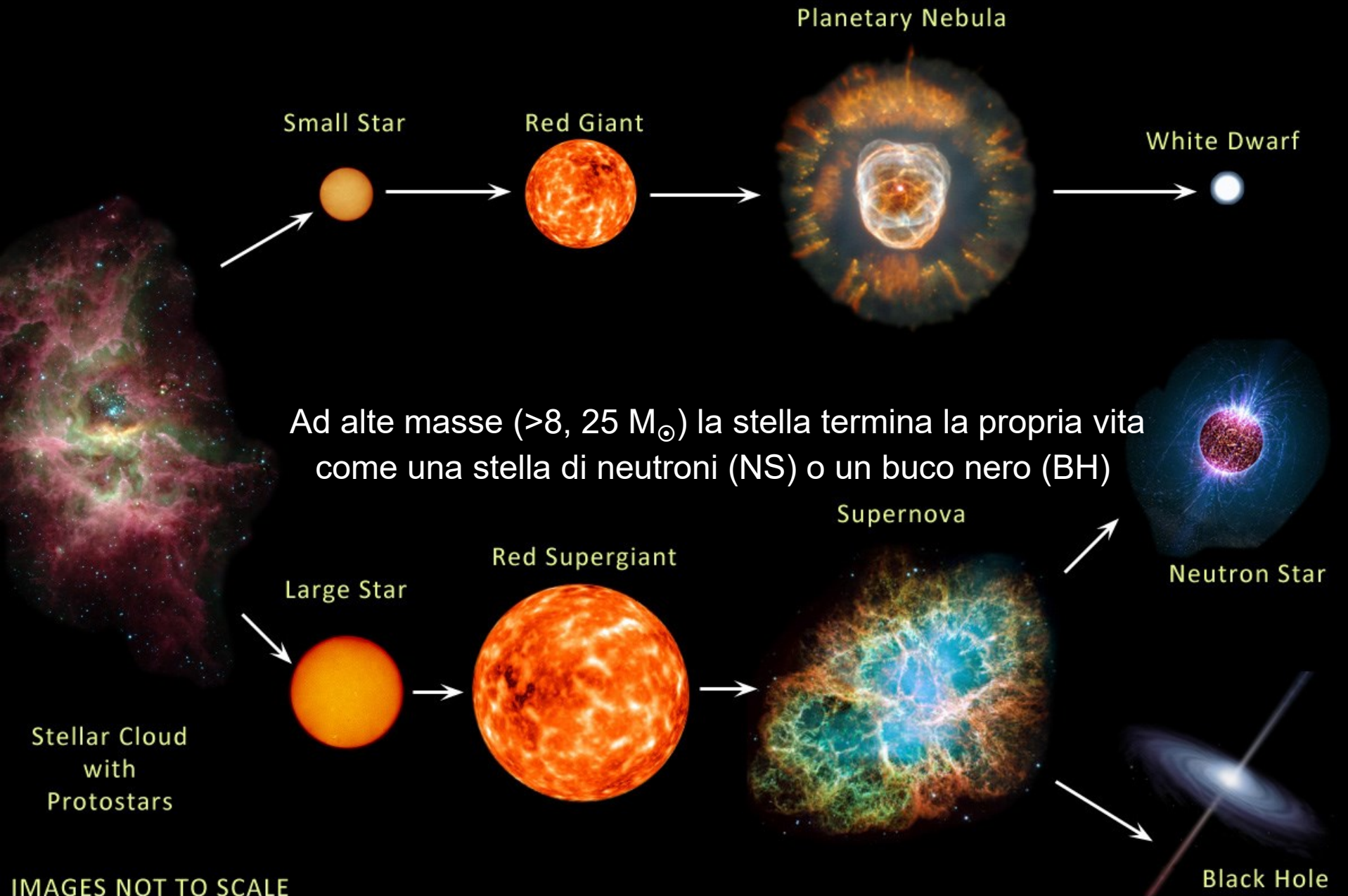


# Evidenze astrofisiche di corpi collassati: Pulsar e Buchi Neri

The image is a composite of two astronomical phenomena. On the left, a black hole is depicted with a glowing accretion disk in shades of orange and red, and a vertical beam of light extending upwards and downwards. On the right, a pulsar is shown as a bright blue sphere with a textured surface, emitting a powerful beam of light that extends towards the left, crossing the path of the black hole's beam.

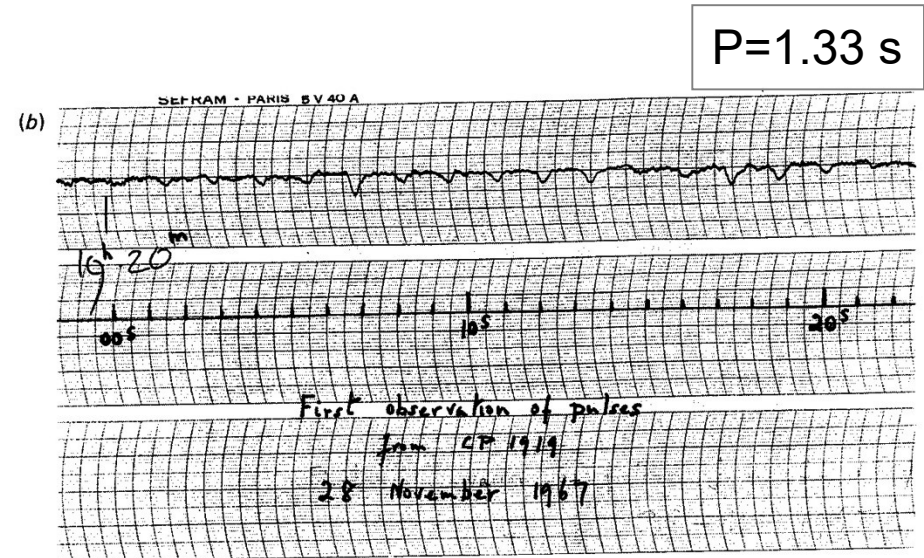
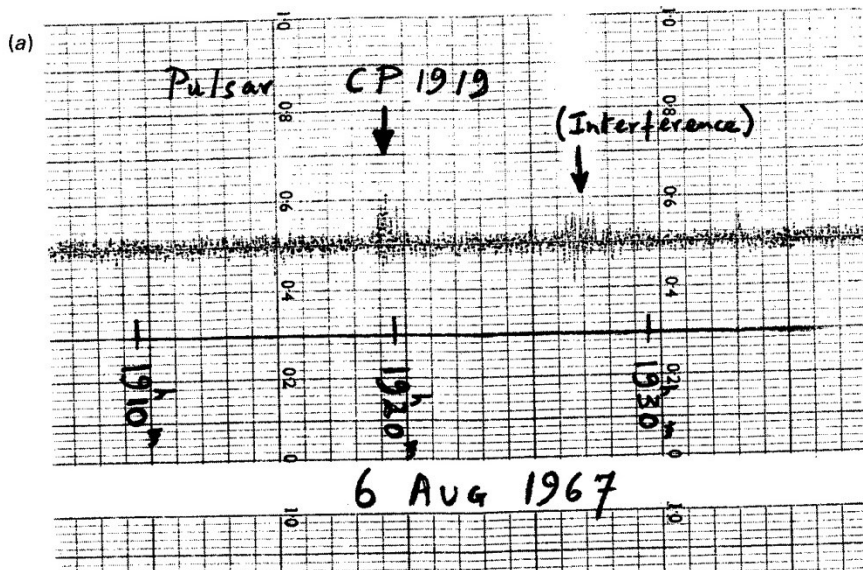
Cristian Vignali  
Dipartimento di Fisica e Astronomia,  
Universita` di Bologna

