

*“All I know is a door  
into the darkness.”*

*Seamus Heaney*

# **I Buchi Neri nelle Galassie**

Fabio Pacucci

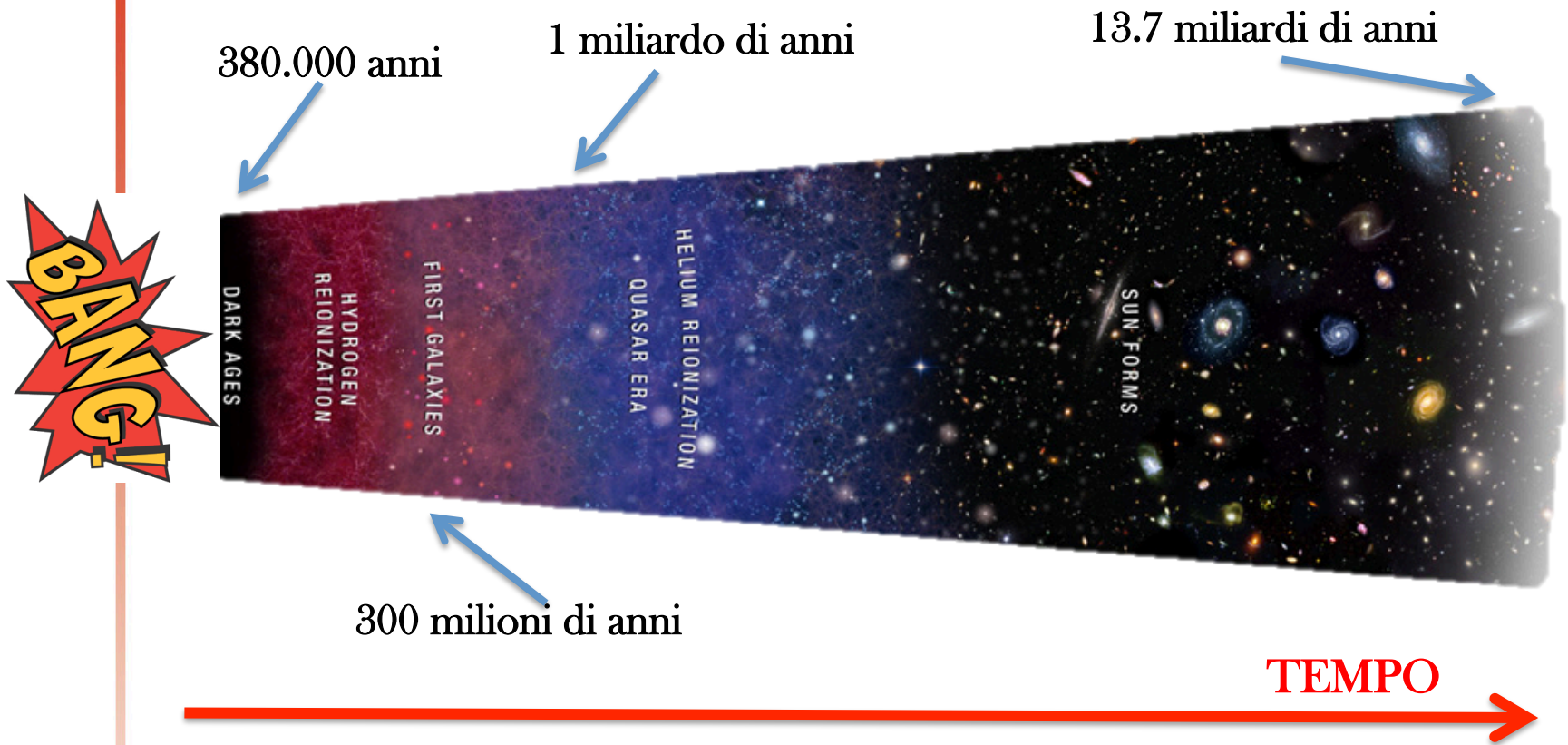
Planetario di Venezia – 28/07/2016

**Yale**  
UNIVERSITY



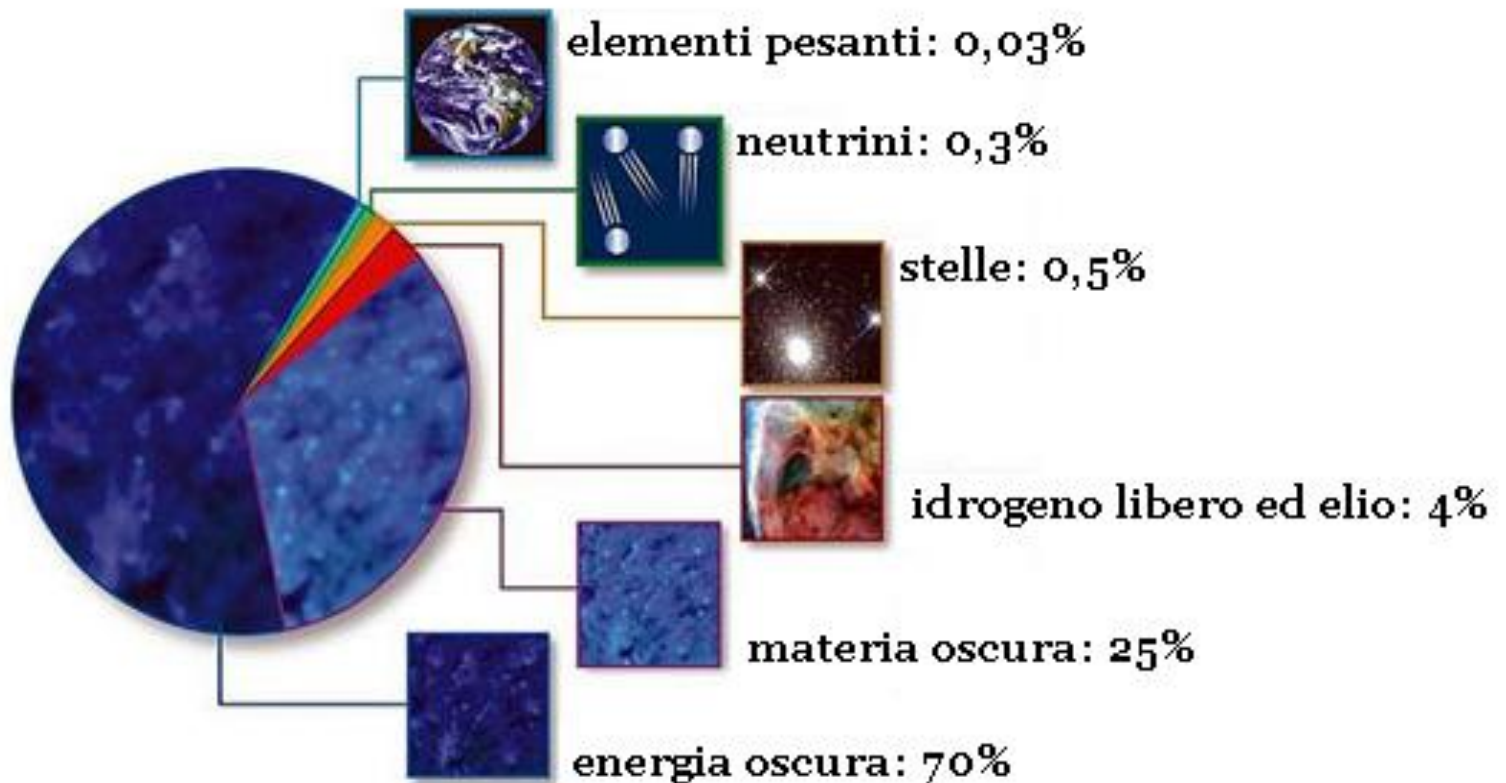
SCUOLA  
NORMALE  
SUPERIORE

# Evoluzione dell'Universo



- ▶ La storia dell'Universo, secondo la tesi ad oggi più accreditata nella comunità scientifica, si può far iniziare con una singolarità iniziale, il **Big Bang**, espressione coniata dallo scienziato Fred Hoyle nel 1949.

