

# Il corpo nero e l'ipotesi di Planck

# La crisi della fisica classica

Alla fine del XIX secolo ci sono ancora dei fenomeni che la fisica classica non riesce a spiegare:

- lo spettro d'irraggiamento del corpo nero
- l'effetto fotoelettrico

# Il corpo nero

**Un corpo nero ideale è un corpo che assorbe tutte le radiazioni elettromagnetiche che lo investono.**

*Perche un corpo con queste caratteristiche si dice nero?*

Quando la luce bianca incide su un oggetto esso ci appare colorato se riflette solo una componente cromatica della luce e assorbe tutte le altre (ci appare verde se riflette la componente cromatica verde della luce).

Un corpo chiaro diffonde la maggior parte della luce che incide su di esso.

Un corpo che assorbe tutta la radiazione incidente (qualunque sia la frequenza) appare completamente nero.

Quindi il nome è sicuramente appropriato perché tali oggetti non riflettono la luce ed appaiono di colore nero, (quando la temperatura è sufficientemente bassa per impedire che brillino di luce propria).

## Attenzione

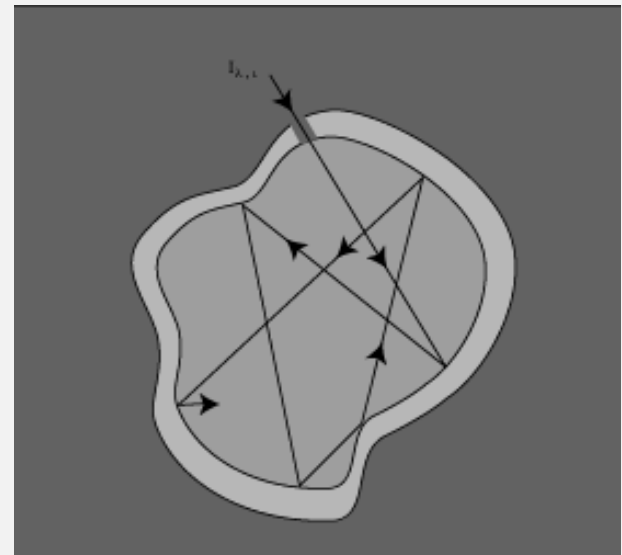
Un corpo nero è un oggetto **teorico** che assorbe il 100% della radiazione che incide su di esso. Perciò non riflette alcuna radiazione e appare perfettamente nero.

In pratica :

- nessun materiale assorbe tutta la radiazione incidente
- la grafite ne assorbe il 97%

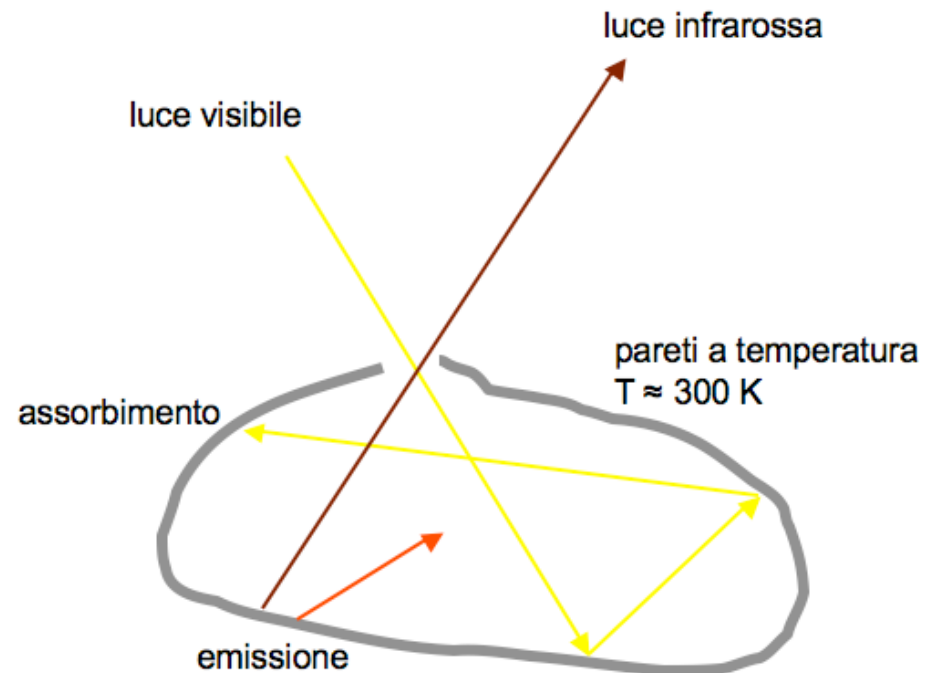
Una buona approssimazione di corpo nero può essere quella di immaginare una cavità di materiale opaco, nella quale è praticato un piccolo foro.

**Il corpo nero è il foro stesso.**





## Corpo nero a temperatura ambiente



Ogni corpo emette radiazione elettromagnetica.

L'insieme delle lunghezze d'onda o delle frequenze su cui è distribuita la potenza irradiata si chiama **spettro di emissione** del corpo.

Le caratteristiche dello spettro in generale dipendono da:

- temperatura  $T$ ;
- natura del corpo e proprietà della sua superficie.

# L'emissione di un corpo nero

Un corpo nero essendo un assorbitore ideale è anche un **emettitore ideale**, ovvero:

il suo spettro di emissione dipende esclusivamente dalla temperatura e *non* dalla forma o dal materiale.

Quindi: il tipo di radiazione emessa dipende dalla temperatura della cavità.

