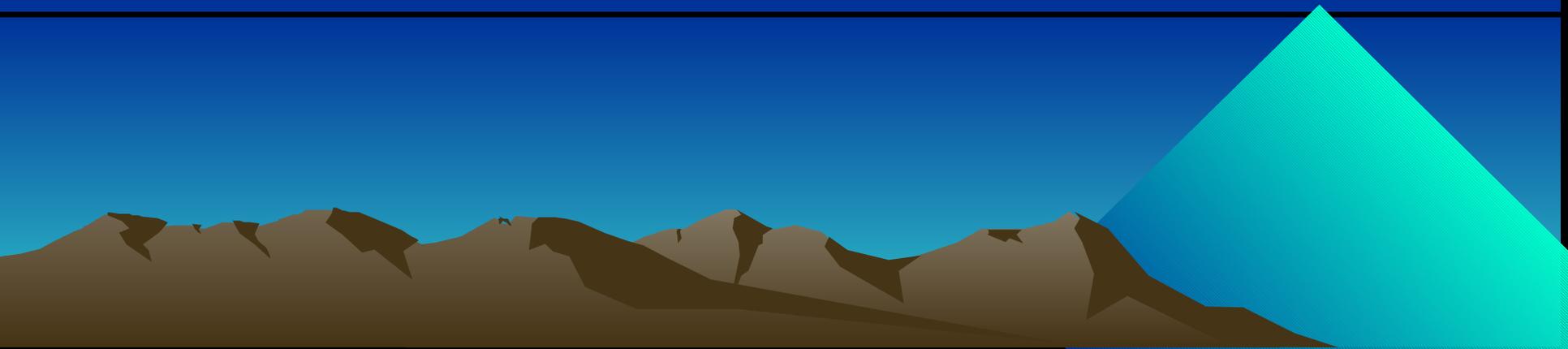


Sospesi tra Due Realtà: Cadere in un Buco Nero

Stefano Spagocci

GACB

(stefanspag@gmail.com)



Introduzione

- I buchi neri sono tra gli oggetti più strani e affascinanti del cielo.
- In questa conferenza, come suggerisce il titolo, presenteremo i buchi neri con un approccio parzialmente diverso rispetto a quello che si adotta di solito.
- Tratteremo infatti dei buchi neri secondo la fisica, l'astronomia e la cosmologia.

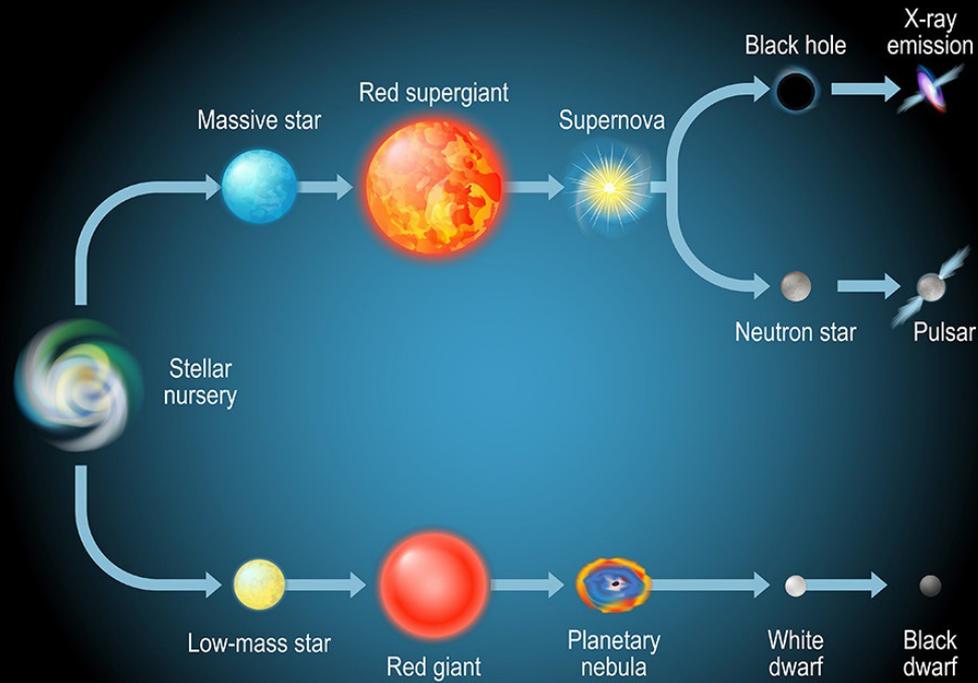


Buchi Neri Classici

- La velocità di fuga da un corpo cresce all'aumentare della sua densità.
- Michell e poi Laplace scoprirono che corpi molto densi hanno velocità di fuga maggiore di quella della luce.
- Ma allora essi non permettono alla luce di fuggire e sono quindi neri.



