

Prednáška 04:
ŠÍRENIE TROPOSFÉRICKÝCH A
IONOSFÉRICKÝCH ELM VLN

doc. Ing. Ľuboš Ovseník, PhD.
(lubos.ovsenik@tuke.sk, tel. 421 55 602 4336)

[http://kemt-old.fei.tuke.sk/predmety/EVaA/_materialy/
Prednasky/Pr04/Pr04.pdf](http://kemt-old.fei.tuke.sk/predmety/EVaA/_materialy/Prednasky/Pr04/Pr04.pdf)

<http://los.fei.tuke.sk/>

Obsah prednášky

■ Základné poznatky

- Vlastnosti troposféry
- Index lomu troposféry
- Rozptyl elektromagnetických vln v troposfére
- Tlmenie elektromagnetických vln v troposfére
- Vlastnosti ionosféry
- Šírenie elektromagnetických vln v homogénnej plazme
- Šírenie elektromagnetických vln v plazme s vrstevnatou štruktúrou

Vlastnosti troposféry

- **Troposférou** nazývame dolnú vrstvu atmosféry, ktorá leží priamo nad zemským povrchom a siaha do výšky
 - 8 až 10 km v oblastiach pólův Zeme
 - 10 až 12 km v stredných zemepisných šírkach
 - 16 až 18 km v oblasti rovníka
- **Zloženie troposféry** (percentuálne zastúpenie jednotlivých plynův)
 - **nezávisí od výšky**
 - výnimkou je **obsah vodnej pary** - závisí od meteorologických podmienok a **zmenšuje sa so zväčšovaním výšky**
- **Charakteristickým javom** v troposfére
 - **pokles teploty** so vzrastajúcou výškou
 - vertikálny **teplotný gradient** má hodnotu 6K/km

- **Príčinou tohto poklesu** je priehľadnosť troposféry pre slnečné žiarenie
 - prakticky **všetka slnečná energia** prechádzajúca troposférou je pohlcovaná zemským povrchom
 - **zohriaty povrch Zeme spôsobuje ohrev** troposféry, pričom rozhodujúcu úlohu hrá **konvekcia** (prúdenie) **tepla**
 - **vrstvy troposféry**, ktoré sú v styku so zemským povrchom **sa ohrievajú a vystupujú hore**, ich miesto zaujímajú chladnejšie vrstvy, atď.
 - **v dôsledku nerovnomerného rozloženia teploty** na povrchu Zeme pritom **vznikajú prúdenia** vzostupné a zostupné, pričom vznikajú v troposfére víry

- V určitých prípadoch môžu v troposfére vznikajú oblasti, v ktorých **teplota vzduchu rastie so zväčšovaním výšky**
 - tento jav sa nazýva **teplotná inverzia**
 - inverzia môže **vznikať rôznym spôsobom** , napr.
 - **premiestnením teplého vzduchu** teplejších oblastí nad zemský povrch
 - alebo **sponad pevniny nad chladnejšie more**

- V izotermickej troposfére **klesá tlak (p) s výškou**

$$p = p_0 e^{-\frac{Mg}{RT}H}$$

p_0 - tlak na hladine mora

$M = 29$ [kgmol⁻¹] - mólová hmotnosť vzduchu

g [ms⁻²] - tiažové zrýchlenie

$R = 8,31 \cdot 10^3$ [Jkmol⁻¹K⁻¹] - univerzálna plynová konštanta

H - nadmorská výška

T - teplota

e - absolútna vlhkosť vzduchu

- Šírenie elektromagnetických vln v troposfére **závisí** od meteorologických podmienok
 - ich vplyv sa prejaví ako **lom, rozptyl** (difrakčný odraz) a **tlmenie** elm vln
 - pre popis ich vplyvu na šírenie elm vln **musíme určiť vzťahy** medzi elektrickými a meteorologickými parametrami troposféry

Index lomu troposféry

- Vznik **lomu (refrakcie)** je spojený s priestorovými zmenami elektrickej permitivity prostredia, v ktorom sa šíria elm vlny
- Relatívny index lomu vzduchu sa **len málo líši od jednotky** - stredná hodnota pri povrchu Zeme je

$$n = \sqrt{\varepsilon_r} \approx 1,000325$$

- Ukazuje sa však, že i **veľmi malé zmeny indexu lomu troposféry**, spojené so zmenou výšky, majú praktický význam
- V praxi sa častejšie používa tzv. **súčiniteľ lomu „N“**

$$N = 10^6 (n - 1)$$

- Súčiniteľ lomu závisí od **teploty, tlaku a vlhkosti vzduchu**

$$N = 10^6 (n - 1) = \frac{77,6}{T} \left(p + \frac{4810e}{T} \right)$$

e - absolútna vlhkosť vzduchu

- Derivovaním vyjadríme **výškovú zmenu** súčiniteľa lomu

$$\frac{dN}{dH} = 77,6 \left[\frac{1}{T} \frac{dp}{dH} - \left(\frac{p}{T^2} + 9620 \frac{e}{T^3} \right) \frac{dT}{dH} + \frac{4810}{T^2} \frac{de}{dH} \right]$$

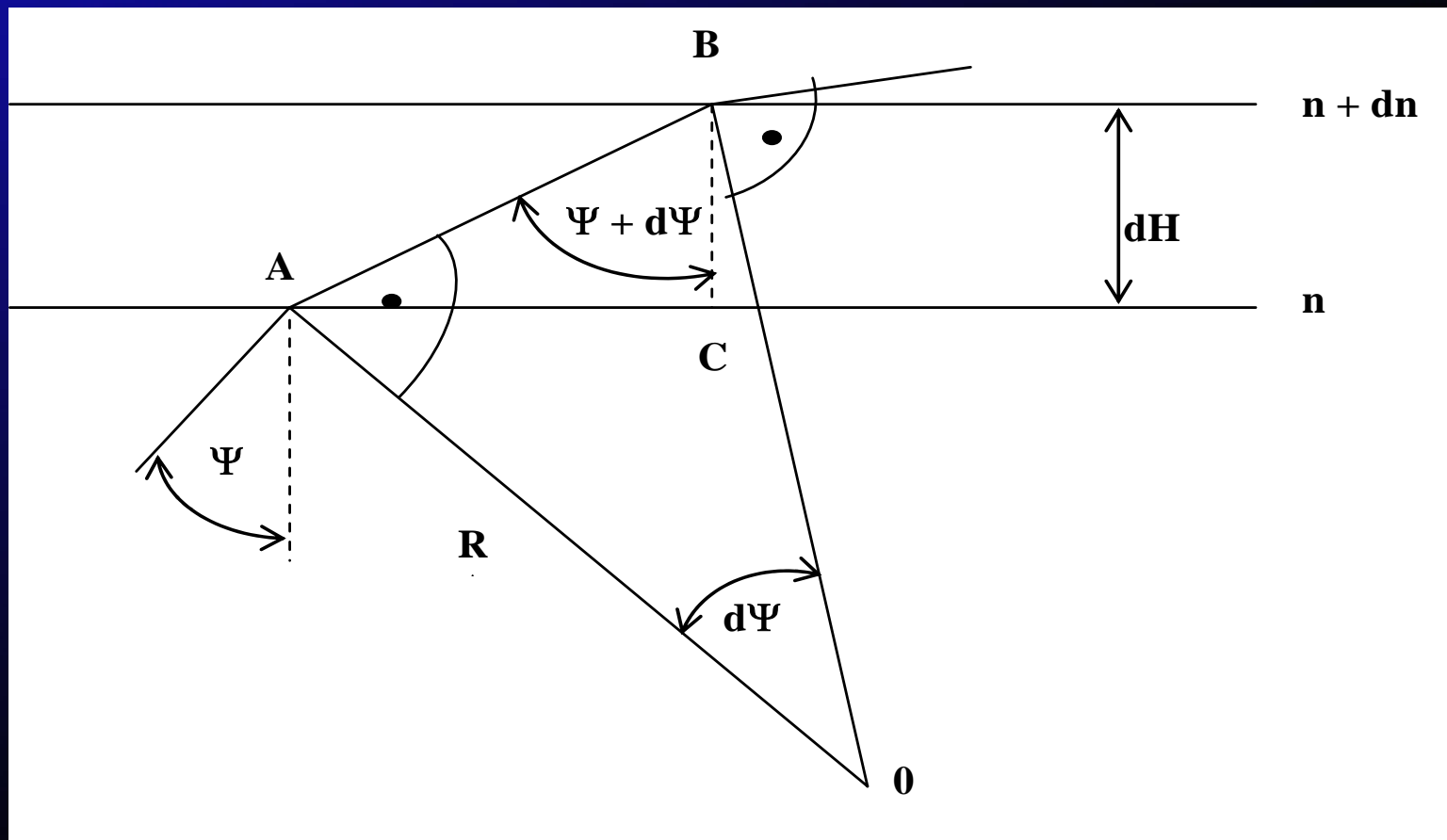
- so zväčšovaním nadmorskej výšky (H) tlak klesá a gradient tlaku len málo závisí od meteorologických podmienok
 - gradient teploty a gradient vlhkosti sú však citlivé na zmeny meteorologických podmienok a môžu meniť i svoje znamienko (smer) – napr. pri inverzii
- Vzhľadom na značné a časté zmeny meteorologických podmienok je matematický popis vplyvu troposféry na šírenie elm vln možný iba za určitých podmienok - **idealizovaná** troposféra sa nazýva **štandardná troposféra**

■ Súčiniteľ lomu štandardnej troposféry

$$N(H) = 289e^{-0,136H}$$

H - nadmorská výška [km]

