

Osservazione e stima della precipitazione mediante radar meteorologici multiparametrici

Luca Facheris

Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni – Università di Firenze

SOMMARIO

- Parametri radar e principi di radar meteorologia
- Radar meteorologici monoparametrici
- Potenzialità e problemi dei radar meteorologici
- Sistemi multiparametrici: Doppler e polarimetria

Il radar meteorologico

Permette sia la classificazione del tipo di idrometeore (*pioggia, neve, grandine*), sia la stima dell'intensità e di altri parametri di precipitazione. Il suo principale vantaggio è l'alta risoluzione spaziale e temporale, e la possibilità di acquisire sezioni atmosferiche in tre dimensioni su aree estese sia in distanza che in quota, consentendo una dettagliata analisi microfisica della precipitazione.

Applicazioni operative:

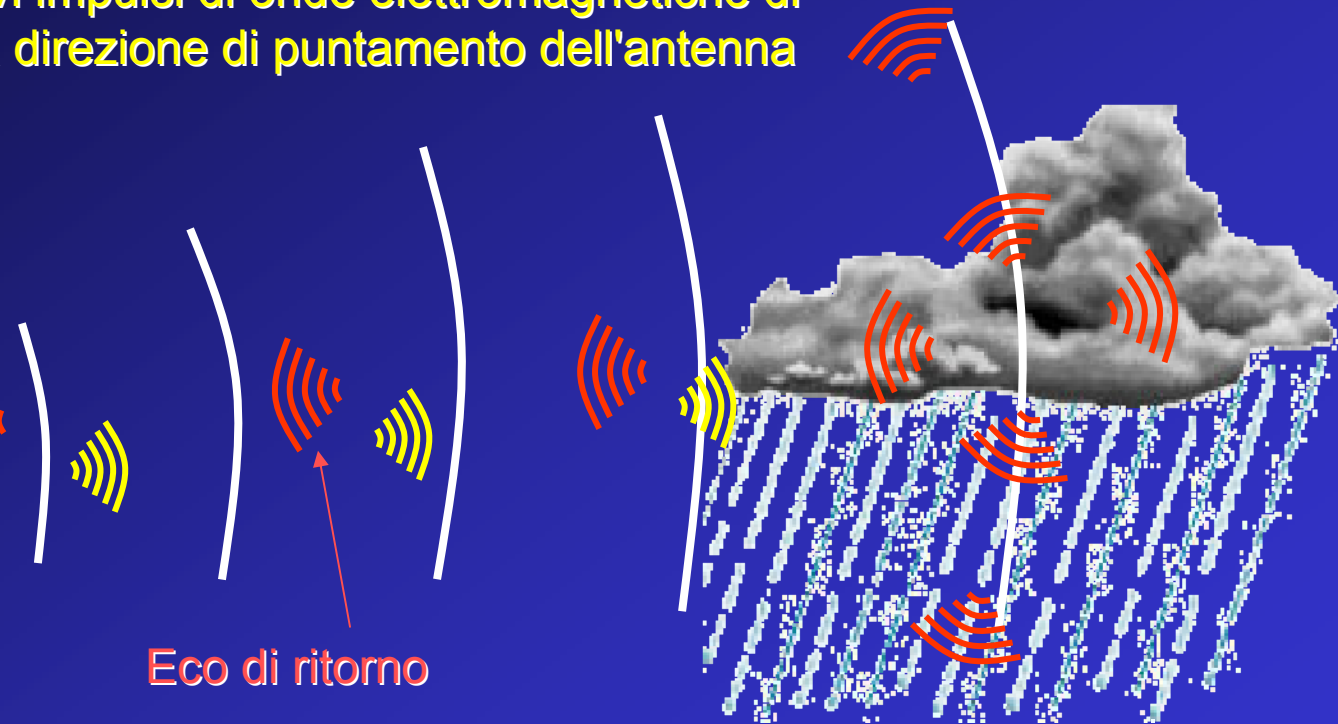
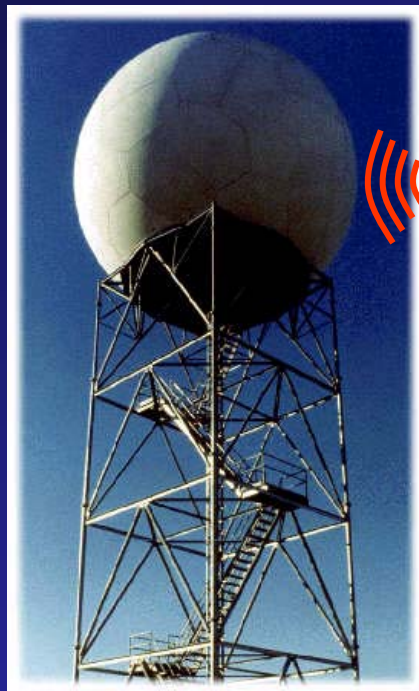
- previsioni meteo a brevissima scala temporale (nowcasting): 3-6 ore
- Trasporti (traffico aereo e traffico automobilistico)
- Agrometeorologia
- Idrometeorologia (previsioni piene, riserve idriche)

Ricerca:

- Studio della formazione ed evoluzione dei fenomeni precipitativi
- Studio della propagazione in precipitazione

Il radar meteo a impulsi

Vengono emessi brevi impulsi di onde elettromagnetiche di elevata potenza nella direzione di puntamento dell'antenna



Eco di ritorno

I pacchetti di onde così emessi vengono *re-irradiati* dalle idrometeore in tutte le direzioni tra cui quella del radar.



La potenza del segnale di ritorno permette di valutare l'intensità di precipitazione,

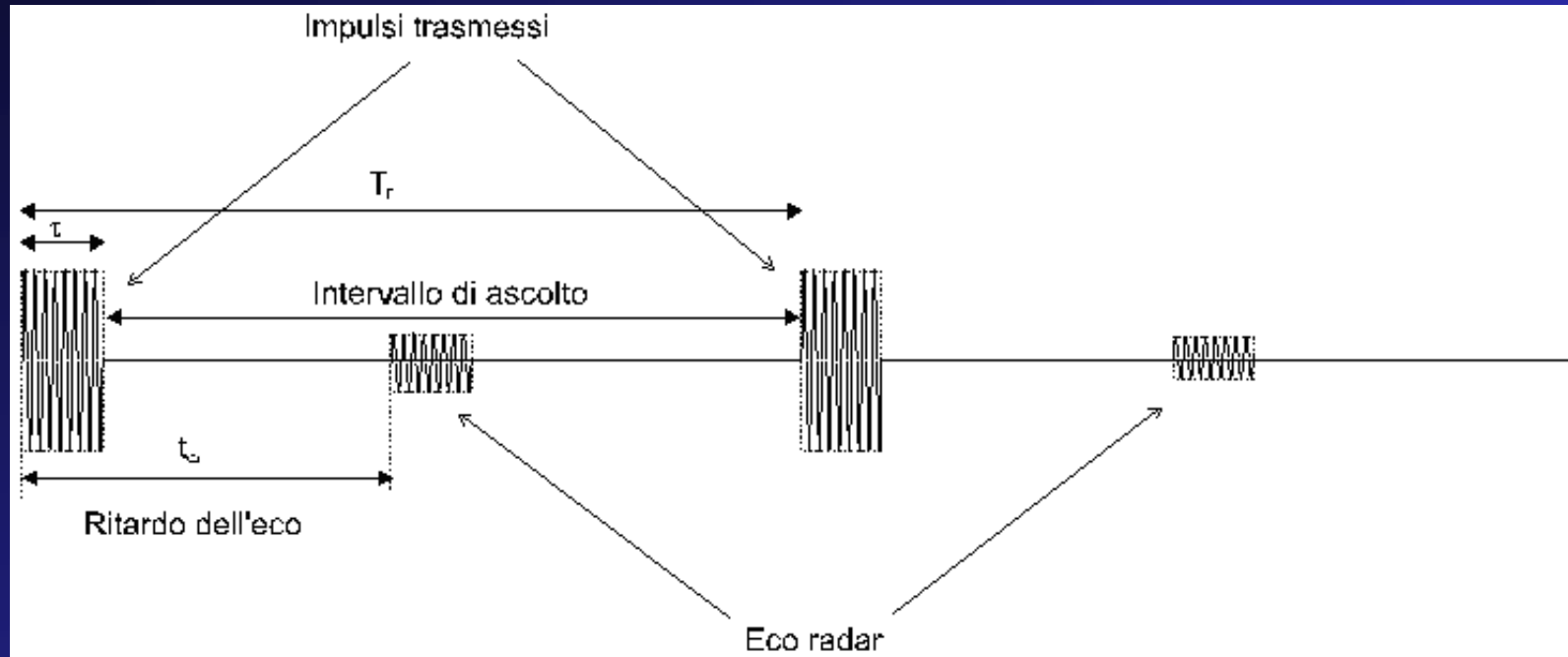


La direzione di puntamento dell'antenna e il tempo impiegato dal segnale nel percorso andata-ritorno consentono di localizzare gruppi di idrometeore in termini di direzione e distanza.



L'analisi Doppler consente di stimare sia la direzione radiale locale della precipitazione, sia la turbolenza (vorticosità) locale

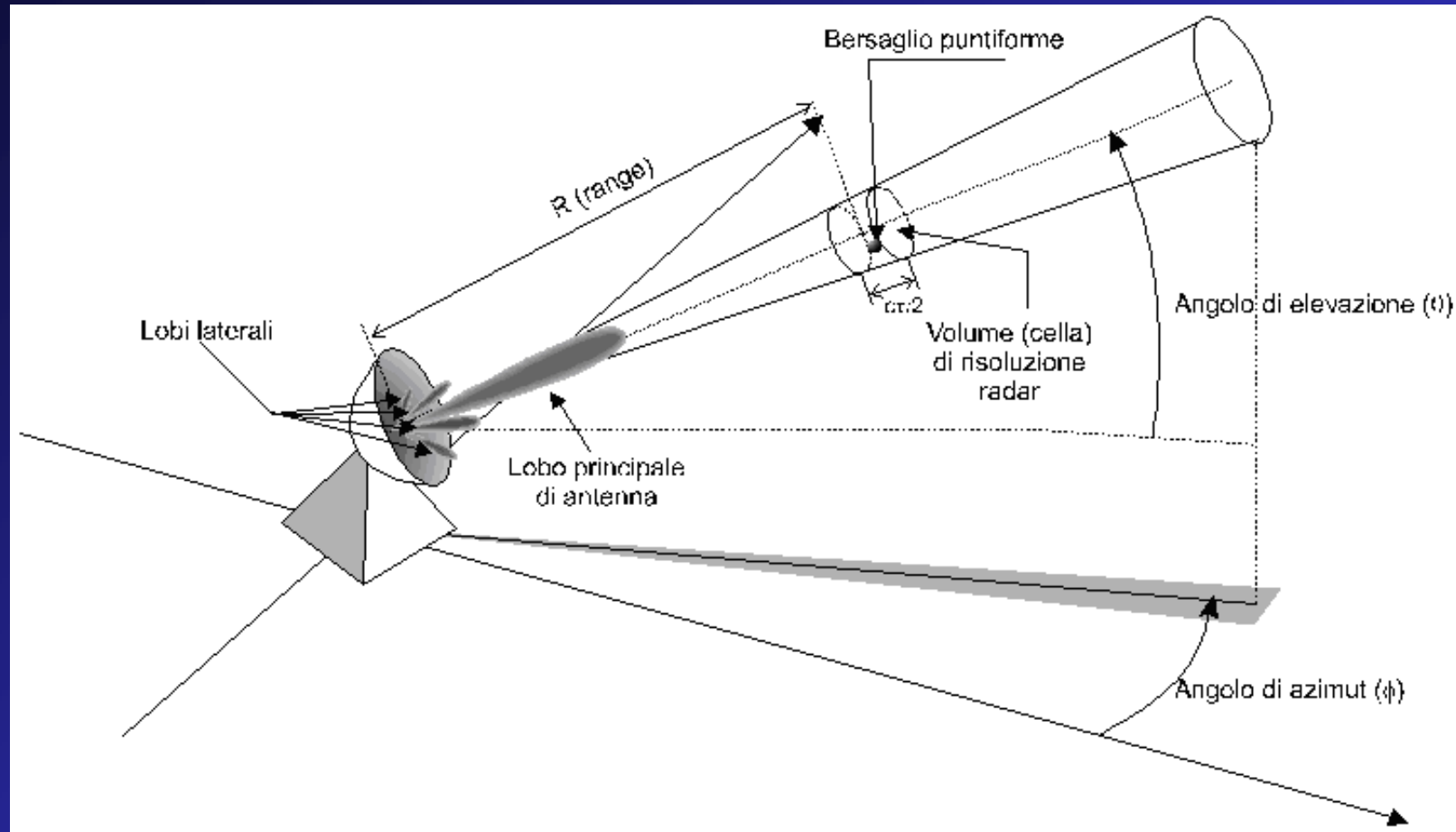
Principio di funzionamento di un radar ad impulsi equispaziati



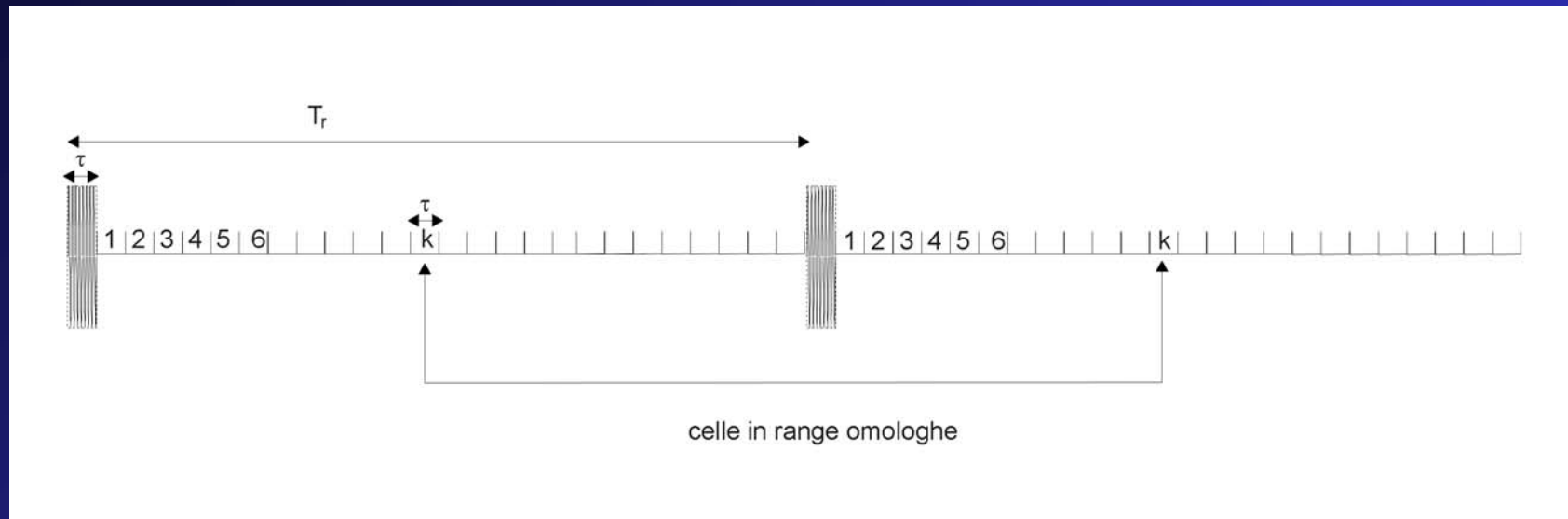
$$t_o = \frac{2R}{c}: \text{ritardo dell'eco da bersaglio puntiforme a distanza } R$$

$1/T_r$: frequenza di ripetizione degli impulsi (PRF: Pulse Repetition Frequency).

