

Quando la gravità non ha limiti: l'universo esotico di Stelle di Neutroni e Buchi Neri

Tiziana Di Salvo

Dipartimento di Fisica e Chimica Emilio Segrè

Università degli studi di Palermo



Academy of Distinction
22 febbraio 2024

Il Sommario

- Formazione, vita e morte delle stelle
- Cosa sono Stelle di Neutroni e Buchi Neri e come si formano
- Quali sono le loro proprietà fisiche
- Come si osservano questi oggetti
- La prima immagine dell'orizzonte degli eventi di un Buco Nero





Università
degli Studi
di Palermo

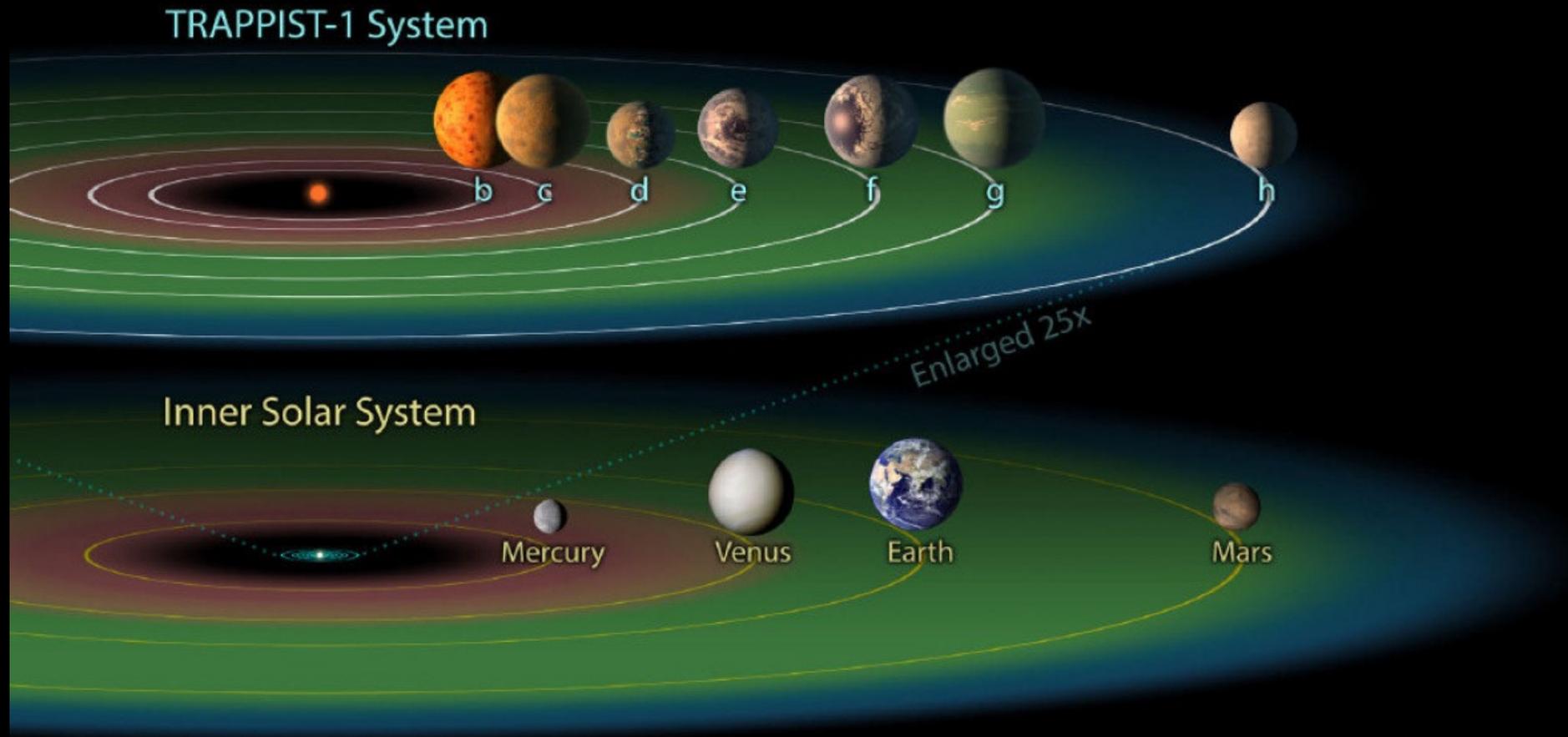
Dipartimento di Fisica e Chimica – Emilio Segrè



INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

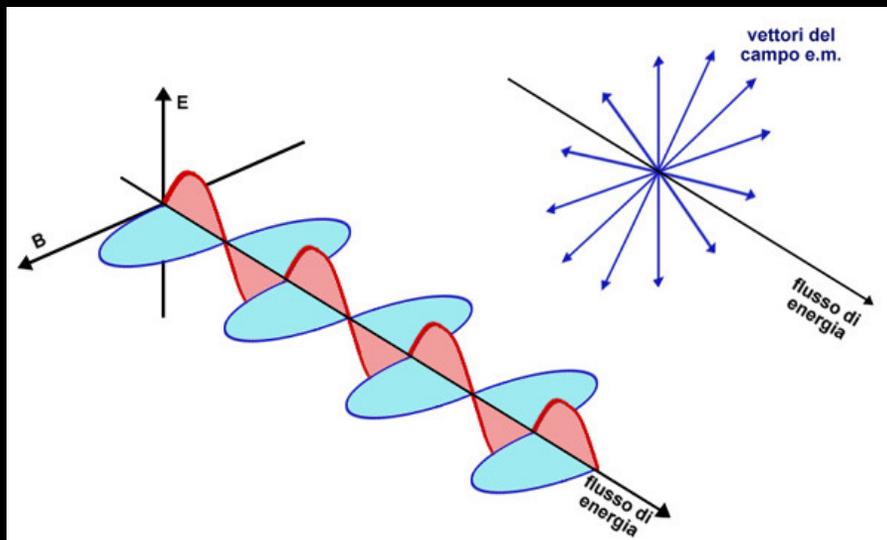
Un Esopianeta non si nega a nessuno...

NASA artistic image of the TRAPPIST-1 system, an ultracool dwarf, is orbited by seven Earth-size planets



Illustration

La natura della luce

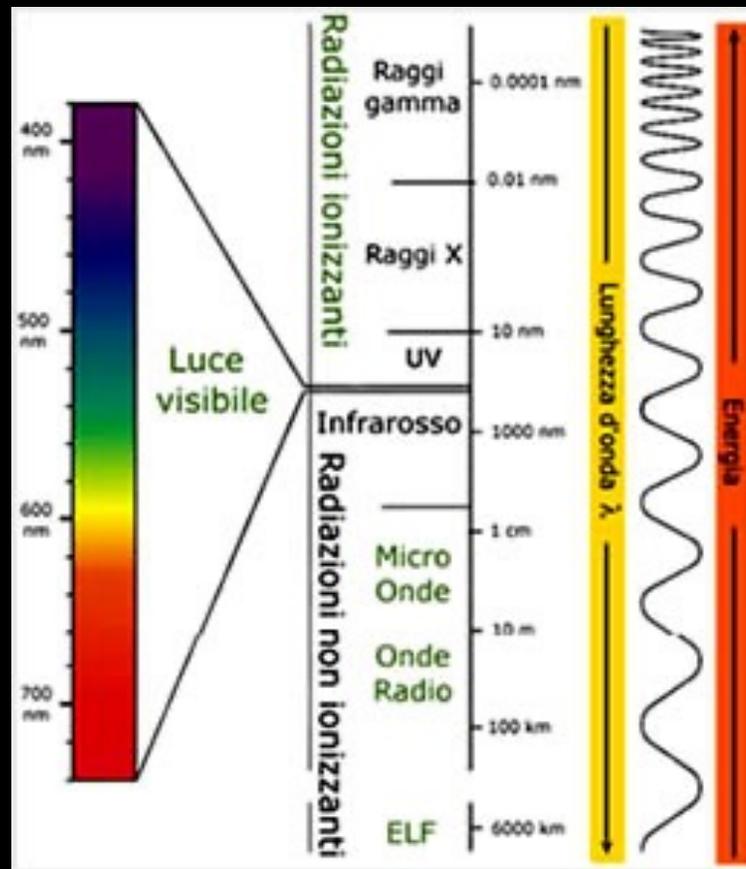


Onde elettromagnetiche

Velocità della luce: 300,000 km/s

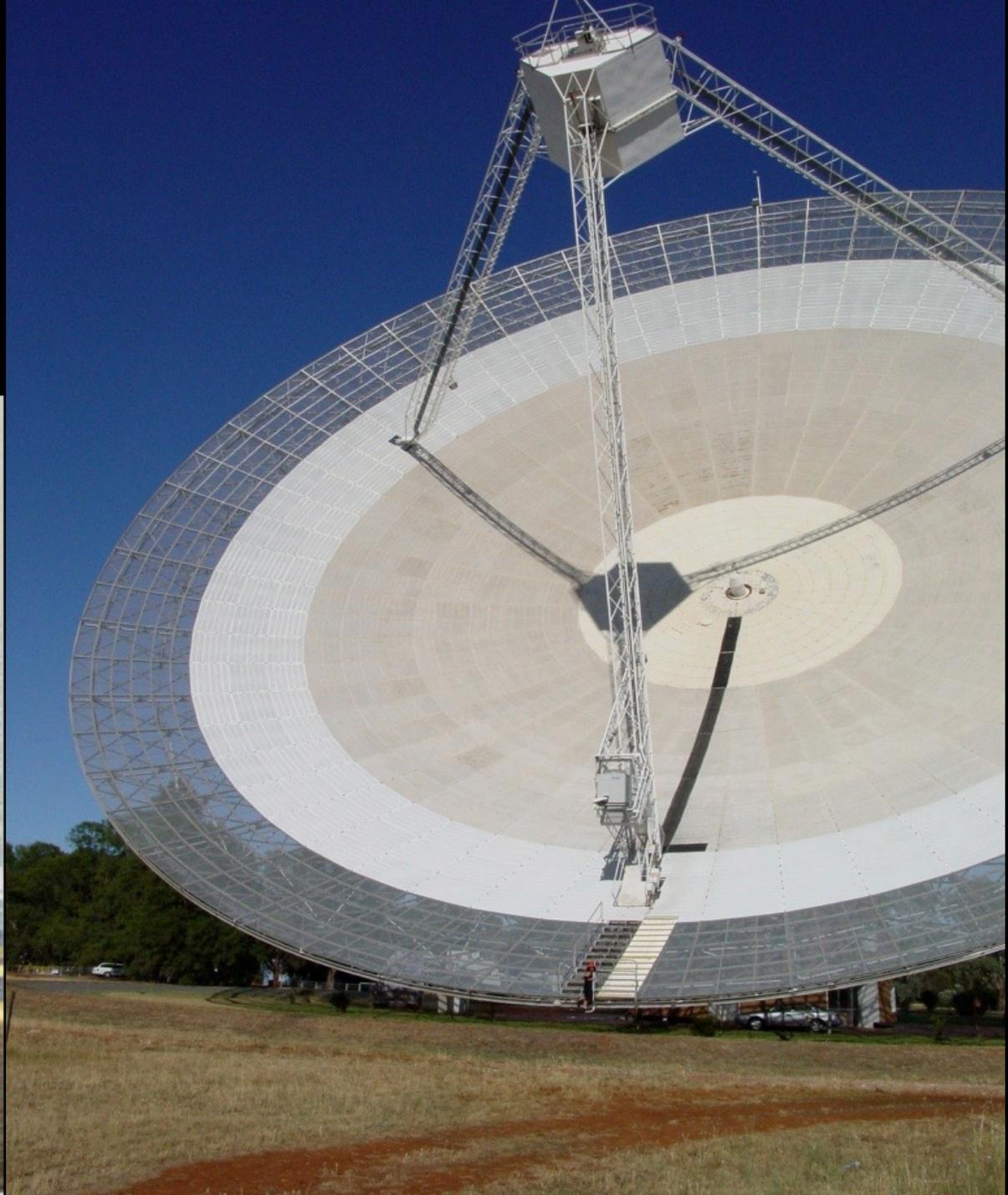
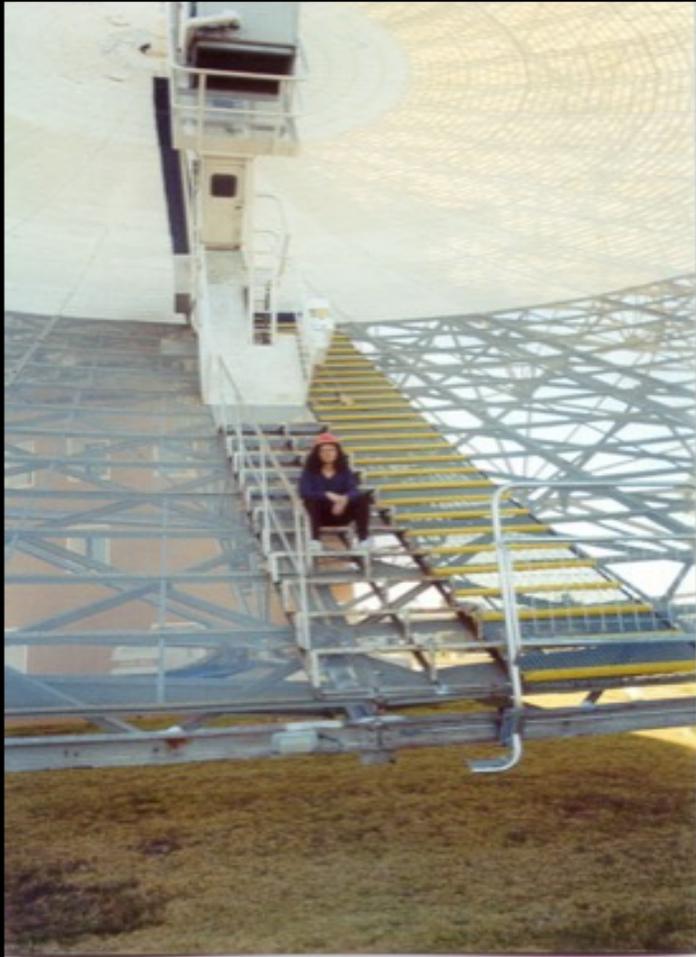
(massima velocità possibile in natura)

