

Breve resoconto dell'Incontro Interdisciplinare del 26 gennaio 2026

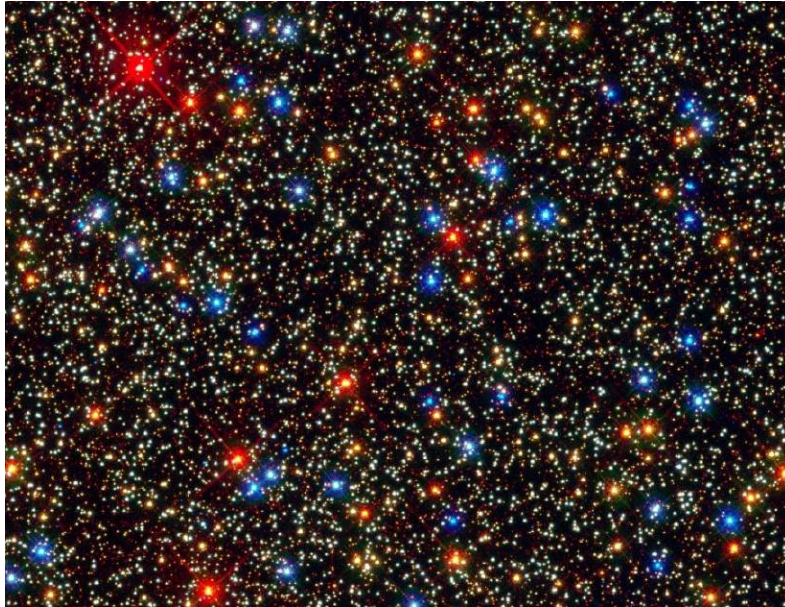
a cura di fra Sergio Parenti O.P.

LONGO - Ho dato come titolo a questa serata “Il trionfo della gravità”, e come sottotitolo “I Buchi Neri e l’infinitamente denso”, aggiungo poi “Un ulteriore viaggio nell’Astrofisica contemporanea” pensando agli altri argomenti che abbiamo trattato. In particolare ricordo che l’espansione dell’universo comporta che, poco alla volta, le sorgenti di luce che oggi vediamo non saranno più visibili. La loro luce non riuscirà più ad arrivare fino a noi ed esse usciranno dallo “Orizzonte degli eventi”. Noi vedremo una zona sempre più piccola dell’universo.

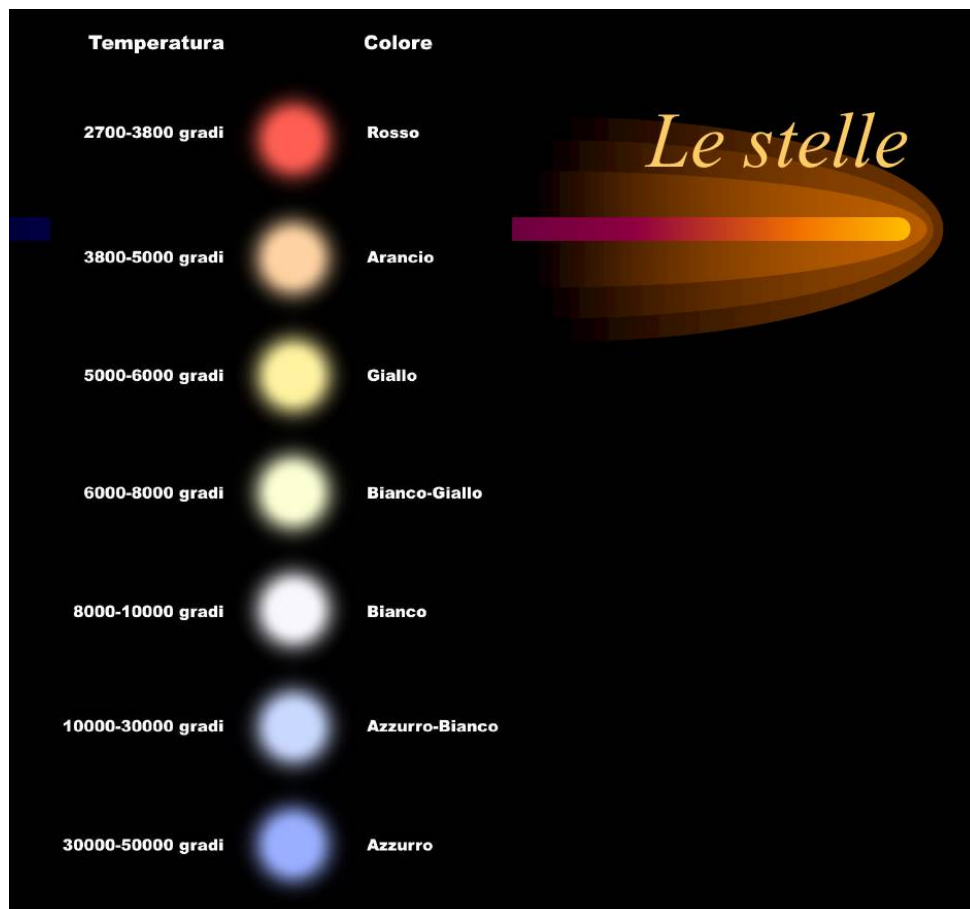
A partire dalla conoscenza che abbiamo oggi delle stelle, la gravità è la forza dominante nella loro evoluzione, e questa ci porterà a parlare dei Buchi Neri. L’uomo ha sempre guardato le stelle, raggruppandole in figure mitiche, come la costellazione di Orione nell’emisfero Nord o la Croce nell’emisfero Australe. L’astrofisica è nata quando si è imparato a riconoscere i tipi di stelle. Oggi il programma “Stellarium” ci permette di vedere tutta la volta celeste. Nella costellazione del Centauro, poco sotto la Croce del Sud, c’è un ammasso globulare di stelle, Omega Centauri [Caldwell 80], tutte nate, grosso modo, nello stesso tempo.



