



# **NANE BIANCHE**

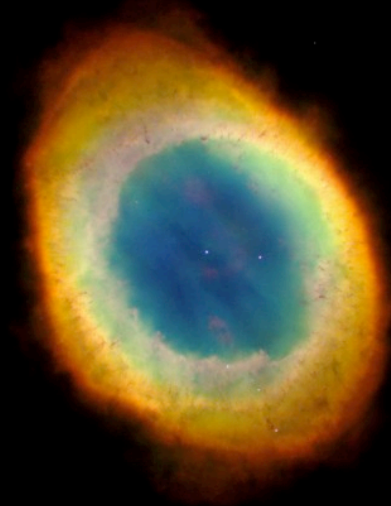
# **STELLE DI NEUTRONI**

# **BUCHI NERI**

MONICA COLPI  
Dipartimento di Fisica G. Occhialini  
Università di Milano Bicocca

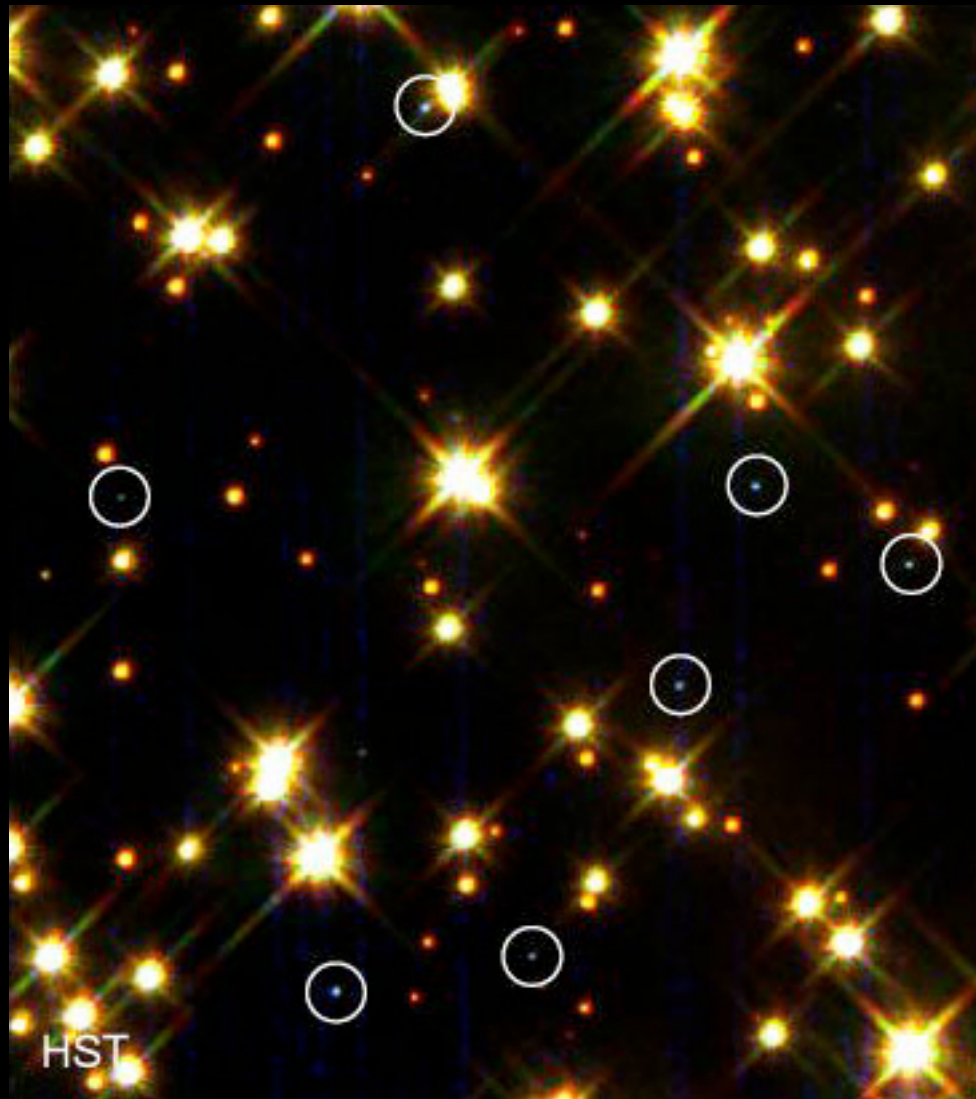
Milano, 11 Gennaio 2012  
Brera, l'Universo in fiore

NANE BIANCHE  
COLTE NELL'ISTANTE DELLA LORO FORMAZIONE  
nuclei stellari “spogliati del loro involucro”





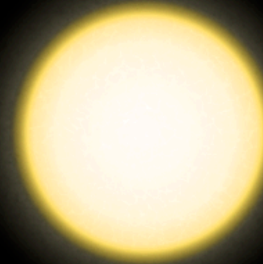
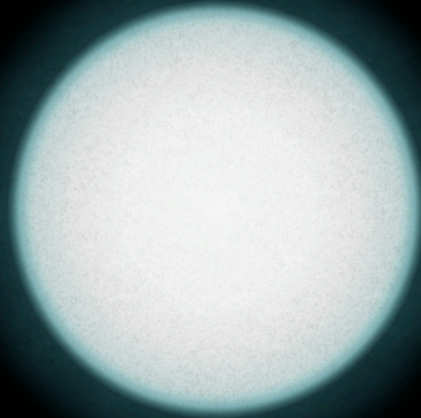
... nane bianche negli ammassi globulari ...



... sono piccole stelle ... densissime ...



$M \approx 1.0 M_{\text{sun}}$   
 $R \approx 5800 \text{ km}$

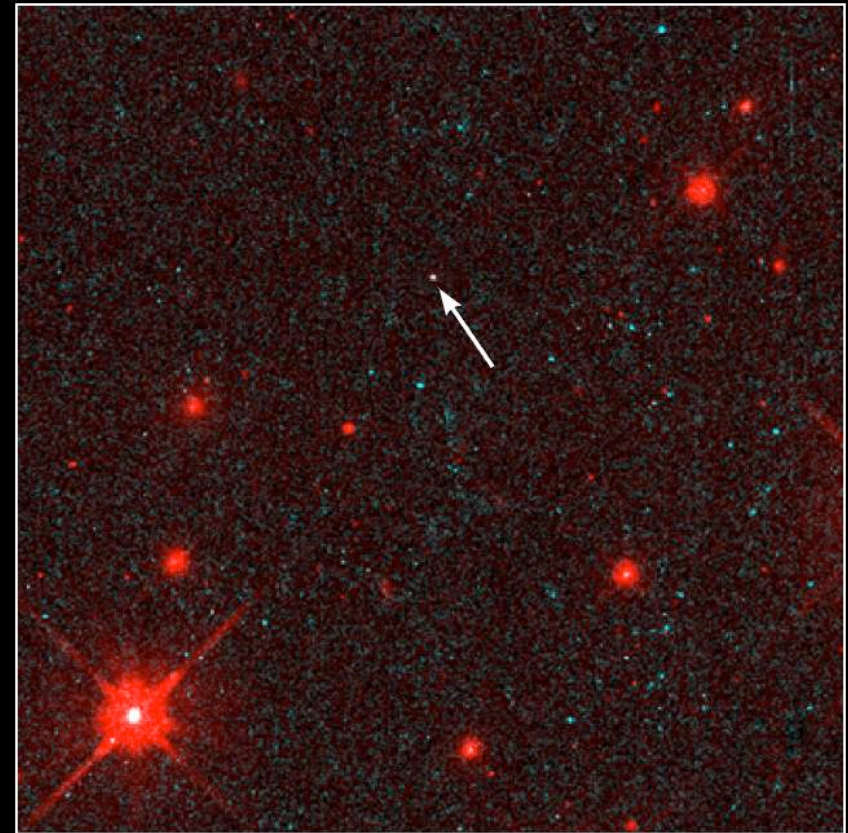
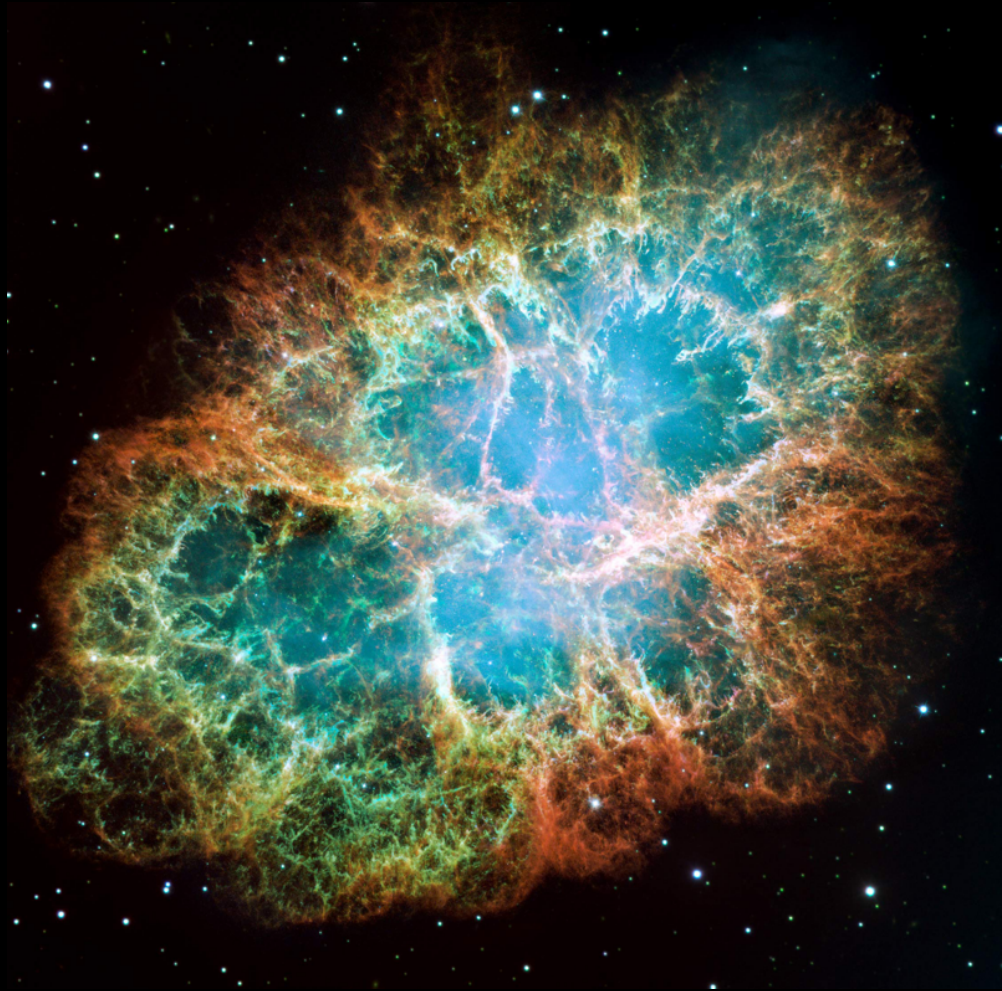






**NASCITA DI UNA STELLA DI NEUTRONI**

STELLE DI NEUTRONI  
COLTE NELL'ISTANTE DELLA LORO FORMAZIONE  
nuclei stellari collassati “spogliati del loro involucro” durante  
l'esplosione di supernova

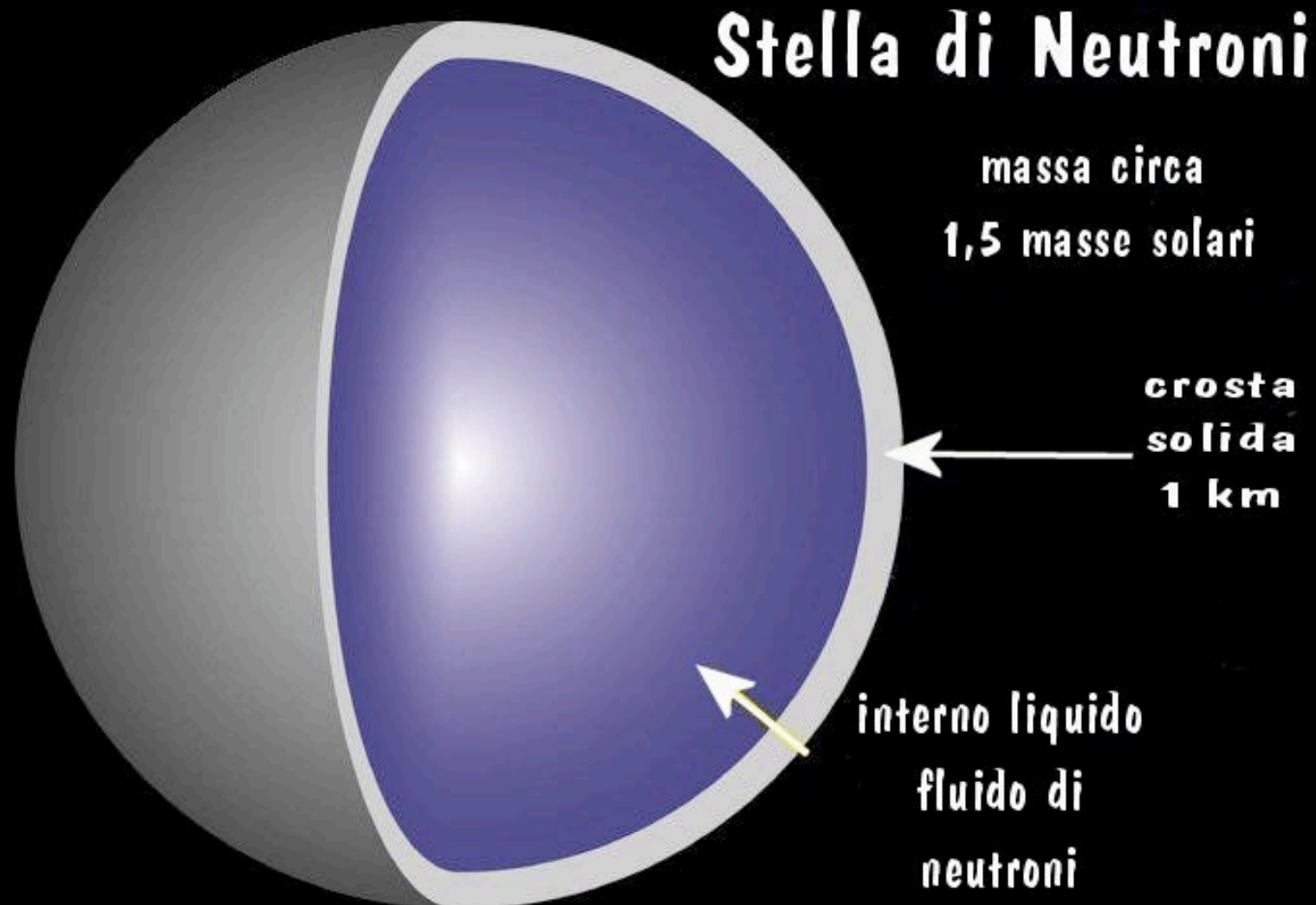


**Isolated Neutron Star RX J185635-3754** HST • WFPC2

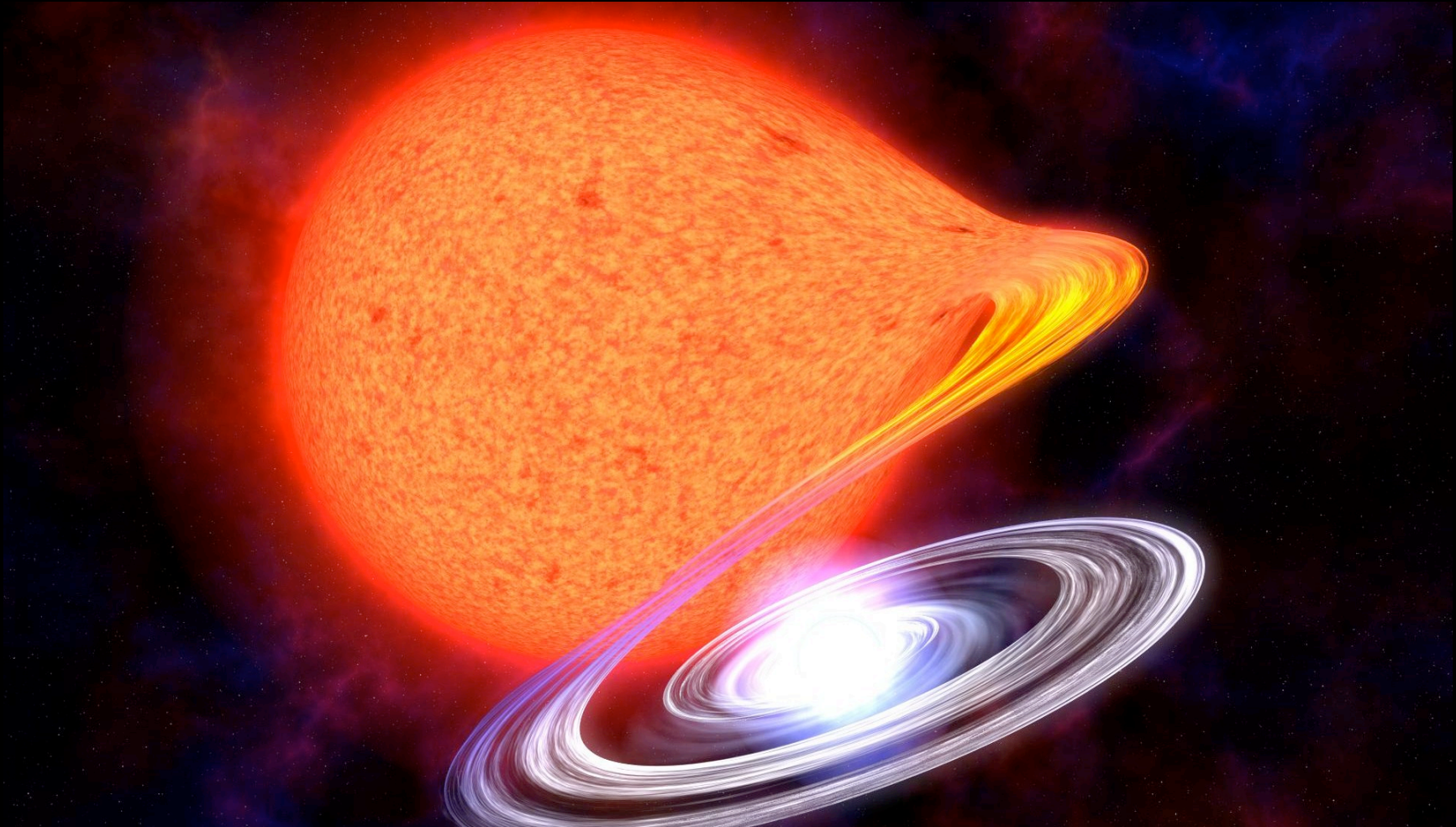
PRC97-32 • ST ScI OPO • September 25, 1997  
F. Walter (State University of New York at Stony Brook) and NASA



