



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

# La scala delle distanze

Argomento 7

Materiale da

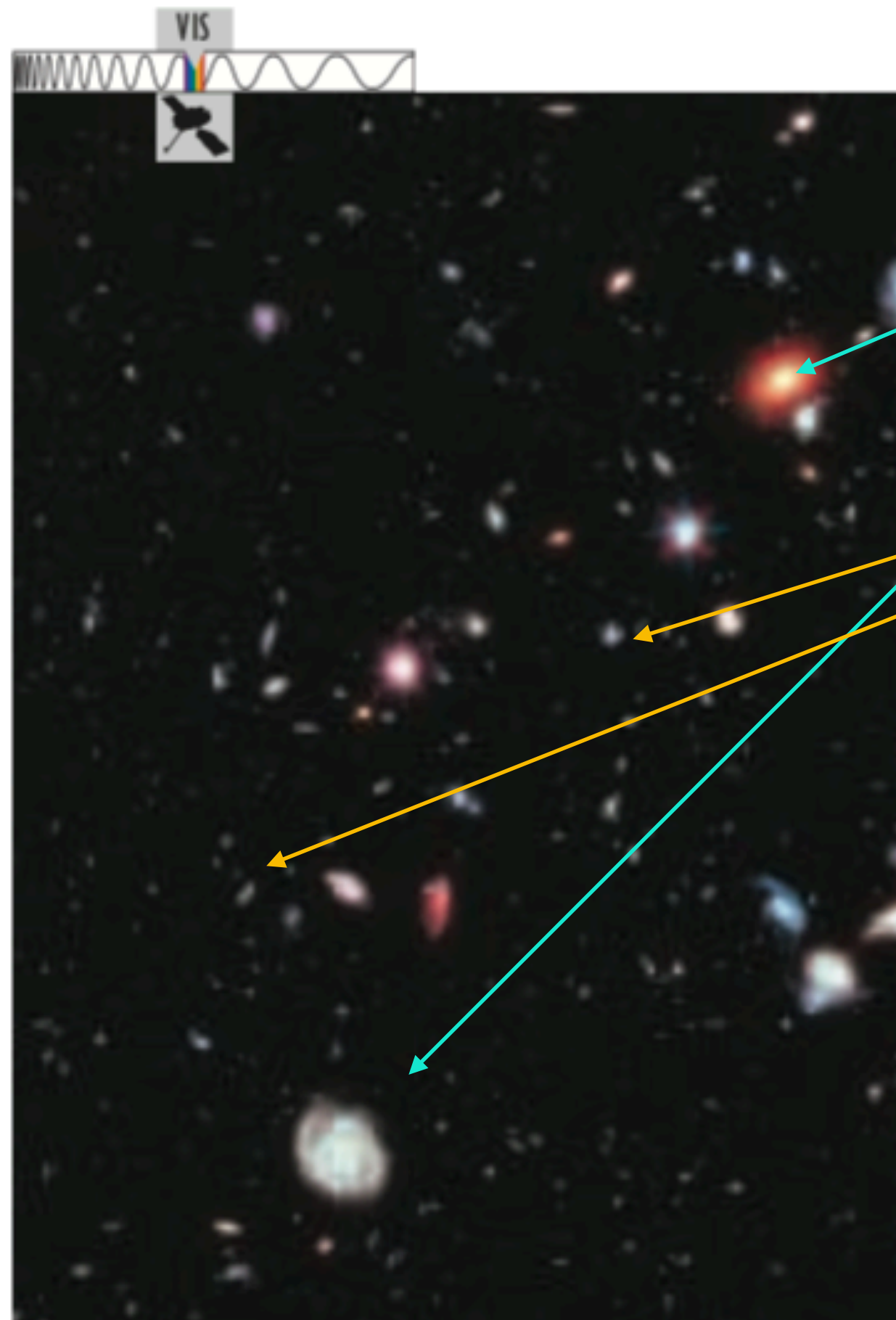
Cap. 20 “The cosmic perspective”, by J. O. Bennett, M. O. Donahue, N. Schneider & M. Voit  
e Cap. 3 “Extragalactic Astronomy and Cosmology”, by P. Schneider, 2nd edition



## Scala delle distanze

- Parallasse
- Candeles standard
  - Cefeidi
  - Supernovae
- Legge di Hubble
- Redshift
- Universo in espansione

# Scala delle distanze



Brillanti e grandi perché vicine

Deboli: sono vicine ma poco luminose,  
o distanti e più luminose?

**Per rispondere, occorre conoscere la  
distanza delle sorgenti**

**Brillanza, o flusso**  
(proprietà osservata)

**Luminosità**  
(proprietà intrinseca)

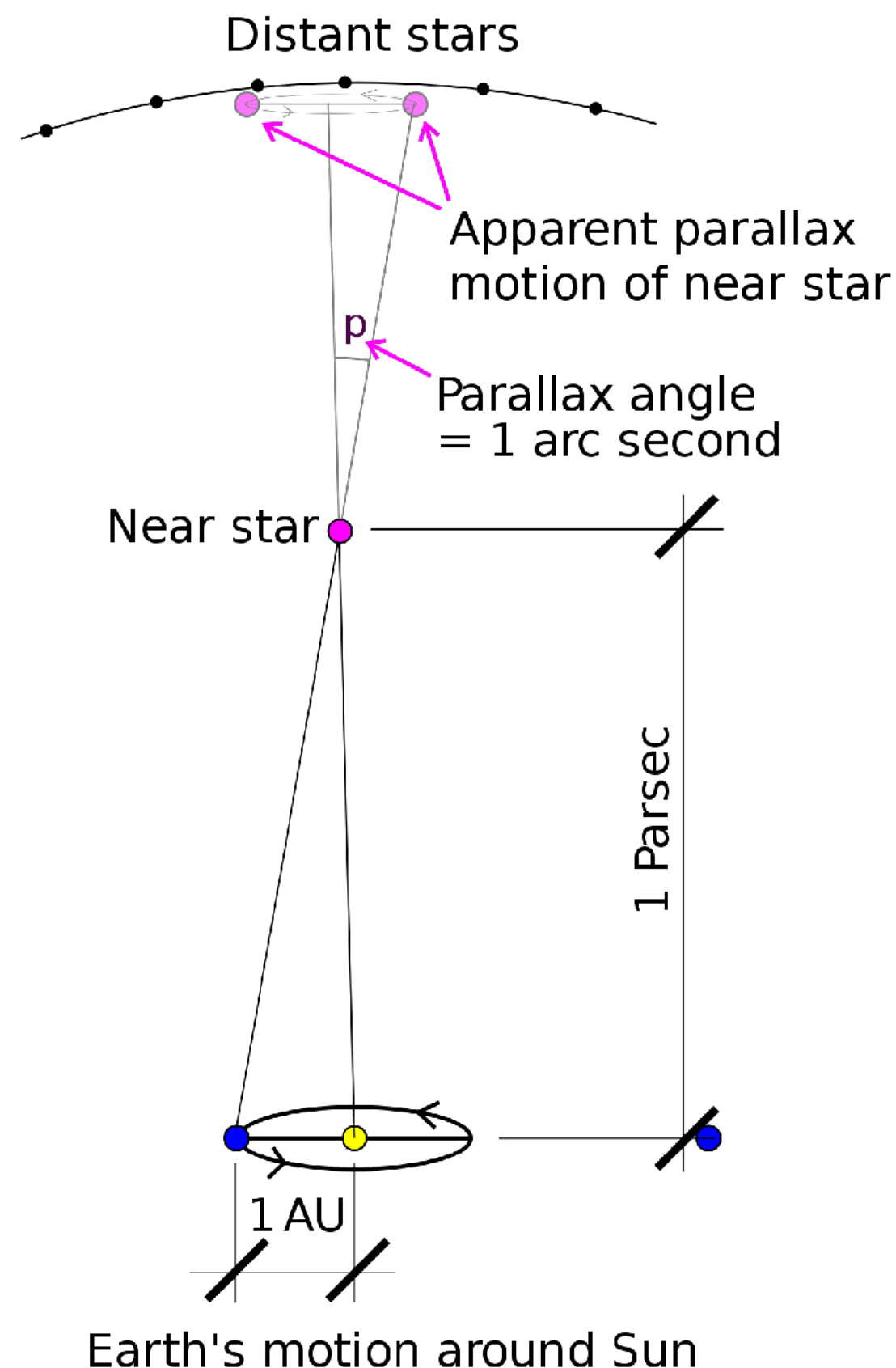
$$B = \frac{L}{4\pi D^2}$$

**Distanza**

$$L = 4\pi D^2 B$$

# Scala delle distanze

La misura delle distanze in astronomia si basa su una catena (scala) di misure che ci permettono di raggiungere distanze sempre più grandi



## 1. misura della UA (Unità Astronomica)

- con il radar si misura la distanza di Venere
- con le leggi di Keplero si ricava la distanza del Sole

## 2. la UA è la base per la determinazione delle distanze con la parallasse

- misuro l'angolo parallattico
- ottengo la distanza in parsec

**La parallasse mi permette di misurare la distanza di stelle vicine**



i pali della luce funzionano come “candele standard”, perché hanno tutti la stessa luminosità

I più vicini appaiono come i più luminosi

Il secondo è il doppio più distante, quindi appare  $(1/2)^2=1/4$  meno brillante

Quest'altro è tre volte più distante, quindi appare  $(1/3)^2=1/9$  meno brillante

**se conosco la luminosità intrinseca di un oggetto, ne posso calcolare la distanza misurandone il flusso**

$$D^2 = \frac{L}{4\pi B}$$



$$\text{Brillanza apparente} = \frac{\text{Luminosità}}{4\pi \times \text{distanza}^2}$$

$$\text{Distanza} = \sqrt{\frac{\text{Luminosità}}{4\pi \times \text{brillanza apparente}}}$$

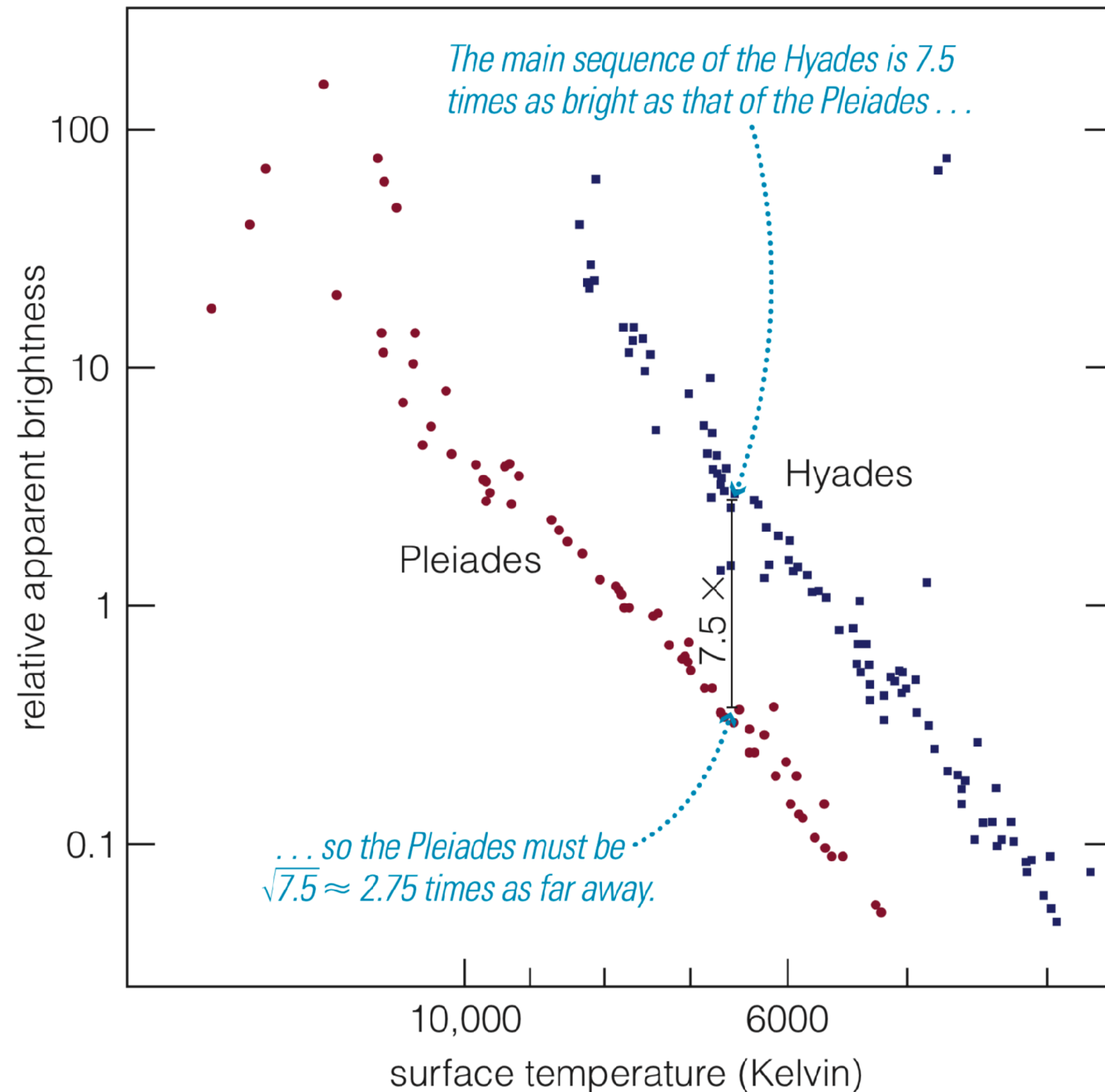
**Conosciamo B per una stella di tipo solare,  $B=1.0 \times 10^{-12}$  Watt/m<sup>2</sup>**

