

Corso di astronomia - IV FAM



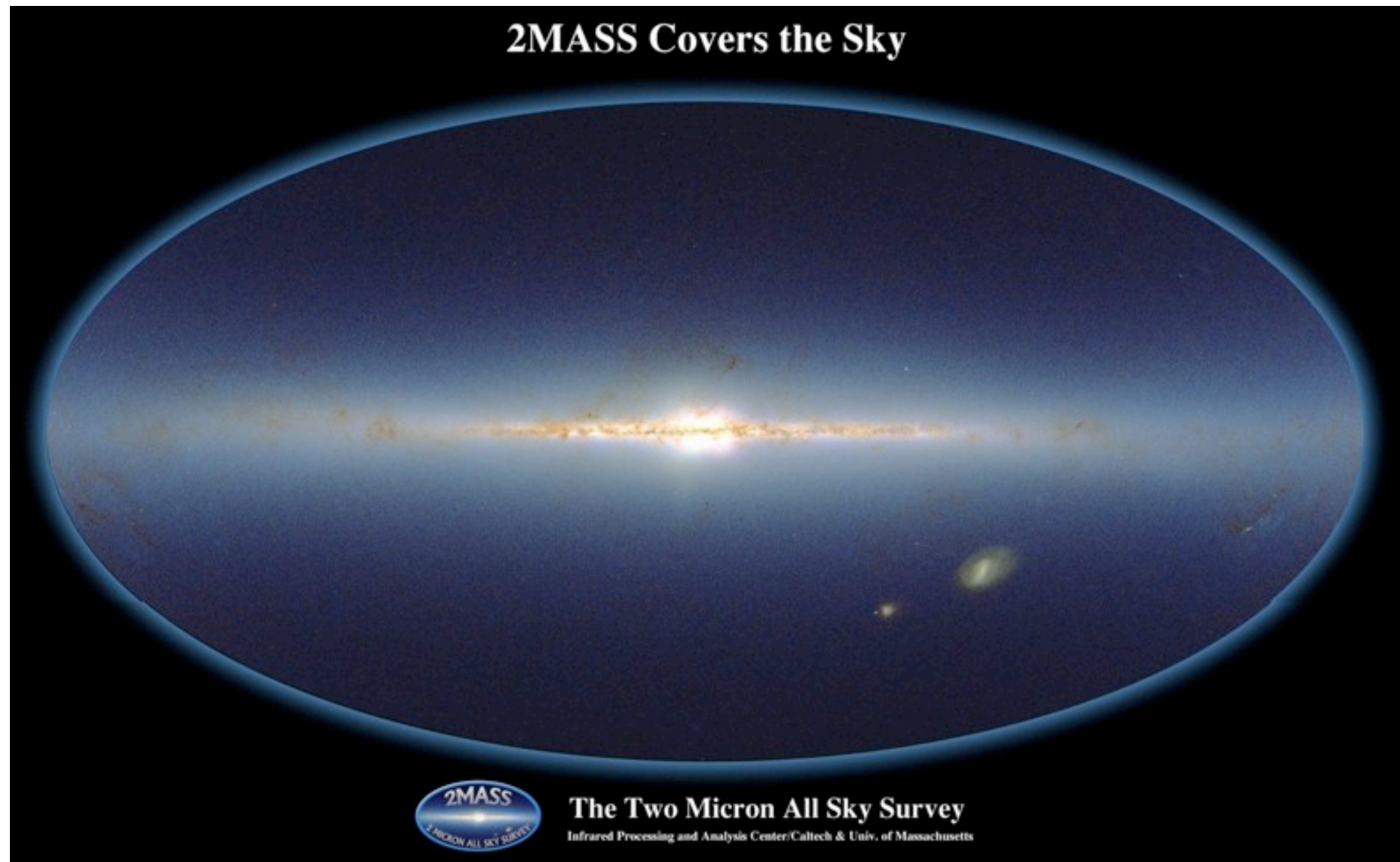
La Via Lattea



La Via Lattea



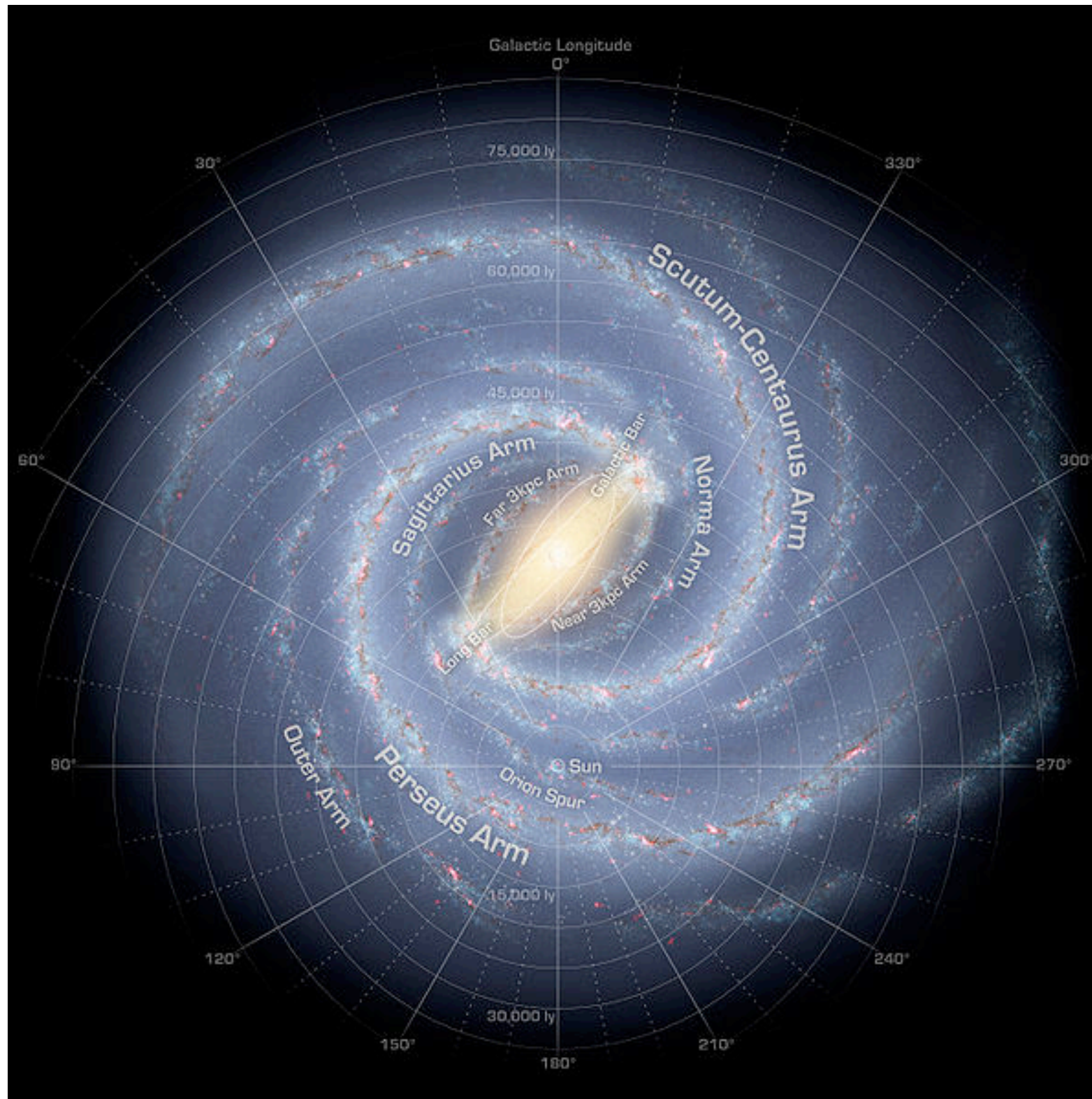
La Via Lattea nell'infrarosso



La Via Lattea nell'infrarosso

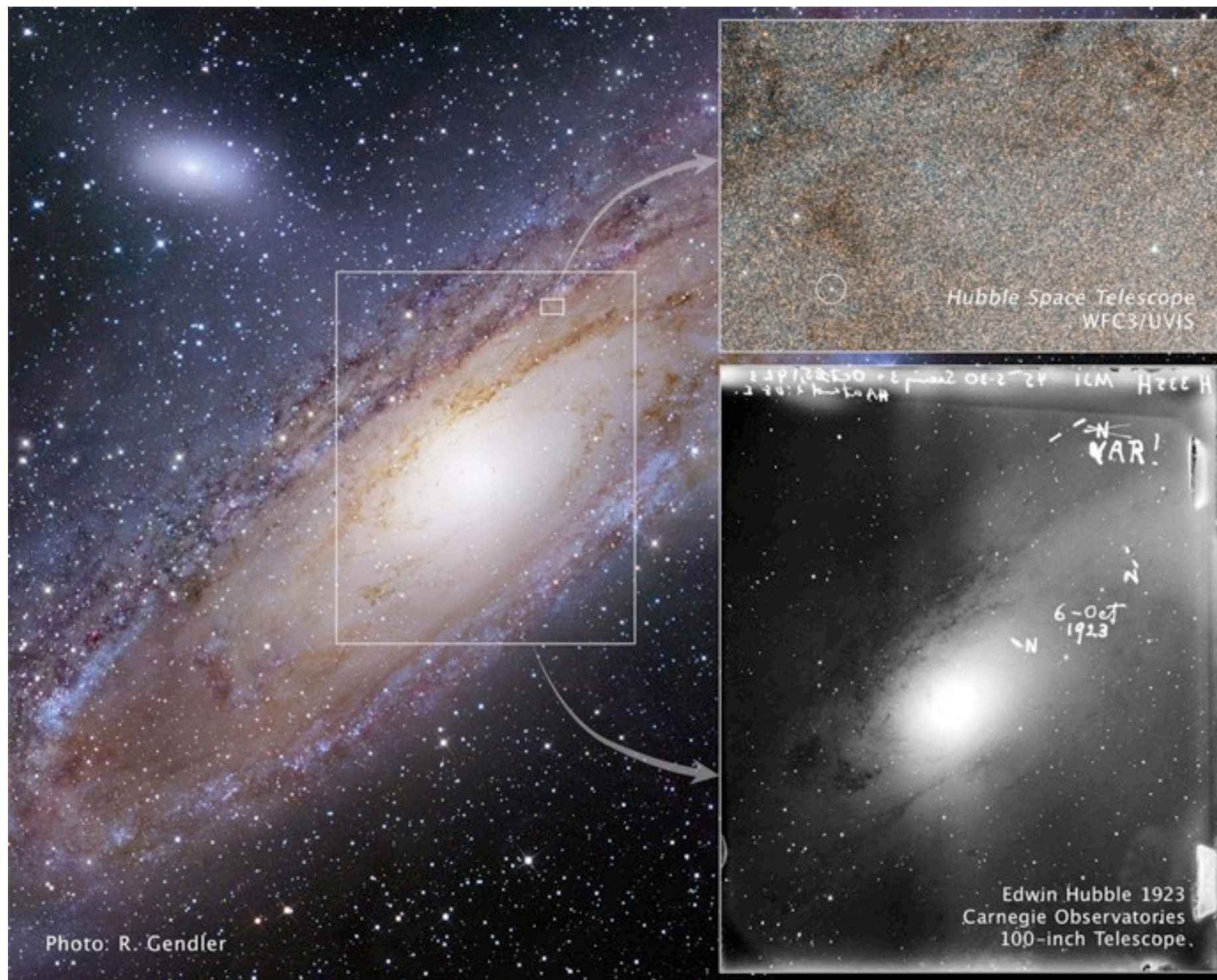


La Via Lattea nell'infrarosso

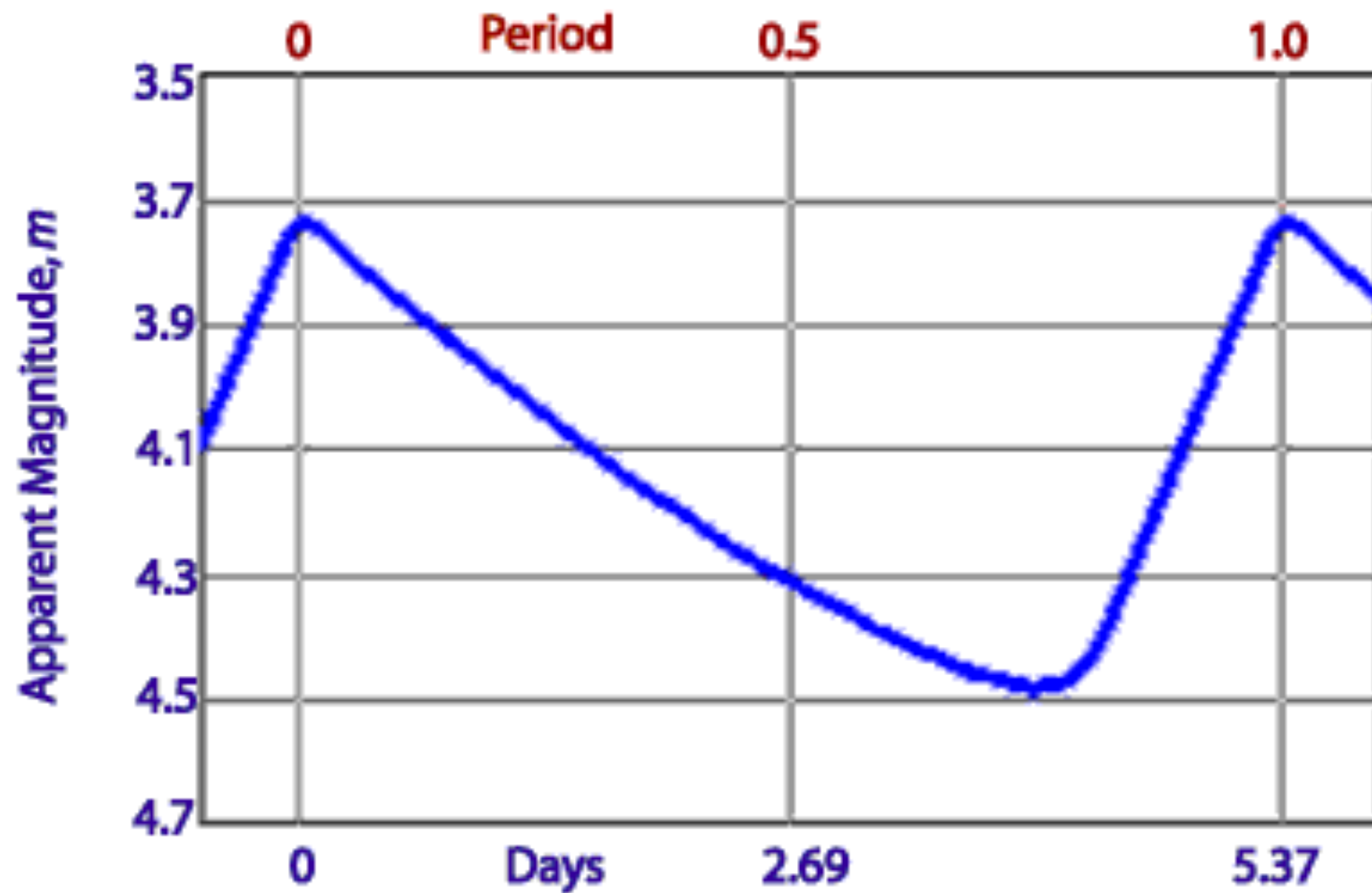


Un po' di storia

Le nebulose sono (molto) oltre la Via Lattea

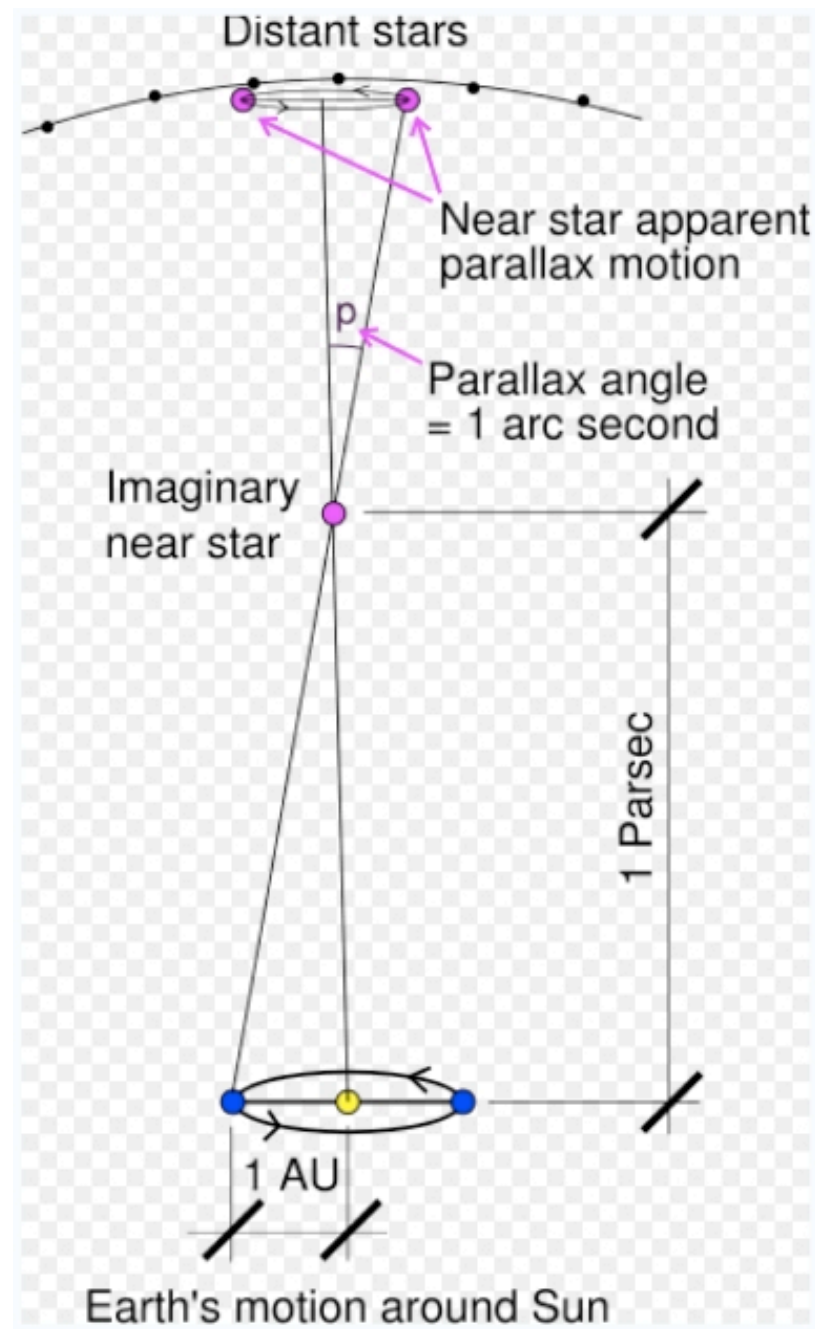


Le nebulose sono (molto) oltre la Via Lattea



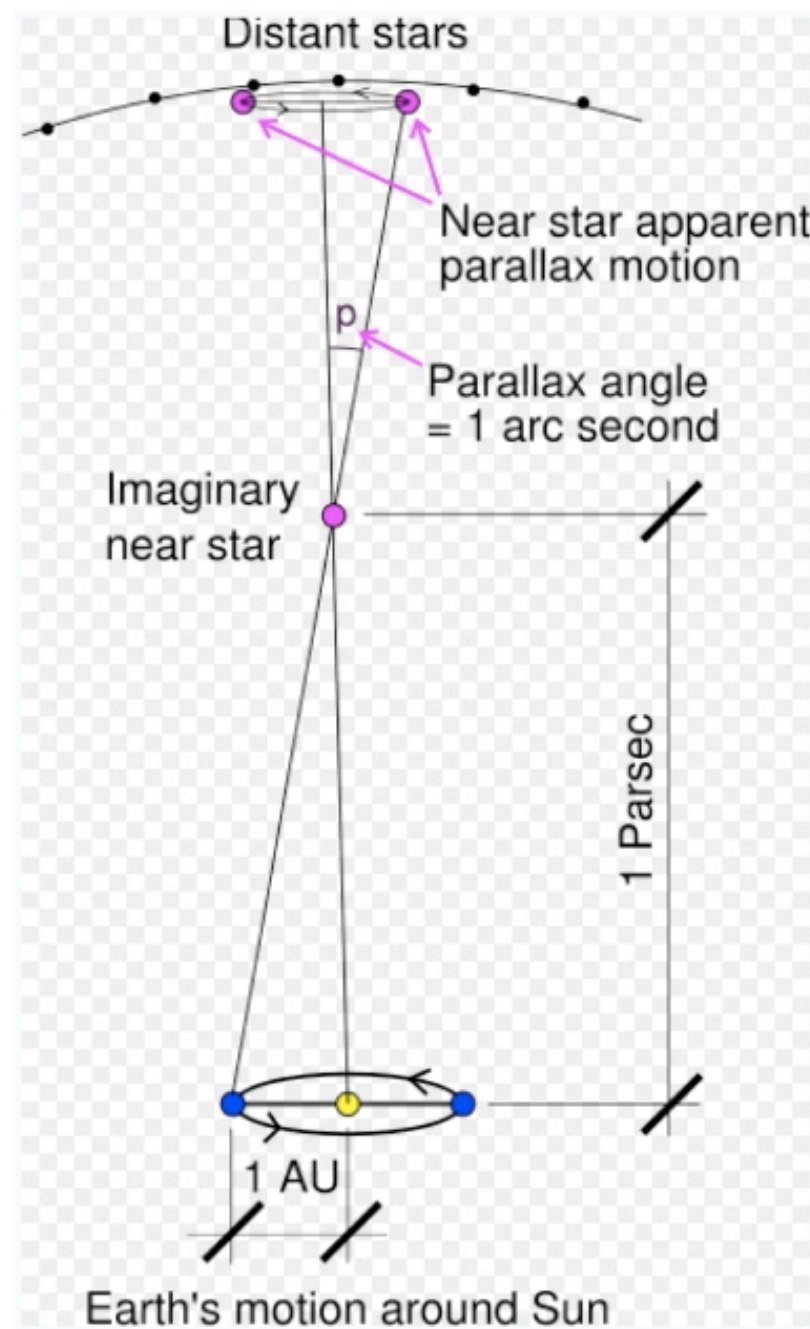
Light Curve for δ Cephei

Parsec come unità di distanza



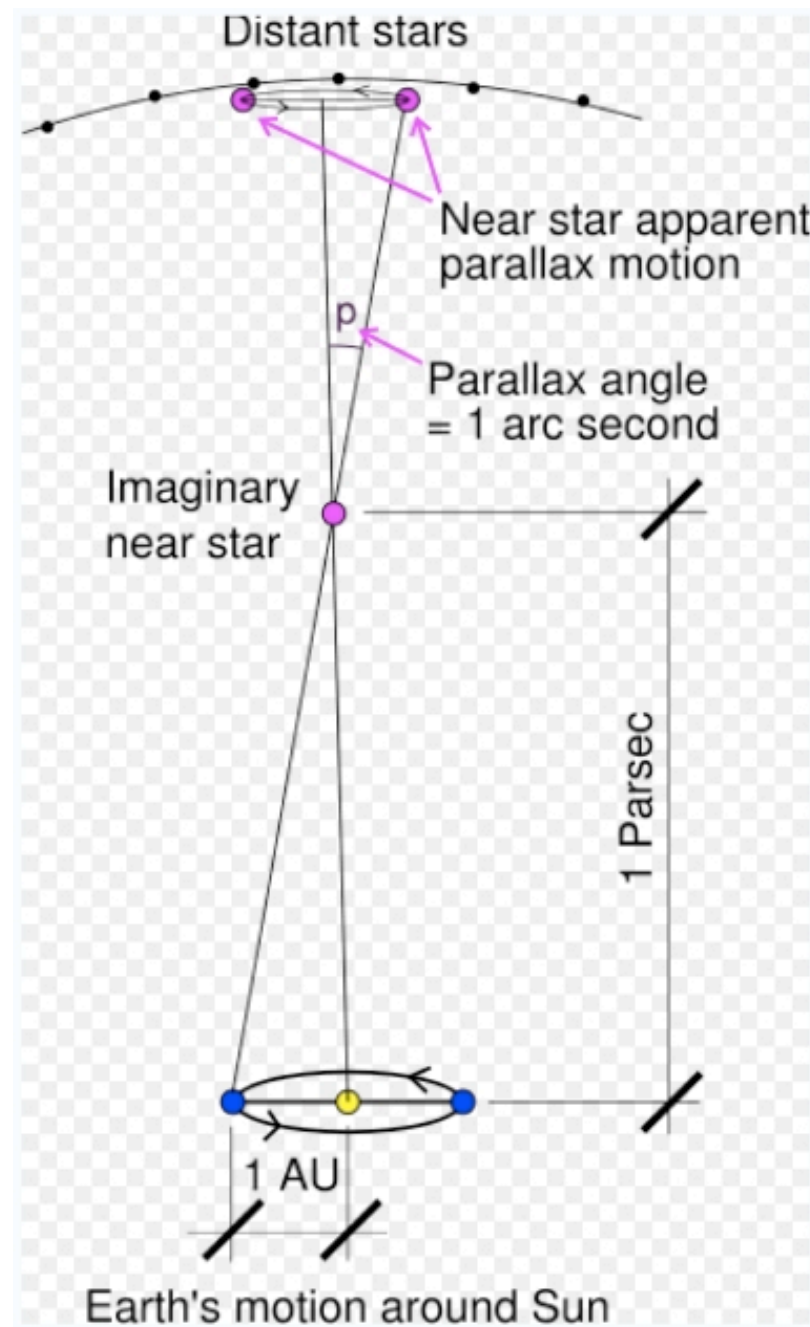
Parsec come unità di distanza

- 1 parsec = distanza sotto la quale 1 AU appare come 1 secondo d'arco



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 e distanze

- magnitudine **apparente** m

Magnitudine e distanze

- magnitudine **apparente** m
- magnitudine **assoluta** M

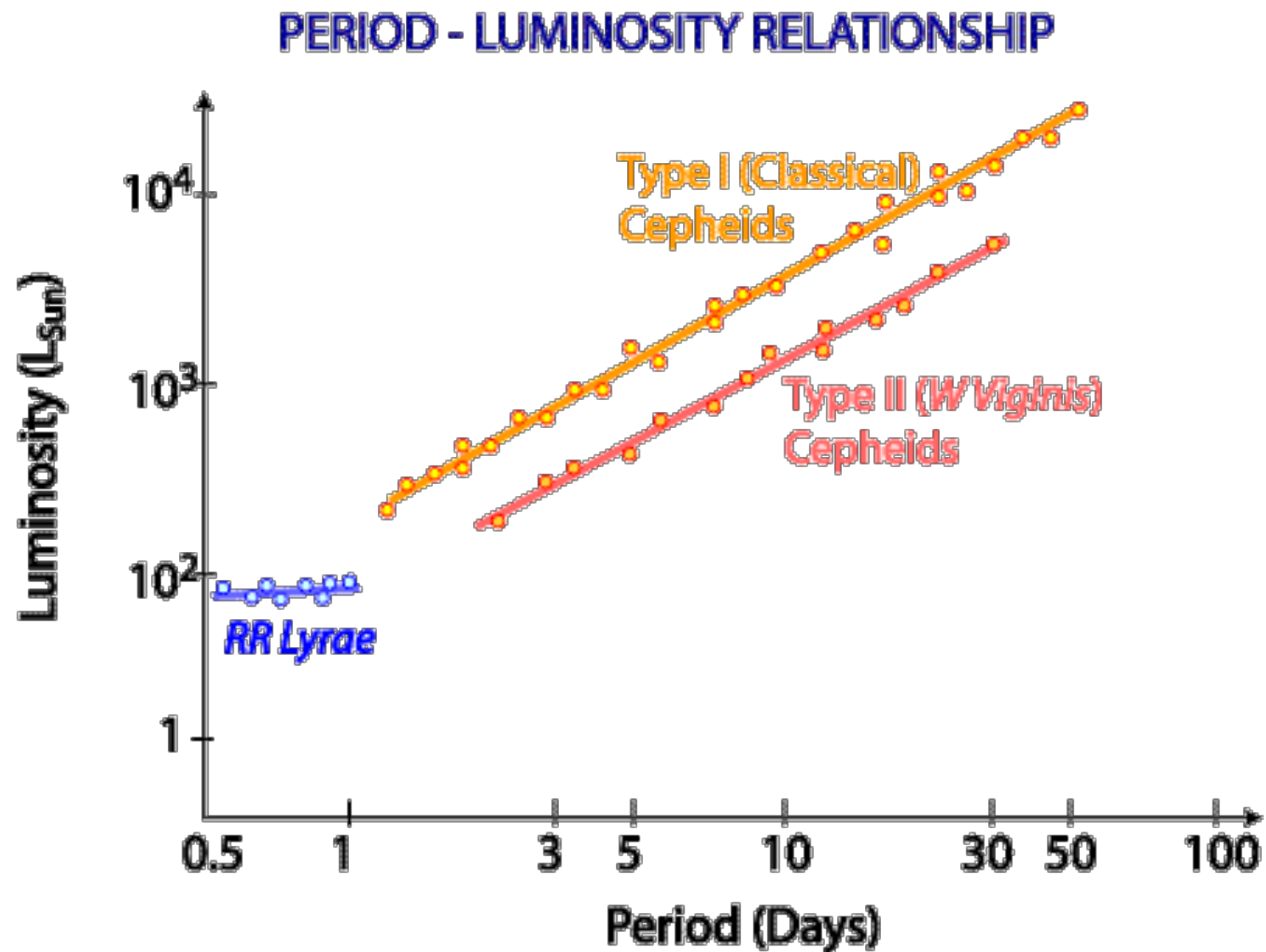
Magnitudine e distanze

- 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_{star} in unità solari.
[<http://en.wikipedia.org/wiki/Luminosity>]

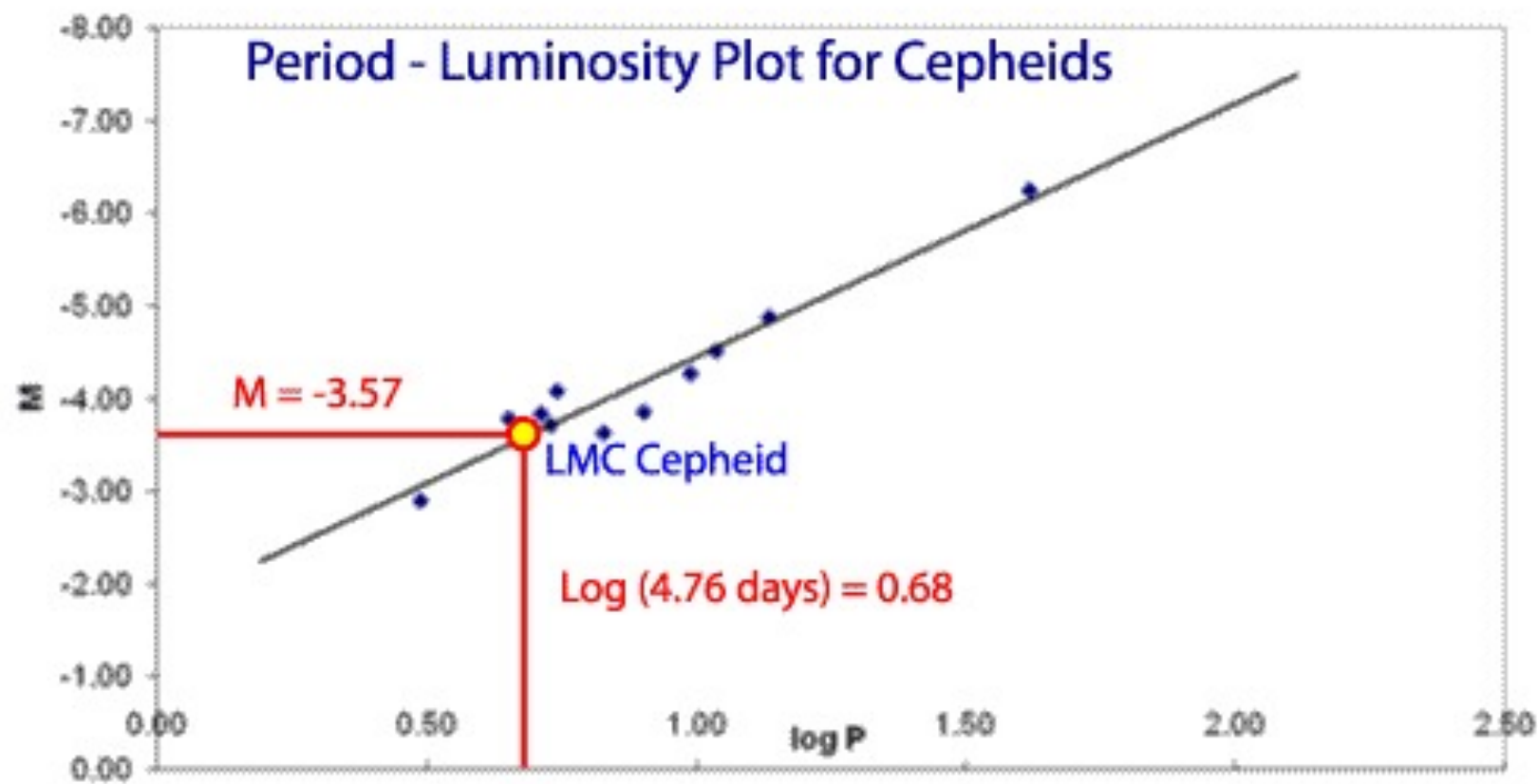
Magnitudine e distanze

- 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_{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

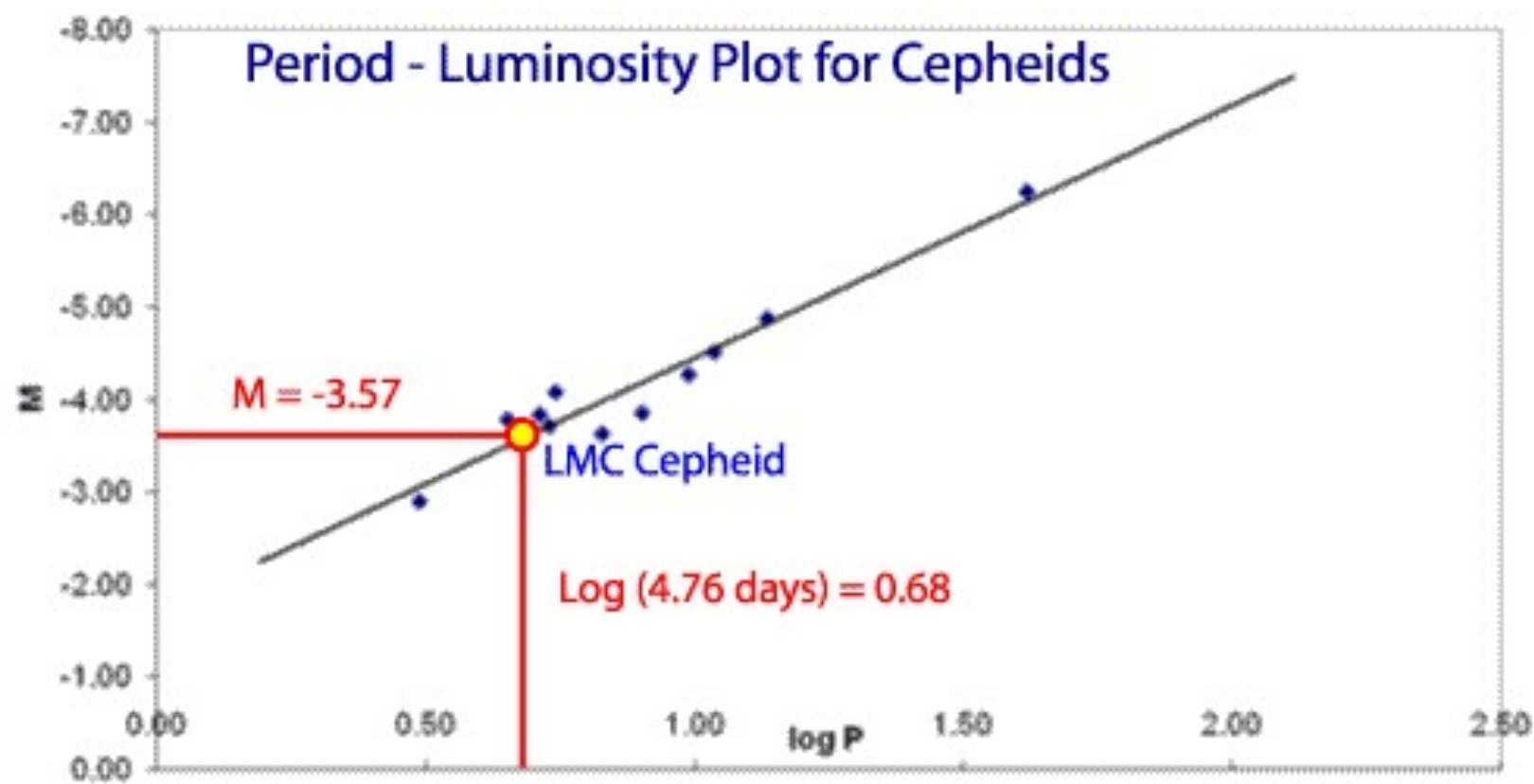


Calcolare la distanza delle cefeide

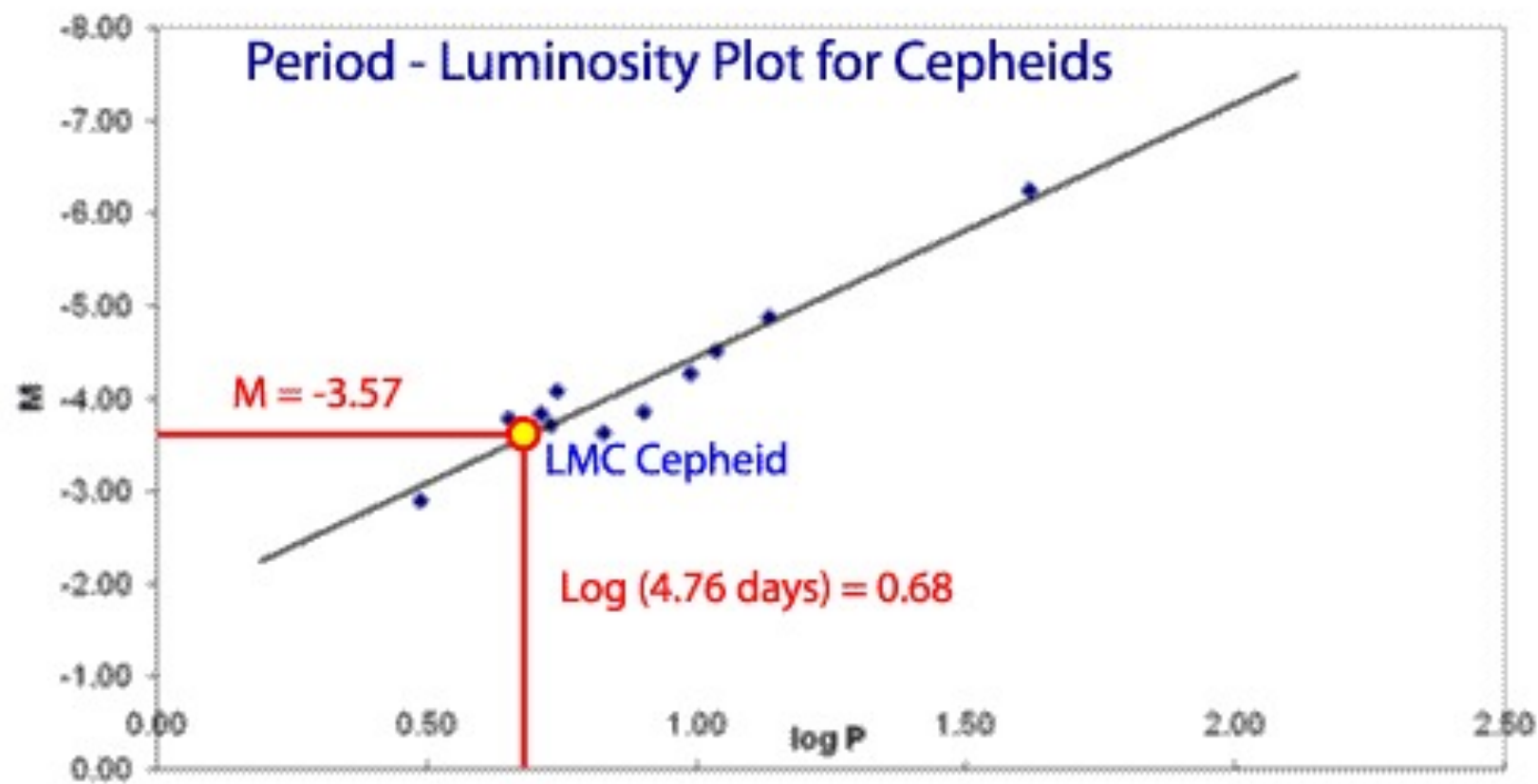


Calcolare la distanza delle cefeide

- magnitudine apparente media: $m = 15.56$



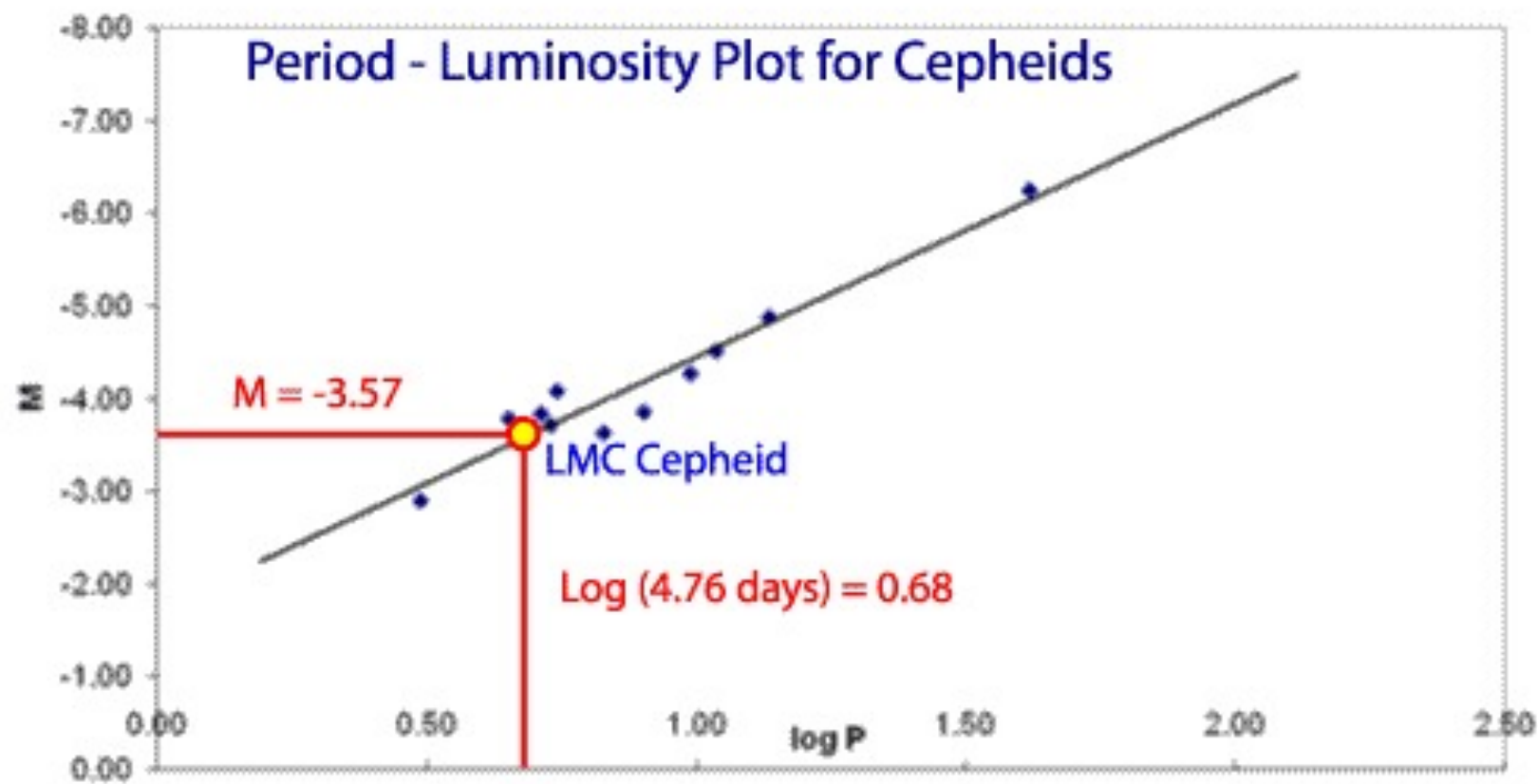
Calcolare la distanza delle cefeide



- magnitudine apparente media: $m = 15.56$

- $m - M = 5 \log (d/10) \Rightarrow$
 $d = 10^{(m-M+5)/5}$

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

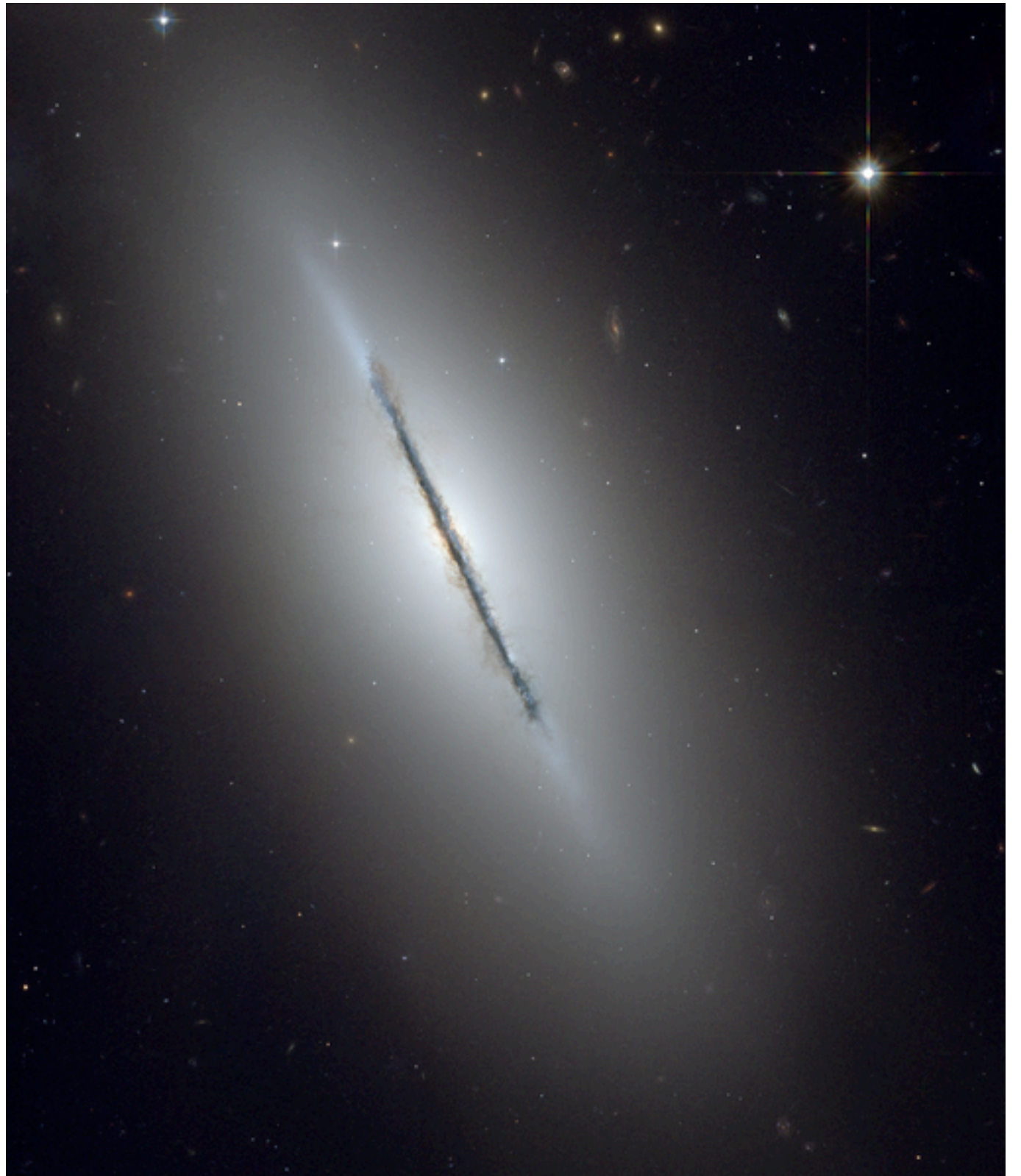
Galassie lenticolari



Galassie

Galassie lenticolari

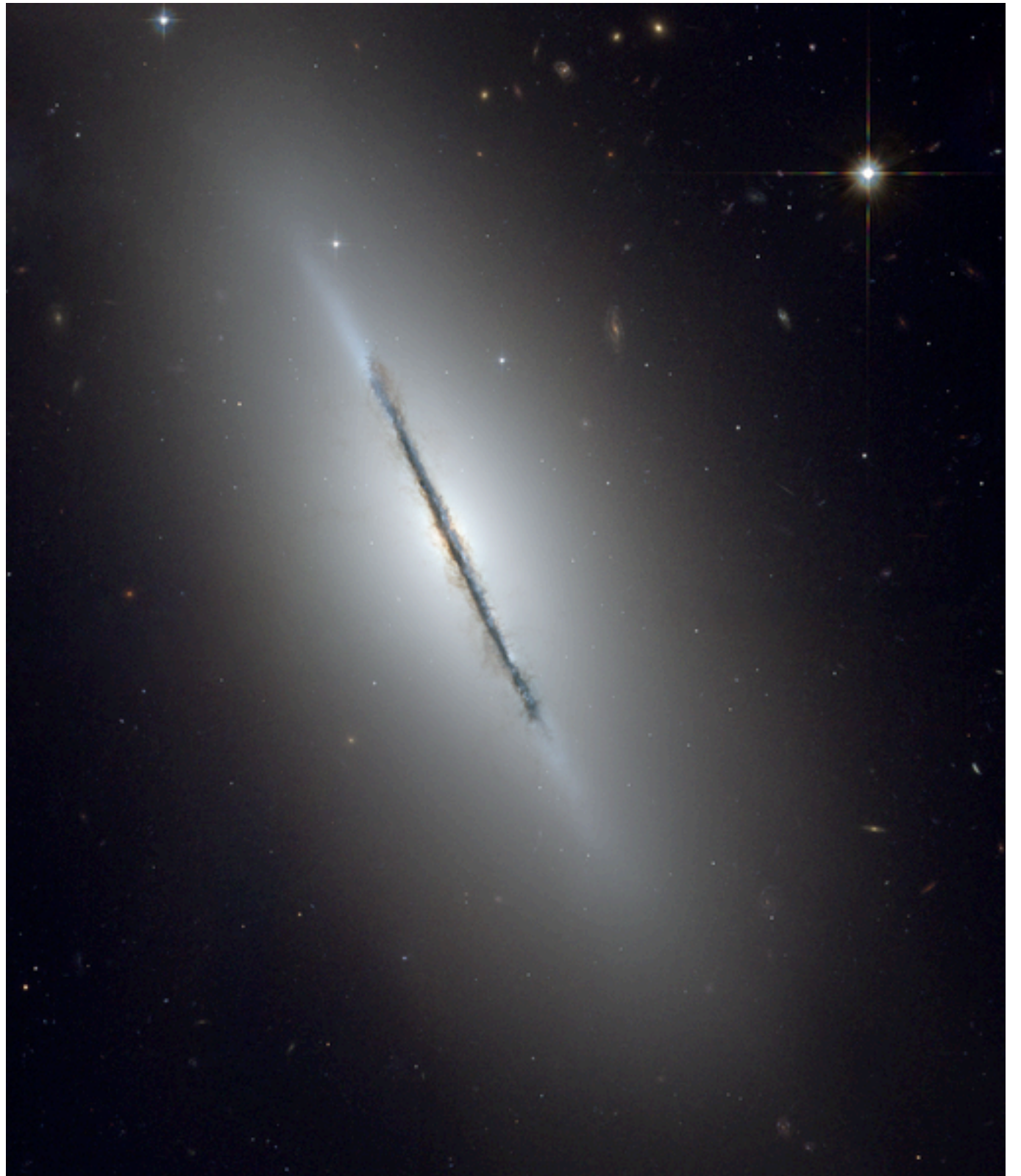
- a forma di “lente”



Galassie

Galassie lenticolari

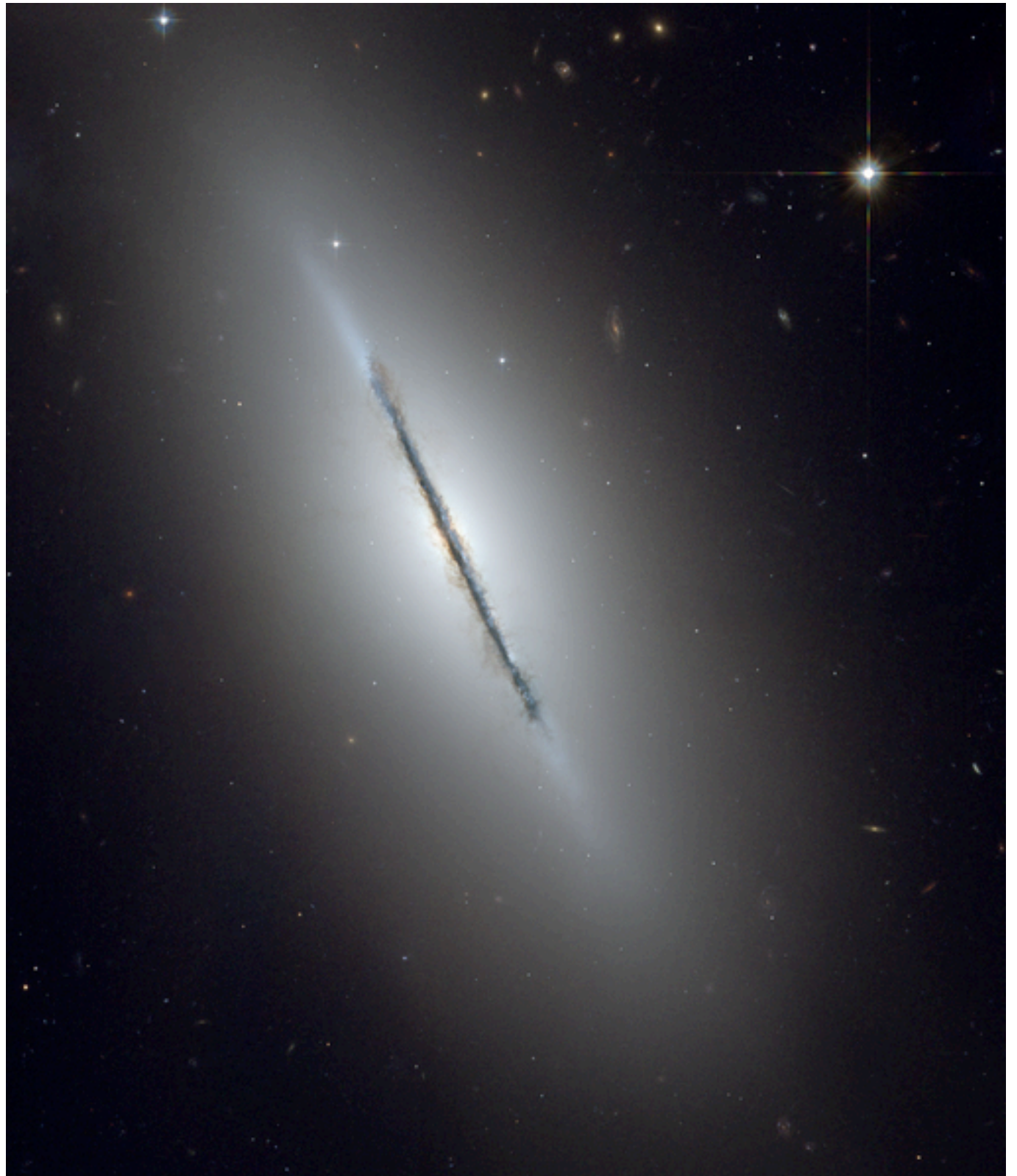
- a forma di “lente”
- possiedono un bulge e un disco



Galassie

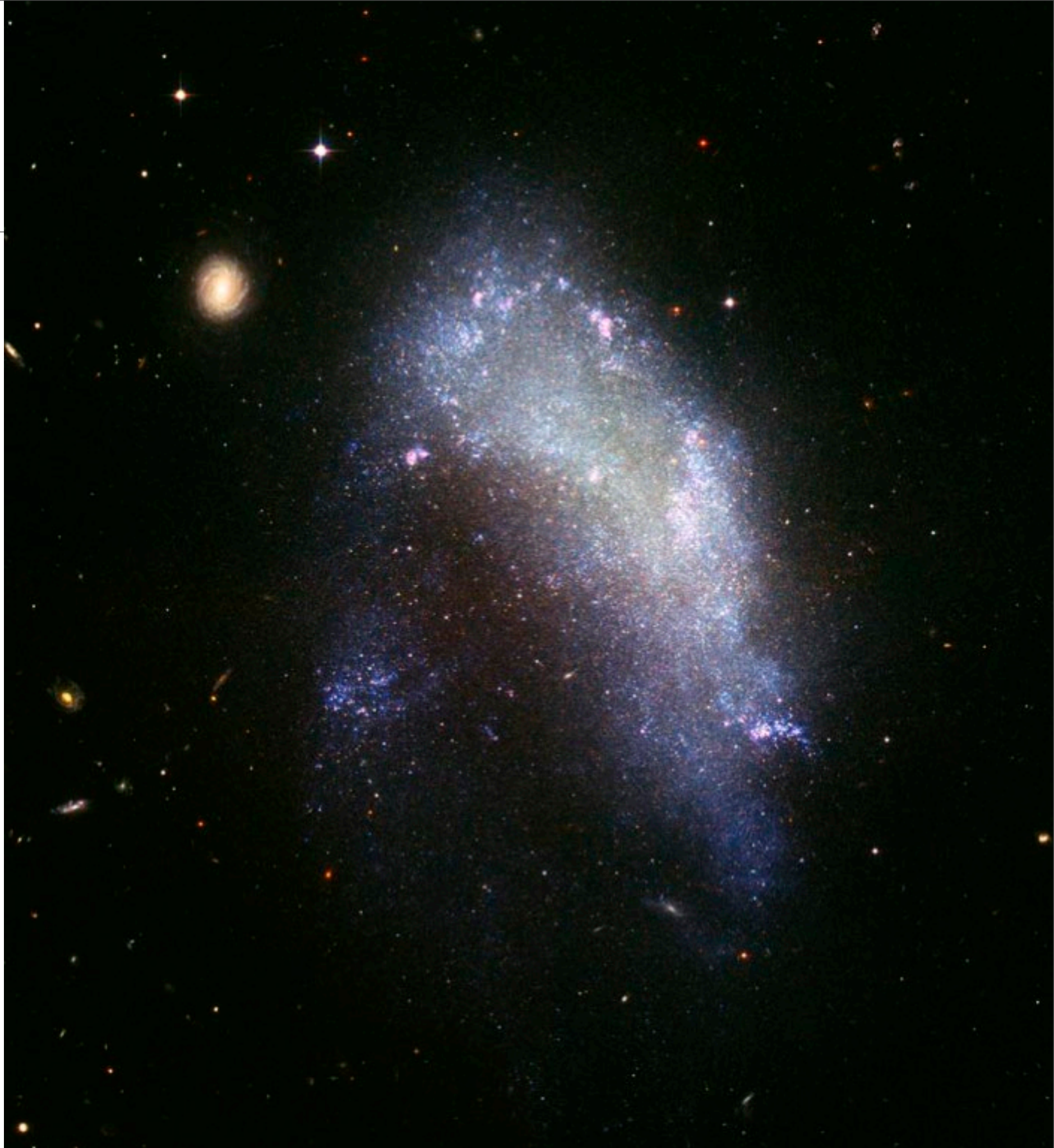
Galassie lenticolari

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

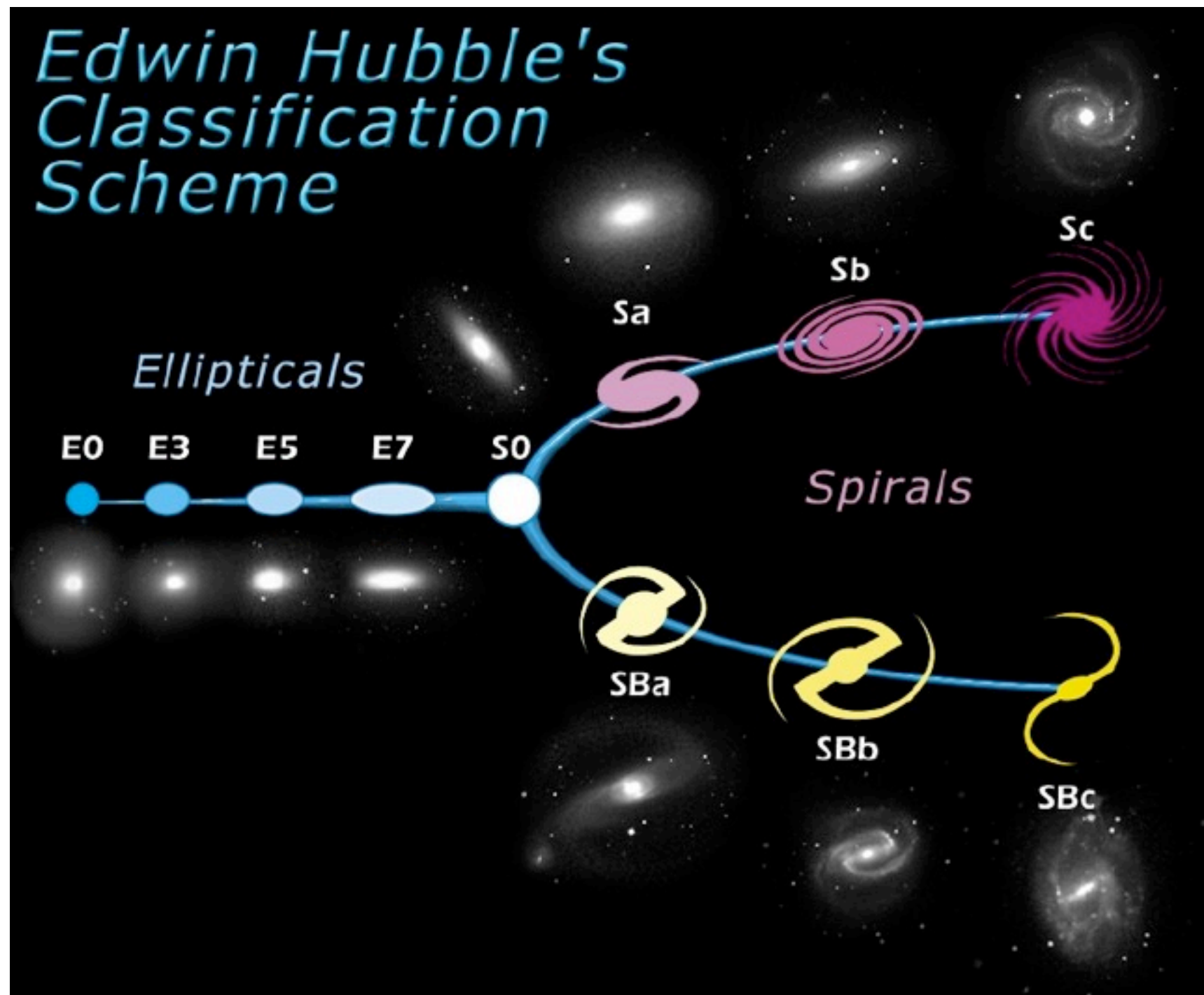


Galassie

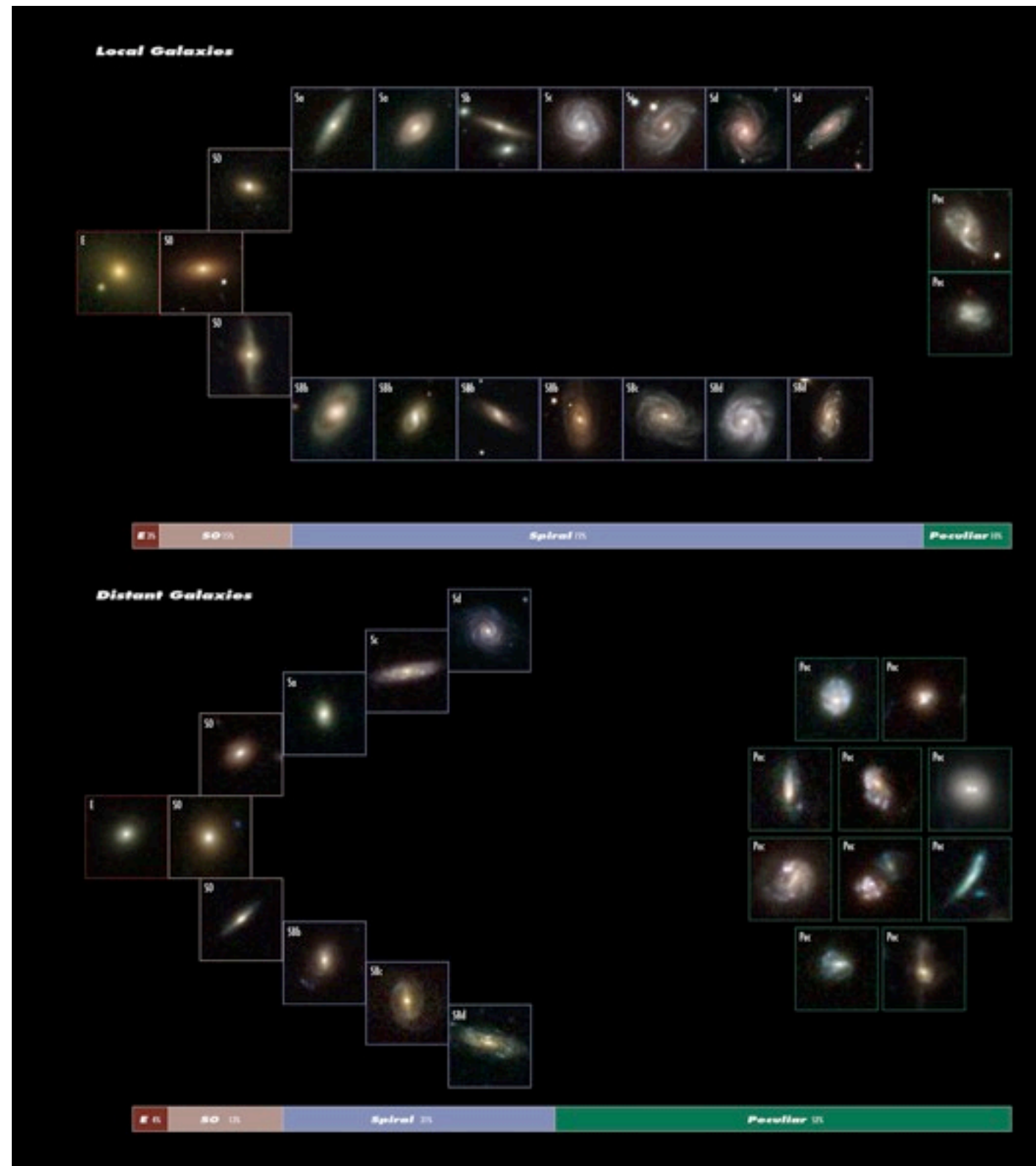
Galassie irregolari



Classificazione di galassie



Classificazione di galassie



Galassie a disco



Galassie a disco



Galassie a disco



Galassie a disco



Galassie a disco



Galassie a disco: NGC 4945

Galassie a disco: NGC 4945



Galassie a disco con barre



Galassie a disco con barre



Galassie a disco con barre



Galassie a disco con barre

Barred Spiral Galaxy NGC 1300



Hubble
Heritage





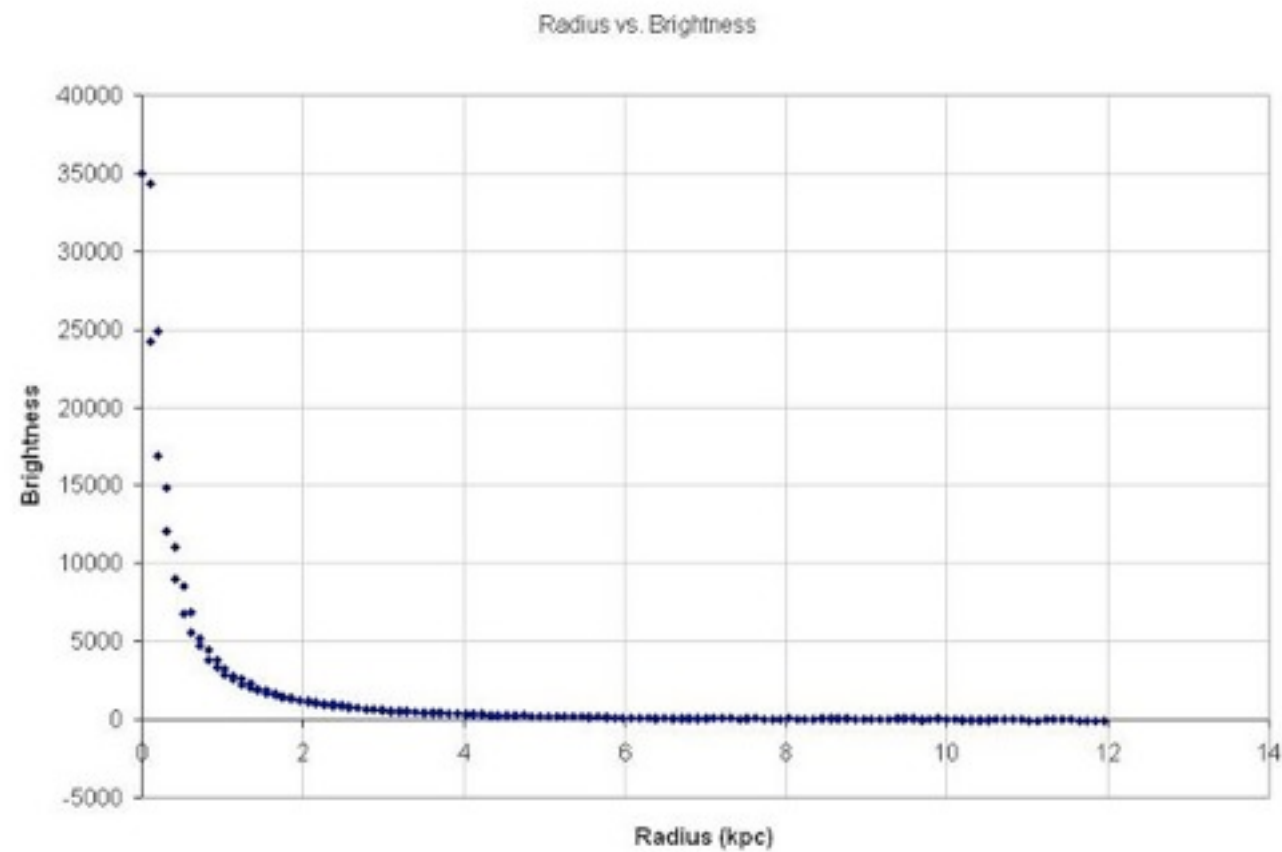
Profili di densità di galassie

Galassia ellittica M59



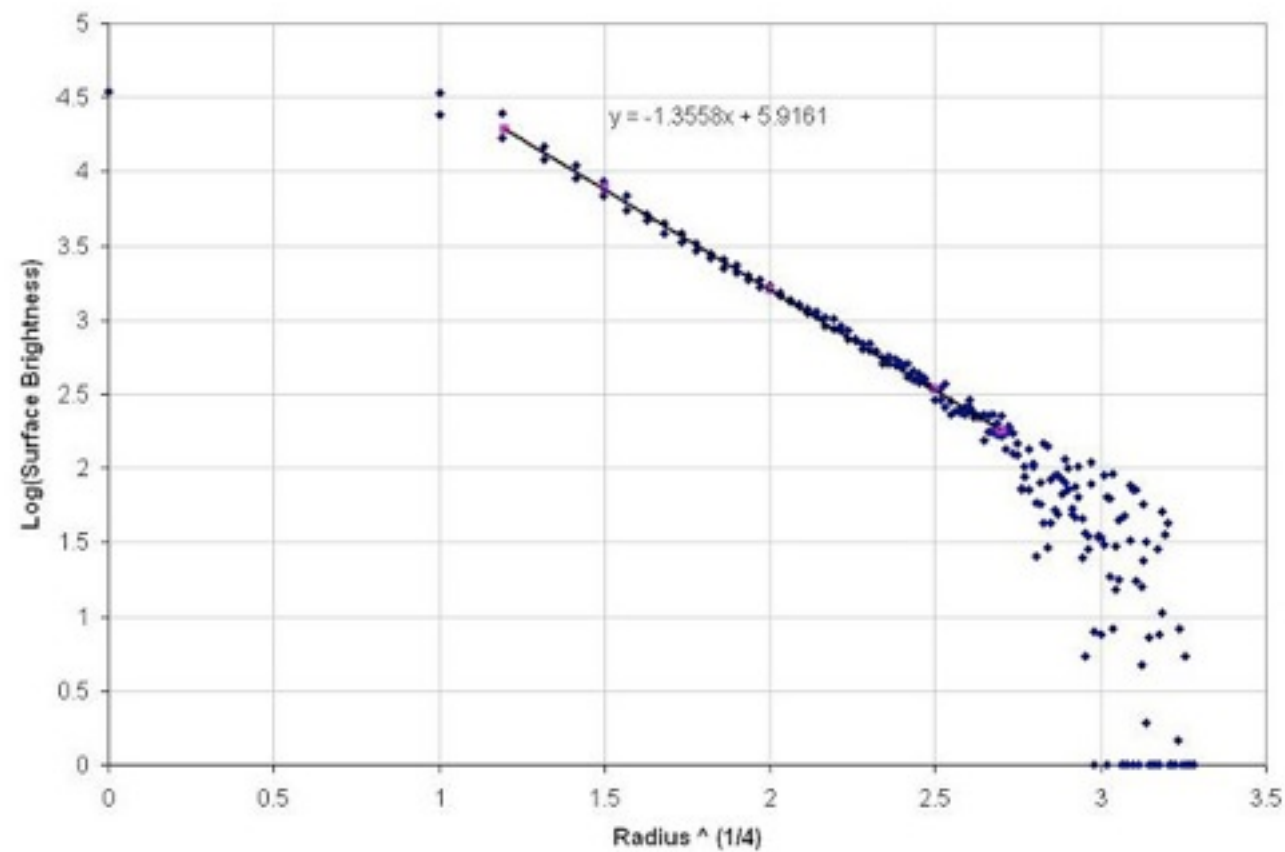
Profili di densità di galassie

Galassia ellittica M59



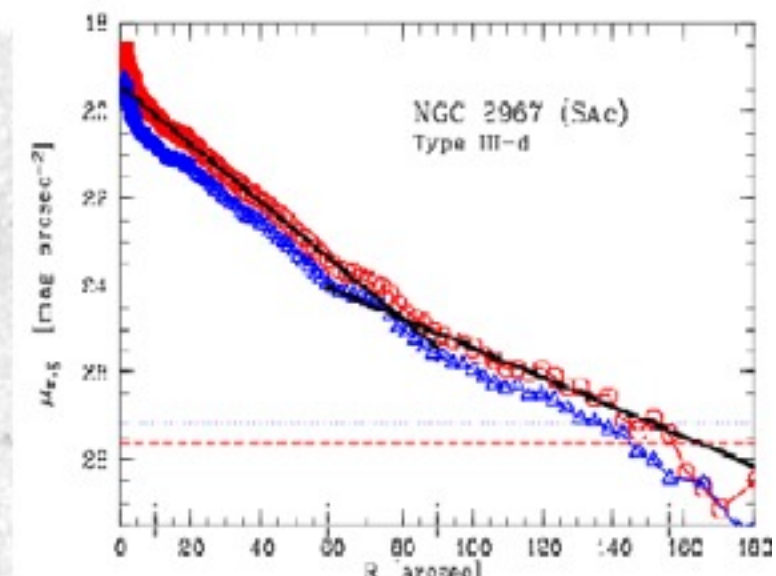
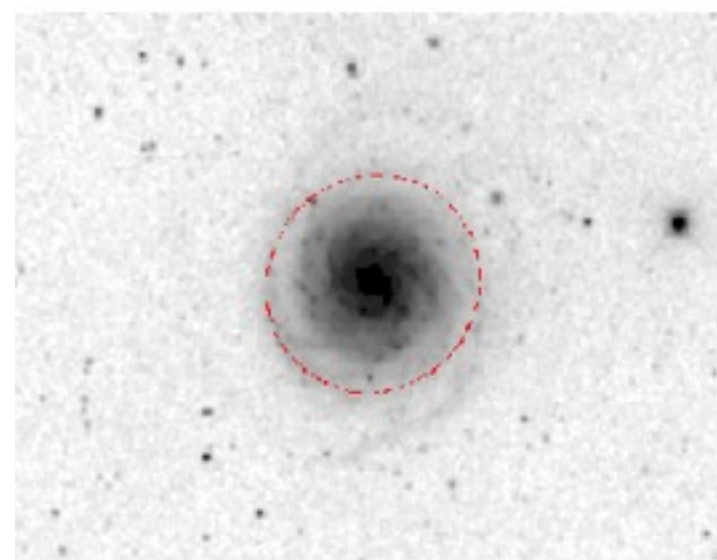
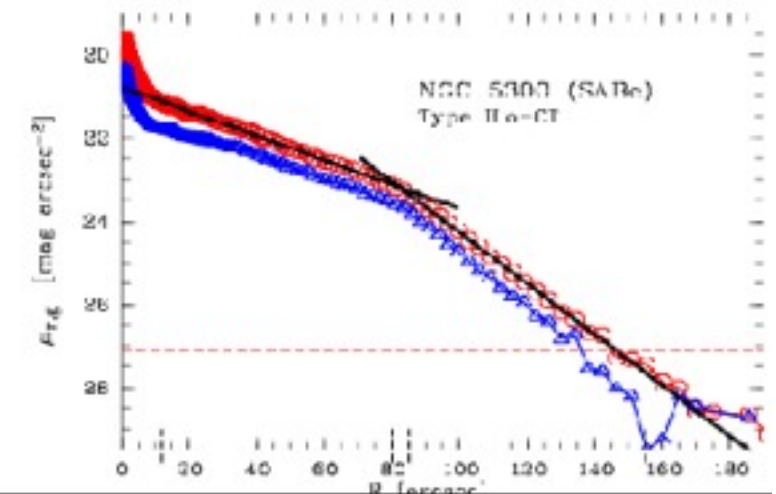
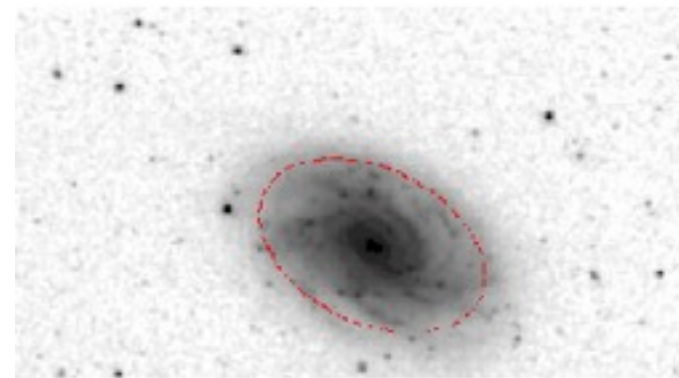
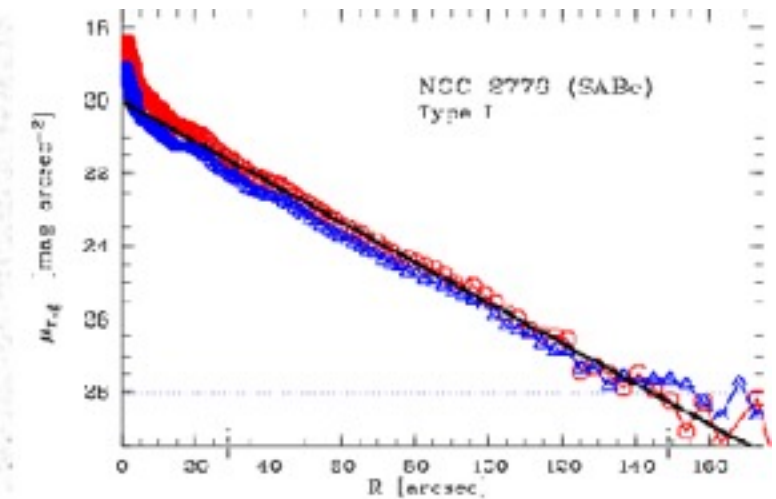
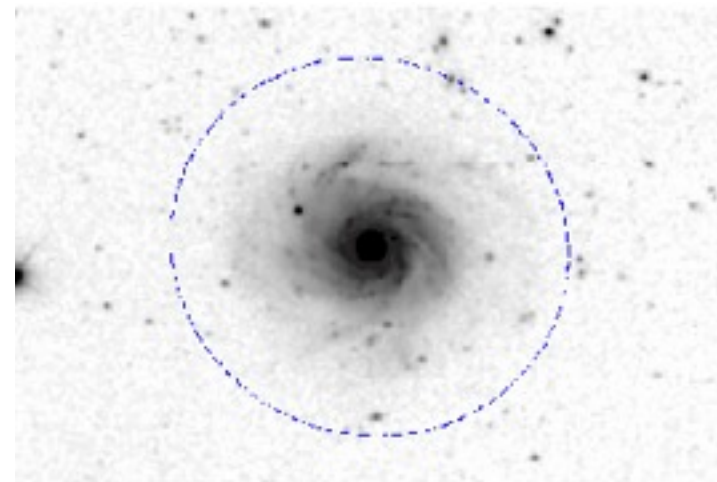
Profili di densità di galassie

Galassia ellittica M59



Profili di densità di galassie

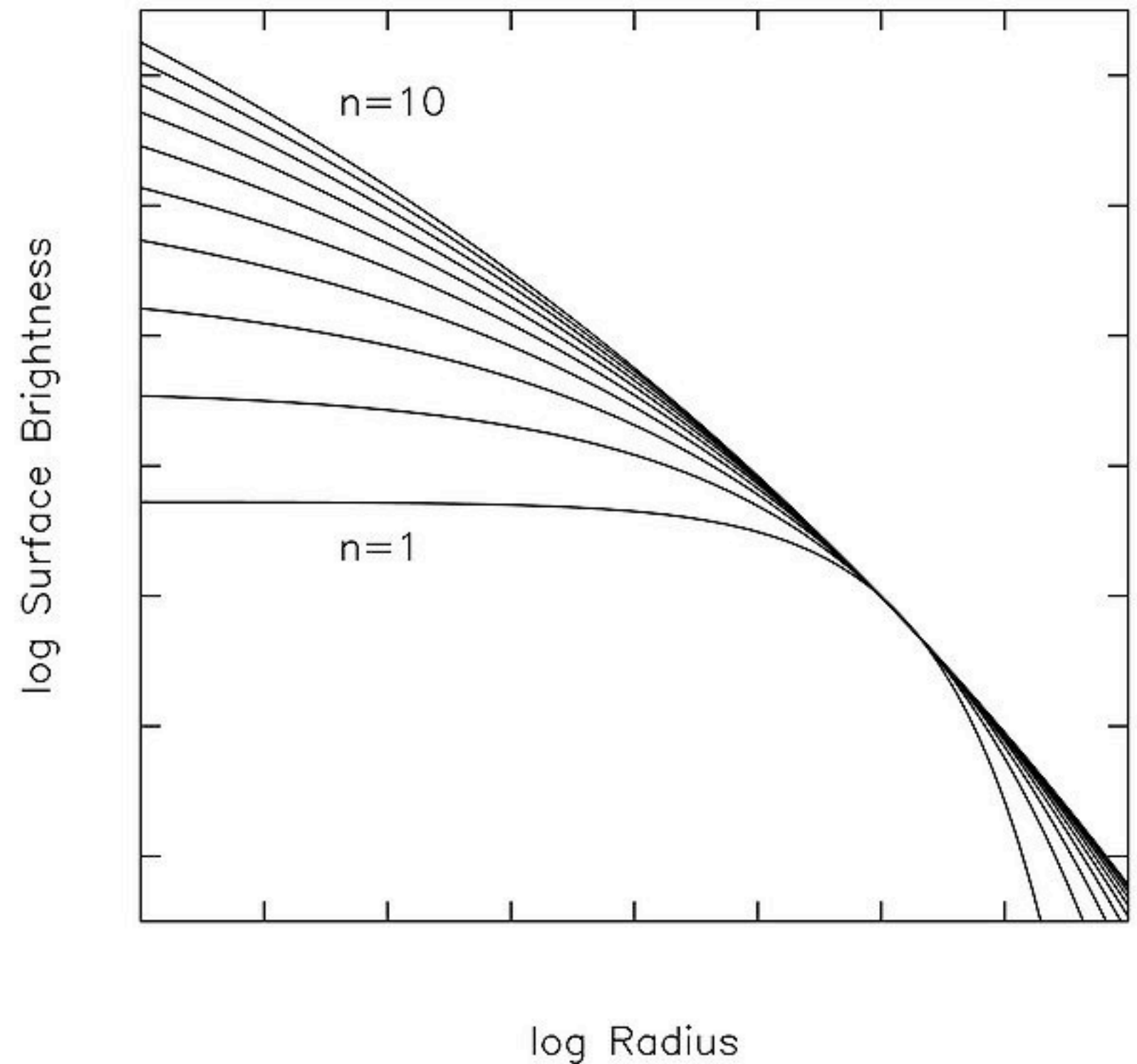
Galassia a disco



Profili di densità di galassie

Sersic's profile:

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



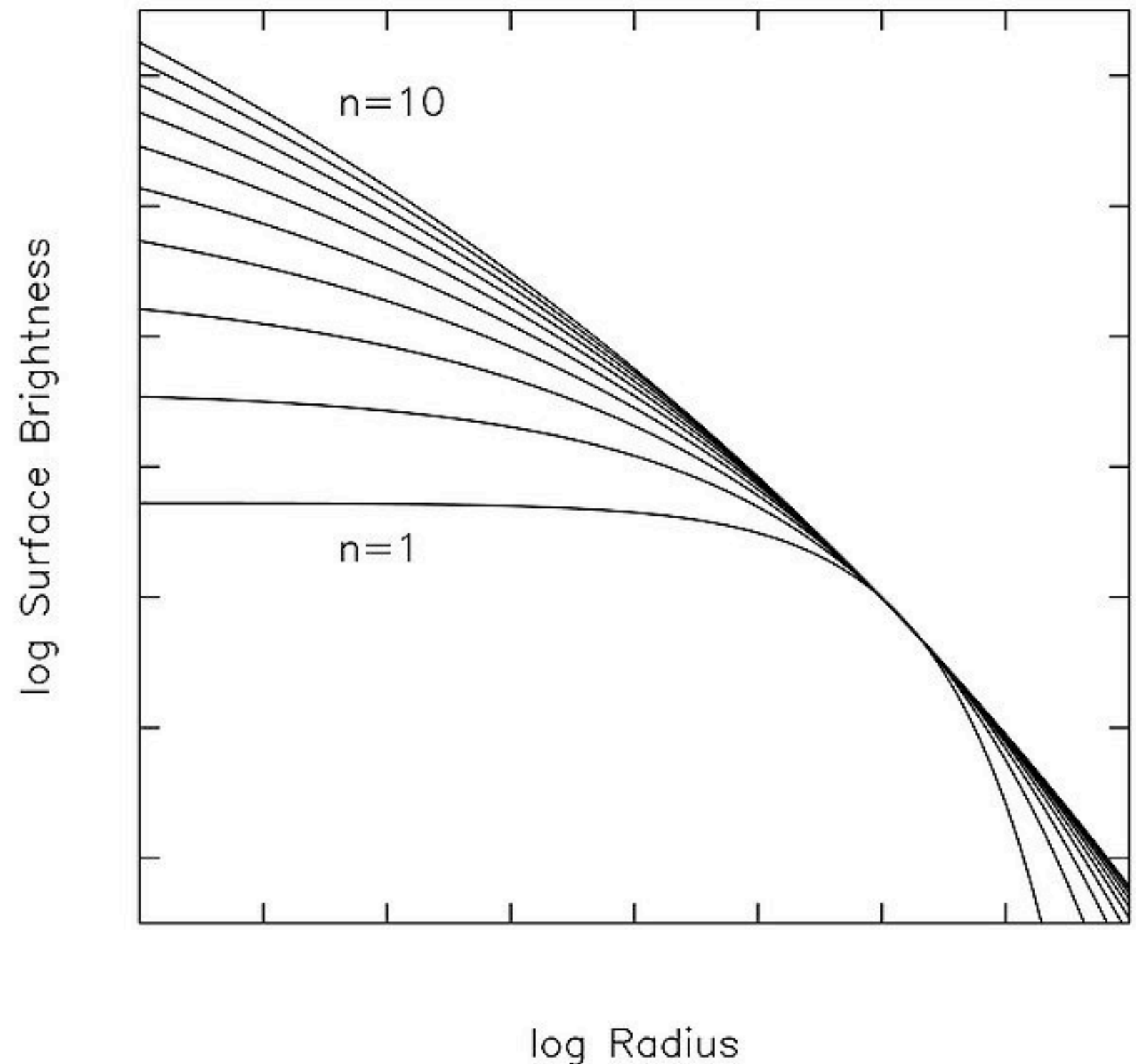
Profili di densità di galassie

Sersic's profile:

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

Galassie ellittiche: $n=4$

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



Profili di densità di galassie

Sersic's profile:

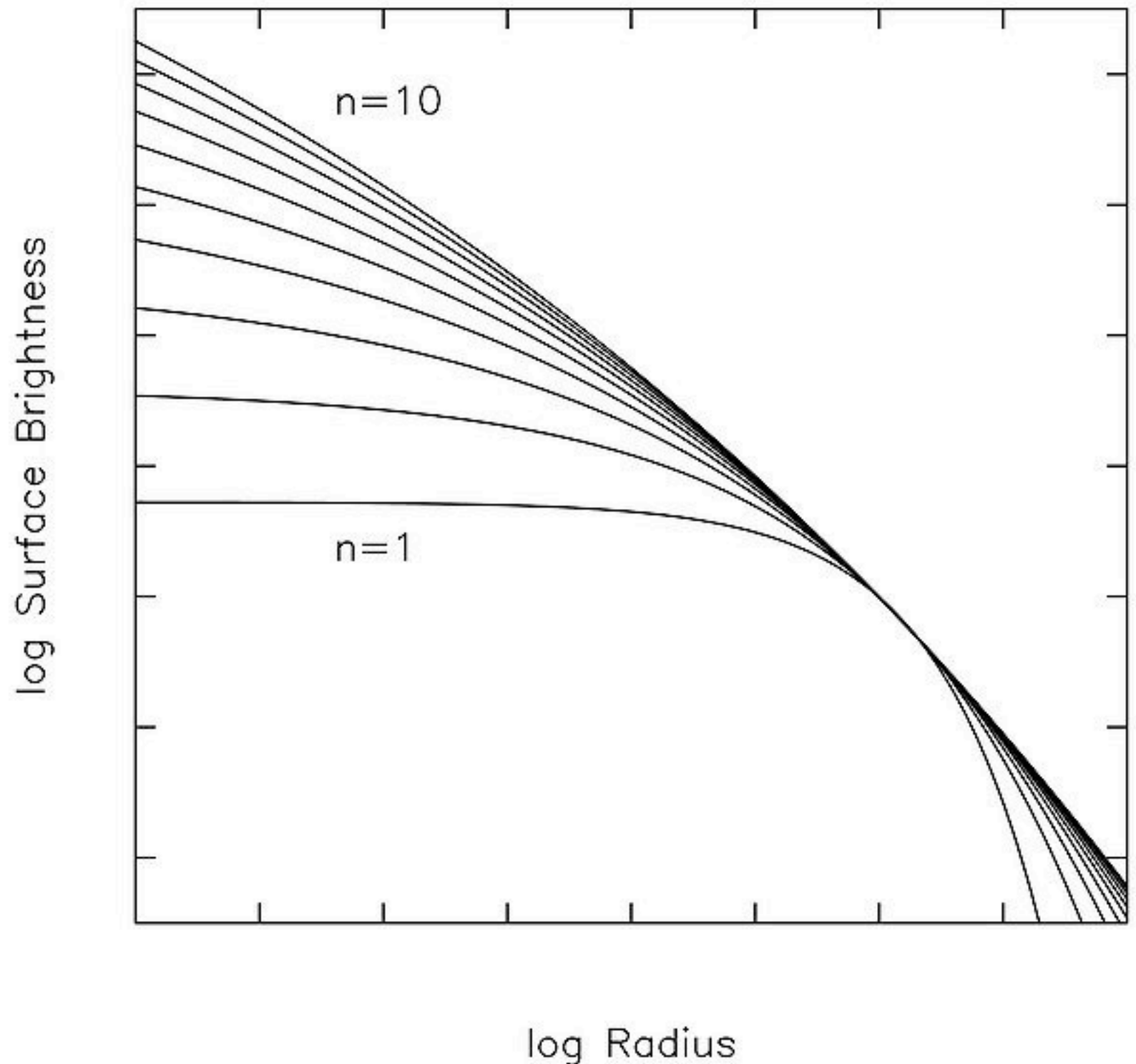
$$I(R) = I_0 \cdot e^{-kR^{1/n}}$$

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



Galassia ellittica nana

- galassie molto comuni



Galassia ellittica nana

- galassie molto comuni
- qualche milioni di stelle



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 4×10^{11}	10^5 to 10^{13}	10^8 to 3×10^{10}
Luminosity ($L_{\odot}$)	10^8 to 2×10^{10}	3×10^5 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 Nucleus and throughout disk: 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?

Come calcolare la distanza di remote galassie?

- parallasse solo per distanze < 500 pc

Come calcolare la distanza di remote galassie?

