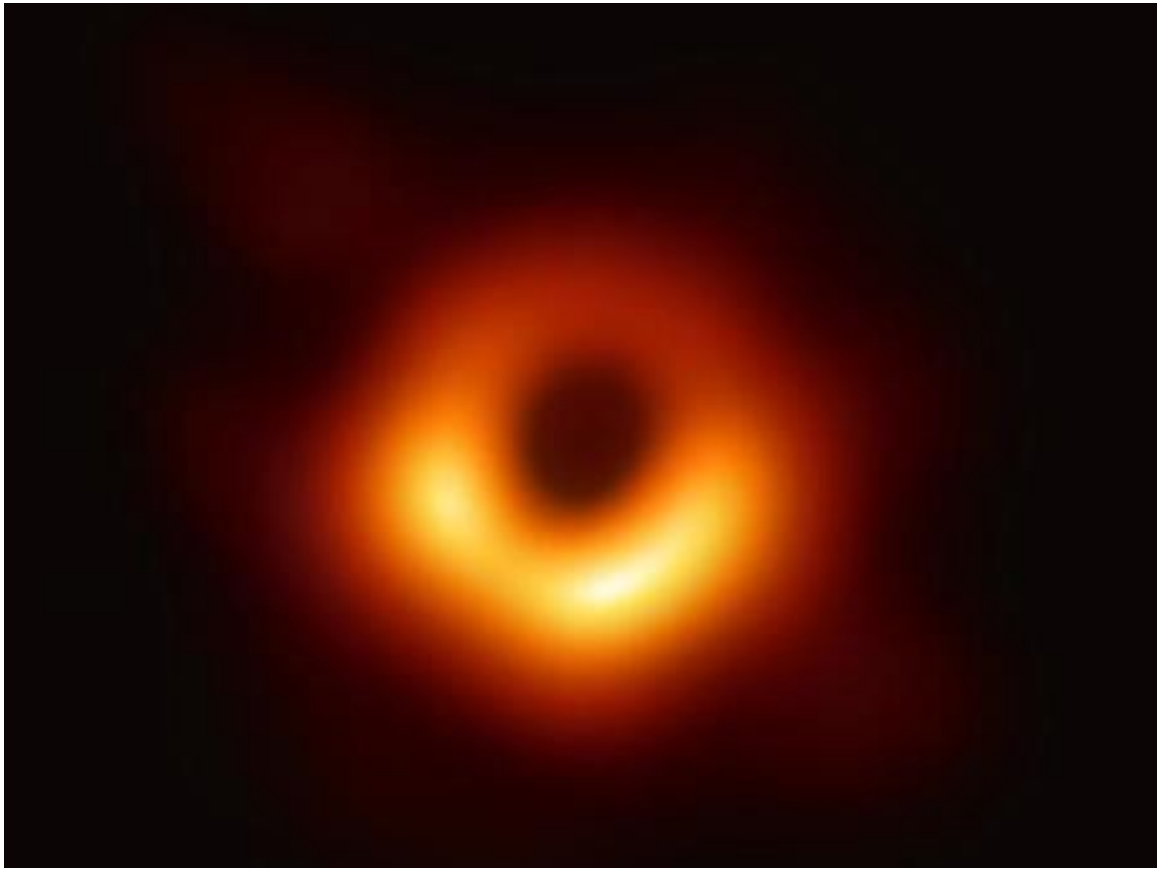
BUCHI NERI E ONDE GRAVITAZIONALI

ALDAI 12 NOVEMBRE 2019



Sua maestà il buco nero in prima assoluta

Buco nero al centro della super Galassia M87
Distanza 55 Milioni di anni-luce
Massa di 6,6 Miliardi di Masse Solari

Buchi Neri: Oggetti astrali senza qualità

- Tre sole caratteristiche li descrivono:
  - Massa
  - Momento angolare (Rotazione)
  - Carica Elettrica
- Visto uno visti tutti
- Perché' tanta curiosità?
- Perché in prossimità dei buchi neri succedono le cose più incredibili

La loro stranezze

- Sono assolutamente invisibili
- Sono circondati da un confine «infernale»
- Il tempo rallenta fino a fermarsi sul confine
- I raggi di luce orbitano intorno ad essi
- Al loro interno spazio e tempo si invertono
- I buchi neri sudano
- In fondo al buco nero forse c'è un buco bianco (Ponte di Rosen-Einstein)

Teoria Classica

- Gravitazione Newtoniana
  - F = -G$\frac{M_1 * M_2}{R^2}$
  - Velocità di fuga : $V_f = \sqrt{2\frac{GM}{r}}$
  - Buco nero classico $\sqrt{2\frac{GM}{r}}$ > c velocità della luce
  - r molto piccolo e M molto grande

Teoria Classica

- Facendo qualche calcolo si vede che un corpo della massa del Sole deve essere contenuto entro una sfera di 3 KM di raggio.
- Oppure risolvendo in base alla densità:
  - $r * \sqrt{\frac{8\pi G\delta}{3}} > c$ cioè corpi omogenei con raggio superiore a 10^{10} Km.

Teoria classica

- Fino a una trentina di anni fa non c’era evidenza della esistenza reale di corpi siffatti
- Tanto piu’ all’ epoca di Newton
- Michel e Laplace alla fine del Settecento discussero un po’ accademicamente di questi corpi, che chiamarono «stelle oscure», ma tutto finì nel dimenticatoio
- Finché…….

Teoria Relativistica

- Einstein nel 1915 rivoluziona la Teoria Gravitazionale pubblicando la teoria generale della Relatività

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}.$$

- La Gravità non è che curvatura dello spazio-tempo
- Causata da energia/massa e pressione

Non così semplice

- Le equazioni di Einstein sono un complesso di operazioni matriciali con derivate parziali di secondo ordine
- Non esiste una soluzione matematica generalizzata
- Ci sono molte soluzioni in casi molto particolari

Non così semplice

- La soluzione più famosa è quella del Big Bang
  - Ipotesi restrittive:
    - Spazio isotropo e omogeneo
    - Pressione = 0
    - Due sole variabili: r e t
- Diventa un semplice sistema di due equazioni differenziali di secondo grado facilmente risolubili

La soluzione di Schwarzschild

- Soluzione per un corpo sferico simmetrico
- In rotazione o meno
- Coincide con le equazioni di Newton ma con diverso significato
- R = $\frac{2GM}{c^2}$
- R e' il raggio entro il quale la velocità di fuga è superiore a quella della luce
- Descrive una sfera ideale detta orizzonte degli eventi

La soluzione di Schwarzschild

- L’ orizzonte degli eventi e’ come la porta dell’ inferno dantesco : nulla, una volta entrato può piu’ uscire, nemmeno la luce, per cui questa sfera e’ color nero assoluto e assolutamente invisibile
- Schwarzschild previde l’ esistenza dei buchi neri cent’ anni prima che potessero essere osservati
- Un’ altra realtà fisica prevista dalla teoria ben prima che potesse essere osservata

