



Università della Terza Età "Cardinale
Giovanni Colombo" - Milano

A. A. 2022 - 2023

Corso di Astrofisica

Docente:

Adriano Gaspani

Lezione 1

Cosmologia Moderna



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

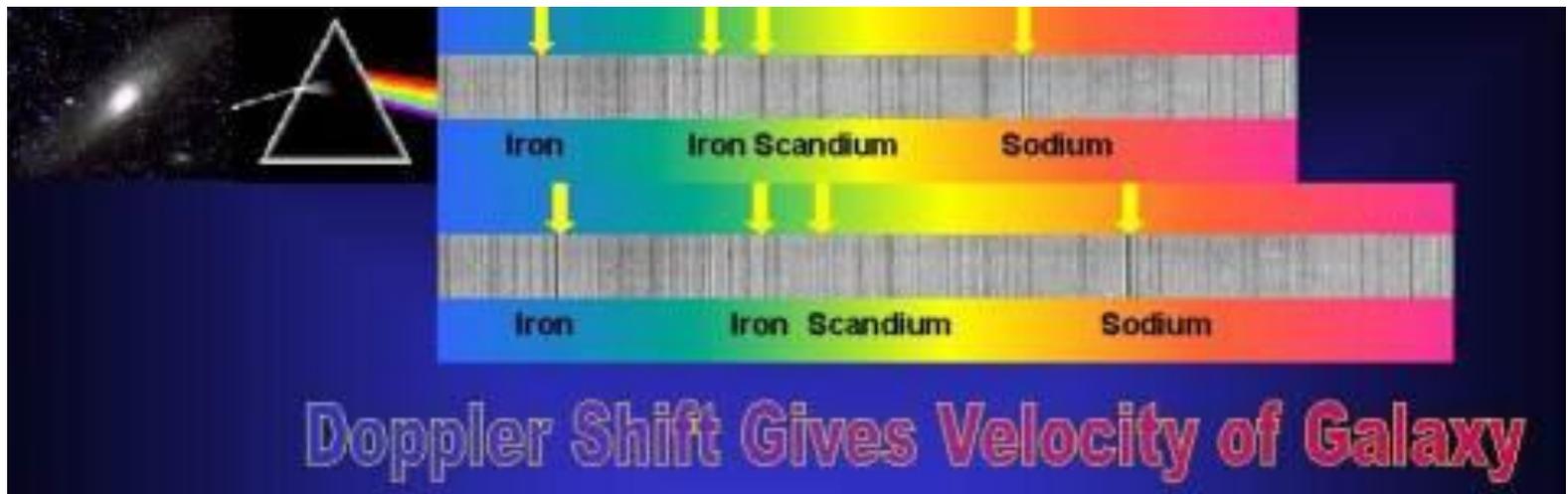
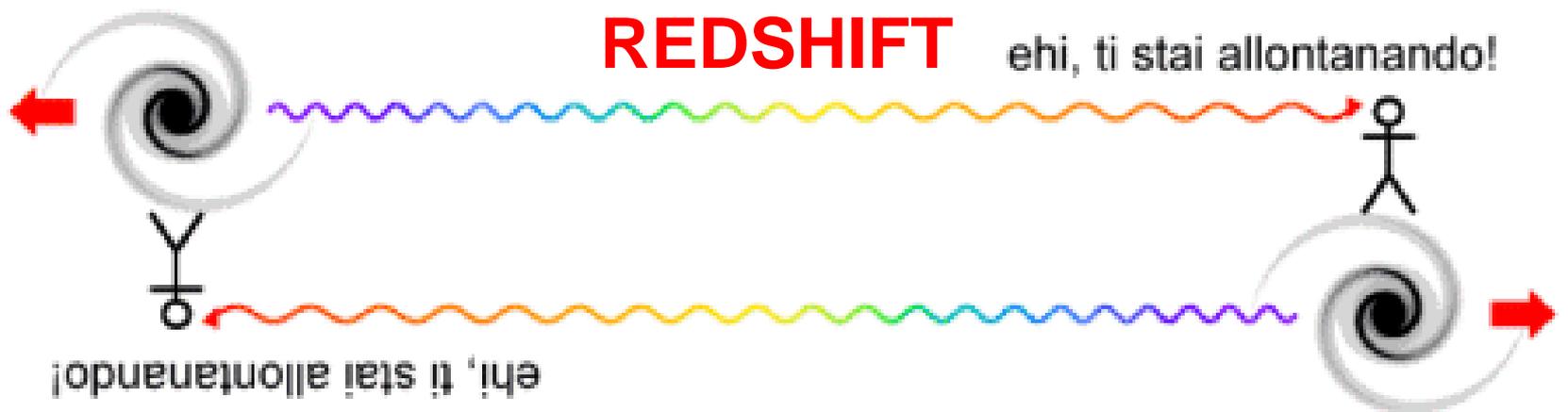
PRINCIPIO COPERNICANO

-NON OCCUPIAMO UNA POSIZIONE PRIVILEGIATA NELL'UNIVERSO

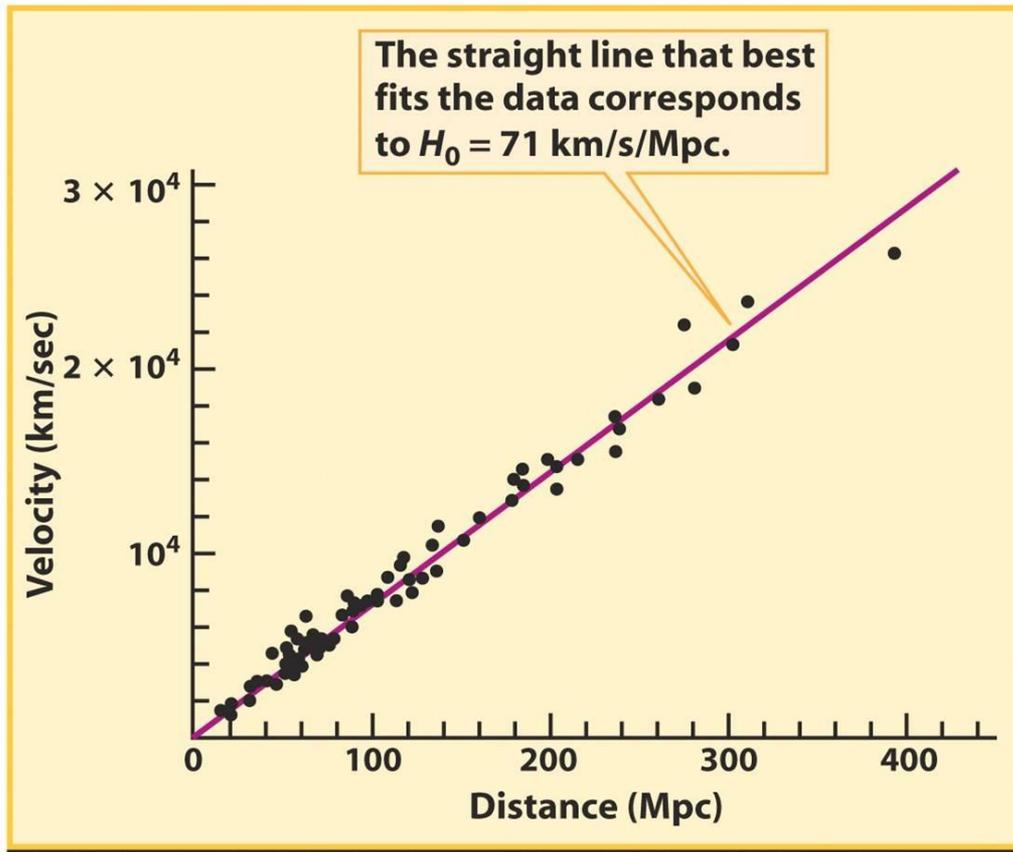
-NON ESISTONO POSIZIONI PRIVILEGIATE

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.



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

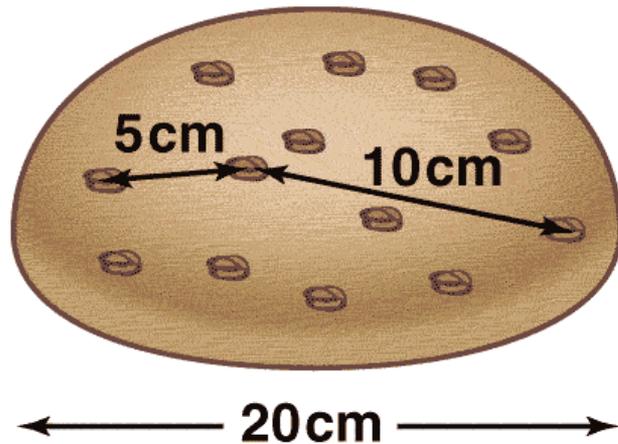


NEL 1929 EDWIN HUBBLE
SCOPRE L'ESISTENZA DI UNA
RELAZIONE LINEARE TRA
IL REDSHIFT E LA DISTANZA
DELLE GALASSIE.

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

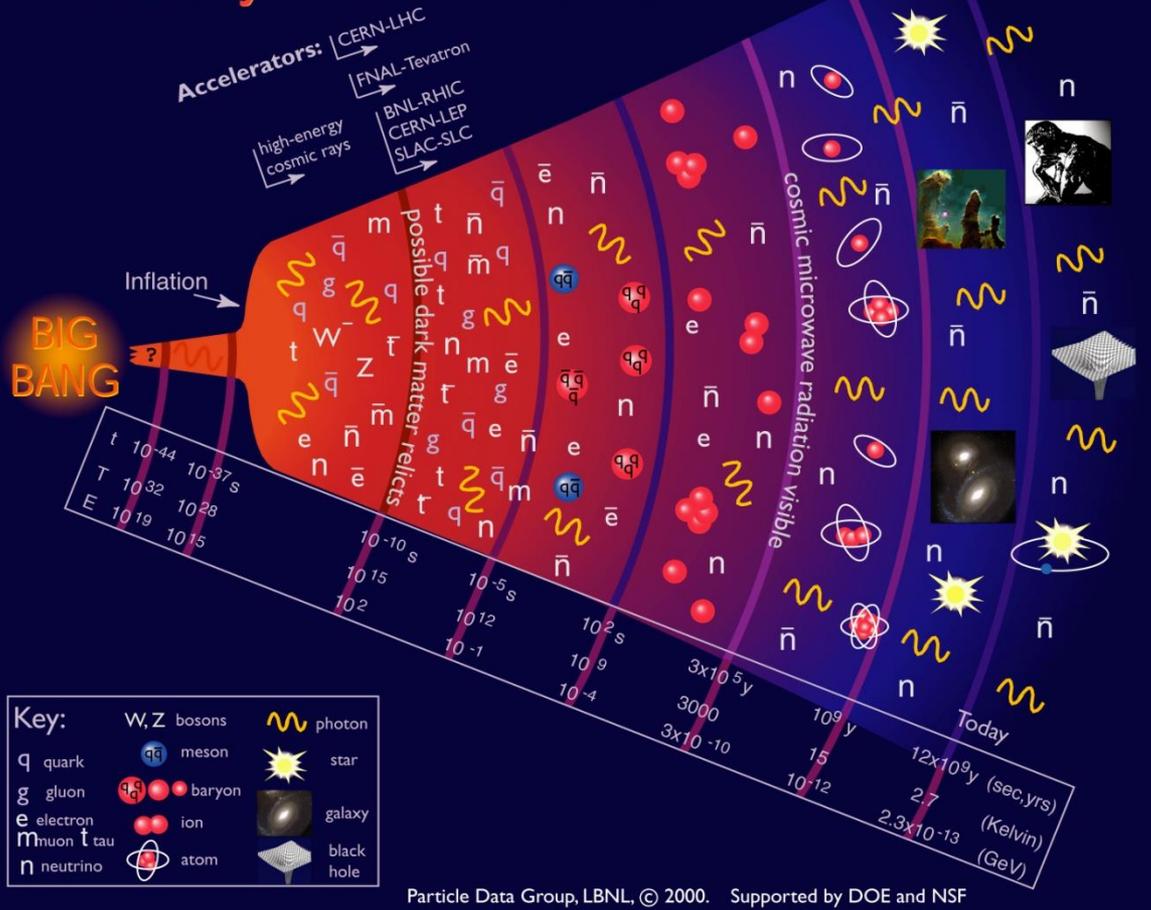
LEGGE DI HUBBLE
 $v = H_0 D$

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**

History of the Universe



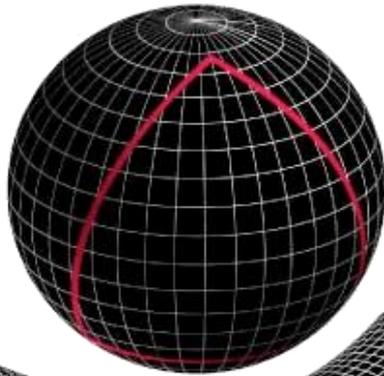
Particle Data Group, LBNL, © 2000. Supported by DOE and NSF

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

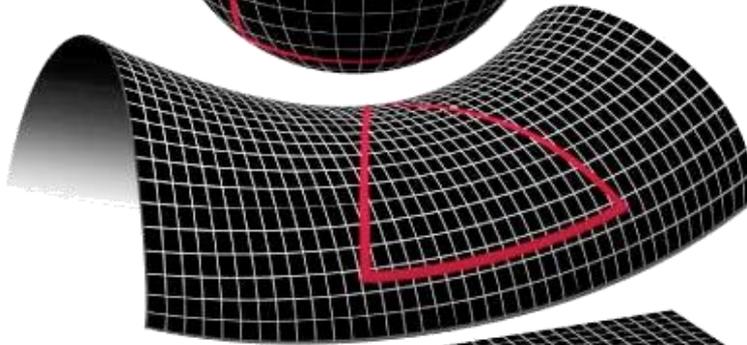
**IN UN UNIVERSO ISOTROPO ED OMOGENEO LO SPAZIO-TEMPO,
CURVATO DALLA PRESENZA DELLA MATERIA/ENERGIA, PUO'
ASSUMERE SOLO TRE FORME:**

$\Omega_0 > 1$



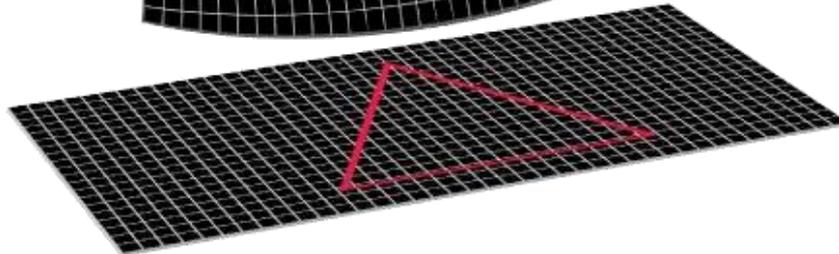
UNIVERSO CHIUSO: FINITO

$\Omega_0 < 1$



UNIVERSO APERTO: INFINITO

$\Omega_0 = 1$



UNIVERSO PIATTO: INFINITO

Equazioni di Friedmann

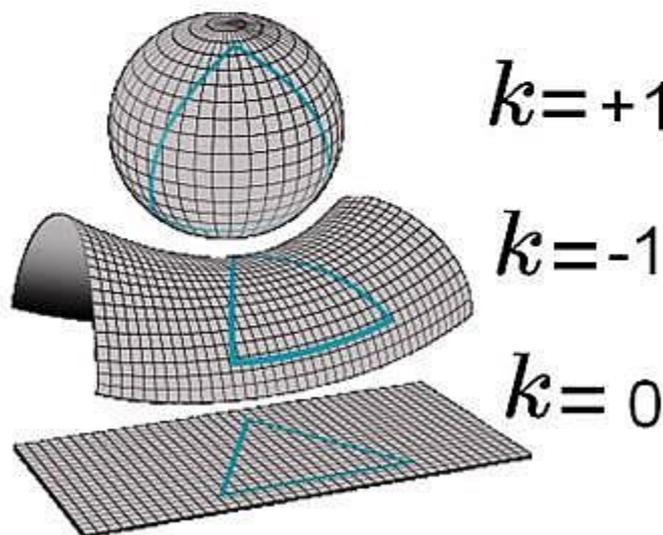
$$\dot{R} = \left[R^2 \frac{8\pi G \rho + \Lambda c^2}{3} - k c^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

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



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

- 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

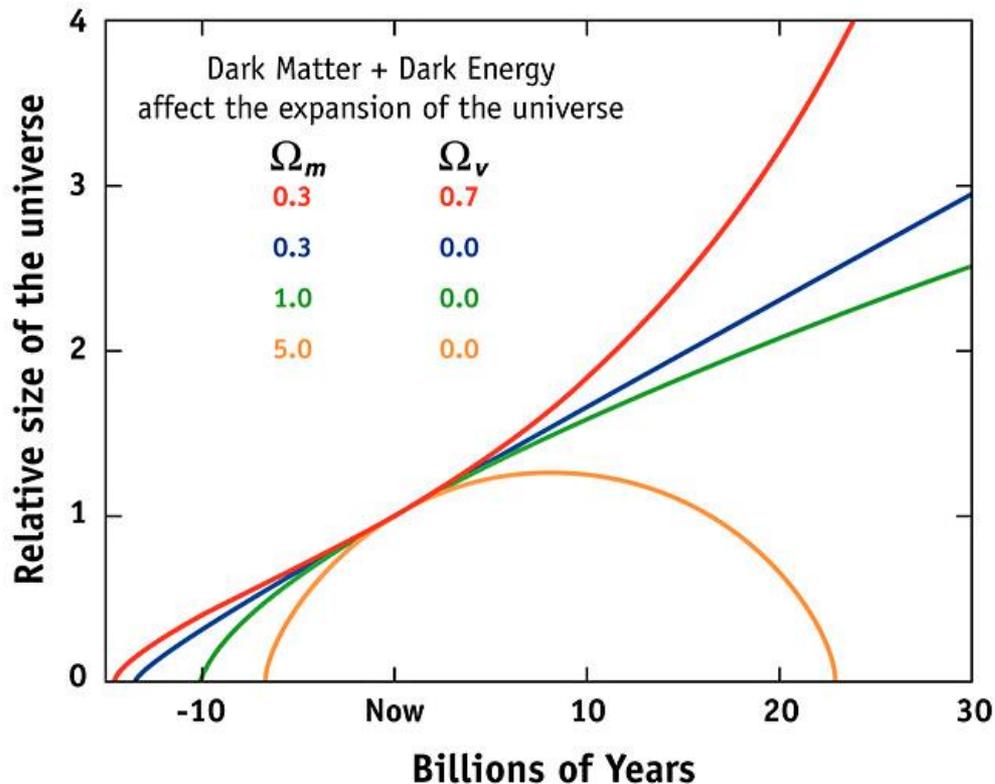


$k=+1$

$k=-1$

$k=0$

EXPANSION OF THE UNIVERSE



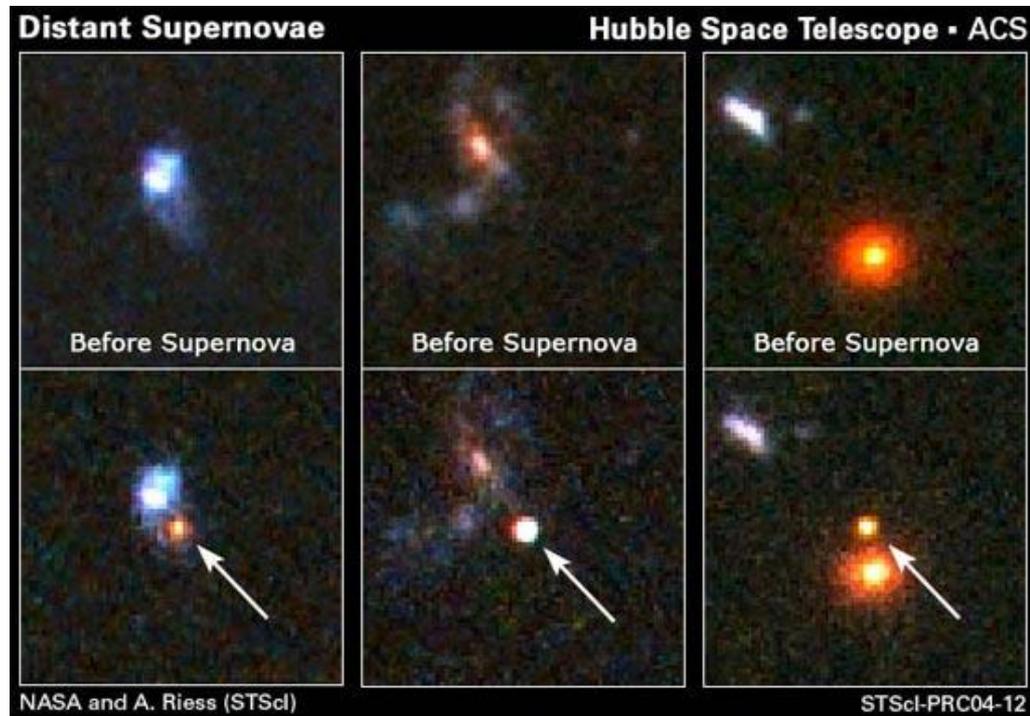
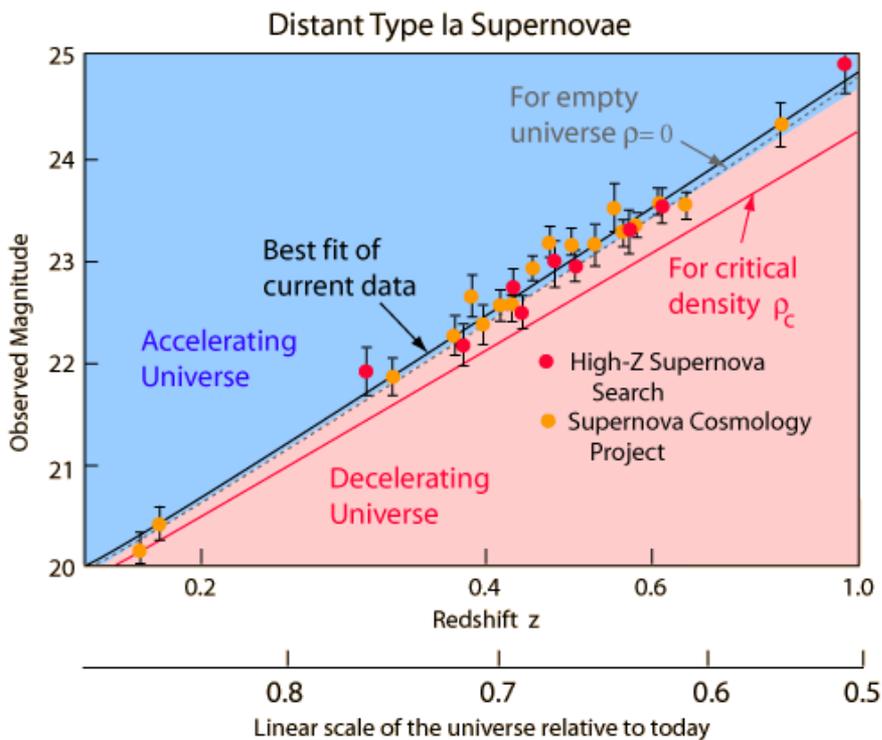
IN UN UNIVERSO COMPLETAMENTE
DOMINATO DALLA MATERIA
L'ESPANSIONE E'
REGOLATA DAL RAPPORTO
TRA LA DENSITA' CRITICA (ρ_c)
E LA DENSITA' OSSERVATA (ρ)