**RAGGIO E' DI 10 chilometri !  
velocita' di fuga e' 0.1 c !!!!  
NUCLEO GIGANTESCO DI NEUTRONI**



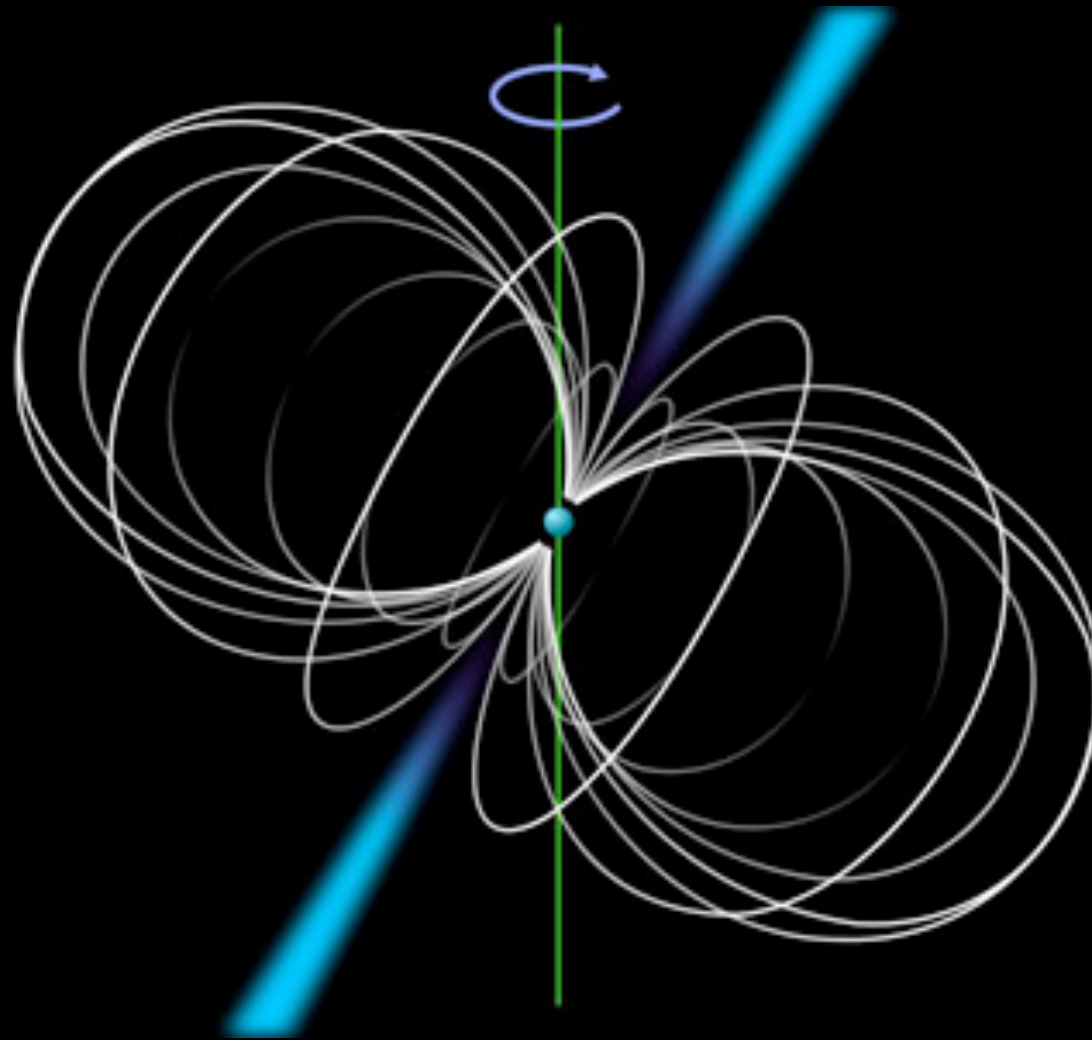
**BINARIE**  
**OSPITANTI STELLE DI NEUTRONI**  
si accendono come sorgenti X  
luminosissime



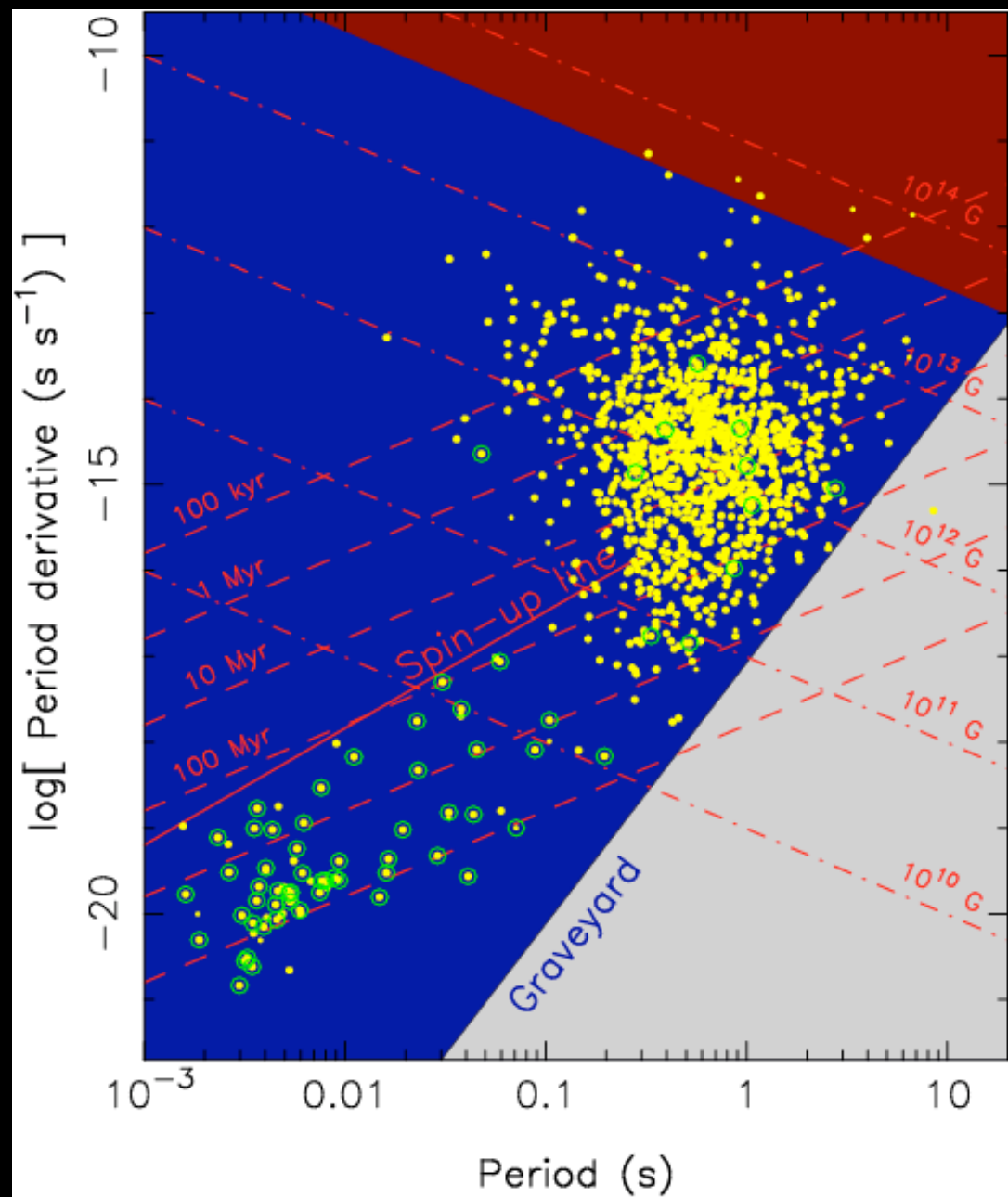




# STELLE DI NEUTRONI COME PULSAR RADIO







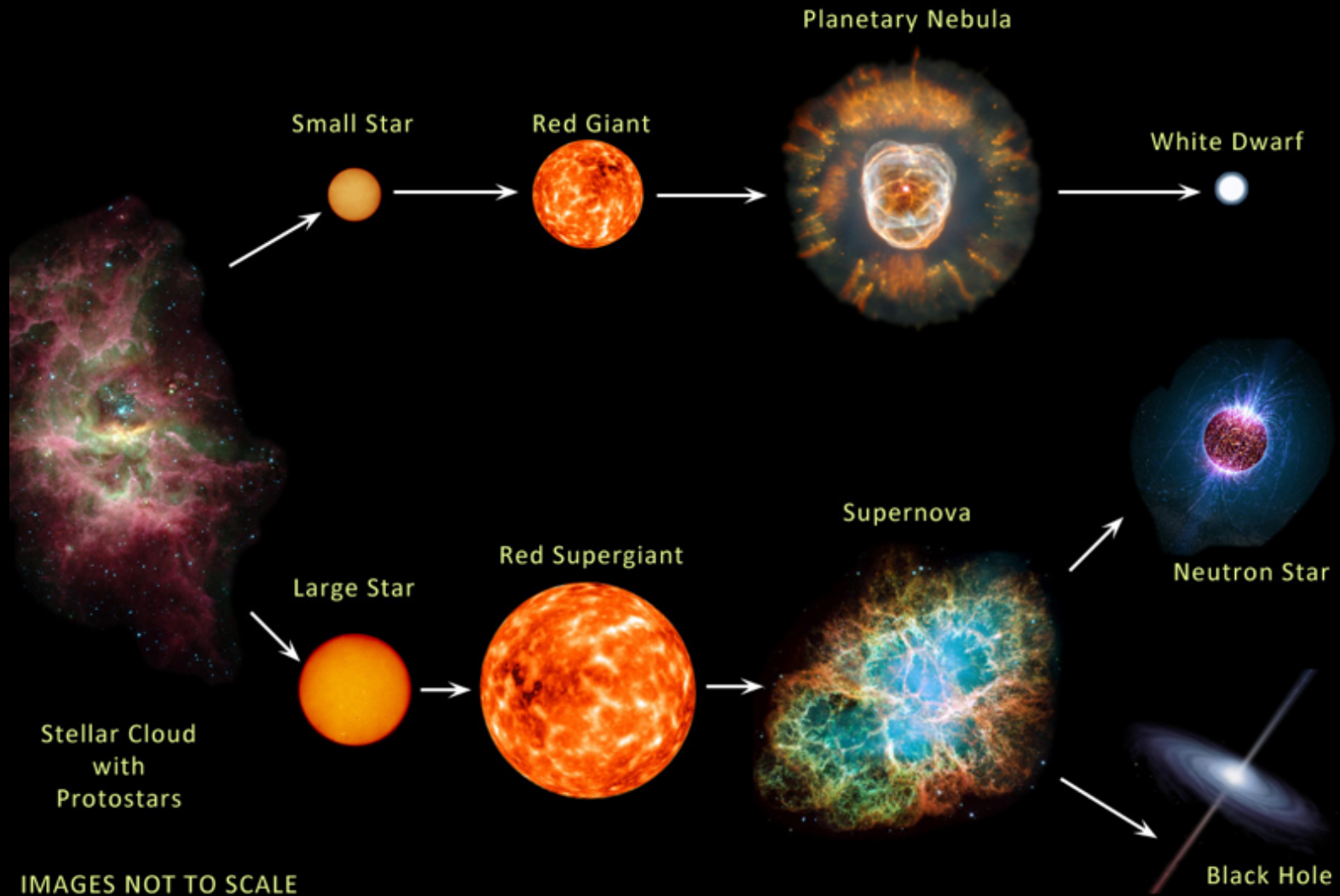


e... i buchi neri?

il concetto di buco nero  
si sviluppa in ambito stellare  
grazie alla consapevolezza che  
stelle di neutroni non esistono al  
di sopra di una massa limite  
3 masse solari  
“quale destino per le stelle molto  
massicce”?

# BUCHI NERI STELLARI

## EVOLUTION OF STARS







I BUCHI NERI  
SONO REALI

?

e se reali sono  
VISIBILI o INVISIBILI

?

# **BUCO NERO**

**CONCETTO - RELATIVITA' GENERALE  
E' UN OGGETTO SEMPLICISSIMO**

**MASSA**

**LA MASSA DI UN BUCO NERO  
E'  
CONFINATA  
IN UN VOLUME....NULLO**

**DENSITA' ..... INFINITA**

VITTORIA DELLA  
**GRAVITA'**  
SU TUTTE LE FORZE PRESENTI  
IN NATURA



**IN UN BUCO NERO  
L'ATTRAZIONE  
GRAVITAZIONALE E'  
INFINITA e NON  
PUO' ESSERE  
CONTROBILANCIATA  
DA NESSUNA FORZA**

