



Introduzione: I metodi classici di inversione dell'equazione lidar per scattering elastico consentono di ricavare informazioni sulle proprietà ottiche degli aerosol (coefficiente di estinzione e coefficiente di backscattering) basandosi su ipotesi non sempre giustificate, relativamente alla conoscenza del rapporto estinzione/backscattering (LR - Lidar ratio)⁽¹⁾ o sulla possibilità di sfruttare anche il segnale di retrodiffusione anelastica Raman⁽²⁾. Quest'ultimo è un segnale molto più debole rispetto a quello di diffusione elastica (tre ordini di grandezza di differenza), dunque le analisi Raman sono limitate dal rapporto segnale/rumore e vengono svolte preferibilmente di sera, in assenza di radiazione solare di fondo.

Viene presentata ed analizzata l'applicazione di un metodo introdotto alcuni anni fa (metodo dello scanning angolare)⁽³⁾ per ricavare il profilo verticale dello spessore ottico e del coefficiente di backscattering che si basa sulla sola ipotesi di stratificazione verticale dell'aerosol atmosferico e di omogeneità orizzontale del tratto di atmosfera investigato. Tale ipotesi non è in effetti sempre verificata e non è certo favorita da situazioni orografiche complesse, tuttavia di solito a presenta di sera, quando la stabilità dello strato limite consente la stratificazione verticale aerosolica, ed in condizioni di forte mescolamento turbolento, quando le misure sono fatte in un tempo molto rispetto a quello caratteristico di evoluzione dello strato limite stesso.

Sono presentati i risultati di misure fatte col metodo dello scanning angolare a Napoli, dove lo strumento Lidar del CNISM presso il Laboratorio di Fisica atomica del Dipartimento di Scienze Fisiche dell'Università Federico II di Napoli. L'apparato permette anche misure registrando simultaneamente sia il segnale corrispondente allo scattering elastico che quello relativo allo scattering Raman da parte delle molecole di N₂. Sfruttando tale possibilità è stato quindi possibile operare un confronto diretto del metodo Raman e del metodo basato sullo scanning angolare. Vengono inoltre presentati i risultati dell'applicazione del metodo variazionale a misure eseguite a Pontecagnano, località rurale della provincia di Salerno, con struttura orografica più regolare di quella napoletana, utilizzando un lidar mobile del Consorzio Co.RI.STA. operante alla lunghezza d'onda di 532 nm.

Equazione Lidar, spessore ottico e coefficiente di backscattering nel metodo variazionale

Il metodo dello scanning angolare consiste nell'inviare il fascio laser dell'apparato lidar a vari angoli rispetto alla verticale z e nel raccogliere la radiazione retrodiffusa elasticamente dalle molecole e dagli aerosol atmosferici. Se z è la verticale, r la distanza dalla stazione di ricezione e θ un arbitrario angolo rispetto alla verticale, si consideri il segnale Lidar corretto per la quota (RCS, Range Corrected Signal) in funzione di z e di θ :

$$S(z, \theta) = P(z, \theta) \frac{1}{\cos^2 \theta} = K \beta(z, \theta) \exp\left[-\frac{2}{\cos \theta} r(z, \theta)\right] \quad (1)$$

Calcolo dello spessore ottico. L'ipotesi su cui si basa il metodo è quella di considerare che l'atmosfera sia orizzontalmente omogenea su tutta la regione angolare esplorata, in modo tale che τ e β non dipendano dall'angolo θ , ma solo da r. Facendo il rapporto tra due segnali presi ad una qualunque coppia di angoli θ_i e θ_j si ricava lo spessore ottico per una qualunque coppia di angoli:

$$\tau(z) = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\cos \theta_j} - \frac{1}{\cos \theta_i} \right] \ln \left[\frac{S(z, \theta_i)}{S(z, \theta_j)} \right] \quad (2)$$

Lo spessore ottico è la media pesata fra tutti i τ_j .

Coefficiente di backscattering Una volta calcolato lo spessore ottico è possibile determinare anche il coefficiente di backscattering. Considerando sempre l'ipotesi di omogeneità orizzontale, si riscrive il segnale corretto per la quota, relativo all'angolo θ_i :

$$S(z) = K \beta(z) \exp\left[-\frac{2}{\cos \theta_i} r(z)\right] \quad (3)$$

Si consideri ora una quota di riferimento in corrispondenza della quale il valore del coefficiente di backscattering sia noto. Questa condizione può essere facilmente verificata se esiste una quota alla quale si può supporre che l'atmosfera sia libera da aerosol. A tale quota il coefficiente di backscattering può essere facilmente calcolato considerando il solo contributo molecolare.

