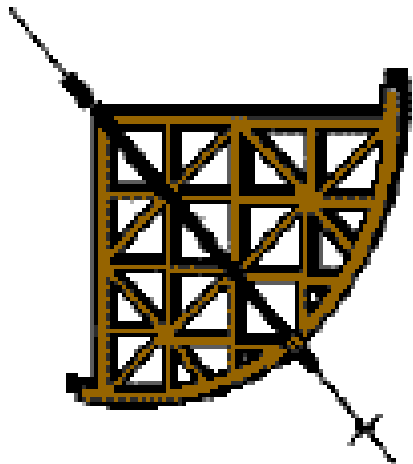


# Introduzione alla Cosmologia

## Fisica

### Lezione 4

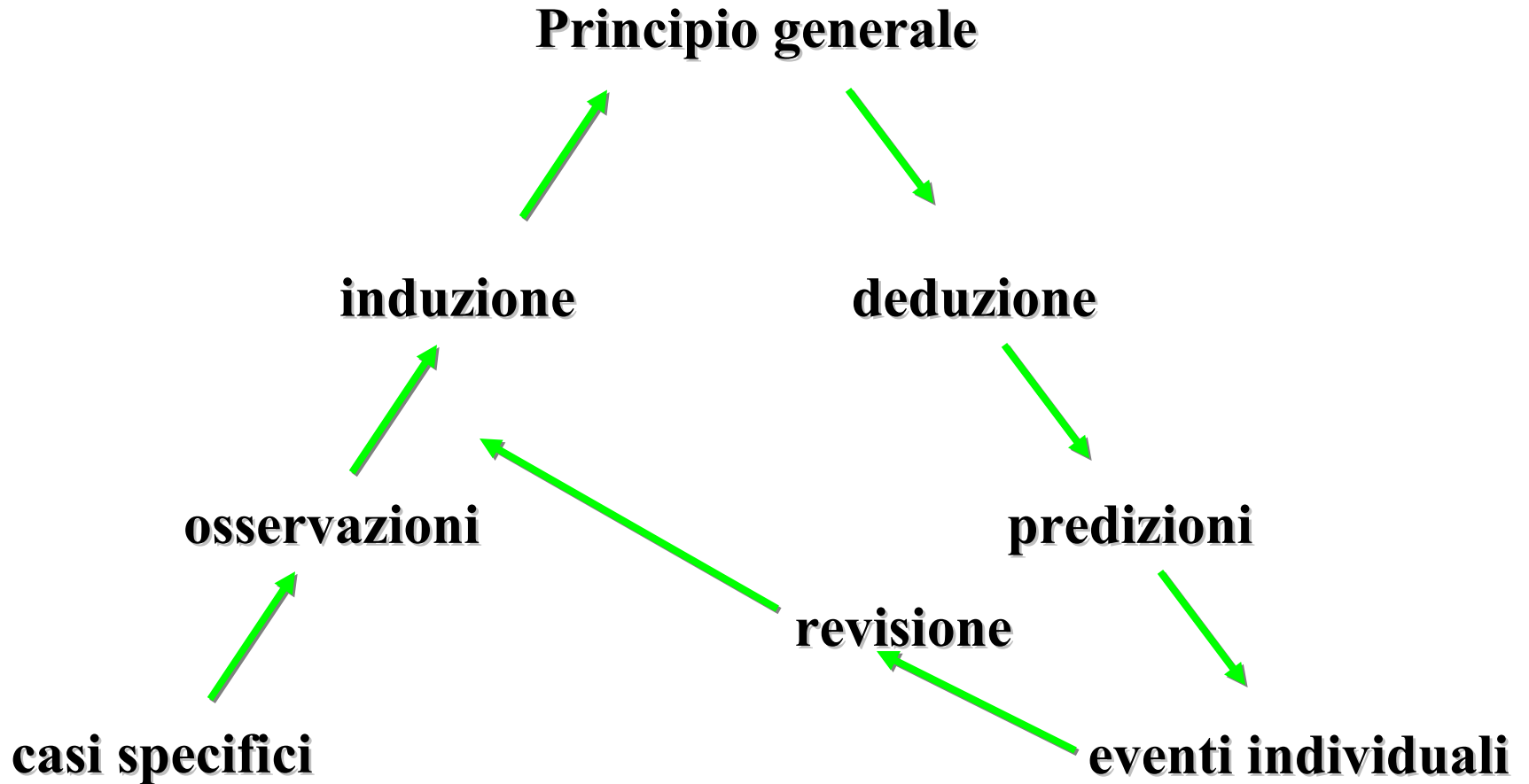
Lo spettro elettromagnetico. Gli strumenti dell'Astronomia,; telescopi e non solo



Giorgio G.C. Palumbo  
Università degli Studi di Bologna  
Dipartimento di Astronomia



# Il Metodo Scientifico



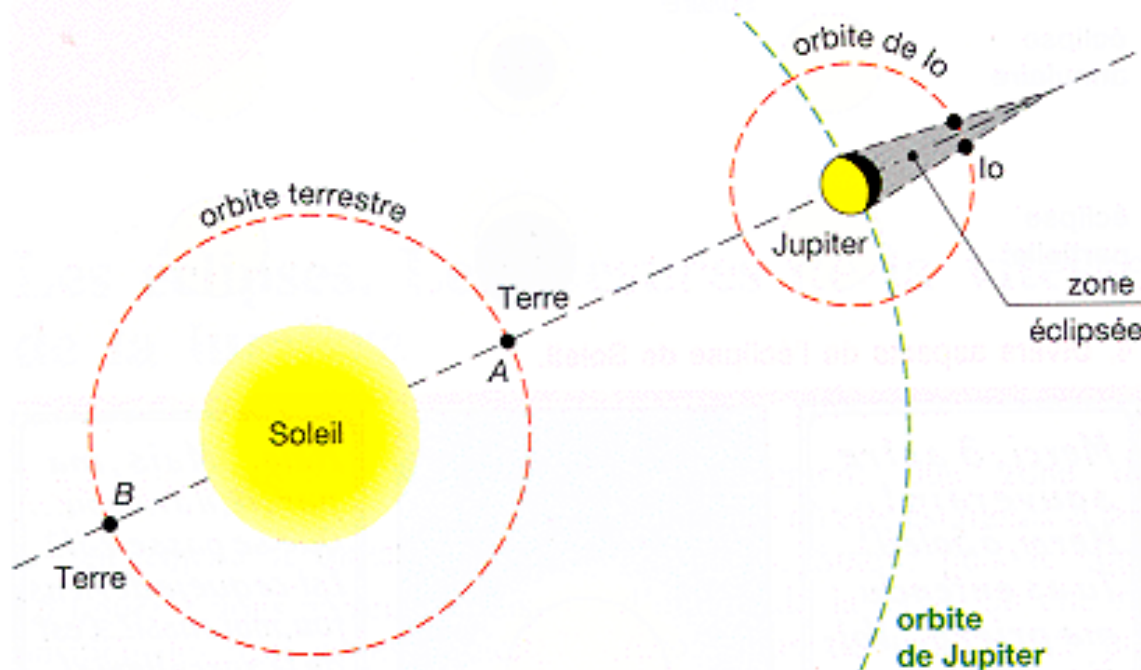
# La Luce: Messaggera dell' Universo



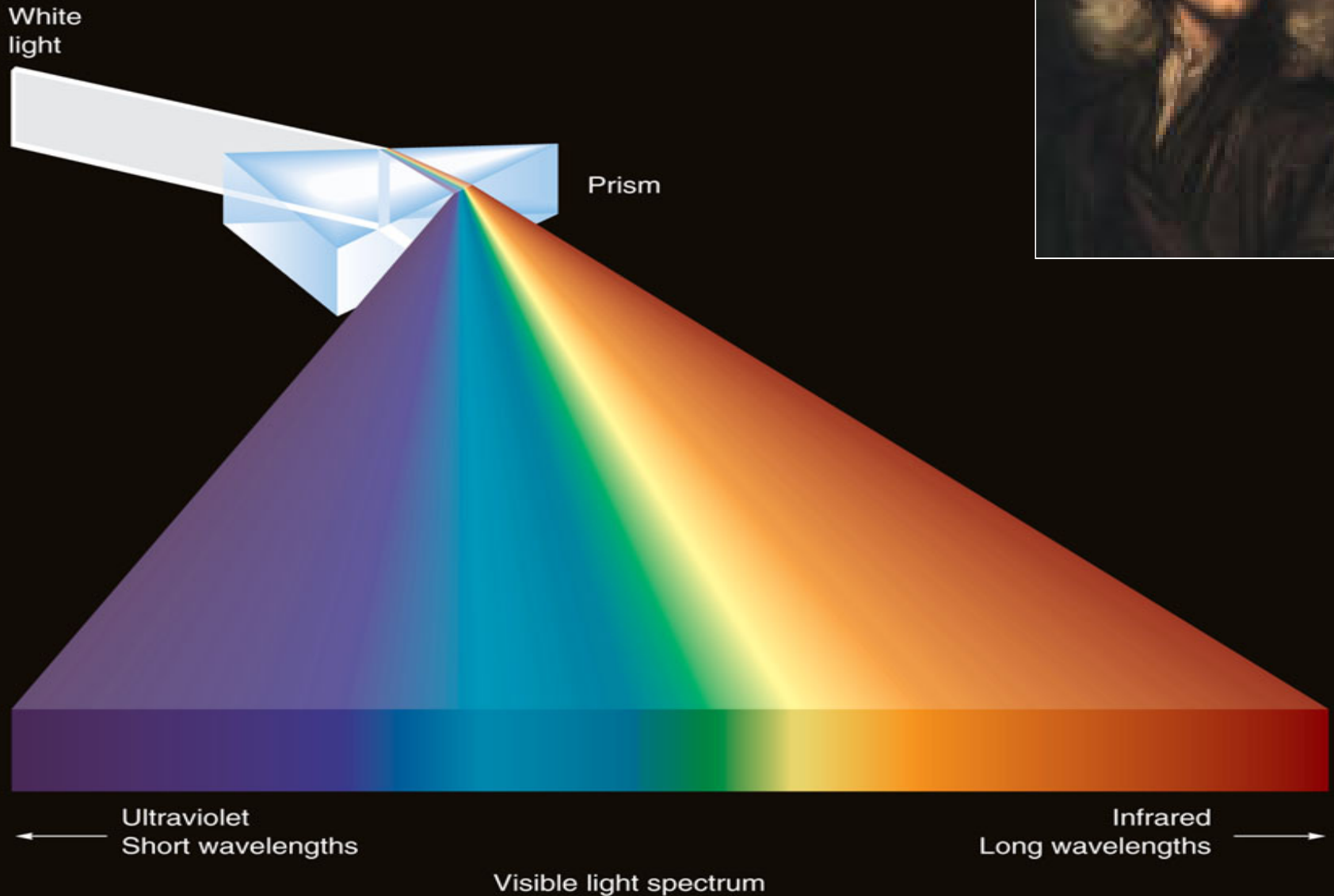
# Velocità della luce

Ole Roemer (1675)

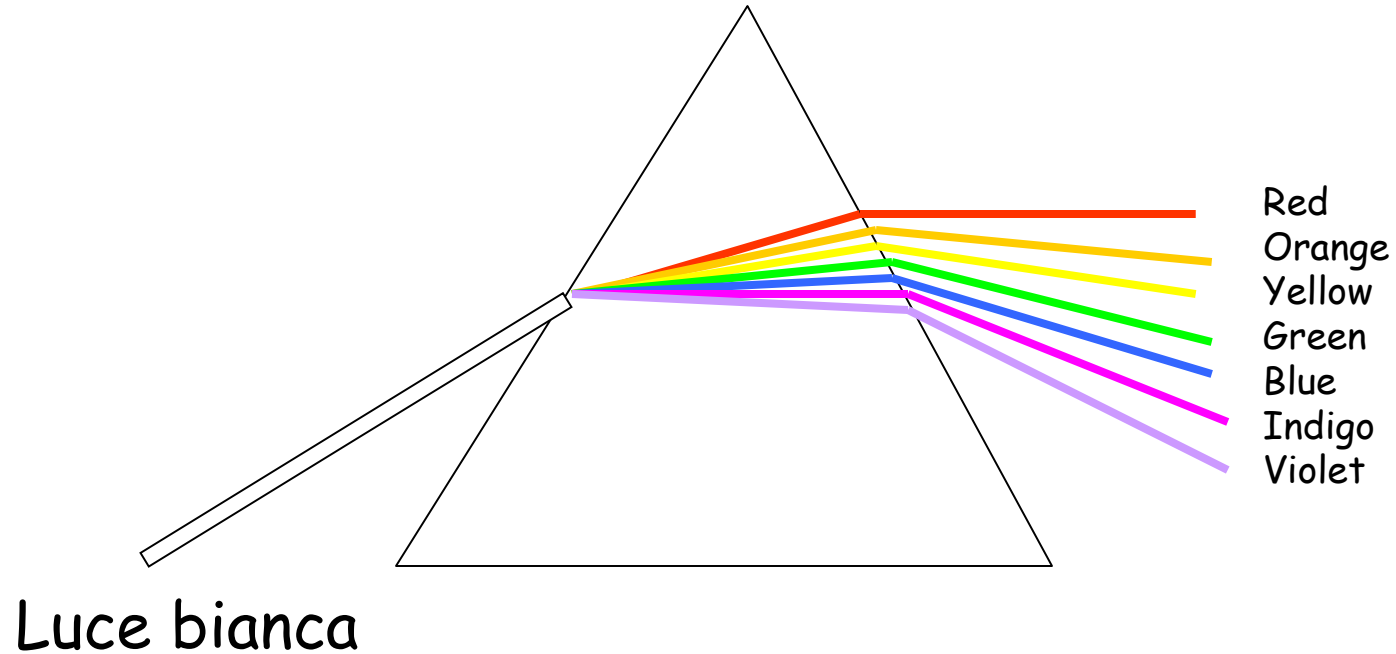
Valore moderno :  $c = 300,000 \text{ km s}^{-1}$   
 $= 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$



Newton usò un prisma e scoprì che la luce bianca contiene un arcobaleno (RAGVAIV)

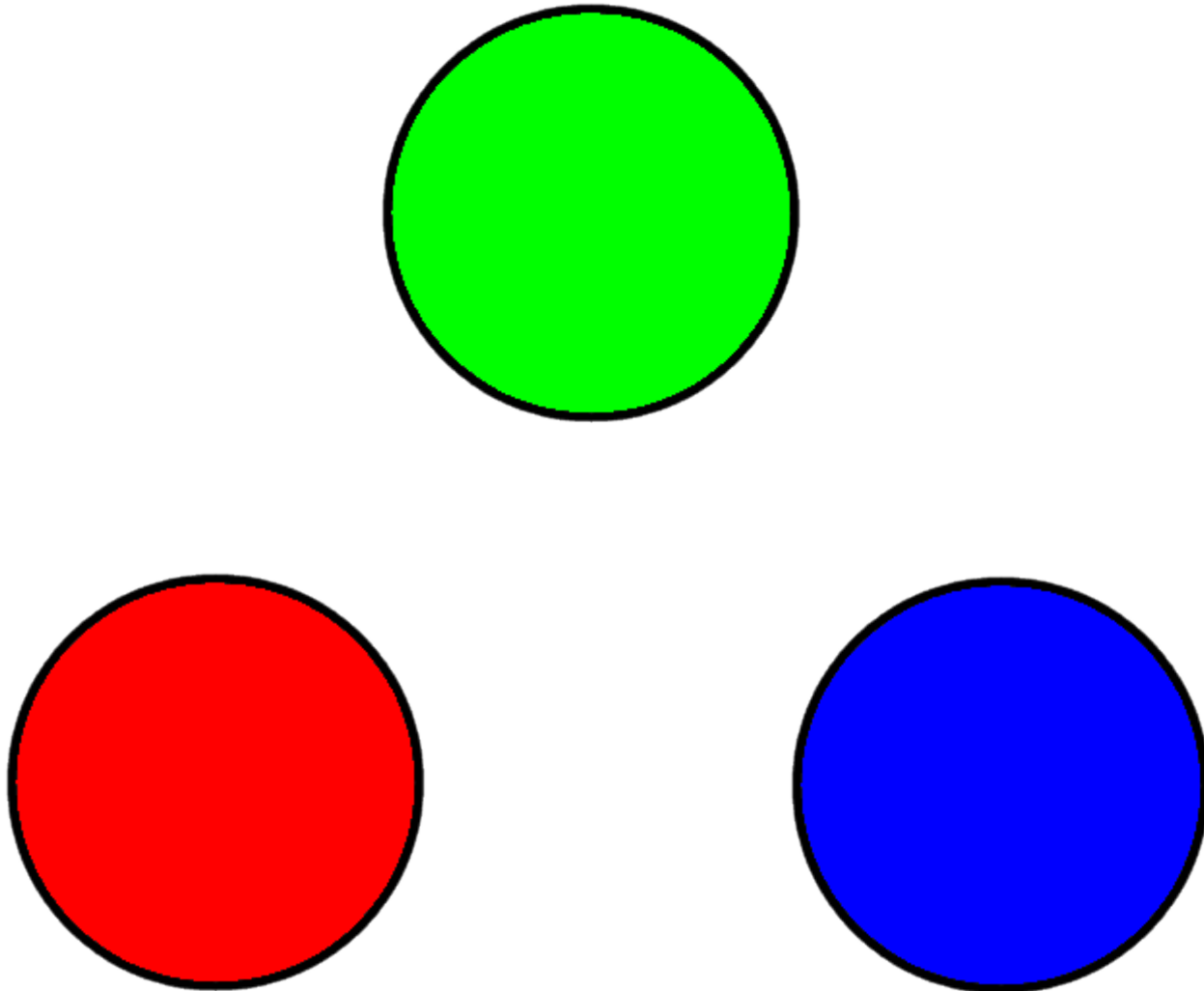


# Prisma



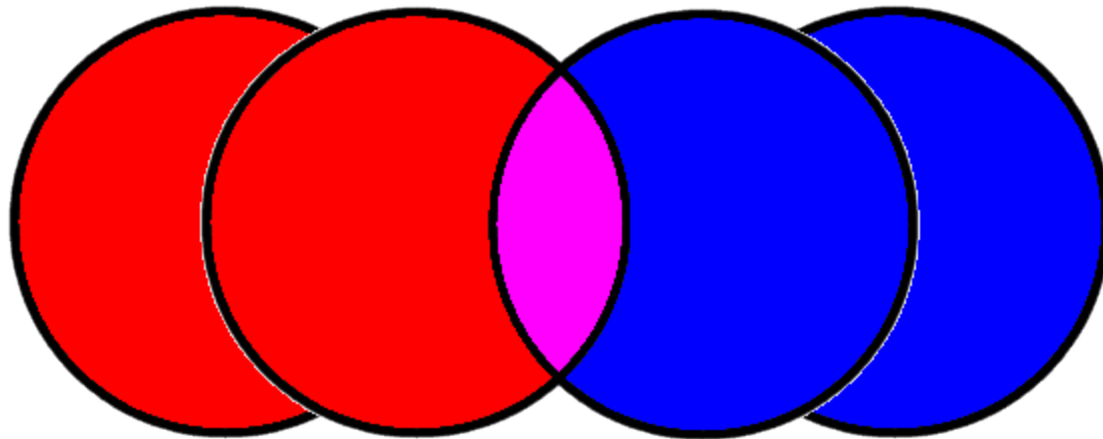
Dispersione della luce bianca produce uno spettro,  
questo succede perchè alcuni colori rifrangono più di altri.

# I Colori Primari

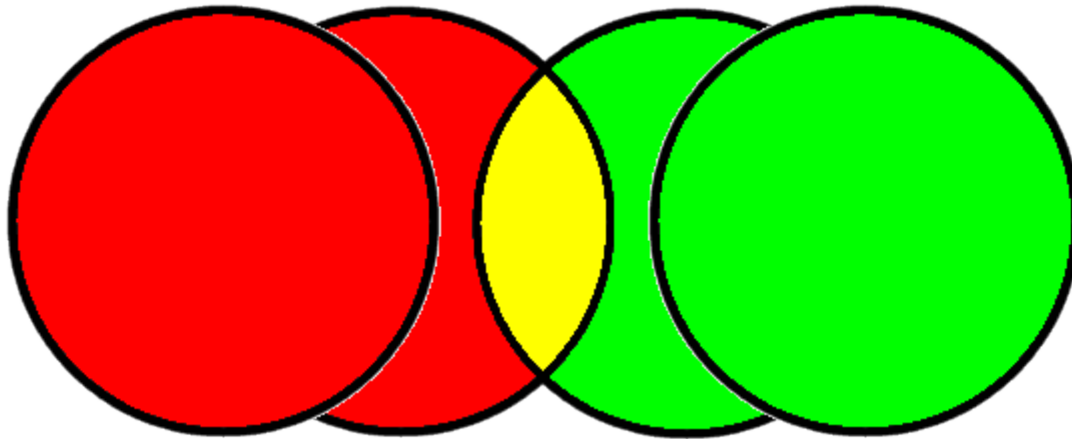


*Click to move on*

Rosso + Blu =  
**Viola**

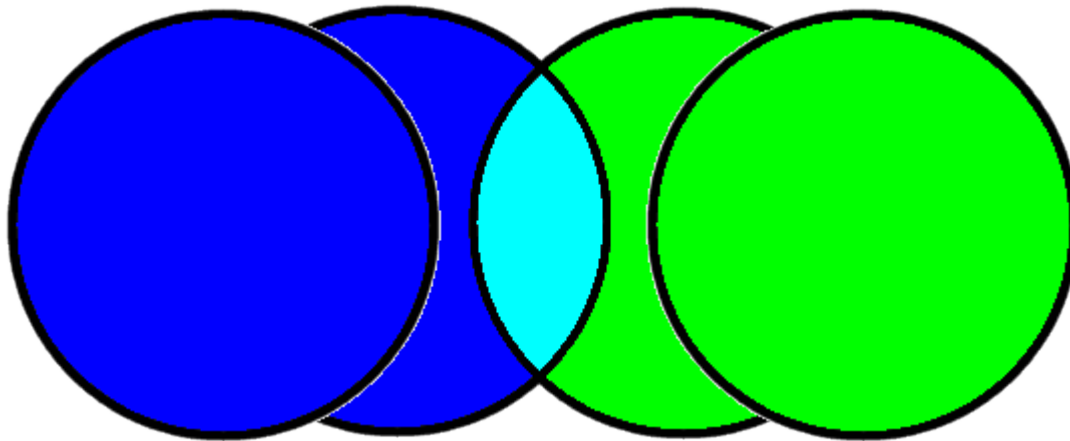


Rosso + Verde =  
**Giallo**

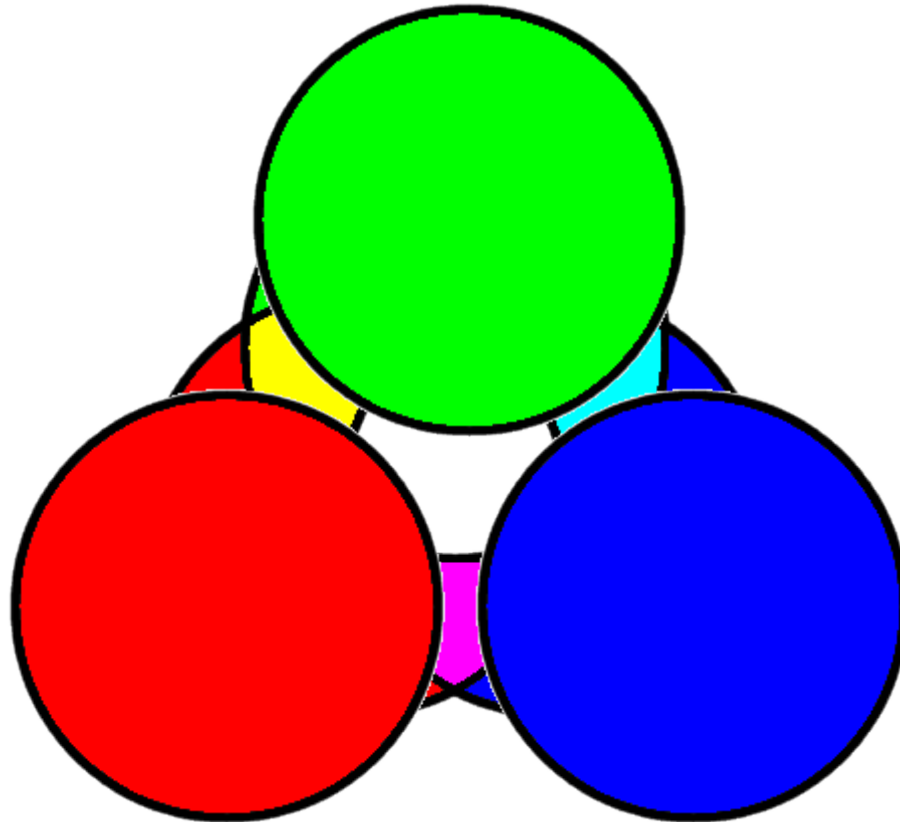


Blu + Verde =

**Azzurro**



Rosso + Verde + Blu =  
**Bianco**



Mescolanza dei Colori Primari

*Click to move on*

# Luce come onde

Huygens suggerì che la luce è composta di onde, se si disperdono = diffrazione

Onde Incidenti

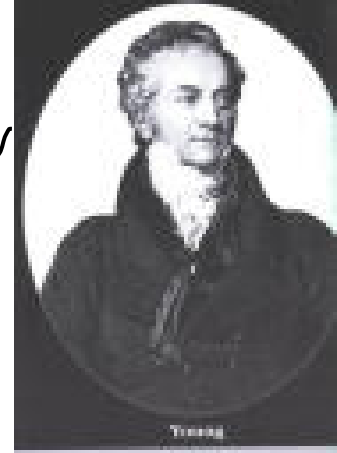


Dispersione della perturbazione

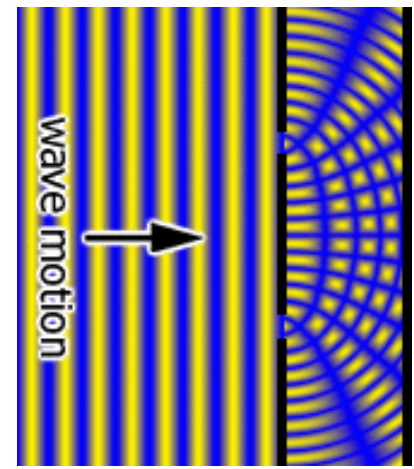
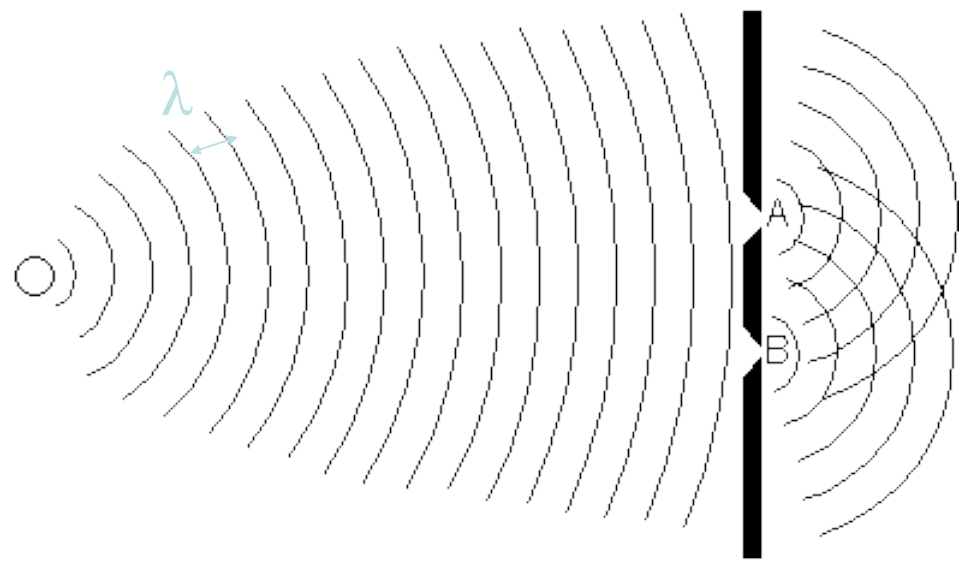


Newton credeva che la luce fosse fatta di particelle:  
teoria “**corpuscolare**”

# Lunghezza d'onda, $\lambda$



Thomas Young misurò la lunghezza d'onda usando due fenditure: figura di interferenza



Frangere Multiple

La lunghezza d'onda della luce è molto piccola:

rosso	400	→	700	nm
blu	4000	→	7000	Å

# Onde di cosa ?

Maxwell (1860) studiò i campi  
elettrici & magnetici

Ricavò 4 equazioni: →

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{B} &= \frac{\vec{j}}{\epsilon_0 c^2} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}\end{aligned}$$



Predice la velocità delle  
onde e-m  $c=300,000 \text{ km s}^{-1}$

→ La luce è un'onda e-m !!