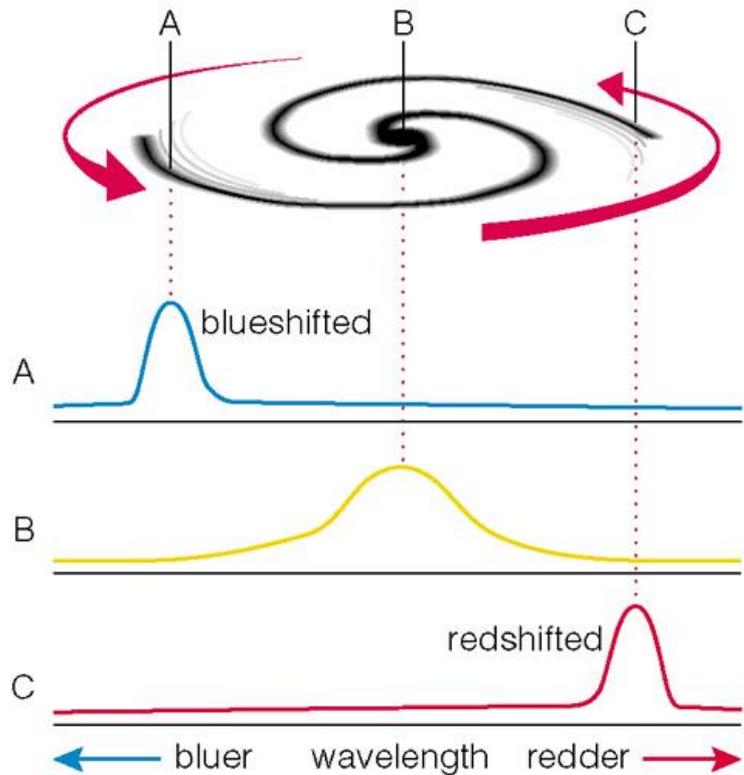
$$\Omega = \rho / \rho_c$$

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

LA SCOPERTA DELL' "ENERGIA OSCURA"

DERIVA DALLO STUDIO DEL REDSHIFT DELLE SUPERNOVAE Ia MOLTO DISTANTI





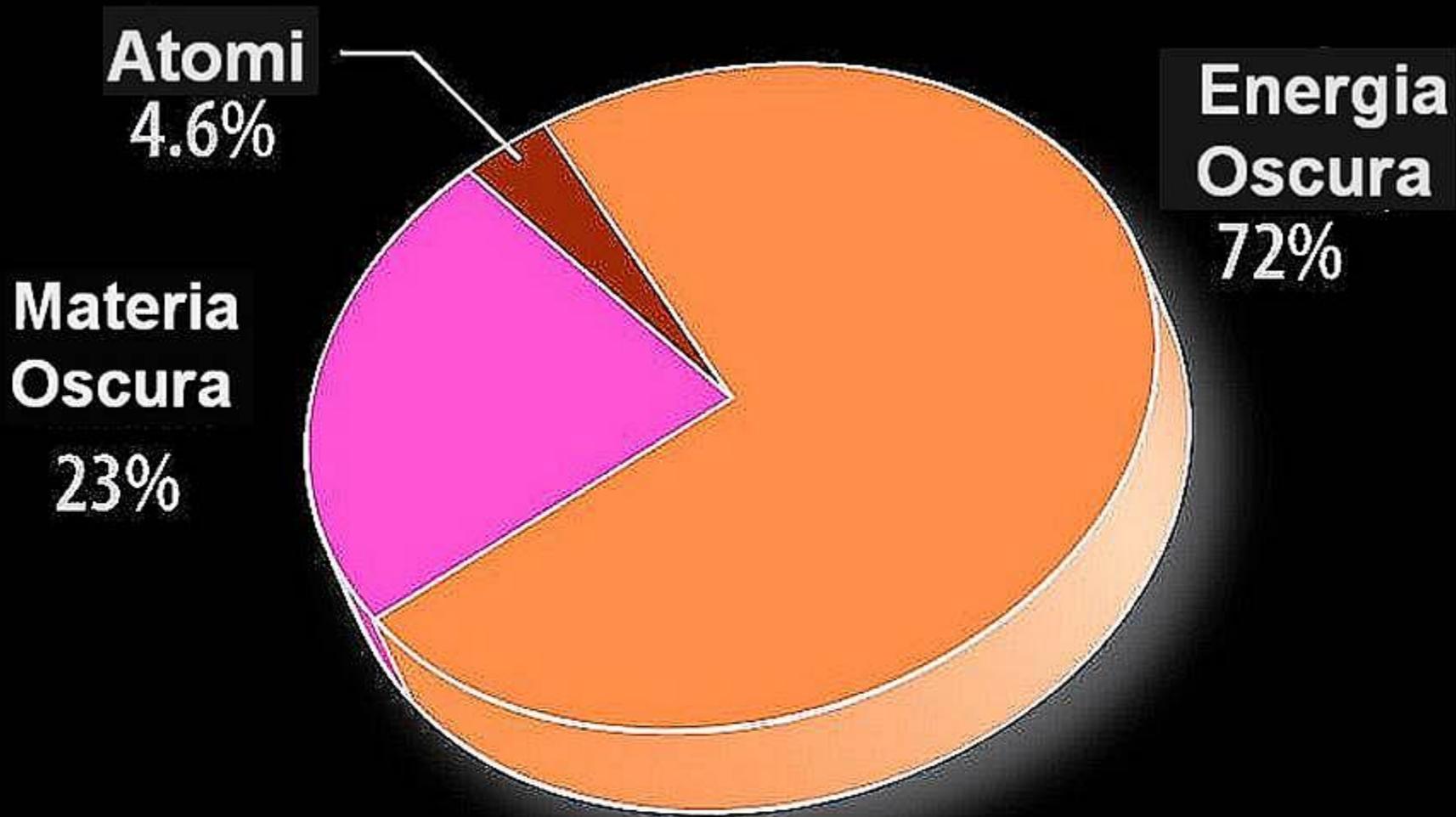
**MISURE EFFETTUATE
SULLA VELOCITA' DI ROTAZIONE
DELLE GALASSIE SPIRALI
HANNO EVIDENZIATO CHE LA
MASSA VISIBILE E' SOLO
UNA PICCOLA FRAZIONE DELLA
MASSA TOTALE DELLE GALASSIE**

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



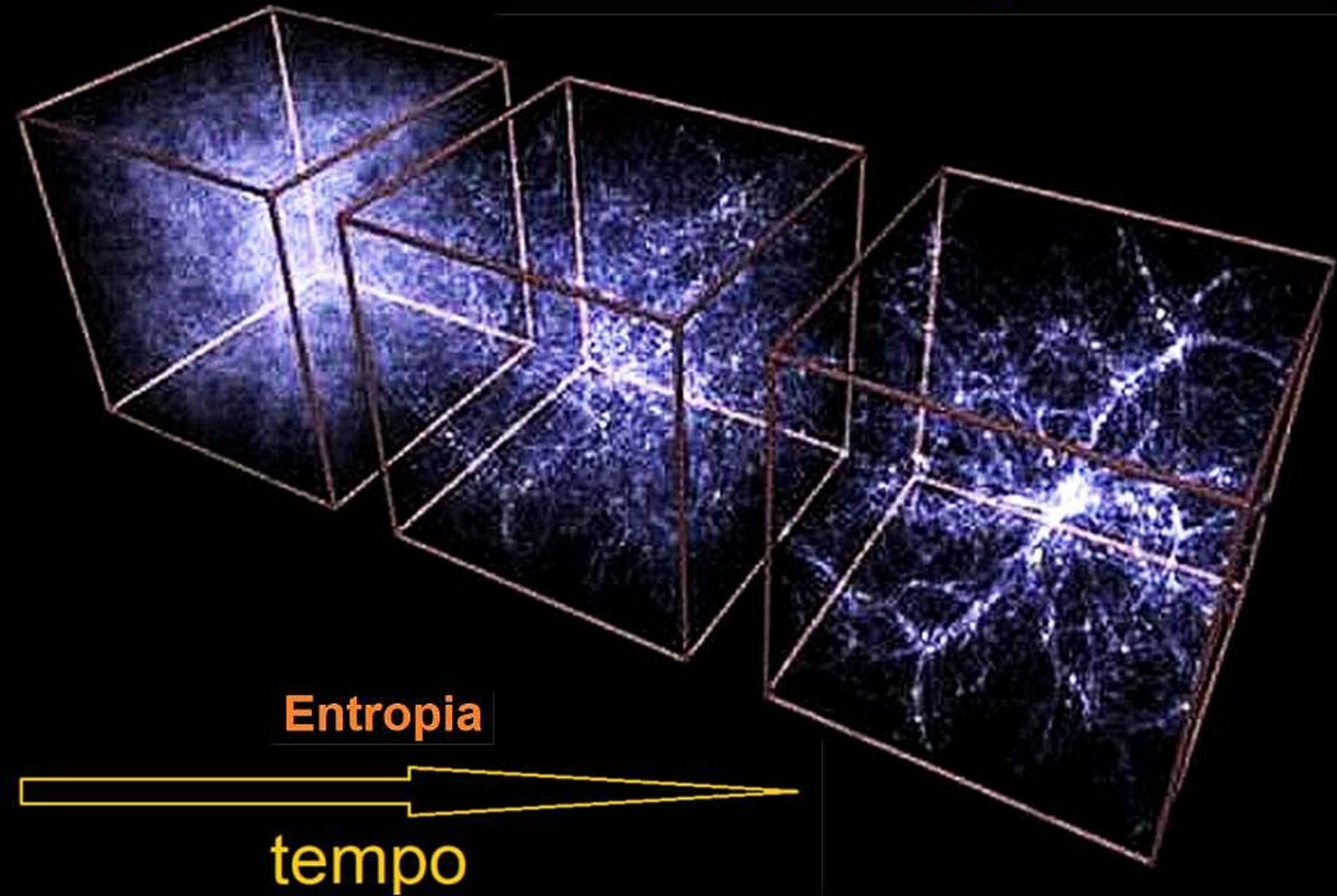
13,7 Miliardi di anni fa

(età dell'Universo: 380.000 anni)



Oggi

Effetti dell'Energia Oscura



PROVE A FAVORE DEL BIG BANG

-ESPANSIONE DELL' UNIVERSO

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

-RADIAZIONE COSMICA DI FONDO

SPETTRO ELETTRIMAGNETICO

Temperatura
equivalente

1	100	10,000	10 milioni	10 miliardi
gradi K	gradi K	gradi K	gradi K	gradi K



Radio Microonde Infrarosso Luce
visibile U.V. Raggi X Raggi Gamma

RADIAZIONE DI CORPO NERO



RADIAZIONE COSMICA DI FONDO A 3°K

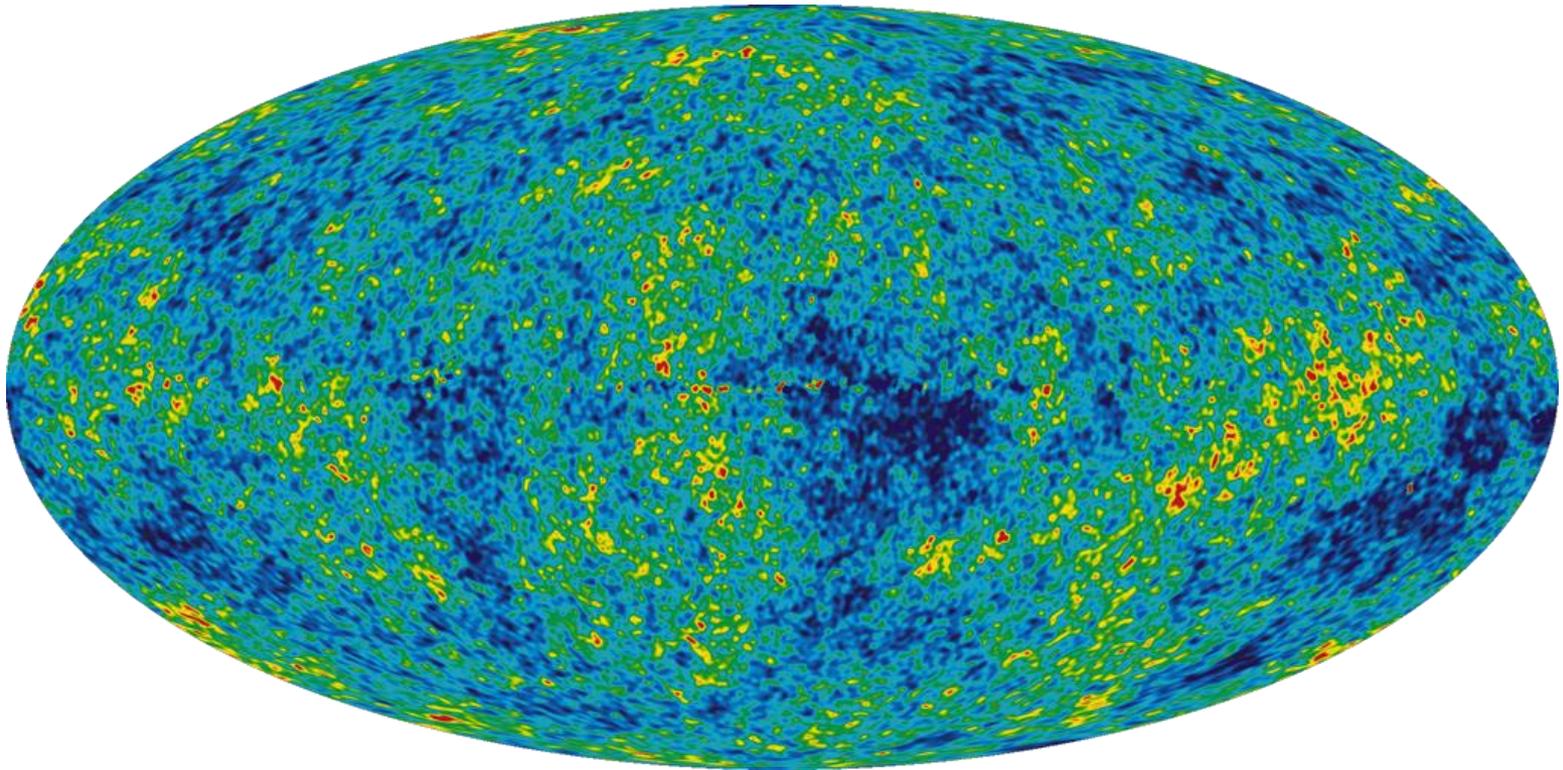
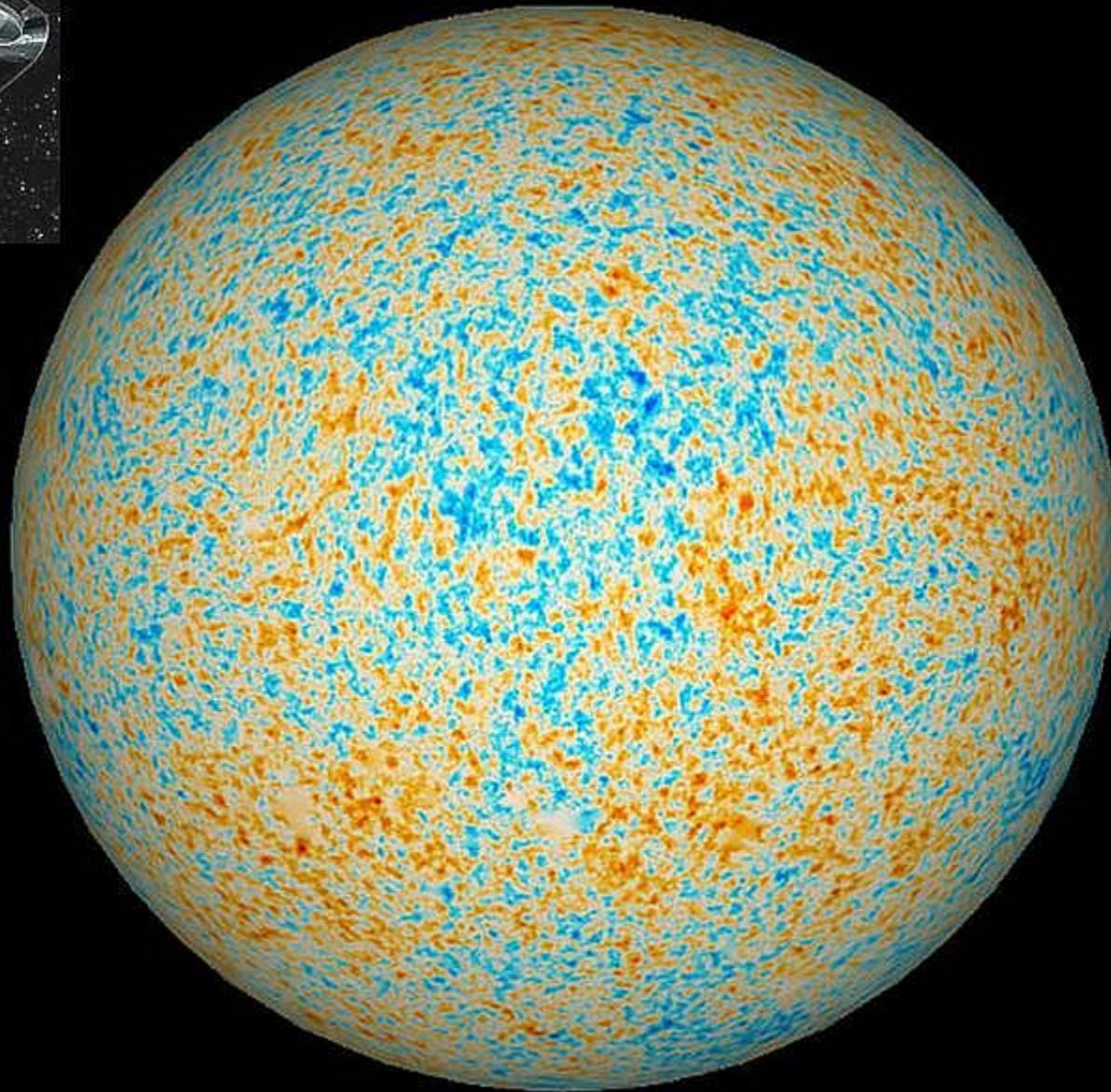


