



NANE BIANCHE

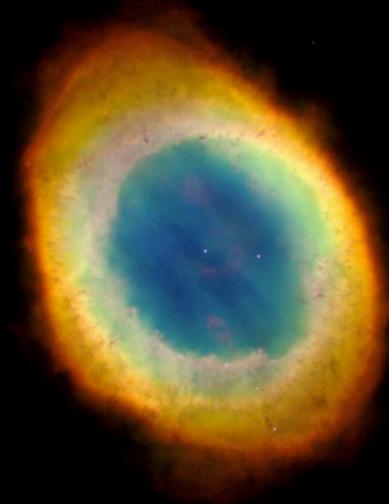
STELLE DI NEUTRONI

BUCHI NERI

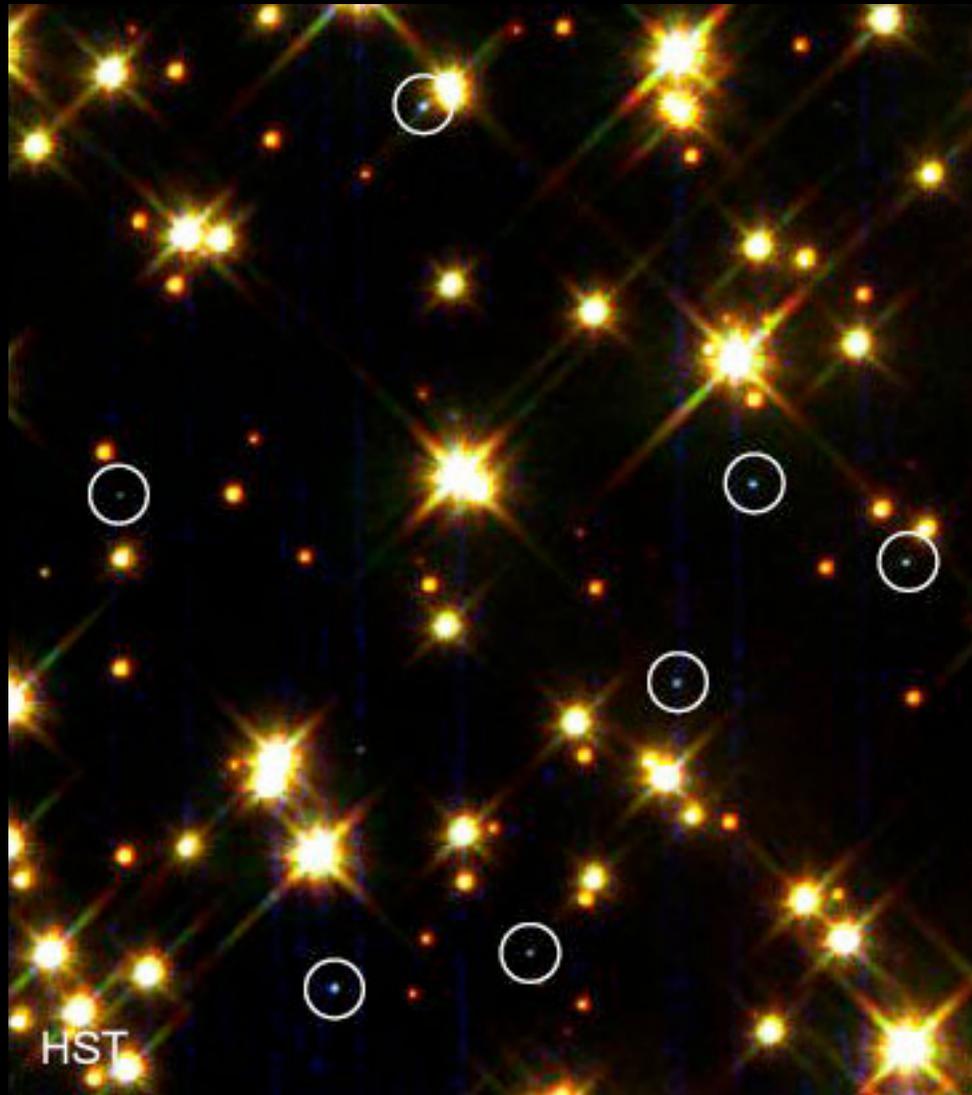
MONICA COLPI
Dipartimento di Fisica G. Occhialini
Università di Milano Bicocca

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

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



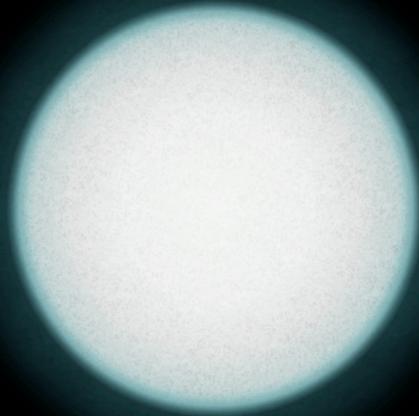
... nane bianche negli ammassi globulari ...



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



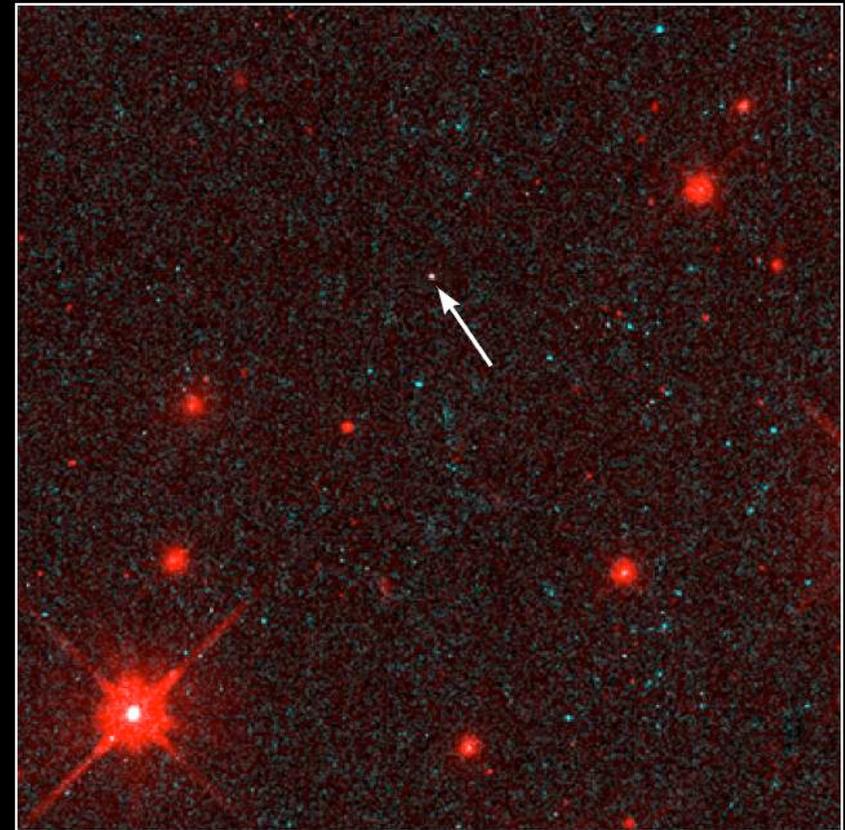
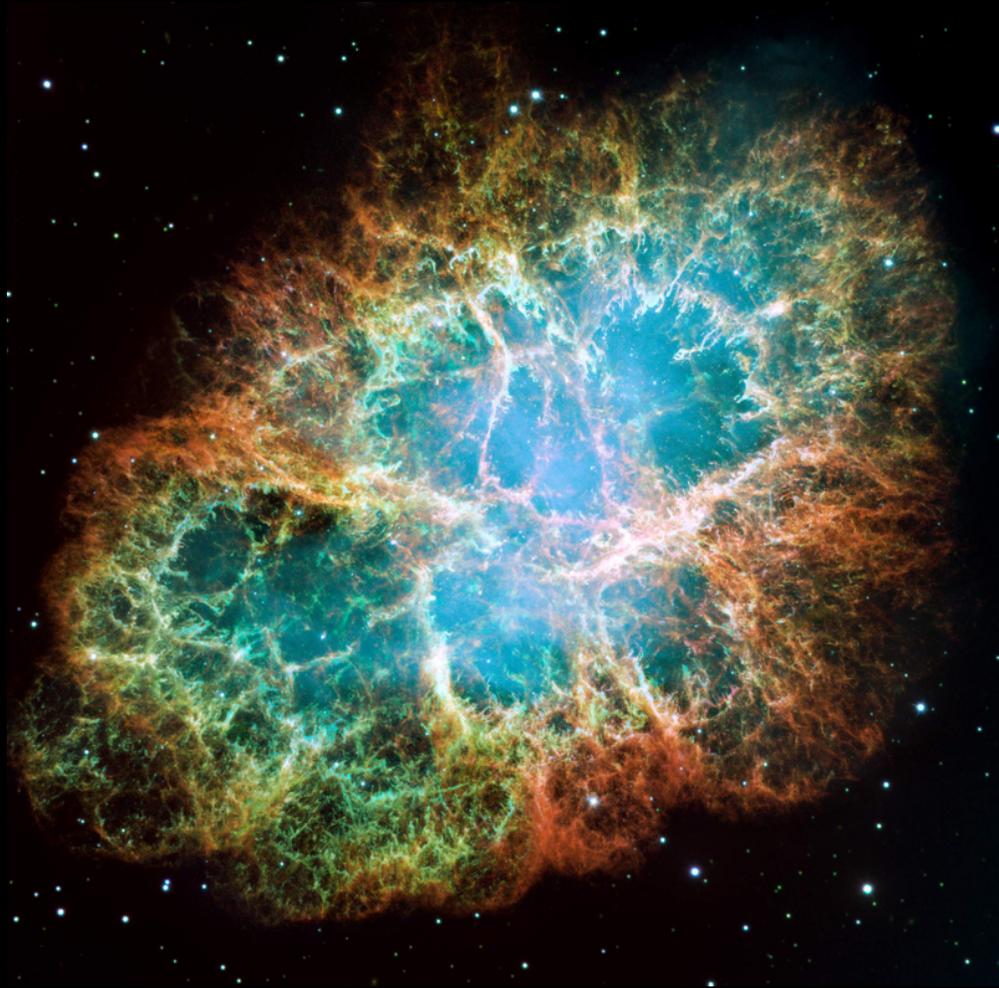
$M \approx 1.0 M_{\text{sun}}$
 $R \approx 5800 \text{ km}$





NASCITA DI UNA STELLA DI NEUTRONI

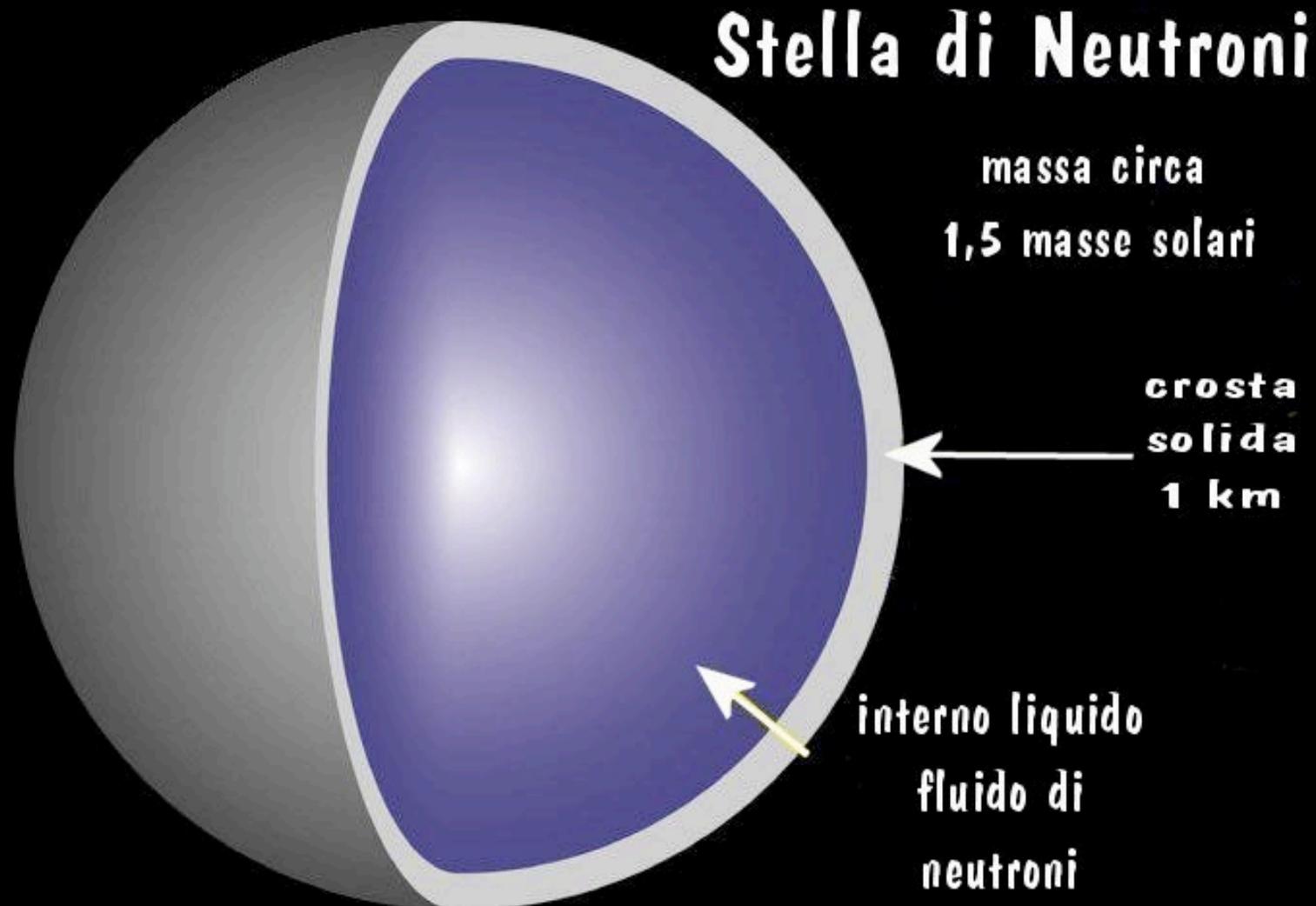
STELLE DI NEUTRONI
COLTE NELL'ISTANTE DELLA LORO FORMAZIONE
nuclei stellari collassati “spogliati del loro involucro” durante
l'esplosione di supernova



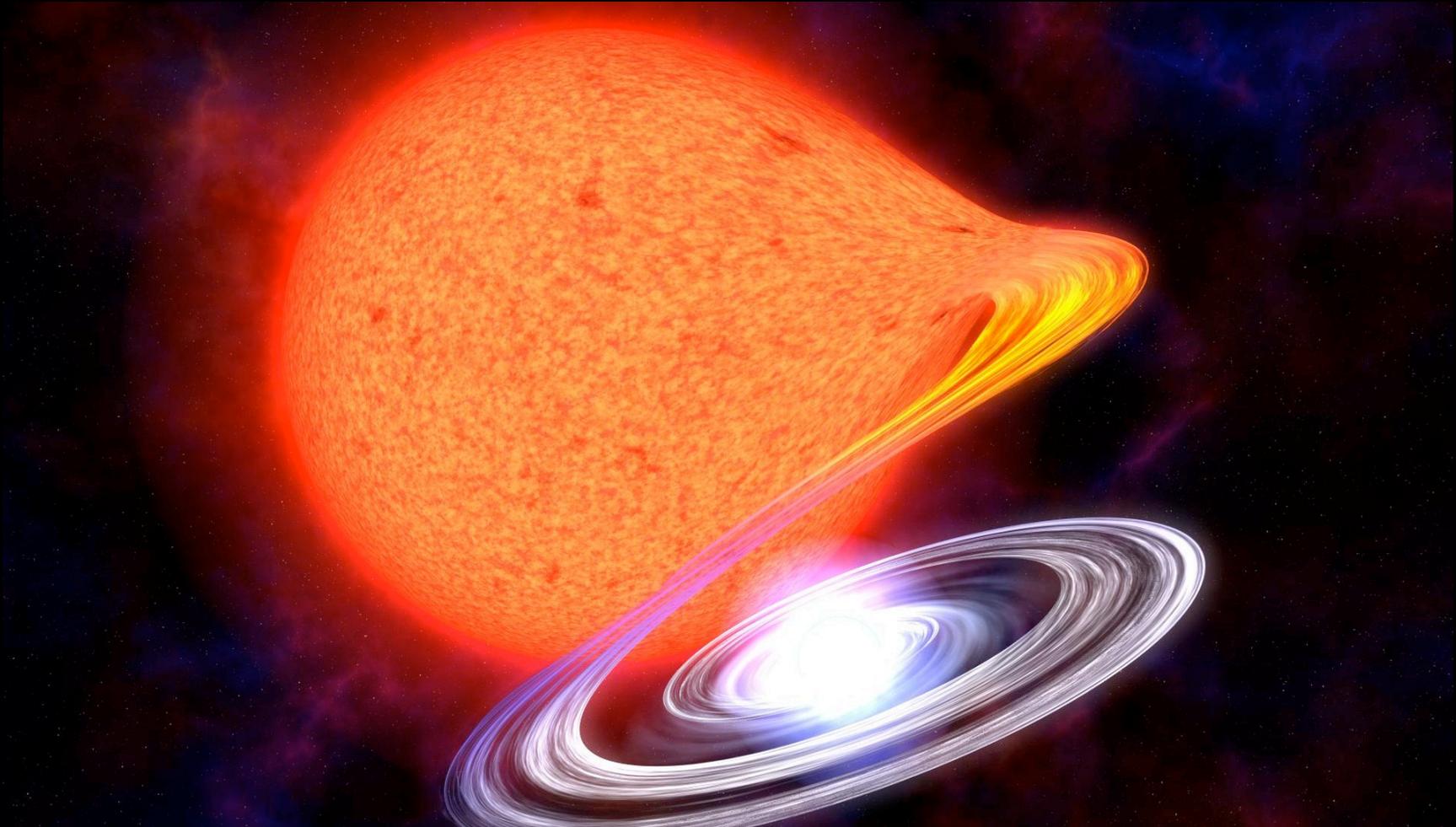
Isolated Neutron Star RX J185635-3754 HST • WFPC2