Obr.4.1 Určenie polomeru krivosti lúča

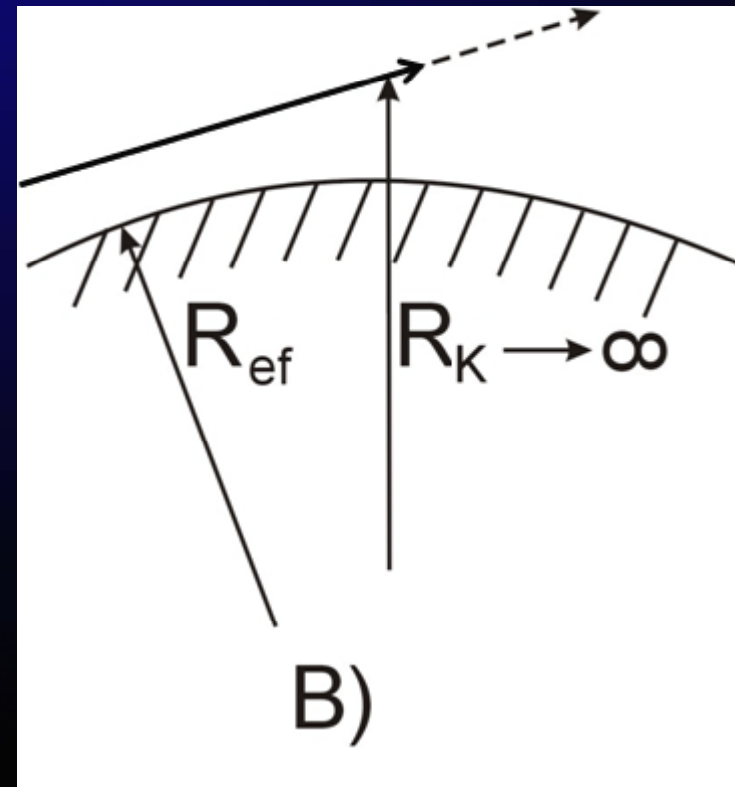
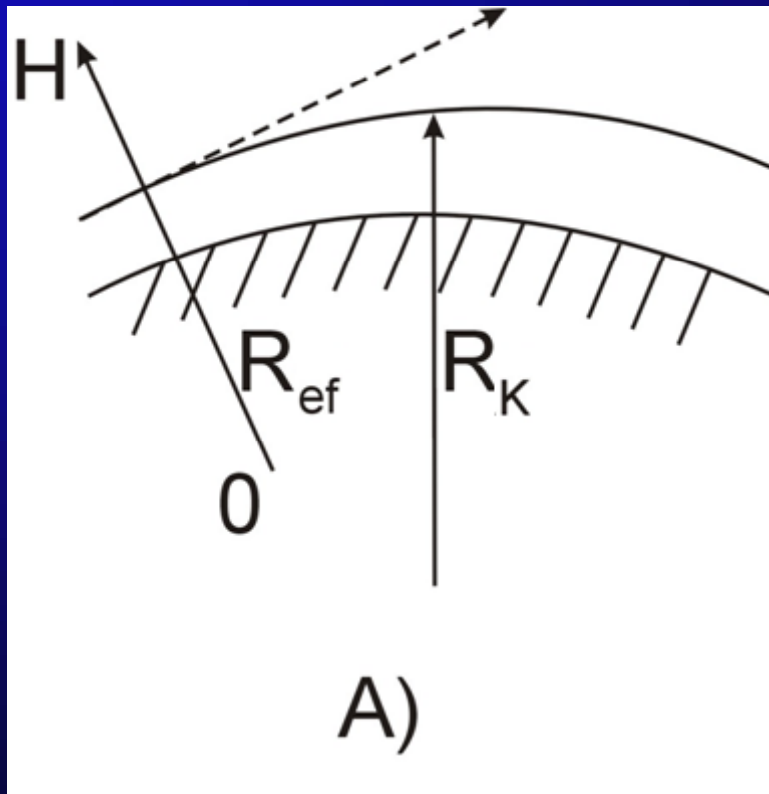


- Pretože súčiniteľ lomu závisí od výšky H, **trajektórie lúčov elm vln** v priblížení geometrickej optiky **nie sú priamky**
- Ich tvar možno vo všeobecnosti určiť
 - pomocou **rovnice eikonalu** (zložité)
 - jednoduchšie - ak predpokladáme, že **troposféra sa skladá z rovinných vrstiev** s konštantnými „N“
 - **uvažujme dve také vrstvy** vzdialené „dH“
 - **index lomu** dolnej vrstvy je „n“, hornej „n + dn“
 - lúč dopadajúci **na dolnú vrstvu** pod uhlom „ψ“ zmení na dráhe „dH“ svoj smer, takže **na hornú dopadne** pod uhlom „ψ + d ψ“; (Obr.4.1)
 - **polomer krivosti**

$$R_K \approx -\frac{1}{\frac{dn}{dH}} = -\frac{10^6}{\frac{dN}{dH}}$$

- Polomer krivosti lúča **nezávisí** od absolútnej hodnoty indexu lomu, ale **závisí** od jeho prírastku so zmenou výšky
- R_K - môže byť **kladné** len vtedy, keď index lomu s narastajúcou výškou **klesá** ($dn/dH < 0$) - zakrivenie lúča sa nazýva **kladná refrakcia** (Obr. 4.2)

Obr.4.2 Kladná refrakcia nad skutočným zemským povrchom (A)
a nad zemským povrchom s efektívnym polomerom krivosti (B)



- Čiarkovane je znázornená priamková trajektória, ktorá zodpovedá priblíženiu homogénneho prostredia ($n = \text{konšt.}$)
- Kladná refrakcia efektívne zväčšuje oblasť priamej viditeľnosti antén

- Vplyv troposférického lomu na šírenie elm vln možno zahrnúť do interferenčných vzťahov a v niektorých prípadoch i do difrakčných vzťahov (minulá prednáška) zavedením tzv. **efektívneho polomeru Zeme „ R_{ef} “**; (obr.4.2 B))
- Efektívny polomer krivosti Zeme možno použiť vtedy, keď **gradient indexu lomu nezávisí od výšky** t . j.

$$\frac{dn}{dH} = \text{konštanta}$$

- Potom **efektívny polomer** je

$$R_{ef} = \frac{R}{1 - R \frac{dN}{dH} 10^6}$$

- Pre **štandardnú troposféru** platí

$$R_K \approx \frac{10^6}{4 \cdot 10^{-2}} = 25000 \text{ km}$$

$$R_{ef} \approx 8500 \text{ km}$$

$$k = \frac{R_{ef}}{R} \approx \frac{4}{3}$$

■ Podľa gradientu (dn/dH) rozlišujeme niekoľko **základných druhov troposférického lomu**

- **Záporný lom** (označenie a) nastáva pre gradient indexu lomu (dN/dH) > 0 - lúč sa **odchyluje** od povrchu Zeme, dochádza k zmenšeniu priamej viditeľnosti antén

$$R_{ef} < R; R_K < 0$$

- **Nulový lom** (označený b) nastáva pre (dN/dH) $= 0$ - lúč sa šíri po priamke, priama viditeľnosť antén sa nemení

$$R_{ef} = R; R_K = \infty$$

- **Kladný lom** (označenie c) nastáva pre (dN/dH) < 0 - lúč sa "prichyluje" k povrchu Zeme, priama viditeľnosť antén sa zväčšuje

$$R_{ef} > R; R_K > 0$$

(Obr.4.3)

- **Kritický lom** (onačenie d) nastáva pre $(dN/dH) = -0,157$
- lúč kopíruje **zakrivenie** zemského povrchu

$$R_{ef} = \infty; R_K = 6,37 \cdot 10^6 \text{ m}$$

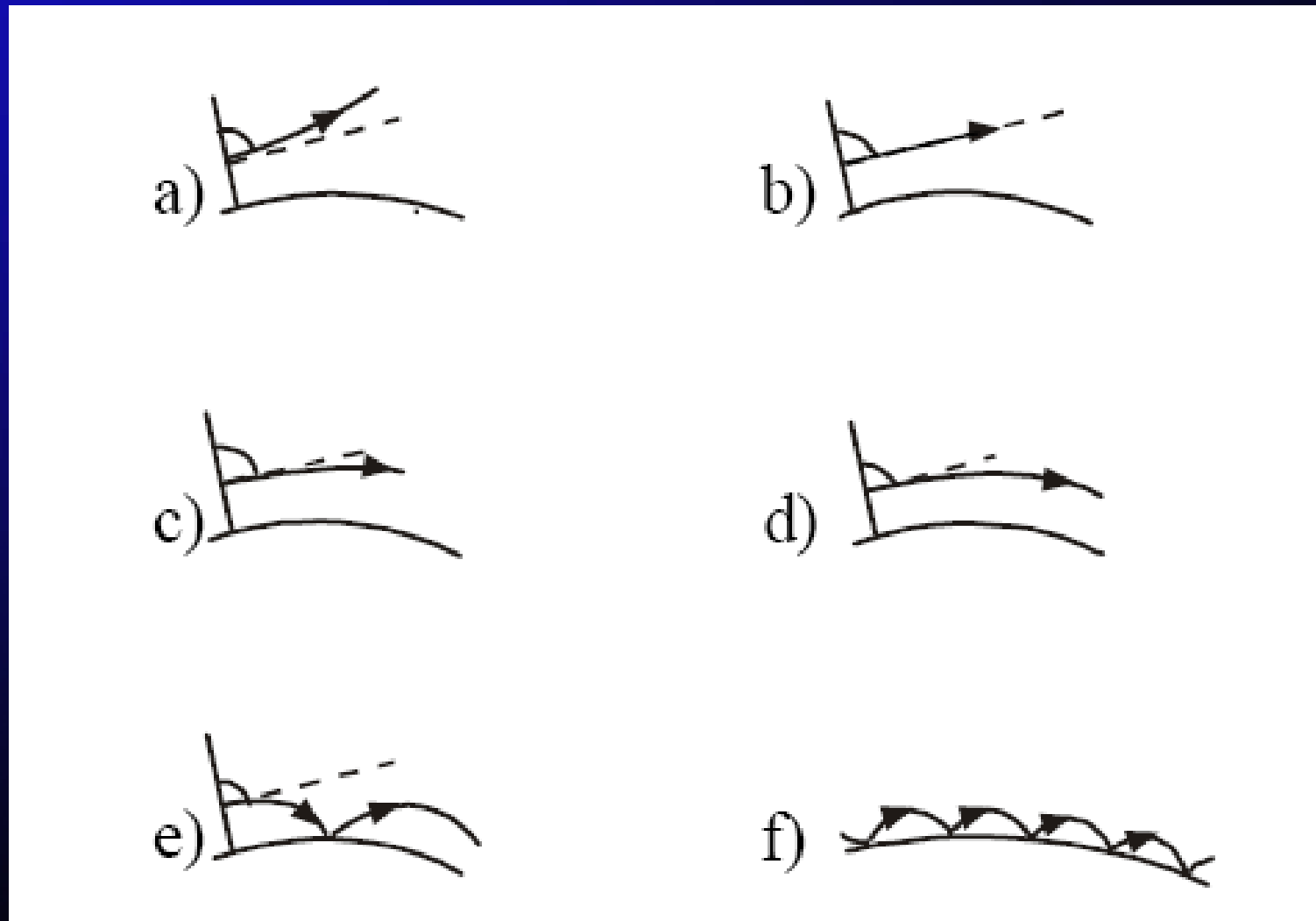
- **Superrefrakcia** (označenie e, f) nastáva pre $(dN/dH) < -0,157$ (príčinou jej vzniku je najčastejšie teplotná inverzia) - lúč sa **vracia späť** k zemskému povrchu a mnohonásobne sa od neho odráža - elm vlna sa šíri tzv. **vlnovodovým kanálom**

$$R_{ef} < 0; R_K = 6,37 \cdot 10^6 \text{ m}$$

(Obr.4.3)

