

L'ATA organizza



In collaborazione con



COMUNE DI FRASCATI



MUSA

MUSEO TUSCOLANO
SCUDERIE ALDOBRANDINI

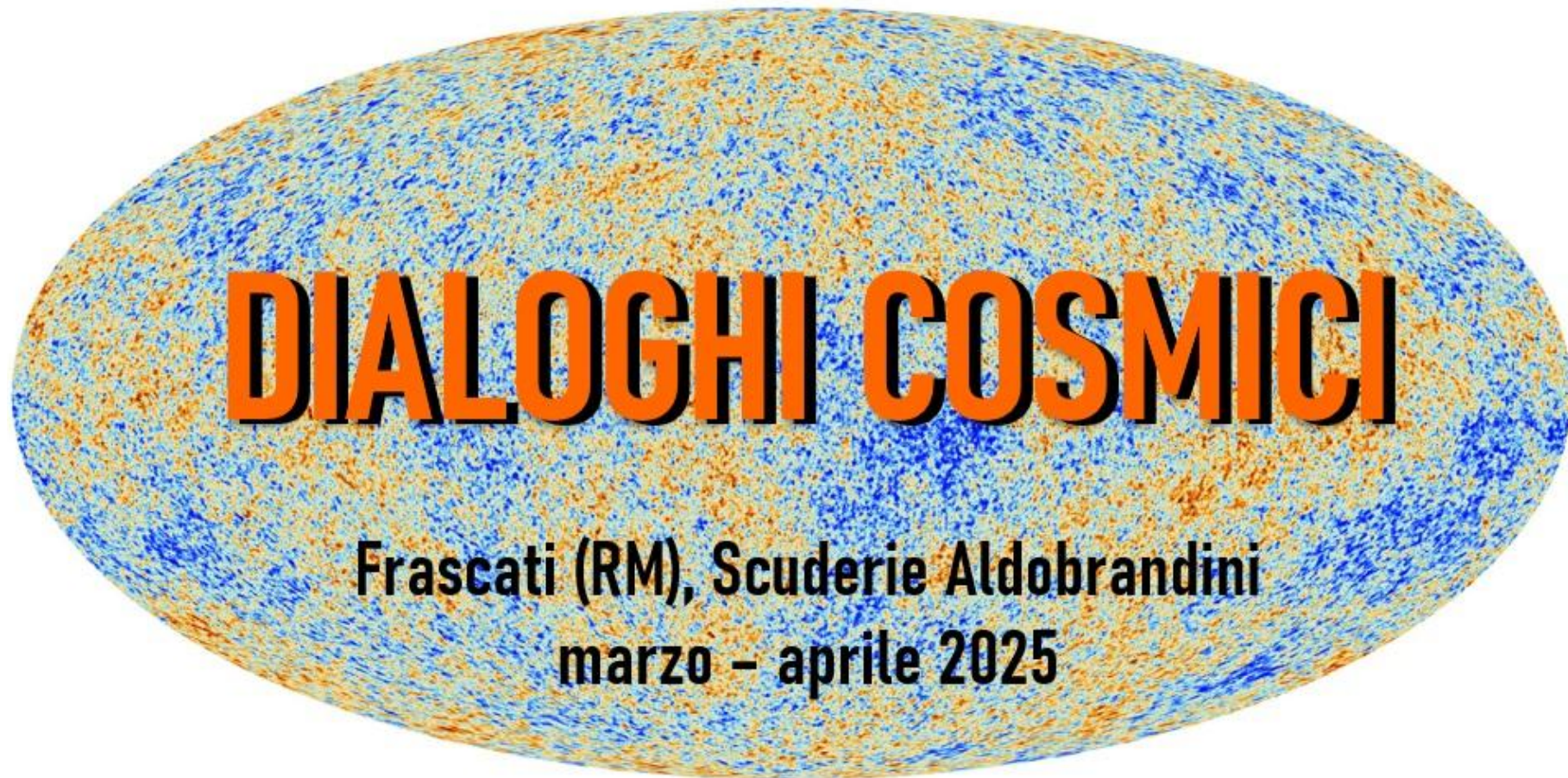
Con il patrocinio di



INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare



DIALOGHI COSMICI

Frascati (RM), Scuderie Aldobrandini
marzo - aprile 2025

Paolo de Bernardis - Dipartimento di Fisica, Sapienza
Dialogo 3 – 15 marzo 2025

3) *La storia dell'universo*

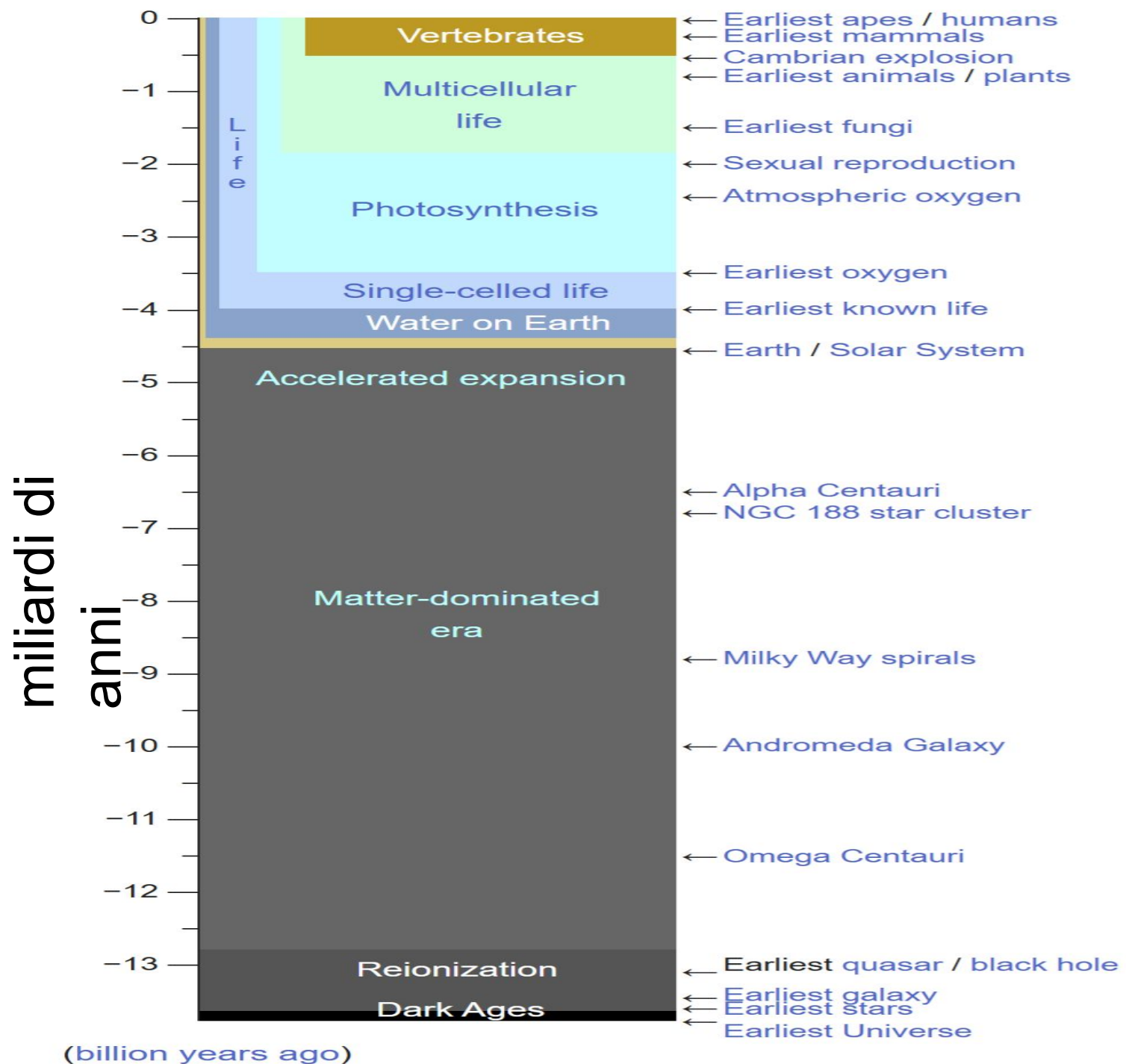


Dialoghi cosmici – 3

- Come sappiamo che l'universo non è sempre stato così come lo osserviamo oggi, ma si è evoluto ?
- A cosa è dovuta l'evoluzione ?
- Quali sono stati i passi più importanti dell'evoluzione ?
- Oggi cercheremo di rispondere a queste domande.

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

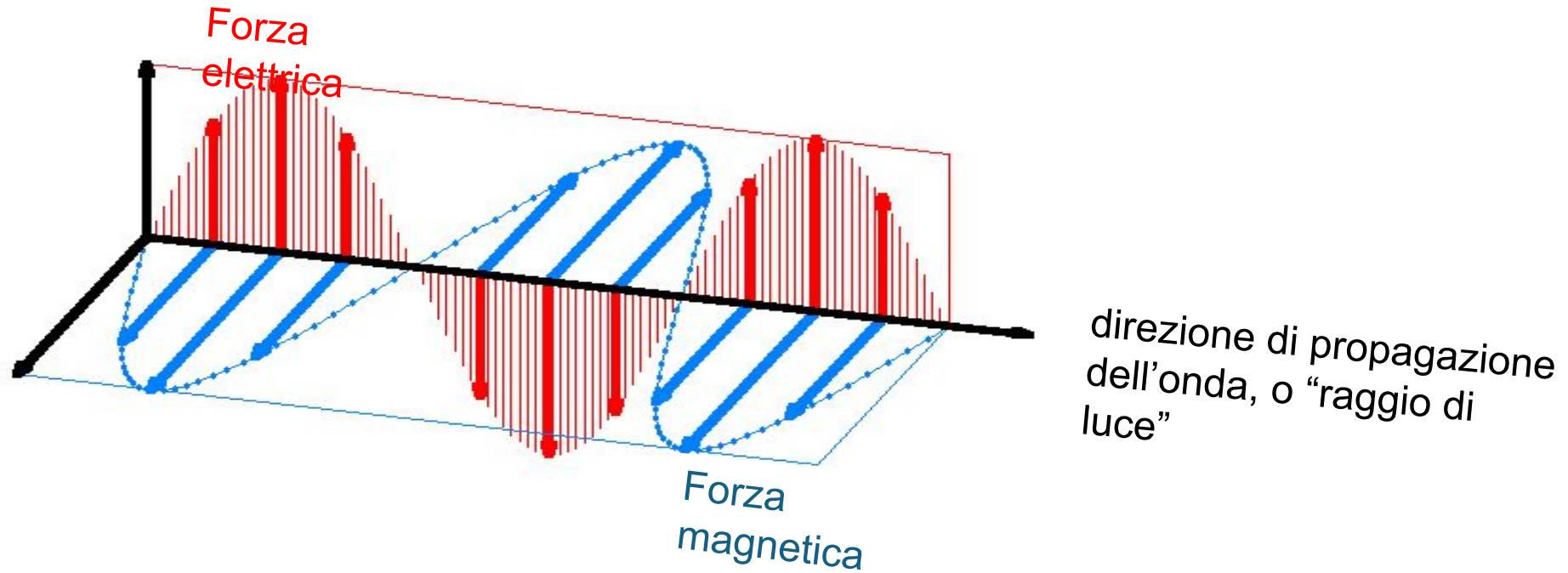
Il passato
dell'universo
si misura in
miliardi di anni



**Dark Energy
Accelerated Expansion**



come osservare il passato dell'universo
per capirne la storia,
e fino a dove si riesce a fare



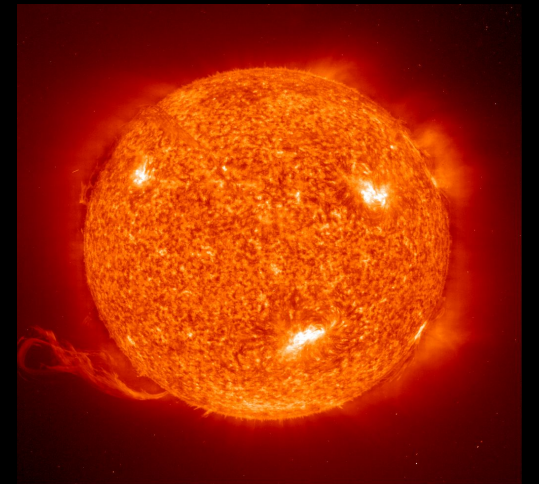
L'onda elettromagnetica si propaga ad una velocità di 299792458 m/s
(un miliardo di chilometri all'ora !)

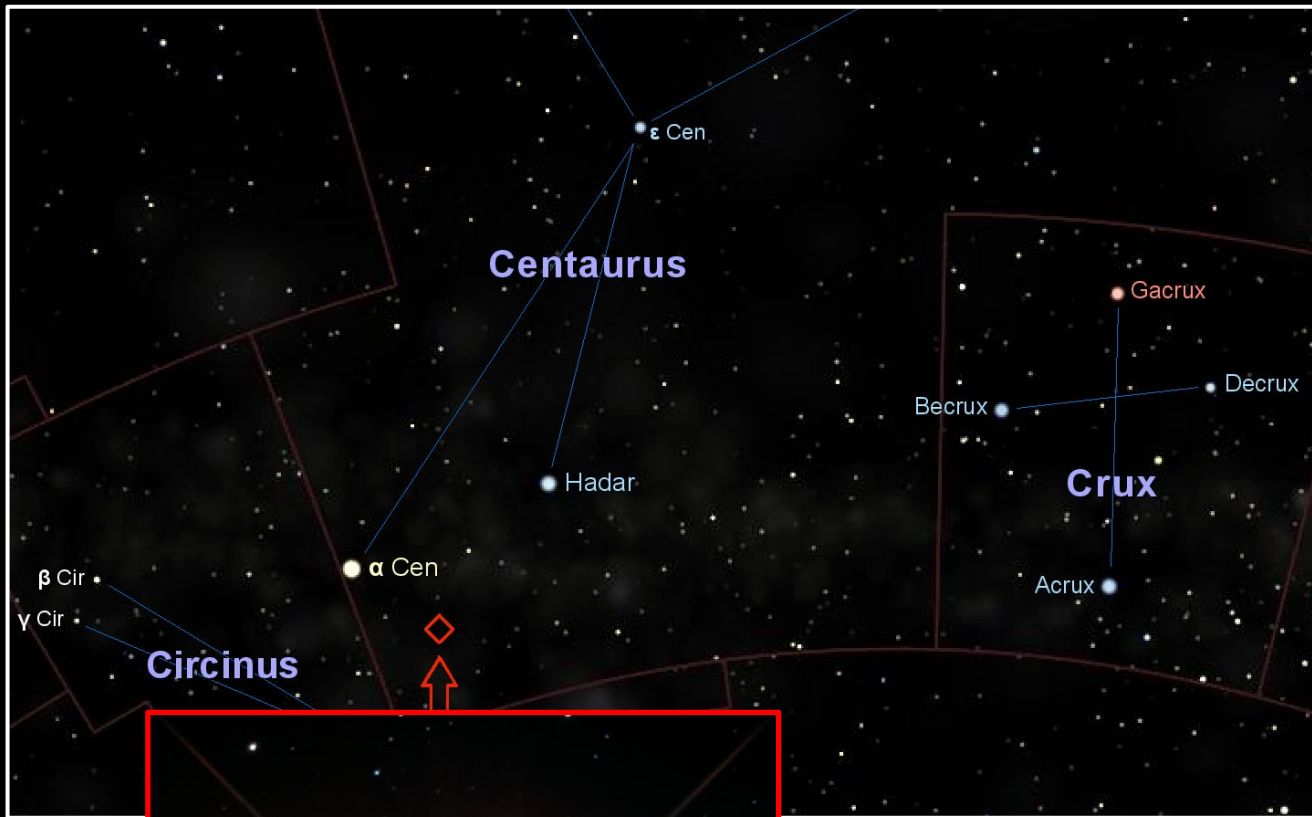
Terra



150 milioni di km
8 minuti luce

Sole



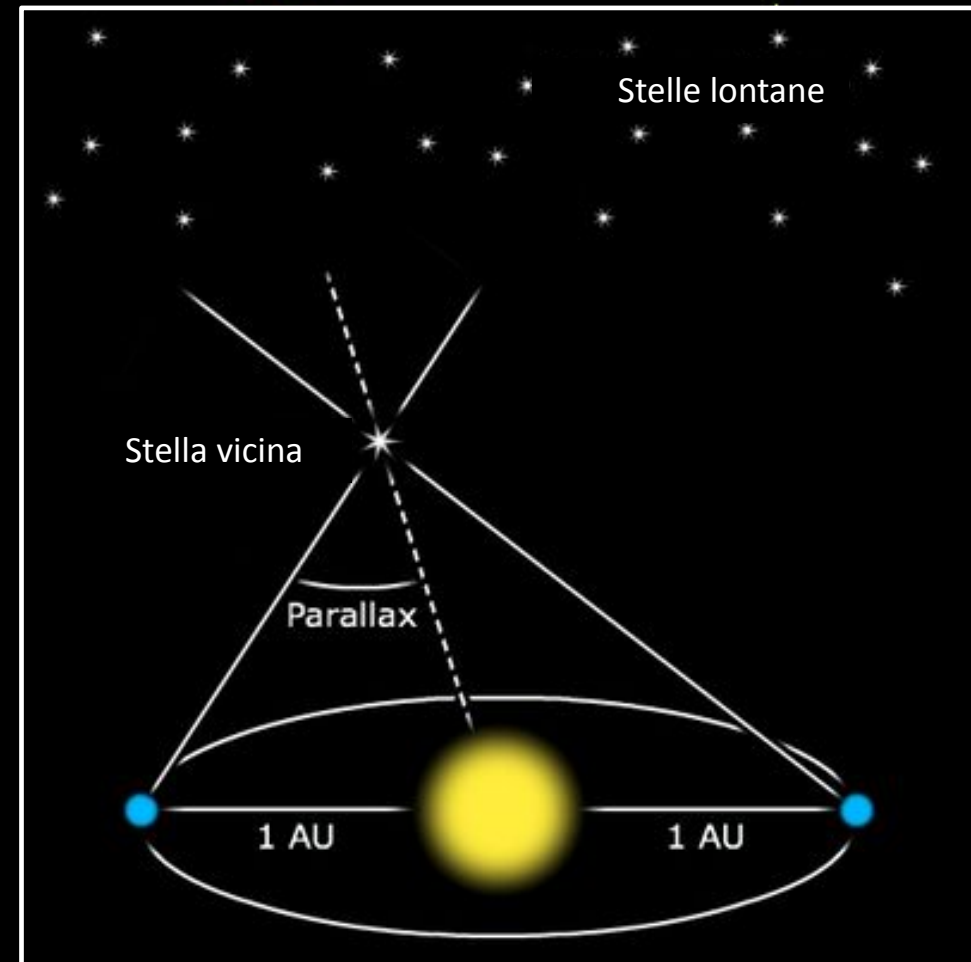


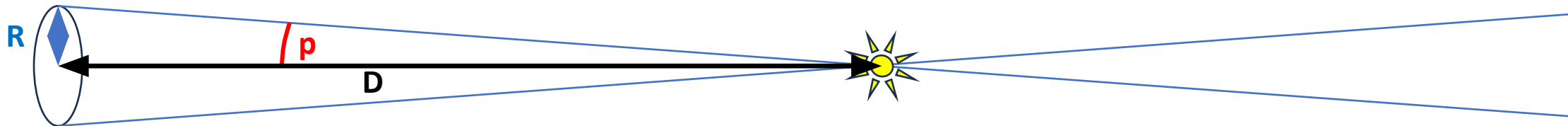
Distanza di **proxima centauri**:
 4.243 anni luce
 4 miliardi di miliardi di m

La vediamo come era più di 4
 anni fa, quando vediamo dei
 brillamenti vuol dire che sono
 avvenuti 4 anni prima.

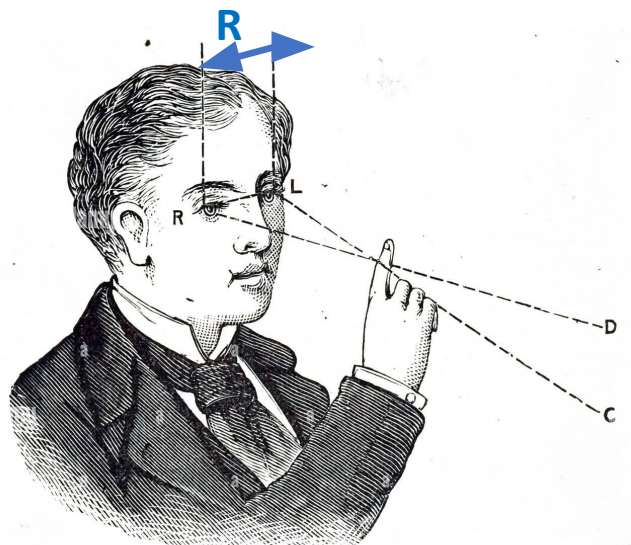


1998 Dec 31



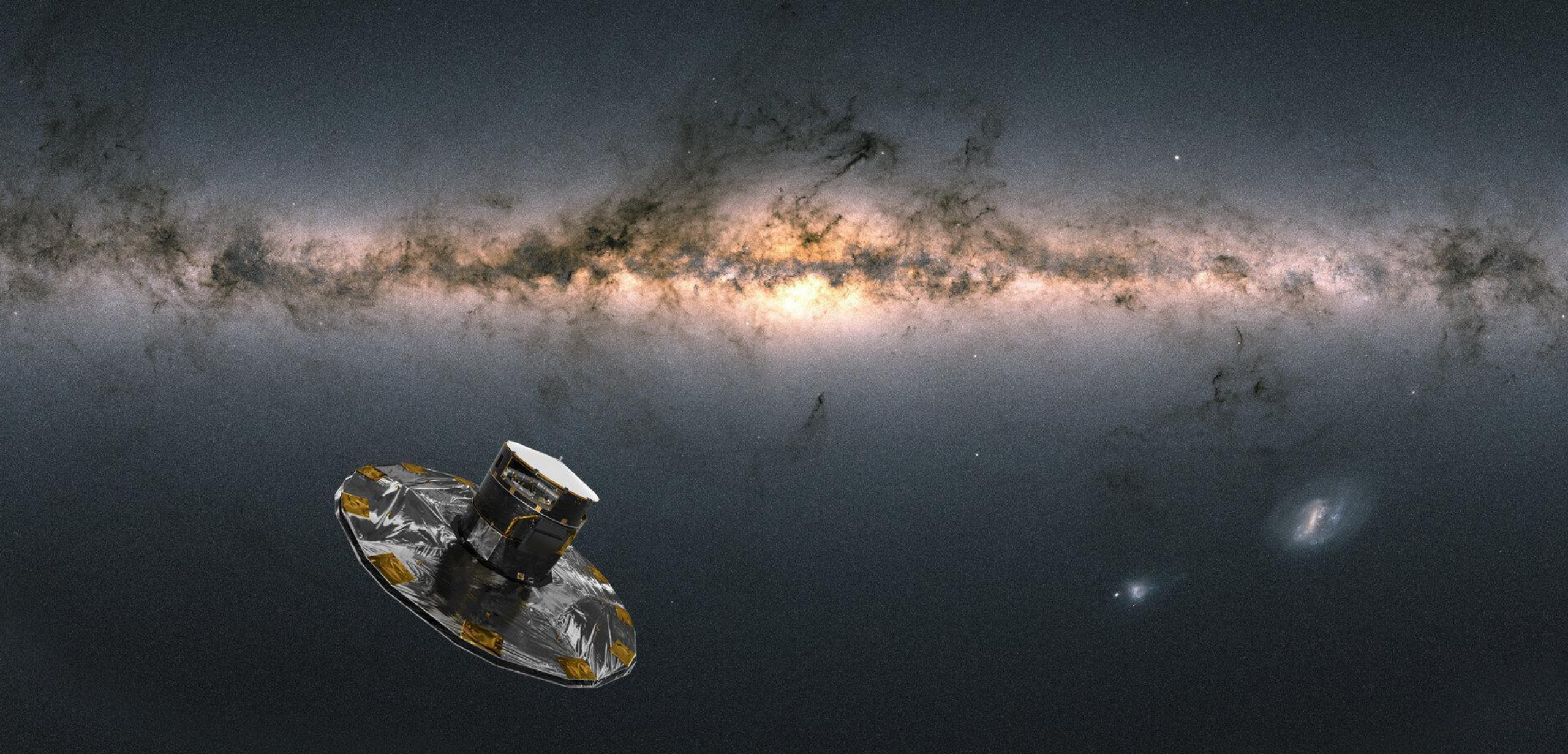


- Se la distanza della stella **D** è di 3.36 anni luce, l'angolo di parallasse **p** vale un secondo d'arco (1").
- **parsec**

