

# Corso di astronomia - IV FAM

---



# La Via Lattea

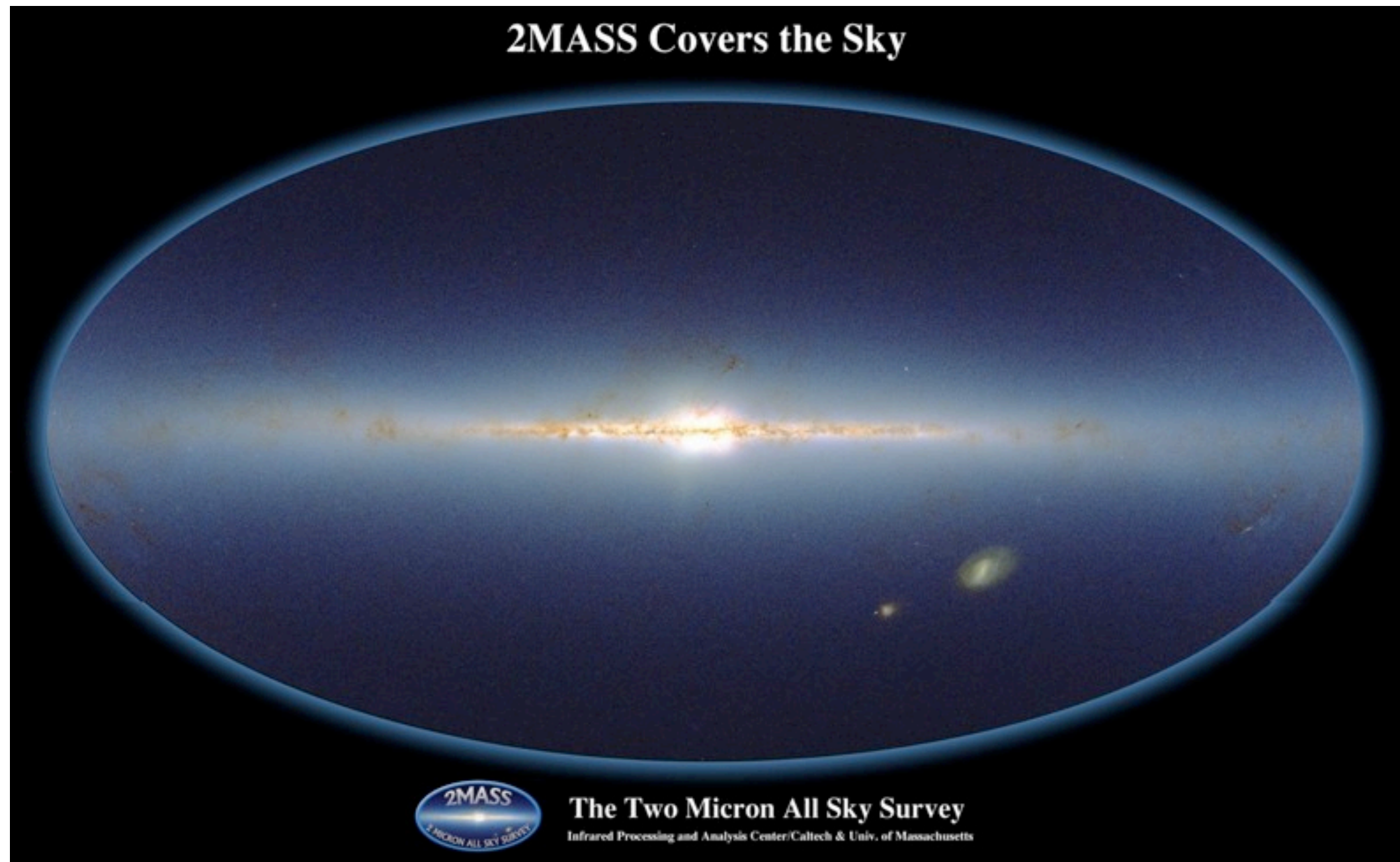
---





# La Via Lattea nell'infrarosso

---



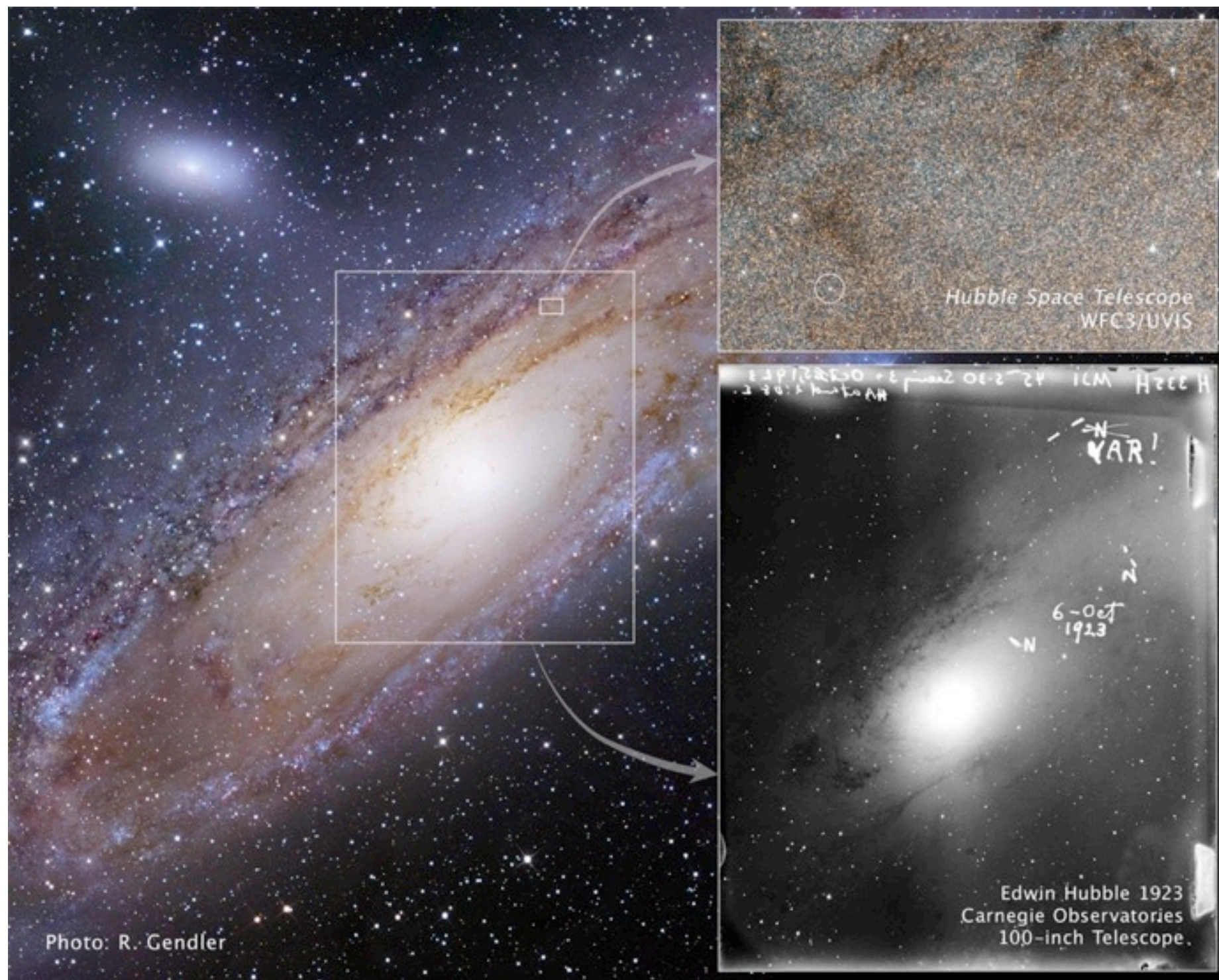
# Un po' di storia

---



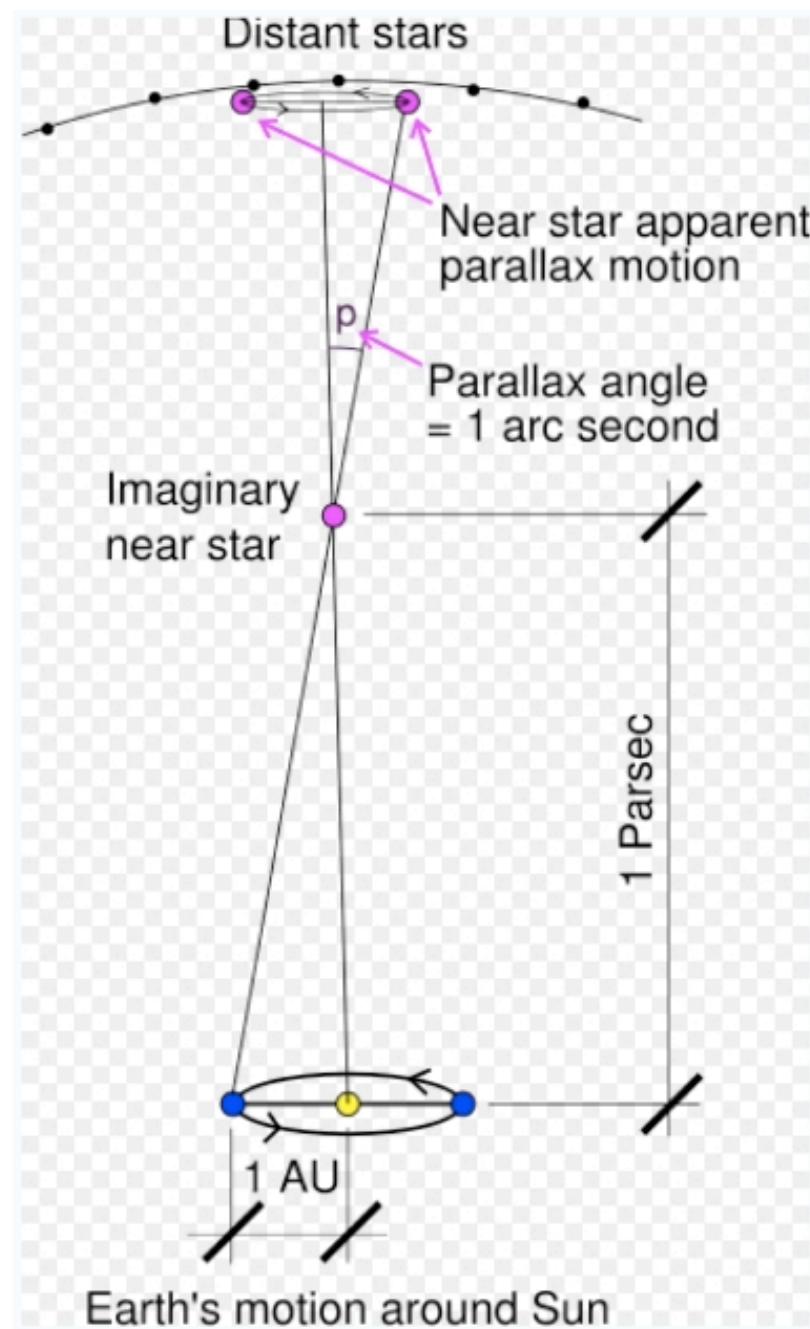
# Le nebulose sono (molto) oltre la Via Lattea

---



# Parsec come unità di distanza

- 1 parsec = distanza sotto la quale 1 AU appare come 1 secondo d'arco
- 1 pc = 3.26 anni-luce



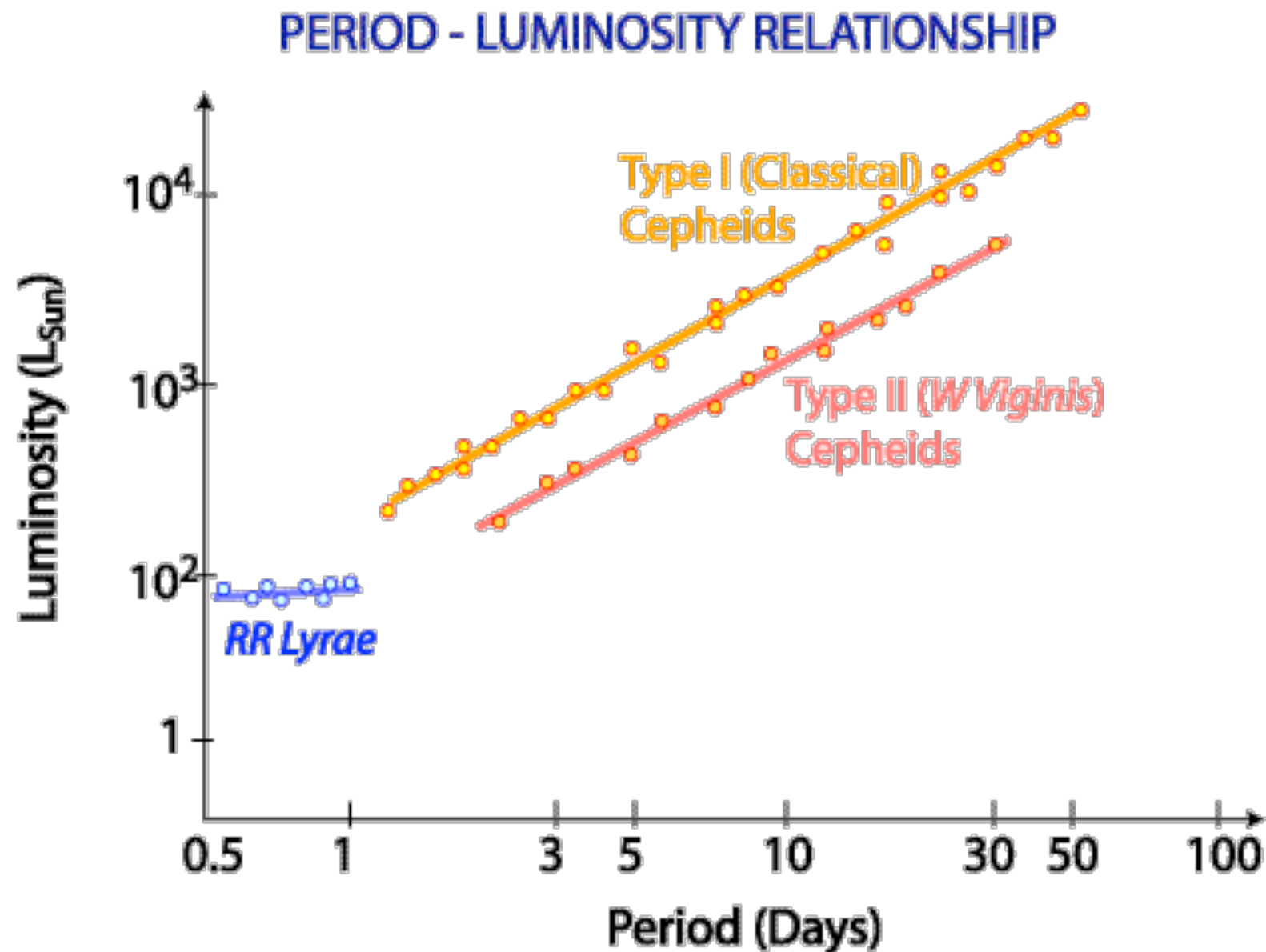
# Magnitudine e distanze

---

- magnitudine **apparente**  $m$
- magnitudine **assoluta**  $M$
- $M_{\text{star}} = M_{\text{Sun}} - 2.5 \log(L_{\text{star}})$  con  $M_{\text{Sun}} = 4.75$  e  $L_{\text{star}}$  in unità solari.  
[<http://en.wikipedia.org/wiki/Luminosity>]
- $m - M = 5 \log(d) - 5 = 5 \log(d/10) \implies d = 10^{(m-M+5)/5}$  in parsec



# Calcolare la distanza delle cefeide



- magnitudine apparente media:  $m = 15.56$
- $m - M = 5 \log (d/10) \Rightarrow$   
 $d = 10^{(m-M+5)/5}$
- con  $M = -3.57$ ,  
 $d = 68'230 \text{ pc}$   
 $d = 222'000 \text{ anni luce}$

# Galassie

## Galassie a disco





# Galassie

---

Galassie ellittiche



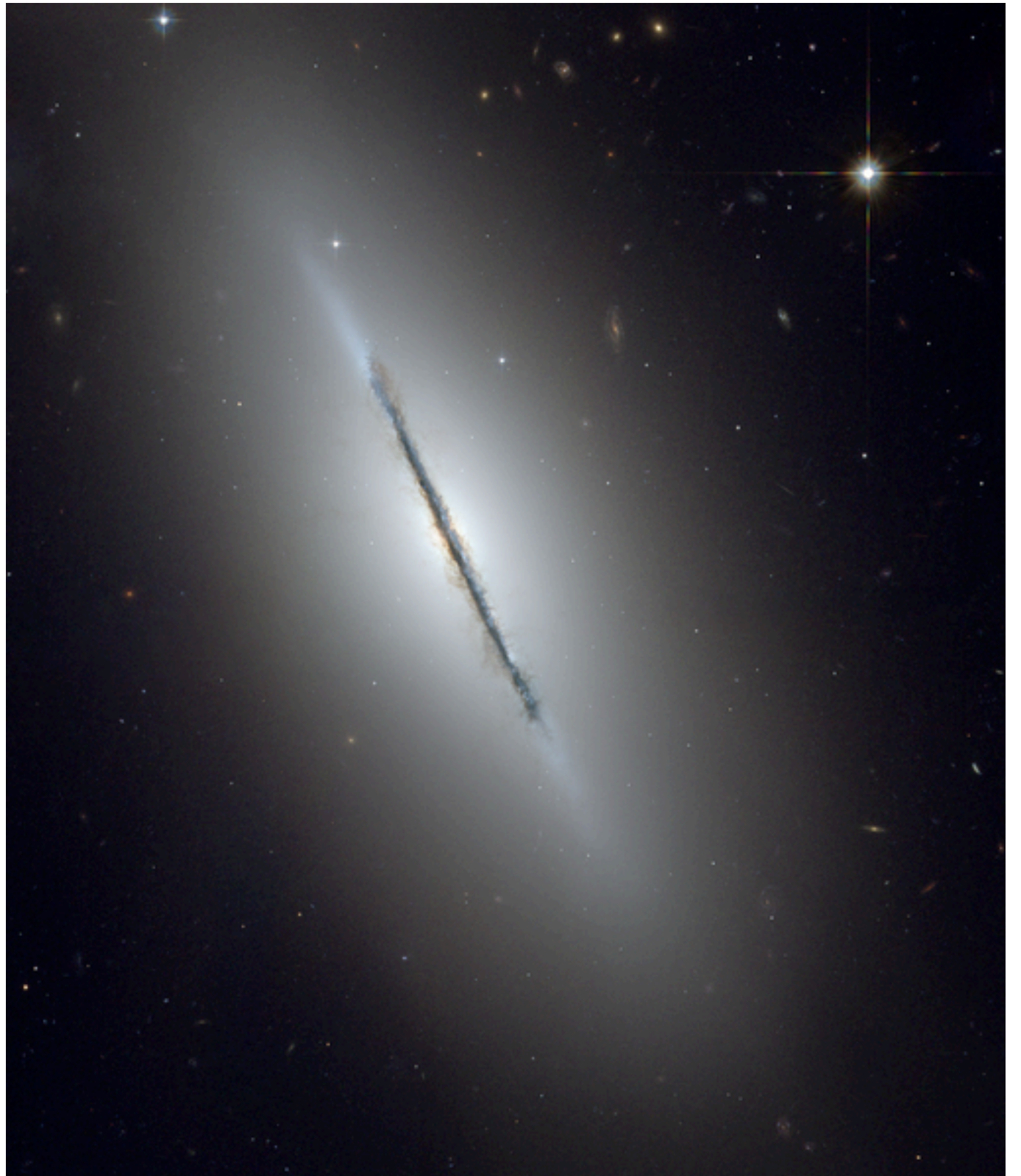


# Galassie

---

## Galassie lenticolari

- a forma di “lente”
- possiedono un bulge e un disco
- niente braccia spirali

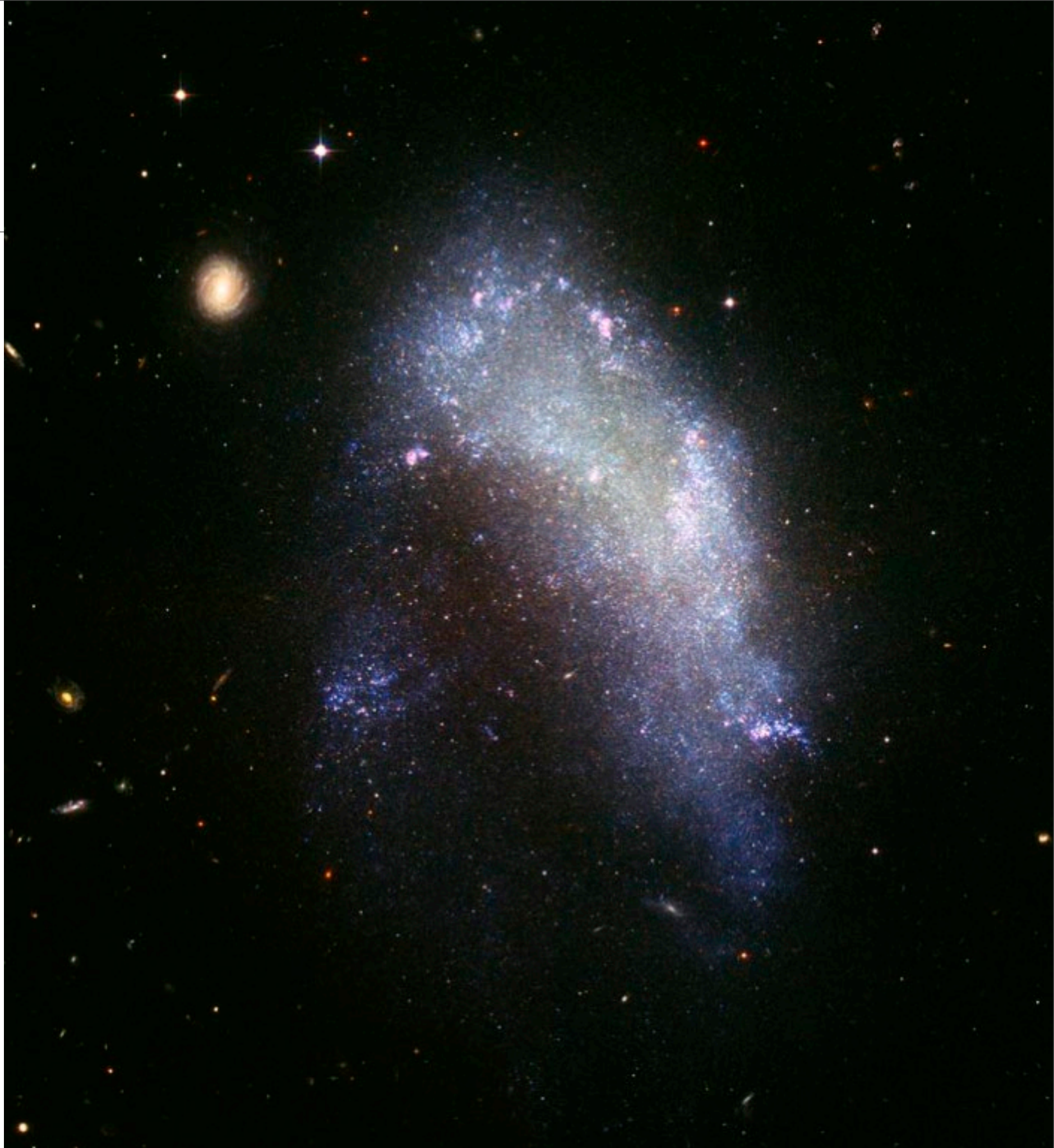




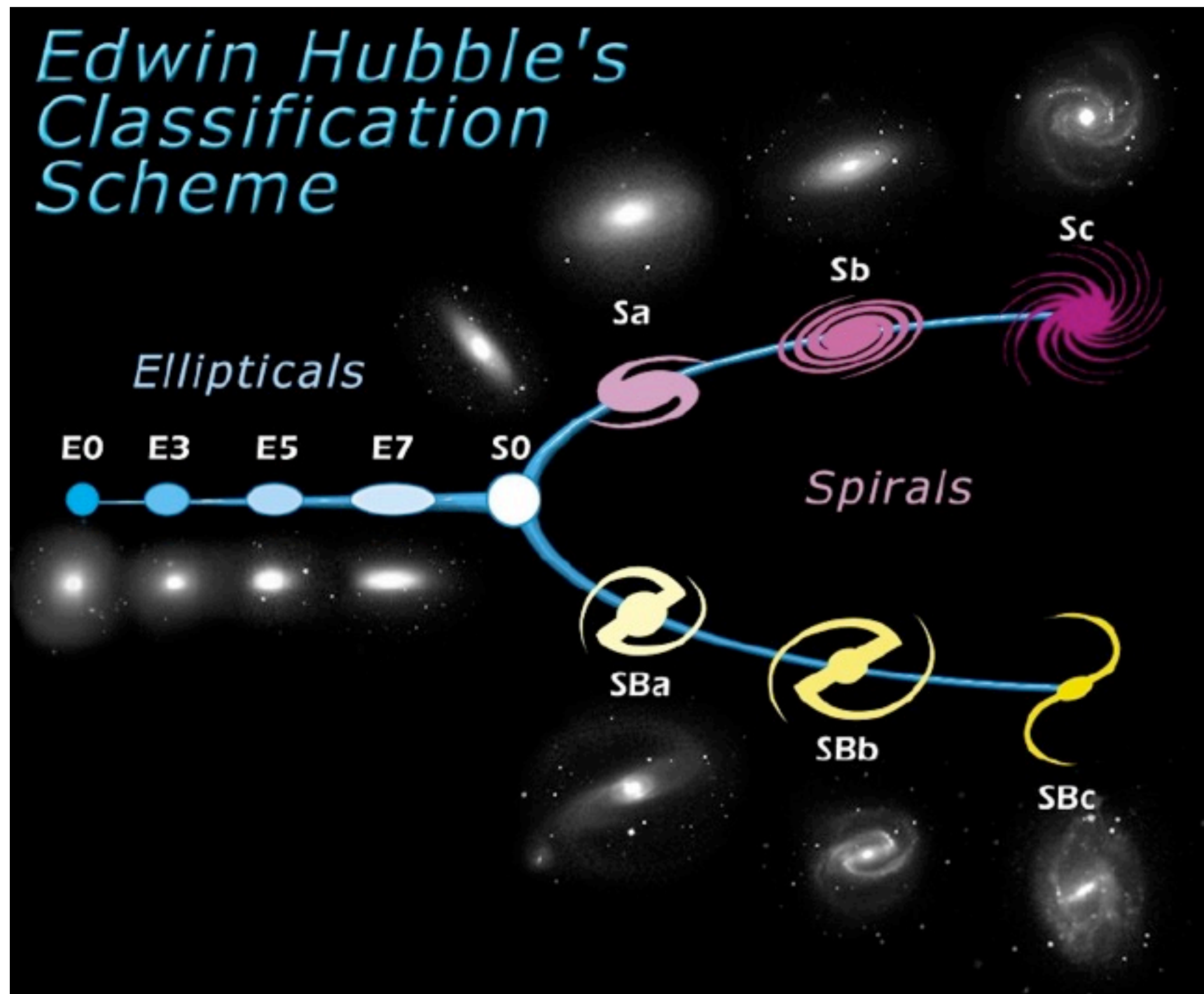
# Galassie

---

Galassie irregolari

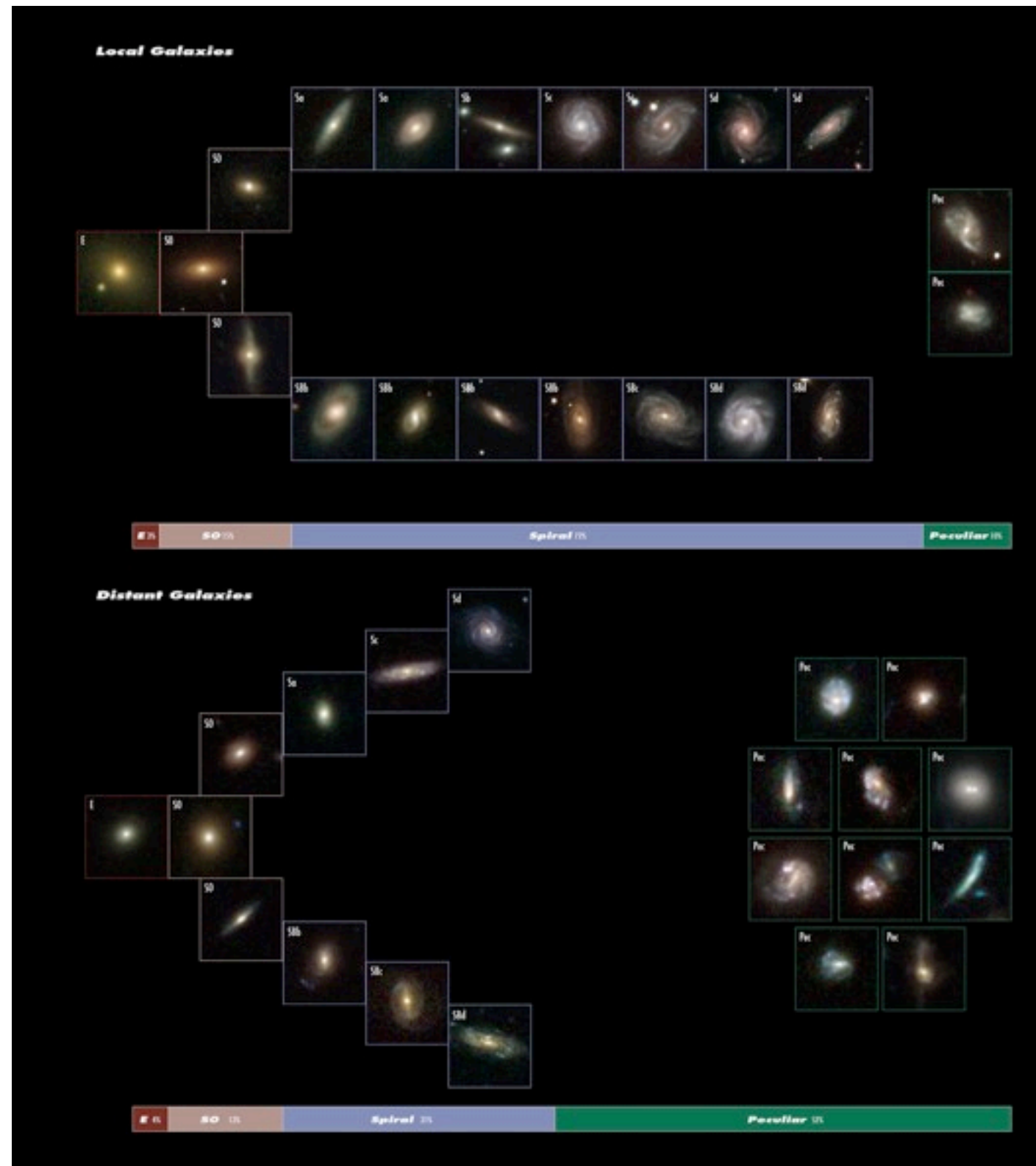


# Classificazione di galassie





# Classificazione di galassie



# Galassie a disco

---





# Galassie a disco: NGC 4945

---





# Galassie a disco con barre

---









# Profili di densità di galassie

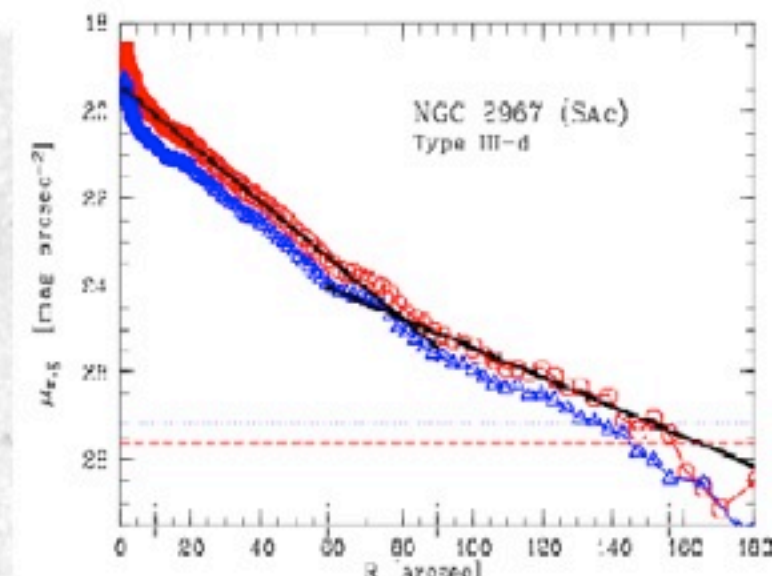
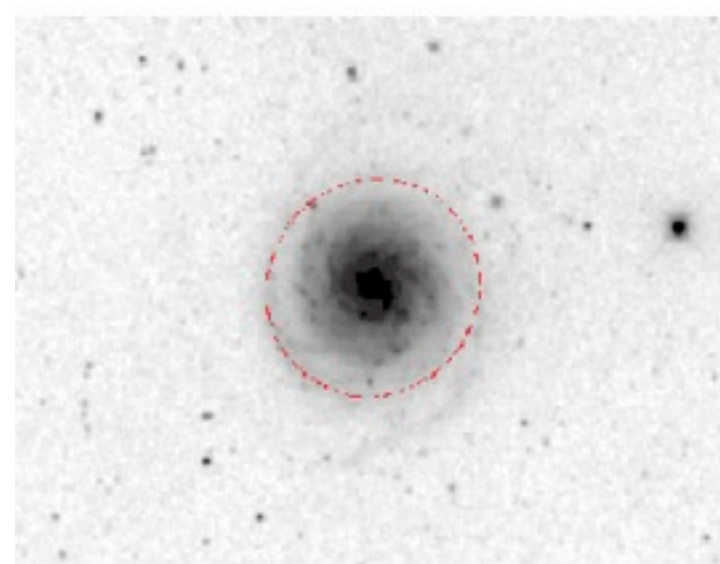
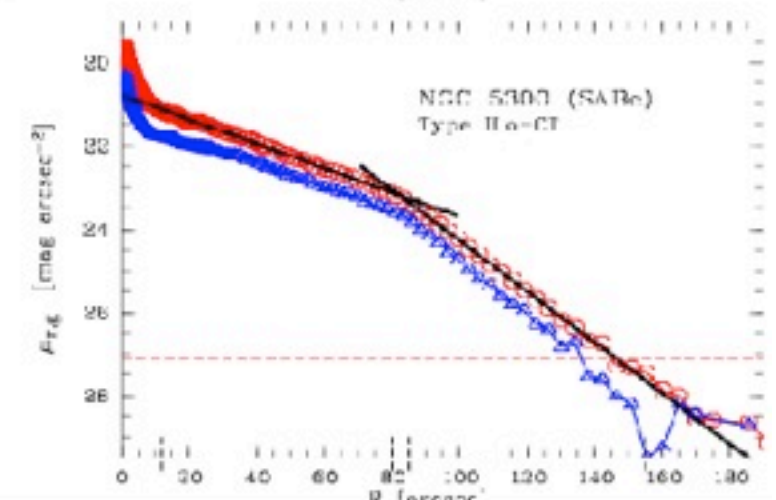
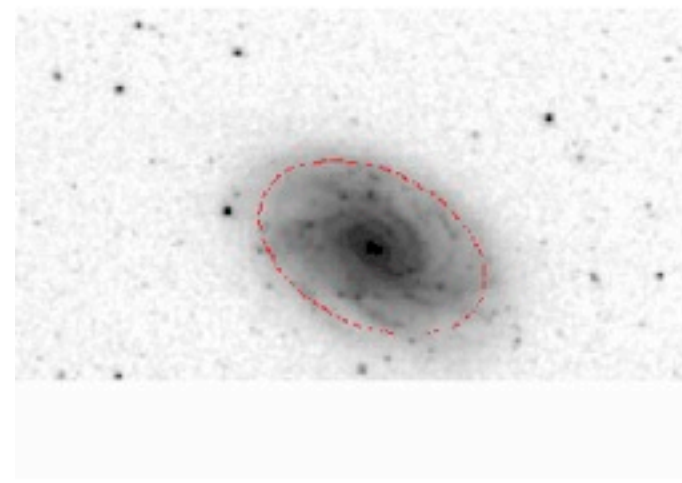
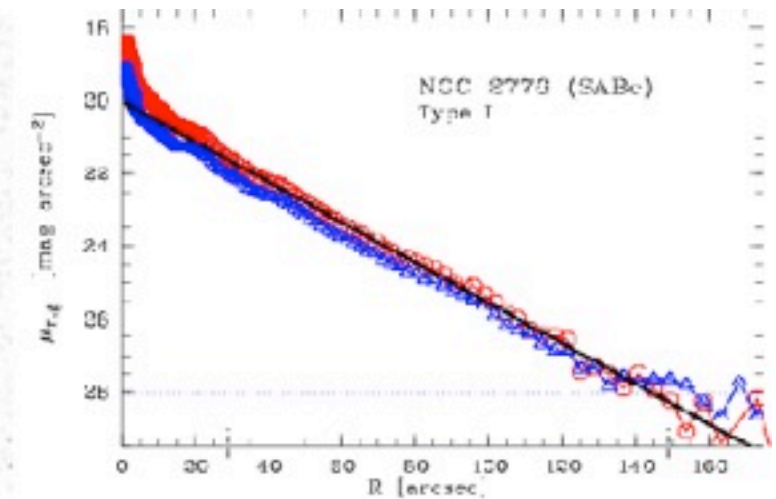
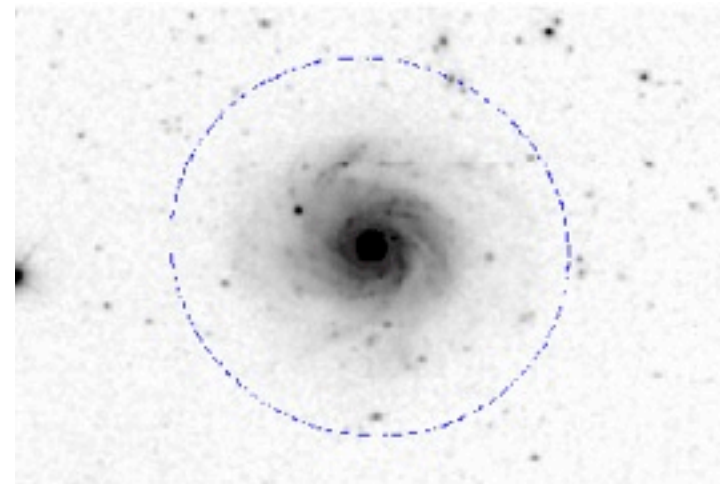
---

