“UNA STELLA SUL DIPLOMA”

I BUCHI NERI

A CURA DI SARA CELANO

I BUCHI NERI

Stelle invisibili?

Come nascono

Come sono fatti

Effetti

Tipi di buchi neri

Probabili buchi neri

Cunicoli spazio-temporali

Bibliografia

Credits

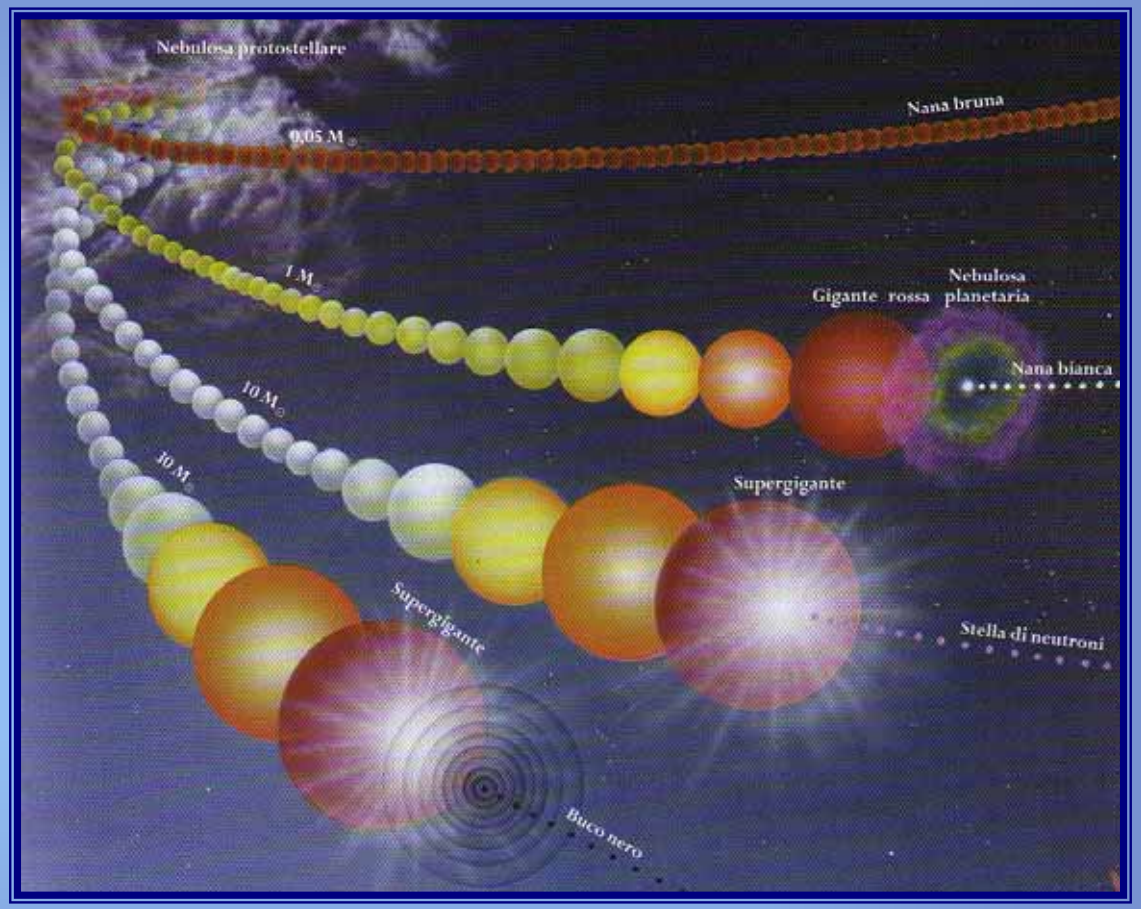
STELLE INVISIBILI?

La prima intuizione in merito all'esistenza di particolari corpi, oscuri e invisibili, fu fatta alla fine del Settecento. Più precisamente, nel 1783, un pastore inglese di nome John Michell (1724-1793) collaborò con la Royal Society di Londra e in particolare ebbe un'assidua corrispondenza con il noto fisico Cavendish, esperto di elettricità.
Egli portò la visione, che un secolo prima Isaac Newton aveva avuto della gravità e della luce, alle sue più estreme conseguenze. Michell basò le sue idee sul concetto di velocità di fuga. Egli pensò ad un raggio di luce che lascia una stella, come noi oggi pensiamo ad un razzo che lascia la superficie terrestre. Per sfuggire all'attrazione gravitazionale terrestre e viaggiare nello spazio, un razzo ha bisogno di un'accelerazione pari a 11 km/s^2, superiore alla forza con cui il corpo è attratto verso il basso dalla gravità.
La velocità di fuga sulla superficie del Sole è di 620 km/s e fu ricavata da Michell sulla base delle dimensioni e della densità dell'astro; ma il reverendo inglese conosceva anche un altro numero con un certo grado di precisione: la velocità della luce, cinquecento volte superiore alla velocità di fuga del Sole. Questo gli permise di calcolare che una stella di dimensioni cinquecento volte maggiori rispetto a quelle del Sole, ma con la stessa densità, avrebbe una velocità di fuga pari alla velocità della luce:
"Se dovessero effettivamente esistere in natura corpi di densità non inferiore a quella del sole e i cui diametri fossero più di cinquecento volte quella del sole… la loro luce non arriverebbe sino a noi."
Michell era fedele alle conoscenze e alle consuetudini del suo tempo e, in particolare, alle idee di Newton e credeva che la luce fosse composta di particelle. Questo implicava che la luce subisse la forza gravitazionale proprio come qualsiasi altro oggetto. Del resto, una stella con la stessa densità del Sole e dimensione più di cinquecento volte maggiori avrebbe avuto una velocità di fuga superiore a quella della

luce, e di conseguenza le particelle di luce non sarebbero state abbastanza veloci da sottrarsi all'attrazione gravitazionale. Una stella del genere da fuori appariva nera e quindi invisibile.
Pochi anni dopo anche Pierre Simon de Laplace (1749-1827) arrivò a considerazioni simili a quelle di Michell, indipendentemente dal parroco inglese, che furono però subito ritrattate a causa delle nuove teorie che si stavano sviluppando in merito alla natura ondulatoria della luce.
Michell e Laplace spiegarono come una stella potesse essere nera, ma bisognerà aspettare il Ventesimo secolo per capire il significato di "buco".
Fondamentale fu il lavoro svolto da Oppenheimer e Snyder nel 1939 che mostrarono come una stella fredda e di grande massa dovesse collassare indefinitamente, diventando un buco nero.
I buchi neri, però, sono molto più che stelle morte, grandi e dense, la cui gravità è troppo forte per lasciar fuoriuscire la luce. Essi si distinguono dalle cosiddette "stelle invisibili" di Michell per una serie di caratteristiche fondamentali: in primo luogo le stelle di Michell sono oggetti solidi di dimensioni definite; i buchi neri invece, per come li conosciamo oggi, sono costituiti quasi interamente da spazio vuoto. Sono letteralmente dei buchi nello spazio, all'interno dei quali le proprietà di spazio e tempo sono del tutto alterate.
La fisica dei buchi neri, non si basa sulle teorie newtoniane tanto care a Michell e Laplace, ma sulle innovative idee di Albert Einstein. Se la relatività generale è corretta infatti, è molto probabile che i buchi neri esistano realmente nell'universo e che siano soprattutto conseguenza inevitabile del concetto di gravità. Secondo Einstein infatti la gravità è legata alla curvatura dello spazio: più forte è il campo gravitazionale di un corpo massiccio, maggiori saranno la curvatura e la distorsione dello spazio circostante.

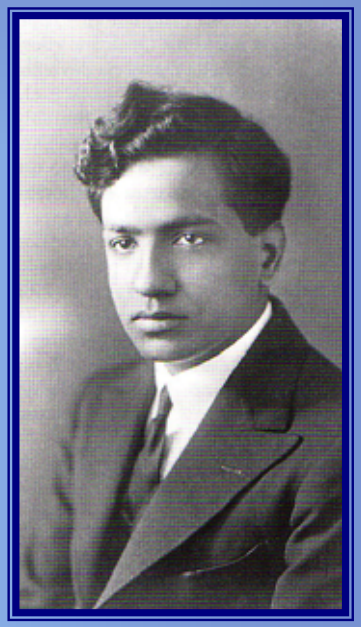
COME NASCONO

Tutte le stelle, Sole compreso, non possono vivere in eterno. La vita delle stelle è basata su un delicato equilibrio fra la forza gravitazionale e la pressione generata dal nucleo interno del corpo celeste. Il calore sviluppato dalle stelle nel corso della loro vita viene continuamente irraggiato nello spazio e così il corpo perde lentamente energia. Questo calore viene rimpiazzato dalle reazioni nucleari (idrogeno-elio) che si sviluppano nei nuclei delle stelle, ma tali reazioni non possono continuare all'infinito ma termineranno quando tutto il combustibile nucleare si dissiperà e il delicato equilibrio con la gravità verrà meno.



Le stelle si originano dal collasso gravitazionale di materia diffusa, presente in origine nelle nubi interstellari; in un primo tempo le stelle si contraggono, ma poi si stabilizzano non appena la temperatura centrale sale abbastanza da rendere possibili le reazioni di fusione del nucleo.

La stella a questo punto entra nella fase principale della sua vita che durerà fino a quando gran parte dell'idrogeno sarà consumato. Per tutto questo tempo temperatura superficiale, luminosità e dimensioni dipendono unicamente dalla massa.

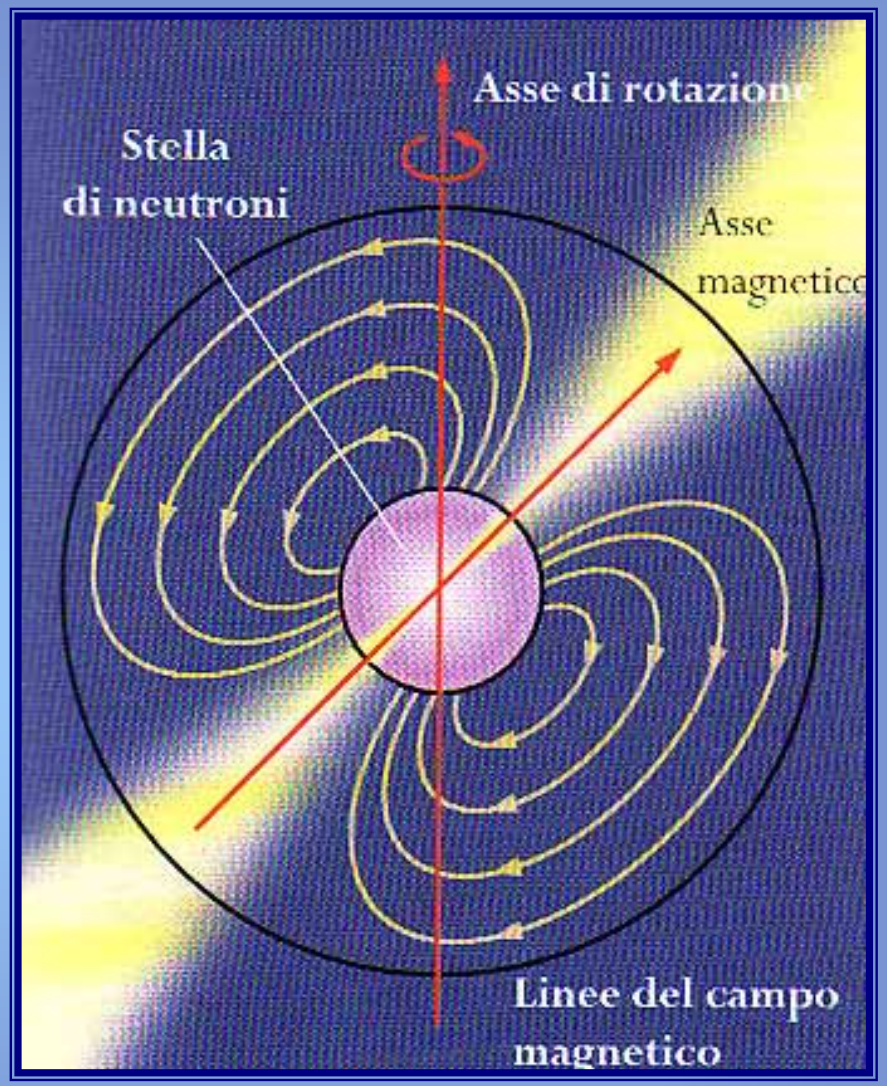


Quanto più procedono le fusioni nucleari nel centro della stella, tanto più l'idrogeno viene convertito in elio. Esaurite le riserve, la produzione di energia nucleare si fa meno efficiente e il nucleo si comprime, schiacciato dal proprio peso. Ma, a seguito di questa contrazione, l'energia gravitazionale rilasciata fa aumentare la velocità di agitazione termica degli atomi di idrogeno restanti, il che comporta un tasso più elevato di reazioni nucleari e, di conseguenza, anche un maggior rilascio energetico. Poiché le reazioni nucleari durano solo fino a quando c'è combustibile, anche questo aumento di luminosità non può durare per sempre. In seguito, la stella crescerà fino a raggiungere le enormi dimensioni di una gigante rossa. Durante questa fase verrà bruciata l'ultima parte dell'idrogeno a favore dell'elio, che a sua volta riuscirà ad innescarsi e a dare origine a nuove reazioni di fusione nucleare (elio-carbonio-ossigeno). Dopo di che la stella inizierà un lento cammino che la porterà a diventare una nana bianca.