- **Superrefrakcia** umožňuje šírenie elm vln na **veľké vzdialenosti** (ďaleko za oblasť priamej viditeľnosti)
- **Praktické využitie** tohto spôsobu šírenia je **obmedzené** pre jeho zriedkavý výskyt - môže však byť príčinou rôznych rušení diaľkovým príjmom

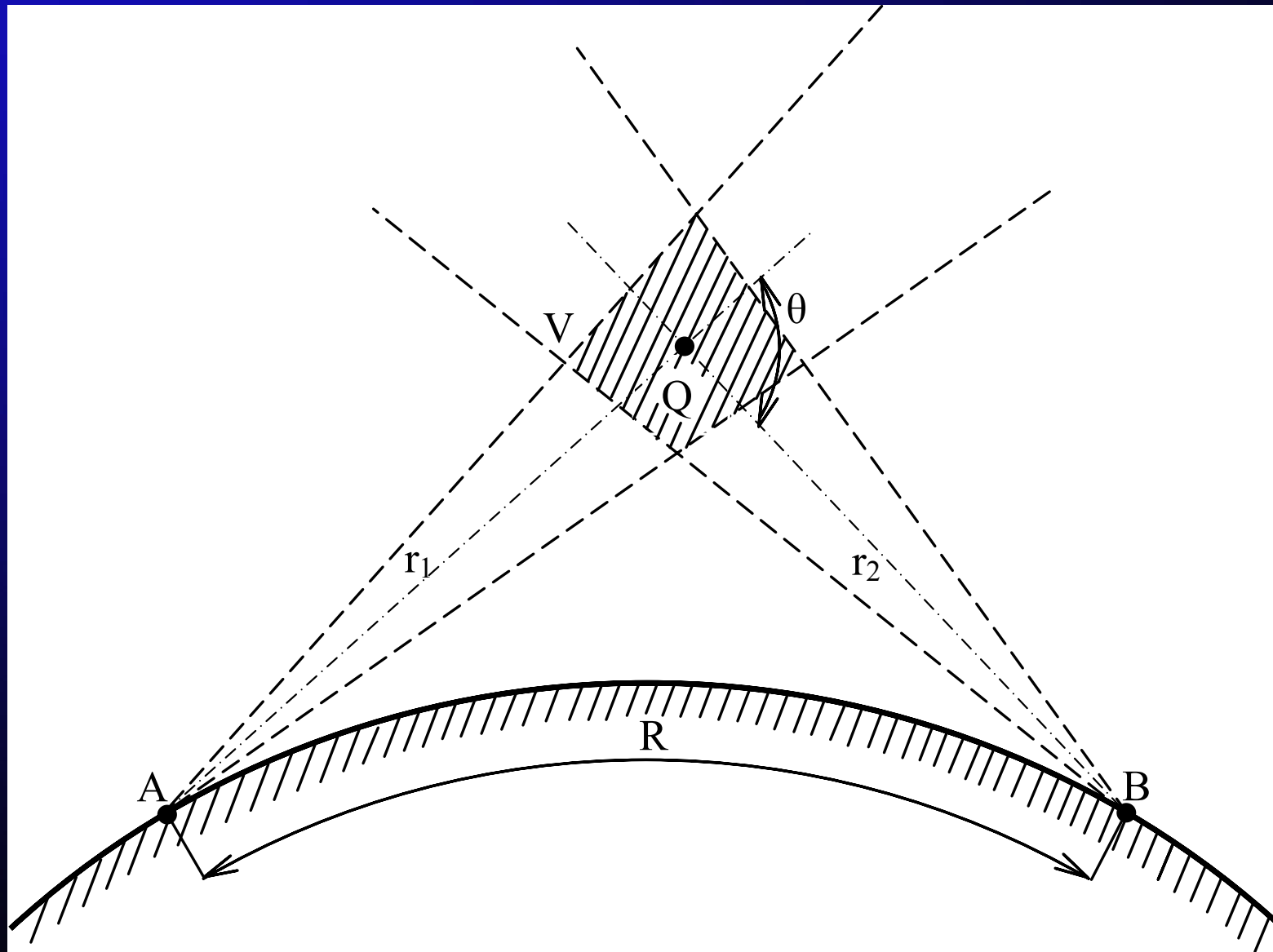
Obr.4.3 Základné druhy troposférického lomu: záporný lom (a), nulový lom (b), kladný lom (c), kritický lom (d), superrefrakcia (e, f)



Rozptyl elektromagnetických vln v troposfére

- Praktické skúsenosti ukazujú, že v troposfére existujú chaotické turbulentné prúdenia vzduchu
- Tieto prúdenia majú vplyv na lokálny súčiniteľ lomu (N), takže závislosť súčiniteľa tlmenia od výšky (tzv. profil súčiniteľa tlmenia) vykazuje fluktuácie (pohyb, vlnenie, kolísanie)
- Tieto fluktuácie sú príčinou rozptylu elm vln šíriacich sa v troposfére, ktorý umožňuje diaľkové spojenie pomocou veľmi krátkych vln (VKV)
- Predpokladajme
 - že VA a PA sú umiestnené v bodoch A a B v blízkosti zemského povrchu
 - V je tá časť troposféry, ktorá je viditeľná súčasne z bodov A, B a ktorá sa zúčastňuje na procese vzniku rozptýlenej vlny
 - každý element objemu vnútri oblasti V ožiarený vysielacou anténou sa stáva sekundárnym zdrojom žiarenia; (Obr.4.4)

Obr.4.4 Šírenie elektromagnetických vln troposférickým rozptylom



- Energia dopadajúca na prijímaciu anténu je výsledkom pôsobenia všetkých sekundárnych zdrojov v objeme „ V “; (Obr.4.4)
- Ak by sa **elm vlny šírili vo voľnom priestore**, potom vo vzdialenosti „ R “ by **do prijímača** bol dodávaný výkon:

$$P_{02} = \frac{P_N G_1 G_2 \lambda^2}{(4\pi)^2 R^2}$$

- Pri použití **činiteľa tlmenia** „ W “ je výkon dodávaný do prijímača v podmienkach troposférického rozptylu

$$P_2 = P_{02} W^2$$

$$W = \frac{2}{R} \sqrt{\frac{V \sigma(\Theta)}{\pi}}$$

$\sigma(\Theta)$ je efektívna rozptyľujúca plocha

- **Objem „ V “** je za predpokladu, že antény sú rovnaké

$$V \approx \frac{1}{8} a R^2 \alpha_V^2 \alpha_H^2$$

α_V a α_H sú uhly polovičného výkonu smerovej charakteristiky v rovine vertikálnej, resp. horizontálnej

- **Rozptyl veľmi krátkych vln** v troposfére je spojený s kolísaním (fluktuáciami) prenášaných signálov
- Pozorujeme **fluktuácie rýchle** (trvajúce minúty, sekundy a zlomky sekúnd) i **fluktuácie pomalé** (hodinové až mesačné)
- **Príčinou pomalých fluktuácií intenzity elektrického poľa** sú regulárne (napr. sezónne) a náhodné zmeny meteorologických podmienok, špeciálne zmeny stredného gradientu indexu lomu a turbulentných procesov v troposfére
- Pri popise podmienok pre príjem signálov šíriacich sa troposférickým rozptylom je preto nutné používať **štatistické metódy**
- Je experimentálne overené, že **pomalé zmeny intenzity elektrického poľa** možno najlepšie popísať pomocou logaritmicko – normálneho rozdelenia, na druhej strane **rýchle zmeny** sa riadia Rayleighovým rozdelením
- **Štatistický vzťah** medzi fluktuáciami intenzity elektrického poľa v dvoch rôznych bodoch priestoru sa vyjadruje pomocou **priestorovej korelačnej funkcie**
(korelácia – súvisť, t.j. vzájomný vzťah, súvislosť)

$$\rho(R)$$

- **Fluktuácie** pozorované v dostatočne vzdialených bodoch **sú štatisticky nezávislé**, pretože rozptýlené vlny prichádzajúce do týchto bodov pochádzajú z rôznych oblastí troposféry, v ktorých náhodné zmeny indexu lomu nie sú štatisticky korelované
- **Priestorová korelačná funkcia** je preto klesajúcou funkciou vzdialenosti
- Fluktuácie považujeme za štatisticky nezávislé, ak priestorová korelačná funkcia klesne pod hodnotu

$$\rho(R) \leq \frac{1}{e} \approx 0,37$$

- **Vzdialenosť R_m** , pri ktorej v tomto vzťahu **nastáva rovnosť**, nazývame **polomerom priestorovej korelácie fluktuácií**
- Vo všeobecnosti R_m nepresahuje obvykle niekoľko desiatok vlnových dĺžok
- Táto skutočnosť sa využíva pre **zlepšenie podmienok príjmu rádiových signálov**

- Ak pre príjem použijeme dve antény vzdialené od seba o viac ako R_m , potom **fluktuácie signálov** v týchto anténach budú **štatisticky nezávislé**
- Ak sa zaujímame o fluktuácie dvoch signálov s rôznymi frekvenciami, možno tvrdiť, že pri **veľkom rozdielne frekvencií Δf** sú tieto fluktuácie **štatisticky nezávislé**
- Pre popis štatistických vzťahov medzi fluktuáciami dvoch signálov s rozdielnymi frekvenciami definujeme **frekvenčnú korelačnú funkciu fluktuácií**

$$\rho(\Delta f)$$

- Frekvenčný odstup Δf_m , pri ktorom

$$\rho(\Delta f) = 1/e$$

nazývame **odstupom frekvenčnej korelácie fluktuácií**

- **Odstránenie frekvenčnej korelácie signálov**, ktoré sa líšia o frekvencie

$$\Delta f > \Delta f_m$$

má **dvojaký význam pre prácu rádiokomunikačných systémov**

- **využíva** sa pre zlepšenie podmienok príjmu (podobne ako odstránenie priestorovej korelácie)
- **odstup korelácie** Δf_m určuje šírku frekvenčného pásma, ktoré možno preniesť bez skreslenia
- Ak šírka frekvenčného pásma prenášaného signálu je menšia ako Δf_m , potom **fluktuácie jednotlivých zložiek signálu sú silne korelované a nedochádza k jeho skresleniu.**
- Ak však šírka pásma omnoho prevyšuje Δf_m , potom **fluktuácie jednotlivých spektrálnych zložiek signálu nie sú korelované a signál je silne skreslený.**
- **Prostredie**, v ktorom sa šíri signál, **má teda určité “frekvenčné pásmo priepustnosti”** ohraničujúce prípustnú šírku pásma signálu.

