

## Diapositiva 1



Unità Didattica 1

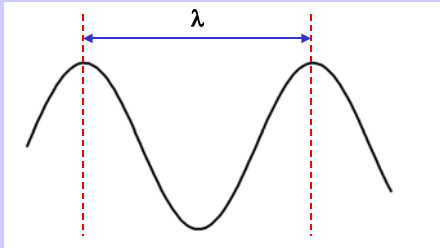
La radiazione di Corpo Nero



Questa unità contiene informazioni sulle proprietà del corpo nero, fondamentali per la comprensione dei meccanismi di emissione delle sorgenti astronomiche, e un breve riassunto storico sul percorso seguito dagli scienziati per giungere ad alcune fra le scoperte più importanti di sempre.

## Diapositiva 2

L'Onda Elettromagnetica

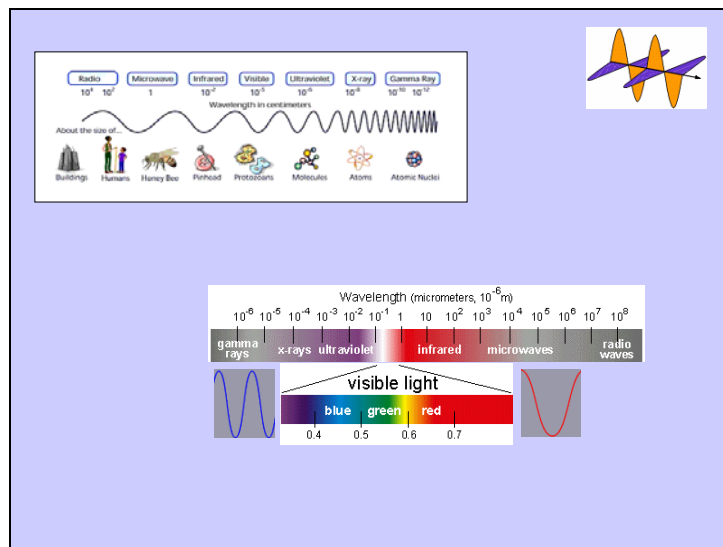


$\lambda$  = lunghezza d'onda  
 $\nu$  = frequenza  
 $c$  = velocità della luce = 300 000 km/s

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

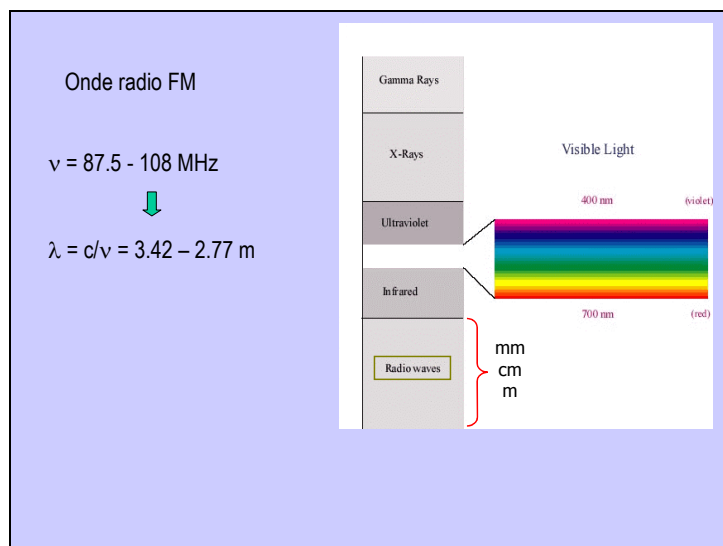
E' noto che la luce, o radiazione elettromagnetica, si propaga sottoforma di onde. Un'onda è caratterizzata da due parametri legati fra loro: la lunghezza d'onda ( $\lambda$ ), definita come la distanza fra due "creste" o massimi di oscillazione, e la frequenza ( $\nu$ ), definita come il numero di oscillazioni al secondo. Queste due quantità sono legate dalla velocità della luce nel vuoto che vale circa 300 000 km/s, in modo tale che onde corte corrispondono a onde ad alta frequenza e onde lunghe corrispondono a onde a bassa frequenza.

### Diapositiva 3



Queste figure illustrano lo spettro elettromagnetico, che si estende dai raggi gamma ad altissima frequenza fino alle onde radio a bassa frequenza. L'intervallo di lunghezza d'onda corrispondenti alla luce cosiddetta visibile è molto piccolo e compreso fra circa 0.3 e 0.8 micron.

### Diapositiva 4




Esempio di trasformazione da frequenze radio in lunghezze d'onda.

