

## VALUTAZIONE DELLA TEMPERATURA SPETTRALE ATTRAVERSO UN FILTRO FOTOGRAFICO A DIFFRAZIONE

Iacopo Nicolosi  
(Progetto Sassalbo)  
[ianicolo@inwind.it](mailto:ianicolo@inwind.it)

### Introduzione

L'osservazione ripetuta di fenomeni luminosi in atmosfera in varie zone del globo ha spinto molte persone a formare gruppi di lavoro, con l'obiettivo di fornire elementi utili alla comprensione della fenomenologia stessa, attraverso una raccolta di dati di varia natura. Generalmente, la cosa che accomuna questi gruppi è la grande volontà operativa accompagnata da una scarsità di risorse e mezzi utili allo studio quantitativo del fenomeno. La sfida che questi gruppi affrontano è proprio quella di massimizzare la qualità e quantità di informazioni avendo a disposizione l'attrezzatura minima indispensabile. La via seguita è generalmente quella di utilizzare materiale di "recupero", ovvero già posseduto dai membri dei gruppi di lavoro, convertito ad uno scopo per il quale tale materiale non è stato concepito. Il senso di questo lavoro è quello di dare uno strumento di analisi utilizzando una normale macchina fotografica digitale, ormai presente in quasi tutte le case, e un filtro fotografico a diffrazione a basso costo, nato originariamente per abbellire le fotografie con un effetto arcobaleno.

### Strumentazione utilizzata

La strumentazione è costituita da una macchina fotografica CCD della Olympus, modello Camedia C-740 a 3 Mpixel, sul cui obiettivo è stato installato un filtro fotografico a diffrazione della Cokin, modello Diffractor Cosmos 040, caratterizzato da una densità di linee pari a 240 al millimetro. La caratteristica fondamentale della macchina fotografica digitale per questo tipo di analisi è rappresentata dalla possibilità di regolare il fuoco manualmente, poiché l'utilizzo impiegato è prevalentemente notturno; la macchina, infatti, non è concepita per foto notturne per cui il sistema autofocus non è in grado di gestire correttamente la messa a fuoco. Per avere buoni risultati è invece fondamentale che l'immagine fotografata sia correttamente messa a fuoco. Un'altra caratteristica è il tempo massimo di apertura del diaframma che nel caso della Camedia risulta essere 16 secondi. Comunque, in queste condizioni di acquisizione, il rumore di fondo è generalmente molto elevato. Il grande vantaggio della Camedia consiste nel suo obiettivo fotografico equivalente ad un 38-380 mm di una macchina reflex a pellicola, rendendola pertanto molto flessibile nelle varie applicazioni.

Per quanto riguarda l'analisi degli spettri ottenuti in fotografia, è necessario l'utilizzo di un PC con software dedicati, tipo VisualSpec (<http://astrosurf.com/vdesnoux/>) e/o IRIS (<http://www.astrosurf.com/buil/>).

## Metodo

Il metodo proposto ha come obiettivo il calcolo della temperatura spettrale di sorgenti luminose, ritenendo che questo parametro sia molto importante da valutare per una comprensione della fisica del fenomeno osservato. Il primo passo è quello di avere lo spettro di una sorgente con temperatura spettrale nota, acquisito con lo stesso sistema che poi verrà utilizzato per lo studio dei fenomeni luminosi. Nel nostro caso è stato acquisito lo spettro del Sole, la cui temperatura di corpo nero corrisponde a 5900-6000 °K. Lo spettro del Sole ha anche un altro vantaggio, in quanto sono presenti sul segnale in ingresso molte righe spettrali di assorbimento dell'idrogeno e del sodio che permettono di calibrare in lunghezza d'onda lo spettro acquisito. A tal proposito viene mostrato in figura-1 lo spettro teorico del Sole e quello osservato con il sistema in esame:

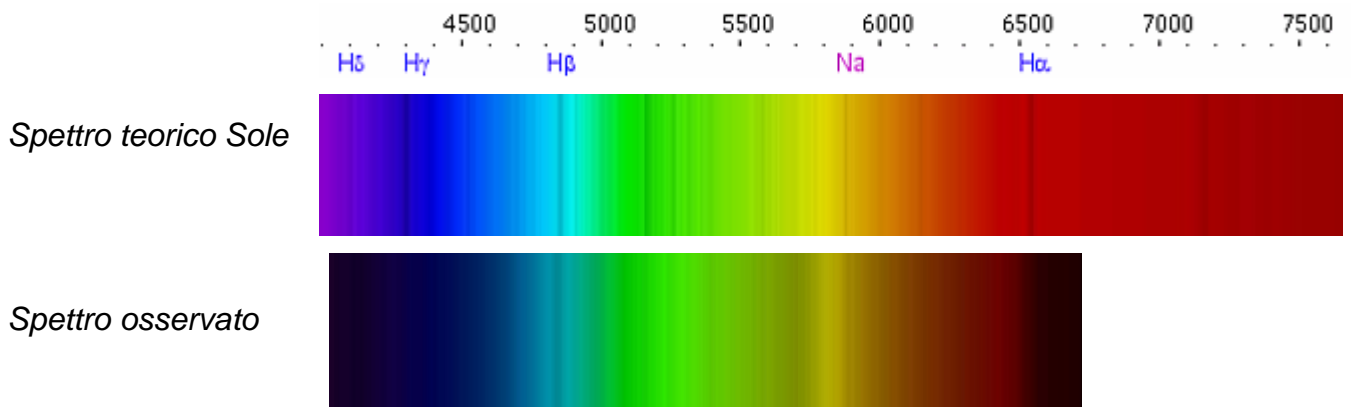


Figura 1

Lo spettro osservato mostra chiaramente la presenza delle più importanti linee spettrali; inoltre si può notare come la banda di sensibilità del ccd della Camedia sia compresa tra 400 e 650 nm. Il taglio a 650 nm è molto probabilmente dovuto alla presenza di un filtro IR, infatti i sensori ccd sono molto sensibili alla banda del rosso e dell'IR (Nicolosi 2004).

In realtà lo spettro osservato non è quello del Sole, ma è il prodotto tra questo'ultimo, che rappresenta il segnale in ingresso nel sistema di acquisizione, e una funzione della lunghezza d'onda detta efficienza quantica della camera ccd, che rappresenta l'efficienza della macchina fotografica nel trasformare i fotoni incidenti sulla superficie del ccd in elettroni. Questa funzione non è generalmente nota, per calcolarla occorre una sofisticata apparecchiatura da laboratorio. Per questa ragione, il metodo proposto non prevede il calcolo di questa funzione; ciò rappresenta un enorme vantaggio a causa degli errori che potrebbero essere introdotti nel cercare di valutare l'efficienza quantica senza gli adeguati strumenti. Una volta acquisito lo spettro del Sole, vi si noteranno massimi e minimi che

non dipendono dalla sorgente, ma dall'efficienza quantica della camera ccd. Questi massimi e minimi sono molto utili per calibrare gli spettri di sorgenti luminose ignote che non hanno righe spettrali caratteristiche ma che sono continui su tutta la banda di sensibilità del ccd.

Si osservi la figura-2 che rappresenta la funzione intensità (in scala relativa) – lunghezza d'onda (angstrom) di una lampadina ad incandescenza:

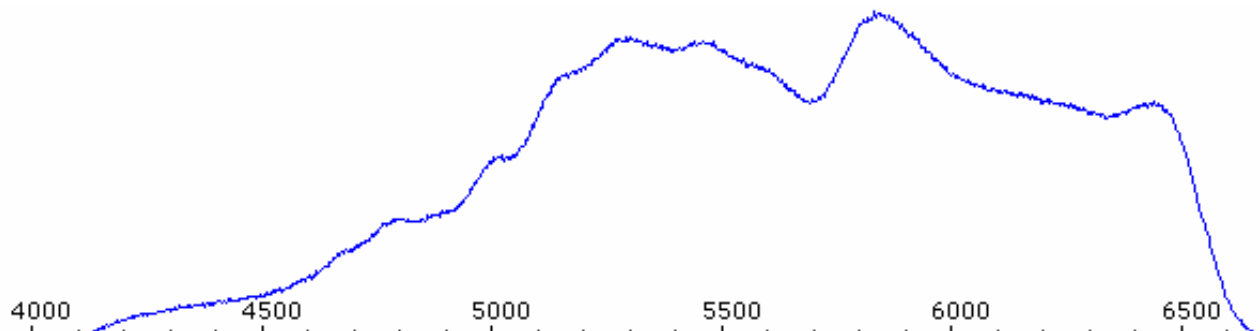


Figura 2

Come si può notare il tracciato è costituito da massimi e minimi non appartenenti al segnale in ingresso ma risultanti dal prodotto di quest'ultimo con l'efficienza quantica del ccd. Pertanto la presenza di questi massimi e minimi, precedentemente posizionati alla corretta lunghezza d'onda utilizzando lo spettro del Sole, permette la calibrazione di qualsiasi spettro continuo.

Consideriamo il caso teorico di due sorgenti di corpo nero alla temperatura T1 e T2 che producono una densità di energia rappresentata dalle funzioni  $PlanckT1(\lambda)$  e  $PlanckT2(\lambda)$ , dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda della radiazione. Se ipotizziamo di acquisire col nostro sistema ottico le due sorgenti nelle stesse condizioni (stesso tempo di esposizione, stessa distanza, etc.) possiamo scrivere la seguente Relazione 1:

$$\frac{planckT1}{planckT2}(\lambda) = \frac{OsservatoT1 \times QE}{OsservatoT2 \times QE}(\lambda)$$

### Relazione 1

$planckT1$  = densità di energia di corpo nero alla temperatura T1 °K.

$planckT2$  = densità di energia di corpo nero alla temperatura T2 °K.

$OsservatoT1$  = energia misurata della sorgente a temperatura T1 °K (unità arbitrarie).

$OsservatoT2$  = energia misurata della sorgente a temperatura T2 °K (unità arbitrarie).

$\lambda$  = lunghezza d'onda.

$QE$  = efficienza quantica della macchina digitale.

Poiché il secondo membro dell'uguaglianza è calcolabile facendo il rapporto tra gli spettri misurati e, come si può osservare, il rapporto non dipende dalla efficienza quantica del sistema di acquisizione, è possibile calcolare una eventuale ignota temperatura spettrale T2 avendo a disposizione lo spettro di una sorgente a temperatura spettrale T1.

Nel caso reale gli spettri misurati non sono confrontabili tra loro perché non acquisiti nelle stesse condizioni teoriche dell'esempio precedente. Se però il sistema di acquisizione è lineare, è possibile ricondursi alle condizioni teoriche attraverso un fattore moltiplicativo che normalizza uno spettro misurato rispetto all'altro.

Lavorare con i sensori ccd offre un vantaggio enorme per il fatto che questi hanno una risposta lineare rispetto alla radiazione incidente; è stato eseguito un test per verificare l'effettiva linearità di risposta del sistema di acquisizione utilizzato. L'esperimento è stato condotto utilizzando come sorgente luminoso una torcia elettrica, fissando la posizione relativa della sorgente con quella della macchina fotografica, in modo da non cambiare le condizioni di misura. Sono stati eseguiti diversi scatti variando soltanto il tempo di posa, ed è stata riportata in un grafico l'intensità relativa misurata per alcune lunghezze d'onda, in funzione del tempo di esposizione (figura 3)

