

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/262038363>

# CARATTERIZZAZIONE DELLO SPETTRO DI EMISSIONE ATMOSFERICA CON MISURE A LARGA BANDA NELL'INFRAROSSO TERMICO ESEGUITE DA PALLONE STRATOSFERICO

Conference Paper · January 2009

CITATIONS

0

READS

279

1 author:



**Giovanni Bianchini**

INO - Istituto Nazionale di Ottica

135 PUBLICATIONS 1,487 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



E2E SIMULATOR / FORUM [View project](#)



CoMPASs [View project](#)

# CARATTERIZZAZIONE DELLO SPETTRO DI EMISSIONE ATMOSFERICA CON MISURE A LARGA BANDA NELL'INFRAROSSO TERMICO ESEGUITE DA PALLONE STRATOSFERICO

L.PALCHETTI, G.BIANCHINI, B.CARLI, U.CORTESI, S.DEL BIANCO

ISTITUTO DI FISICA APPLICATA "NELLO CARRARA", IFAC-CNR

VIA MADONNA DEL PIANO, 10, 50019, SESTO FIORENTINO (FI)

L.PALCHETTI@IFAC.CNR.IT

Nello studio del bilancio radiativo terrestre (ERB, *Earth Radiation Budget*), la comprensione degli effetti radiativi dovuti all'acqua presente in atmosfera nelle varie fasi di aggregazione è solo parziale ed è quindi fonte di incertezza nella stima dei cambiamenti climatici. La caratterizzazione dello spettro di emissione atmosferica con misure spettroscopiche a larga banda consentirà di approfondire lo studio dei fenomeni connessi e risolvere parte delle incertezze relative agli effetti radiativi dovuti all'acqua.

In questo lavoro è descritta la misura spettralmente risolta della radianza atmosferica eseguita da pallone stratosferico su tutta la regione spettrale dell'infrarosso termico (TIR, *Thermal InfraRed*), da 7.1 a 100  $\mu\text{m}$  di lunghezza d'onda ( $100\text{-}1400\text{ cm}^{-1}$ ), dove avviene l'emissione radiativa dell'atmosfera terrestre. Da questa misura è stato possibile determinare lo stato dell'atmosfera in termini di profili verticali di temperatura ed umidità e presenza di nubi. Per eseguire questo tipo di misura è stato sviluppato un nuovo spettrometro a trasformata di Fourier ad alta efficienza e che utilizza rivelatori non raffreddati. Questo spettrometro apre la strada allo sviluppo di nuova strumentazione in grado di eseguire dallo spazio una caratterizzazione sistematica di tutti i componenti atmosferici che determinano l'ERB nella regione spettrale TIR.

## 1. BILANCIO RADIATIVO TERRESTRE NELLA REGIONE SPETTRALE DELL'INFRAROSSO

La comprensione del sistema climatico e l'accuratezza con cui i modelli di previsione numerica stimano l'entità del cambiamento climatico sono dipendenti dalla precisione con cui si conoscono i vari fenomeni che caratterizzano la chimica e la fisica degli scambi energetici nel sistema Terra-Atmosfera-Spazio. L'ERB nella regione spettrale del TIR è fortemente dipendente dall'assorbimento della radiazione da parte dei cosiddetti "gas serra": il vapor acqueo, l'anidride carbonica, l'ozono ed altre specie minori. Queste molecole assorbono la radiazione TIR emessa dalla superficie terrestre contribuendo al riscaldamento dell'atmosfera.

La Figura 1 mostra come lo spettro della radiazione emessa verso lo spazio al vertice dell'atmosfera, nel caso di atmosfera standard alle medie latitudini, sia compreso tra le curve di emissione di corpo nero alla temperatura della tropopausa, la regione dell'atmosfera dove la temperatura raggiunge il minimo (in questo caso 213 K), e della superficie terrestre (in questo caso 286 K) e sia modulato dalle bande di assorbimento/emissione dei principali gas serra. Il cosiddetto "fattore serra", definito come la differenza tra i flussi per unità di banda emessi verso lo spazio alla superficie e al vertice dell'atmosfera, quantifica l'energia assorbita dal sistema. La Figura 2 mostra la dipendenza spettrale del fattore serra ed identifica i gas che contribuiscono maggiormente all'assorbimento della radiazione termica da parte dell'atmosfera: il CO<sub>2</sub> e il vapor acqueo hanno effetti radiativi comparabili e sono predominanti [1].