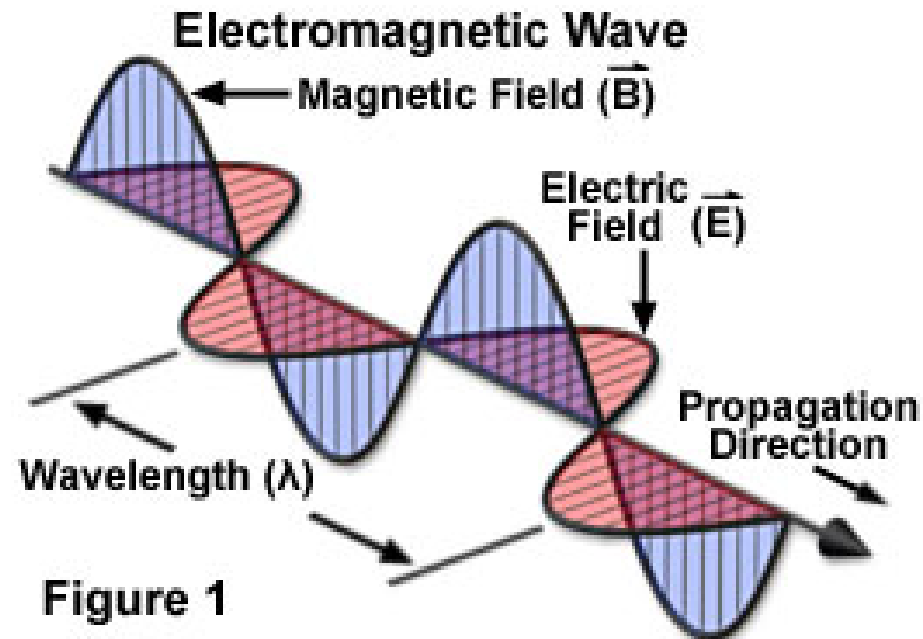
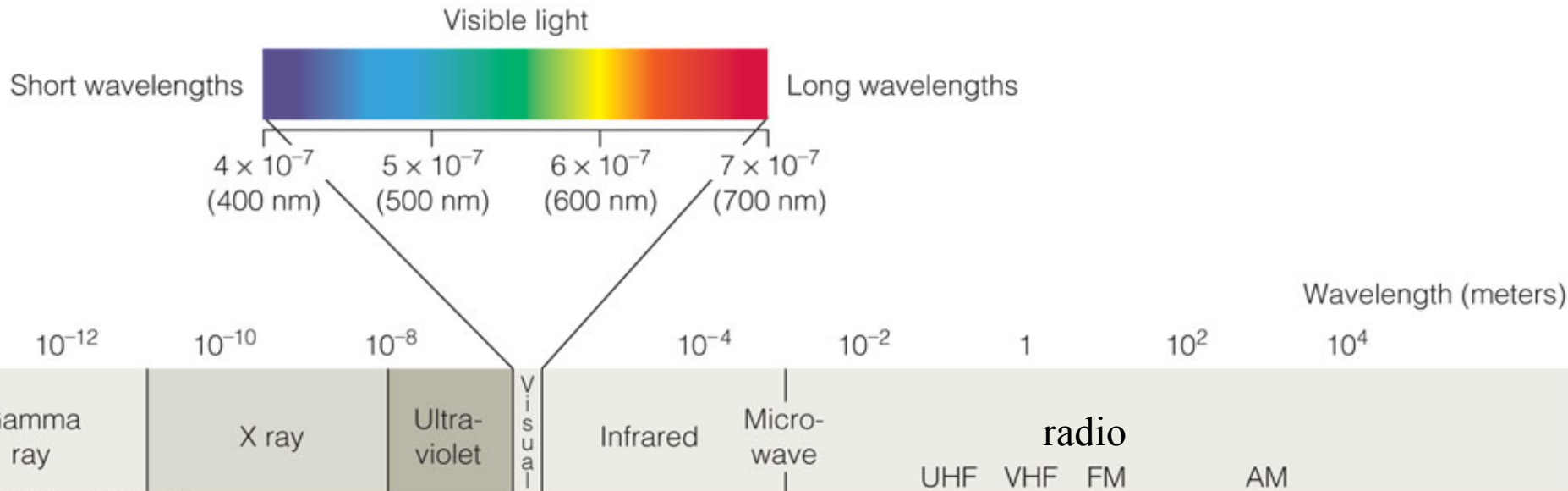


Figure 1

# Altre lunghezze d'onda

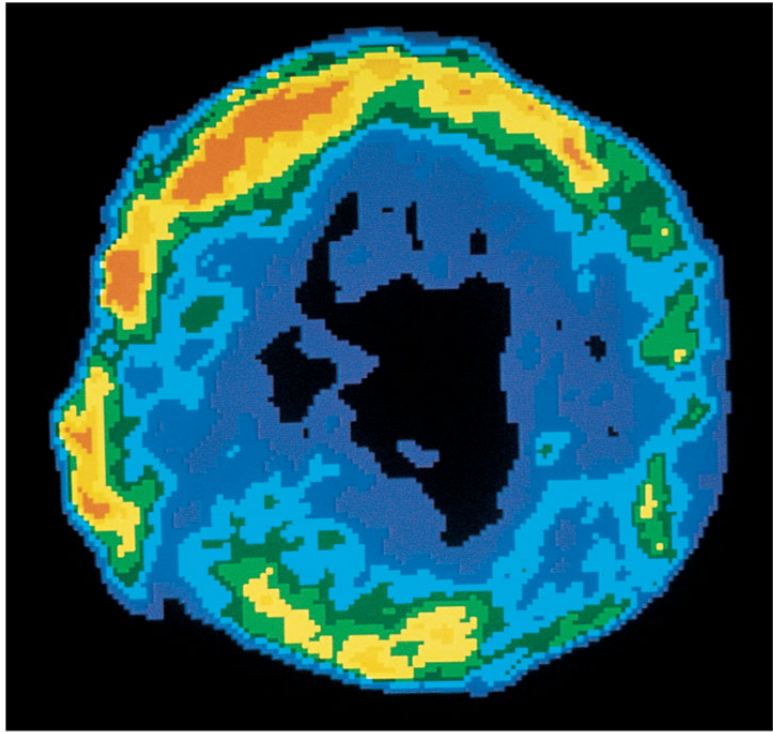
Nei ~100 anni seguenti, si sono scoperte onde e-m di differenti  $\lambda$



© 2005 Brooks/Cole - Thomson

Oggi gli Astronomi usano l'intero spettro e-m

# Radio telescopio



Infrared image



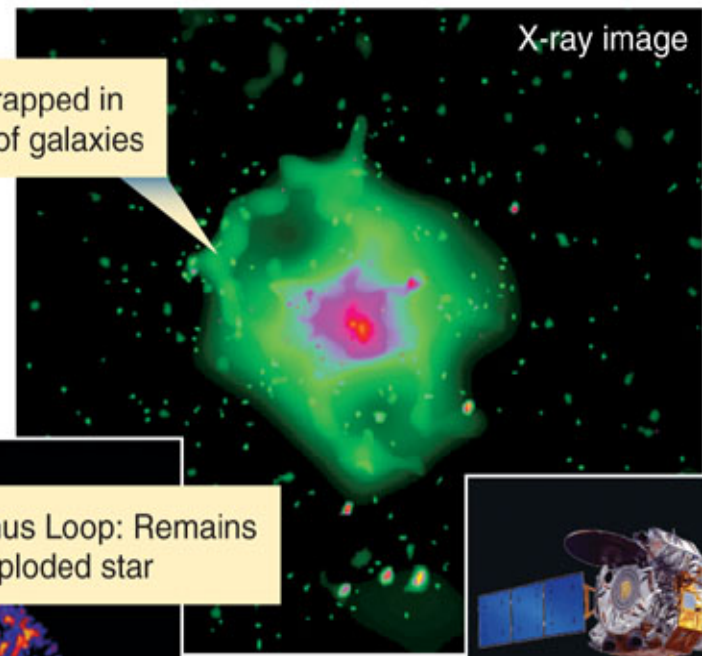
Stars

Interstellar dust warmed by starlight

IRAS



X-ray image

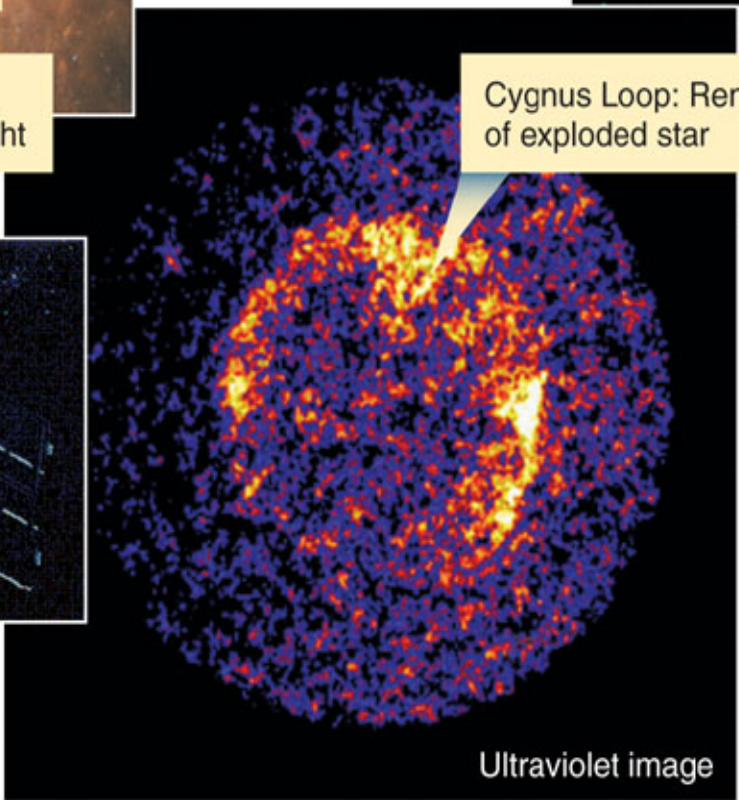


Hot gas trapped in a cluster of galaxies

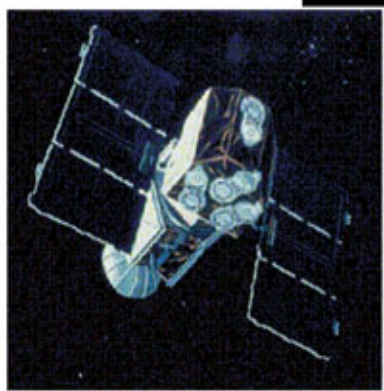
Chandra



Cygnus Loop: Remains of exploded star



Ultraviolet image

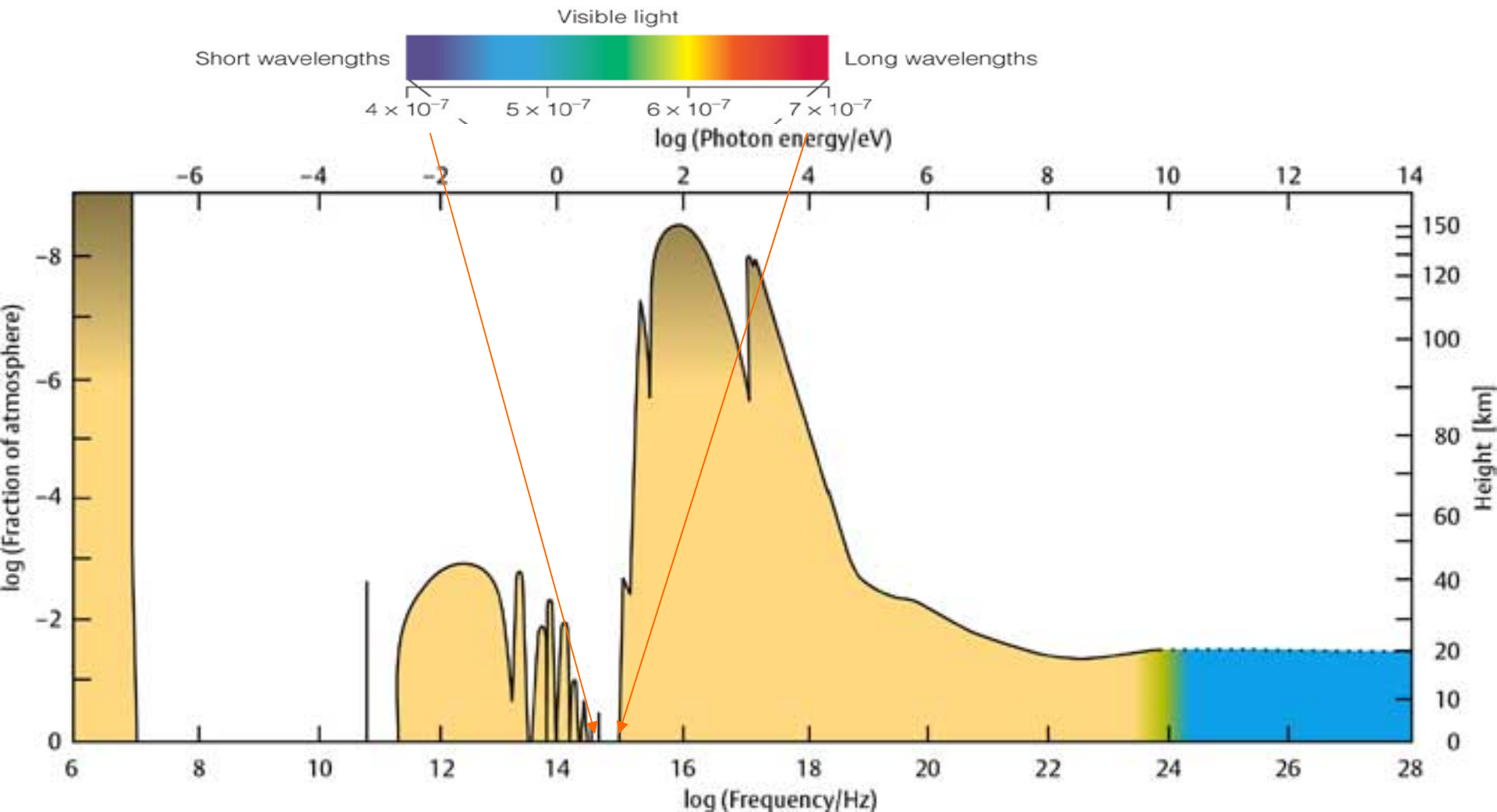


EUVE

Telescopi a  
Infrarosso  
Ultravioletto  
Raggi-X

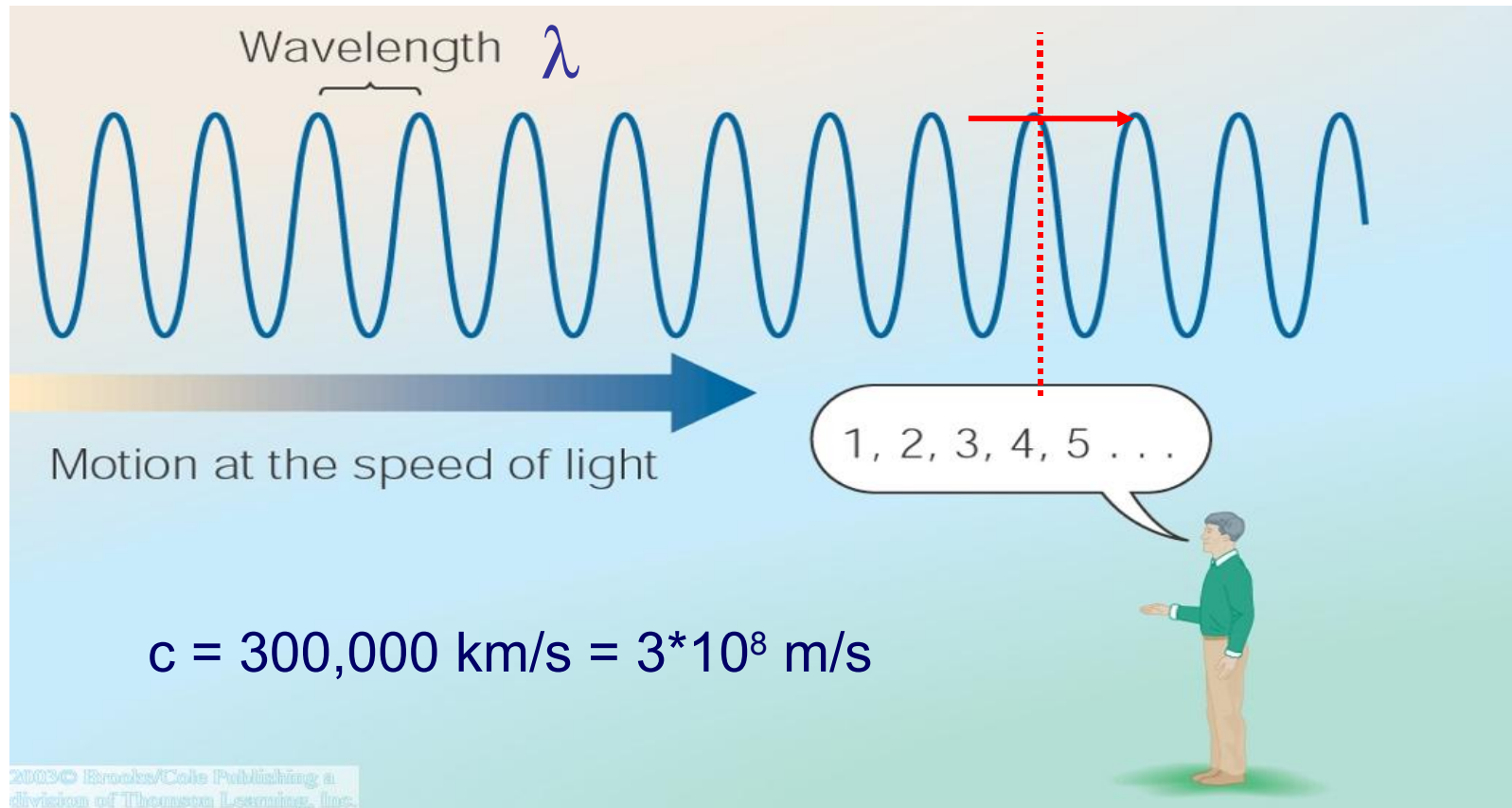
# Finestre Atmosferiche

Parti dello spettro e-m sono bloccate dalla nostra atmosfera



# Frequenza & l'equazione d'onda

Frequenza,  $f$  = numero d'onde che passano per un punto al secondo



Poichè  $f$  onde di lunghezza  $\lambda$  passano in 1 sec, si ha

$$c = f \lambda$$

Onde e-m spesso hanno frequenze molto grandi :

→ l'equazione d'onda si può anche scrivere  $f = c/\lambda$

→ ricorda: c è grande e  $\lambda$  è piccolo → f è enorme

Esempio: frequenza della luce verde,  $\lambda = 500 \text{ nm}$  :

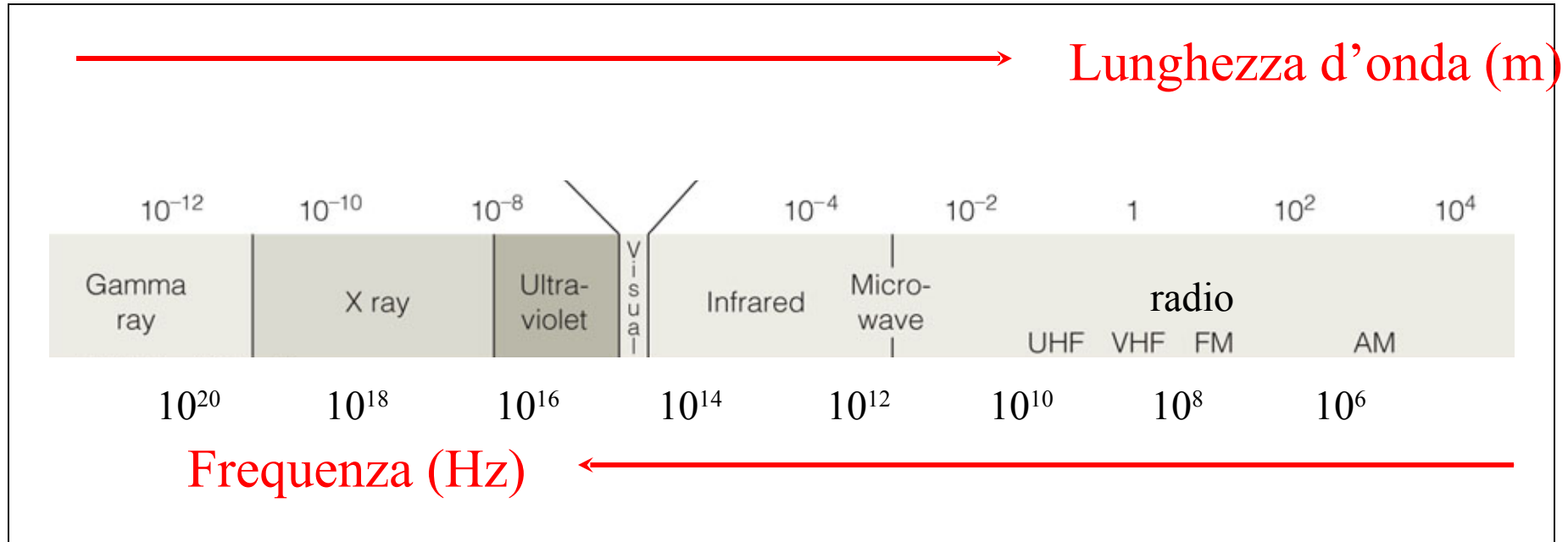
$$f = 3 \times 10^8 / 500 \times 10^{-9} = 6 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

= 6 cento mila miliardi di oscillazioni al secondo

NB: le unità di f sono Hz (Hertz) = # per sec; ( $s^{-1}$ )

Per le onde radio, spesso si usano MHz o GHz

$f$  e  $\lambda$  sono misure equivalenti per una onda e-m

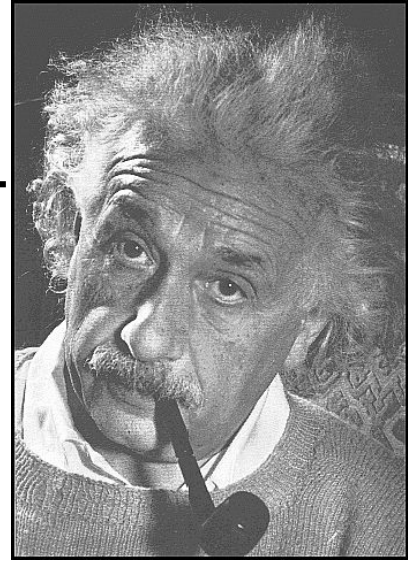
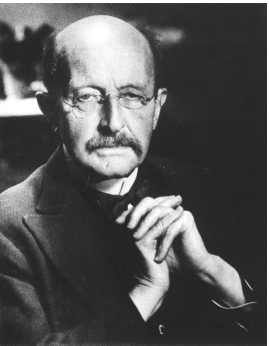


# Luce come particelle = fotoni

Einstein (1905) spiega l'effetto fotoelettrico:  
I fotoni di luce hanno energie proporzionali a  $f$

$$E = h f = hc / \lambda$$

$h$  = Planck's constant =  $6.6 \times 10^{-34}$  J s (Joules x secondo)



Le energie dei fotoni sono molto piccole

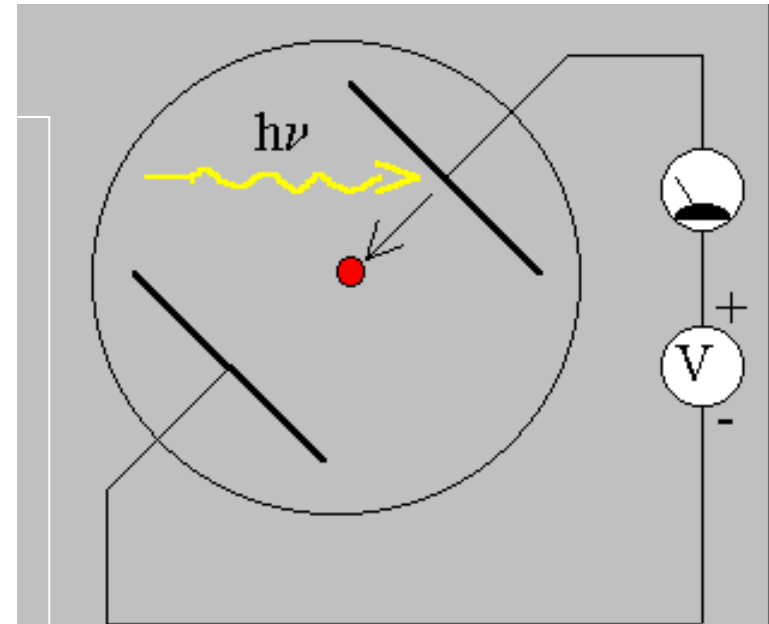
e.g. luce rossa :  $f=5 \times 10^{14}$  Hz

$$E_{\text{red}} = 6.6 \times 10^{-34} \times 5 \times 10^{14} = 3 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Pila da 30 Watt (= 30 J/s) emette :

$$30/3 \times 10^{-19} = 10^{20} \text{ fotoni/s}$$

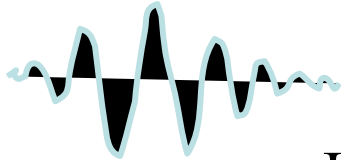
= 100 miliardi di miliardi al sec.