Stellar evolution



Buchi Neri Stellari

- In una stella ci sono forze gravitazionali che tenderebbero a farla contrarre.
- Le reazioni di fusione (idrogeno in elio ecc.) nel nucleo tenderebbero invece a farla esplodere.
- In sequenza principale le due forze si fanno equilibrio e la stella rimane a raggio costante, emettendo luce e calore.



Buchi Neri Stellari

- Quando l'idrogeno si esaurisce si innescano altre reazioni ma quando si è formato il ferro non vi sono più reazioni disponibili.
- Per stelle i cui nuclei sono più pesanti di circa tre masse solari, a quel punto nulla può contrastare la gravità.
- Gli strati superficiali allora esplodono (supernova) mentre gli strati interni si schiacciano e danno origine a un buco nero.





Buchi Neri Galattici

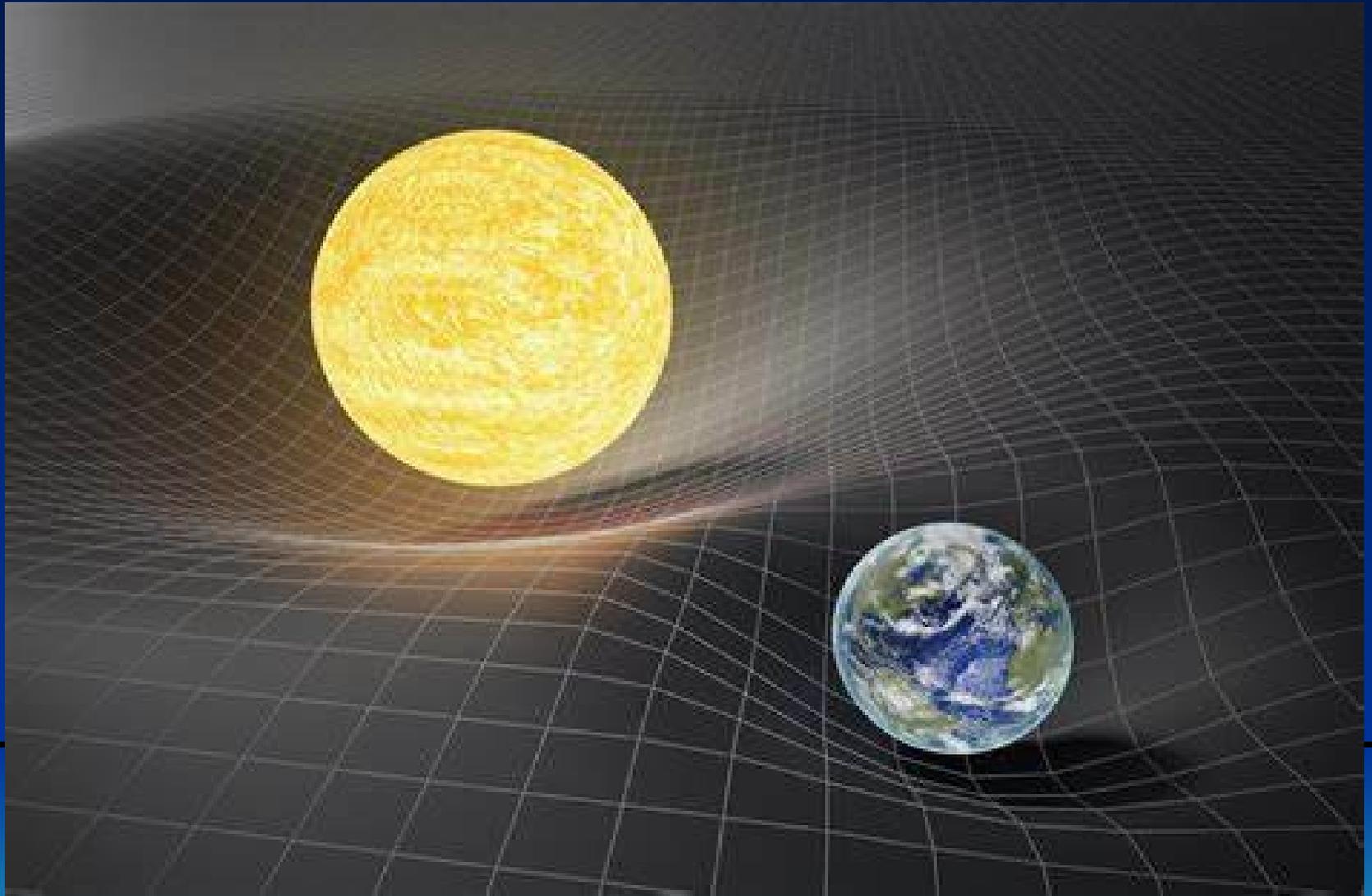
- Le galassie si formarono dalla frammentazione della nube di idrogeno (75%), elio (25%) e poco altro, emersa dal Big Bang.
- Nel centro delle galassie in formazione si trovava una grande concentrazione di gas.
- Le grandi masse in gioco provocarono la formazione di buchi neri di massa da milioni a miliardi di masse solari.



