

Lezione Fermi 12

Luciano Maiani, AA 14-15

Buchi Neri nella Gravita' Classica

Sommario

Molte informazioni e figure, di questa e di altre lezioni, sono prese da:
Universe, di Roger Freedman e William J. Kaufmann (2007)
Black Holes and Time Warps, K. Thorne

1. Relativita' Generale, 100 anni fa
2. la soluzione di Schwarzschild
3. Un "buco nero"
4. Collasso nel buco nero
5. Stelle a raggi X: Cyg X-1
6. Gamma Ray Bursters
7. Buchi neri supermassivi
8. Conclusioni-prima parte

1. La Relativita' generale ha 100 anni

- 1915. Albert Einstein propone la Teoria della Relativita' Generale e rivoluziona ancora una volta la nostra visione dello spazio e del tempo
- La RG include una teoria della gravita' che va oltre la teoria di Newton e puo' comprendere fenomeni altrimenti inspiegabili, come la precessione del perielio di Mercurio, la deflessione della luce nel campo gravitazionale del Sole (osservata nel 1919) e il rallentamento degli orologi nel campo gravitazionale.
- Il 16 gennaio del 1916, Karl Schwarzschild, dal fronte della Grande Guerra, invia ad Einstein un primo lavoro sulla soluzione analitica delle equazioni della RG relativa ad una distribuzione di massa statica e sfericamente simmetrica: una stella senza rotazione. Il lavoro e' presentato dallo stesso Einstein all'Accademia Prussiana delle Scienze ed e' seguito da un secondo lavoro in cui Schwarzschild completa il calcolo nella regione all'interno di quello che chiamiamo il "raggio di Schwarzschild", in termini piu' moderni: l' "orizzonte degli eventi".
- La soluzione di Schwarzschild e' all'origine di un concetto completamente nuovo nella fisica moderna, la possibilita' di una porzione di spazio tempo chiuso su se stesso dalla forza della gravita', nel quale oggetti del nostro Universo possono entrare, ma da cui niente puo' tornare indietro: un "buco nero".
- Pochi mesi dopo, lo stesso Einstein dovette annunciare la morte di Schwarzschild, avvenuta l' 11 maggio 1916, a seguito di una malattia contratta sul fronte in Belgio.

2. La soluzione di Schwarzschild

$$(c = \hbar = 1)$$

$$ds^2 = \left(1 - 2\frac{GM}{r}\right)dt^2 - \frac{1}{\left(1 - 2\frac{GM}{r}\right)}dr^2 - r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2)$$

$$2GM = R_s = \text{raggio di Schwarzschild} = 3.0 \text{ km} \left(\frac{M}{M_{\text{Sun}}}\right) \ll R_{\text{Sun}}$$

- siamo nel sistema di riferimento della stella
- nello spazio circostante al Sole ($r \gg \gg R_s$) si torna alla relatività speciale con correzioni piccole ma importanti:
 - precessione del perielio di Mercurio
 - deflessione della luce da parte del Sole
 - rallentamento degli orologi per effetto della gravitazione (effetto Einstein)
- ci interessa il terzo effetto. Ricordiamo che
- dt è il tempo segnato dagli orologi fermi e lontani dalla stella
- $ds = d\tau =$ tempo segnato da un orologio in quiete rispetto ad una particella in moto con velocità $v = dr/dt$

$$d\tau = \sqrt{1 - 2\frac{GM}{r}} dt \left[1 - \frac{v^2}{\left(1 - 2\frac{GM}{r}\right)^2}\right] \approx (v^2 \ll 1)$$
$$\approx \left(1 - \frac{GM}{r}\right) dt = [1 + \Phi(r)] dt$$

- Φ è il potenziale gravitazionale di Newton

spostamento verso il rosso

$$d\tau = \sqrt{1 - 2\frac{GM}{r}} dt \left[1 - \frac{v^2}{\left(1 - 2\frac{GM}{r}\right)^2} \right] \approx_{(v^2 \ll 1)}$$
$$\approx \left(1 - \frac{GM}{r}\right) dt = [1 + \Phi(r)] dt$$

- poiche' $\Phi < 0$, l'orologio della particella nel campo gravitazionale, $d\tau$, va piu' lentamente degli orologi lontani dalla stella;
- se osserviamo da lontano la luce emessa da un atomo (l'"orologio") in un campo gravitazionale, la vediamo con periodo piu' lungo, ovvero frequenza inferiore: ***le righe sono spostate verso il rosso***

- $\nu = 1/T$, quindi:

$$\nu_{\infty} = \nu_B \left(1 - \frac{GM}{r_B}\right) < \nu_B$$

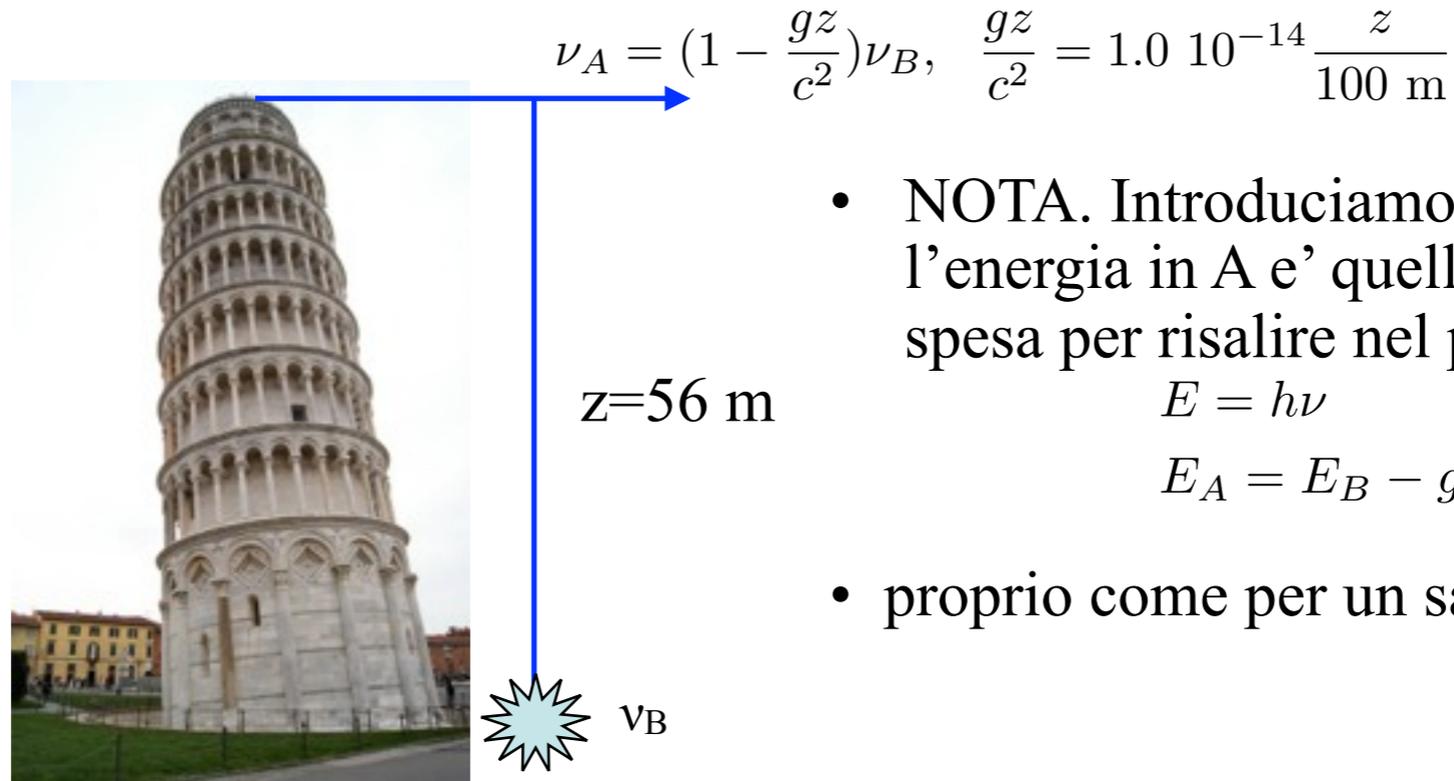
- prendiamo adesso un'altra particella nella posizione r_A . Quale dev'essere la sua frequenza affinche' la frequenza all'infinito sia esattamente $= \nu_{\infty}$? ovviamente, deve essere