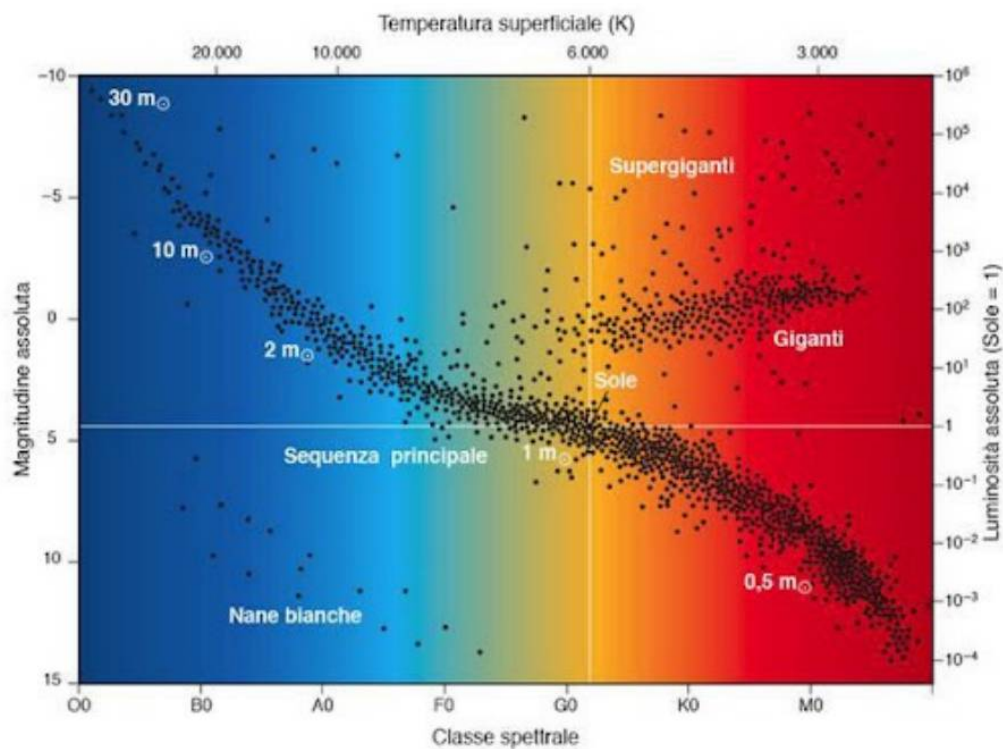
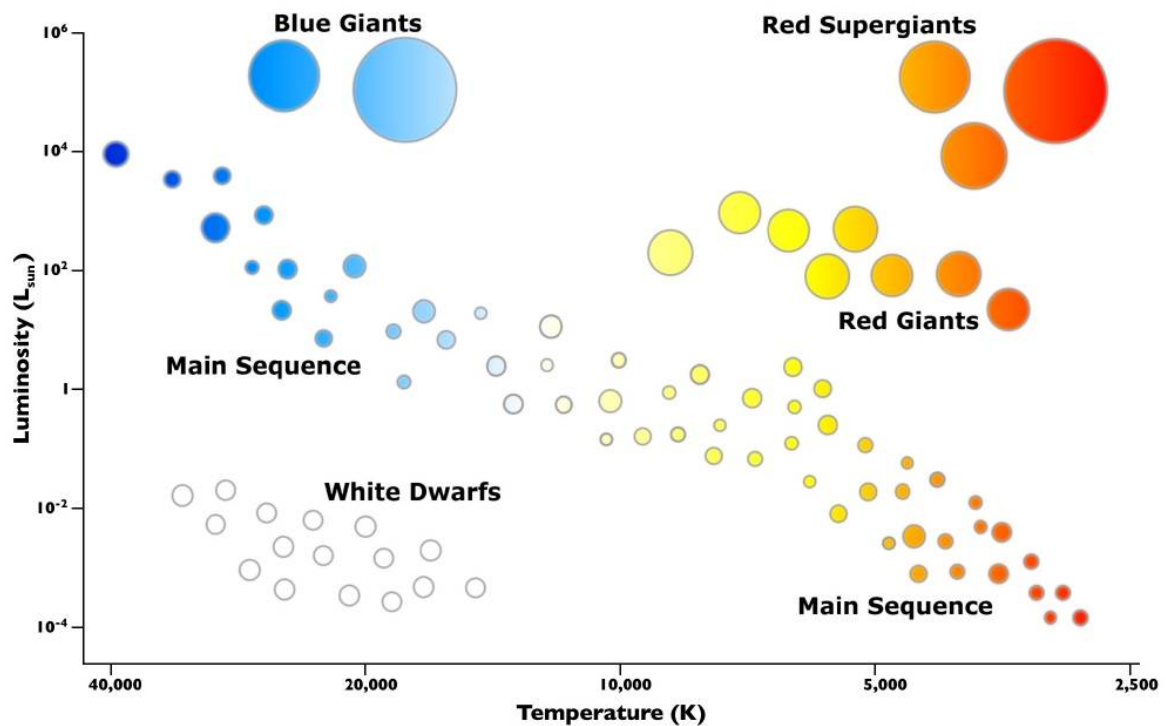
Gli ammassi globulari sono importanti per studiare l’evoluzione dell’universo. Guardandoli con un telescopio vediamo stelle di colore diverso, più grandi, più piccole. Gli astronomi hanno imparato a distinguerle evidenziandone il colore.



Attraverso il colore della stella noi conosciamo la temperatura della sua superficie. Noi vediamo il Sole giallo, perché la sua temperatura superficiale è di circa 6000 gradi. Le stelle rosse sono più fredde (due volte in meno), mentre le stelle azzurre sono molto più calde. Così abbiamo potuto metterle in un grafico.



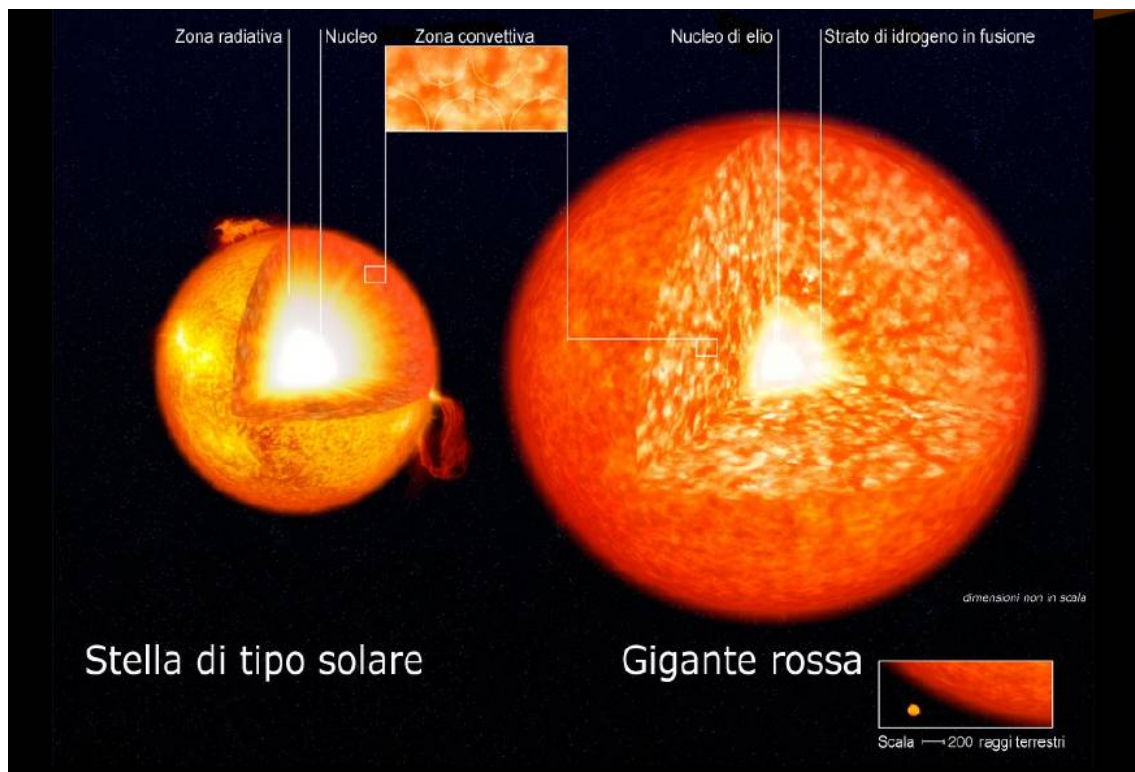
Poi possiamo distinguerle anche per la luminosità.