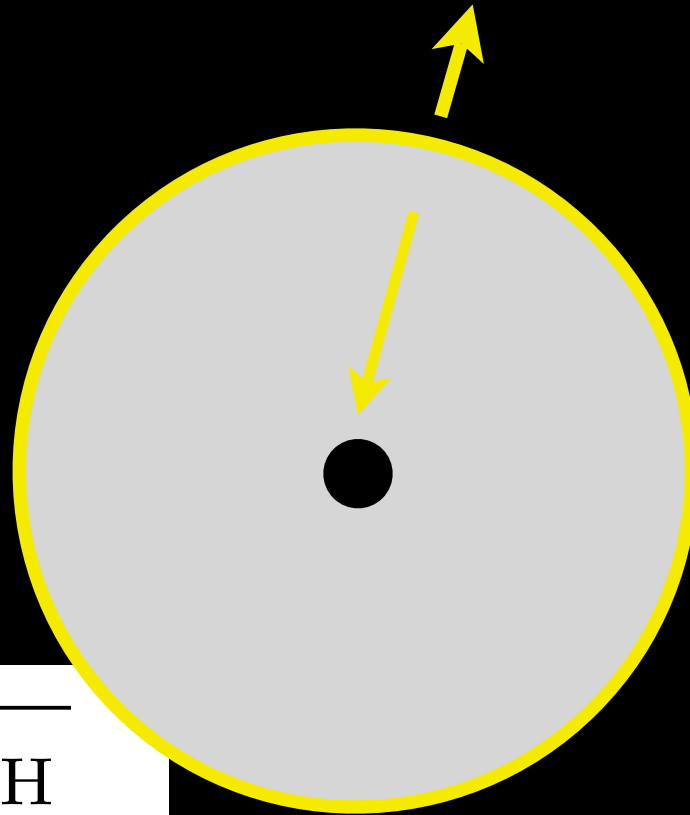


**SINGOLARITA'  
gravita' quantistica**

**SINGOLARITA'**  
**E'**  
**INVISIBILE**

**A UN OSSERVATORE ESTERNO**

ORIZZONTE DEGLI EVENTI  
VELOCITA' DI FUGA  
E' PARI ALLA  
VELOCITA' DELLA LUCE

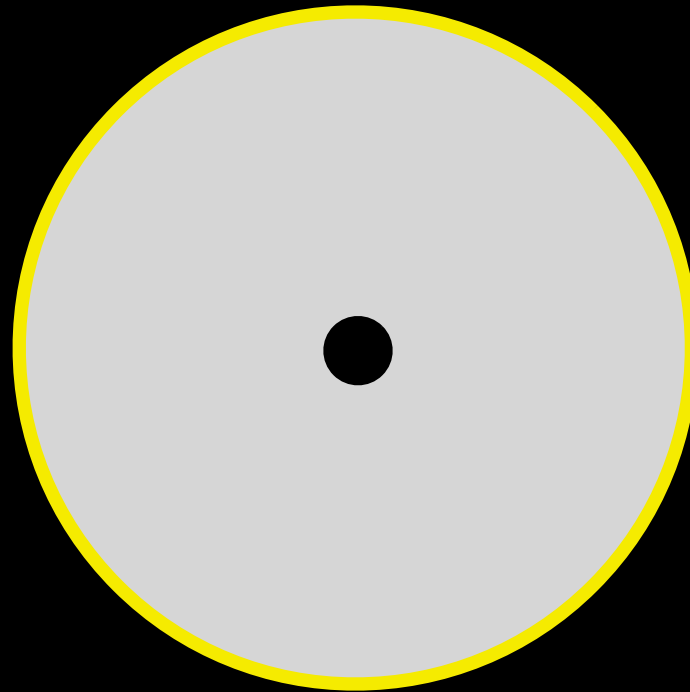


$$c = \sqrt{\frac{2GM_{\text{BH}}}{R_{\text{G}}}}$$



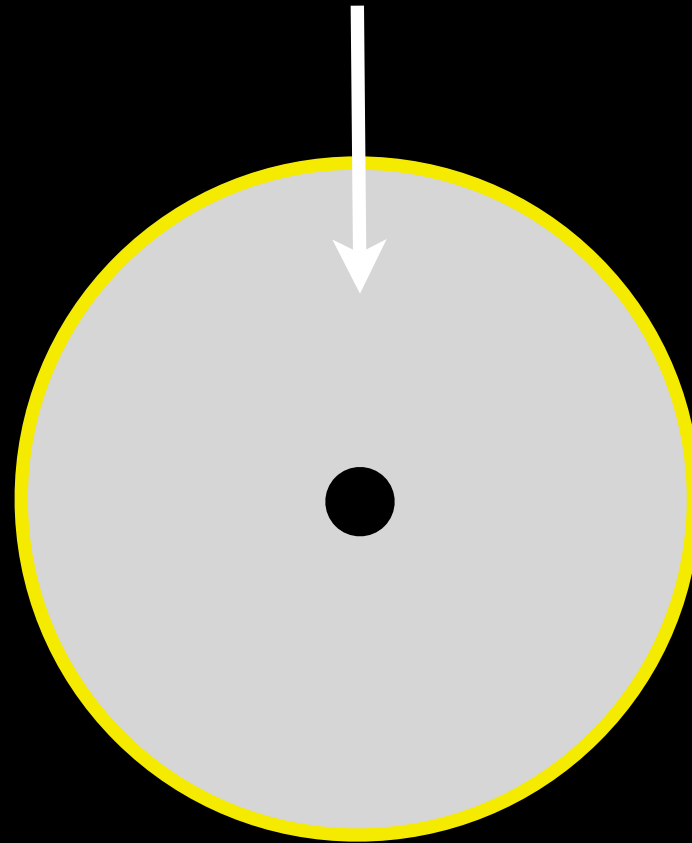
**SINGOLARITA' VESTITA**

**ORIZZONTE DEGLI EVENTI**

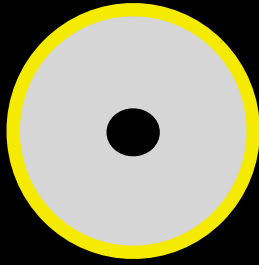


**LA SINGOLARITA' E' RACCHIUSA  
ENTRO IL VOLUME DELL'ORIZZONTE**

**OLTREPASSATO L'ORIZZONTE  
NON VI E' MODO DI RIUSCIRE**

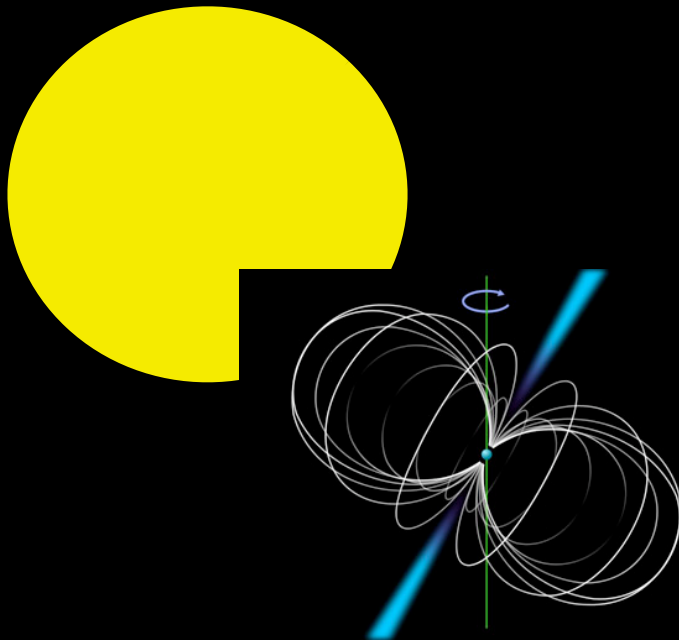


**MONDO CAUSALMENTE  
DISCONNESSO CON L'UNIVERSO ESTERNO**



$$M_{\text{BH}} = 1 M_{\odot}$$

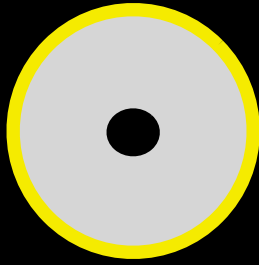
$$R_G \sim 3\text{km}$$



stella di neutroni

$$R_{\text{superficie}} \sim 10\text{km}$$

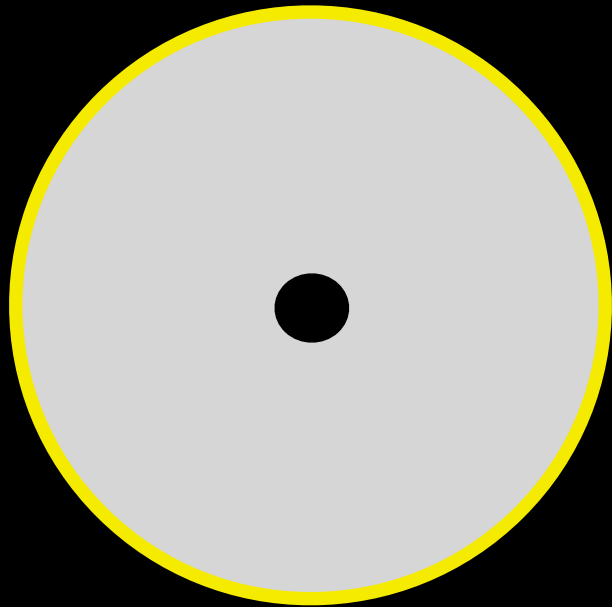




$$M_{\text{BH}} = 10^6 M_{\odot}$$

$$R_G \sim 0.02 \text{ a.u.}$$

interno all'orbita di Mercurio



$$M_{\text{BH}} = 10^9 M_{\odot}$$

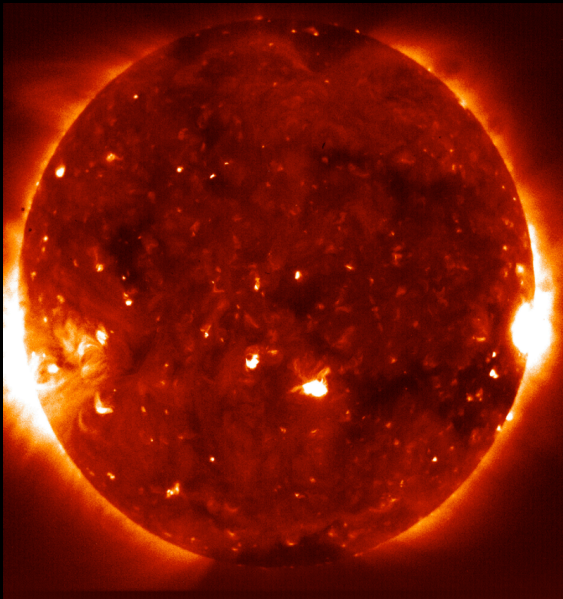
$$R_G \sim 20 \text{ a.u.}$$





$$R_G = 0.42 \text{ cm}$$

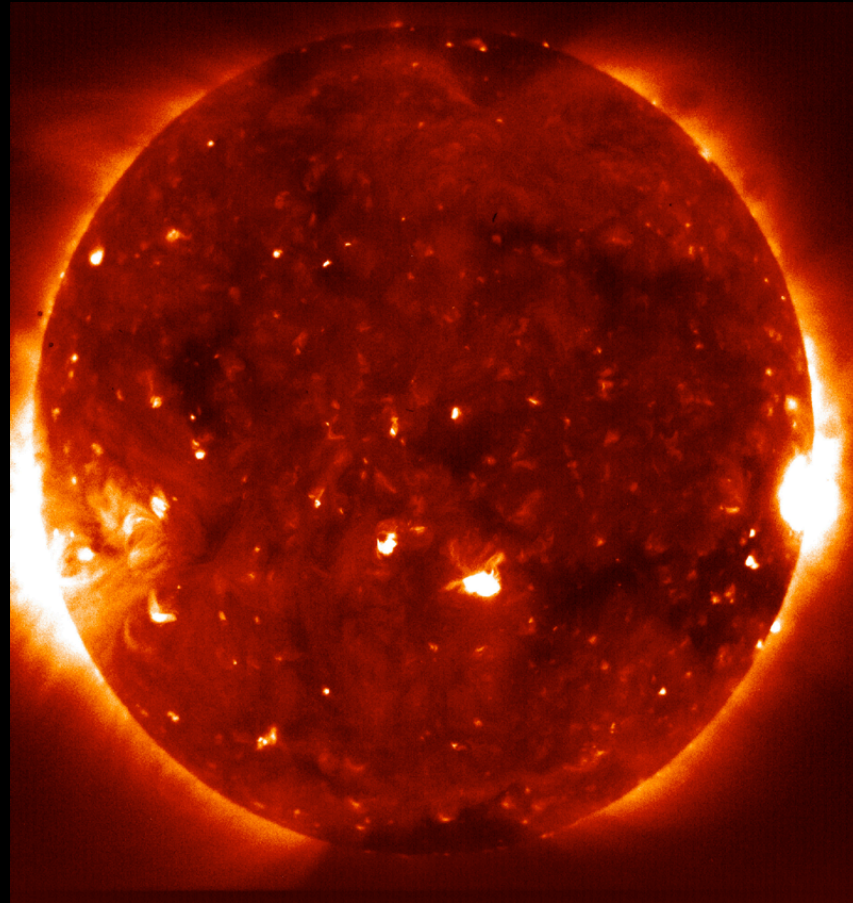
$$R_G / R_{\text{Terra}} \sim 10^{-9}$$



$$R_G \sim 3 \text{ km}$$

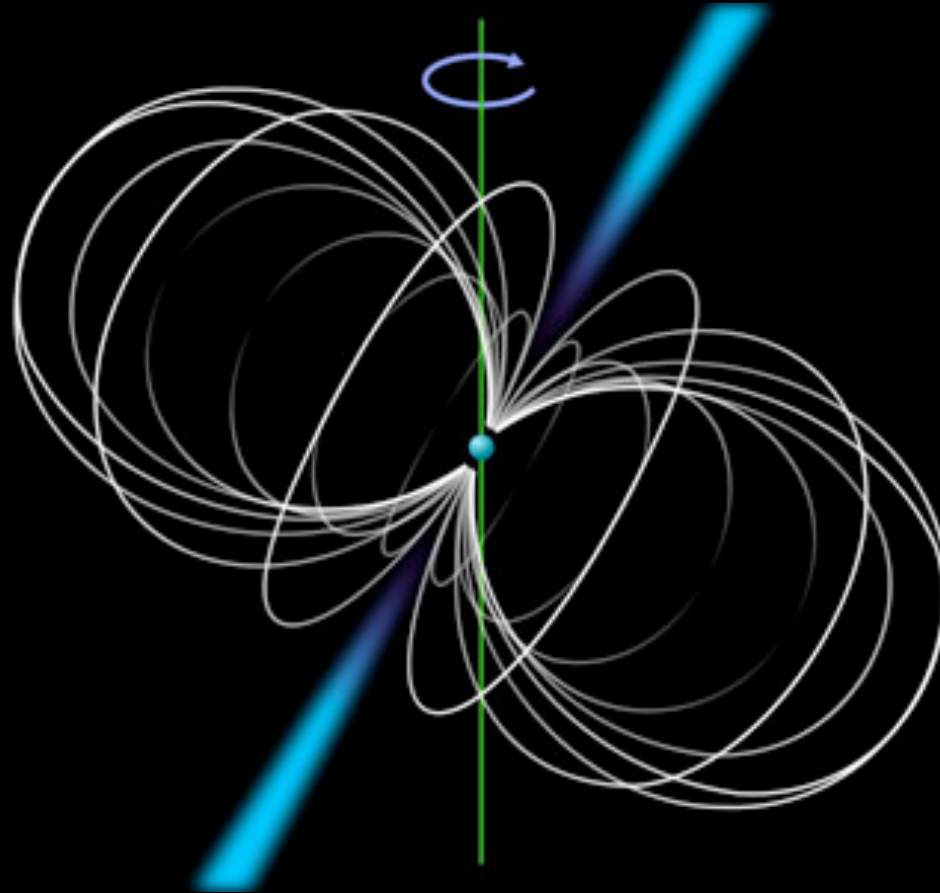
$$R_G / R_{\text{sole}} \sim 4 \times 10^{-6}$$

il sole non e' un buco nero !



gravita' e' controbilanciata dalla forze di pressione di  
origine termica

la stella di neutroni non e' un buco nero !



gravita' e' controbilanciata dalla forze di pressione  
pressione di degenerazione da parte dei neutroni



nemmeno una galassia  
e' un buco nero !



M87 © Anglo-Australian Observatory  
Photo by David Malin

gravita' e' controbilanciata dai moti veloci stellari

# BUCO NERO

E' UNA COSTRUZIONE ASTRATTA  
PREDIZIONE ESTREMA DELLA  
RELATIVITA' GENERALE ?

Karl Schwarzschild 1916

**Roy Kerr 1963**  
**esistono anche**  
**ruotanti !!!**

**BUCO NERO**  
CONCETTO - RELATIVITA' GENERALE  
E' UN OGGETTO SEMPLICISSIMO

**MASSA**

**SPIN**

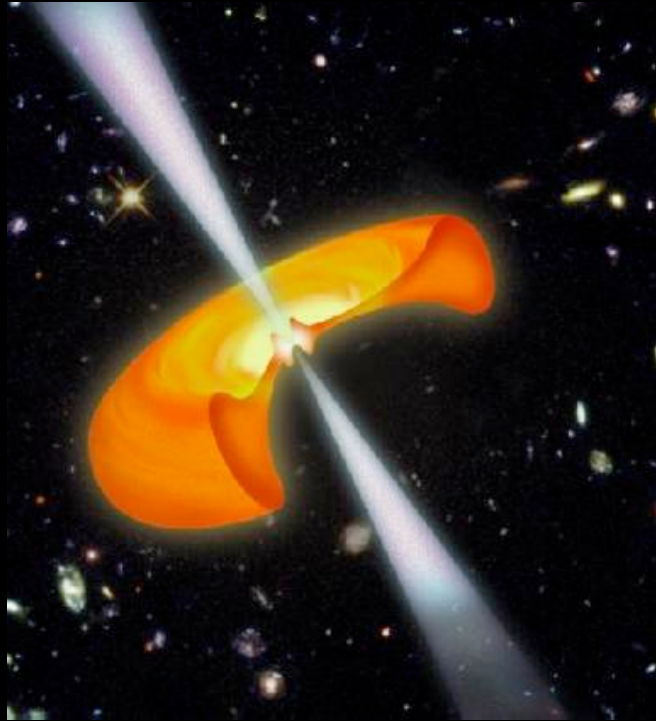
**ESISTONO DAVVERO IN  
NATURA?**

**SI ...**

ma necessitiamo di molte “prove”