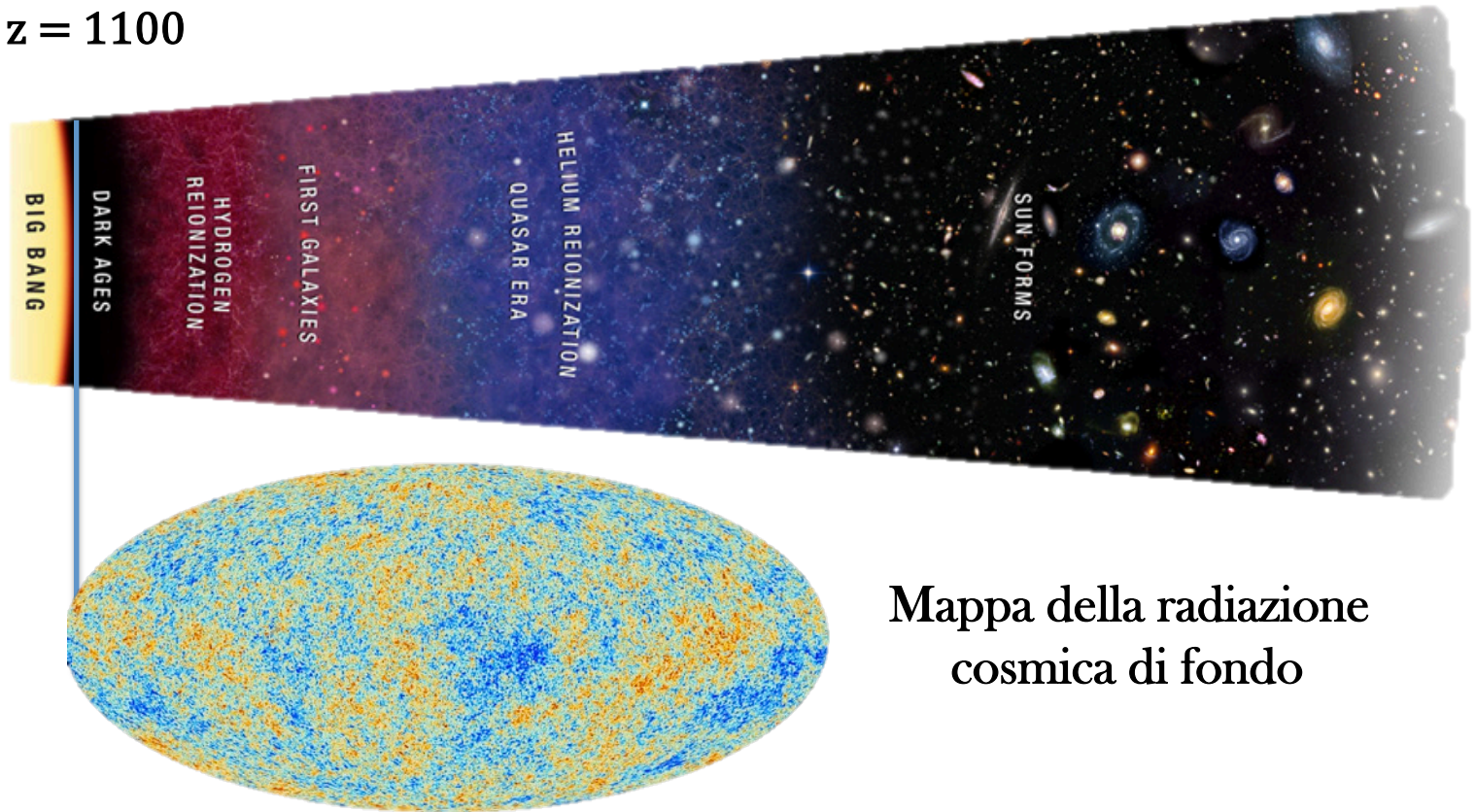
# Composizione dell'Universo



► Tutta la materia che comunemente conosciamo rappresenta **meno del 5% della composizione dell'Universo.**

# Radiazione Cosmica di Fondo

$z = 1100$

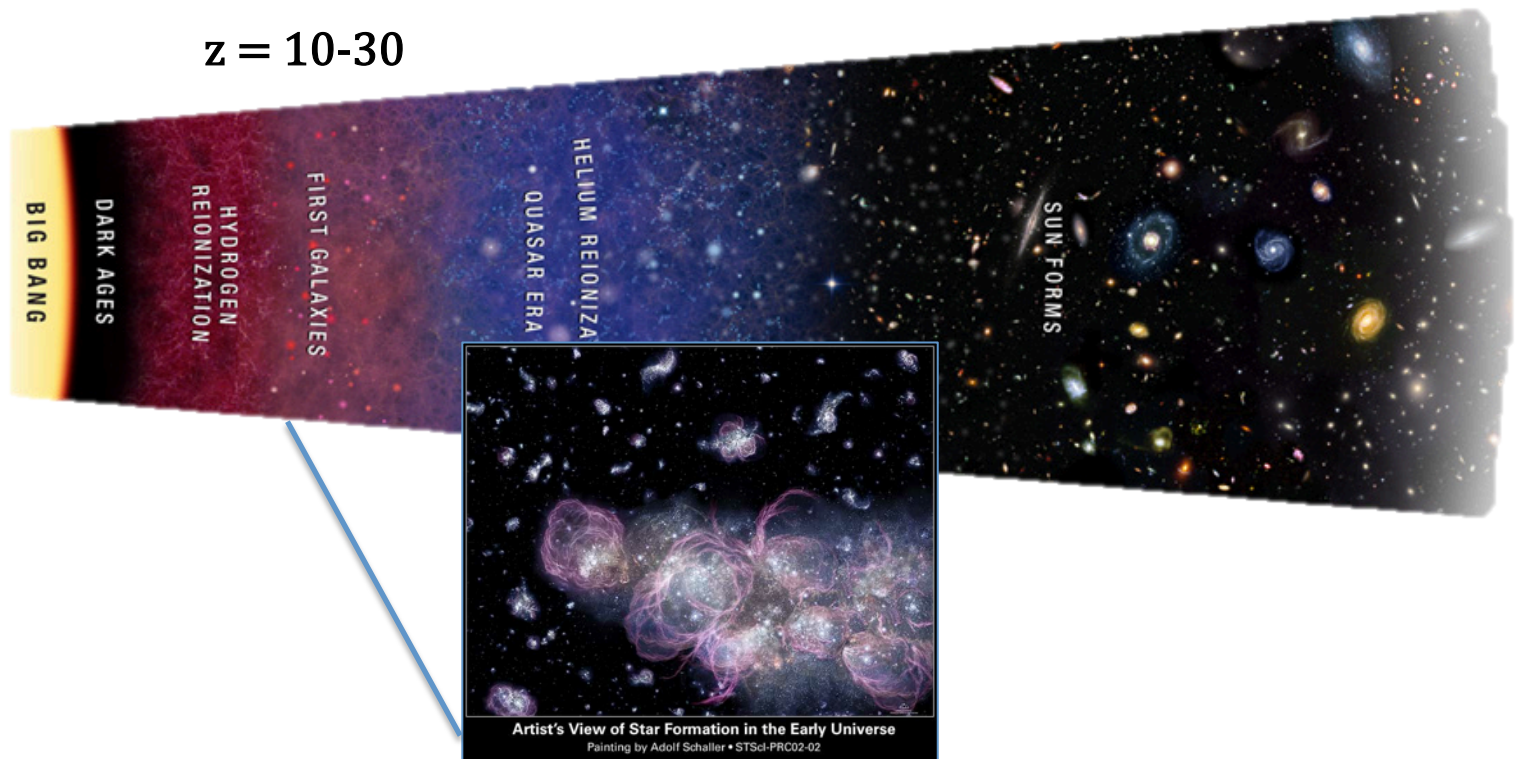




Mappa della radiazione  
cosmica di fondo

- Il **fondo cosmico a microonde** è la radiazione residua proveniente dalle fasi iniziali della nascita dell'Universo. L'Universo neonato era caldo, denso e permeato da una radiazione in stretta interazione con la materia. Con l'espansione cosmica, la materia e la radiazione si raffreddarono e l'Universo diventò trasparente, rilasciando la **radiazione cosmica di fondo**.