Radar terrestre ad impulsi con "pencil beam" - GEOMETRIA 3 D



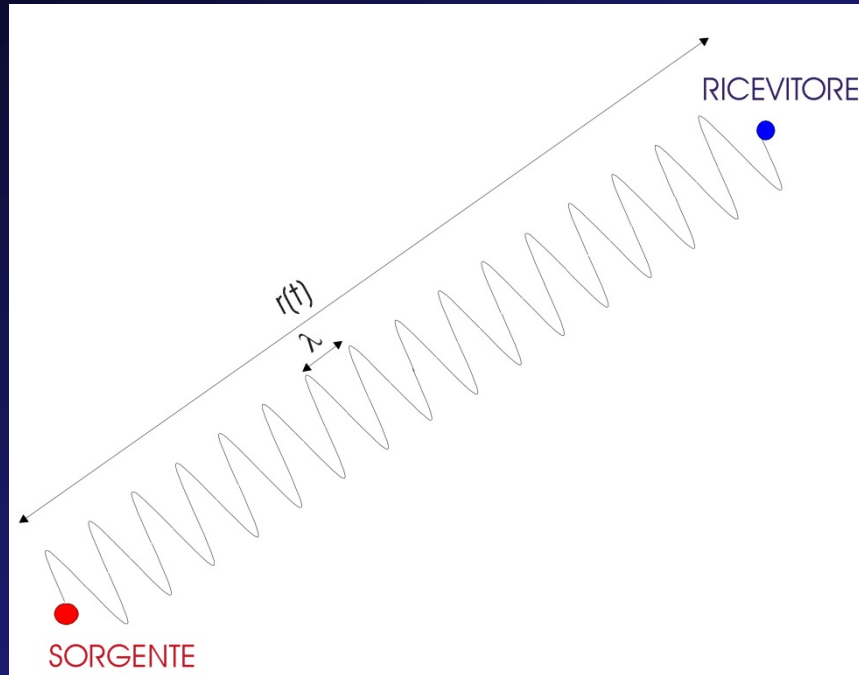
Temporizzazione dell'intervallo di ascolto



Numero celle in range $\cong T_r / \tau$ ($T_r \cdot B$)

B: banda del segnale di Tx

Effetto Doppler come modulazione di fase



In un sistema radar monostatico, la posizione della sorgente di emissione (antenna Tx) coincide con quella del ricevitore (antenna Rx) pertanto il percorso di propagazione è pari a $2r(t)$

Numero di lunghezze d'onda sul percorso totale:

$$\downarrow \quad \frac{r(t)}{\lambda}$$

Sfasamento dell'onda dovuto a propagazione:

$$\downarrow \quad \Delta\phi(t) = 2\pi \frac{r(t)}{\lambda}$$

Frequenza istantanea (addizionale) percepita al ricevitore:

$$\Delta f(t) = \frac{1}{2\pi} \Delta\dot{\phi}(t) = \frac{\dot{r}(t)}{\lambda} = \frac{v_r(t)}{\lambda}$$

Frequenza (istantanea) Doppler

$$\Delta f(t) = f_d(t) = \frac{2v_r(t)}{\lambda}$$

Espressione dell'eco ricevuta

Le caratteristiche dello spettro Doppler derivano da quelle del moto delle idrometeore all'interno della cella di risoluzione radar:

$$V(t) = \sum_n A_n(t) e^{-j2kr_n(t)} e^{-j\gamma_n(t)} F(\underline{r}_n) \quad ; \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}$$



$$\{V(t_k)\}_{k=1}^N$$

N campioni per cella di risoluzione

\underline{r}_n : posizione dello n-esimo scatteratore rispetto al radar al tempo t

A_n : fattore riflettività (complesso) della n-esima idrometeora

γ_n : sfasamento dovuto alla propagazione nel mezzo interposto tra radar ed n-esima idrometeora

$F(\underline{r}_n)$: fattore dipendente da parametri di sistema e posizione della n-esima idrometeora (inclusa attenuazione di percorso)

Tipicamente si considerano A_n e γ_n costanti nel tempo, e un moto radiale rettilineo uniforme: $r_n(t) = r_{on} + v_n t$

(le oscillazioni delle idrometeore in caduta non contribuiscono significativamente a variazioni di A_n nei tempi di osservazione tipici)

Momenti dello spettro Doppler-I

Di massimo interesse in radar meteorologia sono i momenti del primo e secondo ordine dello spettro di Doppler (di frequenza o di velocità)

Momento di ordine 0: potenza media attesa

$$P_R = \int_{-\infty}^{+\infty} S_v(v) dv$$

$$P_R = \int_{-\infty}^{+\infty} S(f) df$$

Momento del primo ordine

$$\bar{v} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} v S_v(v) dv}{P_R}$$

← velocità radiale media

frequenza Doppler media →

$$\bar{f} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} f S(f) df}{P_R}$$

Momento del secondo ordine

$$\sigma_v^2 = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (v - \bar{v})^2 S_v(v) dv}{P_R}$$

Indice di dispersione di frequenza
Doppler o velocità radiale

$$\sigma_f^2 = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (f - \bar{f})^2 S(f) df}{P_R}$$

Momenti dello spettro Doppler-II

Essendo lo spettro di frequenza $S_c(f)$ periodico (periodo PRF), i precedenti integrali devono essere effettuati nell'intervallo $[-PRF/2 \quad PRF/2]$ o, sul corrispondente spettro di velocità $S_{cv}(f)$, nell'intervallo $[-\lambda/2 PRF/2 \quad \lambda/2 PRF/2]$:

$$P'_R = \frac{\int_{-PRF/2}^{PRF/2} S_c(f) df}{\frac{PRF}{2}} = \frac{\int_{-\lambda PRF/4}^{\lambda PRF/4} S_{cv}(v) dv}{\frac{\lambda PRF}{4}}$$

$$\bar{f}' = \frac{\int_{-PRF/2}^{PRF/2} f S_c(f) df}{P'_R} \quad \bar{v}' = \frac{\int_{-\lambda PRF/4}^{\lambda PRF/4} v S_{cv}(v) dv}{P'_R}$$

$$\sigma'^2_f = \frac{\int_{-PRF/2}^{PRF/2} (f - \bar{f}')^2 S_c(f) df}{\frac{PRF}{2} P'_R} \quad \sigma'^2_v = \frac{\int_{-\lambda PRF/4}^{\lambda PRF/4} (v - \bar{v}')^2 S_{cv}(v) dv}{\frac{\lambda PRF}{4} P'_R}$$

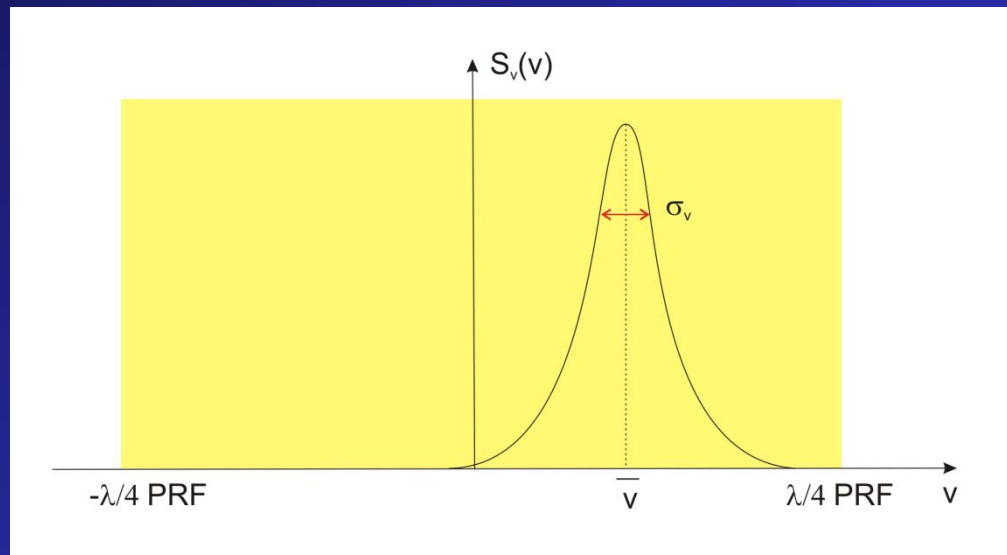
Spettro Doppler della eco di pioggia

La funzione di autocorrelazione normalizzata nel caso di pioggia è gaussiana:

$$\rho(\tau) = \frac{R(\tau)}{P_R} = \frac{E\{V^*(t)V(t+\tau)\}}{P_R} = \exp\left(-\frac{8\pi^2\sigma_v^2}{\lambda^2}\cdot\tau^2\right) \exp\left(j\frac{4\pi\bar{v}}{\lambda}\cdot\tau\right)$$



Spettro gaussiano



Stima dei parametri Doppler a coppie di impulsi

Poiché in pioggia:

$$R(iT_R) = P_R \exp\left(-\frac{8\pi^2 \sigma_v^2}{\lambda^2} \cdot (iT_R)^2\right) \exp\left(j \frac{4\pi \bar{v}}{\lambda} \cdot iT_R\right)$$

$$\bar{v} = \frac{\lambda}{4\pi T_R} \cdot \arg(R(T_R)) \quad \sigma_v^2 = \frac{\lambda^2}{24\pi^2 T_R^2} \cdot \ln \left| \frac{R(T_R)}{R(2T_R)} \right|$$

Pertanto si evita in generale di effettuare la FFT per ogni cella di risoluzione e si ricorre ad uno stimatore della funzione di autocorrelazione deterministica a 1 e 2 passi. In generale, per $i \geq 0$ $R(iT_R)$ è stimato da una media finita di prodotti di coppie di impulsi ricevuti, da cui il nome PULSE PAIR ESTIMATORS:

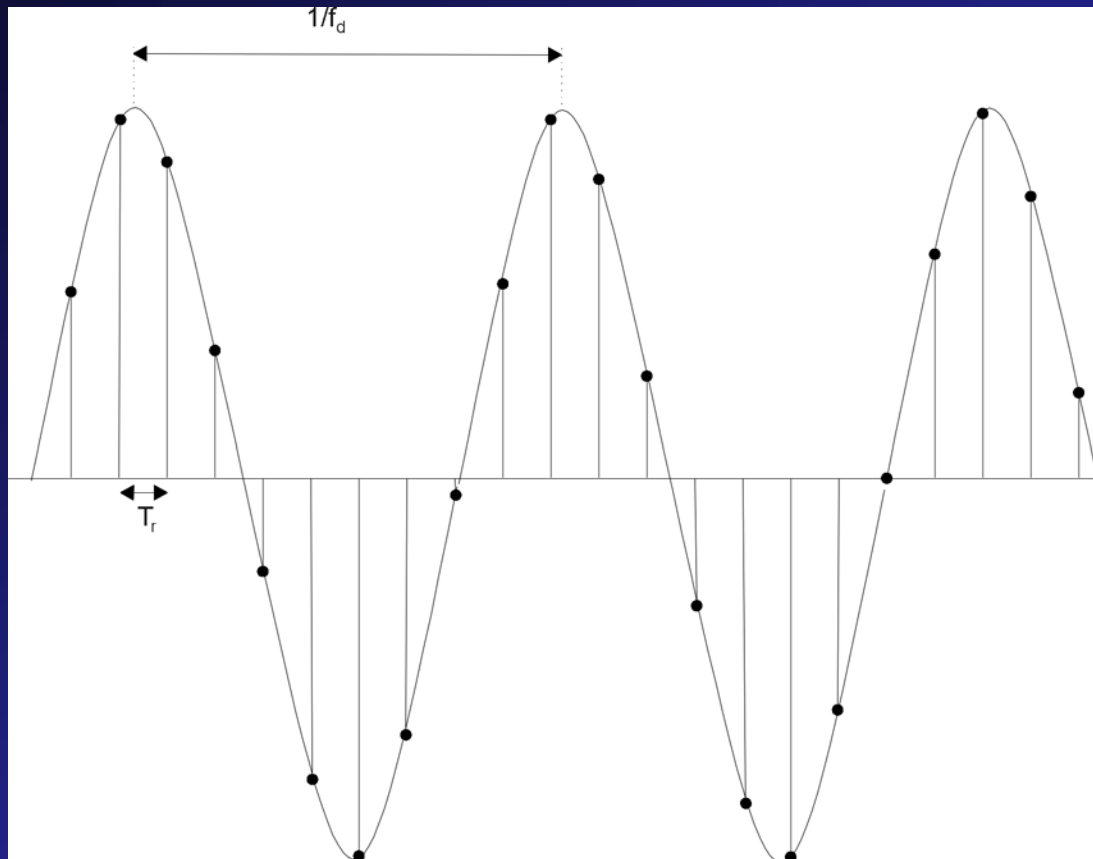
$$\hat{R}(iT_R) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-i} V^*(kT_R) \cdot V[(k+i)T_R]$$

$$\hat{\bar{v}} = -\frac{\lambda}{4\pi T_R} \cdot \arg(\hat{R}(T_R))$$

$$\hat{\sigma}_v^2 = \frac{\lambda^2}{24\pi^2 T_R^2} \cdot \ln \left| \frac{\hat{R}(T_R)}{\hat{R}(2T_R)} \right|$$

Mentre il primo stimatore è utilizzabile anche non in pioggia, il secondo è legato alla forma gaussiana dello spettro e pertanto è impreciso in celle non riempite di gocce di pioggia

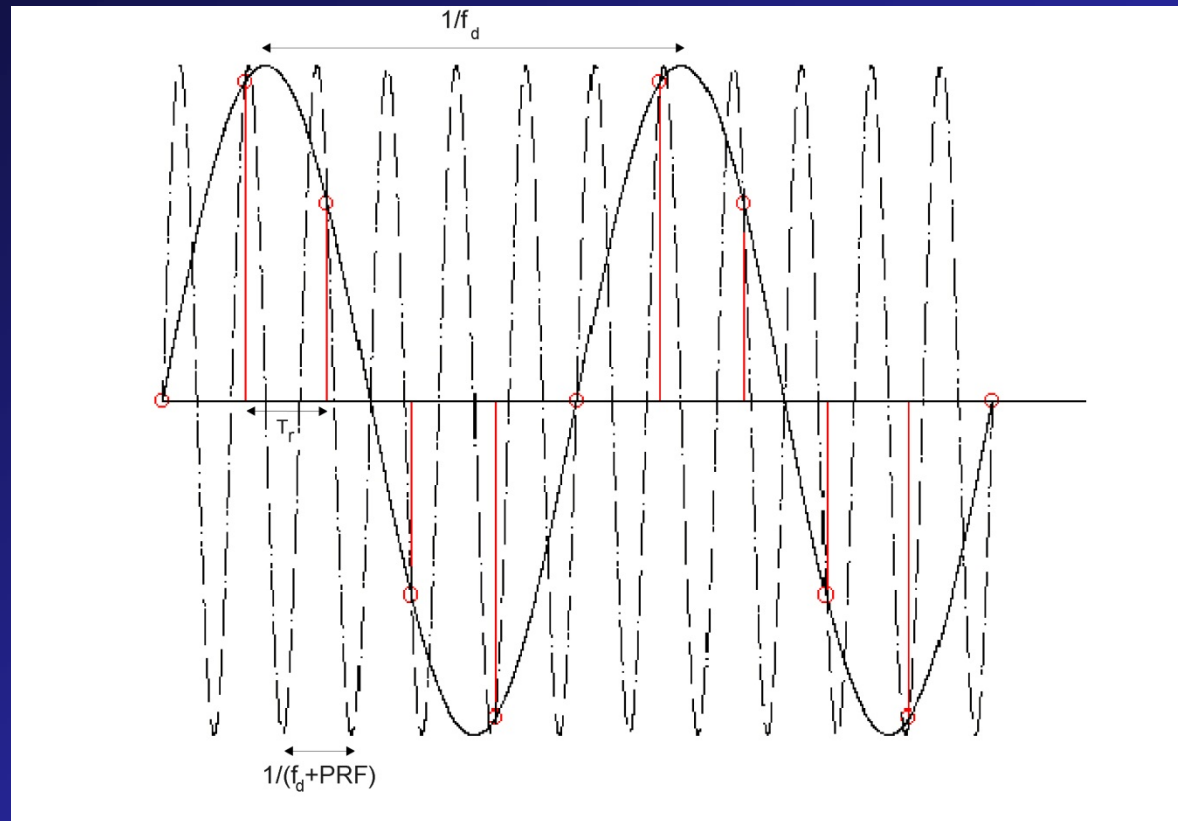
Campionamento del segnale Doppler



Il tempo di analisi della fase Doppler è τ , ed è tipicamente tale per cui $f_d \tau \ll 1$.