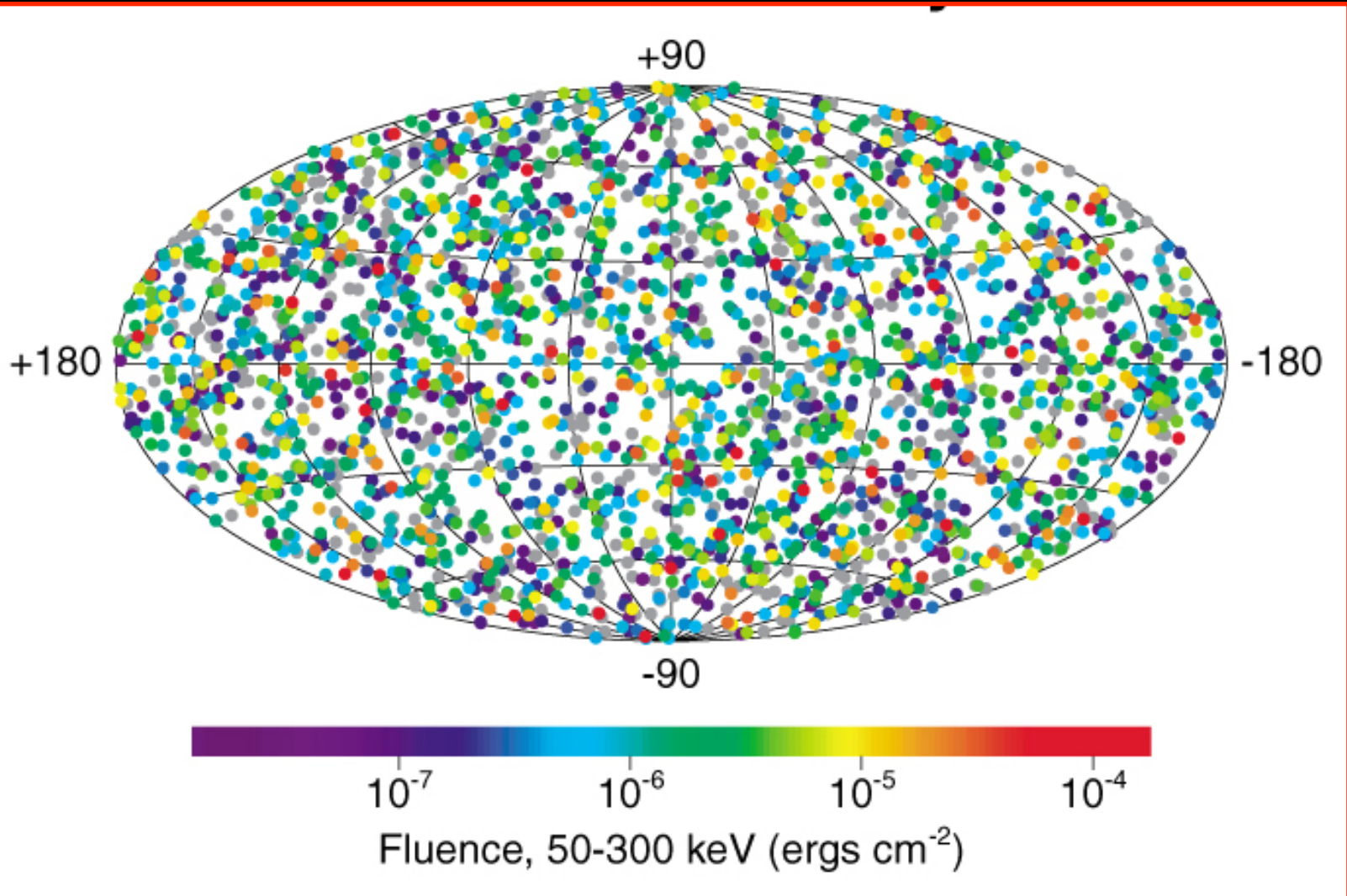


# BUCHI NERI STELLARI?



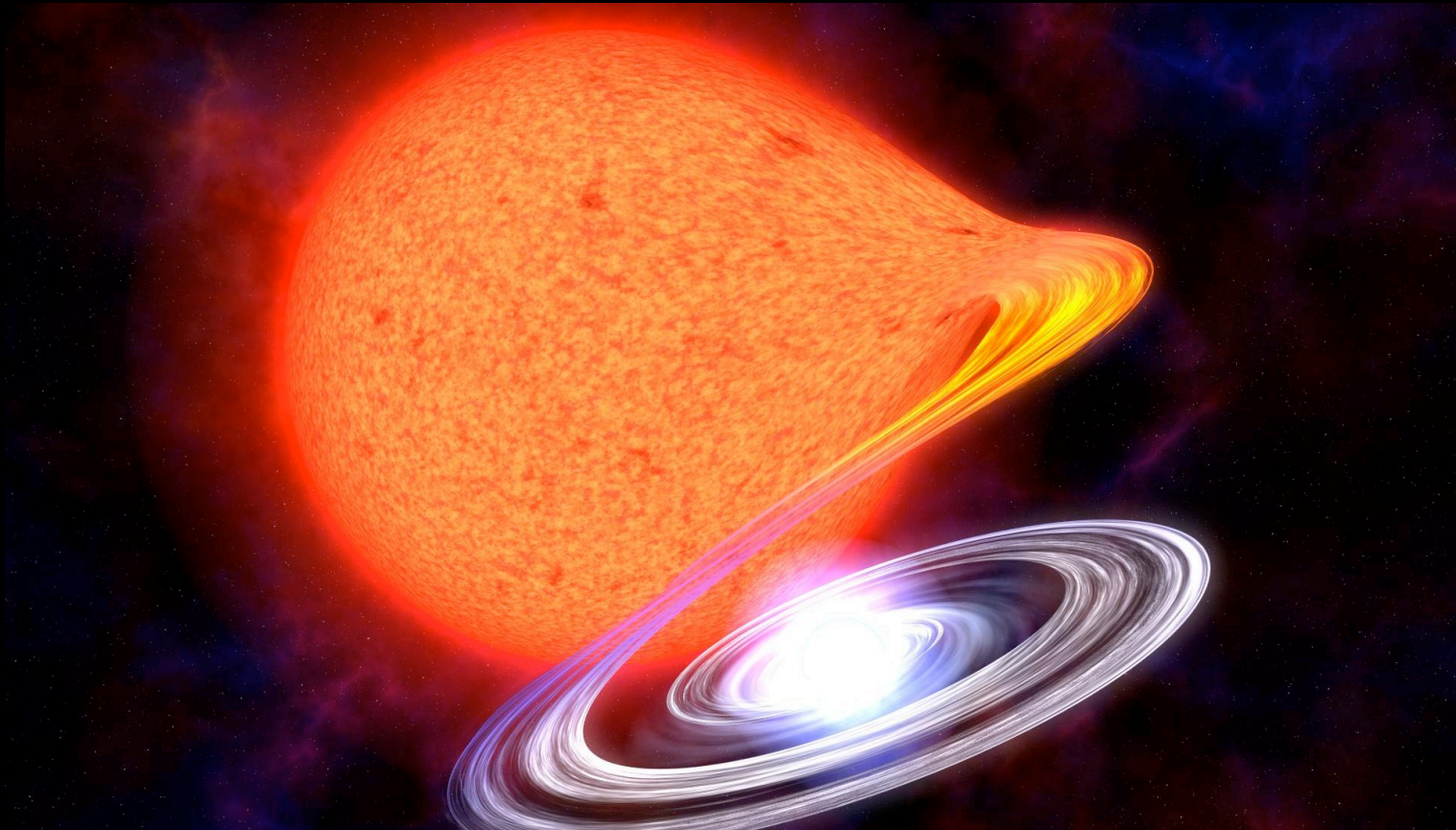
GAMMA RAY BURST  
I LAMPI GAMMA  
atto di nascita di un  
buco nero stellare

# BUCHI NERI COLTI NEL MOMENTO DELLA LORO NASCITA “LAMPI GAMMA”



... buchi neri in sistemi binari ...

si accendono come sorgenti X  
luminosissime



**BUCHI NERI  
SUPERMASSIVI**

**?**



A bright, glowing yellow-white light source is centered in a dark, starry night sky. A black arrow points upwards from a black text box at the bottom towards the glow. The background is filled with numerous small, distant stars of varying brightness.

**BUCO NERO  
SUPERMASSIVO DI  
MILIARDI DI SOLI**

A photograph of a spiral galaxy, likely the Milky Way, viewed from an edge-on perspective. The galaxy's central region is a bright, yellowish-white concentration of stars, known as the stellar bulge. At the very center of this bulge is a supermassive black hole. The galaxy's spiral arms are visible as a dark, dusty band of stars extending from the center outwards. The background is a dark field of stars.

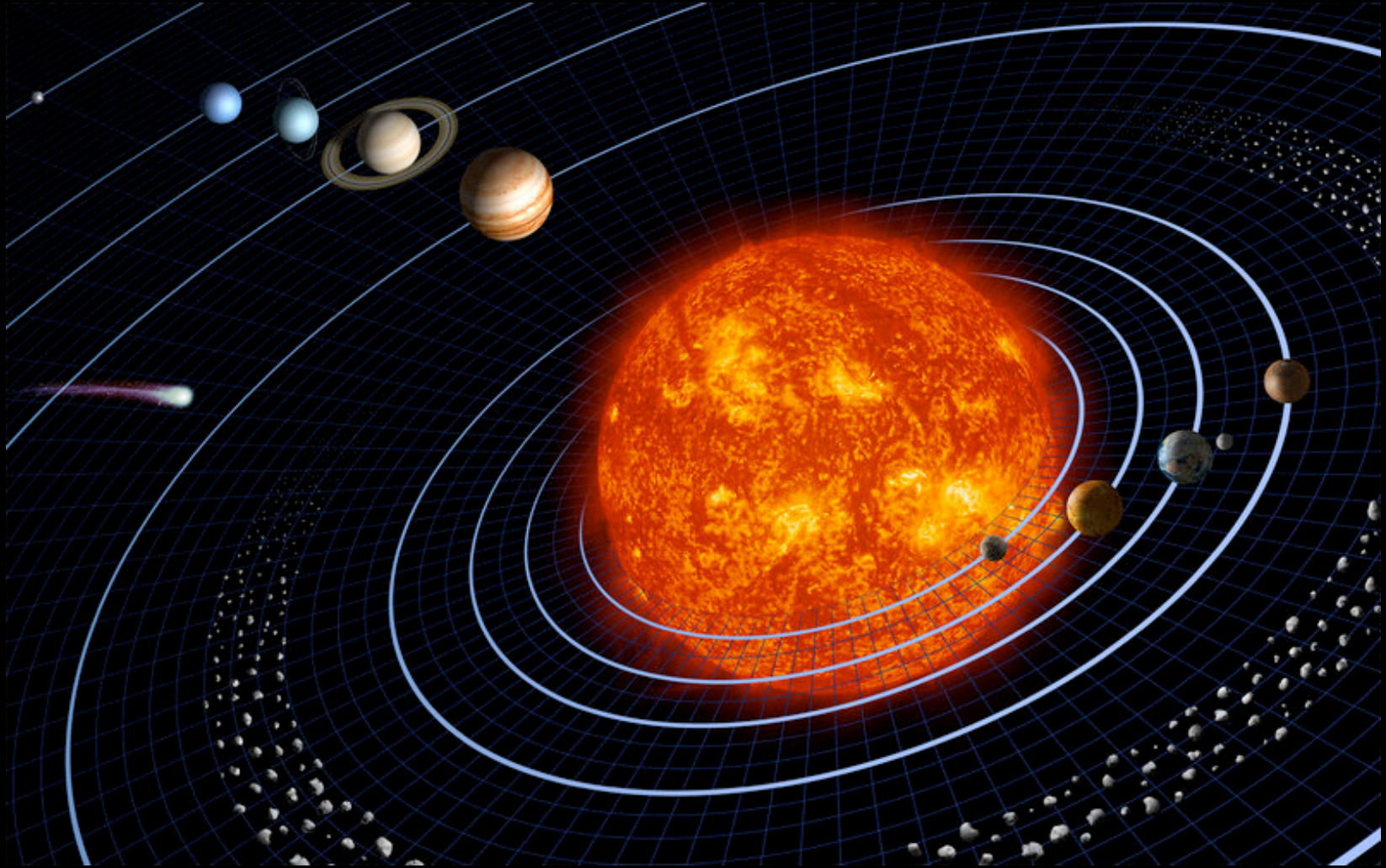
**BULGE STELLARE**

**BUCO NERO SUPERMASSIVO**  
1-100 MILIONI DI SOLI

GALASSIE A DISCO (SPIRALE)

ESISTE  
UN BUCO NERO  
AL CENTRO  
DELLA  
VIA LATTEA  
?





