



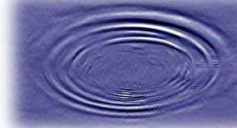
Propagacja w wolnej przestrzeni

$$P_R = \frac{P_T \cdot G_T}{4\pi \cdot r^2} \cdot A_S$$

przy odbiorze na kierunku maksymalnego promieniowania :

$$G_{\max} = \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot A_S \quad \longrightarrow \quad P_R = P_T \cdot G_T \cdot G_{R\max} \left( \frac{\lambda}{4\pi \cdot r} \right)^2$$

## Propagacja w wolnej przestrzeni



W ogólnym przypadku (odbiór sygnału na dowolnym kierunku) :

Równanie Friisa :

$$P_R = P_T \cdot G_T \cdot G_R \left( \frac{\lambda}{4\pi \cdot r} \right)^2$$

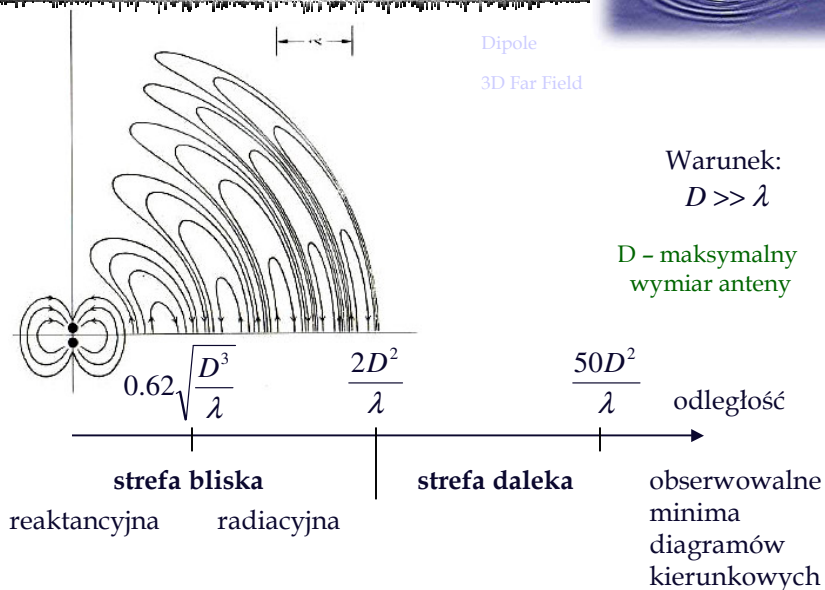
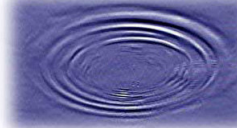
Tłumienie wolnej przestrzeni FSL (Free Space Loss) :

$$G_T = G_R = 1 \quad \longrightarrow \quad FSL = \frac{P_T}{P_R} = \left( \frac{4\pi \cdot r}{\lambda} \right)^2$$

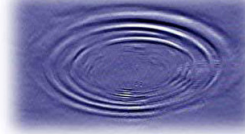
W mierze decybelowej:

$$FSL_{dB} = 32.44 + 20 \log r_{km} + 20 \log f_{MHz}$$

## Strefy promieniowania anteny

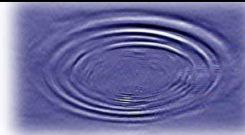


## Zjawiska propagacyjne



Interferencja  
Odbicie  
Załamanie (refrakcja)  
Rozproszenie  
Dyfrakcja

## Odbicie i załamanie



Prawa Snella (Snelliusa):

1. równość kątów padania i odbicia
2. prawo załamania:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\sqrt{\epsilon_2 \mu_2}}{\sqrt{\epsilon_1 \mu_1}} = \frac{n_2}{n_1}$$