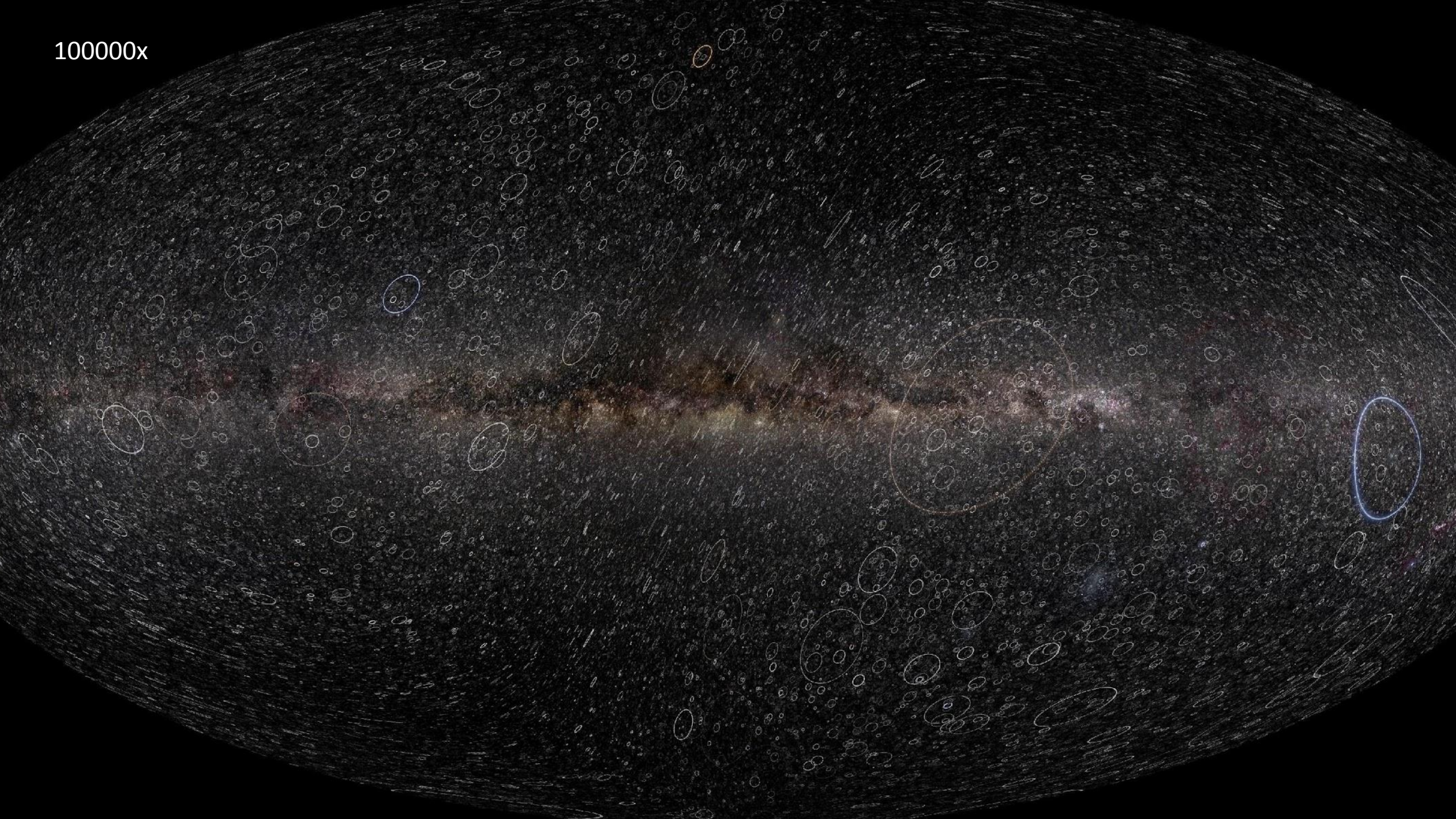


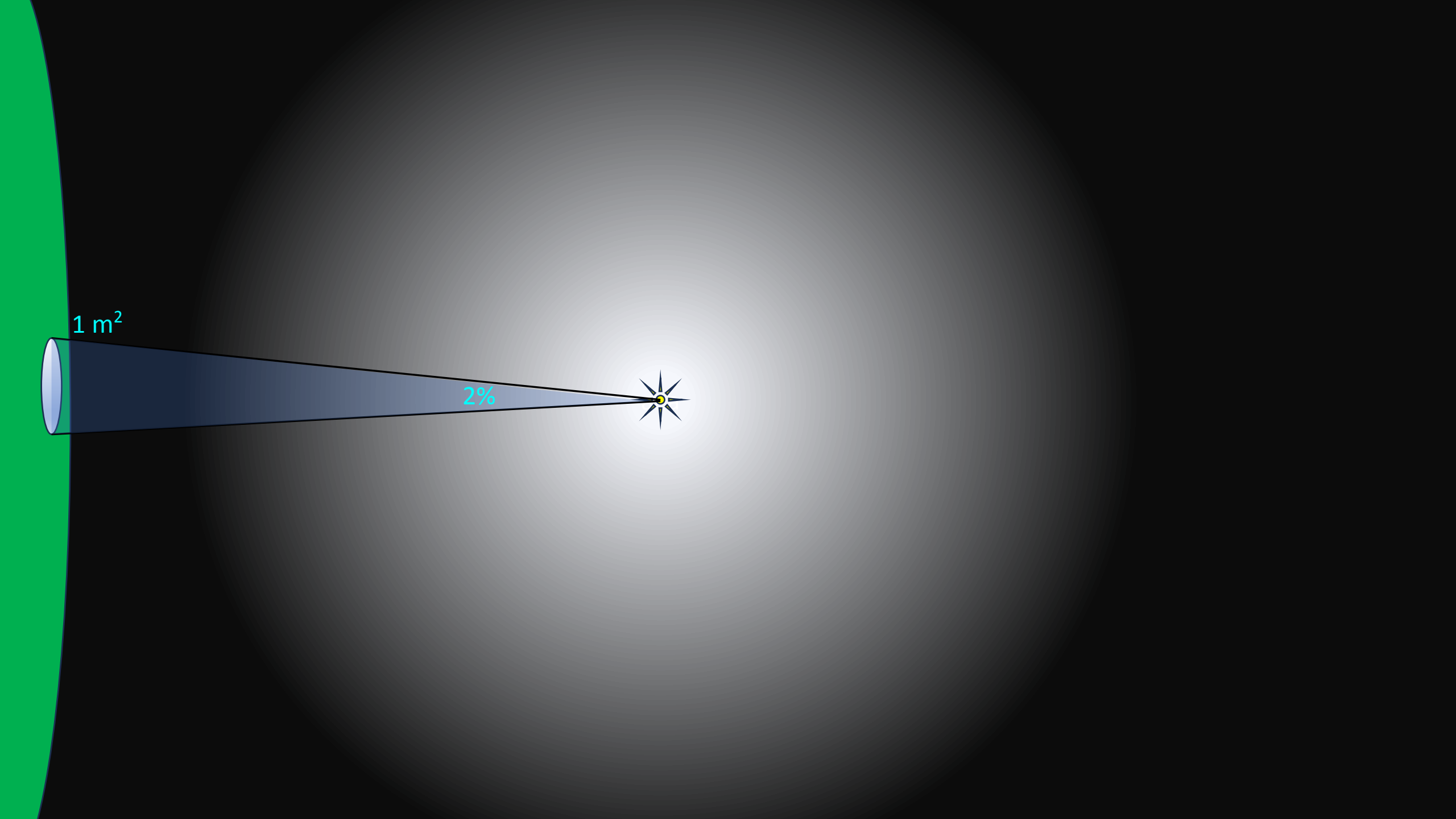
- Per avere una parallasse di 1 secondo d'arco, dovremmo allontanare il dito a una distanza di 15 km da noi (!).

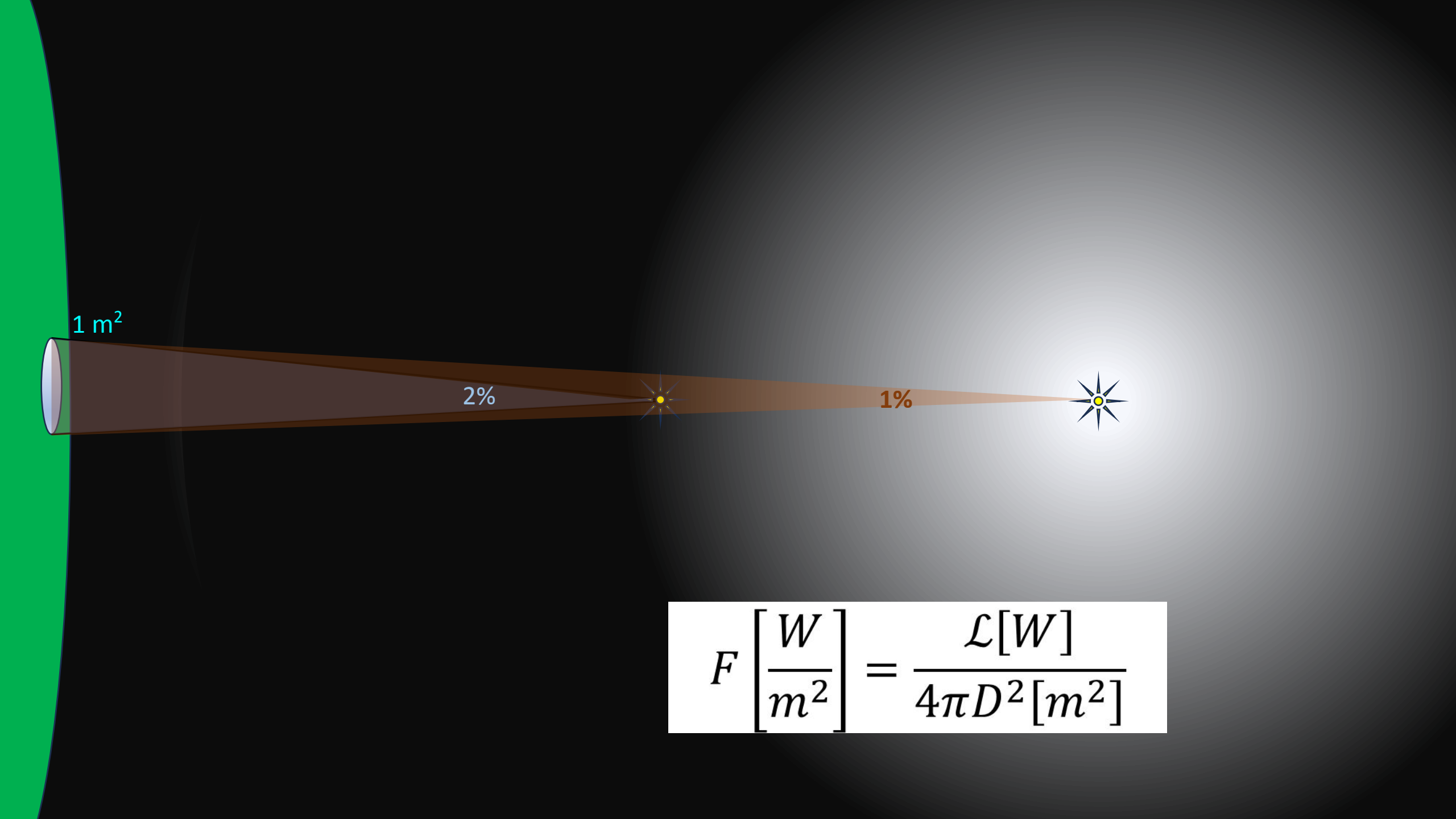
GAIA (ESA): parallasse, e quindi distanza, di 1.47 miliardi di stelle (!)
con distanze fino a migliaia di parsec (!!)



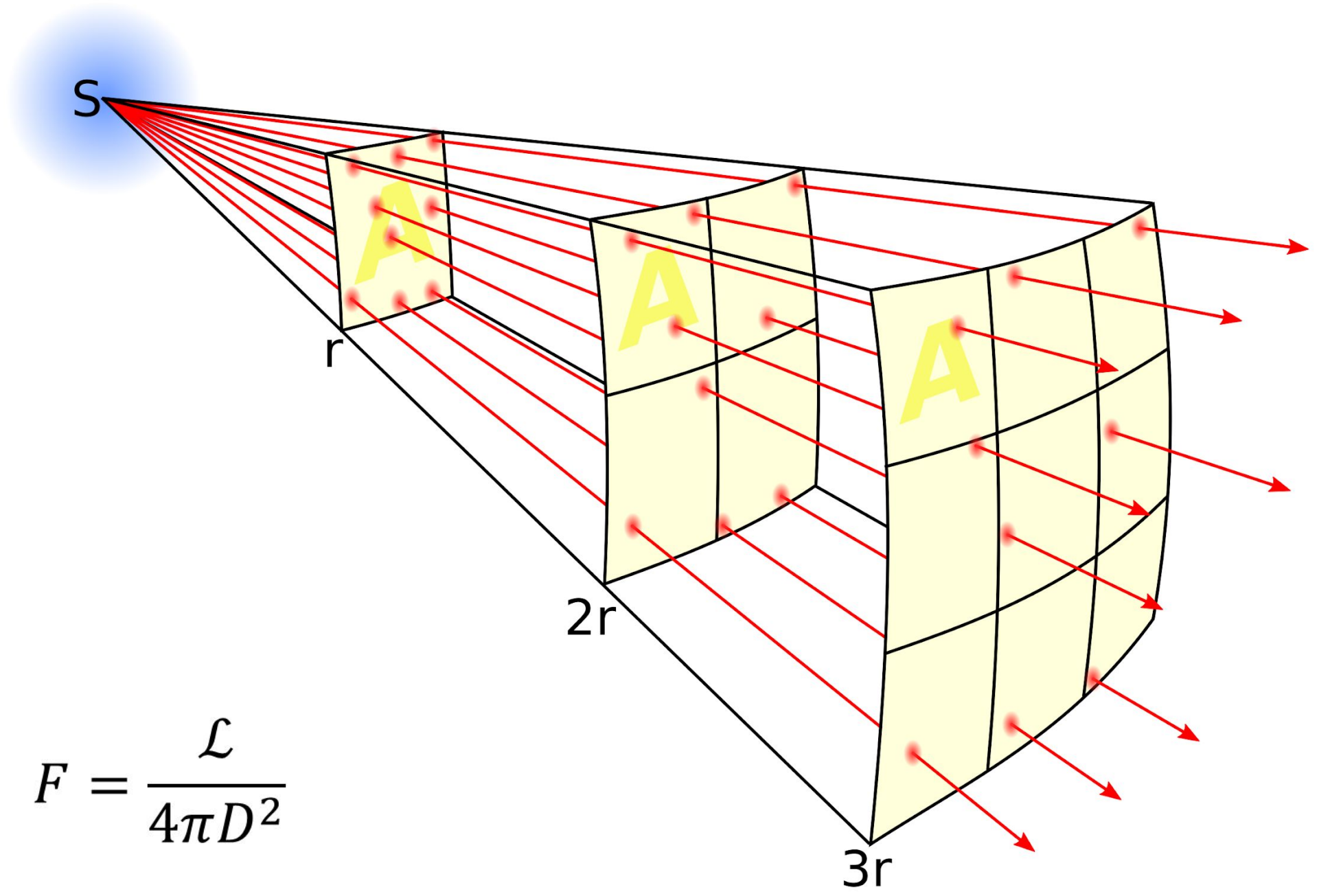
10000x



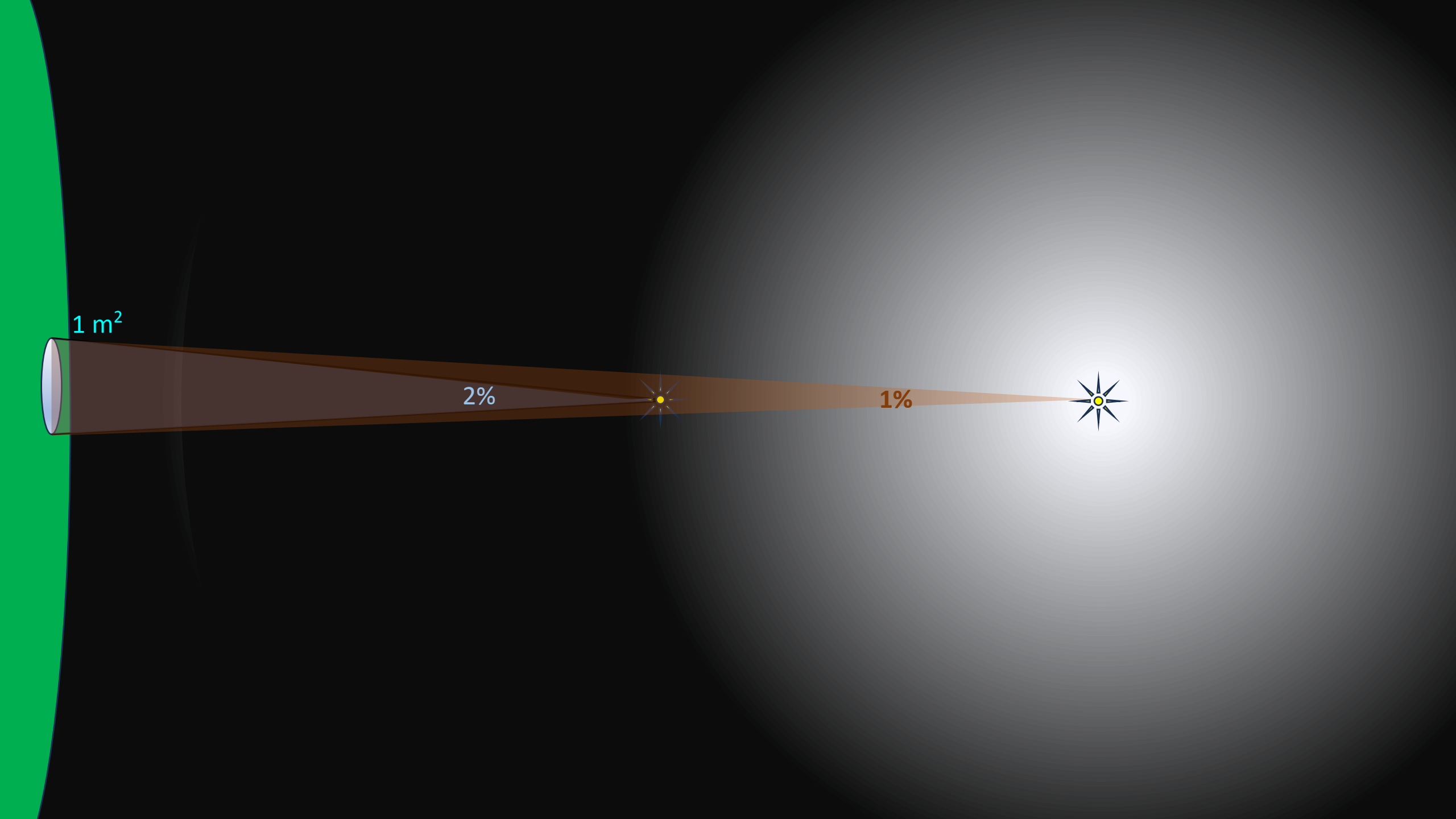




$$F \left[\frac{W}{m^2} \right] = \frac{\mathcal{L}[W]}{4\pi D^2 [m^2]}$$



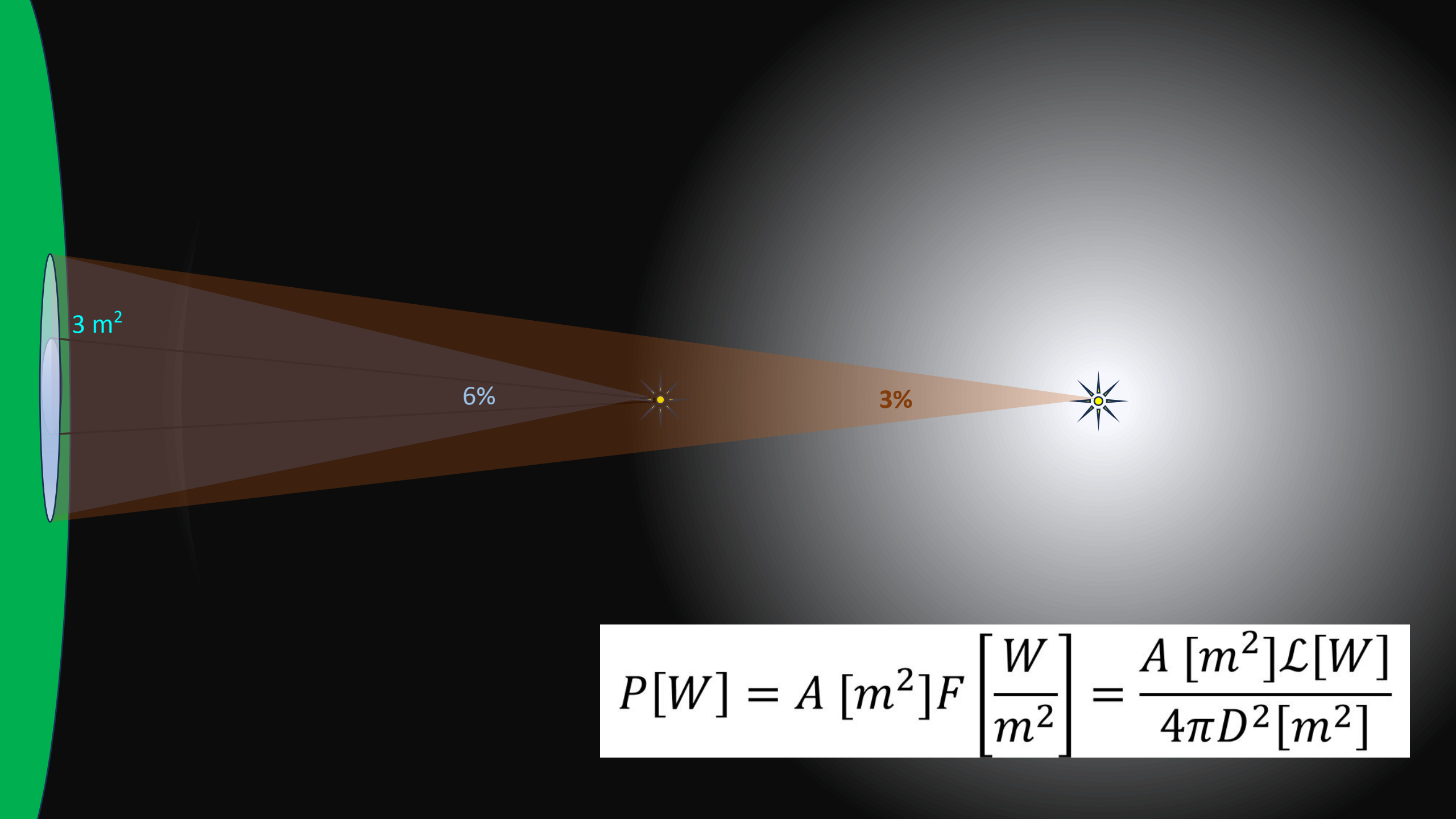
$$F = \frac{\mathcal{L}}{4\pi D^2}$$



1 m^2

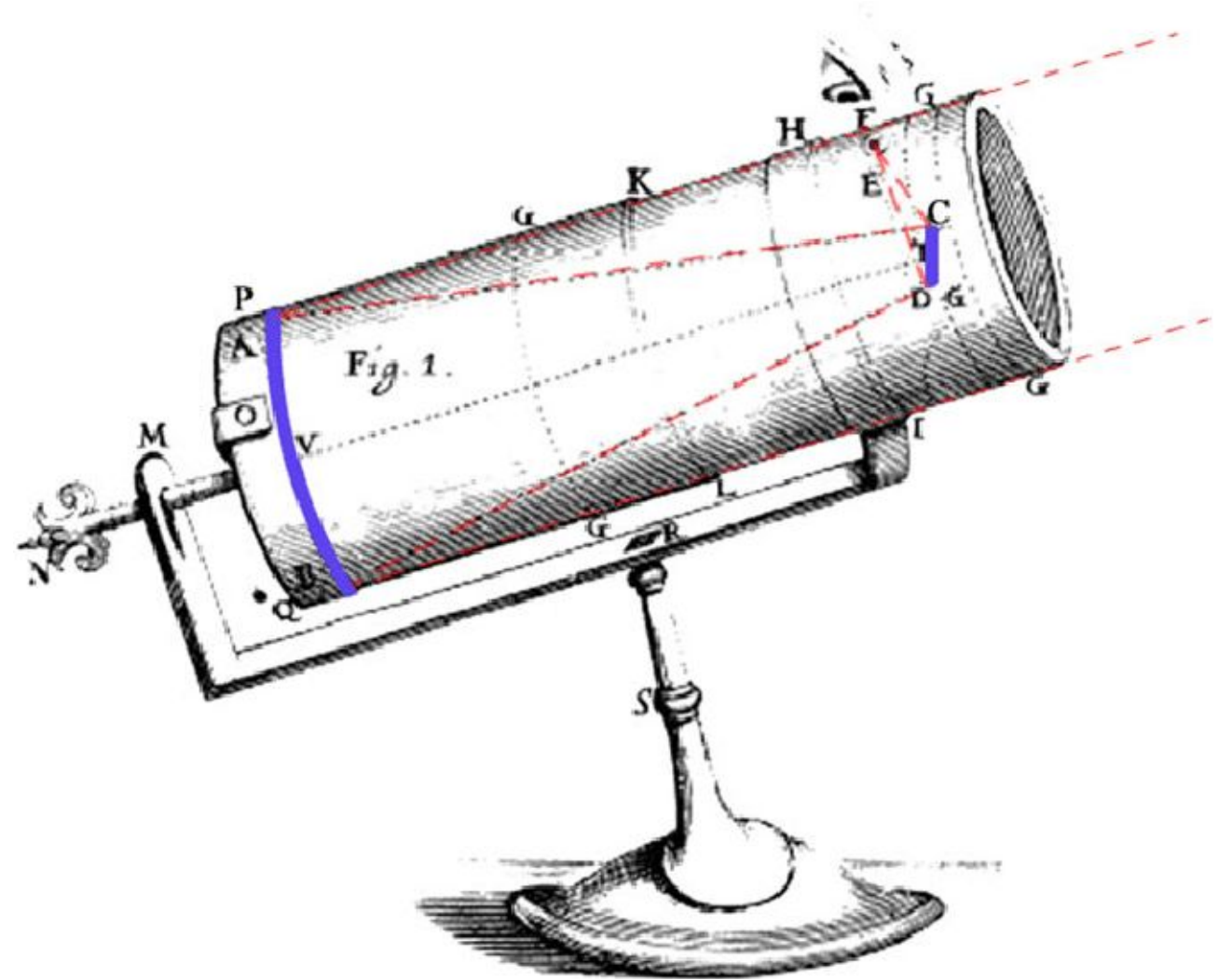
2%

1%

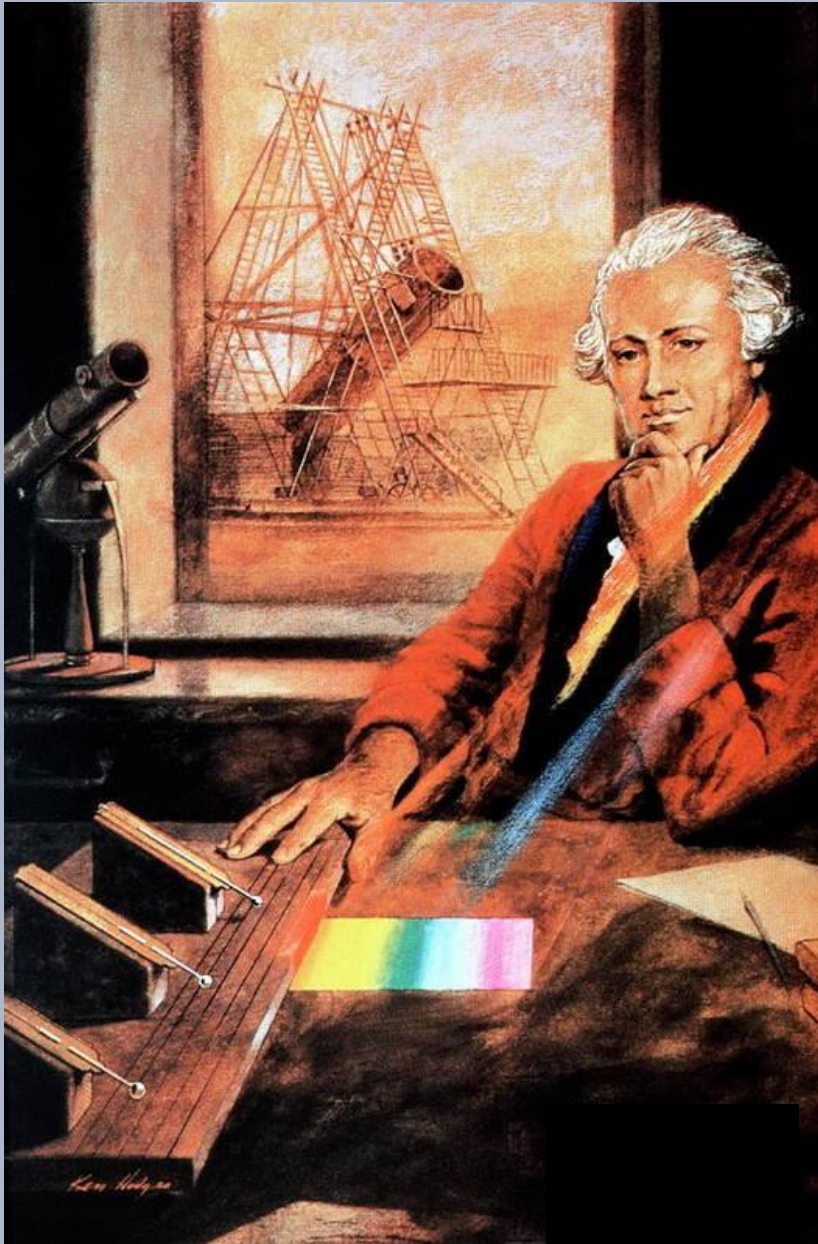


$$P[W] = A [m^2] F \left[\frac{W}{m^2} \right] = \frac{A [m^2] \mathcal{L}[W]}{4\pi D^2 [m^2]}$$