ATTORNO A UN BUCO NERO  
SUPERMASSIVO

**STELLE**

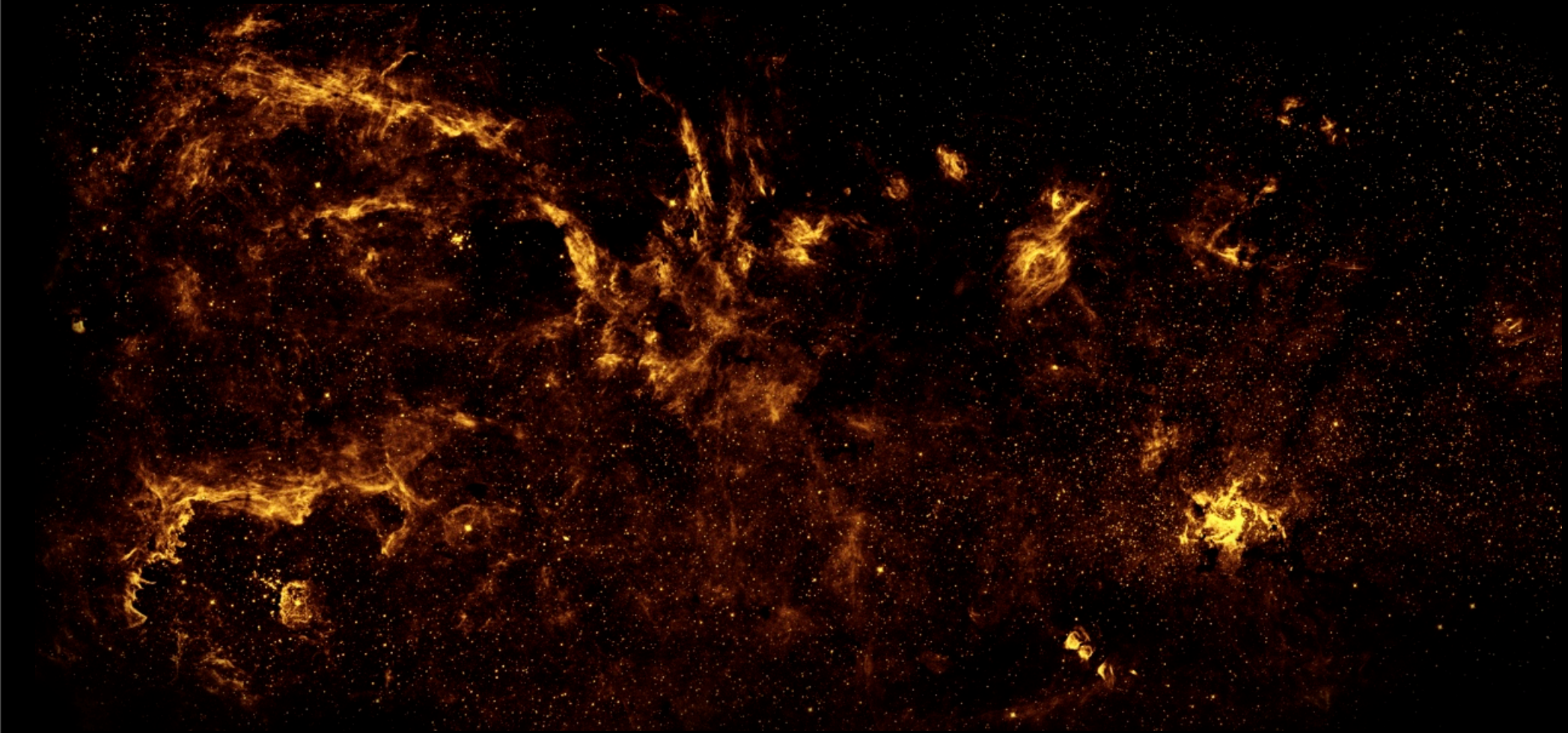
**GAS**

ATTORNO A UN BUCO NERO  
SUPERMASSIVO

**TUTTO RUOTA VELOCE**



SAGGITTARIUS A\*  
debole sorgente radio



2004 July: NGS - AO



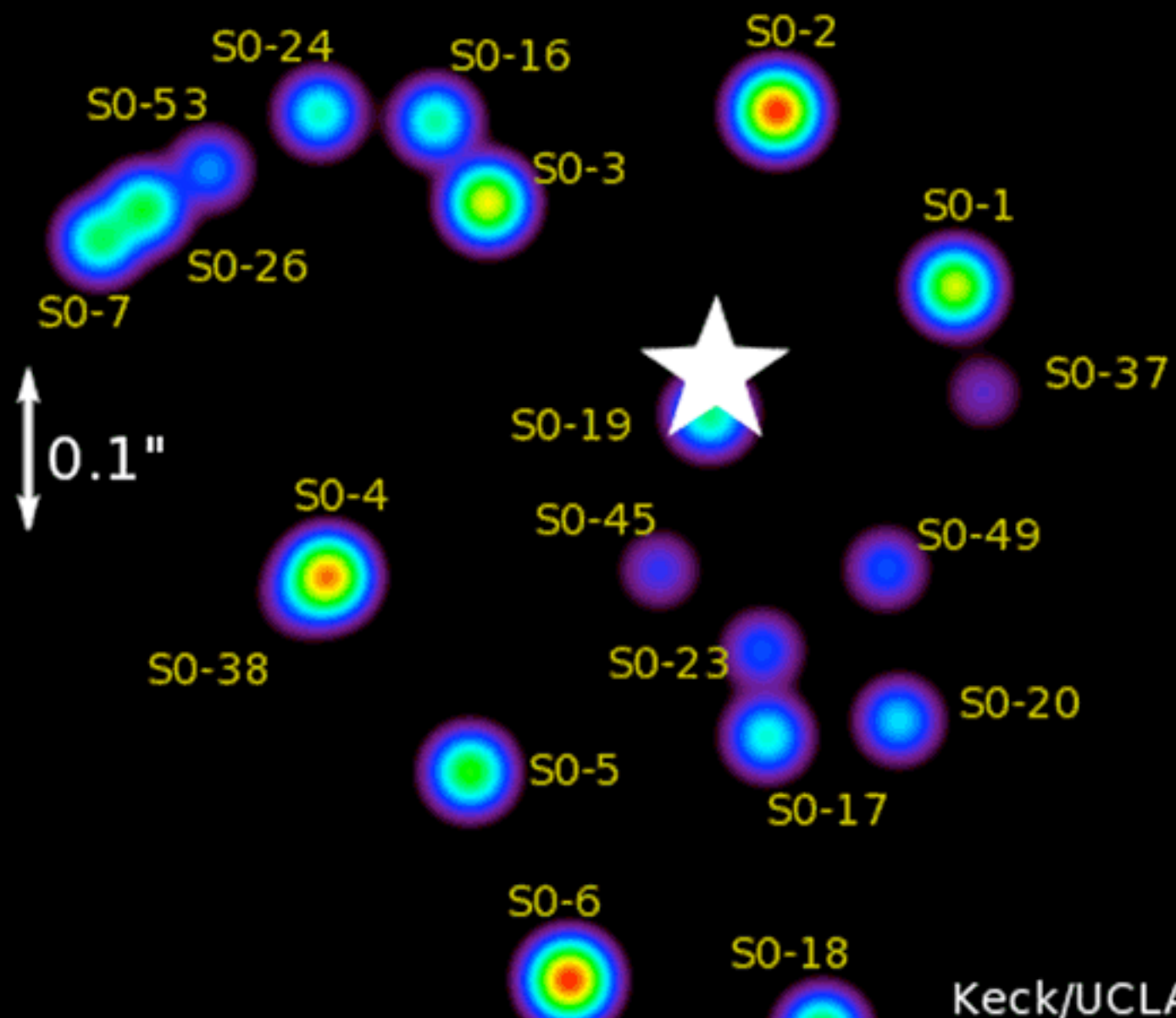
@ Keck/UCLA Galactic Center Group

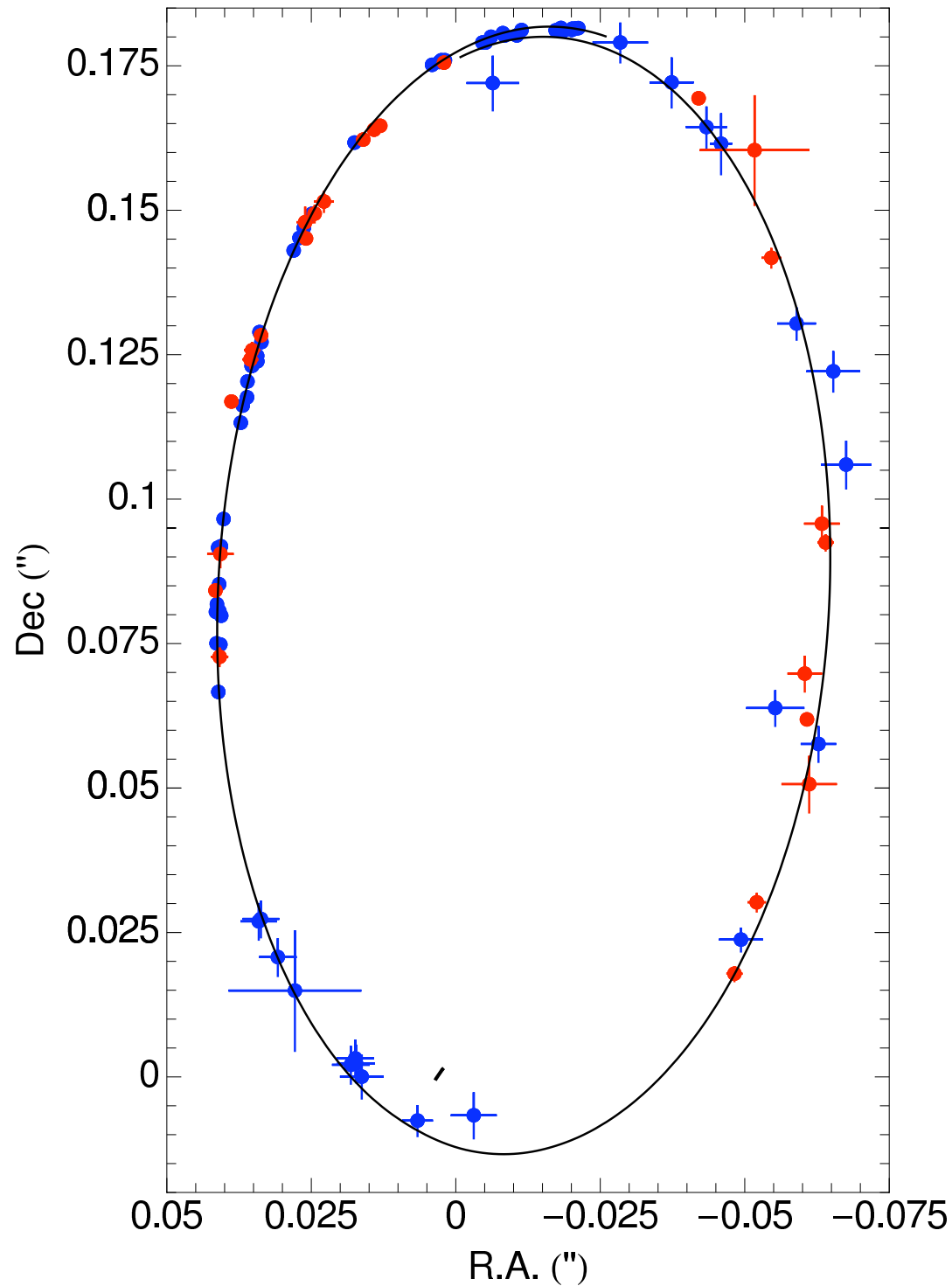


1995.5

# STELLE

S0-8





$$M_{\text{BH}} = 4.3 \pm 0.2 \times 10^6 M_{\odot}$$

$$e = 0.8831 \pm 0.0034$$

$$a = 5.0018 \text{ mpc}$$

$$r_{\text{peri}} = 0.585 \text{ mpc}$$

$$\langle V_{\text{cir}} \rangle \sim \sqrt{\frac{GM_{\text{BH}}}{a}} \sim 2000 \text{ km s}^{-1}$$

$$V_{\text{peri}} = \sqrt{\frac{GM_{\text{BH}}}{a} \frac{1+e}{1-e}} \sim 32000 \text{ km s}^{-1}$$

$$\rho_{\text{BH}} > \frac{M_{\text{BH}}}{(4/3)\pi r_{\text{peri}}^3} > 10^{15} M_{\odot} \text{pc}^{-3}$$

**Gillessen et al. 2010**

# VIAGGIO AL CENTRO DI UNA GALASSIA

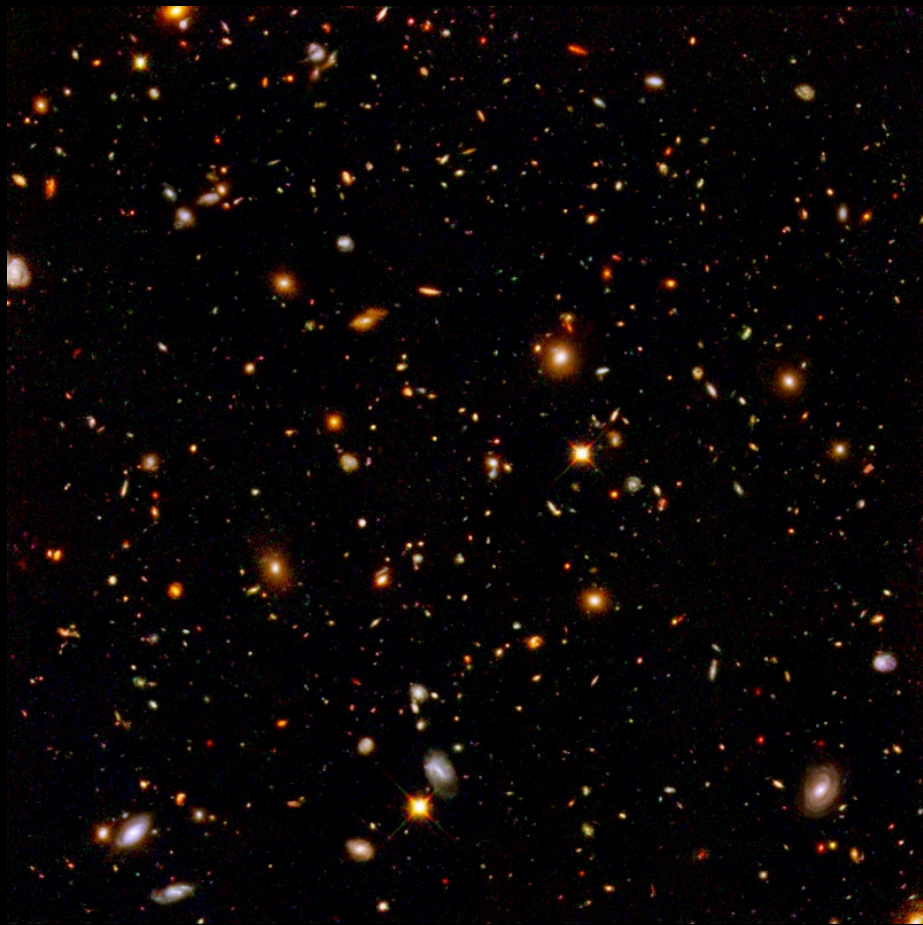


# VIAGGIO AL CENTRO DI UNA GALASSIA

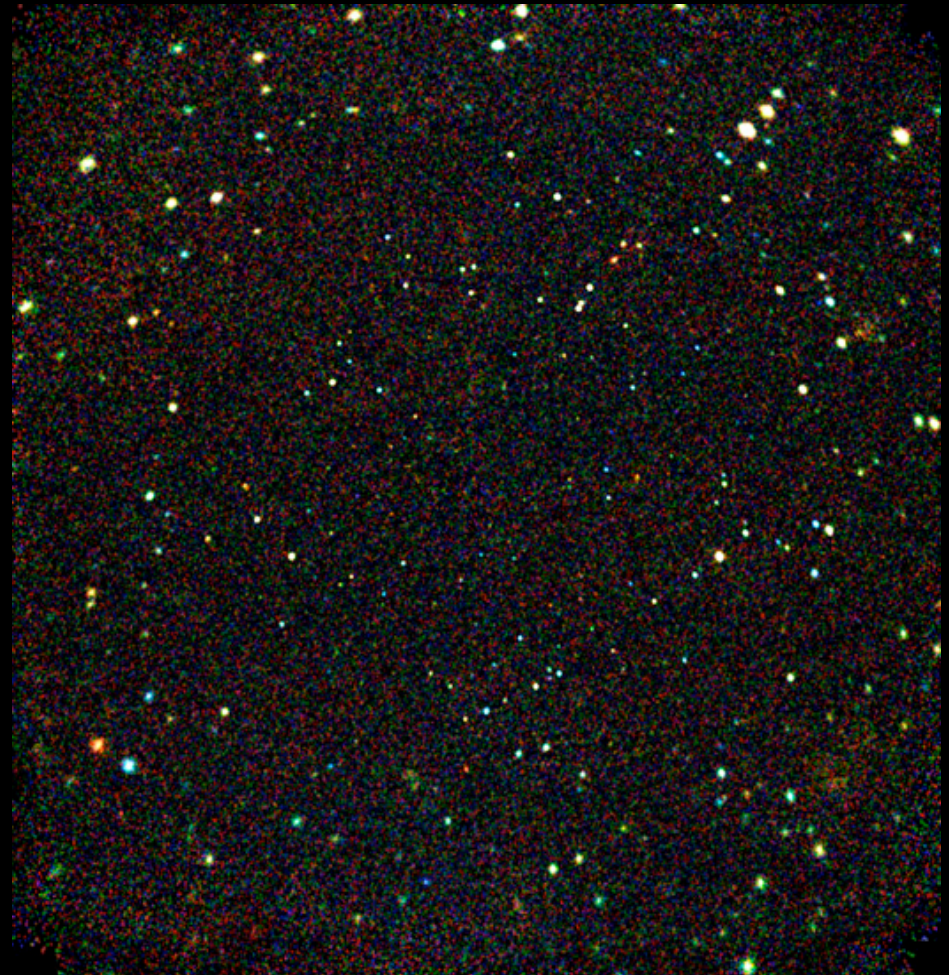




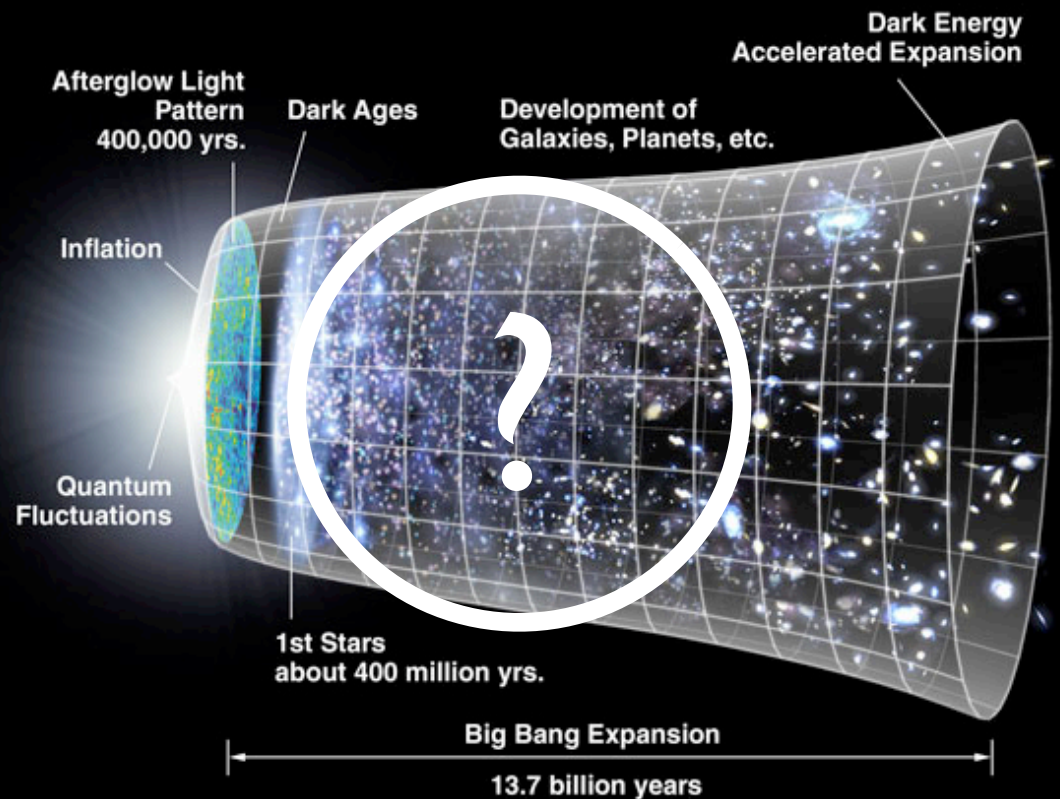
HUBBLE DEEP FIELD  
**GALASSIE**



CHANDRA DEEP FIELD  
**BUCHI NERI ATTIVI**



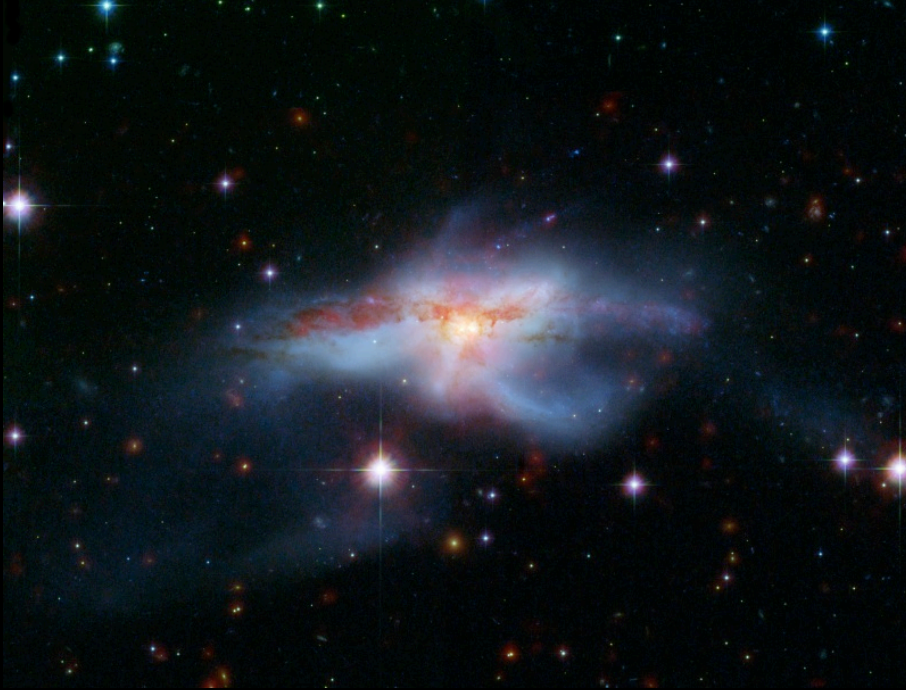
# BUCHI NERI SEMBRANO ESSERE ELEMENTI NATURALI FORMATISI IN SIMBIOSI CON LE GALASSIE