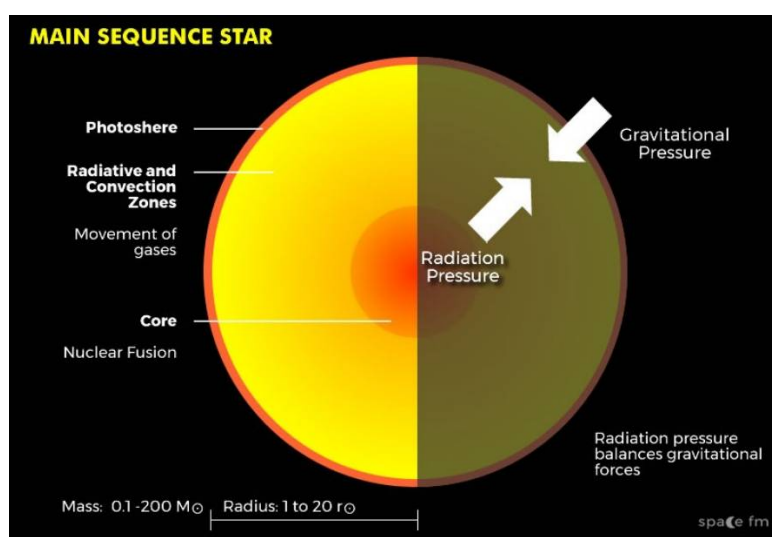
La scala è logaritmica: le giganti blu sono milioni di volte più luminose del Sole. Da qui ricaviamo molte informazioni. La maggior parte delle stelle si trova nella sequenza principale. Si sa che le

stelle più piccole sono meno luminose. Quindi sono nella zona in basso a destra del grafico. Invece le più luminose sono anche le più grandi. Le stelle dell'ammasso globulare con i colori evidenziati, quindi, fanno parte di quelle di una trentina di masse solari. Inoltre, come vedremo, noi sappiamo quanto vivono le stelle. Così possiamo dare un'età approssimativa all'ammasso in questione. Ma dobbiamo prima dire alcune altre cose sull'interno delle stelle.

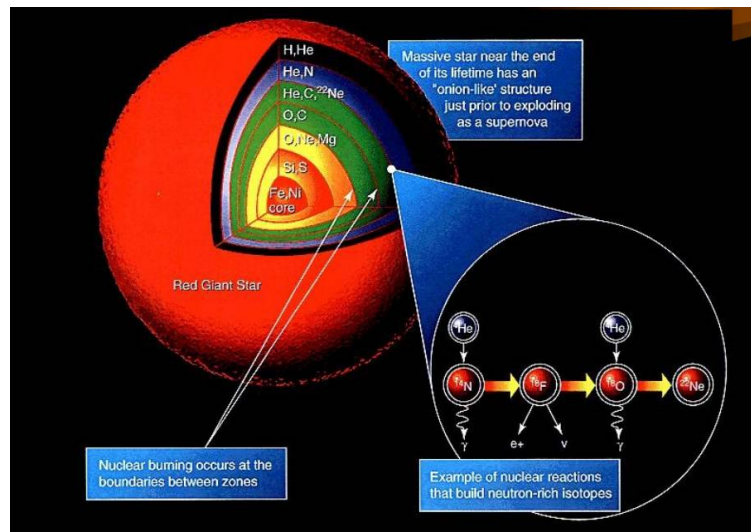
La gravità governa l'equilibrio di una stella. Una stella come il Sole ha il suo nucleo, ed una gigante rossa anche, ma essa è molto più grande.



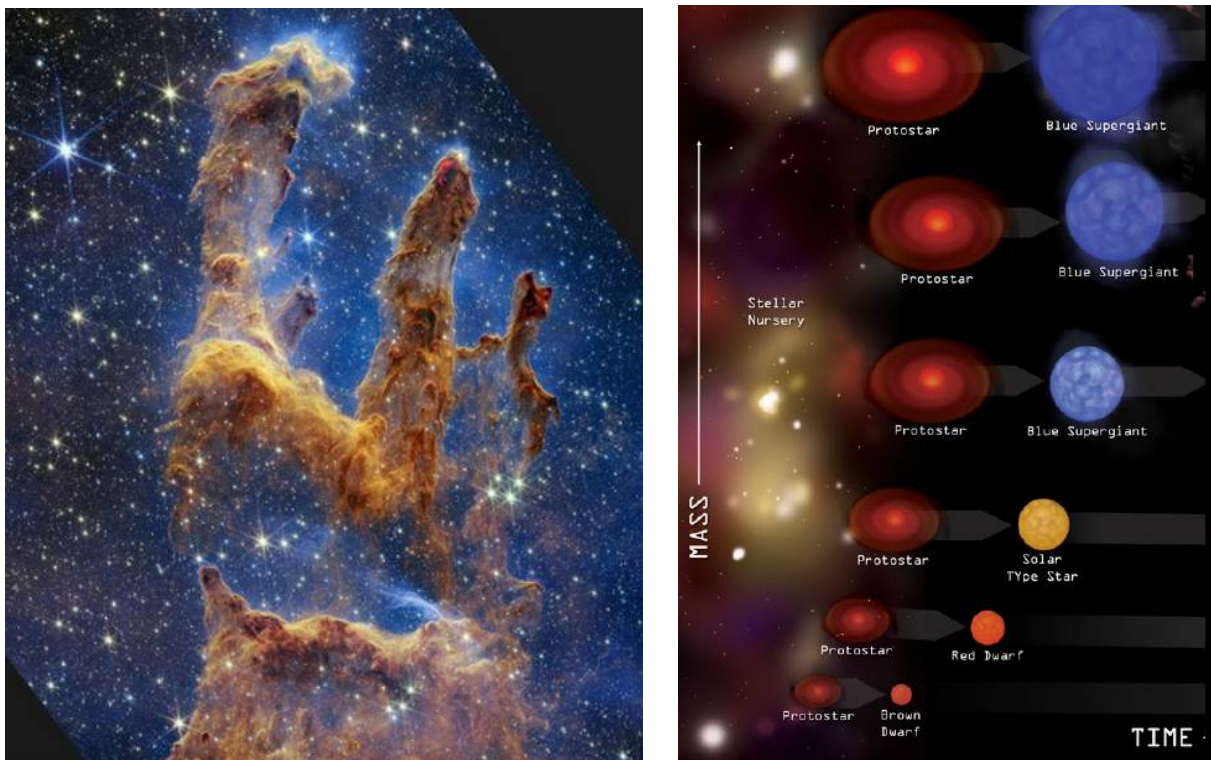
All'interno, durante la vita della stella in cui la classifichiamo nella sequenza principale, si bilanciano la gravità e la pressione generata nel nucleo.



Alla fine della vita della stella si sono generati nel nucleo elementi più pesanti.