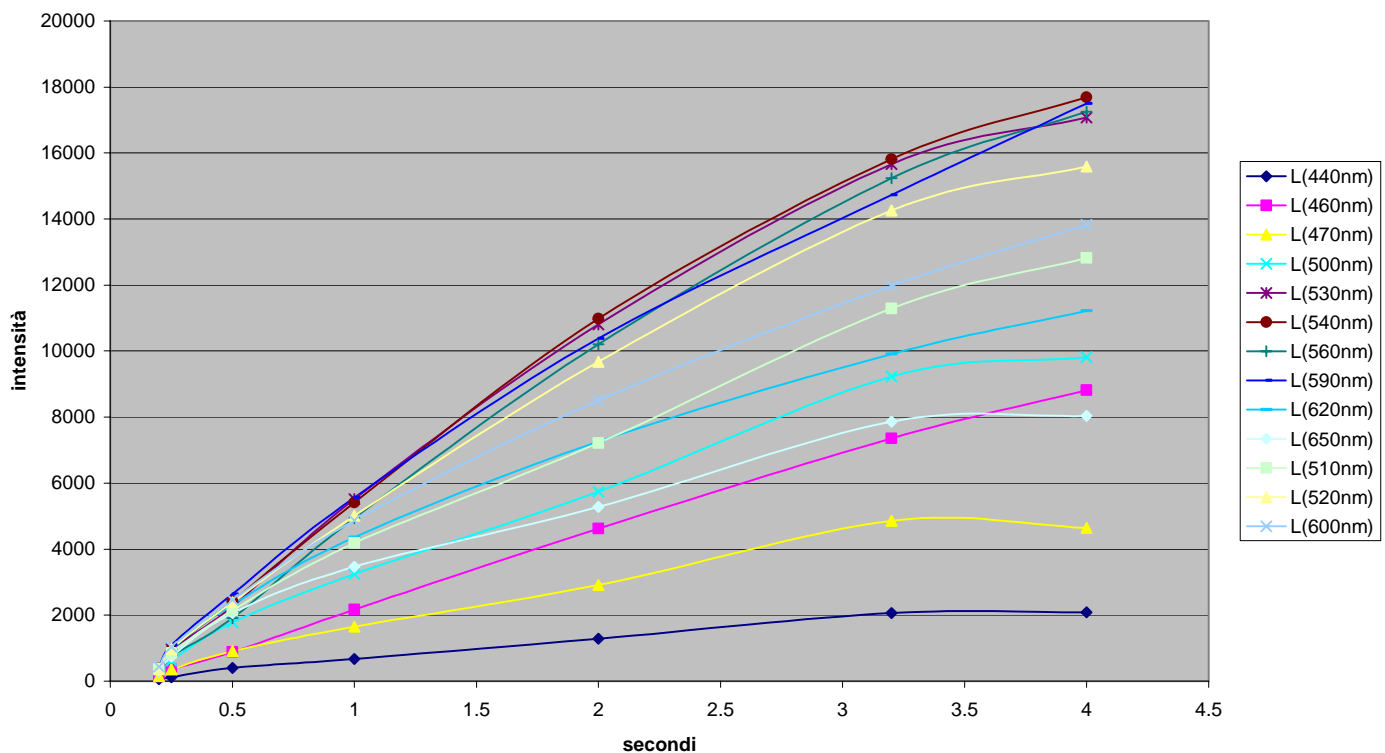


Figura 3

Come si può osservare, la linearità di risposta è sufficientemente verificata per il nostro sistema di acquisizione. Questo implica che è possibile calcolare un parametro di correzione moltiplicativo per uno spettro che lo renda confrontabile con un altro, che renda uguali le condizioni di acquisizione, in modo da verificare la Relazione 1, che viene pertanto così modificata:

$$\frac{\text{planck}T1}{\text{planck}T2}(\lambda) = \frac{\text{Osservato}T1 \times QE \times \text{coefficiente\_correttivo}(T2)}{\text{Osservato}T2 \times QE}(\lambda)$$

## Relazione 2

Il coefficiente correttivo è una funzione della temperatura spettrale incognita T2, pertanto la risoluzione del problema diventa fortemente non lineare.

Consideriamo il caso reale in cui si abbia a disposizione lo spettro misurato del Sole, quindi ad una temperatura spettrale di 5900 °K, e lo spettro di una sorgente sconosciuta a temperatura spettrale incognita T: questo rappresenta il dato in ingresso che è possibile ottenere sperimentalmente col sistema fotografico esaminato, ovvero due spettri calibrati nella lunghezza d'onda, di cui per uno è nota la temperatura spettrale (quello del Sole), ma non calibrati rispetto all'energia emessa dalle sorgenti. Il problema non lineare nell'incognita T può essere risolto minimizzando la funzione seguente non dipendente dall'efficienza quantica QE della ccd:

$$\chi^2(T) = \sum_i \left( \frac{\text{Osservato}(T_{rif}, \lambda_i) \times QE \times \text{coefficiente\_correttivo}(T)}{\text{Osservato}(T, \lambda_i) \times QE} - \frac{\text{Planck}(T_{rif}, \lambda_i)}{\text{Planck}(T, \lambda_i)} \right)^2$$