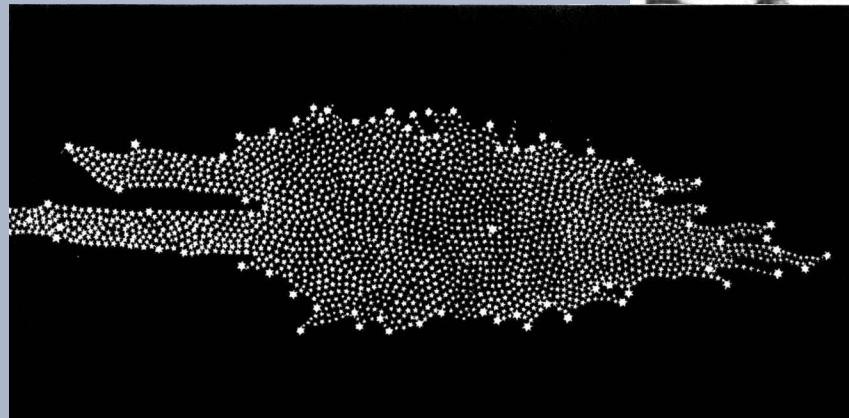
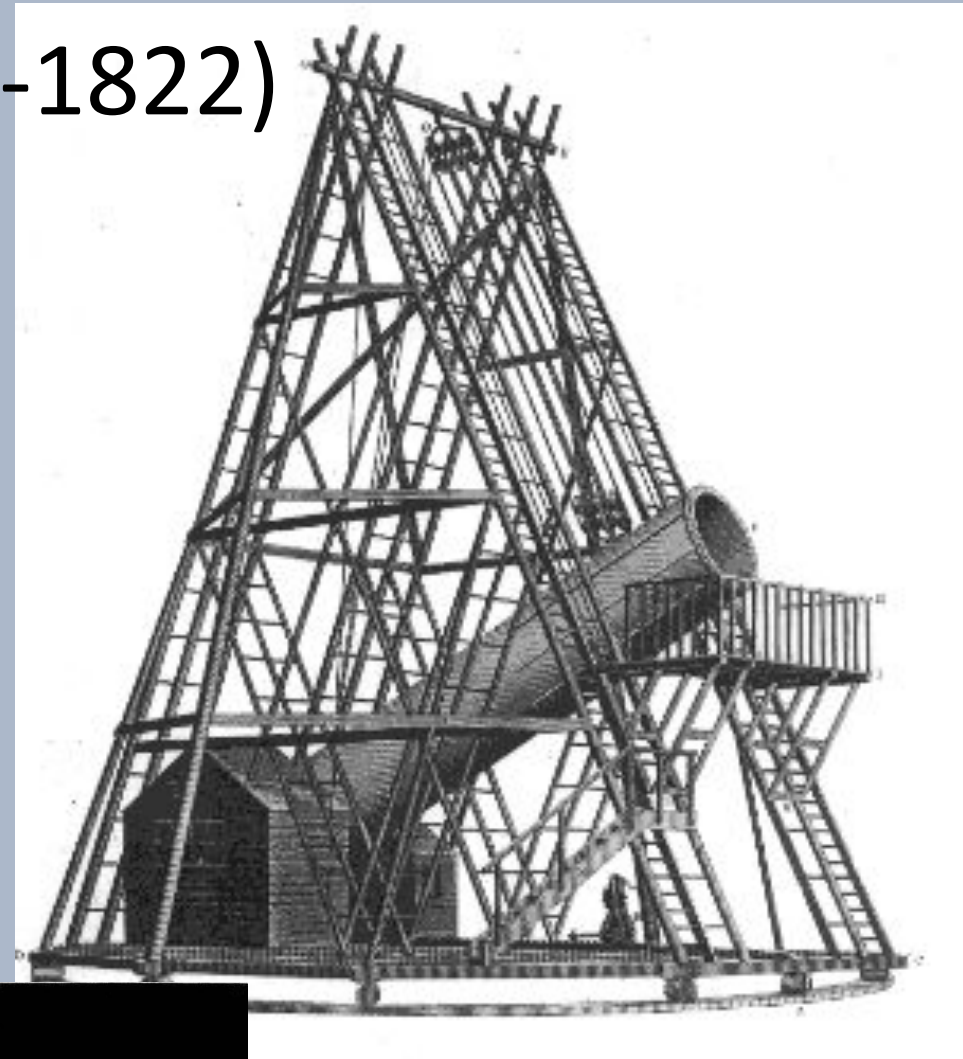
Isaac Newton (1642 - 1727)



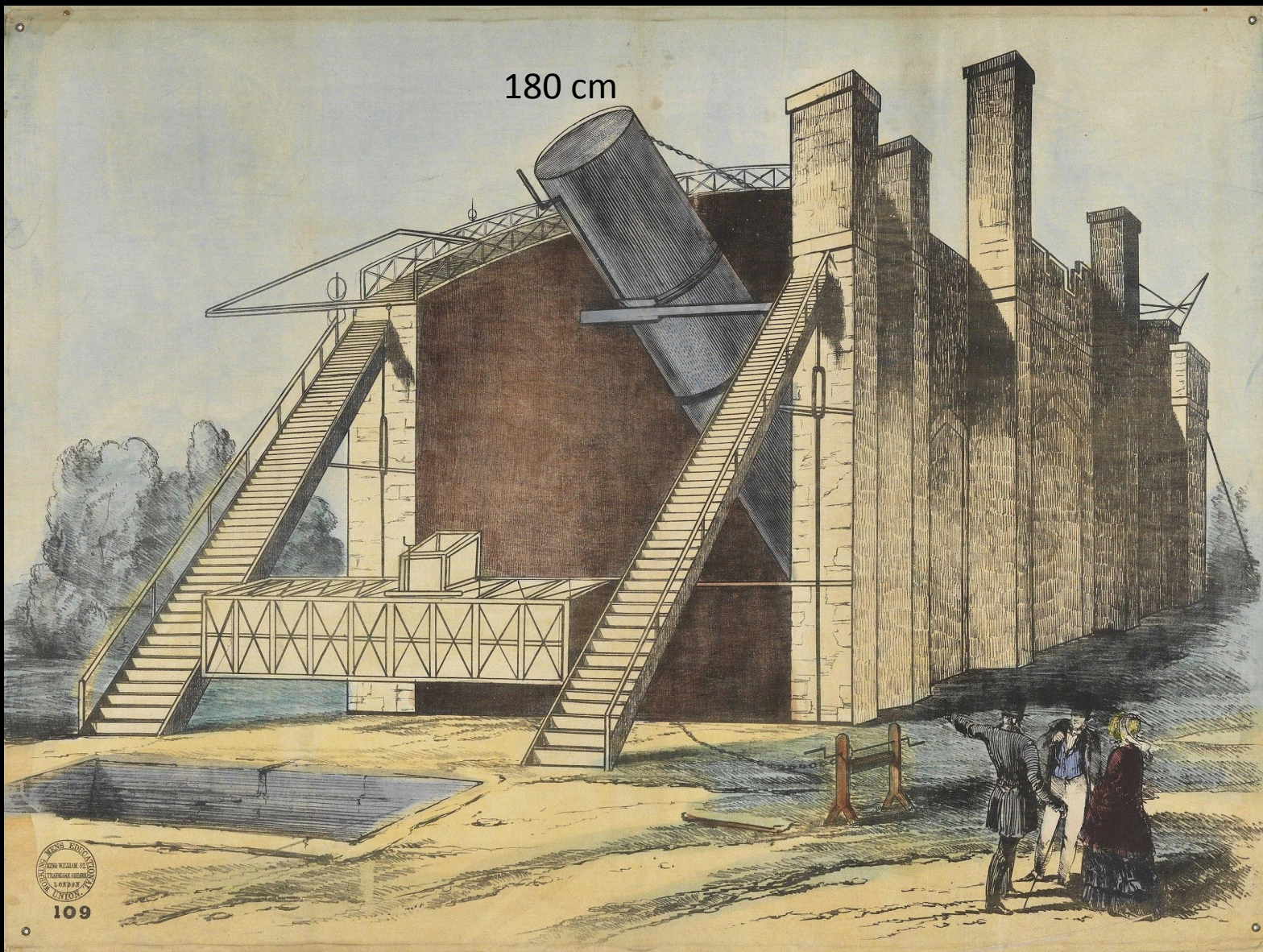
Friedrich Wilhelm Herschel (1738-1822)



- *TELESCOPI RIFLETTORI*
- *Fino a 120 cm di diametro dello specchio di raccolta*
- *IR dal Sole*
- *Struttura Via Lattea*

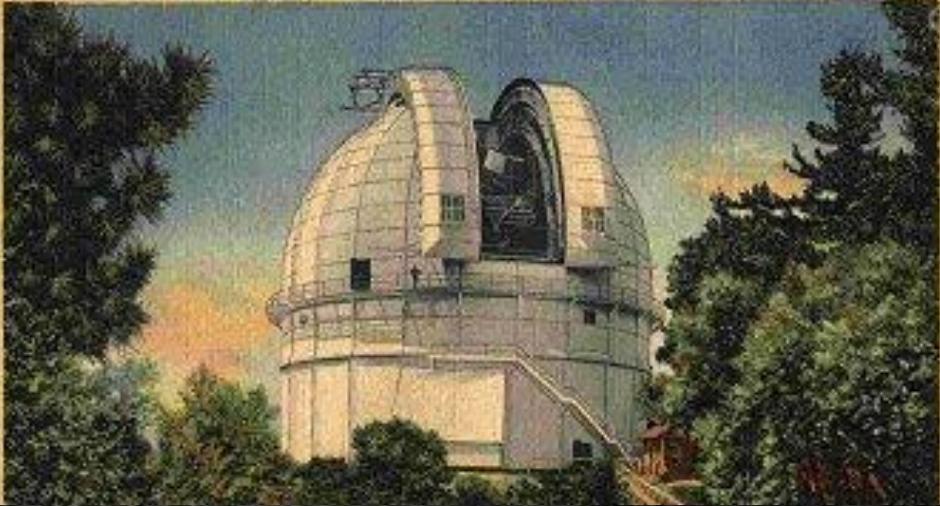


Lord Rosse (William Parsons) (1800-1867)



Edwin Hubble (1889-1953)

P-64 Dome of the 100 inch Hooker Reflector, Mount Wilson Observatory, California



- 1923: Edwin Hubble fotografa per la prima volta una stella Cefeide nella Nebulosa di Andromeda (M31) dimostrandone la natura extragalattica
- Successivamente, dagli spettri delle galassie lontane Hubble scopre il redshift cosmologico e l'espansione dell'universo

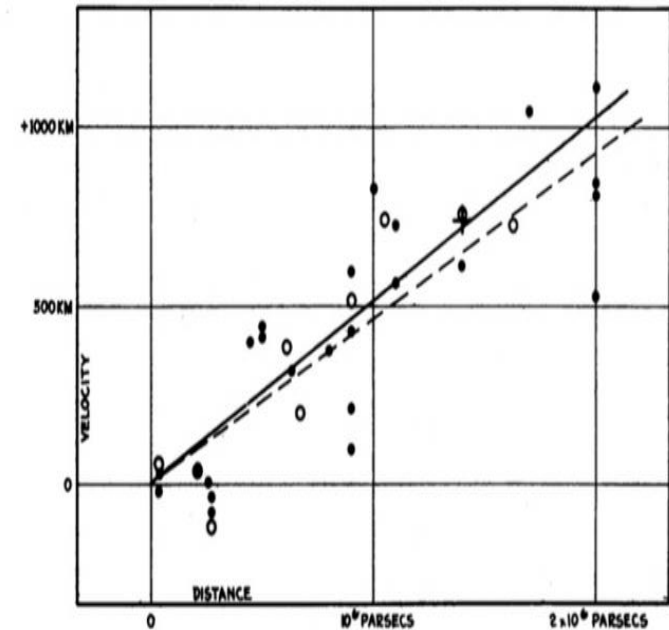
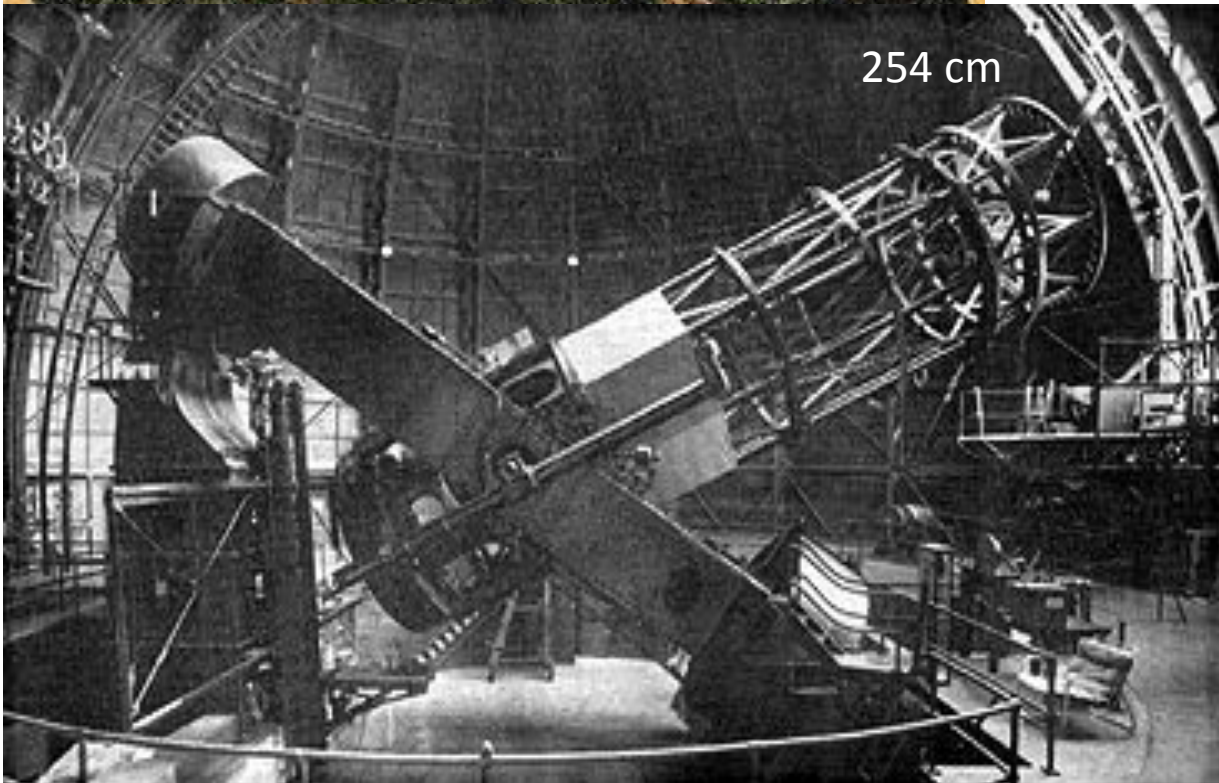
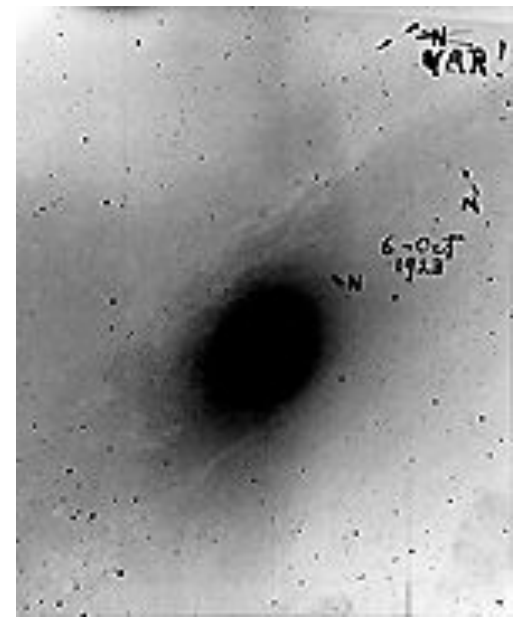
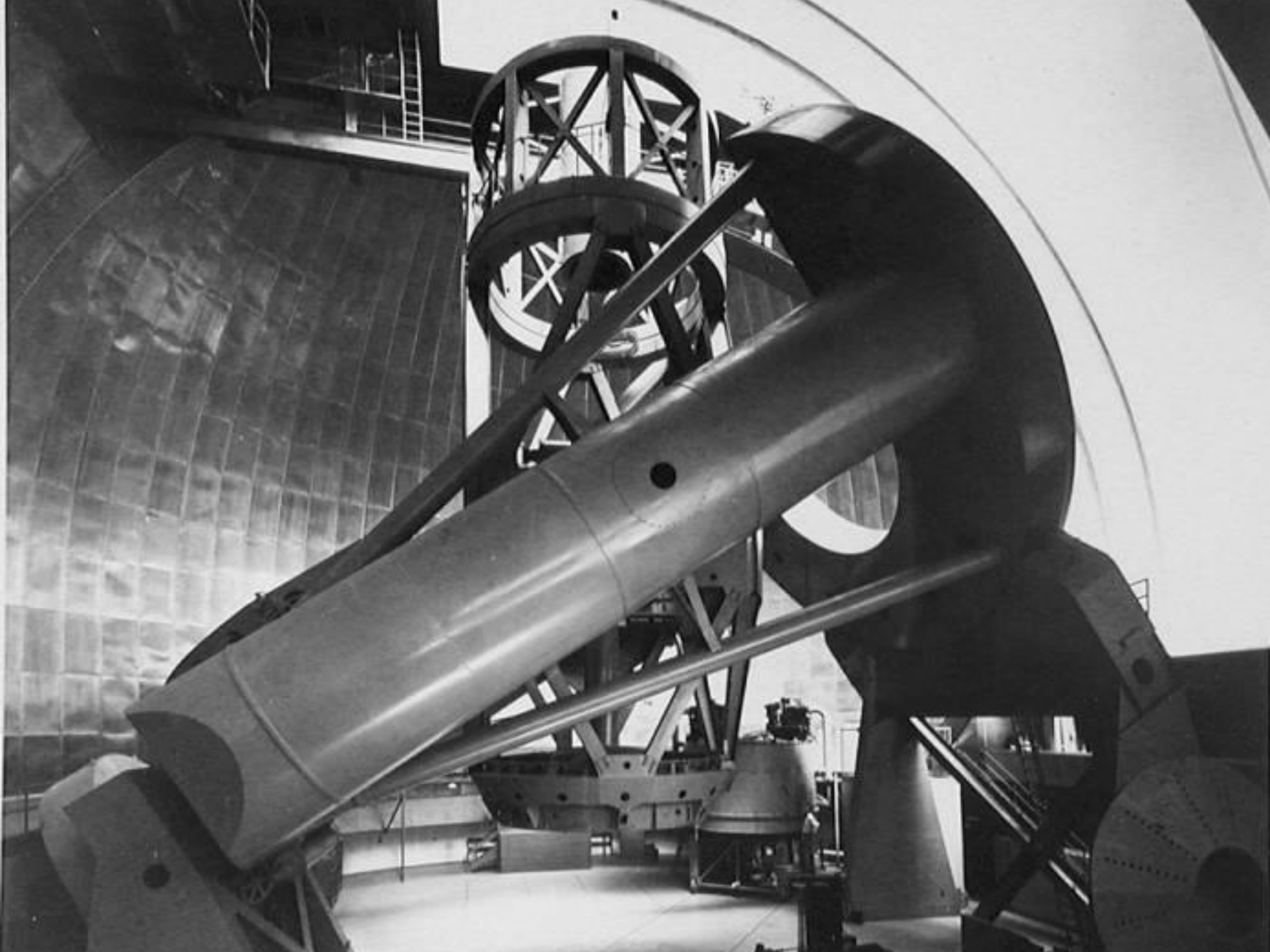


FIGURE 1

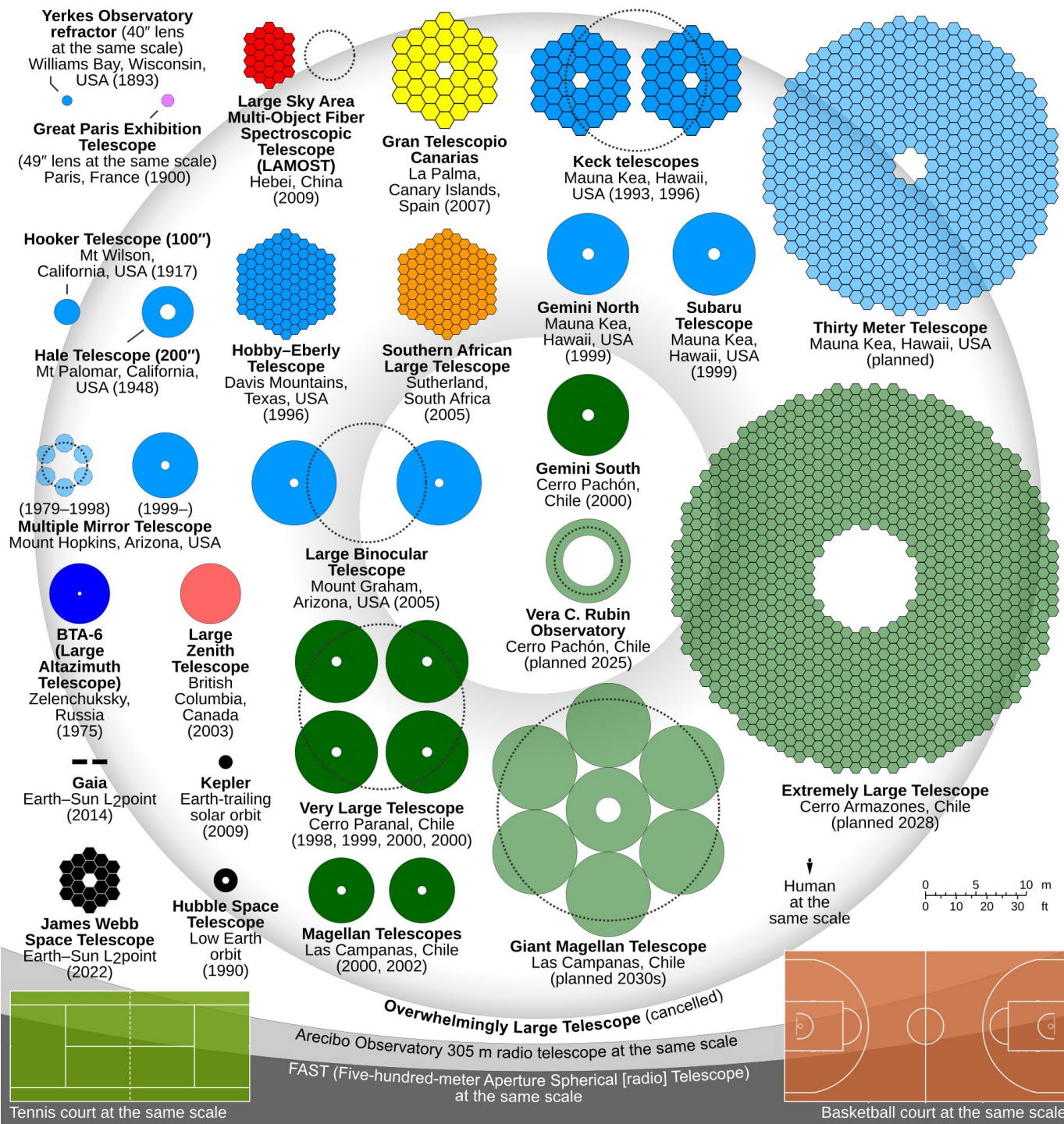
Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.



