

*L'ATA organizza*



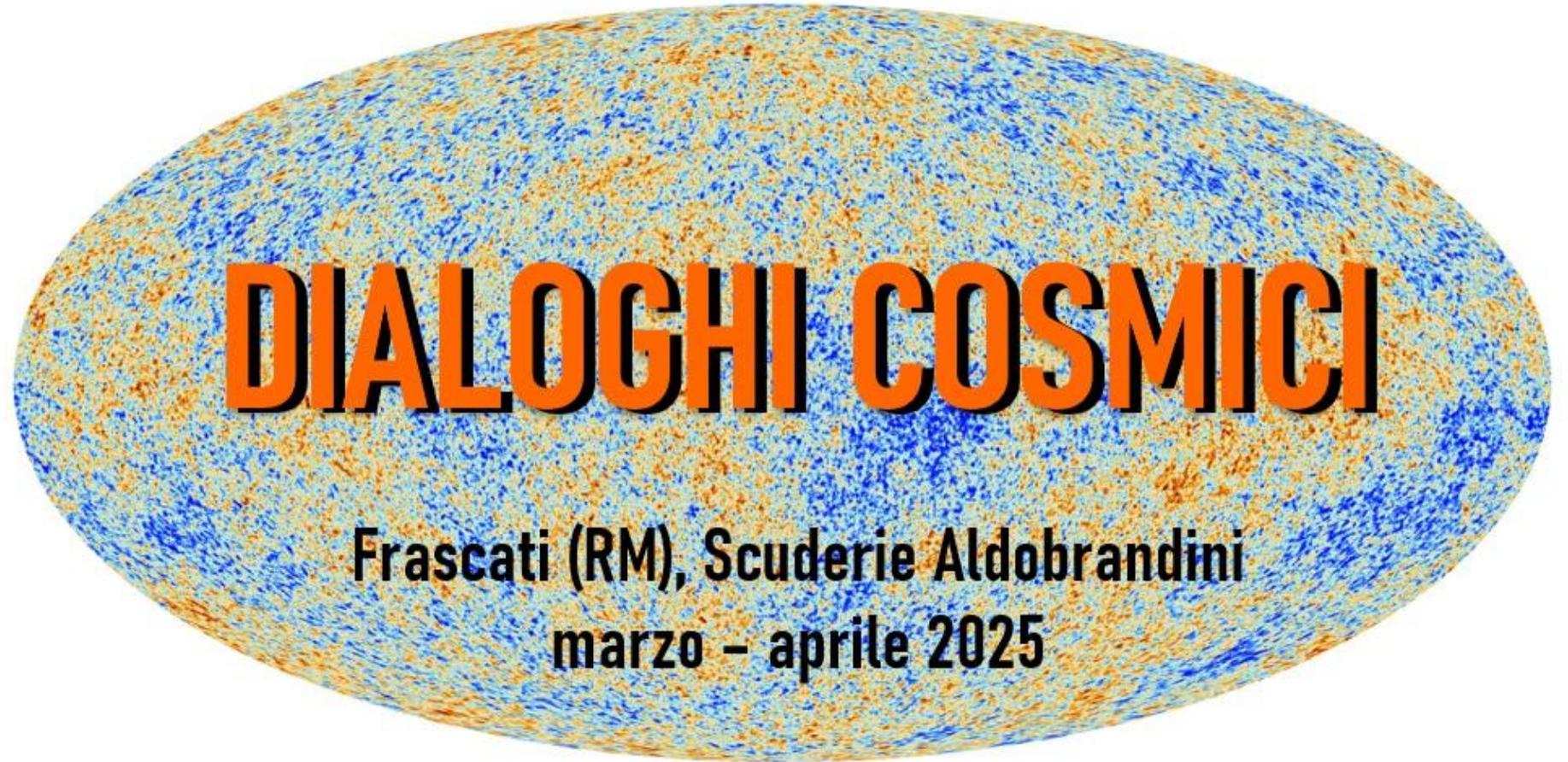
*In collaborazione con*



COMUNE DI FRASCATI



*Con il patrocinio di*



# DIALOGHI COSMICI

Frascati (RM), Scuderie Aldobrandini  
marzo - aprile 2025

Paolo de Bernardis - Dipartimento di Fisica, Sapienza  
Dialogo 1 – 1/marzo/2025

*L'universo omogeneo e isotropo e la sua espansione*



# Dialoghi cosmici

- Una serie di *dialoghi* in cui si racconta e si discute dell'universo come entità (cosmologia)
- basandosi su osservazioni e misure
- confrontando quanto si trova con le previsioni della fisica
- evidenziando ciò che si è capito ...
- ... e anche i problemi e le sfide ancora aperte

1. *L'universo omogeneo e isotropo e la sua espansione*
2. *L'interpretazione fisica dell'espansione dell'Universo*
3. *La storia dell'universo*
4. *Le strutture cosmiche*
5. *Origine e struttura dell'universo*
6. *Evento finale: star party*



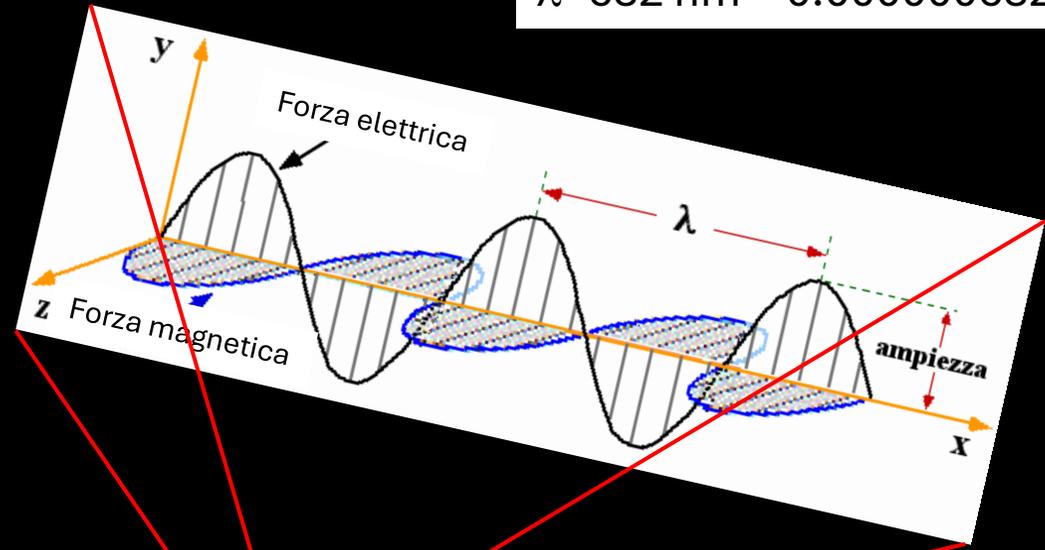
*“... nient’altro che una congerie di innumerevoli stelle, disseminate a mucchi; ché in qualunque regione di essa si diriga il cannocchiale, subito una ingente folla di Stelle si presenta alla vista, delle quali parecchie si vedono abbastanza grandi e molto distinte; ma la moltitudine delle piccole è del tutto inesplorabile ...”*

Galileo Galilei - Sidereus Nuncius - 1610





$\lambda = 632 \text{ nm} = 0.000000632 \text{ m}$

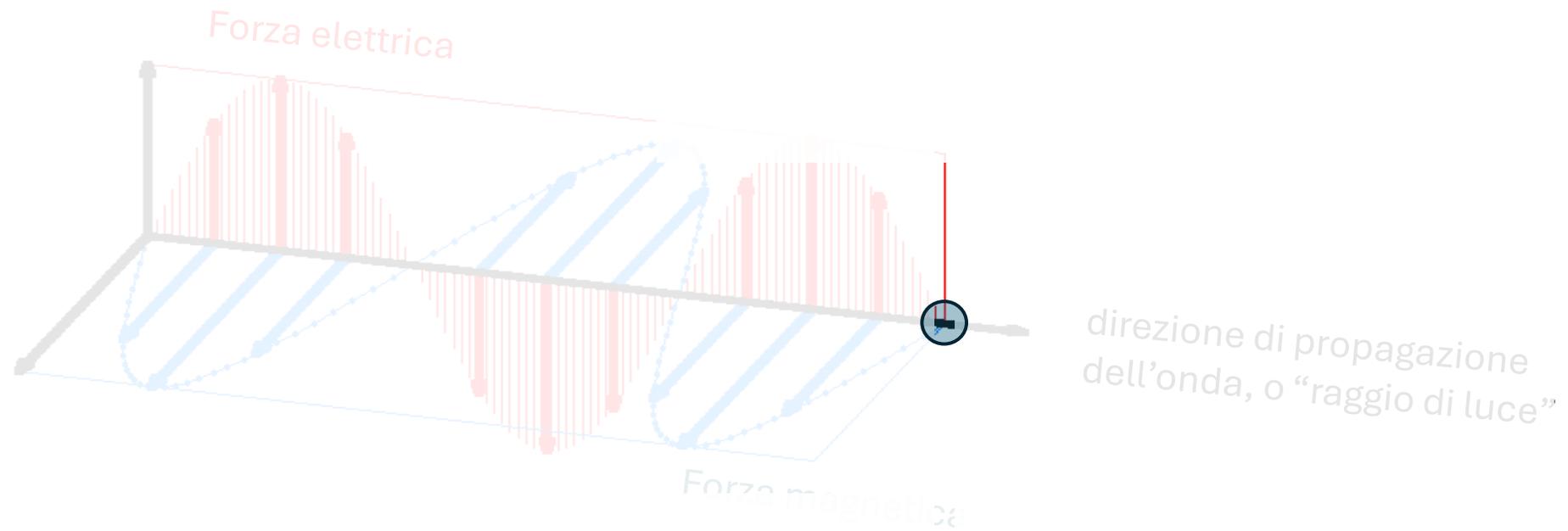


Raggio di luce



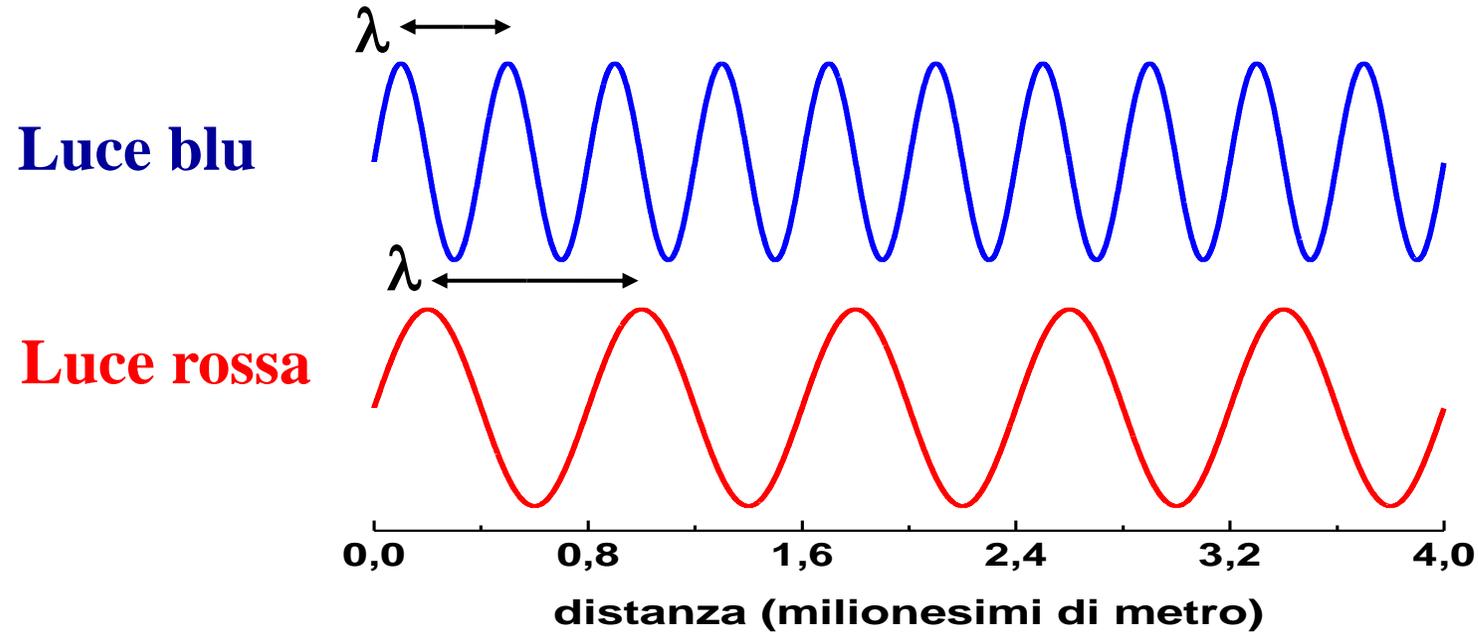
direzione di propagazione





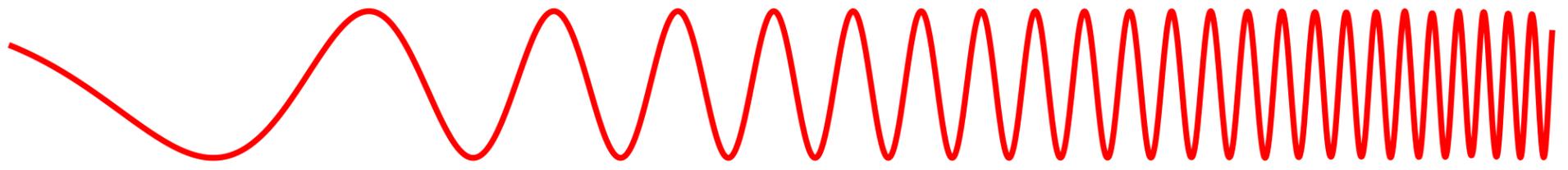
L'onda elettromagnetica si propaga ad una velocità di 299792458 m/s  
(un miliardo di chilometri all'ora !)

- La luce è formata da onde elettromagnetiche. Il **colore** della luce dipende dalla sua lunghezza d'onda  $\lambda$



- I sensori presenti nei nostri occhi reagiscono in modo diverso alle diverse lunghezze d'onda della luce, producendo una sensazione diversa che il nostro cervello visualizza come un colore diverso.
- Le onde elettromagnetiche si manifestano in modo diverso a seconda della lunghezza d'onda: dai metri ai picometri (millesimi di miliardesimo di metro) si hanno onde radio, microonde, raggi infrarossi, luce visibile, raggi ultravioletti, X, gamma

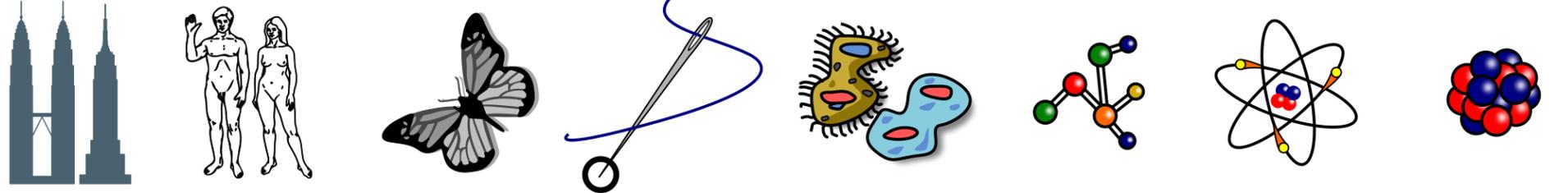
Penetra l'atmosfera terrestre?



Tipo di radiazione  
Lunghezza d'onda (m)

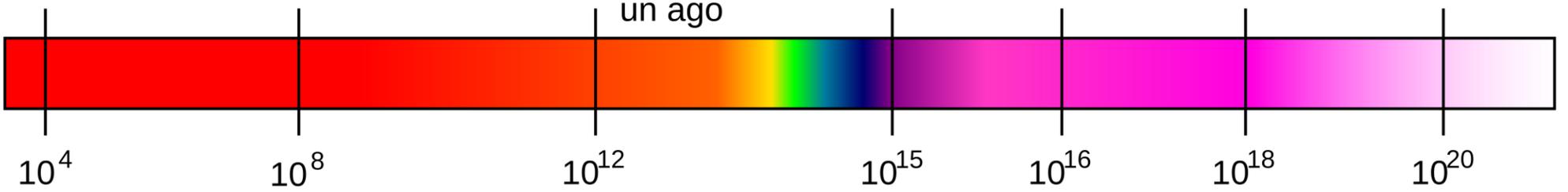
<b>Radio</b>	<b>Microonde</b>	<b>Infrarosso</b>	<b>Visibile</b>	<b>Ultravioletto</b>	<b>Raggi X</b>	<b>Raggi Gamma</b>
$10^3$	$10^{-2}$	$10^{-5}$	$0.5 \times 10^{-6}$	$10^{-8}$	$10^{-10}$	$10^{-12}$

Scala approssimativa della lunghezza d'onda

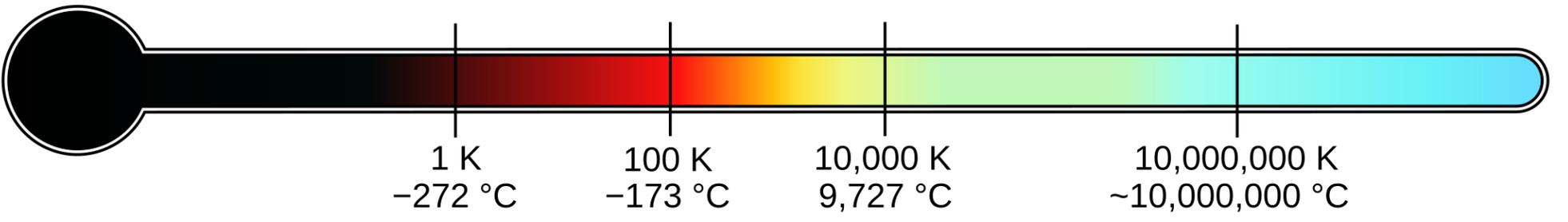


Edifici    Esseri umani    Farfalle    Punta di un ago    Protozoi    Molecole    Atomi    Nuclei atomici

Frequenza (Hz)