*Per studiare l'irraggiamento dei corpi conviene considerare il corpo nero.*

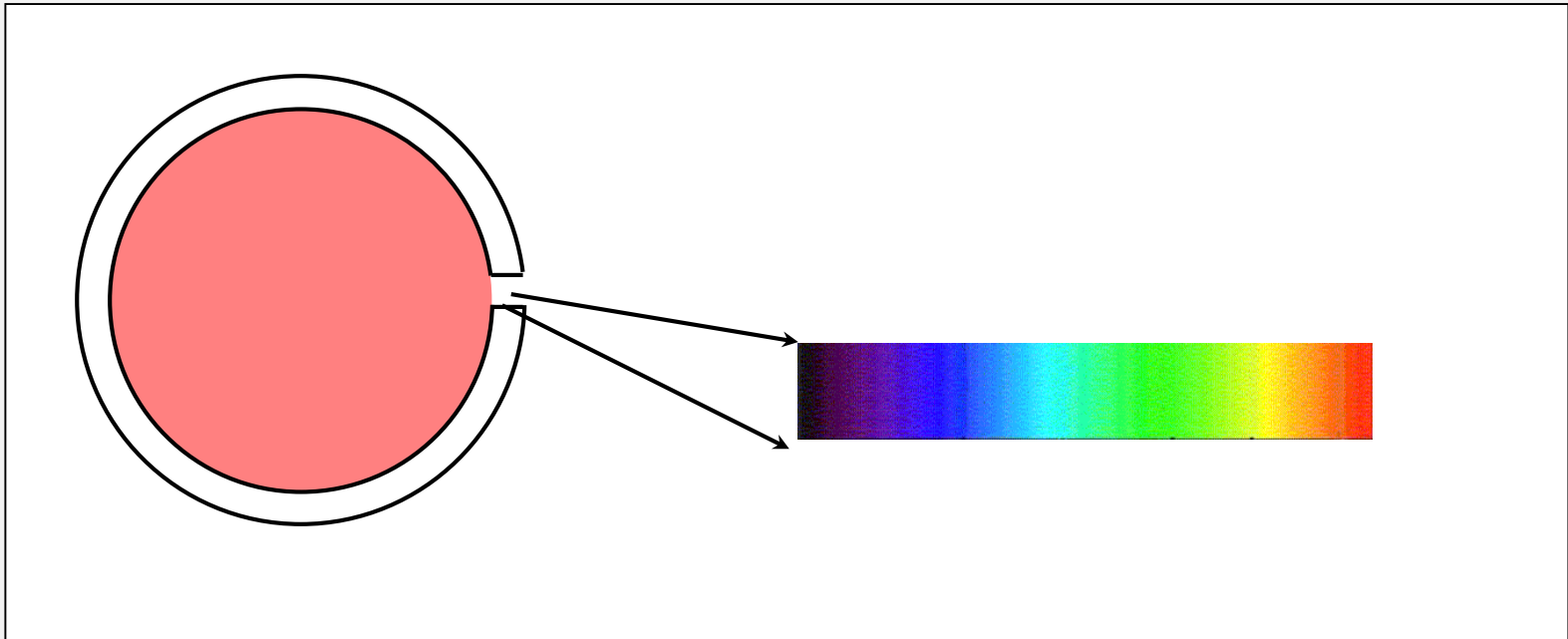
### Precisazione:

Un corpo nero non è effettivamente sempre nero.

Esso appare così solo nei pressi della temperatura ambiente ovvero in quel range di temperatura in cui la radiazione visibile assorbita viene restituita nel campo delle microonde o dell'infrarosso.

Se le pareti del corpo nero fossero a temperatura elevata, ad esempio a circa 1000 °C, allora il foro rimetterebbe radiazione visibile e il corpo non sarebbe assolutamente nero.

Una fornace:





# Spettro di emissione di un corpo nero

Se il corpo è allo stato solido o liquido lo spettro di questa radiazione è *continuo*.

Come si determina il grafico dello **spettro di emissione**?

Fissata una temperatura, è possibile misurare entro un certo intervallo  $\Delta f$  di frequenze, l'energia emessa per unità di tempo e unità di superficie del corpo, ovvero la potenza  $P$  emessa per unità di superficie del corpo.

Ripetendo le misure al variare della frequenza e riportando su un grafico la quantità  $R = P/\Delta f$  si ottiene, facendo tendere a zero la larghezza degli intervalli  $\Delta f$ , una curva continua a forma di campana.

$R$  è chiamata radianza spettrale.

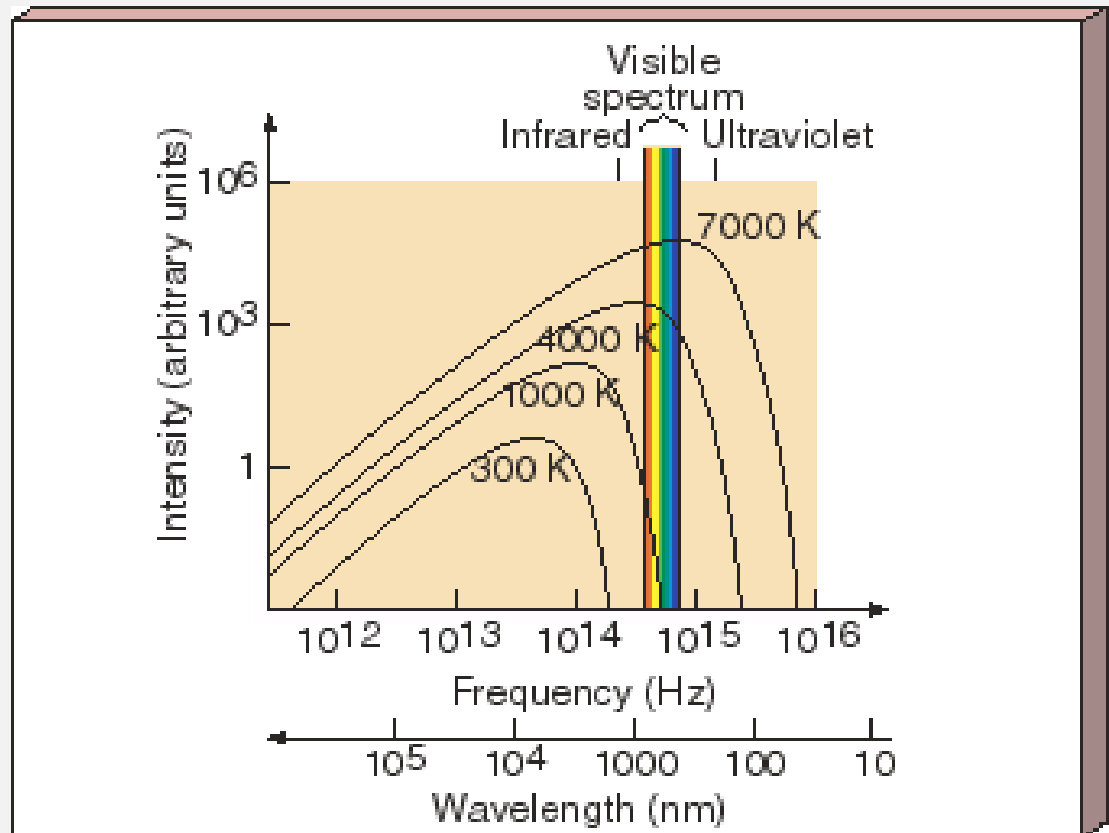
## SPETTRO DI EMISSIONE

### RADIANZA SPETTRALE

$$R(f, T) = \frac{E}{\Delta t \Delta f \Delta S}$$

$$R(f, T) = \frac{P}{\Delta f \Delta S}$$

Lo spettro di emissione di un corpo nero dipende solo dalla temperatura.



L'area compresa fra la curva e l'asse delle ascisse rappresenta **l'energia totale emessa**, nell'unità di tempo, dall'unità di superficie del corpo entro tutto l'intervallo di lunghezza d'onda (o frequenza) considerato.