Le nane bianche sono stelle che rimangono in equilibrio gravitazionale per un tempo indefinito, senza bisogno di alcuna reazione nucleare che le sostenga. Esse contrastano il collasso gravitazionale grazie ai moti caotici delle particelle di cui sono composte, ma, a differenza di quanto avviene nelle stelle normali, questi moti non sono legati alla temperatura del gas nell'interno dell'astro, perciò anche quando irraggiano la loro energia termica e si raffreddano, le nane bianche non perdono il sostegno della loro pressione interna (pressione di degenerazione) e quindi non si contraggono.

Nel 1930 Subrahmanyan Chandrasekhar definì un limite superiore per la massa di una nana bianca: secondo lo studioso indiano non può esistere alcun equilibrio gravitazionale nelle nane bianche che superano la soglia delle 1,4 masse solari.
Per masse più elevate risulta che la pressione di degenerazione non è in grado di controbilanciare la gravità , indipendentemente da quanto è compressa la stella.
Un'altra possibilità è che al termine della vita della stella gli strati gassosi più esterni siano rilasciati in modo esplosivo in un evento di supernova, lasciando come resto una stella di neutroni. Ma la teoria pone un altro limite: la massa di una stella di neutroni non può essere maggiore di 3 masse solari, altrimenti il collasso porterebbe alla formazione di un buco nero.
Le stelle massicce, nelle ultime fasi della loro esistenza, sono alimentate da una sequenza di reazioni nucleari che coinvolgono elementi sempre più pesanti. Non appena finisce un tipo di combustibile nucleare, la stella si contrae, diventando più calda, finché una nuova serie di reazioni può innescarsi, aumentando il numero atomico degli elementi che produce. Le stelle che hanno massa pari a 5-8 volte quella del Sole arrivano a sintetizzare elementi molto pesanti, come il ferro. Fino a questo punto la fornace nucleare riesce a sviluppare l'energia tale da contrastare il collasso gravitazionale, ma non ci sono reazioni che possano liberare energia partendo dal ferro, per cui esso rappresenta il punto d'arrivo terminale per una stella intesa come reattore nucleare. Non essendoci più reazioni in grado di estrarre energia dal ferro, all'improvviso il combustibile viene a mancare e il nucleo subisce un collasso catastrofico fino a raggiungere, in una frazione di secondo, la densità di un nucleo atomico e i nuclei di ferro vengono spezzati in componenti sempre più piccole fino ad arrivare a particelle subatomiche. Gli strati più esterni vengono espulsi con un'immensa esplosione detta supernova, mentre lo smantellamento dei prodotti delle fusioni nucleari non si ferma con la fissione del ferro in particelle subatomiche, ma la densità del nocciolo che sta collassando diventa così grande che protoni ed elettroni vengono fusi insieme e formano i neutroni.

Una stella di neutroni è l'analogo di una nana bianca, con la sola differenza, che la pressione di degenerazione, che bilancia la gravità, si sviluppa fra i neutroni che la compongono.
Al di sopra di 3 masse solari, le stelle sono destinate ad un collasso completo che le trasforma in buchi neri: non essendoci pressione interna di alcun tipo che contrasti la forza gravitazionale, la stella soccombe sotto il peso della gravità.



Le stelle di neutroni sono circondate da campi magnetici straordinariamente intensi. Se le stelle ruotano, i campi generano potenti correnti elettriche e accelerano gli elettroni. Gli elettroni si rendono responsabili dell'emissione di un fascio intenso di radiazioni da ciascun polo magnetico della stella. Siccome il campo magnetico non è perfettamente allineato con l'asse di rotazione, il fascio di radiazioni ruota in cielo come un faro.

SINGOLARITA’

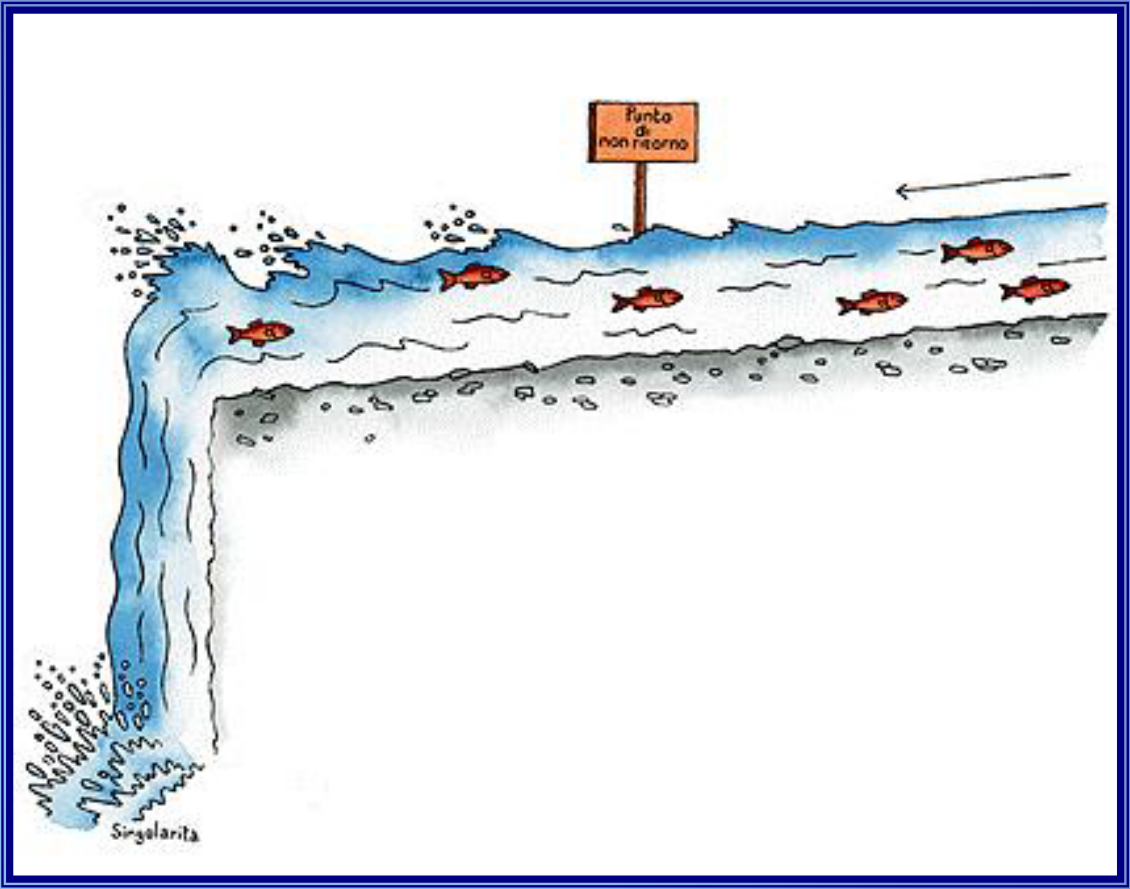
Una singolarità è un punto dello spazio-tempo in cui la forza gravitazionale diviene infinita**.**
Tale risultato è stato raggiunto per la prima volta da Karl Schwarzschild nel 1916 partendo da certe soluzioni alle equazioni del campo gravitazionale di Einstein.
Nel punto di singolarità si ha una densità infinita poiché contiene tutta la massa del buco in uno spazio dalle dimensioni minori di quelle di un atomo. La singolarità si chiama così perché di fronte ad essa la fisica descritta dalla relatività smette di funzionare. Quando le equazioni che descrivono un sistema fisico hanno delle soluzioni che divergono, cioè compaiono degli infiniti, la teoria viene meno.
Secondo la relatività generale le singolarità si formano in due modi. Nel futuro, ad esempio attraverso il collasso gravitazionale delle stelle molto massicce, che avviene inevitabilmente al termine della loro vita dopo aver esaurito tutto il carburante per le reazioni termonucleari; e nel passato, sotto certe ragionevoli condizioni, un universo che si espande deve per forza essere iniziato con una singolarità.
Nel 1965 Roger Penrose**,** che aveva una potente visione geometrica della relatività, analizzando il comportamento dei coni di luce, che rappresentano in pratica il passato e futuro di un evento nell'universo, dentro forti campi gravitazionali, giunse alla conclusione che se un astro in fase di collasso avesse raggiunto un certo limite chiamato orizzonte degli eventi, allora la singolarità sarebbe stata inevitabile**.** Egli in pratica dimostrò che la teoria della relatività generale prediceva, attraverso certe soluzioni alle equazioni di campo di Einstein, la sua stessa incompletezza, affermando la sicura esistenza delle singolarità.

Le singolarità nel futuro, cioè quelle provocate dal collasso gravitazionale di astri massicci, hanno l'interessante proprietà di non essere visibili. Le singolarità infatti si presentano solo in opportune regioni dello spazio-tempo, i buchi neri appunto**,** che non ne permettono l'osservazione essendo questi ultimi delimitati dall'orizzonte degli eventi**.** Quando un corpo sufficientemente massivo implode, la superficie del materiale collassa sotto il peso dell'attrazione gravitazionale delle sue parti e non importa se questo collasso è perfettamente a simmetrica sferica.

La superficie del materiale collassante comincia a vibrare con moti che poi si smorzano lentamente e si assestano nello stato sfericamente simmetrico con il rilascio di onde gravitazionali. Ogni volta che si forma un buco nero, deve così formarsi al suo interno una singolarità.

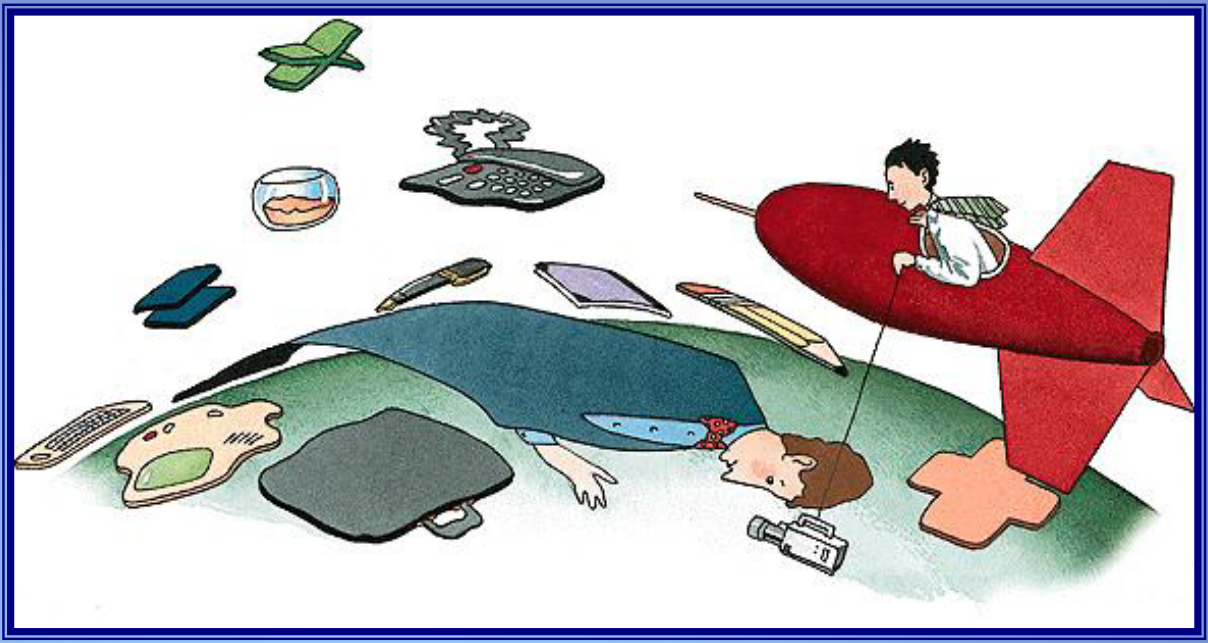
ORIZZONTE DEGLI EVENTI

L'orizzonte è comunemente definito come la linea immaginaria in coincidenza della quale i nostri occhi vedono congiungersi il cielo e la terra. Sappiamo che questo "confine" che vediamo è dovuto in realtà alla curvatura della Terra e, poiché la luce viaggia seguendo una traiettoria più o meno rettilinea vicino alla superficie del nostro pianeta, non siamo in grado di vedere oltre. Analogamente, l'orizzonte di un buco nero segna il confine oltre il quale non ci è possibile osservare alcun "evento".