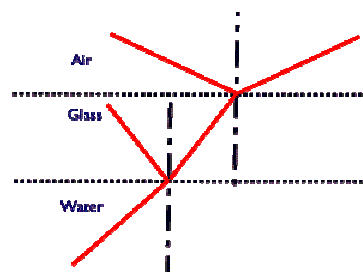
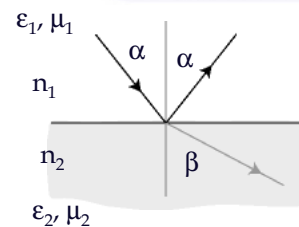
- współczynnik załamania w atmosferze:

$$n = 1 + N \cdot 10^{-6}$$

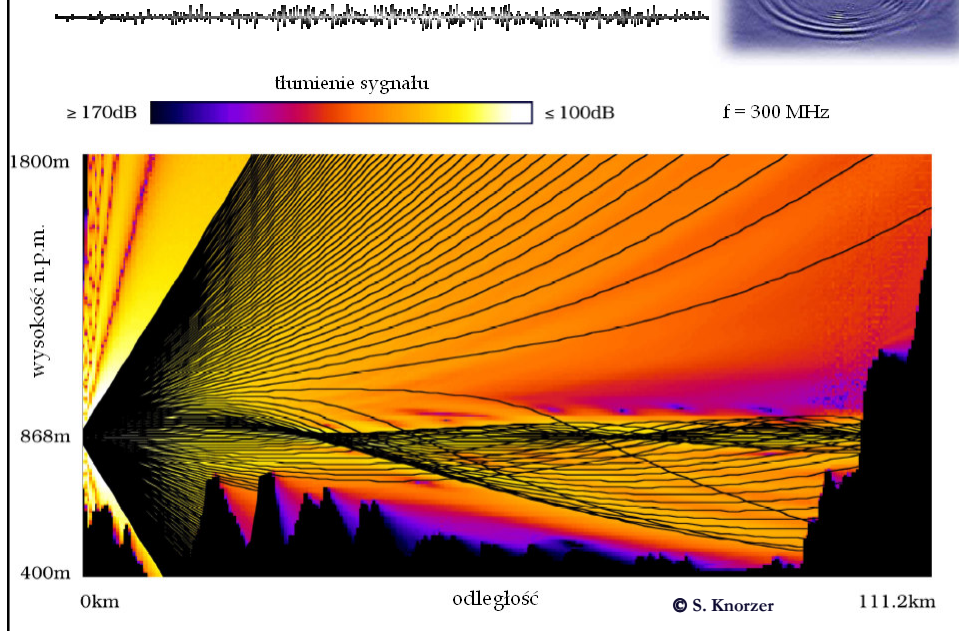
- wskaźnik refrakcji:

$$N = \frac{77.6}{T} (p + 22.2 \cdot \rho)$$

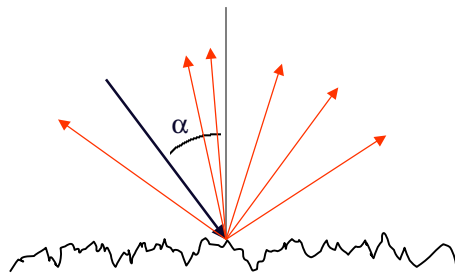
$T$  - temperatura powietrza [K]  
 $p$  - ciśnienie atmosferyczne [hPa]  
 $\rho$  - gęstość pary wodnej [g/m<sup>3</sup>]