## Diapositiva 5

### Il Corpo Nero

Esperienza:  
un corpo solido freddo non produce alcuna emissione, ma al crescere della temperatura comincia a diventare **luminoso** e a cambiare **colore**

Esempio:  
un metallo che diventa incandescente cambia il suo colore e diventa prima rosso, poi arancione, e infine di un giallo-bianco abbagliante



## Diapositiva 6

Un **corpo nero** è un oggetto **teorico** che assorbe il 100% della radiazione che incide su di esso. Perciò non riflette alcuna radiazione e appare perfettamente nero.

In pratica :

- nessun materiale assorbe tutta la radiazione incidente
- la grafite ne assorbe il 97%
- la grafite è anche un perfetto emettitore di radiazione

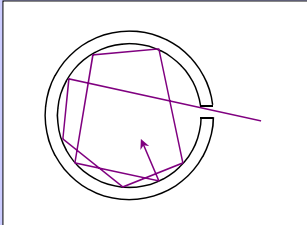
## Diapositiva 7

Un corpo nero riscaldato ad una temperatura sufficientemente elevata **emette** radiazioni

L' **energia emessa** è totalmente **isotropa** e dipende solo dalla **temperatura** del corpo e non dalla sua forma o dal materiale di cui è costituito

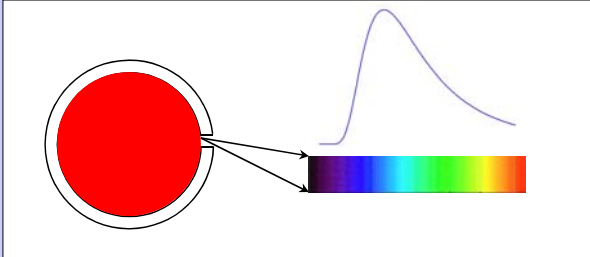
L'energia emessa da un corpo nero riscaldato ad una certa temperatura  $T$  viene chiamata :  
**radiazione di corpo nero**

## Diapositiva 8



Esempio di corpo nero emittente:  
la **fornace**

L'energia entra da un piccolo foro e viene assorbita dalle pareti della fornace che si riscaldano ed emettono radiazione



The diagram shows a red circle representing a black body. Two arrows point from the circle to a horizontal rainbow spectrum bar, indicating the emission of electromagnetic radiation across a range of wavelengths.

## Diapositiva 9

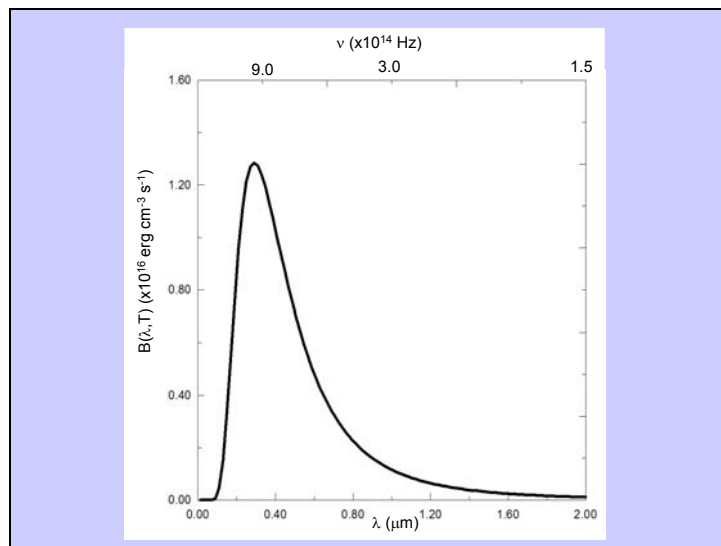
### Funzione di Planck

Facendo passare la radiazione emessa da un corpo a temperatura  $T$  attraverso uno spettrografo e misurando l'intensità dell'energia alle varie lunghezze d'onda si osserva uno spettro riprodotto dalla **funzione di Planck**

$$B(\lambda, T) = \frac{3.742 \cdot 10^{-5}}{\lambda^5 \cdot \left( e^{\frac{1.439}{\lambda T}} - 1 \right)} \text{ erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$$

$\lambda$  in cm  
 $T$  in K

## Diapositiva 10



Questo grafico rappresenta l'andamento della funzione di Planck per un corpo nero ad una certa temperatura. In ascissa ci sono la lunghezza d'onda in unità di micron e in ordinata il valore della funzione in unità di  $10^{16} \text{ erg/cm}^3/\text{s}$ . In alto sono riportati i corrispondenti valori in frequenza della radiazione, in unità di  $10^{14} \text{ Hz}$ . Come si nota, la funzione di Planck ha un massimo di emissione molto ben definito, con l'intensità che cresce molto rapidamente alle lunghezze d'onda più corte e diminuisce più lentamente alle lunghezze d'onda maggiori.