## Relazione 3

Dove:

$$T_{rif} = 5900 \text{ °K}$$

T = temperatura spettrale che voglio calcolare.

$$\text{coefficiente\_correttivo}(T) = \frac{\left( \frac{\text{Planck}(T_{rif}, \lambda_{rif})}{\text{Planck}(T, \lambda_{rif})} \times (\text{Osservato}(T, \lambda_{rif}))^2 \right)}{(\text{Osservato}(T_{rif}, \lambda_{rif}))^2}$$

$\lambda_{rif}$  = lunghezza d'onda di riferimento, in questo caso 500 nm.

La lunghezza d'onda di riferimento può essere qualsiasi, serve soltanto a definire il parametro di calibrazione tra gli spettri osservati. I calcoli riportati sono stati eseguiti considerando la lunghezza d'onda di 500 nm.

Con semplici metodi numerici di letteratura il problema viene risolto, ricavando il minimo di  $\chi^2$  in funzione della temperatura spettrale T. Verifiche realizzate con casi sintetici, in cui si ipotizza la presenza di un sistema di acquisizione perfettamente lineare, hanno prodotto un risultato esatto per cui effettivamente la funzione  $\chi^2$  ha valore nullo. Gli spettri reali mostrano invece un minimo unico ma non nullo di  $\chi^2$ , a testimonianza della presenza di errori, rumore e altri fattori che concorrono a distorcere gli spettri acquisiti.

## Applicazione su spettri reali

Il primo test viene effettuato sullo spettro generato dalla fiamma di una candela di cera. Le informazioni ricavabili dalla letteratura indicano una temperatura spettrale della fiamma di una candela intorno ai 1500 – 1800 °K. Applicando la Relazione 3 e minimizzando  $\chi^2$  rispetto a T, si ottiene un valore di temperatura spettrale pari a 1614 °K. La figura 4 mostra un grafico in cui sono riportati i tracciati del rapporto tra le funzioni di Planck per le due temperature T5900°K e T1614°K (tracciato rosso), e il rapporto tra gli spettri misurati e normalizzati del Sole e della candela (si ricorda che la normalizzazione avviene automaticamente durante la fase di calcolo del minimo del  $\chi^2$ ).