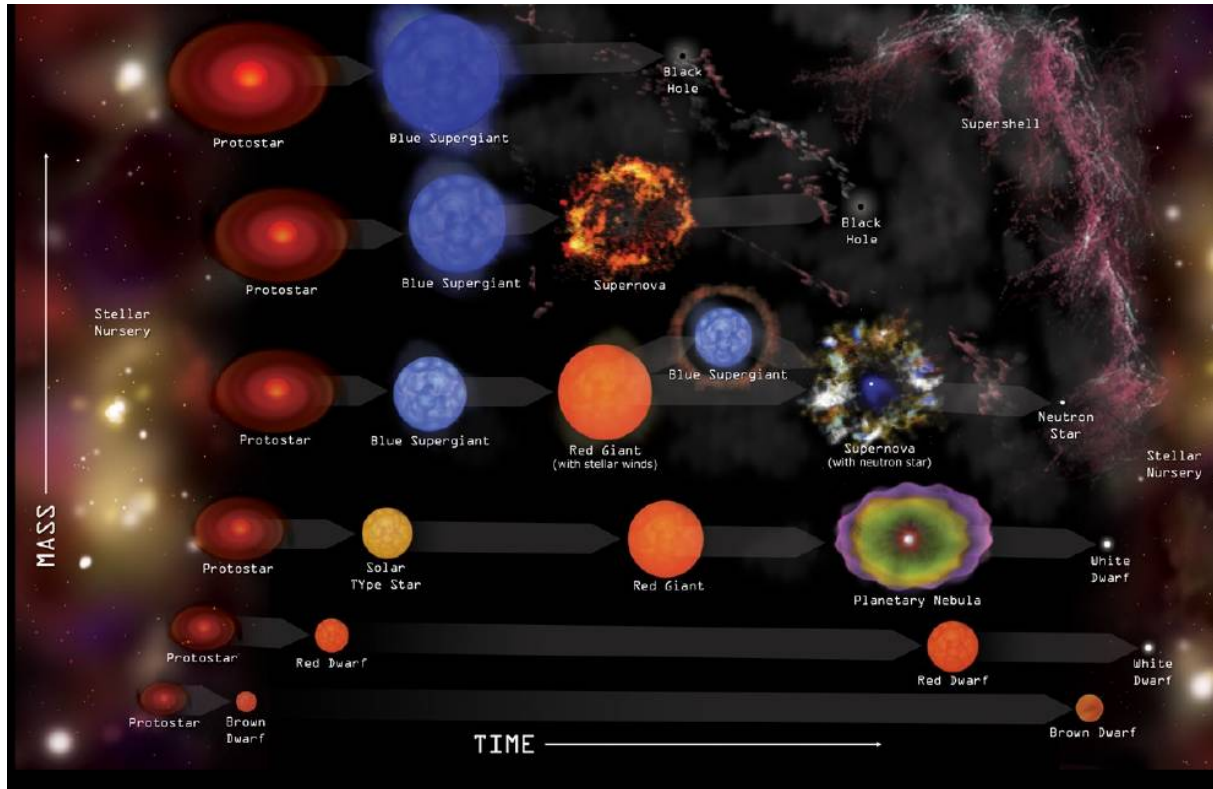
Come nascono le stelle? Dalle nubi di gas e polveri.



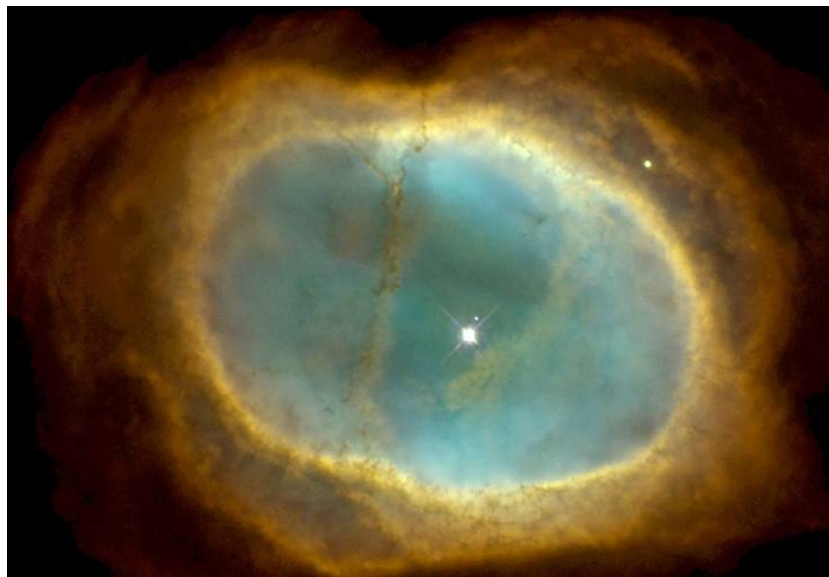
La gravità le aggrega fino a che al centro si accendono le reazioni nucleari che impediscono un ulteriore collassare del gas. La quantità di gas determina la grandezza delle stelle.

Come muoiono le stelle? A seconda della loro massa. Una stella come il Sole diventerà una gigante rossa, con un raggio venti volte superiore inglobando i pianeti fino alla Terra e a Marte, arrivando a lasciare dietro di sé una nebulosa planetaria, che lascia dietro di sé una "nana bianca".

Una gigante rossa non ha più, nella fase finale, reazioni nel nucleo: si condensa e diventa un oggetto molto compatto: ad esempio una nana bianca. Le stelle più grandi vivono molto meno. Una gigante rossa diventa una supernova se ha 8 o 10 masse solari, poi diventa una stella di neutroni. Una gigante blu diventerà anche direttamente un buco nero.

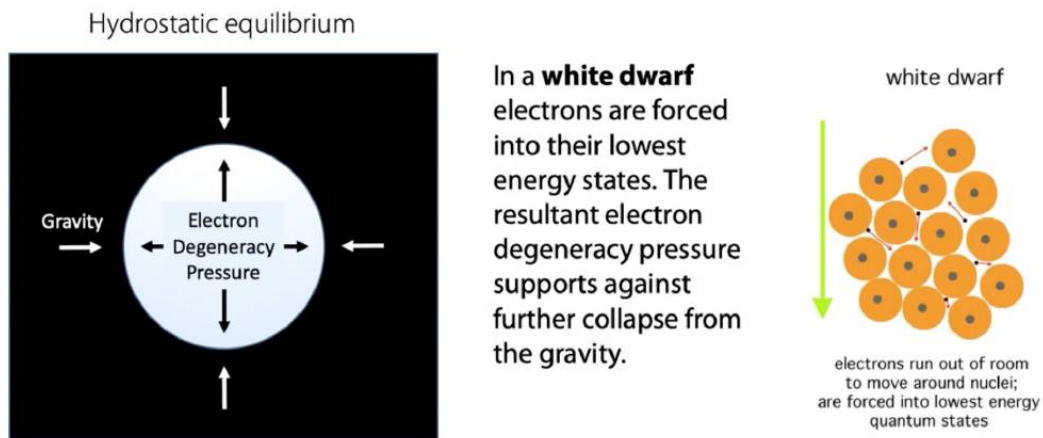


Cerchiamo di comprendere che cos'è una nana bianca.



La nebulosa planetaria ha al centro una nana bianca. Che cosa tiene unita una nana bianca, che non ha più reazioni nucleari all'interno?

