



Università "Cardinale Giovanni Colombo" - Milano

A.A. 2024 - 2025

Corso di Astrofisica

Docente: **Adriano Gaspani**

Lezione 1

Astrofisica e Moderna  
Cosmologia



**LA COSMOLOGIA E' LA  
DISCIPLINA SCIENTIFICA CHE  
STUDIA L'UNIVERSO  
SU LARGA SCALA, TENTA  
DI COMPENDERNE  
L'ORIGINE E L'EVOLUZIONE**

**COME TUTTE LE DISCIPLINE SCIENTIFICHE LA COSMOLOGIA PREVEDE LA  
FORMULAZIONE DI TEORIE O IPOTESI CHE POSSONO ESSERE VERIFICATE  
CON LE OSSERVAZIONI.**

# **PRINCIPALI ASSUNZIONI IN COSMOLOGIA:**

## **PRINCIPIO COSMOLOGICO**

**-L'UNIVERSO SU LARGA SCALA E' ISOTROPO ED OMOGENEO**

## **PRINCIPIO COPERNICANO**

**-NON OCCUPIAMO UNA POSIZIONE PRIVILEGIATA NELL'UNIVERSO**

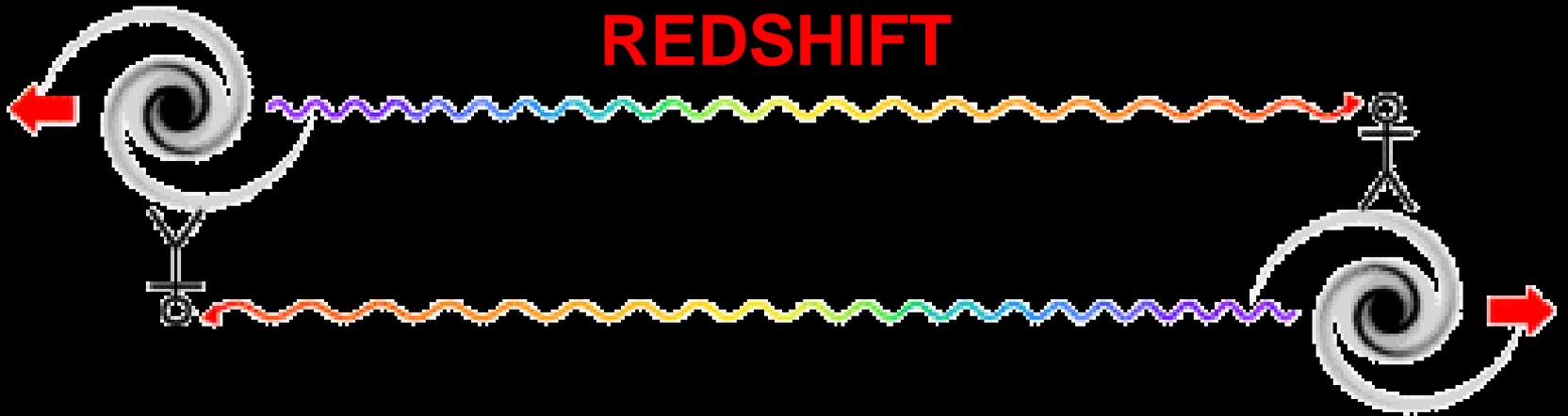
**-NON ESISTONO POSIZIONI PRIVILEGIATE**

# IMPLICAZIONI DEL PRINCIPIO COSMOLOGICO

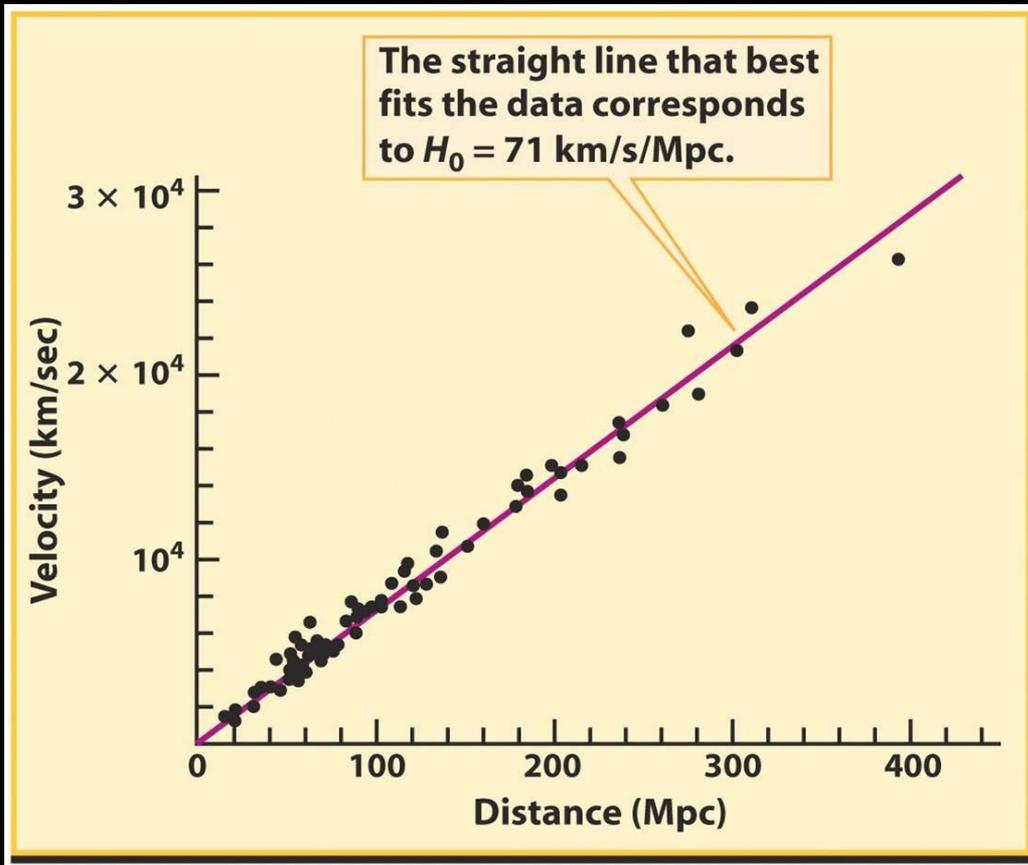
- LA DENSITA' MEDIA DELLA MATERIA E DELL'ENERGIA E' UGUALE IN TUTTO L'UNIVERSO.
- QUALSIASI OSSERVATORE NELL'UNIVERSO PERCEPISCE L'ESPANSIONE NELLO STESSO MODO.
- LA CURVATURA DELL'UNIVERSO E' LA STESSA IN OGNI LUOGO.

Salvo in vicinanza di una  
concentrazione di massa...

# REDSHIFT



$$z = \frac{f_{emessa} - f_{osservata}}{f_{osservata}}$$



**NEL 1929 EDWIN HUBBLE  
SCOPRE L'ESISTENZA DI UNA  
RELAZIONE LINEARE TRA  
IL REDSHIFT E LA DISTANZA  
DELLE GALASSIE.**

**LE GALASSIE SI ALLONTANANO  
RECIPROCAMENTE AD UNA  
VELOCITA' PROPORZIONALE ALLA  
LORO DISTANZA**

**LEGGE DI HUBBLE**  
 **$v = H_0 D$**

**COSTANTE DI HUBBLE**  
 **$H_0 = 71 \text{ (Km/s)/Mpc}$**

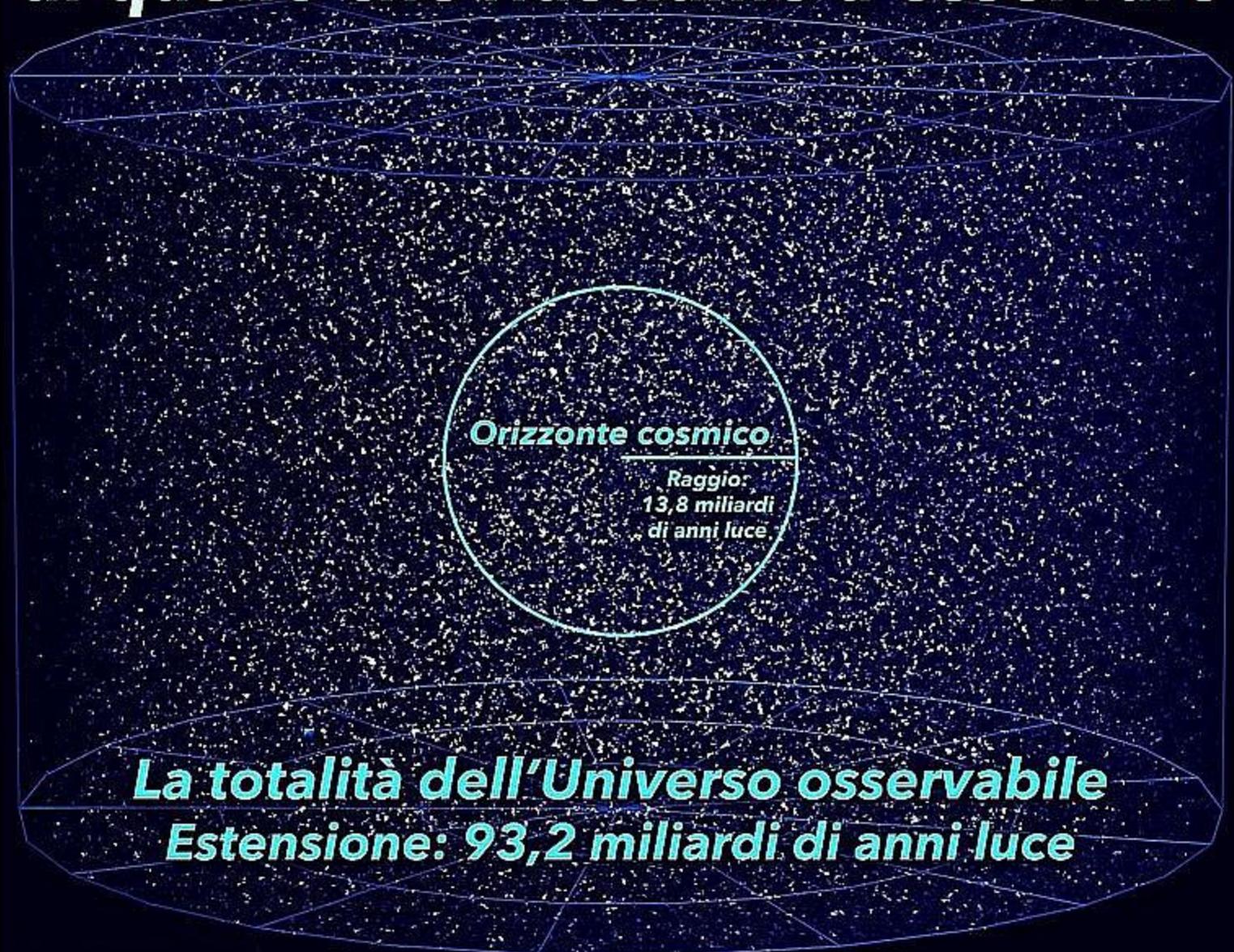
**LA LEGGE DI HUBBLE  
E' IN PERFETTO ACCORDO  
CON UN UNIVERSO  
OMOGENEO IN ESPANSIONE,  
COME PREVISTO DALLA  
TEORIA DEL  
BIG BANG**

L'espansione dell'Universo  
è dovuta all'Energia Oscura  
(negativa, antigravitazionale)  
che genera lo Spazio-Tempo  
ad una velocità molto superiore  
a quella della luce.

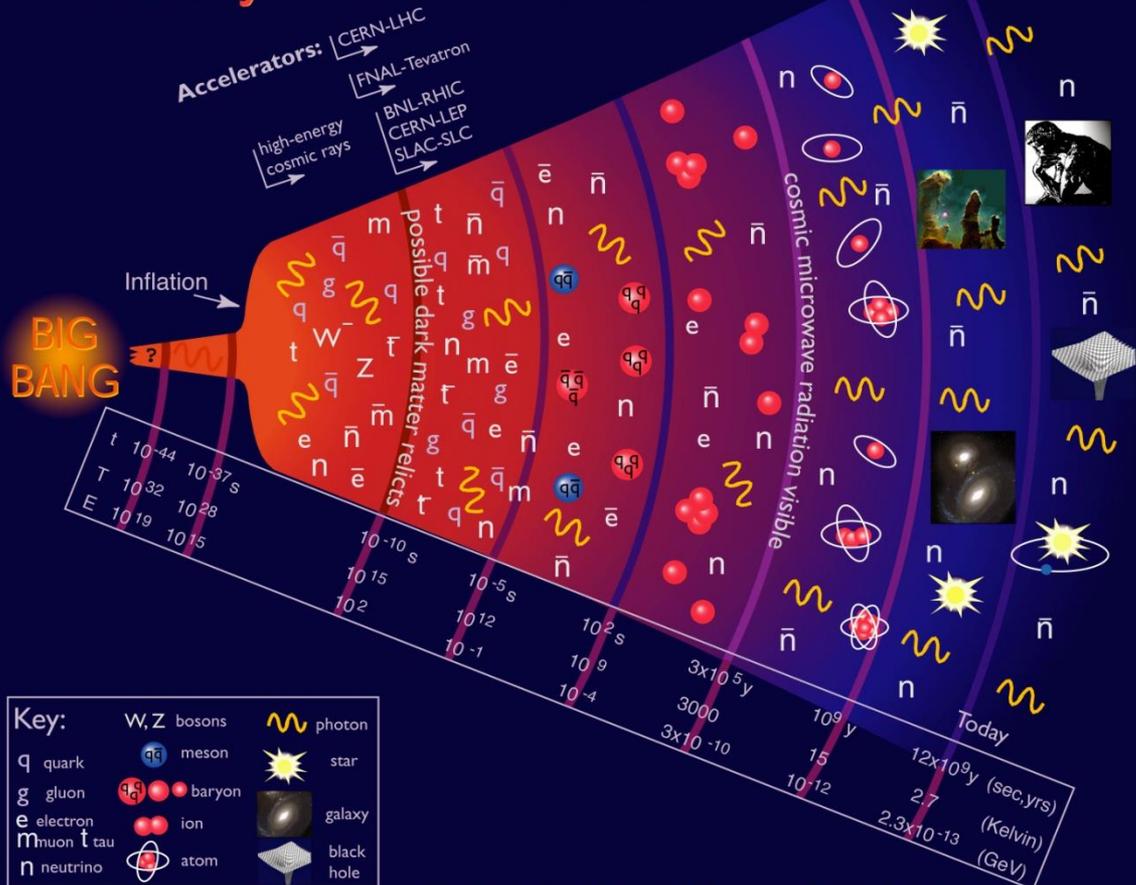
La velocità della luce è il limite solo per  
la materia e l'energia, ma non per lo  
Spazio-Tempo...

Lo Spazio-Tempo fa quello che vuole...

# **L'Universo è 38 volte più grande di quello che riusciamo a osservare**



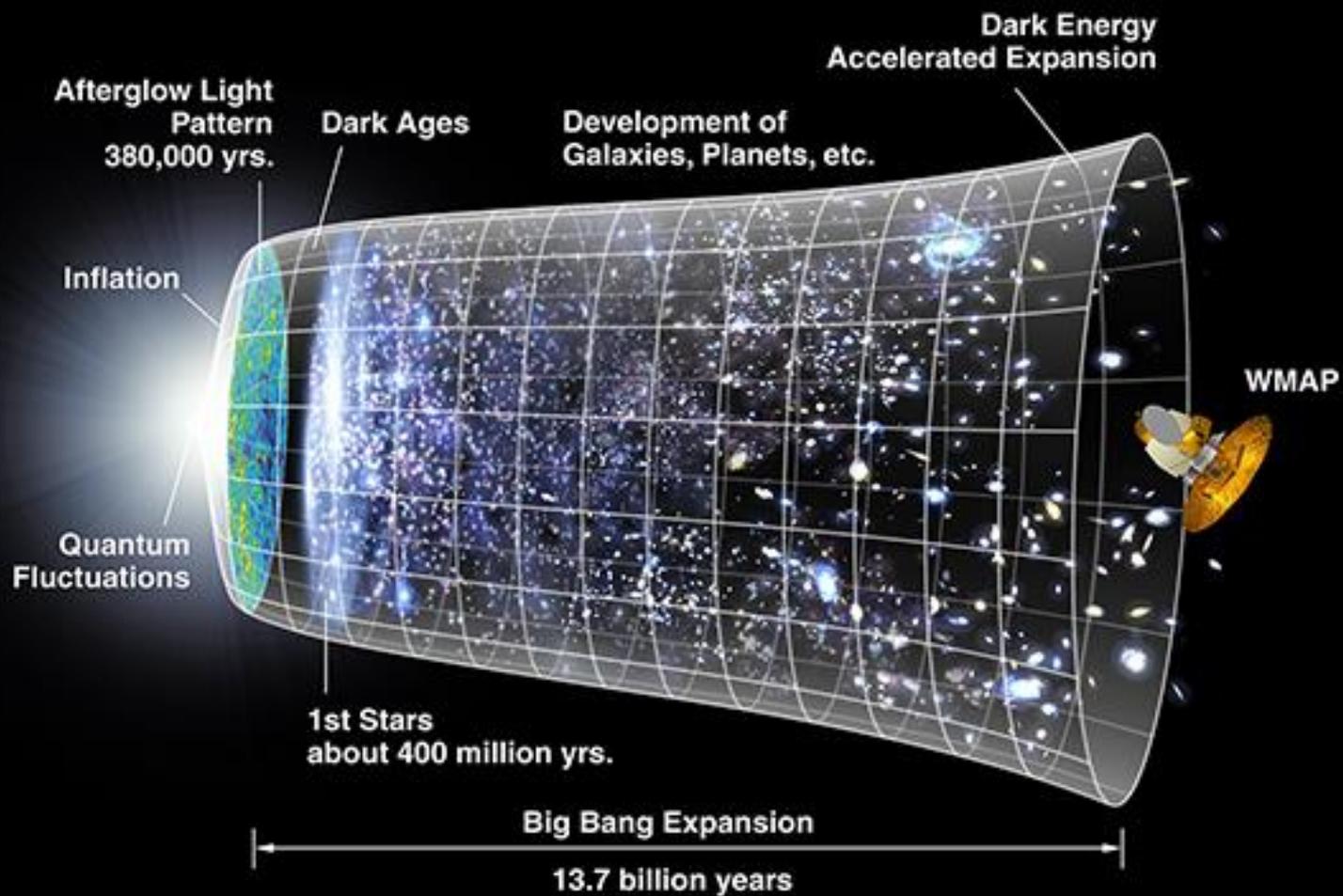
# History of the Universe



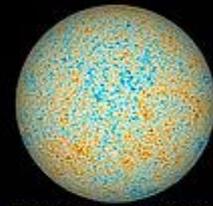
Particle Data Group, LBNL, © 2000. Supported by DOE and NSF

**12-14 MILIARDI DI ANNI  
FA L'UNIVERSO  
AVREBBE AVUTO  
ORIGINE DA UNA  
SINGOLARITA'  
A TEMPERATURA E  
DENSITA' INFINITA**

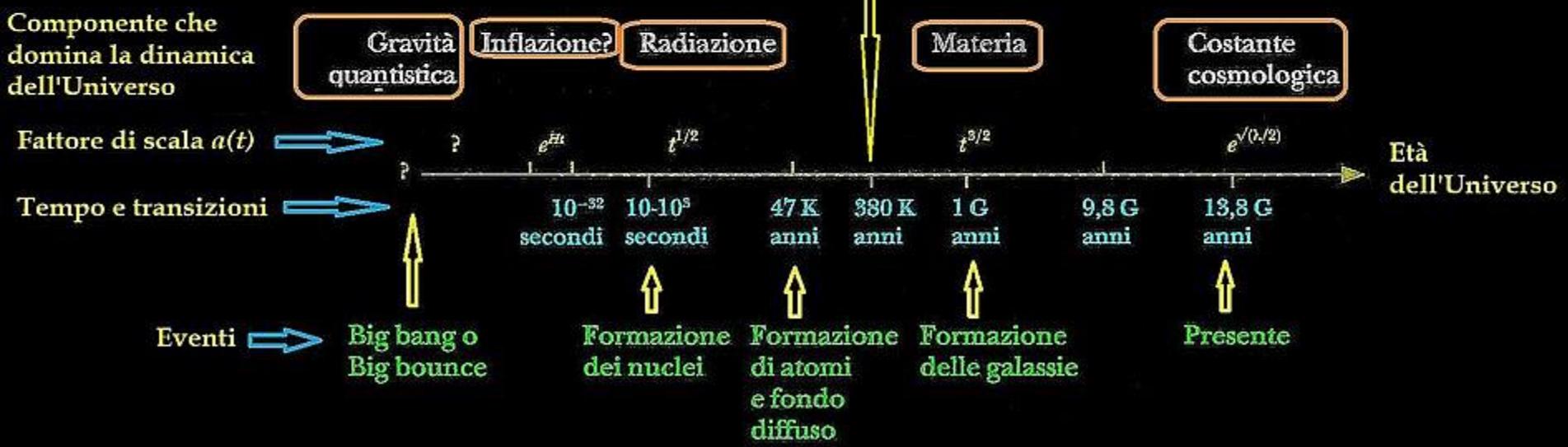
**IL MODELLO DEL BIG BANG  
DERIVA DALL'APPLICAZIONE  
DELLA RELATIVITA'  
GENERALE DI EINSTEIN  
AD UN UNIVERSO  
ISOTROPO ED OMOGENEO**



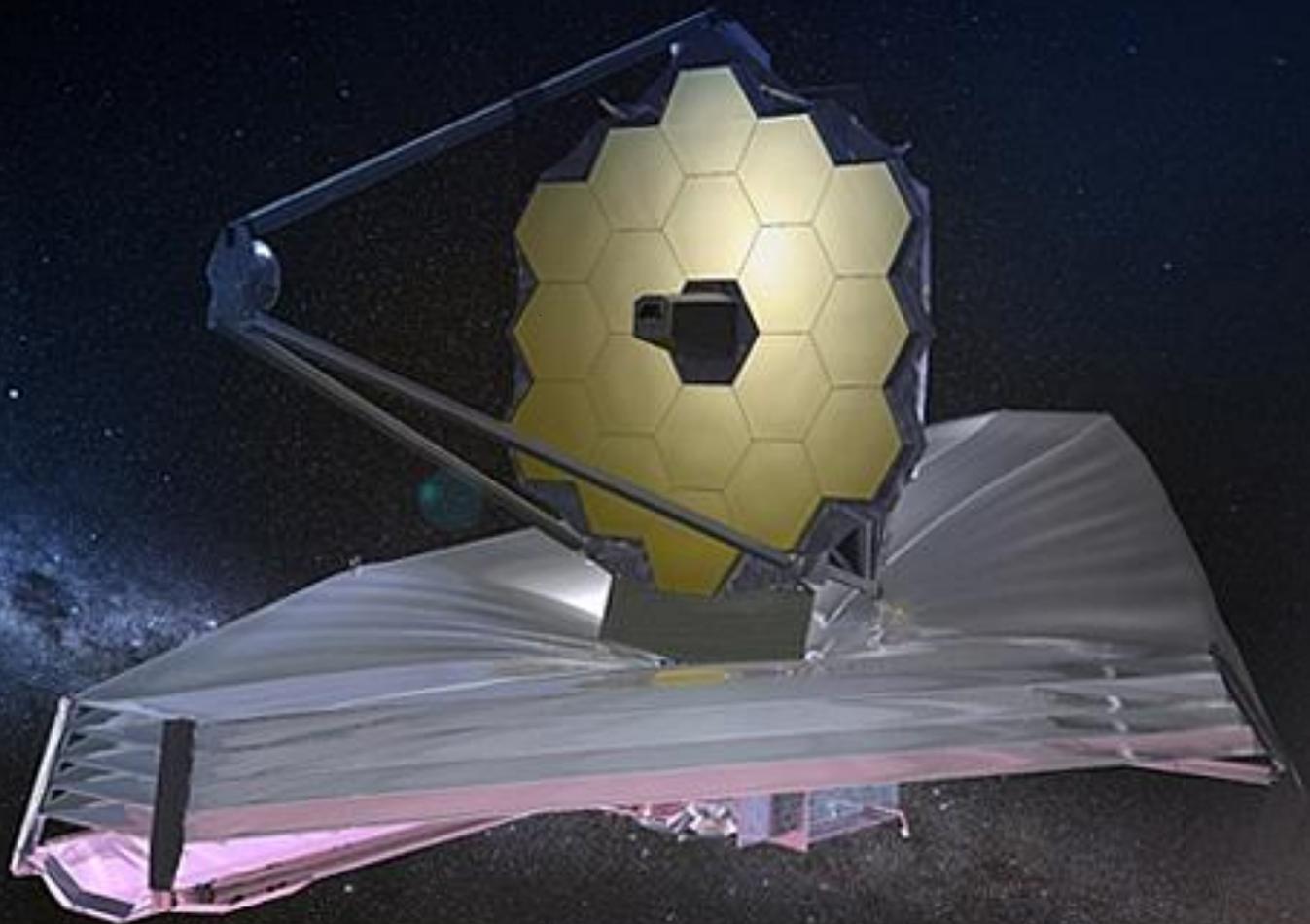
# Evoluzione dell'Universo:



CMB flux (Cosmic Microwave Background) anisotropia termica



# Il telescopio spaziale infrarosso James Webb Space Telescope



**S**ono state catturate dal telescopio spaziale James Webb le immagini delle galassie più antiche mai viste: sono quattro e la loro 'data di nascita' è stata confermata adesso: risalgono all'epoca in cui l'universo era giovanissimo, aveva cioè un'età compresa fra 300 e 500 milioni di anni, vale a dire circa il 2% della sua età attuale. Questo significa che le quattro galassie erano anch'esse giovanissime e in piena formazione.