Quindi praticamente nei radar ad impulsi il segnale Doppler viene campionato con frequenza di campionamento $PRF = 1/T_R$

Ambiguità nella misura di frequenza Doppler



Segnali Doppler sinusoidali con frequenza pari a $f_d + nPRF$, con n intero qualunque, campionate con passo $T_r = 1/PRF$, danno luogo alla medesima sequenza temporale di campioni.

Bande di frequenza radar (microonde e onde millimetriche)

BANDA	Intervallo di frequenze nominali	Intervallo di frequenze di uso effettivo
L	1 ÷ 2 GHz	1.215 ÷ 1.4 GHz
→ S	2 ÷ 4 GHz	2.3 ÷ 2.5 GHz, 2.7 ÷ 3.7 GHz
→ C	4 ÷ 8 GHz	5.25 GHz ÷ 5.925 GHz
→ X	8 ÷ 12 GHz	8.5 ÷ 10.68 GHz
K _u	12 ÷ 18 GHz	13.4 ÷ 14 GHz, 15.7 ÷ 17.7 GHz
K	18 ÷ 27 GHz	24.05 ÷ 24.25 GHz
K _a	27 ÷ 40 GHz	33.4 ÷ 36 GHz
mm	40 ÷ 300 GHz	

→ Frequenze attenuanti

Radar di Chilbolton (UK)



Radar e stazione meteo di S. Pietro Capofiume (BO)



Radar area ricerca CNR di Tor Vergata (ISAC-Roma)

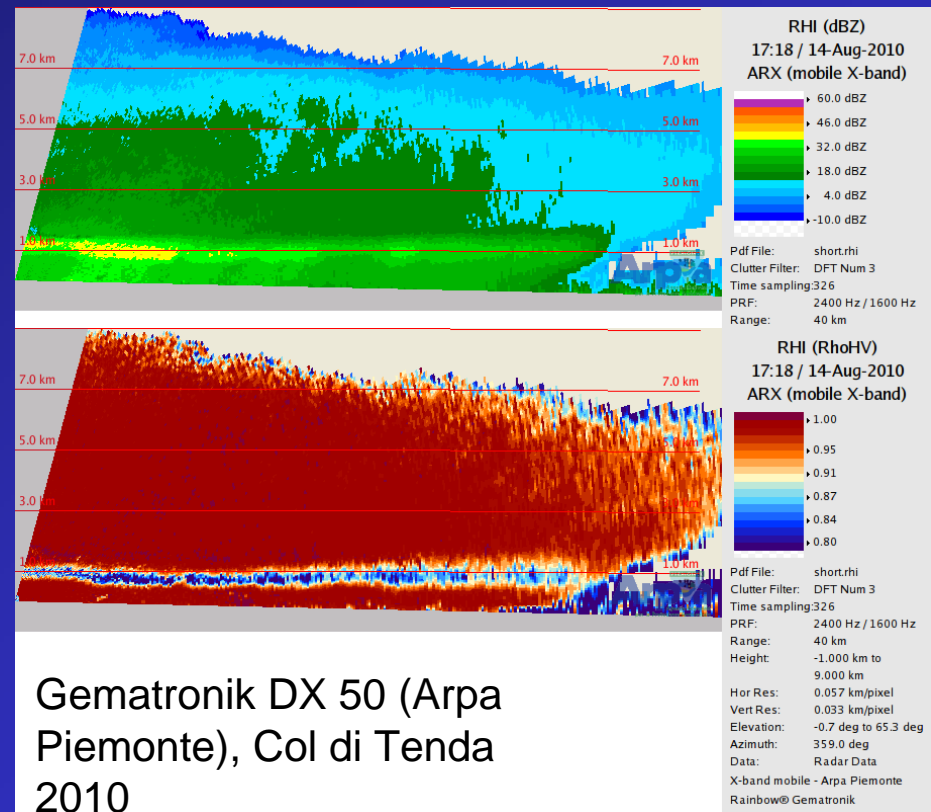


Radar mobile in banda X (Gematronik DX 50 Arpa Piemonte - 4 in dotazione a DPC)

Applicazioni:
Osservazioni ad alta risoluzione in
aree critiche o in presenza di
emergenze



Identificazione strato fondente con ρ_{hv}



Idrometeore in fase liquida

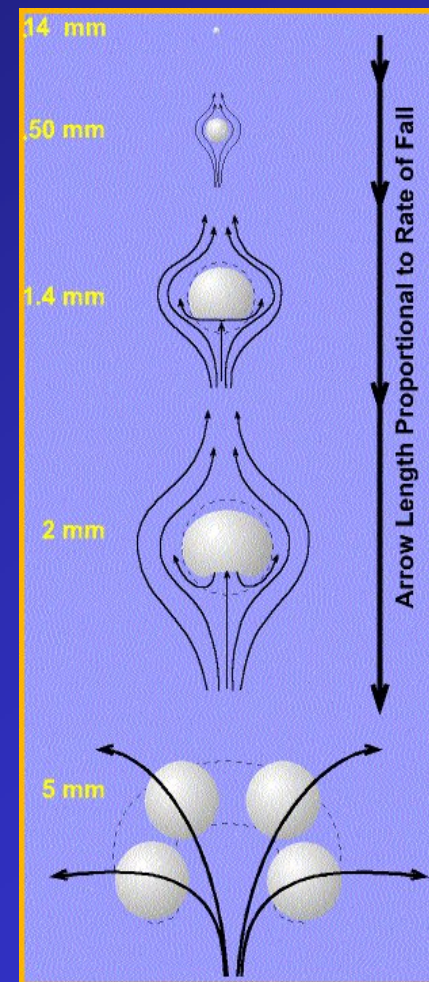
All'aumentare della loro dimensione le gocce assumono, durante la caduta, una forma schiacciata (oblata)

All'aumentare della loro dimensione la velocità terminale di caduta delle gocce aumenta



Forma delle gocce in base alle loro dimensioni

Dimensioni Forma Direzione e Velocità



La velocità terminale delle gocce di pioggia

Approssimazione di Atlas & Ulbrich

$$v_t(D_{eq}) = 386.6 D_{eq}^{0.67} \quad (\text{ms}^{-1})$$



Con D_{eq} espresso in m

$D_{eq} = 2 \text{ mm}$	→	$v_t = 6.01 \text{ m/s}$	→	$v_t = 21.63 \text{ km/h}$
$D_{eq} = 5 \text{ mm}$	→	$v_t = 11.10 \text{ m/s}$	→	$v_t = 39.98 \text{ km/h}$

La funzione DSD (Drop Size Distribution)

E' la distribuzione delle dimensioni delle gocce di pioggia per unità di volume, espressa in termini di diametro equivalente D_{eq}

D_{eq} è il diametro di una ideale goccia sferica avente lo stesso volume V di quella reale):

$$V = \frac{\pi}{6} D_{eq}^3$$

$N(D_{eq}) dD_{eq}$ rappresenta il numero di gocce per unità di volume aventi diametro compreso fra D_{eq} e $D_{eq} + d D_{eq}$

Numero di gocce per unità di volume



$$\int_0^{+\infty} N(D_{eq}) dD_{eq}$$

L'unità di misura della DSD è $\text{mm}^{-1}\text{m}^{-3}$

Modelli di DSD

Modello di Marshall-Palmer (a 1 parametro):

$$N(D_{eq}) = N_o \exp(-\Lambda D_{eq})$$

Con $N_o = 8 \cdot 10^3 \text{ mm}^{-1} \text{ m}^{-3}$ $\Lambda = \frac{4.1}{R^{0.21}} \text{ mm}^{-1}$

Modello esponenziale (a 2 parametri):

$$N(D_{eq}) = N_o \exp(-\Lambda D_{eq})$$

Modello Gamma (a 3 parametri):

$$N(D_{eq}) = N_o D_{eq}^{\mu} \exp(-\Lambda D_{eq})$$

II Disdrometro



Joss Waldvogel

È un disdrometro ad impatto che permette di misurare la dimensione delle gocce. La quantità di moto ricevuta dalle gocce che colpiscono l'area di misura dello strumento viene trasformata in un impulso elettromagnetico, dalla cui ampiezza è possibile risalire al diametro della goccia incidente.



Disdrometro laser

È un disdrometro dotato di laser ottico che permette di determinare la dimensione e la velocità delle idrometeorite che attraversano l'area di misura. La dimensione viene determinata in funzione della variazione dell'ampiezza del segnale laser, mentre la durata di tale variazione permette il calcolo della velocità.



2D video disdrometro

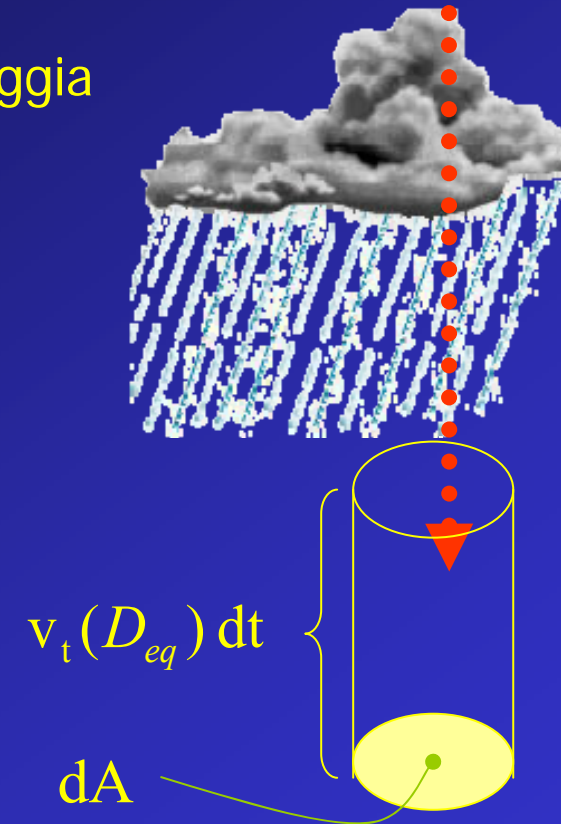
È un disdrometro ottico che permette di misurare la dimensione, la forma e la velocità (orizzontale e verticale) dell'idrometeorite. È composto in due fasci di luce ortogonali proiettati all'interno di due apposite telecamere che forniscono informazioni tridimensionali sulla forma dell'idrometeorite.

Tasso (intensità) di pioggia

$$R = \frac{\pi}{6} \int_0^{D_{\max}} D_{eq}^3 v_t(D_{eq}) N(D_{eq}) dD_{eq}$$

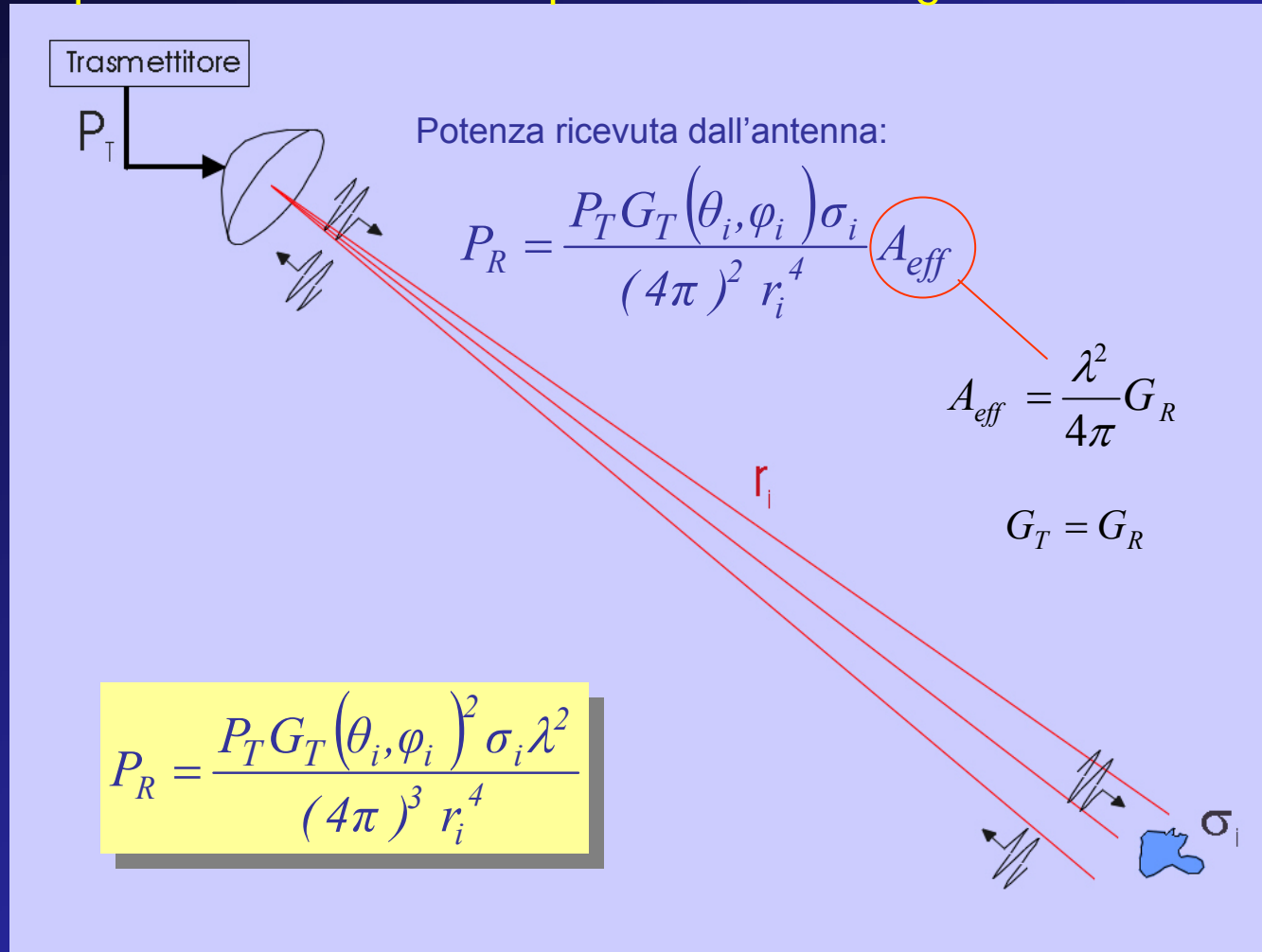
DSD

Livello di acqua liquida equivalente per unità di tempo e di superficie (in mm/s, da convertire in misurato in mm/h)



$$\int_{t_1}^{t_2} R dt \quad \text{Altezza del volume di acqua caduta fra } t_1 \text{ e } t_2$$