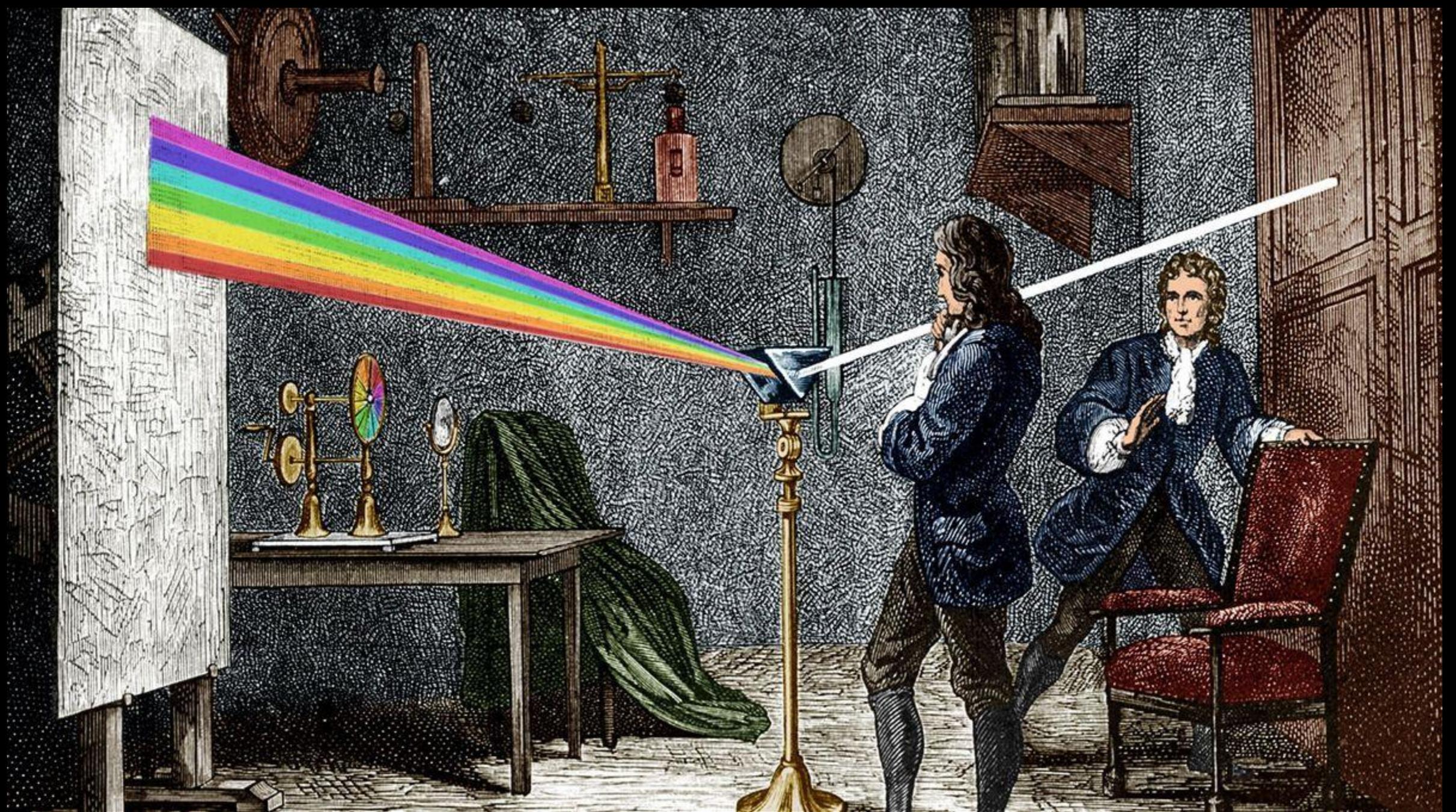


Temperatura degli oggetti alla quale questa radiazione è la più intensa lunghezza d'onda emessa

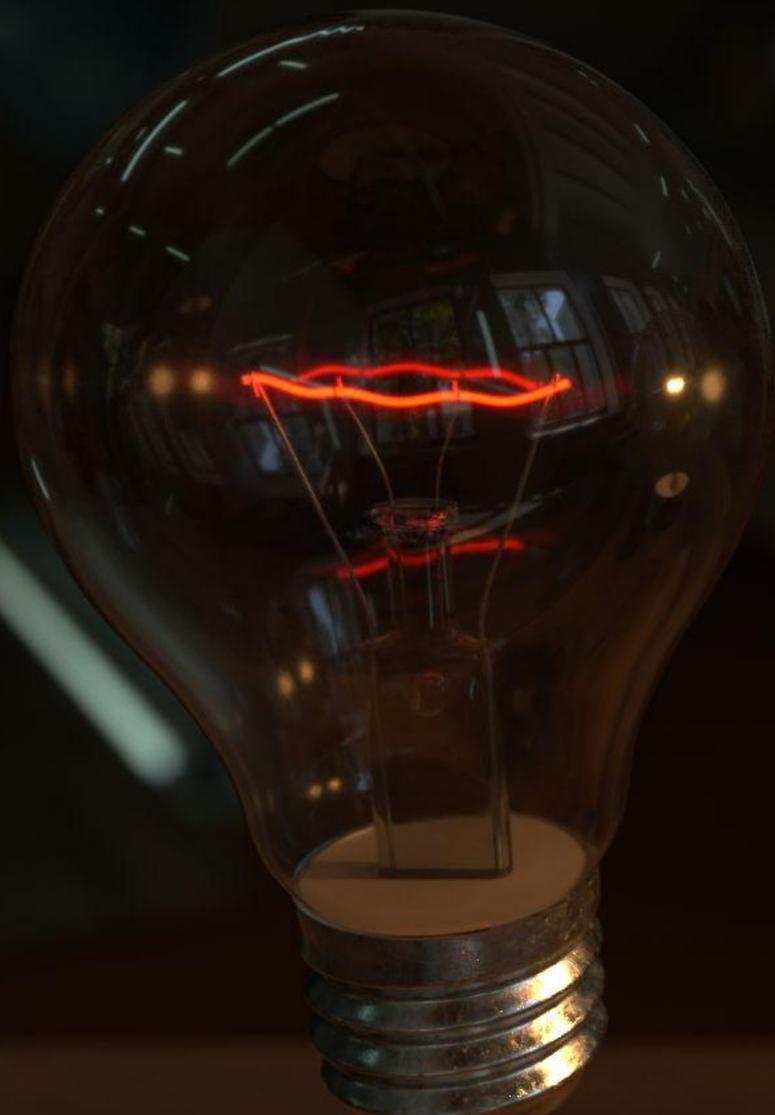


PINK  
FLOYD  
THE  
DARK SIDE  
OF THE  
MOON





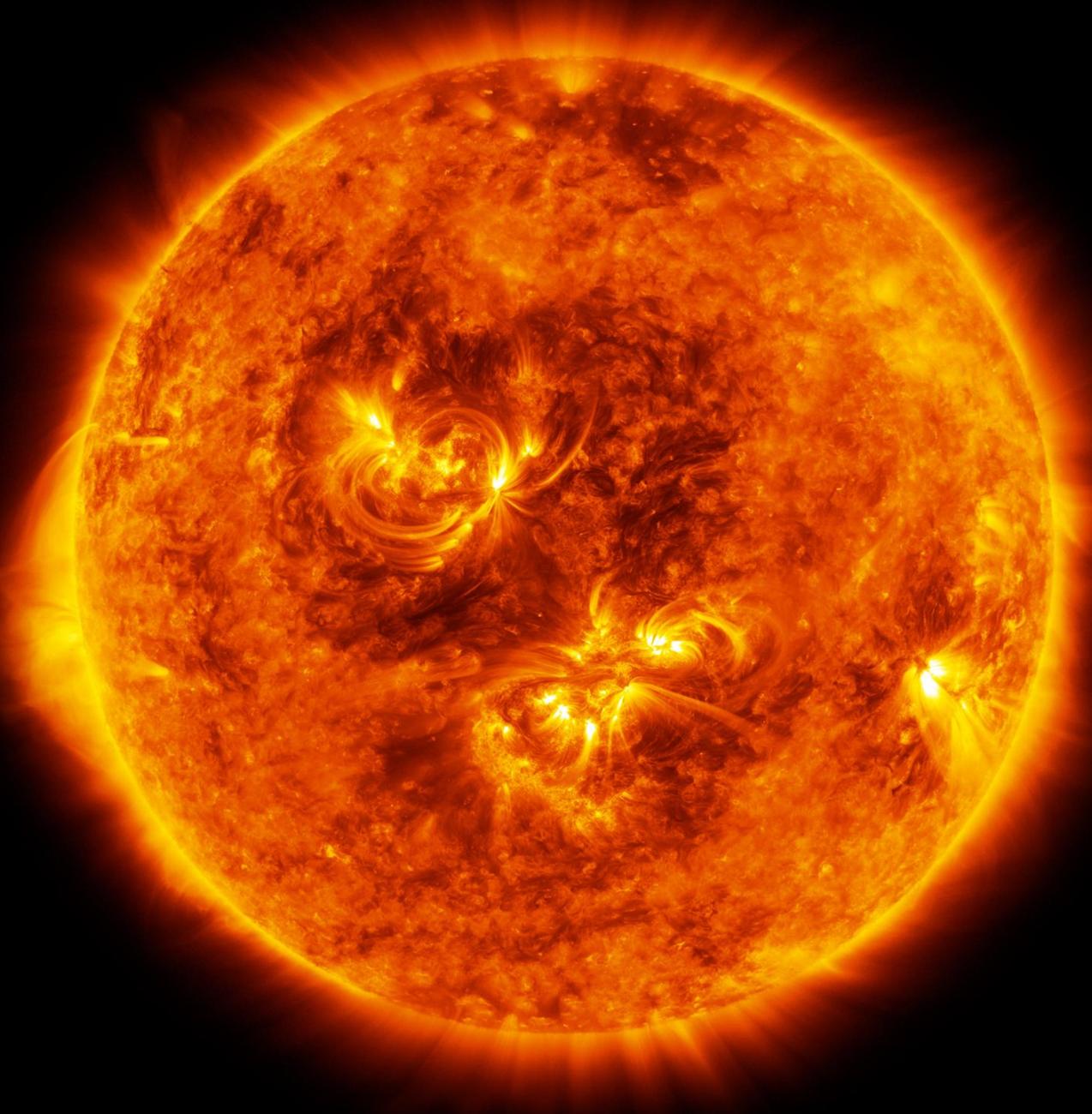
Isaac Newton 1666



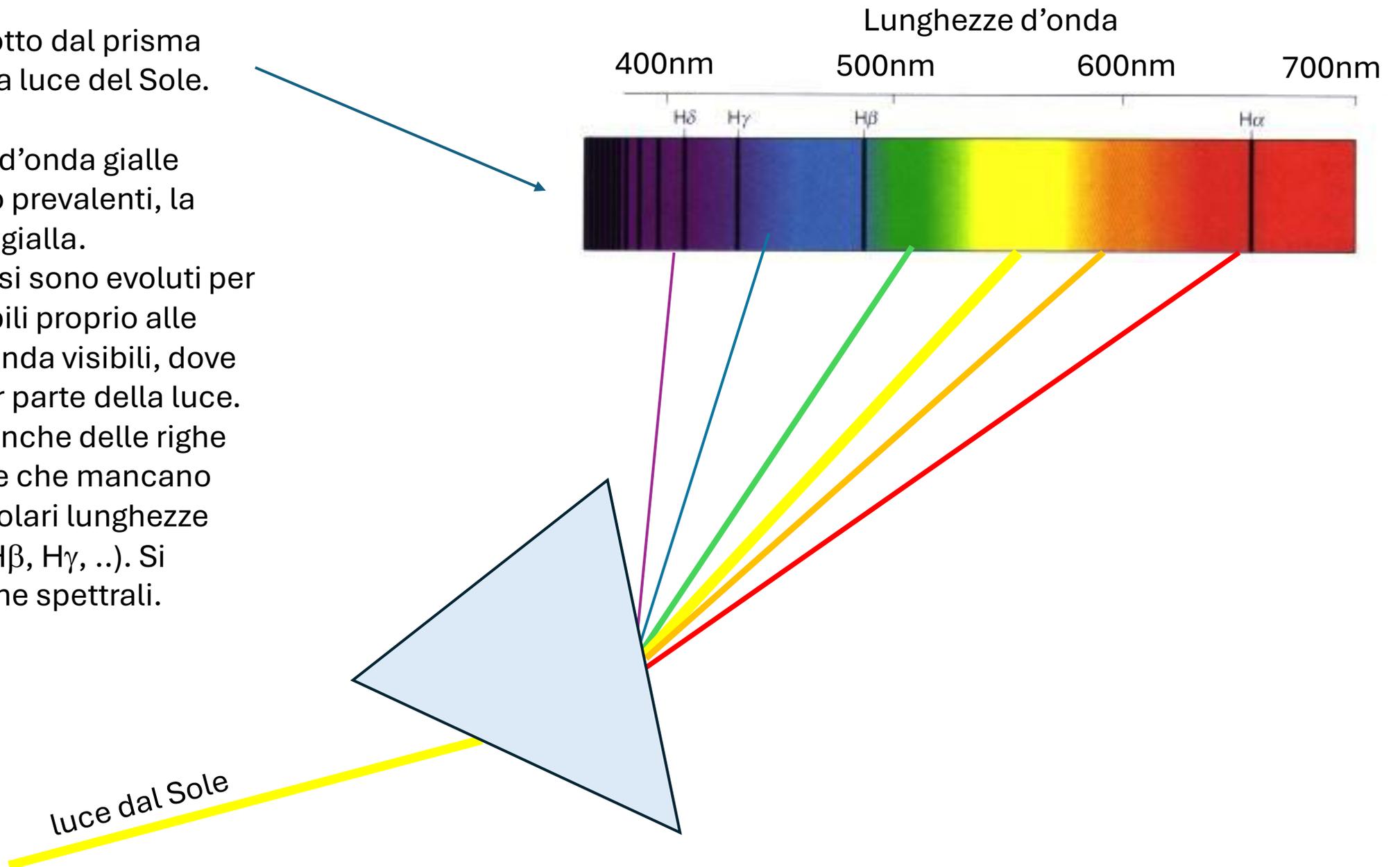
Bassa corrente: minore temperatura, minore agitazione termica, luce più debole e più rossa

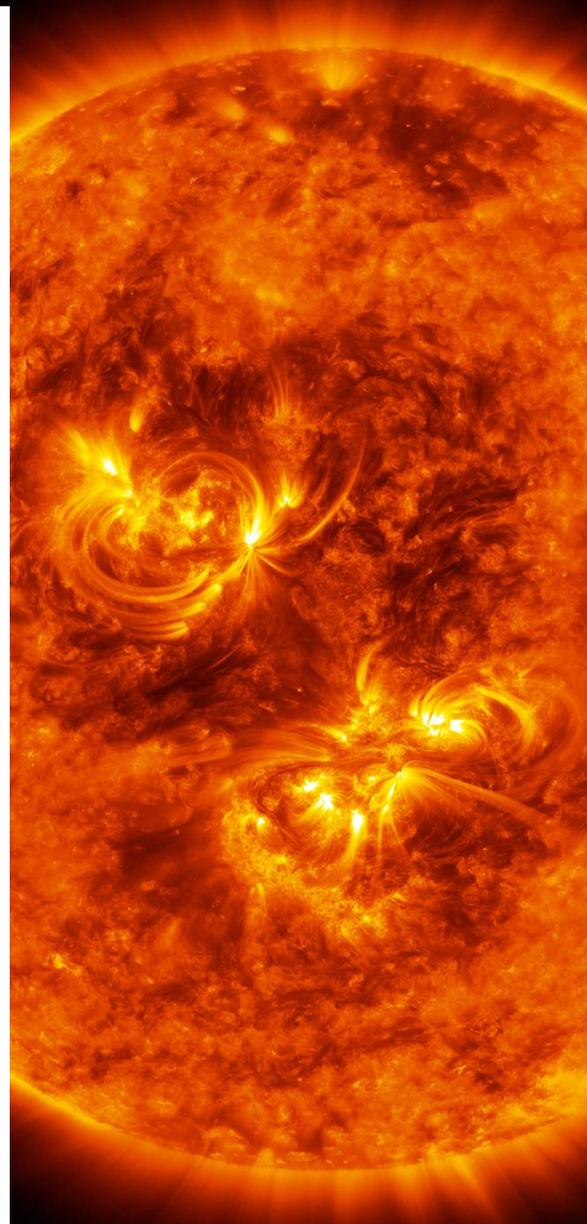
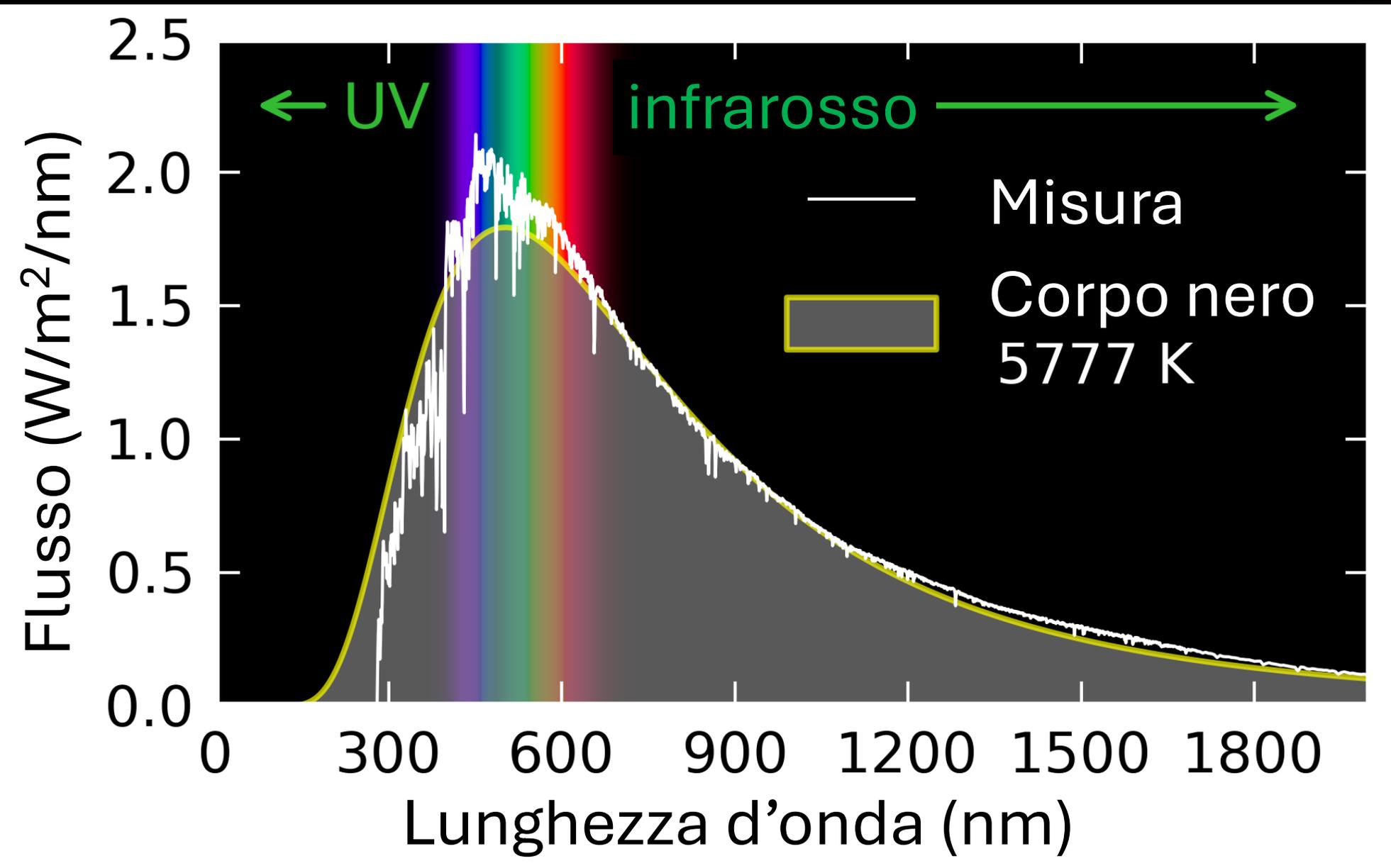


Alta corrente: maggiore temperatura, maggiore agitazione termica, luce più forte e più gialla