Le galassie molto antiche sono molto lontane e hanno una grande velocità di recessione.

Il loro Red-Shift è molto alto e quindi tutta la luce che ci arriva è spostata nell'Infrarosso.

A causa dell'espansione dell'Universo, la luce proveniente da oggetti distanti si sposta verso lunghezze d'onda vicine all'estremità rossa dello spettro: più rossa è l'immagine, più distante è l'oggetto.

Tutto questo ha permesso di ricostruire la formazione di queste quattro giovanissime galassie.

Al momento non hanno un nome e sono indicate dalle sigle:

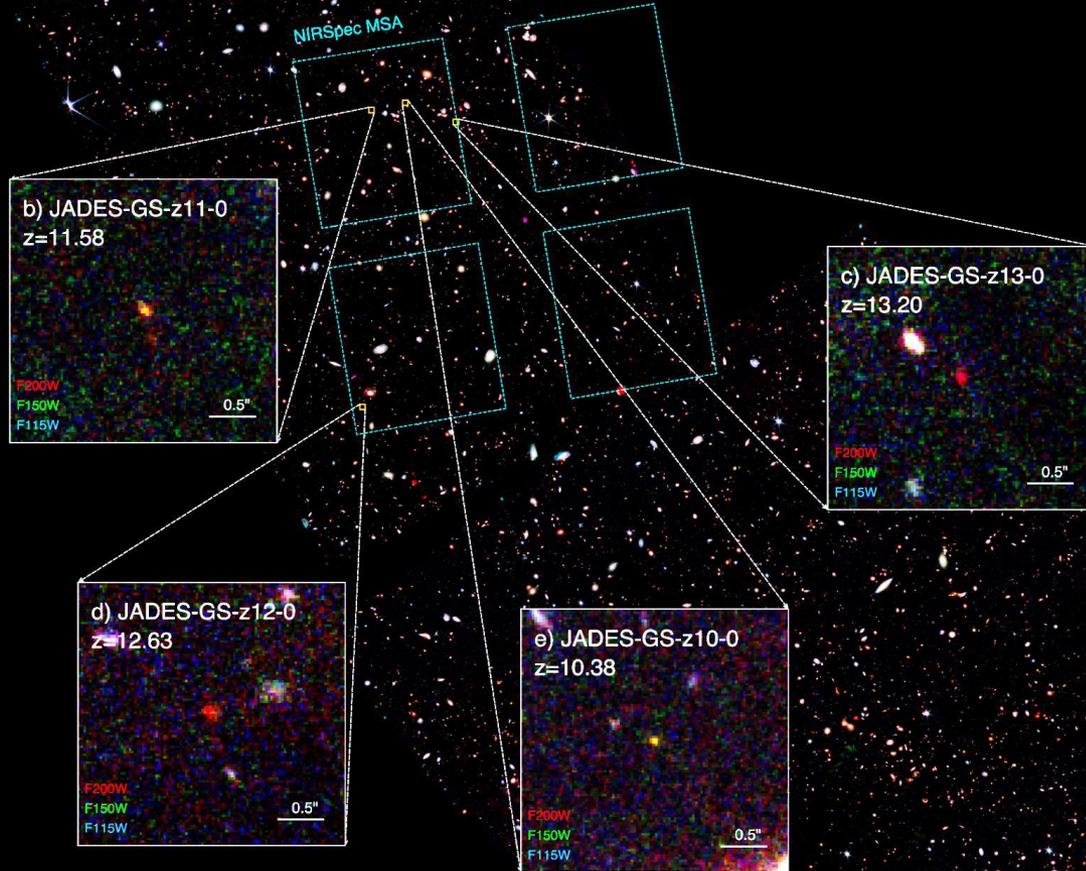
**Jades-GS-z10-0,**

**Jades-GS-z11-0,**

**Jades-GS-z12-0,**

**Jades-GS-z13-0.**

# JADES/GOODS-S JWST/NIRCam



F444W  
F200W  
F115W

1'

# c) JADES-GS-z13-0

## z=13.20

F200W

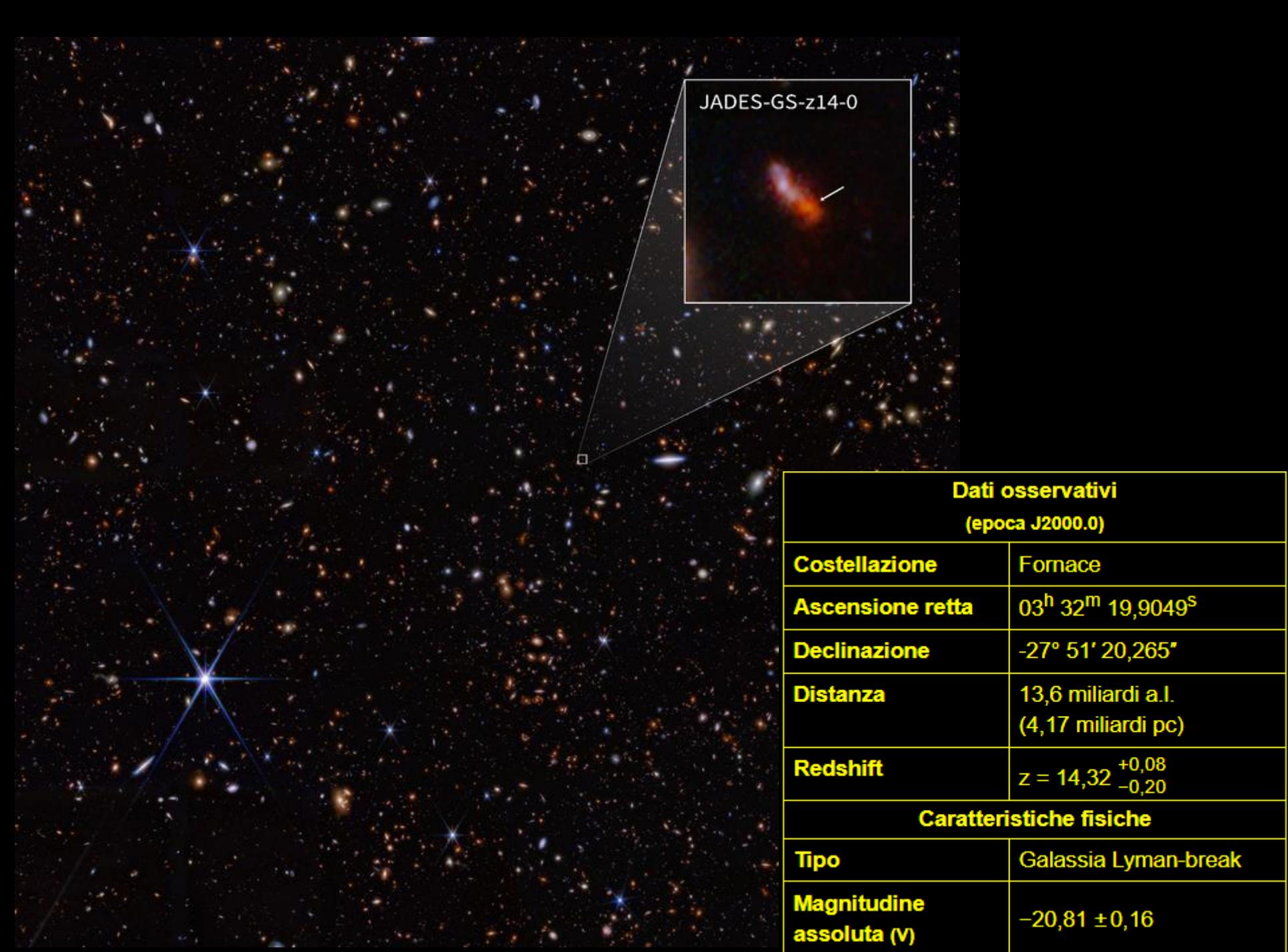
F150W

F115W

| Dati osservativi<br>(epoca J2000.0) |                                                    |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Costellazione                       | Fornace                                            |
| Ascensione retta                    | 03 <sup>h</sup> 32 <sup>m</sup> 35,97 <sup>s</sup> |
| Declinazione                        | -27° 46' 35.4"                                     |
| Distanza                            | 13,4 miliardi a.l.<br>(4,11 miliardi pc)           |
| Magnitudine apparente (V)           | 29,43 ± 0,14                                       |
| Redshift                            | $z = 13,20^{+0,04}_{-0,07}$                        |
| Caratteristiche fisiche             |                                                    |
| Tipo                                | Galassia Lyman-break                               |
| Massa                               | $8,91^{+4,89}_{-4,34} \times 10^7 M_{\odot}$       |
| Magnitudine assoluta (V)            | -18,73 ± 0,06                                      |

0.5"



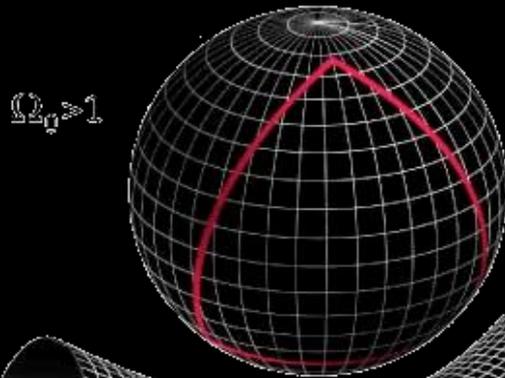


JADES-GS-z14-0

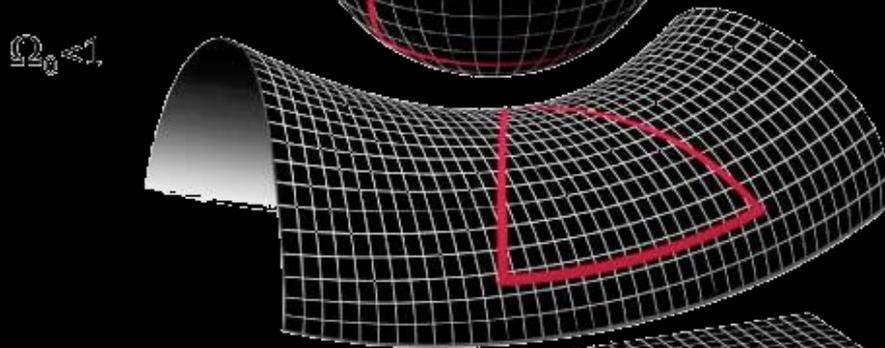
| <b>Dati osservativi</b><br>(epoca J2000.0) |                                                      |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| <b>Costellazione</b>                       | Fornace                                              |
| <b>Ascensione retta</b>                    | 03 <sup>h</sup> 32 <sup>m</sup> 19,9049 <sup>s</sup> |
| <b>Declinazione</b>                        | -27° 51' 20,265"                                     |
| <b>Distanza</b>                            | 13,6 miliardi a.l.<br>(4,17 miliardi pc)             |
| <b>Redshift</b>                            | $z = 14,32^{+0,08}_{-0,20}$                          |
| <b>Caratteristiche fisiche</b>             |                                                      |
| <b>Tipo</b>                                | Galassia Lyman-break                                 |
| <b>Magnitudine assoluta (V)</b>            | -20,81 ± 0,16                                        |

# La forma dell'Universo

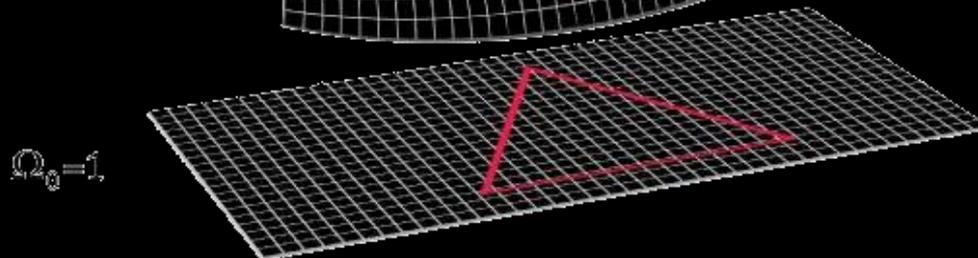
IN UN UNIVERSO ISOTROPO ED OMOGENEO LO SPAZIO-TEMPO,  
CURVATO DALLA PRESENZA DELLA MATERIA/ENERGIA, PUO'  
ASSUMERE SOLO TRE FORME:



UNIVERSO CHIUSO: FINITO



UNIVERSO APERTO: INFINITO



UNIVERSO PIATTO: INFINITO

# Equazioni di Friedmann

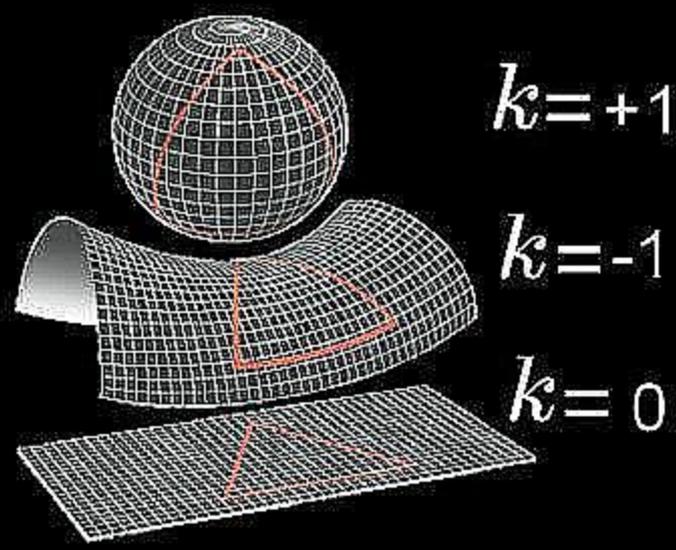
$$\dot{R} = \left[ R^2 \frac{8\pi G \rho + \Lambda c^2}{3} - k c^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\ddot{R} = -\frac{4\pi G}{3} \left( \rho + \frac{3p}{c^2} \right) R + \frac{\Lambda c^2}{3} R$$

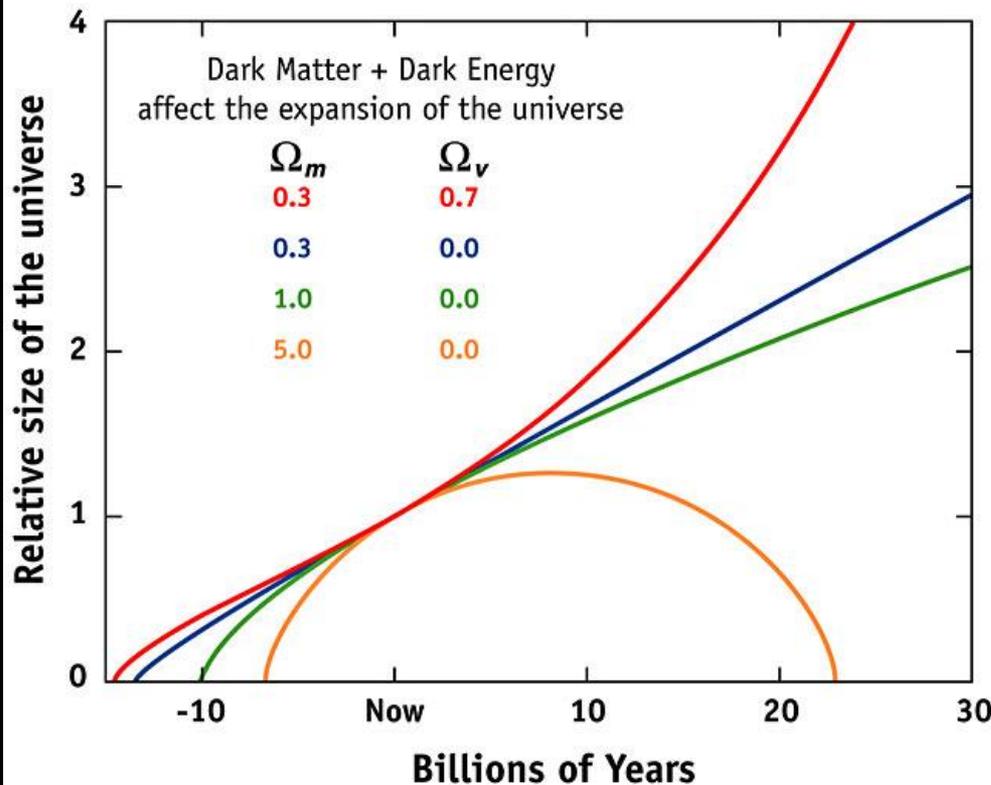
- $R$  = Raggio dell'Universo
- $\dot{R}$  = Velocità di espansione
- $\ddot{R}$  = Accelerazione dell'espansione
- $\rho$  = Densità media della materia
- $p$  = Pressione
- $c$  = Velocità della luce
- $G$  = Costante di Gravitazione Universale
- $\Lambda$  = Costante cosmologica
- $k$  = Parametro di curvatura



Aleksandr Aleksandrovič Fridman  
(San Pietroburgo, 6 giugno 1888 –  
Pietrogrado, 16 settembre 1925)



## EXPANSION OF THE UNIVERSE



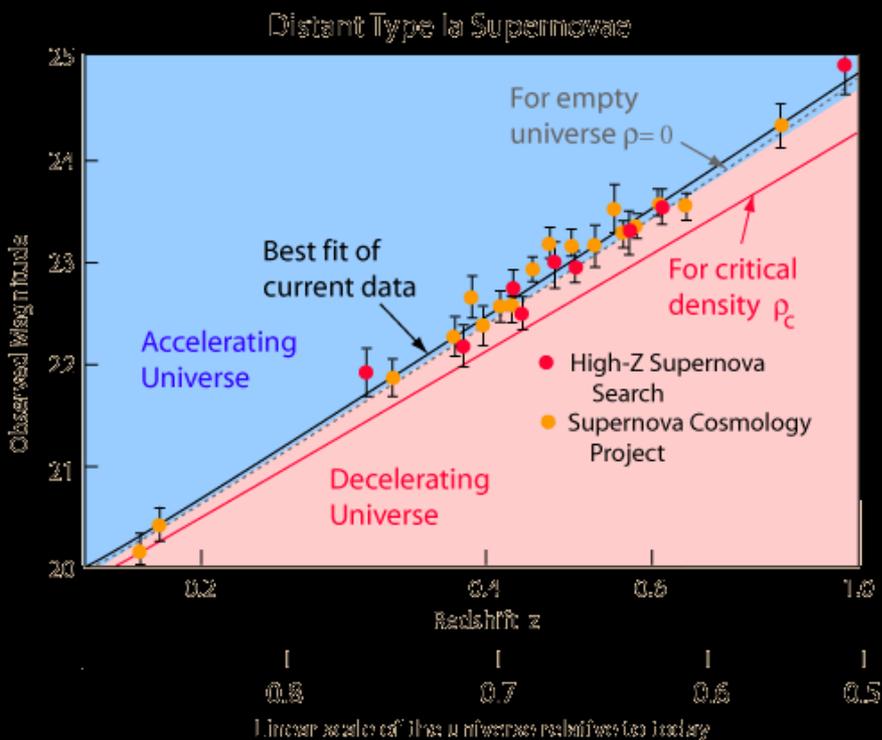
IN UN UNIVERSO COMPLETAMENTE  
DOMINATO DALLA MATERIA  
L'ESPANSIONE E'  
REGOLATA DAL RAPPORTO  
TRA LA DENSITA' CRITICA ( $\rho_c$ )  
E LA DENSITA' OSSERVATA ( $\rho$ )

$$\Omega = \rho / \rho_c$$

RECENTI OSSERVAZIONI  
SEMBRANO CONFERMARE CHE  
CIRCA IL 70% DELL'UNIVERSO SIA  
COSTITUITO DA UNA STRANA FORMA  
DI ENERGIA CHE NE ACCELERA  
L'ESPANSIONE

# L'Energia oscura

## LA SCOPERTA DELL' "ENERGIA OSCURA" DERIVA DALLO STUDIO DEL REDSHIFT DELLE SUPERNOVAE Ia MOLTO DISTANTI



Distant Supernovae



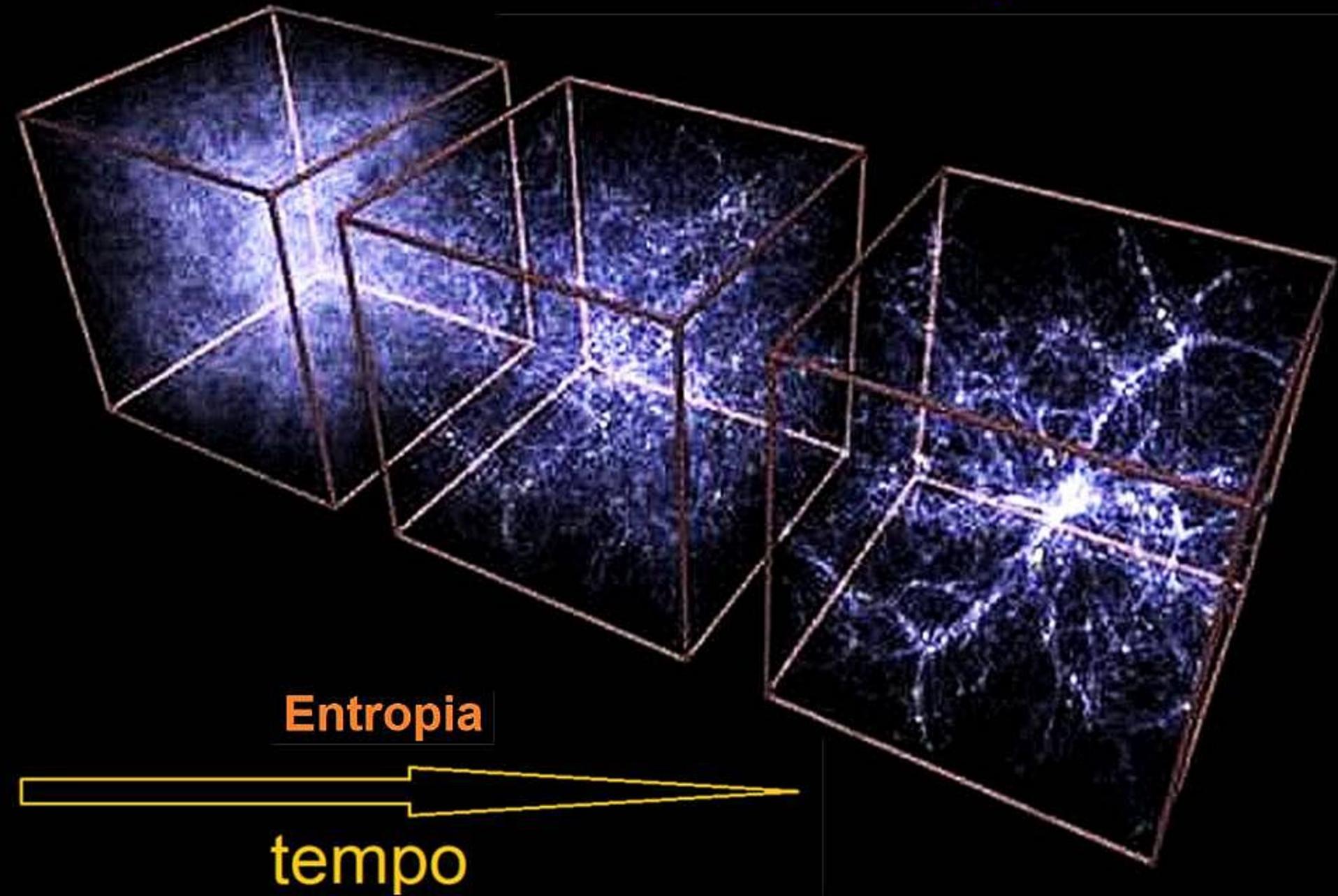
NASA and A. Riess (STScI)

Hubble Space Telescope - ACS



STScI-PRC04-12

# Effetti dell'Energia Oscura



# ...il trascorrere del tempo.

$$(t - t_0) = \frac{3.17 \times 10^{-8}}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{h \cdot G}{2 \cdot k_B \cdot c^5}} \cdot \frac{1}{\sqrt{S_u(t)}} \cdot \left[ S_u(t) - S_u(t_0) \right] \quad (\text{anni})$$

ma anche:

$$(t - t_0) = 3.17 \times 10^{-8} \cdot \left[ R(t) - R(t_0) \right] \quad (\text{anni})$$

dove:

$S_u(t)$  = Entropia dell'Universo al tempo  $t$

$S_u(t_0)$  = Entropia dell'Universo al tempo  $t_0$

$R(t)$  = Raggio dell'Universo visibile al tempo  $t$  (anni luce)

$R(t_0)$  = Raggio dell'Universo visibile al tempo  $t_0$  (anni luce)

$h$  = costante di Plank  $6.626\,070\,040(81) \times 10^{-34} \quad \text{J s}$

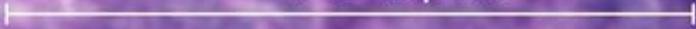
$G$  = costante di gravitazione universale  $6.674\,08(31) \times 10^{-11} \quad \text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$

$K_B$  = costante di Boltzmann  $1.380\,648\,52(79) \times 10^{-23} \quad \text{J K}^{-1}$

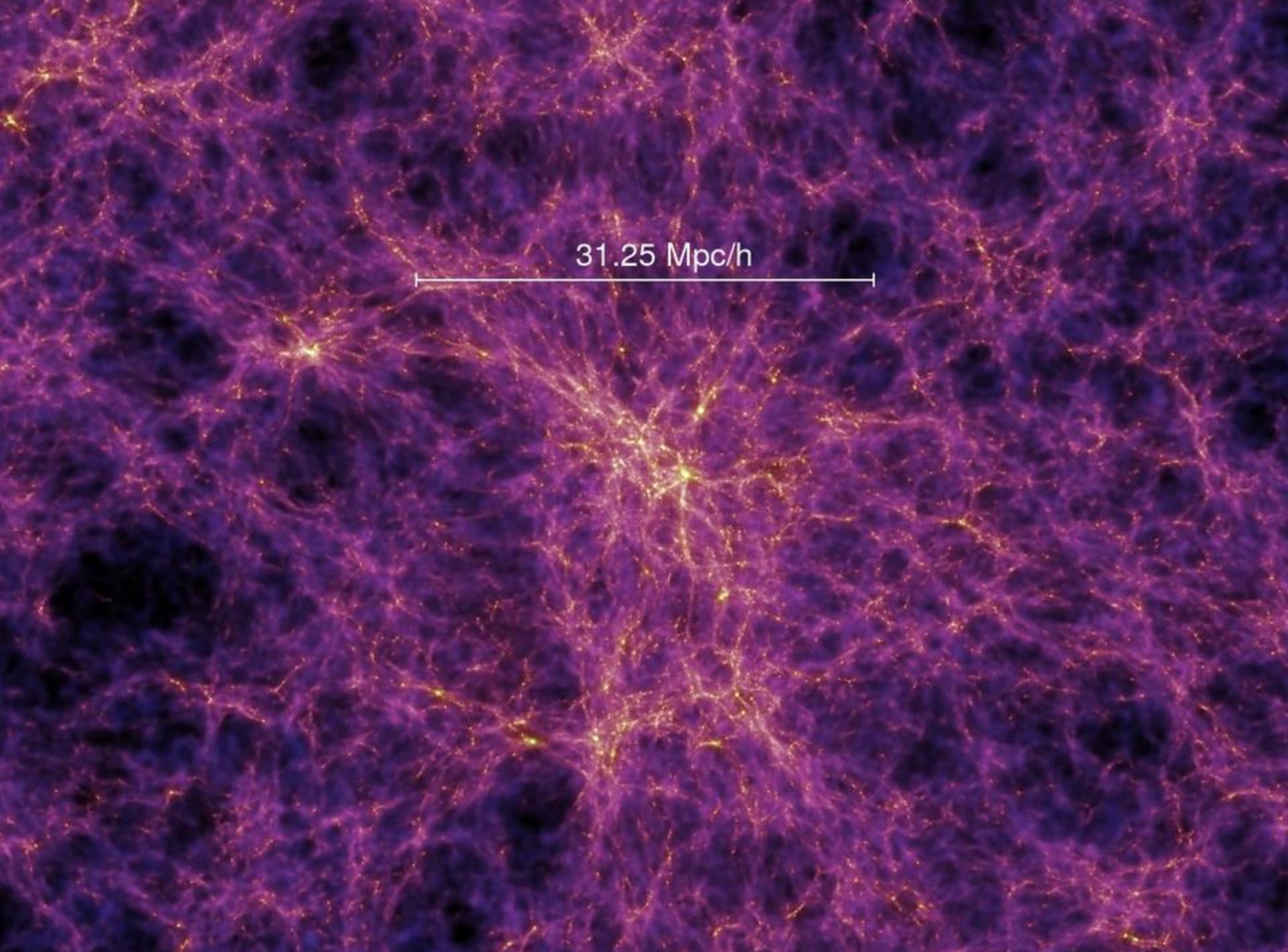
$c$  = velocità della luce nel vuoto  $299\,792\,458 \quad \text{m s}^{-1}$

# FLUTTUAZIONI PRIMORDIALI DI DENSITA'

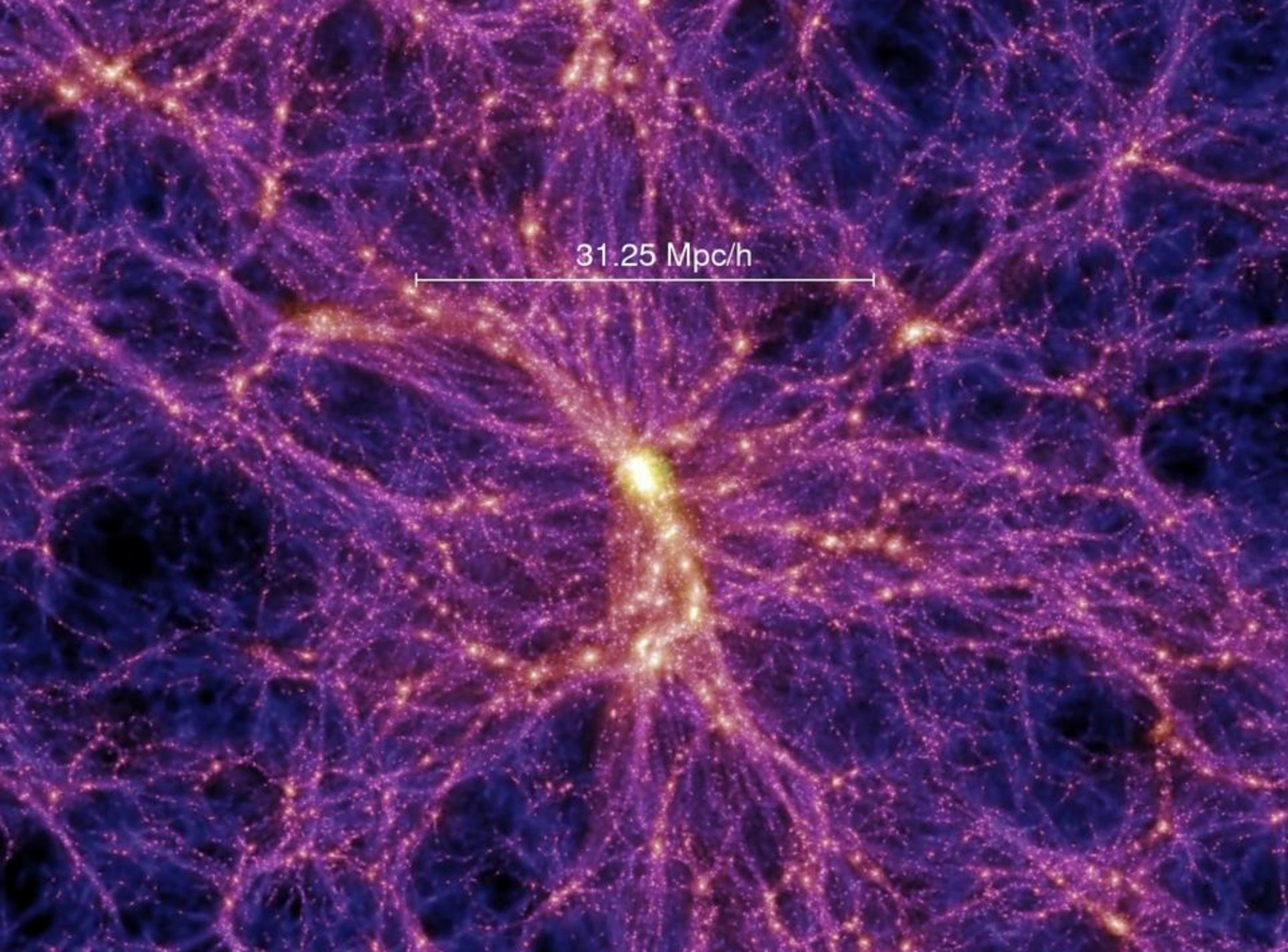
31.25 Mpc/h



**SIMULAZIONI NUMERICHE  
HANNO RICOSTRUITO LA STORIA  
DELLA FORMAZIONE A PARTIRE  
DALLE FLUTTUAZIONI DELLA CMB  
E DALLA DISTRIBUZIONE ATTUALE  
DELLE GALASSIE**



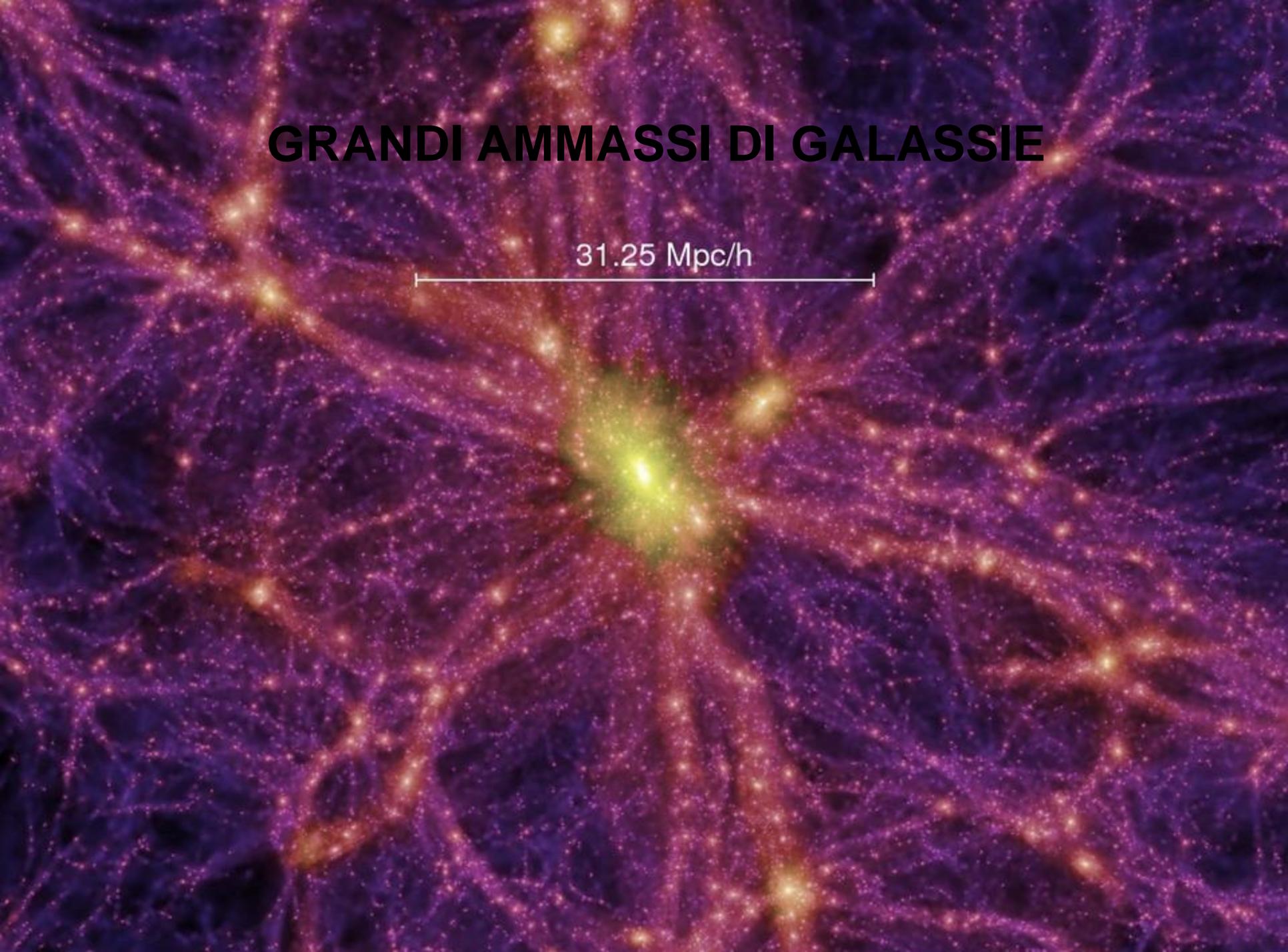
31.25 Mpc/h

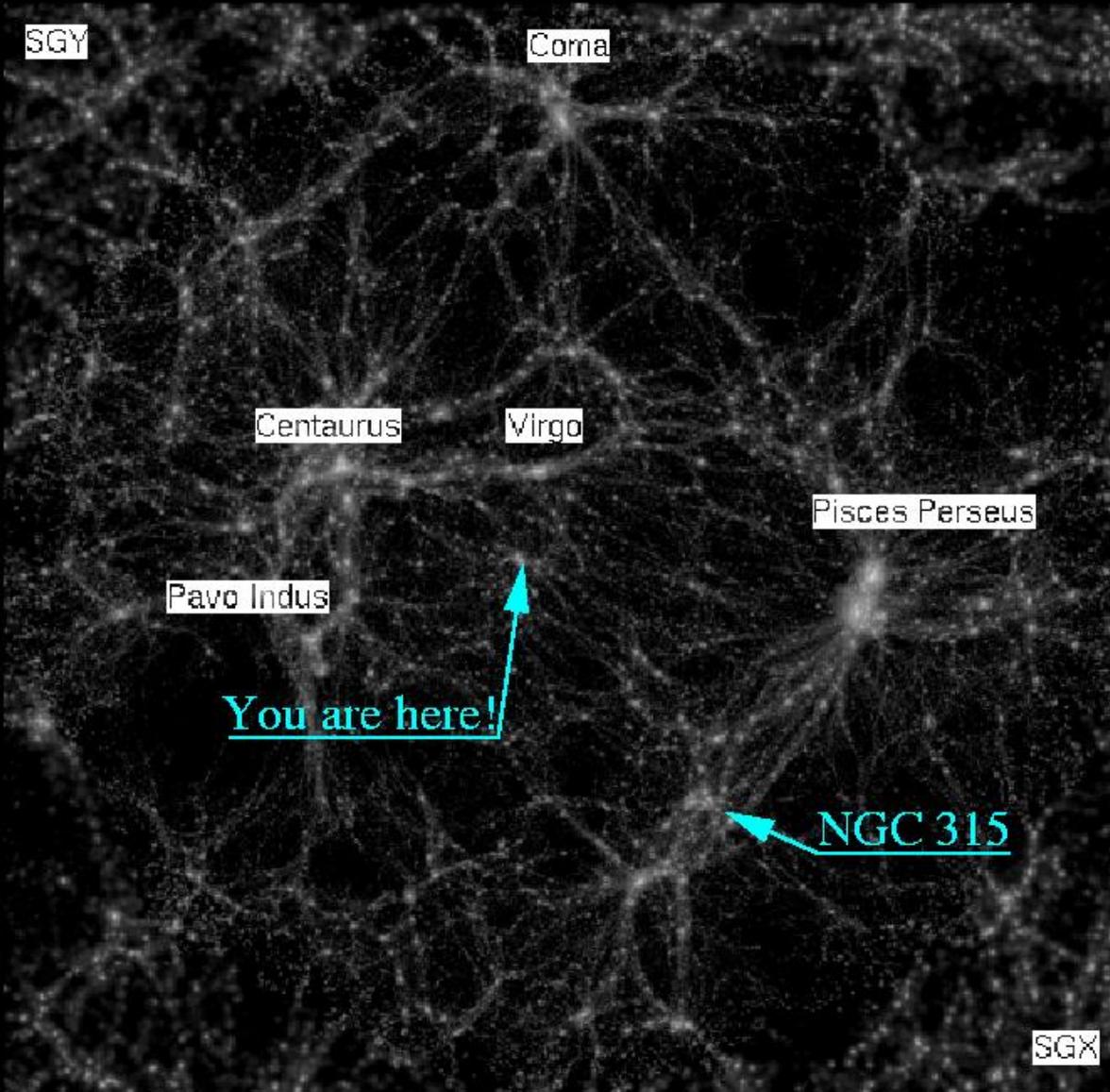


31.25 Mpc/h

# GRANDI AMMASSI DI GALASSIE

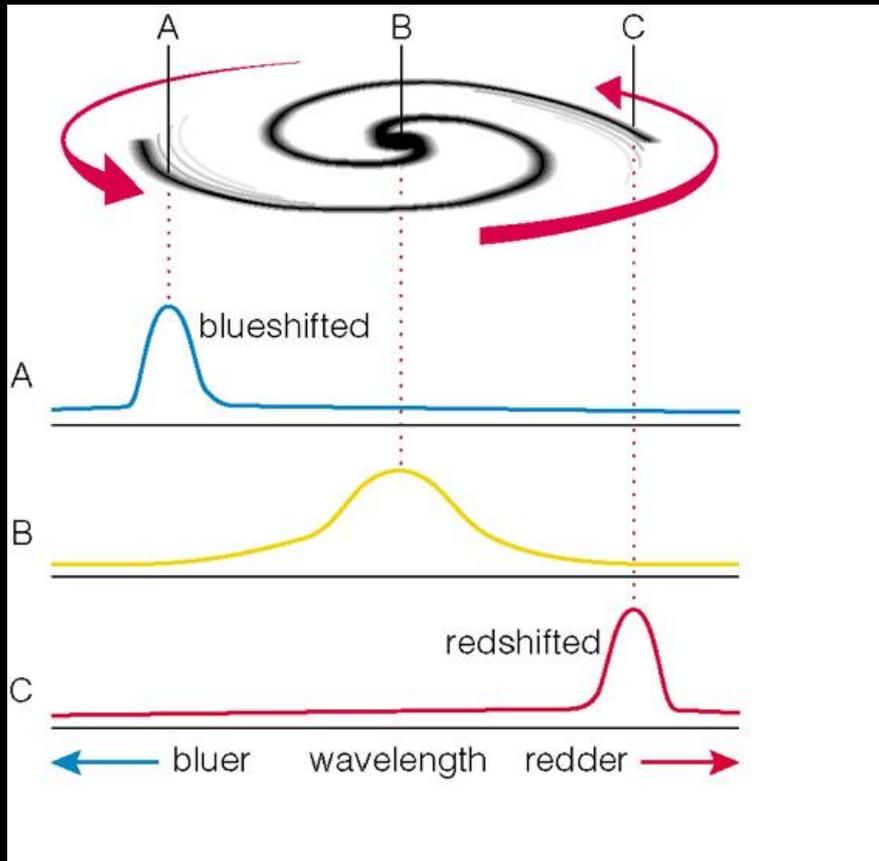
31.25 Mpc/h

A simulated galaxy cluster visualization. The center features a bright, dense core of yellow-green galaxies. Radiating from this core are several filaments and arcs of galaxies, colored in shades of purple and orange. The background is a dark, textured field of smaller galaxies. A white horizontal scale bar is positioned above the center, with the text "31.25 Mpc/h" written above it.



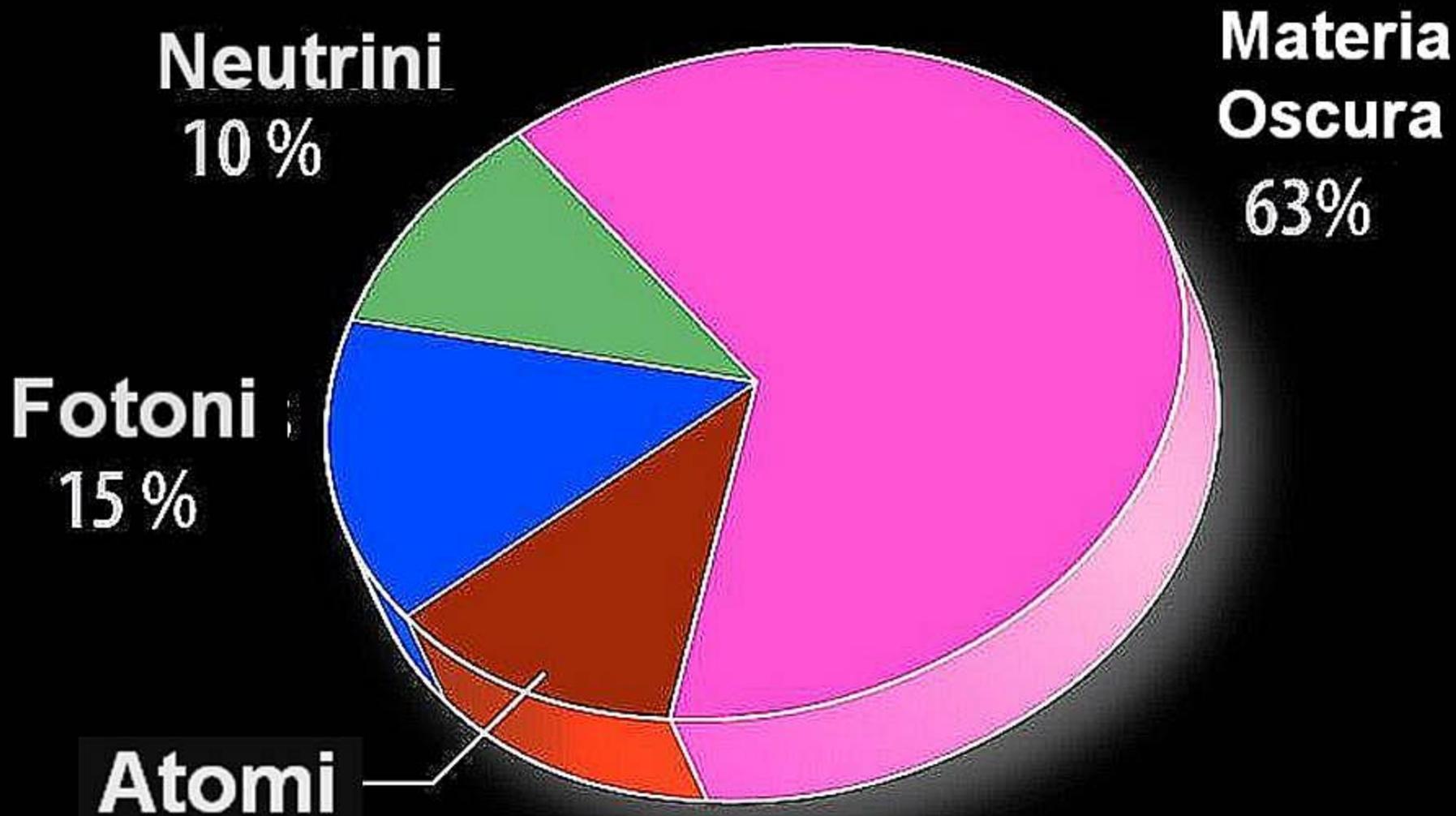
**UNA GALASSIA  
DELL'AMMASSO  
DELLA VERGINE  
E' LA NOSTRA  
VIA LATTEA!**

# La materia oscura



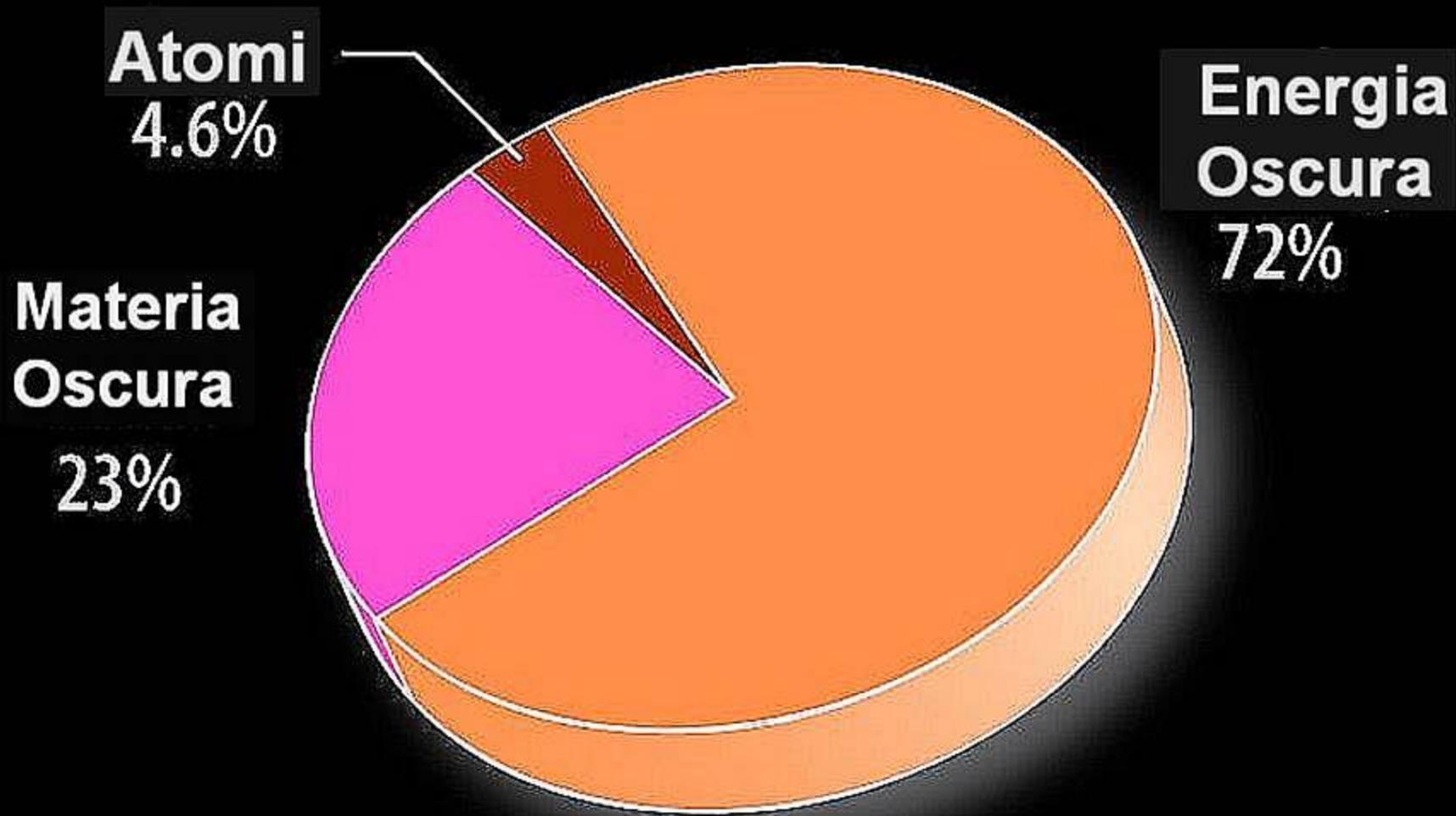
**MISURE EFFETTUATE  
SULLA VELOCITA' DI ROTAZIONE  
DELLE GALASSIE SPIRALI  
HANNO EVIDENZIATO CHE LA  
MASSA VISIBILE E' SOLO  
UNA PICCOLA FRAZIONE DELLA  
MASSA TOTALE DELLE GALASSIE**

