



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

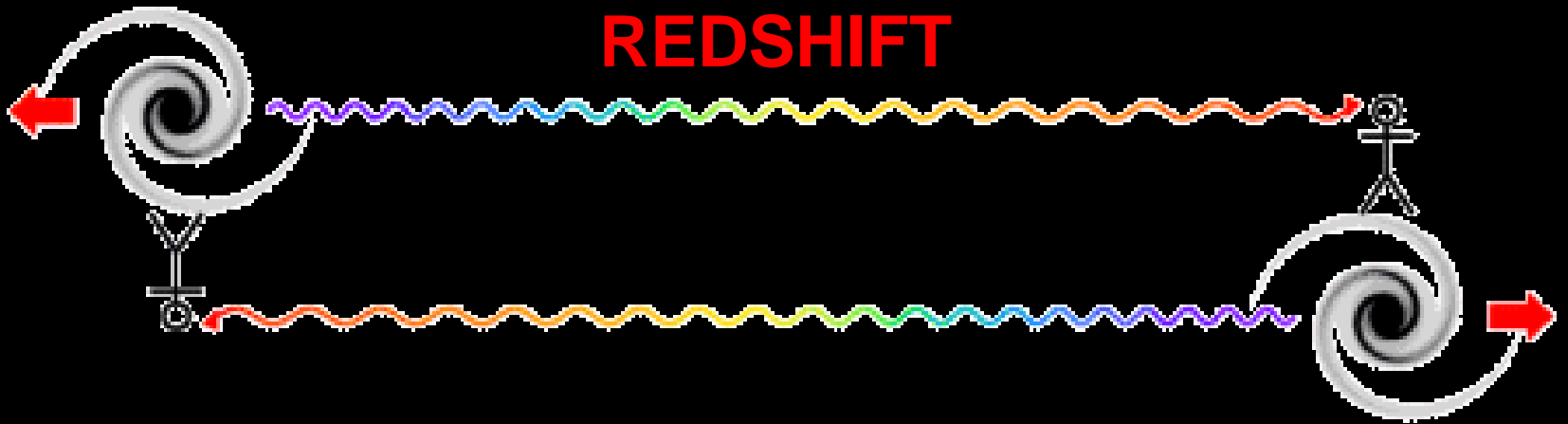
-NON ESISTONO POSIZIONI PRIVILEGIATE

IMPLICAZIONI DEL PRINCIPIO COSMOLOGICO

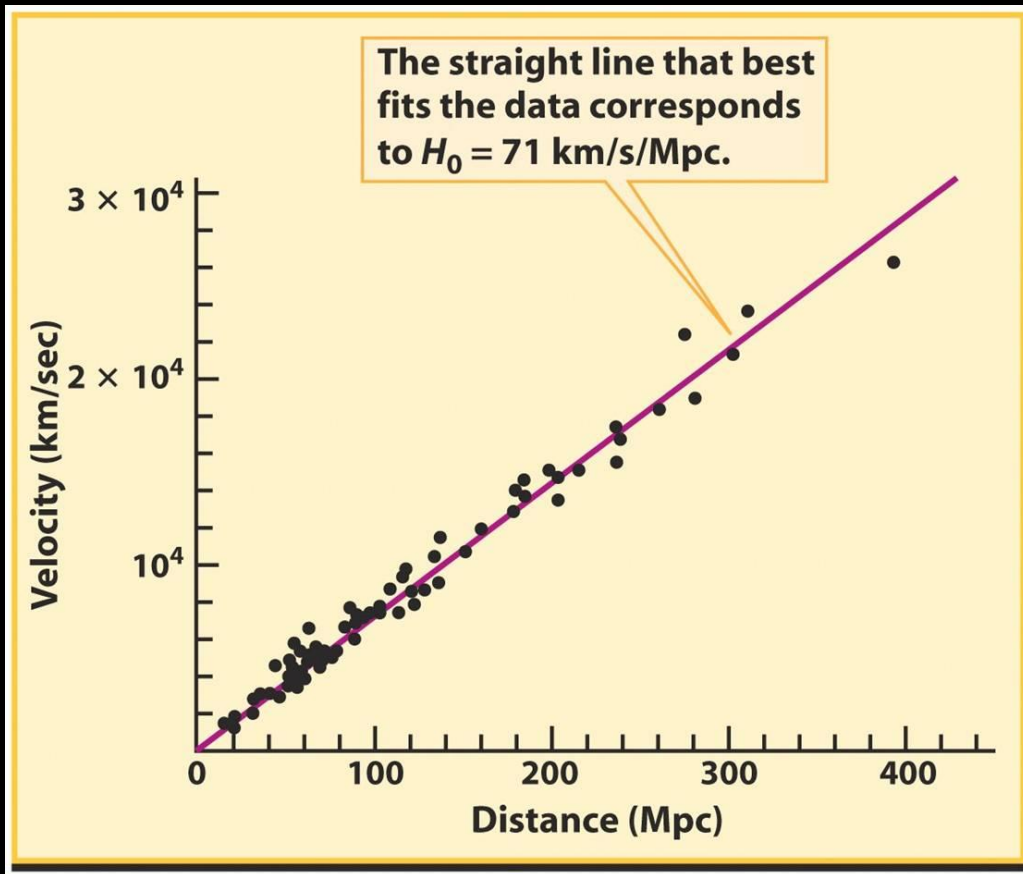
- LA DENSITA' MEDIA DELLA MATERIA E DELL'ENERGIA E' UGUALE IN TUTTO L'UNIVERSO.
- QUALSIASI OSSERVATORE NELL'UNIVERSO PERCEPISCE L'ESPANSIONE NELLO STESSO MODO.
- LA CURVATURA DELL'UNIVERSO E' LA STESSA IN OGNI LUOGO.

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
 $H_0 = 71 \text{ (Km/s)/Mpc}$

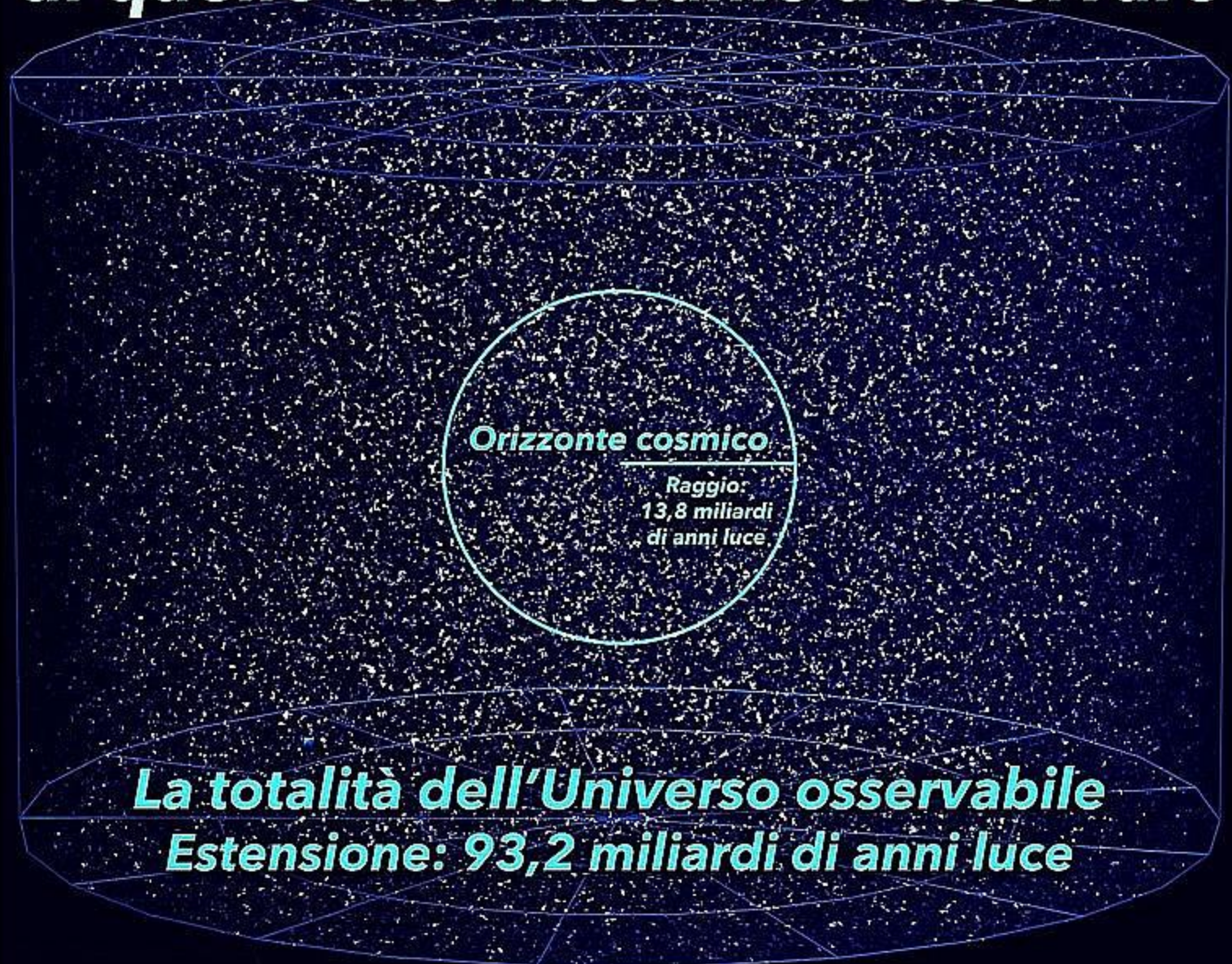
**LA LEGGE DI HUBBLE
E' IN PERFETTO ACCORDO
CON UN UNIVERSO
OMOGENEO IN ESPANSIONE,
COME PREVISTO DALLA
TEORIA DEL
BIG BANG**

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.

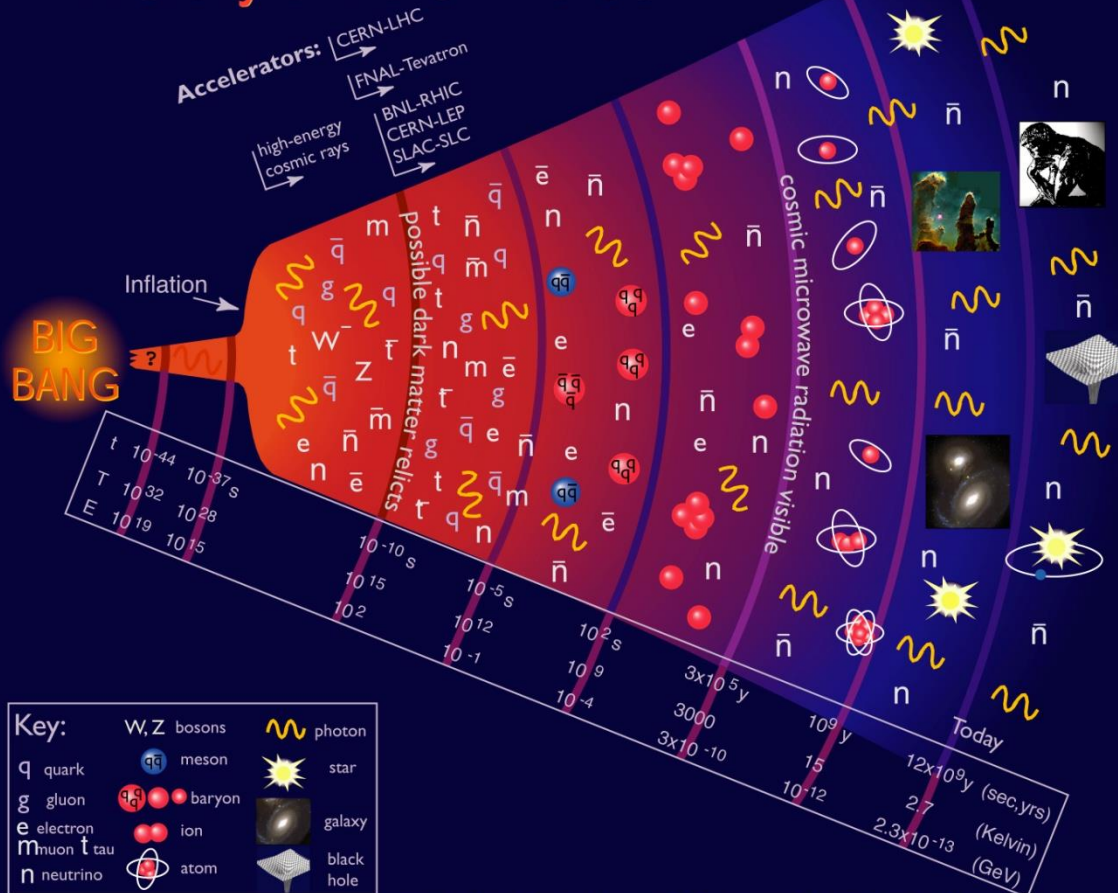
La velocità della luce è il limite solo per
la materia e l'energia, ma non per lo
Spazio-Tempo...

Lo Spazio-Tempo fa quello che vuole...

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



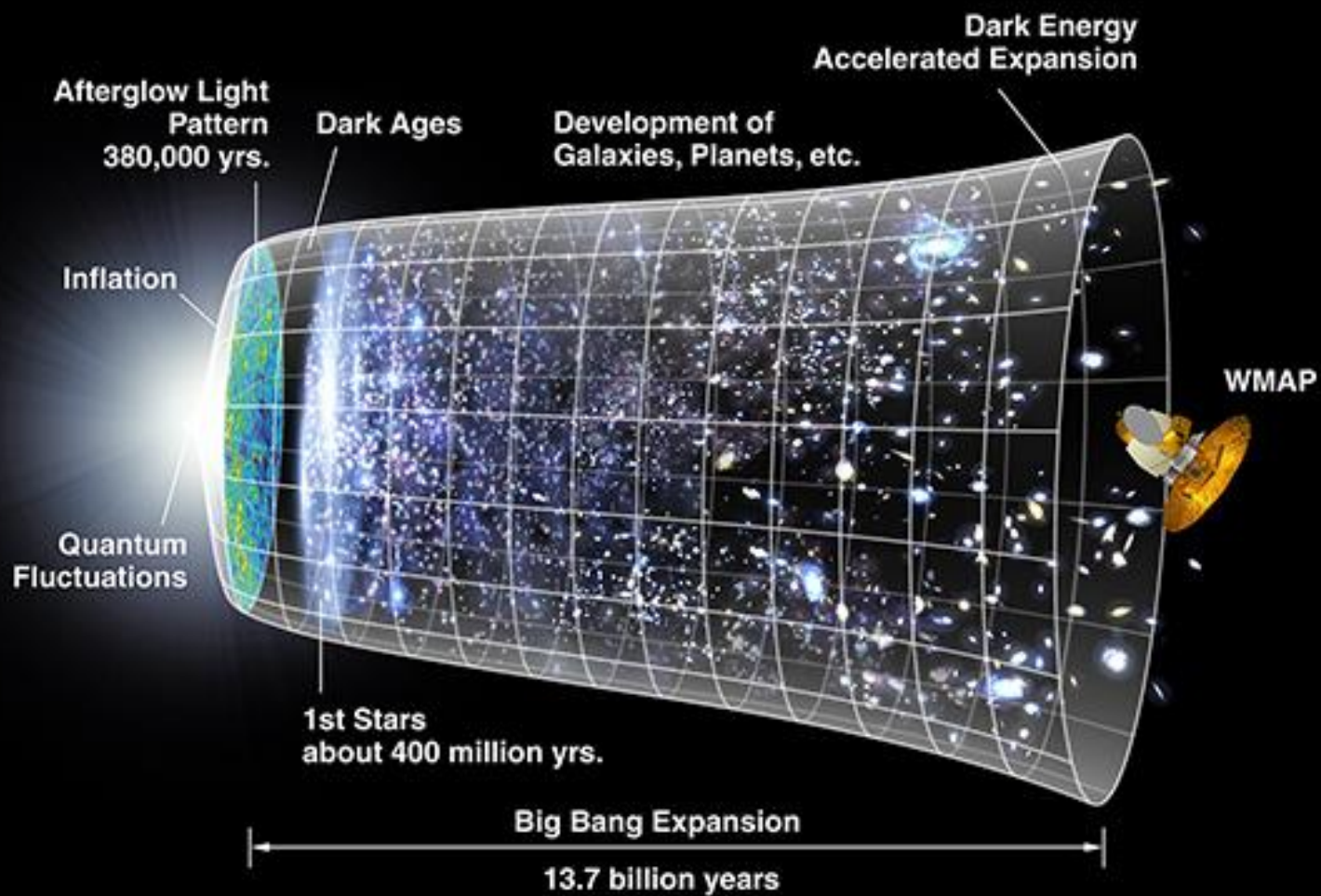
History of the Universe



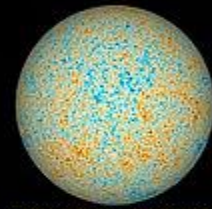
Particle Data Group, LBNL, © 2000. Supported by DOE and NSF

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

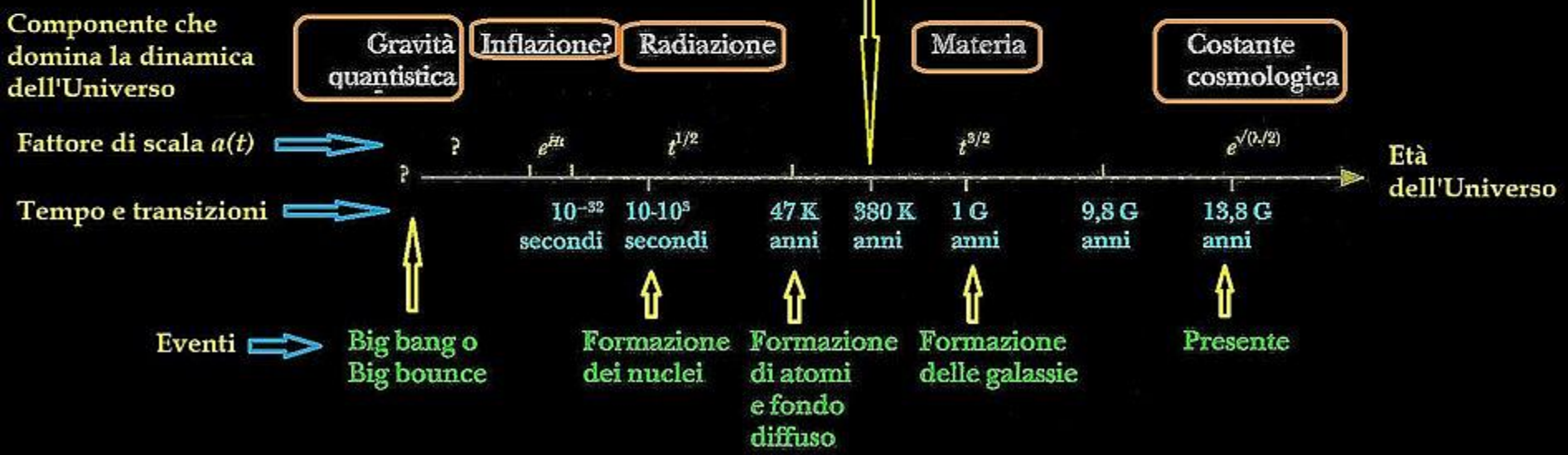
**IL MODELLO DEL BIG BANG
DERIVA DALL'APPLICAZIONE
DELLA RELATIVITA'
GENERALE DI EINSTEIN
AD UN UNIVERSO
ISOTROPO ED OMOGENEO**



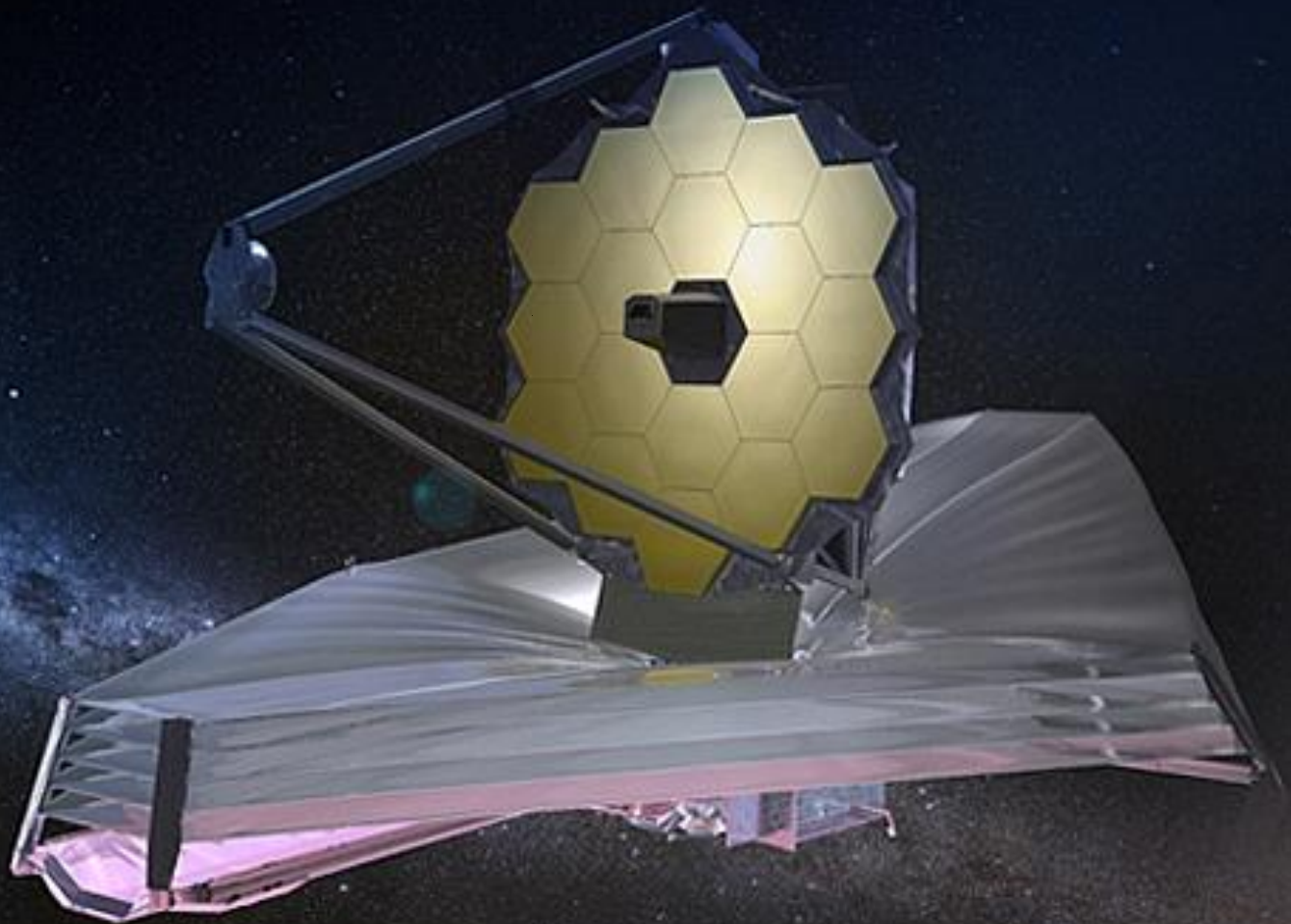
Evoluzione dell'Universo:



CMB flux (Cosmic Microwave Background) anisotropia termica



Il telescopio spaziale infrarosso James Webb Space Telescope



Sono 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:

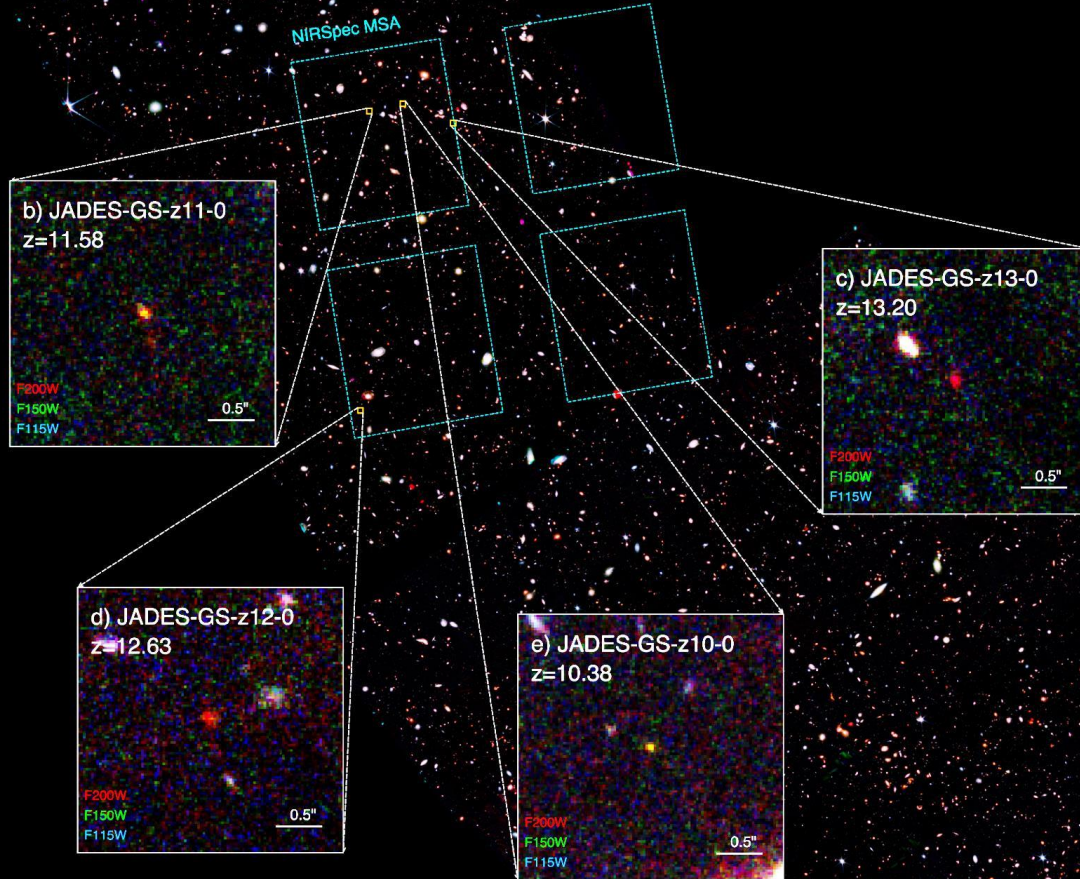
Jades-GS-z10-0,

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

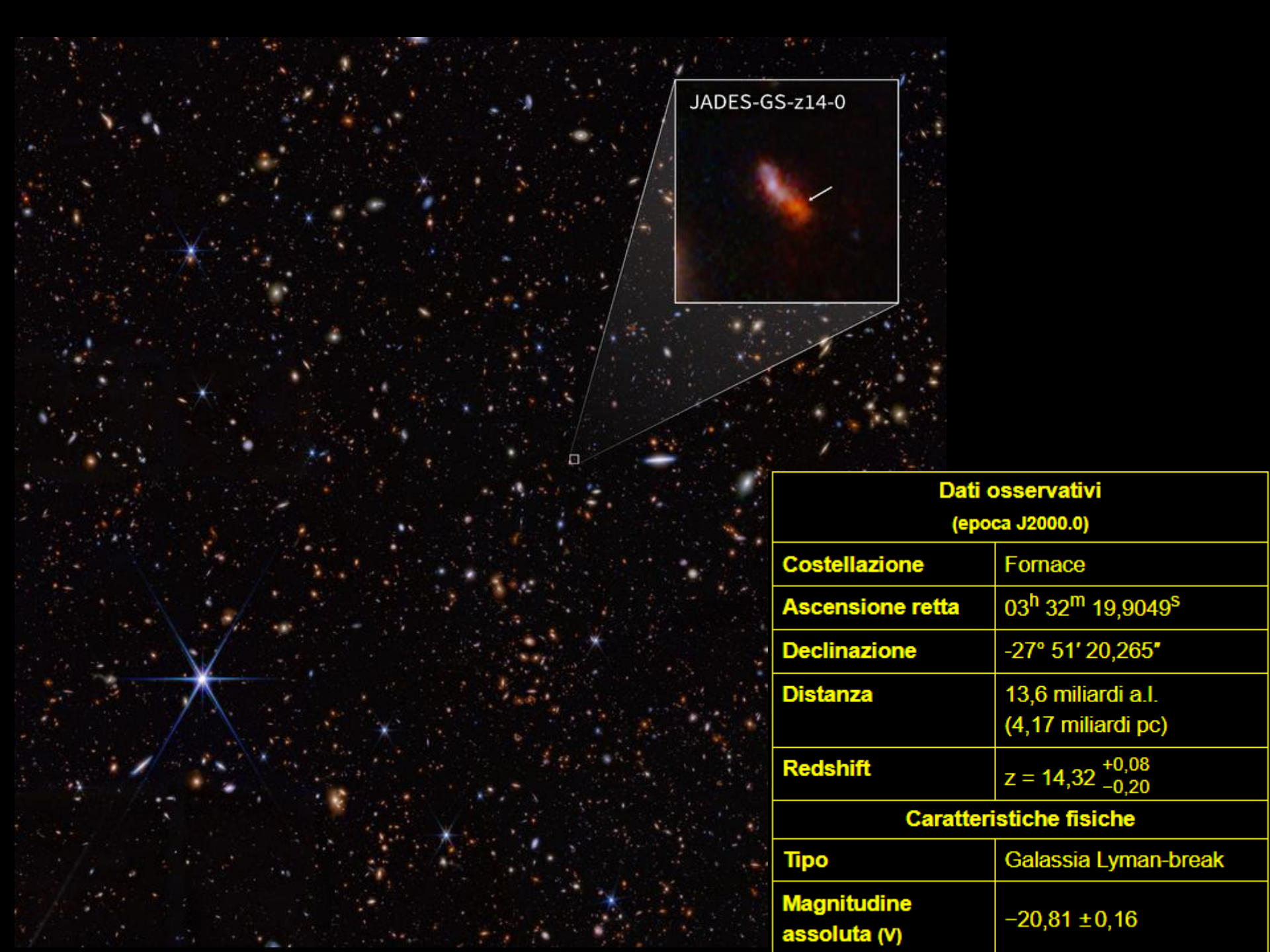
F150W

F115W

| Dati osservativi (epoca J2000.0) | |
|-------------------------------------|--|
| Costellazione | Fornace |
| Ascensione retta | 03 ^h 32 ^m 35,97 ^s |
| Declinazione | -27° 46' 35.4" |
| Distanza | 13,4 miliardi a.l. (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"



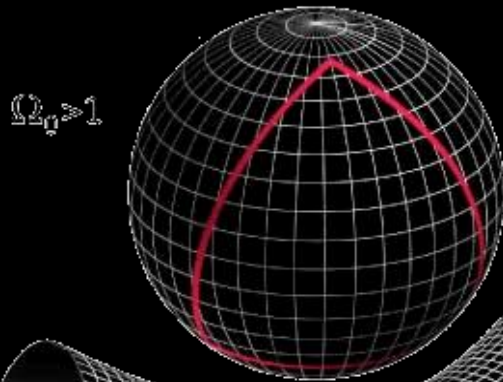


JADES-GS-z14-0

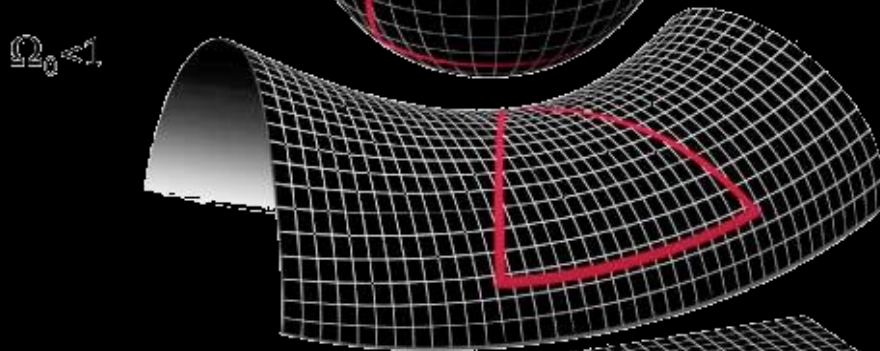
| Dati osservativi (epoca J2000.0) | |
|--|--|
| Costellazione | Fornace |
| Ascensione retta | 03 ^h 32 ^m 19,9049 ^s |
| Declinazione | -27° 51' 20,265" |
| Distanza | 13,6 miliardi a.l. (4,17 miliardi pc) |
| Redshift | $z = 14,32^{+0,08}_{-0,20}$ |
| Caratteristiche fisiche | |
| Tipo | Galassia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

La forma dell'Universo

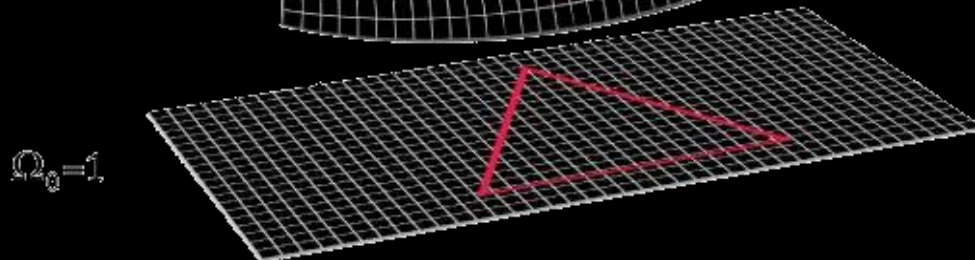
IN UN UNIVERSO ISOTROPO ED OMOGENEO LO SPAZIO-TEMPO,
CURVATO DALLA PRESENZA DELLA MATERIA/ENERGIA, PUO'
ASSUMERE SOLO TRE FORME:



UNIVERSO CHIUSO: FINITO



UNIVERSO APERTO: INFINITO



UNIVERSO PIATTO: INFINITO

Equazioni di Friedmann

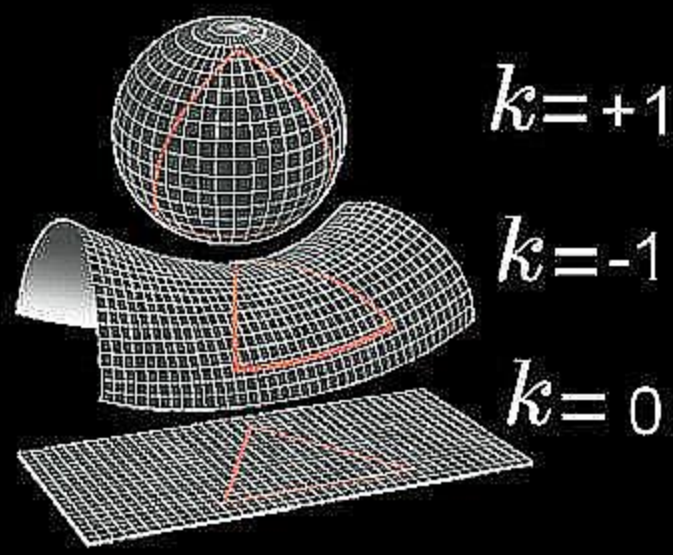
$$\dot{R} = \left[R^2 \frac{8\pi G \rho + \Lambda c^2}{3} - k c^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

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

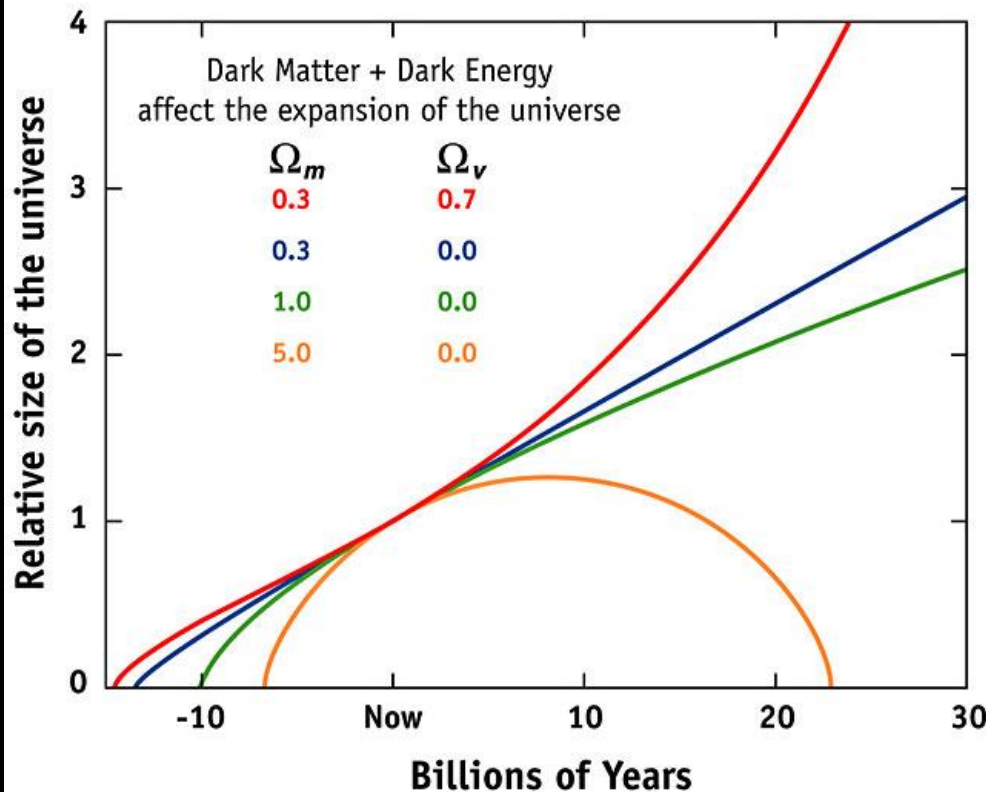
- R = Raggio dell'Universo
- \dot{R} = Velocità di espansione
- \ddot{R} = Accelerazione dell'espansione
- ρ = Densità media della materia
- p = Pressione
- c = Velocità della luce
- G = Costante di Gravitazione Universale
- Λ = Costante cosmologica
- k = Parametro di curvatura



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



EXPANSION OF THE UNIVERSE



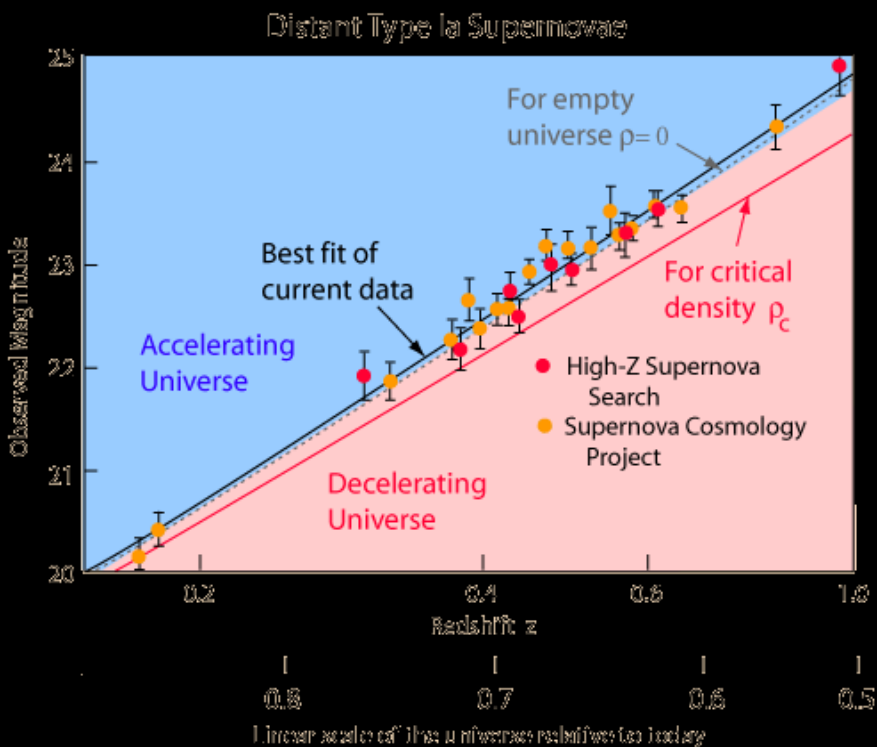
IN UN UNIVERSO COMPLETAMENTE
DOMINATO DALLA MATERIA
L'ESPANSIONE E'
REGOLATA DAL RAPPORTO
TRA LA DENSITA' CRITICA (ρ_c)
E LA DENSITA' OSSERVATA (ρ)

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

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

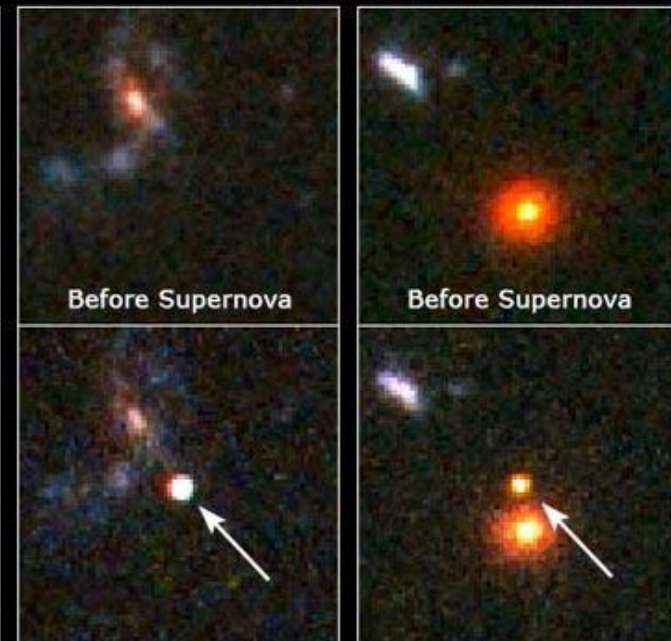


Distant Supernovae



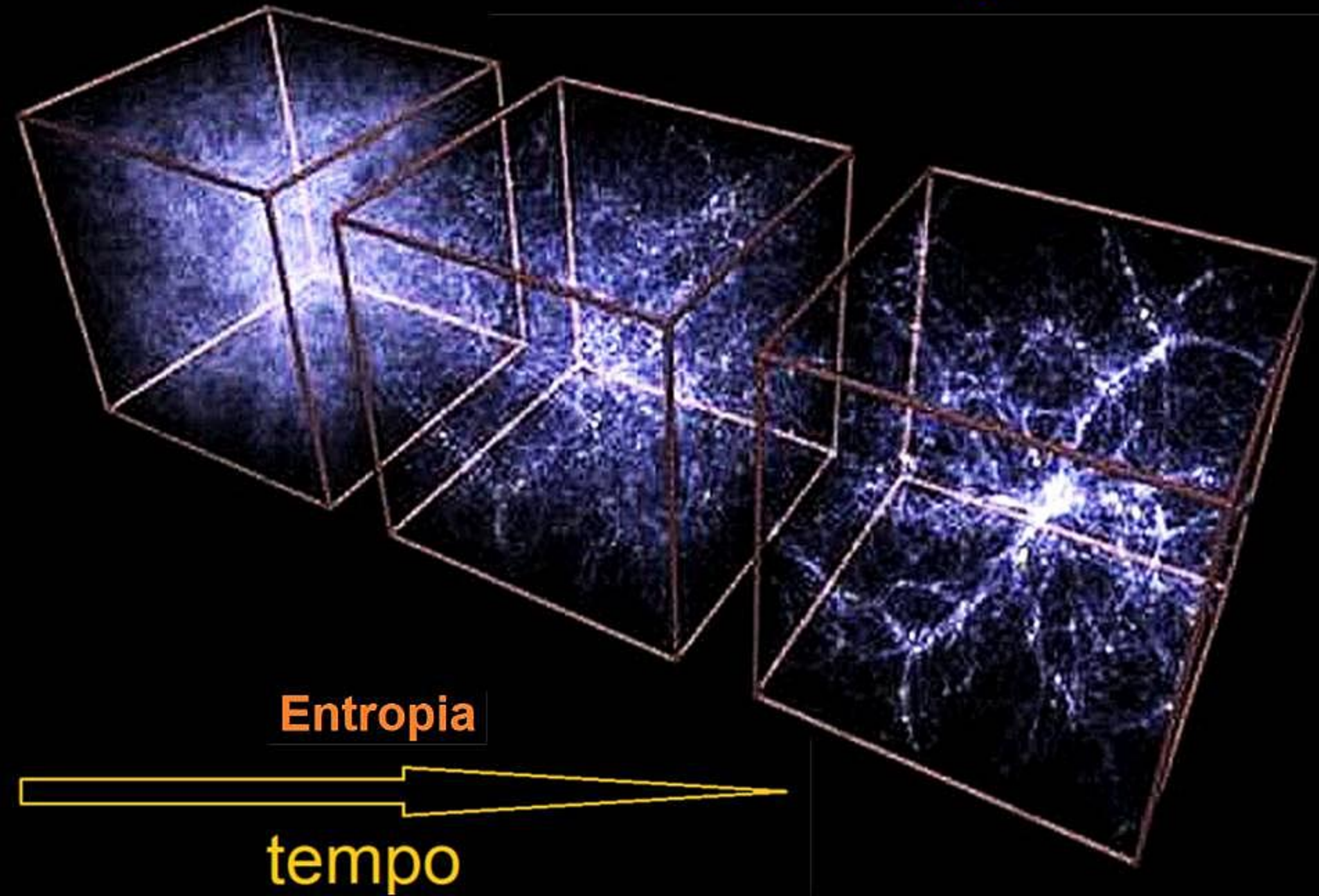
NASA and A. Riess (STScI)