# EVOLUTION OF STARS



# Stelle di neutroni e pulsar

- ✓ Ipotizzate nel 1934 da Baade & Zwicky come prodotto dell'esplosione di una supernova *"With all reserve we advance the view that supernova represents the transition of an ordinary star into a new form of star, the **neutron star**, which would be the end point of stellar evolution. Such a star possess a very small radius and an extremely high density"*
- ✓ Troppo deboli per essere rivelate?
- ✓ 1967-1968: Pacini e Gold ipotizzarono che se le NS fossero state ruotanti e dotate di intensi campi magnetici, sarebbe stato possibile rivelarle
- ✓ **1967**: scoperta della prima **radio pulsar**, CP1919=PSR1919+21 (Hewish & Bell; Hewish ricevette il Premio Nobel per la Fisica nel 1974)



Accelerazione centripeta < accelerazione dovuta alla gravita`

$$a_{rot} < a_{grav} \rightarrow \Omega^2 R < \frac{GM}{R^2} \rightarrow \frac{4\pi^2}{P^2} R < \frac{GM}{R^2} \rightarrow P^2 > \frac{4\pi^2}{GM} R^3$$

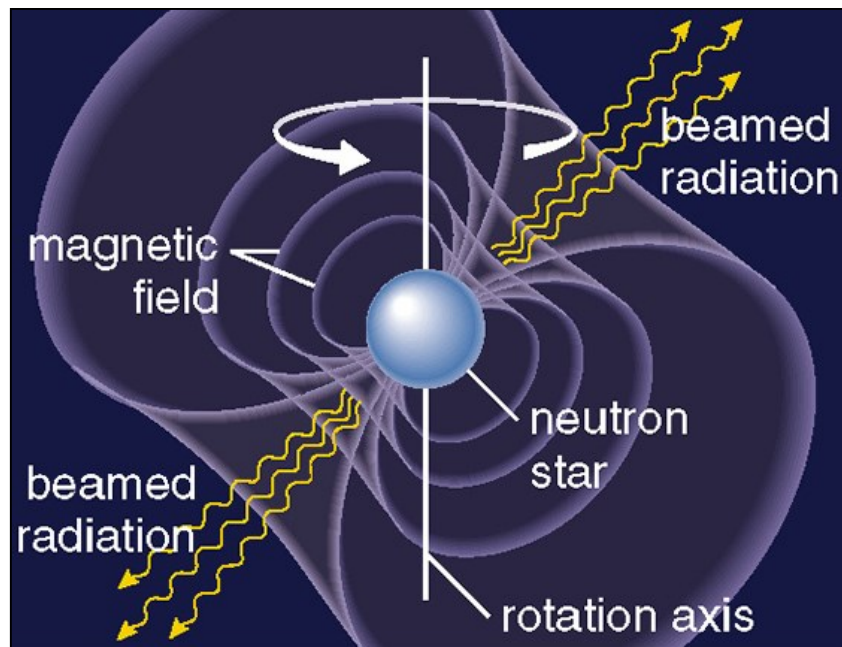
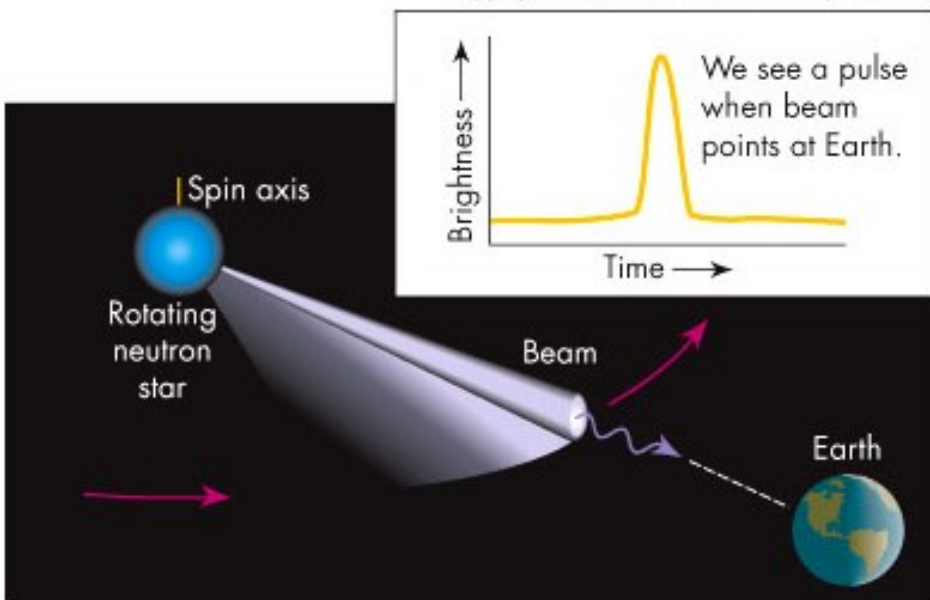
$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3}$$



$$P > \sqrt{\frac{3\pi}{G\rho}} \Leftrightarrow \rho > \frac{3\pi}{GP^2}$$

Assumendo  $M=1M_{\odot}$ ,  $R=10$  km,  $P=1.33$  s  $\rightarrow \rho > 10^8$  g/cm<sup>3</sup> ( $R \approx 10-20$  km)

Crab:  $P=0.033$  s  $\rightarrow \rho \approx 1.3 \times 10^{11}$  g/cm<sup>3</sup>



L'osservazione degli impulsi radio implica che l'asse magnetico e quello di rotazione delle pulsar non siano allineati. Gli impulsi radio sono emessi lungo l'asse magnetico

L'energia emessa è legata alla perdita di energia rotazionale, per cui le pulsar 'rallentano' nel tempo (fanno eccezione le milli-second pulsar)

# Pulsar binarie: PSR B1913+16

1975

Hulse & Taylor (1975): **una pulsar in un sistema binario** ( $P=7.75\text{hr}$ ,  $e=0.62$ , asse maggiore, minore=6.4, 5 secondi luce). Una sola delle due NS e' una PSR.

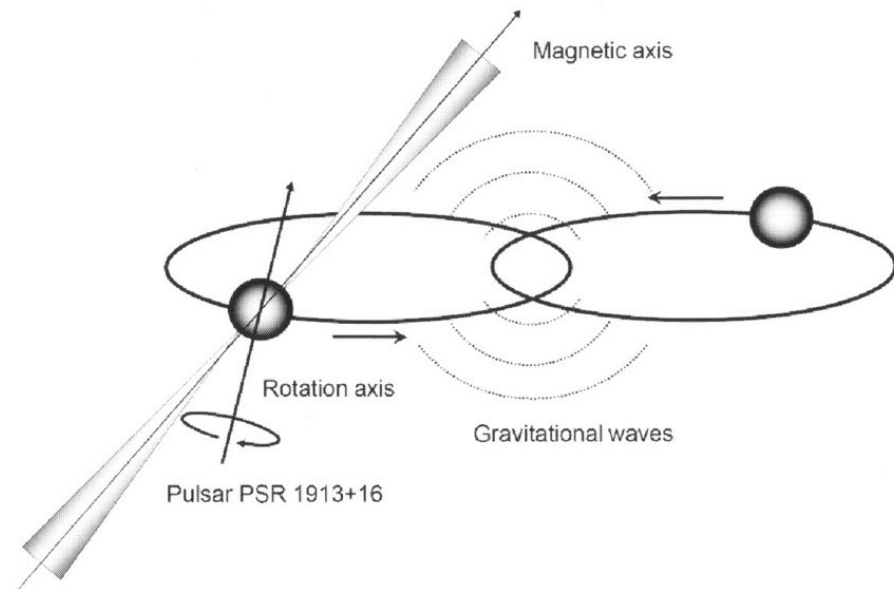
Hulse e Taylor ricevettero il Premio Nobel per la Fisica nel 1993