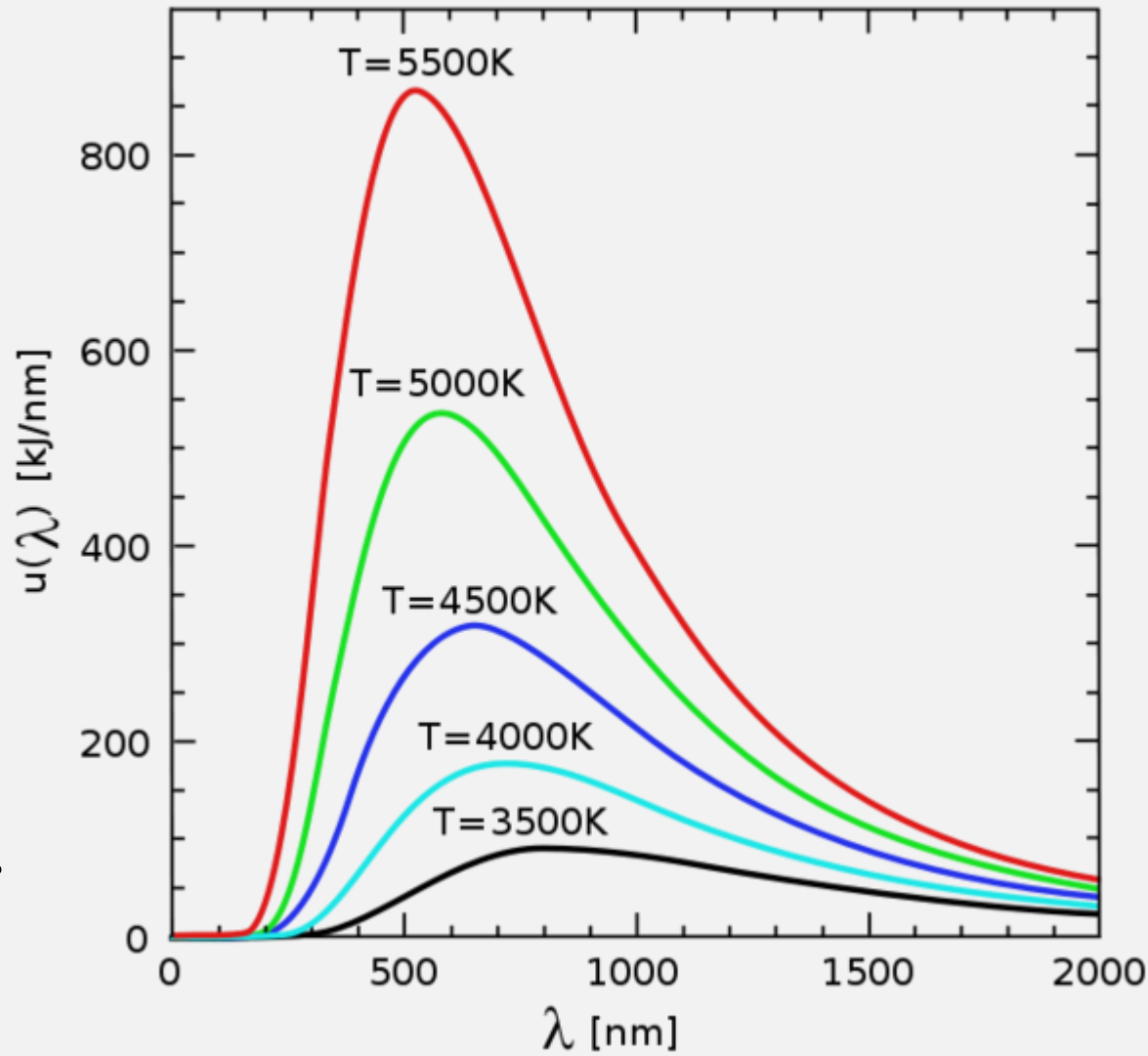
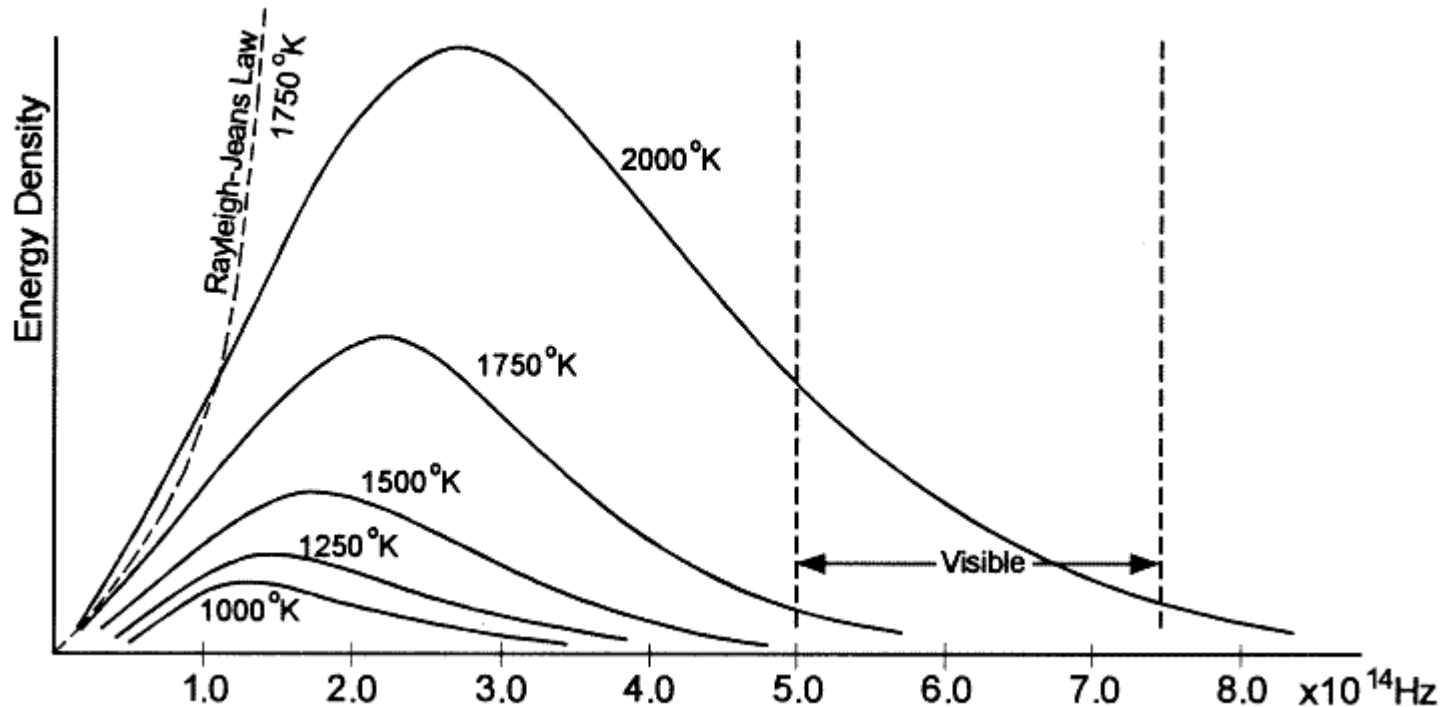