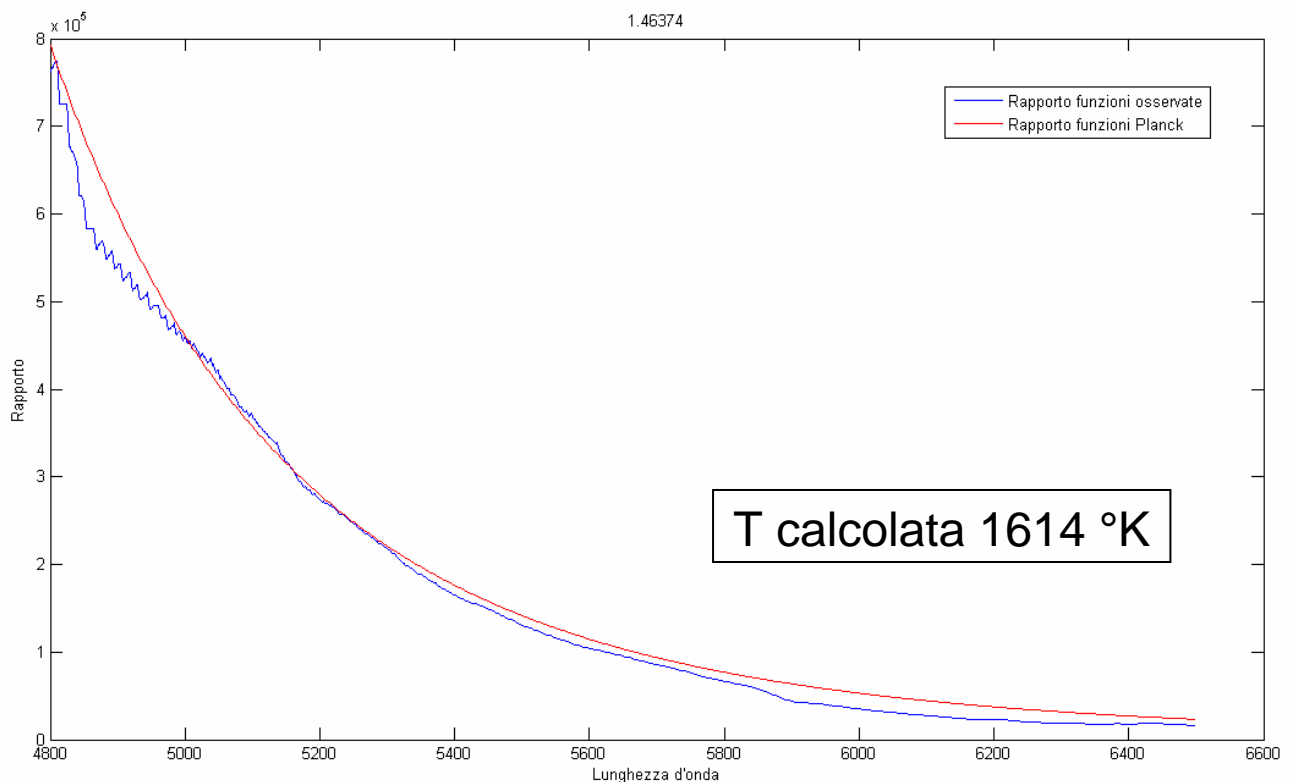


Figura 4

Lo spettro dell'esempio seguente è stato fotografato di notte, ad una distanza di circa 15 km da un aereo in circuito presso l'aeroporto di Pisa, con le luci di atterraggio in funzione. Con il procedimento analogo a quanto riportato precedentemente si è provveduto a calcolare la temperatura spettrale delle luci di atterraggio dell'aereo, che è risultata essere 2511 °K, che, considerando il basso rapporto segnale rumore registrato nello spettro misurato, è un valore compatibile con le temperature spettrali associate alle lampade ad incandescenza. Analogamente la figura 5 mostra il rapporto tra le funzioni di Planck a 5900 e 2511 °K (rosso) e il rapporto tra gli spettri osservati e calibrati del Sole e delle luci di atterraggio (blu).