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**



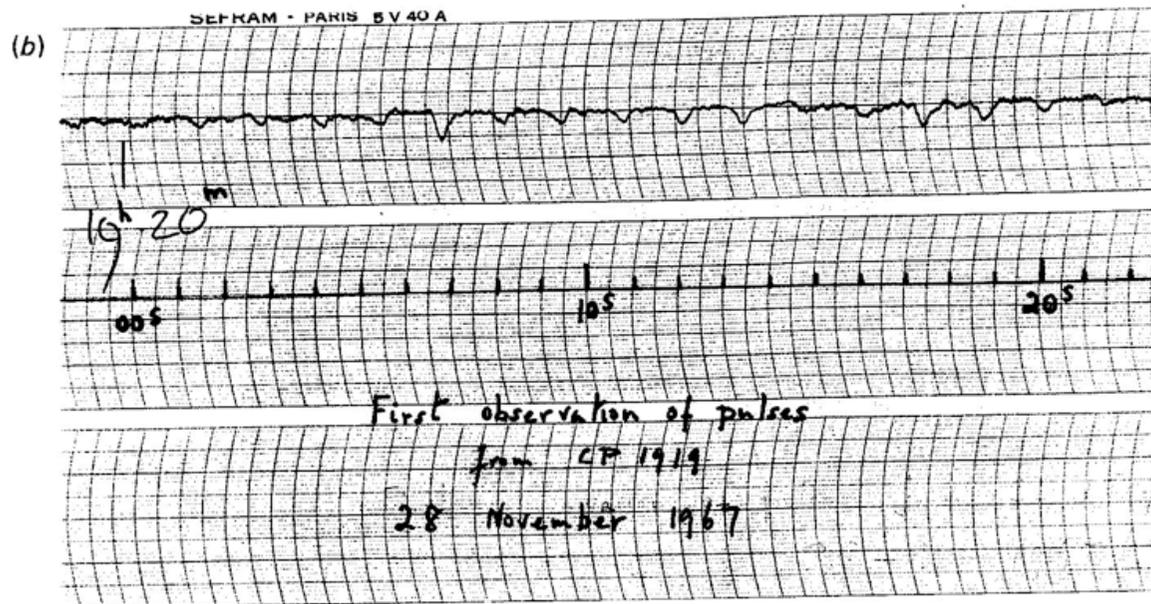
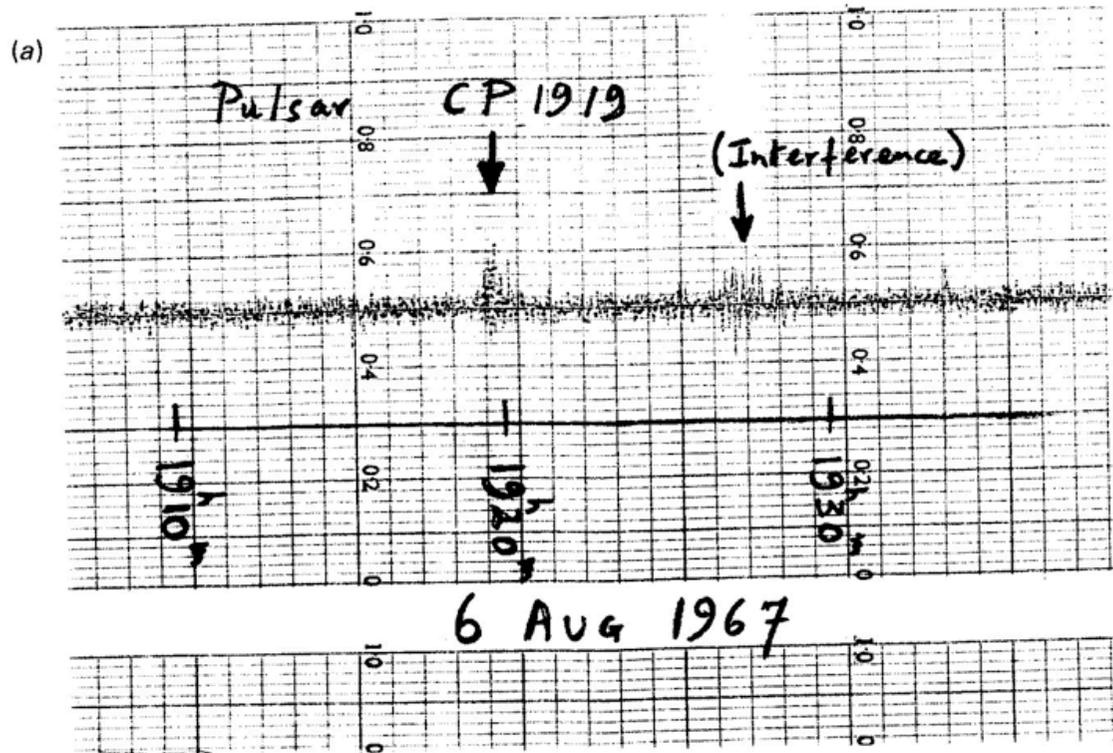
BINARIE
OSPITANTI STELLE DI NEUTRONI
si accendono come sorgenti X
luminosissime



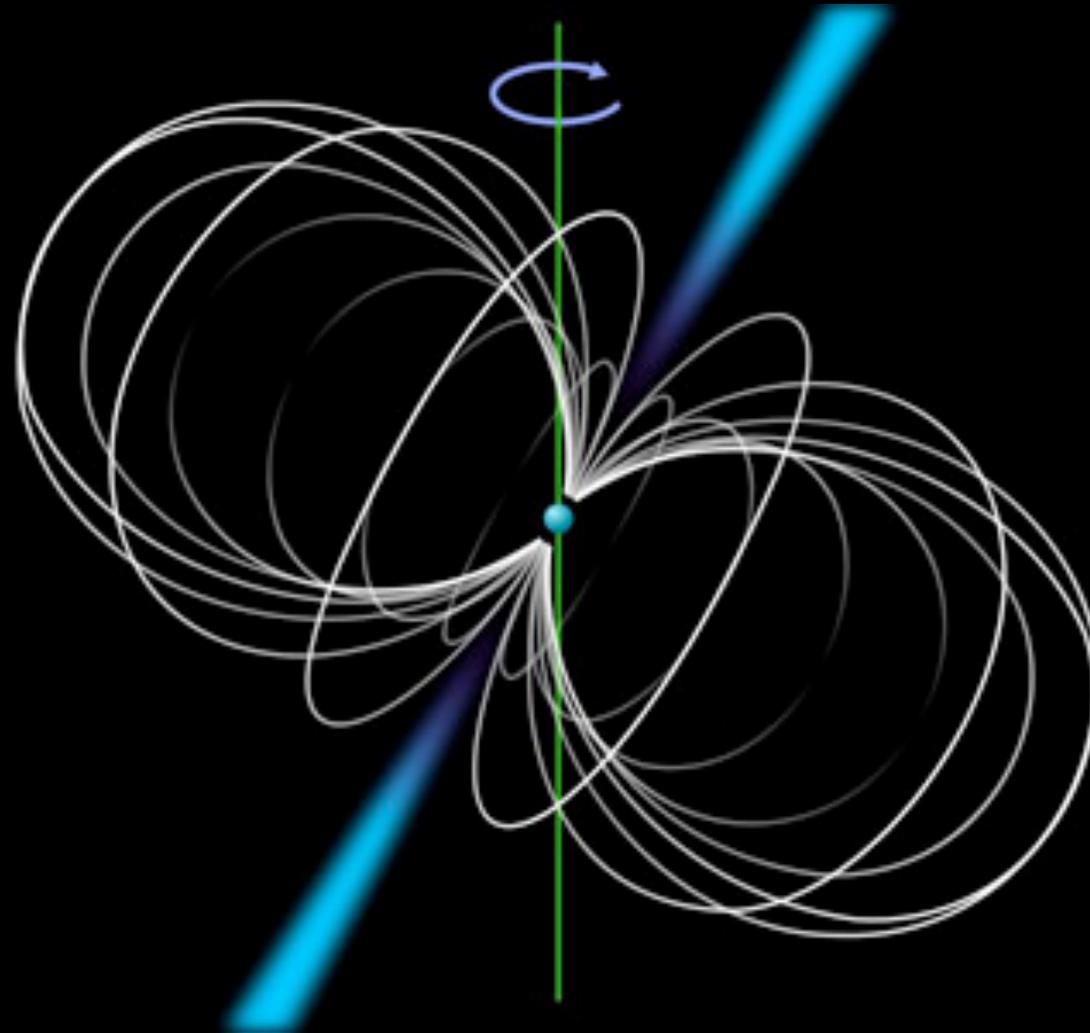
Hewish & Bell 1967
PSR 1919+21

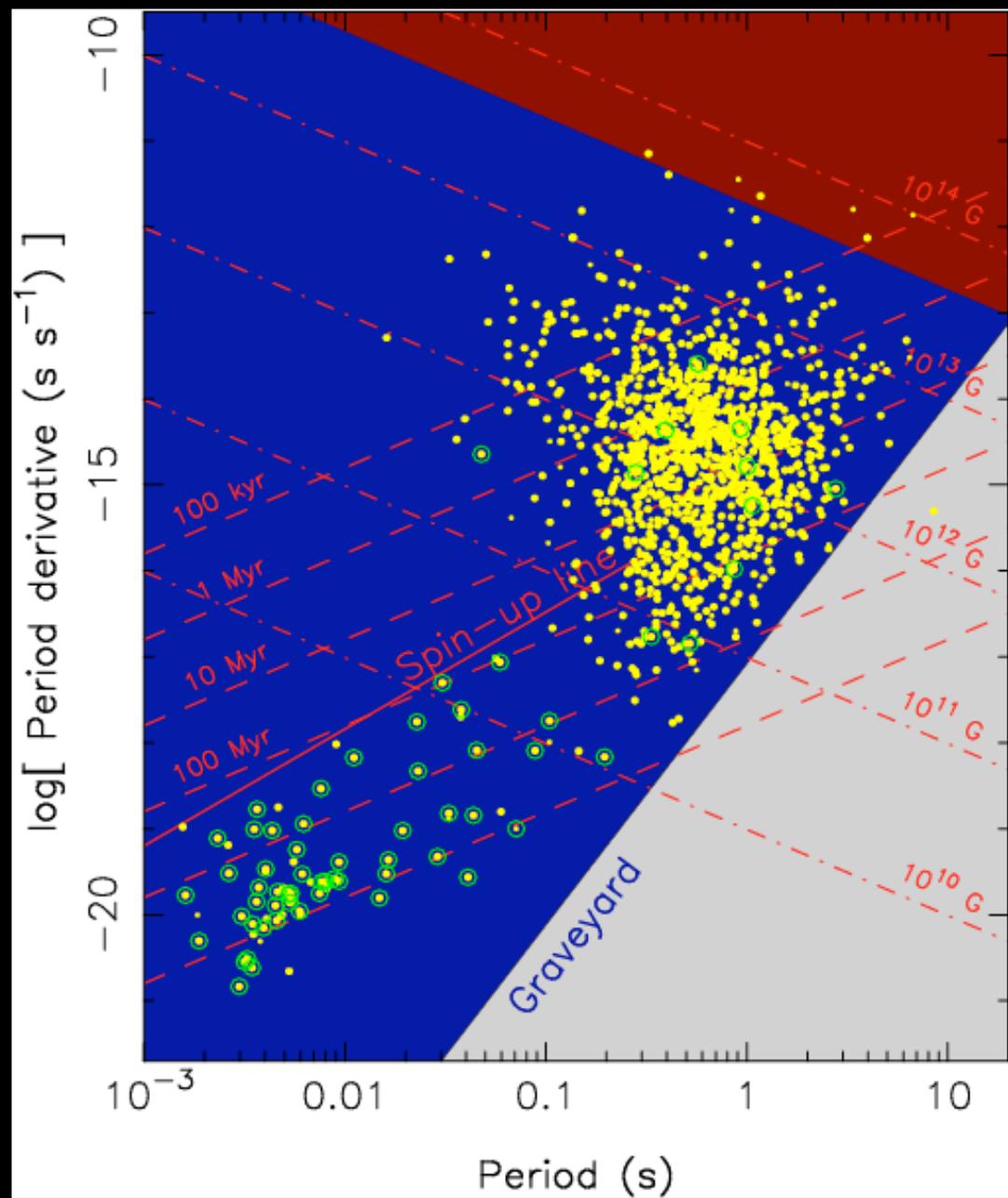
SCOPERTA INATTESA

source lies outside the solar system
distance is typical of stellar distances
source must be very small
possibly a white dwarf or neutron star
astrophysical origin, not ET civilisation



STELLE DI NEUTRONI COME PULSAR RADIO





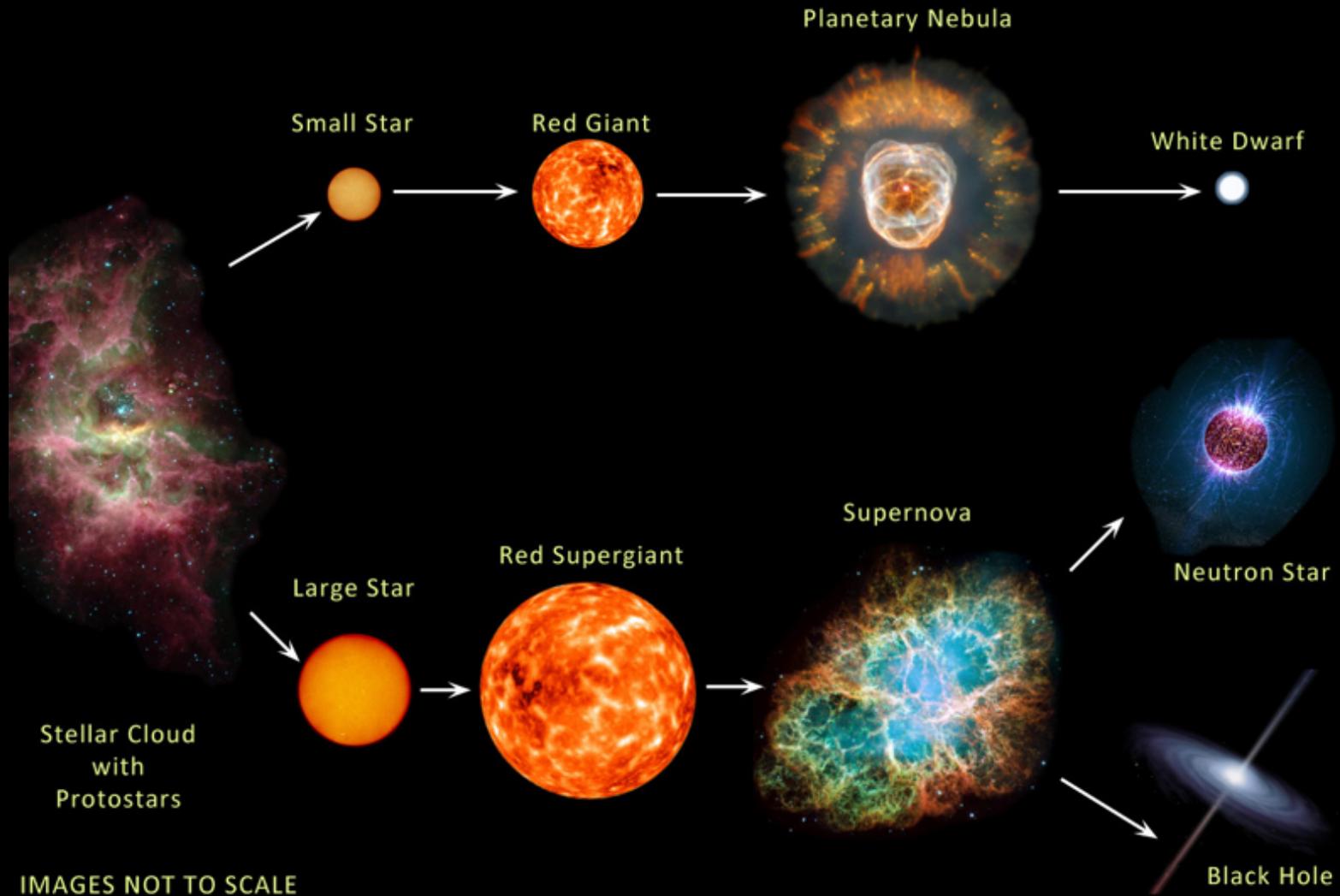


e... i buchi neri?