Per la meccanica quantistica la luce è formata da piccole particelle chiamate fotoni.

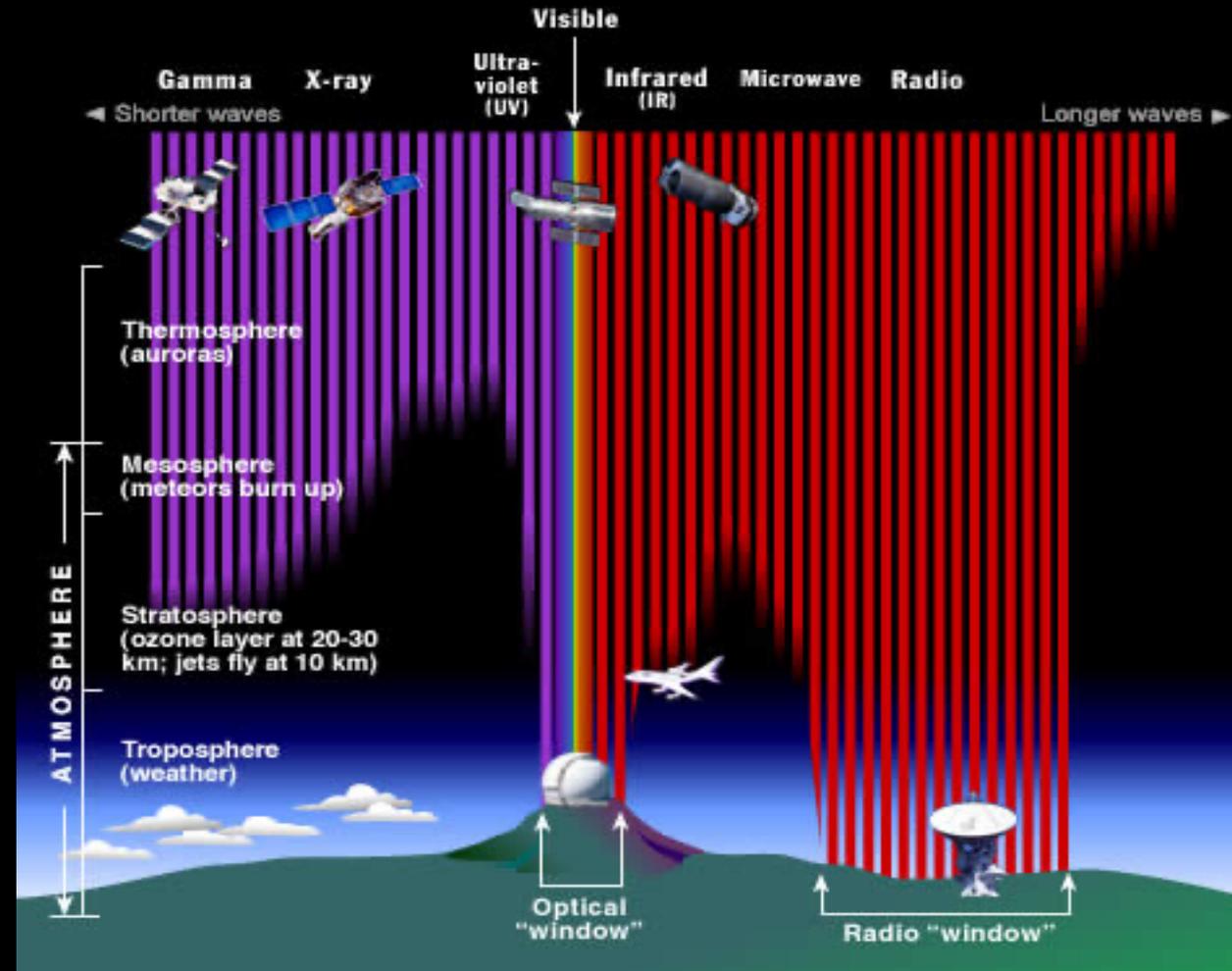


Spettro elettromagnetico

Radiotelescopio di Parkes (Australia)



L'Atmosfera assorbe la luce in modo diverso a lunghezza d'onda diverse





Il Telescopio Spaziale Hubble (diametro 2 metri, banda ottica)
in orbita intorno alla Terra ad una altezza di 600 km circa



Il Telescopio
Spaziale Hubble
Viene estratto
dalla stiva della
navetta Shuttle

Il Sole

$R_{\text{sole}} = 700.000 \text{ km}$
($100 R_{\text{Terra}}$)

$M_{\text{sole}} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$
($300.000 M_{\text{Terra}}$)

$D = 150 \text{ milioni di}$
 km (8 min-luce)

$L_{\text{sole}} = 30.000$
miliardi di volte il
consumo di energia
mondiale



Dimensioni Terra



Eruzione Solare

Satellite: NASA geosincrono
Solar Dynamic Observatory

Posizione: 36000 km da Terra

Lancio: 11/02/2010

Banda: Ultravioletto Estremo

Data: 24 febbraio 2011

Durata: 98 minuti

Dettagli animazione:

1 immagine ogni 24 s

1 s corrisponde a 6 min

Dove nascono le stelle

La nebulosa
Testa di Cavallo
in Orione:
regione di
formazione
stellare

(Immagine
ESO)



Dove nascono le stelle: I Pilastri della creazione



I Pilastri della
Creazione al
centro della
Nebulosa dell'
Aquila: una
regione di gas e
polvere
interstellare
ricca di
protostelle
(immagine del
Telescopio
Spaziale
Hubble)

Le candele dell'Universo: Nascita e formazione delle stelle



Cosa è una Stella?

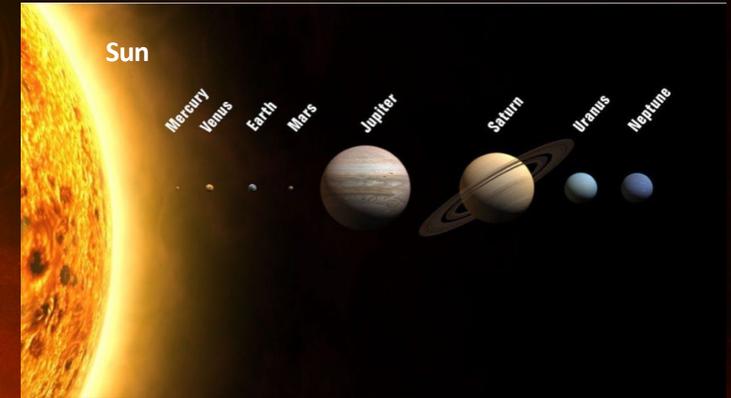
Una stella è un qualunque oggetto astronomico avente una massa tale da permettere la combustione degli elementi al suo interno grazie alla sua pressione gravitazionale.

Una stella è inizialmente composta principalmente da Idrogeno che viene bruciato tramite fusione nucleare

Catena protone – protone
+
Catena Carbonio - Azoto - Ossigeno

Produzione di energia e
di elementi più pesanti

Irradiazione di energia
&
Stabilità gravitazionale
(Equilibrio Idrostatico)



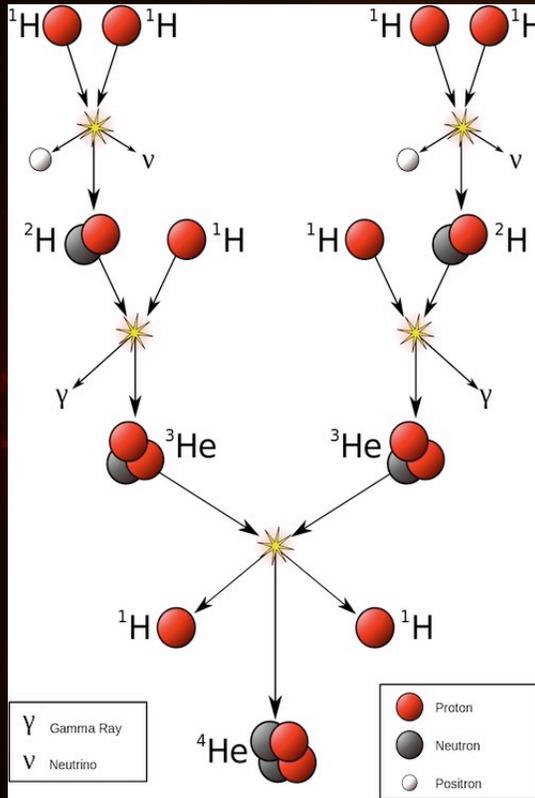
Sistema solare

Sun

Età: 5×10^9 yrs
Massa: 2×10^{33} g = $1 M_{\odot}$
Densità: 1.41 g/cm³
Raggio: 700.000 km = $1 R_{\odot}$

Reazioni nucleari

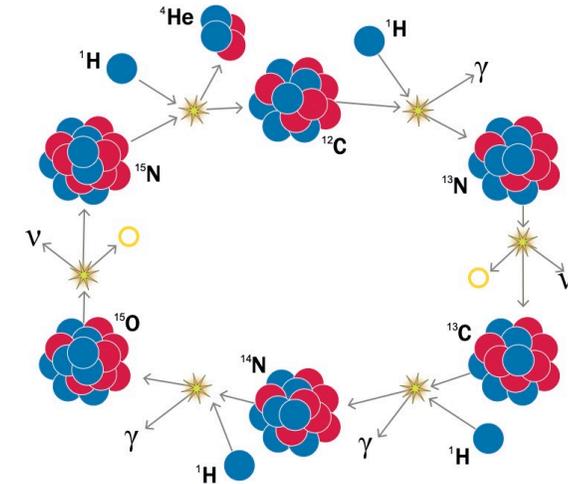
Proton - Proton chain



CNO cycle

Il ciclo di CNO

Nel ciclo CNO, da quattro nuclei di idrogeno H (ossia quattro protoni) si produce un nucleo di elio He, due positroni (antielettroni), due neutrini ed energia rilasciata sotto forma di raggi gamma (fotoni). Questo processo di fusione dell'idrogeno avviene indirettamente attraverso i nuclei di carbonio C, azoto N e ossigeno O, che fungono da catalizzatori e da cui il ciclo prende il nome.