- parallasse solo per distanze < 500 pc
- Candele standard (luminosi, M, riconoscibili, comuni)

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)

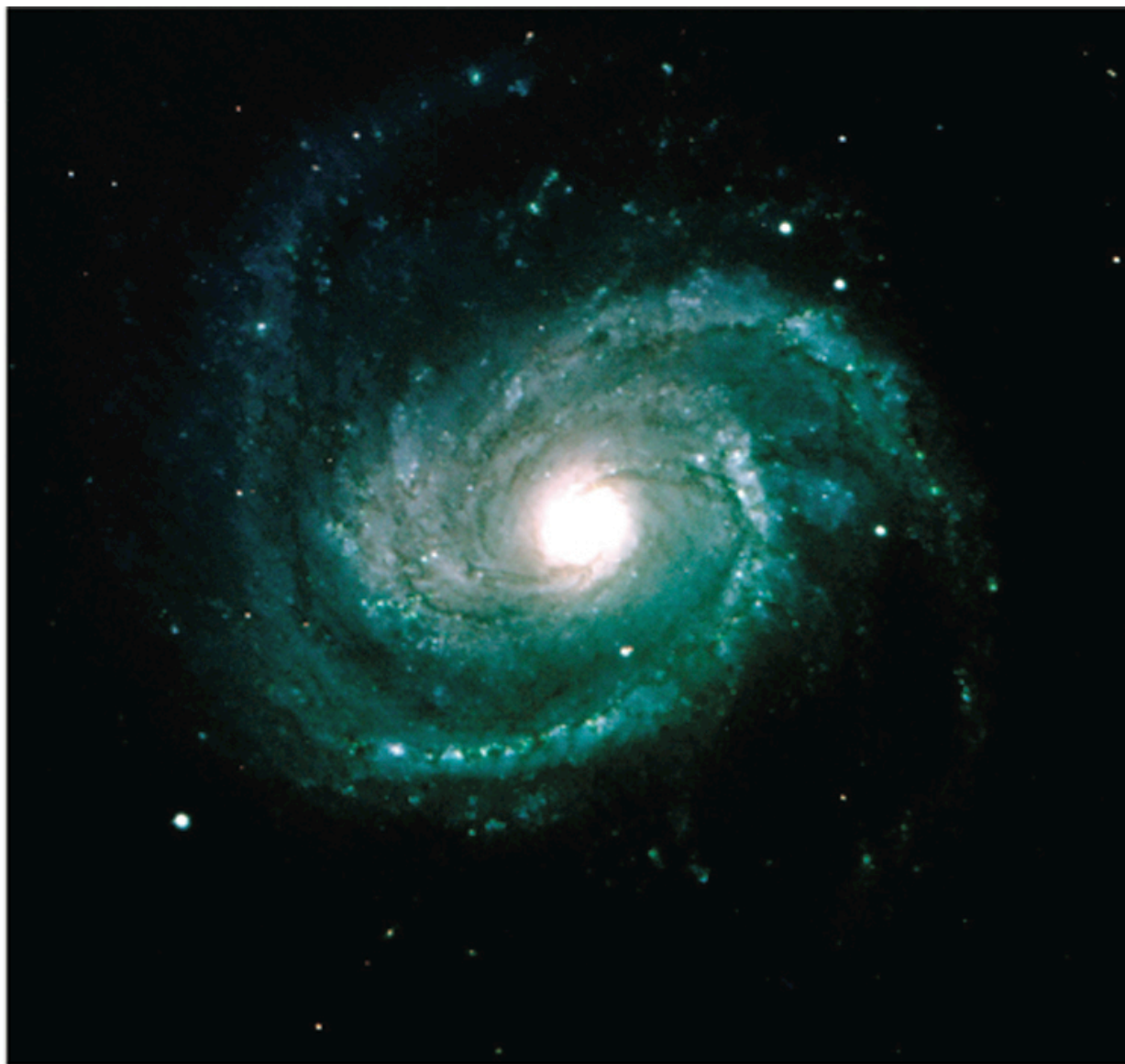
Come calcolare la distanza di remote galassie?

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

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?

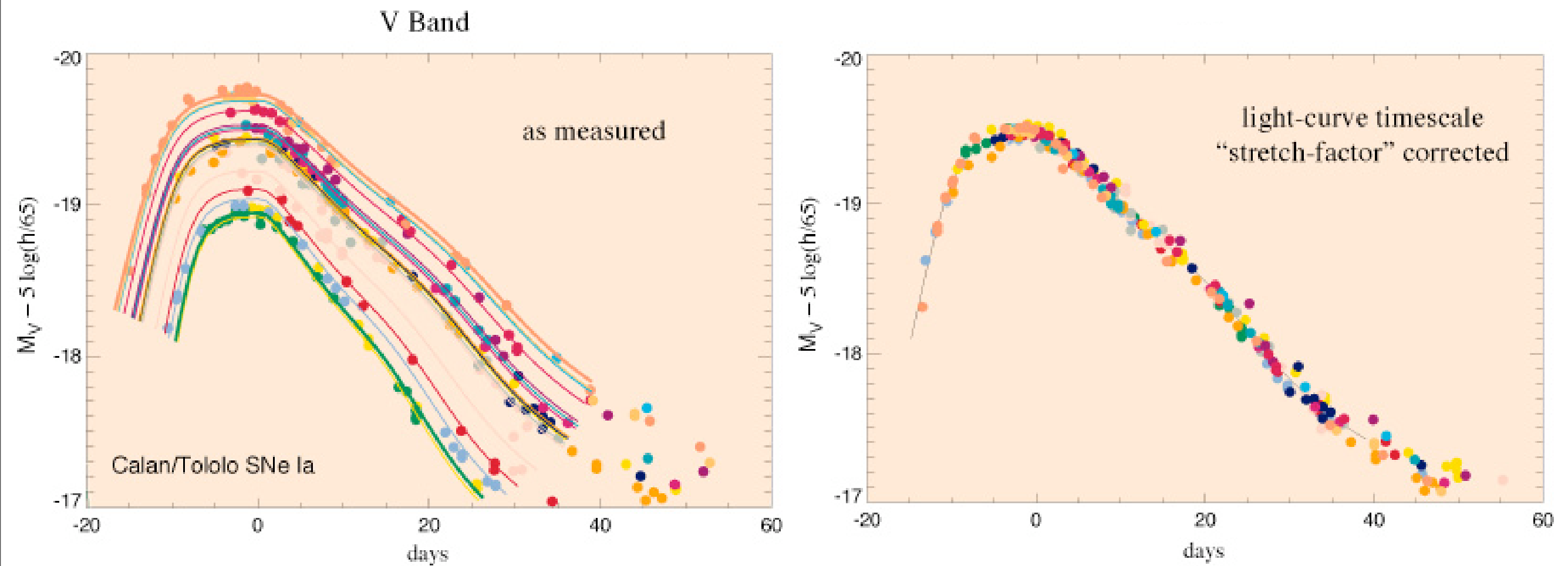


(a) M100 in March 2002

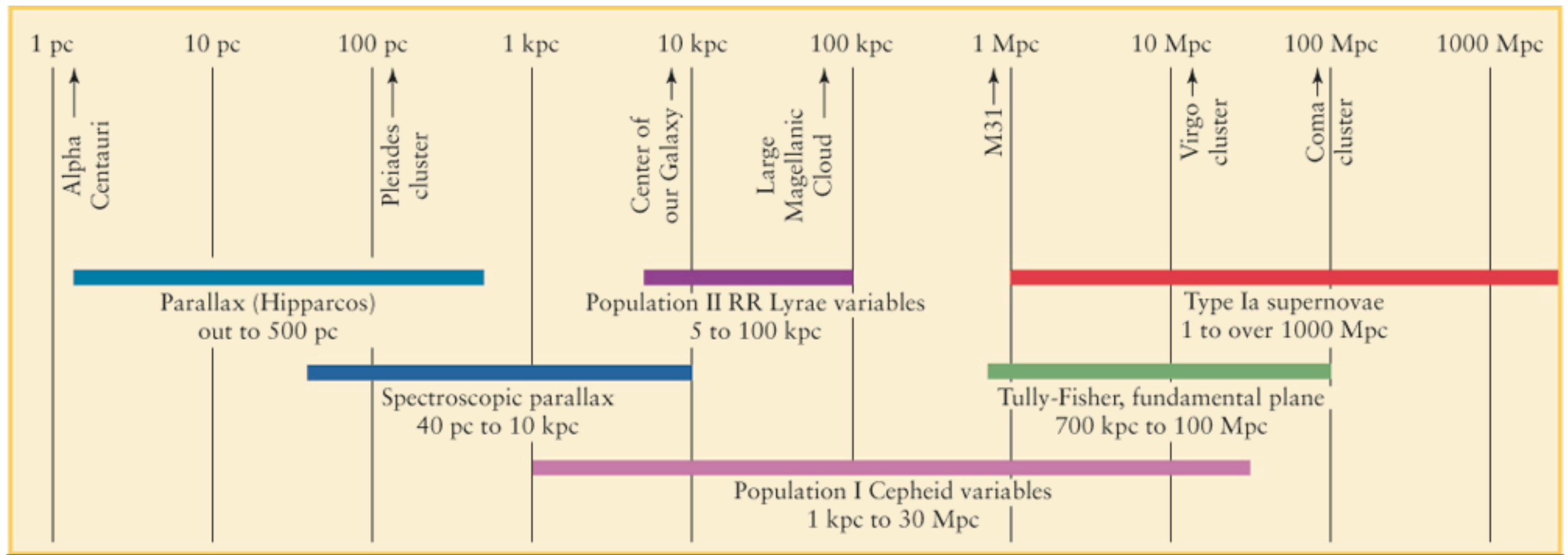


(b) M100 in February 2006, showing Supernova 2006X

Supernova tipo Ia



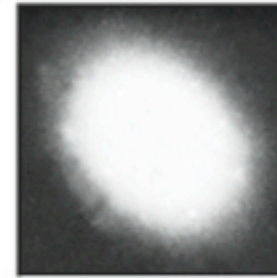
Scala delle distanze



La legge di Hubble

GALAXIES in

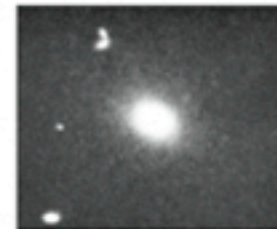
REDSHIFTS



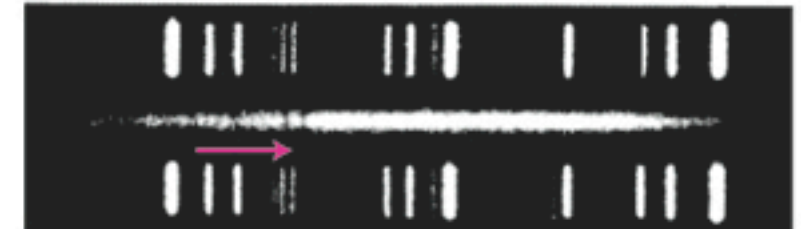
Virgo



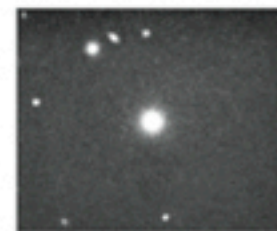
1200 km/s



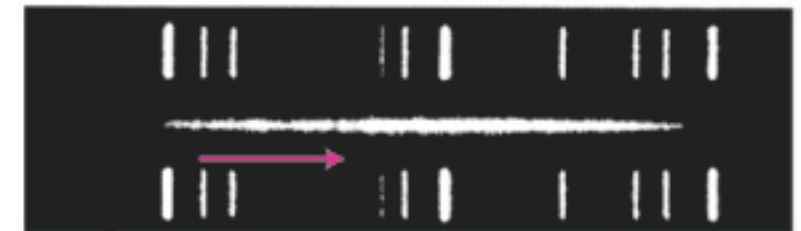
Ursa Major



15,000 km/s



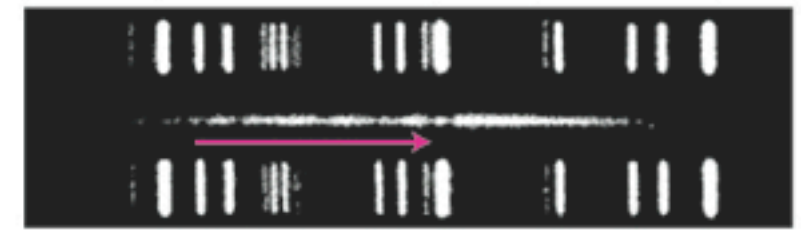
Corona Borealis



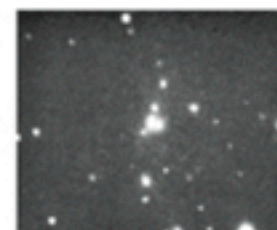
22,000 km/s



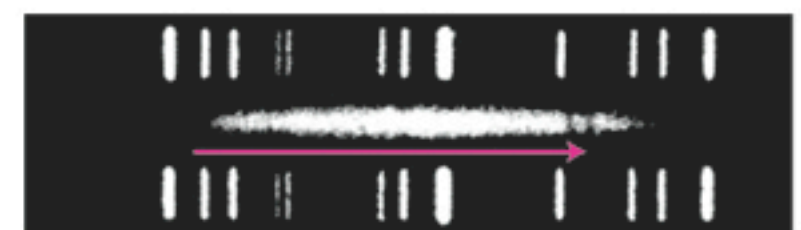
Boötes



39,000 km/s



Hydra



61,000 km/s

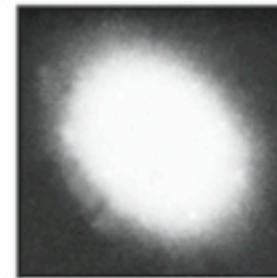
The more distant
the galaxy...

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

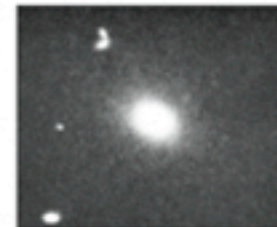
La legge di Hubble

- il redshift $z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0 = \Delta\lambda / \lambda_0$

GALAXIES in



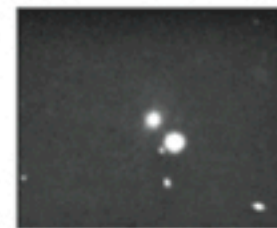
Virgo



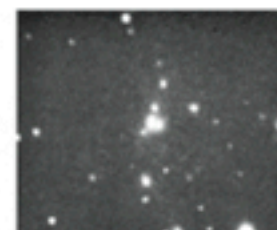
Ursa Major



Corona Borealis



Boötes



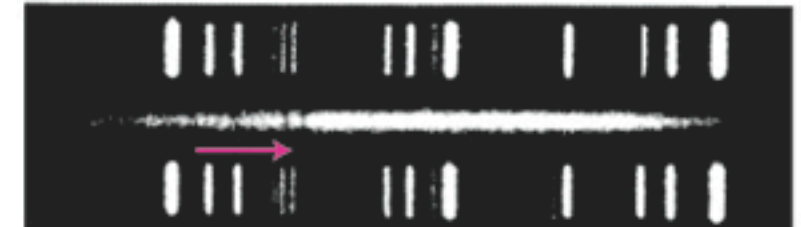
Hydra

The more distant
the galaxy...

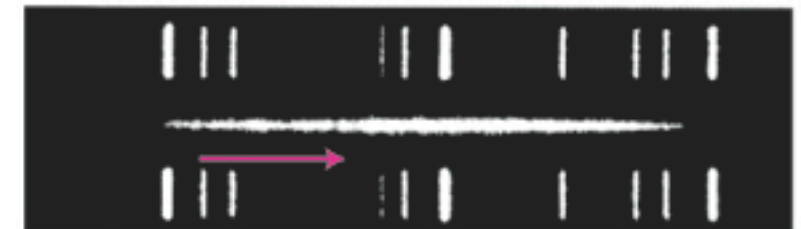
REDSHIFTS



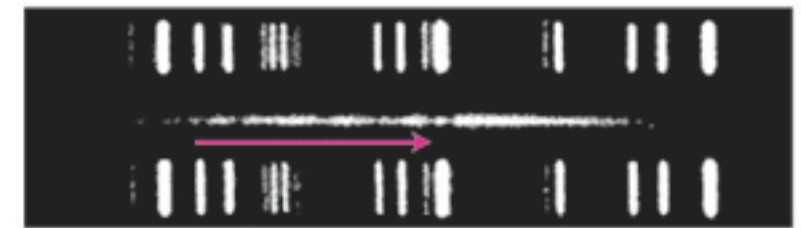
1200 km/s



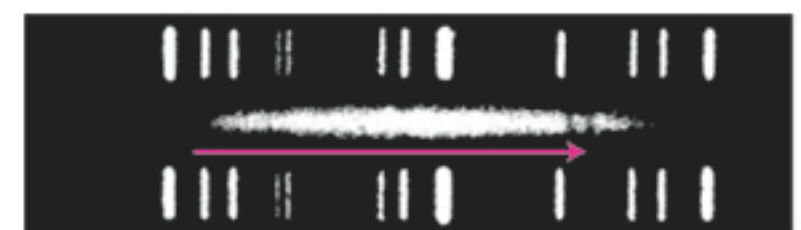
15,000 km/s



22,000 km/s



39,000 km/s



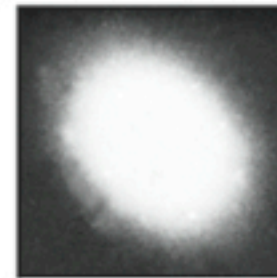
61,000 km/s

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

La legge di Hubble

- il redshift $z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0 = \Delta\lambda / \lambda_0$
- Più una galassia è distante, maggiore è il suo redshift.

GALAXIES in

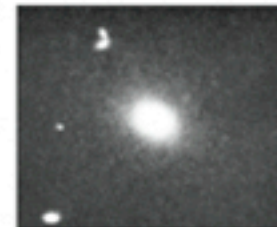


Virgo

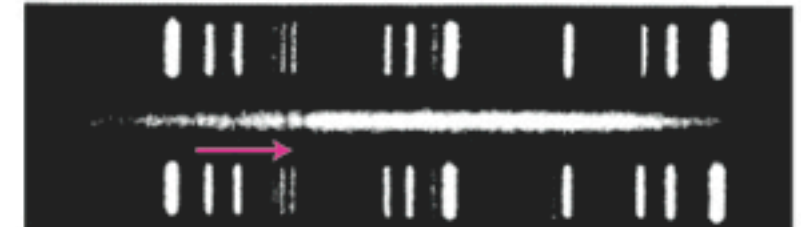
REDSHIFTS



1200 km/s



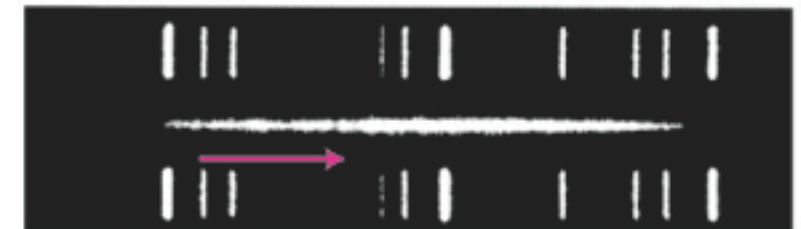
Ursa Major



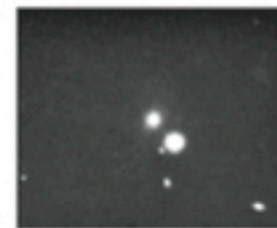
15,000 km/s



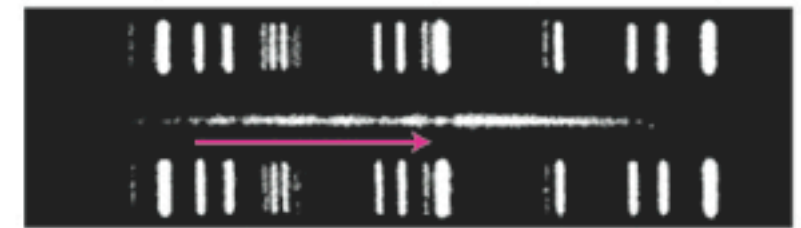
Corona Borealis



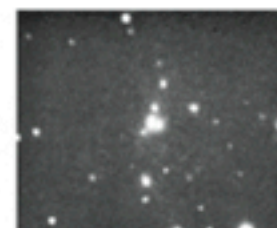
22,000 km/s



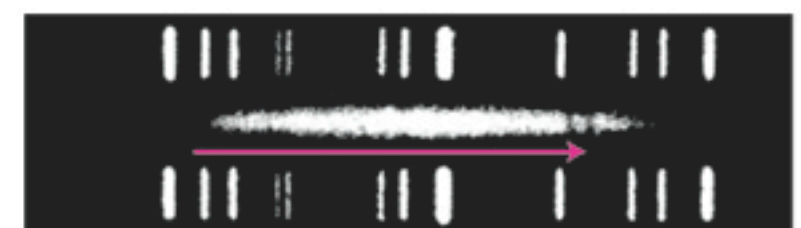
Boötes



39,000 km/s



Hydra



61,000 km/s

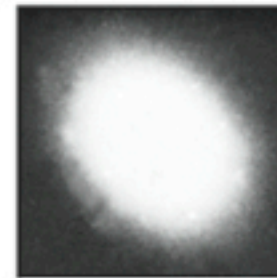
The more distant
the galaxy...

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

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 $v = 0.05 c$

GALAXIES in

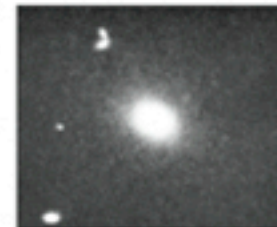


Virgo

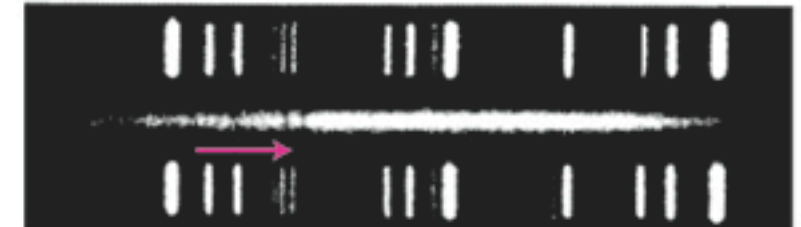
REDSHIFTS



1200 km/s



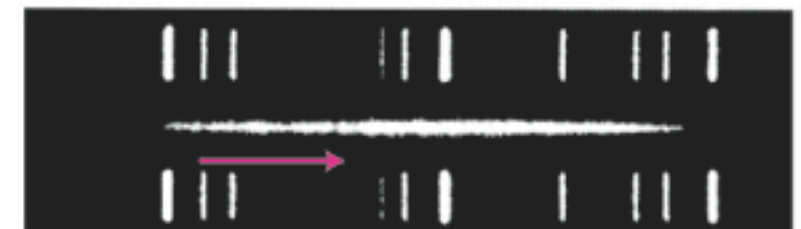
Ursa Major



15,000 km/s



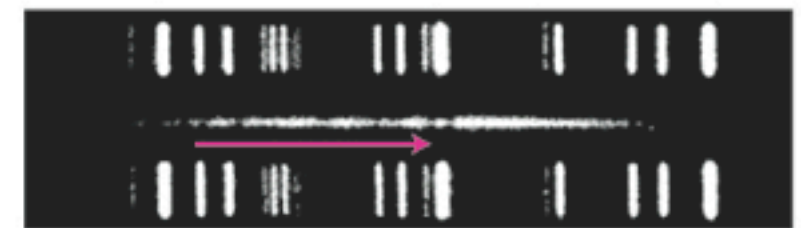
Corona Borealis



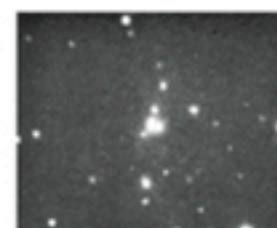
22,000 km/s



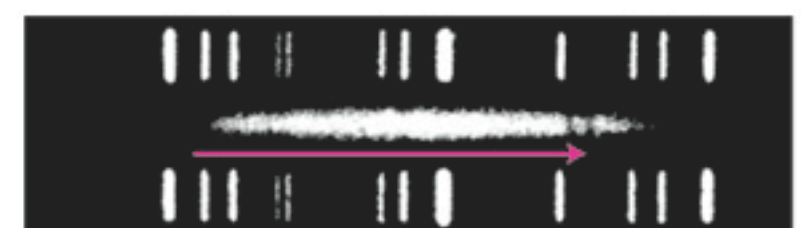
Boötes



39,000 km/s



Hydra



61,000 km/s

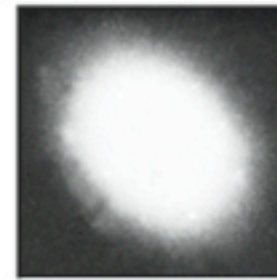
The more distant
the galaxy...

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

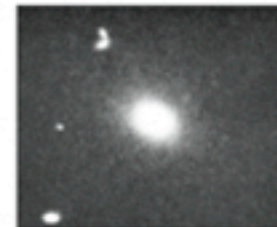
La legge di Hubble

- 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



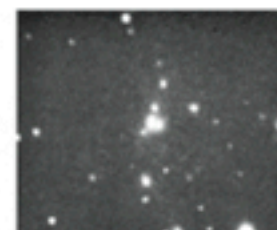
Ursa Major



Corona Borealis



Boötes



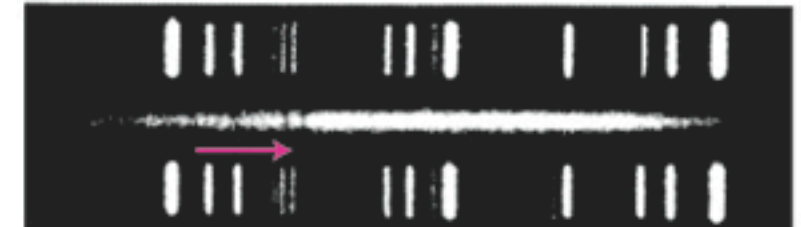
Hydra

The more distant
the galaxy...

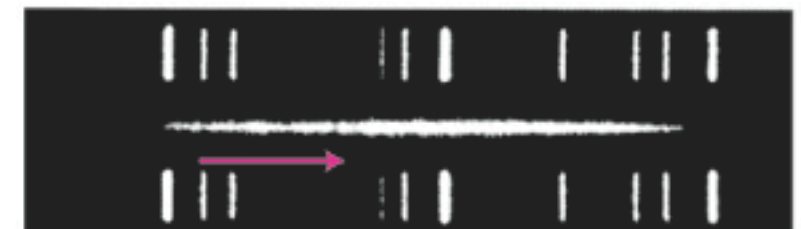
REDSHIFTS



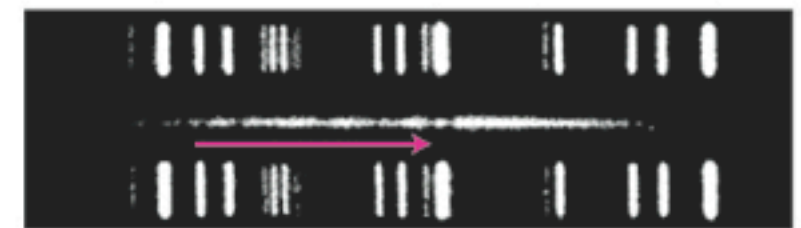
1200 km/s



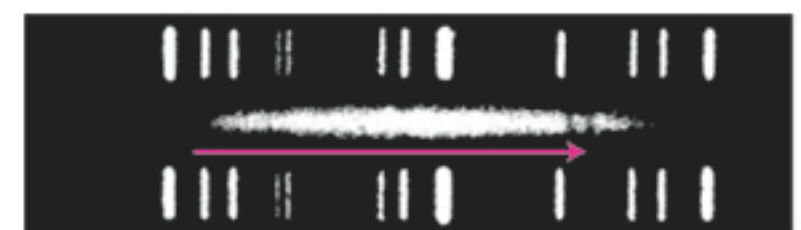
15,000 km/s



22,000 km/s



39,000 km/s



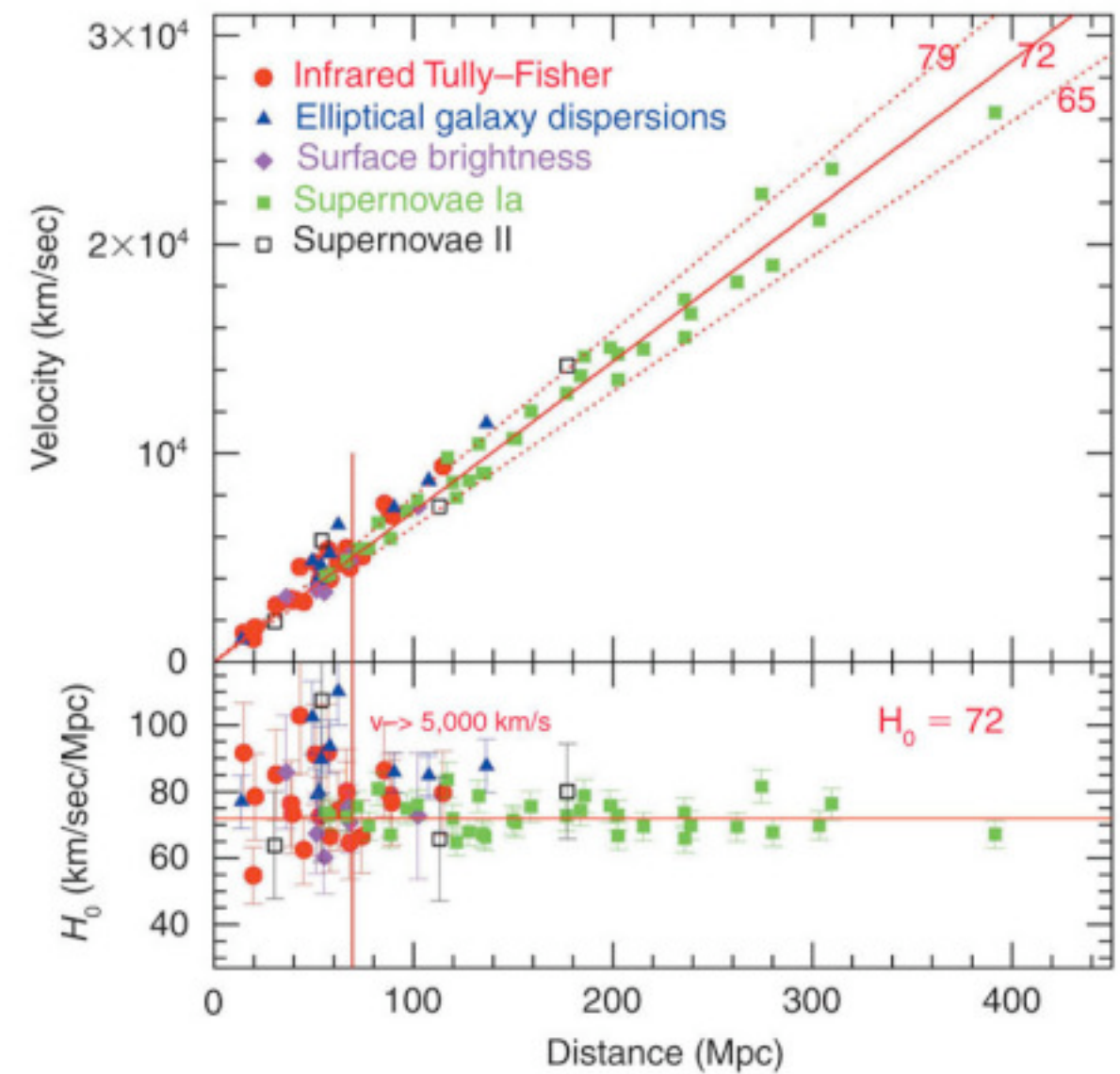
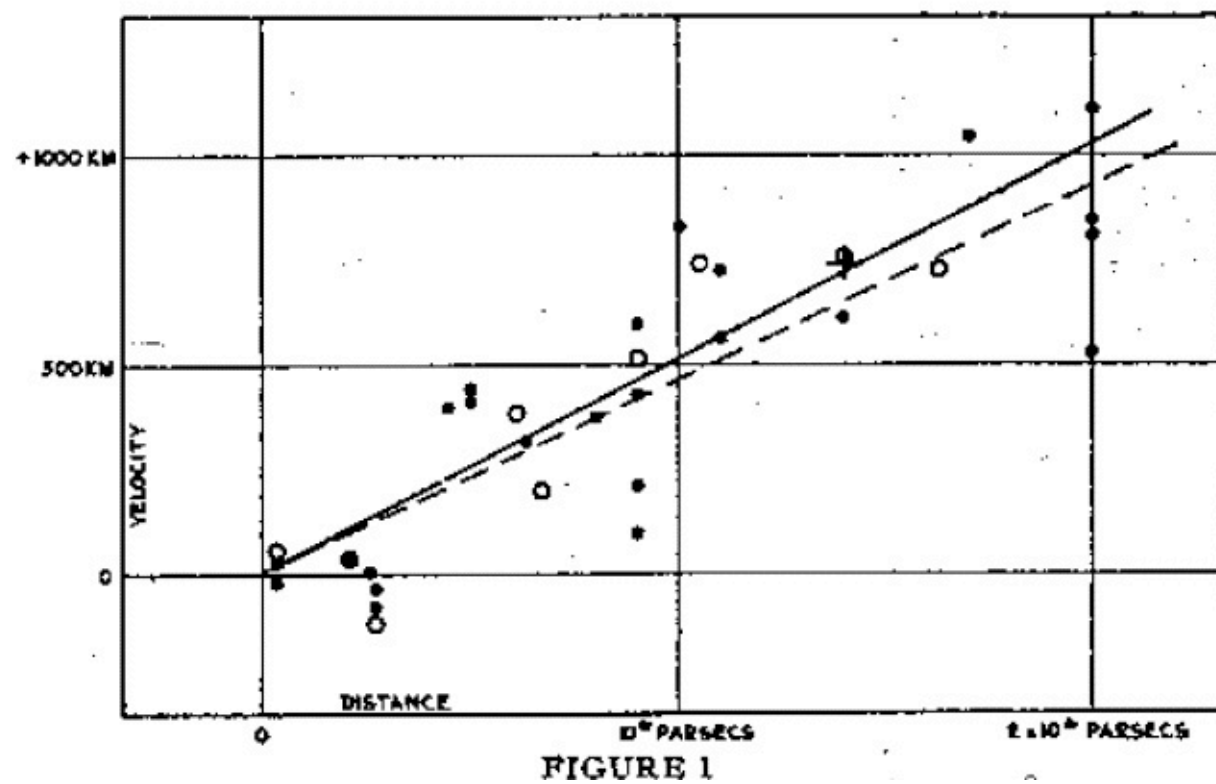
61,000 km/s

...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.



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

La legge di Hubble

$$v = H_0 d$$

La legge di Hubble

$$v = H_0 d$$

- H_0 è importante perché esprime il **tasso di crescita** dell'universo

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 ($1/H_0$)

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

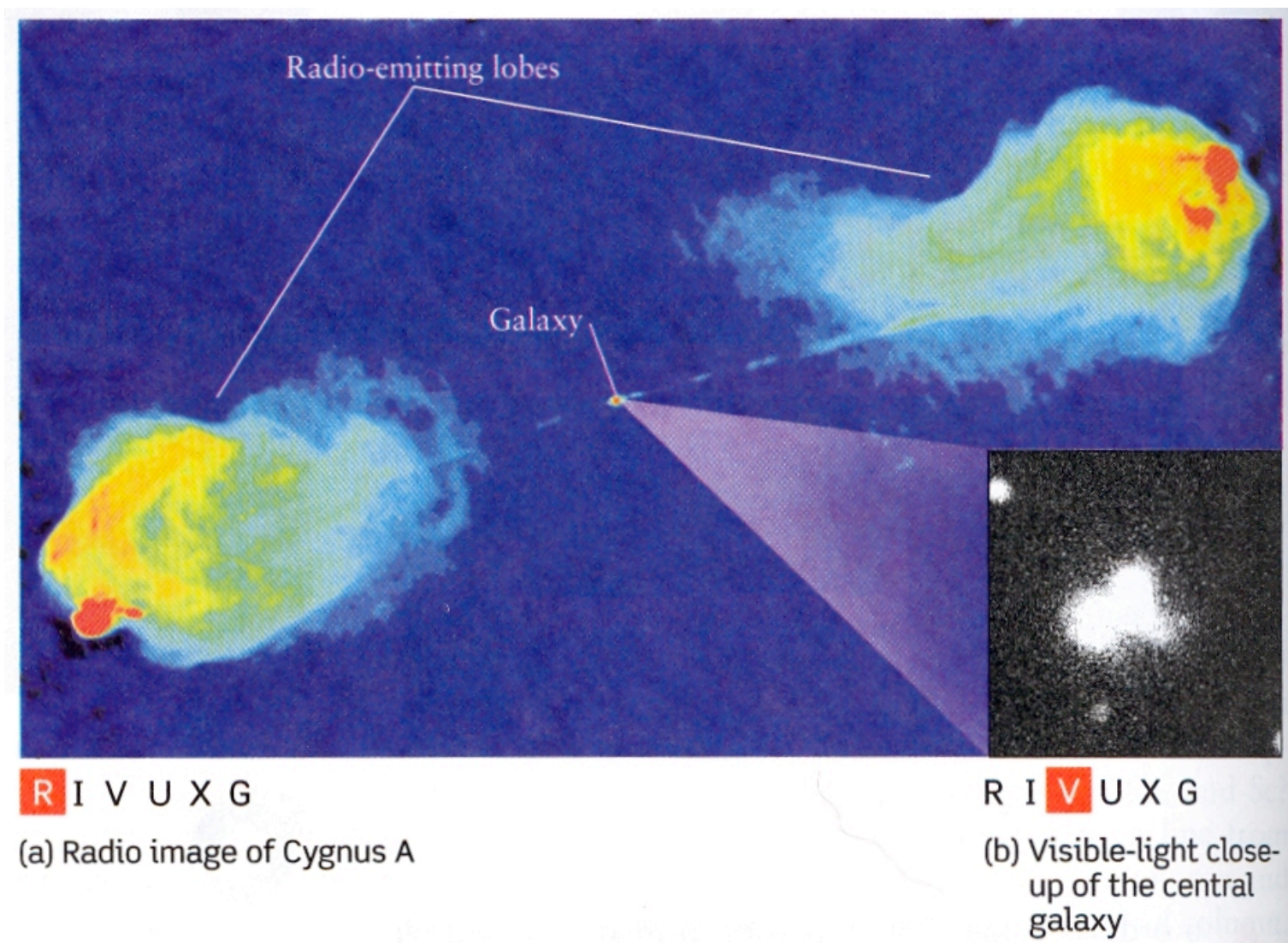
La legge di Hubble

$$v = H_0 d$$

- 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

- Quasar = Quasi Stellar Radio Source

Quasar

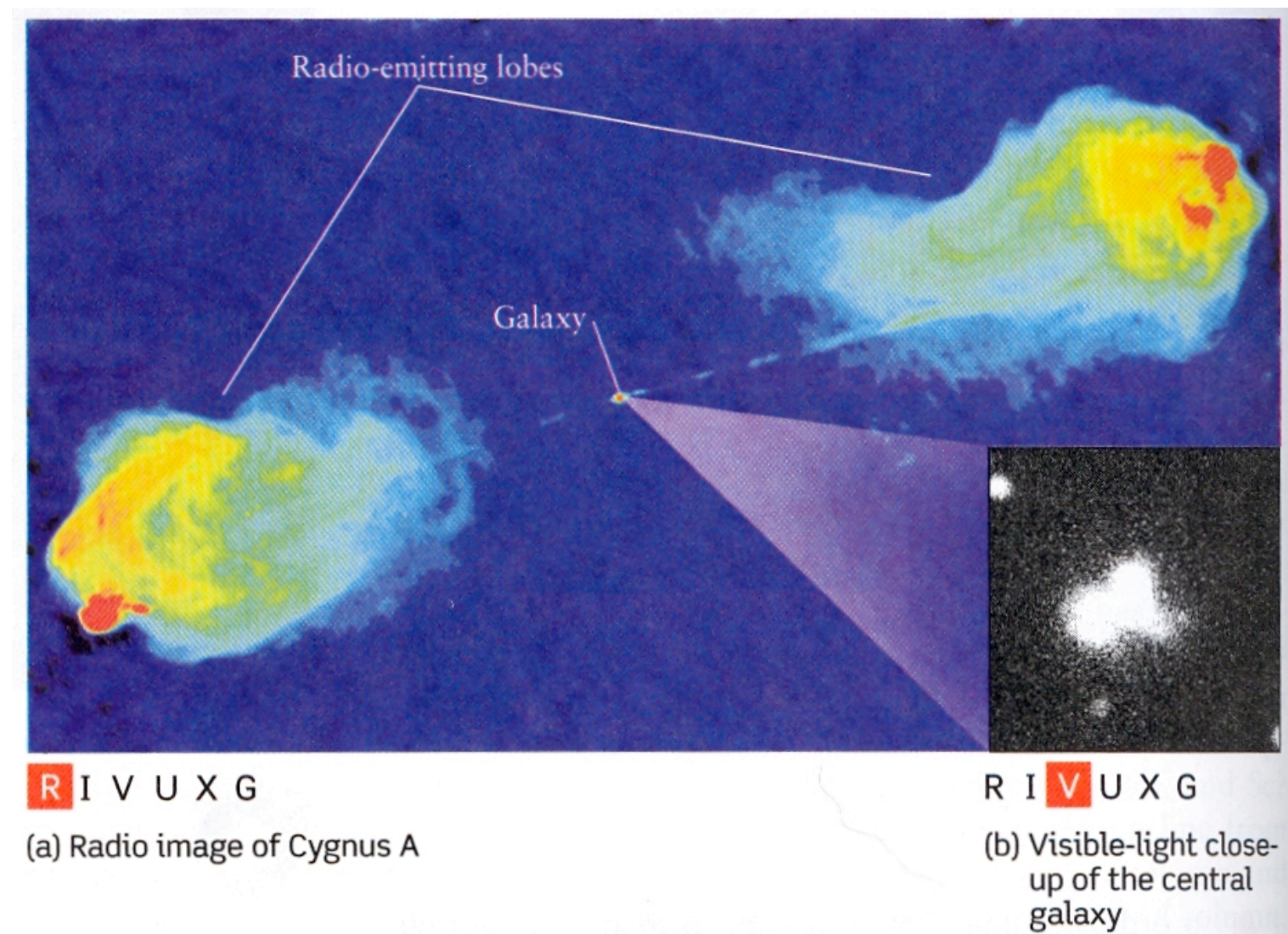
- Quasar = Quasi Stellar Radio Source
- Emissioni radio molto potenti

Quasar

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

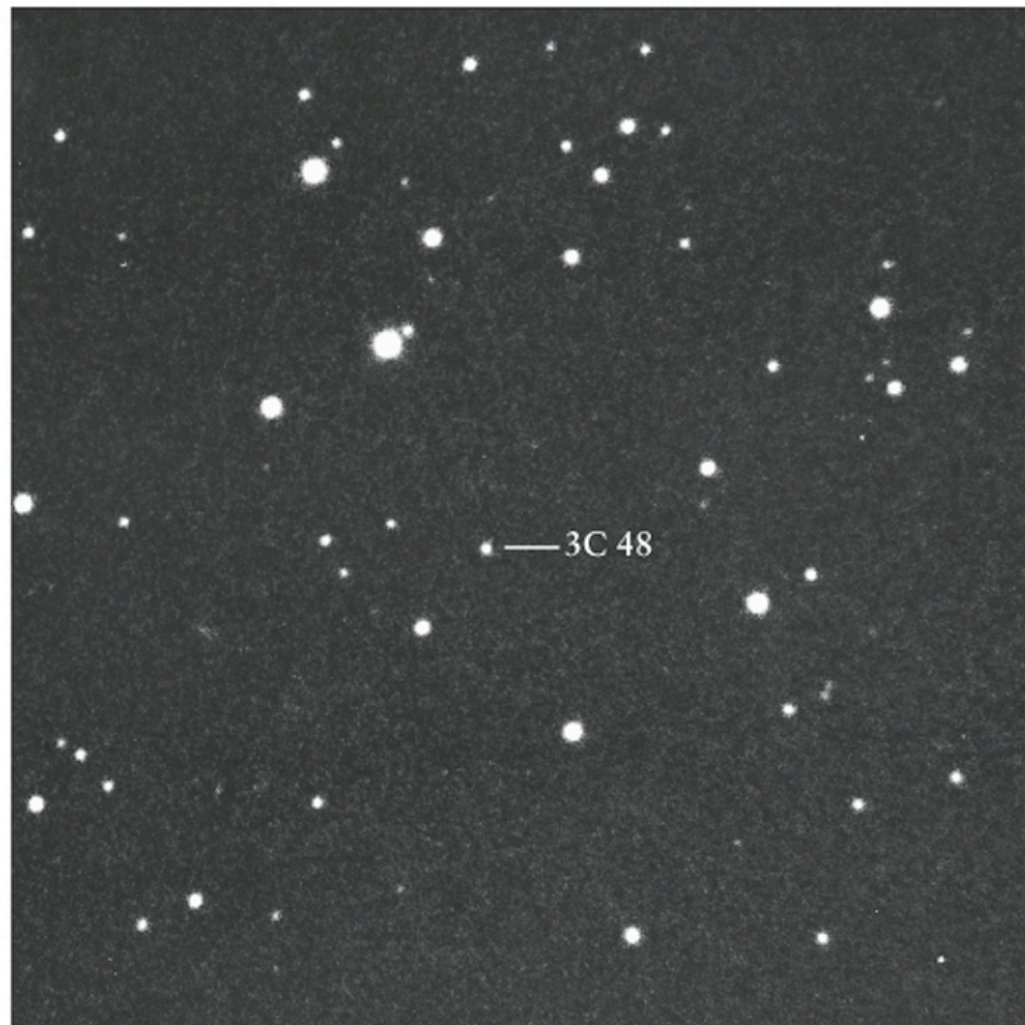
Quasar

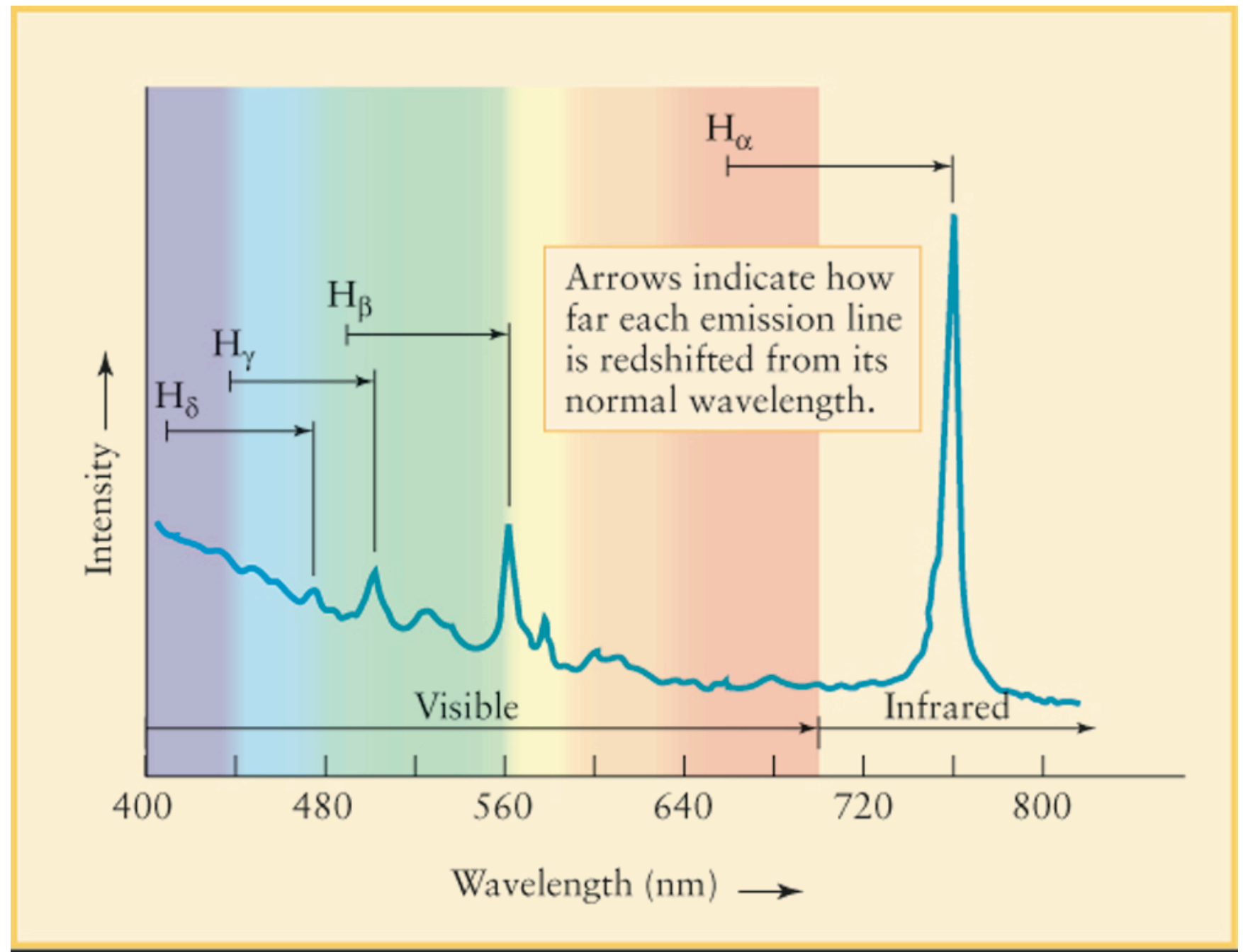
- Quasar = Quasi Stellar Radio Source
- Emissioni radio molto potenti
- Alto redshift



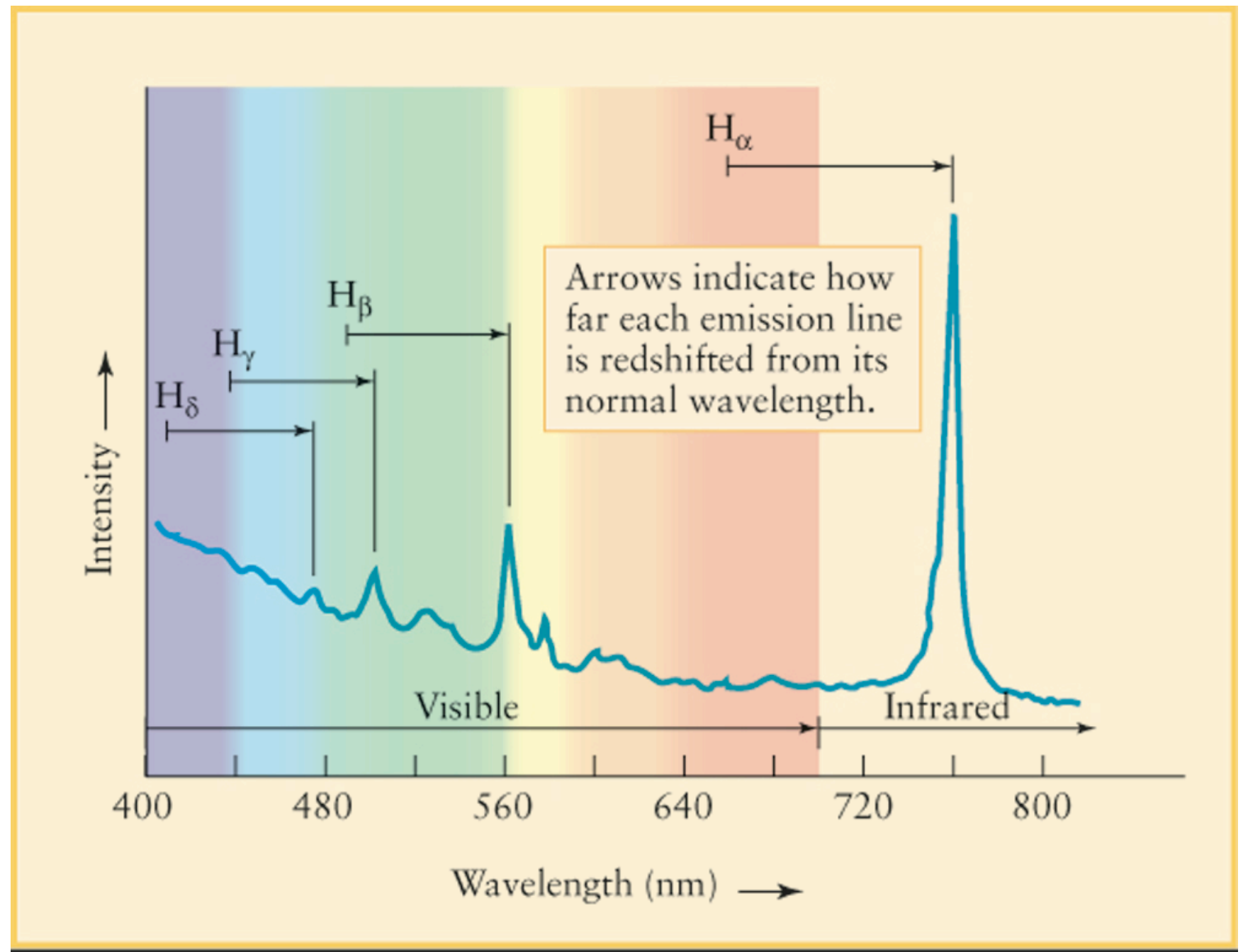
Quasar

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

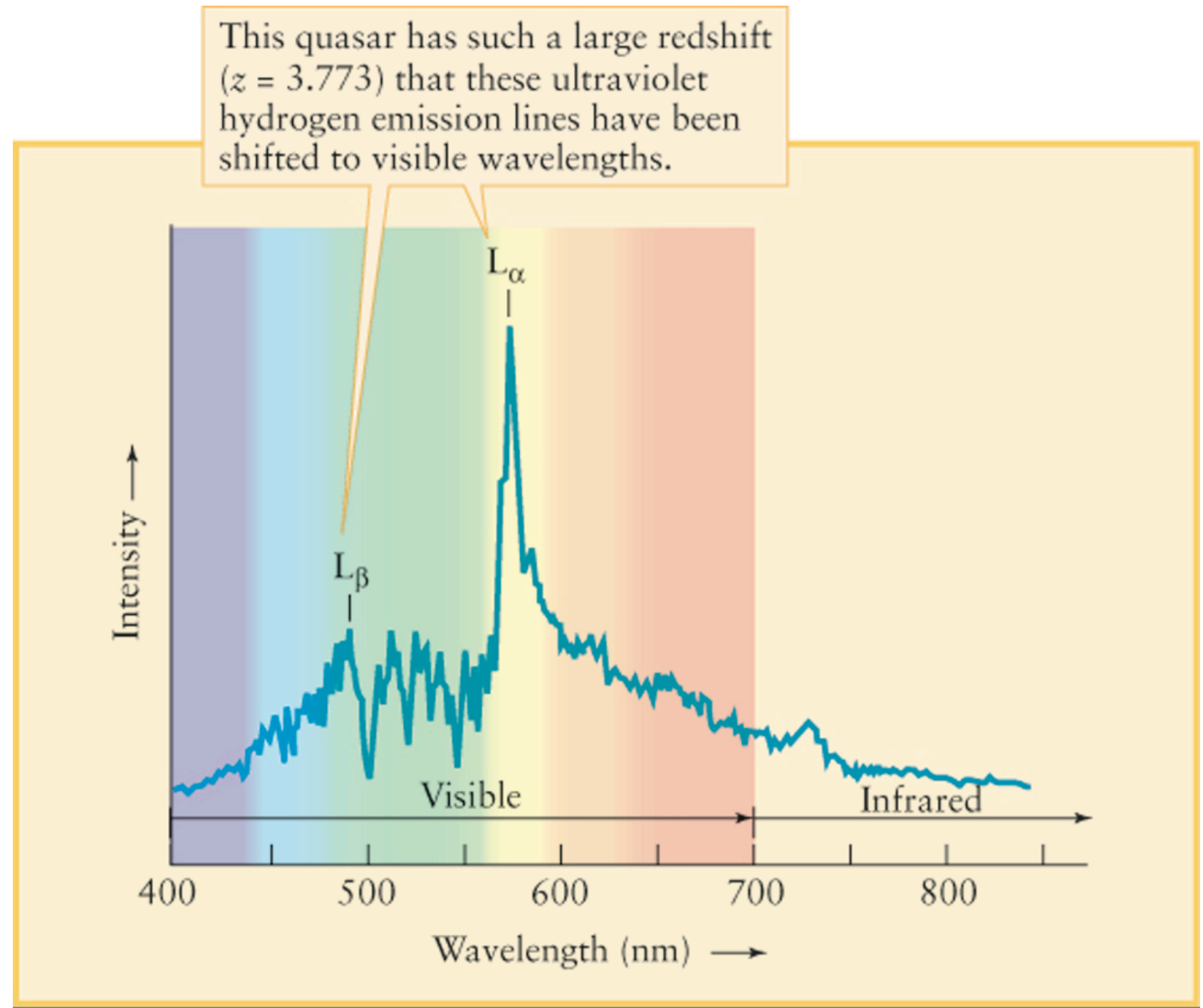




Spettri di quasar

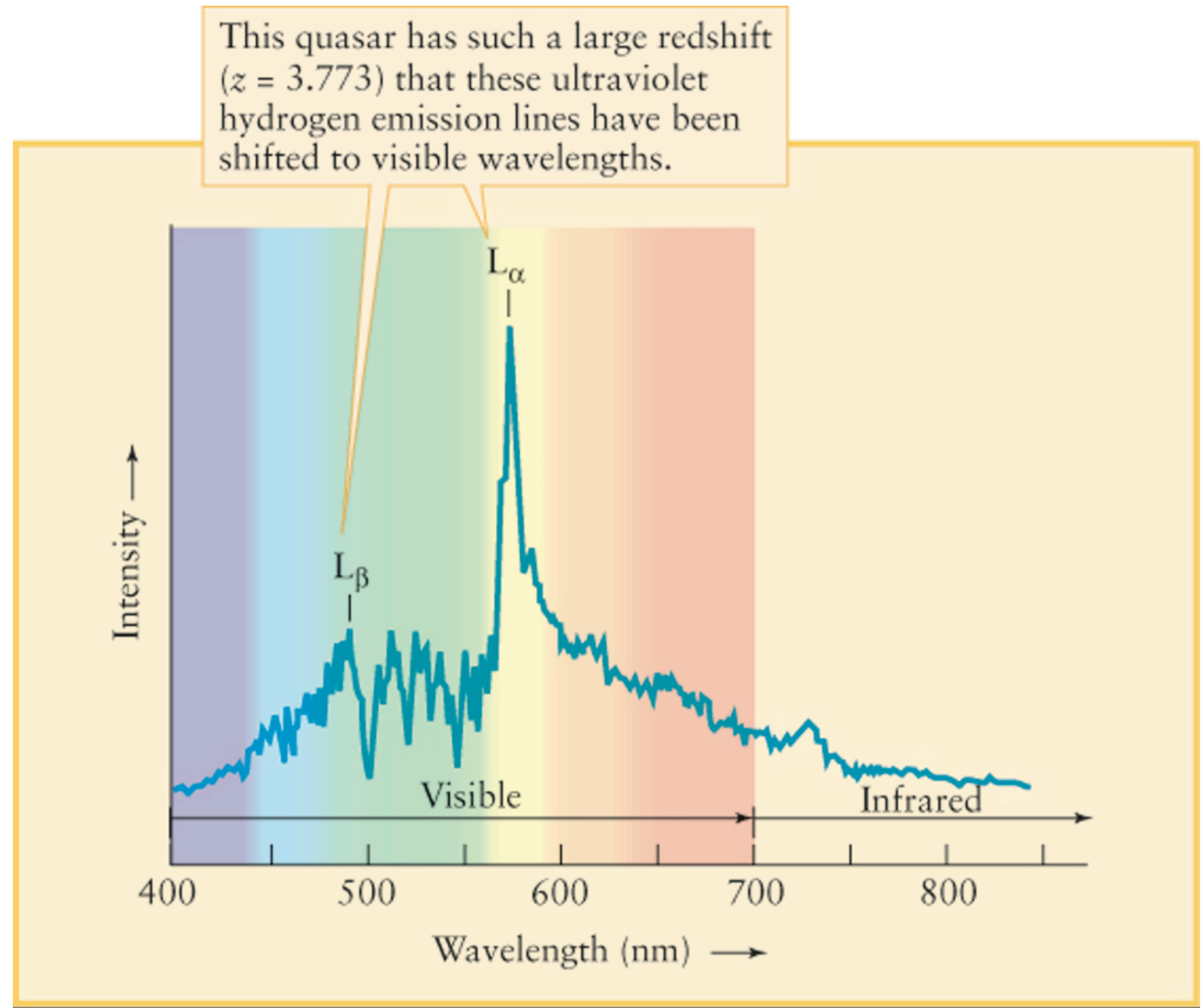


Spettri di quasar



Spettri di quasar

- 3C 273: $z=0.158$

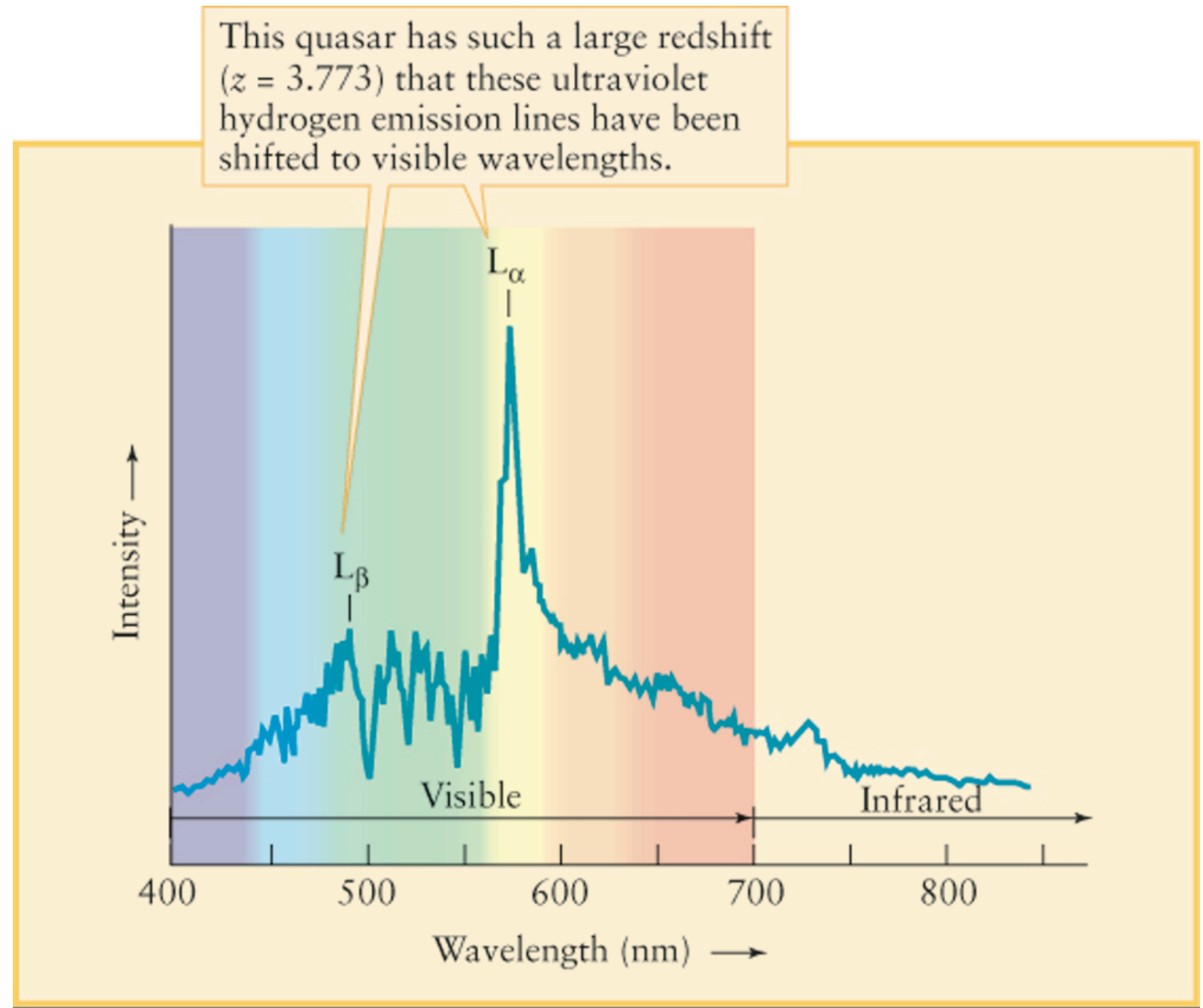


Spettri di quasar

- 3C 273: $z=0.158$

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

Si trova all'esterno
della nostra galassia



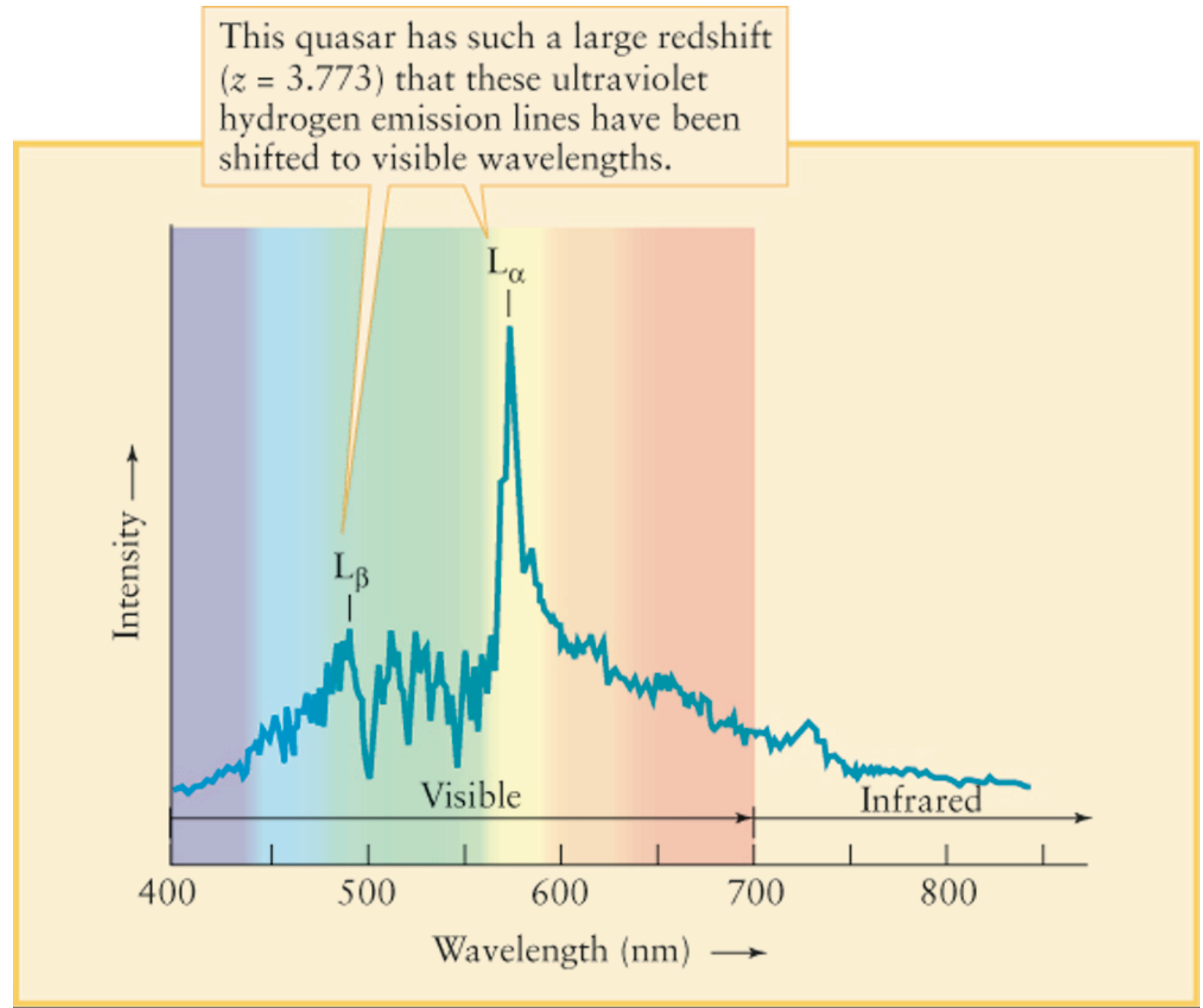
Spettri di quasar

- 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

Relazione redshift - distanza



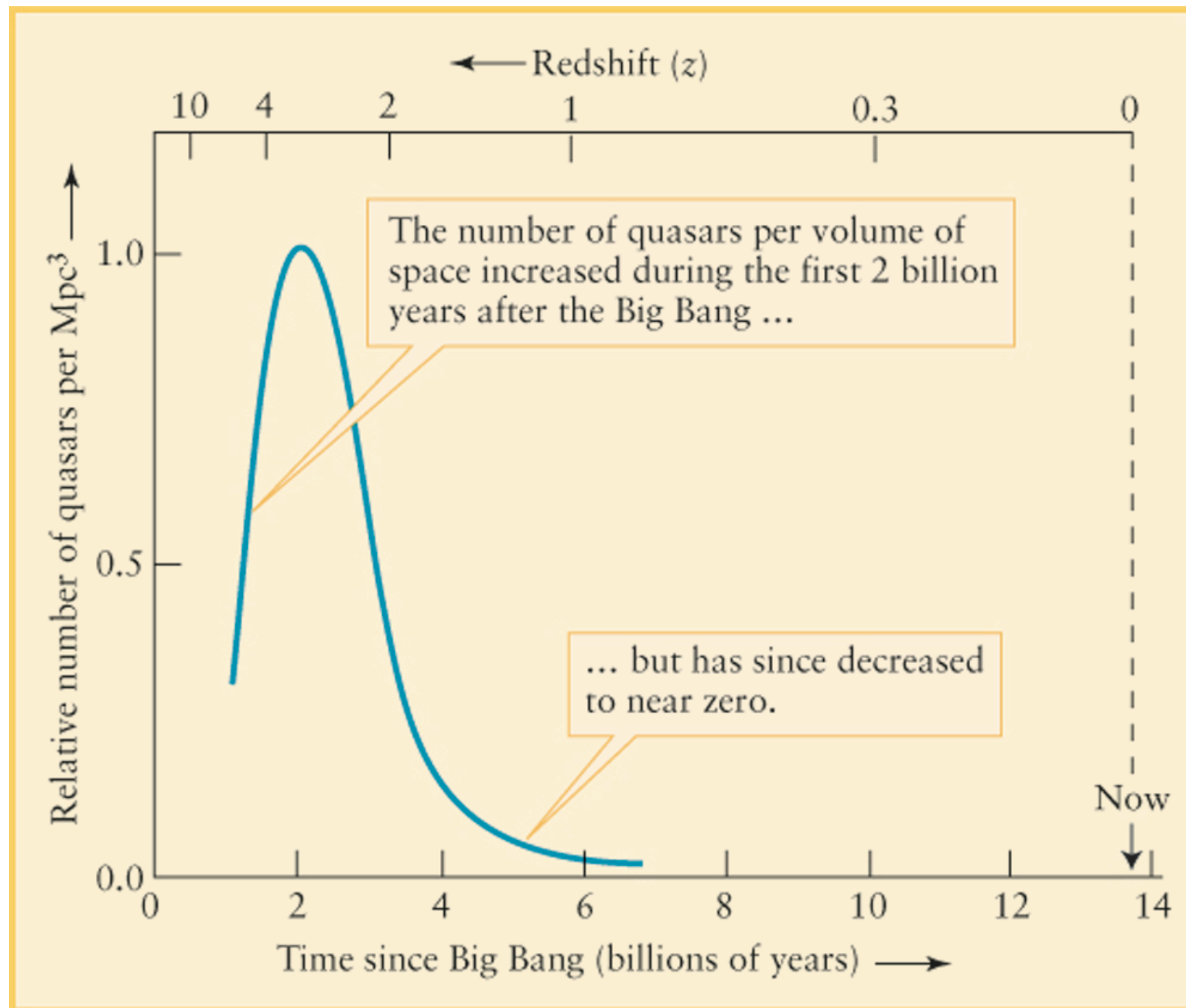
Table 25-1 Redshift and Distance

Redshift z	Recessional velocity v/c	Distance at which we see the object		Present distance to the object (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

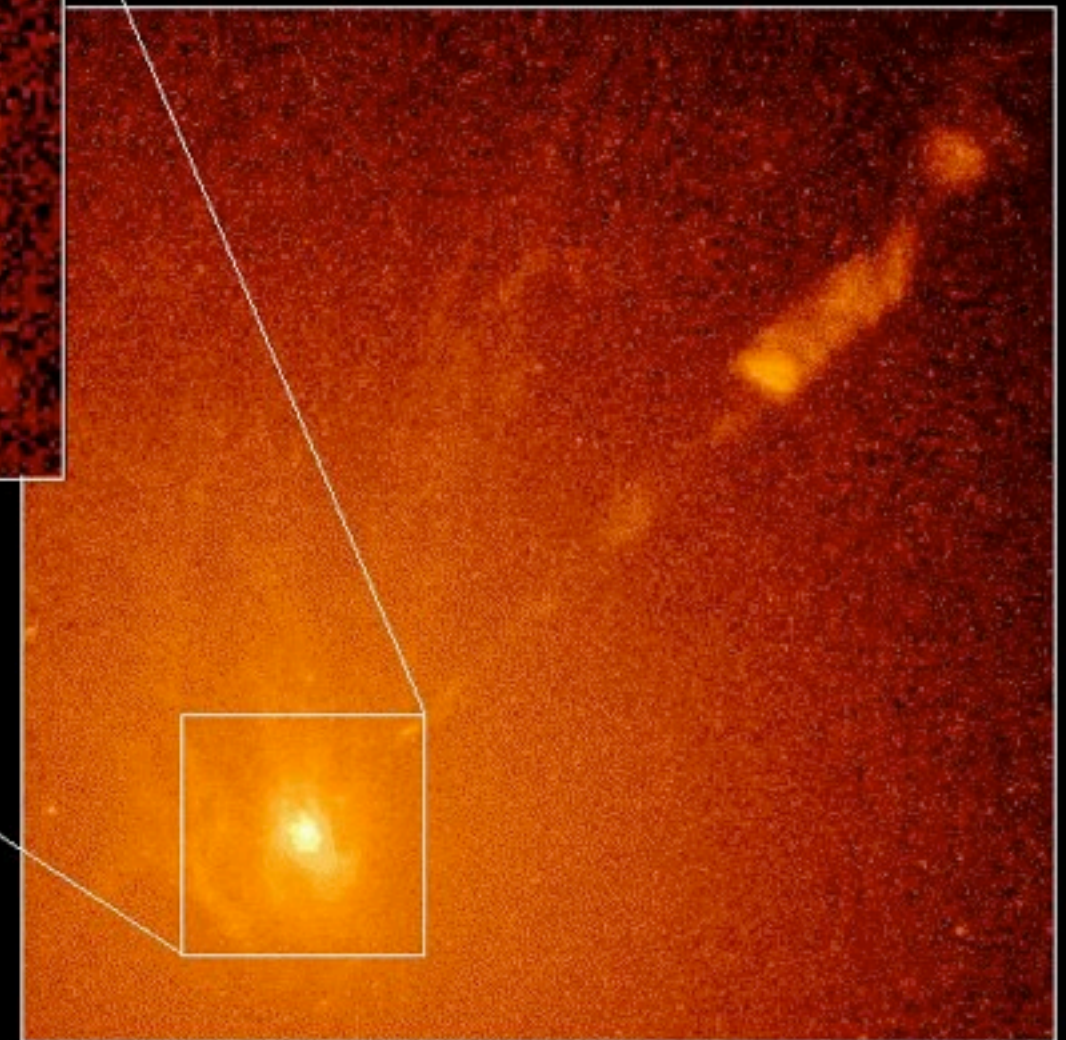
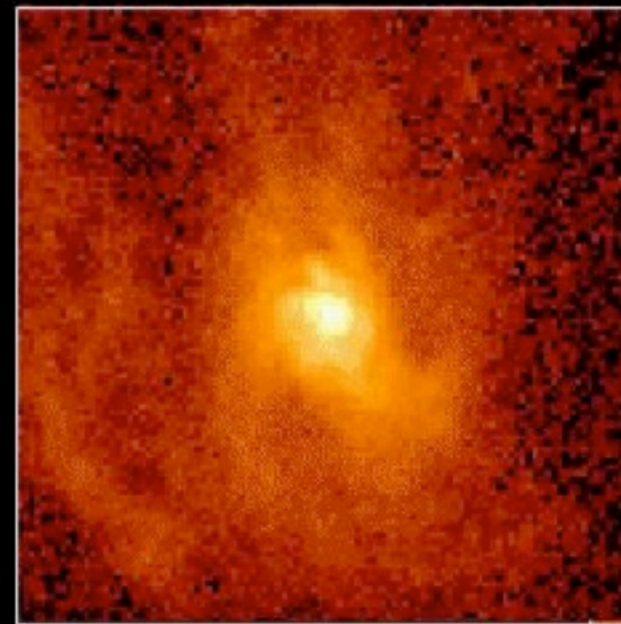
This table assumes a Hubble constant $H_0 = 73$ km/s/Mpc, a matter density parameter $\Omega_m = 0.24$, and a dark energy density parameter $\Omega_\Lambda = 0.76$ (see Chapter 26). The distance at which we see the object (in light-years) is equal to the light travel time in years. The present distance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

Densità di quasar

Densità di quasar



Gas Disk in Nucleus of Active Galaxy M87

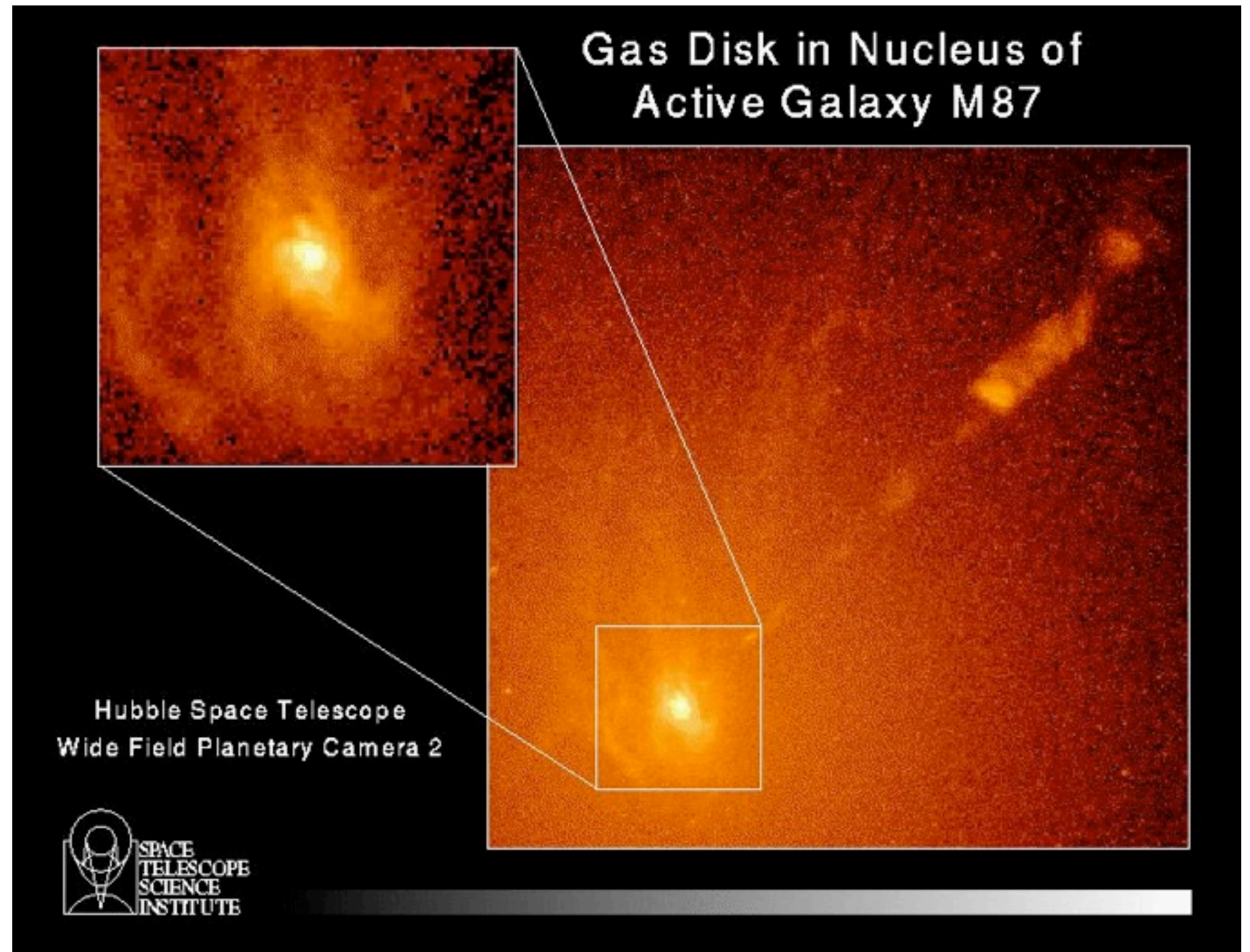


Hubble Space Telescope
Wide Field Planetary Camera 2

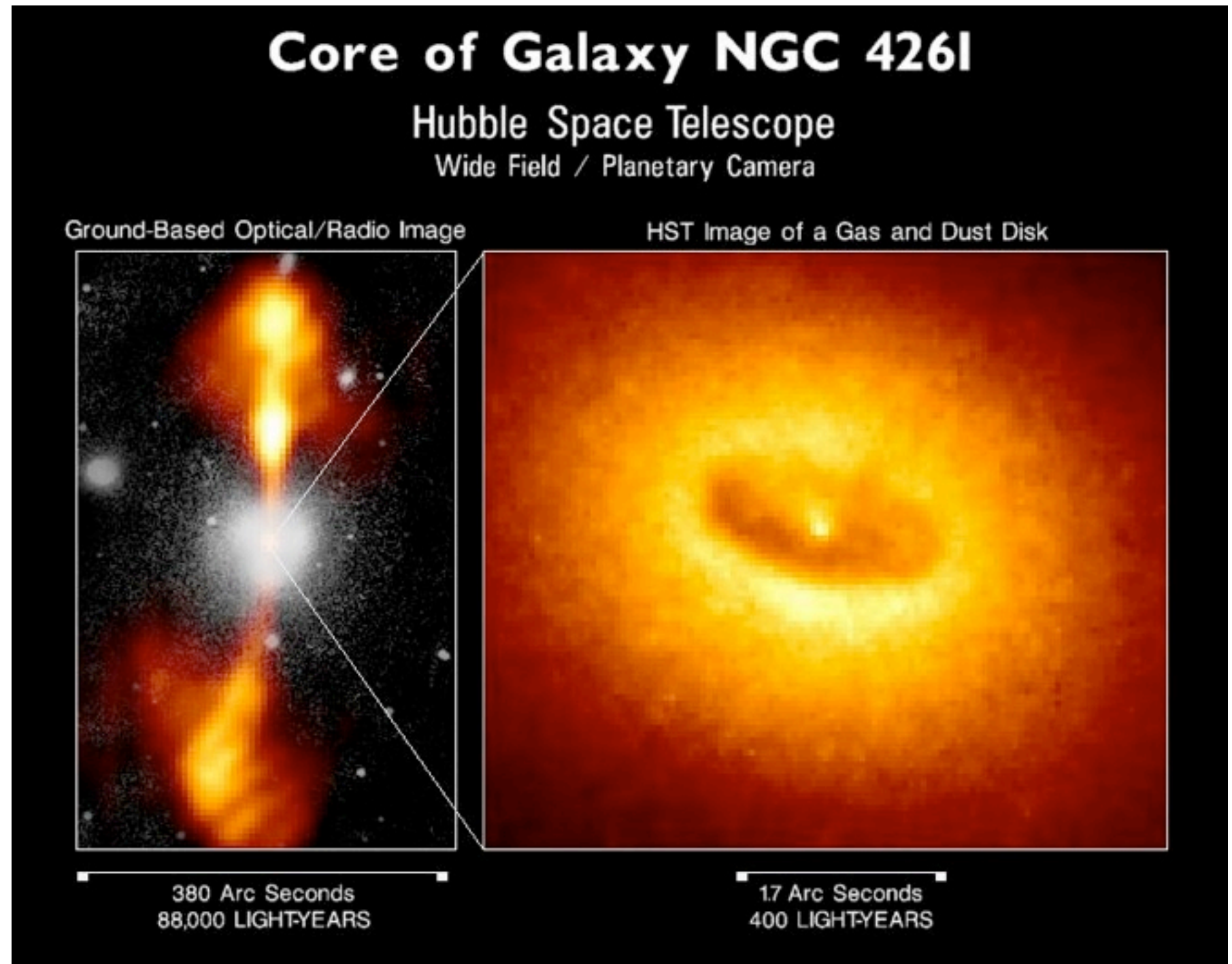


Il motore di un AGN è un buco nero

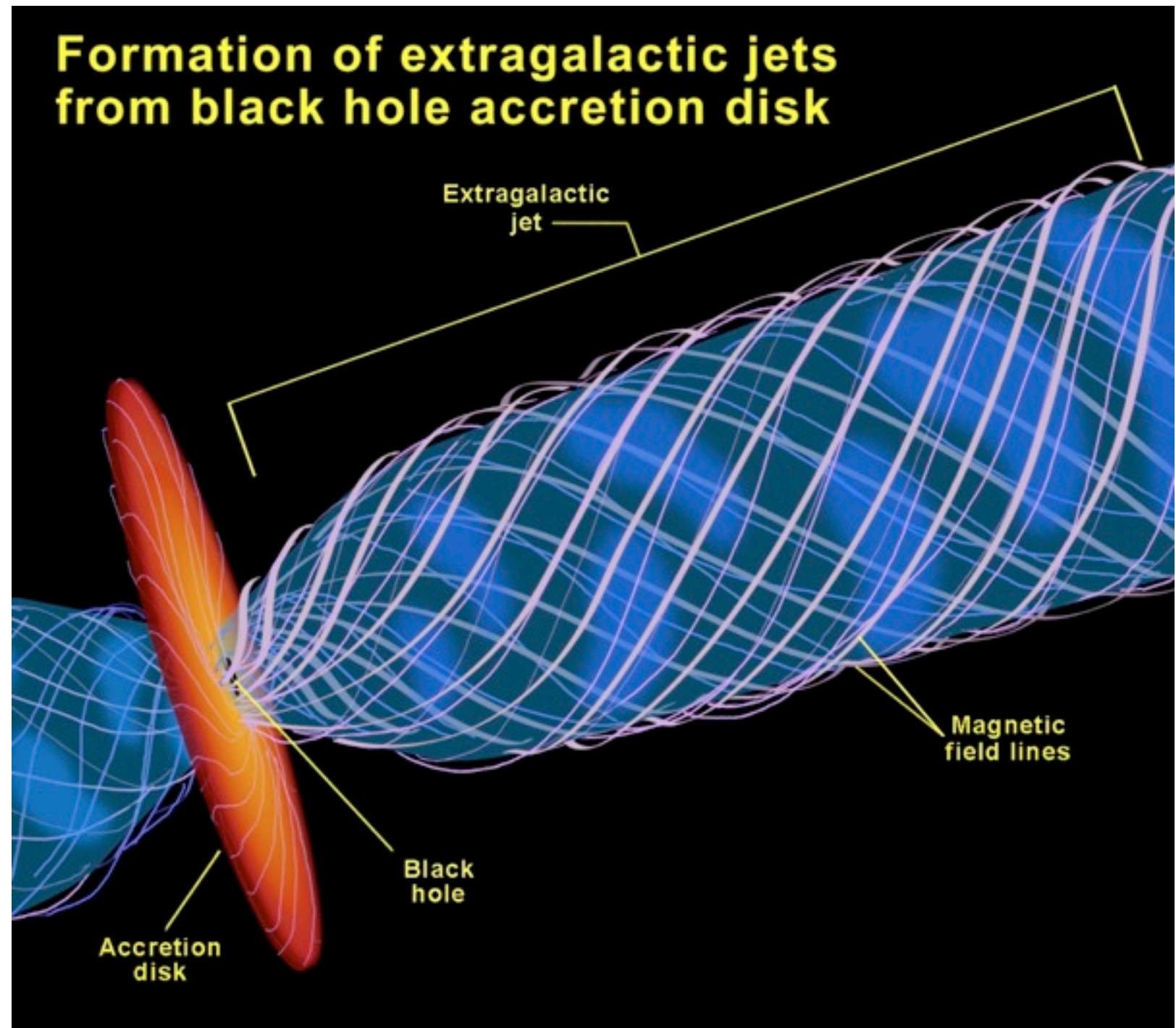
Il motore di un AGN è un buco nero



Il motore di un AGN è un buco nero

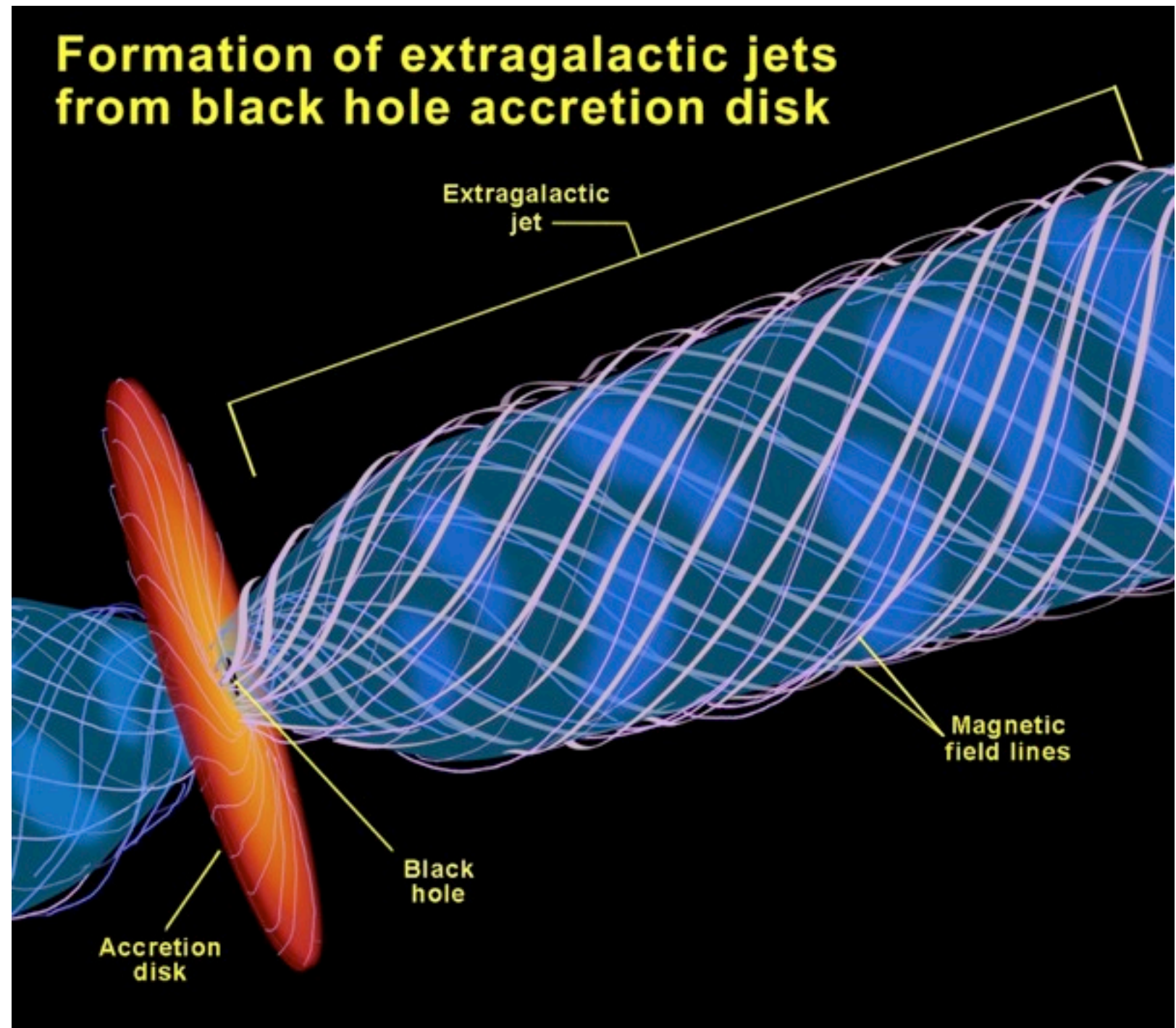


Il motore di un AGN è un buco nero



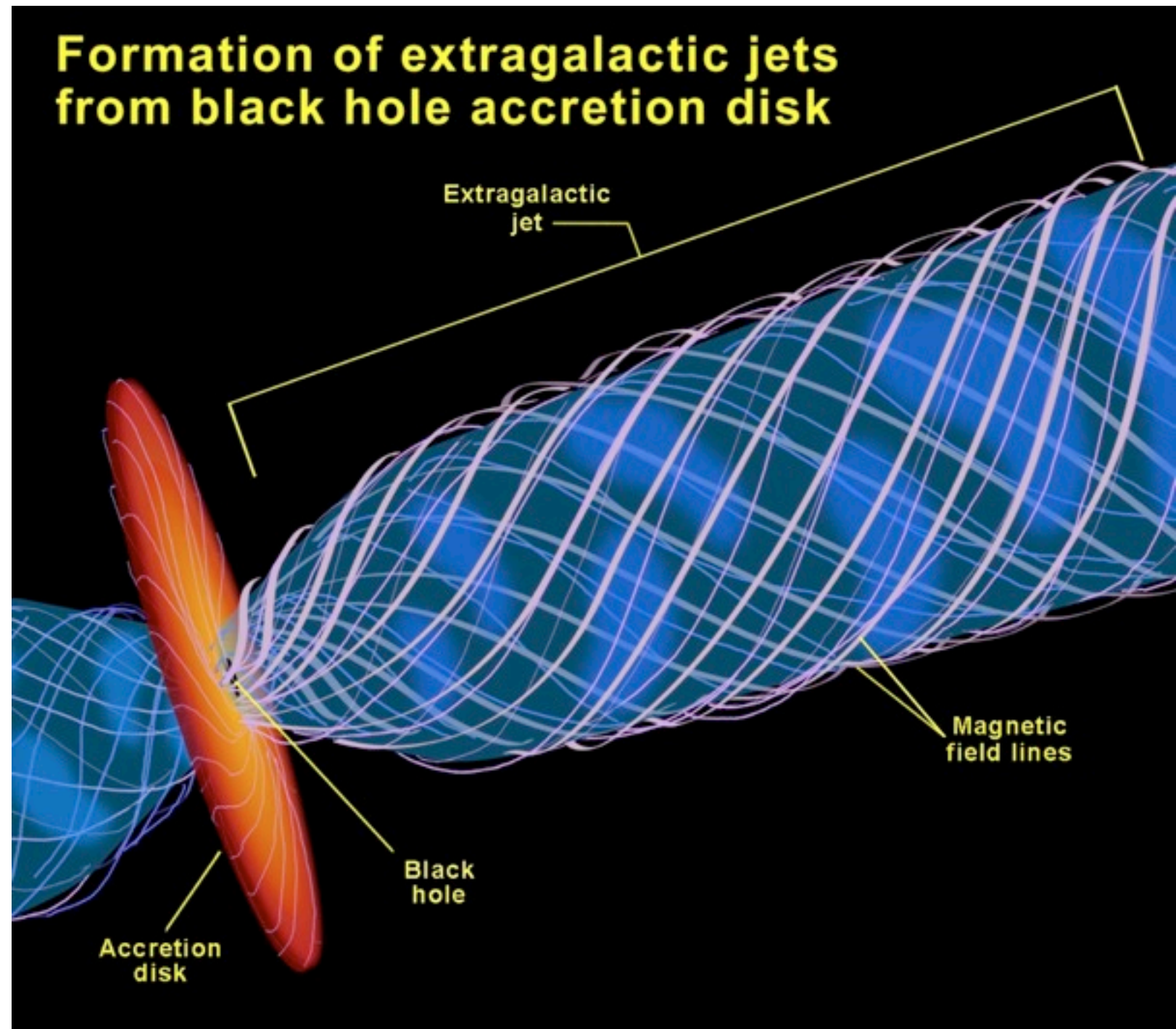
Il motore di un AGN è un buco nero

- Jet energetici



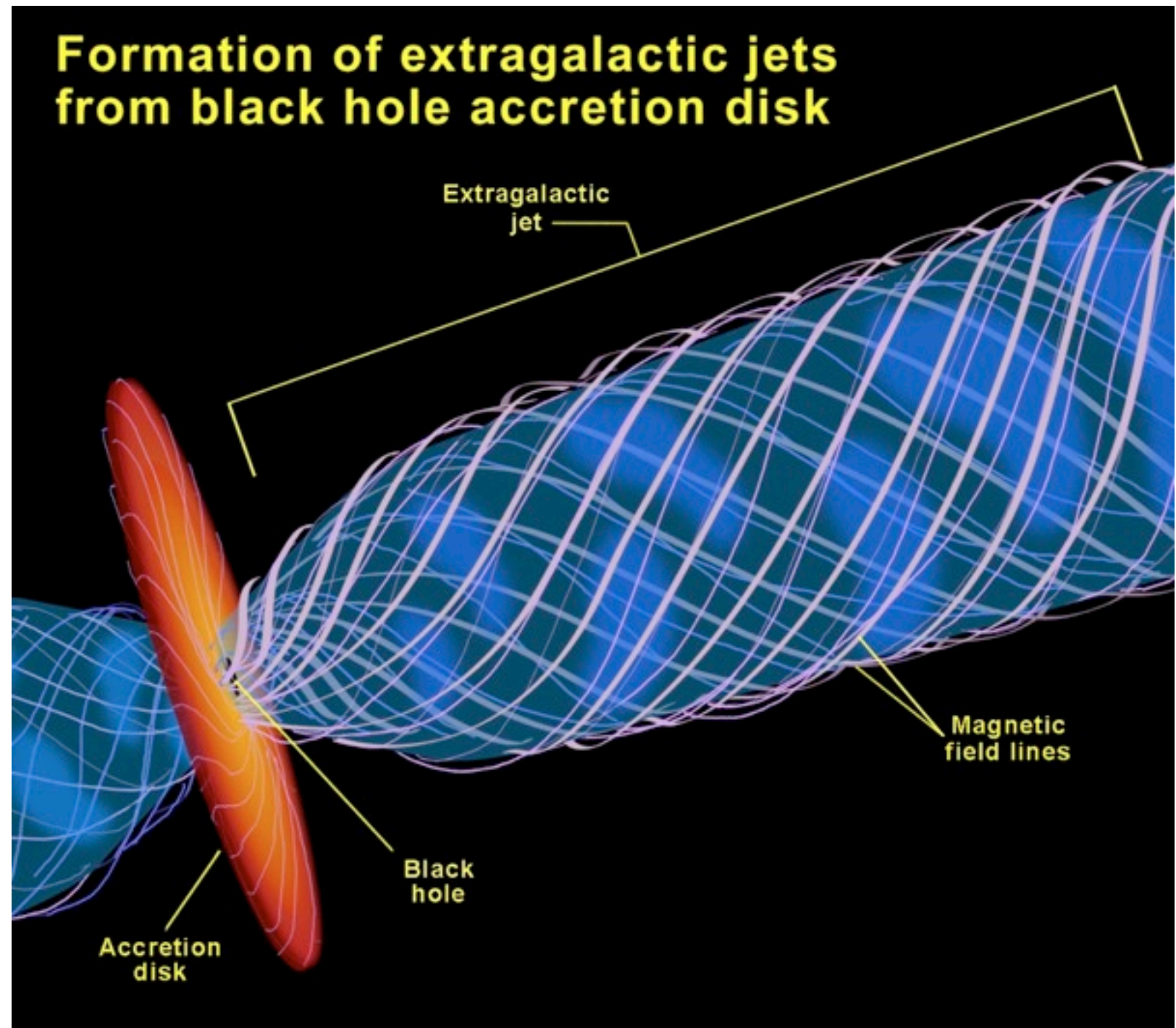
Il motore di un AGN è un buco nero

- Jet energetici
- Massa dedotta dalla cinematica



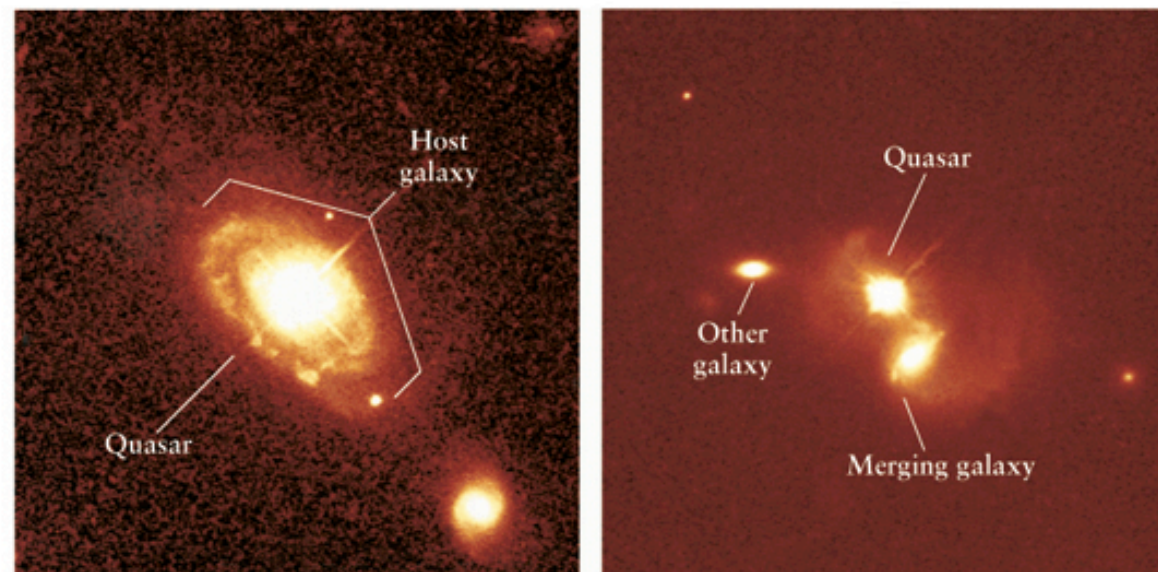
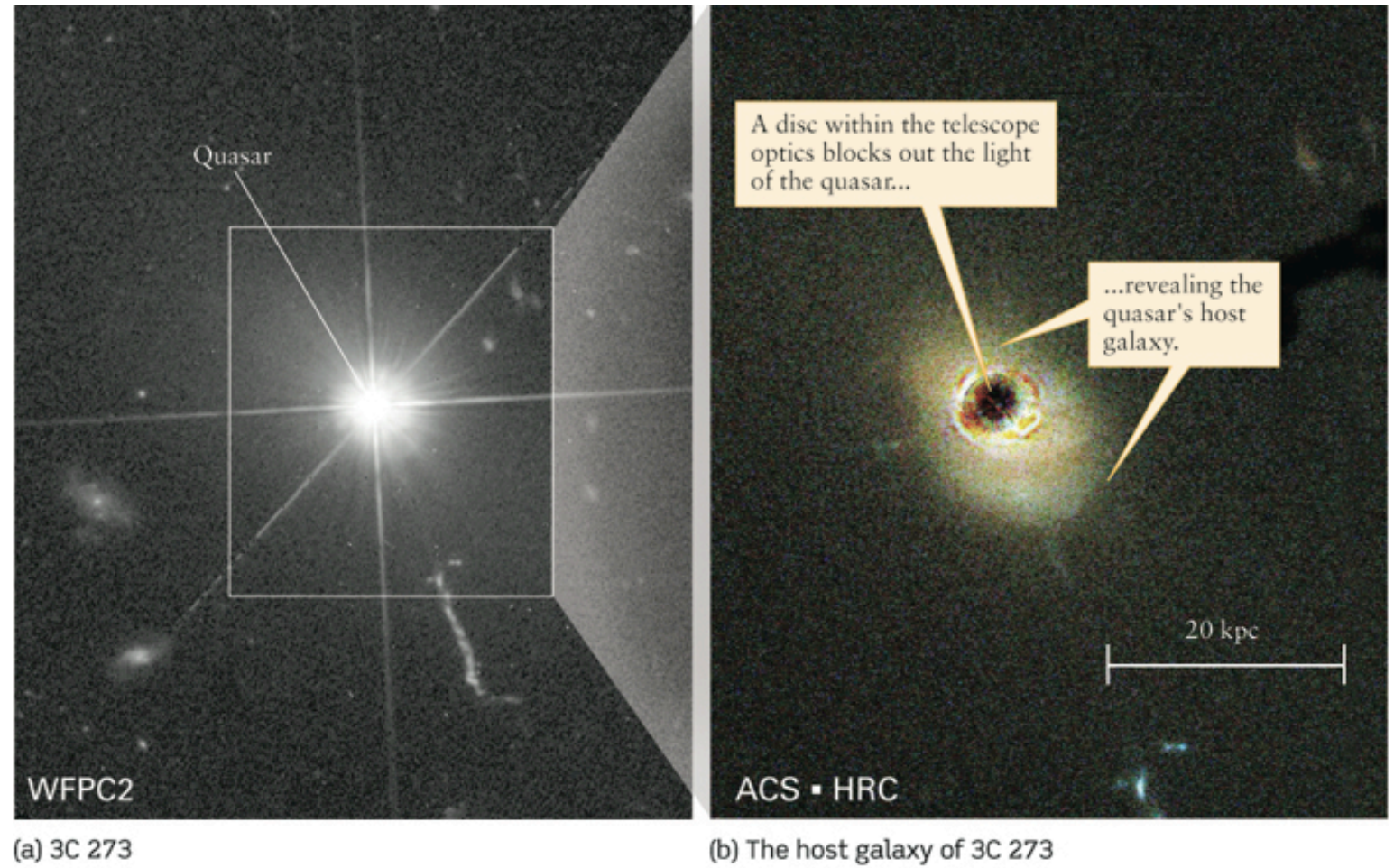
Il motore di un AGN è un buco nero