Tlmenie elektromagnetických vln v troposfére

- Doteraz sme skúmali vplyv troposféry na šírenie elm vln s uvažovaním jej nehomogenosti
- Tento vplyv sa prejavoval zakrivením trajektórie (lúča) a rozptylom
- Pritom sme predpokladali, že troposféra je priehľadná pre elm vlny - má nulové tlmenie
- Bohatý experimentálny materiál získaný pri využití rádiových spojov v širokom frekvenčnom rozsahu ukazuje, že tento predpoklad je oprávnený pre všetky meteorologické podmienky len pre elm vlny s vlnovou dĺžkou

$$\lambda > 10cm$$

!!!

- Kratšie elm vlny (mikrovlny) sa v troposfére šíria s tlmením, ktoré pri niektorých meteorologických podmienkach môže byť také veľké, že bráni nadviazaniu rádiového spojenia

- Rozlišujeme **štyri druhy tlmenia** elm vln v troposfére
 - **tlmenie spôsobené atmosferickými zrážkami** (dážď, hmla, sneh)
 - **molekulárna absorbcia**
 - **rozptyl na časticiach**
 - **tlmenie na pevných častočkách** (prach, dym a pod.)
 - posledné dva druhy tlmenia majú význam len pre najkratšie vlny patriace do **pásma viditeľného svetla**

TLMENIE VPLYVOM ATMOSFERICKÝCH ZRÁŽOK

- Možno rozlíšiť **dve príčiny tlmenia** elm vln kvapôčkami vody
 - kvapku vody môžeme považovať za polovodivé prostredie, v ktorom **elm vlna indukuje prúdy**, ktorých hustota pri veľmi vysokých frekvenciách môže byť veľká - **straty energie spôsobené týmito prúdmi prispievajú k tlmeniu**
 - **prúdy indukované v kvapkách vody sú zdrojmi sekundárneho žiarenia spôsobujúcimi rozptyl elm vln**, pričom intenzita poľa klesá podobne ako pri absorpcii

MOLEKULÁRNA ABSORBCIA

- Elm vlny s vlnovou dĺžkou

$$\lambda < 1,5\text{cm}$$

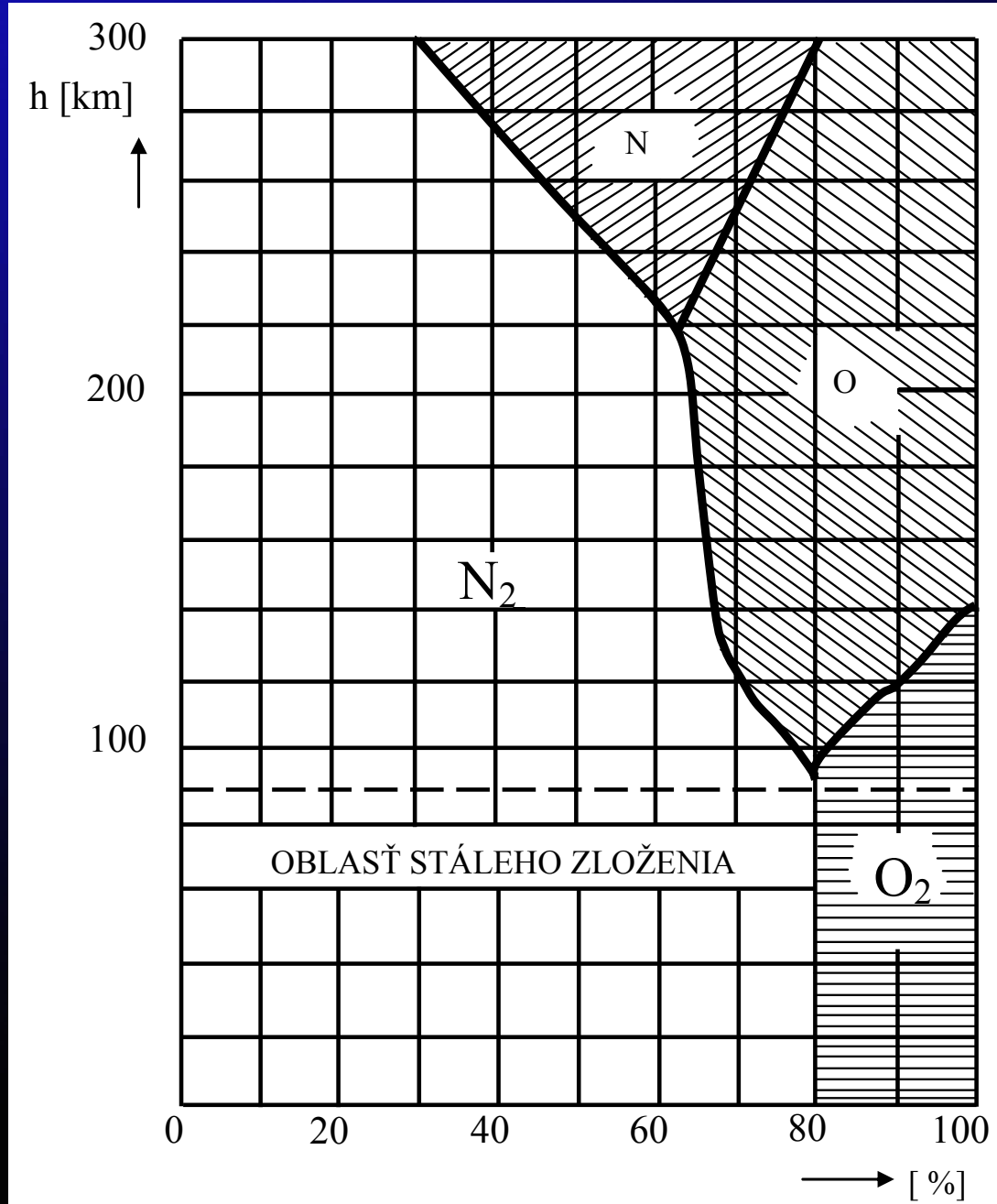
pôsobia priamo na jednotlivé častice (molekuly) plynov, z ktorých je zložená troposféra

- Energia elm vlny sa spotrebúva na vybudenie atómov a molekúl plynu do stavov s vyššou energiou
- Pretože dovolené hladiny energie sú diskkrétne, uvedené javy majú rezonančný (selektívny) charakter
 - najväčší význam majú molekuly kyslíka (O_2) a vodné pary
 - pre kyslík existujú lokálne maximá tlmenia pri vlnových dĺžkach 0,5cm a 0,25cm
 - pre vodné pary – 1,35cm, 1,5mm a 0,75mm
- Tlmenie spôsobené absorpciou molekulami kyslíka (O_2) je približne konštantné (pre danú frekvenciu)
- Tlmenie spôsobené vodnými parami veľmi závisí od vlhkosti vzduchu, preto sa často mení

Vlastnosti ionosféry

- Ionosférou nazývame ionizovanú časť atmosféry, ktorá sa nachádza vo výškach **nad 60 km**
- Výsledky merania ukazujú, že **do výšky asi 90 km** má atmosféra rovnaké zloženie ako pri povrchu Zeme
- Vo veľkých výškach rozdiely v molekulovej hmotnosti jednotlivých plynov spôsobujú **rozvrstvenie atmosféry**
 - **ťažšie plyny sa sústreďujú** v nižších výškach
 - **v zriedenej atmosfére** dochádza vplyvom slnečného žiarenia k **disociácii** (rozklad na ióny, t.j. na kladnú a zápornú zložku) molekúl kyslíka a dusíka
 - molekuly týchto plynov **pohlcujú kvantá energie** a rozštiepia sa na atómy
 - **disociácia kyslíka** (O_2) začína od výšky asi 90 km
 - **disociácia dusíka** (N_2) od výšky nad 220 km (Obr.4.5)
- **Ionizáciou plynu** rozumieme **odstránenie** jedného alebo viacerých elektrónov z atómov plynu
- **Na odstránenie jedného elektrónu** z atómového obalu je potrebné vykonať tzv. **ionizačnú prácu „W“**

Obr.4.5 Zloženie atmosféry



- V prípade, že príčinou ionizácie je interakcia (vzájomné pôsobenie) s časticami (napr. fotónmi) s energiou kvanta ($E_f = h \cdot f$), potom **ionizácia môže nastať**, ak je splnená podmienka

$$hf > W$$

kde „ h “ je Planckova konštanta ($h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$) a „ f “ je frekvencia

Tab. 4.1: Ionizačné práce pre základné plyny v atmosfére
($1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$)

Plyn	Vlnová dĺžka ionizujúcej vlny [nm]	Ionizačná práca [eV]
O ₂	102,6	12,2
O	91	13,6
N	79,5	15,5
N ₂	85	14,5

- Z tabuľky vyplýva, že ionizáciu atomárneho kyslíka „O“ môže spôsobiť len **ultrafialové žiarenie**