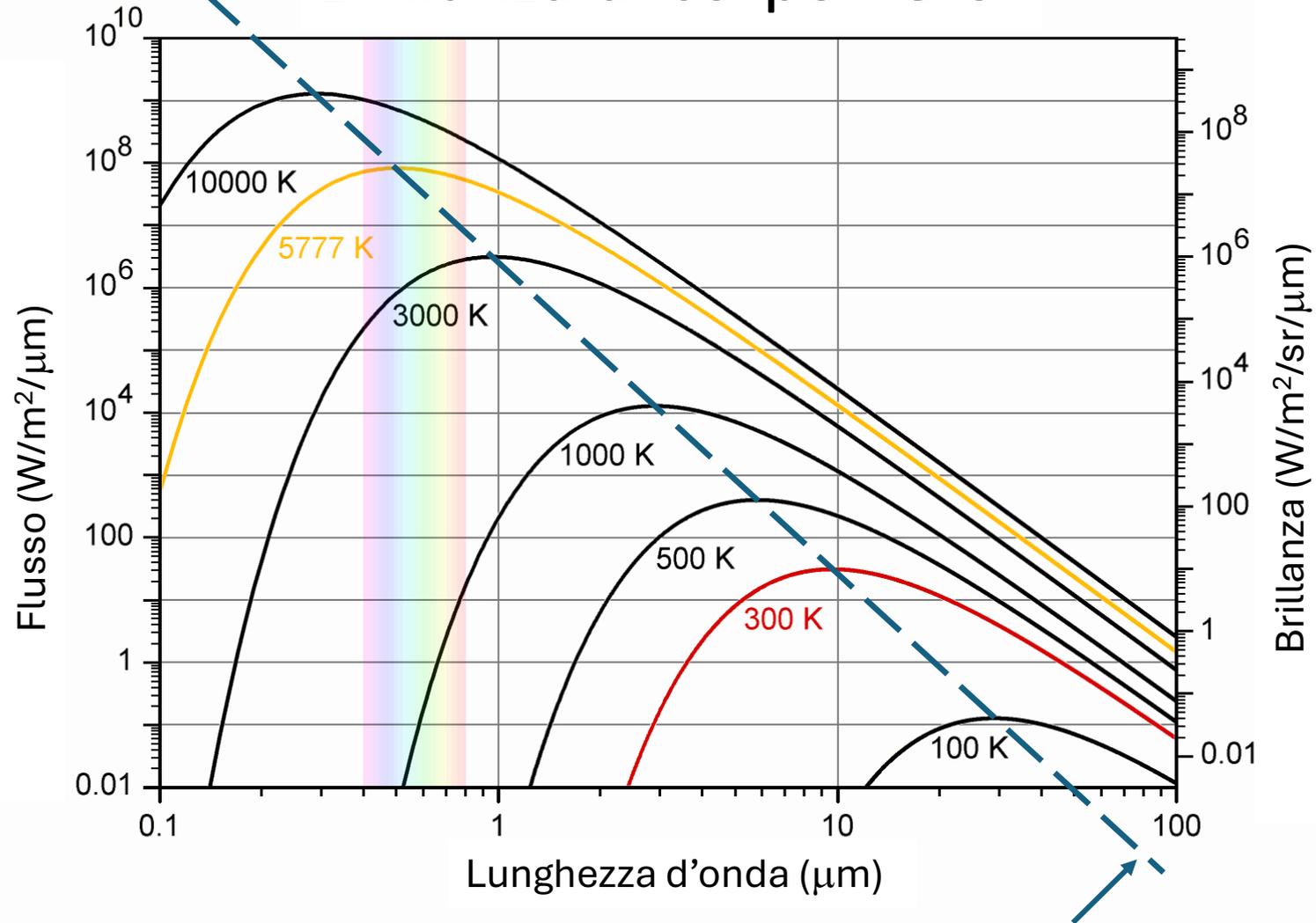


- Spettro prodotto dal prisma analizzando la luce del Sole.
- Le lunghezze d'onda gialle (550nm) sono prevalenti, la stella appare gialla.
- I nostri occhi si sono evoluti per essere sensibili proprio alle lunghezze d'onda visibili, dove c'è la maggior parte della luce.
- Compaiono anche delle righe nere: vuol dire che mancano alcune particolari lunghezze d'onda ( $H\alpha$ ,  $H\beta$ ,  $H\gamma$ , ..). Si chiamano righe spettrali.

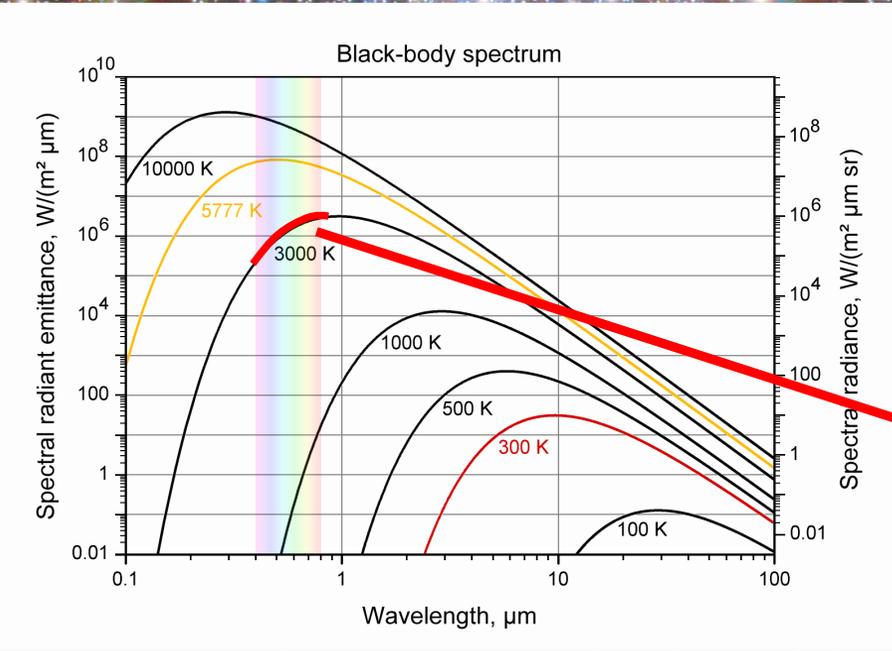
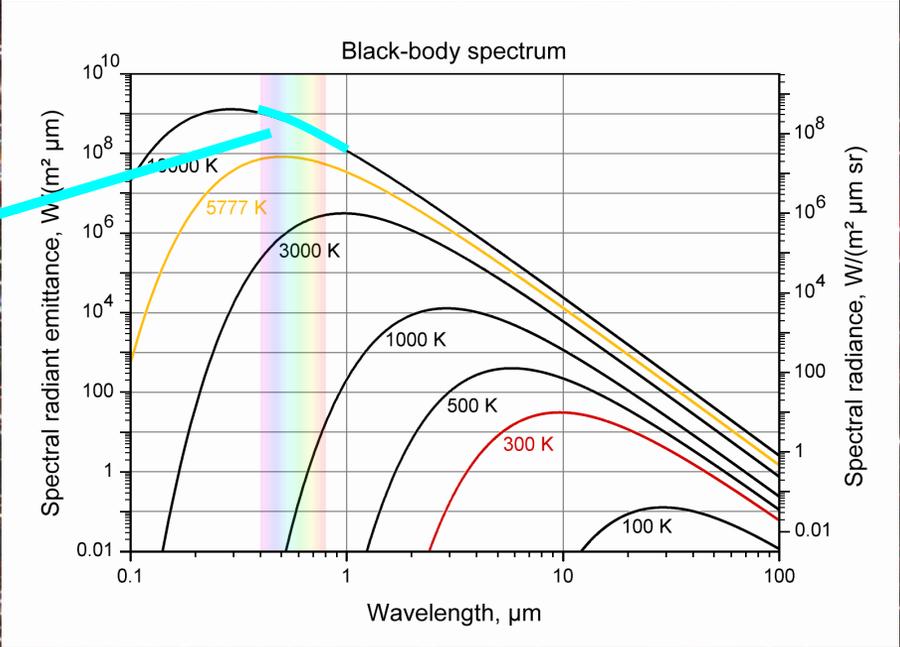
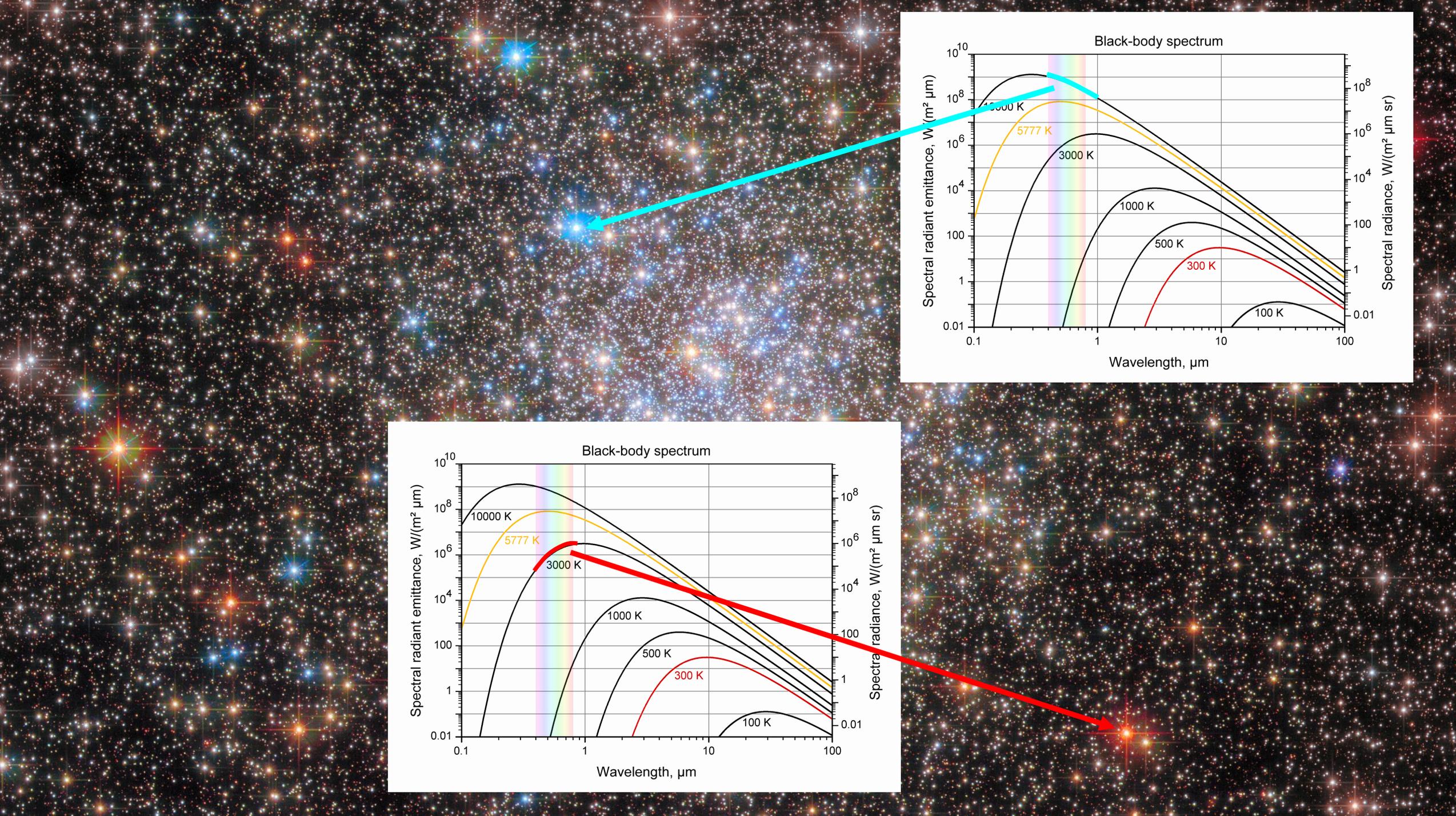


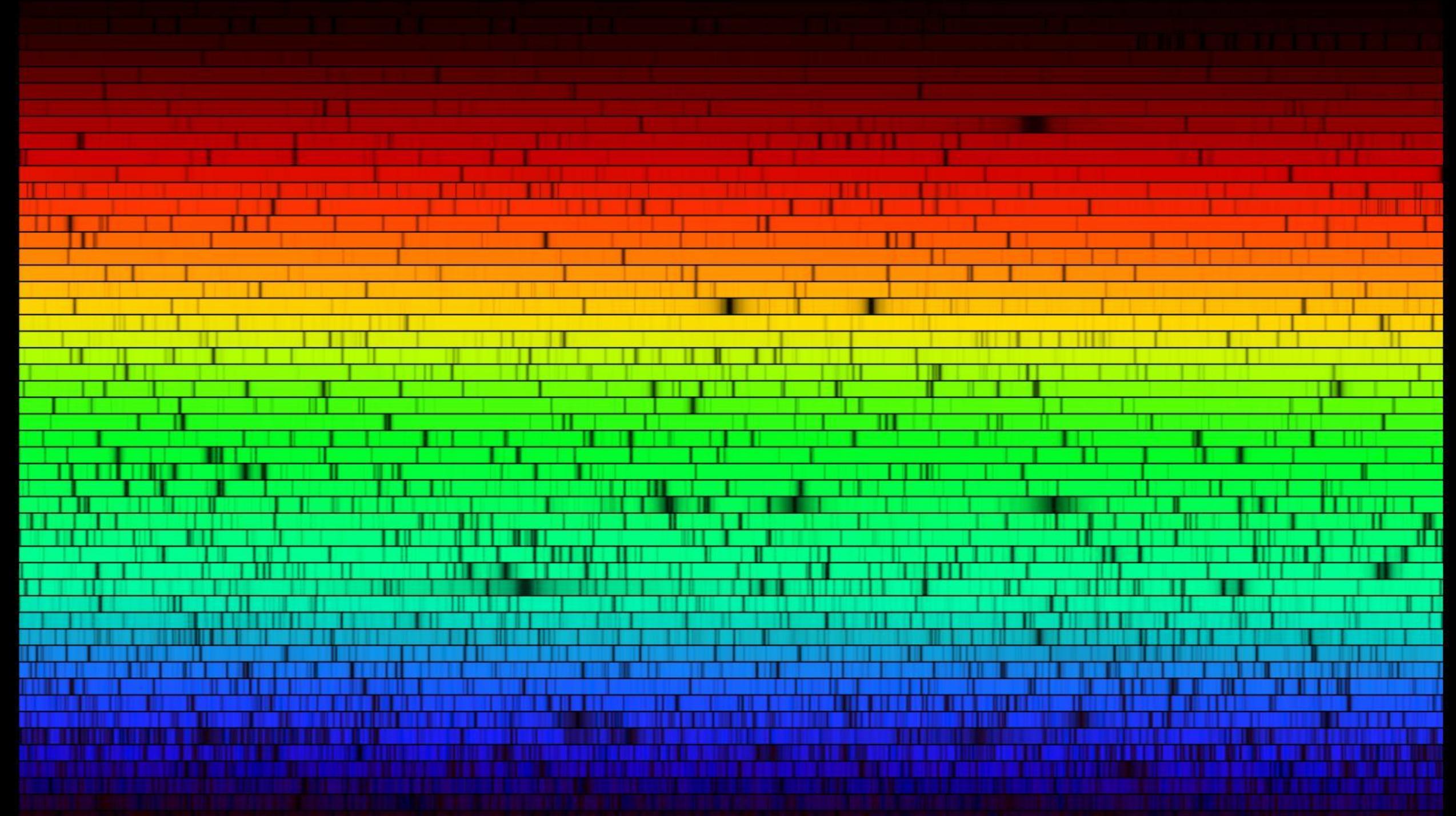


# Brillanza di corpo nero



Lunghezza d'onda di massima emissione:  $\lambda_{\max}(\text{m})=0.0029/ T(\text{K})$