**Ricaviamo D**

**( $5.5 \times 10^{18}$  m)**



# Main-sequence fitting



Sfortunatamente la maggior parte degli oggetti astronomici non hanno luminosità intrinseca conosciuta

Però ad esempio conosco la luminosità intrinseca di stelle di tipo solare  
se riconosco il tipo spettrale di stelle lontane, posso derivarne la distanza

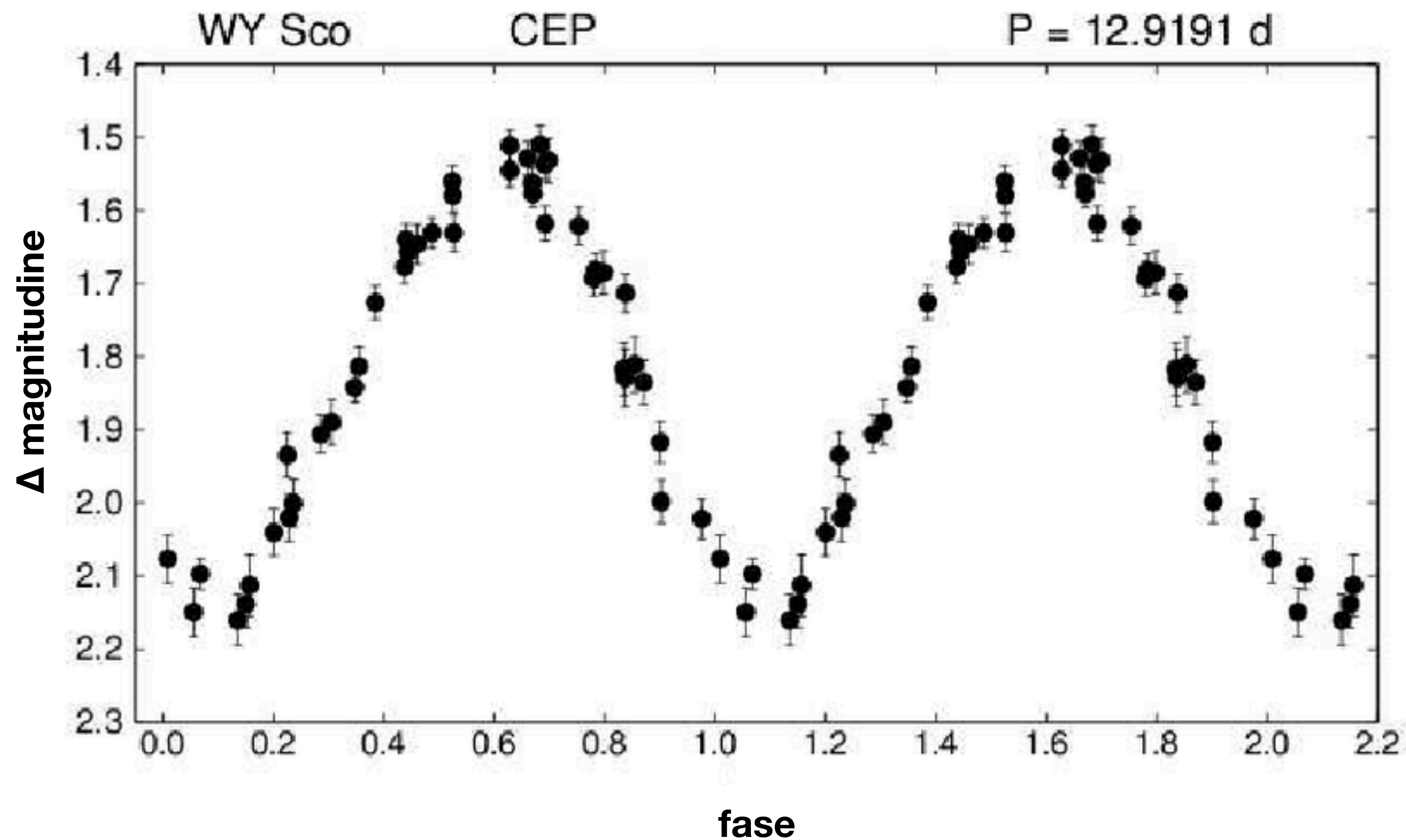
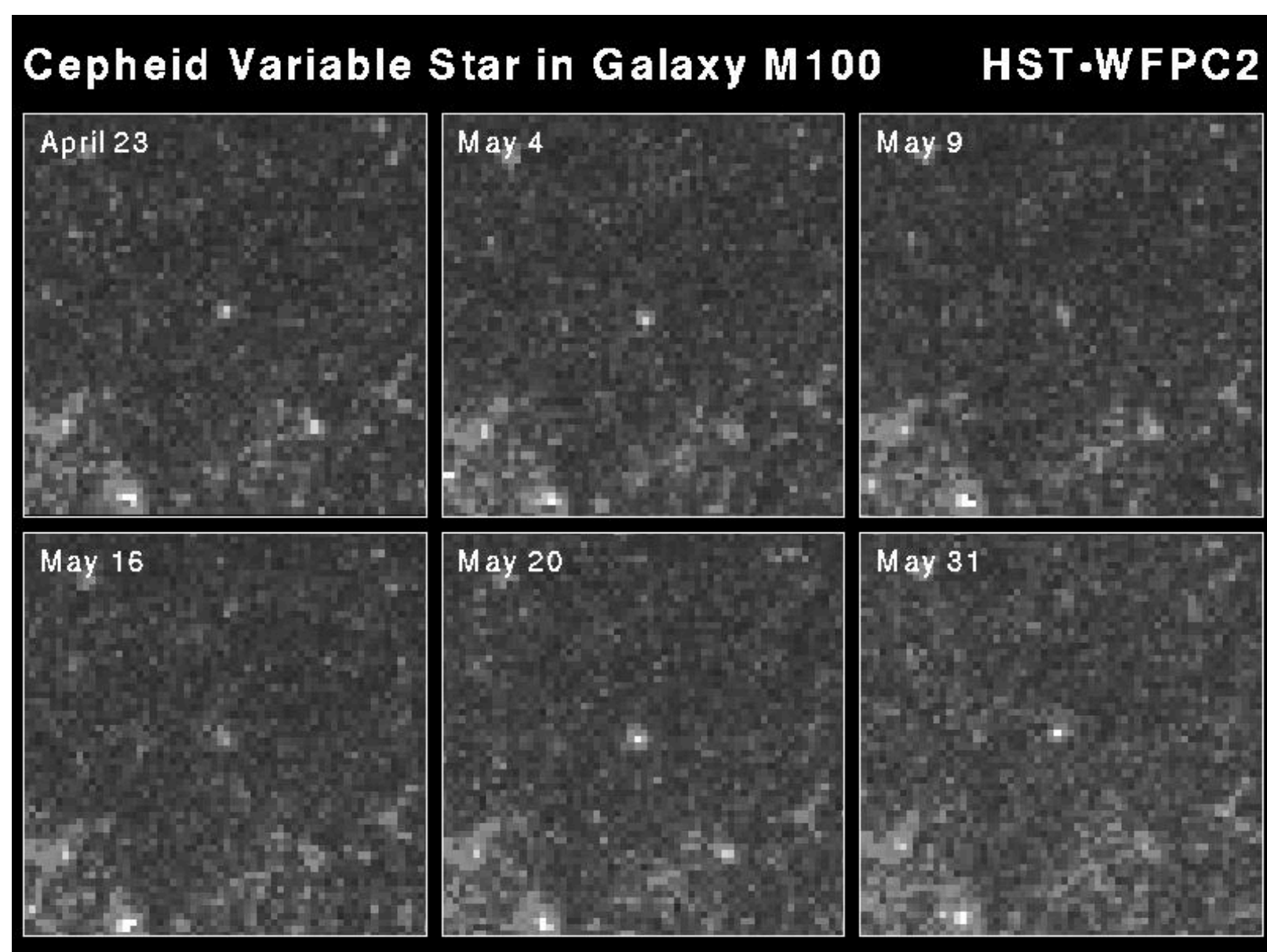


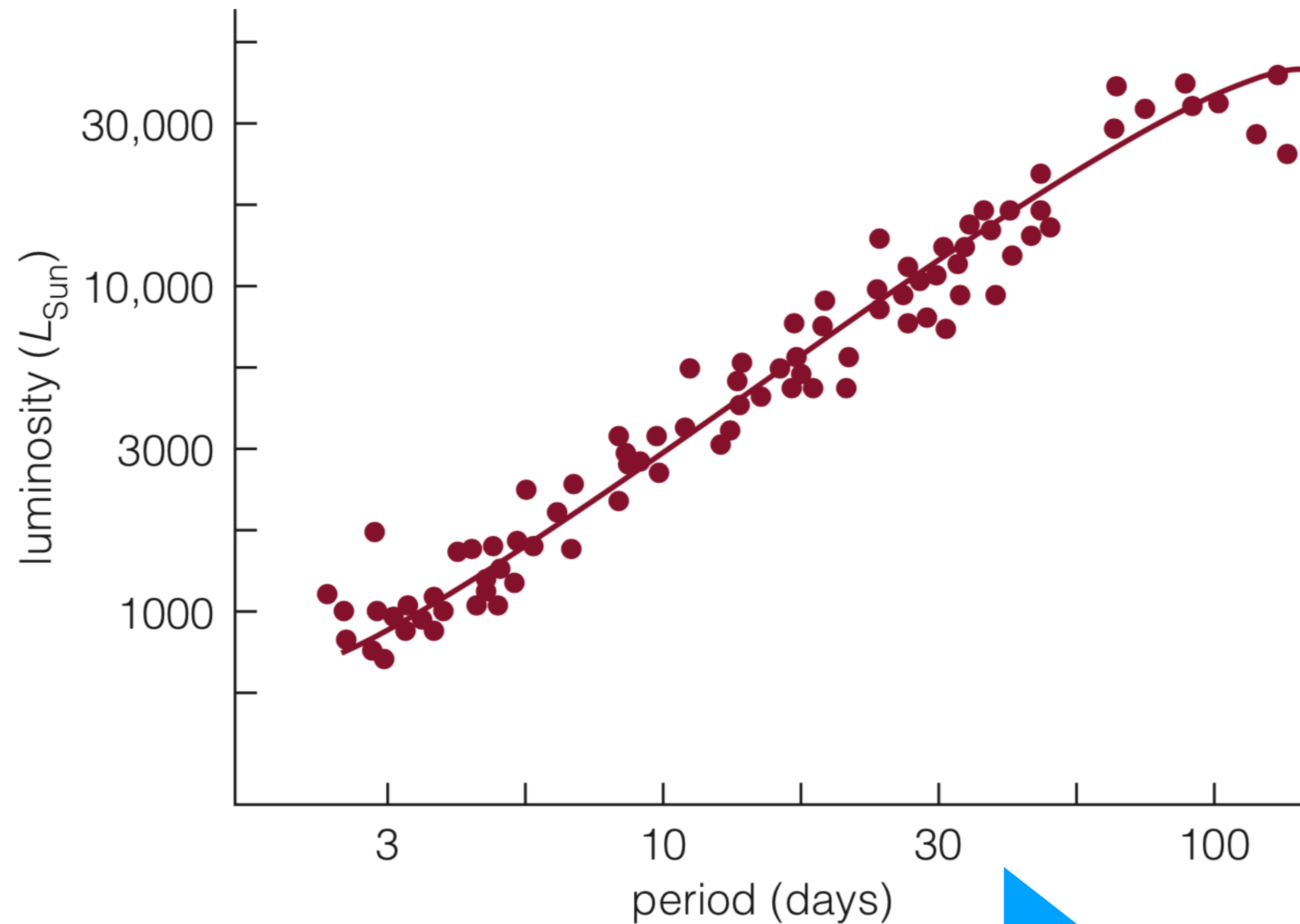
Cosa succede se tra l'osservatore e la  
candela standard c'è molta polvere  
interstellare?