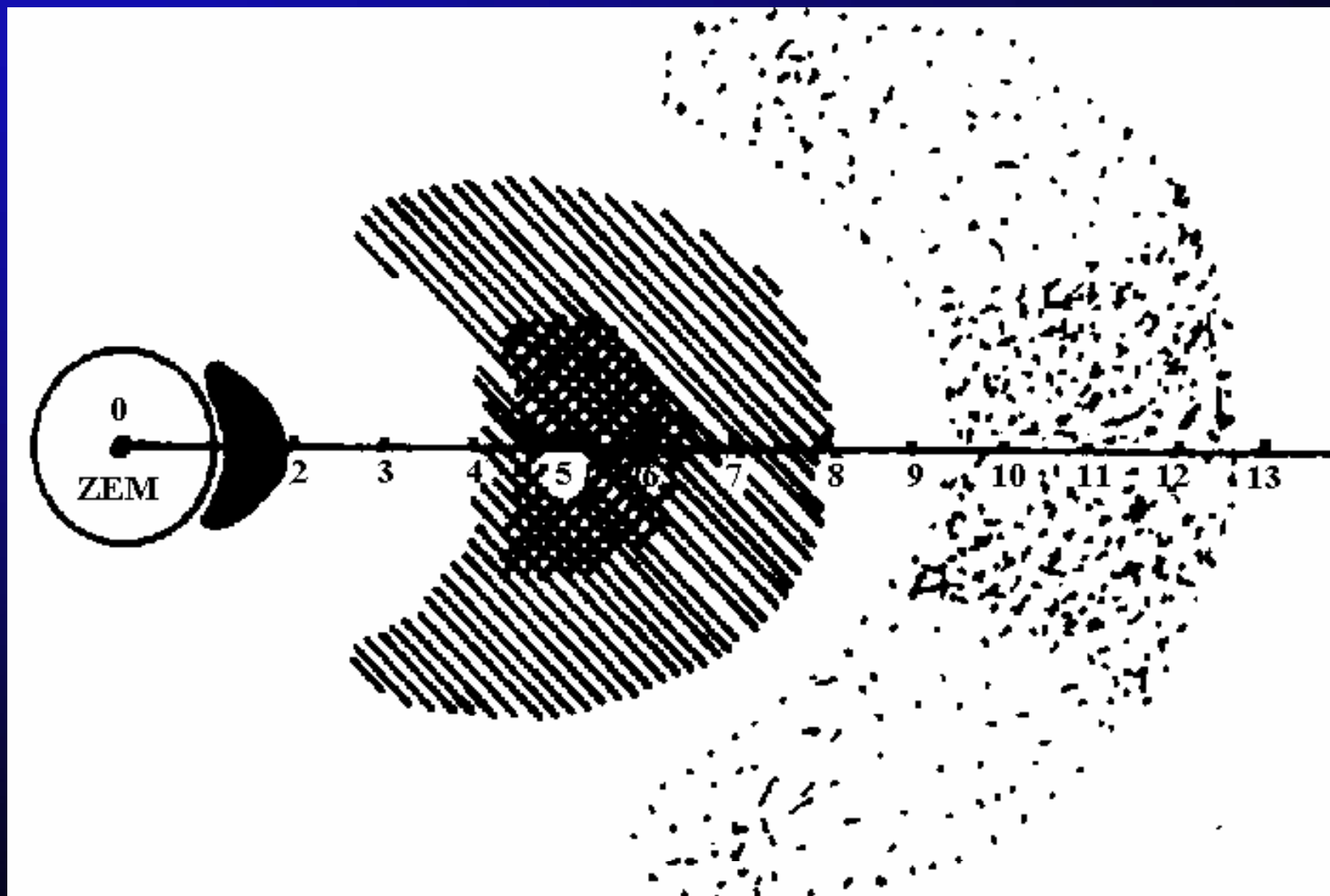
■ Základným zdrojom ionizácie atmosféry je Slnko

- **fotosféra** s teplotou asi 6000 K vyžaruje elm vlny s veľmi širokým spektrom frekvencií
 - **chromosféra** a koróna s teplotou rádovo $2 \cdot 10^6$ K sú zdrojmi UV žiarenia ($\lambda \approx 2$ až 30nm) a mäkkého röntgenového žiarenia ($\lambda = 0,8$ až 2 nm)
 - okrem toho **vyžaruje** elektróny a iné častice, ktoré tvoria korpuskulárne žiarenie
- Na ionizácii atmosféry sa zúčastňuje aj: **vyžarovanie hviezd, kozmické žiarenie, kozmický prach a meteority**
- Súčasne so vznikom elektrónov a iónov prebieha v atmosfére i opačný proces – **rekombinácia** (pohlcovanie, t.j. znovuspojenie do neutrálnych atómov), pri ktorej sa vyžaruje energia, rovná ionizačnej práci
- **pravdepodobnosť rekombinácie** je tým väčšia, čím je vyššia koncentrácia elektrónov a iónov, ktorá závisí od intenzity ionizácie
 - preto medzi ionizáciou a rekombináciou **existuje dynamická rovnováha**
- V skutočnosti sa **podmienky ionizácie pomaly menia**, preto vznikajú i **fluktuácie** (pohyb, zmena) **hustoty elektrónov** v atmosfére

- Pretože hlavným ionizačným činiteľom je Slnko, **hustota elektrónov sa mení s dennou dobou**
 - **najväčšia** je ráno a dopoludnia
 - **popoludní** začína postupne prevládať rekombinácia
 - ionizácia však **nie je nulová ani v noci**, pretože najvyššie vrstvy atmosféry zostávajú trvalo ionizované
 - okrem denných zmien pozorujeme i **sezónne a dlhodobé zmeny**, ktoré sú spojené so zmenami slnečnej aktivity
- V dôsledku rôznych ionizačných mechanizmov a nehomogenity atmosféry je aj **rozloženie hustoty elektrónov** v ionosfére nerovnomerné - **vyznačuje sa vrstevnatou štruktúrou**
- Na základe výsledkov experimentov sa ustálilo **rozdelenie ionosféry na štyri vrstvy**
 - **D** - od 60 do 90km
 - **E** – od 100 do 120km
 - **F₁** - od 180 do 240km (vzniká iba v letnom období)
 - **F₂** - od 230 do 400km
- V **noci zanikajú vrstvy D a F₁**, zostávajú iba vrstvy E a F₂, pričom hustota iónov v nich výrazne klesá

- Vrstvy D, E a F₁ sa **vyznačujú veľkou stabilitou** - zmeny hustoty elektrónov sa opakujú každý deň
- Okrem uvedených vrstiev sa niekedy objaví silne ionizovaná vrstva E_s (**sporadická vrstva**)
 - táto vrstva **môže vzniknúť** v ľubovoľnom čase a ročnom období
 - v **stredných zemepisných šírkach** sa však najčastejšie vyskytuje **cez deň v letnom období**
- V ionosfére **vznikajú rôzne poruchy**, ktoré majú charakter tzv. **ionosférických vetrov** alebo **vírov** (turbulencií)
 - tieto javy sú spojené s **gravitačnými a tepelnými účinkami** Mesiaca a Slnka
- Okrem toho vznikajú v atmosfére tzv. **ionosférické búrky**, pri ktorých môže prakticky zaniknúť i vrstva
- Okrajové (najvyššie) vrstvy ionosféry tvoria tzv. **Van Allenove oblasti** (Obr.4.6)
 - **obklopujú** zemeguľu
 - **tvoria ich vysokoenergetické častice** pohybujúceho sa po závitových trajektóriách pozdĺž siločiar magnetického poľa Zeme (geomagnetického poľa)

Obr.4.6 Van Allenove zóny



Šírenie elektromagnetických vln v homogénnej plazme

- **Homogénna plazma** - ionizovaný plyn
- Predpokladajme že v homogénnej plazme je
 - **N** je koncentrácia elektrónov
 - v nej elektrón vykoná za 1s **v** zrážok s neutrálnymi časticami
 - lineárne polarizovaná rovinná elm vlna sa šíri v smere osi **x**
 - vektor intenzity elektrického poľa má smer osi **z**
 - **m** je hmotnosť elektrónu
 - **e** je náboj elektrónu
- **Sila**, ktorou pôsobí elektrické pole vlny na elektrón

$$F = eE_m e^{j\omega t}$$

ω - kruhová frekvencia

E_m - amplitúda intenzity elektrického poľa

- Vplyvom tejto sily elektrón **vykonáva pohyb** v smere osi **z**
- V každom okamihu je sila **F** v rovnováhe so
 - **zotrvačnou silou**
 - a **silou trenia**, ktorá vzniká v dôsledku zrážok elektrónu s neutrálnymi časticami

- **Hustota vodivostného prúdu** je

$$J_e = Ne \frac{dz}{dt}$$

dz/dt - rýchlosť pohybu elektrónu

- **Celková hustota prúdu** je

$$J_p = \varepsilon_0 \frac{dE}{dt}$$

dE/dt - rýchlosť zmien el. poľa

- Ekvivalentná **vodivosť ionizovaného plynu** je

$$\sigma_i = \frac{e^2 N}{m} \frac{\nu}{\omega^2}$$

$\omega=2\pi f$ – kruhová frekvencia

- Ekvivalentná **relatívna permitivita plazmy** je

$$\varepsilon_{ri} = 1 - \frac{f_0^2}{f^2} < 1$$

- f_0 je **plazmová frekvencia**

$$f_0 = \sqrt{80,8N}$$

- Pretože ekvivalentné parametre σ_i a ε_i závisia od frekvencie - ionizovaný plyn je **disperzným prostredím**
- Vzhľadom na to, že hmotnosť jadier atómov je asi 10^4 - krát väčšia ako hmotnosť elektrónov, **môžeme vplyv iónov** na šírenie elektromagnetických vln **zanedbať** v porovnaní s **vplyvom elektrónov**

Šírenie elektromagnetických vln v plazme s vrstevnatou štruktúrou

- **Koncentrácia elektrónov** v ionosfére je funkciou výšky - veličiny σ (el. vodivosť) a ε (permitivita) závisia od polohy
- **Ionosféra je preto nehomogénnym prostredím**
- **Vplyv ionosféry na šírenie elm vln (odraz a lom)** možno vysvetliť zmenami elektrickej permitivity ako funkcie výšky nad Zemou
- **Ionosféru môžeme považovať za nehomogénne prostredie s vrstevnatou štruktúrou** (troposféra - podobne to bolo modelované aj v troposfére)
- Na rozdiel od troposféry, kde sa elektrická permitivita mení v malom rozsahu a je blízka jednotke, permitivita ionosféry môže v závislosti od frekvencie nadobúdať hodnoty menšie ako 1
- Vo všeobecnosti môže nadobúdať hodnoty blízke alebo rovné nule

■ Pri týchto hodnotách ϵ_{ri} je **vlnová dĺžka** elm vlny v ionosfére **omnoho väčšia** ako vlnová dĺžka vo voľnom priestore, takže na vzdialenostiach porovnateľných s vlnovou dĺžkou sa **môžu parametre podstatne meniť**

■ Predpokladajme že

■ elm vlna s frekvenciou f **dopadá kolmo na ionosféru**, ktorá pozostáva z rovinných homogénnych vrstiev

■ **index lomu ionosféry závisí od výšky**, pokiaľ elektrická permitivita je

$$\epsilon_{ri} = 1 - \frac{80,8N(H)}{f^2} > 0$$

■ index lomu je **reálne veličina**

$$n = \sqrt{\epsilon_{ri}} = \sqrt{1 - \frac{80,8N(H)}{f^2}}$$

■ **Šírenie elm vlny v ionosfére** sa v tomto prípade **kvalitatívne nelíši** od šírenia vlny v troposfére