Gli elettroni in qualche modo arrivano ad uno stato tale per cui non possono più stare se non insieme, al livello più basso di energia. A questo si oppone la legge quantistica che due particelle non possono occupare uno stesso livello di energia, generando così una pressione detta “di degenerazione”.

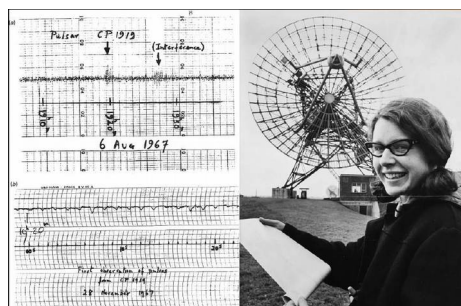


Le stelle come il Sole diventano grandi come la Terra. Le stelle più grandi, come scoprì Chandrasekhar, quando arrivano ad una massa circa una volta e mezzo quella della nana bianca grande come la Terra, subiscono una pressione gravitazionale tale che non possono più essere tenute insieme dalla pressione degli elettroni ed esplodono come supernovae, seminando nello spazio gli elementi formati nel nucleo e lasciando una stella di neutroni, tanto densa che la massa solare e mezzo diventa grande circa una decina di chilometri.

*Dopo e prima
la supernova
del 1987*



La loro rotazione sul proprio asse produce impulsi radio regolari che inizialmente furono creduti opera di extraterrestri, ma in breve Jocelyn Bell scoprì che si trattava di stelle di neutroni, che furono chiamate “Pulsar”.



Ma che cosa succede se la massa di una stella è ancora più grande? In questo caso si forma un “Buco Nero”.

Per capire che cosa sia dobbiamo partire da un concetto molto importante: la velocità di fuga.

Un oggetto che si muove con una velocità v ha un'energia cinetica del moto pari ad un mezzo della massa m per la velocità al quadrato.

Viceversa, in un campo gravitazionale generato da un altro oggetto di massa M ad una distanza r ha un'energia potenziale pari a $-G$ (la costante gravitazionale) per la sua massa e quella della sorgente del campo gravitazionale (M) diviso la distanza r .

Se non ci sono in gioco altre energie, per la conservazione dell'energia meccanica v rimane costante e si definisce velocità di fuga (v_f) la minima velocità necessaria per vincere l'energia potenziale del campo, cioè per potersi allontanare all'infinito ($r = R \rightarrow \infty$) e raggiungerlo con velocità residua nulla ($v = 0$).

$$\mathbf{1)} \quad E_{cin} = \frac{1}{2}mv^2 \quad E_{pot} = -G\frac{mM}{r}$$

$$\mathbf{2)} \quad \frac{1}{2}mv_f^2 - G\frac{mM}{R} = \frac{1}{2}m0 - G\frac{mM}{\infty}$$

$$\mathbf{3)} \quad v_f = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

Il passaggio dalla 2 alla 3 con l'introduzione dello 0 e della divisione per un infinito (ancora 0) ci dice che la seconda parte dell'uguaglianza è 0, quindi le due energie sono uguali. Da qui risulta la 3.

Possiamo chiamare raggio di Schwarzschild quello per cui chi avesse questo raggio avrebbe come velocità di fuga quella della luce. Per fare questo elevo al quadrato le due grandezze della 3, sostituisco a R il simbolo r_s , e c^2 a v_f , ed avrò

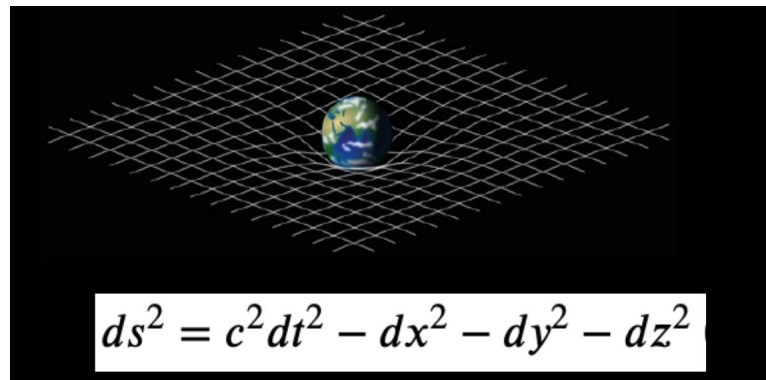
$$r_s = \frac{2G_N M}{c^2}$$

dove G_N è la medesima costante di gravitazione universale G .

Da un oggetto di massa M che avesse tale raggio sarebbe impossibile fuggire, perché la velocità della luce non è raggiungibile.

Questo ci connette alla Relatività Generale di Einstein.

Per capirne alcune cose ricordiamo che in uno spazio-tempo piatto (rappresentato come un telo con un oggetto di poca massa) vale la relazione di Minkowski:



cioè la distanza tra due punti nello spazio-tempo è data dalle distanze di x, y, z e dalla differenza del tempo moltiplicata per la velocità della luce al quadrato (ds sta per la distanza, mentre d sta per la differenza fra le coordinate dei due punti ($t - t'$, $x - x'$, ecc.).

Se la distanza è positiva gli oggetti sono raggiungibili, se la distanza è negativa dovrei superare la velocità della luce e questo non è possibile.

Una massa più grande distorce maggiormente lo spazio-tempo, e questo ci porta alle equazioni della Relatività Generale.

Una delle soluzioni a queste equazioni è lo spazio-tempo di Schwarzschild.

Qui la distanza diventa:

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

e se poniamo r uguale al raggio di Schwarzschild viene $= (1 - 1) - (1 - 1)^{-1} \dots$, cioè $= 0 - 0^{-1} \dots$

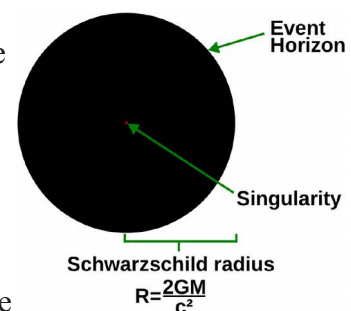
Ma $0^{-1} = \infty \dots$ Dunque non posso più misurare una distanza.

Se il Sole misurasse il raggio di Schwarzschild, misurerebbe circa 3 km...