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**

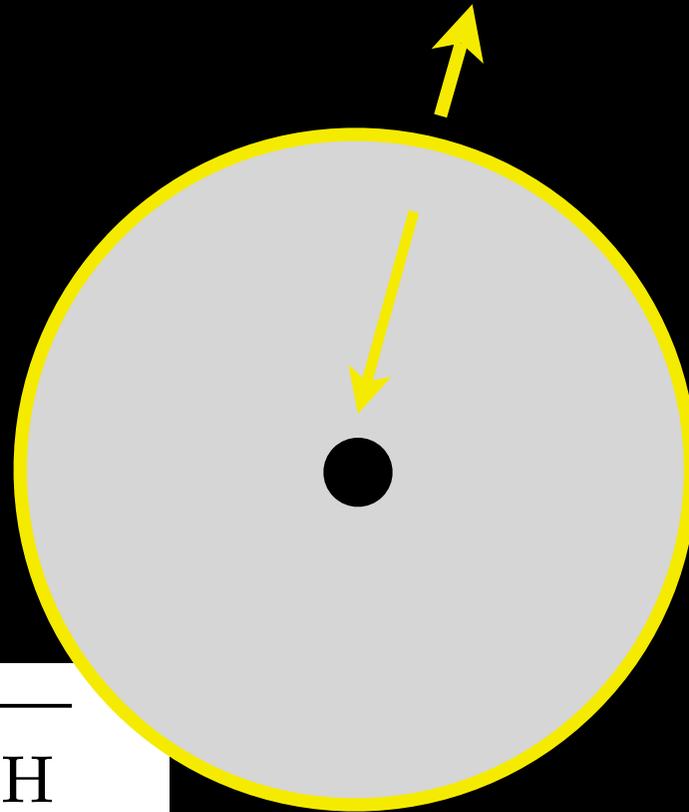


**SINGOLARITA'
gravita' quantistica**

SINGOLARITA'
E'
INVISIBILE

A UN OSSERVATORE ESTERNO

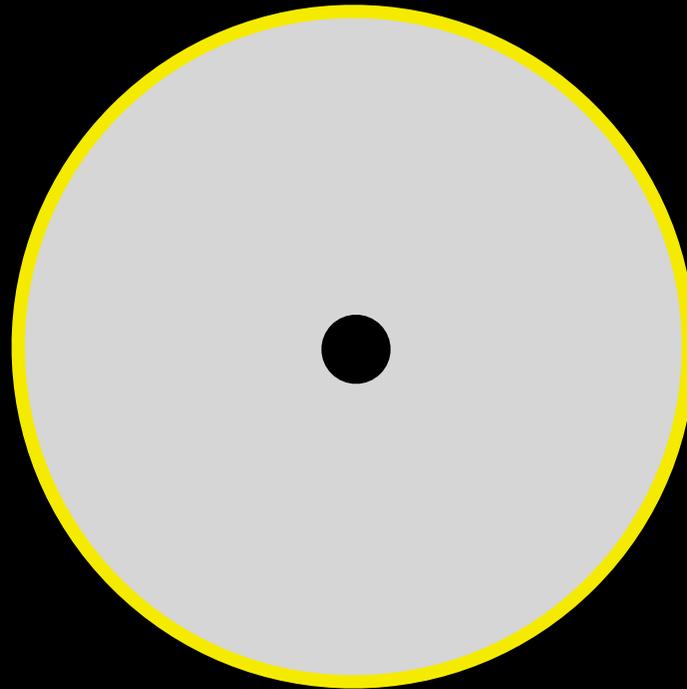
ORIZZONTE DEGLI EVENTI
VELOCITA' DI FUGA
E' PARI ALLA
VELOCITA' DELLA LUCE



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

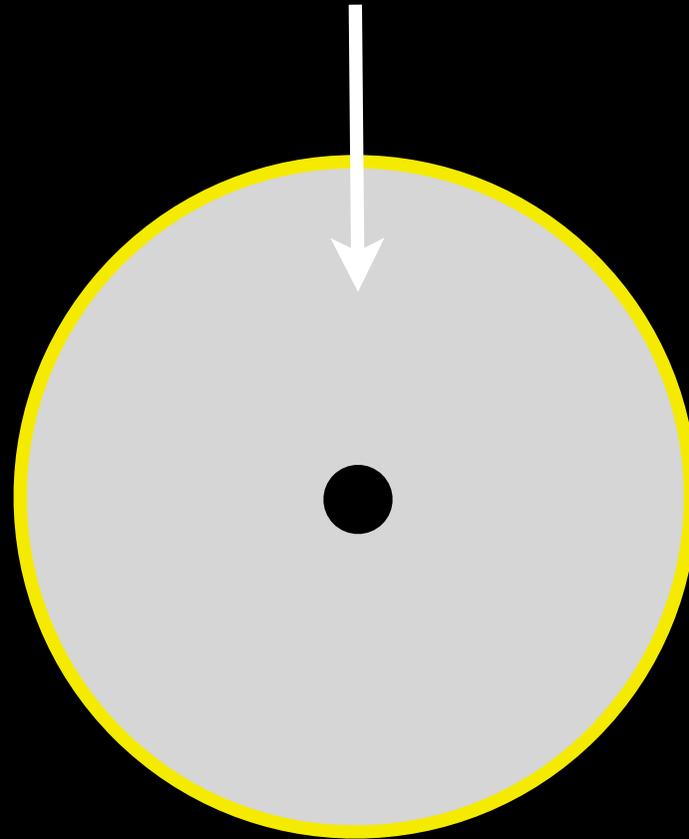
SINGOLARITA' VESTITA

ORIZZONTE DEGLI EVENTI

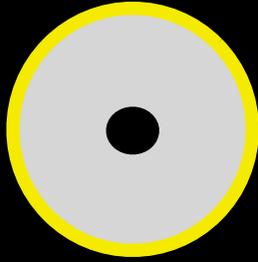


**LA SINGOLARITA' E' RACCHIUSA
ENTRO IL VOLUME DELL'ORIZZONTE**

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

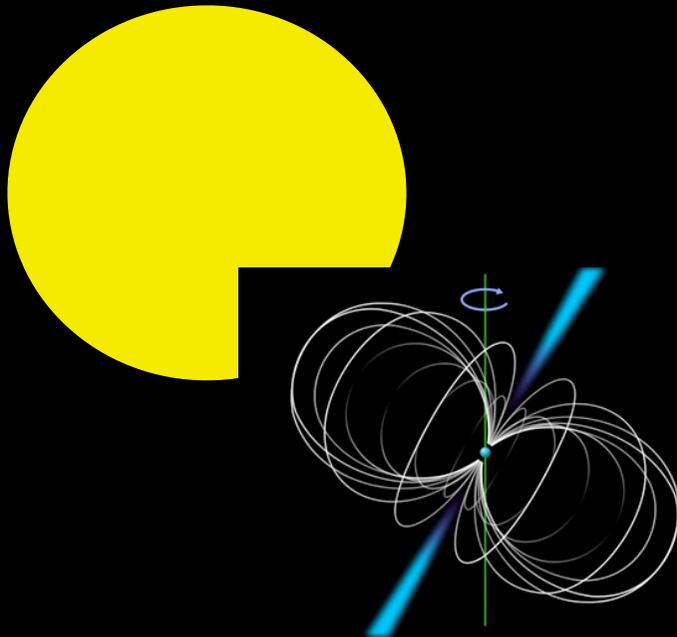


**MONDO CAUSALMENTE
DISCONNESSO CON L'UNIVERSO ESTERNO**



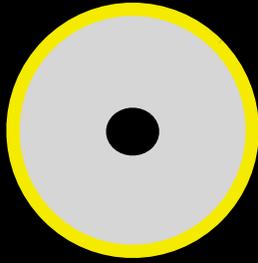
$$M_{\text{BH}} = 1 M_{\odot}$$

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



stella di neutroni

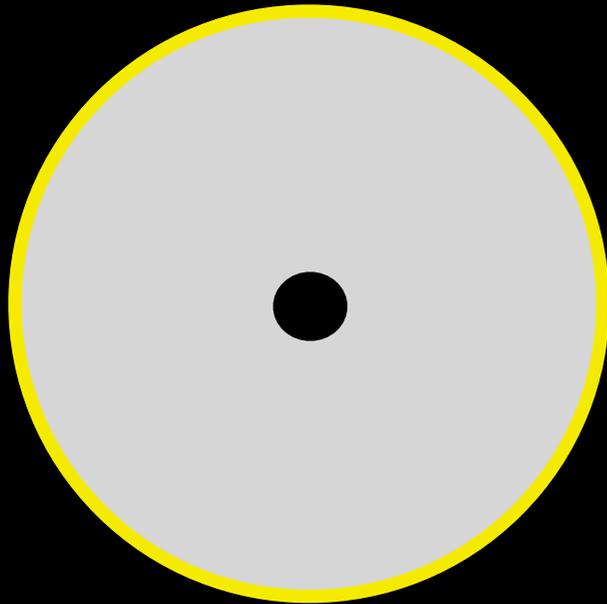
$$R_{\text{superficie}} \sim 10\text{km}$$



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

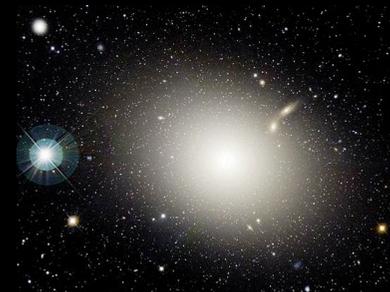
$$R_G \sim 0.02 \text{ a.u.}$$

interno all'orbita di Mercurio



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

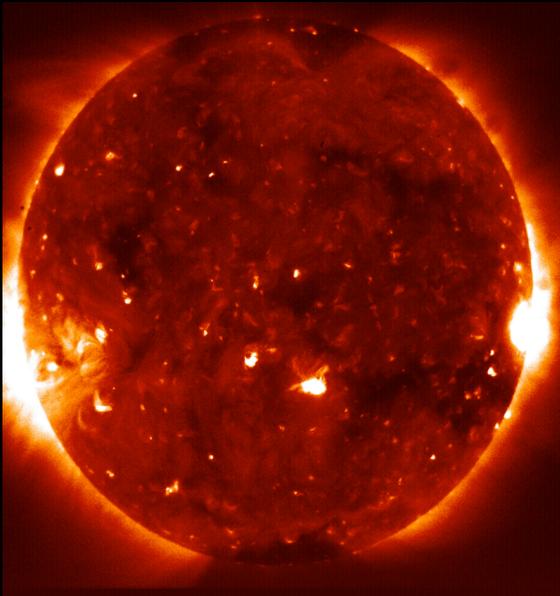
$$R_G \sim 20 \text{ a.u.}$$





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

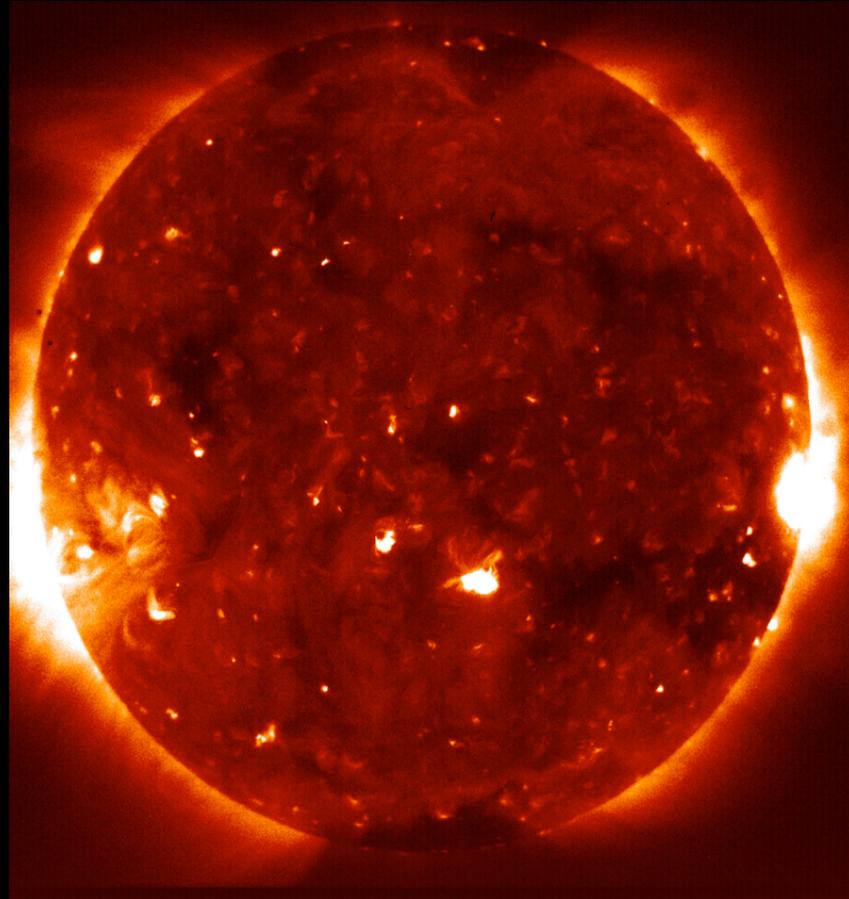
$$R_G / R_{\text{Terra}} \sim 10^{-9}$$



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

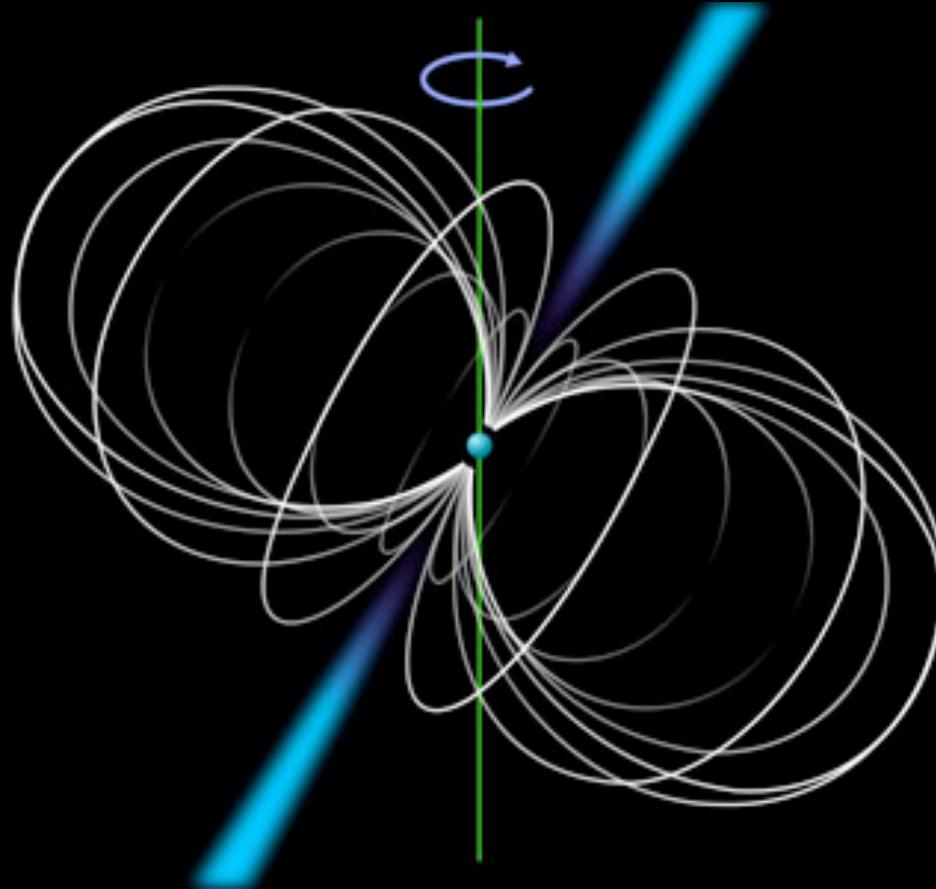
$$R_G / R_{\text{sole}} \sim 4 \times 10^{-6}$$

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

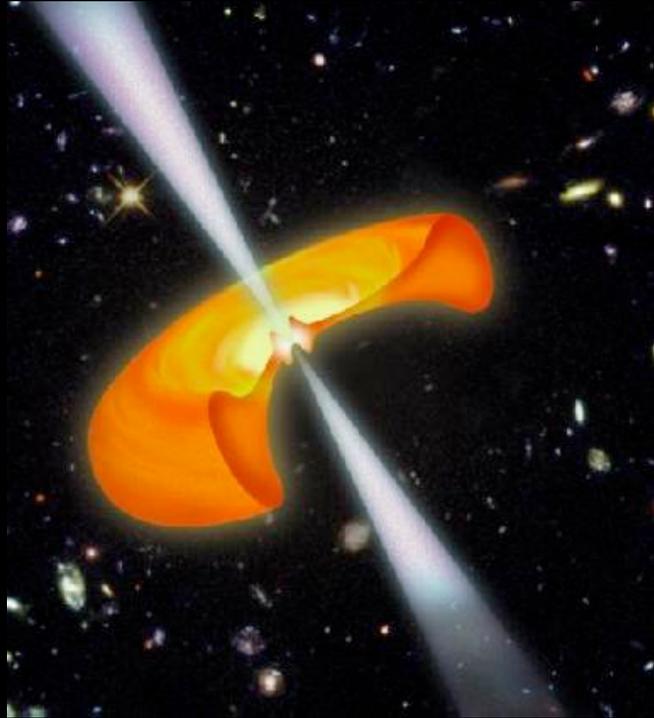
SPIN

**ESISTONO DAVVERO IN
NATURA?**

SI ...