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

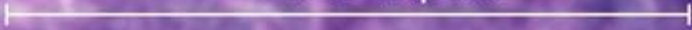
G = costante di gravitazione universale $6.674\,08(31) \times 10^{-11} \quad \text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$

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

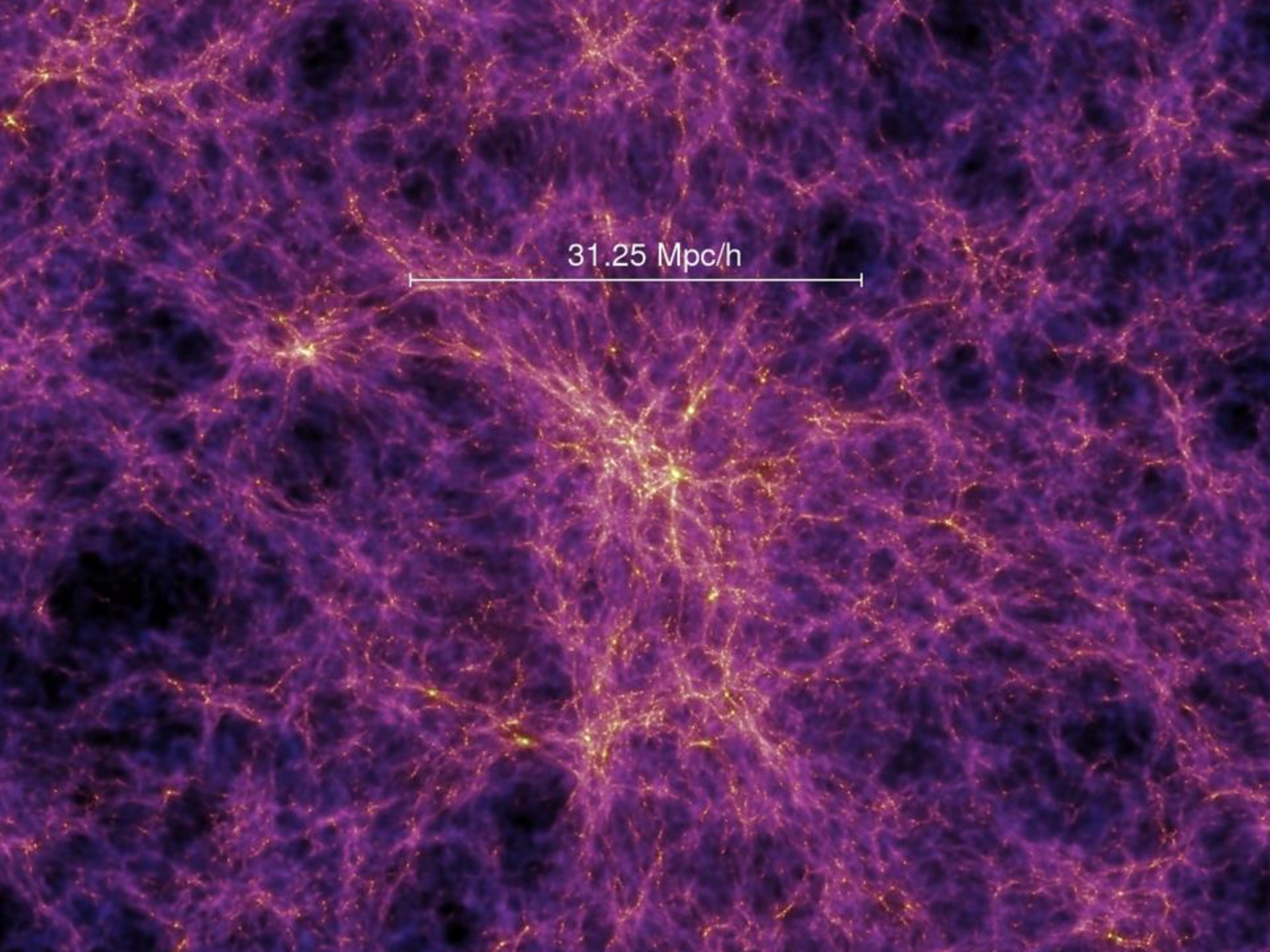
c = velocità della luce nel vuoto $299\,792\,458 \quad \text{m s}^{-1}$

FLUTTUAZIONI PRIMORDIALI DI DENSITA'

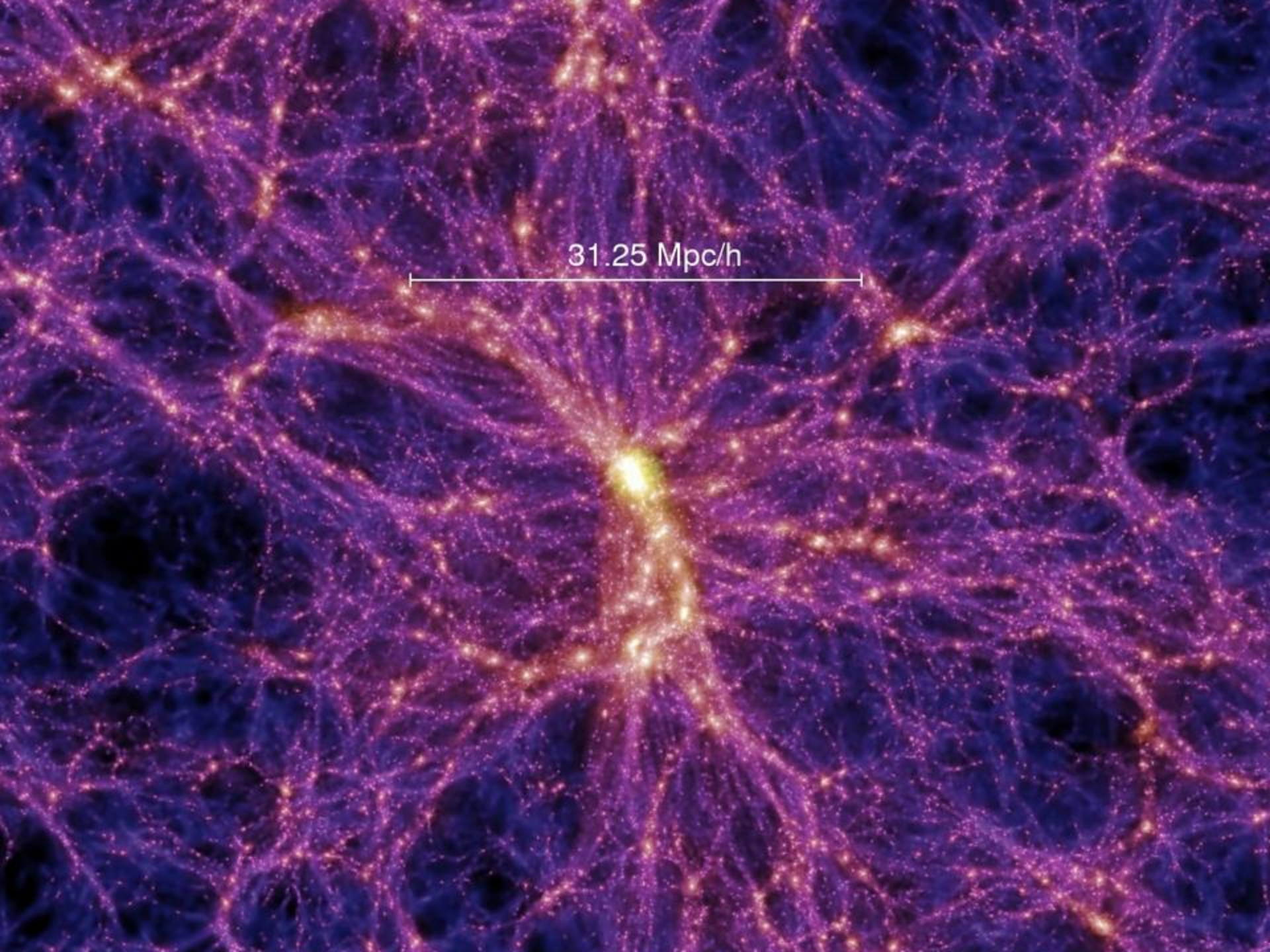
31.25 Mpc/h



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



31.25 Mpc/h

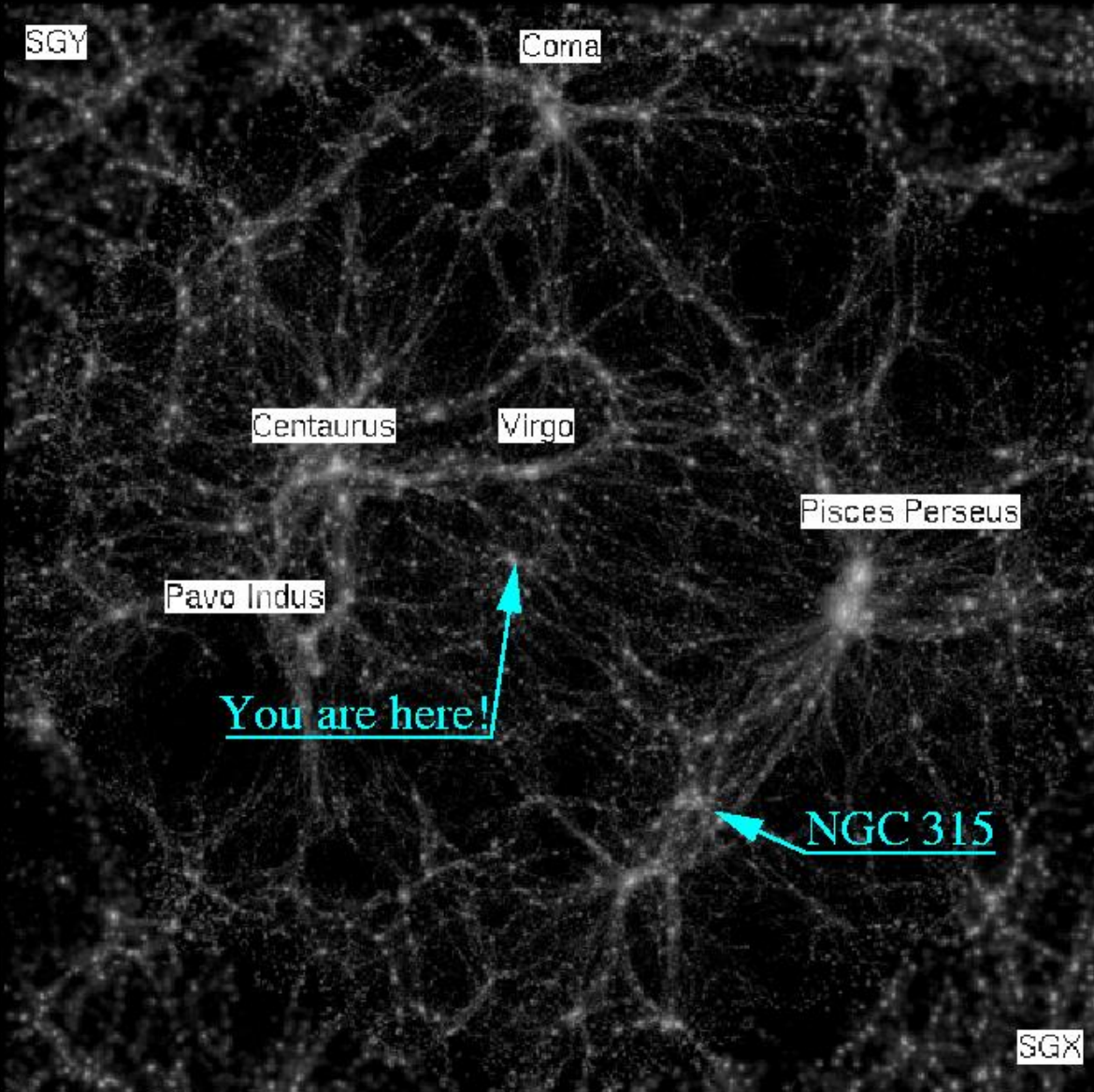


31.25 Mpc/h

GRANDI AMMASSI DI GALASSIE

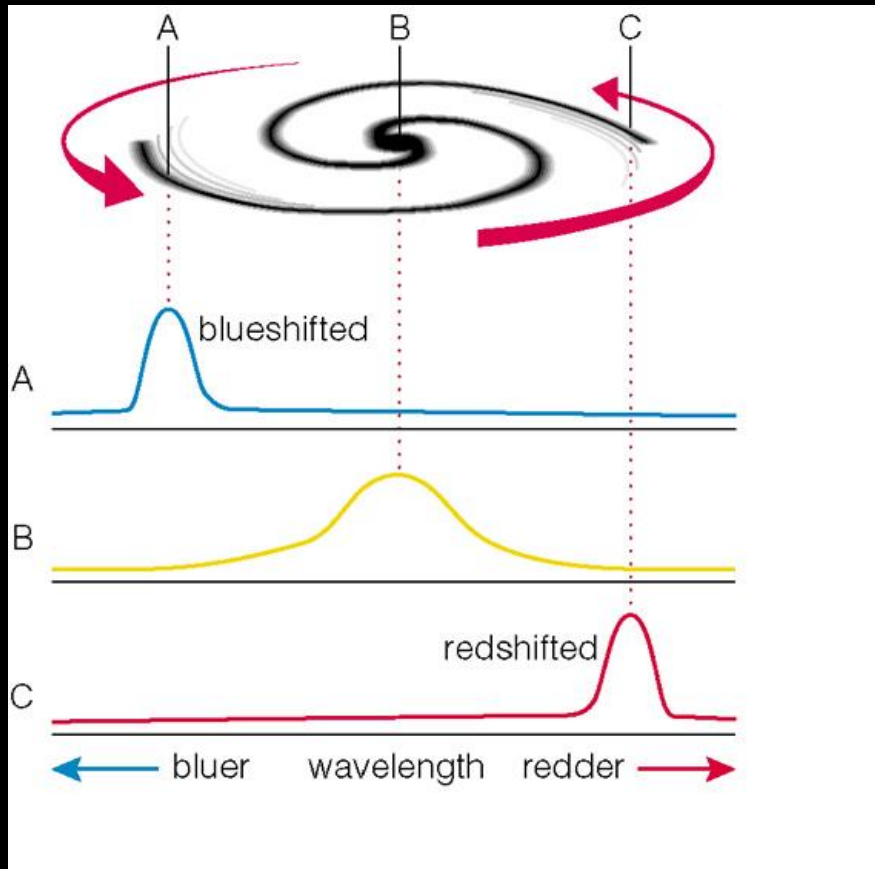
31.25 Mpc/h

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



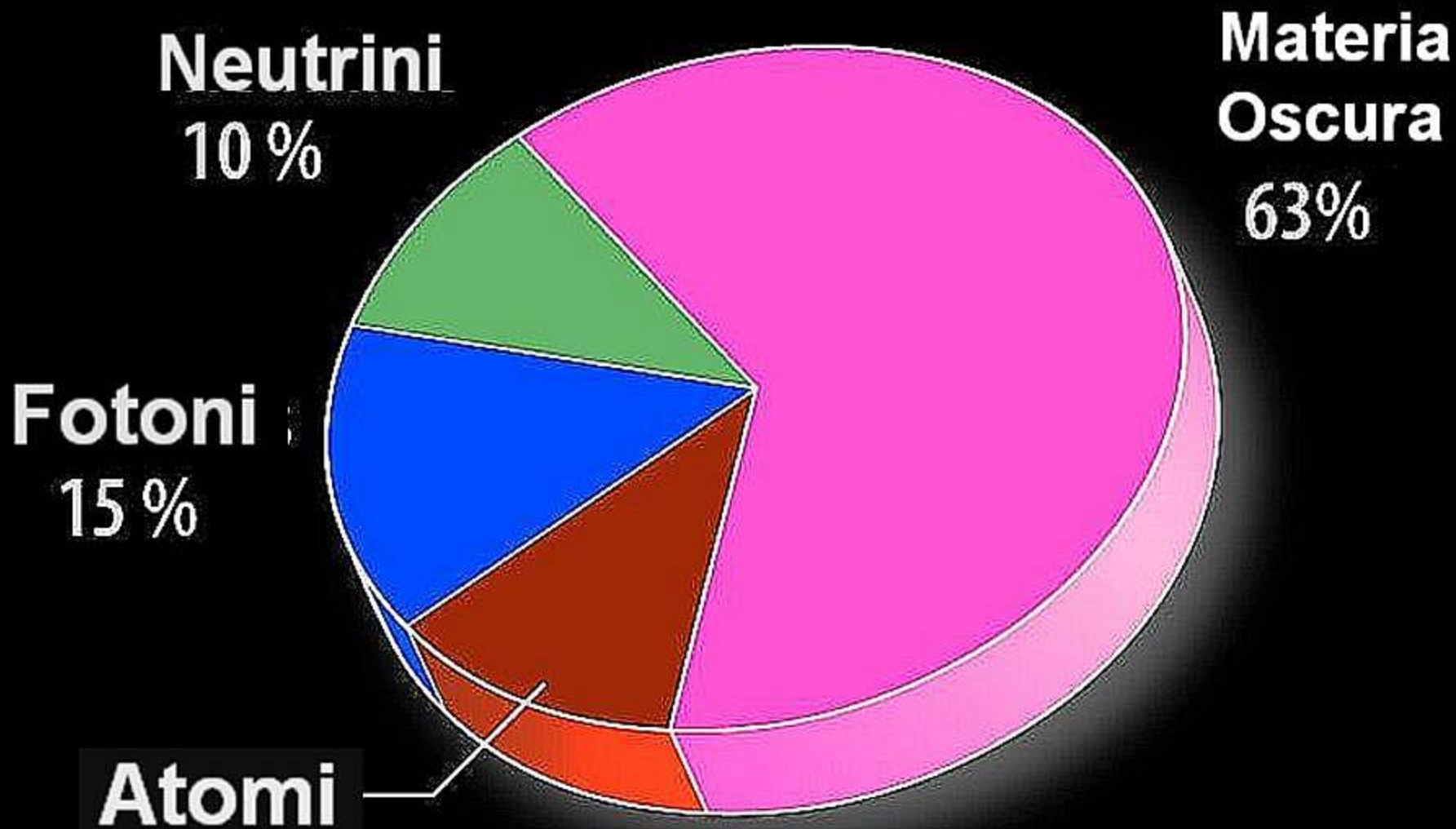
**UNA GALASSIA
DELL'AMMASSO
DELLA VERGINE
E' LA NOSTRA
VIA LATTEA!**

La materia oscura



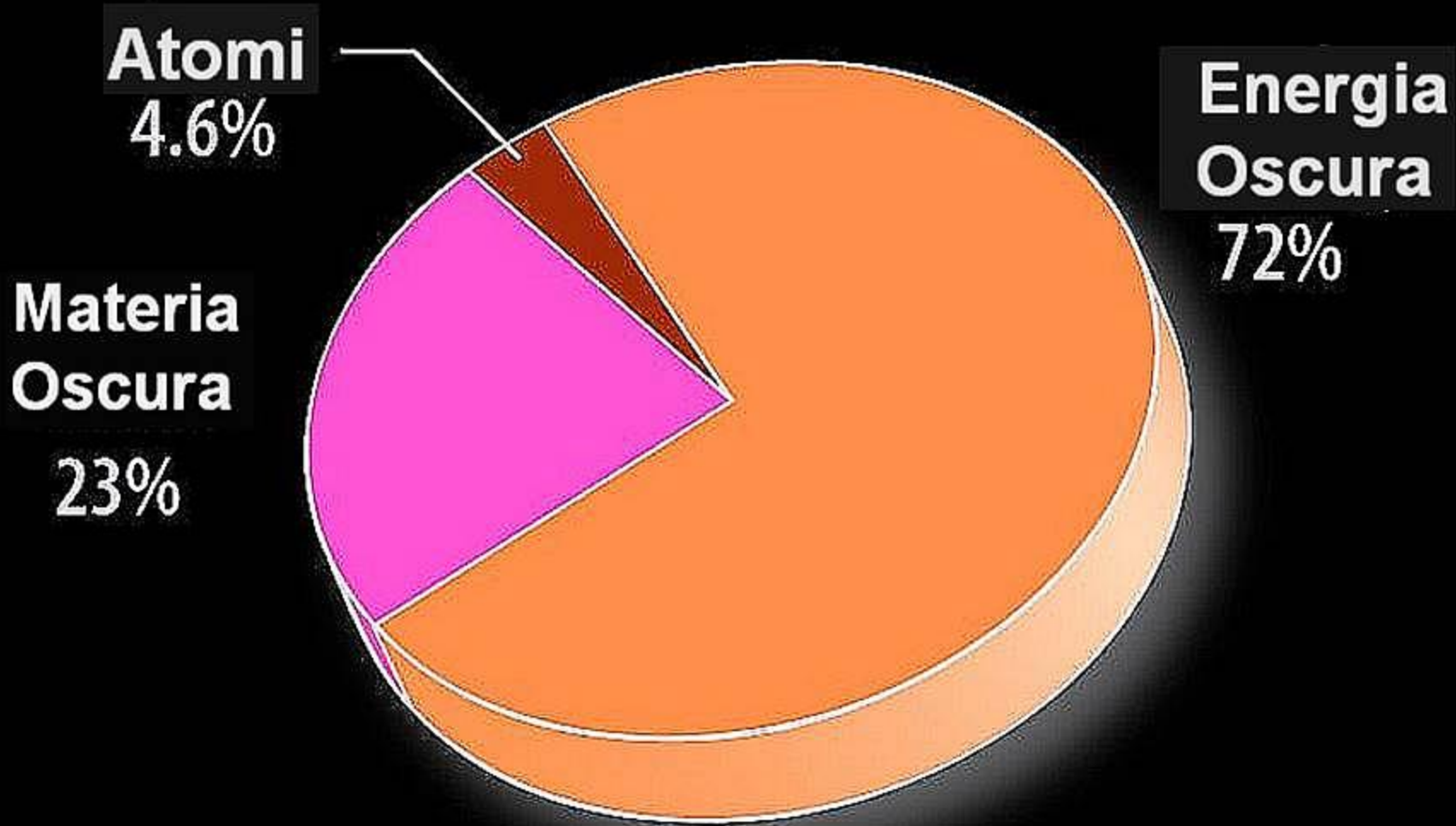
**MISURE EFFETTUATE
SULLA VELOCITA' DI ROTAZIONE
DELLE GALASSIE SPIRALI
HANNO EVIDENZIATO CHE LA
MASSA VISIBILE E' SOLO
UNA PICCOLA FRAZIONE DELLA
MASSA TOTALE DELLE GALASSIE**