## Le cefeidi sono delle stelle variabili

La luminosità delle Cefeidi varia in maniera periodica in funzione del tempo





Henrietta Leavitt nel 1912 scoprì che il periodo delle Cefeidi è legato alla loro luminosità

Basta calcolare il periodo per avere la Luminosità

**Le cefeidi sono ottime *candele standard***

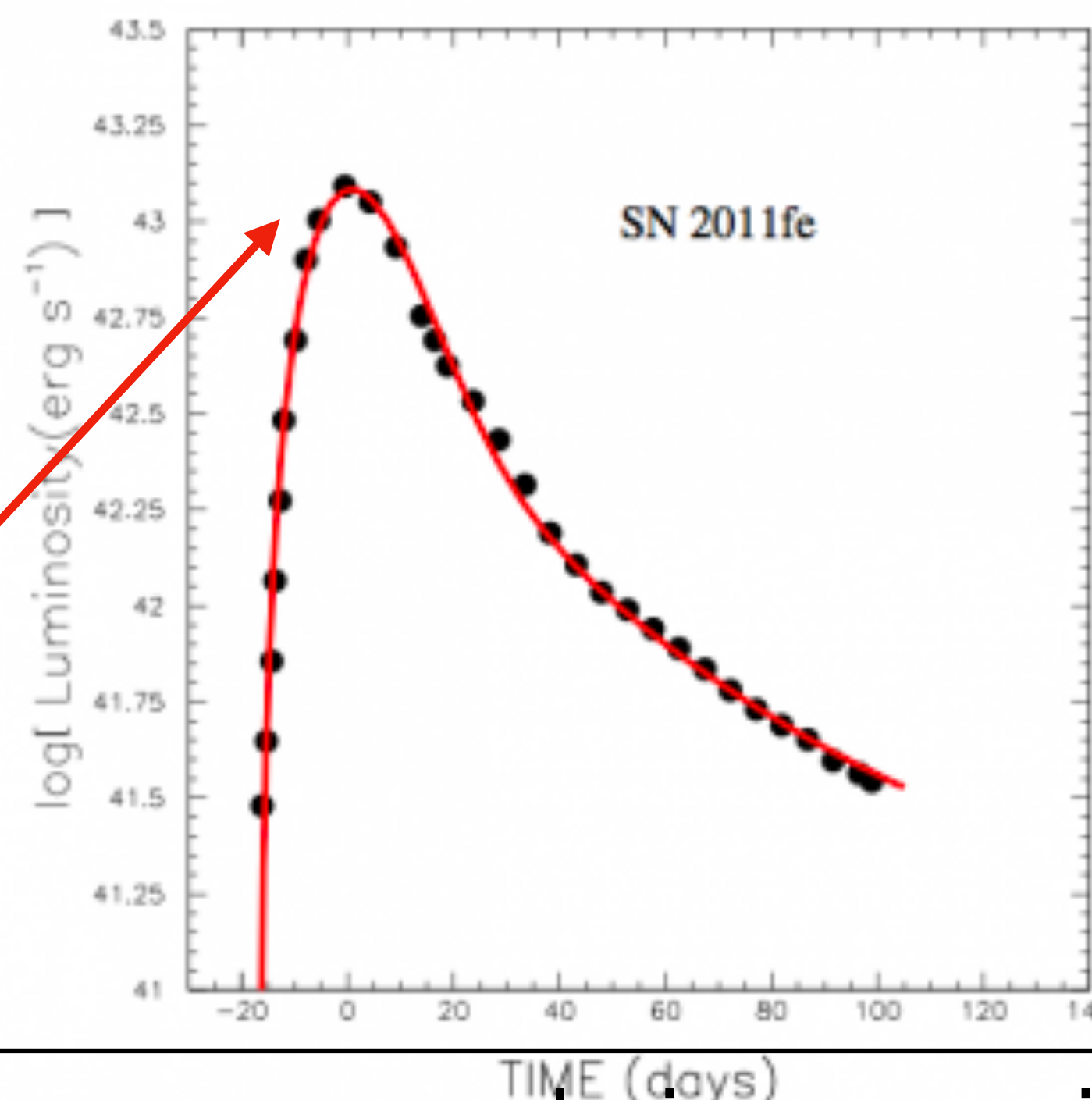




# Candele standard distanti



Le supernovae  
distanti sono ottime  
candele standard



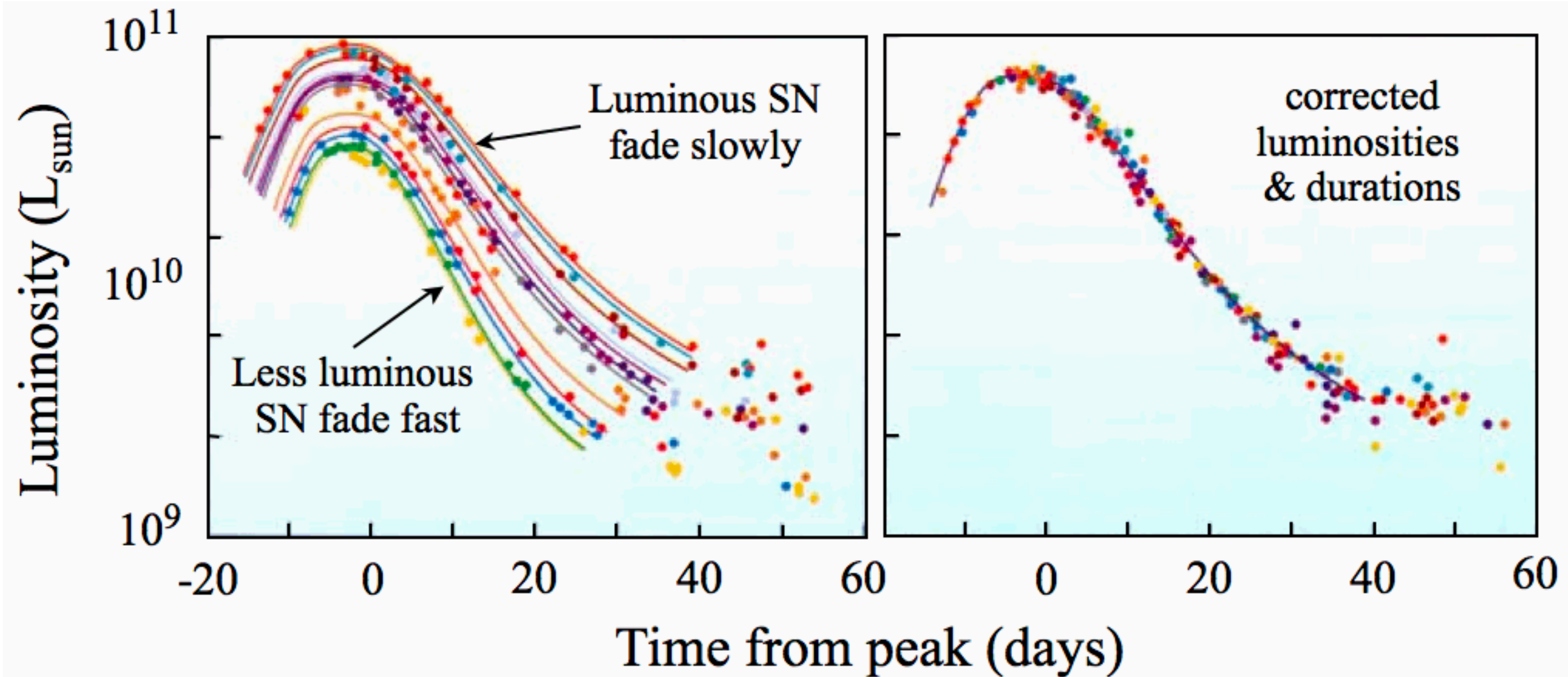
Le supernovae tipo  
Ia sono la fase finale  
dell'evoluzione di  
una coppia di stelle

$$L_{\text{picco}} = 10^{43.25} \text{ erg/s} \sim 2 \times 10^{43} \text{ erg/s}$$

$$L_{\text{sun}} = 3.8 \times 10^{33} \text{ erg/s}$$

$$L_{\text{picco}} = 5 \times 10^9 L_{\text{sun}} !!!$$

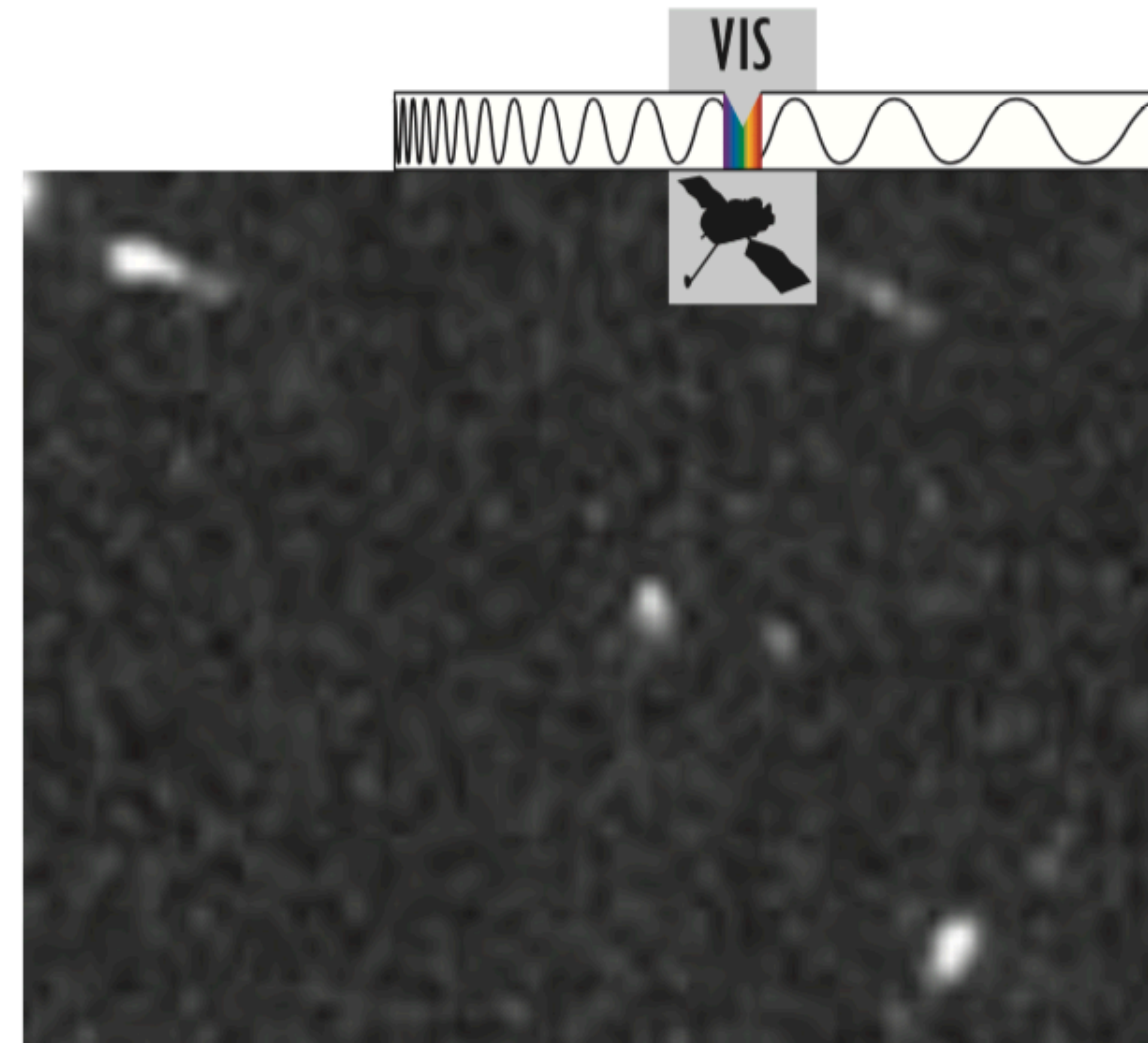
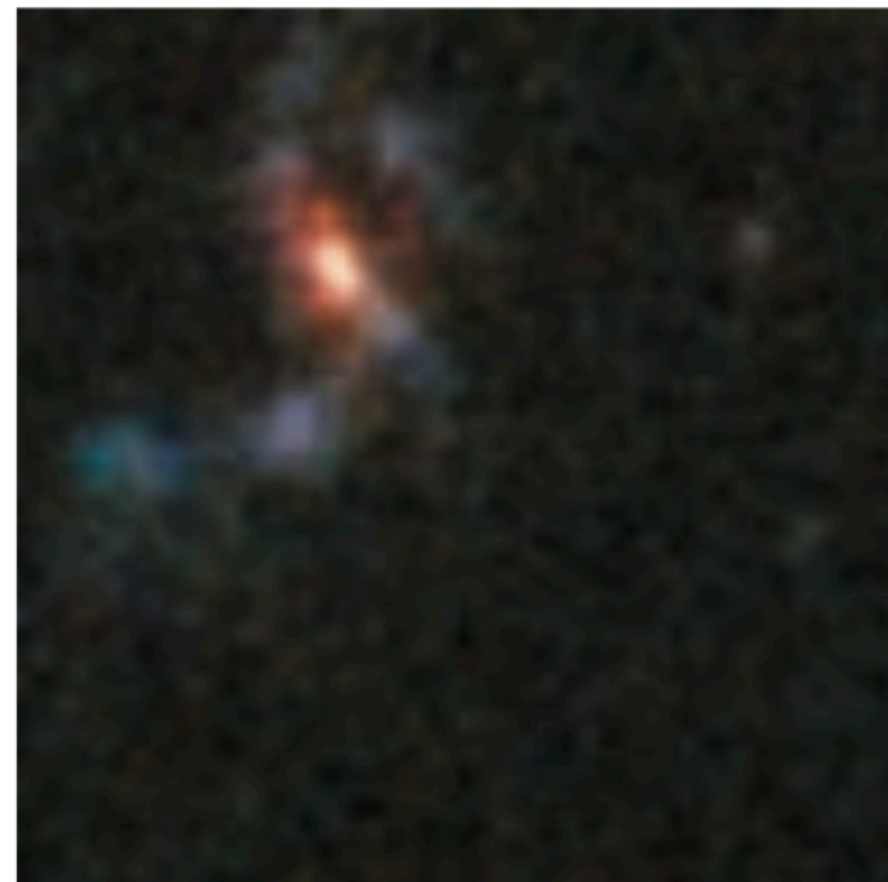
Le supernovae al picco raggiungono luminosità di 5 miliardi di Soli: visibili anche per galassie a miliardi di anni luce, nell'Universo primordiale