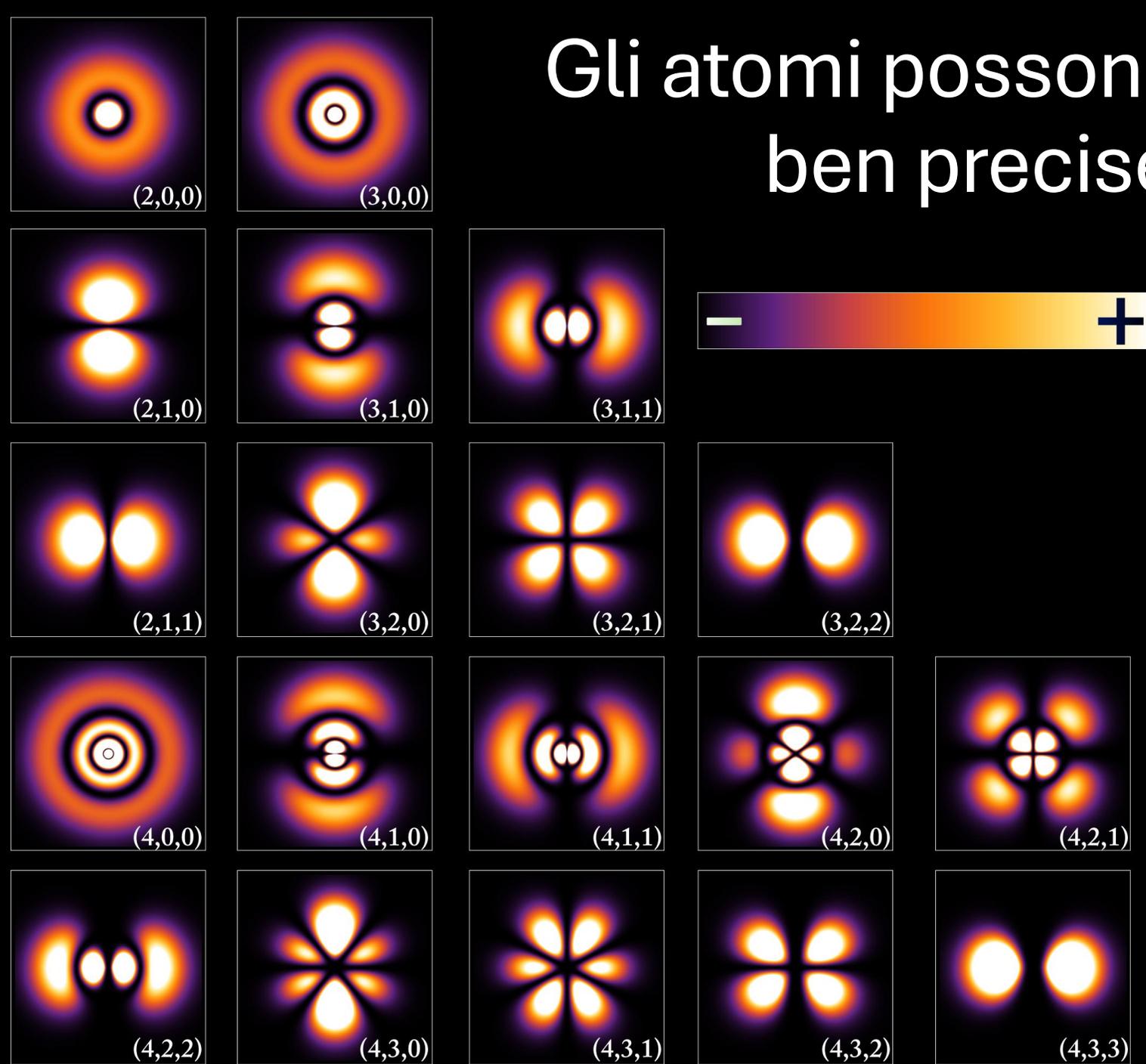




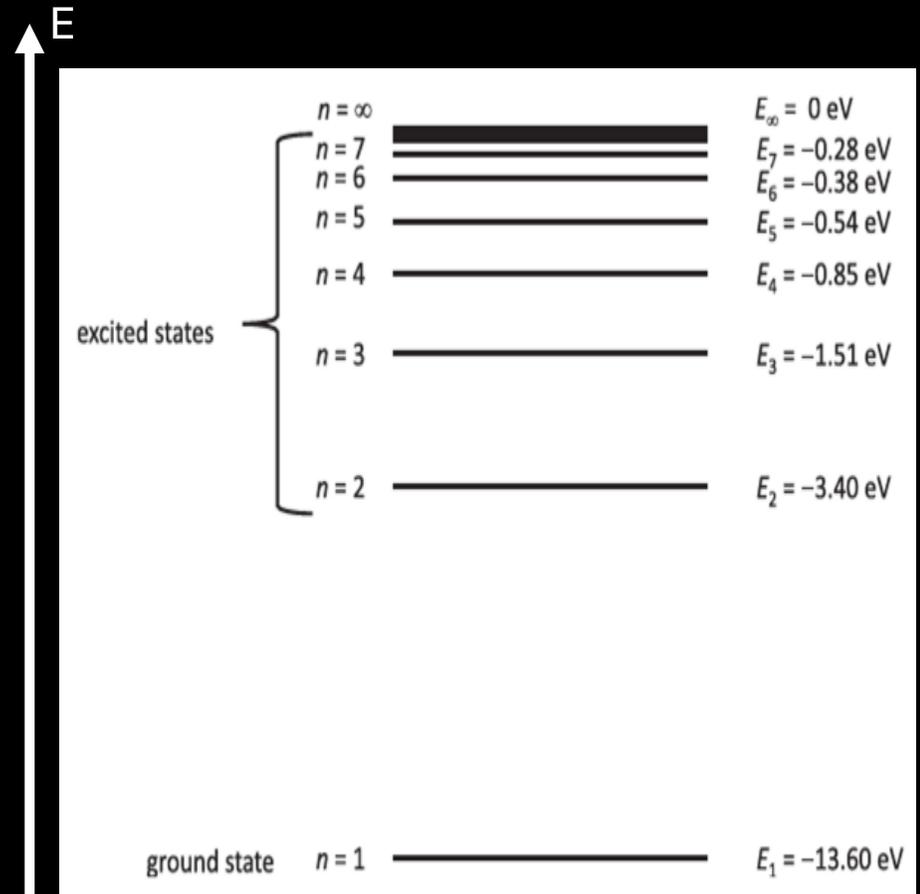
# La luce è quantizzata in fotoni

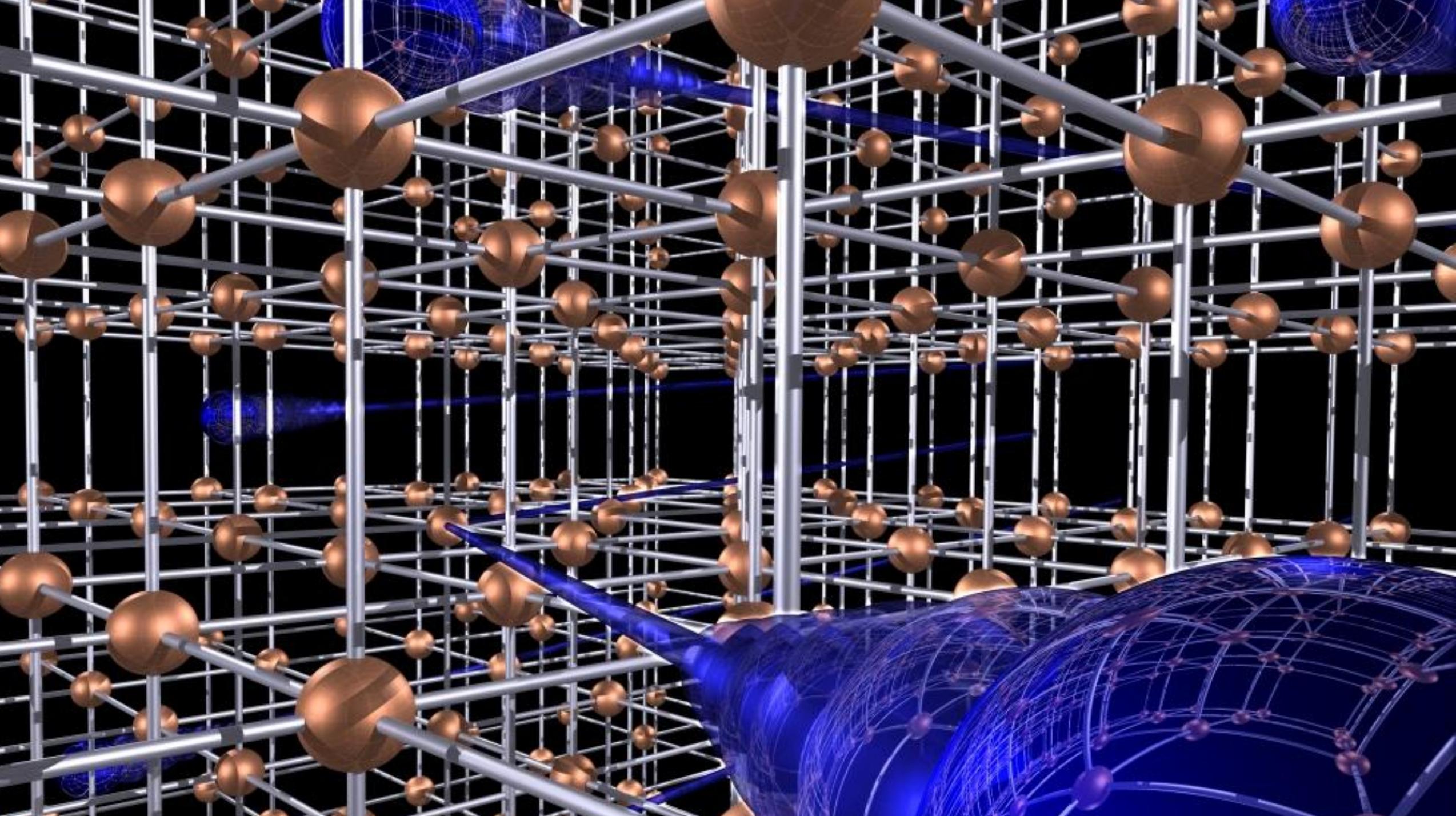
- La legge di Planck del corpo nero, che descrive così bene fenomeni diversissimi, può essere ricavata teoricamente solo assumendo che la luce abbia una doppia natura, ondulatoria e corpuscolare. Ovvero:
- La radiazione elettromagnetica è formata da onde elettromagnetiche, come visto, ma anche...
- ... è formata da *un flusso di fotoni*, (possiamo immaginarli come *ondine elettromagnetiche*) che viaggiano alla velocità della luce, non hanno massa, ,ma ciascuno di essi trasporta un minuscolo quanto di energia elettromagnetica  $\delta E = hc/\lambda$  (ipotesi di Planck dei fotoni)
- A seconda del fenomeno (basse o alte energie) predomina l'una o l'altra natura della radiazione elettromagnetica.
- Solo usando questo dualismo si possono spiegare tutti i fenomeni elettromagnetici.

# Gli atomi possono avere solo energie ben precise, quantizzate



Atomo di idrogeno





## Righe di assorbimento:

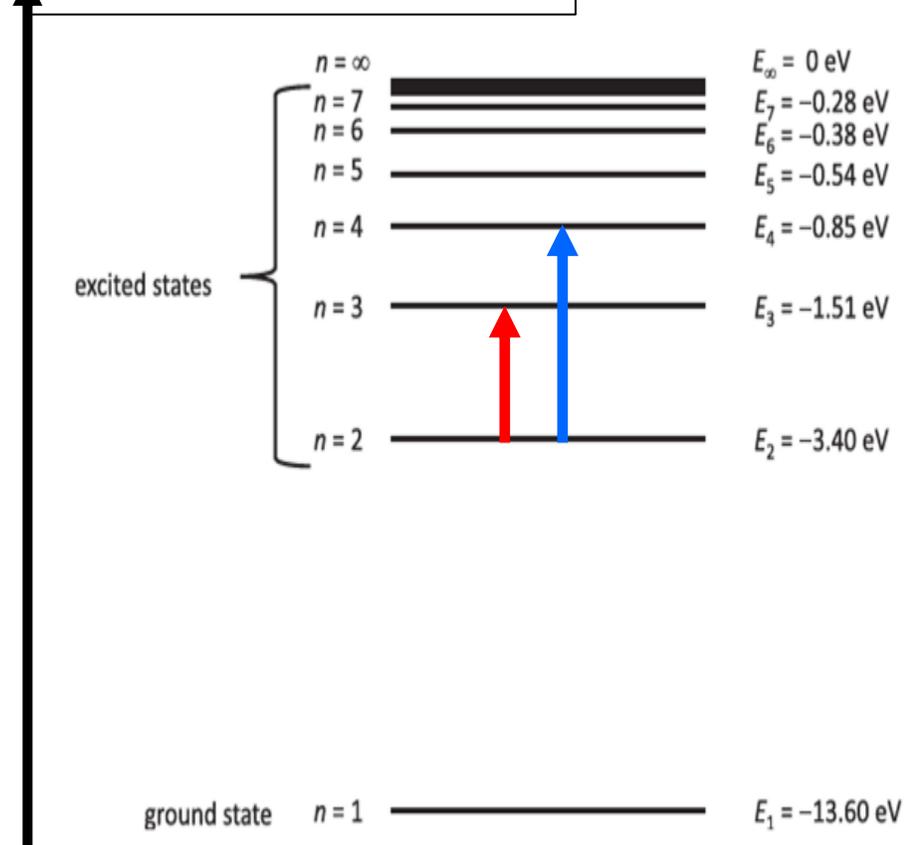
Quando un fotone ha la lunghezza d'onda giusta, ovvero la sua energia è uguale alla differenza di energia tra due possibili energie atomiche, allora può essere assorbito da un atomo, se questo si trova nello stato ad energia più bassa delle due.

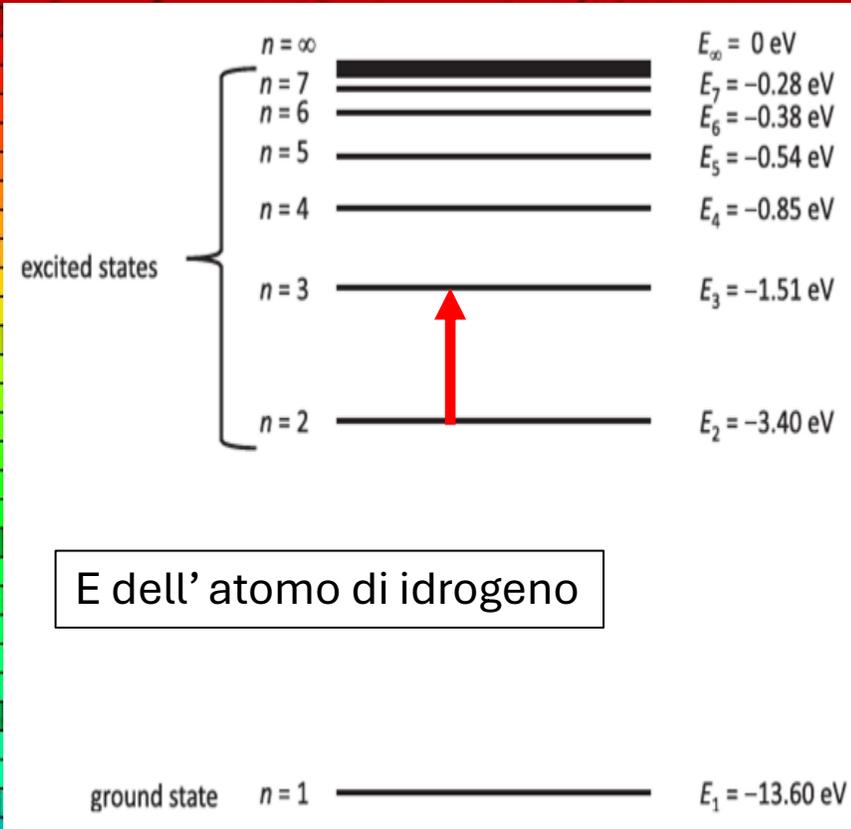
Il fotone sparisce, e l'atomo assorbe la sua energia, portandosi nello stato di energia più alta delle due.

Se l'atomo si trova nella fotosfera di una stella, assorbe i fotoni di quella lunghezza d'onda provenienti dall'interno della stella, e quindi quella lunghezza d'onda non compare nello spettro.

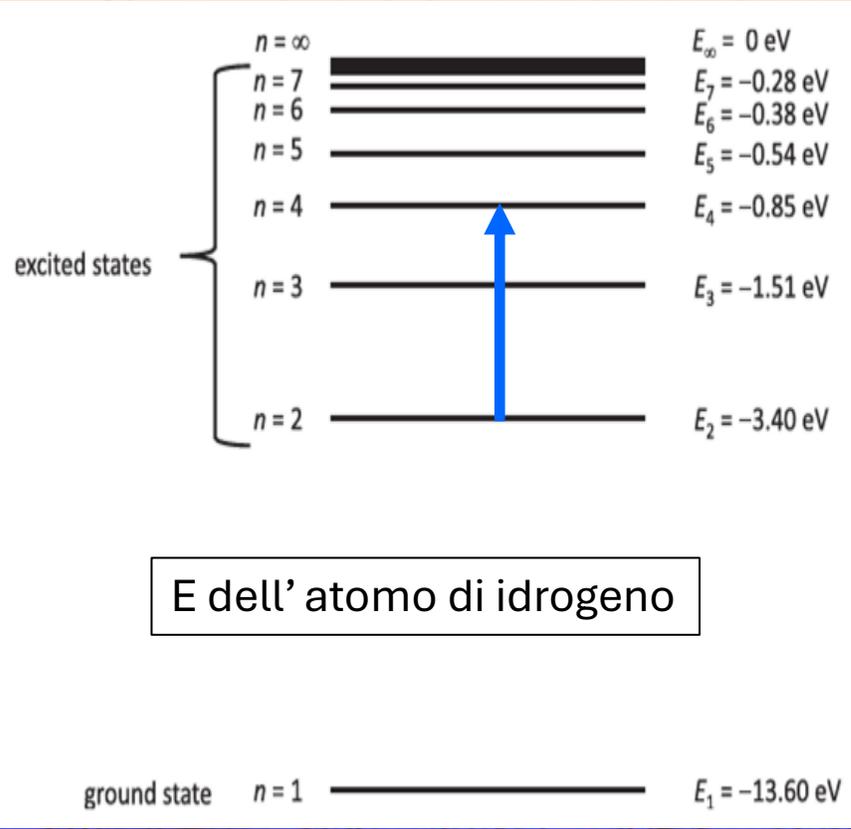
$$E \text{ del fotone} = hc/\lambda$$

E dell' atomo di idrogeno



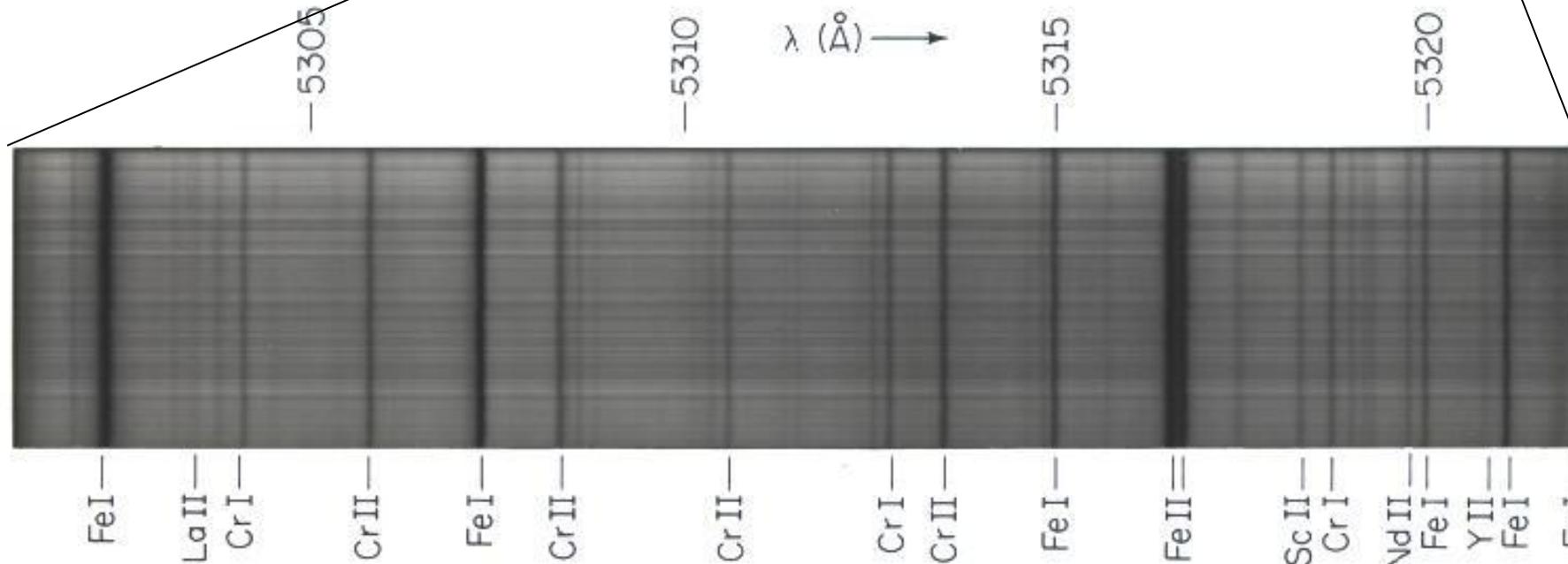
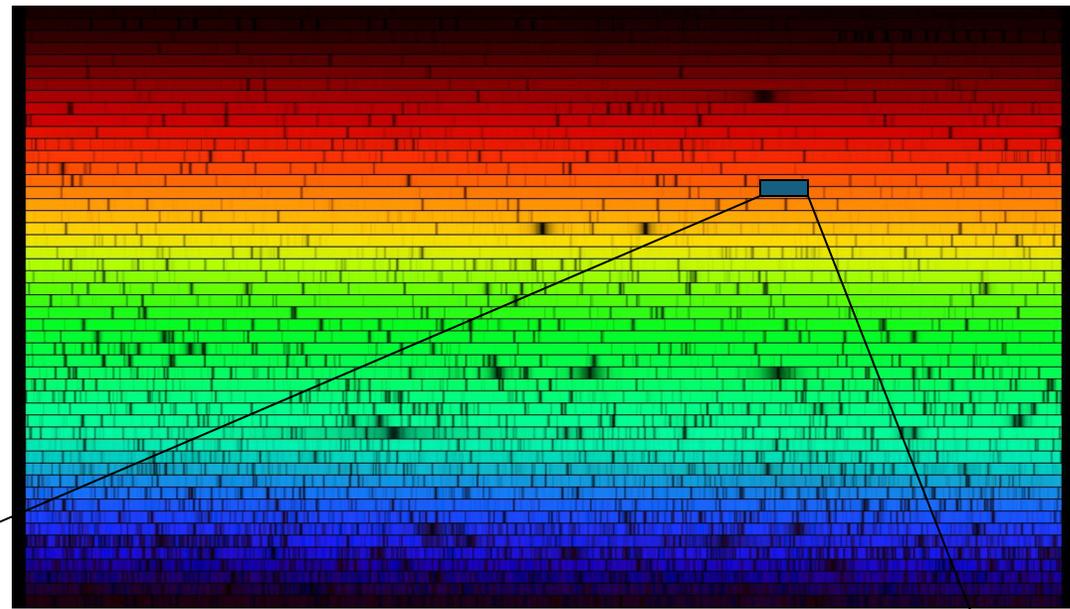


E dell' atomo di idrogeno



E dell' atomo di idrogeno

Nello spettro del Sole sono stati identificati migliaia di diversi elementi, neutri (es. FeI) o ionizzati (es. FeII è ionizzato una volta).