Crisi della teoria classica

- Abbiamo già osservato che il contenuto dell'orizzonte degli eventi non e' compatibile con nessun tipo di materia ed energia a tutt'oggi noto.
- D' altra parte la Relatività Generale ne prevede l' esistenza, con equazioni che ne regolano precisamente la struttura
- L' osservazione del cosmo ha permesso nel corso del XX secolo di costruire una scala di densità che ci permette di giungere a comprendere la genesi dei buchi neri

La scala delle densità

- Il nostro Universo e’ prevalentemente vuoto
- La sua densità media è di 10^{-27} Kg/mc (circa 5 protoni per mc)
- La densità dell’ atmosfera a livello del mare è di 1,2 Kg/mc cioè 1 miliardo di miliardi di miliardi di volte più densa
- L’ acqua ha una densità di 1.000 Kg/mc
- L’ elemento piu’ denso, l’ Osmio 22.661 Kg/mc

La scala delle densità

- Il punto più denso del sistema solare, il centro del sole 150.000 Kg/mc
- Per comprendere il perché di queste densità relativamente basse e inadeguate a generare buchi neri è necessario dare uno sguardo alla composizione della materia

La struttura della materia

- La materia che conosciamo è sostanzialmente fatta di vuoto
- Noi siamo fatti di vuoto, la nostra «pienezza» e opacità e una pura illusione ottica
- In condizioni normali il raggio di un nucleo atomico è un decimillesimo del raggio «apparente» dell’ atomo, che è costituito dal guscio elettronico

La struttura della materia

- Analogia
  - Atomo grande come lo Stadio Meazza
  - Il nucleo ha le dimensioni di una ciliegia
  - L’ elettrone orbitante pari al diametro di un capello
  - Tutto il resto e’ vuoto
  - Quando gli atomi «fatti di vuoto» sono a stretto contatto abbiamo le massime densità della fisica classica

Un esperimento mentale

- Ipotizziamo di poter aumentare la pressione in modo arbitrario.
- Inizialmente le orbita elettroniche fanno da barriera e si oppongono alla compressione: siamo in regime classico
- A un certo punto la pressione è tale che le orbite elettroniche collassano e gli elettroni si compattano

Un esperimento mentale

- Che tipo di materia ne risulta?
- Tutte le stelle con massa non superiore a 1,4 volte quello del Sole finiscono la loro esistenza in questo stato degenerato
- Sono le NANE BIANCHE
- Una massa come il Sole viene compressa in uno spazio come il pianeta Terra e la densità raggiunge i $10^9 \ \mathrm{Kg/mc}$
- Conosciamo migliaia di stelle in questo stato

Un esperimento mentale

- E se aumentiamo ancora la pressione?
- I gusci elettronici collassano completamente
- Gli elettroni penetrano nei nuclei e si accoppiano con i protoni generando neutroni
- Si forma una stella di soli neutroni

Un esperimento mentale

- La densità raggiunge $2*10^{17}$ Kg/mc
- 1 cc di stella a neutroni pesa 200 milioni di tonnellate
- Il nostro Sole a quelle densità sarebbe una palla di 10Km di raggio
- Siamo giunti al limite della attuale comprensione del comportamento della materia

Un esperimento mentale

- Che succede se aumentiamo la pressione ulteriormente?
- Limite massa Stelle di Neutroni è 3 masse solari
- Evidentemente sopra questo limite collassano anche i nuclei atomici
- Esistono stelle di quark?
- Non ci sono evidenze. Non abbiamo idea.

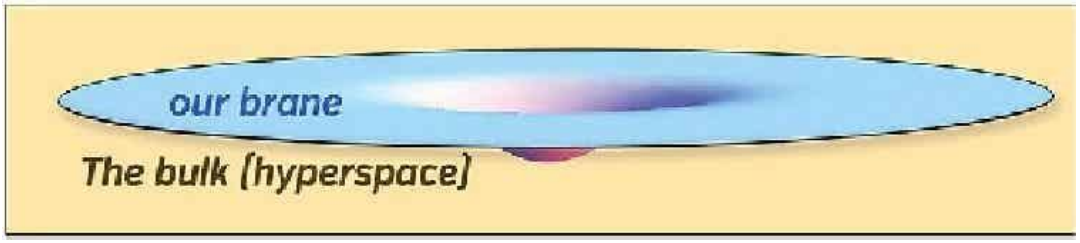
Un esperimento mentale

- Tutto sparisce all’ interno dell’ orizzonte degli eventi
- Abbiamo un buco nero stellare
- Densità media 10^{19} Kg/mc
- Tutte le informazioni vanno perse in una discontinuità spazio-temporale
- Non esiste attualmente una comprensione delle condizioni interne al buco nero
- La descrizione relativistica riguarda lo spazio-tempo, non lo stato della materia

Il buco nero relativistico

Deformazione dello spazio causata dalla massa.