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



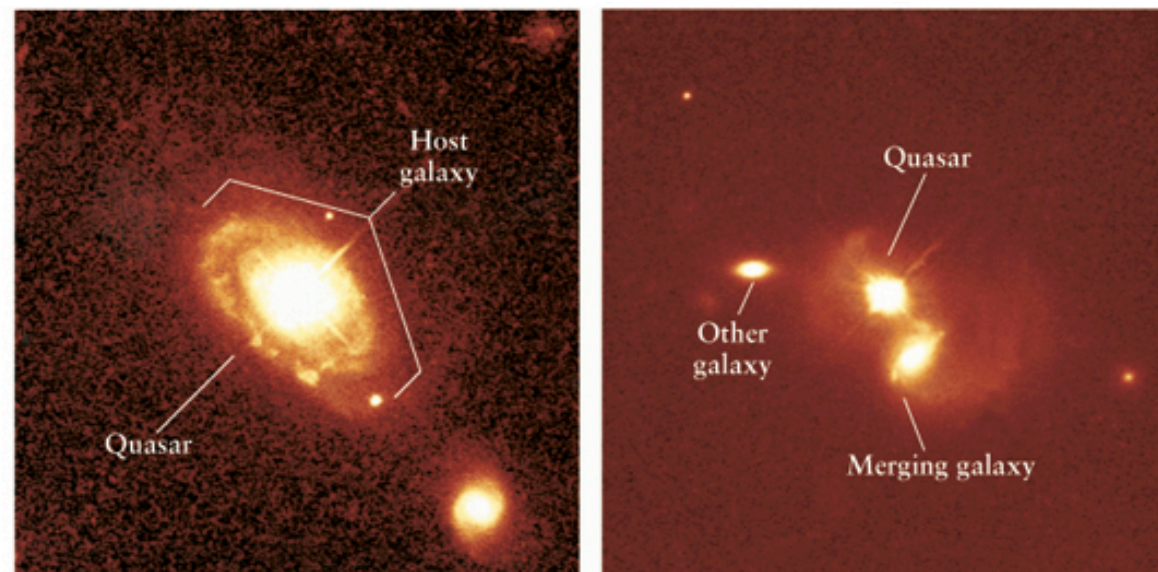
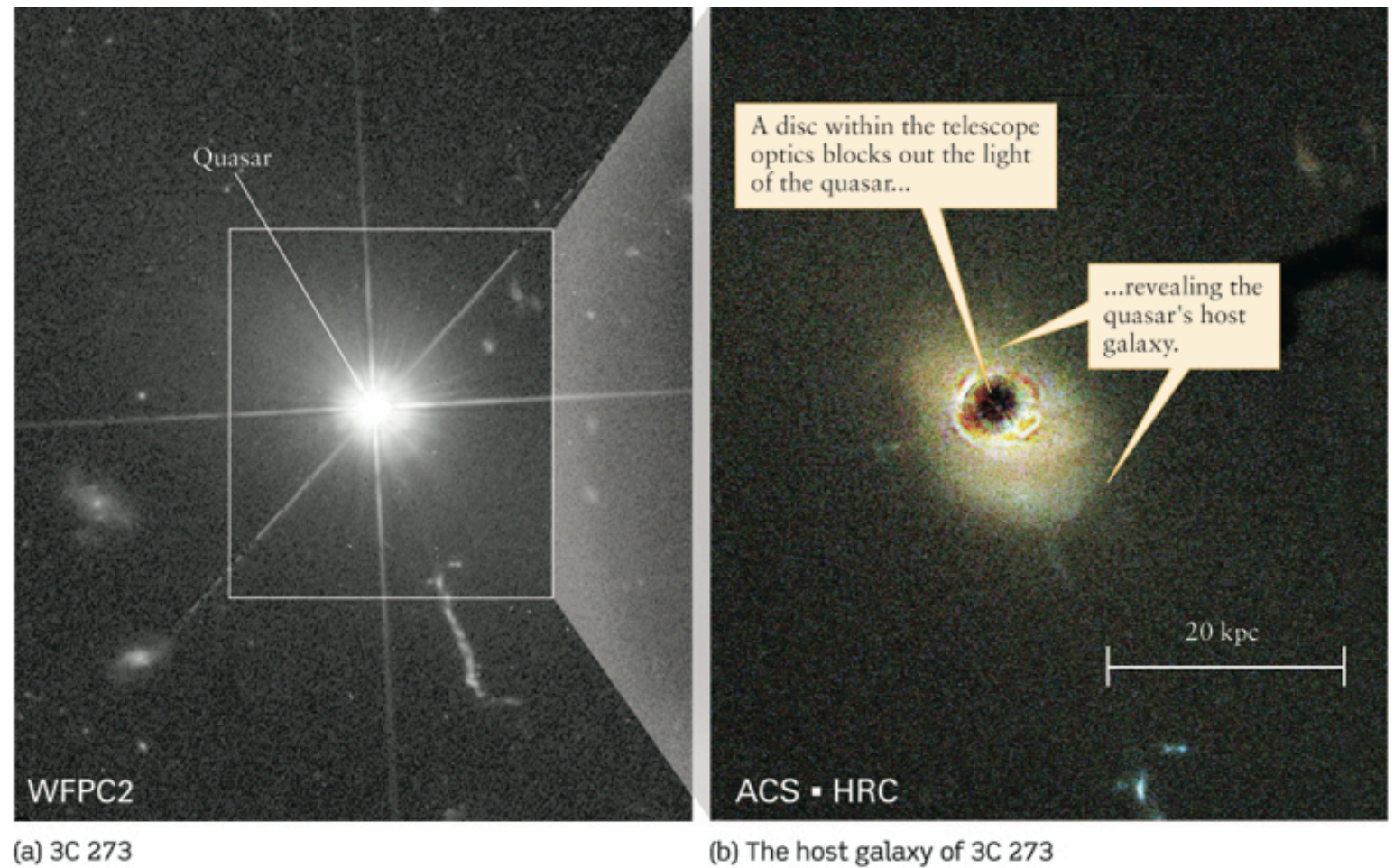
Limite di Eddington per l'accrescimento

Limite di Eddington per l'accrescimento



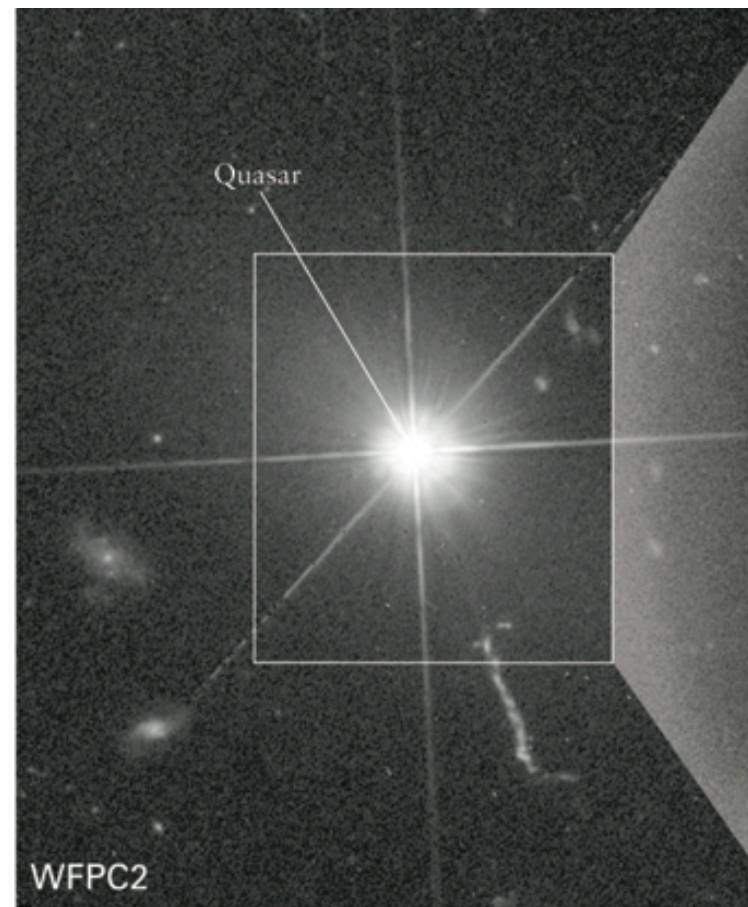
Limite di Eddington per l'accrescimento

- Pressione di radiazione:
 $L_{\text{Edd}} = 30'000 M \bullet L_{\odot}/M_{\odot}$

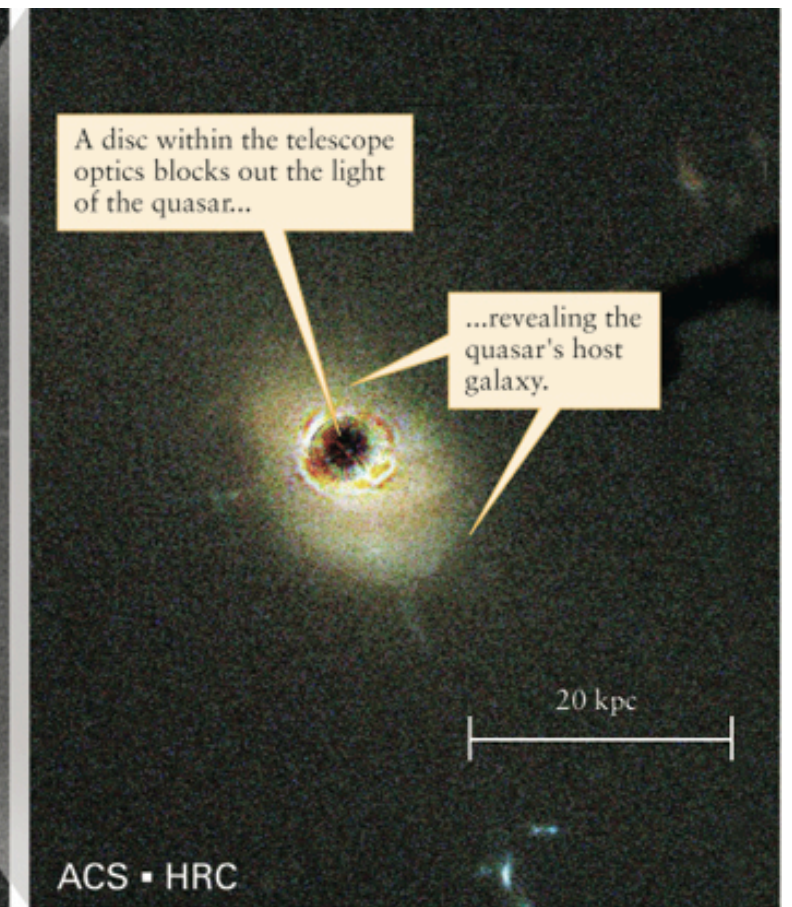


Limite di Eddington per l'accrescimento

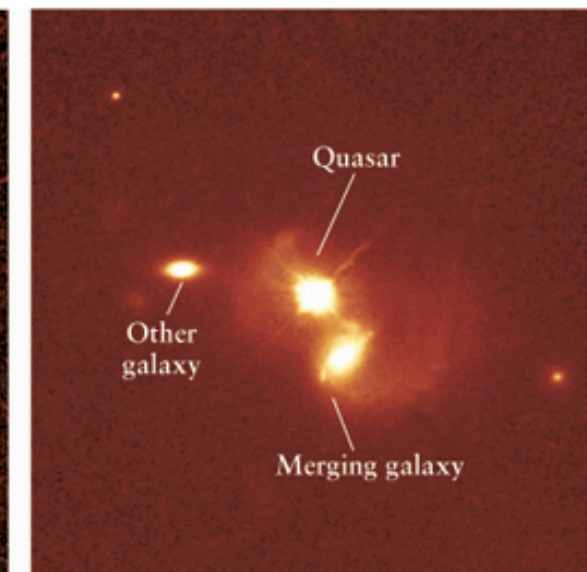
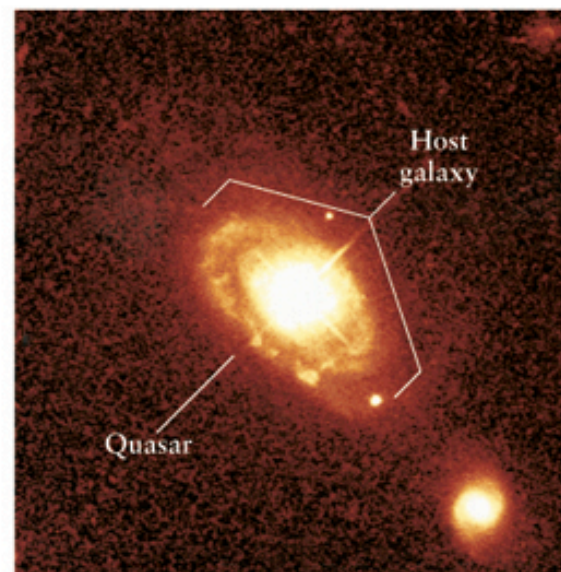
- Pressione di radiazione:
 $L_{\text{Edd}} = 30'000 M_{\bullet} L_{\odot}/M_{\odot}$
- Luminosità di 3C 273 =
 $3 \cdot 10^{13} L_{\odot} \Rightarrow M_{\bullet} = 10^9 M_{\odot}$

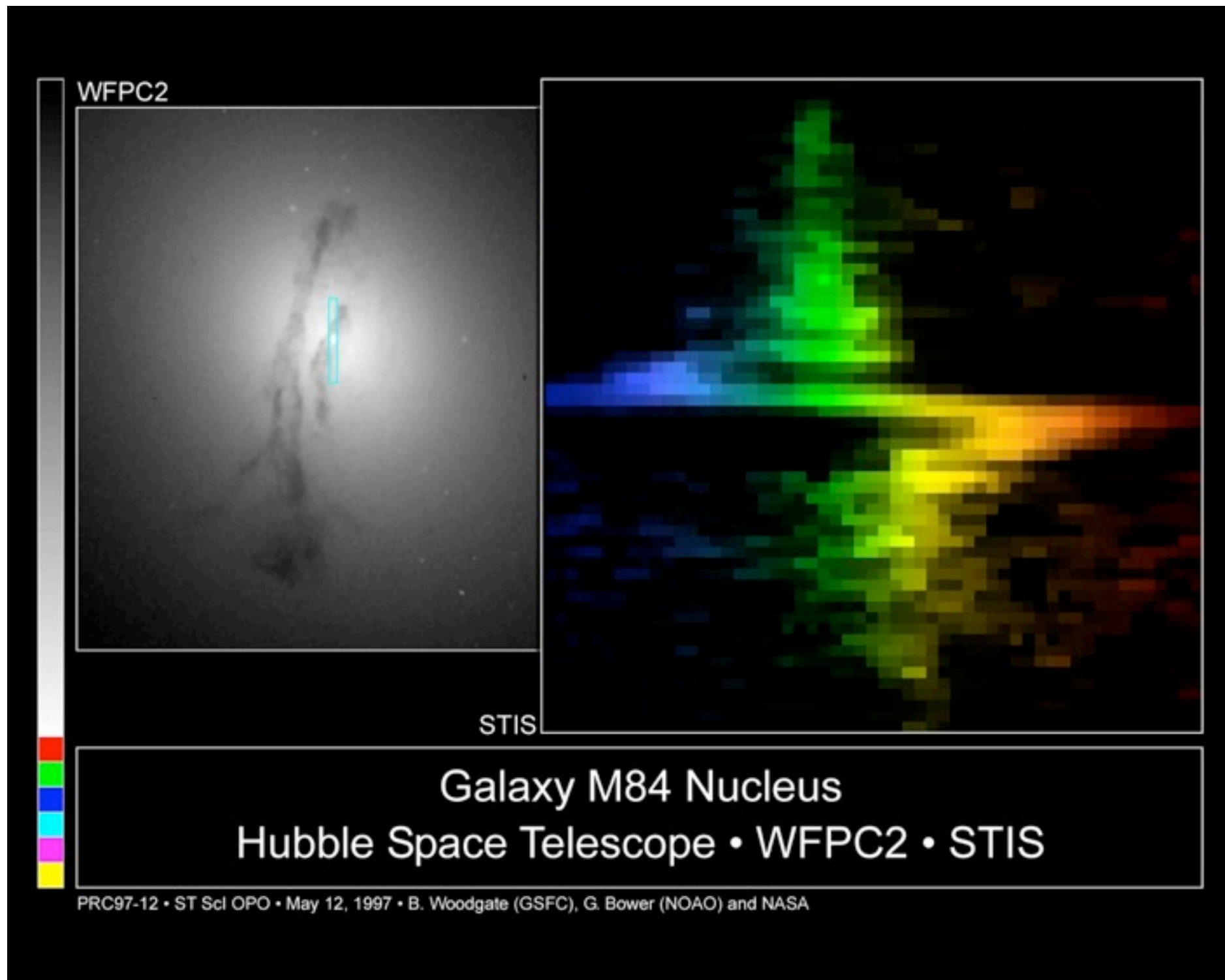


(a) 3C 273

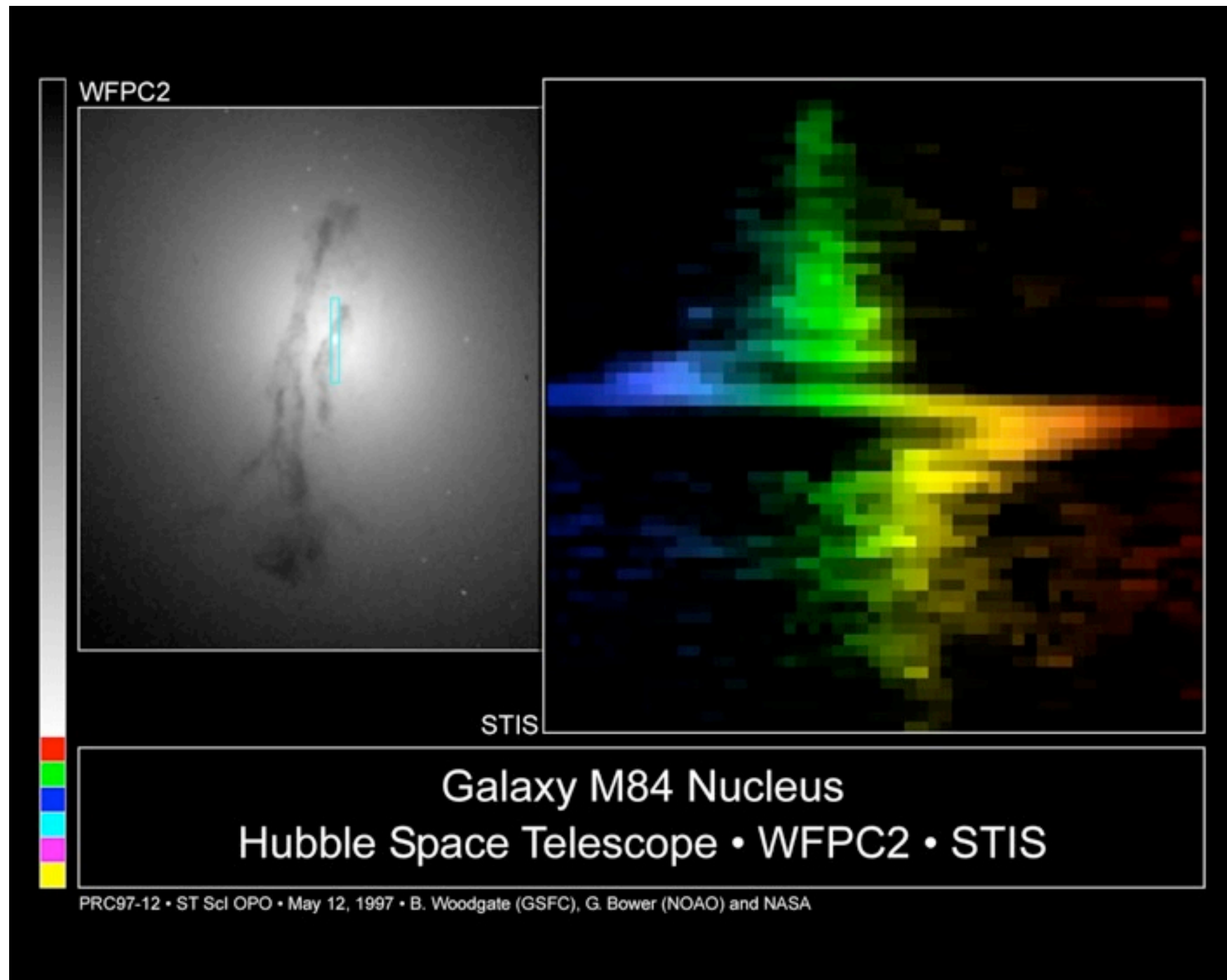


(b) The host galaxy of 3C 273

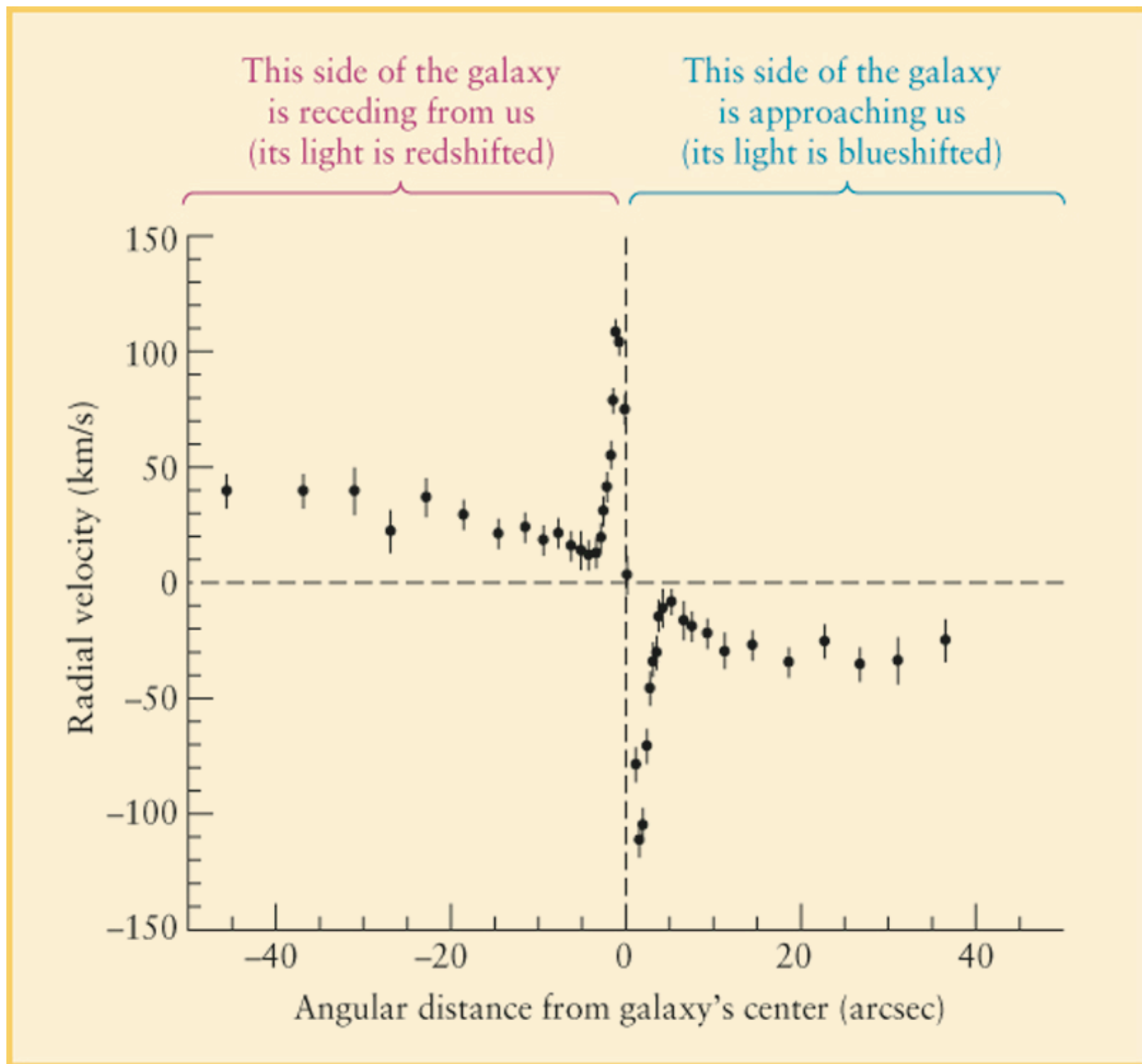


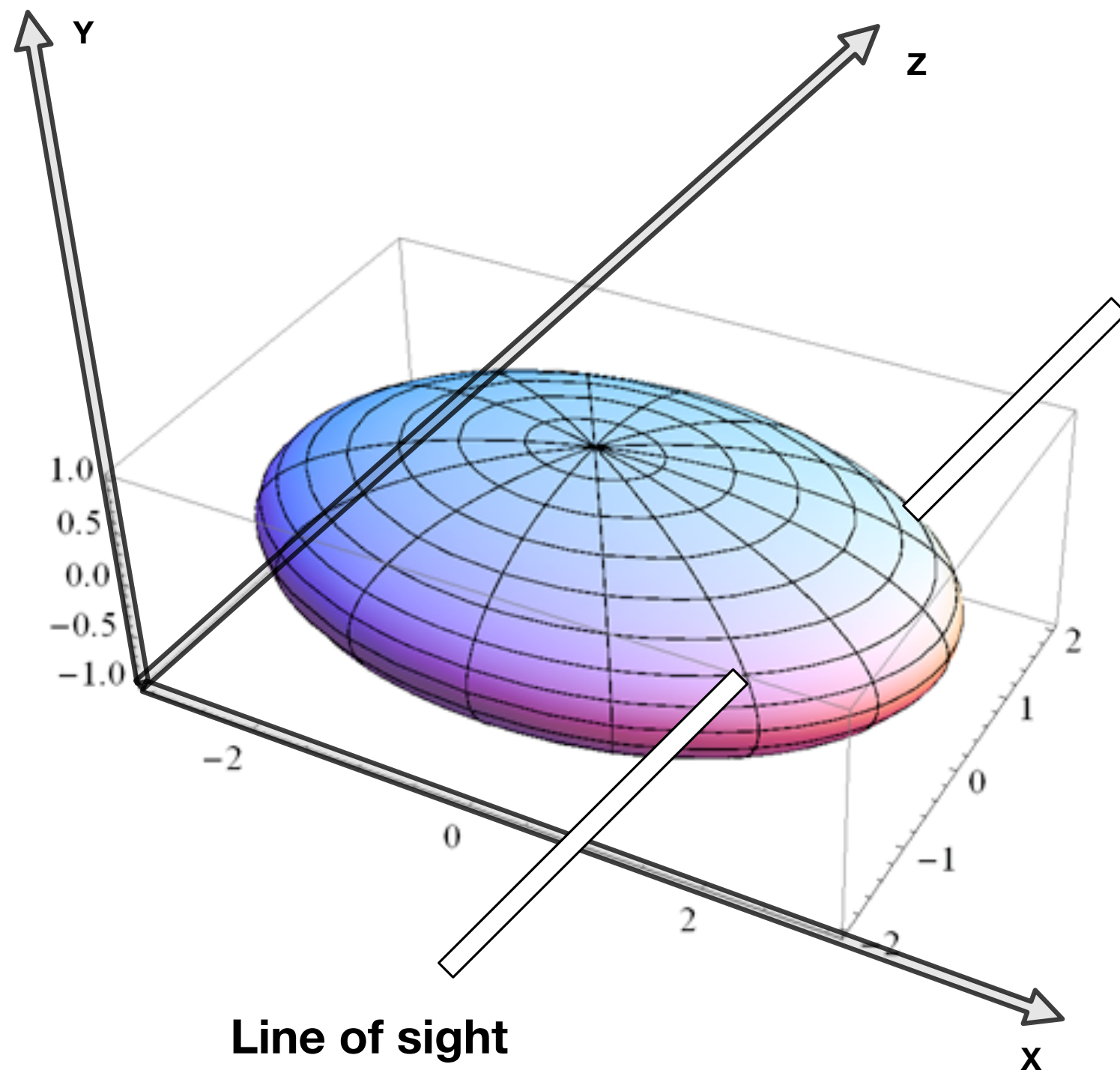


Buchi neri in galassie “normali” (non attive)

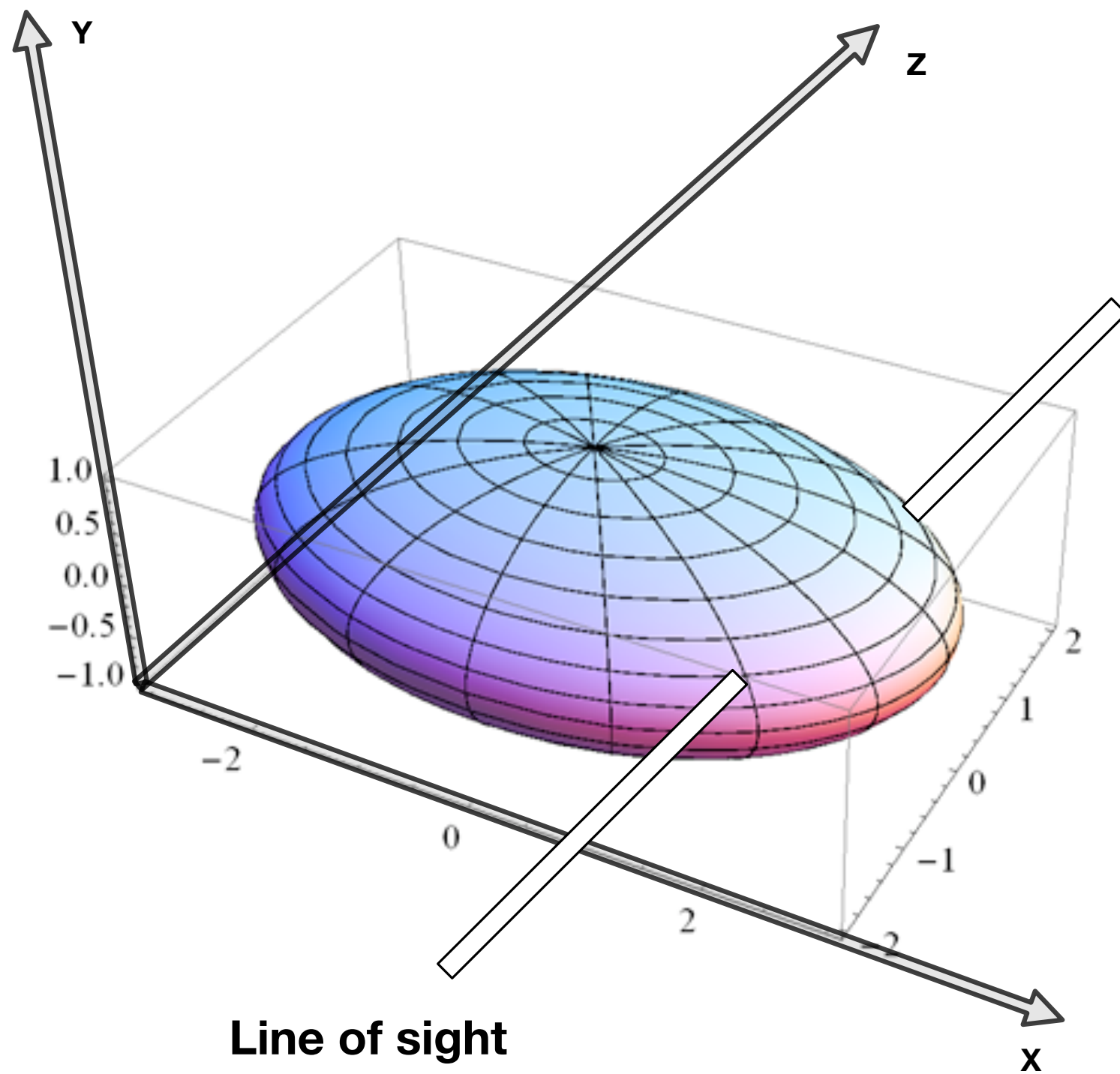


Buchi neri in galassie “normali” (non attive)

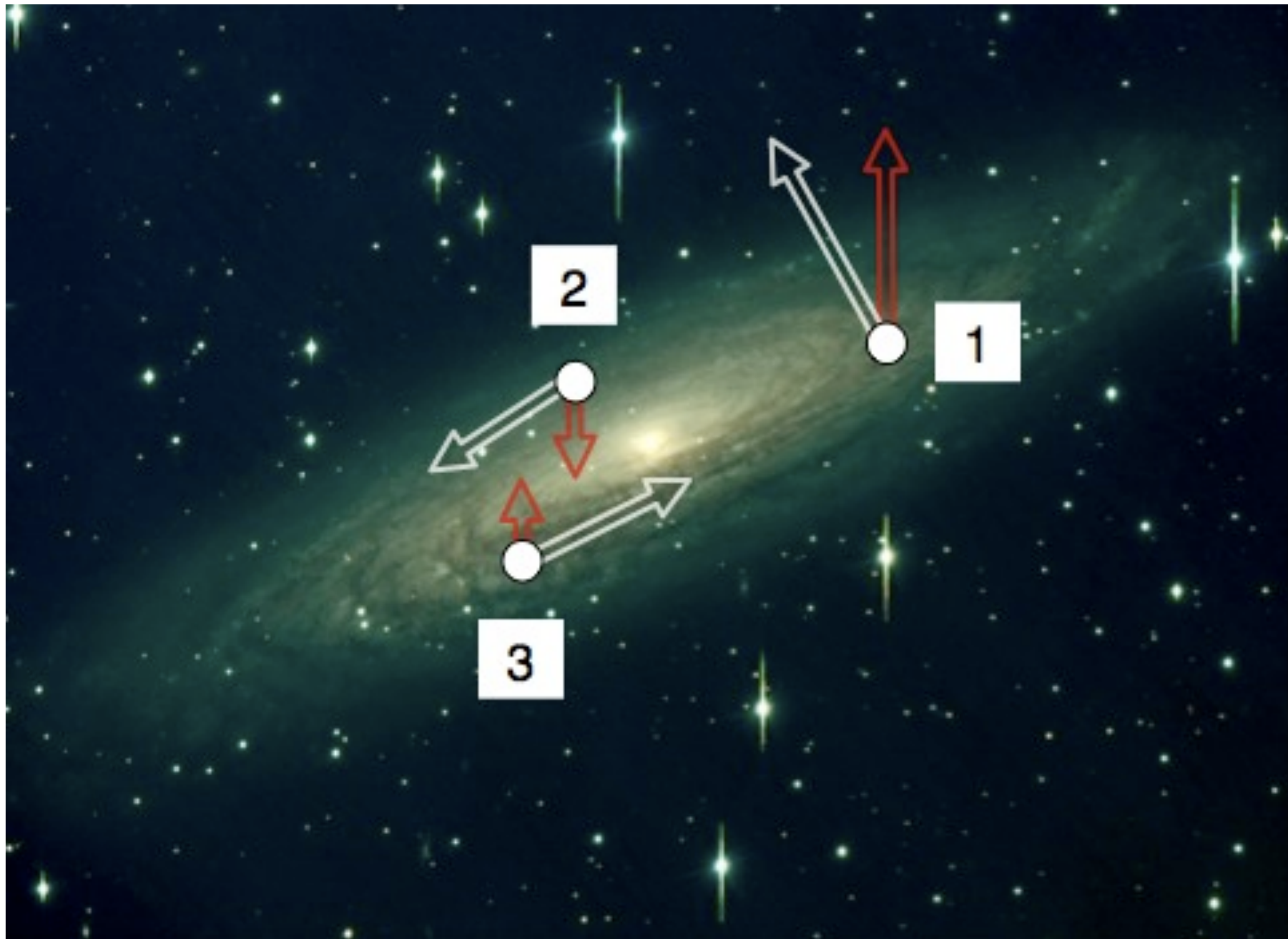




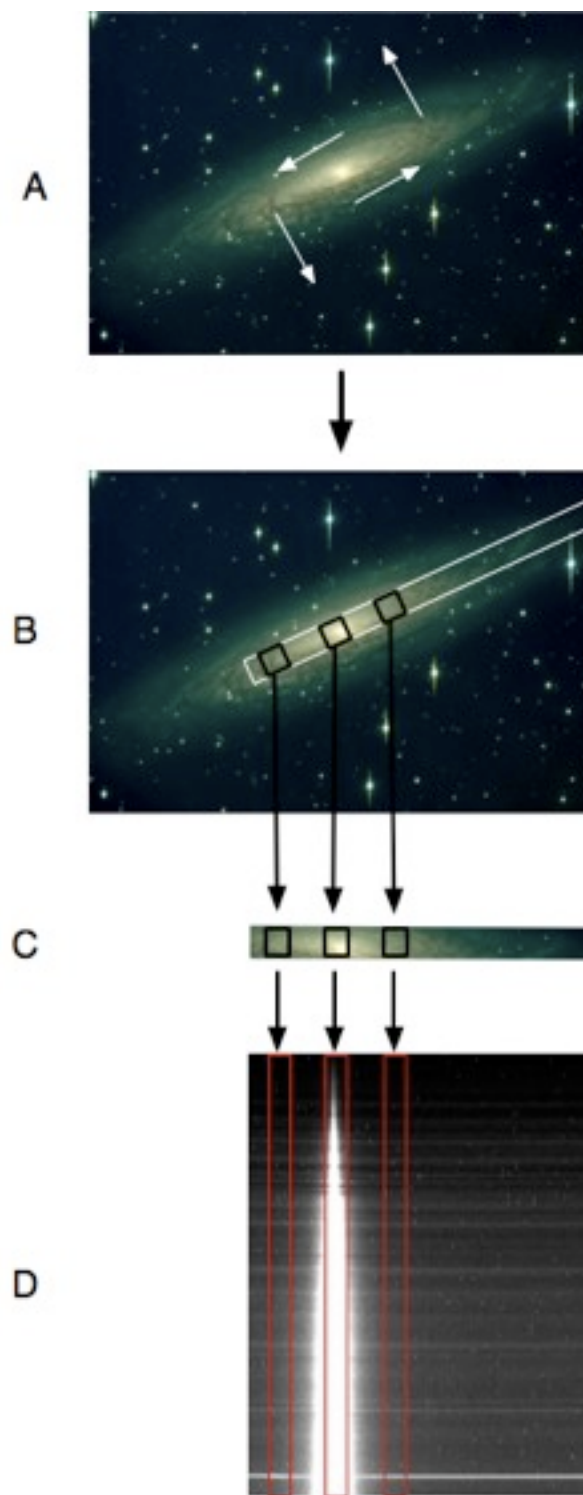
Spettroscopia “long slit”



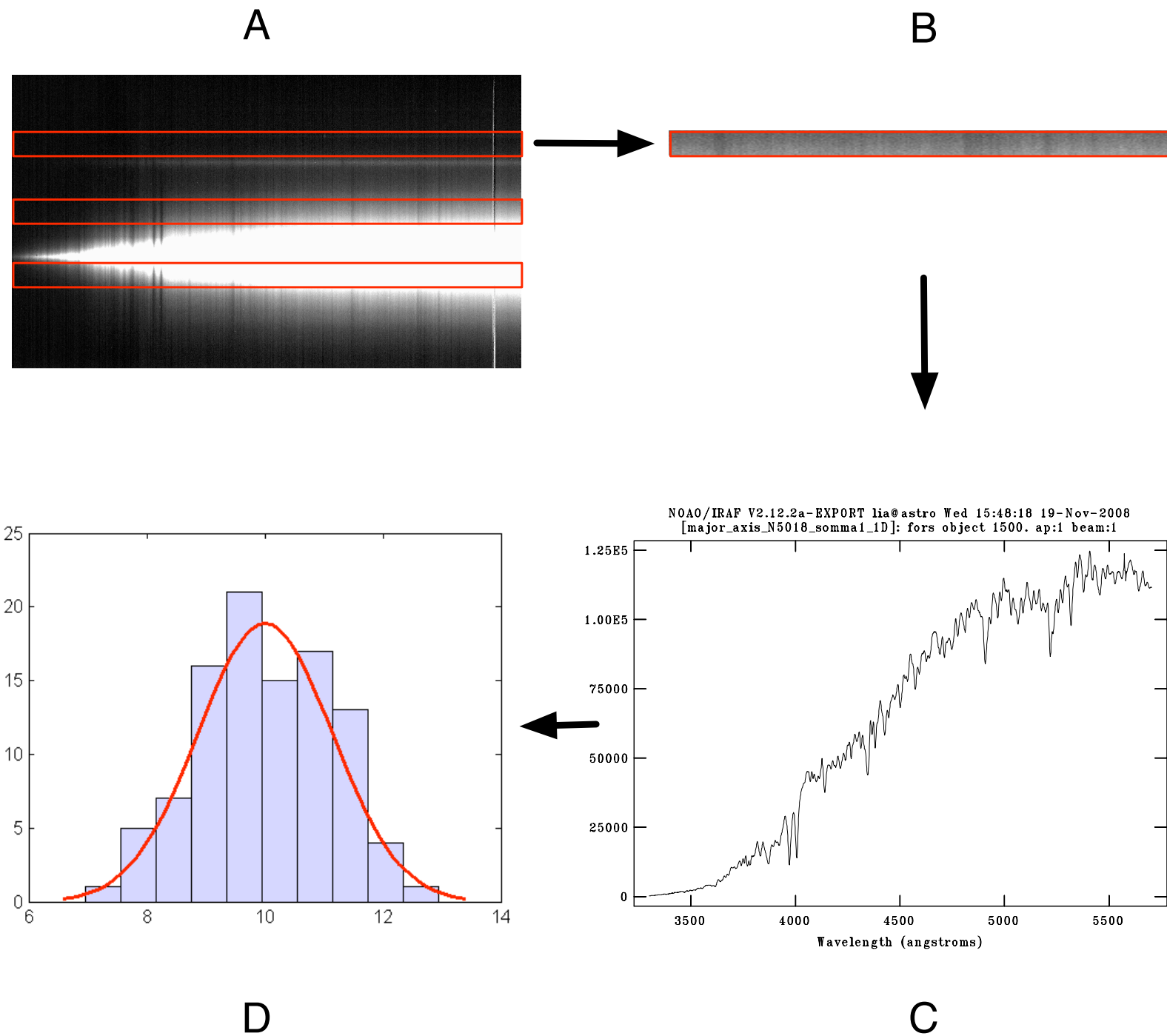
Spettroscopia “long slit”



Spettroscopia “long slit”



Spettroscopia “long slit”

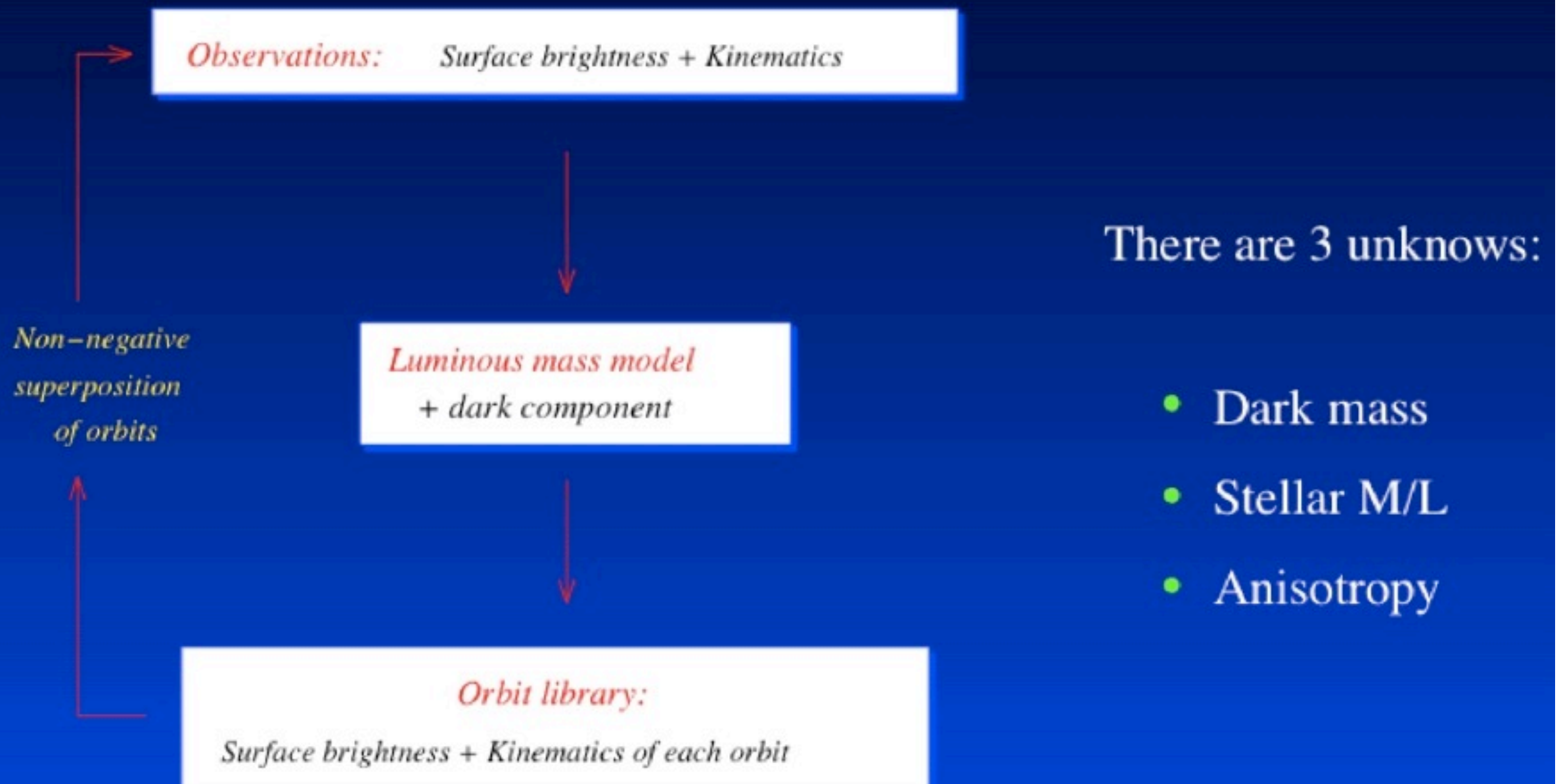


The Schwarzschild method

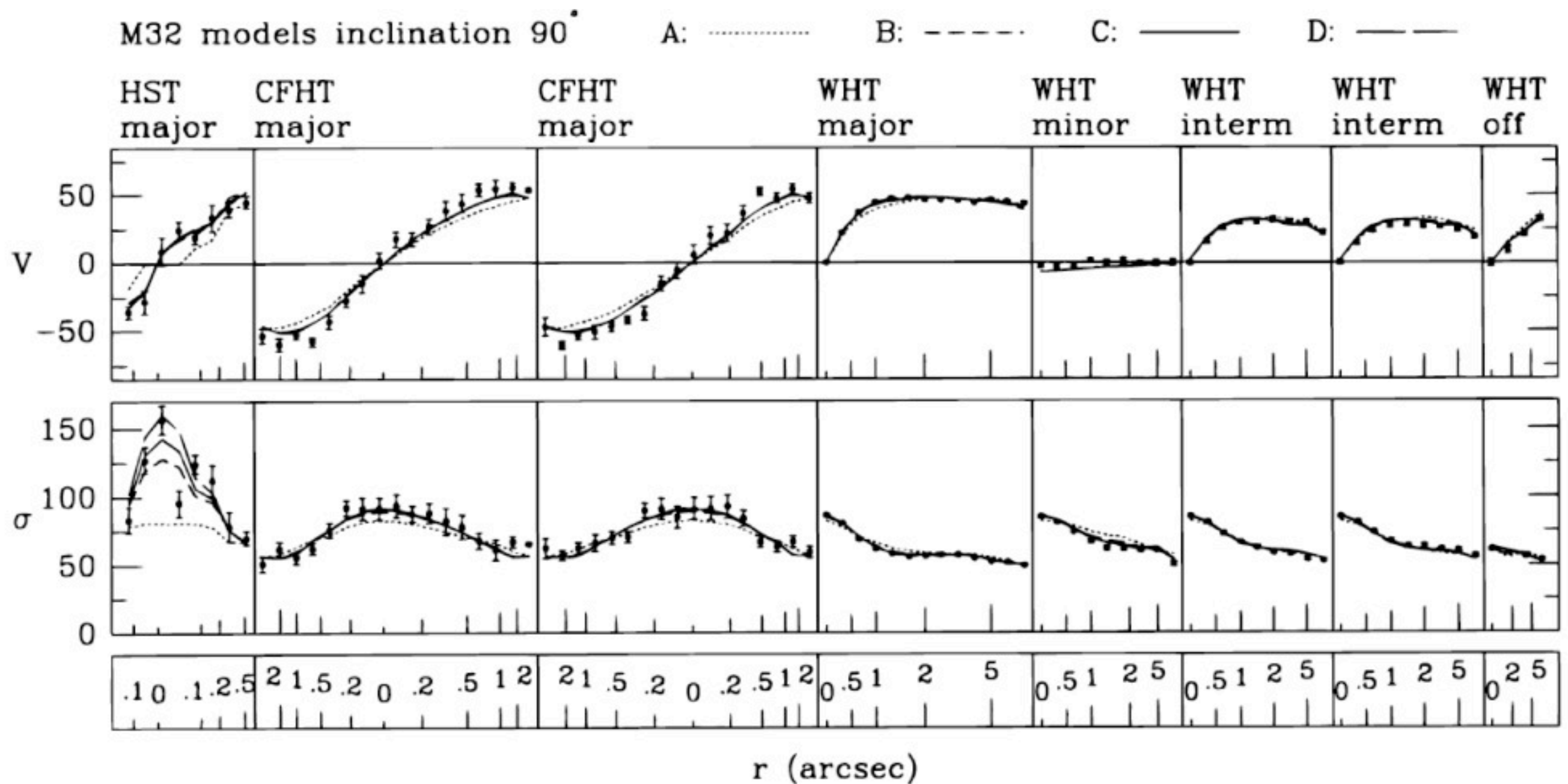


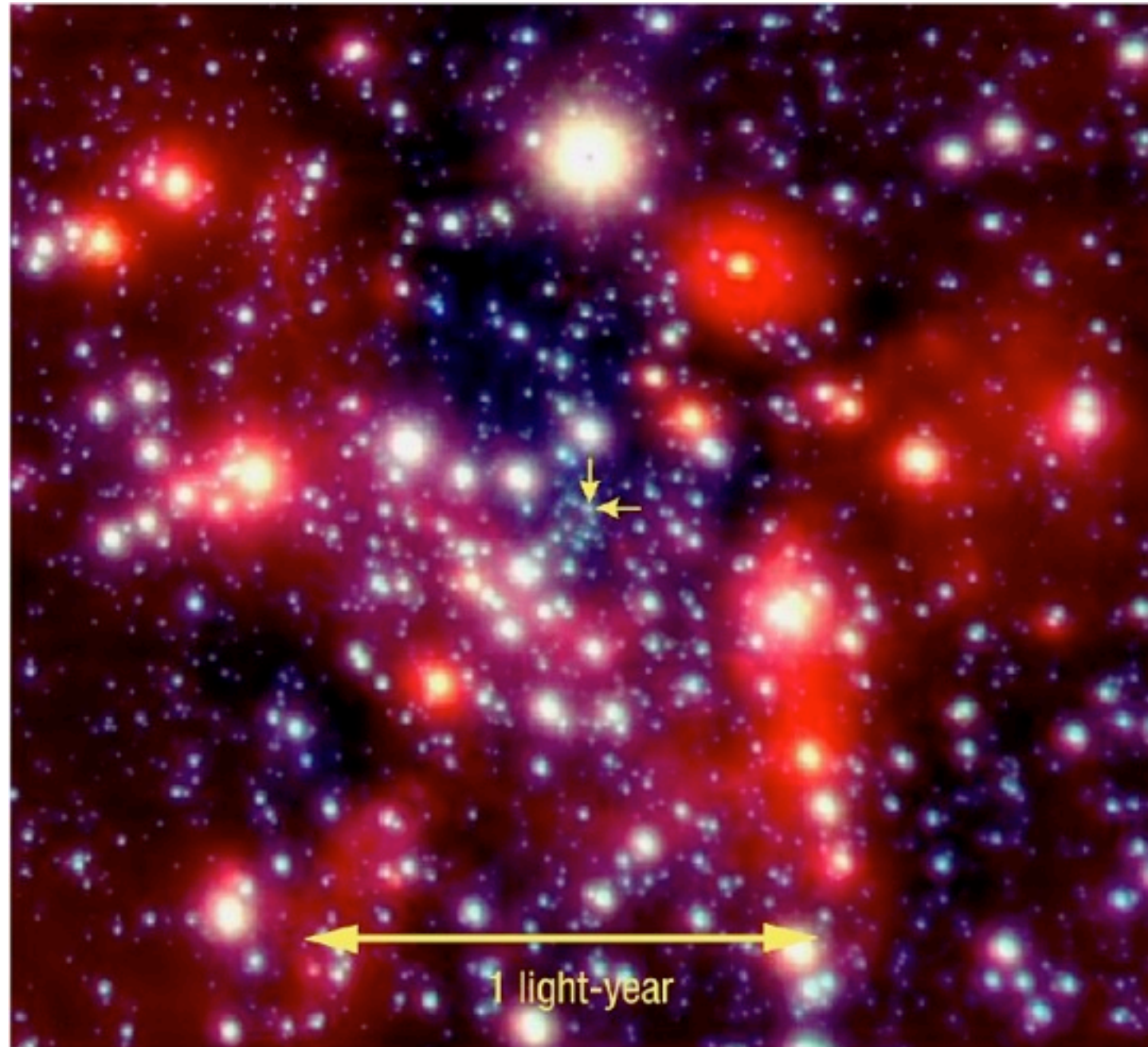
Misurare la massa del buco nero

The Schwarzschild method



Misurare la massa del buco nero





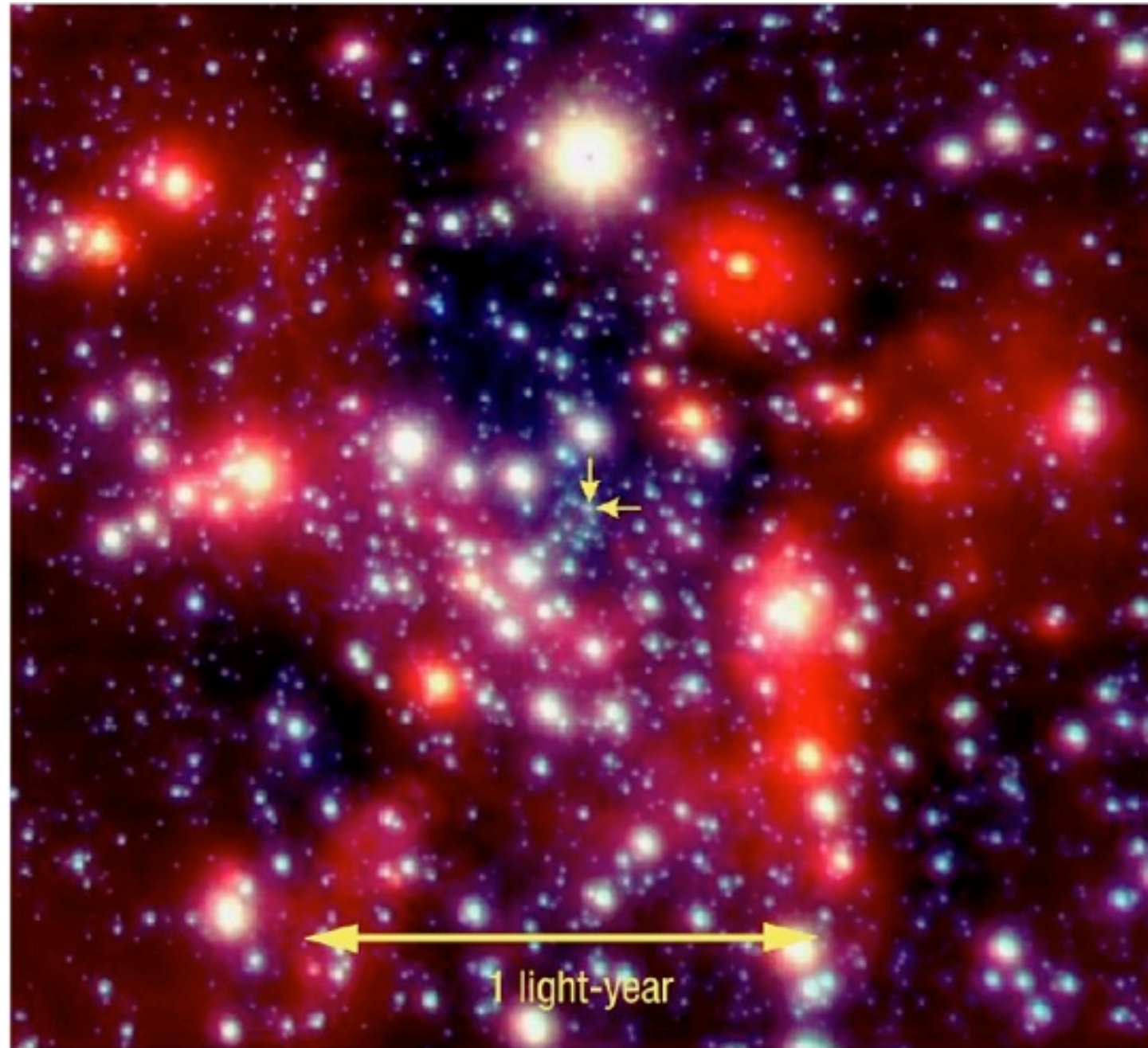
The Centre of the Milky Way
(VLT YEPUN + NACO)

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

© European Southern Observatory



Buco nero al centro della Via Lattea



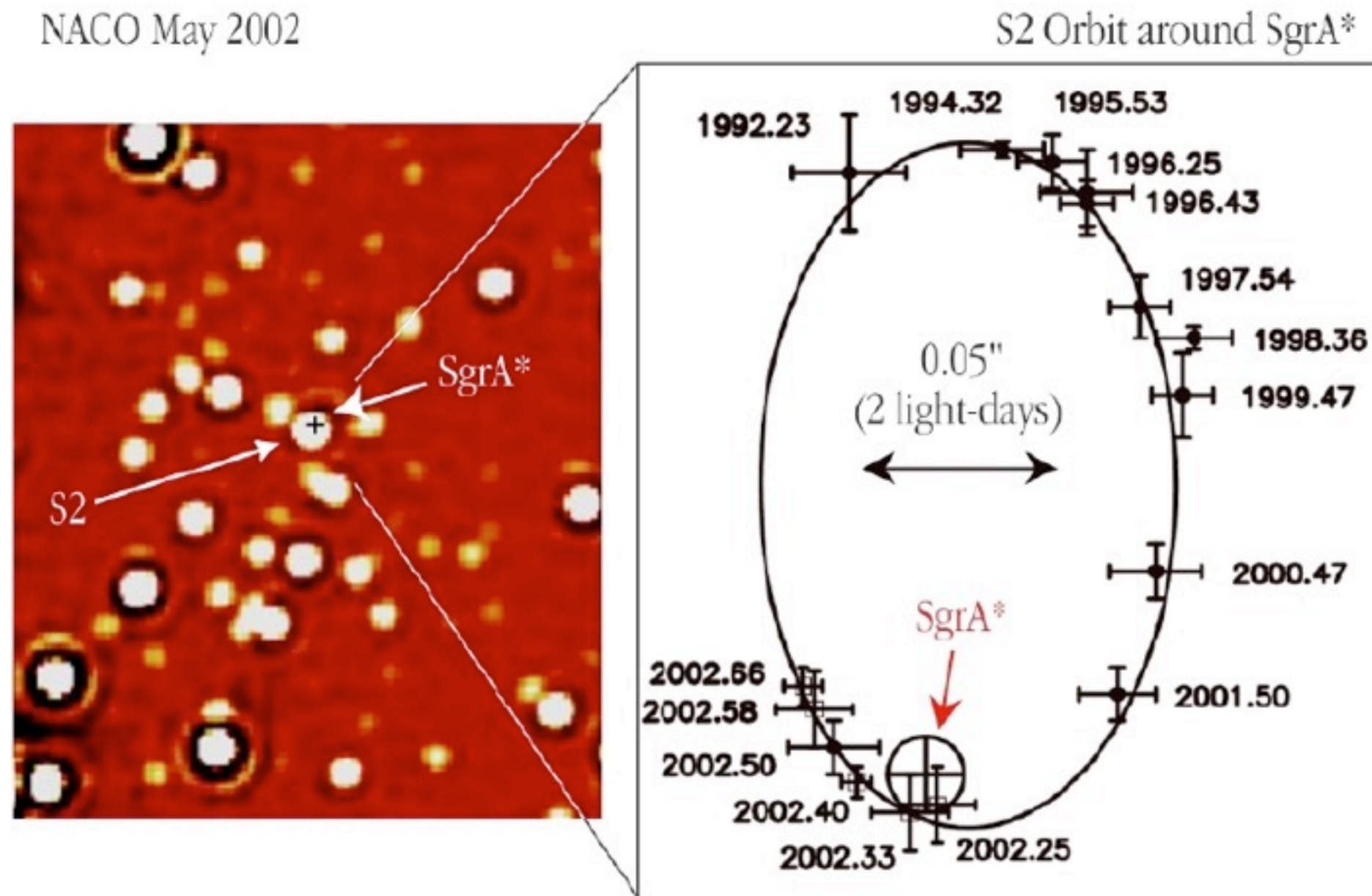
The Centre of the Milky Way
(VLT YEPUN + NACO)

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

© European Southern Observatory



Buco nero al centro della Via Lattea



The Motion of a Star around the Central Black Hole in the Milky Way

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

© European Southern Observatory



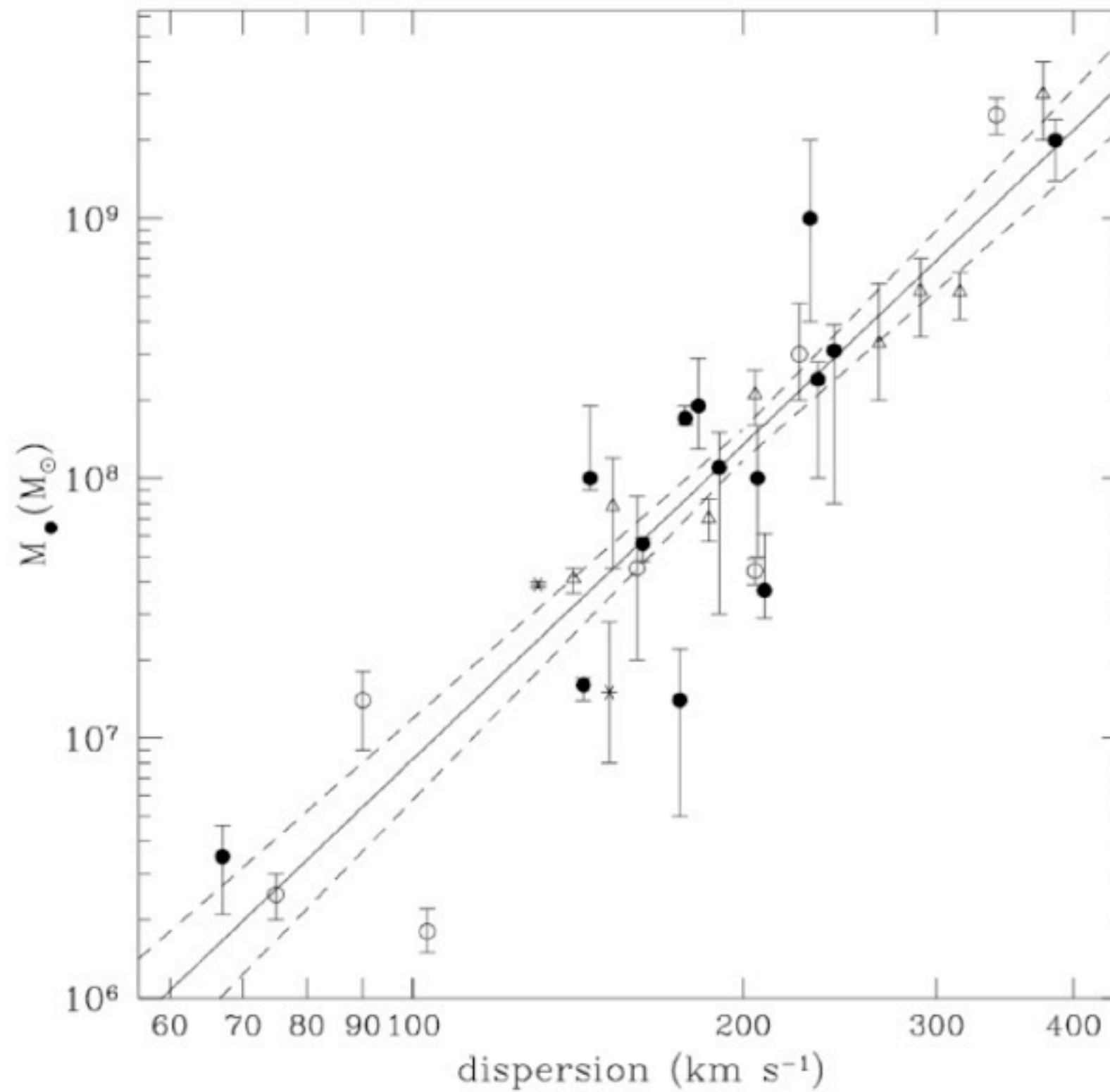
La cena del buco nero al centro della Via Lattea

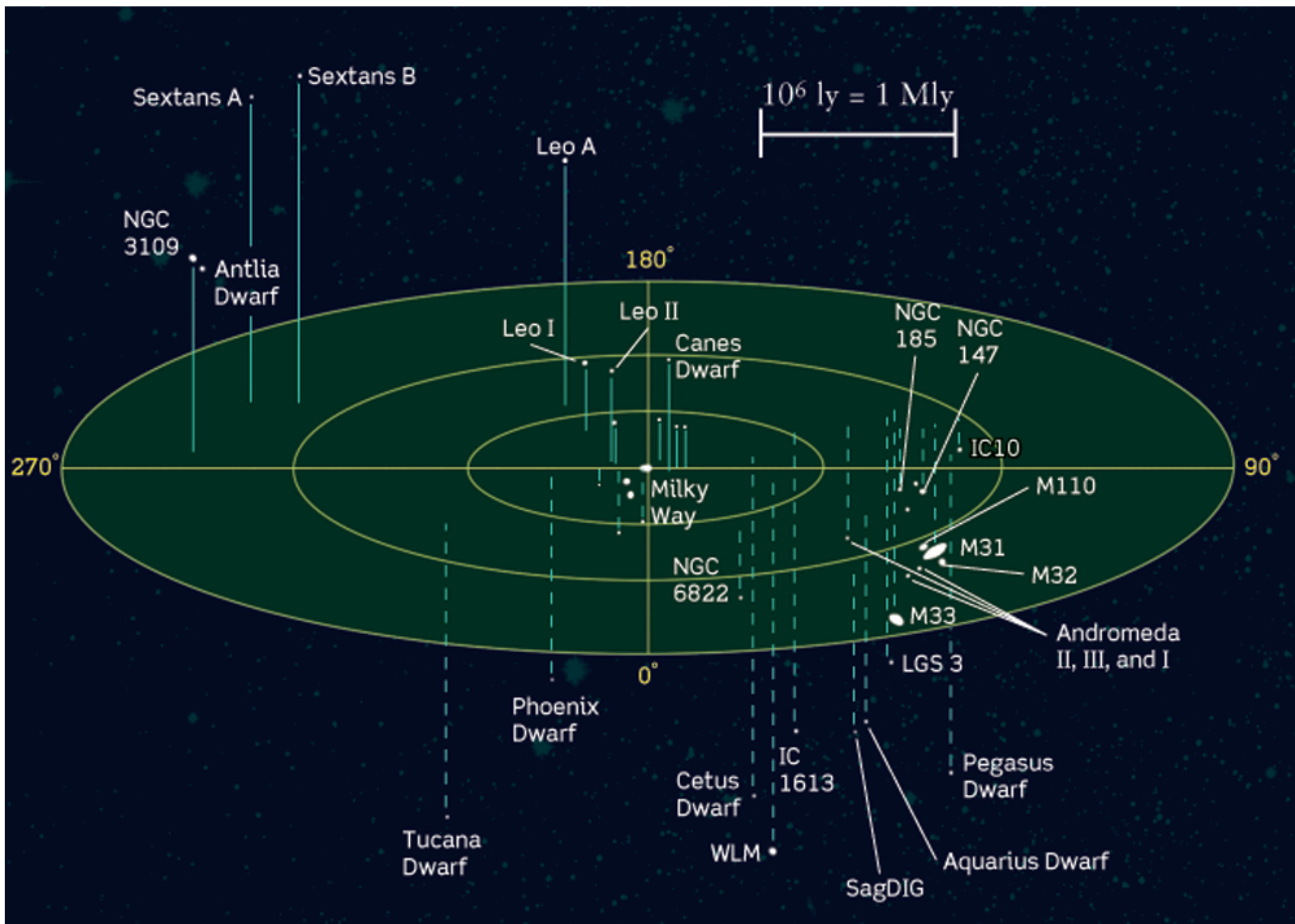
La cena del buco nero al centro della Via Lattea



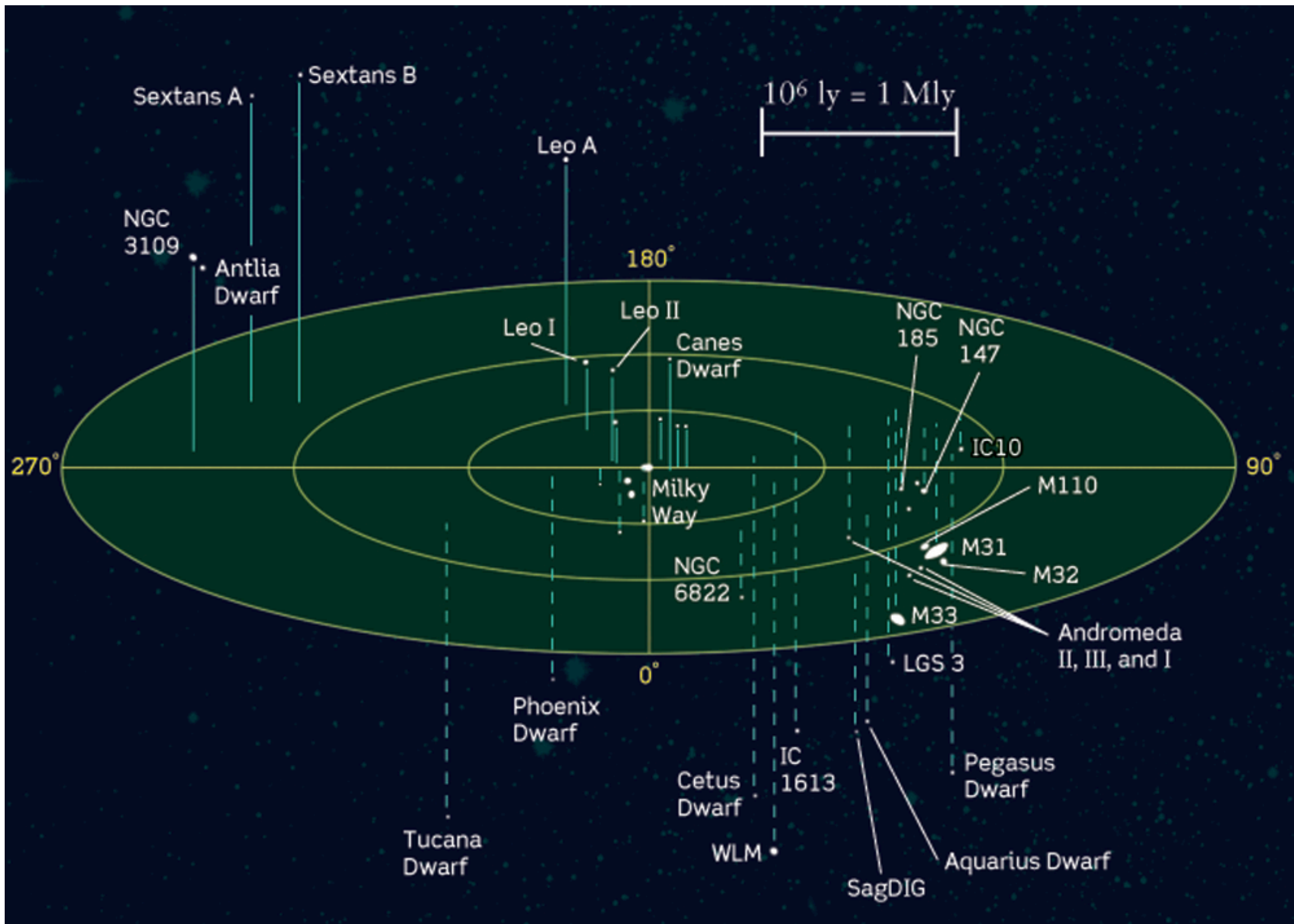
Correlazione: buco nero - galassia

Correlazione: buco nero - galassia





Il gruppo locale





Ammassi e super-ammassi di galassie

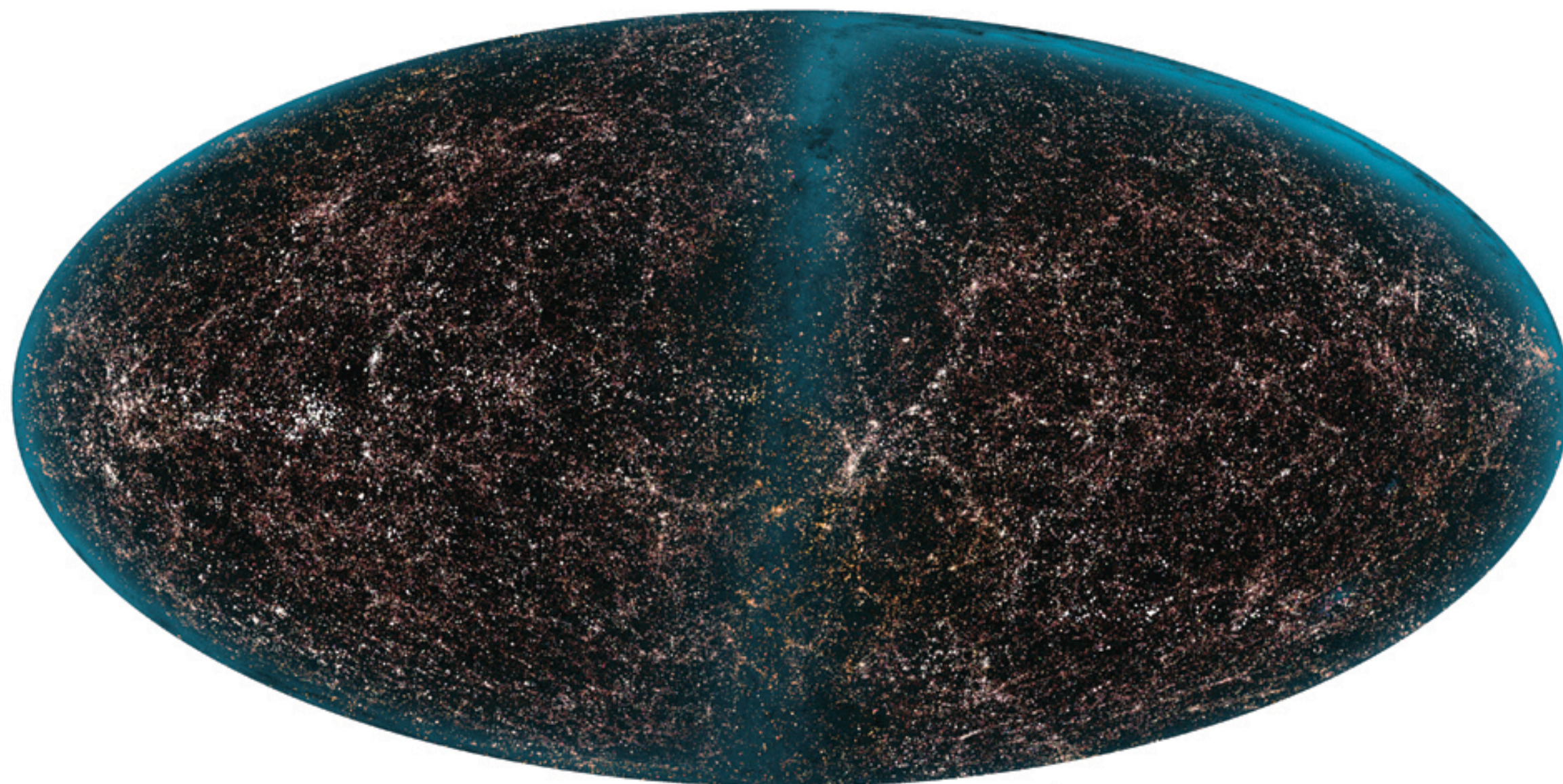


Ammassi e super-ammassi di galassie

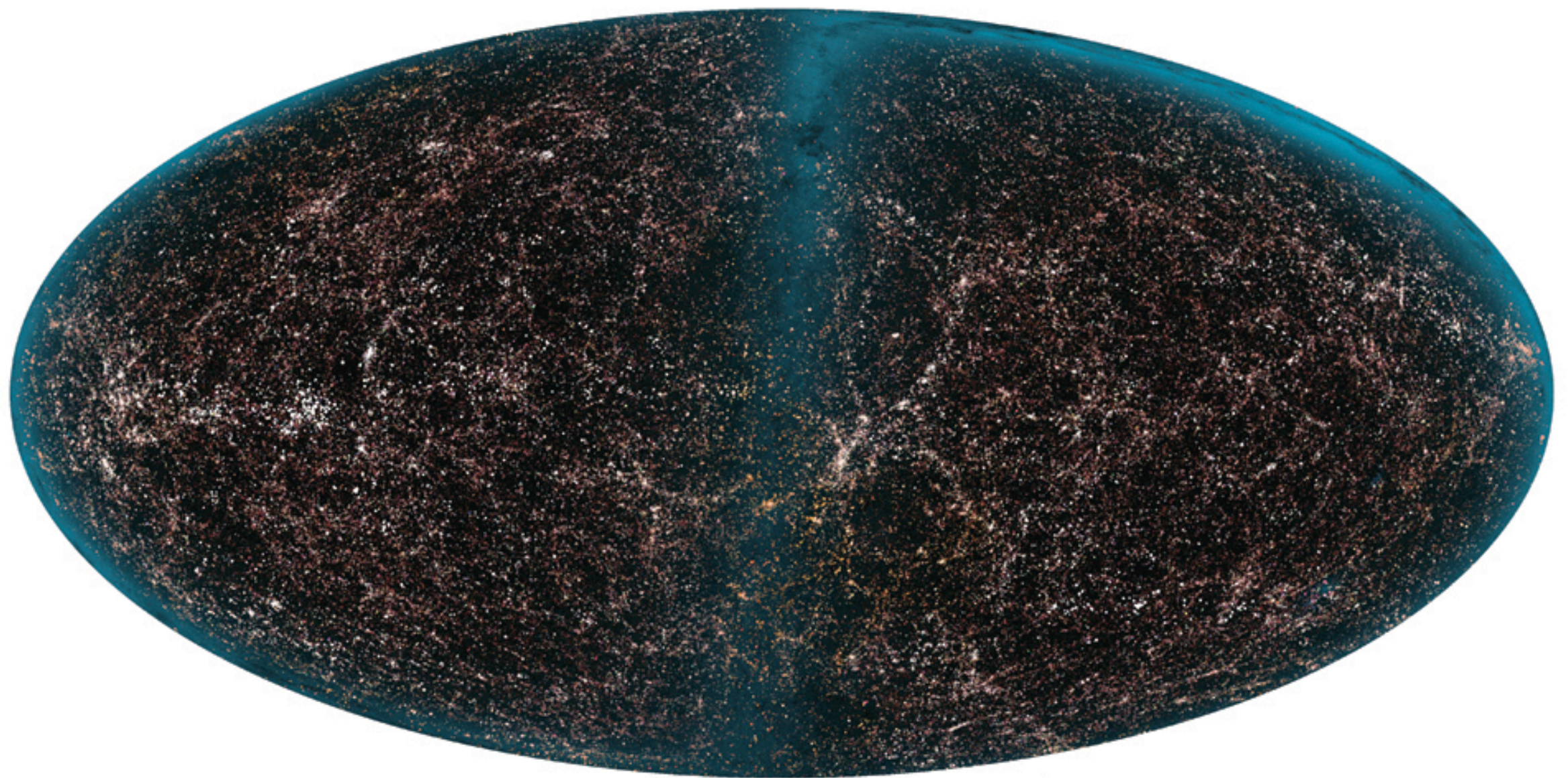


Ammassi e super-ammassi di galassie

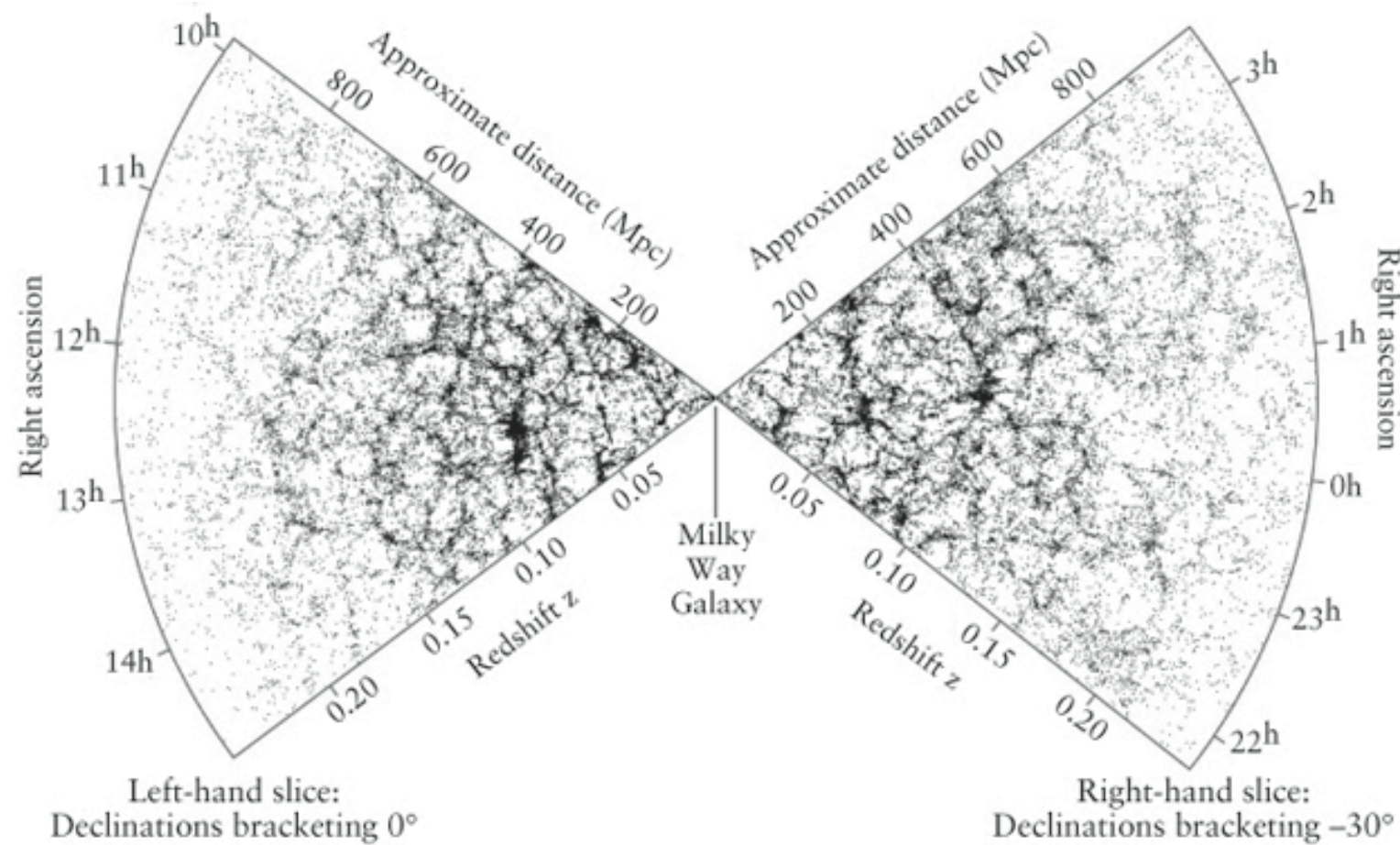




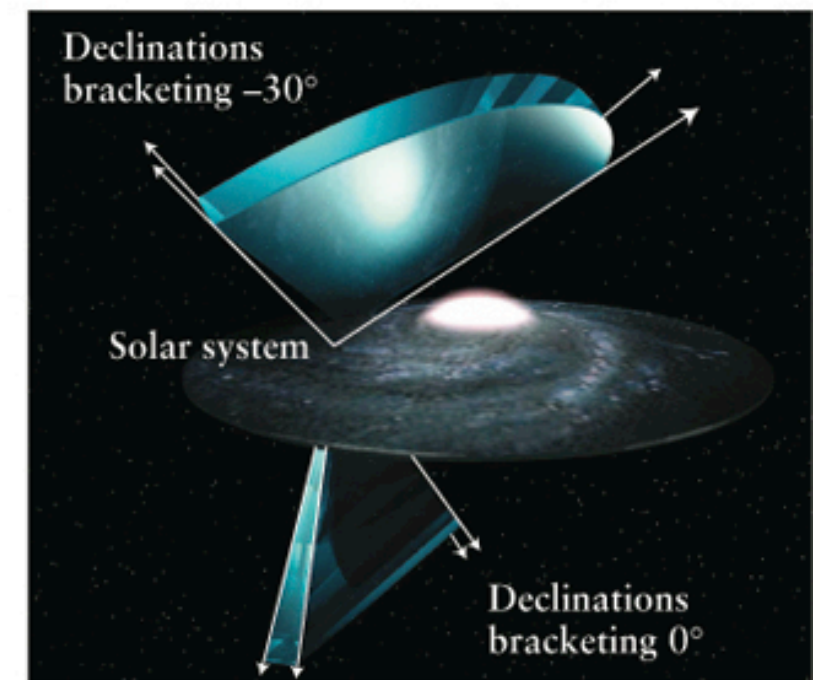
Struttura a grande scala



Struttura a grande scala



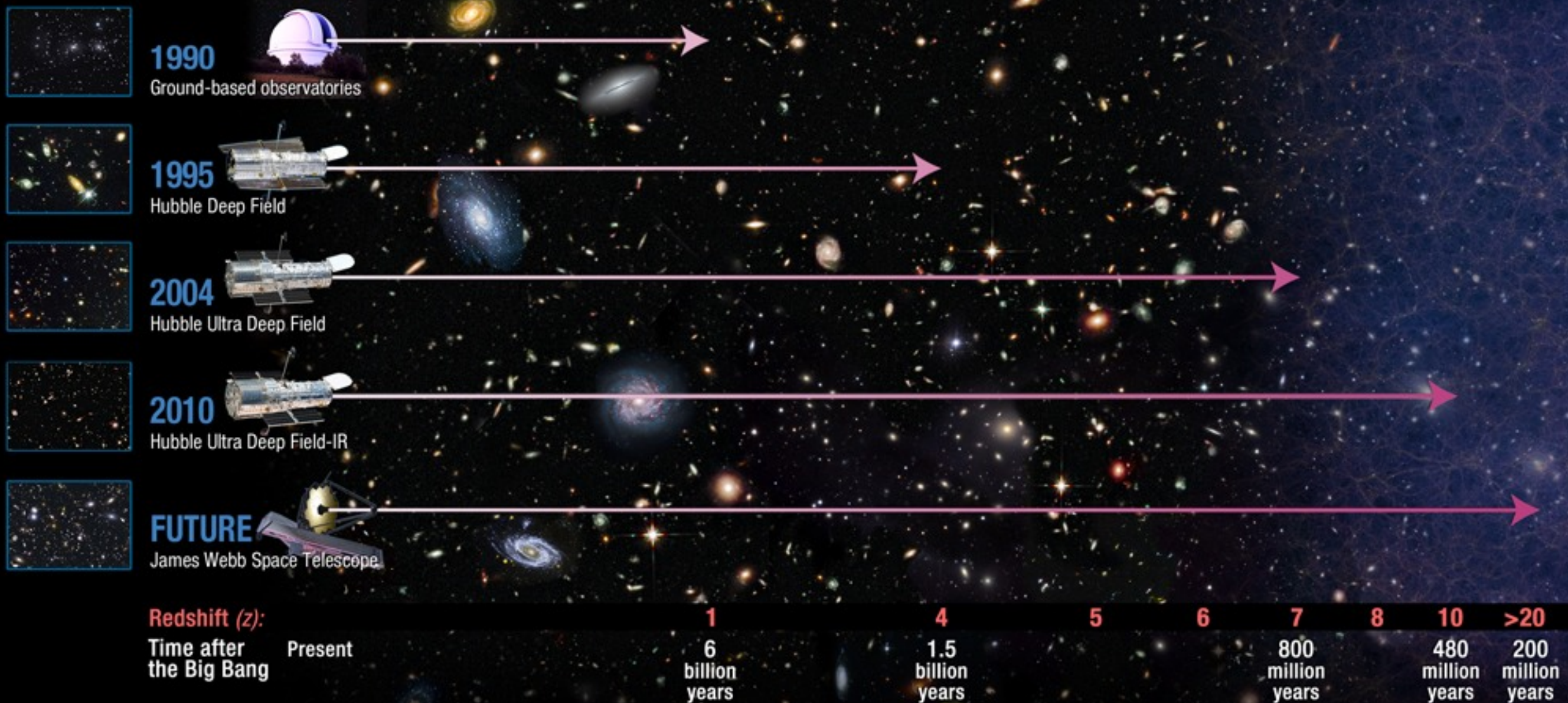
(a) The 2dF galaxy survey



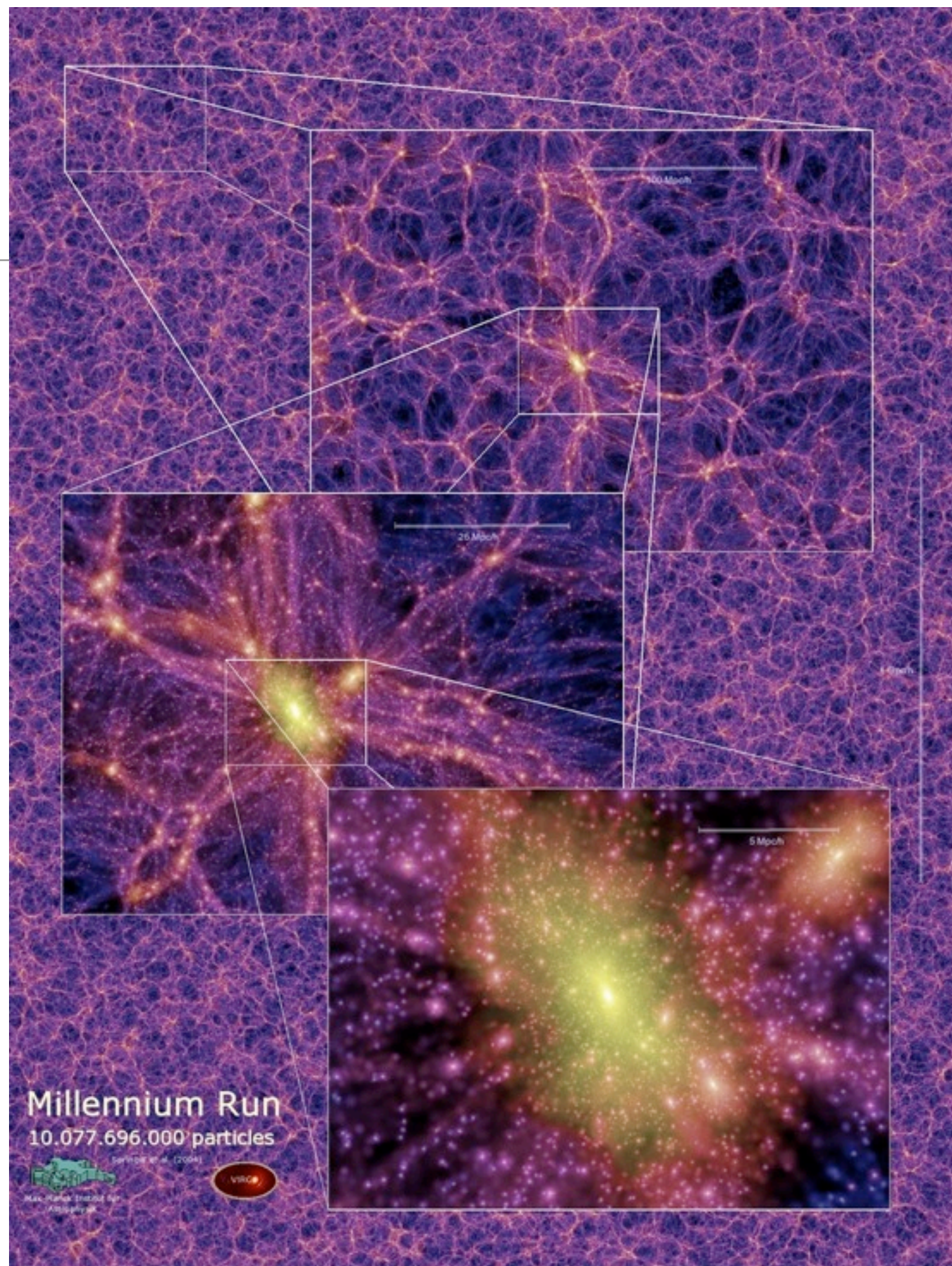
(b) Fields of view in the 2dF survey

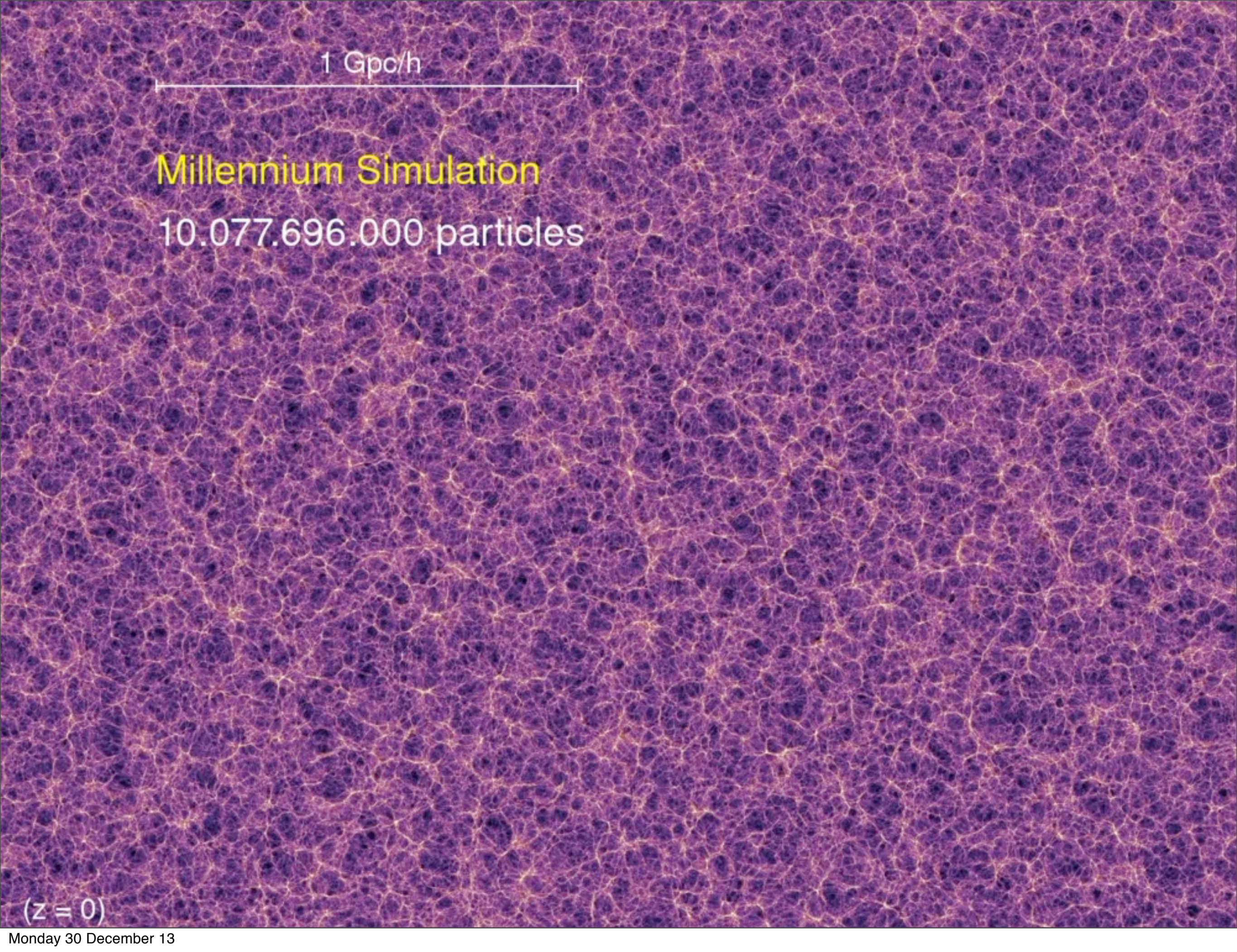
Quanto vediamo dell'universo?