$$\frac{dE}{dt} \propto \frac{M_T \mu^2}{s^5}, \quad E_T \propto \frac{m^2}{s}$$
$$\tau = \frac{E_T}{dE/dt} \propto \frac{s^4}{m^3}$$
$$\xrightarrow{m=1.4 M_{\text{sun}}} 1.5 \times 10^{-28} \text{ s}^4 [\text{sec}]$$

s=separazione delle stelle

$M_T$  = massa totale

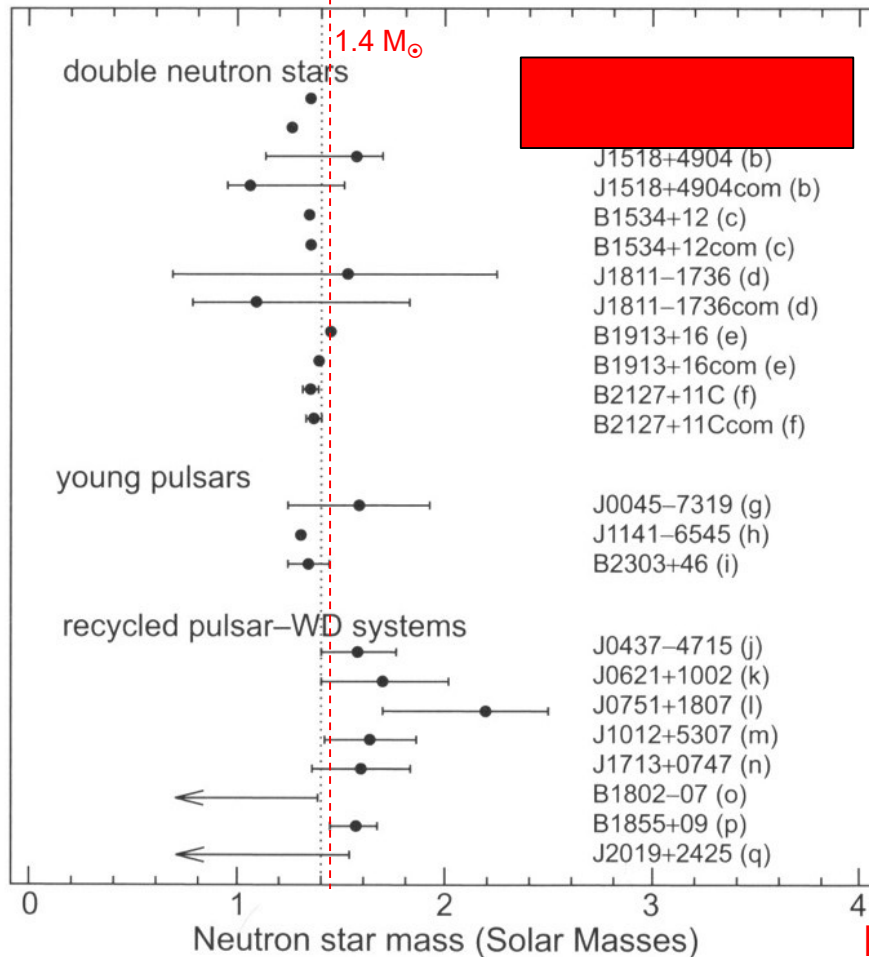
$\mu$  = massa ridotta



Ottimo test di relativita' generale: (a) l'accelerazione dell'orbita della binaria e la sua precessione sono in accordo con quanto previsto dalla RG; (b) il periodo dell'orbita della binaria cambia come  $-d\Omega/dt \approx \Omega^5$  in seguito alla perdita di energia associata all'emissione di onde gravitazionali

# Una pulsar binaria particolare: PSR J0737-3039

2003



Doppia PSR (entrambe le NS sono pulsar)

$$P_{\text{orb}} = 2.4 \text{ hr}, e = 0.09$$

(Burgay et al. 2003, studentessa di dottorato a Bologna, ora all'Osservatorio Astronomico di Cagliari; Lyne et al. 2004)

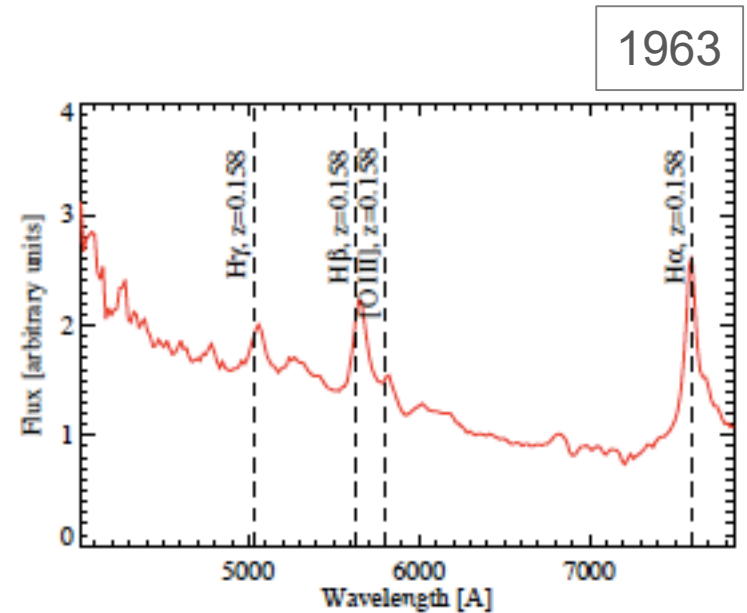
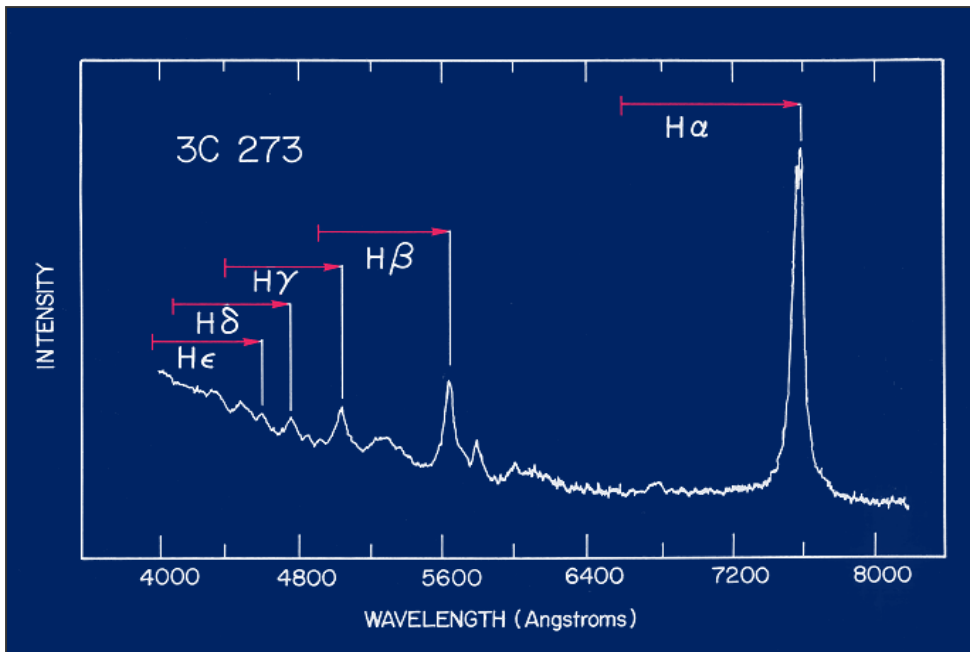
Test di relatività generale: le osservazioni sono in accordo entro 0.05%

Il miglior laboratorio per misure di precisione

Periodo di spin (ms) =  $22.69937884809636 \pm 0.00000000000003$  (misurato entro 30 atto-seconds)

Periodo orbitale (d) =  $0.102251562465 \pm 0.000000000002$  (i.e. 2.45h misurato entro 173 nano-seconds)

# Anni 60', densi di scoperte...



Schmidt et al. (1963; articolo su *Nature*): **3C 273**:  $z=0.158$  ( $v_r = 47500$  km/s)