## Diapositiva 11

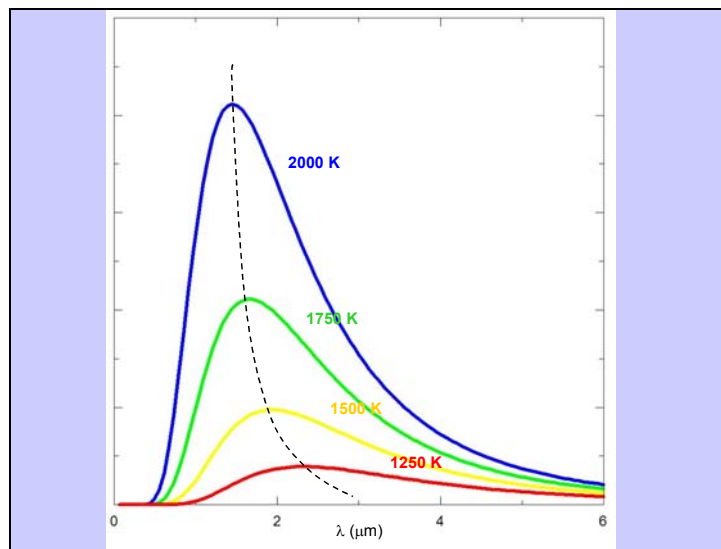
### Legge di Wien

Lo spettro di emissione del corpo nero mostra un **massimo di energia** ad una certa lunghezza d'onda ( $\lambda_{\max}$ )

All'**aumentare** della temperatura T del corpo, la lunghezza d'onda del massimo di emissione **decrece**

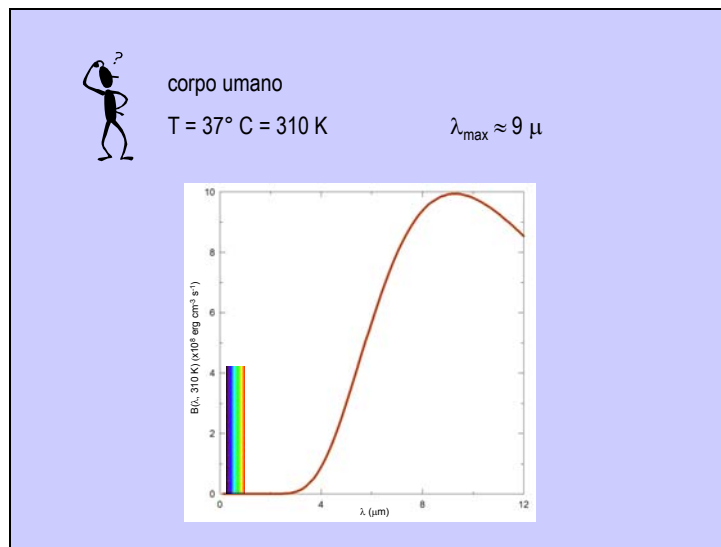
$$\lambda_{\max} = \frac{0.2898}{T} \text{ cm}$$

## Diapositiva 12



Questo grafico rappresenta la funzione di Planck per un corpo nero a quattro temperature diverse, crescenti dalla curva rossa a 1250 K fino alla curva blu a 2000 K. Il grafico dimostra lo spostamento del massimo di emissione verso lunghezze d'onda più corte all'aumentare della temperatura.

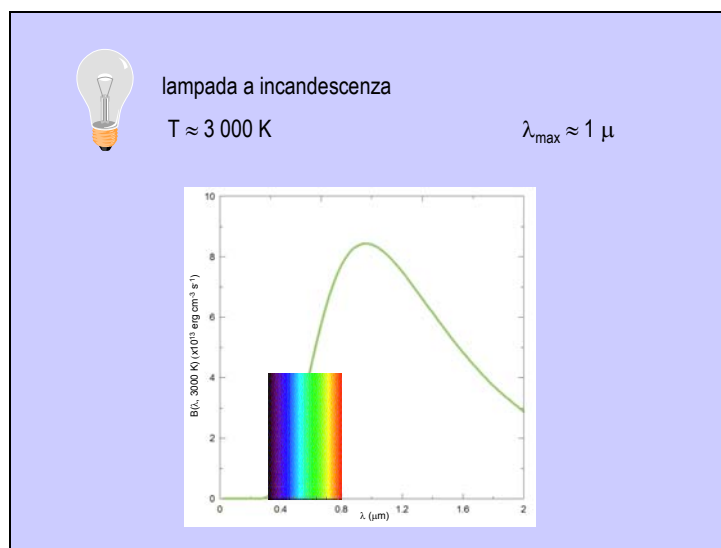
### Diapositiva 13



La funzione di Planck per un corpo nero che emette alla temperatura del corpo umano. Il massimo di emissione si ha a circa 9 micron, mentre al di sotto di 3 micron non c'è praticamente alcuna emissione. Infatti al buio una persona risulta invisibile, mentre diventa visibile con un sensore di luce infrarossa.