$$\nu_A \left(1 - \frac{GM}{r_A}\right) = \nu_B \left(1 - \frac{GM}{r_B}\right)$$
$$\nu_A = \left(\frac{1 - \frac{GM}{r_B}}{1 - \frac{GM}{r_A}}\right) \nu_B \approx [1 + \Phi(r_B) - \Phi(r_A)] \nu_B$$

- ν_A e' la frequenza che vediamo in r_A se un atomo in r_B ha emesso luce di frequenza ν_B .

Effetto Einstein

- sulla Terra



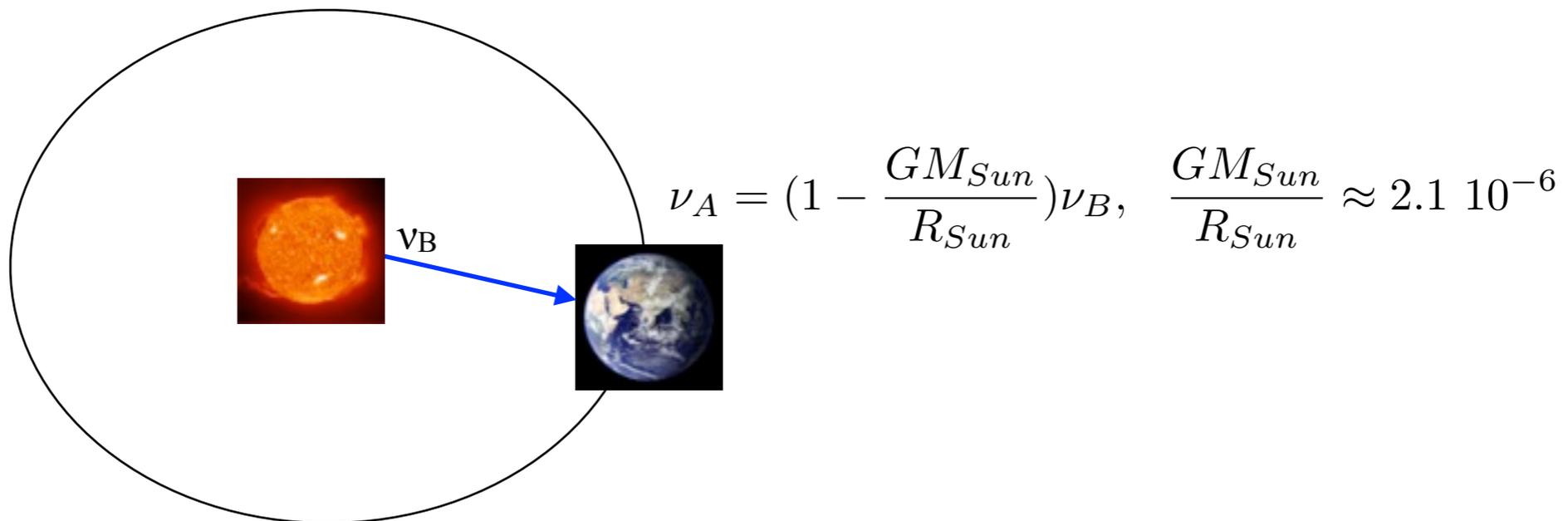
- NOTA. Introduciamo l'energia del fotone: l'energia in A e' quella in B meno l'energia spesa per risalire nel potenziale gravitazionale

$$E = h\nu$$

$$E_A = E_B - gzE_B$$

- proprio come per un sasso lanciato in verticale

- Sole-Terra



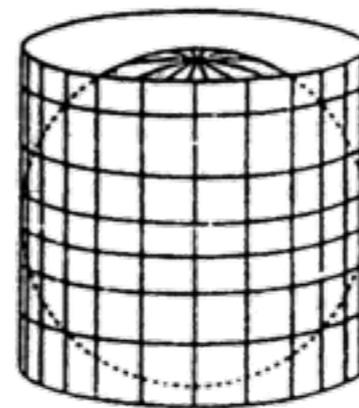
3. Un “buco nero” (J. Wheeler)

$$(c = \hbar = 1)$$

$$ds^2 = \left(1 - 2\frac{GM}{r}\right)dt^2 - \frac{1}{\left(1 - 2\frac{GM}{r}\right)}dr^2 - r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2)$$

$$2GM = R_s = \text{raggio di Schwarzschild} = 3.0 \text{ km} \left(\frac{M}{M_{\text{Sun}}}\right) \ll R_{\text{Sun}}$$

- Se la massa della stella e' tutta contenuta all'interno di R_s , possiamo arrivare fino a $r=R_s$, dove “il tempo si ferma”: che succede?
- in realta' la singularita' in $r=R_s$ non e' una singularita' fisica
- in $r=R_s$ la curvatura e' finita e il problema e' un problema di coordinate: lo spazio tempo curvo non si puo' rappresentare con una unica “mappa” in uno spazio piatto, proprio come la Terra non si puo' rappresentare fedelmente su un solo foglio di carta
- es. nella proiezione di Mercatore i poli sono diventati due bordi estesi, la mappa e' fedele solo intorno all'equatore (la Groenlandia viene esageratamente grande !)
- ma se continuiamo la soluzione di S. oltre la singularita', troviamo che i raggi di luce emesi dai punti con $r < R_s$ non possono mai arrivare all'esterno di questa zona
- ***la superficie $r=R_s$ e' un “orizzonte” che divide l'Universo in due parti non comunicanti***
- Einstein cerco' di dimostrare senza successo che questa situazione non e' permessa in fisica,
- nel 1939, Oppenheimer e Snyder dimostrano invece che una stella senza pressione interna (massa del core $>$ massa di Oppenheimer e Volkoff) “collassa” all'interno di $r=R_s$ verso la singularita' centrale: si forma un “buco nero” (termine coniato da J. Wheeler)