IMMAGINE DELL'UNIVERSO 380.000 ANNI DOPO IL
BIG BANG

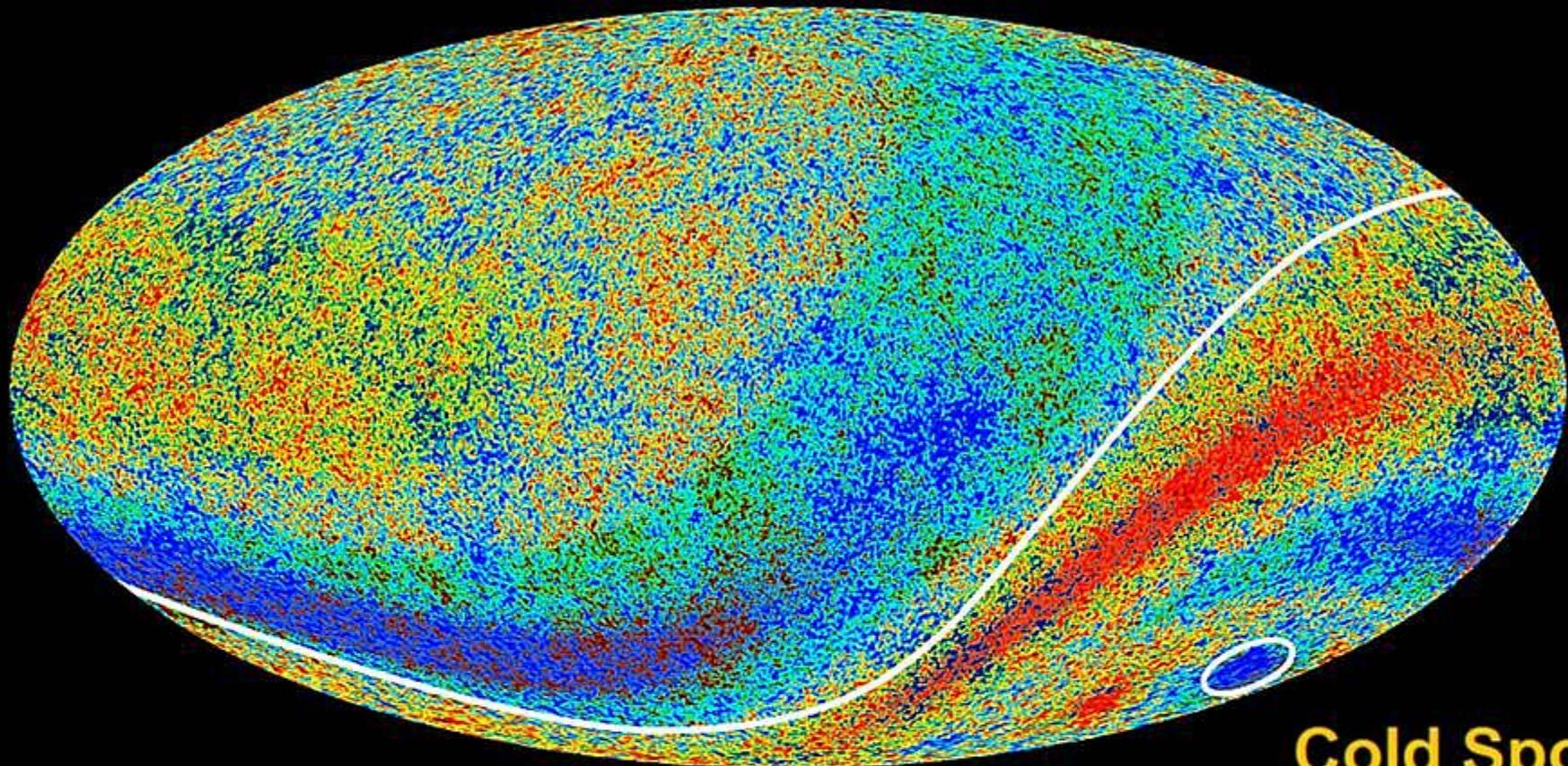


Planck
2018

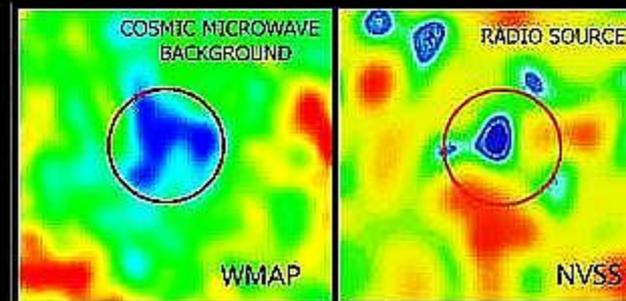


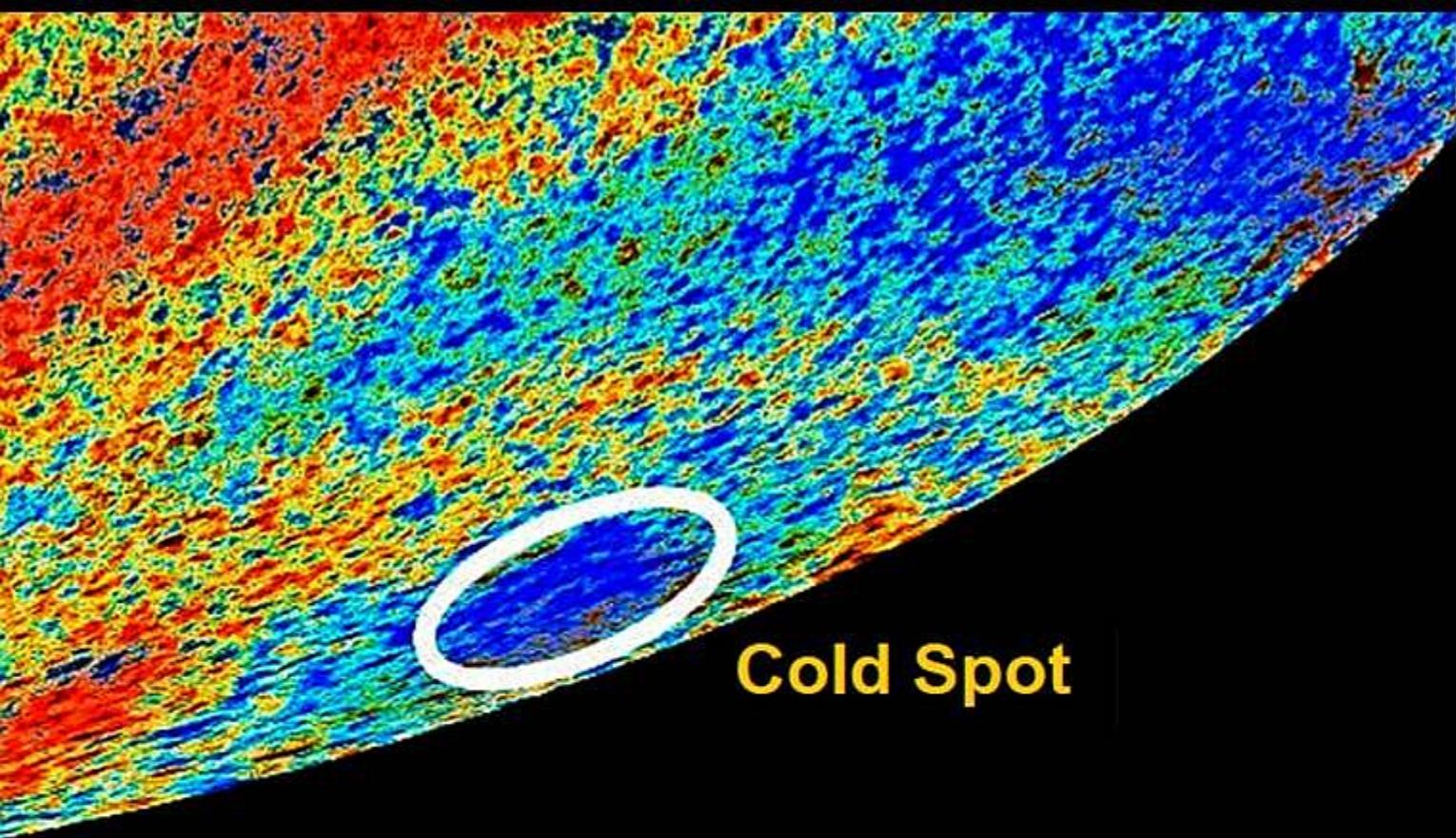
CMB flux (Cosmic Microwaves Background)
anisotropia termica

CMB flux (Cosmic Microwaves Background)

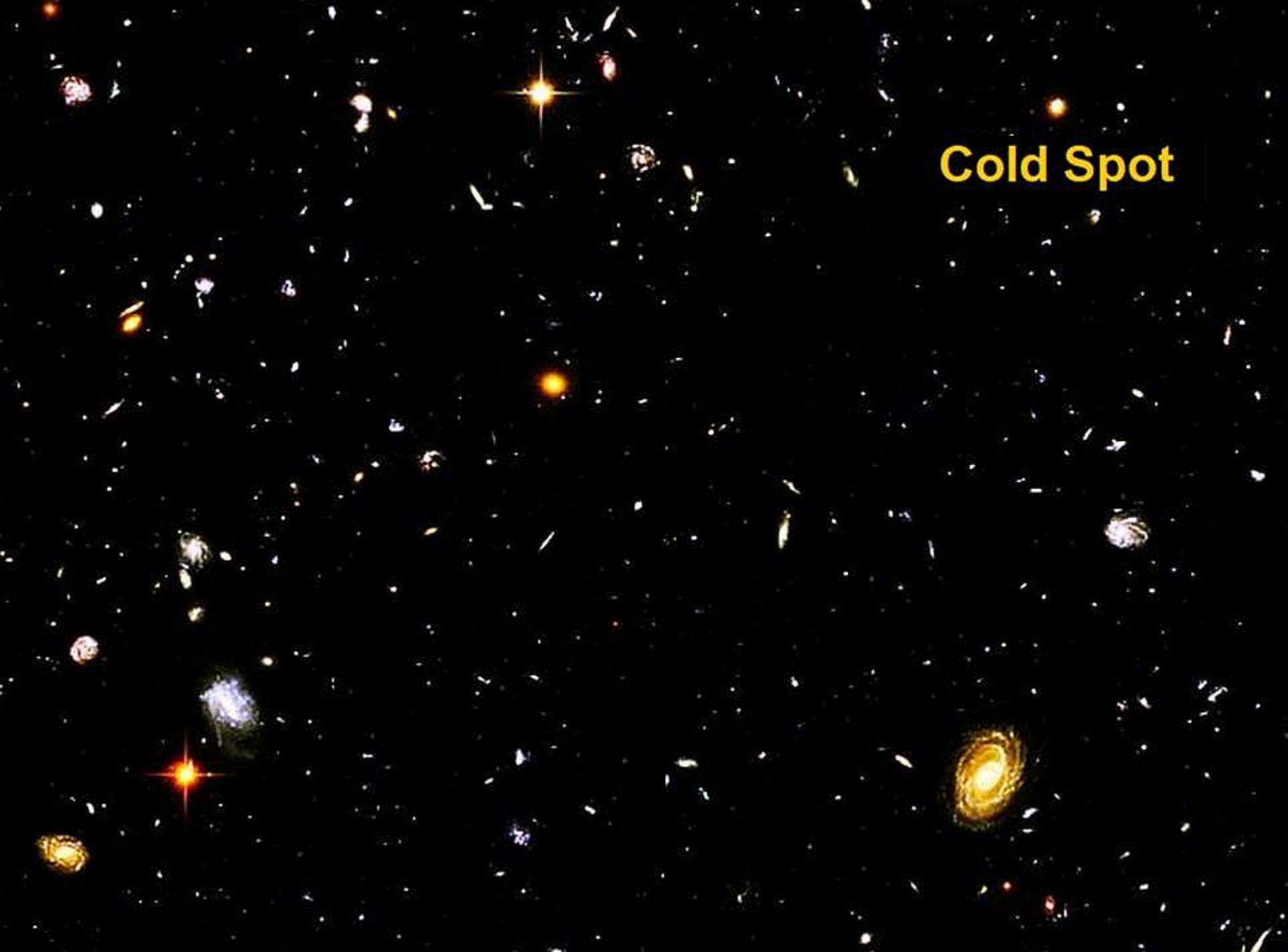


Cold Spot





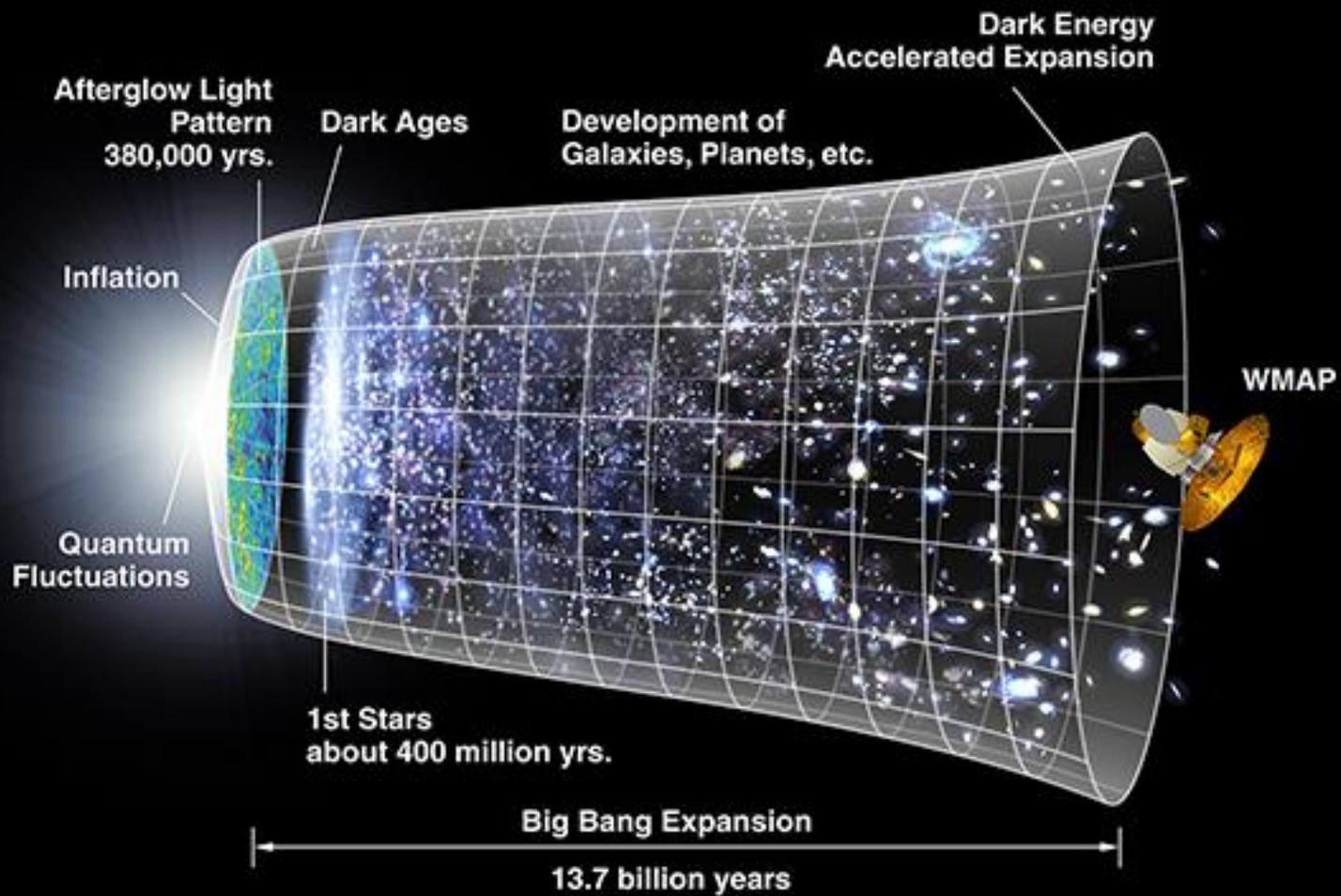
Cold Spot

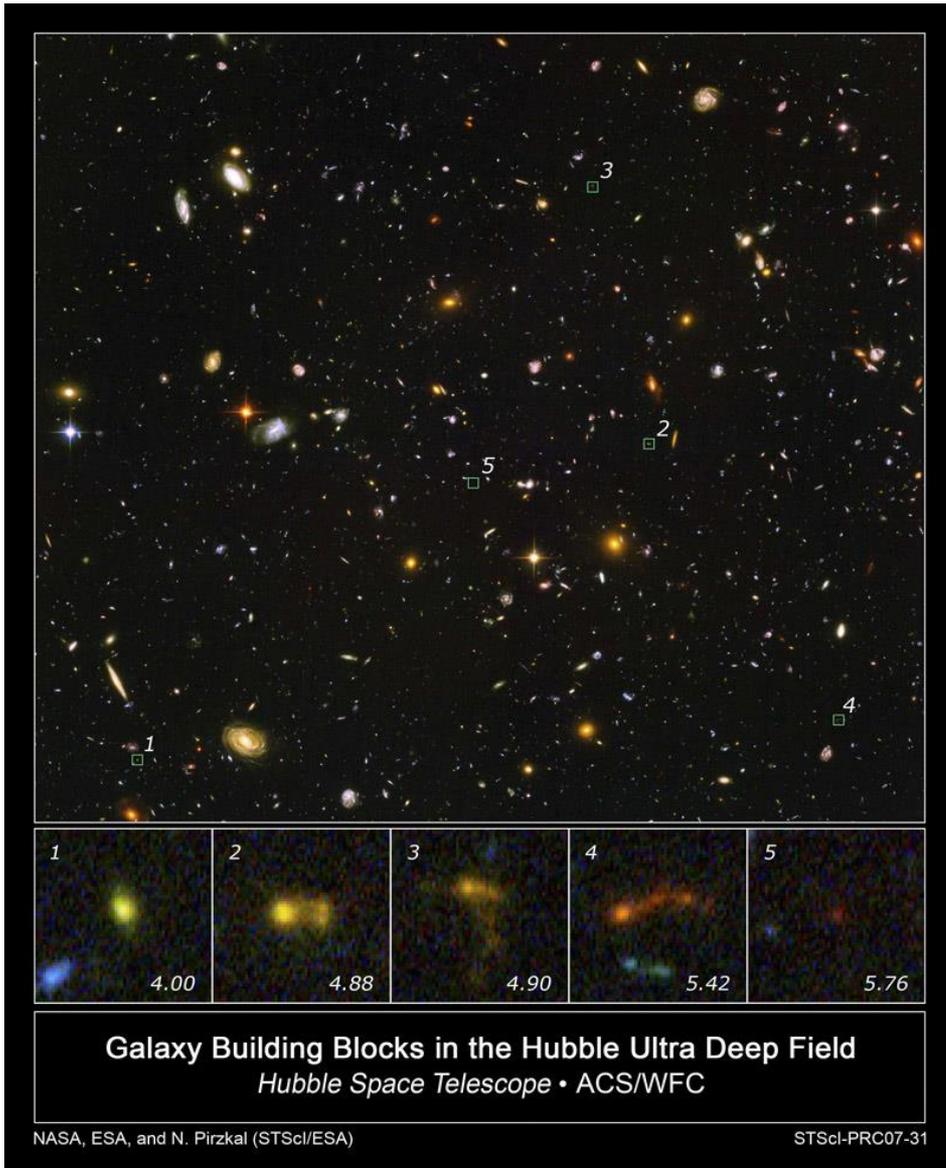
A deep-field astronomical image showing a vast field of galaxies. The galaxies are scattered across the frame, with some appearing as bright, distinct objects and others as faint, diffuse clouds. The colors of the galaxies vary, including yellow, orange, blue, and purple. In the upper right quadrant, the text "Cold Spot" is written in a bold, yellow font. The background is a dark, blackish space filled with numerous small, white and grey specks, likely representing distant stars or smaller galaxies.

Cold Spot

Multiverso

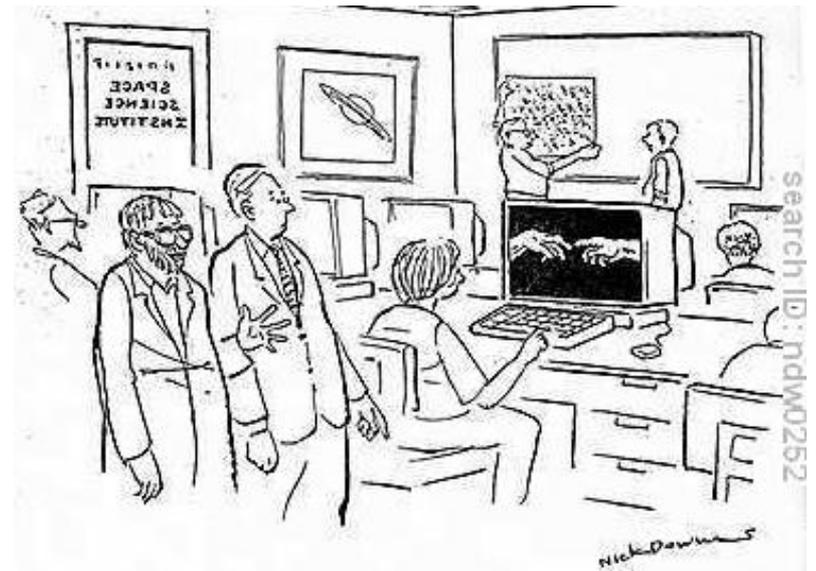






**LA VOLTA CELESTE APPARE
 COSTELLATA DI GALASSIE.**

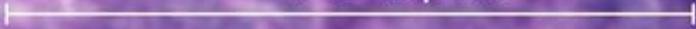
**LA TEORIA DEL BIG BANG
 NON SPIEGA LA LORO ORIGINE**



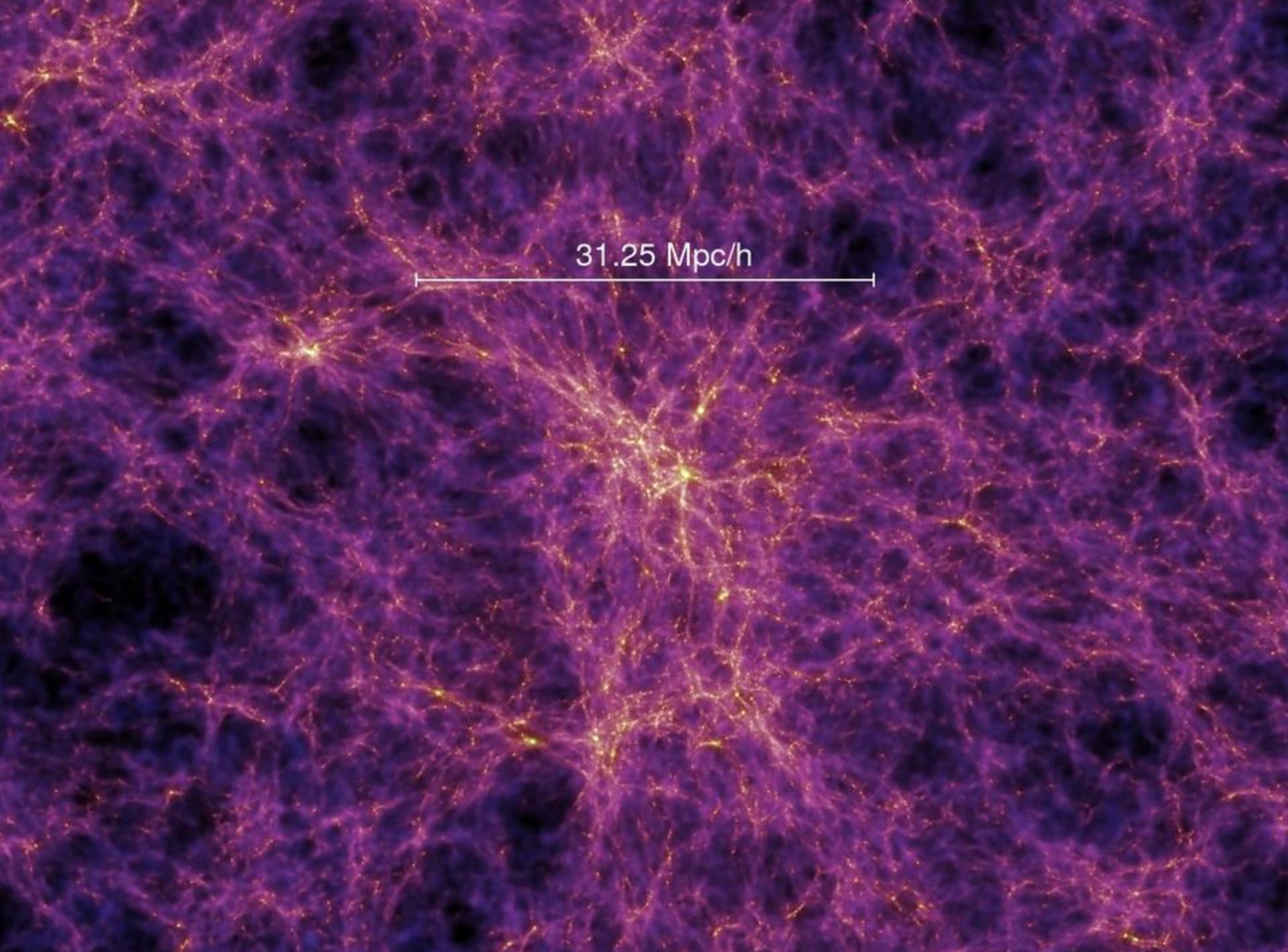
"The Hubble telescope is providing us with incredibly distant images of a very early universe."