Galassia ellittica M59



# Profili di densità di galassie

## Galassia a disco





# Profili di densità di galassie

Sersic's profile:

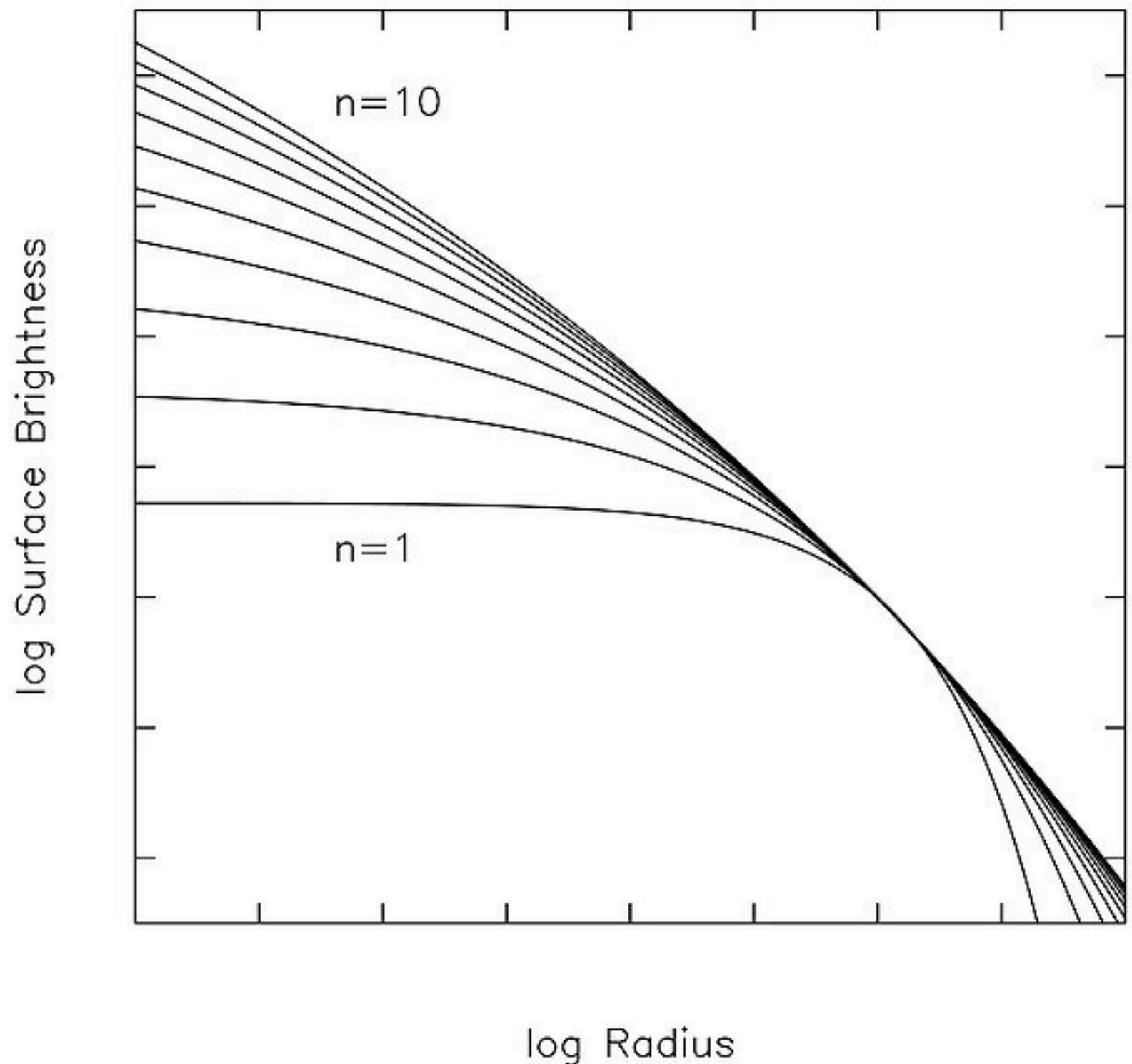
$$I(R) = I_0 \cdot e^{-kR^{1/n}}$$

Galassie ellittiche:  $n=4$

$$I(R) = I_0 \cdot e^{-kR^{1/4}}$$

Galassie a disco:  $n=1$

$$I(R) = I_0 \cdot e^{-kR}$$



# Galassia ellittica nana

---

- galassie molto comuni
- qualche milioni di stelle
- Leo I: 1 kpc di diametro, ad una distanza di 180 kpc





# Spirali e ellittiche a confronto



**Table 24-1 Some Properties of Galaxies**

|                                 | Spiral (S) and barred spiral (SB) galaxies                                                            | Elliptical galaxies (E)            | Irregular galaxies (Irr)     |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| Mass ( $M_{\odot}$ )            | $10^9$ to $4 \times 10^{11}$                                                                          | $10^5$ to $10^{13}$                | $10^8$ to $3 \times 10^{10}$ |
| Luminosity ( $L_{\odot}$ )      | $10^8$ to $2 \times 10^{10}$                                                                          | $3 \times 10^5$ to $10^{11}$       | $10^7$ to $10^9$             |
| Diameter (kpc)                  | 5 to 250                                                                                              | 1 to 200                           | 1 to 10                      |
| Stellar populations             | Spiral arms: young Population I<br>Nucleus and throughout disk:<br>Population II and old Population I | Population II and old Population I | mostly Population I          |
| Percentage of observed galaxies | 77%                                                                                                   | 20%*                               | 3%                           |

*\*This percentage does not include dwarf elliptical galaxies that are as yet too dim and distant to detect. Hence, the actual percentage of galaxies that are ellipticals may be higher than shown here.*

# Come calcolare la distanza di remote galassie?

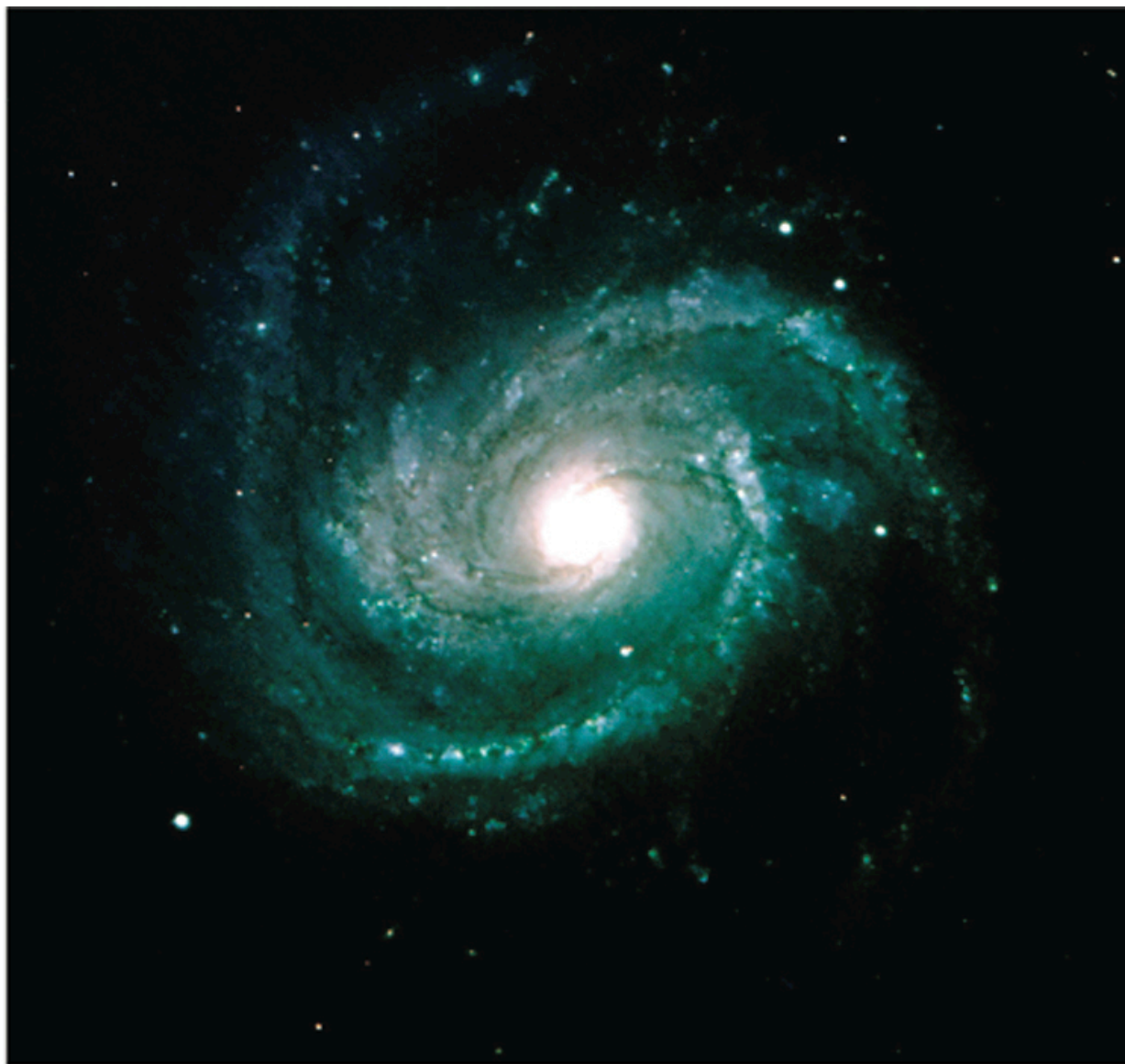
---

- parallasse solo per distanze  $< 500$  pc
- Candele standard (luminosi,  $M$ , riconoscibili, comuni)
- RR Lyrae (fino a 100 kpc)
- Cefeidi (fino a 30 Mpc)
- Supernova tipo I (fino a 1000 Mpc)



# Come calcolare la distanza di remote galassie?

---

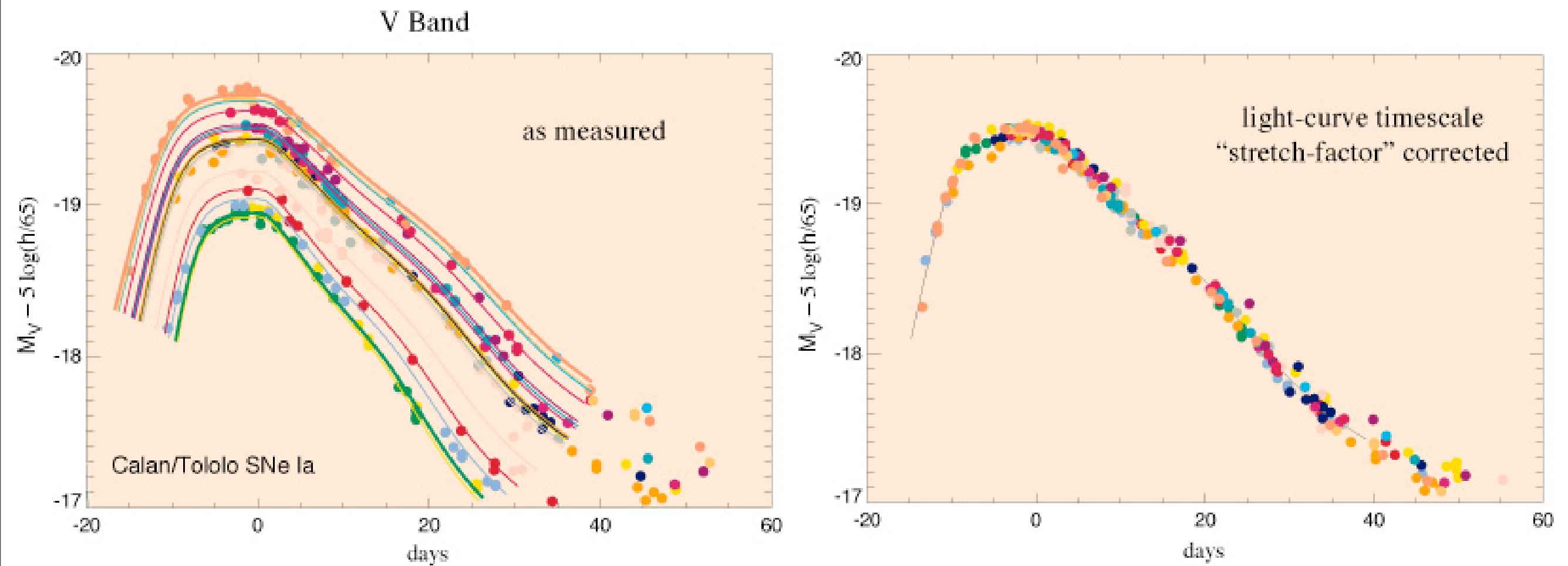


(a) M100 in March 2002



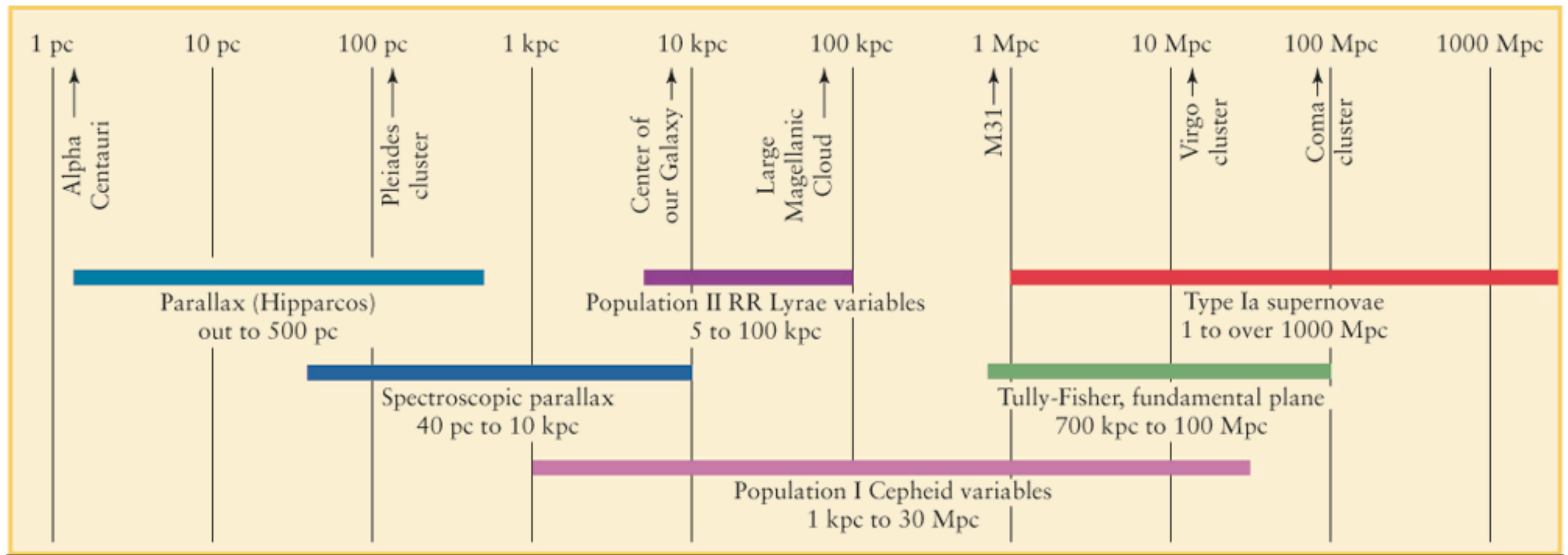
(b) M100 in February 2006, showing Supernova 2006X

# Supernova tipo Ia





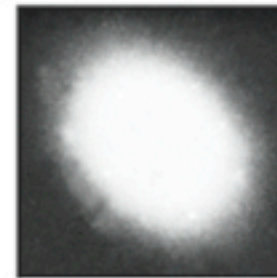
# Scala delle distanze



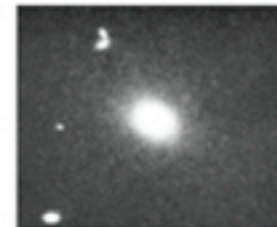
# La legge di Hubble

- il redshift  $z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0 = \Delta\lambda / \lambda_0$
- Più una galassia è distante, maggiore è il suo redshift.
- $z = v / c$  (per  $v \ll c$ ),  
p.es. se  $z = 0.05$ , allora  $v = 0.05 c$
- Più una galassia è distante, più rapidamente si allontana da noi.

GALAXIES in



Virgo



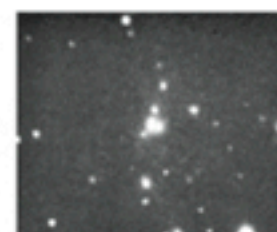
Ursa Major



Corona Borealis



Boötes



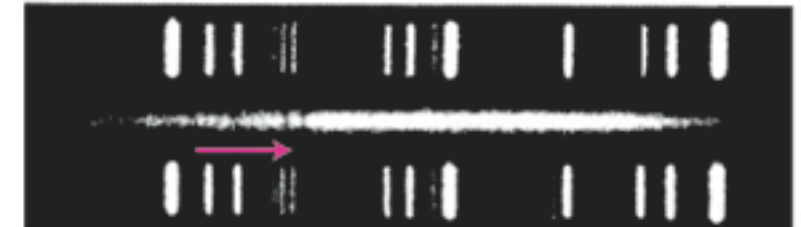
Hydra

The more distant  
the galaxy...

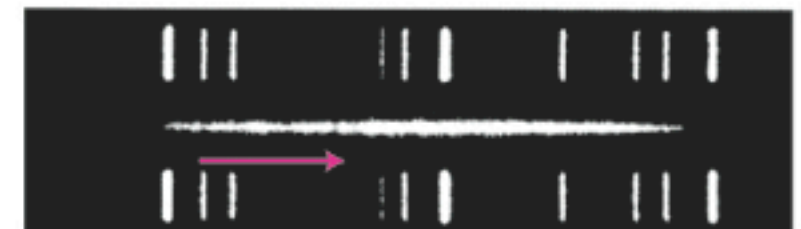
REDSHIFTS



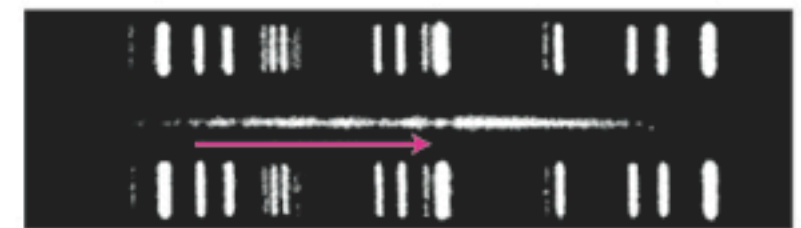
1200 km/s



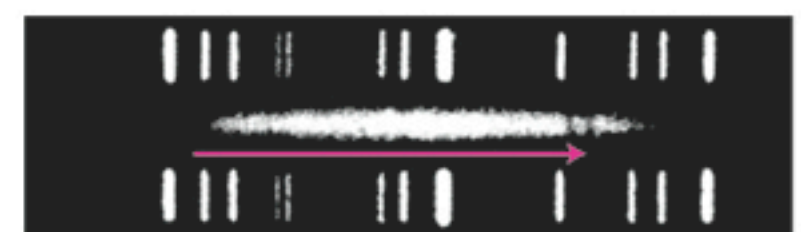
15,000 km/s



22,000 km/s



39,000 km/s



61,000 km/s

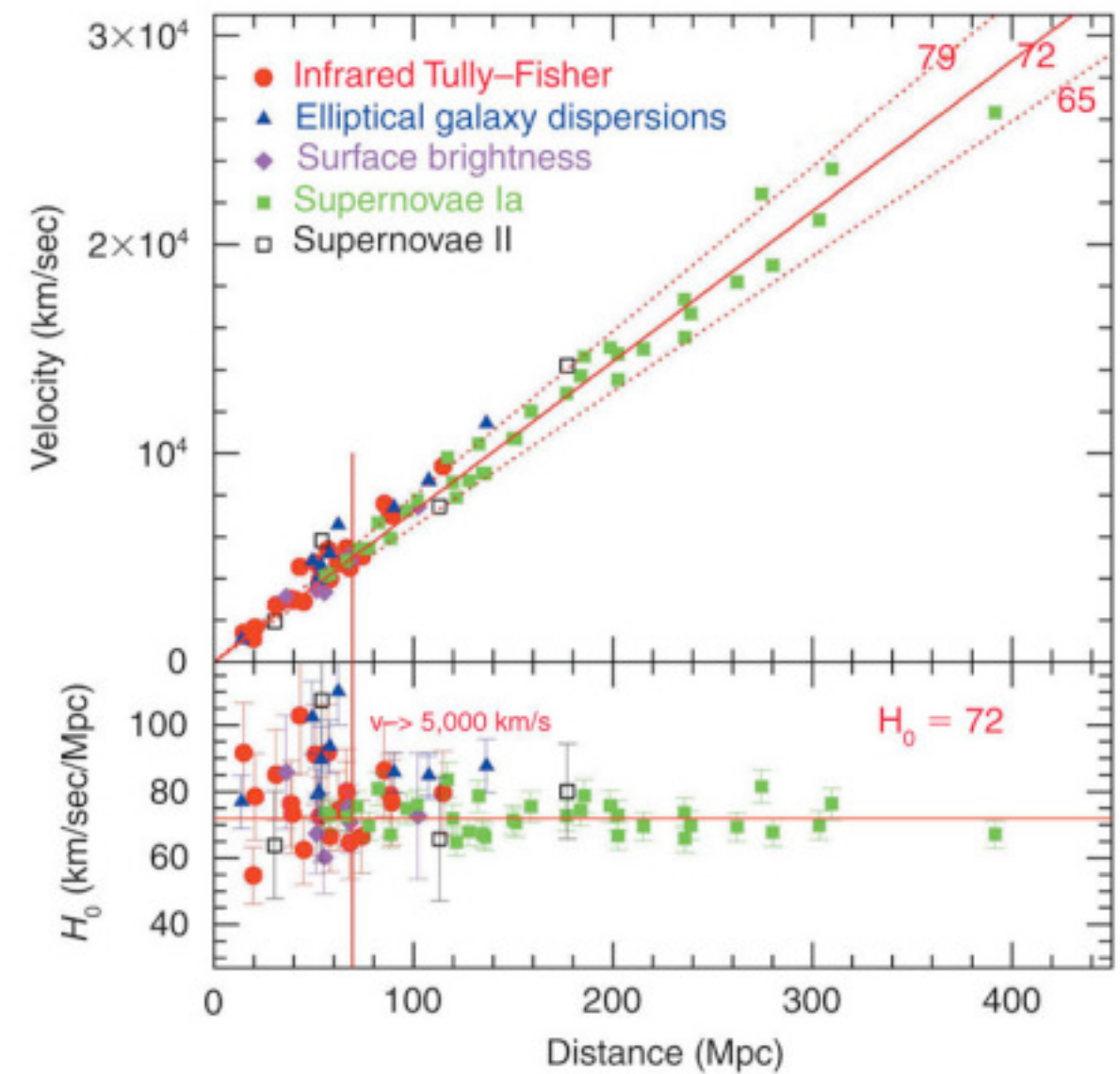
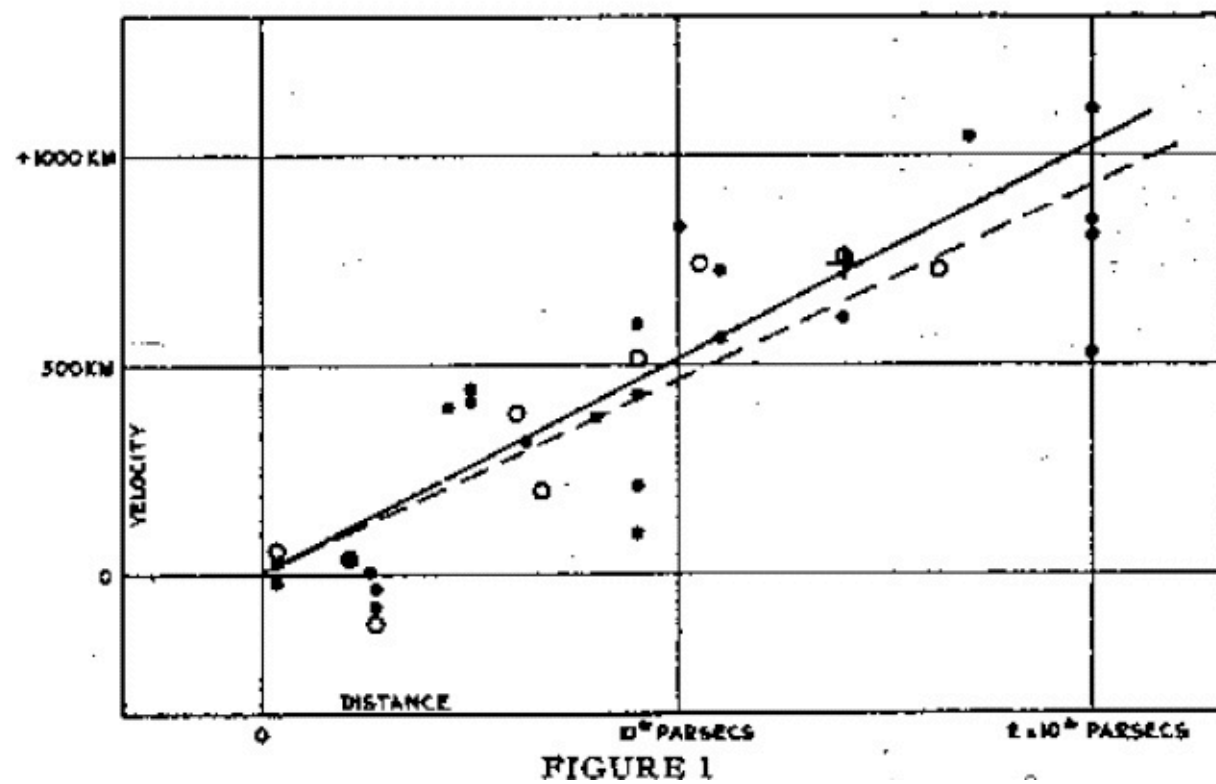
...the greater its redshift and  
the more rapidly it is receding from us.



# La legge di Hubble

$$v = H_0 d \quad \text{con } H_0 = 73 \text{ km/s/Mpc}$$

Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.



**B**

(Wendy L. Freedman, Observatories of the Carnegie Institution of Washington, and NASA)

# La legge di Hubble

---

$$v = H_0 d$$

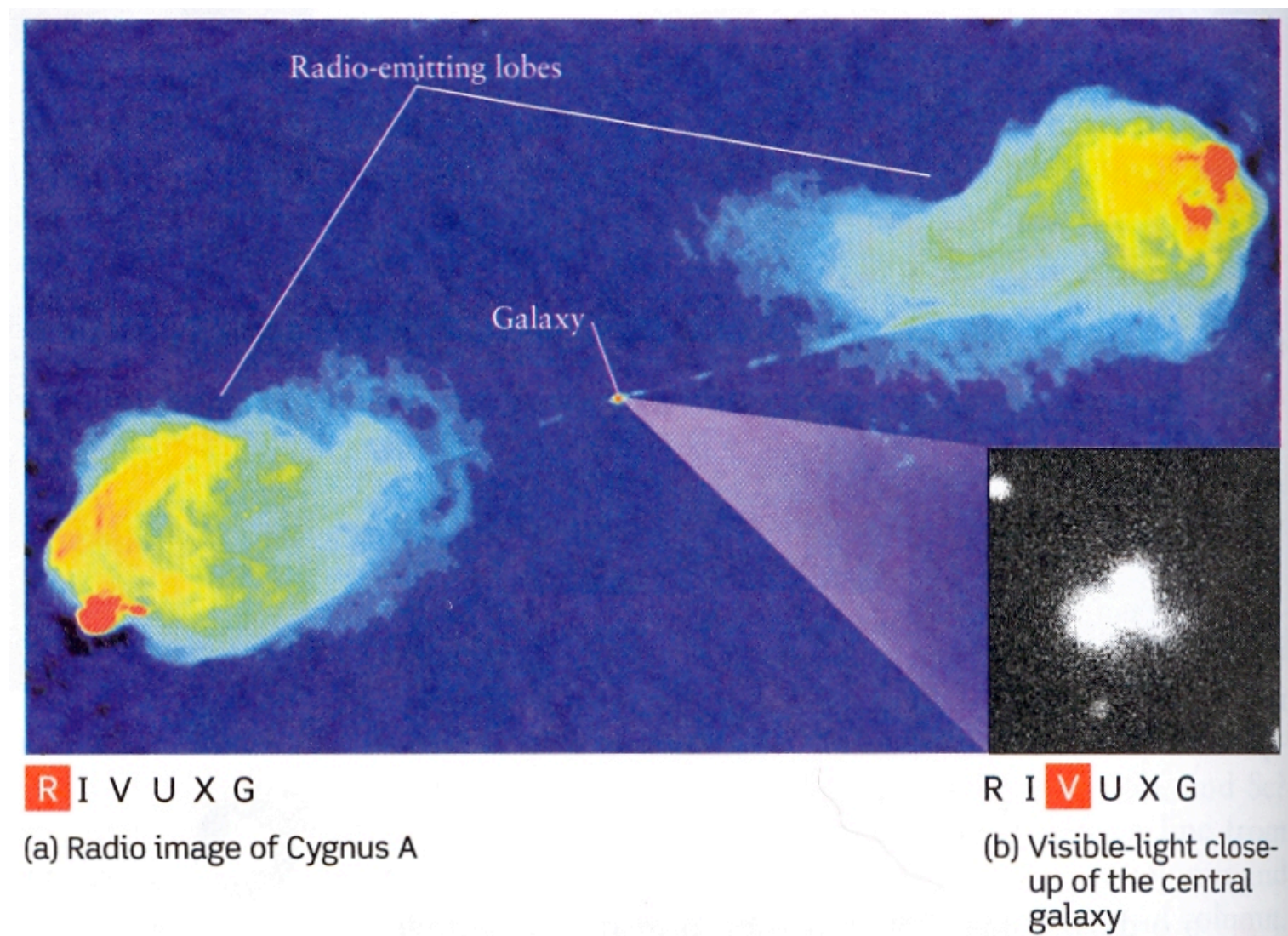
- $H_0$  è importante perché esprime il **tasso di crescita** dell'universo
- $H_0$  permette di stimare l'**età** dell'universo ( $1/H_0$ )
- misurando  $z$ , si può conoscere la **distanza** di una galassia
- grazie a HST, si conosce  $H_0$  con un incertezza di 10%





# Quasar

- Quasar = Quasi Stellar Radio Source
- Emissioni radio molto potenti
- Alto redshift



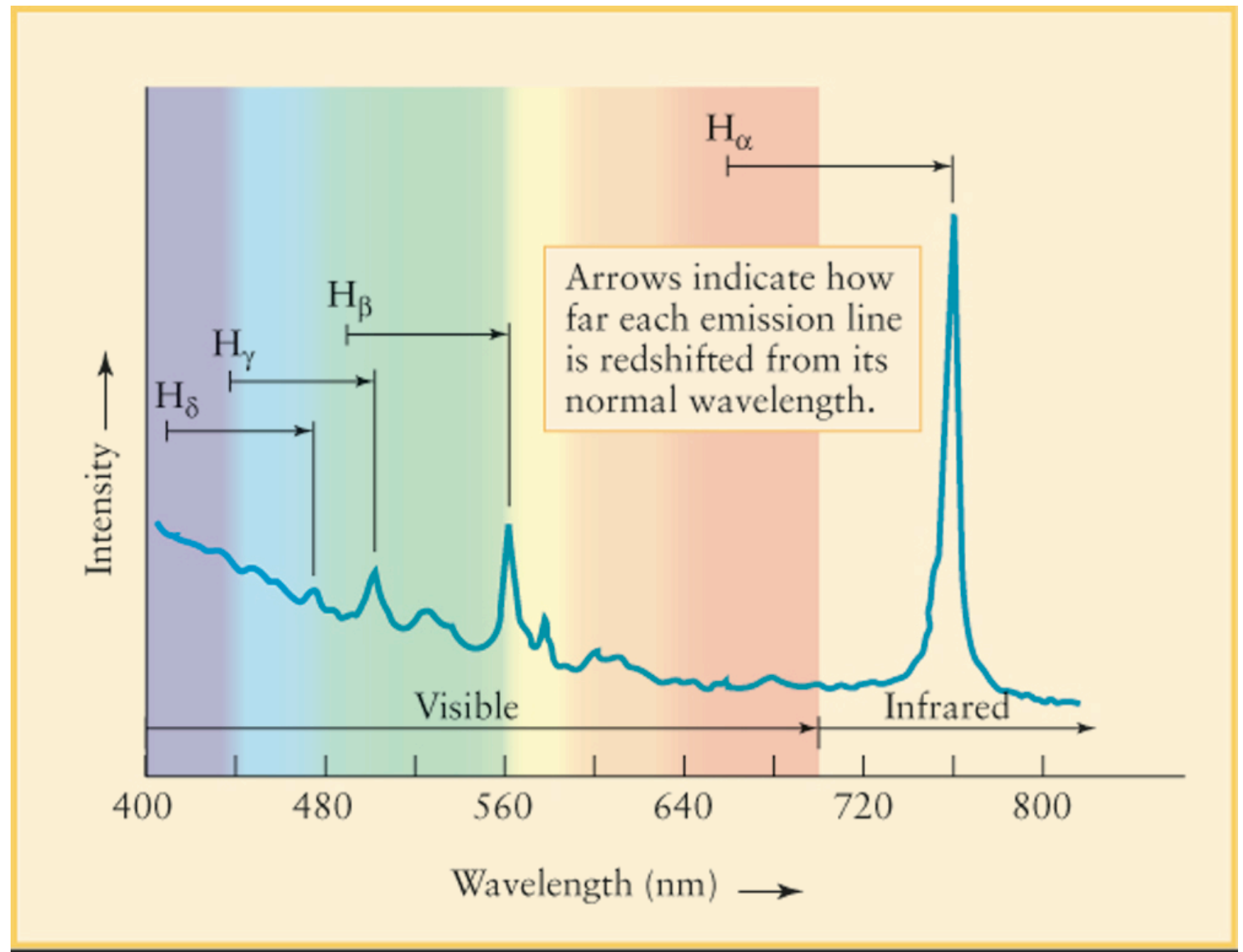
# Spettri di quasar

- 3C 273:  $z=0.158$

- $v = 44'000 \text{ km/s}$   
 $= 0.15 c \Rightarrow$

Si trova all'esterno  
della nostra galassia

- Secondo  $v = H_0 d$   
la distanza è 630  
Mpc ( $2 \cdot 10^9$  a.l.)