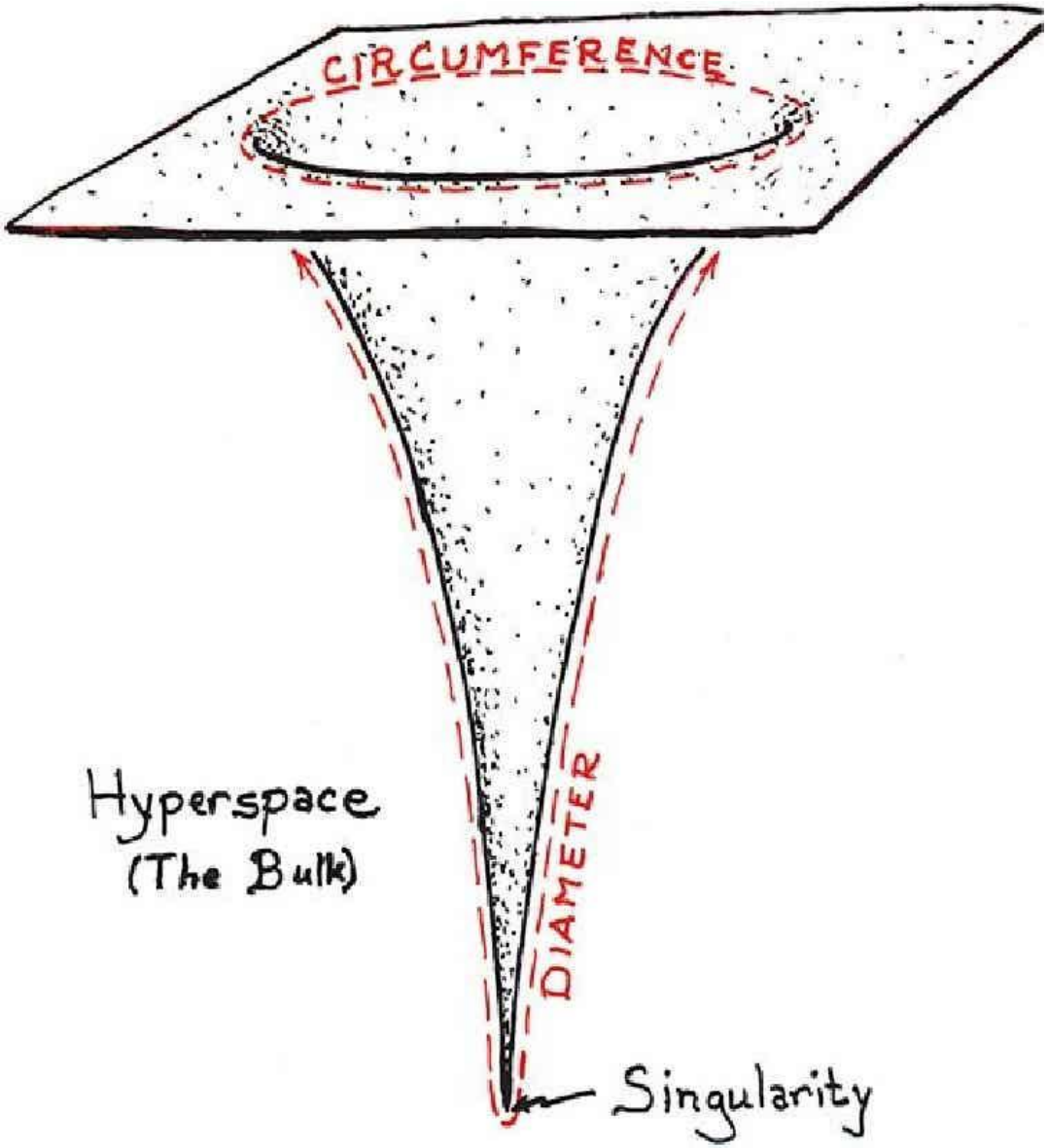
Visione in due dimensioni



Deformazione infinita

Vortice infinitamente profondo

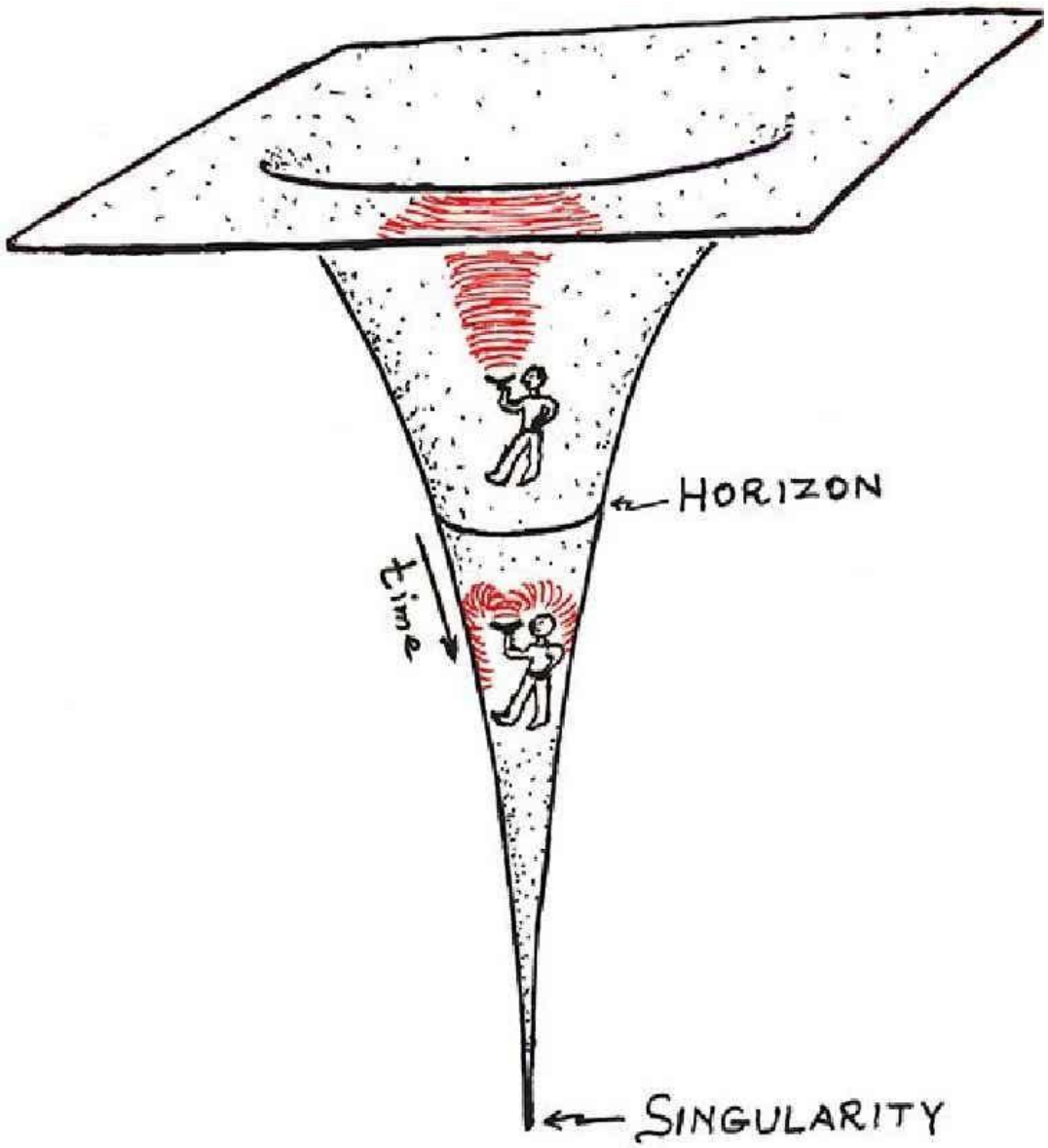
Diametro infinito



L’ orizzonte degli eventi

Sopra i raggi di luce si allontanano

Sotto tornano indietro

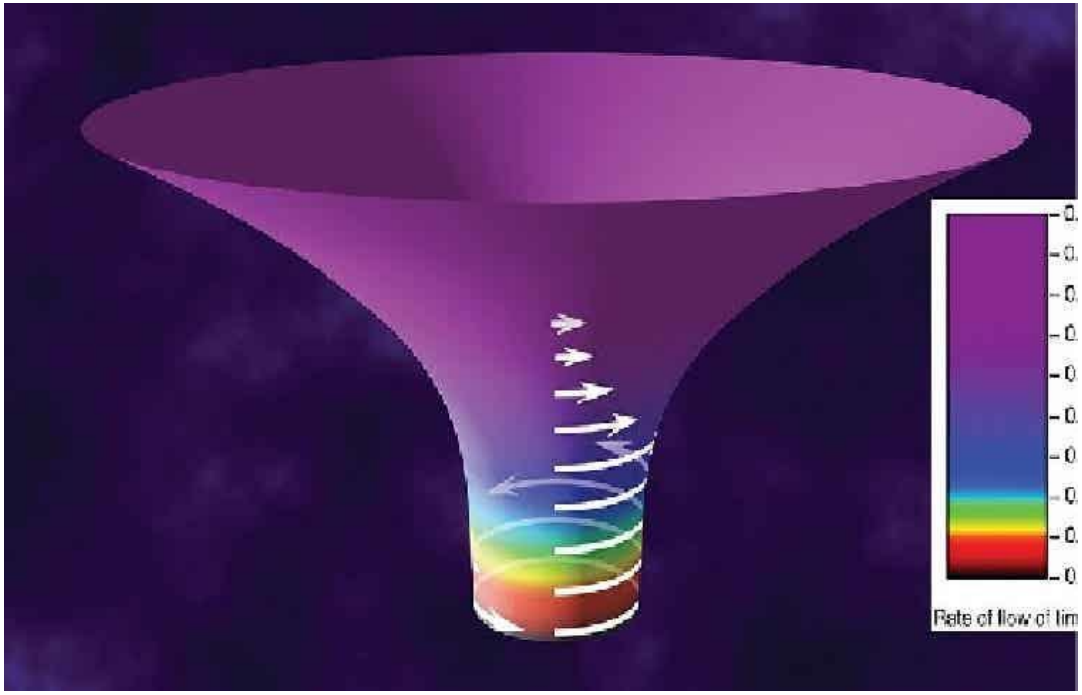


Rallentamento del tempo

Rallentamento del tempo avvicinandosi all’ orizzonte degli eventi.

Qui rappresentato come un cerchio perché’ abbiamo abolito una dimensione

Al di sotto dell’ orizzonte la Relativita’ Generale si arresta



Un po’ di fantascienza

- Interstellar e il viaggio dell’ Endurance
- Il Buco nero Gargantua
- Come un Nobel: Kip Thorne, ha rappresentato realisticamente un viaggio fantastico
- Per salvare degli astronauti dispersi l’ astronave Endurance deve usare un buco nero come fionda gravitazionale

Diario di bordo dell’ Endurance

- Una sonda lascia l’ astronave Endurance per discendere verso il buco nero
- I due equipaggi sono in contatto televisivo
- Inizialmente non notano nessuna anomalia
- Quando la sonda raggiunge velocità relativistiche si sommano due effetti opposti

Diario di bordo dell’ Endurance

- Per effetto della relatività speciale entrambi gli equipaggi vedranno il tempo dell’ altro rallentare
- Mentre per effetto di quella generale il tempo della Endurance rallenta con l’ aumentare della gravità e vede il tempo della nave madre accelerare