## Zjawiska propagacyjne - refrakcja



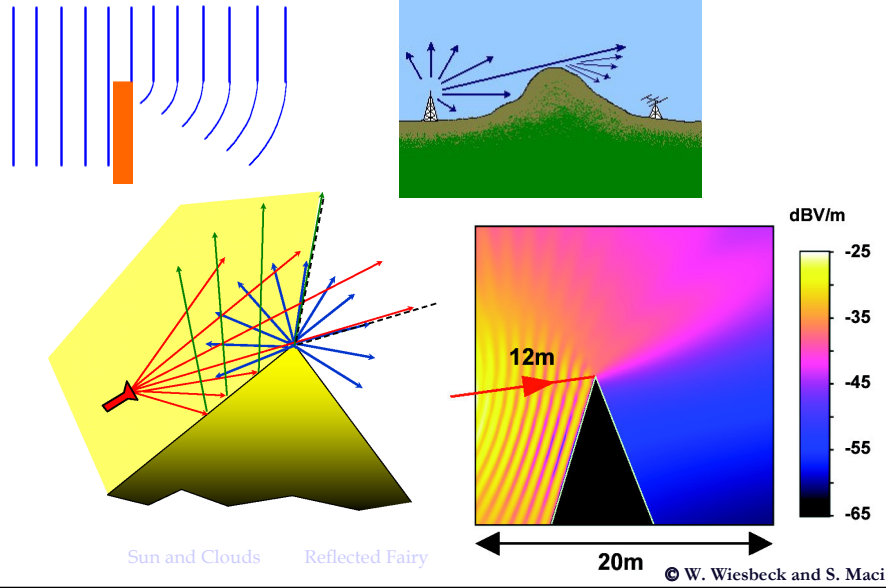
## Zjawiska propagacyjne - rozproszenie



kryterium Fraunhofera  
na szorstkość powierzchni:  $\sigma_h \leq \frac{\lambda}{32 \cos \alpha}$

$\sigma_h$  - odchylenie standardowe  
nierówności powierzchni

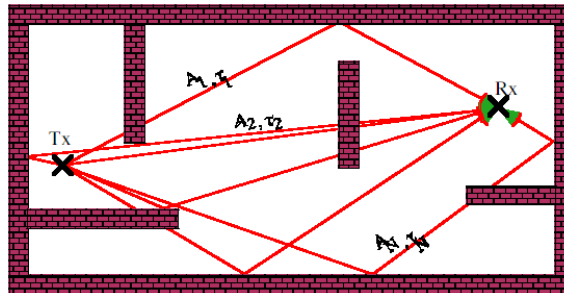
## Zjawiska propagacyjne - dyfrakcja



## Optyka geometryczna - modelowanie kanału radiowego

Warunki:

- kryterium Fraunhofera
- $\lambda \ll$  rozmiar obiektów w otoczeniu



Zastosowania:

- środowisko wewnątrz budynków (*indoor*)
- centra miast, „kaniony” uliczne

Metody:

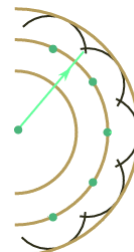
- *shadowing*
- *ray launching*
- *ray tracing*

**Dlaczego promienie ???**

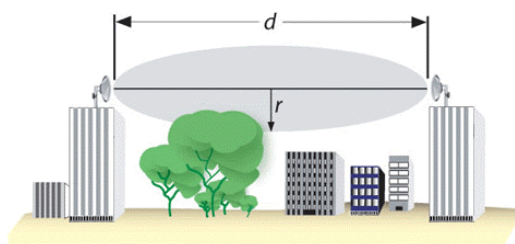
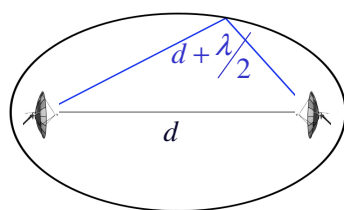
## Promienie radiowe w optyce geometrycznej

### Zasada Huygensa:

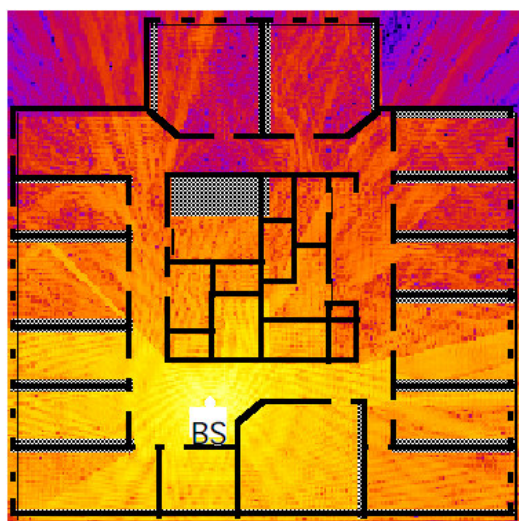
Każdy punkt na czole fali jest źródłem nowej fali kulistej:



### Strefy Fresnela:



## Optyka geometryczna - modelowanie kanału radiowego



Tłumienie sygnału:

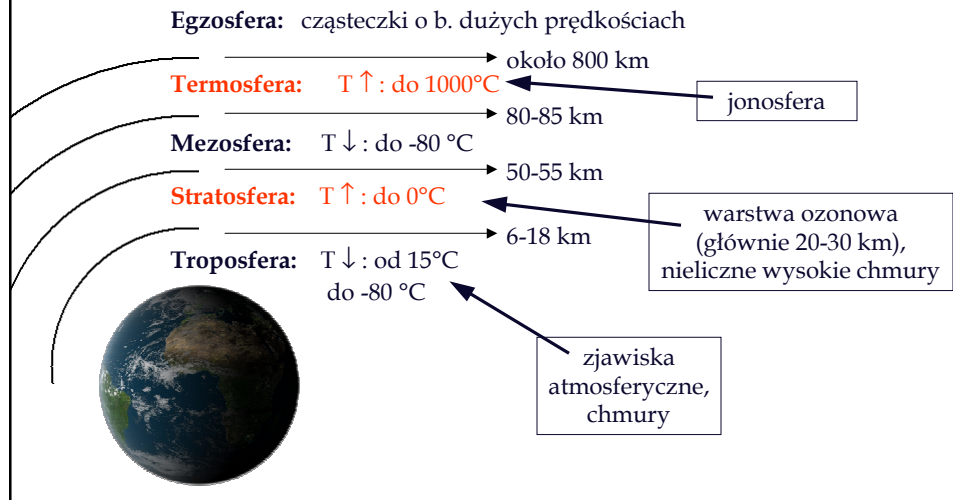
20 dB

$f = 856.5$  MHz

120 dB

© S. Knorz

# Atmosfera ziemska



# Troposfera



- tłumienie sygnału w gazach atmosferycznych (głównie  $\text{O}_2$  i  $\text{H}_2\text{O}$ )
- wpływ opadów oraz obecności chmur i mgieł
- tłumienie wywołane przez burze piaskowe
- scyntylacje
- przeniki polaryzacyjne
- wpływ refrakcji atmosferycznej: rozproszenie wiązki antenowej, zmiana kąta natarcia

## Jonosfera



- warstwa obejmująca prawie całą termosferę:
  - dolna granica: ok. 80 km
  - górna granica: 300 – 800 km
- silna koncentracja jonów i wolnych elektronów
- niejednorodność i niestacjonarność
- procesy jonizacji (prom. słoneczne: UV i X) i rekombinacji, wpływ deszczów meteorytów
- wpływ jonosfery na fale radiowe:
  - odbijanie fal radiowych
  - zjawisko Faradaya -> przeniki polaryzacyjne

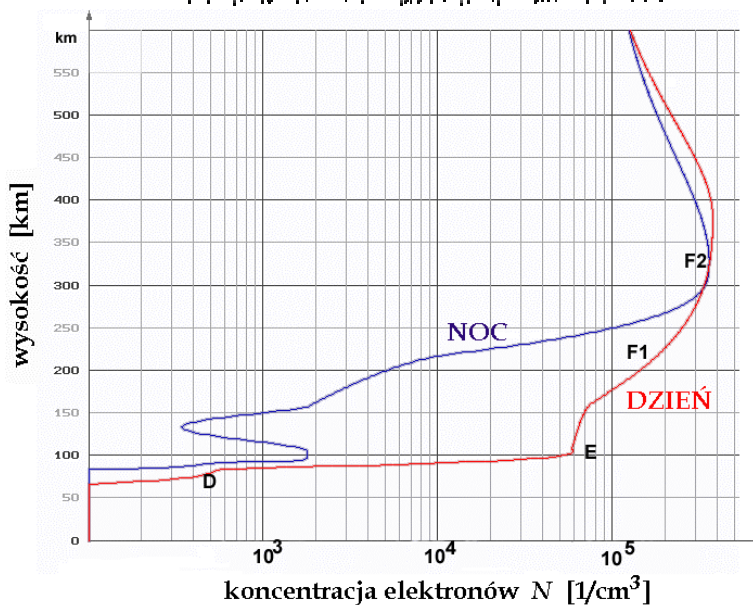
• współczynnik załamania:  $n^2 = 1 - \left(\frac{f_p}{f}\right)^2$