**SI CREDE CHE LA  
"MASSA MANCANTE" SIA UNA  
QUALCHE FORMA DI MATERIA CHE  
INTERAGISCE SOLO  
GRAVITAZIONALMENTE CON LA  
MATERIA ORDINARIA, LA COSIDETTA  
"MATERIA OSCURA"**



**13,7 Miliardi di anni fa**

**(età dell'Universo: 380.000 anni)**



Oggi

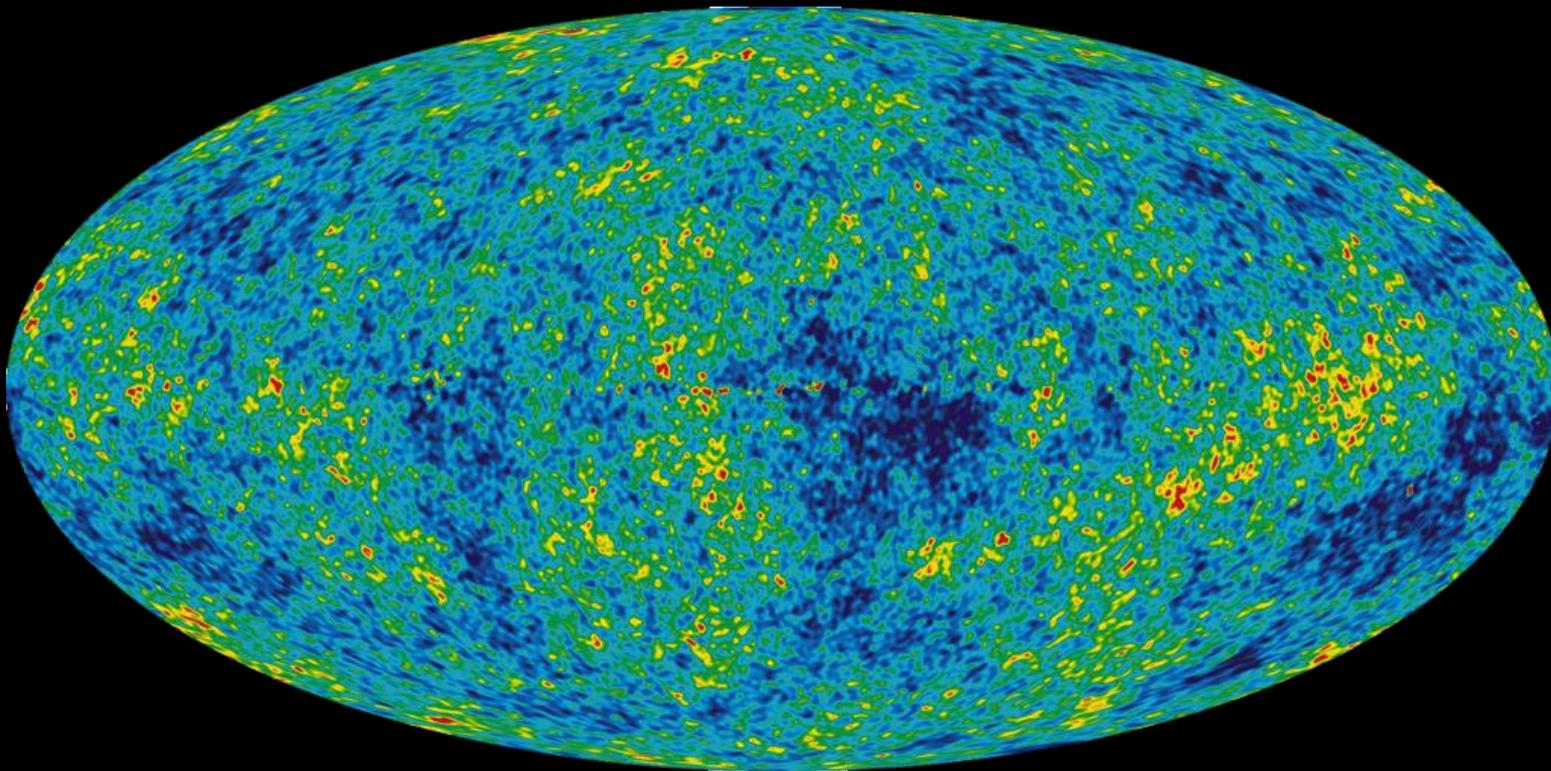
# **PROVE A FAVORE DEL BIG BANG**

**-ESPANSIONE DELL' UNIVERSO**

**-ABBONDANZA DI ELEMENTI LEGGERI (H, He, Li)**

**-RADIAZIONE COSMICA DI FONDO**

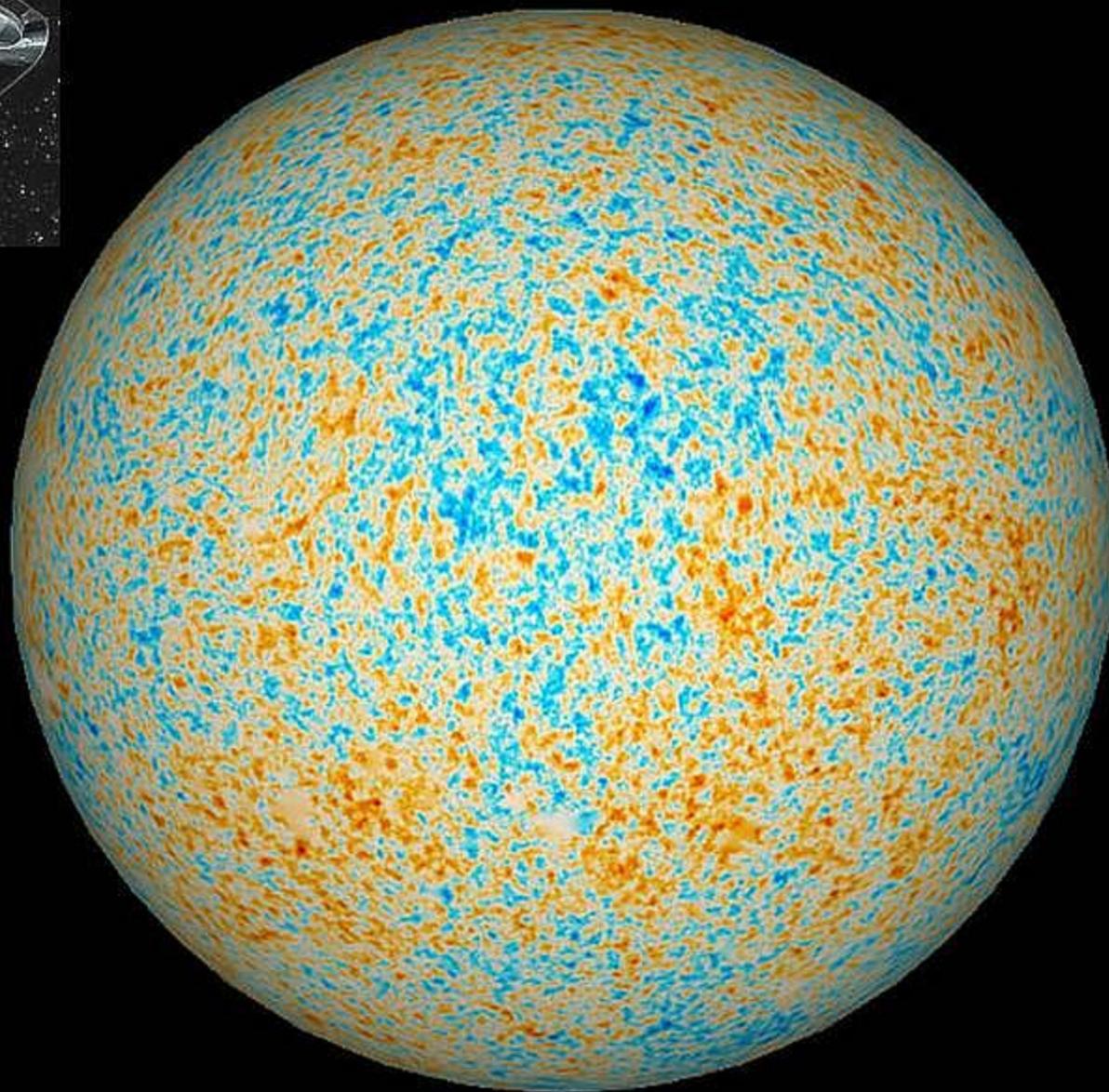
**RADIAZIONE COSMICA DI FONDO A 3°K**



**IMMAGINE DELL'UNIVERSO 380.000 ANNI DOPO IL  
BIG BANG**

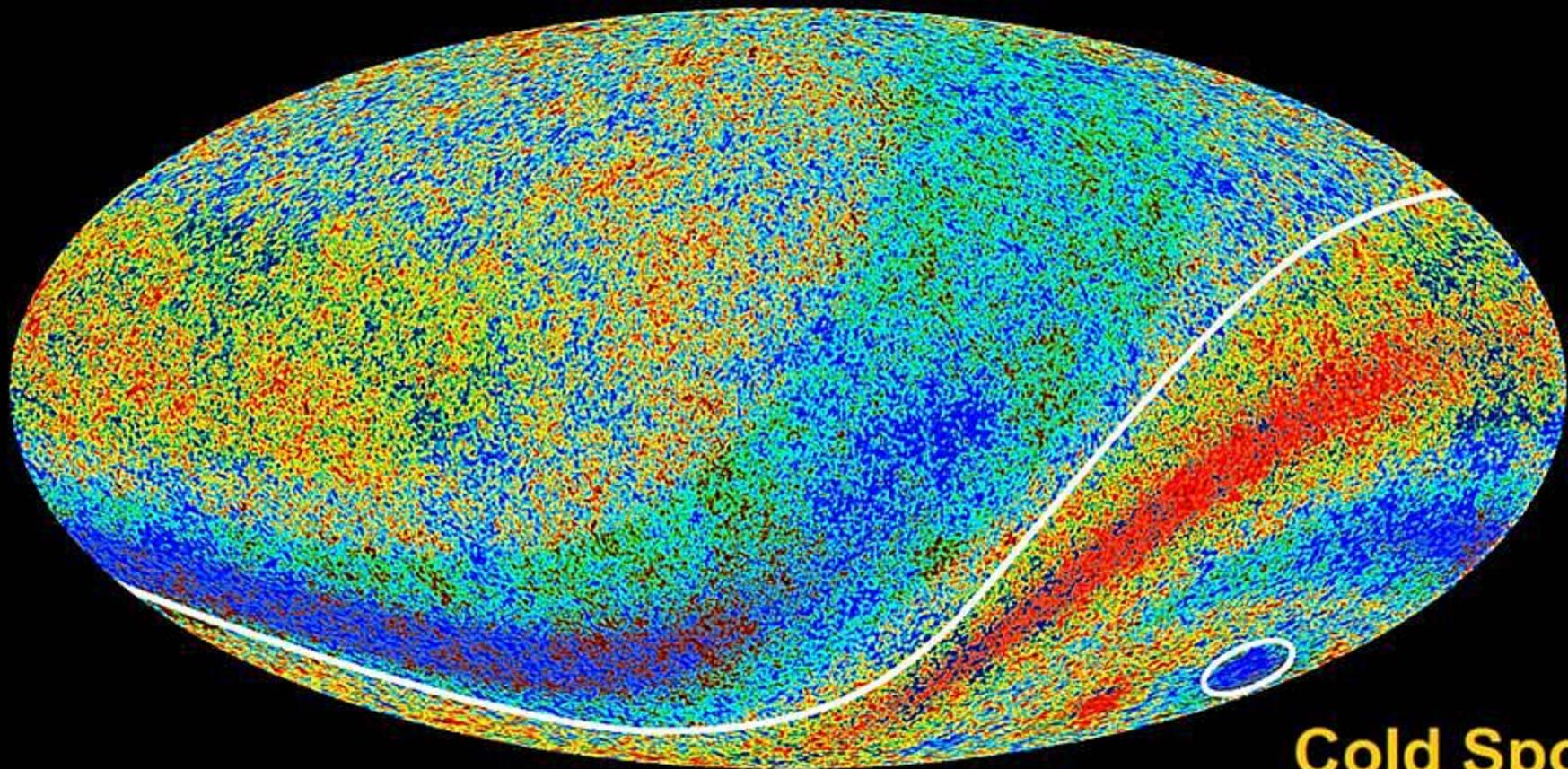


Planck  
2018

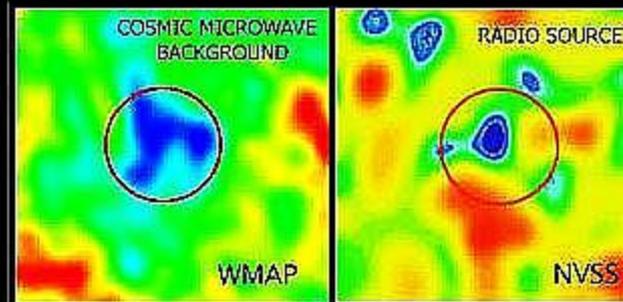


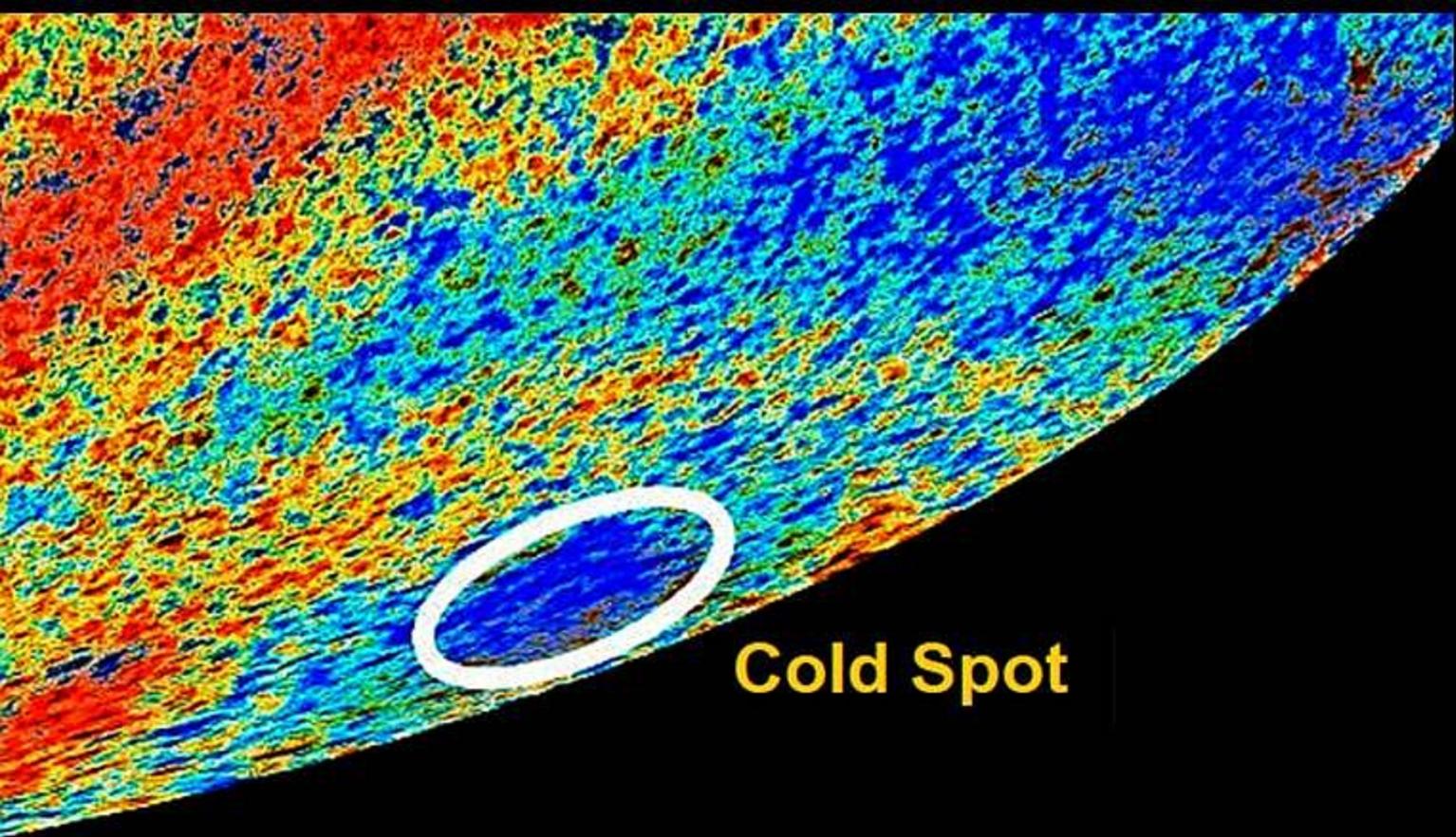
CMB flux (Cosmic Microwaves Background)  
anisotropia termica

# CMB flux (Cosmic Microwaves Background)

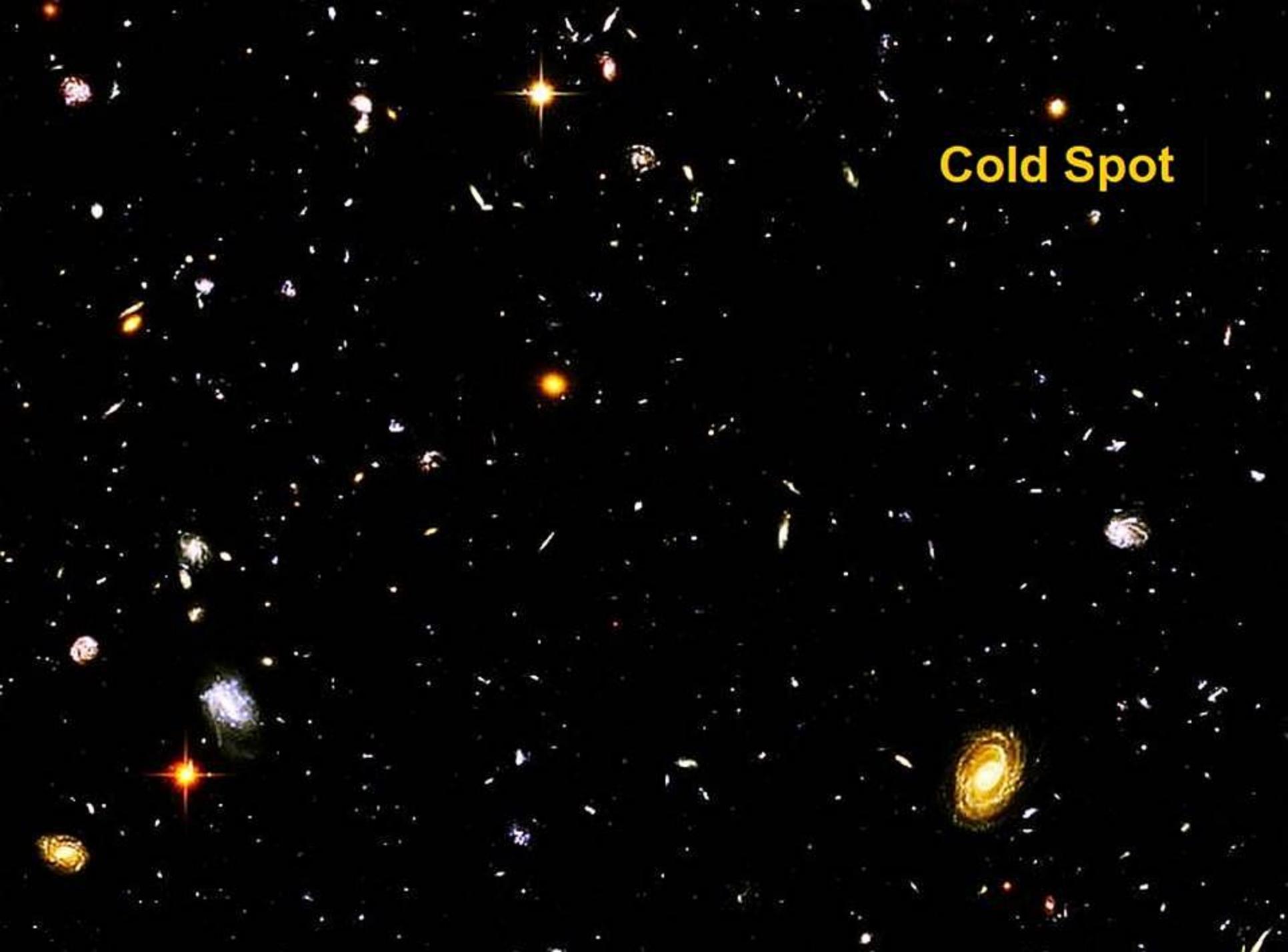


**Cold Spot**





**Cold Spot**



**Cold Spot**

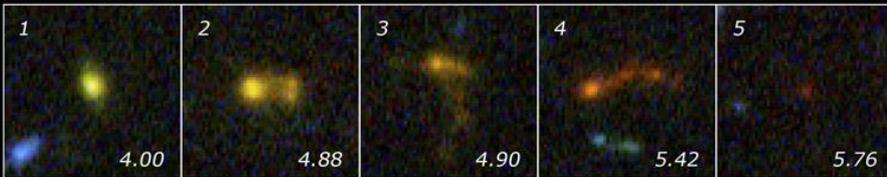
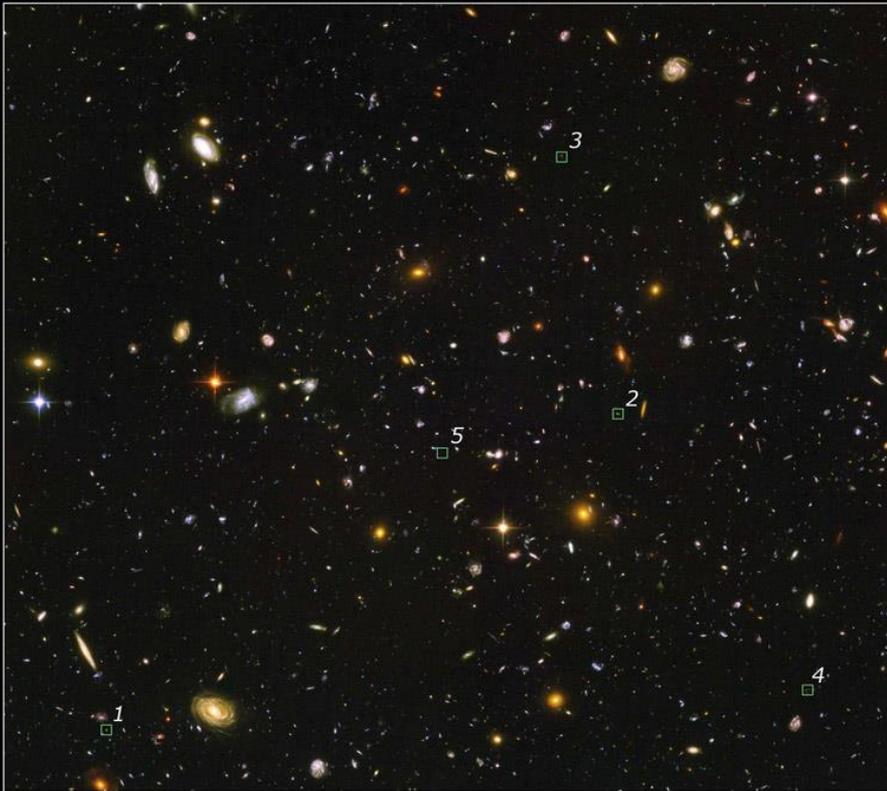
# Multiverso



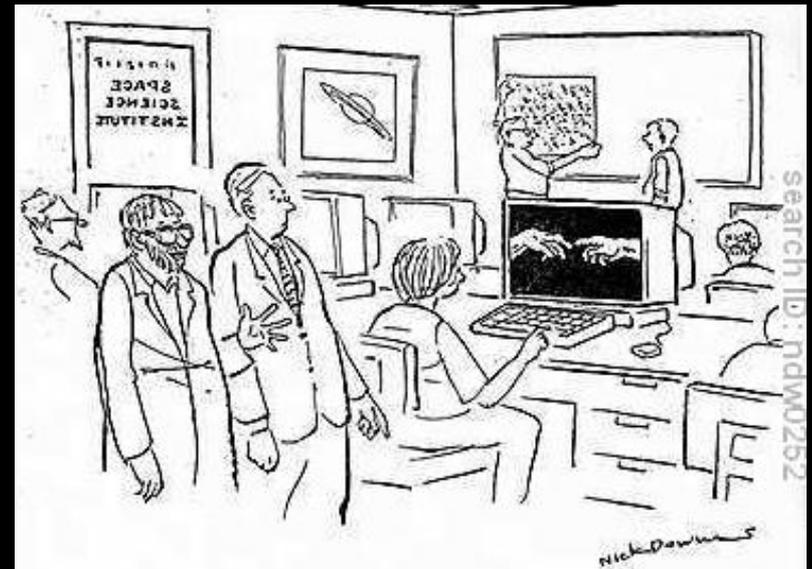
# Però...