SIZE COMPARISON OF STARS

By SCtester

Sun
695,700 km Radius

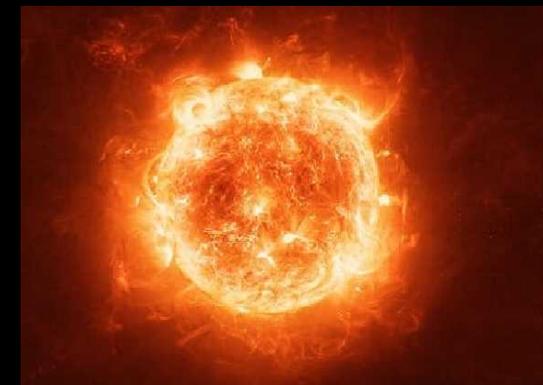
Sirius
1,191,000 km Radius

Pollux
5,568,000 km Radius

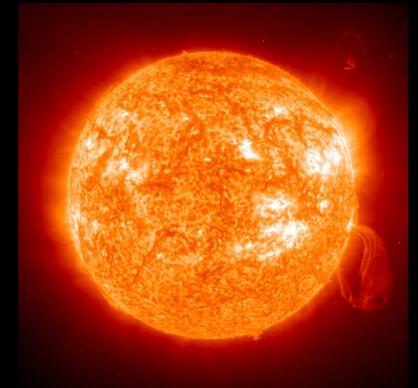
Arcturus
17,890,000 km Radius

UY Scuti
1,188,000,000 km Radius

Le stelle sono tutte uguali?



Betelgeuse: $15-20 M_{\odot}$



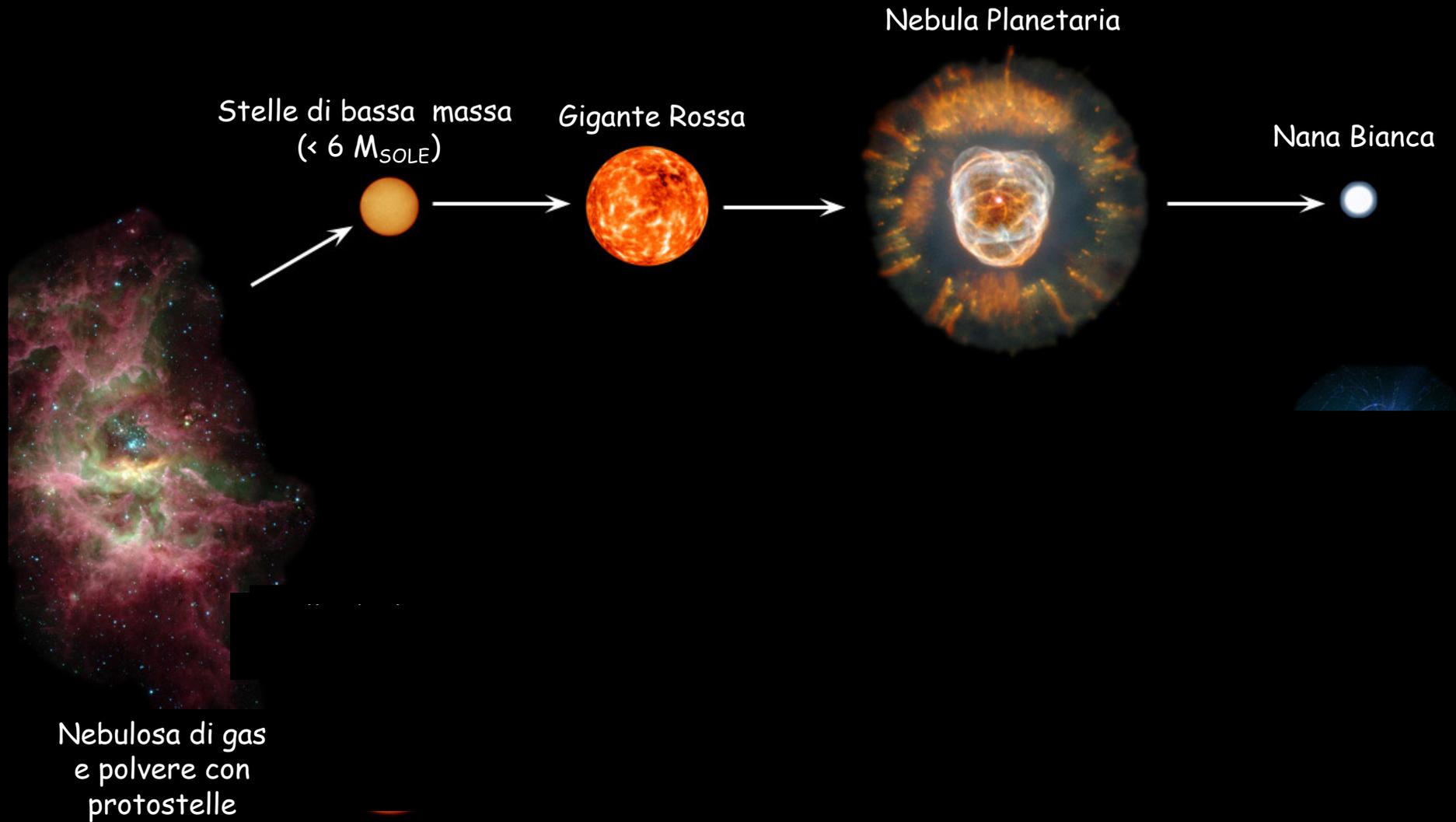
Sole: $1 M_{\odot}$



Gliese 229b (prima nana bruna scoperta): $0.08 M_{\odot}$

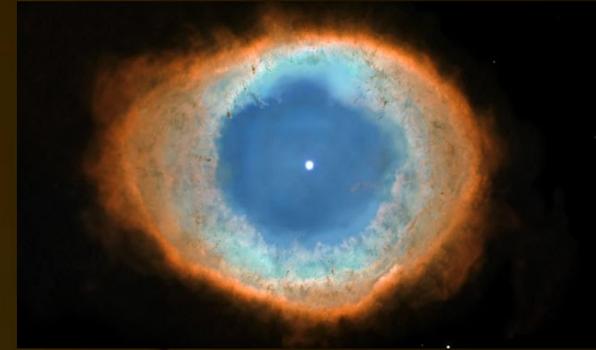
Il combustibile (idrogeno), quindi, finirà in tempi diversi a causa delle differenti caratteristiche delle stelle (massa ed età).

Fasi dell' Evoluzione Stellare (< 6 Msole)

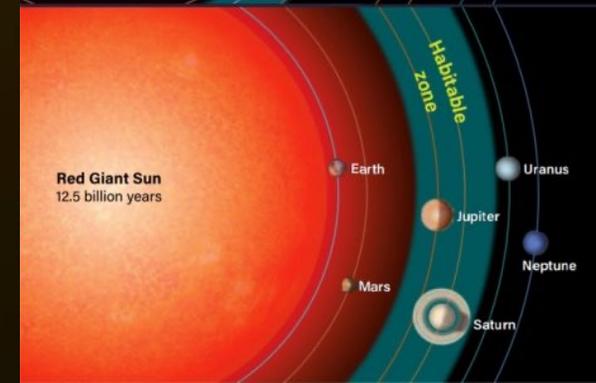


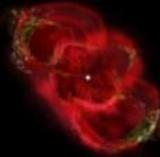
(immagini non in scala)

FASE DI GIGANTE ROSSA – NANA BIANCA (tra 5 miliardi di anni...)



Nebulosa planetaria e nana bianca (al centro)





Morte di una stella tipo Sole ($M < 6 M_{\text{sole}}$)