$N$  -> koncentracja wolnych elektronów

$q_e$  i  $m_e$  -> ładunek i masa elektronu

• częstotliwość plazmowa:  $f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{N \cdot q_e^2}{\epsilon_0 \cdot m_e}}$

## Jonosfera





## Rekomendacje ITU-R

International Telecommunication Union (ITU)  
- [www.itu.int](http://www.itu.int)



- urząd podległy ONZ
- grupy rekomendacji:
  - ITU-T: Telecom Standardization
  - ITU-D: Telecom Development
  - **ITU-R: Radiocommunication**
- ITU-R: zalecenia dotyczące wykorzystania częstotliwości radiowych, projektowania i działania systemów radiowych, propagacji fal radiowych, kwestii bezpieczeństwa
- 15 serii rekomendacji ITU-R, m.in. **S** – Fixed satellite service, **SM** – Spectrum management, **M** – Mobile, radiodetermination, amateur and related satellite services, **P** – Radiowave propagation
- numeracja dokumentów:  
np. ITU-R P.618-7 -> projektowanie łączy satelitarnych

## Tłumienie w gazach atmosferycznych



- absorpcja fali radiowej przez parę wodną i tlen, a powyżej 100 GHz również przez azot
- poniżej 10 GHz -> tłumienie pomijalnie małe
- obliczanie tłumienia wg ITU-R P.676-5:

$$A = d \cdot \gamma_o + d \cdot \gamma_w \quad [\text{dB}]$$

$d$  - długość trasy radiowej [km]

$\gamma_o$  - tłumienie jednostkowe [dB/km] powietrza suchego

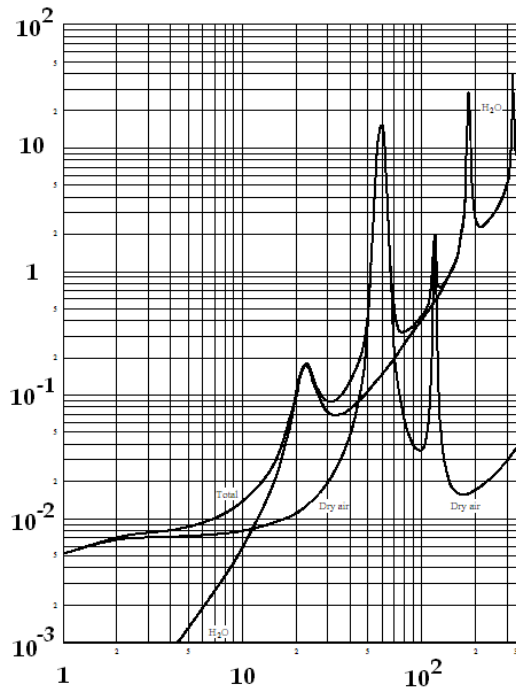
$\gamma_w$  - tłumienie jednostkowe [dB/km] pary wodnej

$\gamma_o$  i  $\gamma_w$  są obliczane jako funkcje częstotliwości fali radiowej  $f$ , temperatury  $T$ , ciśnienia powietrza  $p$  i gęstości pary wodnej  $\rho$



Tłumienie jednostkowe [dB/km]  
powietrza suchego (*dry air*)  
i pary wodnej ( $H_2O$ )  
w funkcji częstotliwości  $f$  [GHz]

$p = 1013 \text{ hPa}$   
 $T = 15^\circ\text{C}$   
 $\rho = 7.5 \text{ g/m}^3$



## Tłumienie w deszczu



- tłumienie na skutek absorpcji i rozproszenia na kroplach wody
- wymagane są reprezentatywne (kilkudziesięcioletnie) statystyki opadowe dla danego obszaru geograficznego
- problem: jakie (jak intensywne) deszcze uwzględnić?
- procedura obliczania tłumienia wg ITU-R (P.530, P.618, P.837, P.838):

$$A_p = d_{eff} \cdot \gamma_R \quad [\text{dB}] \quad \gamma_R = k \cdot R_p^\alpha \quad [\text{dB/km}]$$