Le ordinate sono espresse in unità di  $10^8 \text{ erg/cm}^3/\text{s}$ .

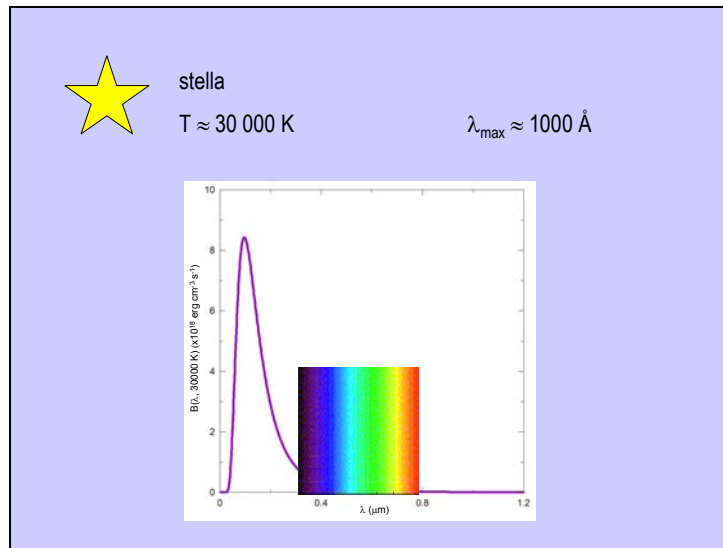
### Diapositiva 14



La funzione di Planck per un corpo nero che emette alla temperatura di una lampadina a incandescenza. Di nuovo, il massimo di emissione è collocato nell'infrarosso, eppure la lampadina emette luce visibile. Questo è possibile perché come si vede dal grafico la funzione si estende fino a 0.3 micron, includendo l'intervallo di lunghezza d'onda visibile. Quindi solo una frazione della radiazione globale emessa dalla lampadina è luce visibile.

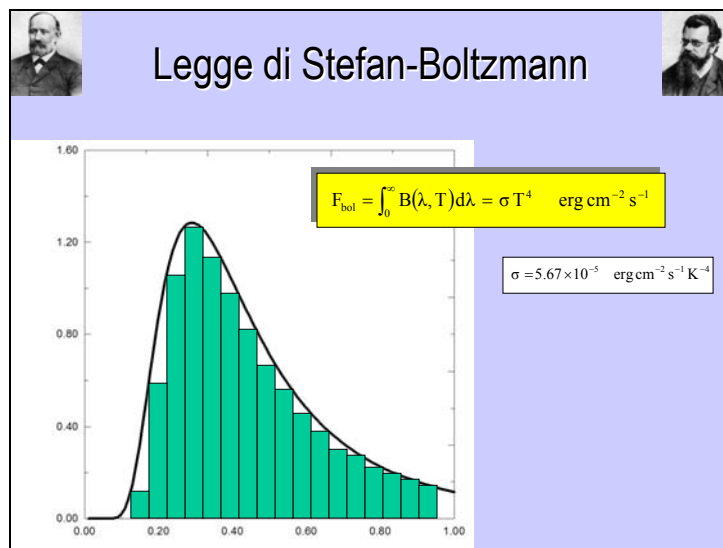
Le ordinate sono espresse in unità di  $10^{13} \text{ erg/cm}^3/\text{s}$ , valori centomila volte superiori a quelli del caso precedente.

Diapositiva 15



La funzione di Planck per un corpo nero che emette alla temperatura superficiale di una stella molto calda. Questa volta il massimo di emissione cade nell'ultravioletto. La stella risulta visibile ad occhio perché la funzione si estende fino all'infrarosso e oltre con emissione decrescente, ma pur sempre con valori molto alti. Le ordinate sono espresse in unità di  $10^{18}$  erg/cm<sup>3</sup>/s, valori dieci miliardi di volte superiori a quelli del primo esempio.