Hubble Probes the Early Universe



Strutture a grande scala simulazione numeriche



A visualization of the Millennium Simulation, showing a vast, complex network of dark matter filaments and clusters. The structure is highly interconnected, with a dense web of filaments forming a cosmic web. The color scheme is a gradient of purples and blues, with brighter yellow and orange highlights indicating regions of higher density or specific physical properties. A horizontal scale bar is located at the top left, and text labels are overlaid on the image.

1 Gpc/h

Millennium Simulation

10,077,696,000 particles

($z = 0$)



Simulazioni con super-computer (CSCS)

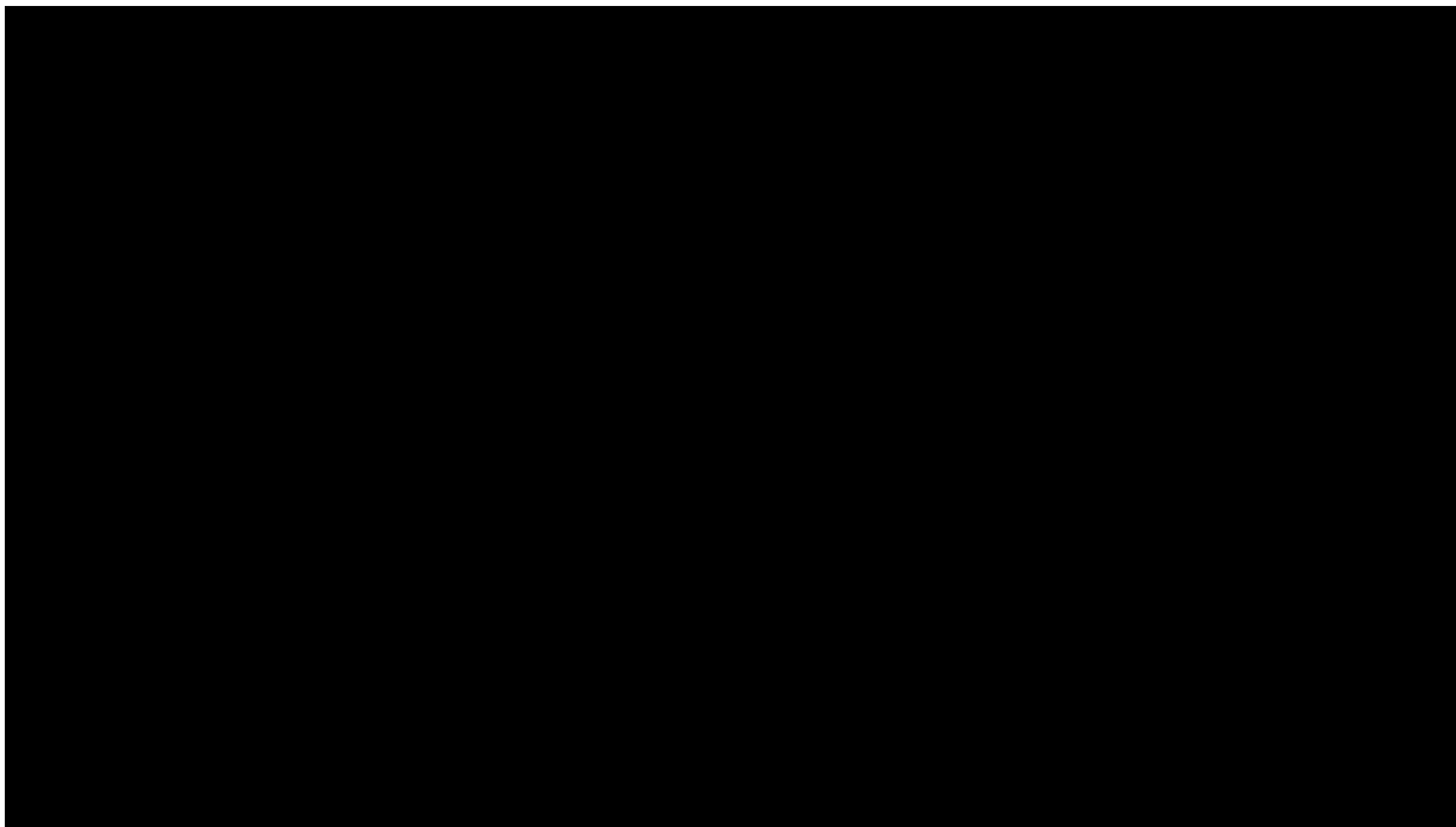


Javiera Guedes, Simone Callegari, Piero Madau, Lucio Mayer, Forming Realistic Late-Type Spirals in A CDM Universe

Simulazioni con super-computer (CSCS)

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

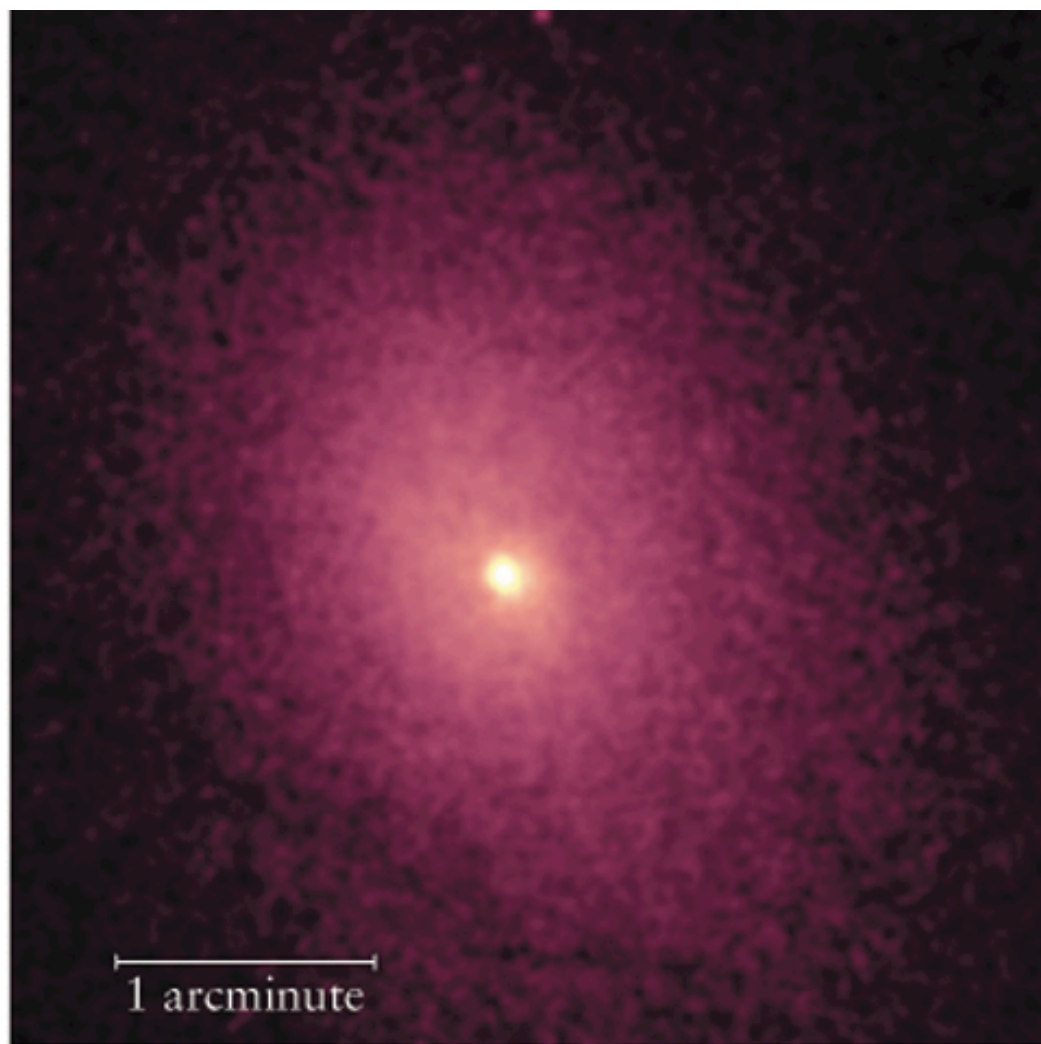
Simulazioni con super-computer (CSCS)



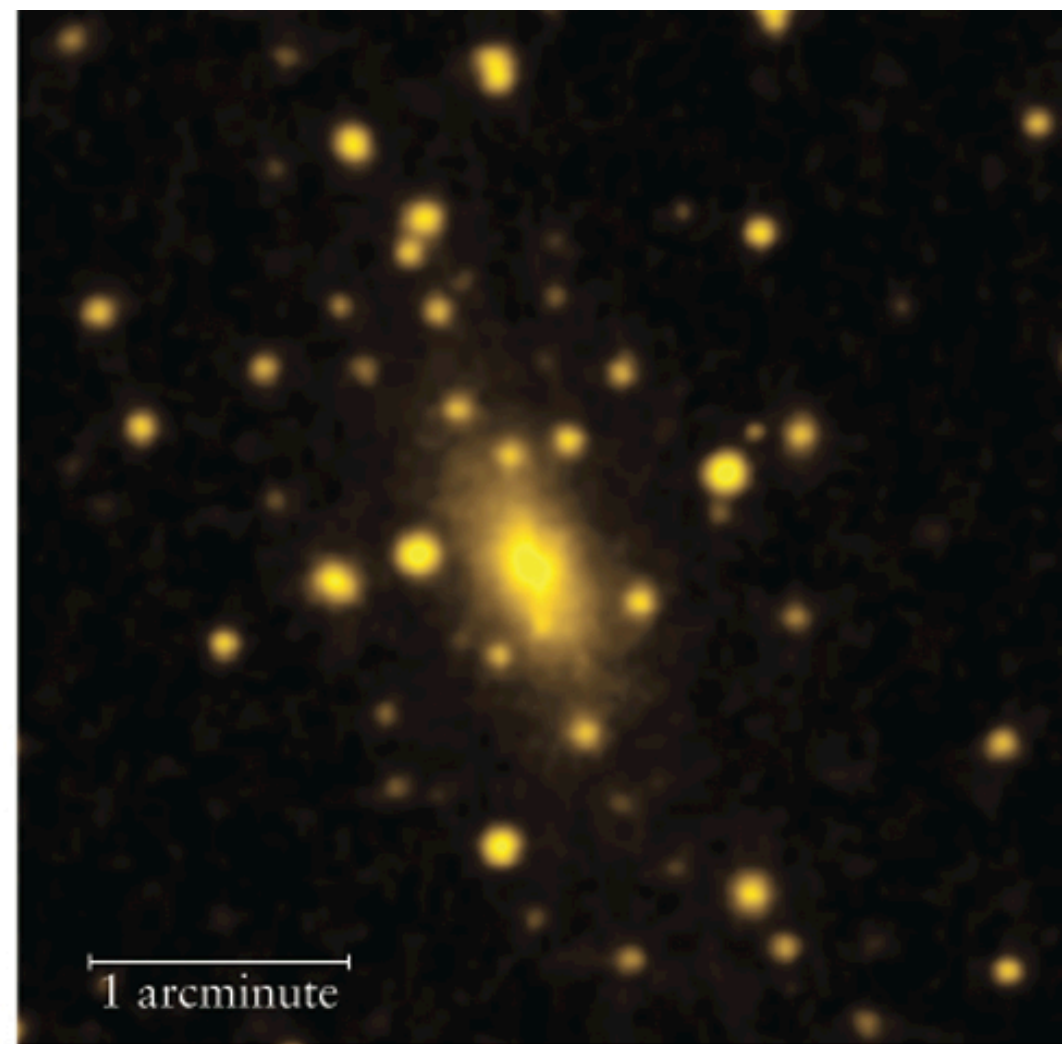
Javiera Guedes, Simone Callegari, Piero Madau, Lucio Mayer, Forming Realistic Late-Type Spirals in A CDM Universe

Collisione di galassie

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



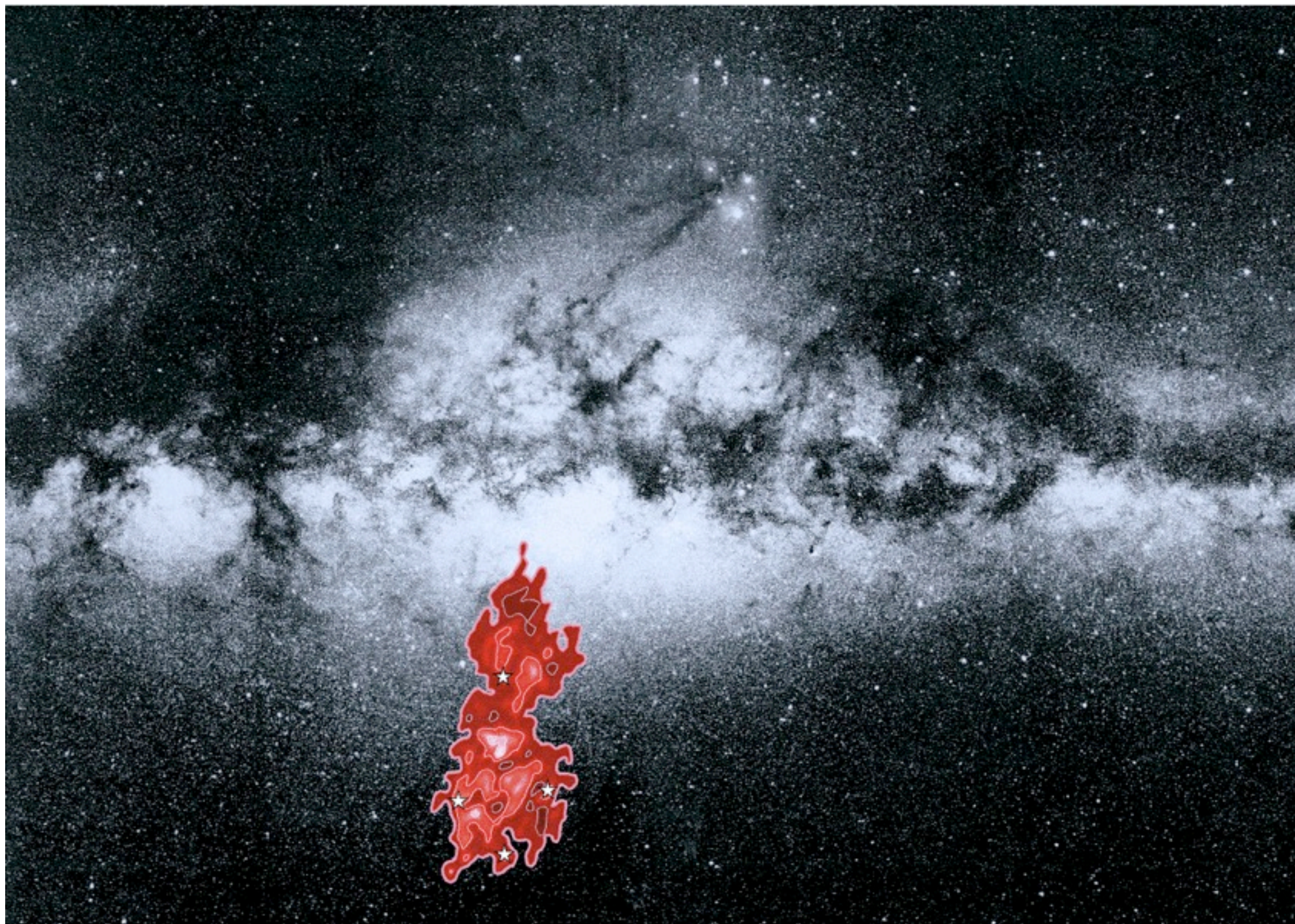
(a) An X-ray image of Abell 2029 shows emission from hot gas.



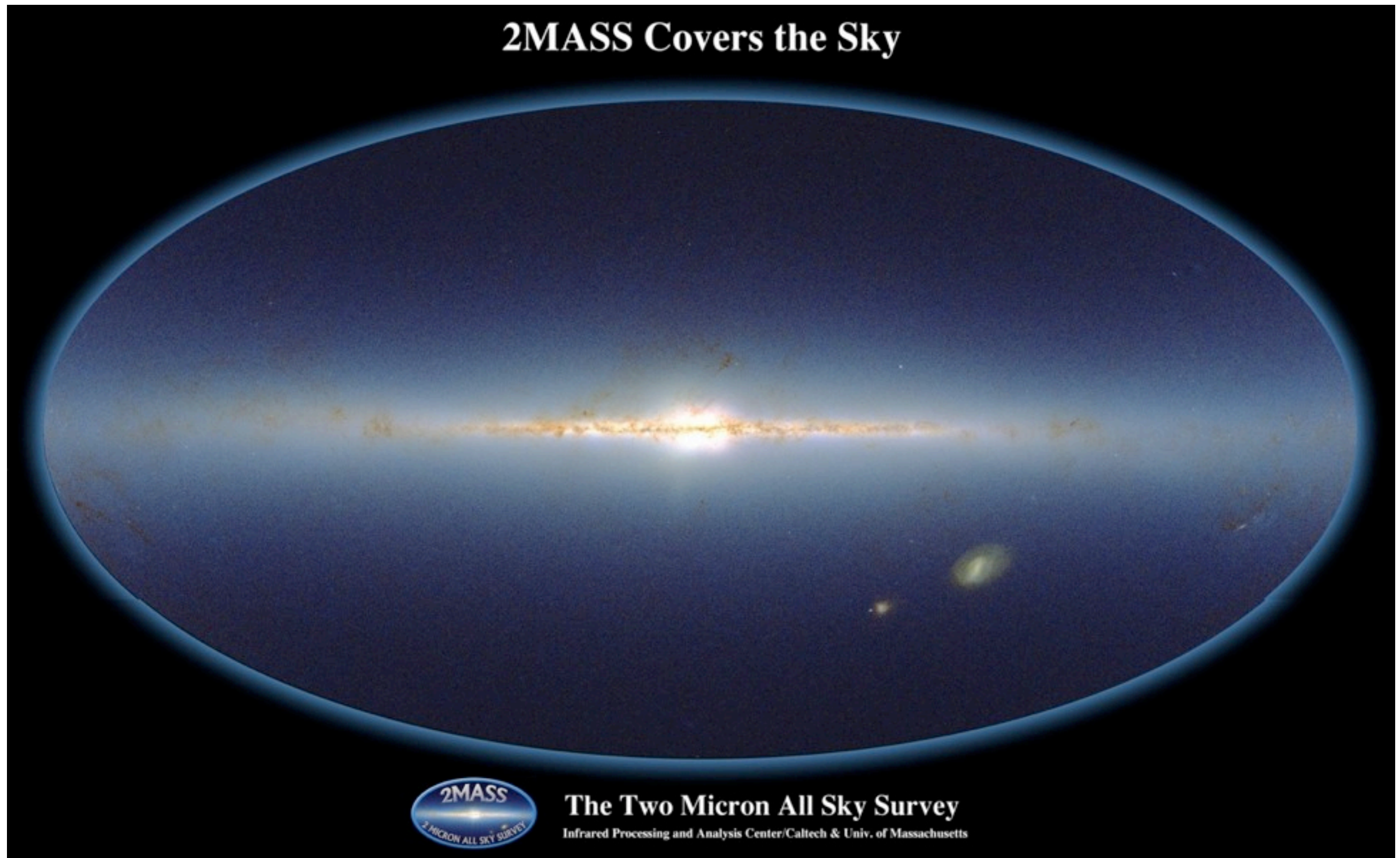
(b) A visible-light image of Abell 2029 shows the cluster's galaxies.

Collisione della galassia Sagittarius con la nostra

Collisione della galassia Sagittarius con la nostra



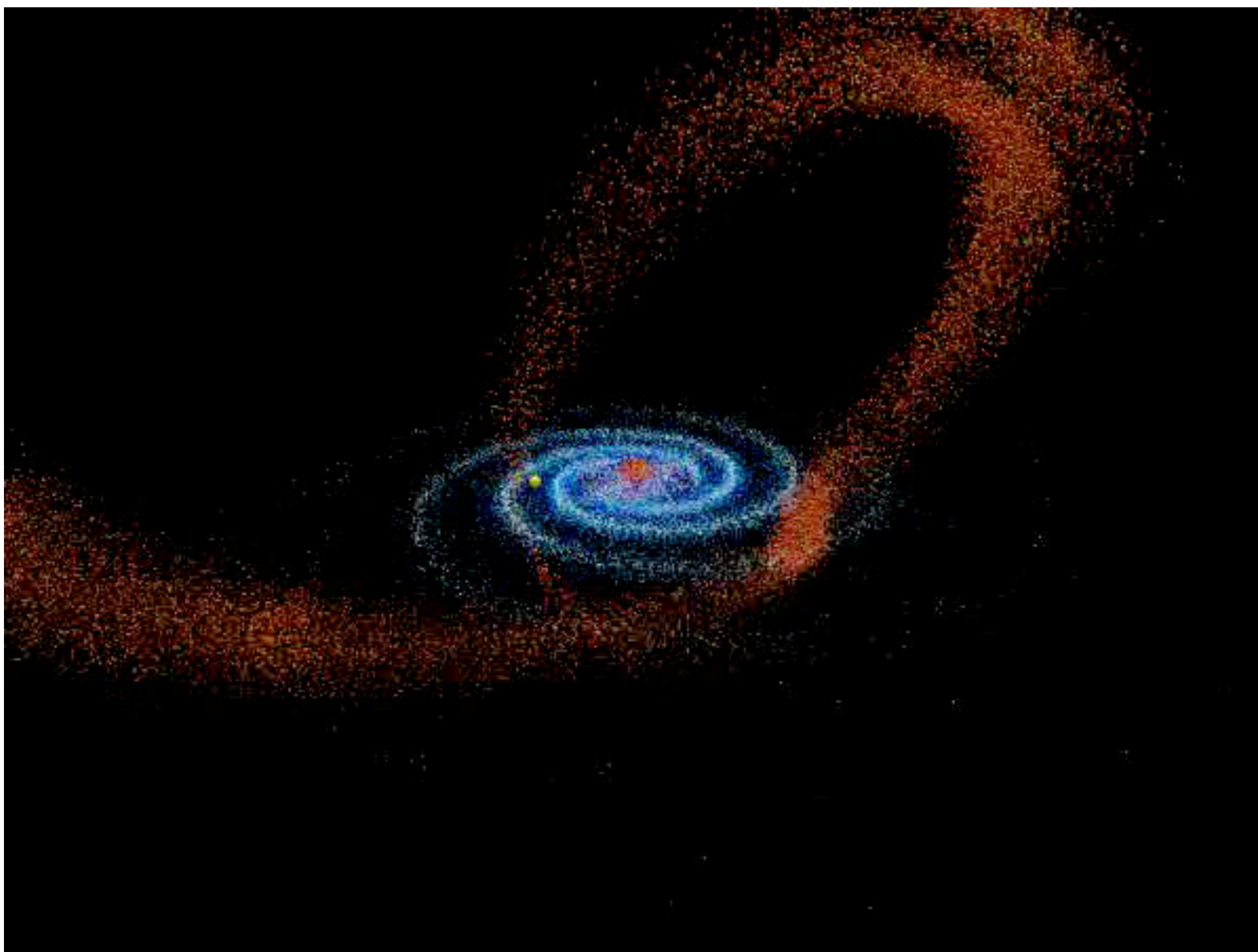
Collisione della galassia Sagittarius con la nostra



Collisione della galassia Sagittarius con la nostra



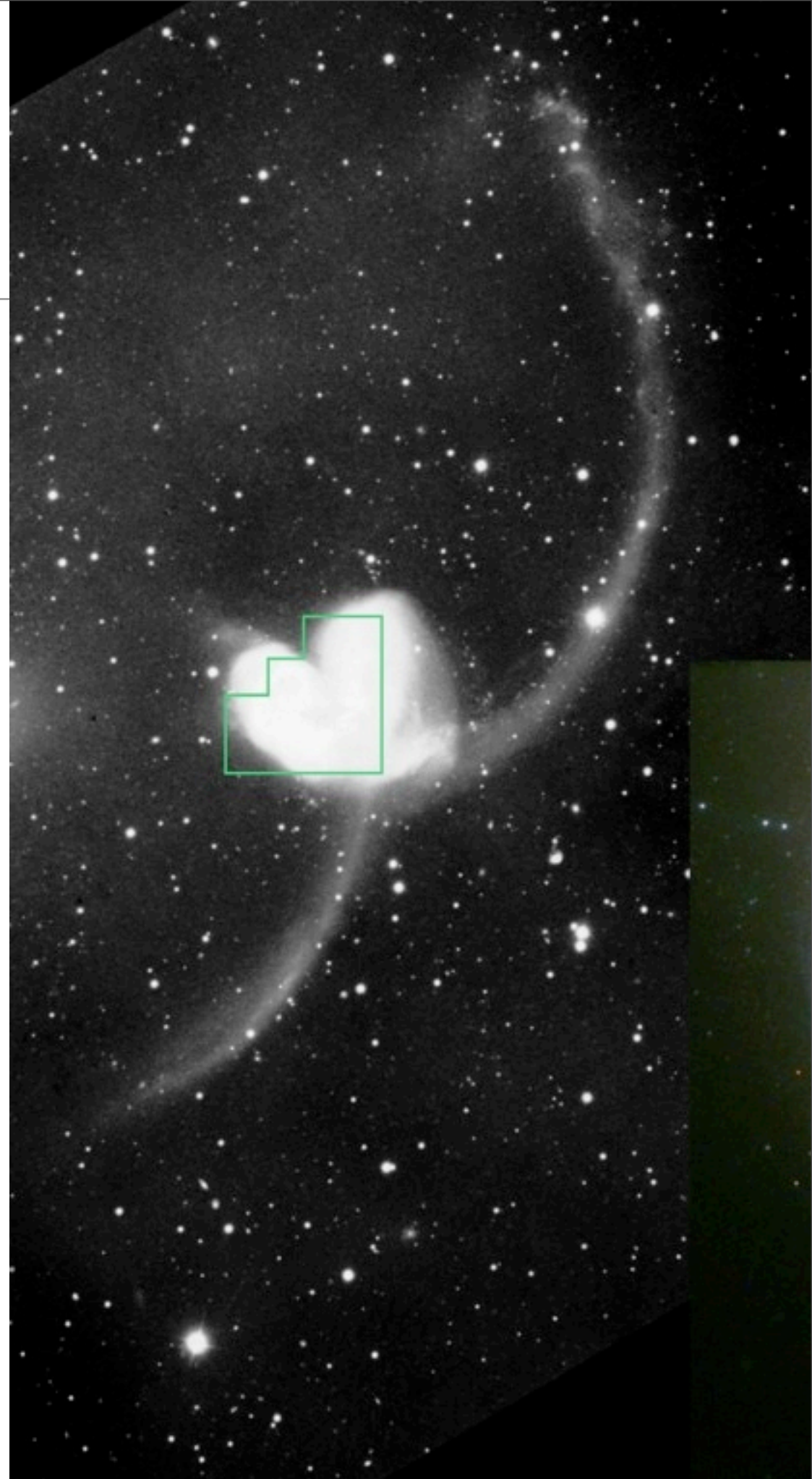
Collisione della galassia Sagittarius con la nostra

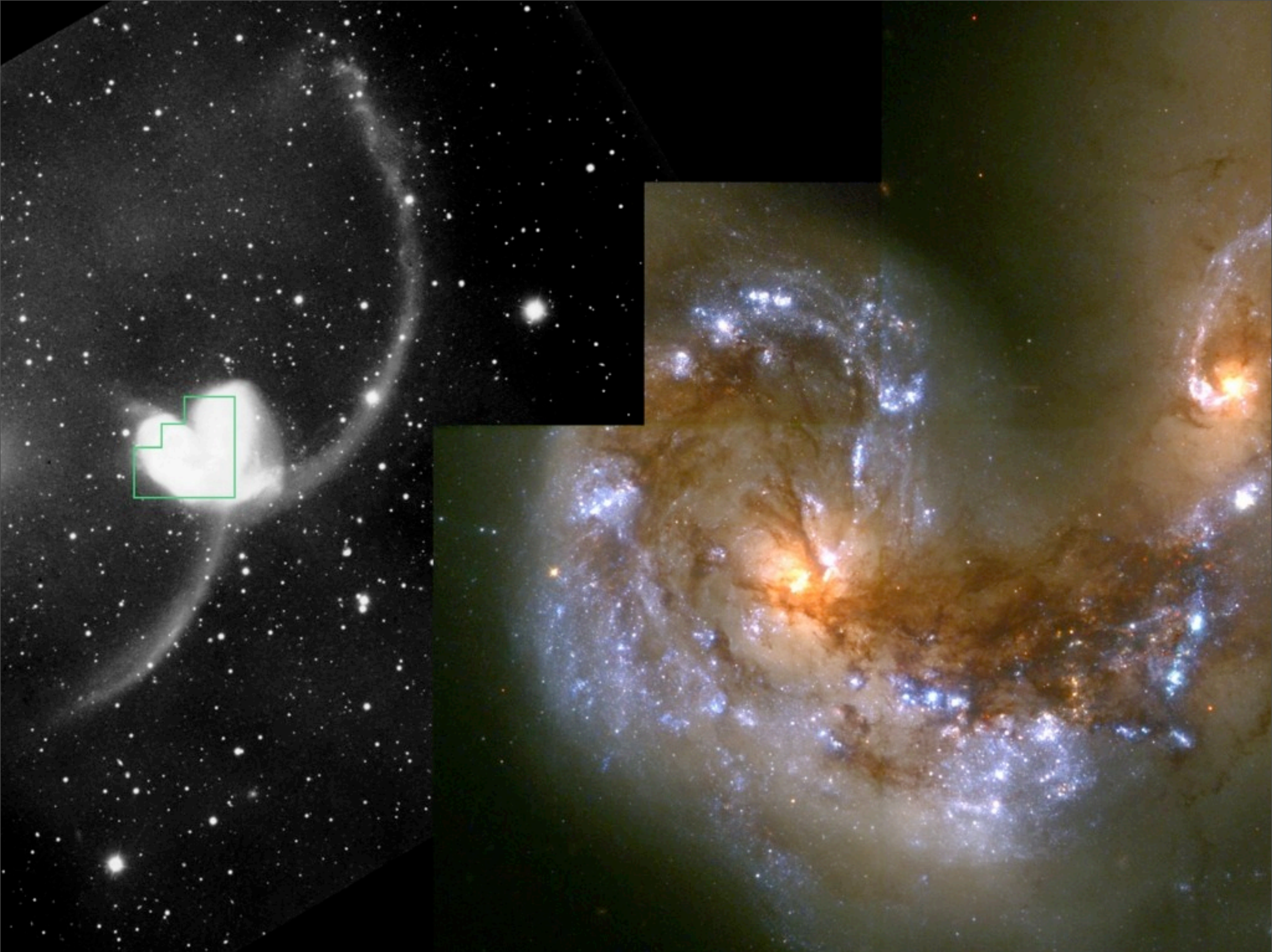


Collisione di galassie

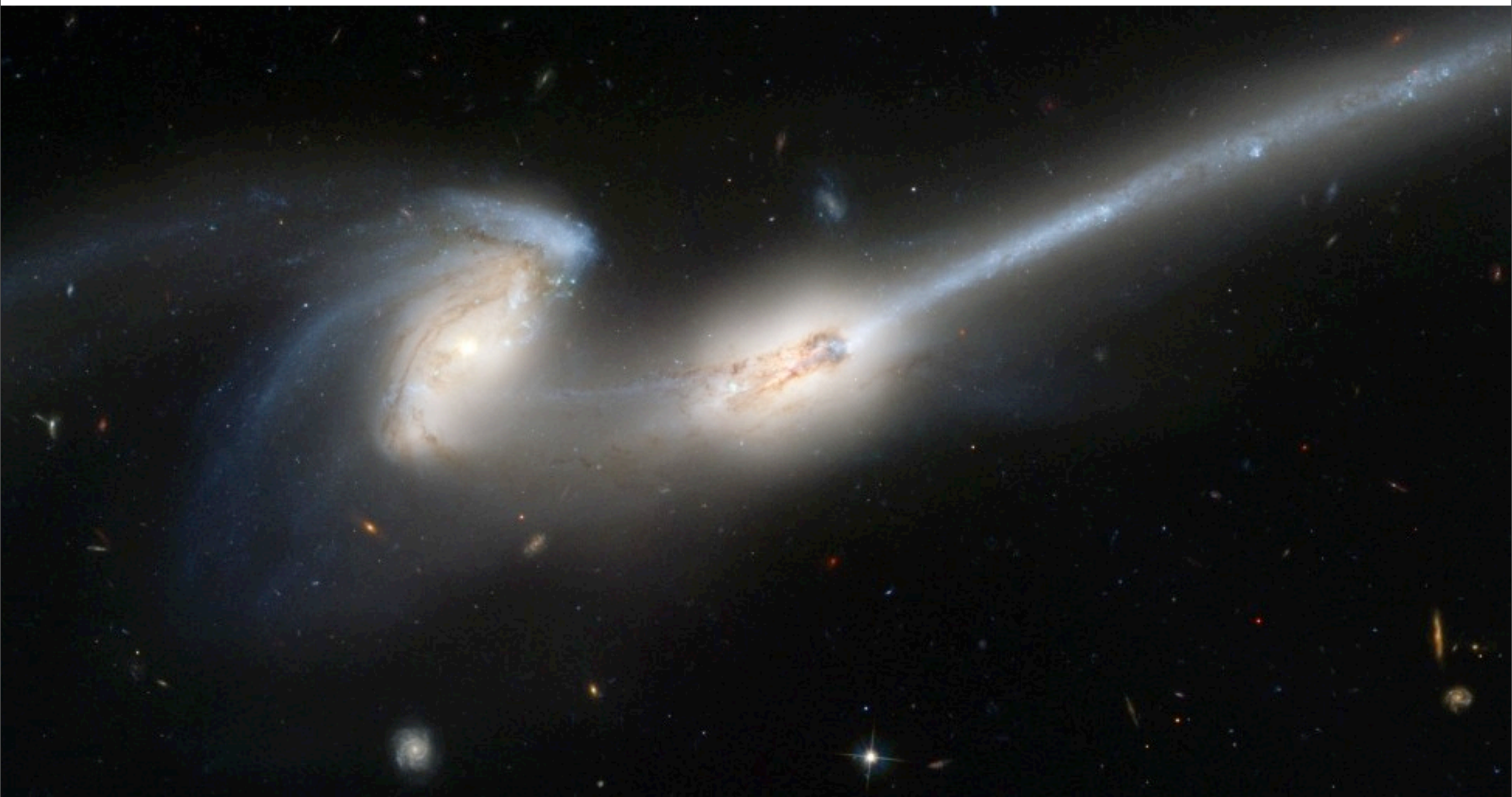
Collisione di galassie

- Oggetti di strana forma: irregolare, lunghe code
- Intensa formazione stellare



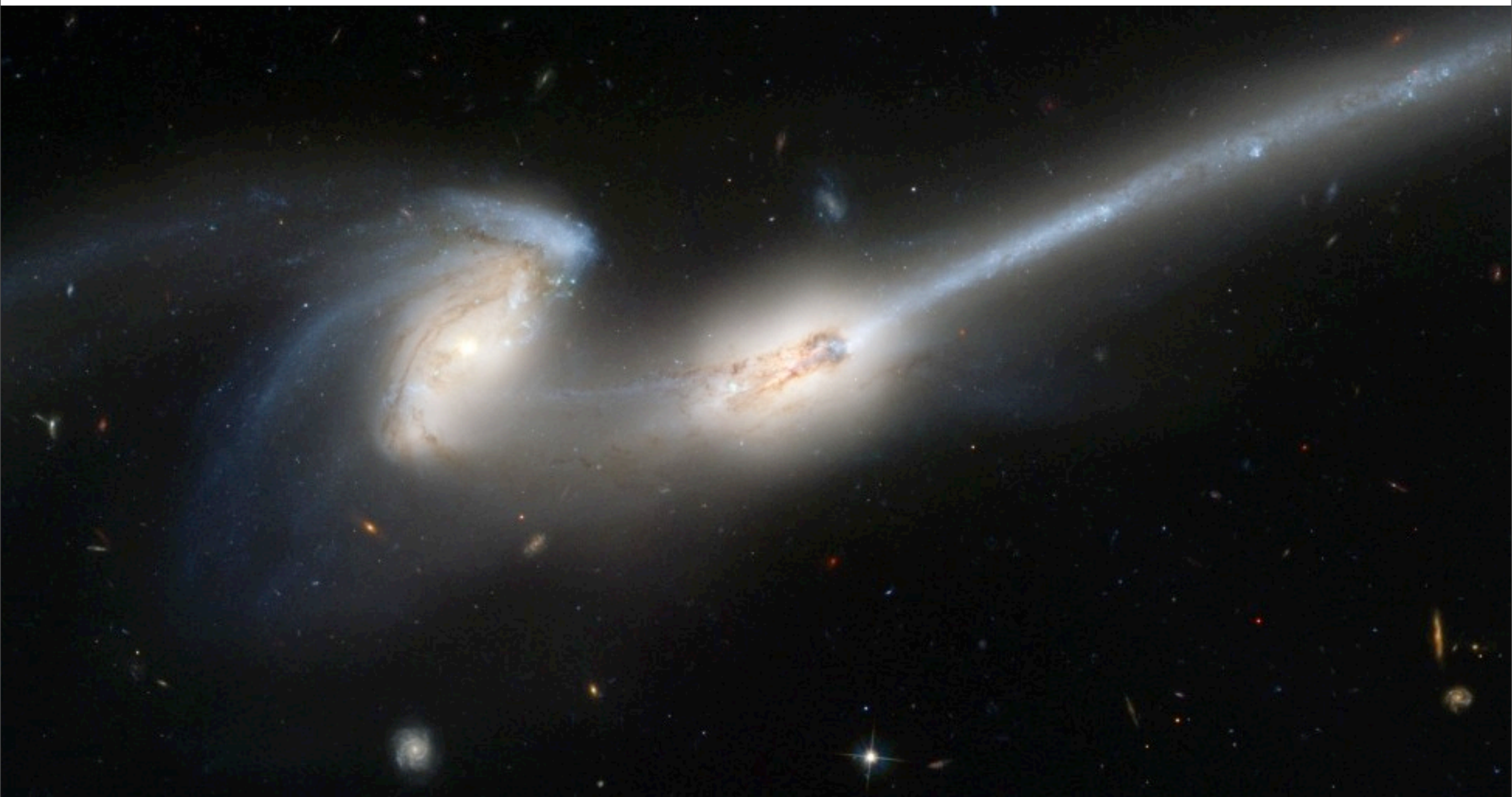


Collisione di galassie



Collisione di galassie

Primi calcoli al computer hanno fornito la soluzione.



Galassie in interazione

Galaxies NGC 2207 and IC 2163



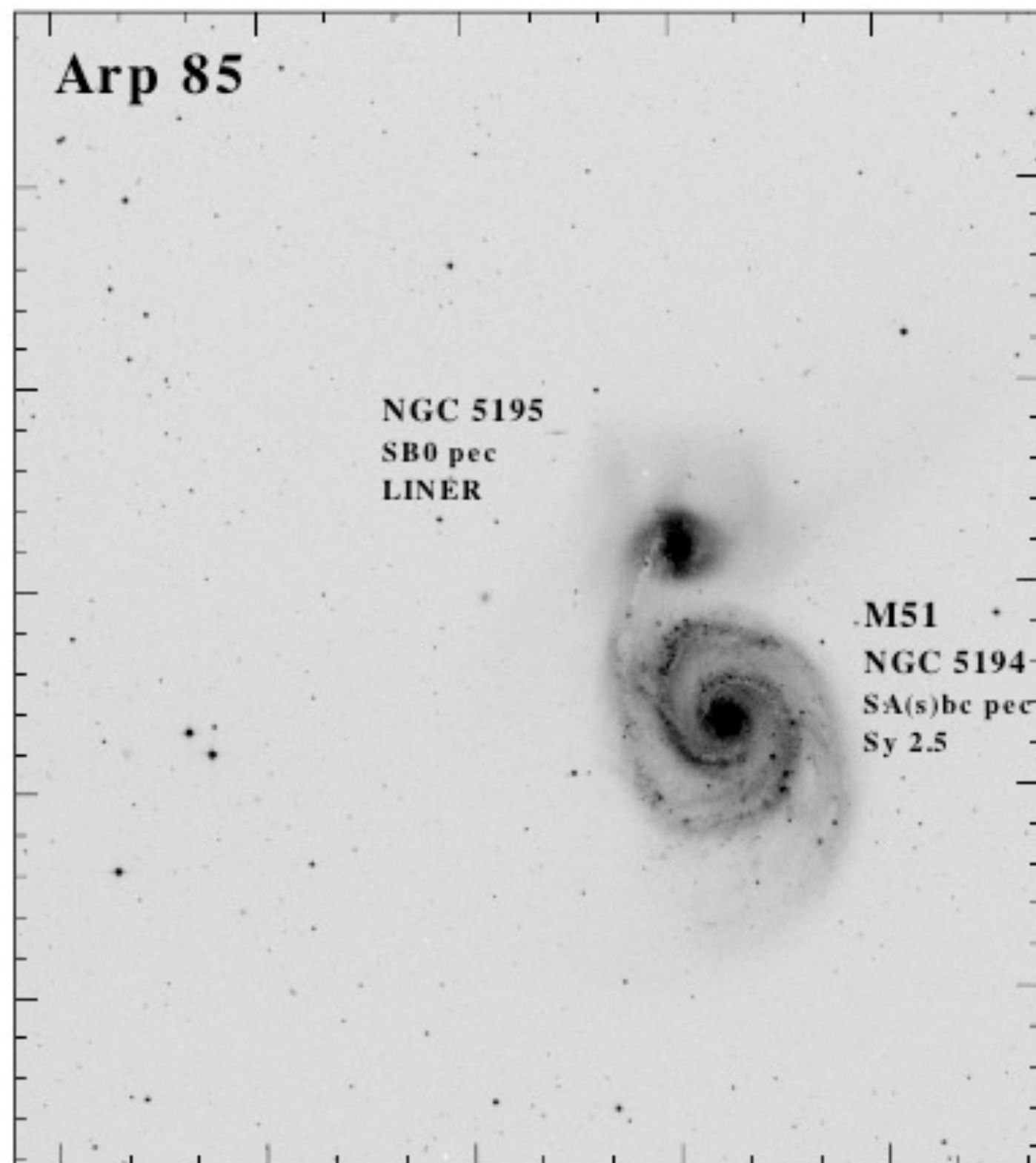
Hubble
Heritage

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

Galassie in interazione



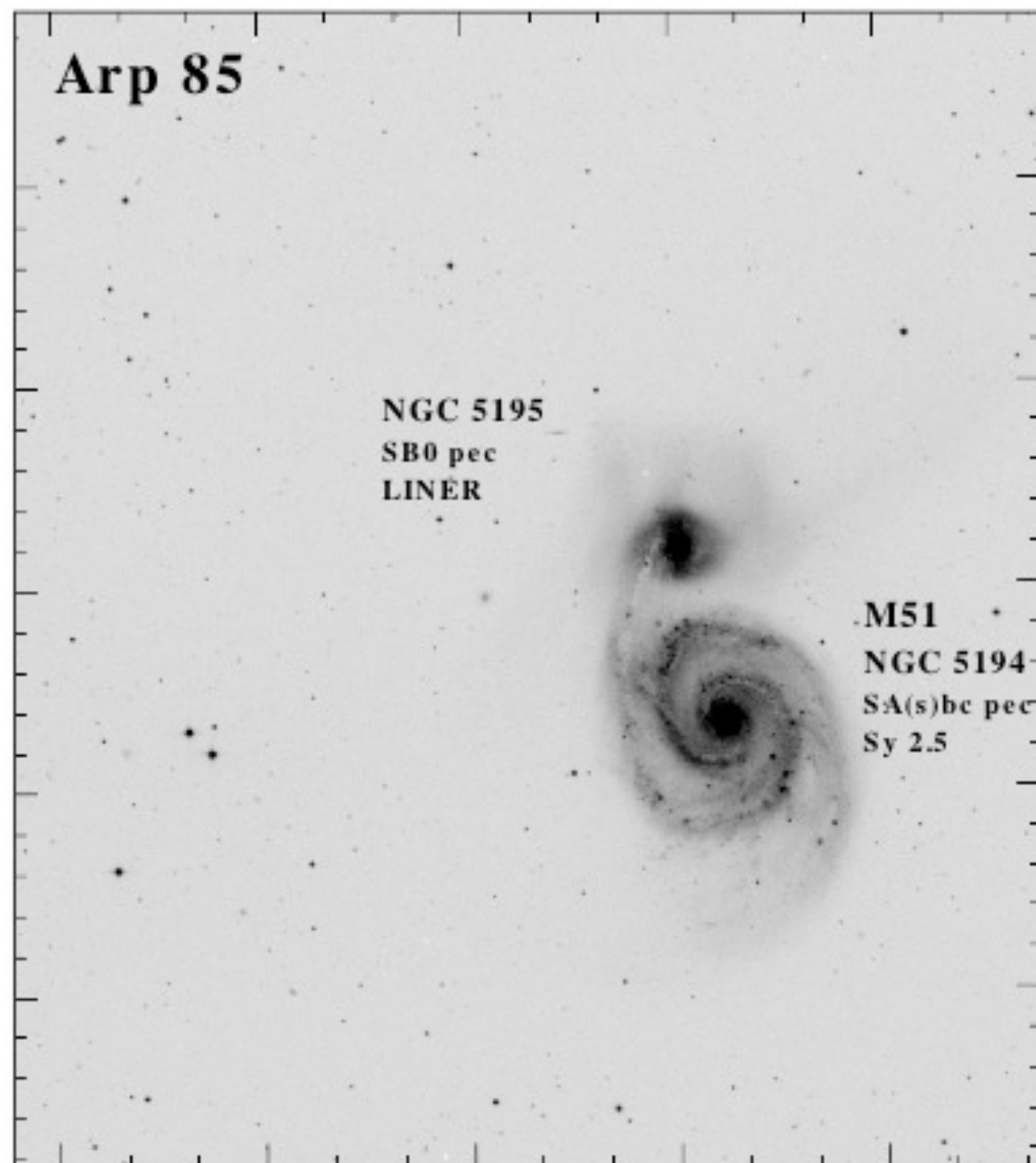
Tracce di gas... testimoni di interazioni passate



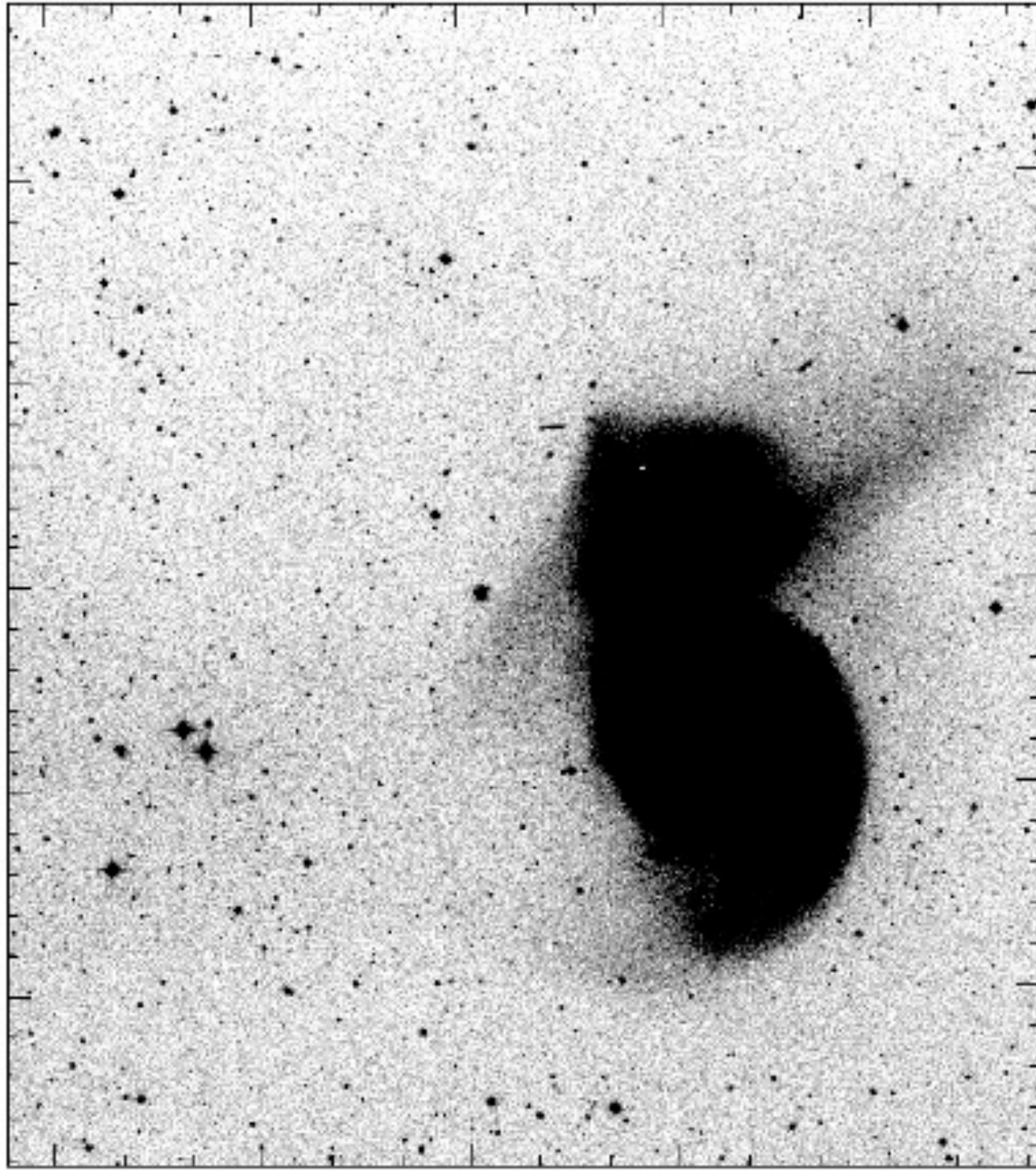
Tracce di gas... testimoni di interazioni passate



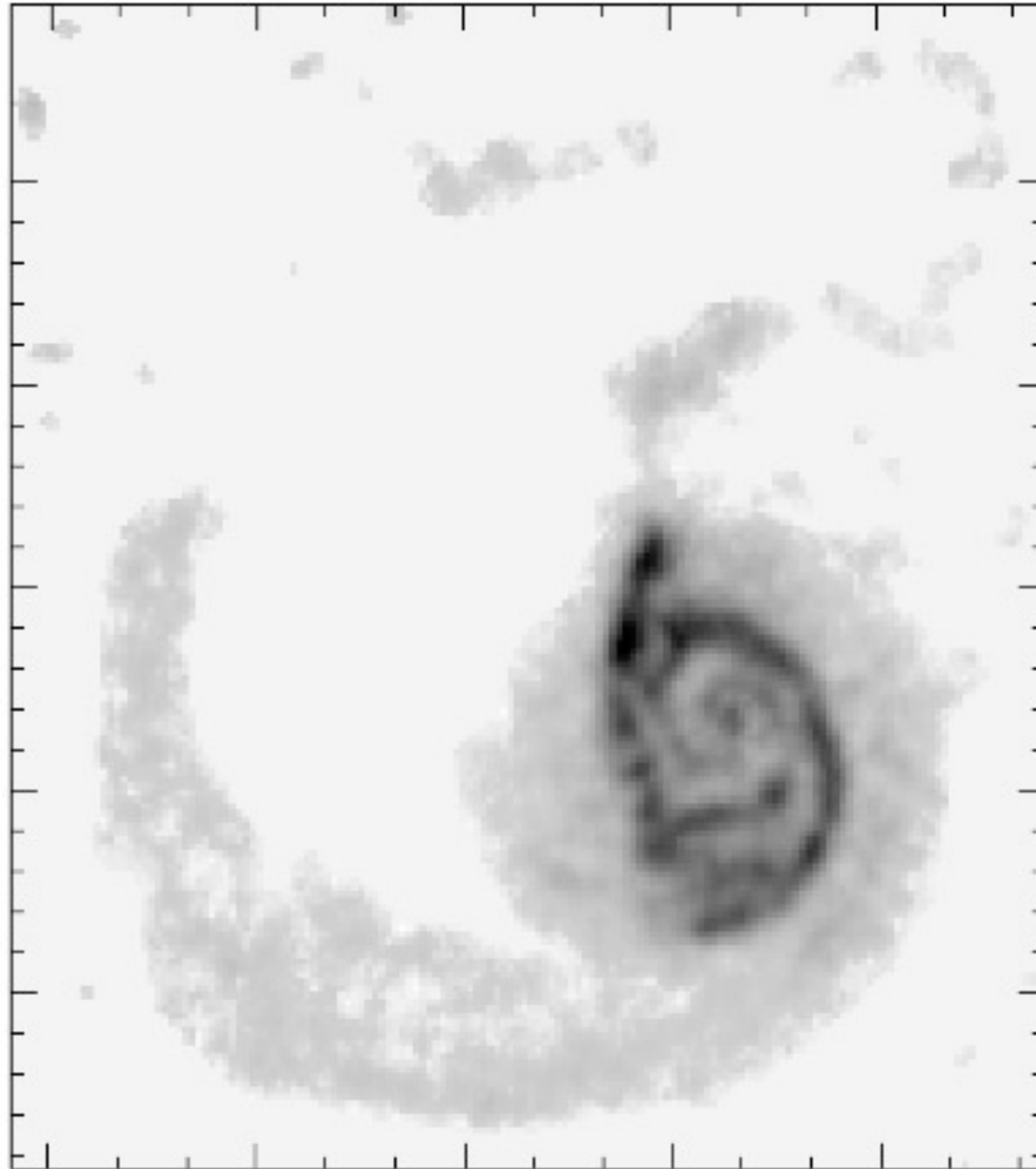
Tracce di gas... testimoni di interazioni passate



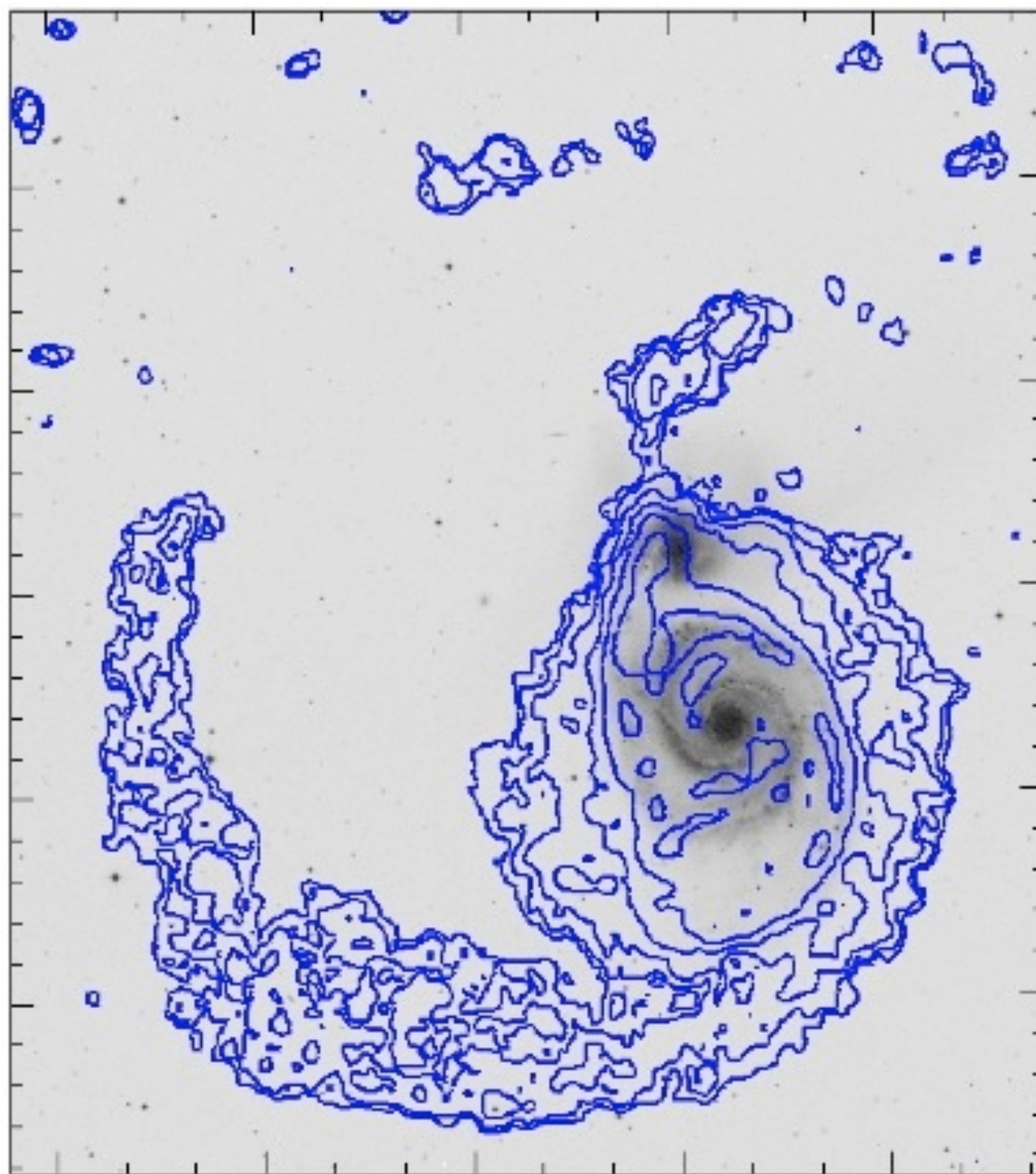
Tracce di gas... testimoni di interazioni passate



Tracce di gas... testimoni di interazioni passate



Tracce di gas... testimoni di interazioni passate



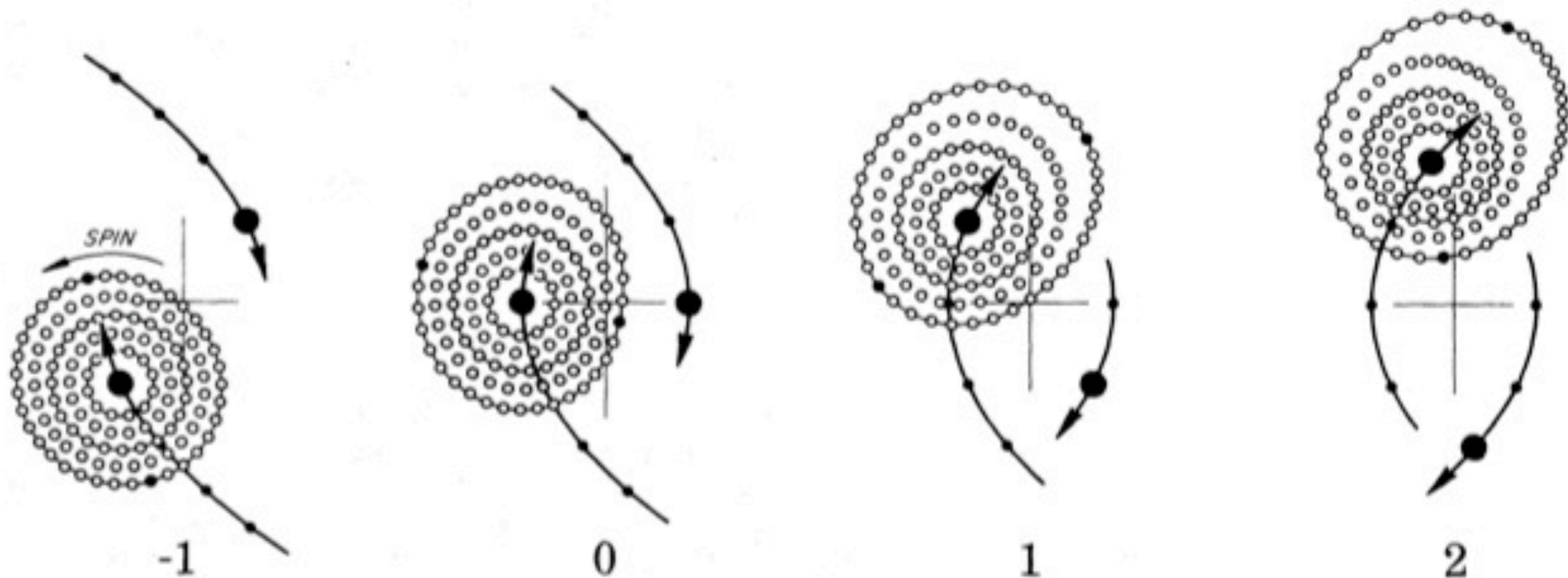
Simulazioni numeriche

Simulazioni numeriche

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

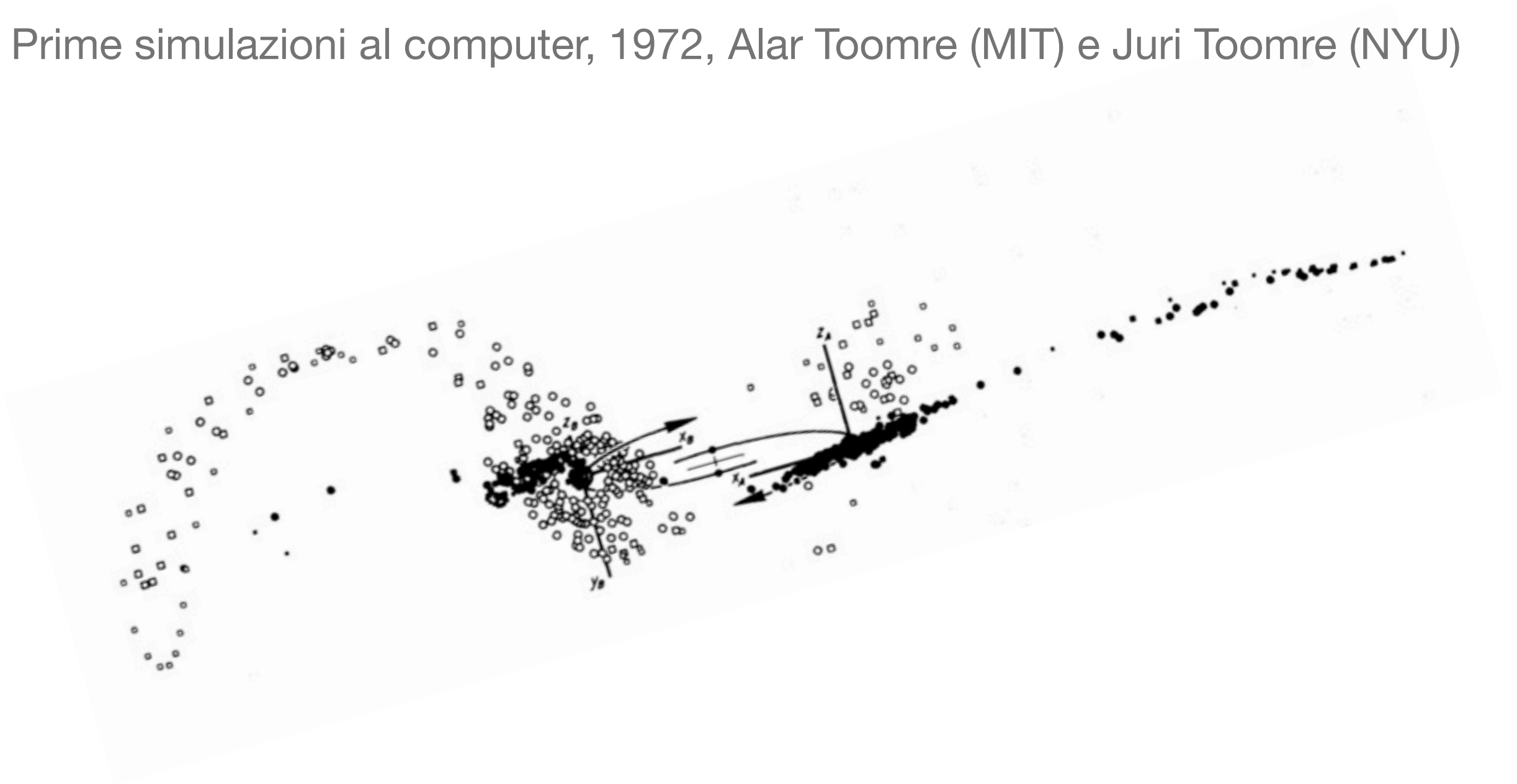
626

ALAR TOOMRE AND JURI TOOMRE



Simulazioni numeriche

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



Simulazioni numeriche

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

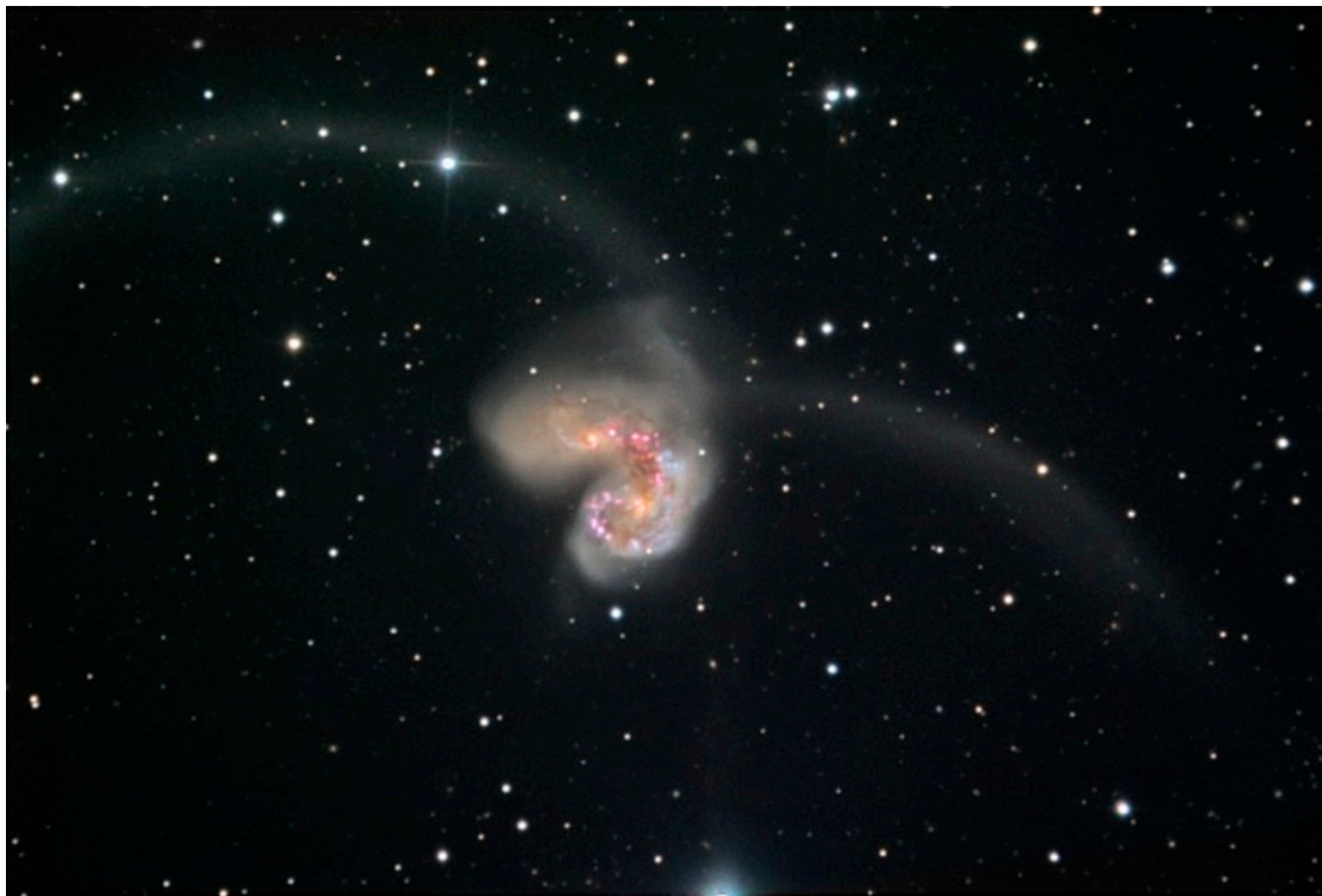


Simulazioni numeriche



Simulazioni numeriche

Le galassie delle “antenne”, NGC 4038-4039



Simulazioni numeriche

Le galassie delle “antenne”, NGC 4038-4039

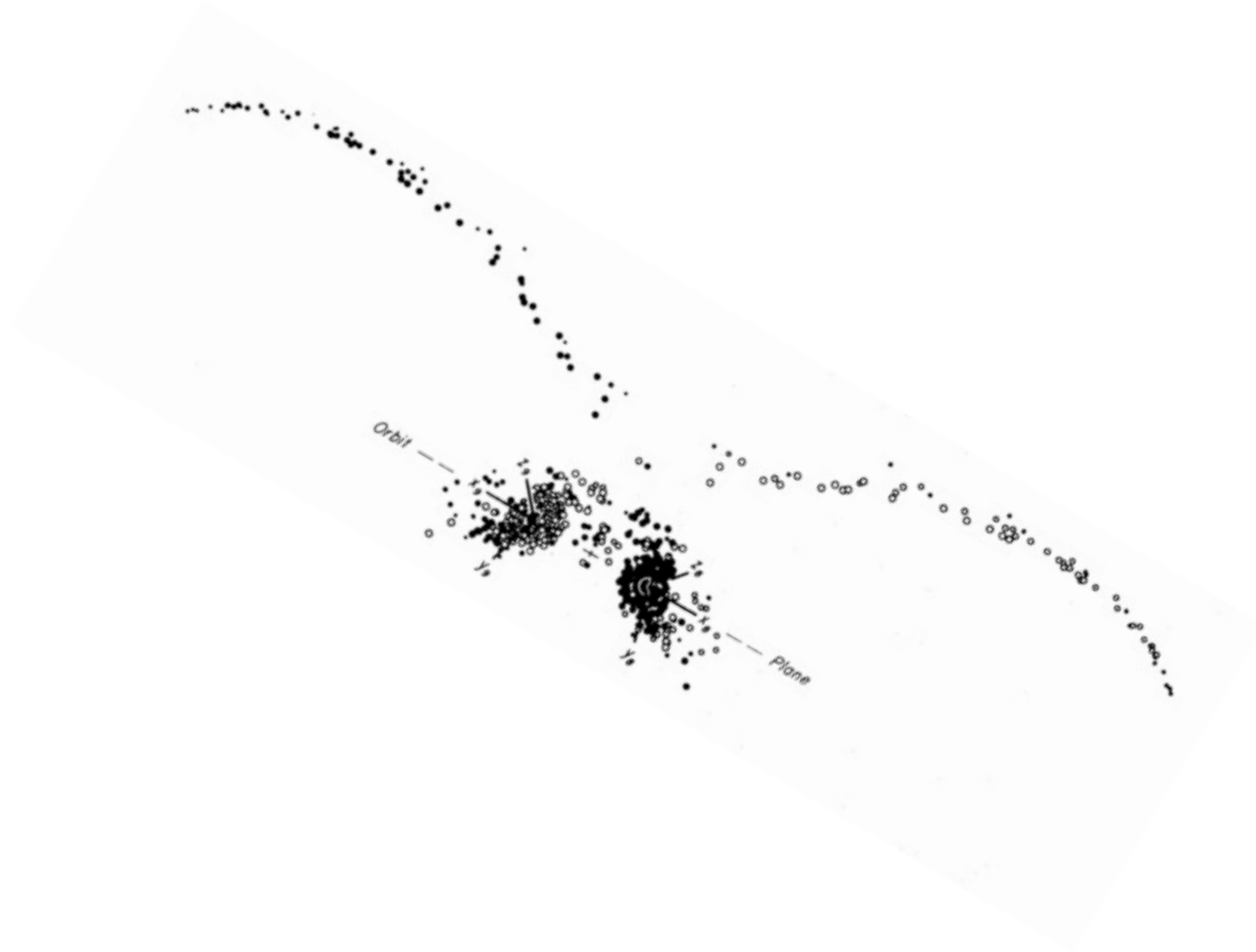


Simulazioni numeriche

Le galassie delle “antenne”, NGC 4038-4039

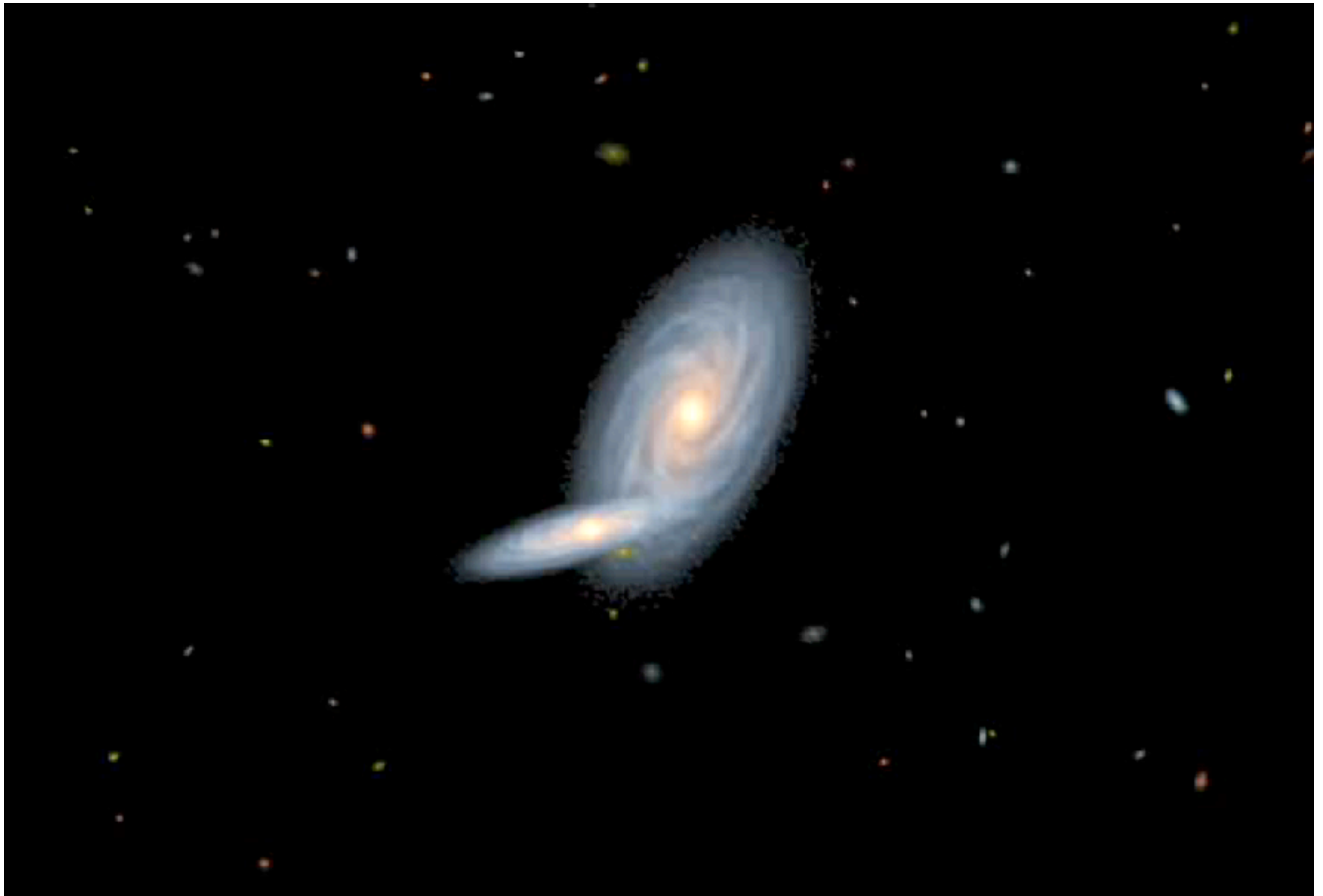
Simulazioni numeriche

Le galassie delle “antenne”, NGC 4038-4039



Simulazioni numeriche

Simulazioni numeriche



Paragone: simulazioni - vere galassie in interazione

Collisione della Via Lattea con Andromeda

Collisione della Via Lattea con Andromeda



Collisione della Via Lattea con Andromeda



Future Sky

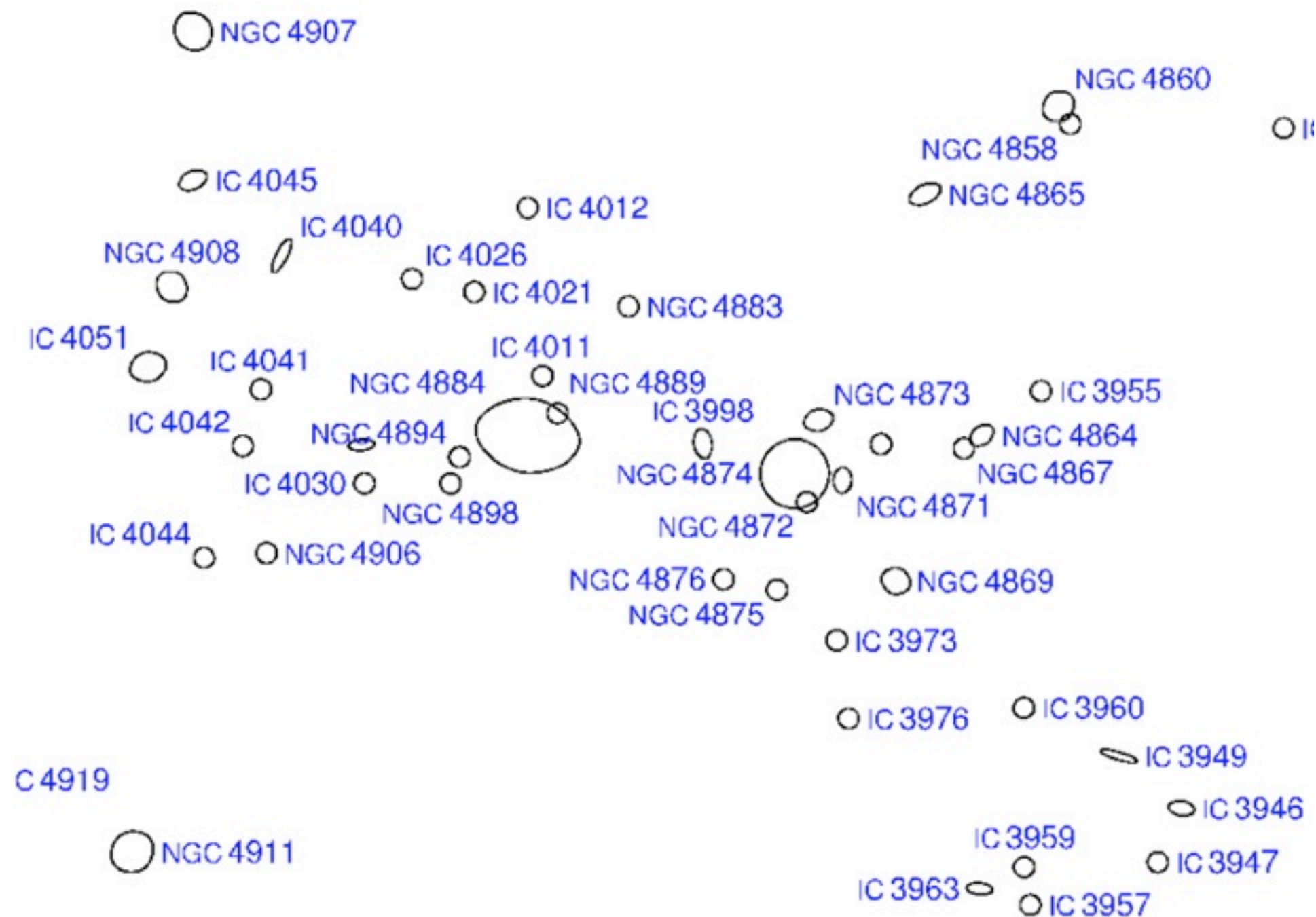
Materia oscura: un po' di storia

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

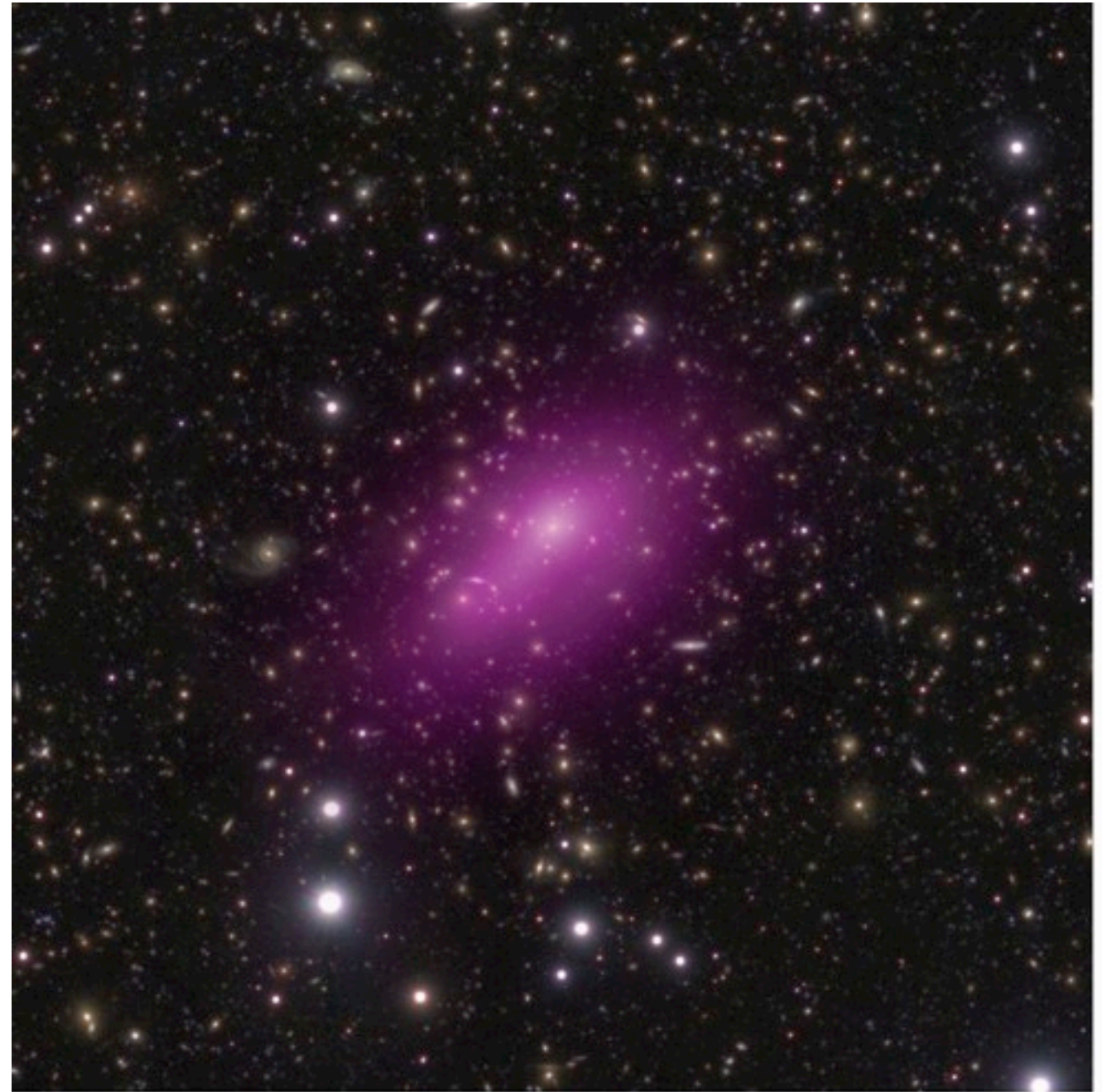


Materia oscura: un po' di storia

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

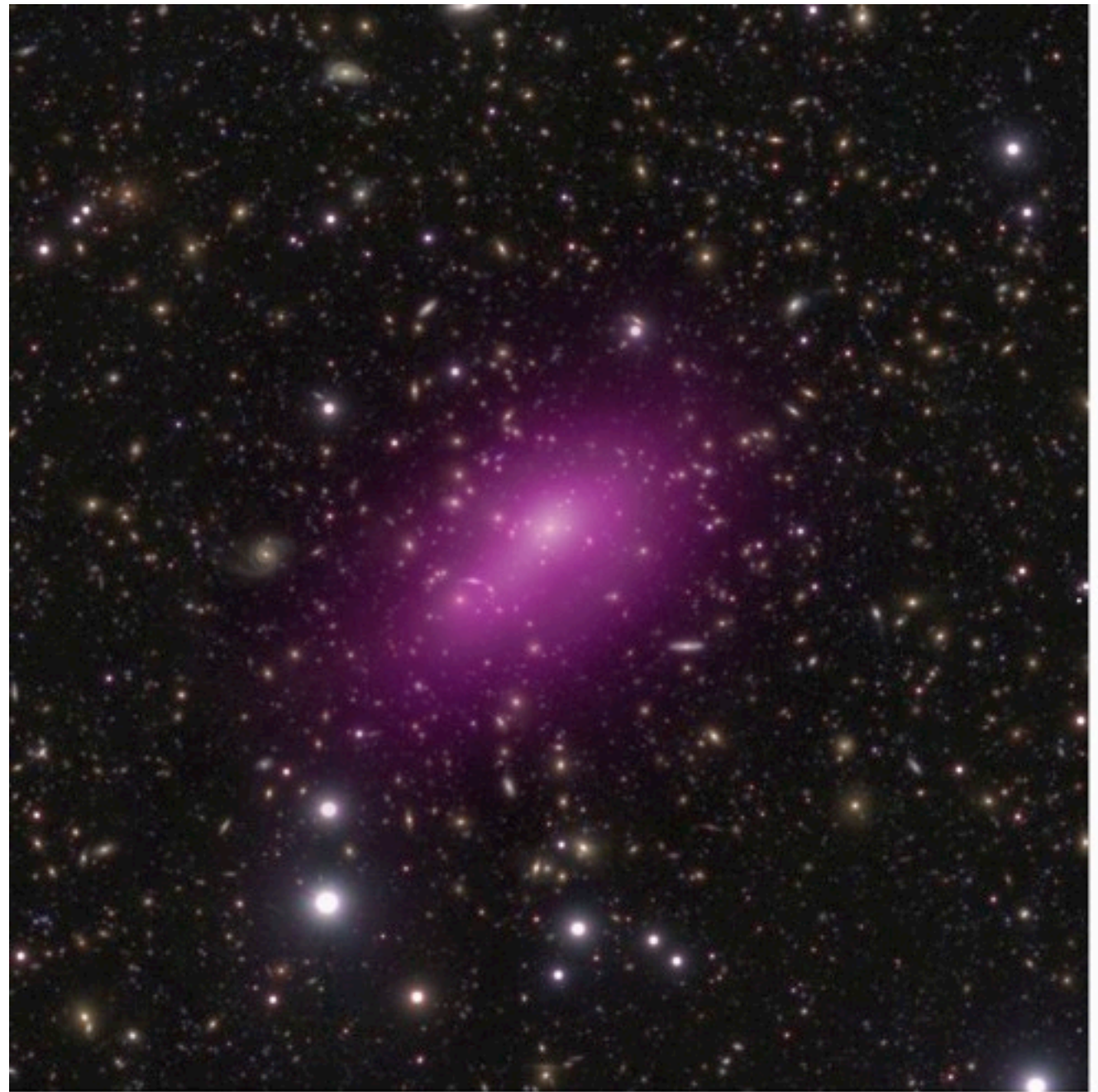


Materia oscura



Materia oscura

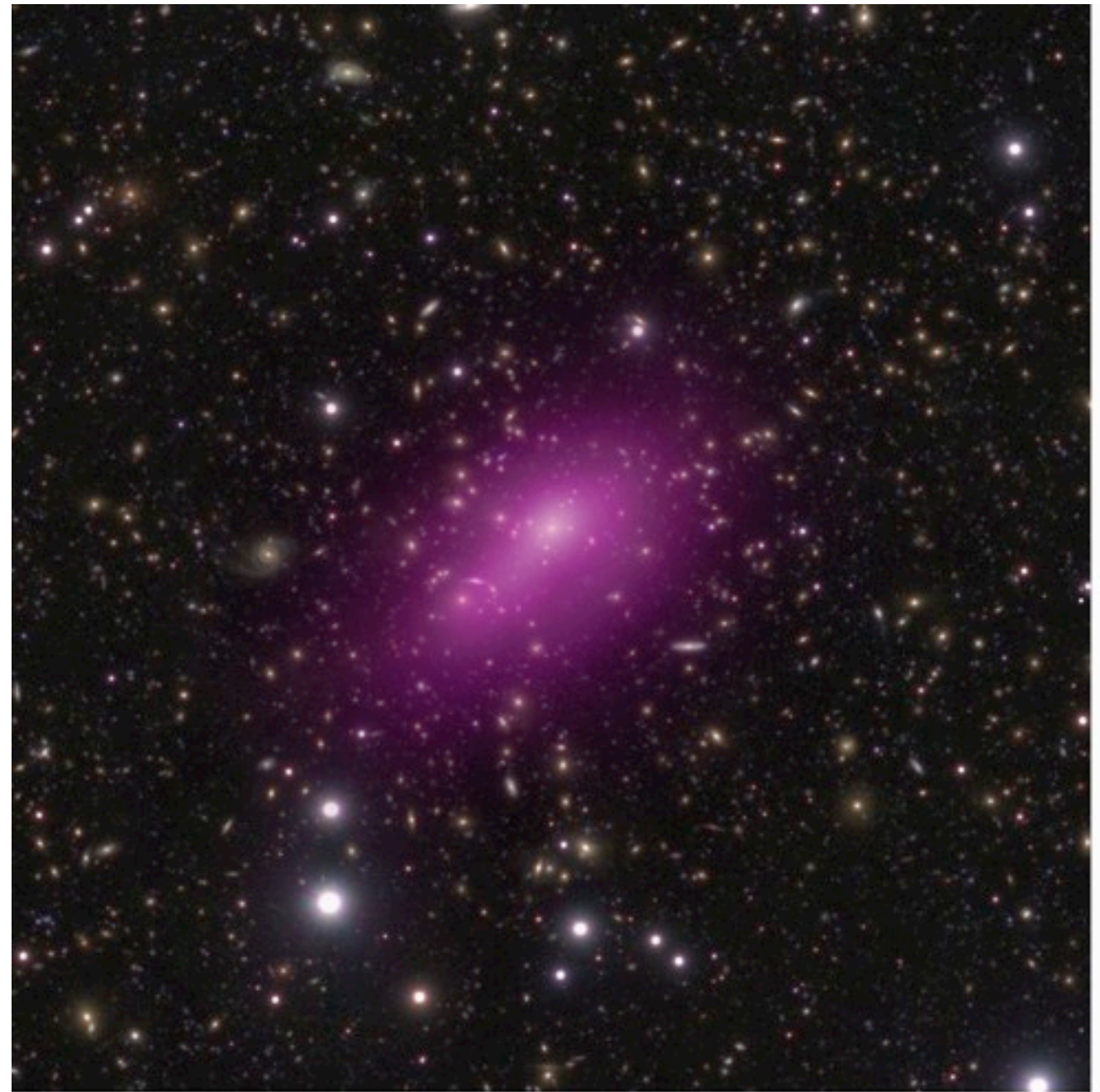
Parziale soluzione negli ammassi:



Materia oscura

Parziale soluzione negli ammassi:

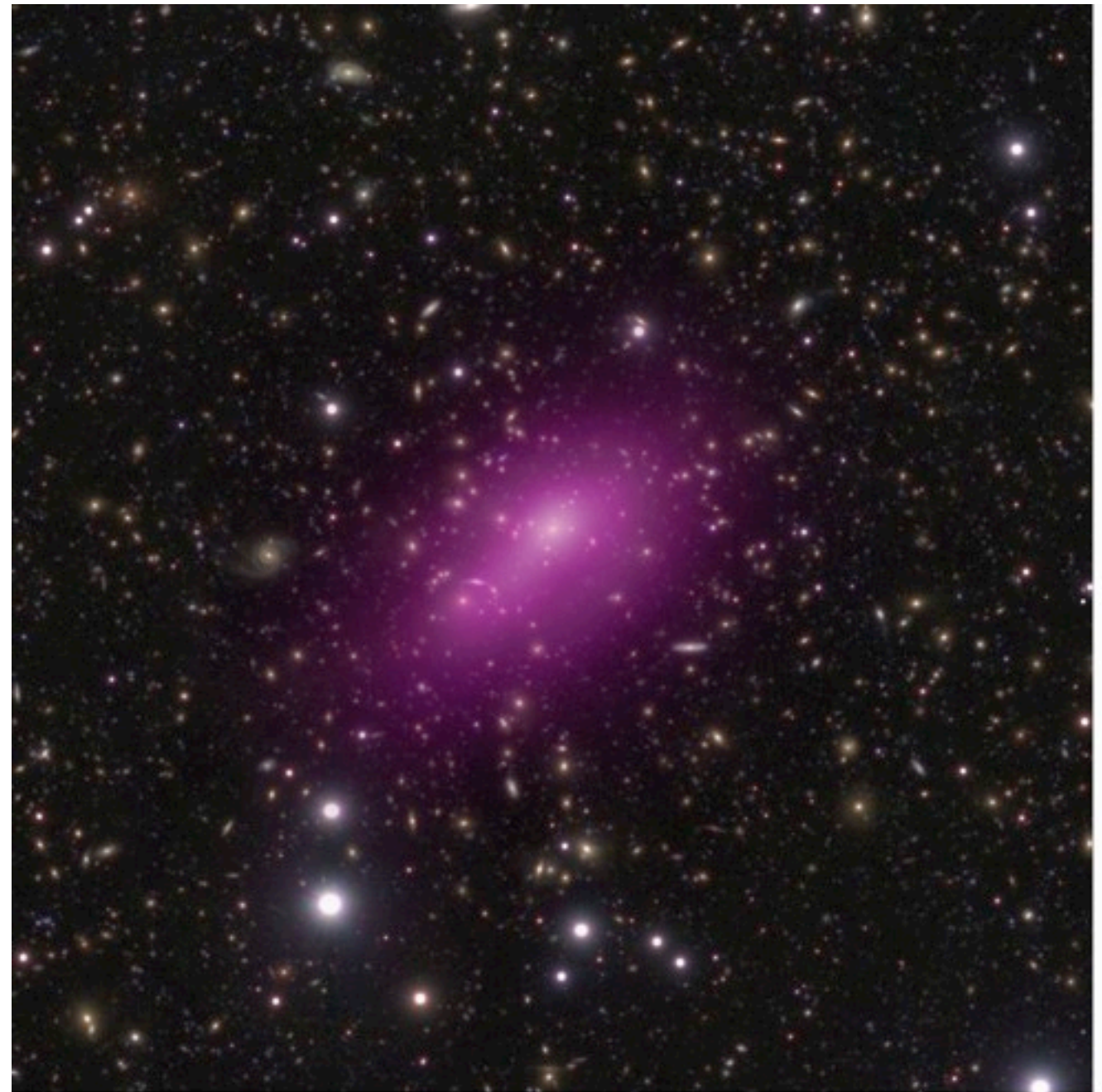
- Gas $10^7 - 10^8$ K (raggi X) : 10% della massa totale



Materia oscura

Parziale soluzione negli ammassi:

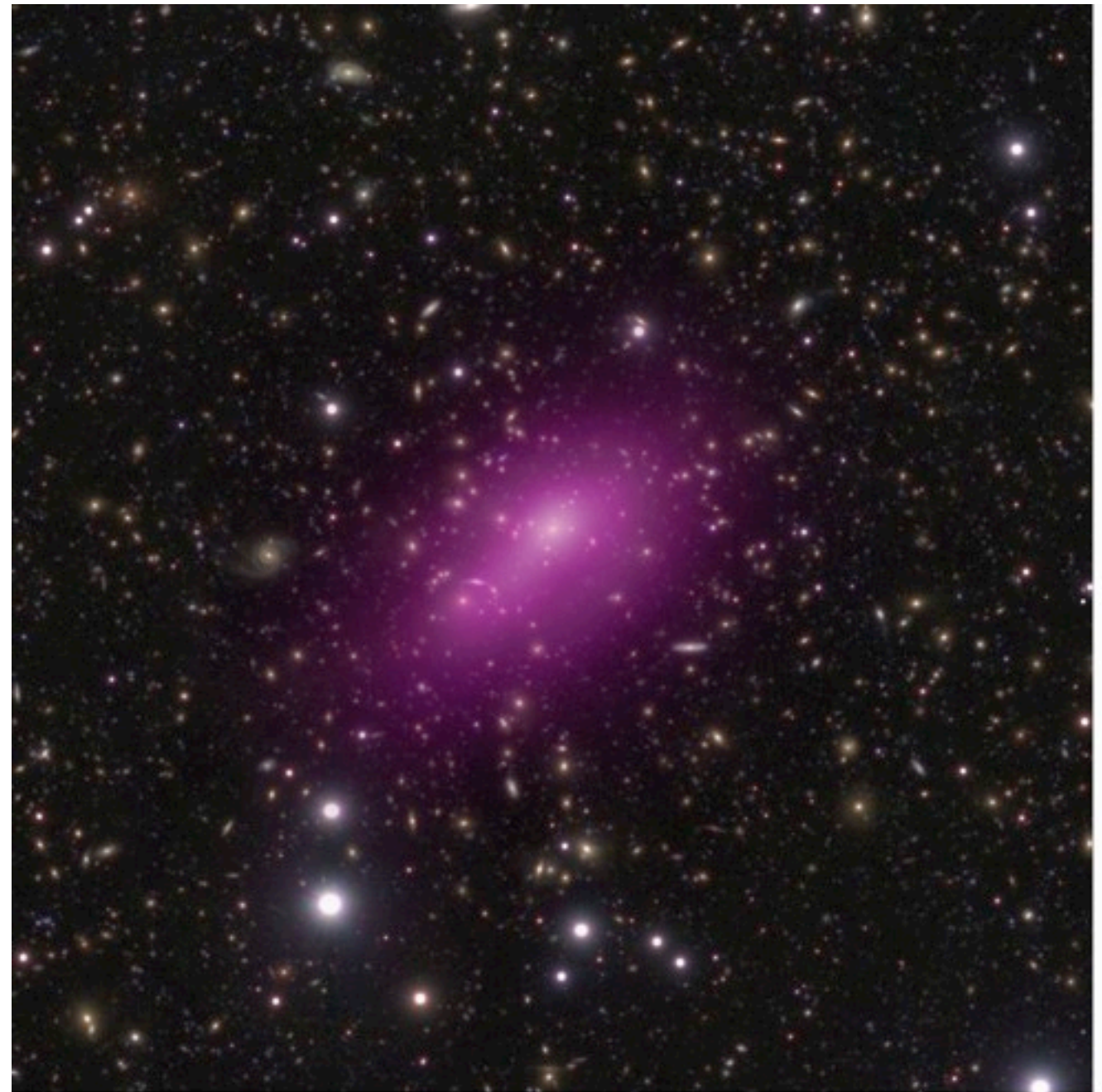
- Gas $10^7 - 10^8$ K (raggi X) : 10% della massa totale
- Galassie: 5% della massa totale



Materia oscura

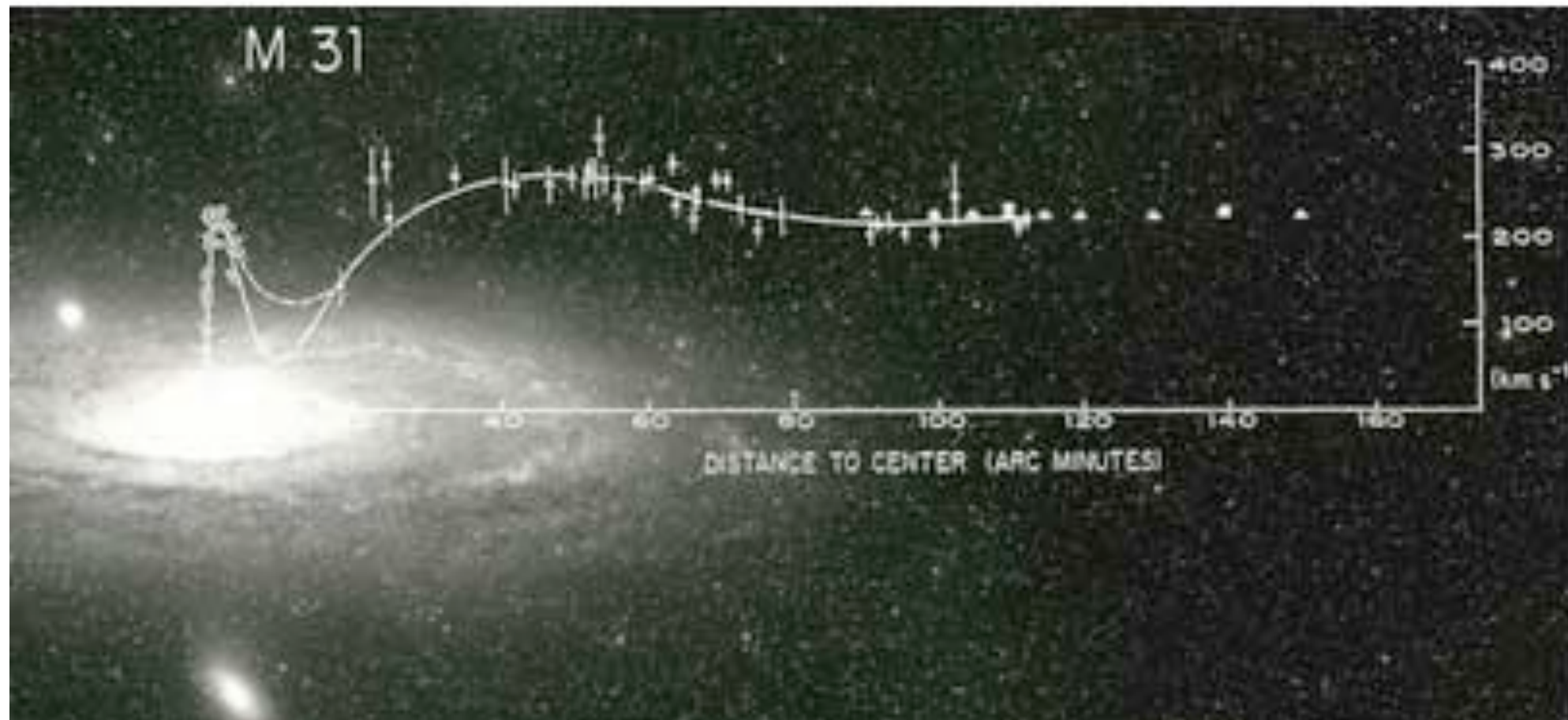
Parziale soluzione negli ammassi:

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



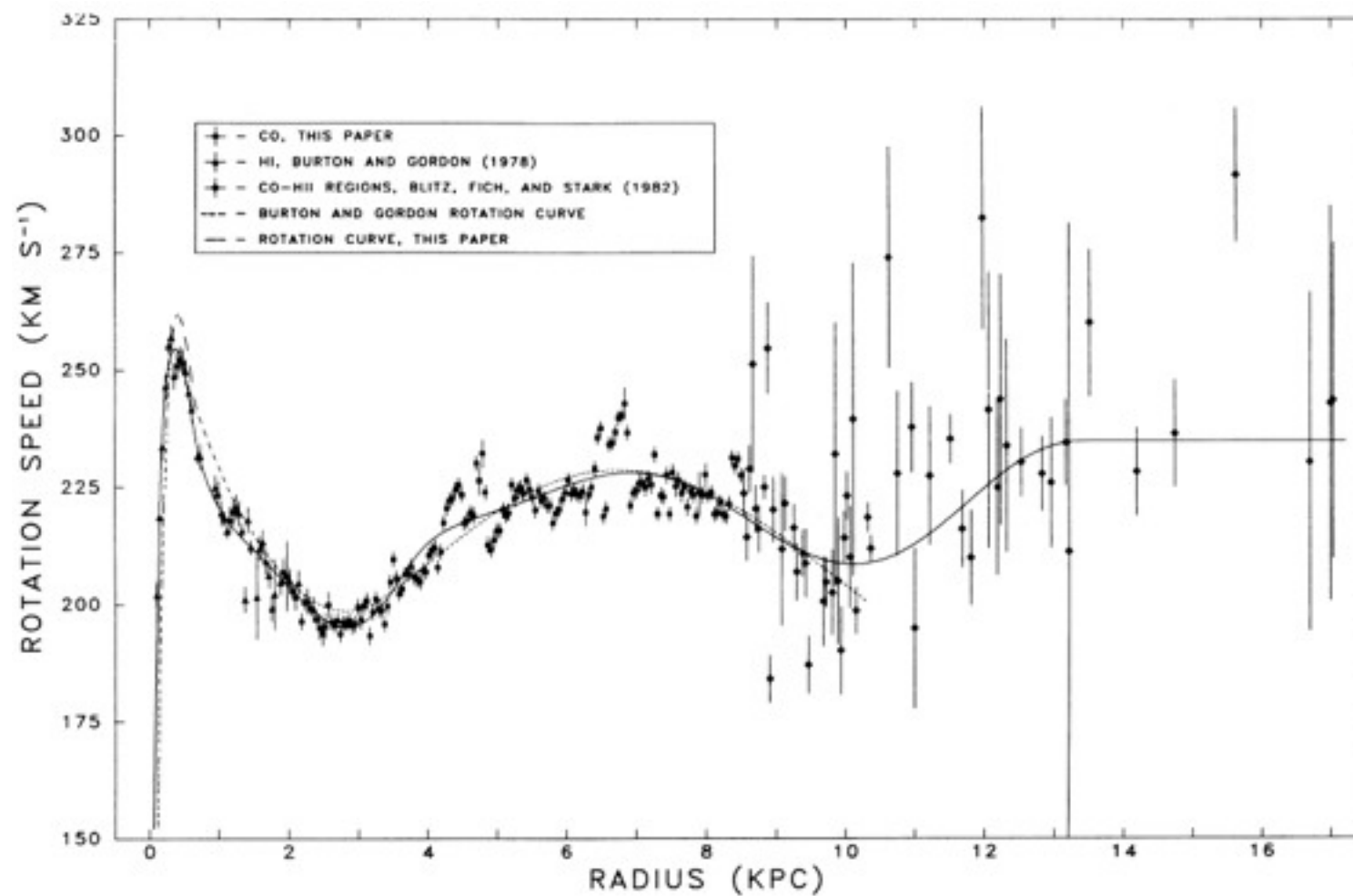
Materia oscura: un po' di storia

Rubin (1960). Rotazione di galassie spirale



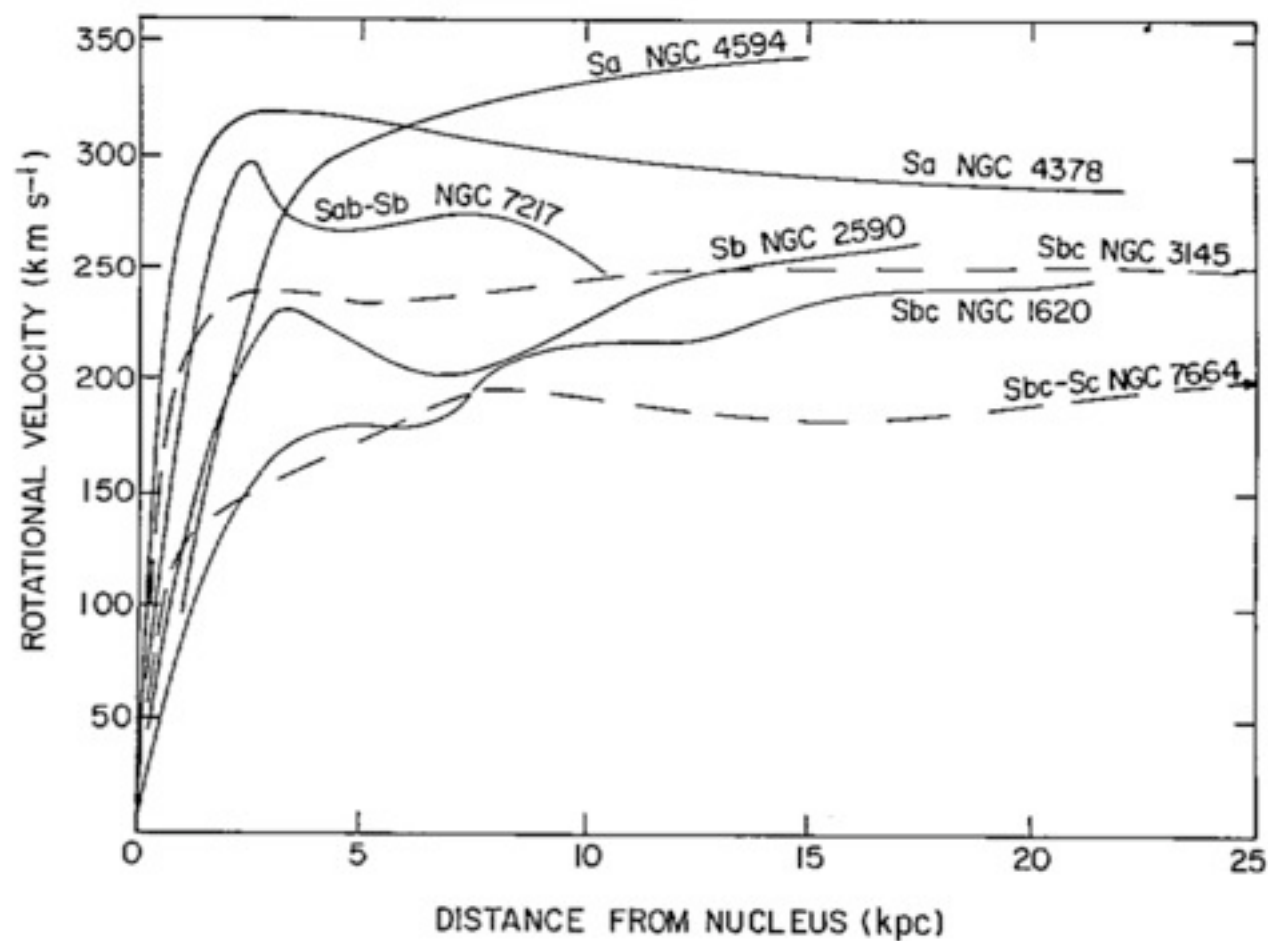
Materia oscura: un po' di storia

Rubin (1960). Rotazione di galassie spirale

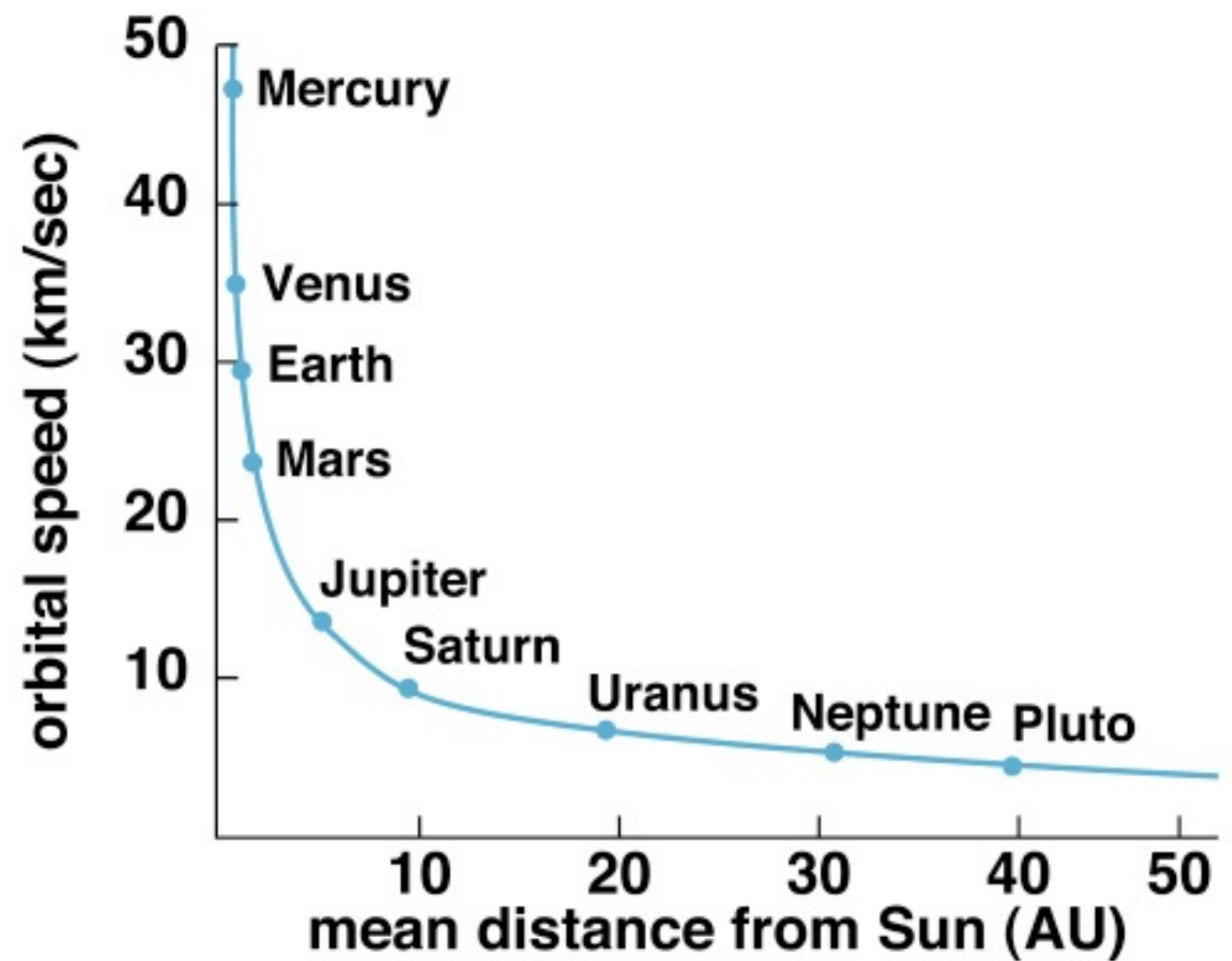


Materia oscura: un po' di storia

Rubin (1960). Rotazione di galassie spirale



Materia oscura



(b)

Copyright © Addison Wesley

Materia oscura

- Per una massa **M** tutta concentrata al centro del sistema e una massa **m** di un corpo orbitando attorno:

Materia oscura

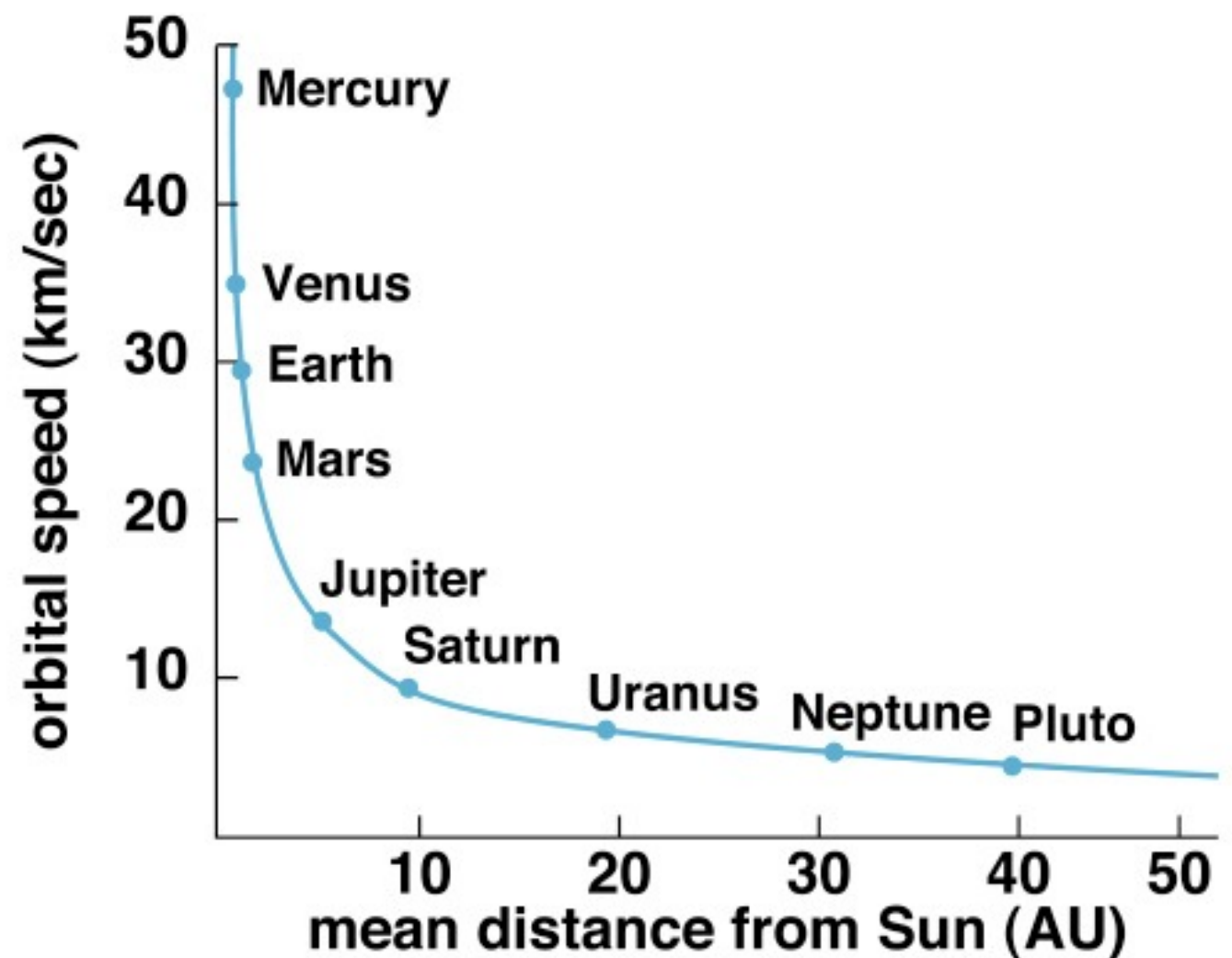
- Per una massa **M** tutta concentrata al centro del sistema e una massa **m** di un corpo orbitando attorno:
- $F_{\text{centripeta}} = F_{\text{gravità}}$

Materia oscura

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

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)

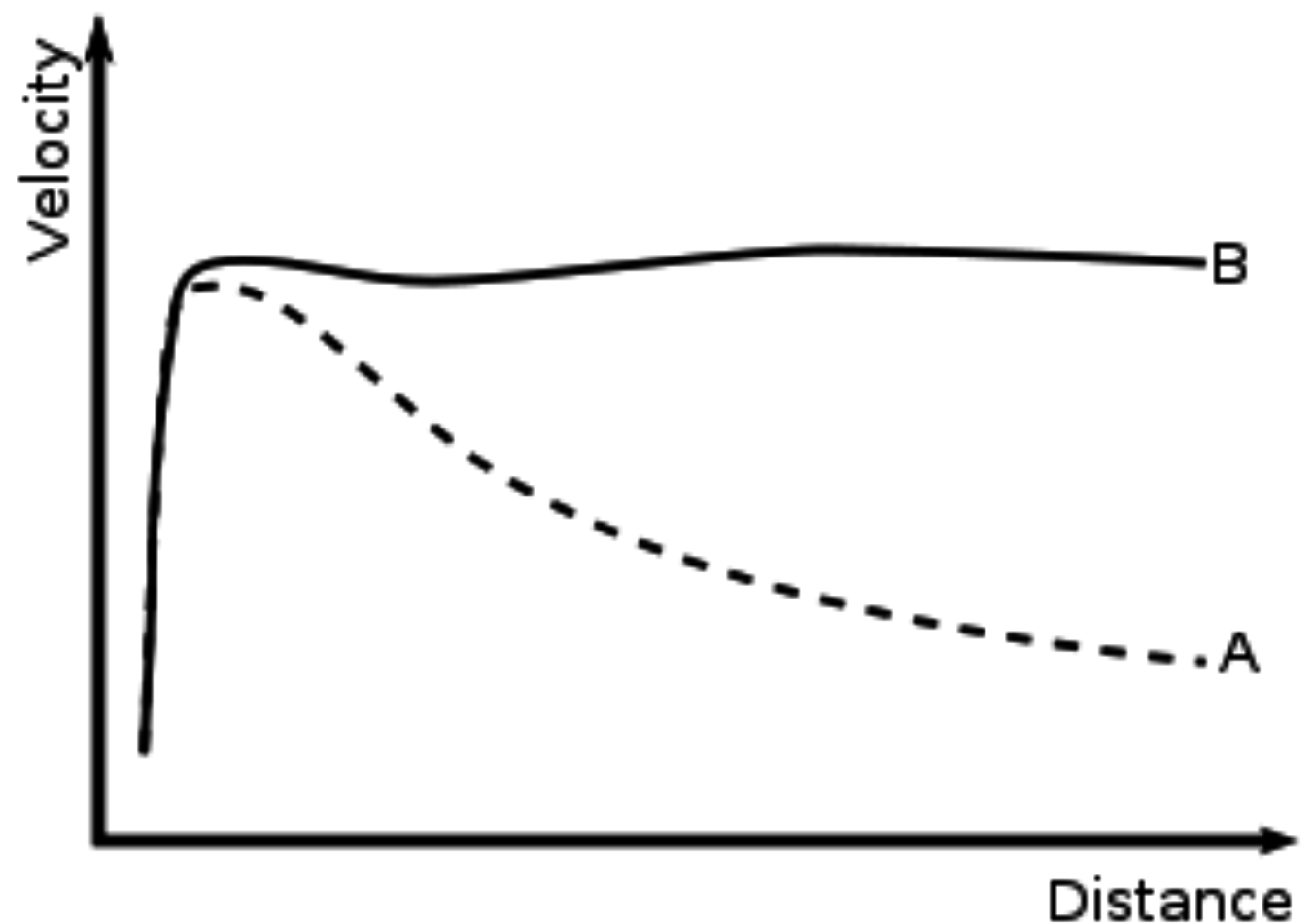
Copyright © Addison Wesley

Materia oscura

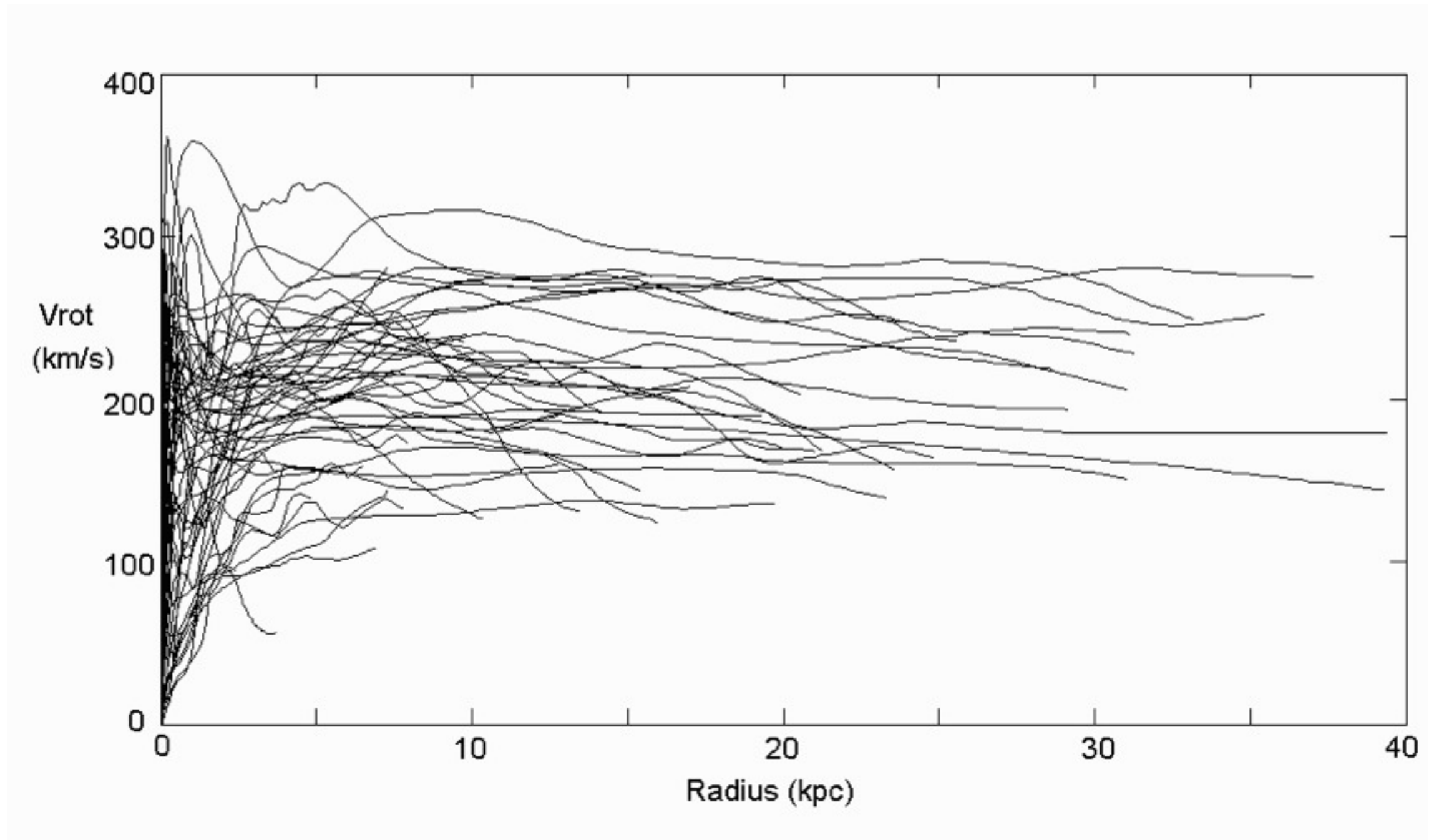
- Per una massa **M** tutta concentrata al centro del sistema e una massa **m** di un corpo orbitando attorno:

- $F_{\text{centripeta}} = F_{\text{gravità}}$

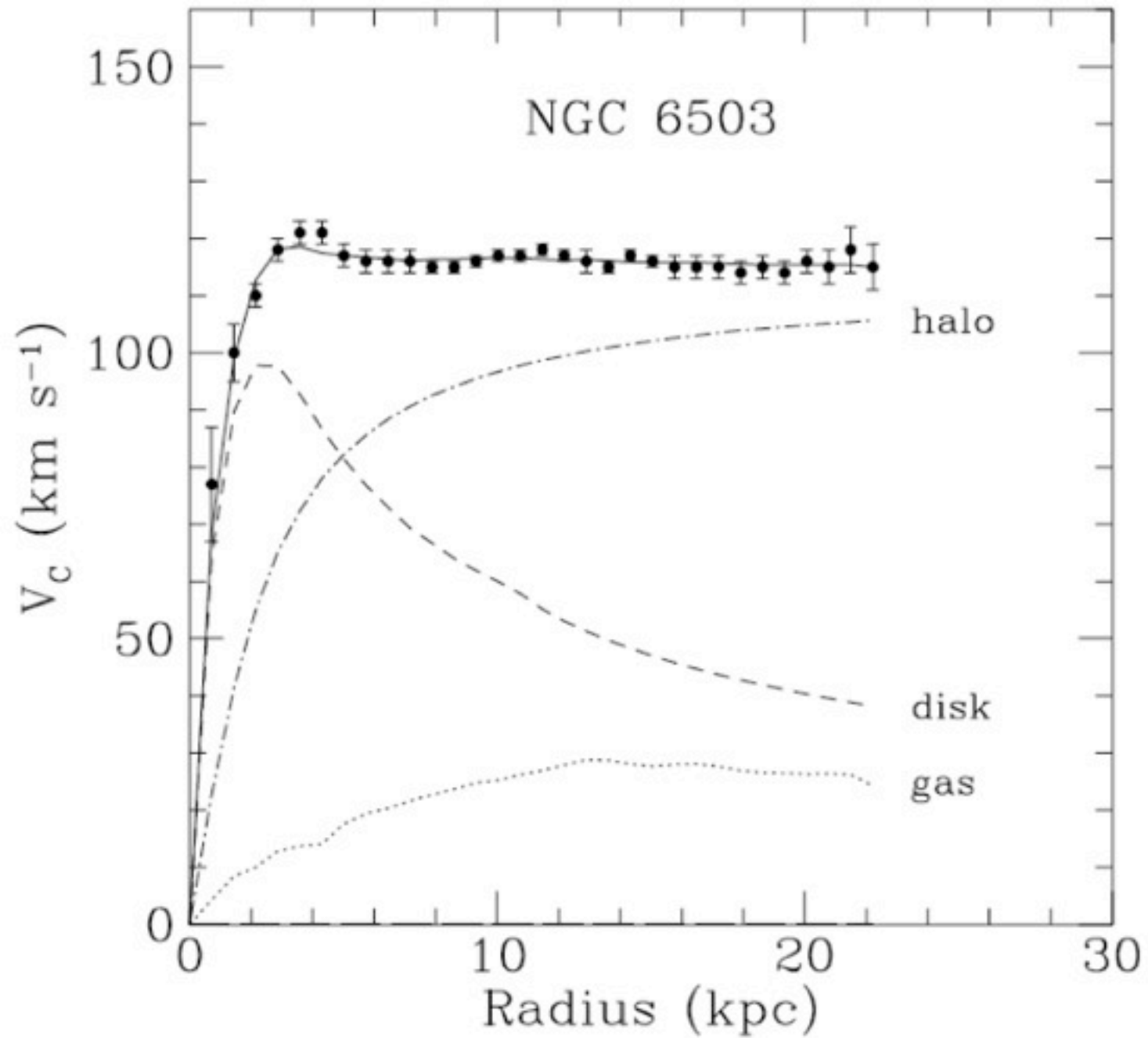
- $mv^2 / R = G M m / R^2 \Rightarrow$
 $v = \sqrt{GM/R} \sim 1 / \sqrt{R}$



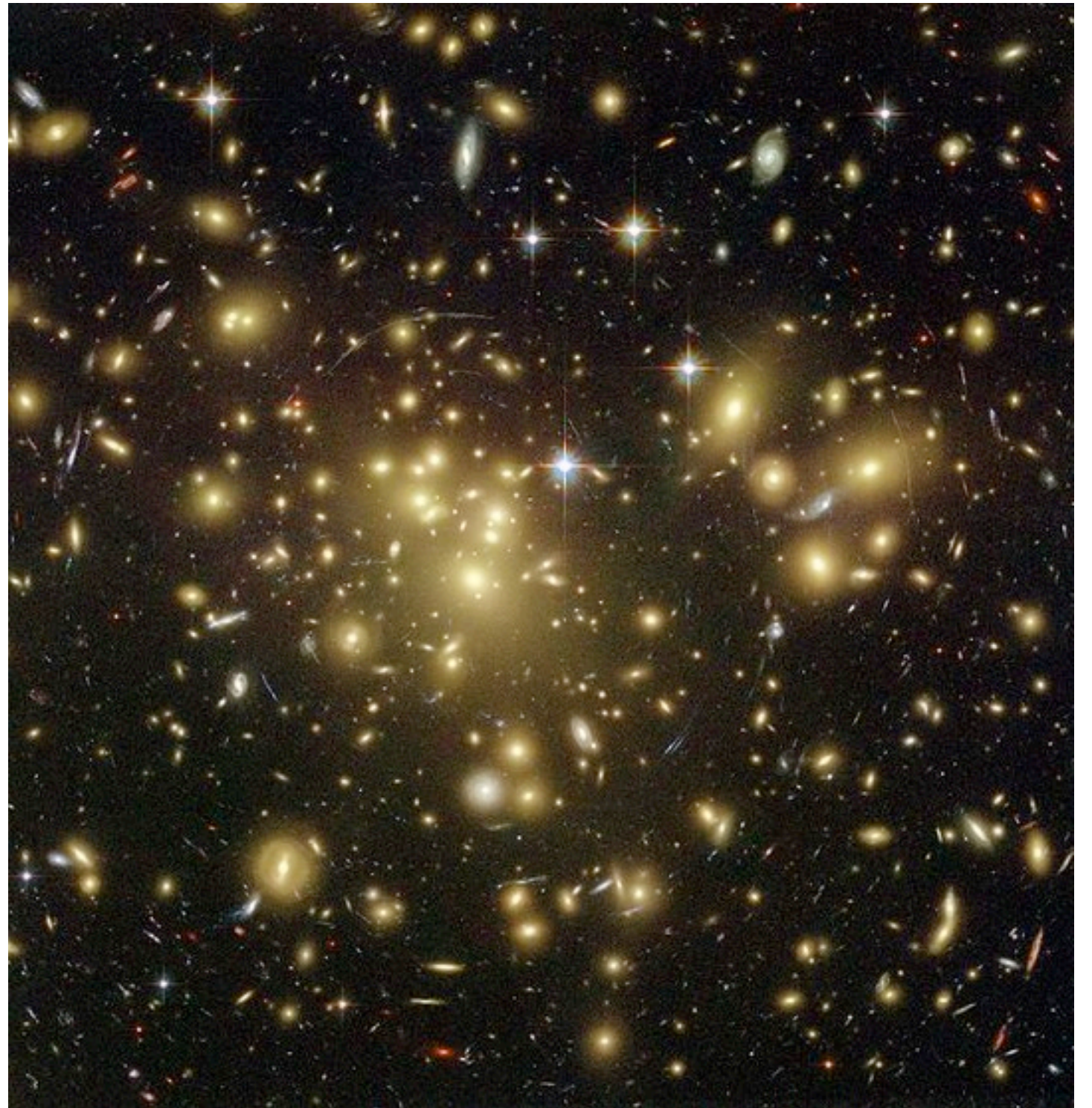
Materia oscura: misurare la velocità del gas



Materia oscura: misurare la velocità del gas



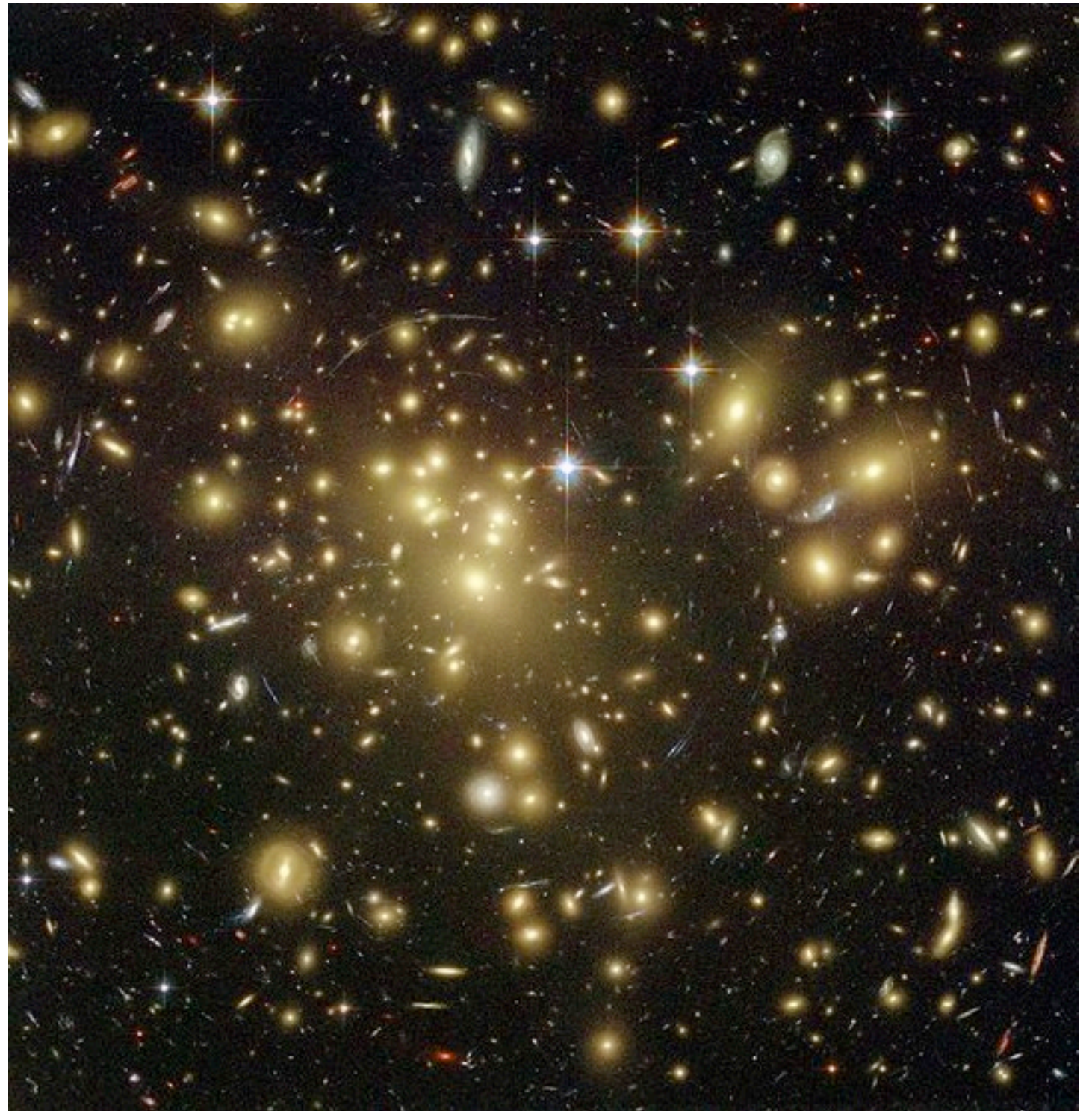
Materia oscura: lente gravitazionale



Amasso di galassie Abell 1689

Materia oscura: lente gravitazionale

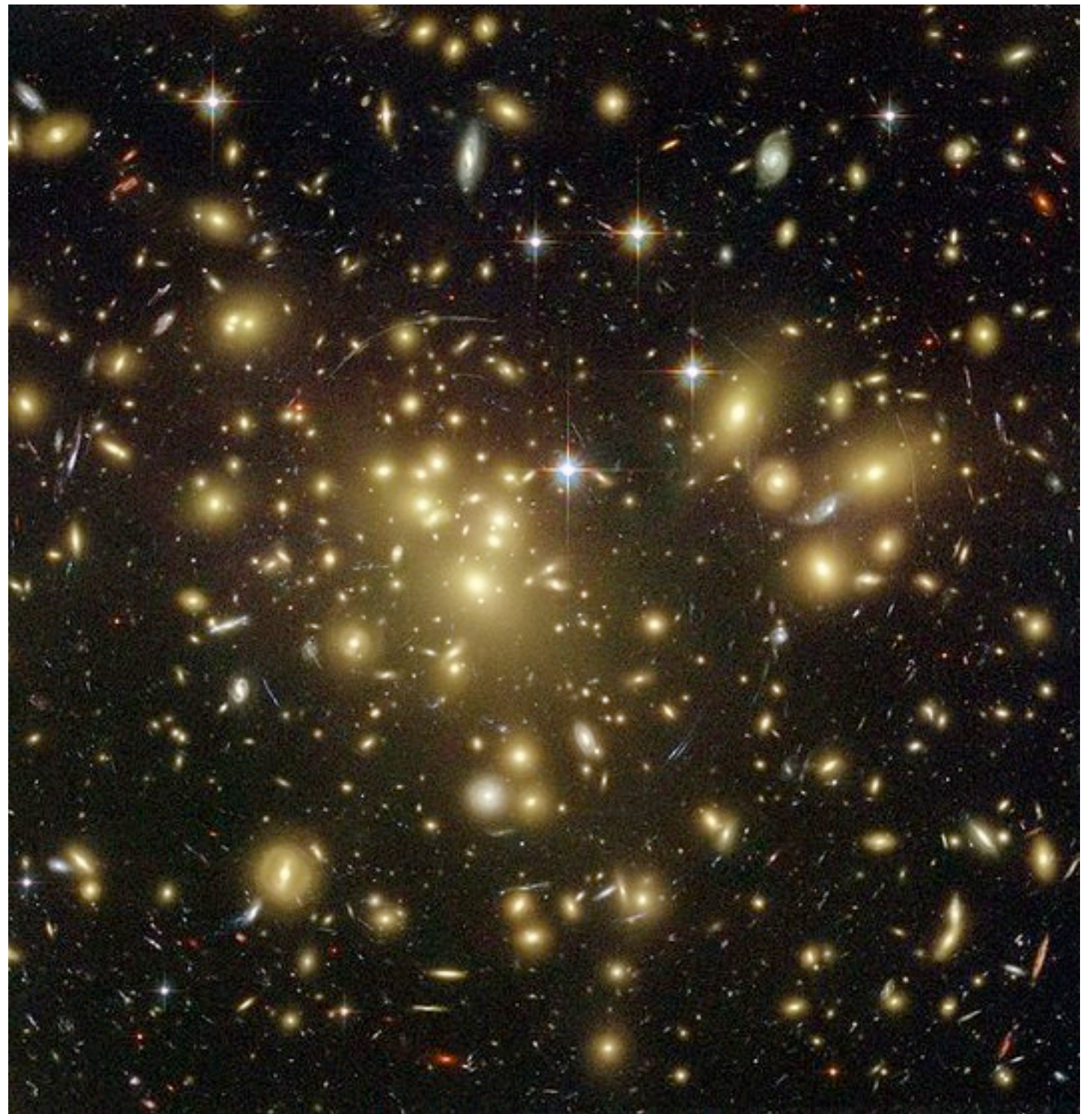
- Punto chiave: La distorsione luminosa dipende solo dalla **massa gravitazionale**



Amasso di galassie Abell 1689

Materia oscura: lente gravitazionale

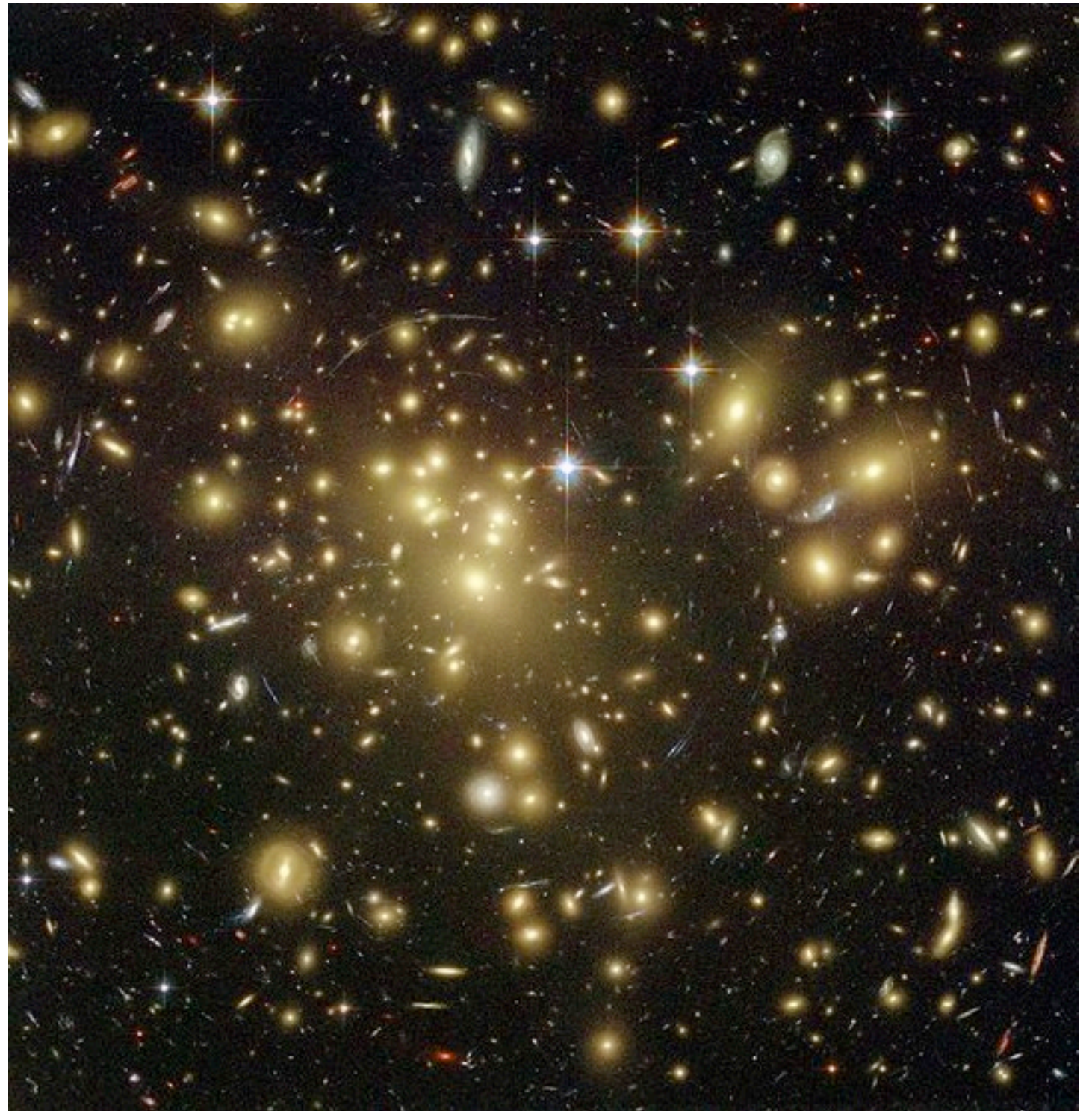
- Punto chiave: La distorsione luminosa dipende solo dalla **massa gravitazionale**
- Ricostruzione della massa grav. a partire dall'immagine di lente grav.



Amasso di galassie Abell 1689

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

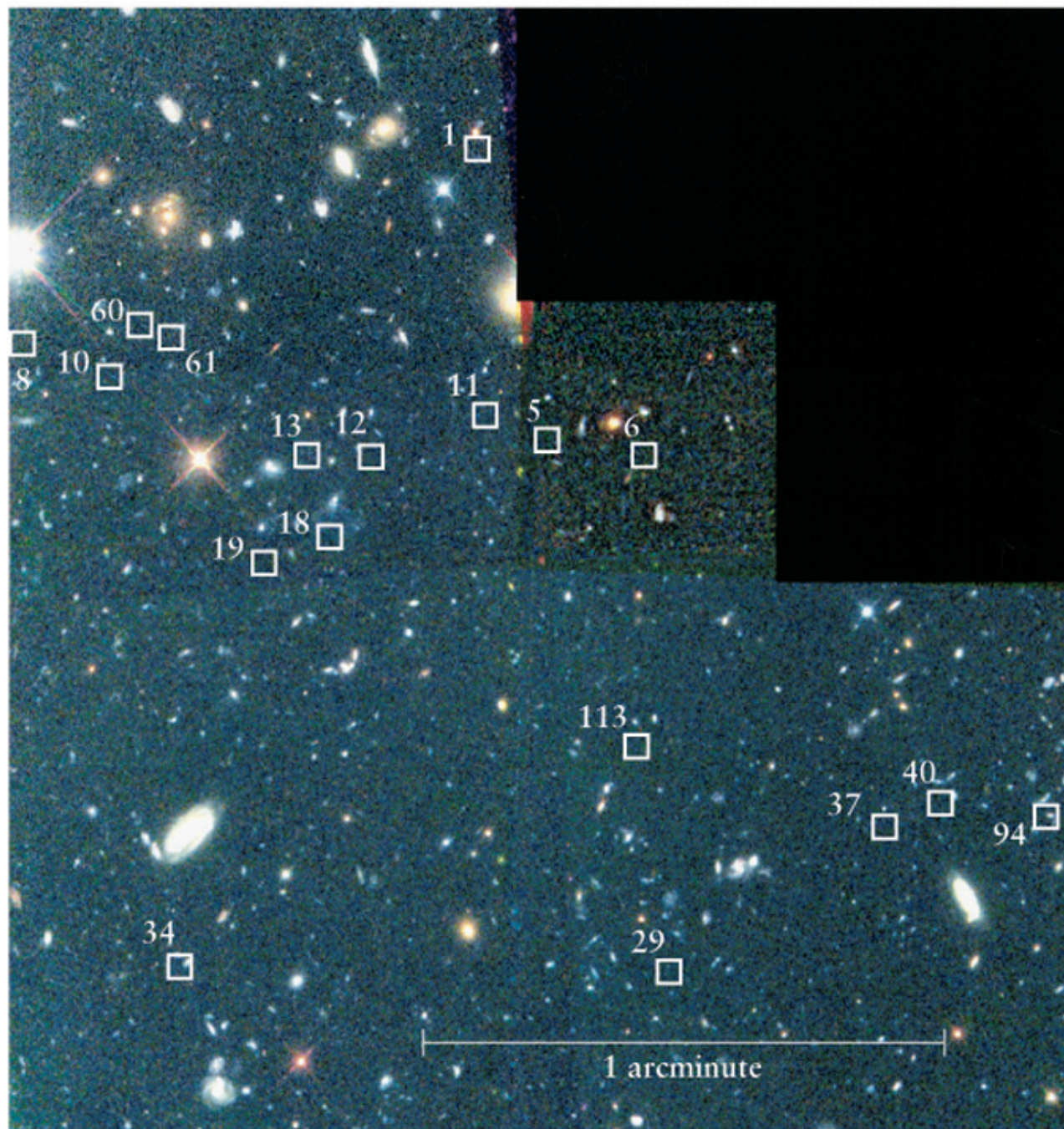


Amasso di galassie Abell 1689

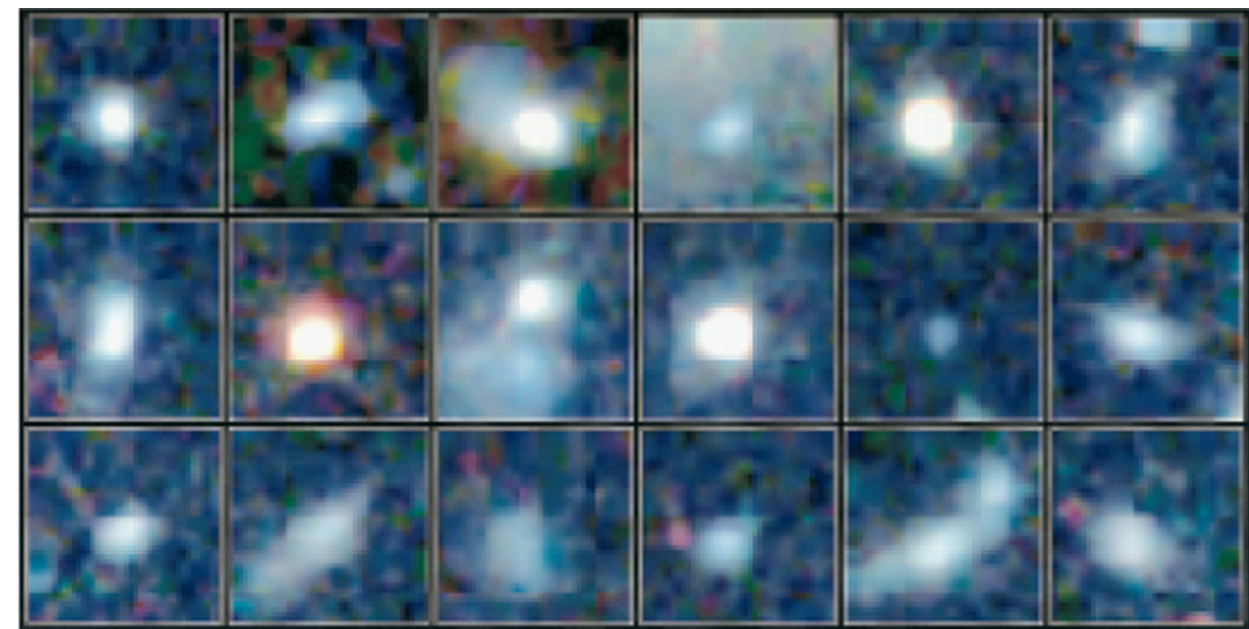
Formazione delle galassie con fusione

Formazione delle galassie con fusione

- Scenario “Bottom up” = fusione di oggetti piccoli



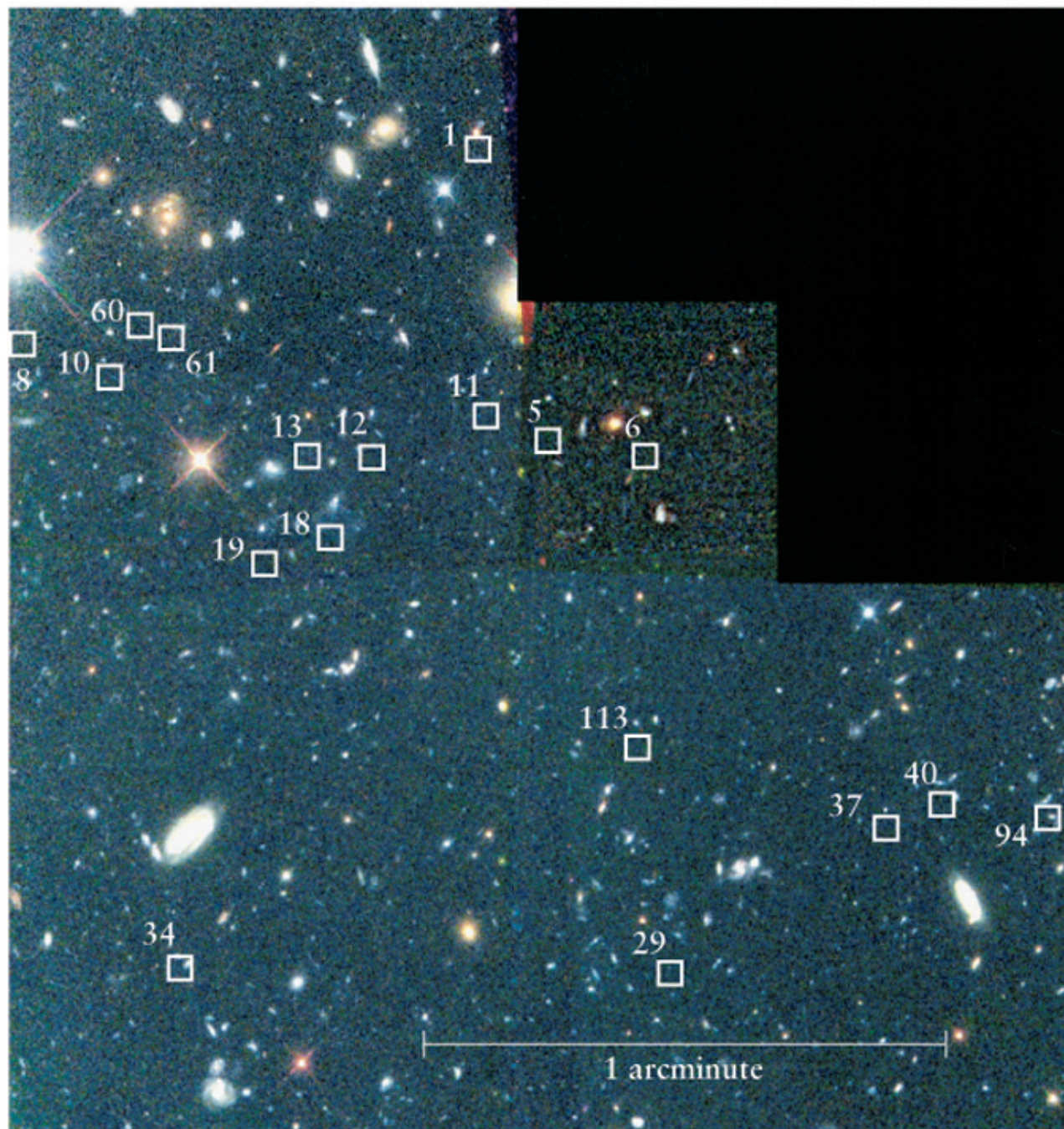
(a) A portion of the constellation Hercules



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

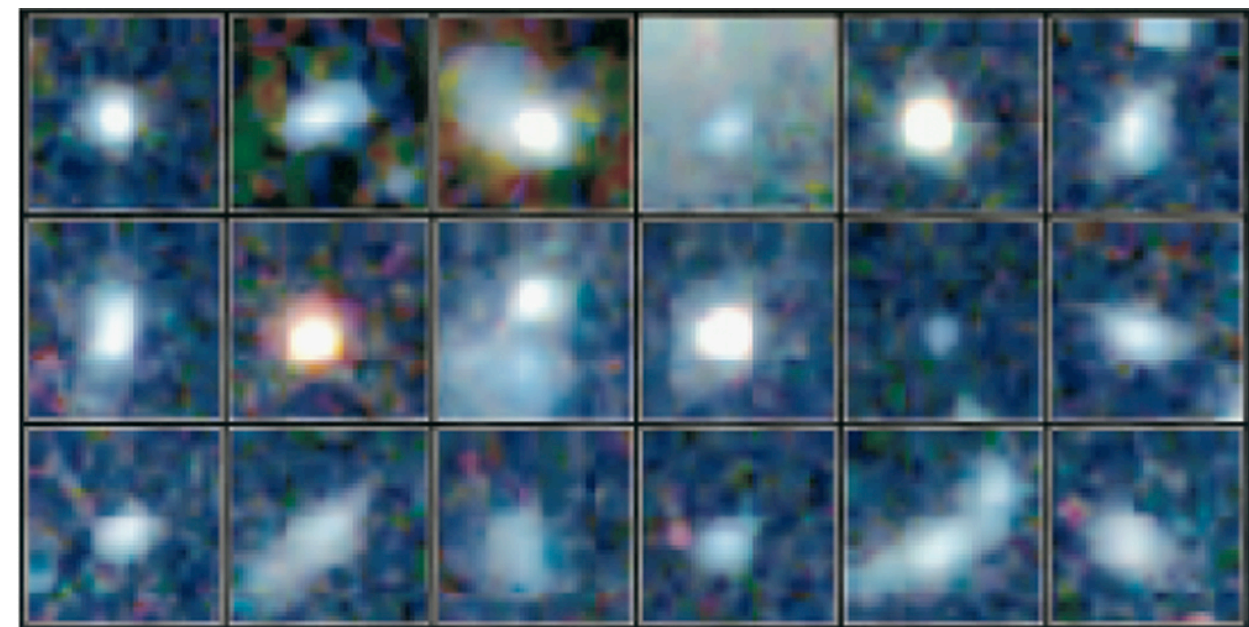
Formazione delle galassie con fusione

- Scenario “Bottom up” = fusione di oggetti piccoli



(a) A portion of the constellation Hercules

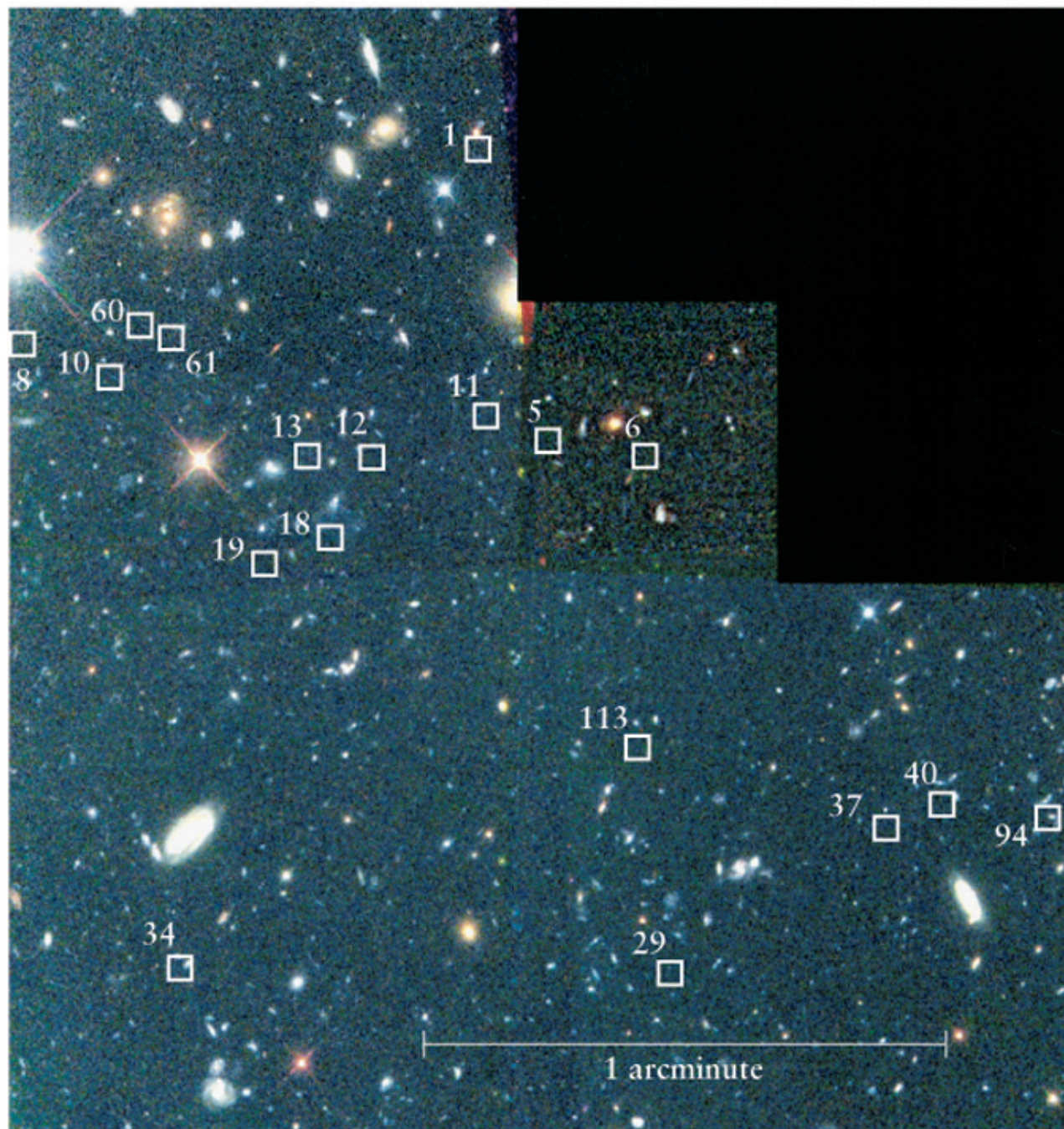
- distanza = 3.5 Mpc (11 miliardi di anni-luce)



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

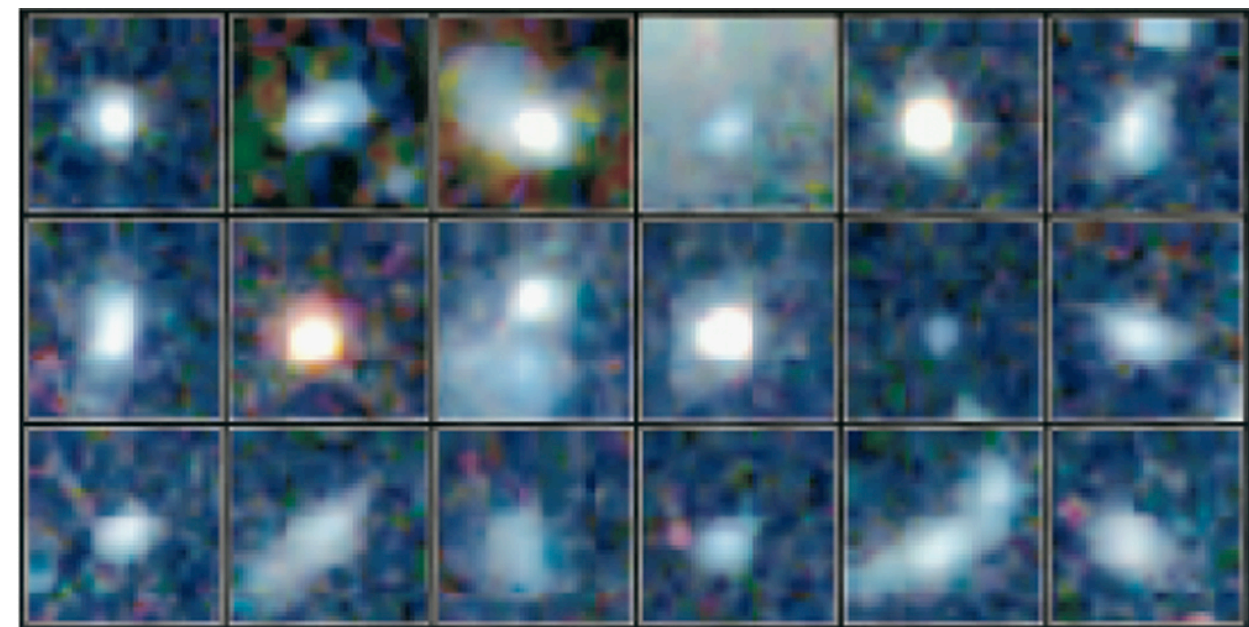
Formazione delle galassie con fusione

- Scenario “Bottom up” = fusione di oggetti piccoli



(a) A portion of the constellation Hercules

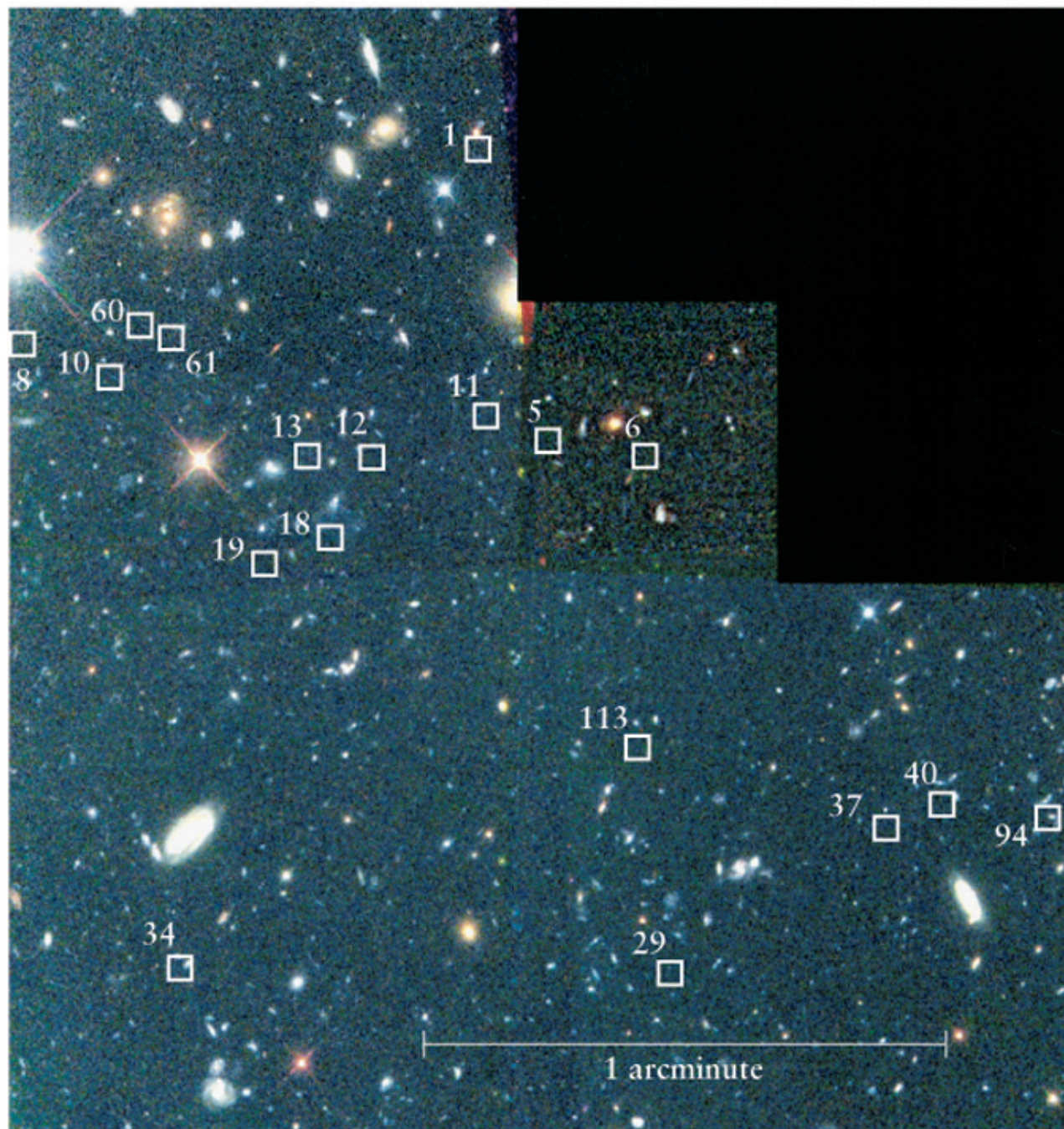
- distanza = 3.5 Mpc (11 miliardi di anni-luce)
- diametro = 0.5 - 1 kpc



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

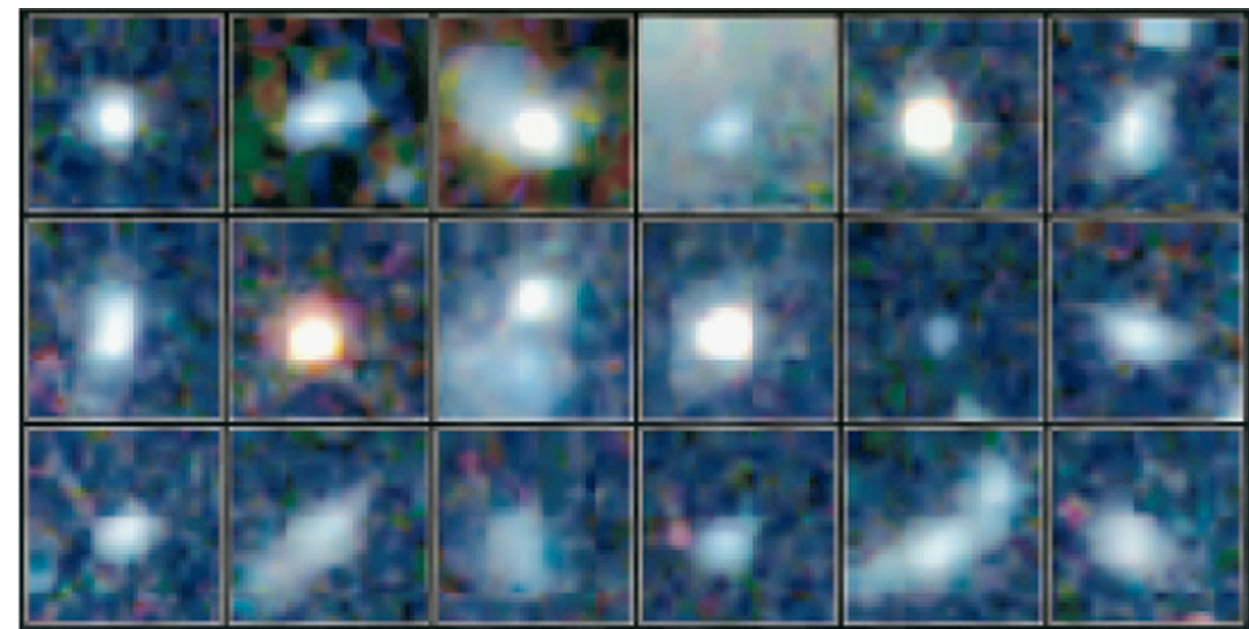
Formazione delle galassie con fusione

- 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)

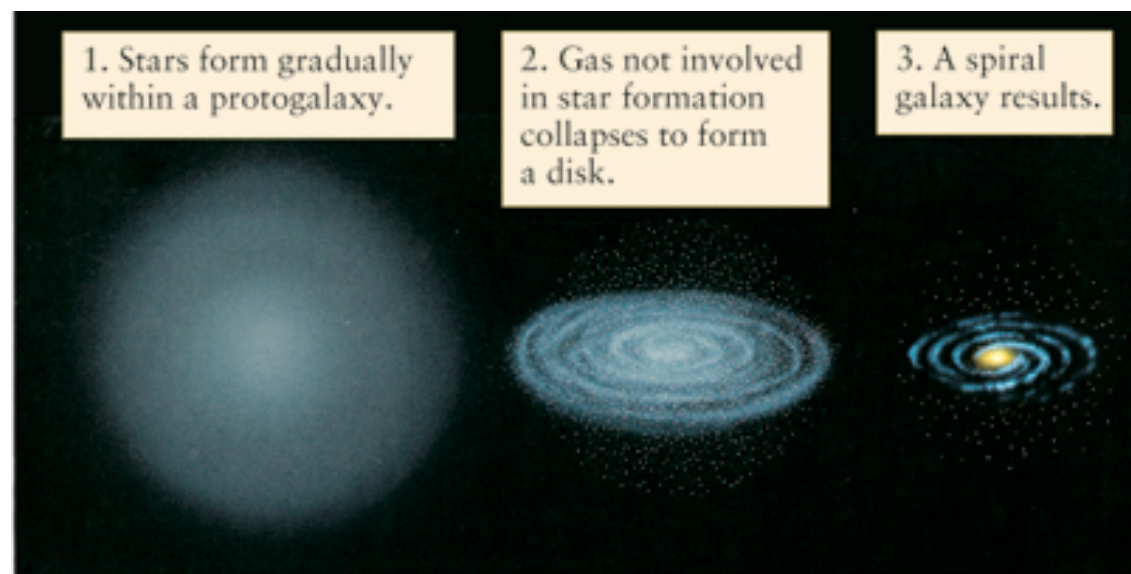


(b) Closeup images of the numbered objects in (a)

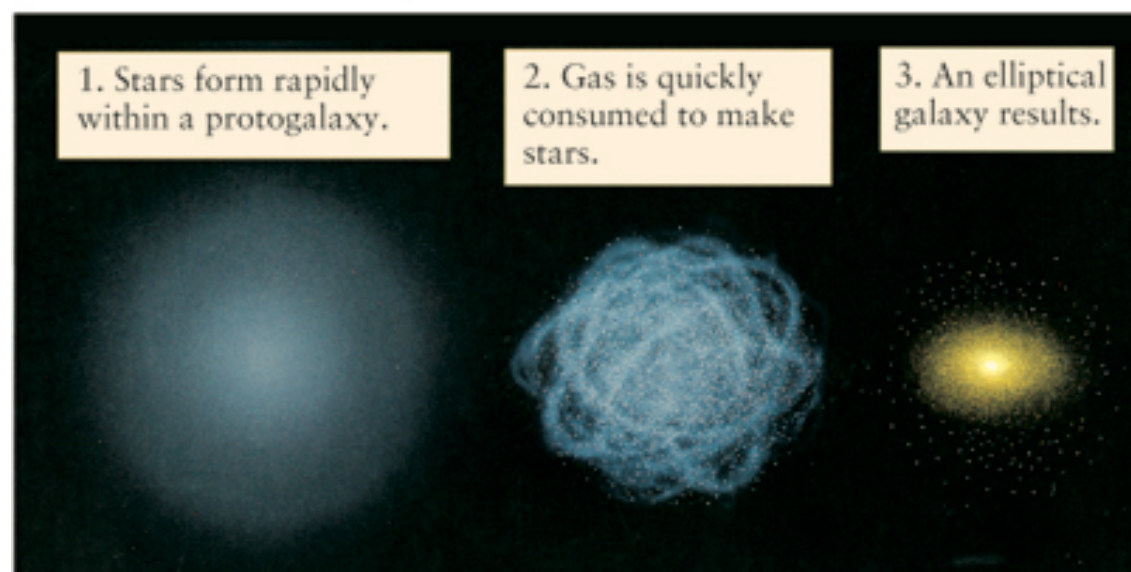
Formazione delle spirali, lenticolari e ellittiche

Formazione delle spirali, lenticolari e ellittiche

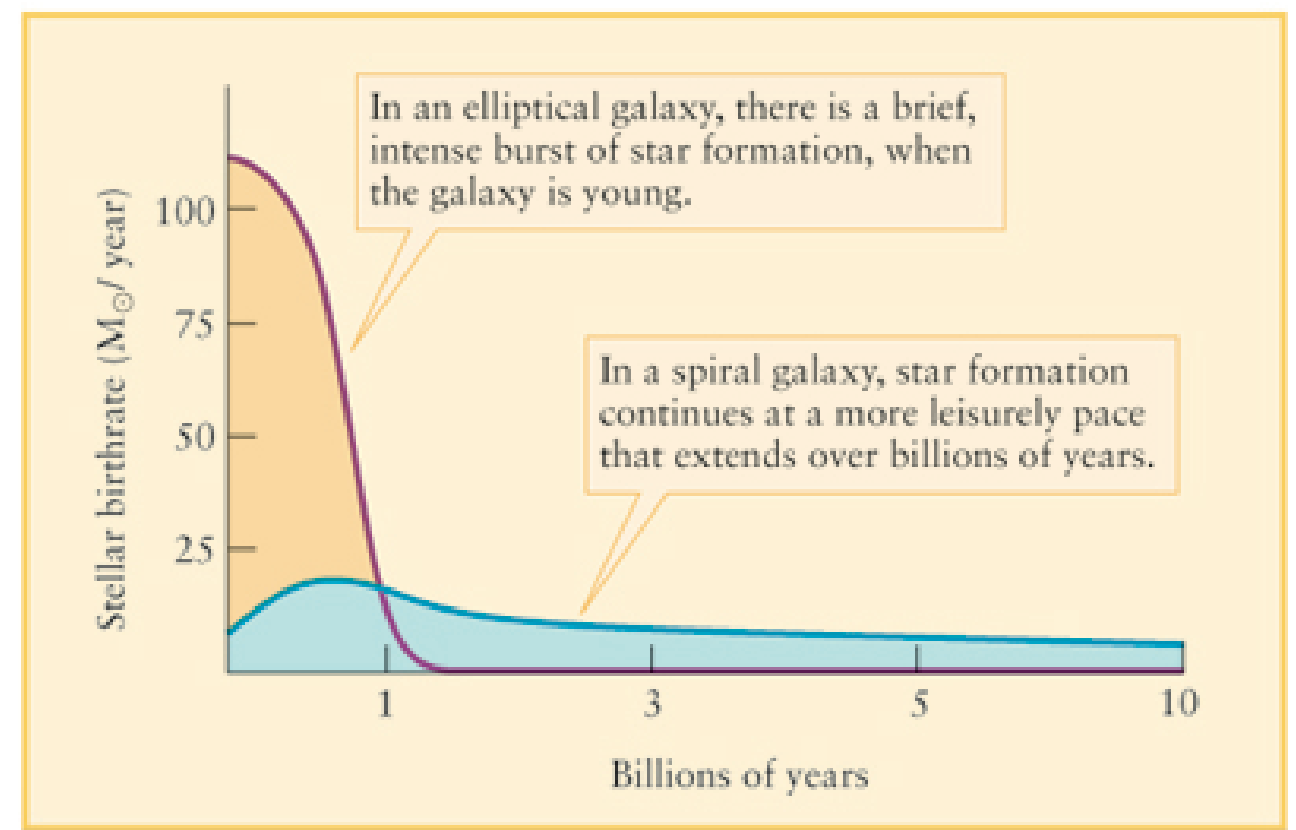
- Protogalassia
- Tasso di formazione stellare
- Contenuto in metalli
- Colore blu



(a) Formation of a spiral galaxy



(b) Formation of an elliptical galaxy



(c) The stellar birthrate in galaxies

Cosmologia: origine e evoluzione dell'universo

Cosmologia: origine e evoluzione dell'universo

- Quant'è grande l'universo?