L'acqua scorre più rapidamente di quanto un «pesceluce» riesca a nuotare; se oltrepassa questo il punto di non ritorno, il pesceluce non riesce più a risalire la corrente ed è destinato a sfracellarsi nella cascata. Ma nel punto critico il pesce non avverte nulla di particolare. Analogamente, un raggio di luce o una persona che si trovi all'interno dell'orizzonte non può più uscirne e cade inevitabilmente nella singolarità che sta al centro del buco nero, ma non nota alcunché di particolare nell'attraversamento dell'orizzonte.
(Illustrazione buco nero: Bryan Christie; illustrazione fiume: Yan Nascimbene)

L’orizzonte degli eventi è il bordo di un buco nero. Una volta oltrepassato questo confine si è all’interno del buco catturati in maniera inesorabile dalla gravità. La natura peculiare di questo limite deriva dal suo carattere unidirezionale.
L’orizzonte degli eventi è un confine sferico, il cui raggio dipende dalla massa del buco nero.
Il raggio di un buco nero, o raggio di Schwarzchild, è numericamente pari a 2,95 chilometri moltiplicato per la massa del buco espressa in masse solari. Un buco nero di dieci masse

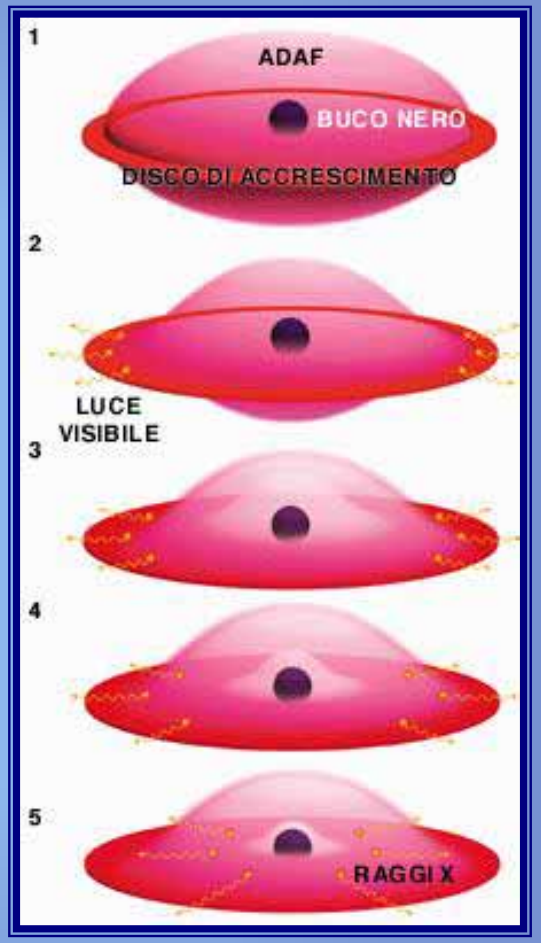


La superficie di un buco nero appare a Tromboni (che sta sull’astronave) come una membrana sferica, il cosiddetto orizzonte. Tromboni vede Golosi, che sta cadendo nel buco nero, rallentare e appiattirsi all’orizzonte; secondo la teoria delle stringhe, sembra anche che Golosi si diffonda su tutto l’orizzonte. Perciò Tromboni, da osservatore esterno, vede che l’informazione contenuta in tutto ciò che cade nel buco nero si arresta alla sua superficie. Invece Golosi si accorge di attraversare l’orizzonte e di cadere nel centro del buco nero, dove viene schiacciato.
(Illustrazione: Yan Nascimbene)

solari ha un raggio di 30 chilometri e un diametro di 60.
L’orizzonte degli eventi è un limite, non si può vedere nulla di ciò che accade al di là o sopra di esso, poiché nessun fotone che proviene da esso può giungere al di fuori del buco nero.
Man mano che ci si avvicina all’orizzonte degli eventi il tempo rallenta e ipotetici orologi che si trovassero vicini al buco nero scorrerebbero più lentamente.
L’orizzonte degli eventi appare come un luogo paradossale. In realtà l’idea che il tempo si fermi a livello di questo limite è solo una conseguenza della posizione esterna al buco nero da cui osserviamo l’orizzonte. Per un osservatore che, sopportando le forze di marea, oltrepassasse l’orizzonte degli eventi, il tempo scorrerebbe normalmente, così come dice la relatività di Einstein.

DISCO DI ACCRESCIMENTO

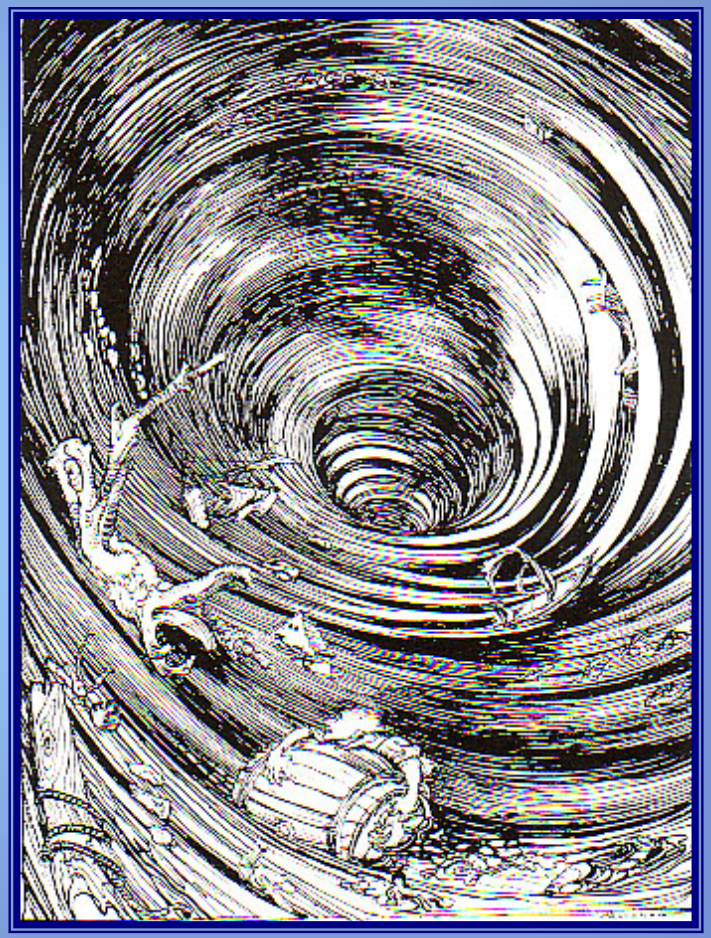
In tutti i sistemi di stelle binarie la materia viene trasferita da una stella normale o dall'ambiente ad un oggetto compatto che può essere una stella di neutroni oppure un buco nero. La caduta di gas e materia su una stella o in altri sistemi gravitanti è definita accrescimento.
L'accrescimento può avvenire sia alle spese dell'ambiente gassoso, ma anche a discapito di una delle componenti del sistema binario. Poiché le due stelle, in un sistema binario, orbitano l'una intorno all'altra, il gas che si trasferisce porta con sé un certo momento angolare.



In un sistema intermittente a raggi X il flusso d'accrescimento consiste in gas caldo, rarefatto e organizzato in forma sferoidale (in rosa) circondato da un disco di accrescimento freddo, denso e appiattito (in rosso). Nel normale stato di quiete (1) il gas caldo cade nel buco nero emettendo solo una piccola quantità di radiazione: è il regime che gli astronomi chiamano ADAF (advection dominated accretion flow). Ma durante un lampo di emissione il disco instabile si riscalda e comincia a splendere nel visibile (2). Il bordo interno del disco avanza a poco a poco verso il buco nero (3, 4, 5), sostituendo l'ADAF, fino a che comincia a emettere raggi X. Questo modello spiega il ritardo di sei giorni fra l'emissione nel visibile e quella nei raggi X osservato in GRO J1655–40.

Esso quindi non può muoversi semplicemente in linea retta da una stella all'altra e così forma una specie di vortice centrato attorno all'oggetto in accrescimento. Raffreddandosi il gas diviene sempre più comprimibile e invece di formare un vortice tridimensionale, il flusso di materia si appiattisce su un piano rotante chiamato disco di accrescimento.

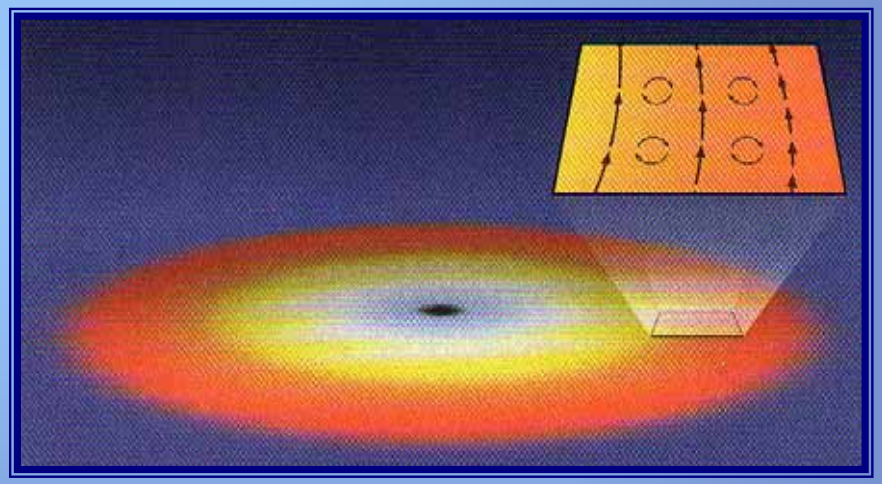
Il disco di accrescimento non ruota come un corpo rigido: le parti interne ruotano molto più velocemente delle parti esterne ed è proprio questa rotazione differenziale che permette al buco nero di inglobare poco per volta il gas: la parte interna, rapidamente rotante, infatti subisce l'attrito degli strati appena più esterni, che sono più lenti, e perciò perde un po' del suo momento angolare finendo per cadere con un lento moto a spirale verso l'interno.



Il gas catturato da una stella di neutroni o da un buco nero generalmente non cade con moto radiale verso l'oggetto collassato: il suo momento angolare gli fa compiere un moto a spirale. Il disegno di Arthur Rackham per *La discesa nel Maelström* di Edgar Allan Poe rende efficaciemente l'effetto di un vortice

Per la definizione stessa di orizzonte degli eventi, l'energia, sprigionata dal disco di accrescimento, non può più essere irraggiata una volta che il gas ha oltrepassato l'orizzonte ed è entrato nel buco; eppure si può dimostrare che il momento angolare non è in grado di mantenere il gas in rotazione stabile attorno al buco nero quando la materia si trova ad una distanza inferiore a tre raggi dell'orizzonte; una volta raggiunta l'ultima orbita stabile più interna, il gas, che cade con moto a spirale, può precipitare dentro il buco nero senza bisogno di attriti: così sparisce la frazione restante di energia potenziale gravitazionale che non viene irraggiata dal disco. Se l'energia non fosse emessa dal disco in ogni suo punto, ma scaturisse solo dal centro i buchi neri in accrescimento resterebbero invisibili poiché sarebbe invisibile il disco di accrescimento.

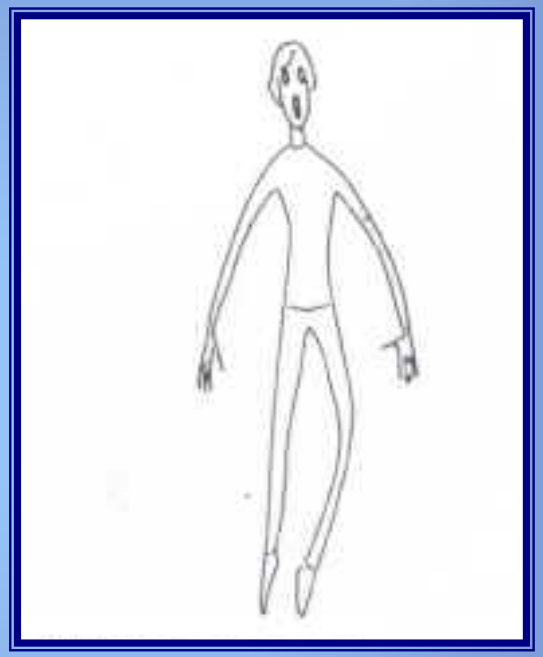
Il gas più vicino al centro ruota più velocemente di quello lontano. Gli attriti tendono a trasferire energia e spin verso le zone più esterne del disco, consentendo al gas di cadere progressivamente verso l'interno. La natura degli attriti è incerta potrebbero essere provocati dai moti turbolenti9 del gas, ma anche i campi magnetici potrebbero svolgervi un ruolo attivo. Gli attriti scaldano il disco, le cui parti più interne irraggiano più intensamente di quelle esterne. In ultima analisi, questa energia proviene dal rilascio progressivo di energia gravitazionale man mano che il gas cade dentro la buca potenziale dell'oggetto centrale.