# Analogie nei meccanismi di emissione

Astrophysical Letters, 1969, Vol. 4, pp. 103-105

© GORDON AND BREACH, SCIENCE PUBLISHERS LTD. Printed in Glasgow, Scotland

1969

## ROTATING COLLAPSED OBJECTS, QUASARS AND SUPERNOVA REMNANTS

A. CAVALIERE

*Laboratorio Gas Ionizzati Frascati (Rome) and Istituto di Fisica, Bologna, Italy*

F. PACINI†

*Laboratorio di Astrofisica Frascati (Rome), Rome, Italy*

AND

G. SETTI

*Istituto di Fisica, Bologna, Italy*

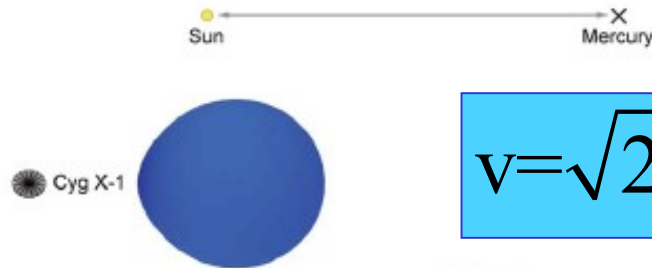
By analogy with the case of the Crab Nebula, we suggest that the high energy activity of quasars and similar objects may result from the presence of a spinning, magnetic supermassive star.

During the 1966 Symposium on Relativistic Astrophysics, Woltjer stressed some striking similarities between the phenomenology of quasars and that of the Crab Nebula (Woltjer 1966). In particular, in both cases we must require an energetic stockpile able to provide a continuous injection of relativistic particles and in both cases the center of activity seems to be connected with a small central region.

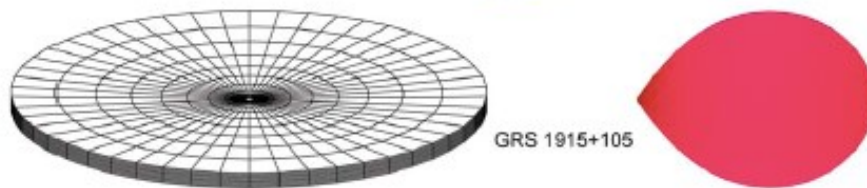
*We must require an energetic stockpile able to provide a continuous injection of relativistic particles ...and the center of activity seems to be connected with a **small central region**. Energetic reasons suggest the presence of a mass of about  $10^9$ - $10^{10}$  solar masses collapsed near the gravitational radius.*

# Buchi neri galattici

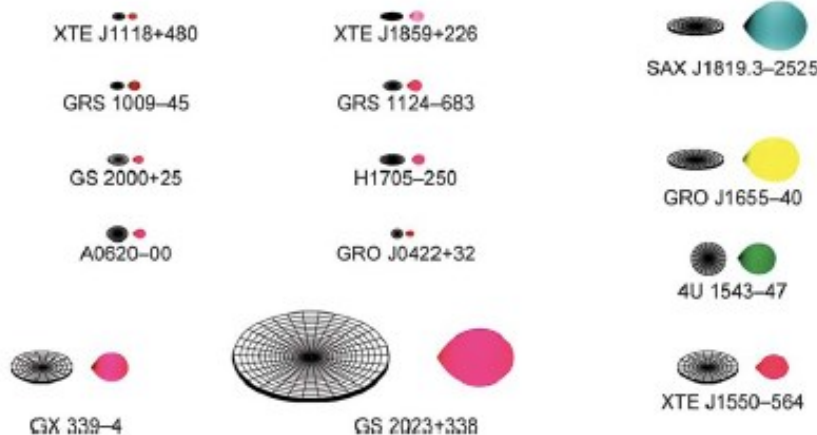
1783: John Mitchell fece notare alla Royal Society di Londra che, se una stella fosse stata sufficientemente massiccia, la velocità di fuga dalla sua superficie sarebbe stata superiore alla velocità della luce (ossia niente esce dalla stella)



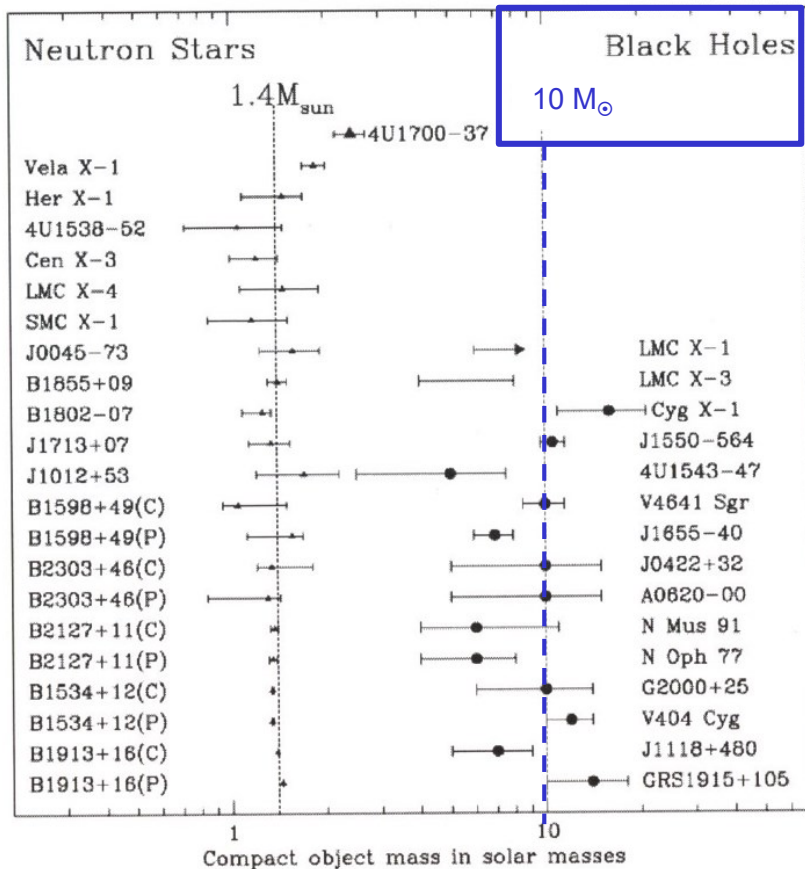
$$v = \sqrt{2GM/r} \rightarrow r_g = 2GM/c^2$$



$R_g$  = raggio di Schwarzschild  
 $\approx 3 (M/M_\odot) \text{ km}$



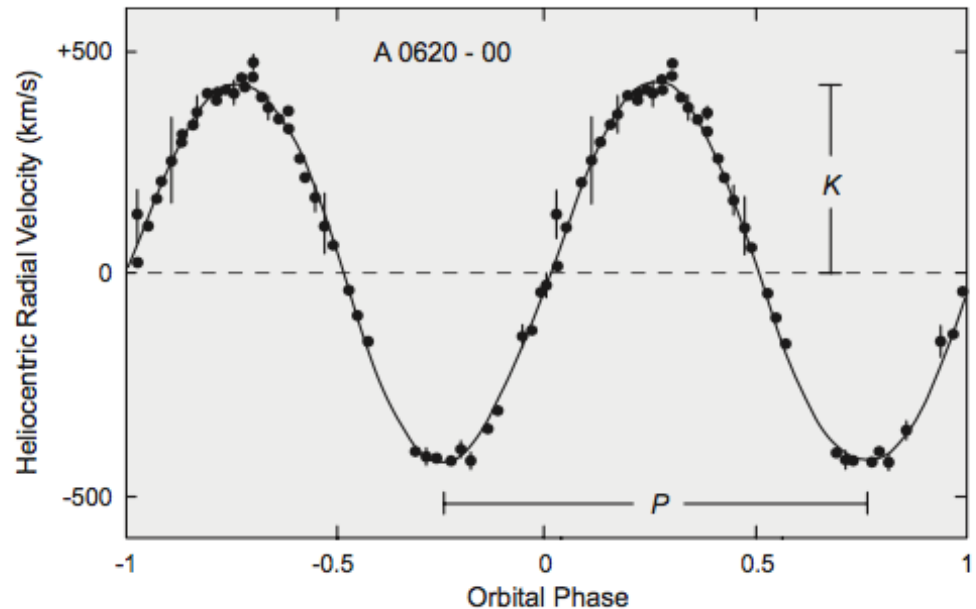
A differenza delle stelle di neutroni, per i BH non si può parlare di superficie ma di ultima orbita circolare stabile, dell'ordine di alcuni  $R_g$