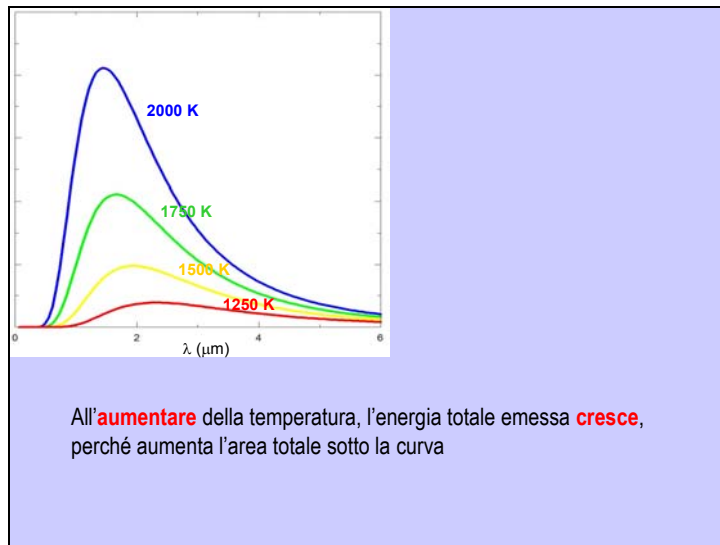
Diapositiva 16



Abbiamo appena visto che all'aumentare di  $T$  non solo diminuisce il valore di  $\lambda_{\text{max}}$ , ma accade anche che la funzione di Planck assume valori con intensità rapidamente crescente. Se sommiamo i valori della funzione ad ogni lunghezza d'onda, otteniamo il flusso globale di energia, cioè la quantità di energia emessa dall'unità di superficie nell'unità di tempo. Questo è possibile calcolando l'integrale di  $B(\lambda, T)$ , che nel grafico è rappresentato tramite l'approssimazione dei rettangoli, e si ottiene una semplicissima soluzione, secondo cui il flusso è proporzionale alla quarta potenza della temperatura. Questo risultato è noto come legge di Stefan-Boltzmann.



## Diapositiva 17

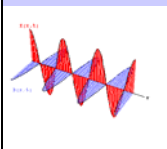


## Diapositiva 18

### Note storiche

Già nel XIX secolo i fisici tentavano di ricavare una teoria che fosse in grado di predire lo spettro della radiazione emessa da un corpo nero

Applicando le leggi di **Maxwell** dell'**elettromagnetismo classico** si otteneva che l'intensità della radiazione emessa da un corpo nero ad una certa temperatura dipendeva dall'inverso della quarta potenza della lunghezza d'onda




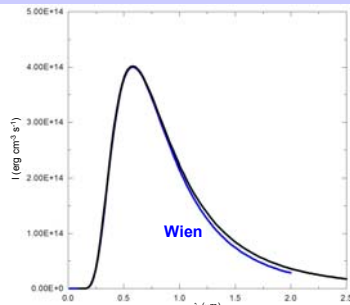
$$I \propto \frac{1}{\lambda^4}$$



Diapositiva 19

**Wilhelm Wien** trattò la radiazione all'interno di una cavità in modo analogo a un **gas di molecole** e riuscì a riprodurre l'andamento generale della curva di corpo nero, inclusa la presenza di un massimo di emissione, ma la sua teoria falliva nel riprodurre i dati sperimentali alle grandi lunghezze d'onda



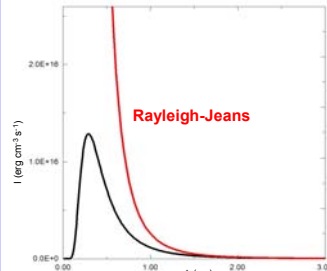
$$u(\lambda, T) = \frac{A}{\lambda^5} e^{-\frac{B}{\lambda T}} \text{ erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$$


Diapositiva 20

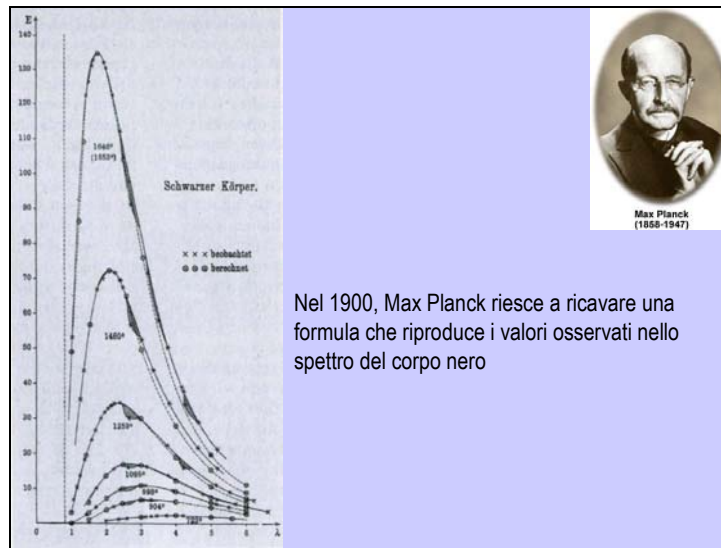
Un altro tentativo fu fatto da **Lord Rayleigh** e **James Jeans**, i quali considerarono la radiazione all'interno di una cavità come costituita da una certo numero di **onde stazionarie**. Il loro risultato riproduceva bene la curva di corpo nero alle grandi lunghezze d'onda, ma falliva alle lunghezze d'onda corte e non mostrava nessun massimo di emissione

$$I = \frac{2\pi ckT}{\lambda^4} = 2.6 \cdot 10^{-5} \frac{T}{\lambda^4} \text{ erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$$

**Costante di Boltzmann**

$$k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1} = 1.38 \cdot 10^{-16} \text{ erg K}^{-1}$$