**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

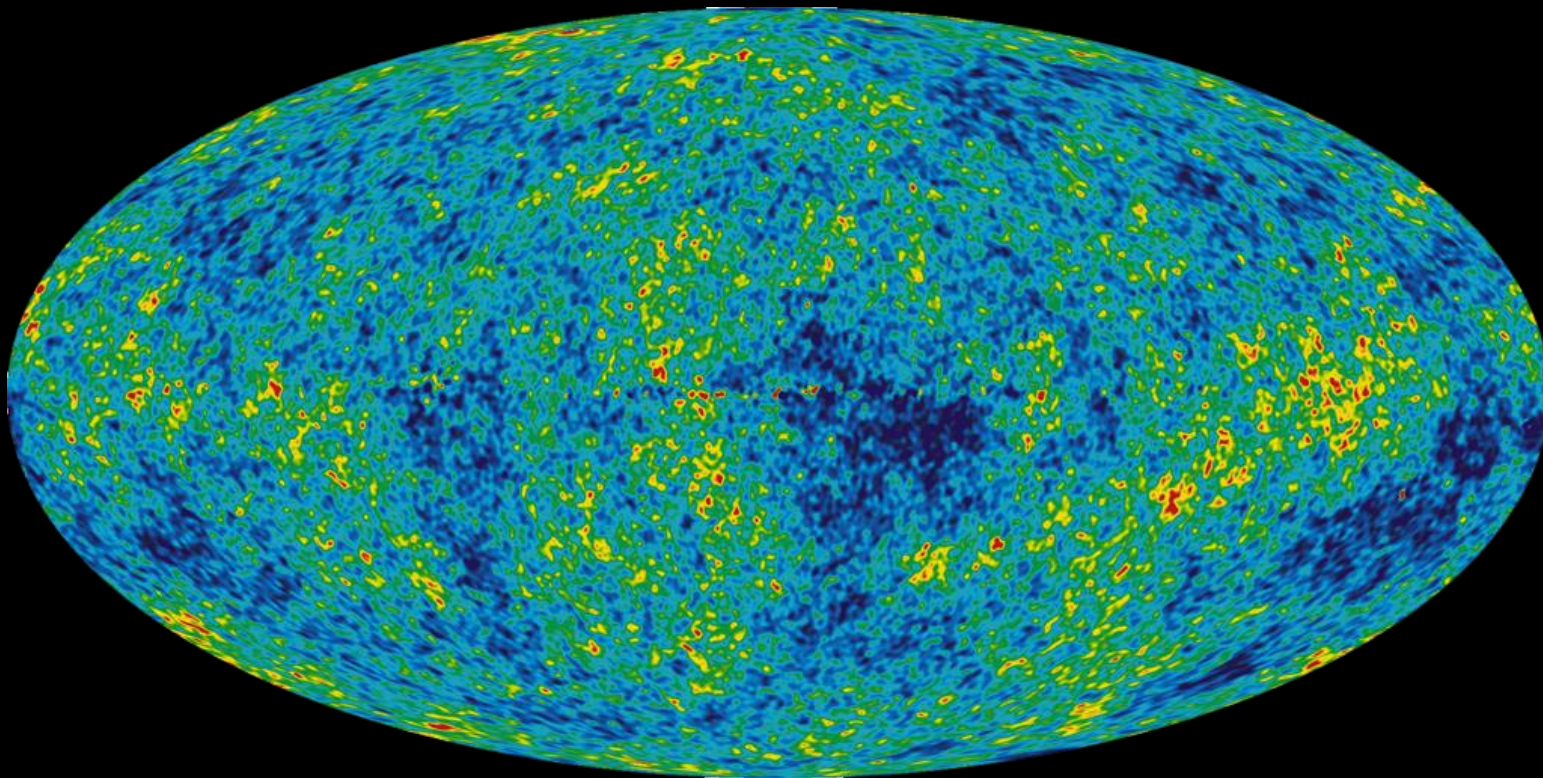
PROVE A FAVORE DEL BIG BANG

-ESPANSIONE DELL' UNIVERSO

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

-RADIAZIONE COSMICA DI FONDO

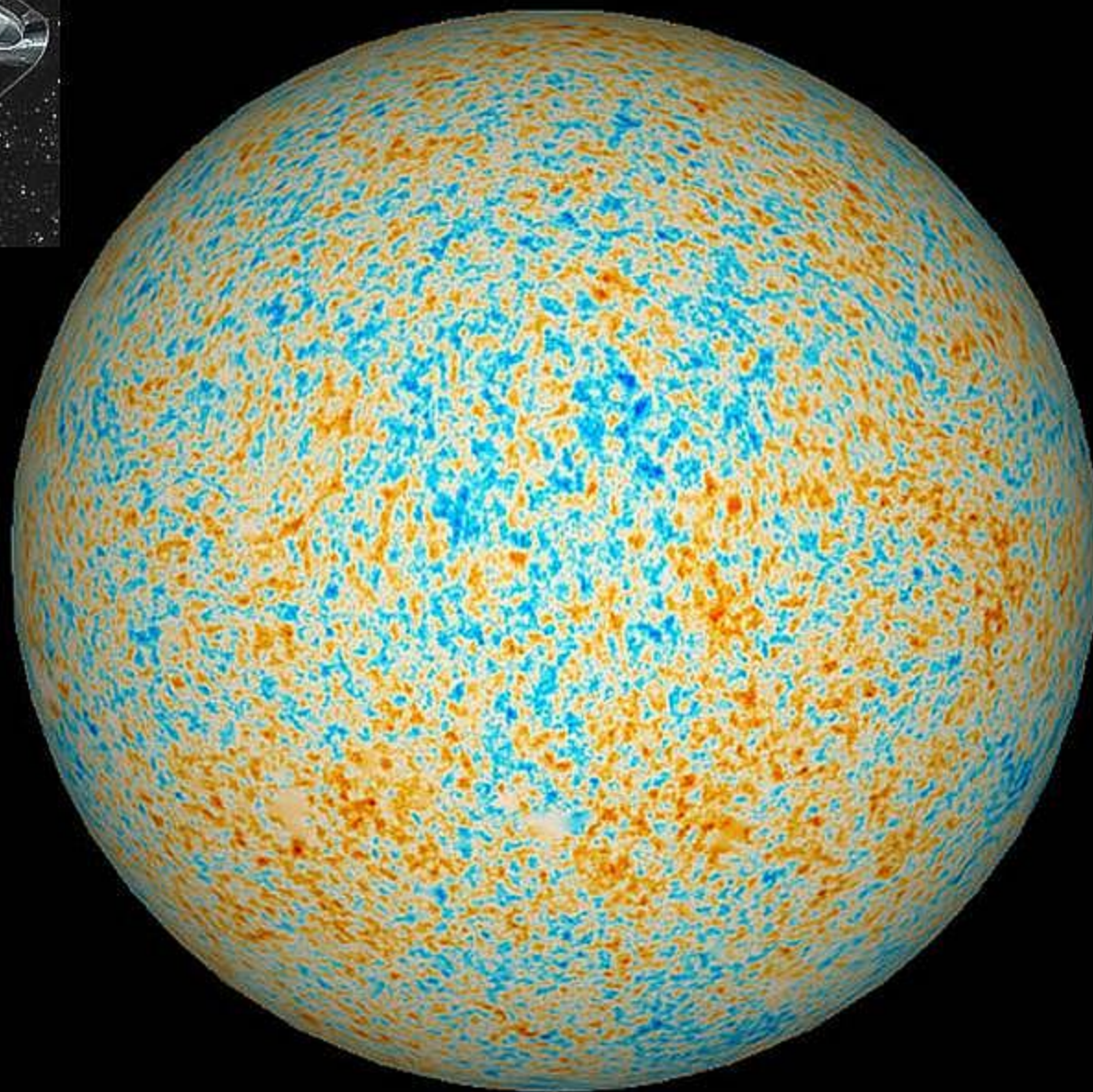
RADIAZIONE COSMICA DI FONDO A 3°K



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

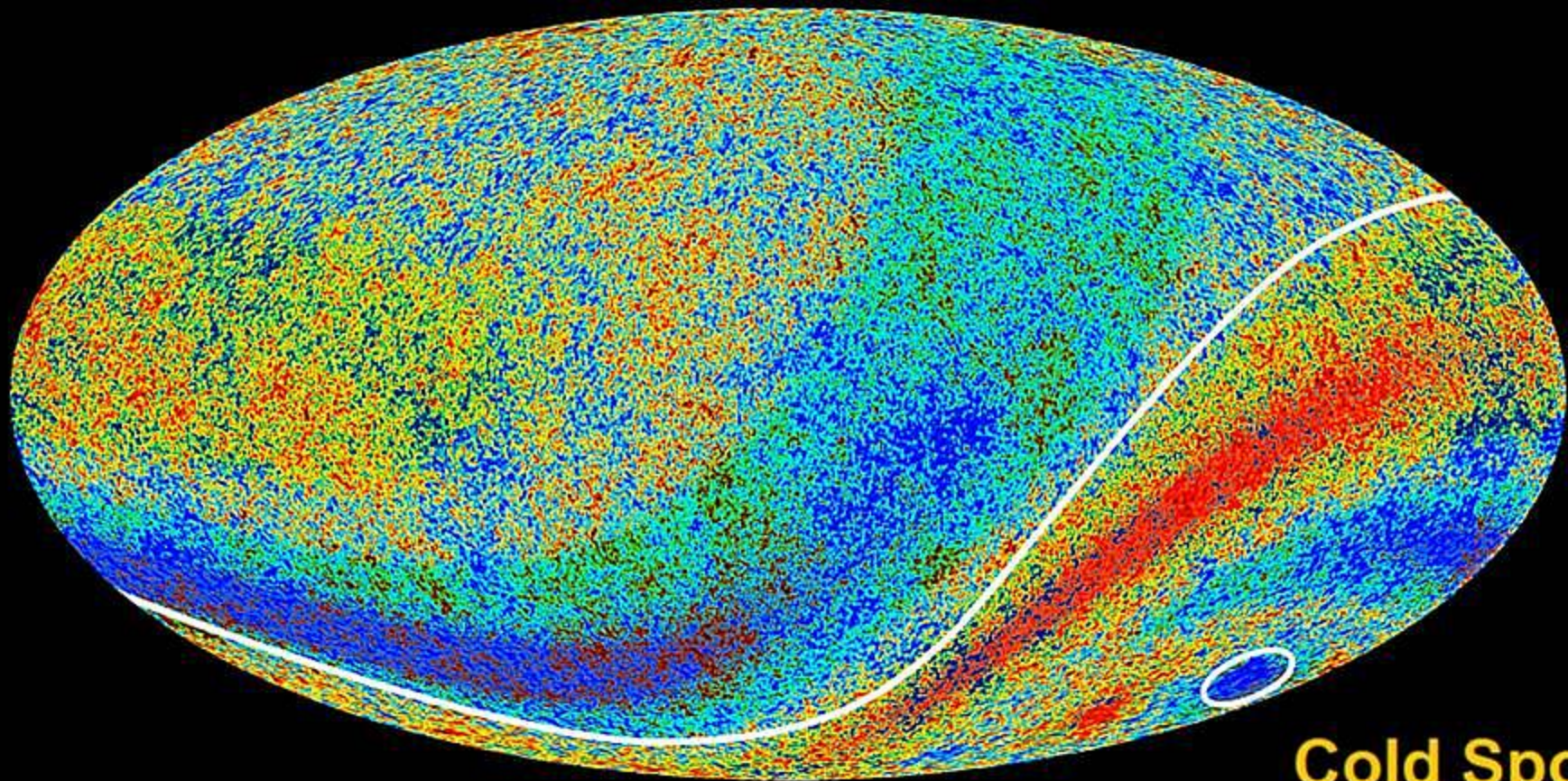


Planck
2018

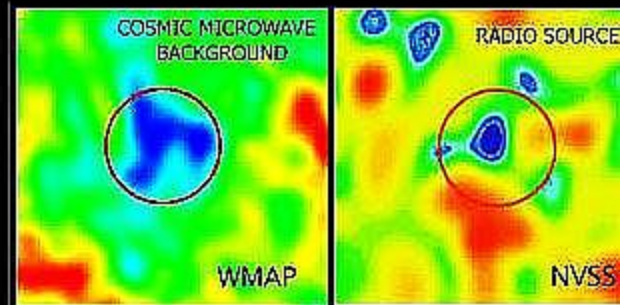


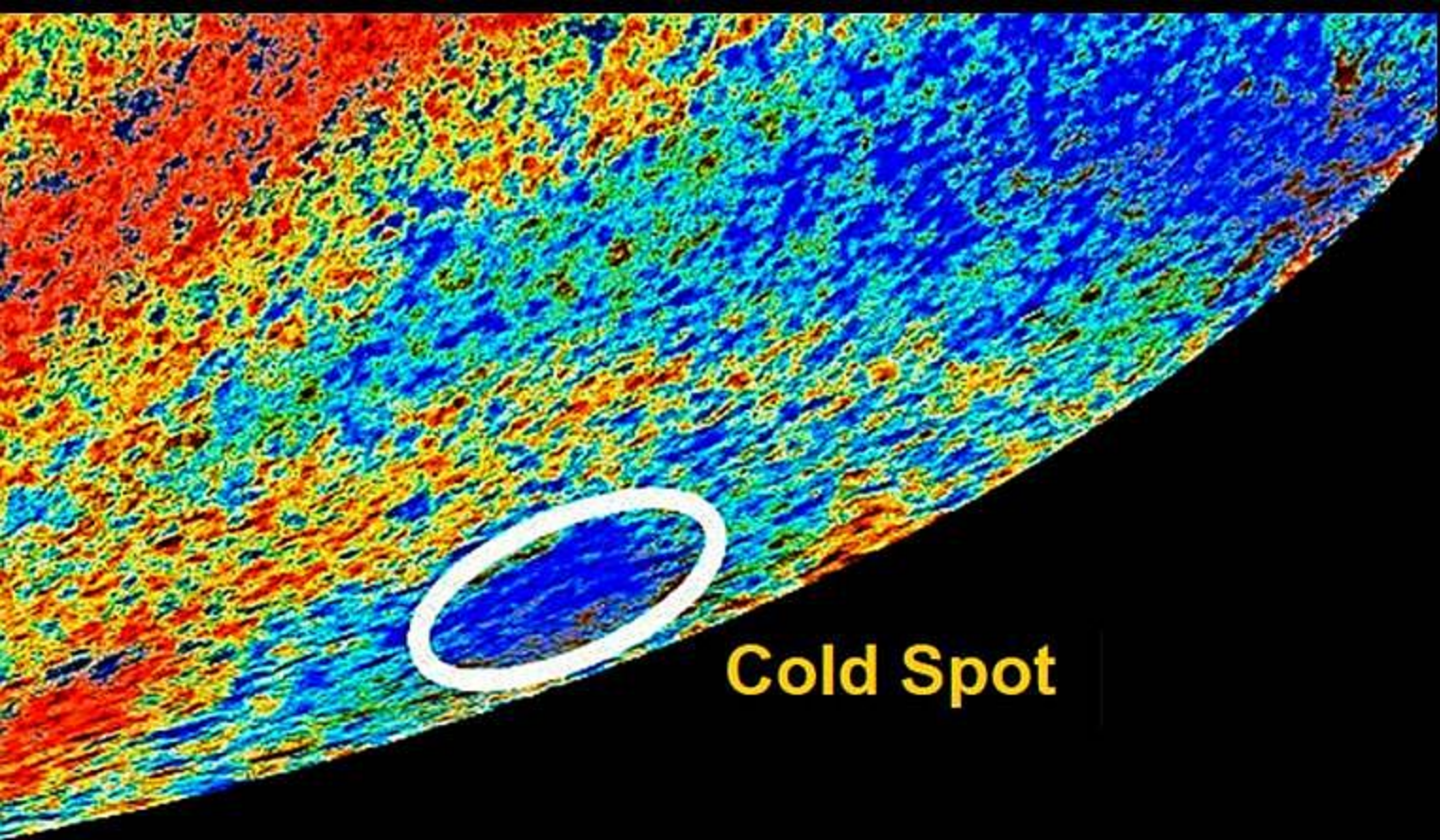
CMB flux (Cosmic Microwaves Background)
anisotropia termica

CMB flux (Cosmic Microwaves Background)



Cold Spot





Cold Spot



Cold Spot

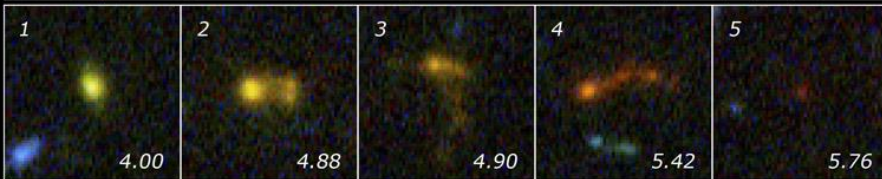
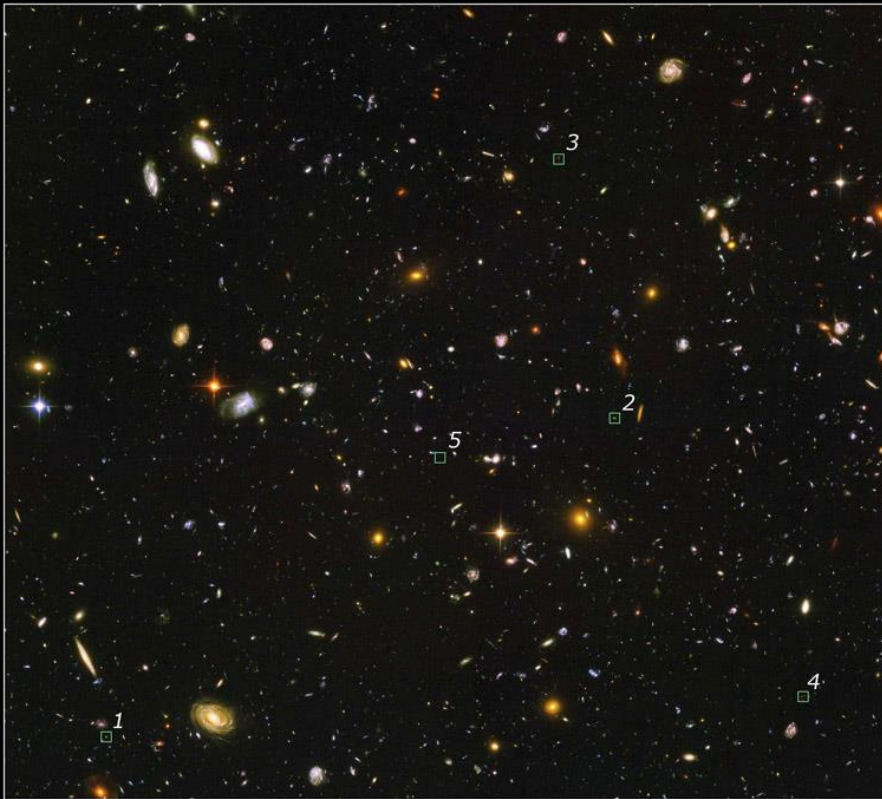
Multiverso



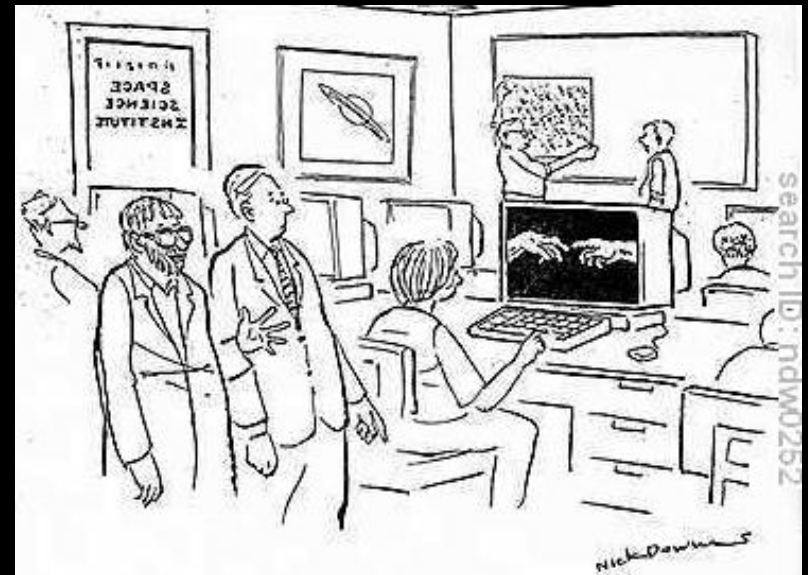
Però...