Stimare le masse dei BHs e' sempre complicato. Un metodo prevede il calcolo della funzione di massa utilizzando la III legge di Keplero e la curva di velocita' radiale. Se  $f(M) > 3$ , allora la stella compatta (massa  $M_X$ ) e' ragionevolmente un **buco nero**

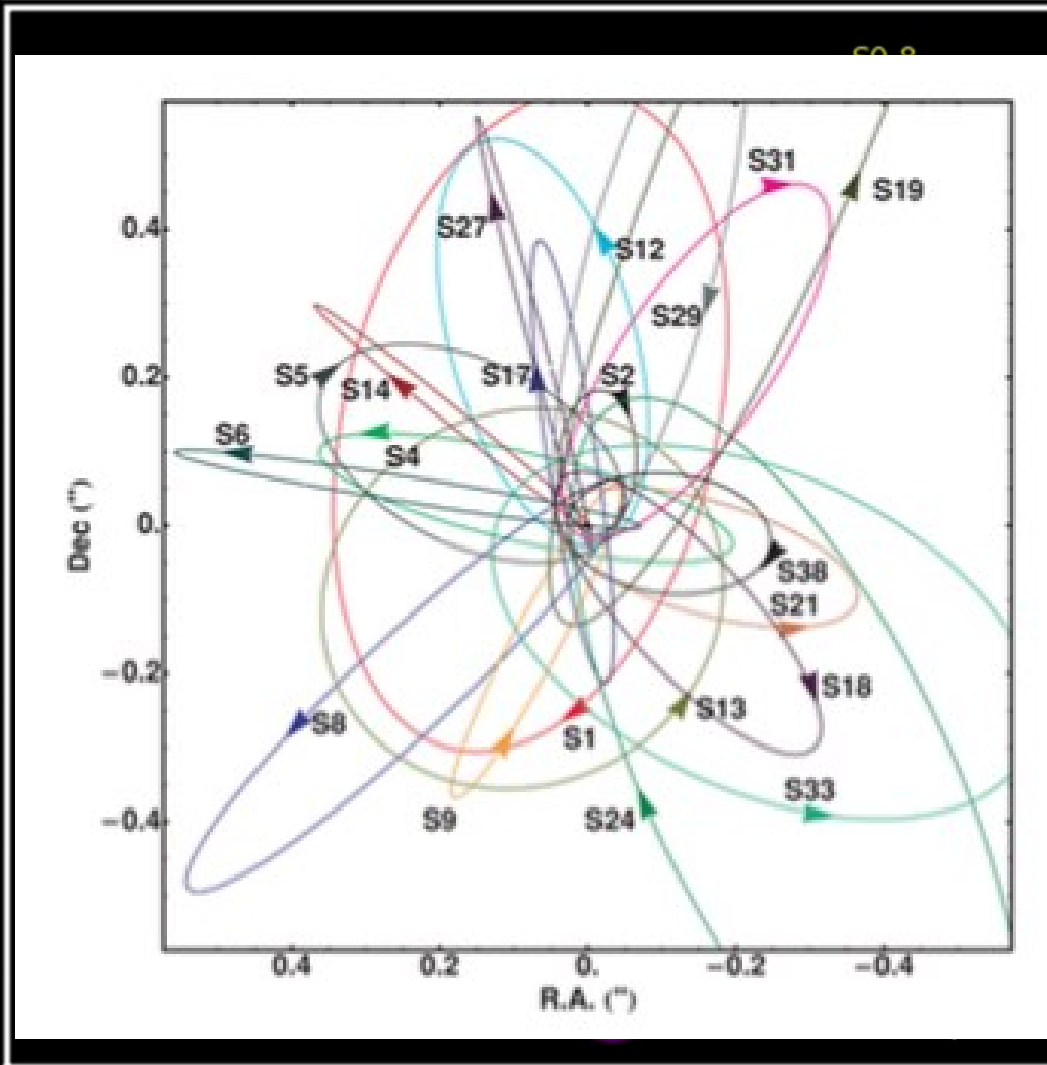
$$f(M) = \frac{M_X^3 (\sin i)^3}{(M_X + M_c)^2} = \frac{PK^3}{2\pi G}$$

Funzione di massa



# Sgr A\*, il buco nero al centro della della Galassia

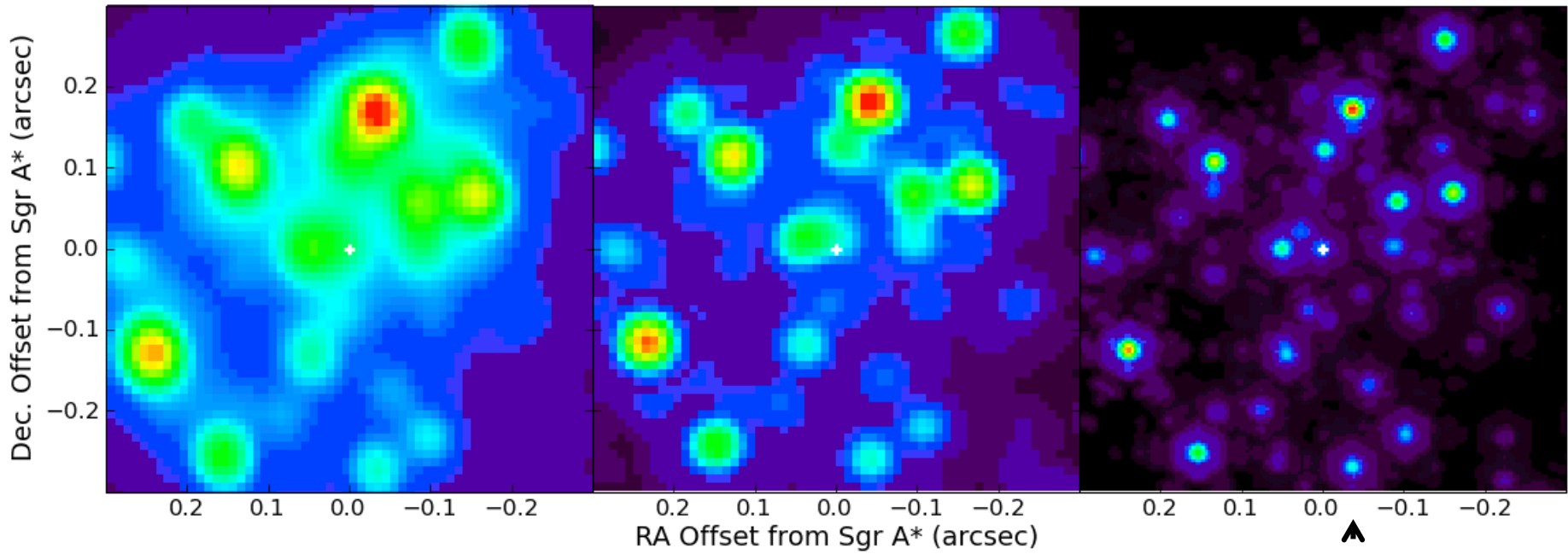
*Monitoring* del moto delle stelle in prossimità del BH al centro della nostra Galassia (Sgr A\*): le stelle si muovono su orbite kepleriane intorno ad un comune fuoco.  $M_{\text{BH}} = (4.4 \pm 0.4) \times 10^6 M_{\odot}$   
(Genzel group)