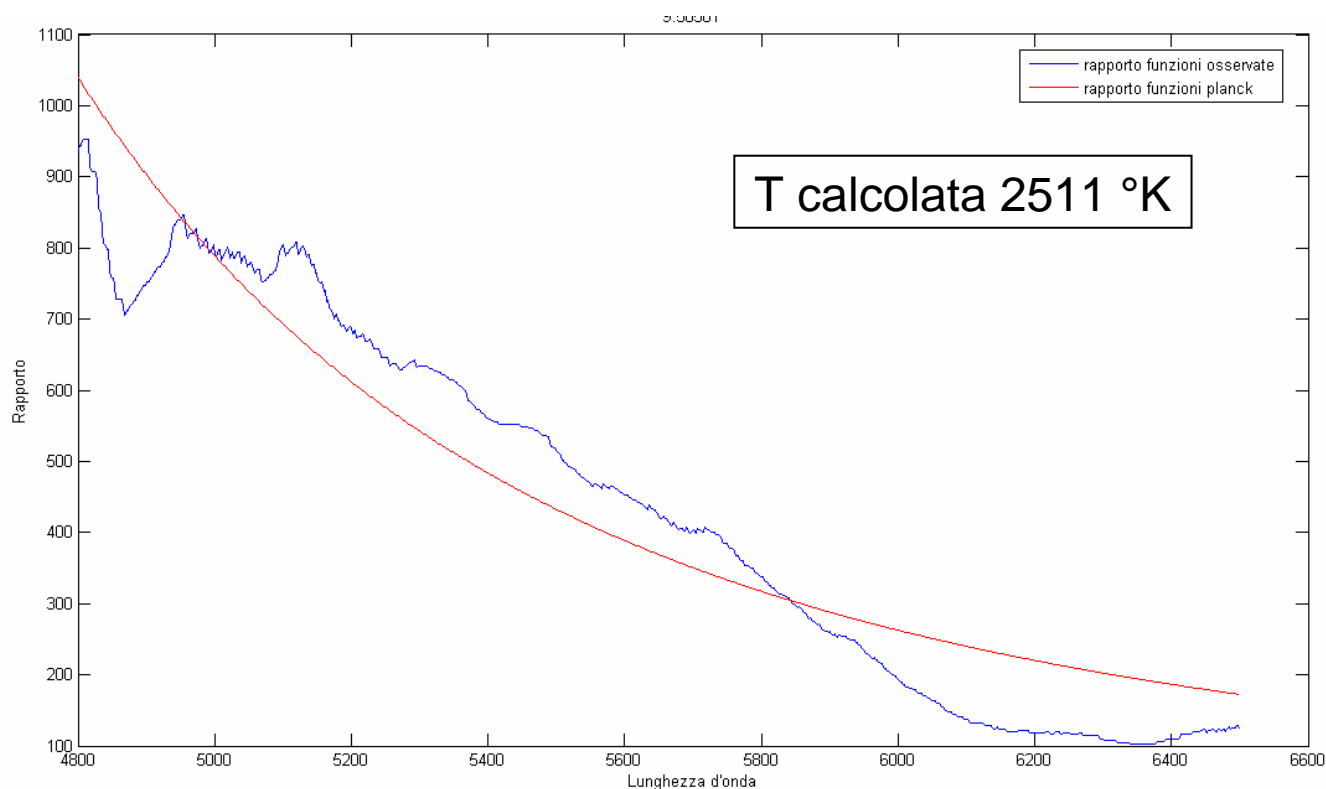


Figura 5

Il risultato ottenuto è significativo in quanto lo spettro misurato non è stato ottenuto in "laboratorio" ma è stato acquisito in un contesto simile a quanto può avvenire durante un'osservazione notturna finalizzata allo studio dei fenomeni luminosi, con una debole sorgente di luce lontana in lento movimento relativo.

L'ultimo esempio che viene mostrato in questo lavoro riguarda un curioso fenomeno luminoso che si sprigiona all'interno di un forno a microonde se vi sono le condizioni favorevoli, quali la presenza di una fiamma libera scaturita da legno che brucia al suo interno mentre il forno è in funzione, o la presenza di scariche elettriche. Per una più accurata valutazione di questo fenomeno si rimanda a siti specializzati. Il fenomeno caratteristico è la formazione di una sfera luminosa molto stabile. Lo spettro prodotto da questo fenomeno è continuo nella banda di sensibilità ottica della camera ccd. Applicando il metodo descritto si ottiene una temperatura spettrale pari a 991 °K; il fenomeno è apparentemente più "freddo" della fiamma di una candela dalla quale il fenomeno sembra generarsi. Visivamente il fenomeno luminoso si manifesta con delle colorazioni giallo scuro-arancione, quindi, senza avere nessun riferimento bibliografico di confronto, la temperatura calcolata sembra compatibile con l'osservazione visuale della colorazione. La figura 6 mostra il grafico del rapporto funzione di Planck a 5900°K con quella a 991 °K in rosso, e il rapporto tra gli spettri osservati e normalizzati del Sole e del fenomeno luminoso prodotto dal forno a microonde, in blu.