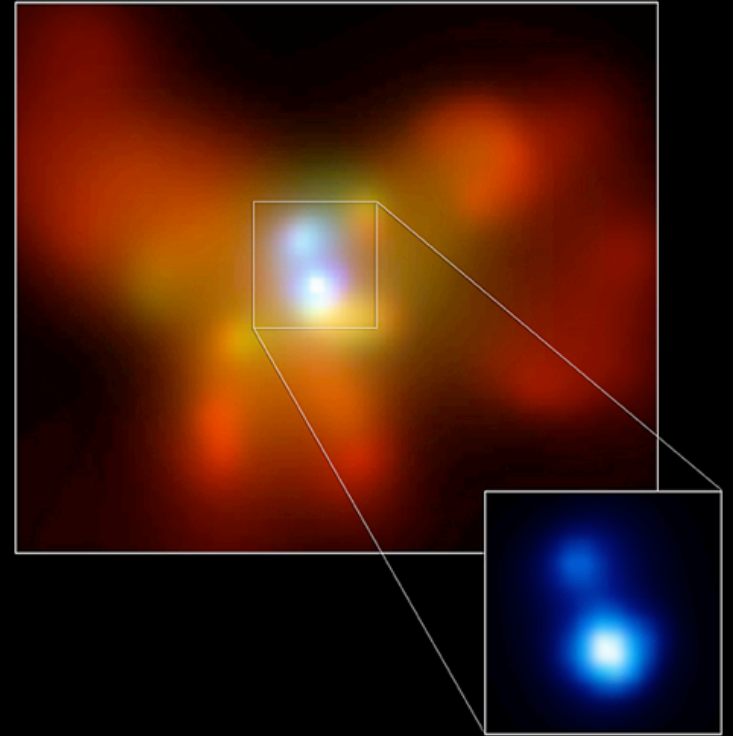


# NGC 6240

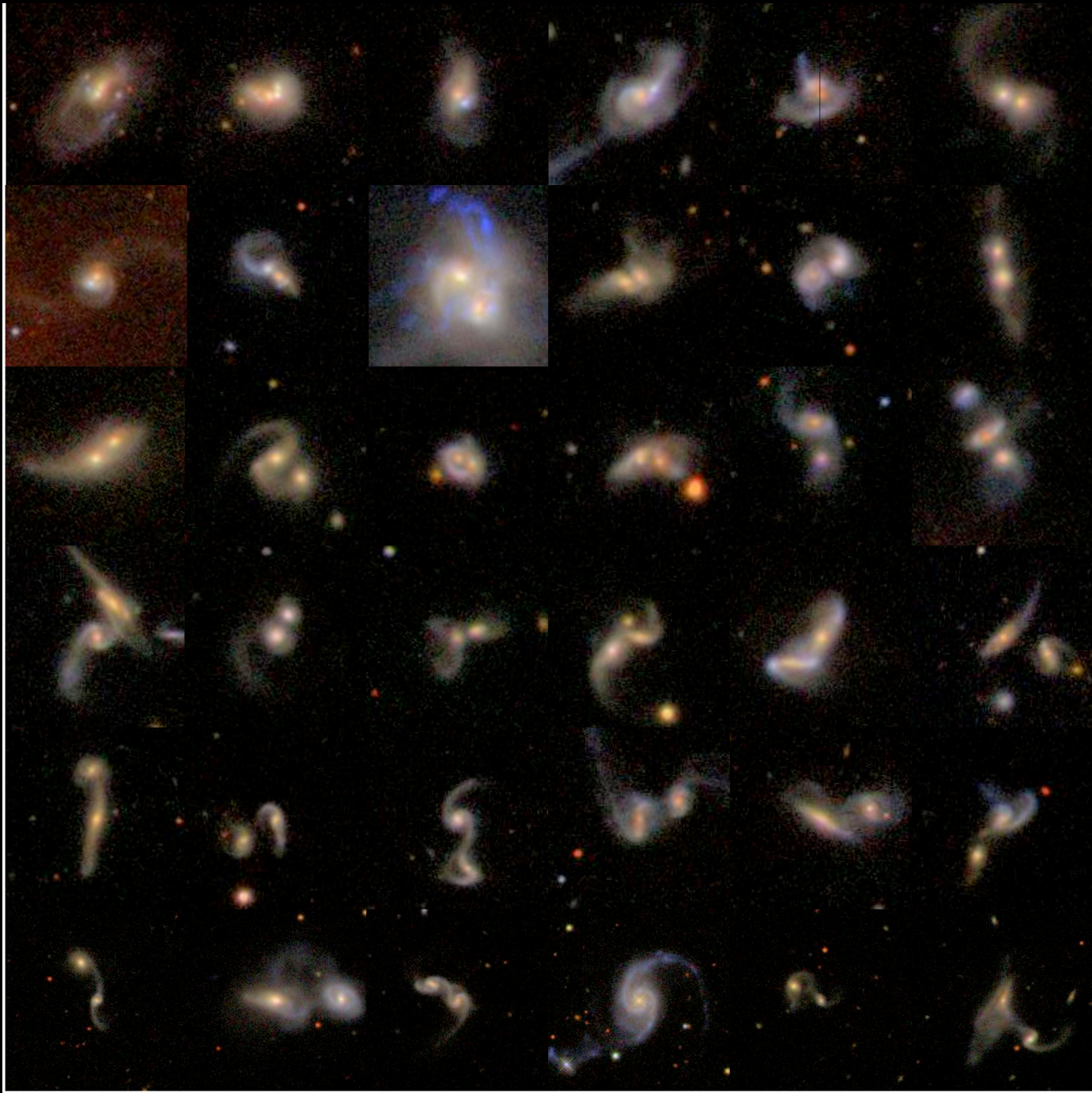
OTTICO



RAGGI X



**FORMAZIONE DI BUCHI NERI BINARI  
IN GALASSIE IN COLLISIONE**



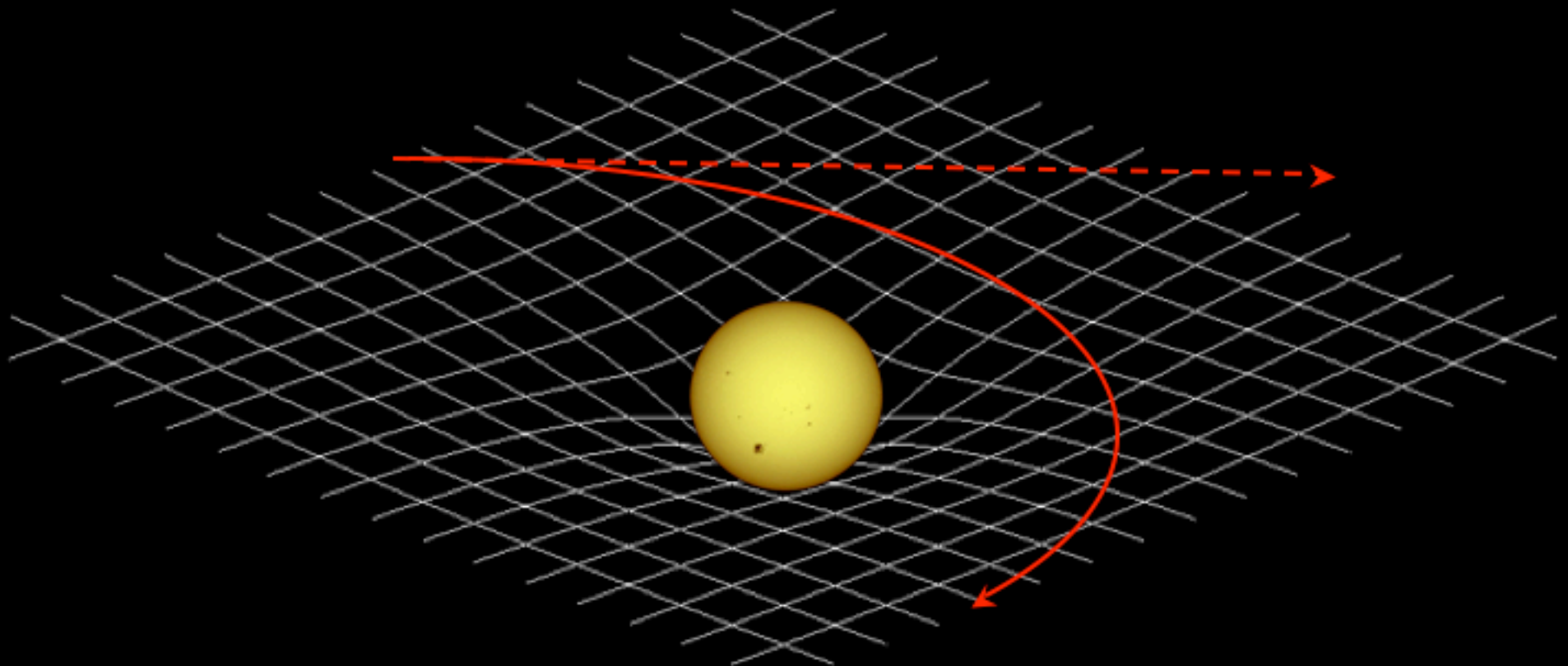


POSSIAMO CAPIRE SE QUEI NUCLEI  
BRILLANTI E LUMINOSISSIMI SONO  
BUCHI NERI ATTIVI ?  
SONO I BUCHI NERI  
DELLA RELATIVITA' GENERALE?



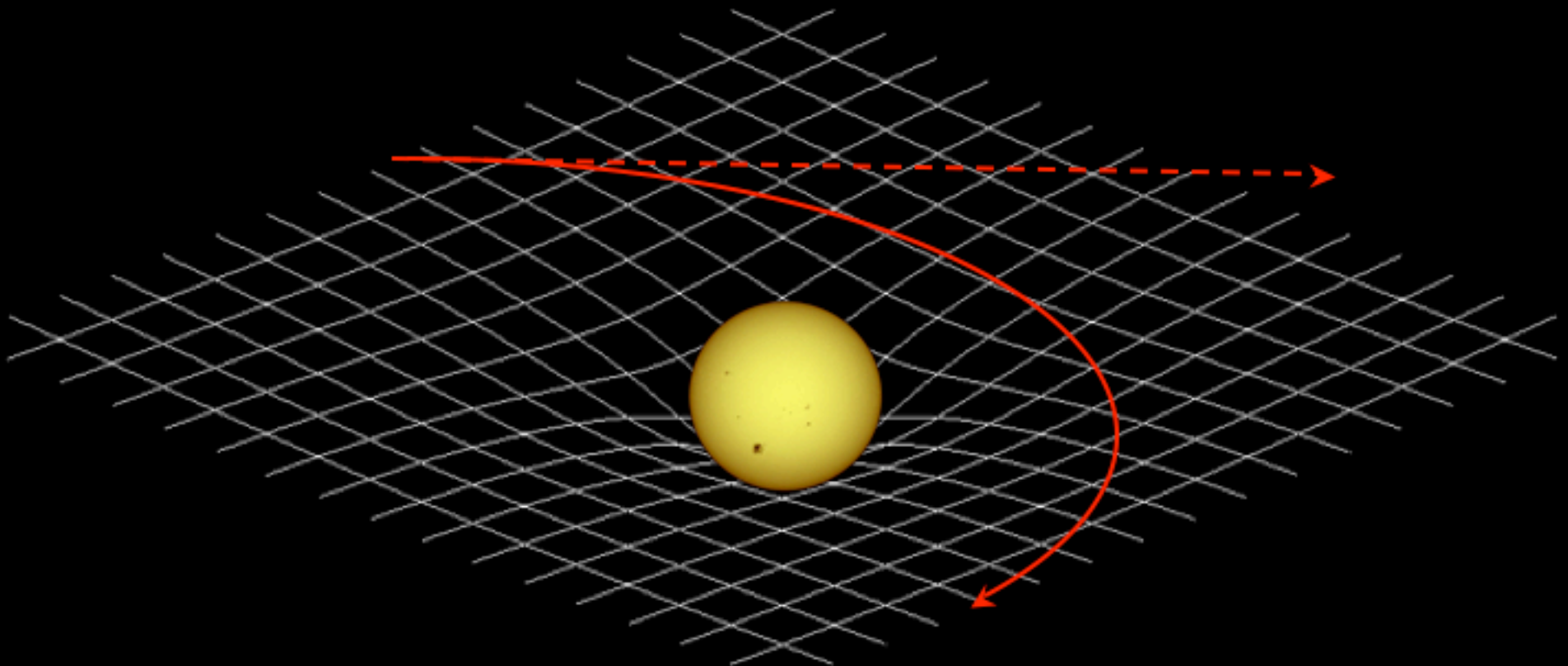
**SORGENTI DI ONDE GRAVITAZIOALI**  
una nuova finestra sull'universo

# GRAVITA' DESCRIVIBILE IN TERMINI DI CURVATURA DELLO SPAZIO TEMPO



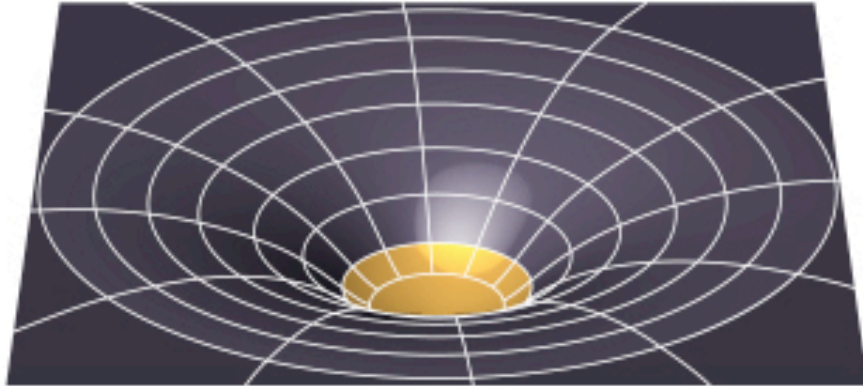
# GRAVITA' DESCRIVIBILE IN TERMINI DI CURVATURA DELLO SPAZIO TEMPO

"space tells matter how to move:  
matter tells space how to curve"

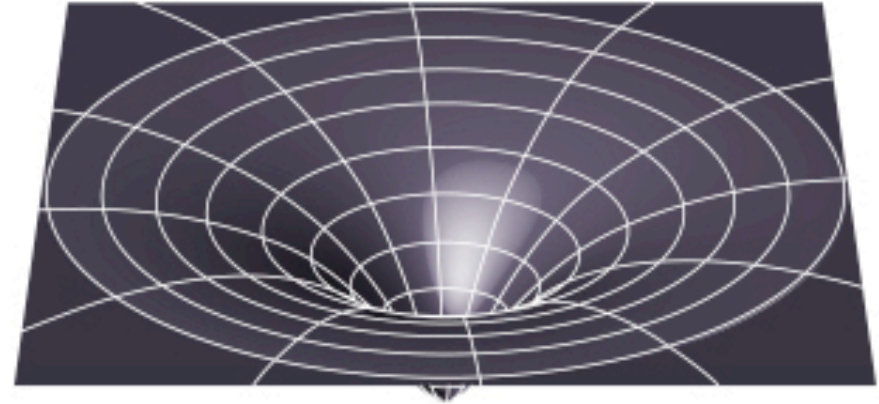


“space tells matter how to move:  
matter tells space how to curve”

spacetime around the Sun today

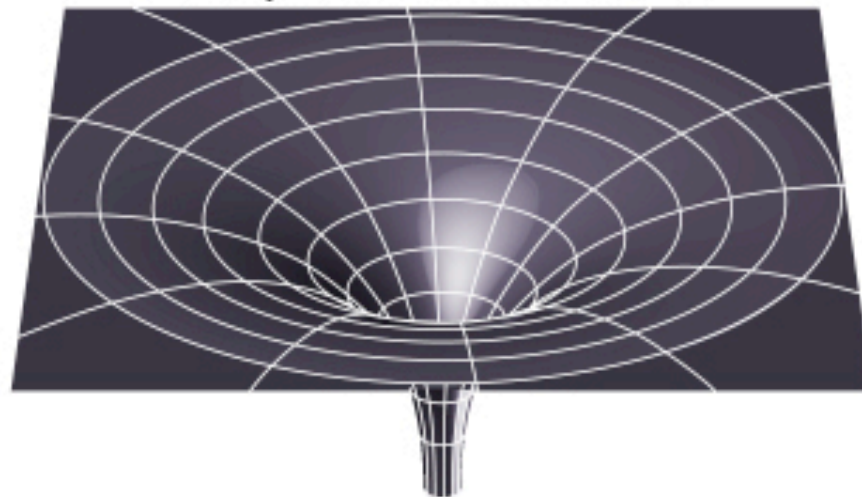


spacetime around the Sun  
compressed to a white dwarf



(a)

