

Introduzione

Un buco nero è un corpo celeste con un campo gravitazionale così intenso che dal suo interno non può uscire nulla, nemmeno la luce essendo la velocità di fuga sulla superficie di tale corpo celeste superiore a quella della luce.

Il buco nero è la fase finale di una stella con massa abbastanza grande

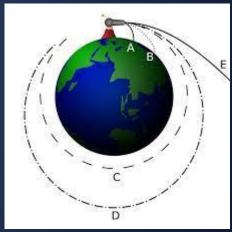
Velocità di fuga

Facciamo un breve accenno al concetto di velocità di fuga

- Velocità iniziale che deve avere un oggetto lanciato dalla superficie di un corpo gravitazionale in direzione verticale per sfuggire al campo gravitazionale del corpo stesso. Questa velocità è detta anche seconda velocità cosmica.
- Sulla Terra la velocità di fuga è di circa 11,2 km/s.
- Supponiamo di lanciare in aria un oggetto dalla superficie terrestre e imponiamo la condizione che il nostro pianeta non riesca più ad attrarlo, cioè il campo gravitazionale non abbia più effetto.
- Per il principio di conservazione dell'energia meccanica

$$\frac{1}{2}mv_i^2 - \frac{mMG}{R} = \frac{1}{2}mv_{\infty}^2 - \frac{mMG}{R_{\infty}} = 0$$

$$=> v_i = \sqrt{\frac{2MG}{R}}$$

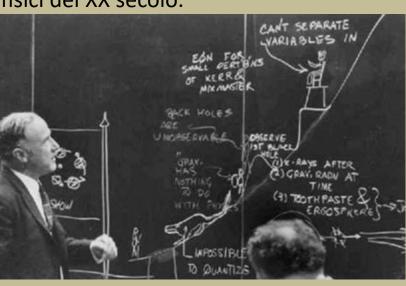


Storia di un nome

- Il termine 'buco nero', in astrofisica, fu coniato dal fisico John Archibald Wheeler, che lo utilizzò a partire dal 1967 in un discorso per indicare un corpo celeste con un campo gravitazionale così intenso da attrarre tutto ciò che si trova in una zona particolare del suo campo gravitazionale e persino la radiazione. Tale zona fu chiamata orizzonte degli eventi
- I fisici, prima di Wheeler, chiamavano "stella nera" o "stella scura" quell'oggetto relativistico dotato di un campo gravitazionale così grande da inghiottire qualsiasi cosa intorno a lui e non lasciare nulla fuori

John Wheeler

- John Archibald Wheeler (Jacksonville, Florida, 9 luglio 1911 Hightstown, New Jersey, 13 aprile 2008) è stato uno dei grandi fisici del XX secolo.
- Ha svolto un ruolo fondamentale nel "Rinascimento" della relatività generale.
- Ha studiato, collaborato e pubblicato articoli di ricerca con alcuni dei maggiori scienziati del XX secolo, come Niels Bohr, Albert Einstein ed Enrico Fermi.
- Ha ispirato numerosi scienziati e premi Nobel, tra cui Richard Feynman e Kip Thorne.
- Ha coniato alcuni dei noti nomi che rappresentano alcuni affascinanti fenomeni, descritti e/o previsti dalla relatività generale, tra cui il nome "buchi neri e l'espressione che li descrive bene "i buchi neri non hanno peli".
- I peli di cui parlava Wheeler sono i campi elettromagnetici che potevano sporgere da una stella ma non da un buco nero.



Storia della teoria

- Il primo astronomo scienziato ad immaginare un corpo tanto massivo da trattenere la luce, fu il francese Pierre Simon Laplace nel 1796
- Qualche anno prima, nel 1783, lo studioso inglese Jhon Mitchell, aveva ipotizzato un tale fenomeno suggerendo a Cavendish l'esistenza su un corpo abbastanza massivo, di una velocità di fuga maggiore di quella della luce.
- Siamo in anni in cui vige ancora la fisica classica ma a quel tempo si trattava in entrambi i casi solo di ipotesi fantasiose.
- Qualche anno più tardi la teoria della «Relatività generale» di Albert Einstein, ha fornito una spiegazione scientifica sull'esistenza dei buchi neri anche se lo stesso Einstein e Schwarzschild non credevano nella loro esistenza