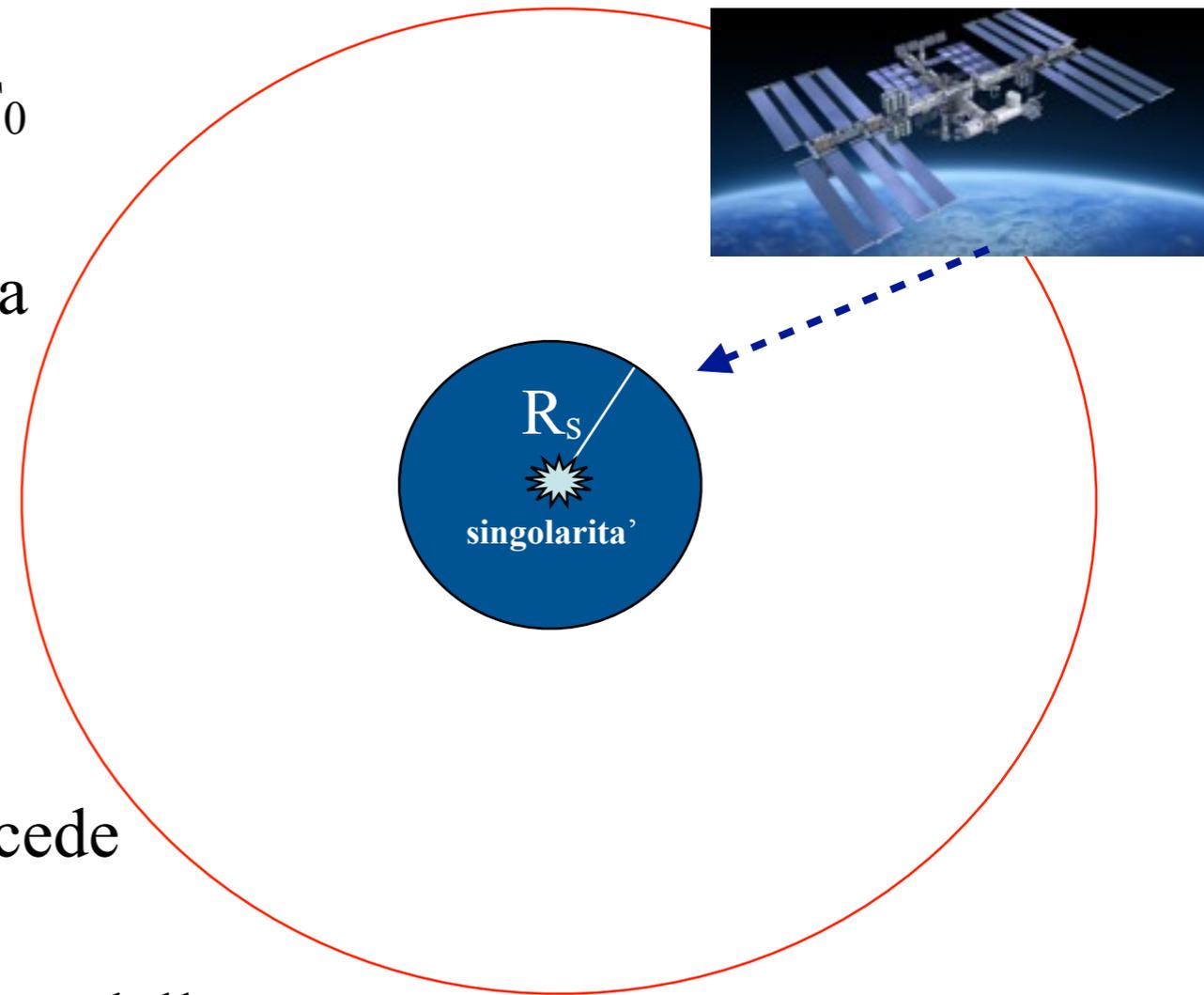


.. da una International Space Station in orbita intorno a un buco nero

- lasciamo cadere verso il centro un satellite, che trasmette con frequenza propria $\nu_0=1/T_0$
- da ISS riceviamo segnali con periodi tanto piu' lunghi quanto piu' il satellite e' vicino a $r=R_s$:

$$T_{ISS} = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \frac{R_s}{r}}}$$

- $T_{ISS} \rightarrow \infty$ per $r \rightarrow R_s$, quindi per ISS il satellite arriva a R_s ***solo dopo un tempo infinito***
- visto dal satellite in caduta libera, non succede niente di speciale:
- la gravita' e' quasi completamente cancellata dalla caduta libera; solo, avvicinandoci al centro, aumentano le forze di marea,
- .. ***dopo un tempo finito, in unita' di T_0 , si arriva a $r=R_s$ e si entra nella zona senza ritorno, $r < R_s$.***
- ????? c'e' contraddizione con quanto vede ISS??? no, in quanto da $r < R_s$ lo sfortunato passeggero del satellite non puo' piu' comunicare con ISS