# Onde e/o particelle?

La luce è un'onda o una particella ?

Ha le proprietà di entrambe



Un pacchetto d'onda : un gruppo di onde localizzate

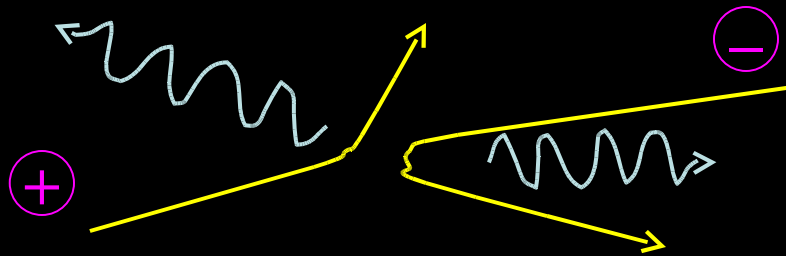
Anche le “Particelle” si comportano come onde  
e.g. protoni & elettroni diffrangono e interferiscono

Nella moderna Fisica (quantistica), tutto ha comportamento duale (le cose più massive sono più simili a particelle).

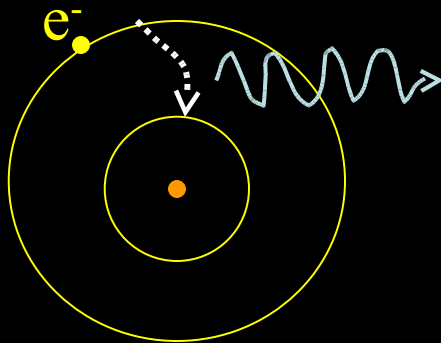
# Generazione della luce

Due meccanismi di base che producono luce :

Carica accelerata (cambia velocità &/o direzione)



b) Quando gli elettroni saltano tra orbite negli atomi



# Energia termica & temperatura

“Caldo”

Moto di Molecole/atoms :

qualitativo: **più caldo** → **moto più veloce**

quantitativo: T proporzionale a  $\langle KE_{picle} \rangle$

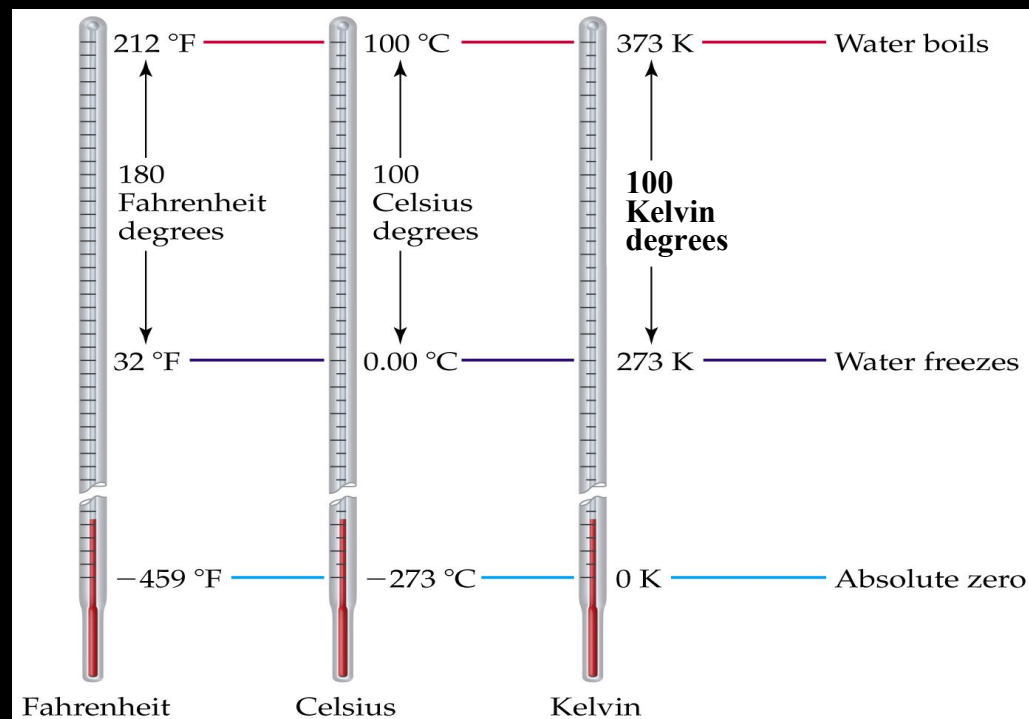
(energia cinetica media per particella)

Scale di Temperatura:

Kelvin :

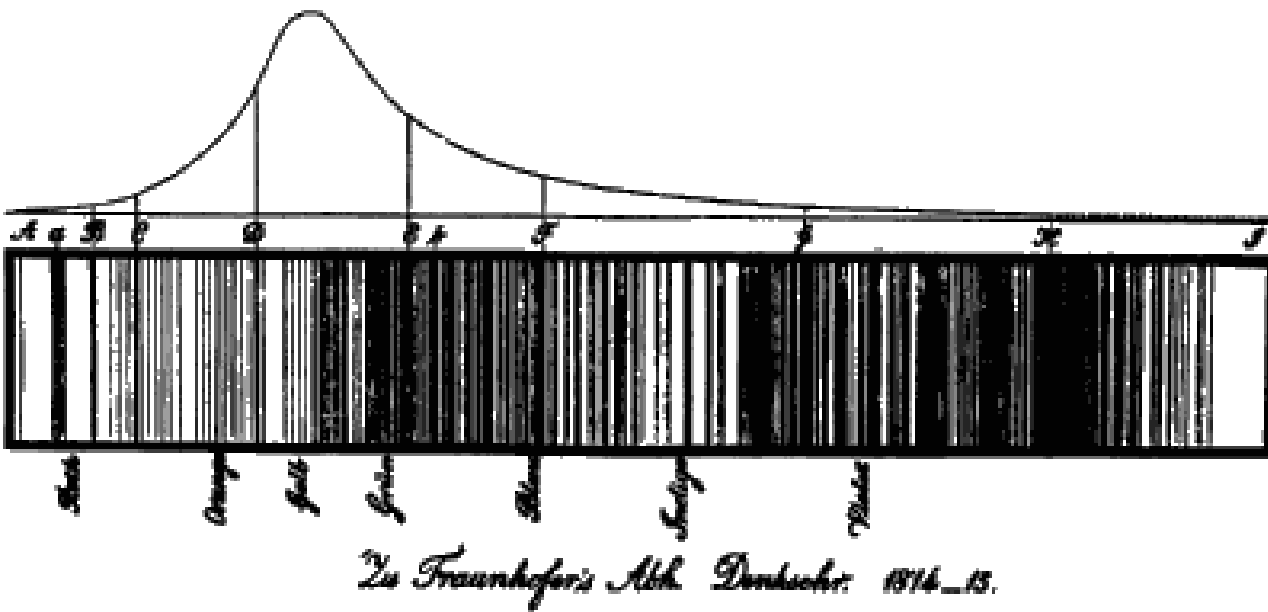
0 K = zero moto

$$[ K = C + 273 ]$$



# Fraunhofer e le righe Spettrali

Scoprì le **righe spettrali** nel Sole (1814)



Joseph von Fraunhofer  
(1787-1826)



Spettrografo a prisma

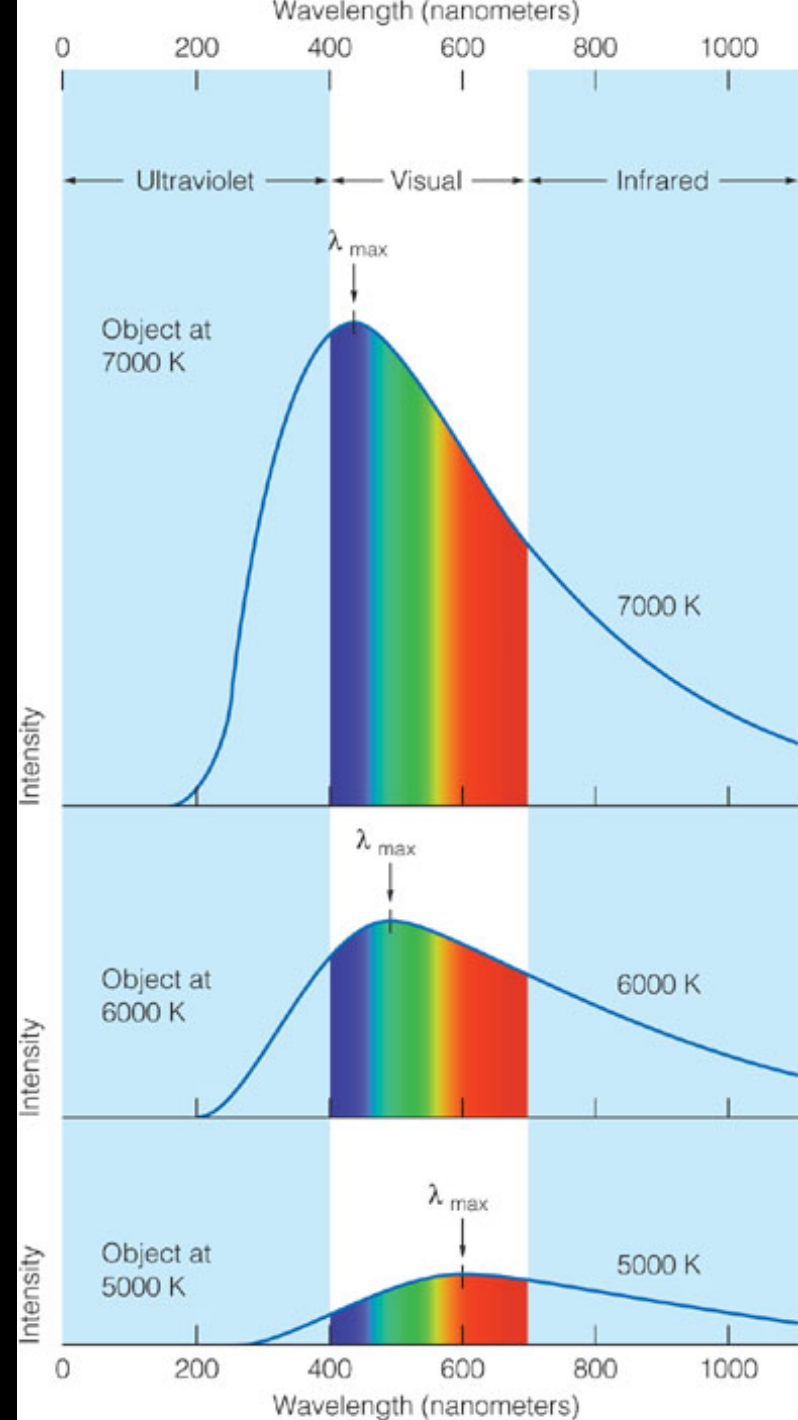
# Radiazione termica

Molecole che rimbalzano → fotoni  
Spettro di energie → Intervallo di colori  
Rimbalzi alle alte energie → fotoni + blu

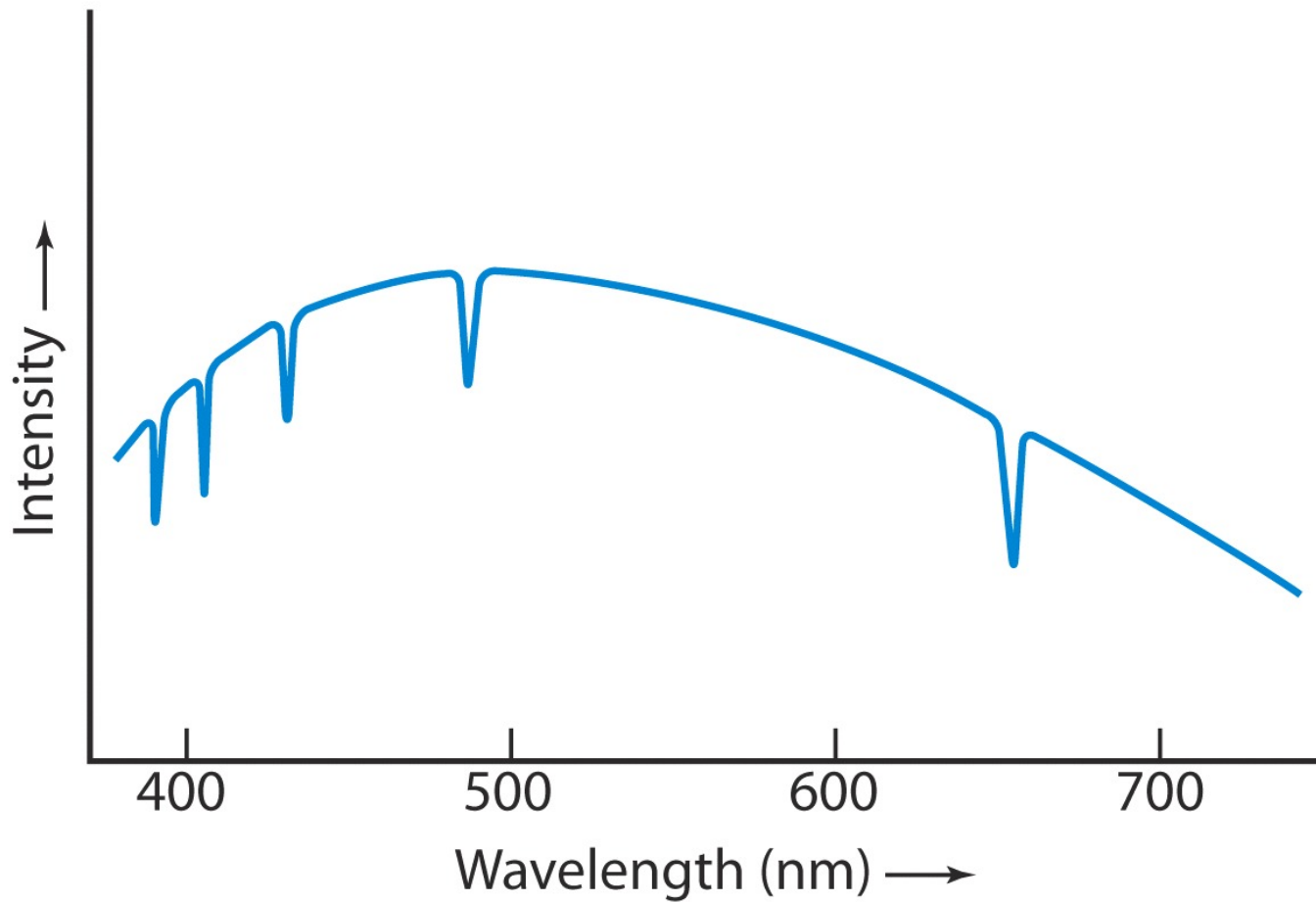
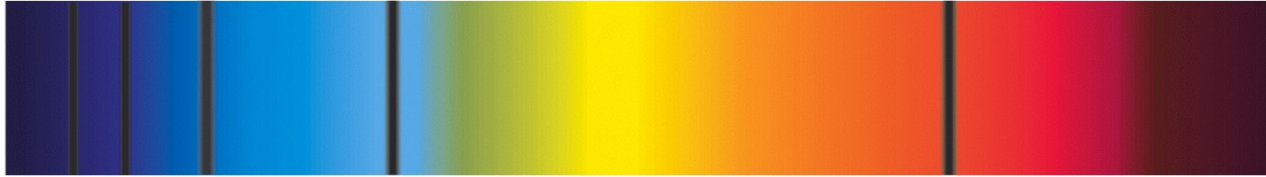
Pura generazione della luce  
puro assorbimento della luce.  
In questo caso → nero puro

Ciò produce “Spettro di Corpo Nero”  
= puro “Spettro termico”  
= forma spettrale unica  
dipende solo dalla temperatura.

Le Stelle approssimano lo spettro termico



# Righe di Assorbimento



# Spettri con righe di emissione da atomi specifici

HYDROGEN



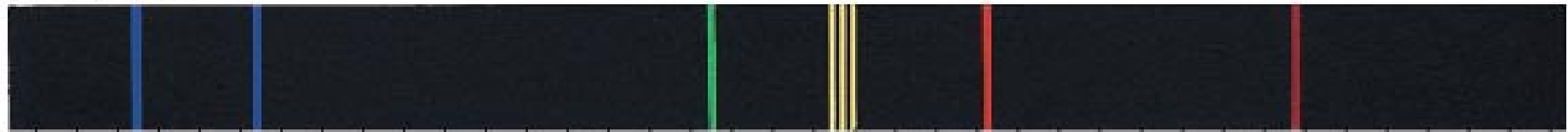
HELIUM



SODIUM



MERCURY



400

450

500

550

600

650

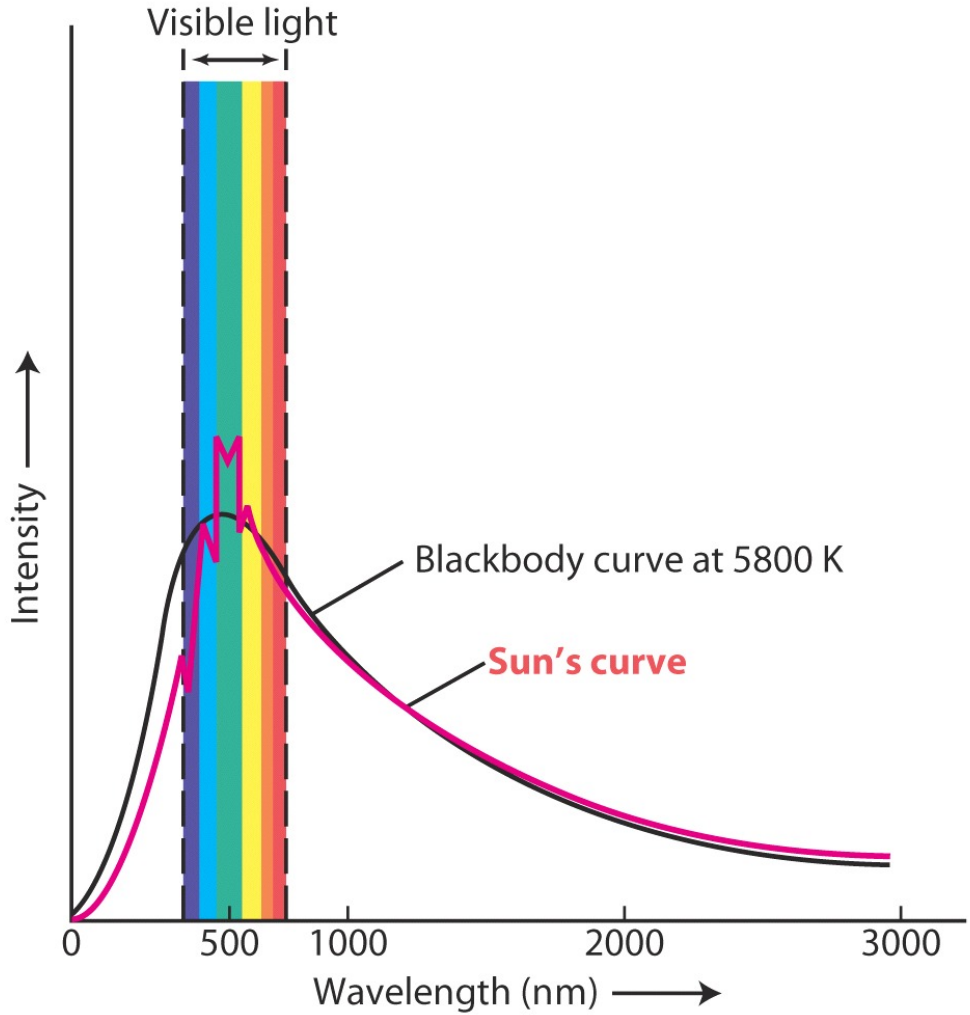
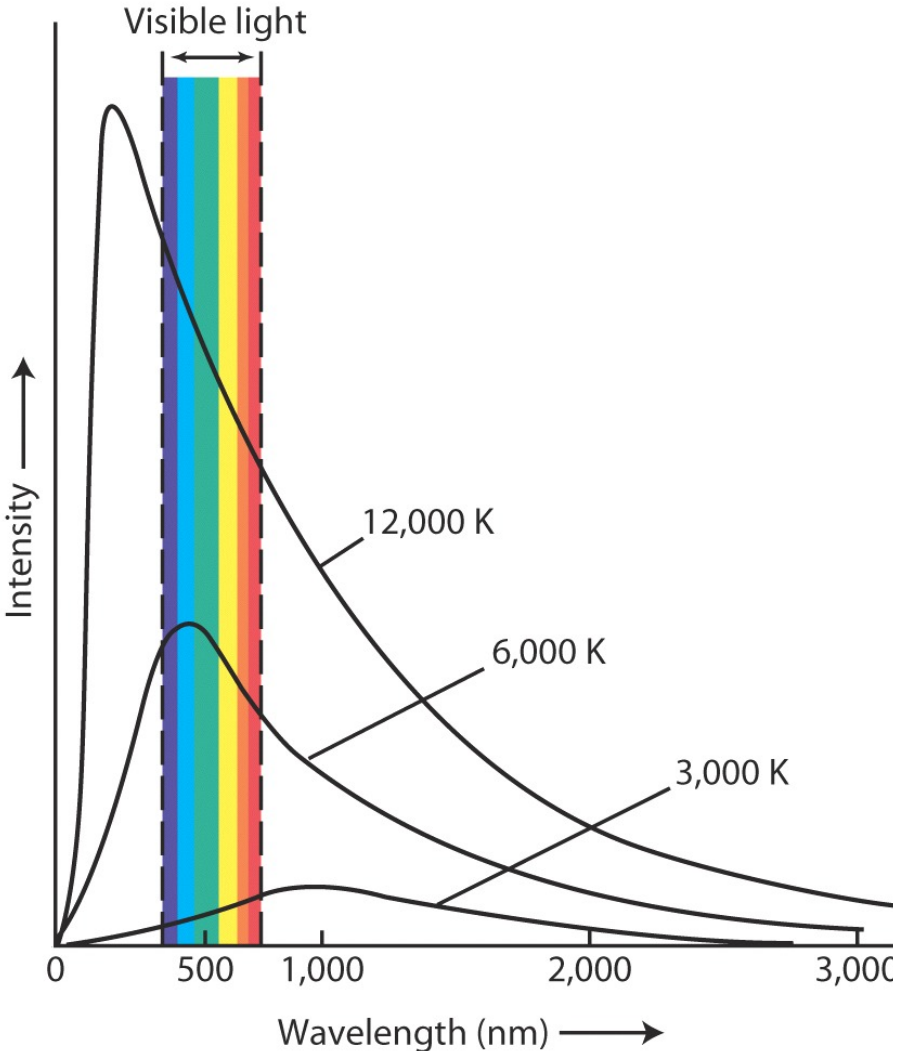
700

750

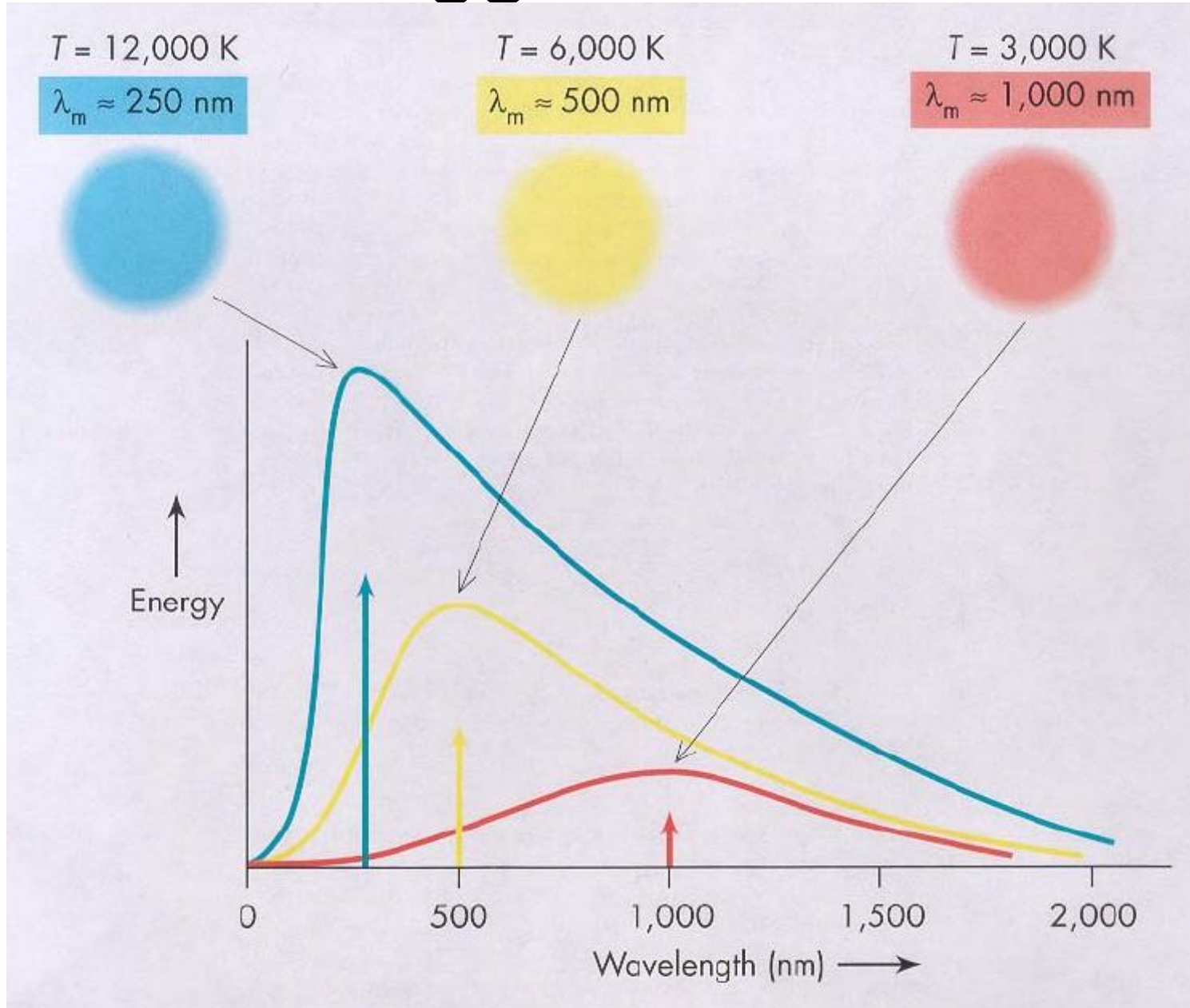
Nanometers

Insieme di righe uniche per ogni atomo.