Keck + Current AO

Keck + NGAO

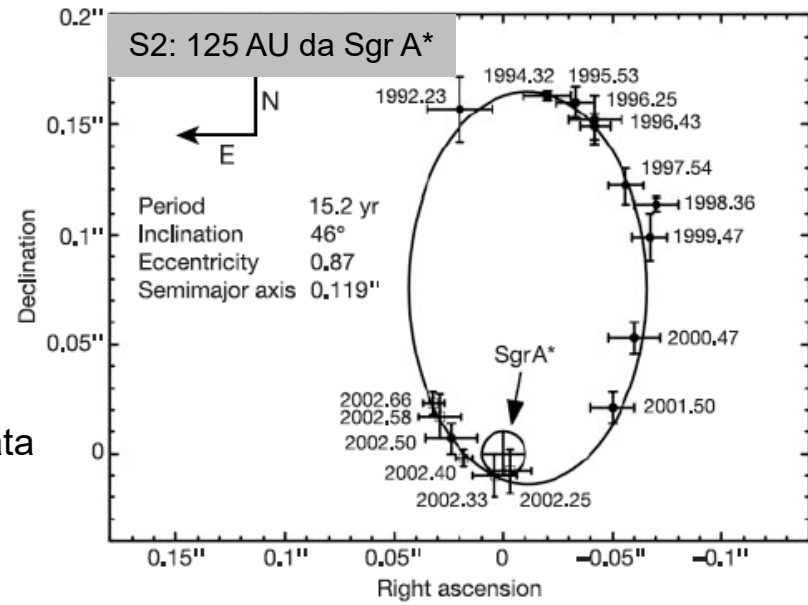
30 m ELT + AO



[http://www.astro.ucla.edu/~ghezgroup/gc/pictures/Future\\_GCorbits.shtml](http://www.astro.ucla.edu/~ghezgroup/gc/pictures/Future_GCorbits.shtml)

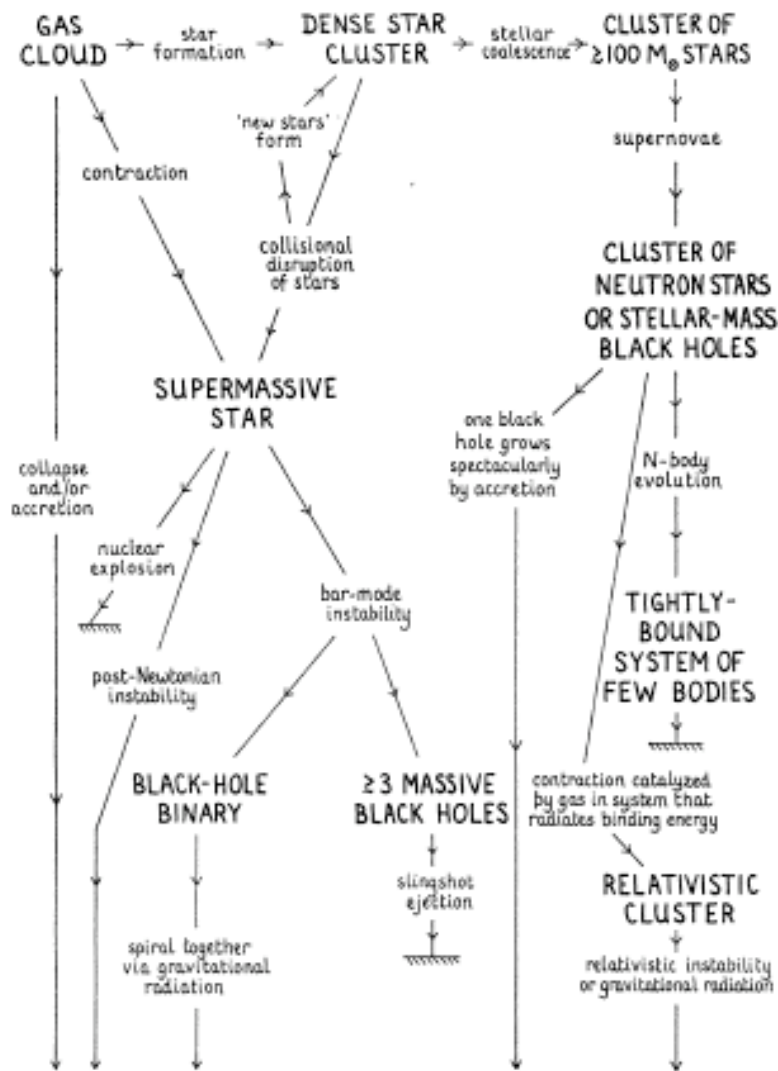
Sgr A\* e' un tipico esempio di buco nero molto poco attivo

La posizione di 28 stelle e' stata "tracciata" per quasi 20 anni



↑  
ELT: telescopio di prossima generazione (della classe dei 30m)

# Come si formano i buchi neri massicci?



massive black hole

Rees 1978, 1984; Lynden-Bell 1969

L'energia in gioco non puo' essere spiegata da processi di tipo stellare (efficienze di conversione di H in He  $\approx 0.7\%$ )  $\rightarrow$

La soluzione consiste in accrescimento di materia su un oggetto compatto

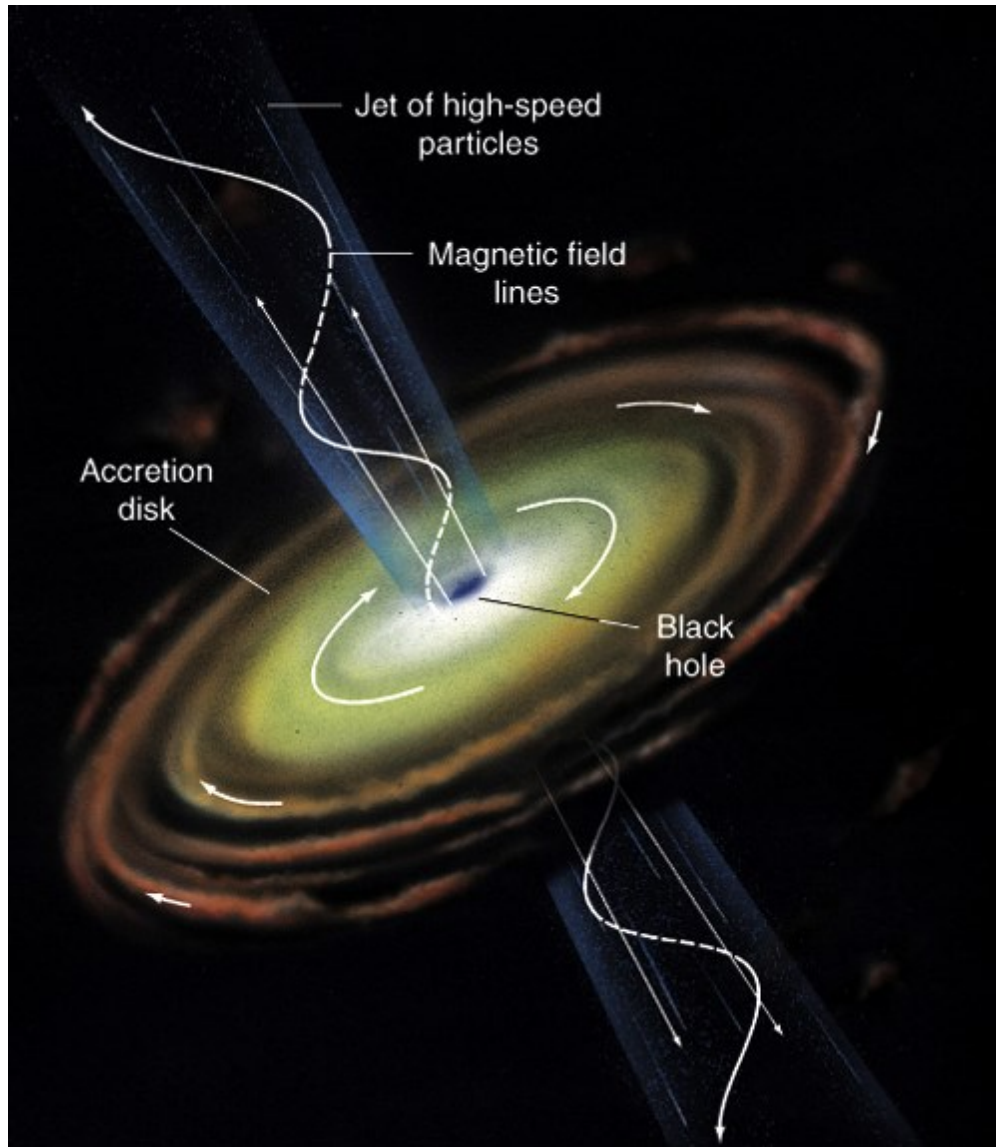
$$L = \frac{GM\dot{M}}{R} = \eta \dot{M} c^2$$