Piccola porzione dello spettro del Sole con identificazione degli elementi responsabili delle righe

100000 anni luce

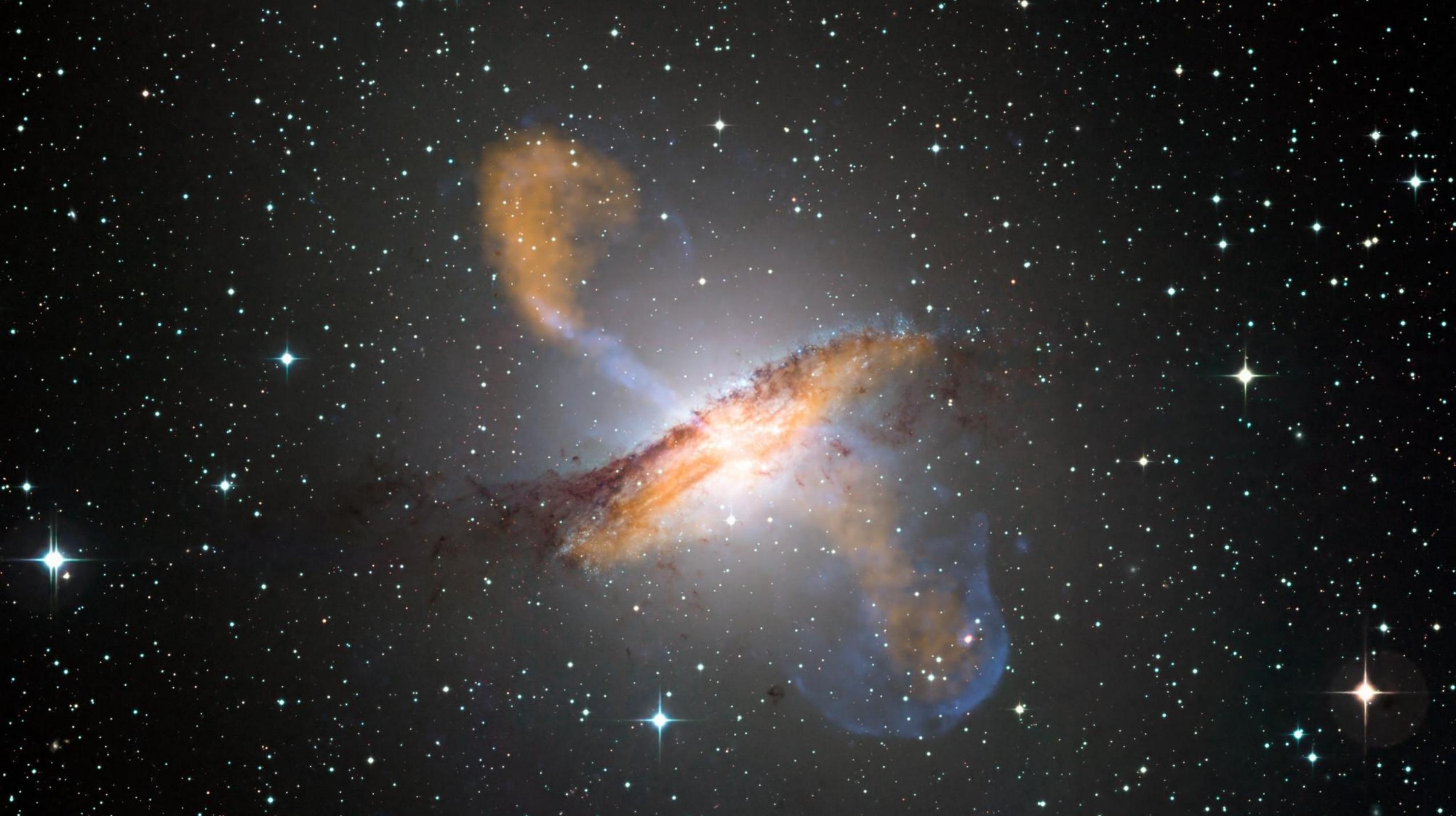


We are here —○













# Distribuzione delle galassie

- Se guardiamo lontano, le galassie sono distribuite in modo **statisticamente isotropo** sulla sfera celeste.
- In prima approssimazione il numero di Galassie che si contano in un grado quadrato di cielo segue una statistica di Poisson.
- Il numero medio dipende ovviamente da quanto è sensibile l'osservazione: osservazioni più sensibili saranno più profonde, e conteranno anche galassie molto distanti. Il numero medio sarà maggiore.

# A million galaxies



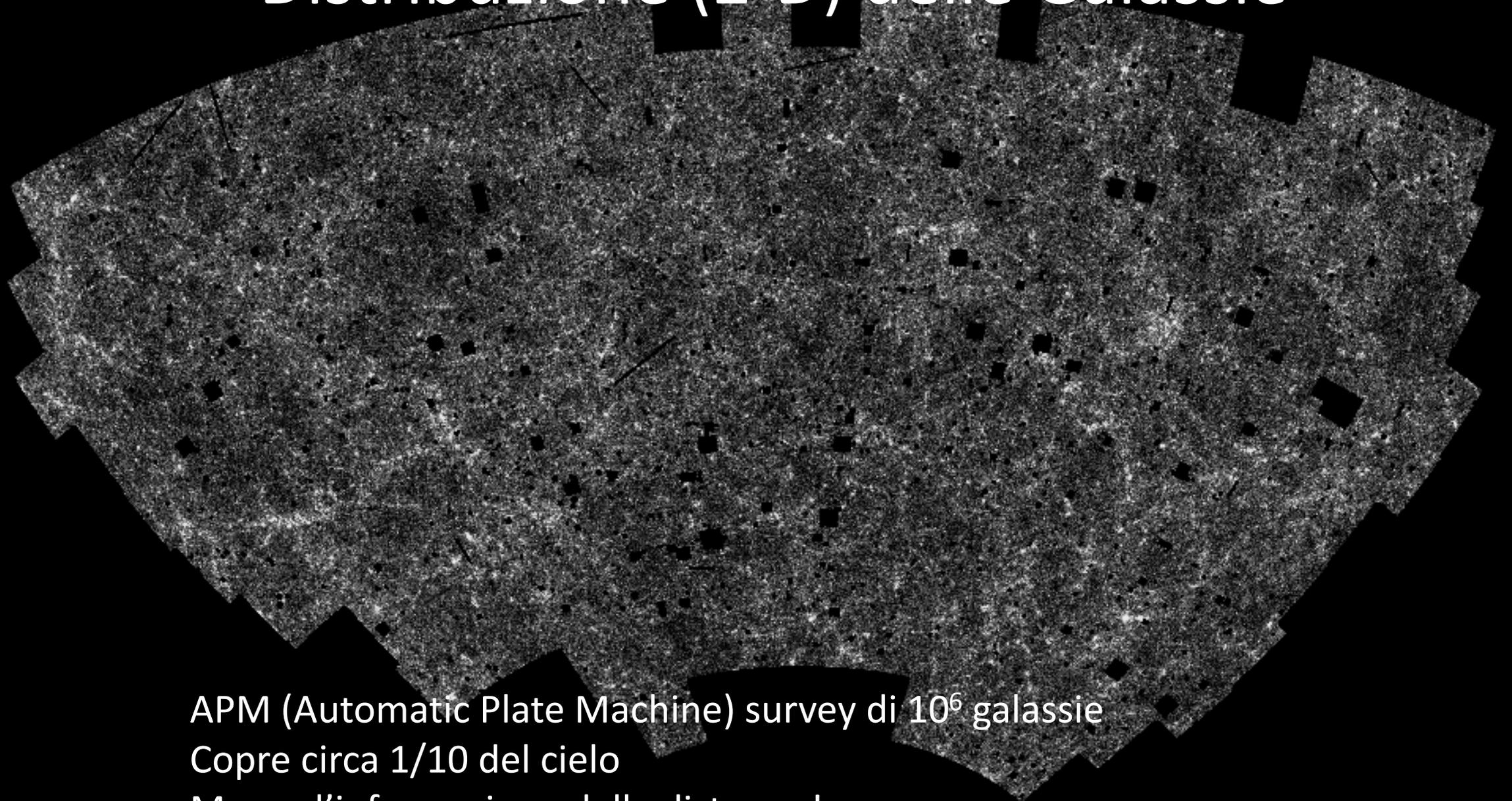
Shane-Wirtanen map:

On the basis of the Shane-Wirtanen counts,

P.J.E. Peebles produced a map of the sky distribution of 1 million galaxies on the sky:

- Clearly visible are clusters
- hint of filamentary LSS features, embedding clusters

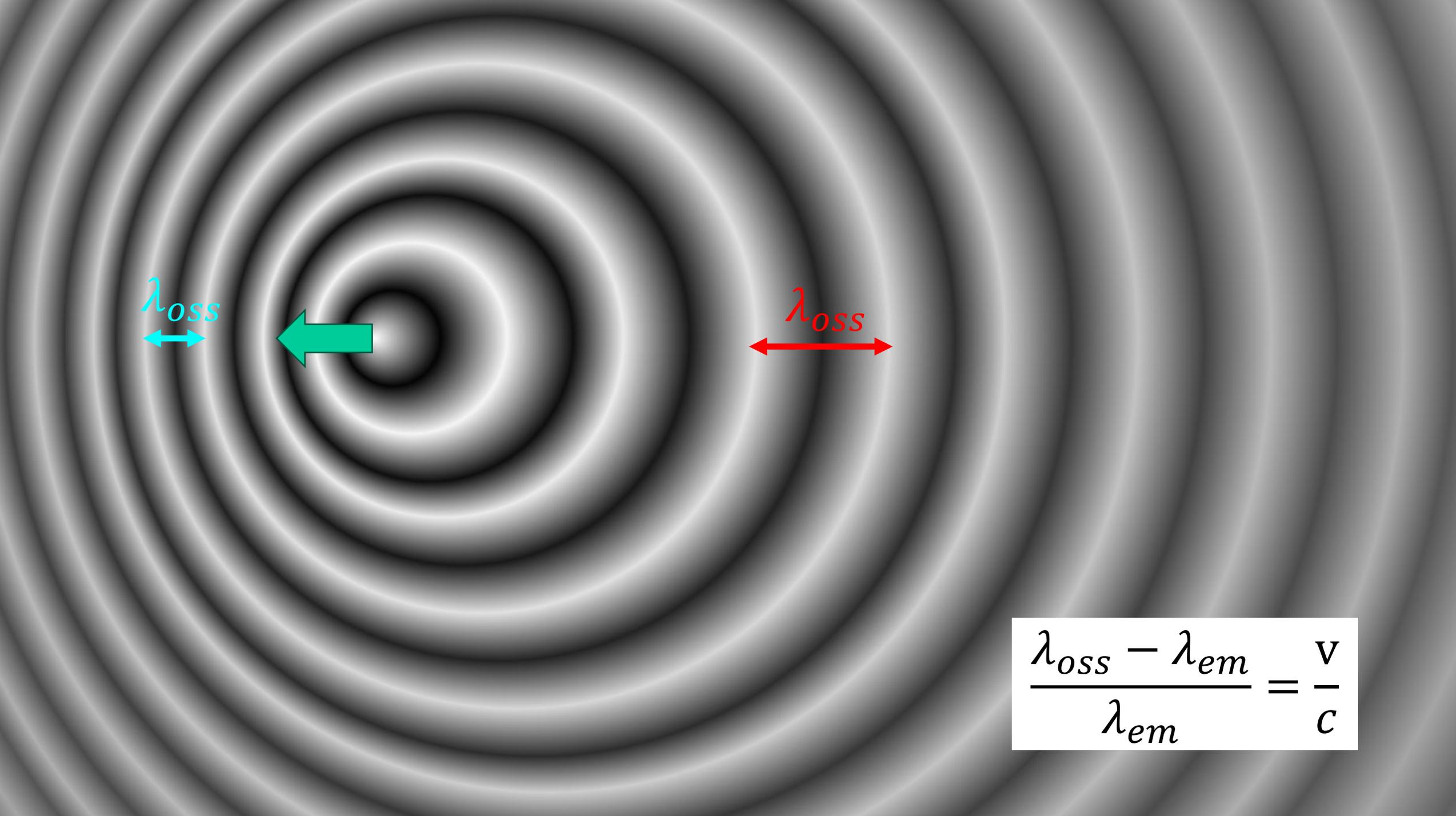
# Distribuzione (2-D) delle Galassie



APM (Automatic Plate Machine) survey di  $10^6$  galassie

Copre circa 1/10 del cielo

Manca l'informazione della distanza !



$\lambda_{oss}$

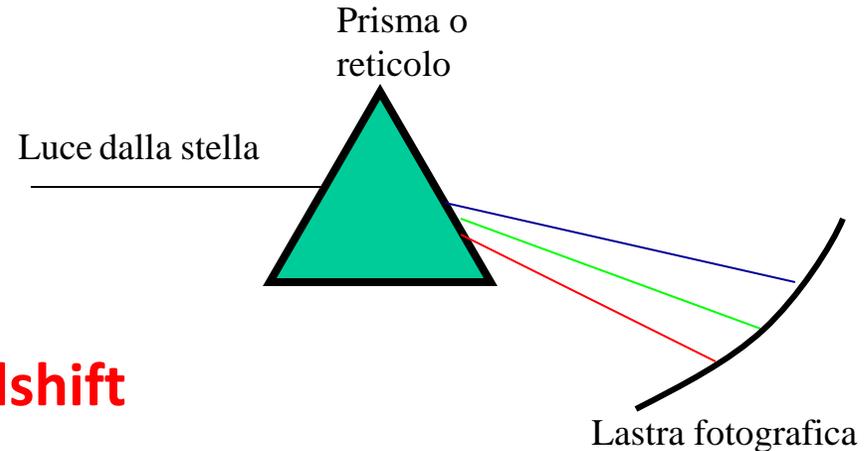
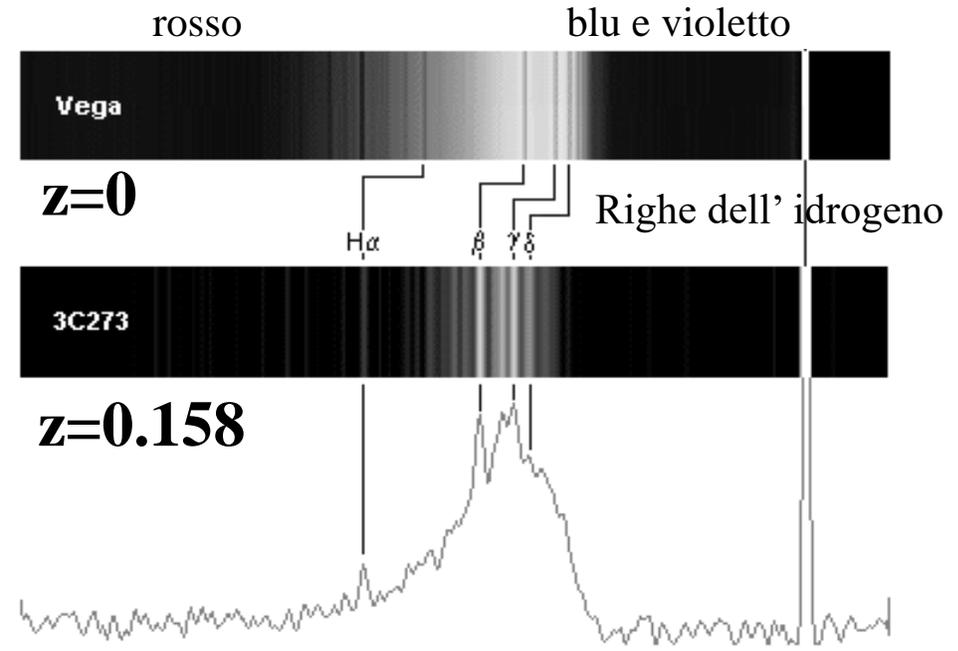


$\lambda_{oss}$

$$\frac{\lambda_{oss} - \lambda_{em}}{\lambda_{em}} = \frac{v}{c}$$

# Il redshift

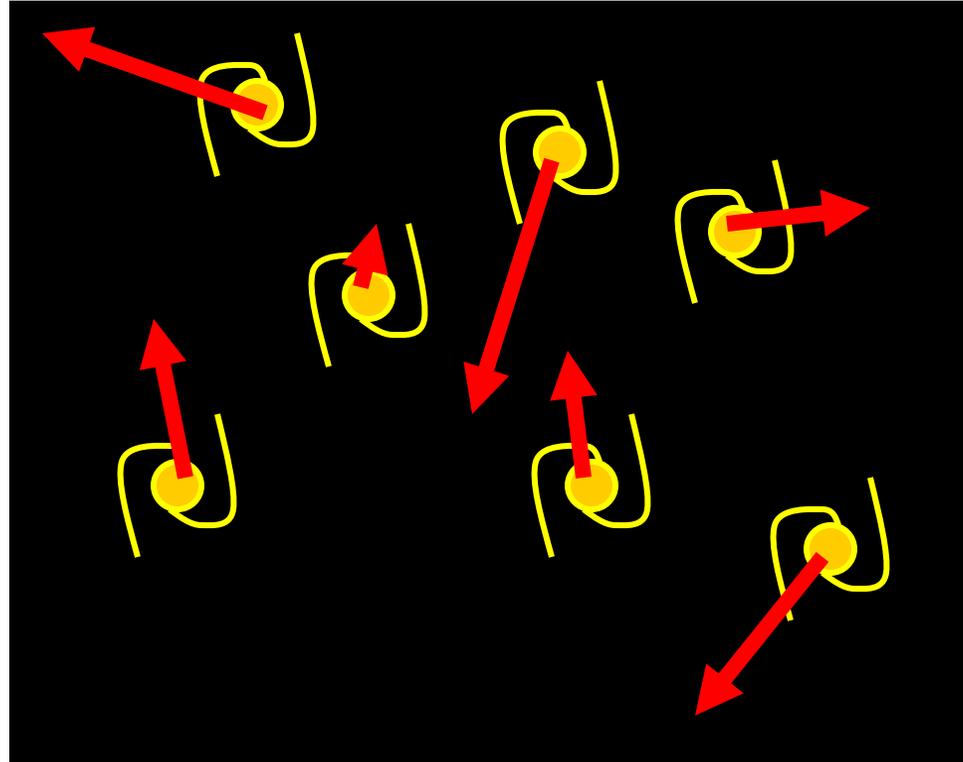
- Gli spettri stellari e galattici mostrano serie di righe di assorbimento o emissione delle quali è ben nota la lunghezza d'onda di laboratorio.
- **Se** la sorgente si muove rispetto a noi, con velocità apprezzabile, le serie di righe appaiono spostate rispetto a quelle misurate in laboratorio.  $\Delta\lambda/\lambda = v/c$ ;
- **Si definisce il redshift**  $\Delta\lambda/\lambda = z$