**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

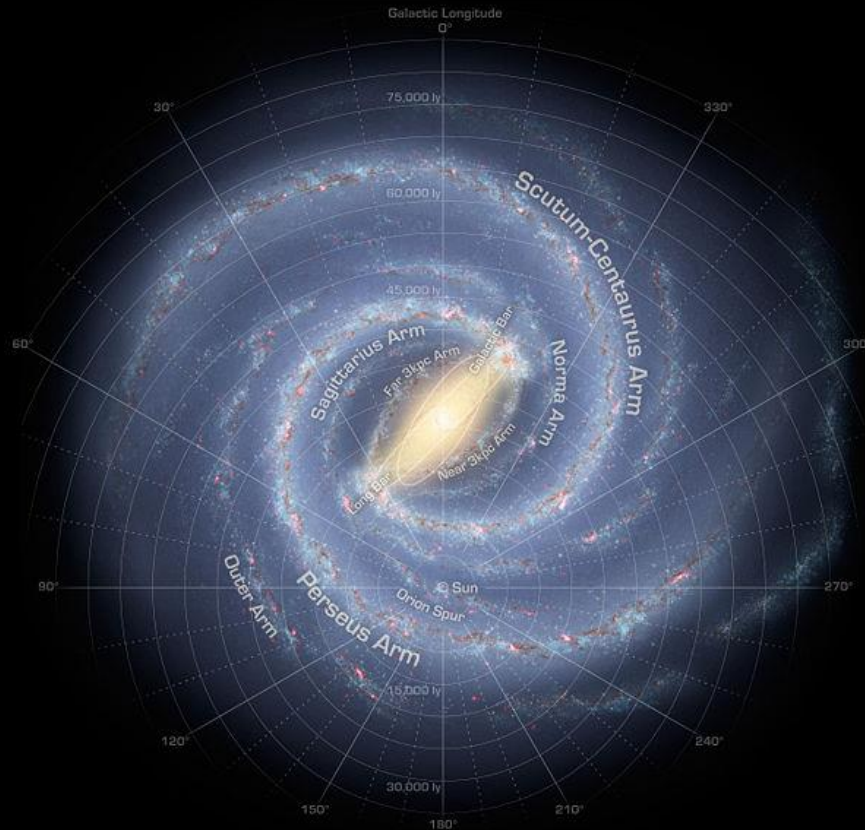


"The Hubble telescope is providing us with incredibly distant images of a very early universe."

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

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

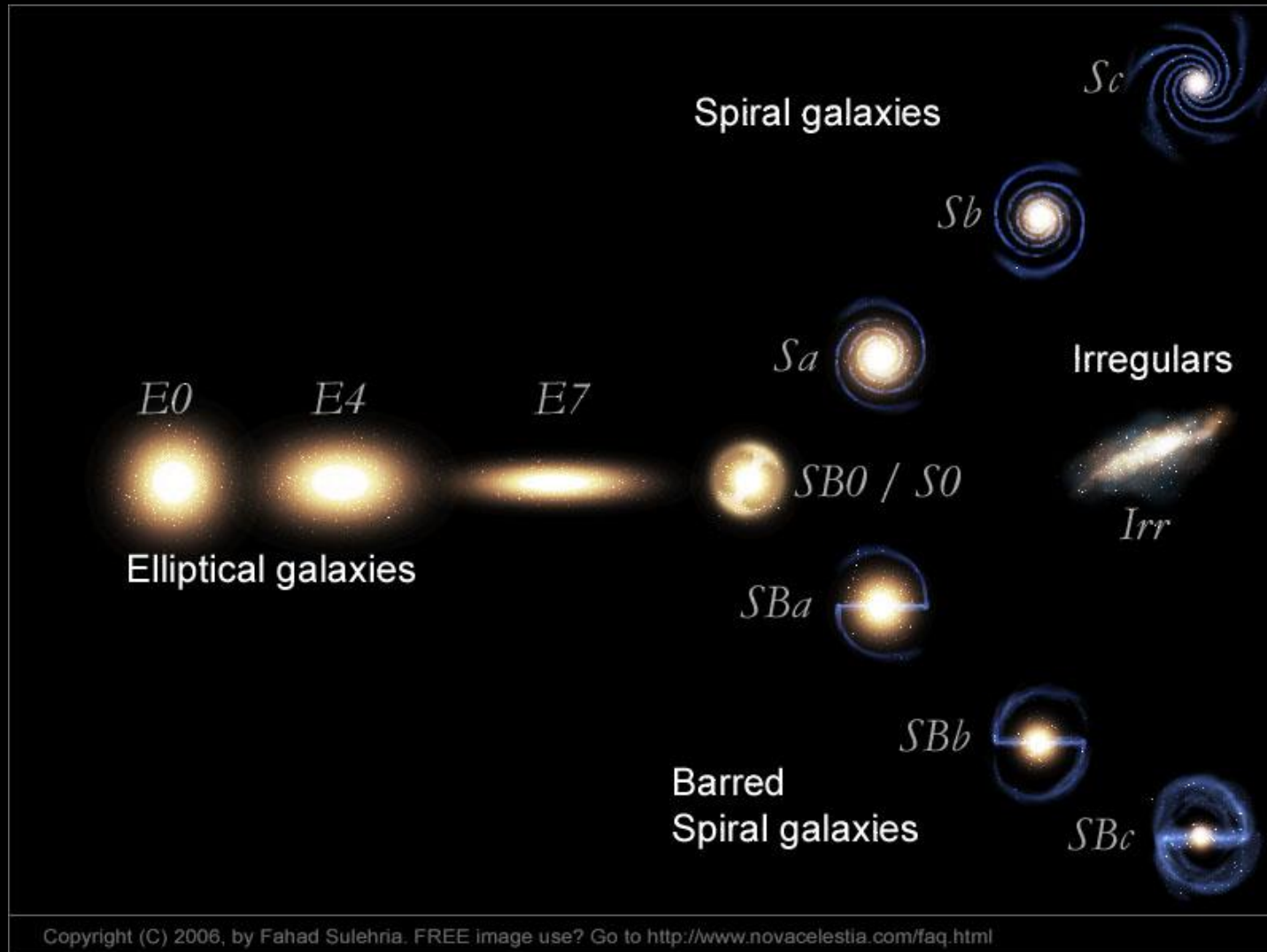
**IL SOLE SI TROVA IN UN PICCOLO
BRACCIO NON COMPLETAMENTE
SVILUPPATO TRA IL BRACCIO
DEL PERSEO E
QUELLO DEL SAGITTARIO**



THE MILKY WAY GALAXY



CLASSIFICAZIONE DELLE GALASSIE DI HUBBLE



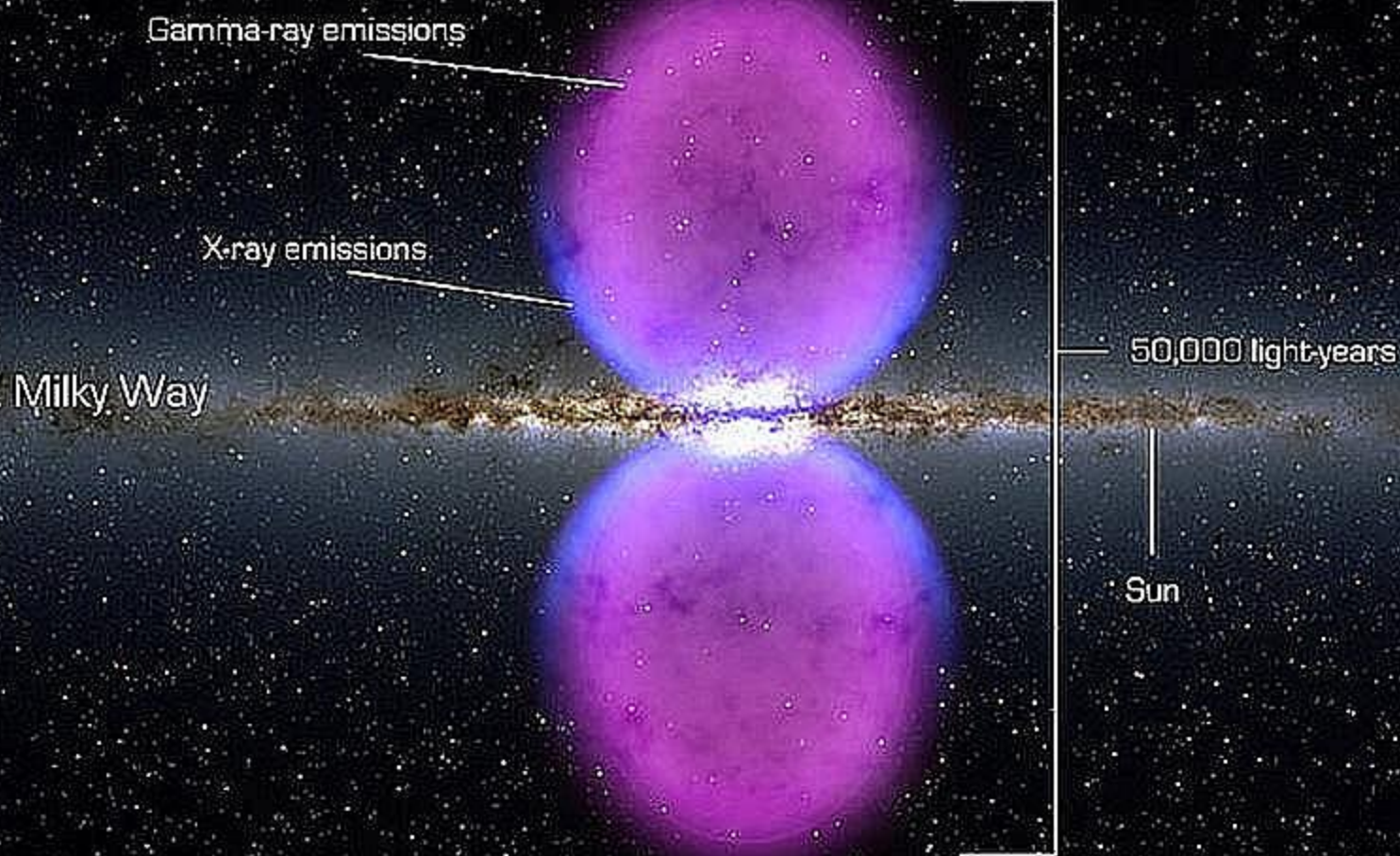
La nostra galassia



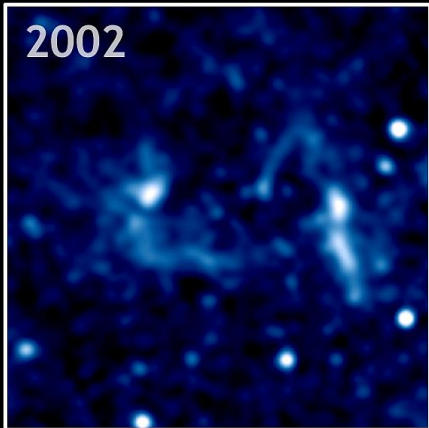
Caratteristiche fisiche

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

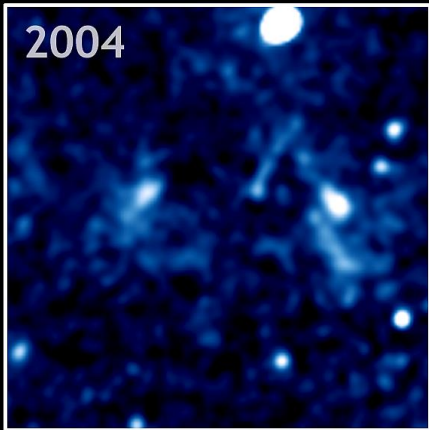
Il centro galattico



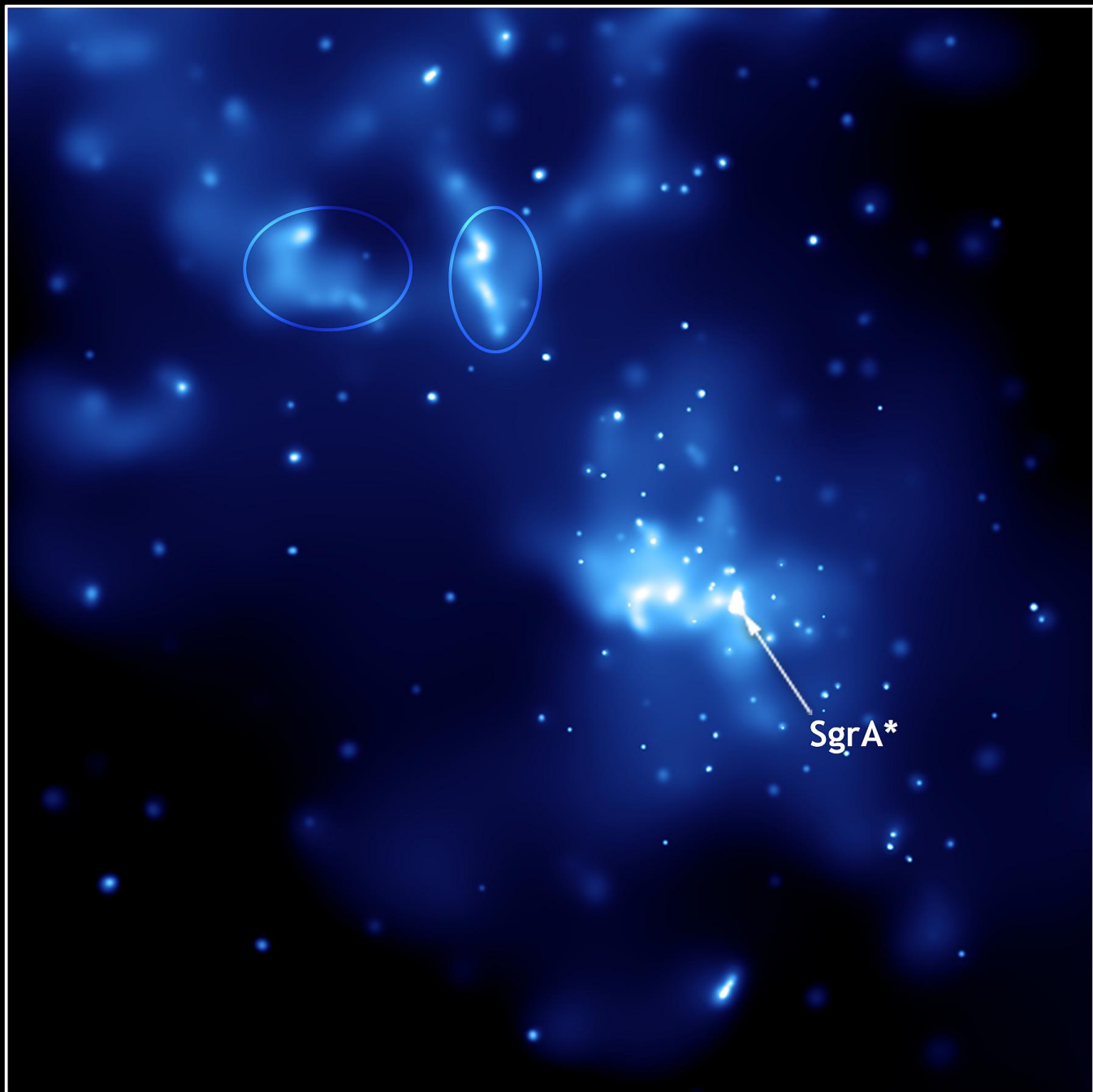
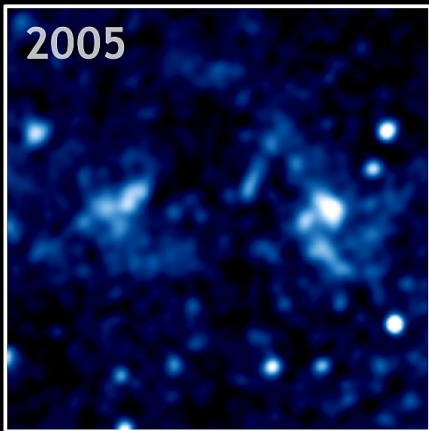
2002