Buchi neri e teoria della relatività

- La teoria della relatività ristretta è valida nello spazio completamente vuoto, dove un corpo di prova si muove in assenza masse e con velocità prossima a quelle della luce. In questo caso, la geometria è audidea.
- Se le velocità dei corpi in questione sono molto più piccole della luce allora si possono fare approssimazioni e studiare tutto secondo la teoria della fisica classica
- La relatività generale entra in scena in presenza di un qualsiasi oggetto massivo.
- Essa afferma che attorno ad ogni oggetto materiale lo spazio si curva. Naturalmente, se le masse sono molto piccole allora le approssimazioni sono quelle della relatività ristretta.

Scwarzscild

- Fu proprio il matematico e astronomo tedesco **Karl Schwarzschild** (il cui nome *Schwarz-schild* significa per *scudo nero*) che nel 1916 usò le equazioni della Relatività Generale per calcolare la geometria dello spazio-tempo intorno a una massa.
- Scoprì che, se un corpo massivo di forma sferica ha un raggio minore di un determinato valore, nessuna informazione, né particelle né fotoni, sono in grado di raggiungere un osservatore esterno perché la velocità di fuga risulta superiore alla velocità della luce.
- Fino ad Einstein e Schwarzschild i buchi neri erano considerati ancora una soluzione matematica delle equazioni delle Relatività.
- Einstein e Schwarzschild non credevano che i buchi neri esistessero

Raggio di Schwarzschild

- La superficie individuata da questo raggio è chiamata orizzonte degli eventi per un buco nero di Schwarzschild cioè privo di carica elettrica e non rotante.
- Le onde elettromagnetiche e la materia provenienti dall'interno del corpo con tale raggio o con raggio inferiore, non possono superare l'orizzonte degli eventi, da qui deriva il nome "buco nero".
- Il raggio di Schwarzschild si calcola con la seguente formula: $r_S = \frac{2G}{c^2} M$

essendo G la costante gravitazionale, M la massa del corpo e c la velocità della luce.

Singolarità

Sintomi di concretezza

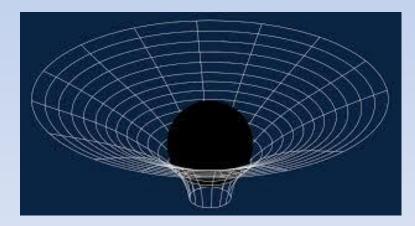
- I buchi neri acquistano concretezza solo nel 1939, quando Tolman, Oppenheimer e Volkoff dimostrarono che una stella alla fine della sua evoluzione subisce un collasso gravitazionale che, se la sua massa è maggiore di 3 volte quella del Sole (3 masse solari), si comprime al di sotto dell'orizzonte degli eventi.
- Nel 1963, Roger Penrose, uno dei tre premi Nobel per la Fisica 2020, dimostrò che l'orizzonte degli eventi rappresenta una superficie che forza tutto ciò che la colpisce a puntare verso il proprio centro, verso una singolarità a densità infinita, un'inevitabile creazione di un buco nero.

Esempio: telo e vuoto

Si consideri uno spazio a due dimensioni costituito di un telo elastico teso ai suoi estremi. In assenza di oggetti sulla sua superficie il telo è perfettamente piano, le linee tracciate con una squadra sono rette e formano fra loro angoli di 90 gradi.

Esempio: telo e massa

- Si supponga di poggiare sul telo elastico una palla pesante.
- Il telo si curverà e le righe tracciate seguiranno un percorso che sarà tanto più curvo quanto più le righe stesse saranno vicine alla palla. Siamo in una condizione simile a quella della relatività generale
- Le linee più lontane possono essere approssimate a rette parallele o perpendicolari tra loro come erano prima che venisse poggiata una massa sul telo.
- Nella realtà, l'equivalente del telo è lo spazio vuoto nel quale viene posizionato un oggetto massivo che genera l'attrazione gravitazionale in quanto curva lo spazio.