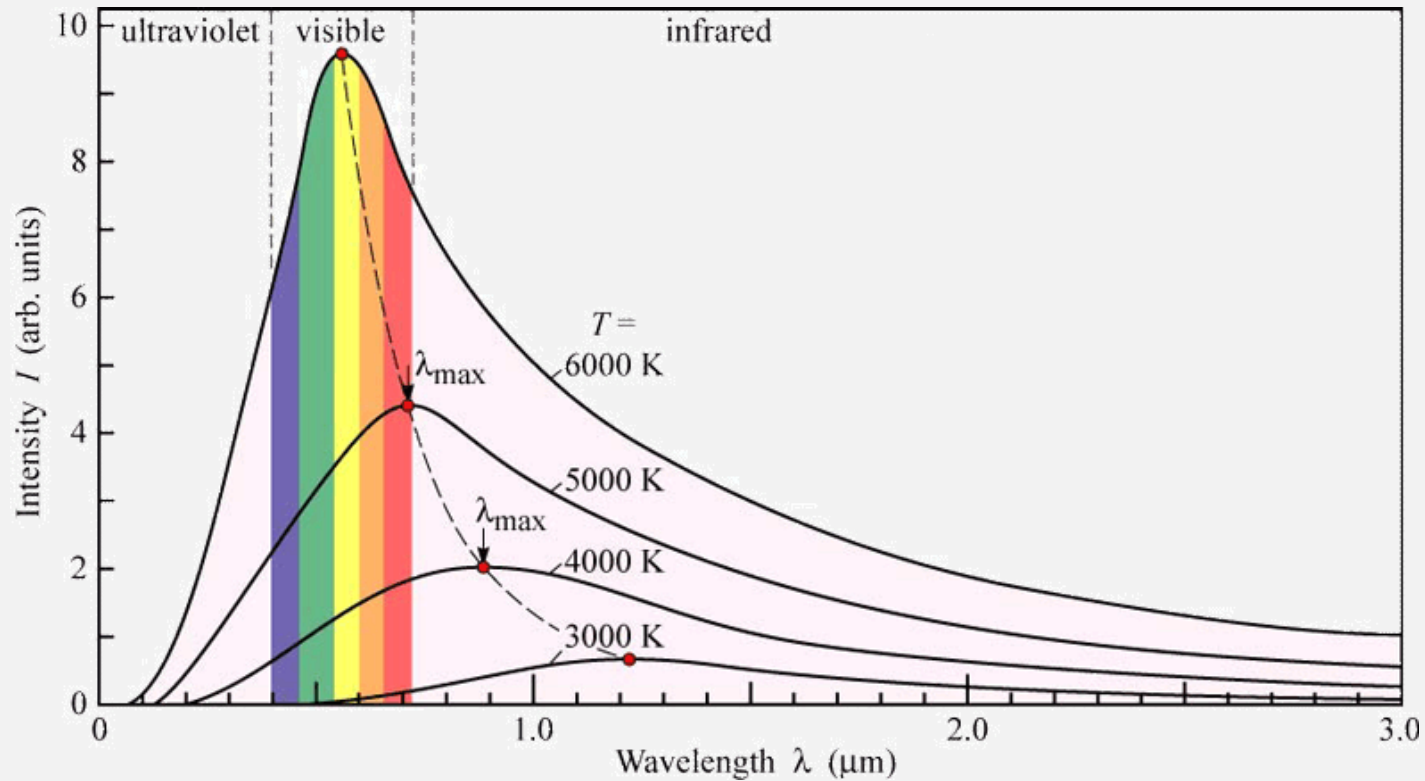
Figure 6.24



Due caratteristiche importanti:

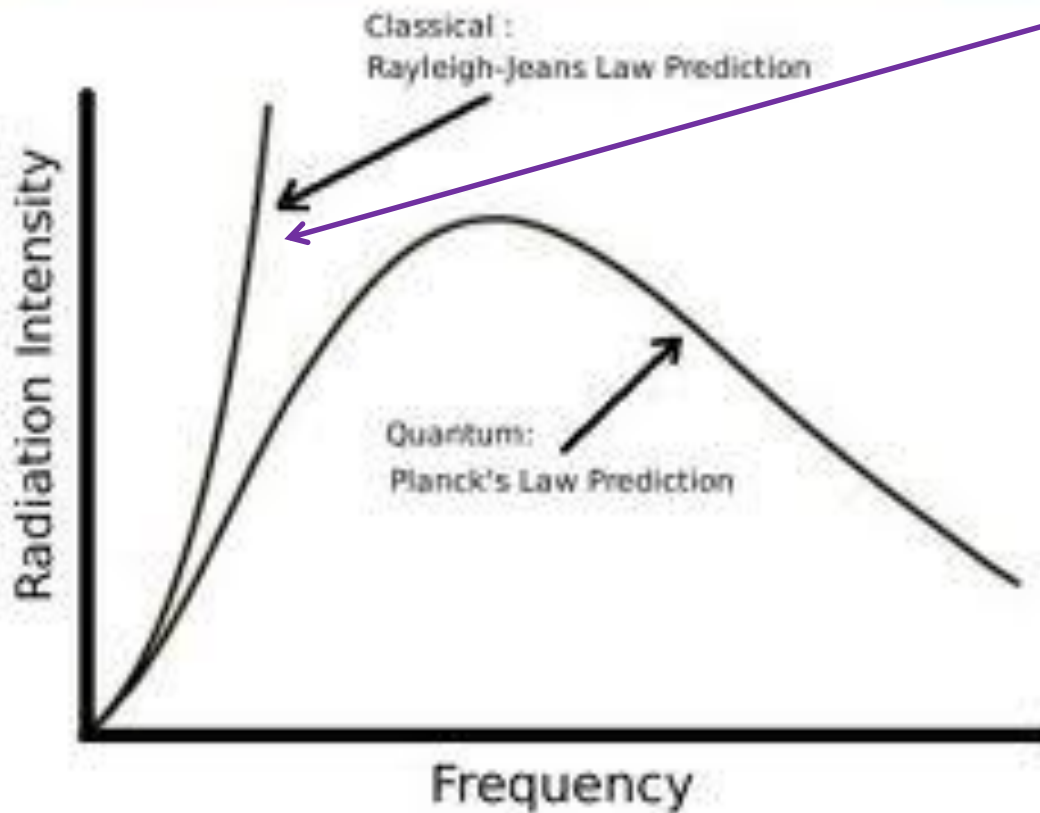
1. All'aumentare della temperatura il massimo dello spettro si sposta verso frequenze maggiori (o lunghezze d'onda minori).
2. La frequenza corrispondente al massimo è più alta per temperature maggiori.

Lo stesso per lo spettro in funzione della lunghezza d'onda...