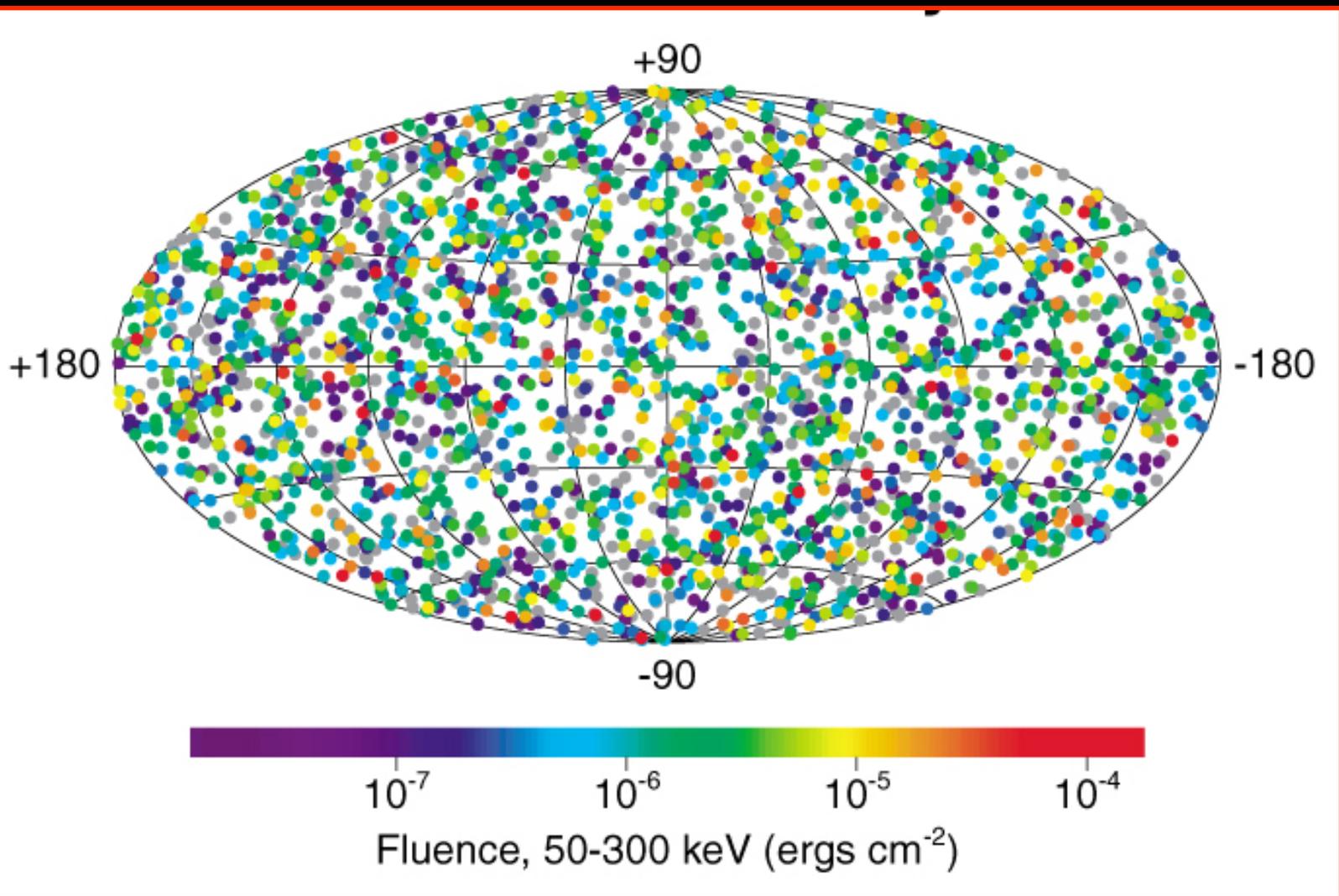
ma necessitiamo di molte “prove”

BUCHI NERI STELLARI?

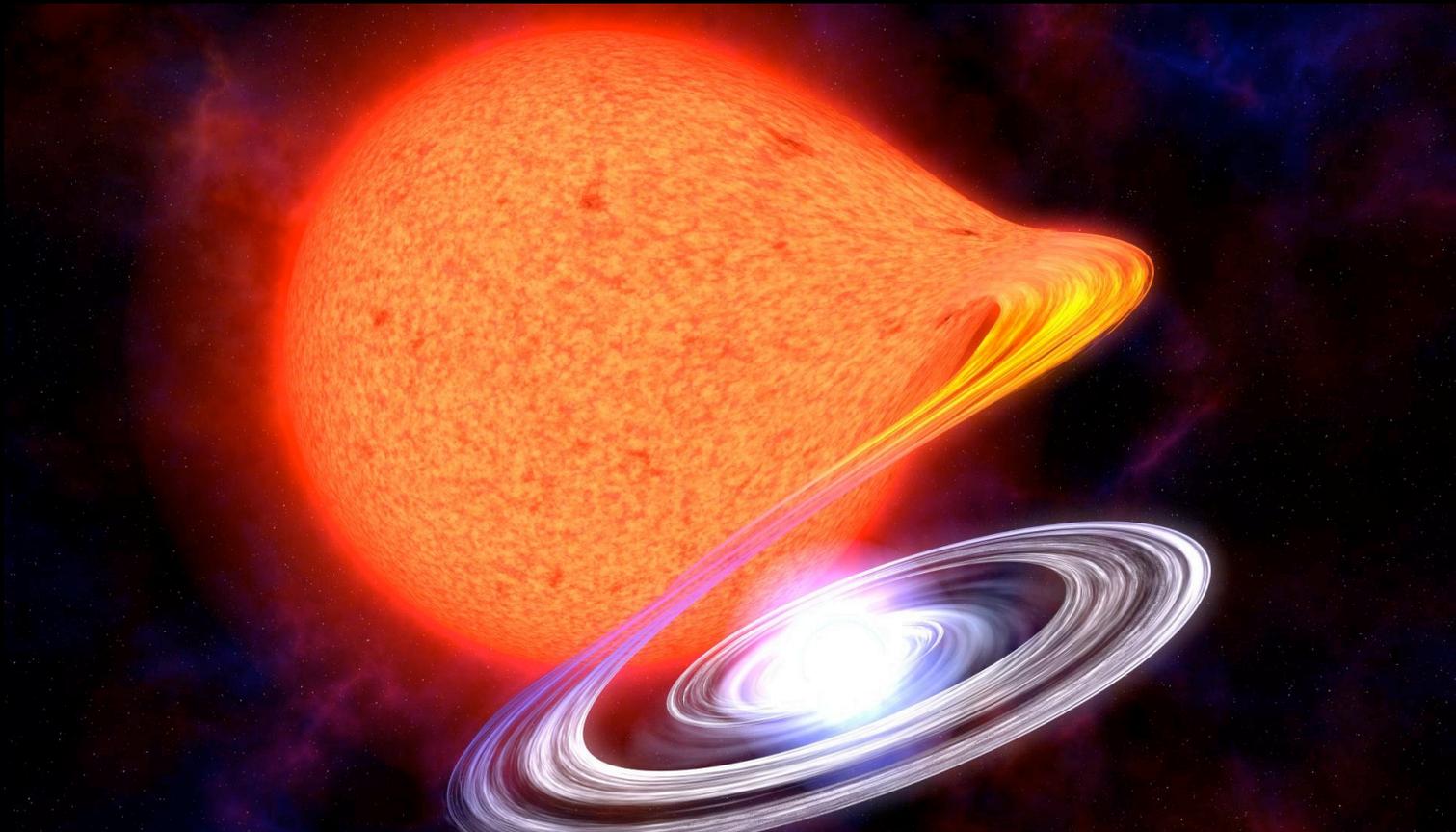


GAMMA RAY BURST
I LAMPI GAMMA
atto di nascita di un
buco nero stellare

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 dark blue and black starry field with a bright, glowing yellow-white central region. A black arrow points upwards from a text box at the bottom towards the glowing region.