# lo Spettro della Radiazione di Blackbody



# Legge di Wien



# Legge di Stephan-Boltzmann

- Per blackbodies (corpo nero), la brillantezza, o intensità, o l'energia prodotta, è proporzionale a  $T^4$  (in Kelvin).
- Se una stella grande come il Sole, fosse due volte più calda, sarebbe 16 volte più brillante.

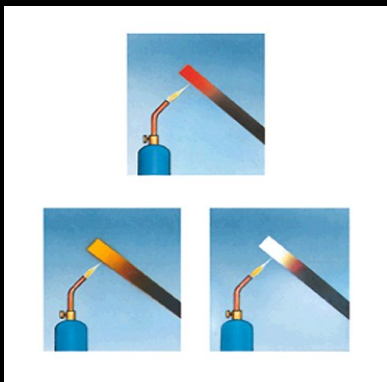
# Caratteristiche

(a) Oggetti più caldi → curve → blu

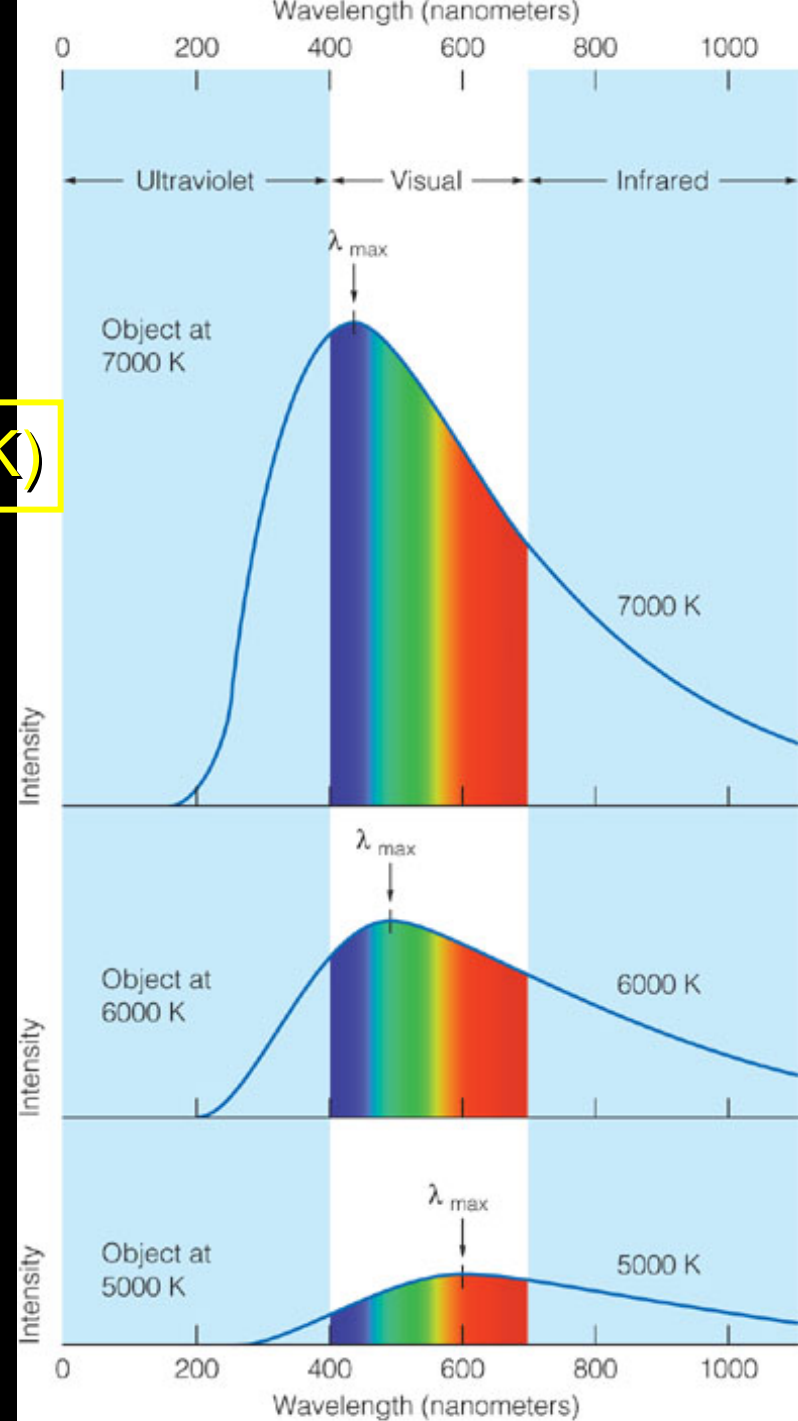
**Legge di Wien :  $\lambda_{\text{picco}}(\text{nm}) = 3 \times 10^6 / T(\text{K})$**

(b) Oggetti + caldi → più fotoni

**Stefan-Boltzmann :  $E = \sigma T^4$**   
E in Watt per metro quadrato  
T in Kelvin  
 $\sigma$  costante di Stefan =  $5.7 \times 10^{-8}$



Umani: 300K, 10 μm  
Emissione termica



# Radiazione di Corpo Nero

- Equilibrio tra emissione & assorbimento
  - Si applica alla fotosfera

- **Legge di Kirchhoff:**  $\epsilon_\nu = n_\nu^2 \alpha_\nu B_\nu(T)$

$\epsilon$  - coefficiente di emissione ( $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-3} \text{Hz}^{-1} \text{rad}^{-1}$ )

$\alpha$  -coefficiente di assorbimento ( $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-3} \text{Hz}^{-1} \text{rad}^{-1}$ )

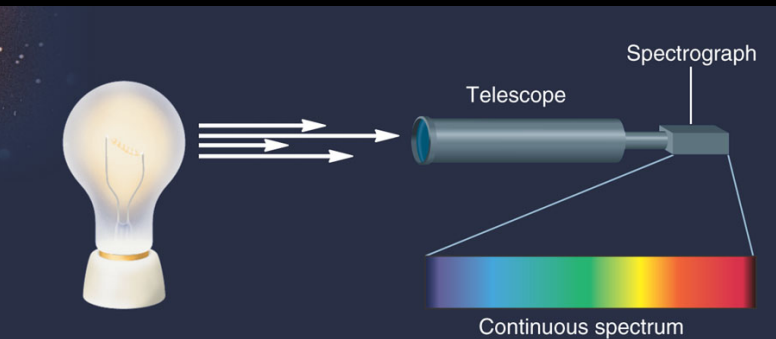
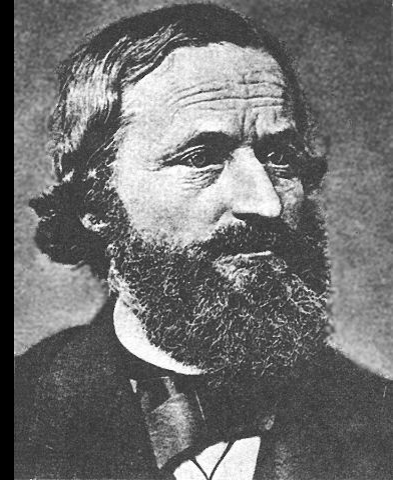
$n$  - indice di rifrazione del mezzo

$B(T)$  -funzione universale di brillantezza alla temperatura T  
( $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{cm}^{-1} \text{steradian}^{-1}$ )

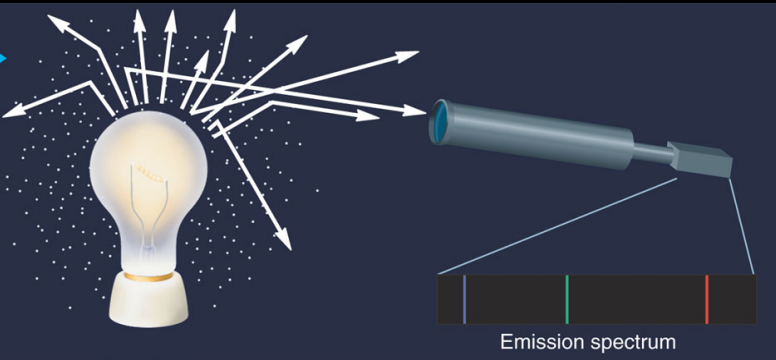
$\nu$  - frequenza (Hz)

# Leggi di Kirchoff

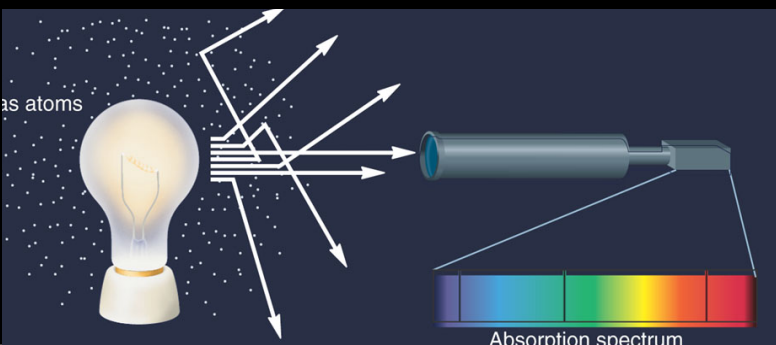
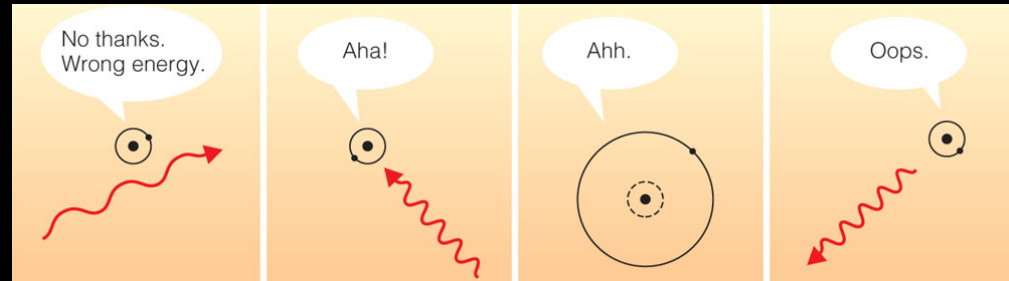
Definiscono le condizioni per le formazioni di spettri



Continuo :  
Solidi caldi o gas densi

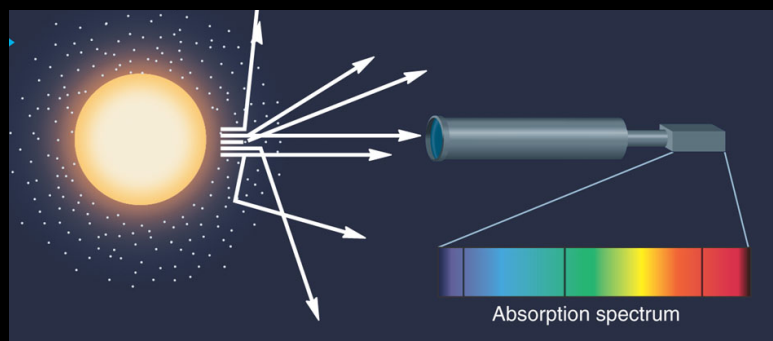


Emissione : gas caldo e rarefatto



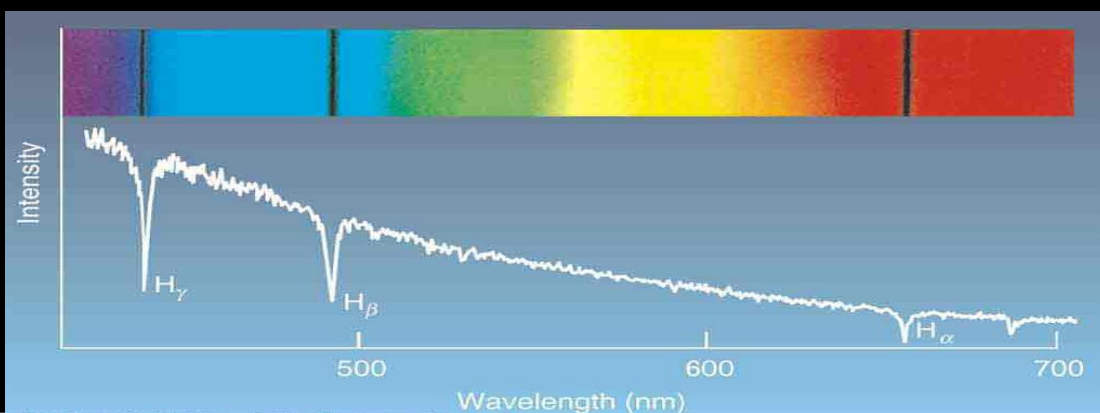
Absorbimento :  
Sorgente continua vista  
un gas sottile e caldo

# Gli Spettri stellari hanno righe di assorbimento



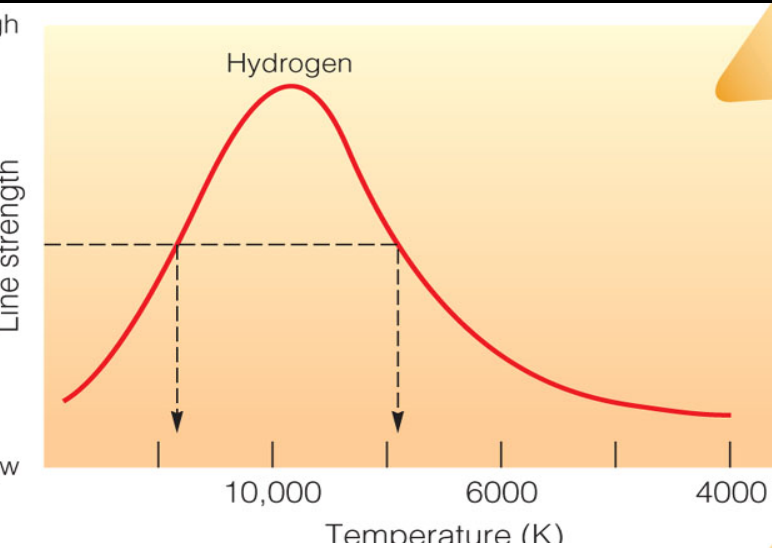
Gas denso e caldo sotto ad un  
Gas sottile e freddo (atmosfera)

Spettro ha molte righe in assorbimento



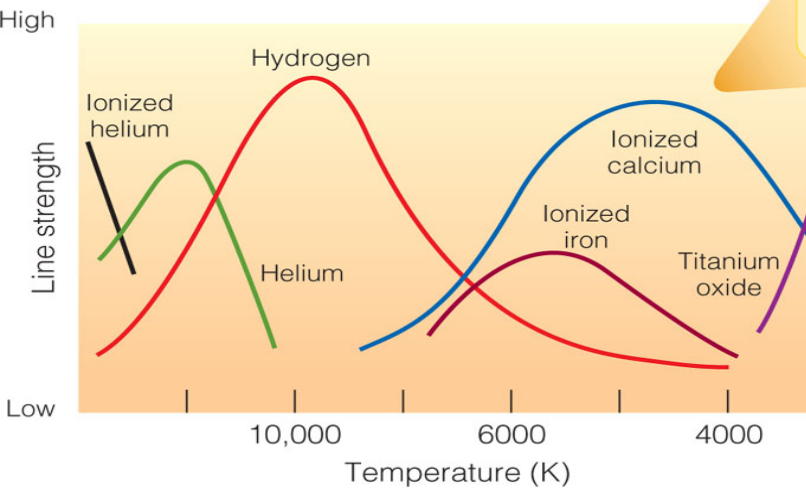
# Forza delle righe di Assorbimento

Dipende dalla temperatura



Righe Balmer deboli in stelle molto calde  
→ tutto l'H è ionizzato

Righe Balmer molto deboli in stelle fredde  
→ servono e nel livello  $n=2$



Sequenza della forza delle righe

He ionizzate

He neutro

Balmer H

“metalli” ionizz.

“metalli” neutri

molecole.

O  
B  
A  
F  
G  
K  
M

Molto calde  
~ 20,000K

“fredde”  
~ 3000K

# Legge di Planck

## Brillanza di Blackbody vs. $\lambda$ (o $\nu$ ) e $T$

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2 n_{\nu}^2}{\lambda^5} \frac{1}{[\exp(hc/\lambda k_B T) - 1]}$$

$B(T)$  – Funzione di Planck (erg s<sup>-1</sup> cm<sup>-2</sup> cm<sup>-1</sup> sterad<sup>-1</sup>)

$h$  – Costante di Planck = 6.63 10<sup>-27</sup> erg s

$\nu$  – frequenza in Hz

$\lambda$  – lunghezza d'onda in cm

$n$  – indice di rifrazione del mezzo

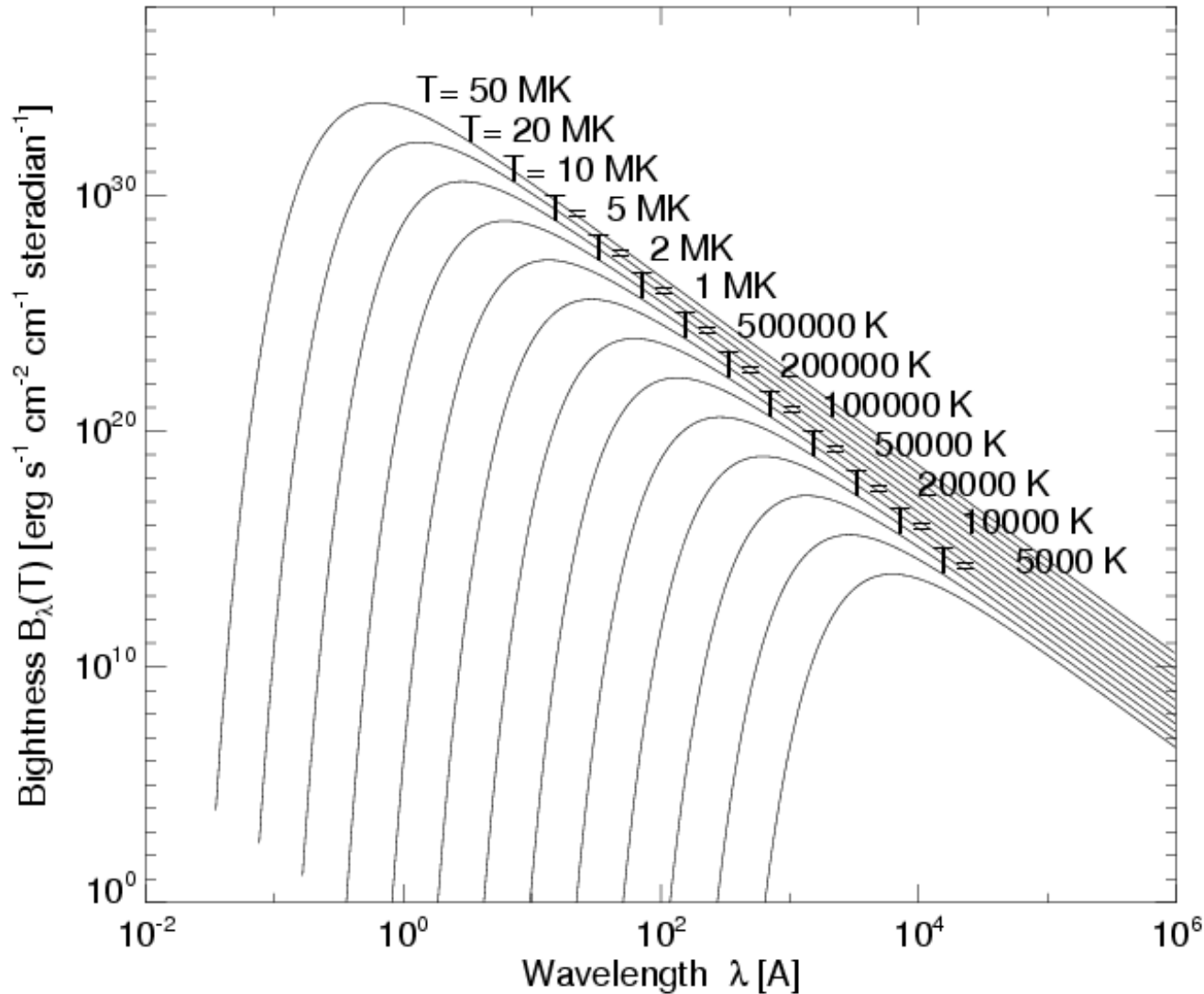
$c$  – velocità della luce = 3.0 10<sup>10</sup> cm s<sup>-1</sup>

$k_B$  – Costante di Boltzmann = 1.38 10<sup>-16</sup> erg K<sup>-1</sup>

$T$  – temperatura in K

# Radiazione di corpo nero

## Funzione di Planck - $B_\lambda(T)$



# Aprossimazioni della legge di Planck

## Lunghezza d'onda corte (UV, Raggi-X)

**Legge di Wien**  $B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3 n_\nu^2}{c^2} \exp\left(-\frac{h\nu}{k_B T}\right)$

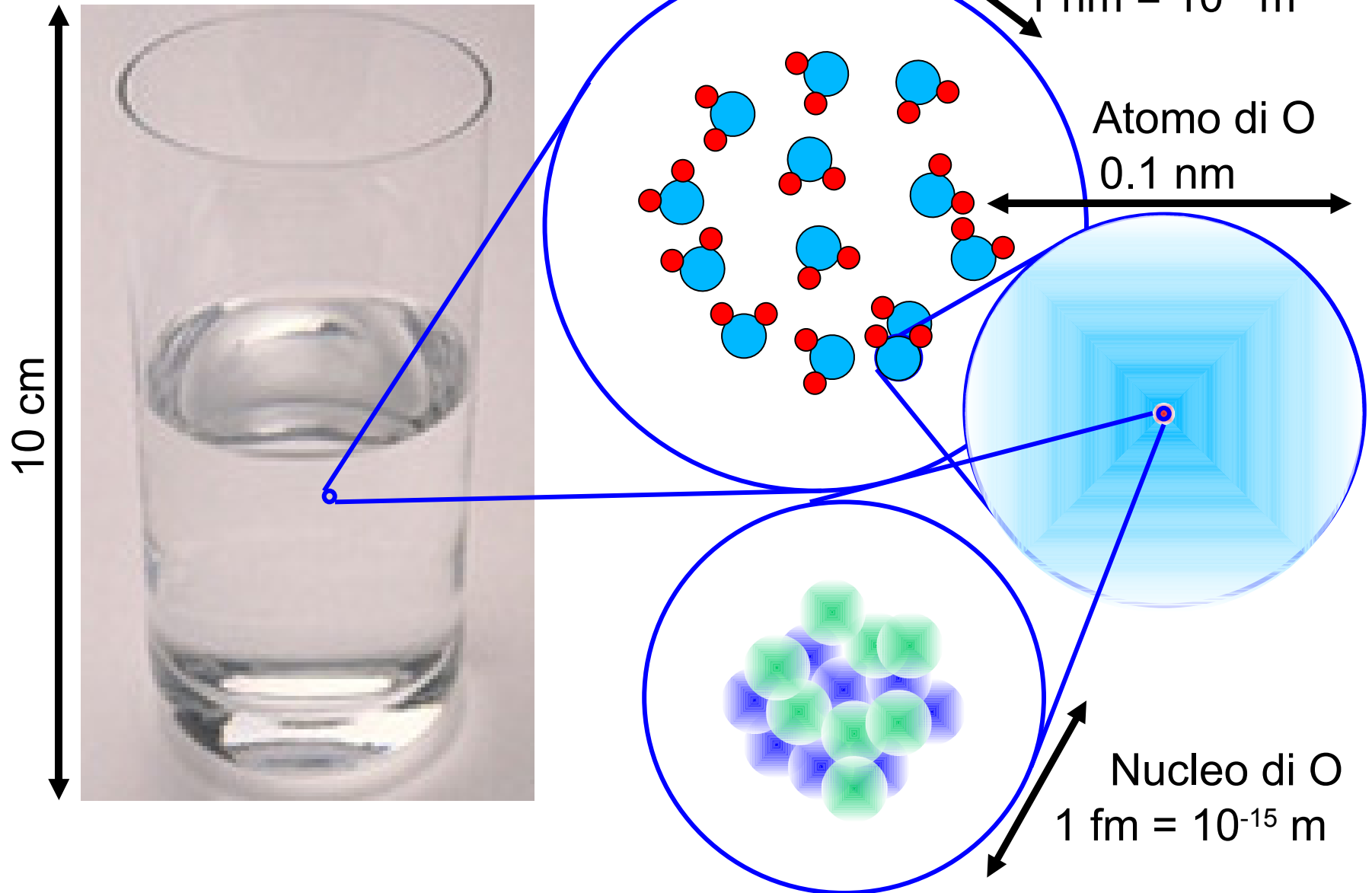
$k_B$  – Costante di Boltzmann =  $1.38 \cdot 10^{-16}$  erg K<sup>-1</sup>