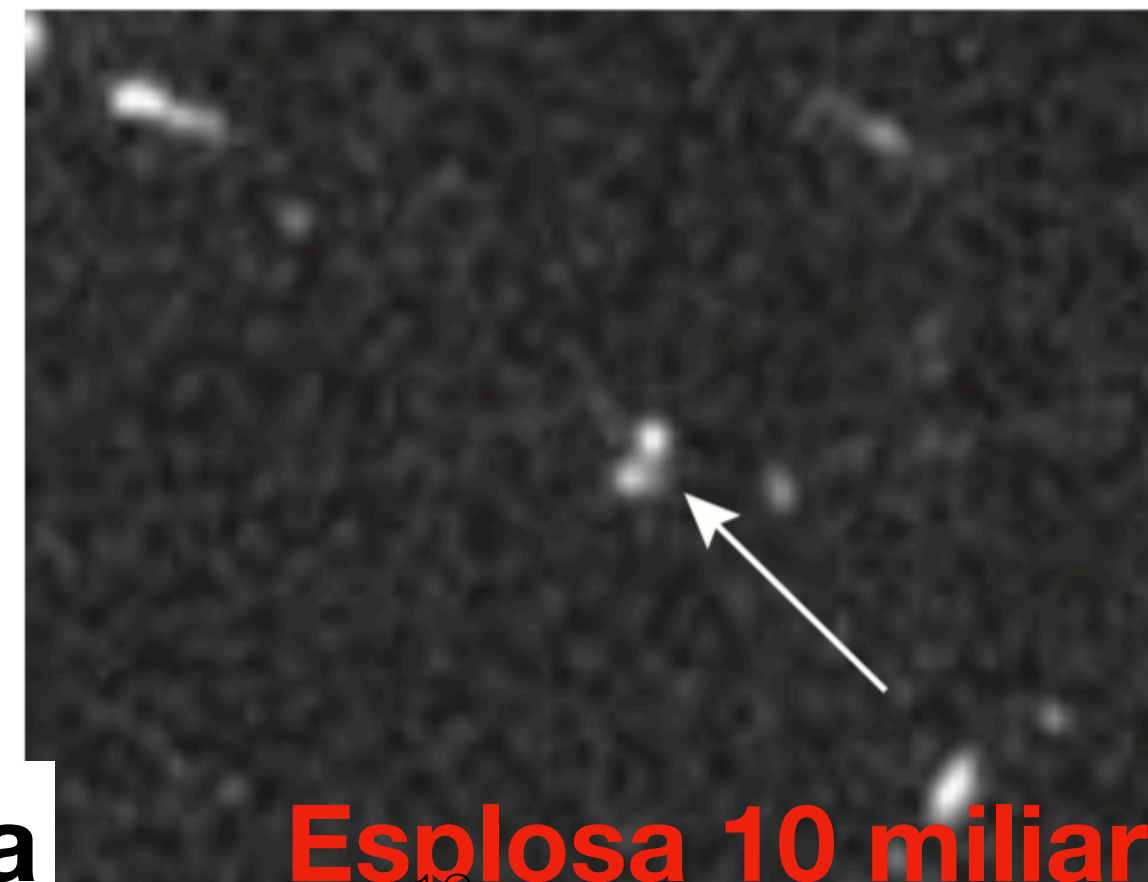
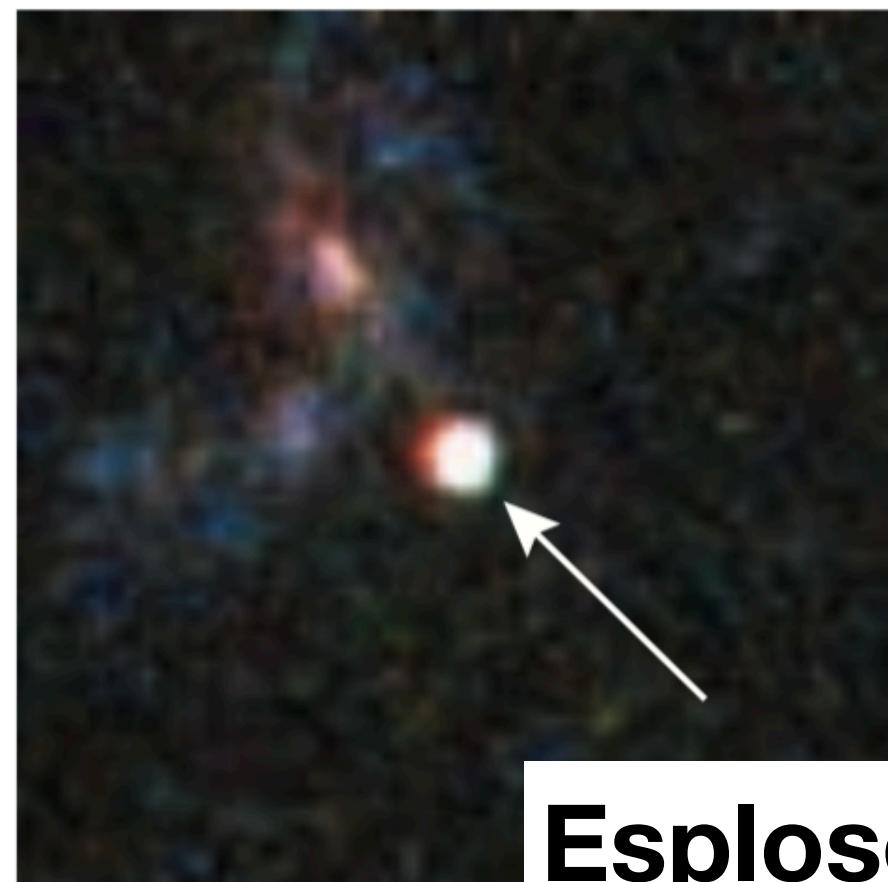
In realtà le curve di evoluzione delle supernovae sono un po' più complesse: la luminosità del picco correla con la velocità del declino del flusso

È però sufficiente correggere per questa correlazione tra luminosità e durata perché tutte le curve si sovrappongano





Galassie distanti  
prima dell'esplosione  
di supernova



Stesse galassie  
durante l'esplosione  
di supernova

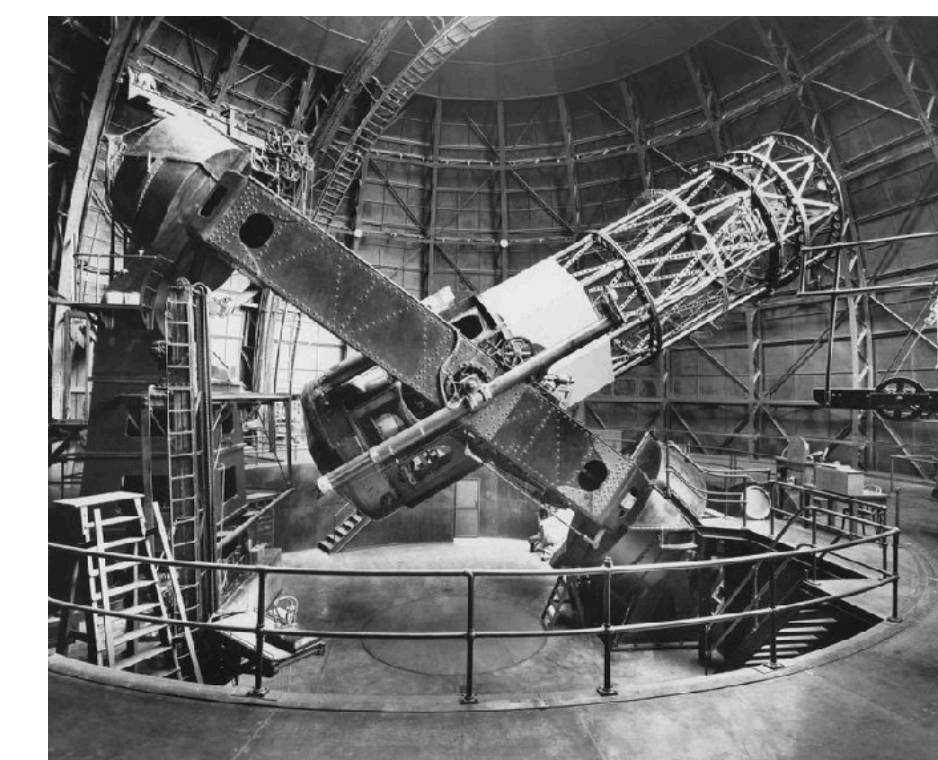
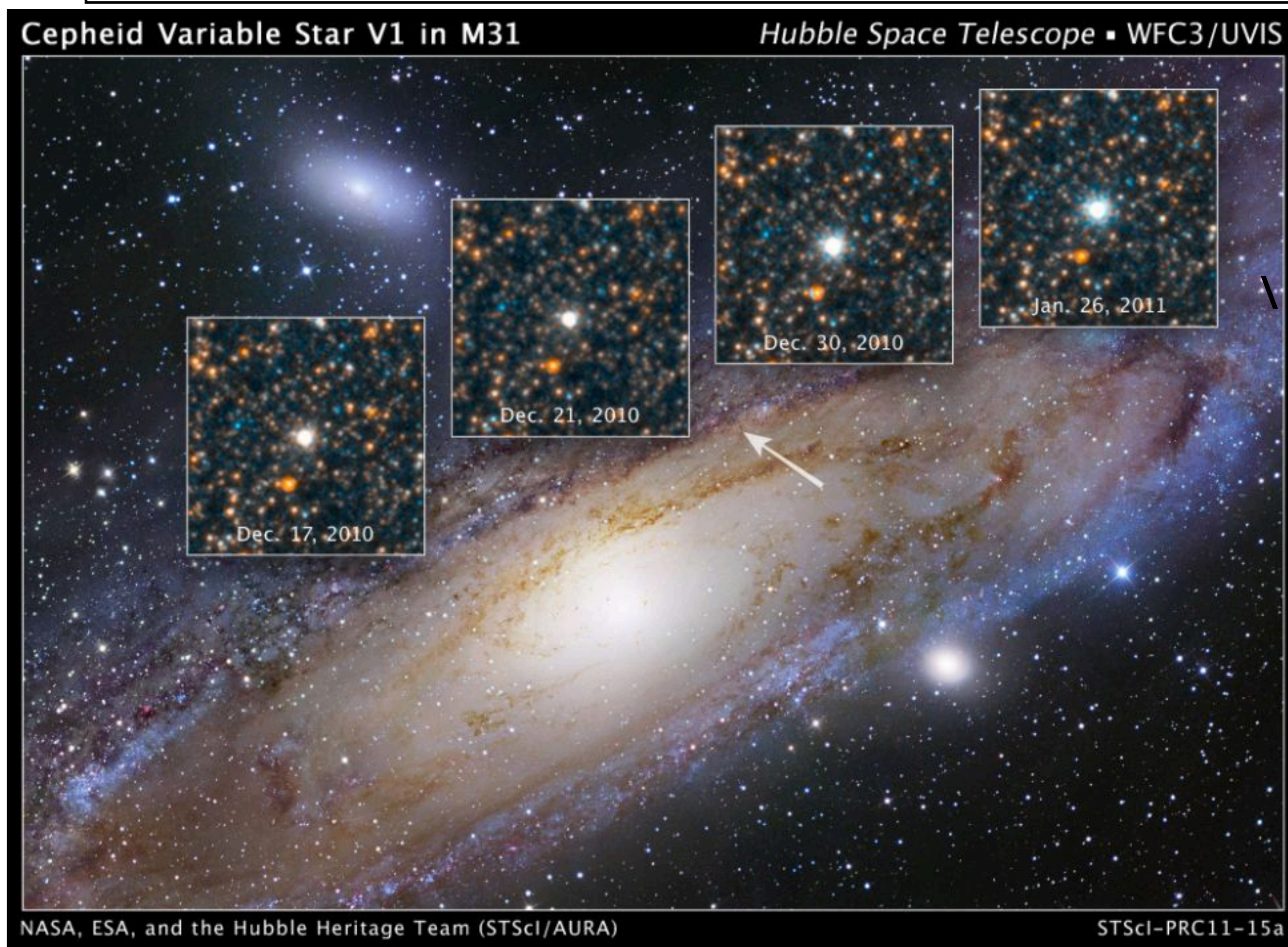
**Esplose 7 miliardi di anni fa**

**Esplosa 10 miliardi di anni fa**



# Distanza di Andromeda

Fino a un secolo fa, non si sapeva se le “nebulosità” che oggi sappiamo essere galassie esterne fossero oggetti esterni alla nostra galassia

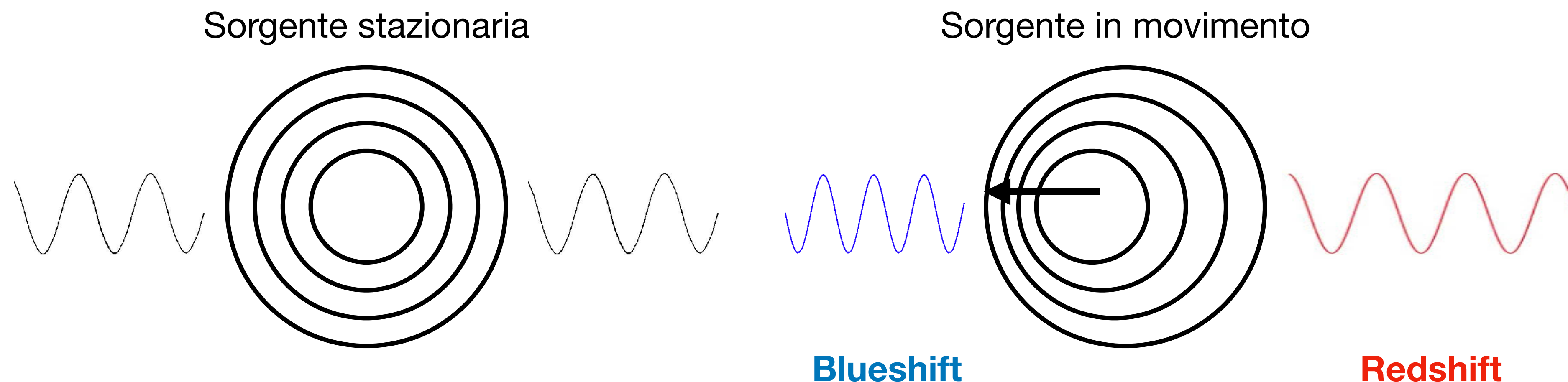


Tutto cambiò nel 1925 quando Edwin Hubble osservò stelle individuali nella galassia di Andromeda: era la prova che quella fosse una galassia come la Via Lattea

Hubble si accorse che alcune di queste stelle individuali erano variabili; riconobbe che si trattava di Cefeidi e ne calcolò la distanza



