

Luce termica e luce coerente

- Nice Terzi
- Prof. Ord. in pensione
- Docente di *Fisica dello Stato Solido* alla Statale di Milano e a Milano-Bicocca (dal 1979 al 2009)
- Docente di *Fisica e sua didattica* alla SILSIS di Milano
- Coordinatore del Master *Didattica delle scienze* in Milano-Bicocca

Equazione di d'Alembert delle onde

SUONO

Eq. delle onde in un fluido.

Perché le onde propagino, il fluido deve possedere

elasticità [compressibilità $\kappa = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T$]

e inerzia [massa, densità $\rho_0 = \frac{\partial m}{\partial V}$]

In 1 dim (direz z) la varia \hat{z} nello spazio e nel tempo della pressione $p(z, t)$ obbedisce alle relazioni

$$\frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

Eq. di d'Alembert

con $\frac{1}{c^2} = \rho_0 \kappa$. c è una velocità: la velocità del suono

Equazione di d'Alembert delle onde

Date le forme dell'^{differenziale} equazione, tempo e spazio devono comparire in modo simmetrico e additivo nell'equazione finale

$$p = f(z \pm ct)$$

f funzione qualsiasi.

In particolare, esiste la famiglia delle fz trigonometriche

$$p = p_0 \cos 2\pi \left(\frac{z}{\lambda} \pm \frac{t}{T} + \alpha_0 \right)$$

λ lunghezza d'onda

T periodo dell'onda

$\nu \equiv \frac{1}{T}$ frequenza

$$c = \lambda/T = \lambda\nu$$

α_0 costante di fase

Onda monocromatica
di frequenza ν
di lunghezza d'onda λ

FORMA SINUSOIDALE

Radiazione e materia

- All'equilibrio termico ogni sistema materiale è schematizzabile in almeno due sottosistemi indipendenti: materia e radiazione.
- Lontano dalle transizioni di fase i due s.s. interagiscono debolmente nel senso che piccole perturbazioni dell'uno inducono piccole perturbazioni nell'altro.
- possibili altri s.s. (magnetico, ...)
- Ogni s.s. è termometro del sistema complessivo

il s.s. radiazione

- Ubiquamente presente: ogni corpo materiale emette radiazione e.m. e quindi è “sorgente di luce”.
- Nei testi di fisica se ne discute per la prima volta in terminologia nello studio sulla propagazione del calore (irraggiamento).
- Irraggiamento proposto per la prima volta da B. Thomson (lord Rumford) (vedi G.I. Brown ‘Count Rumford’)
- A temperature normali energia interna e calore specifico del s.s. radiazione sono molto minori di quelli del s.s. materiale e quindi si possono trascurare nei conti
- ma forse bisognerebbe introdurli da subito

il s.s. materiale

- I due s.s. radiazione e materia sono ognuno lo specchio, lo stampo, il complementare dell'altro
- L'indagine ottica dei materiali (indagine sul ss. radiazione) è l'indagine principe per carpire informazioni e conoscenze sul s.s. materiale
- Ovviamente lo spettro del s.s. radiazione cambia da un materiale all'altro

Caratterizzazione ottica dei materiali

- Ogni sistema materiale (atomo, molecola, aggregato, ..., gas, ... cristallo, ...) è caratterizzato otticamente non tanto dall'insieme dei suoi singoli livelli energetici quanto dal sistema di coppie che con tali livelli si possono formare.
- Ogni coppia è caratterizzata da una energia (distanza tra i livelli) e dalla probabilità di transizione radiativa: spettri di assorbimento o emissione continui e/o a righe
- Tale sistema di coppie è unico per ogni sostanza e la identifica e forma il cosiddetto spettro di....

sistema ideale

- In fisica si ha a che fare spesso con sistemi ideali che mettono in luce il comportamento che sottosta ai più complessi sistemi reali.
- Un sistema ideale è una semplificazione del mondo reale capace però di catturar caratteristiche e comportamenti salienti di una classe di fenomeni.
- Le leggi fenomenologiche che governano i sistemi ideali sono spesso espresse da relazioni significative e di solito abbastanza semplici.
- esempi: punto materiale, gas ideale, tavola di Mendeleiev, ...
- (J.S.Ridgen “Hydrogen” Harvard Un. Press 2002)

sorgente ideale :

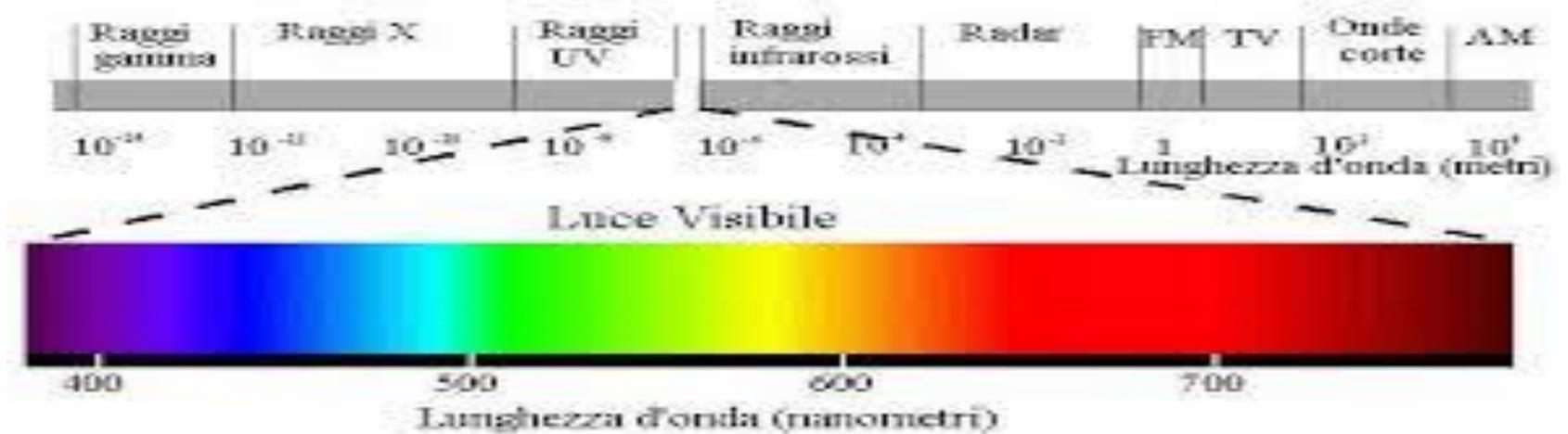
Corpo Nero e radiazione di Corpo Nero

- **RADIAZIONE DI CORPO NERO** : è quella formata dal s.s. radiazione di un corpo materiale capace di assorbire ed emettere tutte le radiazioni di tutte le lunghezze d'onda.
- E' questo il cosiddetto **CORPO NERO** (in inglese BlackBody), un materiale inesistente in quanto senza struttura energetica
- Corpi grigi e colorati sono i materiali reali con struttura energetica che causa (poco o tanto) la riflessione della luce. Il colore dipende da quale zona dello spettro riflette maggiormente
- Corpo Nero alla Kirkhoff