## Lunghezza d'onda lunga (Radio)




$$B_\nu(T) = \frac{2\nu^2 k_B T n_\nu^2}{c^2}$$

**Legge di Rayleigh-Jeans**

# La Fisica in un bicchier d'acqua



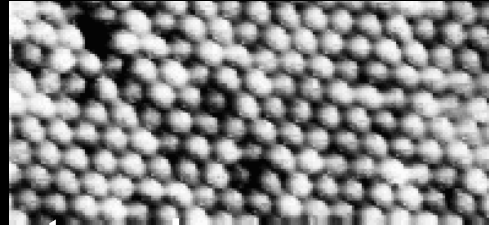
# Protoni, neutroni, elettroni

-  **Elettroni**  
Carica -1  
Massa  $9.110 \times 10^{-28}$  g
-  **Protoni**  
carica +1  
1832 volte più massivo dell'elettrone (massa  $1.673 \times 10^{-24}$  g)
-  **Neutroni**  
Nessuna carica elettrica  
Un pò più massivo del protone (massa  $1.675 \times 10^{-24}$  g)

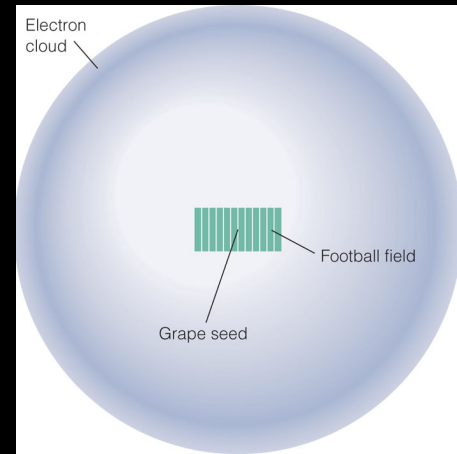
# Atomi & Particelle

- (i) elettroni saltano → colori/luce → diagnostica
- (ii) nuclei combinano → potenza delle stelle → costruzione degli elementi

- Atomi  $\sim 10^{-10}$  m



- (b) **Nuclei** più piccoli  $\sim 10^{-5}$  atomi  
contengono 99.95% della massa;  
carica +ve

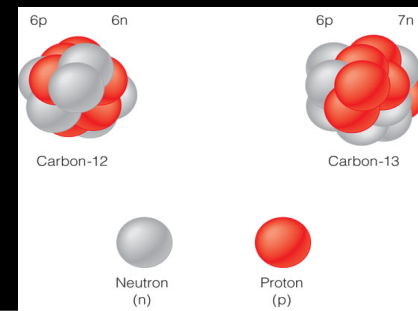


- (c) # protoni definiscono gli **elementi** :

1:H, 2:He, 3:Li, .... 6:C, 7:N, .... 26:Fe, .... 92:U

- (d) # neutroni definiscono **isotopi** :

e.g.  $C^{12}$  : 6p6n ;  $C^{13}$  : 6p7n ;  $C^{14}$  : 6p8n



# Periodic Table of the Elements

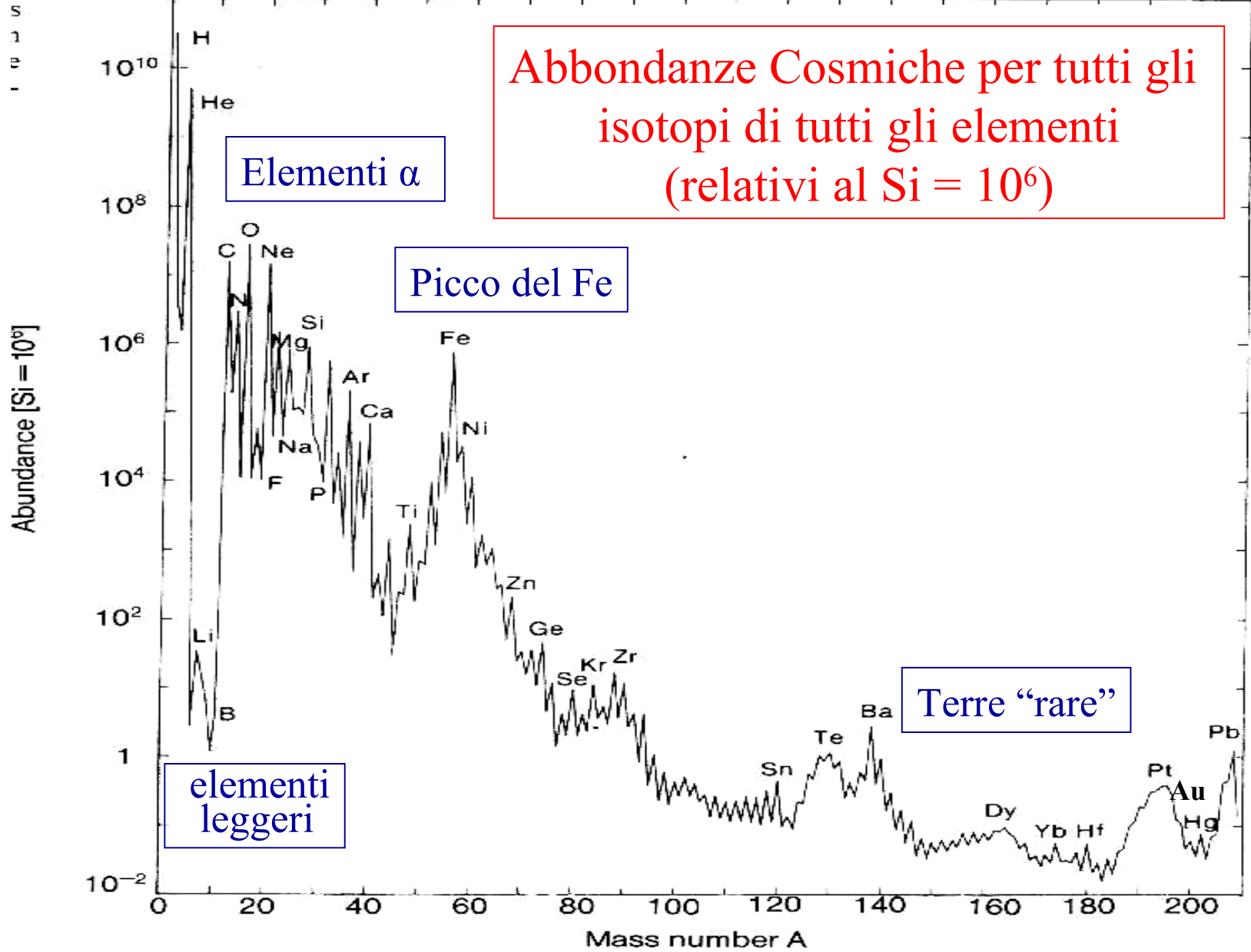
1A																	0					
1	<b>H</b>															<b>He</b>						
	IIA															III A	IV A	V A	VI A	VII A		
2	3	4															5	6	7	8	9	10
	<b>Li</b>	<b>Be</b>															<b>B</b>	<b>C</b>	<b>N</b>	<b>O</b>	<b>F</b>	<b>Ne</b>
3	11	12	III B	IV B	V B	VI B	VII B	— VII —				IB	IB	13	14	15	16	17	18			
	<b>Na</b>	<b>Mg</b>												<b>Al</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cl</b>	<b>Ar</b>			
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36				
	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Sc</b>	<b>Ti</b>	<b>V</b>	<b>Cr</b>	<b>Mn</b>	<b>Fe</b>	<b>Co</b>	<b>Ni</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Ga</b>	<b>Ge</b>	<b>As</b>	<b>Se</b>	<b>Br</b>	<b>Kr</b>				
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54				
	<b>Rb</b>	<b>Sr</b>	<b>Y</b>	<b>Zr</b>	<b>Nb</b>	<b>Mo</b>	<b>Tc</b>	<b>Ru</b>	<b>Rh</b>	<b>Pd</b>	<b>Ag</b>	<b>Cd</b>	<b>In</b>	<b>Sn</b>	<b>Sb</b>	<b>Te</b>	<b>I</b>	<b>Xe</b>				
6	55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86				
	<b>Cs</b>	<b>Ba</b>	<b>*La</b>	<b>Hf</b>	<b>Ta</b>	<b>W</b>	<b>Re</b>	<b>Os</b>	<b>Ir</b>	<b>Pt</b>	<b>Au</b>	<b>Hg</b>	<b>Tl</b>	<b>Pb</b>	<b>Bi</b>	<b>Po</b>	<b>At</b>	<b>Rn</b>				
7	87	88	89	104	105	106	107	108	109	110												
	<b>Fr</b>	<b>Ra</b>	<b>+Ac</b>	<b>Rf</b>	<b>Ha</b>	<b>106</b>	<b>107</b>	<b>108</b>	<b>109</b>	<b>110</b>												

\* Lanthanide Series

58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
<b>Ce</b>	<b>Pr</b>	<b>Nd</b>	<b>Pm</b>	<b>Sm</b>	<b>Eu</b>	<b>Gd</b>	<b>Tb</b>	<b>Dy</b>	<b>Ho</b>	<b>Er</b>	<b>Tm</b>	<b>Yb</b>	<b>Lu</b>

+ Actinide Series

90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
<b>Th</b>	<b>Pa</b>	<b>U</b>	<b>Np</b>	<b>Pu</b>	<b>Am</b>	<b>Cm</b>	<b>Bk</b>	<b>Cf</b>	<b>Es</b>	<b>Fm</b>	<b>Md</b>	<b>No</b>	<b>Lr</b>



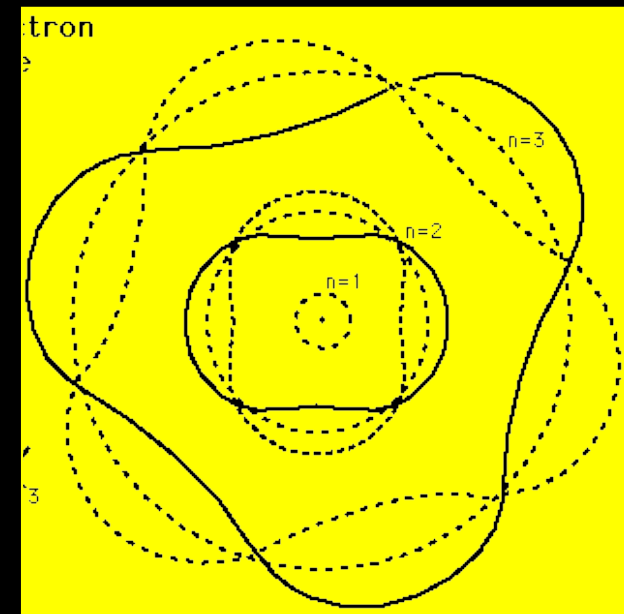
(e) Elettroni : 1/2000 massa dei p,n ; cariche -ve  
se  $\#e = \#p \rightarrow$  atomi neutri  
se  $\#e \neq \#p \rightarrow$  ioni carichi (meno e)

(f) Orbite

$e^- \leftarrow$  attraggono  $\rightarrow$  nuclei<sup>+</sup>  
& e meno massivi del nucleo } e orbitano il nucleo  
(analogo alla Terra che orbita Sole)

Non tutte le orbite sono possibili:  
devono avere numero intero di onde.

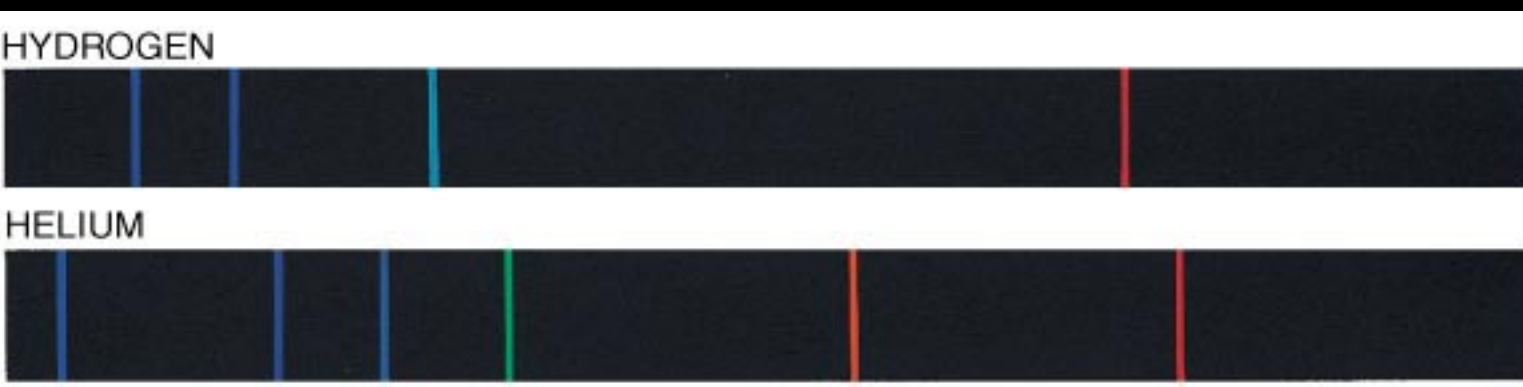
1,2,3 onde  $\rightarrow$  shells 1,2,3  
e stanno nelle shells , si riempiono  
prima le interne (energia + basse).



# Tre tipi di spettri:



Continuo



Righe di  
Emissione

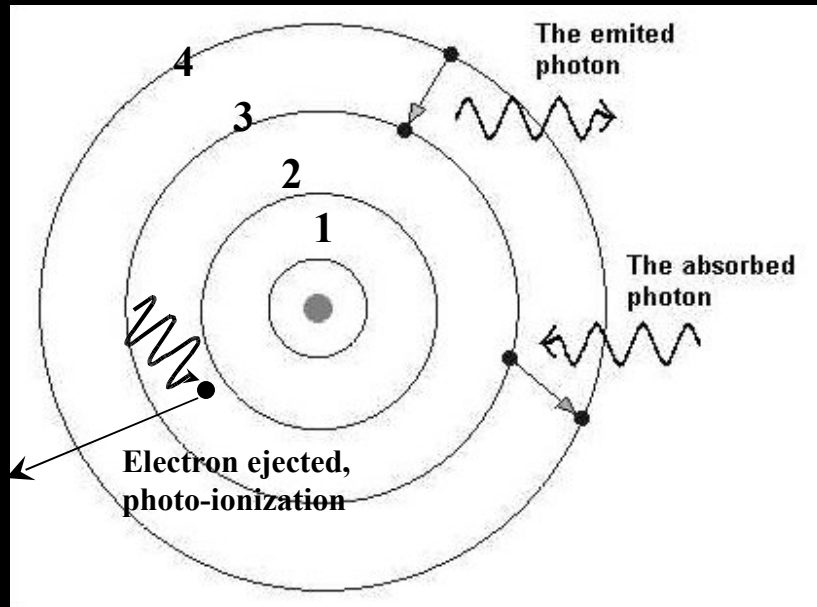


Righe di  
Assorbimento

# Luce $\leftrightarrow$ interazioni atomiche

I fotoni interagiscono in modo forte con gli elettroni negli atomi

- elettroni saltano in giù  $\rightarrow$  emissione di un fotone
- elettroni saltano in su  $\rightarrow$  assorbimento di un fotone



Energia del fotone = differenza  
fra le orbite

$$E_{\text{fotoni}} = hf = hc/\lambda = E_4 - E_3$$

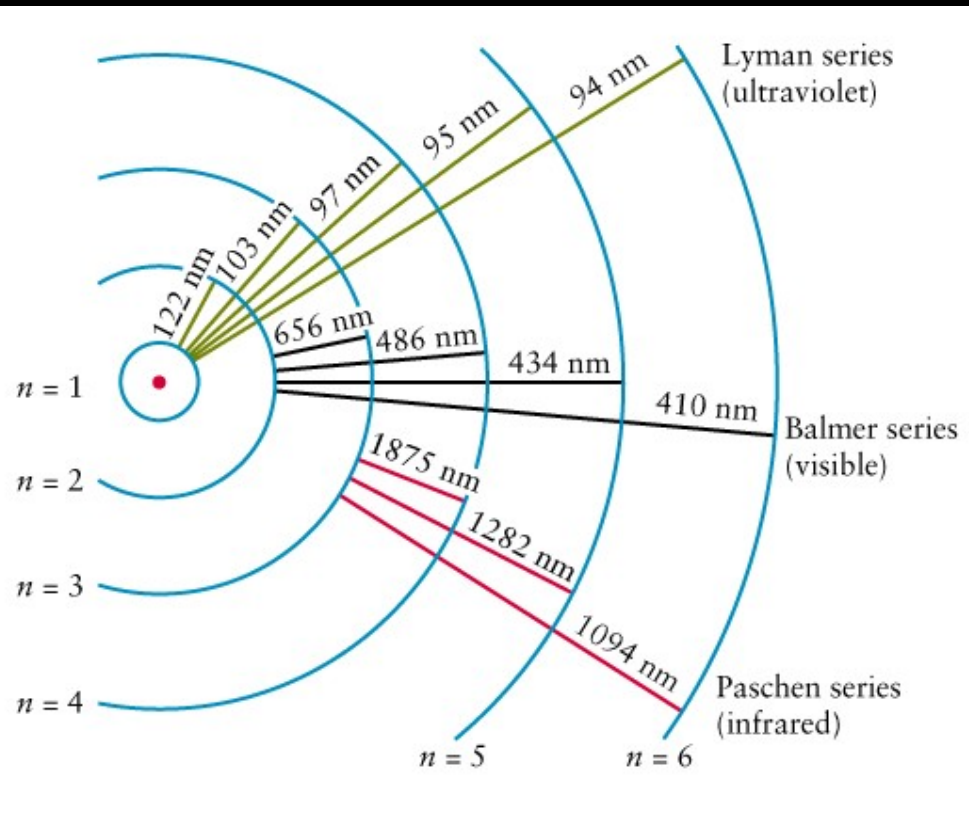
Singoli colori emessi/assorbiti

La scala dei colori dipende dalle orbite diverse per ogni atomo.

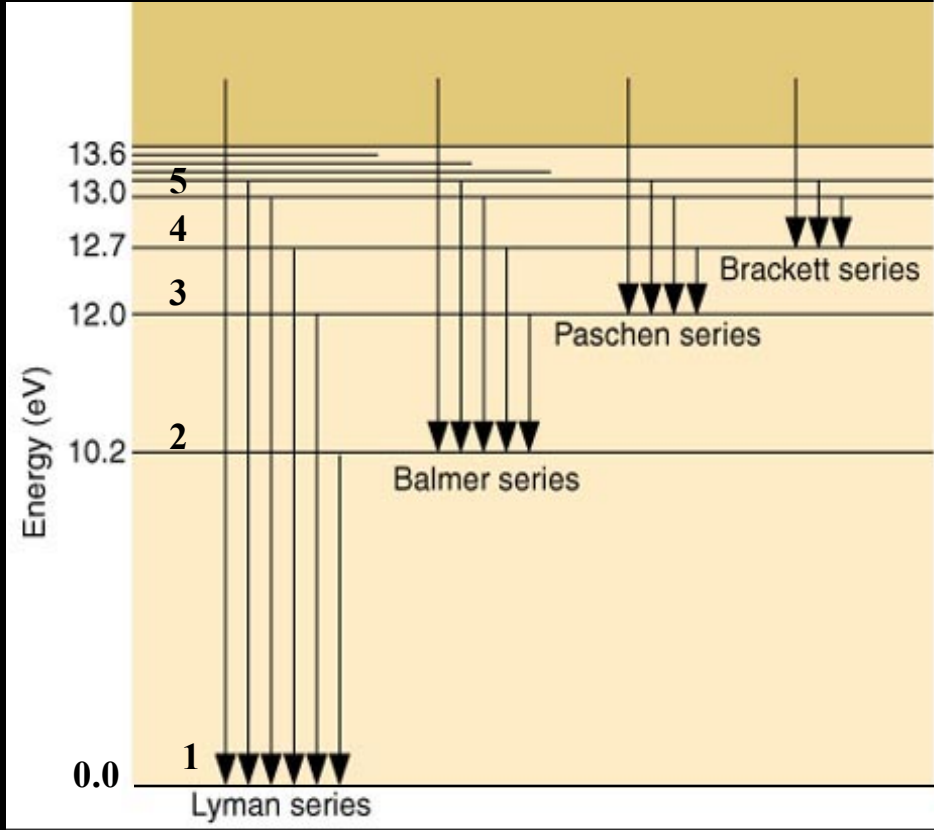
c) elettroni emessi (ionizzazione)  $\rightarrow$  fotoni energetici assorbiti

# Spettro dell' atomo di idrogeno

## Orbite di Bohr



## Diagramma dei livelli di Energia



Serie di righe spettrali: Lyman (UV); Balmer (ottico); Paschen (IR).....

UV  
Lyman

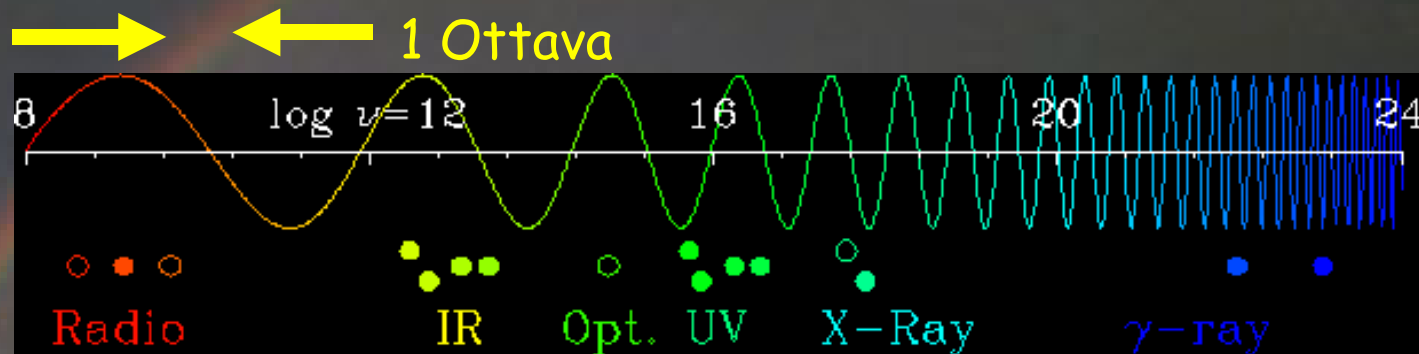
Visibile  
Balmer

Infrarosso  
Paschen

Lughezze d'onda →



Le Nebulose appaiono rosa  
a causa della riga Balmer H $\alpha$   
emessa a 656nm  
dall' idrogeno del gas.