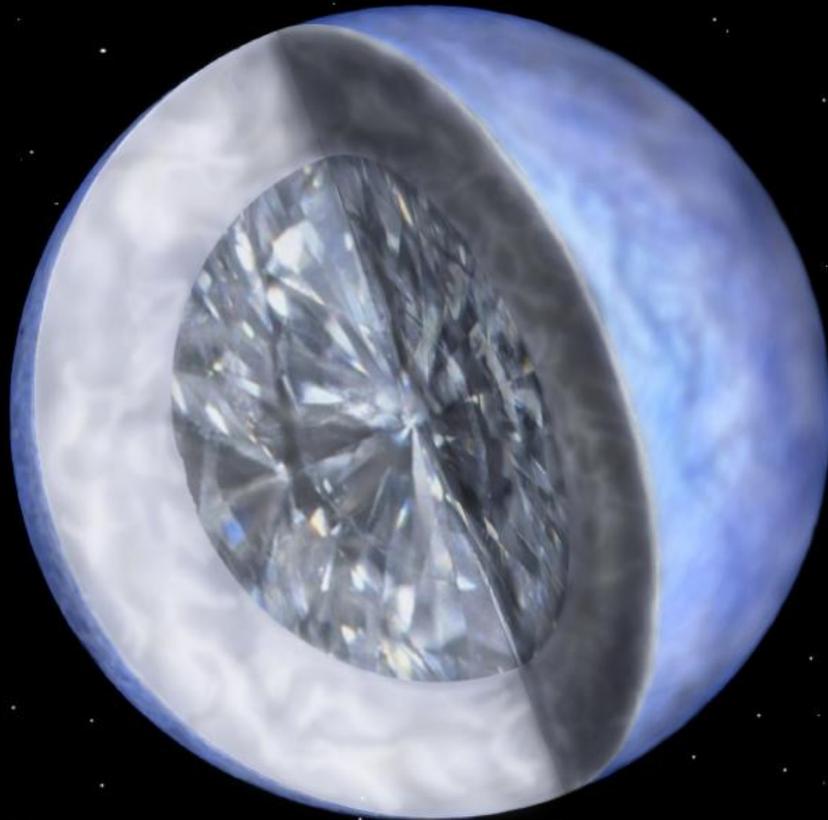
Nana bianca di
carbonio

$M = 1 M_{\text{sole}}$

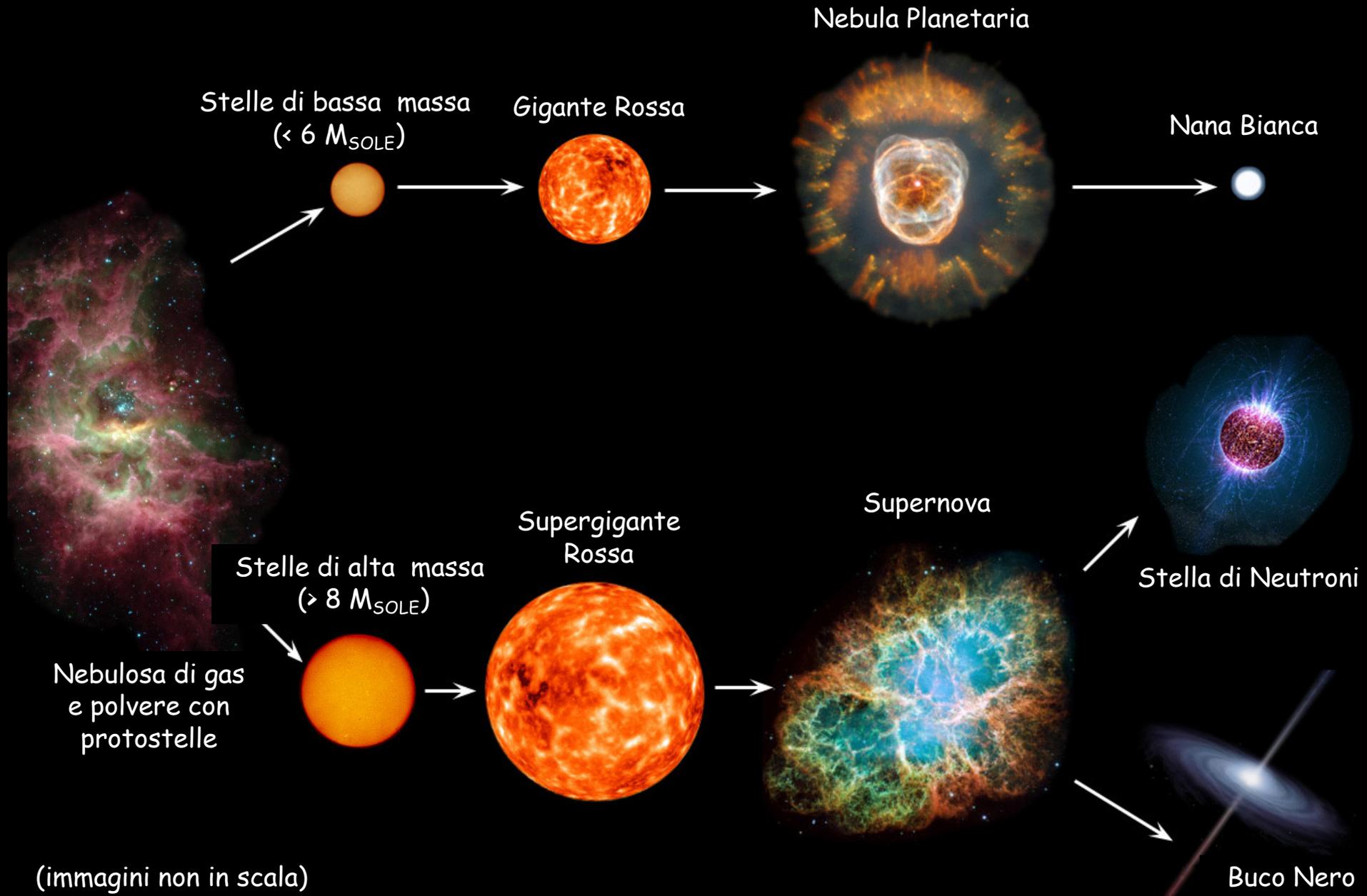
$R = 10.000 \text{ km}$

Densità = 1 ton/cm^3

Un gigantesco
diamante!

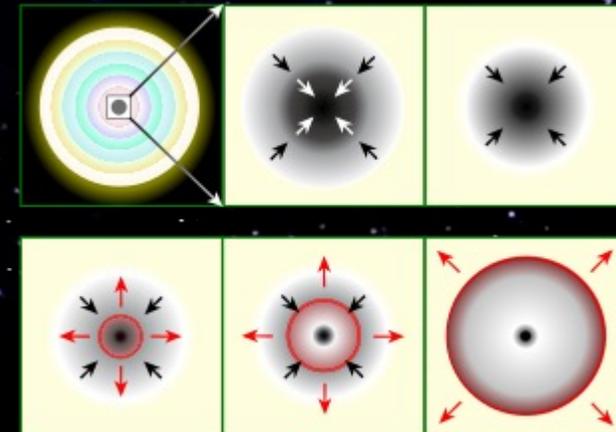


Fasi dell' Evoluzione Stellare (> 8 Msole)

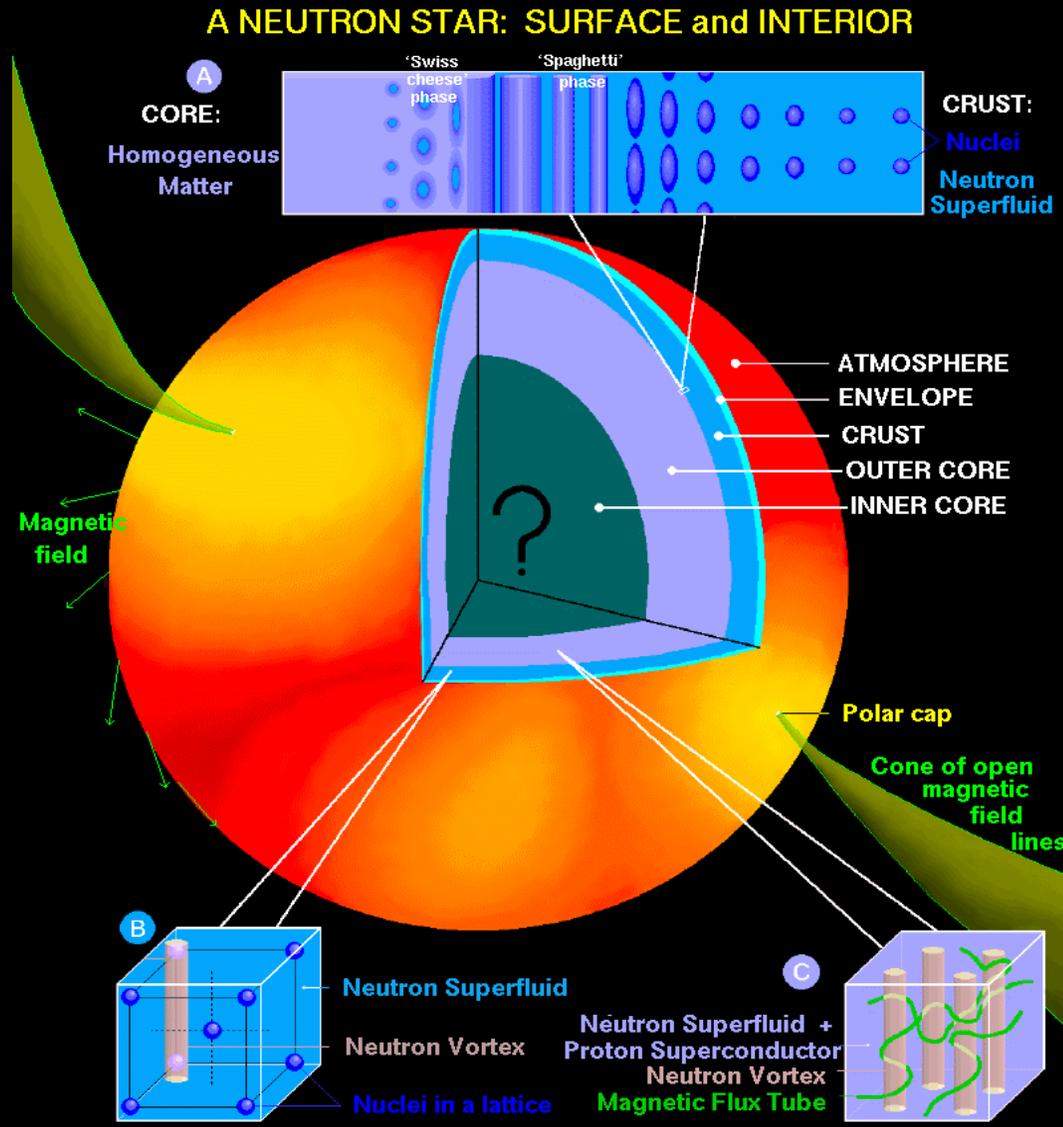


ESPLOSIONE di SUPERNOVA

(Massa della stella superiore a $8 M_{\odot}$)



Morte di una stella di grande massa ($M > 8 M_{\text{sole}}$)



Stelle di Neutroni:
un nucleo atomico
gigantesco

$M > 1,4 M_{\text{sole}}$

$R = 10 \text{ km}$

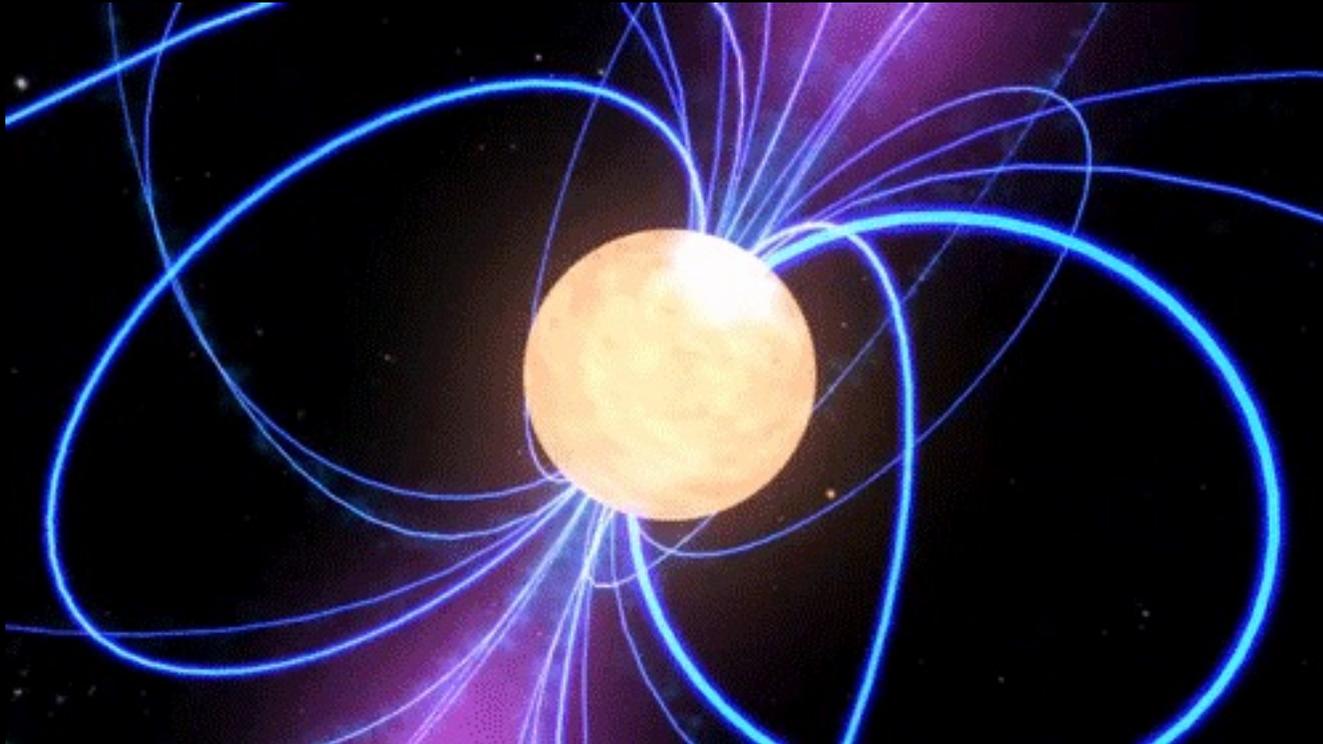
Densità = 1 miliardo ton/cm³

I record delle Stelle di Neutroni

- Gli oggetti più densi dell'Universo
- Gli oggetti con i campi magnetici più intensi dell'Universo
da $\approx 10^8$ Gauss a $\approx 10^{12-14}$ Gauss
- Gli oggetti autogravitanti più veloci dell'Universo
 $P_{\min} \approx 1$ millisecondo \rightarrow fino a 1000 giri in un secondo
- Gli orologi più precisi dell'Universo



Le Pulsar: Stelle di Neutroni con Intensi Campi Magnetici



Le Stelle di Neutroni (masse **1.4 Msun** e raggi di **10 km** circa) hanno intensi campi magnetici:

$$B = 10^8 - 10^{14} \text{ G}$$

e possono essere rapidamente ruotanti:

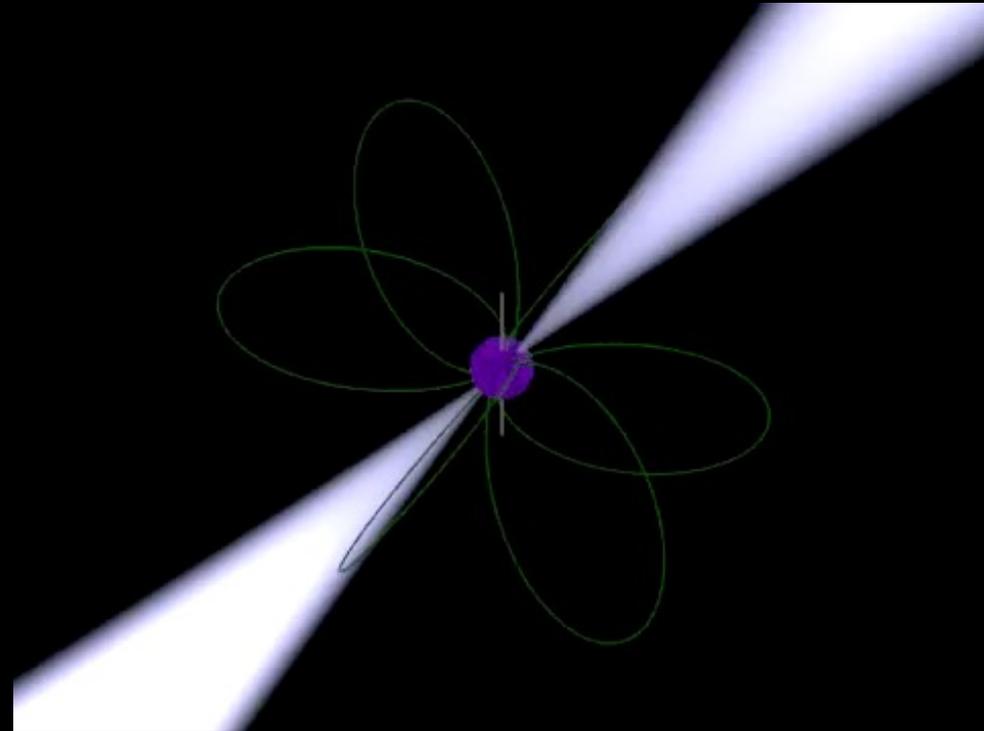
$$P = 1 \text{ ms} - 10 \text{ s}$$

Pulsar: emissione radio collimata ed effetto faro

Stelle di Neutroni ruotanti con intensi campi magnetici di dipolo emettono energia: la Pulsar rallenta

Fascio di onde radio in rotazione = effetto faro (pulsazioni)

Suono da una pulsar X al millisecondo: IGR J00291+5934 periodo di rotazione 1.67 msec; in 1 s la pulsar gira circa 600 volte su se stessa



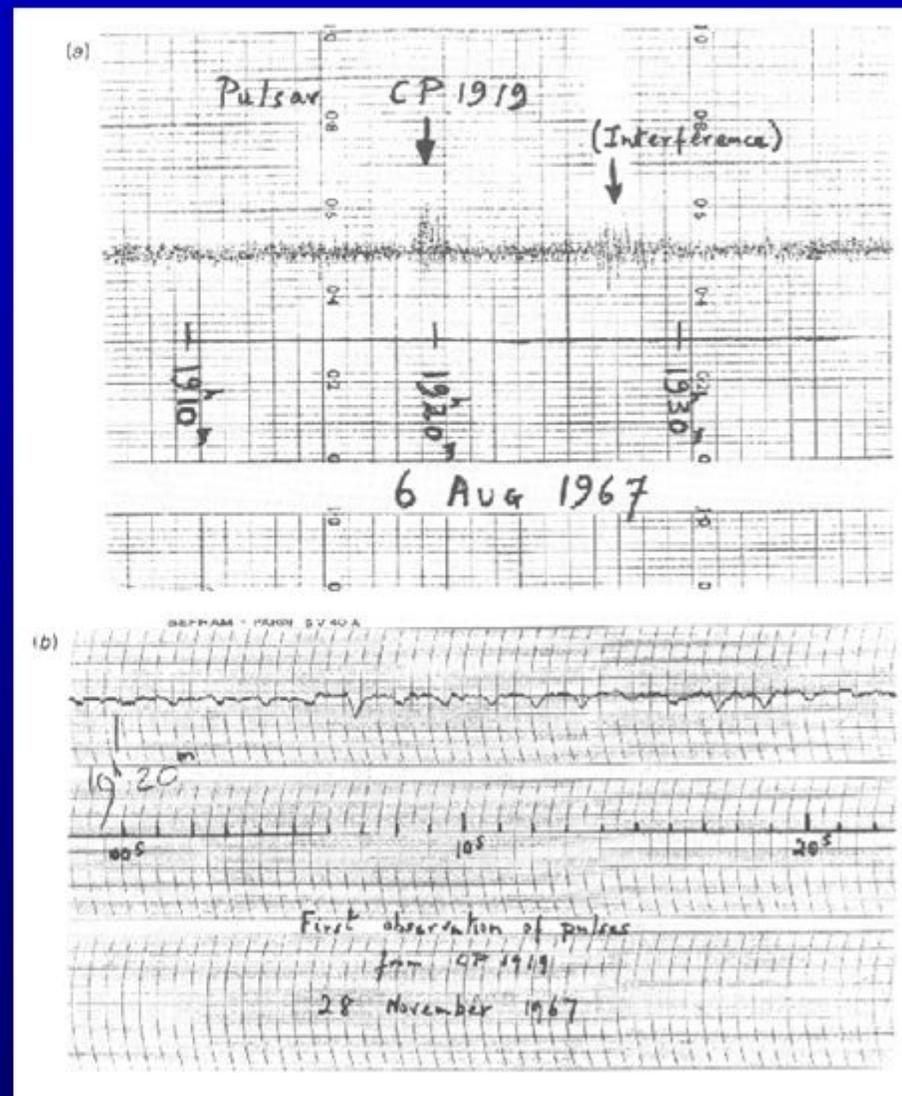
La scoperta...

- Jocelyn Bell scopre un segnale periodico extra-terrestre di 1.337 s alla posizione:

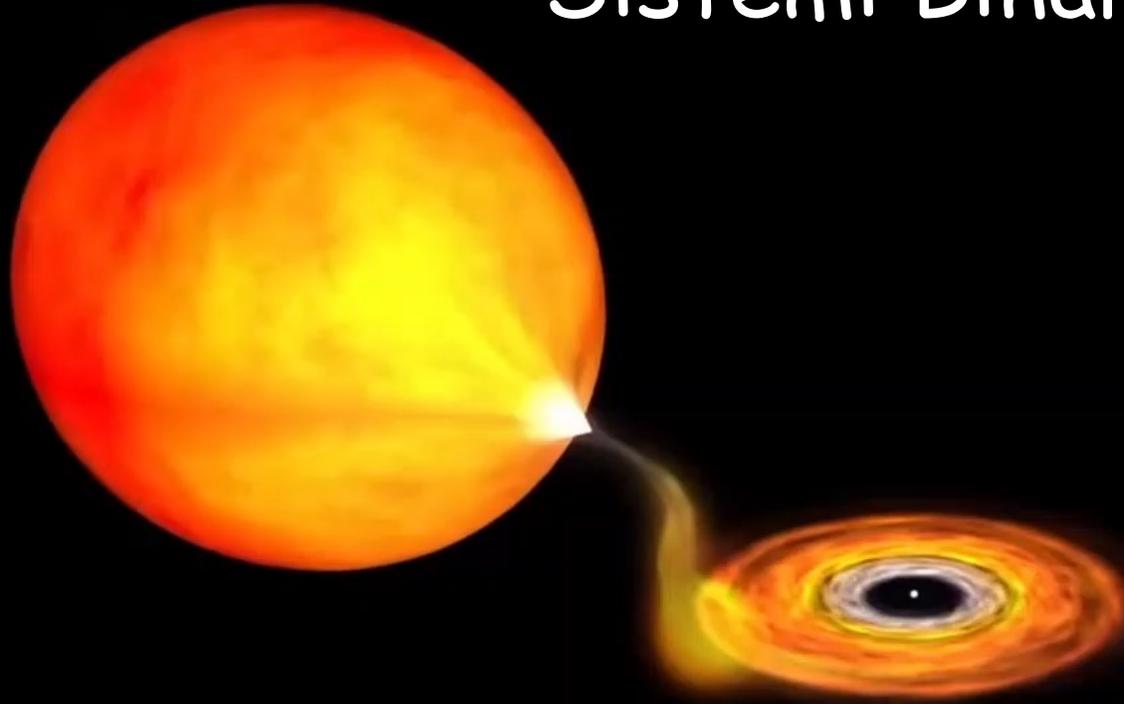
RA 19:19:36

DEC +21:47:16

- Little Green Men ?!



Sistemi Binari X



Sistema Binario
formato da una
Stella di Neutroni e
Stella tipo Sole

La Stella di
Neutroni che
accelera la sua
rotazione a causa
dell' accrescimento
della materia della
stella compagna
fino a 500/1000
giri al secondo

Morte di una stella di $M > 15 M_{\text{sole}}$: Buco Nero, un oggetto squisitamente relativistico

$M = 3 M_{\text{sole}}$

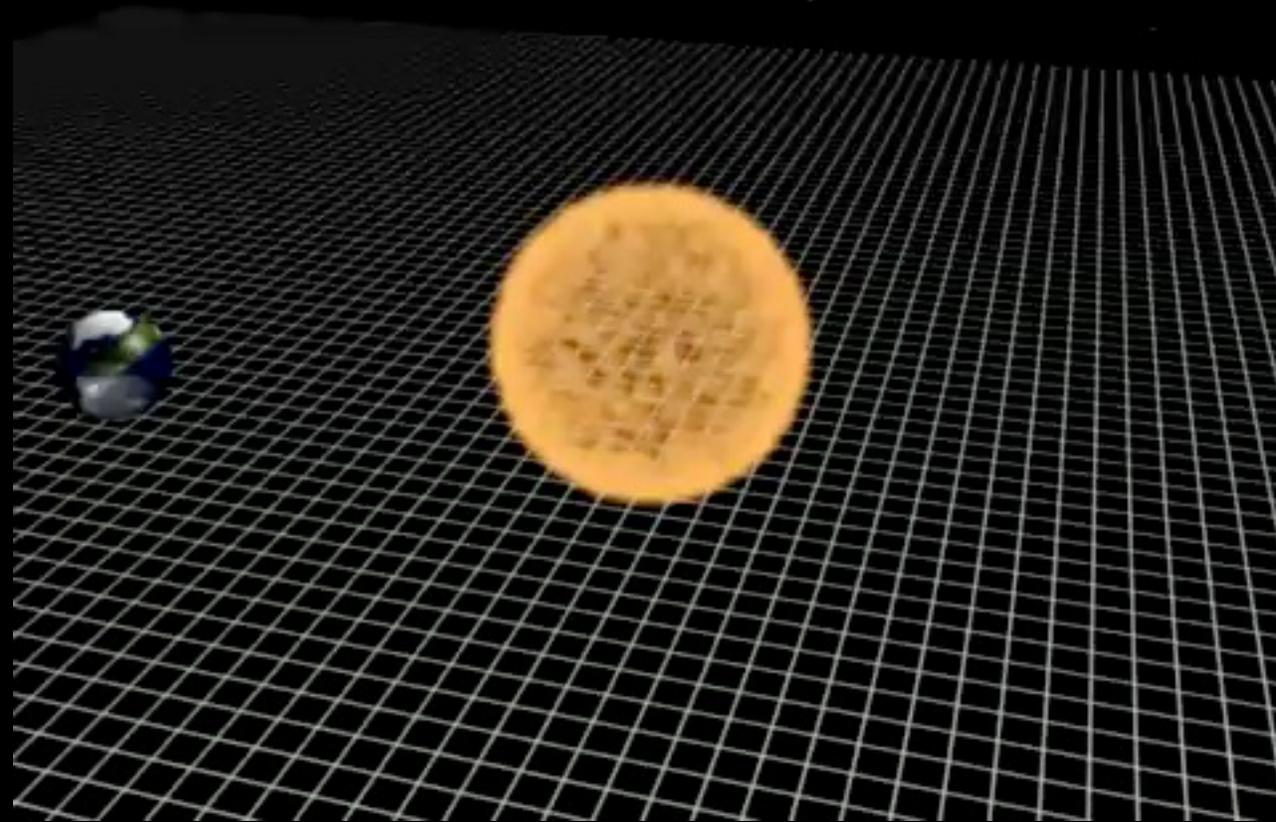
$R = 10 \text{ km}$

Nulla, nemmeno
la luce, può
sfuggire alla
attrazione
gravitazionale
di questo
oggetto