Legge della radiazione di corpo nero

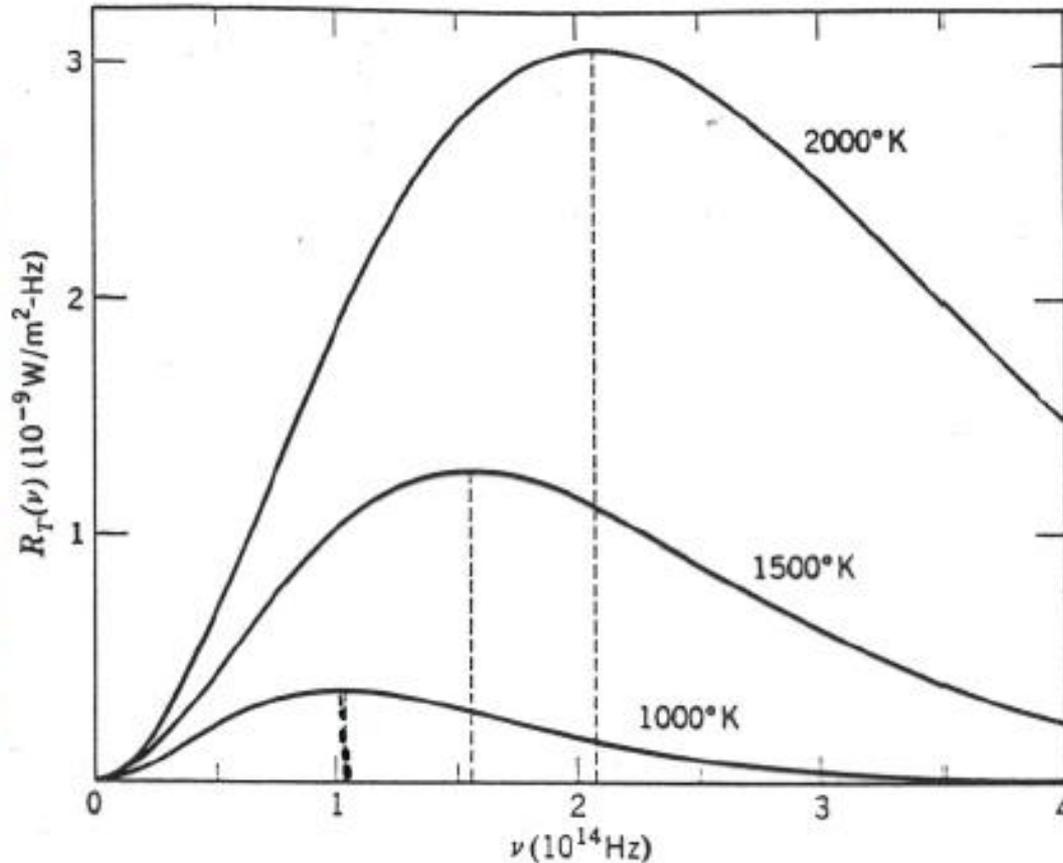
- Interpretazione di Planck: quantizzazione dell'energia della radiazione
 - Radiazione composta da fotoni di frequenza ν che possiedono energia $h\nu$ e momento $k = h/\lambda$
-
- Equazione di d'Alembert per i campi E e H nel vuoto
 - Soluzione generale dipendente da $(x \pm ct)$: impulso luminoso e pacchetti d'onda (*wave-packet*)
 - Matematica. Analisi di Fourier: scomposizione di ogni pacchetto in onde monocromatiche
 - Fisica. Valore fisico delle singole onde che compongono ogni pacchetto d'onda

Spettro in lunghezze d'onda delle onde elettromagnetiche



Radiazione di corpo nero (C.N.)

RADIANZA SPETTRALE



$$4.3 \cdot 10^{14} \text{ Hz} < \nu_{\text{vis}} < 7.5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

$$400 \text{ nm} < \lambda_{\text{vis}} < 700 \text{ nm}$$

$$R_T(\nu) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \left(\frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} \right)$$

$$\lambda_{\text{max}}(1000 \text{ K}) = 2900 \text{ nm}$$

Figure 1-1 The spectral radiance of a blackbody radiator as a function of the frequency of radiation, shown for temperatures of the radiator of 1000°K, 1500°K, and 2000°K. Note that the frequency at which the maximum radiance occurs (dashed line) increases linearly with increasing temperature, and that the total power emitted per square meter of the radiator (area under curve) increases very rapidly with temperature.

Legge dello spostamento di Wien del C.N.

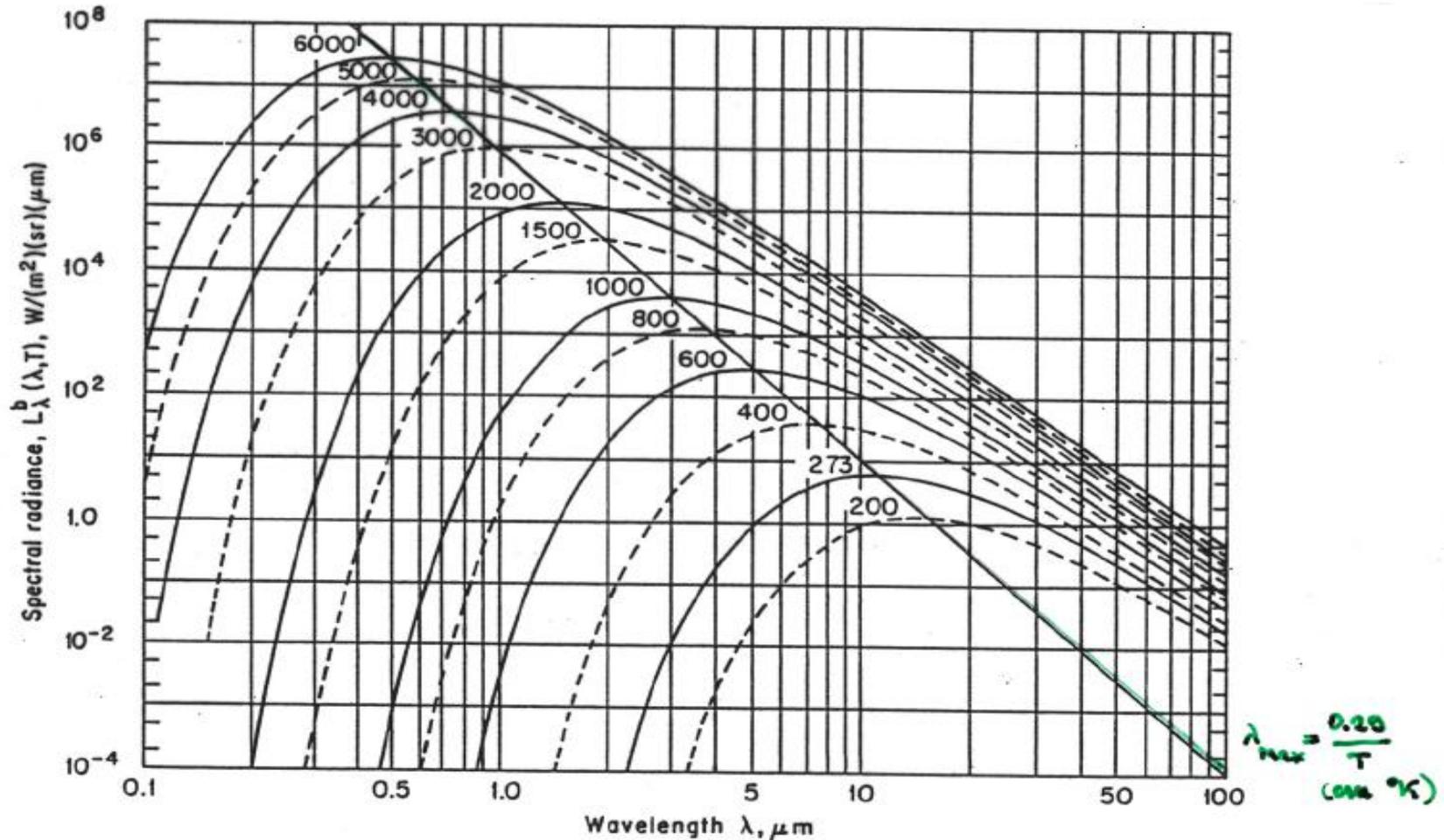


Fig. 4 Spectral radiance L_{λ}^b of a blackbody at the temperature in kelvins shown on each curve. The diagonal line intersecting each curve at its maximum shows Wien's displacement law. Subdivisions of the ordinate scale are at 2 and 5.

esempi di radiazione di corpo nero

- Illustrazione libri di testo
- fornace
- ...