56 Ottave (7 „Piani a coda“)



7 octaves

7 octaves

7 octaves

7 octaves

7 octaves

7 octaves

7 octaves

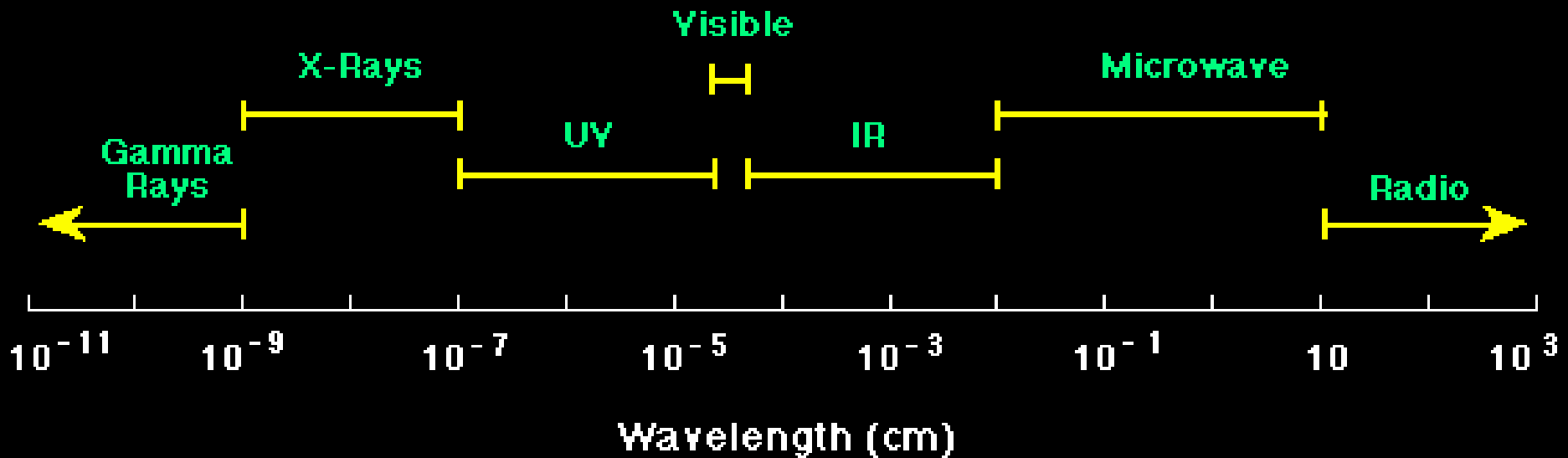


cosmic  
concerto

Transpose up by ~50 octaves = 7 pianos (~7 octaves each)

human  
concerto

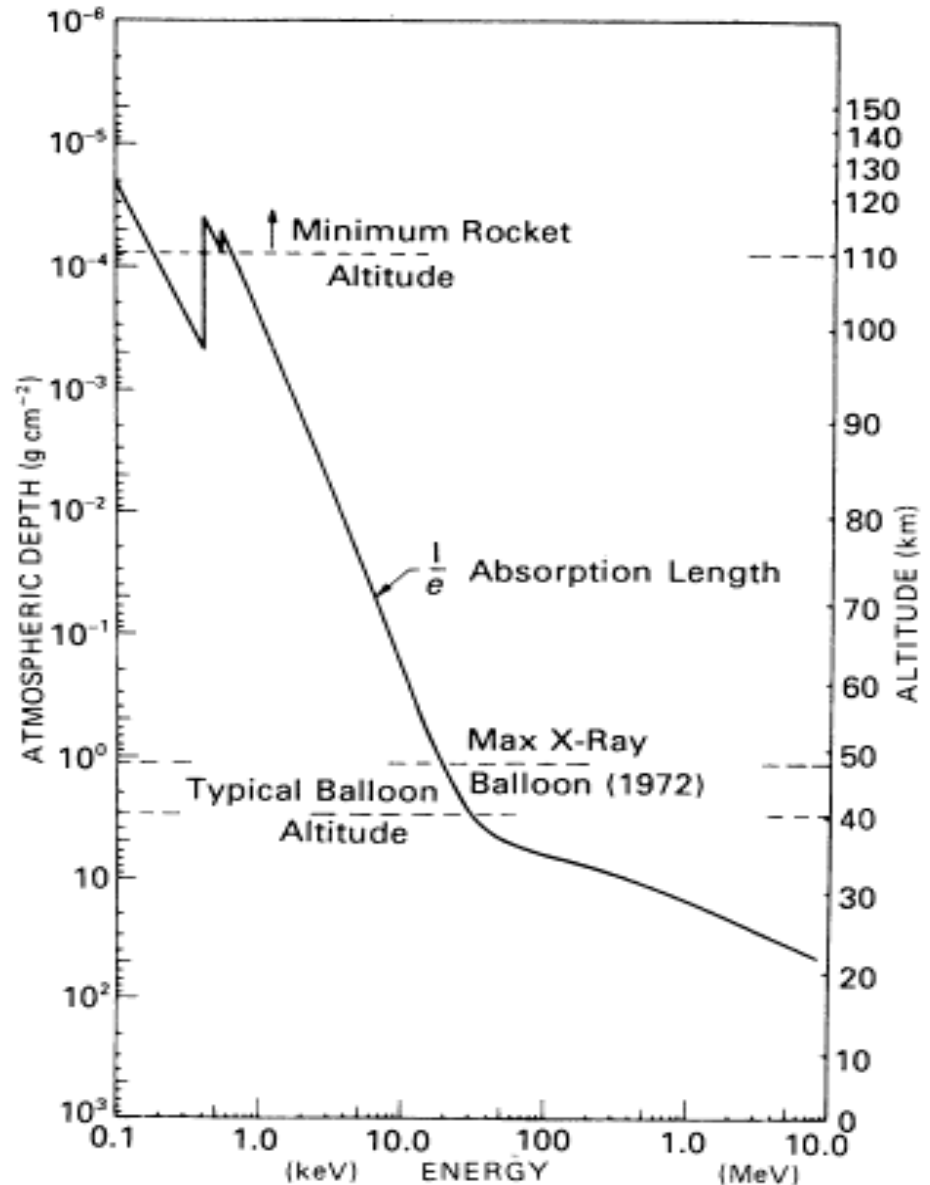
# Spettro Elettromagnetico

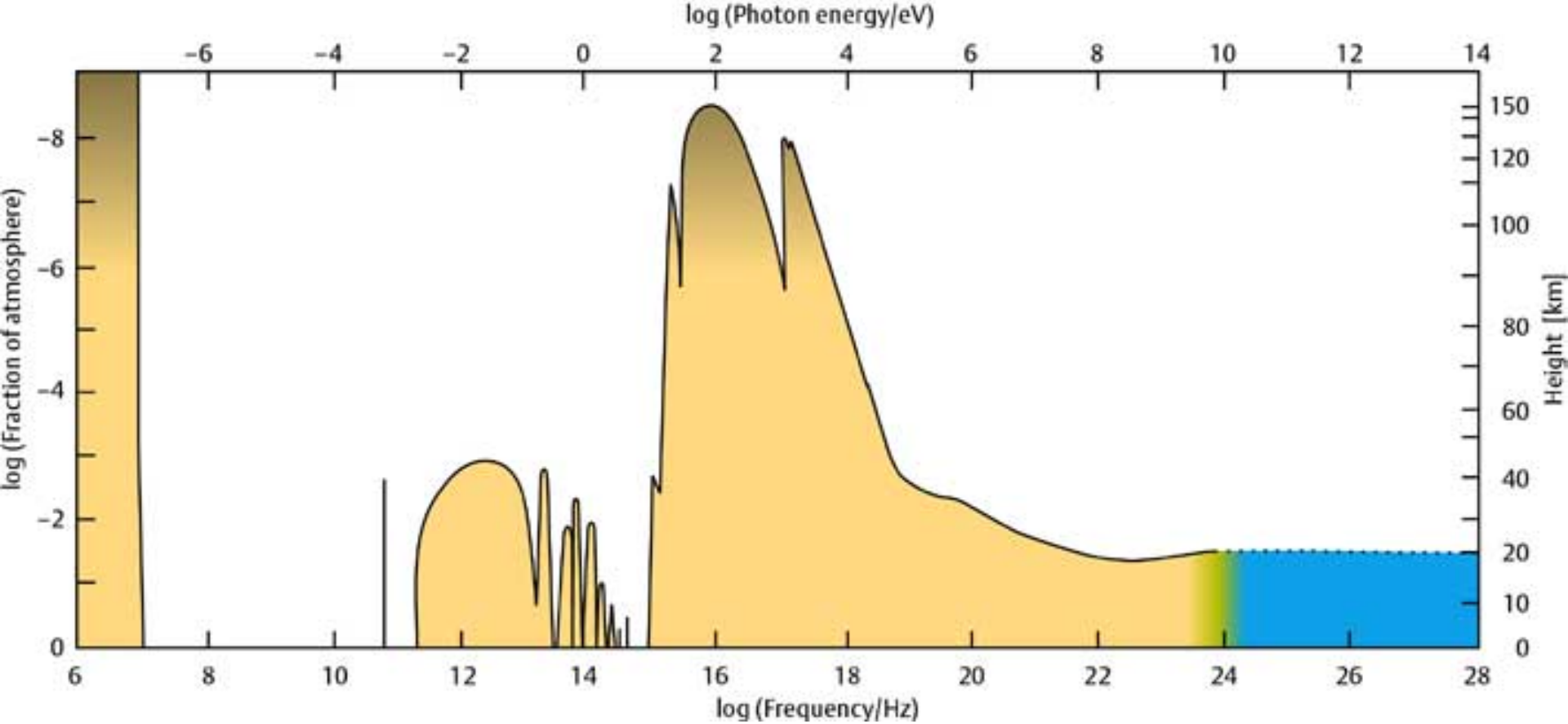


# Attenuazione dei fotoni nell'atmosfera

## Attenuation of photons in the atmosphere

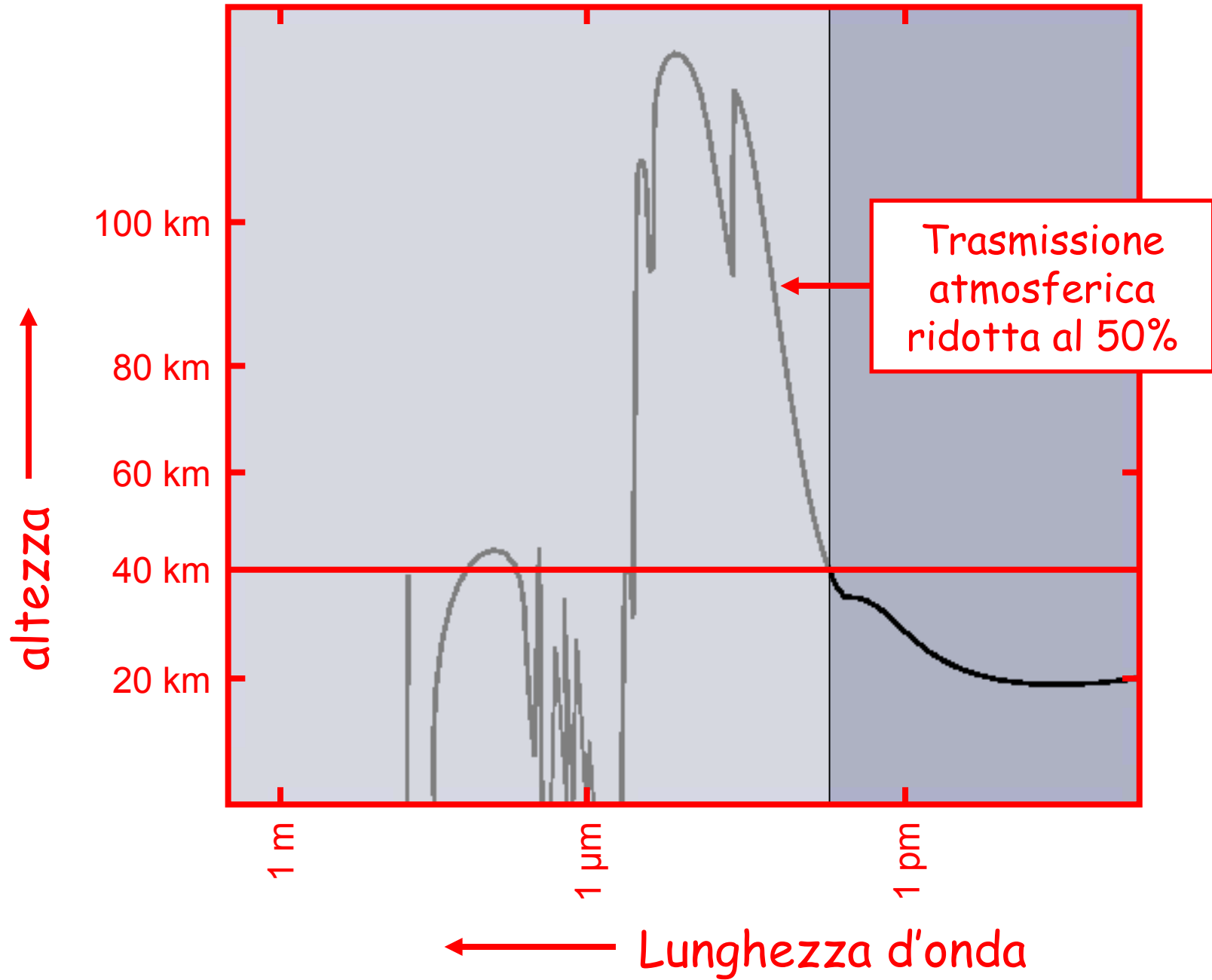
Attenuation of photons in the 1972 COSPAR International Reference Atmosphere with  $1/e$  absorption length plotted as a function of energy and altitude or atmospheric depth.

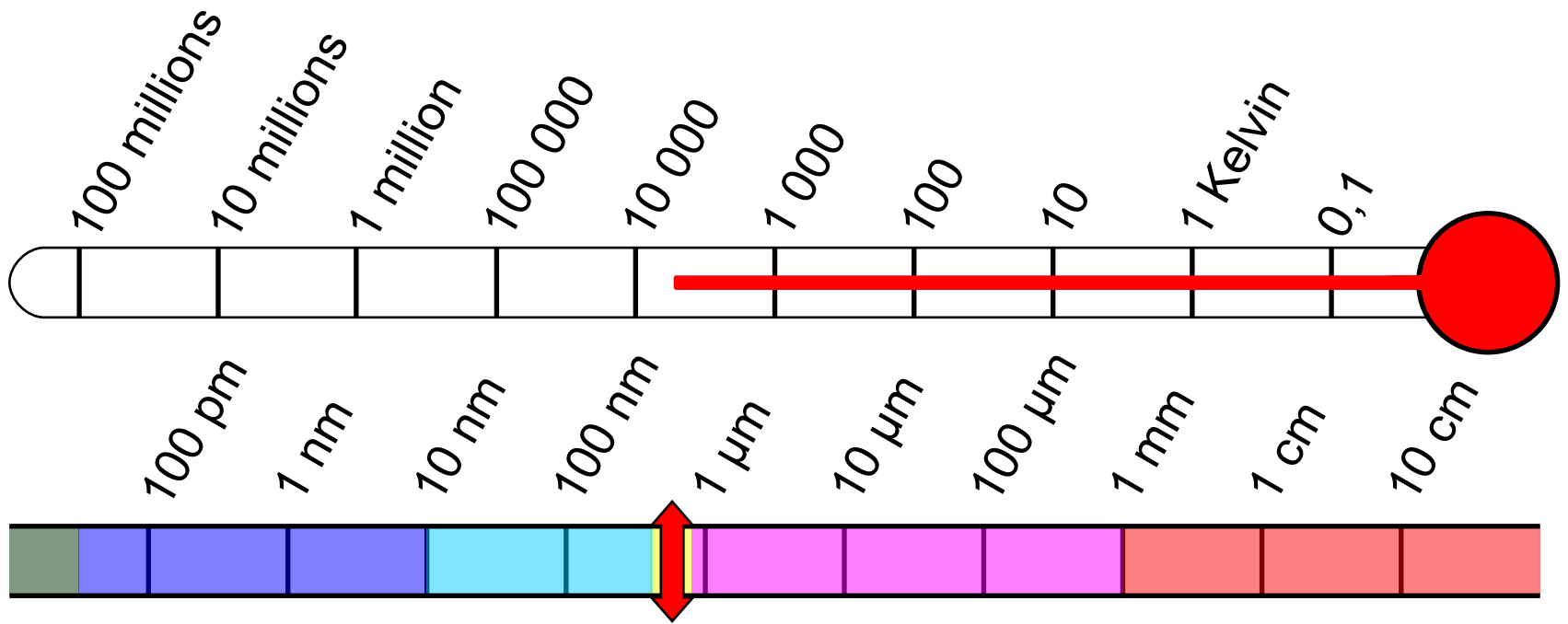




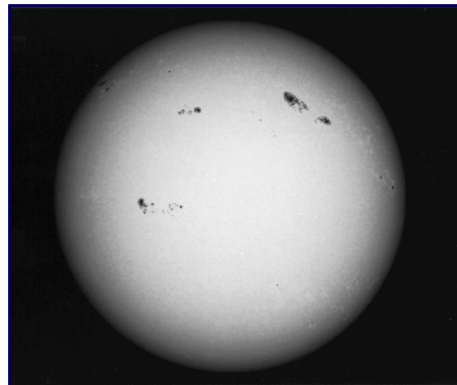
**Trasparenza dell'atmosfera alla radiazione elettromagnetica**

# Perché dallo spazio?

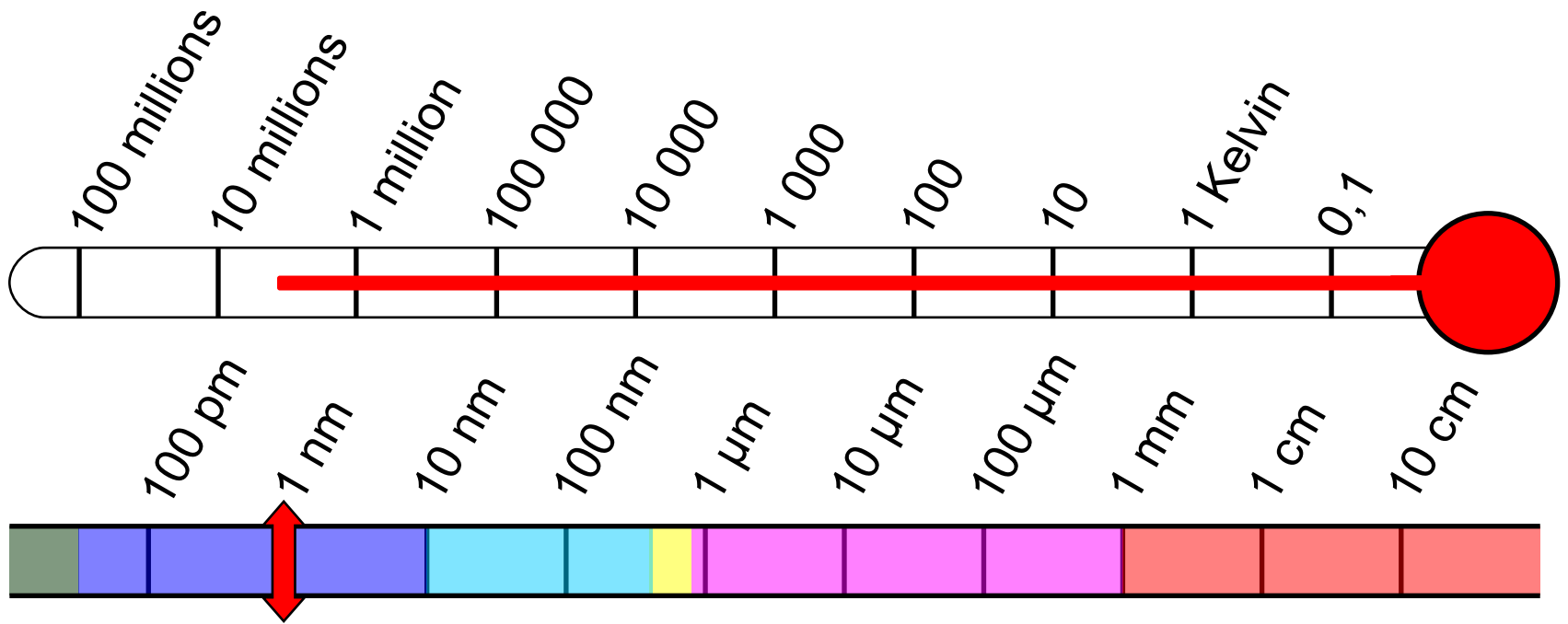




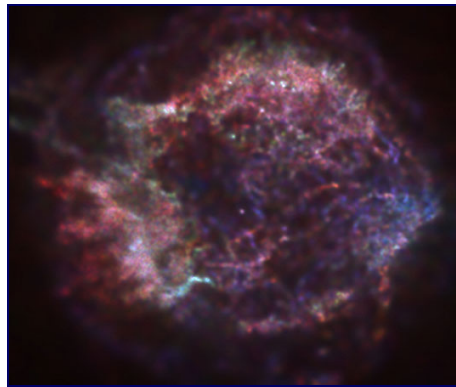
II VISIBILE



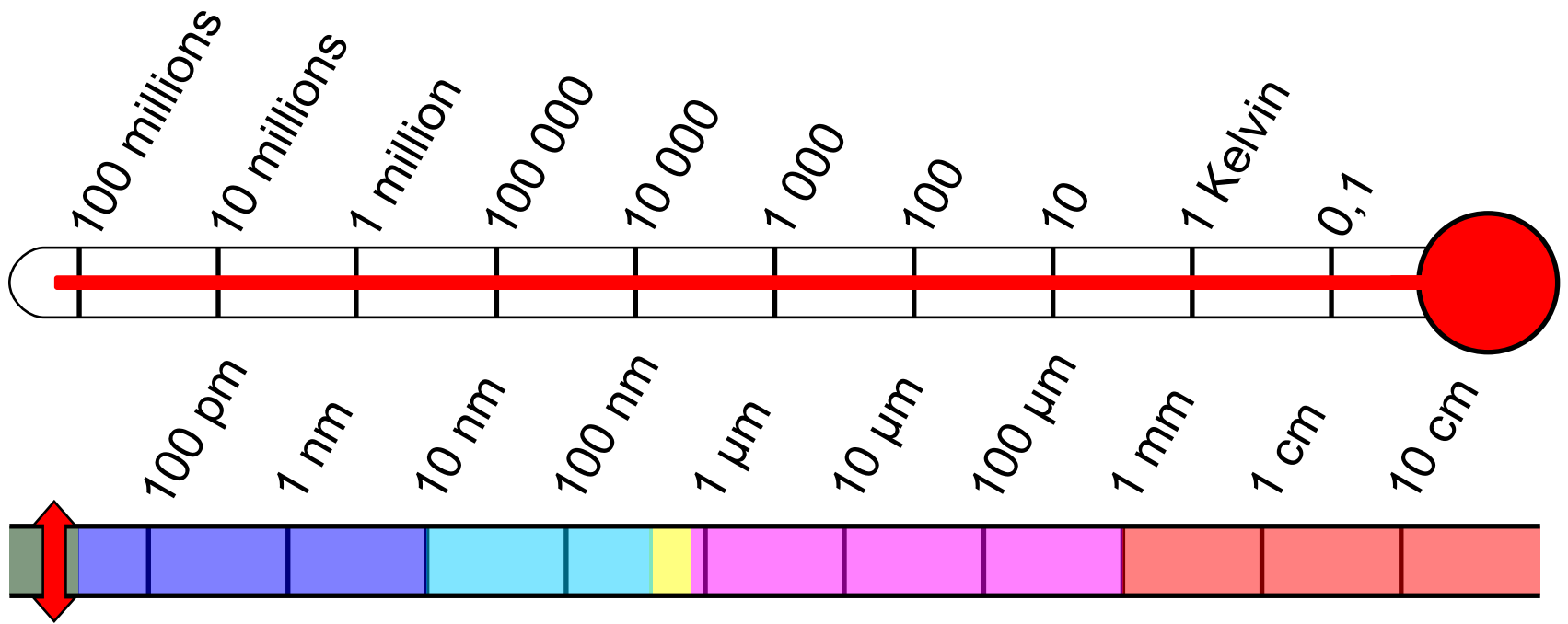
II SOLE



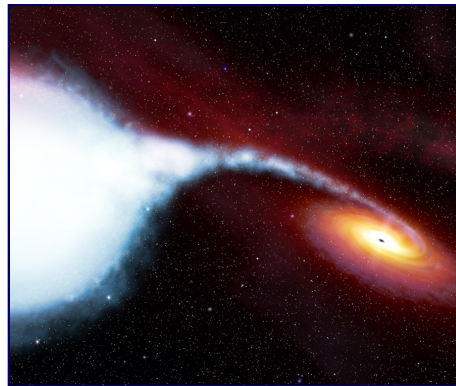
I RAGGI X



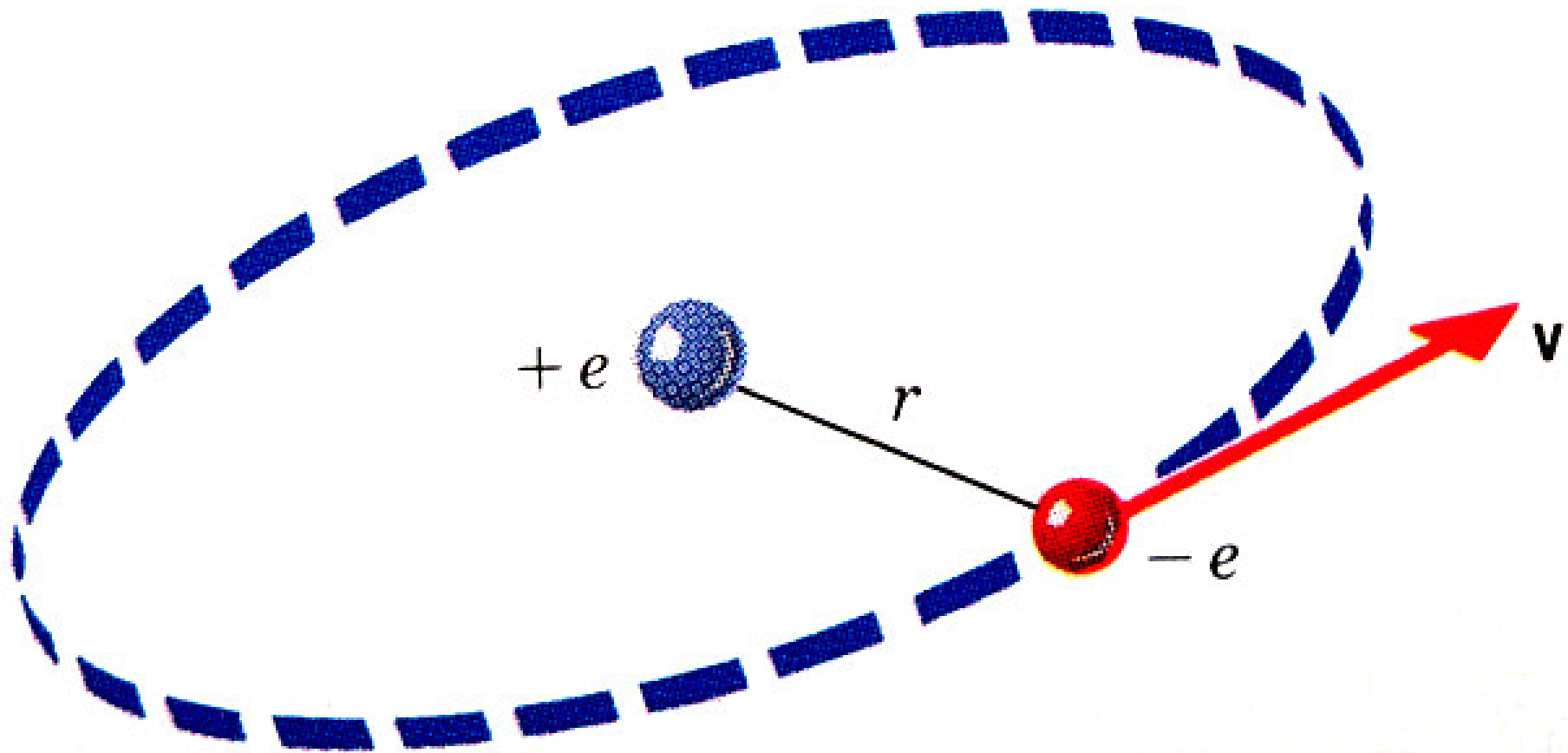
L'Universo  
Caldo  
Resti di  
Supernova