FLUTTUAZIONI PRIMORDIALI DI DENSITA'

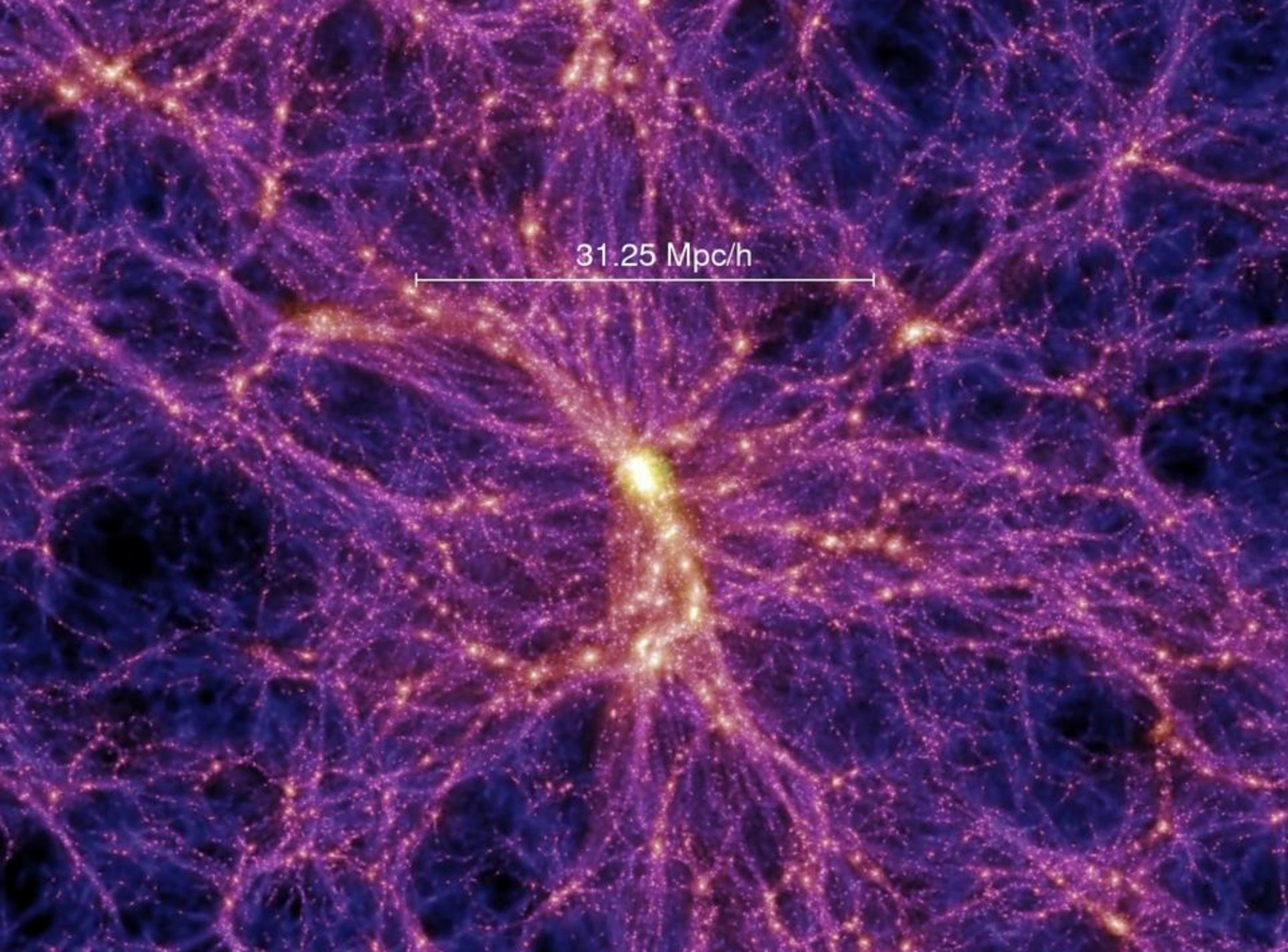
31.25 Mpc/h



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



31.25 Mpc/h

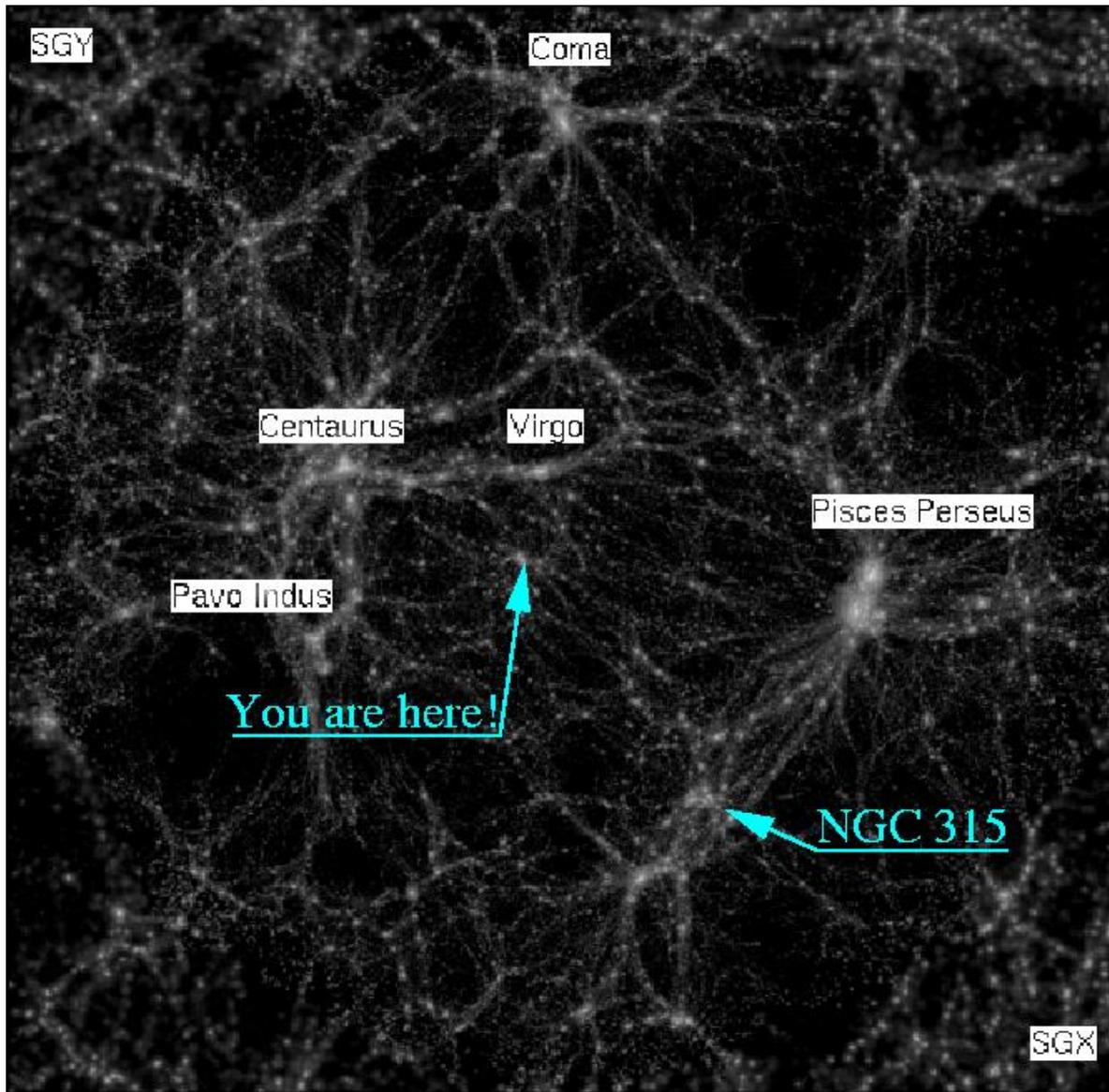


31.25 Mpc/h

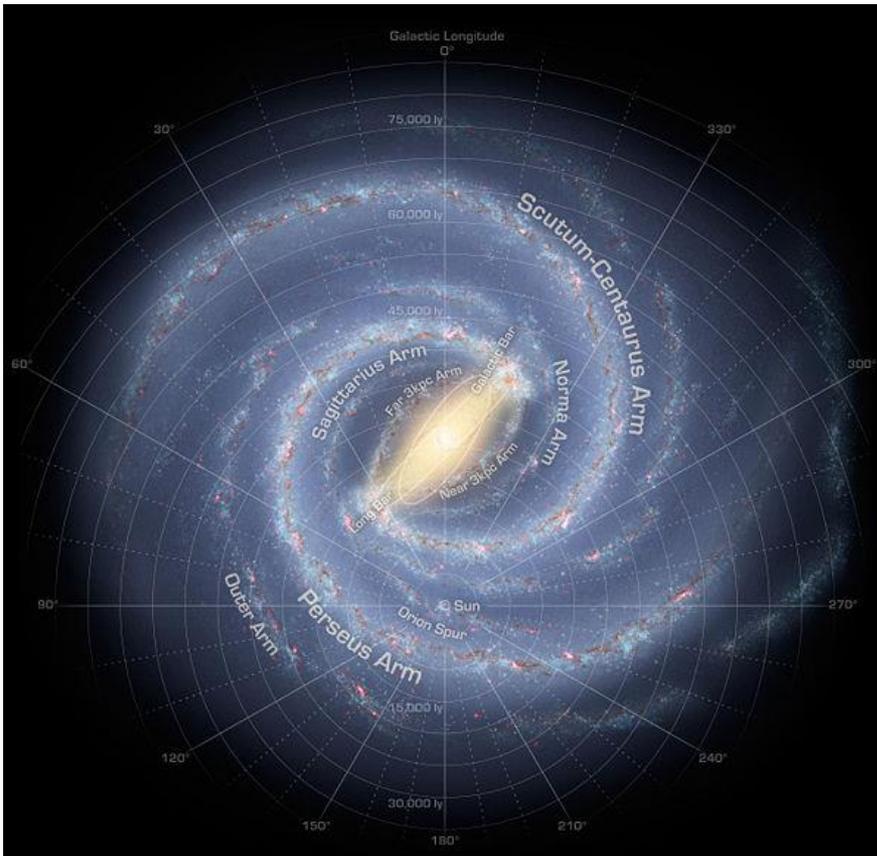
GRANDI AMMASSI DI GALASSIE

31.25 Mpc/h

A visualization of the cosmic web, showing a dense network of galaxies. The galaxies are represented as small dots, with a color gradient from blue to yellow. A central, bright yellow-green cluster is the most prominent feature. A horizontal white line with vertical end caps is positioned below the title, indicating a scale of 31.25 Mpc/h.



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



LA NOSTRA GALASSIA E' UNA SPIRALE BARRATA

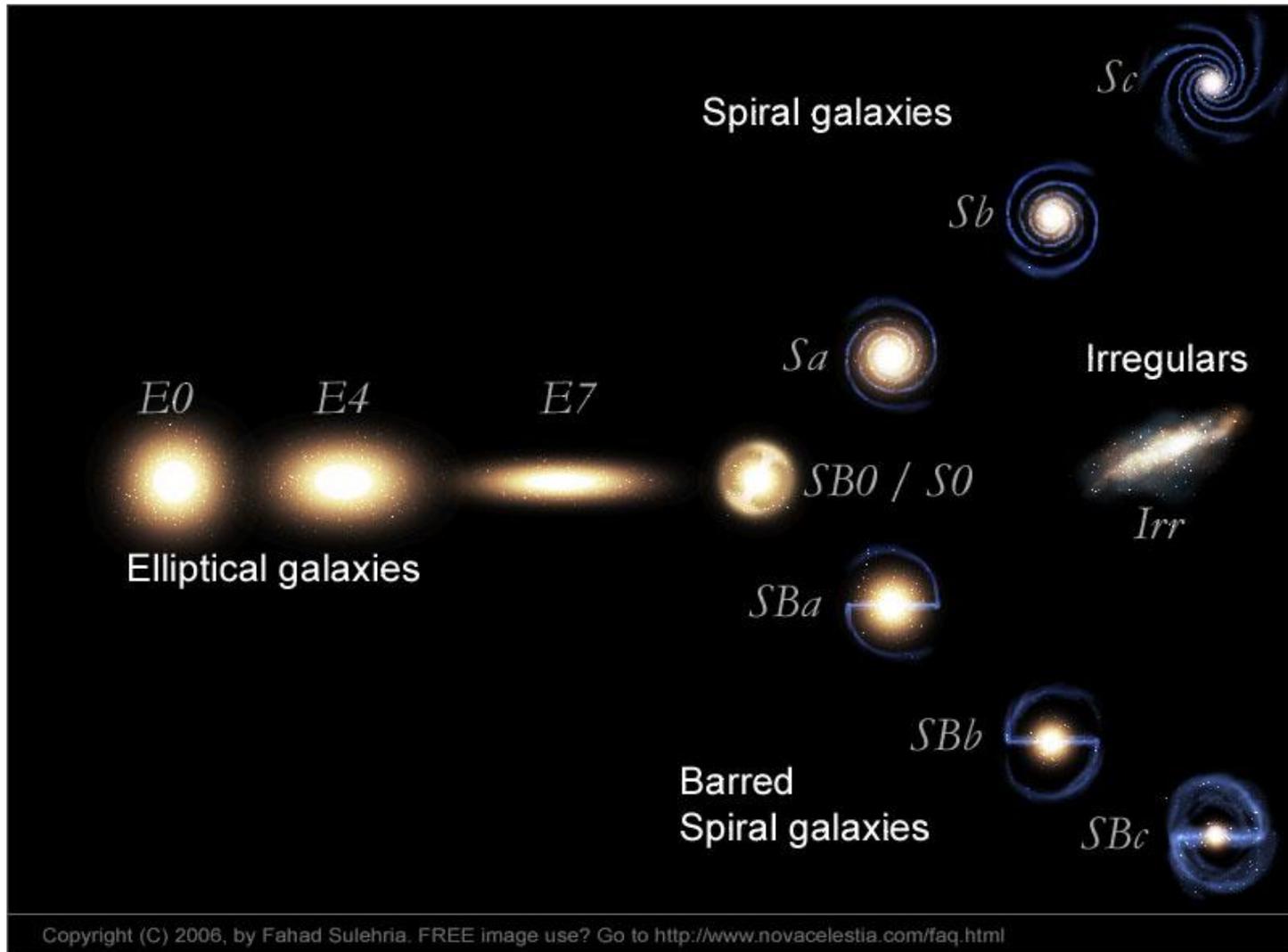
DUE BRACCI PRINCIPALI SONO UNITI DA UNA BARRA CENTRALE

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



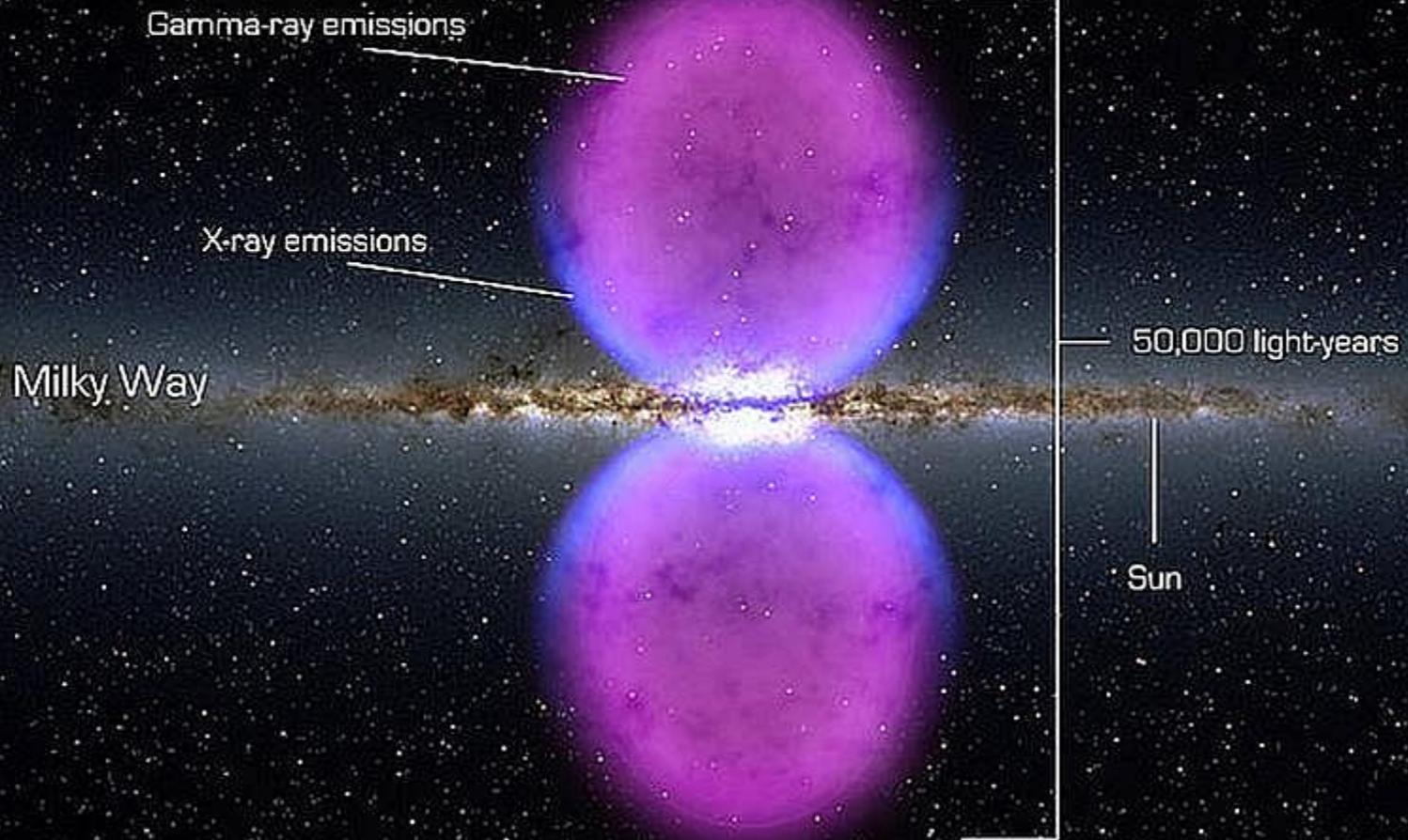
La nostra galassia



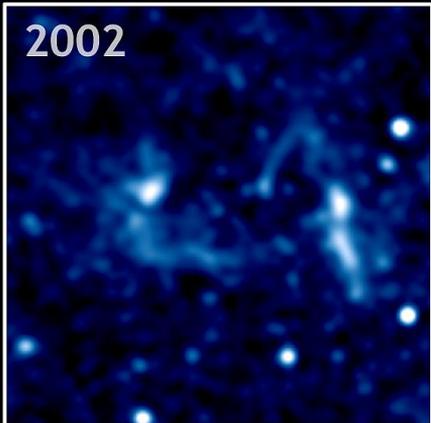
Caratteristiche fisiche

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

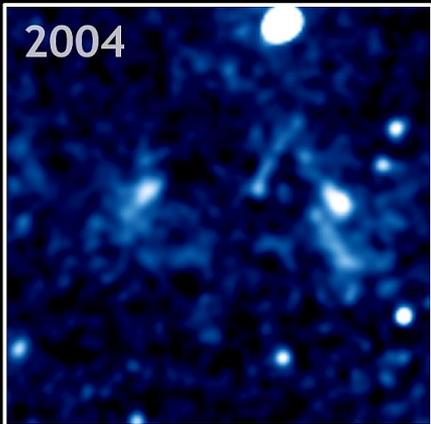
Il centro galattico



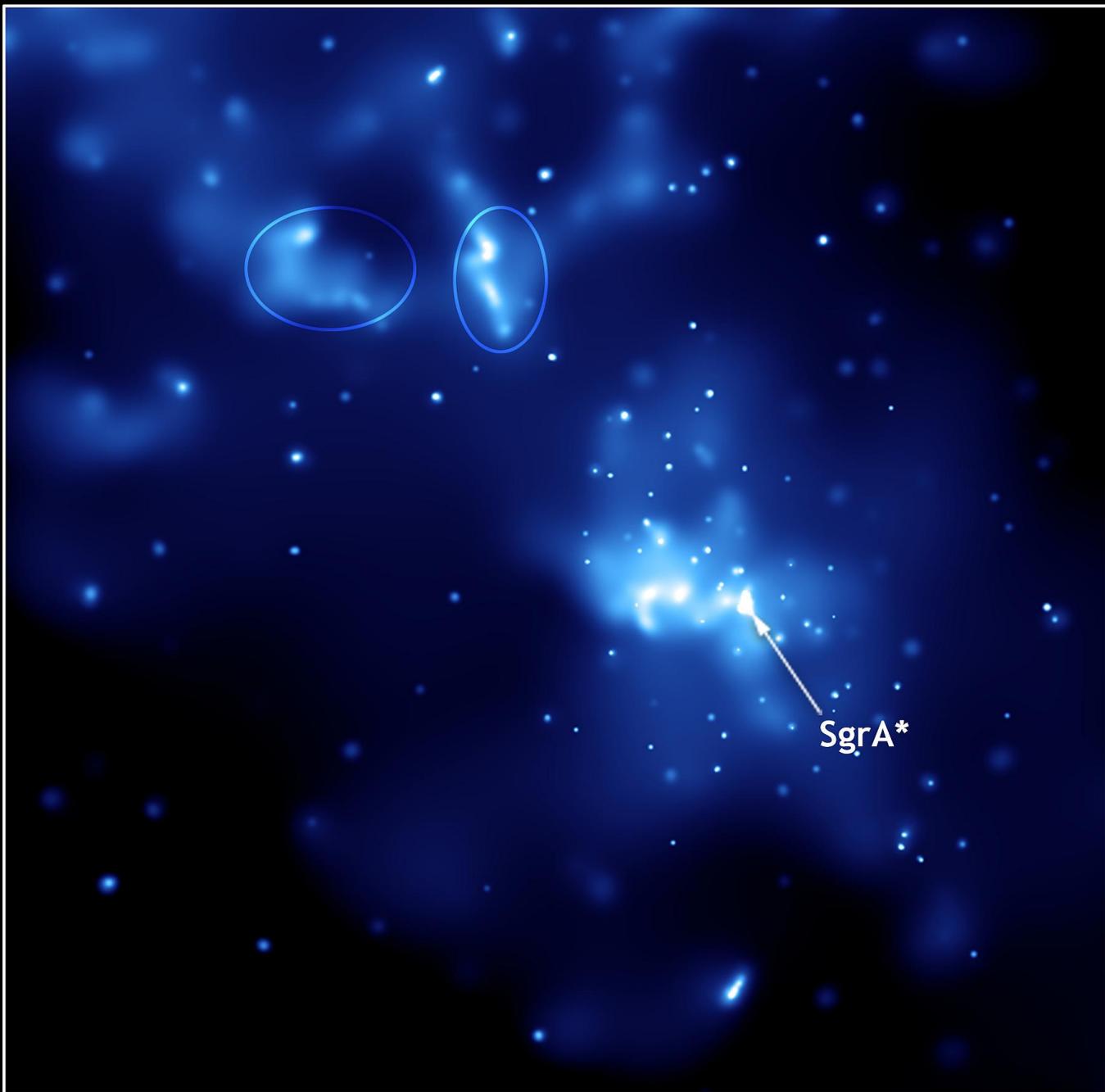
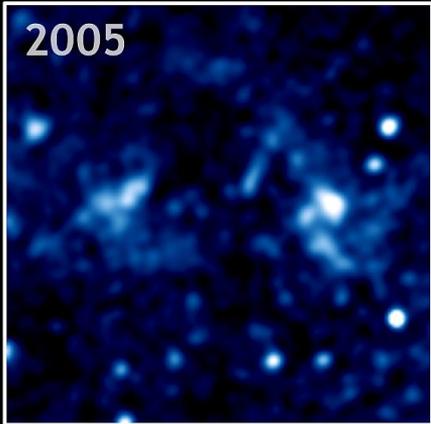
2002