Buchi Neri Cosmologici

- Il Big Bang, con le sue altissime densità, potrebbe aver prodotto mini buchi neri.
- Tali buchi neri avrebbero le dimensioni quasi puntiformi di una particella elementare e massa dell'ordine dei miliardi di tonnellate.
- Secondo alcune teorie, potrebbero anche prodursi in acceleratori come l'LHC del CERN ma le ricerche finora non hanno avuto successo.



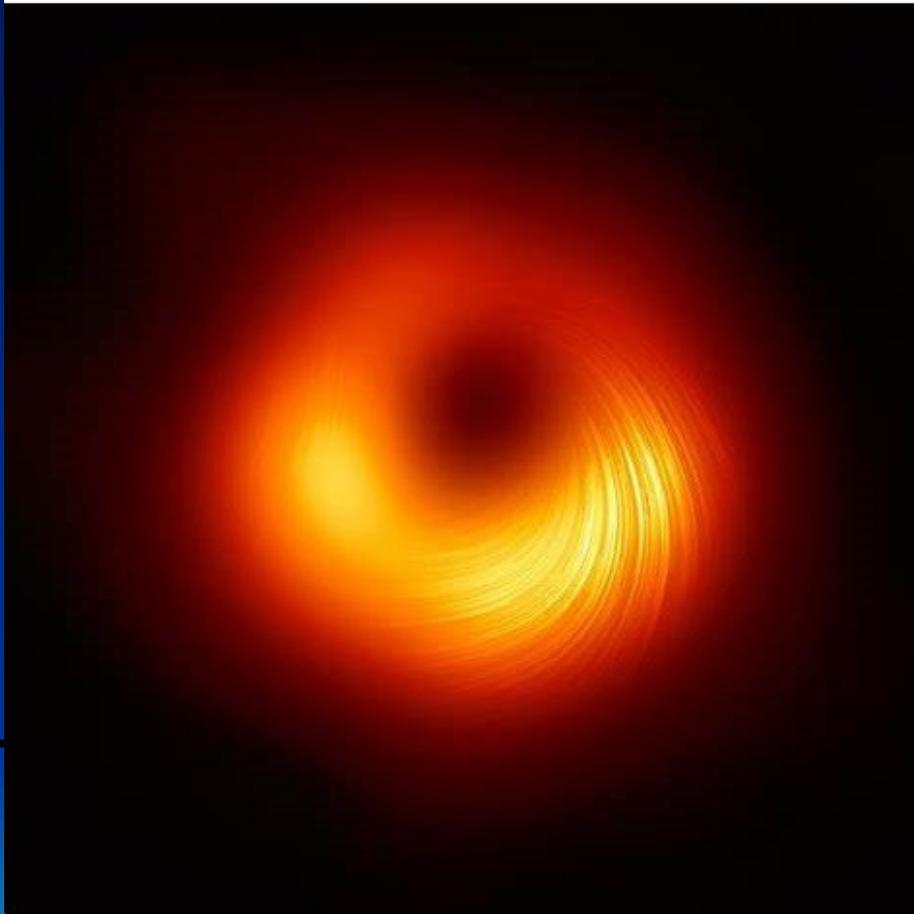


- Nella relatività ristretta la velocità della luce è la massima possibile.
- Nella relatività generale un corpo incurva lo spazio circostante, tanto più quanto è maggiore l'attrazione gravitazionale del corpo stesso.
- Schwarzschild predisse che quando la velocità di fuga da un corpo supera quella della luce, lo spazio si chiude su se stesso.
- L'analogia migliore è quella di una goccia d'acqua che si stacca da un rubinetto.