$\eta$ =efficienza di conversione di energia gravitazionale in radiazione

Assumendo un tasso di accrescimento di  $1M_{\odot}/\text{anno}$  e  $\eta=0.1$ ,  $L \approx 6 \times 10^{45}$  erg/s

Praticamente un BH al centro di ogni galassia, ma solo una modesta frazione di questi e' attiva

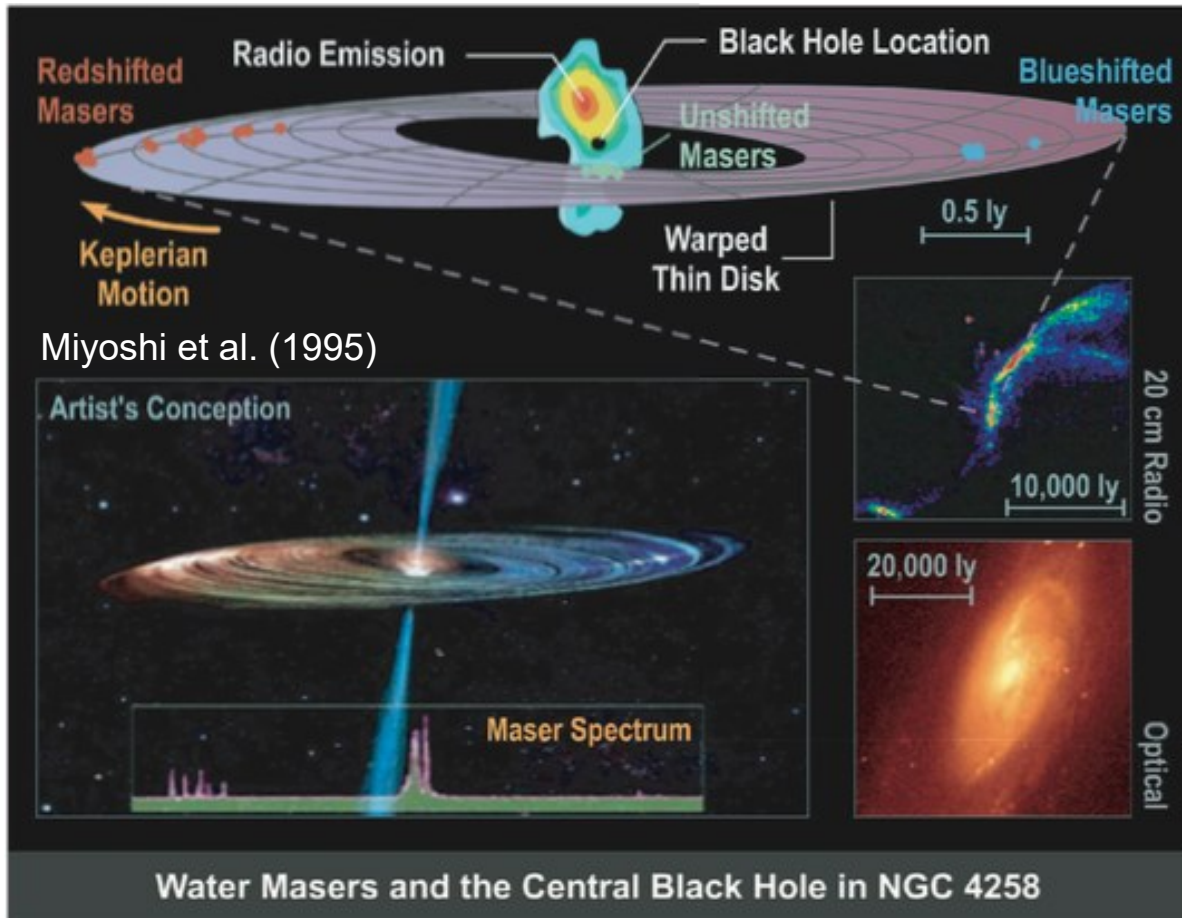
# Quando un buco nero diventa attivo: i Nuclei Galattici Attivi (AGN)



## INGREDIENTI

- ✓ Una sorgente centrale compatta caratterizzata da un intenso campo gravitazionale.  
 $M_{\text{BH}} = 10^6 - 10^9 M_{\odot}$
- ✓ Il gas in caduta forma un disco di accrescimento intorno al BH
- ✓ Il gas spiraleggia verso il centro cedendo momento angolare, si riscalda ed emette ad alte temperature come un corpo nero
- ✓ Negli oggetti radio-emittenti possiamo osservare anche getti in direzione perpendicolare al disco di accrescimento

# Il maser dell'acqua in NGC 4258



Transizioni della molecola dell'acqua nella struttura a disco possono produrre emissione radio maser. La velocità dei blob di gas lungo la linea di vista è caratterizzata da un moto kepleriano ( $v \propto R^{-1/2}$ ) può essere misurata accuratamente tramite misure Doppler →

$$M_{\text{BH}} = (4.00 \pm 0.09) \times 10^7 M_{\odot}$$

Osservazioni VLBI (interferometriche, 1.35 cm), elevata risoluzione angolare. Scale dell'ordine di 0.1–0.5 pc