PER UN OSSERVATORE DALL'ESTERNO

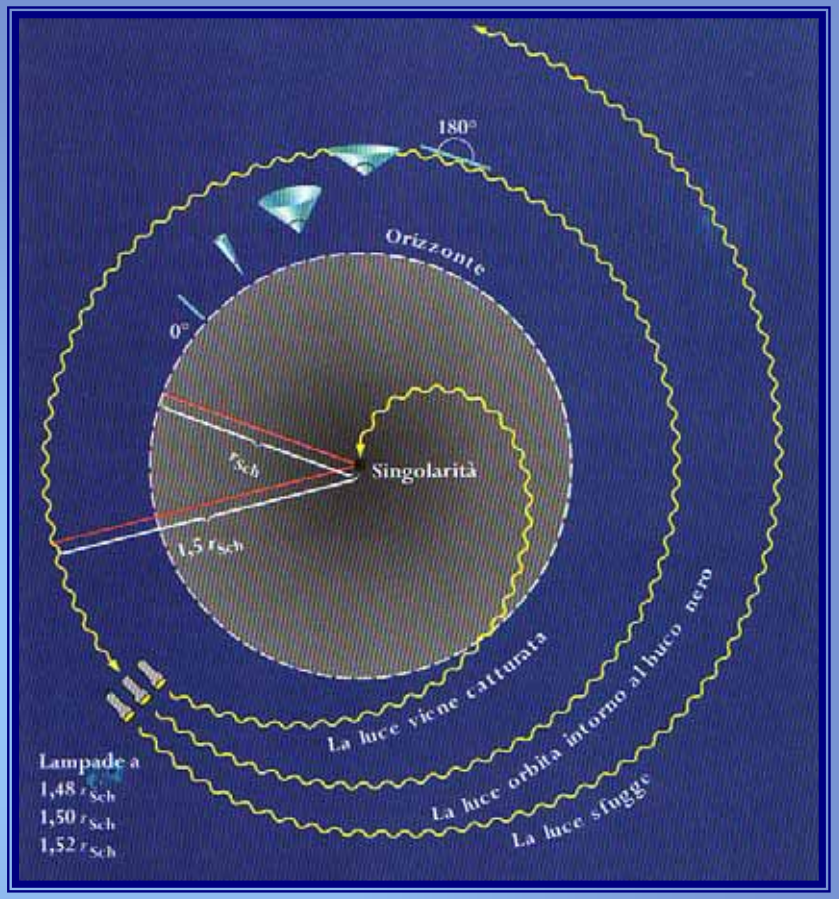
Un osservatore ipotetico, che si trovasse all'esterno dell'orizzonte degli eventi ad una distanza tale da non essere attratto fatalmente dalla gravità del buco nero, non vedrebbe la stella collassata, ma percepirebbe la sua presenza solo in relazione agli effetti del campo gravitazionale.
Il primo effetto avvertito sarebbe una spinta gravitazionale debole, ma incessante per cui la navicella dell'osservatore inizierebbe a cadere nel buco nero; niente di particolarmente strano se si pensa che in ogni punto dell'universo esiste un campo gravitazionale, seppure debole, che influisce sui corpi che gravitano nello spazio. Solo quando si guarda verso il buco nero si possono vedere cose veramente strane: a cominciare dal fatto che, dato il forte campo gravitazionale, ci si sarebbe aspettati di vedere un qualche tipo di stella al centro dell'orbita, e invece non si vedrebbe niente, si sarebbe in orbita intorno ad un oggetto invisibile. Infatti, i raggi luminosi provenienti dalle stelle che si trovano dall'altro lato del buco si vedranno curvarsi, quando passano vicino al corpo; secondo Einstein infatti le traiettorie di tutte le particelle, fotoni compresi, sono influenzate dalla gravità, così ogni raggio luminoso viene deviato dal campo gravitazionale. Poiché le traiettorie dei raggi luminosi provenienti dalle stelle distanti verrebbero incurvate se passassero vicino ad un buco nero, queste stelle sembrerebbero fuori posizione, perciò la luce deve cadere vicino al buco per essere osservabile dalla navicella.
Purtroppo osservando da fuori si può capire ben poco di un buco nero, per cui il nostro osservatore dovrà mandare un coraggioso astronauta verso la stella collassata per capire cosa succede.
Quando la sonda si avvicina al buco nero non accade nulla di strano per molto tempo poiché gli effetti caratteristici del corpo si colgono solo molto vicino alla stella.

Il primo effetto scomodo del buco nero sono le maree. Se si considera l'effetto della gravità su un astronauta che cade in un buco nero, si nota che le gambe, più vicine alla stella rispetto alla testa, subiscono una forza gravitazionale più intensa rispetto a quella parte superiore del corpo. La differenza tra queste due forze è la forza di marea gravitazionale, che, se non viene bilanciata, trasformerà il corpo dell'uomo in un lungo cilindro.



Quando un astronauta si avvicina ad un buco nero, la differenza fra la forza gravitazionale per le diverse parti del suo corpo eserciterà su di lui una forza. Quando non potrà più resistere a queste forze, sarà stirato verticalmente e compresso orizzontalmente.

Tale forza ha origine dal fatto che, più si è vicini ad un oggetto di grande massa, più intensa è la forza gravitazionale. Un'altra forza mareale agirà come una giacca stretta, comprimendo le spalle dell'astronauta l'una verso l'altra. Tutte le parti dell'astronauta cadranno verso il centro del buco nero, in particolare le spalle avranno traiettorie convergenti. Le forze mareali sono comunque talmente intense che l'astronauta verrebbe distrutto prima di arrivare al buco nero.
Se per ipotesi, il nostro astronauta riuscisse a sopravvivere alle forze di marea andrebbe incontro al punto di non ritorno, l'orizzonte degli eventi .



Le traiettorie dei raggi luminosi si incurvano fortemente nei pressi dell'orizzonte di un buco nero. Quanto più ci si avvicina all'orizzonte, tanto più sottile è il cono all'interno del quale deve essere rilasciato un fascio luminoso se si vuole impedire che venga risucchiato dentro il buco. Alla distanza di 1,5 r_{sch} un fascio correttamente orientato può restare in orbita indefinitamente attorno al buco nero. Sull'orizzonte il cono di fuga si richiude: nessun raggio luminoso emesso da questa distanza può evitare di ricadere nel buco nero. La radiazione emessa appena fuori dal r_{sch} raggiungerebbe un osservatore distante fortemente spostata verso il rosso e un orologio nei pressi del buco sembrerebbe sembrare il tempo più lentamente.

Il buco nero influisce sullo spazio e sul tempo intorno a se stesso: la sua gravità distorce e ostacola i segnali provenienti dagli oggetti vicini quando cercano di comunicare con il mondo esterno e il trascorrere del tempo vicino al buco viene gradatamente distorto; molto importante quindi risulta il comportamento degli orologi nei pressi di un buco nero.
Un effetto importante è il fatto che la luce, proveniente dagli orologi in caduta verso il buco nero, risulta spostata verso il rosso: i fotoni provenienti dagli orologi perdono energia nel lottare con l'immenso campo gravitazionale vicino al buco nero; essi si trasformano da fotoni ad alta energia e breve lunghezza d'onda in fotoni a bassa energia con grande lunghezza d'onda; tale fenomeno è detto redshift. Oltre allo spostamento verso il rosso, gli orologi tendono a rallentare gradualmente e gli eventi sembrano svolgersi più lentamente. Tale rallentamento continuerà fino a quando non si arriverà all'orizzonte degli eventi, quando fra un "tic" e l'altro ci vorrà un tempo infinito, per cui sembrerà che lo stesso si sia congelato. L'osservatore ipotetico, che orbita intorno al buco nero, vedrebbe l'astronauta avvicinarsi alla stella e fermarsi a livello dell'orizzonte degli eventi.

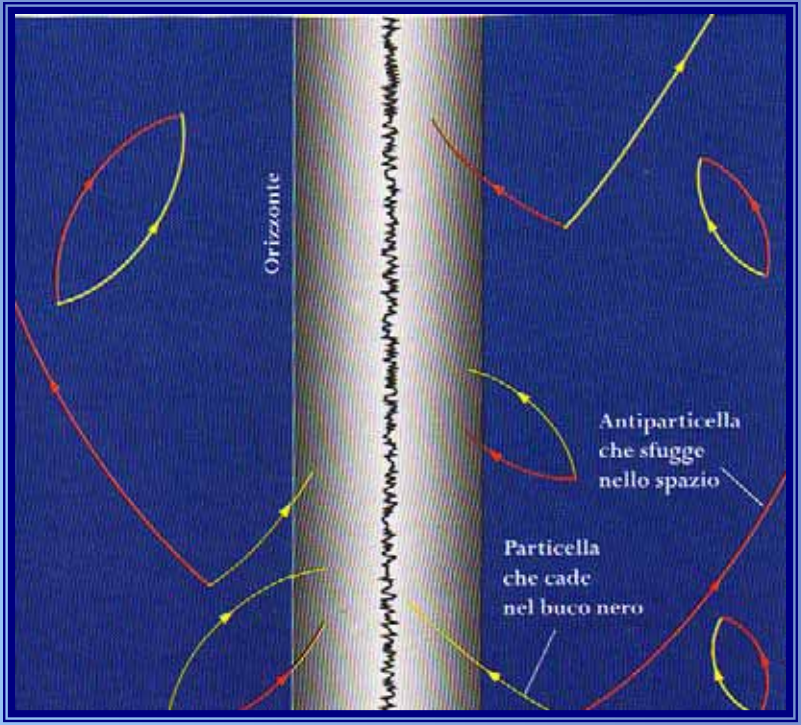
PER UN OSSERVATORE CHE PRECIPITA VERSO LA SINGOLARITA’

Dal punto di vista dell’astronauta che cade nella sonda il discorso è diverso e molto più semplice: l’orizzonte degli eventi in effetti non è un limite fisico che blocca il corpo, ma è facilmente oltrepassabile ed è solo il punto di vista esterno a farci sembrare che l’astronauta si fermi sul bordo del buco nero. Infatti dal punto di vista dell’astronauta niente è cambiato e il tempo continua a scorrere così come scorreva sull’astronave. Da questo nuovo punto di vista, a livello dell’orizzonte degli eventi spariscono sia il redshift che il tempo infinito.

Il problema serio in questo caso nasce dal fatto che una volta entrati in un buco nero niente può più uscire, infatti la sonda con l’astronauta, una volta oltrepassato l’orizzonte degli eventi, verrà attratta senza posa verso il centro. Le forze mareali diventeranno sempre più intense e cresceranno indefinitamente per cui la sonda verrà distrutta prima di raggiungere la singolarità. Essa lotterebbe contro la gravità, cercando di sfuggire al suo destino, voltando il motore a razzo e lanciandosi in direzione opposta, ma potrebbe solo rallentare la sua inesorabile fine. E’ solo a livello della singolarità quindi che il tempo diventa infinito.

MINI-BUCHI NERI ED EFFETTO HAWKING

I buchi neri possono prodursi: per collasso stellare, al centro delle grandi galassie e come fluttuazioni dello spazio-tempo. Questi ultimi possono essersi formati negli istanti iniziali del Big Bang, quando la temperatura e la densità toccarono valori altissimi, impossibili da riprodurre in laboratorio. Questi mini buchi neri sono molto importanti per i fisici, perché potrebbero legare la gravità a tutte le altre interazioni fondamentali esistenti in natura. Molto importanti diventano allora i risultati a cui è arrivato uno dei fisici più dotati degli ultimi cinquanta anni, Stephen Hawking, che ha fatto un passo avanti nella lunga strada che dovrebbe portare ad una teoria che unisca la relatività alla fisica quantistica.
I risultati di Hawking in merito ai buchi neri valgono soprattutto per quelli più piccoli visto il legame con la fisica quantistica.



Nel grafico sono raffigurate le linee di universo di particelle virtuali prossime ad un piccolo buco nero. In ogni punto dello spazio, appaiono e spariscono incessantemente coppie di particelle formate da ogni possibile particella con la relativa antiparticella. In condizioni normali, il principio di indeterminazione di Heisenberg consente a questi oggetti di esistere solo per un tempo infinitesimale, ma nei pressi dell'orizzonte di un buco nero le maree possono allontanare queste particelle l'una dall'altra con una forza tale che esse acquistano abbastanza energia per poter durare indefinitamente. Quando questo succede, una delle particelle della coppia (a energia negativa) viene sempre inghiottita dal buco nero, il quale così perde energia e massa; l'altra particella sfugge nello spazio. Dall'analisi di questo fenomeno, Hawking dedusse che i buchi neri possono emettere radiazione termica e, alla fine, "evaporare" completamente.