L'equazione (3) relativa a questa quota sarà pertanto:

$$S(z_w) = K \beta(z_w) \exp\left[-\frac{2}{\cos \theta_i} r(z_w)\right] \quad (4)$$

Dall'equazione 4 è ora possibile ricavare la costante K: $K = \frac{S(z_w)}{\beta(z_w) \exp\left[-\frac{2}{\cos \theta_i} r(z_w)\right]}$ (5)

possiamo ricavare Sostituendo ora la (5) nella (3) $\beta(z)$:

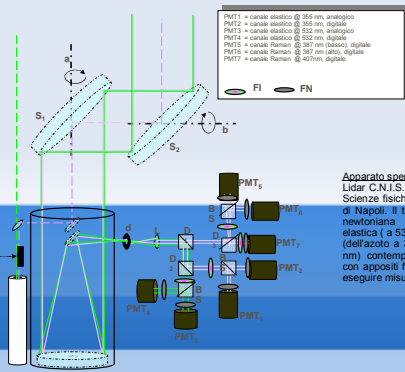
$$s(z) = \frac{S(z_w)}{\beta(z_w)} \beta(z) \exp\left[-\frac{2}{\cos \theta_i} r(z) + \frac{2}{\cos \theta_i} r(z_w)\right] \Rightarrow \beta(z) = \frac{S(z)}{S(z_w)} \beta(z_w) \exp\left[-\frac{2}{\cos \theta_i} (r(z) - r(z_w))\right] \quad (6)$$

E' quindi possibile ricavare un valore di $\beta(z)$ dalle misure effettuate a ciascuno degli angoli θ_i . Anche per il calcolo della migliore stima di $\beta(z)$ può essere effettuata una media dei coefficienti di backscattering

$\beta(z)$, pesata con i relativi errori $\delta\beta(z)$. Pertanto si ha: $\beta(z) = \frac{\sum w_i \beta_i(z)}{\sum w_i}$ dove $w_i = 1/[\delta\beta_i(z)]^2$

Apparati sperimentali

Gli apparati sperimentali utilizzati per le misure sono stati: l'apparato Lidar fisso C.N.I.S.M. che si trova presso il Dipartimento di Scienze Fisiche dell'Università Federico II di Napoli per la misura di scanning angolare e Raman a Napoli il 10 Giugno 2004 e l'apparato Lidar mobile Co.RI.STA. per la sola misura di scanning angolare del 10 Maggio 2005 a Pontecagnano (Sa).



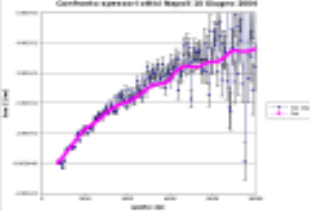
Apparato sperimentale
Lidar C.N.I.S.M. presso il Dipartimento di Scienze fisiche dell'Università Federico II di Napoli. Il telescopio in configurazione newtoniana raccoglie la radiazione elastica (a 532 nm e a 355 nm) e Raman (dell'azoto a 386 nm e dell'acqua a 407 nm) contemporaneamente, separandole con appositi filtri. Il sistema è in grado di eseguire misure di scanning



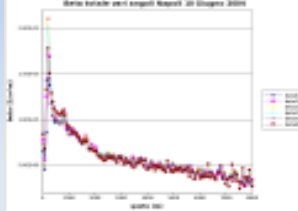
Apparato sperimentale
Lidar mobile Co.RI.S.T.A. Il telescopio in configurazione cassegrain raccoglie la sola radiazione elastica a 532 nm. L'apparato di invio della radiazione laser, insieme al telescopio, possono inclinarsi rispetto alla verticale, comandati in remoto.

Risultati sperimentali della scansione angolare del 10 Giugno 2004 a Napoli

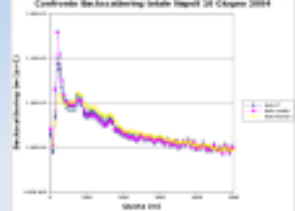
Il 10 Giugno 2004 a Napoli alle ore 21:11 (Local Time) sono iniziate le misure di scanning angolare, utilizzando la radiazione laser a 355 nm, partendo da un angolo di 60° rispetto alla verticale. I successivi angoli sono stati: 50°, 30°, 20°, 10°, 0°. Ciascuna misura è durata dieci minuti, e circa 60 secondi è stato il tempo necessario per consentire al sistema di cambiare orientamento angolare e successivamente ad ogni misura. In particolare la misura a 0°, cioè quella lungo la verticale, è durata trenta minuti ed è stata fatta in contemporanea alla misura Raman, per poter operare il confronto tra i parametri ottici dell'aerosol atmosferico ottenuti con i due metodi. Nonostante di sera l'atmosfera sia stabilmente stratificata e i flussi di calore provenienti dal suolo siano trascurabili la non contemporaneità delle misure di scanning e Raman, ad eccezione di quella lungo la verticale, può dar conto di un non perfetto accordo fra i risultati dei due metodi.



Confronto tra lo spessore ottico ricavato con il metodo variazionale (in blu) e quello ricavato con il metodo che sfrutta il segnale Raman (rosa).