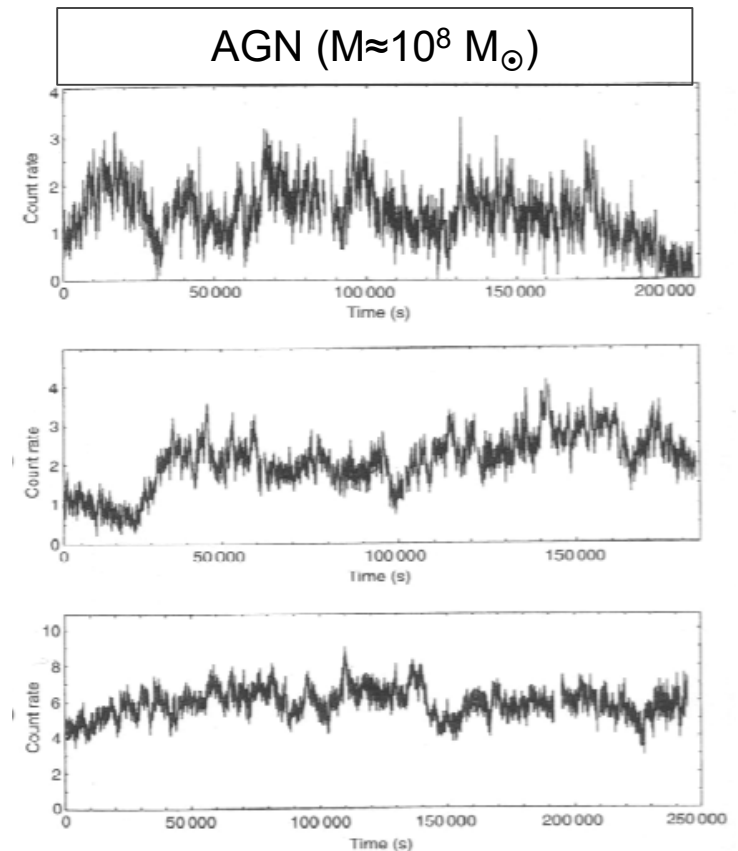
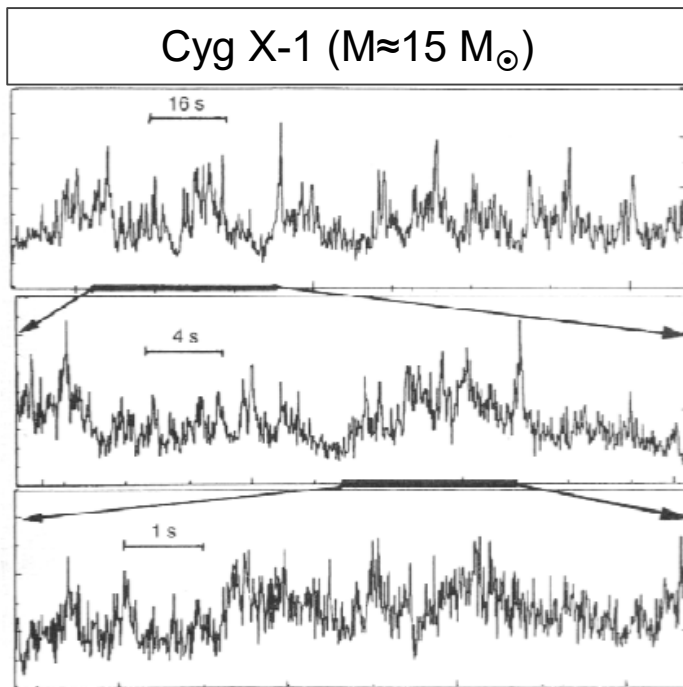


# Misure di variabilita` in BHs

$$T_{\min} \approx \frac{r_g}{c} = 10^{-5} \frac{M}{M_{\text{sun}}} \text{ s}$$

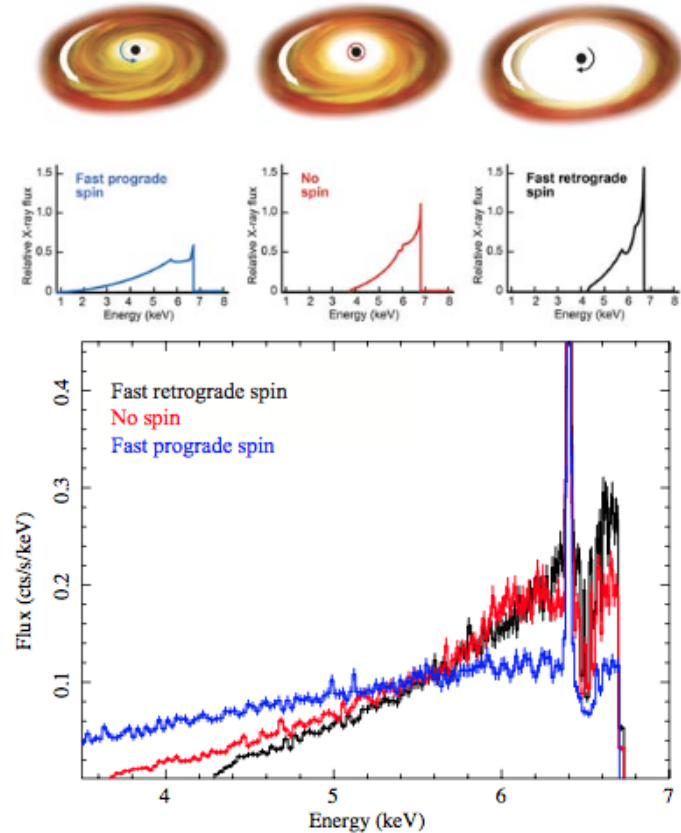
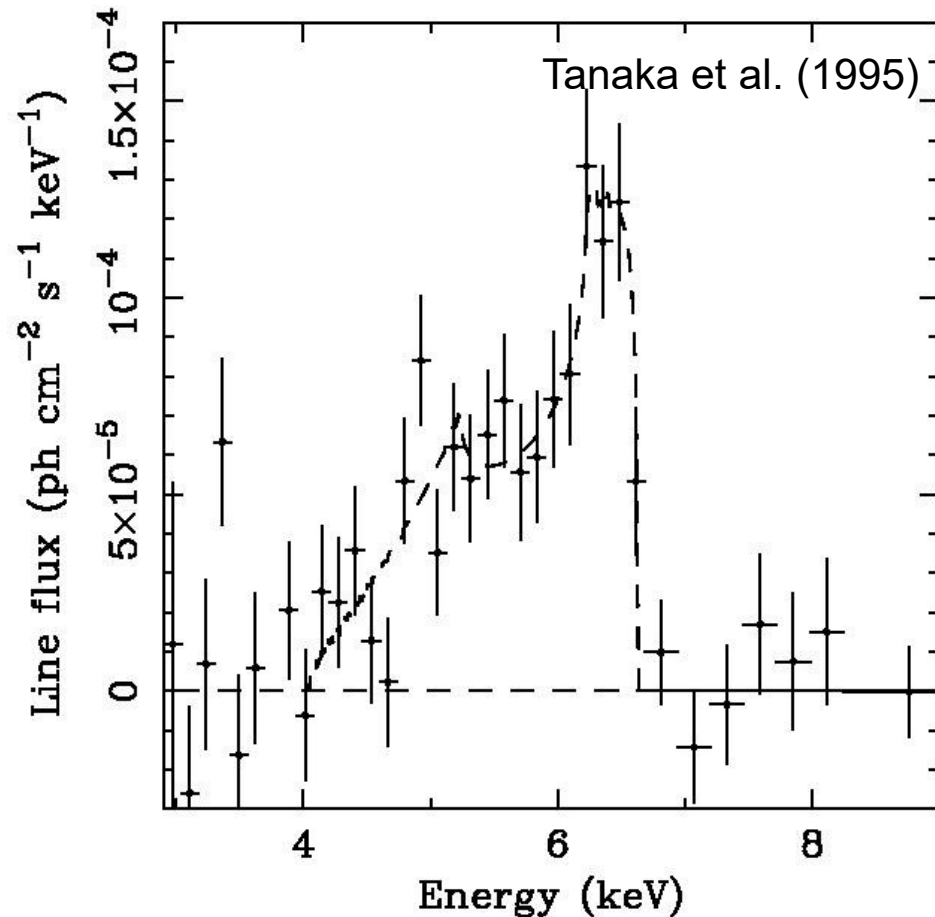
Un tempo scala di variabilita` in corrispondenza di un BH puo` essere quello legato alle dimensioni dell'ultima orbita stabile  $\approx$  raggio di Schwarzschild.

In altre parole, e` il tempo scala minimo che puo` essere associato ad un oggetto di massa M in assenza di fenomeni quali il *beaming* relativistico



Il tempo di variabilita` (*flickering*) scala con la massa (<ms per binarie galattiche vs. hr per AGN)

# Presenza di righe allargate gravitazionalmente in BHs



Il forte campo gravitazionale in prossimità di un buco nero (galattico o extragalattico) e di stelle di neutroni produce un allargamento gravitazionale della riga del ferro (a cui si sommano effetti Doppler 'classici')

# JUST OUTSIDE THE BOX



...said the black hole to the alien