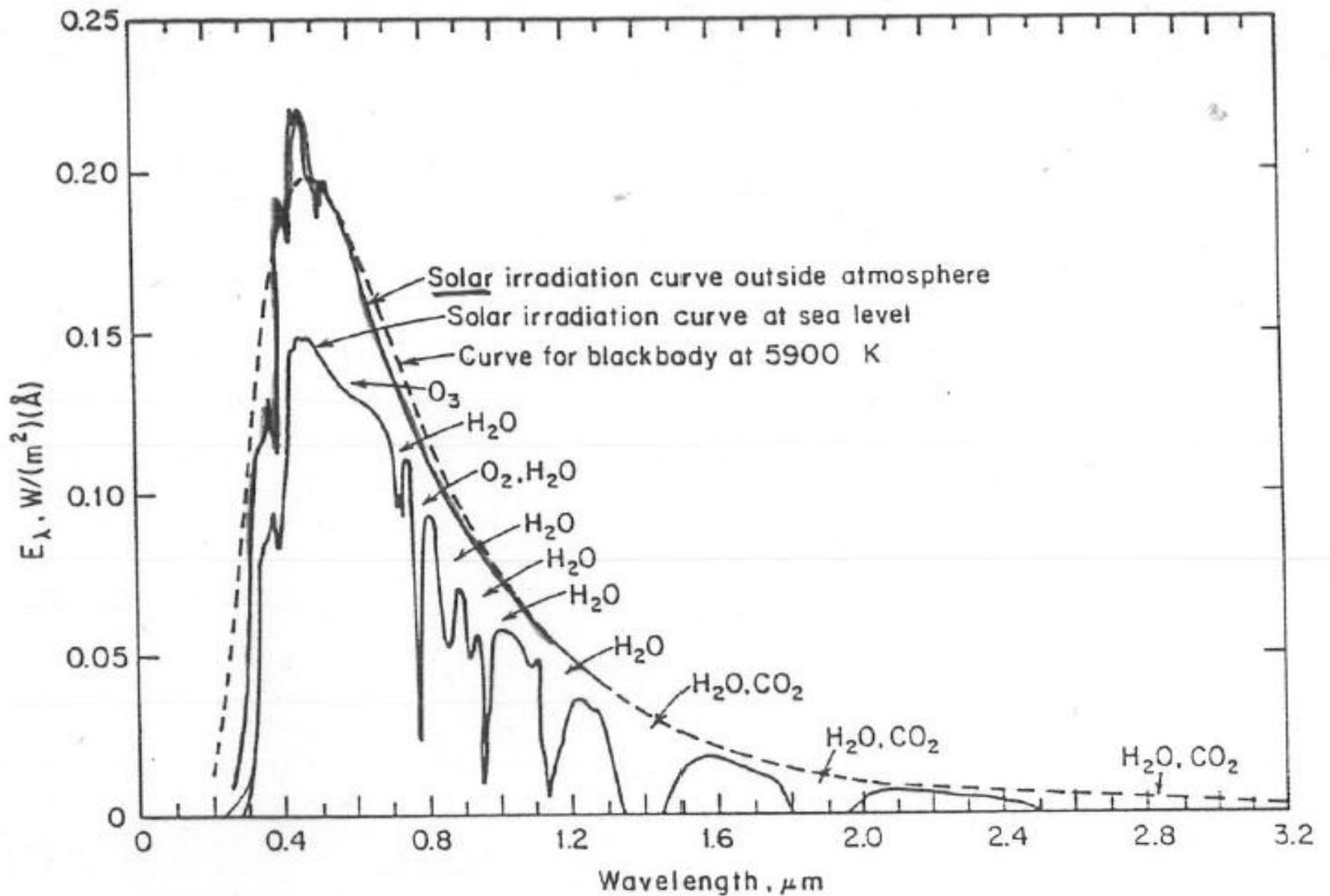
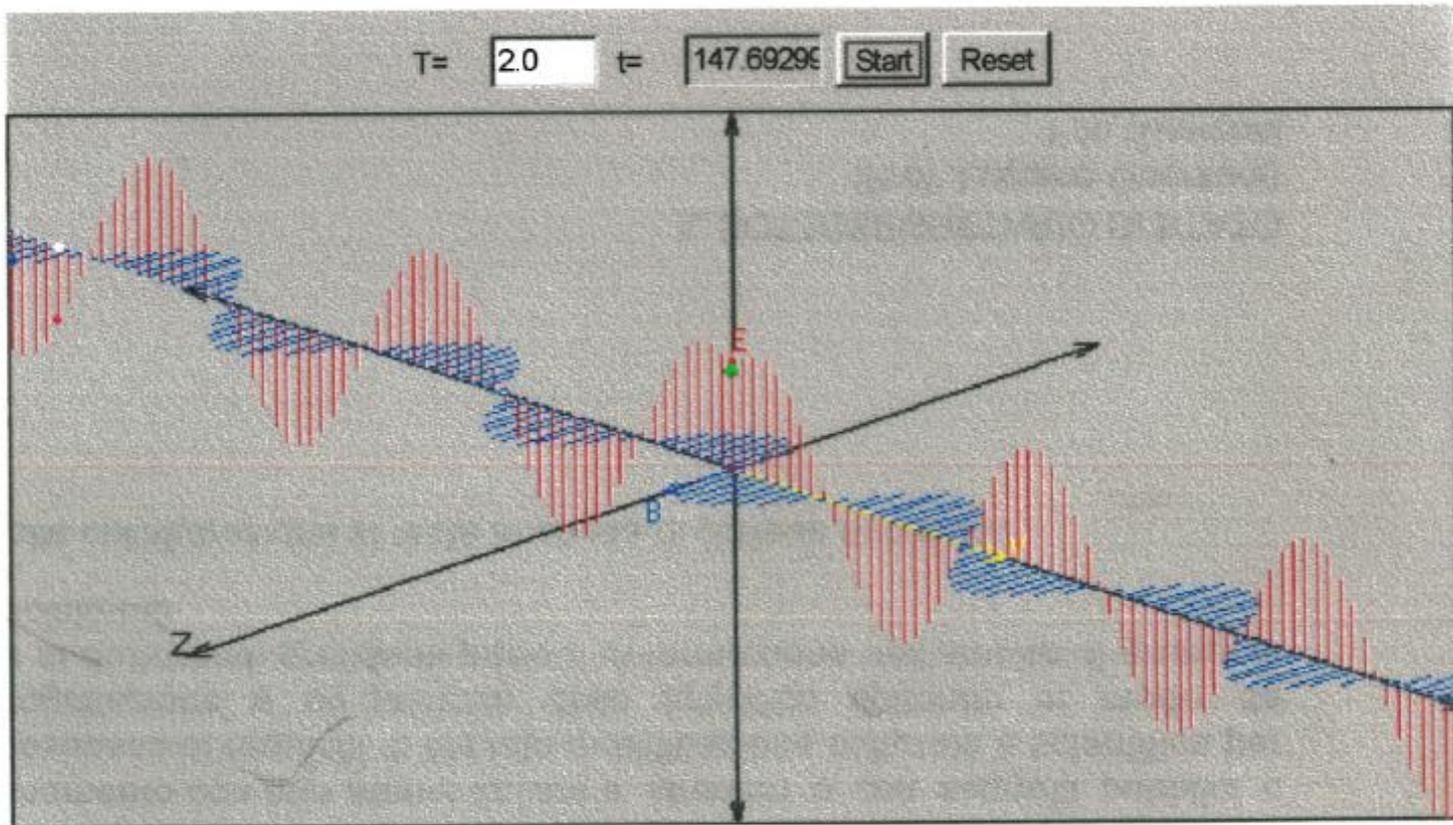


Fig. 51 Spectral distribution curves related to the sun; shaded areas indicate absorption at sea level due to the atmospheric constituents shown. [Valley (1965).]

dal sito www.lucevirtuale.net



Legenda

T = periodo di propagazione dell'onda

t = tempo trascorso dall'inizio dell'esperimento (in secondi)