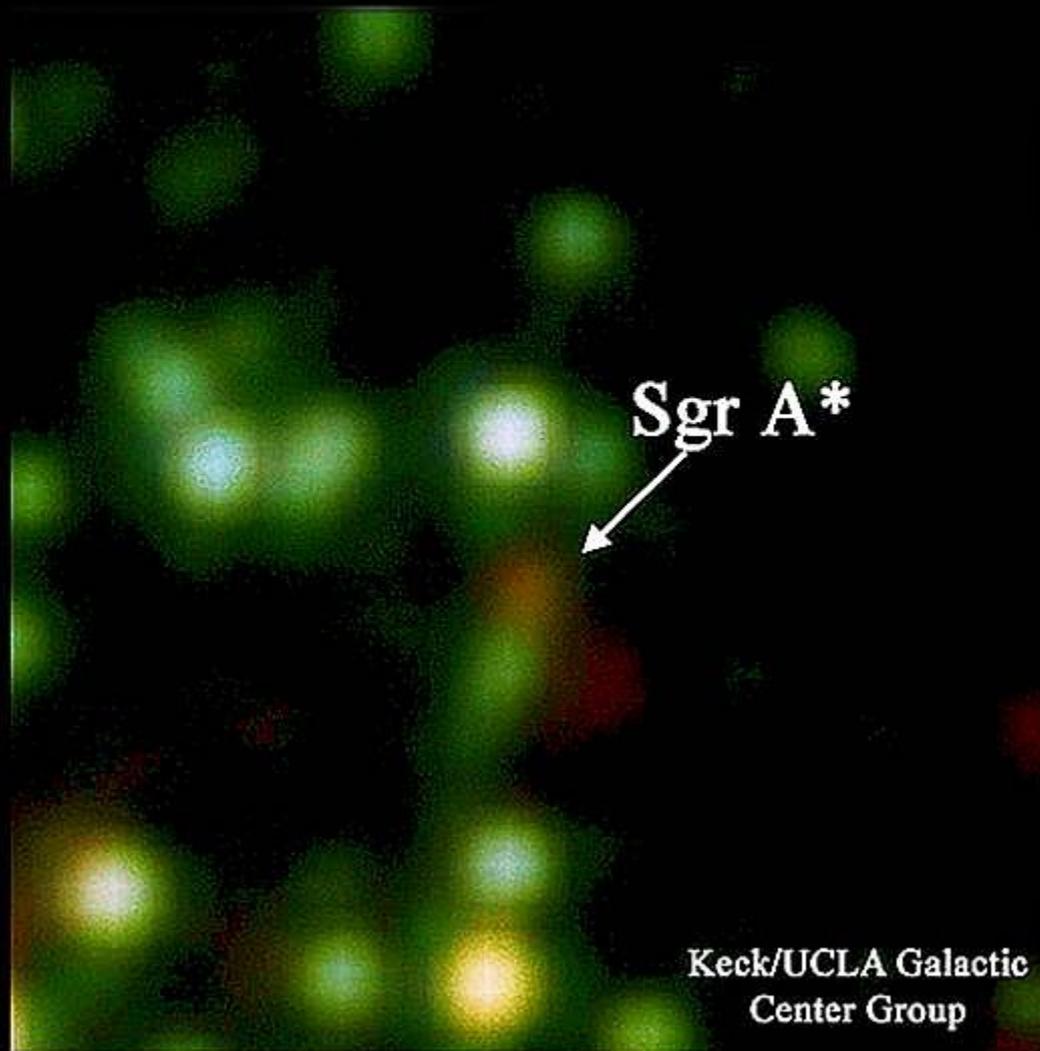
2004



2005

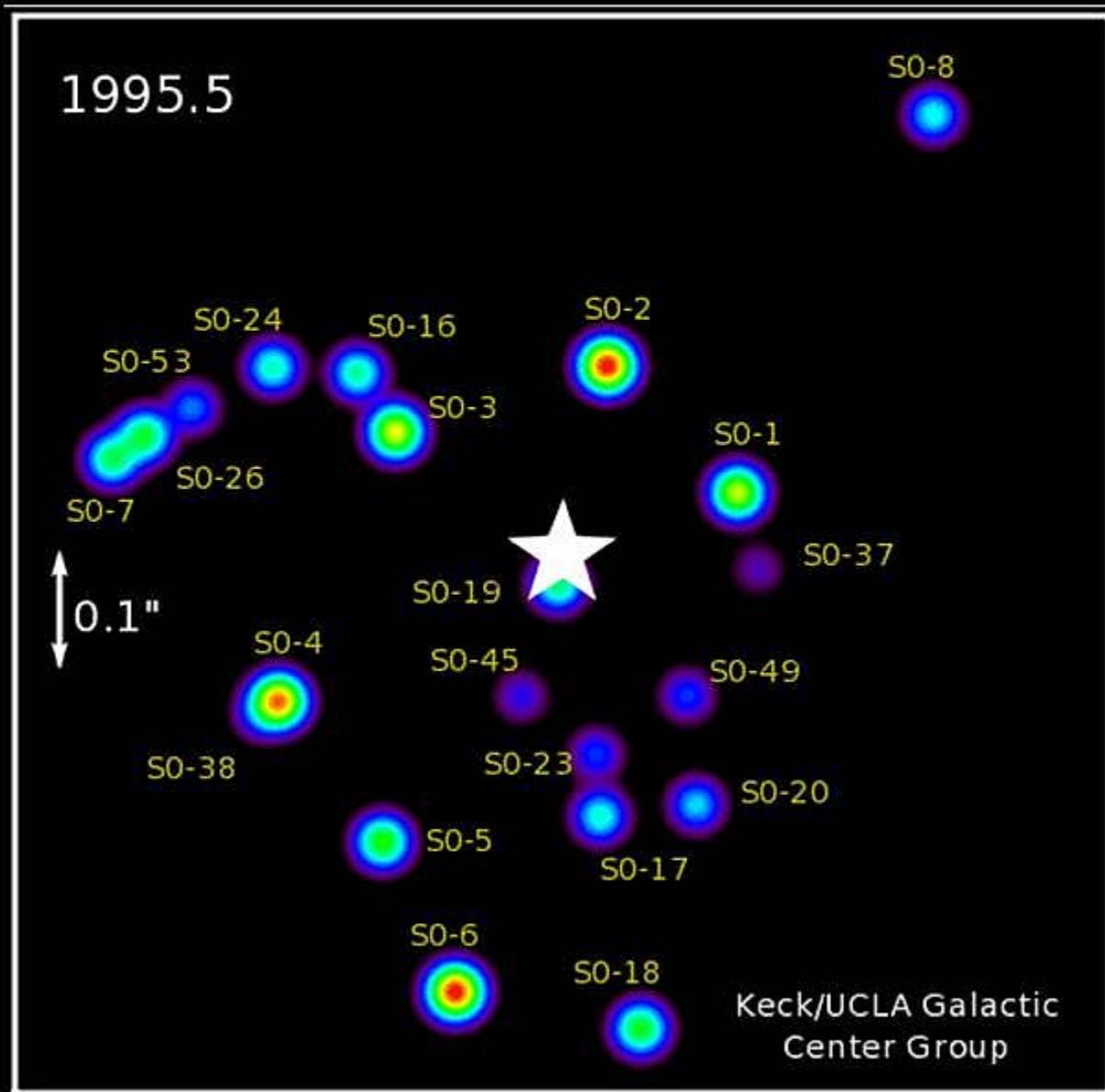


Il buco nero al centro della nostra Galassia



Centro Galattico

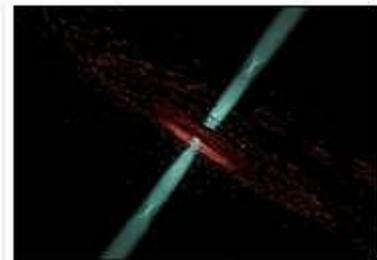
Orbite delle stelle supermassive intorno al buco nero centrale

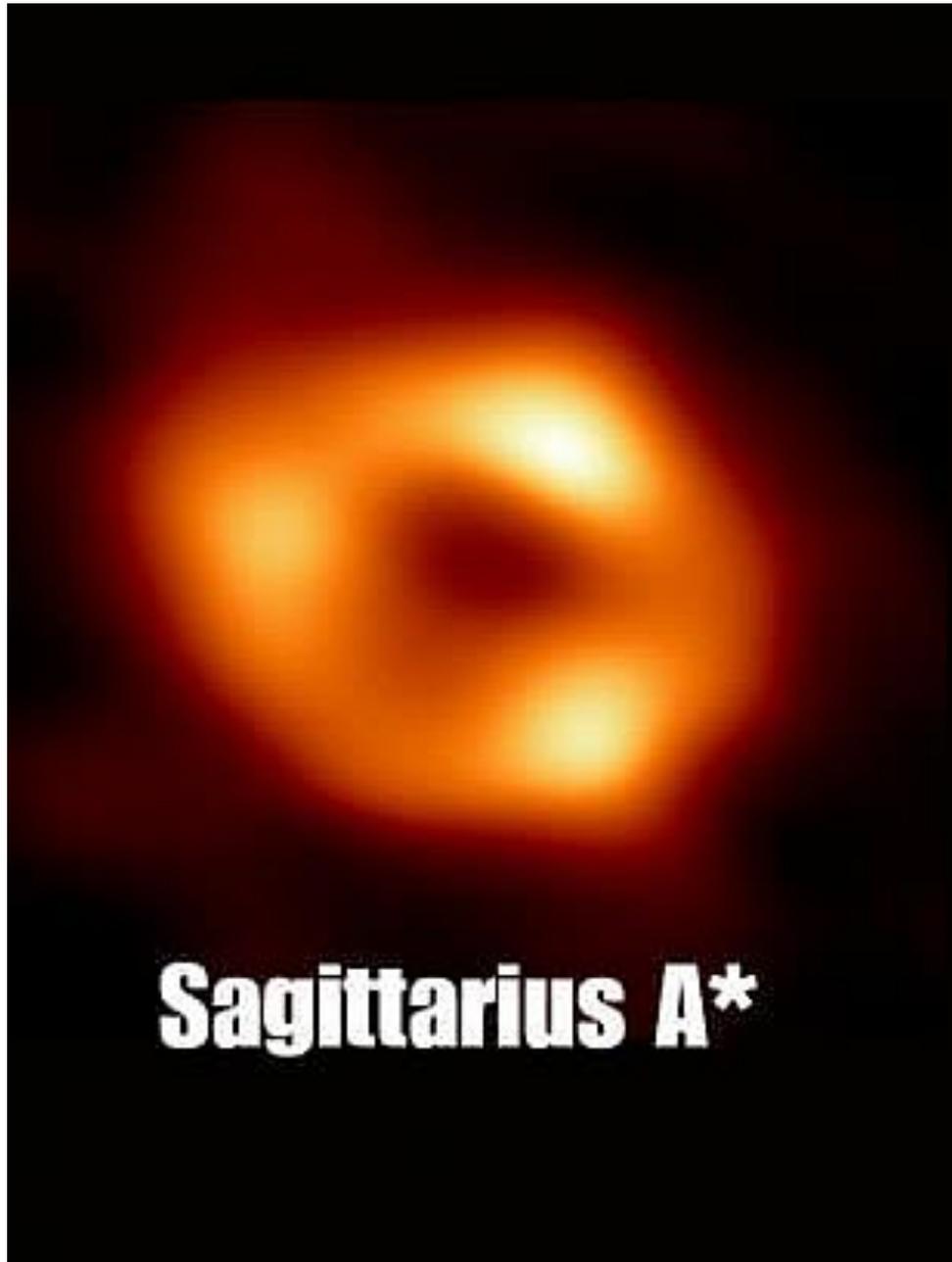




Sagittarius A

Il centro galattico

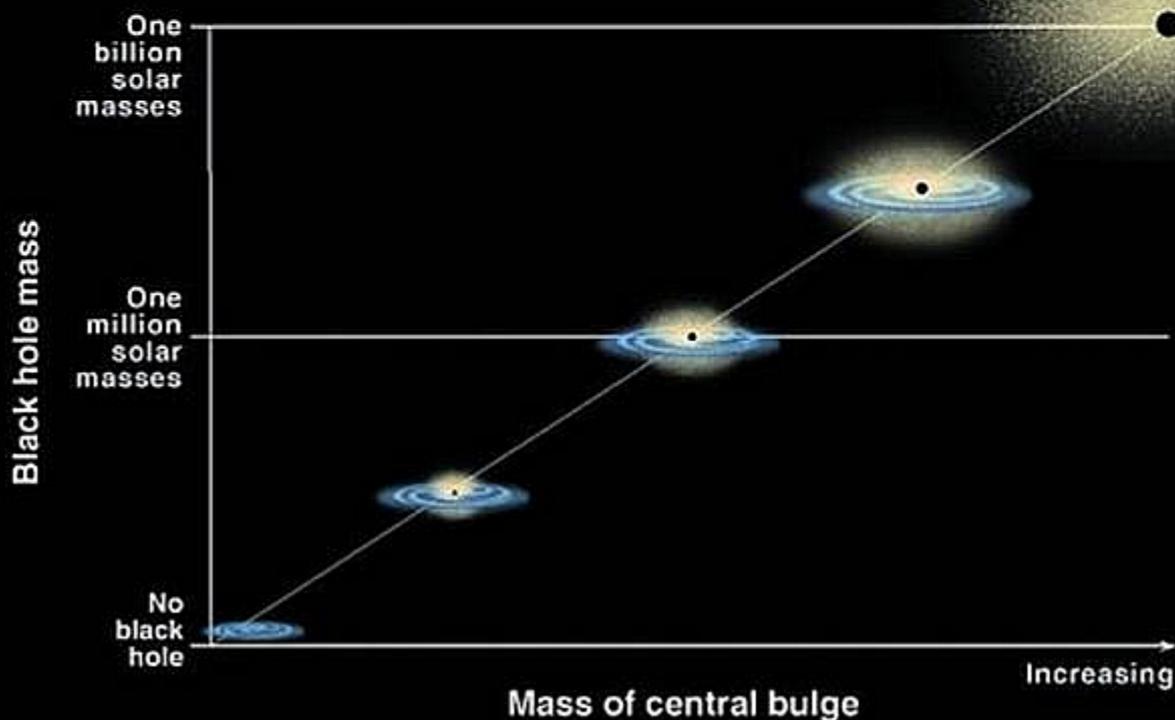




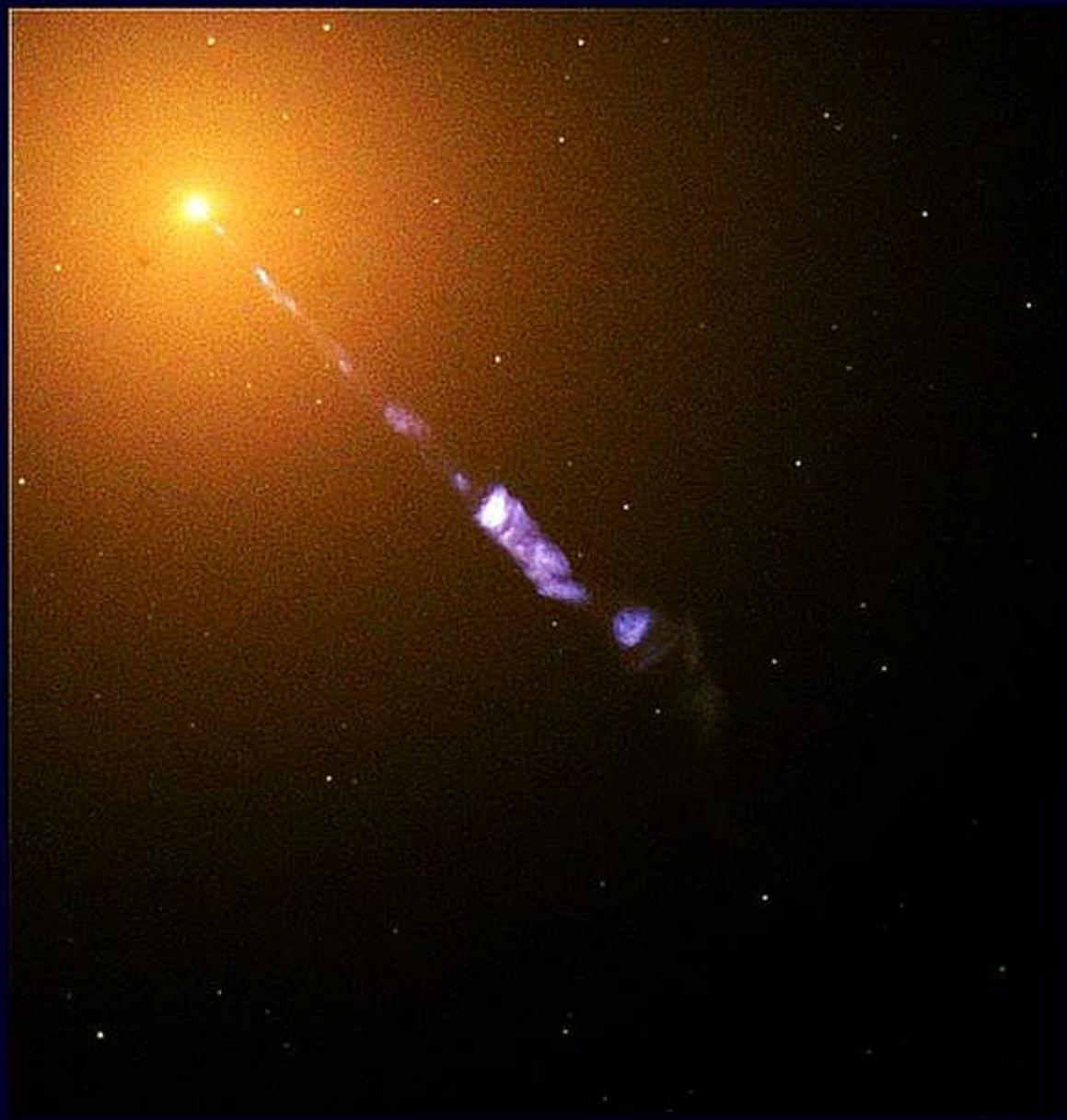
Sagittarius A*

Buchi neri e formazione delle galassie

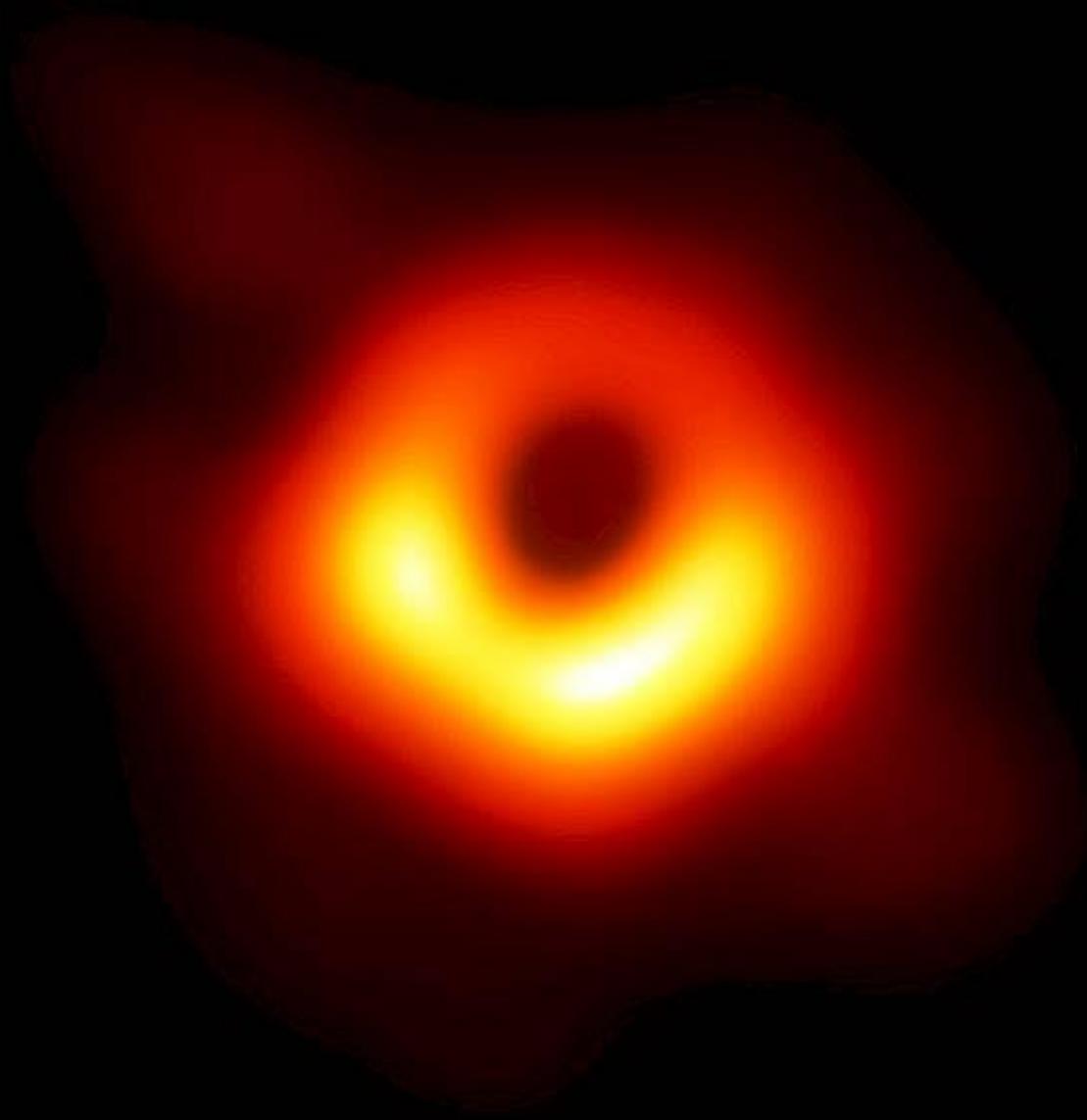
Correlation Between Black Hole Mass and Bulge Mass