- Poiché’ ogni oggetto che cade nel buco arriva all’ orizzonte degli eventi circa alla velocità della luce

Diario di bordo dell’ Endurance

- L’ astronave madre vedrà il tempo dell’ Endurance gradualmente fermarsi, mentre da quest’ ultima vedranno il tempo della nave madre svolgersi così rapidamente da giungere all’ infinito futuro
- A ciò si aggiungono i due effetti doppler relativistici che si combinano facendo si che le lunghezze d’ onda delle immagini reciproche tendano all’ infinito, sfumando quindi nell’ infrarosso e poi nel nulla

Diario di bordo dell’ Endurance

- La sonda oramai non vede piu’ nulla dell’ Universo che sta abbandonando
- La voragine nero assoluto che si apre davanti ad essa si espande fino a circondarli a 360°
- Ora le forze mareali stirano i loro corpi con intensità crescente fino a distruggerli giù fino al livello atomico con la cosiddetta spaghettificazione.
- Al momento del passaggio attraverso l’ orizzonte degli eventi nessuna struttura materiale nota avrà resistito

Diario di bordo dell’ Endurance

- Mentre l’ Endurance vede la sonda fermarsi e svanire nel nulla ai bordi dell’ orizzonte,
- Gli astronauti, che ipotizziamo fantascientificamente contenuti in una navicella capace di schermare la gravità, penetrano a velocità quasi pari a quella della luce all’ interno del buco nero
- Cosa troveranno non si sa. Vedremo qualche ipotesi quantistica