**Redshift**

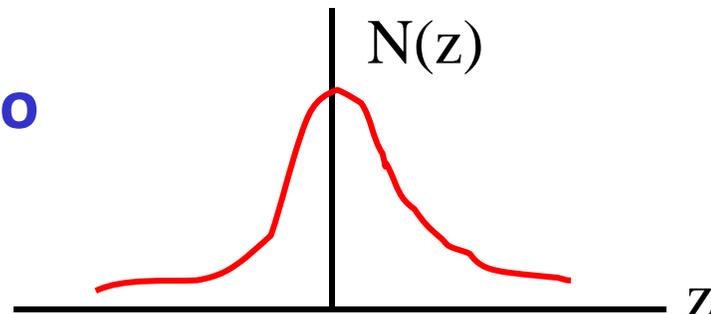
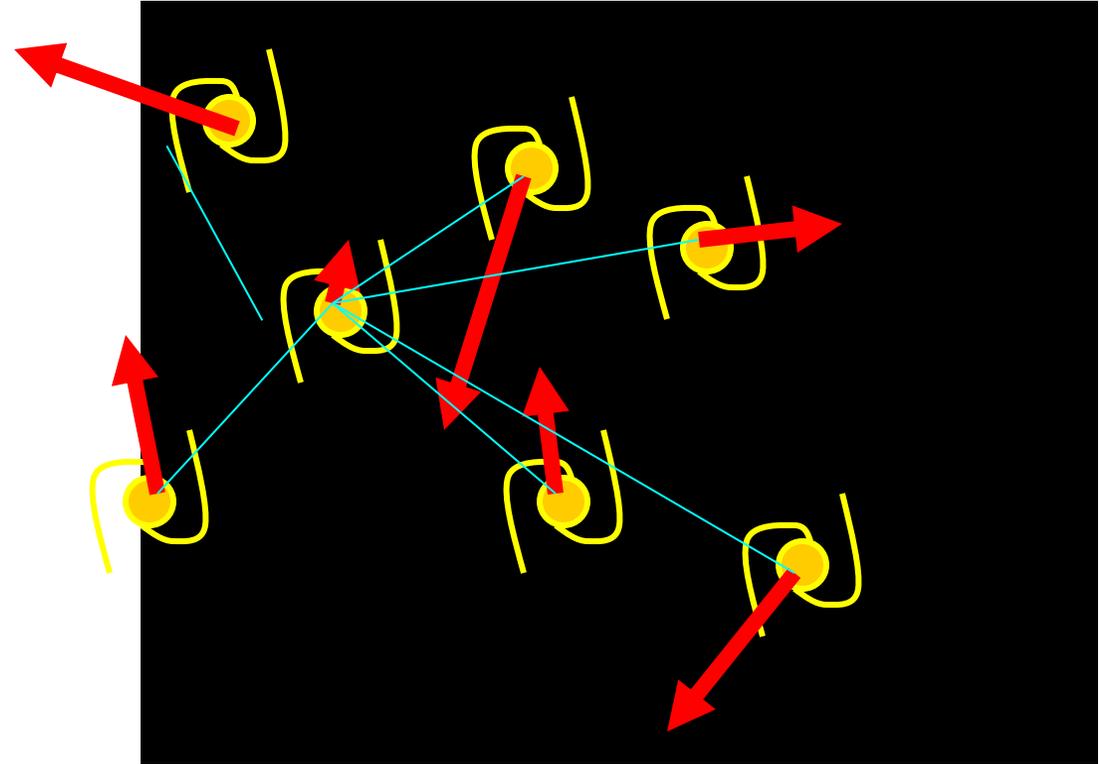
# Velocità delle galassie

- Se le velocità delle galassie fossero distribuite a caso, come le molecole di un gas, si dovrebbero misurare velocità relative rispetto a noi sia positive che negative (alcune si allontanano e altre si avvicinano a noi).

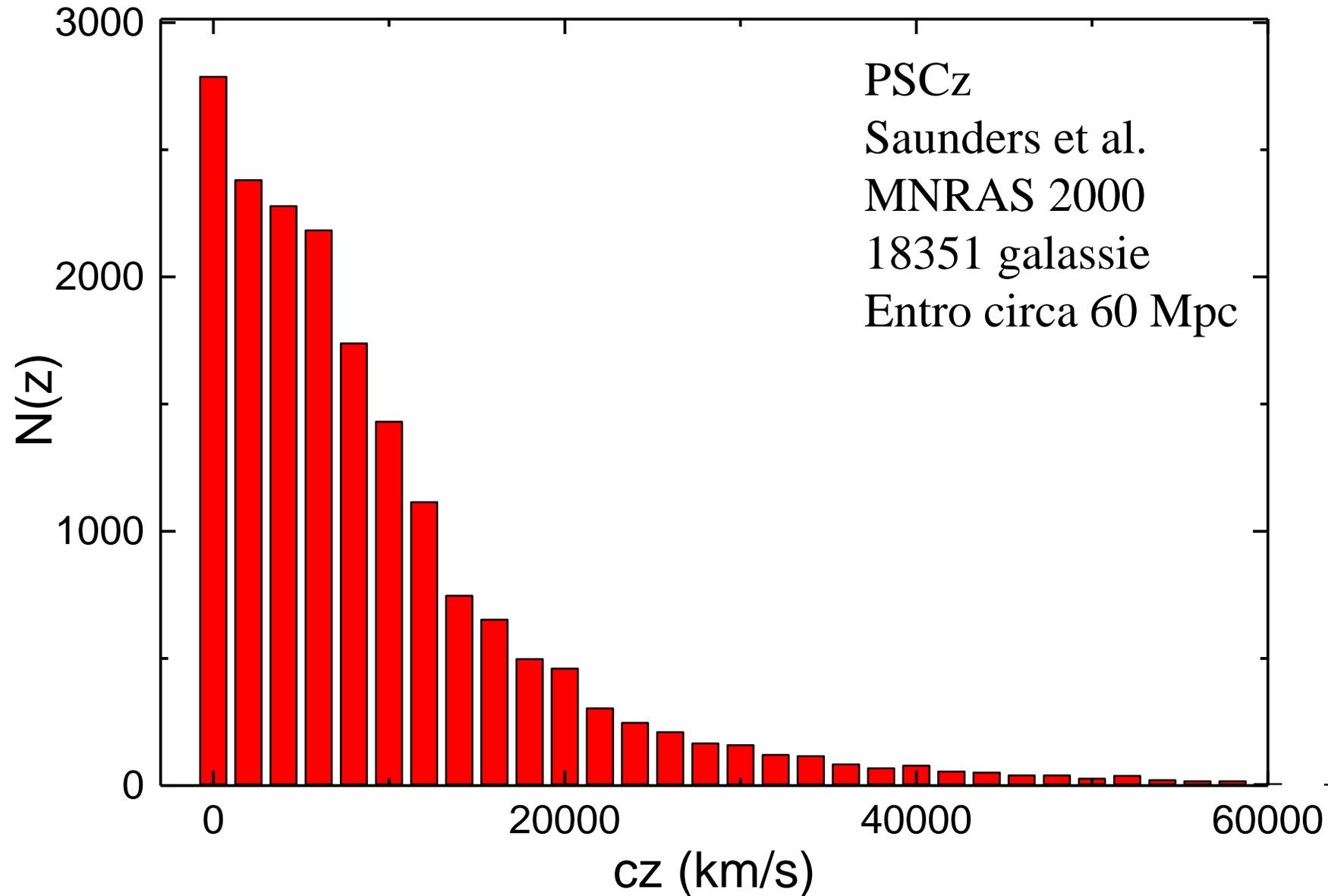


# Velocità radiali delle galassie

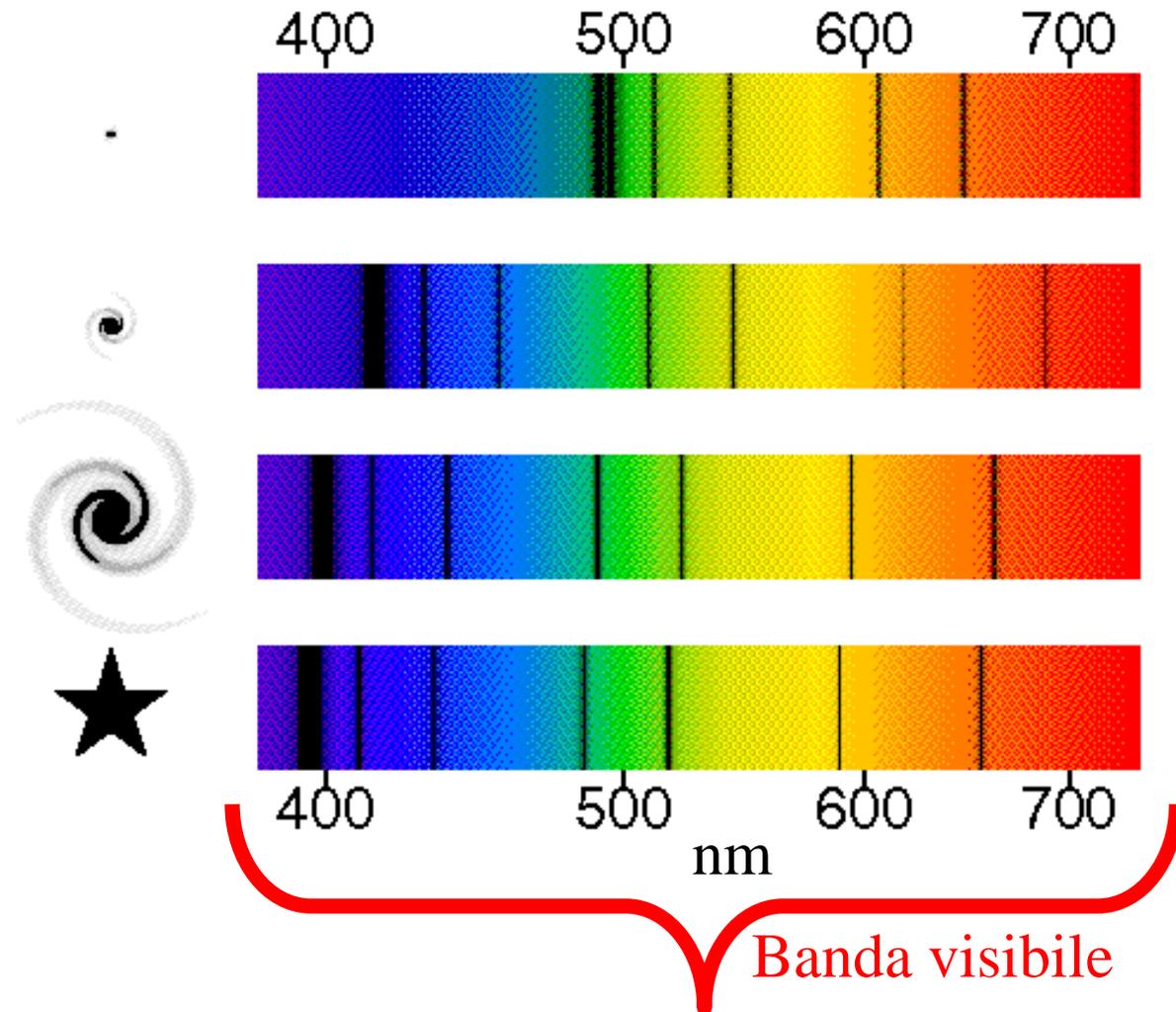
- Se le velocità delle galassie fossero distribuite a caso, come per le molecole di un gas, si dovrebbero misurare velocità radiali (e quindi  $z$ ) sia di allontanamento ( $z > 0$ ) che di avvicinamento ( $z < 0$ )
- Si ha invece sperimentalmente che, a parte poche galassie molto vicine,  **$z$  è sempre  $> 0$  (redshift)**, e può essere anche **molto grande !**
- **Tutte le galassie lontane appaiono allontanarsi da noi.**



# Redshift delle galassie



- Le Galassie sembrano allontanarsi tutte da noi....
- ... e con velocità tanto più alta quanto più sono distanti.



In the star which is at rest with respect to us, or in a laboratory standard, the line wavelengths are 393 & 397 nm from Ca II [ionized calcium]; 410, 434, 486 & 656 nm from H I [atomic hydrogen]; 518 nm from Mg I [neutral magnesium]; and 589 nm from Na I [neutral sodium].



- Hubble trovò una correlazione tra velocità apparente di recessione (redshift) delle galassie e loro distanza.
- Edwin Hubble, Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 15 no. 3, pp.168-173, 1929
- Evidenze del genere erano già state trovate da altri (Carl Wirtz, in Europa, ad esempio).

$$cz = H_0 D$$

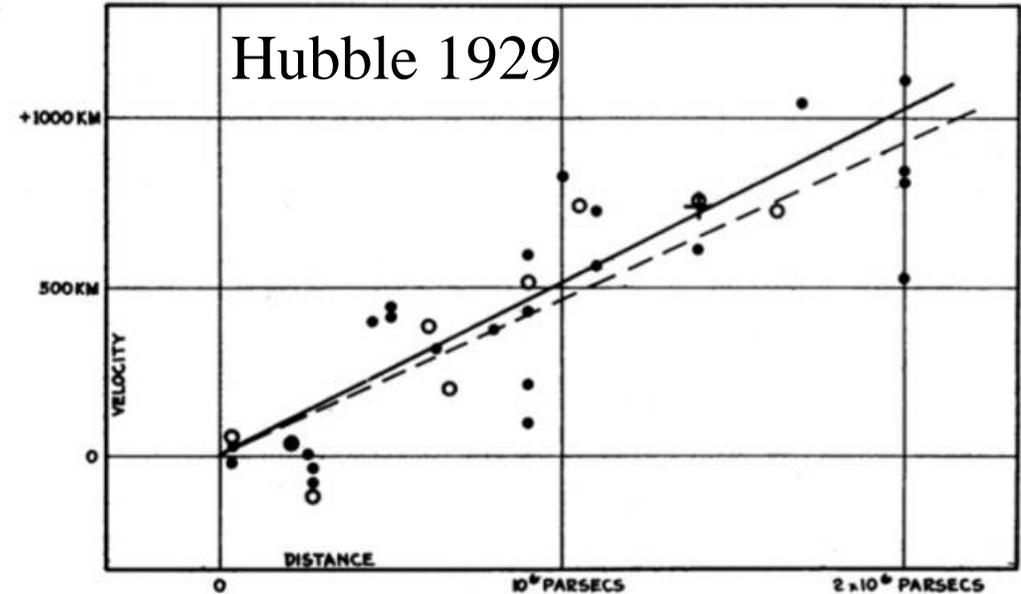
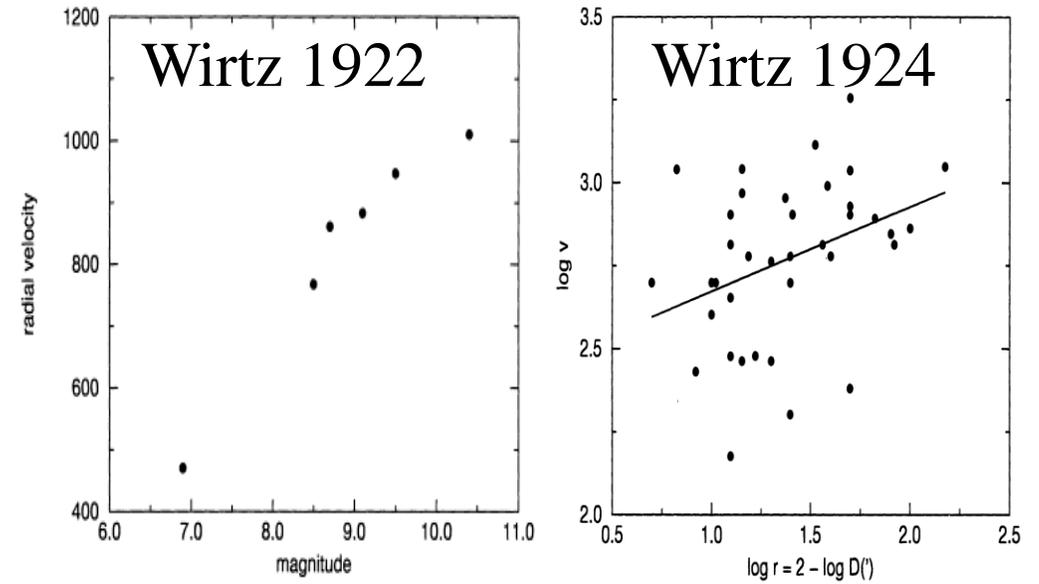