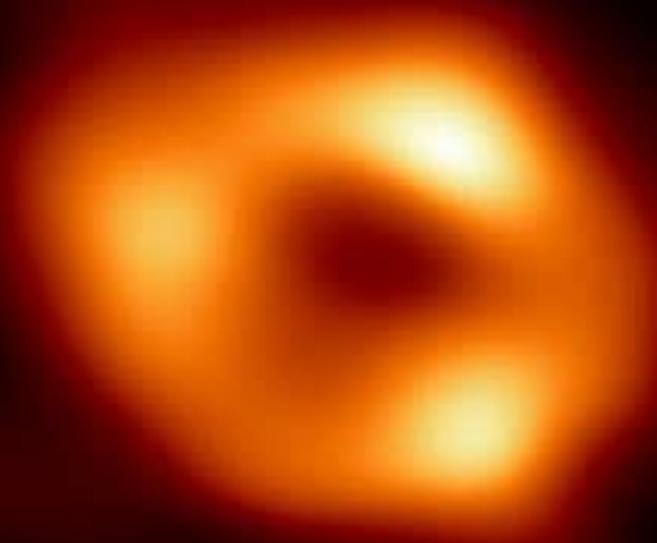


M87

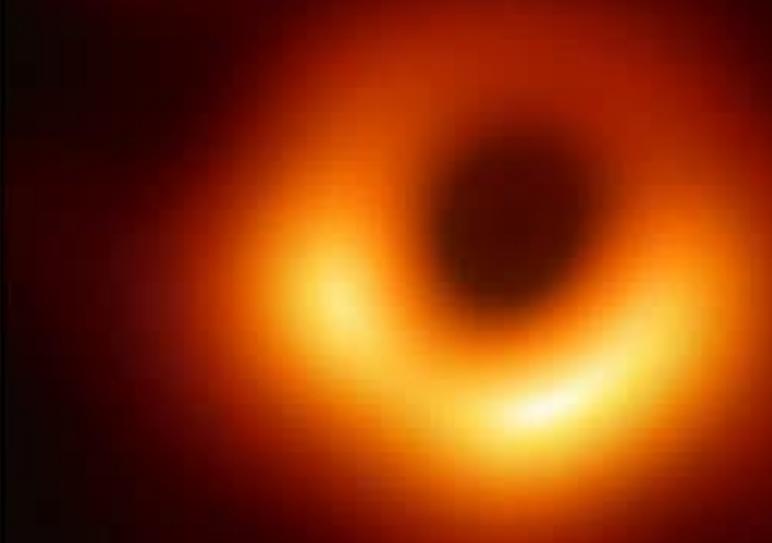


M87





Sagittarius A*



M87

M87*

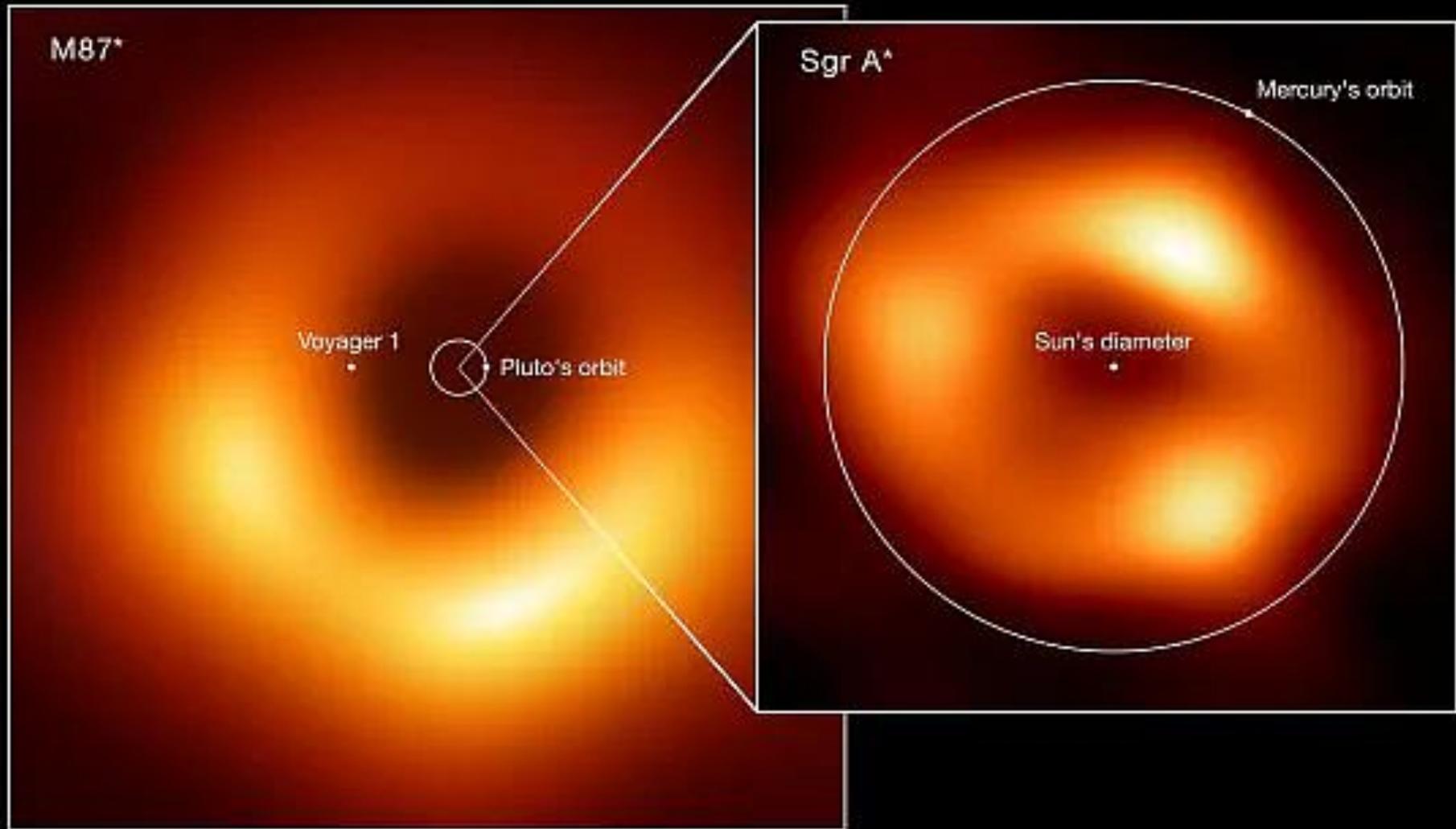
Voyager 1

Pluto's orbit

Sgr A*

Mercury's orbit

Sun's diameter



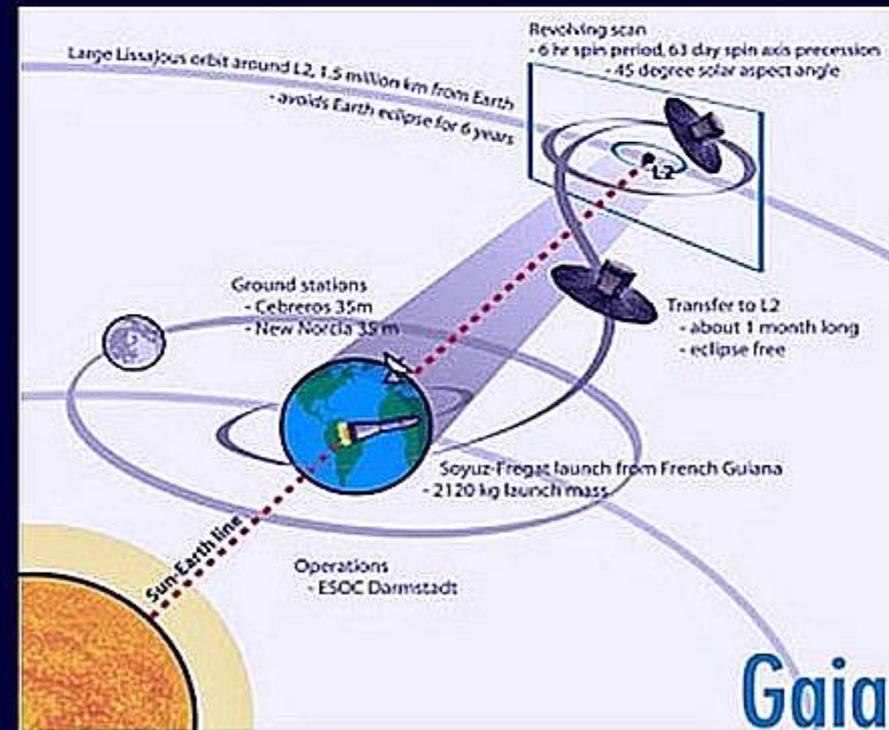
La missione spaziale Gaia

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.



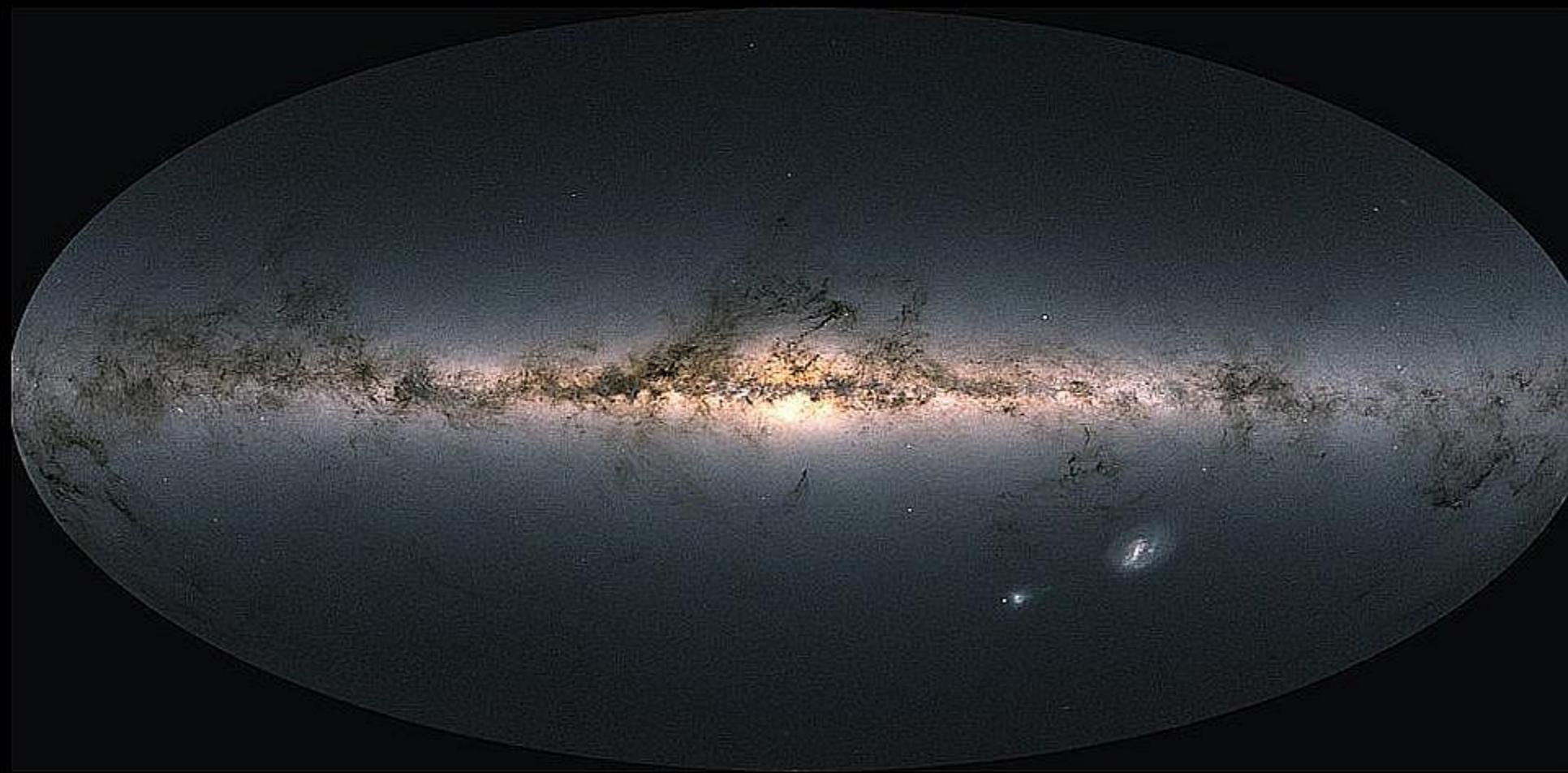
La missione spaziale Gaia

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)**

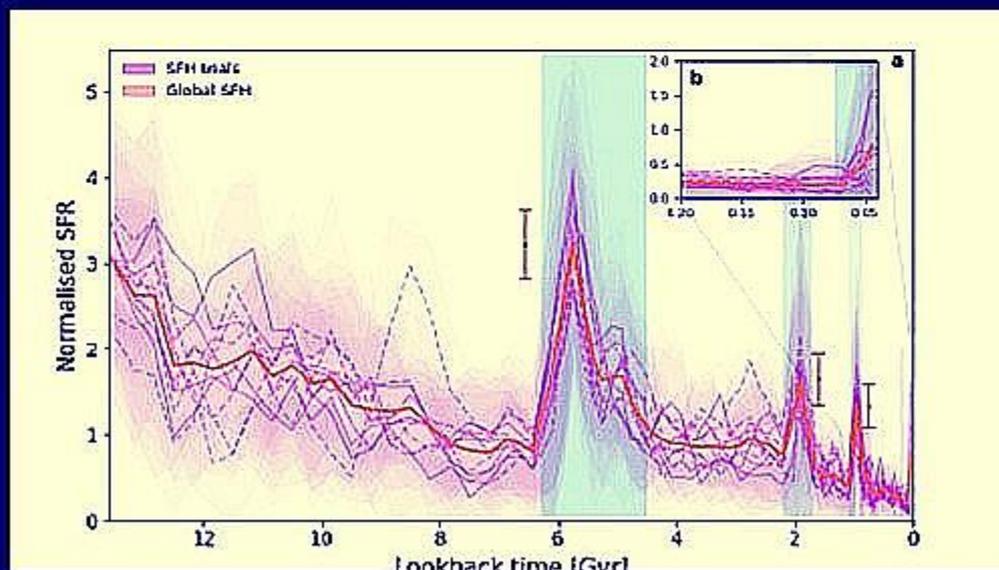


La Via Lattea sembra aver sperimentato circa 13 miliardi di anni fa un processo di formazione stellare molto violento, la cui intensità è andata progressivamente diminuendo nel tempo.

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

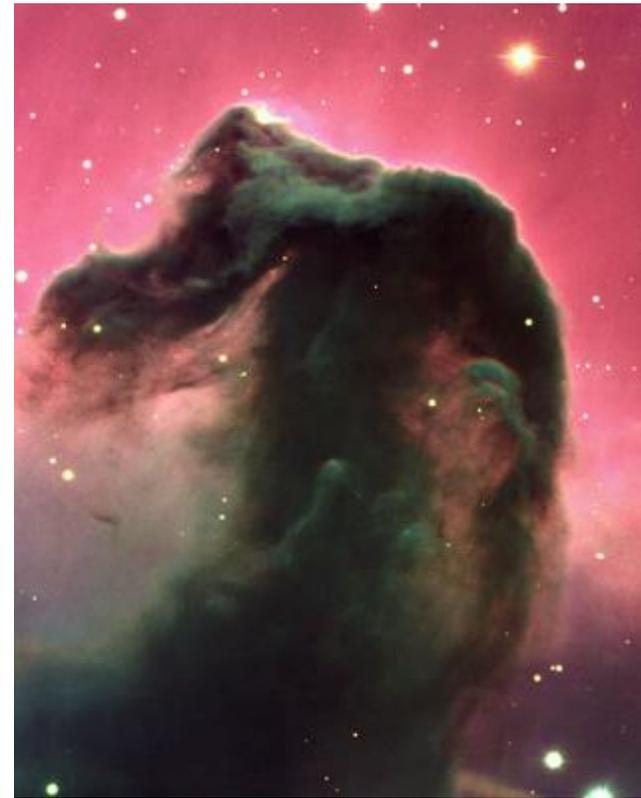
EMISSIONE

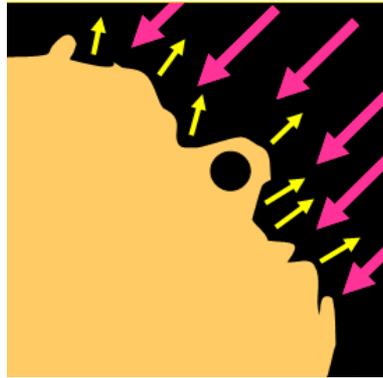
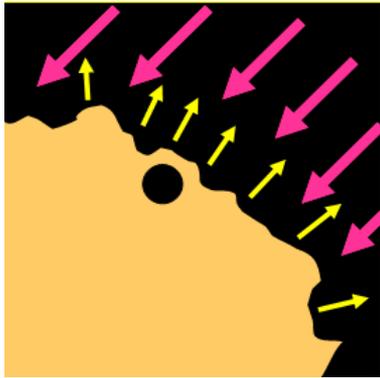


RIFLESSIONE



OSCURE



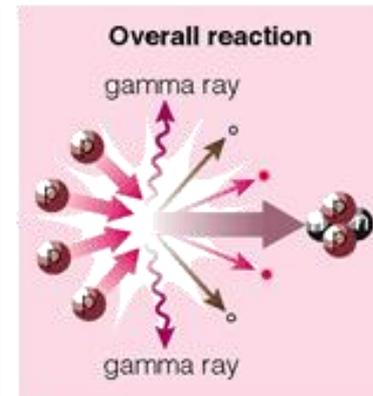
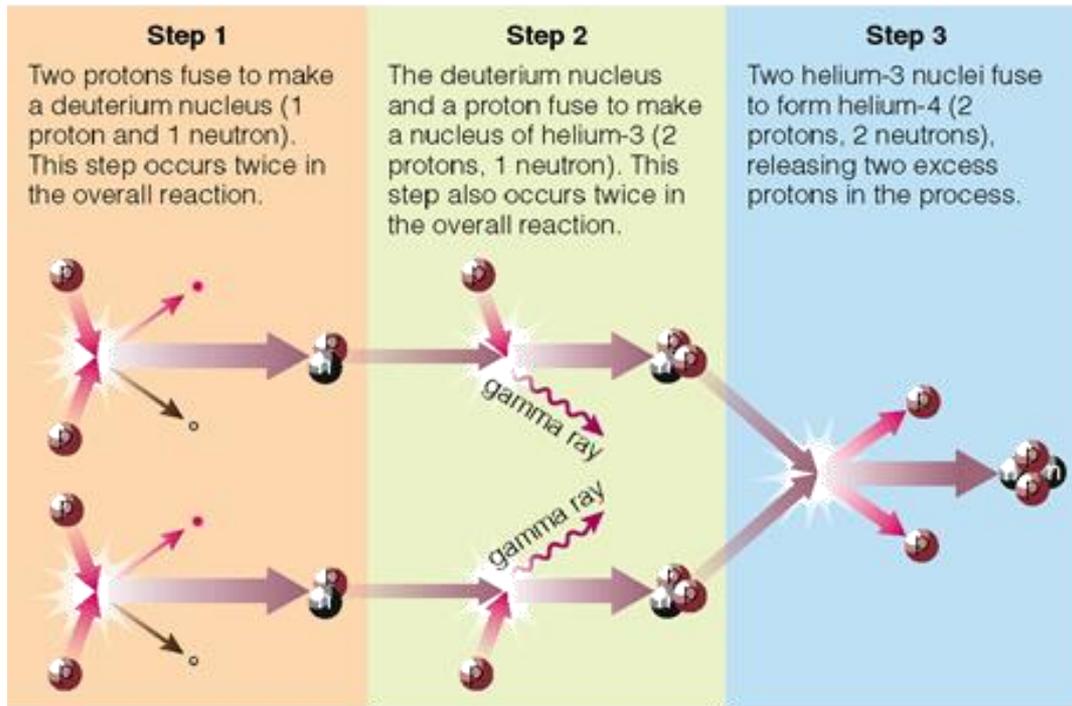