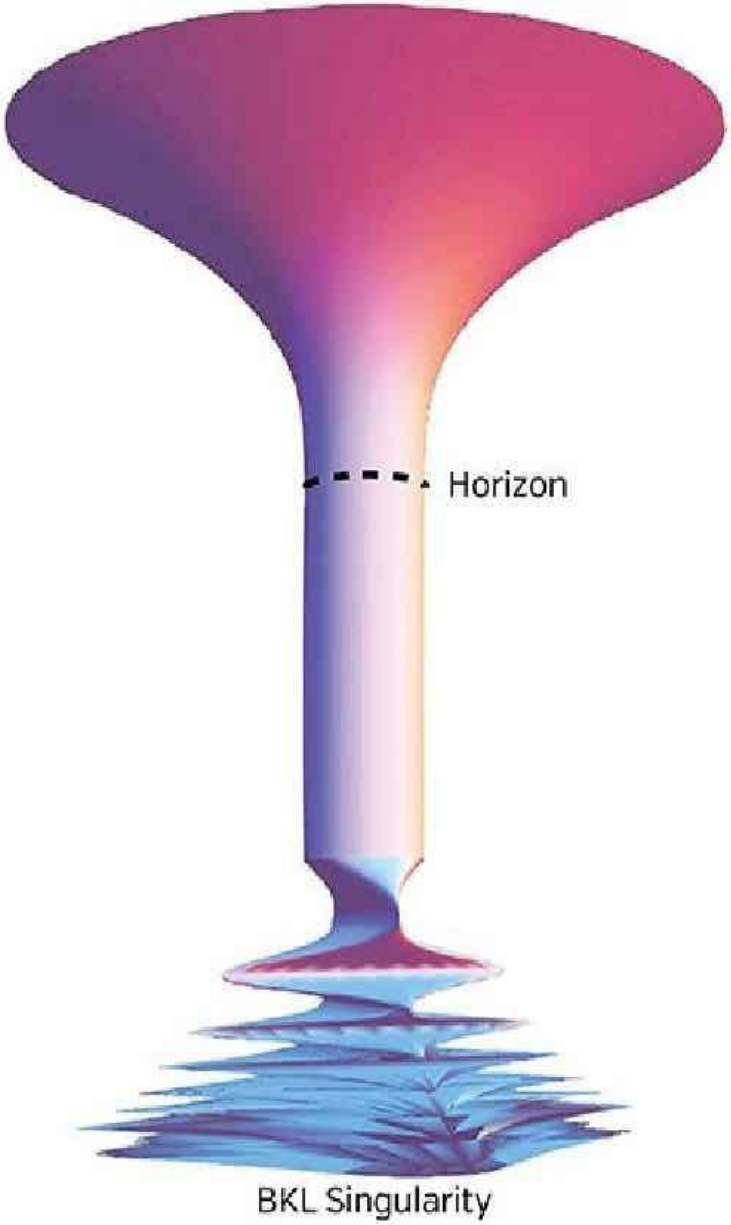
Caduta nel Buco nero

CADUTA NEL BUCO NERO: 2-09-22

Il contributo quantistico

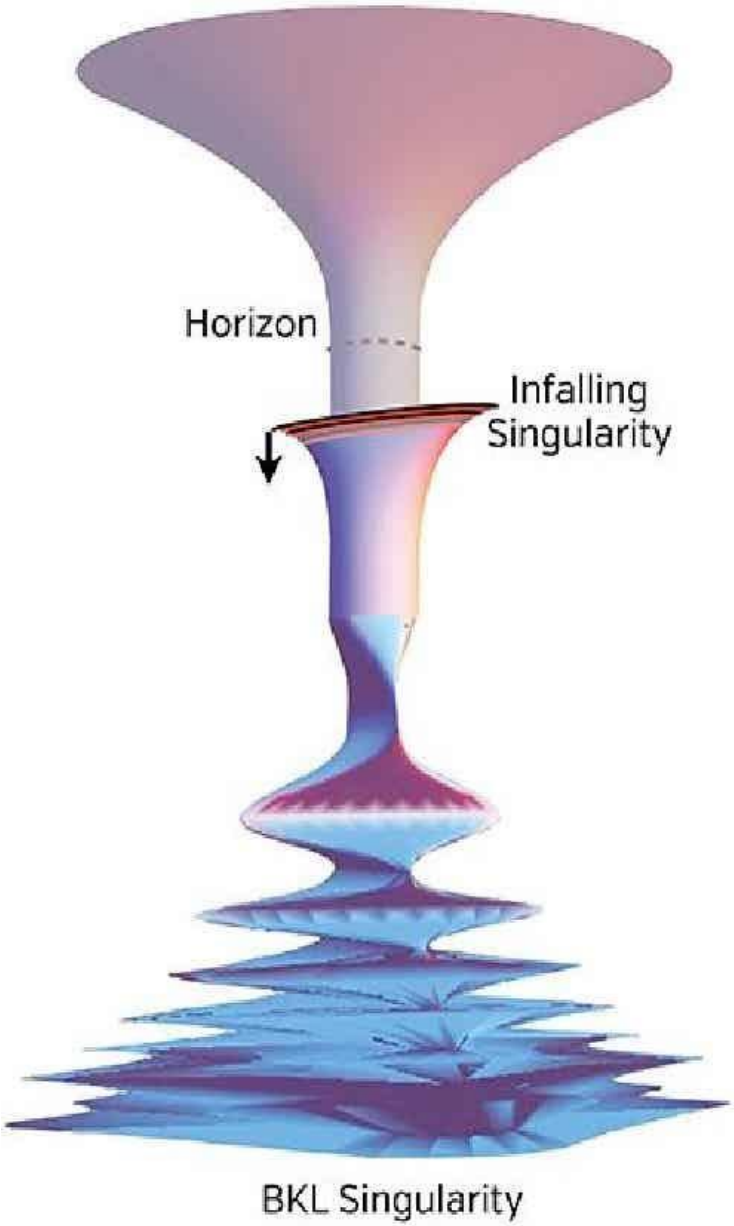
A differenza della previsione relativistica, l' approssimarsi alla discontinuità è accompagnato da instabilità dello spazio-tempo.

L' instabilità è distruttiva e impedisce di predire che succede oltre



Il contributo quantistico

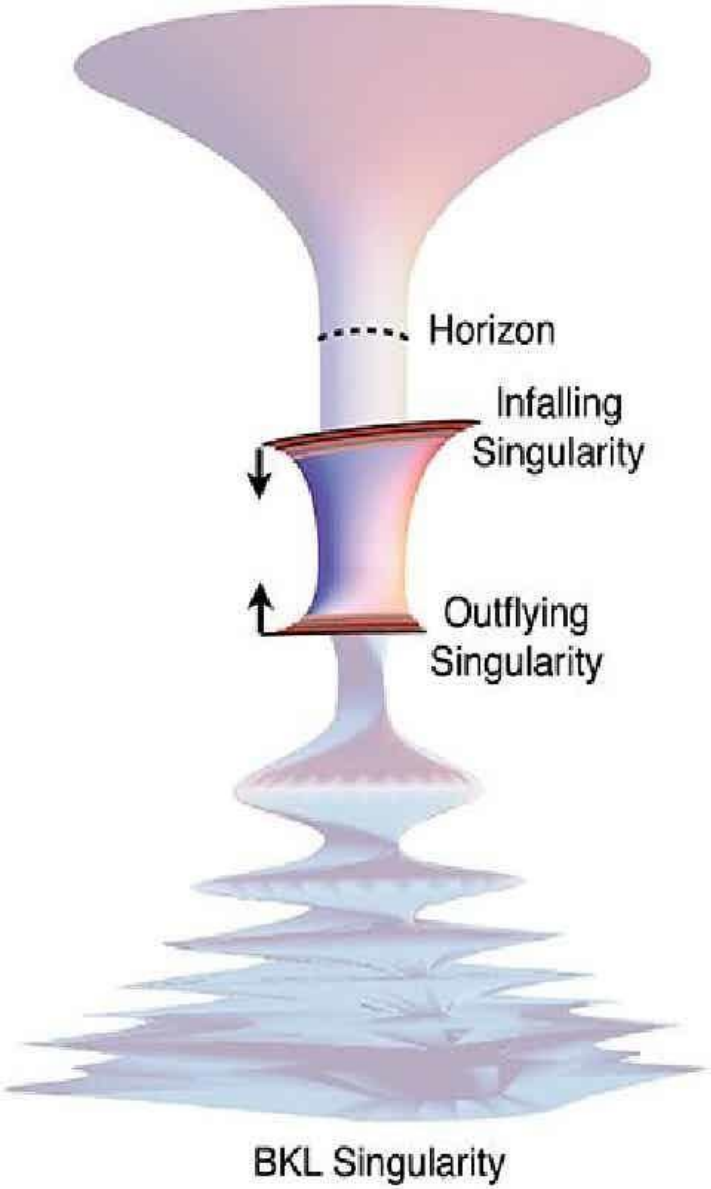
Per effetto della distorsione temporale già vista, tutto ciò che cade nel buco dopo gli astronauti subisce ai loro occhi un rallentamento e un conseguente appiattimento in un foglio sottile che tende a densità infinita



Il contributo quantistico

Analogamente il materiale che li ha preceduti forma un fronte di discontinuità che viene loro incontro

Abbiamo fatto qualche passo avanti all' interno del buco nero ma ancora non sappiamo dove si finisce