# Relazione redshift - distanza

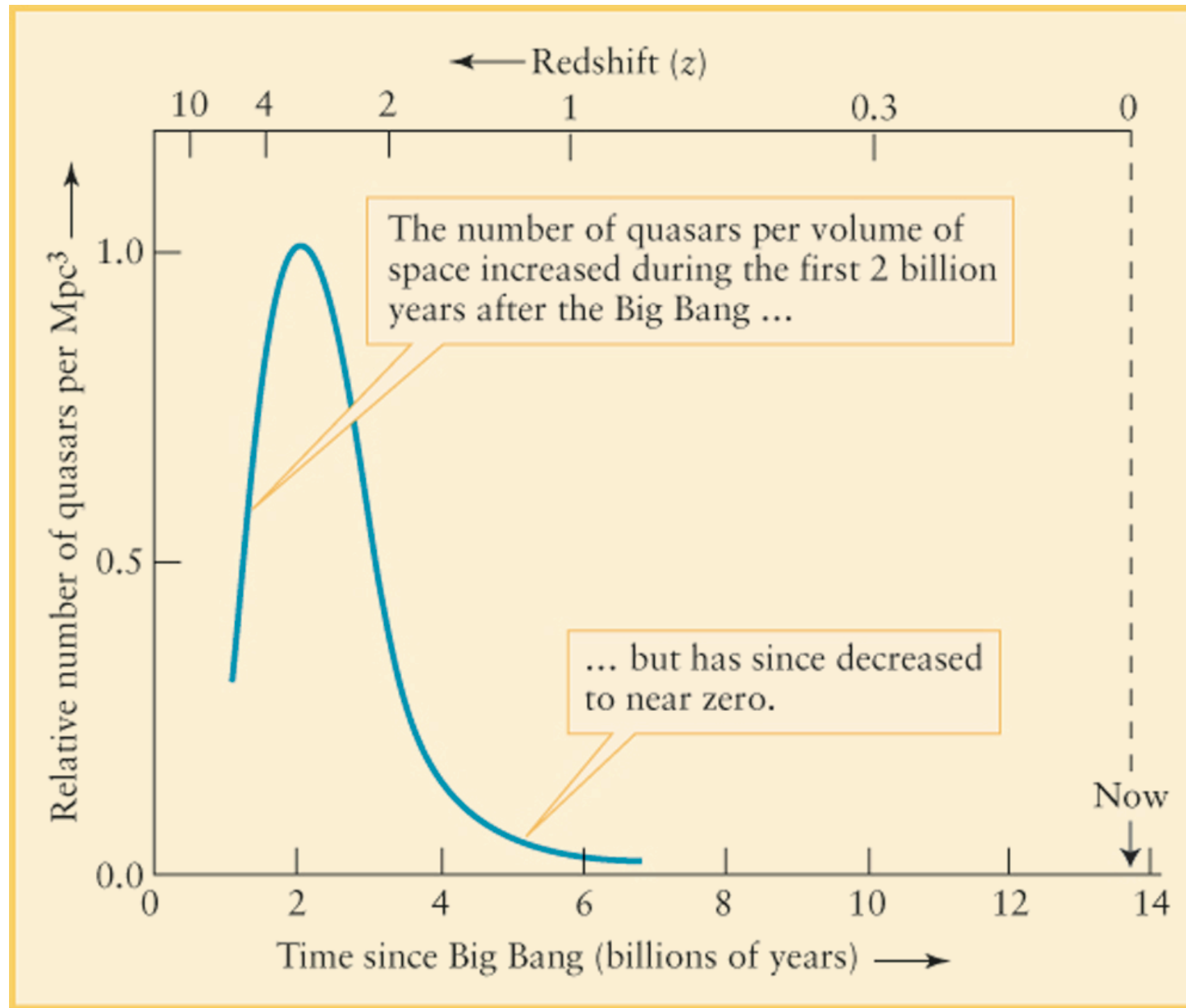


**Table 25-1 Redshift and Distance**

| Redshift<br>$z$ | Recessional<br>velocity<br>$v/c$ | Distance at which we<br>see the object |              | Present distance to<br>the object<br>(comoving radial distance) |              |
|-----------------|----------------------------------|----------------------------------------|--------------|-----------------------------------------------------------------|--------------|
|                 |                                  | (Mpc)                                  | ( $10^9$ ly) | (Mpc)                                                           | ( $10^9$ ly) |
| 0               | 0                                | 0                                      | 0            | 0                                                               | 0            |
| 0.1             | 0.095                            | 384                                    | 1.25         | 403                                                             | 1.32         |
| 0.2             | 0.180                            | 721                                    | 2.35         | 790                                                             | 2.58         |
| 0.3             | 0.257                            | 1020                                   | 3.32         | 1160                                                            | 3.79         |
| 0.4             | 0.324                            | 1280                                   | 4.17         | 1510                                                            | 4.94         |
| 0.5             | 0.385                            | 1510                                   | 4.93         | 1850                                                            | 6.04         |
| 0.75            | 0.508                            | 2070                                   | 6.48         | 2620                                                            | 8.54         |
| 1               | 0.600                            | 2350                                   | 7.65         | 3290                                                            | 10.7         |
| 1.5             | 0.724                            | 2840                                   | 9.26         | 4390                                                            | 14.3         |
| 2               | 0.800                            | 3160                                   | 10.3         | 5250                                                            | 17.1         |
| 3               | 0.882                            | 3520                                   | 11.5         | 6500                                                            | 21.2         |
| 4               | 0.923                            | 3710                                   | 12.1         | 7370                                                            | 24.0         |
| 5               | 0.946                            | 3830                                   | 12.5         | 8010                                                            | 26.1         |
| 10              | 0.984                            | 4060                                   | 13.2         | 9790                                                            | 31.9         |
| Infinite        | 1                                | 4210                                   | 13.7         | 14500                                                           | 47.4         |

*This table assumes a Hubble constant  $H_0 = 73$  km/s/Mpc, a matter density parameter  $\Omega_m = 0.24$ , and a dark energy density parameter  $\Omega_\Lambda = 0.76$  (see Chapter 26). The distance at which we see the object (in light-years) is equal to the light travel time in years. The present distance to the object is the distance  $d$  to be used in the Hubble law,  $v = H_0 d$ .*

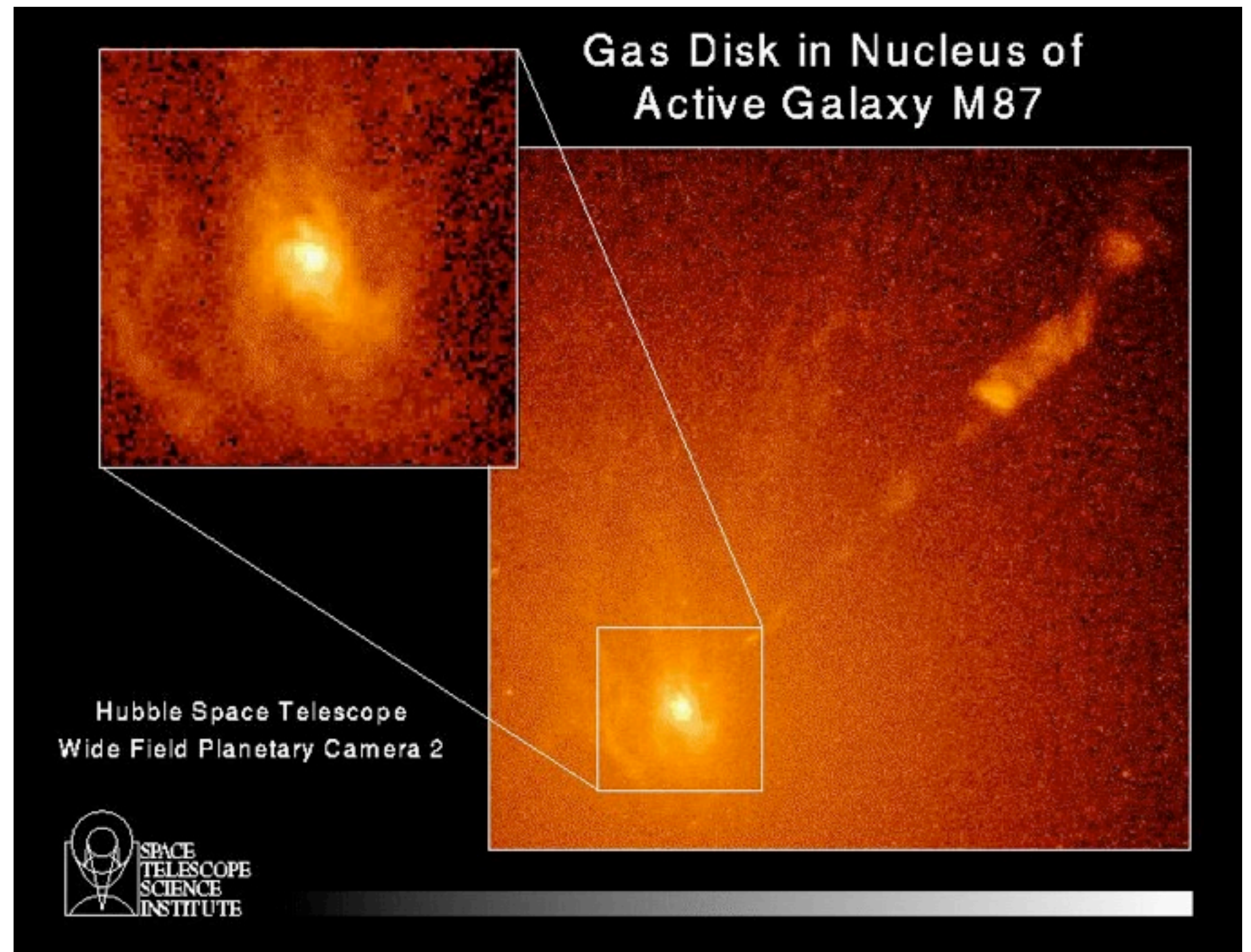
# Densità di quasar





# Il motore di un AGN è un buco nero

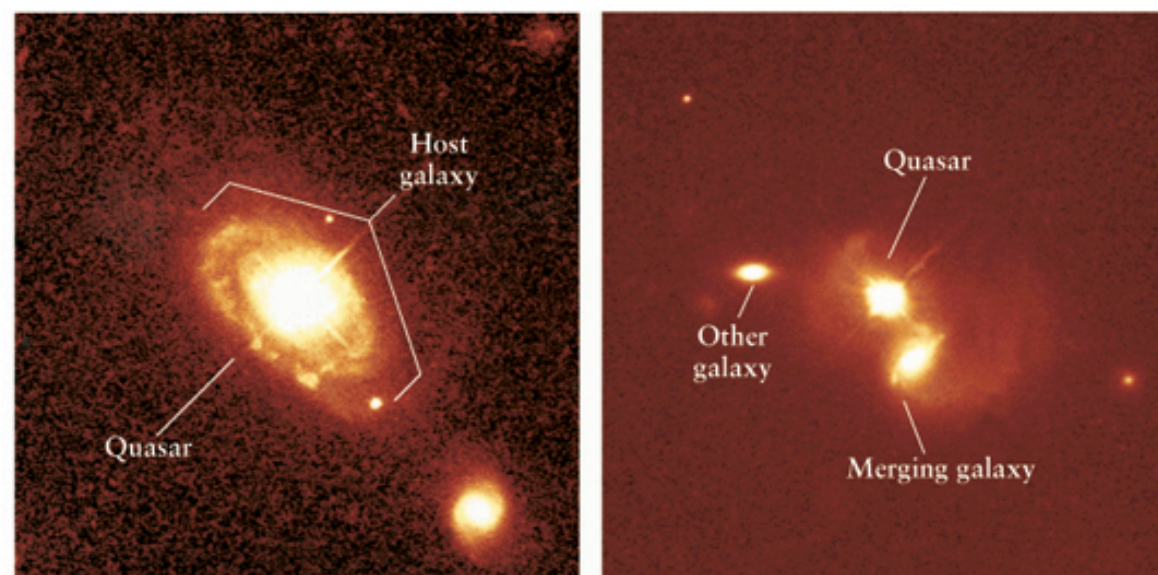
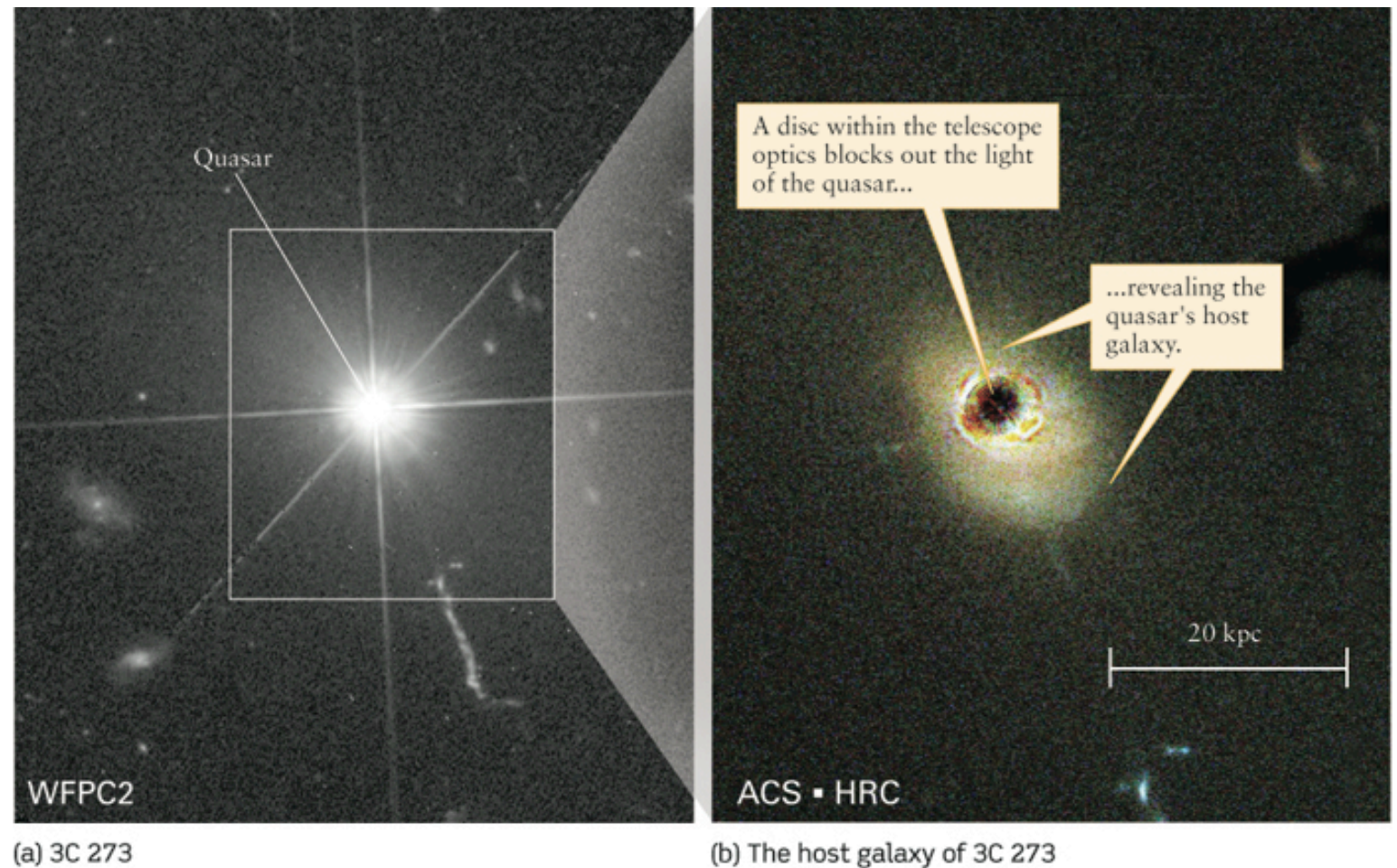
- Jet energetici
- Massa dedotta dalla cinematica
- Disco di accrescimento





# Limite di Eddington per l'accrescimento

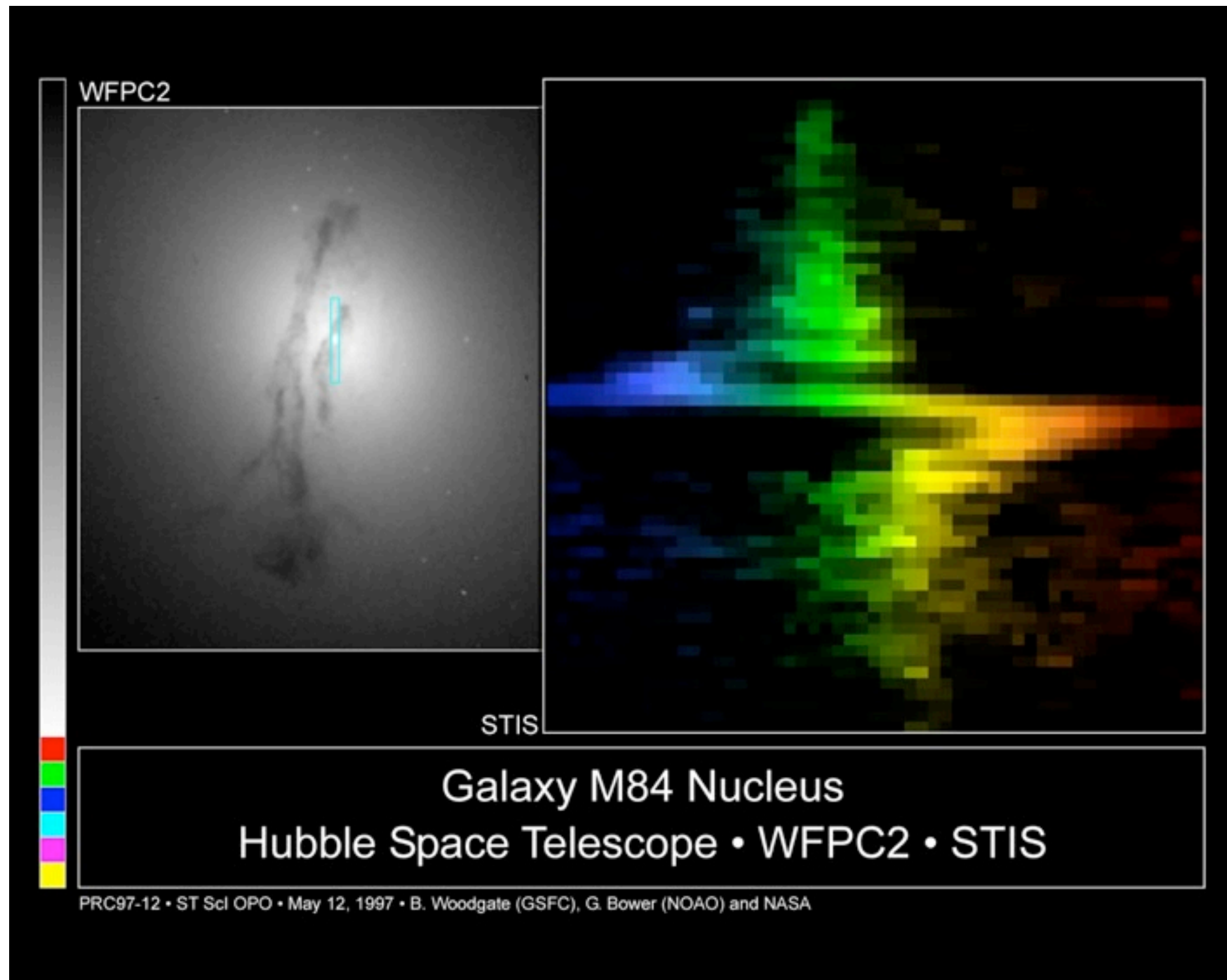
- Pressione di radiazione:  
 $L_{\text{Edd}} = 30'000 M_{\bullet} L_{\odot}/M_{\odot}$
- Luminosità di 3C 273 =  
 $3 \cdot 10^{13} L_{\odot} \Rightarrow M_{\bullet} = 10^9 M_{\odot}$





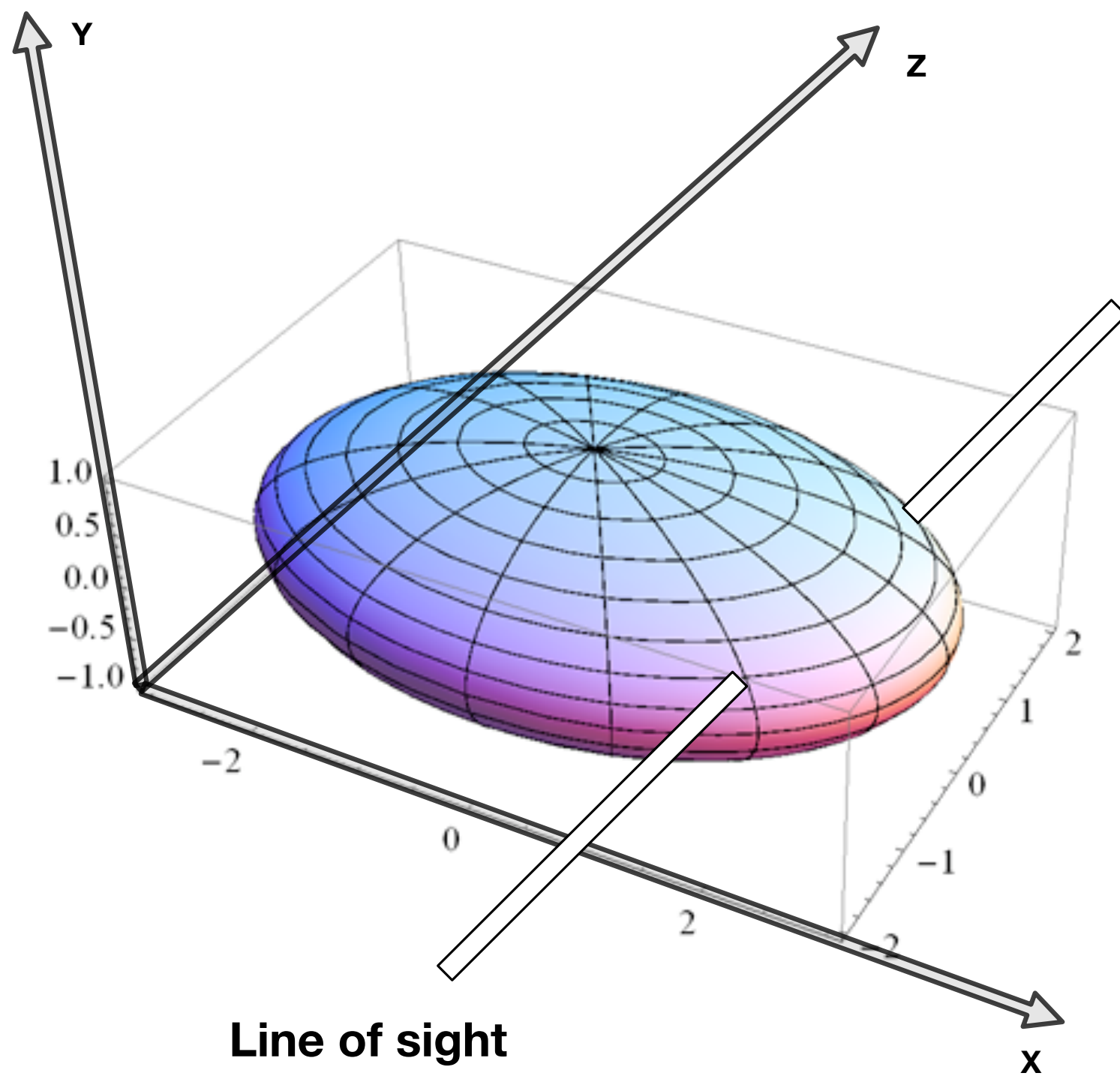
# Buchi neri in galassie “normali” (non attive)

---



# Spettroscopia “long slit”

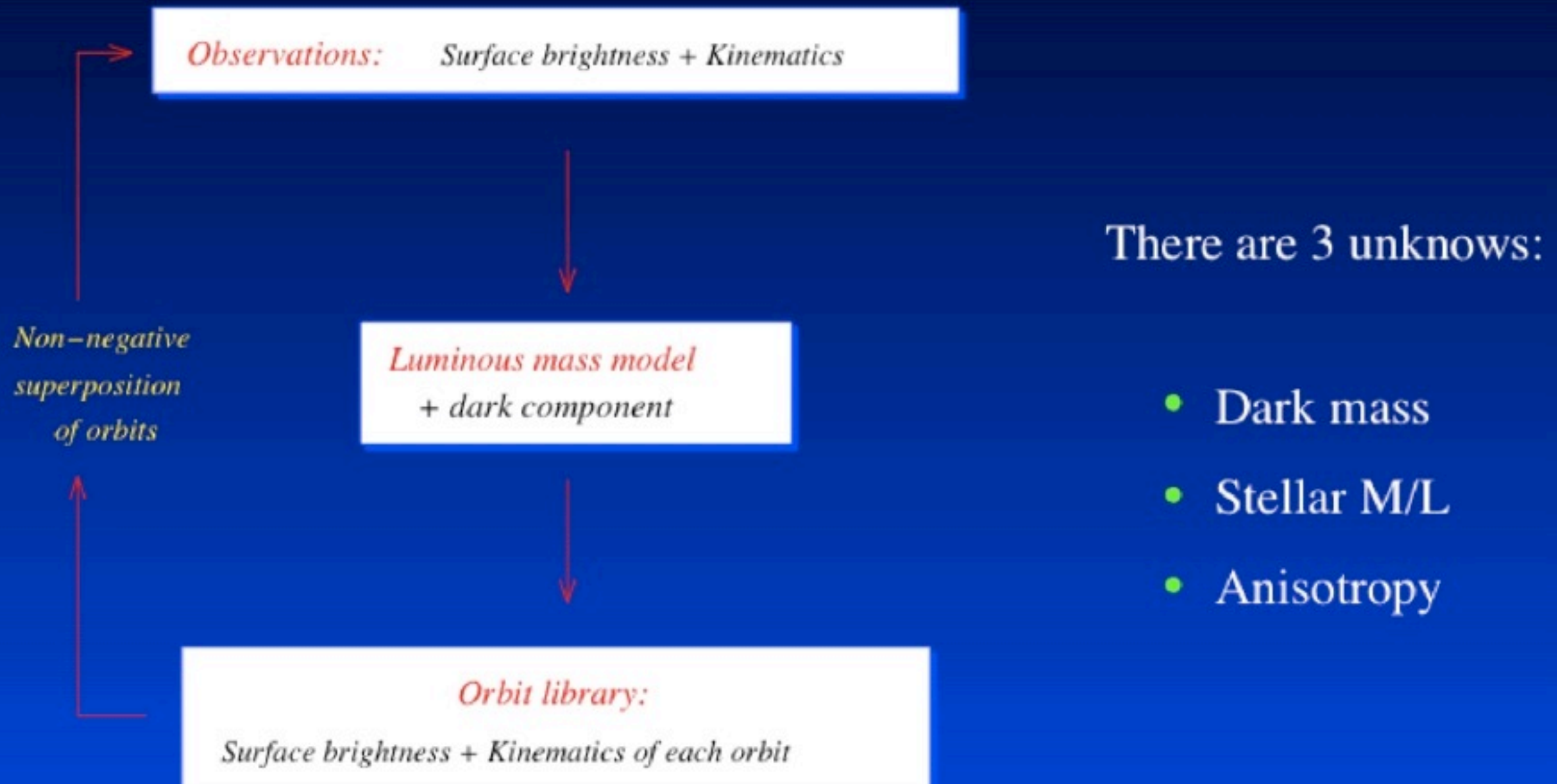
---





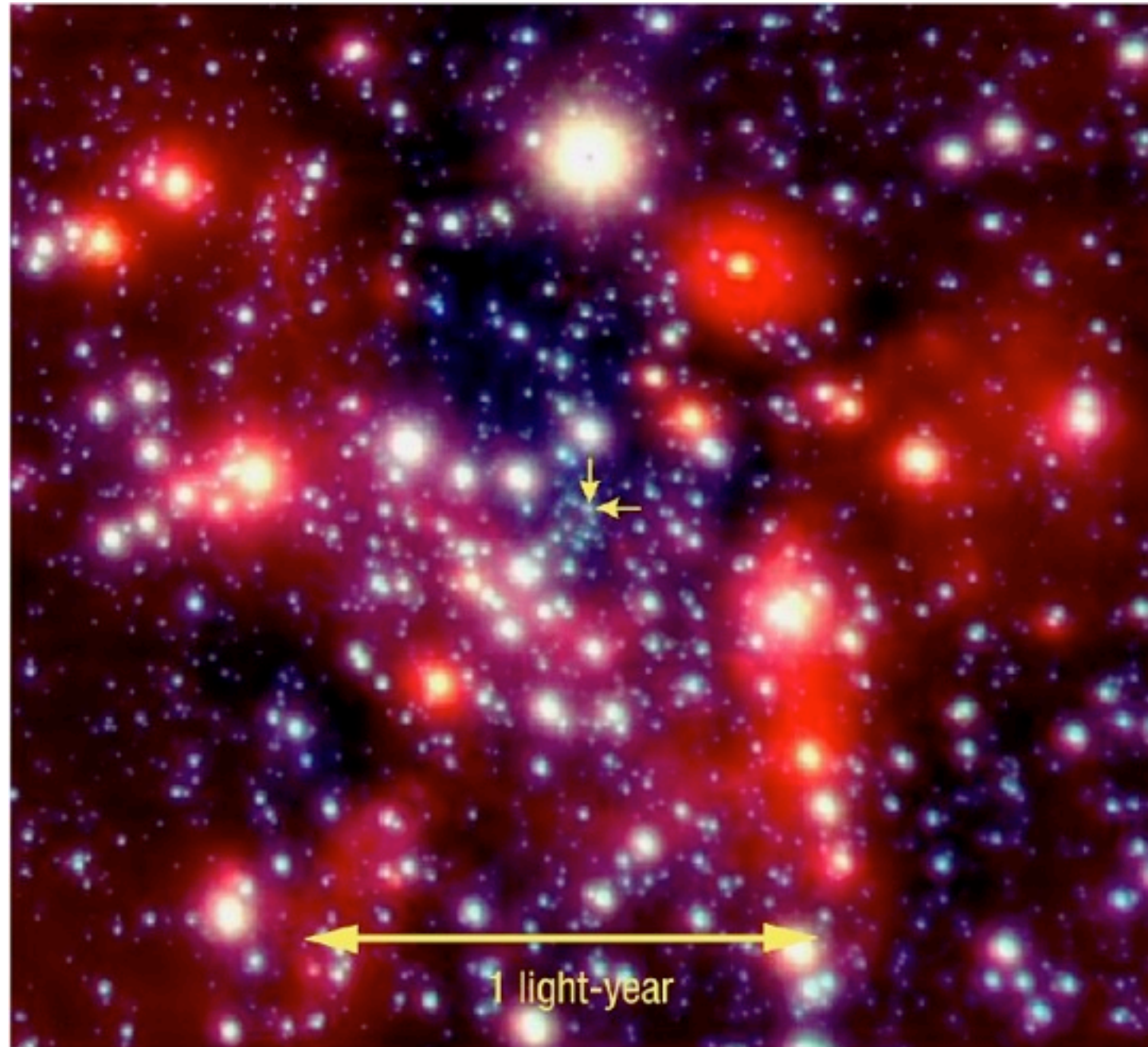
# Misurare la massa del buco nero

## *The Schwarzschild method*



# Buco nero al centro della Via Lattea

---



The Centre of the Milky Way  
(VLT YEPUN + NACO)

ESO PR Photo 23a/02 (9 October 2002)

© European Southern Observatory





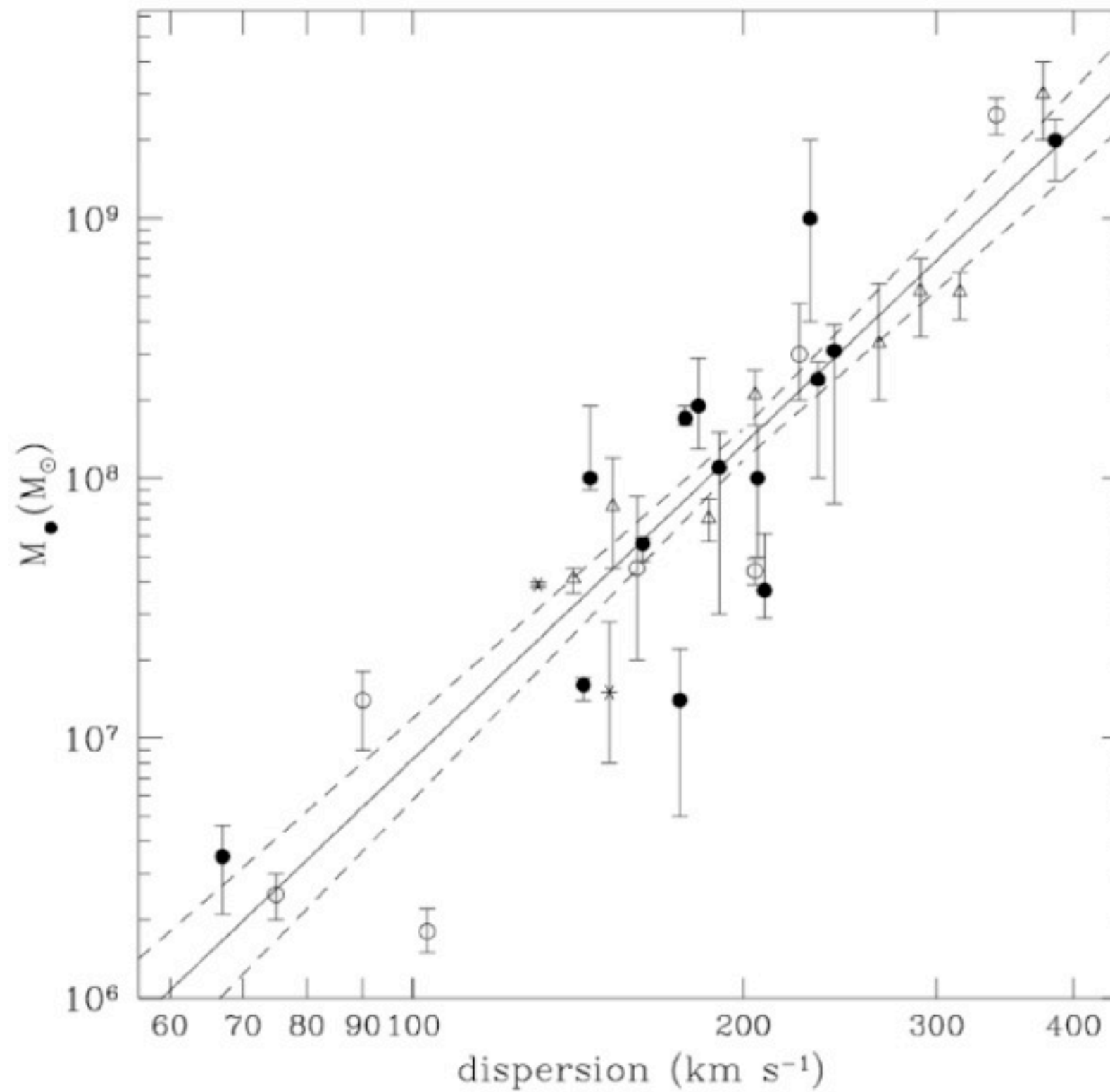
# La cena del buco nero al centro della Via Lattea