**BUCO NERO
SUPERMASSIVO DI
MILIARDI DI SOLI**

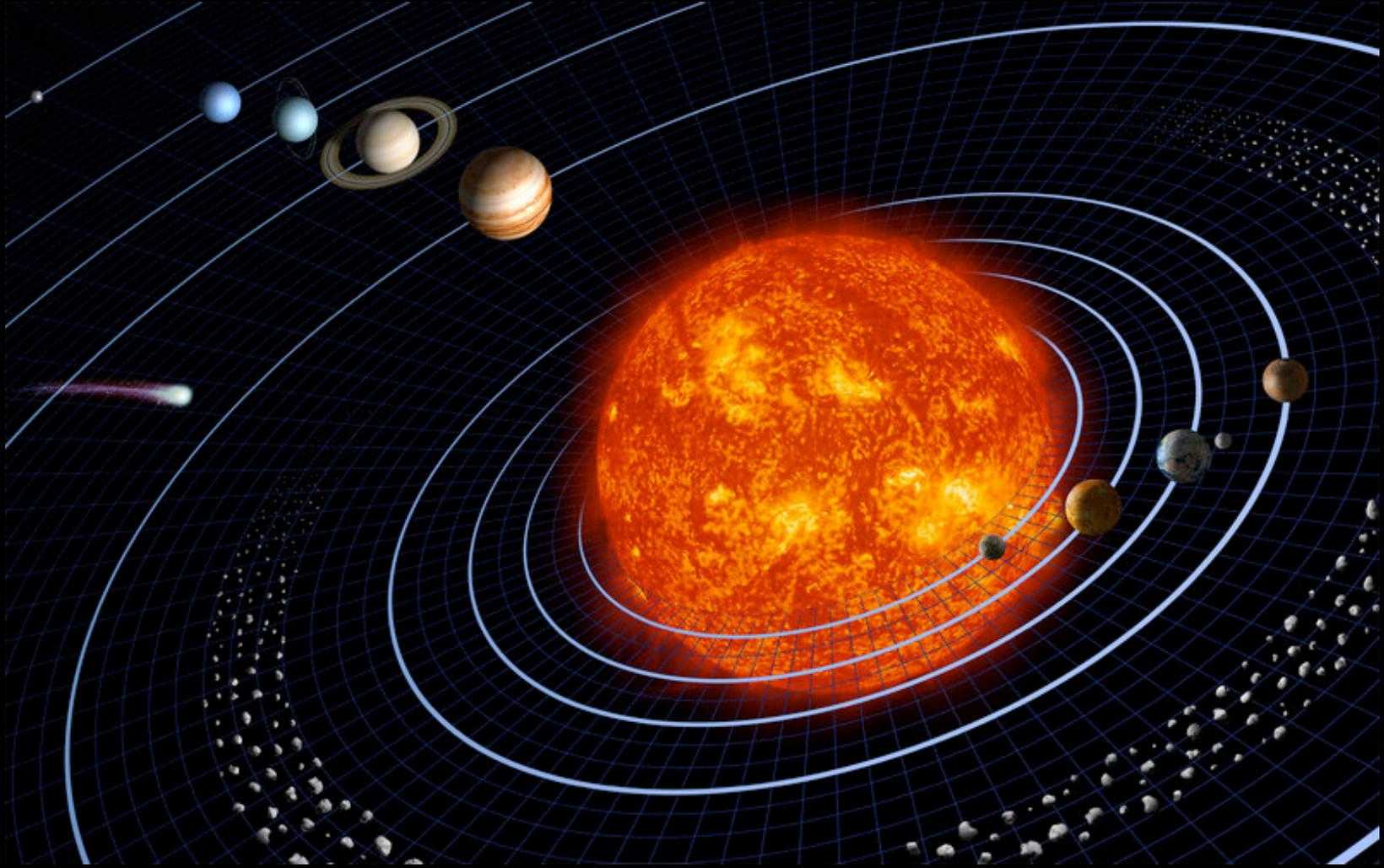


BULGE STELLARE

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

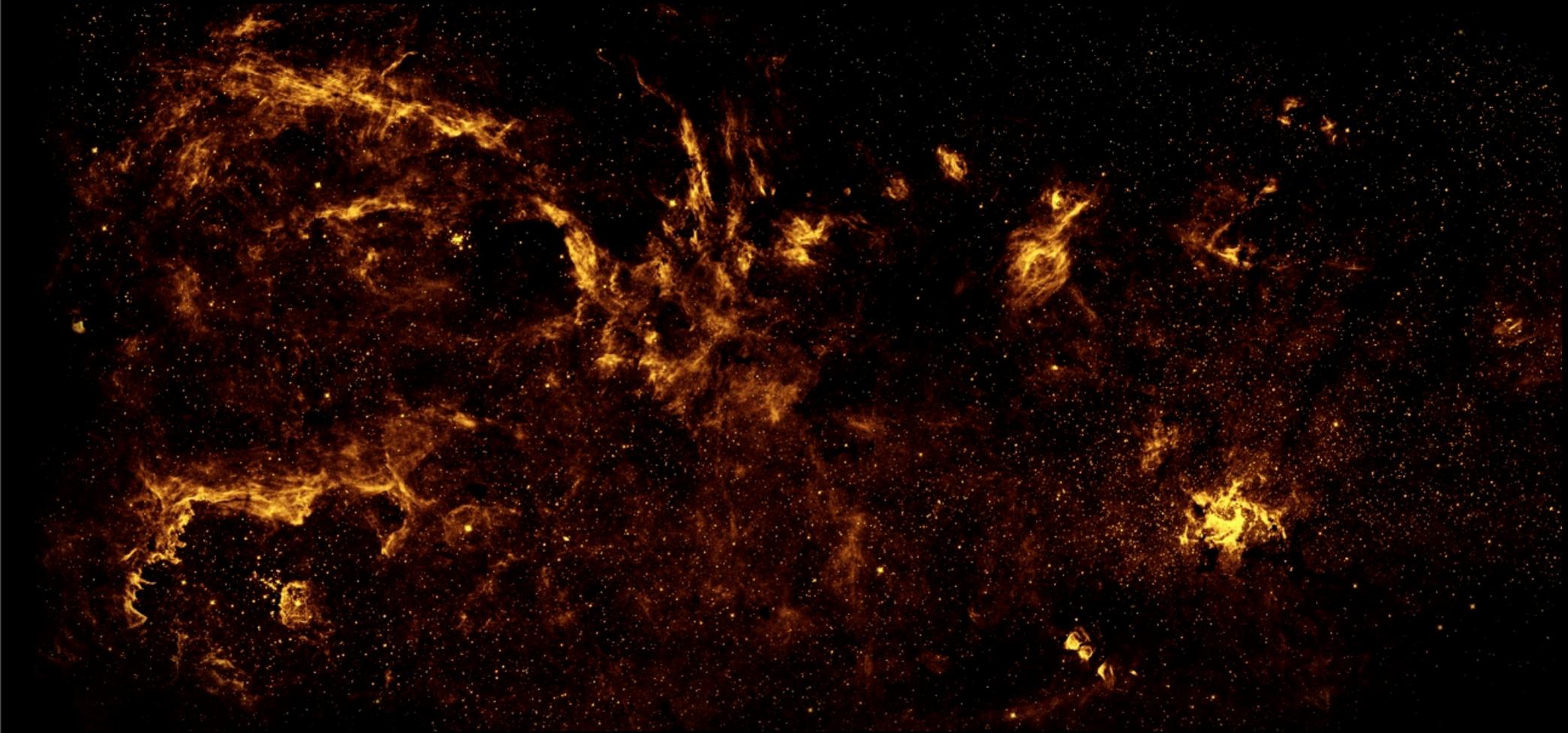
STELLE

GAS

ATTORNO A UN BUCO NERO
SUPERMASSIVO

TUTTO RUOTA VELOCE

SAGGITTARIUS A*
debole sorgente radio



2004 July: NGS - AO

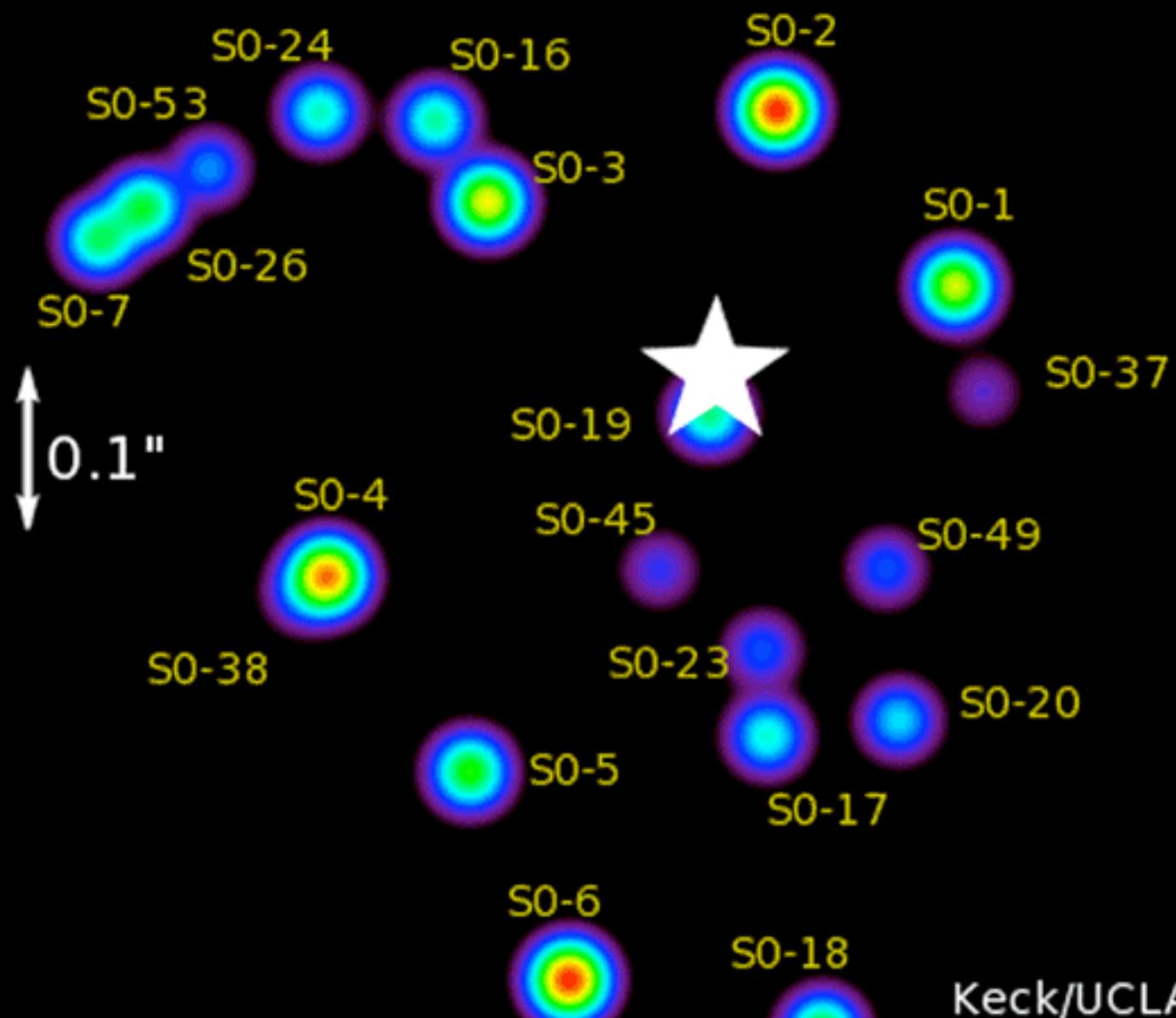


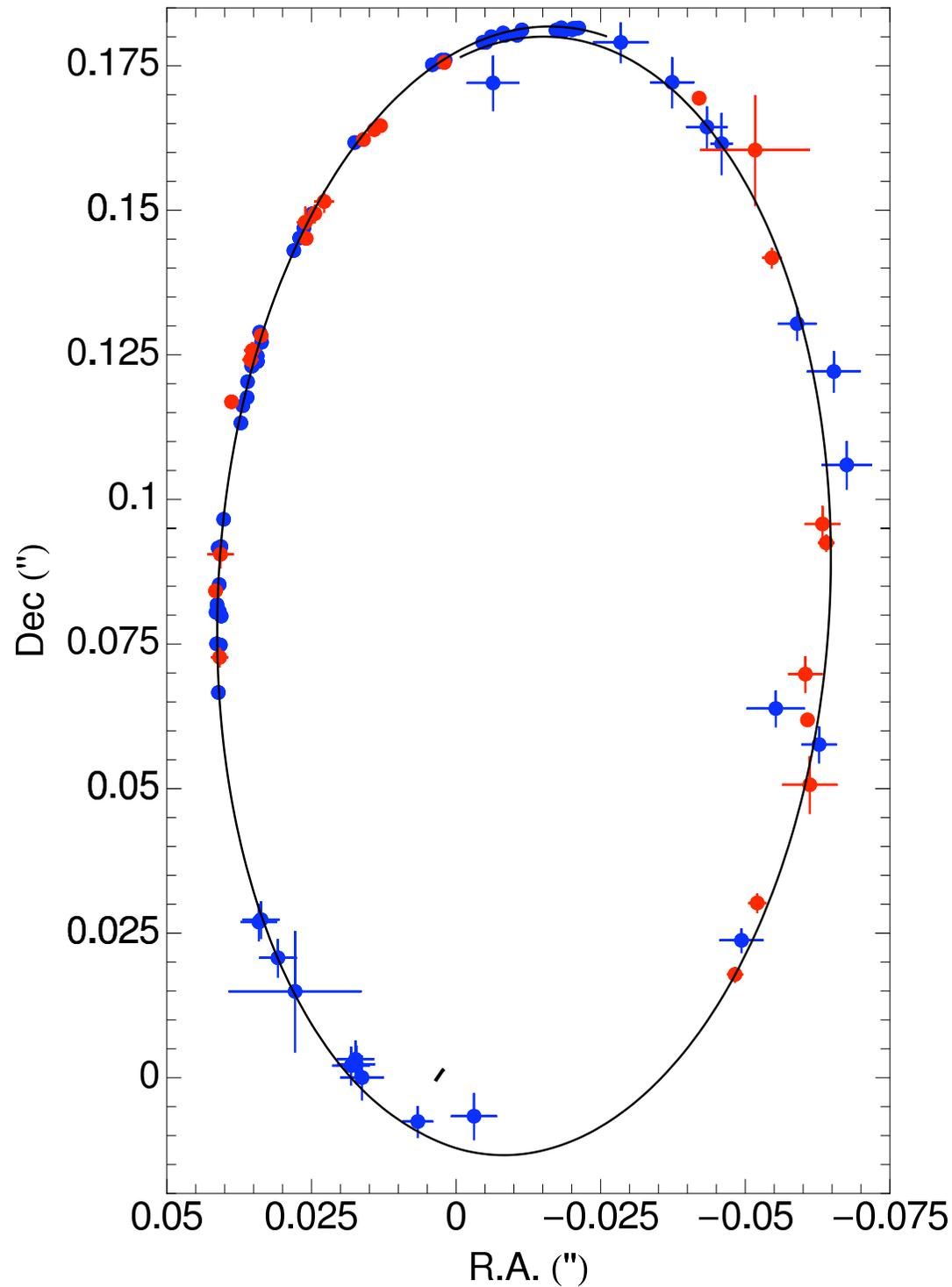
@ Keck/UCLA Galactic Center Group

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

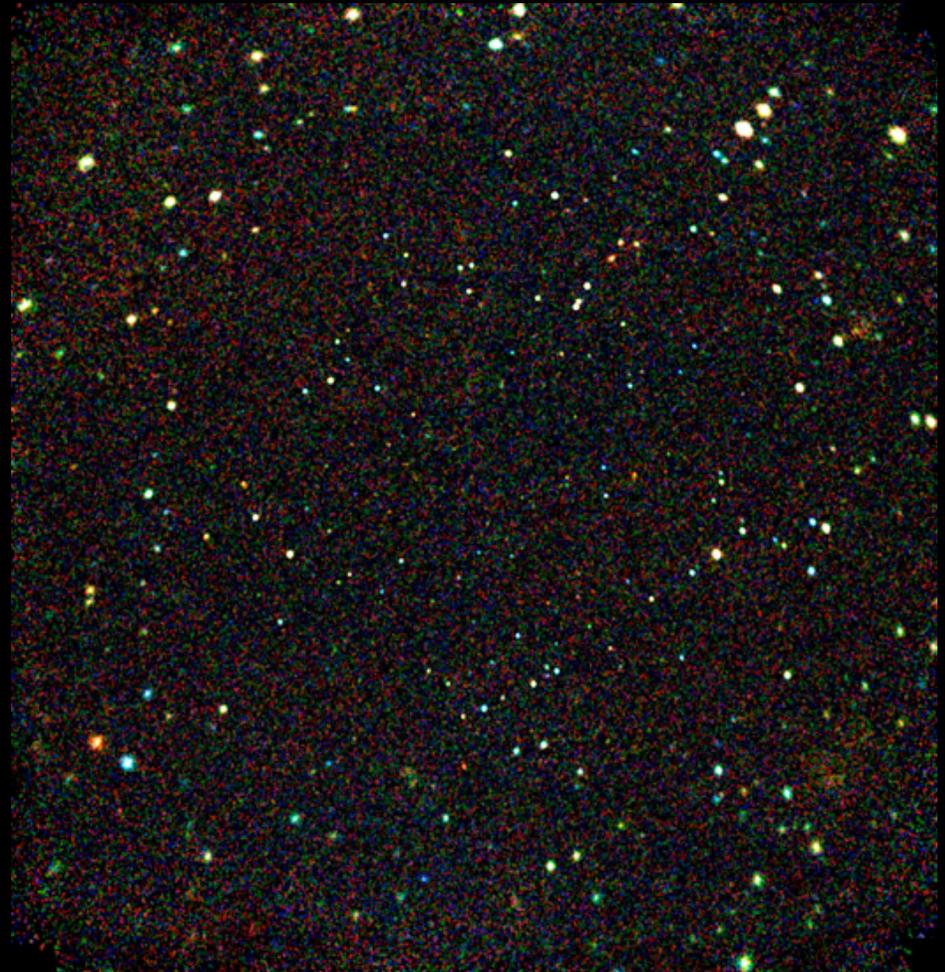
VIAGGIO AL CENTRO DI UNA GALASSIA



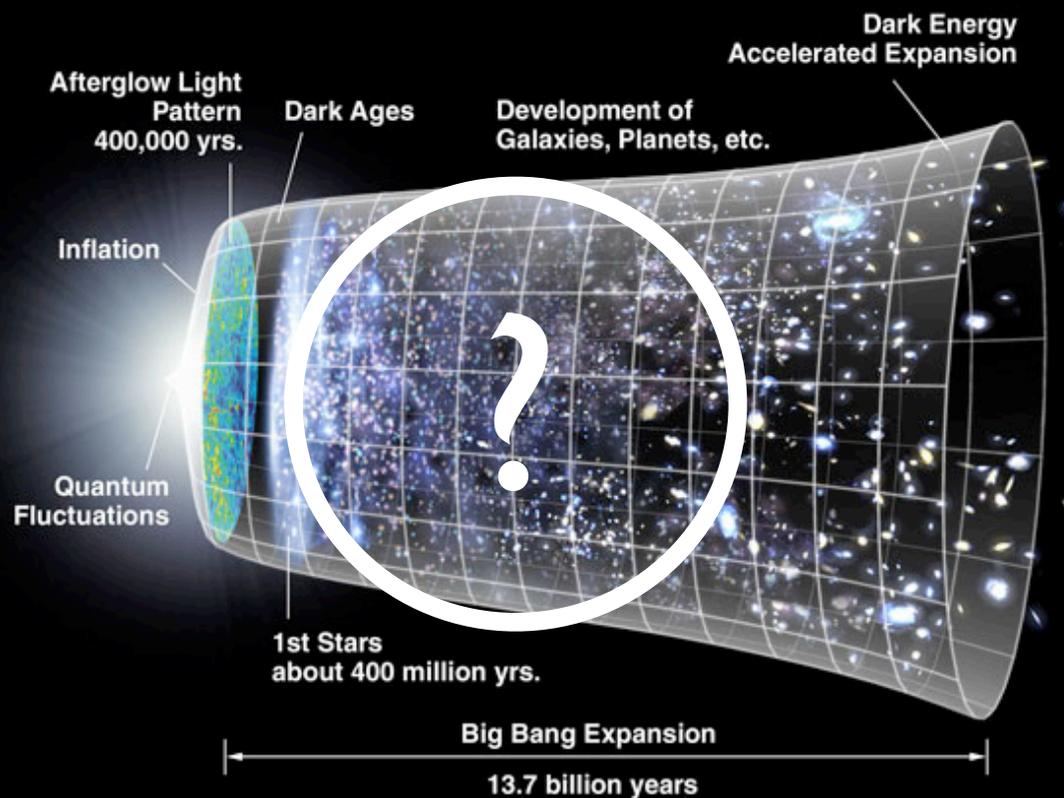
HUBBLE DEEP FIELD
GALASSIE



CHANDRA DEEP FIELD
BUCHI NERI ATTIVI

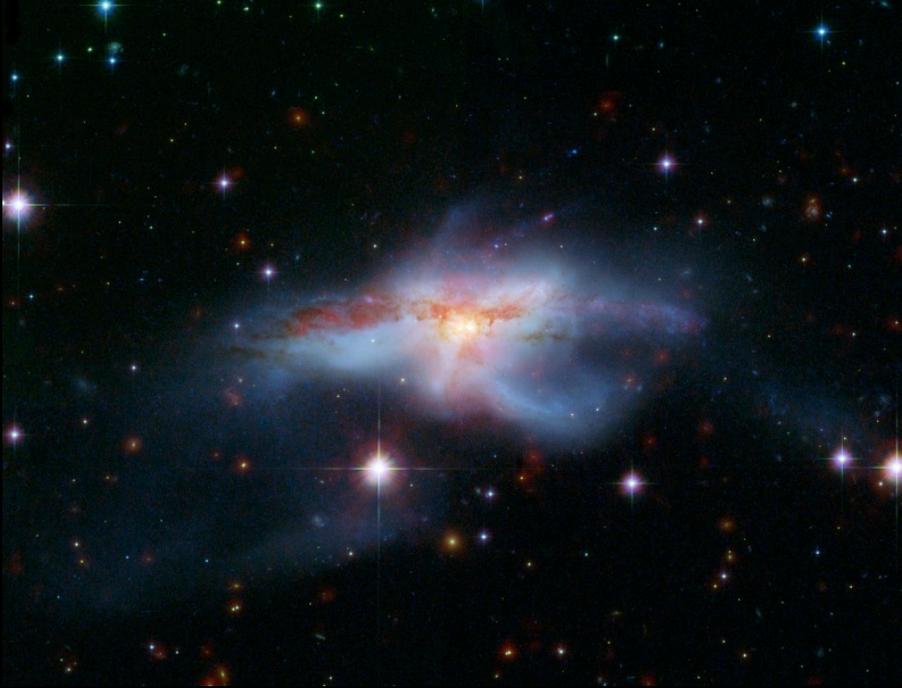


BUCHI NERI SEMBRANO ESSERE ELEMENTI NATURALI FORMATISI IN SIMBIOSI CON LE GALASSIE

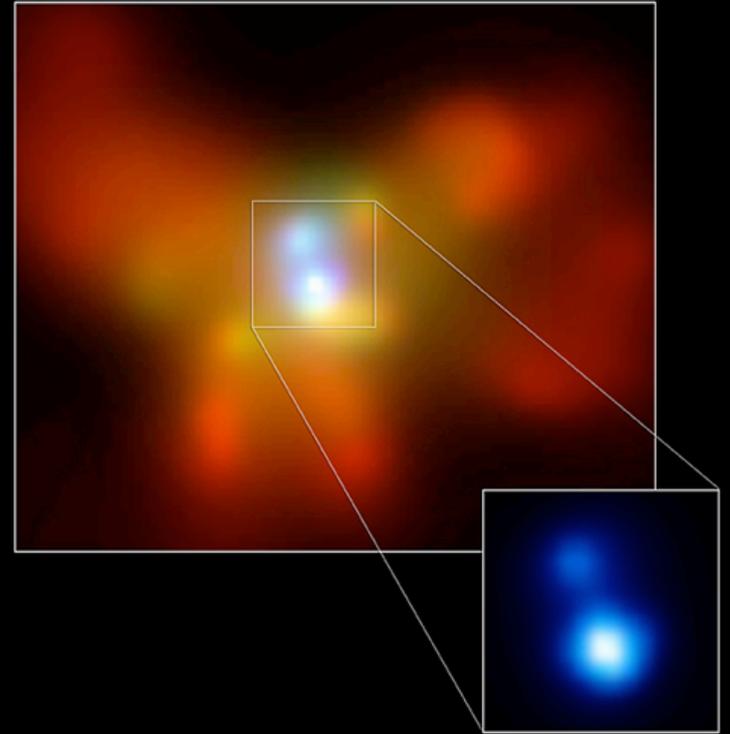


NGC 6240