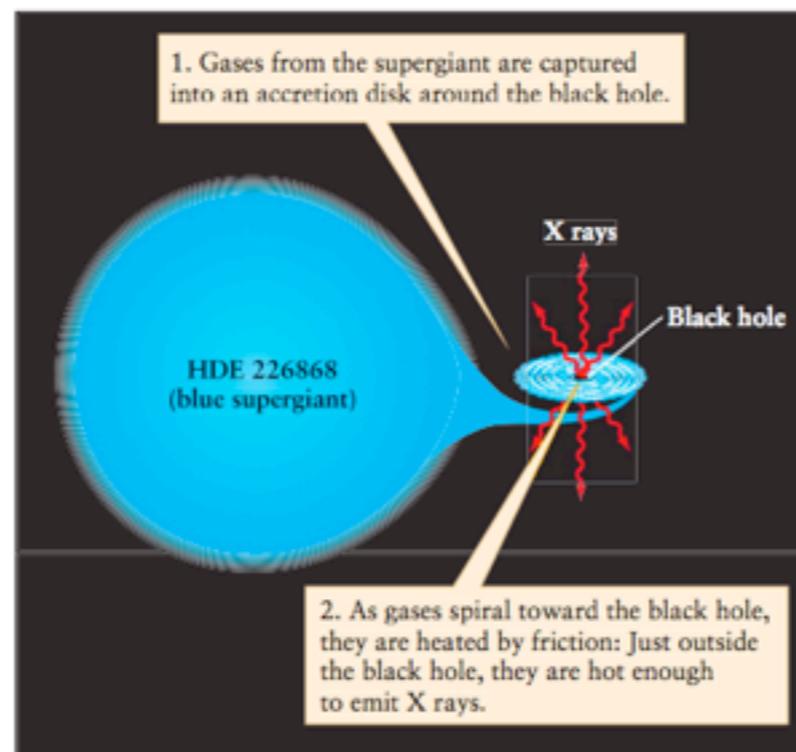


4. Collasso nel buco nero

- All'inizio degli anni sessanta, J. Wheeler e il suo team negli USA e Y. Zeldovich e il suo team nell'URSS, impiegarono i nuovi metodi di calcolo messi a punto per la realizzazione degli ordigni termonucleari, per calcolare in modo realistico il collasso di una supernova di grande massa, in assenza di momento angolare (vedi dopo)
- I calcoli confermarono in modo indipendente il calcolo di Oppenheimer e Snyder: senza una pressione che resista alla gravità (e non se ne conosce alcuna, quando il combustibile nucleare è finito e la massa supera i limiti per una stella di neutroni) la stella sparisce dentro il suo orizzonte e diventa un buco nero
- Wheeler inventa il termine Black Hole, che all'inizio la rivista *Physical Review* non vuole accettare
- 1964. Il fisico Neozelandese Roy Kerr propone una soluzione delle equazioni di Einstein che viene riconosciuta come una black hole dotata di momento angolare
- 1960-1970. V. Ginzberg, e W. Israel altri arrivano a stabilire il teorema che *Black Holes have no Hair*: l'orizzonte non ha gobbe o protuberanze, come una stella, ma è solo caratterizzato da: massa, carica elettrica (soluzione di Reissner e Nordstrom, 1916-1919), e momento angolare (soluzione di Kerr);
- ***queste quantità sono le sorgenti delle forze a lungo raggio (mediatori con massa = 0): gravitazione e elettromagnetismo, determinate da simmetrie esattamente conservate.***

Come osservare un buco nero vicino a noi?

- Meta' anni '60. Zeldovich-Novikov, in URSS, e Salpeter, USA, fanno una proposta interessante,
 - un sistema binario in cui si vede una sola stella nel visibile e la stella oscura ha una massa superiore a $3 M_{\odot}$ (stimata dai dati dell'orbita della stella visibile)
 - se l'altra e' una BH, dovrebbe catturare materia dal gas interstellare
 - la materia forma un'onda di shock e per collisione emette raggi X
- conclusione: cercare un sistema binario con una stella che emette nel visibile e l'altra nei raggi X.
- Negli anni '70, H. Friedmann (US Naval Research Laboratory) e B. Rossi e R. Giacconi sviluppano i rivelatori per un'astronomia a raggi X
- Giacconi (Premio Nobel 2002) scopre piu' di 300 sorgenti X, con il satellite UNHURU, tra cui Cygnus X-1, che risponde a tutti i requisiti!!