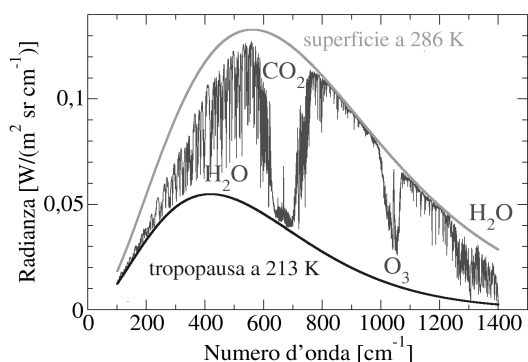


Figura 1. Emissione al vertice dell'atmosfera spettralmente risolta (atmosfera standard, medie latitudini).

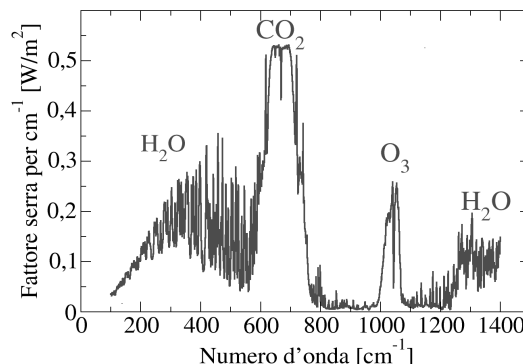


Figura 2. Fattore serra calcolato nel caso di Figura 1.

Una variazione di concentrazione di questi gas porta ad una variazione dell'equilibrio termico dell'atmosfera e quindi ad un possibile cambiamento del clima. Nello studio di questo fenomeno, un primo aspetto è quantificare l'effetto radiativo diretto (*forcing*) causato dalla variazione di concentrazione dei gas serra, tra cui il più importante è il CO<sub>2</sub>. Un secondo aspetto importante è quantificare come il sistema reagisce (*feedback*) alle variazioni di equilibrio prodotte dal forcing radiativo. Il sistema può retroagire cercando di ristabilire l'equilibrio perturbato (feedback negativo) o può amplificare la perturbazione (feedback positivo). Diversi lavori hanno mostrato come gli effetti radiativi dovuti al vapor acqueo sono effetti di feedback positivo e producono l'amplificazione di un fattore 2 dell'effetto di forcing prodotto dall'aumento di concentrazione del CO<sub>2</sub> [2].

L'accuratezza delle previsioni climatiche è limitata dalla scarsa conoscenza dei fenomeni di feedback ed in particolare di quelli dovuto al vapor acqueo e alle nubi sottili, come i cirri. Le Figure 1 e 2 mostrano come gli effetti radiativi dell'acqua siano predominanti nella regione spettrale a grande lunghezza d'onda. Lo studio del fenomeno richiede quindi lo sviluppo di strumentazione spettroscopica che copra adeguatamente tutta la banda di emissione atmosferica dal medio al lontano infrarosso (FIR, *Far InfraRed*) [3].

## 2. NUOVO SPETTROMETRO A LARGA BANDA NON RAFFREDDATO

Fino a pochi anni fa, le misure TIR a larga banda, incluso il FIR, erano limitate dalla richiesta di sensibilità che poteva essere soddisfatta solo con strumentazione raffreddata, in particolare con rivelatori alla temperatura dell'azoto o dell'elio liquidi. Inoltre per coprire efficacemente il FIR, le misure devono essere eseguite in località caratterizzate da bassissima umidità: alta quota, regioni polari, o a bordo di palloni stratosferici e dei satelliti. L'applicazione da satellite è necessaria per avere una copertura globale e sistematica di tutte le condizioni atmosferiche presenti. Questi requisiti, difficili da soddisfare, hanno reso costose e poco attraenti queste misure. Negli ultimi anni lo sviluppo di spettrometri a trasformata di Fourier ad alta efficienza che utilizzano rivelatori non raffreddati ha consentito di superare queste limitazioni [4].