Diapositiva 21



Nel 1900, Max Planck riesce a ricavare una formula che riproduce i valori osservati nello spettro del corpo nero

Diapositiva 22

$$B(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/k\lambda T} - 1} \quad \text{erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$$

$$B(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad \text{erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$$

$$h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} = 6.63 \cdot 10^{-27} \text{ erg s}$$

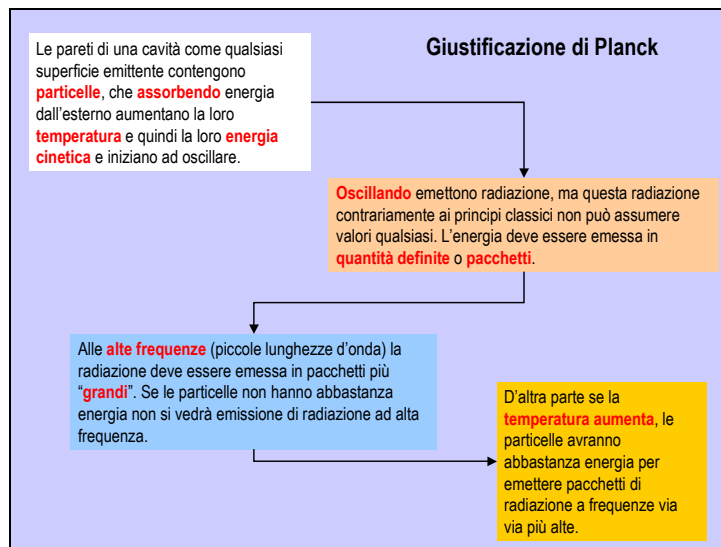
**Costante di Planck**

$$\lim_{\lambda \rightarrow \infty} B(\lambda, T) = 2\pi ck \frac{T}{\lambda^4} \rightarrow \text{Rayleigh-Jeans}$$

$$\lim_{\lambda \rightarrow 0} B(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} e^{-\frac{hc}{k\lambda T}} \rightarrow \text{Wien}$$

In alto le formule della legge di Planck in funzione della lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) o della frequenza ( $\nu$ ). La costante  $h$  è chiamata costante di Planck,  $c$  è la velocità della luce. Se calcoliamo l'andamento della legge di Planck alle grandi lunghezze d'onde, otteniamo l'approssimazione di Rayleigh-Jeans, mentre alle lunghezze d'onda corte abbiamo l'approssimazione di Wien.

## Diapositiva 23



## Diapositiva 24

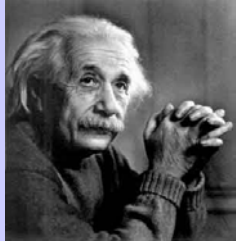
Qual è il legame fra la dimensione dei pacchetti (E) e la frequenza della radiazione emessa ( $\nu$ ) ?

Wien  $\rightarrow$   $\lambda_{\max} \propto \frac{1}{T} \Rightarrow \nu_{\max} \propto T$

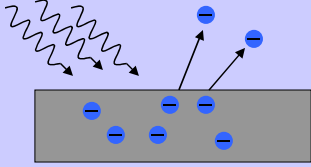
- Se la temperatura raddoppia, anche la frequenza a cui gli oscillatori producono la massima energia raddoppia
- Se la temperatura raddoppia anche la dimensione dei pacchetti di energia emessa raddoppia

$E = h \cdot \nu$

## Diapositiva 25



Nel 1905 Einstein conferma l'idea di Planck spiegando l'effetto fotoelettrico e mostrando che la radiazione non è solo emessa, ma anche assorbita sotto forma di pacchetti o **fotoni**