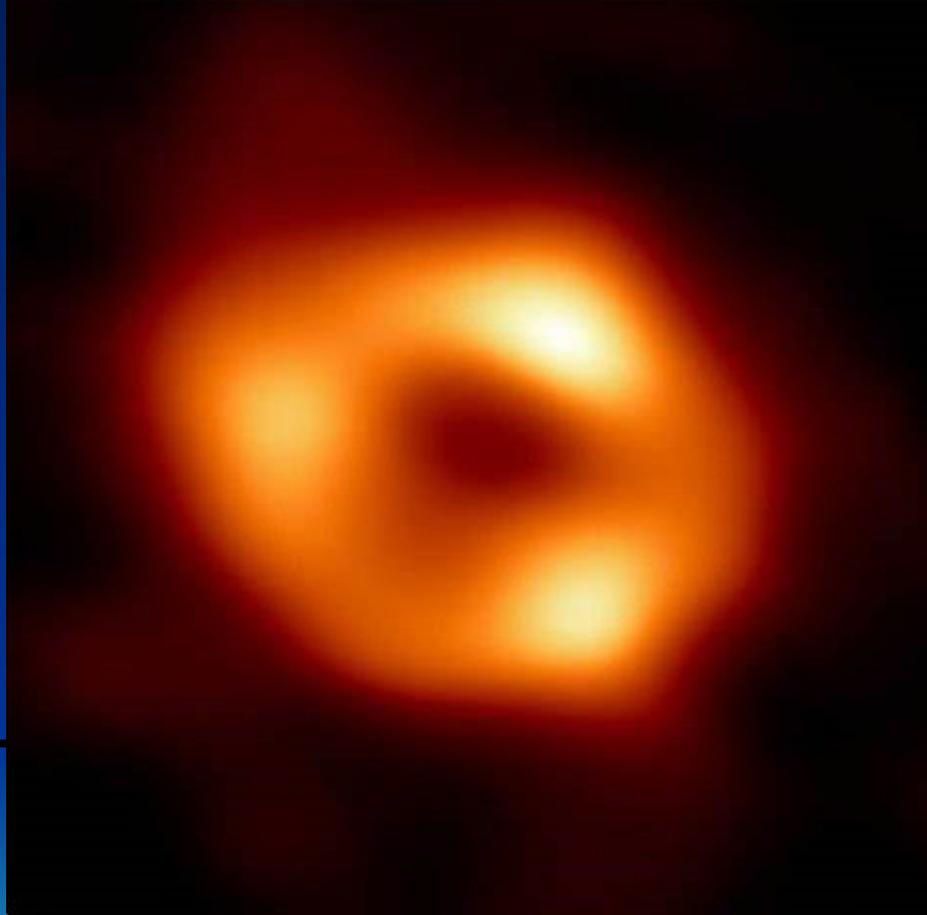




M 87 A*



SAGITTARIUS A*



Il Raggio di Schwarzschild

- Esiste un raggio, detto raggio di Schwarzschild, tale che se un corpo è compresso sotto quel raggio diviene un buco nero.
- Per il Sole il raggio di Schwarzschild è di circa 3 km: se compresso sotto i 3 km, esso diventerebbe un buco nero.



L'Orizzonte degli Eventi

- Il raggio di Schwarzschild definisce l'orizzonte degli eventi.
- Ciò che cade all'interno dell'orizzonte degli eventi precipita nel buco nero e non ne può uscire, qualunque velocità abbia.
- Nemmeno la luce può sfuggire all'orizzonte degli eventi di un buco nero che, infatti, è nero.