L'equazione radar nello spazio libero - singolo scatteratore



L'equazione radar meteorologica

In regione di Rayleigh $\left(\frac{\pi D}{\lambda} \ll 1\right) \longrightarrow \sigma_i = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 D_i^6$

$$|K| = \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2}$$

$$\bar{P}_R(r) = \left(\frac{P_T \pi^3 G_{max}^2 \Theta \Phi c \tau}{1024 \ln 2 \lambda^2} \right) \cdot \frac{|K|^2}{r^2} \cdot \left(\frac{\sum_i D_i^6}{V} \right)$$

$$Z = \frac{\sum_i D_i^6}{V}$$

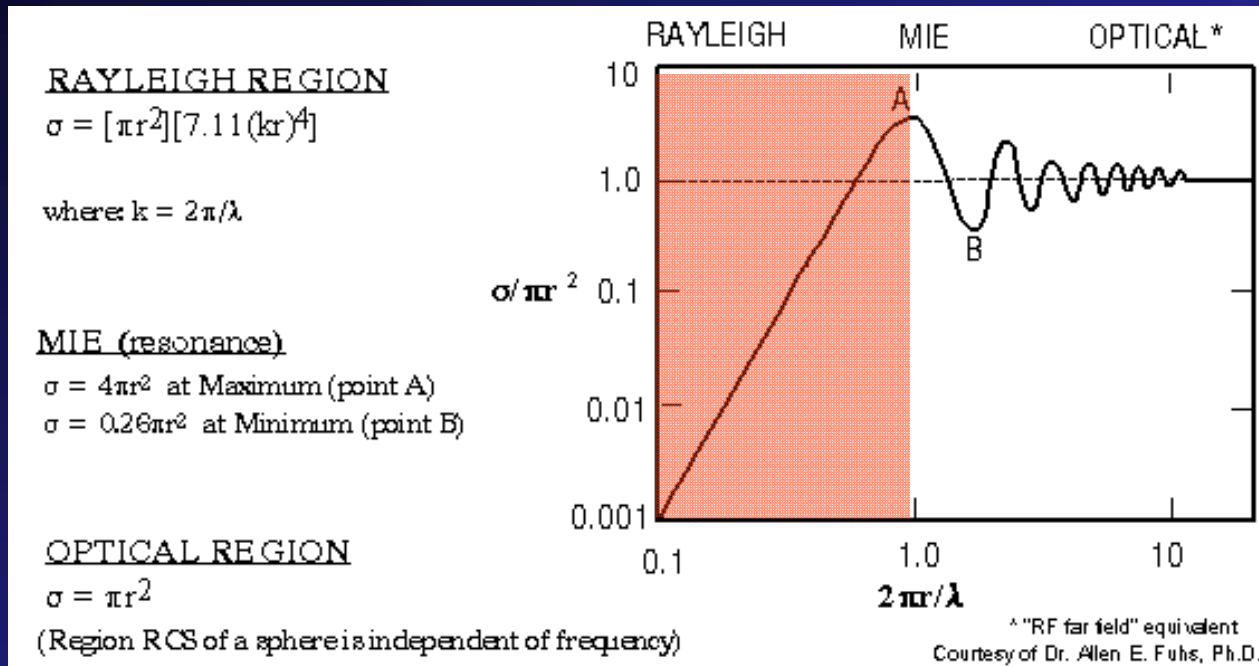
Fattore di riflettività
(mm⁶ m⁻³)

$$Z = \int_0^{\infty} D^6 N(D) dD$$

DSD

$$P_R(r) = C \cdot |K|^2 \cdot \frac{Z(r)}{r^2}$$

L'equazione radar meteorologica



Fuori dalla regione di Rayleigh:

$$\sigma_i \neq \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 D_i^6$$



$$Z \neq \int_0^{\infty} D^6 N(D) dD !!!$$

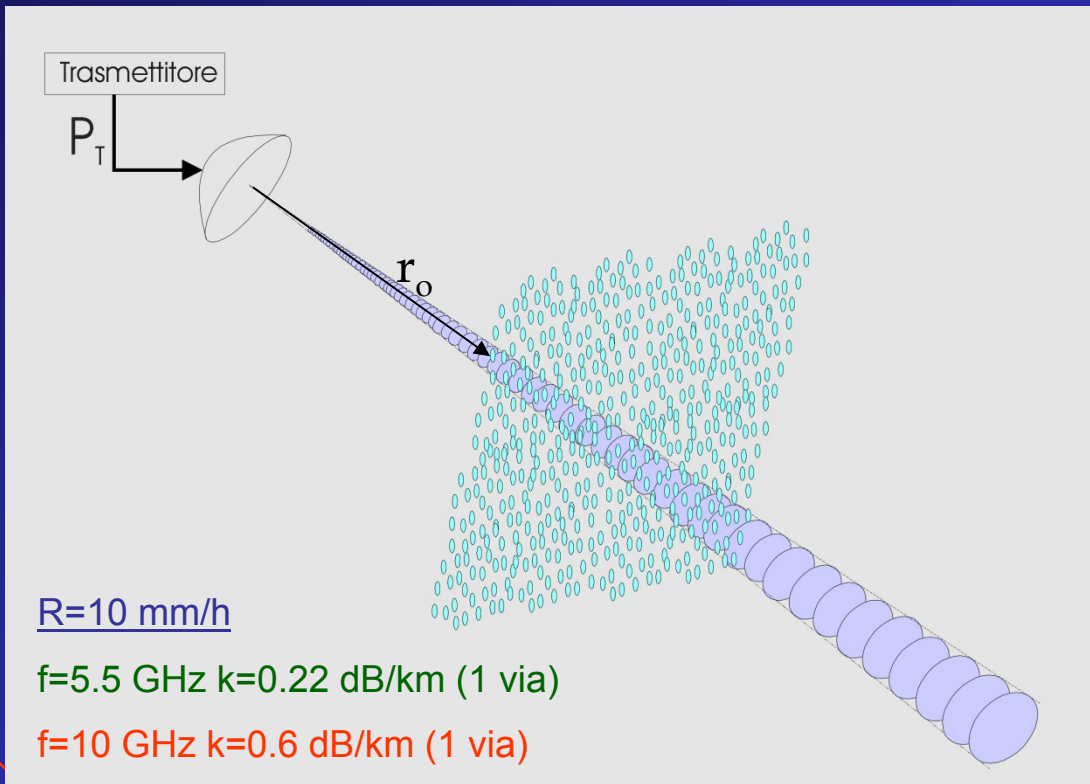
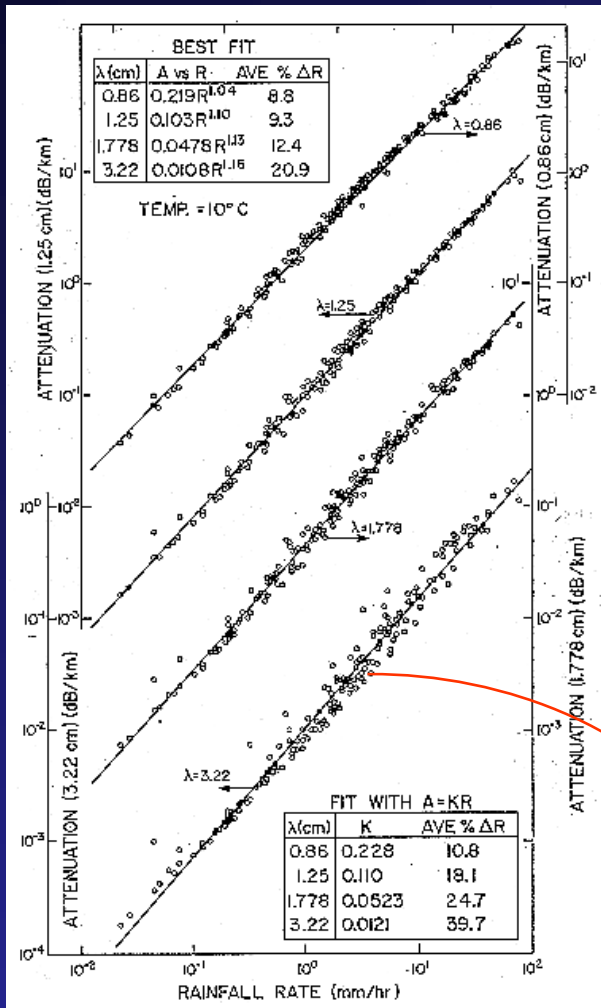
Pioggia: a 23 GHz siamo già fuori dalla regione di Rayleigh

Fattore di riflettività efficace

$$P_R(r) = C \cdot |K|^2 \cdot \frac{Z_e(r)}{r^2}$$

.....+ eventuale attenuazione !!!

L'equazione radar meteorologica a frequenze attenuanti-I



$k = a R^b$

$$A_{att}(r) = \exp \left(-2 \ln 10 \int_{r_0}^r k(s) ds \right)$$

dB/m

L'equazione radar meteorologica a frequenze attenuanti-II

$$P_R(r) = C \cdot |K|^2 \cdot \frac{Z_e(r)}{r^2} \cdot \exp\left(-0.2 \ln 10 \int_{r_0}^r k(s) ds\right)$$

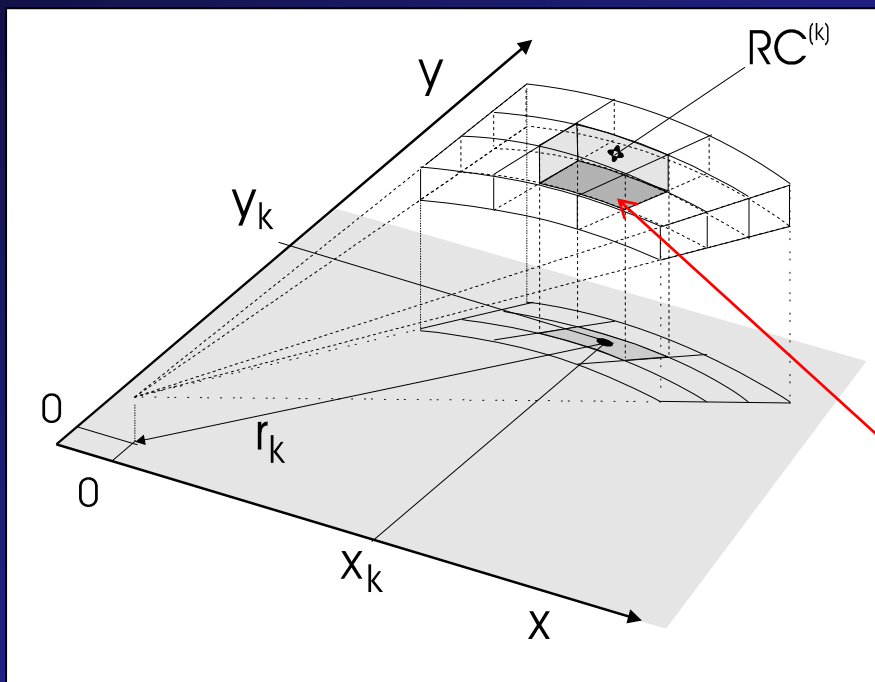
$$P_R(r) = C \cdot |K|^2 \cdot \frac{Z_a(r)}{r^2}$$

Fattore di riflettività apparente

Riflettività (dBZ) : $10 \log_{10}(Z \text{ (mm}^6\text{m}^{-3}))$

Relazione Z-R (calibrazione pluviometrica)

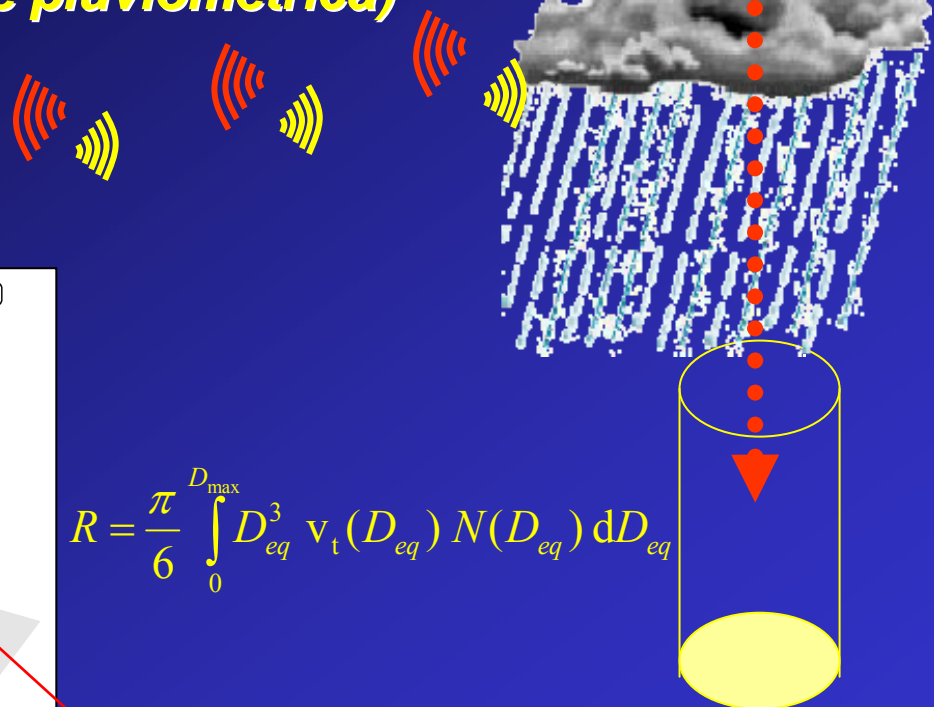
$$Z = \int_0^{D_{\max}} D_{eq}^6 N(D_{eq}) dD_{eq}$$



$$R = \frac{\pi}{6} \int_0^{D_{\max}} D_{eq}^3 v_t(D_{eq}) N(D_{eq}) dD_{eq}$$

Z è un dato relativo ad un volume in quota misurato istantaneamente

R è un dato relativo ad una superficie a terra calcolato come media temporale della quantità di acqua precipitata

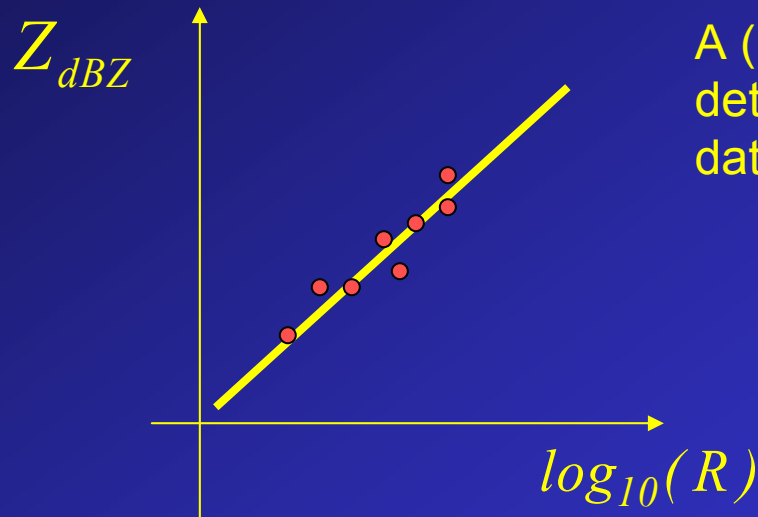


Legame tra Z ed R - Approccio sperimentale (CALIBRAZIONE PLUVIOMETRICA)

$$Z = aR^b \quad \longrightarrow \quad 10\log_{10}(Z) = 10\log_{10}(a) + b \cdot 10\log_{10}(R)$$

$$Z_{dBz} = A + B \cdot \log_{10}(R) \quad A = 10 \cdot \log_{10}(a)$$

$$B = 10 \cdot b$$



A (intercetta) e B (pendenza) sono determinati tramite regressione lineare sui dati sperimentali

$$R = 10 \frac{Z_{dBz} - 10\log_{10}(a)}{10b}$$

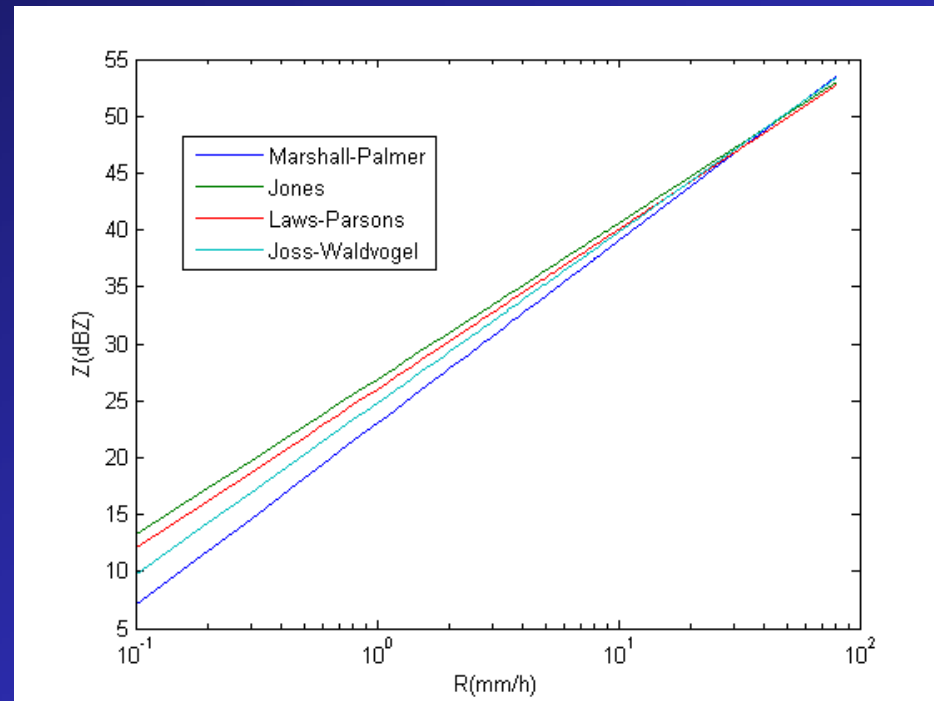
Esiste una enorme varietà di relazioni Z-R, ad esempio:

$Z = 200R^{1.6}$ Marshall-Palmer

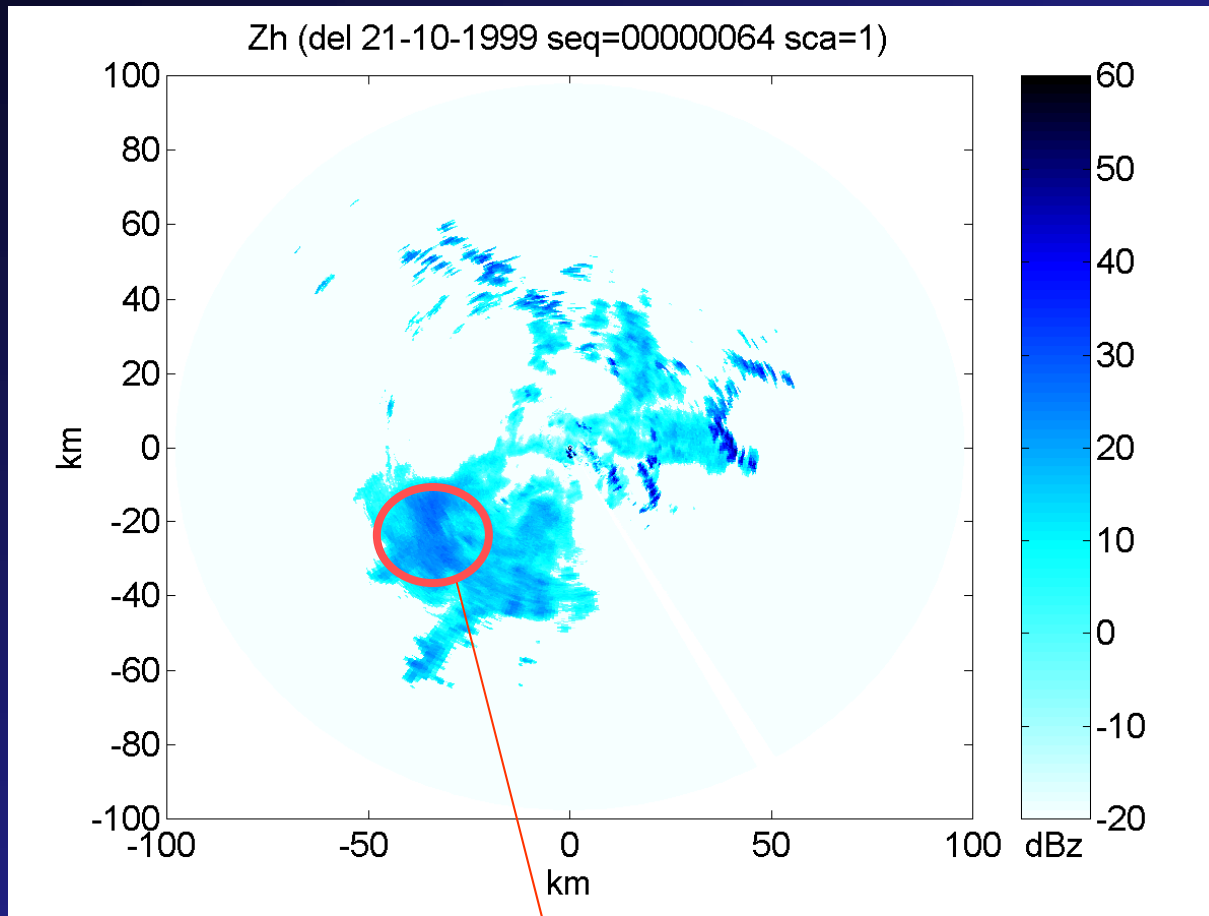
$Z = 486 R^{1.37}$ Jones

$Z = 400 R^{1.4}$ Laws-Parsons

$Z = 300 R^{1.5}$ Joss-Waldvogel



Effetti delle relazioni Z-R....



mm/h		
397	411	720
76	70	140
14	12	27
3	2	5
0.5	0.3	1
0.1	0.05	0.2
0.02	0.01	0.04
0.004	0.002	0.007
0.0008	0.0003	0.001

$$Z = 230R^{1.4}$$

$$Z = 400R^{1.3}$$

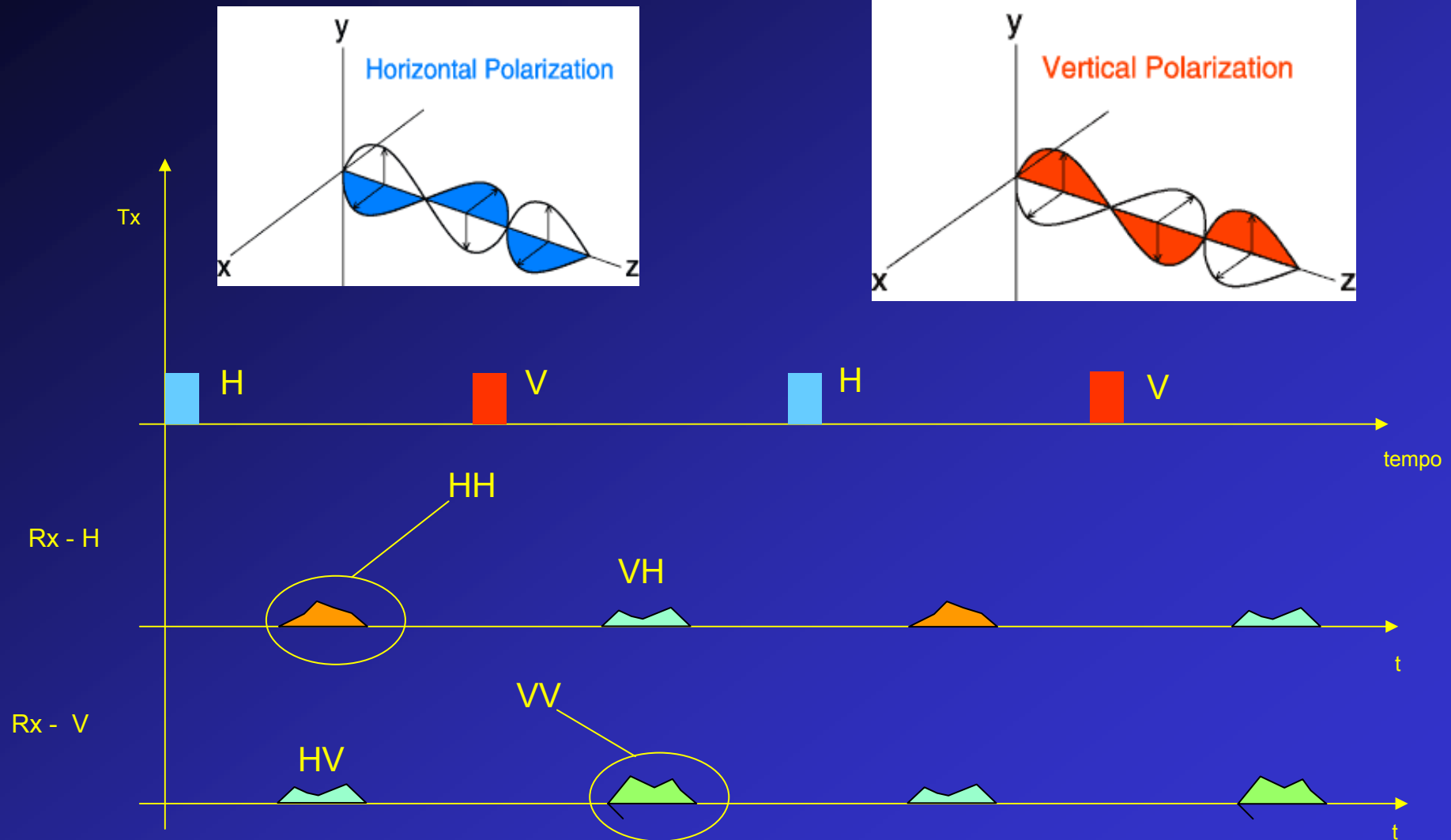
$$Z = 100R^{1.4}$$

Soluzione: approcci
adattivi / iterativi

Differenze fino al 100%!!

+ errori dovuti a clutter, grandine etc.

Radar polarimetrici - Sequenza di trasmissione alternata



La riflettività differenziale – 1

Segnale eco copolare
orizzontale (HH)



Riflettività orizzontale Z_H

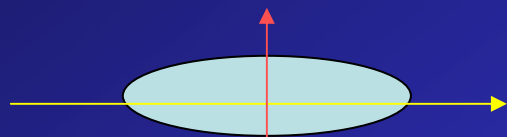
$$P_{HH} = C \cdot |K|^2 \cdot \frac{Z_H}{R^2}$$

Segnale eco copolare
verticale (VV)

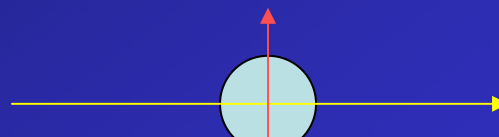


Riflettività verticale Z_V

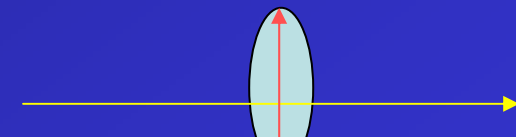
$$P_{VV} = C \cdot |K|^2 \cdot \frac{Z_V}{R^2}$$



$$Z_H > Z_V$$



$$Z_H = Z_V$$



$$Z_H < Z_V$$

La riflettività differenziale-2

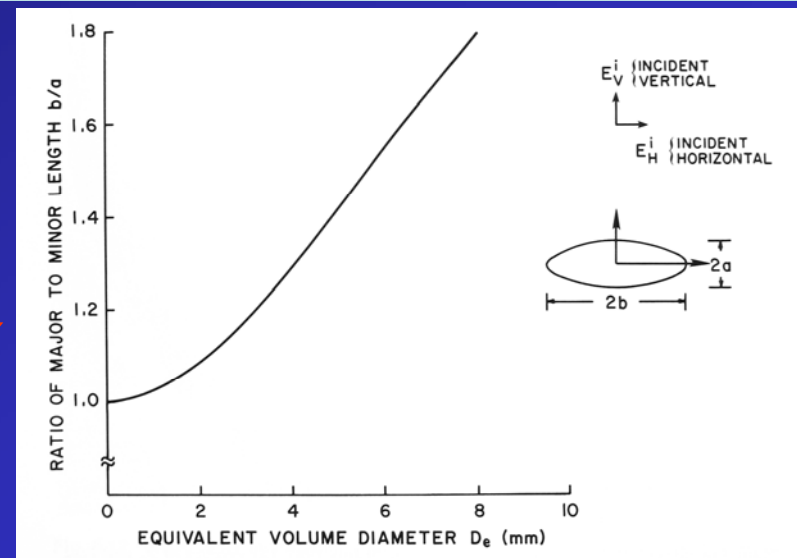
In regione di Rayleigh:

$$Z_H = \frac{16\pi^2}{9|K|^2} \int_0^{D_{max}} D_{eq}^6 S_H(m, a/b) N(D_{eq}) dD_{eq} \quad , \quad S_H(m, a/b) = \left| \frac{m^2 - 1}{4\pi + (m^2 - 1)P_H} \right|^2$$

$$Z_V = \frac{16\pi^2}{9|K|^2} \int_0^{D_{max}} D_{eq}^6 S_V(m, a/b) N(D_{eq}) dD_{eq} \quad , \quad S_V(m, a/b) = \left| \frac{m^2 - 1}{4\pi + (m^2 - 1)P_V} \right|^2$$

$$P_V = 4\pi - 2P_H = \left(\frac{4\pi}{e^2} \right) \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{1-e^2}{e^2}} \arcsen(e) \right)$$

$$e = \sqrt{1 - (a/b)^2}$$



La riflettività differenziale-3

$$Z_{DR} = 10 \log_{10} \left(\frac{Z_H}{Z_V} \right)$$

È la riflettività differenziale (dB)

In teoria

Se si ipotizza una DSD esponenziale, quindi a 2 parametri: $N(D_{eq}) = N_o \exp(-\Lambda D_{eq})$

$$Z_H = \frac{16\pi^2}{9|K|^2} N_o \int_0^{D_{max}} D_{eq}^6 S_H(m, a/b) \exp(-\Lambda D_{eq}) dD_{eq} \quad Z_V = \frac{16\pi^2}{9|K|^2} N_o \int_0^{D_{max}} D_{eq}^6 S_V(m, a/b) \exp(-\Lambda D_{eq}) dD_{eq}$$

Essendo legata solo a Λ , la misura di Z_{DR} consente di stimare Λ .

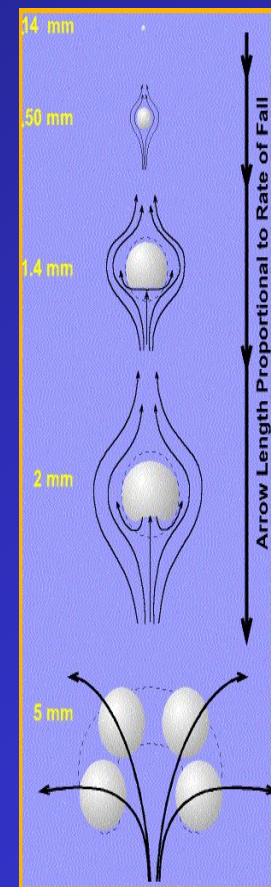
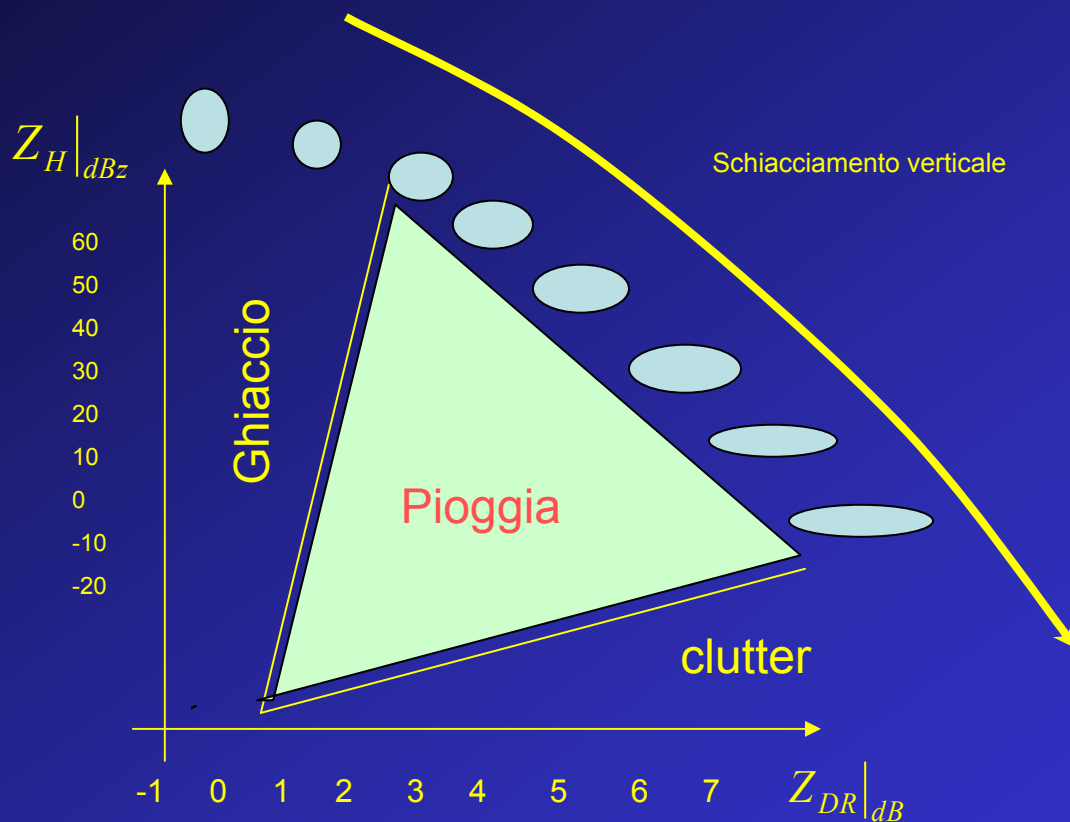
Una volta noto Λ , dalla riflettività assoluta Z_H è possibile stimare N_o