Start = avvia l'animazione

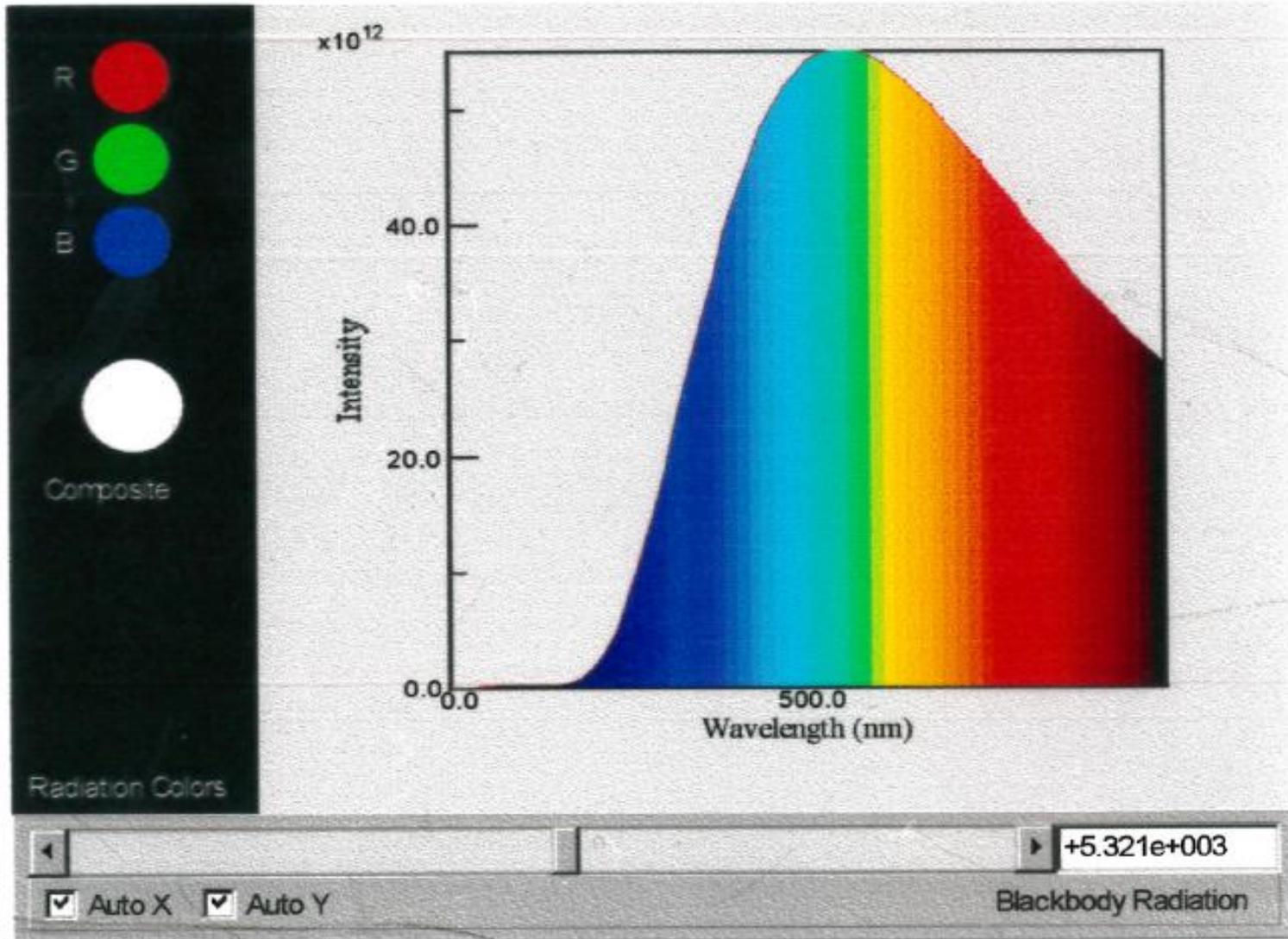
Reset = azzera i parametri

\mathbf{E} = vettore campo elettrico

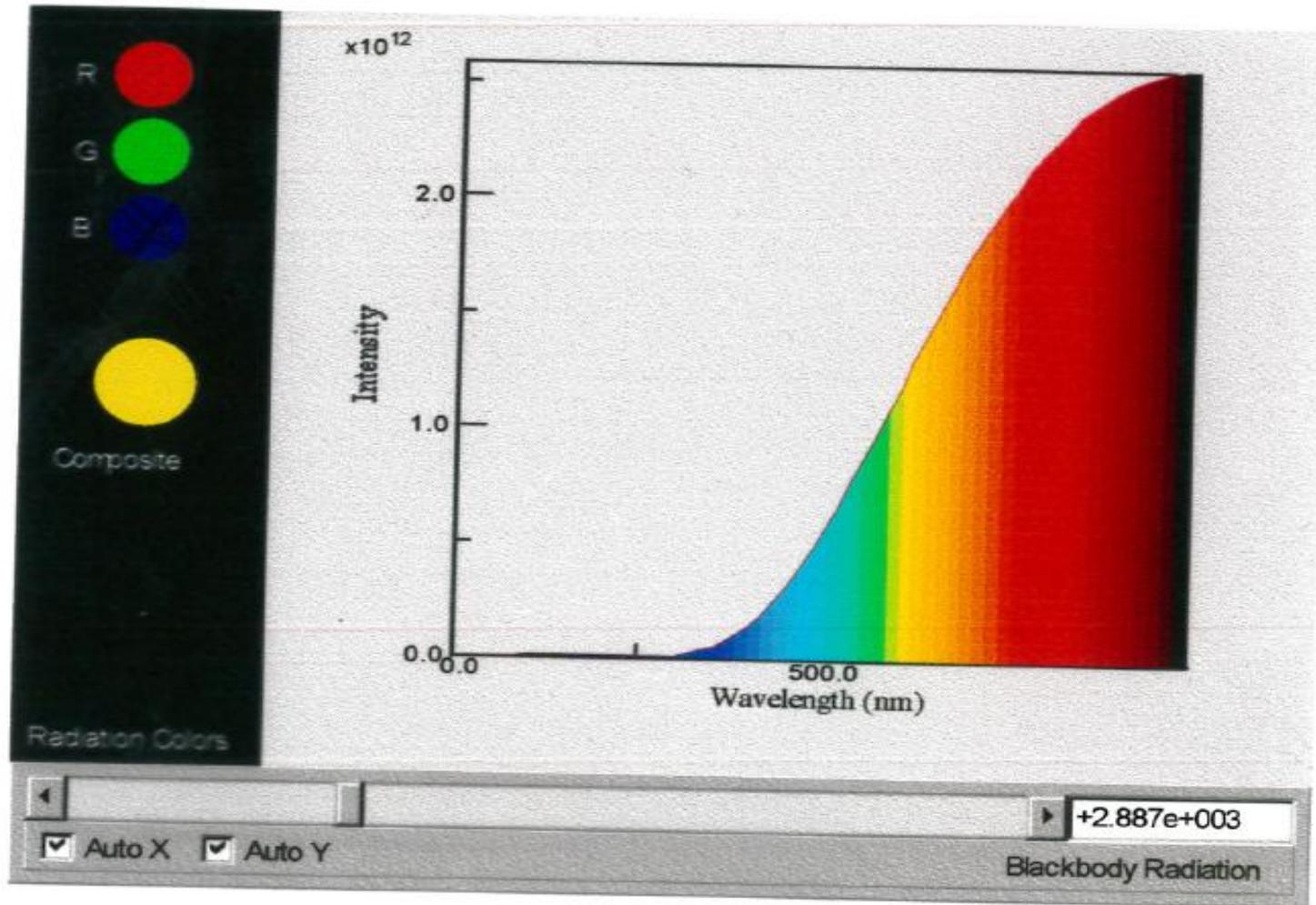
\mathbf{B} = vettore campo magnetico

\mathbf{v} = vettore d'onda

dal sito www.lucevirtuale.net



dal sito www.lucevirtuale.net



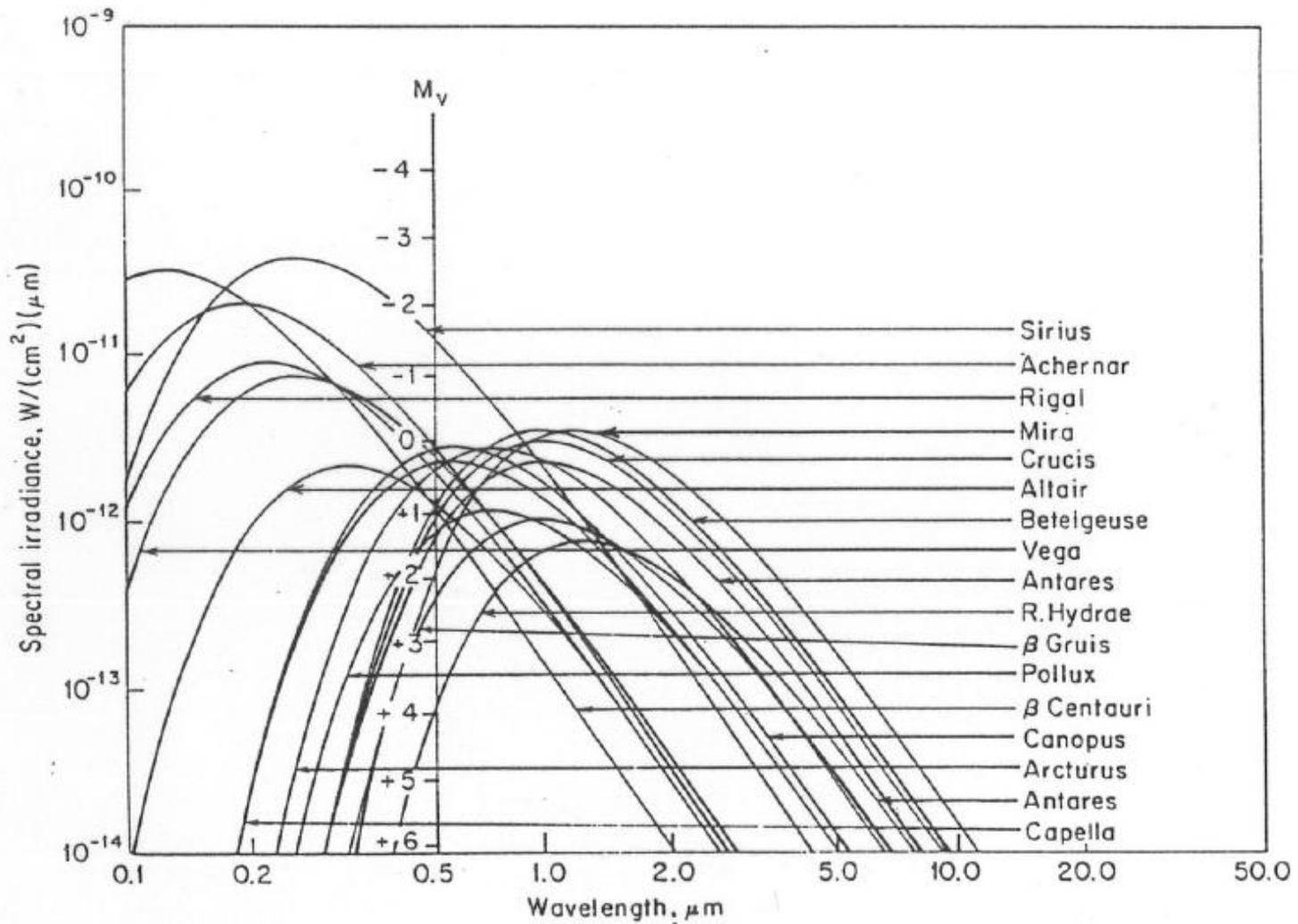