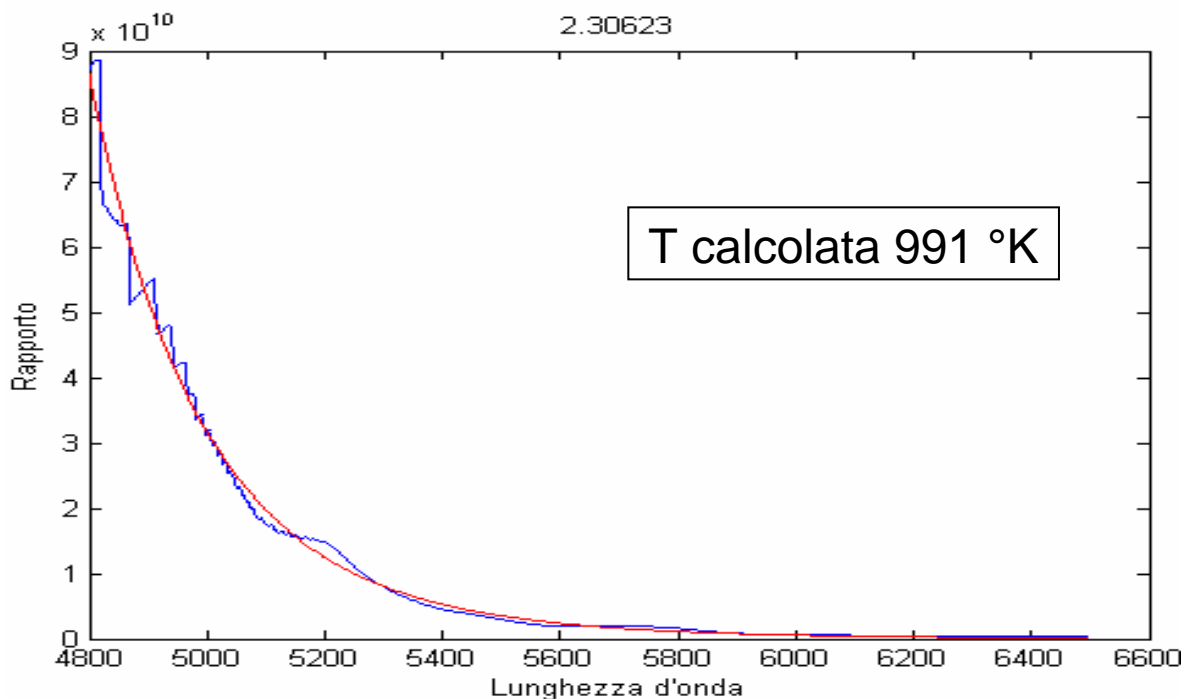


Figura 6

## **Conclusioni**

Il metodo proposto è stato concepito con l'idea di fornire uno strumento di analisi efficiente e pratico; sono stati eseguiti test numerici che hanno mostrato l'efficacia sia nei casi sintetici che in quelli reali; questi ultimi sembrano mostrare piccole deviazioni dalle curve teoriche imputabili ad effetti vari di distorsione degli spettri osservati, la cui origine non è ben chiara. Ma la valutazione della temperatura spettrale risulta compatibile con quella stimata per le sorgenti di cui si è fotografato lo spettro, inoltre il calcolo ottenuto da un processo di inversione non lineare è stabile producendo lo stesso risultato a prescindere dalla temperatura di partenza fissata per l'inizio del processo di calcolo. Per i calcoli è stato realizzato un software che richiede in ingresso esclusivamente due spettri di intensità in unità arbitrarie, acquisiti con uno stesso sistema, calibrati rispetto alla lunghezza d'onda della radiazione luminosa e per i quali sia nota la temperatura spettrale di una delle due sorgenti.

## **Ringraziamenti**

Desidero ringraziare tutte le persone che mi hanno stimolato nella realizzazione di questo lavoro, in particolare il coordinatore del Progetto-Sassalbo Marco Peruzzi (Mr. Spock) e Nicoletta Ricchetti (Mr. Picard, titolo conquistato per meriti sul campo sassalbino!). Un ringraziamento particolare al Dott. Massimo Teodorani per la sua consueta disponibilità e per la cortese revisione del lavoro.

## **Bibliografia**

Nicolosi, I. (2004) "Brevi note sull'analisi della natura dello spettro acquisito dal Team EMBLA 2002", [www.sassalboproject.com](http://www.sassalboproject.com)

VisualSpectrum : <http://astrosurf.com/vdesnoux/>

IRIS: <http://www.astrosurf.com/buil/>

Plasmi e forni a microonde: <http://www.powerlabs.org/uwavexp.htm>

<http://margo.student.utwente.nl/el/microwave/>

<http://www.angelfire.com/electronic/cwillis/microwave.html>