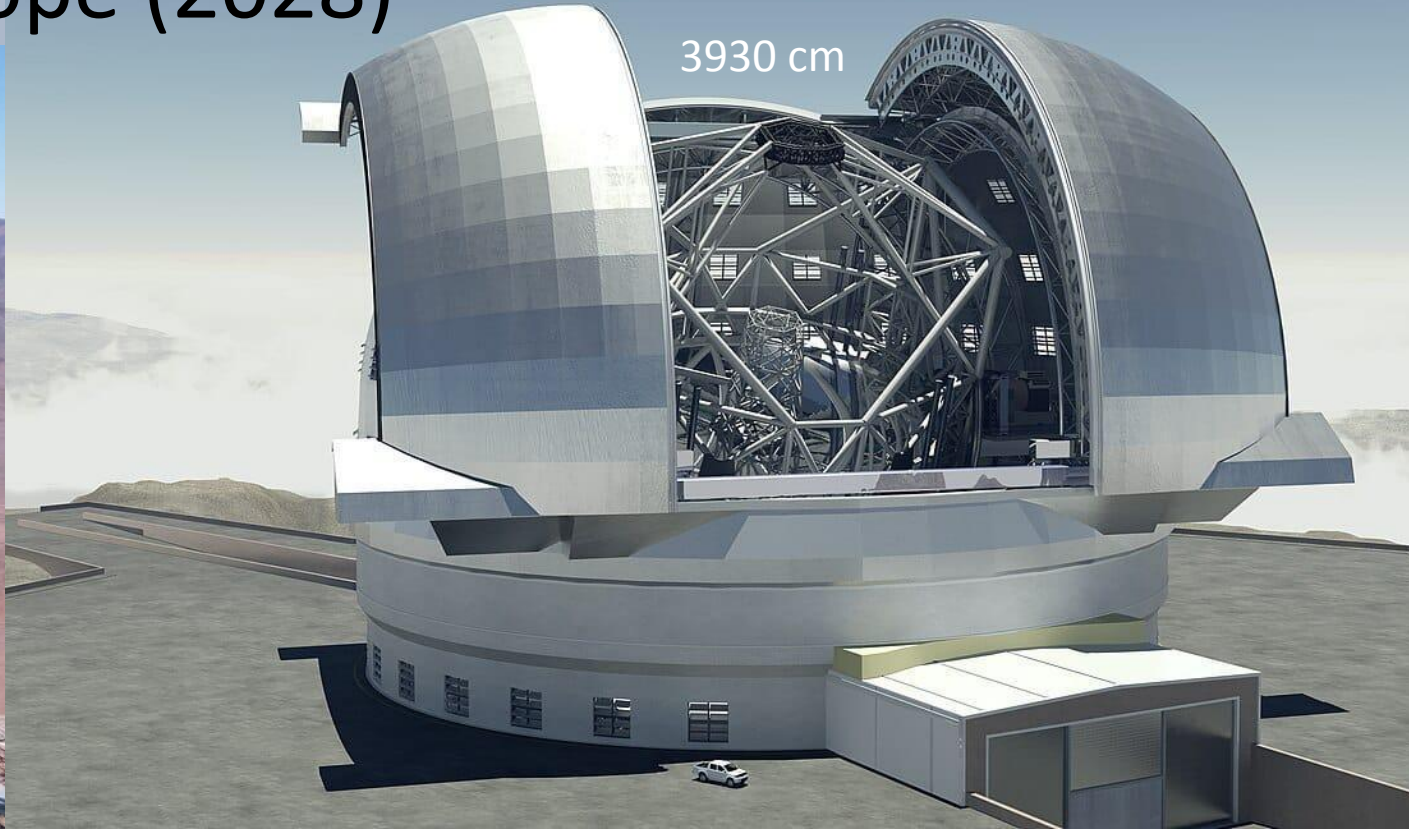
Hale
telescope
@ Mount
Palomar
(1949)

508 cm

Oggi: diversi telescopi da più di 5m



ESO Extremely Large Telescope (2028)



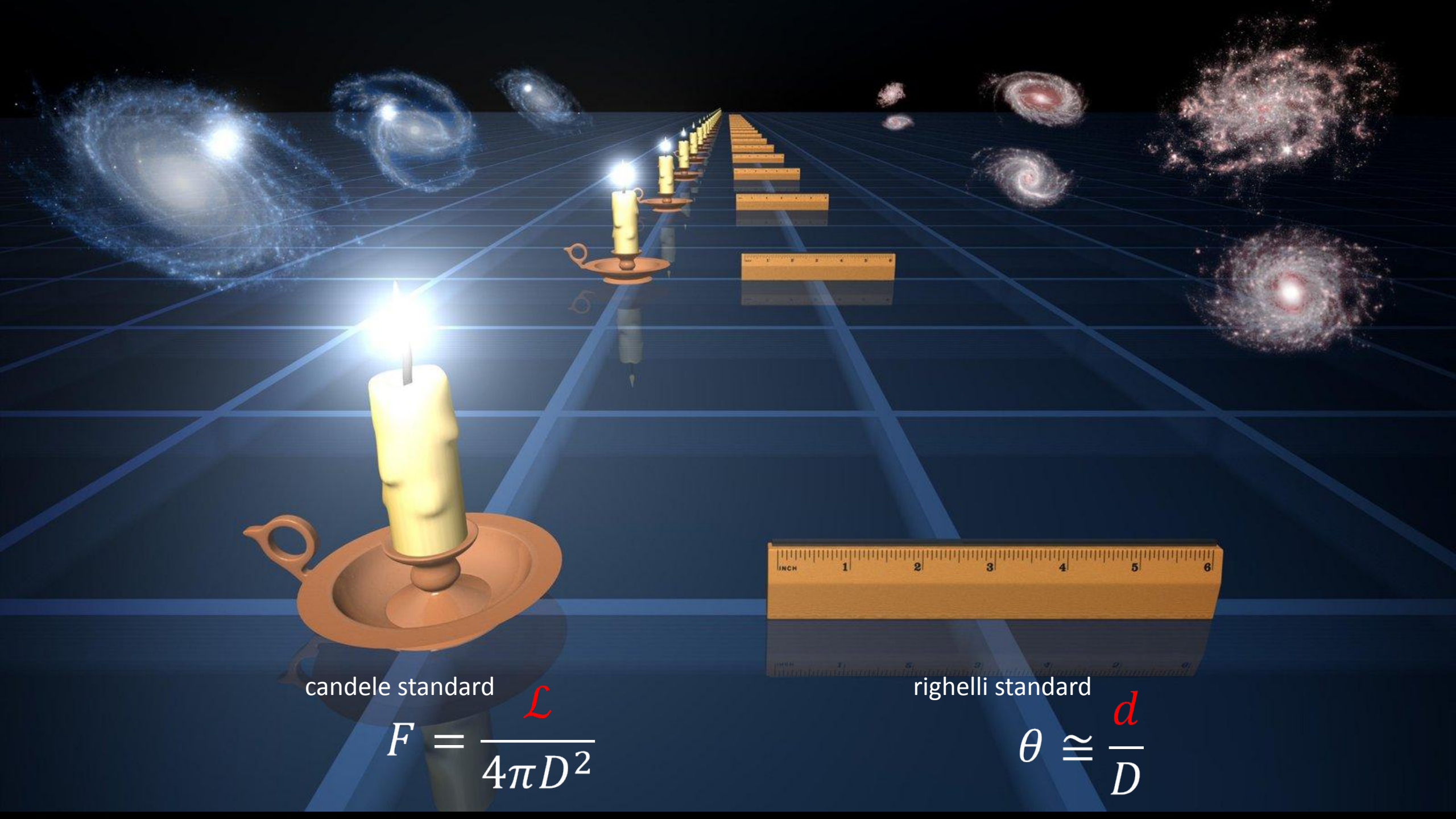
Con i grandi telescopi e sensibilissime camere CCD si riesce a raccogliere abbastanza potenza luminosa nonostante il debolissimo flusso luminoso proveniente dagli astri più lontani ...

... e quindi si riesce a osservare come era l'universo nel suo passato, anche remoto









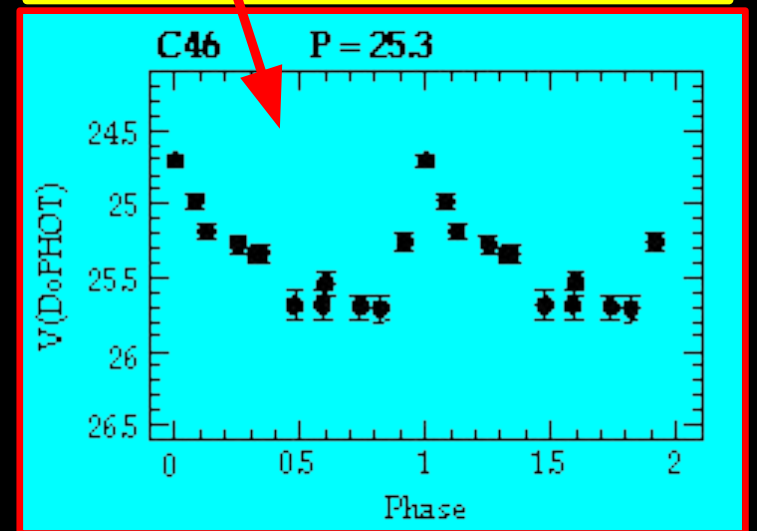
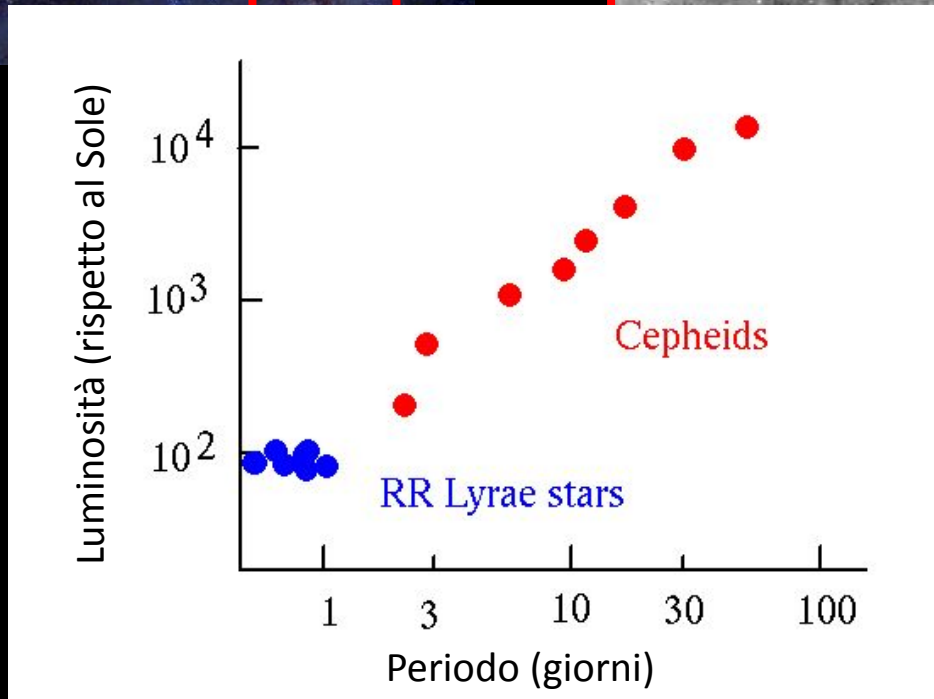
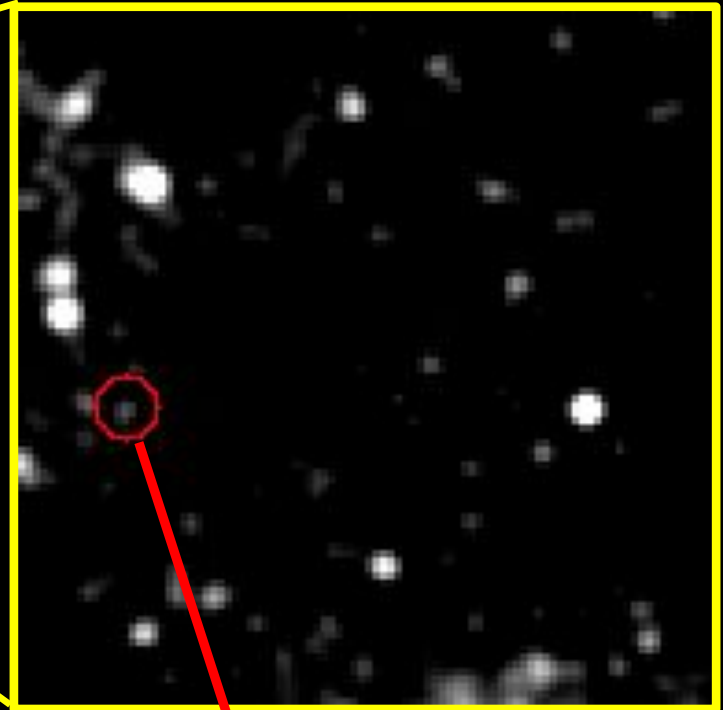
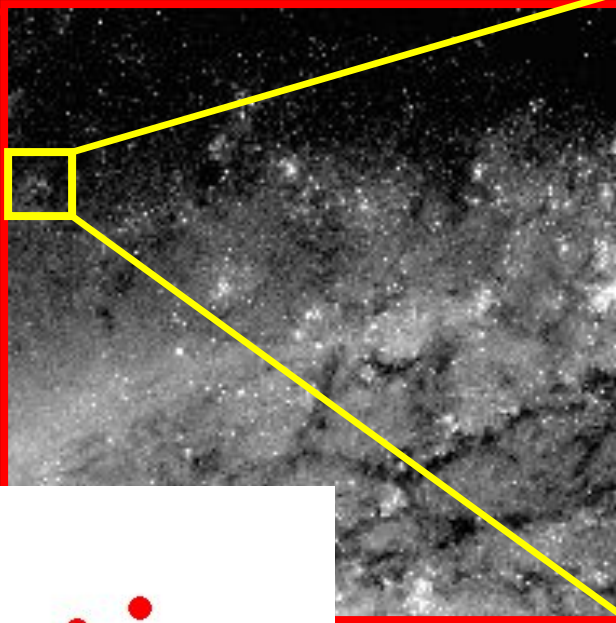
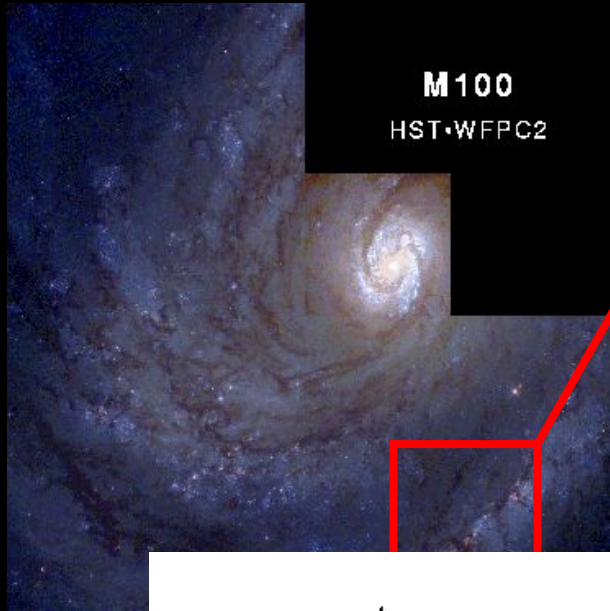
candle standard

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

righelli standard

$$\theta \cong \frac{d}{D}$$

Le cefeidi



Terra



← 2.2 milioni di anni luce
2.2 milioni di anni fa

Galassia di
Andromeda

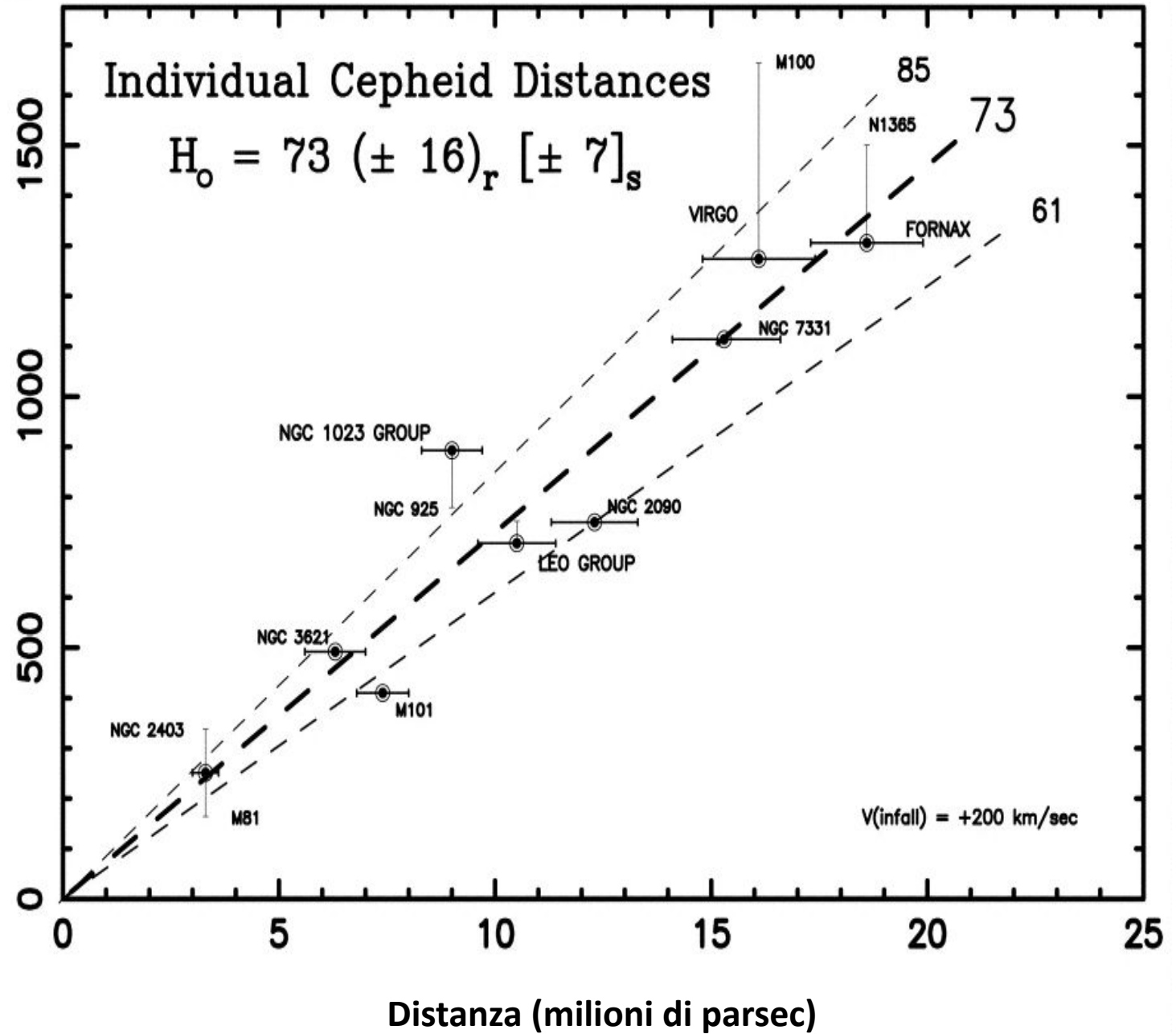


-
- Misure di distanza D dal periodo delle stelle cefeidi, per galassie sempre più distanti.
- Misure di spostamento percentuale delle lunghezze d'onda $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ delle stesse galassie, con lo spettrometro
- Risulta che le due quantità sono proporzionali:

$$c \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = H_0 D$$

- Legge di Hubble-Lemaitre.
- Costante di Hubble:

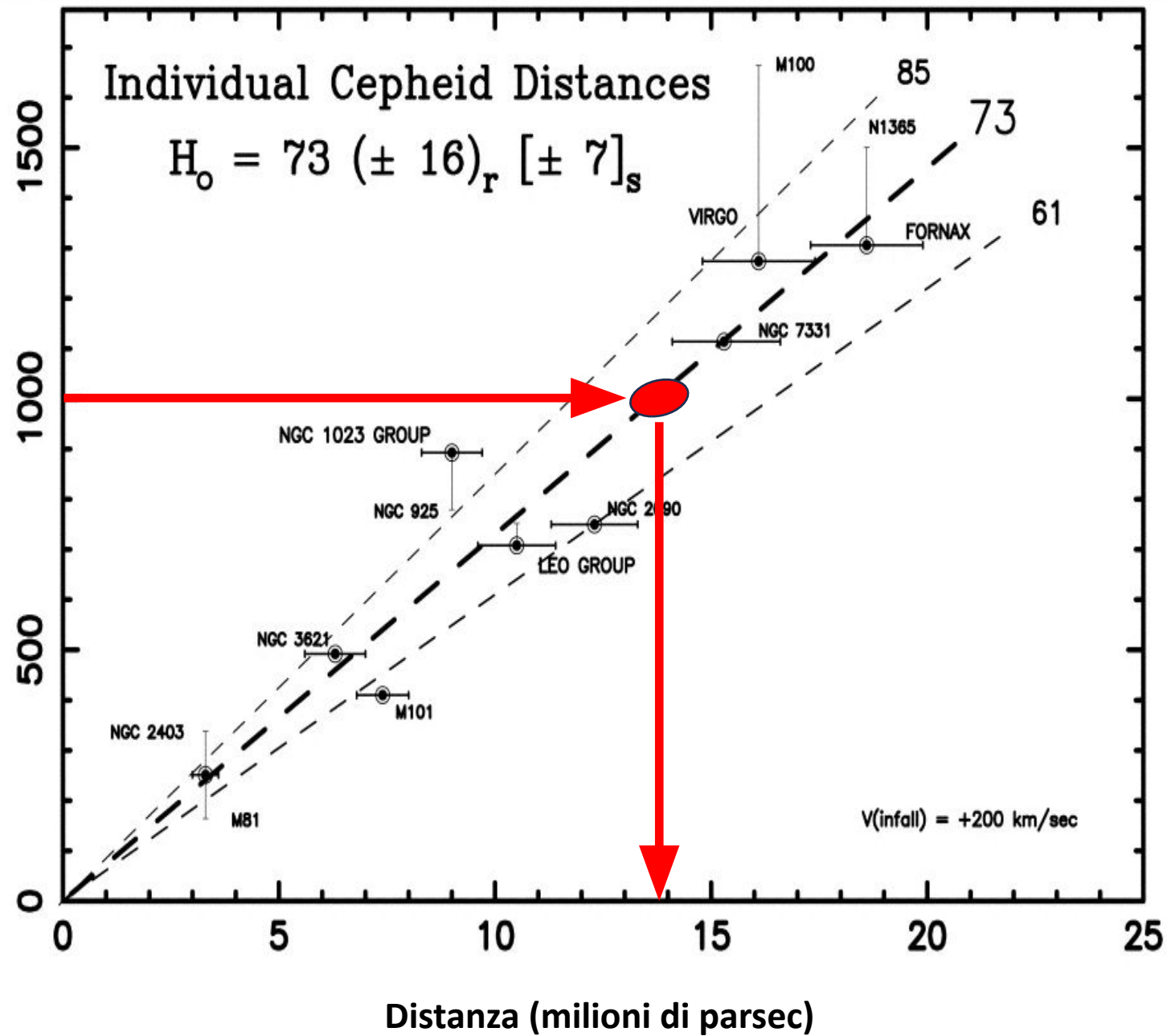
$$H_0 = 70 \frac{km}{s} / Mpc$$



- Se la legge di Hubble-Lemaître è universale, allora la si può usare per stimare la distanza di qualunque galassia, anche se non si vedono le sue cefeidi.