---



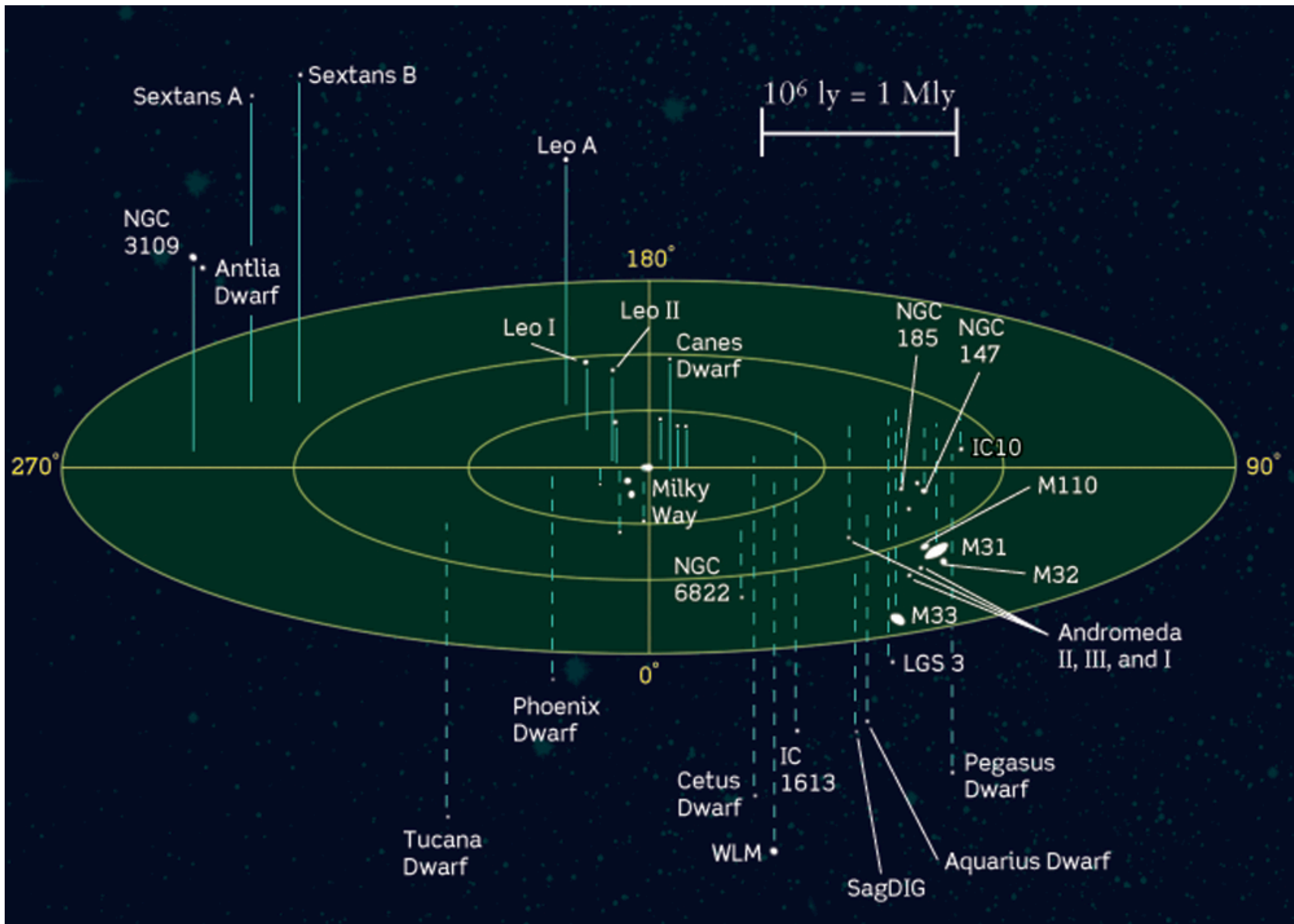
# Correlazione: buco nero - galassia

---





# Il gruppo locale



# Ammassi e super-ammassi di galassie

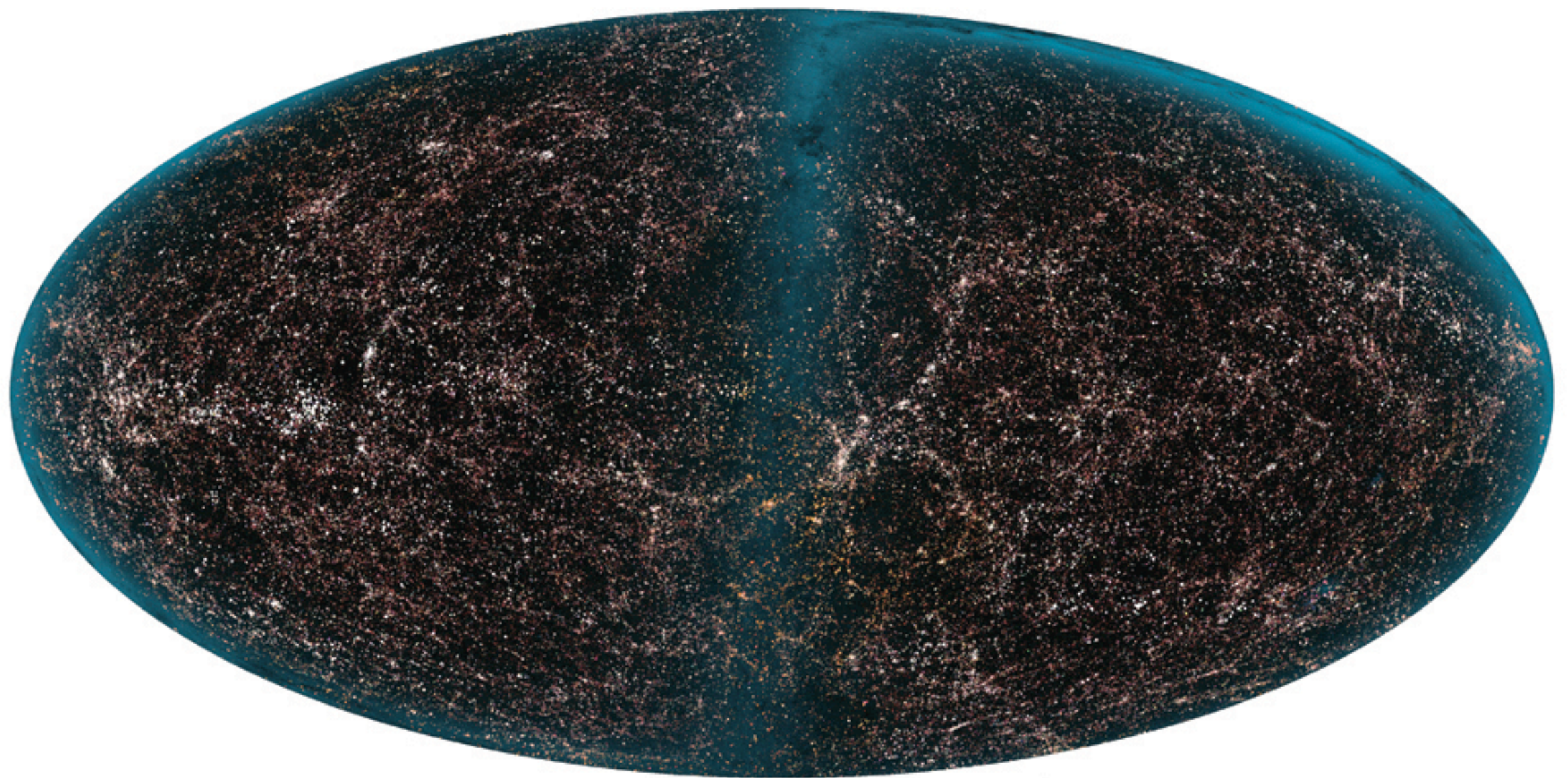
---





# Struttura a grande scala

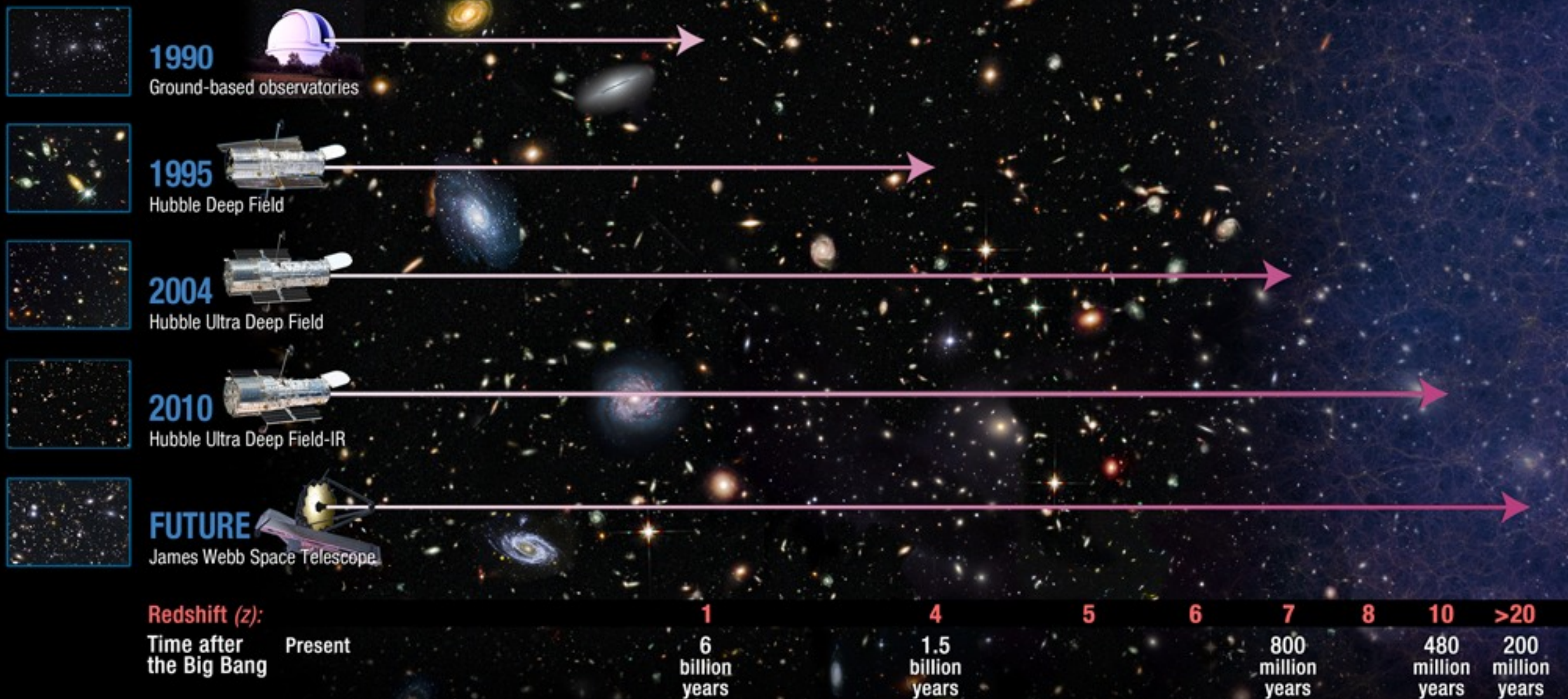
---





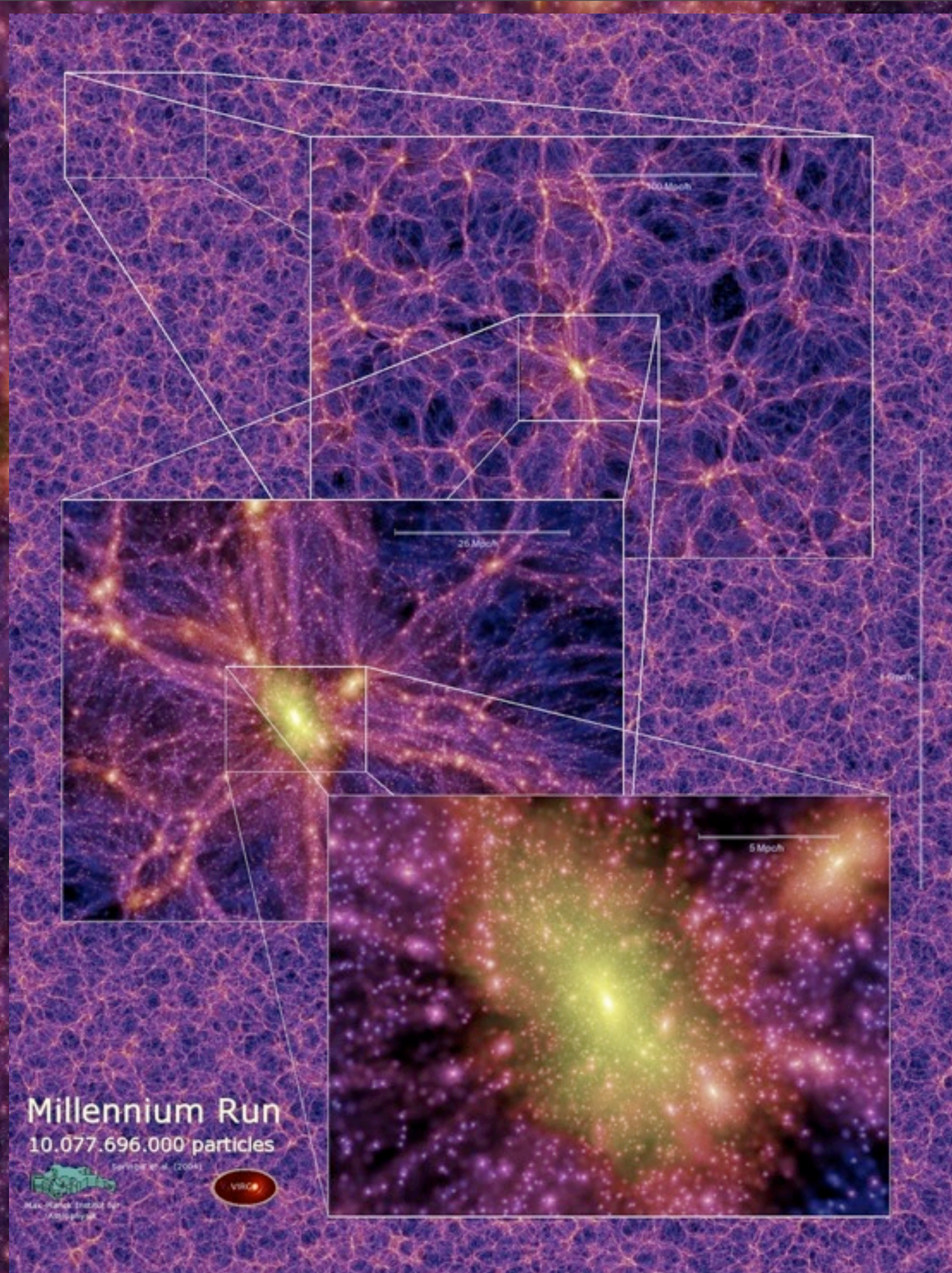
# Quanto vediamo dell'universo?

## Hubble Probes the Early Universe





# Strutture a grande scala simulazione numeriche





# Simulazioni con super-computer (CSCS)

---

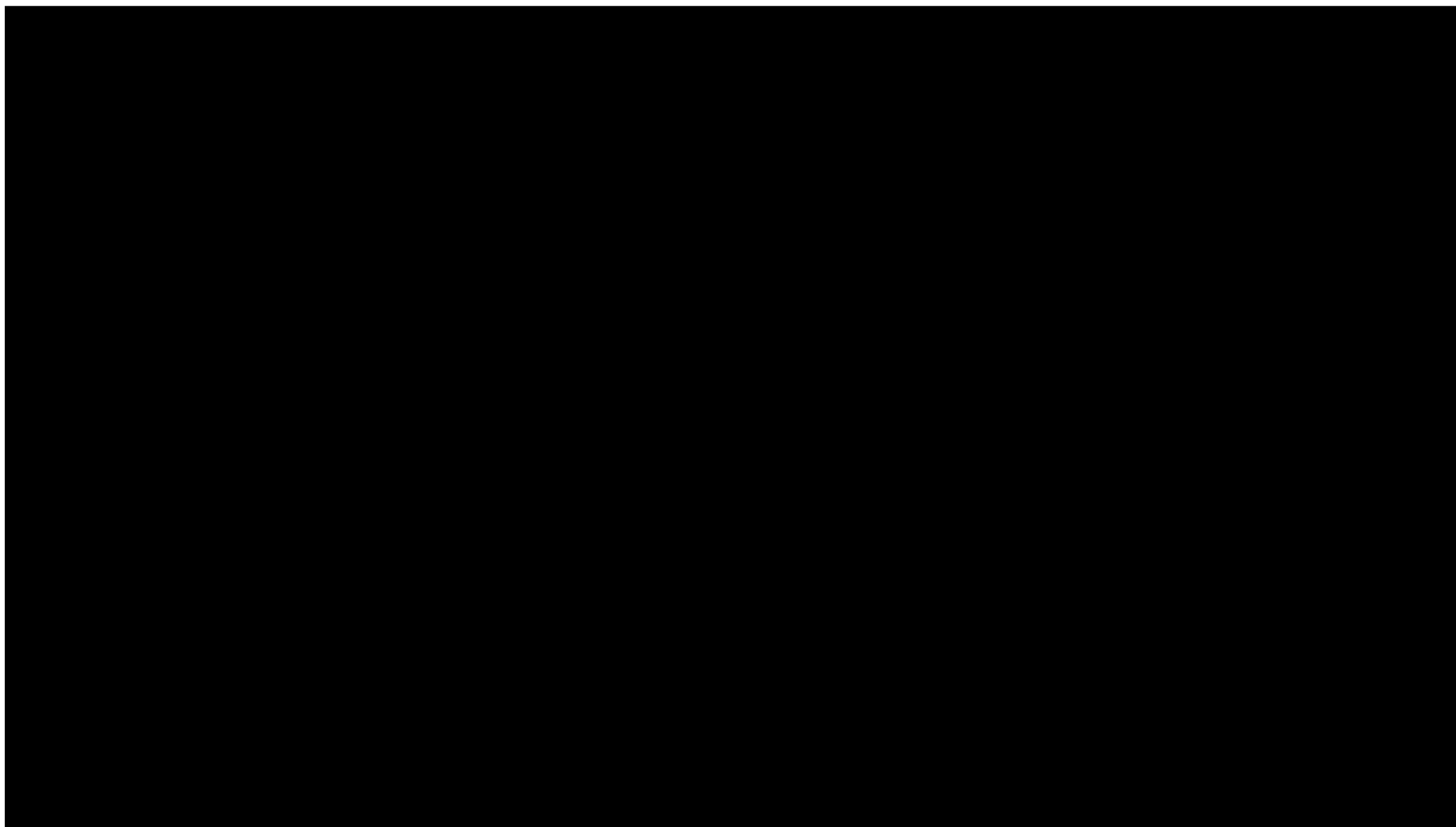


Javiera Guedes, Simone Callegari, Piero Madau, Lucio Mayer, Forming Realistic Late-Type Spirals in A CDM Universe



# Simulazioni con super-computer (CSCS)

---

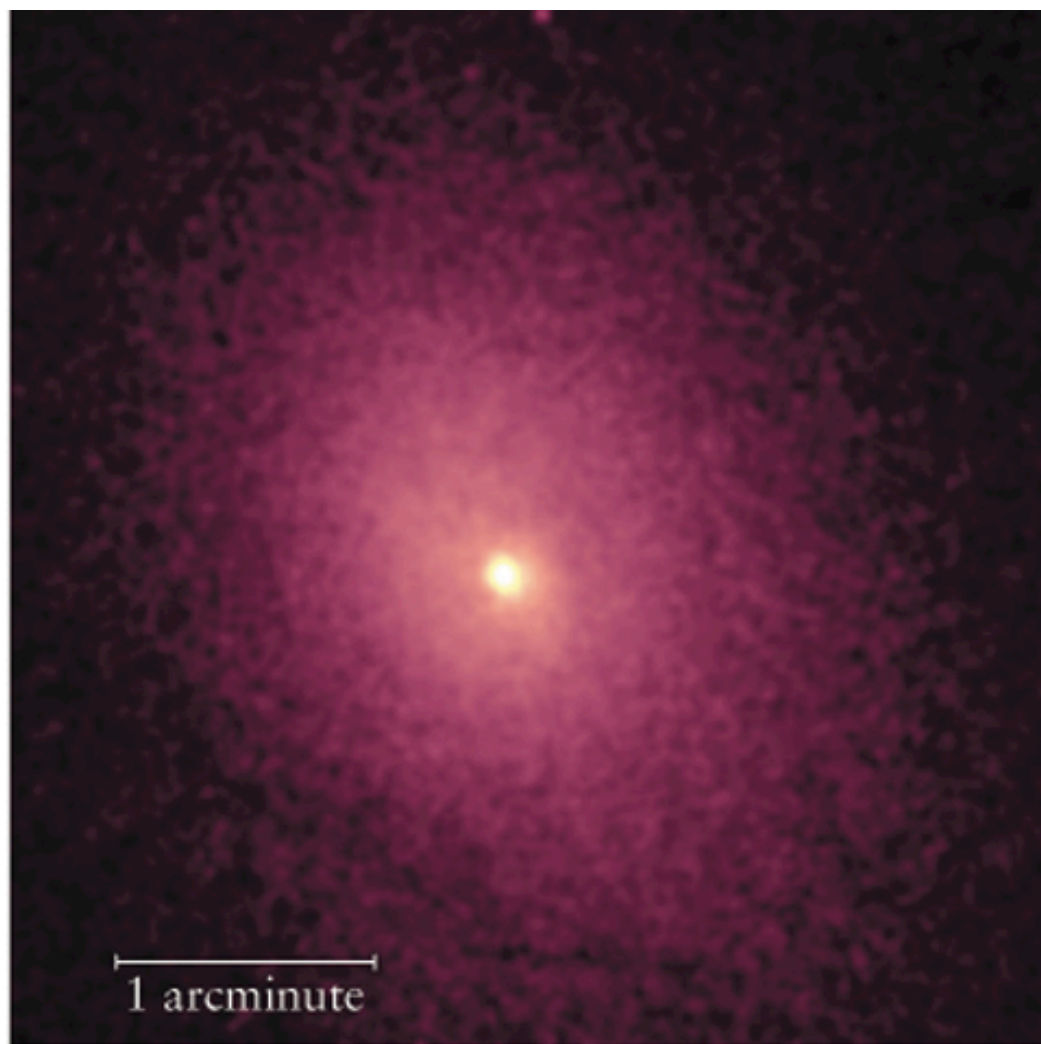


Javiera Guedes, Simone Callegari, Piero Madau, Lucio Mayer, Forming Realistic Late-Type Spirals in A CDM Universe

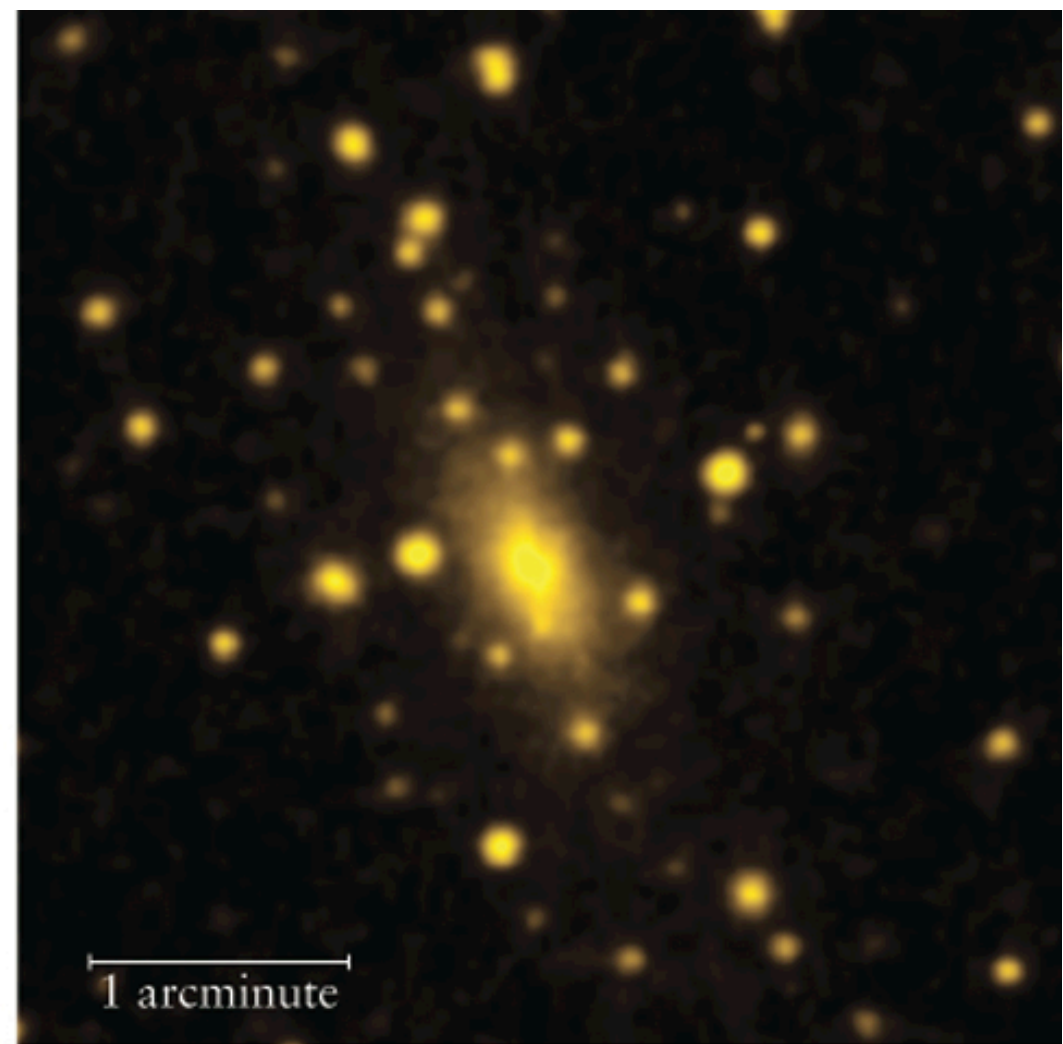
# Collisione di galassie

---

- gas bollente (visibile nei raggi X) negli ammassi dovuto a violenti collisioni



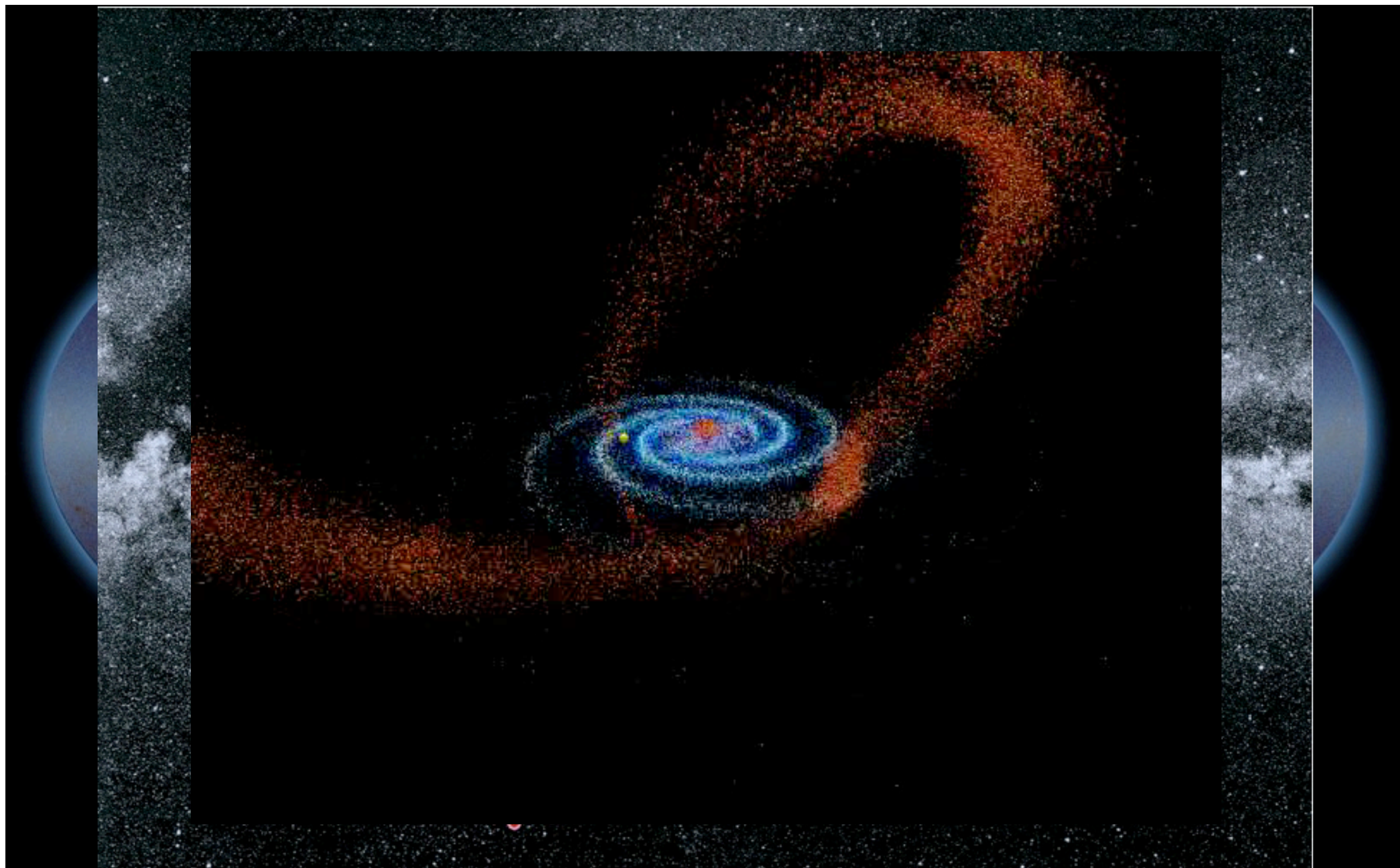
(a) An X-ray image of Abell 2029 shows emission from hot gas.



(b) A visible-light image of Abell 2029 shows the cluster's galaxies.



# Collisione della galassia Sagittarius con la nostra

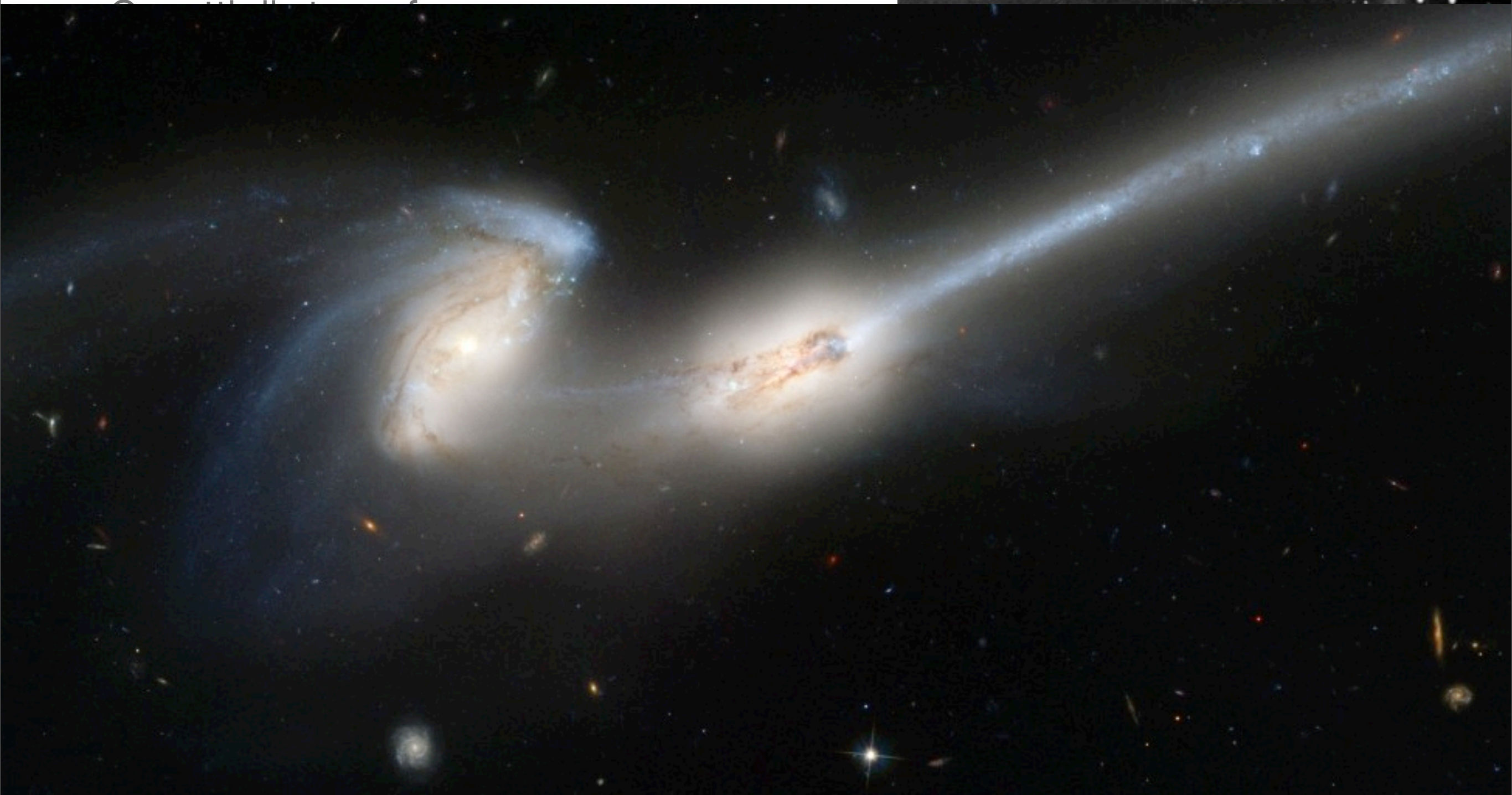




# Collisione di galassie

---

Primi calcoli al computer hanno fornito la soluzione.





# Galassie in interazione

---

Galaxies NGC 2207 and IC 2163



Hubble  
Heritage

NASA and The Hubble Heritage Team (STScI) • Hubble Space Telescope WFPC2 • STScI-PRC99-41

# Tracce di gas... testimoni di interazioni passate

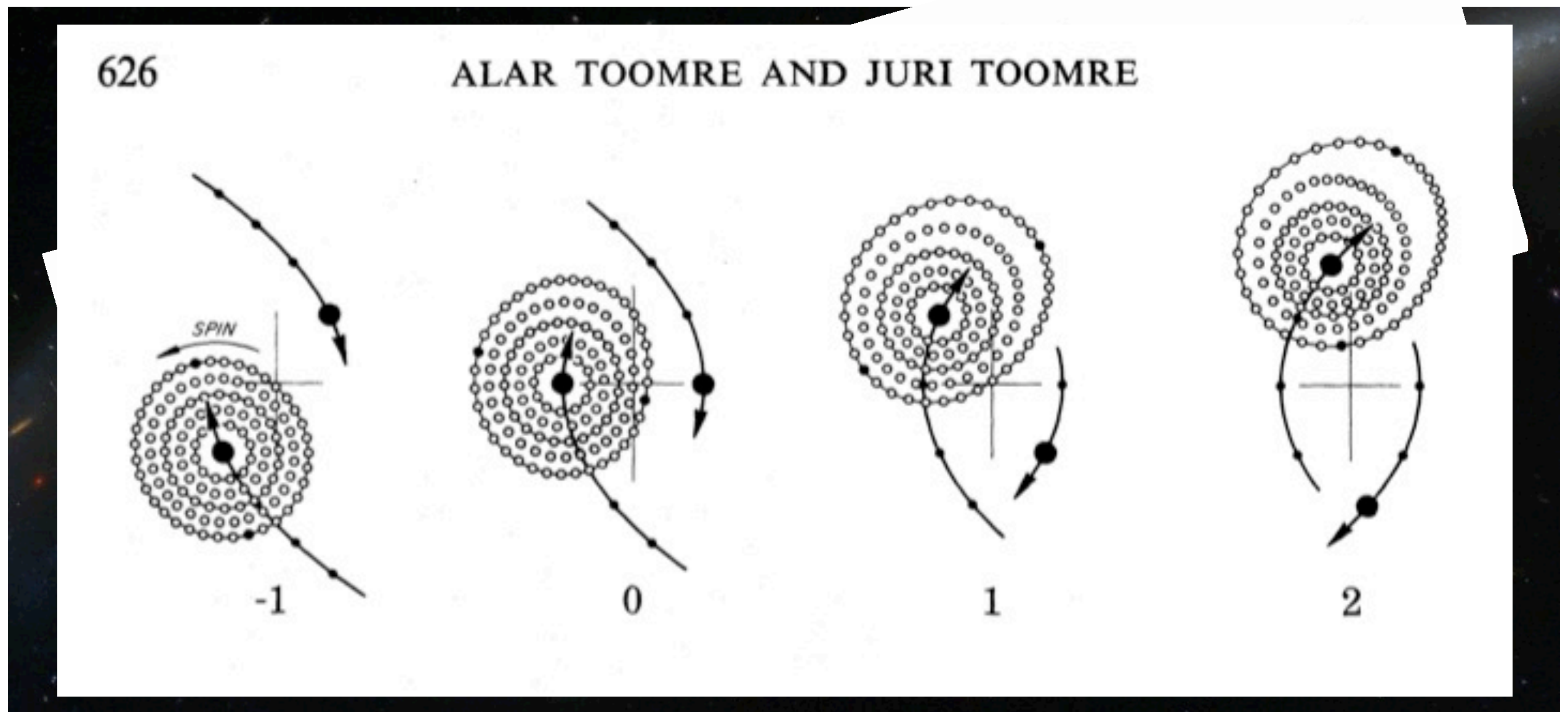
---





# Simulazioni numeriche

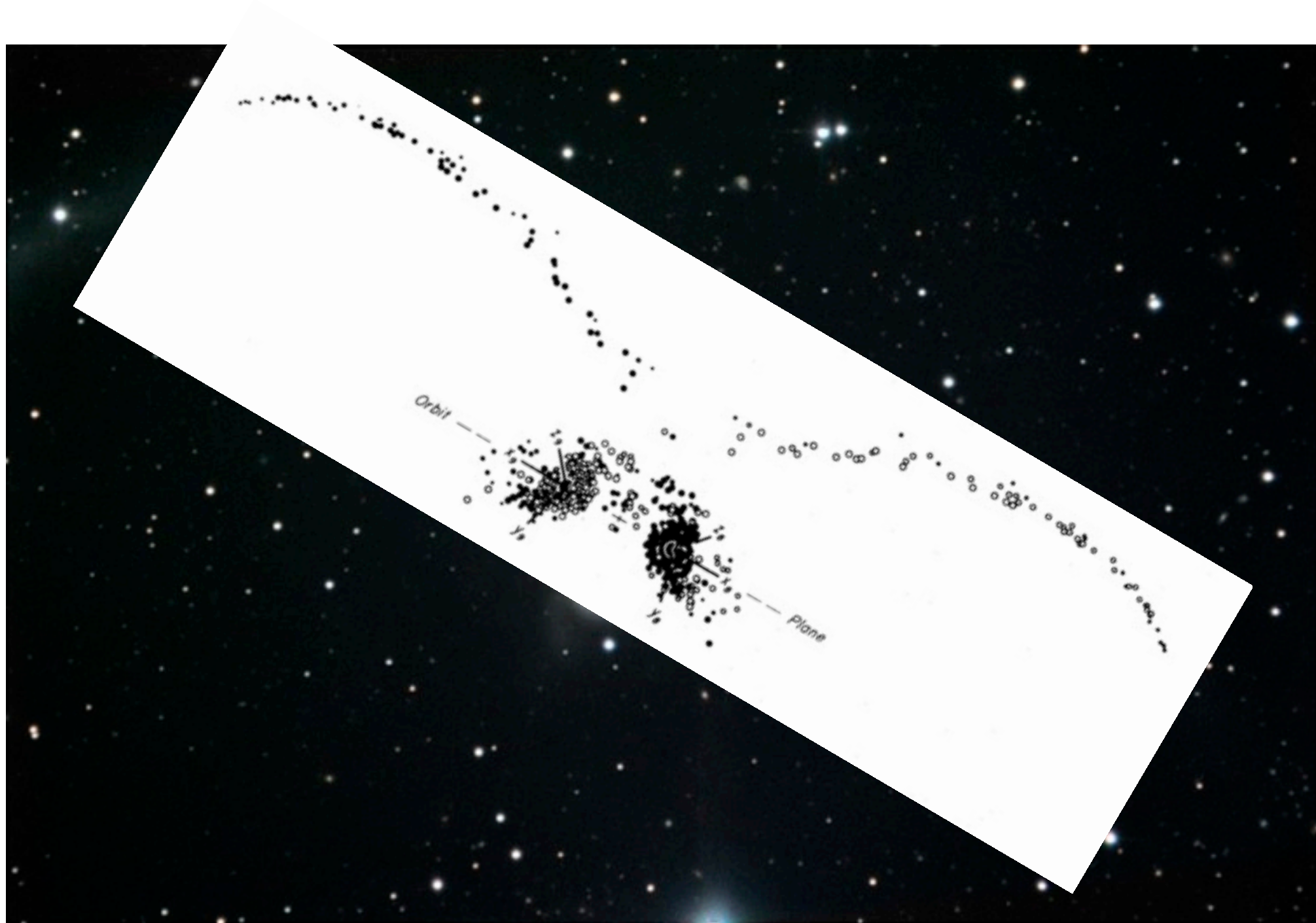
Prime simulazioni al computer, 1972, Alar Toomre (MIT) e Juri Toomre (NYU)



# Simulazioni numeriche

---

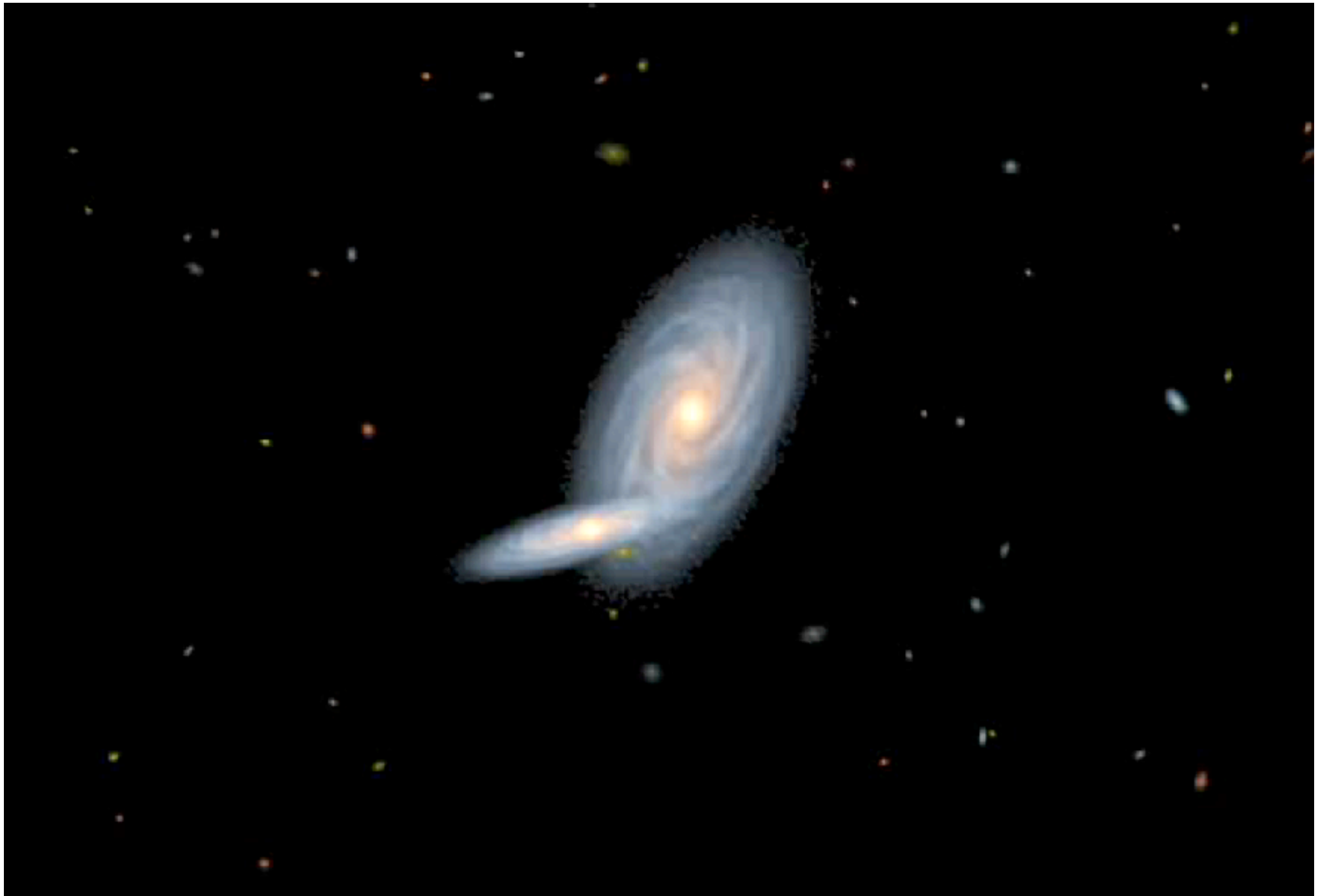
Le galassie delle “antenne”, NGC 4038-4039