Distorsione dello spazio-tempo: la forza di gravità distorce lo spazio e rallenta il tempo (Relatività Generale di Einstein)

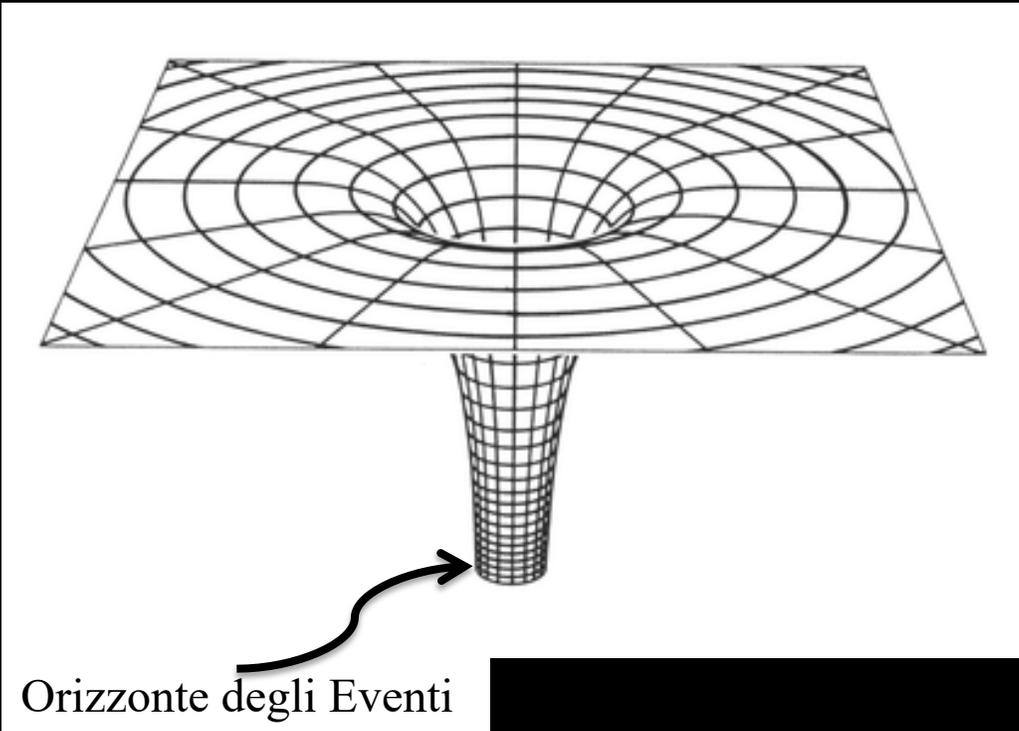
Gravitazione
Universale
(Newton):
 $F = G M m / R^2$



Relatività
Generale
(Einstein):
Deformazione
dello spazio-
tempo

La forza di gravità distorce lo spazio intorno

Morte di una stella di $M > 15 M_{\text{sole}}$: Buco Nero, un oggetto squisitamente relativistico



$$M > 3 M_{\text{sole}}$$

$$R = 2 G M / c^2 > 10 \text{ km}$$

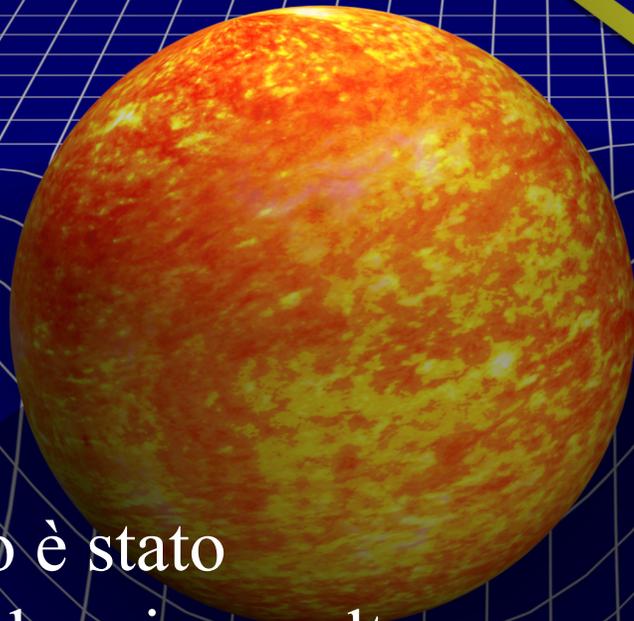
Nulla, nemmeno la luce,
può sfuggire alla
attrazione gravitazionale
di questo oggetto

Distorsione dello Spazio-Tempo
vicino ad un Buco Nero

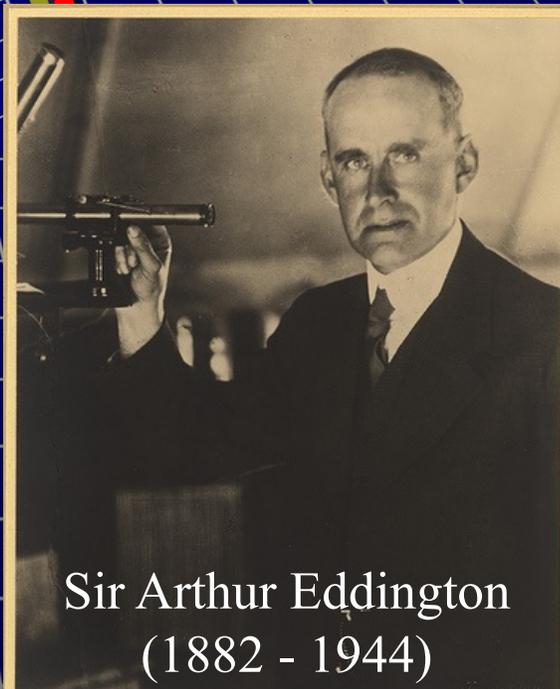
Real

Observed

Il principio della lente gravitazionale: la luce è deviata dal campo gravitazionale del Sole



Questo effetto è stato osservato per la prima volta durante un'eclissi di Sole dall'isola di Principe (vicino l'Africa) da Sir Arthur Eddington il 29 maggio 1919



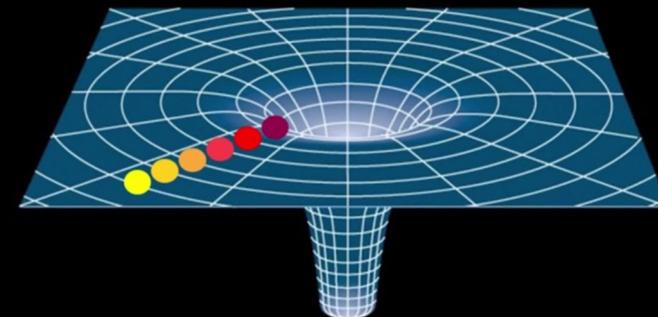
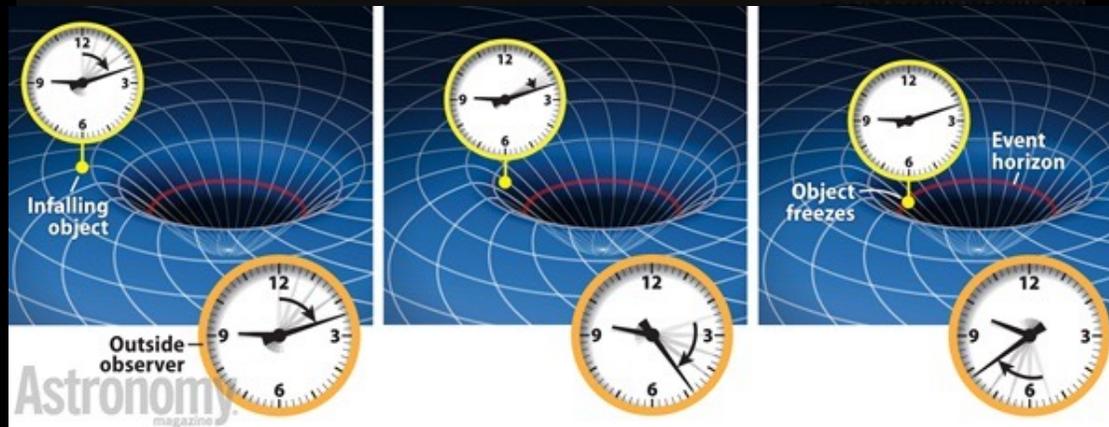
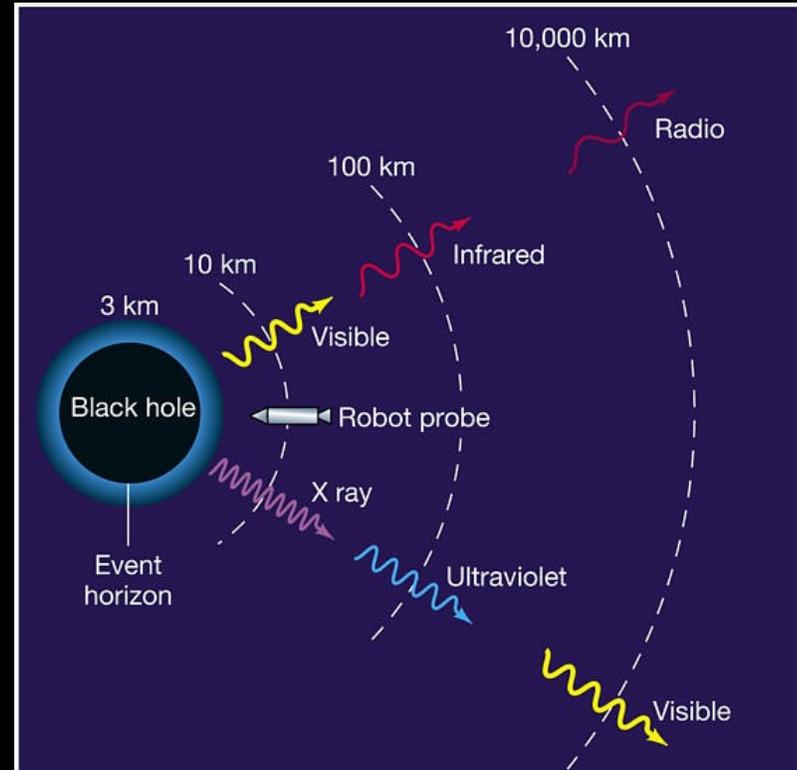
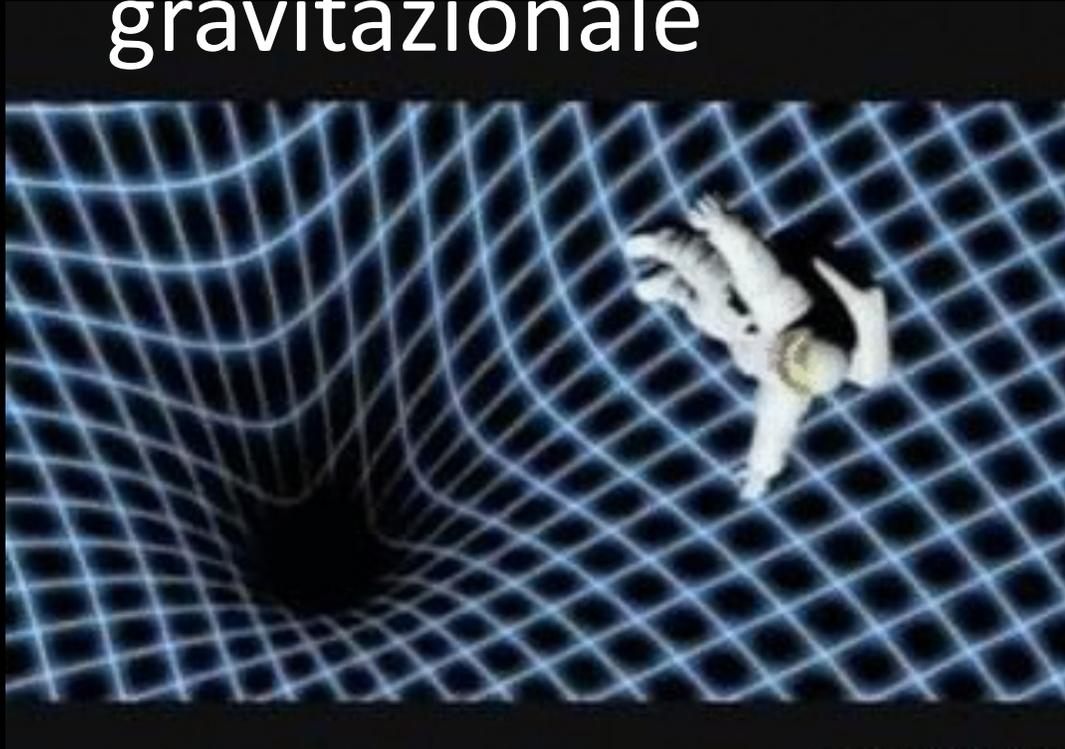
Sir Arthur Eddington
(1882 - 1944)