Fig. 55 Calculated irradiance from brightest stars at top of the atmosphere. [Ramsay (1962).]

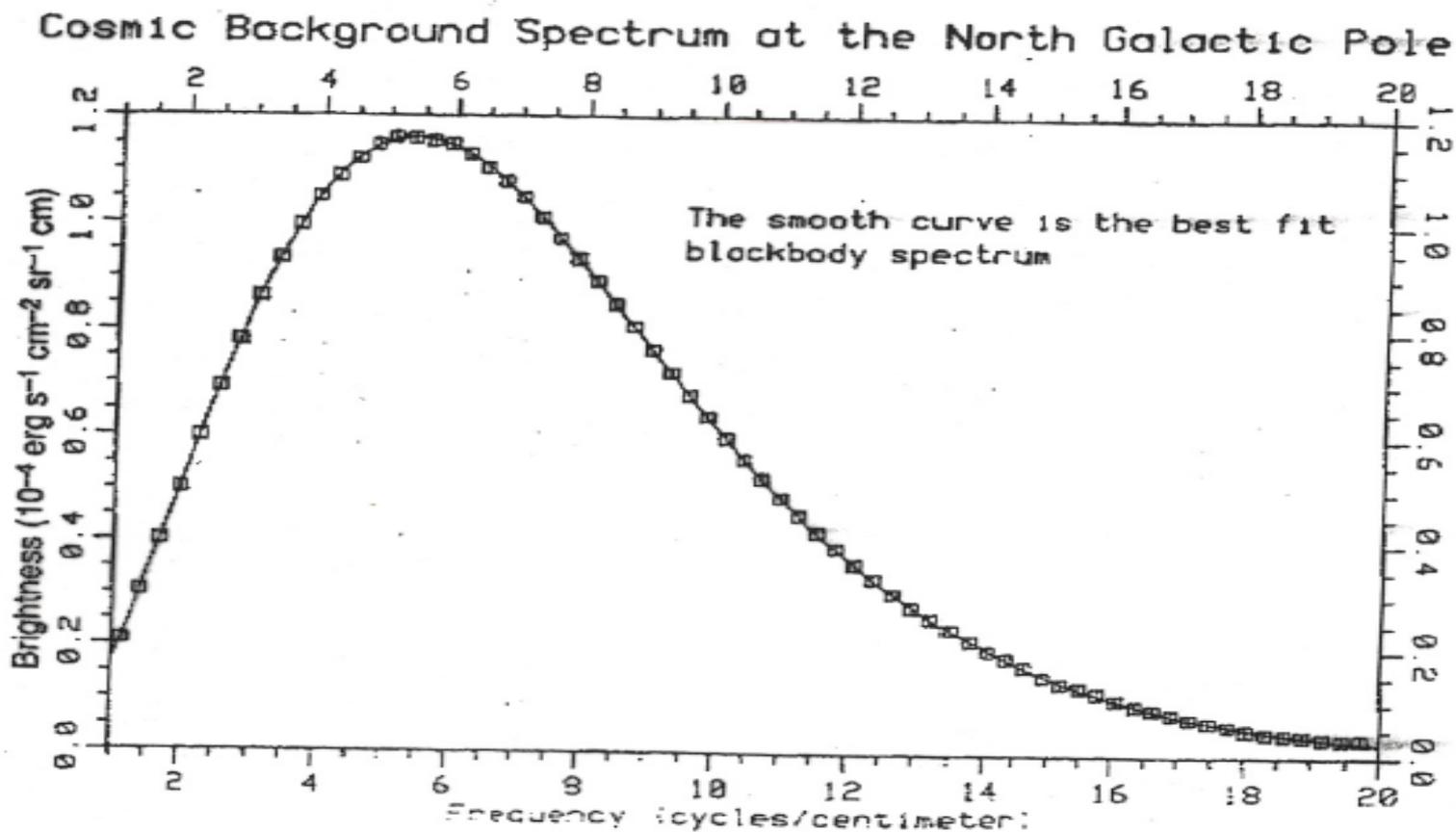


Fig. 4.25 The CBR spectrum from 0.05 to 1.0 cm as measured by FIRAS (points with 2% error boxes) compared to a blackbody curve with $T_0 = 2.735$ K (line). No evidence of spectral distortions in this wavelength range is present. Mather et al. (1990).