- Basta misurare $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$, e poi calcolare

$$D = \frac{c}{H_0} \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

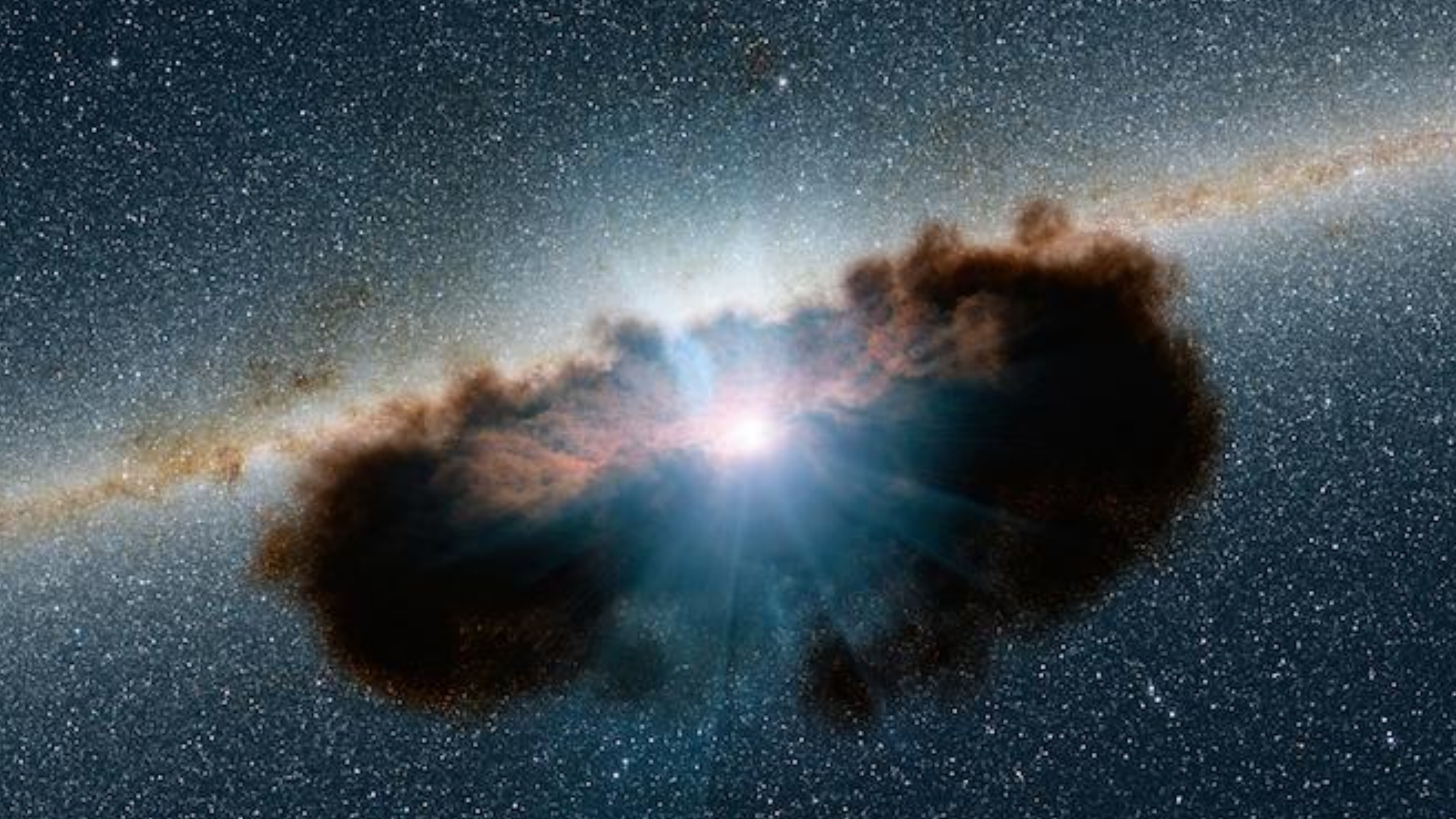


$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 0.1 \quad \rightarrow \quad D = \frac{c}{H_0} \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 430 \text{ milioni di pc} \rightarrow 1.4 \text{ miliardi di anni fa}$$

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 0.2 \quad \rightarrow \quad D \cong \frac{c}{H_0} \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 860 \text{ miliardi di pc} \rightarrow 2.8 \text{ miliardi di anni fa}$$

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 1 \quad \rightarrow \quad 7.7 \text{ miliardi di anni fa} \rightarrow 6 \text{ miliardi di anni dopo il big bang}$$

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 4 \quad \rightarrow \quad 12.2 \text{ miliardi di anni fa} \rightarrow 1.5 \text{ miliardi di anni dopo il big bang}$$



Terra



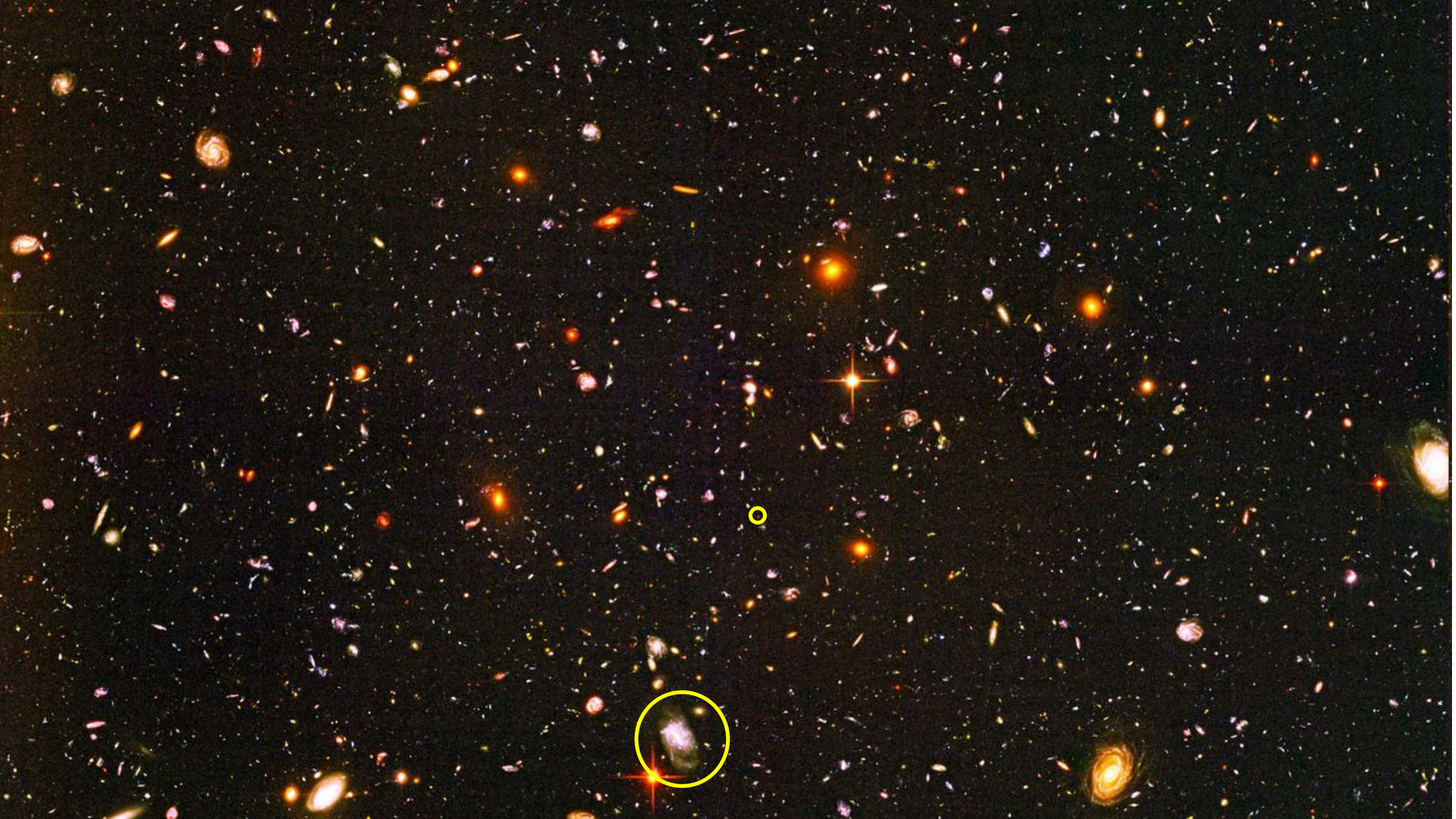
1 miliardo di anni luce



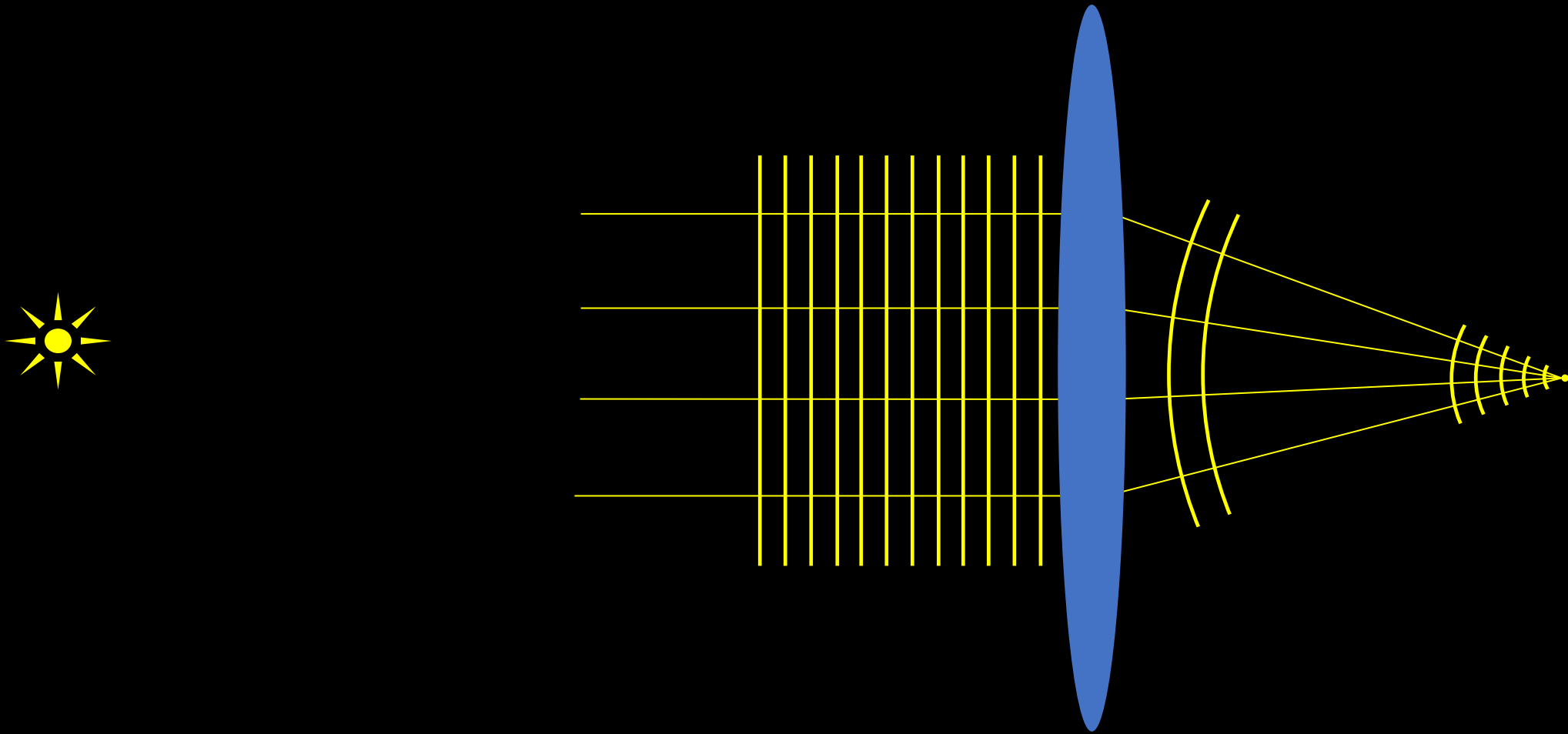
1 miliardo di anni fa

QSO

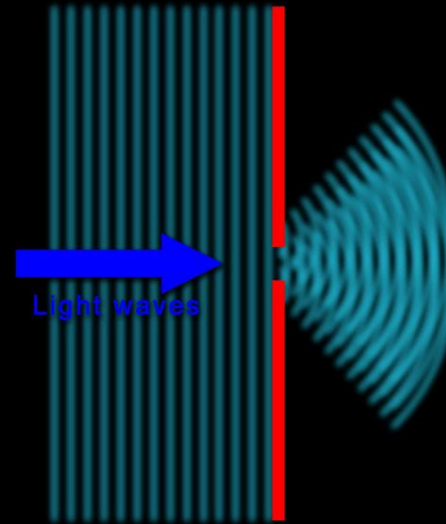




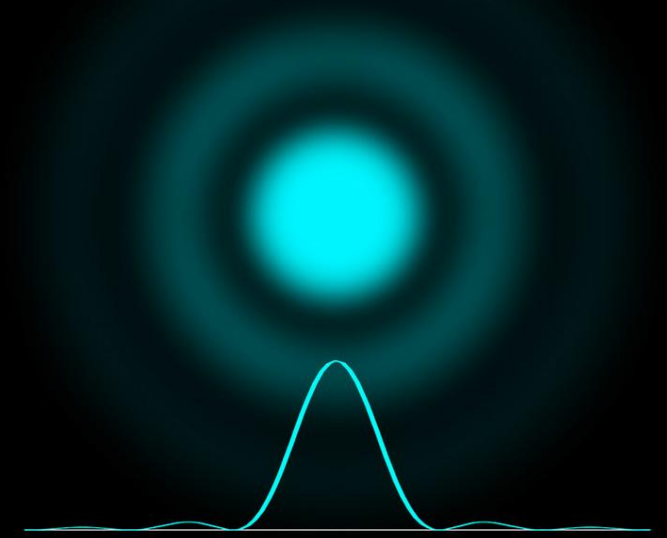
Telescopio ideale: l'immagine di una stella è un punto senza dimensioni



Telescopio reale: l'immagine di una stella è una macchiolina luminosa

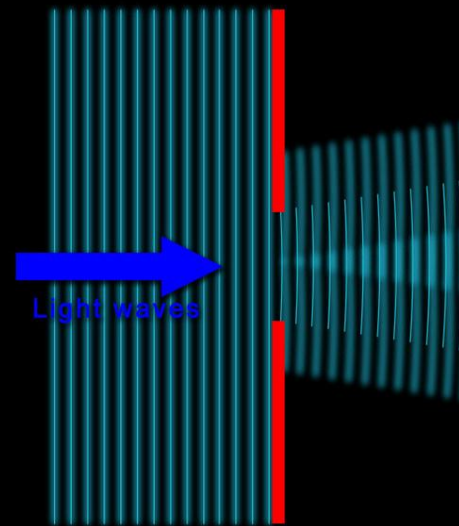


Apertura (lente) piccola

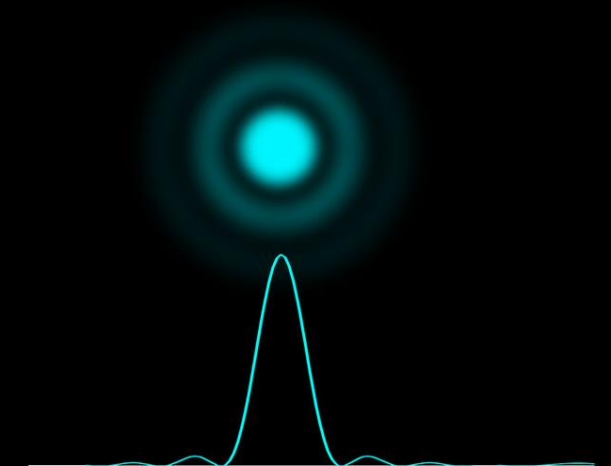


Airy disc

$$\theta \approx \frac{\lambda}{d}$$

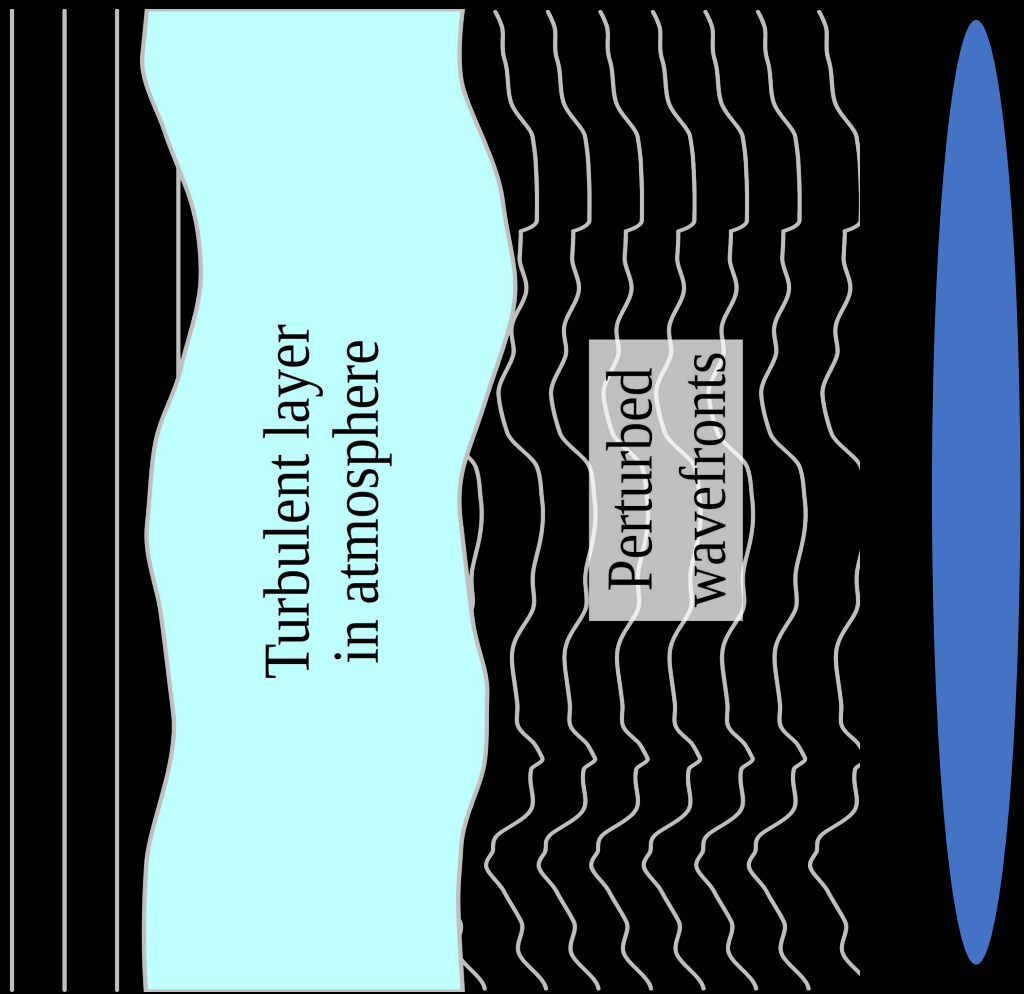


Apertura (lente) grande



Airy disc

Telescopio ideale con atmosfera turbolenta: l'immagine di una stella è una macchia che varia la sua forma nel tempo



Turbulent layer
in atmosphere

Perturbed
wavefronts





La soluzione: un grande telescopio
al di sopra dell'atmosfera terrestre



$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 0.1 \quad \rightarrow \quad D = \frac{c}{H_0} \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 430 \text{ milioni di pc} \rightarrow 1.4 \text{ miliardi di anni fa}$$

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 0.2 \quad \rightarrow \quad D \cong \frac{c}{H_0} \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 860 \text{ miliardi di pc} \rightarrow 2.8 \text{ miliardi di anni fa}$$

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 1 \quad \rightarrow \quad 7.7 \text{ miliardi di anni fa} \rightarrow 6 \text{ miliardi di anni dopo il big bang}$$

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 4 \quad \rightarrow \quad 12.2 \text{ miliardi di anni fa} \rightarrow 1.5 \text{ miliardi di anni dopo il big bang}$$

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 7 \quad \rightarrow \quad 12.9 \text{ miliardi di anni fa} \rightarrow 800 \text{ milioni di anni dopo il big bang}$$

Terra



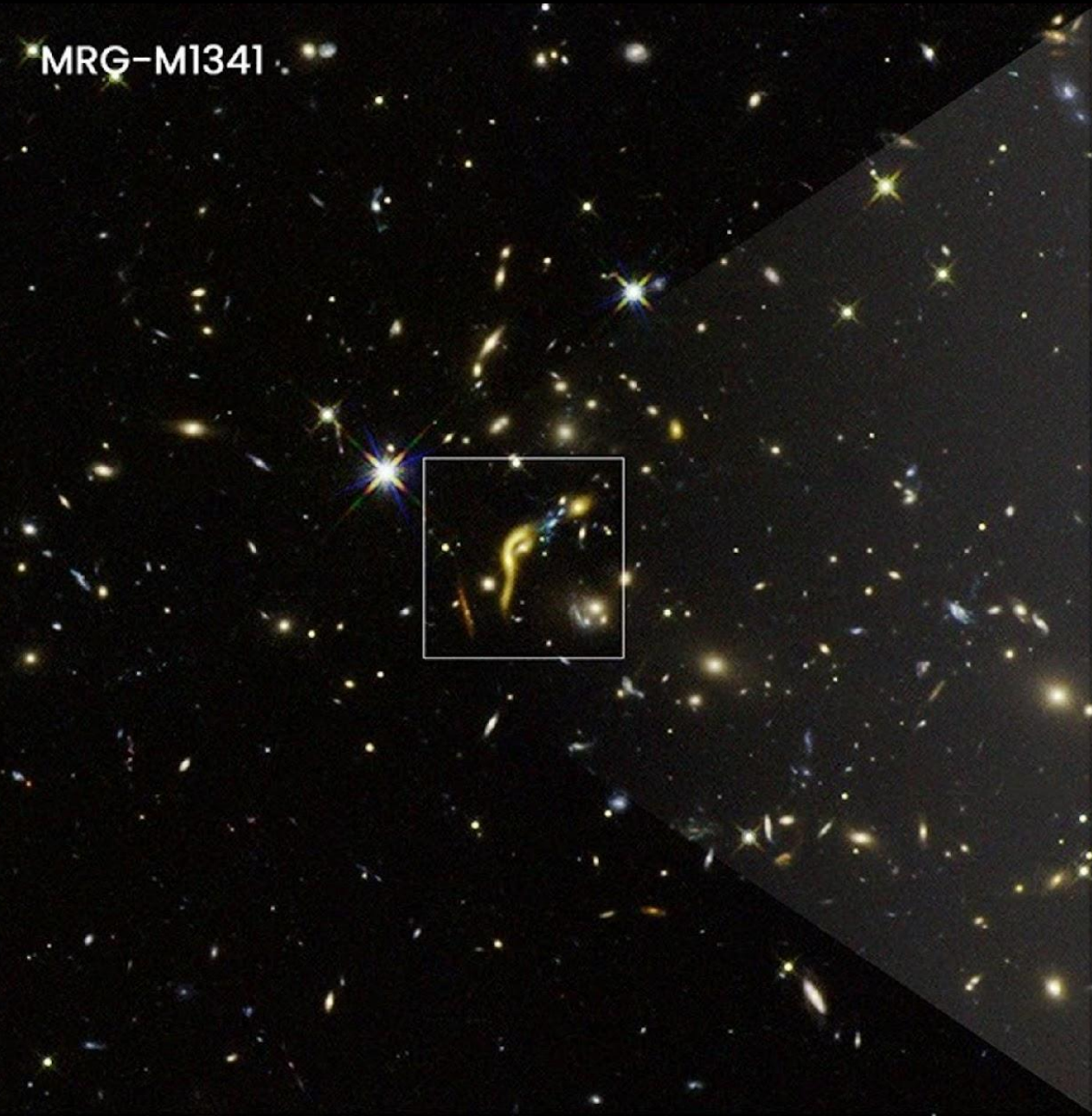
10000 milioni di anni luce
←
10000 milioni di anni fa

Galassie
più lontane
osservate con HST





MRG-M1341



3 miliardi di anni dopo il big bang



$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 0.1 \quad \rightarrow \quad D = \frac{c}{H_0} \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 430 \text{ milioni di pc} \rightarrow 1.4 \text{ miliardi di anni fa}$$

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 0.2 \quad \rightarrow \quad D \cong \frac{c}{H_0} \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 860 \text{ miliardi di pc} \rightarrow 2.8 \text{ miliardi di anni fa}$$

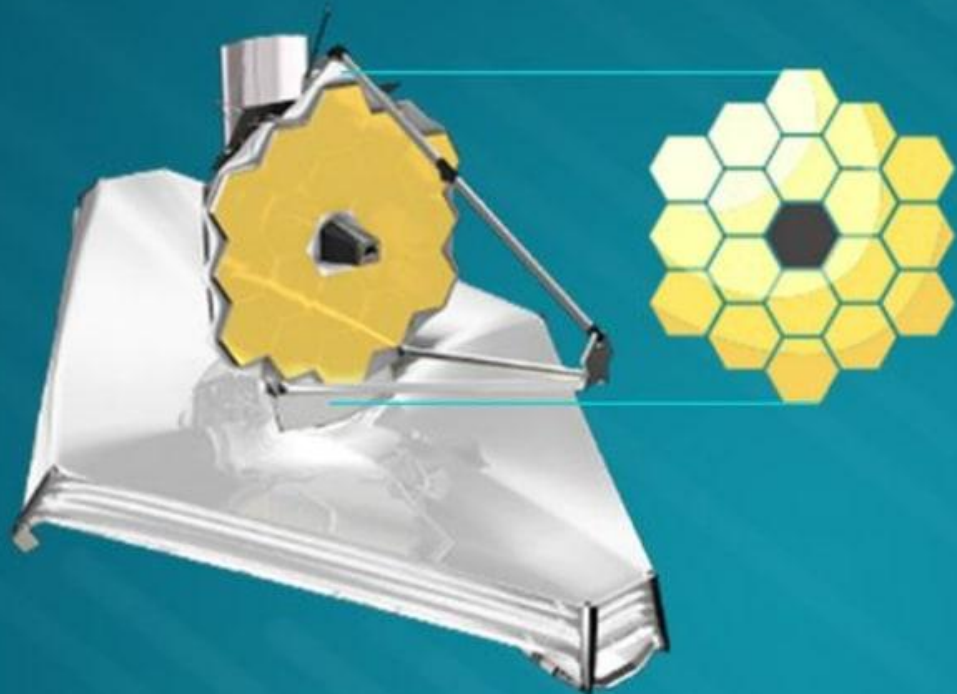
$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 1 \quad \rightarrow \quad 7.7 \text{ miliardi di anni fa} \rightarrow 6 \text{ miliardi di anni dopo il big bang}$$

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 4 \quad \rightarrow \quad 12.2 \text{ miliardi di anni fa} \rightarrow 1.5 \text{ miliardi di anni dopo il big bang}$$

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 7 \quad \rightarrow \quad 12.9 \text{ miliardi di anni fa} \rightarrow 800 \text{ milioni di anni dopo il big bang}$$

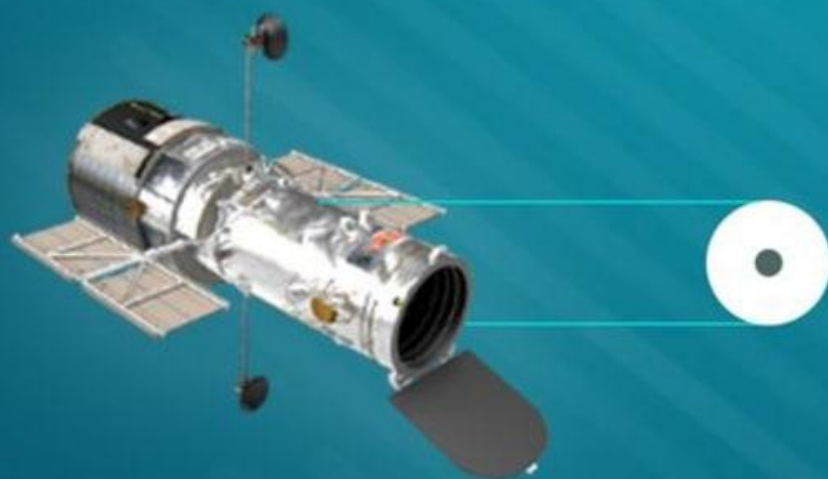
$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 10 \quad \rightarrow \quad 13.2 \text{ miliardi di anni fa} \rightarrow 480 \text{ milioni di anni dopo il big bang}$$