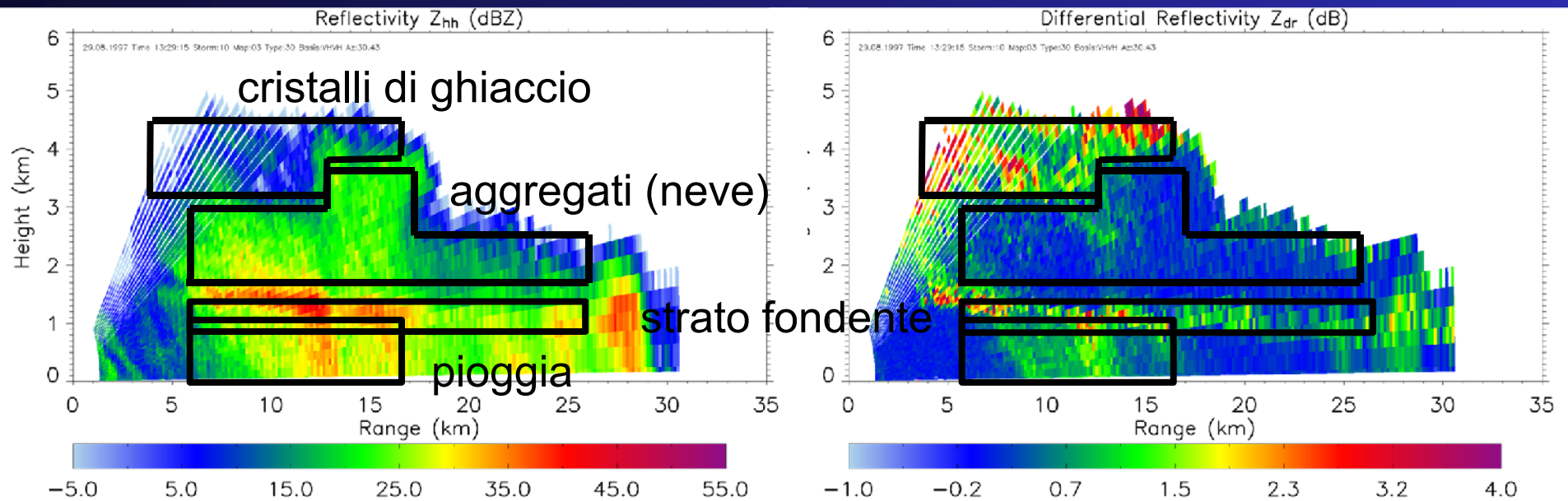
In pratica

$$R = a \cdot Z_H (mm^6 m^{-3}) \cdot Z_{DR}^b \quad \text{Con } b < 0$$

La riflettività differenziale -4

$$Z_{DR}|_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{Z_H}{Z_V} \right)$$





Riflettività (dBZ)

Riflettività differenziale (dB)

Segnali radar polarimetrici - 1

L'espressione di ciascuno dei 4 segnali ricevuti sui due canali H e V di ricezione è analoga a quella vista per il caso di singola polarizzazione:

$$V_{ij}(t) = \sum_n s_{ij}(n) e^{-j2kr_n(t)} e^{j\gamma_{ij}(n)} F(\underline{r}_n) \quad i, j = H, V \quad \longrightarrow \quad \{V(t_k)\}_{k=1}^N$$

N campioni per cella di risoluzione

$V_{ij}(t)$: risposta nel canale di polarizzazione j ad un impulso con polarizzazione i

$s_{ij}(n)$: elemento di posto i,j della matrice di scattering della n-esima idrometeora

$\gamma_{ij}(n)$: deriva dalla matrice di trasmissione , che tiene conto degli effetti propagativi (differenti sfasamenti ed attenuazioni per i canali H e V)

Vettore di Jones del campo elettrico ricevuto, matrice di trasmissione e matrice di scattering sono legati come segue (r: range nominale della cella di risoluzione):

$$\underline{E}_r = \begin{bmatrix} E_r^H \\ E_r^V \end{bmatrix} = \frac{1}{r^2} \underline{T}' \cdot \underline{S} \cdot \underline{T} \cdot \underline{E}_t = \frac{1}{r^2} \underline{S}_{eff} \cdot \underline{E}_t \quad \underline{S} = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix}$$

Segnali radar polarimetrici - 2

Vettore di Jones del campo elettrico ricevuto, matrice di trasmissione e matrice di scattering sono legati come segue (r: range nominale della cella di risoluzione):

$$\underline{\underline{E}}_r = \begin{bmatrix} E_r^H \\ E_r^V \end{bmatrix} = \frac{1}{r^2} \underline{\underline{T}}' \cdot \underline{\underline{S}} \cdot \underline{\underline{T}} \cdot \underline{\underline{E}}_t = \frac{1}{r^2} \underline{\underline{S}}_{eff} \cdot \underline{\underline{E}}_t \quad \underline{\underline{S}} = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix}$$

Nella sua forma più semplice la matrice di trasmissione è:

$$\underline{\underline{T}} = \begin{bmatrix} e^{-jk_H r} & 0 \\ 0 & e^{-jk_V r} \end{bmatrix}$$

dove k_H e k_V sono le costanti di propagazione per le due polarizzazioni. Quindi:

$$\underline{\underline{S}}_{eff} = \begin{bmatrix} s_{HH} e^{-j2k_H r} & s_{HV} e^{-j(k_H + k_V) r} \\ s_{VH} e^{-j(k_H + k_V) r} & s_{VV} e^{-j2k_V r} \end{bmatrix}$$

Dai termini copolari di $\underline{\underline{S}}_{eff}$ si può dedurre lo

Sfasamento differenziale da propagazione

$$\Phi_{DP} = 2 \cdot (k_H - k_V) r$$

Parametri polarimetrici (teorici)

$$Z_H (dBZ) = 10 \log \left[\frac{4\lambda^4}{\pi^4 |K_w|^2} \cdot E \left[|s_{HH}|^2 \right] \right]$$

Riflettività assoluta

$$|K_w|^2 = (m^2 - 1) / (m^2 + 2)$$

$$Z_{DR} (dB) = 10 \log \left[\frac{E \left[|s_{HH}|^2 \right]}{E \left[|s_{VV}|^2 \right]} \right]$$

Riflettività differenziale

$$LDR (dB) = 10 \log \left[\frac{E \left[|s_{HV}|^2 \right]}{E \left[|s_{HH}|^2 \right]} \right]$$

Rapporto di depolarizzazione lineare

$$K_{DP} = (rad \cdot m^{-1}) = \frac{\Phi_{DP}}{\Delta r} = 2 \cdot (k_H - k_V)$$

Costante di sfasamento differenziale da propagazione

$$\rho_{HHVV}(0) = \frac{E \left[s_{VV} s_{HH}^* \right]}{\sqrt{E \left[|s_{HH}|^2 \right] \cdot E \left[|s_{VV}|^2 \right]}}$$

Coefficiente di correlazione HH-VV

$$Z_{DR} = 10 \log \left(\frac{\hat{P}_{HH}}{\hat{P}_{VV}} \right)$$

Parametri polarimetrici e Doppler (stime) - 1

I parametri incoerenti Z_H e Z_{DR} e LDR sono stimati mediante medie incoerenti sui segnali copolari:

$$\hat{P}_{HH} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} |V_{HH}(2i)|^2 \longrightarrow \hat{Z}_H \quad \hat{P}_{VV} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} |V_{VV}(2i+1)|^2$$

$$\hat{Z}_{DR} = 10 \log \left(\frac{\hat{P}_{HH}}{\hat{P}_{VV}} \right)$$

$$\hat{LDR} = 10 \log \left(\frac{\hat{P}_{HV}}{\hat{P}_{HH}} \right) \longleftarrow \hat{P}_{HV} = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{N-1} |V_{HV}(2i)|^2$$

$$\sigma_{DP} = 10 \cdot \log \left(\frac{\hat{P}_{HH}}{\hat{P}_{VV}} \right)$$

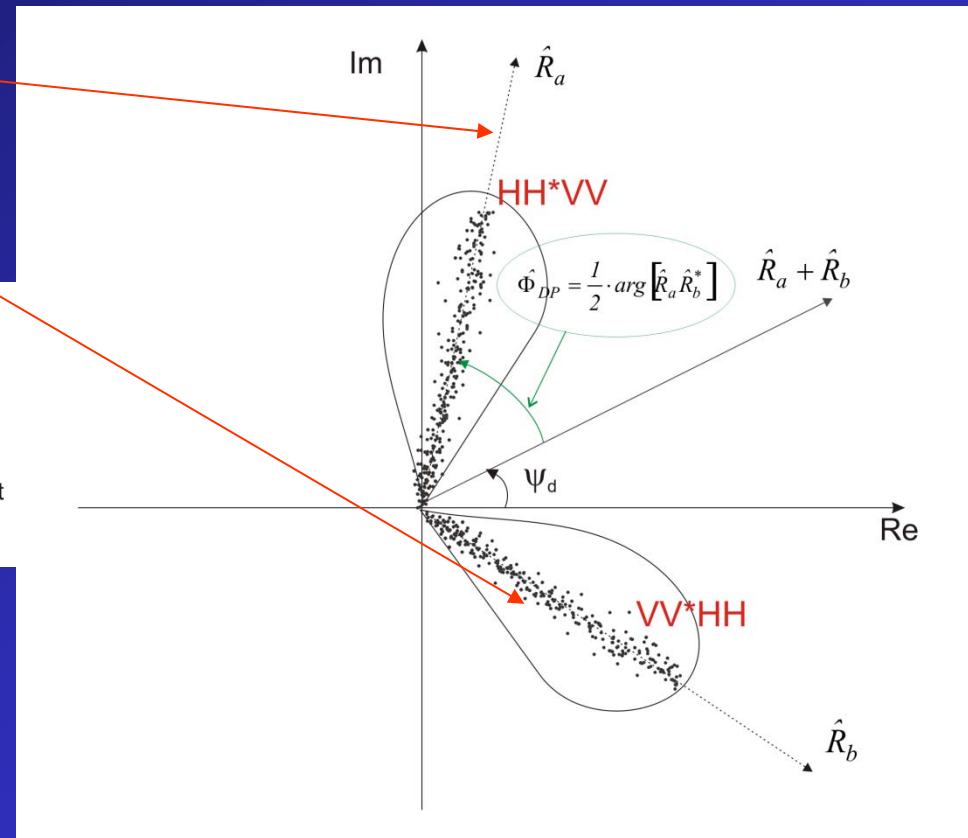
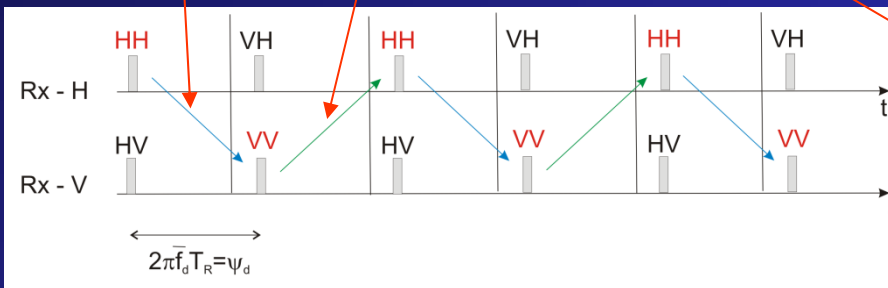
Parametri polarimetrici e Doppler (stime) - 2

Per la stima dei parametri coerenti più importanti (sfasamento differenziale e Doppler) si ricorre al metodo “autocovariance processing” che fornisce congiuntamente $\hat{\Phi}_{DP}$ ed i 2 parametri Doppler.

Con 2 N impulsi trasmessi:

$$\hat{R}_a(T_R) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V_{HH}^*(2i) V_{VV}(2i+1)$$

$$\hat{R}_b(T_R) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V_{VV}^*(2i+1) V_{HH}(2i+2)$$



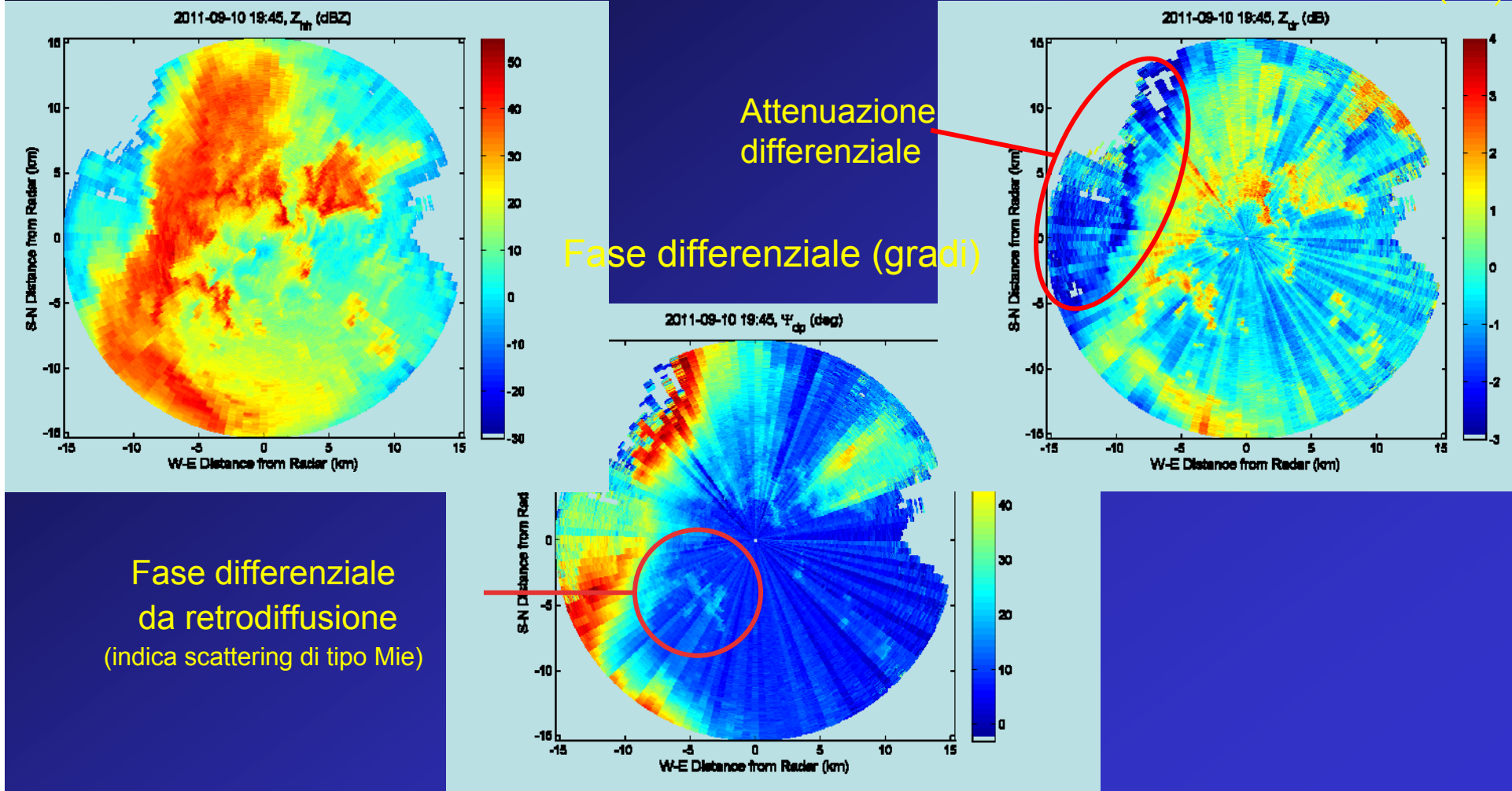
$$\hat{\Phi}_{DP} = \frac{1}{2} \cdot \arg \left[\hat{R}_a \hat{R}_b^* \right]$$

$$\hat{v} = -\frac{\lambda}{4\pi T_R} \cdot \arg \left[\hat{R}_a e^{-j\hat{\Phi}_{DP}} \right]$$