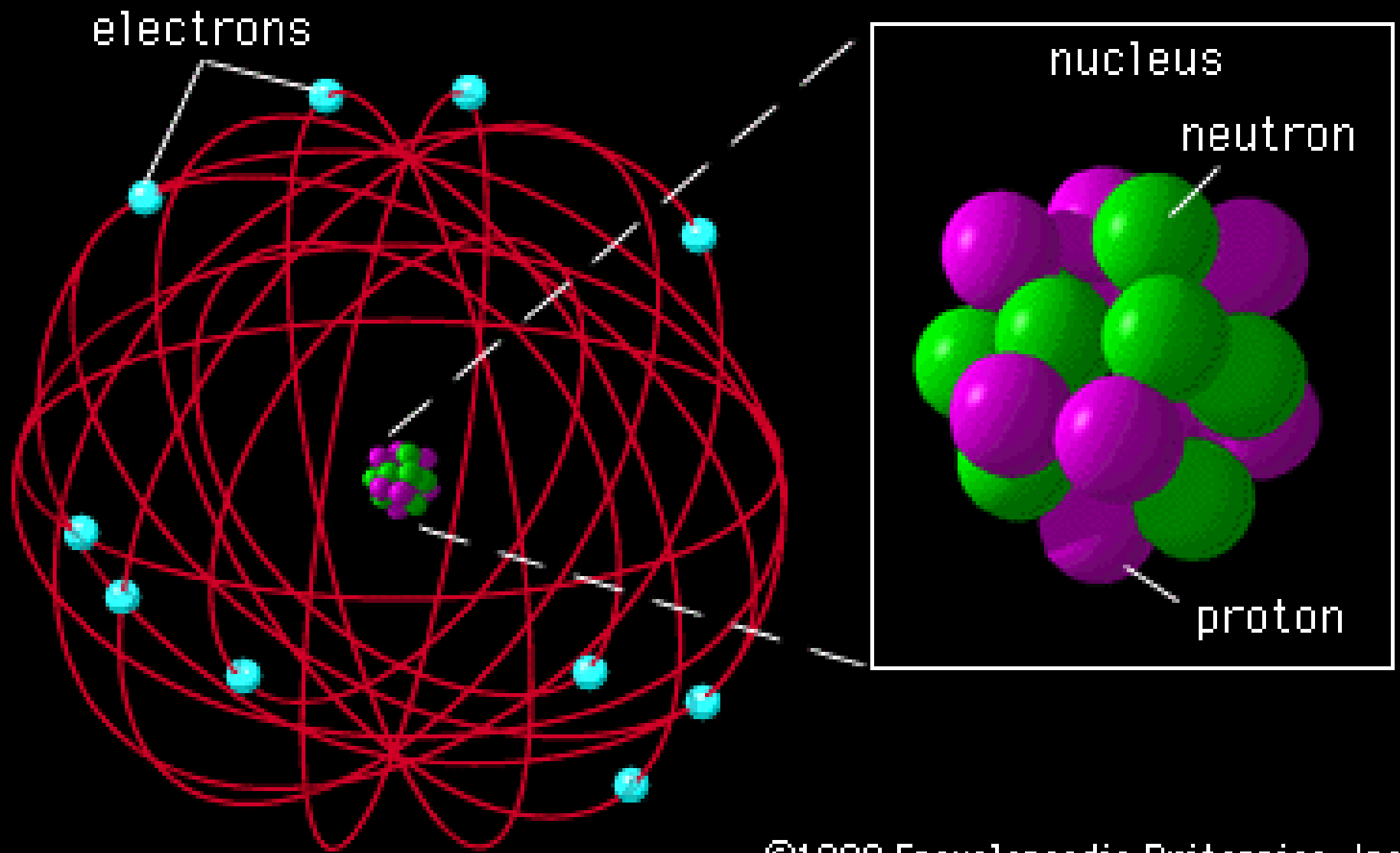
I raggi  $\gamma$



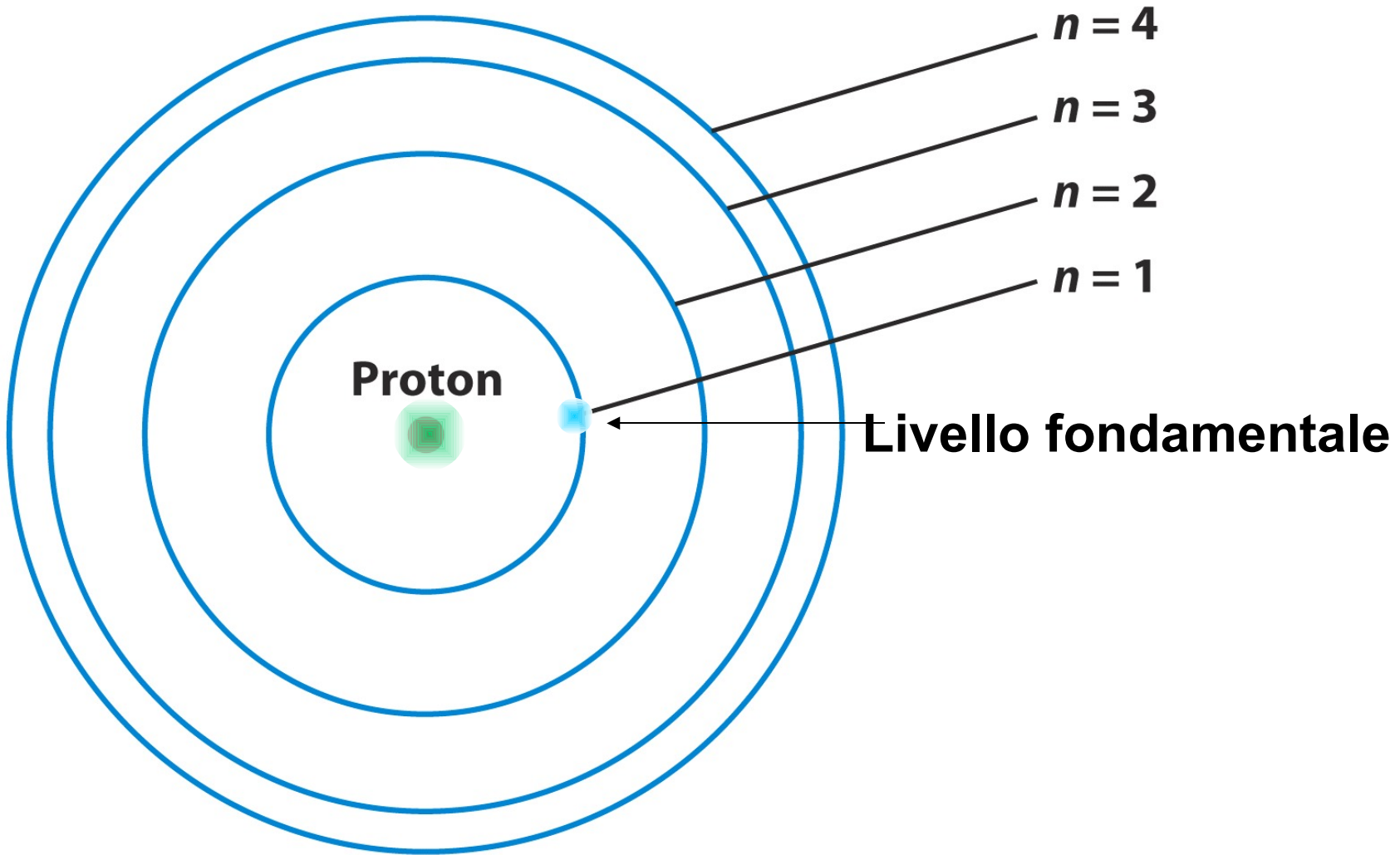
L'Universo  
estremo  
I buchi neri



*Copyright John Wiley & Sons*

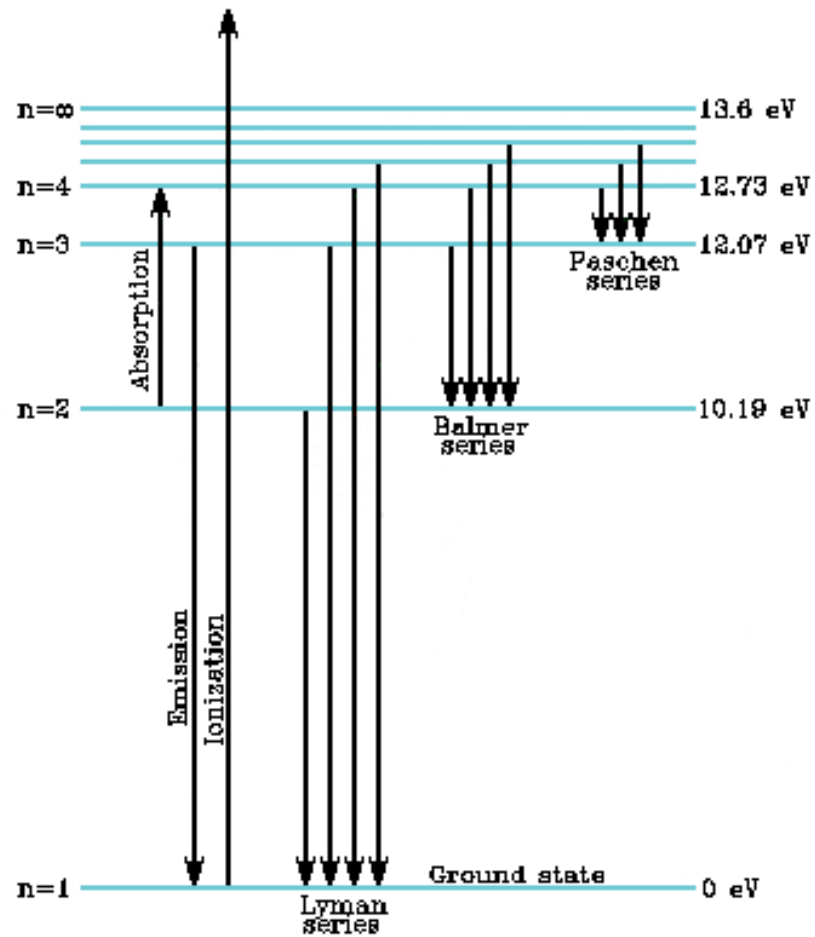
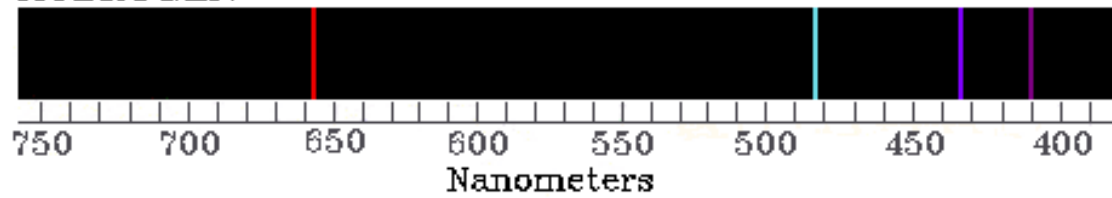


# Struttura Atomica

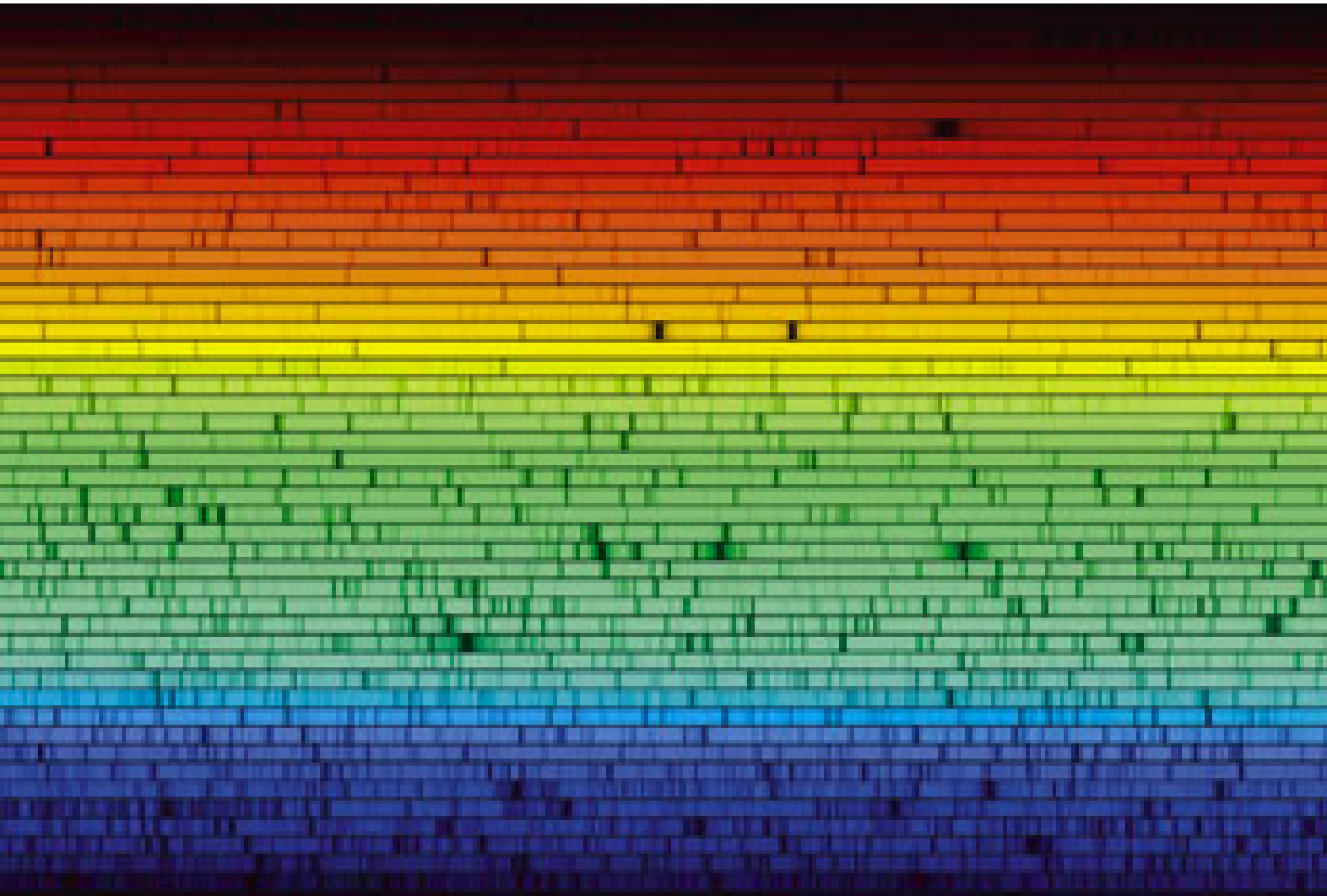


Atomo di H

# HYDROGEN

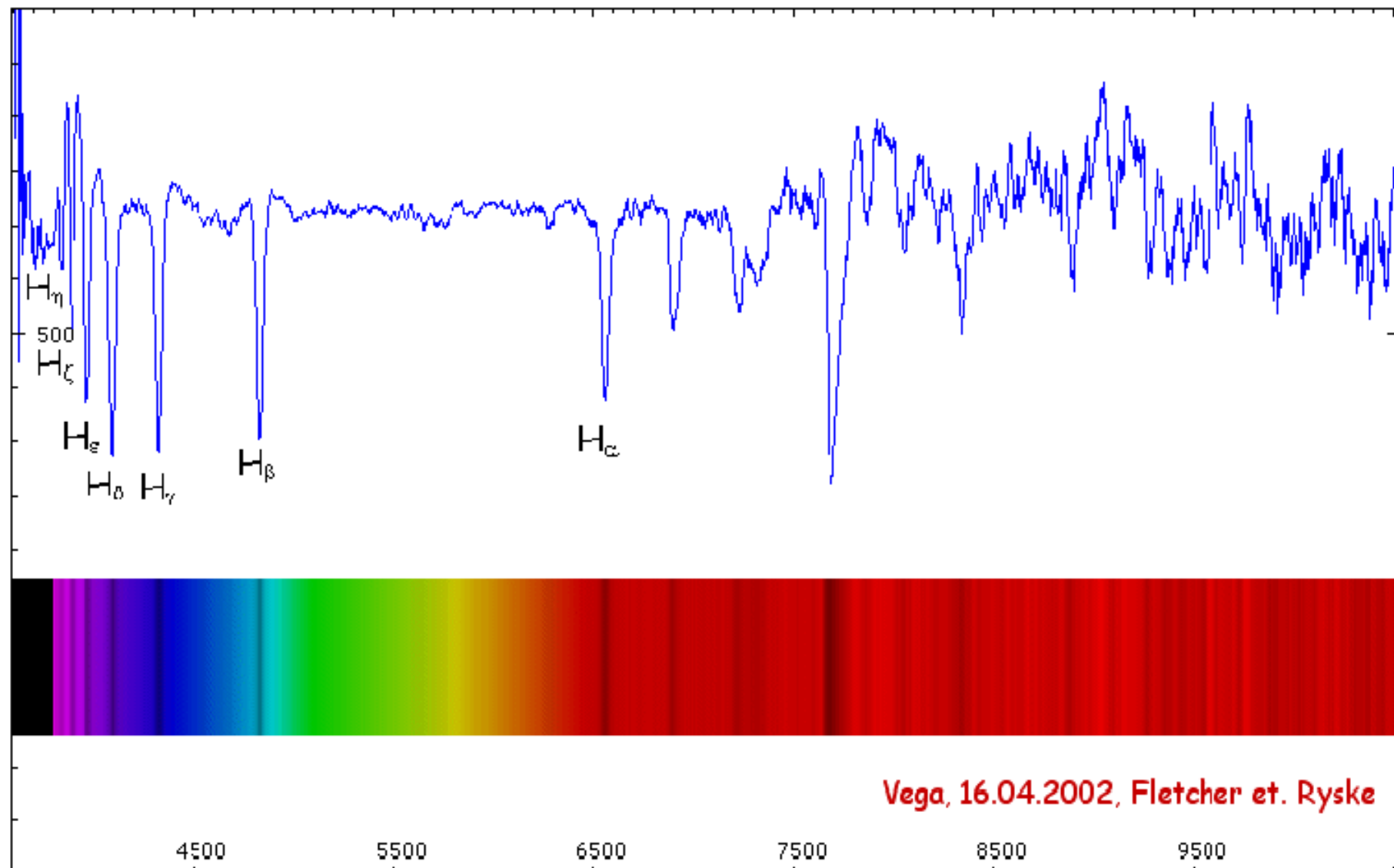


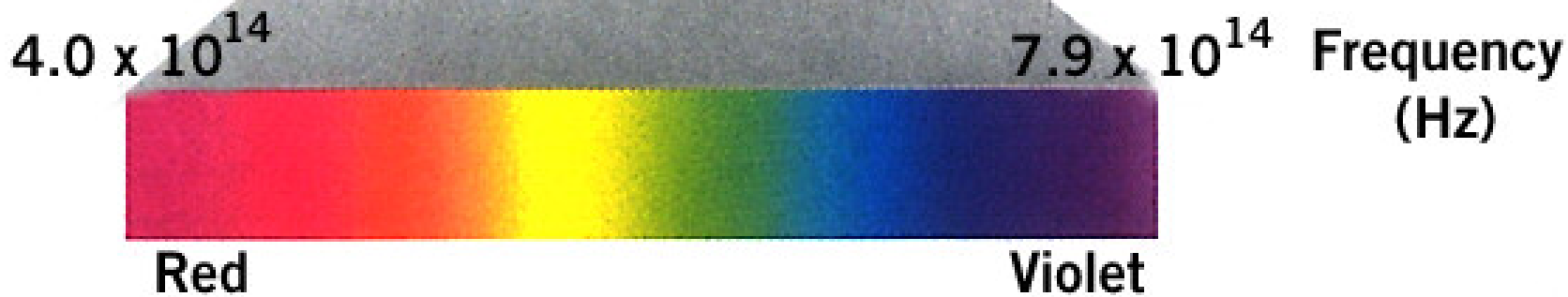
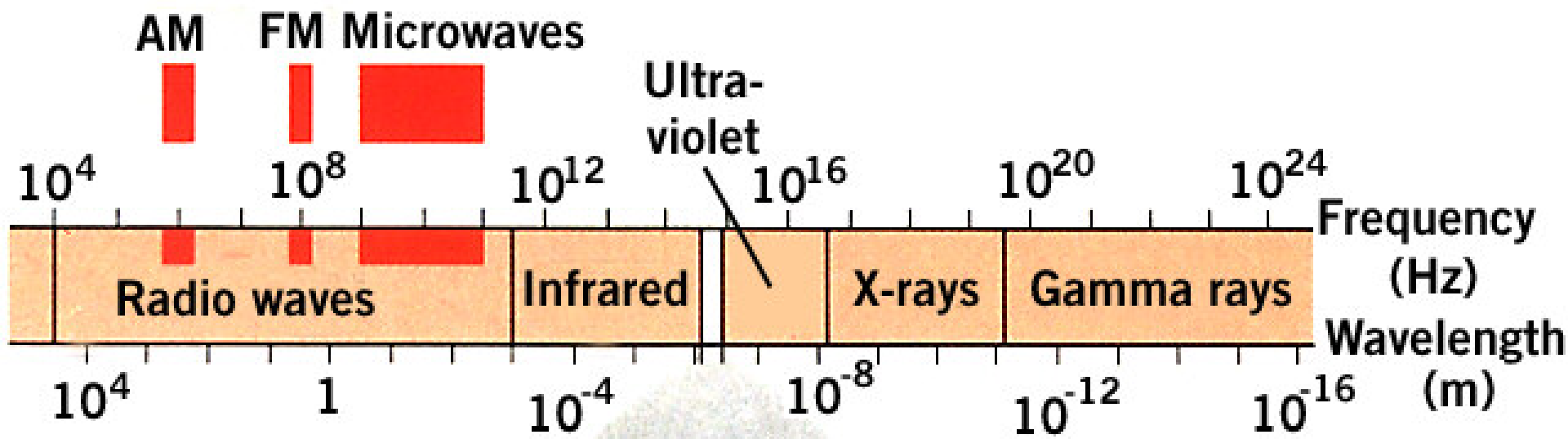
# Fine dell' 800 lo spettro del Sole