# Simulazioni numeriche

---



# Paragone: simulazioni - vere galassie in interazione

---



# Collisione della Via Lattea con Andromeda

---

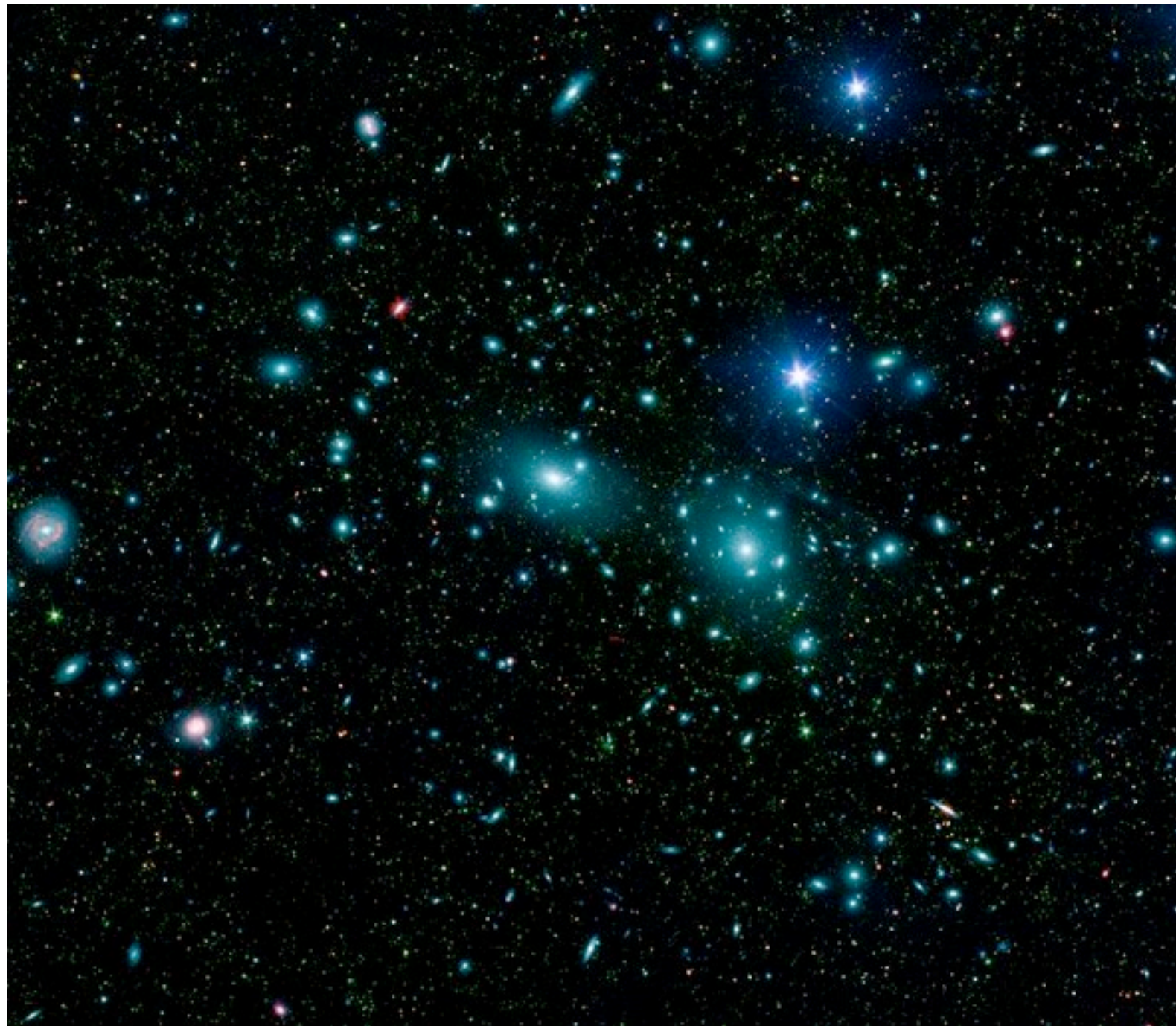


Future Sky

# Materia oscura: un po' di storia

---

Zwicky (1933). Ammasso di galassie "Coma": 400 x più massa che visibile



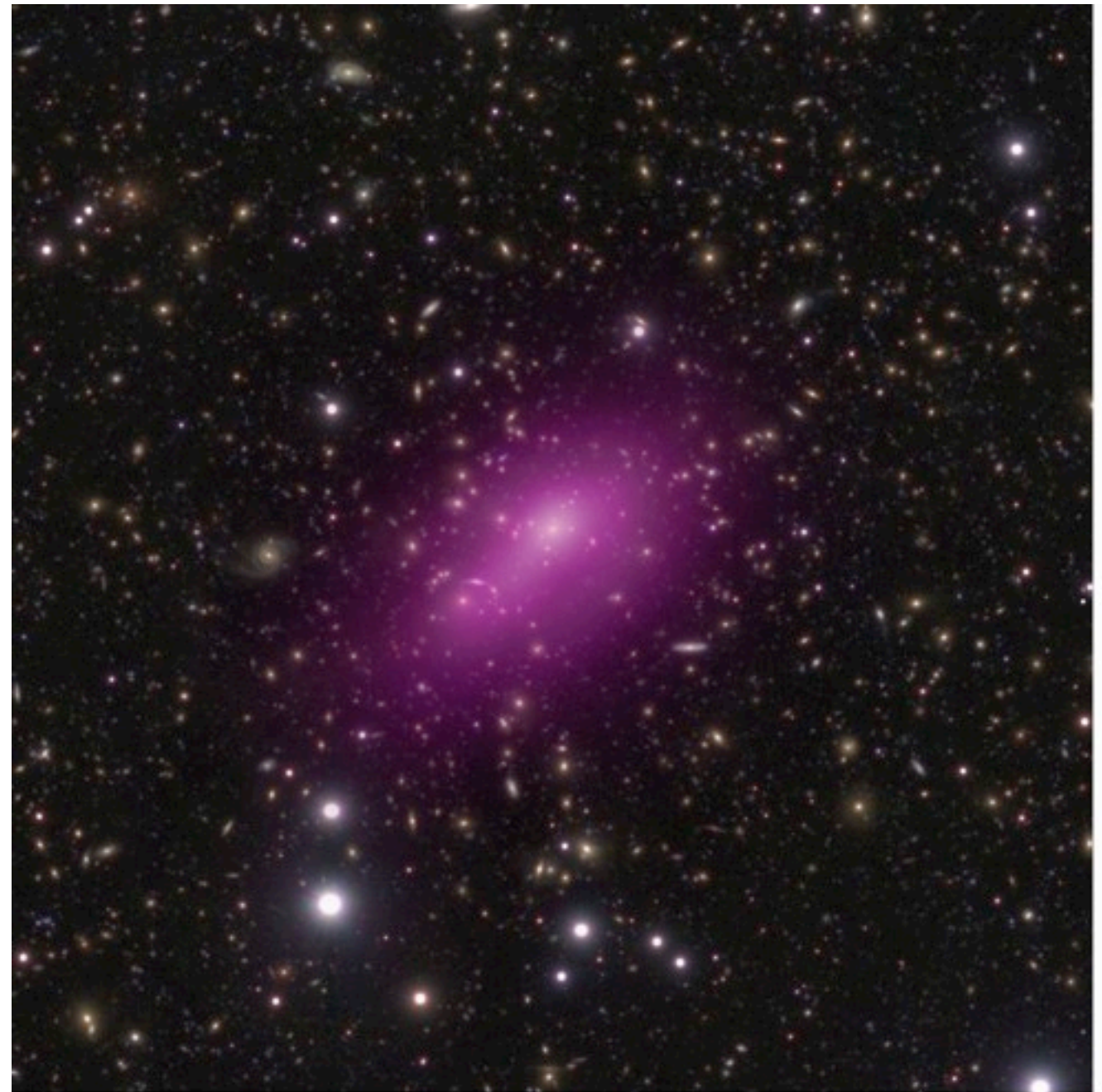


# Materia oscura

---

Parziale soluzione negli ammassi:

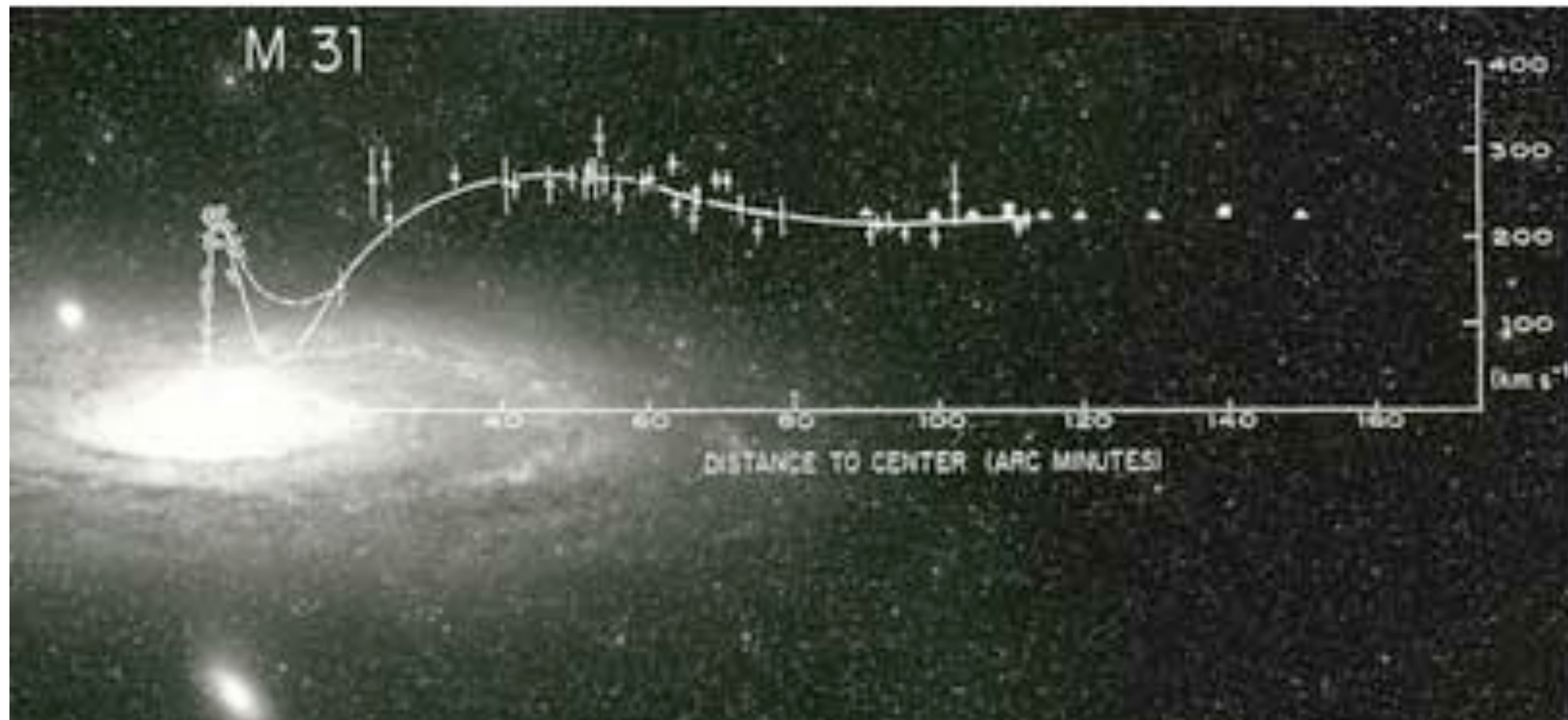
- Gas  $10^7 - 10^8$  K (raggi X) : 10% della massa totale
- Galassie: 5% della massa totale
- Materia oscura: tutto il resto (85%)



# Materia oscura: un po' di storia

---

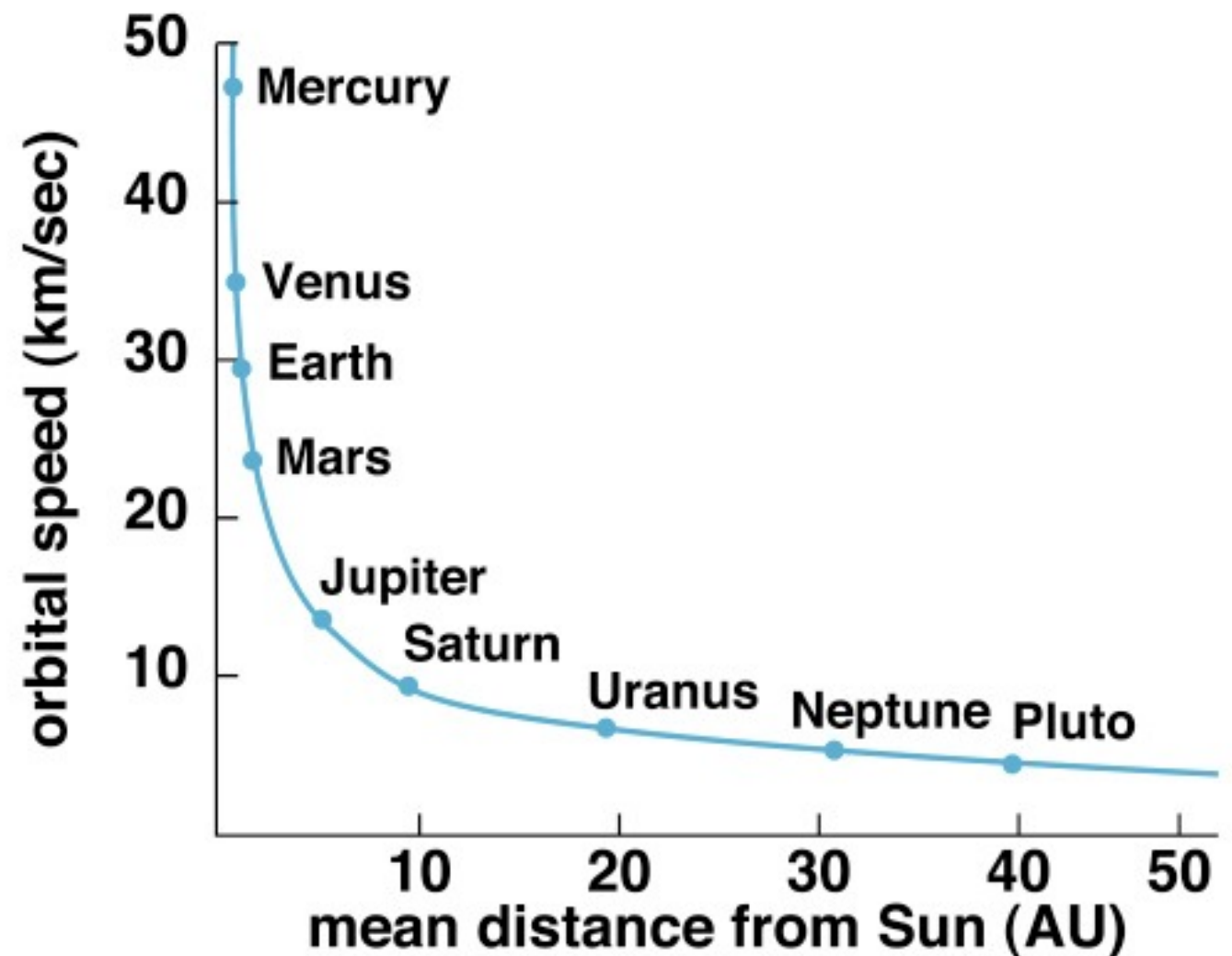
Rubin (1960). Rotazione di galassie spirale





# Materia oscura

- Per una massa **M** tutta concentrata al centro del sistema e una massa **m** di un corpo orbitando attorno:
  - $F_{\text{centripeta}} = F_{\text{gravità}}$
  - $mv^2 / R = G M m / R^2 \Rightarrow$   
 $v = \sqrt{GM/R} \sim 1 / \sqrt{R}$

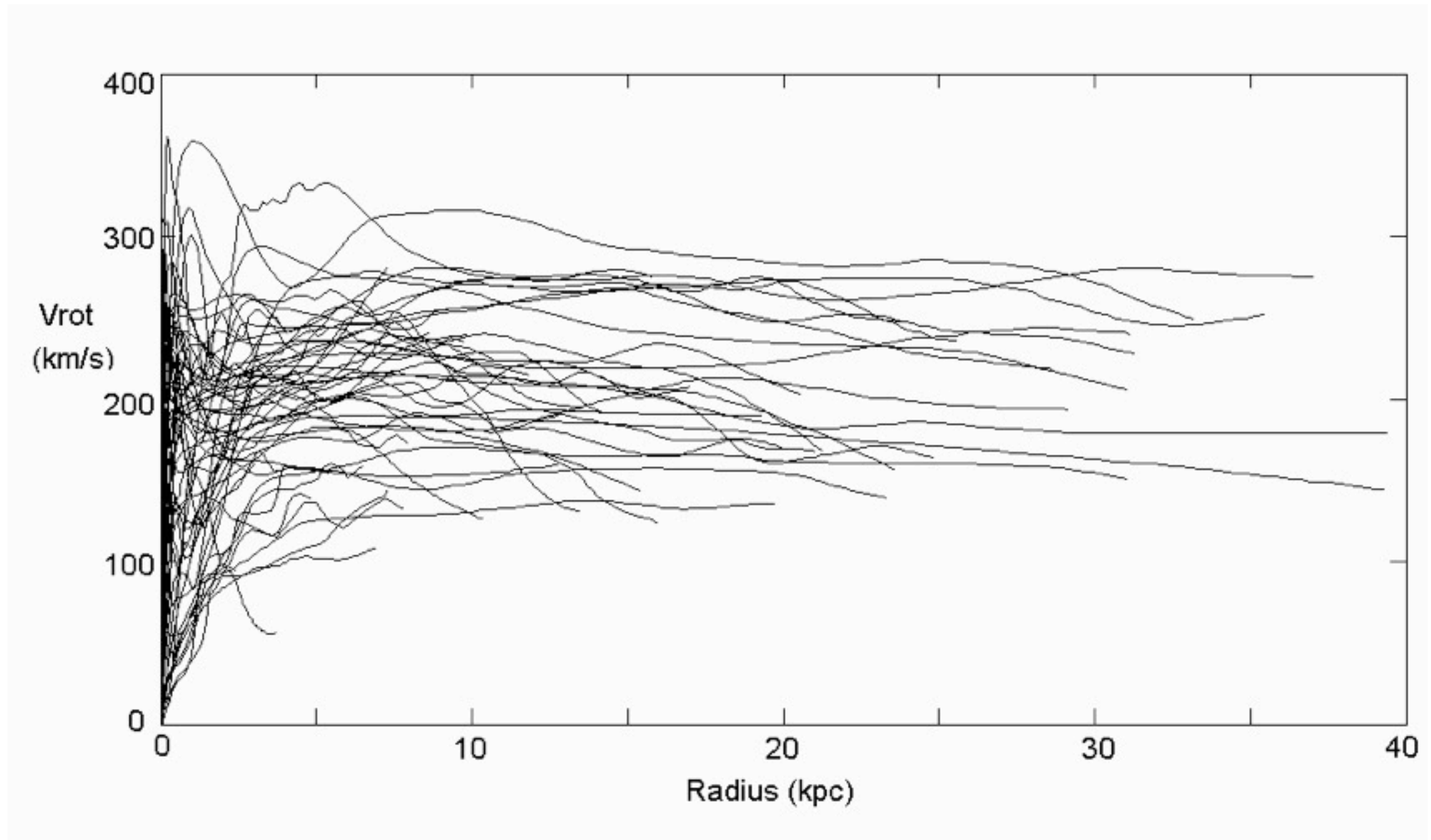


(b)

Copyright © Addison Wesley

# Materia oscura: misurare la velocità del gas

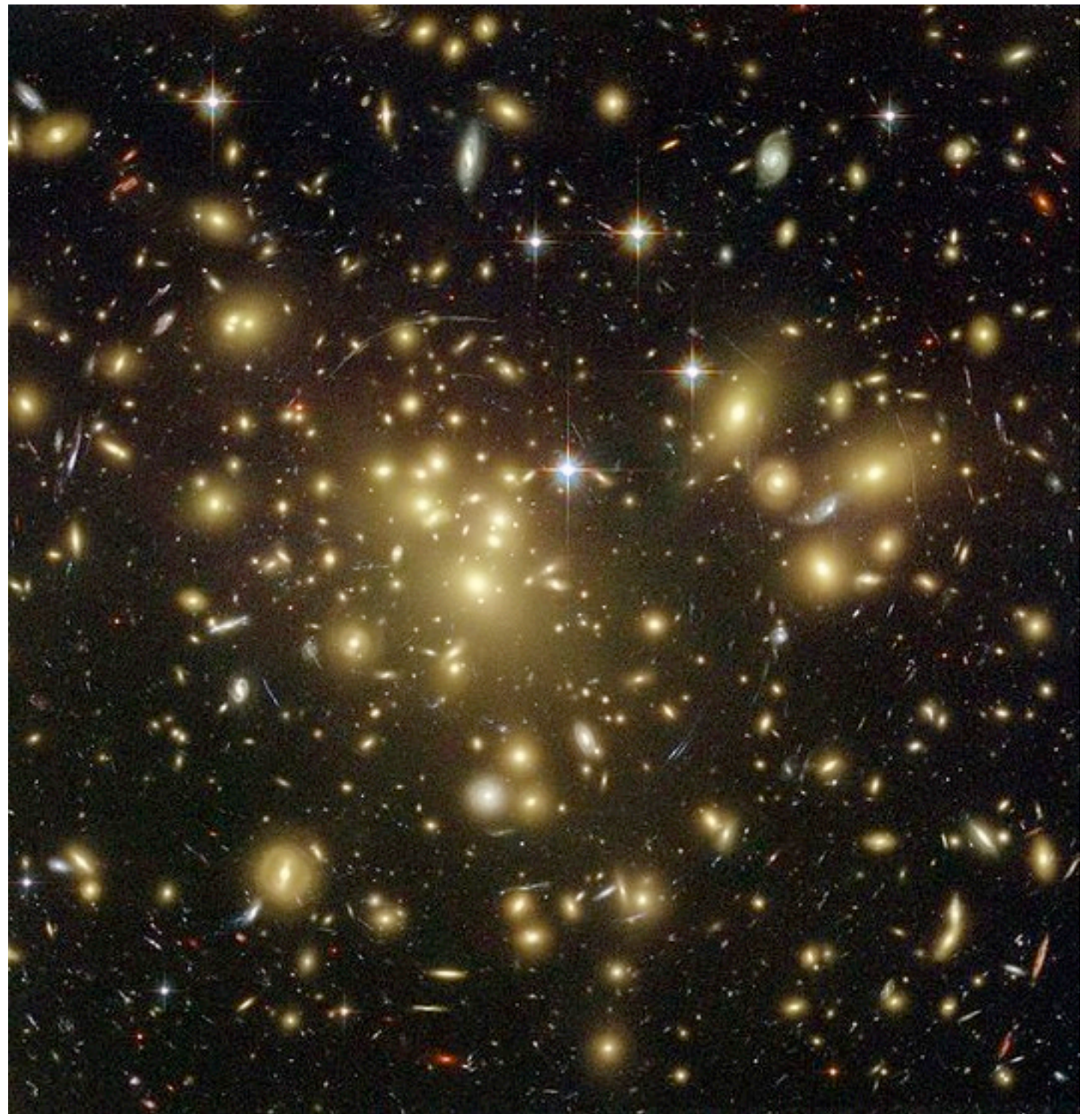
---





# Materia oscura: lente gravitazionale

- Punto chiave: La distorsione luminosa dipende solo dalla **massa gravitazionale**
- Ricostruzione della massa grav. a partire dall'immagine di lente grav.
- Massa totale (grav.) = massa luminosa + massa oscura

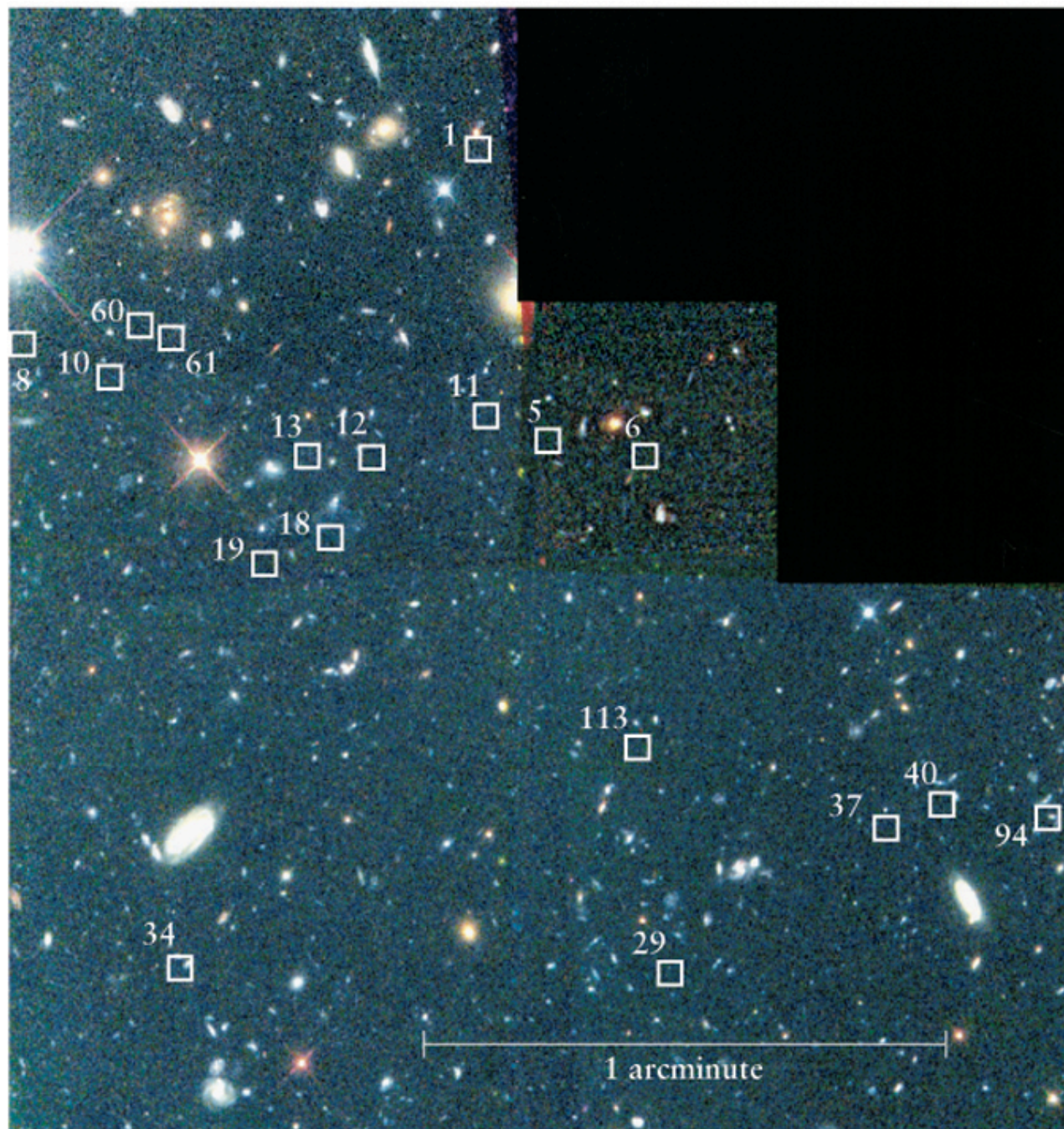


Amasso di galassie Abell 1689



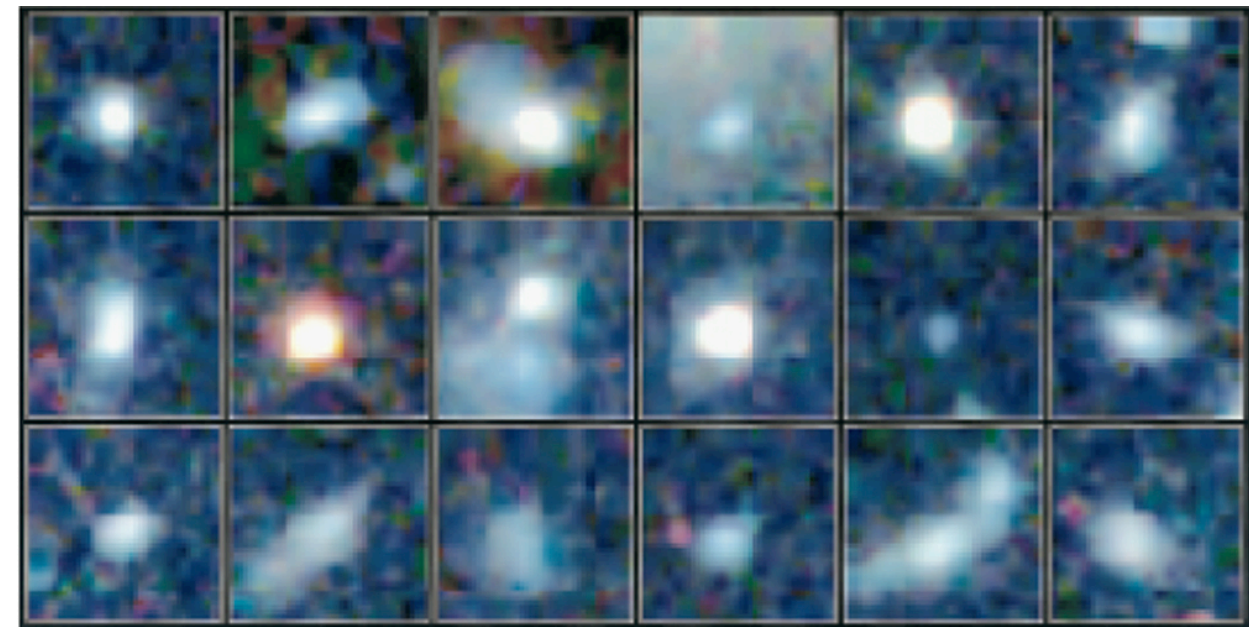
# Formazione delle galassie con fusione

- Scenario “Bottom up” = fusione di oggetti piccoli



(a) A portion of the constellation Hercules

- distanza = 3.5 Mpc (11 miliardi di anni-luce)
- diametro = 0.5 - 1 kpc
- Area = 600 kpc (meno della distanza a M31)

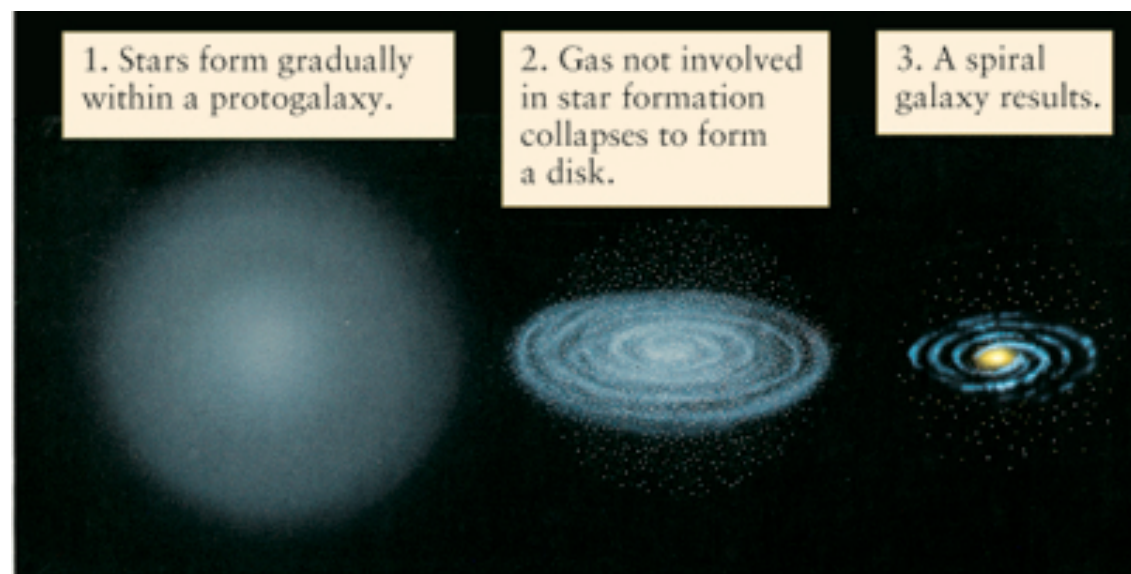


(b) Closeup images of the numbered objects in (a)

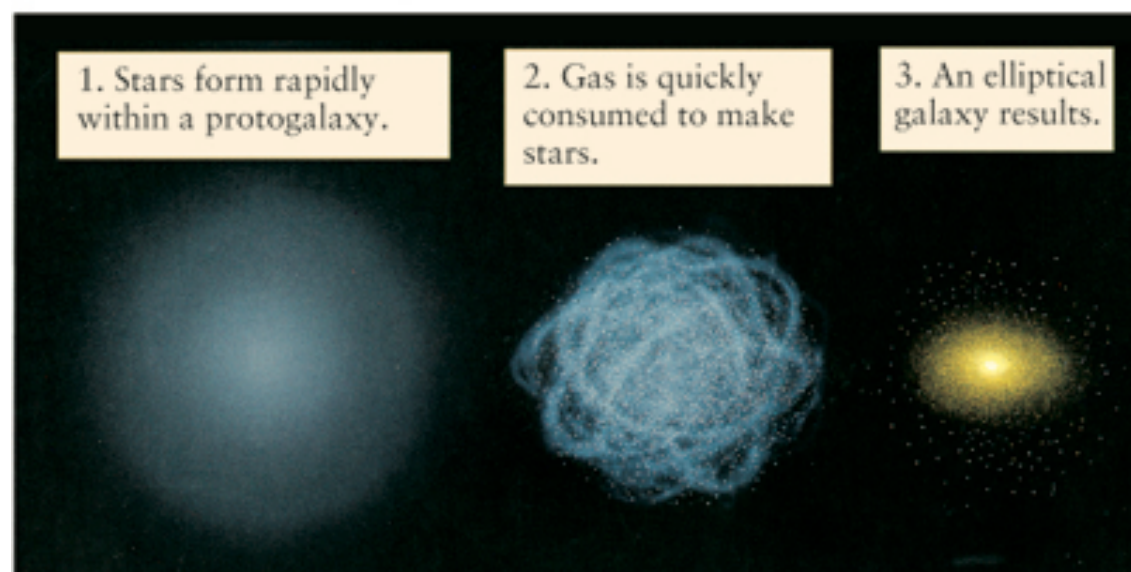


# Formazione delle spirali, lenticolari e ellittiche

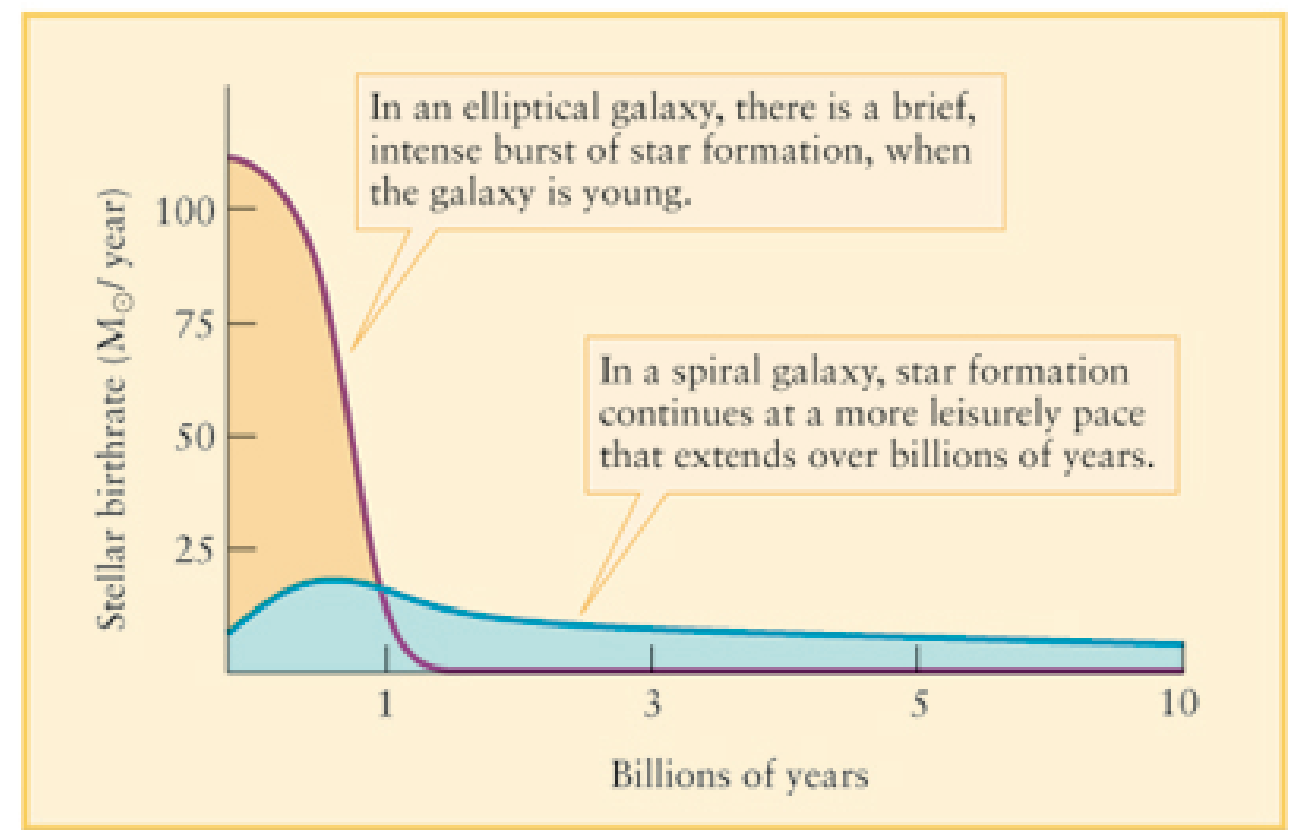
- Protogalassia
- Tasso di formazione stellare
- Contenuto in metalli
- Colore blu



(a) Formation of a spiral galaxy



(b) Formation of an elliptical galaxy



(c) The stellar birthrate in galaxies

# Cosmologia: origine e evoluzione dell'universo

---

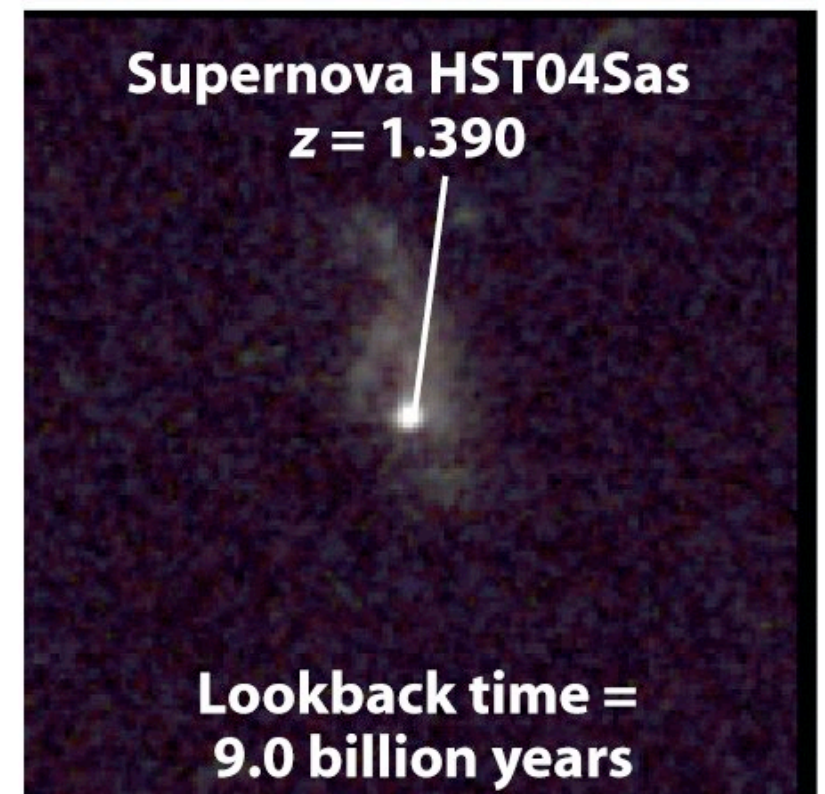
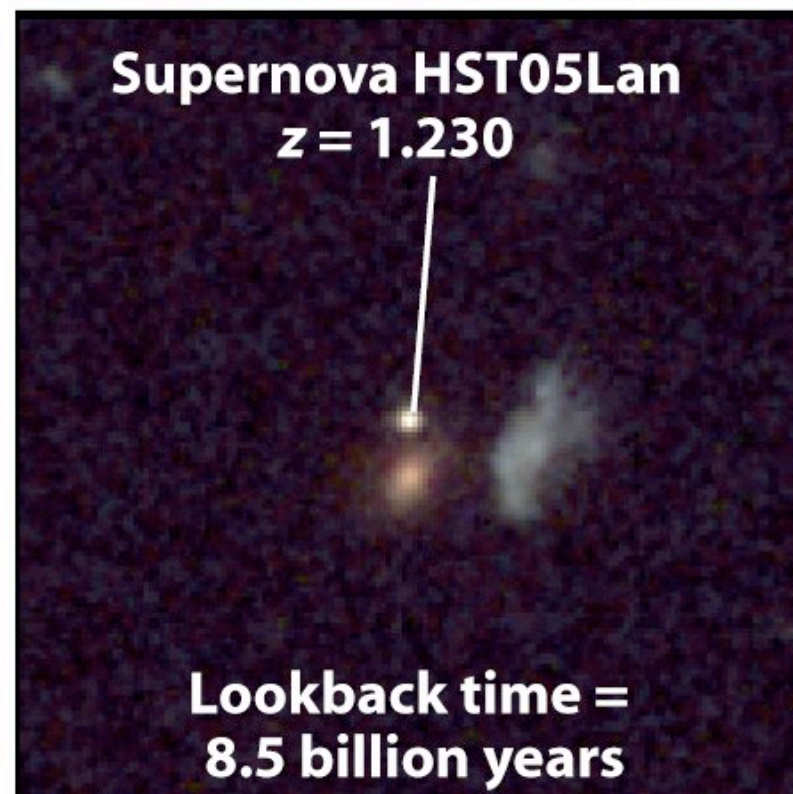
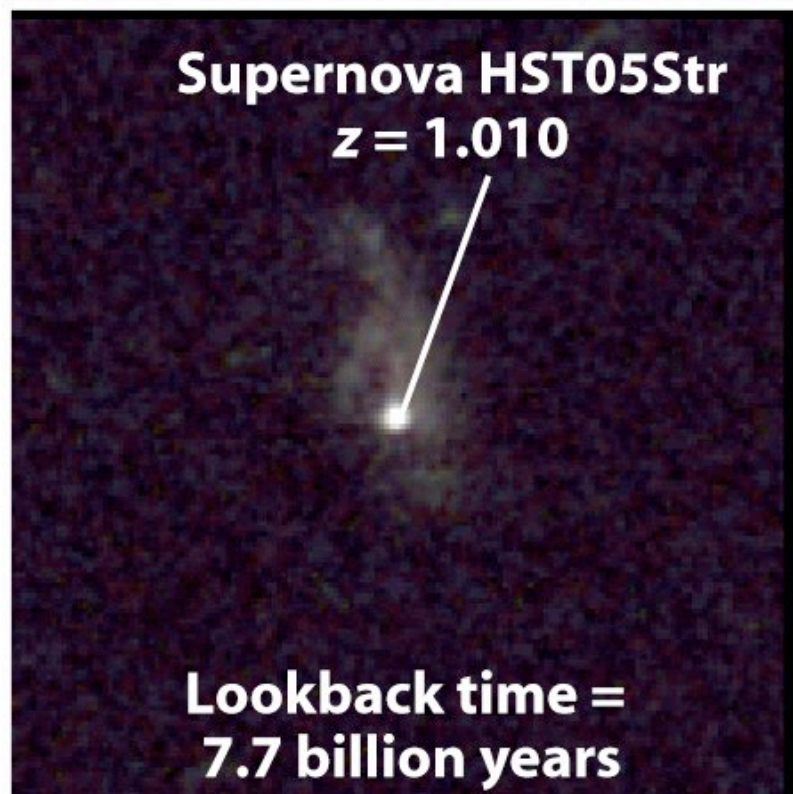
- Quant'è grande l'universo?
- Quale è la sua struttura?
- Da quanto tempo esiste?
- Come è cambiato nel tempo?