Presso l'IFAC-CNR di Firenze, è stato sviluppato uno strumento, chiamato REFIR-PAD (*Radiation Explorer in the Far InfraRed - Prototype for Applications and Development*), in grado di eseguire la misura dello spettro della radiazione emessa dall'atmosfera a larga banda incluso il FIR [5-7]. Lo strumento è uno spettrometro a trasformata di Fourier che utilizza un rivelatore piroelettrico, operante a temperatura ambiente, per coprire l'intervallo 100-1400 cm<sup>-1</sup> con una risoluzione di 0.5 cm<sup>-1</sup>. REFIR-PAD, mostrato in Figura 3, è uno spettrometro molto compatto, con un diametro di 62 cm, un peso di 55 kg ed un consumo medio di circa 50 W.

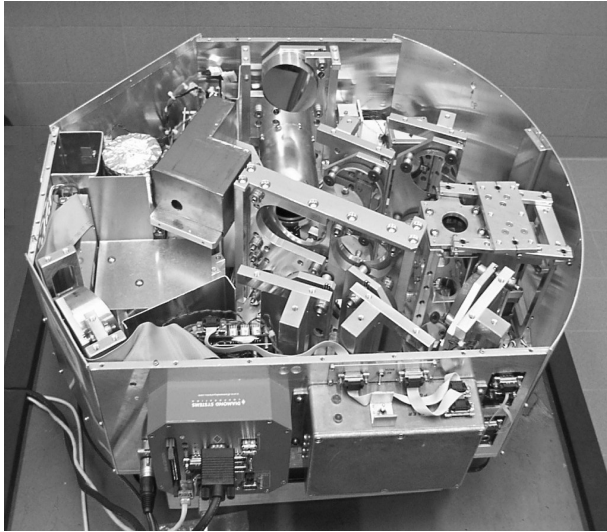


Figura 3. REFIR-PAD.

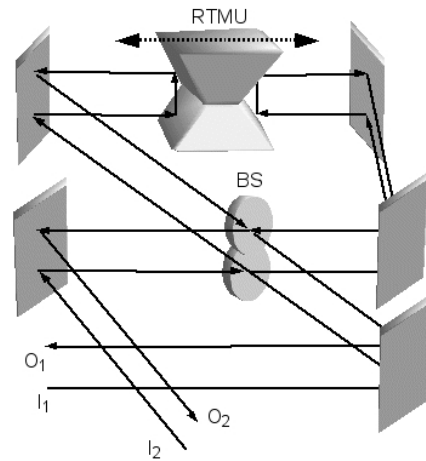


Figura 4. Schema ottico dell'interferometro. RTMU (Roof-Top-Mirror Unit) = unità mobile specchi a tetto, BS = beam splitter di ampiezza,  $I_1/I_2$  = ingressi,  $O_1/O_2$  = canali di uscita.

Lo strumento è stato progettato per operare in maniera automatica sia per misure dall'alto della radiazione emessa verso lo spazio (OLR, *Outgoing Longwave Radiation*) a bordo di palloni stratosferici, che per misure dal basso della radiazione emessa verso la superficie (DLR, *Downward Longwave Radiation*) in alta montagna o in regioni polari. La configurazione ottica mostrata in Figura 4 è del tipo Mach-Zehnder con *beam splitter* (BS) di germanio su film di polietilene tereftalato (PET). L'interferometro ha 2 porte di ingresso ( $I_1/I_2$ ) e 2 canali di uscita ( $O_1/O_2$ ) ed è otticamente compensato per errori angolari dell'unità mobile RTMU (*Roof Top Mirror Unit*). Queste caratteristiche massimizzano le prestazioni dell'interferometro e l'affidabilità in operazioni automatiche sul campo.