**NASCITA DI
UNA STELLA**

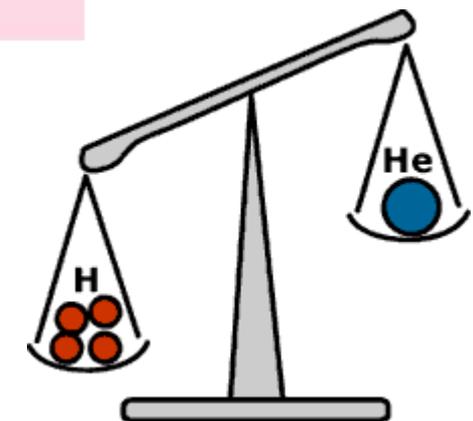
LA CATENA PROTONE-PROTONE FONDE QUATTRO ATOMI DI IDROGENO IN UN ATOMO DI ELIO. LA DIFFERENZA DI MASSA VIENE CONVERTITA IN ENERGIA SECONDO LA RELAZIONE

$$E=mc^2$$

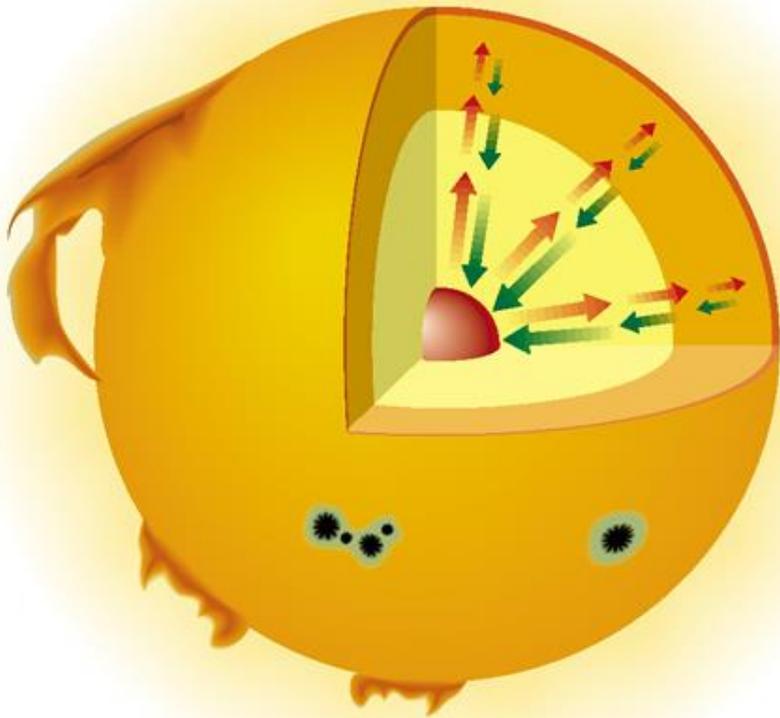
Hydrogen Fusion by the Proton-Proton Chain



- Key:
- neutron
 - proton
 - gamma ray
 - neutrino
 - positron



pressure →
gravity ←

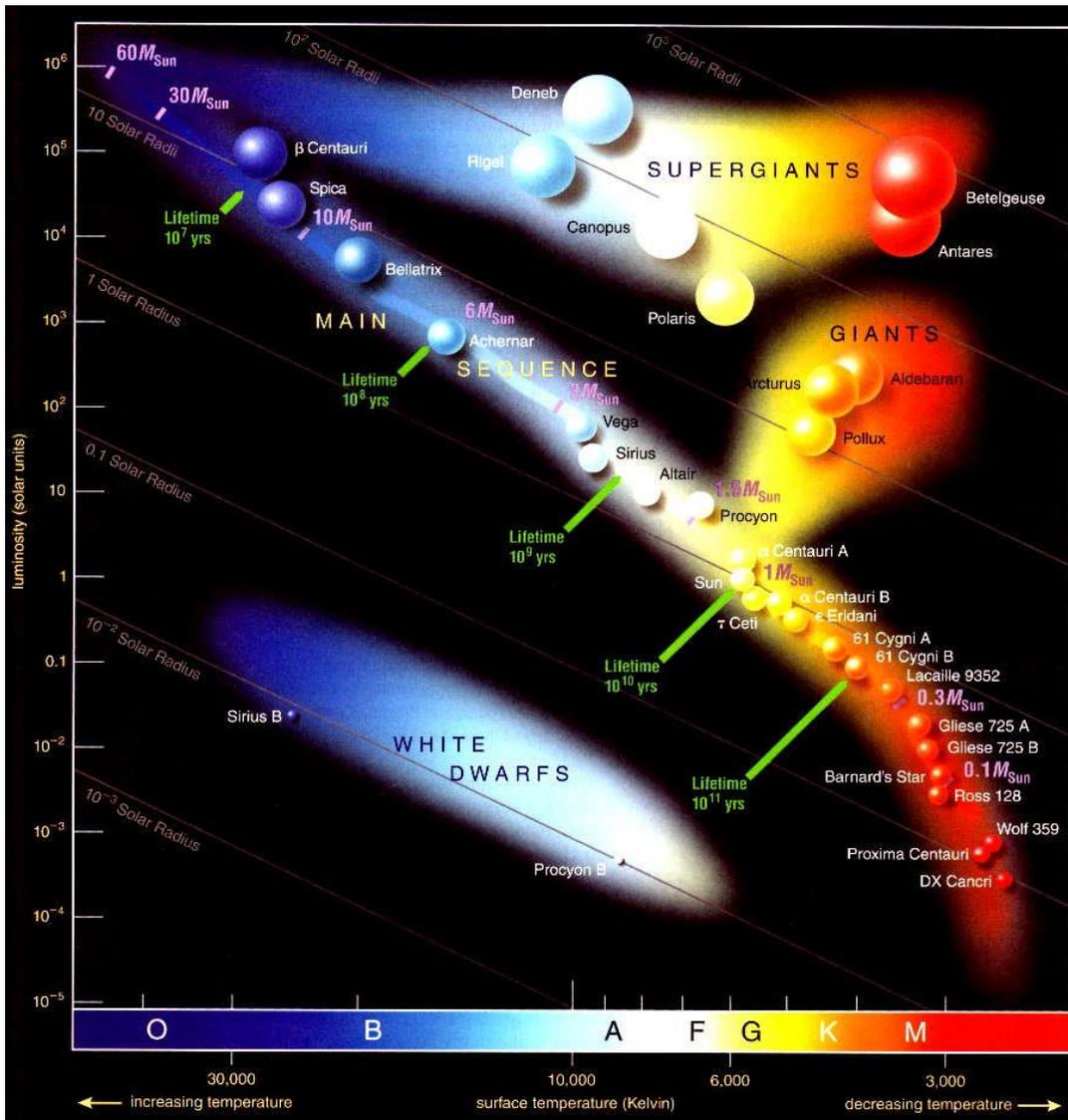


**UNA VOLTA INnescata
LA FUSIONE DELL'IDROGENO
LA STELLA ENTRA IN UNA
FASE DI EQUILIBRIO
DOVE LA PRESSIONE
BILANCIA LA GRAVITA'**

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

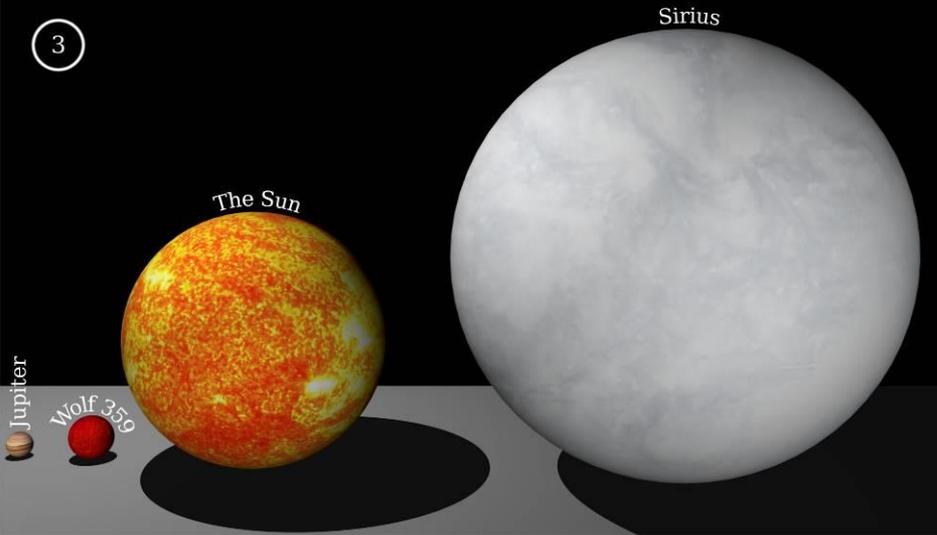
IL DIAGRAMMA DI HERTZSPRUNG-RUSSEL METTE IN RELAZIONE LA LUMINOSITA' E LA TEMPERATURA DELLE STELLE

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

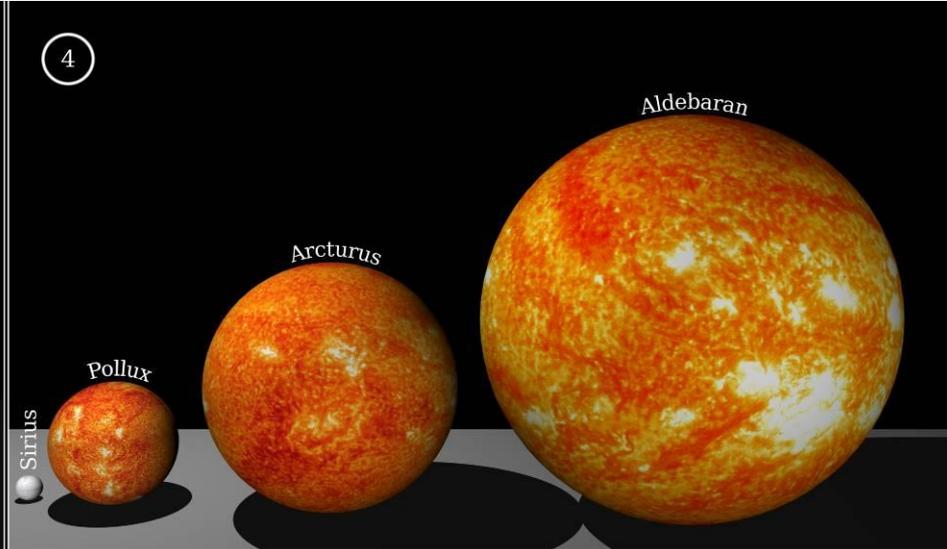


DIMENSIONI DELLE STELLE

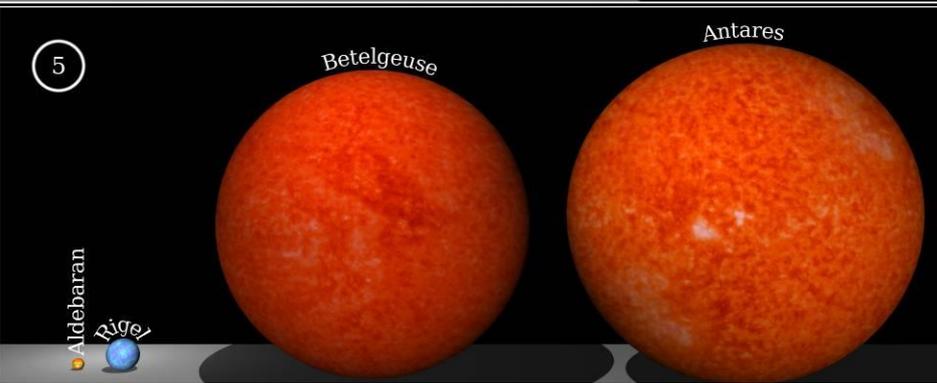
3



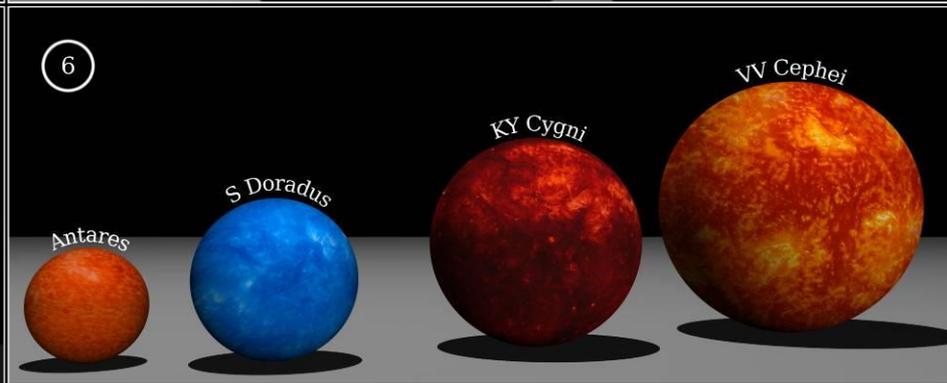
4



5



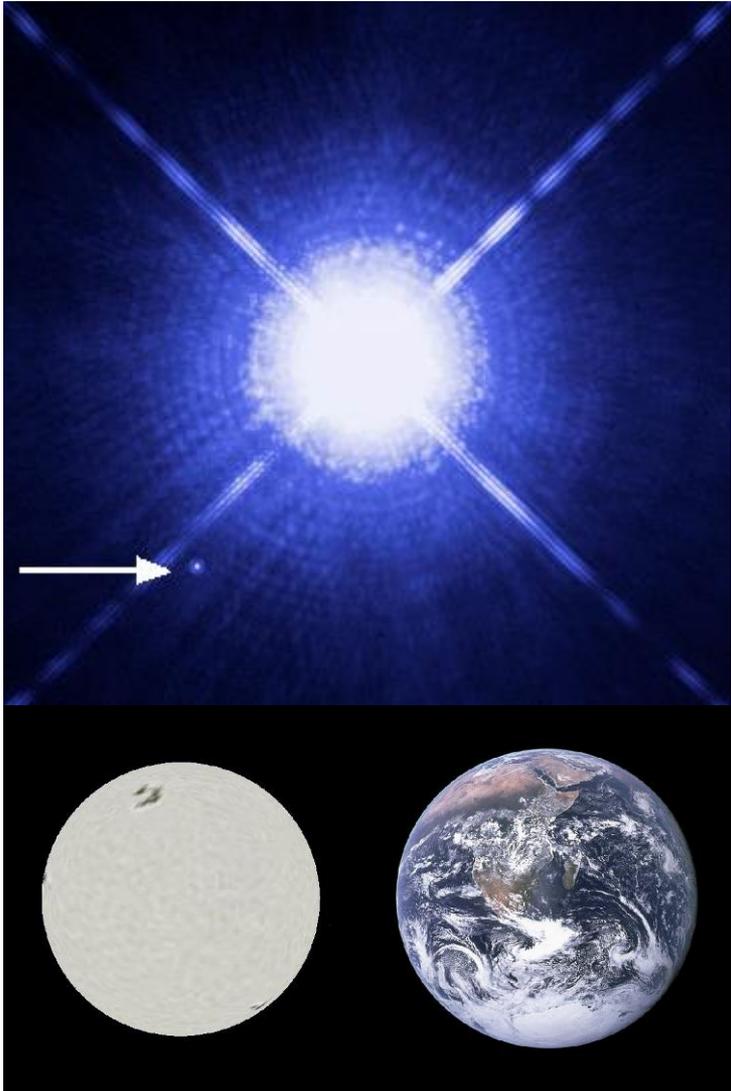
6



**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**

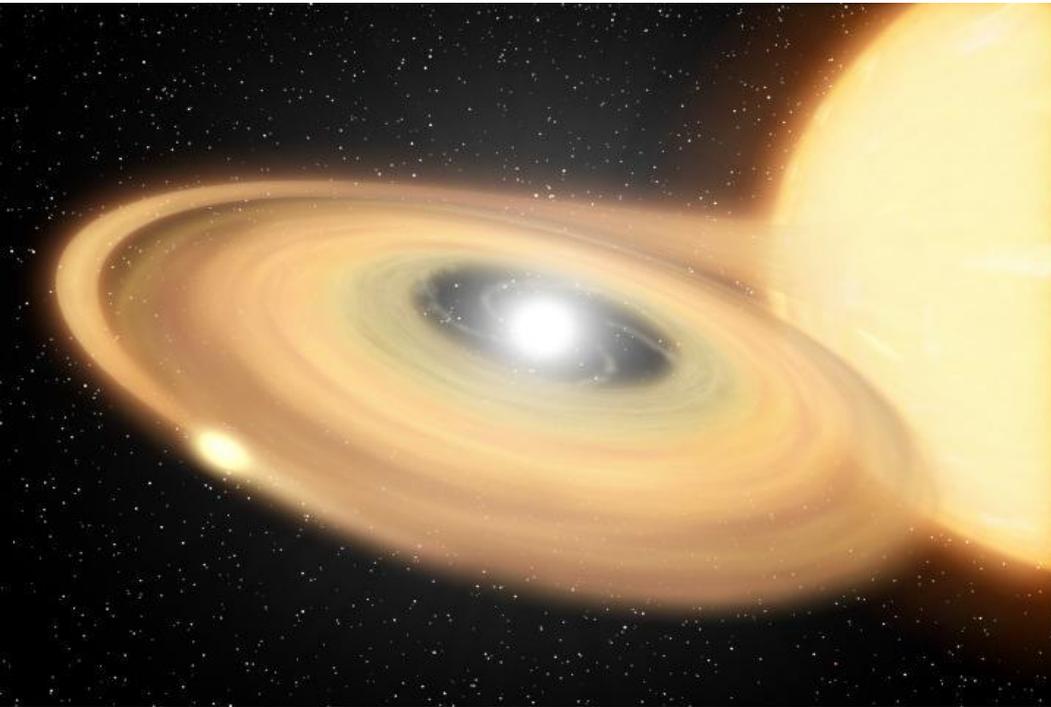
**LE NANE BIANCHE RESISTONO ALLA
COMPRESSIONE DELLA GRAVITA'
GRAZIE ALLA PRESSIONE DEGLI
ELETTRONI:
IL LIMITE E' 1,4 MASSE SOLARI**

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

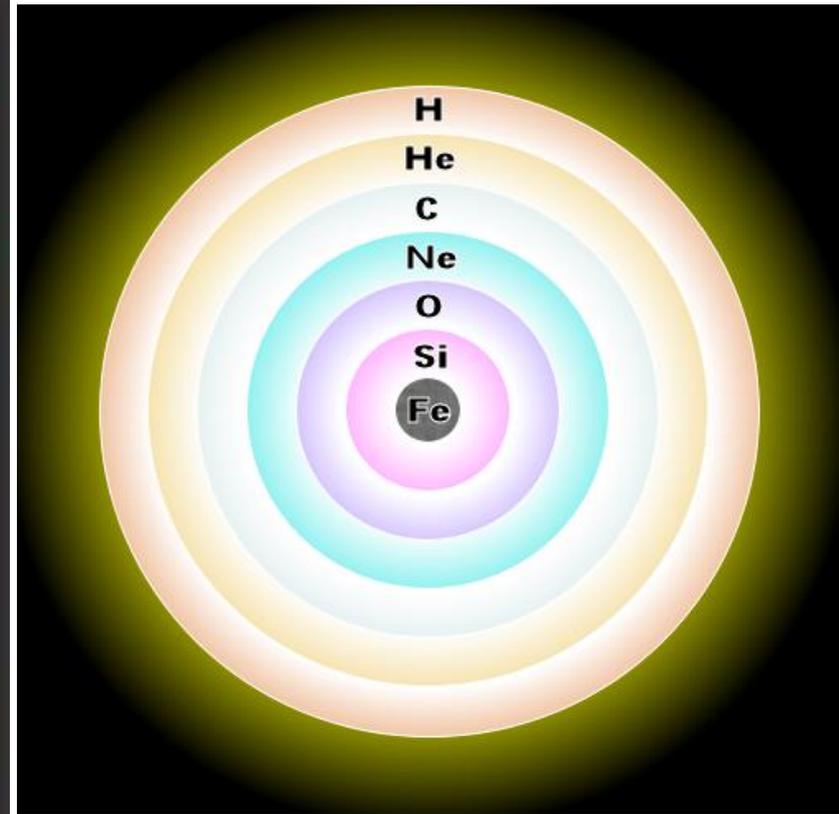
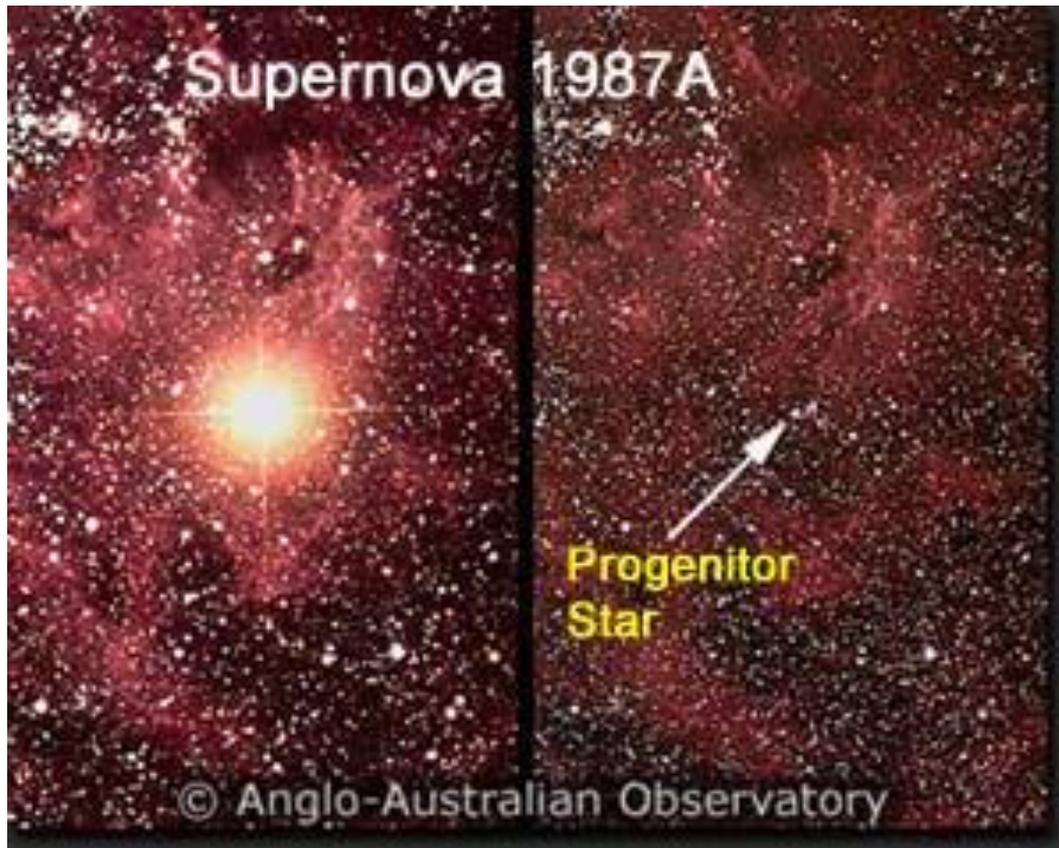
SUPERNOVAE DI TIPO Ia