Il SOLE e il suo irraggiamento

COLORI

GIALLO: $0.58 \mu\text{m}$
(TERRA DI SIENA)

VERDE → GIALLO:
 $0.54 \mu\text{m}$

BLU: $0.45 \mu\text{m}$

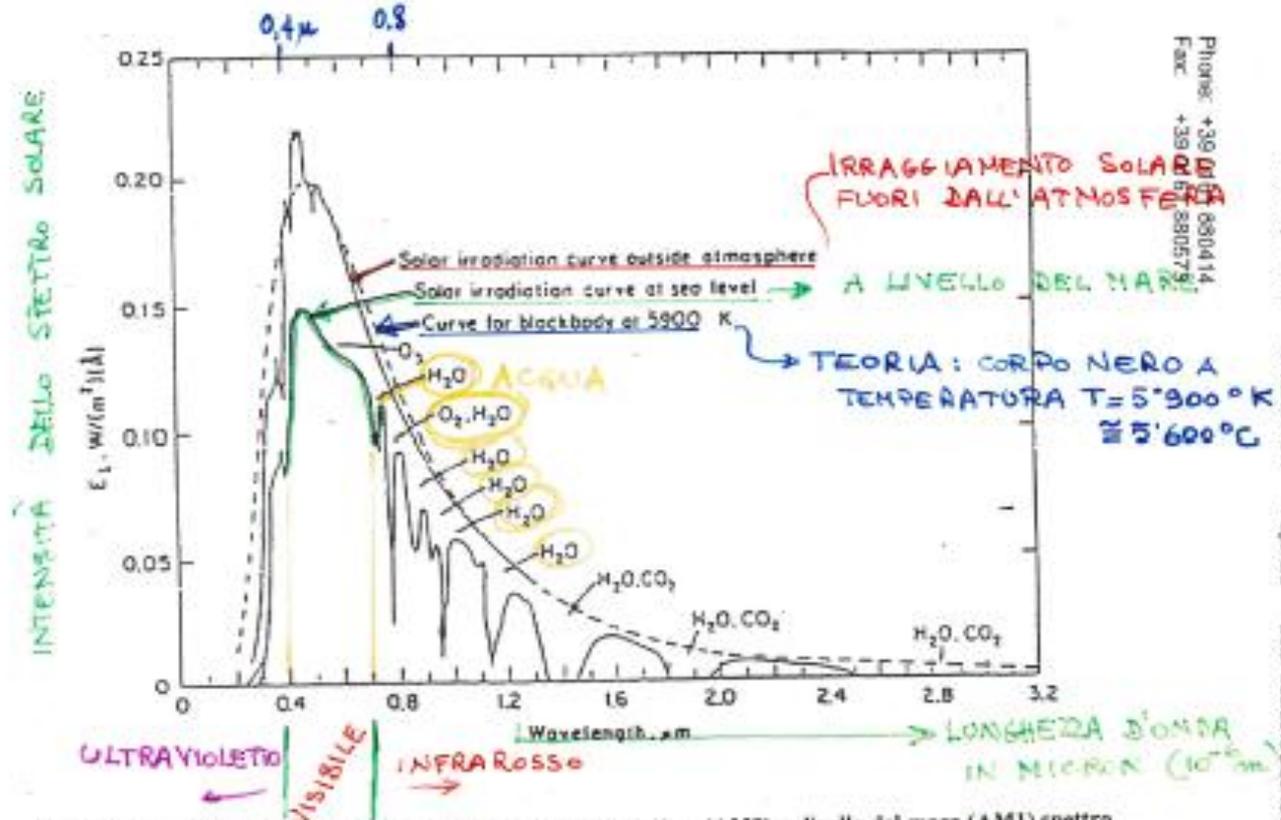
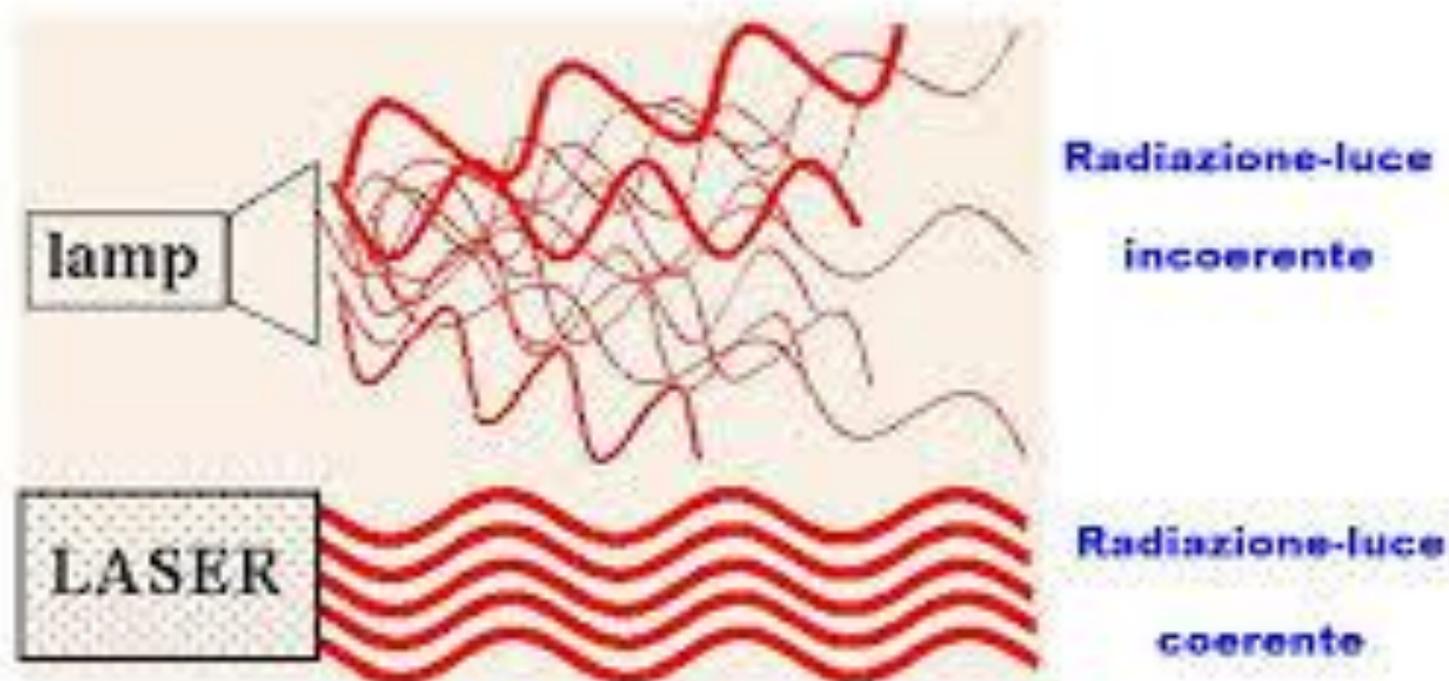


Figura I.1.1 Andamento dello spettro solare fuori dall'atmosfera (AM0), a livello del mare (AM1), spettro del corpo nero per $T=5900\text{k}$.

disordine vs ordine

- Luce emessa da una sorgente termica: disordine spaziale (i fotoni vengono emessi a caso qua e la') e temporale (imprevedibile il momento in cui ogni elettrone eccitato ritorna spontaneamente allo stato fondamentale o a un livello di energia inferiore)
- Luce emessa da una sorgente laser: ordine spaziale e temporale. Un numero cospicuo di elettroni (ordine o quasi-ordine spaziale) viene stimolato a decadere contemporaneamente allo stato fondamentale.
- I fotoni emessi sono legati in fase e formano un fascio, o pacchetto di onde, coerente



onde monocromatiche coerenti:

**lunghezza d'onda λ fissa e fasi relative fissate =
Tantissime sinusoidi tutte identiche sovrapposte**

a) assorbimento,
b) emissione spontanea
c) emissione stimolata
(Albert Einstein 1917)

- Einstein propose che nella formazione di una linea atomica spettrale concorrono tre processi: emissione spontanea, stimolata, e assorbimento,
- A ciascuno di essi è associato un coefficiente (di Einstein) che è una misura della probabilità che quel processo abbia luogo.