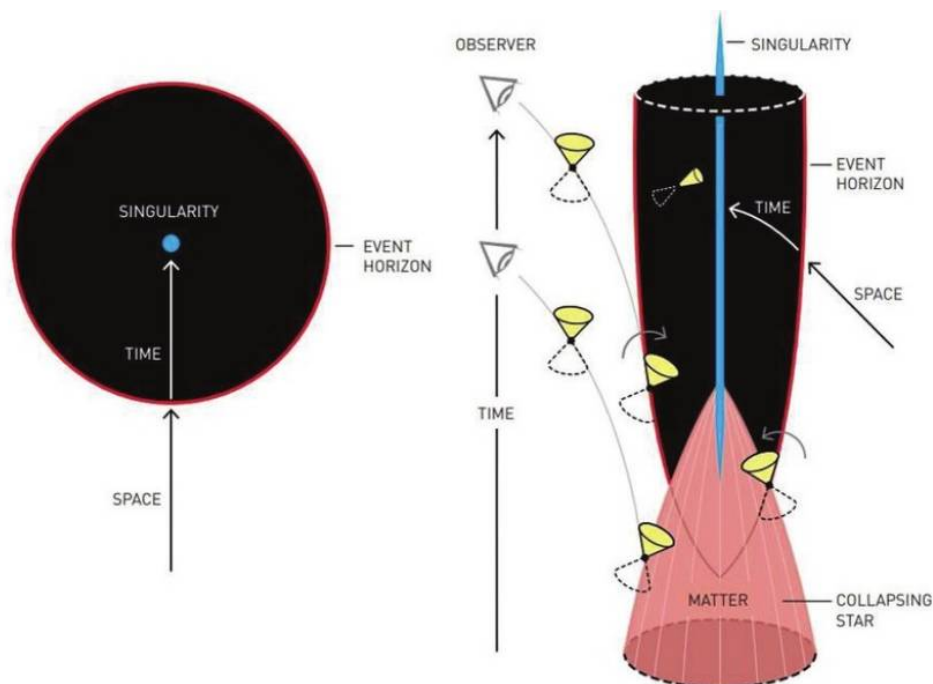
Questo è uno spazio tempo generato da un oggetto che sta fermo ed è il Buco Nero di Schwarzschild. Ma ci sono altri buchi neri. Quello di Schwarzschild è caratterizzato da questa dimensione oltre la quale non ho più modo di descrivere che cosa avvenga, anche se la gravità non ha più una forza che la compensi e si pensa che si raggiunga una densità infinita. Ma nessuno può descrivere che cosa avvenga al di là dell'orizzonte degli eventi.

C'è poi il Buco Nero di Kerr, che è un buco nero ruotante, dove la singolarità è un anello. Questo tipo è il più comune in astrofisica.

C'è un terzo tipo di buco nero, che non è ancora stato osservato, che ha anche una carica elettrica. Perché massa, carica elettrica e rotazioni sono le uniche tre proprietà



che il buco nero conserva. Ed erano solo soluzioni esatte delle equazioni di Einstein: non erano mai stati osservati: per questo sono interessanti. Penrose ha ricevuto il Nobel per aver descritto che cosa accade quando un oggetto dello spazio cade all'interno dell'orizzonte degli eventi.



Quando l'oggetto arriva sull'orizzonte degli eventi, il suo futuro (il cono giallo) è tutto dentro l'orizzonte degli eventi: dunque non tornerà mai fuori. Questa è la singolarità.

Si può parlare di densità infinita solo per la singolarità, mentre noi ci fermiamo all'orizzonte degli eventi.

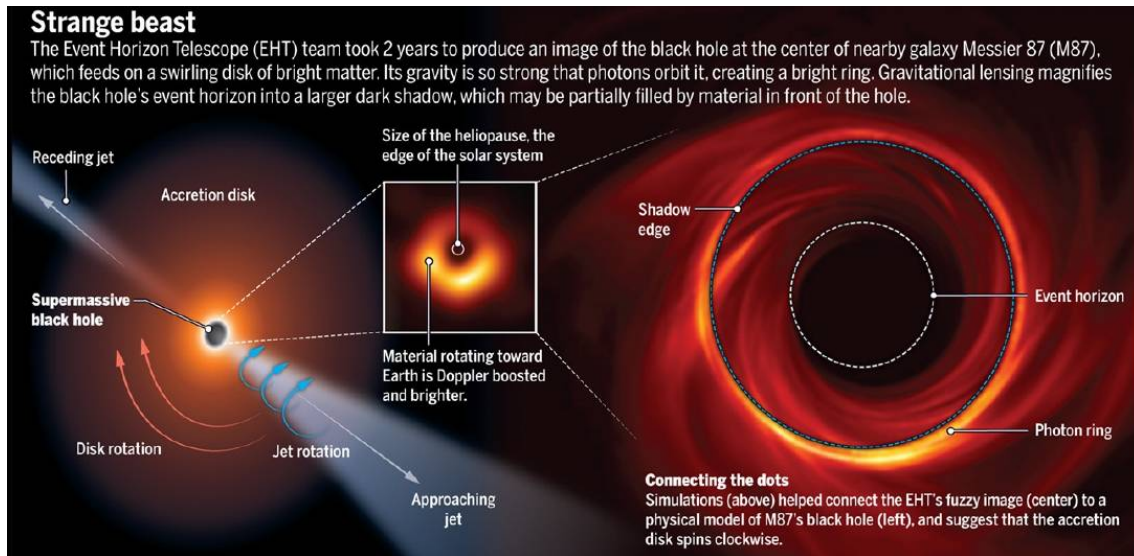
Oggetto	Raggio di Schwarzschild (m)	Densità corrispondente (g/cm ³)
Via Lattea	$2,08 \cdot 10^{15}$ (~0,2 a.l.)	$3,72 \cdot 10^{-8}$
Sole	$2,95 \cdot 10^3$	$1,84 \cdot 10^{16}$
Terra	$8,87 \cdot 10^{-3}$	$2,04 \cdot 10^{27}$

Un oggetto grande come la Terra raggiungerebbe il raggio di Schwarzschild a circa un centimetro e raggiungerebbe una densità altissima. Ma un oggetto grande come la Via Lattea avrebbe una densità molto bassa.

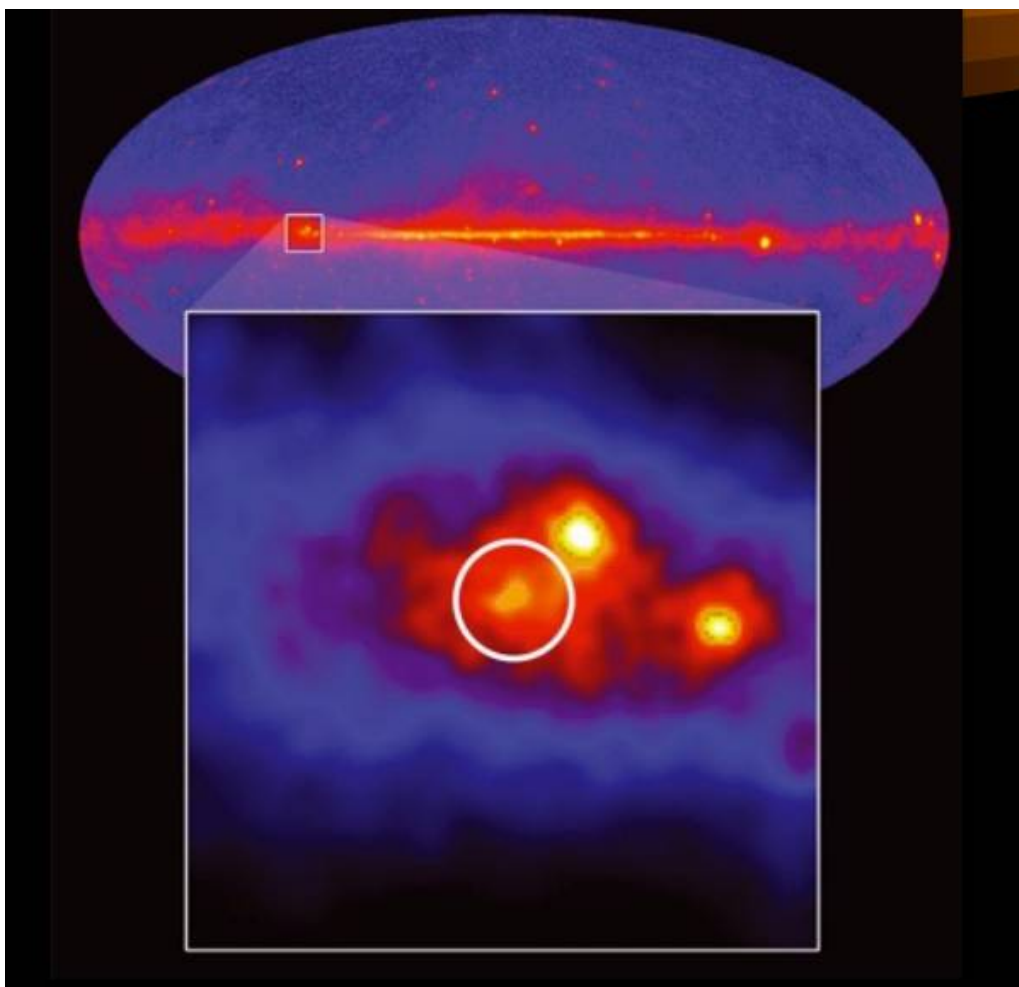
Veniamo all'osservazione dei buchi neri.