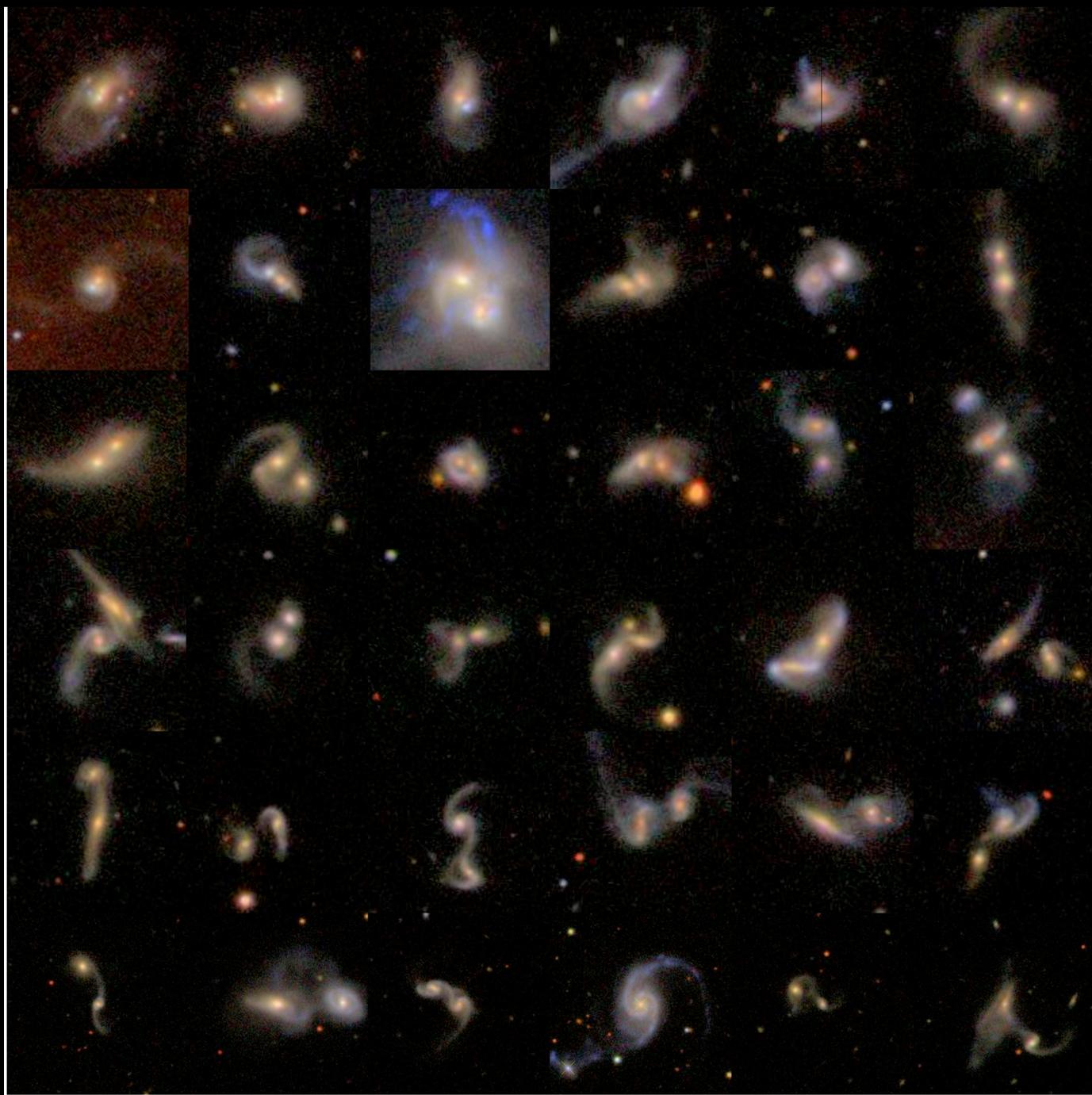
OTTICO



RAGGI X



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

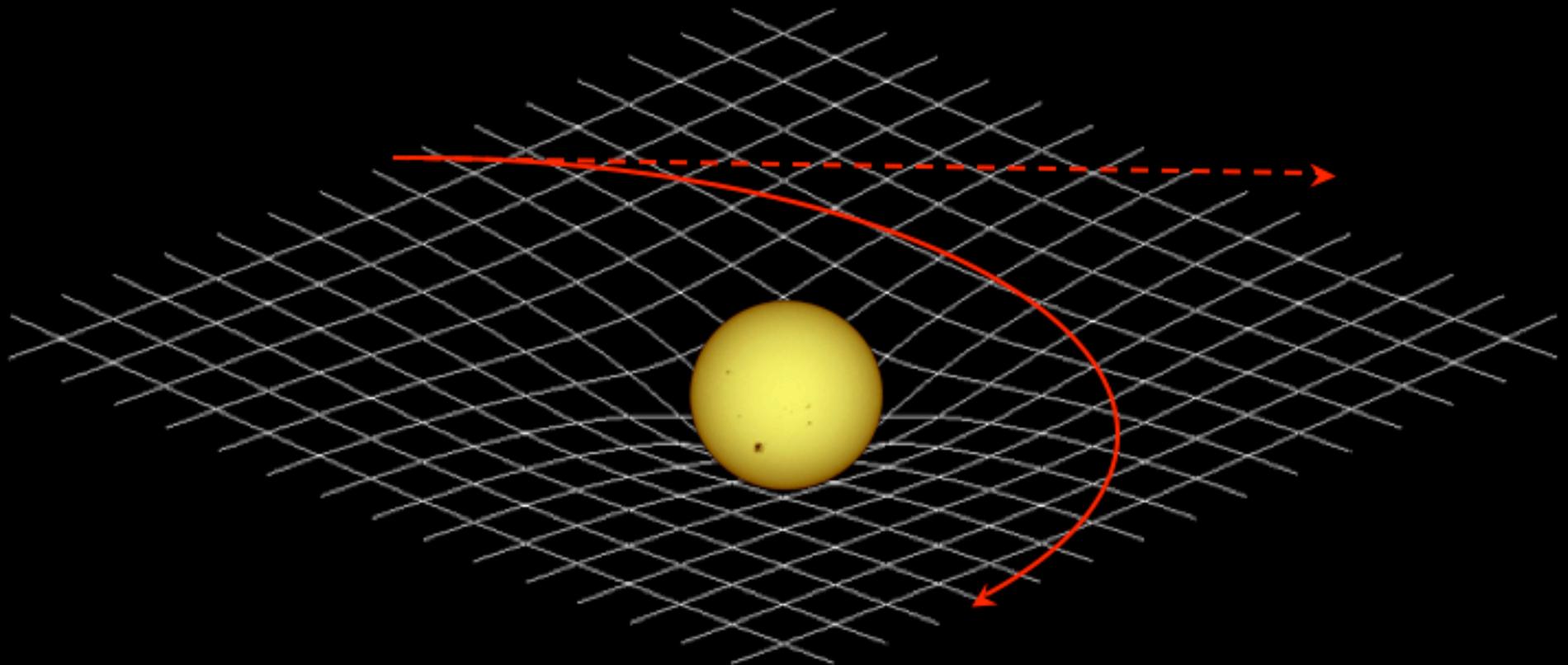


POSSIAMO CAPIRE SE QUEI NUCLEI
BRILLANTI E LUMINOSISSIMI SONO
BUCHI NERI ATTIVI ?
SONO I BUCHI NERI
DELLA RELATIVITA' GENERALE?



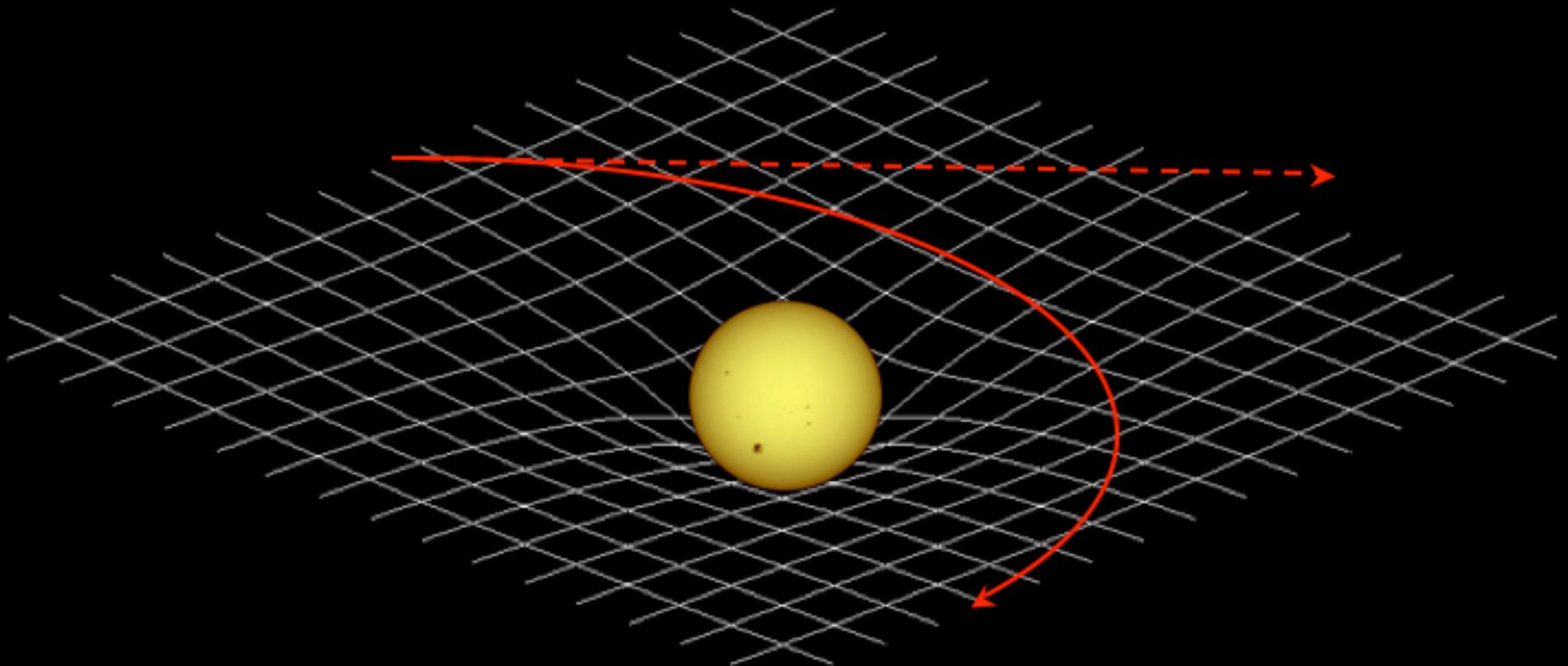
SORGENTI DI ONDE GRAVITAZIONALI
una nuova finestra sull'universo

GRAVITA' DESCRIVIBILE IN TERMINI DI CURVATURA DELLO SPAZIO TEMPO



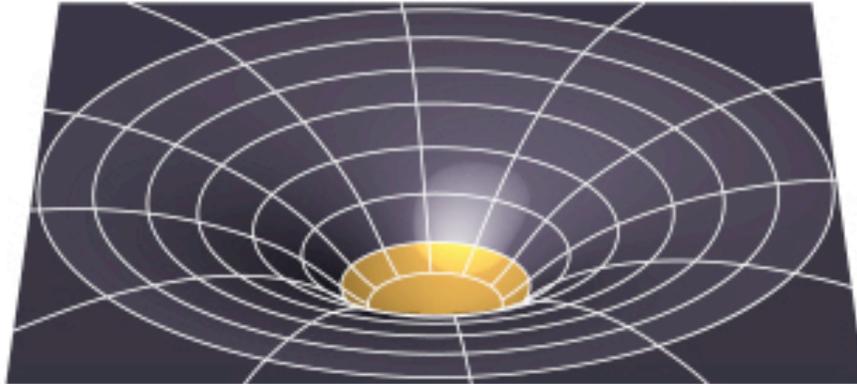
GRAVITA' DESCRIVIBILE IN TERMINI DI CURVATURA DELLO SPAZIO TEMPO

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

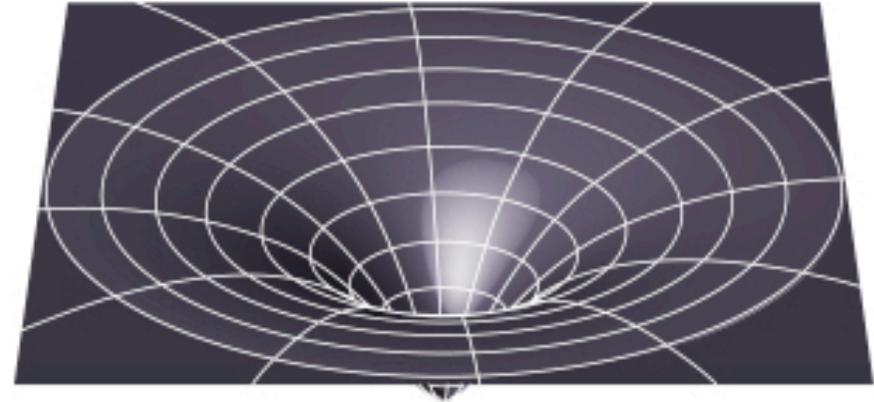


“space tells matter how to move:
matter tells space how to curve”

spacetime around the Sun today

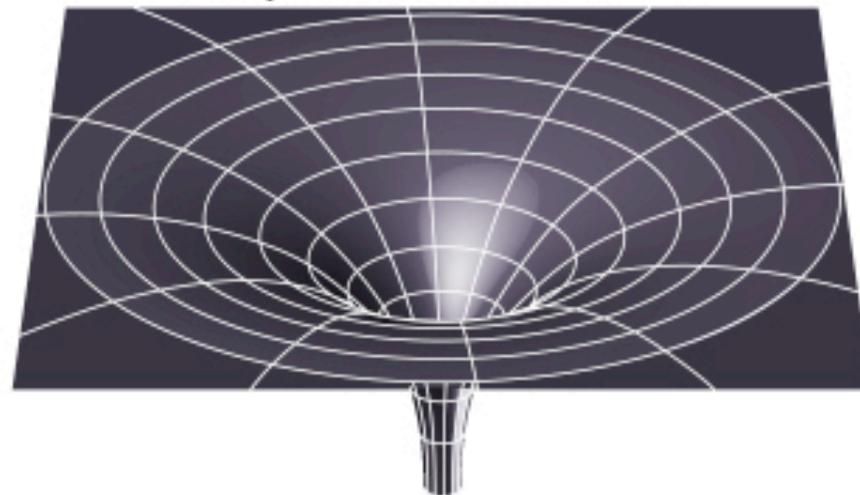


spacetime around the Sun
compressed to a white dwarf



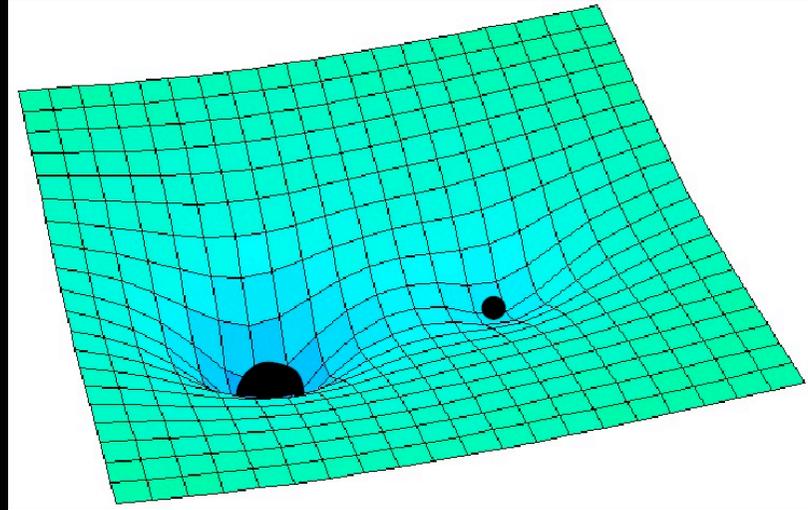
(a)