# Cosmologia: origine e evoluzione dell'universo

---

- Supernovae molto distanti: studio dell'evoluzione dell'universo



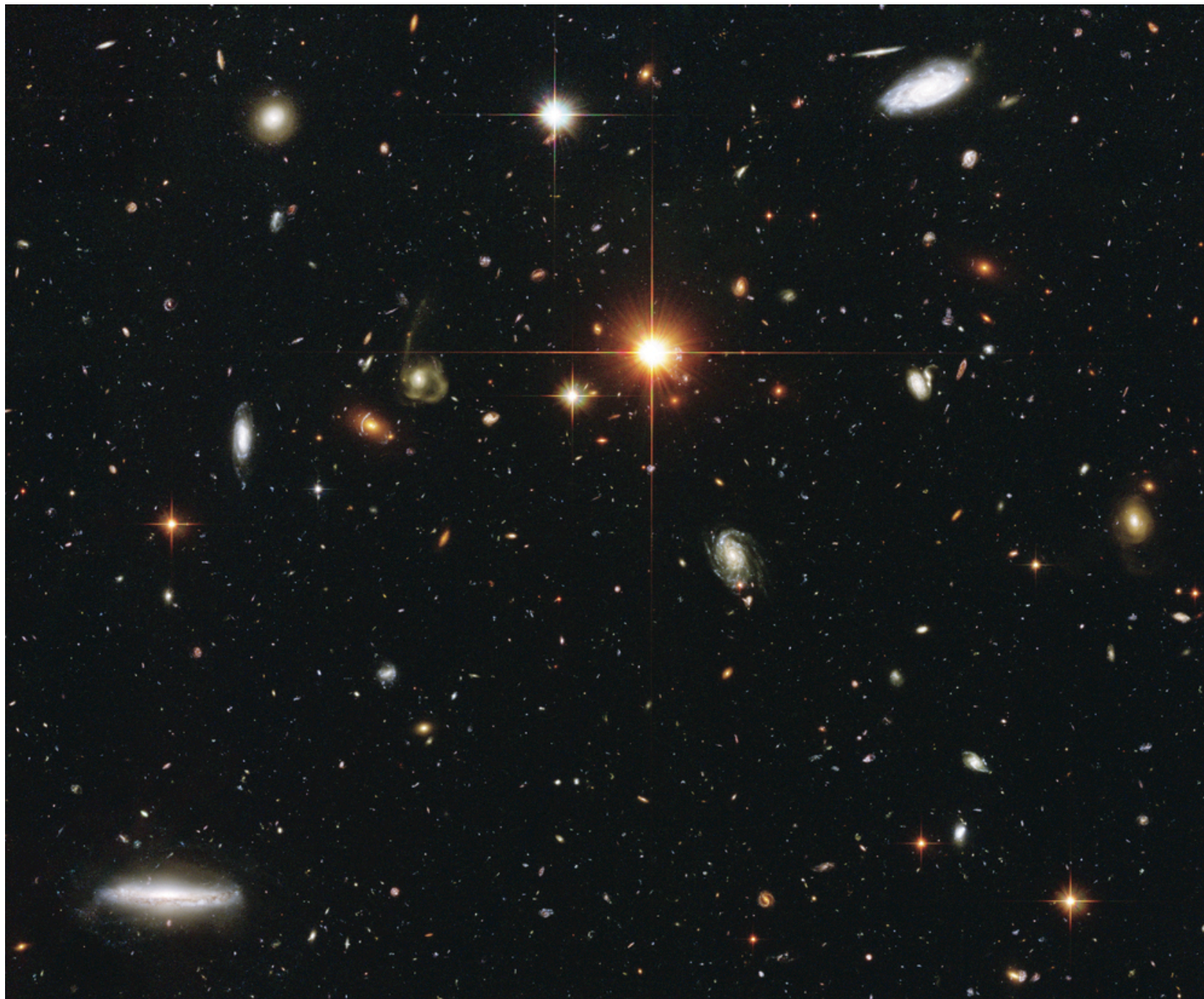
Chapter 26 Opener  
*Universe, Eighth Edition*  
© 2008 W.H. Freeman and Company



# Oscurità del cielo la notte

---

- Paradosso di Olbers-Chéseaux (18° secolo)

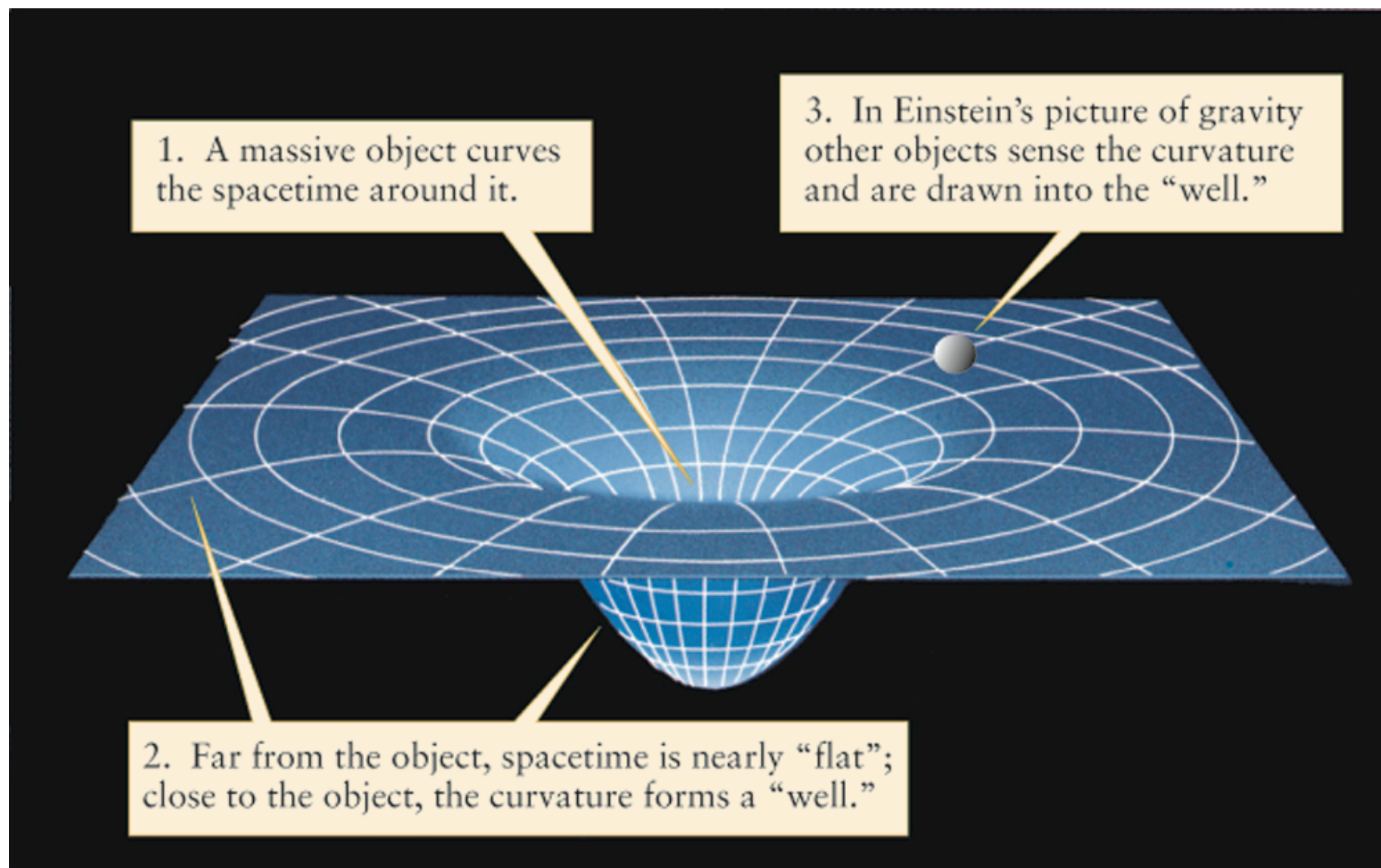




# La rivoluzione di Einstein

---

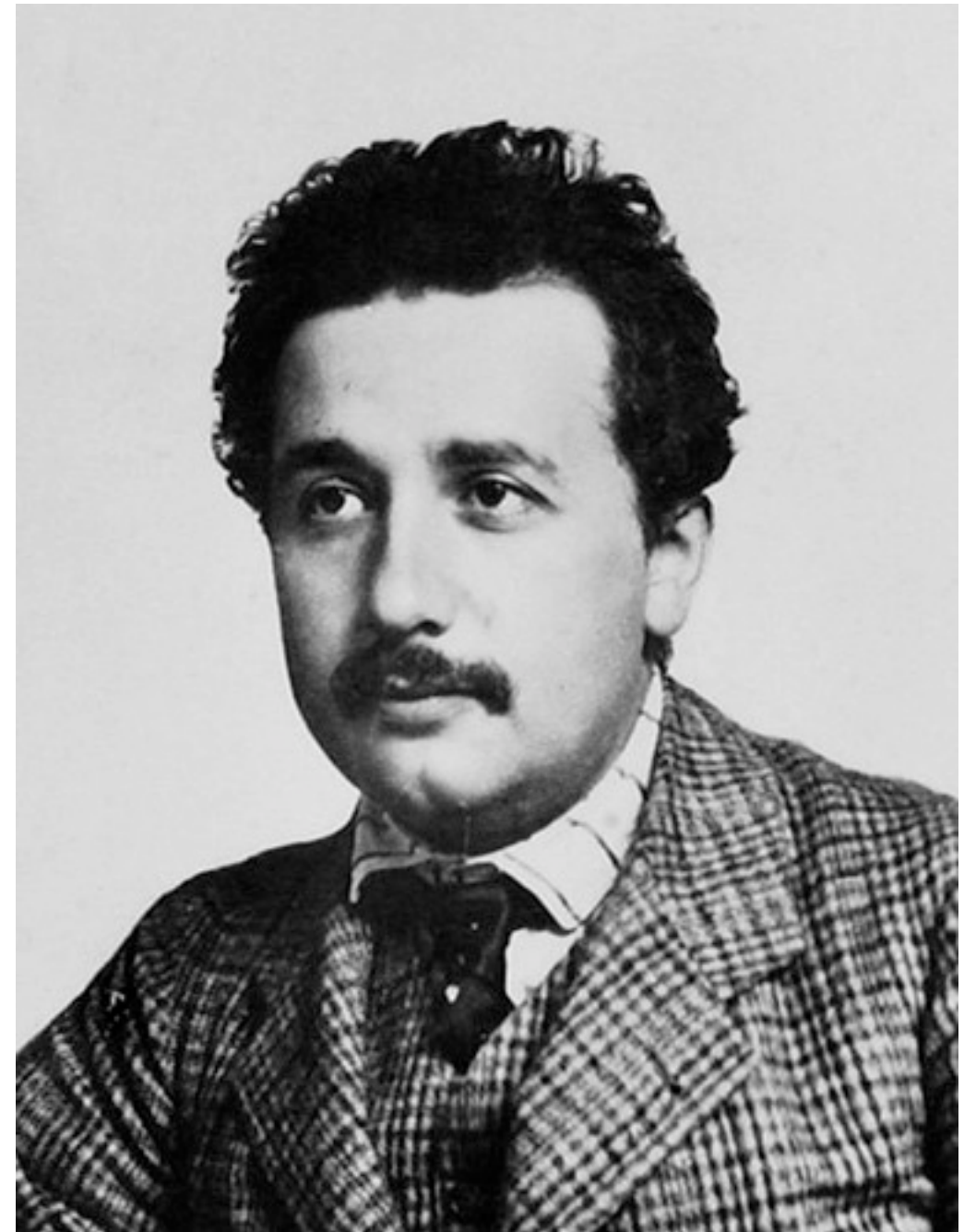
- Relatività ristretta: tempo e spazio dipendono dal moto dell'osservatore
- Relatività generale: lo spazio è curvato dalla massa



# La rivoluzione di Einstein

---

- L'universo è statico (come lo pensava Newton) ?
- La relatività generale implica che l'universo **non** può esserlo.
- Einstein aggiunge un termine nelle equazioni (la **costante cosmologica  $\Lambda$** ) per renderlo statico.

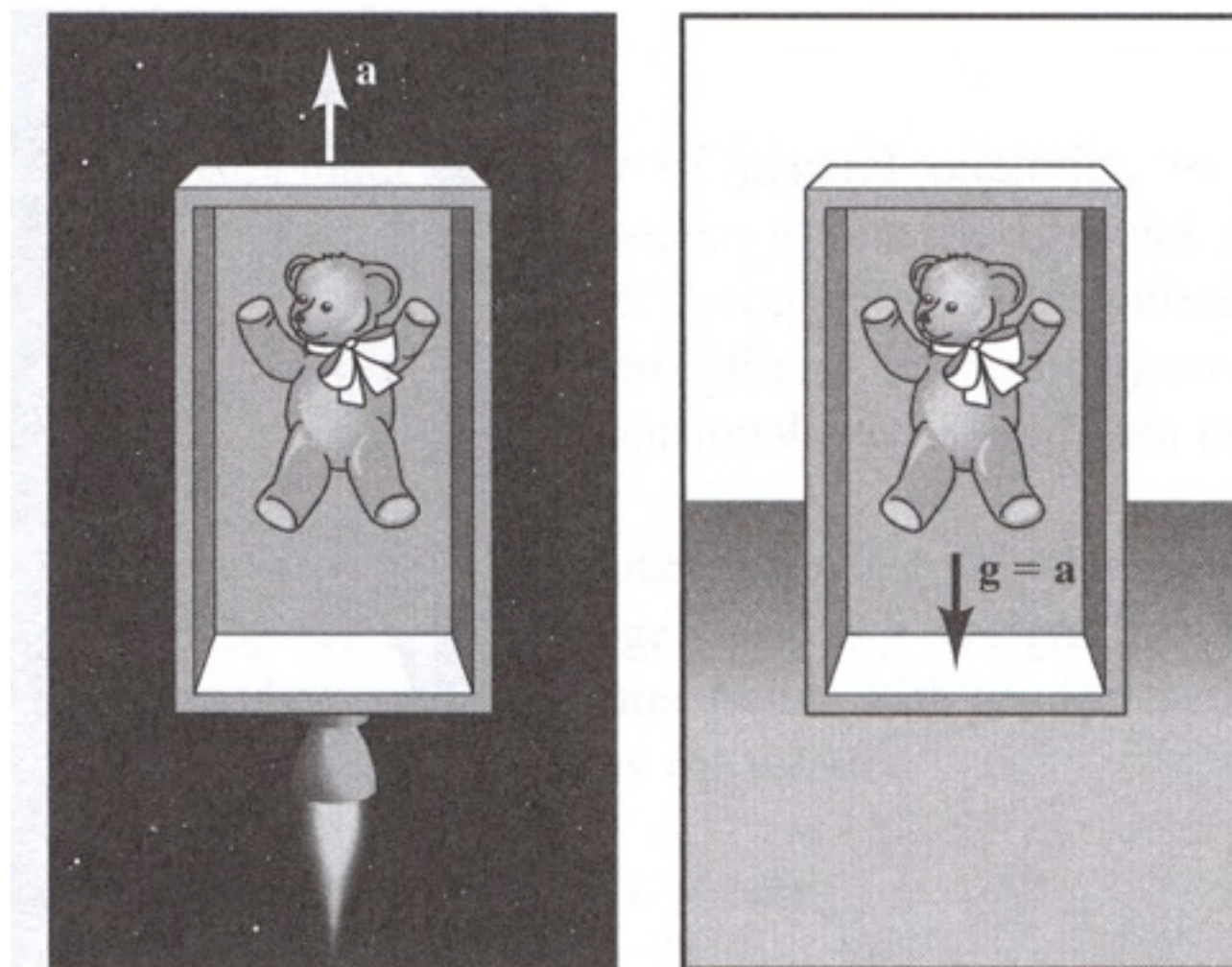




# Il principio di equivalenza

---

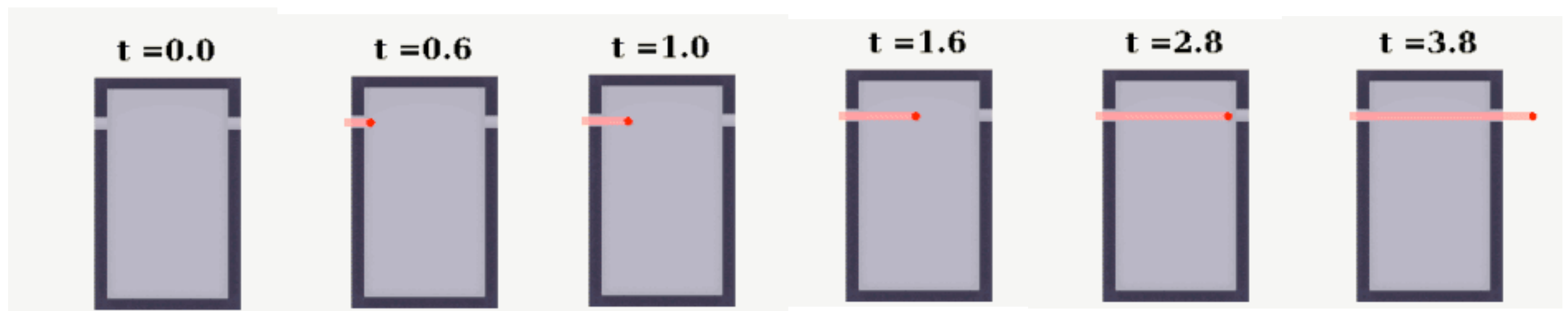
- Versione non accelerata: Ascensore senza Forze = Ascensore in caduta libera
- Versione accelerata:



# Il principio di equivalenza

- Massa **gravitazionale**:  $F = -GM_g m_g / r^2$
- Massa **inerziale**:  $F = m_i a$
- Principio di equivalenza:  $m_g = m_i$  (rimarchevole!)  $\Rightarrow$  lo spazio è curvo.

Dall'**interno** di un ascensore in caduta libera



assenza di forze  $\equiv$  caduta libera  $\Rightarrow v_{luce} = \text{cost.}$

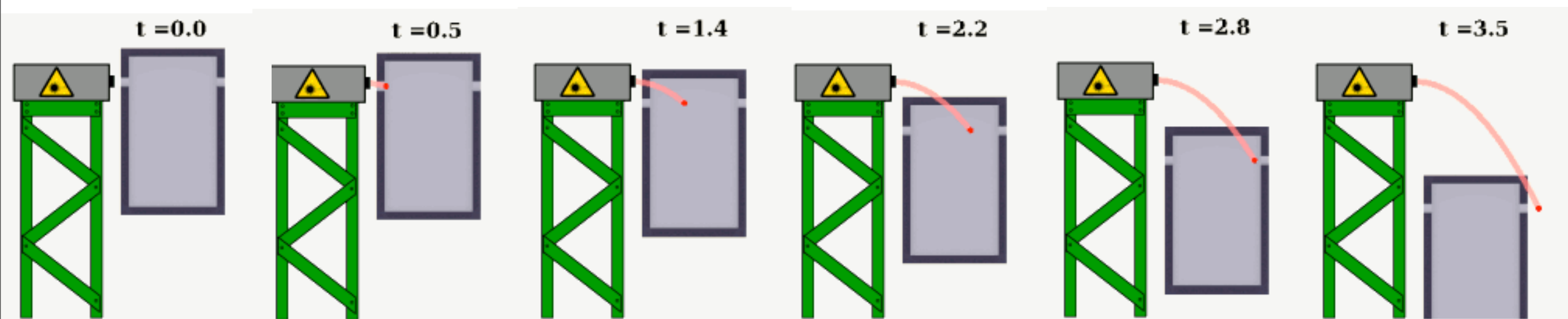


# Il principio di equivalenza

---

- La luce entra dal primo buco e esce dall'altro.
- Dal punto di vista esterno, la luce **non** può viaggiare **secondo una retta**.
- Velocità piccole (meccanica Newtoniana): moto **parabolico**.

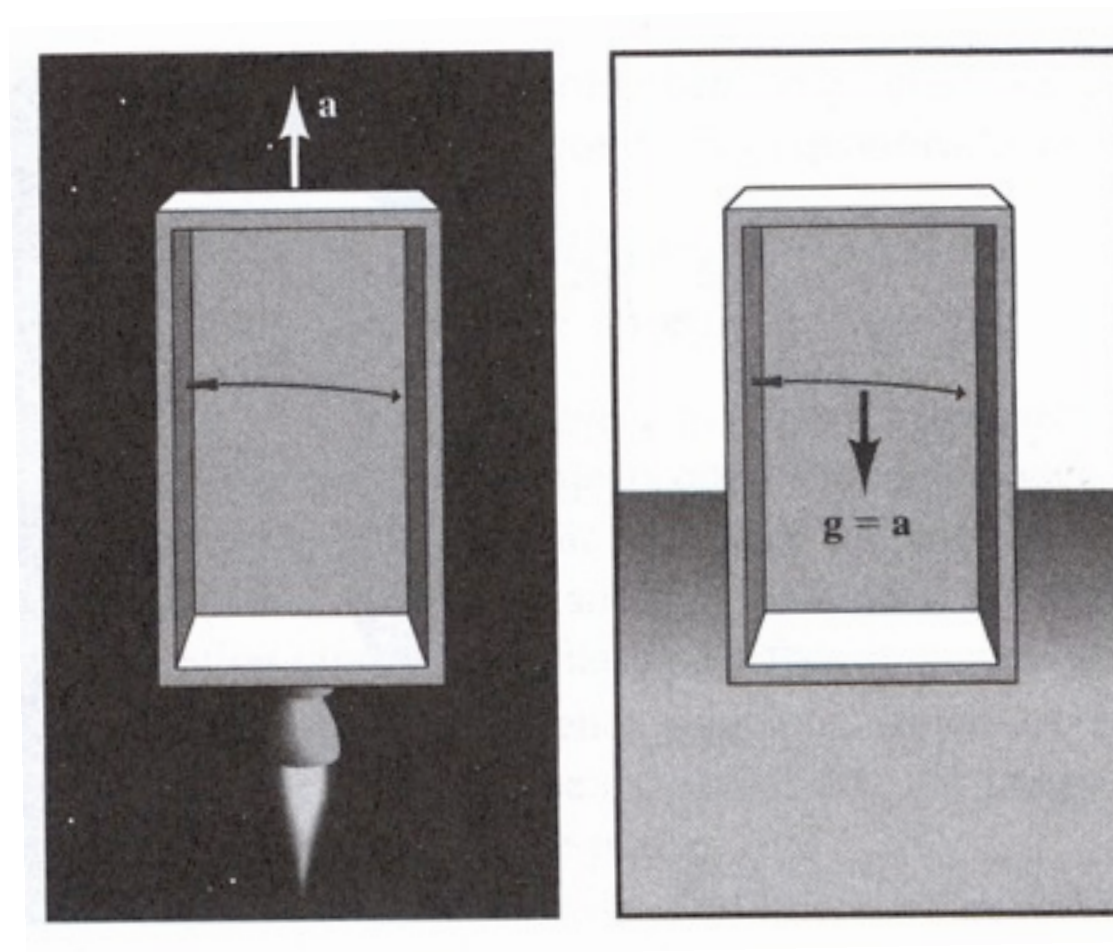
Dall'**esterno** di un ascensore in caduta libera



# Il principio di equivalenza

---

- Visione globale: senza l'ascensore  $\Rightarrow$  **La luce è deviata dal campo gravitazionale**
- Principio di equivalence, versione "luce": la traiettoria della luce in una scatola accelerata è identica alla traiettoria della luce in un campo gravitazionale.





# La gravità

---

## **Secondo Newton**

La massa dice alla gravità come esercitare una forza ( $F = -GMm/r^2$ ),  
La forza dice alla massa come accelerare ( $F = ma$ ).

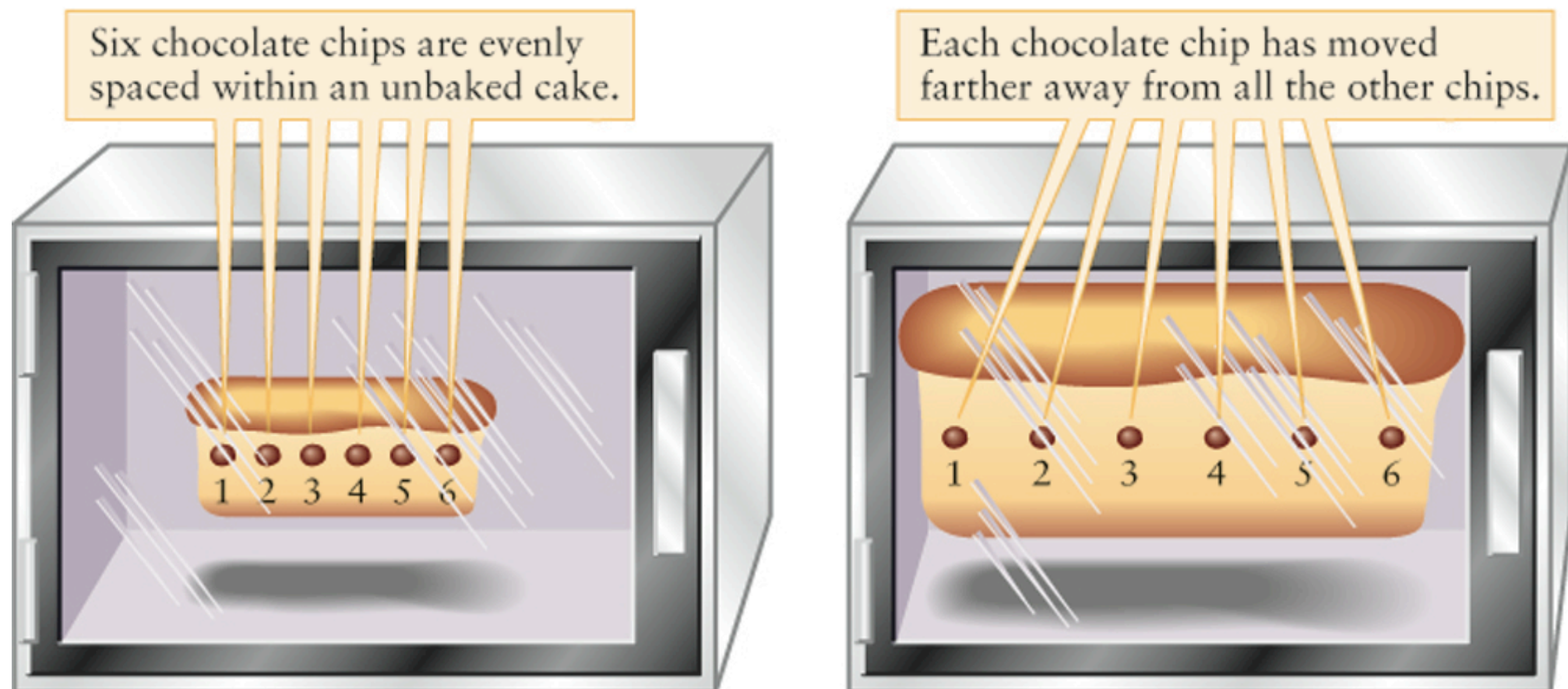
## **Secondo Einstein**

La Massa-Energia dice allo spazio-tempo come curvarsi,  
Lo spazio-tempo curvo dice alla Massa-Energia come muoversi.

- Nella descrizione di Newton,  $m_g = m_i$  è una coincidenza
- Nella descrizione di Einstein, la curvatura è una proprietà dello spazio-tempo stesso  $\Rightarrow a_g$  è indipendente della massa, l'oggetto segue la traiettoria stabilita dalla geometria.

# L'espansione dell'universo

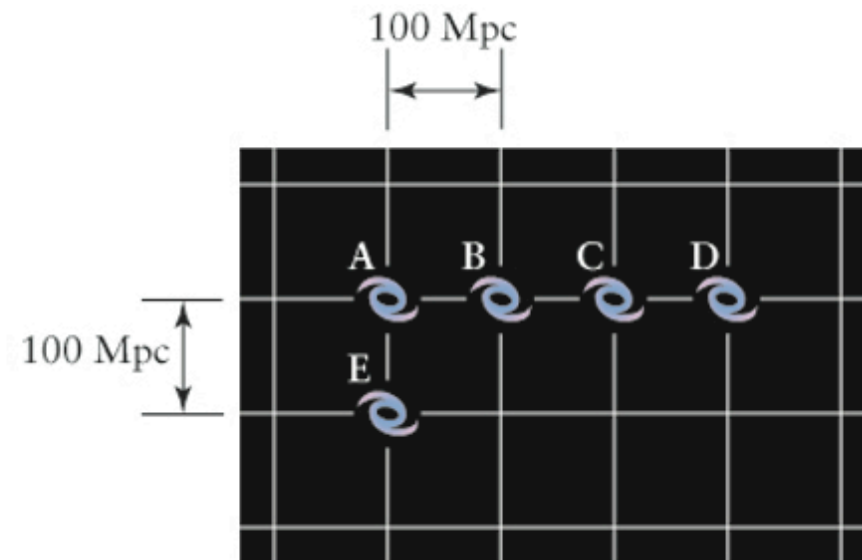
- Legge di Hubble:  $v = H_0 d$
- Lo spazio-tempo non è rigido ma si espande.



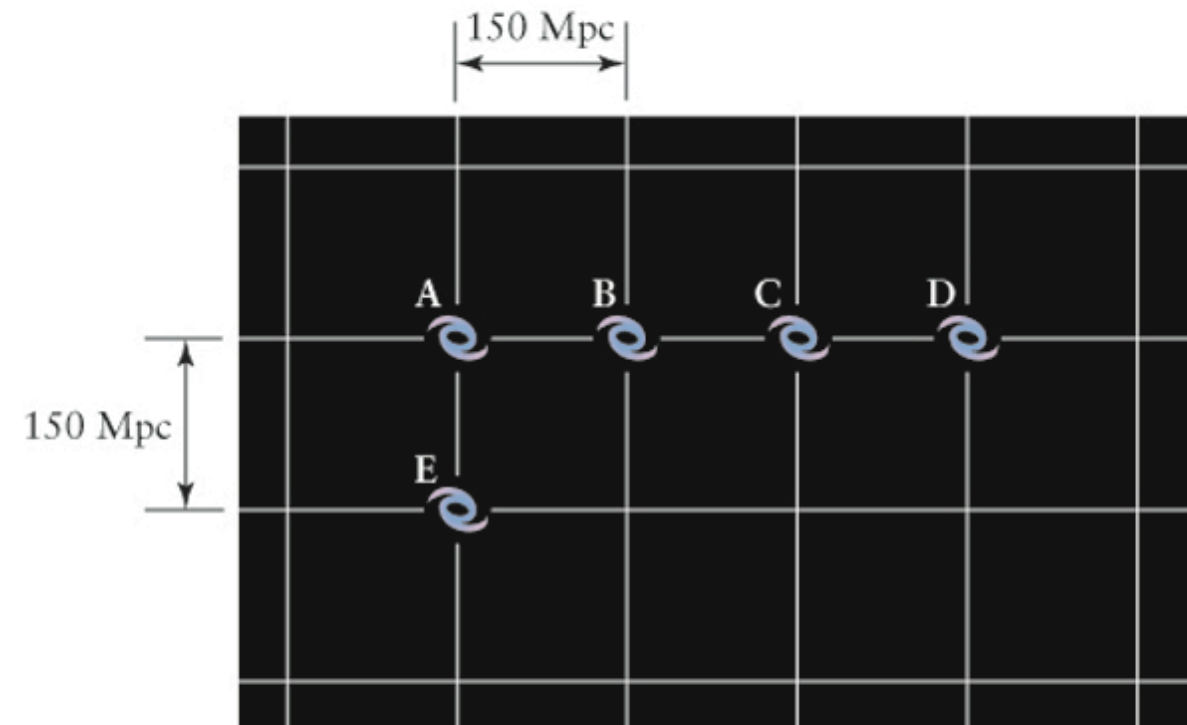


# L'espansione dell'universo

- Legge di Hubble:  $v = H_0 d$
- Nessun “centro” nell'universo.