Cosmologia: origine e evoluzione dell'universo

- Quant'è grande l'universo?
- Quale è la sua struttura?

Cosmologia: origine e evoluzione dell'universo

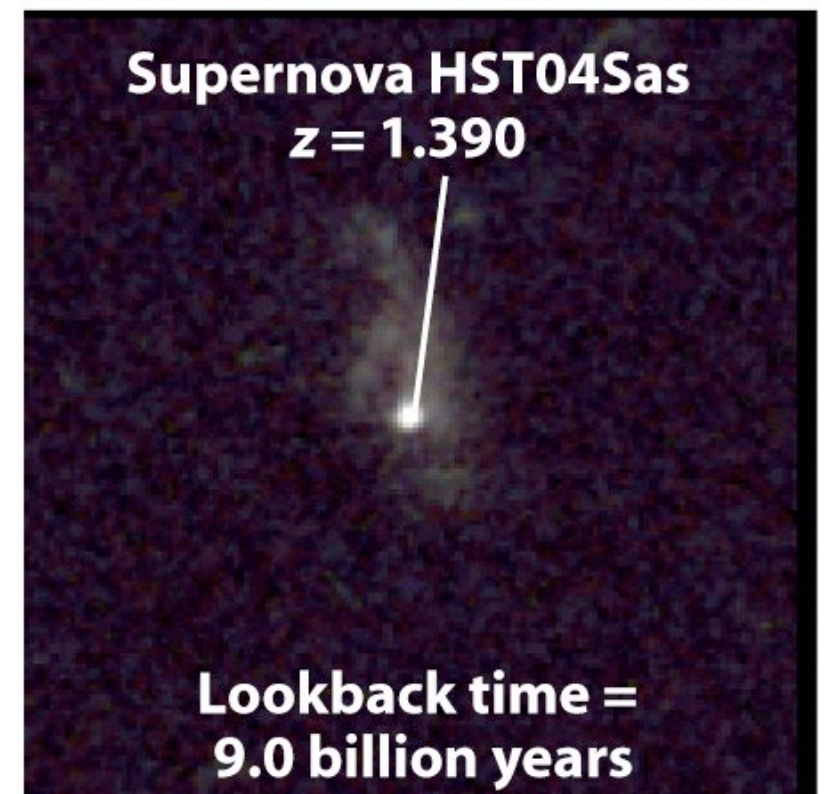
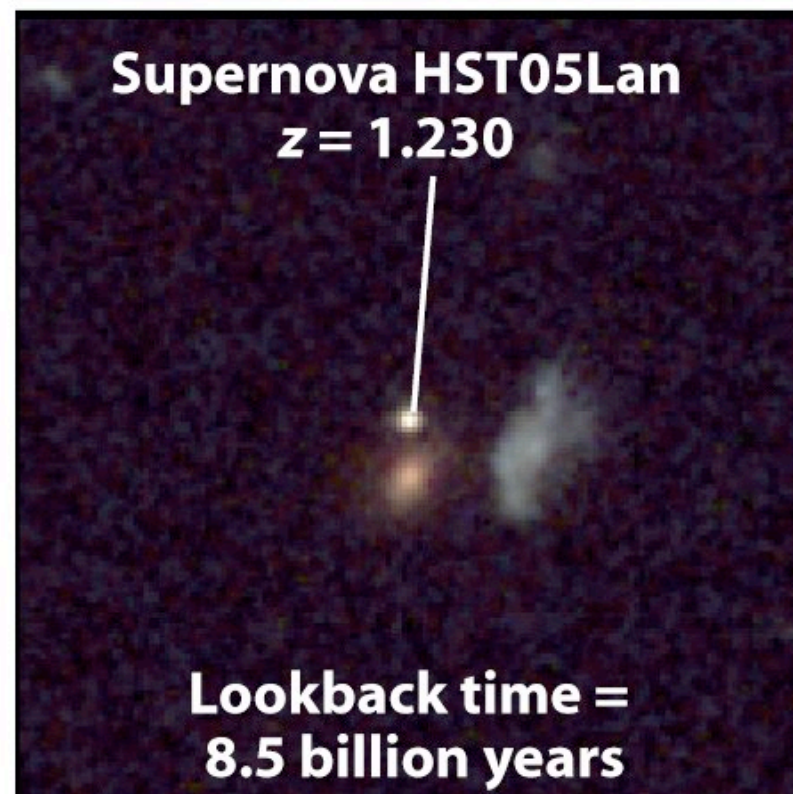
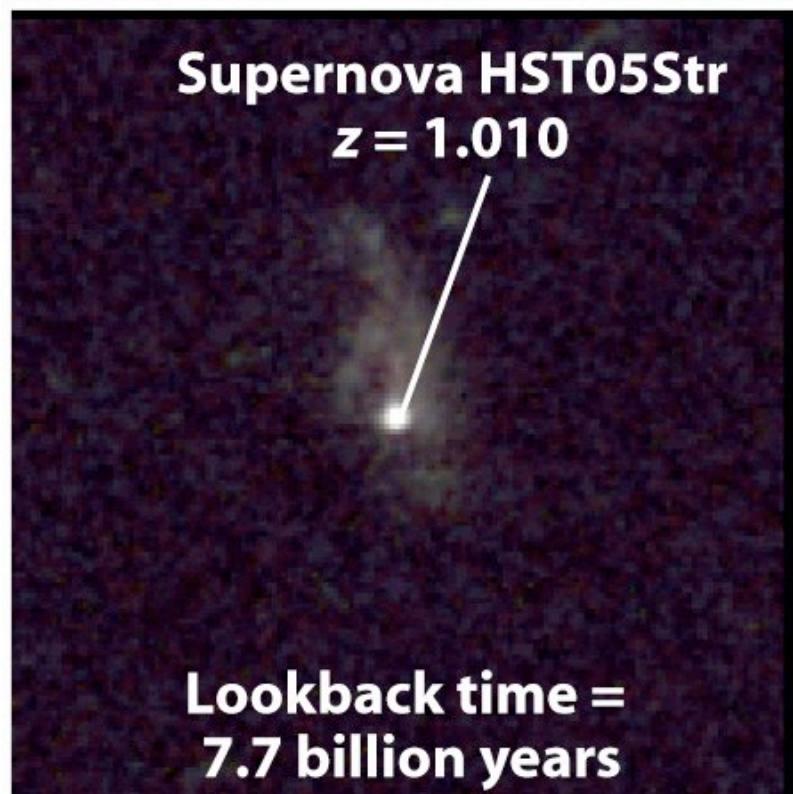
- Quant'è grande l'universo?
- Quale è la sua struttura?
- Da quanto tempo esiste?

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

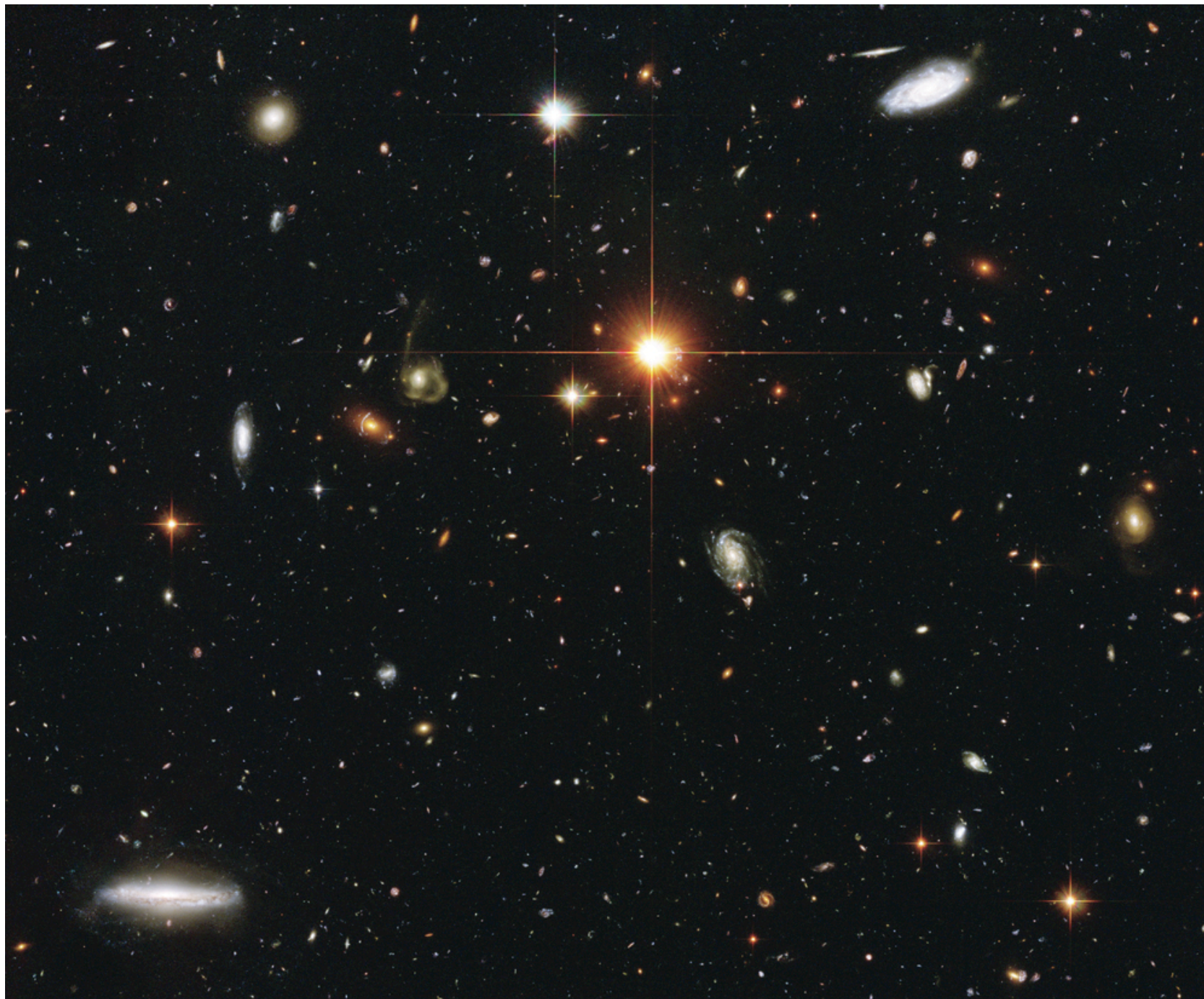
- Supernovae molto distanti: studio dell'evoluzione dell'universo



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

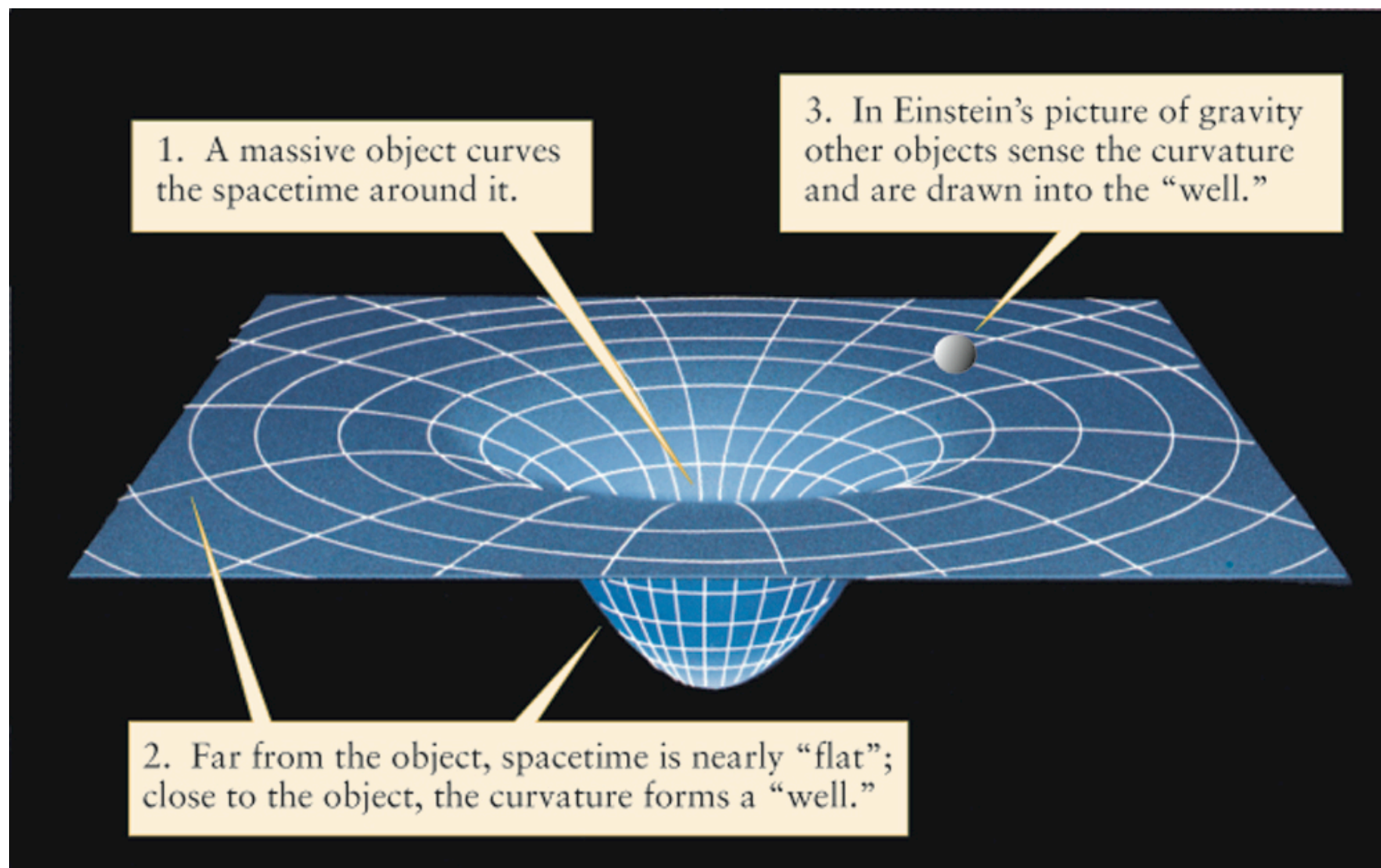
Oscurità del cielo la notte

- Paradosso di Olbers-Chéseaux (18° secolo)



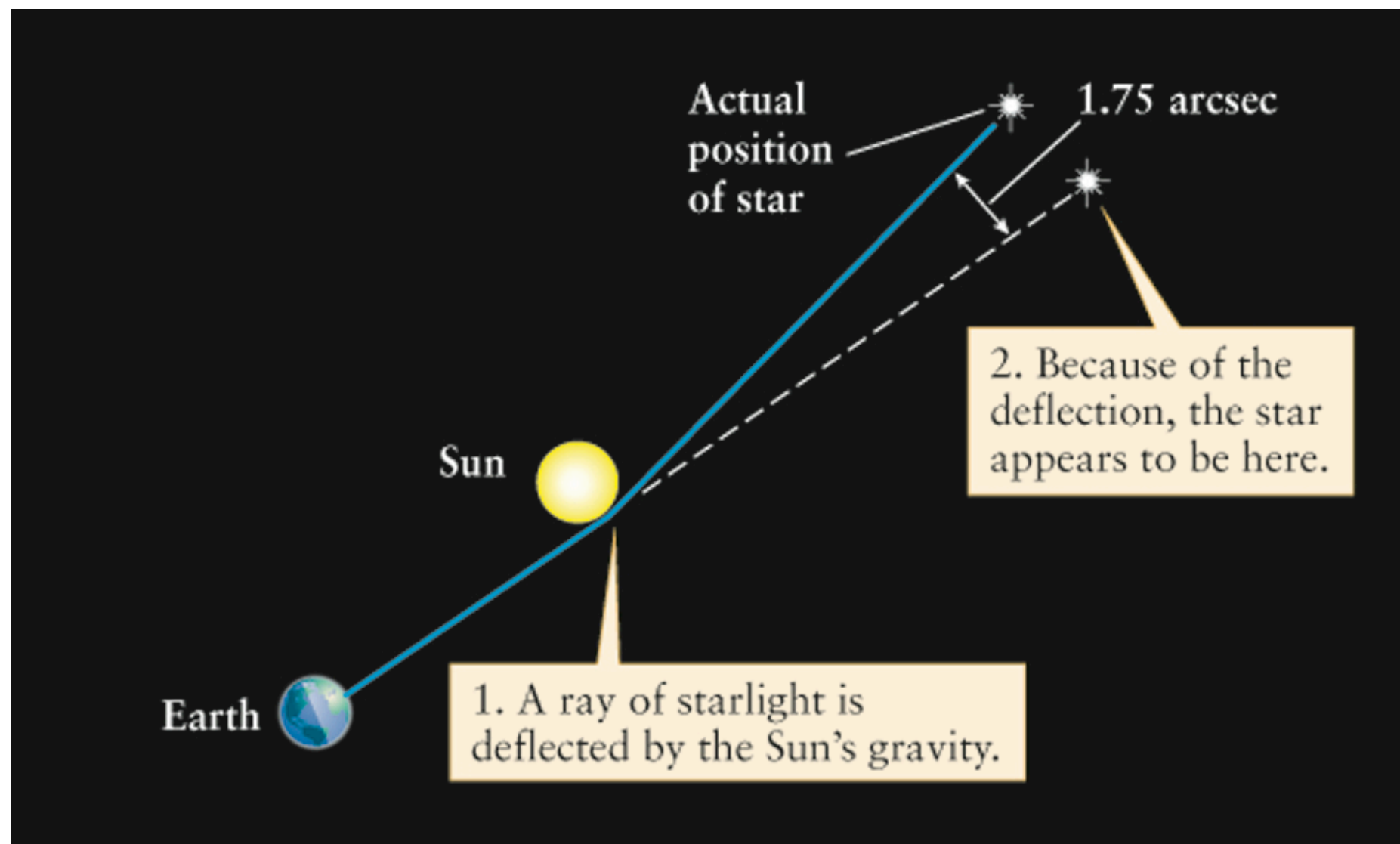
La rivoluzione di Einstein

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



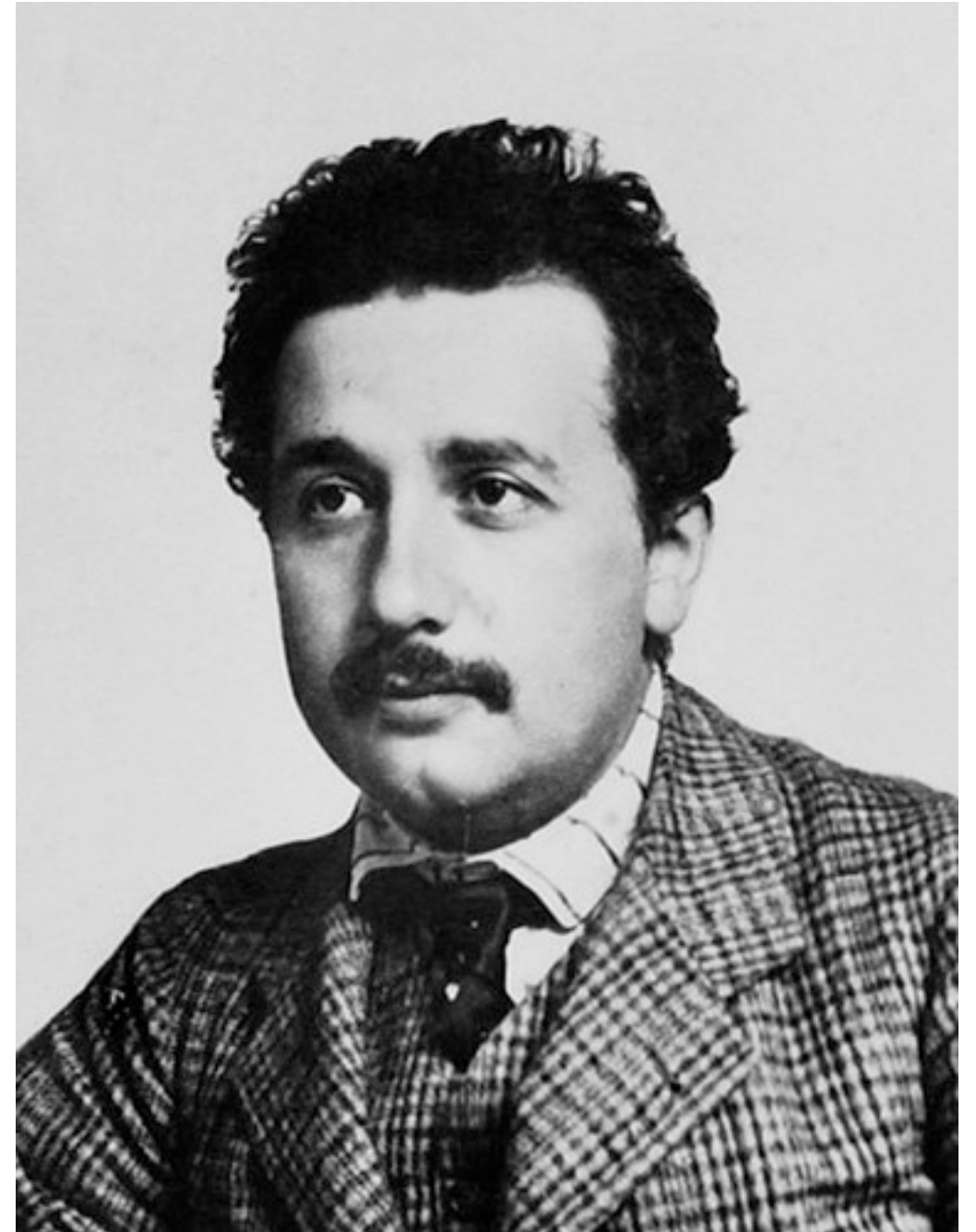
La rivoluzione di Einstein

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



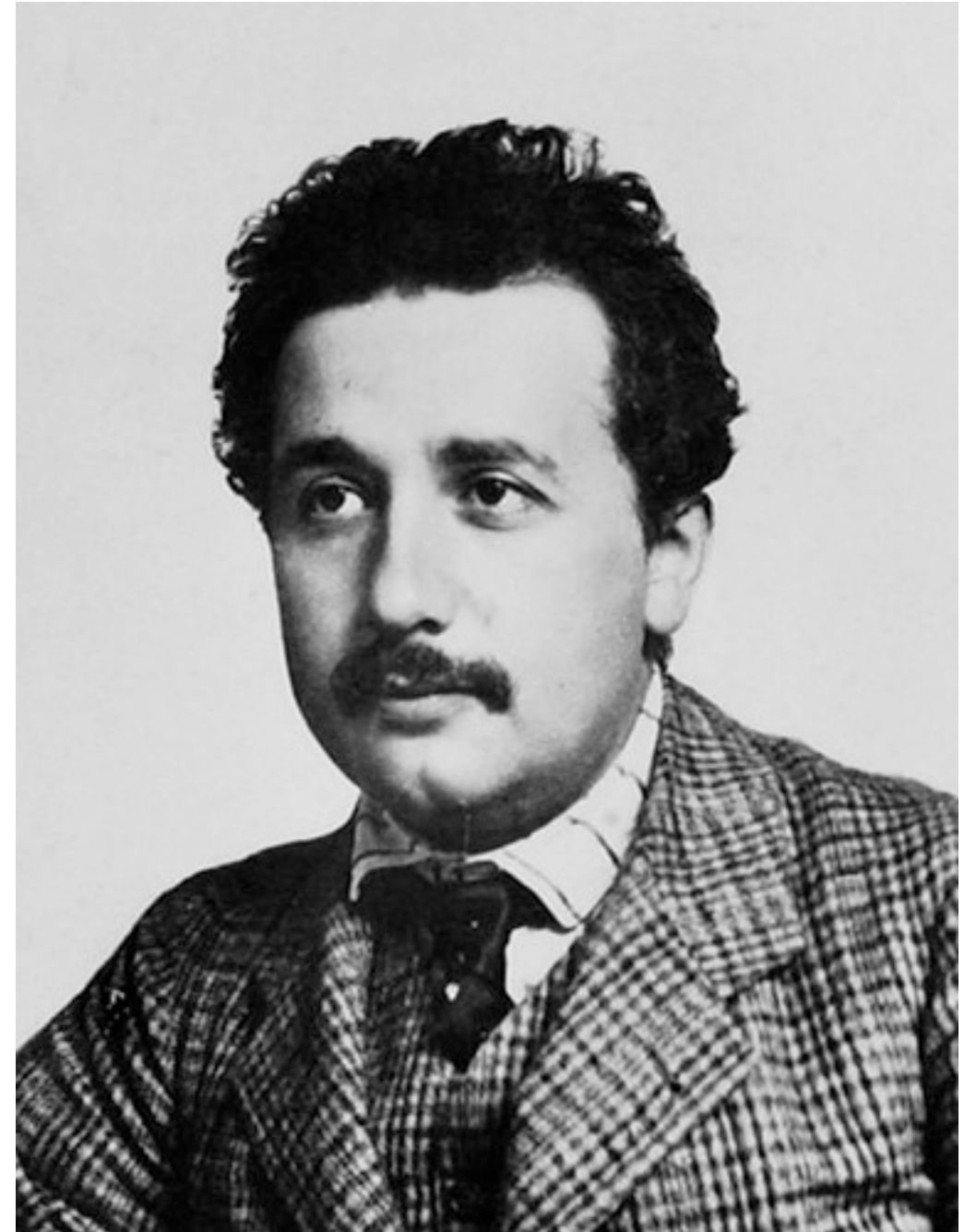
La rivoluzione di Einstein

La rivoluzione di Einstein



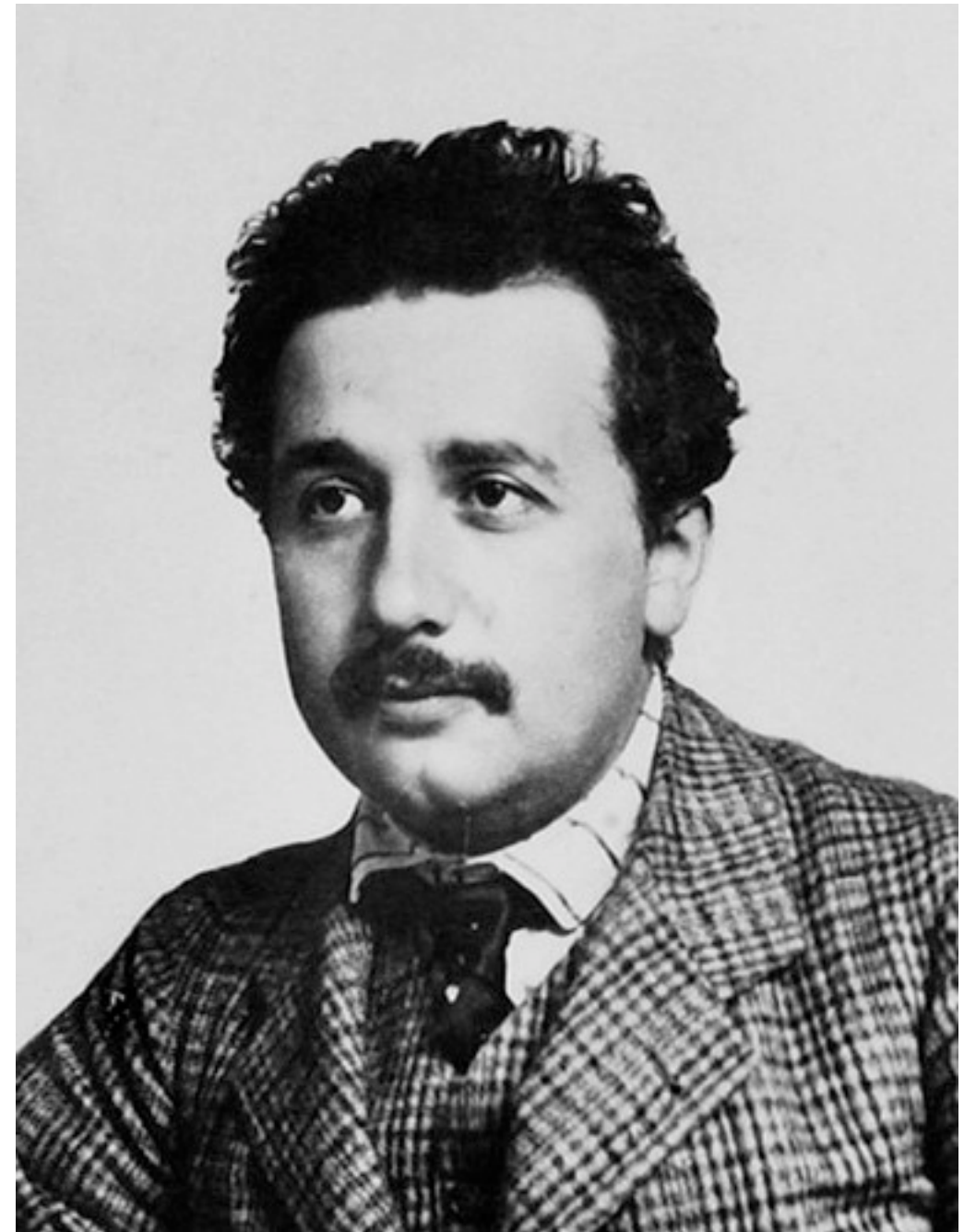
La rivoluzione di Einstein

- L'universo è statico (come lo pensava Newton) ?



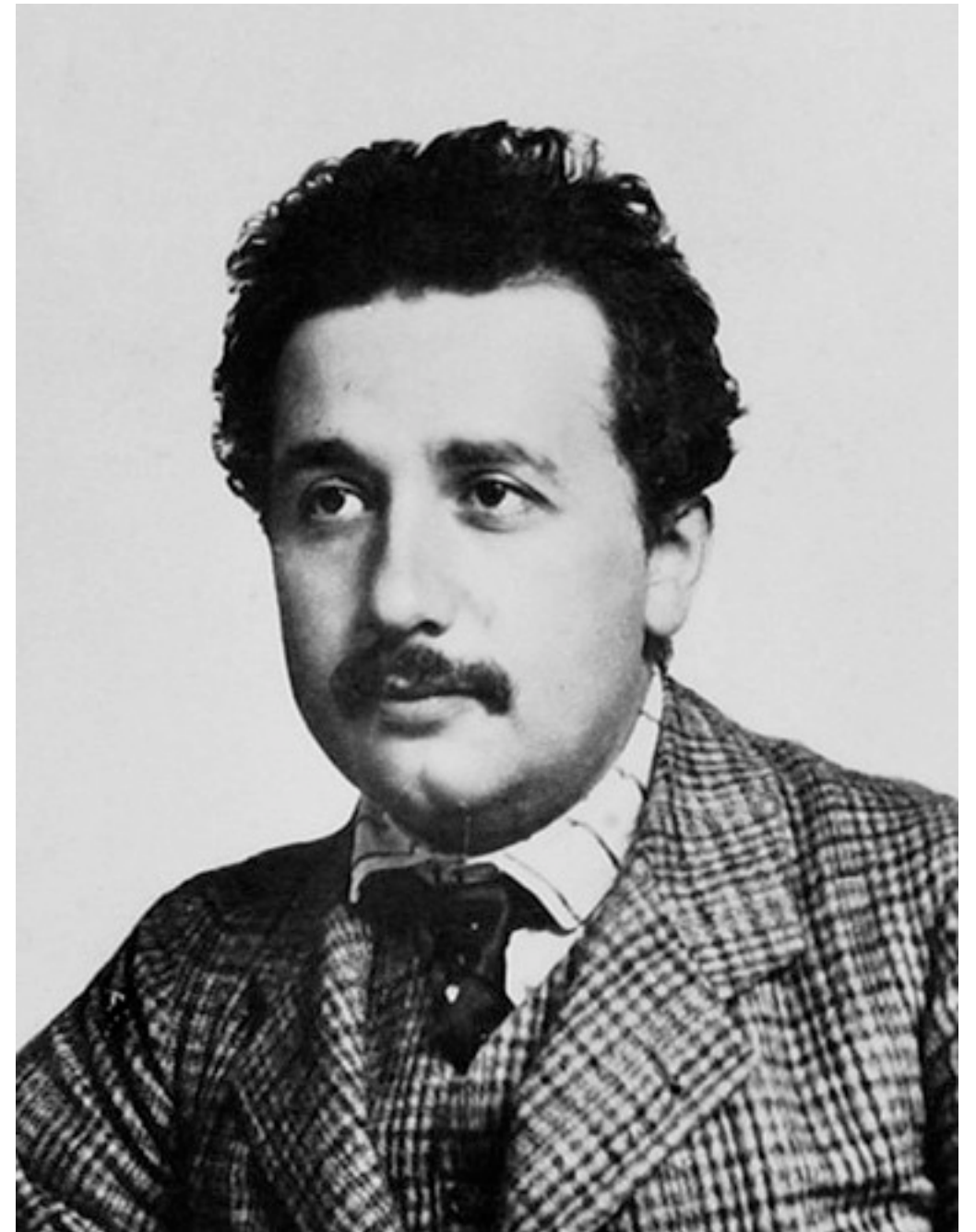
La rivoluzione di Einstein

- L'universo è statico (come lo pensava Newton) ?
- La relatività generale implica che l'universo **non** può esserlo.



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 Λ**) per renderlo statico.



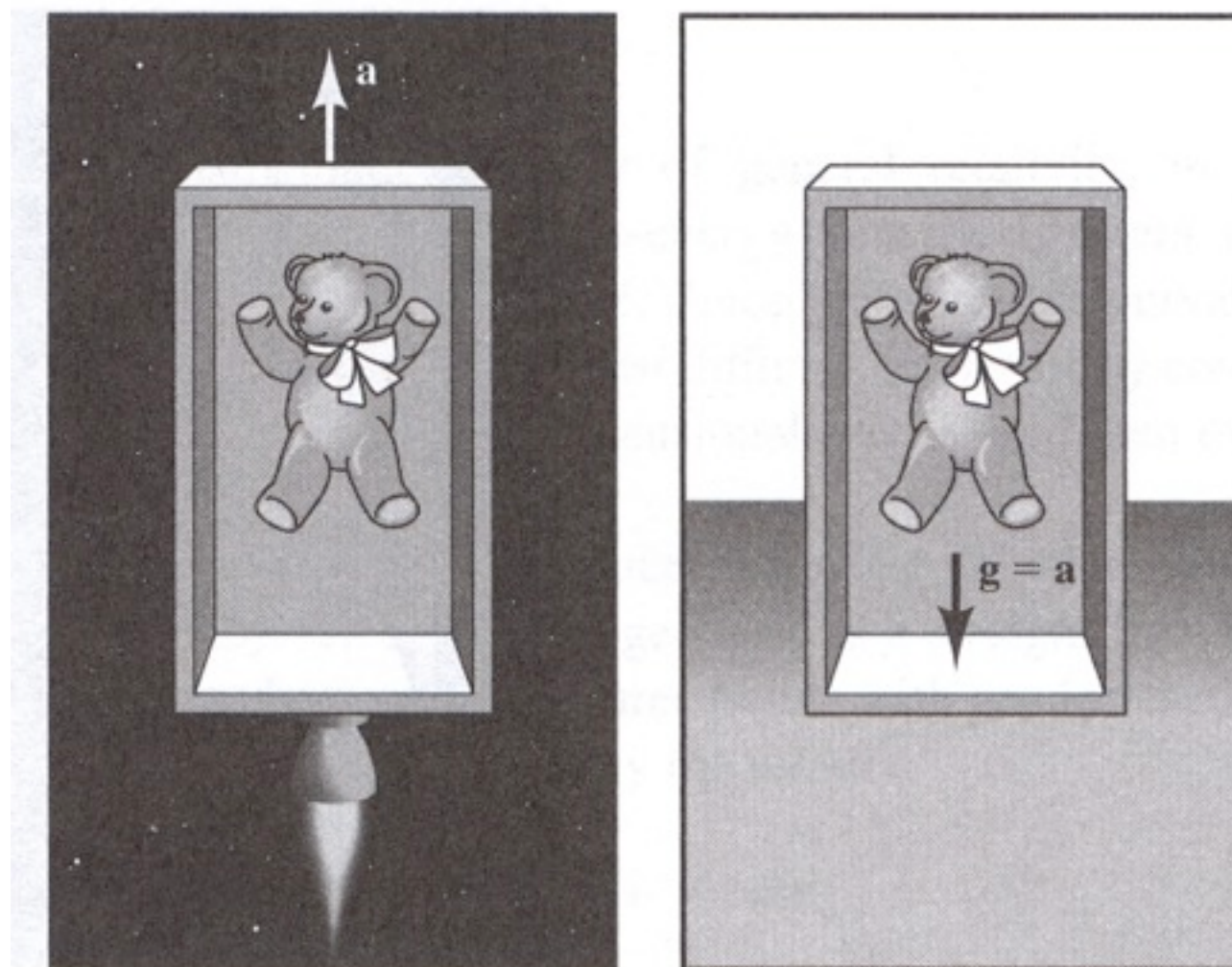
Il principio di equivalenza

Il principio di equivalenza

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

Il principio di equivalenza

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



Il principio di equivalenza

Il principio di equivalenza

- Massa **gravitazionale**: $F = -GM_g m_g / r^2$

Il principio di equivalenza

- Massa **gravitazionale**: $F = -GM_g m_g / r^2$
- Massa **inerziale**: $F = m_i a$

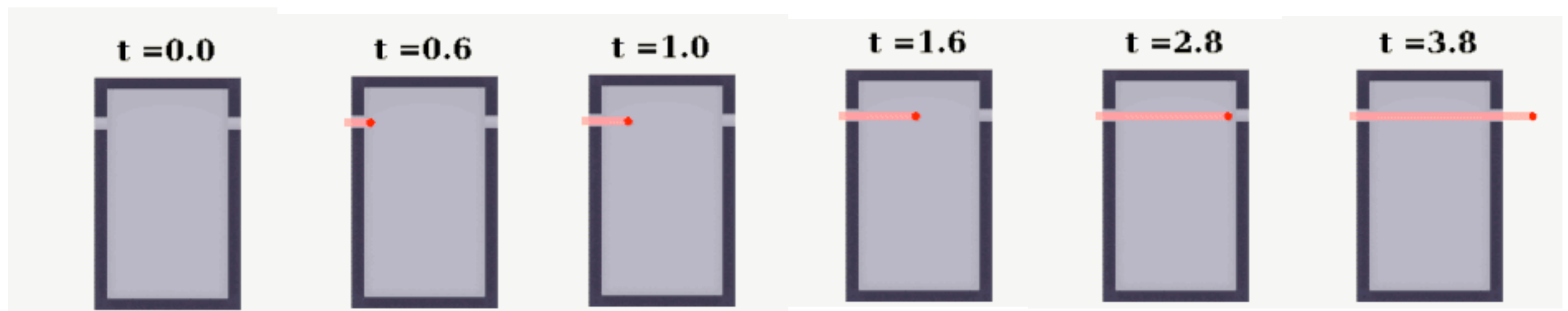
Il principio di equivalenza

- 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.

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.

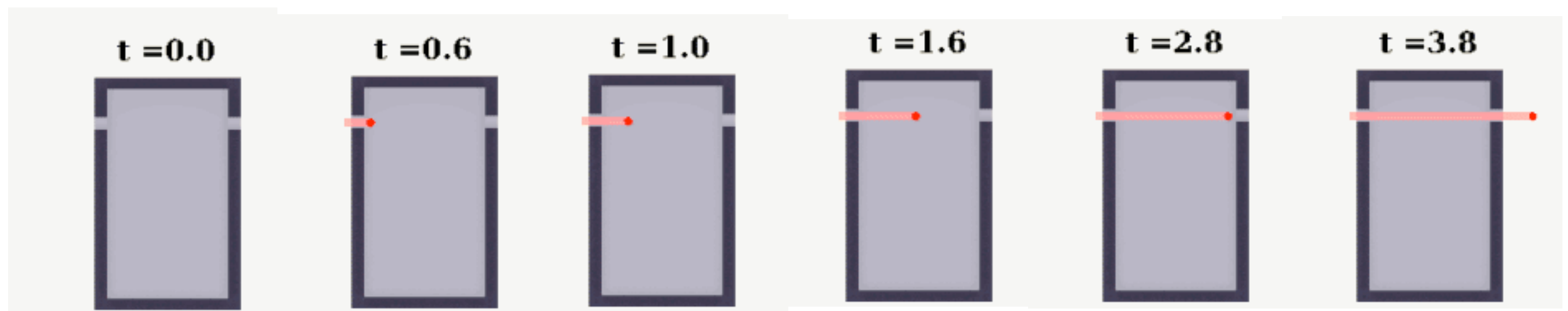
Dall'interno di un ascensore in caduta libera



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



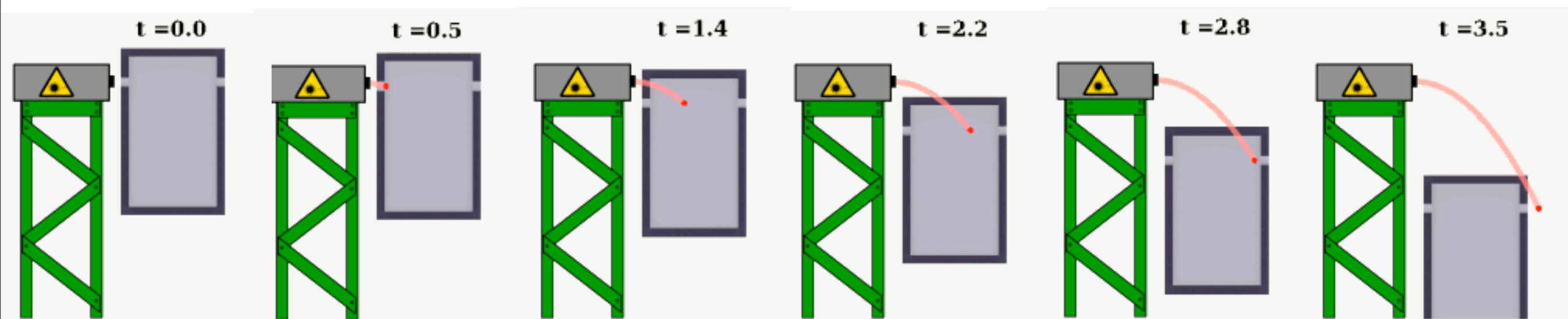
assenza di forze $\equiv$ caduta libera $\Rightarrow v_{luce} = \text{cost.}$

Il principio di equivalenza

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



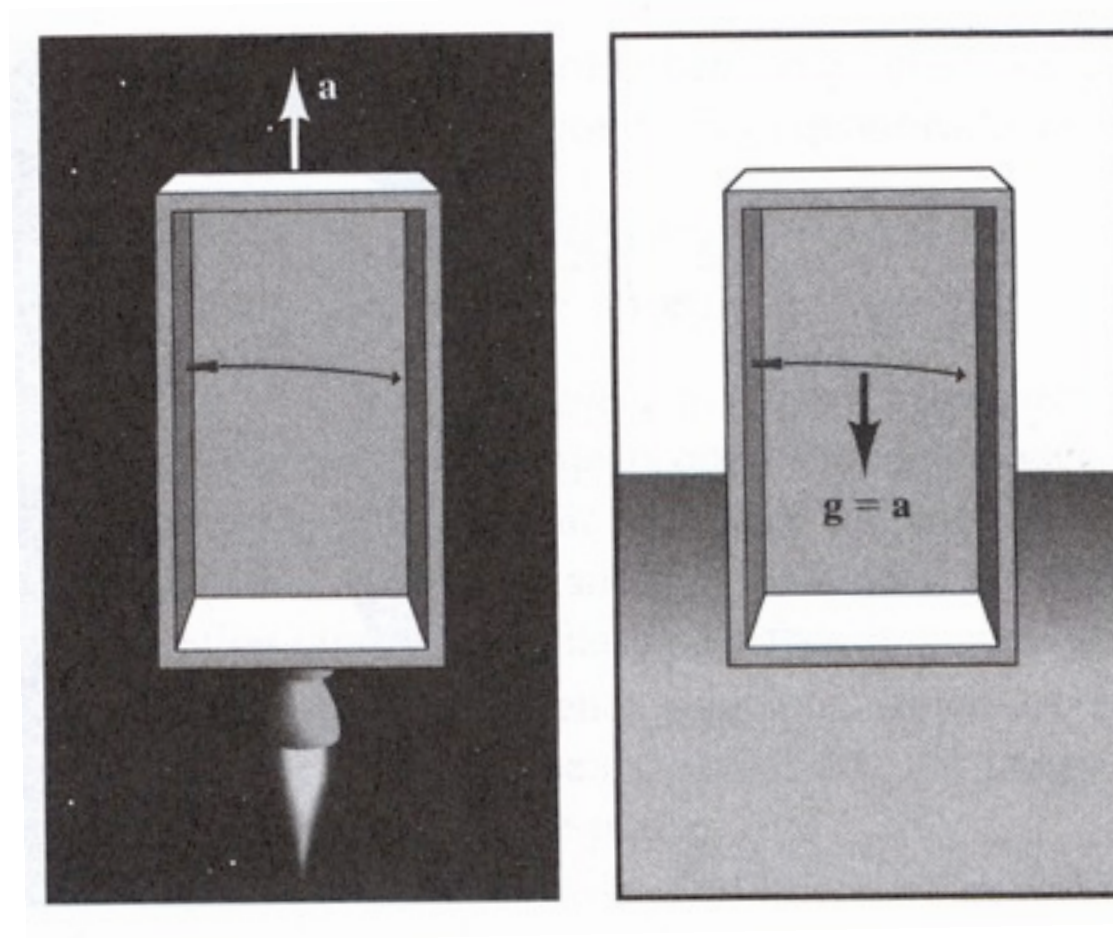
Il principio di equivalenza

Il principio di equivalenza

- Visione globale: senza l'ascensore $\Rightarrow$ **La luce è deviata dal campo gravitazionale**

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.

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

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.

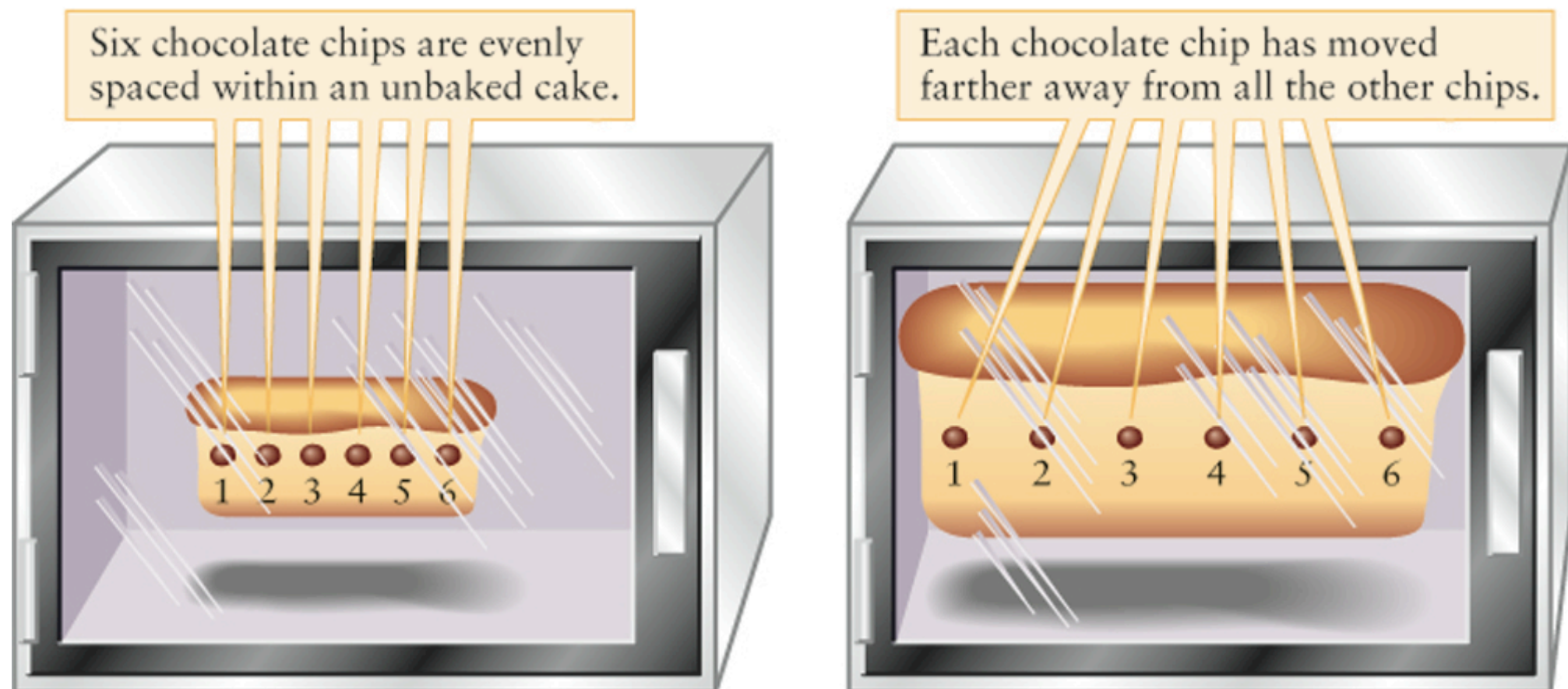
L'espansione dell'universo

L'espansione dell'universo

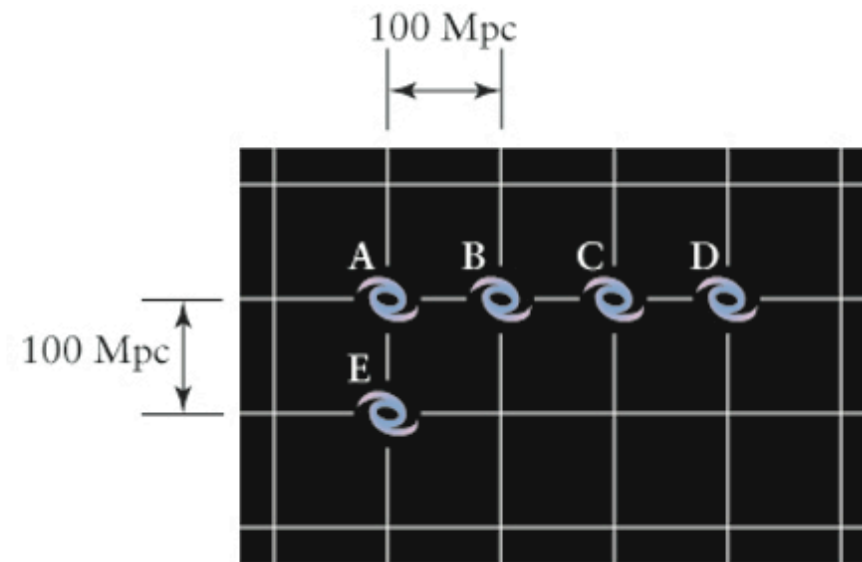
- Legge di Hubble: $v = H_0 d$

L'espansione dell'universo

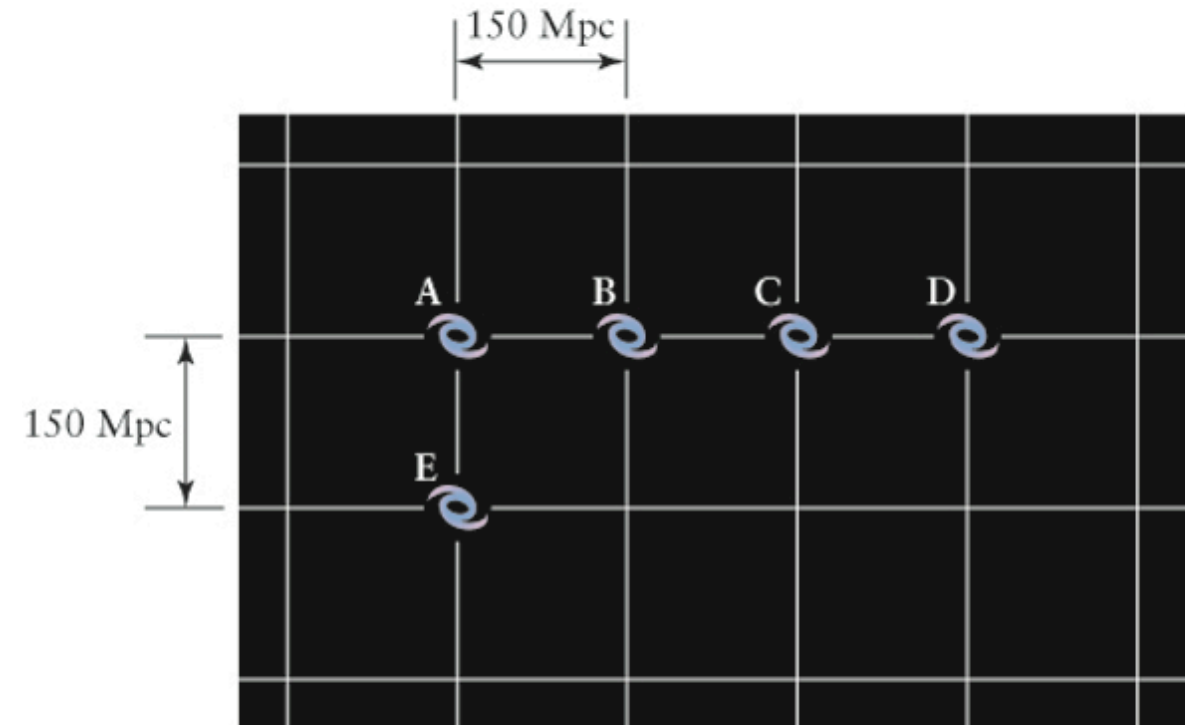
- Legge di Hubble: $v = H_0 d$
- Lo spazio-tempo non è rigido ma si espande.



L'espansione dell'universo



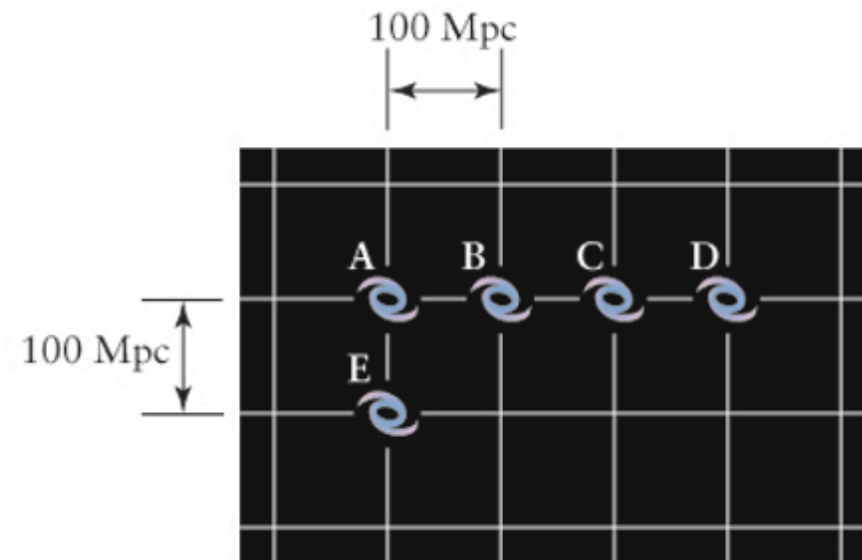
(a) Five galaxies spaced 100 Mpc apart



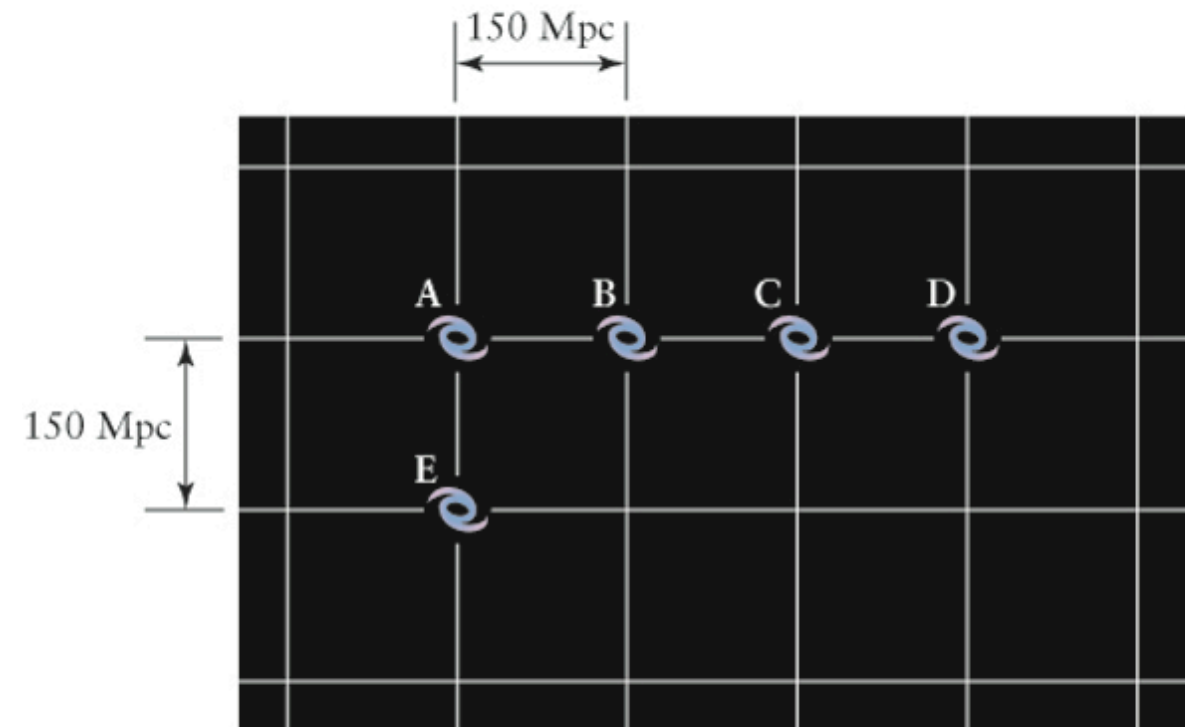
(b) The expansion of the universe spreads the galaxies apart

L'espansione dell'universo

- Legge di Hubble: $v = H_0 d$



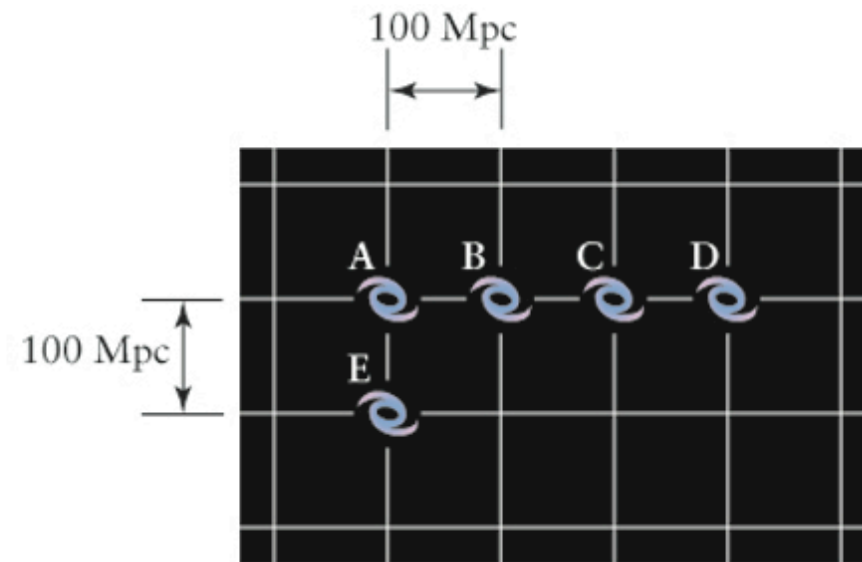
(a) Five galaxies spaced 100 Mpc apart



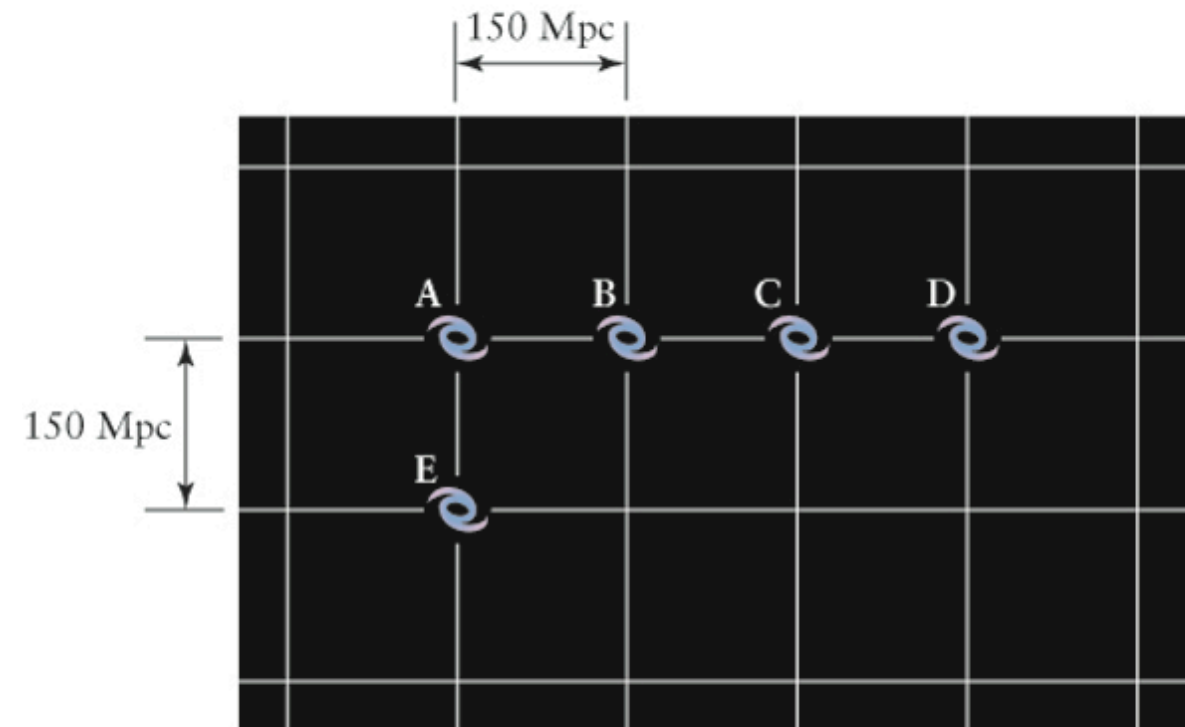
(b) The expansion of the universe spreads the galaxies apart

L'espansione dell'universo

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

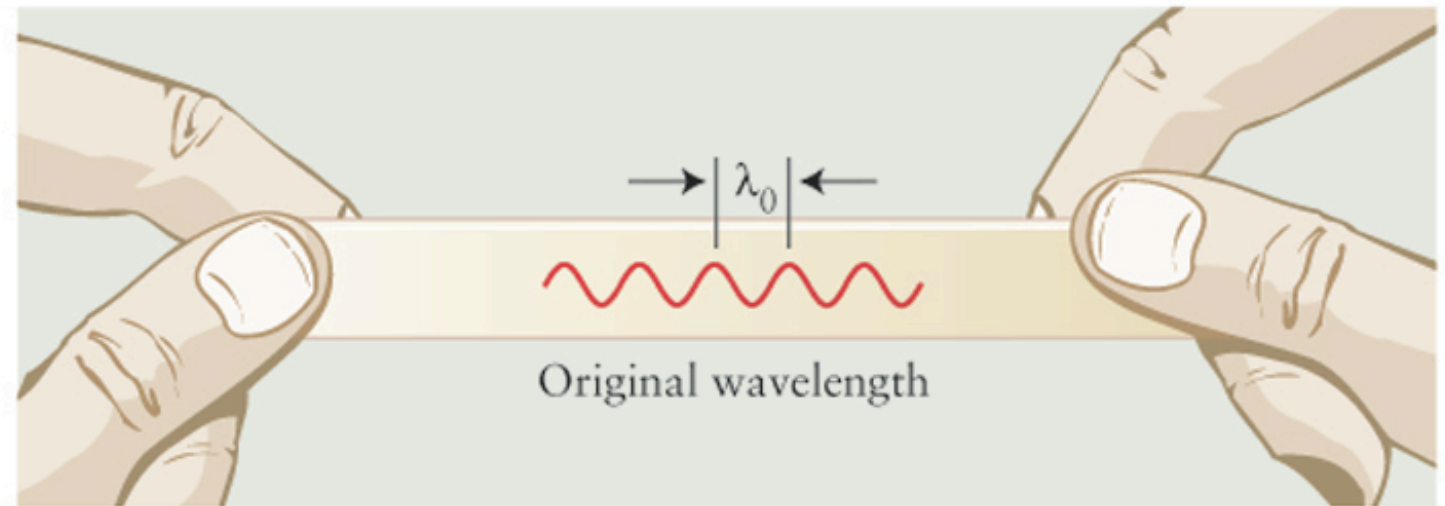


(a) Five galaxies spaced 100 Mpc apart

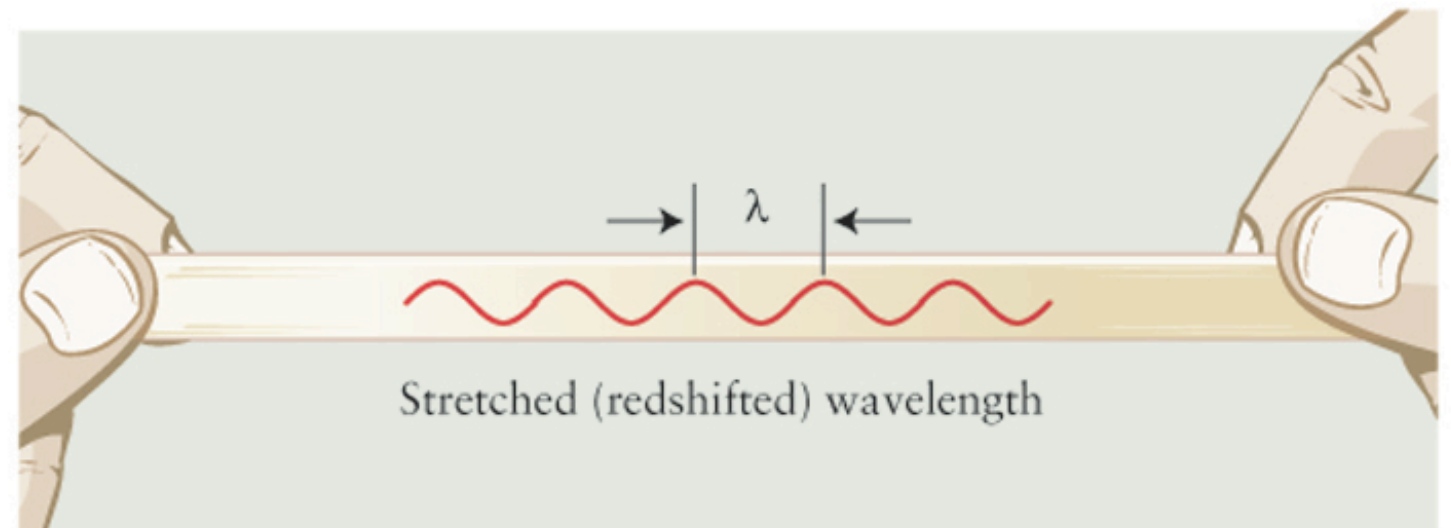


(b) The expansion of the universe spreads the galaxies apart

Il redshift dovuto all'espansione



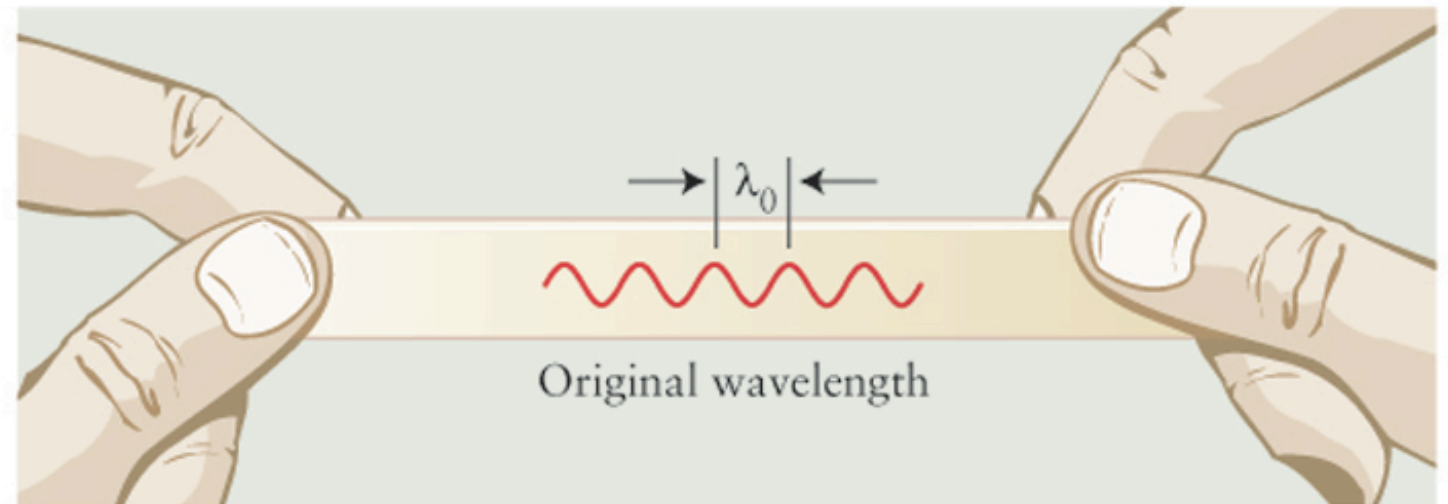
(a) A wave drawn on a rubber band ...



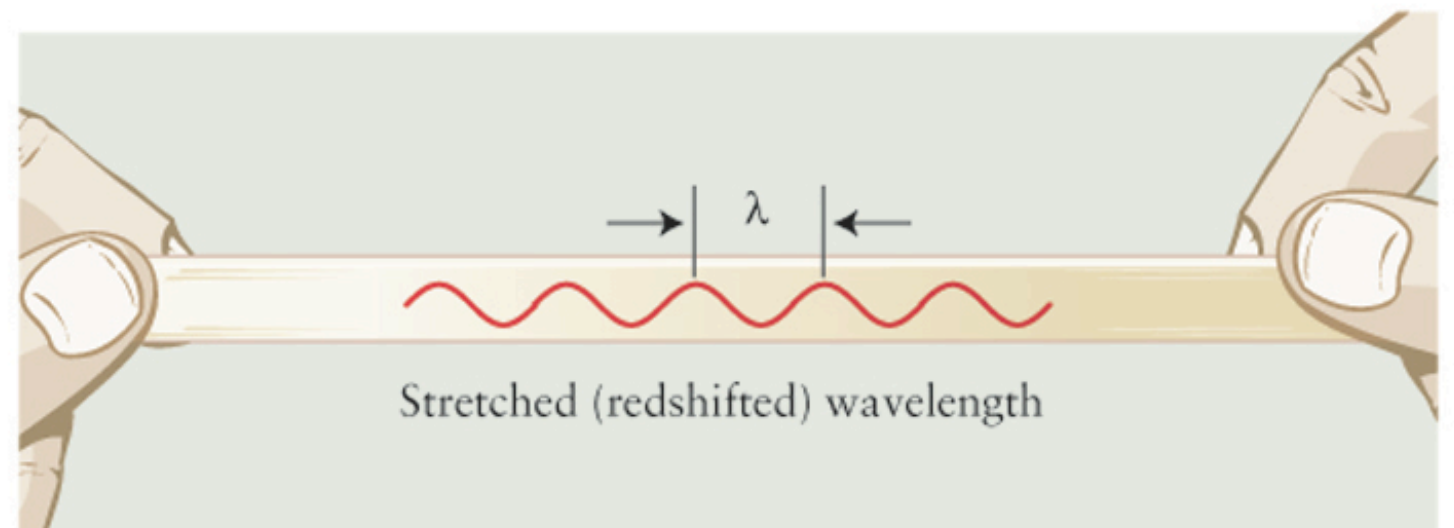
(b) ... increases in wavelength as the rubber band is stretched.

Il redshift dovuto all'espansione

- Più lungo è il viaggio (galassie distanti), maggiore è il redshift



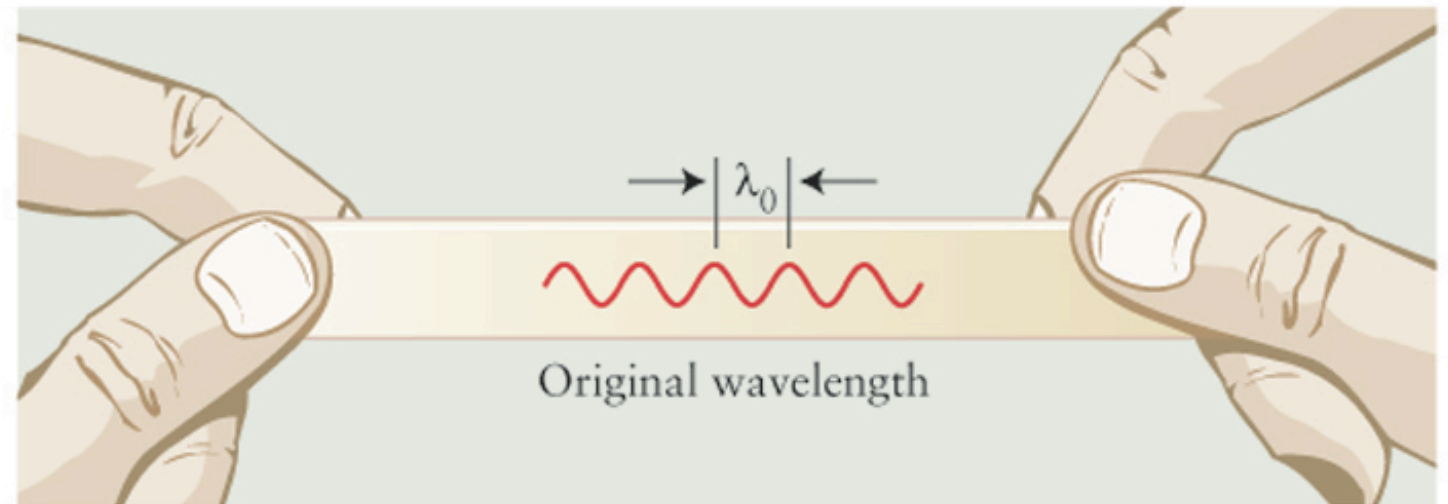
(a) A wave drawn on a rubber band ...



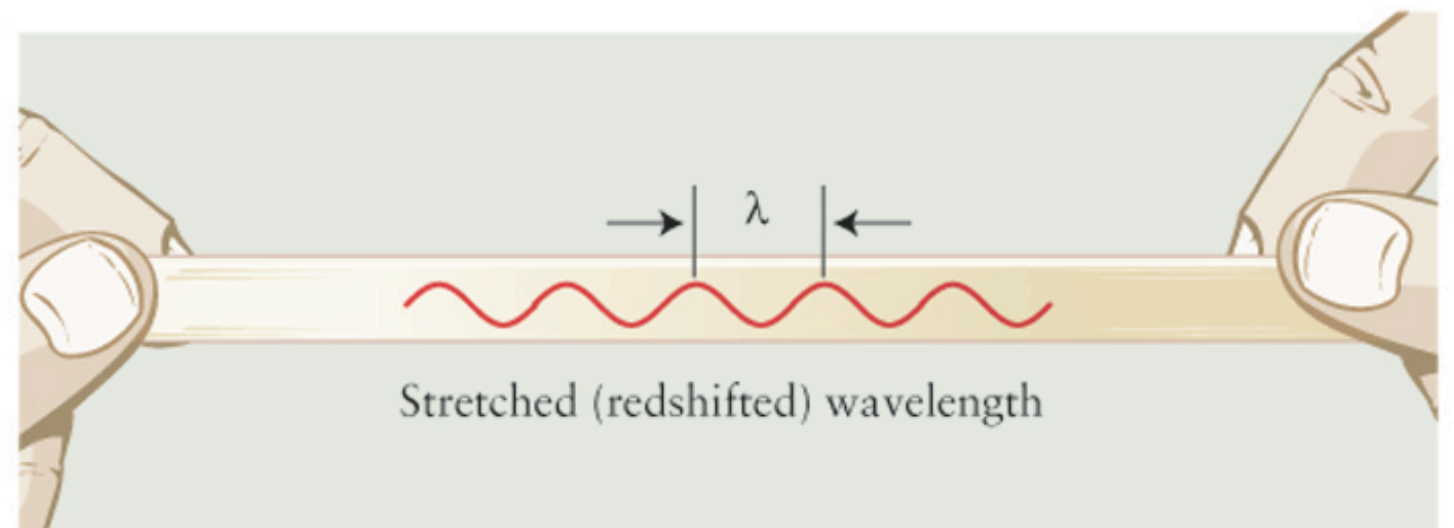
(b) ... increases in wavelength as the rubber band is stretched.

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

Redshift e lookback time

- $z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0 \Rightarrow \lambda / \lambda_0 = 1 + z$

Redshift e lookback time

- $z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0 \Rightarrow \lambda / \lambda_0 = 1 + z$
- λ / λ_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 $4^3 = 64$.

Redshift e lookback time

- $z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0 \Rightarrow \lambda / \lambda_0 = 1 + z$
- λ / λ_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 ($d = v/H_0$).

Redshift e lookback time

- $z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0 \Rightarrow \lambda / \lambda_0 = 1 + z$
- λ / λ_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

Il principio cosmologico

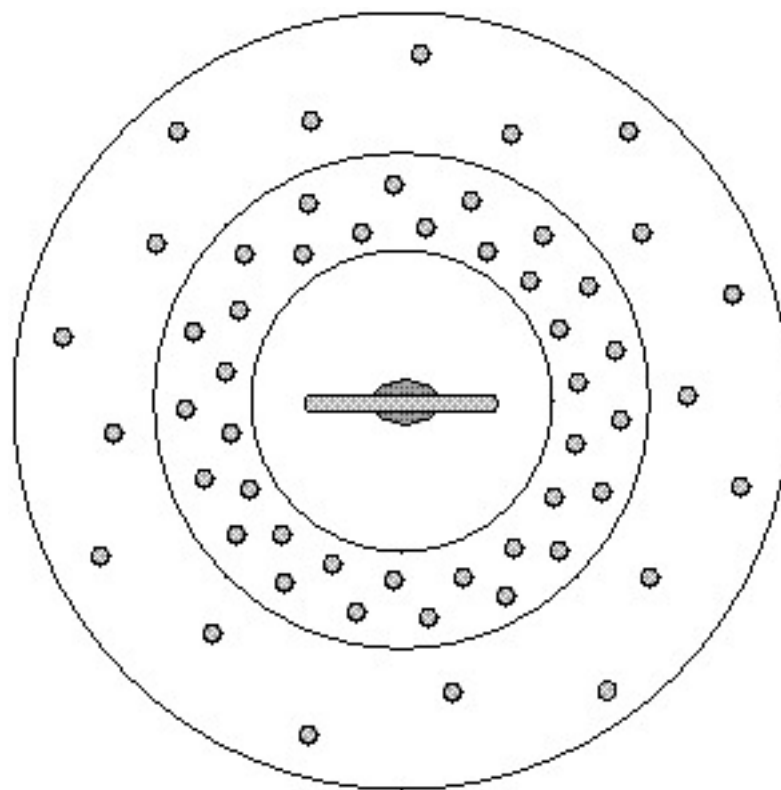
- A grande scala, l'universo è **omogeneo e isotropo**.

Il principio cosmologico

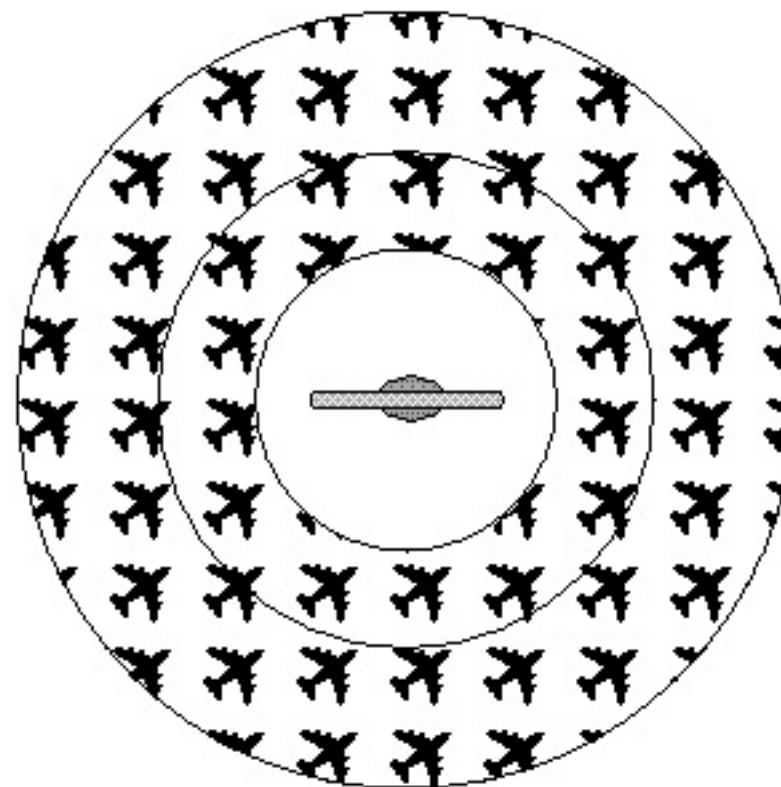
- A grande scala, l'universo è **omogeneo e isotropo**.
- omogeneo: ogni regione è la stessa delle altre (densità costante).

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.

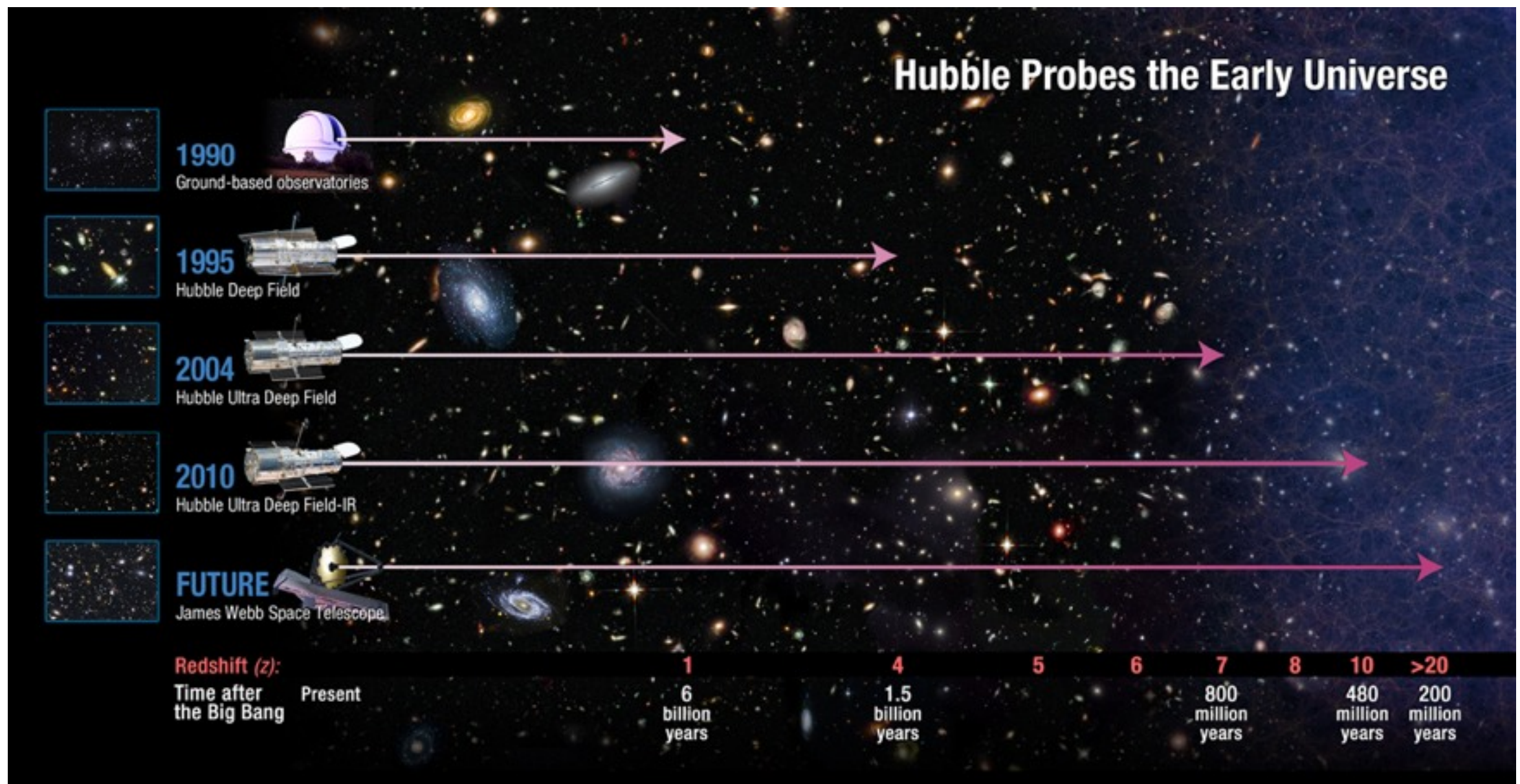


Is this *homogeneous* and *isotropic*? Which aspect is it not?



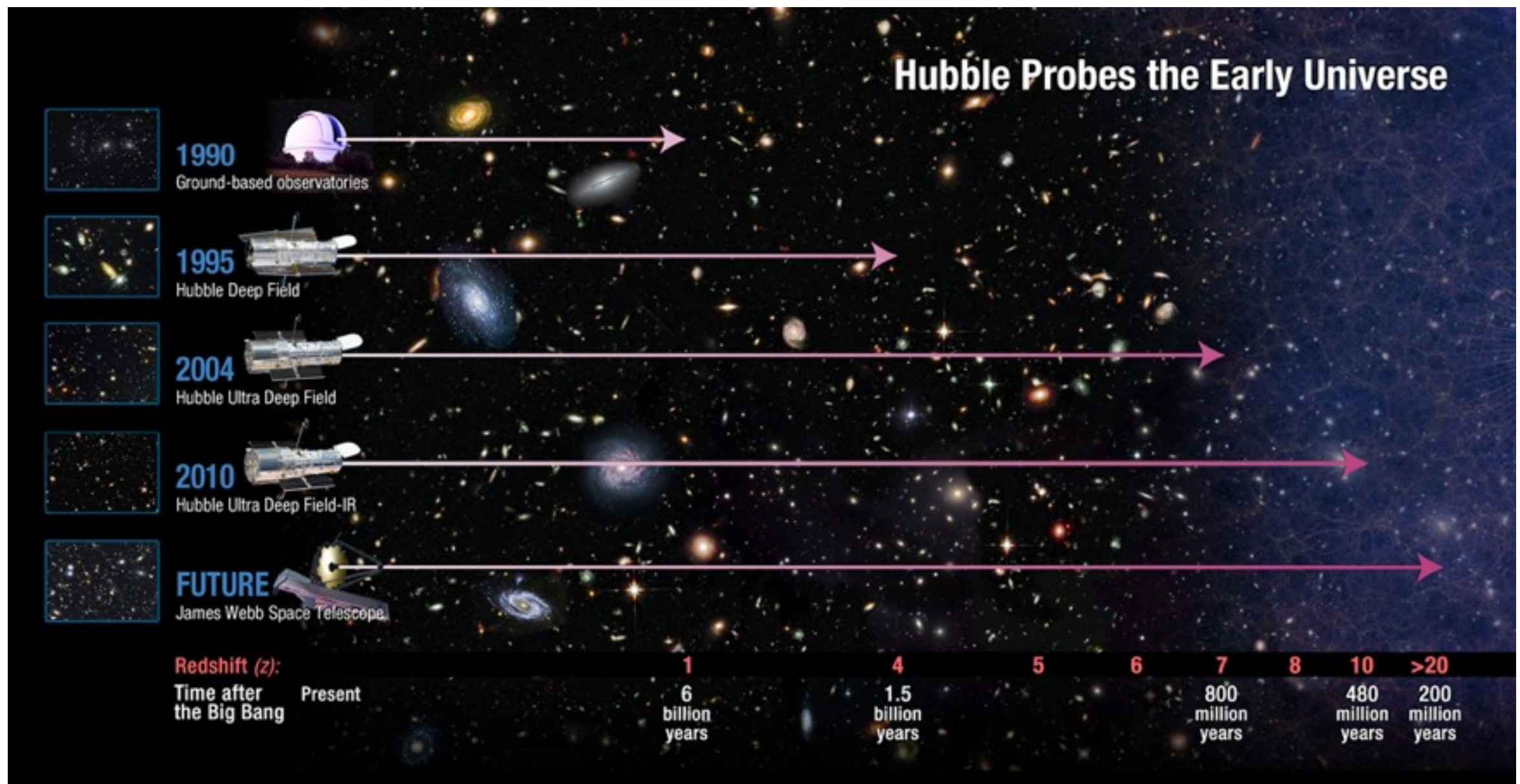
Outside the central sphere, is this universe *homogeneous* and *isotropic*? Which aspect is it not?

II Big Bang



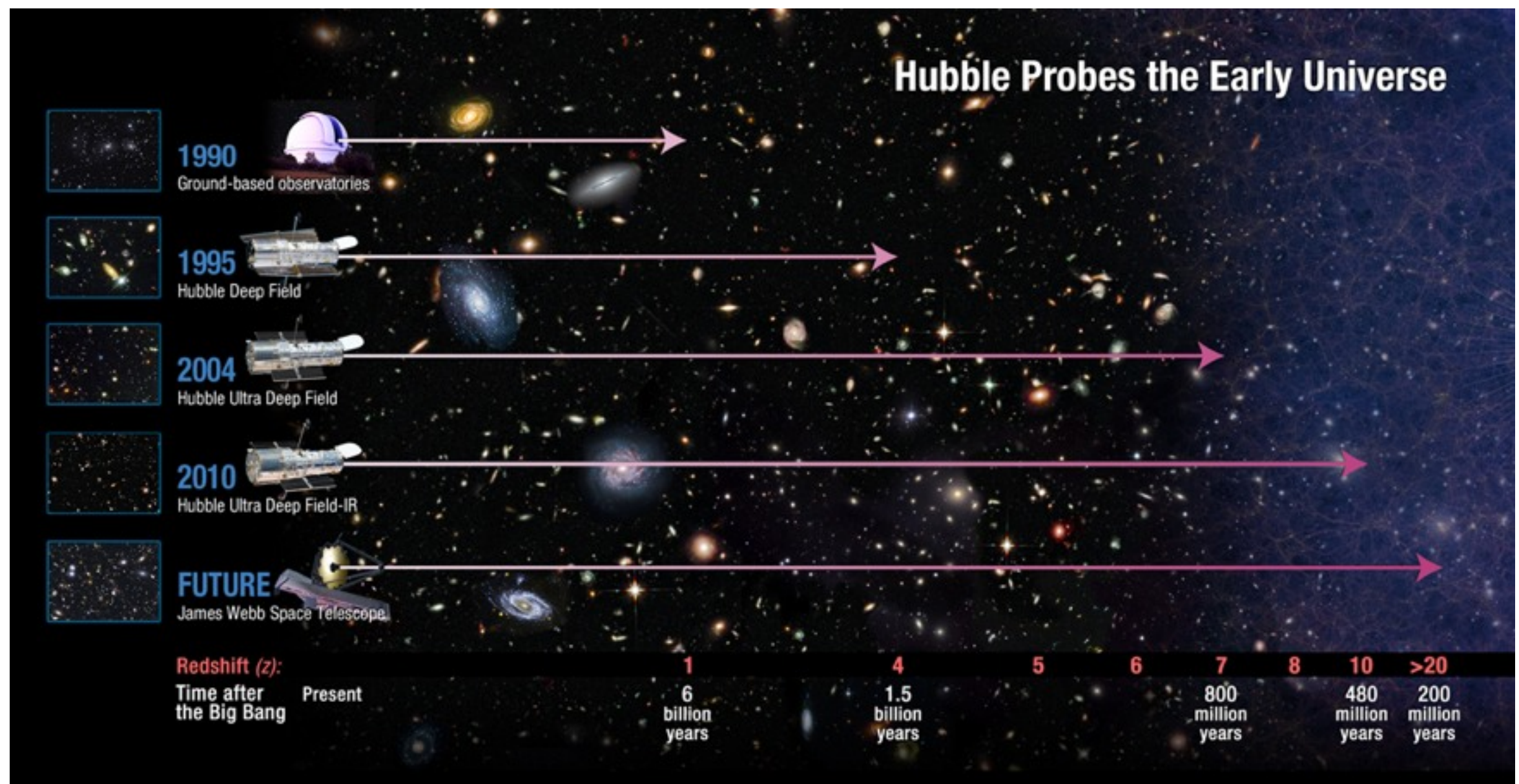
Il Big Bang

- Big Bang = inizio dell'espansione $\neq$ esplosione.