spacetime around the Sun
compressed to a black hole

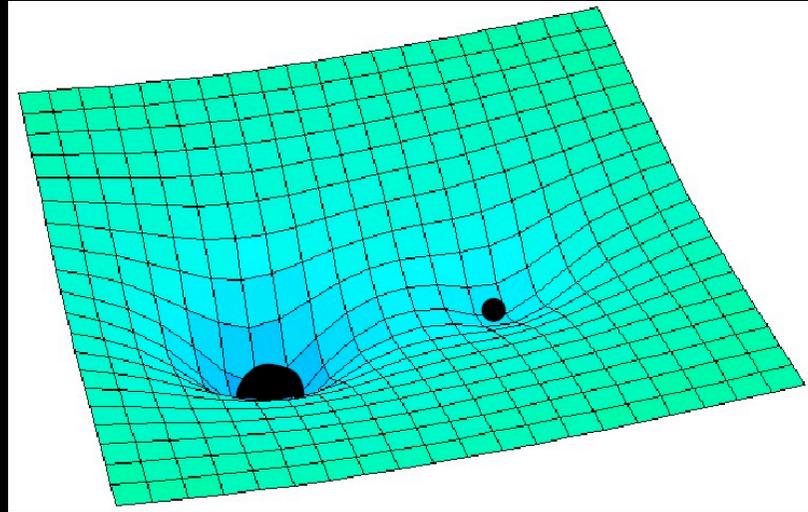


(b)

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

EMISSIONE **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

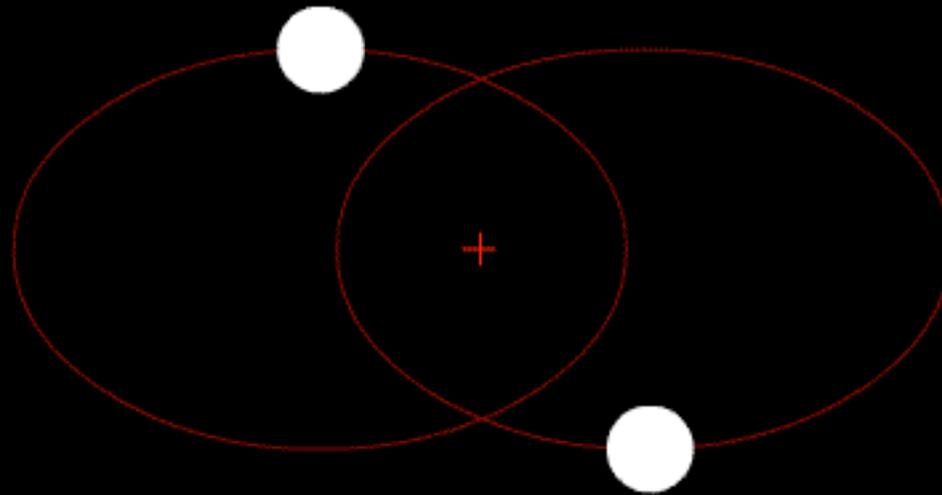
stabilita' su 1 parte su 10^{14}

sistematiche varizioni nei tempi di arrivo attribuite al moto orbitale

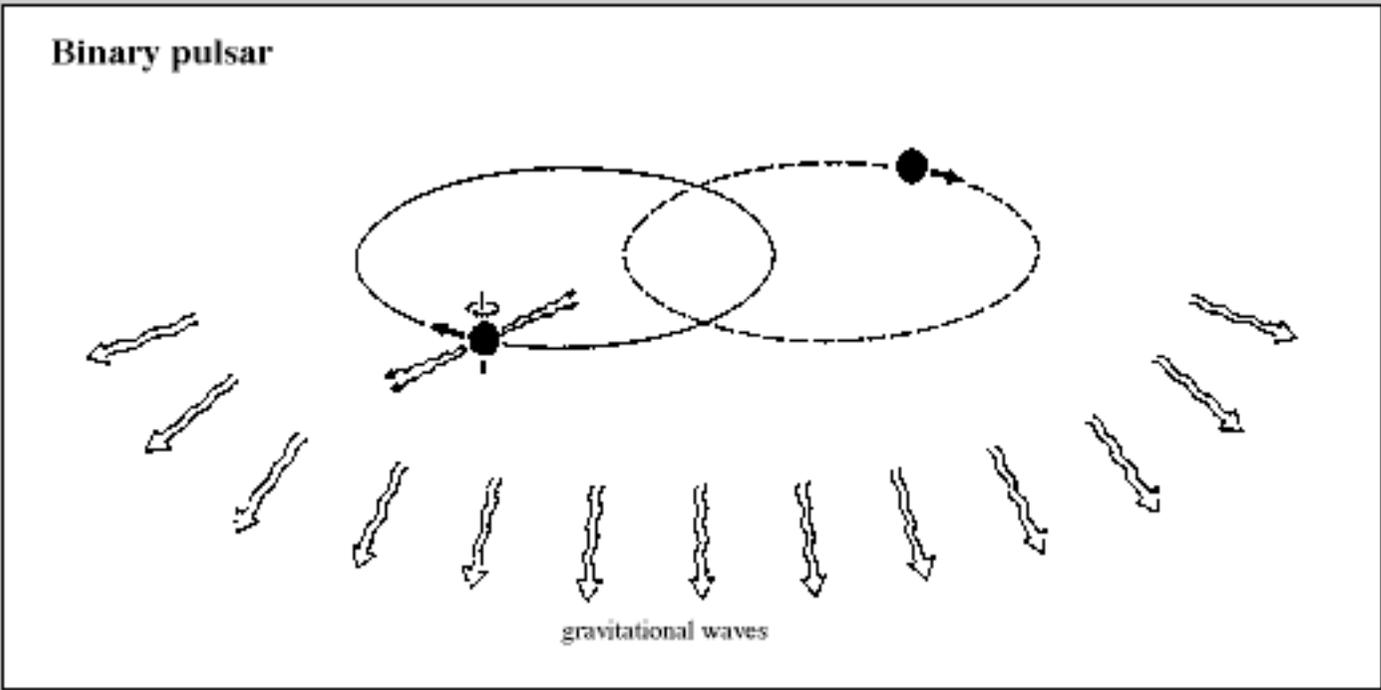
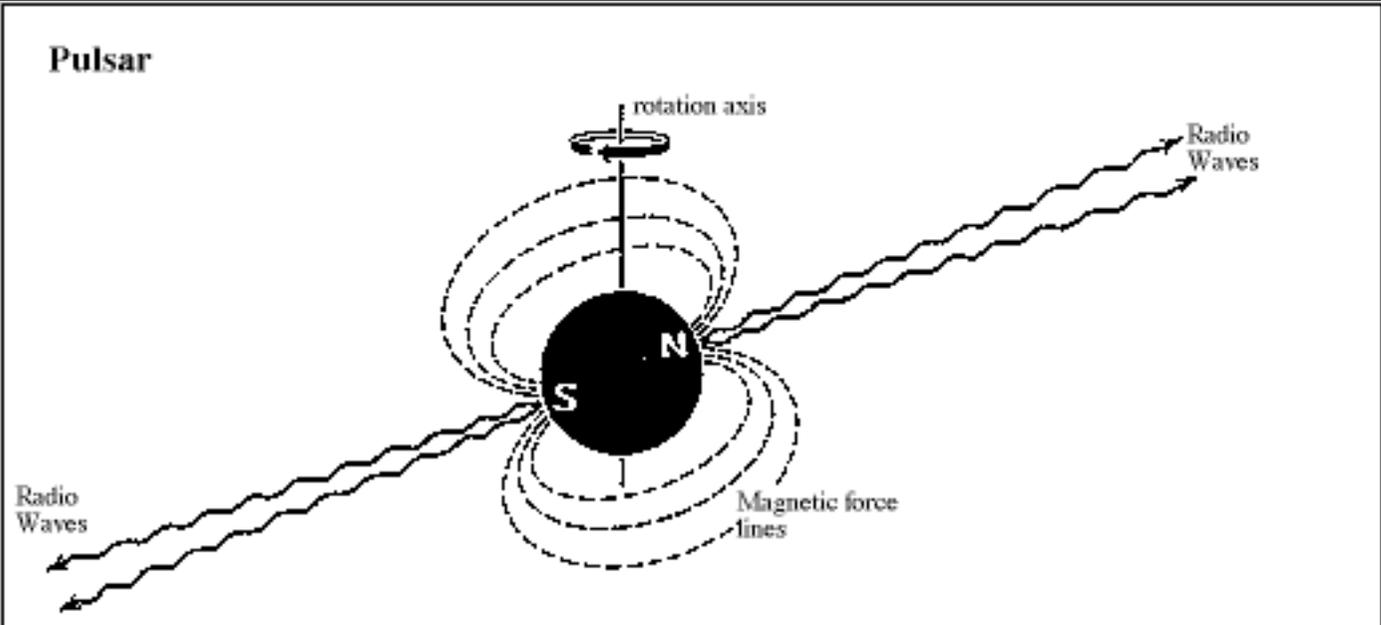
per PSR1913+16 di 7.75 ore

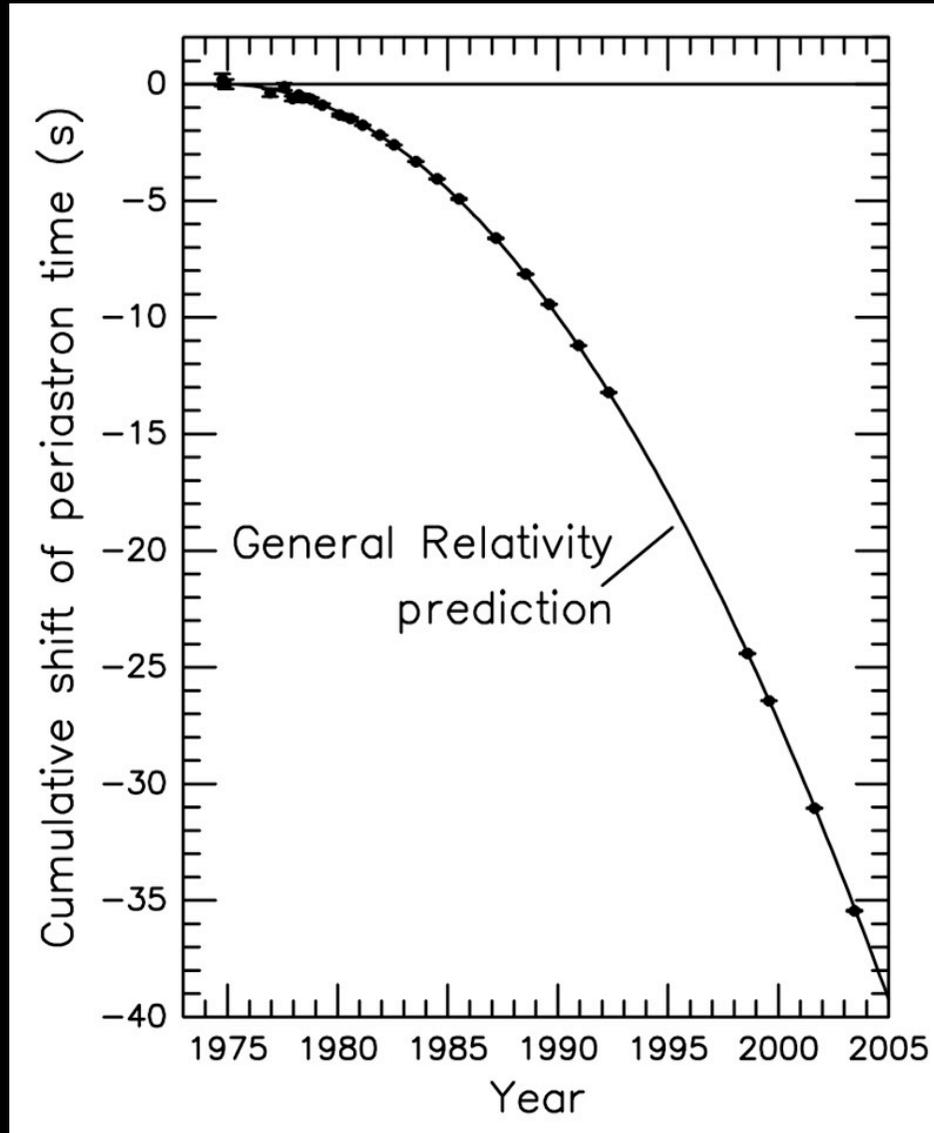
tasso di riduzione del periodo orbitale di 76.5 microsecondi per anno