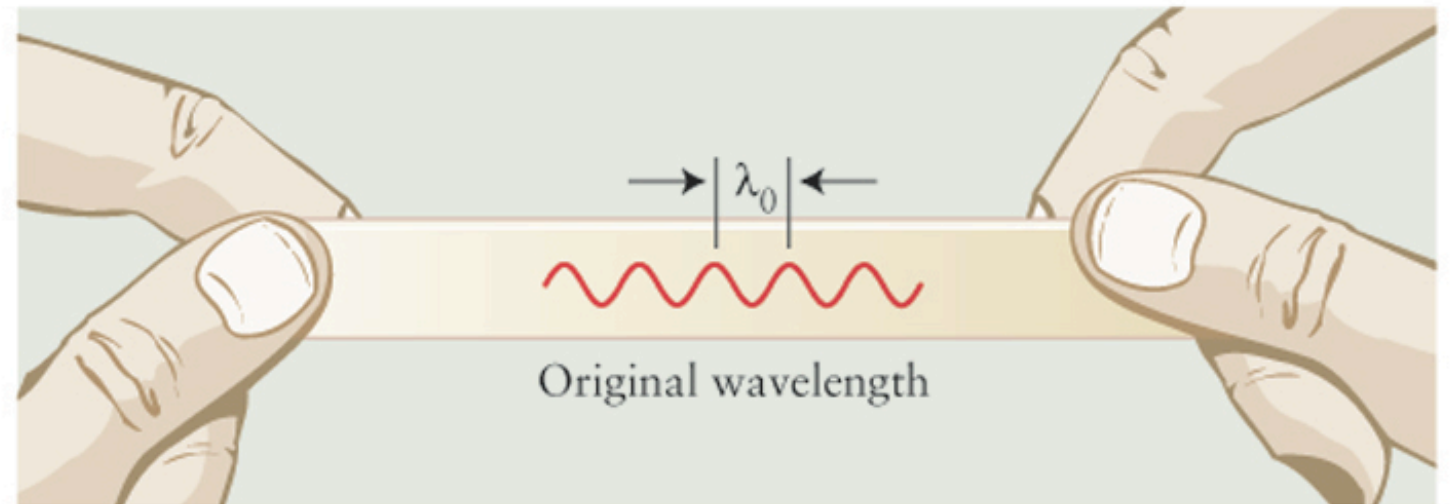
(a) Five galaxies spaced 100 Mpc apart



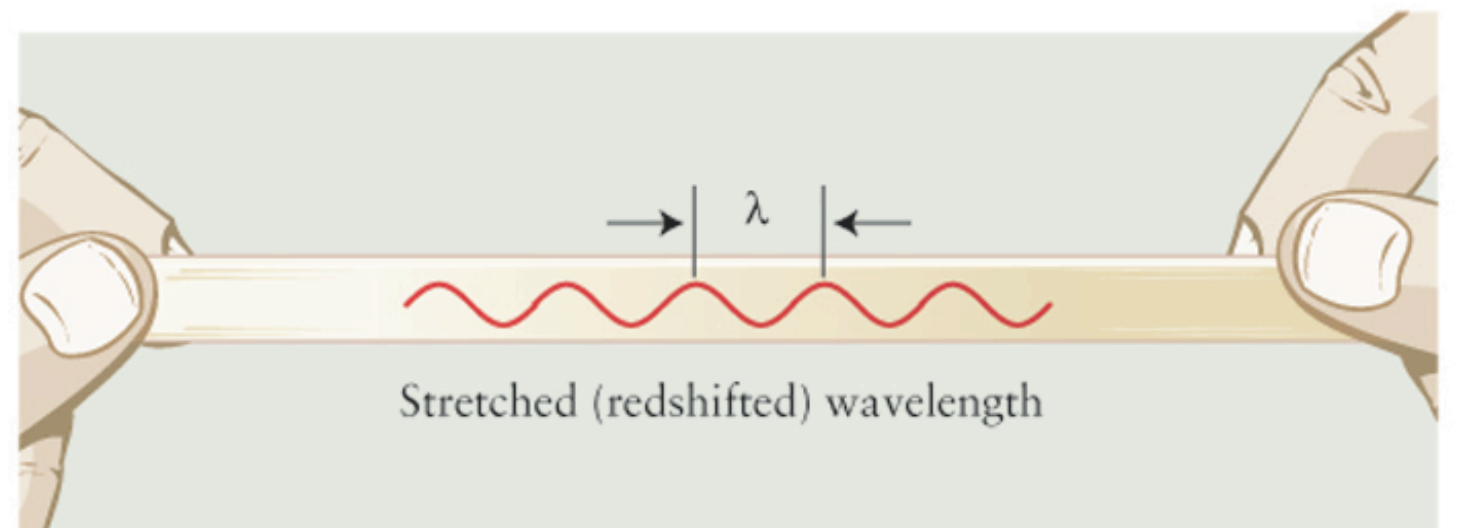
(b) The expansion of the universe spreads the galaxies apart

# Il redshift dovuto all'espansione

- Più lungo è il viaggio (galassie distanti), maggiore è il redshift
- Il redshift non è dovuto all'effetto Doppler (causato dal moto **nello spazio**), ma dall'espansione **dello spazio**.



(a) A wave drawn on a rubber band ...



(b) ... increases in wavelength as the rubber band is stretched.



# Redshift e lookback time

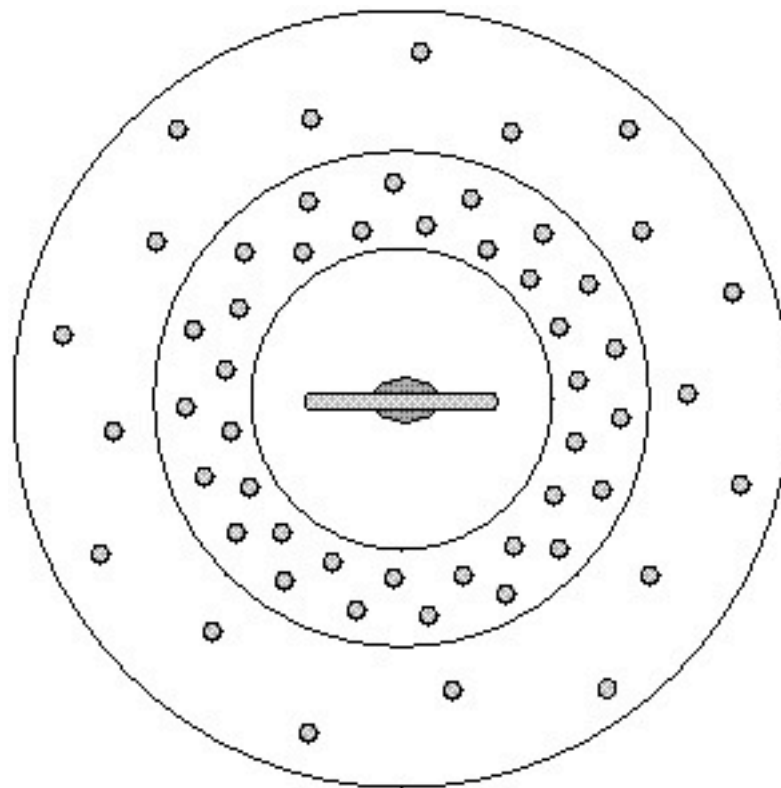
---

- $z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0 \Rightarrow \lambda / \lambda_0 = 1 + z$
- $\lambda / \lambda_0$  è una **misura della quantità di allungamento**. Per esempio, una galassia con  $z = 3 \Leftrightarrow$  espansione delle distanze di un fattore 4  $\Leftrightarrow$  espansione del volume un fattore  $4^3 = 64$ .
- Con il redshift  $z$ , si può calcolare velocità ( $z = v/c$ ) e distanza ( $d = v/H_0$ ).
- $d$  espresso in anni-luce è il **lookback time**.

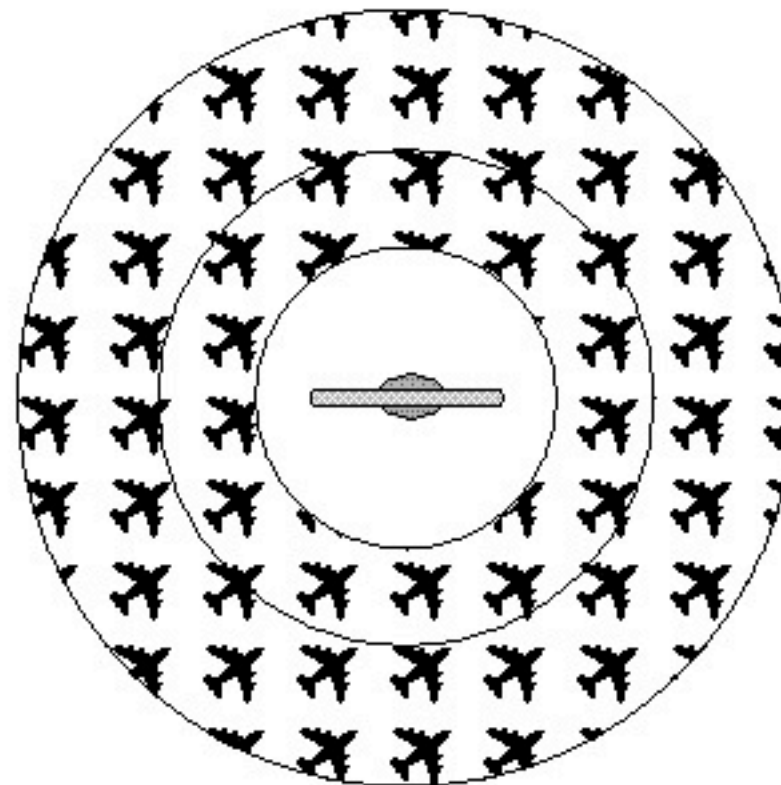
# Il principio cosmologico

---

- A grande scala, l'universo è **omogeneo e isotropo**.
- omogeneo: ogni regione è la stessa delle altre (densità costante).
- isotropo: l'universo ha la stessa apparenza in tutte le direzioni.



Is this *homogeneous* and *isotropic*? Which aspect is it not?

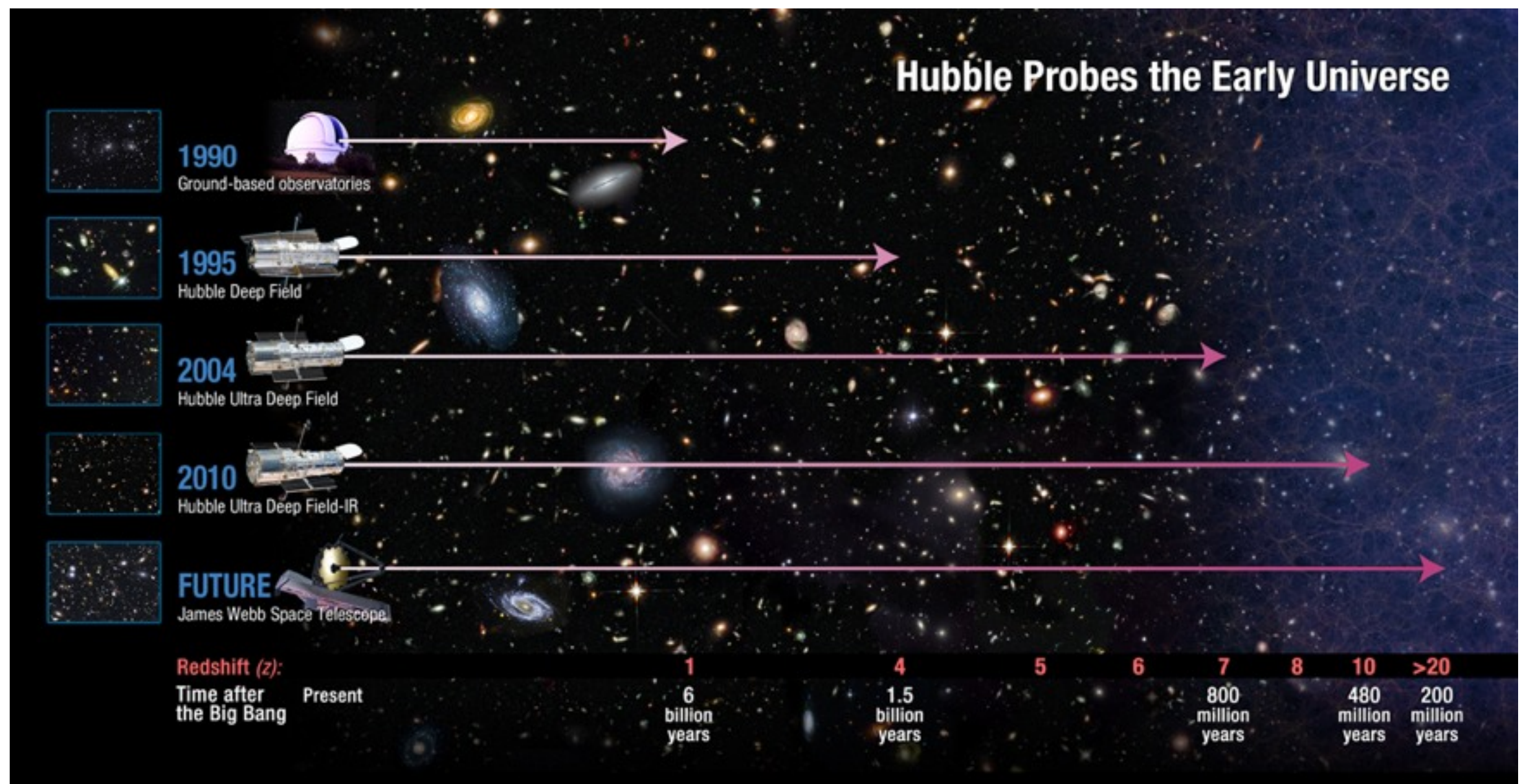


Outside the central sphere, is this universe *homogeneous* and *isotropic*? Which aspect is it not?

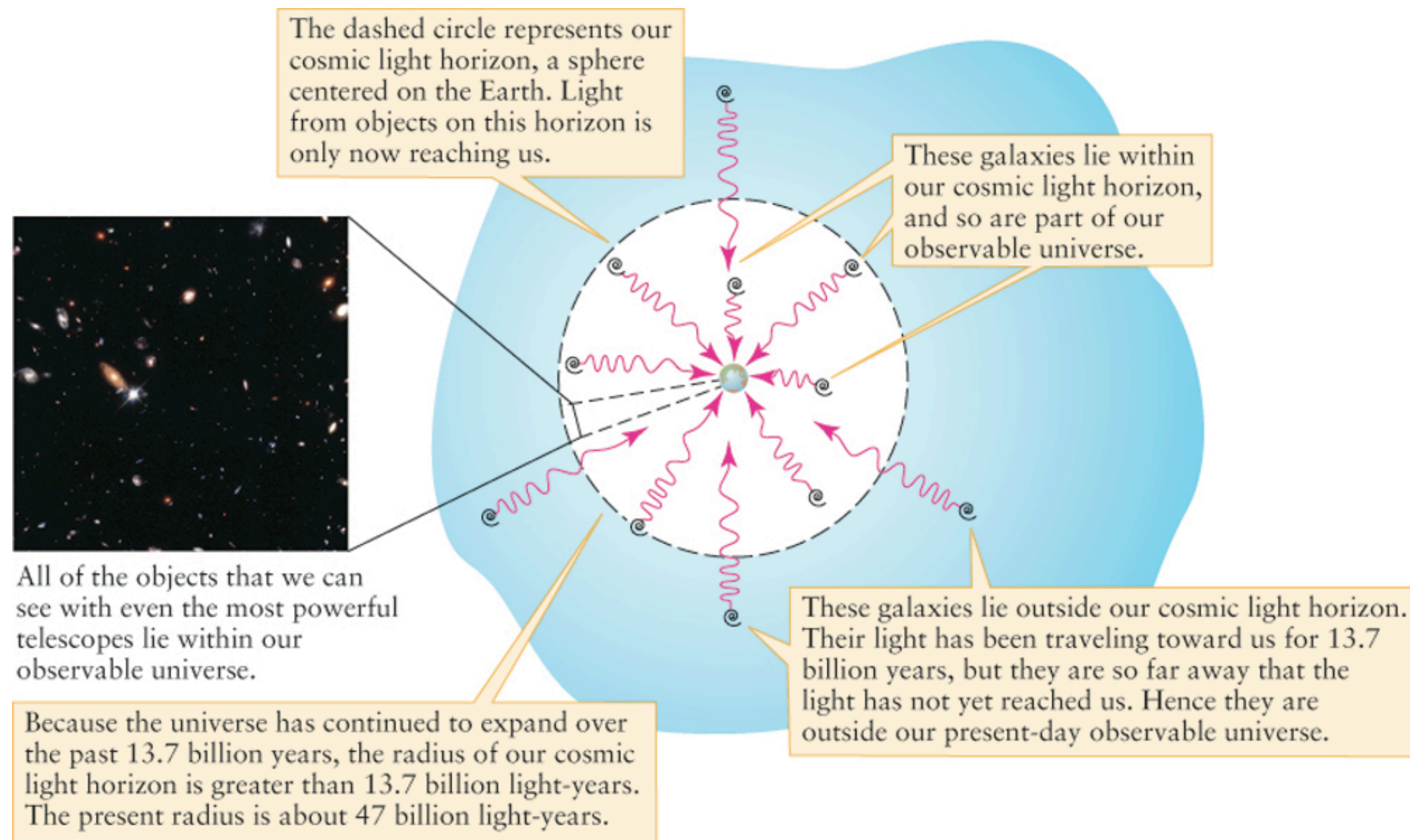


# Il Big Bang

- Big Bang = inizio dell'espansione  $\neq$  esplosione.
- Espansione **dello** spazio, non **nello** spazio.
- Età dell'universo:  $T_0 = d/v = d/(H_0 d) = 1/H_0 = (73 \text{ km/s/Mpc})^{-1} = 13.4 \cdot 10^9 \text{ anni}$



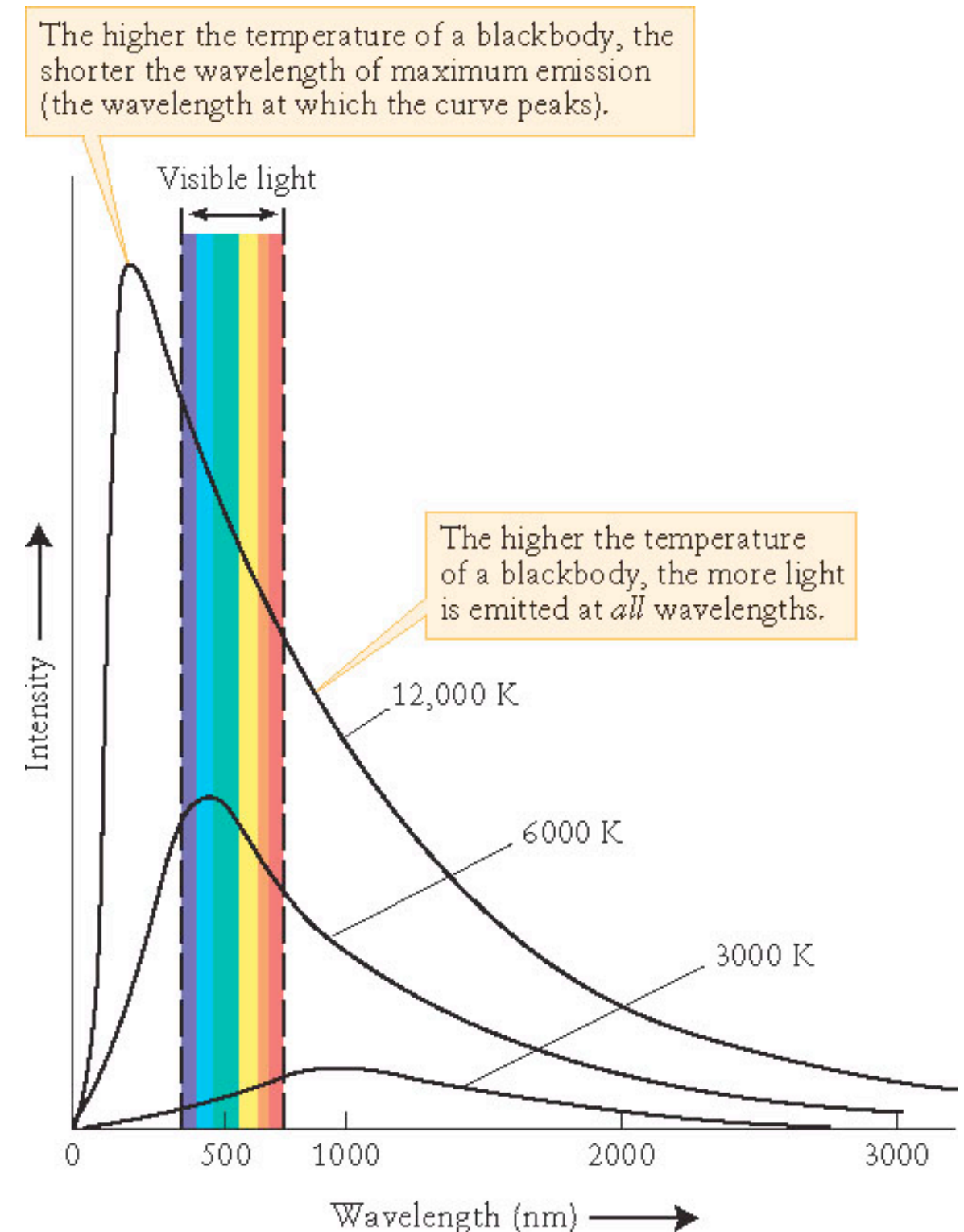
# Il Big Bang risolve il paradosso di Olbers





# La radiazione cosmica di fondo e il Big Bang caldo

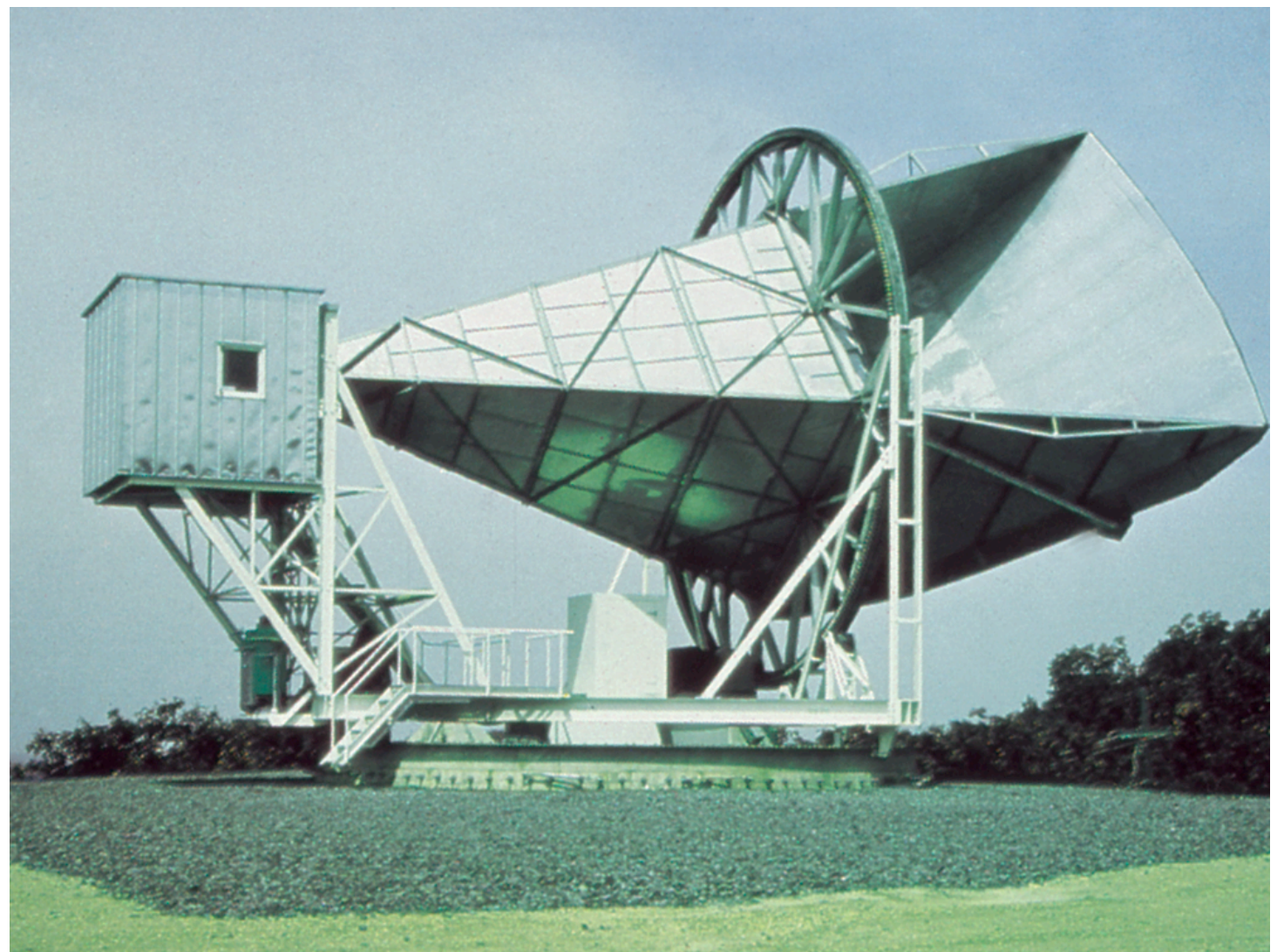
- Successo della nucleosintesi stellare. Ma c'è troppo He (se esso fosse solo creato dalla fusione di H nelle stelle).
- Soluzione: un Big Bang caldo (come il centro delle stelle)
- L'universo primordiale era riempito di fotoni ad alta energia (e piccola  $\lambda$ ), come descritto dalla **legge di Planck** per il corpo nero.



# La radiazione cosmica di fondo e il Big Bang caldo

---

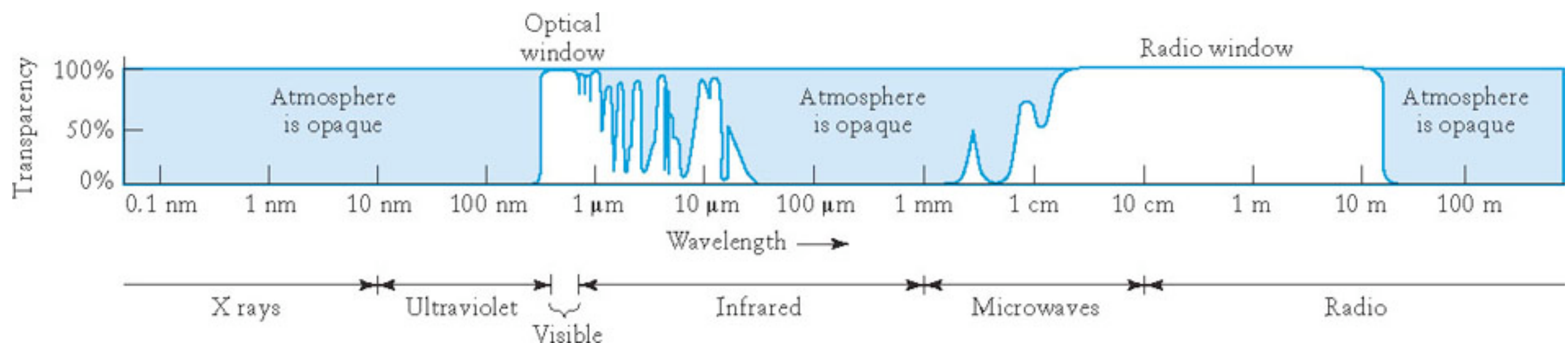
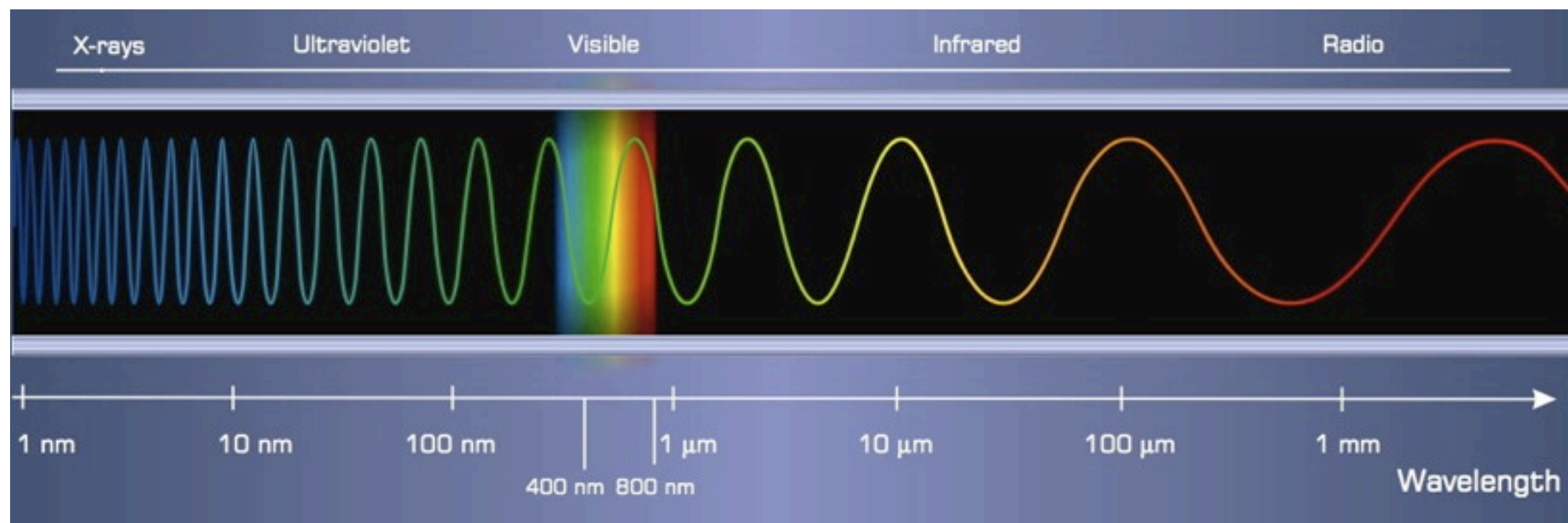
- Dopo miliardi di anni di espansione, questi fotoni hanno bassa  $E$  e grande  $\lambda$ .
- Picco:  $\lambda = 1 \text{ mm}$
- Radiazione cosmica di fondo





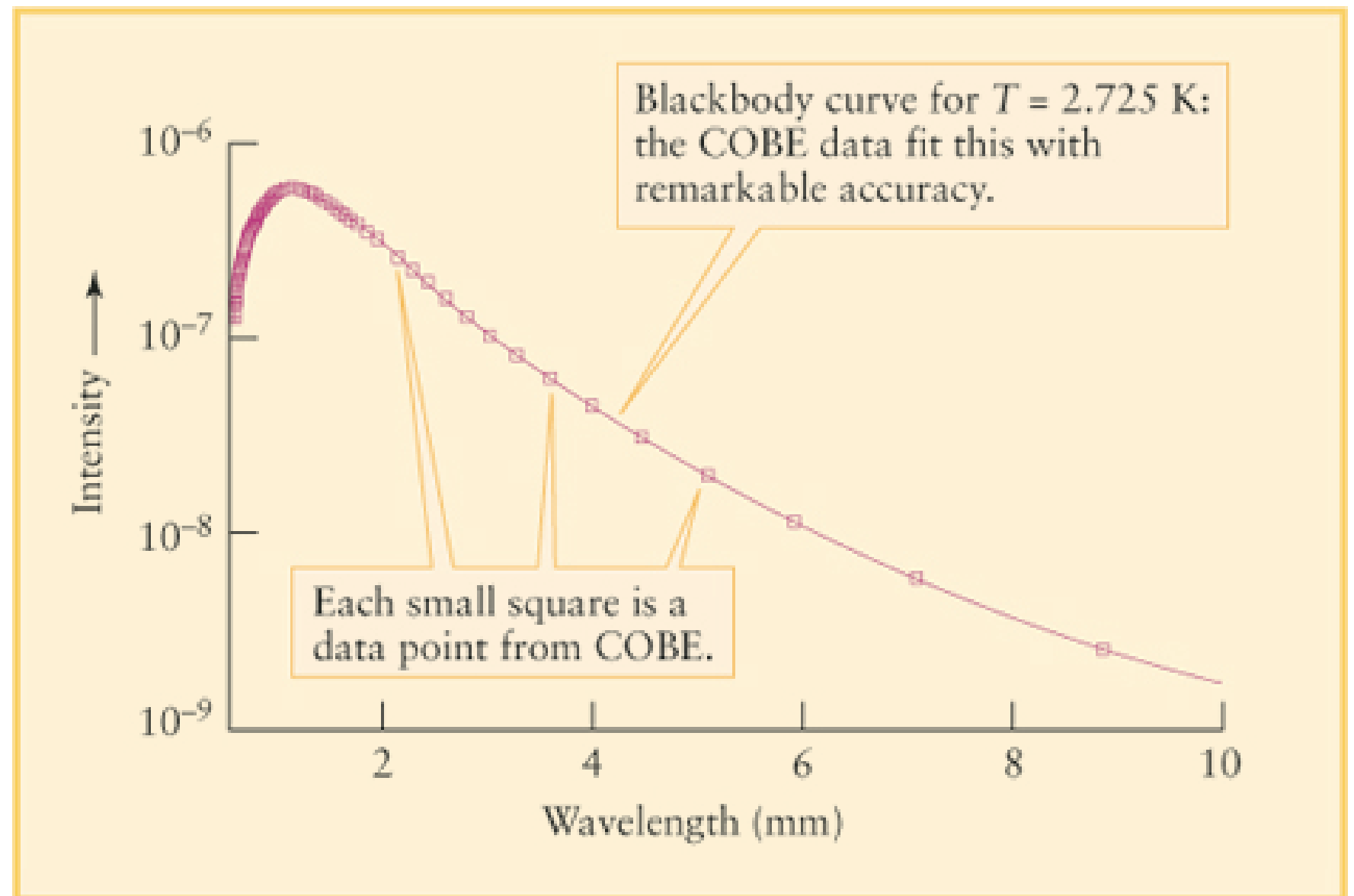
# La radiazione cosmica di fondo e il Big Bang caldo

- L'atmosfera terrestre è (quasi) opaca per  $\lambda$  tra 10  $\mu\text{m}$  e 1 cm



# La radiazione cosmica di fondo e il Big Bang caldo

- COBE
- Corpo nero perfetto (1 parte in  $10^5$ )
- quasi perfettamente isotropa

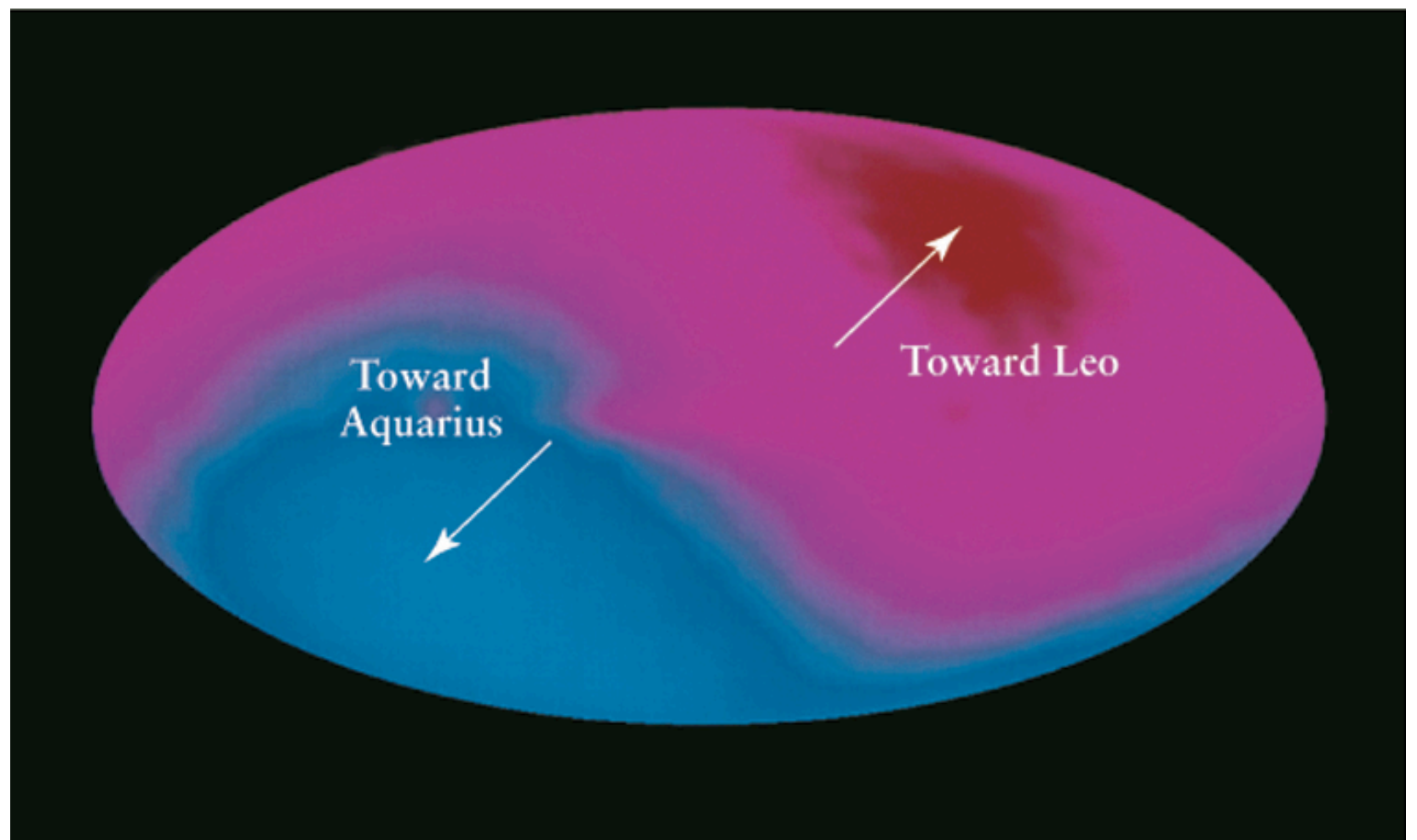




# La radiazione cosmica di fondo e il Big Bang caldo

---

- Mappa di temperatura (rosso = caldo).
- $\Delta T = 0.003377 \text{ K}$
- Moto della Terra (371 km/s) verso Leo.
- Spostamento Doppler verso  $\lambda$  più corte  $\Rightarrow$  più caldo.



# L'universo primordiale

---

- 2 categorie nell'universo: energia o massa.
- La stragrande maggioranza dei **fotoni** sono nella radiazione CMB.
- La **massa** si trova nelle stelle e la materia oscura.
- Chi domina l'universo ?



# Bilancio Radiazione / massa

---

- $E = mc^2$
- Per paragonare radiazione e massa, trasformiamo l'energia dei fotoni in **massa equivalente**  $\implies$  densità (di massa) della radiazione  $\rho_{\text{rad}}$
- Legge di Stefan-Boltzmann:  $F = \sigma T^4$  (F: flusso di energia, J/m<sup>2</sup>/s)
- Chi domina l'universo ?