*La teoria classica non era in grado di riprodurre correttamente la distribuzione spettrale della radiazione emessa da un corpo nero.*

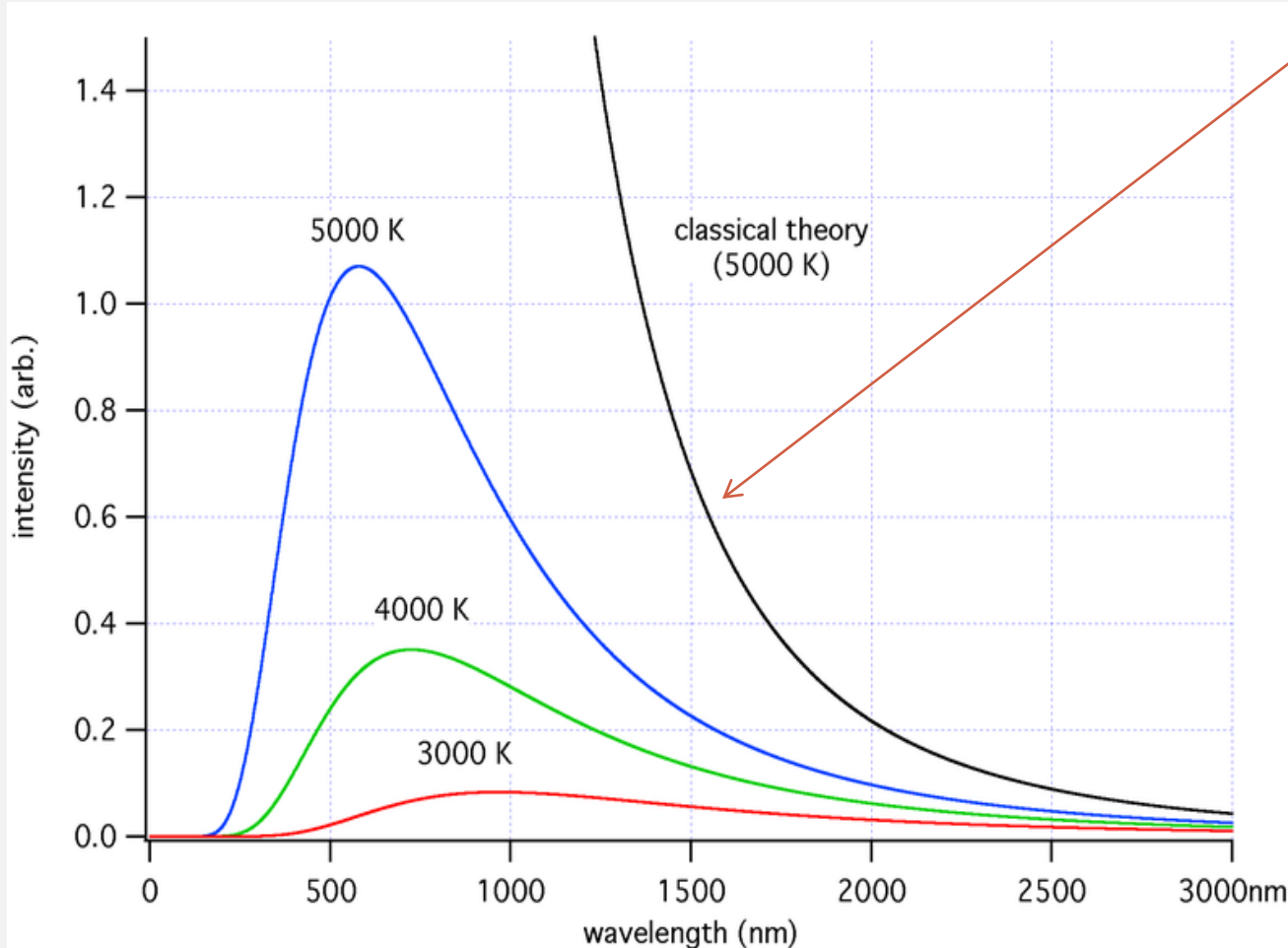
## Blackbody Radiation vs Frequency



### Catastrofe Ultravioletta

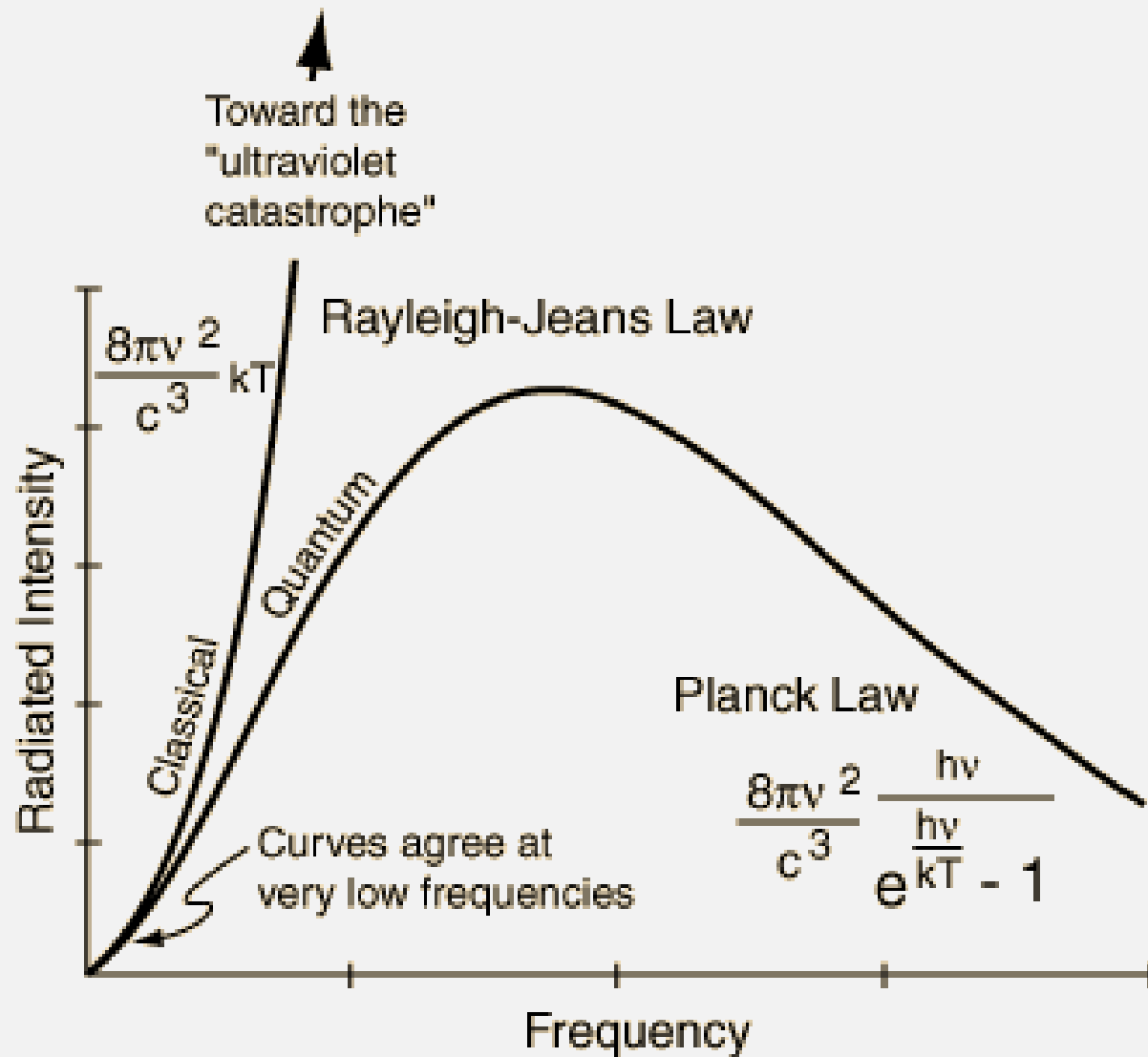
Energia emessa cresce indefinitamente all'aumentare della frequenza.  
L'energia totale Emessa (e quindi contenuta nel corpo nero), sarebbe infinita!