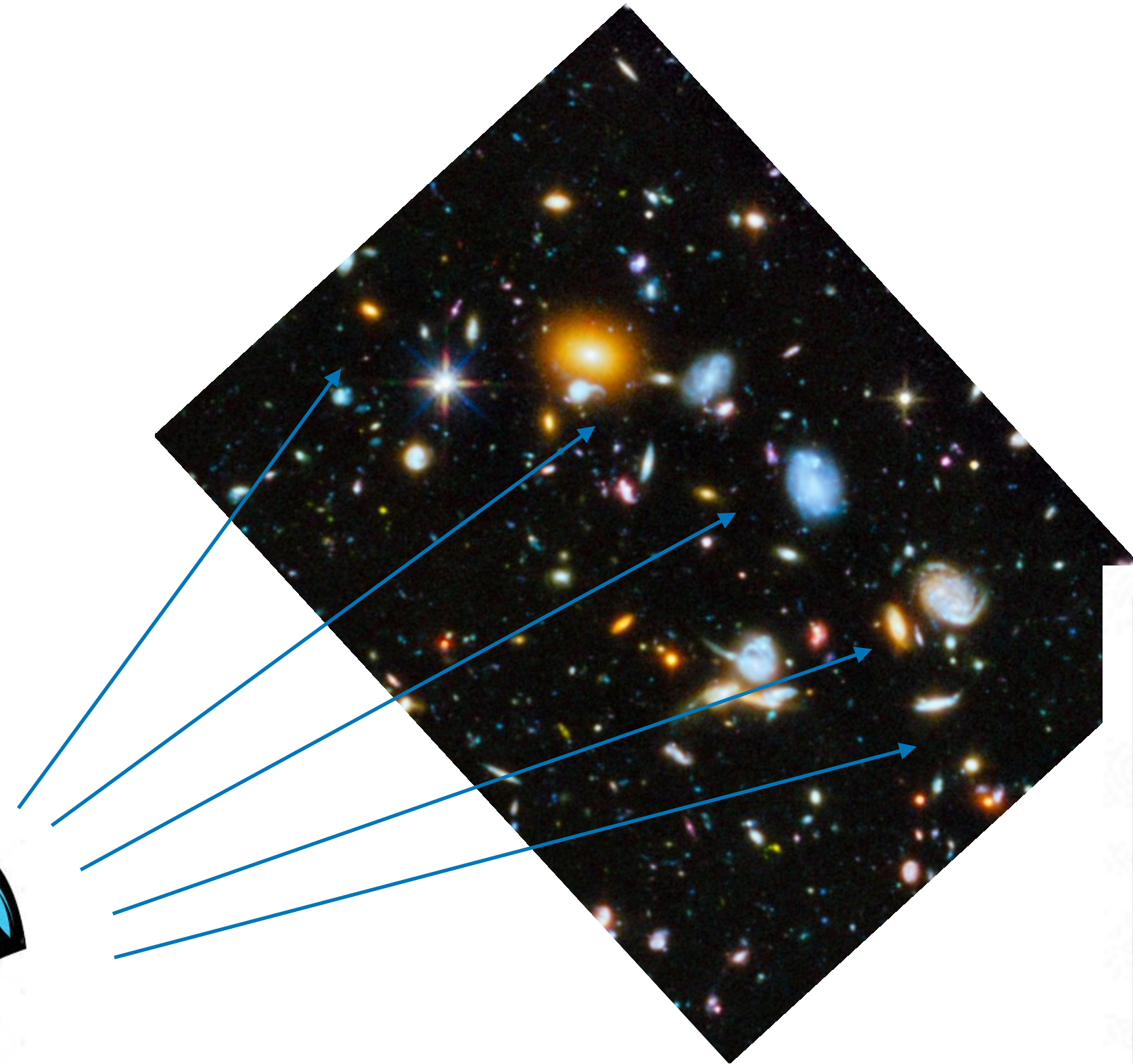
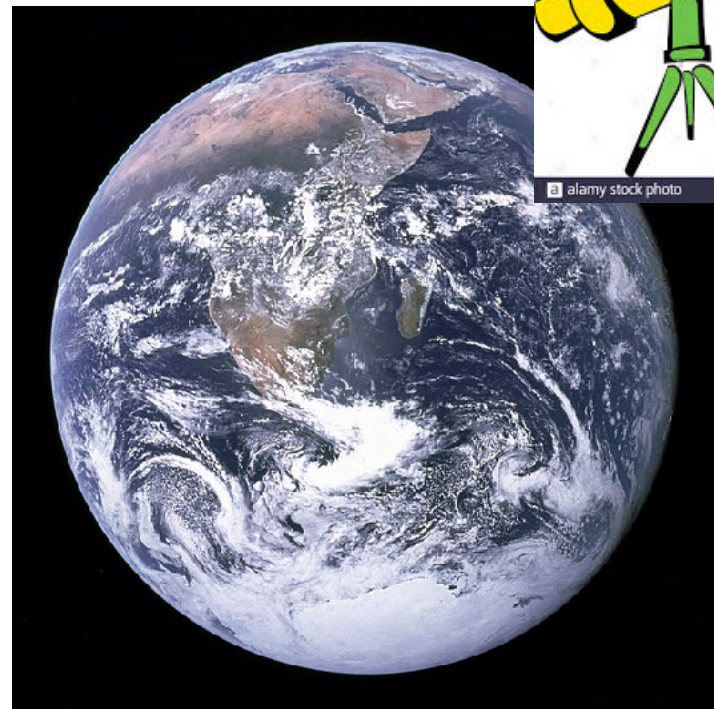
## Come misurare le velocità di galassie esterne



Tramite l'effetto Doppler

Già prima di Hubble c'erano misure di velocità per le nebulose, però ancora non si sapeva fossero galassie esterne; la maggior parte si allontana da noi



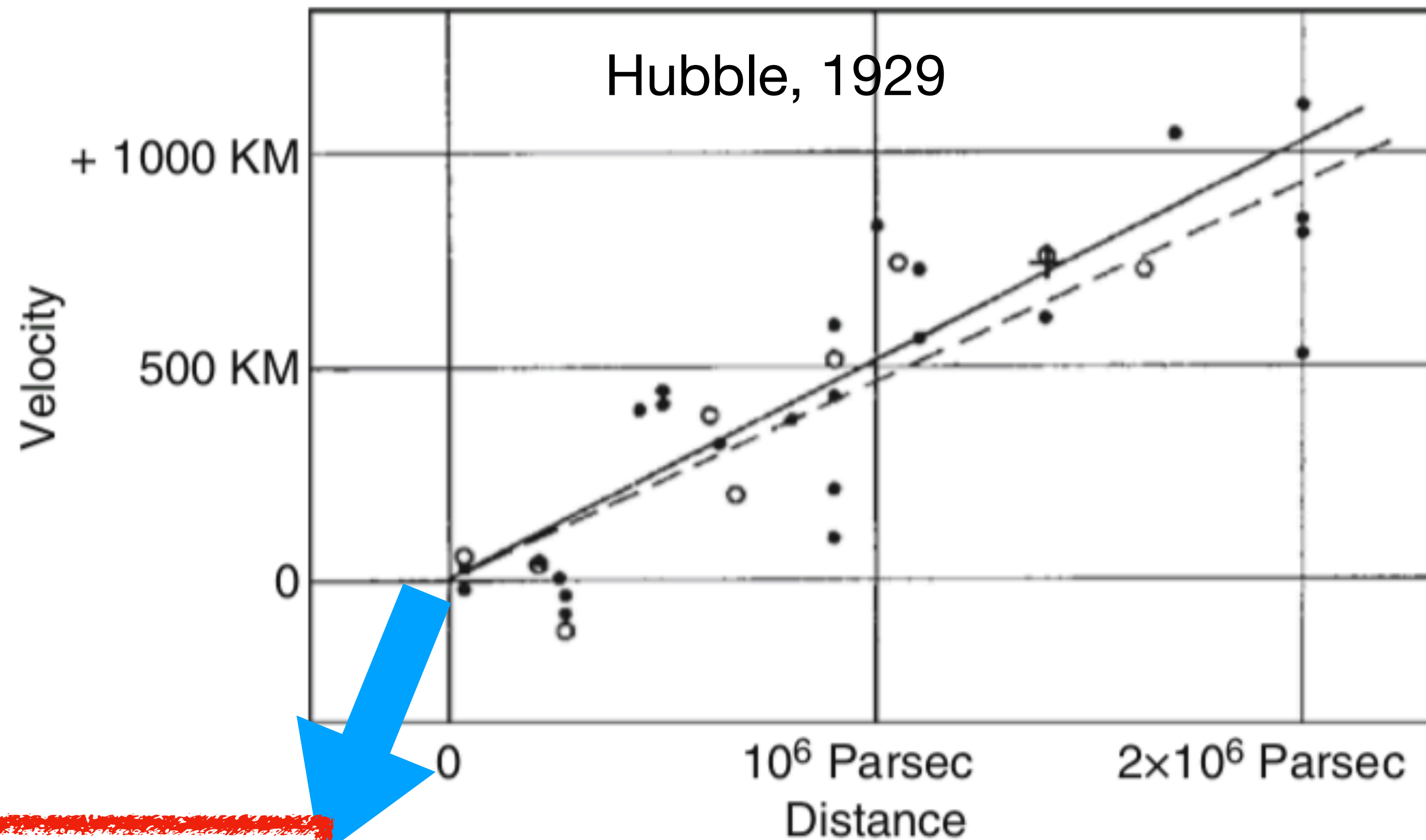


Hubble misurò distanze  
e velocità di molte  
galassie...

Galaxy	Distance (Mpc)	H-Alpha (angstroms)	Velocity (Mm/s)
NGC 1357	24.72	6608	2.19
NGC 1832	30.99		2.02
NGC 2775	17.89		1.46
NGC 2903	6.96		0.45
NGC 3368	11.89		0.88
NGC 3516	40.00		2.53
NGC 3627	9.57		0.72



# legge di Hubble



La versione originale del diagramma di Hubble mostra la velocità radiale delle galassie in funzione della loro distanza. Mentre la velocità radiale è facilmente misurabile mediante lo spostamento Doppler delle linee spettrali, una determinazione accurata delle distanze è molto più difficile.

$$v = H_0 D$$

$$H_0 = (71 \pm 4) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

***H<sub>0</sub> costante di Hubble***

Hubble aveva considerevolmente sottostimato le distanze, ottenendo quindi un valore troppo alto per la costante di Hubble. Solo pochissime galassie molto vicine mostrano un blueshift, cioè, si muovono verso di noi; una di queste è Andromeda (M31).





## Nota storica: Lemaitre

Già nel 1927, 2 anni prima di Hubble, il prete belga Georges Lemaitre pubblicò la scoperta della relazione distanza-velocità di recessione, quindi l'espansione dell'Universo

Mise insieme le distanze calcolate e pubblicate da Hubble con le velocità di recessione pubblicate da Slipher

Sfortunatamente pubblicò il risultato in una poco conosciuta rivista in francese, e il risultato passò dunque inosservato (anche ad Hubble, che pubblicò la sua legge senza sapere della pubblicazione di Lemaitre)

Nel 2018 a Vienna, dopo quasi un secolo, l'Unione Astronomica Internazionale ha votato per cambiare la denominazione della legge sull'espansione dell'Universo in **legge di *Hubble-Lemaitre***







# Redshift e distanze

$$z := \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_0}{\lambda_0}, \quad \lambda_{\text{obs}} = (1 + z)\lambda_0$$

Definizione di redshift

Per piccoli redshift  $z \ll 1$

$$v \approx zc$$

uso la legge  
di Hubble

$$v = H_0 D$$

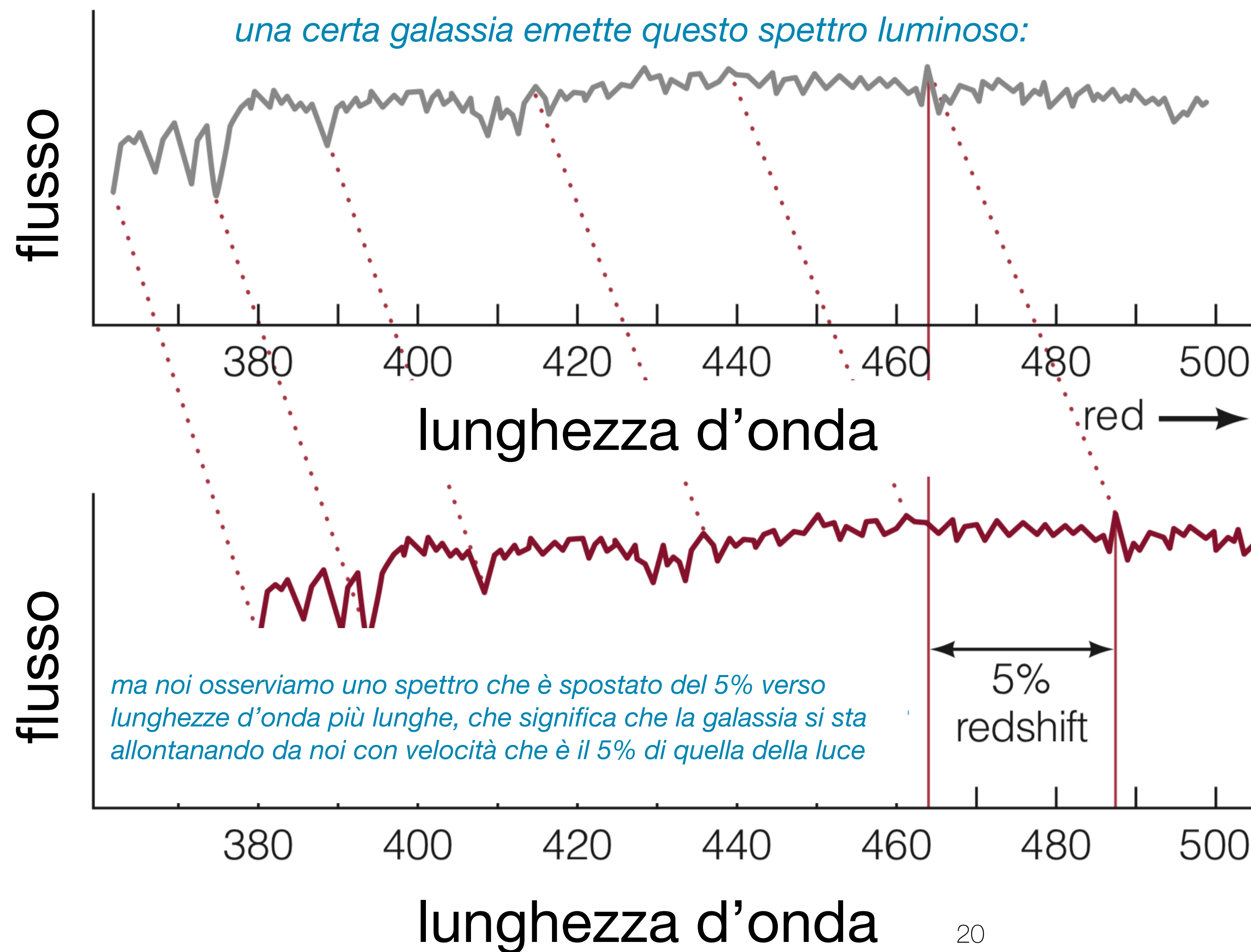
$$H_0 = h \, 100 \, \text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$$