**LA VOLTA CELESTE APPARE  
COSTELLATA DI GALASSIE.**

**LA TEORIA DEL BIG BANG  
NON SPIEGA LA LORO ORIGINE**



**Galaxy Building Blocks in the Hubble Ultra Deep Field**  
*Hubble Space Telescope • ACS/WFC*

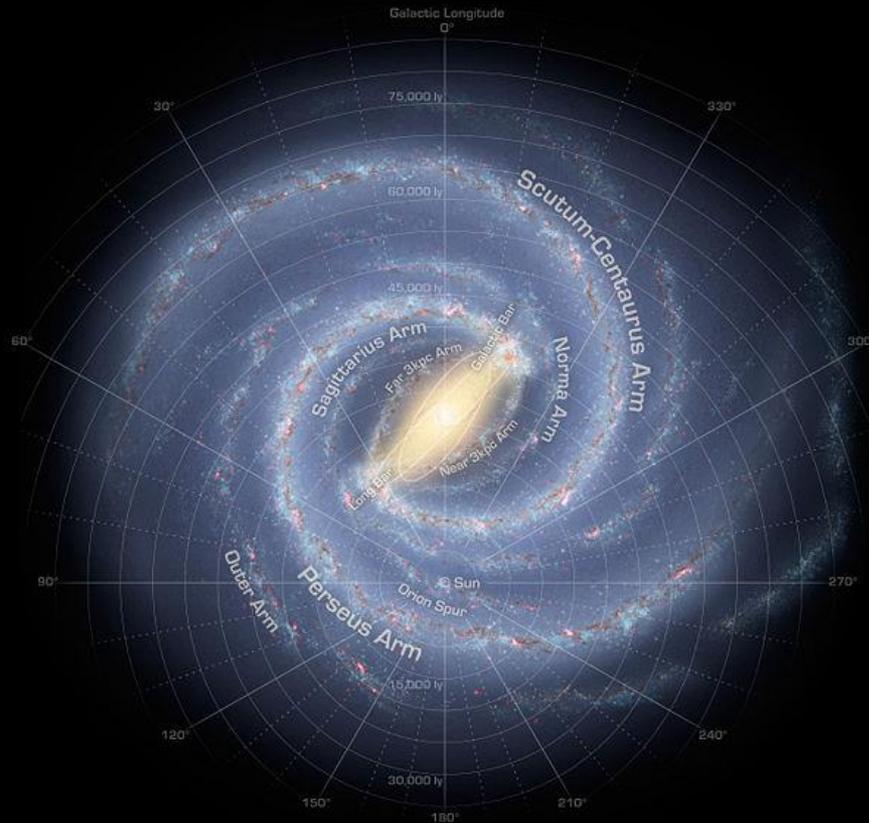


"The Hubble telescope is providing us with incredibly distant images of a very early universe."

**LA NOSTRA GALASSIA E' UNA  
SPIRALE BARRATA**

**DUE BRACCI PRINCIPALI  
SONO UNITI DA UNA BARRA CENTRALE**

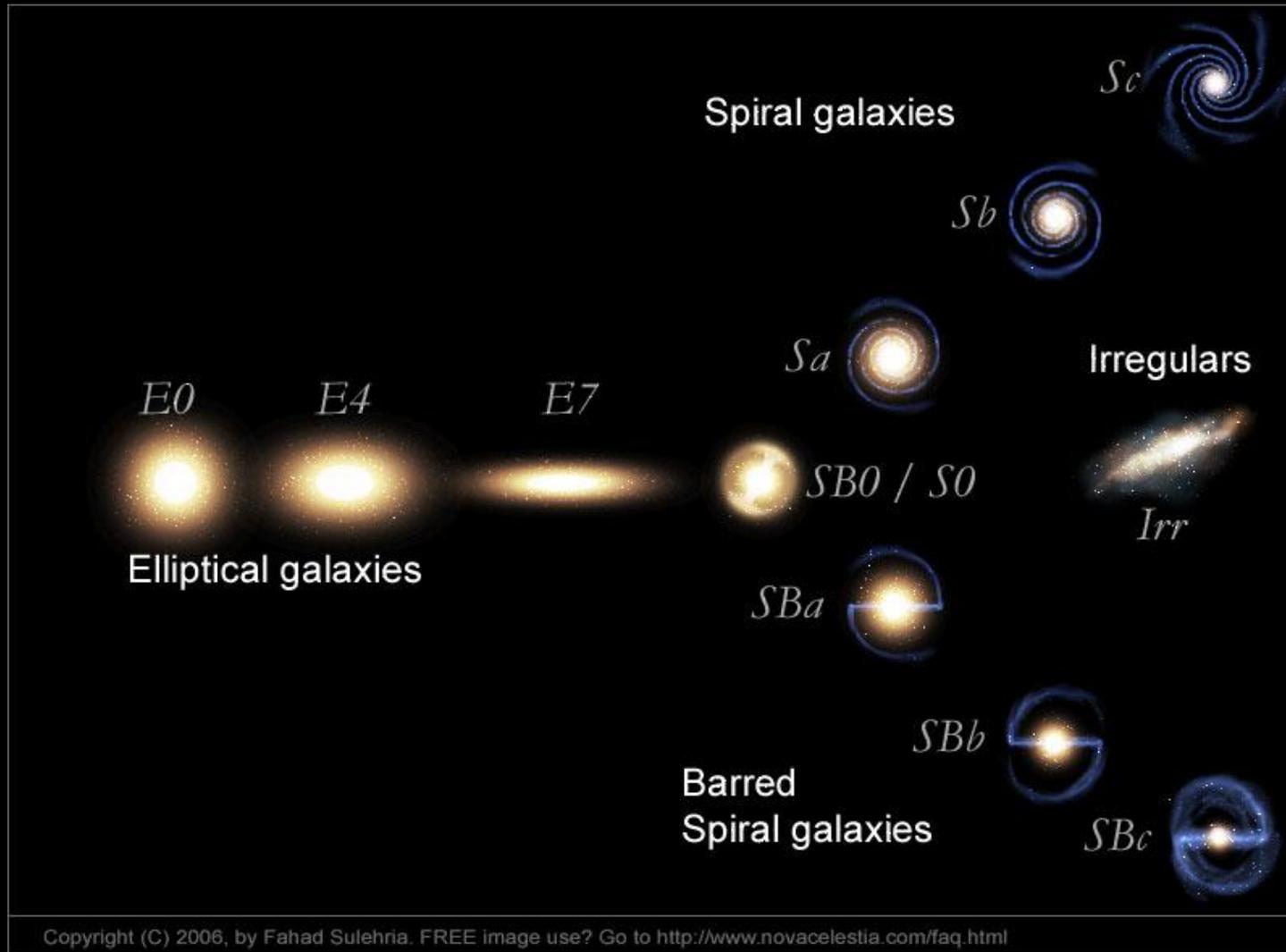
**IL SOLE SI TROVA IN UN PICCOLO  
BRACCIO NON COMPLETAMENTE  
SVILUPPATO TRA IL BRACCIO  
DEL PERSEO E  
QUELLO DEL SAGITTARIO**



THE MILKY WAY GALAXY



# CLASSIFICAZIONE DELLE GALASSIE DI HUBBLE



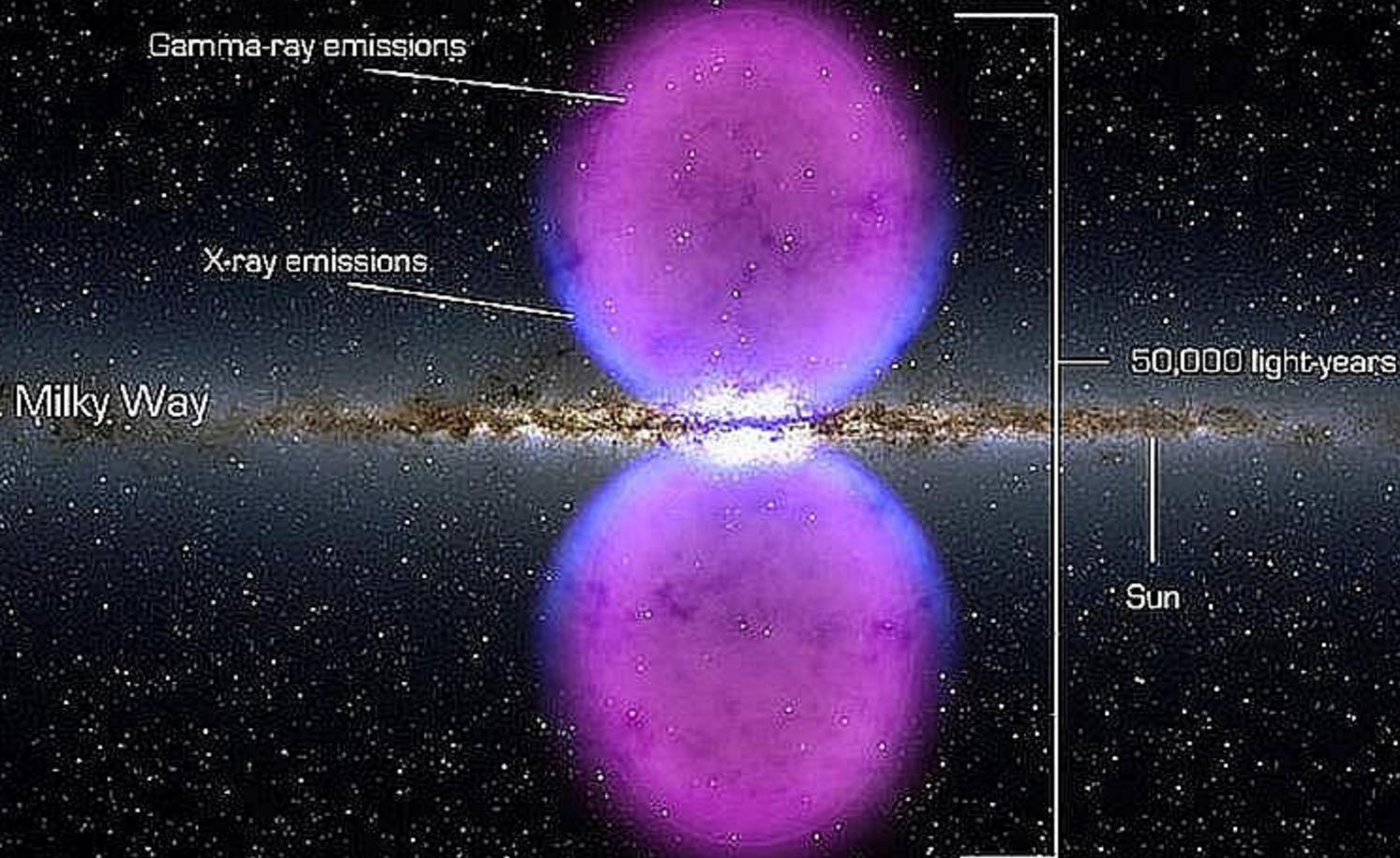
# La nostra galassia



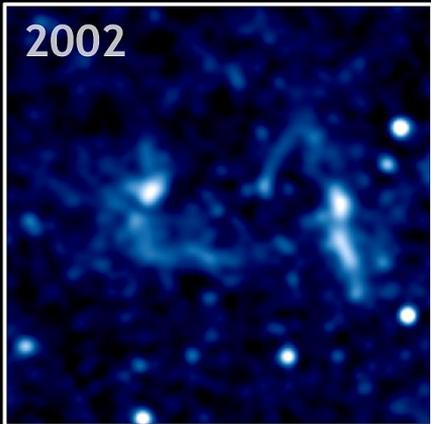
## Caratteristiche fisiche

|                                     |                                                                                                                                                            |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Tipo</b>                         | Galassia a spirale<br>barrata                                                                                                                              |
| <b>Classe</b>                       | SBbc                                                                                                                                                       |
| <b>Massa</b>                        | $6,82 \times 10^{11} M_{\odot}$                                                                                                                            |
| <b>Dimensioni</b>                   | 100 000 a.l.<br>(32 600 pc)                                                                                                                                |
| <b>Magnitudine<br/>assoluta (V)</b> | -20,9                                                                                                                                                      |
| <b>Età stimata</b>                  | 13,7 miliardi di anni                                                                                                                                      |
| <b>Caratteristiche rilevanti</b>    | <b>Spessore:</b><br>gas: 12 000 al <sup>[1]</sup><br>fascia stellare: 1 000 al                                                                             |
|                                     | <b>Periodo di rotazione:</b><br>barra: 15-18 milioni di anni <sup>[2]</sup><br>spirale: 50 milioni di anni <sup>[2]</sup><br>Sole: 225-250 milioni di anni |

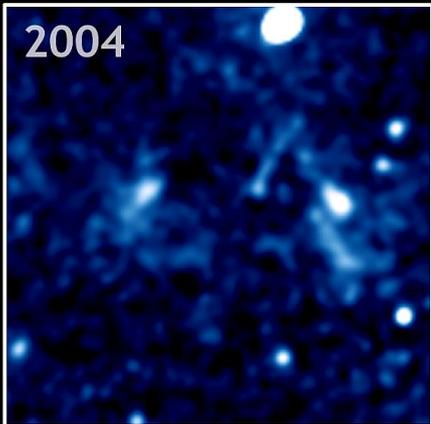
# Il centro galattico



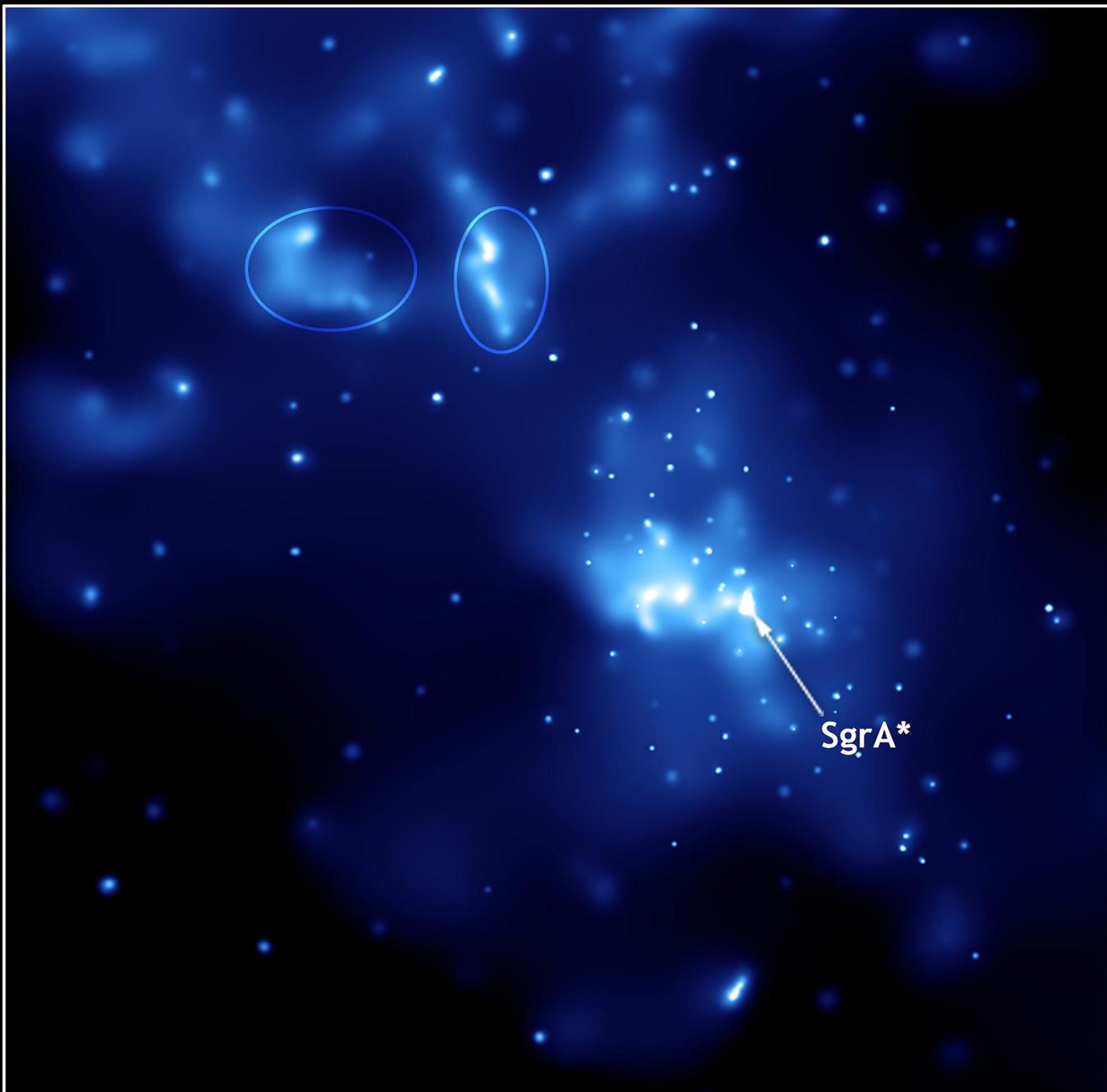
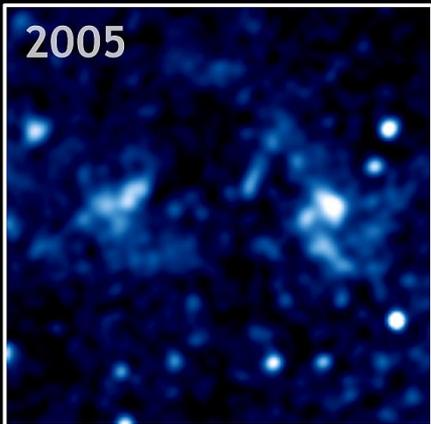
2002