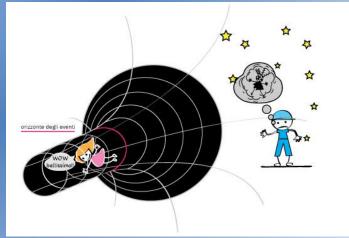


Buchi neri e singolarità

- Quando si parla di buchi neri si parla anche di singolarità.
- In generale, le singolarità sono possibili configurazioni dello spazio-tempo previste dalla teoria della relatività generale di Albert Einstein nel caso in cui la densità della materia raggiunga valori così elevati, ed il volume valori così ridotti, da provocare un collasso gravitazionale dello spazio-tempo.

 Ogni buco nero, al suo centro, contiene una singolarità circondata da un orizzonte degli eventi dal quale nessun corpo potrebbe uscire.

 Un qualsiasi corpo che cadesse in un buco nero non potrebbe evitare di essere trasportato nella singolarità una volta attraversato l'orizzonte degli eventi. Appena si raggiunge la regione singolare si viene schiacciati a densità infinita e la propria massa viene aggiunta alla massa totale del buco nero.

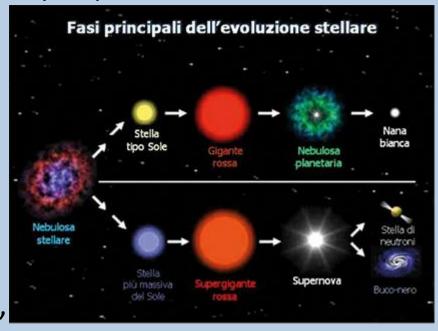


Nascita e vita di una stella

- La stella è costituita da plasma, gas estremamente caldo formato da particelle cariche e neutre.
- Secondo le attuali teorie, una stella nasce dalle nebulose cioè da aree in cui c'è una grande massa di gas tale da potersi legare gravitazionalmente.
- Il gas presente nello spazio è molto semplice, è il più semplice della tavola periodica: l'idrogeno
- Le stelle sono originariamente costituite da nuclei di idrogeno definito in tal proposito il carburante fondamentale delle stelle.
- Nell'istante in cui nasce una stella, è già ha iniziato il processo di fusione dell'idrogeno in elio con una conseguente stabilità nel processo che conduce ad un continua liberazione di calore e luce dal nucleo.

Morte di una stella

- Finito l'idrogeno, la stella comincia a contrarsi diventando sempre più piccola e il nucleo sempre più caldo
- Gli strati esterni della stella si espandano, trasformandola in una gigante rossa.
- Quando il nucleo è
 abbastanza caldo, l'elio
 comincia a fondersi in carbonio
 e una volta esaurito anche l'elio,



il nucleo si espande e la stella inizia a raffreddarsi.

Morte di una stella: due casi

I caso:

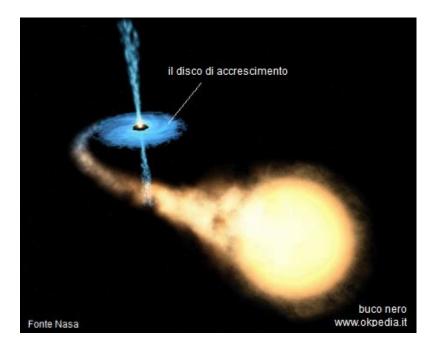
 Se la massa stellare è simile a quella del Sole, il nucleo raggiunge una temperatura talmente bassa da diventare una nana bianca.

Il caso:

- Se la stella è davvero grande, la sua massa è tale che dopo aver esaurito l'elio, ha abbastanza carbonio da fonderlo in elementi pesanti come il ferro. Quando il nucleo si trasforma in ferro, termina la combustione nucleare. La gravità della stella la fa collassare, e poi esplodere in una supernova, fase che rappresenta la morte di una vecchia stella. Quello che resta del nucleo può generare una stella di neutroni o un buco nero.
- Le stelle più piccole invece, le nane rosse, non seguono questi passaggi, ma si spengono progressivamente, esistendo per centinaia di miliardi di anni. Alla fine della loro vita non esplodono.