*La teoria classica non era in grado di riprodurre correttamente la distribuzione spettrale della radiazione emessa da un corpo nero.*



### Catastrofe Ultravioletta

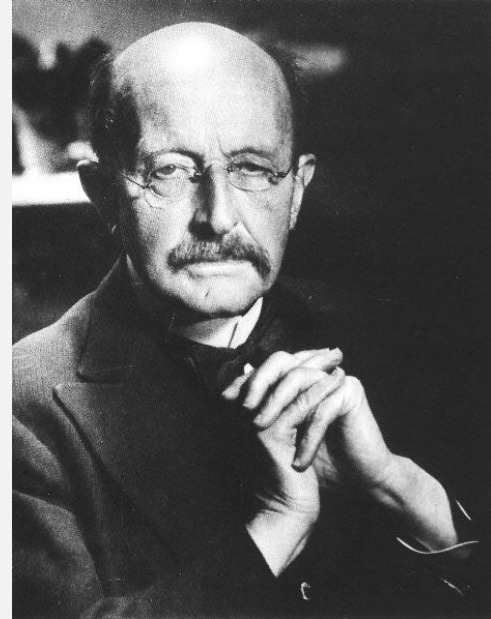
Energia emessa cresce indefinitamente all'aumentare della frequenza.  
L'energia totale irradiata, quindi contenuta nel corpo nero, sarebbe infinita.





# L'ipotesi di Planck

Il 14 dicembre del 1900, durante un incontro organizzato dalla Società di Fisica Tedesca, Max Planck presentò un saggio dal titolo *«Sulla teoria della legge di distribuzione dell'energia nello spettro normale»*.



Nobel Prize, 1918

Questo scritto prefigurava una rivoluzione nel campo della fisica, segnando la nascita della meccanica quantistica.

In esso Planck propose una nuova espressione per la radianza spettrale  $R(f, T)$  di un corpo nero, che riproduceva lo spettro di emissione correttamente per tutte le frequenze (o lunghezze d'onda).

$$R(f, T) = \frac{2\pi h f^3}{c^2} \frac{1}{e^{hf/kT} - 1}$$

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$$

Costante di Boltzmann

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$$

**Costante di Planck**

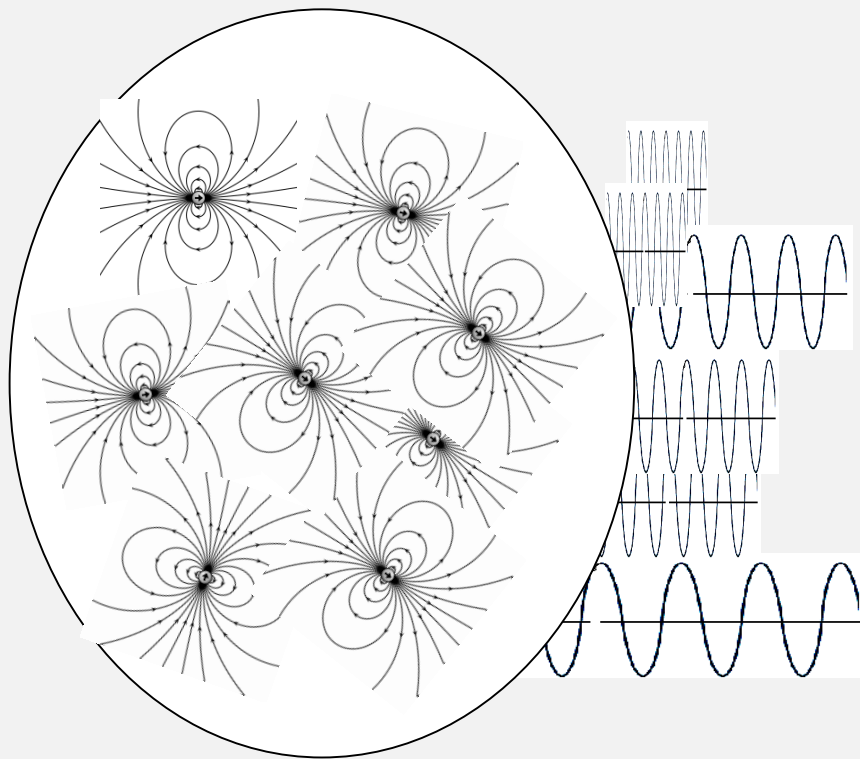
*Come arriva Planck a questa formula?*

Planck la ricava empiricamente osservando i dati sperimentali.  
Il suo fondamento teorico è un'ipotesi del tutto nuova, un fatto ancora insospettato nella fisica:

*«L'energia associata ad un'onda elettromagnetica emessa da una sorgente non è continua, bensì suddivisa in determinate porzioni, in **quanti** che si susseguono l'uno all'altro».*

## *Come si calcola l'energia totale irradiata...*

Ogni carica elettrica oscillante emette energia sotto forma di onda elettromagnetica. Perciò ogni corpo irradia a causa delle oscillazioni delle cariche elettriche distribuite negli atomi che lo costituiscono.



La frequenza della radiazione dipende dalla frequenza di vibrazione dei dipoli.

Aumentando la **temperatura** aumenta anche la **frequenza** di vibrazione, e quindi la frequenza della radiazione emessa.

Dipoli oscillanti a frequenze diverse emettono radiazioni alla stessa frequenza di oscillazione.

*Per calcolare l'energia emessa da tutti i dipoli aventi la stessa frequenza, o la stessa lunghezza d'onda, basterà quindi:*

- calcolare **quanti oscillatori hanno una certa frequenza ad una data temperatura e**
- moltiplicare questo numero per **l'energia posseduta da ciascun oscillatore. (ma come si fa???)**

**Nella fisica classica** ognuno di questi microscopici oscillatori scambia energia con continuità, in misura tanto maggiore quanto è più ampia la sua oscillazione e indipendentemente dalla sua frequenza.

La teoria era basata sull'ipotesi che i dipoli oscillanti potessero avere qualsiasi energia, e che la distribuzione di energia tra di loro fosse secondo una statistica termodinamica classica.