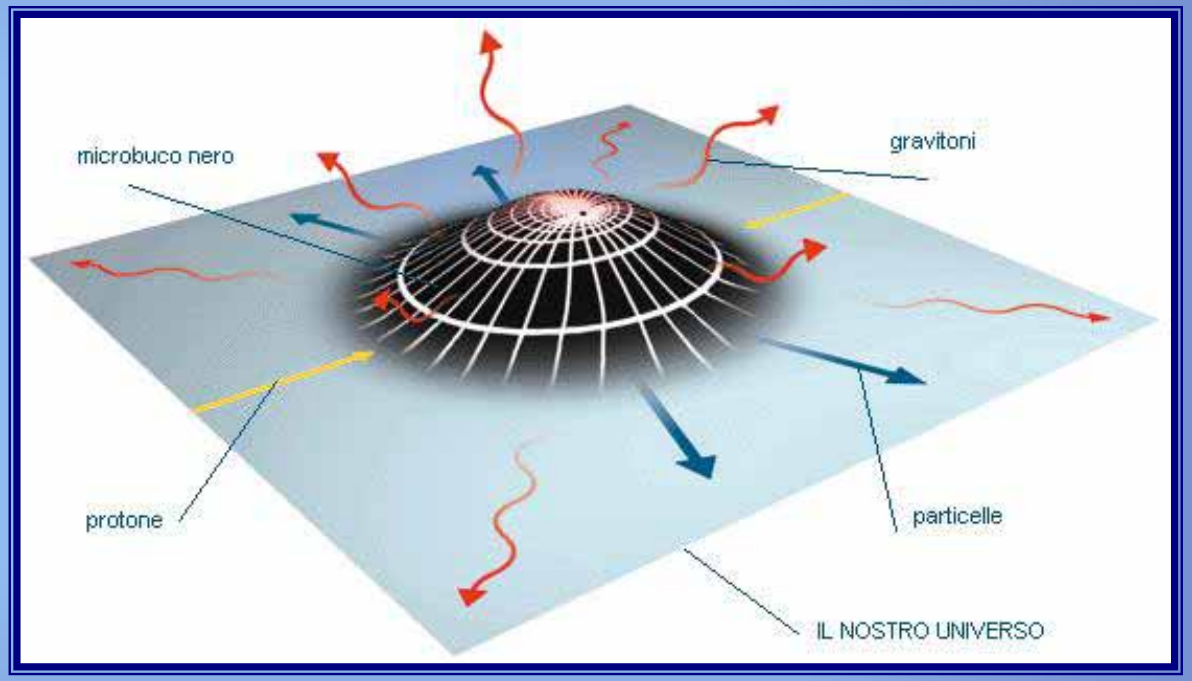
Secondo la relatività generale non esistono grosse differenze qualitative tra un buco nero di grande massa da uno con una massa minore, cambiano solo le dimensioni. Un buco nero delle dimensioni di un atomo produrrebbe nello spazio circostante effetti quantistici rilevanti poiché le forze di marea sarebbero talmente forti da produrre effetti sugli stessi protoni ed elettroni.

Lo spazio senza materia, il vuoto, ribolle di attività alla scala microscopica quantistica. Quando particelle dotate di alta energia collidono, si creano nuove particelle, insieme alle loro antiparticelle: tali collisioni possono creare enormi quantità di elettroni e positroni. Queste particelle possono essere considerate come viventi in forma latente in ogni punto dello spazio, come particelle virtuali. Normalmente le particelle virtuali esistono solo per tempi brevissimi poiché il principio di indeterminazione di Heisenberg consente loro di prendere in prestito la loro energia di massa solo per un istante infinitesimale. Una coppia virtuale può diventare reale se, nel breve tempo della comparsa acquisisce una quantità adeguata di energia. Ad esempio un elettrone ed un positrone possono essere creati in modo permanente se un campo elettrico agisce su di essi così fortemente da allontanarli e nel contempo dotarli della loro energia di massa prima che il principio di indeterminazione li costringa a ritornare nel nulla.

L'enorme campo gravitazionale che si trova attorno ad un buco nero può creare particelle in modo analogo: la sola differenza è che la forza che le allontana è una forza gravitazionale di marea. Casualmente una particella virtuale può comparire più vicino al buco nero dell'altra. Se è abbastanza intensa, la forza mareale riuscirà a separare le due particelle in modo talmente violento che esse potranno acquisire per intero la loro energia di massa a riposo nel breve lasso di tempo in cui il principio d'indeterminazione permette che questa energia sia presa in prestito. Le particelle non sono più costrette ad annichilirsi per saldare il debito d'energia, e si trasformano in una particella e in una antiparticella reali; esse però non possono sfuggire entrambe al buco nero: una se ne va, l'altra viene intrappolata nel buco con un'energia negativa. L'assorbimento di una particella con energia negativa dovrebbe provocare una diminuzione della massa del buco nero, mentre l'altra particella può scappare dal campo gravitazionale del buco.

Secondo Hawking i buchi neri non sono del tutto oscuri, ma emettono qualcosa per cui perdono gradualmente massa. Un buco nero isolato nello spazio “evapora”. Il meccanismo di Hawking permette al mini buco nero di creare particelle grandi più o meno come il buco stesso. I buchi neri molto piccoli possono creare elettroni e positroni, mentre quelli più grandi possono emettere fotoni la cui lunghezza d’onda deve essere maggiore del diametro dell’orizzonte del buco nero. A seconda della massa del buco nero la radiazione dominante emessa sarà nel dominio dei raggi X, della luce visibile o delle microonde.

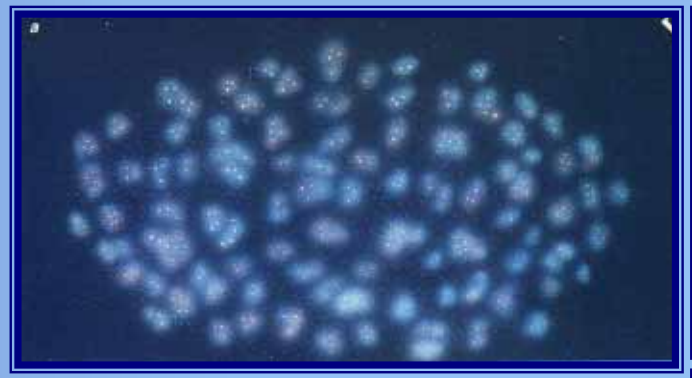
Microbuchi neri potrebbero essere creati in acceleratori di particelle come il Large Hadron Collider, facendo collidere particelle come i protoni di alta energia (in giallo).
I buchi neri evaporerebbero rapidamente emettendo la cosiddetta radiazione di Hawking, costituita da particelle del modello standard (in blu) e gravitoni (in rosso).

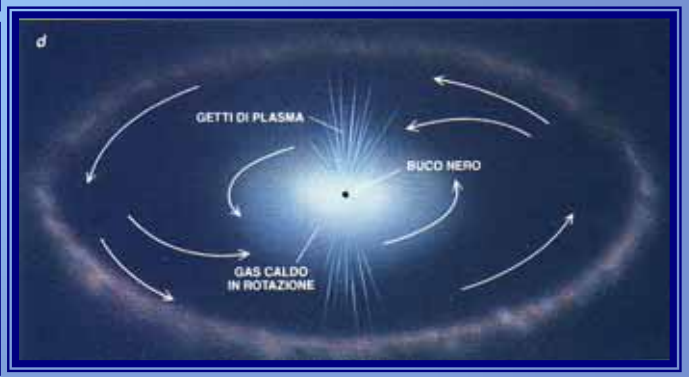


BUCHI NERI SUPERMASSIVI

I buchi neri supermassivi sono quelli di massa pari a 10^6 masse solari o maggiore e che hanno le dimensioni del sistema solare. Questi buchi neri sono probabilmente presenti nel nucleo di una buona percentuale di galassie e anche nella nostra dovrebbe essercene uno "dormiente".
La rotazione delle galassie richiede che attorno al buco nero supermassivo si formi un disco di accrescimento, sempre che il rifornimento di materiale sia disponibile. In tal caso l'accrescimento innesca una potente produzione di energia, e la galassia si dice attiva.

Una grande nube di gas si contrae per effetto della propria attrazione gravitazionale (**a**) formando un disco appiattito con una regione centrale condensata, dove numerose stelle vanno fondendosi (**b**). In seguito la regione più interna e densa della galassia subisce un collasso, contraendosi fino a formare un buco nero. La materia circostante che cade nel buco nero emette una luminosità assai intensa (**c**); i buchi neri più grandi alimentano quasar molto luminosi (**d**).





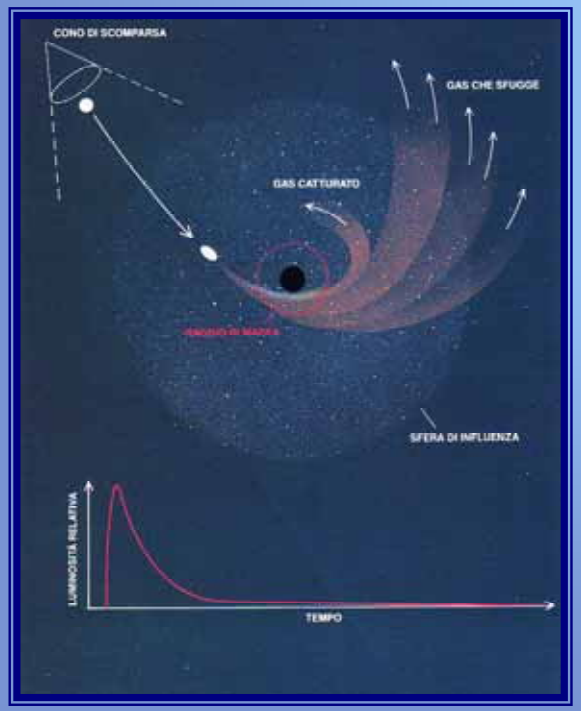
Si parla allora di Nuclei Galattici Attivi (**AGN**). Con questa denominazione vengono indicati astri che fino a qualche anno fa parevano distinti come ad esempio i quasar. Tutti gli AGN sono caratterizzati dal cosiddetto motore centrale, in grado di spiegare l'emissione dell'impressionante flusso di energia e radiazione osservati in volumi di spazio alquanto compatti e l'accrescimento gravitazionale attorno ad un buco nero supermassivo.

Il materiale in accrescimento, a causa della dissipazione viscosa e degli attriti tra i diversi strati, si riscalda ed irradia, scivolando verso il buco nero supermassivo centrale per compensare le perdite di energia con un acquisto di energia gravitazionale. Assumendo che il gas si trovi nello stato di minima energia permesso, cioè nel fondo della buca di potenziale formata dal corpo centrale collassato, le orbite del materiale possono ritenersi circolari ed il risultato è la formazione di un disco di accrescimento che ha come bordo interno l'ultima orbita stabile.

Le prove dell'esistenza dei buchi neri supermassivi, non si trovano solo quando si osserva la quantità di energia sviluppata nei nuclei galattici attivi, ma anche quando si studiano le galassie cosiddette "normali".

Anche la nostra galassia, potrebbe contenere all'interno del suo nucleo un buco nero supermassivo quiescente, che in passato sarebbe stato attivo come quello di un quasar. Infatti il centro della Via Lattea è circondato da getti, filamenti e da anelli di gas e polveri, ed è presente una emissione radio non ancora ben spiegata, quindi è possibile che in passato grandi esplosioni, scatenate da un buco nero massivo in accrescimento di materia, abbiano contribuito alla formazione delle strutture oggi osservate.

Buchi neri supermassivi quiescenti sembrano essere presenti in molte galassie osservate. La nascita stessa di una galassia nell'universo giovane, potrebbe essere strettamente legata alla formazione di un buco nero nel suo nucleo. Le dimensioni del buco nero dormiente dovrebbero essere in rapporto con quelle del rigonfiamento centrale (il bulge) della galassia ospite. La maggior parte delle galassie dominate dal bulge continua a mostrare una attività radio nel nucleo. Inoltre analizzando la dispersione delle velocità delle stelle e le velocità orbitali all'interno di galassie vicine con osservazioni cinematiche, si vede che queste grandezze presentano un marcato incremento in corrispondenza del centro della galassia. Ciò suggerisce fortemente la presenza di un oggetto invisibile di grande massa che attrae le stelle del nucleo.



L'attrazione gravitazionale di un buco nero provoca la cattura di tutte le stelle che si trovano all'interno di un certo raggio critico, dando origine ad un ammasso caratteristico di stelle in moto veloce (**in alto**). Le stelle che si avvicinano al buco nero secondo un angolo stretto finiscono entro il raggio di marea, dove l'attrazione gravitazionale le frantuma (**al centro**).
Parte del gas che le costituisce cade nel buco nero, producendo un rapido lampo; per la maggior parte del tempo, quando questi eventi non si verificano, il buco nero resta in quiete (**in basso**).