# Bilancio Radiazione / massa

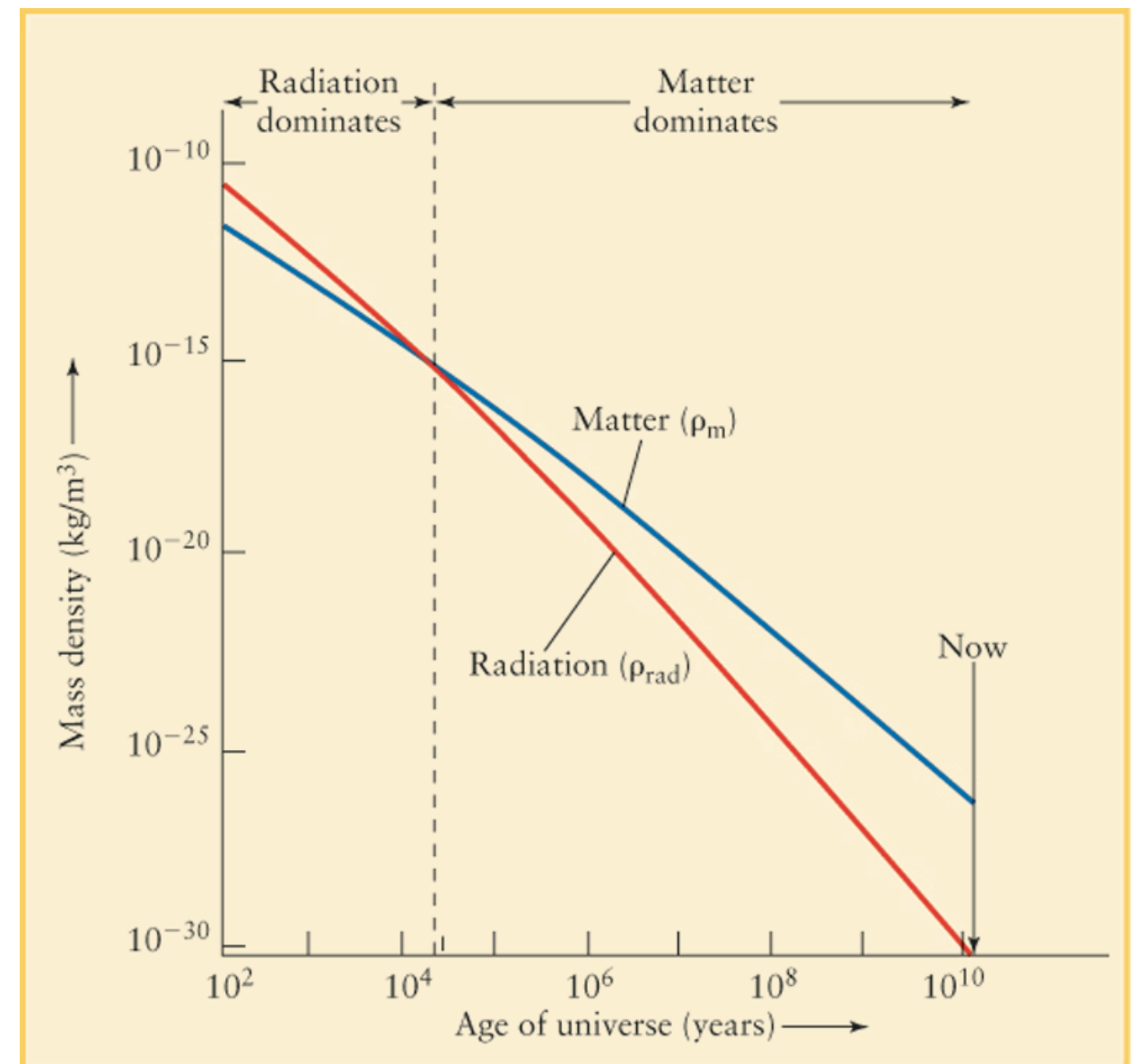
---

- $\rho_{\text{rad}} = 4\sigma T^4 / c^3$
- Oggi, con  $T = 2.725 \text{ K}$ ,  $\rho_{\text{rad}} = 4.6 \cdot 10^{-31} \text{ kg/m}^3$
- $\rho_{\text{materia}} = \text{Massa stelle-galassie-oscuro} / \text{Volume}$
- Ammassi e raggi X in equilibrio idrostatico: Gravità - Pressione(T)
- Oggi,  $\rho_{\text{materia}} = 2.4 \cdot 10^{-27} \text{ kg/m}^3$  (di cui 17% è luminosa)  $\equiv 1.5 \text{ atomo di H al m}^3$
- Nell'aria che respirate, ci sono  $5 \cdot 10^{25} \text{ atomo al m}^3$



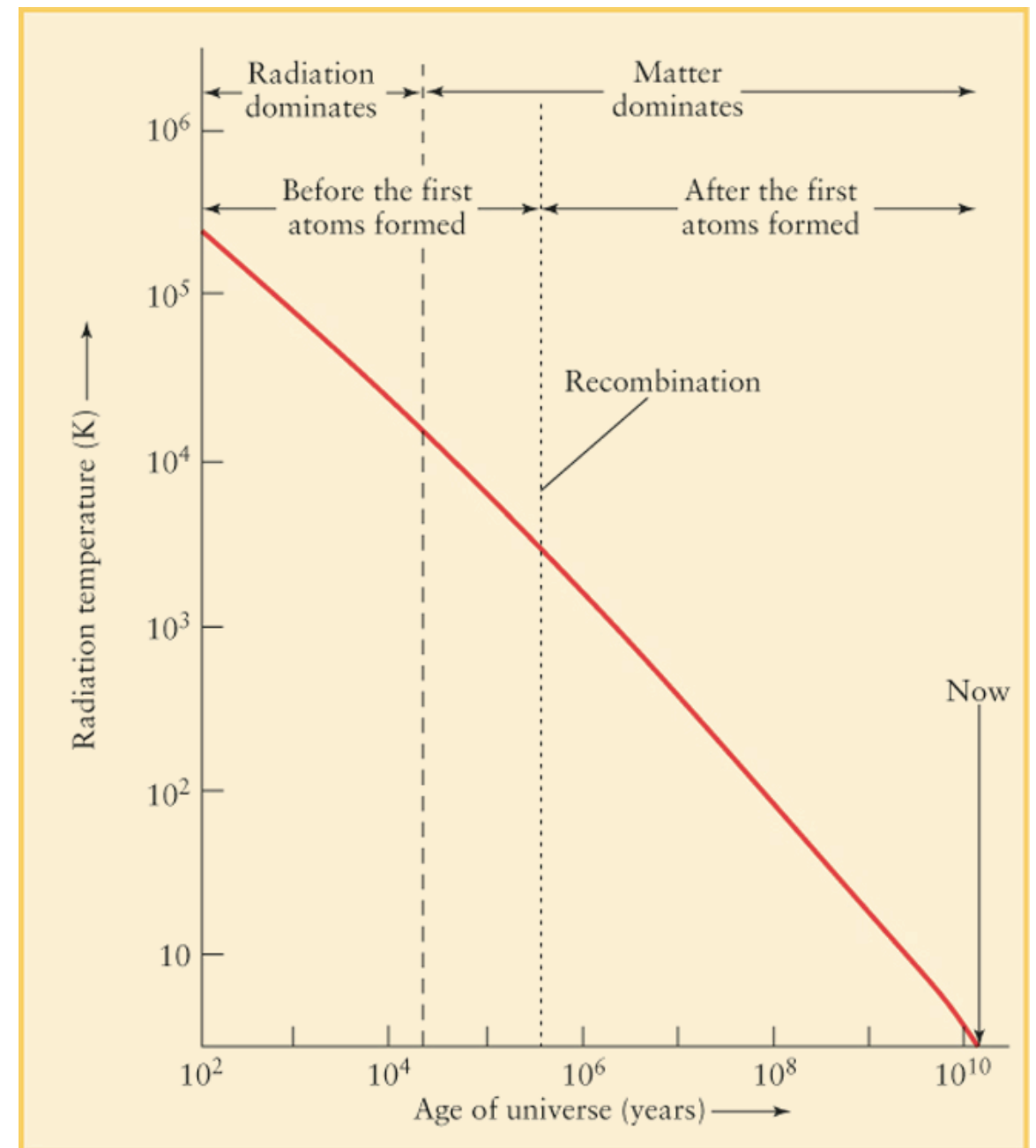
# Quando la radiazione dominava la materia

- $\rho_{\text{materia}} \gg \rho_{\text{rad}}$ , ma non è sempre stato così.
- Oggi, l'energia dei fotoni è piccola, anche se ci sono  $410 \cdot 10^6$  fotoni /  $\text{m}^3$
- fotoni / atomi =  $10^9 / 1$
- Risalendo il passato, la densità dei fotoni e dei atomi aumenta. In più, l'energia dei fotoni aumenta perché sono meno redshiftati.
- Transizione: 24'000 anni dopo il Big Bang ( $z = 5200$ ): fotoni UV.



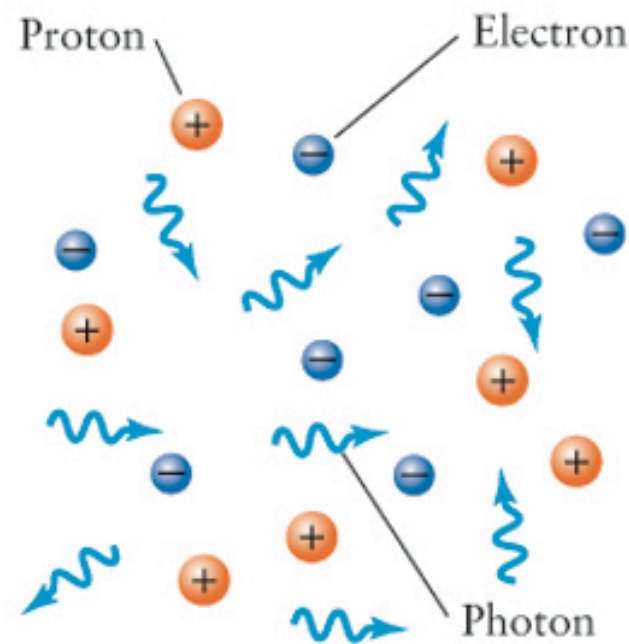
# Quando la radiazione dominava la materia

- Legge di Wien:  $\lambda_{\text{picco}} = 0.0029 / T$
- $T_{\text{transizione}} = 5200 \cdot 2.725 = 14'000 \text{ [K]}$



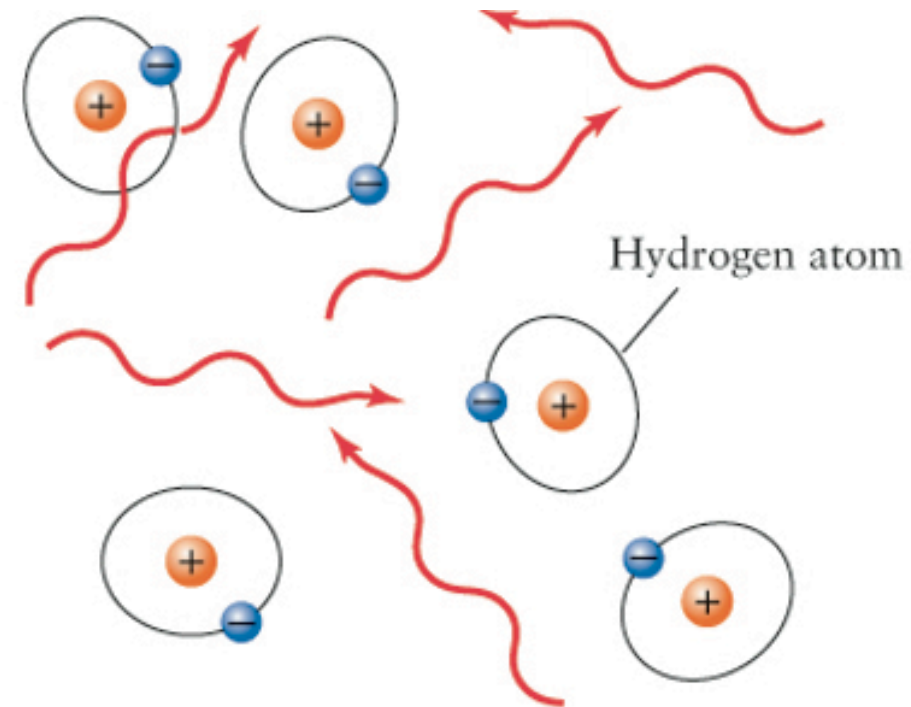


# Quando la radiazione dominava la materia



(a) Before recombination:

- Temperatures were so high that electrons and protons could not combine to form hydrogen atoms.
- The universe was opaque: Photons underwent frequent collisions with electrons.
- Matter and radiation were at the same temperature.



(b) After recombination:

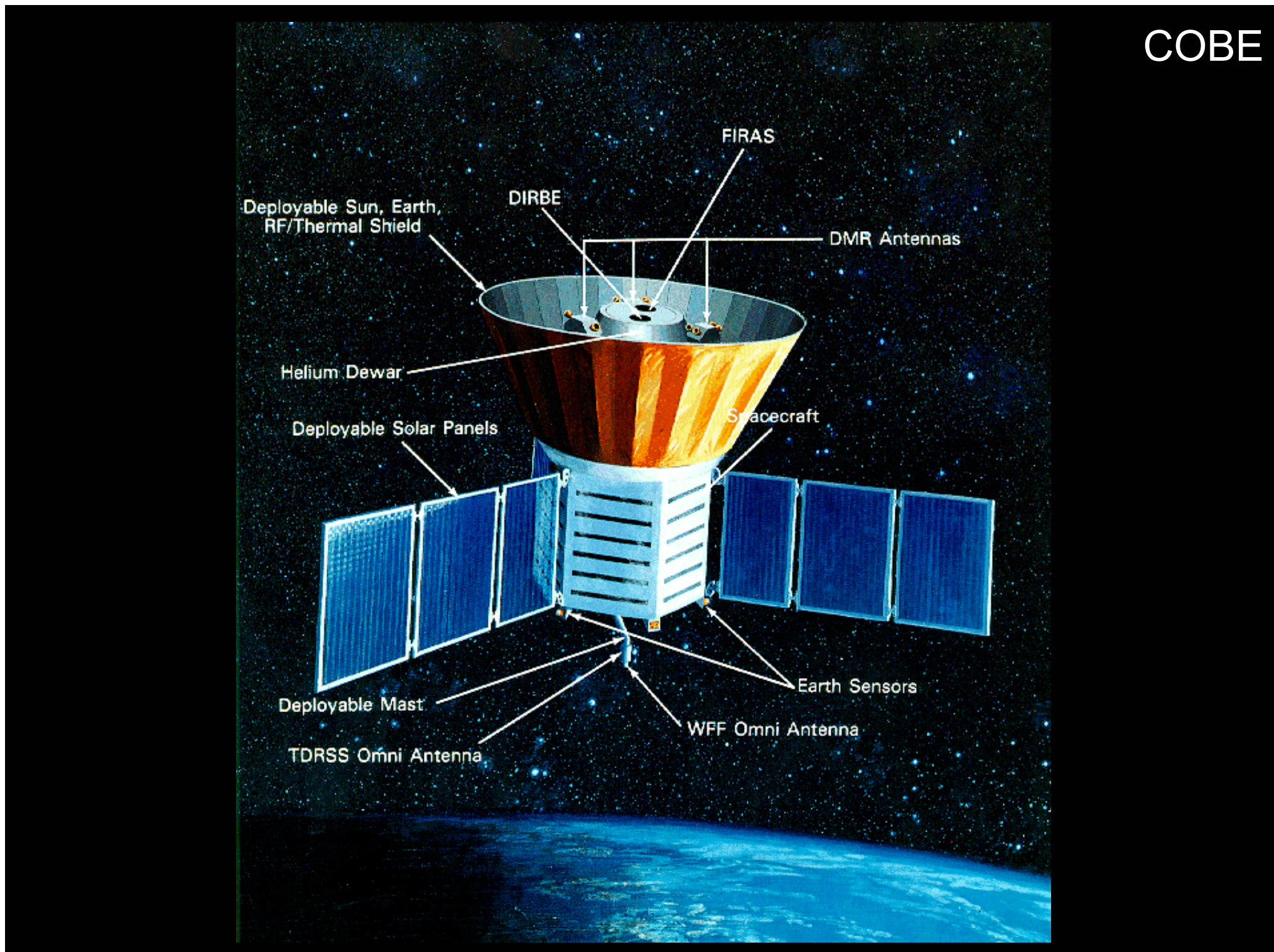
- Temperatures became low enough for hydrogen atoms to form.
- The universe became transparent: Collisions between photons and atoms became infrequent.
- Matter and radiation were no longer at the same temperature.

• Ricombinazione 380'000 anni dopo il Big Bang:

•  $z = 1100$  e  $T_{\text{ricombinazione}} = 1100 \cdot 2.725 = 3'000 \text{ [K]}$  (ionizzazione di H)



# Irregolarità nell'universo primordiale: COBE (1989)



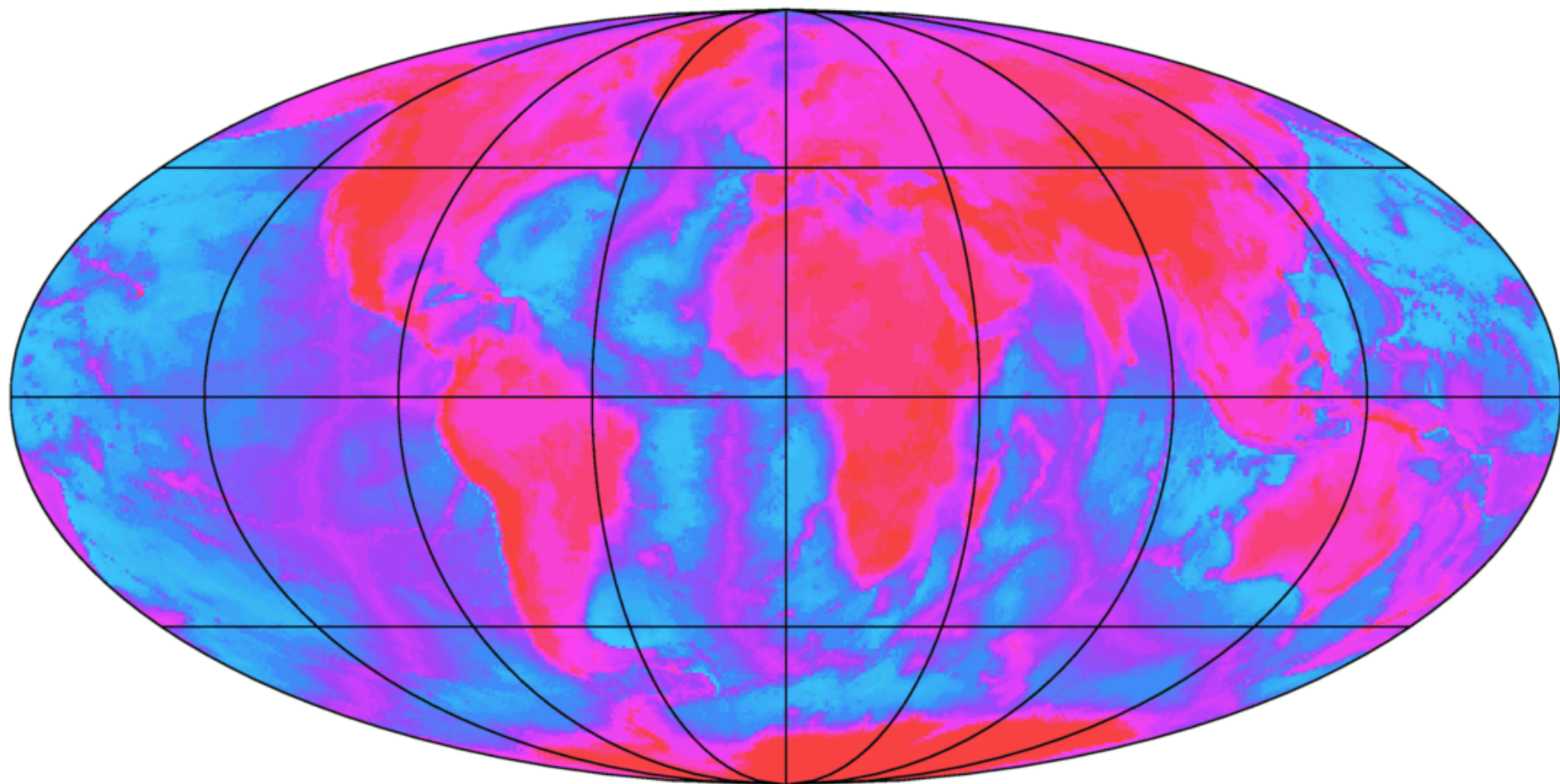


# Irregolarità nell'universo primordiale: COBE (1989)

---

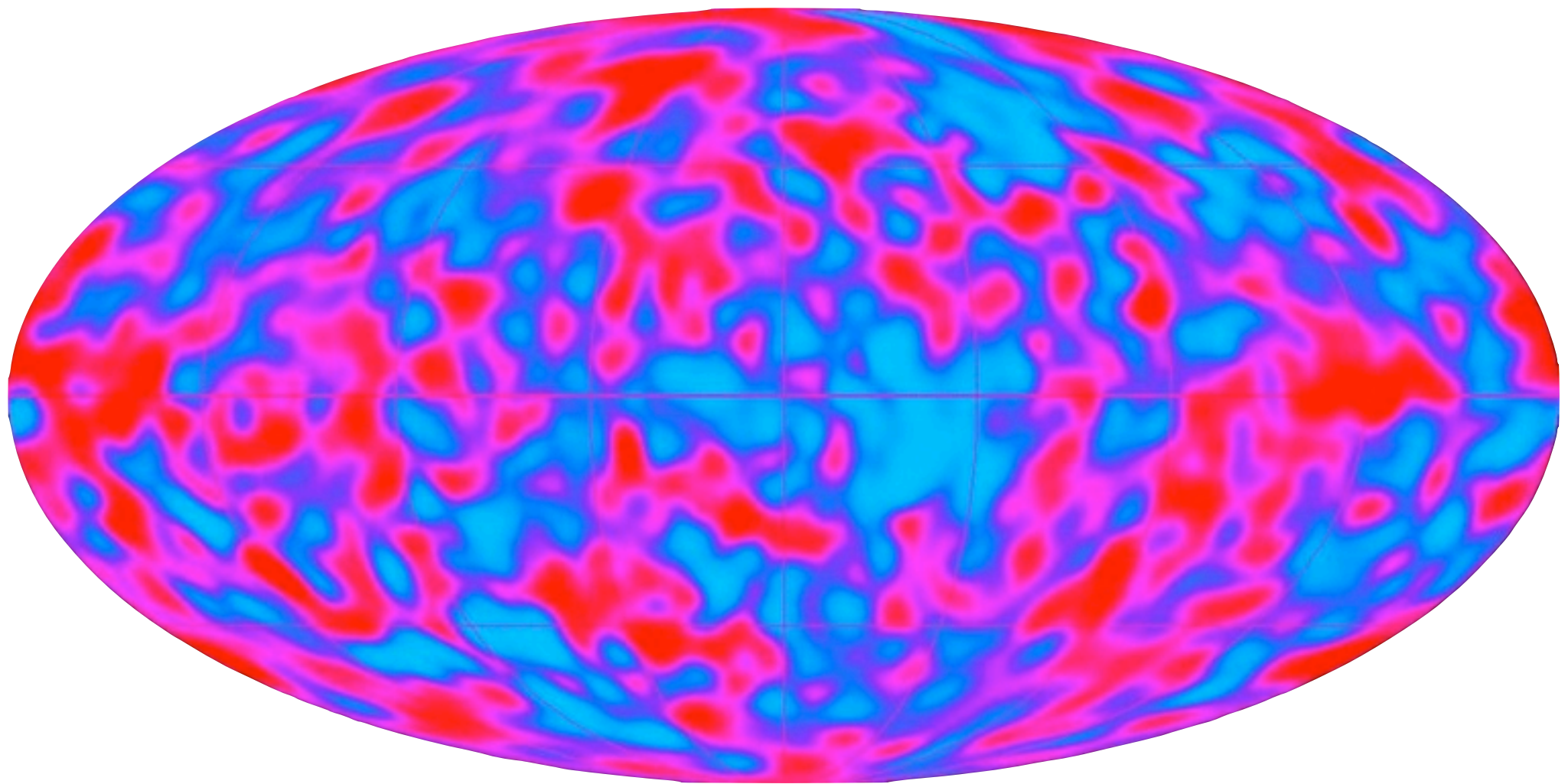
An equal area projection:

EARTH



# Irregolarità nell'universo primordiale: COBE (1989)

---

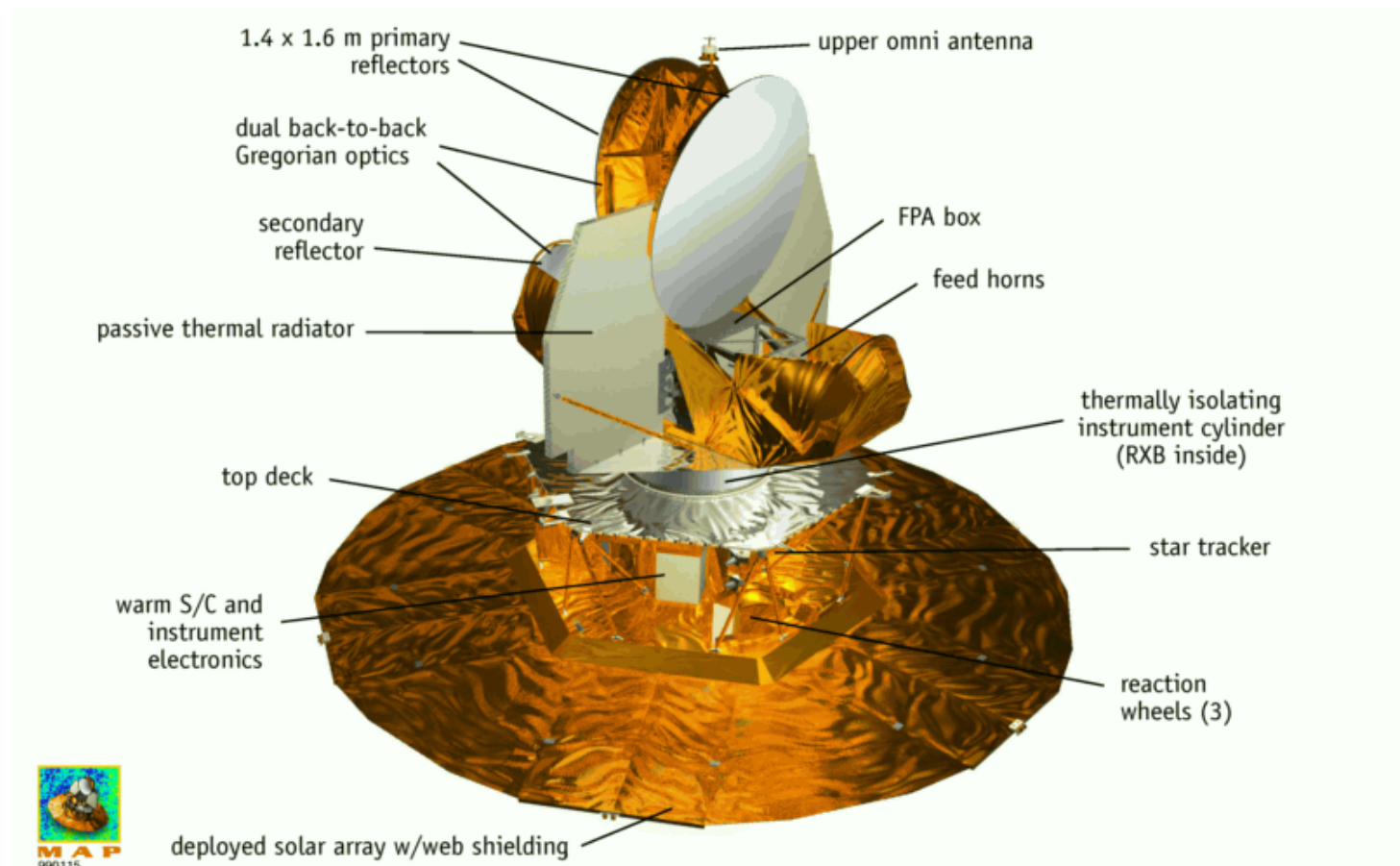




# Irregolarità nell'universo primordiale: WMAP (2003)

$$\Delta T < 2 \cdot 10^{-4} \text{ K}$$

## A New Cosmology Satellite



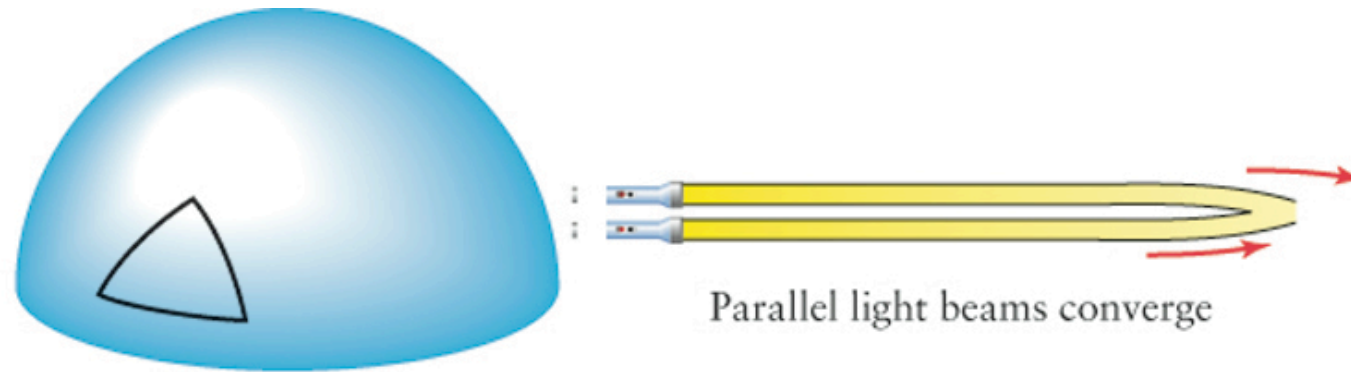
# La forma dell'universo e il suo contenuto in Energia/Massa

---

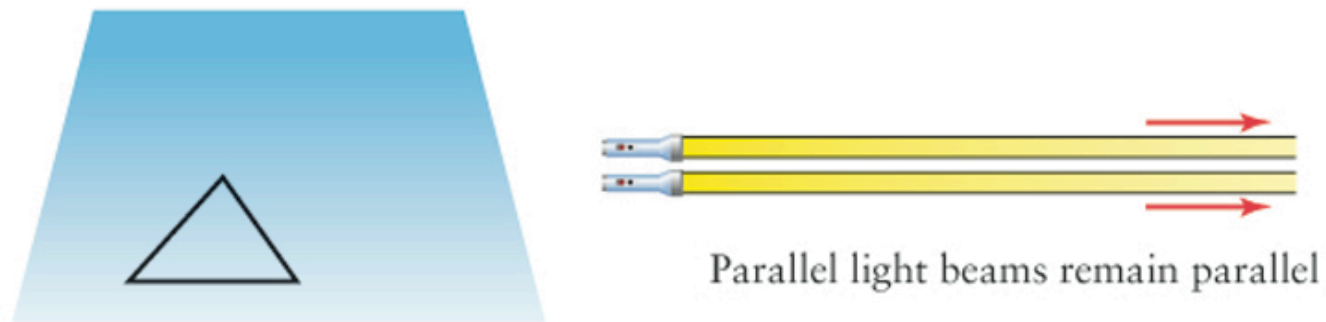
- “La gravità piega lo spazio” (Einstein).
- Sia la materia che l'energia ( $E = mc^2$ ) producono gravità.
- La curvatura globale dell'universo dipende dalla **densità di massa media ( $\rho_0$ )** di tutte le forme di materia e di energia.
- $\rho_0$  è la somma della densità di massa della materia, della radiazione e di ogni forma di energia.
- La misura della curvatura globale  $\implies \rho_0$



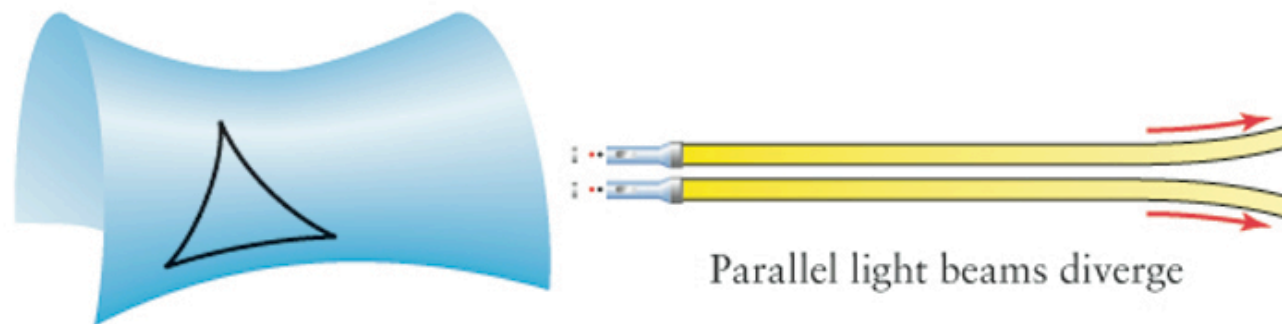
# La curvatura dell'universo



(a) Spherical space  $\rho_0 > \rho_c$ ,  $\Omega_0 > 1$



(b) Flat space  $\rho_0 = \rho_c$ ,  $\Omega_0 = 1$



(c) Hyperbolic space  $\rho_0 < \rho_c$ ,  $\Omega_0 < 1$

# La curvatura dell'universo

---

- densità critica  $\rho_c = 3H_0^2 / 8\pi G = 10^{-26} \text{ kg/m}^3$  (6 atomi di H al  $\text{m}^3$ )
- Parametro di densità  $\Omega_0 = \rho_0 / \rho_c$



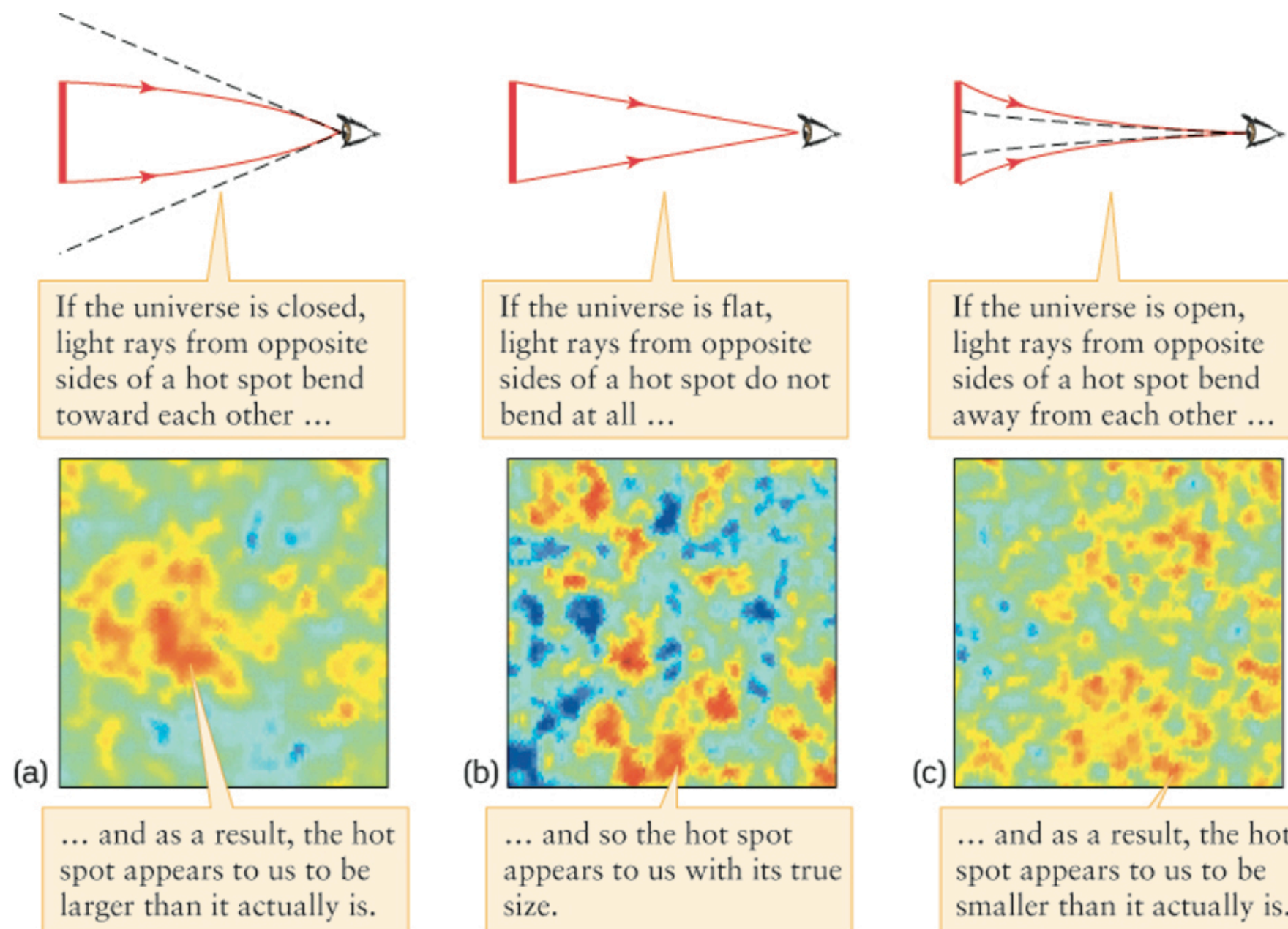
**Table 26-1** The Geometry and Average Density of the Universe

| Geometry of space | Curvature of space | Type of universe | Combined average mass density ( $\rho_0$ ) | Density parameter ( $\Omega_0$ ) |
|-------------------|--------------------|------------------|--------------------------------------------|----------------------------------|
| Spherical         | positive           | closed           | $\rho_0 > \rho_c$                          | $\Omega_0 > 1$                   |
| Flat              | zero               | flat             | $\rho_0 = \rho_c$                          | $\Omega_0 = 1$                   |
| Hyperbolic        | negative           | open             | $\rho_0 < \rho_c$                          | $\Omega_0 < 1$                   |



# Misurare la curvatura dell'universo

- Dimensione angolare dei hot spots in un universo piatto:  $1^\circ$



# L'universo è piatto

---

- Se l'universo è piatto ( $\Omega_0 = 1$ ,  $\rho_0 = \rho_c$ ), c'è un grave problema:
- $\rho_0$  dovrebbe essere uguale a  $\rho_m$  (solo 0.02% proviene dalla radiazione)
- La **densità media di materia** è  $\rho_m = 2.4 \cdot 10^{-27} \text{ kg/m}^3$
- Possiamo definire un **parametro di densità di materia**  $\Omega_m = \rho_m / \rho_c = 0.24$
- Se  $\rho_0 = \rho_m$ , allora  $\Omega_0$  dovrebbe essere uguale a  $\Omega_m$ ! L'universo dovrebbe essere aperto, ma non piatto come lo mostra il CMB.
- Ma  $\Omega_0 = 1 \implies$  la radiazione e la materia rendono conto **solo** del 24% della  $\rho_0$ .  
**Che cosa rende conto del resto?**

# Energia oscura

---

- La sorgente della densità mancante non si rivela da effetti gravitazionali (come la materia oscura)
- Parametro di densità di energia oscura:  $\Omega_\Lambda = \rho_\Lambda / \rho_c$
- $\Omega_0 = \Omega_m + \Omega_\Lambda$  e  $\rho_0 = \rho_m + \rho_\Lambda$  (il contributo della radiazione è trascurabile)
- $\Omega_\Lambda = \Omega_0 - \Omega_m = 0.76$ : L'energia oscura rende conto del 76% del contenuto dell'universo!