- L'emissione spontanea (già nota ai tempi di Einstein) è il processo per cui un elettrone decade spontaneamente (ossia in assenza di perturbazioni esterne) da un livello di energia E_2 a uno E_1 ($E_1 < E_2$), vuoto, emettendo un fotone di energia $h\nu = E_2 - E_1$.
- La fase e la direzione (tradotta dal momento o quantità di moto $k = h/\lambda = h\nu/c$) del fotone emesso sono completamente casuali.

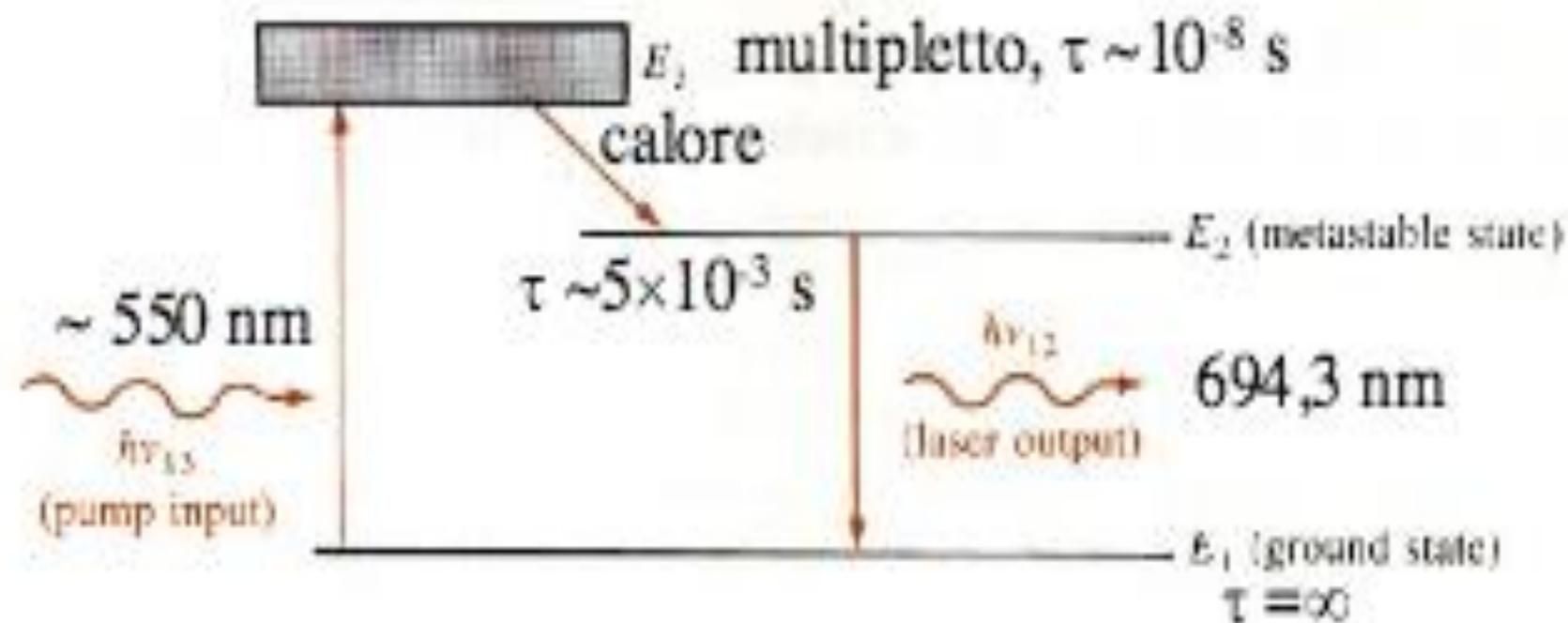
Emissione stimolata (nota anche come emissione indotta, ignota ai tempi di Einstein): è il processo per cui un elettrone è indotto a transire da un livello di energia E_2 a uno di energia E_1 ($< E_2$) dalla presenza di un campo e.m. di energia pari (o vicina) alla differenza di energia fra i due livelli, $h\nu = E_2 - E_1$

- Il secondo fotone creato è totalmente coerente con il primo: ha lo stesso momento, fase, frequenza, e polarizzazione del fotone incidente.

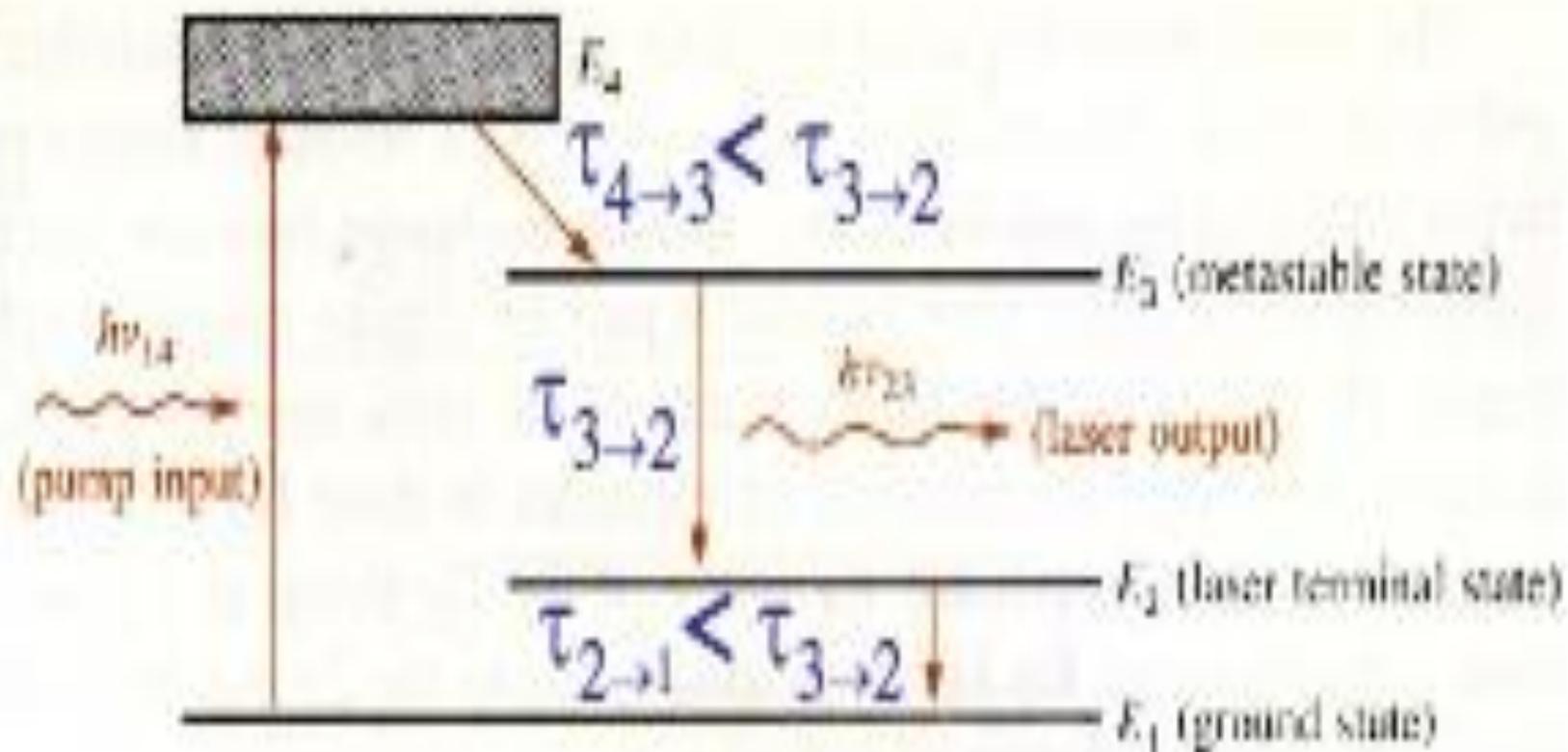
Condizioni necessarie per un Laser

- 1) **Inversione di popolazione**
- L'emissione stimolata deve essere maggiore dell'assorbimento: si devono ottenere condizioni di inversione di popolazione
- 2) **Cavità risonante**
- L'emissione stimolata deve essere maggiore anche della emissione spontanea: necessita di una cavità risonante
- Alta T e bassa energia del campo e.m. favoriscono il raggiungimento di queste due condizioni, ma non sono necessarie.