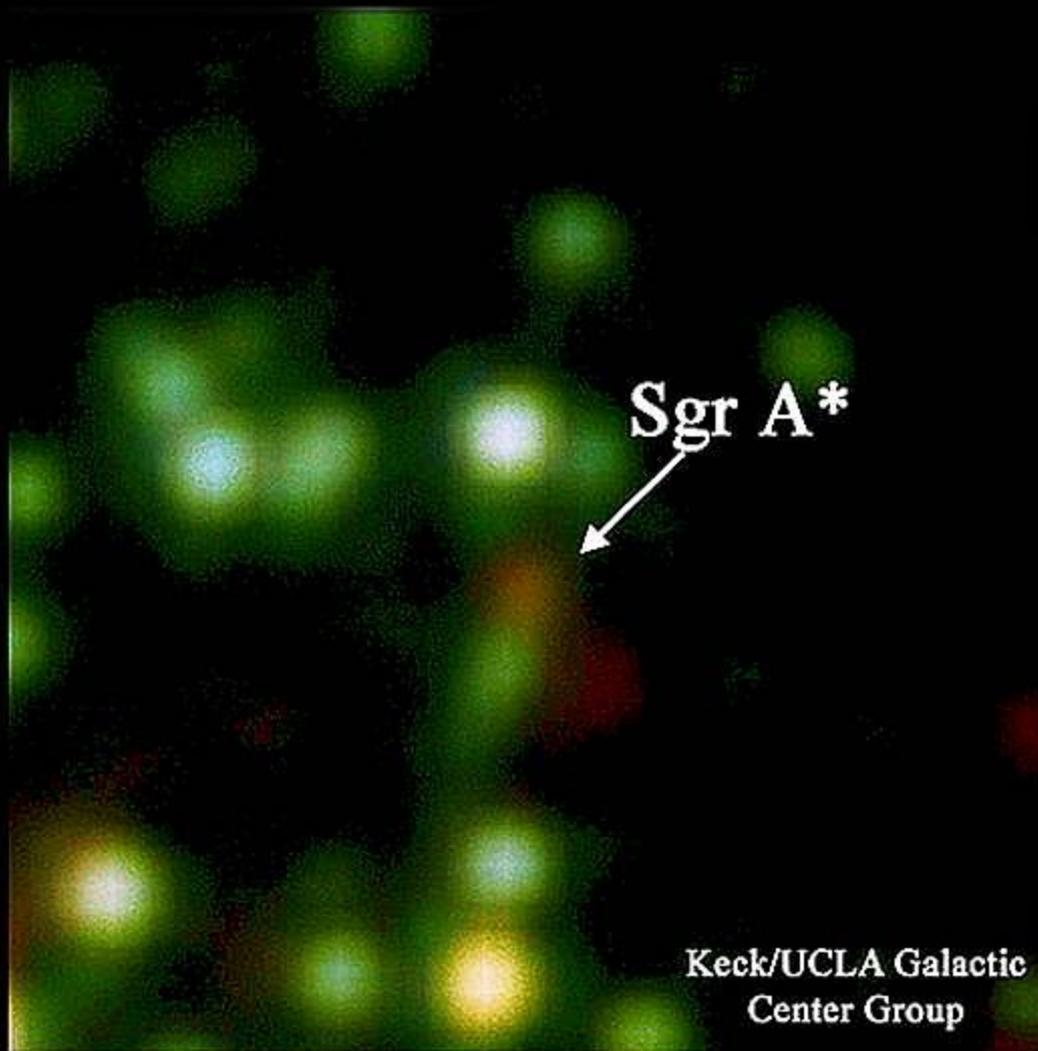
2004



2005

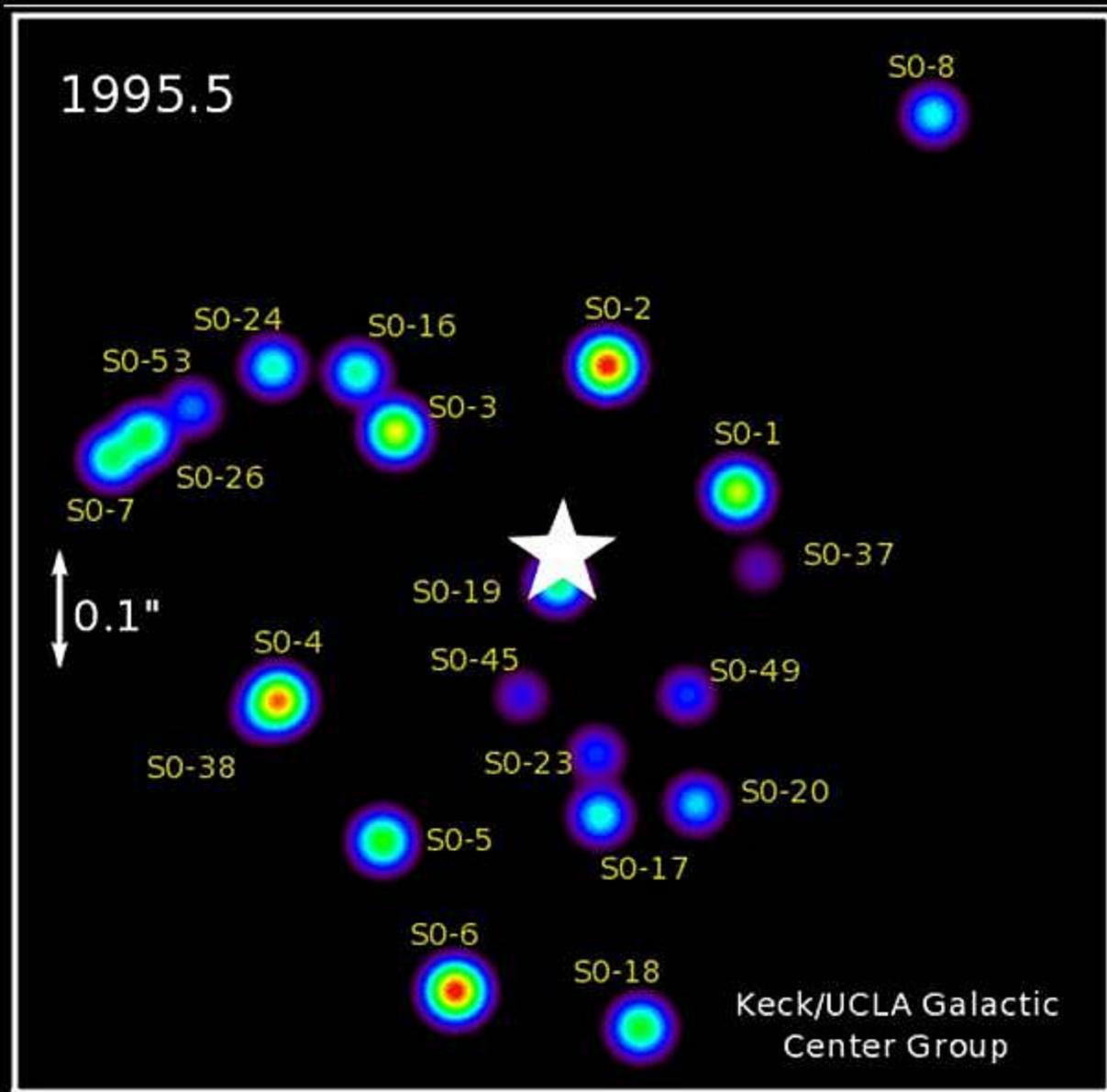


# Il buco nero al centro della nostra Galassia



# Centro Galattico

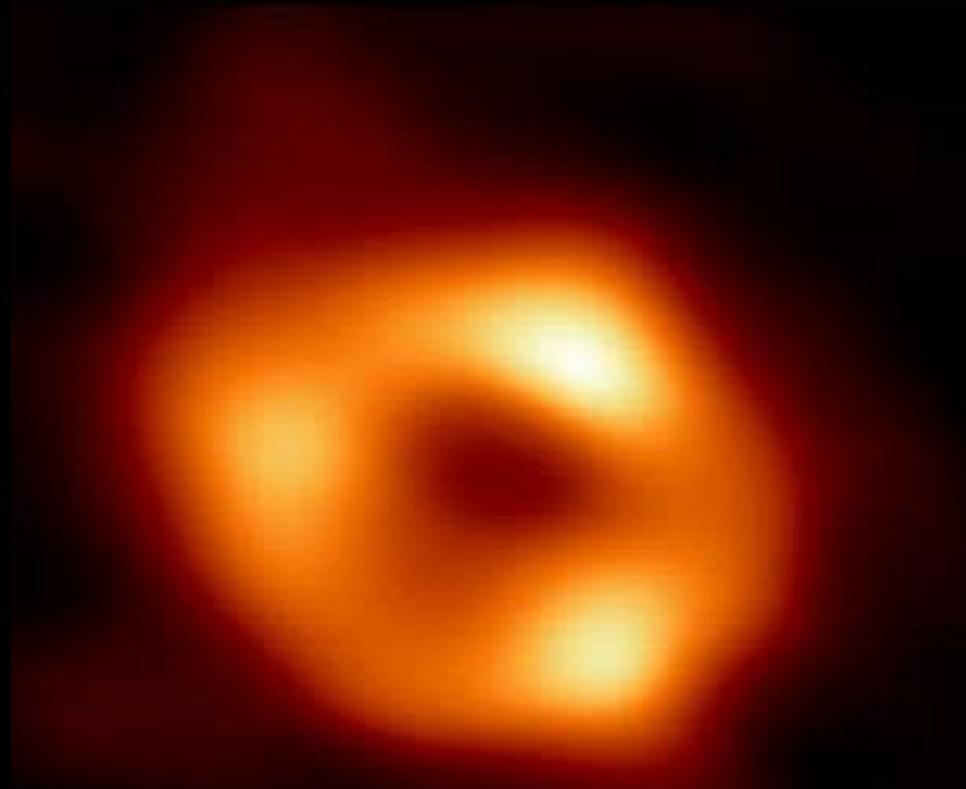
Orbite delle stelle supermassive intorno al buco nero centrale



# Sagittarius A

## Il centro galattico



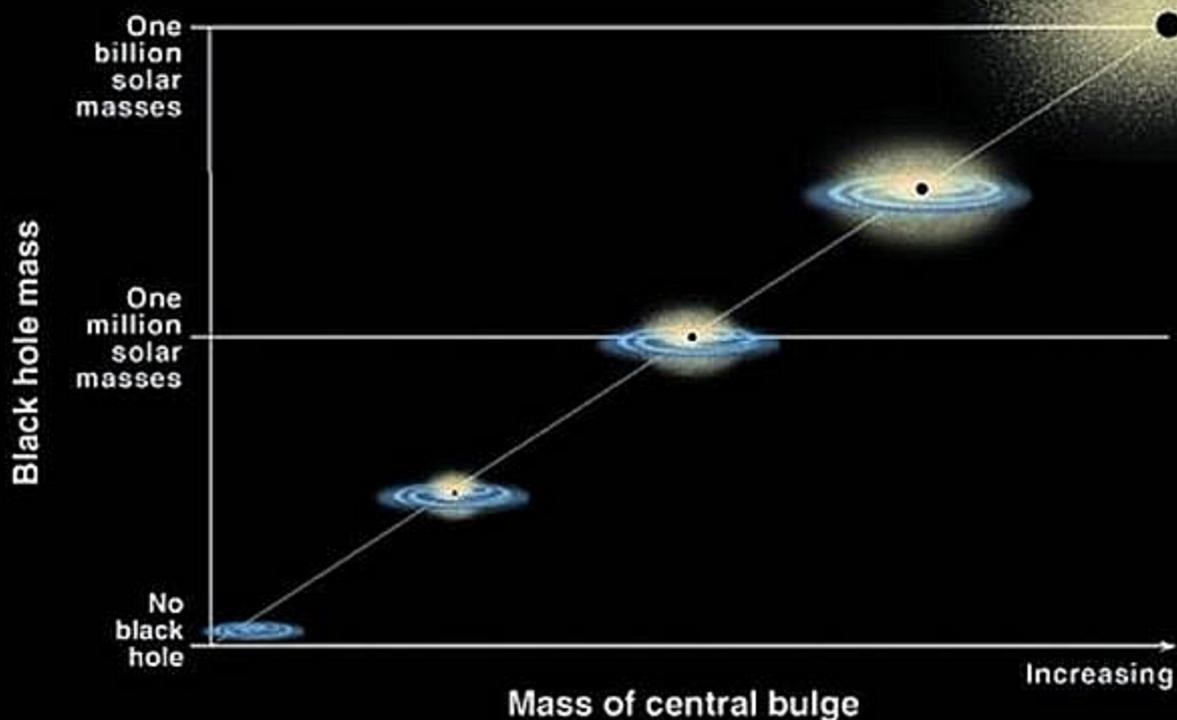


**Sagittarius A\***

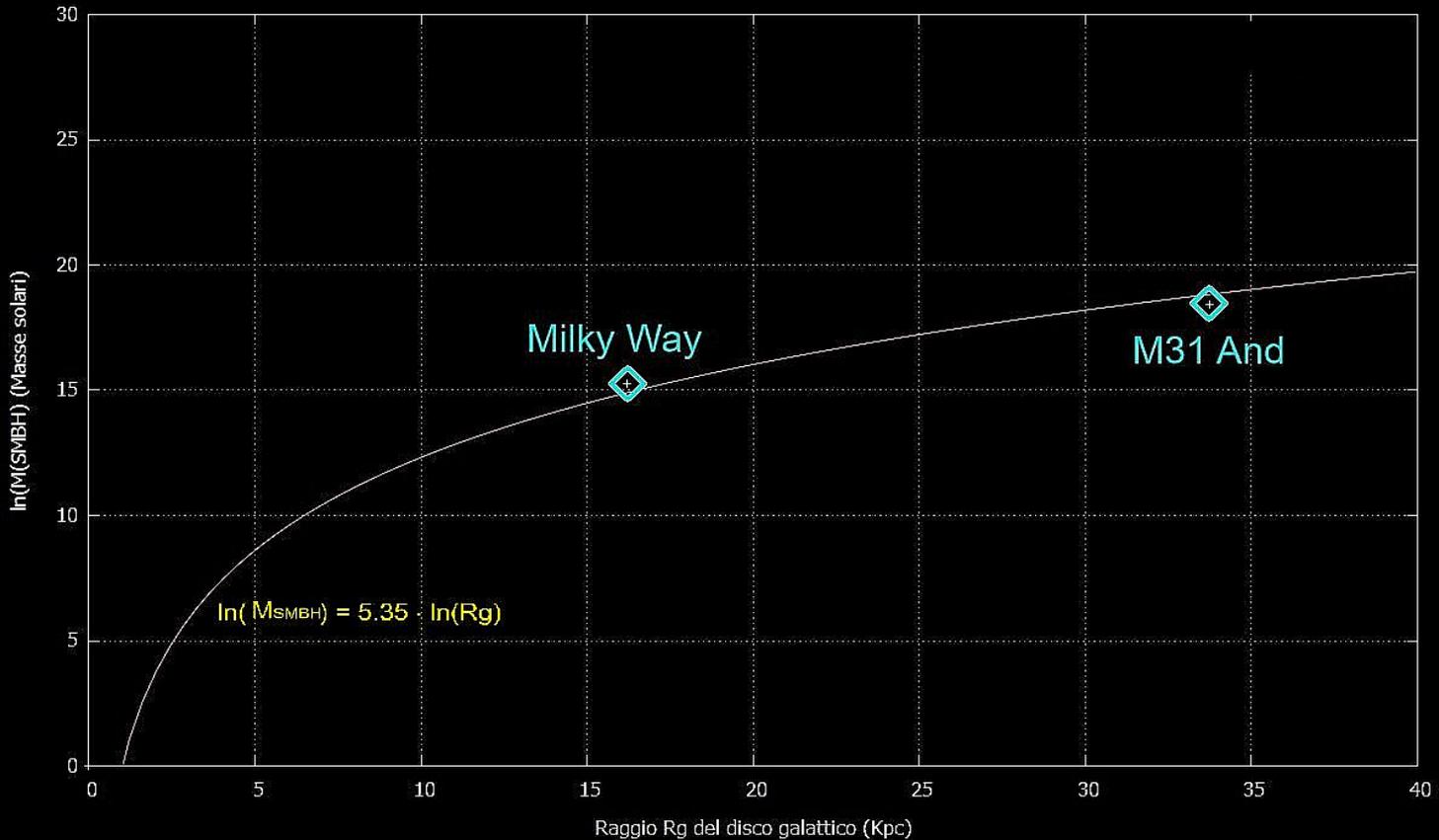
Mappa radio

# Buchi neri e formazione delle galassie

Correlation Between Black Hole Mass and Bulge Mass



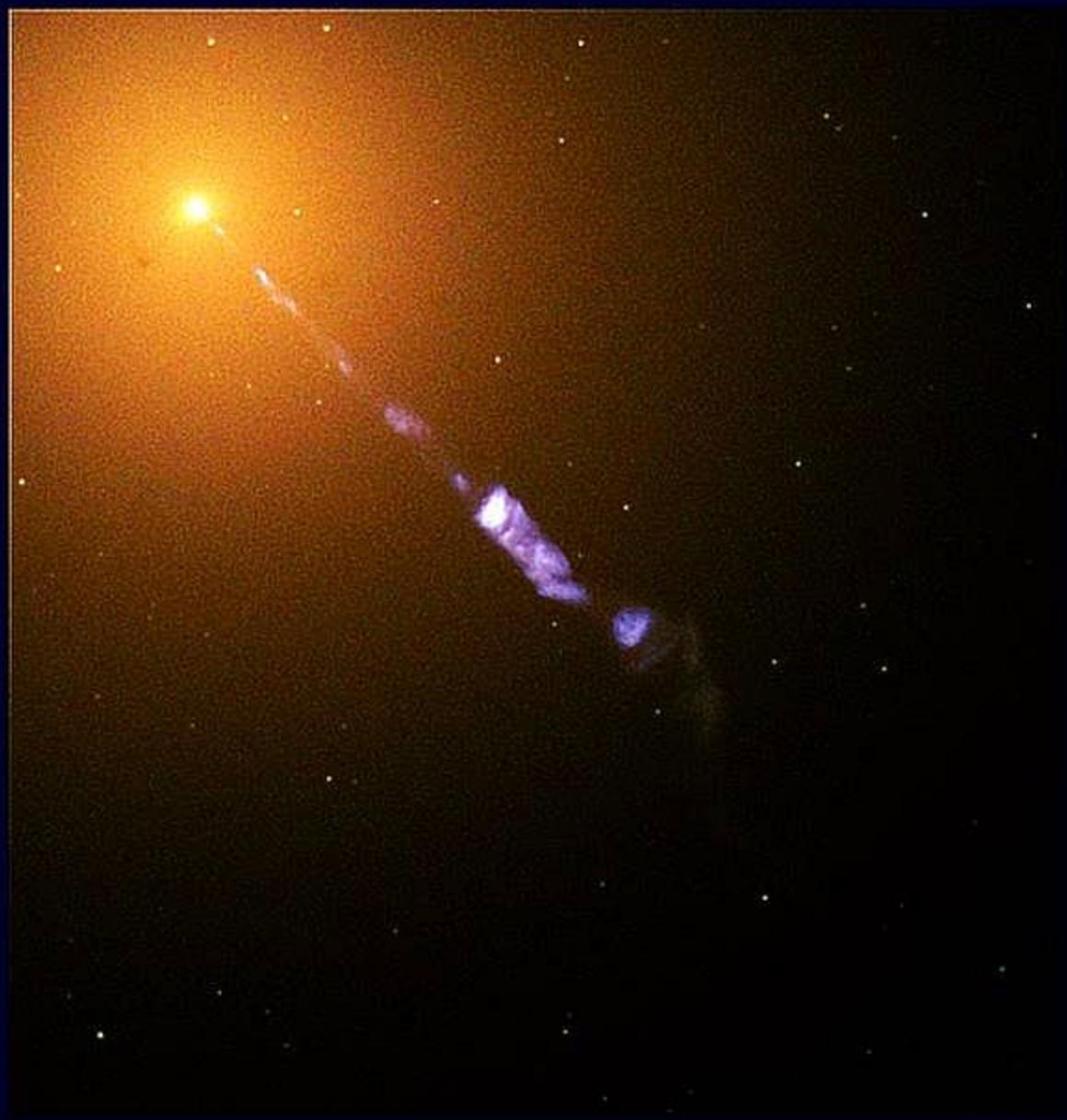
# Relazione statistica tra il raggio del disco di una galassia a spirale e la massa del buco nero centrale



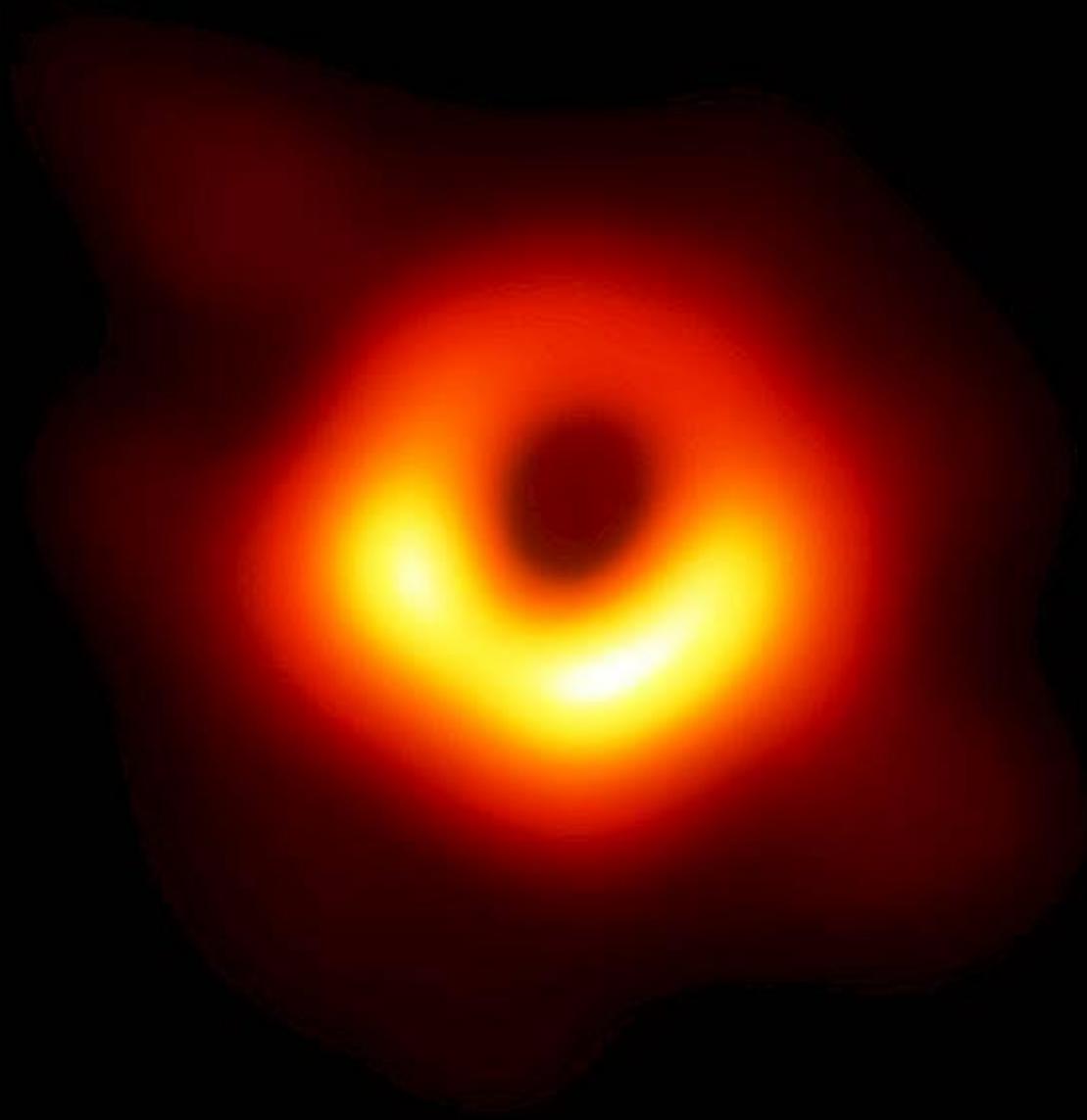
La relazione approssimata tra il raggio  $R_g$  del disco galattico, espresso in Kpc e la massa  $M_{\text{SMBH}}$  del buco nero centrale espressa in Masse solari  $M_\odot$  è data da:

$$\ln(M_{\text{SMBH}}) = 5.35 \cdot \ln(R_g)$$

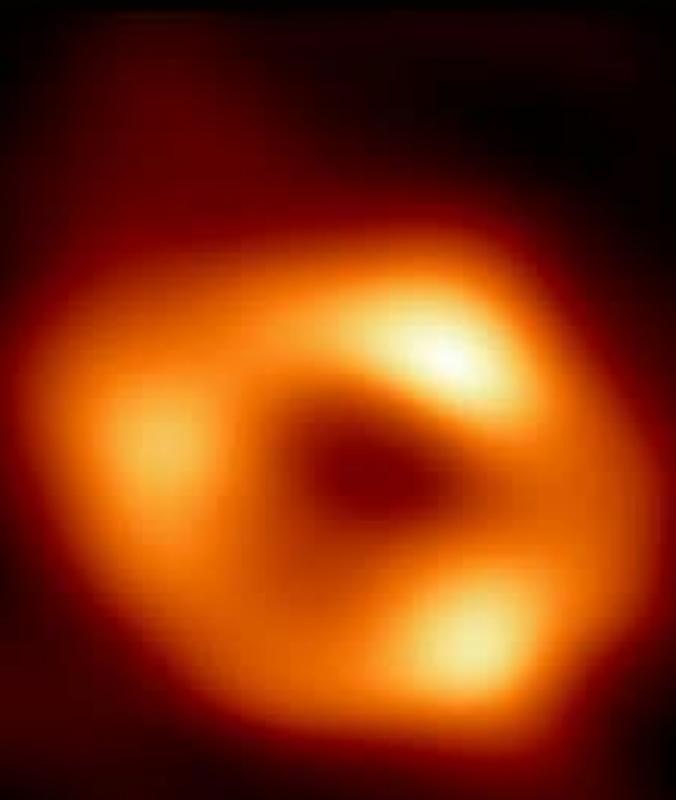
# M87



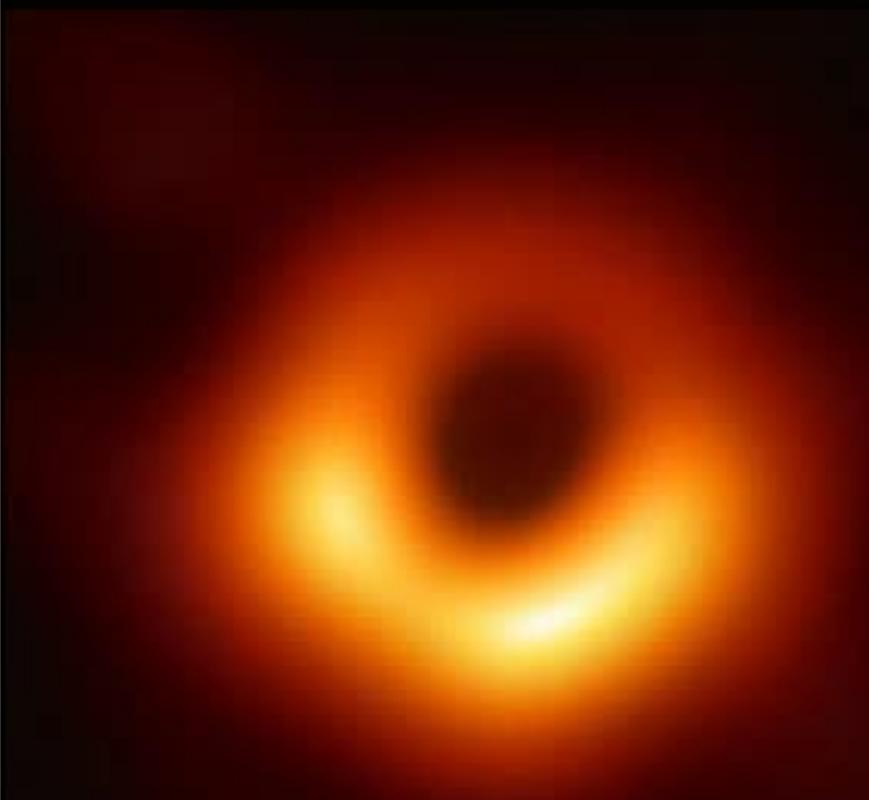
M87



Mappa radio

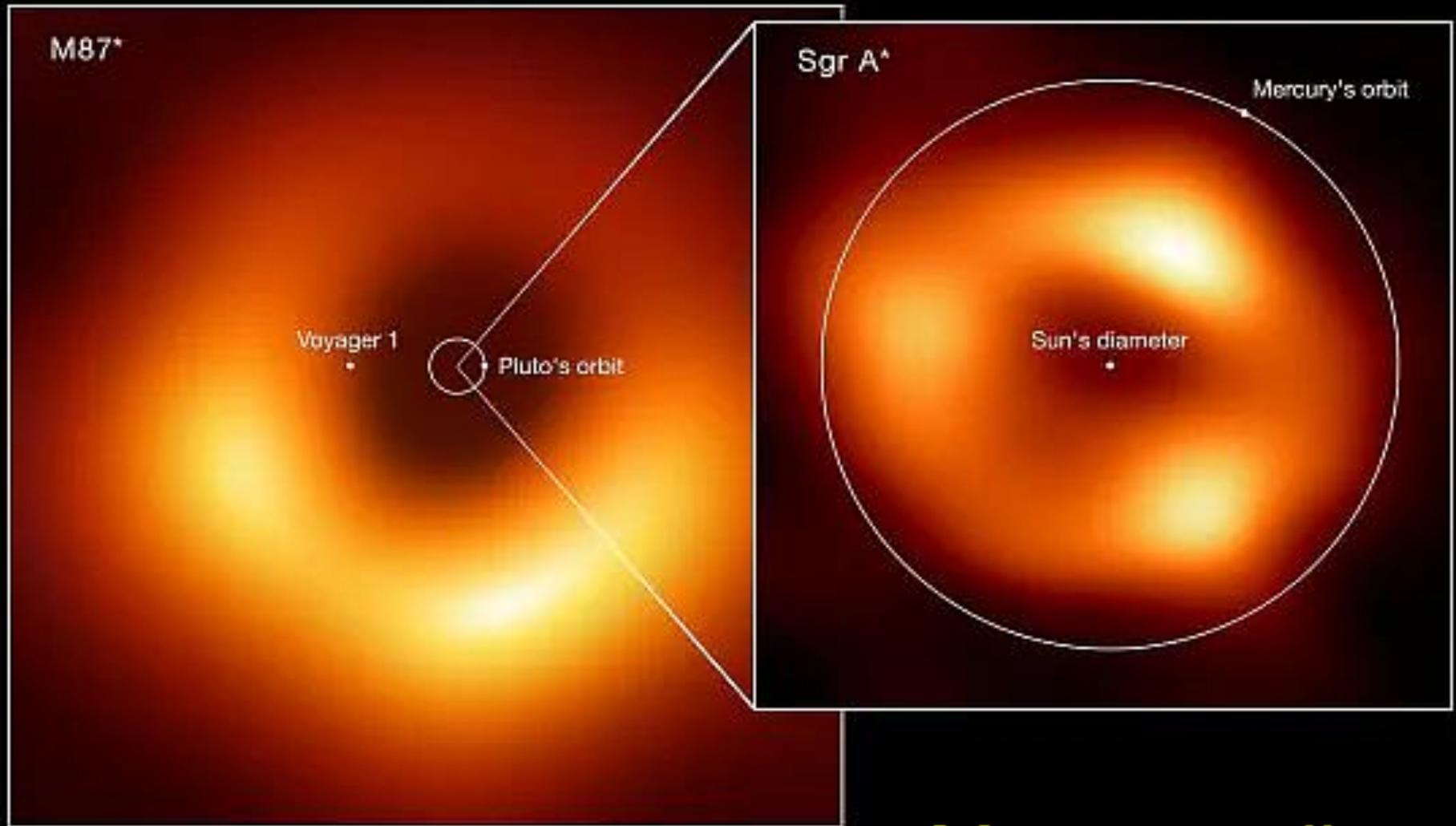
A radio map of Sagittarius A\* showing a bright, irregular ring of emission with a dark central region. The ring is composed of several bright spots connected by a diffuse glow.