Un viaggio verso i Buchi Neri...

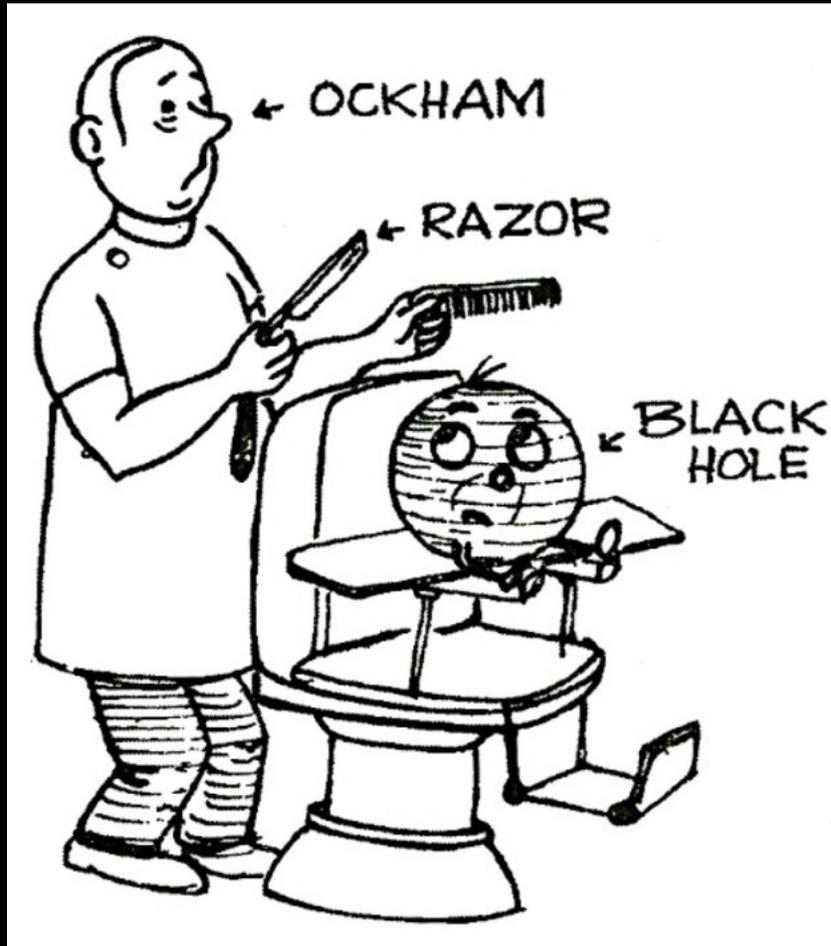


General Relativity

Dilatazione temporale e redshift gravitazionale



Proprietà di un buco nero: Il buco nero non ha capelli – “No Hair” theorem



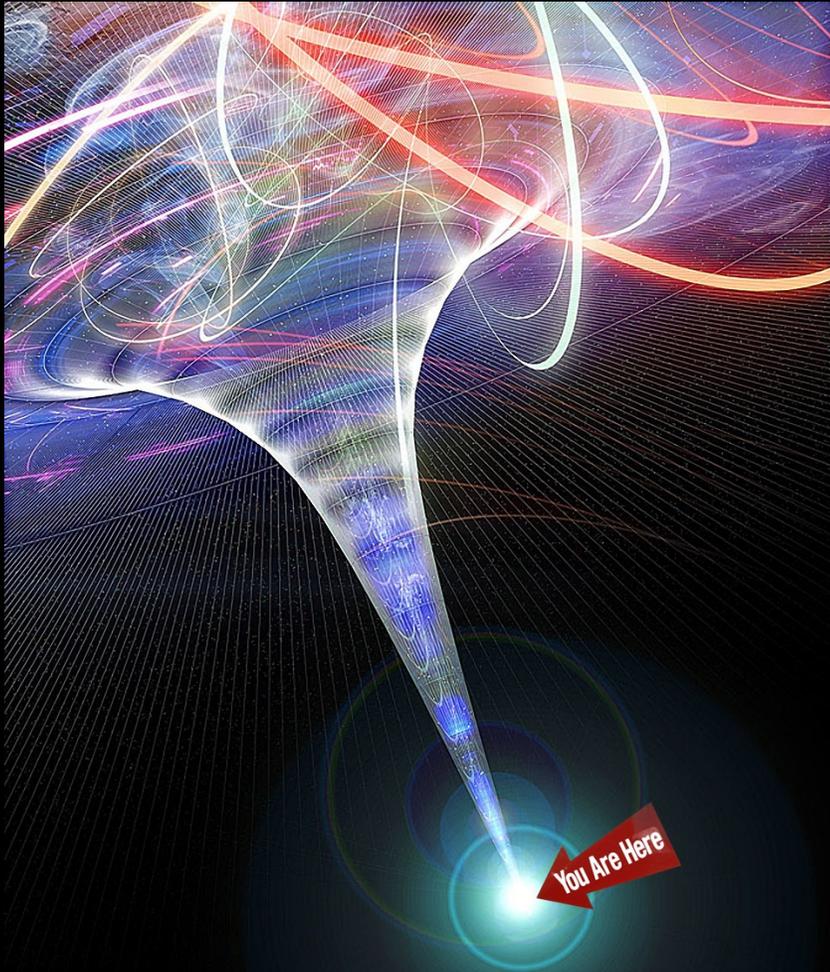
Un buco nero può essere caratterizzato da soli tre parametri:

- Massa
- ~~Carica Elettrica~~
- Rotazione (o momento angolare di spin)

John Archibald Wheeler: “a black hole has no hair”

Conggettura del "Censore Cosmico"

Le Singolarità nude non possono esistere

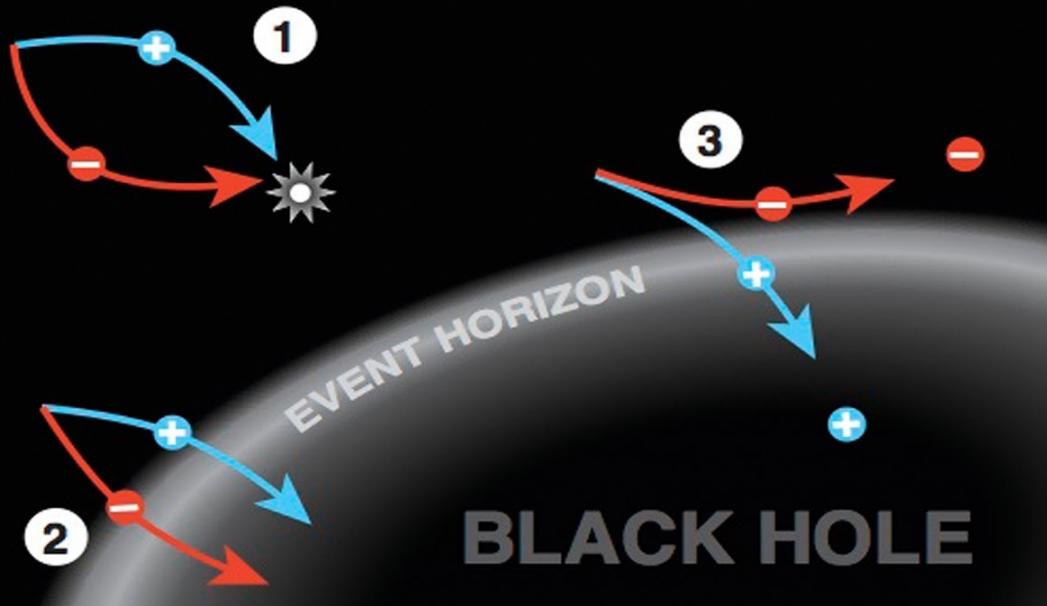


Le singolarità che emergono nelle soluzioni dalle equazioni di Einstein sono nascoste dietro l'orizzonte degli eventi e quindi non possono essere viste dal resto dell'universo.

Le singolarità che non sono nascoste sono chiamate nude.

Conggettura del Censore Cosmico – Roger Penrose (1969)

Un Buco Nero è per sempre...?



I Buchi Neri evaporano emettendo *radiazione di Hawking*, emissione termica dovuta ad effetti quantistici che si verificano a ridosso dell'orizzonte degli eventi.