Riflettività (dBZ)

Misure da radar meteo in banda X
filtrate da clutter

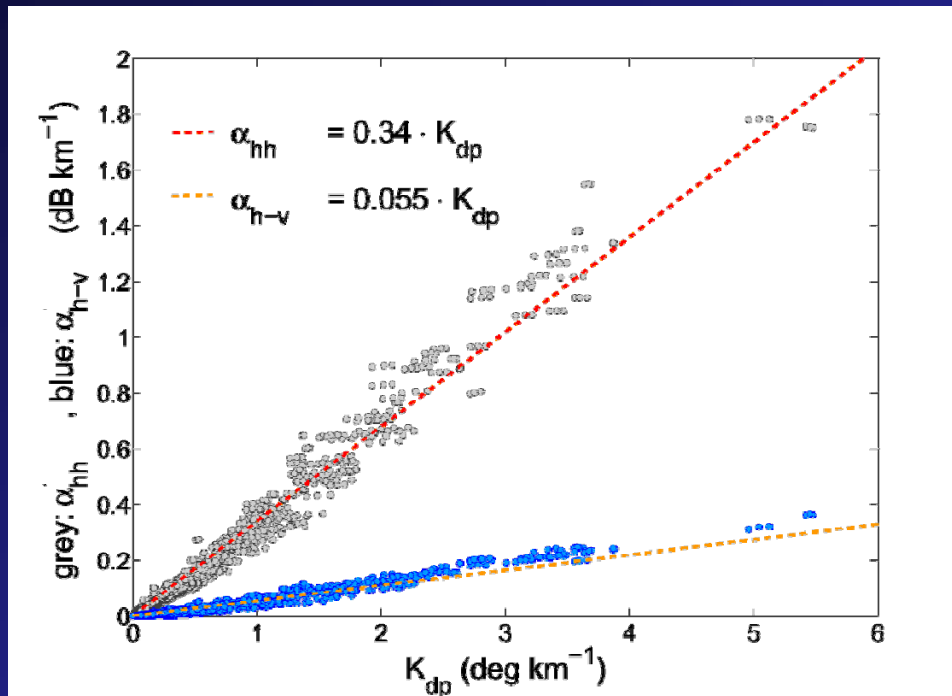
Riflettività differenziale (dB)



Dati: TU Delft X-band IDRA, liberamente scaricabili da <http://data.3tu.nl/repository/collection:cabauw>

Stima dell'attenuazione mediante K_{dp}

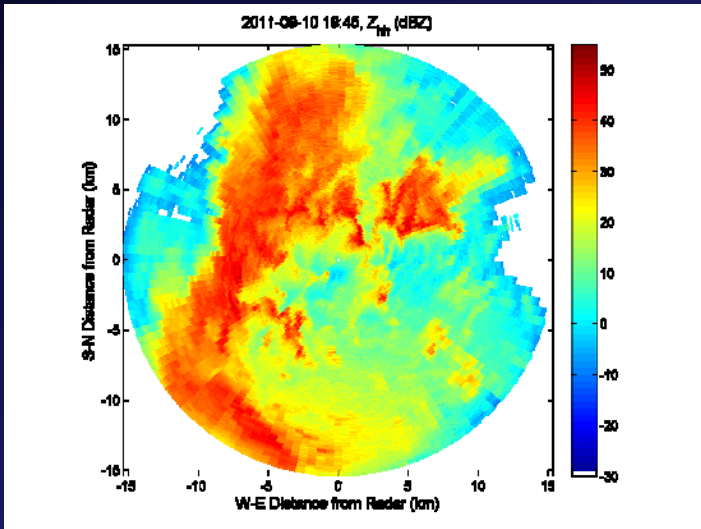
Attenuazione specifica e differenziale in Banda X calcolate usando DSD misurate con disdrometro 2D video (Tobias Otto, TU Delft)



α_{hh} attenuazione specifica a 1 via, polarizzazione H (dB km⁻¹)

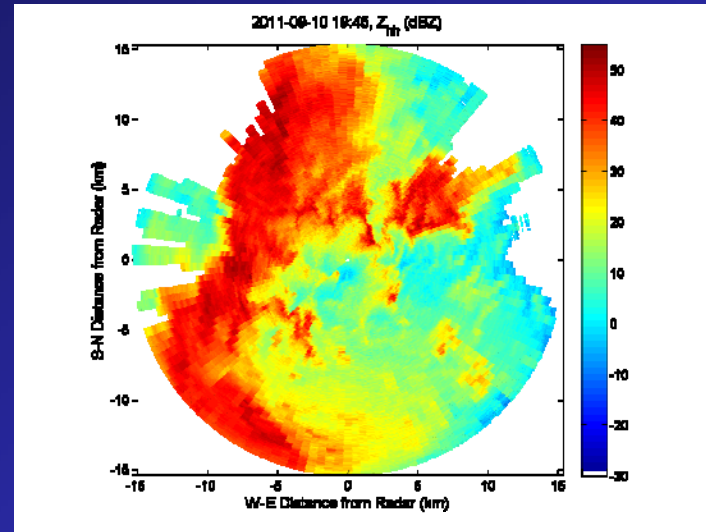
α_{h-v} attenuazione differenziale a 1 via (dB km⁻¹),
i.e. $\alpha_{h-v} = \alpha_{hh} - \alpha_{vv}$

attenuata

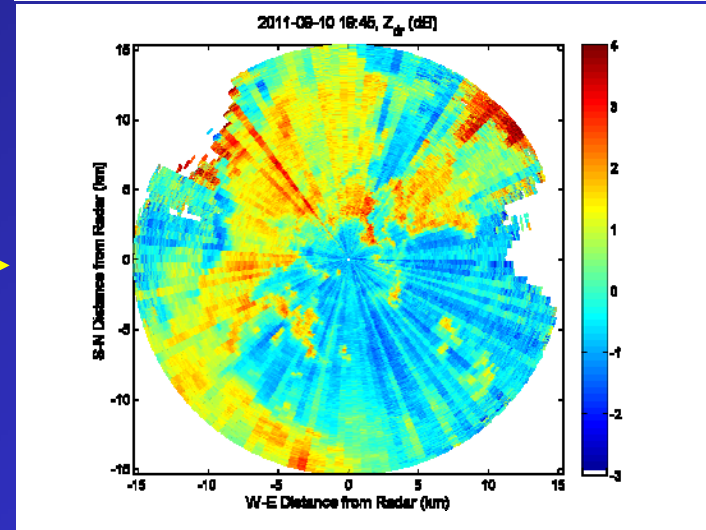
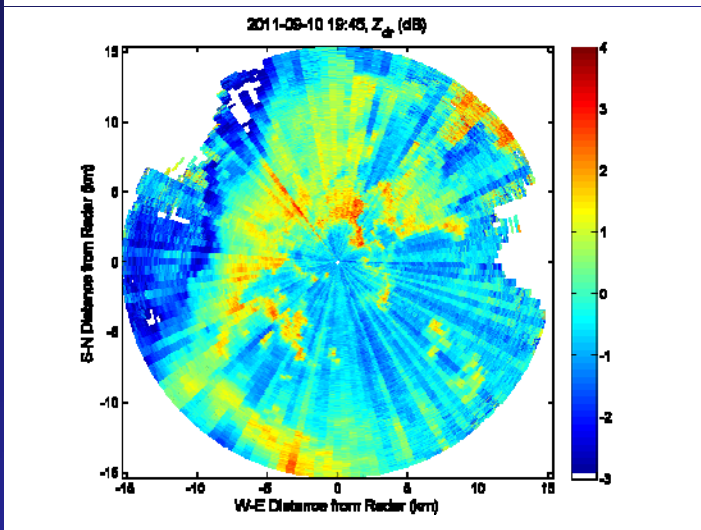


Z_H

corretta



Z_{DR}

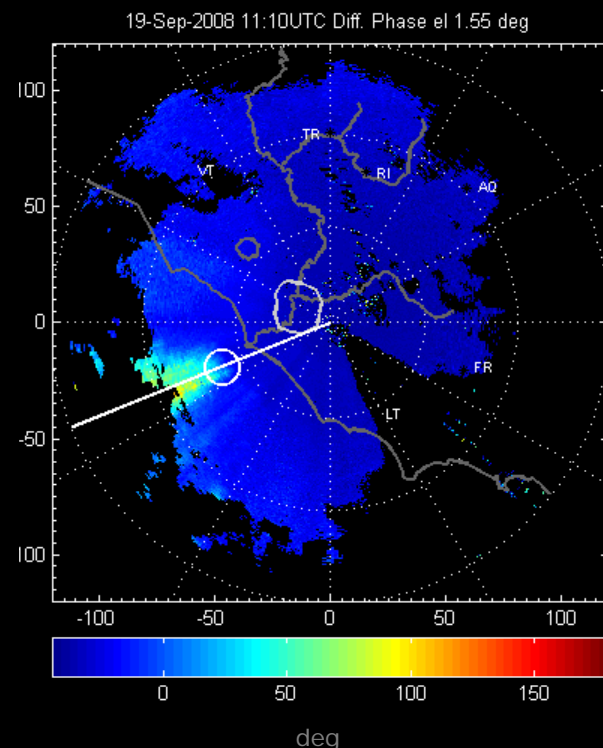
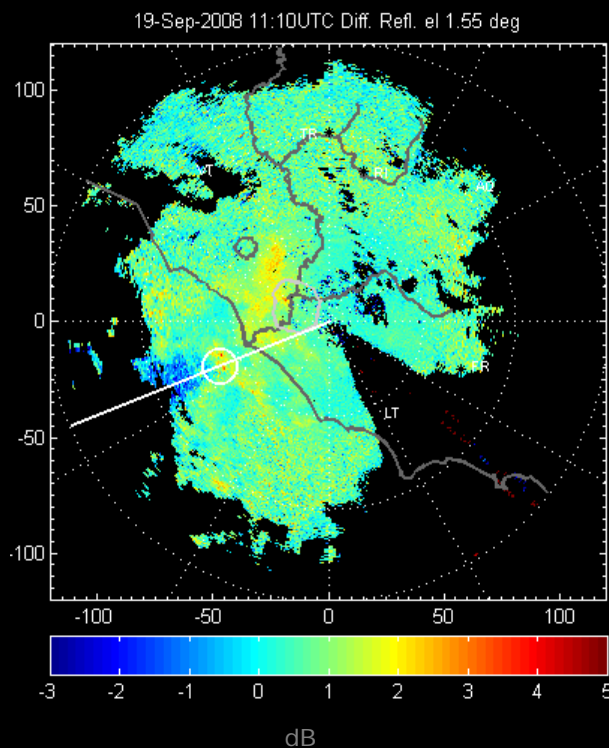
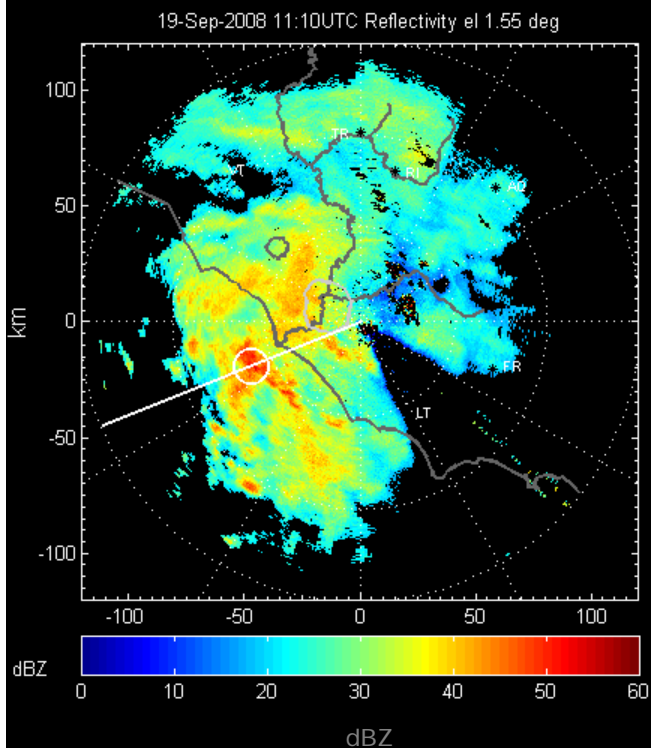