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 20 \quad \rightarrow \quad 13.6 \text{ miliardi di anni fa} \rightarrow 100 \text{ milioni di anni dopo il big bang}$$



JAMES WEBB

Launch 2021
Lifetime 10 years
Mirror size 6.5m
Mass 6,200 kg
Operating
temperature . . . -230C

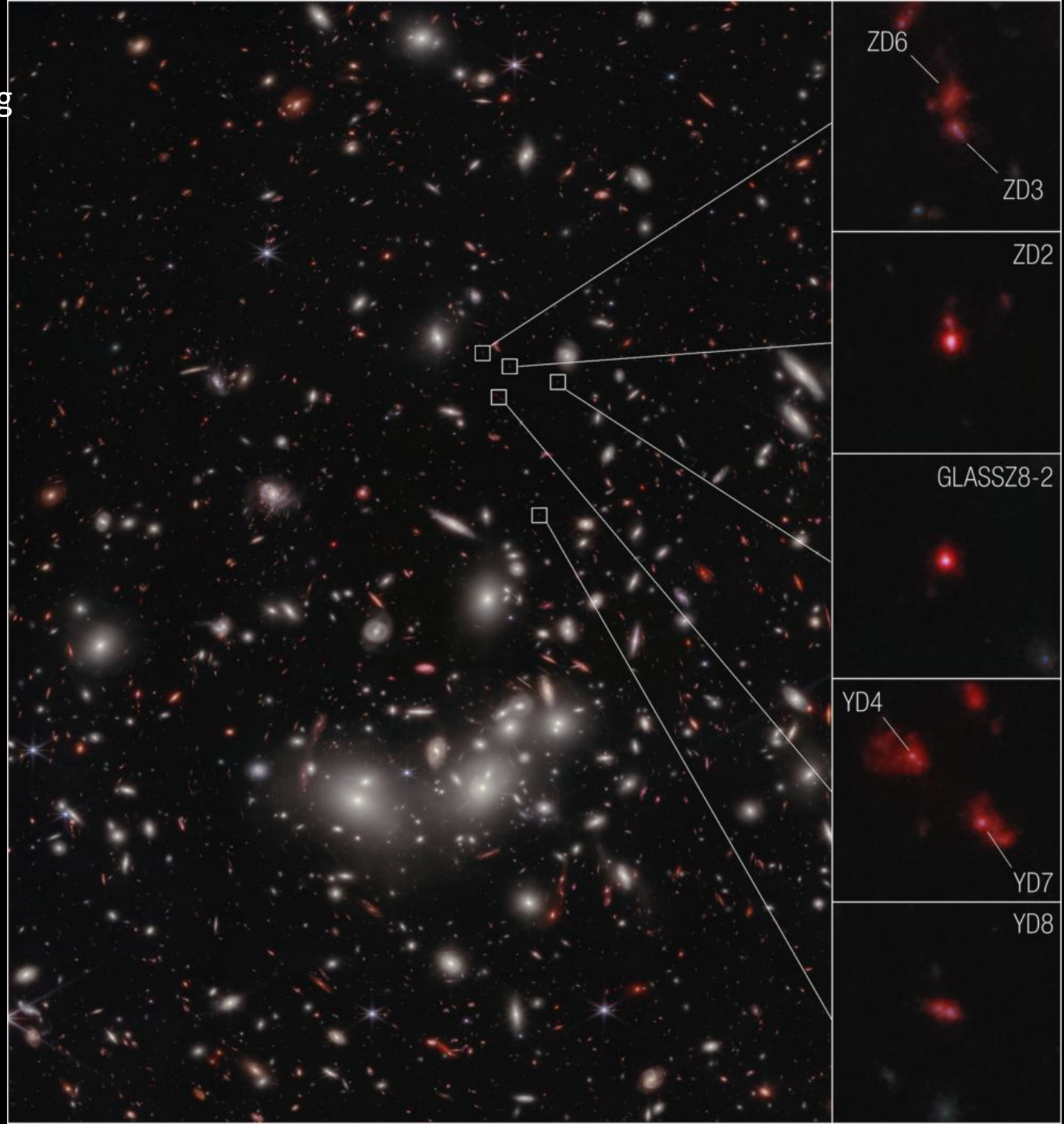
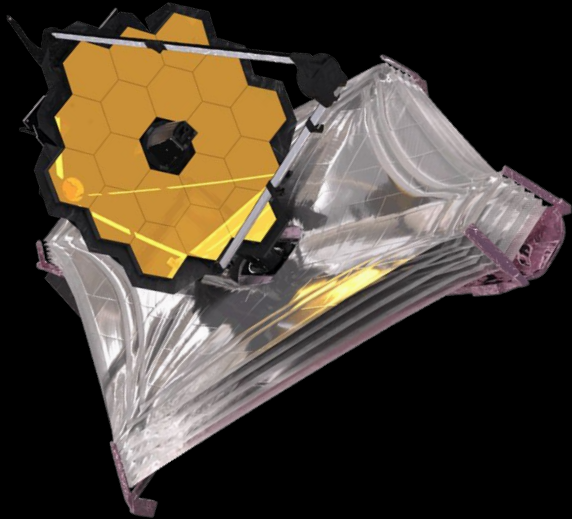


HUBBLE

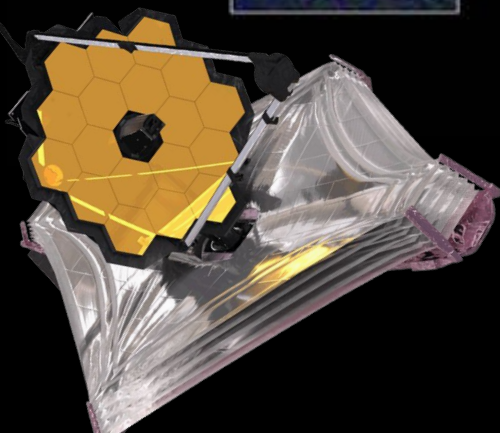
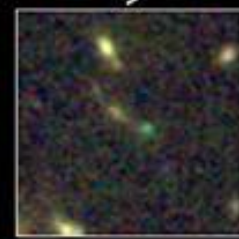
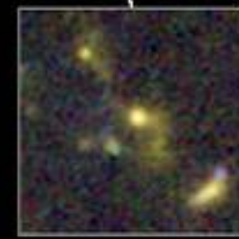
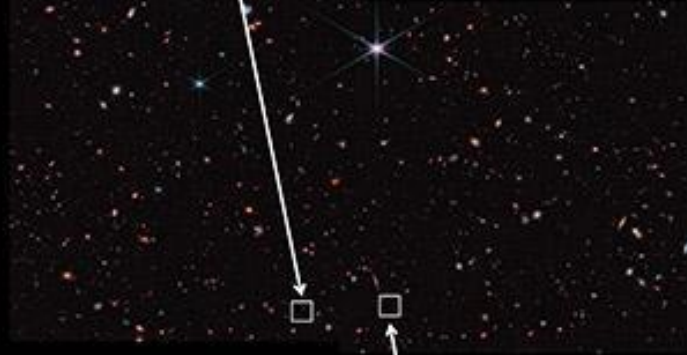
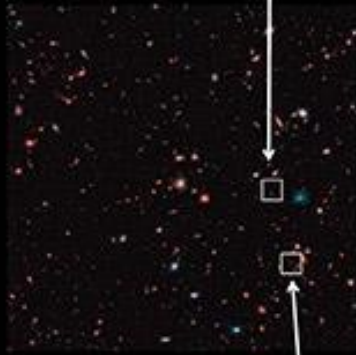
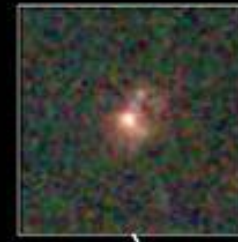
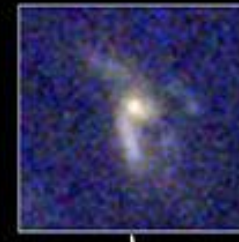
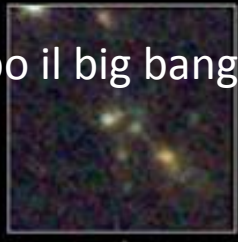
Launch 1990
Lifetime 31 years
Mirror size 2.4m
Mass 12,200kg
Operating
temperature 20C



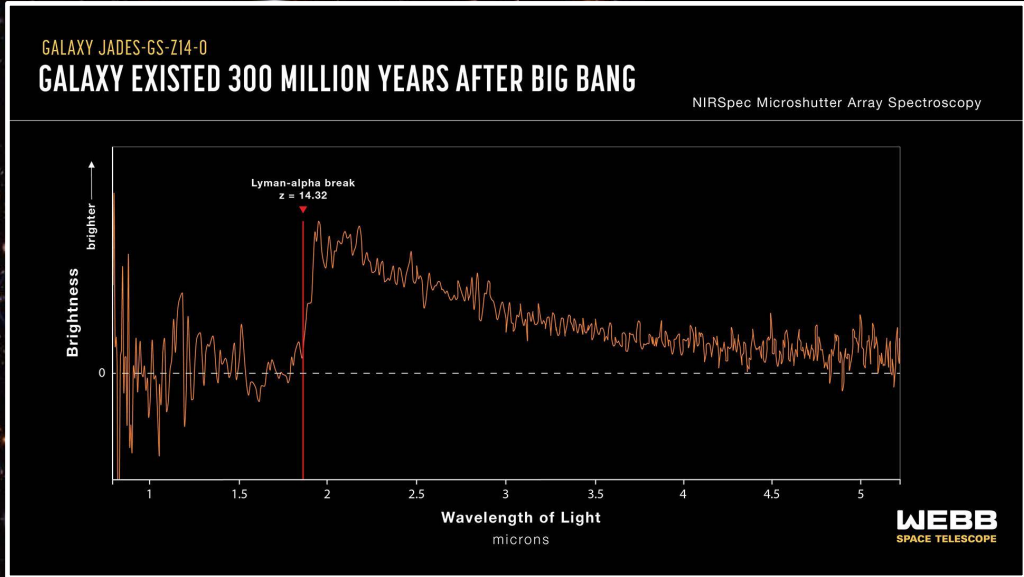
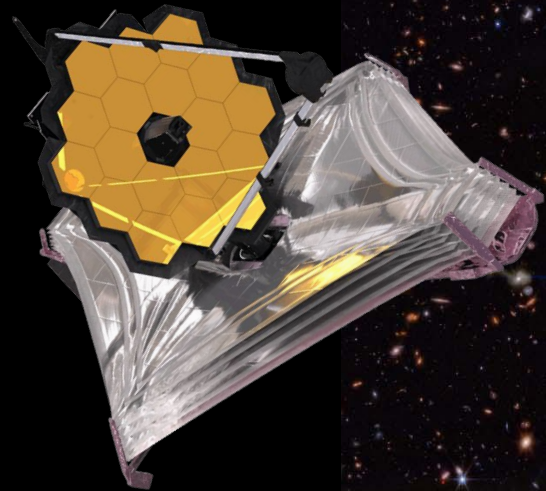
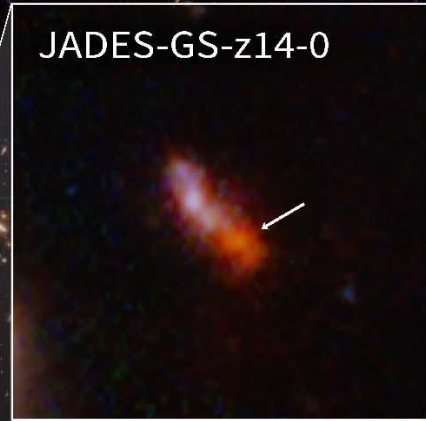
650 milioni di anni dopo il big bang



650 milioni di anni dopo il big bang



300 milioni di anni dopo il big bang

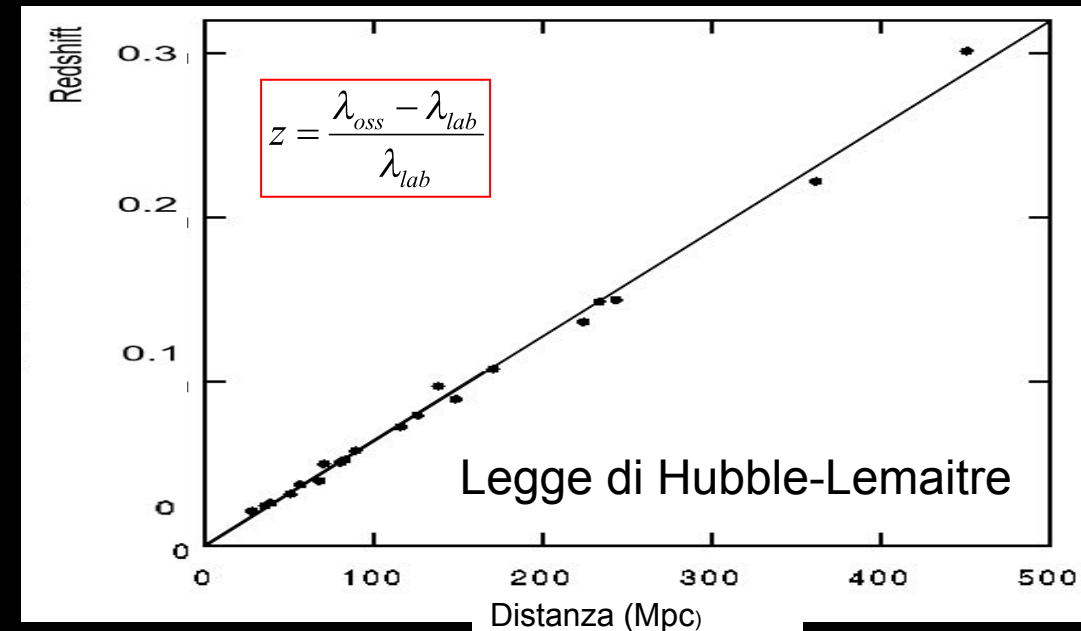
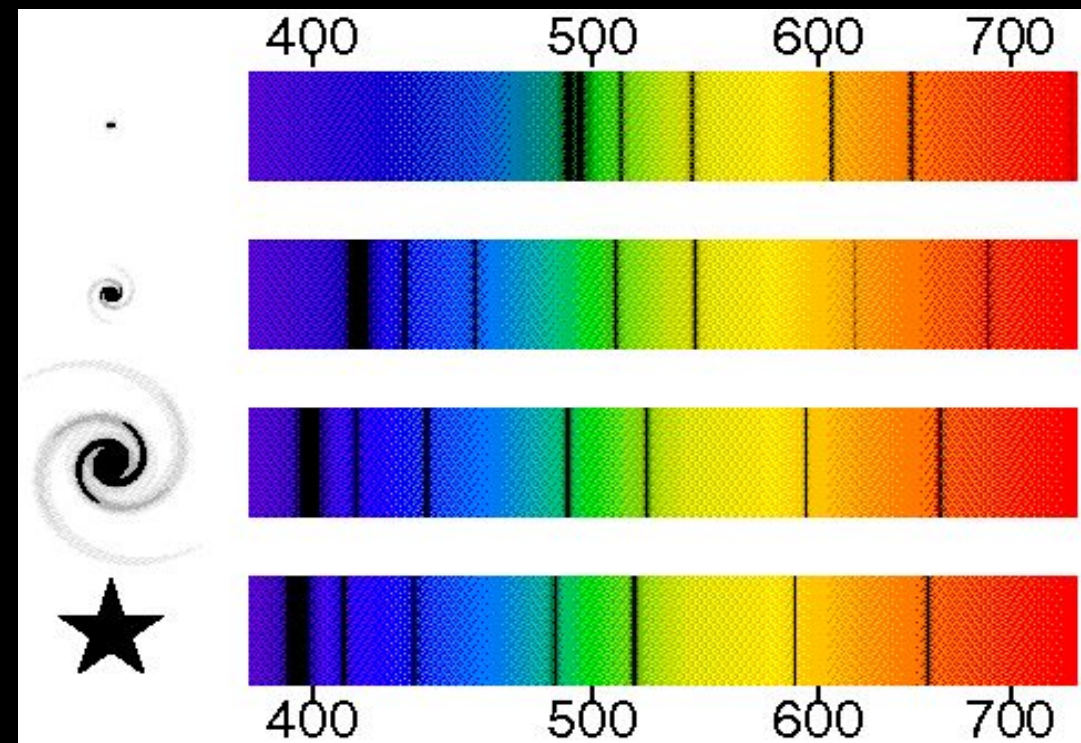


Si può osservare ancora più lontano, e quindi **osservare com'era l'universo ancora più vicino al big bang ?**

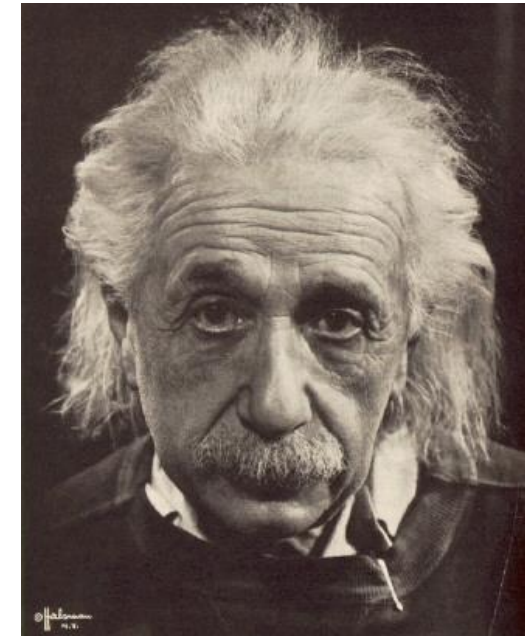
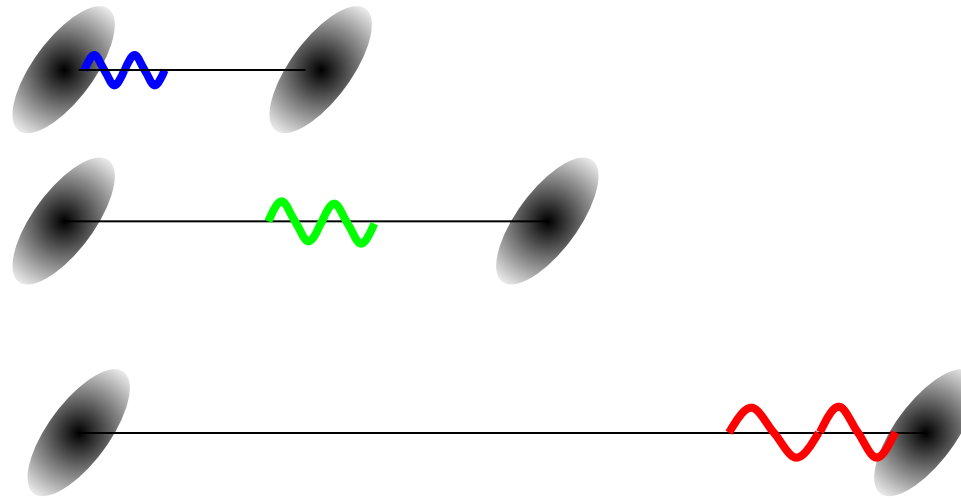
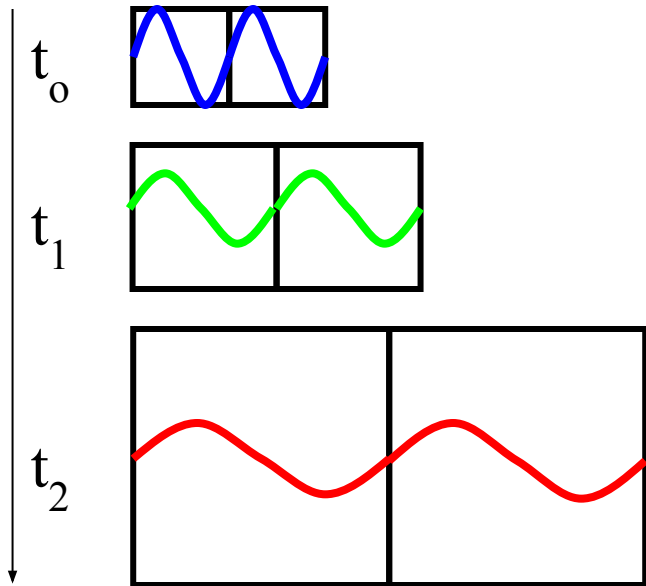
Si. Ma per farlo si deve tenere conto dell'**espansione dell'universo** ... il che ha conseguenze molto pratiche sul **come** si può pensare di farlo.

L'espansione dell'Universo

- Luce = onde elettromagnetiche
- Lunghezze d'onda caratteristiche degli atomi presenti
- Nel caso delle galassie più lontane, lunghezze d'onda molto allungate.
- Il redshift aumenta con la distanza.
- Le sorgenti più lontane mostrano un redshift maggiore del 100%
- E' il risultato *dell'espansione dell'universo.*



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



Possiamo osservare **ancora più lontano**, e quindi ancora più indietro nella storia dell'universo ?

- Per osservare sorgenti sempre più lontane serviranno telescopi sensibili a lunghezze d'onda sempre più lunghe:
 - Infrarossi
 - Onde submillimetriche
 - Onde millimetriche
 - Onde radio



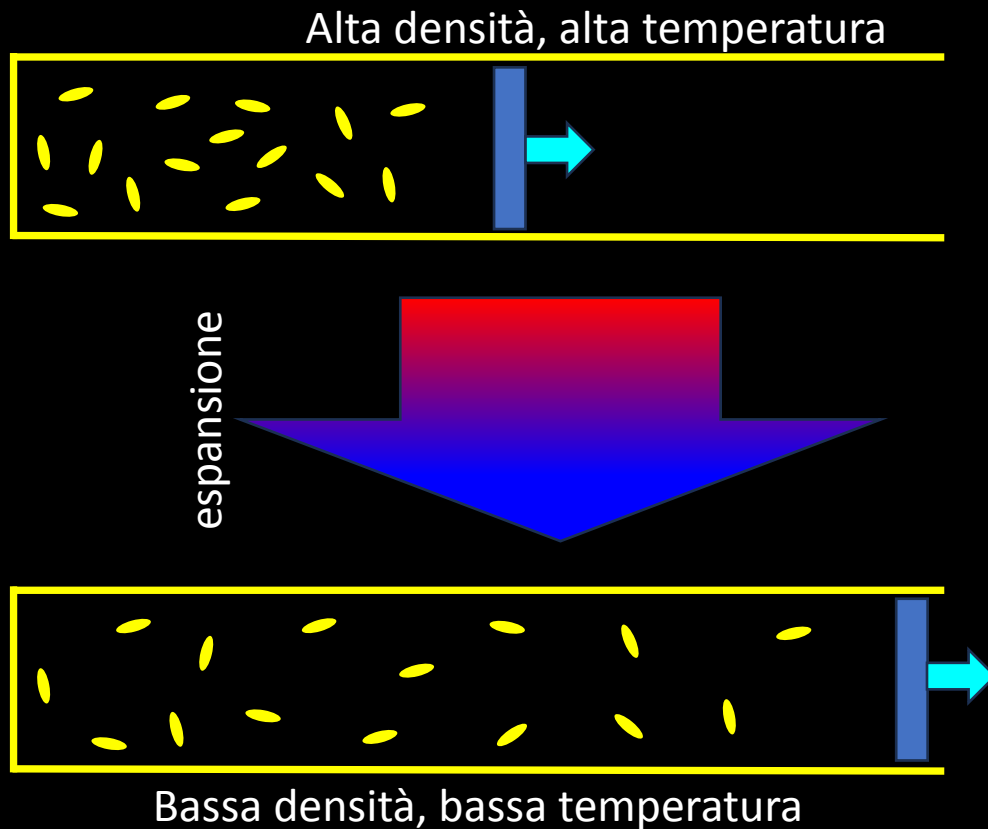
Cercando la luce più antica

- Marcello Palingenio (Zodiacus Vitae, circa 1530): oltre le stelle c'è una speciale luce, intensissima ma invisibile ai nostri occhi:

*Lucem, quam nostri Solis longe minor est lux
Lucem, quam terreni oculi non cernere
possum*

- Una intuizione poetica ...
- ... sorprendentemente vicina a quanto detto finora
- Una luce che possiamo **misurare** con particolari telescopi per le microonde
- ... *il fondo cosmico di microonde.*

L'espansione implica un raffreddamento



- Gas in un cilindro isolato dall'esterno (espansione adiabatica)
- Quando il gas si espande, compie del lavoro per muovere il pistone
- Il lavoro è fatto a spese dell'energia di agitazione termica, che diminuisce
- Quindi il gas si raffredda

- Possiamo pensare all'universo come un gas di galassie isolato (non c'è un esterno)
- L'espansione dell'universo quindi implica un suo raffreddamento
- L'universo primordiale doveva essere molto più caldo di oggi

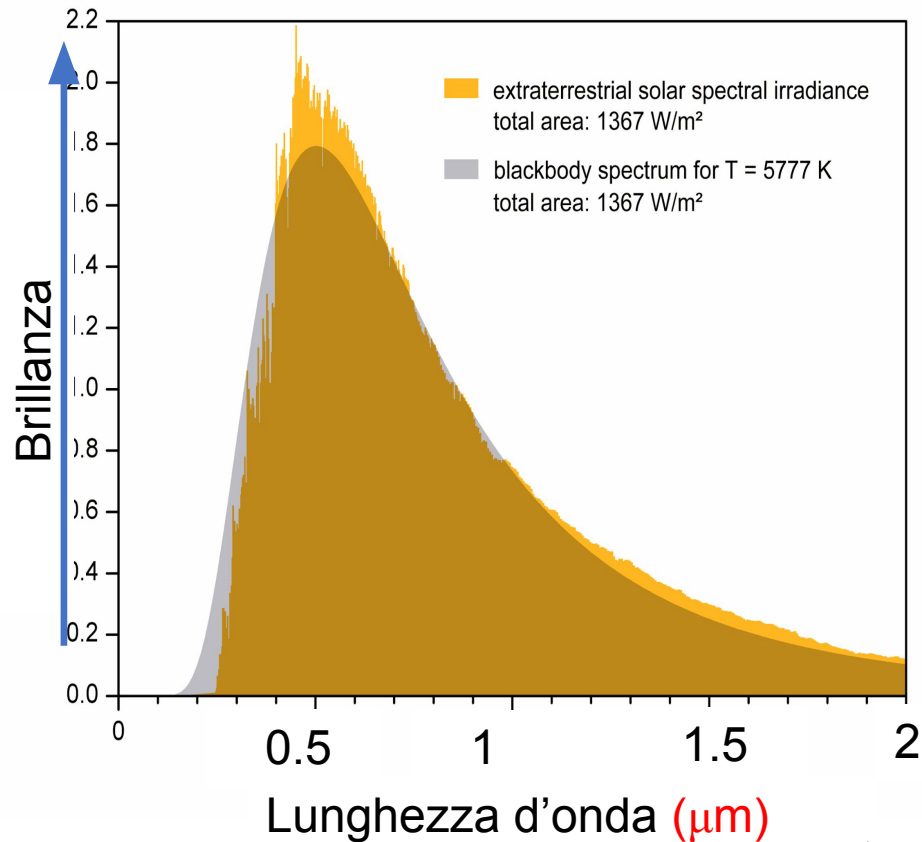
Cercando la luce più antica

- Quindi nel passato il nostro universo doveva essere più caldo di adesso.
- Quanto ?
- George Gamow, 1950, Big Bang Caldo
- Sopra una certa temperatura (qualche migliaio di gradi) la materia diventa opaca.
- L'universo iniziale era talmente caldo da essere tutto come l'interno di una stella !
- Primeval Fireball.