$$D \approx \frac{zc}{H_0} \approx 3000 z h^{-1} \text{Mpc}$$

Parametrizza la nostra  
“ignoranza” su  $H_0$



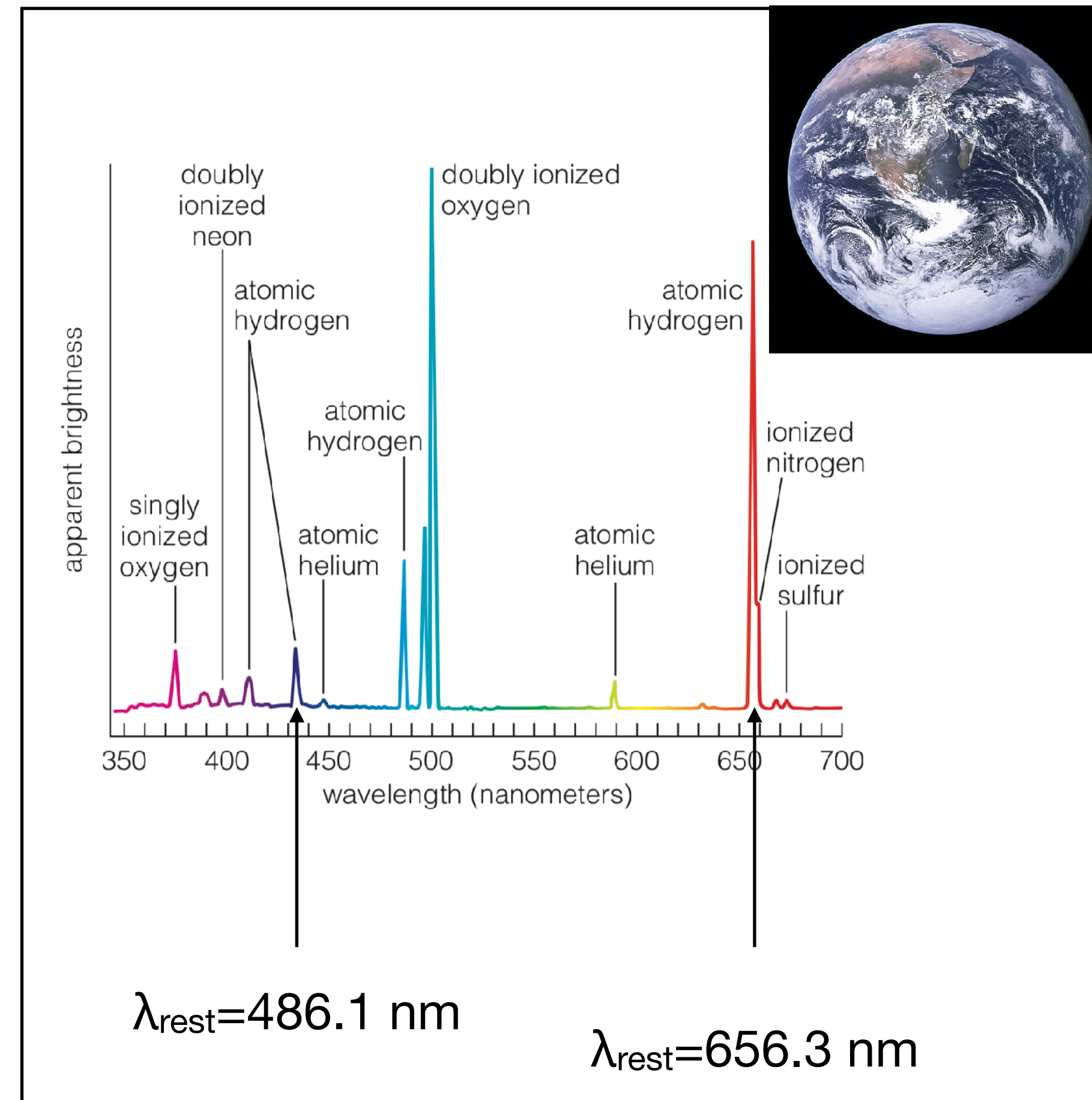
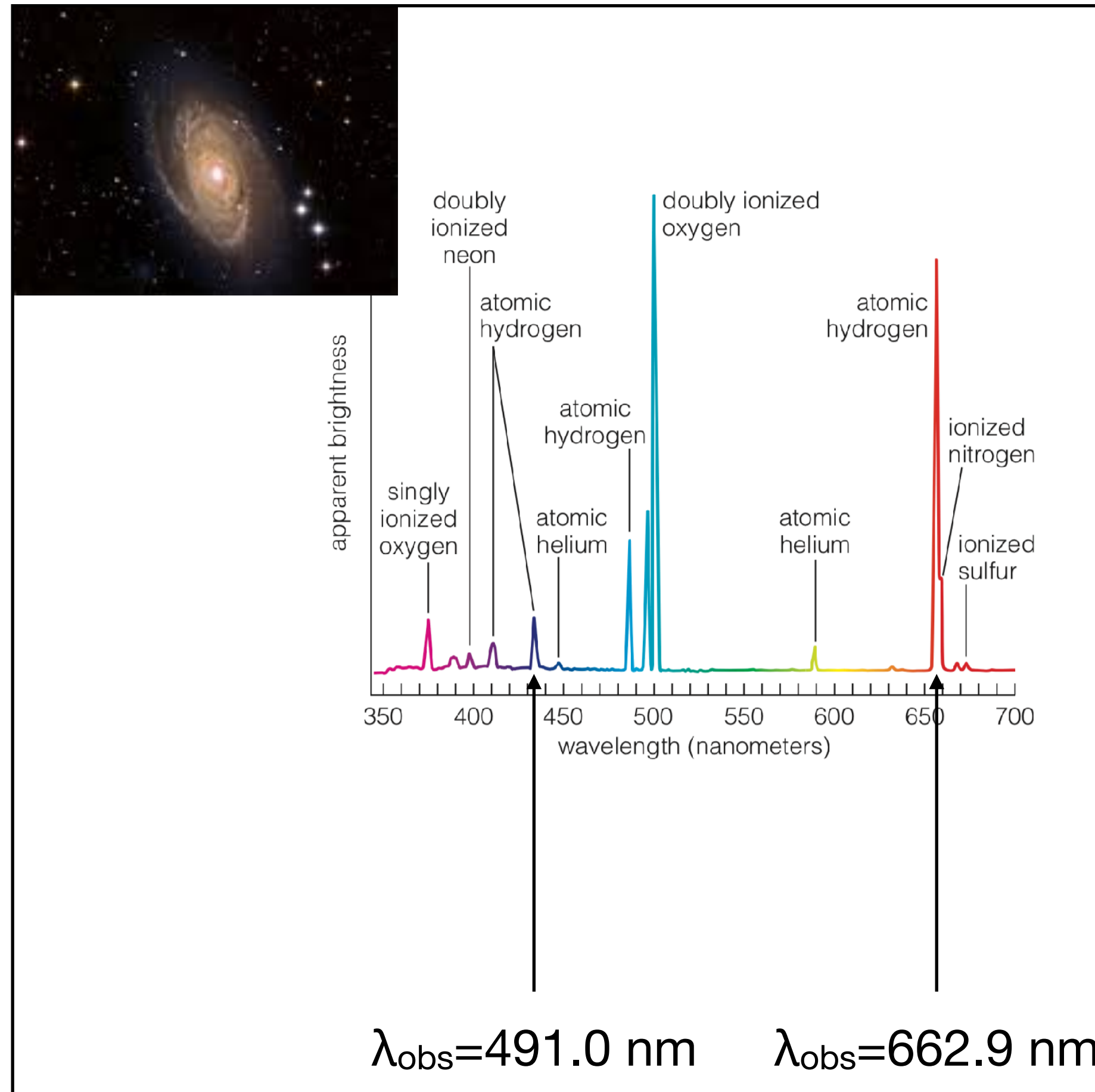
# Redshift



$$\Delta\lambda/\lambda = z = 0.05$$

$$v = z \cdot c = 0.05 \cdot c$$



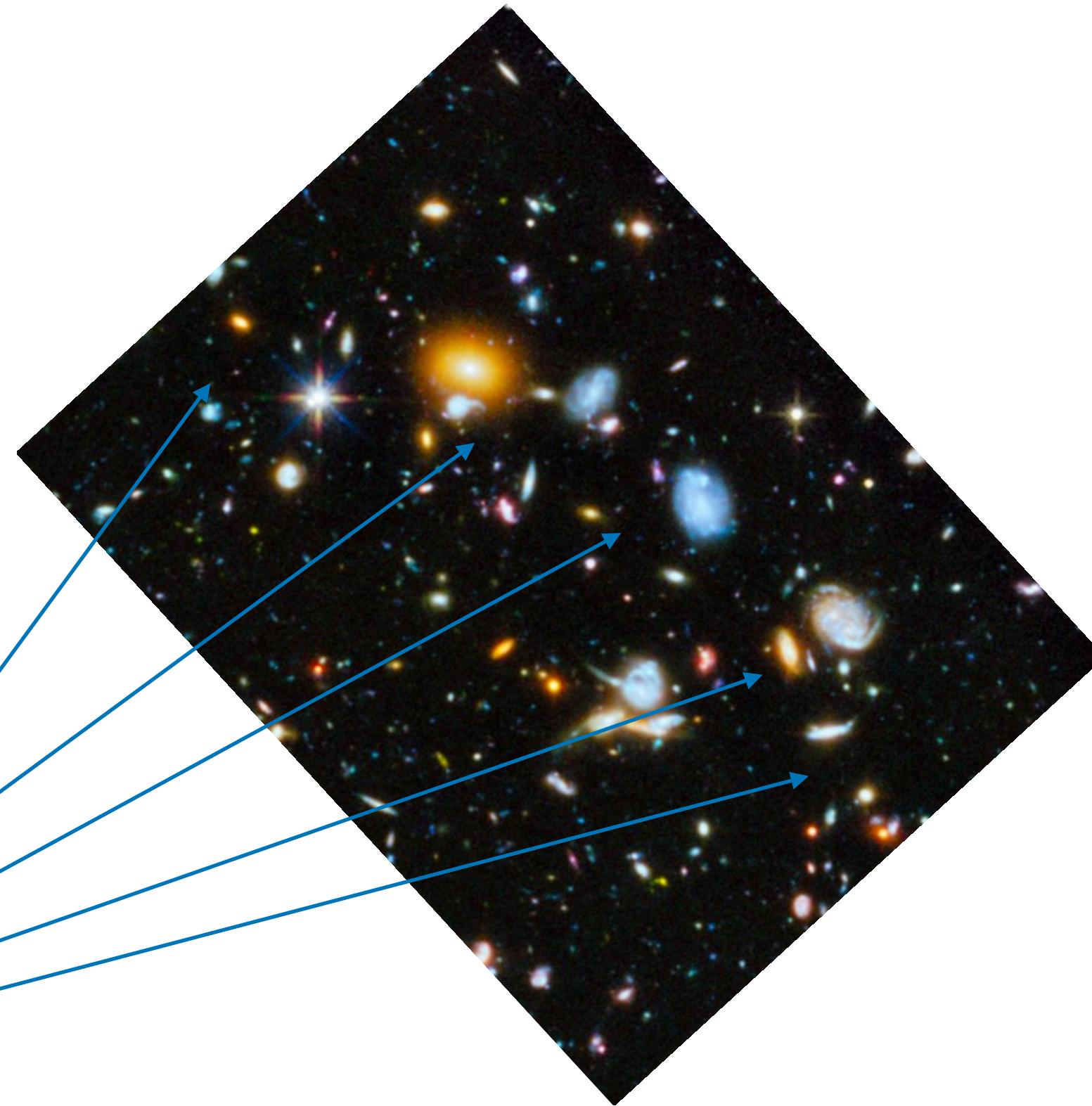


**Qual è il redshift della galassia? A che velocità si muove rispetto a noi?**

$$z = (\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{rest}}) / \lambda_{\text{rest}}$$

$$v = z \times c \text{ (se } z \ll 1)$$





Hubble misurò distanze e velocità di molte galassie...