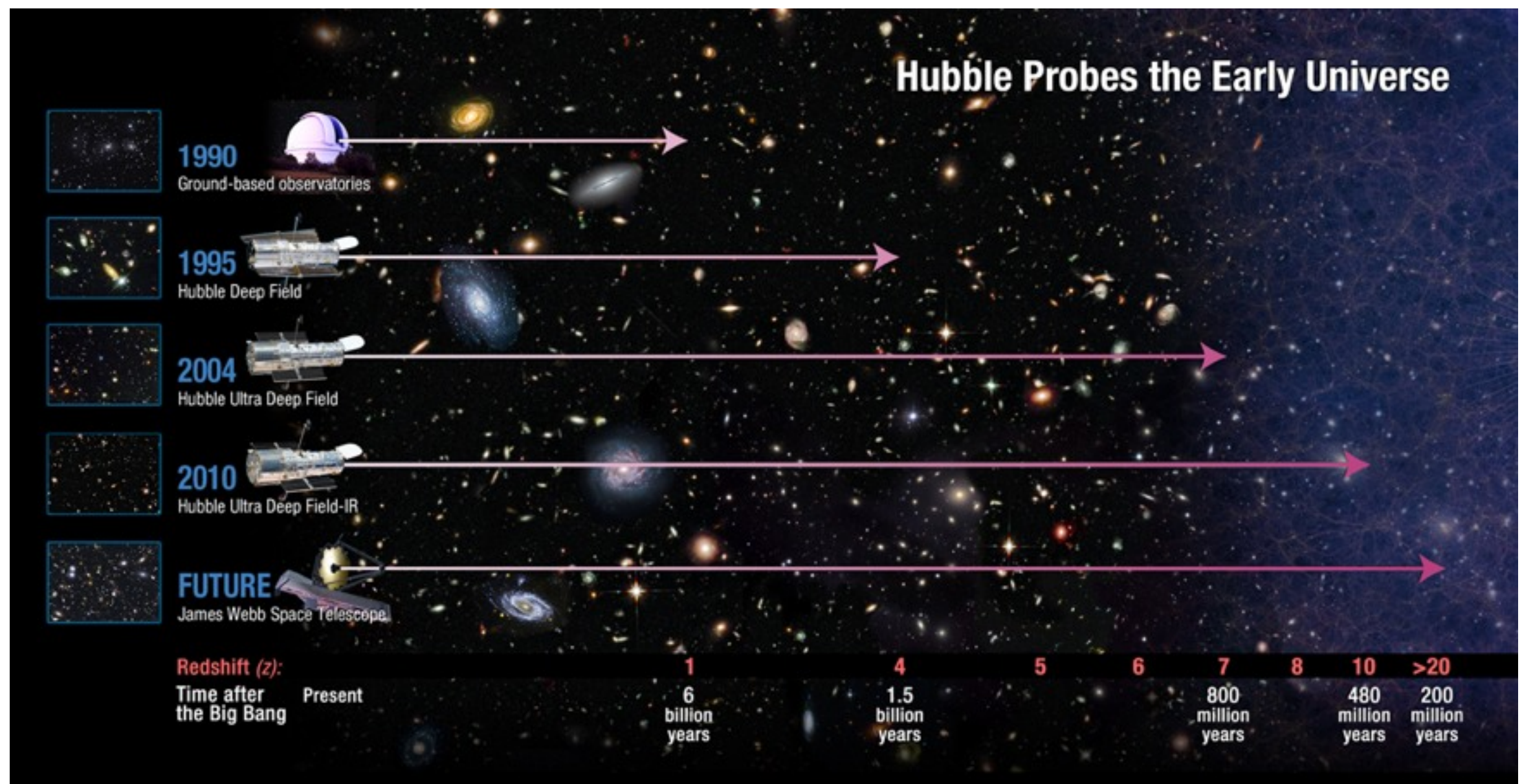
Il Big Bang

- Big Bang = inizio dell'espansione $\neq$ esplosione.
- Espansione **dello** spazio, non **nello** spazio.

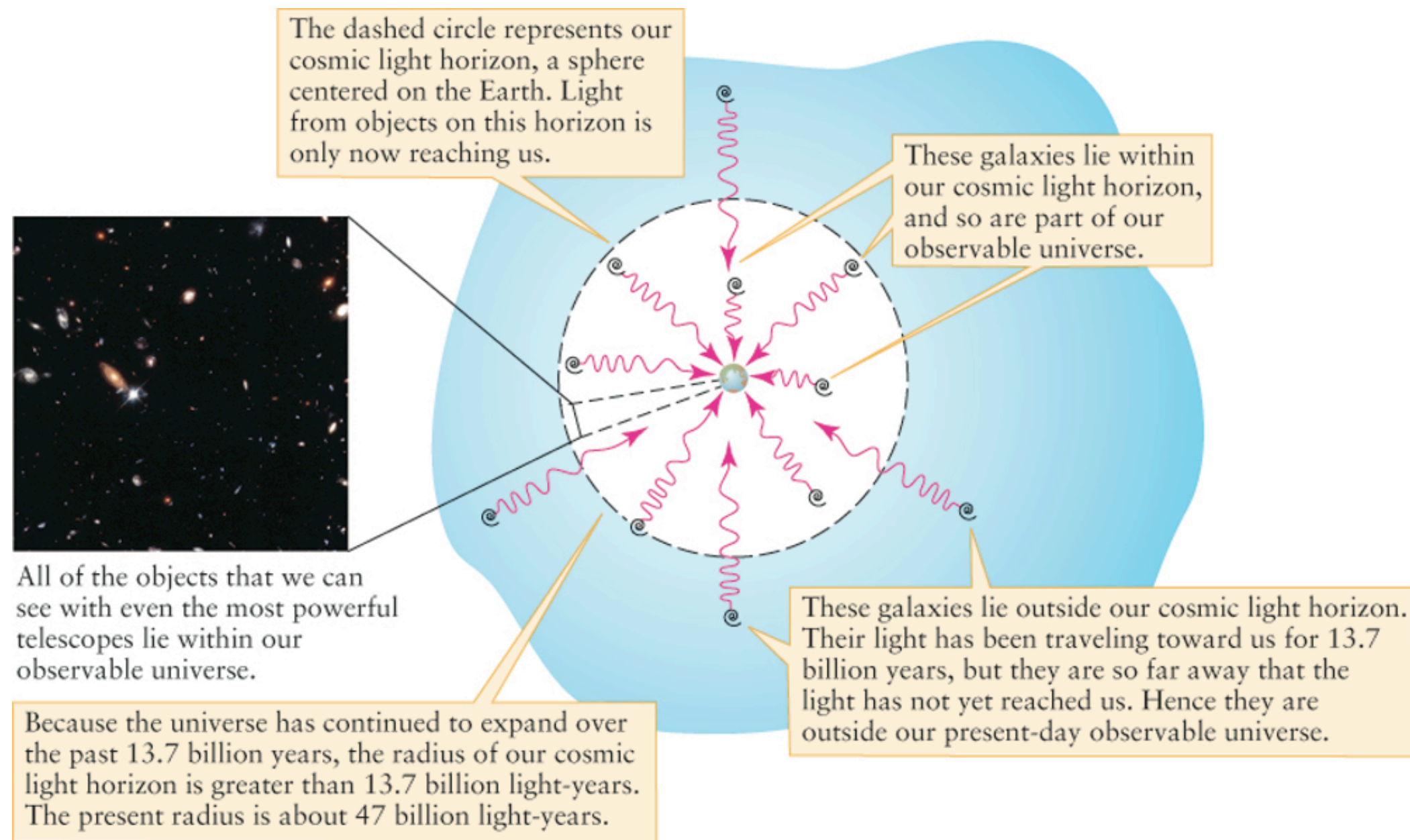


Il Big Bang

- 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

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).

La radiazione cosmica di fondo e il Big Bang caldo

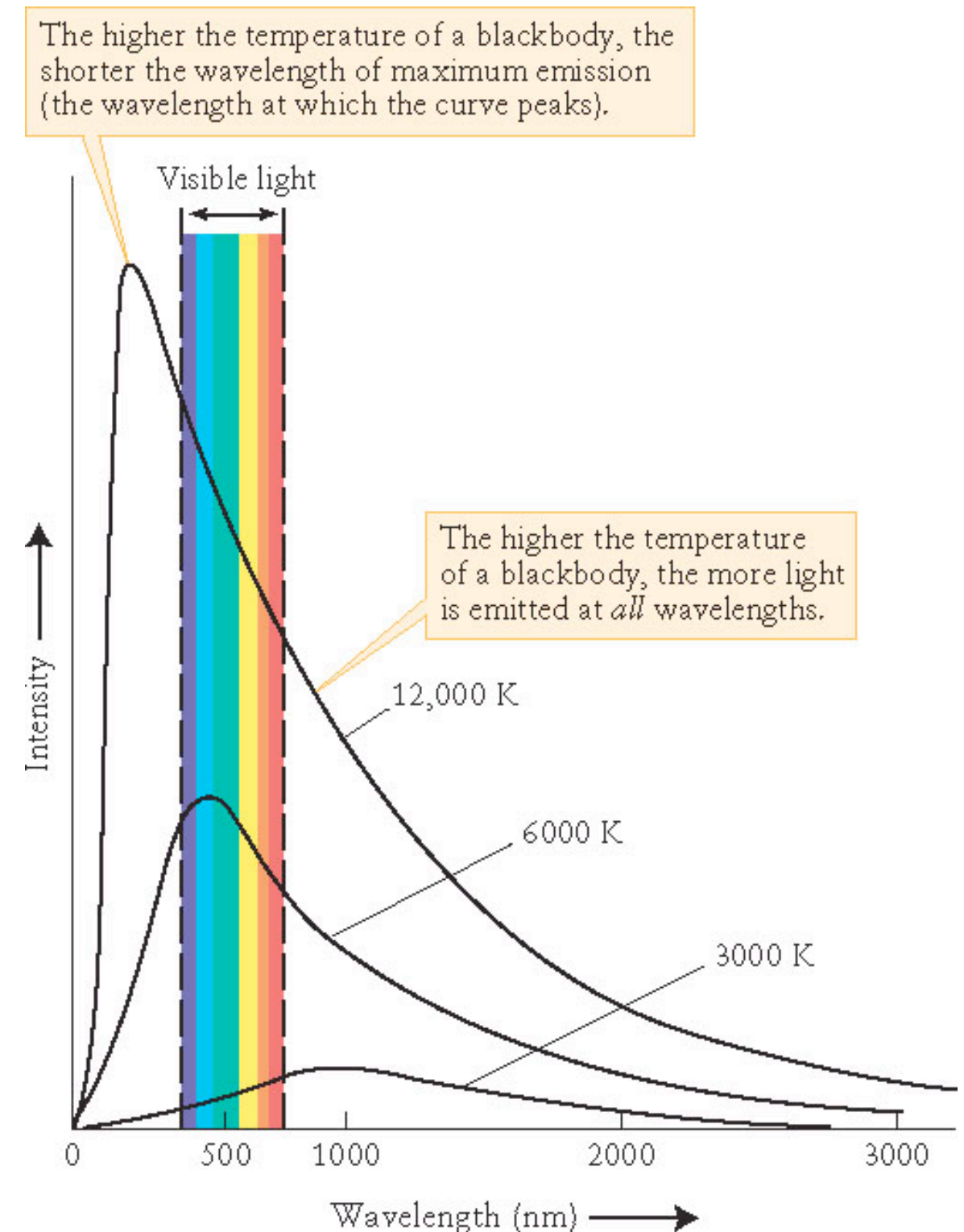
- Successo della nucleosintesi stellare. Ma c'è troppo He (se esso fosse solo creato dalla fusione di H nelle stelle).
- Soluzione: un Big Bang caldo (come il centro delle stelle)

La radiazione cosmica di fondo e il Big Bang caldo

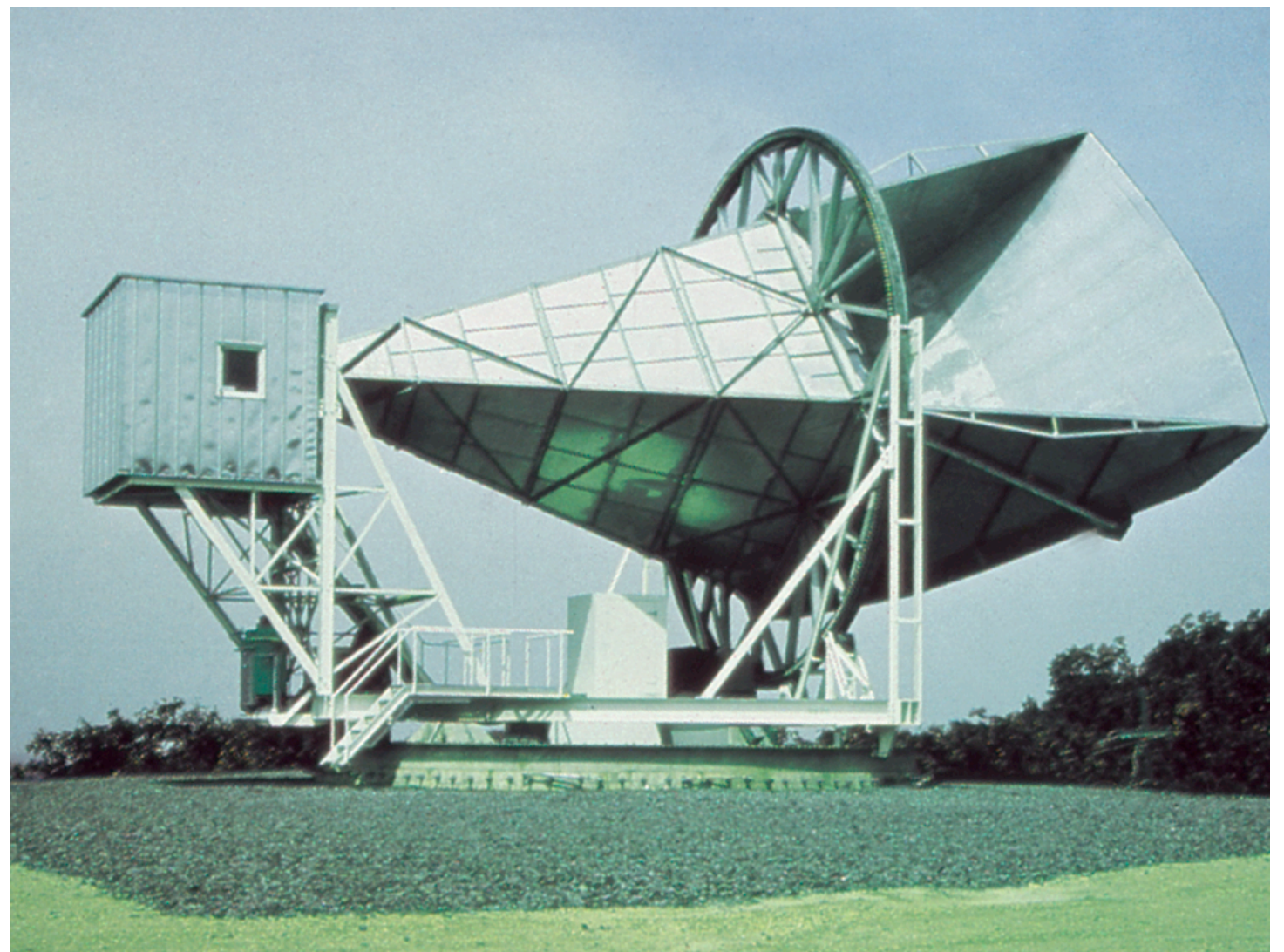
- Successo della nucleosintesi stellare. Ma c'è troppo He (se esso fosse solo creato dalla fusione di H nelle stelle).
- Soluzione: un Big Bang caldo (come il centro delle stelle)
- L'universo primordiale era riempito di fotoni ad alta energia (e piccola λ), come descritto dalla **legge di Planck** per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

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 λ), come descritto dalla **legge di Planck** per il corpo nero.

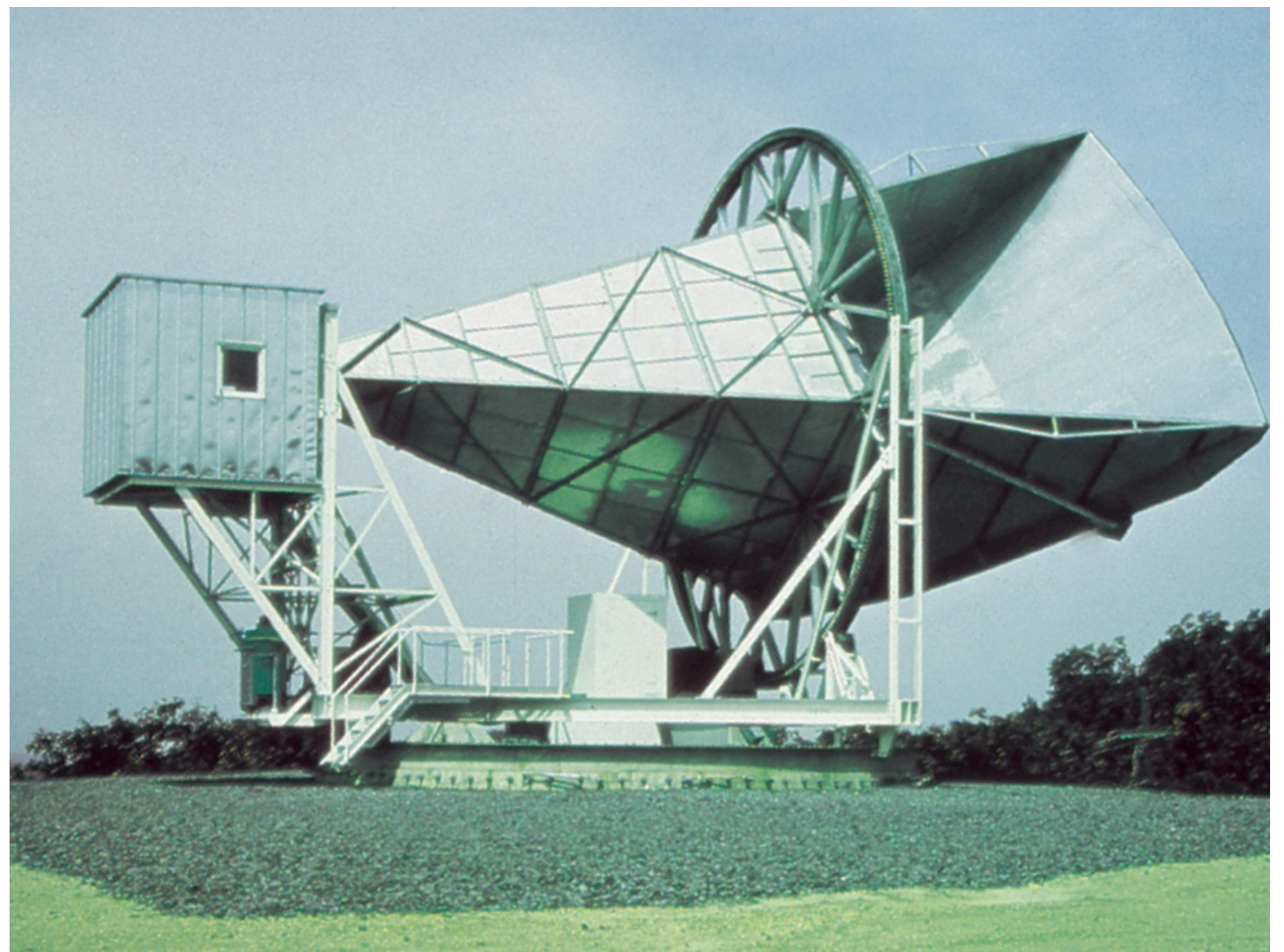


La radiazione cosmica di fondo e il Big Bang caldo



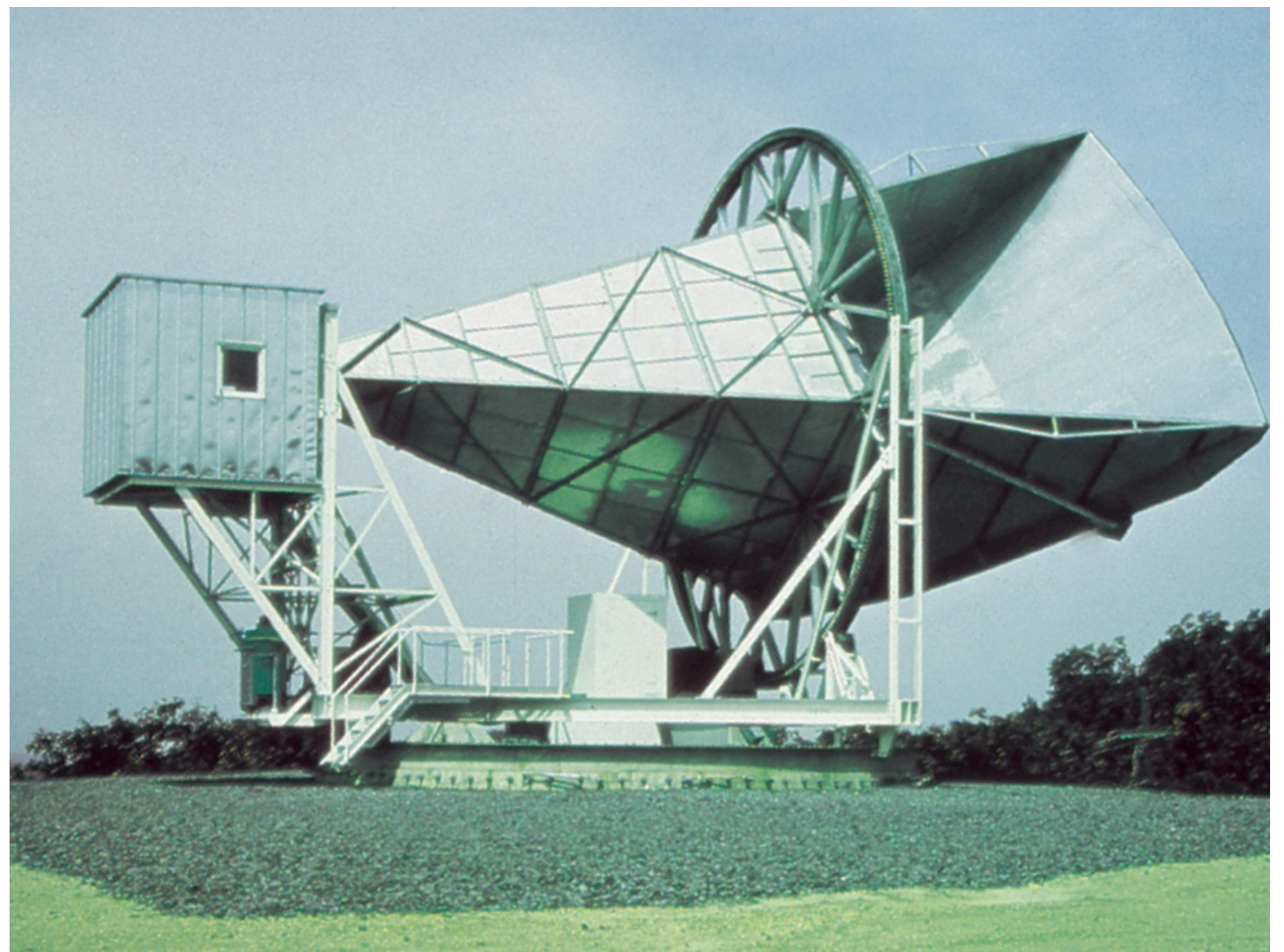
La radiazione cosmica di fondo e il Big Bang caldo

- Dopo miliardi di anni di espansione, questi fotoni hanno bassa E e grande λ .



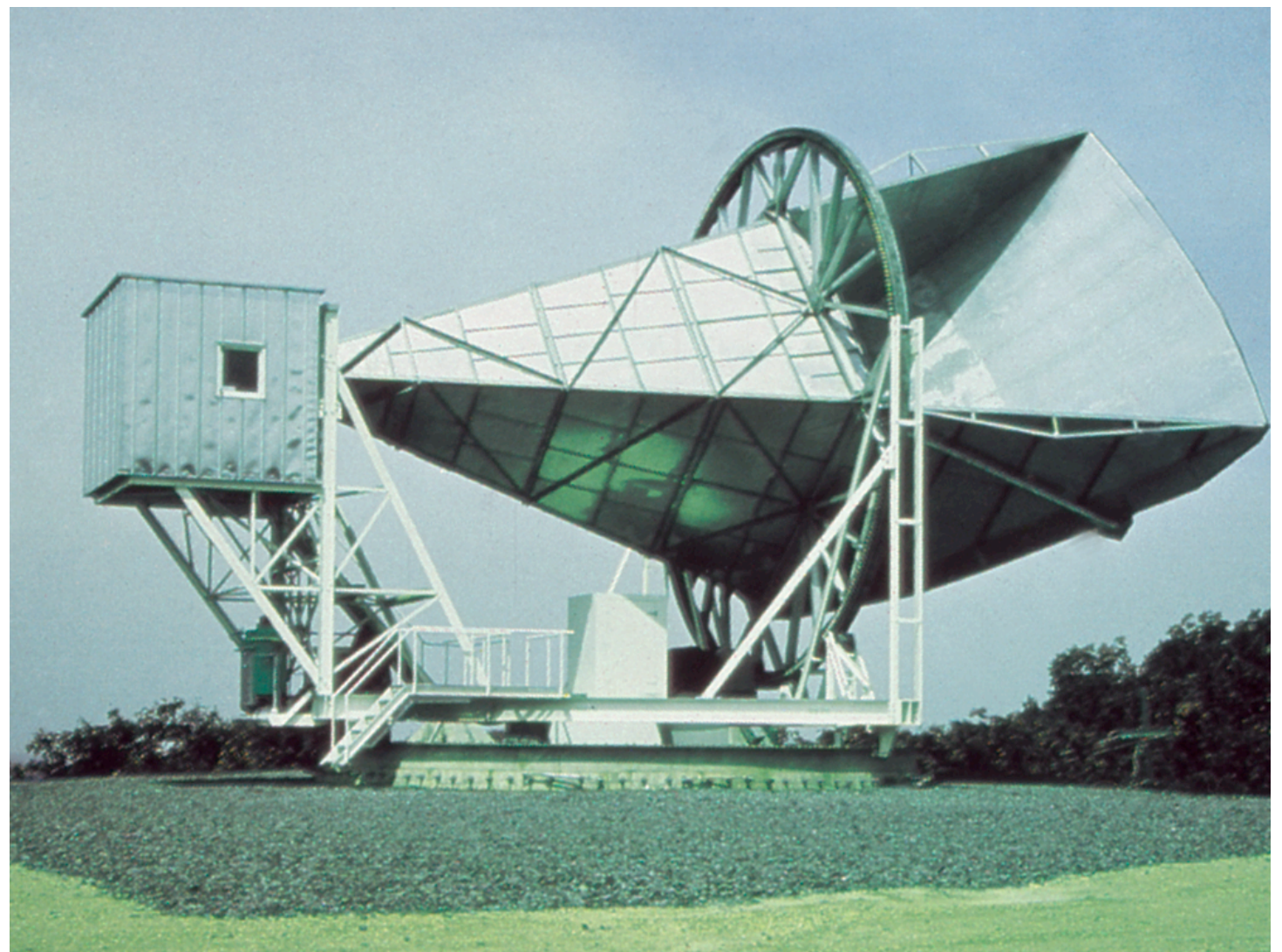
La radiazione cosmica di fondo e il Big Bang caldo

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



La radiazione cosmica di fondo e il Big Bang caldo

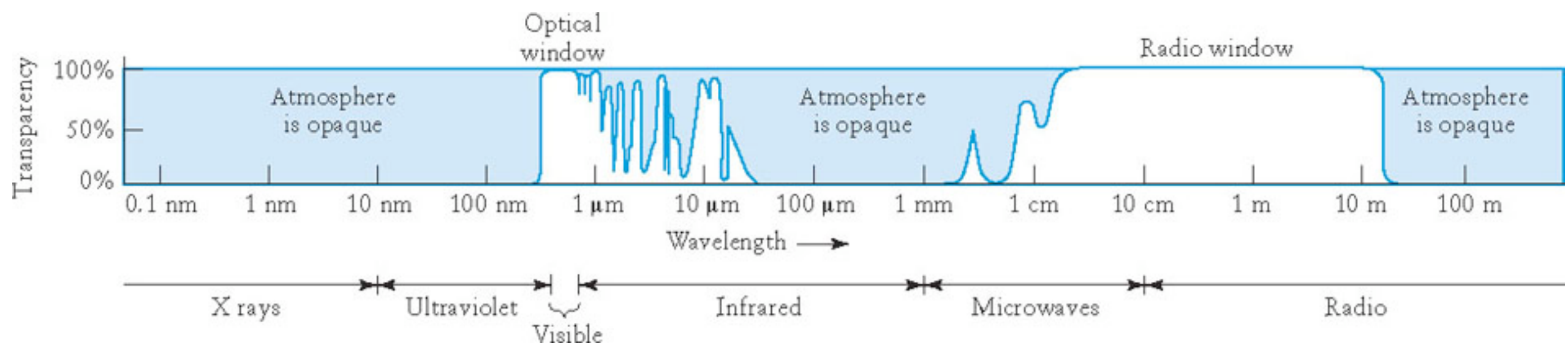
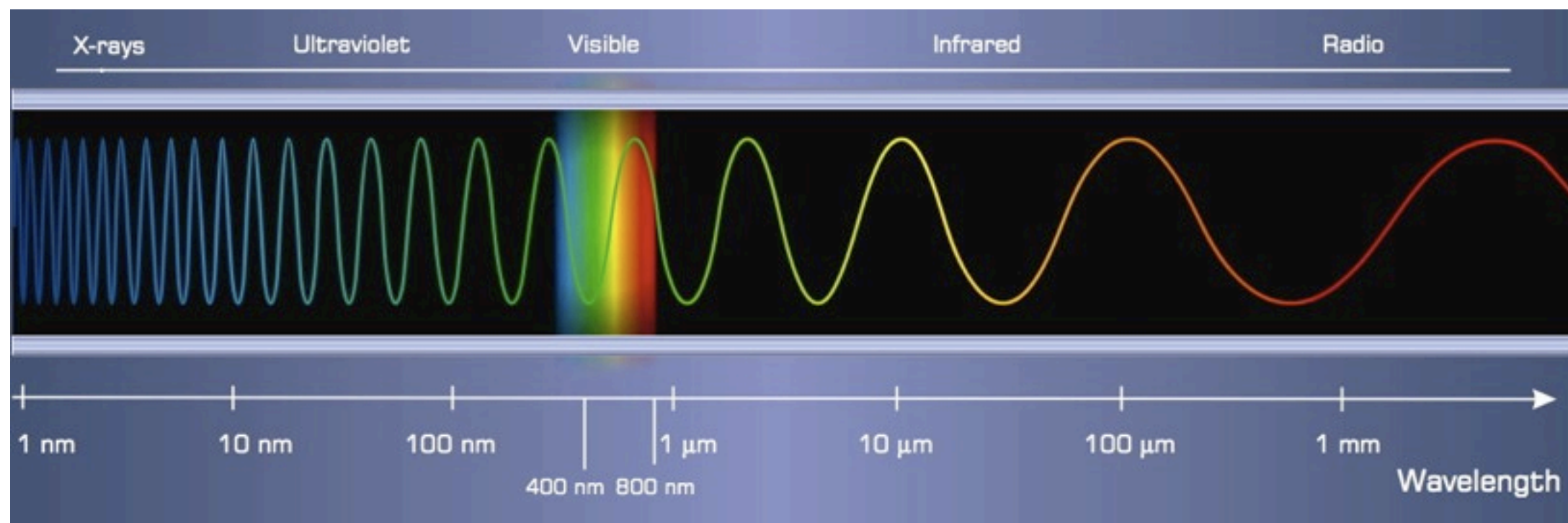
- Dopo miliardi di anni di espansione, questi fotoni hanno bassa E e grande λ .
- Picco: $\lambda = 1 \text{ mm}$
- Radiazione cosmica di fondo



La radiazione cosmica di fondo e il Big Bang caldo

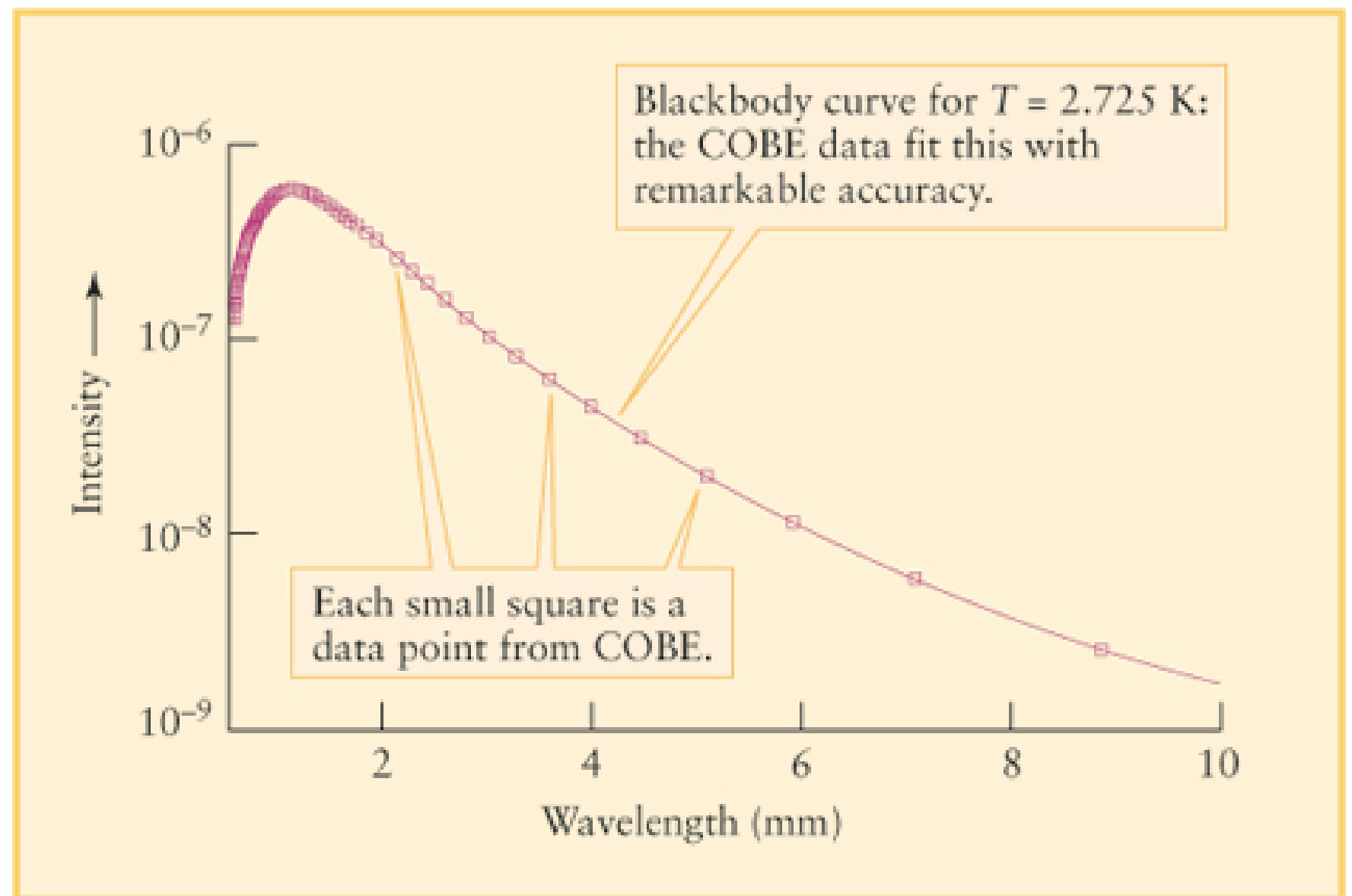
La radiazione cosmica di fondo e il Big Bang caldo

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



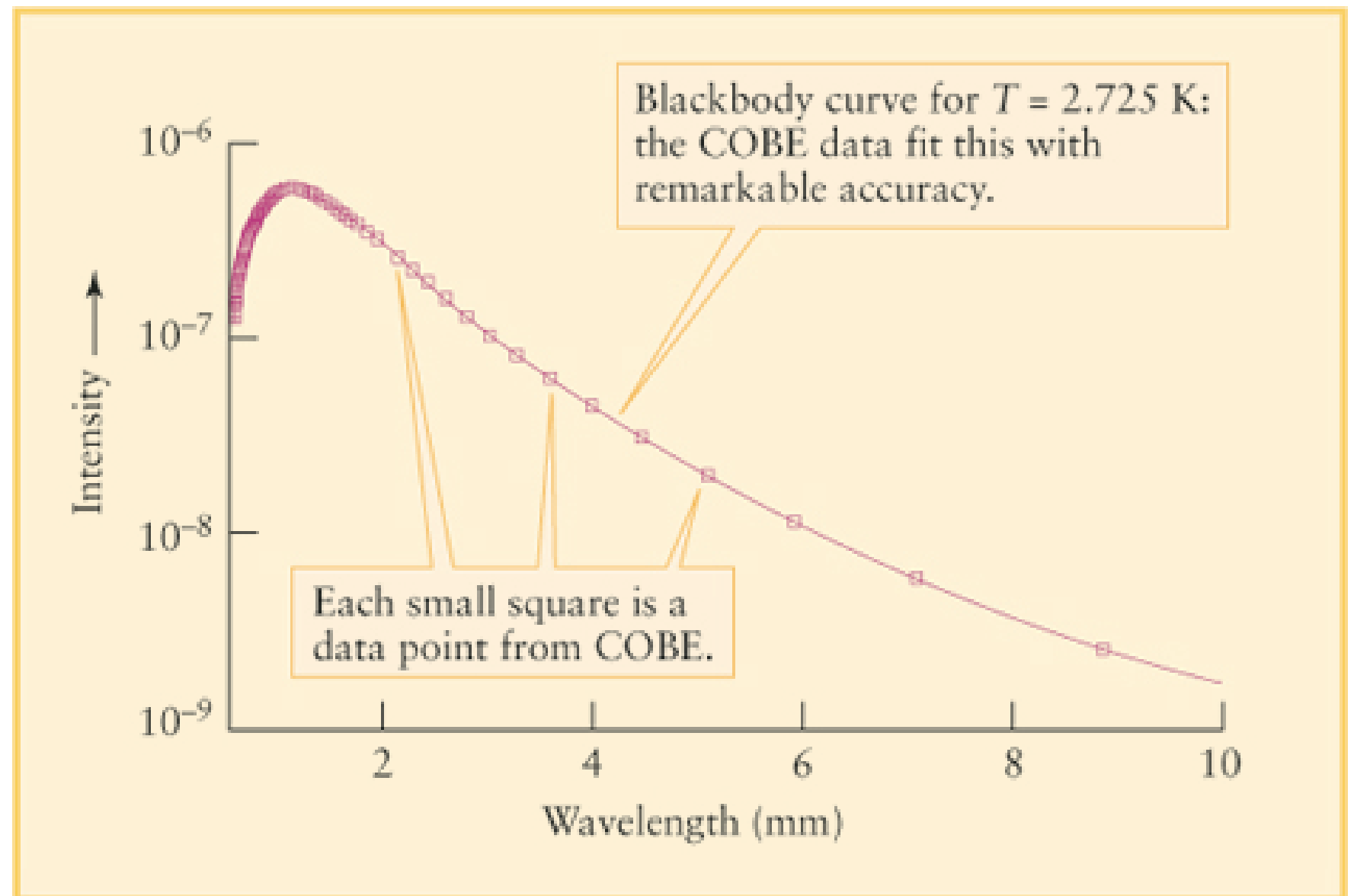
La radiazione cosmica di fondo e il Big Bang caldo

La radiazione cosmica di fondo e il Big Bang caldo



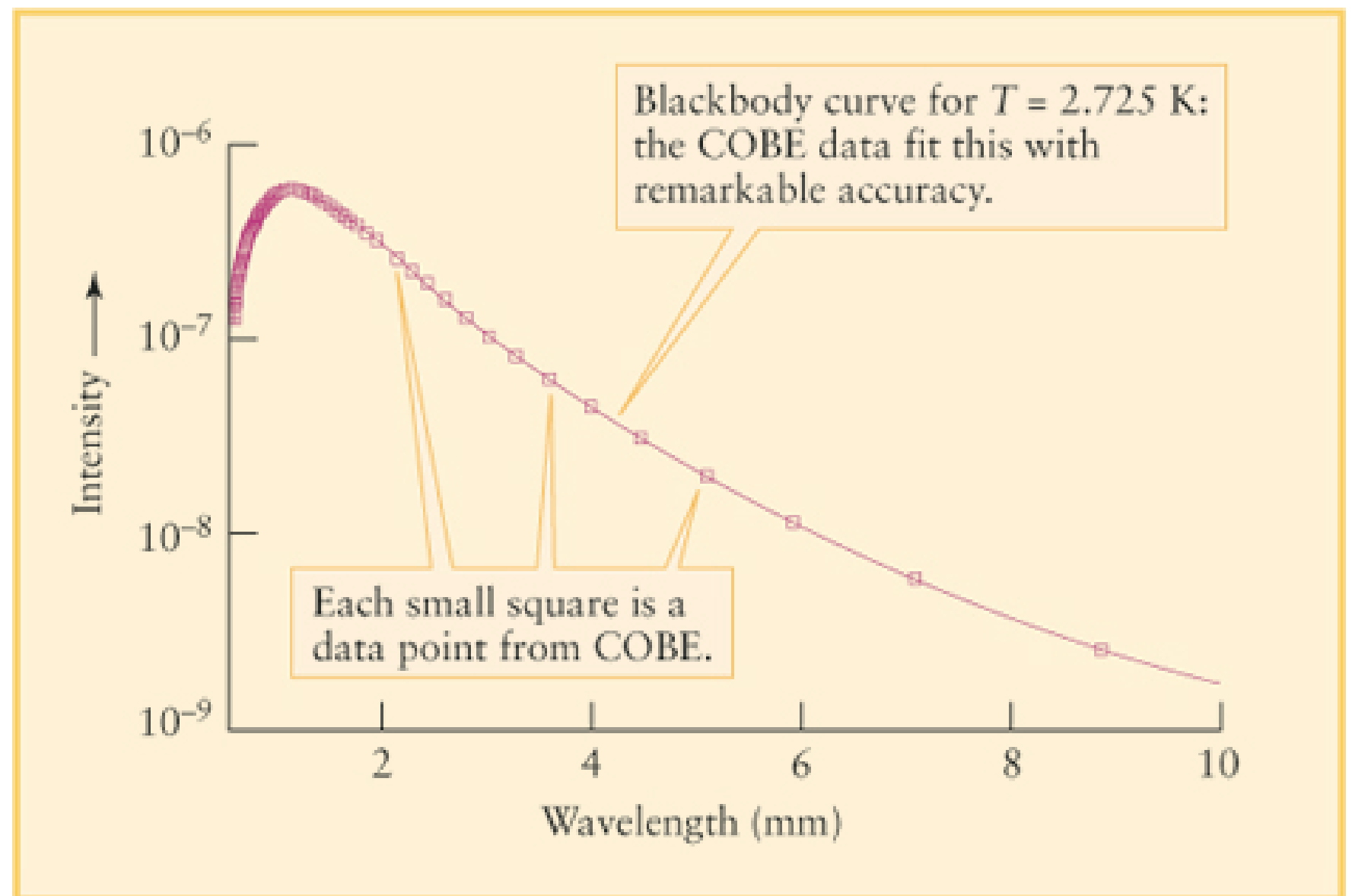
La radiazione cosmica di fondo e il Big Bang caldo

- COBE



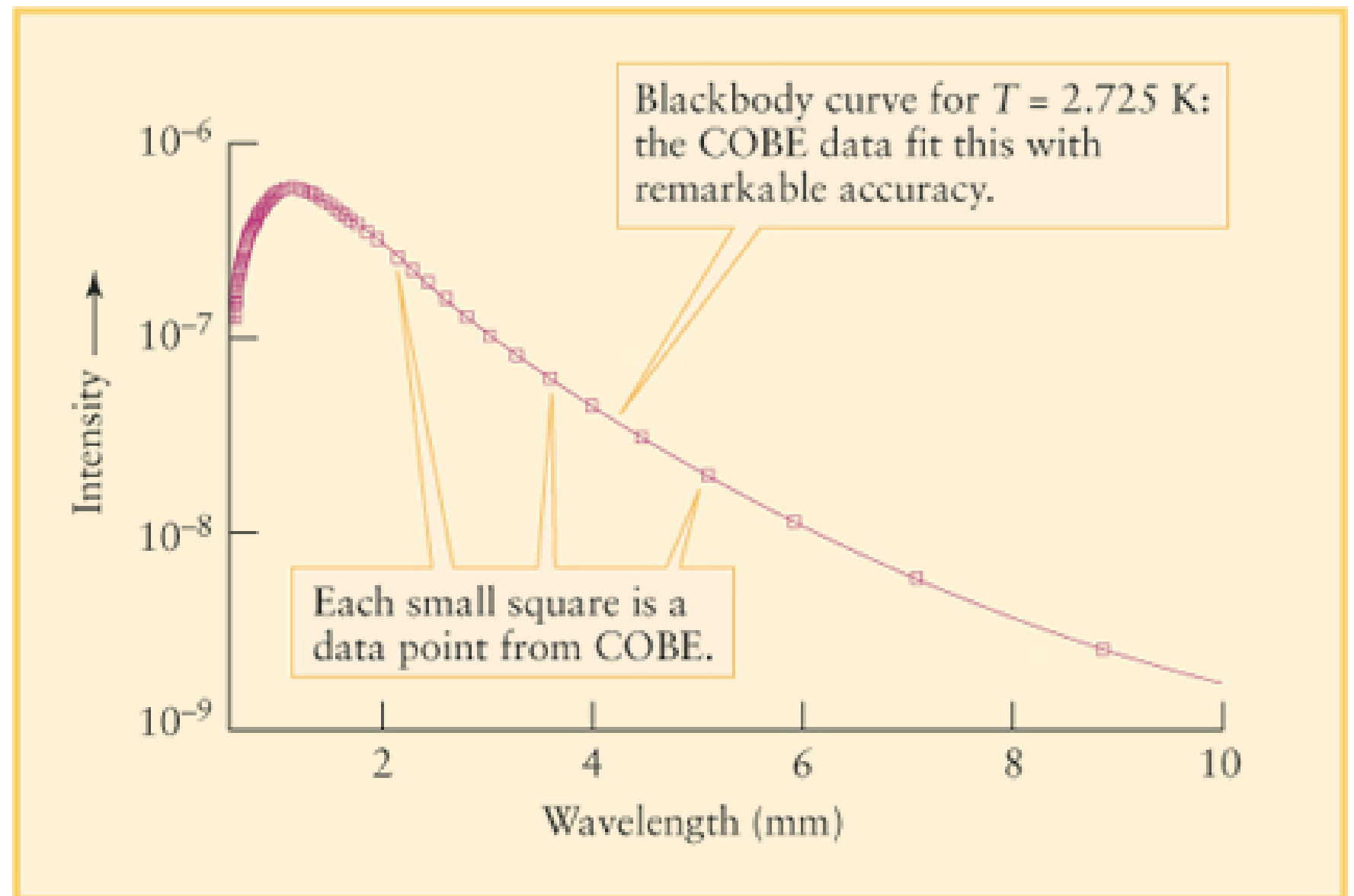
La radiazione cosmica di fondo e il Big Bang caldo

- COBE
- Corpo nero perfetto (1 parte in 10^5)

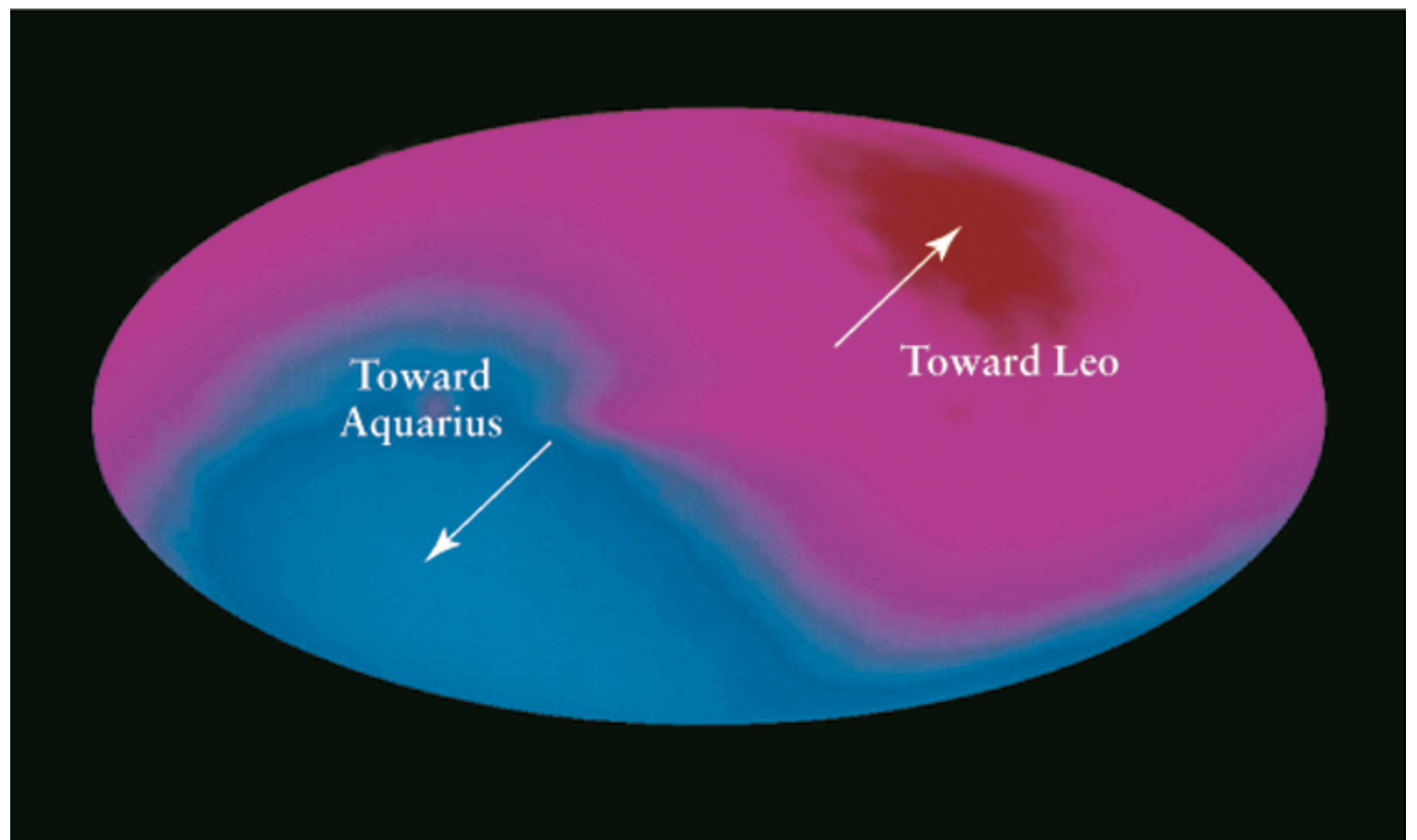


La radiazione cosmica di fondo e il Big Bang caldo

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

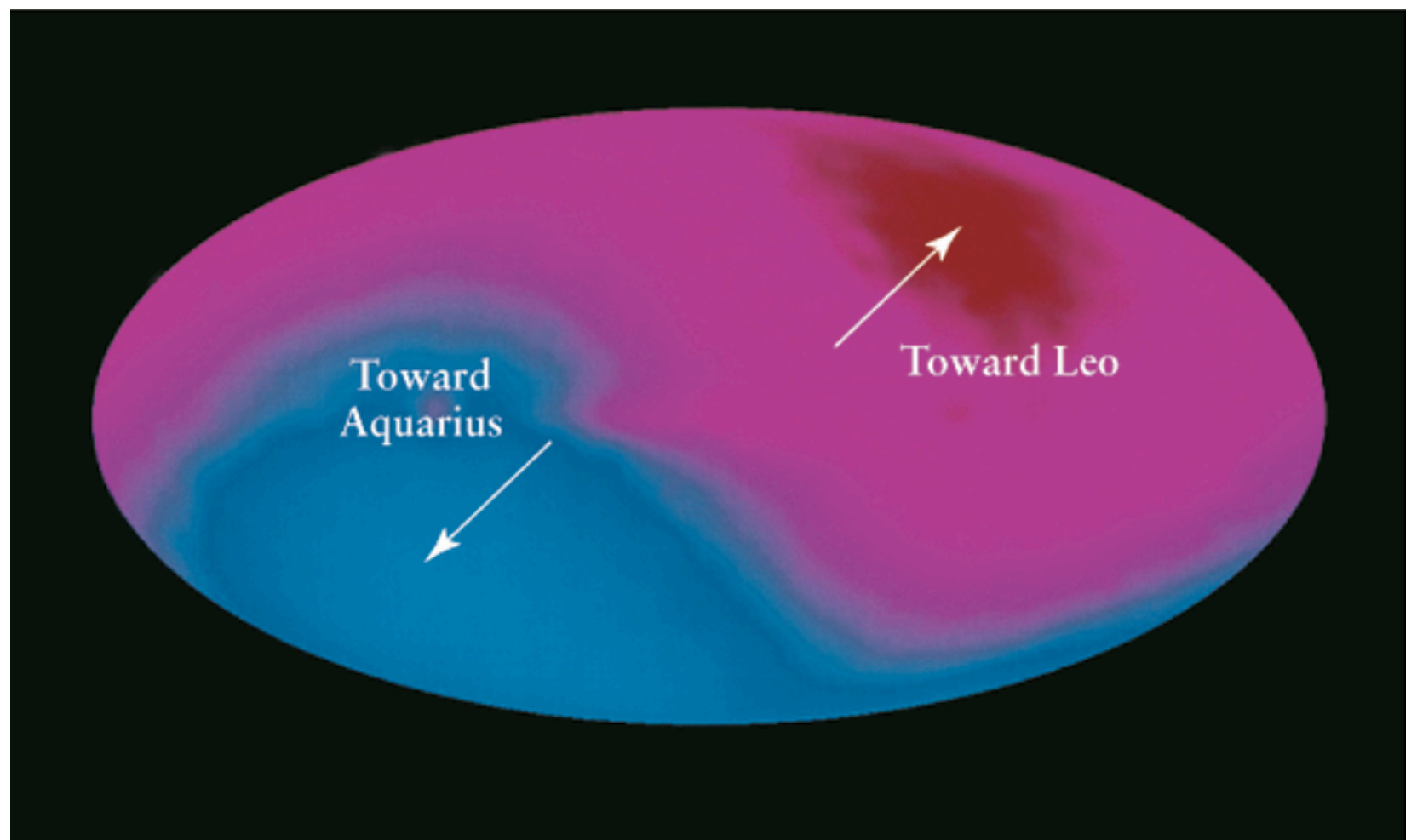


La radiazione cosmica di fondo e il Big Bang caldo



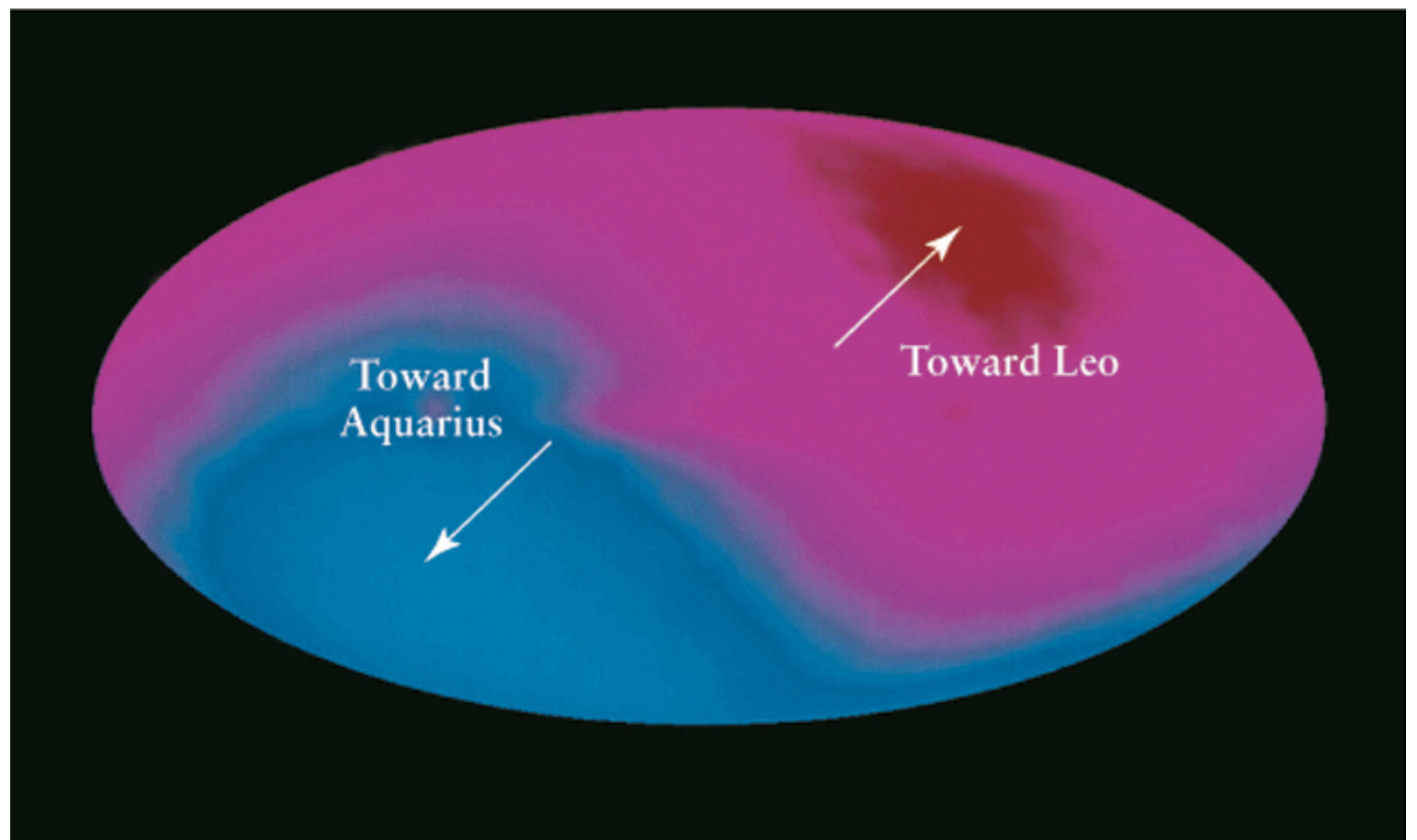
La radiazione cosmica di fondo e il Big Bang caldo

- Mappa di temperatura (rosso = caldo).



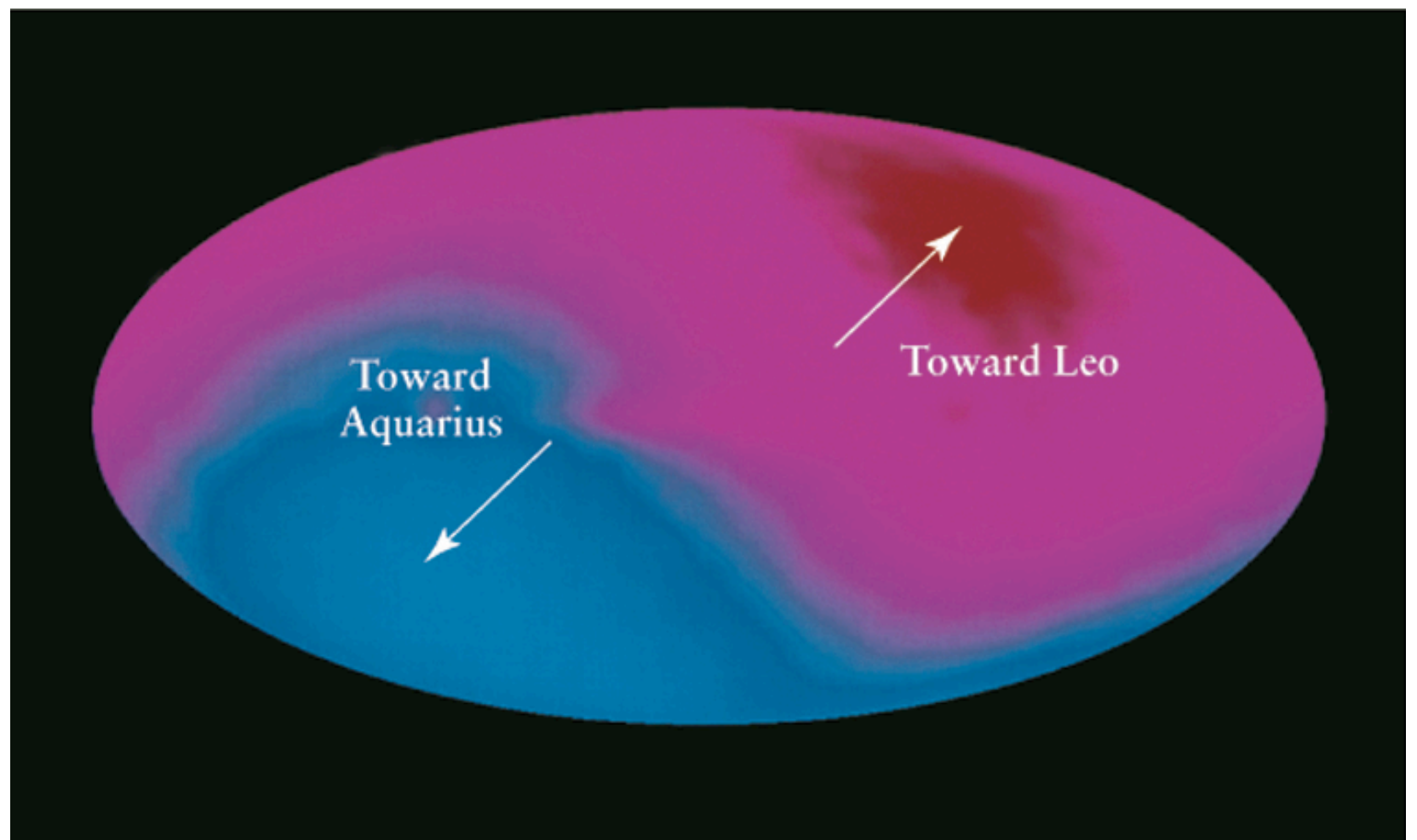
La radiazione cosmica di fondo e il Big Bang caldo

- Mappa di temperatura (rosso = caldo).
- $\Delta T = 0.003377 \text{ K}$



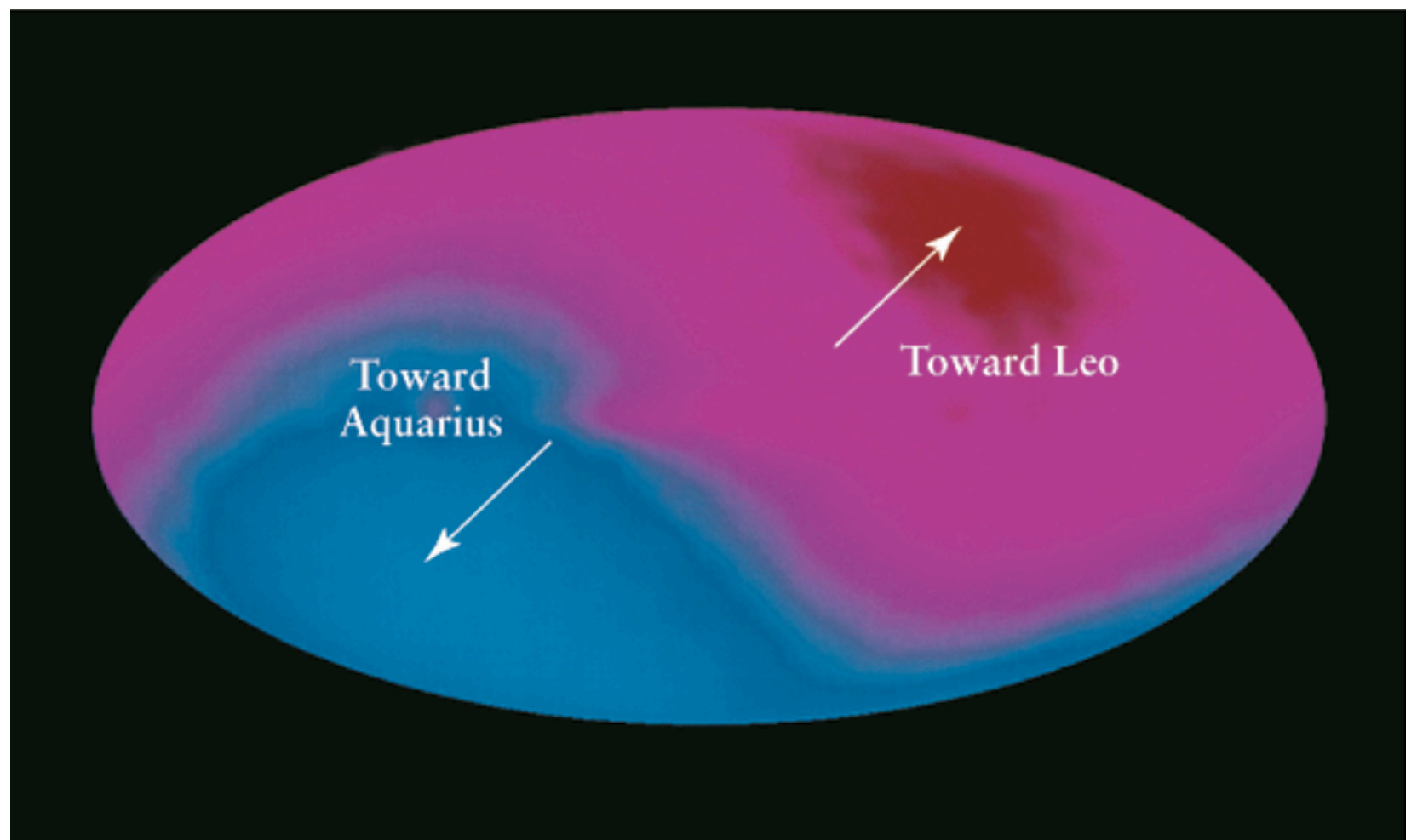
La radiazione cosmica di fondo e il Big Bang caldo

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



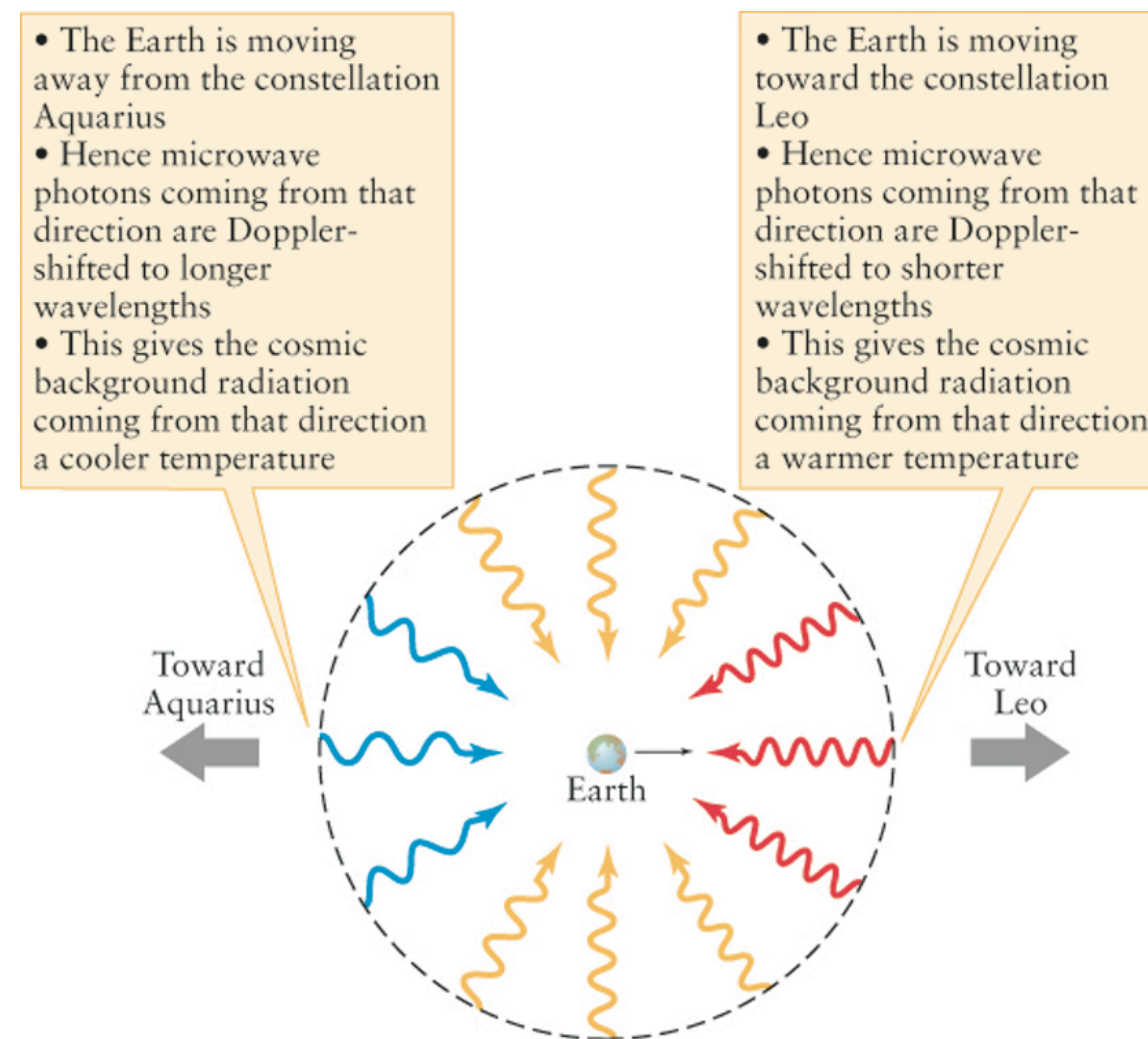
La radiazione cosmica di fondo e il Big Bang caldo

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



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 λ più corte $\Rightarrow$ più caldo.



L'universo primordiale

L'universo primordiale

- 2 categorie nell'universo: energia o massa.

L'universo primordiale

- 2 categorie nell'universo: energia o massa.
- La stragrande maggioranza dei **fotoni** sono nella radiazione CMB.

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.

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

Bilancio Radiazione / massa

- $E = mc^2$

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 ρ_{rad}

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 ρ_{rad}
- Legge di Stefan-Boltzmann: $F = \sigma T^4$ (F: flusso di energia, J/m²/s)

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 ρ_{rad}
- Legge di Stefan-Boltzmann: $F = \sigma T^4$ (F: flusso di energia, J/m²/s)
- Chi domina l'universo ?

Bilancio Radiazione / massa

Bilancio Radiazione / massa

- $\rho_{\text{rad}} = 4\sigma T^4 / c^3$

Bilancio Radiazione / massa

- $\rho_{\text{rad}} = 4\sigma T^4 / c^3$
- Oggi, con $T = 2.725 \text{ K}$, $\rho_{\text{rad}} = 4.6 \cdot 10^{-31} \text{ kg/m}^3$

Bilancio Radiazione / massa

- $\rho_{\text{rad}} = 4\sigma T^4 / c^3$
- Oggi, con $T = 2.725 \text{ K}$, $\rho_{\text{rad}} = 4.6 \cdot 10^{-31} \text{ kg/m}^3$
- $\rho_{\text{materia}} = \text{Massa stelle-galassie-oscuro} / \text{Volume}$

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)

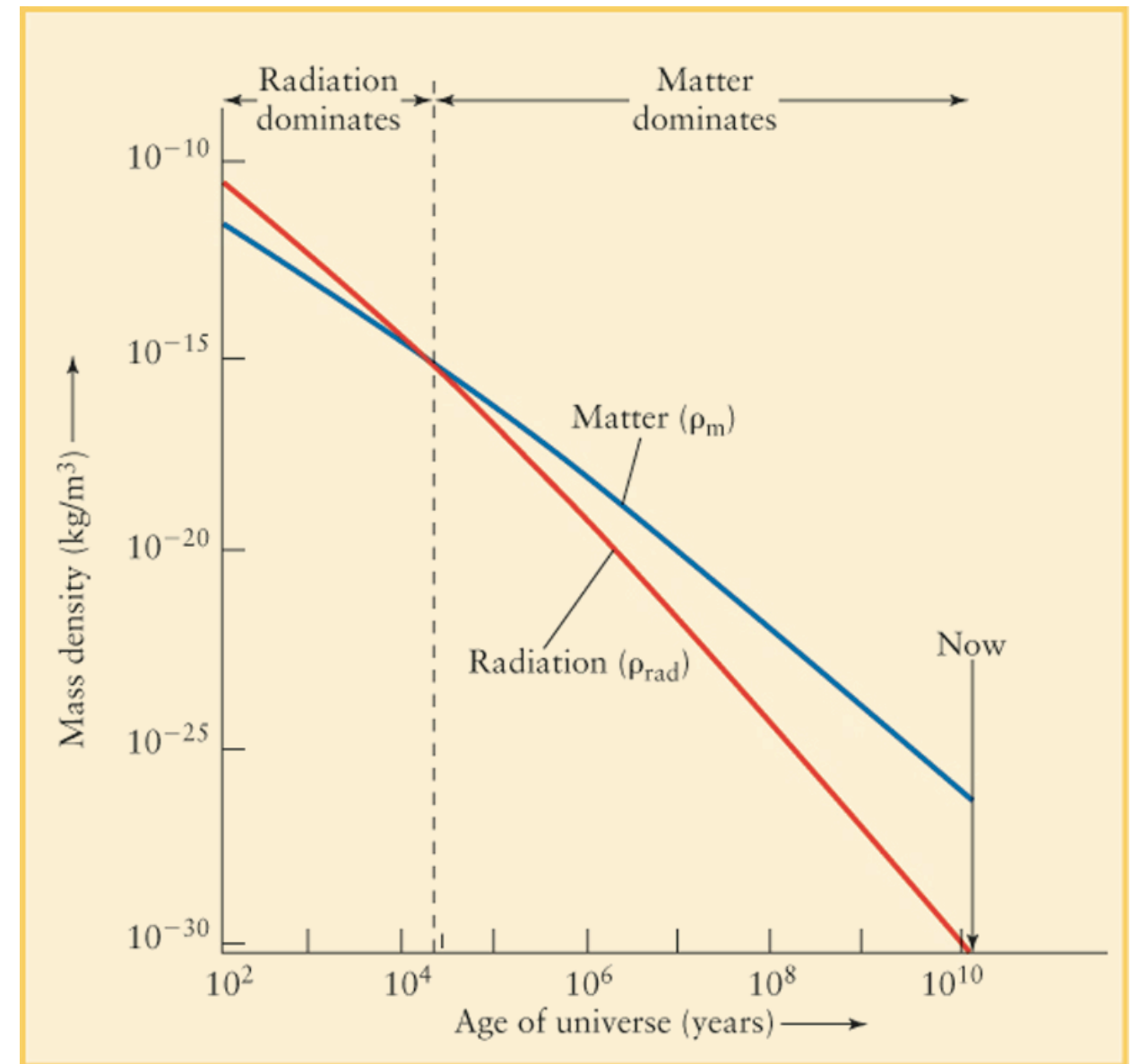
Bilancio Radiazione / massa

- $\rho_{\text{rad}} = 4\sigma T^4 / c^3$
- Oggi, con $T = 2.725 \text{ K}$, $\rho_{\text{rad}} = 4.6 \cdot 10^{-31} \text{ kg/m}^3$
- $\rho_{\text{materia}} = \text{Massa stelle-galassie-oscure} / \text{Volume}$
- 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) $\equiv 1.5 \text{ atomo di H al m}^3$

Bilancio Radiazione / massa

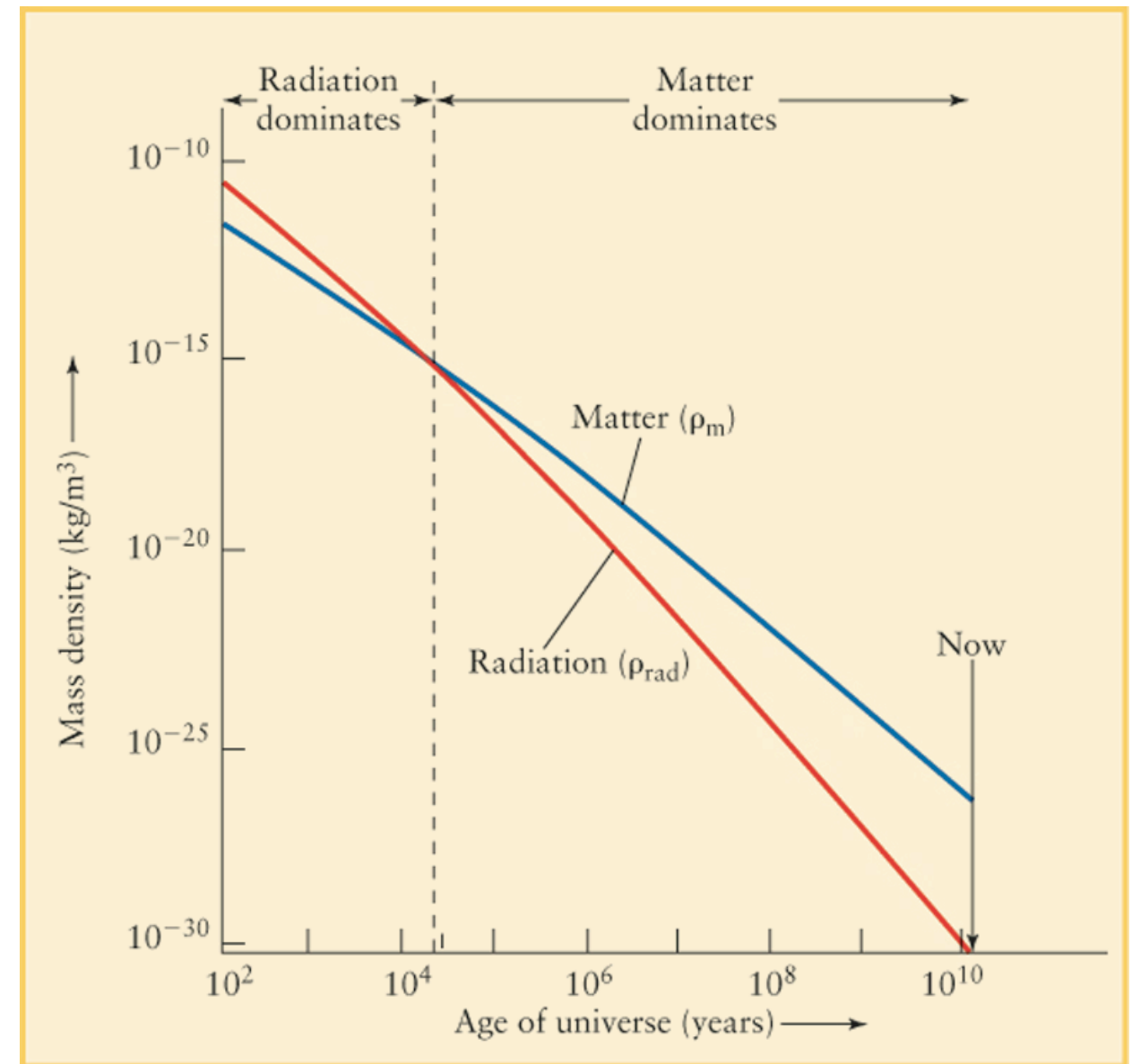
- $\rho_{\text{rad}} = 4\sigma T^4 / c^3$
- Oggi, con $T = 2.725 \text{ K}$, $\rho_{\text{rad}} = 4.6 \cdot 10^{-31} \text{ kg/m}^3$
- $\rho_{\text{materia}} = \text{Massa stelle-galassie-oscure} / \text{Volume}$
- Ammassi e raggi X in equilibrio idrostatico: Gravità - Pressione(T)
- Oggi, $\rho_{\text{materia}}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

Quando la radiazione dominava la materia



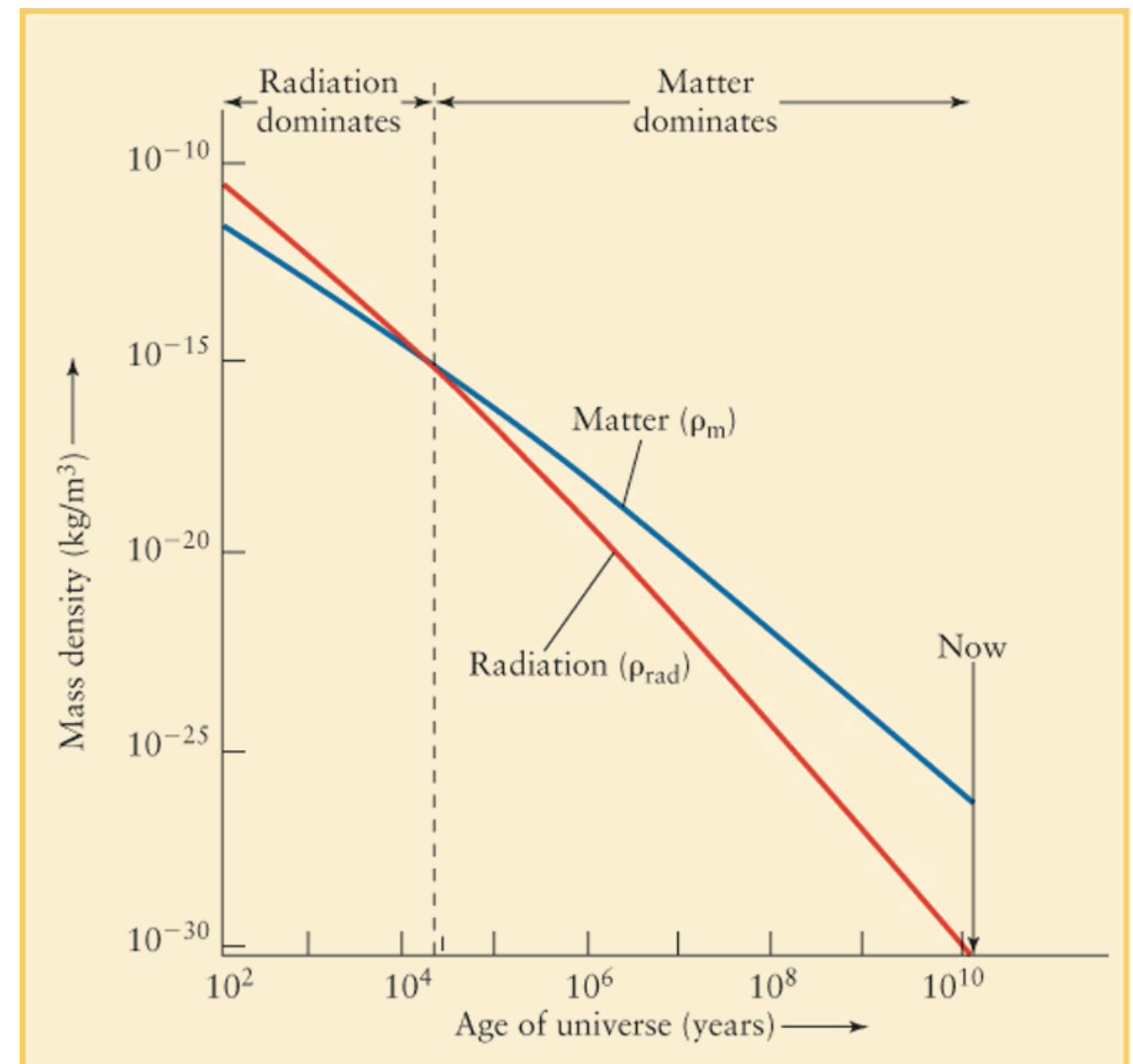
Quando la radiazione dominava la materia

- $\rho_{\text{materia}} \gg \rho_{\text{rad}}$, ma non è sempre stato così.



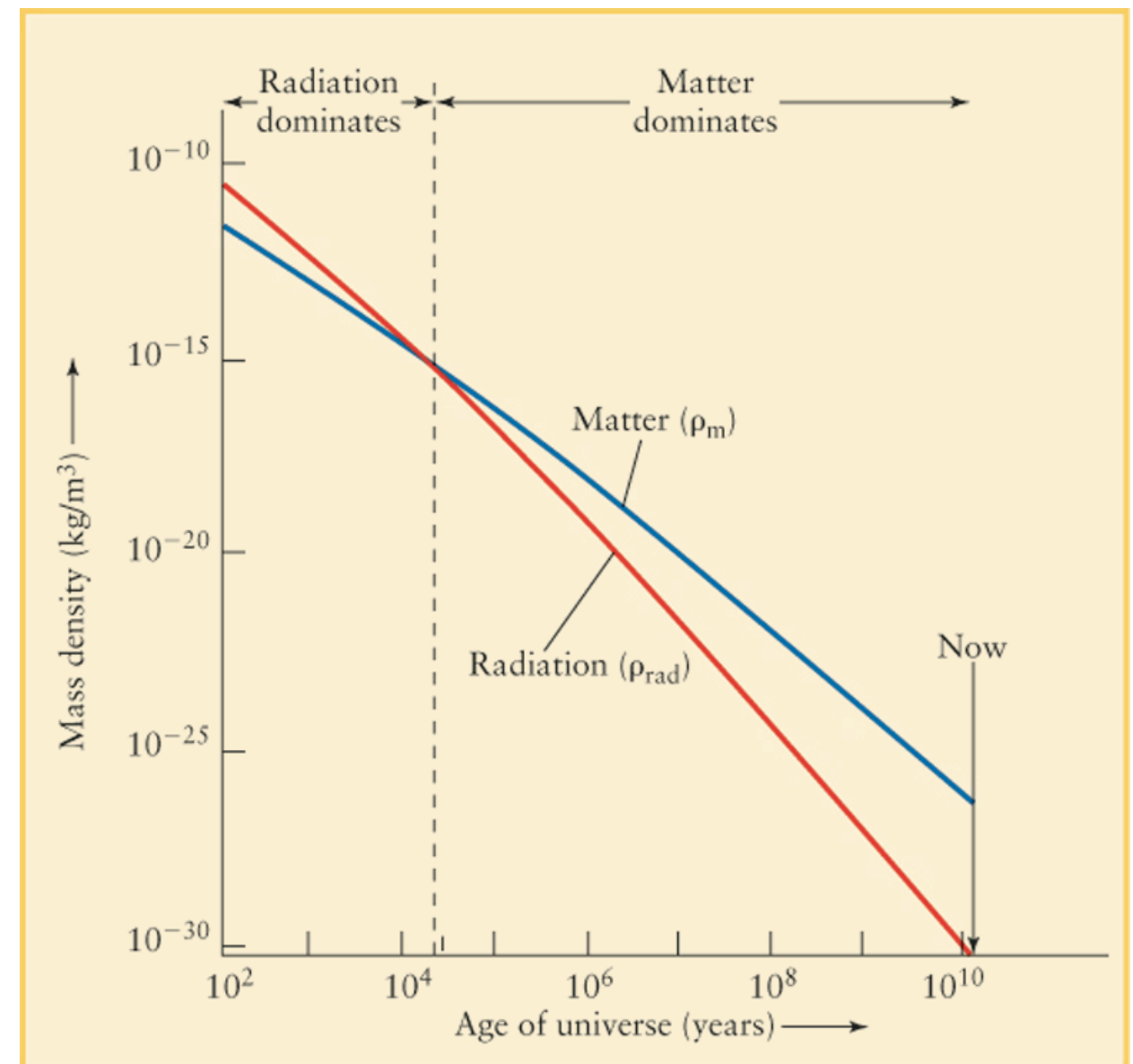
Quando la radiazione dominava la materia

- $\rho_{\text{materia}} \gg \rho_{\text{rad}}$, ma non è sempre stato così.
- Oggi, l'energia dei fotoni è piccola, anche se ci sono $410 \cdot 10^6$ fotoni / m^3



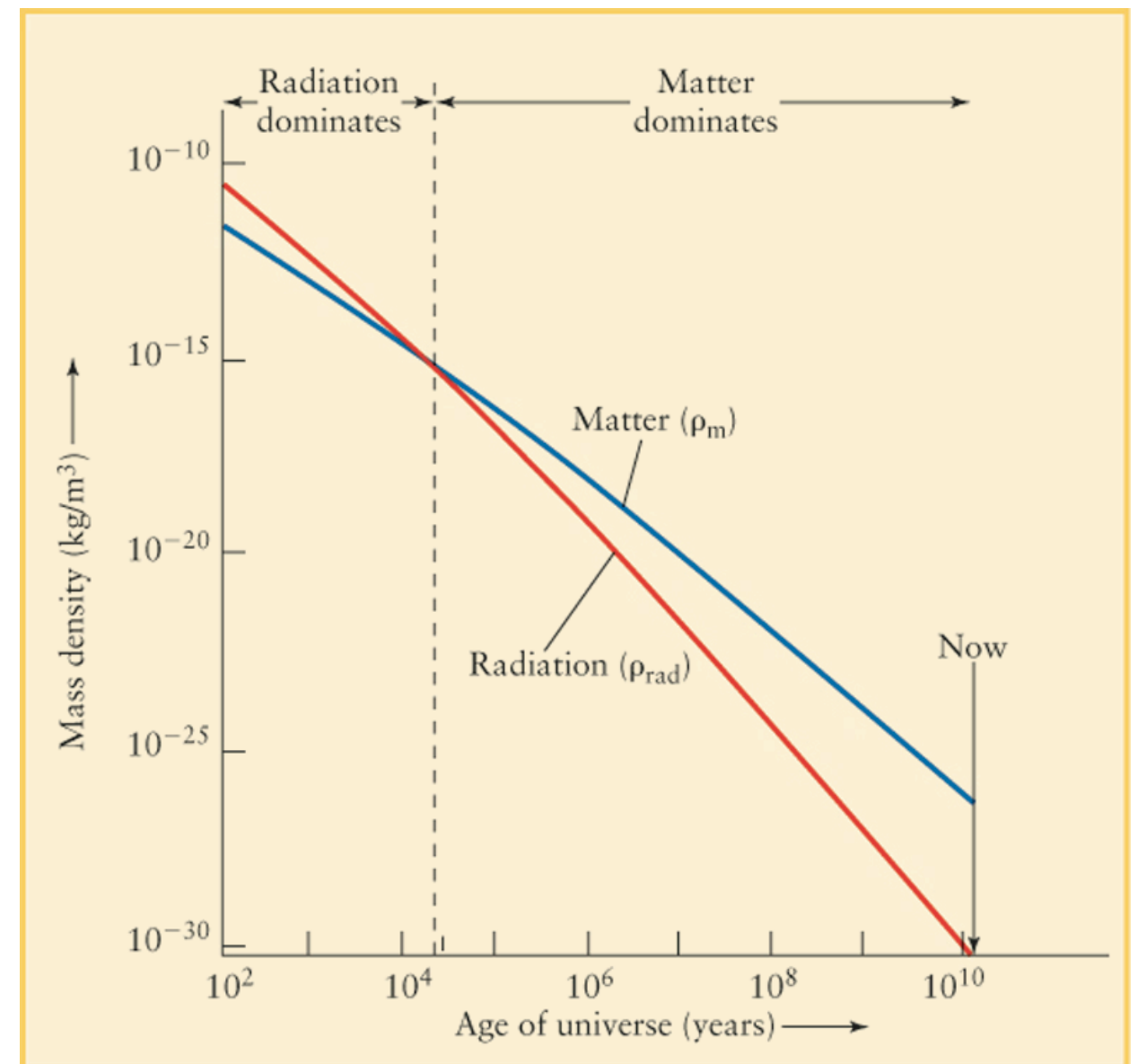
Quando la radiazione dominava la materia

- $\rho_{\text{materia}} \gg \rho_{\text{rad}}$, ma non è sempre stato così.
- Oggi, l'energia dei fotoni è piccola, anche se ci sono $410 \cdot 10^6$ fotoni / m^3
- fotoni / atomi = $10^9 / 1$



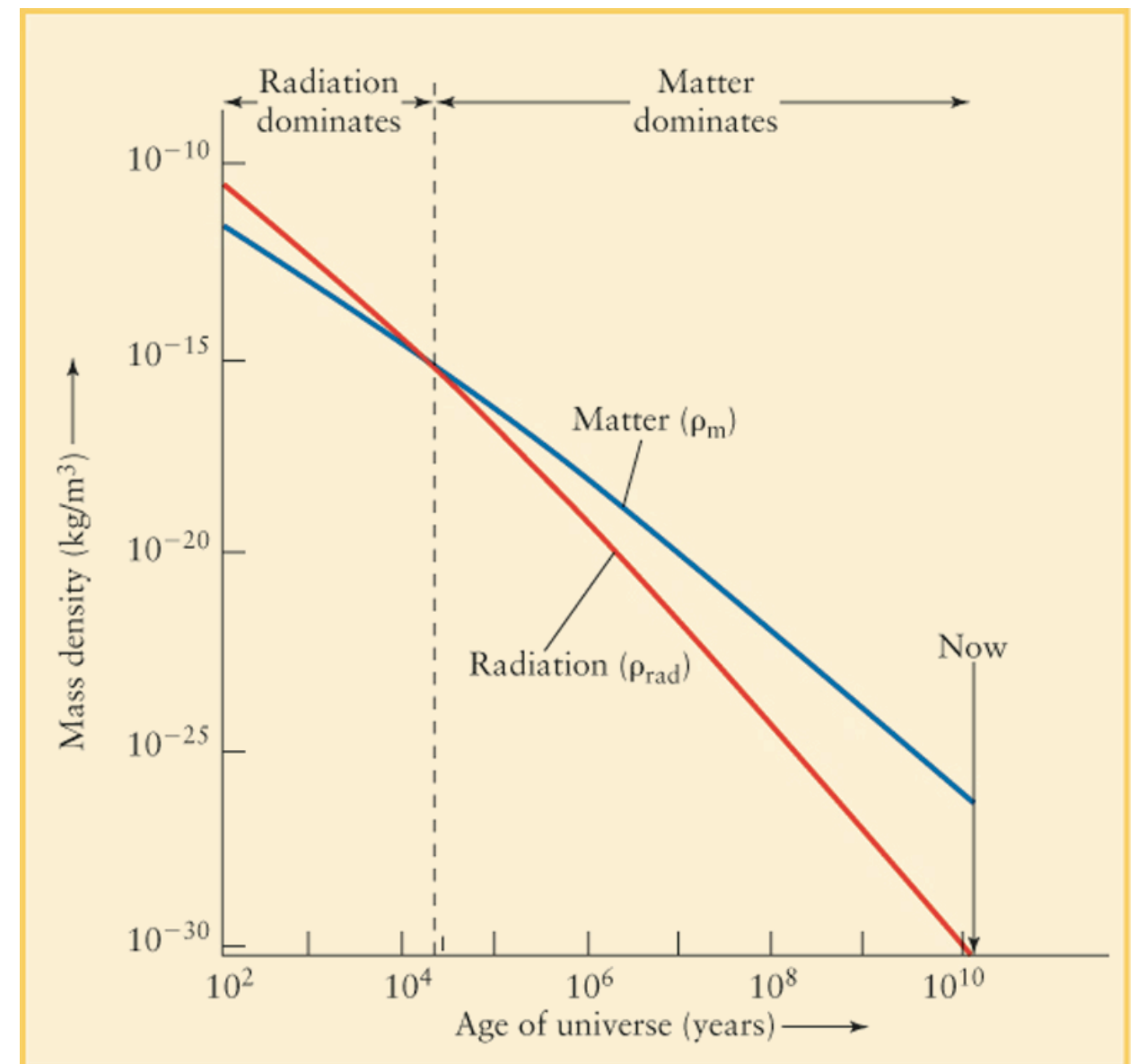
Quando la radiazione dominava la materia

- $\rho_{\text{materia}} \gg \rho_{\text{rad}}$, ma non è sempre stato così.
- Oggi, l'energia dei fotoni è piccola, anche se ci sono $410 \cdot 10^6$ fotoni / 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.