Inversion di popolazione, sistema a tre livelli



Laser a quattro livelli



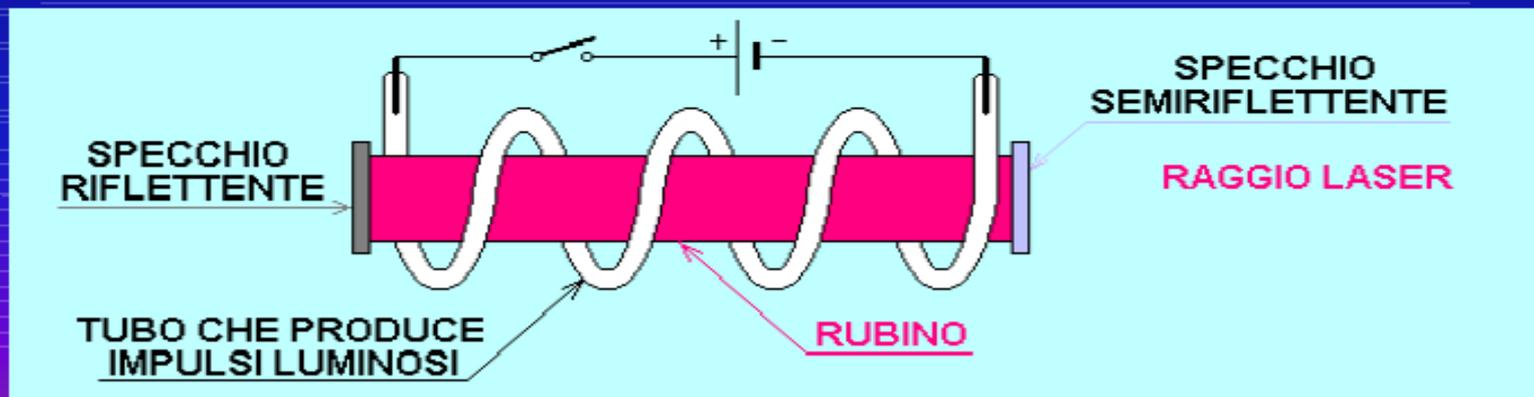
Condizioni necessarie per un Laser

- 1) Inversione di popolazione
- L'emissione stimolata deve essere maggiore dell'assorbimento: si devono ottenere condizioni di inversione di popolazione
- 2) **Cavità risonante**
- L'emissione stimolata deve essere maggiore anche della emissione spontanea: necessita di una cavità risonante
- Alta T e bassa energia del campo e.m. favoriscono il raggiungimento di queste due condizioni, ma non sono necessarie.

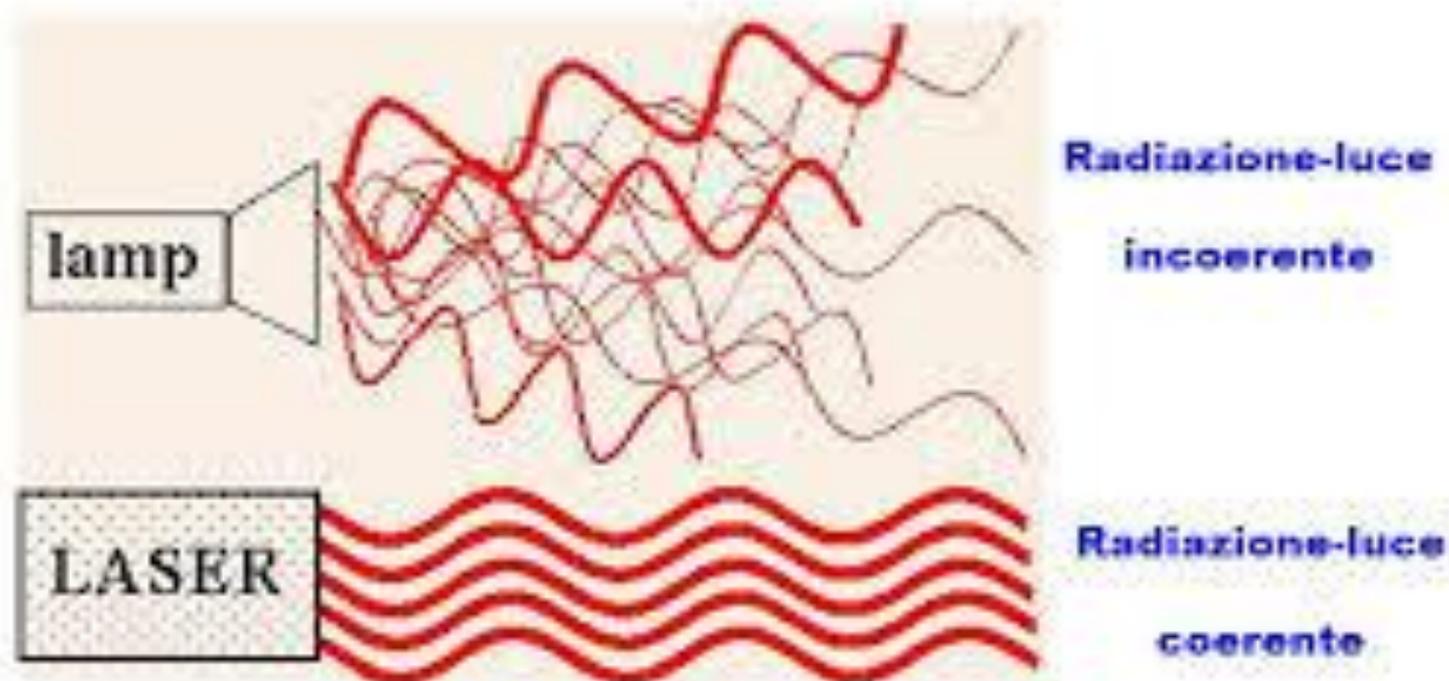
Laser a rubino

PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

I primi **LASER** sperimentali, utilizzavano come materia prima un **rubino**, cioè una pietra preziosa di colore rosso intenso, posto fra due specchi paralleli e circondato da un tubo di vetro contenente gas che veniva sottoposto a scariche luminose di tipo impulsivo.



- **Pompa.** Una sorgente esterna di energia stimola transizioni degli atomi dallo stato fondamentale a uno stato eccitato, creando una inversione di popolazione.
- **Stimolo.** Quando un campo e.m. con fotoni di energia pari alla differenza di energia dei due livelli in questione interagisce con questi atomi a popolazione invertita, i fotoni stimolano gli atomi eccitati a emettere altri fotoni coerenti con loro dando luogo a una amplificazione della intensità del campo e.m.



onde monocromatiche coerenti:

**lunghezza d'onda λ fissa e fasi relative fissate =
Tantissime sinusoidi tutte identiche sovrapposte**

Stati coerenti in Quantum ElectroDynamics (QEM)

(solo due frasi)

- La luce emessa da un laser forma un pacchetto d'onda coerente di fotoni, dove la coerenza (cioè la relazione di fase) è tra gli autostati dell'oscillatore armonico che formano il pacchetto
- Questo pacchetto d'onda viene talvolta chiamato stato coerente alla Glauber.
- In realtà era già stato proposto da Schroedinger come esempio di pacchetto d'onda a minima indeterminazione, con comportamento quasi classico.
- Seconda quantizzazione