L'Ergosfera

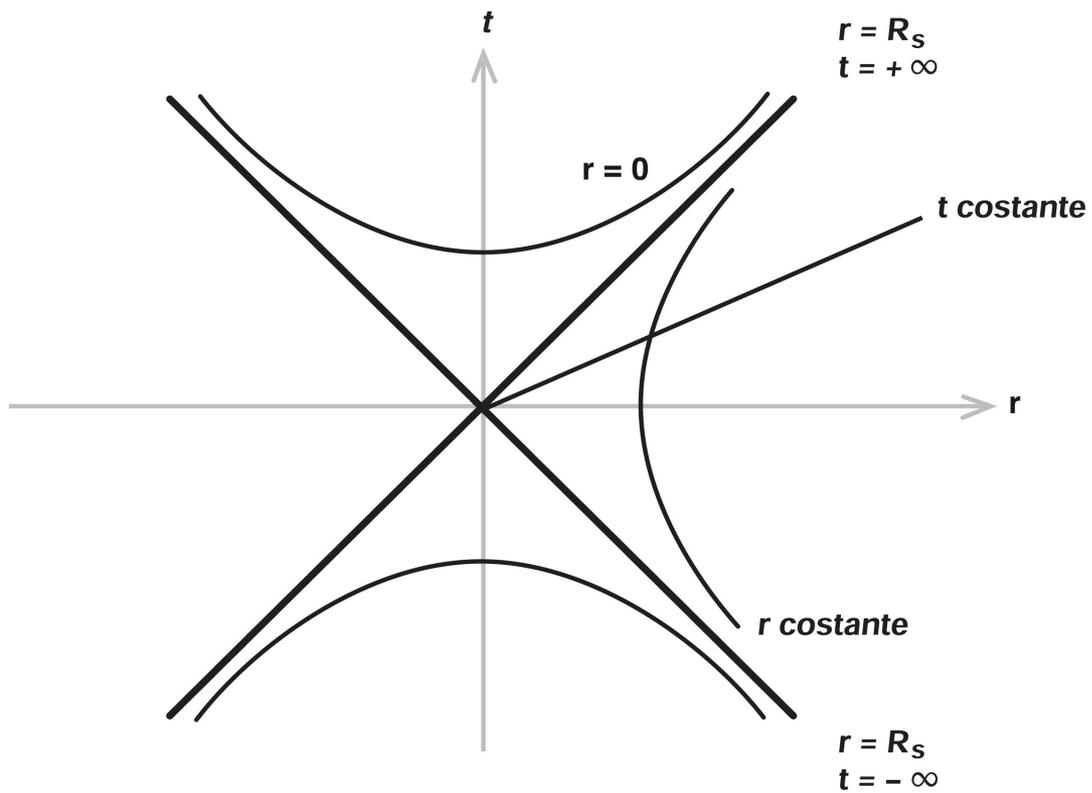
- Nel caso di buchi neri rotanti vi è anche un'altra zona importante, l'ergosfera, di raggio maggiore dell'orizzonte degli eventi.
- Dall'ergosfera si può fuggire ma un corpo che sfugge all'ergosfera acquista un po' della rotazione del buco nero e può quindi estrarne energia.



La Singolarità

- Nel centro di un buco nero temperatura, pressione e densità sono infinite e si ha una singolarità.
- Dove le quantità sono infinite non valgono le leggi fisiche, dunque la relatività generale prevede la propria inapplicabilità in corrispondenza delle inevitabili singolarità.
- Se però, come stabilisce la teoria delle stringhe, un buco nero fosse un insieme di minuscole corde vibranti, le dimensioni minime sarebbero quelle di una stringa e non zero e si avrebbe quindi una minuscola “palla di elastici” e non una singolarità puntiforme.





Cadere in un Buco Nero

- E' particolarmente interessante considerare cosa accade a un astronauta che cada in un buco nero.
- Dal punto di vista dell'astronauta, viene superato l'orizzonte degli eventi e si precipita verso la singolarità circa alla velocità della luce.



- Dentro l'orizzonte degli eventi i ruoli dello spazio e del tempo si invertono, dunque lo spazio diventa tempo e il tempo diventa spazio.
- Come nell'universo ordinario si procede inesorabilmente verso la fine dei tempi, dentro l'orizzonte degli eventi si procede inesorabilmente verso la fine dello spazio, cioè verso la singolarità.



- L'astronauta quindi in un tempo brevissimo raggiunge la singolarità, dove sarà schiacciato in una sfera di dimensione zero (o dimensione molto piccola).
- In realtà ancora prima di raggiungere la singolarità l'astronauta sarà dilaniato dalle forze di marea, tanto più potenti quanto più ci si avvicina alla singolarità (spaghetizzazione).



Cadere in un Buco Nero

- Consideriamo invece la situazione dal punto di vista di un osservatore esterno al buco nero.
- Ad un osservatore esterno il tempo nei pressi dell'orizzonte degli eventi sembra fermarsi, dunque l'astronauta impiegherà un tempo infinito per raggiungere l'orizzonte degli eventi.