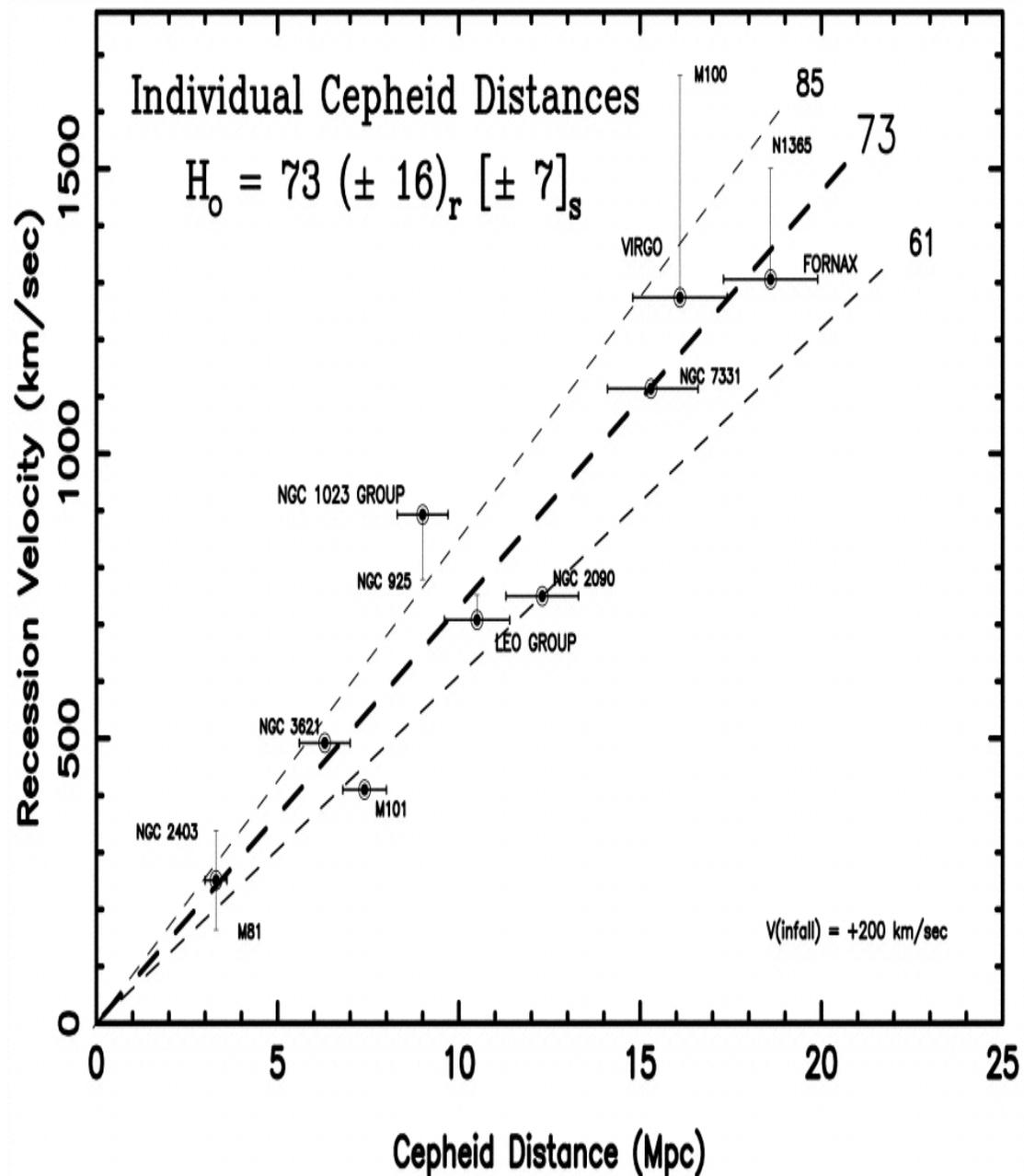
FIGURE 1

Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

- Legge di Hubble da misure di stelle cefeidi
- Legge di Hubble:

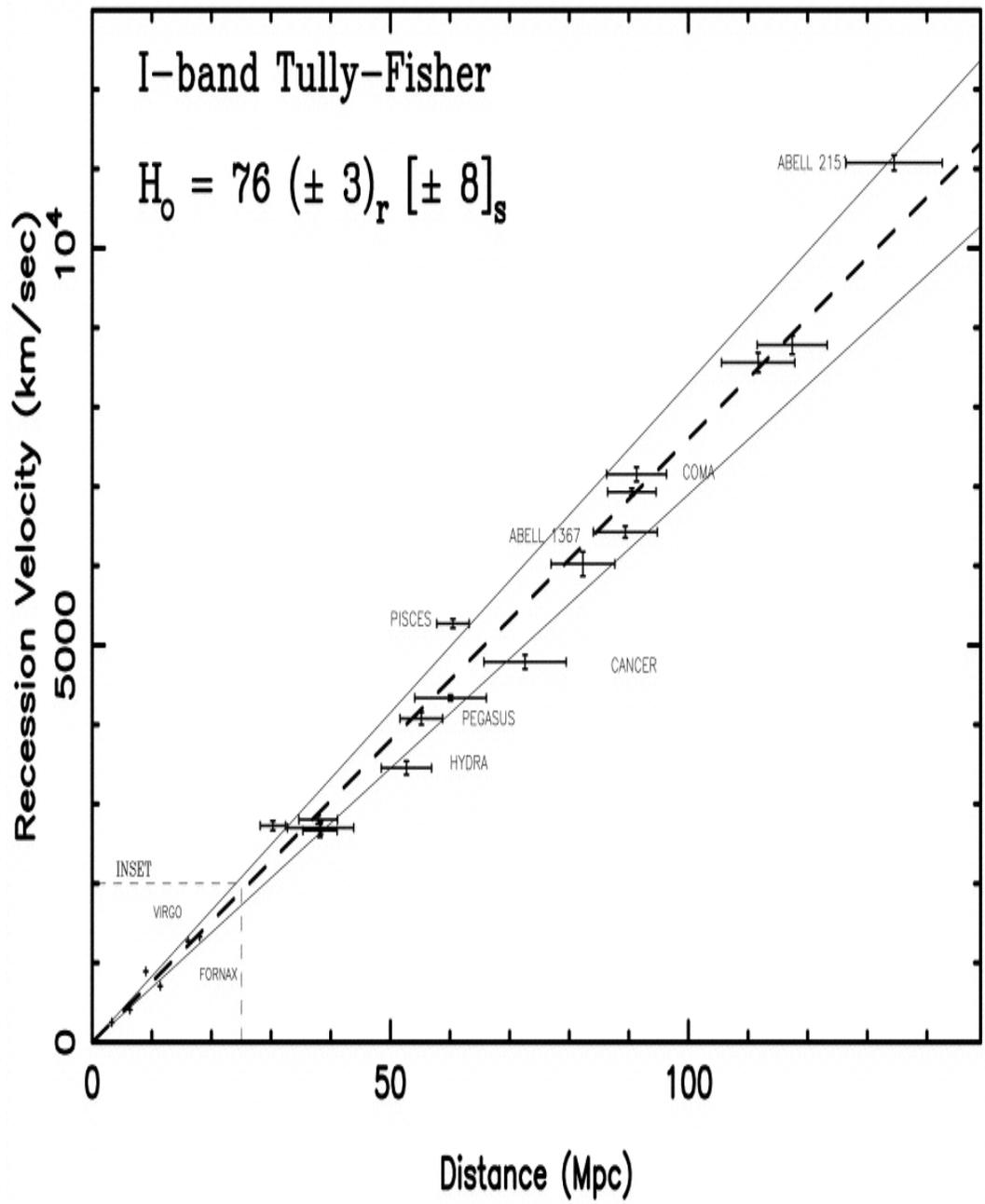
$$cz = H_0 D$$

$$cz = H_0 D$$



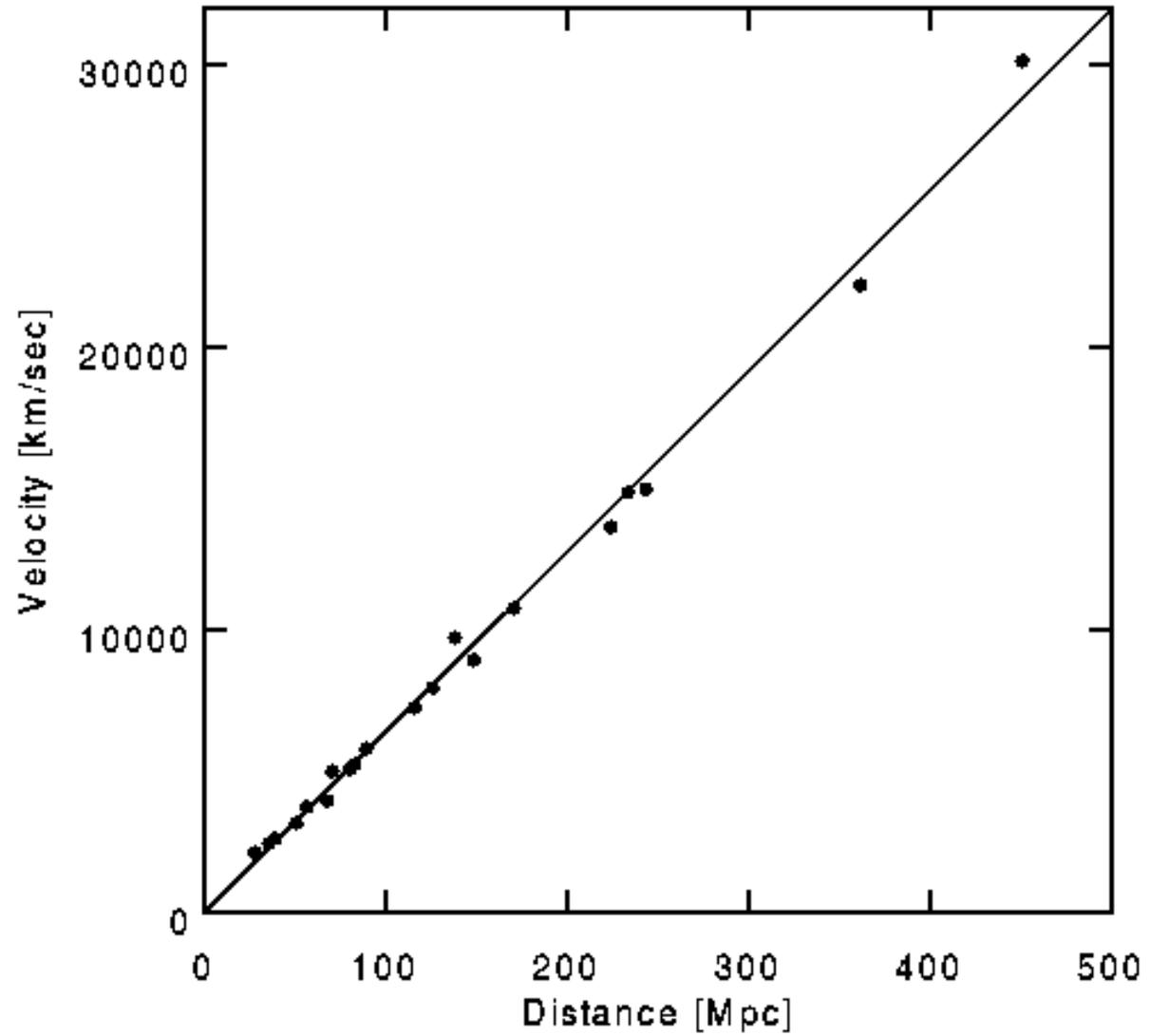
- Legge di Hubble  
ottenuta tramite il  
metodo di Tully-Fisher

$$cz = H_0 D$$



- Legge di Hubble  
ottenuta tramite le  
Supernovae 1a

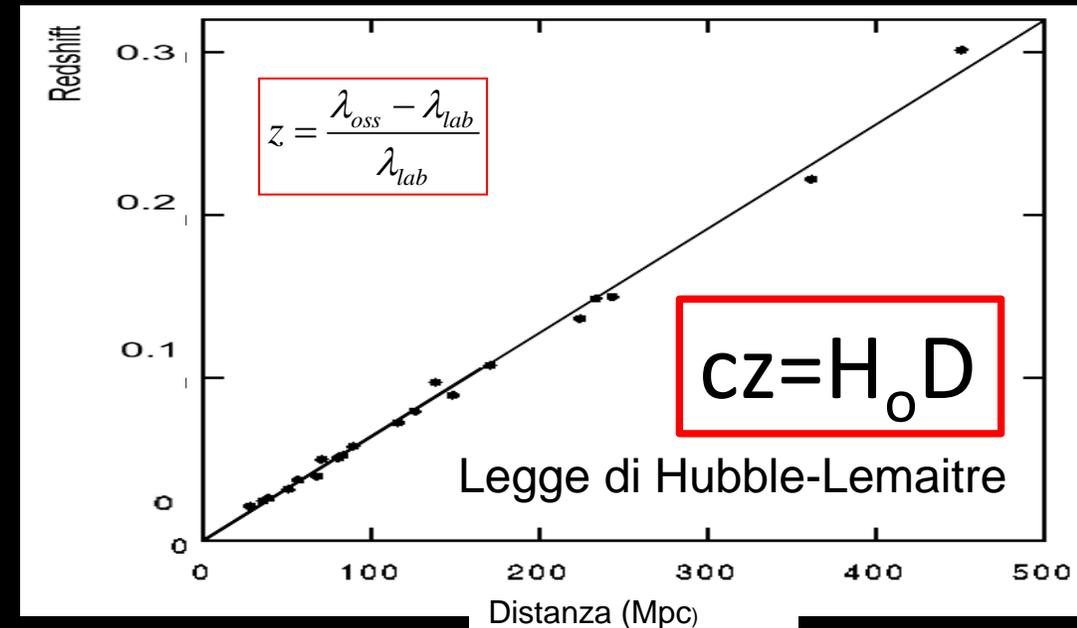
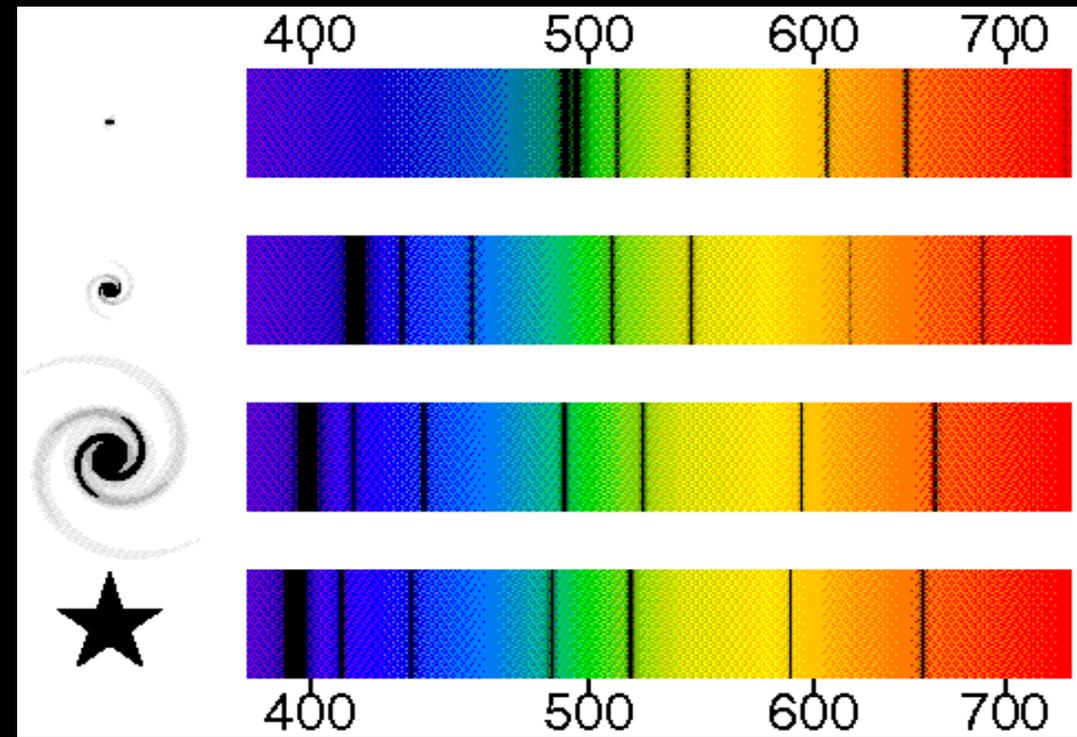
$$cz = H_0 D$$



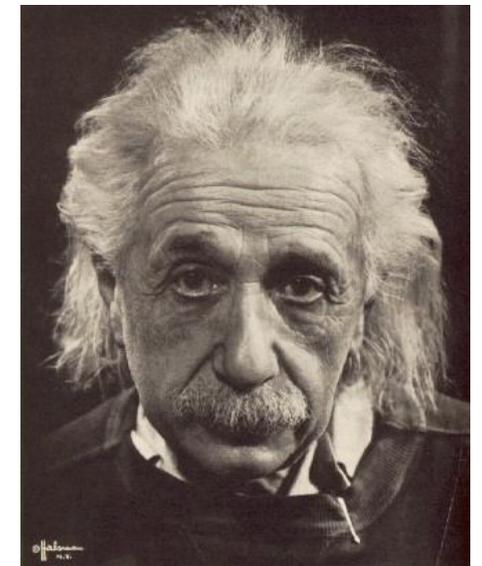
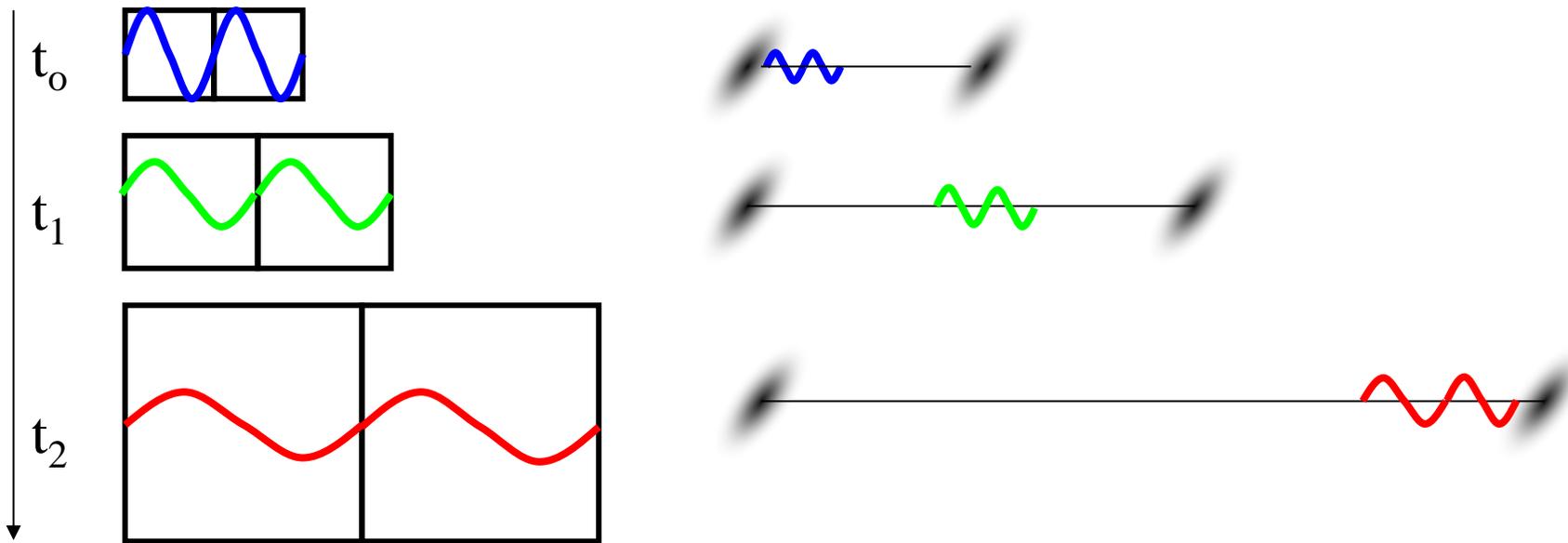
Riess et al.

# Riassunto:

- Luce = onde elettromagnetiche
- Lunghezze d'onda caratteristiche degli atomi presenti
- Nel caso delle galassie più lontane, lunghezze d'onda molto allungate.
- Il redshift aumenta con la distanza.
- E' il risultato *dell'espansione dell'universo*.
- Perché ?