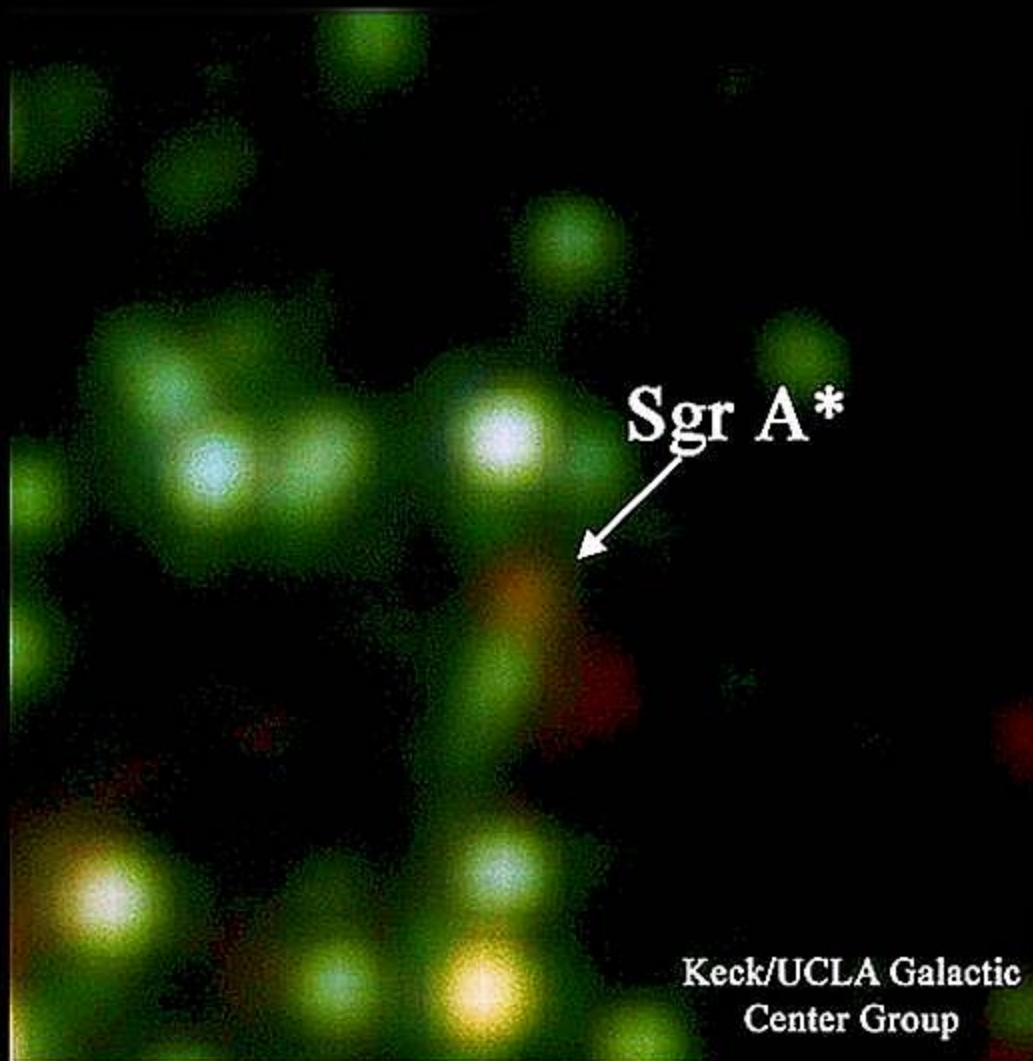
2004



2005

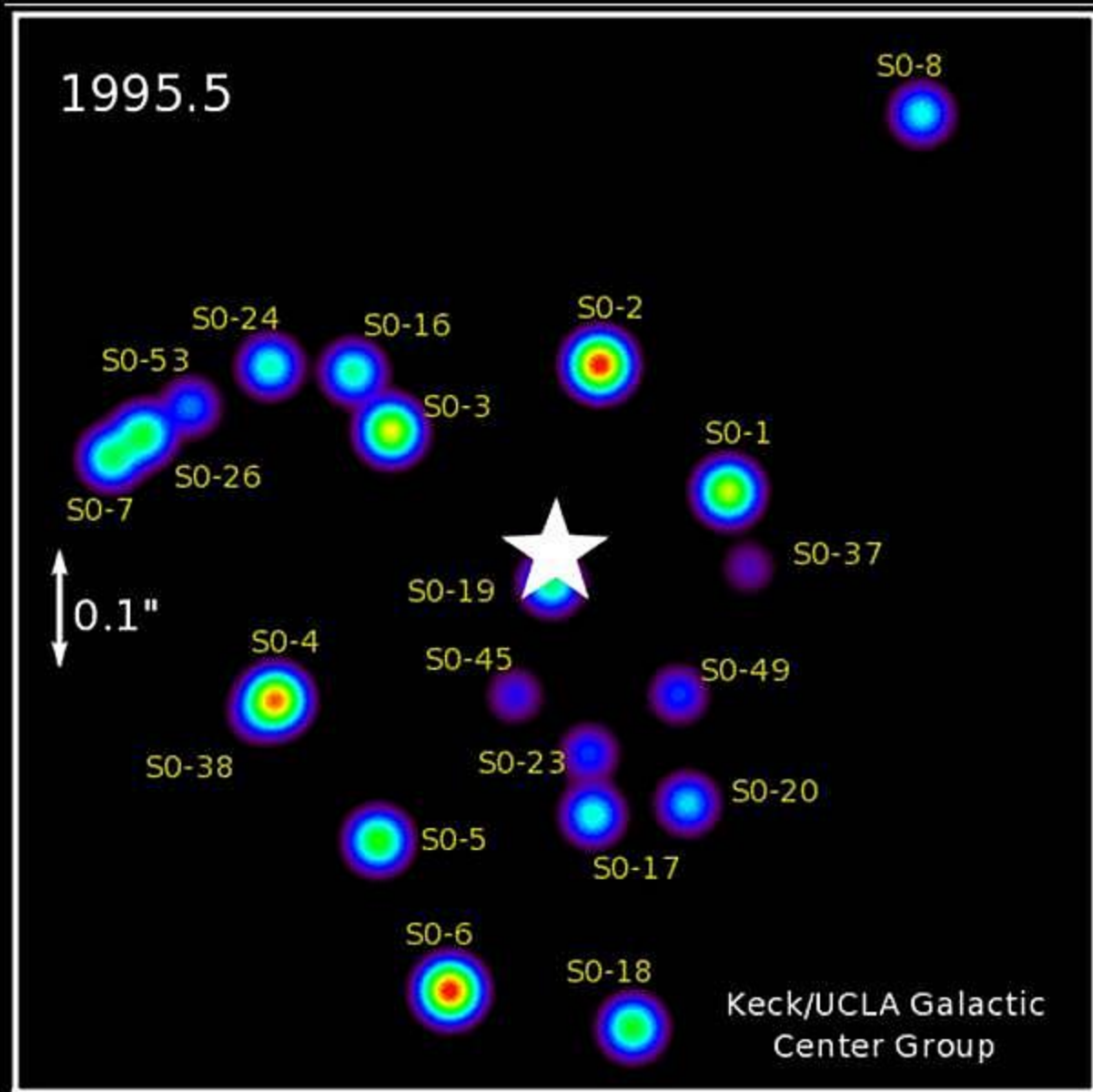


Il buco nero al centro della nostra Galassia



Centro Galattico

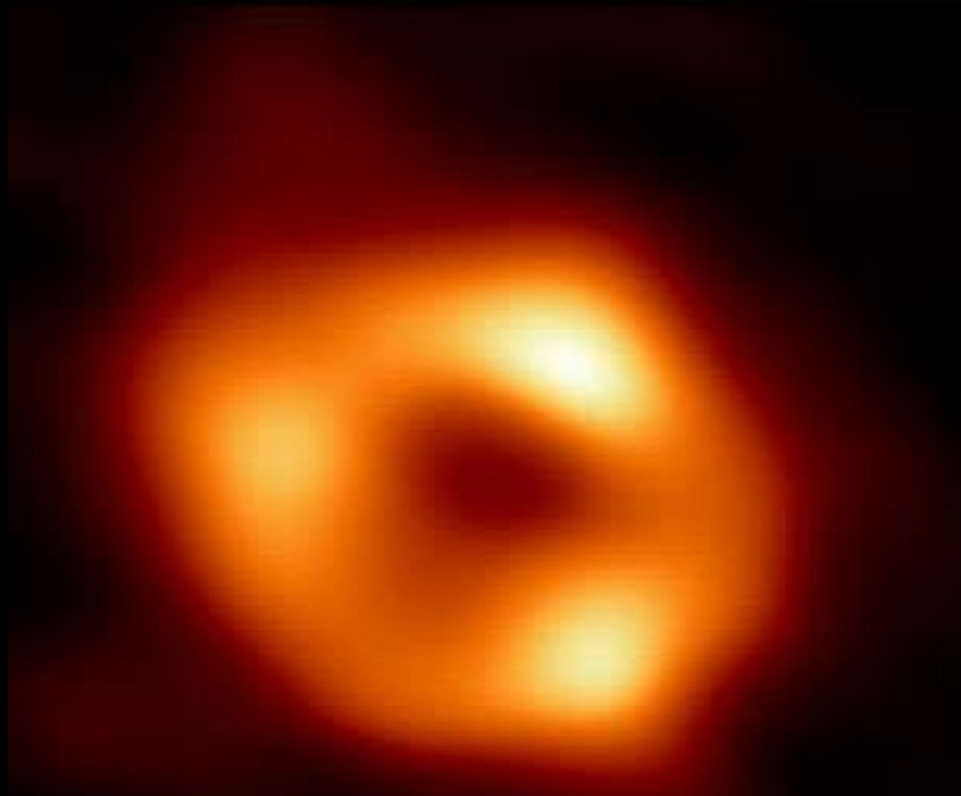
Orbite delle stelle supermassive intorno al buco nero centrale



Sagittarius A

Il centro galattico



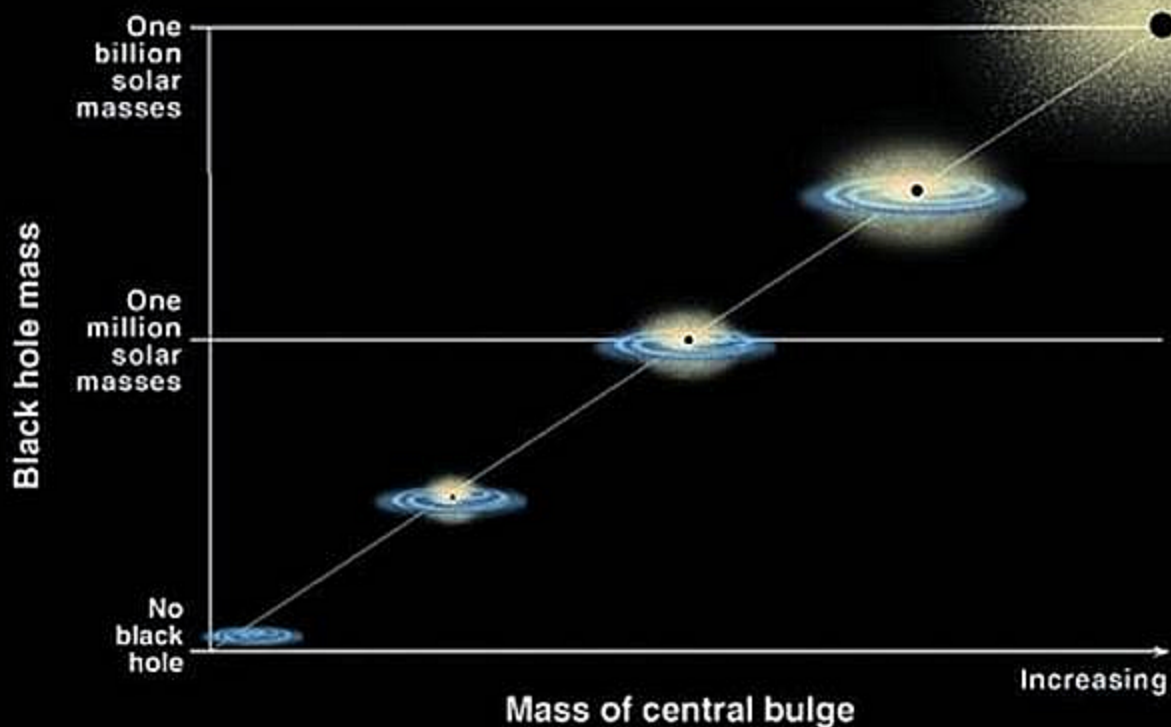


Sagittarius A*

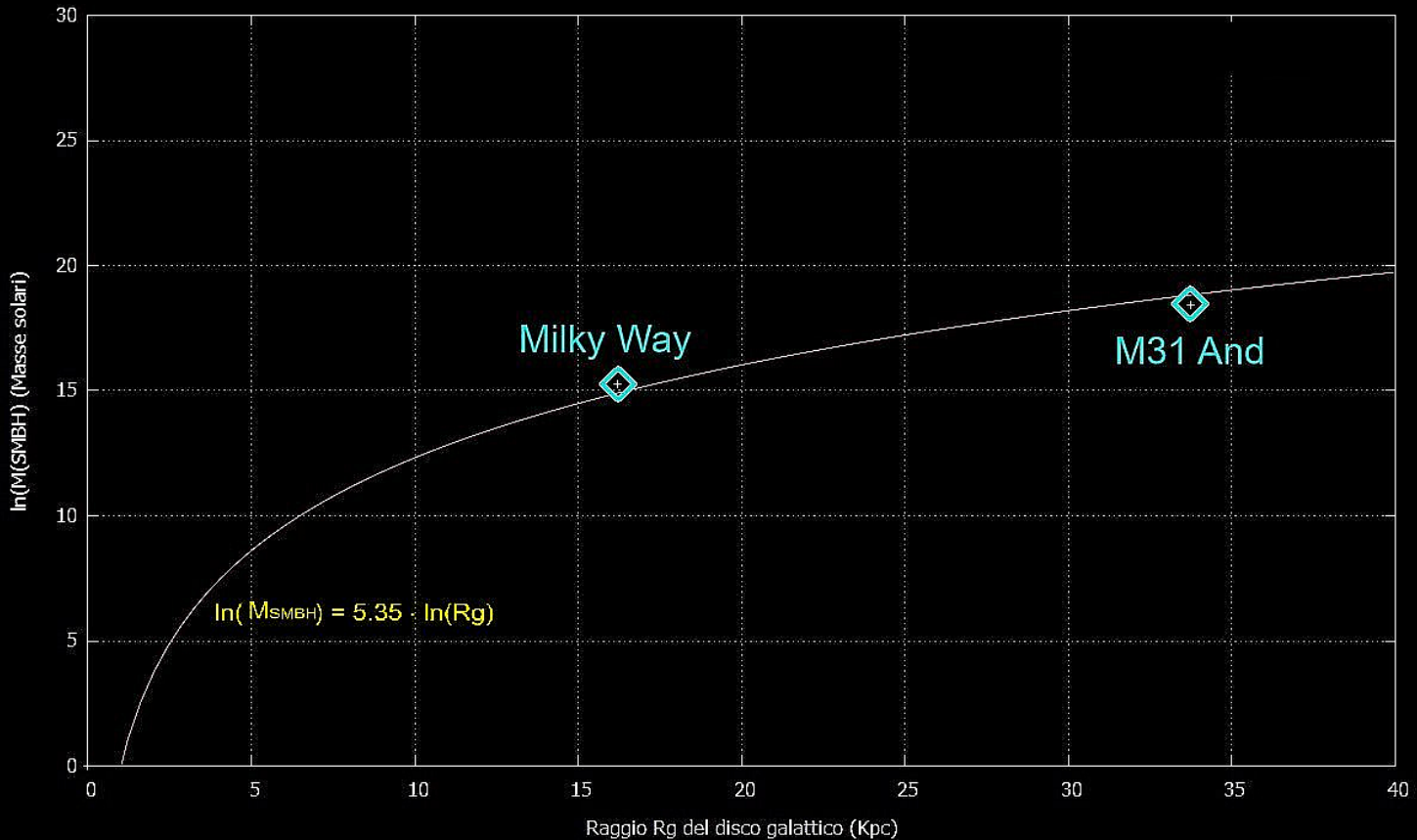
Mappa radio

Buchi neri e formazione delle galassie

Correlation Between Black Hole Mass and Bulge Mass



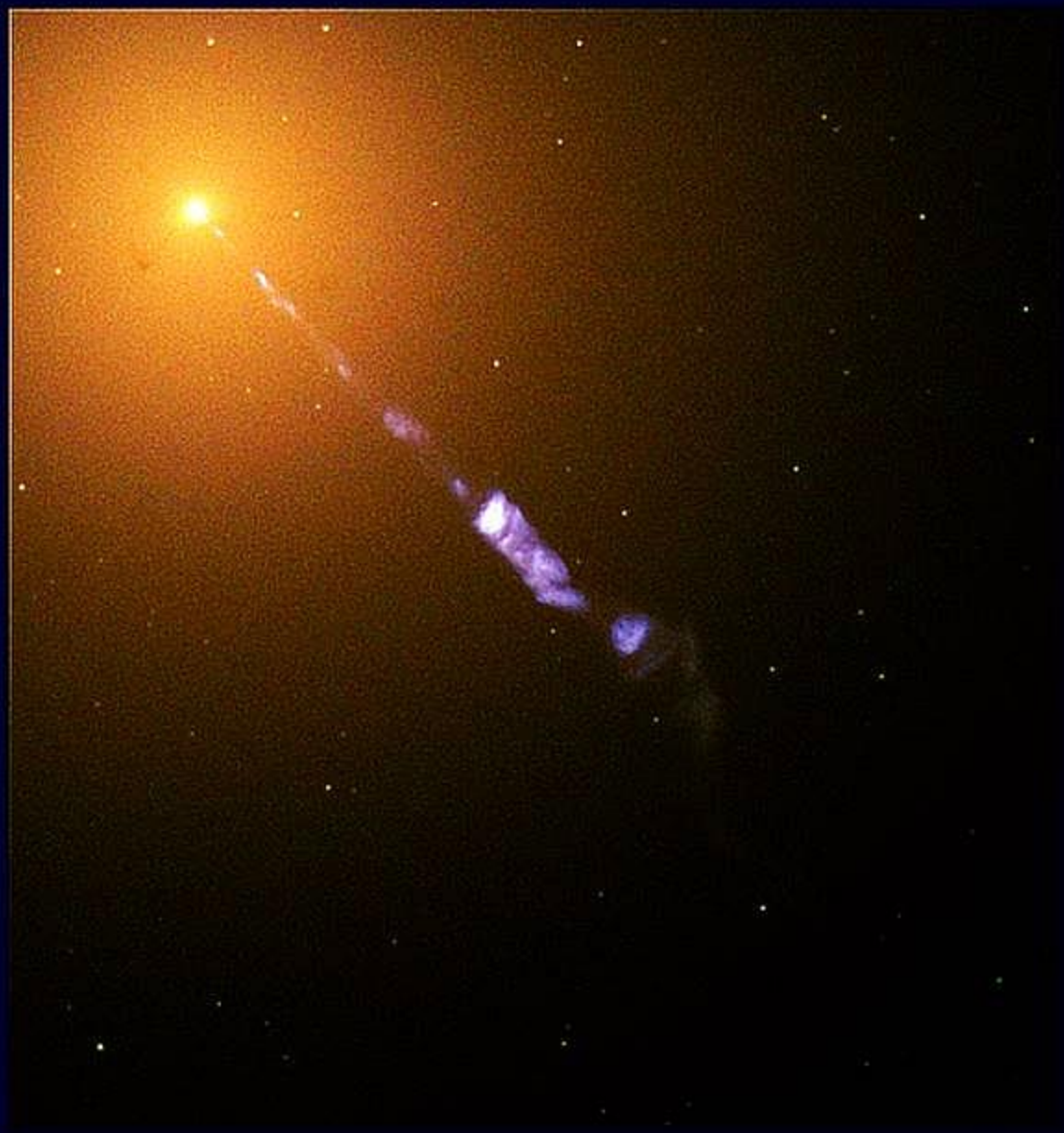
Relazione statistica tra il raggio del disco di una galassia a spirale e la massa del buco nero centrale



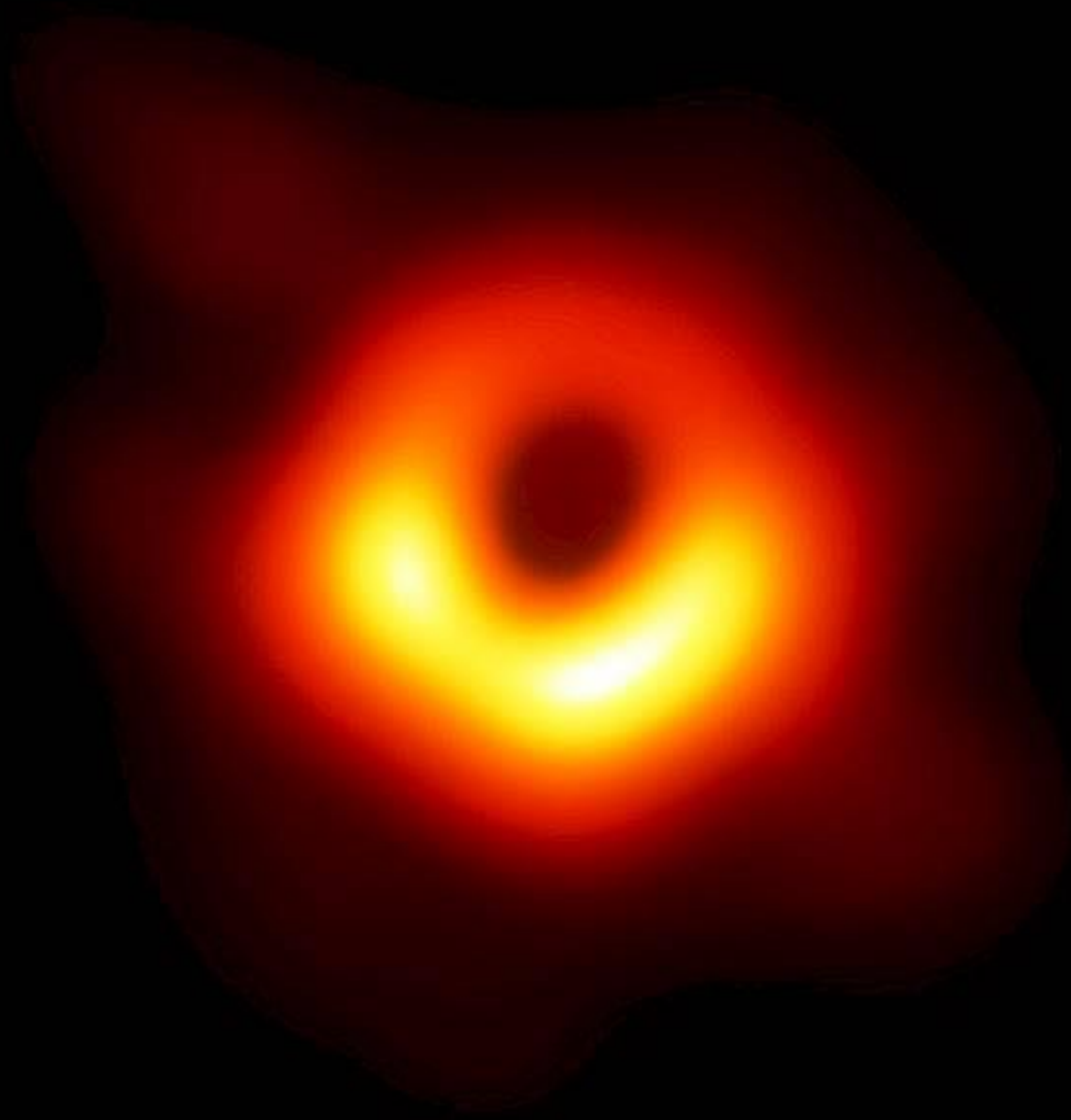
La relazione approssimata tra il raggio Rg del disco galattico, espresso in Kpc e la massa M_{SMBH} del buco nero centrale espressa in Masse solari M_{\odot} è data da:

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

M87



M87



Mappa radio

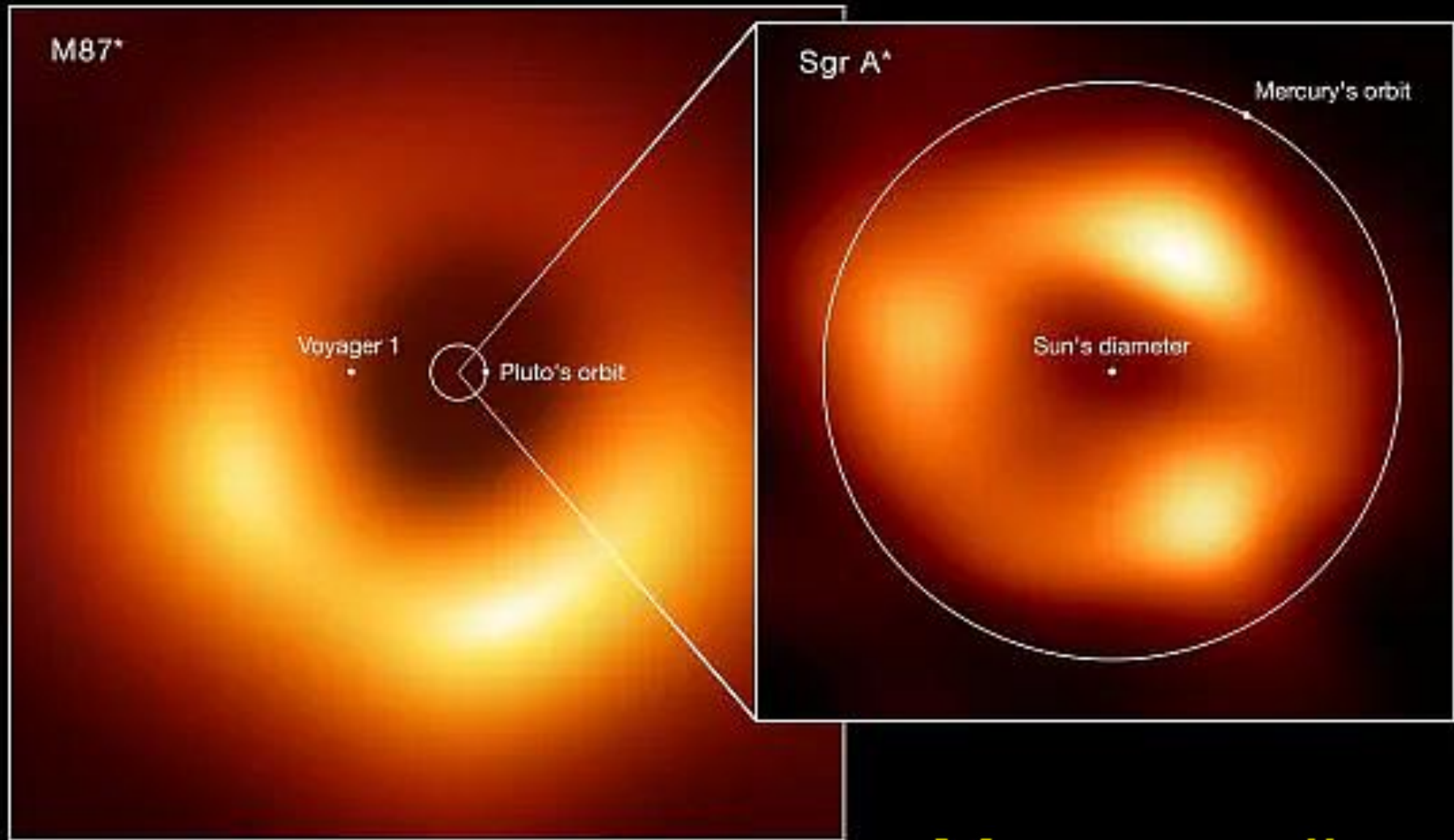
A radio map of Sagittarius A* showing a bright, irregular ring of emission with a dark central region. The ring is composed of several bright spots connected by a diffuse glow.