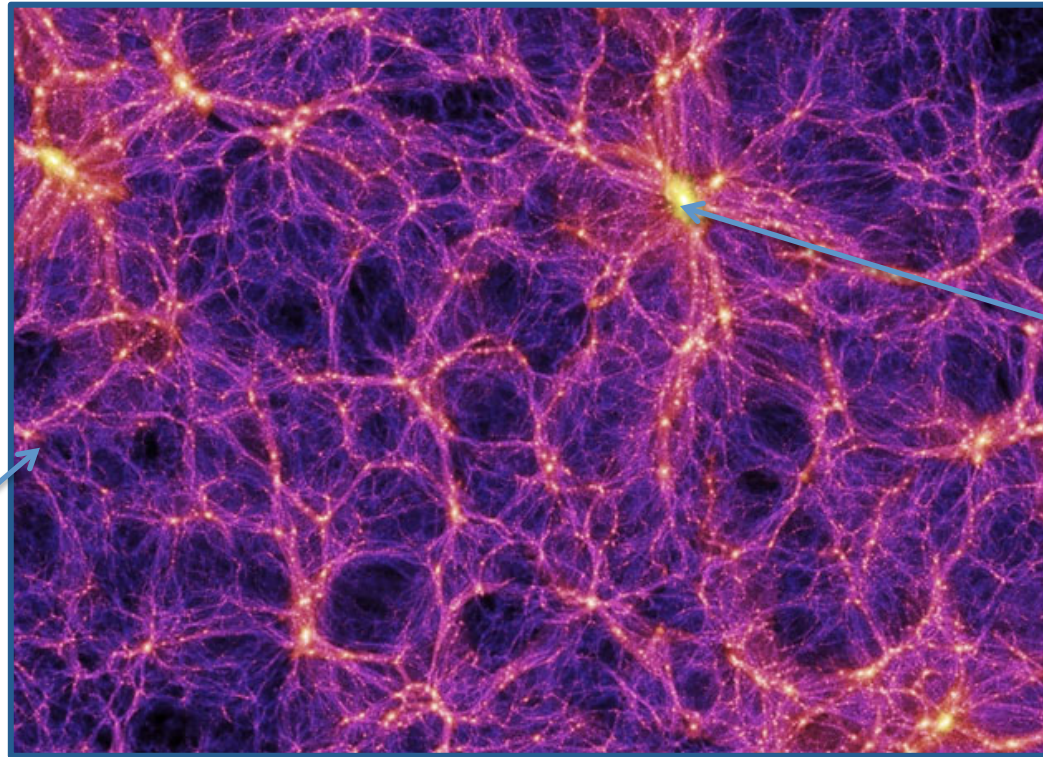
# Le Prime Stelle

$z = 10-30$



- 
 Circa 300 milioni di anni dopo il Big Bang si formarono le **prime stelle**. Esse erano prive di elementi più pesanti di idrogeno e elio e avevano masse centinaia di volte maggiori rispetto a quelle del Sole e, alla fine della loro vite, **esplosero come supernovae**.
- 
 Queste esplosioni arricchirono l'Universo di metalli, formati all'interno delle prime stelle, le quali diedero origine anche ai **primi buchi neri**.

# Le Prime Galassie



filamenti  
di materia  
oscura

ammasso  
di galassie

- Le strutture dell'universo che osserviamo si formarono dall'accrescimento delle fluttuazioni primordiali per mezzo di **instabilità gravitazionali**.

sovra-densità → collasso del gas → formazione della galassia

# Osservare l'Universo Primordiale

## HUBBLE SPACE TELESCOPE

Il **telescopio spaziale Hubble**, è un telescopio ottico posto negli strati esterni dell'atmosfera terrestre, a circa 560 km di altezza, in orbita attorno alla Terra. Osservare fuori dall'atmosfera comporta numerosi vantaggi, perché l'atmosfera distorce le immagini e filtra la radiazione elettromagnetica, in particolare nell'ultravioletto.



## CHANDRA X-RAY TELESCOPE

È un **telescopio spaziale a raggi X**, posto in orbita ellittica attorno alla Terra, con apogeo a 138.000 chilometri. Lo strumento principale ha un'apertura di 1.2 metri ed è progettato per osservare le onde elettromagnetiche ad altissima energia, generate dai fenomeni più violenti dell'Universo, come i buchi neri.

# Osservare l'Universo Primordiale



## VLT (VERY LARGE TELESCOPE)

Il complesso consiste di un gruppo di **quattro grandi telescopi fissi**, tra i più grandi del mondo (8.2 metri di diametro). Il VLT si trova all'Osservatorio del Paranal sul Cerro Paranal, una montagna alta 2635 m nel deserto di Atacama, nel Cile settentrionale.

## VLA (VERY LARGE ARRAY)

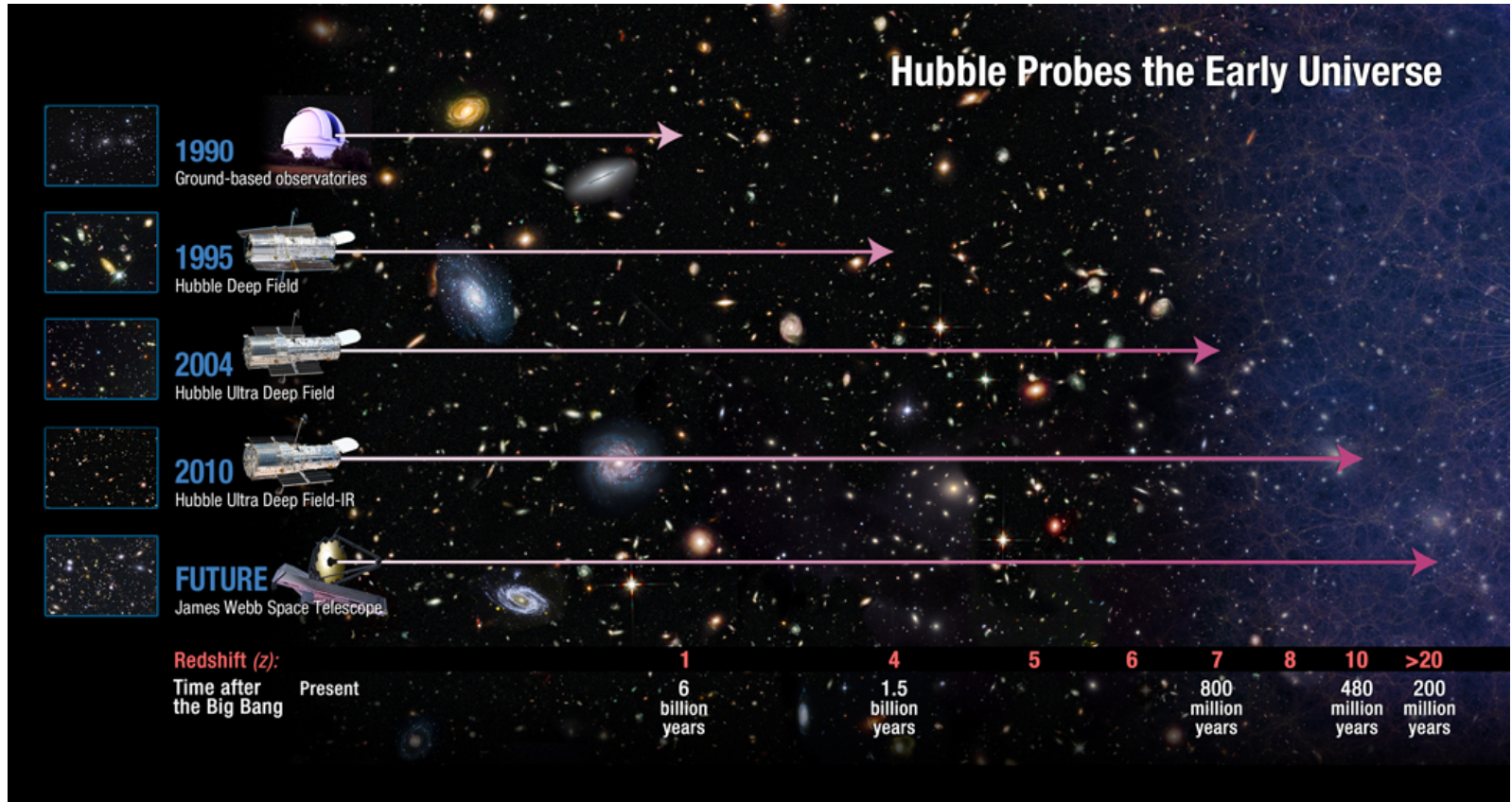
Il VLA di Socorro, Nuovo Messico (USA) è un **interferometro radio**.