(a) A schematic diagram of Cygnus X-1



(b) An artist's impression of Cygnus X-1



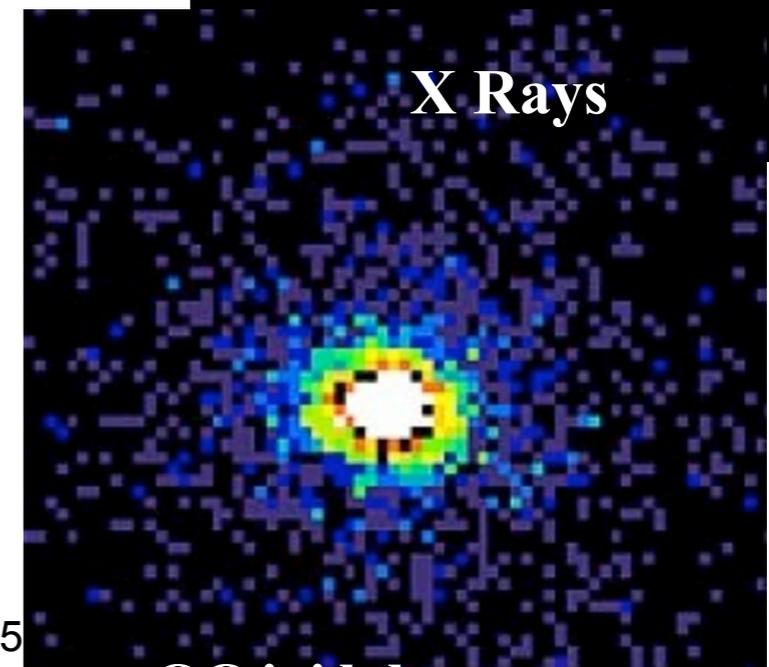
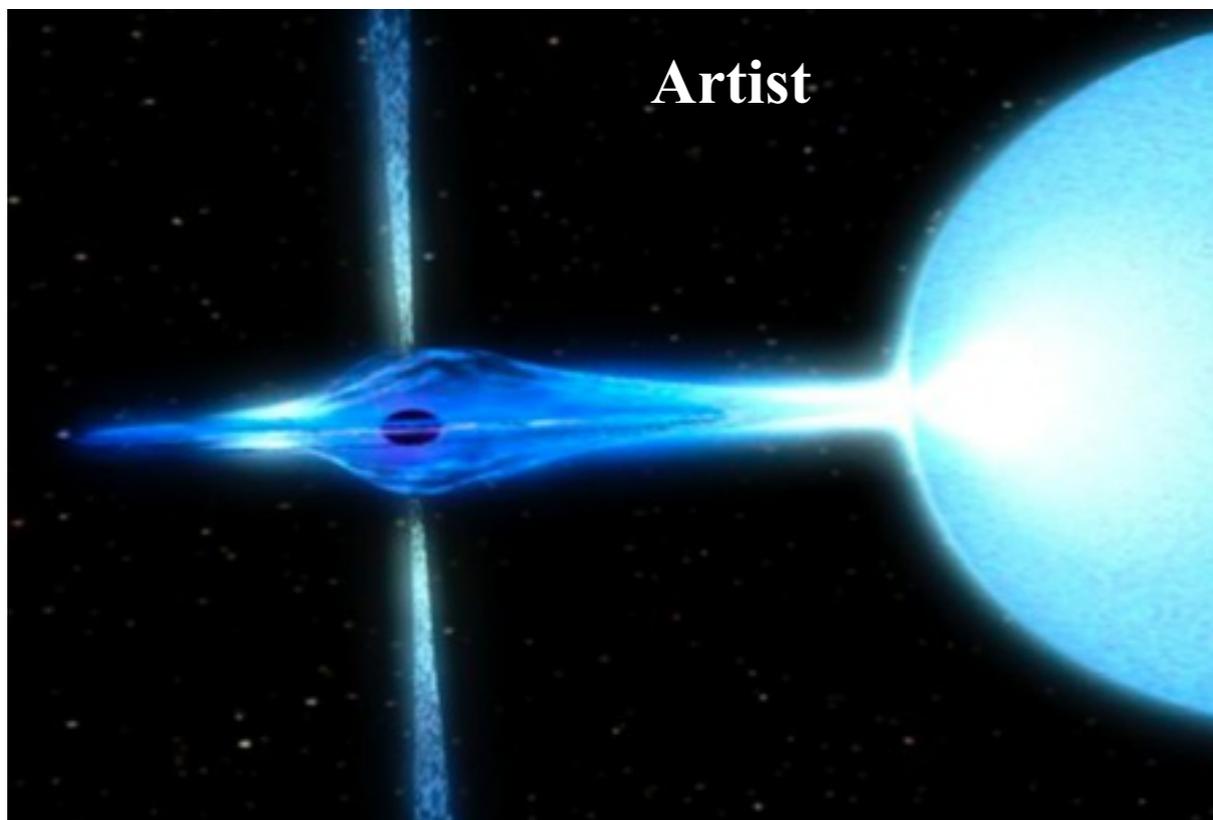
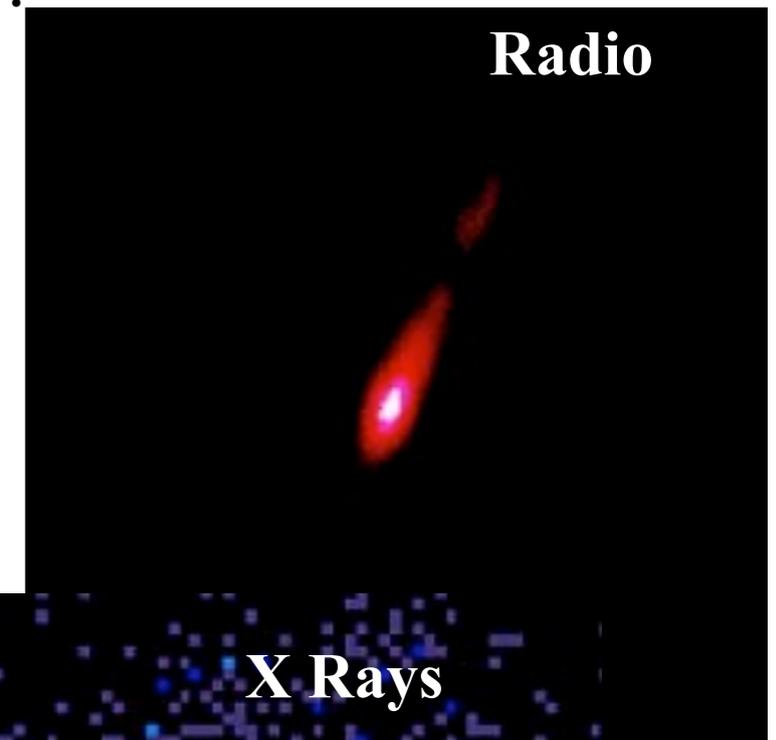
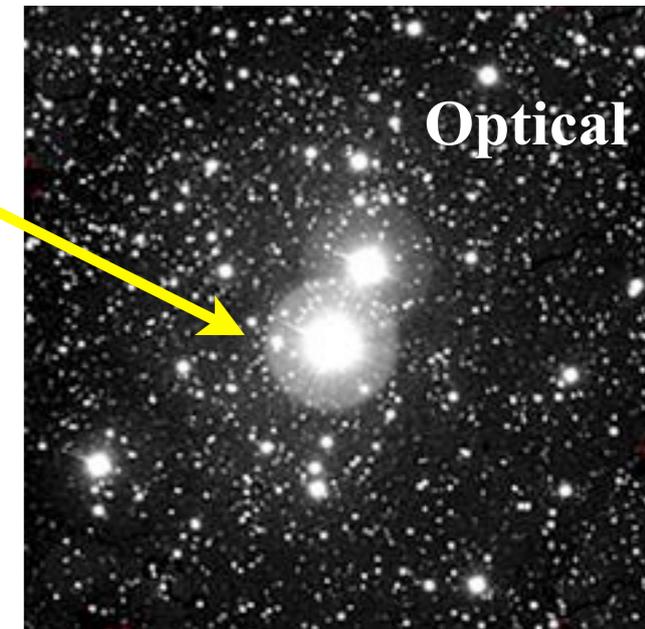
Figure 22-11

The Cygnus X-1 System (a) The larger member of the Cygnus X-1 system is a B0 supergiant of about $30 M_{\odot}$. The other, unseen member of the system has a mass of at least $7 M_{\odot}$ and is probably a black hole. (b) This illustration shows how the Cygnus X-1

system might look at close range. (The illustration that opens this chapter depicts a similar system.) At even closer range, the black hole and its immediate surroundings might appear as shown in Figure 22-12. (Courtesy of D. Norton, Science Graphics)

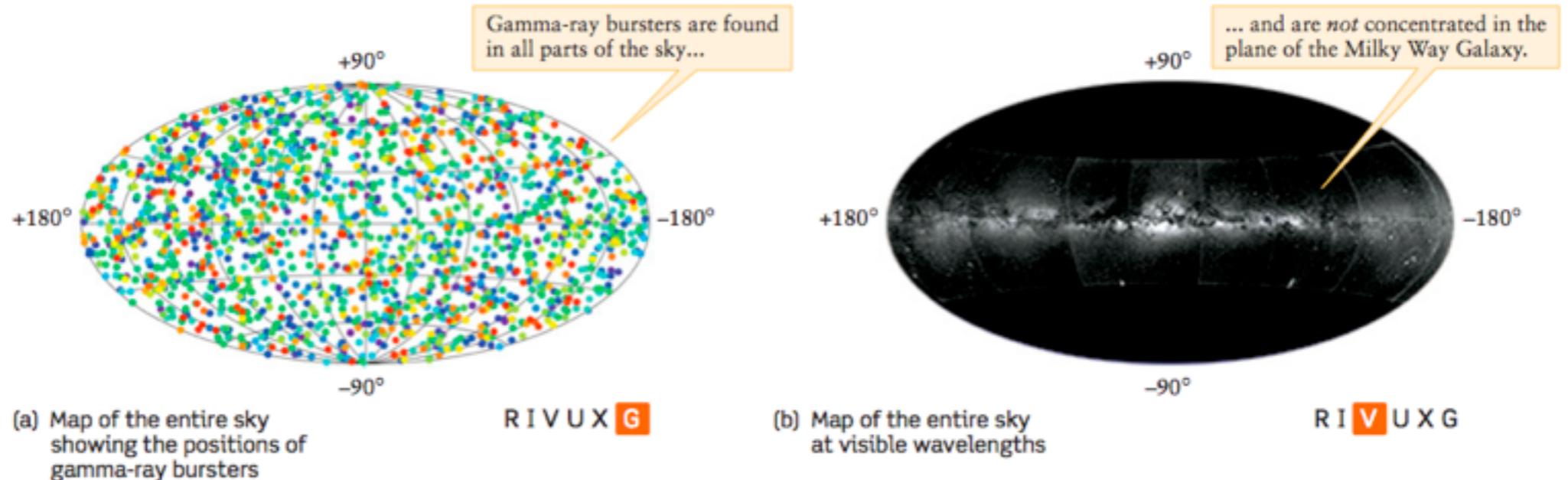
5. Cygnus X-1 (black hole)

- The visible companion is a B0 supergiant of about $30 M_{\odot}$
- The mass of Cygnus-X1 been measured to be $14.8 \pm 1.0 M_{\odot}$ (Orosz et al. 2011 “The Mass of the Black Hole in Cygnus X-1”).
- Its spin parameter, greater than 0.97, is near maximal (Guo et al. 2011 “The Extreme Spin of the Black Hole in Cygnus X-1”).