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

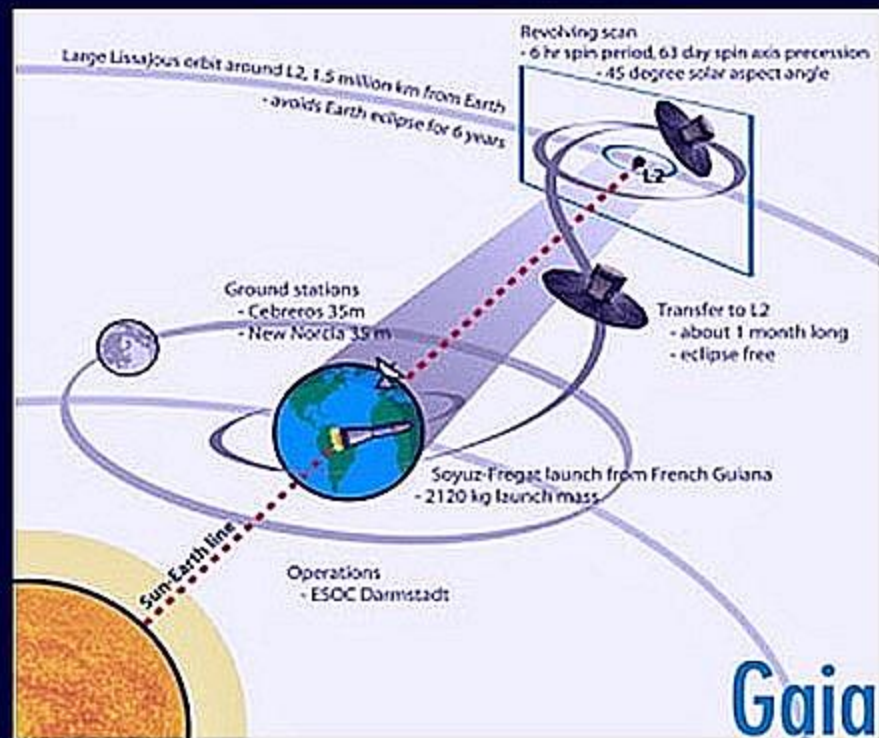
La missione spaziale Gaia

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.



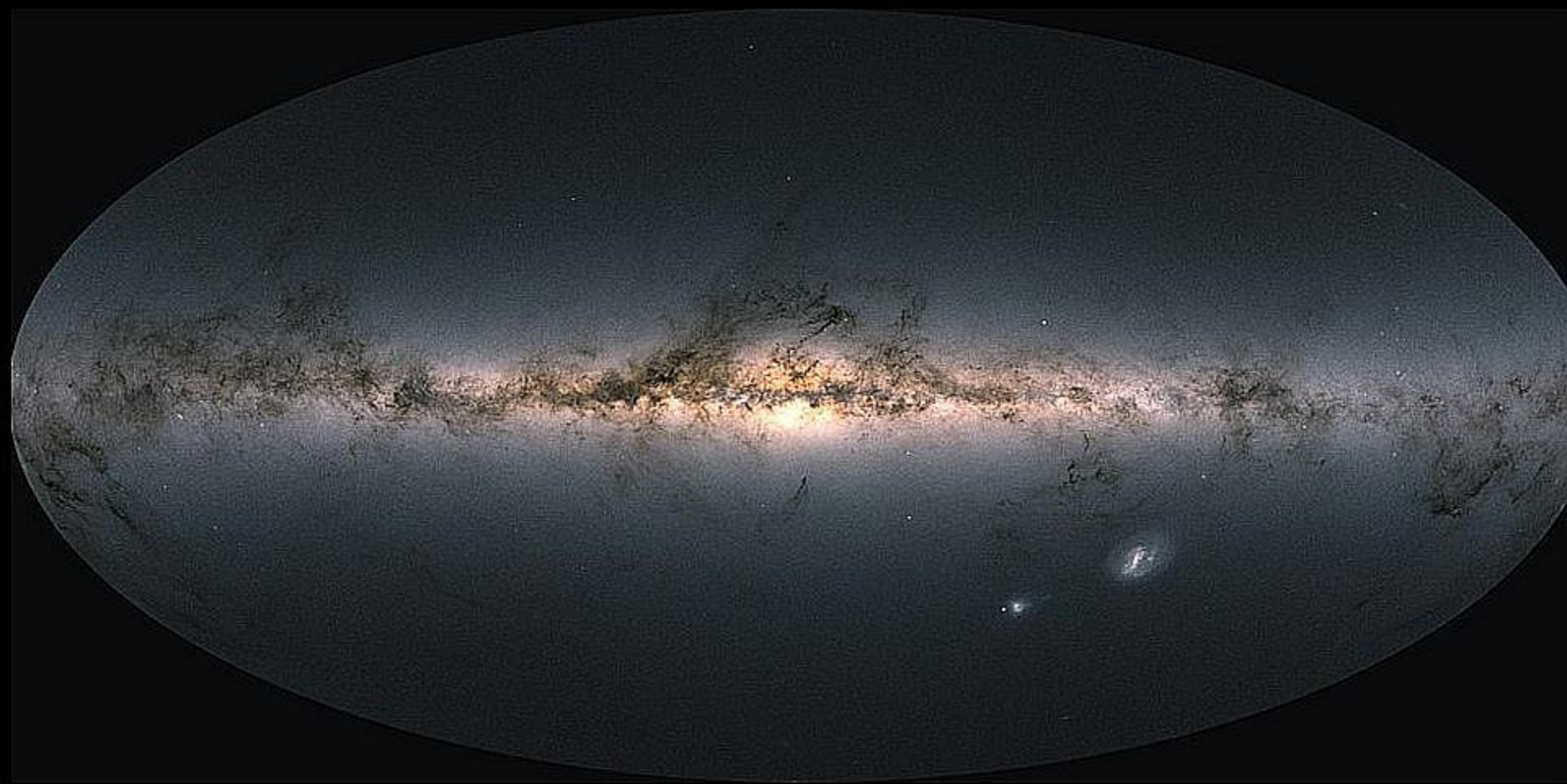
La missione spaziale Gaia

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)**

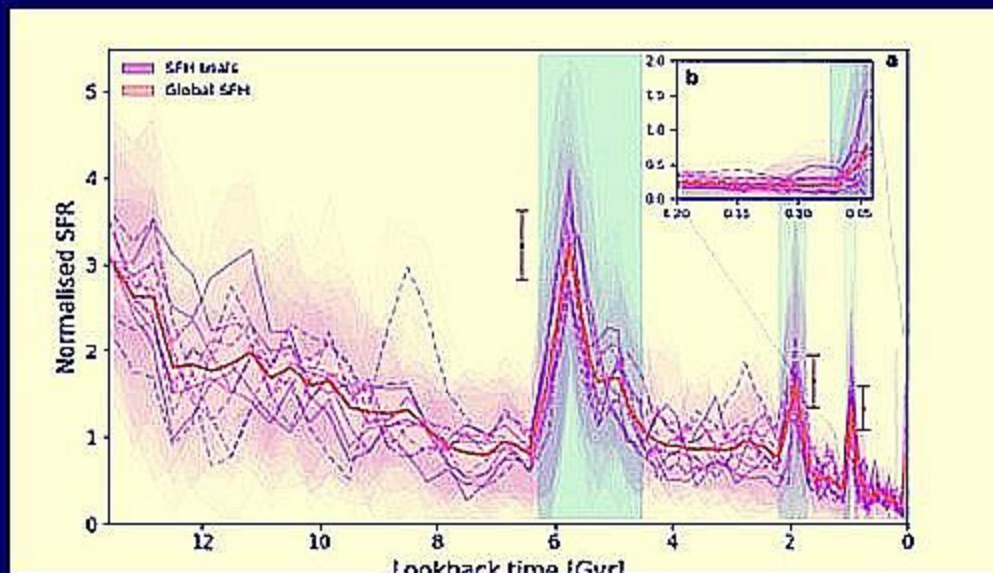


La Via Lattea sembra aver sperimentato circa 13 miliardi di anni fa un processo di formazione stellare molto violento, la cui intensità è andata progressivamente diminuendo nel tempo.

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

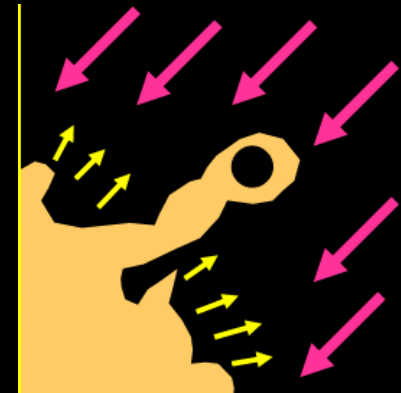
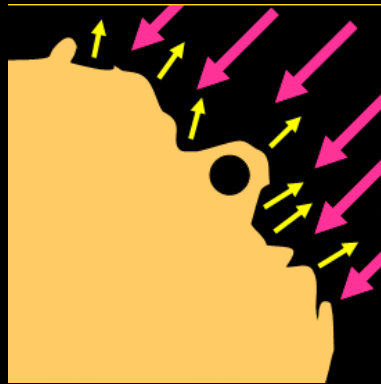
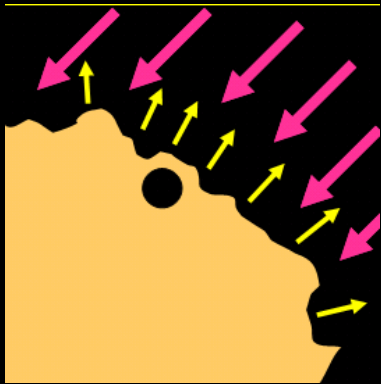


RIFLESSIONE



OSCURE



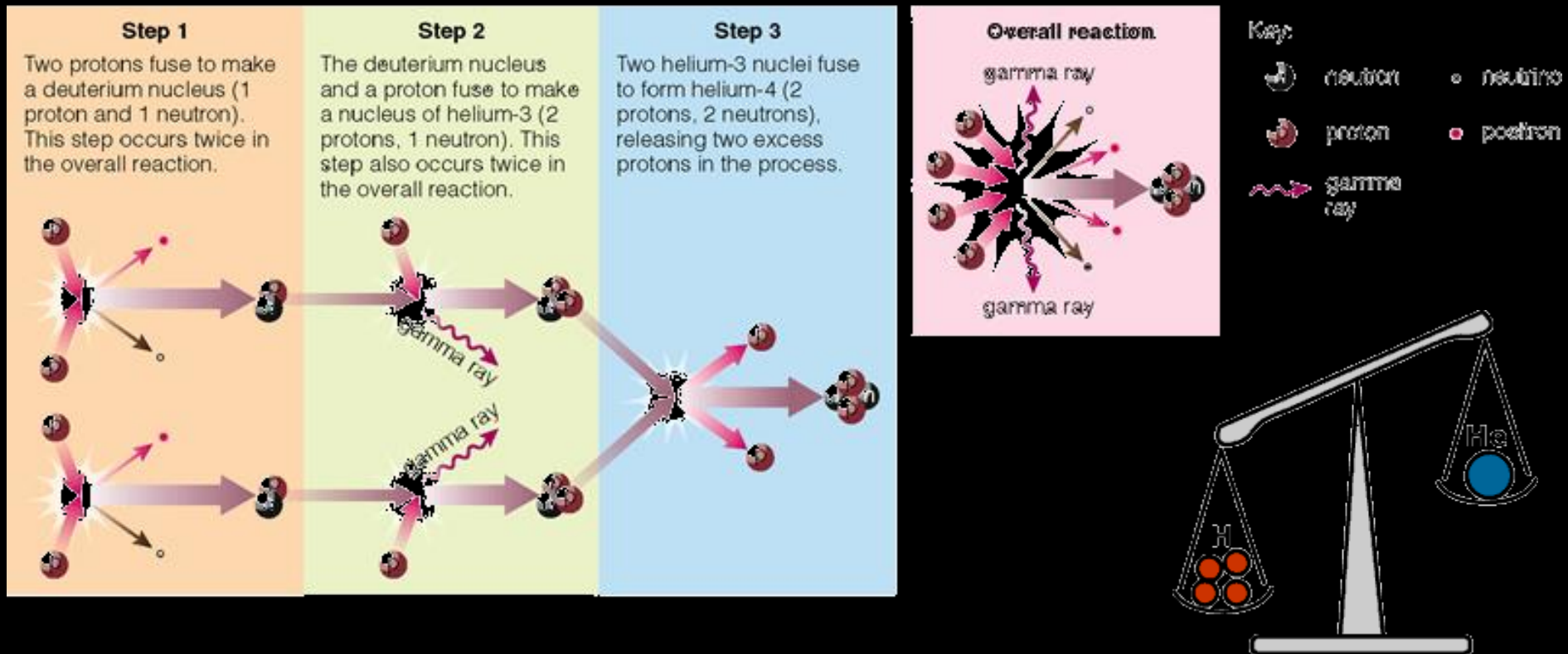


**NASCITA DI
UNA STELLA**

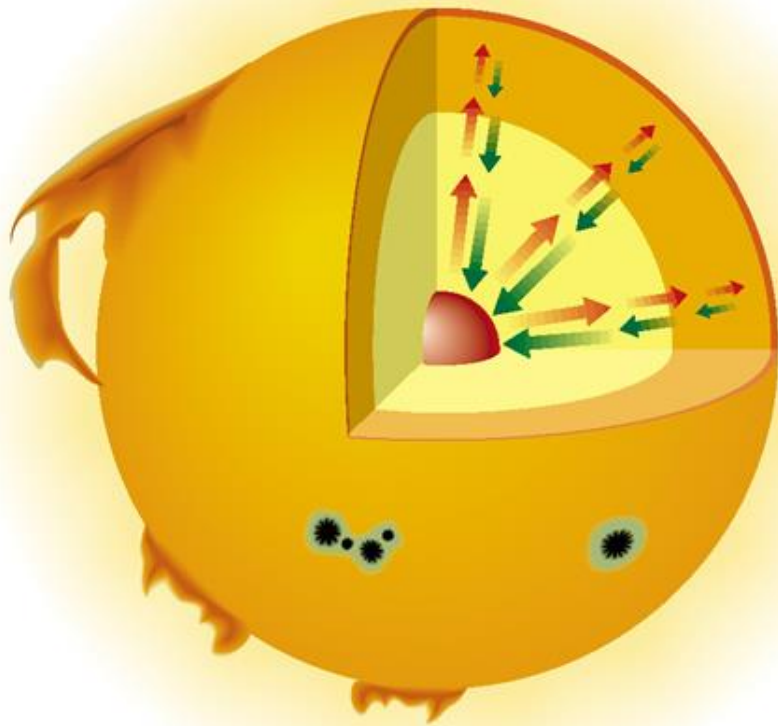
LA CATENA PROTONE-PROTONE FONDE QUATTRO ATOMI DI IDROGENO IN UN ATOMO DI ELIO. LA DIFFERENZA DI MASSA VIENE CONVERTITA IN ENERGIA SECONDO LA RELAZIONE

$$E=mc^2$$

Hydrogen Fusion by the Proton-Proton Chain



pressure →
gravity ←

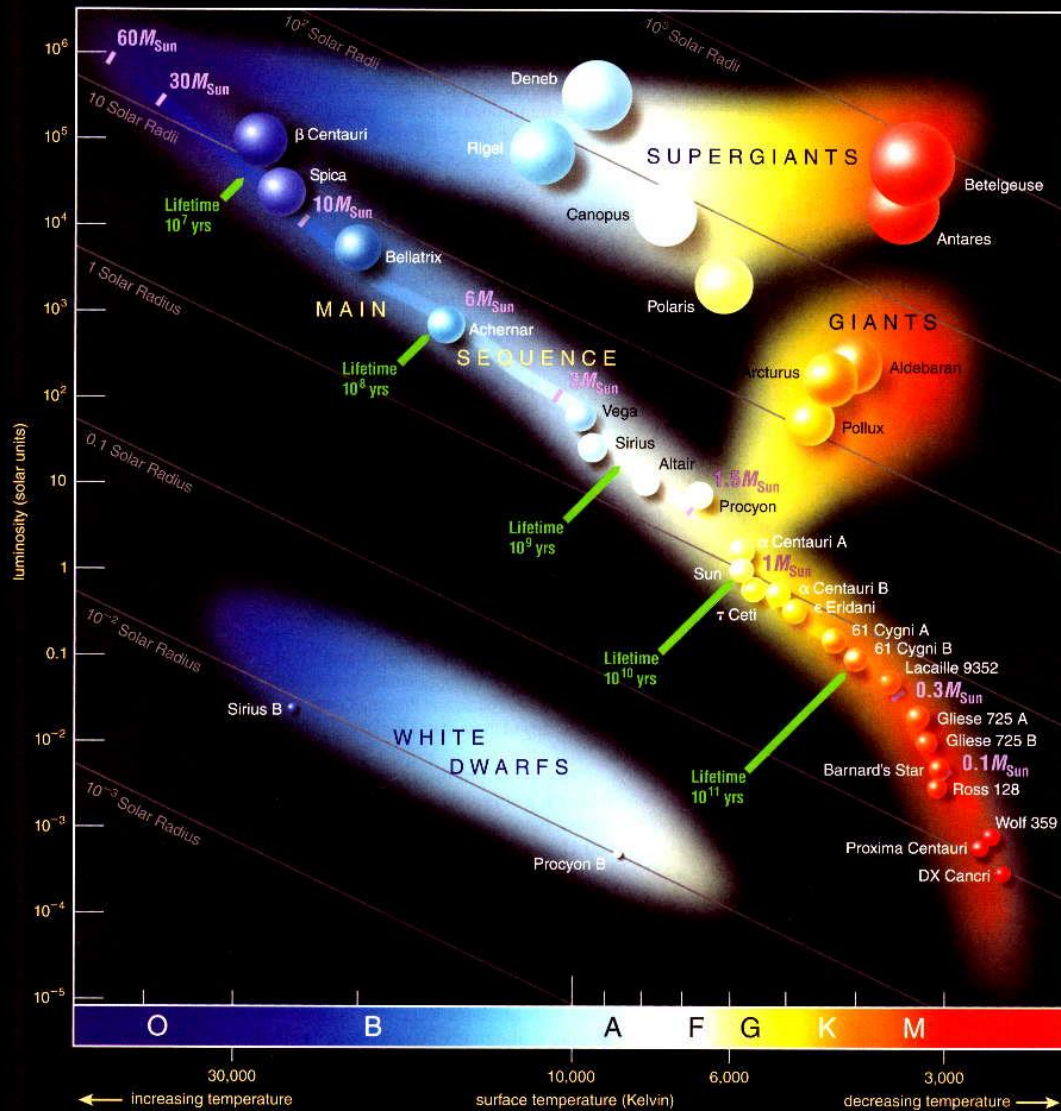


**UNA VOLTA INNESECA
LA FUSIONE DELL'IDROGENO
LA STELLA ENTRA IN UNA
FASE DI EQUILIBRIO
DOVE LA PRESSIONE
BILANCIA LA GRAVITA'**

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

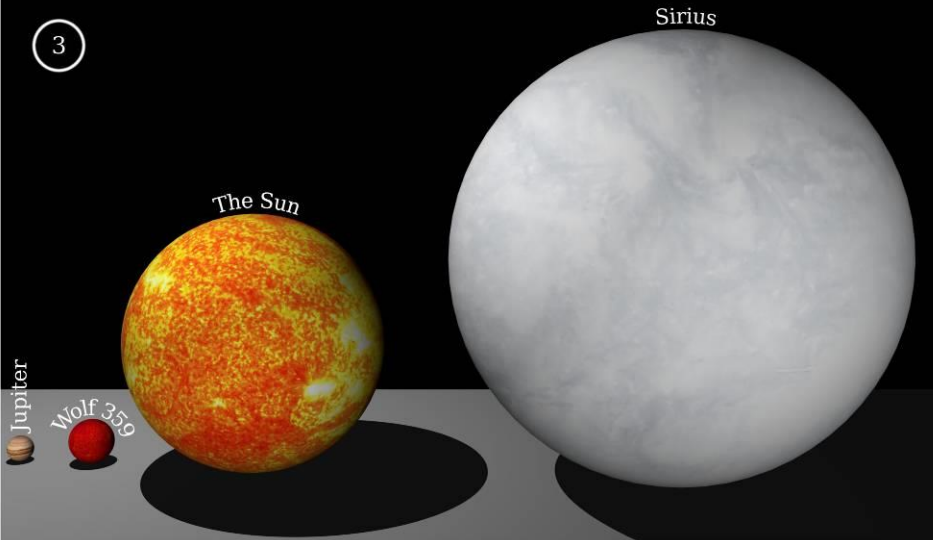
IL DIAGRAMMA DI HERTZSPRUNG-RUSSEL METTE IN RELAZIONE LA LUMINOSITA' E LA TEMPERATURA DELLE STELLE