Esso è costituito da 27 antenne paraboliche del diametro di 26 metri ciascuna. L'interferometro è in grado di operare come un'unica antenna ricevente di 40 km di diametro.





# Il Futuro: James Webb Space Telescope



# I Buchi Neri: Introduzione

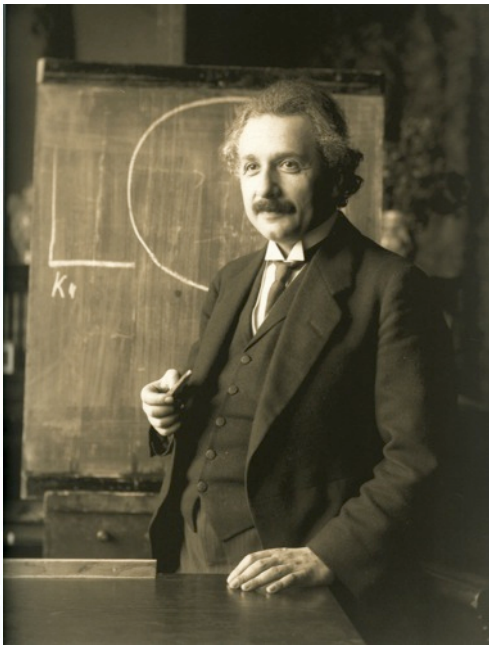


- ▶ Un buco nero è **oggetto astrofisico dal quale nulla, nemmeno la luce, può sfuggire**. Non potendo emettere alcun tipo di radiazione, tale oggetto risulta necessariamente “nero”.
- ▶ I buchi neri sono degli oggetti relativamente semplici. Il parametro fondamentale per descriverli è la massa: da questa dipendono la classificazione e il loro effetto sull’ambiente circostante. Nonostante la loro apparente semplicità, essi **sono in grado di modificare l’ambiente che li circonda in maniera estrema**.

# Un po' di Storia...



La prima intuizione relativa a un oggetto di questo tipo risale al XVIII secolo, per merito di **John Michell** e **Pierre-Simeon Laplace**, i quali ipotizzarono l'esistenza di oggetti così pesanti da non lasciar sfuggire la luce.

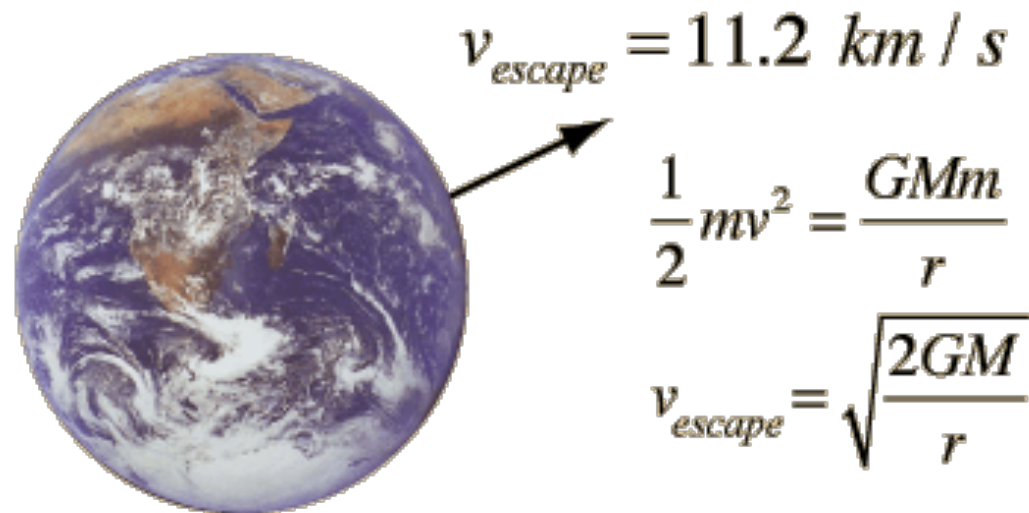


Bisognerà aspettare il XX secolo affinché, con la **Relatività Generale di Einstein**, si comprenda come il campo gravitazionale influenzi la luce.

In seguito, **Karl Schwarzschild** arrivò alla prima descrizione matematica dettagliata di questo strano oggetto celeste.



# La Velocità di Fuga



La **velocità di fuga** da un corpo celeste dipende dalla sua massa e dalle sue dimensioni. I buchi neri sono oggetti talmente massicci e hanno dimensioni talmente ridotte da avere una **velocità di fuga** superiore a quella della luce, circa 300 000 km/s.