Galaxy	Distance (Mpc)	H-Alpha (angstroms)	Velocity (Mm/s)
NGC 1357	24.72	6608	2.19
NGC 1832	30.99		2.02
NGC 2775	17.89		1.46
NGC 2903	6.96		0.45
NGC 3368	11.89		0.88
NGC 3516	40.00		2.53
NGC 3627	9.57		0.72

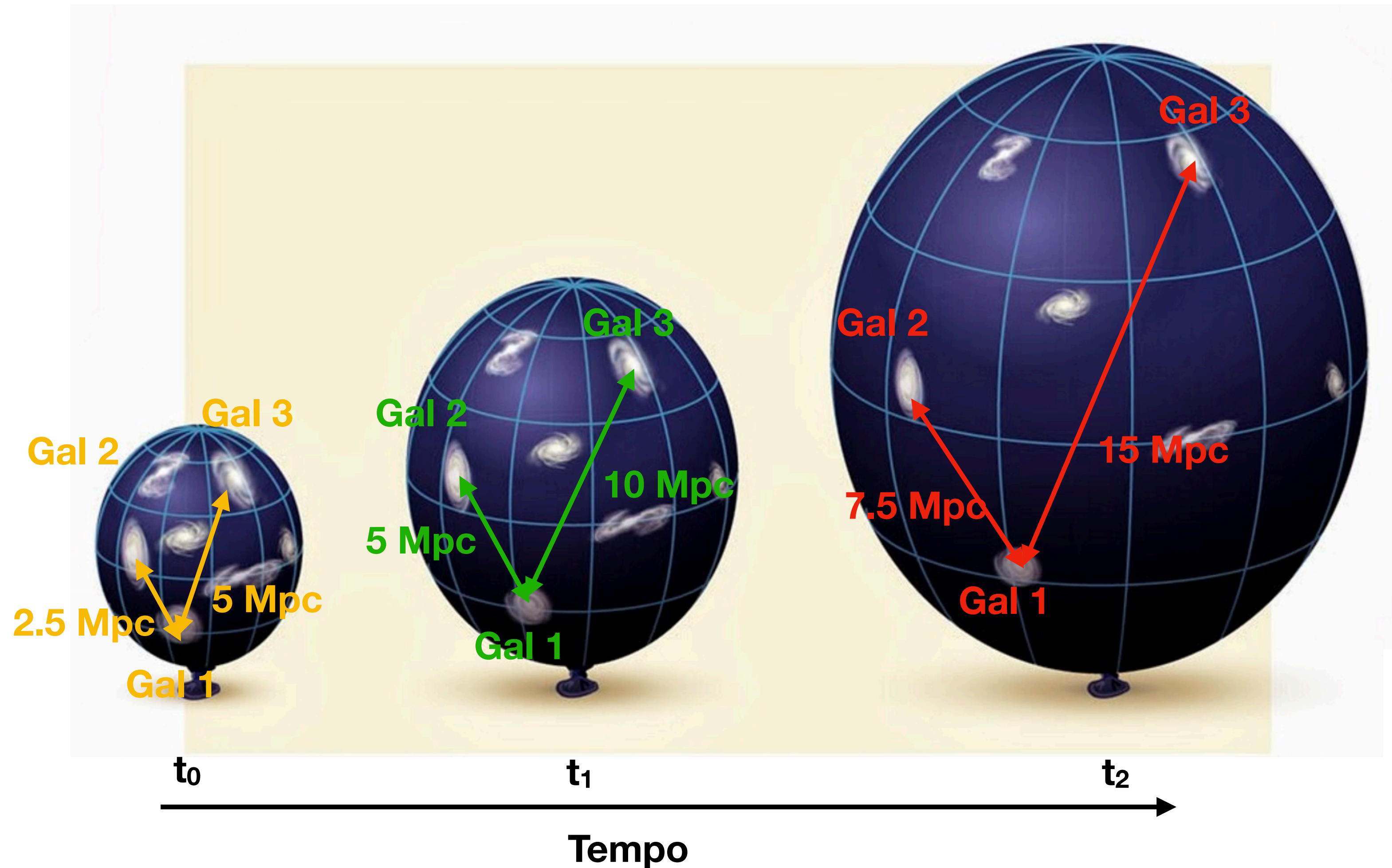
**calcolate la lunghezza d'onda H-Alpha per tutte le galassie**





Qual è l'effetto del moto della Terra intorno al Sole o del moto del Sole intorno al centro della galassia sulle misure di redshift di galassie distanti?

# Espansione dell'Universo: legge di Hubble



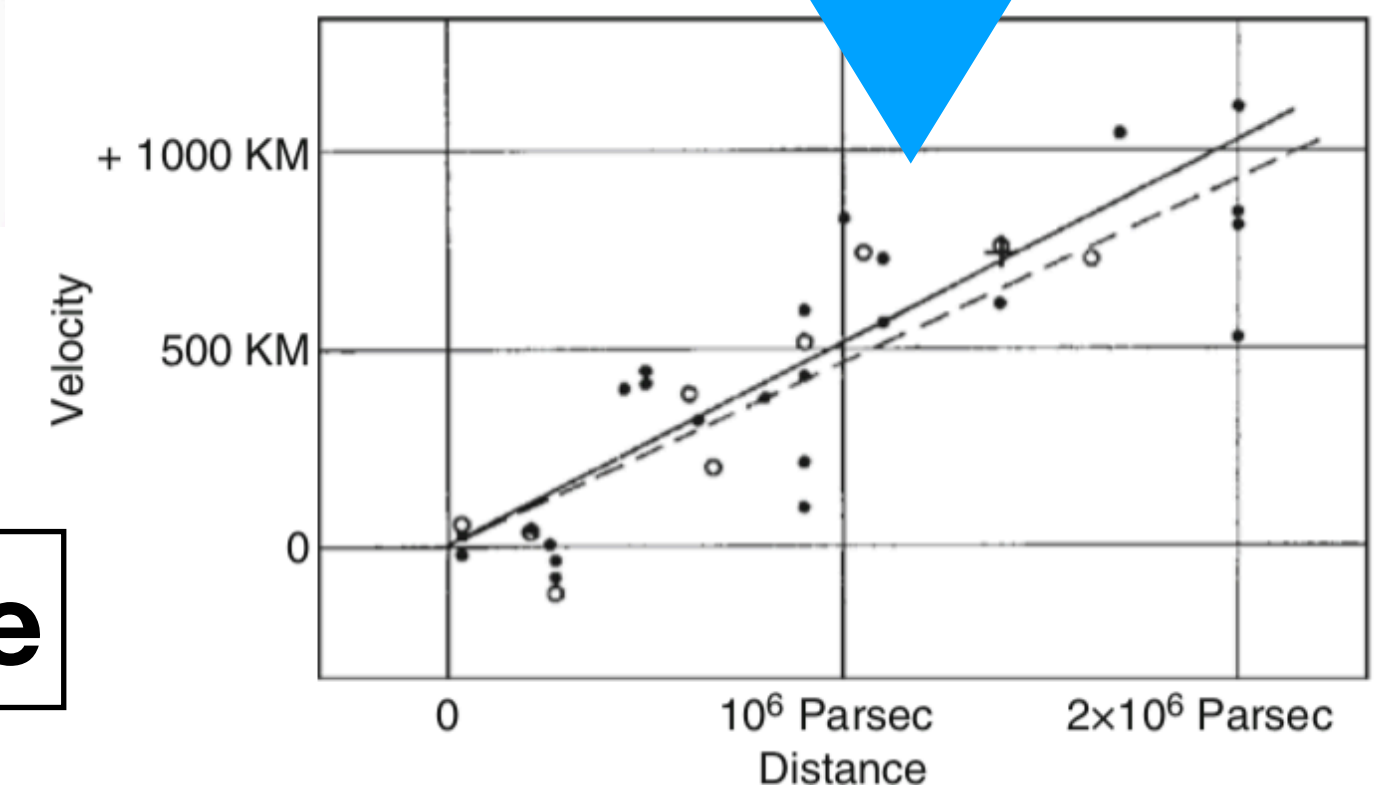
Ci mettiamo  
sulla galassia 1:

$$d_{12} = 2.5 \text{ Mpc}$$

$$d_{13} = 5 \text{ Mpc}$$

$$v_2 = 2.5 \text{ Mpc/yr}$$

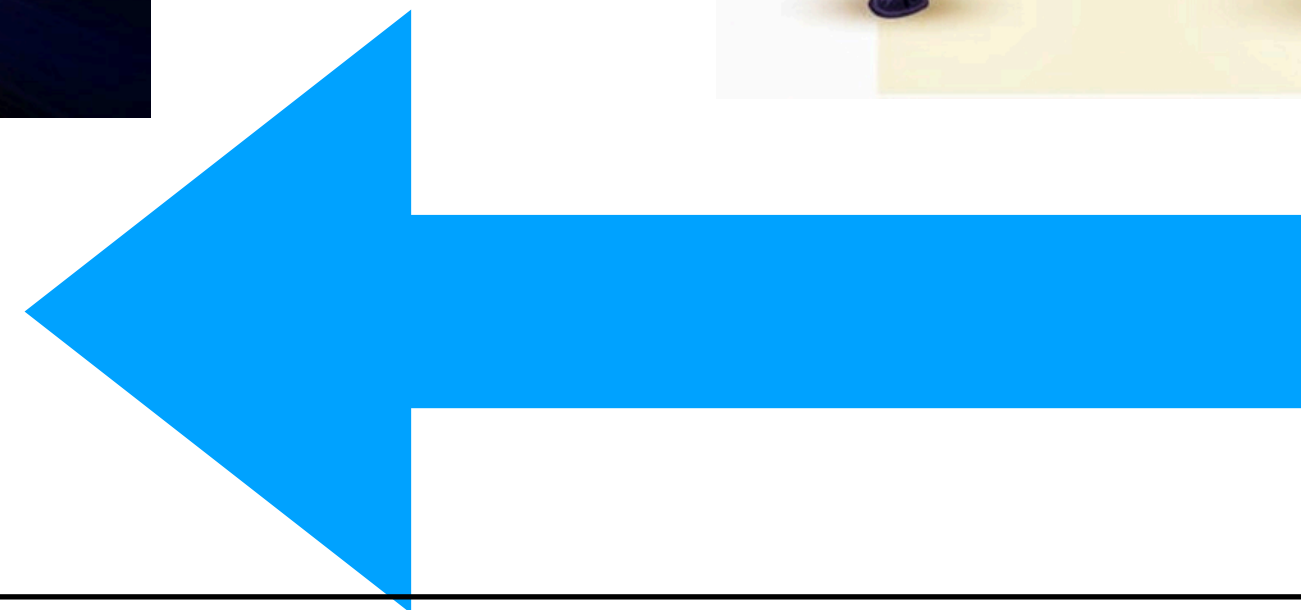
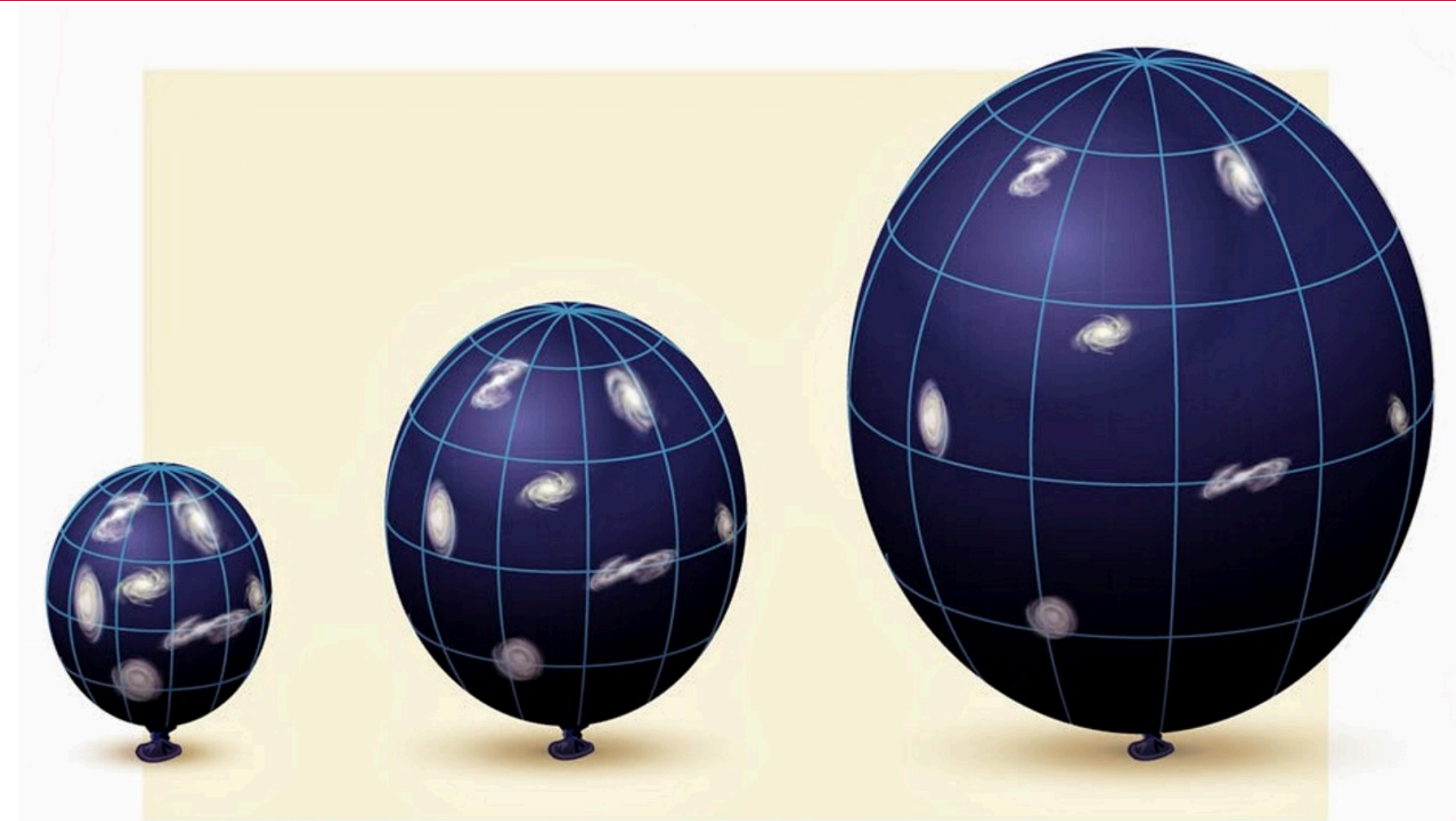
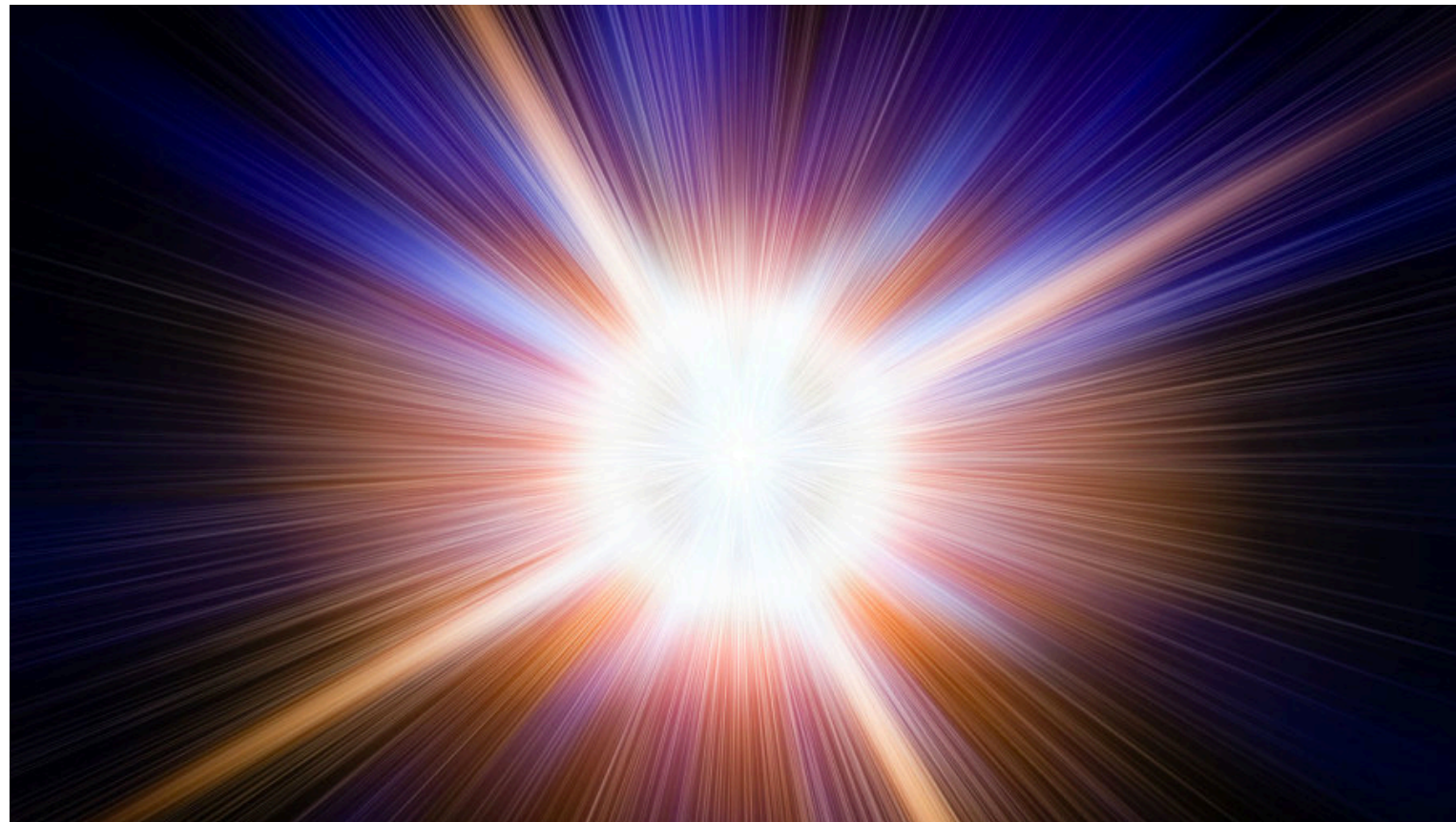
$$v_3 = 5 \text{ Mpc/yr}$$