Un primo modo è stato di osservare il centro della Galassia. Gli astronomi hanno notato delle traiettorie ellittiche di stelle con velocità variabile spiegabili con un oggetto all'interno delle orbite ellittiche, ma dalla gravità di milioni di masse solari, quando la regione interessata non era più grande del nostro sistema solare.

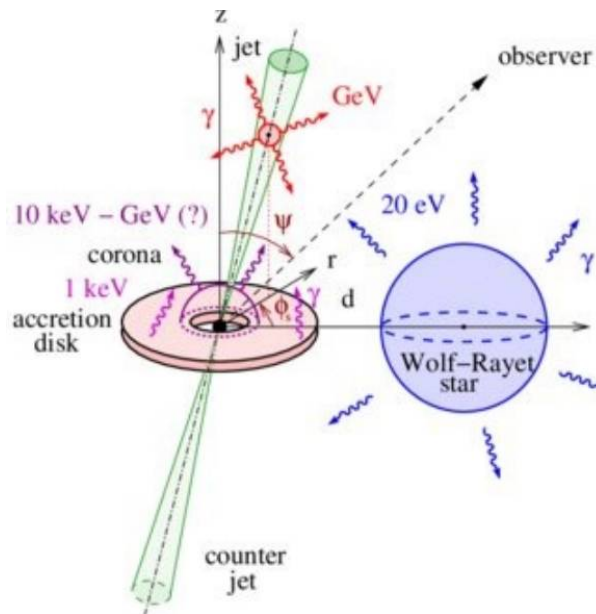
Un secondo tipo è di buchi neri di Kerr, rotanti, al centro delle galassie. Si pensa che accendano dei getti di radiazioni che noi vediamo con i nostri radiotelescopi. Lo abbiamo visto al centro della galassia M87.



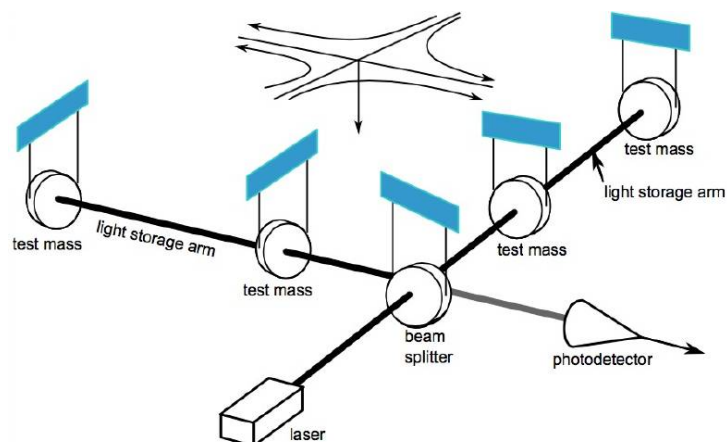
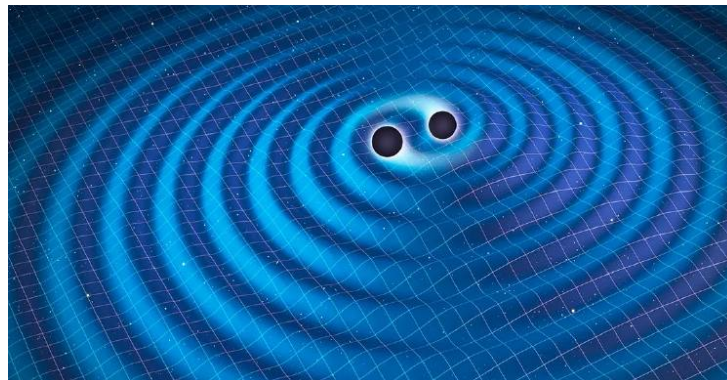
Infine ci sono i buchi neri di massa stellare (una decina di masse solari, non di più). Ce ne è uno, intorno a cui ruota una gigante blu, che emette raggi gamma: Cygnus X3.



Cygnus X3 dal telescopio Fermi



Oggi con le onde gravitazionali riusciamo a conoscere ancora di più la fisica dei buchi neri. Due oggetti deformano lo spazio tempo. Quando ruotano tra loro due buchi neri nel momento in cui si fondono, essi generano onde gravitazionali che siamo riusciti a scoprire.



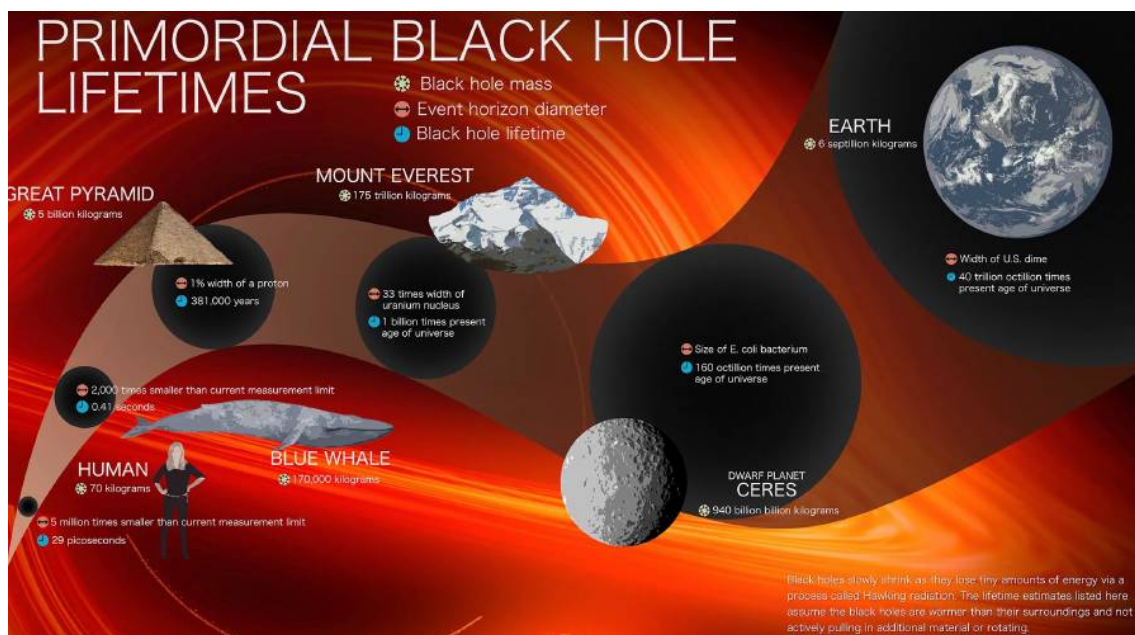


Si riconoscono le onde perché alterano la struttura dello spazio-tempo, e noi ce ne accorgiamo dalla deformazione del cammino della luce laser tra due specchi.