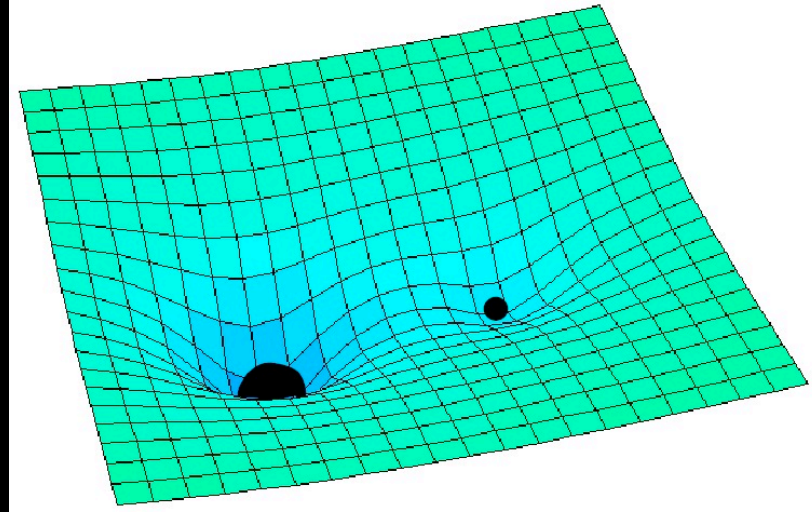
spacetime around the Sun  
compressed to a black hole



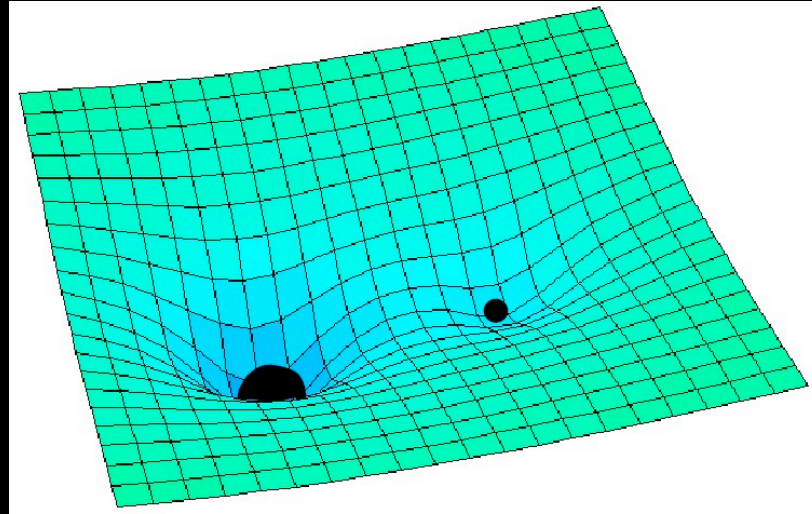
(b)



# DUE BUCHI NERI IN UN SISTEMA BINARIO



# DUE BUCHI NERI IN UN SISTEMA BINARIO



PREDIZIONE DELLA RELATIVITA' GENERALE:  
EMETTONO  
**ONDE GRAVITAZIONALI**  
INFORMANO DELL'AVVENUTO  
CAMBIAMENTO DELLA CURVATURA  
DELLO SPAZIO TEMPO CAUSATO DAL  
LORO MOTO COERENTE

# ONDE GRAVITAZIONALI COSA SONO?

**DISTURBI** NELLA CURVATURA DELLO  
SPAZIO TEMPO CAUSATI DAL MOTO DI  
GRANDI MASSE

SI PROPAGANO ALLA VELOCITA' DELLA LUCE

IN REALTA'  
NON VIAGGIANO ATTRAVERSO  
LO SPAZIO E'

**LA TESSITURA DELLA  
SPAZIO TEMPO STESSO CHE OSCILLA**

# ANALOGIE E DIFFERENZE CON LE ONDE ELETTROMAGNETICHE

## SORGENTI

EM  
**CARICHE  
ELETTRICHE  
ACCELERATE**

GW  
**GRANDI MASSE  
ACCELERATE**

EMISSIONE **INCOERENTE**  
DA ATOMI  
E/O MOLECOLE

EMISSINE **COERENTE**  
DA MASSE COSMICHE  
IN RAPIDISSIMA ROTAZIONE

# FREQUENZA

EM  
LUNGHEZZE  
D'ONDA  
MOLTO MINORI  
DIMENSIONI DELLA  
SORGENTE

radio-gamma

GW  
LUNGHEZZE  
D'ONDA  
CONFRONTABILI  
DIMENSIONI  
DELLA SORGENTE

$$f \sim \frac{1}{T} \sim \frac{c}{R_G}$$

$$f > \frac{c^3}{4\pi G M_{\text{BH}}} \sim 10^{-2} \text{ Hz} \frac{10^6 M_{\odot}}{M_{\text{BH}}}$$



# Pulsar come orologi cosmici

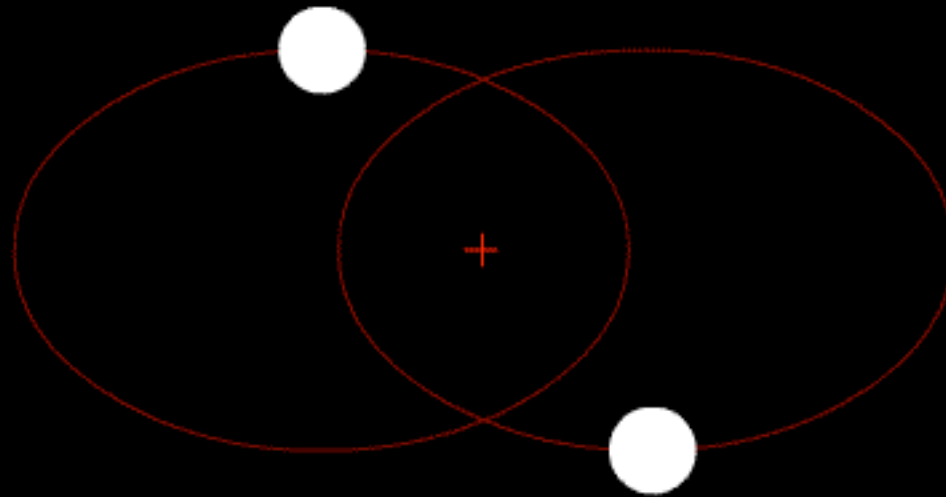
stabilita' su 1 parte su  $10^{14}$

sistematiche varizioni nei tempi di arrivo attribuite al moto orbitale

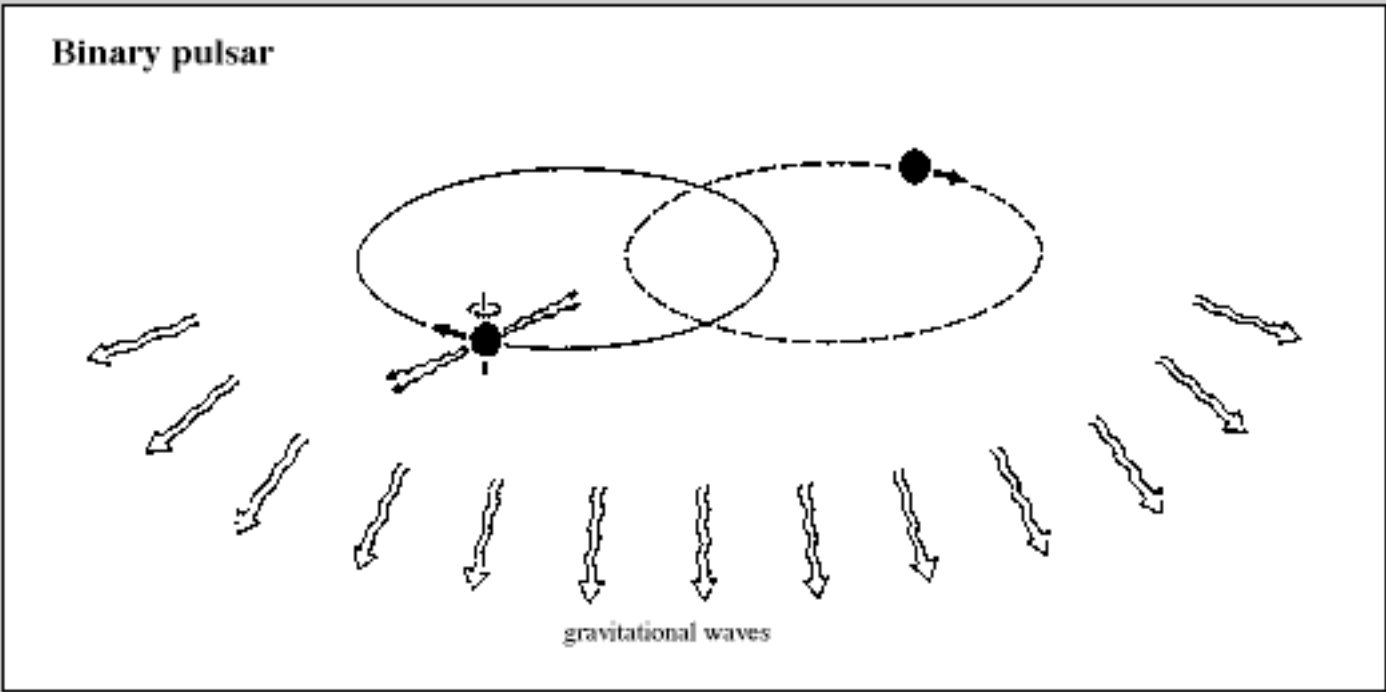
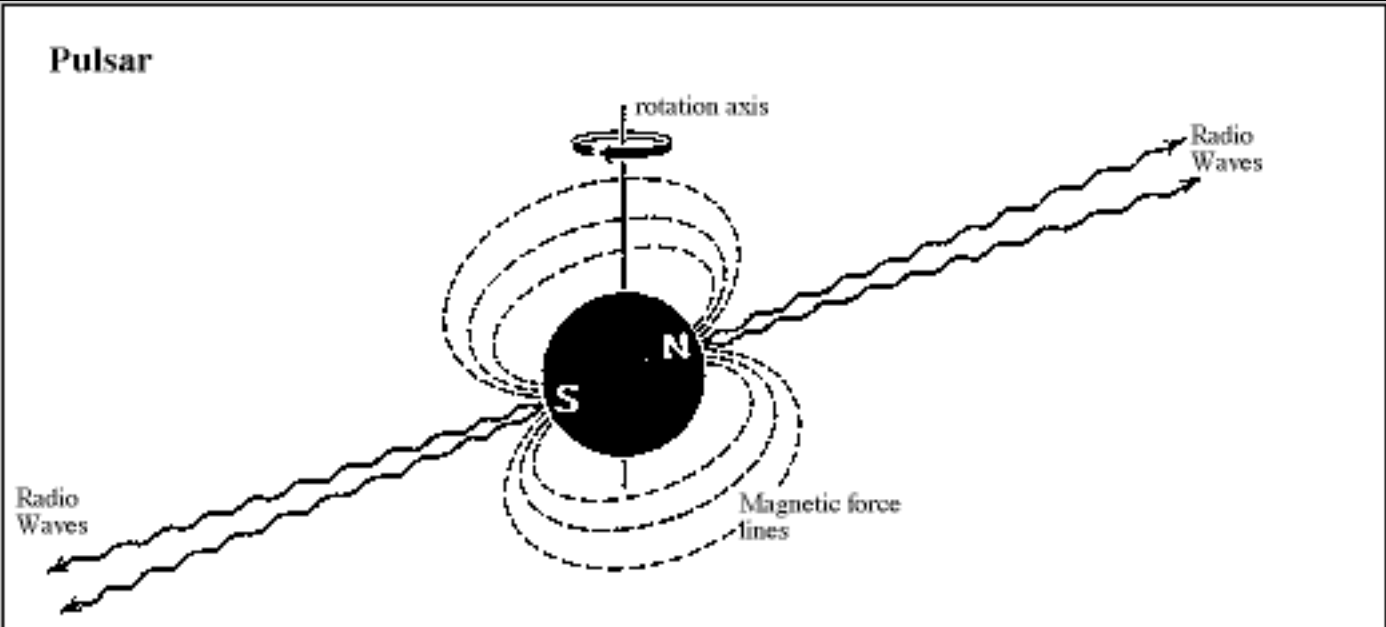
per PSR1913+16 di 7.75 ore

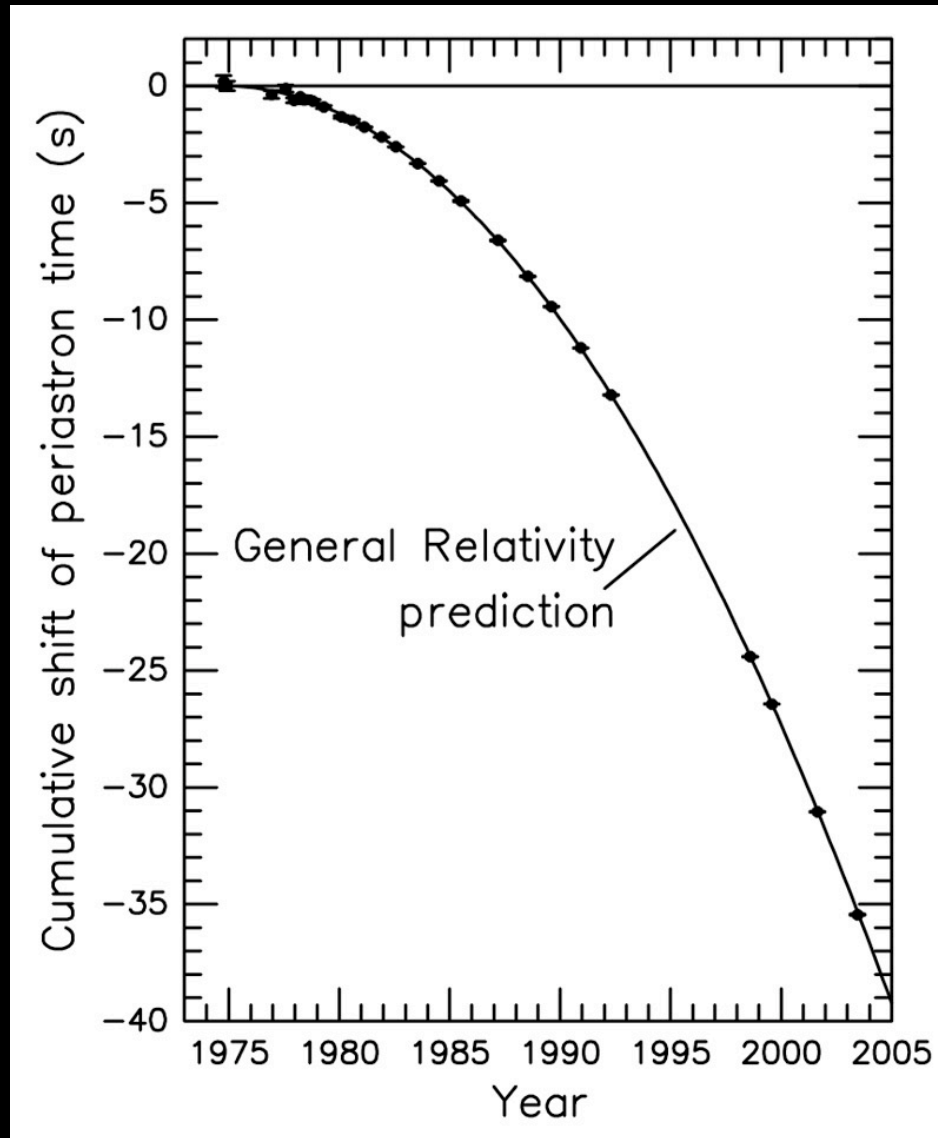
tasso di riduzione del periodo orbitale di 76.5 microsecondi per anno