ossia 3.5 metri all'anno



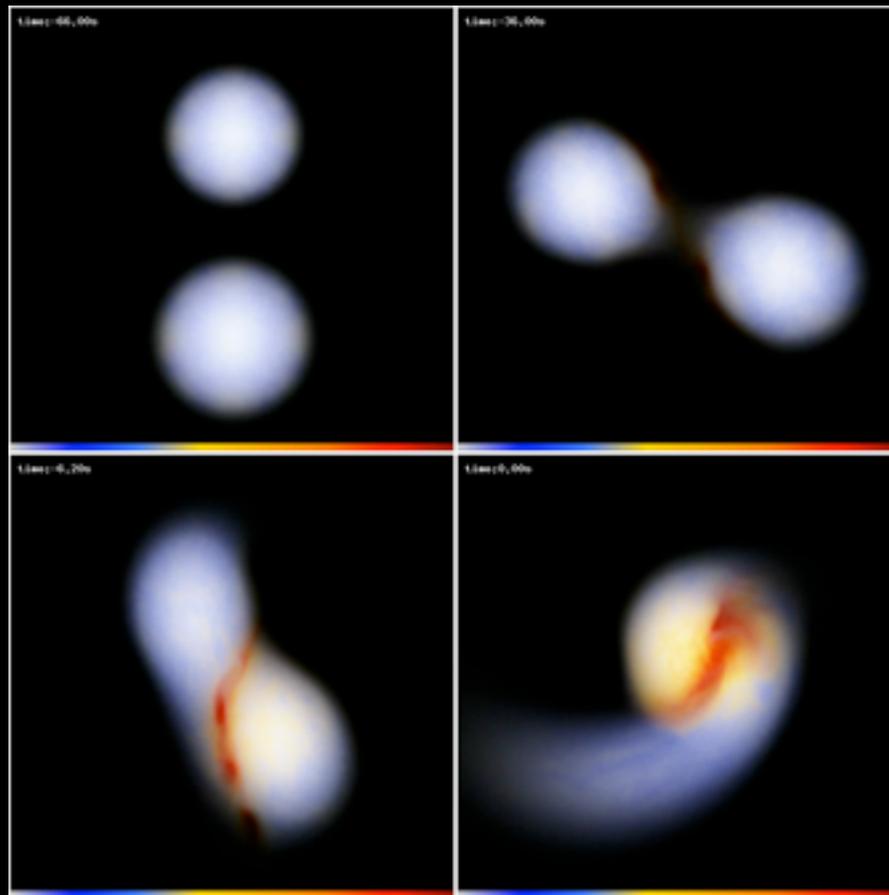
ONDE GRAVITAZIONALI ANCHE DA STELLE DI NEUTRONI IN BINARIE





Hulse & Taylor Nobel price 1993

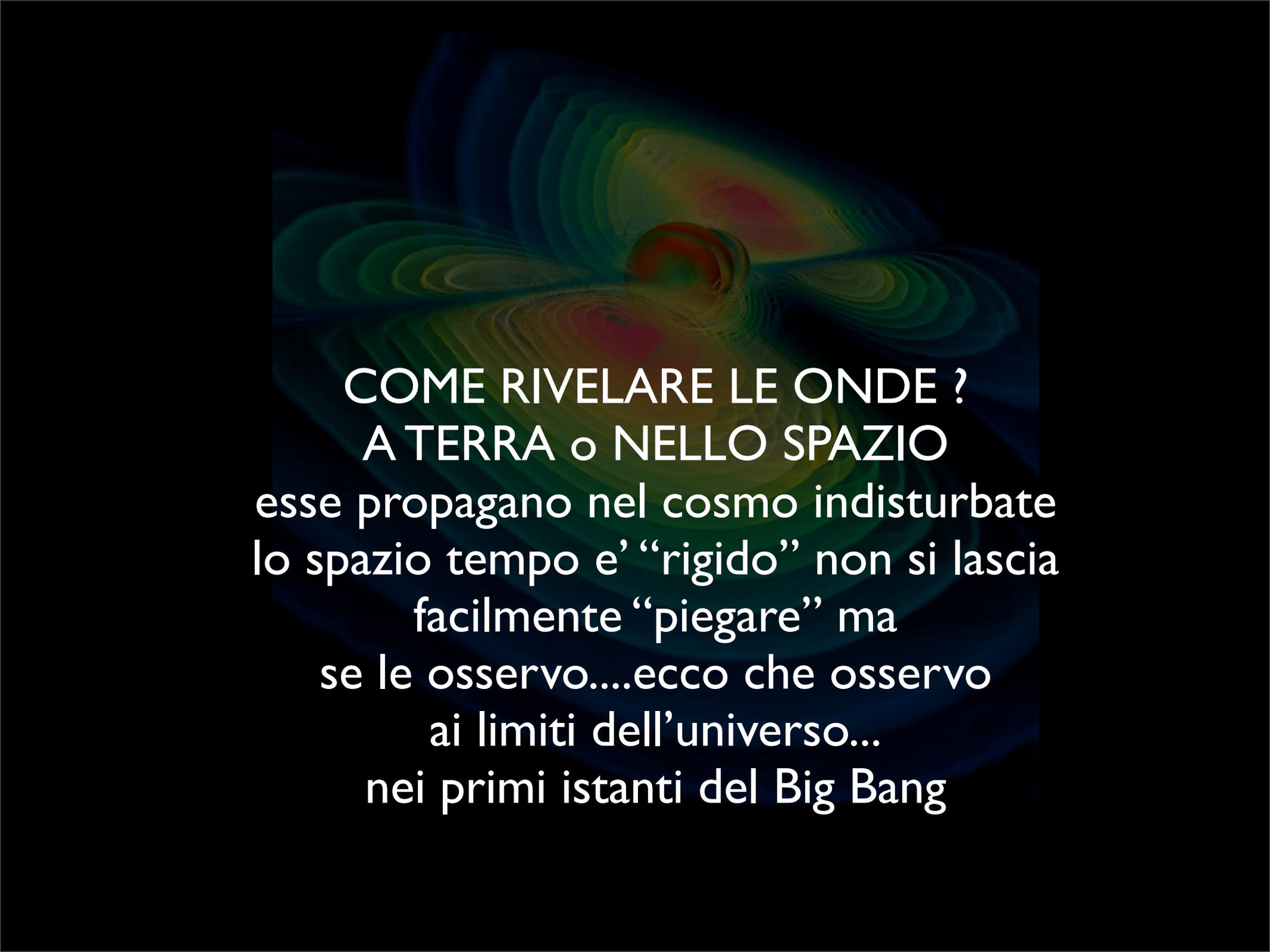
... stelle di neutroni in sistemi binari ...
decadimento dell'orbita
attraverso un lento spiraleggiare
esse si fondono in un'unica nuova
"stella"..... ossia un "buco nero"



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

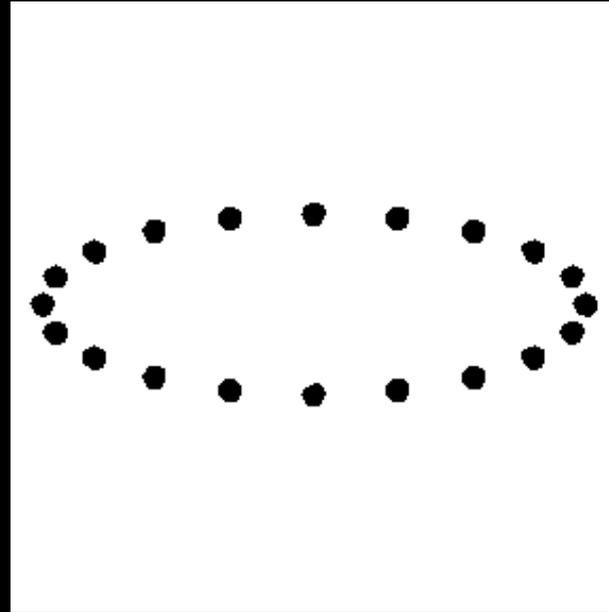
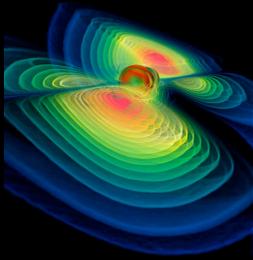
$$\Delta E_{\text{gw}} \simeq 5.7 \times 10^{-2} \mu c^2 \simeq 3 \times 10^{57} \left(\frac{\mu}{10^6 M_{\odot}} \right) \text{ erg}$$

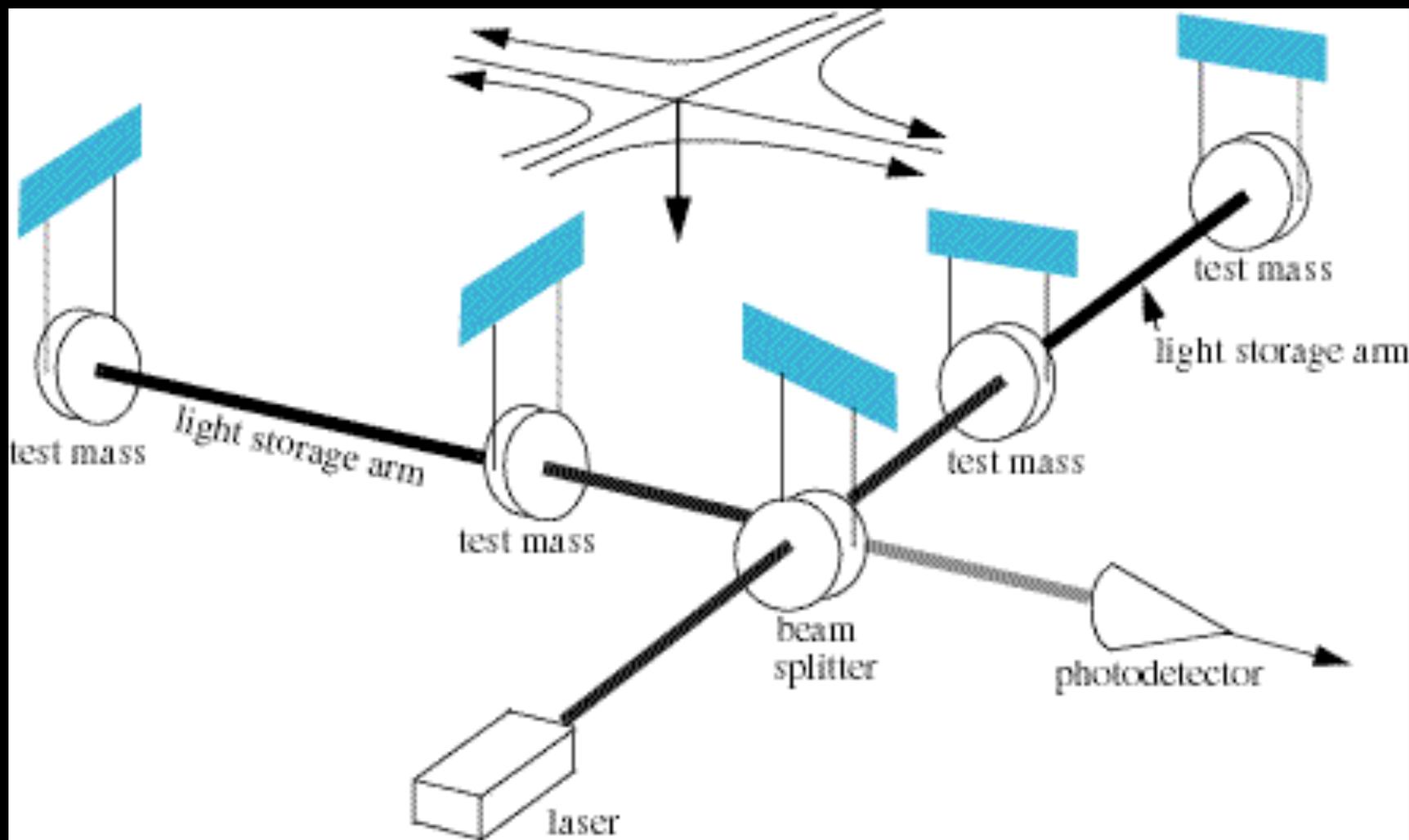
SIMULAZIONE “ARTISTICA”



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

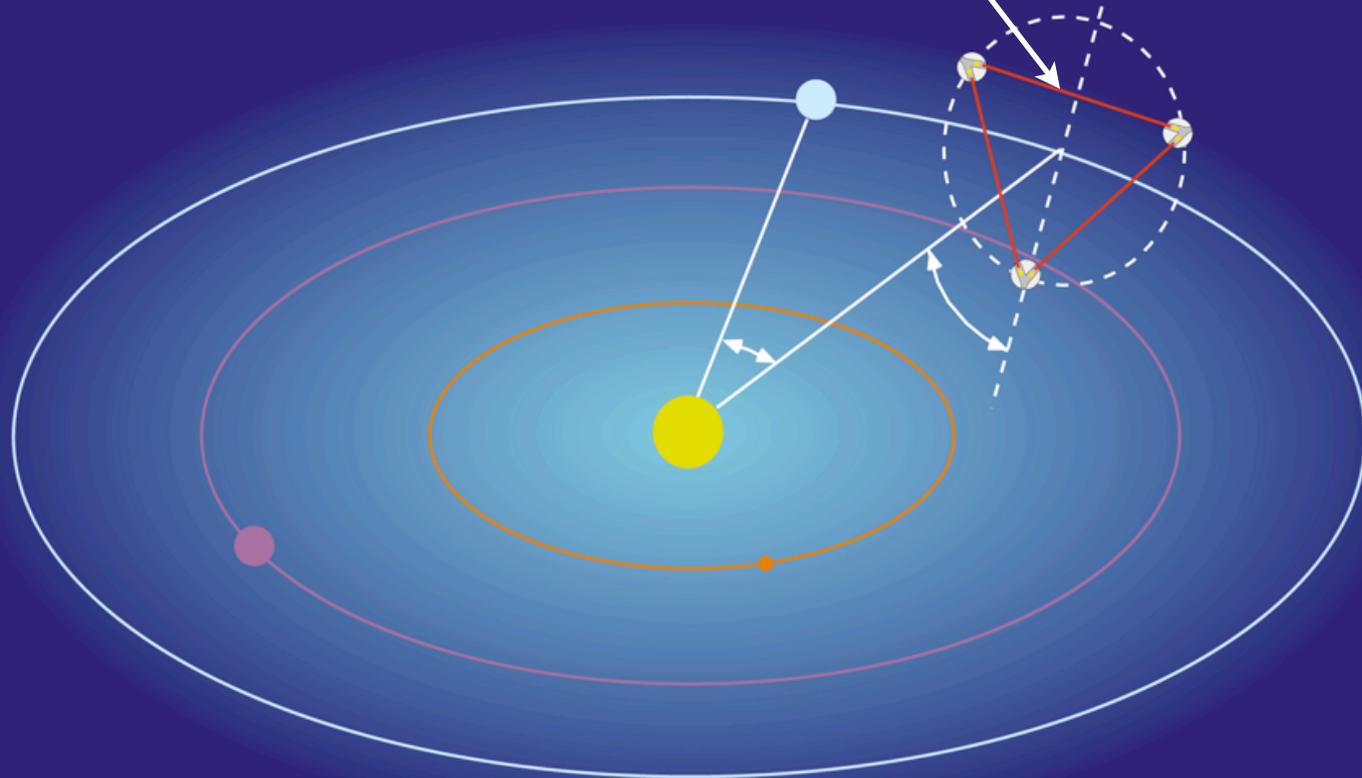
DALLA FORMA DELL'ONDA SI
DETERMINANO MASSA E SPIN
DEI BUCHI NERI IN
COALESCENZA

ESA COSMIC VISION 2015-2025

eLISA/NGO

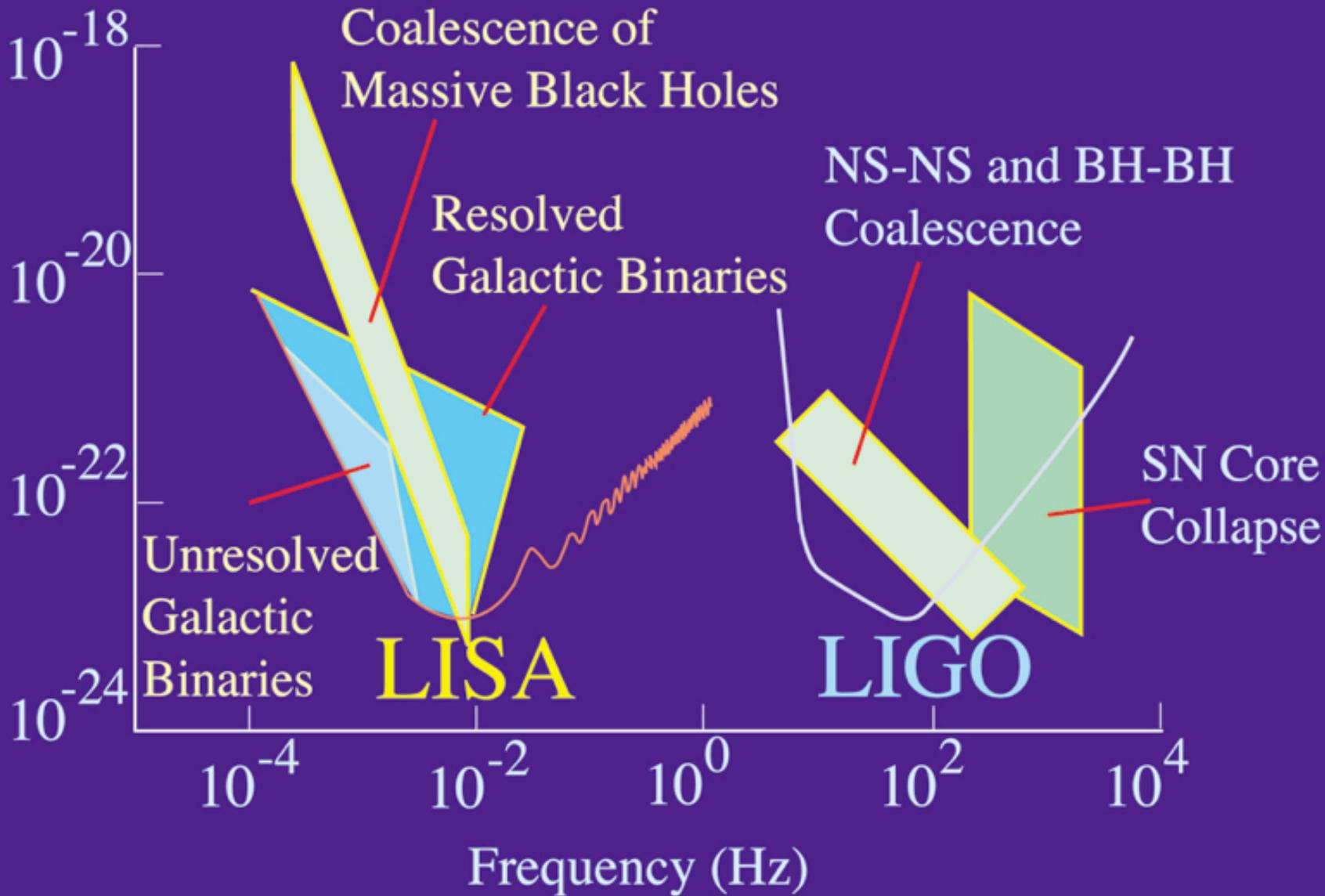
LASER INTERFEROMETER SPACE ANTENNA

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