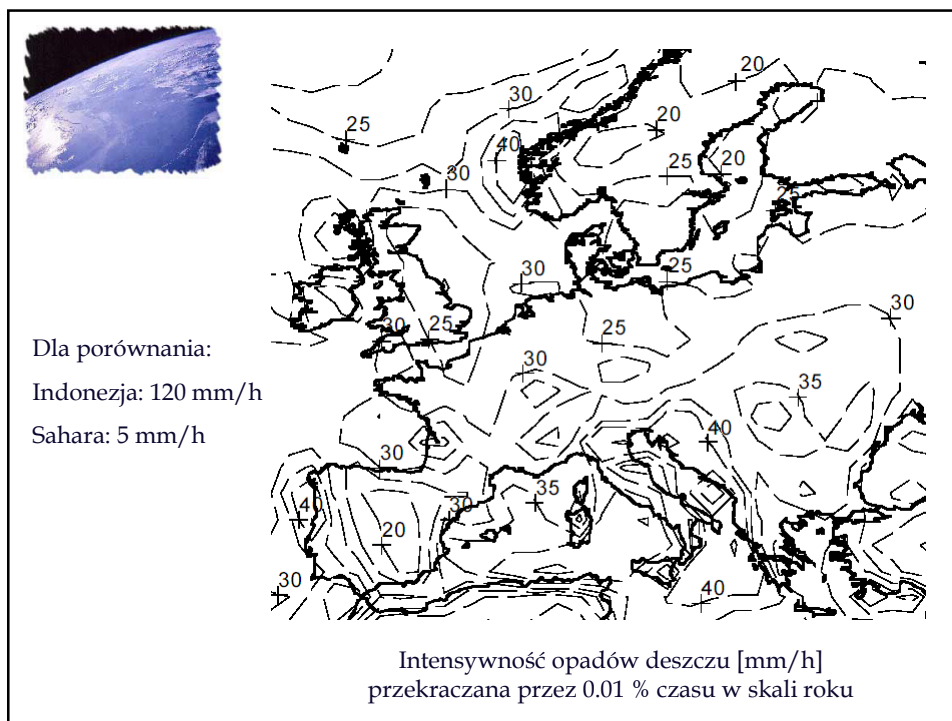
$p$  - rozważany procent czasu w skali roku

$d_{eff}$  - efektywna długość trasy radiowej [km],  
na której może wystąpić opad deszczu

$\gamma_R$  - tłumienie jednostkowe [dB/km]

$k$  i  $\alpha$  - współczynniki zależne od częstotliwości i polaryzacji fali radiowej

$R_p$  - intensywność opadu deszczu [mm/h]  
przekraczana przez  $p$  procent czasu w skali roku