Einstein colpisce ancora

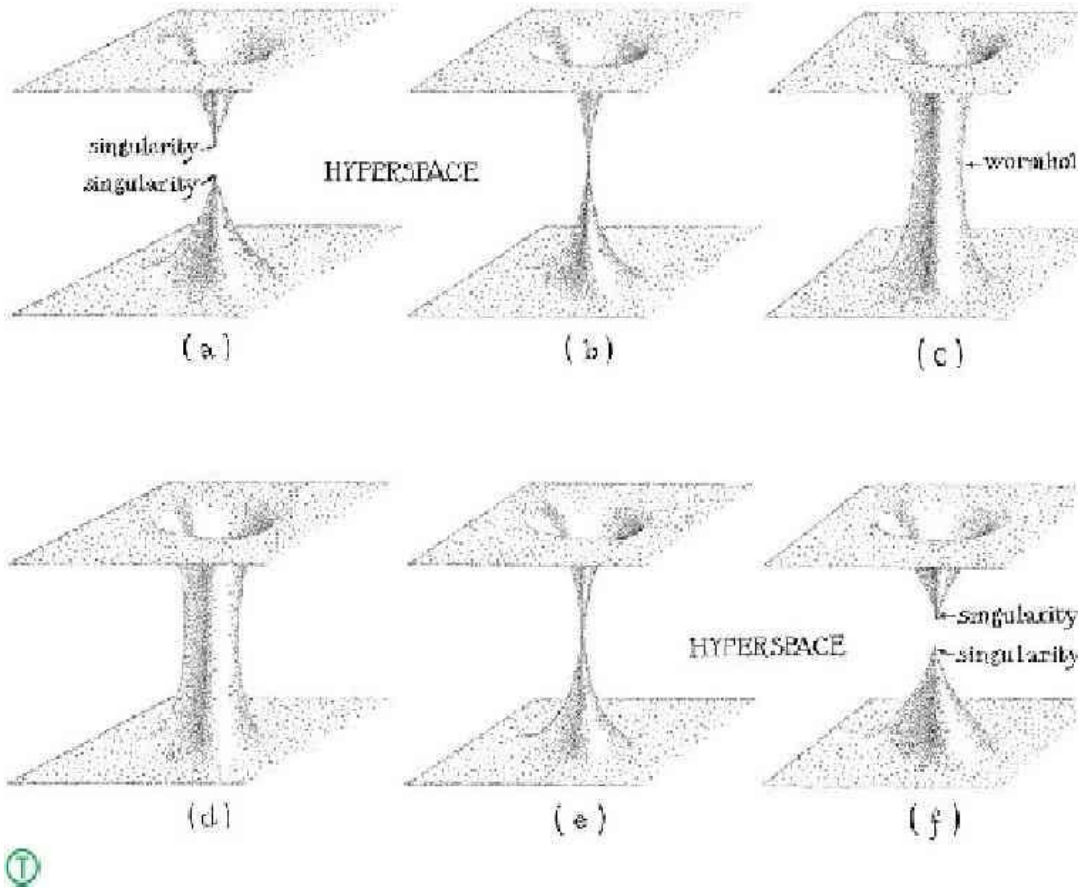
- Ma se la Relativita' Generale non poteva dirci nulla sull' interno dei buchi neri
- Einstein trovò una soluzione che ne descriveva la traiettoria esterna
- Nel 1935 insieme a Rosen, scoprì il «Ponte di Einstein-Rosen» che Wheeler poi rese famoso col nomignolo di «wormhole»

Buchi neri e wormhole

Einstein e Rosen scoprirono che aldilà della singolarità del buco nero poteva esistere un buco bianco, cioè qualcosa in cui nulla può entrare.

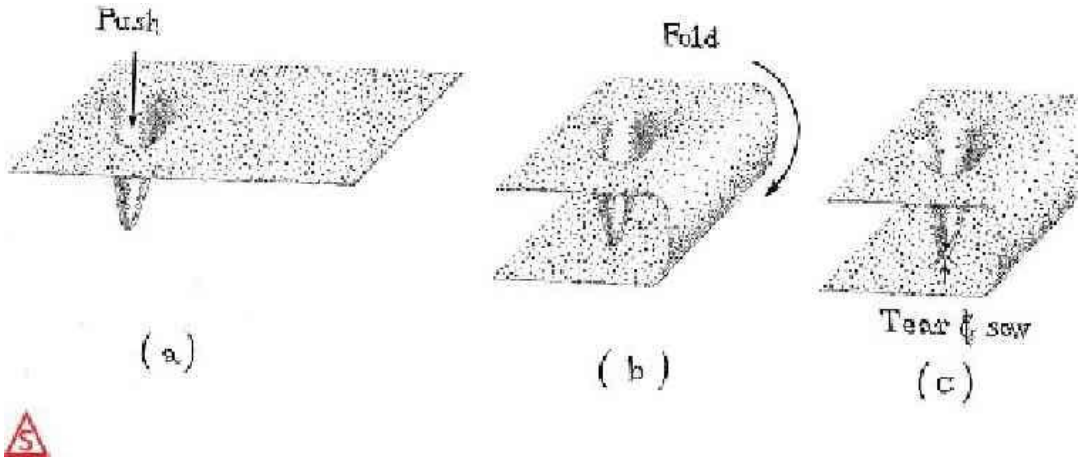
La durata del wormhole è così breve che nulla può passare nemmeno la luce.

A meno che non si disponga di materia esotica……



Buchi neri e wormhole

Si può pensare perciò di finire sia in un altro Universo sia in una parte remota del nostro



PASSAGGIO NEL WORMHOLE: 30.48 E 55.30

Nascita vita e morte dei buchi neri

- Contrariamente alle stelle e in genere ai tutti i corpi celesti la massa dei buchi neri non e’ distribuita con continuità
- In base alla massa ne esistono tre categorie nettamente distinte e con ampio intervallo di separazione
- Ciò implica diversi meccanismi di formazione