C'è anche la domanda: cosa succede all'interno dell'orizzonte degli eventi? Il suo futuro è verso l'interno.

Stephen Hawking ha studiato allora che cosa succederebbe nelle vicinanze dell'orizzonte degli eventi. Nello spazio del vuoto quantistico si formano continuamente coppie di particelle ed antiparticelle. Cosa succede se una di queste entrasse nel buco nero? L'altra potrebbe avere ancora energia per sfuggirne. E questo avviene nelle vicinanze dell'orizzonte degli eventi. In questo modo è come se estraessimo dell'energia a spese del buco nero. Da che cosa in realtà si origina la radiazione che emettono? Queste coppie di particelle e antiparticelle in realtà portano via un poco della massa/energia del buco nero: questo consentirà al buco nero di “evaporare”, cioè, col tempo, sparire.

Questa immagine ci dice in quanto tempo un buco nero scomparirà.



Se fosse grande come un uomo evaporerebbe in 29 picosecondi. Se grande come una piramide, in 381 anni; se grande come il monte Everest, in un miliardo di volte l'età dell'universo... Se ci fossero dei buchi neri primordiali cambierebbe tutta l'immagine standard della storia dell'universo.

Se ci fosse un buco nero primordiale si potrebbe vedere qualcosa, e lo si sta cercando.

Ma la mia conclusione è che di densità infinita si può parlare solo a proposito della singolarità, che però non possiamo conoscere. Invece possiamo osservare i buchi neri.

SCIRÈ - Come ha fatto Einstein a dedurre la sua visione dell'universo?

LONGO - Einstein non ha fatto nessuna osservazione, ma è partito da considerazioni concettuali. Anzitutto: perché in qualsiasi sistema di riferimento la luce ha sempre la stessa velocità? Da qui lo spazio di Minkowski. La Relatività Generale si chiede se siamo in grado di distinguere un oggetto che sia attratto da una massa o che accelera. Se siamo in un ascensore che sale, ci sentiamo schiacciare verso il basso, come se ci fosse una forza che ci attira. Un oggetto che accelera è come se fosse in un campo gravitazionale in più. Questo ha portato a descrivere lo spazio-tempo con una geometria non più piatta, euclidea, ma curva. I buchi neri potrebbero essere solo soluzioni delle equazioni di Einstein, delle ipotesi matematiche. Solo dopo è venuta l'osservazione astrofisica. Anche l'evaporazione di Hawking è un'ipotesi matematica che potrebbe avere qualche osservazione possibile e che stiamo cercando.

SCIRÈ - Quindi tutto si fonda sul movimento?

LONGO - Piuttosto sulla massa, sulla materia. I buchi neri ruotano, ma potrebbero essere fermi.

CASADIO - Tutto questo è affascinante. Ma quale probabilità c'è che cadiamo in un buco nero?

LONGO - Nessuna. I Buchi Neri si formano con l'evoluzione delle stelle. Il Sole avrebbe un orizzonte degli eventi di circa 3 km. Ma la gravità dipende dalla massa, non dalla densità. La forza che ci attira verso il Sole resterebbe la stessa e la deformazione dello spazio-tempo resterebbe vicino al Sole, che comunque è troppo piccolo per diventare un buco nero.

CASADIO - Quando noi facciamo le osservazioni, che cosa vediamo? Possiamo vedere qualcosa a noi simultaneo?

LONGO - No. In senso stretto non ci è possibile: noi vediamo sempre il passato.

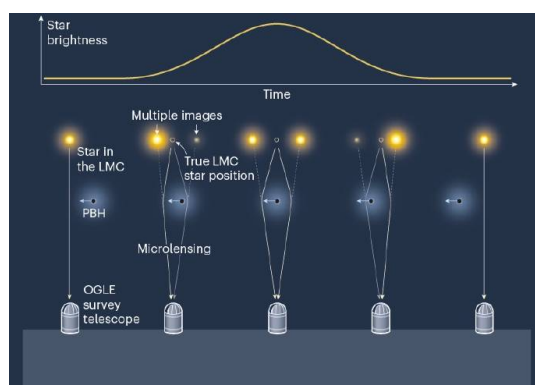
GRASSI - Questo universo immenso sempre più grande sempre più freddo... Le teorie ci danno il passato, ma ci dicono poco del futuro. Questo mette angoscia.

LONGO - Non possiamo predire il futuro dell'universo. Sappiamo però che il Sole tra circa 5 miliardi di anni diventerà una gigante rossa... Un astrofisico ha scritto che, invece di preoccuparci del male che può arrivarci dall'universo, dovremmo preoccuparci di quello che possiamo farci noi.

VIGLIANO - Non possiamo sapere che cosa accade ora, ma solo la storia, e questo ci dà tantissimo. La morte dell'universo potrebbe essere equivalente al Big Bang.

JULVE - Si è cercato di trovare buchi neri primordiali mediante lo sdoppiamento dell'immagine. Si è trovato qualcosa?

LONGO - Attualmente mi pare di no.



JULVE - Si è detto che la massa del collasso di una intera galassia, se ha senso chiederci questo, sarebbe non tanto densa.

LONGO - L'interessante è che se uno mettesse l'intero universo all'interno di un buco nero, avrebbe la densità dello spazio cosmico.

CASADIO - Dunque potremmo venire da un buco nero?

LONGO - Forse sì. Ma non abbiamo modo di sapere che cosa avvenga dentro ad un Buco Nero.

PARENTI - Parliamo di dimensioni di un buco nero. Ha senso il discorso su una singolarità, quando si parla di dividere per 0 ?

LONGO - Noi parliamo dell'interno dell'orizzonte degli eventi, dove resta la massa e la densità media, che comunque non è osservabile.

PARENTI - Il tempo è una grandezza un poco strana. Esiste il presente, non il passato o il futuro. La misura di una linea è qualcosa che c'è, ma il presente è come il punto e la misura la faccio solo io con memoria e previsione. Misurare il tempo è diverso dal misurare una lunghezza.

LONGO - Esiste una distanza temporale tra due eventi, e tale misura dipende dalla massa cui sono vicino. Ai poli, più vicini al centro di gravità, la misura è diversa che all'equatore.

CASADIO - Hawking parla di una cosa che entra nell'orizzonte degli eventi. Che senso ha?

LONGO - Cerca di fare una fisica dell'orizzonte. La prossima volta Alessandro Vigliano ci parlerà dei modelli matematici.