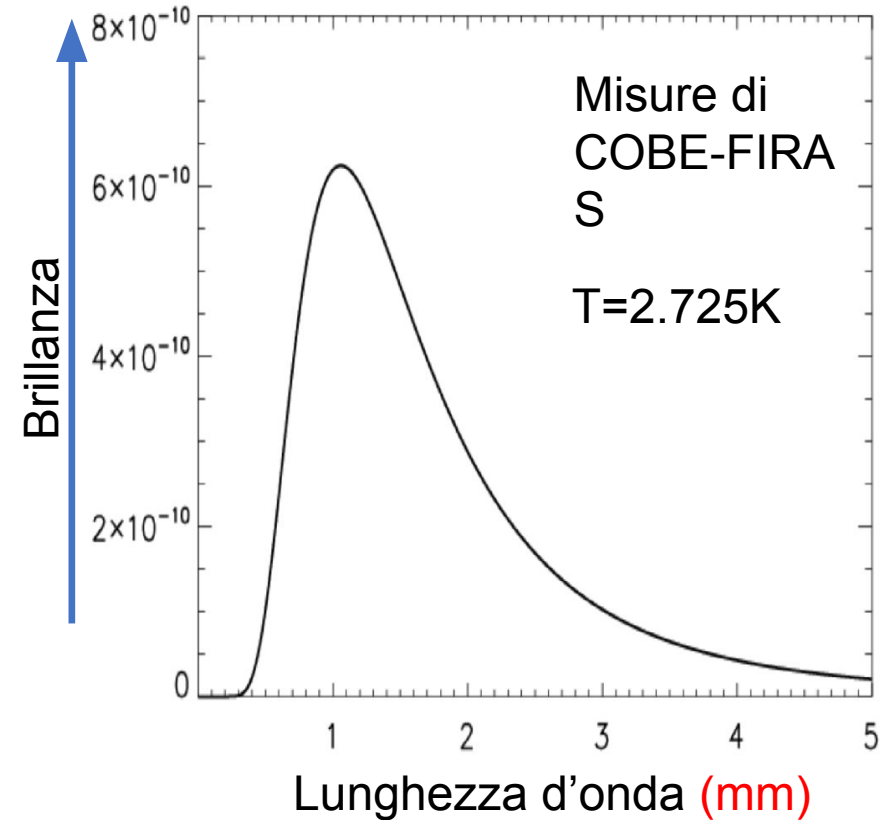


Come dalla superficie esterna di una stella proviene luce di origine termica, così deve provenire luce termica dalla primeval fireball.

Emissione del Sole
(e dell'universo primordiale)



Emissione del fondo cosmico
di microonde, scoperta nel 1965



redshift

Arno Penzias e Robert Wilson (1965)
Premio Nobel nel 1977



A MEASUREMENT OF EXCESS ANTENNA TEMPERATURE

AT 4080 Mc/s

Penzias and Wilson 1965

Measurements of the effective zenith noise temperature of the 20-foot horn-reflector antenna (Crawford, Hogg, and Hunt 1961) at the Crawford Hill Laboratory, Holmdel, New Jersey, at 4080 Mc/s have yielded a value about 3.5° K higher than expected. This excess temperature is, within the limits of our observations, isotropic, unpolarized, and free from seasonal variations (July, 1964–April, 1965). A possible explanation for the observed excess noise temperature is the one given by Dicke, Peebles, Roll, and Wilkinson (1965) in a companion letter in this issue.

COSMIC BLACK-BODY RADIATION*

..... Dicke Peebles Roll Wilkinson 1965

Could the universe have been filled with black-body radiation from this possible high-temperature state? If so, it is important to notice that as the universe expands the cosmological redshift would serve to adiabatically cool the radiation, while preserving the thermal character. The radiation temperature would vary inversely as the expansion parameter (radius) of the universe.

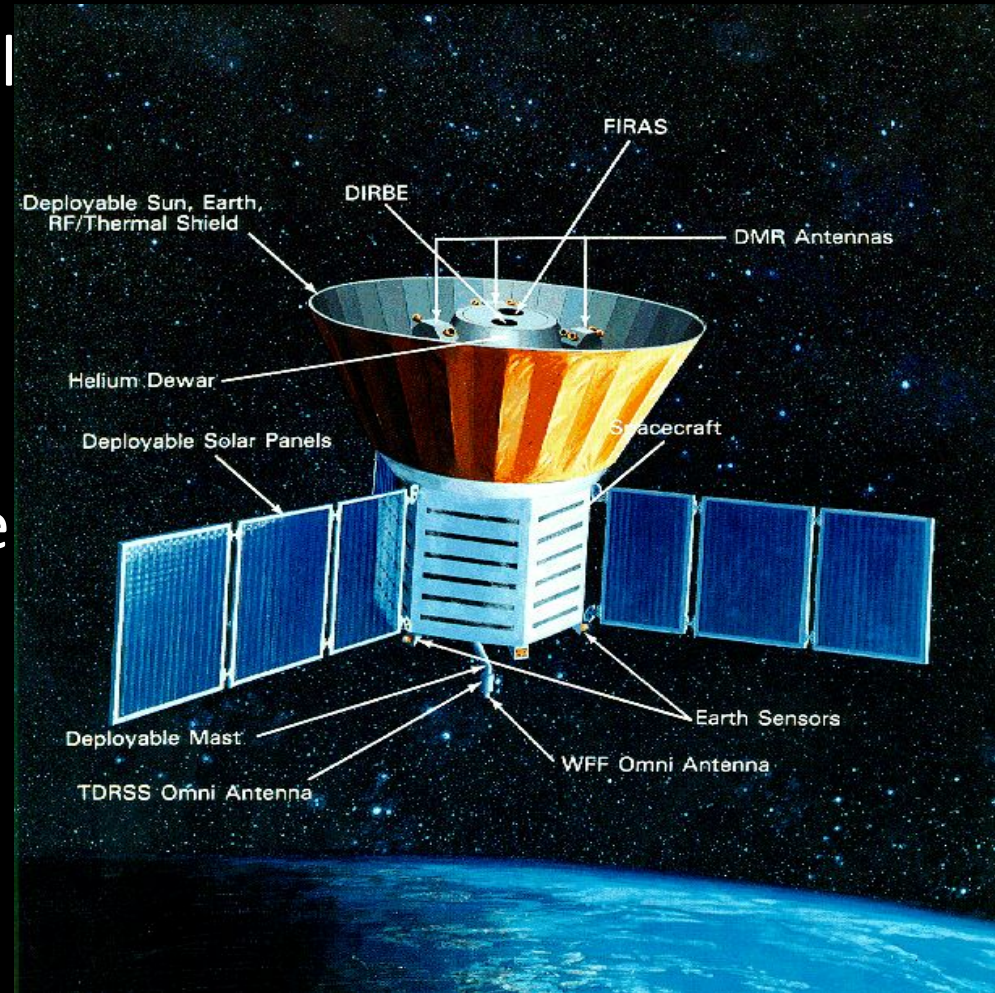
While we have not yet obtained results with our instrument, we recently learned that Penzias and Wilson (1965) of the Bell Telephone Laboratories have observed background radiation at 7.3-cm wavelength. In attempting to eliminate (or account for) every contribution to the noise seen at the output of their receiver, they ended with a residual of $3.5^{\circ} \pm 1^{\circ}$ K. Apparently this could only be due to radiation of unknown origin entering the antenna.

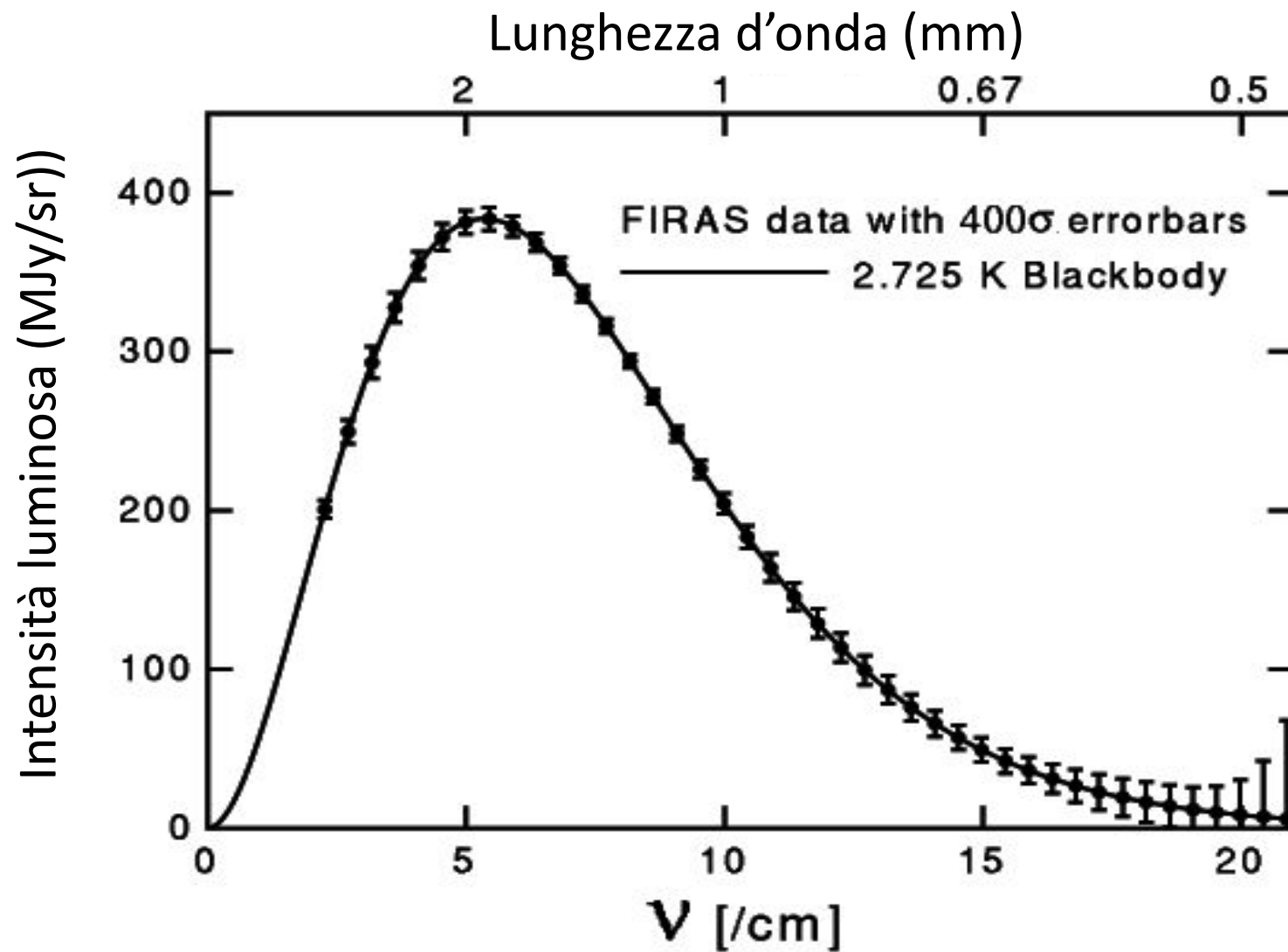
A temperature in excess of 10^{10} ° K during the highly contracted phase of the universe is strongly implied by a present temperature of 3.5° K for black-body radiation.

Scoperta della radiazione cosmica di fondo, e Teoria del big bang caldo

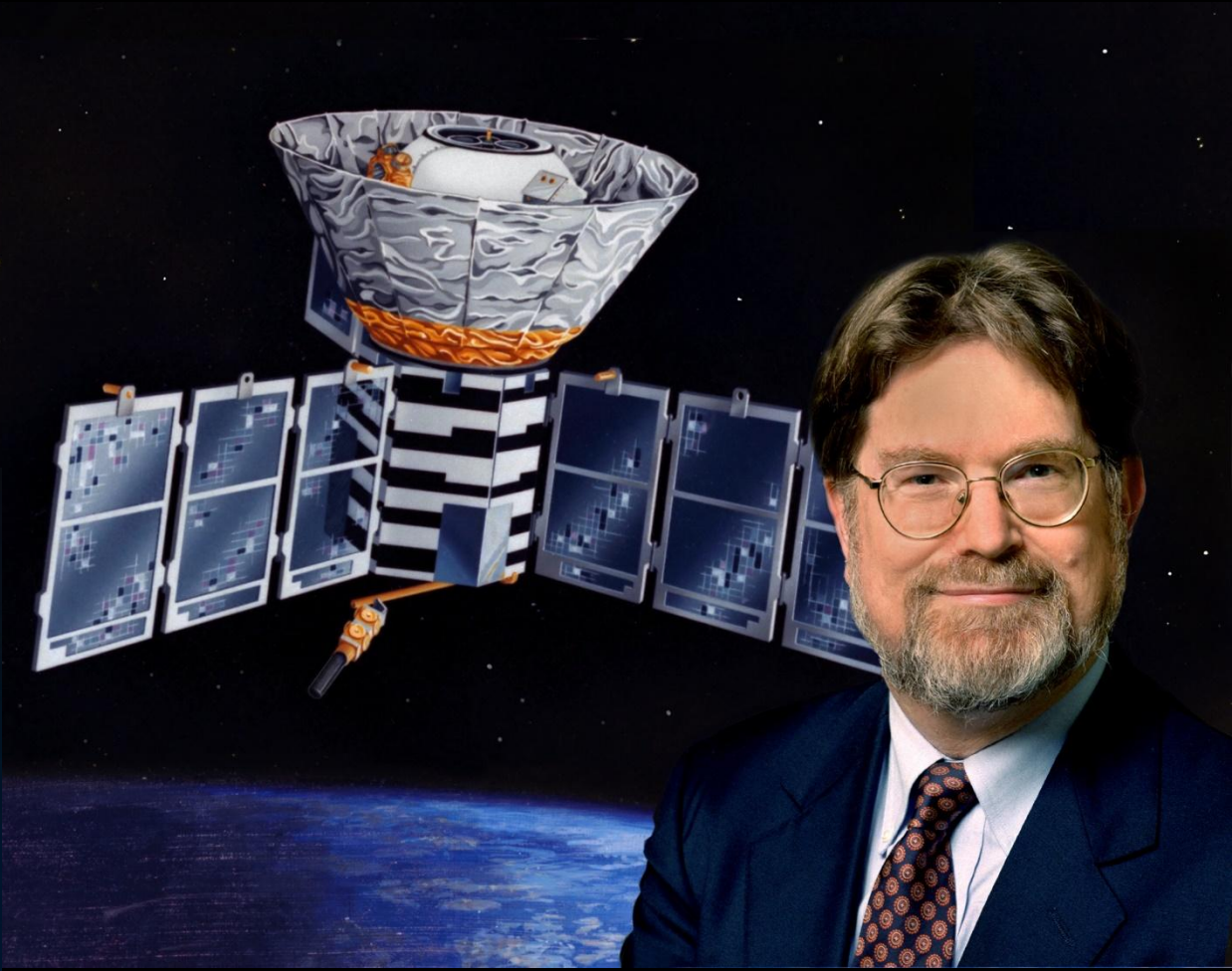
COBE

- Nel 1989 viene lanciato il piccolo satellite COBE della NASA
- l'esperimento FIRAS mostra che la radiazione cosmica nelle microonde ha una precisa distribuzione di corpo nero, come previsto nella teoria del big bang caldo.



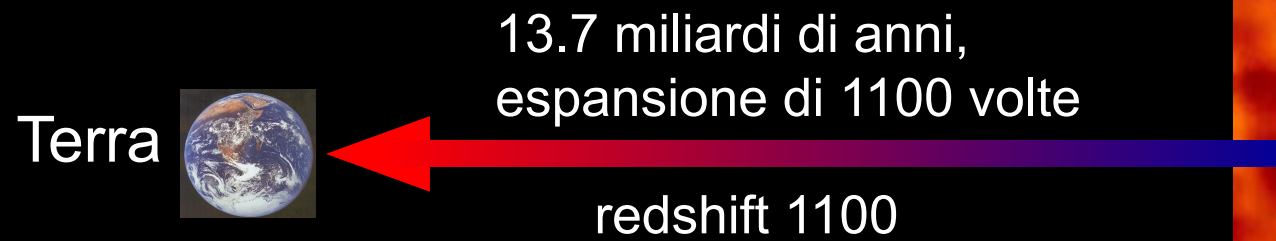


- Una caratteristica fondamentale del nostro universo: ci sono molti più fotoni che particelle di materia.
- 411 fotoni per ciascun cm^3 di universo.
- **Circa un miliardo di fotoni per ogni barione.**



John Mather e George Smoot
Premio Nobel 2006

L'universo
primordiale
incandescente



trasparente

opaco

La storia dell'universo è una storia termica

Si parte da temperatura e densità infinite, al big bang.

In queste condizioni, non abbiamo nemmeno una teoria fisica consolidata (energie troppo alte)

Assumiamo per ora un universo iniziale riempito da particelle di materia e antimateria in quantità simili.

Con l'espansione, gli urti diventano meno violenti, permettendo così la formazione di legami sempre più deboli, e quindi di complessità.

barioni, nuclei, .. atomi, molecole, ...
... stelle, galassie, ammassi di galassie....

Standard Model of Elementary Particles

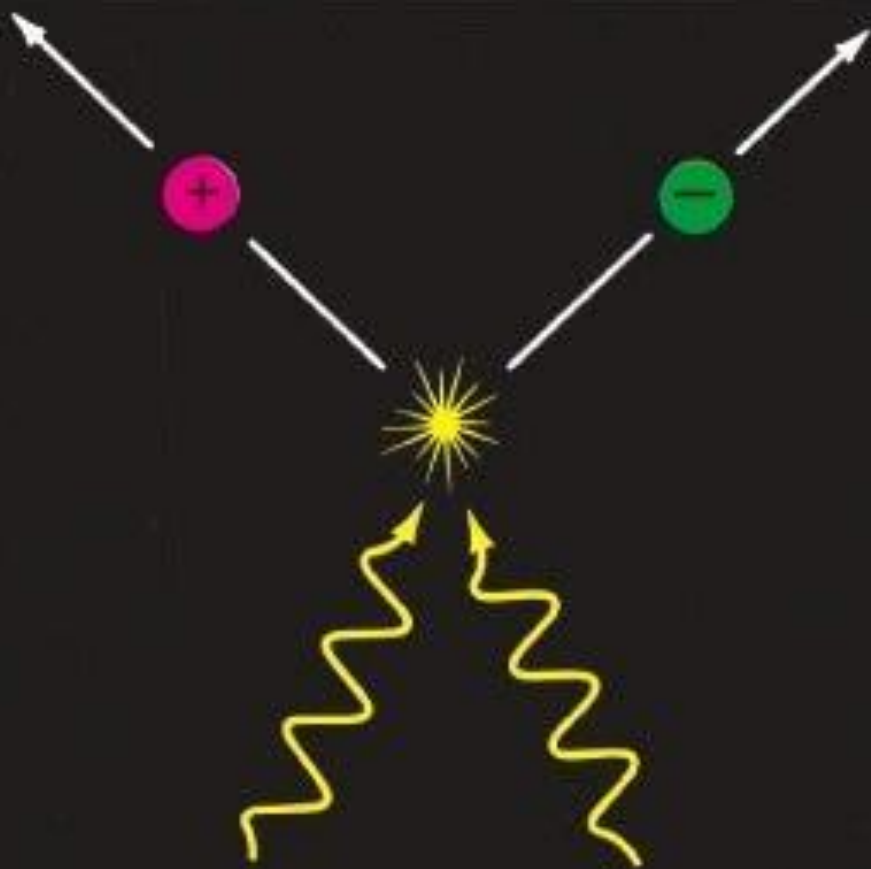
three generations of matter (elementary fermions)			three generations of antimatter (elementary antifermions)			interactions / force carriers (elementary bosons)		
QUARKS	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u up	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charm	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t top	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ \bar{u} antiup	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ \bar{c} anticharm	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ \bar{t} antitop	0 1 g gluon	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 H higgs
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ \bar{d} antidown	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ \bar{s} antistrange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ \bar{b} antibottom	0 0 1 γ photon	GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS SCALAR BOSONS
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ e electron	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ tau	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ 1 $\frac{1}{2}$ e^+ positron	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ 1 $\frac{1}{2}$ $\bar{\mu}$ antimuon	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ 1 $\frac{1}{2}$ $\bar{\tau}$ antitau	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z Z ⁰ boson	
$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ $\bar{\nu}_e$ electron antineutrino	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ $\bar{\nu}_\mu$ muon antineutrino	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ $\bar{\nu}_\tau$ tau antineutrino	$\approx 80.360 \text{ GeV}/c^2$ 1 1 W^+ W ⁺ boson	$\approx 80.360 \text{ GeV}/c^2$ -1 1 W^- W ⁻ boson	

- **Big bang** ($t=0$, $T = +\infty$, $\rho = +\infty$)
- **Bariogenesi** (annichilazione di particelle e antiparticelle, *produzione di fotoni*, $t = \text{pochi } \mu\text{s}$ dopo il big bang)
- **Nucleosintesi** (i primi 3 minuti)
- **Ricombinazione** (formazione dei primi atomi: 380000 anni)
- **Formazione delle galassie** (100 milioni di anni)
- **Oggi** (13.7 miliardi di anni)

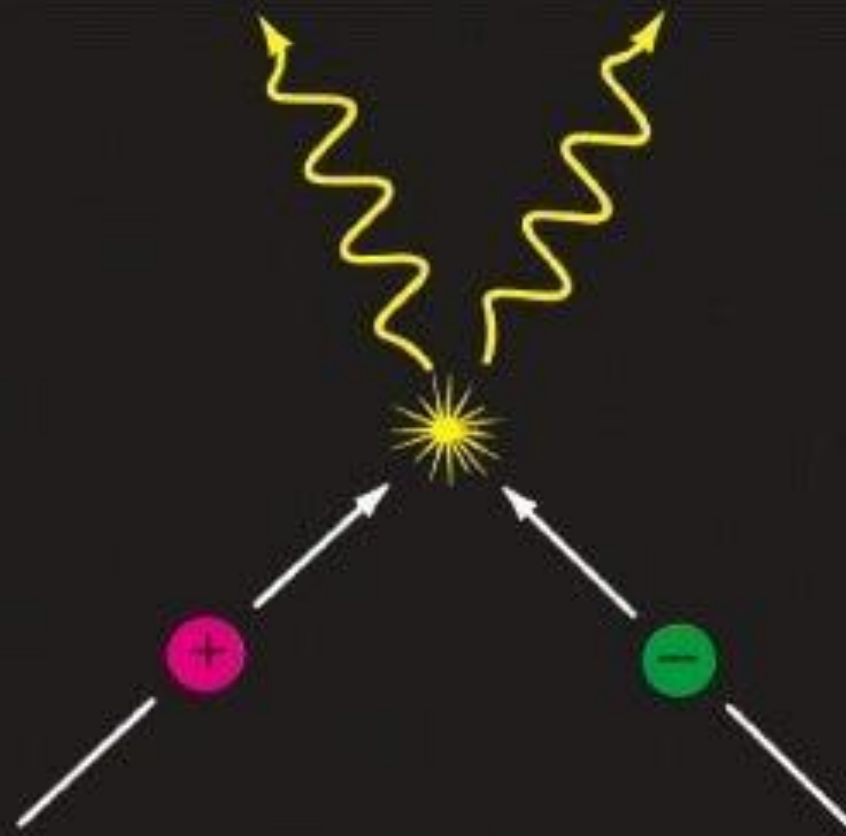
Universo opaco

Universo trasparente

tempo

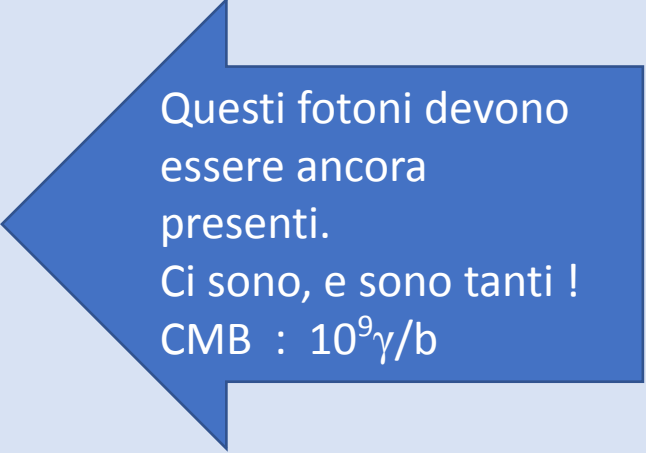


Produzione di coppie materia antimateria



Annichilazione di materia antimateria


- **Big bang** ($t=0$)
- **Bariogenesi** (annichilazione di particelle e antiparticelle, *produzione di fotoni*, $t =$ pochi μs dopo il big bang)
- **Nucleosintesi** (i primi 3 minuti)
- **Ricombinazione** (formazione dei primi atomi: 380000 anni)
- **Formazione delle galassie** (100 milioni di anni)
- **Oggi** (13.7 miliardi di anni)