In passato, nella storia dell'universo, il numero di quasar era molto maggiore rispetto all'epoca presente. Il diverso numero di essi in differenti età dell'universo ci dice che immediatamente dopo il Big Bang non c'erano galassie e, anche nell'ipotesi che i buchi neri supermassivi già esistessero, non c'era alcun meccanismo in grado di rifornirli di materia, e di dare quindi origine alla violenta emissione di energia ed al fenomeno quasar. Nelle epoche successive le galassie hanno cominciato ad assemblarsi e a collidere tra loro, dato le dimensioni relativamente piccole dell'universo, producendo l'alto numero di quasar osservati a circa 10 miliardi di anni luce (data la costanza della velocità della luce, nell'universo guardare lontano implica anche guardare indietro nel tempo). La formazione di quasar è quindi probabilmente innescata da collisioni galattiche nell'universo giovane, le quali hanno dato materiale per l'accrescimento dei buchi neri al loro centro. In seguito l'espansione dell'universo ha allontanato molte galassie le une dalle altre, riducendo il numero di collisioni e quindi il numero di quasar. Dati recenti ricavati da osservazioni del Telescopio Spaziale Hubble, hanno rivelato ad esempio che ben 11 galassie tra le 27 più vicine a noi, dovrebbero avere un oggetto oscuro massivo al loro centro. Queste quindi potrebbero aver alimentato dei quasar miliardi di anni fa.

BUCHI NERI STATICI DI SCHWARZCHILD

La soluzione di Schwarzschild descrive le proprietà dello spazio-tempo nel campo gravitazionale che circonda una qualsiasi concentrazione sferica di massa. Solo in seguito ci si rese conto che i risultati di Schwarzschild contenevano anche la descrizione di un buco nero nello spazio.
Secondo la soluzione delle equazioni di Einstein elaborata da Schwarzschild, quando un corpo ha massa sufficientemente grande collassa sotto il proprio peso, raggiunge delle dimensioni critiche oltre le quali nulla può trattenerlo dal collassare ulteriormente, per quanto compresso possa già essere. Secondo la relatività generale, se una stella dovesse collassare fino a raggiungere determinate dimensioni critiche, in modo tale che la velocità di fuga risultasse pari alla velocità della luce, allora la forza gravitazionale agente sulla sua superficie sarebbe infinita e sarebbe infinita anche la forza necessaria ad arrestare il collasso della stella.
Il raggio che coincide con queste dimensioni critiche è detto “raggio di Schwarzschild” e segna il passaggio allo stadio di buco nero. Il collasso deve quindi proseguire oltre questo raggio. Dall’interno del raggio di Schwarzschild nulla può sfuggire, non solo la luce.
Una sfera, con raggio pari a quello di Schwarzschild che circonda la stella collassata, può essere considerata come l’orizzonte degli eventi e rappresenta un confine artificiale dello spazio che segna il punto di non ritorno. Al di fuori dell’orizzonte degli eventi, la gravità è forte ma comunque finita e gli oggetti possono sottrarsi alla sua attrazione. Una volta all’interno, invece, per poter sfuggire alla gravità un oggetto dovrebbe viaggiare più veloce della luce e questo non è possibile. All’interno dei buchi neri statici c’è una singolarità che è il punto in cui tutta la materia è concentrata in un volume praticamente nullo, per cui si ha una densità infinita.

BUCHI NERI ROTANTI O DI KERR

Nel 1963 lo studioso neozelandese Roy Kerr ha sviluppato una descrizione matematica dei buchi neri rotanti. Kerr non fu del tutto consapevole dell'entità della sua scoperta e, solo in seguito fu chiaro che la sua soluzione era valida nel caso di qualsiasi stella rotante collassata in un buco nero e che la definizione di buco nero secondo Kerr era più generale e realistica di quella dei buchi neri non-rotanti di Schwarzschild.

Secondo Kerr, le stelle, come la Terra, ruotano intorno ad un proprio asse e, quando vanno in contro al collasso, iniziano a ruotare sempre più velocemente. Tutti i corpi che ruotano, infatti sono caratterizzati dal momento angolare, che come l'energia, è una grandezza conservata e resta invariata a meno che l'oggetto che sta ruotando non sia soggetto ad una forza esterna. Il momento angolare dipende dalla massa, dalla velocità di rotazione e dalla forma dell'oggetto. Una stella in fase di collasso riduce le sue dimensioni che devono essere compensate da una velocità di rotazione maggiore in modo da mantenere invariato il momento angolare (lo spin).

Un buco nero rotante (di Kerr) è un oggetto più complicato del suo omologo statico (di Schwarzschild). Le sue proprietà dipendono da diversi fattori: lo spin, la massa ed eventualmente la carica elettrica.

Lo spazio che circonda un buco nero rotante non ha simmetria sferica come ogni stella o pianeta che ruota su se stesso, ma ha un rigonfiamento equatoriale. Lo spazio non solo precipita nel buco, ma si avvita attorno all'asse di rotazione fino a formare un vortice gravitazionale (effetto Lense-Thirring). In questa regione dello spazio, un corpo in orbita dovrebbe accelerare in direzione opposta rispetto al senso di rotazione del buco nero solo per rimanere fermo dove si trova. I corpi orbitanti intorno ad un buco nero si muovono ad una velocità di poco inferiore a quella della luce, e le loro orbite, invece di mostrare solo una leggera precessione come avviene per Mercurio, si sviluppano lungo traiettorie estremamente complicate, dipendenti non solo dalle dimensioni e dalle eccentricità delle orbite stesse, ma anche dalla velocità di rotazione del buco nero: l'effetto Lense-Thirring tende infatti a trascinare l'orbita nella direzione della rotazione del buco.

Per misurare la velocità di rotazione di un buco nero, in teoria, basta mandare in orbita due satelliti intorno al buco nero e fare in modo che si muovano in direzioni opposte l'uno rispetto all'altro.

Dal momento che il satellite orbitante in direzione opposta al senso di rotazione del buco deve viaggiare “controcorrente” rispetto allo spazio in movimento, per compiere un’orbita completa esso impiegherà più tempo poiché, percorrendo uno spazio maggiore, compirà un tragitto più lungo. La differenza tra i periodi di orbita dei due satelliti permette di ricavare la velocità di rotazione del buco nero.

Quando si descrive un buco nero di Kerr, è importante tenere conto di due distinte superficie. All’interno della superficie maggiore, nota come limite statico, lo spazio ruota così velocemente che anche la luce è costretta a ruotare con il buco nero. All’interno della superficie minore la luce viene invece risucchiata verso il centro, così come succede anche all’interno del raggio di Schwarzschild di un buco nero non-rotante. La superficie interna è perciò l’orizzonte degli eventi. La regione compresa tra l’orizzonte e il limite statico è detta ergosfera, così chiamata perché vi avvengono processi capaci di estrarre energia dal buco nero.

L’orizzonte degli eventi di un buco nero rotante si trova nello stesso luogo dell’orizzonte di un buco nero statico, che abbia la stessa massa. I fenomeni che hanno luogo nei pressi dell’orizzonte degli eventi sono però un po’ differenti. Se si suppone di avvicinarsi ad un buco nero dall’alto, cadendo sul polo di rotazione, si cadrà attraverso l’orizzonte degli eventi, per non essere mai più visti, e non si noterà niente di particolare nei pressi dell’orizzonte finché si potrà sopravvivere alle forze di marea gravitazionali e finché sarà possibile vedere qualcosa. Dall’esterno si vedrà cadere il corpo sempre più lentamente quanto più si avvicinerà all’orizzonte degli eventi. Se invece ci si avvicina a livello dell’equatore, una volta arrivati vicino al buco, la rotazione di questo tende a spazzare gli oggetti intorno ad esso nella stessa direzione in cui ruota.

L’aspetto più interessante dei calcoli di Kerr riguarda la natura della singolarità al centro dei buchi neri rotanti: non è più un punto di dimensioni pari a zero, come nei buchi neri statici, ma prende la forma di un anello. Sul perimetro dell’anello si trova tutta la materia, mentre il suo spessore è praticamente nullo, perciò ha densità quasi infinita. In mezzo all’anello c’è solo spazio vuoto.

La singolarità ad anello è caratterizzata da un secondo orizzonte interno, il cosiddetto “orizzonte di Cauchy” che la circonda. Ovviamente una volta superato l’orizzonte degli eventi non c’è modo di tornare indietro, ma c’è ancora la possibilità di vedere la luce che proviene dall’universo esterno, per quanto curvata e concentrata dalla gravità del buco nero.

L’orizzonte di Cauchy segna il confine oltre il quale non è più possibile vedere la luce proveniente dall’universo esterno. Una delle implicazioni più strane della matematica dei buchi neri riguarda ciò che accade alla luce che si vede arrivare dall’esterno mentre ci si avvicina all’orizzonte di Cauchy. Dal momento che il tempo dell’osservatore che precipita nel buco nero rallenta progressivamente, il tempo esterno accelererà sempre più, fino a che, in corrispondenza dell’orizzonte di Cauchy, la sua velocità non diventerà infinita e l’osservatore vedrà il futuro dell’Universo sfrecciargli letteralmente dinanzi nel momento stesso in cui varca l’orizzonte.

La singolarità di Kerr è detta tipo-tempo, cioè segna il margine dello spazio e potrebbe, in teoria essere usata come una finestra verso un Universo diverso dal nostro.

Un oggetto può orbitare più vicino a un buco nero di Kerr che a uno di Schwarzschild, e quindi i dischi di accrescimento attorno ai buchi neri rotanti possono rilasciare più energia a parità di tasso d’accrescimento. L’efficienza del processo di estrazione di energia, misurata come la percentuale della massa convertita in energia, va dal 6% per un buco di Schwarzschild fino al 42% per un buco di Kerr che abbia la massima velocità di rotazione consentita.

Le equazioni di Kerr, benché abbiano soltanto un parametro aggiuntivo rispetto a quelle di Schwarzschild, lo spin, sono abbastanza generali da descrivere tutti i buchi neri. Un buco nero può essere l’esito di un collasso generale asimmetrico durante il quale si verifica una breve fase di violento disequilibrio capace di generare intense onde gravitazionali. Ma quando si instaura l’equilibrio e compare il buco nero, le equazioni di Kerr lo descrivono in modo esatto: se si conoscono massa e spin, tutte le altre proprietà sono fissate.

Quando inghiotte materia, un buco nero aumenta la sua massa e di solito anche la sua velocità di rotazione. Ma di ciò che è stato inghiottito non sopravvive alcun’altra traccia. In questo caso, l’area dell’orizzonte degli eventi si comporta come l’entropia in termodinamica, nel senso che cresce sempre.

L’area di un buco di Kerr dipende sia dallo spin sia dalla massa. E’ possibile che certi processi che avvengono nell’ergosfera rallentino la rotazione del buco e quindi ne estraggano energia, senza far comunque diminuire l’area dell’orizzonte.

IL TEOREMA “NO HAIR”

Massa, spin ed eventualmente carica elettrica sono le proprietà fondamentali che caratterizzano ogni buco nero. La massa determina la grandezza dell’orizzonte degli eventi e l’ordine di grandezza dei fenomeni di buco nero, come ad esempio le forze mareali. Spin e carica modificano leggermente le proprietà di un buco nero. In realtà aldilà di queste proprietà tutti i buchi neri sono uguali: non si può distinguere un buco nero nato dal collasso di un nucleo di ferro da uno nato da una stella con un nucleo di carbonio, né fa differenza il tipo di materia che assorbono.

All’inizio degli anni 70 molti teorici avevano ipotizzato che le uniche caratteristiche di un buco nero fossero queste, ma molti credevano che una volta collassata, la stella avrebbe mantenuto alcune delle sue proprietà.

I teorici Kip Thorne e John Wheeler, che fra l’altro aveva coniato il termine “buco nero”, definirono tali ipotetiche proprietà “hair”, un attributo che potrebbe distinguere uno dall’altro i buchi neri di massa e rotazione simili. Nel 1975 è stato provato che le uniche proprietà permesse dalla teoria della gravitazione di Einstein sono proprio la massa, lo spin e la carica elettrica. Il cosiddetto teorema “no hair” afferma che due buchi neri possono differire per la massa, per la presenza o meno della rotazione o della carica elettrica, ma non hanno proprietà intrinseche che li caratterizzino e li differenzino l’uno dall’altro.

ALLA RICERCA DEI BUCHI NERI

Negli anni Sessanta, una volta scoperte le caratteristiche teoriche dei buchi neri, si pose il problema di come andare alla ricerca di tali corpi compatti e soprattutto oscuri. In particolare, il teorico sovietico Jakov Zel'dovich e l'americano Edwin Salpeter, iniziarono a meditare su quali potessero essere i fenomeni legati alla presenza di un buco nero.

Una volta formati, i buchi neri sono essenzialmente oggetti passivi per cui l'unica possibilità per riconoscerli è localizzarli e analizzare gli effetti gravitazionali che essi hanno sui corpi e i gas circostanti.