Profili verticali dei coefficienti di backscattering totali (contributo aerosolico e molecolare) ottenuti col metodo variazionale a partire dai segnali lidar ai vari angoli rispetto alla verticale. Sono riportati, in funzione della quota, i profili di backscattering relativi ai segnali registrati a 60°, 50°, 40°, 30°, 20°, 10°, 0°.



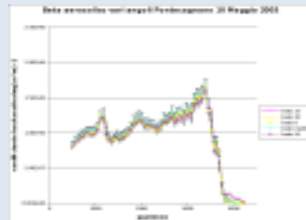
Confronto tra il profilo verticale del beta medio ottenuto dalla media pesata dei coefficienti di backscattering relativi ai segnali lidar presi ai vari angoli, quello a 0° ottenuto dal metodo variazionale, preso in contemporanea al segnale Raman, ed il backscattering ricavato con il metodo che sfrutta il segnale Raman. Lo scarto tra beta medio e Raman è più elevato a bassa quota a causa dell'effetto della overlap function del sistema lidar. Tra i 200 e i 2000m lo scarto percentuale si aggira intorno al 10%, mentre a quote più elevate non supera il 5%.

Risultati sperimentali della scansione angolare del 10 Maggio 2005 a Pontecagnano

Il 10 Maggio 2005 a Pontecagnano, alle ore 22:53 (Local Time) sono iniziate le misure di scanning angolare, utilizzando radiazione laser a 532 nm, partendo dall'angolo di 0° rispetto alla verticale. I successivi angoli sono stati: 15°, 30°, 45°. Ciascuna misura è durata cinque minuti ed il tempo necessario per passare da un angolo all'altro è stato di circa quattro secondi. In un tale intervallo di tempo e considerando che le misure sono state fatte di sera, quando i flussi di calore turbolento provenienti dal suolo sono trascurabili, non ci si aspetta variazioni significative del tratto di atmosfera investigato.



Profilo verticale dello spessore ottico ottenuto con il metodo variazionale. La quota di riferimento alla quale sono stati normalizzati i segnali è quella a partire dalla quale è misurato lo spessore ottico e nullo (vedi equazione 2).

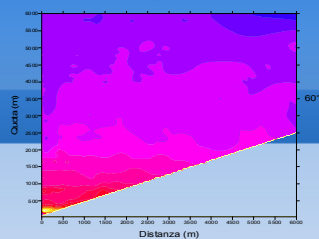


Profili verticali dei coefficienti di backscattering aerosolici ottenuti dal metodo variazionale, a partire dai segnali lidar presi ai diversi angoli rispetto alla verticale (0°, 15°, 30°, 45°). Durante le misure, le strutture verticali aerosoliche si sono conservate, come si evince dai profili di beta, che, entro gli errori sperimentali, sono consistenti tra loro.

Mappe dei coefficienti di backscattering a Napoli e Pontecagnano

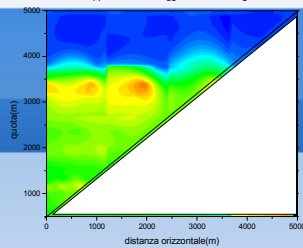
Le mappe dei coefficienti di backscattering sottoportate consentono di verificare a posteriori l'esistenza delle condizioni di stratificazione verticale aerosolica e l'omogeneità orizzontale del tratto di atmosfera investigato (ipotesi di base per la validità del metodo dello scanning angolare) con il segnale Lidar durante le misure del 10 Giugno 2004 a Napoli e del 10 Maggio 2005 a Pontecagnano. I coefficienti di backscattering sono riportati come funzione della quota e della coordinata orizzontale. Dalle mappe si può osservare che per entrambe le misure la stratificazione orizzontale dell'atmosfera è chiaramente visibile.

Mappa di beta 10 Giugno 2004 Napoli



Napoli, 10 Giugno 2004
Mappa dei coefficienti di backscattering in funzione della distanza orizzontale e della quota.

Mappa di beta 10 Maggio 2005 Pontecagnano



Pontecagnano, 10 Maggio 2005 Mappa dei coefficienti di backscattering in funzione della distanza orizzontale e della quota. La mappa è stata fatta considerando quattro angoli rispetto alla verticale: 0°, 15°, 30°, 45°.

References

1. M.Sciar, P.Chazette, J.Pelon, J.G.Won, S.C.Yoon, "Variational method for the retrieval of optical thickness and the backscatter coefficient from multiangle lidar profiles", *Applied Optics*, vol.41,n.3 (2002)
2. A.Ansmann, U.Wandinger, "Combined Raman Elastic Backscatter LIDAR for vertical profiling of moisture, aerosol extinction, backscatter and Lidar ratio", *Applied Physics, B* 55, 18-28 (1992)
3. J.D.Klett, "Lidar inversion with variable backscattering/extinction ratios"- *Applied Optics*, 24, N°11 (1 June 1985)