■ Ak **zmenšíme frekvenciu signálu** (f), potom sa aj hodnota **indexu lomu zmenší**

- Pri frekvencii f rovnej plazmovej frekvencii f_0 ($f = f_0$)

$$f = f_0(H) = \sqrt{80,8N(H)}$$

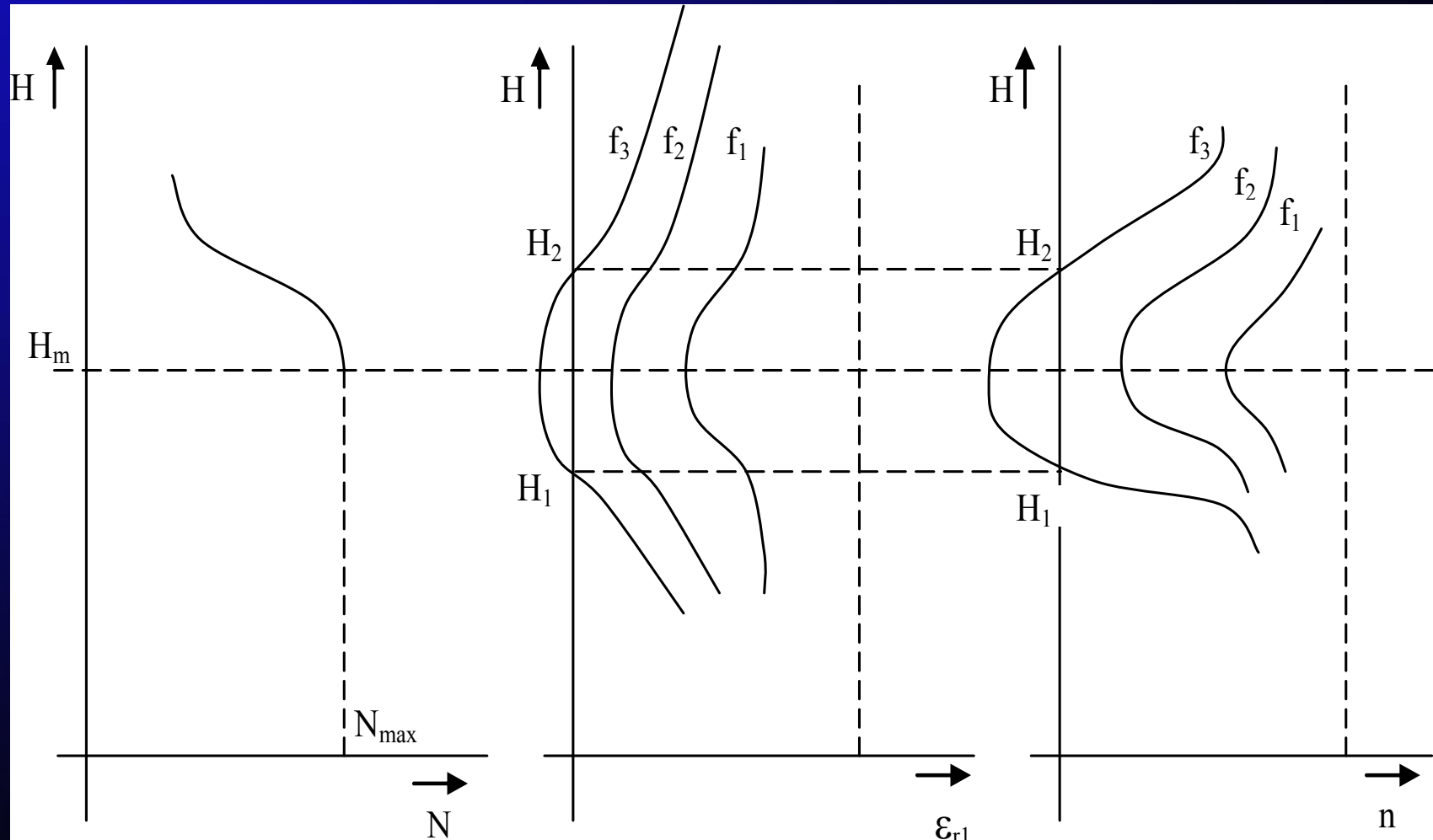
- Elektrická permitivita „ ϵ_r “ a index lomu „ n “ nadobúda **nulovú** hodnotu - elm vlna sa **nemôže takýmto prostredím šíriť**
- Zo zákona zachovania energie vyplýva, že takáto elm vlna sa **odrazí** podobne ako od povrchu vodiča
- Ak zväčšujeme frekvenciu signálu, **odraz** elm vlny **vzniká** v dôsledku **výškovej závislosti** $N(H)$ v čoraz väčšej výške, pokiaľ nedosiahneme výšku, pri ktorej $N(H) = N_{\max}$
- **Maximálna frekvencia**, pri ktorej sa vertikálne vyžiarená elm vlna **odráža od ionosféry**, sa nazýva **kritickou frekvenciou**

$$f_{kr} = \sqrt{80,8N_{\max}}$$

- Pri frekvenciách $f > f_{kr}$ sa elm vlna **od ionosféry neodráža**; ionosféra sa stáva **priezračnou**

Obr.4.7 Frekvenčná závislosť odrazu a prechodu elm vlny pri kolmom dopade na nehomogénnu ionosféru

(Závislosti súčiniteľa lomu, permitivity a indexu lomu od výšky a frekvencie)



Odraz od ionosféry vzniká pri frekvencii f_3 !!!

- Pri **šikmom dopade elm vlny** na vrstevnatú ionosféru môžeme rovnicu trajektórie vlny vstupujúcej do ionosféry pod uhlom Θ_0 napísať ako:

$$n \sin \Theta = n_0 \sin \Theta_0$$

$$n_0 = 1$$

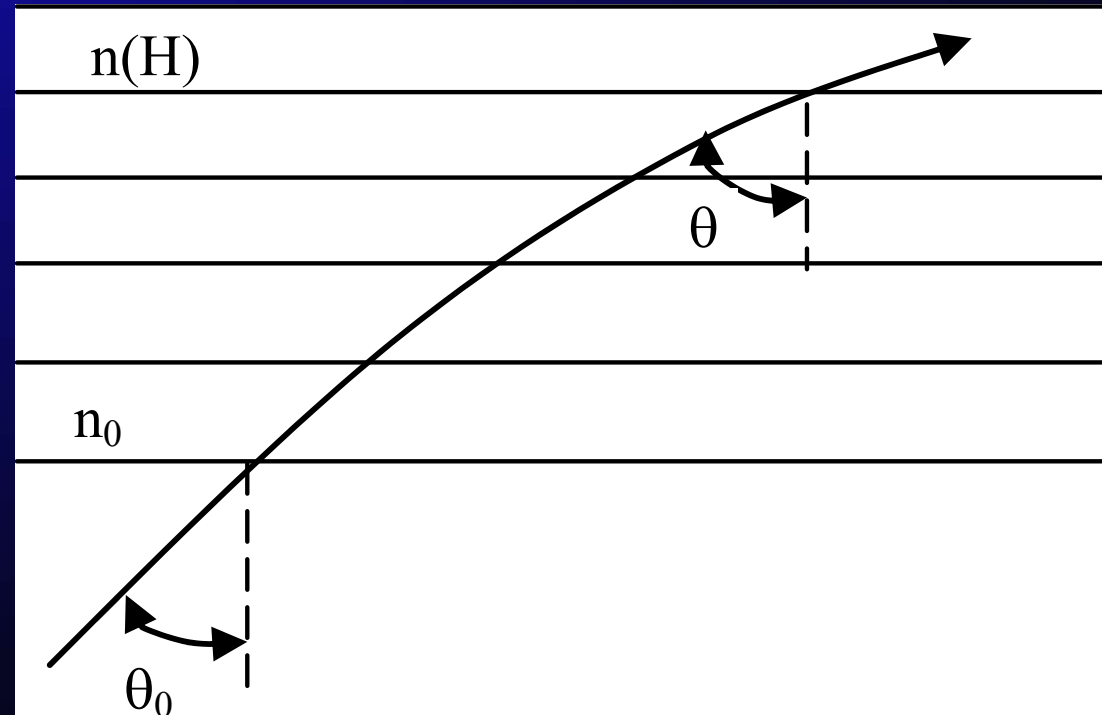
- Elm vlna sa vráti na Zem, ak v bode obratu

$$\sin \Theta = 1$$

- Podmienka návratu vlny na Zem

$$n = \sin \Theta_0$$

$$\sqrt{1 - \frac{80,8N(H)}{f^2}} = \sin \Theta_0$$



- Pre frekvenciu signálu potom vyplýva

$$f = \sqrt{80,8N(H)} \sec \Theta_0 = f_0 \sec \Theta_0$$

- elm vlna s frekvenciou f dopadajúca na ionosféru pod uhlom Θ_0 a vlna s frekvenciou f_0 sa odrážajú v rovnakej výške
- pri danom uhle dopadu Θ_0 odraz vlny nastáva v tým väčšej výške, čím je väčšia jej frekvencia