### 3. MISURE SUL CAMPO

REFIR-PAD è stato utilizzato con successo per la misura di OLR in regioni tropicali durante un volo di un pallone stratosferico lanciato il 30 giugno 2005 dall'aeroporto di Timon, presso Teresina, Brasile ( $5^\circ 5' S$ ,  $42^\circ 52' W$ ) [8]. Lo strumento è stato installato a bordo della gondola stratosferica francese LPMAA-CNES (*Laboratoire de Physique Moléculaire pour l'Atmosphère et L'Astrophysique – Centre National d'Etudes Spatiales*), Figura 5, che ospita la versione da pallone dello spettrometro IASI-balloon (*Infrared Atmospheric Sounding Interferometer - balloon*) operante nel medio infrarosso. Durante le 8 ore di volo, REFIR-PAD ha acquisito, dalla quota di 34 km, spettri di emissione atmosferici, con un campo di vista di 133 mrad, sia in condizioni di cielo sereno che in presenza di una parziale copertura nuvolosa. Oltre alla vista al nadir, lo strumento ha acquisito la radianza emessa nella direzione del lembo dell'atmosfera e dello spazio a  $+30^\circ$  di elevazione per verifiche di calibrazione. Le misure mostrano che lo strumento è sufficientemente sensibile per la caratterizzazione della radianza atmosferica nella regione spettrale di interesse del FIR con un rumore NESR (*Noise Equivalent Spectral Radiance*) di  $0.5\text{-}2 \text{ mW}/(\text{m}^2 \text{ sr cm}^{-1})$ , ottenuto con un tempo di misura di 30 s, ed un'accuratezza assoluta di calibrazione di 0.5 K.

Le condizioni di copertura nuvolosa sono state identificate indipendentemente tramite una telecamera termica operativa a bordo della gondola LPMAA-CNES, in grado di misurare la temperatura di brillantezza della scena nell'intervallo spettrale  $7.5\text{-}13 \mu\text{m}$  e co-allineata con REFIR-PAD prima del lancio. Il campo di vista a terra della telecamera è rettangolare di circa  $10 \times 14 \text{ km}$  e sufficientemente ampio per analizzare tutta la scena osservata da REFIR-PAD, che opera con un campo di vista a terra circolare di circa 4.5 km di diametro.

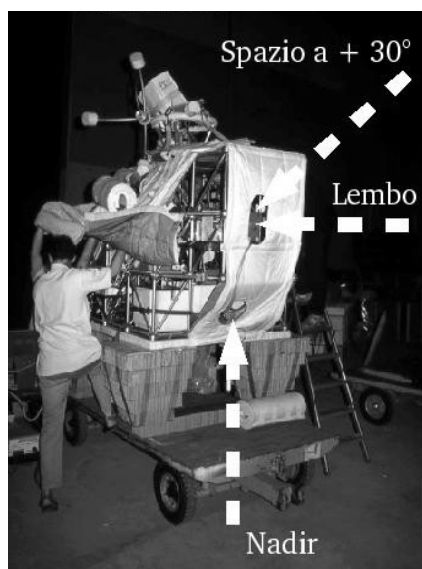


Figura 5. Lancio dell'esperimento IASI-balloon/REFIR-PAD sulla gondola stratosferica LPMAA-CNES.

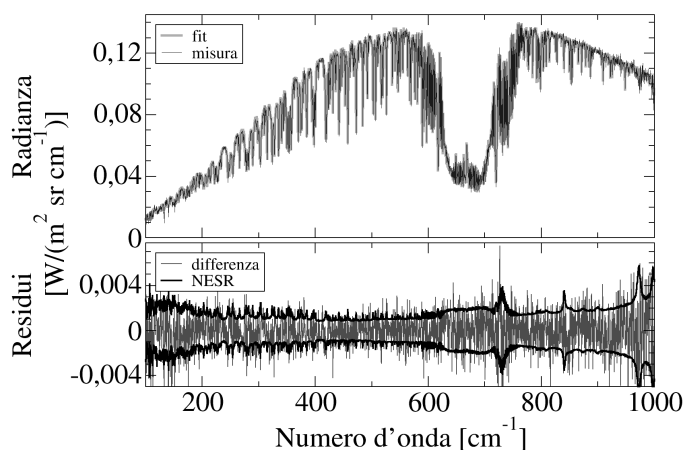


Figura 6. Fit dell'emissione radiativa al vertice dell'atmosfera. Nel pannello superiore la misura (linea nera) è confrontata con la simulazione (linea grigia) ottenuta dal fit dei parametri atmosferici. Nel pannello inferiore la differenza residua tra misura e simulazione (linea grigia) è confrontata con il valore del rumore di misura NESR (linea nera).