**Sagittarius A\***

A radio map of M87 showing a bright, smooth ring of emission surrounding a dark central region. The ring is more uniform in brightness compared to Sagittarius A\*.

**M87**

**Mappa radio**



**Mappa radio**

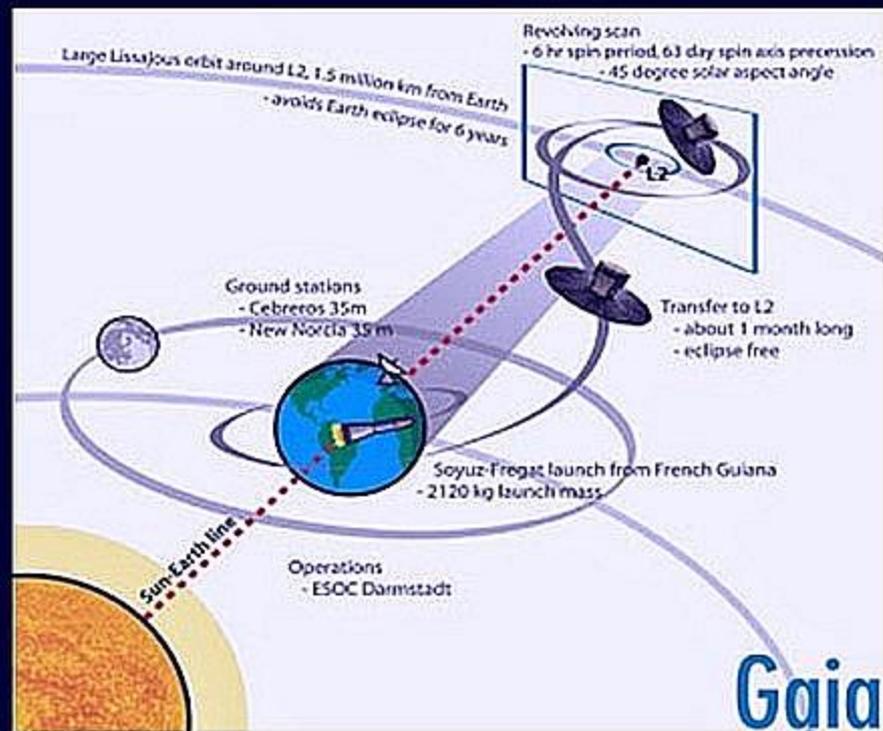
# La missione spaziale Gaia

L'obiettivo di *Gaia* è la creazione della più accurata mappa della Via Lattea mai realizzata, attraverso la misura delle distanze e dei moti stellari.



# La missione spaziale Gaia

GAIA (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics) è stata lanciata il 19 dicembre 2013 e sta orbitando attorno al punto lagrangiano L2, a una distanza di 1,5 milioni di chilometri dalla Terra.



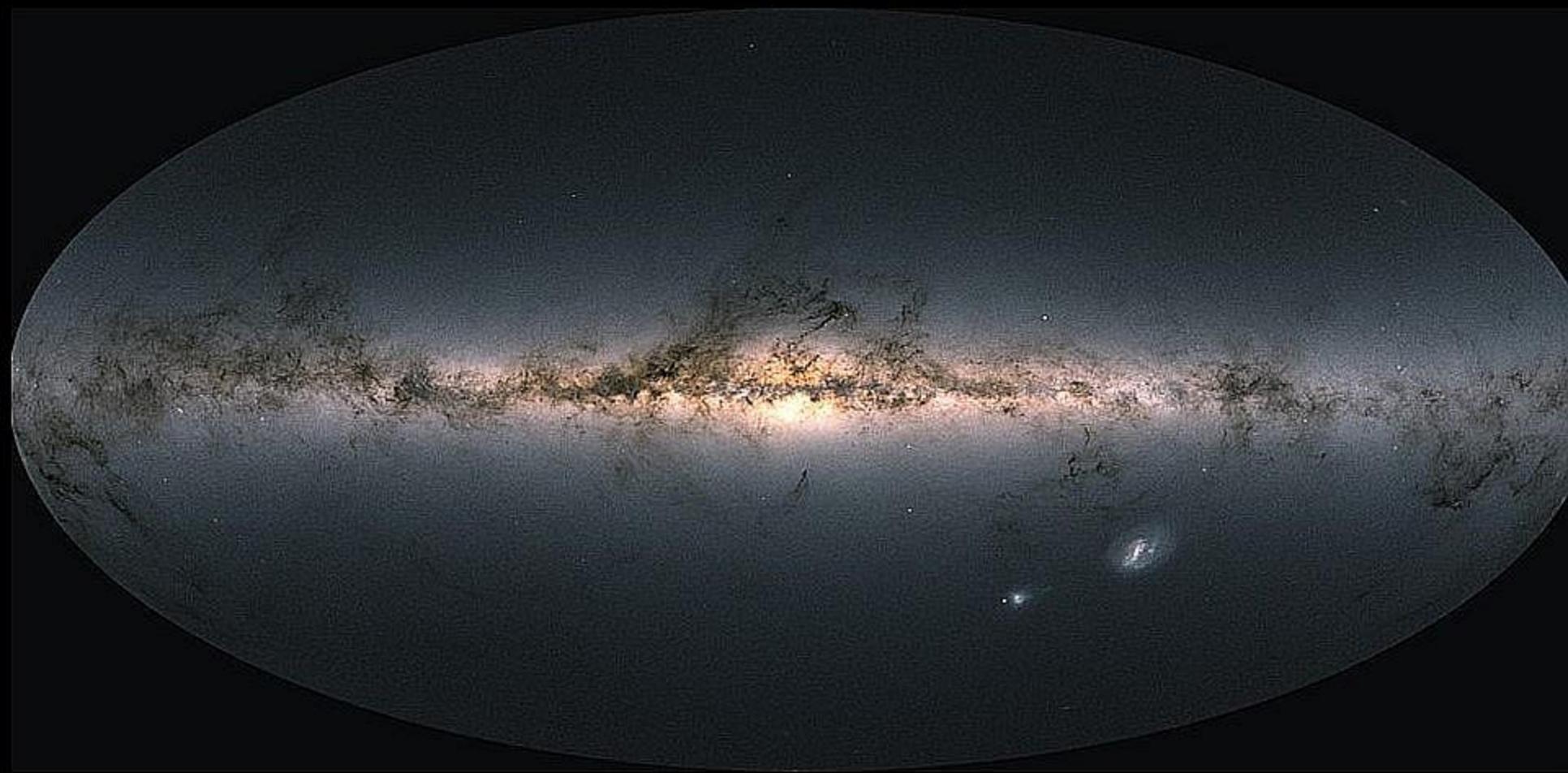
# La missione spaziale Gaia

Ricostruire la posizione, i moti e le distanze delle stelle della Via Lattea è cruciale per capire come è fatta la nostra Galassia ma anche quanto sono realmente luminose le stelle e, in seconda battuta, ricavare informazioni sulla loro massa e la loro età.

E' così possibile ricavare anche informazioni sul tasso di formazione stellare e capire se la formazione stellare ha proceduto in modo uniforme o ci sono stati episodi con picchi di formazione.

Il confronto tra le osservazioni e accurati modelli stellari elaborati dai ricercatori dell'Istituto Nazionale di Astrofisica ha permesso di ricostruire la storia evolutiva della Via Lattea

**GAIA EARLY DATA RELEASE 3  
(3 DICEMBRE 2020)**

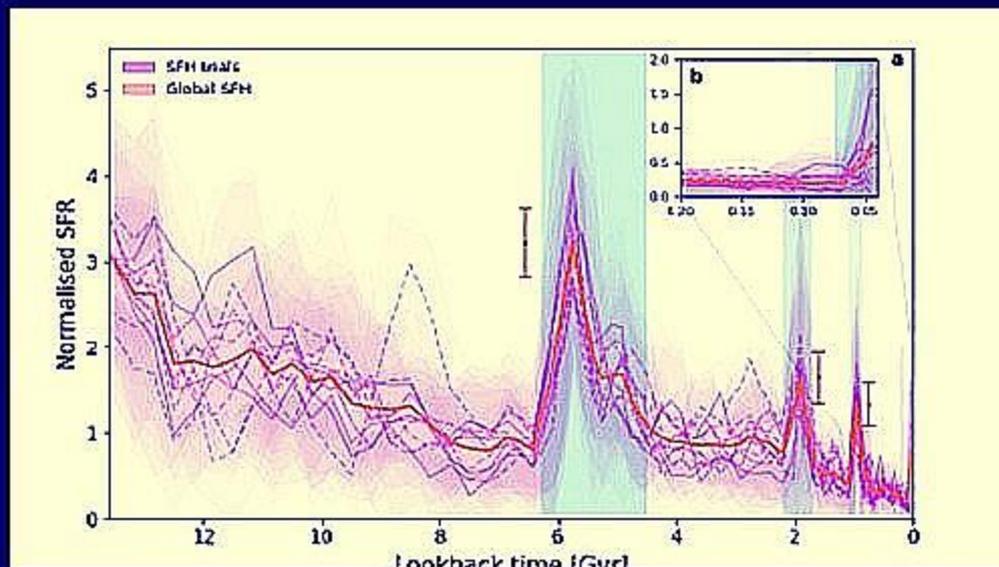


La Via Lattea sembra aver sperimentato circa 13 miliardi di anni fa un processo di formazione stellare molto violento, la cui intensità è andata progressivamente diminuendo nel tempo.

Ma in tutto questo periodo si notano anche alcuni eventi estremamente intensi di formazione stellare.

Il primo sarebbe avvenuto circa 5-6 miliardi di anni fa, seguito da altri eventi avvenuti rispettivamente 2 miliardi e 1 miliardo di anni fa, per arrivare all'ultimo, "vecchio" solo 100 milioni di anni.

## S.F.R. Stellar Formation Rate



Sagittarius dwarf galaxy



Milky Way

8 billion years ago



5.7 billion years ago  
First Sagittarius passage



3 billion years ago



1.9 billion years ago  
Second Sagittarius passage



1 billion years ago  
Third Sagittarius passage



Current situation

La durata può essere anche dell'ordine del miliardo di anni per l'episodio più antico

Questo significa che l'episodio di 5,5 miliardi di anni fa' potrebbe essere all'origine della nascita del sistema solare.

In effetti il nostro Sole ha 4,5 miliardi di anni.

**I BRACCI DELLE SPIRALI POSSONO ESSERE PUNTEGGIATI  
DA REGIONI HII CHE SONO ZONE DI FORMAZIONE STELLARE**



# NEBULOSE

EMISSIONE

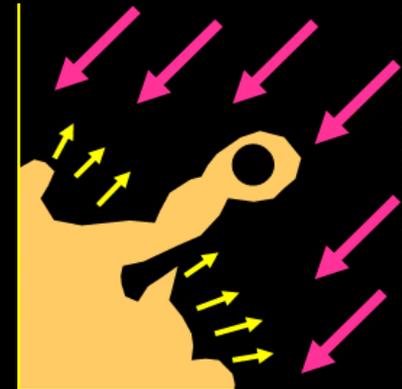
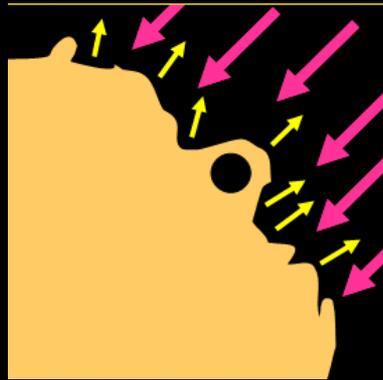
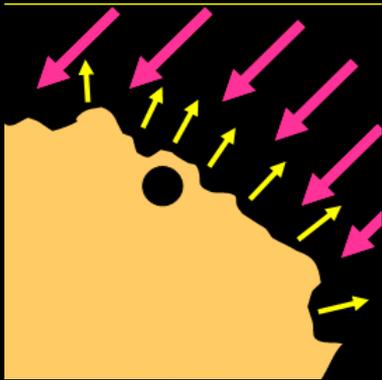


RIFLESSIONE



OSCURE



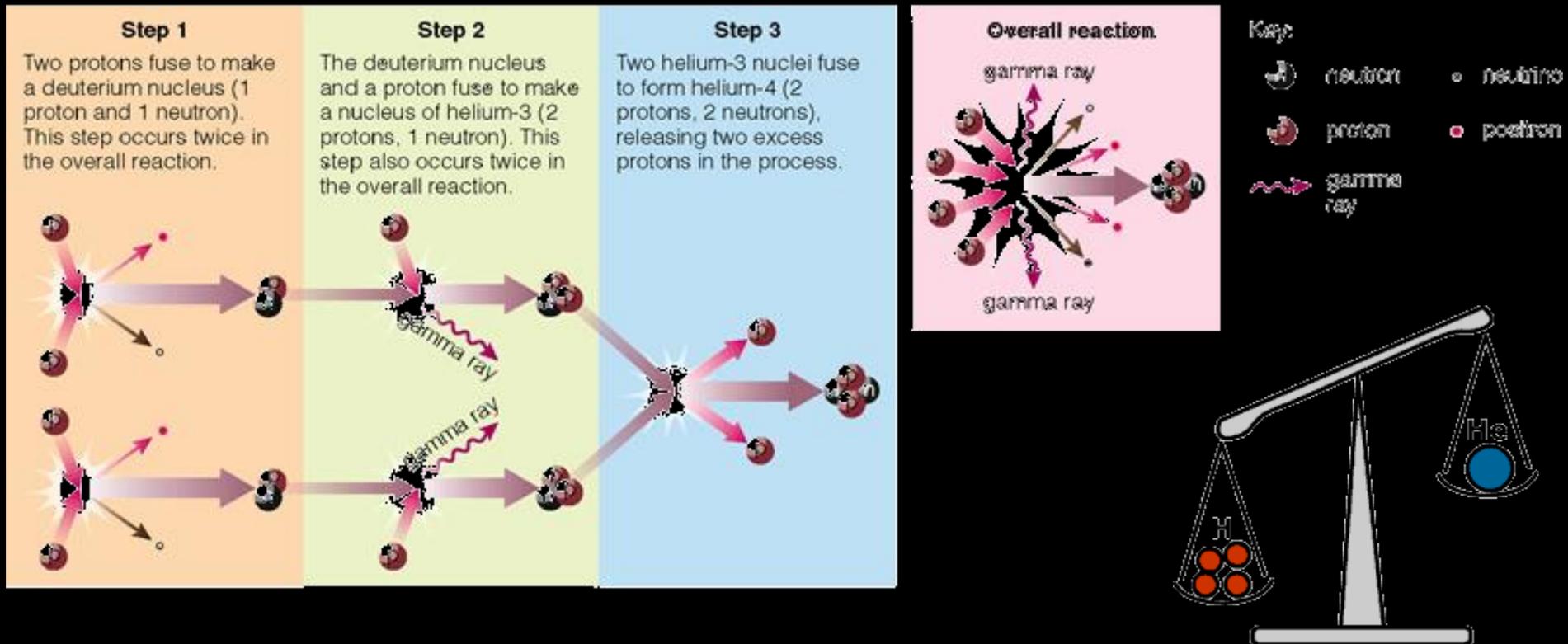


**NASCITA DI  
UNA STELLA**

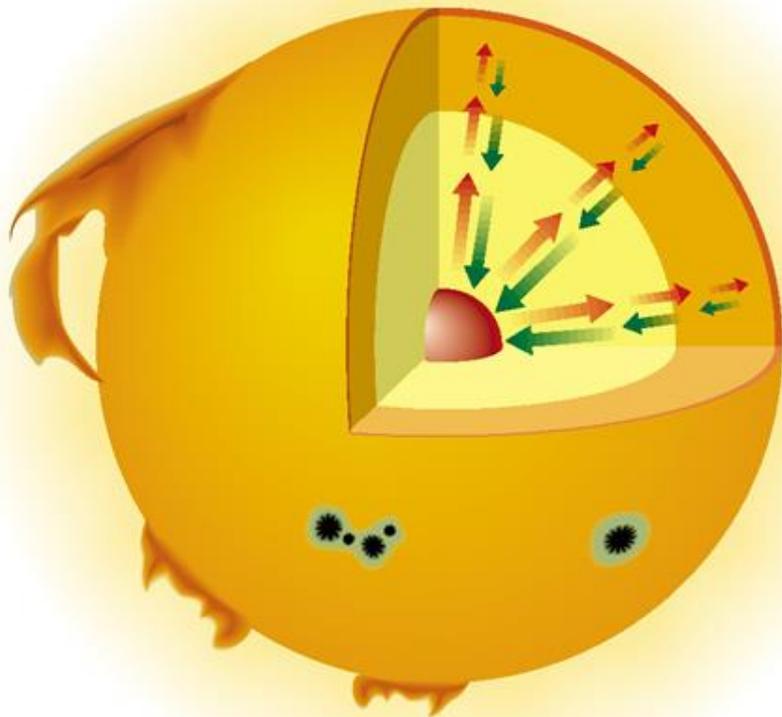
# LA CATENA PROTONE-PROTONE FONDE QUATTRO ATOMI DI IDROGENO IN UN ATOMO DI ELIO. LA DIFFERENZA DI MASSA VIENE CONVERTITA IN ENERGIA SECONDO LA RELAZIONE

$$E=mc^2$$

Hydrogen Fusion by the Proton-Proton Chain



pressure →  
gravity ←

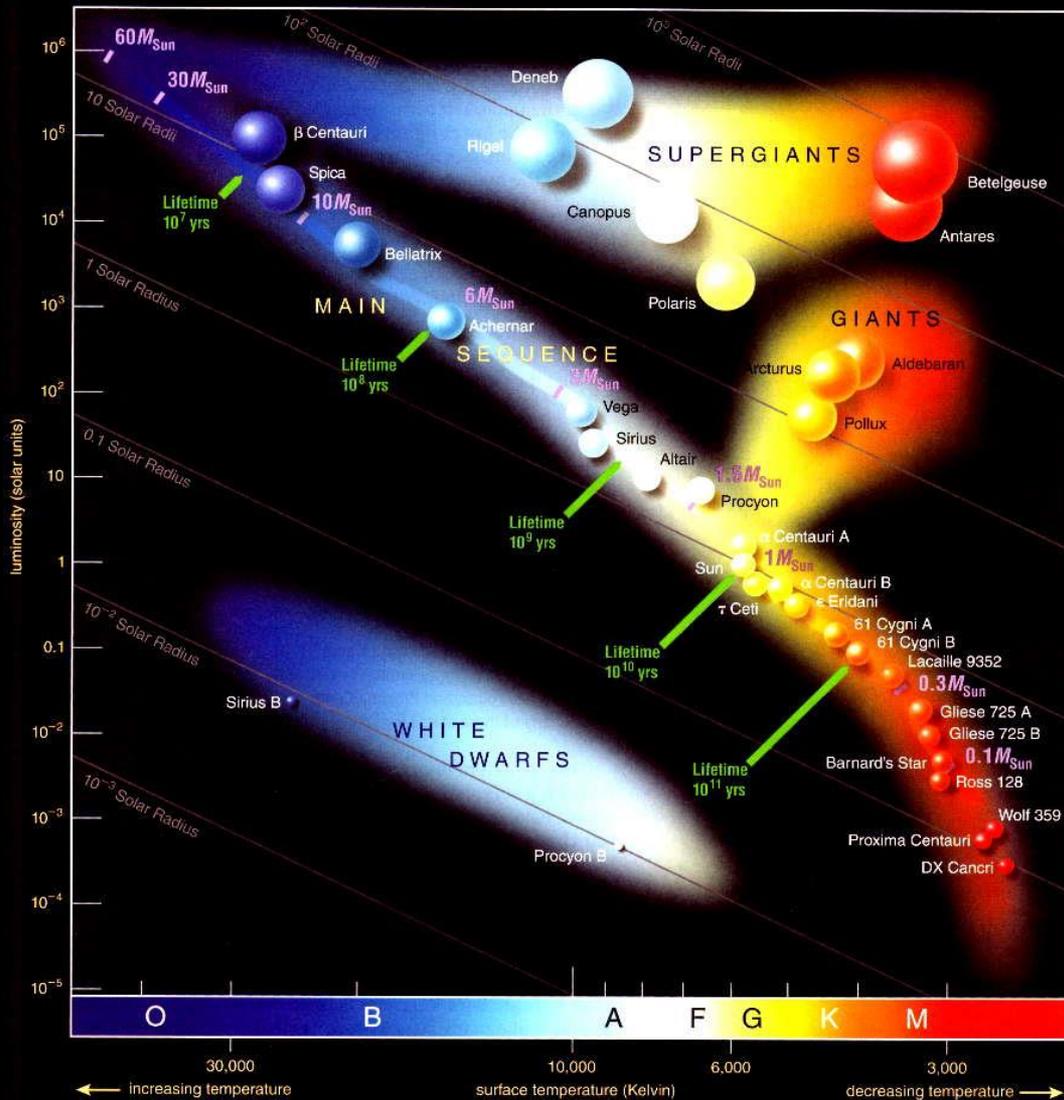


**UNA VOLTA INNESECATO  
LA FUSIONE DELL'IDROGENO  
LA STELLA ENTRA IN UNA  
FASE DI EQUILIBRIO  
DOVE LA PRESSIONE  
BILANCIA LA GRAVITA'**

**LA STELLA ENTRA NELLA  
"SEQUENZA PRINCIPALE"  
UNA FASE CHE PUO'  
DURARE MILIARDI  
DI ANNI PER STELLE  
COME IL SOLE**