Cadere in un Buco Nero

- Dall'esterno vedremo quindi l'astronauta rallentare tanto più quanto più è vicino all'orizzonte degli eventi (che non raggiungerà mai).
- La radiazione emessa dall'astronauta (luce) aumenterà sempre più di lunghezza d'onda (red shift) e dunque egli diventerà sempre più rosso e poi scomparirà (la luce si muterà in infrarossi, poi in microonde e onde radio).



Due Realtà?

- Come possono coesistere due realtà contraddittorie? Come può essere contemporaneamente vera una cosa e il suo contrario?
- Nel caso in cui non si tenti di osservare l'astronauta, si tratta in effetti di due realtà contraddittorie che però non ci possono influenzare, dunque è solo una questione di punti di vista.



Due Realtà?

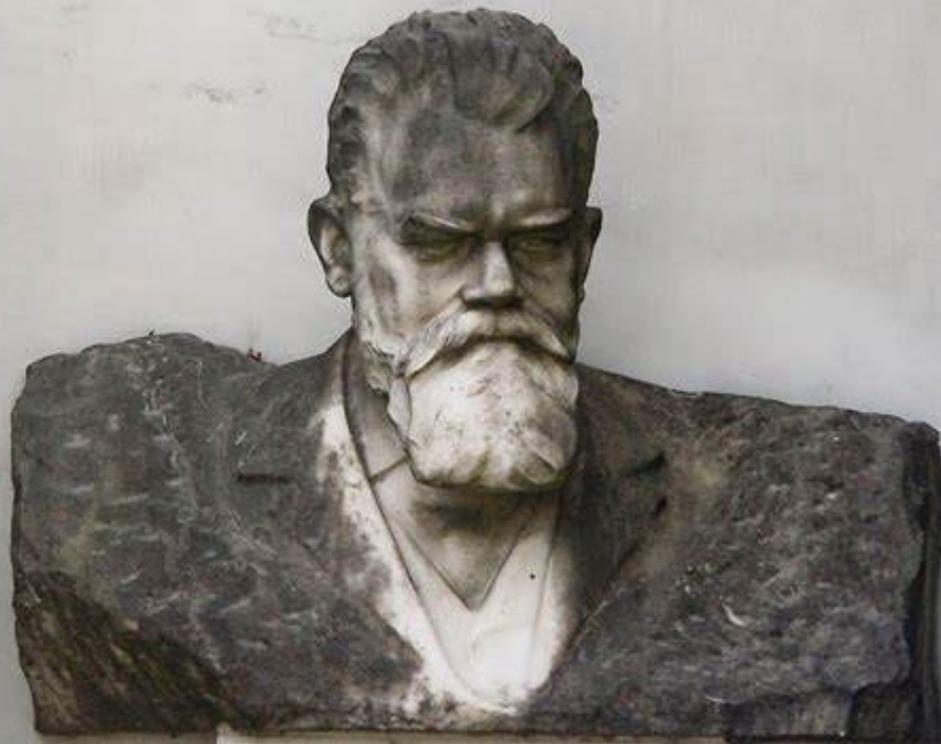
- Diverso è il discorso se tentiamo di osservare l'astronauta: vedremmo un astronauta fermo contro l'orizzonte degli eventi o un astronauta che attraversa l'orizzonte degli eventi? Possiamo vedere allo stesso tempo due realtà contraddittorie?
- In realtà i calcoli ci dicono che per osservare l'astronauta fermo contro l'orizzonte degli eventi dovremmo usare una radiazione di piccolissima lunghezza d'onda, quindi fotoni gamma di altissima energia.



- I fotoni gamma di altissima energia uccideranno l'astronauta, quindi osservandolo noi ne causeremmo la morte. L'astronauta sarebbe ucciso e non potrebbe quindi attraversare l'orizzonte degli eventi. Il paradosso, dunque, è risolto!



$$S = k \cdot \log W$$



Entropia di un Buco Nero

- Il fatto che ad es. un gas abbia una data temperatura significa che le molecole che lo compongono hanno una certa energia cinetica media (energia di moto).
- Quando due molecole del gas si scontrano le loro velocità cambiano ma, se al gas non è aggiunto o sottratto calore, esso manterrà costante la temperatura (macrostato), pur assumendo successivamente microstati diversi (ad es. la media tra 2, 2, 3, 1, 2 è 2 ma è 2 anche la media tra 1, 4, 3, 1, 1). Al macrostato del gas corrispondono moltissimi microstati.



- L'entropia di un sistema è una quantità collegata al disordine del sistema:
più entropia = più disordine
e l'entropia dell'universo non può che aumentare col tempo.