ossia 3.5 metri all'anno



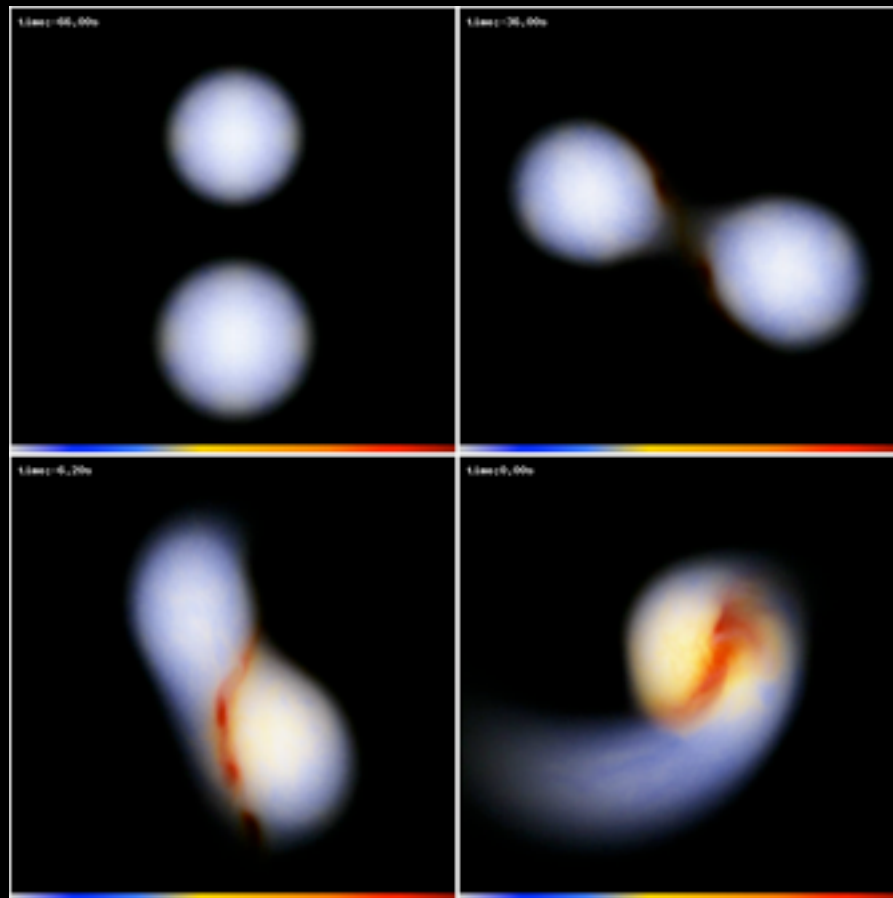
# ONDE GRAVITAZIONALI ANCHE DA STELLE DI NEUTRONI IN BINARIE





Hulse & Taylor Nobel price 1993

... stelle di neutroni in sistemi binari ...  
decadimento dell'orbita  
attraverso un lento spiraleggiare  
esse si fondono in un'unica nuova  
"stella"..... ossia un "buco nero"




$$L_{\text{ondegrav}} \simeq \frac{32}{5} \frac{c^5}{G} \simeq 2 \times 10^{60} \text{ erg s}^{-1} \simeq 10^{15} L_{\text{galassia}}$$

$$\Delta E_{\text{gw}} \simeq 5.7 \times 10^{-2} \mu c^2 \simeq 3 \times 10^{57} \left( \frac{\mu}{10^6 M_{\odot}} \right) \text{ erg}$$

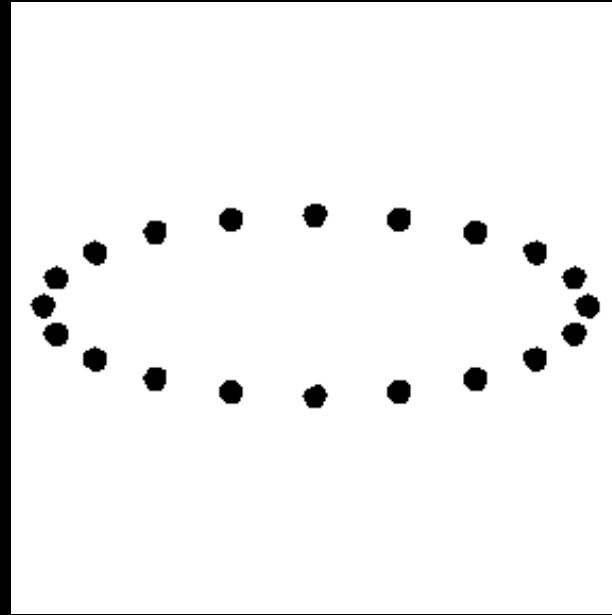
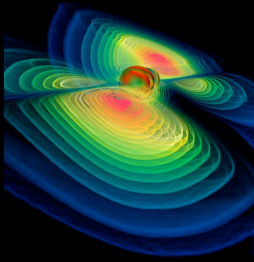


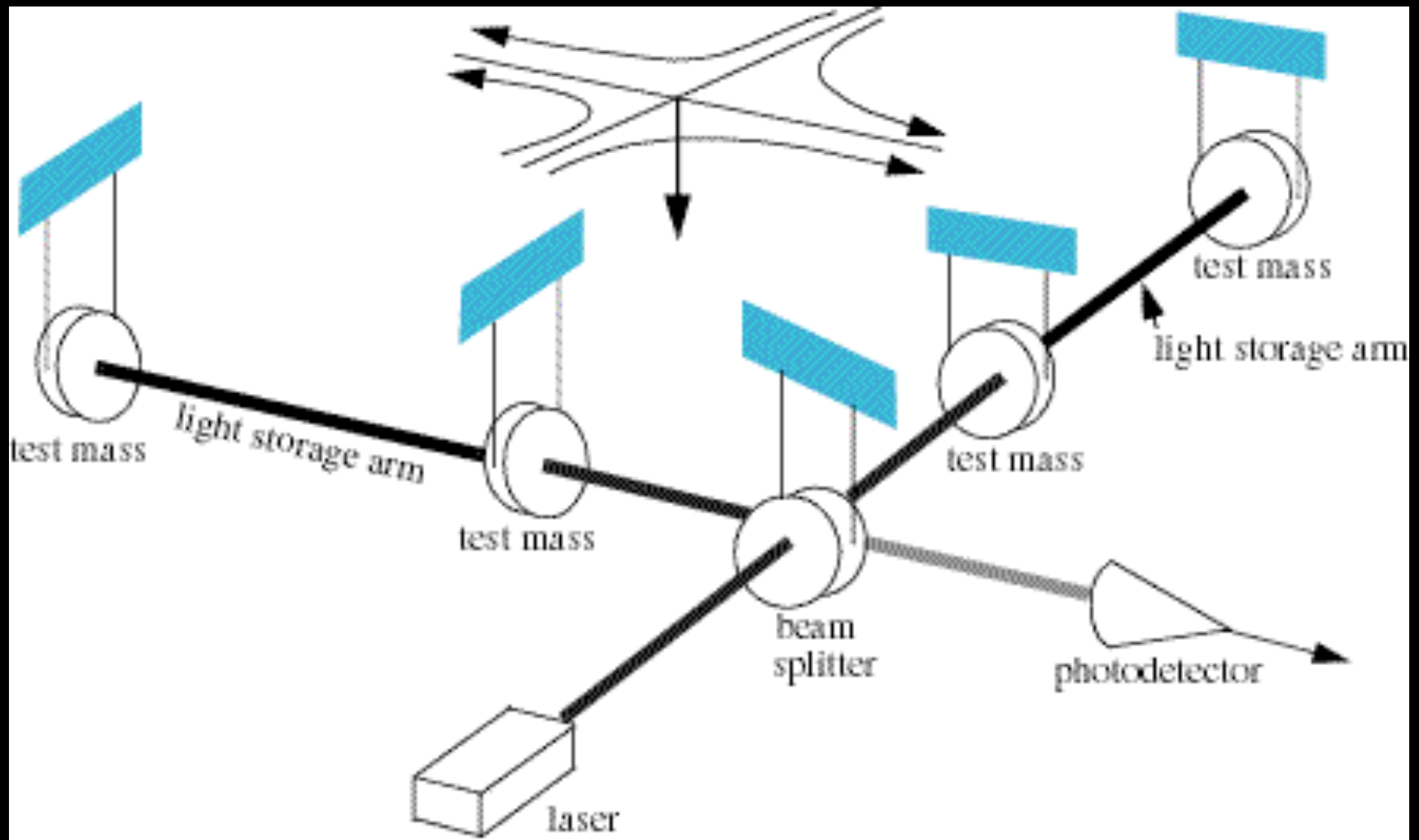
# SIMULAZIONE “ARTISTICA”



COME RIVELARE LE ONDE ?  
A TERRA o NELLO SPAZIO  
esse propagano nel cosmo indisturbate  
lo spazio tempo e' "rigido" non si lascia  
facilmente "piegare" ma  
se le osservo...ecco che osservo  
ai limiti dell'universo...  
nei primi istanti del Big Bang

l'onda imprime oscillazioni sull'anello di masse  
che fungono nel loro insieme da rivelatori





I: ONDE GRAVITAZIONALI  
DALL'UNIVERSO:  
BUCO NERO  
IN CADUTA SU UN  
BUCO NERO SUPERMASSIVO  
  
ORBITA CIRCOLARE



III: ONDE GRAVITAZIONALI  
DALL'UNIVERSO:  
BUCO NERO  
IN CADUTA SU UN  
BUCO NERO SUPERMASSIVO  
ORBITA ECCENTRICA

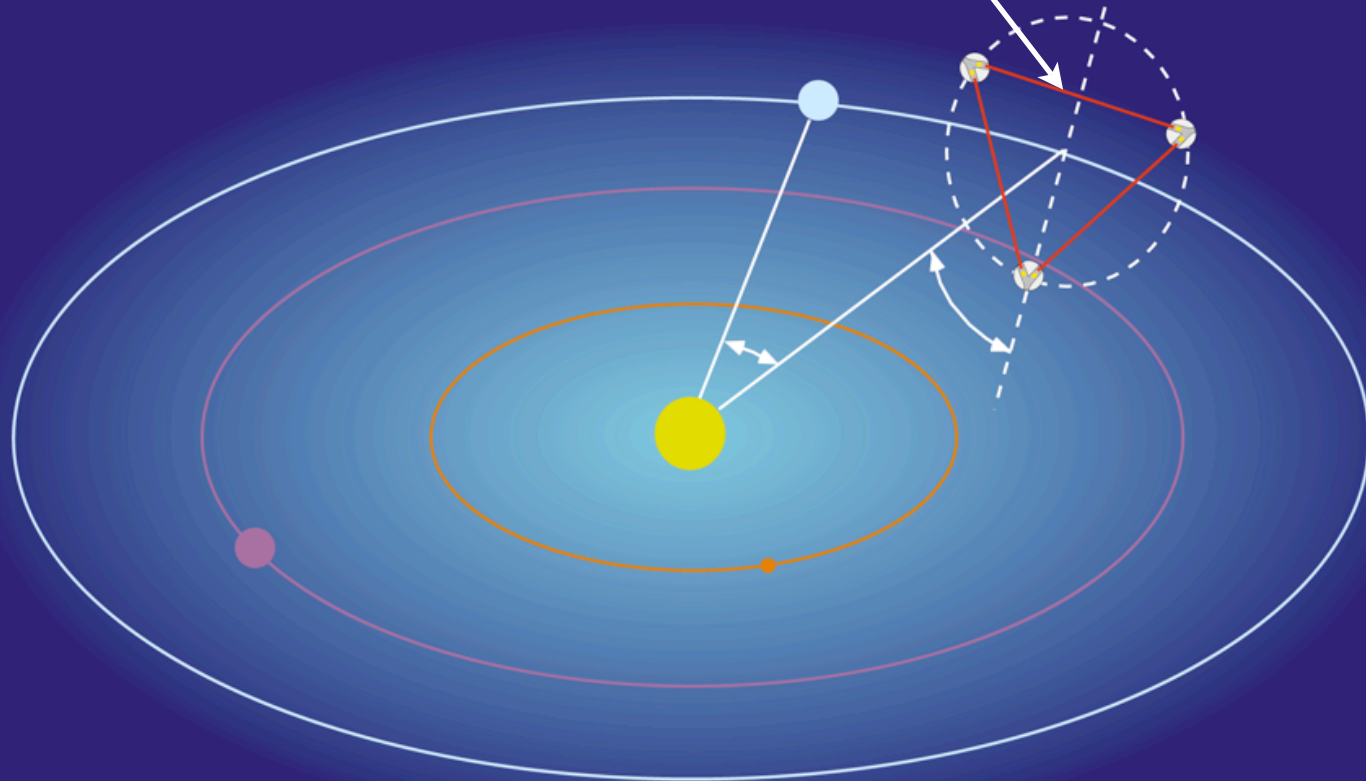
DALLA FORMA DELL'ONDA SI  
DETERMINANO MASSA E SPIN  
DEI BUCHI NERI IN  
COALESCENZA

# ESA COSMIC VISION 2015-2025

## eLISA/NGO

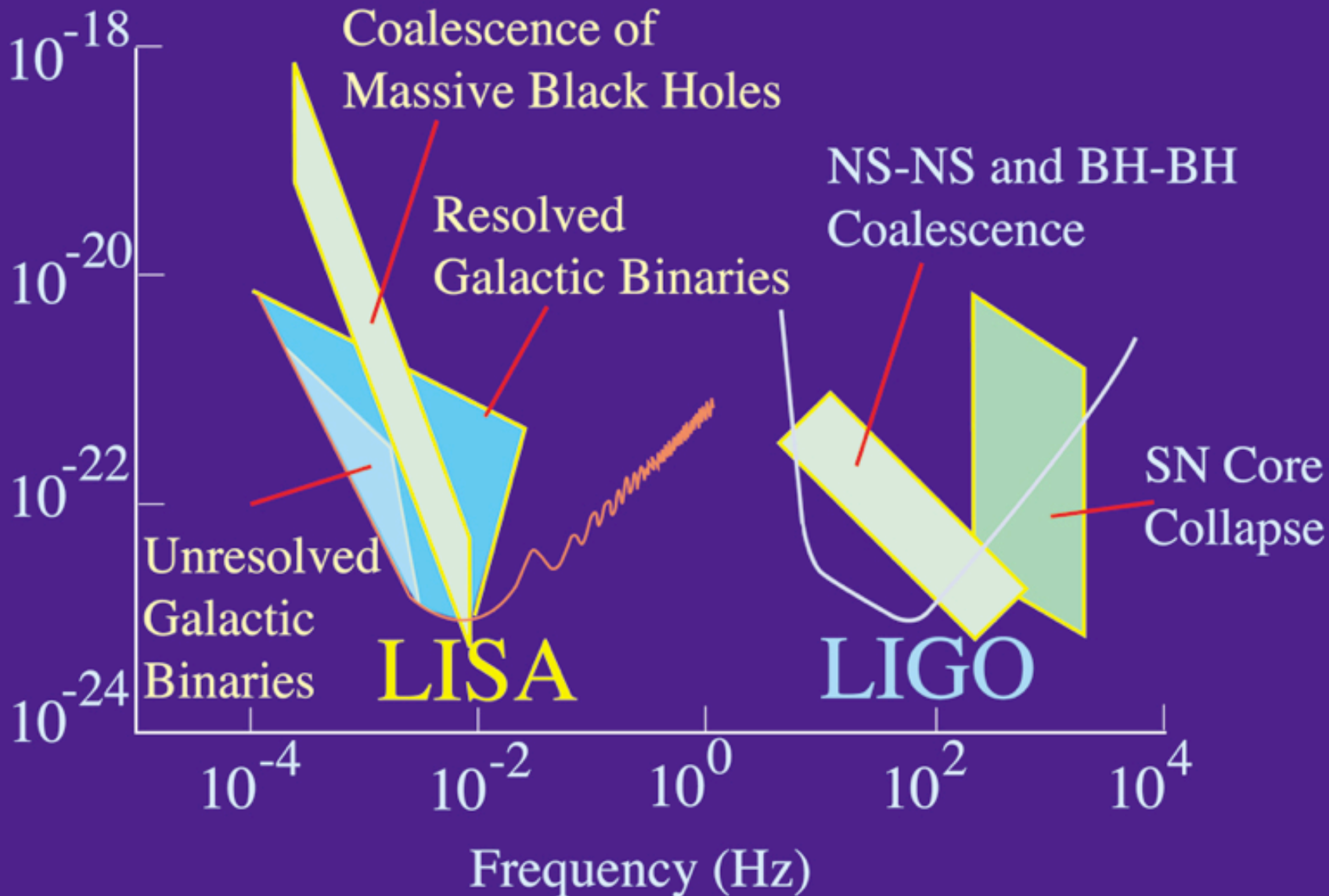
### LASER INTERFEROMETER SPACE ANTENNA

I MILIONI DI  
CHILOMETRI



$$\Delta L \sim hL \sim 10^{-21} \cdot 10^{11} \sim 10^{-10} \text{ cm}$$

Gravitational Wave Amplitude



NEL 2015 - 2020... 2025...20???  
SI APRIRA'  
UNA NUOVA FINESTRA SULL'UNIVERSO

POTREMO RIVELARE  
BUCHI NERI DI 1000-1000000 MASSE SOLARI  
IN GALASSIE IN FORMAZIONE  
E TRACCIARE L'ALBA COSMICA  
QUANDO LE PRIME GALASSIE, STELLE E  
BUCHI NERI SI FORMANO

.....

E

.....SCOPRIRE L'INATTESO



# come dove e quando i buchi neri si sono formati nell'universo