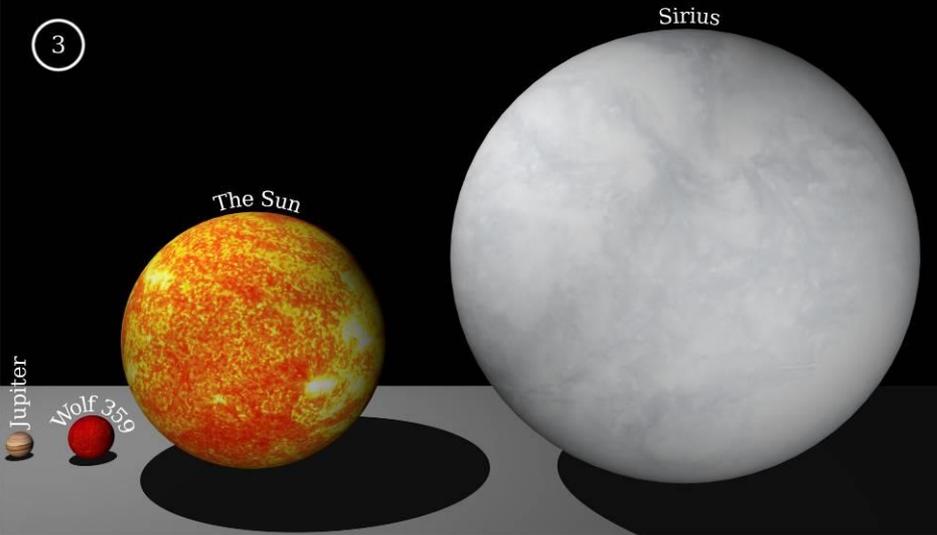
# IL DIAGRAMMA DI HERTZSPRUNG-RUSSEL METTE IN RELAZIONE LA LUMINOSITA' E LA TEMPERATURA DELLE STELLE

LA MASSA DELLA STELLA  
DETERMINA  
LA DURATA DELLA VITA E  
IL TIPO DI MORTE

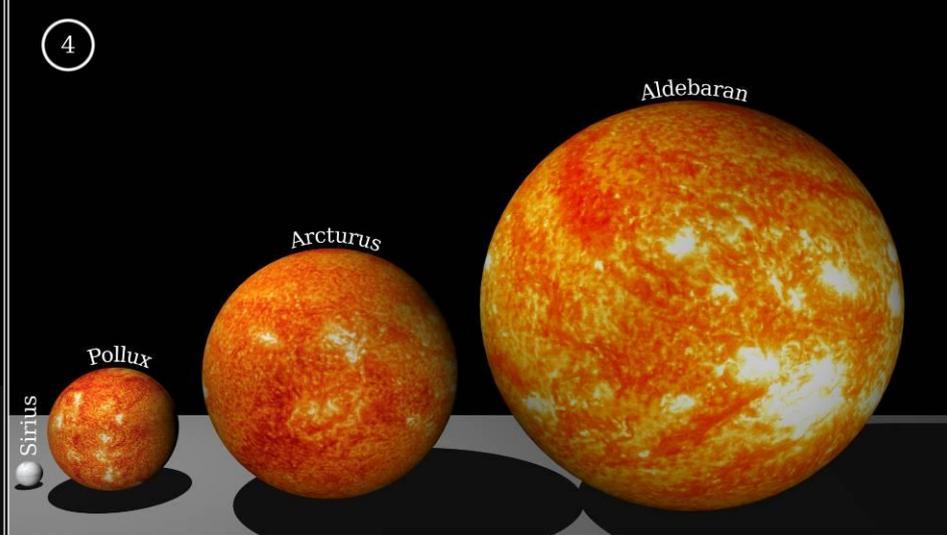


# DIMENSIONI DELLE STELLE

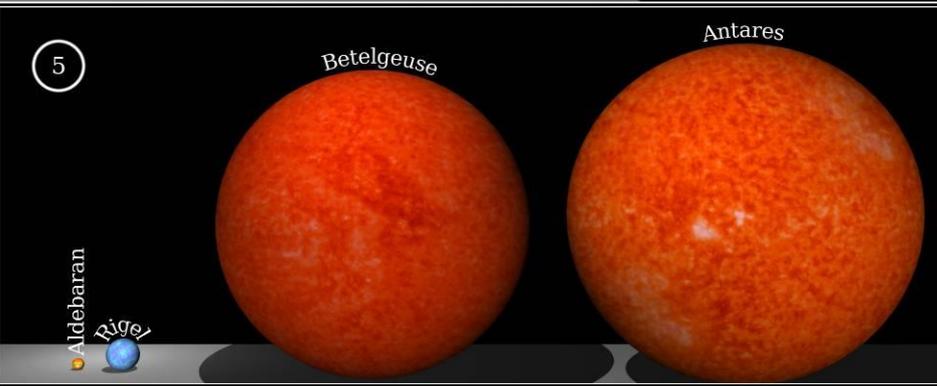
3



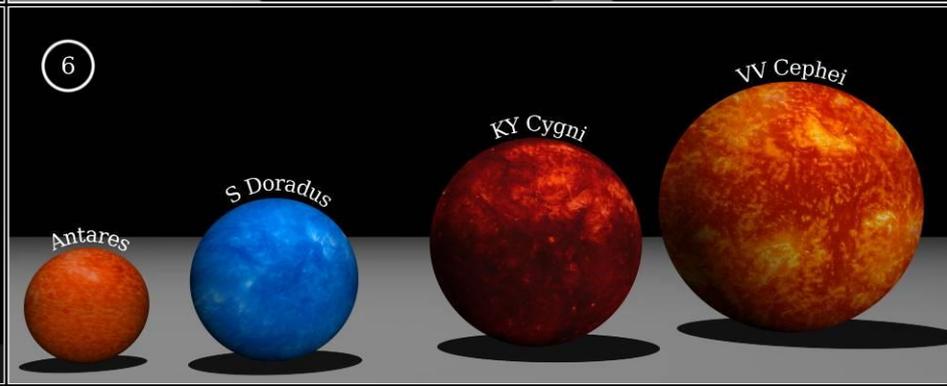
4



5



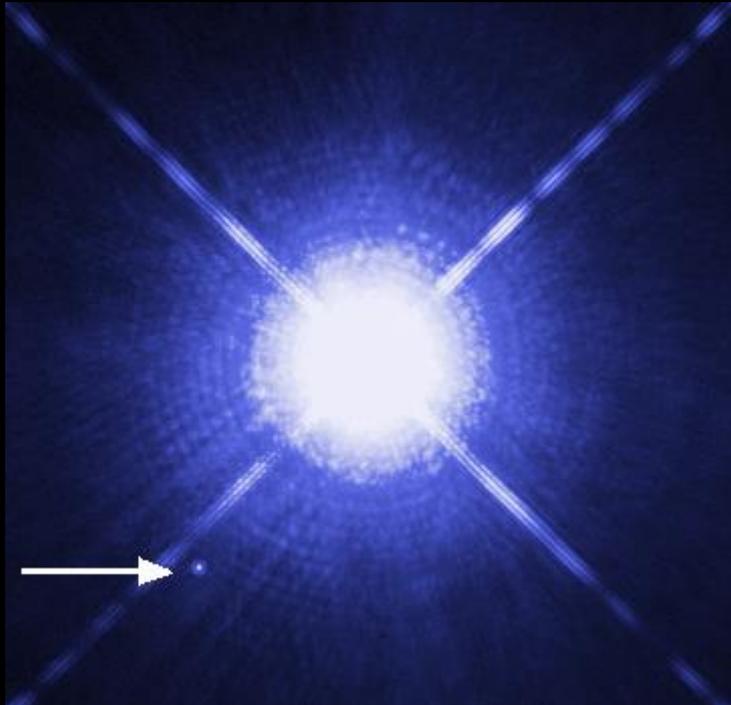
6



**LE GIGANTI ROSSE PIU' LEGGERE DI 8 MASSE SOLARI  
DISPERDONO GLI STRATI ESTERNI NELLO SPAZIO,  
FORMANDO LE NEBULOSE PLANETARIE**



**LE NEBULOSE PLANETARIE SI DILUISCONO NELLO SPAZIO  
IN POCHE DECINE DI MIGLIAIA DI ANNI**



**UNA VOLTA DISSOLTI GLI STRATI  
ESTERNI RIMANE SOLO IL  
NUCLEO DENSO E CALDO:  
LA NANA BIANCA**

**LE NANE BIANCHE RESISTONO ALLA  
COMPRESSIONE DELLA GRAVITA'  
GRAZIE ALLA PRESSIONE DEGLI  
ELETTRONI:  
IL LIMITE E' 1,4 MASSE SOLARI**

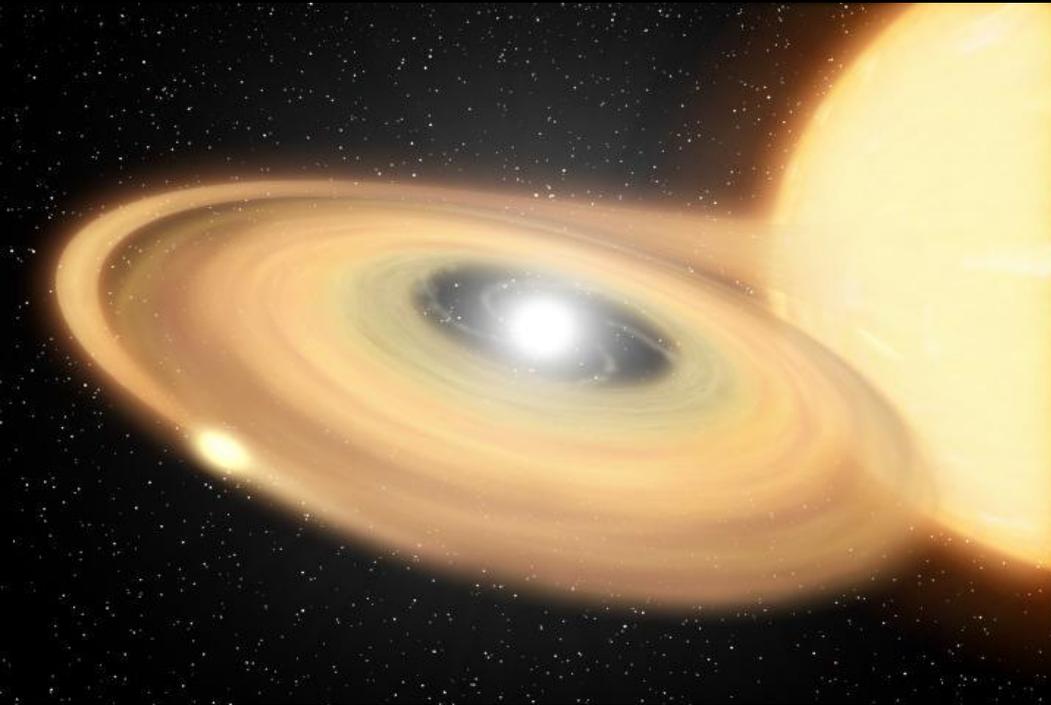


**SIRIO B HA QUASI LA MASSA  
DEL SOLE  
RACCHIUSA NELLE DIMENSIONI  
DELLA TERRA**

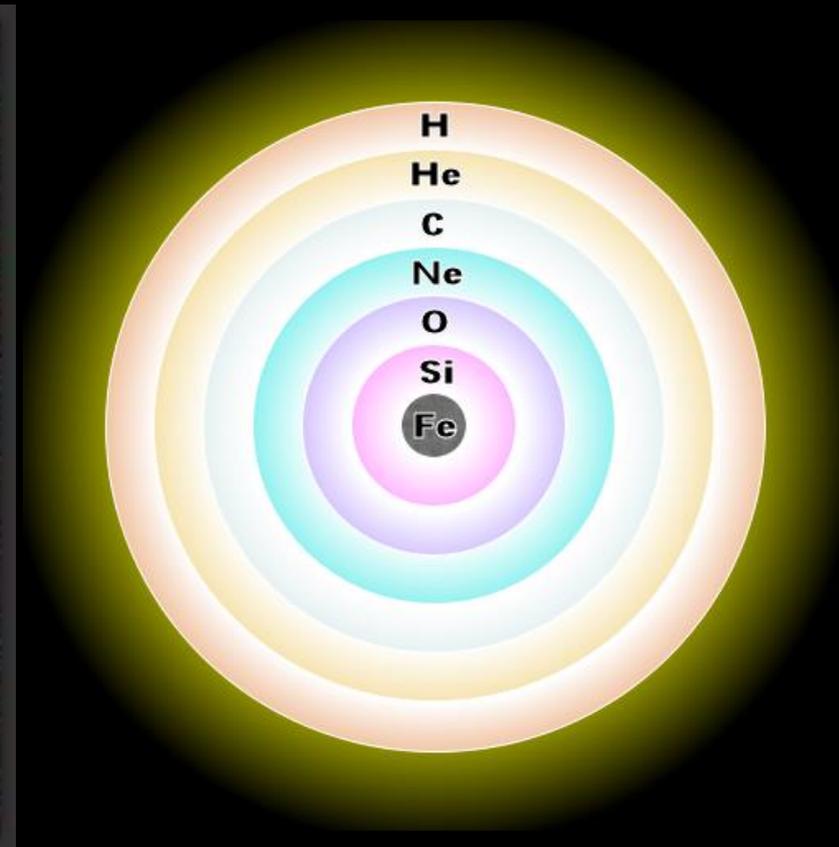
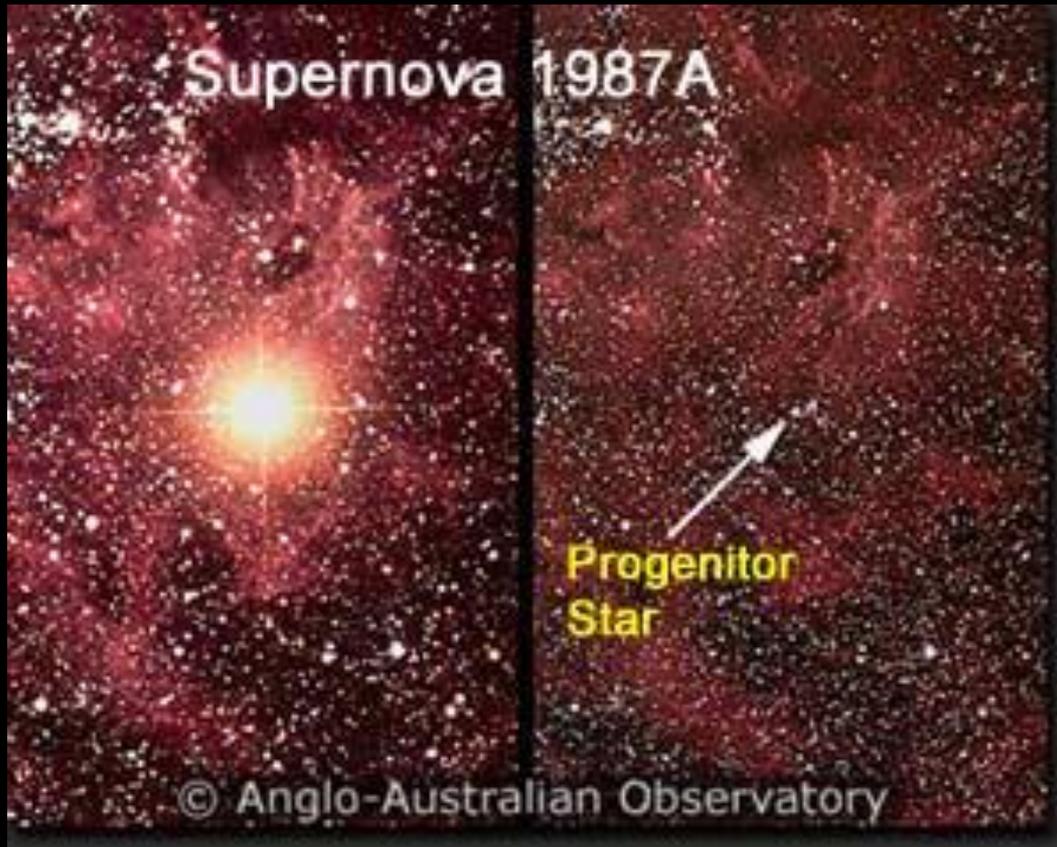
# **SUPERNOVAE DI TIPO Ia**

**UNA NANA BIANCA MOLTO VICINA AD UNA SUPERGIGANTE ROSSA  
SI ACCRESCE FINO A SUPERARE IL LIMITE DI 1,4 MASSE SOLARI:  
L'INNESCO DELLA FUSIONE DEL CARBONIO**

**DISTRUGGE LA STELLA IN UNA GIGANTESCA ESPLOSIONE**

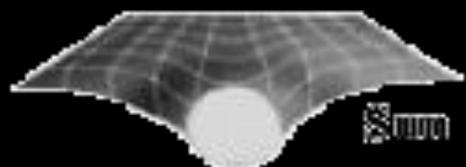


**LE SUPERNOVAE DI TIPO II<sub>cc</sub>  
HANNO ORIGINE DA STELLE CON MASSA  
ALMENO 8 VOLTE SUPERIORE QUELLA DEL SOLE**

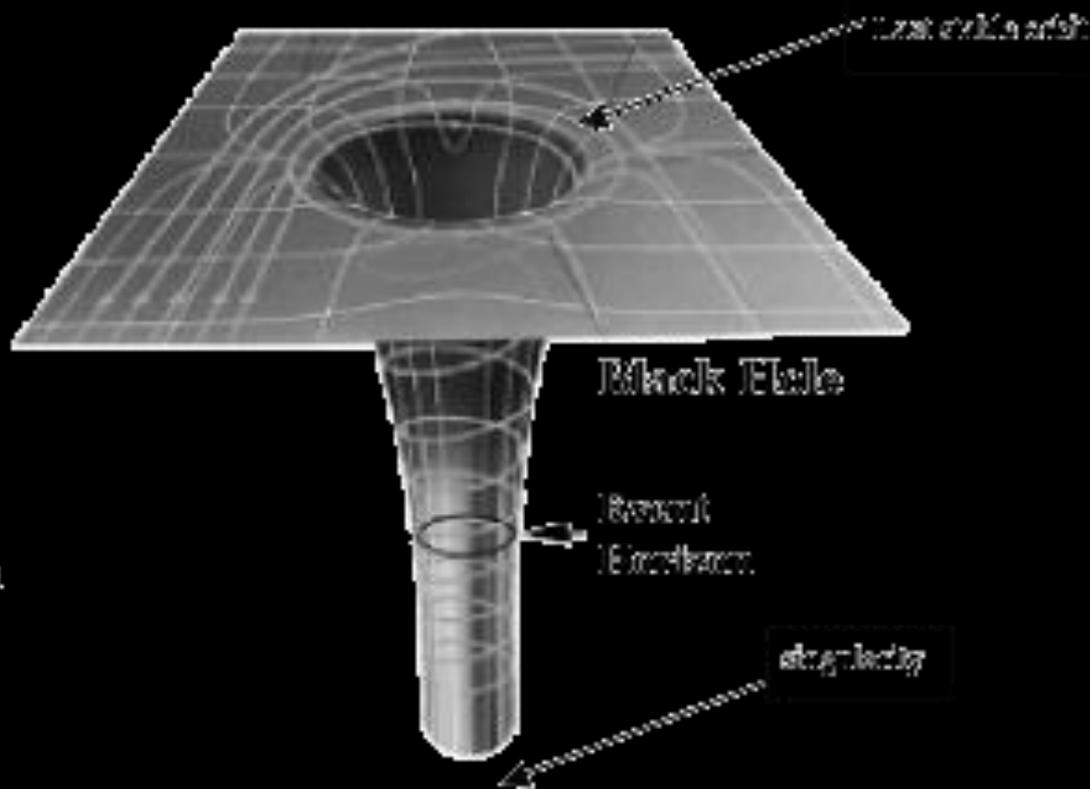


**IL NUCLEO COMPRESSO DIVENTA UNA STELLA DI NEUTRONI**

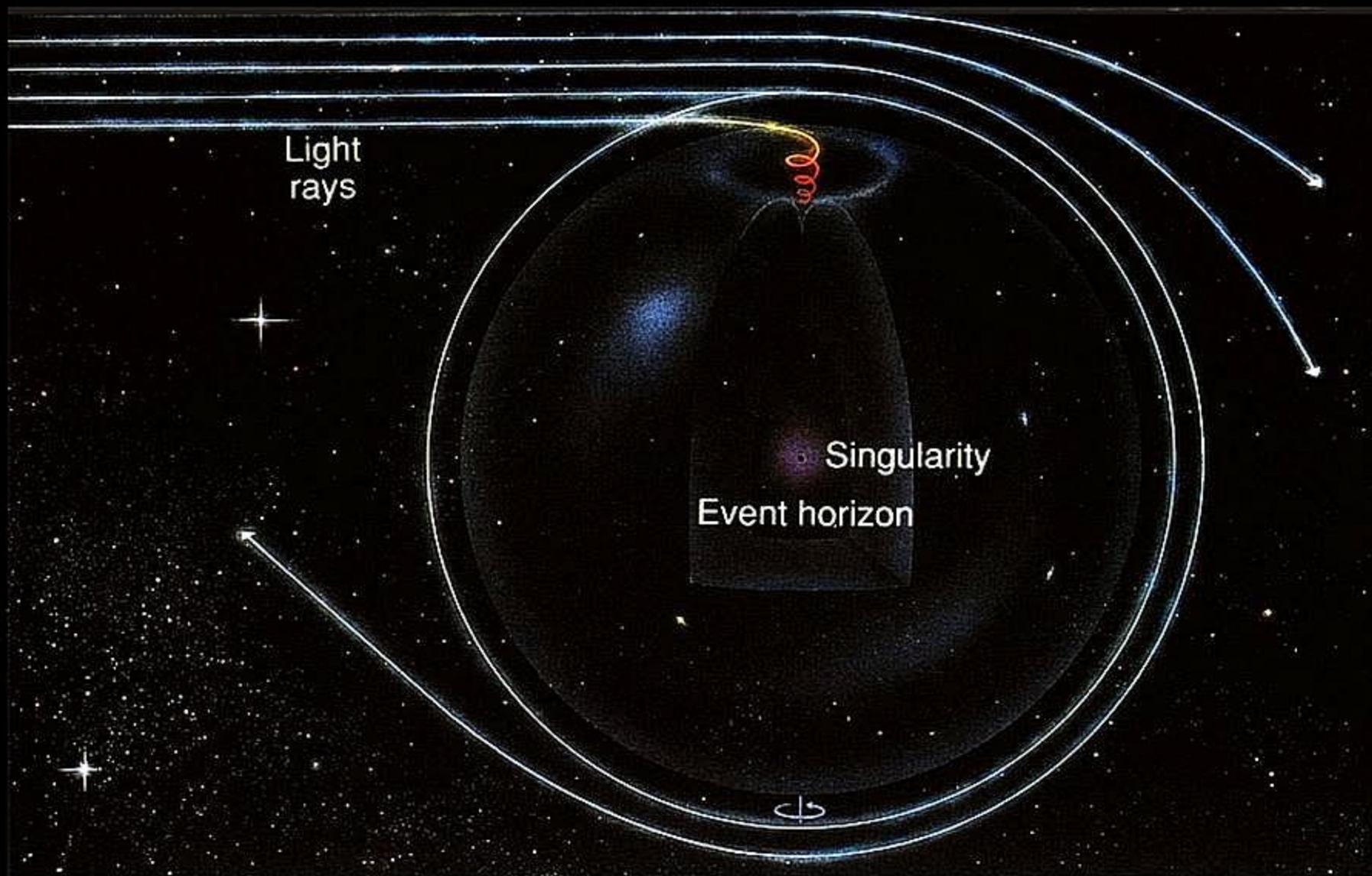
# STELLE CON MASSA 20 VOLTE SUPERIORE A QUELLA DEL SOLE DANNO ORIGINE AD UN BUCO NERO



Illustrated  
space time



# Deviazione dei raggi di luce



# L'orizzonte degli eventi



*Singolarità*



*Orizzonte degli eventi*

# La soluzione di Schwarzschild

Nel 1916 l'astrofisico Karl Schwarzschild trova per primo una soluzione alle equazioni della relatività di Einstein per un oggetto sferico, statico e immerso in uno spazio vuoto. Se l'oggetto è concentrato entro un raggio critico, allora nulla, neanche la luce, può più uscirne.

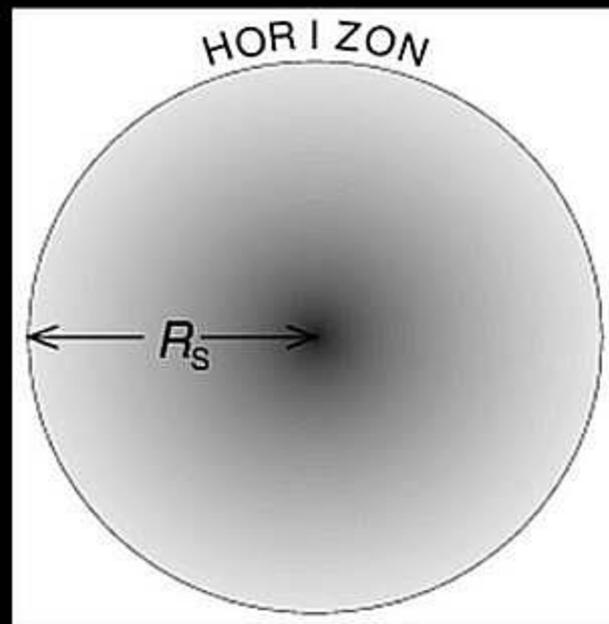


Karl Schwarzschild (1873-1916)

Raggio di Schwarzschild

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

$$R_s (km) \approx 3 \times \frac{M_{stella}}{M_{Sole}}$$



Nel 1967, Wheeler li battezza buchi neri



Grazie per  
l'attenzione!