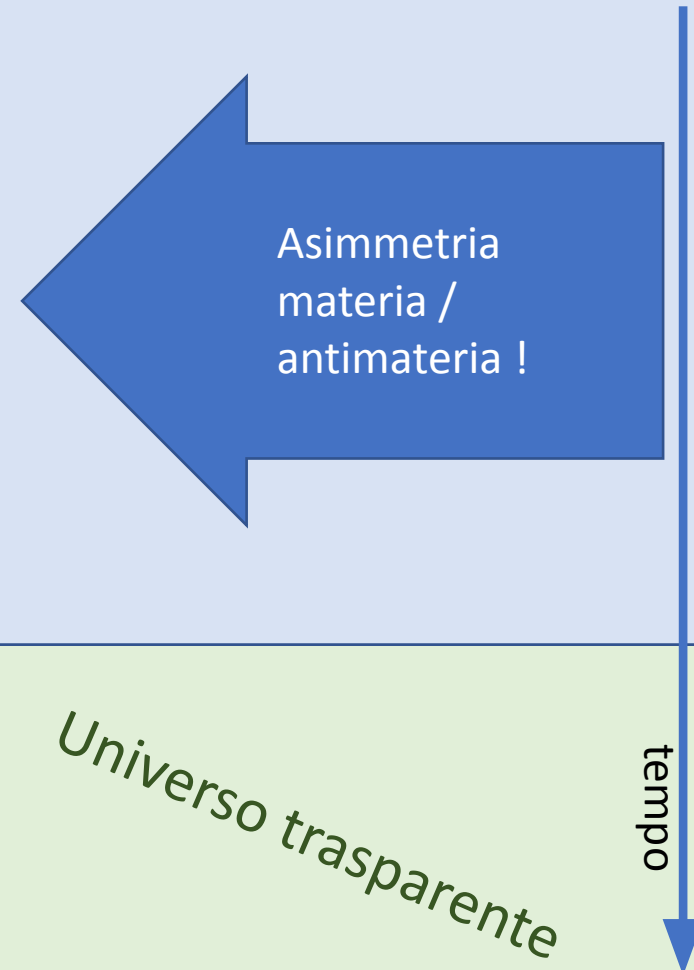
Questi fotoni devono essere ancora presenti.
Ci sono, e sono tanti !
CMB : $10^9 \gamma/b$

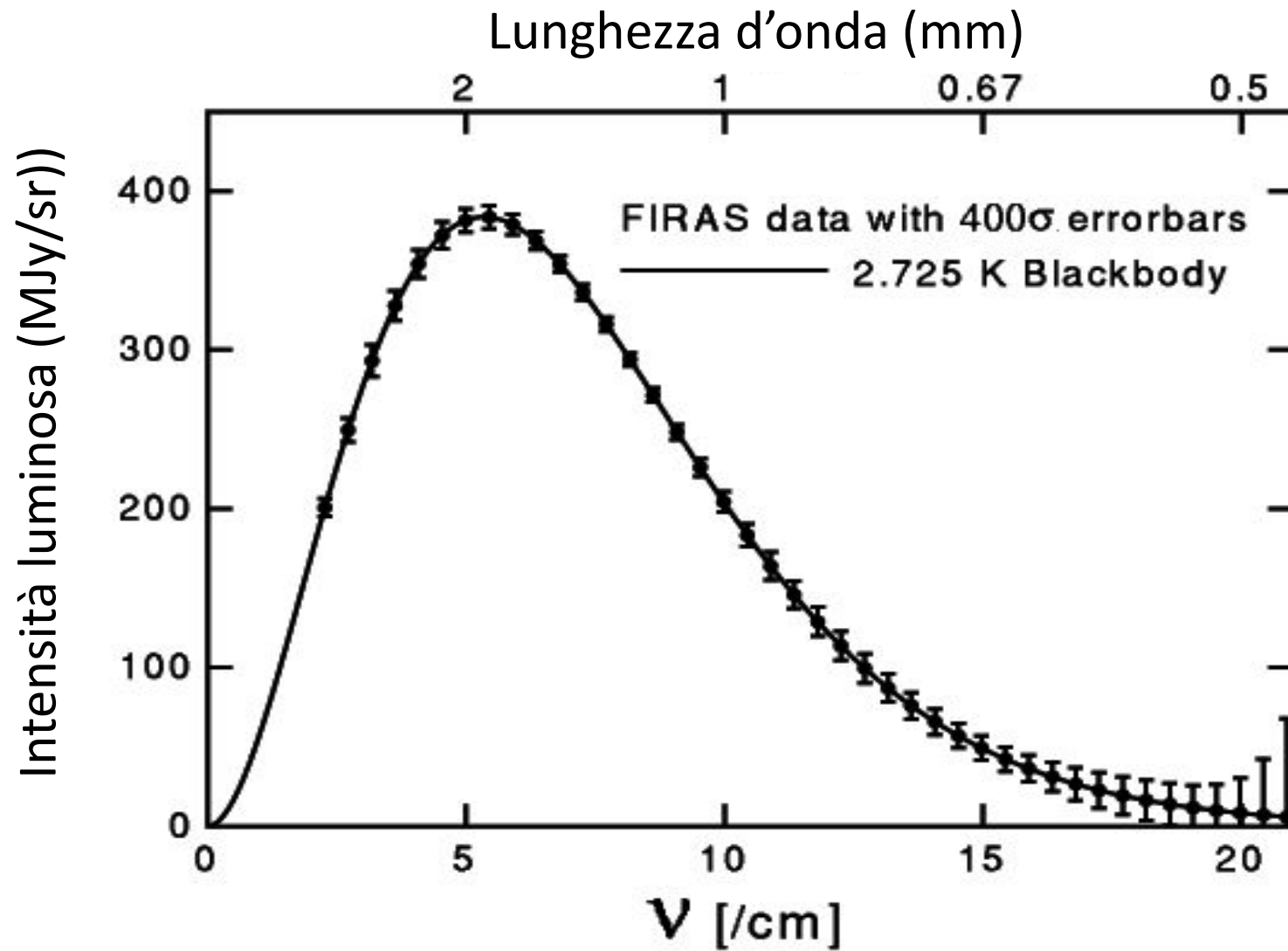
Universe trasparente

tempo



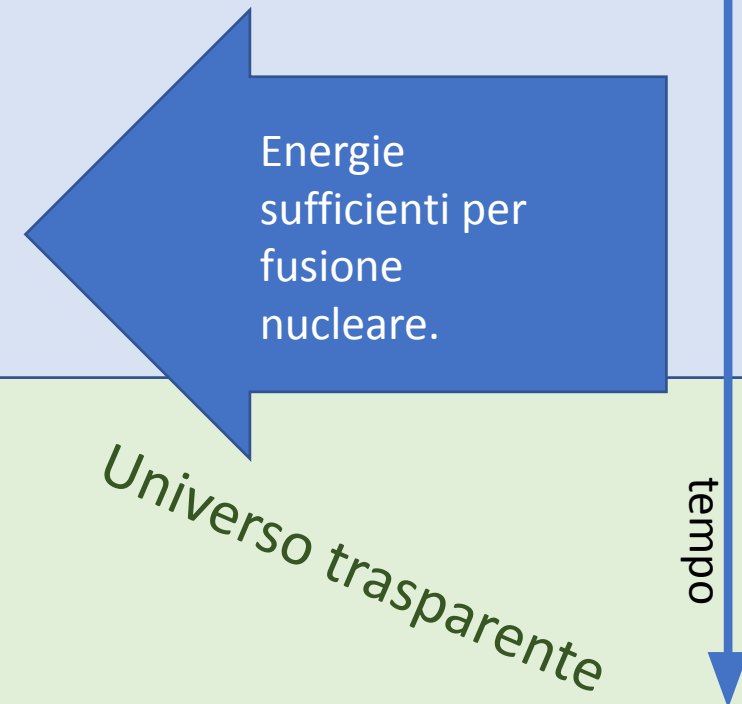
- **Big bang** ($t=0$)
- **Bariogenesi** (annichilazione di particelle e antiparticelle, *produzione di fotoni*, $t = \text{pochi } \mu\text{s}$ dopo il big bang)
- **Nucleosintesi** (i primi 3 minuti)
- **Ricombinazione** (formazione dei primi atomi: 380000 anni)
- **Formazione delle galassie** (100 milioni di anni)
- **Oggi** (13.7 miliardi di anni)



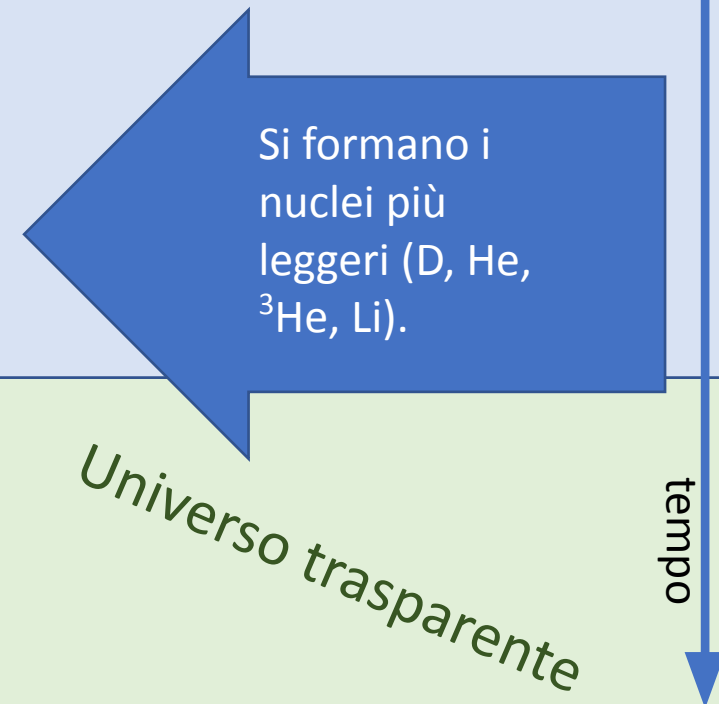


- Una caratteristica fondamentale del nostro universo: ci sono molti più fotoni che particelle di materia.
- 411 fotoni per ciascun cm^3 di universo.
- **Circa un miliardo di fotoni per ogni barione.**

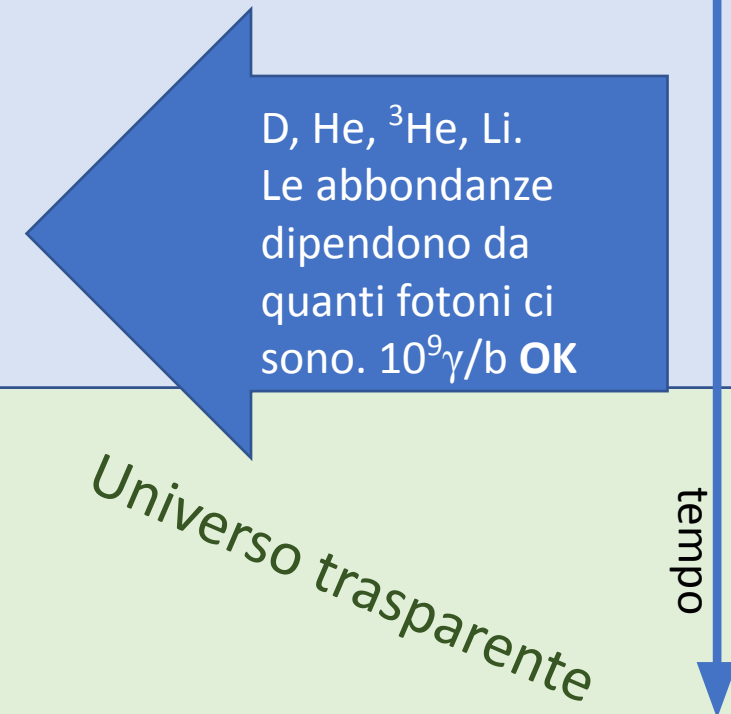
- **Big bang** ($t=0$)
- **Bariogenesi** (annichilazione di particelle e antiparticelle, *produzione di fotoni*, $t =$ pochi μs dopo il big bang)
- **Nucleosintesi** (i primi 3 minuti)
- **Ricombinazione** (formazione dei primi atomi: 380000 anni)
- **Formazione delle galassie** (100 milioni di anni)
- **Oggi** (13.7 miliardi di anni)

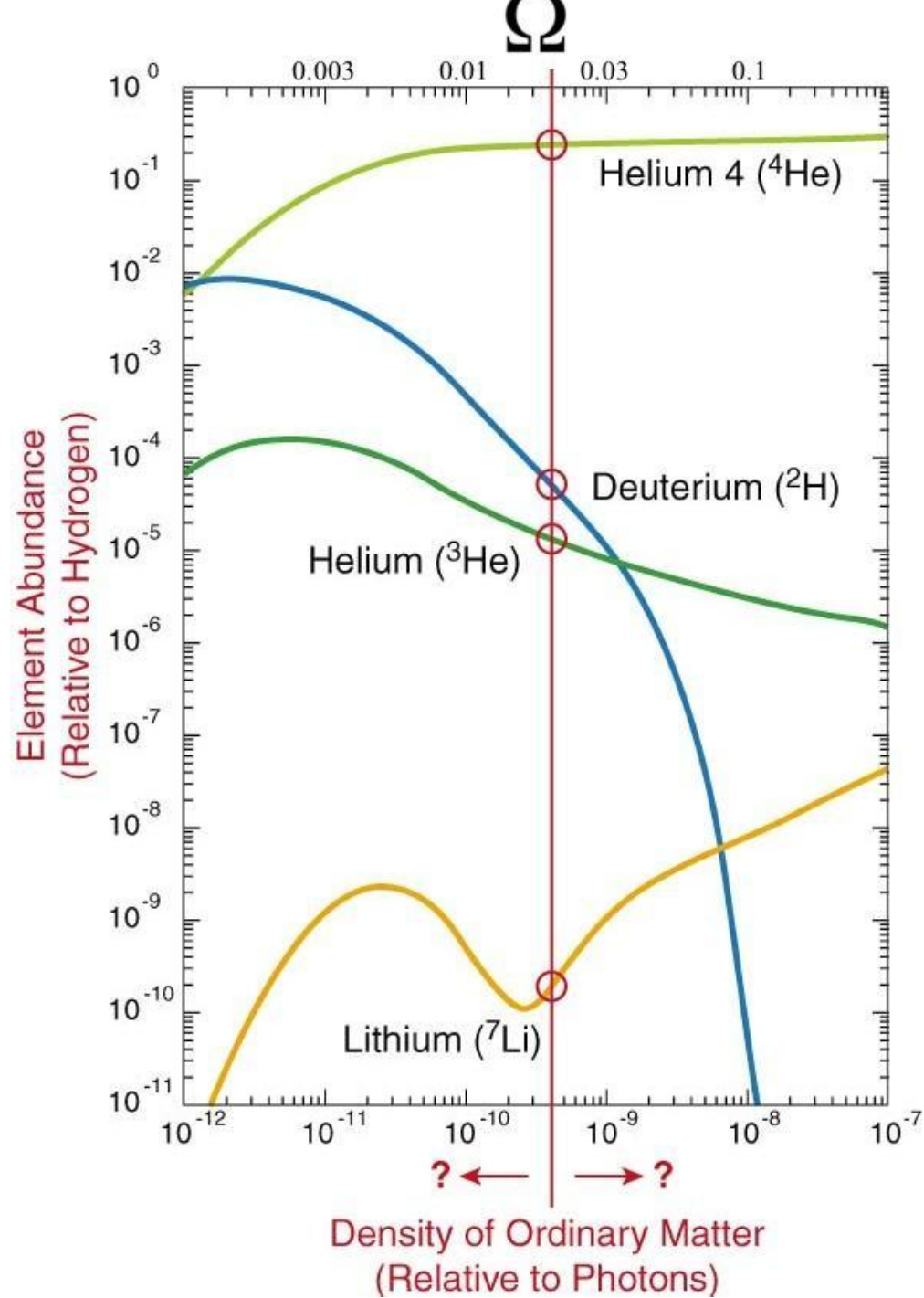
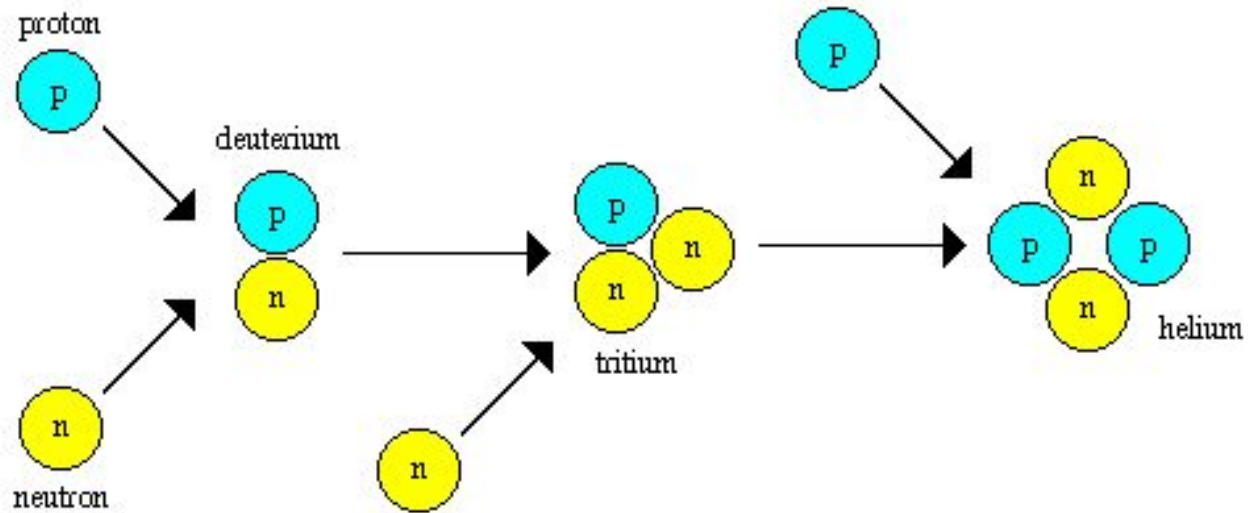


- **Big bang** ($t=0$)
- **Bariogenesi** (annichilazione di particelle e antiparticelle, *produzione di fotoni*, $t =$ pochi μs dopo il big bang)
- **Nucleosintesi** (i primi 3 minuti)
- **Ricombinazione** (formazione dei primi atomi: 380000 anni)
- **Formazione delle galassie** (100 milioni di anni)
- **Oggi** (13.7 miliardi di anni)



- **Big bang** ($t=0$)
- **Bariogenesi** (annichilazione di particelle e antiparticelle, *produzione di fotoni*, $t =$ pochi μs dopo il big bang)
- **Nucleosintesi** (i primi 3 minuti)
- **Ricombinazione** (formazione dei primi atomi: 380000 anni)
- **Formazione delle galassie** (100 milioni di anni)
- **Oggi** (13.7 miliardi di anni)





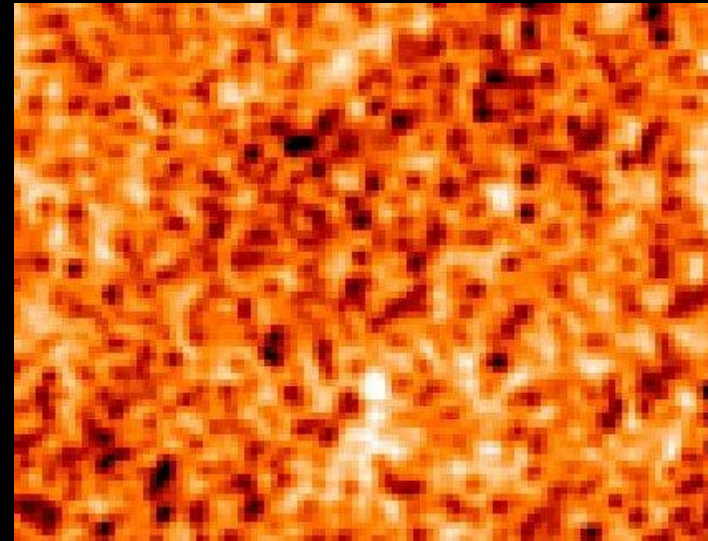
- **Big bang** ($t=0$)
- **Bariogenesi** (annichilazione di particelle e antiparticelle, *produzione di fotoni*, $t =$ pochi μs dopo il big bang)
- **Nucleosintesi** (i primi 3 minuti)
- **Ricombinazione** (formazione dei primi atomi: 380000 anni)
- **Formazione delle galassie** (100 milioni di anni)
- **Oggi** (13.7 miliardi di anni)

Qui (3000K) l'universo da ionizzato diventa neutro, la luce può propagarsi in linea retta, astronomia

Universo trasparente

tempo

Granulazione solare



Gas incandescente
sulla superficie del
Sole (5500 K)

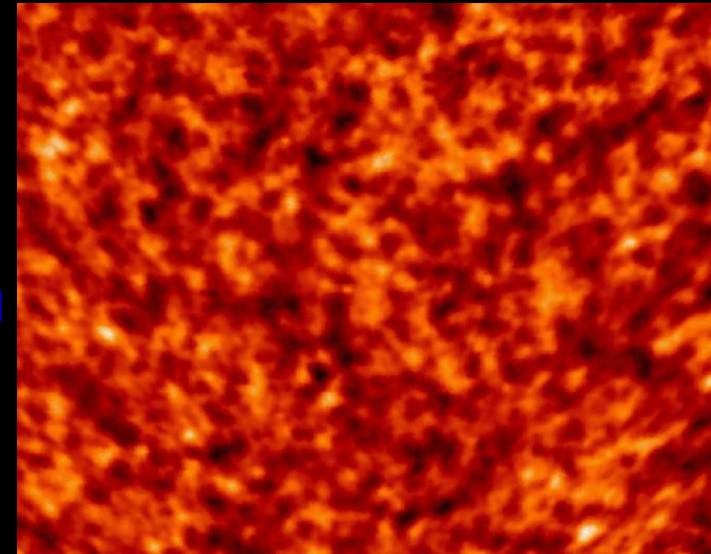
8 minuti luce

Qui, ora

Gas incandescente
nell' universo
primordiale (l'
universo diventa
trasparente a 3000 K)

14 miliardi di anni luce

Qui, ora



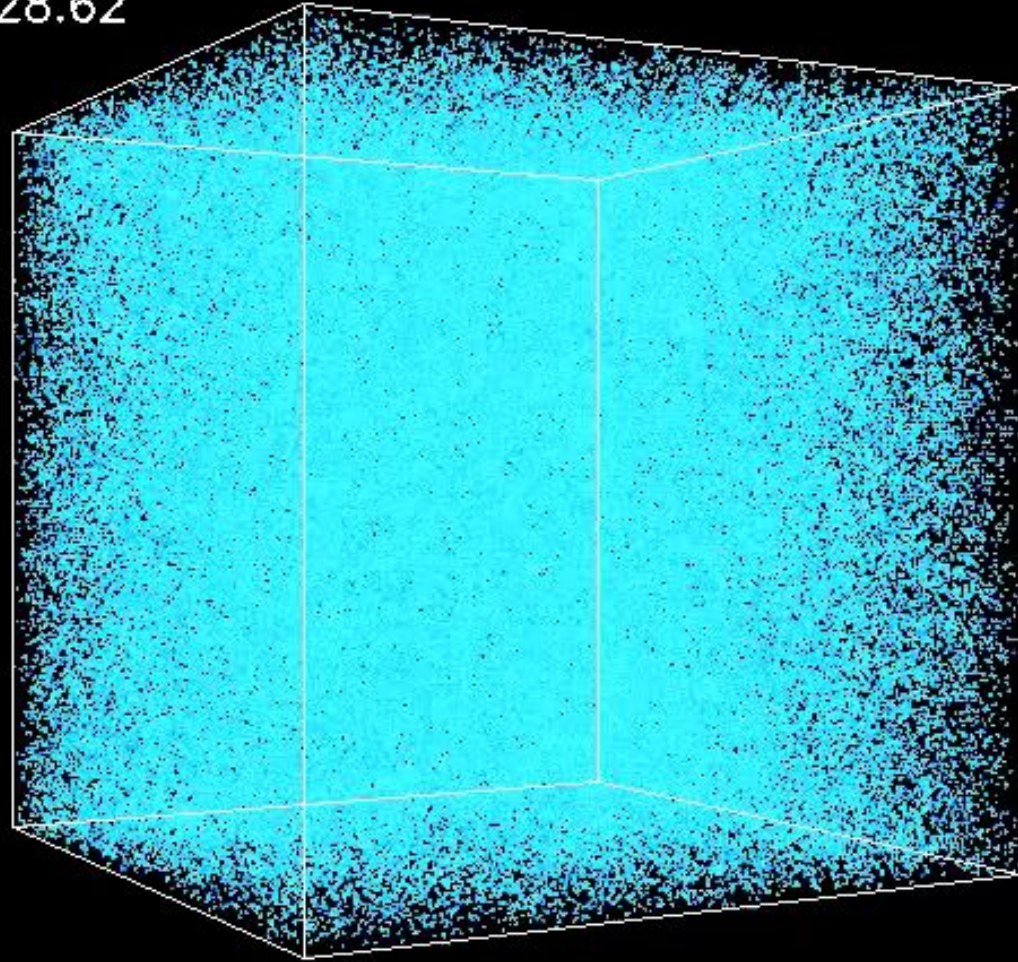
Mappa di BOOMERanG dell' Universo Primordiale

- **Big bang** ($t=0$)
- **Bariogenesi** (annichilazione di particelle e antiparticelle, *produzione di fotoni*, $t =$ pochi μs dopo il big bang)
- **Nucleosintesi** (i primi 3 minuti)
- **Ricombinazione** (formazione dei primi atomi: 380000 anni)
- **Formazione delle galassie** (100 milioni di anni)
- **Oggi** (13.7 miliardi di anni)

Finito l'effetto delle pressione dei fotoni, la gravità fa il suo lavoro e forma le strutture

tempo

$Z=28.62$



Tutti i dettagli nel prossimo dialogo ...