#### 4. RISULTATI

Dall'analisi degli spettri misurati da pallone stratosferico è stato possibile ottenere, oltre alla validazione dei modelli di trasferimento radiativo, la ricostruzione dei profili verticali di temperatura e vapor acqueo.

La misura di REFIR-PAD è stata confrontata con i risultati ottenuti con un modello di trasferimento radiativo *line-by-line* che utilizza il database spettroscopico HITRAN 2004 [9] e il modello del continuo atmosferico dell'acqua sviluppato da Clough et al. [10]. Le simulazioni sono confrontate con le misure all'interno di una procedura di *fit* non lineare per la ricostruzione simultanea dei profili verticali di temperatura e vapor d'acqua dell'atmosfera e della temperatura della superficie terrestre [11]. La procedura di ricostruzione tiene conto delle informazioni a priori sui profili di temperatura e vapor acqueo fornite dai dati climatologici.

Un esempio di risultato ottenuto con questa procedura è mostrato in Figura 6, dove la misura è confrontata con la simulazione ottenuta con il fit dei parametri atmosferici. Nell'analisi sono utilizzati gli spettri da 100 a 1000  $\text{cm}^{-1}$ , sufficientemente estesi da includere tutte le informazioni relative al vapor d'acqua e alla temperatura. Nel pannello inferiore della figura, la differenza residua tra la misura e la simulazione (linea grigia) è confrontata con il valore del rumore NESR associato alla singola misura (linea nera). Il confronto mostra dei residui inferiori al rumore di misura ed evidenzia la qualità raggiunta nella procedura di fit.

In termini di profili verticali, i risultati ottenuti sono mostrati nelle Figure 7 e 8, rispettivamente per la temperatura ed il vapor acqueo. Le figure mostrano il confronto dei profili ricavati (linea nera) con i valori forniti dall'analisi del Centro europeo per le previsioni a medio raggio ECMWF (*European Centre for Medium-range Weather Forecast*) (linea grigia) e con i valori puntuali ottenuti con un radiosondaggio (linea a croci) eseguito in contemporanea alla misura spettroscopica. Le figure riportano anche il profilo climatologico (linea a punti) utilizzato come informazione a priori nella procedura di ricostruzione.

La procedura di analisi consente di ricavare il profilo di temperatura fino alla quota di volo di 34 km con una precisione media di 0.5 K e quello del vapor d'acqua fino a 17 km con una precisione media del 3 %. L'accordo trovato con i dati puntuali del radiosondaggio, nonostante la discontinuità dei dati di umidità, evidenzia la bontà della tecnica utilizzata per la ricostruzione dei profili a partire dalle misure spettrali a larga banda della radianza OLR.

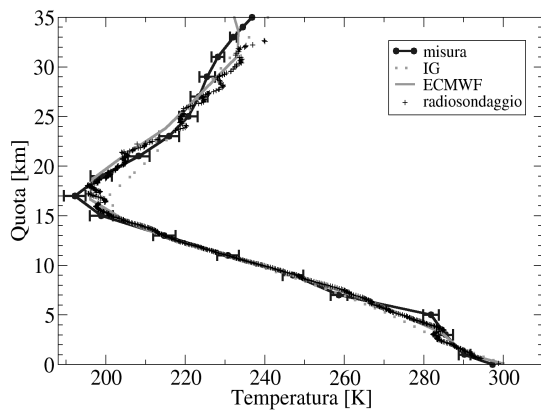


Figura 7. Profilo verticale di temperatura.