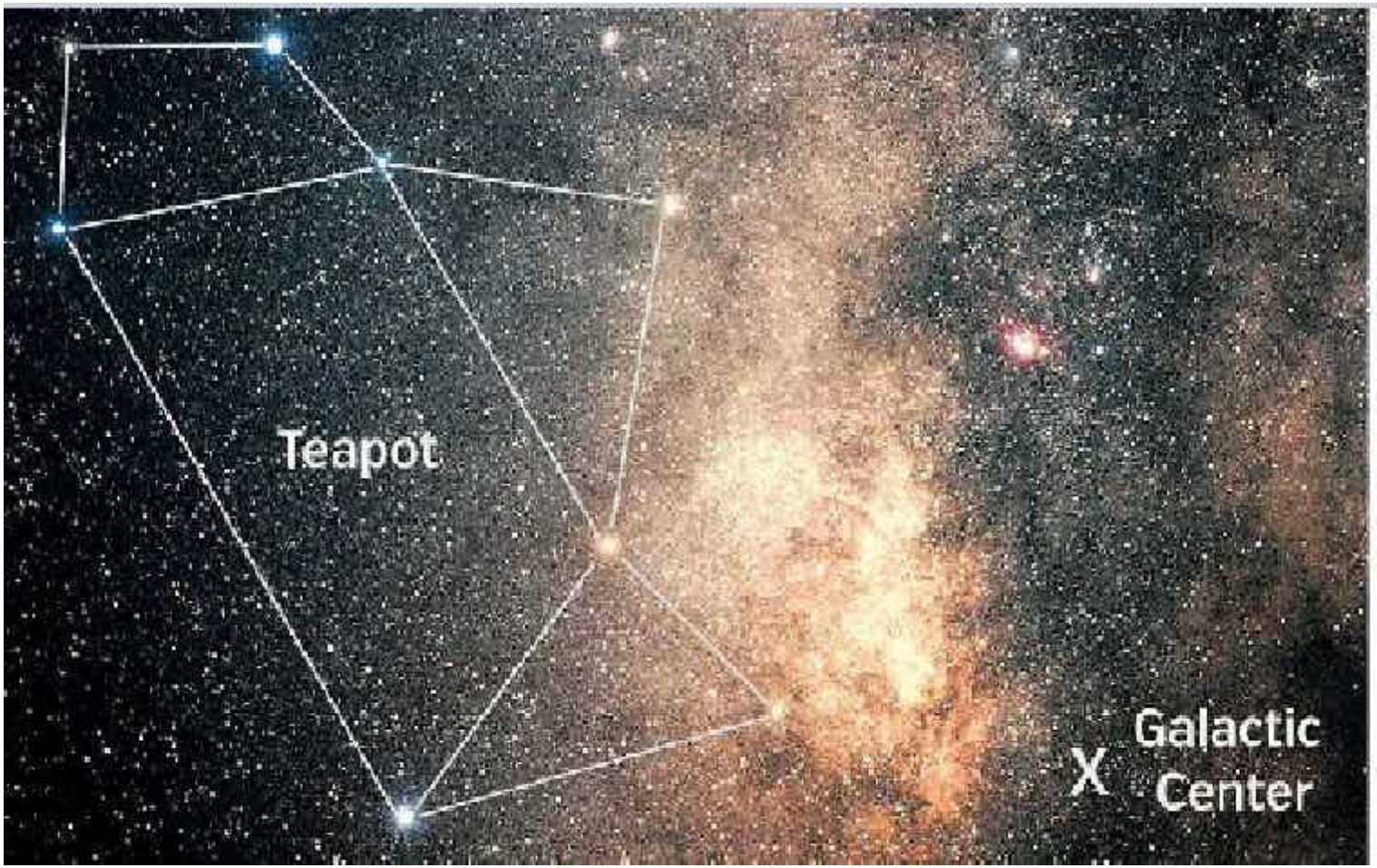
Buchi neri di origine stellare

- Massa da 3 a 50 masse solari
- Origine diretta dall’ esplosione di una supernova super-massiccia, con massa residua superiore a 3 masse solari
- Dall’ assorbimento graduale di materia da una binaria orbitante
- Dalla fusione di due stelle a neutroni

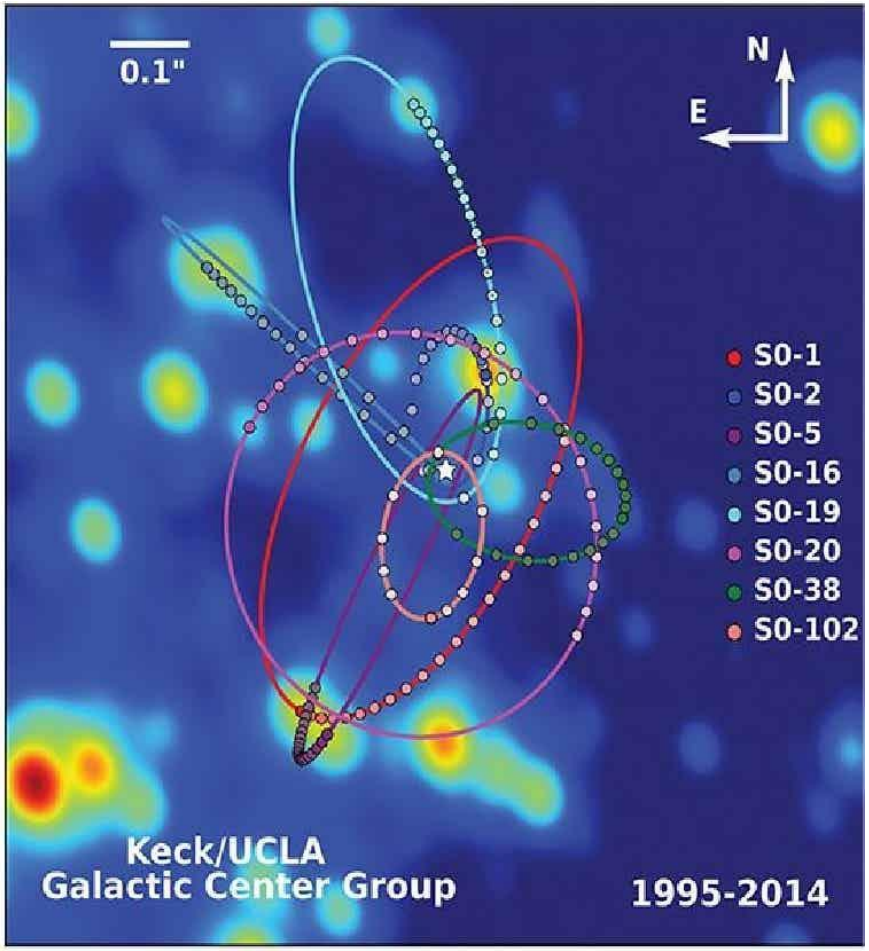
Buchi neri super-massicci

- Massa fra un milione e un miliardo di masse solari
- Non esiste una teoria soddisfacente sulla loro formazione
- Se fosse graduale ci dovrebbero essere BN di massa intermedia, ma non ne conosciamo
- Di fatto la quasi totalità delle galassie ne ha uno al centro

Il centro della nostra galassia



Stelle orbitanti attorno al buco nero



Micro-buchi neri primordiali

- Formati durante il Big-Bang
- Previsti teoricamente ma mai osservati
- Dovuti alle fluttuazioni quantistiche di pressione e densità
- Massa simile a un piccolo asteroide e raggio infinitesimale
- Dovrebbero finire di evaporare ai nostri tempi con esplosione finale a raggi gamma

Vita di un buco nero

- A distanza il buco nero ha un campo gravitazionale simile a quello di ogni altro oggetto di pari massa
- La differenza sorge solo dove la distorsione dello spazio-tempo relativistica diventa rilevante
- Circa due raggi di Schwarzschild
- Per il sole circa 6 Km

Vita di un buco nero

- Nei pressi del buco le cose cambiano
- Gli stress mareali frantumano gli oggetti che si avvicinano troppo
- Si creano anelli di gas e polvere a velocità relativistiche
- Le enormi forze di attrito frenano il materiale che lentamente precipita nel buco nero emettendo raggi ad alta energia che lo rendono visibile per contrasto

Vita di un buco nero

- Spiegato il mistero dei Quasar
- Perché' sono così brillanti
- Perché' esistevano solo nel passato
  - Alla formazione delle galassie il loro centro e' estremamente denso di stelle
  - Esse vengono aspirate in grande quantità dal buco nero centrale emettendo energia luminosa
  - Quando la spazio circostante e' svuotato, il buco nero diventa dormiente e il Quasar si spegne

E poi……

- La vita del buco nero non si ferma qui
- Lentamente (Hawking) il buco evapora
- Meccanismo sofisticato
- Principio di indeterminazione
- Fluttuazioni coppia energia-tempo
- Coppie di particelle sorgono e scompaiono nel finto vuoto mediando l’ interazione fra particelle

E poi…….