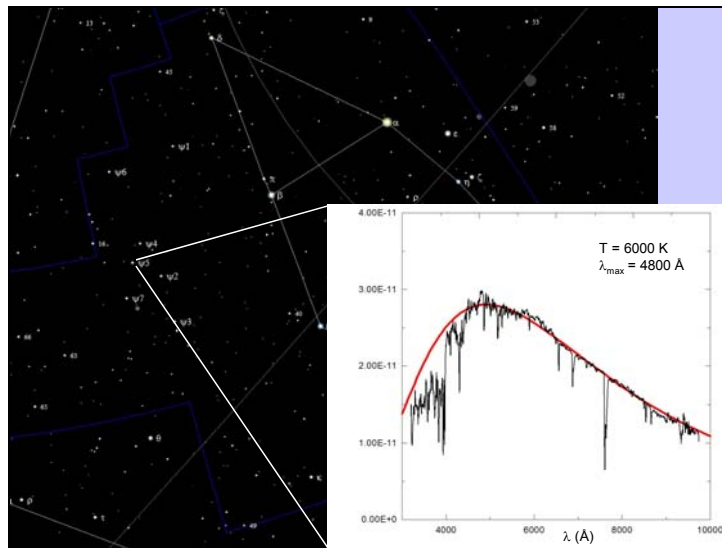


## Diapositiva 26

### Applicazioni astronomiche

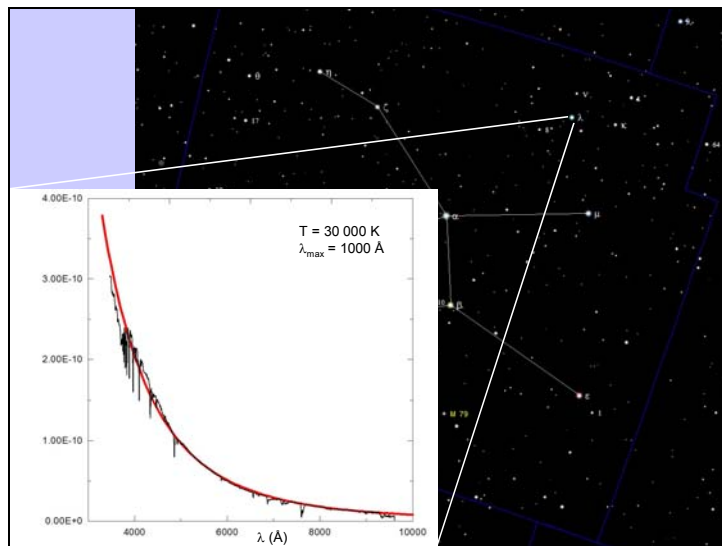
Sorgente	Temperatura	$\lambda_{\text{max}}$	Regione spettrale
Fondo cosmico	3 K	1 mm	Infrarosso-radio
Nube molecolare	10 K	300 $\mu$	Infrarosso
Sole	6000 K	4800 $\text{\AA}$	Visibile
Stella calda	30 000 K	1000 $\text{\AA}$	Ultravioletto
Gas intra-cluster	$10^8$ K	0.3 $\text{\AA}$	Raggi X

## Diapositiva 27



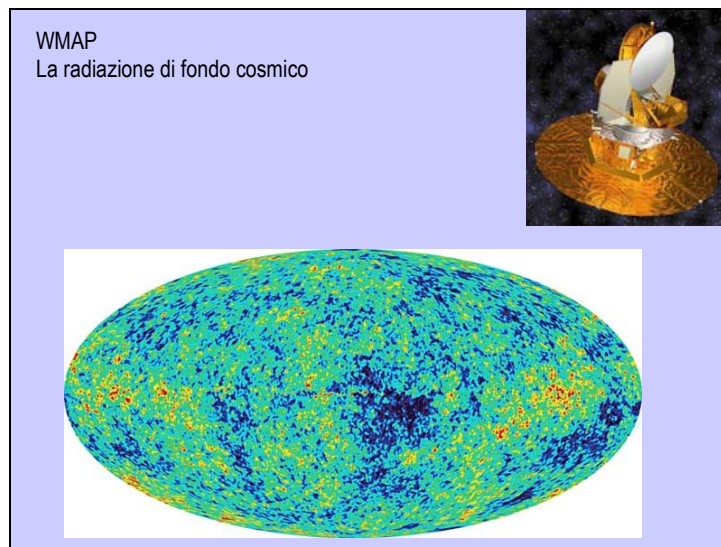
Esempio di stella con temperatura superficiale pari a 6000 K. Il grafico a destra rappresenta lo spettro della stella, cioè la distribuzione di energia alle varie lunghezze d'onda. La linea continua rossa è la funzione di Planck per un corpo nero di temperatura analoga. Il massimo di emissione di energia si ha a 4800 Å. La stella in questo esempio è molto simile al Sole.

## Diapositiva 28



Esempio analogo al precedente, ma per una stella con temperatura cinque volte maggiore. Il massimo di emissione non cade nell'intervallo del visibile, dove si osserva solo la "coda" a bassa energia della funzione di Planck.