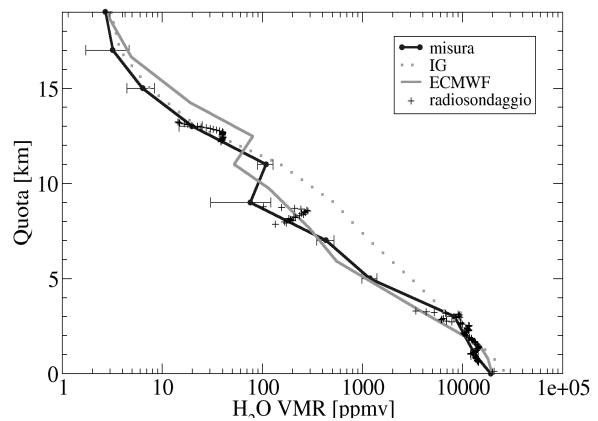


Figura 8. Profilo verticale di vapor acqueo.

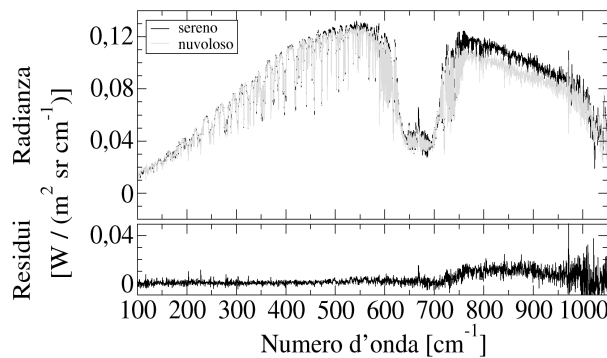


Figura 9. Effetto delle nubi.

Le misure dimostrano che REFIR-PAD è sufficientemente sensibile per eseguire la caratterizzazione dei principali componenti atmosferici che producono effetti radiativi nella regione spettrale del FIR. In particolare si osserva che la misura del vapor acqueo in alta troposfera tra 12 e 17 km è sensibilmente diversa dai dati forniti da ECMWF ed in accordo con i dati forniti dal radiosondaggio. L'utilizzo di questo strumento da satellite potrebbe quindi utilmente integrare i database atmosferici con misure che avrebbero una copertura globale e una frequenza temporale elevata, in particolare per quanto riguarda la stima del contenuto di vapor acqueo.

Dall'analisi degli spettri di emissione atmosferica misurati a larga banda con osservazioni al nadir è possibile, inoltre, identificare l'effetto prodotto sulla OLR dalle nubi presenti nel campo di vista e di caratterizzarne le proprietà radiative su tutta la banda di emissione termica. La Figura 9 mostra due spettri: uno acquisito in condizioni di cielo sereno (linea nera) e l'altro in condizioni di cielo nuvoloso (linea grigia). La misura in condizioni di cielo nuvoloso corrisponde ad una parziale contaminazione con nubi basse identificate dalla telecamera termica nella scena osservata dallo spettrometro. La presenza di nubi basse riduce la radianza in uscita verso lo spazio nelle finestre spettrali di trasparenza dell'atmosfera, in particolare tra 700 e 1000  $\text{cm}^{-1}$ , ma non altera l'emissione nelle regioni di assorbimento del vapor acqueo e del  $\text{CO}_2$ . Nelle regioni spettrali dove l'atmosfera è trasparente la radiazione termica raggiunge lo spazio direttamente dalla superficie terrestre o dal vertice delle nubi. In presenza di nubi, quindi, l'emissione sarà minore perché la temperatura delle nubi è minore di quella della superficie terrestre. Nelle regioni spettrali dove l'atmosfera è opaca, la radiazione OLR proviene dagli strati più alti dell'atmosfera, nel nostro caso al di sopra delle nubi, e quindi non risente della presenza delle nubi più basse. Nel caso di nubi sottili visibili e sub-visibili, come ad esempio i cirri, invece la radianza OLR presenta delle caratteristiche spettrali ben definite in funzione dei parametri micro-fisici che caratterizzano le nubi: spessore, densità, stato di aggregazione dell'acqua, dimensione e forma delle particelle. La misura di REFIR-PAD spettralmente risolta su tutta la banda di emissione consentirà quindi la caratterizzazione della radianza emessa dalle nubi anche nel caso di nubi sottili.