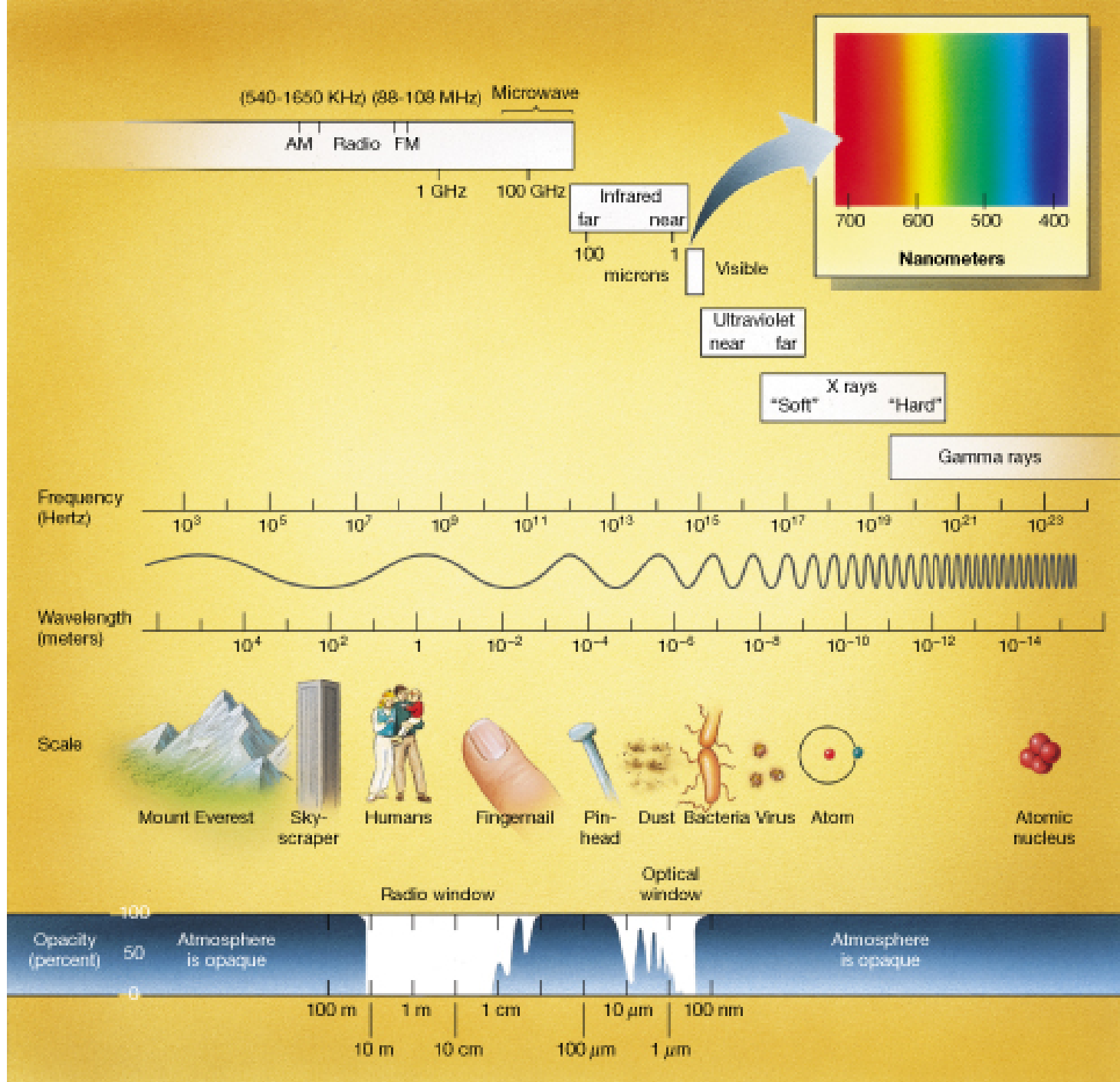
# Vegan osittain kompensoitu spektri

Balmerin sarjan mukaiset vedyn Fraunhofer-viivat



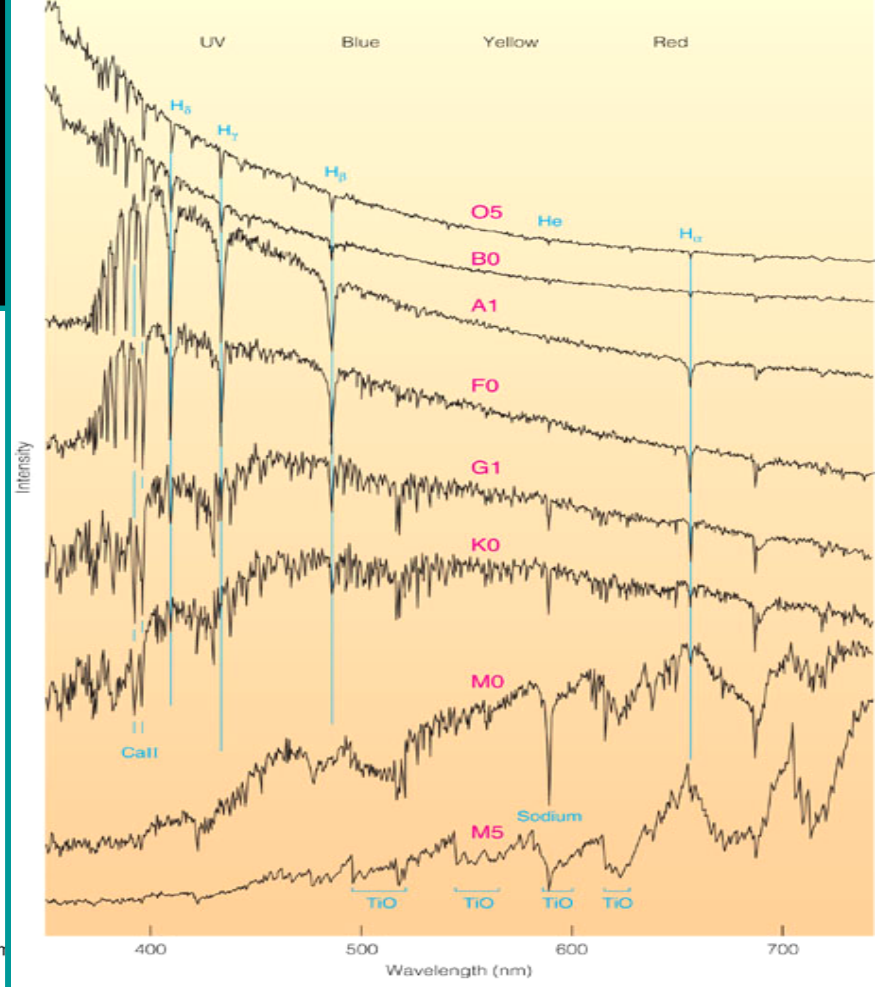
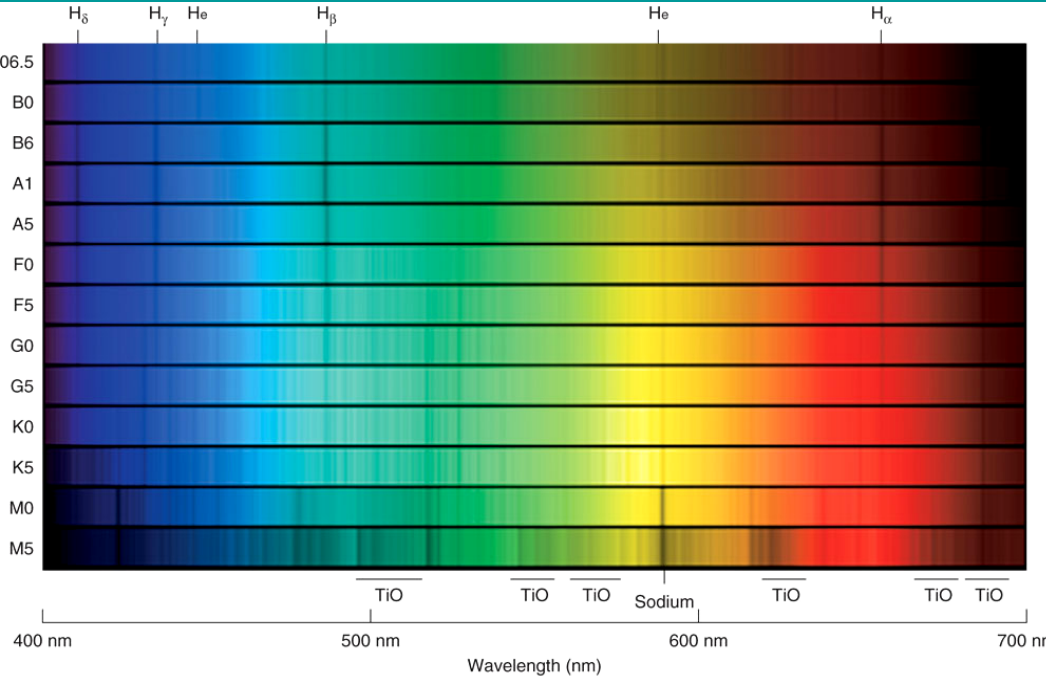


**Visible light**



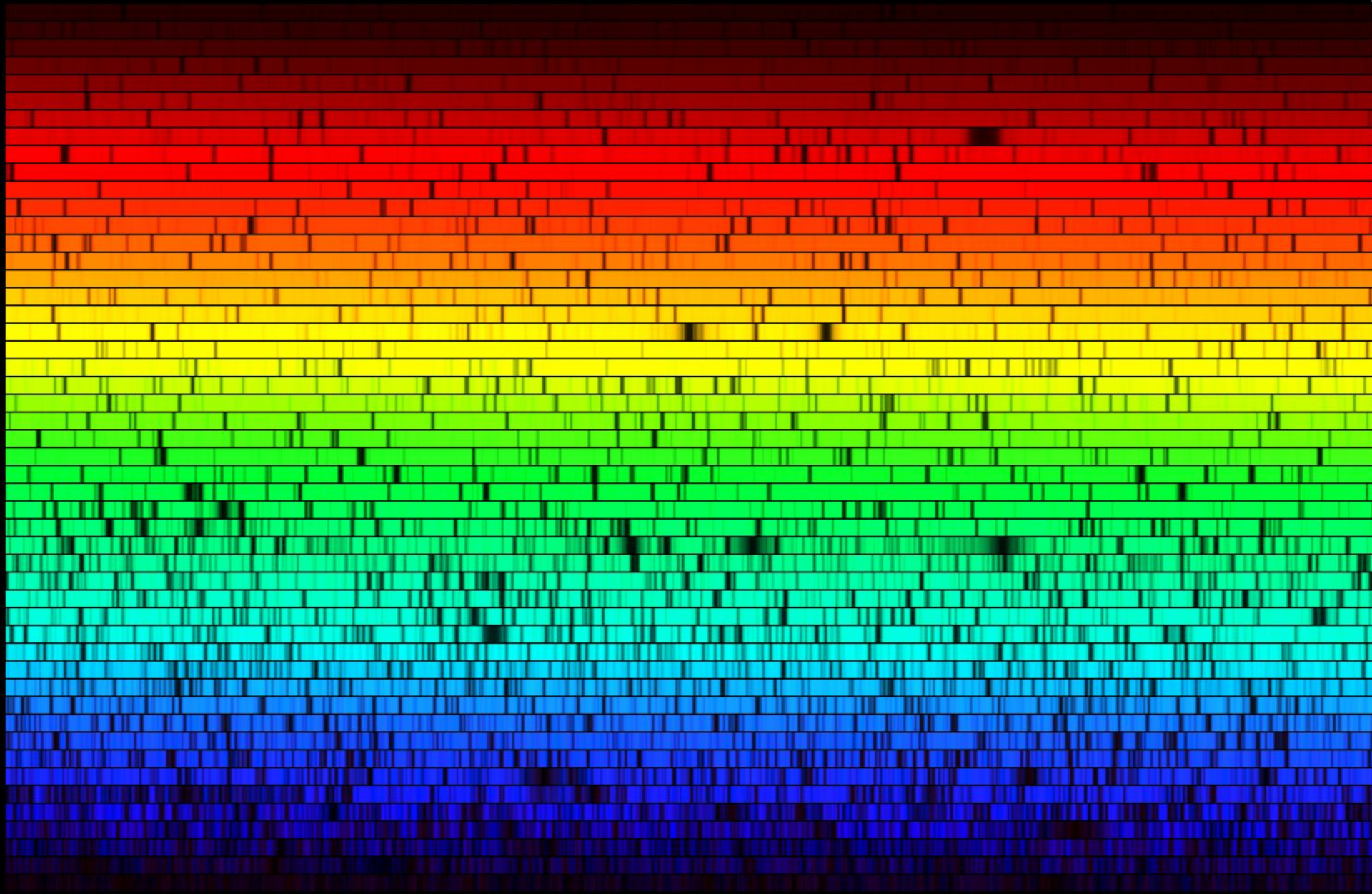
# Sequenza spettrale

Oh Be A Fine Girl/Guy Kiss Me

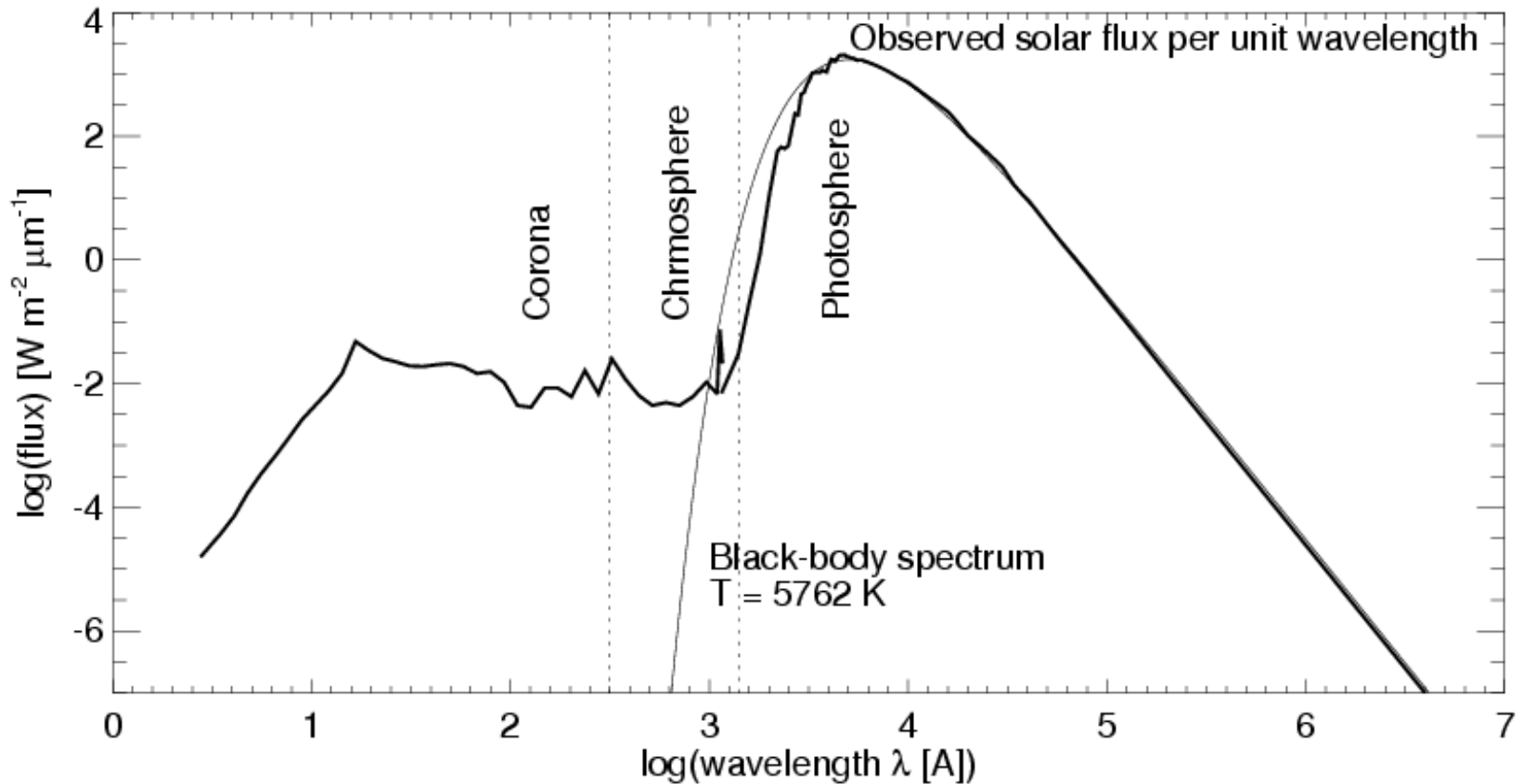


Spectral Class	Approximate Temperature (K)	Hydrogen Balmer Lines	Other Spectral Features	Naked-Eye Example
O	40,000	Weak	Ionized helium	Meissa (O8)
B	20,000	Medium	Neutral helium	Achernar (B3)
A	10,000	Strong	Ionized calcium weak	Sirius (A1)
F	7,500	Medium	Ionized calcium weak	Canopus (F0)
G	5,500	Weak	Ionized calcium medium	Sun (G2)
K	4,500	Very weak	Ionized calcium strong	Arcturus (K2)
M	3,000	Very weak	TiO strong	Betelgeuse (M2)

# Spettro della luce solare

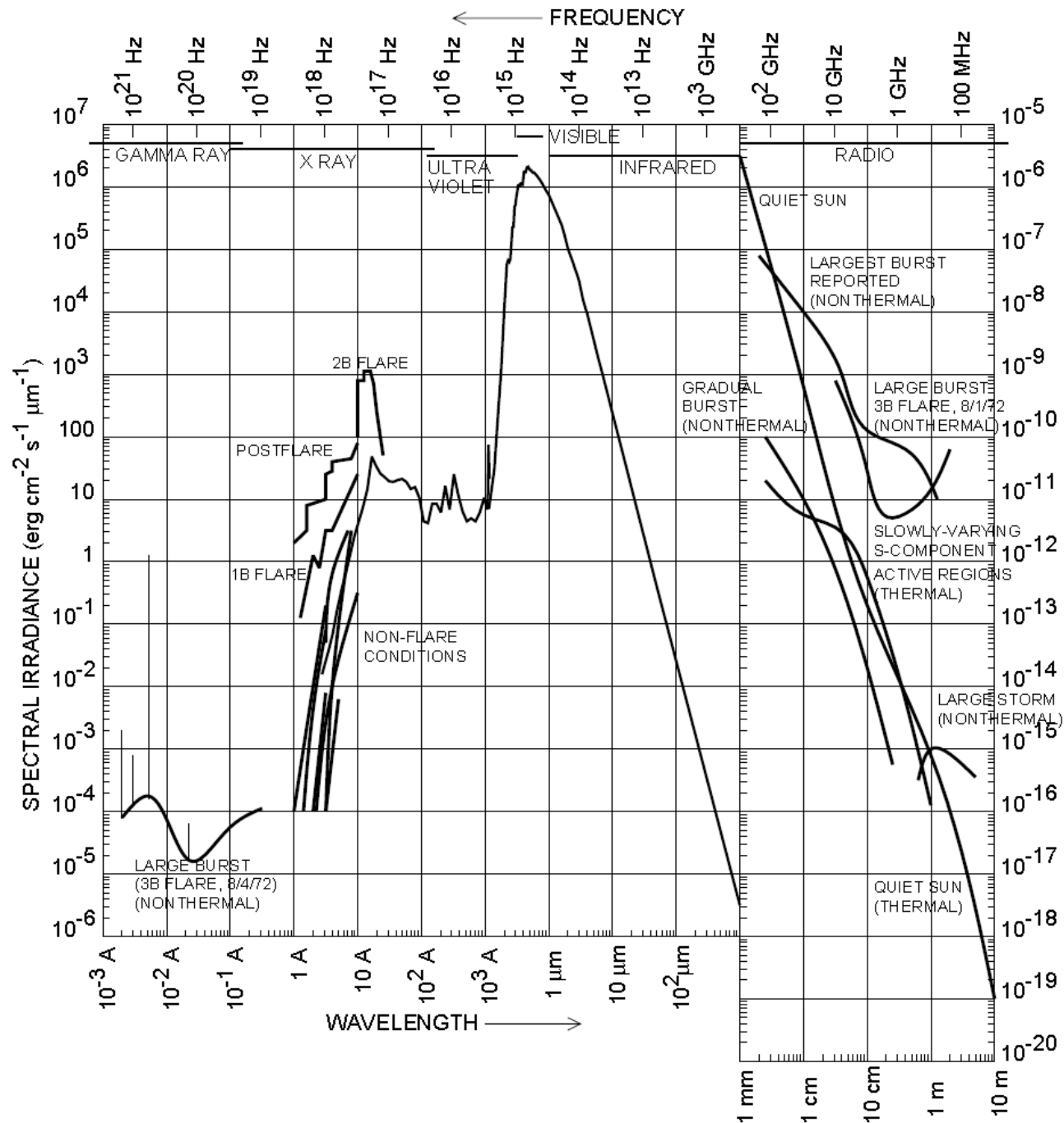


# Spettro Solare



# Solar Spectrum

Quiet Sun  
&  
Flares  
-  
Gamma-rays  
to  
Radio



# Abbondanze

La forza delle righe in assorbimento dipende da  $T_e$  e dalle **abbondanze** – quanti elementi sono presenti

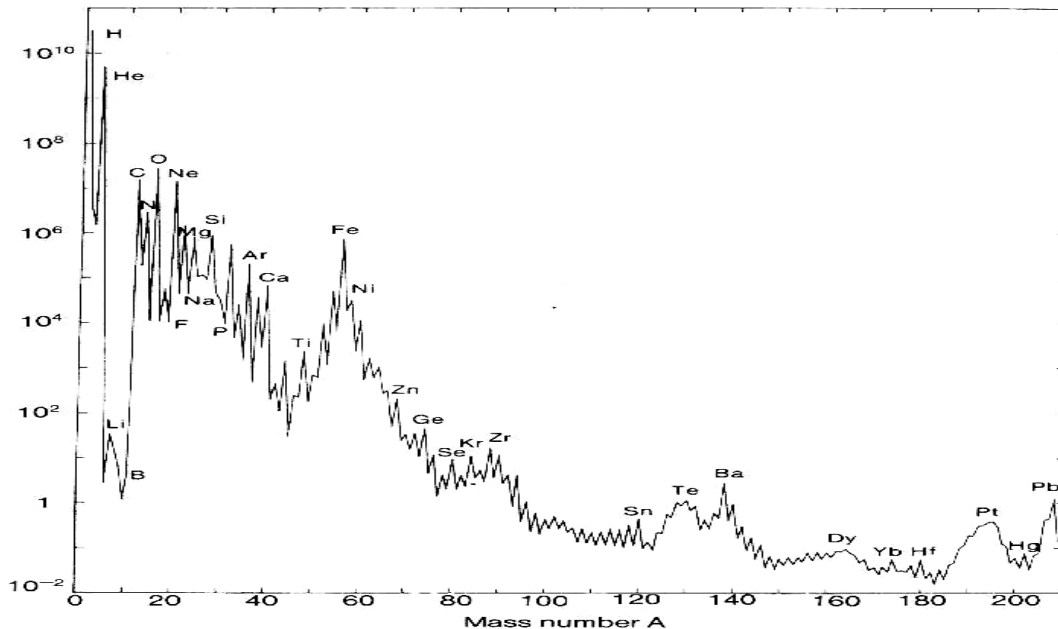
~Tutte le stelle hanno ~74% H

~24% He

~2% tutti gli altri elementi

(Superfici, non interno delle stelle).

The Most Abundant Elements in the Sun



Element	Percentage by Number of Atoms	Percentage by Mass
Hydrogen	91.0	70.9
Helium	8.9	27.4
Carbon	0.03	0.3
Nitrogen	0.008	0.1
Oxygen	0.07	0.8
Neon	0.01	0.2
Magnesium	0.003	0.06
Silicon	0.003	0.07
Sulfur	0.002	0.04
Iron	0.003	0.1

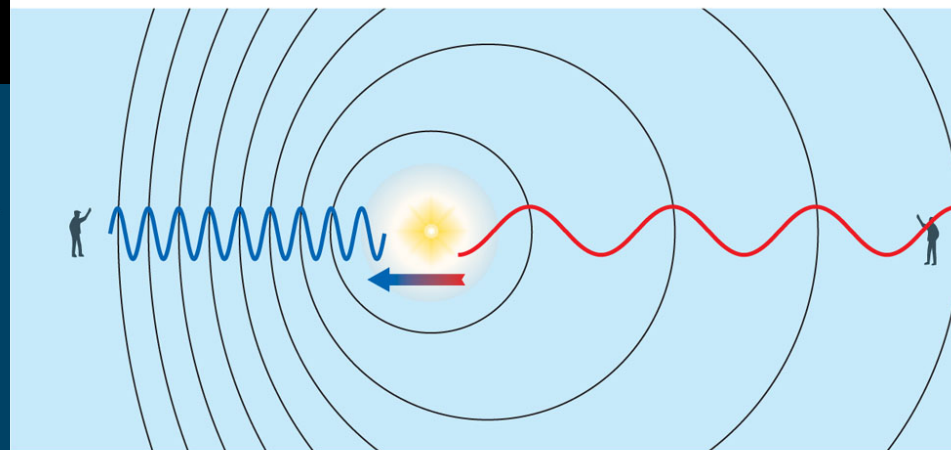
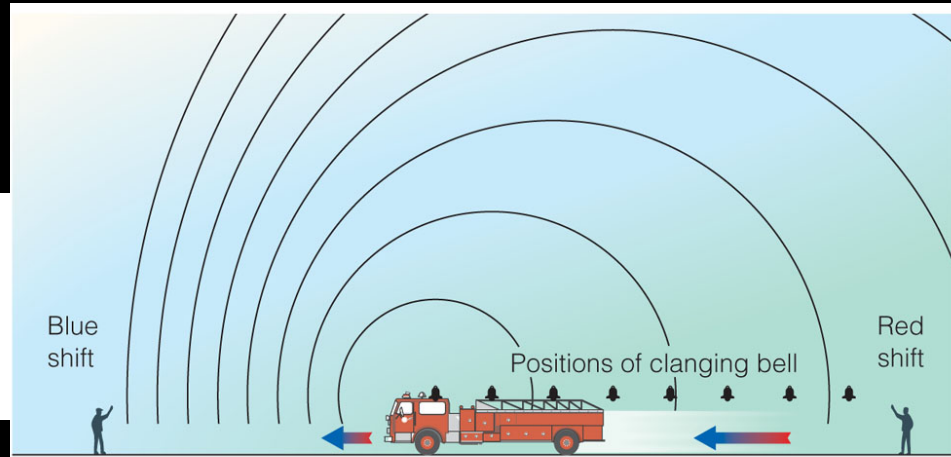
# Doppler Shifts: velocità

Solo la componente radiale della velocità  $V_r$ ,  
influenza la lunghezza d'onda

$$V_r/c = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$$



Binary star in orbit

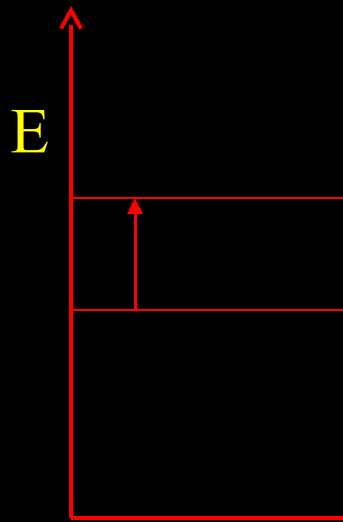


# Larghezza delle righe: pressione del gas

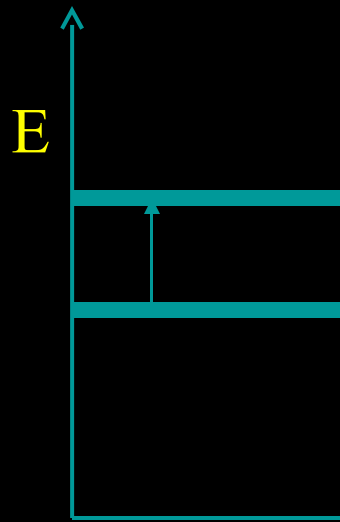
Alcune stelle hanno righe più larghe di altre.  
gas ad alta pressione mischiano i livelli atomici  
→ risultano righe più larghe.

Nane → atmosfere compresse → righe larghe

Giganti → atmosfere a bassa pressione → righe strette



Low pressure  
Narrow line



High pressure  
Broad line