- Nello spazio normale le coppie si riaccoppiano in tempi rapidissimi secondo l' equazione di Heisenberg: $\Delta E * \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$
- L' orizzonte degli eventi e' una discontinuità spazio temporale
- Le coppie che statisticamente si creano a cavallo di tale limite non si possono riaccoppiare
- La particella esterna diventa reale ed equivale a una espulsione dal buco nero

Radiazione di Hawking

- Tempo di evaporazione:
  - $t_{ev} = \frac{5120\pi G^2 {M_0}^3}{\hbar c^4}$
  - Per il sole = 10^{67} anni
  - Per un micro-buco nero: 3 miliardi di anni
  - Aumento evaporazione esponenziale con esplosione finale
  - Finora cercati ma non trovati

Test e trionfo della Relatività Generale

- Einstein e’ il vero mago Otelma
- Nel 1916 sviluppando le sue equazioni, previde che il movimento della massa generava onde gravitazionali, cioè perturbazioni di tipo ondulatorio dello spazio tempo
- 100 anni dopo le onde sono state finalmente osservate e misurate

Timidezza della Relatività

- La relatività si nasconde all’ osservazione
- C’è ma non si vede
- Ciò e’ dovuto allo sbilanciamento delle sue equazioni fondamentali
- La RS ci dice che il rapporta fra massa ed energia è pari a c^2
- 1 unità di massa è pari a 10 miliardi di miliardi di unità di energia
- Di qui le bombe atomiche le stelle e i fenomeni piu’ potenti dell’ Universo

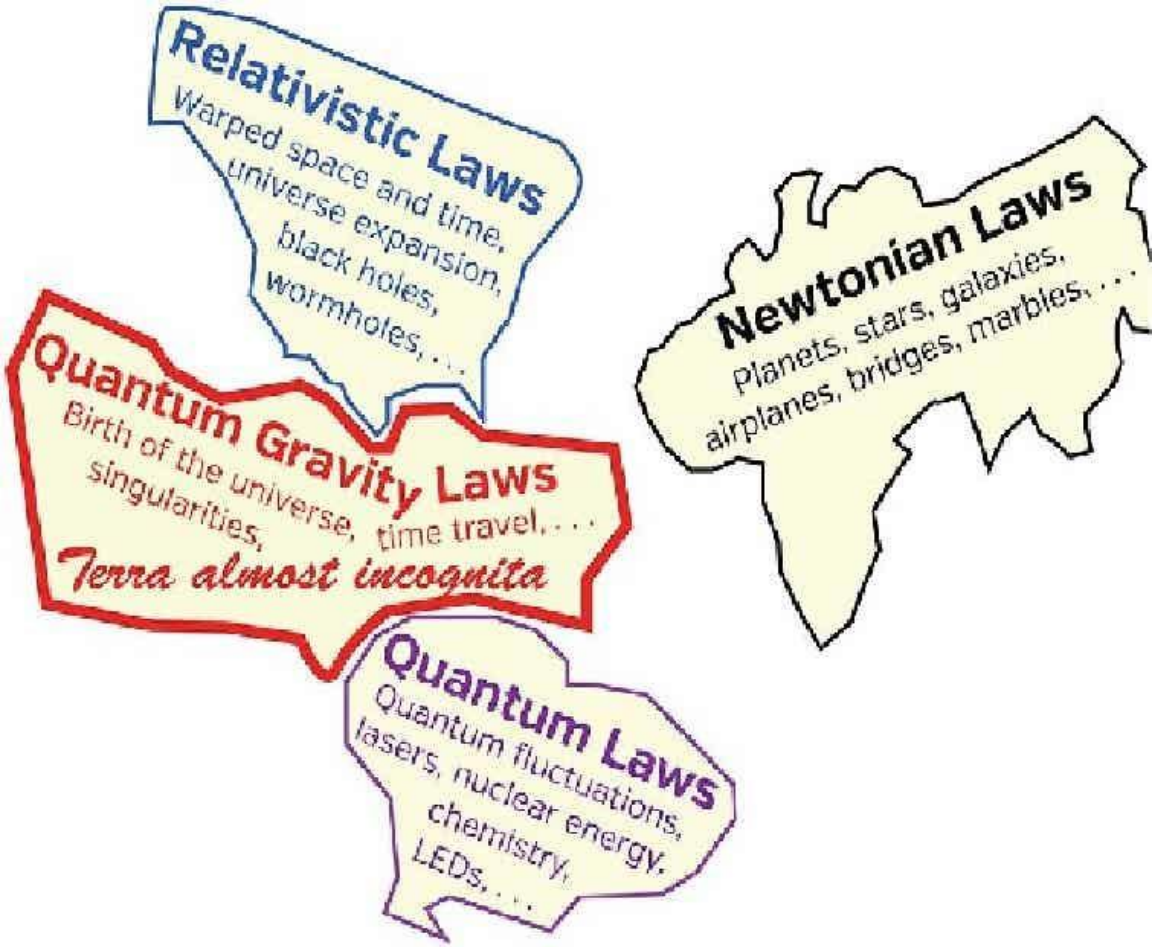
Timidezza della Relatività

- Nell RG il rapporto fra Massa/Energia e curvatura dello spazio- tempo è ancora piu' alto, approssimativamente pari a 10^{47}
- Una unità di massa provoca una distorsione dello spazio-tempo di un centesimo di miliardesimo di miliardesimo di miliardesimo di miliardesimo di miliardesimo di volte
- Piu' facile notare distorsioni statiche: deflessione della luce registrata da Eddington durante l' eclisse del 1919

Timidezza della Relatività

- La esplosione piu’ potenti che conosciamo, la fusione di due buchi neri, genera una energia pari alla trasformazione quasi istantanea di 3 masse solari
- Ciò equivale a 10^{32} megatoni, mille miliardi di miliardi di miliardi della piu’ potente bomba all’ idrogeno mai costruita
- Ebbene, tale esplosione genera onde la cui ampiezza è pari al diametro di un protone

Manca una teoria unificatrice



Speranze per il futuro

- Gravità quantistica
- Unificazione RG e Teoria quantistica
- Passi avanti ma non decisivi
- Oggi c'è piu’ consapevolezza della necessità di un superamento, ma non si intravede ancora come
- Le speranze di Hawking di vedere l’ unificazione in vita sono state deluse