Entropia di un Buco Nero

- Più precisamente, l'entropia di un certo macrostato è proporzionale al logaritmo del numero dei microstati che corrispondono al macrostato.
- Consideriamo ad es. un contenitore diviso a metà da una paratia isolante, nelle due metà del quale sia versata acqua a due diverse temperature. Sollevando la paratia l'acqua si mescolerà e raggiungerà una temperatura media tra le due, stato più disordinato di quello iniziale.



- Quando avremo sollevato la paratia e omogeneizzato le temperature, il macrostato corrispondente alla nuova temperatura dell'acqua corrisponderà a moltissimi microstati - gli stati in cui l'energia cinetica delle singole molecole sarà diversa, in conseguenza degli urti - ma si avrà la stessa energia cinetica media, quella corrispondente alla temperatura dell'acqua mescolata.
- Lo stato a temperatura omogeneizzata avrà dunque alta entropia e infatti sarà più disordinato di quello in cui l'acqua nelle due metà del recipiente aveva due diverse temperature.



- Un teorema, dovuto a Hawking e altri, ci garantisce che un buco nero può essere descritto al massimo da tre parametri: il momento angolare (una misura della velocità di rotazione), la massa e la carica elettrica.
- Consideriamo ad es. una serie di buchi neri che non ruotino e non abbiano carica elettrica (buchi neri di Schwarzschild) e supponiamo che derivino dalla compressione di ammassi di oggetti di tutti i tipi ma che abbiano la stessa massa: otterremo buchi neri uguali, proprio a causa del fatto di avere la stessa massa.



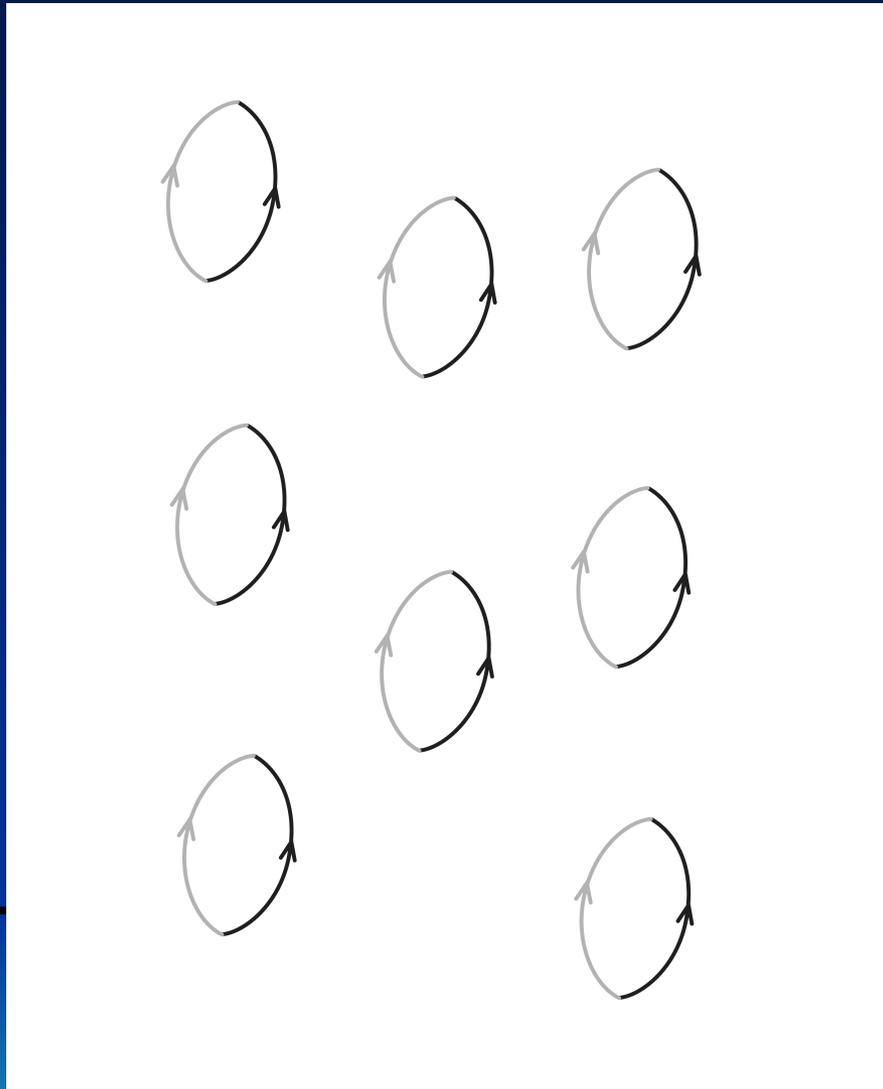
Entropia di un Buco Nero

- In corrispondenza di un macrostato - un buco nero con una data massa, nel nostro caso - avremo molti microstati - buchi neri generati dalla compressione di ammassi di oggetti i più vari ma aventi la stessa massa.
- Dunque a un buco nero, come scoprirono Hawking e Bekenstein, si può attribuire un'entropia (legata all'area del buco nero, il cui confine è l'orizzonte degli eventi) e tale entropia è molto elevata.