## Tłumienie w chmurach i mgłach



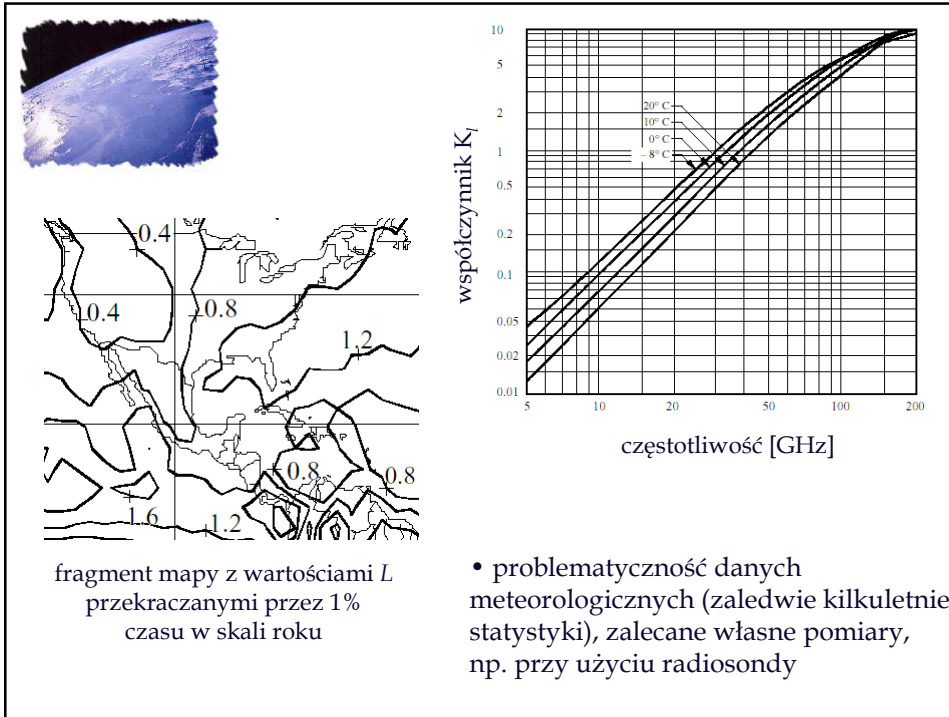
- mikroskopijne kropelki wody, kryształki lodu lub ich mieszanina, powstające przy powierzchni gruntu (mgły) lub do wysokości kilkunastu kilometrów (chmury)
- zawartość wody:
  - obiekty lodowe: do 0.01 g/m<sup>3</sup>
  - chmury wodne: do 5 g/m<sup>3</sup>
- obliczanie tłumienia przy projektowaniu łącza satelitarne (ITU-R P.840):

$$A_c = \frac{L \cdot K_l}{\sin \theta} \text{ [dB]}$$

$L$  - całkowita zawartość wody w słupie powietrza od powierzchni Ziemi do górnej warstwy atmosfery liczona na jednostkę powierzchni [kg/m<sup>2</sup>]

$K_l$  - współczynnik proporcjonalności [(dB/km)/(g/m<sup>3</sup>)]

$\theta$  - kąt elewacji anteny stacji naziemnej



## Scyntyłacje

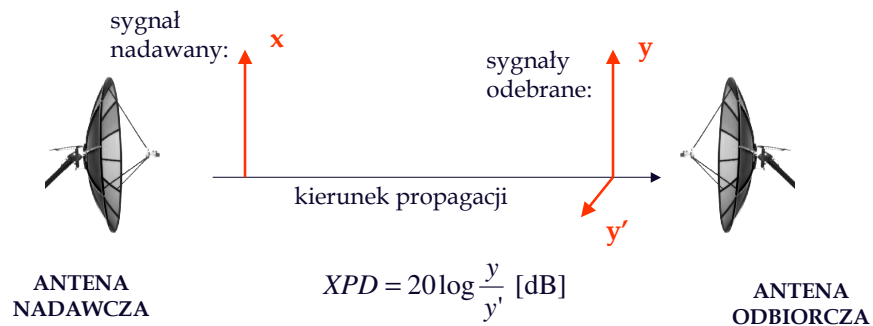
- losowe i gwałtowne fluktuacje amplitudy, fazy, polaryzacji i kierunku propagacji fali radiowej spowodowane nieregularnością zmian wskaźnika refrakcji – czyli nieregularnymi zmianami wilgotności, temperatury i ciśnienia powietrza
- zjawisko znaczące w łączach satelitarnych, dla dużych częstotliwości ( $f > 10$  GHz) i małych kątów elewacji anten stacji naziemnych ( $\theta < 15^\circ$ )
- tłumienia sygnału na skutek scyntyłacji:  
-> procedura wg ITU-R P.618

## Przeniki polaryzacyjne XPD (Cross Polar Discrimination)



Przyczyny:

- zjawiska troposferyczne: zmiany wskaźnika refrakcji, propagacja wielodrogowa, opady deszczu i śniegu
- jonosfera: skręcanie polaryzacji pod wpływem pola EM (efekt Faradaya)



Dziękuję za uwagę