La prima proposta dei due teorici fu di cercare nei sistemi binari dove una stella ordinaria orbita intorno ad una compagna invisibile. Applicando le leggi di Newton, che funzionano ancora bene lontani da un corpo massiccio, alla velocità e al periodo orbitale della stella normale in alcuni casi si riesce a stimare con buona approssimazione il limite inferiore per la massa della componente invisibile. Se il valore rilevato è maggiore di 1,4 masse solari allora si può pensare ad una stella di neutroni o ad un buco nero se il valore è maggiore di 3 masse solari.

Zel'dovich e Salpeter suggerirono anche un'altra possibilità: un buco nero muovendosi assorbe materia da quella diffusa nello spazio costituita da gas e polveri e che occupa lo spazio tra le stelle della galassia. Questo progressivo inglobamento di materia è il processo che viene detto accrescimento. Un buco nero che si accresca del gas interstellare potrebbe acquisire una certa luminosità; infatti, mentre cade nel campo gravitazionale, il gas dovrebbe essere fortemente compresso e riscaldato: in teoria potrebbe irradiare nello spazio un'energia equivalente a qualche punto percentuale della sua energia di massa, calcolata secondo la relazione $E=mc^2$.

Il miglior modo per andare alla ricerca dei resti stellari compatti è utilizzare i sistemi binari stretti, dove il buco nero o la stella di neutroni dovrebbero accrescersi a spese della materia della compagna. Le onde d'urto nel gas in caduta riscalderebbero questa materia fino a temperature dell'ordine di centinaia di milioni di gradi, alle quali il gas emetterebbe radiazione soprattutto nella banda dei raggi X.

Più tardi si comprese anche che le variazioni rapide e casuali dell'emissione dei raggi X, su tempi scala di pochi millesimi di secondo, potevano costituire un ulteriore indizio della sua provenienza da un oggetto estremamente compatto con le dimensioni tipiche di un buco nero o di una stella di neutroni.

EPSILON AURIGAE

La ricerca dei buchi neri sui sistemi binari inizia con una candidata particolare: Epsilon Aurigae.
L'Auriga è una costellazione molto facile da riconoscere: è composta da un gruppo pentagonale di stelle brillanti, a nord di Orione. L'Auriga contiene la brillante stella Cappella, vicino alla quale c'è un gruppo di tre stelle, di cui Epsilon è la più brillante ed è una binaria. Tale stella, ogni 27 anni diventa più debole poiché la secondaria, cioè la compagna, passando eclissa Epsilon.
Molti studiosi sono d'accordo che la secondaria contenga una nube di polveri e gas che blocca parte della luce della primaria provocando così la diminuzione della luminosità. In realtà noi percepiamo la presenza della secondaria solo attraverso l'eclisse, perché normalmente tale stella appare invisibile. Misurando le dimensioni delle orbite e il periodo orbitale possiamo determinare la massa della stella invisibile che risulta essere di otto masse solari. Ad un primo esame la stella invisibile che accompagna Epsilon ha una massa sufficientemente grande per essere un buco nero. In realtà non si può dire di aver scoperto un buco nero tanto facilmente. Le eclissi, ad esempio, durano circa 2 anni, un tempo troppo lungo perché si tratti di un buco nero compatto e di dimensioni ridotte. Inoltre molti studiosi sono in disaccordo sulla forma e sulla natura della nube che circonda la stella poiché essa, in teoria, potrebbe nascondere ai nostri telescopi una comune stella di sequenza principale con massa pari ad otto masse solari.
A questo punto ci si rifà all'astronomia a raggi X. Secondo osservazioni e studi approfonditi, Epsilon Aurigae non emette raggi X, per cui è realistico pensare che la stella invisibile non sia provvista di un disco di accrescimento che ruota intorno ad un piccolo corpo compatto e che, con molta probabilità, non si tratti di un buco nero.

CYGNUS X-1

Sebbene non si abbia la piena sicurezza che sia un buco nero, Cygnus X-1 è uno dei migliori candidati ad esserlo.
La storia di Cygnus X-1 inizia nel 1965, quando venne scoperta durante il volo di un razzo. Fu una delle prime sorgenti a raggi X ad essere rilevata e proprio per questo la sua natura era incerta. Alla fine degli anni Sessanta si capì che non solo Cygnus X-1 si trovava all'interno della Via Lattea, ma anche che la sua sorgente di raggi X variava.
Nel 71-72 si ebbe una svolta fondamentale quando il satellite Uhuru, il primo a raggi X, indicò un notevole cambiamento della radiazione X proveniente da Cygnus X-1 e soprattutto comparve nel cielo una radio-sorgente nella stessa zona della sorgente X. A questo punto Cygnus X-1 fu riconosciuta come stella. Un'ulteriore verifica e scoperta fu fatta da un gruppo giapponese nel 1971, che notò che le emissioni di raggi X della stella in questione variavano molto rapidamente e ciò significava che la stella doveva essere molto compatta.
Il sistema stellare di Cygnus X-1 è doppio e contiene una stella supergigante di tipo B che ha come compagna, in teoria, un buco nero. Una certa quantità di massa sfugge alla supergigante a causa del vento stellare e viene attratta dal buco nero. Questo gas, nel muoversi da una stella all'altra si riscalda ed emette raggi X prima di essere inghiottito dal buco nero. Tali emissioni fecero supporre, con un margine di errore notevole, che Cygnus X-1 fosse un buco nero, ma un'ulteriore verifica fu fatta successivamente: fu calcolata, con metodi affini a quelli adottati per Epsilon Aurigae, la massa della supergigante e si scoprì che era di 30 masse solari, per cui la sua compagna non poteva avere massa minore di 5 masse solari e perciò era un buco nero.

CIRCINUS X-1

Circinus X-1 è una sorgente di raggi X enigmatica. E' un sistema binario, infatti l'emissione di raggi X si spegne ogni 16 giorni, indicando che il moto orbitale porta la sorgente X dietro qualche altra stella rispetto al nostro punto di osservazione. Per molto tempo non si è potuto identificare alcuna stella come controparte ottica del sistema; fu solo nel 1976 che un gruppo di astronomi identificò Circinus X-1 con una stella molto debole e molto rossa. Questa stella sembra rossa perché la sua luce ha attraversato un gran numero di nubi di polvere interstellare che hanno assorbito gran parte della luce azzurra proveniente dal sistema, e, in luce azzurra, è appena visibile. Tuttavia l'aspetto misterioso della sorgente risiede nel fatto che l'intensità dei raggi X fluttua nello stesso modo con cui varia l'intensità dei raggi X di Cygnus X-1 su tempi dell'ordine del millisecondo.

Poiché la stella ottica è così debole, non si sa ancora se sia una stella binaria spettroscopica a righe singole, ossia se la stella che vediamo abbia una compagna invisibile che possa essere un buco nero. Lo stato di Circinus X-1 come possibile buco nero deriva dalla sua identificazione con una binaria e dalla natura di rapida variabilità della sorgente di raggi X.

V 861 SCORPII

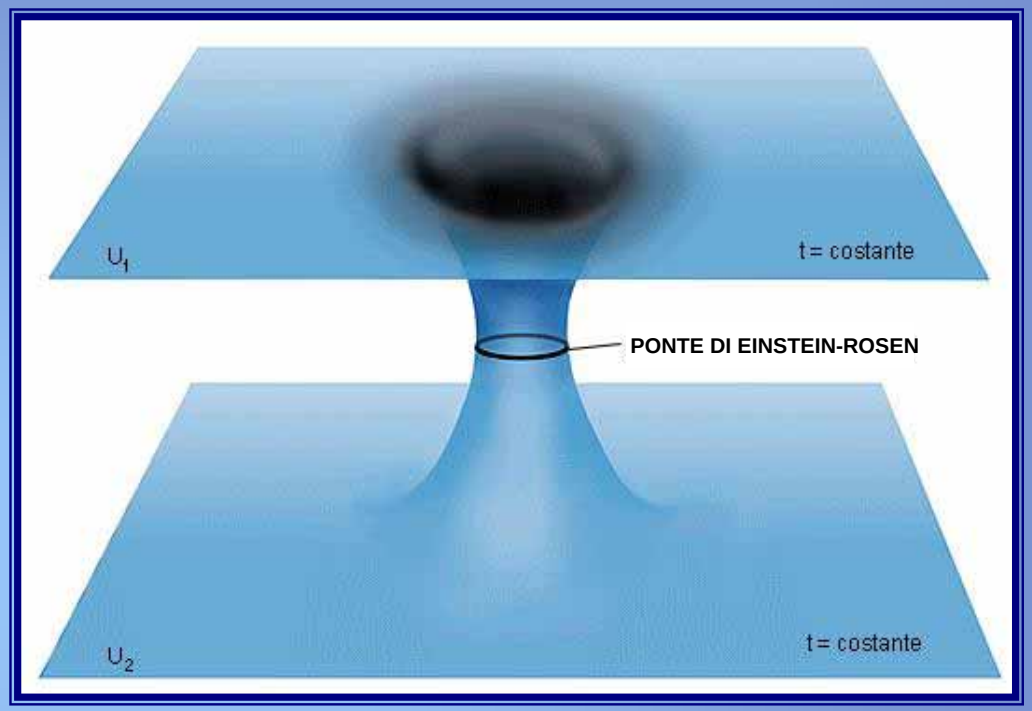
Nell’estate del 1978, è stato scoperto, da un gruppo di astronomi che utilizzavano il satellite Copernico, un altro possibile buco nero, potenzialmente più promettente di Circinus X-1.
V 861 Scorpii si è rivelata una binaria spettroscopica a righe singole, e l’analisi della sua orbita, completata agli inizi degli anni Settanta, aveva mostrato che la compagna invisibile doveva avere una massa compresa tra le 7 e le 11 masse solari, troppo grande per una stella di neutroni. Questa stella è anche una sorgente di raggi X che vengono eclissati una volta ad ogni periodo orbitale quando la stella supergigante o le correnti di gas impediscono ai raggi X di raggiungerci.
V 861 Scorpii sembra quindi essere analoga a Cygnus X-1. Ci sono tutti gli ingredienti per parlare di buco nero: una compagna invisibile di grande massa, raggi X che potrebbero provenire da un disco di accrescimento e una stella visibile che fornisce massa a quest’ultimo.

PONTE DI EINSTEIN-ROSEN

L'idea che potessero esistere dei cunicoli spazio temporali nasce nel periodo della relatività generale. Schwarzschild fu il primo a capire che le equazioni di Einstein prevedevano l'esistenza dei buchi neri che avevano al centro una singolarità. Questo per Einstein costituiva un problema, infatti non accettava i buchi nello spazio-tempo, né era soddisfatto dal fatto che essi fossero isolati dall'esterno tramite l'orizzonte degli eventi.

Nel 1953 Einstein, e il suo collaboratore Nathen Rosen, pubblicarono un saggio in cui tentarono di dimostrare che le singolarità di Schwarzschild non esistevano, attraverso un trucco matematico che evitasse che le soluzioni delle equazioni della relatività generale non contenessero punti in cui lo spazio e il tempo si fermavano.

La soluzione proposta da Einstein e Rosen annullò la singolarità ma portò a qualcosa di ancora più bizzarro: un ponte che collega l'universo conosciuto con uno parallelo.