# La Velocità di Fuga

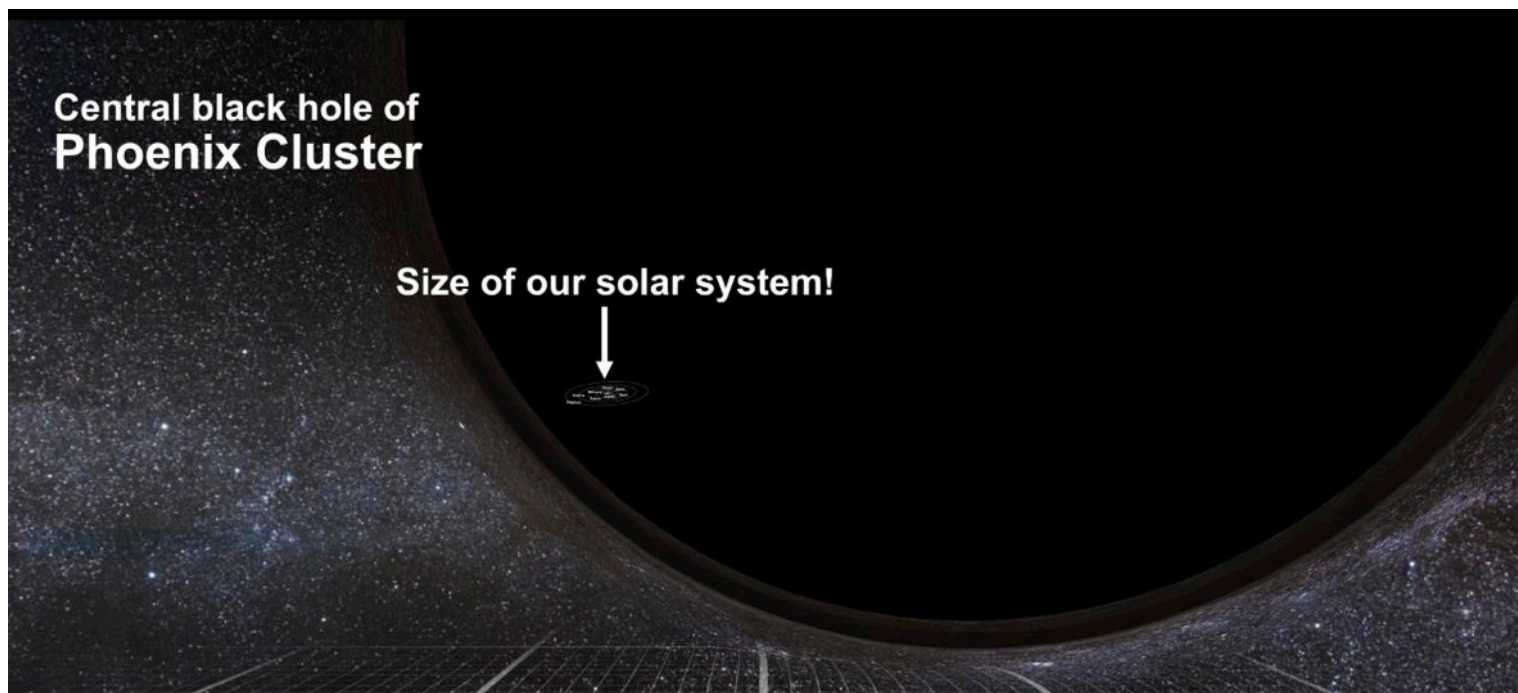


**APOLLO 11 Launch**

Cape Canaveral (Florida, USA) - 16 Luglio 1969

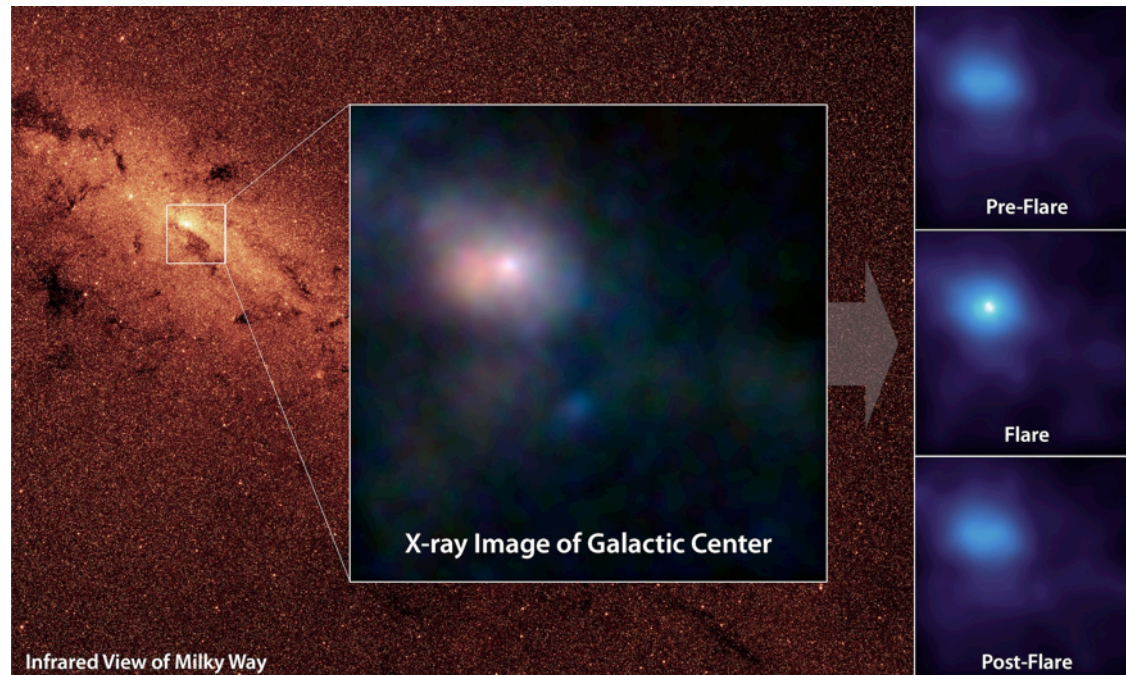
# L'Orizzonte degli Eventi

La **dimensione caratteristica di un buco nero** è data dal cosiddetto “orizzonte degli eventi”, o raggio di Schwartzchild. Esso è definito in questo modo poichè un qualsiasi evento che avvenga al suo interno non può propagarsi al suo esterno: è una **superficie di confine**.



Le dimensioni dei buchi neri possono variare molto. I buchi neri supermassicci raggiungono masse fino a **10 miliardi di masse solari** e raggi di Schwartzchild di 500 volte la distanza Terra-Sole.

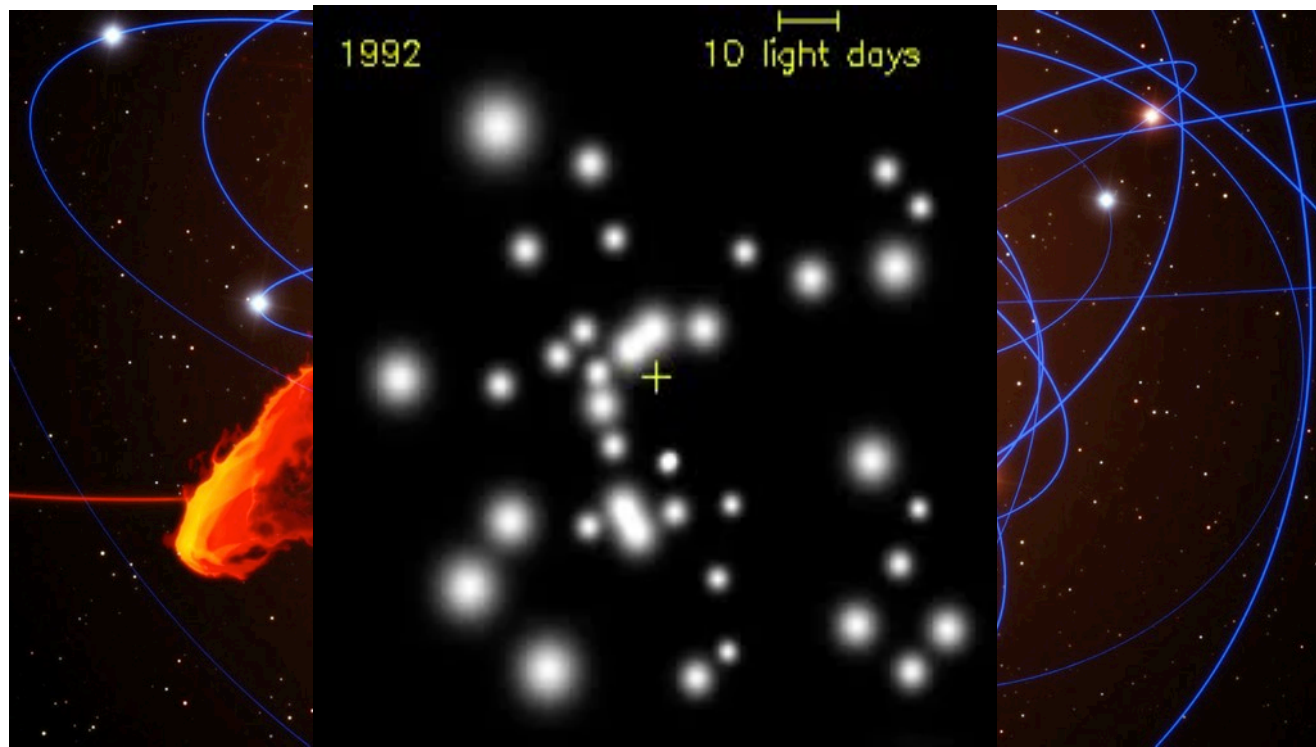
# Il Centro della Via Lattea



- ▶ Per osservare un buco nero veramente massiccio, non dobbiamo nemmeno andare troppo lontano. Al **centro della nostra Galassia**, la Via Lattea, è presente un oggetto delle dimensioni di qualche milione di masse solari, un **buco nero supermassiccio**.
- ▶ Fu scoperto osservando il centro della Galassia a frequenze molto basse (**onde radio**) e molto alte (**raggi X**). In queste bande gli effetti dei buchi neri nello spazio circostante sono molto evidenti.