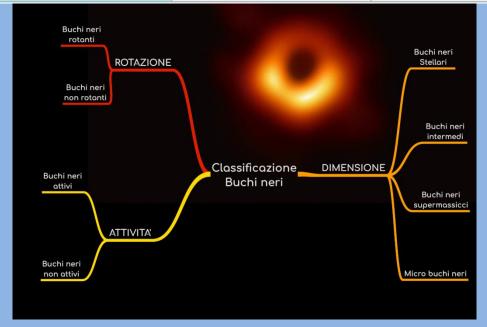
Massa di un buco nero

- La grandezza di un buco nero dipende dalla sua massa, che può variare da poche volte a miliardi di volte rispetto a quella del Sole. In generale possiamo classificare i buchi neri in tre categorie:
 - stellari, con una massa compresa tra 1,5 e 10 volte quella del Sole;
 - di massa intermedia, con una massa compresa tra 100 e 100.000 volte quella del Sole;
 - supermassicci, con una massa di milioni o miliardi di volte quella del Sole.
- Un buco nero di massa vicina a quella solare ha un diametro di circa 6 chilometri, ma un buco nero supermassiccio può avere un diametro di miliardi di chilometri.
 Il buco nero più grande finora scoperto si chiama TON618, e ha una massa di circa 40 miliardi di volte quella del Sole.



Classifica dei buchi neri

Classe	Massa	Raggio
Buco nero supermassiccio	~10 ⁶ –10 ⁹ M _{Sole}	~0.001–400 AU
Buco nero di massa intermedia	~10 ³ M _{Sole}	~10 ³ km ≈ $R_{Plutone}^{[31]}$
Buco nero stellare	~3-30 M _{Sole}	~30 km
Micro buco nero	fino a ~M _{Luna}	fino a ~0,1 mm



Stelle di neutroni e buchi neri

 Le stelle di neutroni osservate sono molto meno pesanti dei buchi neri:

$$1.4M_{\odot} < M_{\rm NS} < 3M_{\odot}$$

 $3M_{\odot} < M_{\rm BH} < 10^9 M_{\odot}$

- Le stelle di neutroni ruotano attorno a se stesse, i buchi neri non necessariamente.
- I buchi neri hanno un orizzonte degli eventi, le stelle di neutroni no.
- Stelle di neutroni hanno un raggio tipico di circa 10 km

Hawking

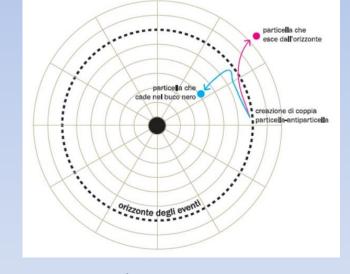
- Negli anni '70 Hawking scoprì che i buchi neri perdono massa sotto forma di particelle quantistiche che sfuggono nel corso del tempo: un fenomeno noto come di Radiazione di Hawking.
- Secondo alcune teorie, la radiazione di Hawking non consente di recuperare informazioni sui corpi celesti che avevano dato origine al buco nero.
- Un paradosso al riguardo è che sulla scala quantistica le leggi della fisica sono completamente reversibili, il che significa che le informazioni che esistevano in passato dovrebbero essere teoricamente recuperabili.
- Ultimamente Hawking aveva però sostenuto che l'informazione può uscire da un buco nero, confutando l'affermazione di Wheeler sui 'peli dei buchi neri'
- Secondo Hawking 'I buchi neri hanno i peli'.

Radiazione di Hawking

- Detta anche di Bekenstein-Hawking, radiazione termica emessa dai buchi neri a causa di effetti quantici.
- Si dimostra teoricamente sulla base dei principi della meccanica quantistica, che tale radiazione si formi nei pressi di una zona particolare che circonda il buco nero detta orizzonte degli eventi.
- Non esistono prove sperimentali di tale teoria
- Il nome si deve al fisico Stephen Hawking, che nel 1974 ne ha elaborato la teoria e al fisico Jacob Bekenstein che sosteneva che i buchi neri avessero proprietà termiche.
- Hawking ha dimostrato come gli effetti quantistici consentano ai buchi neri di emettere una radiazione di corpo nero.
- Questa radiazione è il risultato di particelle virtuali che

 nascendo in coppia continuamente nel vuoto cosmico –
 diventano reali a causa della forza gravitazionale del buco nero.

Le fluttuazioni quantistiche del vuoto provocano la comparsa



di coppie particella-antiparticella in prossimità dell'orizzonte degli eventi dell'oggetto celeste. Una particella della coppia cade nel buco nero, mentre l'altra riesce a sfuggire nell'universo esterno. Se la particella che cade nel buco nero è un'antiparticella allora il buco nero perde massa e a un osservatore esterno sembrerebbe che il buco stesso abbia appena emesso una particella.