## Diapositiva 29



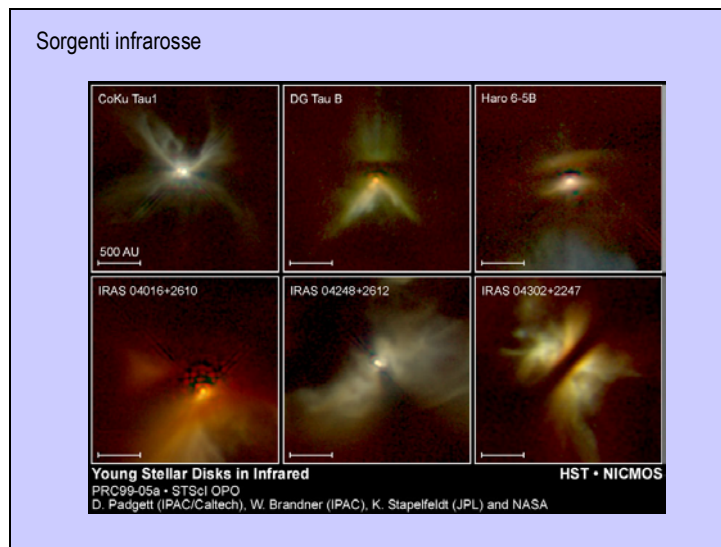
Una delle più importanti scoperte astronomiche, che è valsa il premio Nobel a Penzias e Wilson: la radiazione di fondo cosmico, cioè com'era l'universo ai suoi inizi. Essa viene emessa ad una temperatura equivalente di 3 K e si osserva alle lunghezze d'onda millimetriche, dal lontano infrarosso al radio.

## Diapositiva 30



Esempi di sorgenti astronomiche presenti nella nostra Galassia: le nubi di gas molecolare (CO, H<sub>2</sub>, etc.). La loro temperatura è molto bassa, e questo le rende "oscure" in luce visibile. Sono invece osservate in infrarosso e radio.

Diapositiva 31



Altre sorgenti visibili in infrarosso: dischi di gas e polveri attorno a stelle giovani.

Diapositiva 32



Immagine del Sole in ultravioletto, ottenuta dal satellite SOHO.  
Le zone di colore bianco sono regione della fotosfera a temperatura più alta.



Diapositiva 33

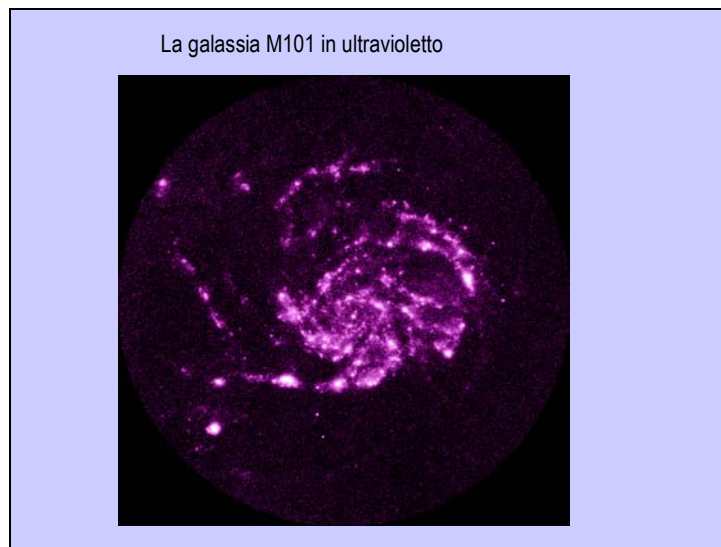
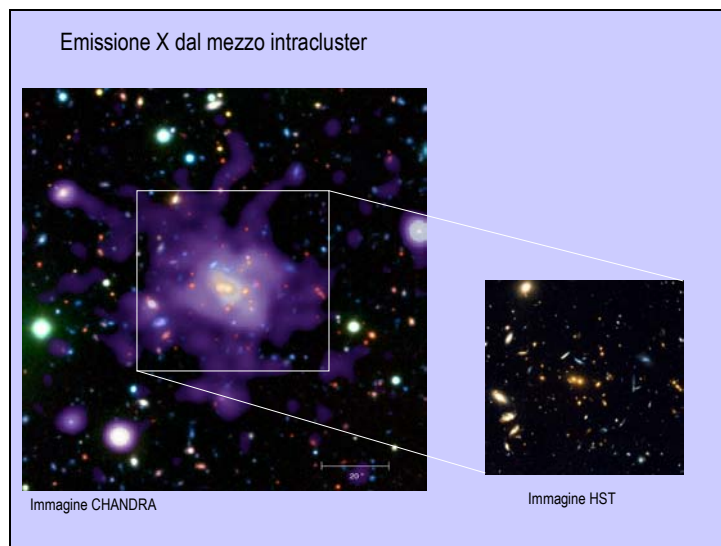


Immagine di una galassia vicina in ultravioletto.  
Osservare a queste lunghezze d'onda consente di mettere in evidenza le stelle più calde rispetto a quelle più fredde la cui emissione è spostata a lunghezze d'onda maggiori.

Diapositiva 34



A sinistra, la sovrapposizione di un'immagine ottenuta nel visibile di un ammasso di galassie con un'immagine ottenuta in X dal satellite CHANDRA. La macchia di colore violetto è l'emissione X di gas ad altissima temperatura, centinaia di milioni di gradi, presente fra le galassie dell'ammasso.  
L'immagine a destra è una porzione di quella visibile a sinistra, ottenuta con Hubble Space Telescope. Si può notare l'elevato numero di galassie presenti.