Un buco nero non è per sempre...?

$$\text{Temperatura} \propto 1 / M_{\text{BH}}$$
$$\text{tempo}_{\text{evaporazione}} \propto M_{\text{BH}}^3$$



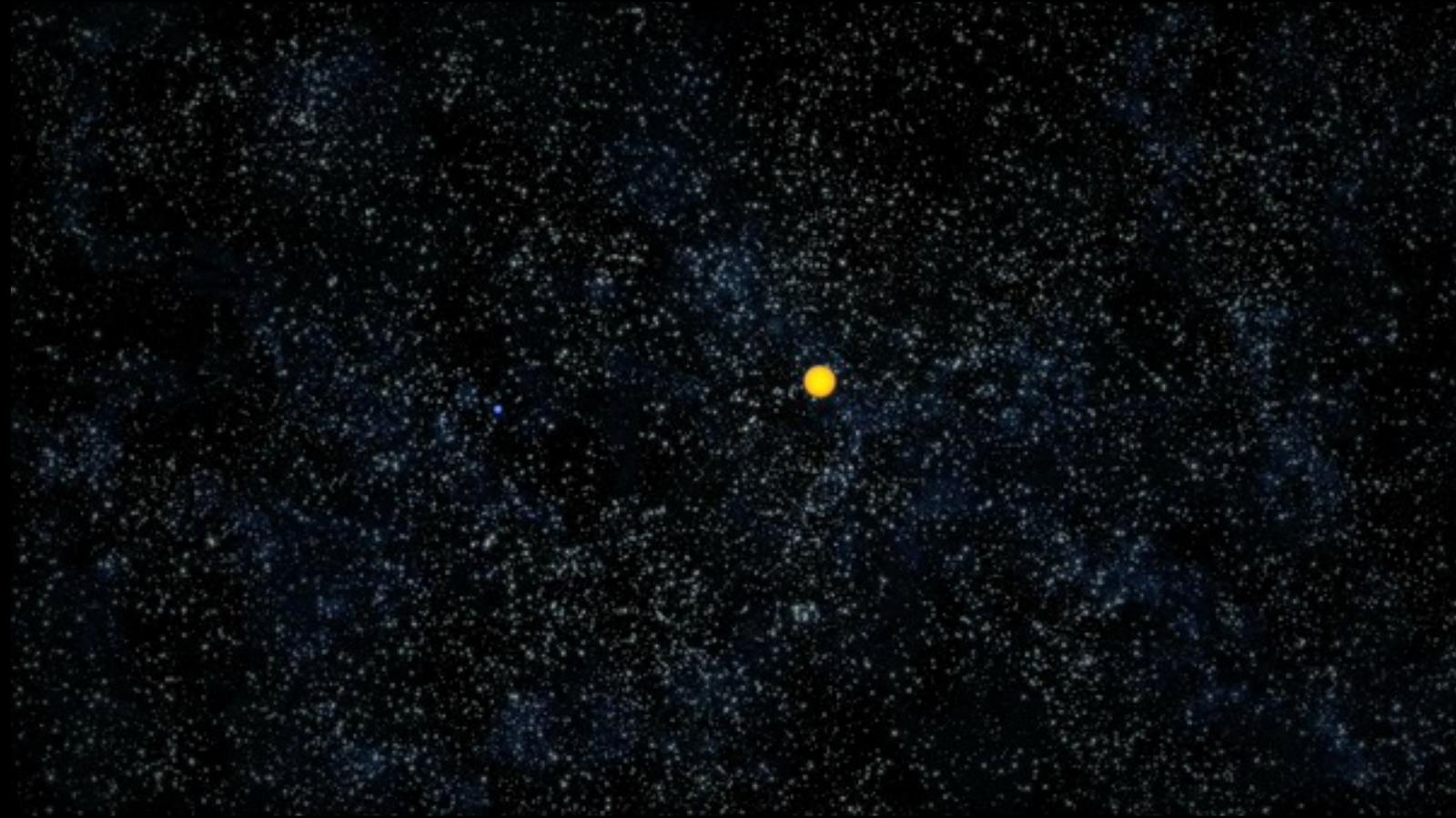
$$M_{\text{BH}} = 200 \text{ Ton} \rightarrow t_{\text{eva}} = 1 \text{ s}$$

$$M_{\text{BH}} = 1 \text{ Msole} \rightarrow t_{\text{eva}} = 10^{67} \text{ anni!}$$

Età dell'Universo (Hubble time) $\approx 1.4 \cdot 10^{10}$ anni

Radiazione di Hawking – Steven Hawking (1974)

Buchi Neri di massa stellare in sistemi binari



Un Buco Nero che inghiotte materia da una stella compagna:
la materia cade spiraleggiando verso il BH, e talvolta emette un jet

Il centro della nostra Galassia vista dal VLT

ESO Video News Reel 46/08

Unprecedented 16-year long study tracks stars orbiting Milky Way black hole.

B-roll

European Southern Observatory

Copyright ESO 2008

SuperMassive Black Holes



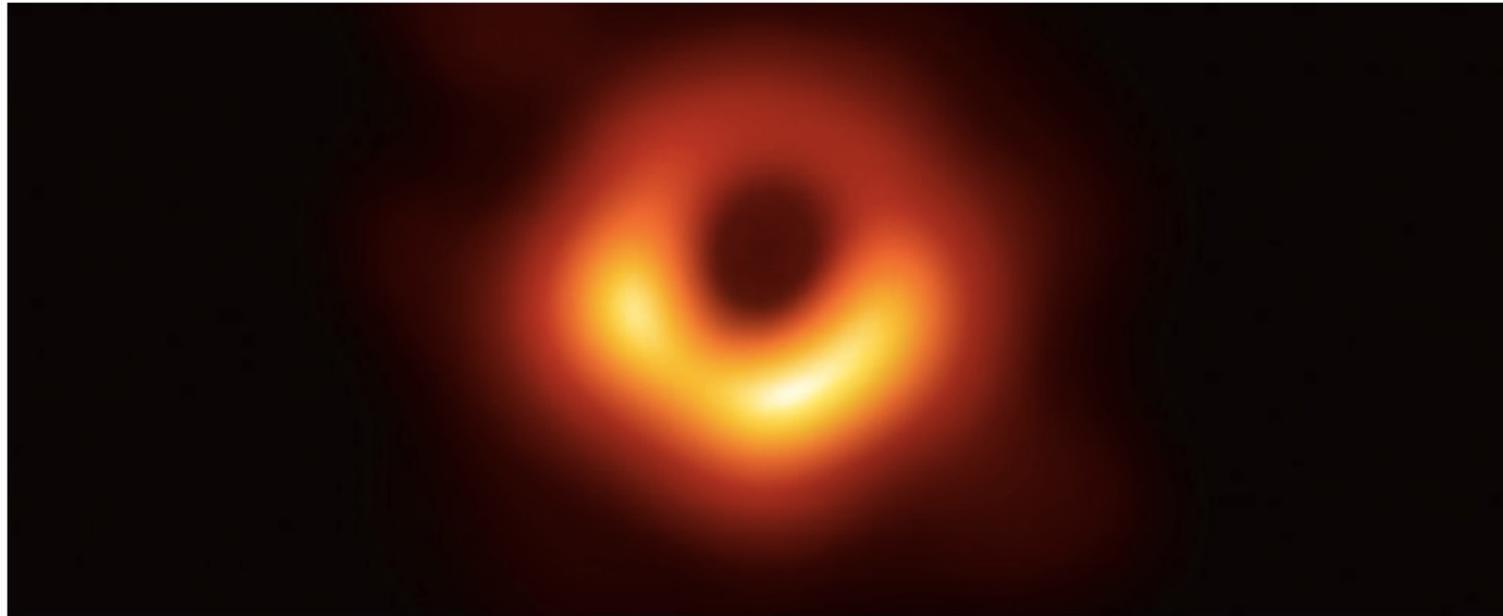
La prima "foto" di un Buco Nero

R.it

Scienze

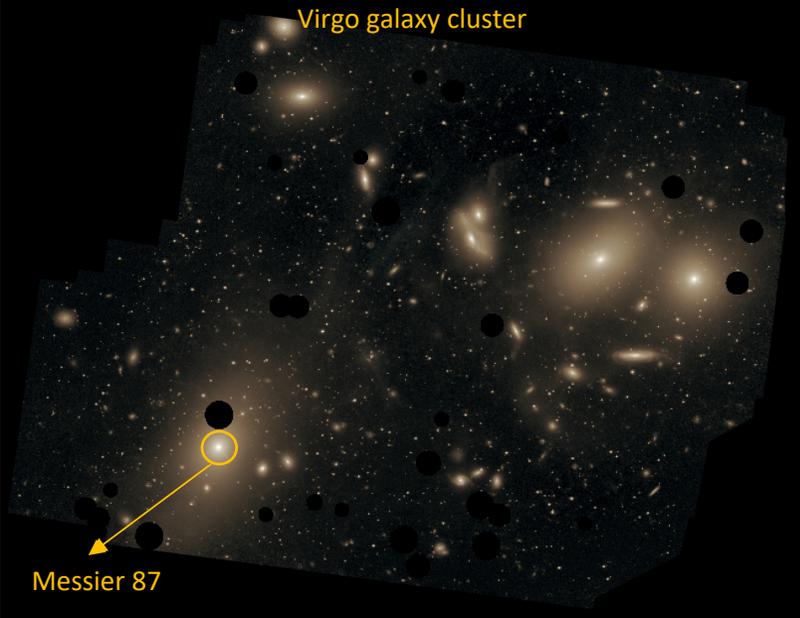
10 aprile 2019

Ecco la prima immagine di un buco nero. "Einstein aveva ragione"



L'ombra del buco nero al centro di M87, una enorme galassia a circa 55 milioni di anni luce dalla Terra

La foto del secolo per gli astrofisici: si vede la linea dell'orizzonte degli eventi, la distorsione dello spazio-tempo. E' una conferma della teoria della Relatività, mai appurata prima in un laboratorio di fisica così estremo. All'osservazione hanno partecipato 8 radiotelescopi di tutto il mondo



Event Horizon Telescope

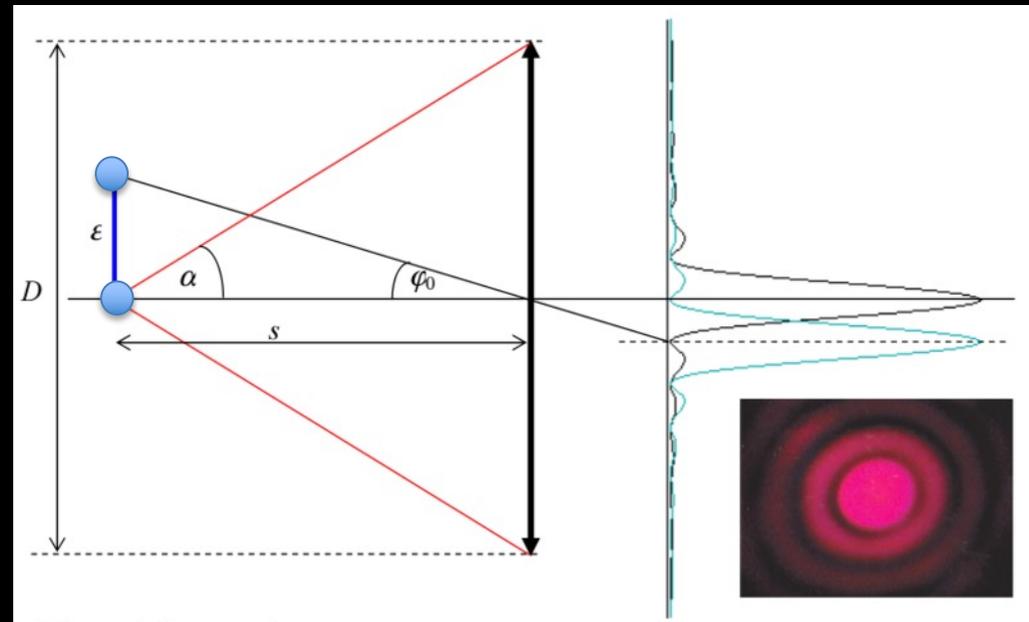
BUCO NERO M87 NELLA GALASSIA VIRGO A
(Dimensione apparente 40 microarcosecondi)

Potere risolutivo

Due punti si considerano risolti quando il massimo principale di diffrazione del primo coincide con il primo minimo dell'altro.

$$\sin \varphi_0 \approx \varphi_0 = 1.22 \lambda / D$$

dove λ è la lunghezza d'onda della luce e D il diametro della lente o specchio.



1 μas è un angolo molto piccolo...

- Per definizione è l'angolo sotteso dal sistema Terra-Sole visto dalla distanza di 1 Mpc
- La terra vista dalle Pleiadi (100 pc)
- Bagheria vista da α Centauri (1.3 pc)
- Un granello di riso sulla Luna (380,000 km)
- Un capello umano che si trova a Kabul visto da Heidelberg (5000 km)

Più è grande il telescopio maggiore è il suo potere risolutivo.

Tuttavia, per ottenere una tale risoluzione di immagine serve un telescopio grande quanto tutta la Terra....

The Global VLBI - Array



L'EHT e la foto dell'orizzonte





That's all Folks!