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

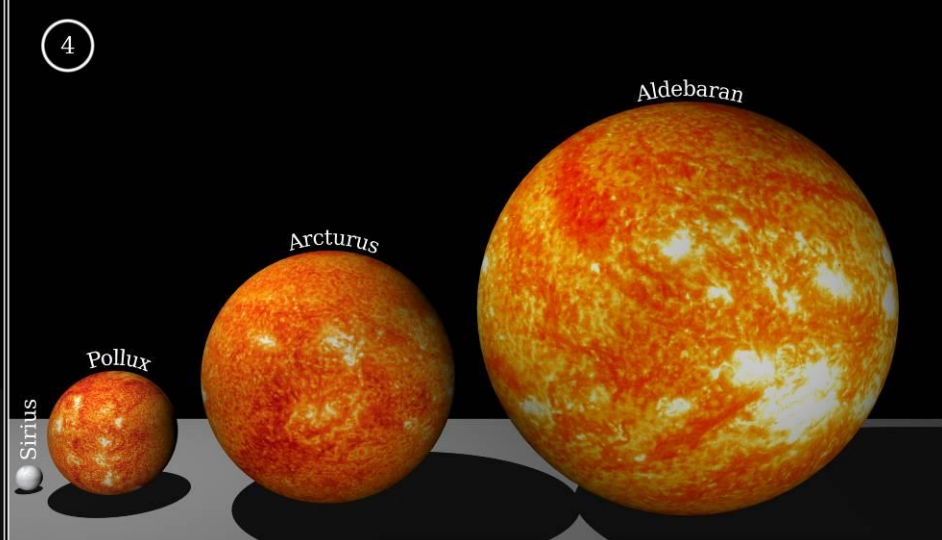


DIMENSIONI DELLE STELLE

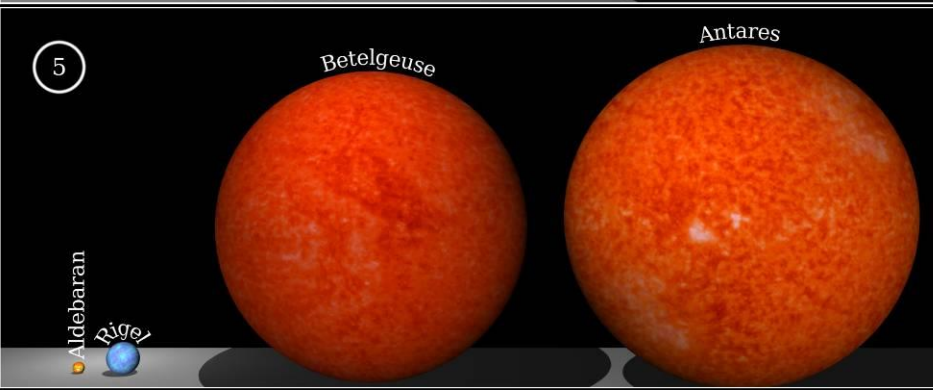
3



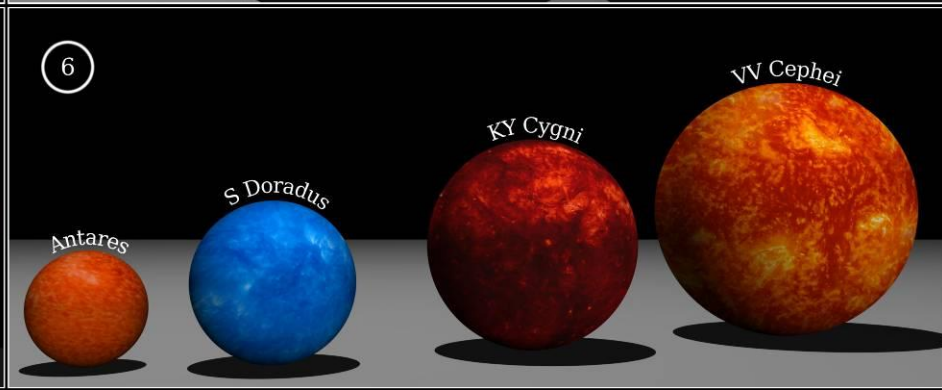
4



5



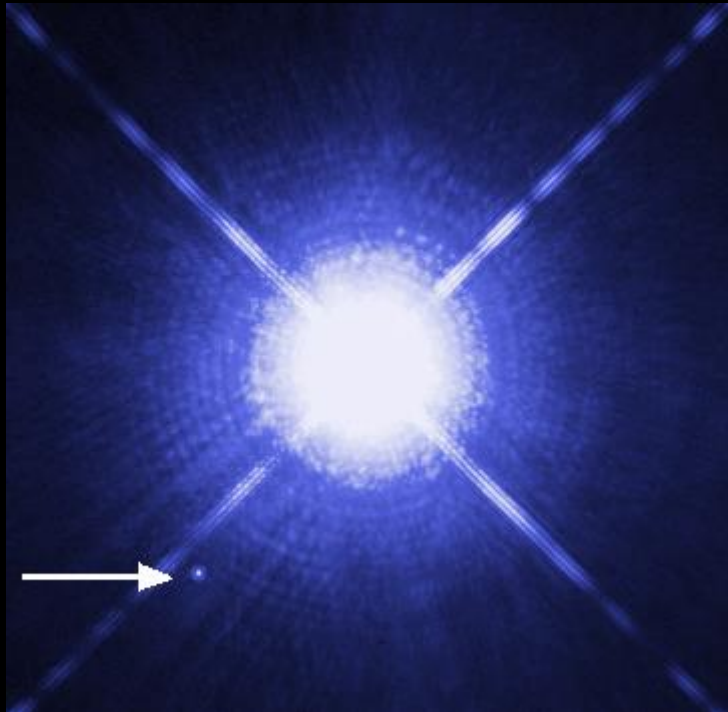
6



**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**

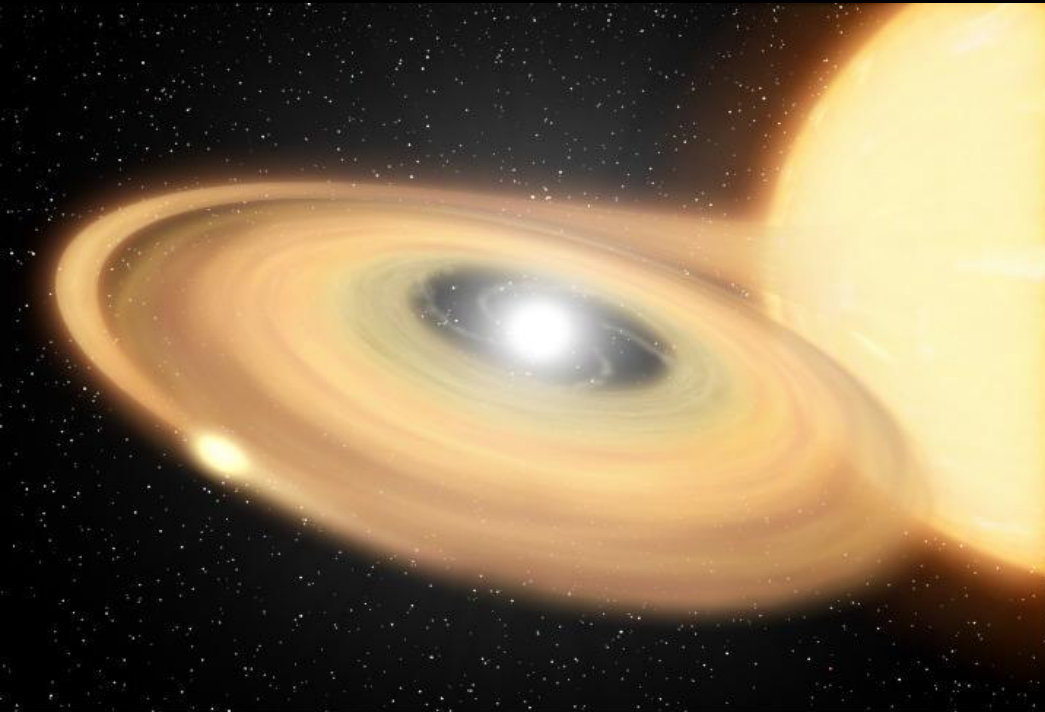


**SIRIO B HA QUASI LA MASSA
DEL SOLE
RACCHIUSA NELLE DIMENSIONI
DELLA TERRA**

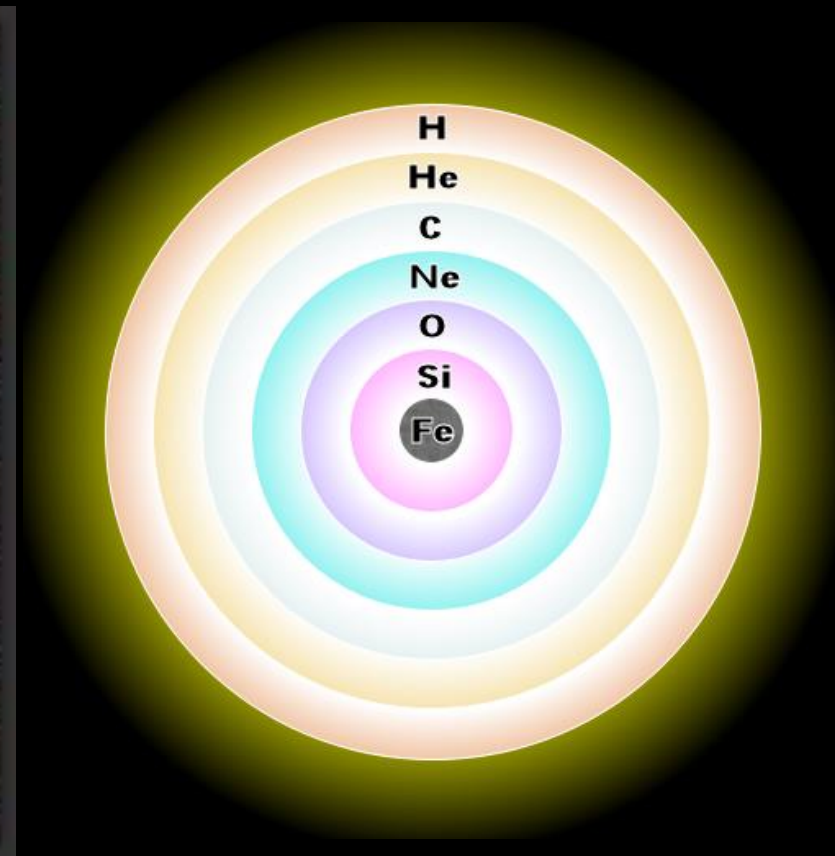
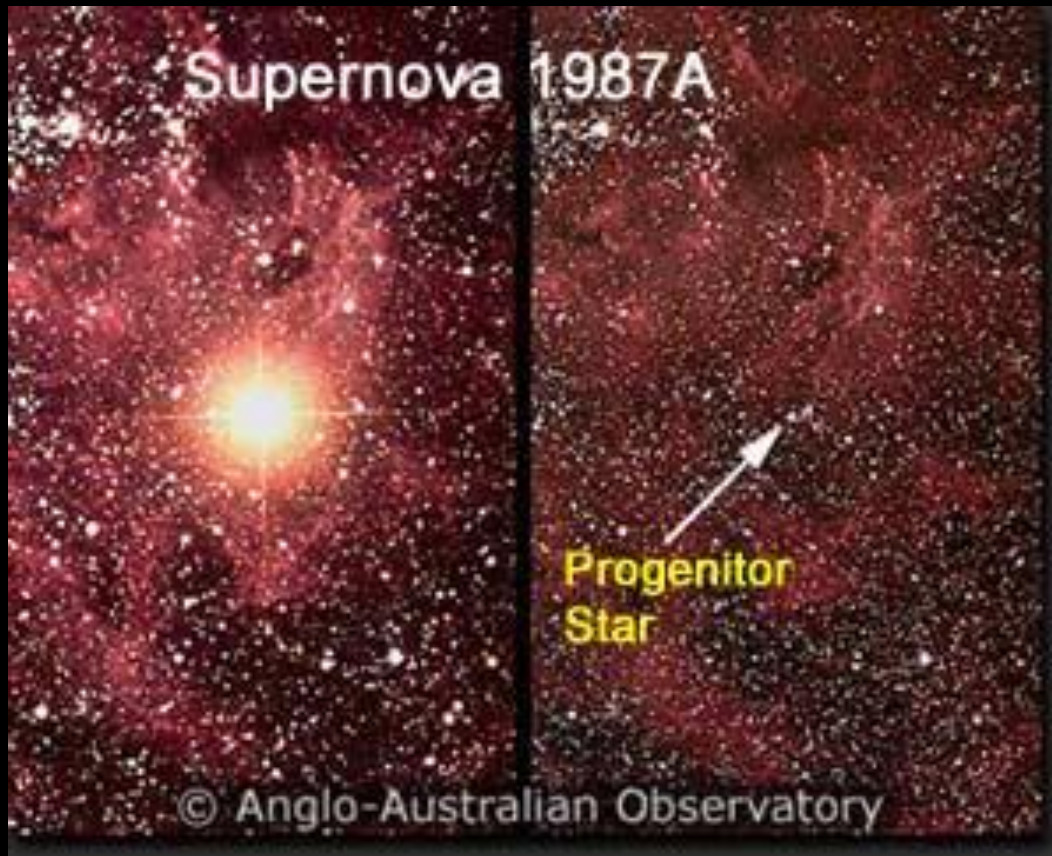
SUPERNOVAE DI TIPO Ia

**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

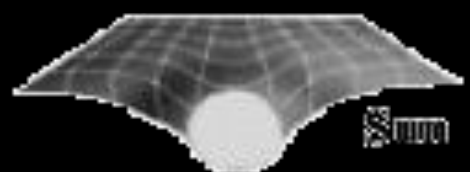


**LE SUPERNOVAE DI TIPO IIcc
HANNO ORIGINE DA STELLE CON MASSA
ALMENO 8 VOLTE SUPERIORE QUELLA DEL SOLE**

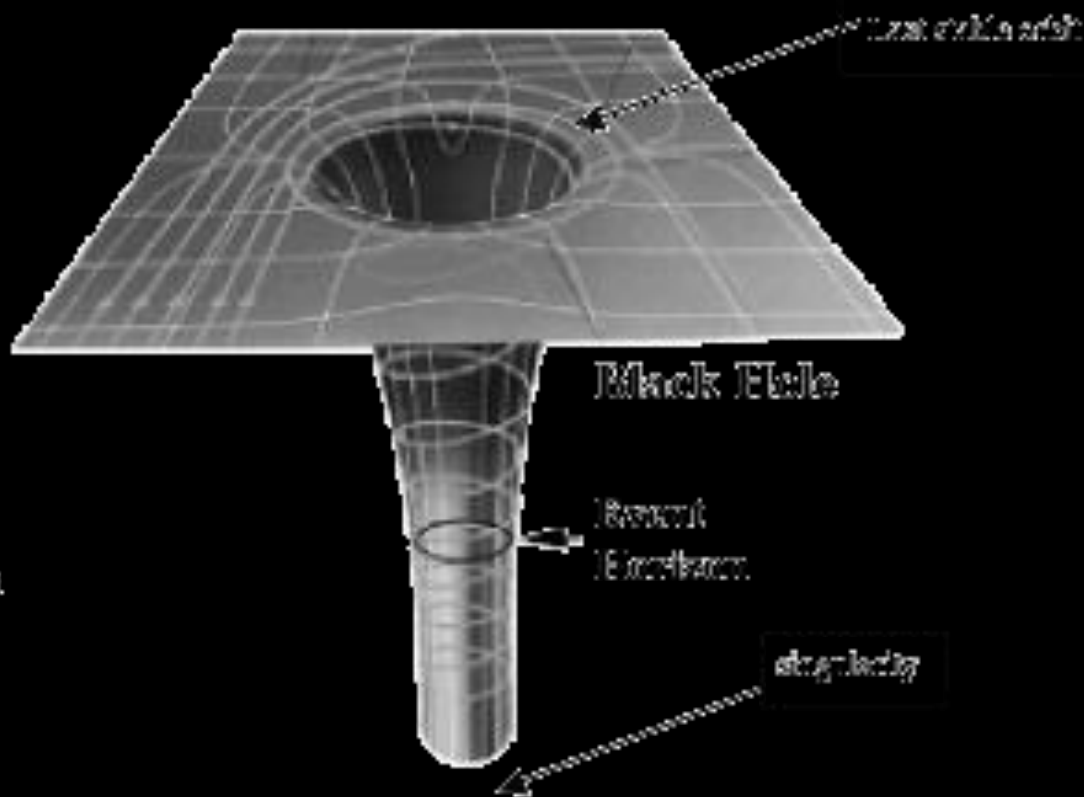


IL NUCLEO COMPRESSO DIVENTA UNA STELLA DI NEUTRONI

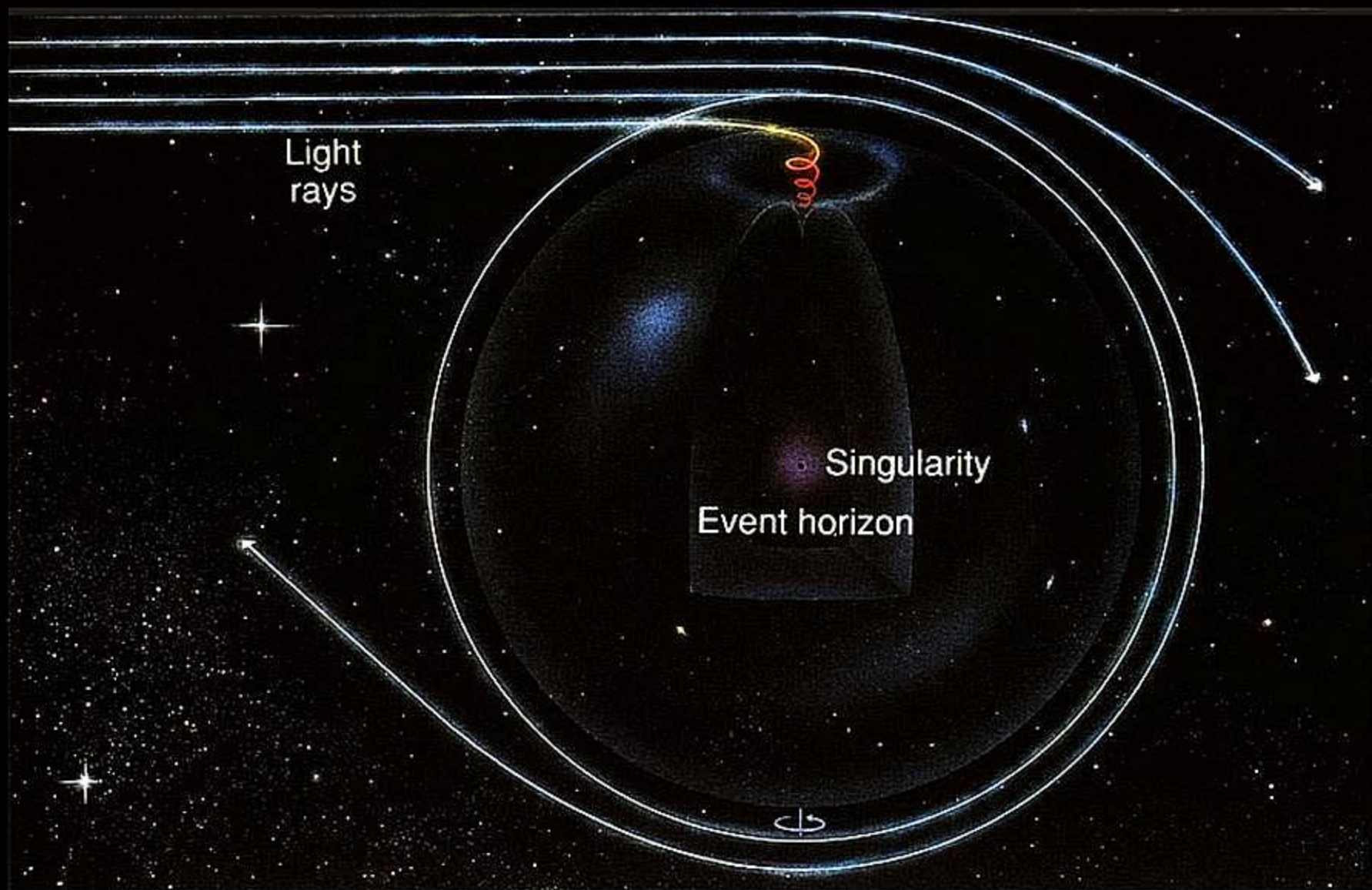
STELLE CON MASSA 20 VOLTE SUPERIORE A QUELLA DEL SOLE DANNO ORIGINE AD UN BUCO NERO



Illustrated space time



Deviazione dei raggi di luce



L'orizzonte degli eventi



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.

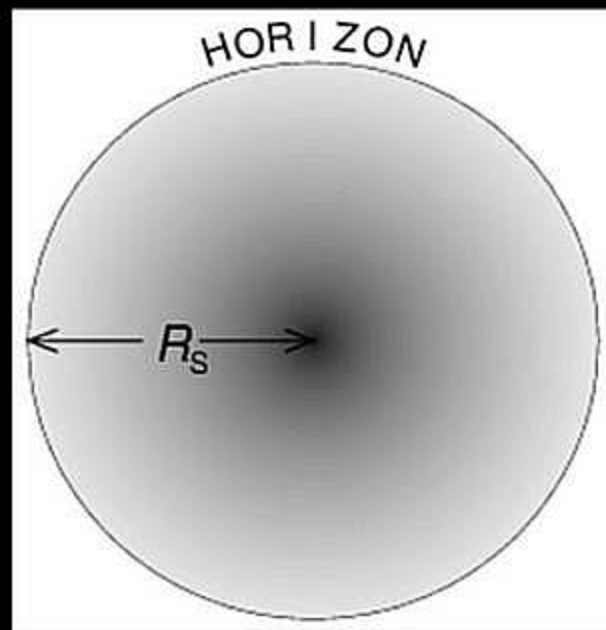


Karl Schwarzschild (1873-1916)

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!