$$\sec x = \frac{1}{\cos x}$$

sekans

$$\operatorname{cosec} x = \frac{1}{\sin x}$$

kosekans

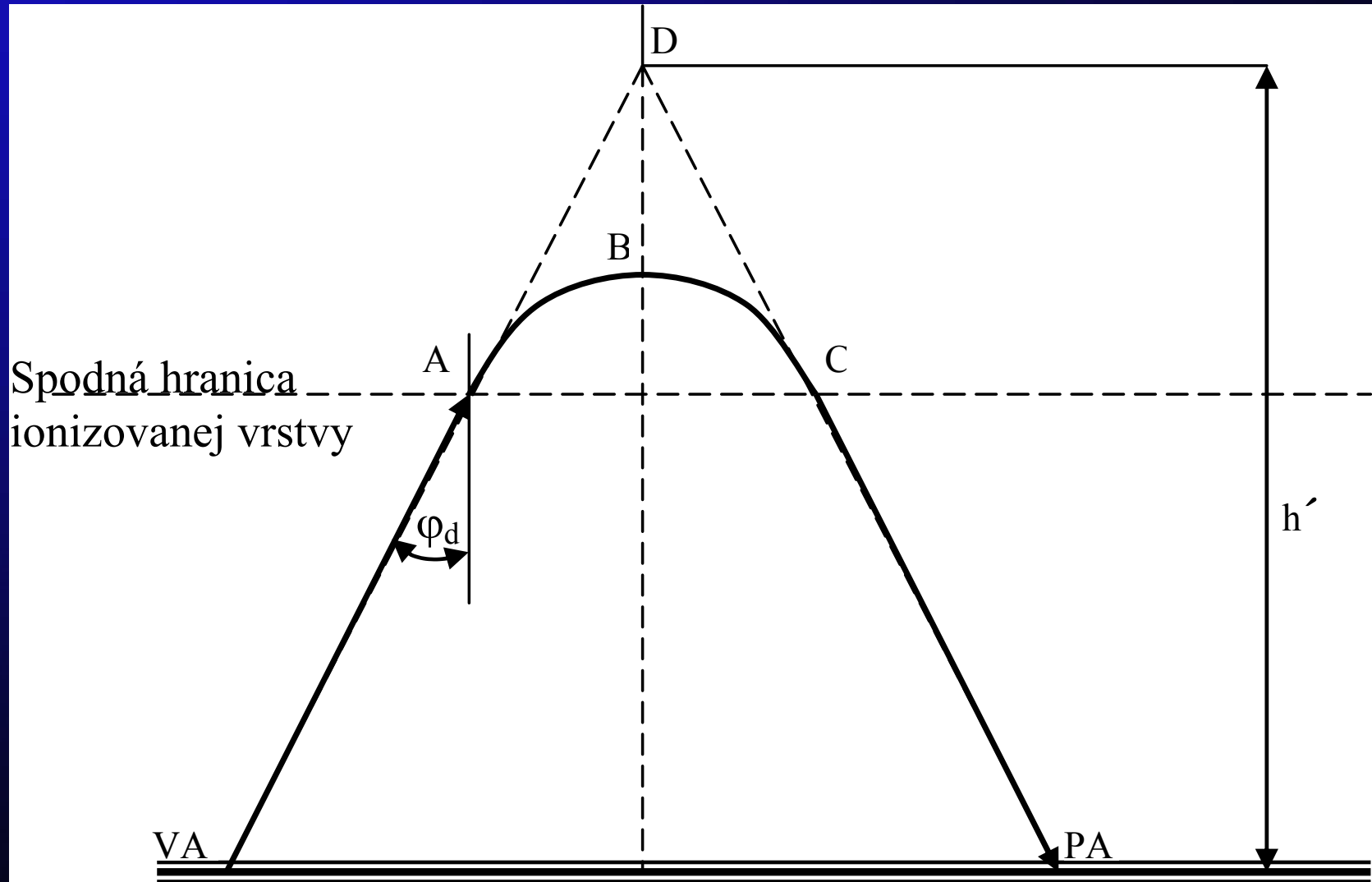
- Výška priesečníka D predĺženia trajektórie vlny vstupujúcej do ionosféry a vlny vystupujúcej z ionosféry sa nazýva **relatívna výška odrazu**
- **Zväčšovaním frekvencie vlny** sa bod obratu dostáva do oblasti, kde $N(H) = N_{\max} \Rightarrow f_0 = f_{kr}$

$$f_{\max}(\Theta_0) = f_{kr} \sec \Theta_0$$

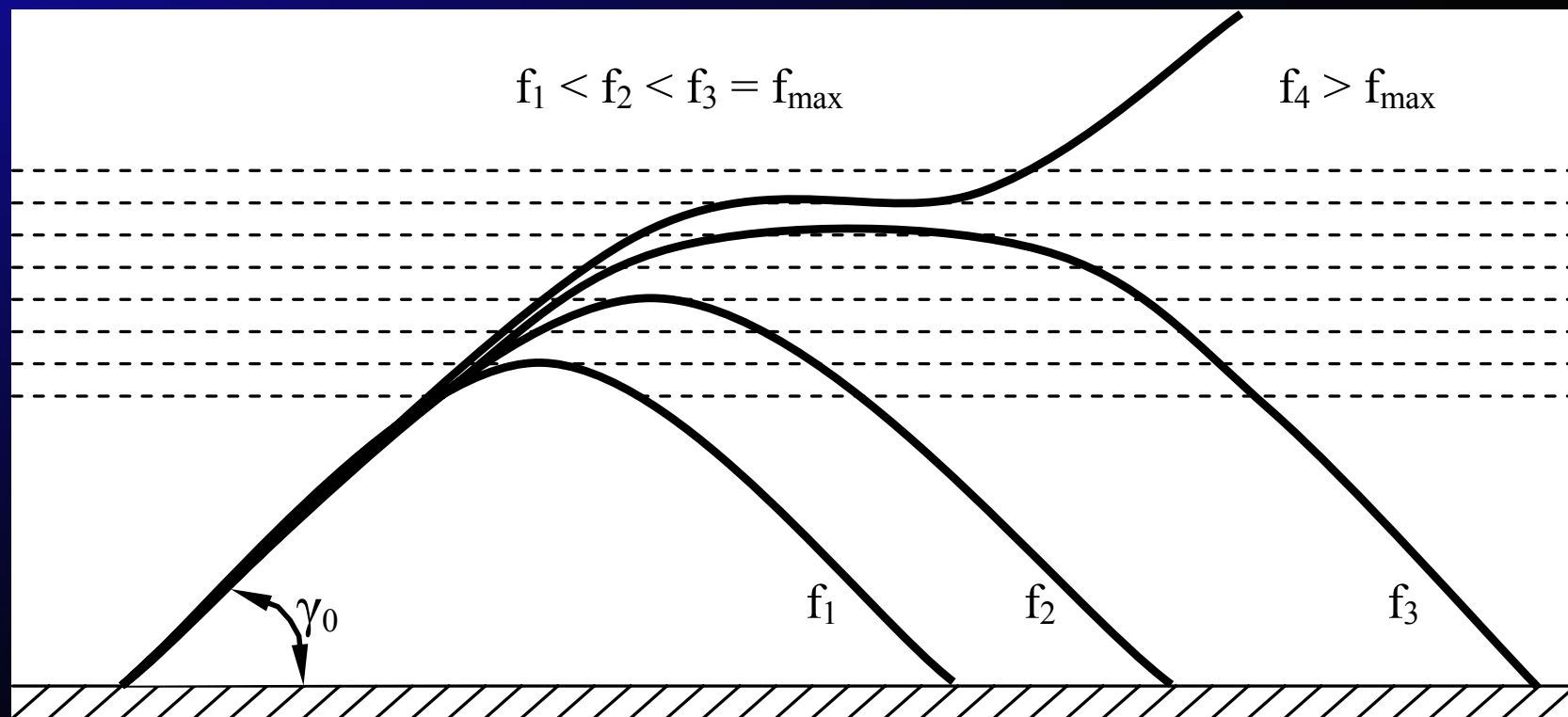
frekvenciu f_{\max} nazývame **maximálnou frekvenciou** a je funkciou uhla dopadu Θ_0

- Ak meníme **uhol dopadu** v rozsahu od 0 do $\pi/2$, f_{\max} sa mení od $f_{\max} = f_{kr}$ do $f_{\max} = \infty$
- Pri uhle dopadu Θ_0 a frekvencii menšej ako je f_{\max} , **vzdialenosť bodu dopadu na Zem** pre elm vlnu odrazenú od ionosféry **rastie** so zväčšovaním sa frekvencie signálu

Obr.4.8 Určenie relatívnej výšky odrazu



- So zväčšovaním frekvencie sa **polomer krivosti trajektórie R_K zväčšuje**
- Keď sa frekvencia signálu blíži ku f_{\max} , **polomer krivosti sa zväčšuje** tak, že odrazená vlna dopadá na povrch Zeme vo **veľkej vzdialenosti od vysieláča**
- Pri **veľkej frekvencii** ($f_4 > f_{\max}$) vlna vstupuje do oblasti klesajúceho gradientu koncentrácie elektrónov, **polomer krivosti trajektórie mení znamienko** - trajektória sa odchyľuje od výšky a **vlna nedosiahne povrch Zeme**



■ Plazma má v magnetickom poli **anizotropné** (závislosť na smere) **vlastnosti**

- v dôsledku toho sa lineárne polarizovaná vlna (jej vektor polarizácie nie je rovnobežný so smerom zemského mag. poľa) **rozloží na dve elipticky polarizované vlny**

- riadnu vlnu
- a mimoriadnu vlnu

- tieto **sa šíria** rôznymi fázovými rýchlosťami

- **tlmenie a kritická frekvencia** mimoriadnej vlny sú o niečo väčšie ako vlny riadnej

■ Pri praktickom návrhu spojov je potrebné **poznať konkrétne parametre ionosféry v danom mieste a čase**

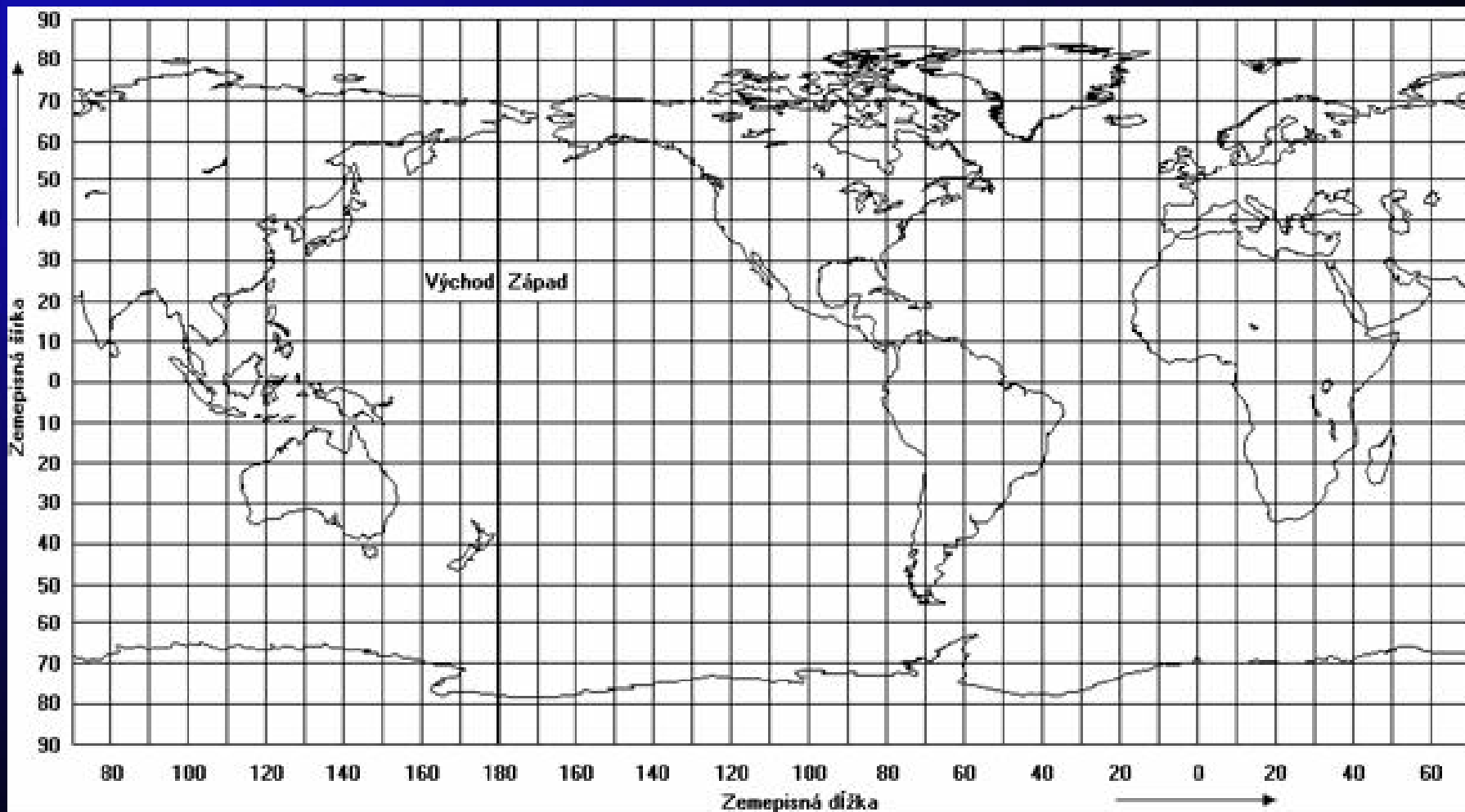
- je potrebné poznať **relatívnu výšku odrazu** od príslušnej vrstvy ionosféry a **maximálnu použiteľnú frekvenciu** (MUF- Maximum Usable Frequency), ktoré sa určujú experimentálne rádiolokačnými metódami