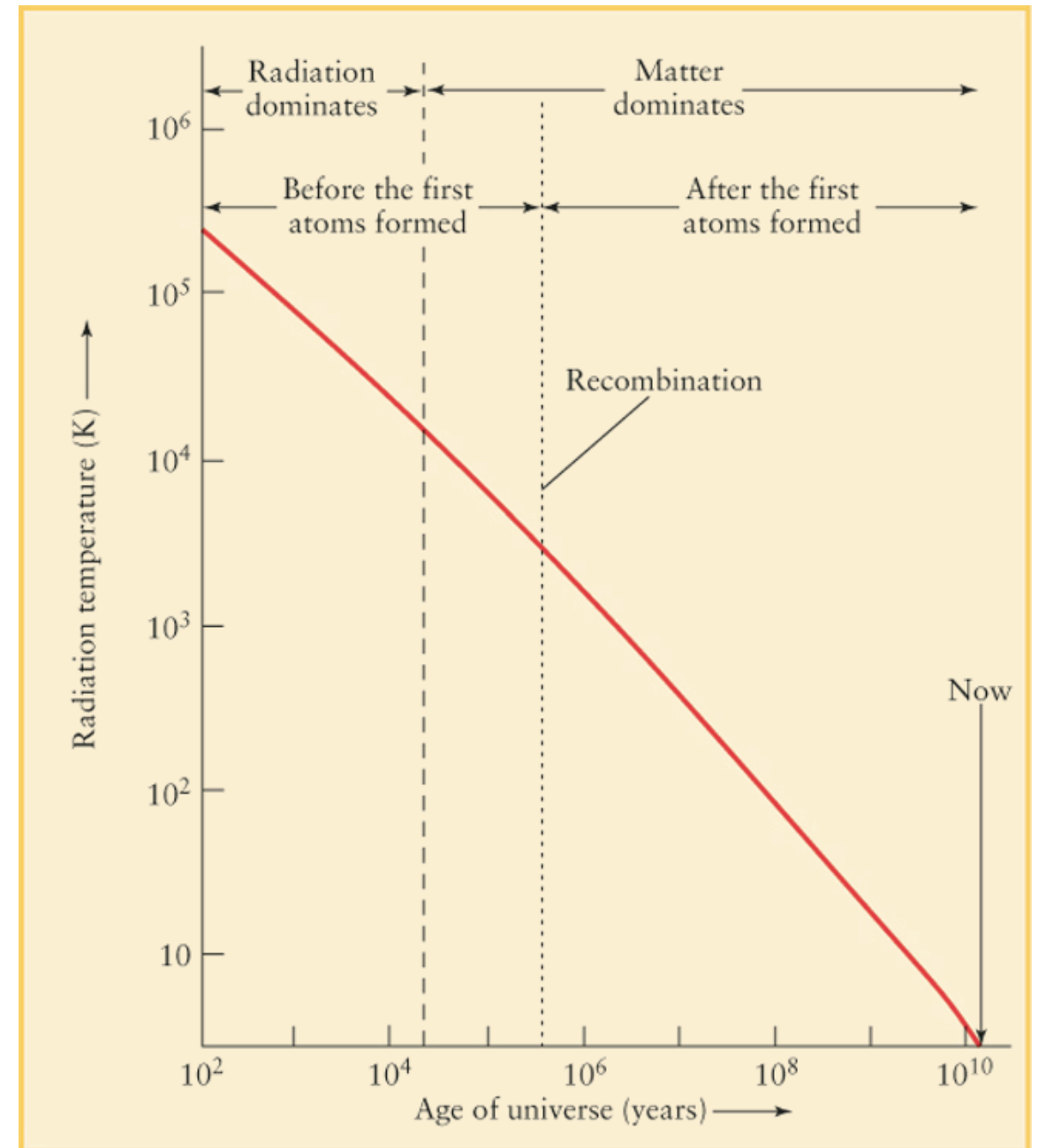


Quando la radiazione dominava la materia

- $\rho_{\text{materia}} \gg \rho_{\text{rad}}$, ma non è sempre stato così.
- Oggi, l'energia dei fotoni è piccola, anche se ci sono $410 \cdot 10^6$ fotoni / 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.

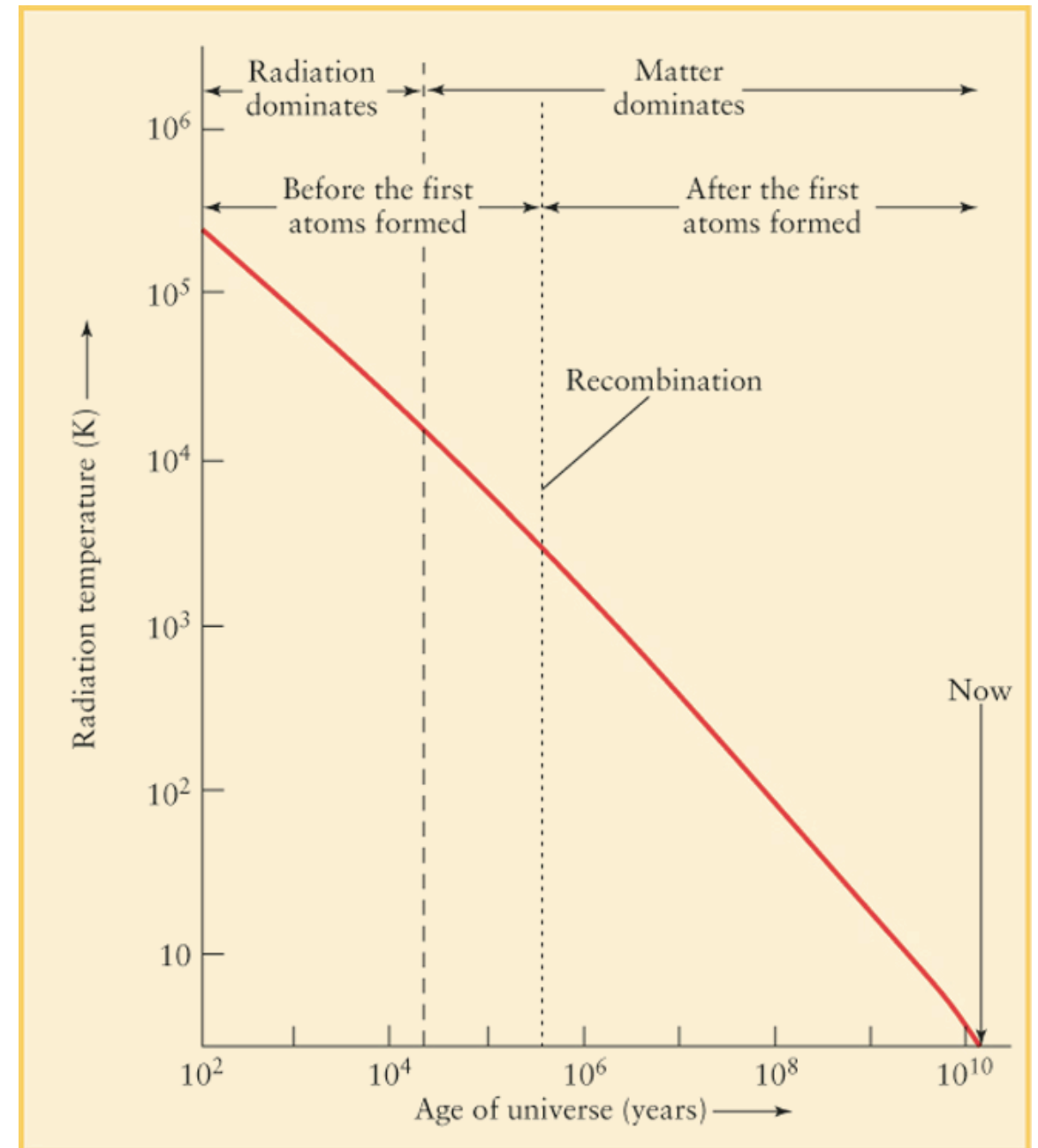


Quando la radiazione dominava la materia



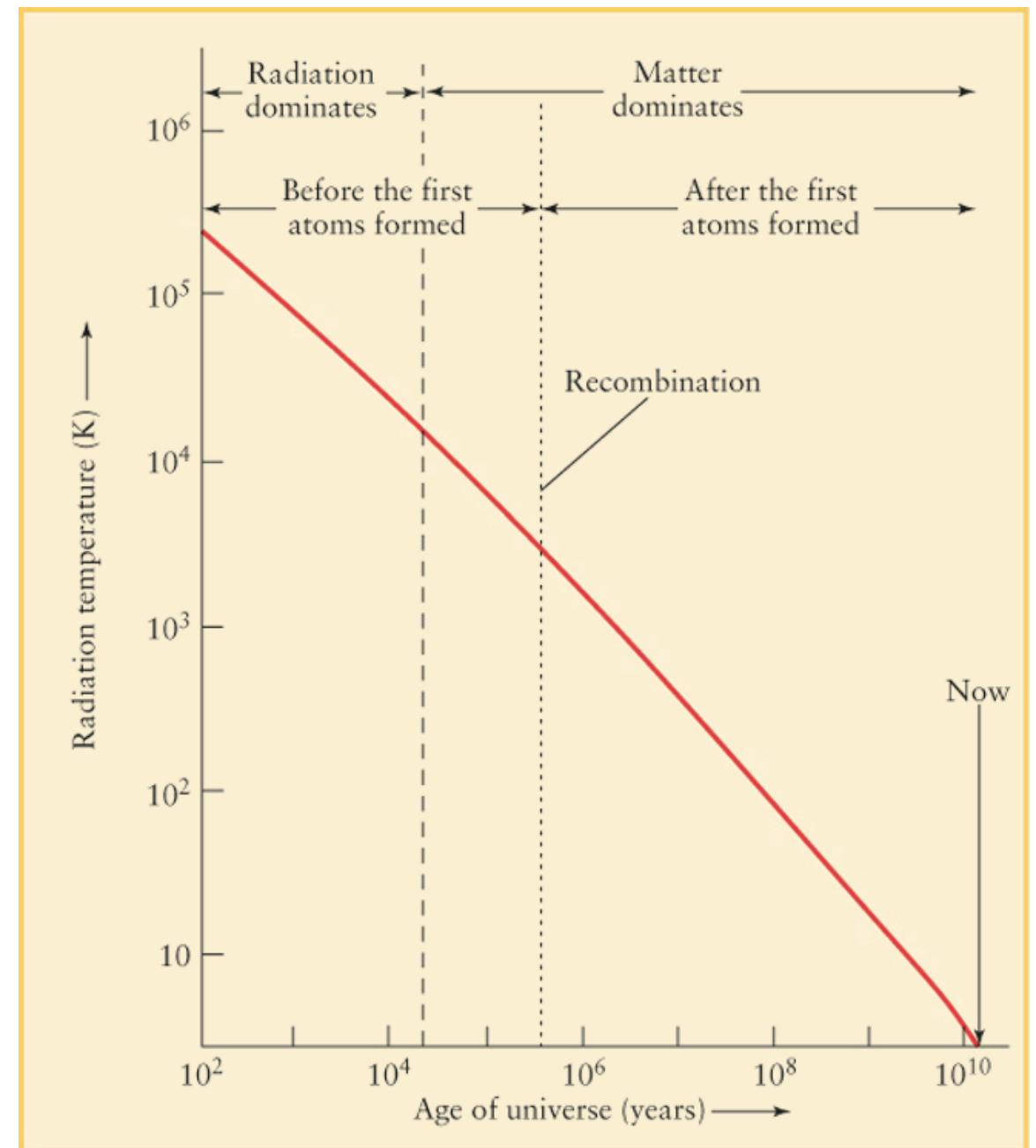
Quando la radiazione dominava la materia

- Legge di Wien: $\lambda_{\text{picco}} = 0.0029 / T$

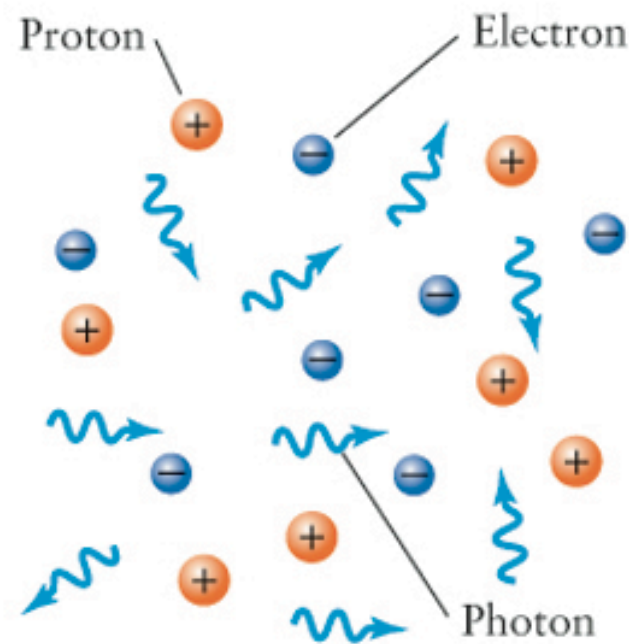


Quando la radiazione dominava la materia

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

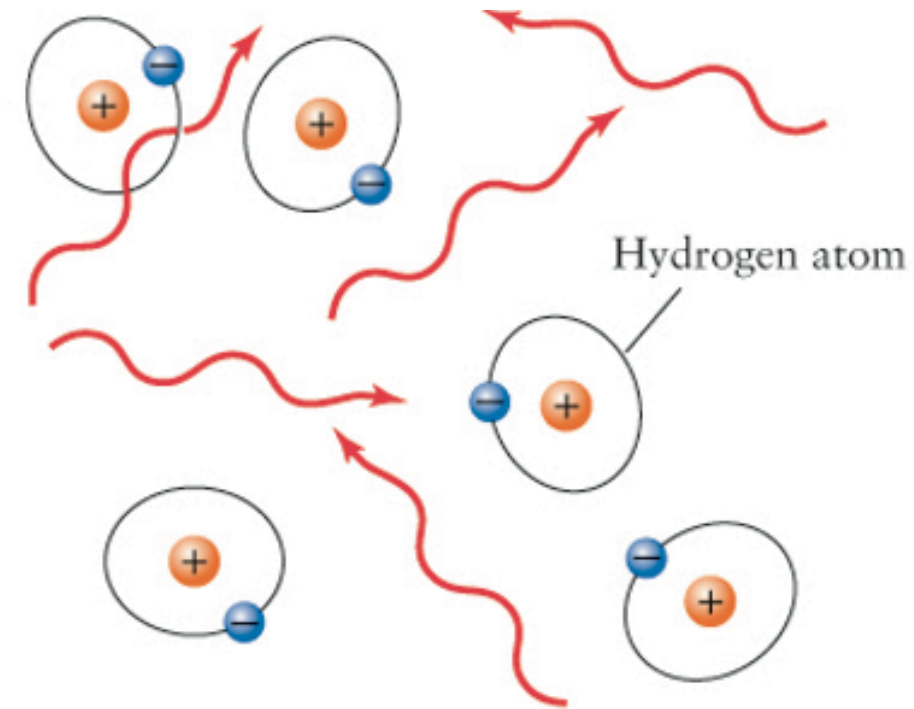


Quando la radiazione dominava la materia



(a) Before recombination:

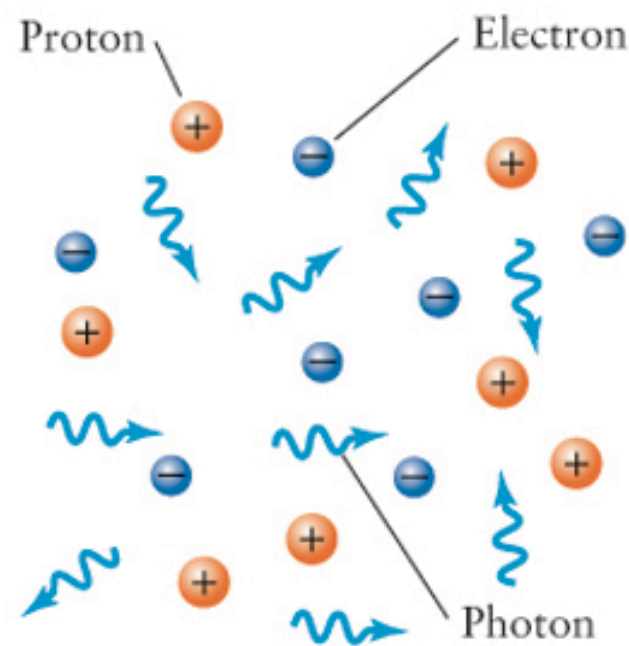
- Temperatures were so high that electrons and protons could not combine to form hydrogen atoms.
- The universe was opaque: Photons underwent frequent collisions with electrons.
- Matter and radiation were at the same temperature.



(b) After recombination:

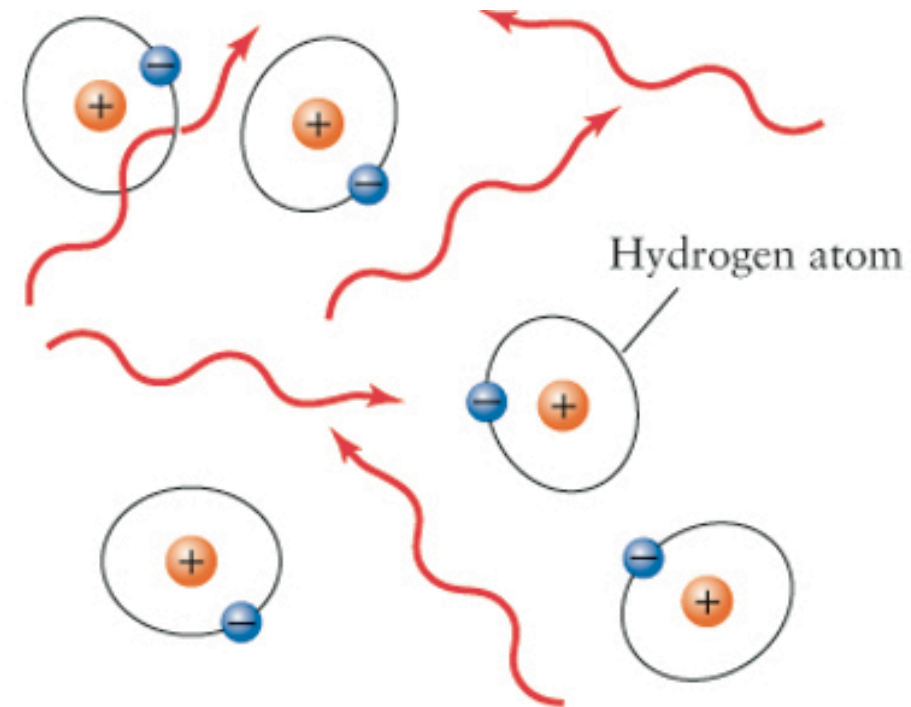
- Temperatures became low enough for hydrogen atoms to form.
- The universe became transparent: Collisions between photons and atoms became infrequent.
- Matter and radiation were no longer at the same temperature.

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.

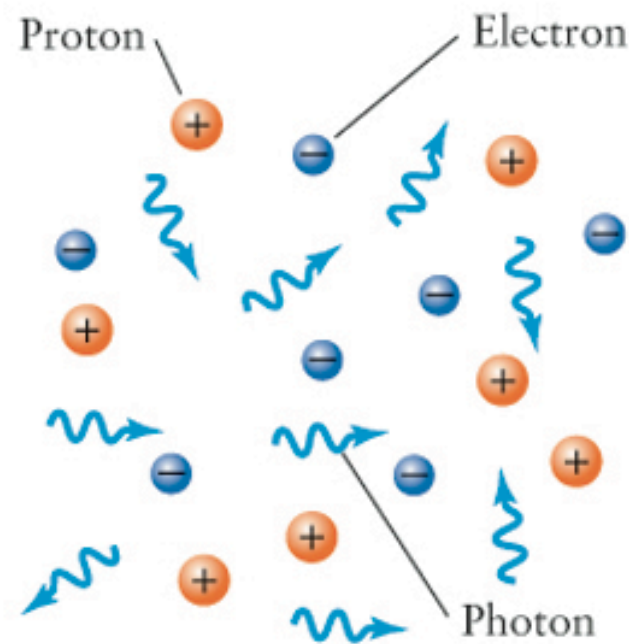


(b) After recombination:

- 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.

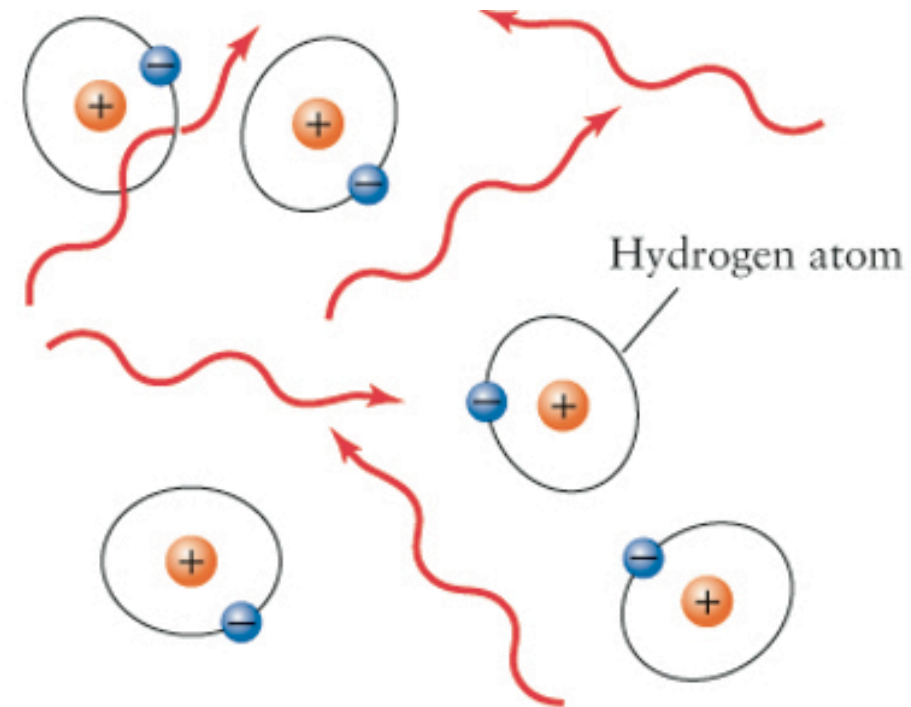
- Ricombinazione 380'000 anni dopo il Big Bang:

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.



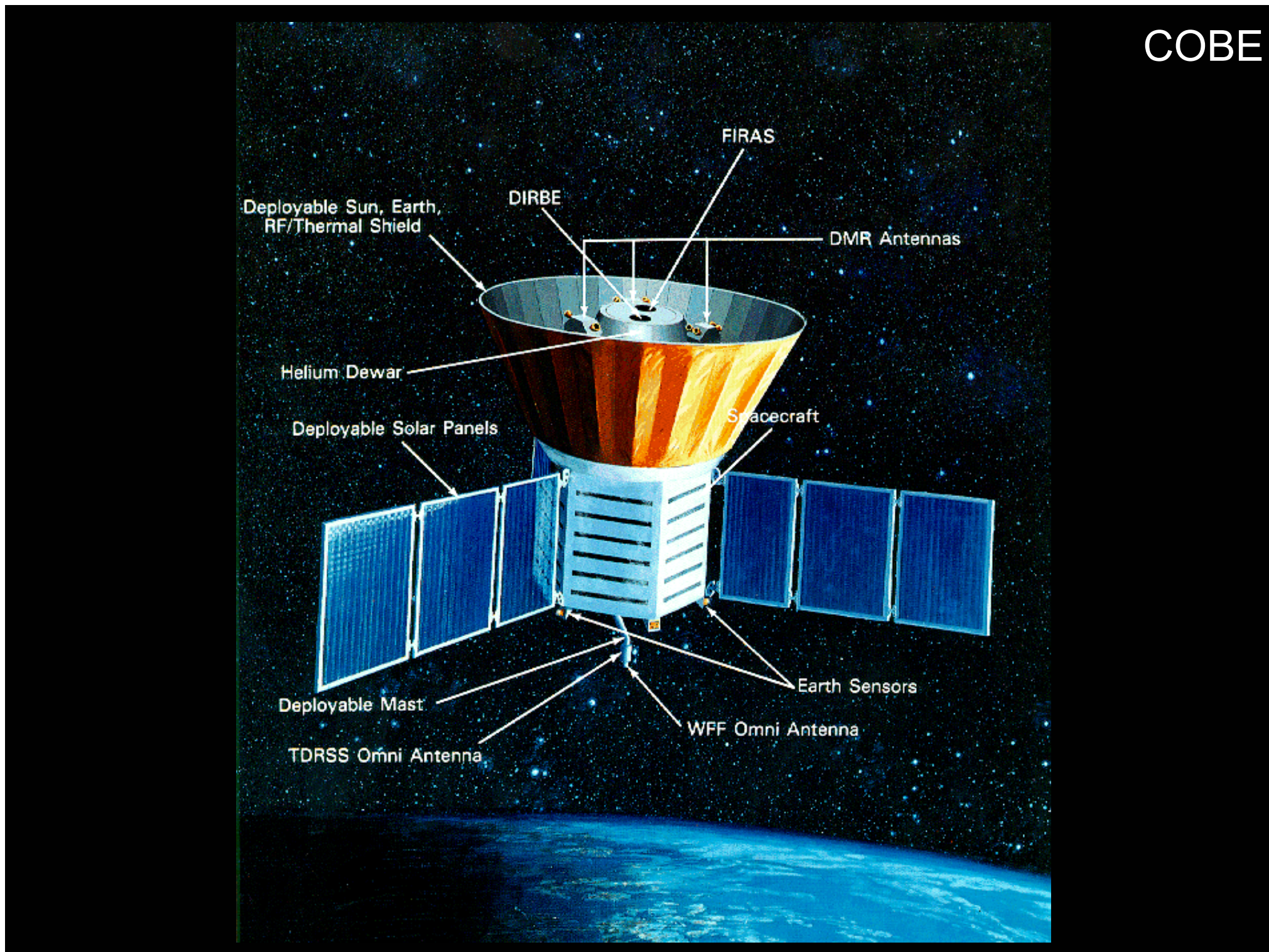
(b) After recombination:

- 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)

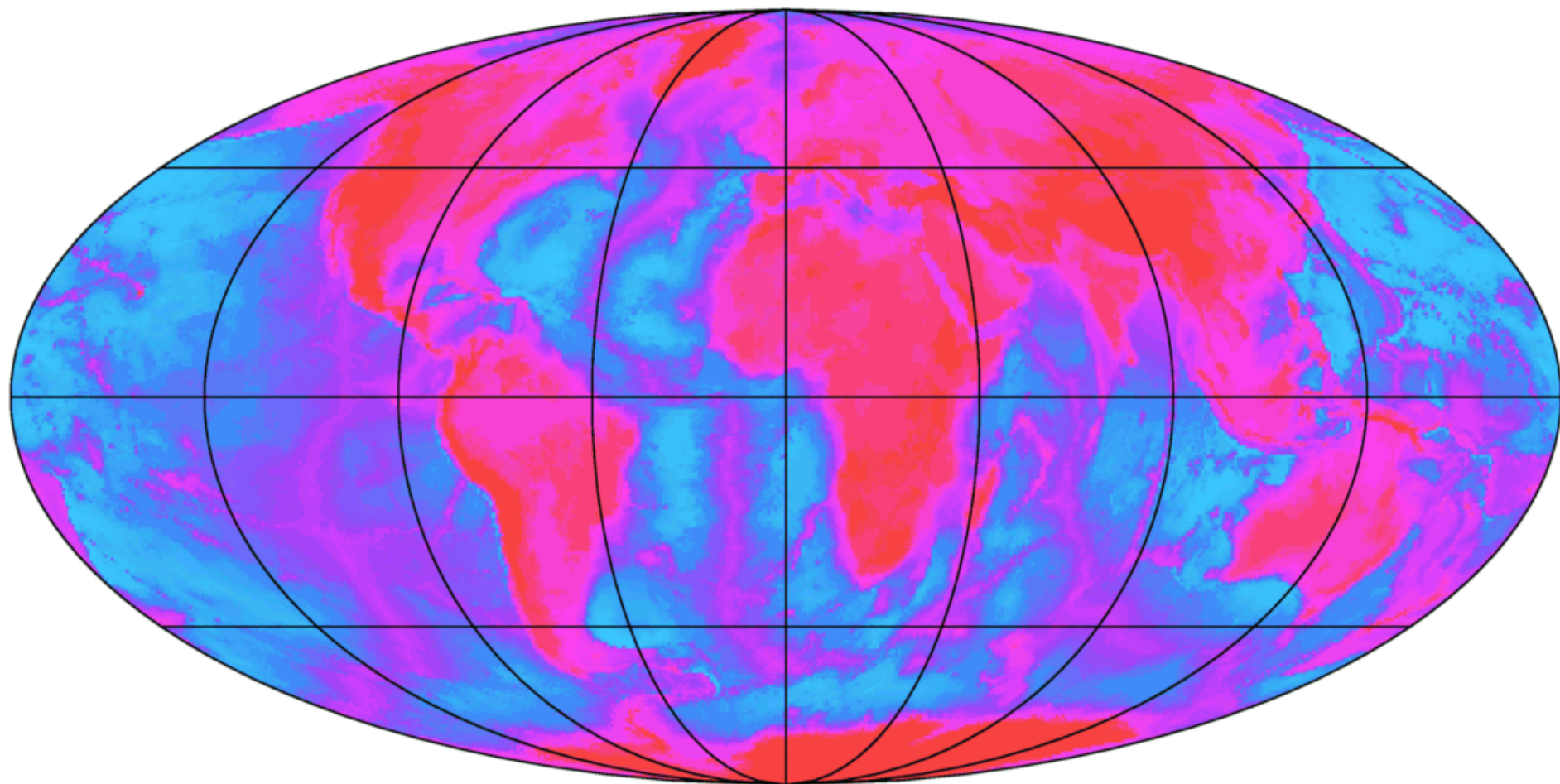
Irregolarità nell'universo primordiale: COBE (1989)



Irregolarità nell'universo primordiale: COBE (1989)

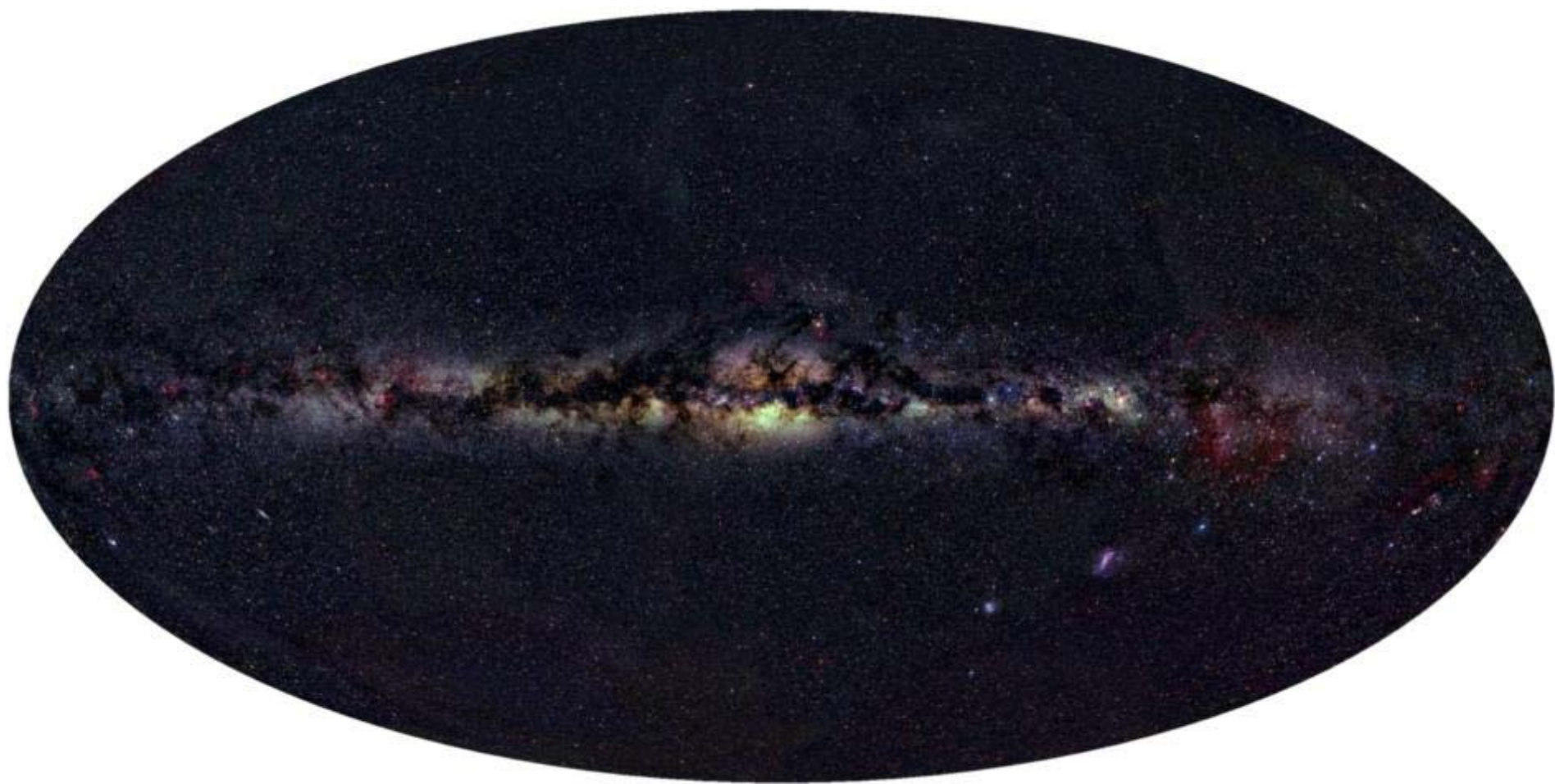
An equal area projection:

EARTH

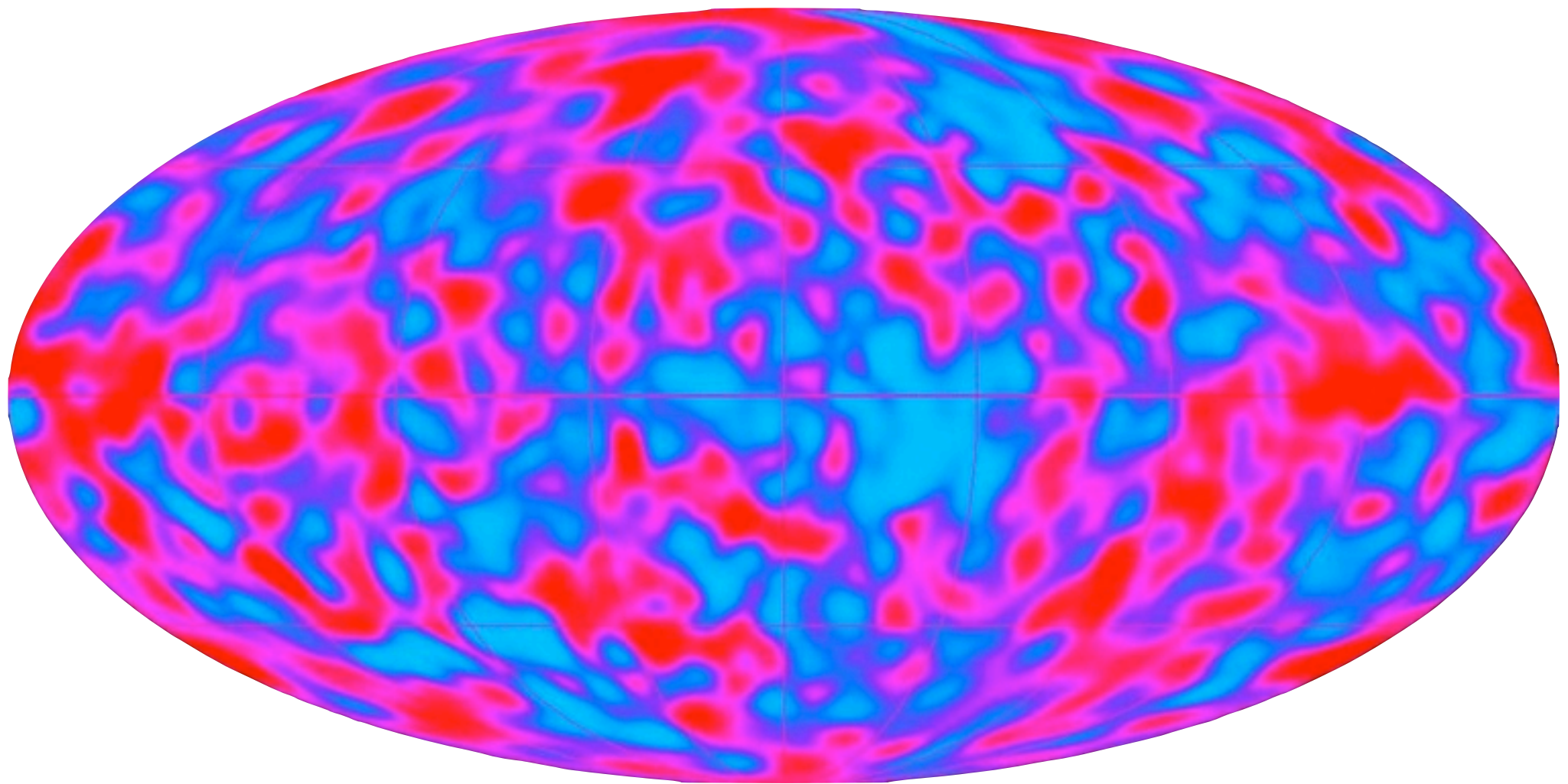


Irregolarità nell'universo primordiale: COBE (1989)

The oval is an all-sky map in galactic coordinates:



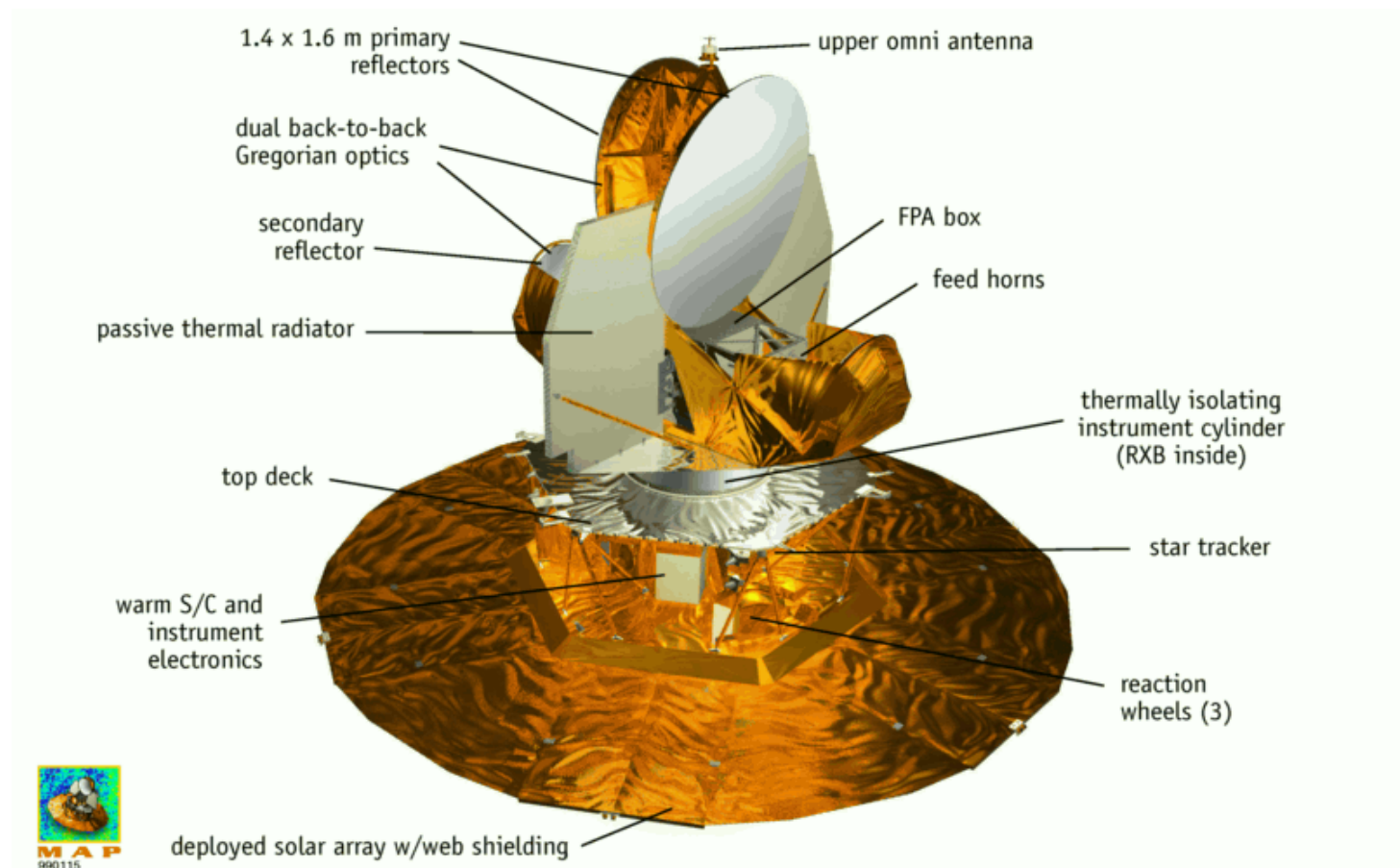
Irregolarità nell'universo primordiale: COBE (1989)



Irregolarità nell'universo primordiale: WMAP (2003)

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

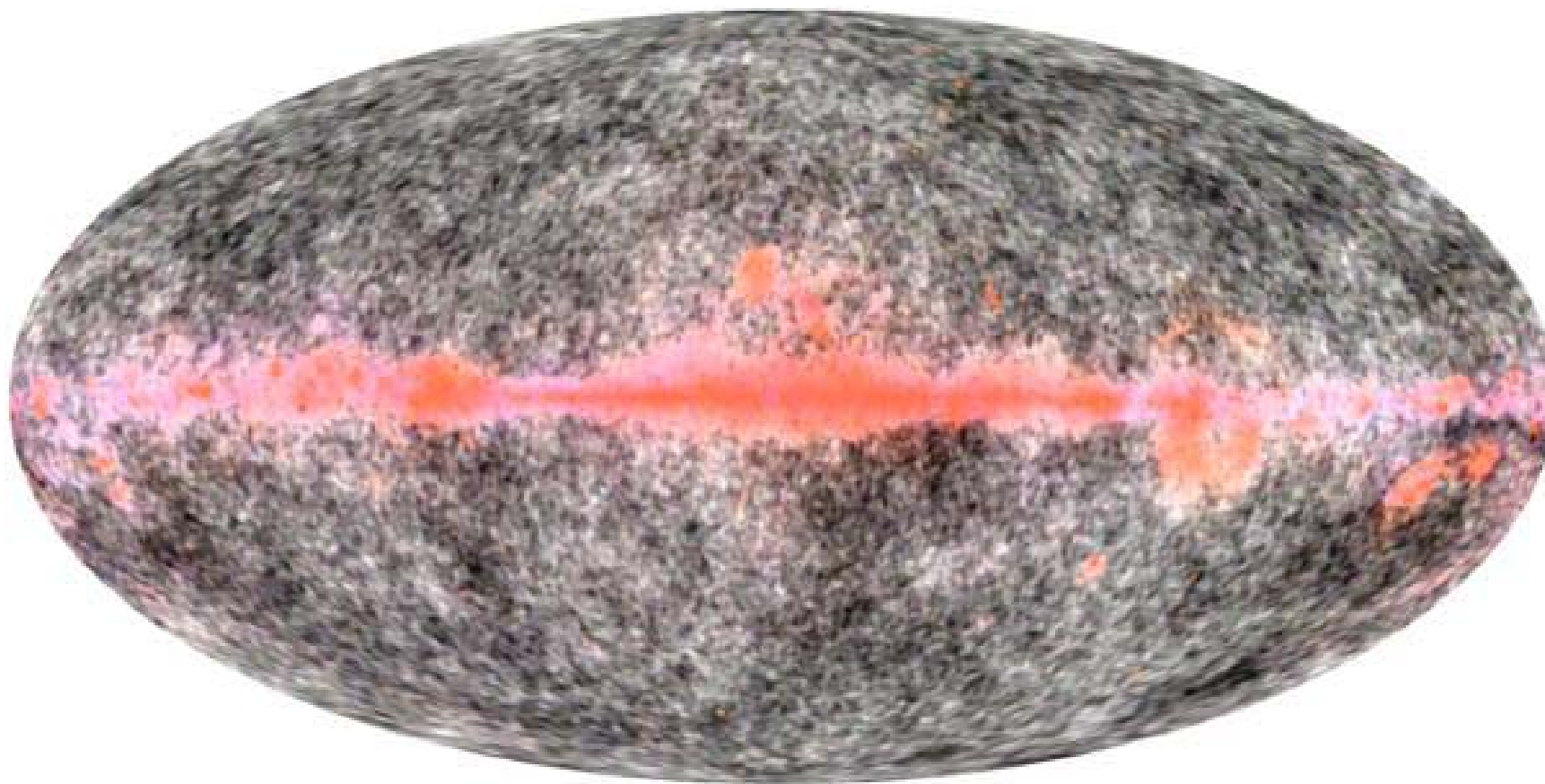
A New Cosmology Satellite



Irregolarità nell'universo primordiale: WMAP (2003)

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

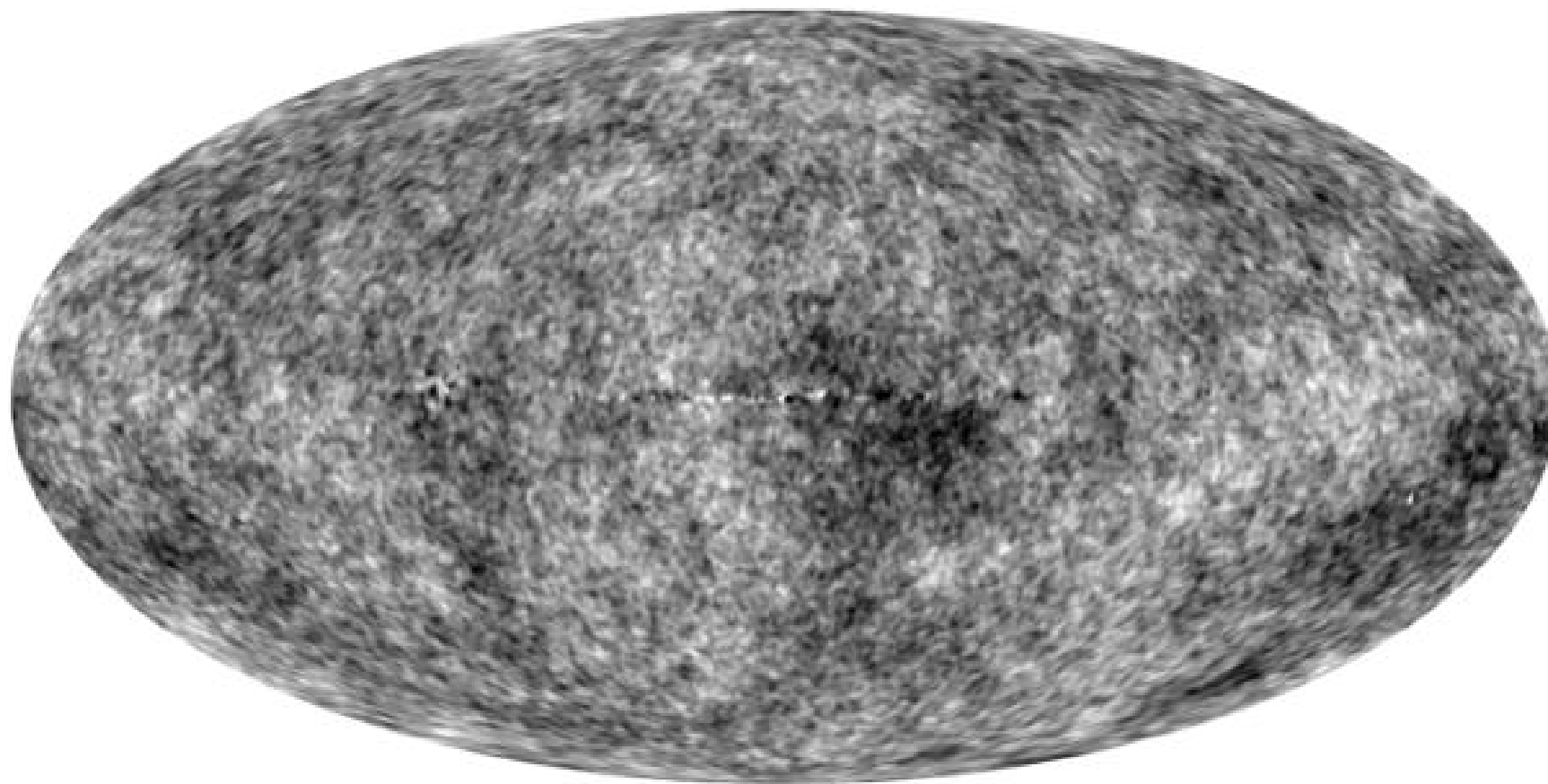
WMAP 7, 5 & 3 mm data as RGB



Irregolarità nell'universo primordiale: WMAP (2003)

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

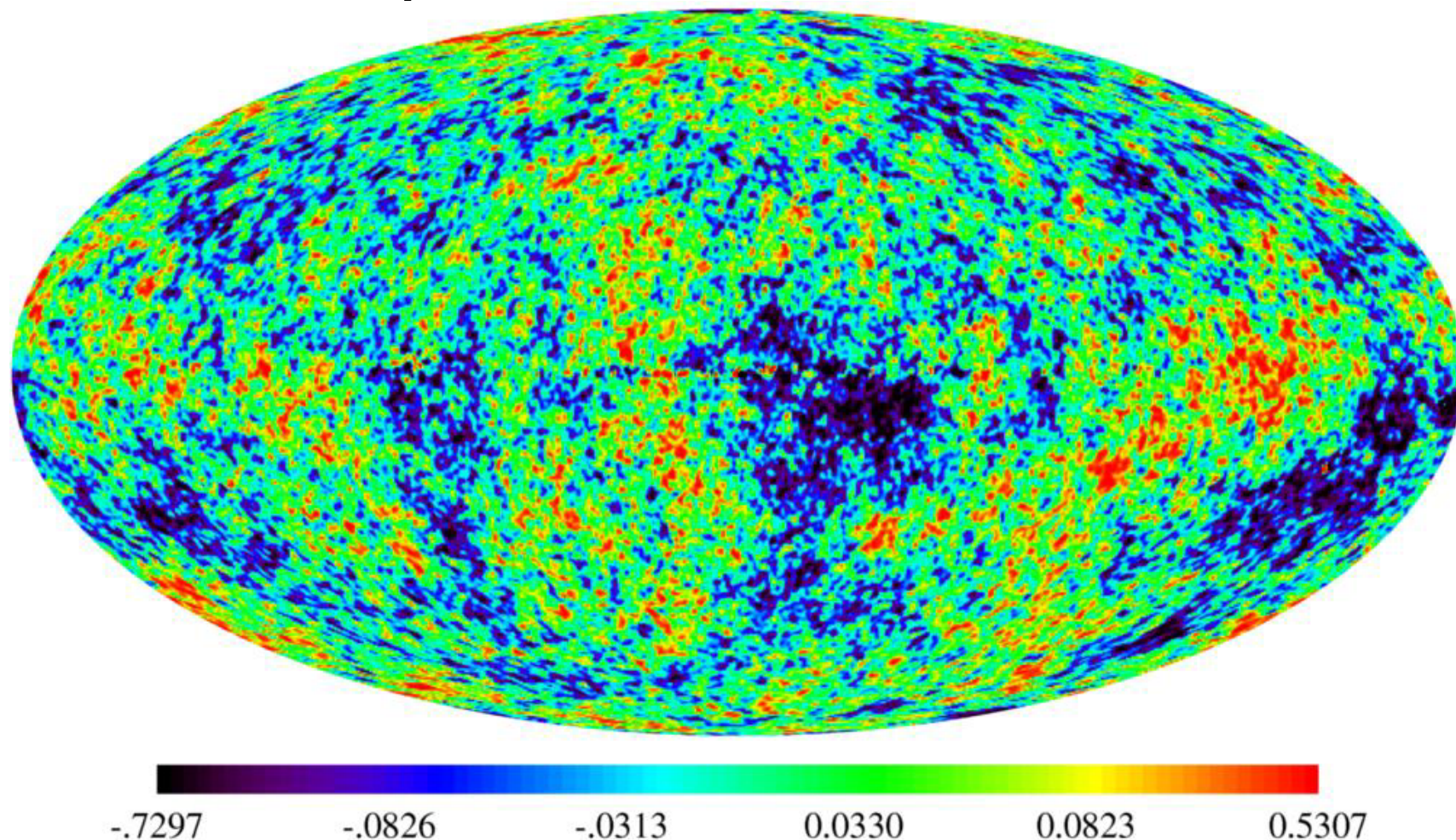
Combine maps to subtract galaxy



Irregolarità nell'universo primordiale: WMAP (2003)

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

WMAP 5 year Data Released March 5



- Contrast enhanced by 12,500 times

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

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

- “La gravità piega lo spazio” (Einstein).

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 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 (ρ_0)** di tutte le forme di materia e di energia.

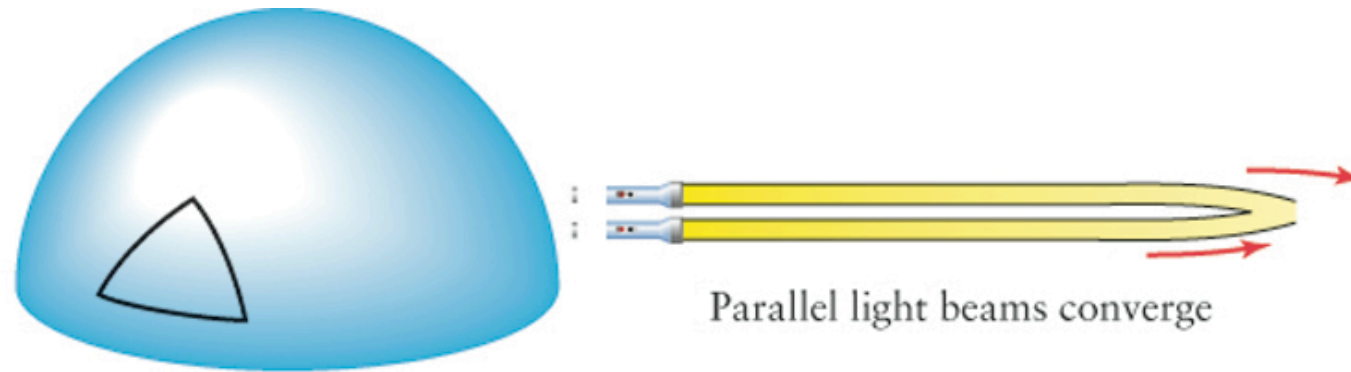
La forma dell'universo e il suo contenuto in Energia/Massa

- “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 (ρ_0)** di tutte le forme di materia e di energia.
- ρ_0 è la somma della densità di massa della materia, della radiazione e di ogni forma di energia.

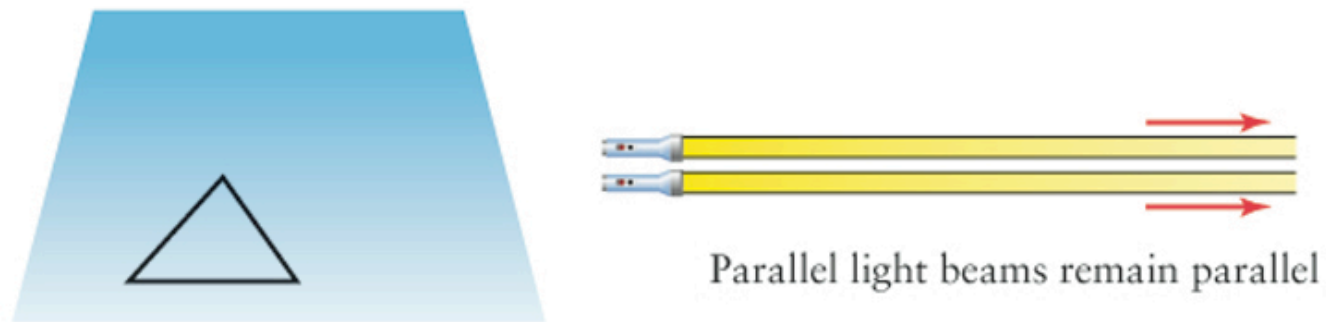
La forma dell'universo e il suo contenuto in Energia/Massa

- “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 (ρ_0)** di tutte le forme di materia e di energia.
- ρ_0 è la somma della densità di massa della materia, della radiazione e di ogni forma di energia.
- La misura della curvatura globale $\implies \rho_0$

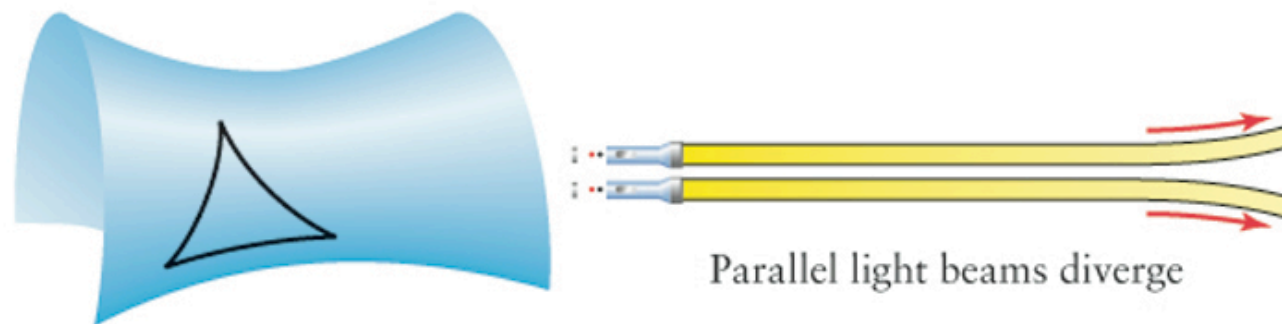
La curvatura dell'universo



(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

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 m^3)

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 m^3)
- Parametro di densità $\Omega_0 = \rho_0 / \rho_c$

La curvatura dell'universo

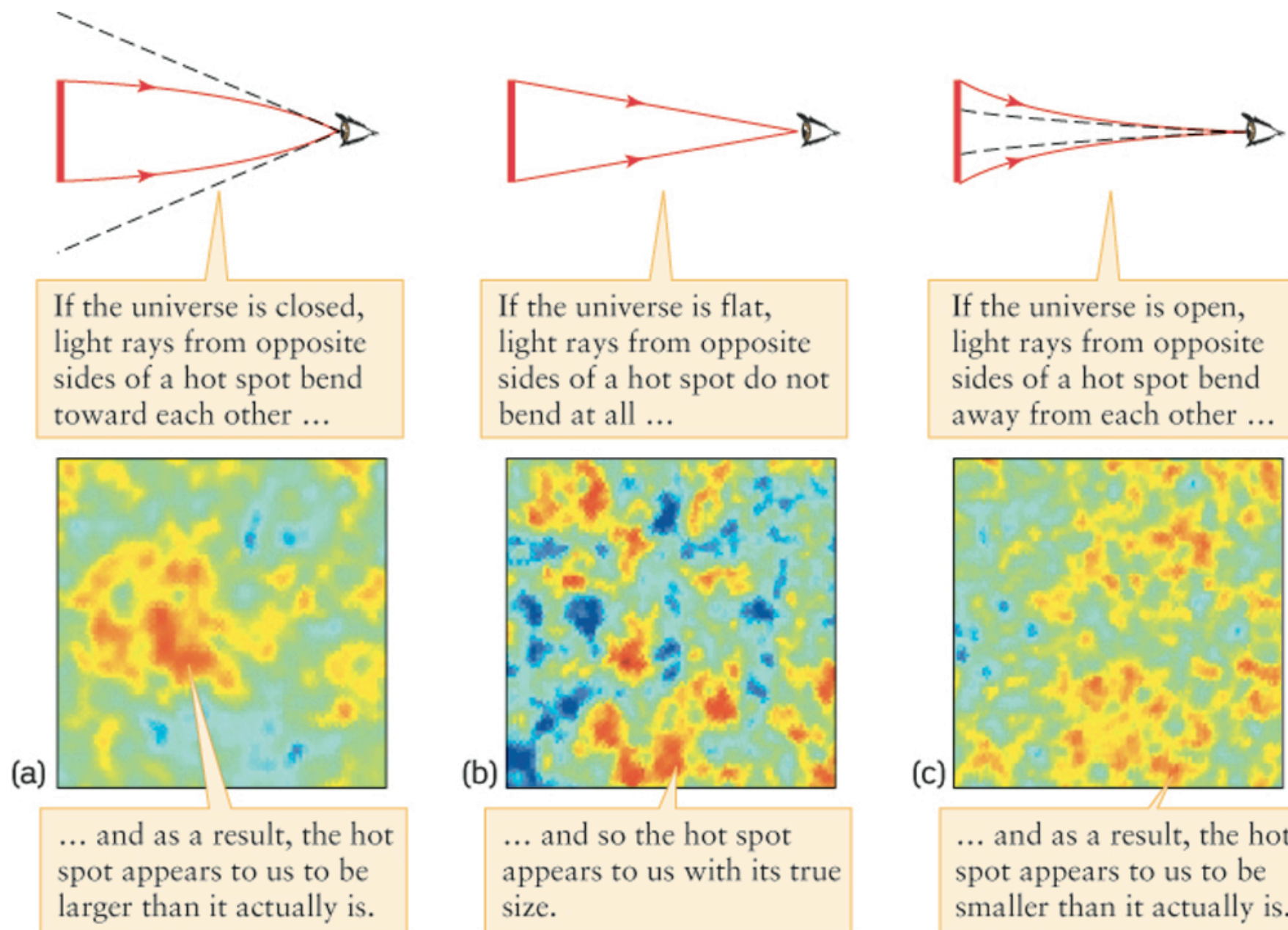
- densità critica $\rho_c = 3H_0^2 / 8\pi G = 10^{-26} \text{ kg/m}^3$ (6 atomi di H al m^3)
- Parametro di densità $\Omega_0 = \rho_0 / \rho_c$



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

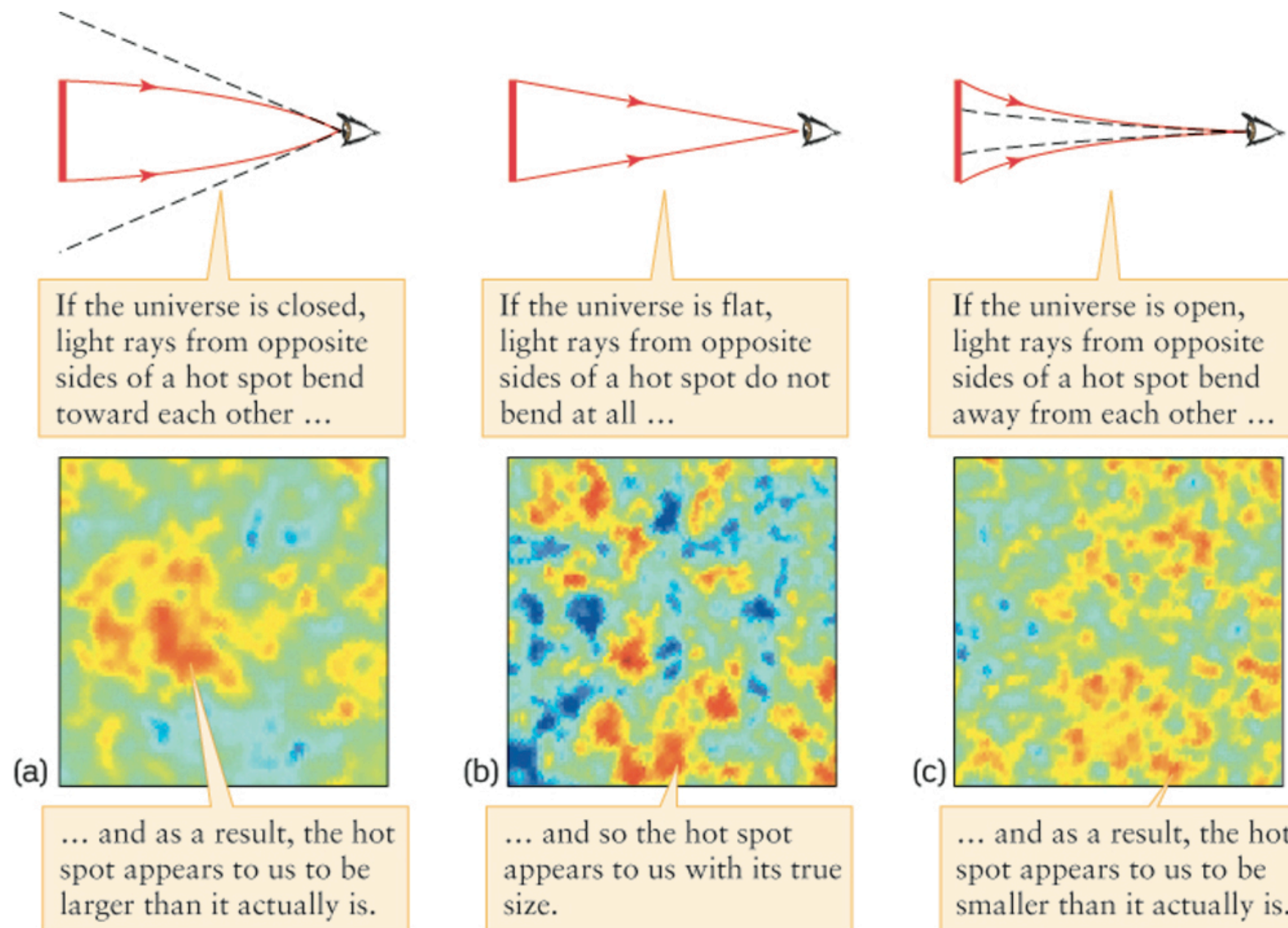
Geometry of space	Curvature of space	Type of universe	Combined average mass density (ρ_0)	Density parameter (Ω_0)
Spherical	positive	closed	$\rho_0 > \rho_c$	$\Omega_0 > 1$
Flat	zero	flat	$\rho_0 = \rho_c$	$\Omega_0 = 1$
Hyperbolic	negative	open	$\rho_0 < \rho_c$	$\Omega_0 < 1$

Misurare la curvatura dell'universo



Misurare la curvatura dell'universo

- Dimensione angolare dei hot spots in un universo piatto: 1°



L'universo è piatto

L'universo è piatto

- Se l'universo è piatto ($\Omega_0 = 1$, $\rho_0 = \rho_c$), c'è un grave problema:

L'universo è piatto

- Se l'universo è piatto ($\Omega_0 = 1$, $\rho_0 = \rho_c$), c'è un grave problema:
- ρ_0 dovrebbe essere uguale a ρ_m (solo 0.02% proviene dalla radiazione)

L'universo è piatto

- Se l'universo è piatto ($\Omega_0 = 1$, $\rho_0 = \rho_c$), c'è un grave problema:
- ρ_0 dovrebbe essere uguale a ρ_m (solo 0.02% proviene dalla radiazione)
- La **densità media di materia** è $\rho_m = 2.4 \cdot 10^{-27} \text{ kg/m}^3$

L'universo è piatto

- Se l'universo è piatto ($\Omega_0 = 1$, $\rho_0 = \rho_c$), c'è un grave problema:
- ρ_0 dovrebbe essere uguale a ρ_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** $\Omega_m = \rho_m / \rho_c = 0.24$

L'universo è piatto

- Se l'universo è piatto ($\Omega_0 = 1$, $\rho_0 = \rho_c$), c'è un grave problema:
- ρ_0 dovrebbe essere uguale a ρ_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 Ω_0 dovrebbe essere uguale a Ω_m ! L'universo dovrebbe essere aperto, ma non piatto come lo mostra il CMB.

L'universo è piatto

- Se l'universo è piatto ($\Omega_0 = 1$, $\rho_0 = \rho_c$), c'è un grave problema:
- ρ_0 dovrebbe essere uguale a ρ_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 Ω_0 dovrebbe essere uguale a Ω_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 ρ_0 .
Che cosa rende conto del resto?

Energia oscura

Energia oscura

- La sorgente della densità mancante non si rivela da effetti gravitazionali (come la materia oscura)

Energia oscura

- La sorgente della densità mancante non si rivela da effetti gravitazionali (come la materia oscura)
- Parametro di densità di energia oscura: $\Omega_\Lambda = \rho_\Lambda / \rho_c$

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)

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!

SN Ia rivelano l'accelerazione dell'universo

SN Ia rivelano l'accelerazione dell'universo

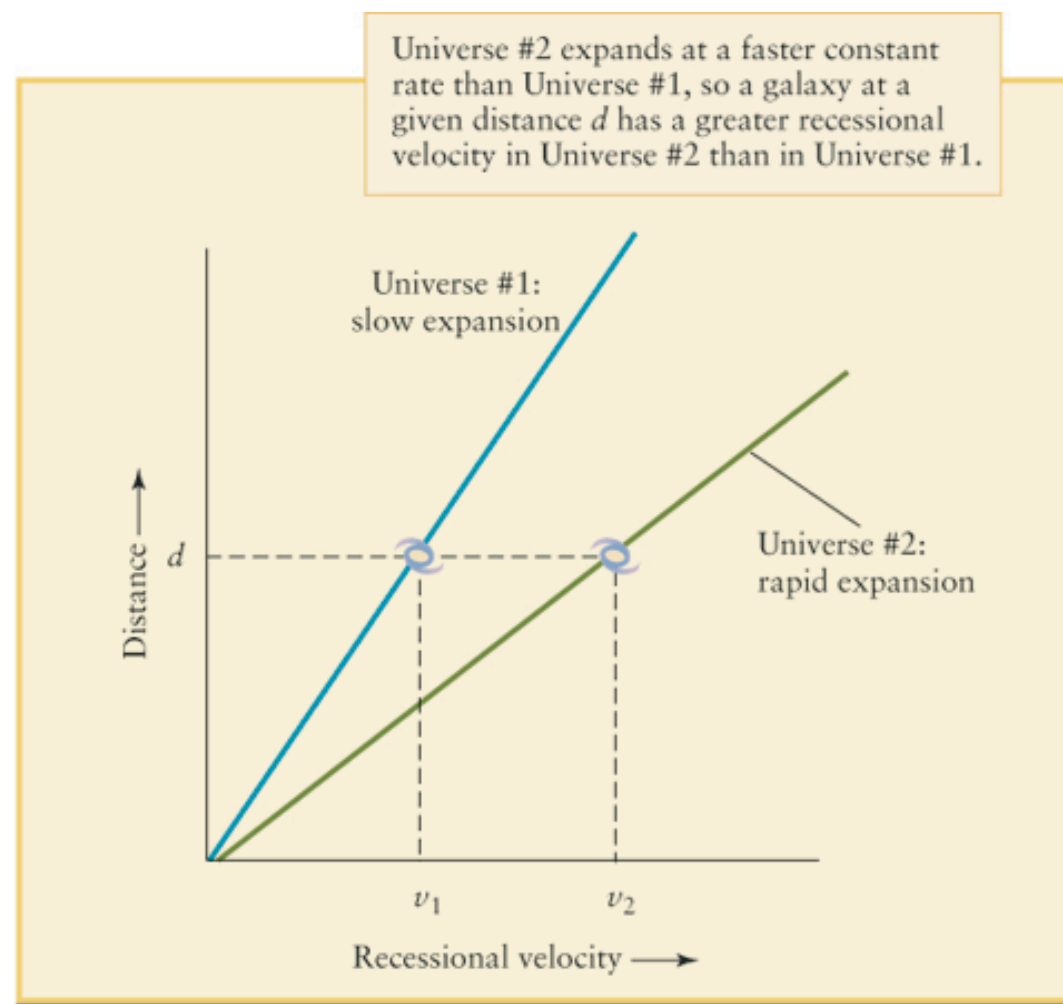
- Gravità $\implies$ rallentamento dell'espansione.

SN Ia rivelano l'accelerazione dell'universo

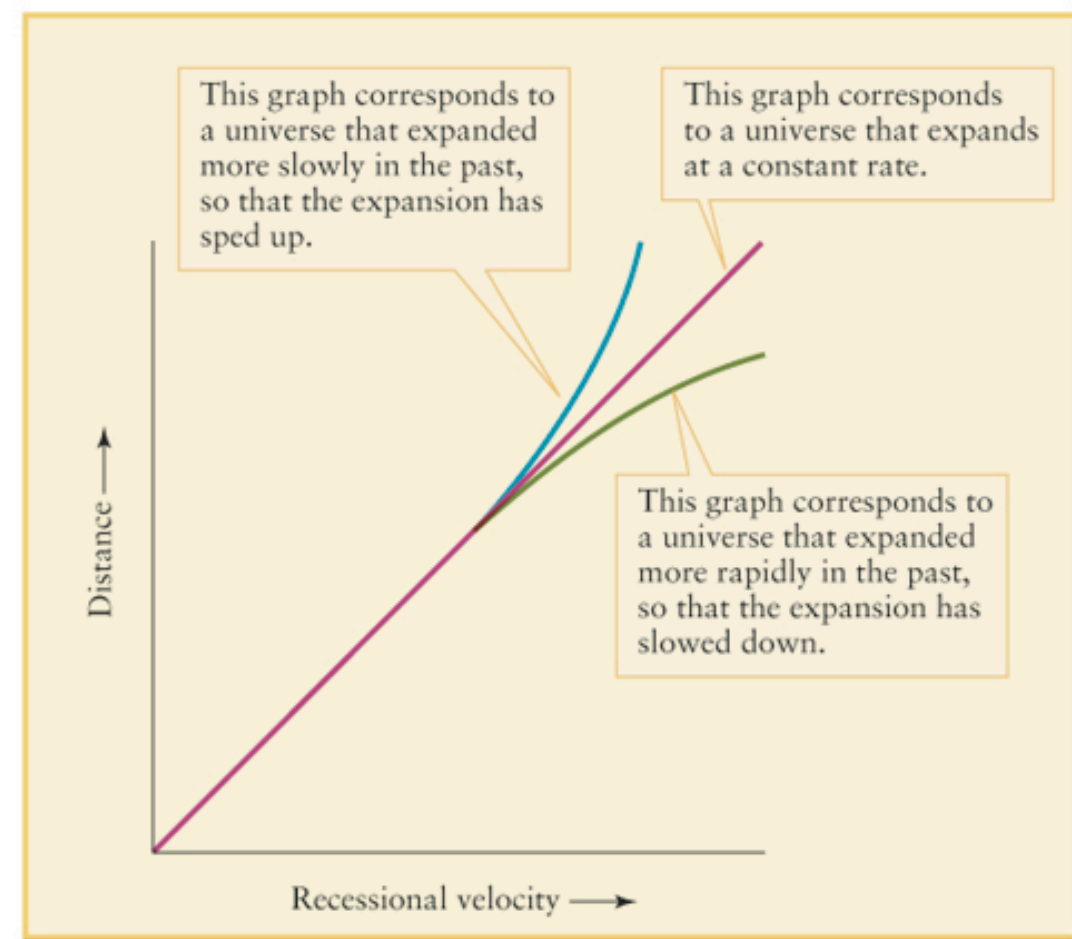
- Gravità $\implies$ rallentamento dell'espansione.
- La legge di Hubble è la stessa nel passato? Studiamo le SN Ia.

SN Ia rivelano l'accelerazione dell'universo

- Gravità $\Rightarrow$ rallentamento dell'espansione.
- La legge di Hubble è la stessa nel passato? Studiamo le SN Ia.



(a) Two universes with different expansion rates



(b) Possible expansion histories of the universe

SN Ia rivelano l'accelerazione dell'universo

SN Ia rivelano l'accelerazione dell'universo

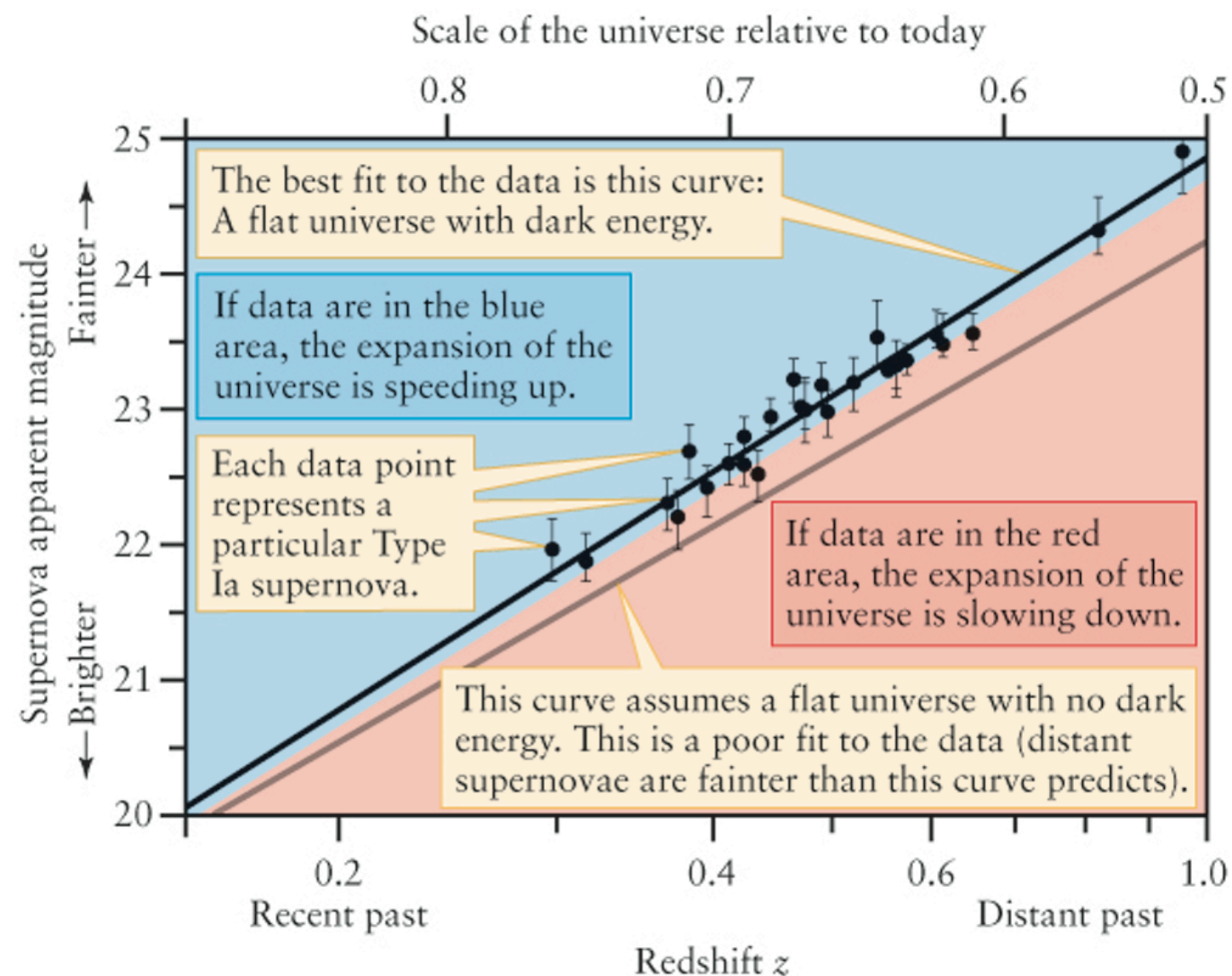
- Supernova Cosmology Project (Perlmutter et al), Berkeley

SN Ia rivelano l'accelerazione dell'universo

- Supernova Cosmology Project (Perlmutter et al), Berkeley
- High-Z Supernova Team (Schmidt et al), Australia

SN Ia rivelano l'accelerazione dell'universo

- Supernova Cosmology Project (Perlmutter et al), Berkeley
- High-Z Supernova Team (Schmidt et al), Australia



SN Ia rivelano l'accelerazione dell'universo

SN Ia rivelano l'accelerazione dell'universo

- SN Ia indicano l'importanza relativa di Ω_Λ (accelera l'espansione) e Ω_m (frena l'espansione): $\Omega_\Lambda - \Omega_m$

SN Ia rivelano l'accelerazione dell'universo

- SN Ia indicano l'importanza relativa di Ω_Λ (accelera l'espansione) e Ω_m (frena l'espansione): $\Omega_\Lambda - \Omega_m$
- CMB indica il valore di $\Omega_0 = \Omega_\Lambda + \Omega_m$

SN Ia rivelano l'accelerazione dell'universo

- SN Ia indicano l'importanza relativa di Ω_Λ (accelera l'espansione) e Ω_m (frena l'espansione): $\Omega_\Lambda - \Omega_m$
- CMB indica il valore di $\Omega_0 = \Omega_\Lambda + \Omega_m$
- Ammassi indicano il valore di Ω_m

SN Ia rivelano l'accelerazione dell'universo

- SN Ia indicano l'importanza relativa di Ω_Λ (accelera l'espansione) e Ω_m (frena l'espansione): $\Omega_\Lambda - \Omega_m$
- CMB indica il valore di $\Omega_0 = \Omega_\Lambda + \Omega_m$
- Ammassi indicano il valore di Ω_m

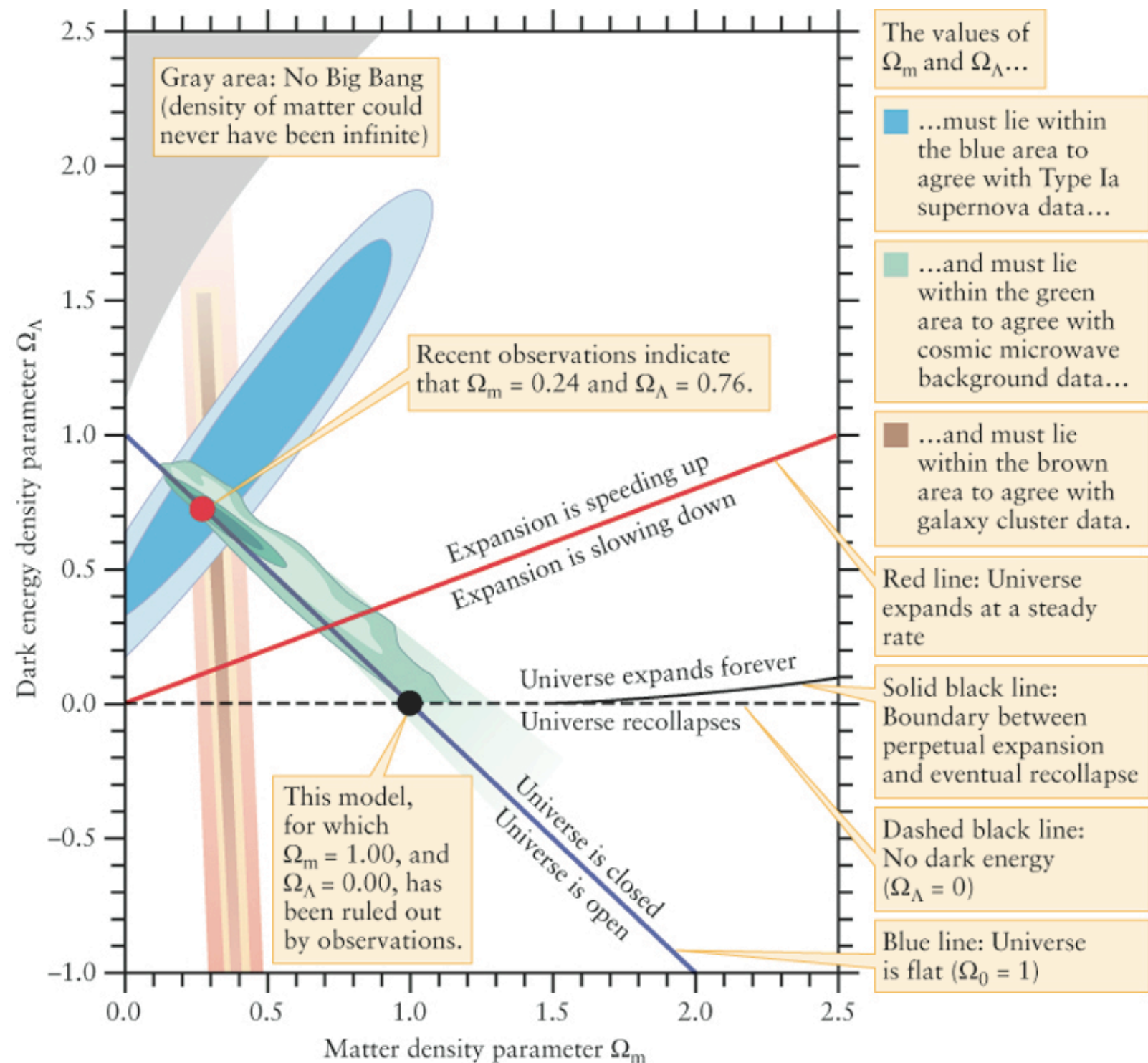
$$\mathbf{SN\ Ia} \implies \Omega_\Lambda - \Omega_m$$

$$\mathbf{CMB} \implies \Omega_\Lambda + \Omega_m = \Omega_0$$

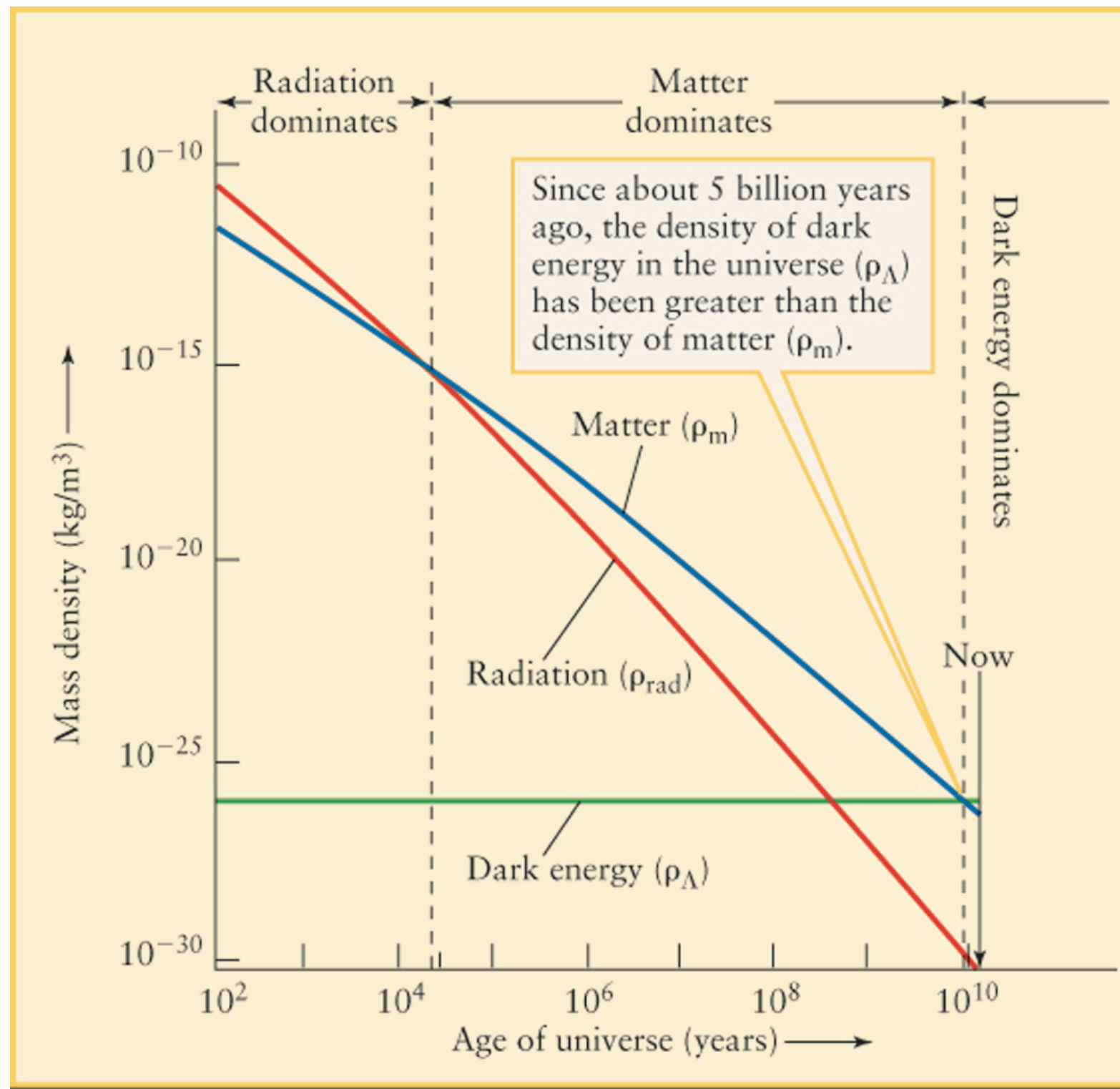
$$\mathbf{Ammassi} \implies \Omega_m$$

SN Ia rivelano l'accelerazione dell'universo

$$\begin{aligned}\Omega_m &= 0.241 \pm 0.034 \\ \Omega_\Lambda &= 0.759 \pm 0.034 \\ \Omega_0 &= \Omega_m + \Omega_\Lambda = 1.02 \pm 0.02\end{aligned}$$

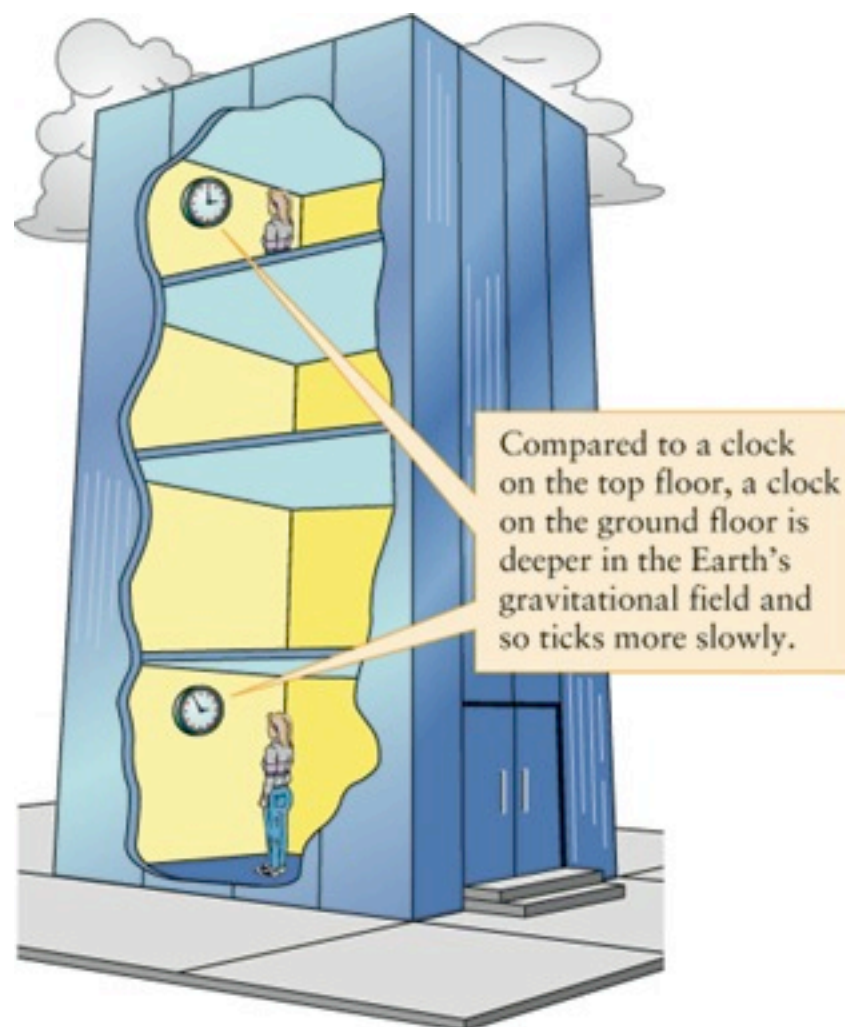


L'energia oscura domina l'universo (ultimi $5 \cdot 10^9$ di anni)

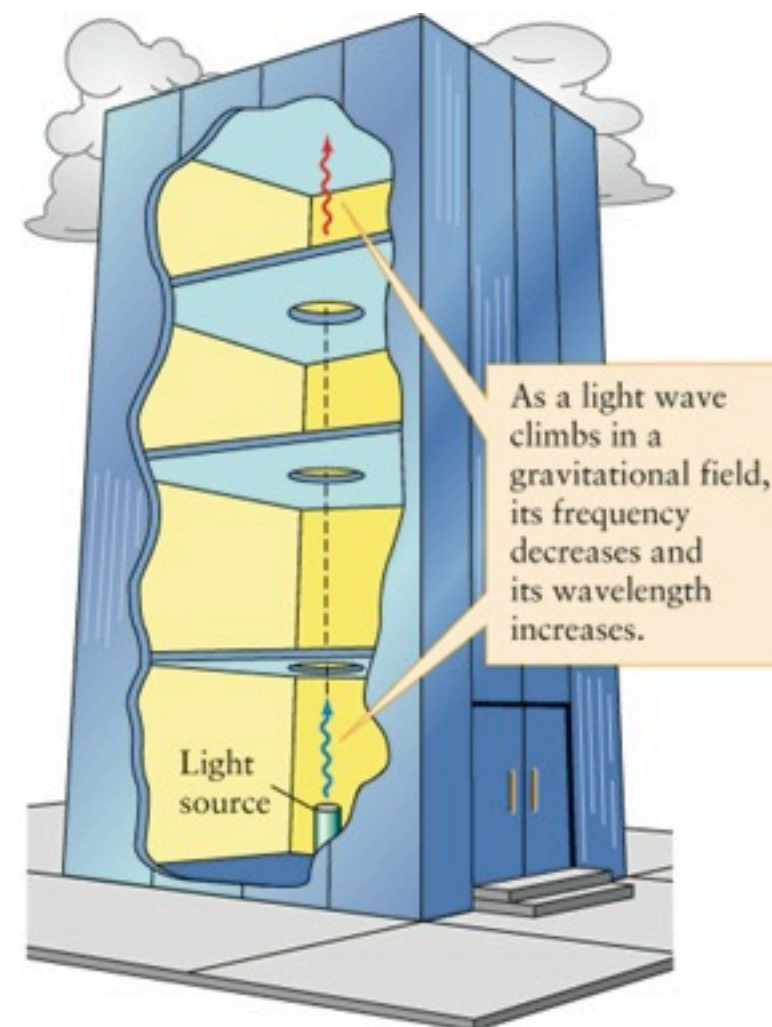


Redshift gravitazionale

- Campo gravitazionale più intenso: il tempo rallenta
- Salendo, la frequenza f (il numero di cicli / sec) diminuisce $\Rightarrow \lambda$ aumenta



(a) The gravitational slowing of time



(b) The gravitational redshift

Universo primordiale, proto-ammassi.

- Fotoni che emergono da zone **più dense**, maggiore $z_{\text{grav.}} \implies \lambda$ più lunghe
 $\implies$ zone più fredde