Hawking

- Stephen William Hawking, nato a Oxford l'8 gennaio 1942 e deceduto a Cambridge il 14 marzo 2018; è stato fra i più autorevoli e conosciuti fisici teorici al mondo, noto soprattutto per i suoi studi sui buchi neri, sulla cosmologia quantistica e sull'origine dell'universo.
- Tra i suoi contributi più rilevanti figurano la radiazione di Hawking, la teoria cosmologica sull'inizio senza confini dell'universo denominata stato di Hartle-Hawking, e la termodinamica dei buchi neri.
- È stato titolare della cattedra lucasiana di matematica all'Università di Cambridge per trent'anni, dal 1979 al 2009 ed è stato fino alla morte direttore del Dipartimento di Matematica Applicata e Fisica Teorica di Cambridge.
- Membro della Royal Society, Royal Society of Arts e Pontificia Accademia delle Scienze, nel 2009 ha ricevuto dal presidente statunitense Barack Obama la Medaglia presidenziale della libertà, la più alta onorificenza degli Stati Uniti d'America.
- Noto divulgatore nonché scrittore di libri divulgativi di questioni cosmologiche, fisiche e astrofisiche.

Come si studiano i buchi neri

- I buchi neri non sono visibili agli strumenti per questo motivo vengono osservati attraverso le interazioni con i corpi nelle immediate vicinanze
- Una delle tecniche utilizzate per studiare i buchi neri è il lensing gravitazionale che consiste nell'osservare la curvatura della luce emessa da oggetti che passano vicino ai buchi neri. La lente gravitazionale, o lensing gravitazionale, è un fenomeno predetto dalla teoria della relatività generale di Albert Einstein. Si verifica quando la luce che proviene da una fonte distante è deviata dalla gravità di un oggetto massivo, come un buco nero o una galassia, che si interpone sulla linea di vista. Questa deviazione causa una distorsione dell'immagine della sorgente, che può essere vista come una sorta di lente di ingrandimento.

Lensing gravitazionale

and part of the second of the

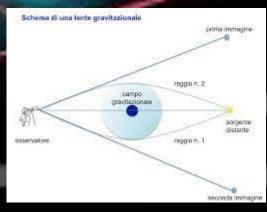
Il lensing gravitazionale può essere utilizzato per studiare

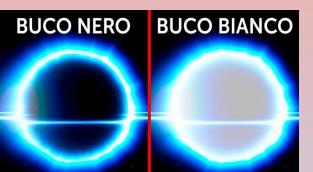
l'universo e per determinare la massa degli oggetti massivi come i buchi neri. Infatti, quando un oggetto massivo devia la luce, la traiettoria subisce una curvatura. L'entità di questo fenomeno dipende dalla massa dell'oggetto. In questo modo, osservando il lensing gravitazionale di una fonte distante, è possibile determinare la massa dell'oggetto massivo che ha causato la deviazione.

Il lensing gravitazionale è stato osservato per la prima volta negli anni '70, ma è
diventato un campo di ricerca molto attivo solo negli ultimi decenni grazie
all'avanzamento delle tecnologie e delle simulazioni al computer.

Grazie alla lente gravitazionale è stato possibile studiare la distribuzione della

materia nell'universo, compresi i buchi neri, che altrimenti sarebbero invisibili. Il lensing gravitazionale può anche essere utilizzato per studiare le proprietà dell'energia oscura, una forma di energia ipotetica che sembra guidare l'espansione dell'universo.





Buchi bianchi

- I buchi bianchi sono regioni spazio-temporali previsti dalla teoria della relatività generale secondo la quale, non si può entrare dall'esterno, ma dalla quale può uscire energia-materia e luce.
- In questo senso, un buco bianco è l'opposto del buco nero, in cui si può entrare solo dall'esterno e da cui non può uscire né energia-materia né luce.
- Alcuni autori affermano che buchi neri e buchi bianchi potrebbero essere collegati.
- Stephen Hawking credeva che questa regione non poteva esistere anche perché non ci sono processi fisici noti tramite i quali possa formarsi un buco bianco.