- pretože MUF môže vykazovať malé denné odchýlky, volí sa pre rádiový spoj **optimálna prevádzková frekvencia** (FOT- Frequency Optimum for Transmitting) tak, aby

- pre **90% dní v mesiaci** v danej hodine sa mohlo uskutočniť rádiové spojenie - tomu zodpovedá zníženie maximálnej použiteľnej frekvencie MUF asi o 15%

- **najnižšia použiteľná frekvencia (LUF** - Lowes Usable Frequency) pre danú dĺžku rádiového spoja a pre daný vyžiarený výkon je definovaná ako najnižšia frekvencia, pri ktorej bude príjem ešte prijateľný
 - vyžiarený výkon sa volí 1kW a odstup **signál/šum** 15 dB
 - pre frekvencie, ktoré sú **príliš nízke** v porovnaní s **MUF**, **zväčšuje sa tlmenie** elm vln v ionosfére a **intenzita elektrického poľa** v mieste príjmu je malá
- Frekvencie **MUF** a **LUF** sa **menia** v priebehu dňa, roka aj v priebehu jedenásťročnej periódy slnečnej aktivity
- **Možno ich zistiť** v každom čase meraním, ale pre navrhovanie rádiových spojov ich **musíme poznať dopredu**
- Preto sa vydávajú **ionosférické predpovede** (regionálne, celosvetové, krátkodobé, dlhodobé a pod.)
- Pri návrhu rádiového spoja **musíme určiť** MUF a LUF v mieste odrazu v miestnom čase
- **Najdlhšia vzdialenosť**, ktorú možno preklenúť jedným skokom (jedným odrazom od ionosféry) je **4000km**

- Pri väčšej dĺžke spoja je potrebné trasu rozdeliť tak, aby dĺžka skokov nebola väčšia ako 4000km
- Na určenie dĺžky trasy a súradníc polohy vysielača, prijímača a bodov odrazu sa používa mapa sveta vo valcovej projekcii



- **Presný výpočet** intenzity el. a mag. poľa ionosférickej vlny **je prakticky nemožný** - nie sú známe potrebné údaje o náhodne sa meniacich ionosférických vrstvách
- Technické metódy výpočtu umožňujú **predpovedať len pravdepodobné hodnoty** intenzity poľa v mieste príjmu
- Pri výpočtoch sa **vychádza z predpovede** tzv. **netlmenej intenzity el. poľa**, ktorú možno určiť pomocou nomogramu
- Je **potrebné brať do úvahy** tlmenie vznikajúce pri odrazoch od zemského povrchu a tlmenie vplyvom ionosféry
- Charakteristickým javom pri šírení ionosférických elm vln je **únik**, ktorý spôsobuje fluktuácie intenzity poľa v mieste príjmu
 - **Únik vzniká** ako dôsledok nestálosti jednotlivých ionosférických vrstiev
 - Elm vlna sa šíri po niekoľkých trajektóriách, ktorých vzájomné vzťahy sú nekorelované
 - **Výsledná vlna je superpozíciou** týchto svojich zložiek, ktoré majú náhodné sa meniacu amplitúdu a fázu
 - Únik ohraničuje **spoľahlivosť** ionosférických rádiových spojov
- Využitie ionosférických vln je charakteristické pre rádiové spojenie na **krátkych vlnách** (KV) na vzdialenosti rádovo **10^2 až 10^3 km** s využitím odrazu od vrstvy

Témy na zapamätanie

- Vlastnosti troposféry (vrstvy, zloženie, teplotný gradient, teplotná inverzia)
- Index lomu troposféry (veľkosť, súčiniteľ indexu lomu, polomer krivosti, lom - záporný, kladný, nulový, kritický, superrefrakcia)
- Rozptyl elm vln v troposfére (fluktuácie a rozptyl elm vln, polomer priestorovej korelácie fluktuácií, odstup korelácie – šírka frekvenčného pásma)
- Tlmenie elm vln v troposfére (šírenie elm vln s tlmením a bez tlmenia – vlnové dĺžky, typy tlmení v troposfére, atmosferické zrážky a molekulárna absorbcia)
- Vlastnosti ionosféry (rozvrstvenie atmosféry, ionizácia, vrstvy ionosféry)
- Šírenie elm vln v homogénnej plazme (homogénna plazma, vodivosť ionizovaného plynu, permitivita plazmy a plazmová frekvencia)
- Šírenie elm vln v nehomogénnej plazme (koncentrácia e^- , index lomu, plazmová a kritická frekvencia, vrstevnatá štruktúra, uhol dopadu, bod obratu, polomer krivosti, riadna a mimoriadna vlna, MUF, FOT, LUF, najdlhšia vzdialenosť, únik)

Kontrolné otázky

- Do akej výšky nad zemským povrchom siaha troposféra v oblasti rovníka?
- Do akej výšky nad zemským povrchom siaha troposféra v stredných zemepisných šírkach?
- Do akej výšky nad zemským povrchom siaha troposféra v oblasti pólův?
- Závisí zloženie troposféry (percentuálne zastúpenie jednotlivých plynov) od výšky?
- Čo je charakteristickým javom v troposfére?
- Čo je teplotná inverzia a ako vzniká?
- Od akých podmienok závisí šírenie elm vln v troposfére a ako sa prejaví ich vplyv?
- Aký veľký je index lomu troposféry (vzduchu)?
- Aké sú základné druhy troposférického lomu (vedieť aj kresliť)?
- Aký je polomer krivosti „ R_k “ a efektívny polomer Zeme „ R_{ef} “ pri zápornom troposférickom lome?

- Aký je polomer krivosti „ R_k “ a efektívny polomer Zeme „ R_{ef} “ pri nulovom troposférickom lome?
- Aký je polomer krivosti „ R_k “ a efektívny polomer Zeme „ R_{ef} “ pri kladnom troposférickom lome?
- Aký je polomer krivosti „ R_k “ a efektívny polomer Zeme „ R_{ef} “ pri kritickom troposférickom lome?
- Aký je polomer krivosti „ R_k “ a efektívny polomer Zeme „ R_{ef} “ pri superrefrakcii?
- Čo spôsobuje rozptyl elm vln šíriacich sa v troposfére a teda umožňuje diaľkové spojenie pomocou „VKV“?
- Pre elm vlnenie akej vlnovej dĺžky „ λ “ môžeme predpokladať, že troposféra je priehľadná, t.j. má nulové tlmenie?
- Aké sú druhy tlmenia elm vln v troposfére?
- V akých výškach (nad koľko kilometrov) atmosféry sa nachádza ionosféra?
- Do akej výšky nad zemským povrchom má atmosféra rovnaké zloženie ako pri povrchu Zeme?

- Od akej nadmorskej výšky dochádza k disociácii dusíka „N₂“ (rozštiepeniu na atómy N)?
- Od akej nadmorskej výšky dochádza k disociácii kyslíka „O₂“ (rozštiepeniu na atómy O)?
- Čo je to ionizácia plynu?
- Čo je to rekombinácia?
- Čo musí existovať medzi ionizáciou a rekombináciou?
- Akú podmienku musí spĺňať ionizačná práca „W“, aby došlo k ionizácii fotónmi s energiou kvanta ($h \cdot f$)?
- Čo (kto) je základným zdrojom ionizácie atmosféry?
- Aký je výškový interval „D“ vrstvy ionosféry?
- Aký je výškový interval „E“ vrstvy ionosféry?
- Aký je výškový interval „F₁“ vrstvy ionosféry?
- Aký je výškový interval „F₂“ vrstvy ionosféry?
- Ktoré vrstvy ionosféry zanikajú v noci?
- Ako sa nazývajú oblasti, ktoré tvoria najvyššie (okrajové) vrstvy ionosféry?

- Čo tvorí Van Allenove oblasti ionosféry?
- Čo je homogénna plazma?
- Pre aké frekvencie „ f “ v porovnaní s kritickou frekvenciou „ f_{kr} “ sa ionosféra stáva priezračnou (elm vlna sa od ionosféry neodráža)?
- Na aké vzdialenosti sa využíva šírenie pomocou odrazu od ionosféry pre prenos „KV“?

Zoznam použitých skratiek a symbolov

■ Skratky:

- ELM, elm- elektromagnetický
- PA- prijímacia anténa
- VA- vysielacia anténa

■ Značky:

- ε – permitivita
- e- absolútna vlhkosť vzduchu
- H- nadmorská výška
- N- súčiniteľ lomu
- R- polomer Zeme
- R_{ef} - efektívny polomer Zeme
- R_K - polomer krivosti Zeme
- T- teplota

Ďakujem za pozornosť