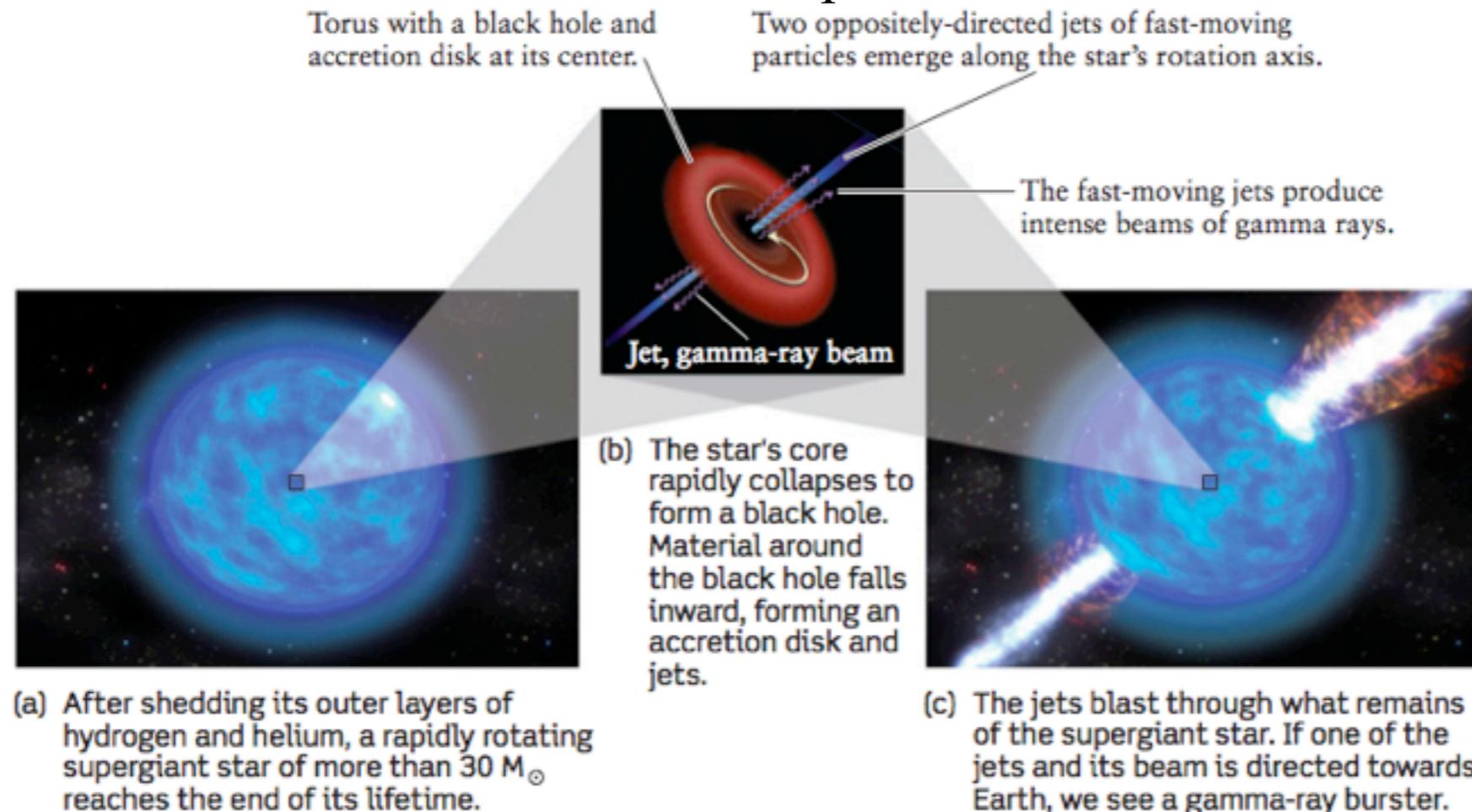
6 .Gamma Ray Bursters

- Gamma ray Bursts scoperti nel 1974
- corti (20 sec) o lunghi 1000 sec
- distribuzione isotropa: natura cosmologica (lontani) o galattica (ma perche' fuori del piano equatoriale della Galassia?)
- 1997. Il satellite Italo-Olandese Beppo-SAX (Beppo=Beppo Occhialini) identifica con grande risoluzione angolare un GR burster e permette di individuare, 21 ore dopo, una supernova con righe di assorbimento spostate verso il rosso: origine cosmologica!
- se la radiazione fosse isotropa, la luminosita' sarebbe assolutamente enorme data la distanza: i GR burster piu' luminosi dovrebbero emettere l'energia di 100.000 supernove in pochi minuti!
- soluzione: i raggi gamma sono emessi da un fascio collimato molto stretto che colpisce la Terra come il raggio di un faro



...e Jets

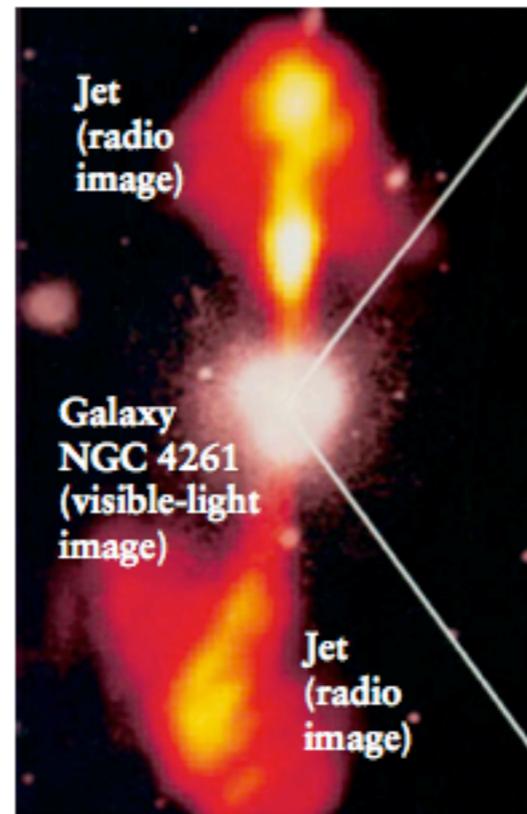
- *Collapsar* (o *Hypernova*): stella supermassiva che finisce il combustibile
- si e' gia' liberata di molta massa, ma comunque il core ha una troppa grande per formare una stella di neutroni
- dato il momeno angolare la materia che collassa forma un anello di accrezione
- dall'anello partono due jet opposti di particelle energetiche
- quando le particelle del jet collidono con l'atmosfera residua danno luogo ai raggi gamma
- dopo 20'' il disco di accrezione e' scomparso oltre l'orizzonte di S. e il burst finisce