**La legge di Hubble implica l'Universo in espansione**



# Espansione dell'Universo: legge di Hubble



Estrapolando al contrario l'espansione...

**L'Universo, nel passato, era più piccolo; se andiamo indietro incontriamo il **Big Bang****

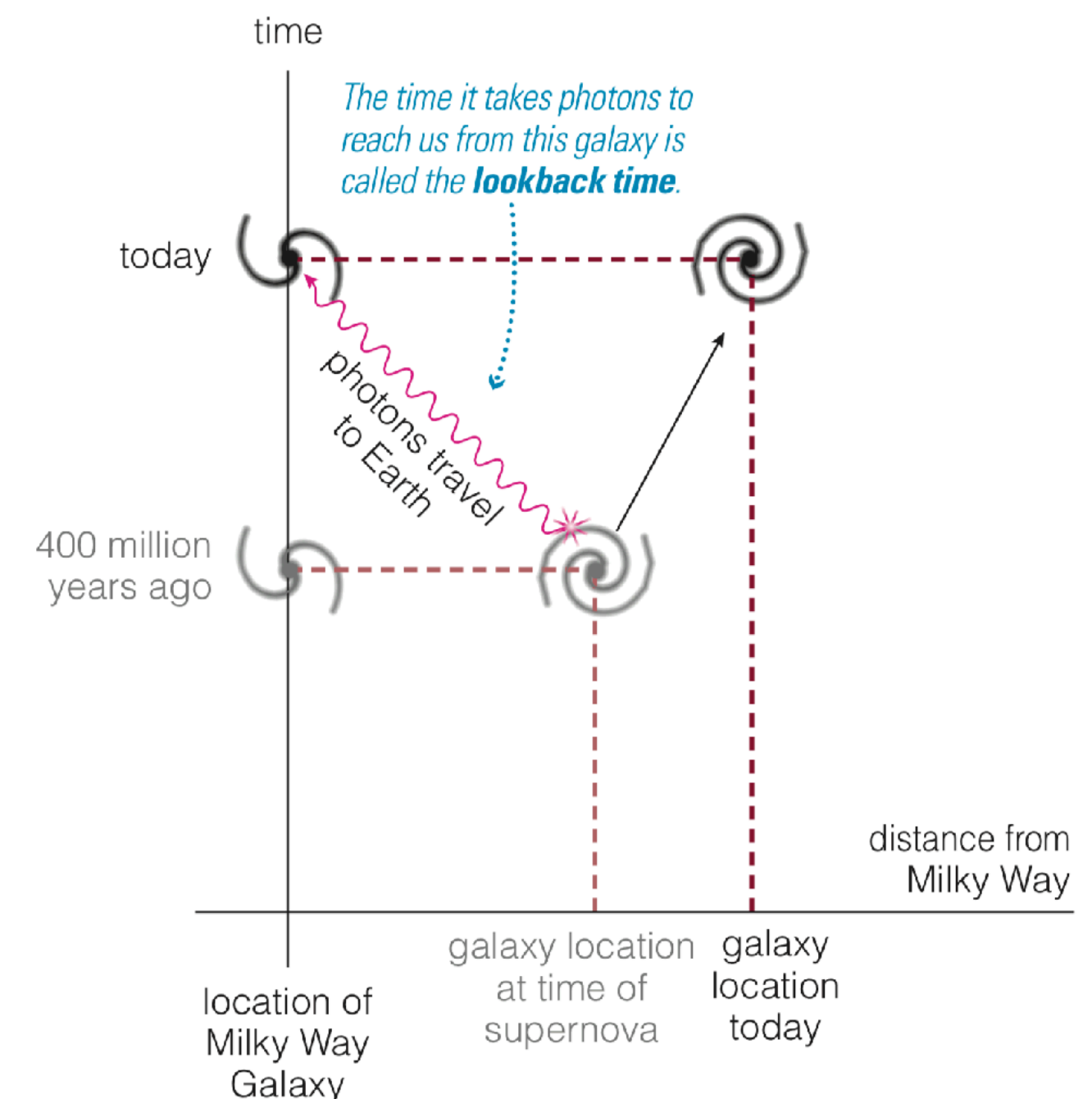




# Effetto dell'espansione sulla misura di distanze

- L'espansione dell'Universo porta ad una complicazione nella discussione delle distanze
- Siccome la velocità della luce è finita, la luce che ci arriva da una supernova in una galassia distante impiegherà un tempo non trascurabile a raggiungerci
- Ciò implica che dall'istante in cui la luce della supernova è partita, la galassia si è spostata, quindi la distanza che la luce ha percorso non mi indica direttamente a che distanza si trovi da noi

- (si intuisce anche che il concetto di *presente* in cosmologia è molto vuoto: non ha senso chiedersi dove sia ora la galassia di cui riceviamo solo ora la luce)
- questo ragionamento implica tra l'altro anche che vedendo galassie lontane le stiamo vedendo come esse erano nel passato; più lontano guardiamo, più le vediamo indietro nel tempo: questo è molto comodo nello studio dell'evoluzione delle galassie perché studiando galassie a diverse distanze da noi le posso vedere in diverse fasi della loro evoluzione







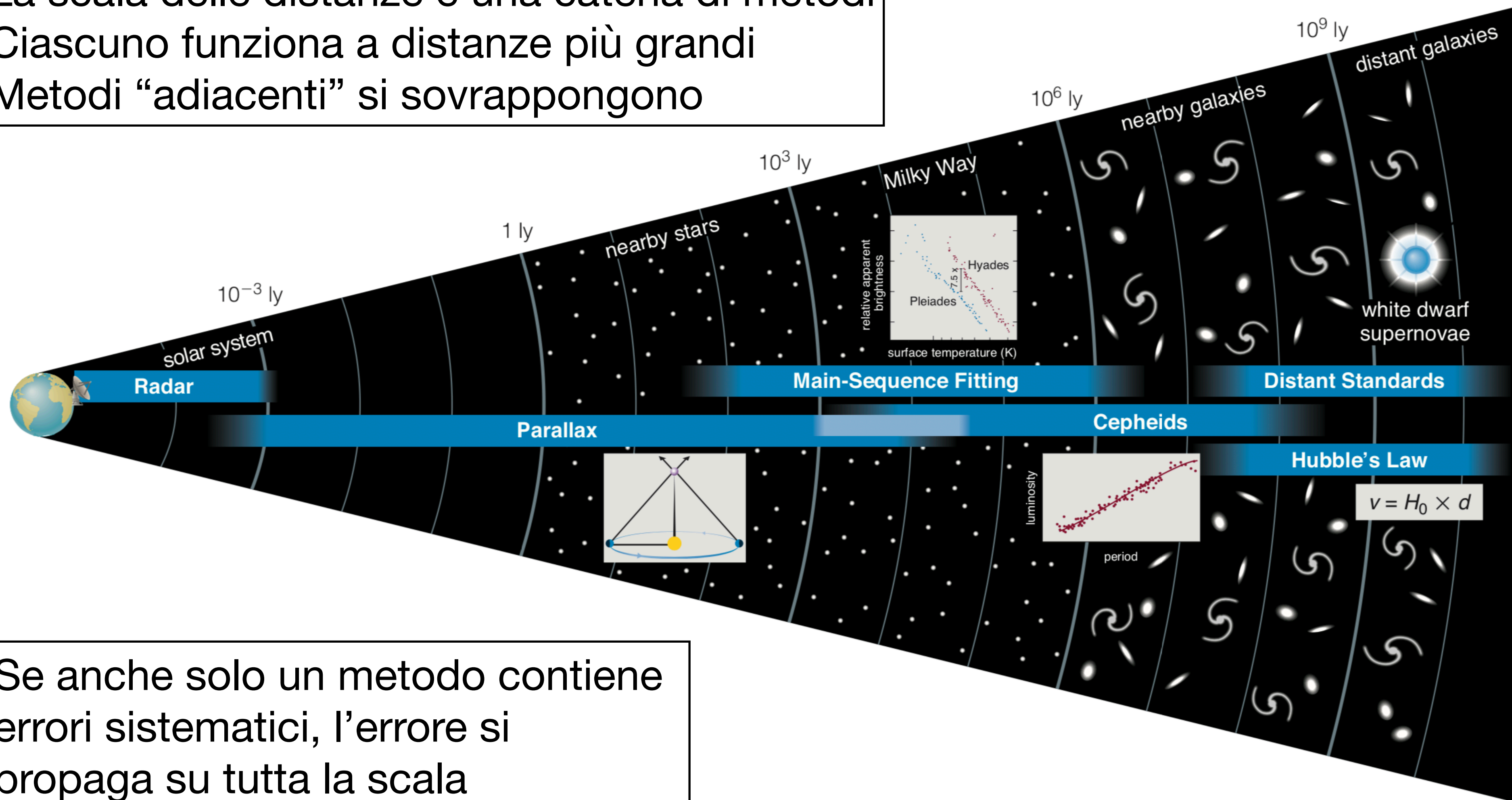
# Età dell'Universo dalla costante di Hubble

Il reciproco della costante di Hubble  $H_0$ ,  $1/H_0$ , mi dice l'età dell'Universo se la velocità di espansione si è mantenuta costante. Proviamo a calcolare quest'età, sapendo che

$$H_0 = (71 \pm 4) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

# Ricapitolo scala distanze

- La scala delle distanze è una catena di metodi
- Ciascuno funziona a distanze più grandi
- Metodi “adiacenti” si sovrappongono



Se anche solo un metodo contiene errori sistematici, l'errore si propaga su tutta la scala