## Cosa ha scoperto Planck?

...che lo scambio di energia tra gli atomi della cavità e la radiazione avviene attraverso pacchetti di energia: i ***quanti***.

$$\Delta E = hf$$

con  $\Delta E$  quanto di energia;

$f$  frequenza;

$h$  costante di Planck:  **$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J s}$** .

Ipotesi rivoluzionaria:

*L'energia è una grandezza fisica **quantizzata**,  
che può assumere solo valori discreti.*

Quindi era sbagliato considerare che gli oscillatori potessero avere *qualsiasi energia*; dunque **l'energia dipende dalla frequenza**.

Gli oscillatori alla frequenza  **$f$**  possono avere solo energie date da multipli interi di  **$hf$** :

$$E_n = nhf$$

$$n = 0, 1, 2, 3, \dots$$



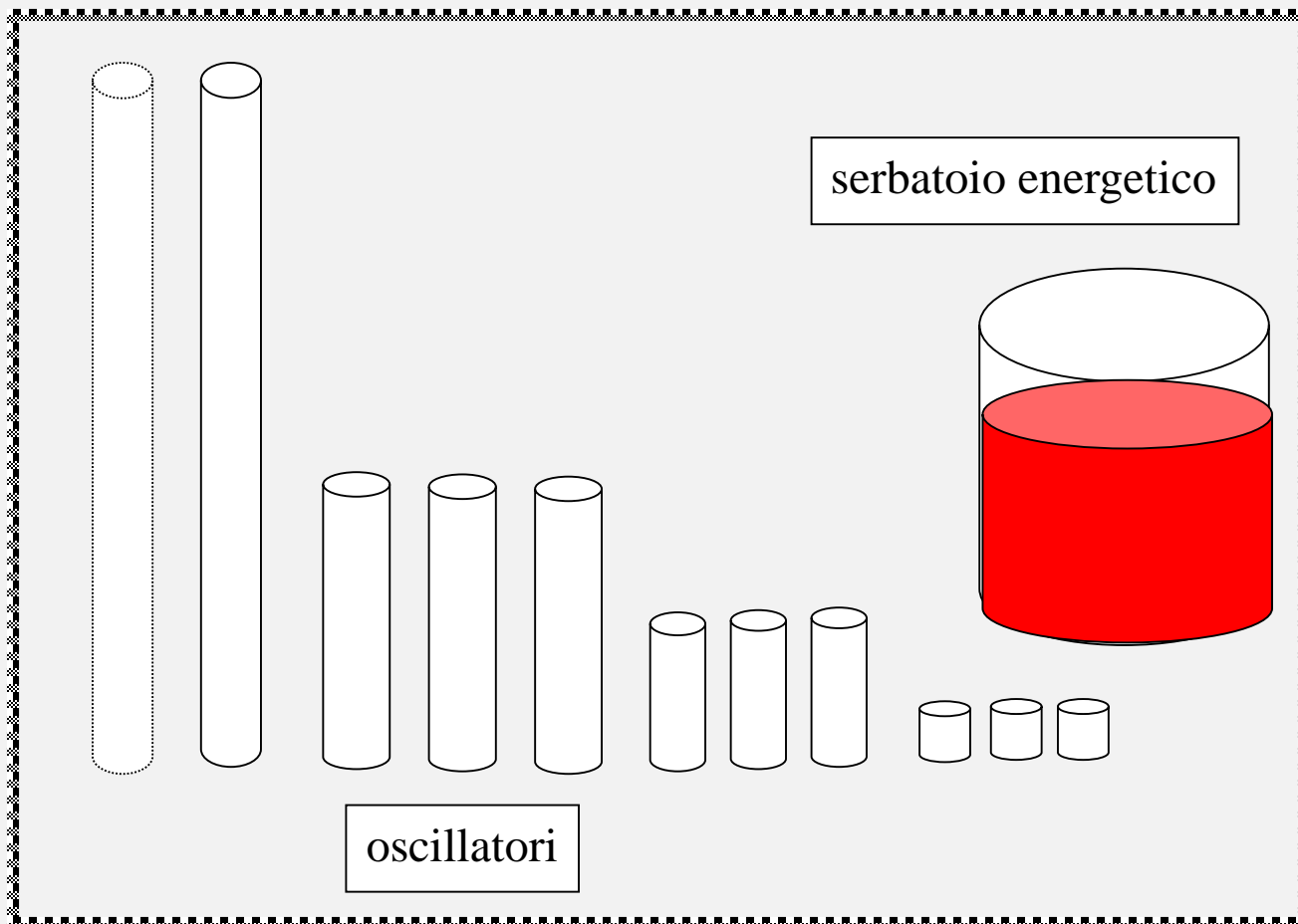
*Si spiegano molte cose.....*

Secondo l'ipotesi di Planck un oscillatore che oscilla alla frequenza  $f$  può assumere energie che siano multipli di  $hf$ , e quindi **l'energia minima** è:

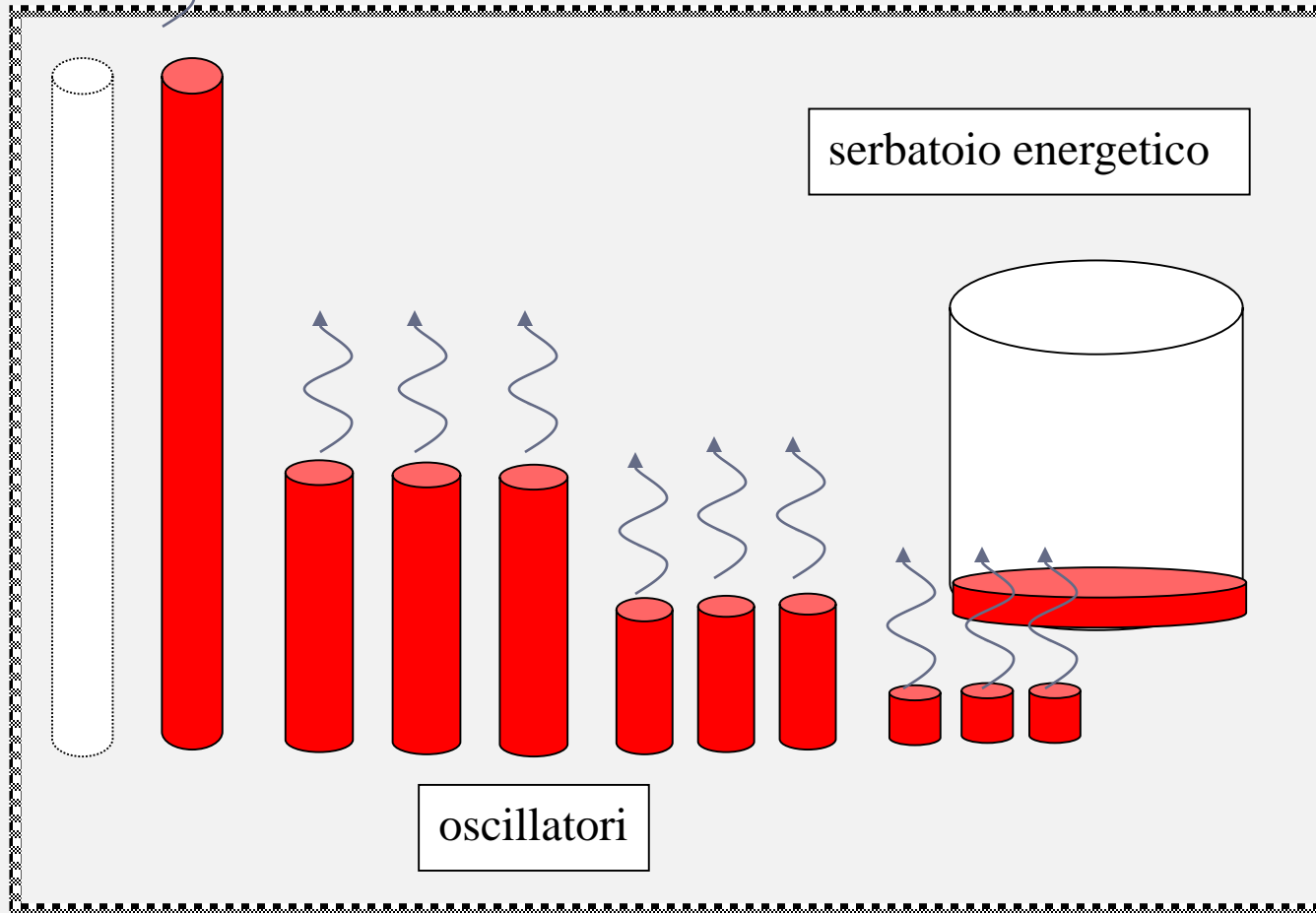
$$E_{\min} = hf$$

Ma allora i dipoli devono fare i conti con l'energia termodinamicamente disponibile: un dipolo con una frequenza  $f$  alta ha bisogno per essere attivo di un'energia minima  $hf$  che è **maggiore dell'energia disponibile termodinamicamente**.

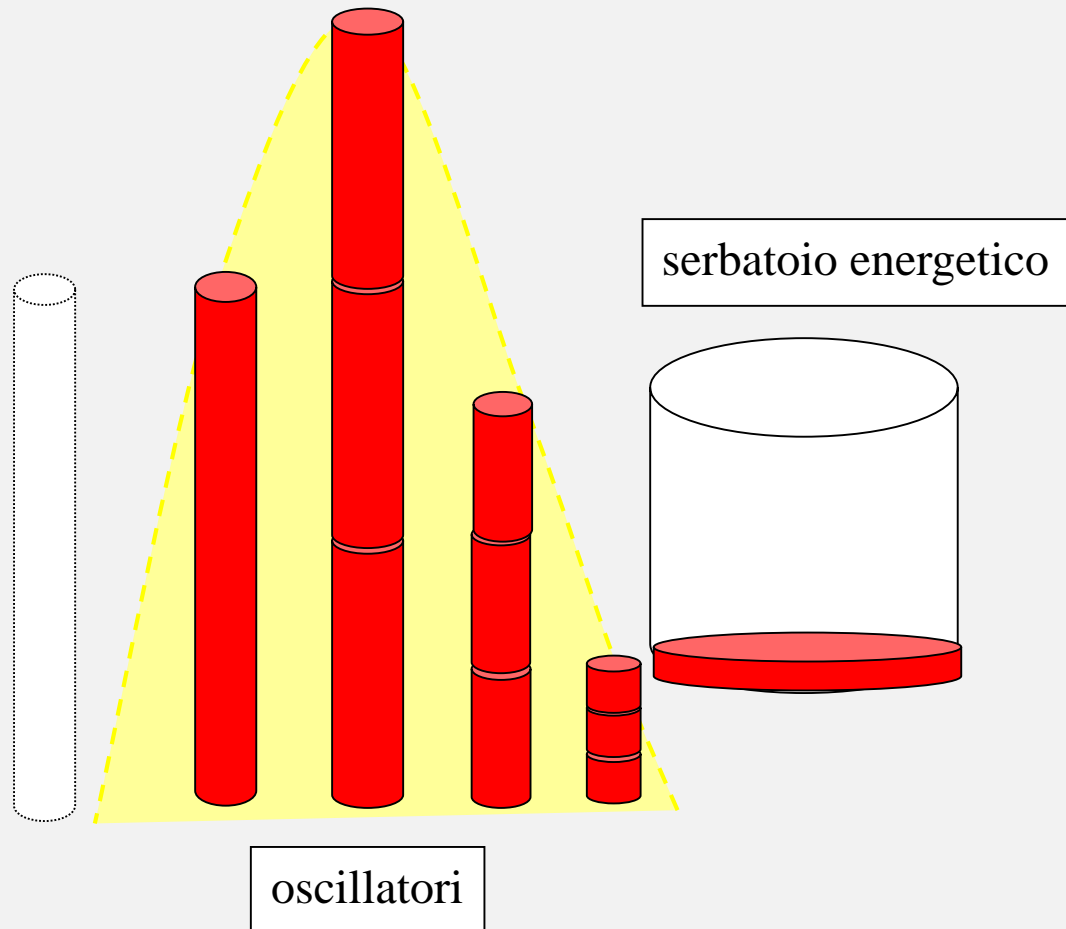
La conseguenza è che a temperature ordinarie non ci sono dipoli oscillanti a frequenze elevate, e quindi le radiazioni ad alta energia sono assenti.



Vengono “eccitati”, ossia “attivati”, dapprima gli oscillatori aventi poche esigenze in termini energetici, per poi arrivare a tutti gli altri.



- Facciamo un istogramma della distribuzione, sommando i contributi per ciascun tipo di oscillatore (classificandoli per lunghezza d'onda).
- Otteniamo la tipica forma a campana della distribuzione spettrale di Planck



## Ipotesi di Planck

Le pareti di una cavità, come qualsiasi superficie emittente, contengono particelle che assorbendo energia dall'esterno aumentano la loro temperatura e quindi la loro energia cinetica e iniziano ad oscillare.

Oscillando emettono radiazione, ma questa radiazione contrariamente ai principi classici non può assumere valori qualsiasi. **L'energia deve essere emessa in quantità definite o *pacchetti*.**

Alle alte frequenze (piccole lunghezze d'onda) la radiazione deve essere emessa in *pacchetti* più "grandi". Se le particelle non hanno abbastanza energia non si vedrà emissione di radiazione ad alta frequenza.

D'altra parte se la temperatura aumenta, le particelle avranno abbastanza energia per emettere *pacchetti* di radiazione a frequenze via via più alte.

Riassumendo:

Planck riproduce i dati sperimentali dello spettro di emissione del corpo nero partendo da una teoria microscopica, **assumendo lo scambio di quanti discreti di energia tra atomi e radiazione della cavità**, con un parametro libero da aggiustare, che risulta essere una costante fondamentale della natura:

$$h = 6.626068 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \quad (K = 1.381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K})$$