- L'entropia dell'universo (presente, passato e futuro) è dominata dall'entropia dei suoi buchi neri e il valore dell'entropia dell'universo (presente, passata e futura) ne condiziona il destino. I buchi neri, come vedremo, alla lunga evaporano e la morte termica dell'universo si avrà dopo che gli oggetti di ciascuna galassia saranno confluiti nel buco nero centrale che sarà poi evaporato, dando origine a un gas di particelle elementari ad alta entropia, la cui temperatura tenderà col passare del tempo allo zero assoluto.





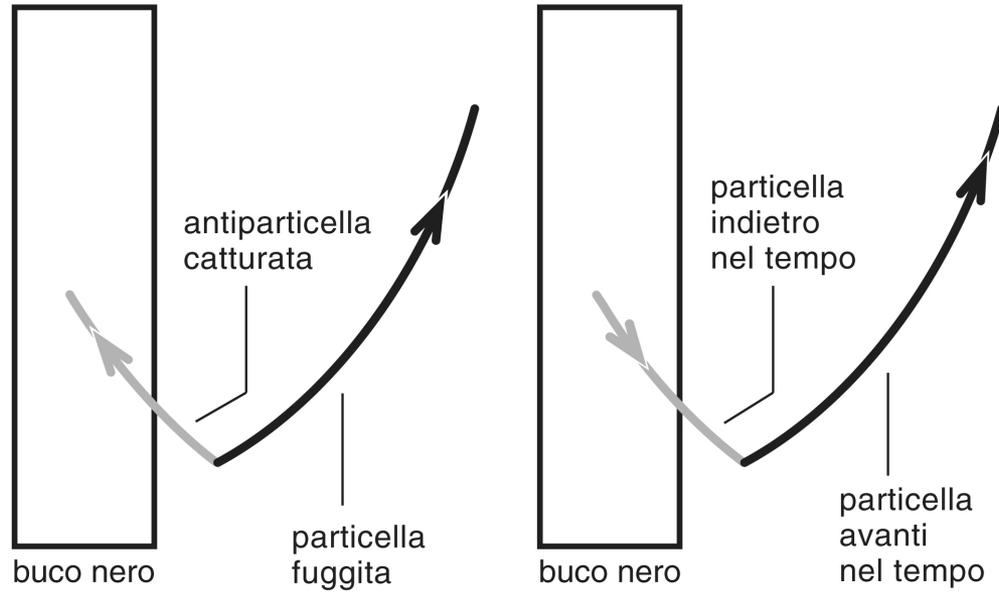
Evaporazione di un Buco Nero

- Dove c'è entropia c'è temperatura, dove c'è temperatura c'è evaporazione: come ha scoperto Hawking, infatti, i buchi neri progressivamente evaporano, anche se all'atto pratico il tempo di evaporazione tende all'infinito, a parte i mini buchi neri che hanno invece tempi di evaporazione molto più brevi.



- Per il principio di indeterminazione di Heisenberg, infatti, nello spazio “vuoto” appaiono e scompaiono continuamente coppie particella/antiparticella.
- Ciò avviene anche nei pressi dell'orizzonte degli eventi di un buco nero. In tal caso l'antiparticella cade nel buco nero mentre la particella lascia la sua superficie: l'effetto è quello dell'emissione di una particella da parte del buco nero che così progressivamente evapora.





Conclusioni

- I buchi neri sono oggetti previsti teoricamente che però danno origine e fenomeni osservabili sperimentalmente (sono stati scoperti buchi neri stellari e galattici e due buchi neri galattici sono stati anche fotografati ma degli aspetti sperimentali qui non ci occupiamo).
- Le loro proprietà sono affascinanti e lontane dall'ordinaria intuizione. I buchi neri non sono solo importanti per l'astronomia ma stanno progressivamente diventando sempre più importanti per la cosmologia e la fisica teorica.