#### 4. CONCLUSIONI E PROSPETTIVE

Lo sviluppo dello strumento REFIR-PAD ed il suo utilizzo su pallone stratosferico ha consentito di verificare la fattibilità di misure a larga banda su tutto lo spettro di emissione dell'atmosfera, incluso il lontano infrarosso, con strumentazione spettroscopica non raffreddata.

Il buon accordo delle misure con le previsioni dei modelli di trasferimento radiativo in condizioni di cielo sereno consente di estendere l'utilizzo di questa strumentazione allo studio delle caratteristiche spettrali delle nubi visibili e sub-visibili, inclusi i cirri. In questo modo sarà possibile caratterizzare contemporaneamente i contributi dell'acqua in tutte le sue fasi di aggregazione.

Infine lo sviluppo di una strumentazione operativa anche da satellite consentirà di caratterizzare sistematicamente e su scala globale tutti i componenti atmosferici che nel FIR sono sorgente delle maggiori incertezze nelle previsioni climatiche ed in particolare la componente di raffreddamento del bilancio radiativo terrestre ed i meccanismi di feedback radiativo del vapor d'acqua e delle nubi.

#### BIBLIOGRAFIA

1. J.E. Harries, *The Greenhouse Earth - A view from space.*, Q. J. Roy. Meteor. Soc. 122, 799- 818, 1996.
2. I.M. Held and B.J. Soden, *Water vapor feedback and global warming*, Annu. Rev. Energy Environ. 25, 441-475, 2000.
3. A. Sinha and J. E. Harries, *Water vapor and greenhouse trapping: the role of far infrared absorption*, Geophys. Res. Lett. 22, 2147-2150, 1995.
4. R. Rizzi, L. Palchetti, B. Carli, R. Bonsignori, J.E. Harries, J. Leotin, S. C. Peskett, C. Serio, and A. Sutera, *Feasibility of the spaceborne radiation explorer in the far infrared (REFIR)*, in "Optical Spectroscopic Techniques, Remote Sensing, and Instrumentation for Atmospheric and Space Research IV", Proc. SPIE 4485, 202-209, 2002.
5. B. Carli, A. Barbis, J.E. Harries, and L. Palchetti, *Design of an efficient broadband far-infrared Fourier transform spectrometer*, Appl. Opt. 38, 3945-3950, 1999.
6. L. Palchetti, G. Bianchini, F. Castagnoli, B. Carli, C. Serio, F. Esposito, V. Cuomo, R. Rizzi, and T. Maestri, *Breadboard of a Fourier-transform spectrometer for the Radiation Explorer in the Far Infrared atmospheric mission*. Appl. Opt. 44, 2870-2878, 2005.
7. G. Bianchini, L. Palchetti, B. Carli, *A wide-band nadir-sounding spectroradiometer for the characterisation of the Earth's outgoing long-wave radiation*, in "Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites X", Roland Meynart; Steven P. Neeck; Haruhisa Shimoda Editors, Proc. SPIE 6361, 63610A, 2006.
8. L. Palchetti, C. Belotti, G. Bianchini, F. Castagnoli, B. Carli, U. Cortesi, M. Pellegrini, C. Camy-Peyret, P. Jeseck, and Y. Té, *Technical note: First spectral measurement of the Earth's upwelling emission using an uncooled wideband Fourier transform spectrometer*, Atmos. Chem. Phys. 6, 5025-5030, 2006.
9. L.S. Rothman, et al., *The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database*, J. Quant. Spectrosc. Rad. 96, 139-204, 2005.
10. S.A. Clough, M.W. Shephard et al., *Atmospheric radiative transfer modeling: a summary of the AER codes*, J. Quant. Spectrosc. Rad. 91, 233-244, 2005.
11. C.D. Rodgers, *Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice*, World Scientific, Singapore, New Jersey, London, Hong Kong, 2000.