# Indizi del Buco Nero

Nel caso del buco nero al centro della nostra Galassia è stato possibile anche **seguire le orbite delle stelle che gli sono passate vicino.**

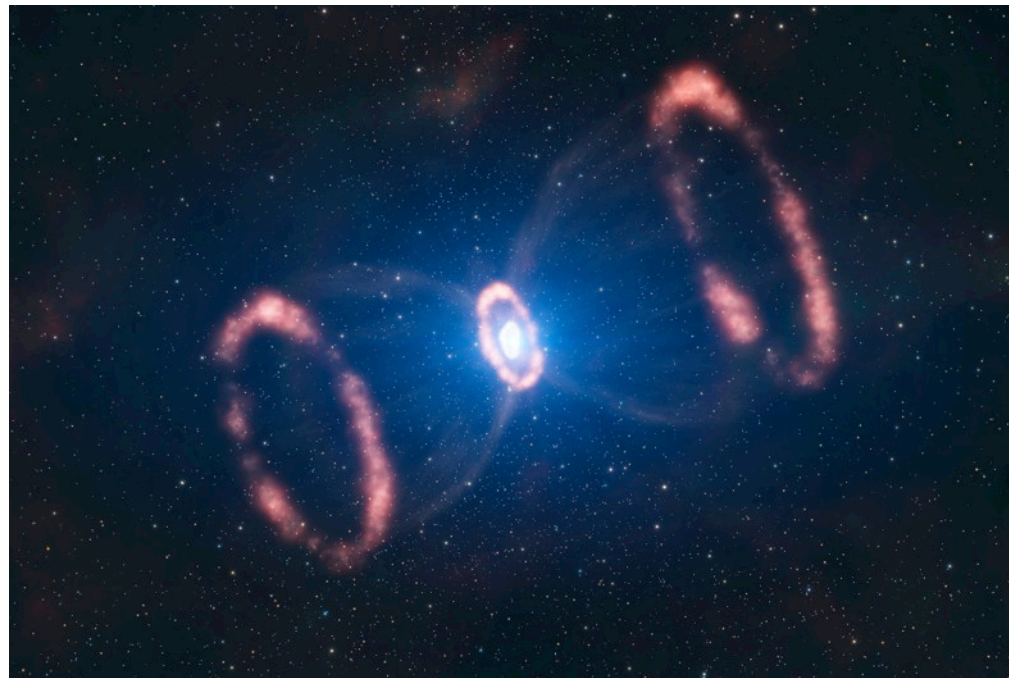


Le orbite delle stelle mostrano chiaramente la presenza di un **oggetto molto massiccio e oscuro al centro**. Studiando accuratamente le traiettorie è stato possibile anche determinare con grande accuratezza la massa del buco nero, circa **4 milioni di masse solari**.



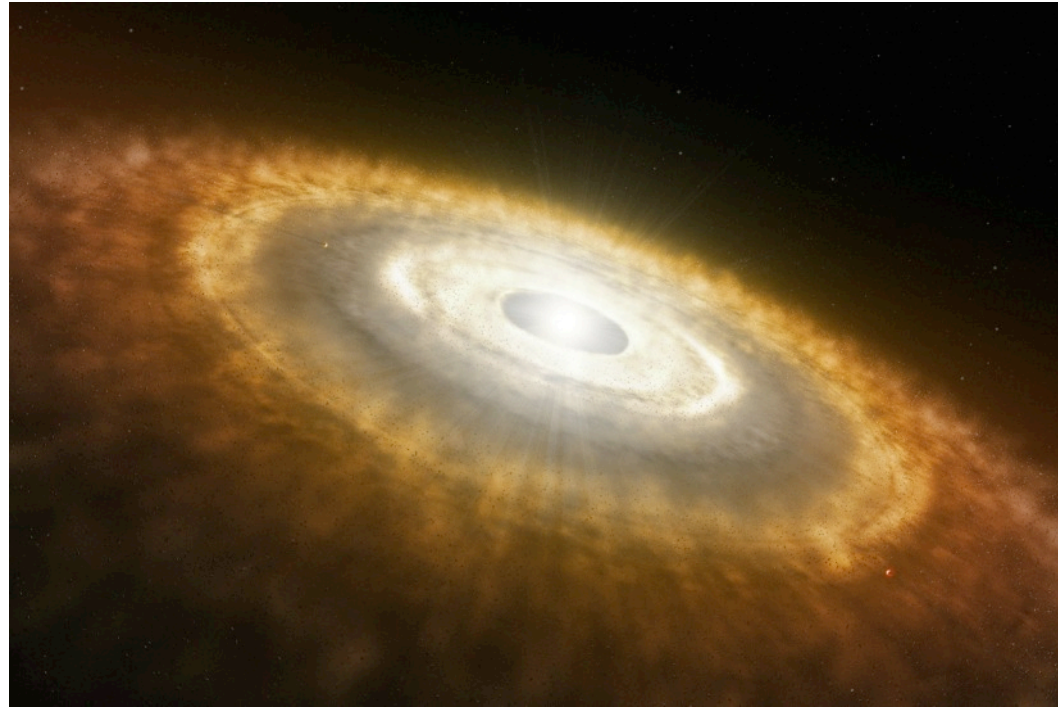
# Formazione dei Buchi Neri

Il meccanismo di formazione dei buchi neri di piccola massa è il **collasso gravitazionale di stelle molto massicce**. Questo può avvenire perchè la stella ha **terminato il combustibile nucleare**, o grazie a un **apporto esterno di massa**.



Al collasso gravitazionale segue l'esplosione di una supernova, con il rilascio di enormi quantità di energia. Se la massa rimanente è superiore a 3-4 masse solari, si ha la **formazione di un buco nero**, altrimenti si formano stelle di neutroni o nane bianche.

# Dischi di Accrescimento



- ▶ Il fortissimo campo gravitazionale generato da un buco nero attrae una enorme quantità di materia, che, per conservazione del momento angolare, crea un **disco di accrescimento attorno all'oggetto**.
- ▶ Durante la caduta, il **gas del disco di accrescimento si riscalda a temperature elevatissime** ed emette enormi quantità di energia, dagli infrarossi fino ai raggi X.