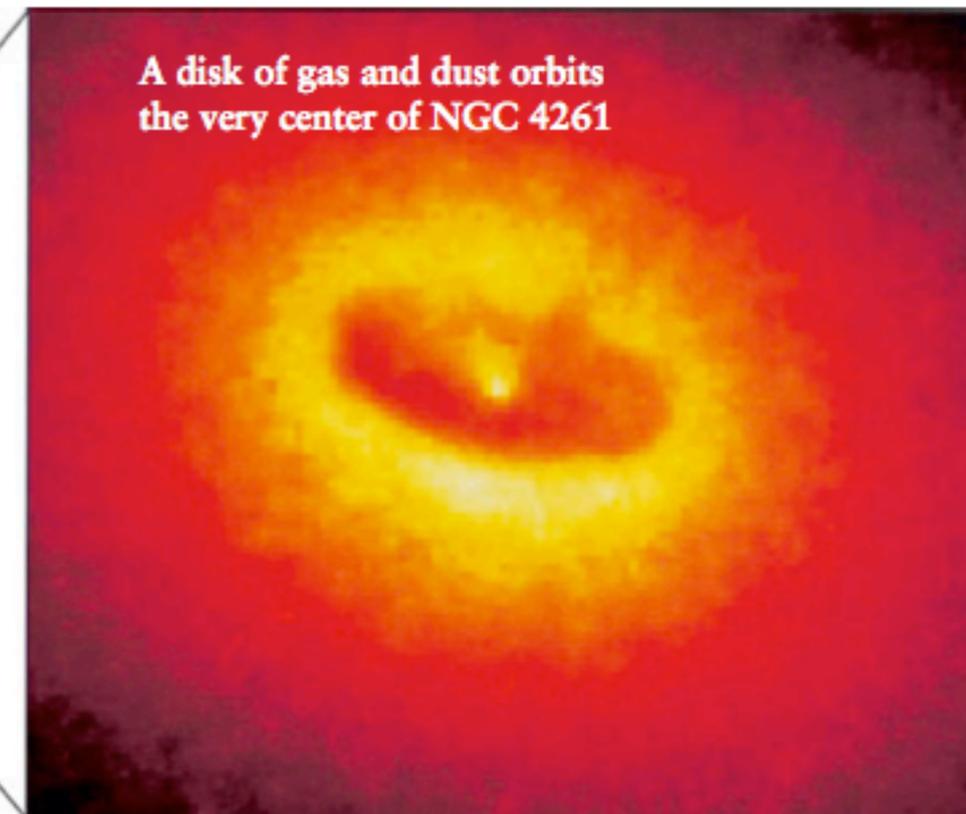
Processi di coalescenza di due stelle di neutroni sono altre possibili sorgenti di GRB

7. Supermassive BH

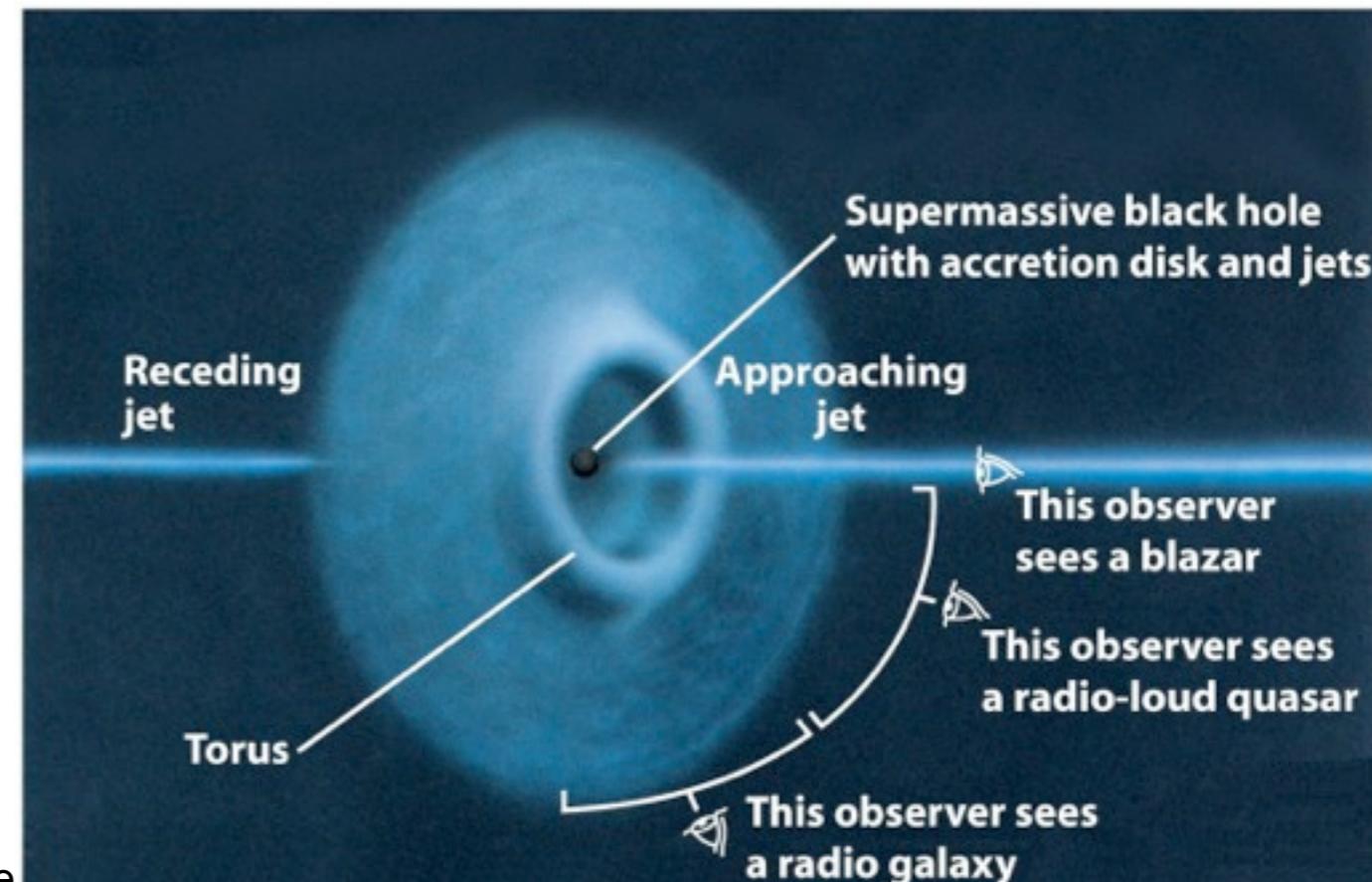
- *Quasars* sono oggetti “quasi stellari” scoperti negli anni '60 con i radiotelescopi a larga base. Alcuni sono tra gli oggetti più antichi, fino a 10^{10} anni fa, quando l'Universo aveva solo qualche miliardo di anni
- la luce, più intensa della luce prodotta dall'intera galassia, proviene dal disco di accrezione di una BH supermassiva ($10^6 - 10^9$ masse solari) al centro della galassia;
- due jet, visibili radio per luce di sincrotrone, trasmettono energia a lobi di gas esterni alla galassia, con estensioni anche di 30-50 kpc
- La materia che cade in un BH supermassivo è all'origine dell'emissione di radiazione da parte degli *Active Galactic Nuclei*.