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

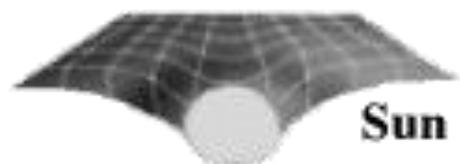


**LE SUPERNOVAE DI TIPO IIcc
HANNO ORIGINE DA STELLE CON MASSA
ALMENO 8 VOLTE SUPERIORE QUELLA DEL SOLE**

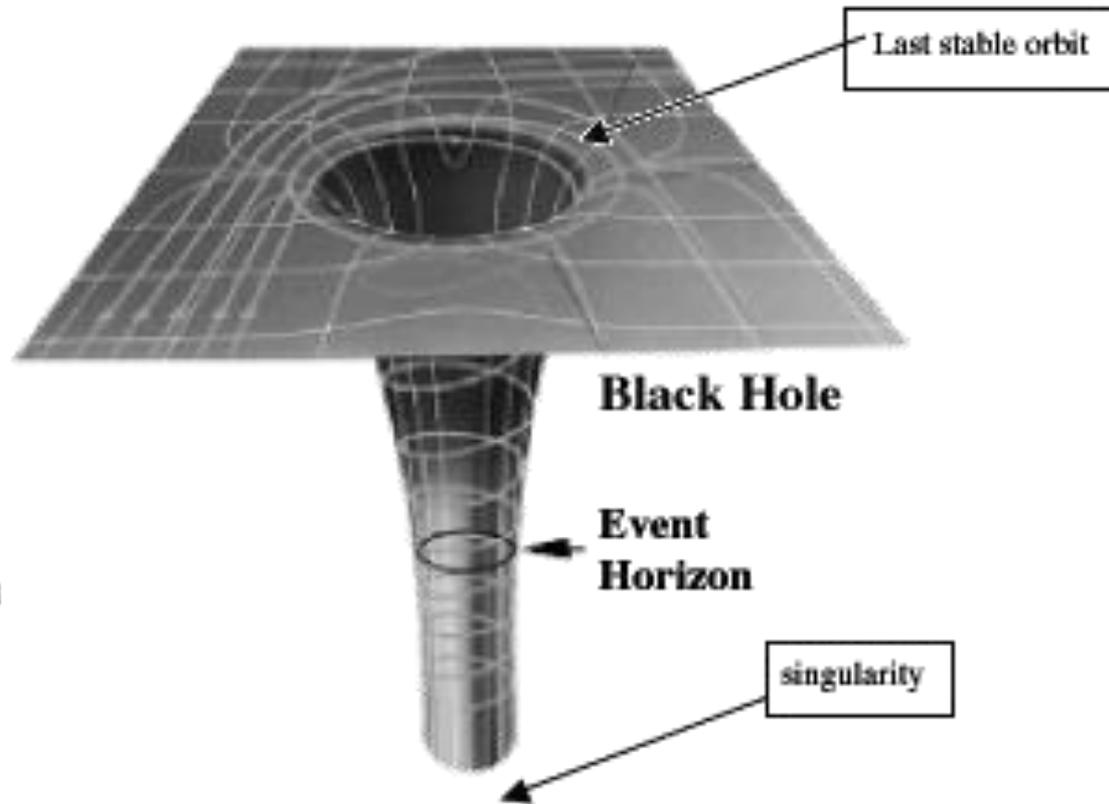


IL NUCLEO COMPRESSO DIVENTA UNA STELLA DI NEUTRONI

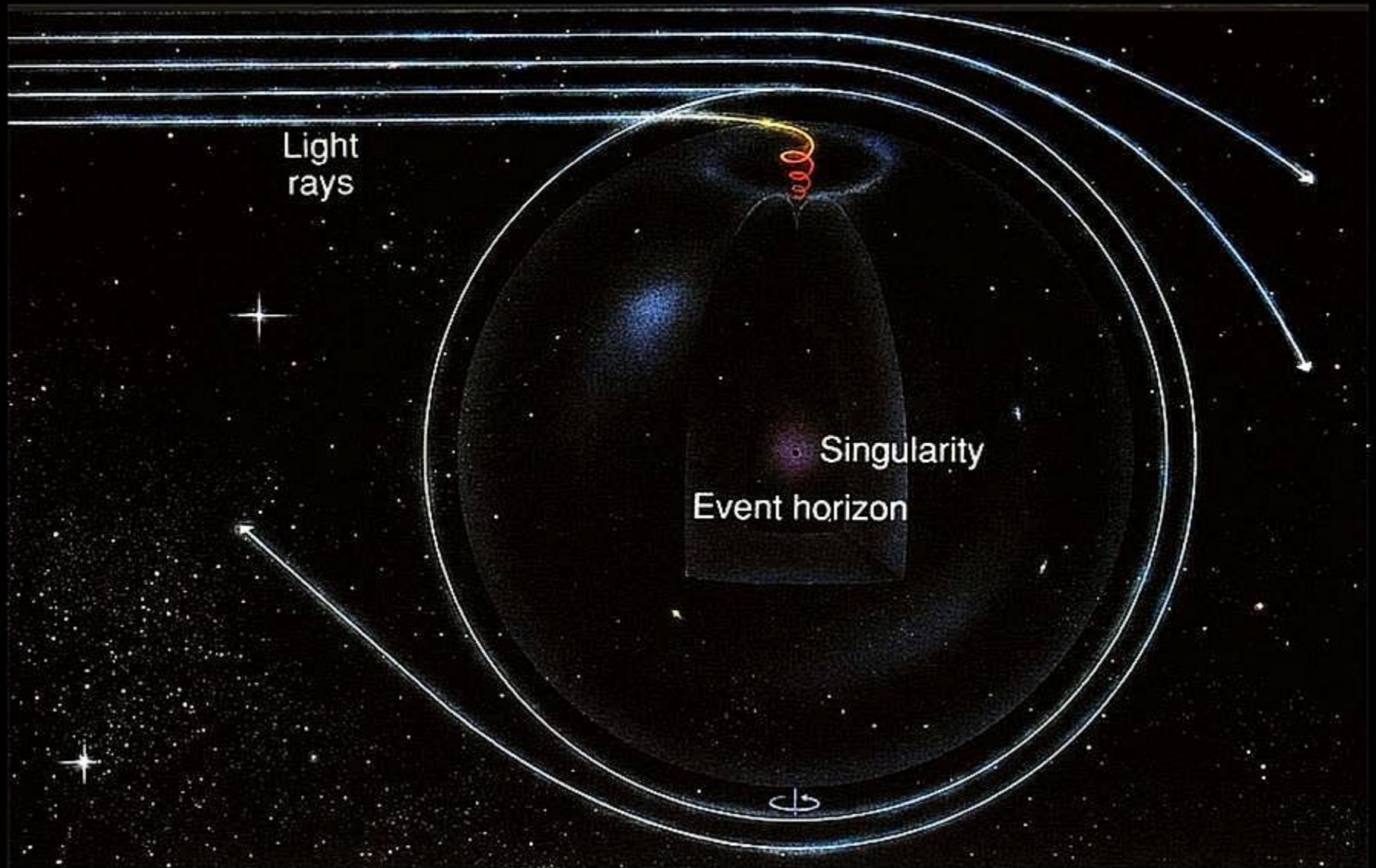
STELLE CON MASSA 20 VOLTE SUPERIORE A QUELLA DEL SOLE DANNO ORIGINE AD UN BUCO NERO



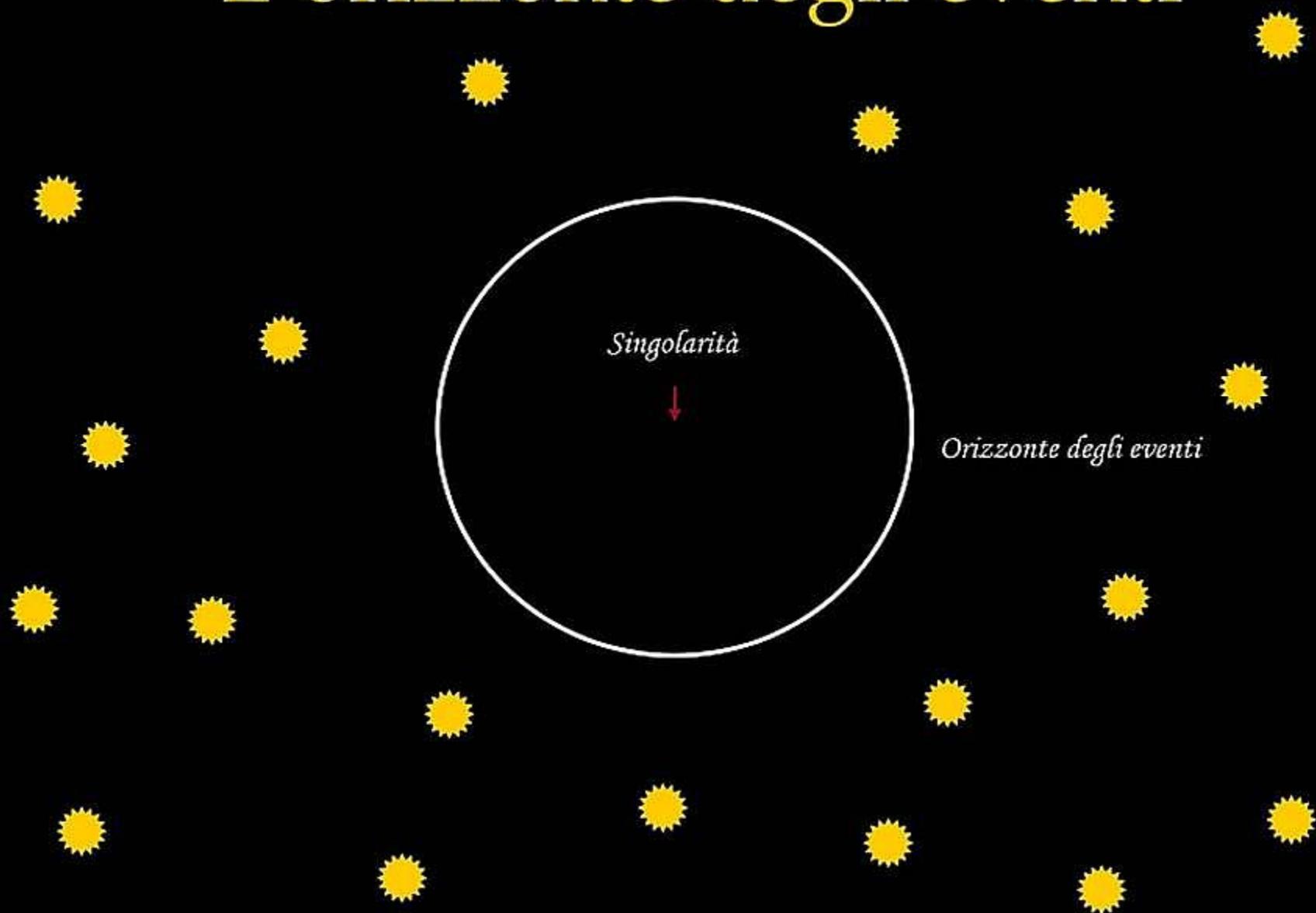
Distorted space time



Deviazione dei raggi di luce



L'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.

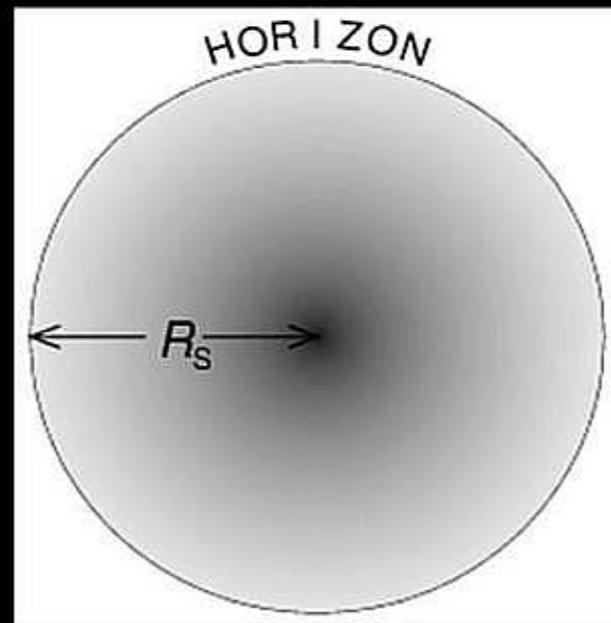


Karl Schwarzschild (1873-1916)

Raggio di Schwarzschild

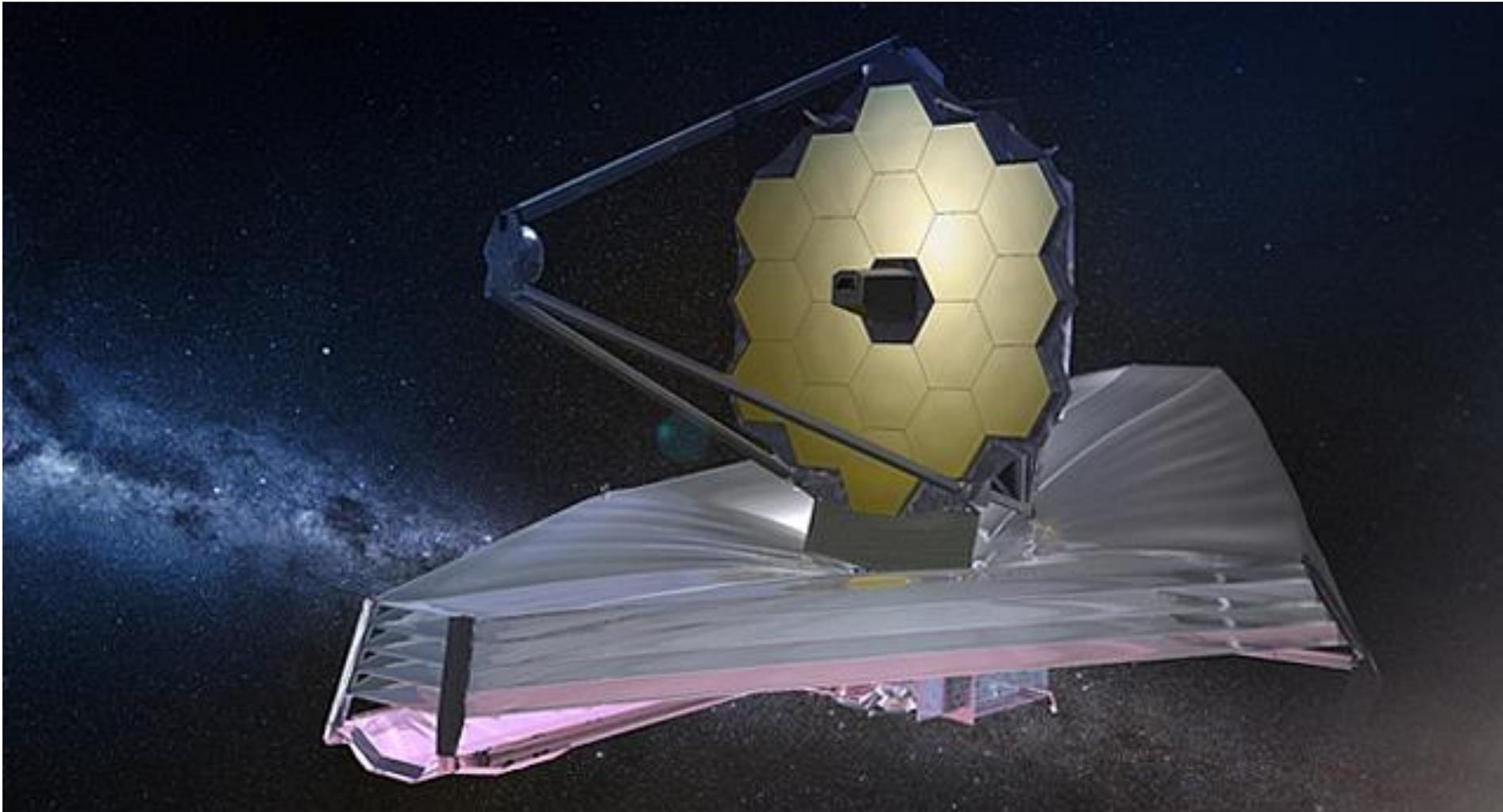
$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

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

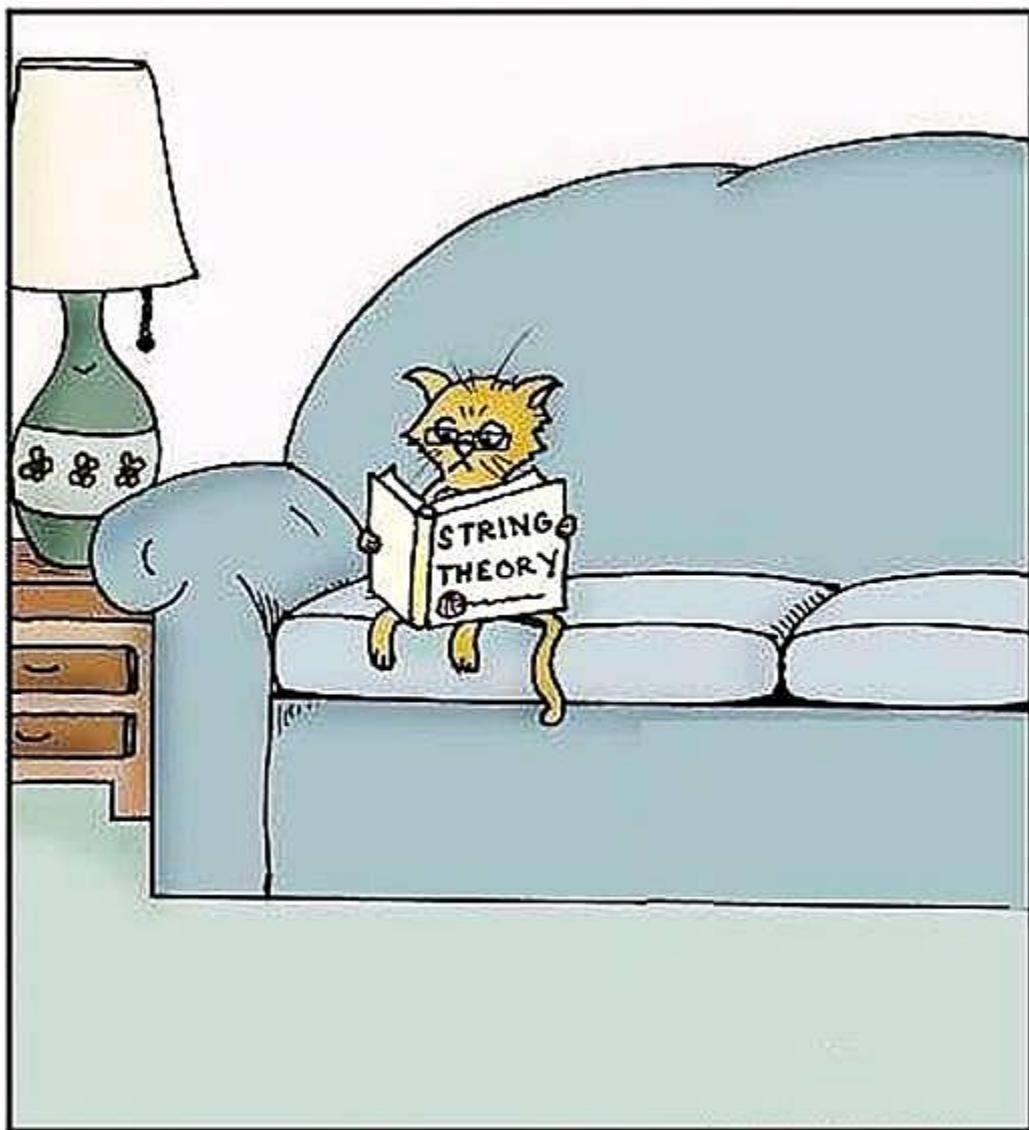


Nel 1967, Wheeler li battezza buchi neri

JWST



Il futuro....



Grazie per
l'attenzione!