# Dischi di Accrescimento



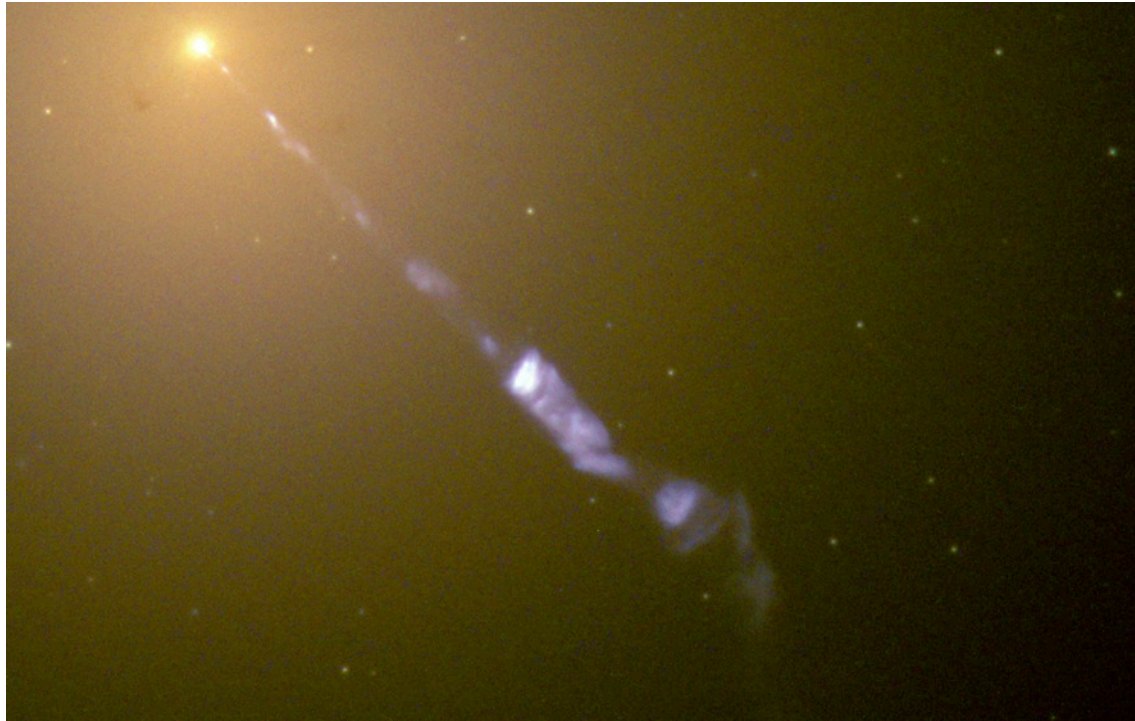
**INTERSTELLAR**  
USA, 2014

# Nuclei Galattici Attivi



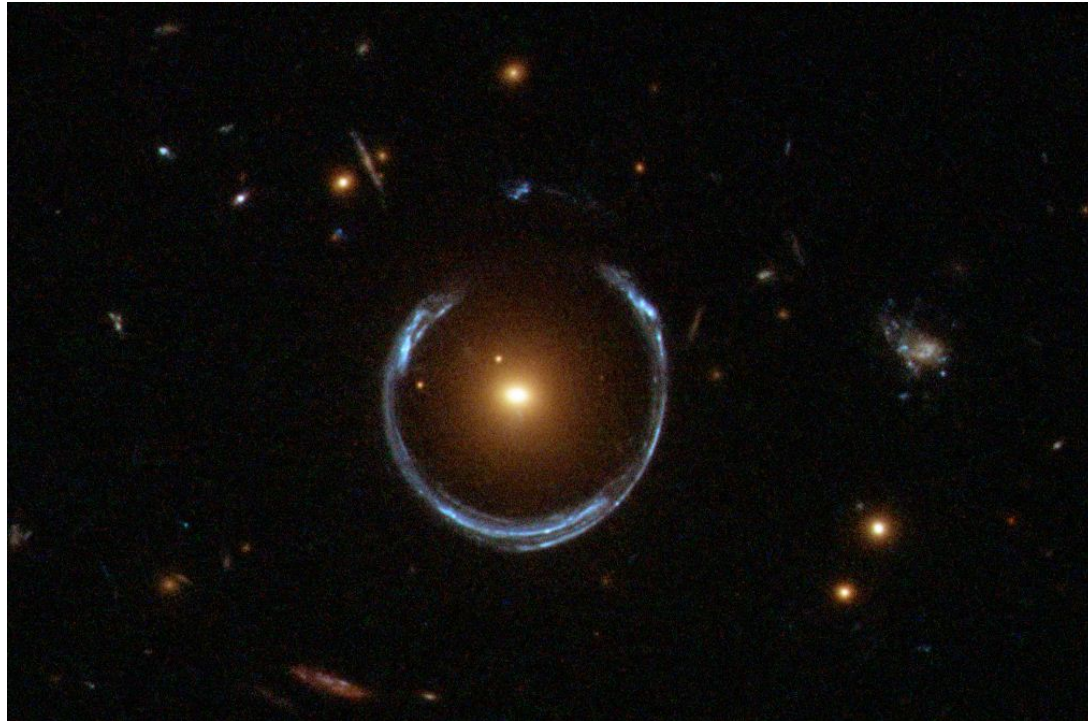
- ▶ Al centro di molte galassie sono presenti buchi neri supermassicci, di milioni o miliardi di masse solari. Se questi buchi neri continuano ad accrescere materia, **rilasciano enormi quantità di energia**.
- ▶ Essa influenza fortemente l'ambiente della galassia ospite, che viene chiamata **Nucleo Galattico Attivo (AGN)**. Queste galassie mostrano una grande emissione e anche la presenza di strutture estreme, come i jets.

# Getti Relativistici



- ▶ Alcuni dischi di accrescimento all'interno di AGN emettono dei **fortissimi getti di materia**, in entrambe le direzioni polari. Il meccanismo di formazione e la loro composizione non sono ancora del tutto chiare.
- ▶ Questi getti di materia raggiungono **velocità elevatissime**, fino a un quinto della velocità della luce. Possono estendersi per distanze enormi, fino a centinaia di migliaia di anni luce dal buco nero centrale.

# Lenti Gravitazionali



- ▶ Un altro effetto molto importante previsto dalla Relatività Generale è il cosiddetto “lensing gravitazionale”. La **massa curva lo spazio-tempo** e, di conseguenza, modifica le traiettorie dei raggi luminosi.
- ▶ Grandi concentrazioni di massa, come i buchi neri, **modificano profondamente le traiettorie dei raggi luminosi** provenienti da oggetti che si trovano sullo sfondo.

# I Buchi Neri Primordiali



**la Repubblica**

Data: mercoledì 25.05.2016 Estratto da Pagina: 27

**L'annuncio.** Sarebbero nati dal collasso di una nube di gas primordiale  
La Nasa rilancia la scoperta di un team tutto italiano

## Ecco gli antenati dei buchi neri la storia dell'Universo vista al telescopio

**GIOVANNI BIGNAMI**

**V**A a cena da un amico che ti presenta un cucciolo appena nato. Ripassi il mattino dopo, e lo trovi diventato un caprone troppo cresciuto. Perplesso, ti chiedi in che universo tu stia vivendo, e non sai che lo stesso sembra succedere nelle prime galassie dell'Universo: giovanissime, con sì e no un miliardo di anni, hanno già nel loro centro un enorme buco nero, con massa di un miliardo di volte quella del nostro Sole.

Grosso problema per gli astronomi, che credevano di avere una teoria collaudata per la formazione dei buchi neri nel centro delle galassie. Nella teoria si cominciava con l'immaginare il "collasso" di una stella un po' troppo circoscritta (fino a qualche decina di masse solari) che crolla su, se stessa, generando la formazione di un cuspolo di buco nero galattico. Poi il buco nero, affamato, divorza tutto quello che trova in giro, tipo gas o addirittura altre stelle, e cresce fino alle enormi masse osservate. Solo che questo processo di crescita, ben noto, richiede molto più tempo del miliardo di anni di vita delle prime galassie dell'Universo, che invece mostrano già il loro bel buco nero adulto, supermassiccio.

Per fortuna ci sono gli scienziati della Scuola normale superiore di Pisa, dell'Inaf e dell'Asi che, insieme, adesso pubblicano una soluzione per l'origine di questi buchi neri troppo cresciuti. Il gruppo, tutto italiano, ha immaginato che gli attuali buchi neri galattici siano nati già belli grossi, centinaia di migliaia di volte più grossi di quelli fatti dal "normale" collasso di una stella, anche se una stellina.

Sarebbero quindi l'anello mancante nella catena evolutiva dei buchi neri, posti tra quelli di qualche massa solare e quelli di milioni o miliardi di masse solari. Questi buchi neri "intermedi" risolvono il problema del tempo di crescita: nascono già grossi, un miliardo di anni sarebbe più che sufficiente per farli poi diventare massicci anche come i più grandi finora osservati.

Ma adesso bisogna immaginare come sia nata questa nuova classe di buchi neri, che non possono essere stati generati dal tradizionale collasso stellare semplicemente perché non possono esistere stelle così grosse. Il gruppo italiano ha tagliato corto: ha immaginato che il meccanismo iniziale di formazione non abbia bisogno di passare attraverso una stella, ma avvenga per "collasso diretto" di gas primordiale. Un nu-

vole di materia intergalattica, appiunto con una massa di centomila volte il Sole, comincia a cadere su se stesso e non si ferma più: genera direttamente un buco nero della stessa massa. Che così nasce già grande.

Usando i tre grandi osservatori spaziali della Nasa, che guardano il cielo in ottico, infrarosso e raggi X, gli italiani sono anche andati a cercarli in cielo, questi nuovi tipi di buchi neri. E proprio la Nasa, con un suo comunicato dal-





Ritaglio stampa ad uso esclusivo del destinatario, non riproducibile.

► Il gruppo di Cosmologia della SNS ha fatto una **importante scoperta nel campo dei primi buchi neri** formati nell'Universo.

