



Progetto PNRR EMM – Task 1500-02

Metodi veloci di trasferimento radiativo

Il trasferimento radiativo (RT) è governato da un'equazione che descrive la propagazione della radiazione nell'atmosfera e prevede lo spettro misurato dagli strumenti satellitari. Con metodi full-physics, il calcolo di una singola scena in cielo sereno può richiedere diversi minuti, mentre in presenza di nubi può richiedere ore a causa della maggiore complessità dovuta allo scattering.

L'inversione dell'RT è necessaria per analizzare le osservazioni satellitari; questo processo è noto come retrieval. Il numero di simulazioni RT richieste operativamente (ad esempio IASI-NG produce circa un milione di spettri al giorno) non è compatibile con vincoli di tempo reale se si utilizzano modelli full-physics.

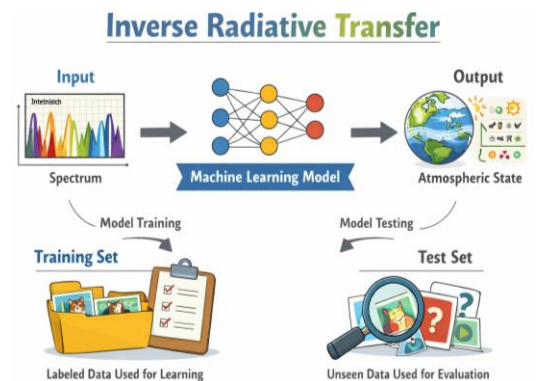
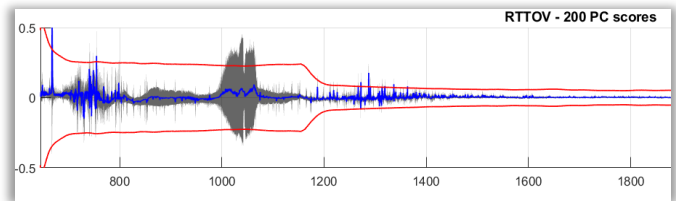
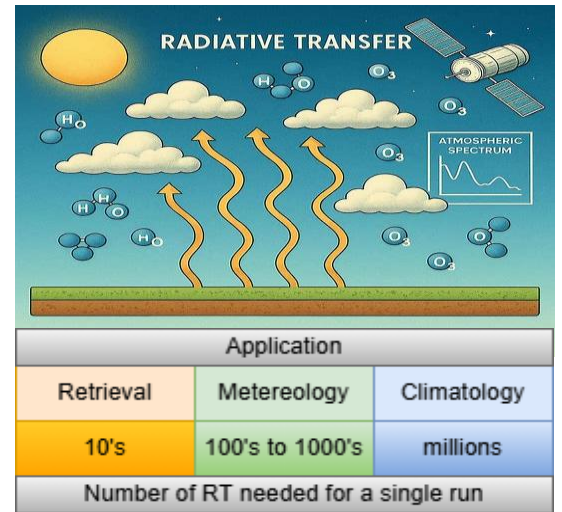
RTTOV [1] e SIGMA [2] sono esempi di modelli RT veloci. Per applicazioni meteorologiche e climatologiche, RTTOV è particolarmente adatto perché consente il calcolo efficiente delle radianze a singole frequenze o canali.

RTTOV può essere ulteriormente accelerato tramite la tecnica di Matricardi [3], che riduce il numero di calcoli RT monocromatici utilizzando la Principal Component Analysis (PCA). Per uno spettro IASI (~4000 canali), l'errore ottenuto usando 200 calcoli RT basati su PCA invece dell'insieme completo dei calcoli monocromatici è generalmente inferiore al rumore strumentale (curve rosse).

Metodi di IA per il trasferimento radiativo: studi, opportunità e criticità

- **Identificazione cielo sereno/coperto.** La classificazione preliminare delle scene è essenziale per selezionare il modello diretto e la strategia di inversione appropriati. Classificazione IASI, accuratezza del 90% [4].
- **Problema diretto di RT.** Criticità: *maledizione della dimensionalità*. L'output consiste in migliaia di radianze spettrali, mentre lo stato atmosferico in ingresso include centinaia di variabili. Questa mappatura ad alta dimensionalità è complessa per i modelli di machine learning.
- **Problema inverso di RT.** Criticità: *problema malposto*. Stati atmosferici diversi possono produrre spettri molto simili; sono quindi necessarie tecniche di regolarizzazione, tipicamente con informazioni a priori. Inversione RT con simulazioni FORUM in condizioni di cielo sereno [5] e in condizioni all-sky [6], usando latent-twins e un classificatore con accuratezza del 94%.

I metodi basati su IA sono significativamente più rapidi: dopo la fase di addestramento, un retrieval richiede tipicamente pochi secondi. Possono inoltre stimare parametri non direttamente osservabili, come le proprietà atmosferiche sotto uno strato nuvoloso (tramite correlazioni apprese). Tuttavia, l'accuratezza finale e la coerenza fisica sono generalmente inferiori. La sfida dei prossimi anni è migliorare robustezza, interpretabilità e precisione dei metodi IA, riducendo il divario rispetto agli approcci fisici.



[1] Saunders, R., Hocking, J., Turner, E., Rayer, P., Rundle, D., Brunel, P., Vidot, J., Roquet, P., Matricardi, M., Geer, A., Bormann, N., and Lupu, C., 2018: An update on the RTTOV fast radiative transfer model (currently at version 12), Geosci. Model Dev., 11, 2717-2737 (2018)

[2] Masiello G., Serio C., Maestri T., Martinazzo M., Masin F., Liuzzi G., Venafra S., The new σ -IASI code for all sky radiative transfer calculations in the spectral range 10 to 2760 cm⁻¹: σ -IASI/F2N, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 312, 108814 (2024)

[3] Matricardi, M.: A principal component based version of the RTTOV fast radiative transfer model, Q. J. Roy. Meteor. Soc., 136, 1823-1835, (2010)

[4] Zugarini C., Sgattoni C., Sgheri L.: Machine Learning for Cloud Detection in IASI Measurements: A Data-Driven SVM Approach with Physical Constraints, arXiv:2508.10120 (2025)

[5] Sgattoni C., Sgheri L. and Chung M.: A data-driven approach for fast atmospheric radiative transfer inversion, Inverse Problems 41, 085006 (2025)

[6] Sgattoni C., Sgheri L. Chung M., Martinazzo M.: Latent Twins: A Framework for Scene Recognition and Fast Radiative Transfer Inversion in FORUM All-Sky Observations, arXiv:2512.24865 (2025)