PPI Scans – Sept. 19 2008, 1110 UTC

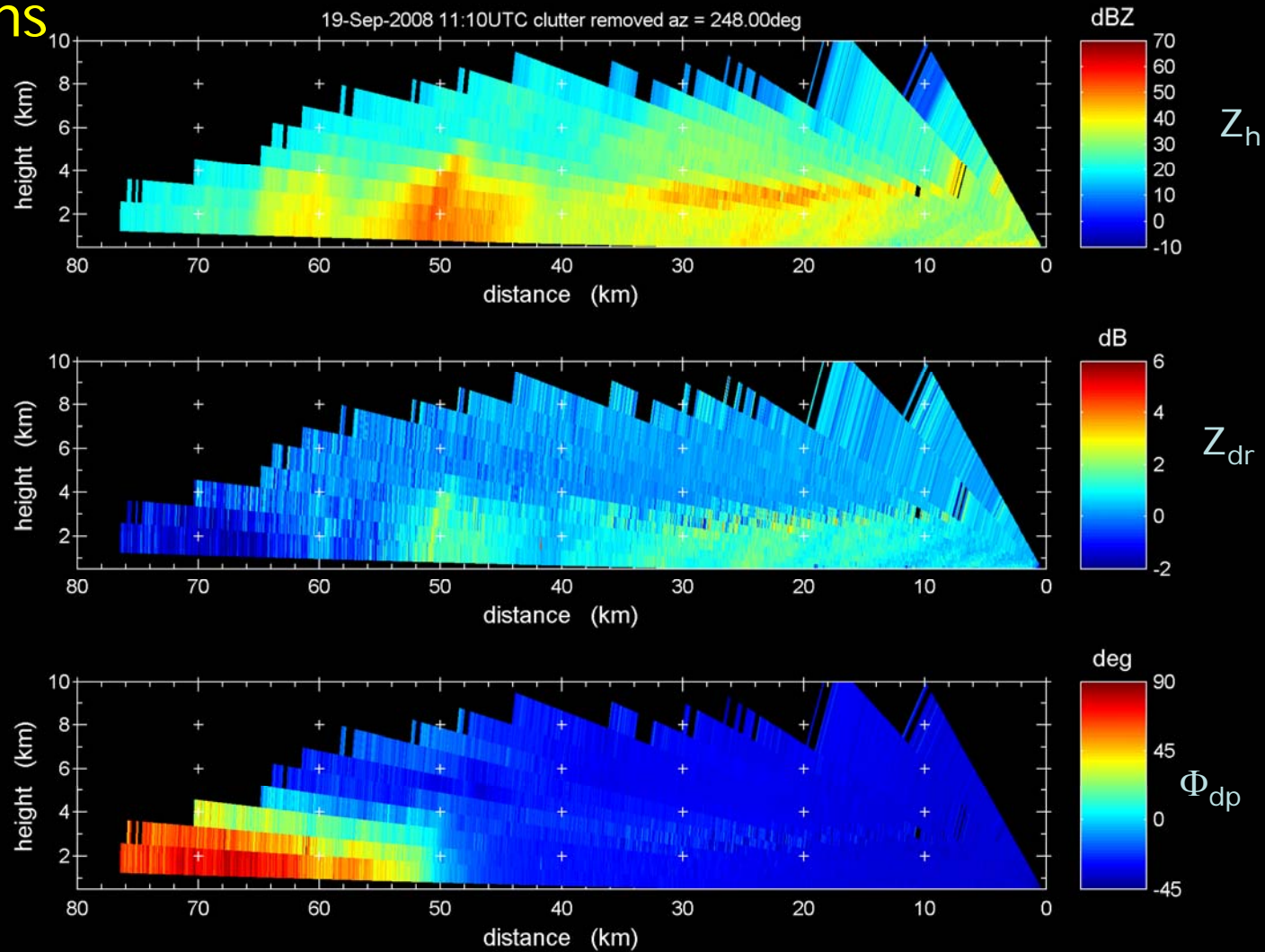
Z_h

Z_{dr}

Φ_{dp}



RHI scans



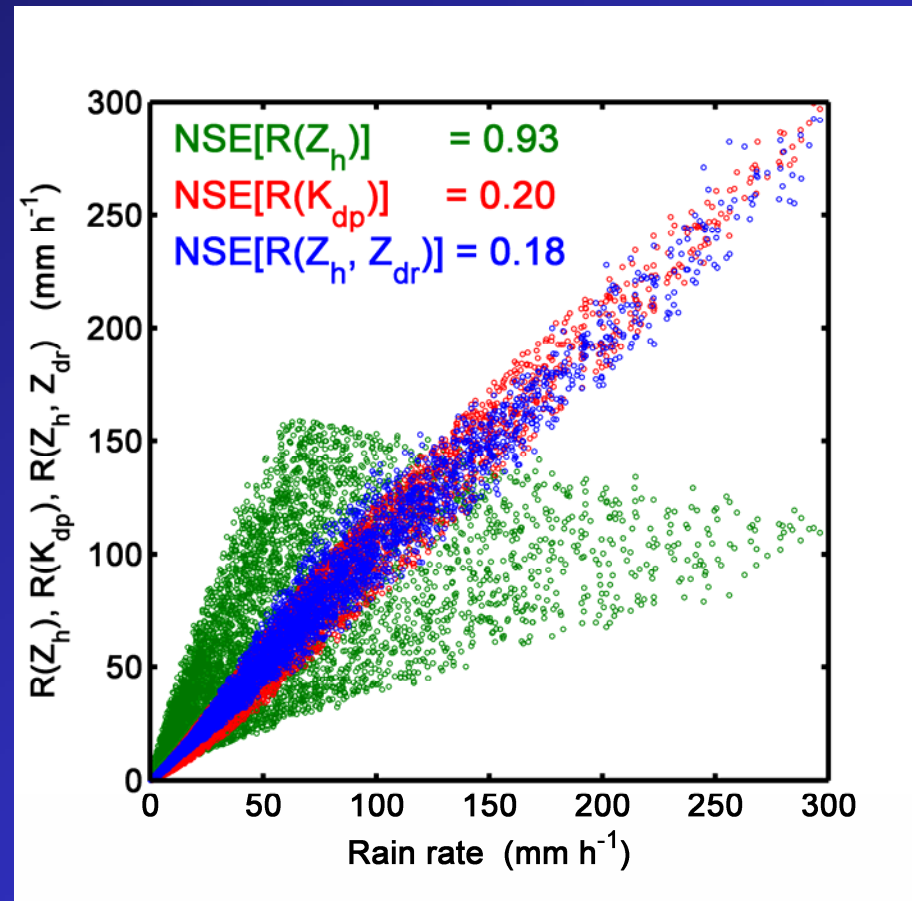
Stima del tasso di pioggia mediante K_{dp}

Mentre Z_H e Z_{DR} , vanno corrette dall'attenuazione, K_{DP} non ne è affetta e può essere usata per stimare direttamente R . E' però soggetta ad errori per bassi valori di R .

$$R(Z_h) = a_1 Z_h^{b_1}$$

$$R(K_{dp}) = a_2 K_{dp}$$

$$R(Z_h, Z_{dr}) = a_3 Z_h^{b_3} Z_{dr}^{c_3}$$

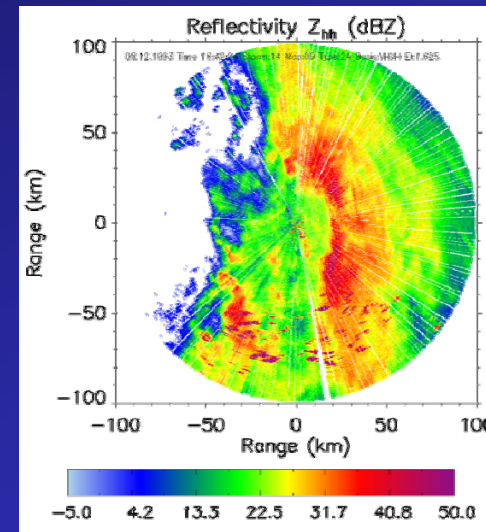
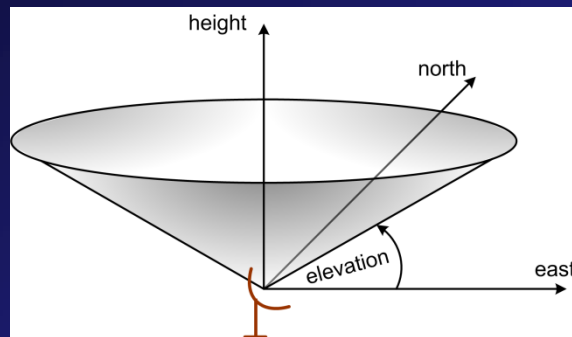


In conclusione...

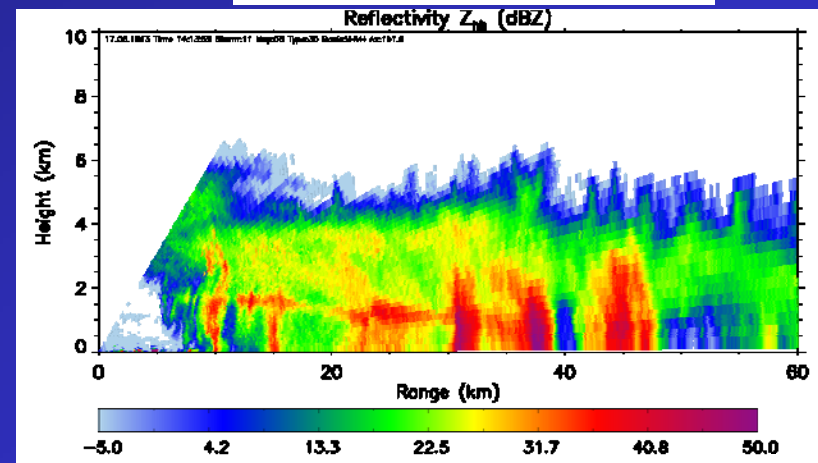
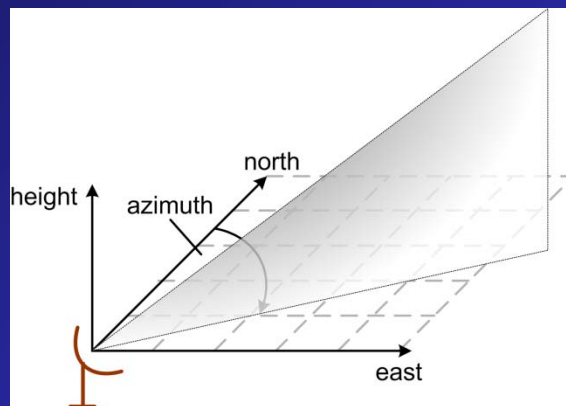
- Eccellente capacità discriminatoria tra le diverse idrometeore e rispetto all'eco da terreno (clutter)
- Migliore stima della microfisica e della dinamica dei fenomeni atmosferici
- Migliore stima della DSD e dell'intensità di precipitazione
- Possibilità di correggere l'attenuazione da propagazione in pioggia (assolutamente necessaria in banda X) mediante algoritmi stabili
- Necessità di calibrazione accurata, sia assoluta che differenziale

Modalità di presentazione dei dati

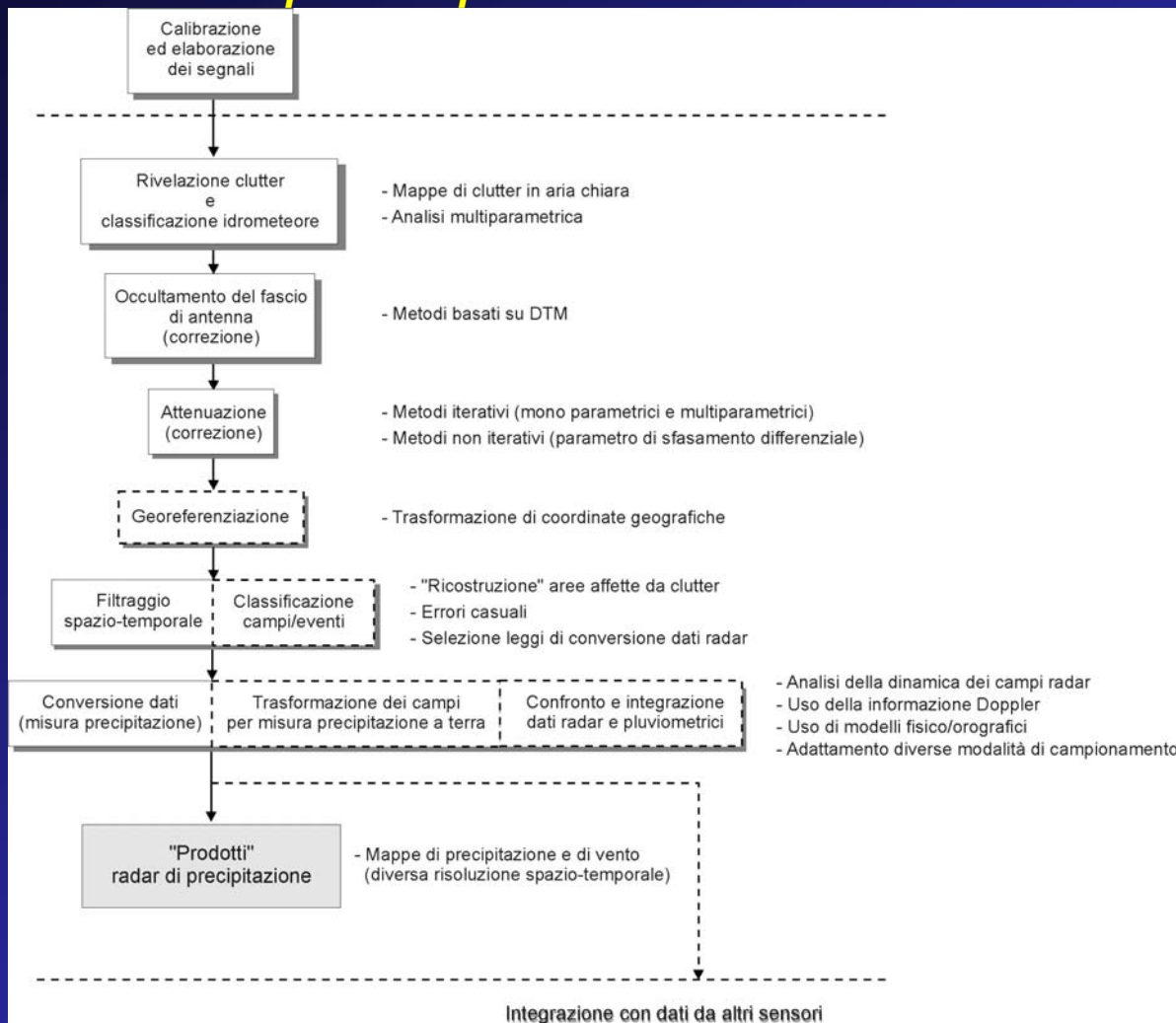
PPI (plan-position indicator):



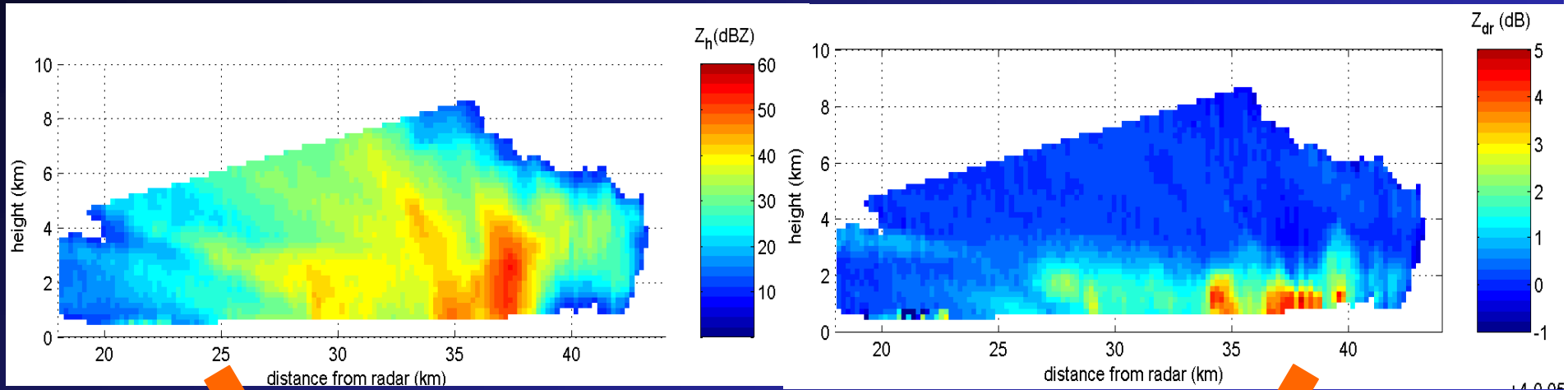
RHI (range-height indicator):



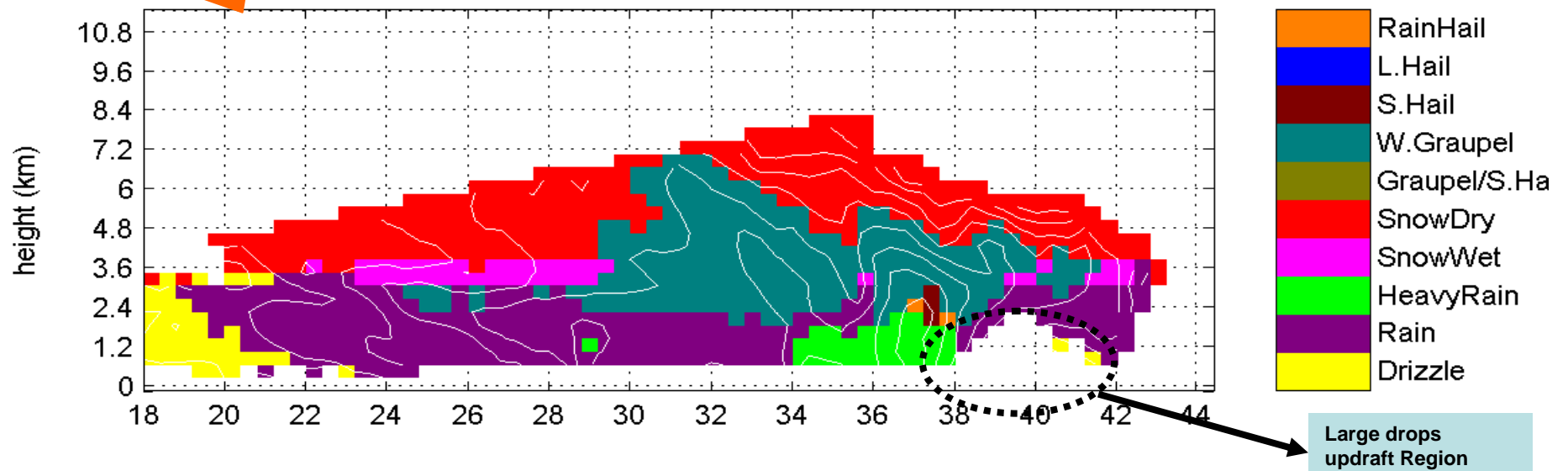
Una struttura operativa per l'elaborazione dei dati radar meteorologici



Un evento convettivo



Classificazione idrometeore



Struttura ed evoluzione di eventi stratiformi – puntamento verticale