# Qual è il Problema?



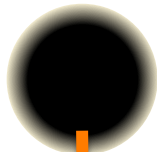


# Qual è il Problema?

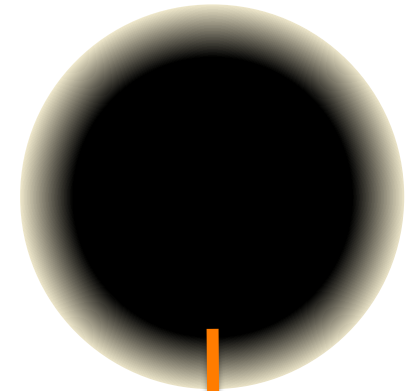
$M_{\bullet} \sim 100 M_{\odot}$



$M_{\bullet} \sim 10^{4-5} M_{\odot}$



$M_{\bullet} \sim 10^9 M_{\odot}$



$\Delta t \sim 500 \text{ Myr}$

$z \sim 15$

$z = 7$

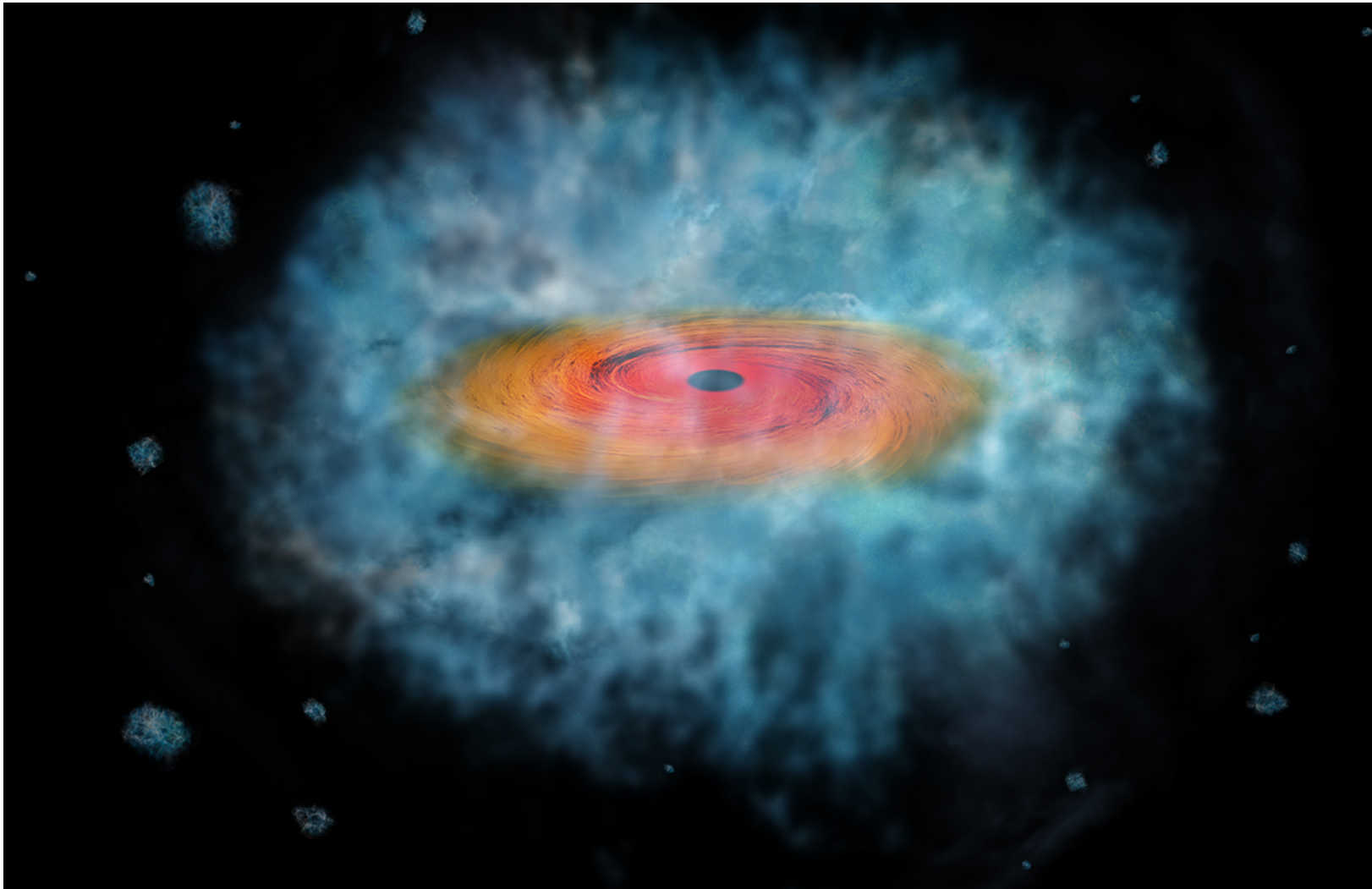


**DIRECT COLLAPSE  
BLACK HOLE**



ULS J1120+0641

# Buchi Neri a Collasso Diretto

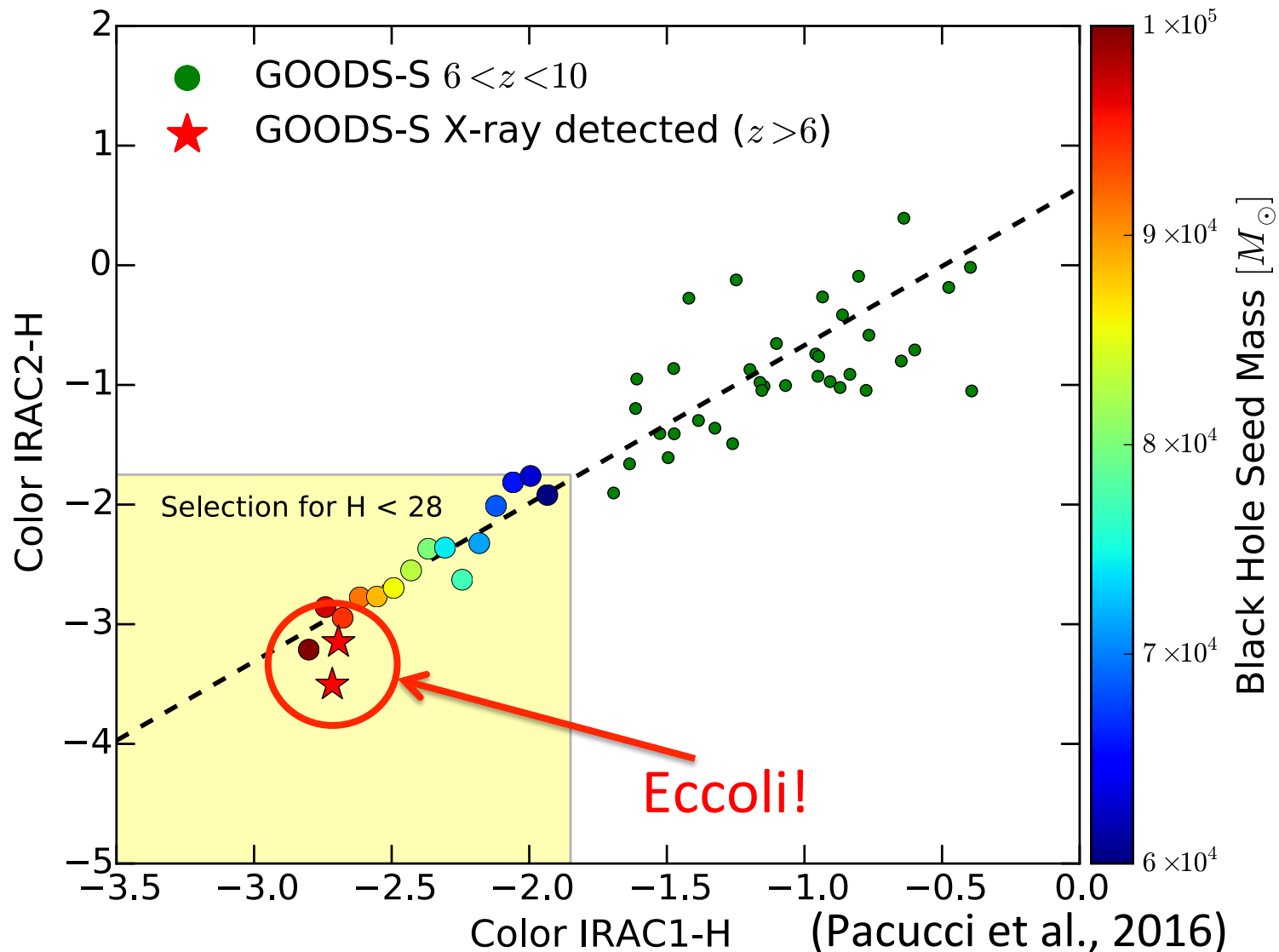


# La Domanda Fondamentale

Quali sono I buchi neri più antichi dell'Universo?



# La Nostra Risposta



# I Buchi Neri più Antichi...



**OBJ 29323**

**$z = 9.7$**

**OBJ 33160**

**$z = 6.1$**

Se tutto fosse confermato, questo sarebbe  
di gran lunga il **buco nero più antico mai scoperto.**