(a) Galaxy NGC 4261

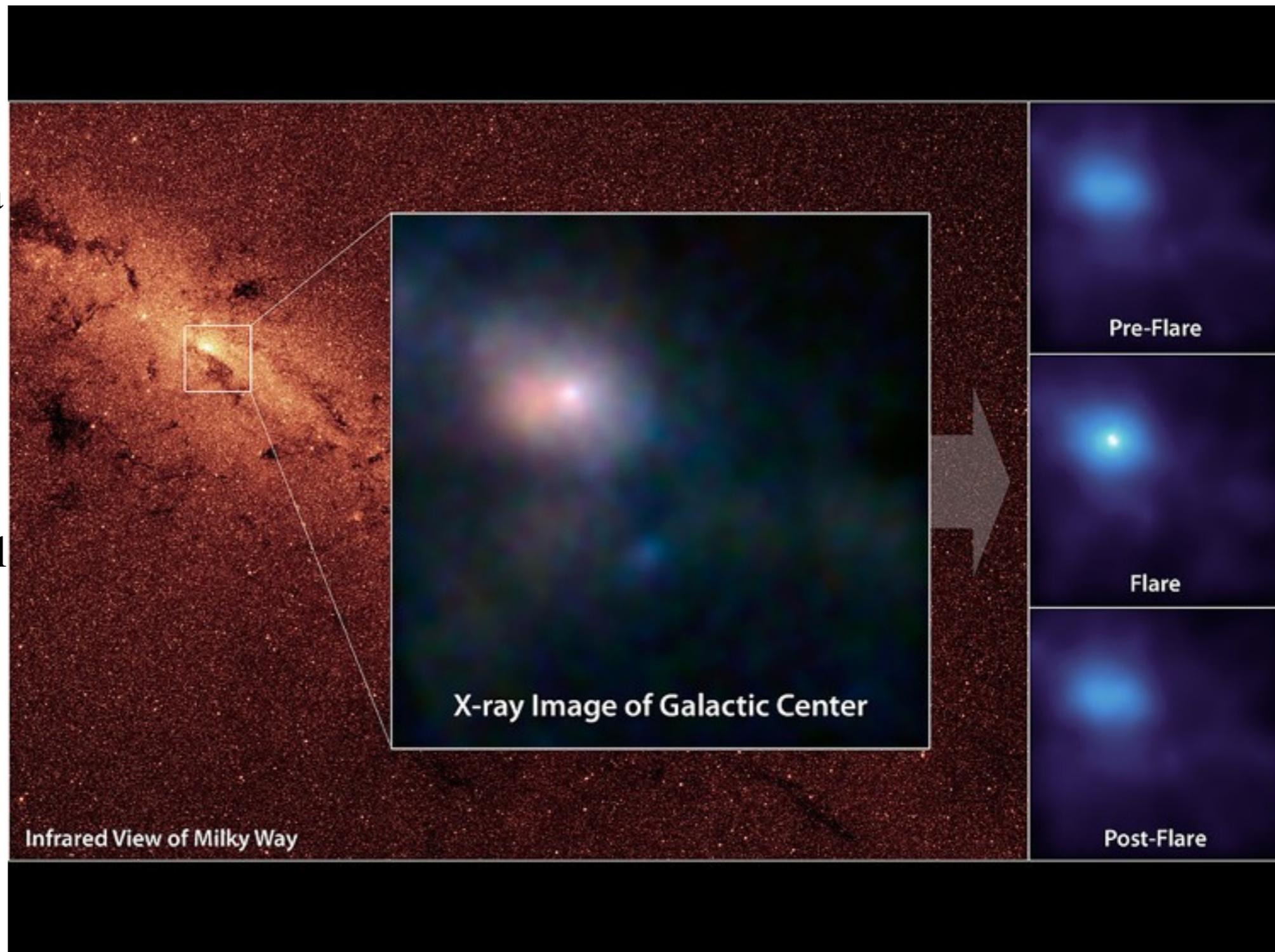


(b) Evidence for a supermassive black hole in NGC 4261



nel centro della nostra Galassia

- Nel centro della nostra Galassia nella costellazione del Sagittario si trova un buco nero supermassivo, $O(10^6)$ masse solari
- la materia che cade nel buco nero produce flash di raggi X, rivelati dal satellite Chandra



8. Conclusioni-prima parte

- A 100 anni dalla sua creazione, il potere predittivo della Teoria della Relativita' Generale si dispiega completamente nei fenomeni estremi su scala stellare e galattica, osservati nel corso dell'ultimo secolo
- Stelle a raggi X, Gamma Ray Bursters, Quasars, Active Galactic Nuclei, sono fenomeni imponenti che trovano una spiegazione comune nell'esistenza di Buchi Neri con masse da decine di M_{\odot} fino a $(10^6-10^9) M_{\odot}$;
- come per le supernove di tipo II (collasso del core), la gravita' fornisce l'energia necessaria per questi fenomeni imponenti, ;
- se si possono cercare spiegazioni alternativi ai Buchi Neri per Cyg X-1, gli oggetti supermassivi al centro delle galassie (nostra inclusa) non possono essere altro che degli enormi buchi neri formati per aggregazioni successive di oggetti collassati
- Il Teorema no-Hair da' un'immagine di un buco nero sorprendentemente simile a quella delle moderne particelle elementari: un oggetto caratterizzato da alcuni numeri, privo di quelle complicazioni che sono caratteristiche degli oggetti macroscopici (pianeti, stelle, galassie)
- gli sviluppi piu' recenti della gravita' quantistica danno nuova luce su questi aspetti e nuove indicazioni sul comportamento dei buchi neri e sul destino finale dell' Universo.