La soluzione di Schwarzschild descrive due universi U1 e U2 identici, collegati da un cunicolo spaziale detto «ponte di Einstein-Rosen». La figura mostra questa connessione a ogni istante t. Per poter visualizzare la struttura, è stata soppressa una coordinata spaziale. Il cunicolo qui rappresentato non è attraversabile, a meno che l'osservatore non viaggi a velocità maggiore della luce.
(Illustrazione: Laura Caleca)

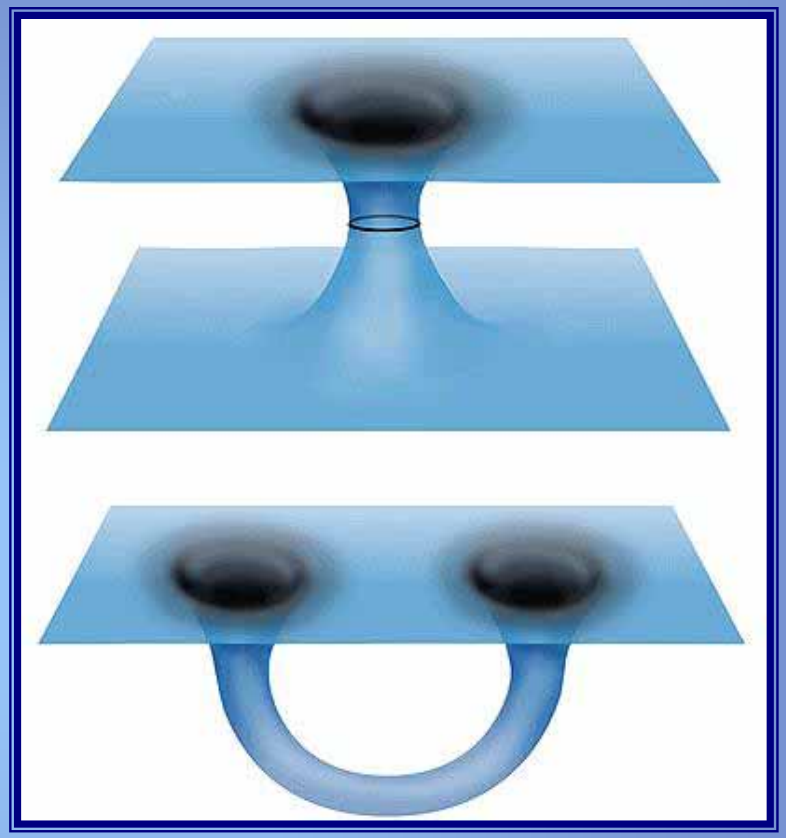
Questo legame prese il nome di “ponte di Einstein-Rosen”. Per Einstein si trattava solo di un esercizio di geometria puramente teorico che permetteva un collegamento tra due spazi-tempi. In realtà lo scienziato non credeva che un simile ponte potesse esistere, proprio come non credeva alla singolarità.
Un modo per immaginare la formazione di un ponte di Einstein-Rosen è quella di pensare che una singolarità dell’universo conosciuto si leghi ad una singolarità appartenente a un universo parallelo.
Nel ponte di Einstein-Rosen esiste l’orizzonte degli eventi, per cui, una volta entrati in un buco nero, non si può più uscire. Per uscire dal buco nero dall’altra parte è necessaria l’esistenza di un buco bianco, capace di espellere materia. Un buco bianco è l’immagine a tempo invertito di un buco nero che si forma quando materia cade dentro l’orizzonte degli eventi; un buco bianco è l’eruzione di materia verso l’esterno da un “antiorizzonte” degli eventi che farà sì che la materia segua un’unica direzione e possa uscire ma mai entrare nel buco bianco. Tali antiorizzonti sono molto instabili e si convertono facilmente in normali orizzonti solo pochissimi secondi dopo la loro formazione. In pratica dopo aver superato l’orizzonte degli eventi del primo buco nero, si trova un altro orizzonte che impedisce di uscire dall’altro lato.
Il problema principale del ponte di Einstein-Rosen è che è estremamente instabile. La connessione fra i due universi dura solo qualche frazione di secondo prima di scomparire e la vita media di un ponte è talmente breve che nemmeno la luce è abbastanza veloce da riuscire ad oltrepassarlo. Di conseguenza se mai ci si avventurasse in un buco nero con la speranza di uscire dall’altra parte si rimarrebbe intrappolati irrimediabilmente dalla singolarità.

I WORMHOLES

I wormholes (cunicoli spazio-temporali) restano ancora dei puri virtuosismi teorici, poiché l'osservazione astronomica non ha ancora dato alcun riscontro. Essi sono profondamente diversi dal ponte di Einstein-Rosen, infatti hanno la caratteristica di essere stabili, costantemente aperti e privi di orizzonte degli eventi alle estremità in modo tale da permettere viaggi nei due sensi, privi di singolarità e di forze di marea.

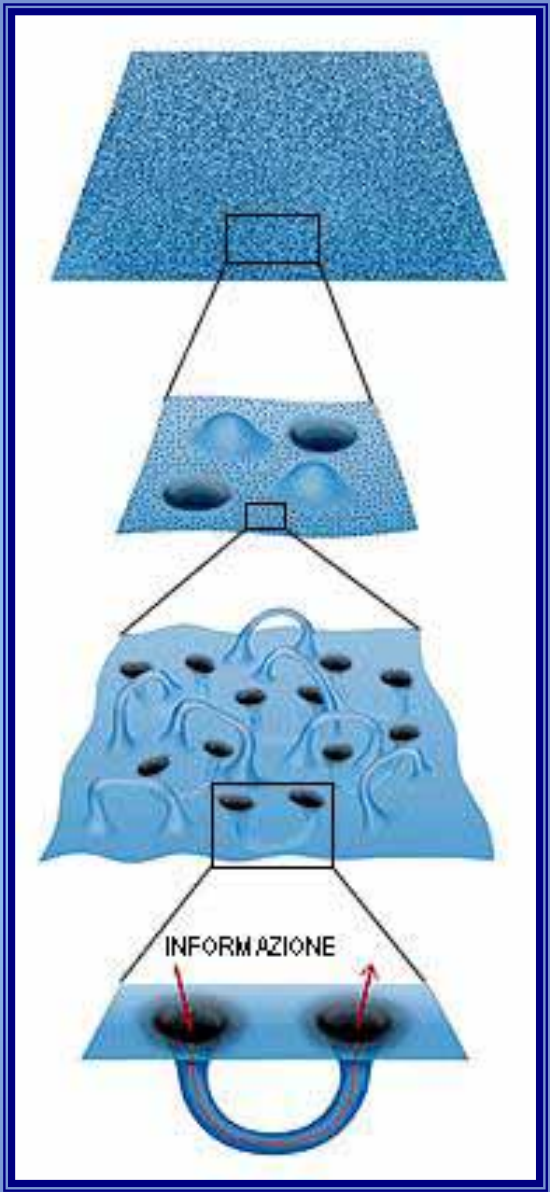
Secondo Kip Thorne, in teoria è possibile avere un collegamento tra due diverse regioni dell'universo attraversabile da parte di qualsiasi corpo, astronauta compreso, che potesse tornare indietro a fare rapporto su ciò che ha visto.

Un wormhole è un cunicolo caratterizzato da due entrate dette bocche, mentre il collo che le collega è detto gola del wormhole. Importante capire che, mentre la distanza tra le due bocche attraverso lo spazio può



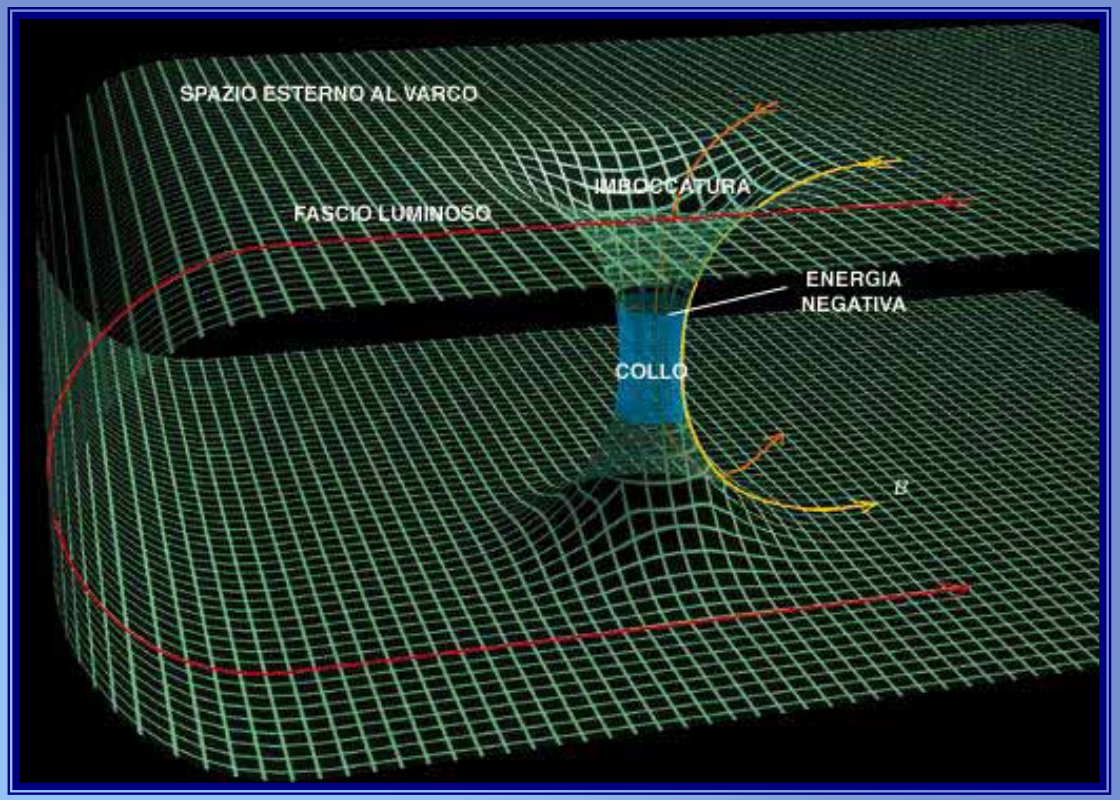
Se le singolarità di curvatura sono attraversabili, allora è possibile connettere universi distinti o parti lontane dello stesso universo mediante cunicoli spazio-temporali. In questa illustrazione i cunicoli sono attraversabili; una soluzione che descrive tali strutture pur senza violare le condizioni di positività dell'energia è stata recentemente trovata da F. Schein e P. C. Aichelburg dell'Università di Vienna.
(Illustrazione: Laura Caleca)

essere arbitrariamente lunga, la lunghezza del tunnel vero e proprio può essere arbitrariamente corta. I wormholes di Thorne non partono dai buchi neri e per questo non sono provvisti di orizzonti degli eventi.
Uno dei modi per creare un wormhole è allargare un wormhole quantistico. A livello della scala più piccola immaginabile, lo spazio-tempo non è più liscio, ma è caratterizzato da un continuo ribollire delle forme più diverse, che nascono e immediatamente scompaiono. E' a questa fase che corrispondo i wormholes quantistici che sono destinati a scomparire nel giro di brevissimo tempo. Il trucco consisterebbe nel riuscire a catturare uno di questi wormholes e gonfiarlo progressivamente prima che possa scomparire di nuovo, magari con lo stesso meccanismo che ha provocato l'inflazione subito dopo il Big Bang.
Oggi Matt Visser, il più importante studioso di wormholes, ha dimostrato che esistono diversi tipi di wormholes, a seconda di come viene piegato lo spazio-tempo: il caso più interessante è quello di Lorentz. I wormholes di Lorentz sono di due tipi: permanenti e transitori; ognuna di queste specie è costituita da sottospecie: wormholes che collegano universi differenti (interuniversale) o che collegano due regioni distanti dello stesso universo (intrauniversale).



La struttura microscopica dello spazio-tempo è caratterizzata da fluttuazioni quantistiche della geometria. È possibile che esse si manifestino come una distribuzione casuale di cunicoli attraverso i quali l'informazione può filtrare da e per regioni distanti dell'universo.
(Illustrazione: Laura Caleca)

Ciascuna di queste sottospecie si divide in varietà macroscopiche e microscopiche: le prime sono quelle attraversabili, le altre sono i wormholes quantistici che sono transitori, anche se per il principio di indeterminazione a volte possono crearsene alcuni permanenti.
Fra tutte le proprietà dei wormholes, quella più importante è sicuramente la stabilità, infatti non è ancora chiaro come poter tenere aperto un cunicolo spazio-temporale. Bisognerebbe riuscire a contrastare le immense forse gravitazionali che cercano di chiudere il wormhole; tutto ciò oggi non è realizzabile, ma questo non vuol dire che nel futuro non potremmo essere capaci di farlo.
Thorne capì che sfortunatamente non esiste nulla nell'universo capace di tenere aperto il cunicolo, per cui egli comprese che l'unico modo per far si che il suo wormhole restasse aperto era che fosse intessuto di uno stranissimo tipo di materia dotata di massa negativa (e quindi energia negativa). Thorne chiamò tale materia "esotica".



Un varco spazio-temporale agisce come un cunicolo che collega due punti dello spazio. Per andare da A a B, i fasci luminosi possono entrare in un'imboccatura del varco, attraversarne il collo e uscire dalla parte opposta; il viaggio richiederebbe molto più tempo se non potessero seguire questa scorciatoia. In corrispondenza del collo deve esservi energia negativa (in blu), il cui campo gravitazionale permette ai fasci di luce convergenti di cominciare a divergere. (Il diagramma è una rappresentazione bidimensionale dello spazio tridimensionale. Le imboccature e il collo del varco sono in realtà sferici.) Sebbene non sia mostrato nell'illustrazione, un varco può anche collegare due punti diversi del tempo.

BIBLIOGRAFIA

Harry L. Shipman, Buchi neri, quasar e universo, Zanichelli

Stephen Hawking, Dal Big Bang ai buchi neri, Rizzoli

Mitchell Begelman e Martin Rees, L'attrazione fatale della gravità: i buchi neri dell'universo, Zanichelli

Al-Khalili Jim, Buchi neri, Wormholes e macchine del tempo, Dedalo

Elaborato realizzato per la partecipazione al concorso “Una stella sul diploma” indetto da UAI e ICRA.

Studente autore della presentazione: Celano Sara

sascia86@tiscali.it

Docente di riferimento: Cocozza Pasquale

cocozza.p@tiscali.it

Scuola di riferimento: Istituto d’Istruzione Superiore Liceo Scientifico “E.Fermi”

Catanzaro Lido

Periodo: Giugno-Luglio 2005