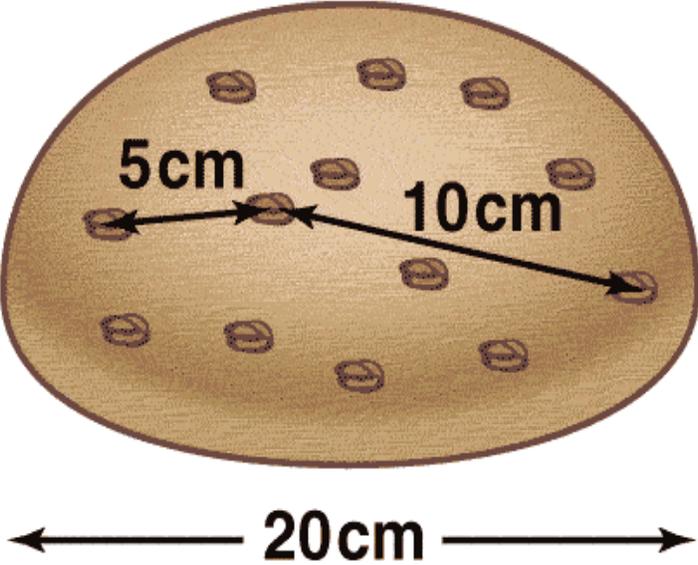


- **Secondo la relatività generale di Einstein:** in un universo in espansione, le lunghezze d'onda  $\lambda$  della luce si allungano esattamente quanto le altre lunghezze. Quindi:
  - più distante è una galassia
  - più è lungo il cammino che la luce deve percorrere prima di arrivare a noi
  - più lungo è il tempo che impiega
  - maggiore è l'espansione dell'universo tra l'emissione e la ricezione
  - più la lunghezza d'onda viene allungata (redshift e legge di Hubble-Lemaitre).



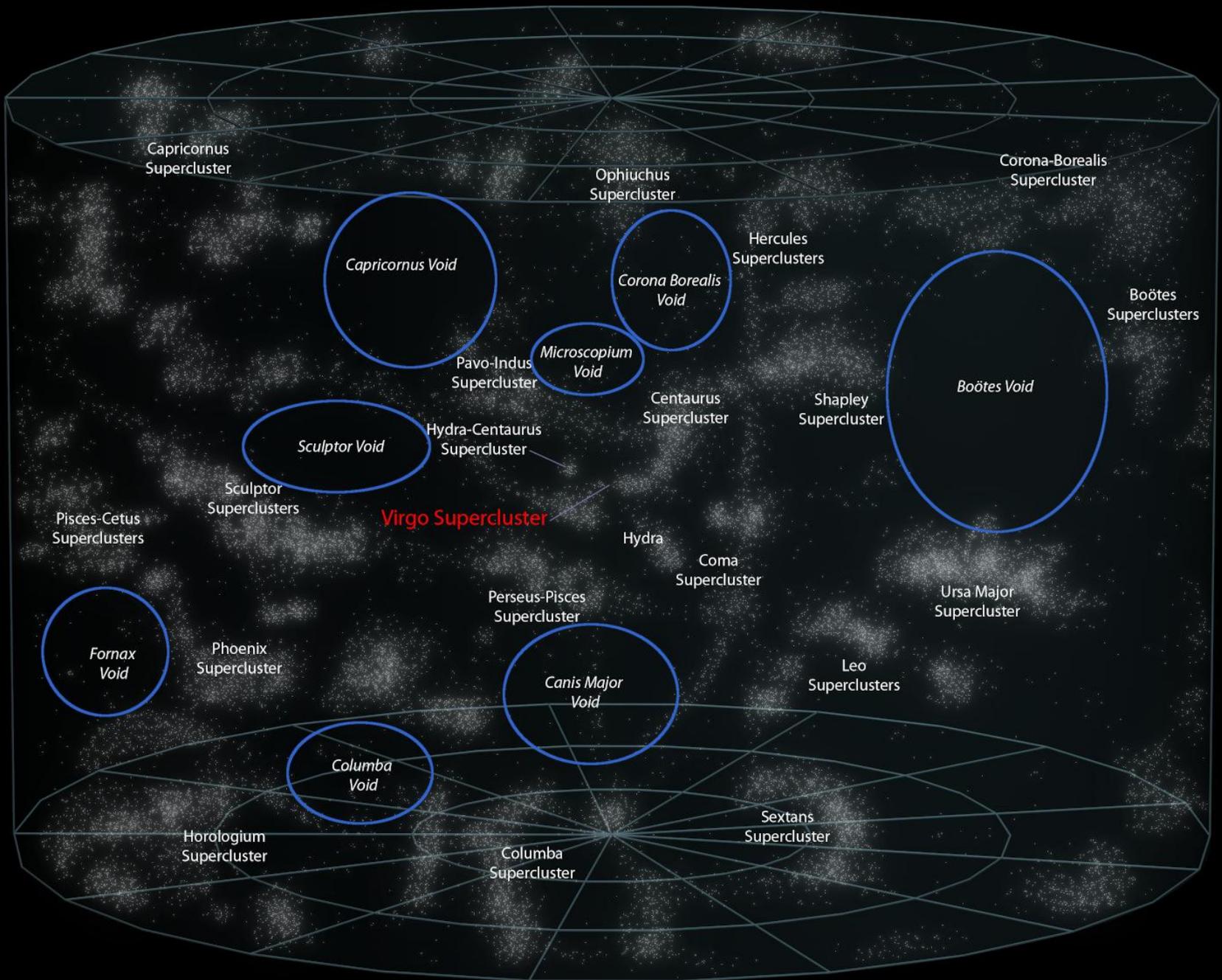
Notare che con questa interpretazione  $z$  può essere tranquillamente maggiore di 1

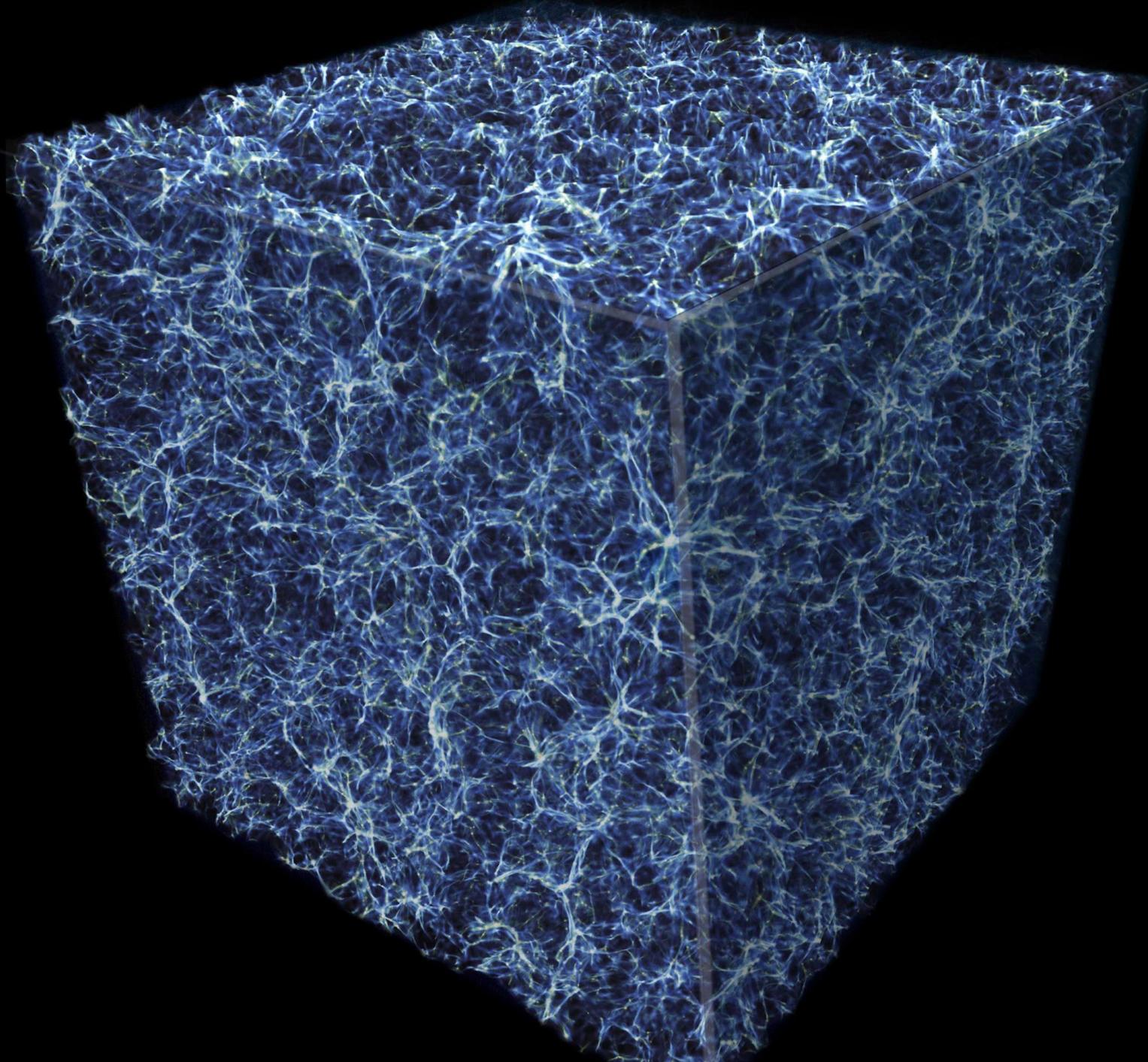
Il fatto che la legge di Hubble valga in tutte le direzioni implica una espansione isotropa dell'universo, senza centro. Tutte le galassie si allontanano le une dalle altre nello stesso modo



# La costante di Hubble

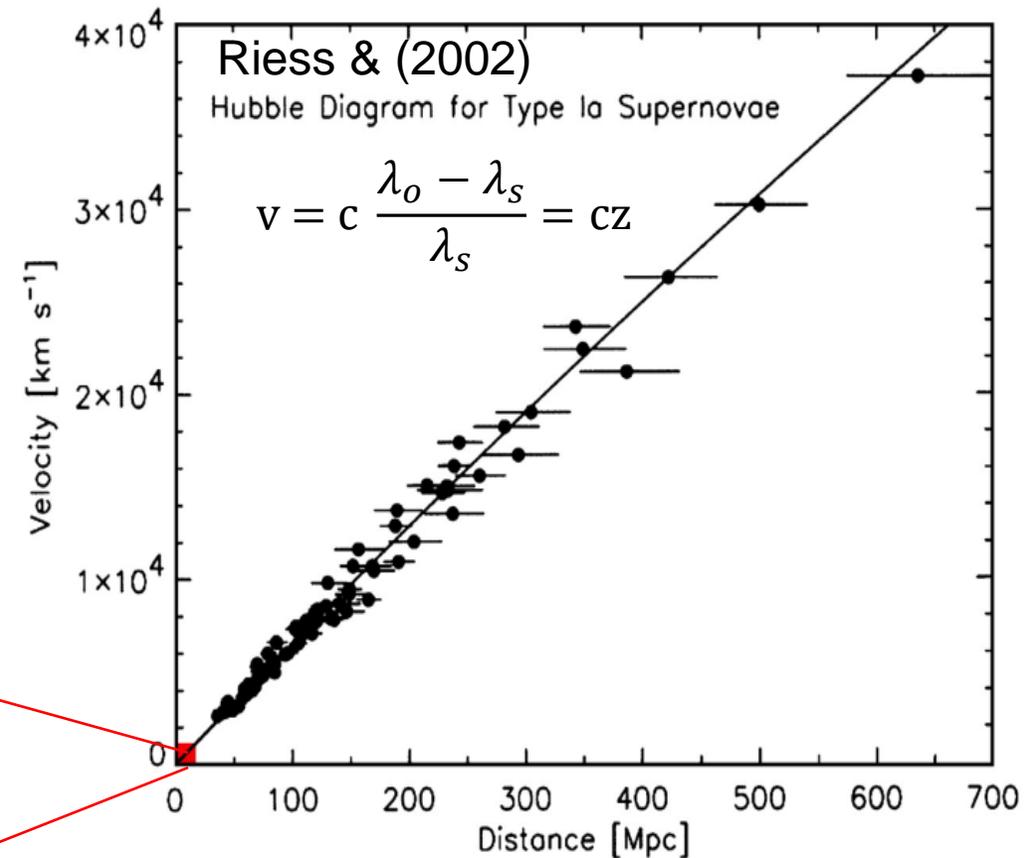
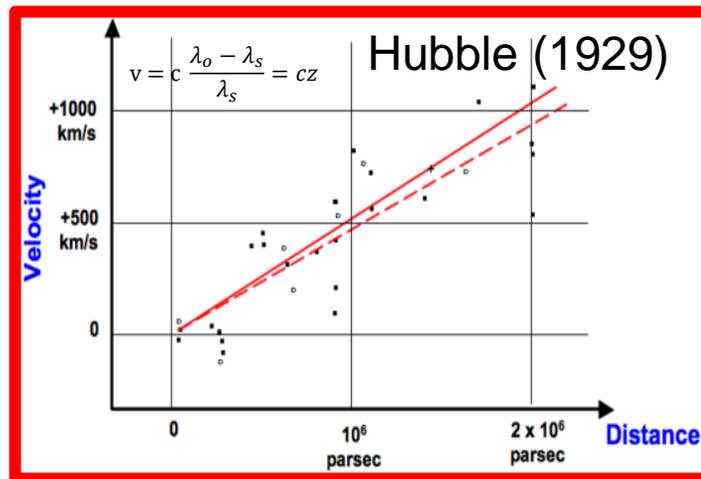
- La costante  $H_0$  nella relazione  $cz=H_0D$  è detta Costante di Hubble e vale circa 70 km/s/Mpc, ovvero  $1/(1.4 \times 10^{10}$  anni).
- Siamo partiti per studiare la distribuzione nello spazio delle galassie e abbiamo trovato invece una legge fondamentale della dinamica dell'Universo, a prima vista sorprendente.
- Torniamo per un attimo alla distribuzione tridimensionale delle Galassie.
- Se vale la legge di Hubble, possiamo usare lo spostamento verso il rosso per stimare la distanza: grazie alla legge di Hubble una misura di distanza si riduce ad una misura di posizione delle righe spettrali, senza bisogno di identificare candele o righelli standard.



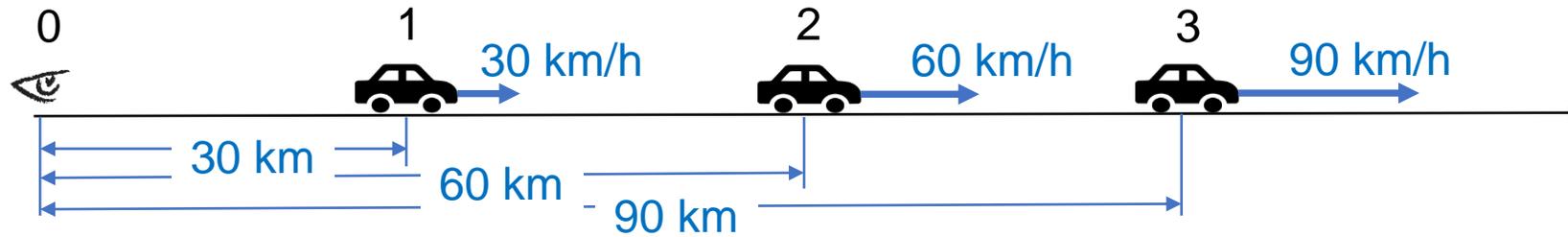


# Dal'espansione: big bang ed età dell'universo

- Legge empirica di Hubble-Lemaitre
- Il *redshift* è proporzionale alla *distanza*.
- Maggiore è la distanza, maggiore è lo spostamento percentuale delle lunghezze d'onda osservate rispetto a quelle emesse.
- Oggi sappiamo che è verificata fino a distanze enormi.
- **La legge di Hubble-Lemaitre permette anche di stimare l'età dell'universo ....**

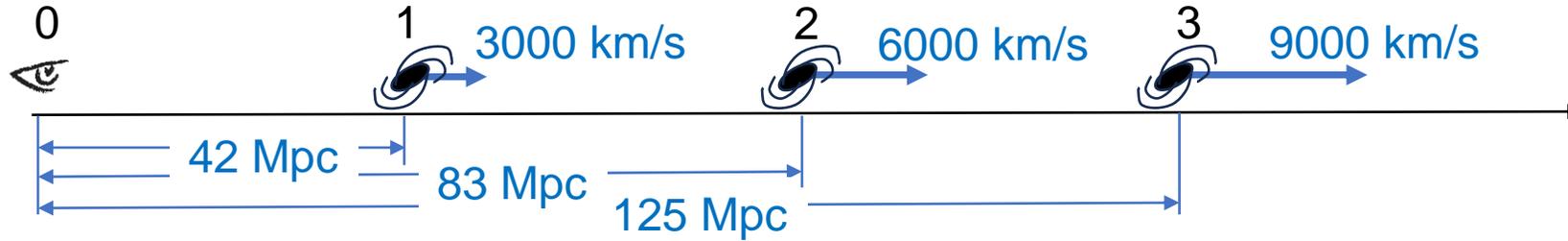


# Dall'espansione: big bang ed età dell'universo



- L'auto 1 si trova a 30 km di distanza dall'osservatore 0, e si sta allontanando a 30 km/h. Se si è mossa a velocità costante, un'ora fa si trovava proprio nella posizione 0 dell'osservatore.
- L'auto 2 si trova a 60 km di distanza (distanza doppia della 1) e si sta allontanando a velocità doppia: 60 km/h. Se si è mossa a velocità costante, un'ora fa si trovava anch'essa proprio nella posizione 0 dell'osservatore.
- L'auto 3 si trova a 90 km di distanza (distanza tripla della 1) e si sta allontanando a velocità tripla: 90 km/h. Se si è mossa a velocità costante, un'ora fa anche questa si trovava proprio nella posizione 0 dell'osservatore.
- Se le velocità  $v$  sono proporzionali alle distanze  $D$ , *ad un tempo*  $t_0 = D/v$  precedente all'osservazione *le auto si trovavano tutte nello stesso punto.*
- Se le velocità sono proporzionali alle distanze, è facile ricavare l'ora di inizio del viaggio dal rapporto tra  $D$  e  $v$ , che è costante.

- Prendiamo ora tre galassie tra quelle di cui si sa distanza e velocità (dal diagramma di Hubble-Lemaitre). Ad esempio:



$$t_o = \frac{D_1}{V_1} = \frac{D_2}{V_2} = \frac{D_3}{V_3} = \frac{125 \text{ Mpc}}{9000 \text{ km/s}} = \frac{3.9 \times 10^{21} \text{ km}}{9000 \text{ km/s}} = 4.3 \times 10^{17} \text{ s} = 14 \text{ Gy}$$

- Ad un tempo  $t_o=14$  miliardi di anni fa le 3 galassie erano tutte nello stesso punto (!).
- Si può pensare che 14 miliardi di anni sia l'età dell'universe: a quell'epoca tutti i punti occupati oggi dalle galassie erano a distanza zero gli uni dagli altri.
- Per come lo abbiamo stimato noi, 14 miliardi di anni è il tempo passato dal momento in cui tutti i punti dell'universo hanno iniziato ad allontanarsi gli uni dagli altri. Potremmo chiamare questo evento "big bang".
- Il rapporto tra  $v$  e  $D$  è la costante di Hubble. Il suo inverso è il tempo dall'inizio.

# Ma allora ?

- Se è vero che l'universo si sta espandendo, e che lo ha fatto a partire da uno stato iniziale a densità e temperatura altissime circa 14 miliardi di anni fa ... ci si chiede ora:
  - Perché è successo tutto questo ?
  - L'espansione c'è sempre stata ?
  - E' sempre avvenuta alla stessa velocità ?
- Finora abbiamo studiato la cinematica dell'universo.
- Adesso dobbiamo studiarne la dinamica.
- Prossimi dialoghi !