

La Gravità Quantistica

Stefano Spagocci
GACB



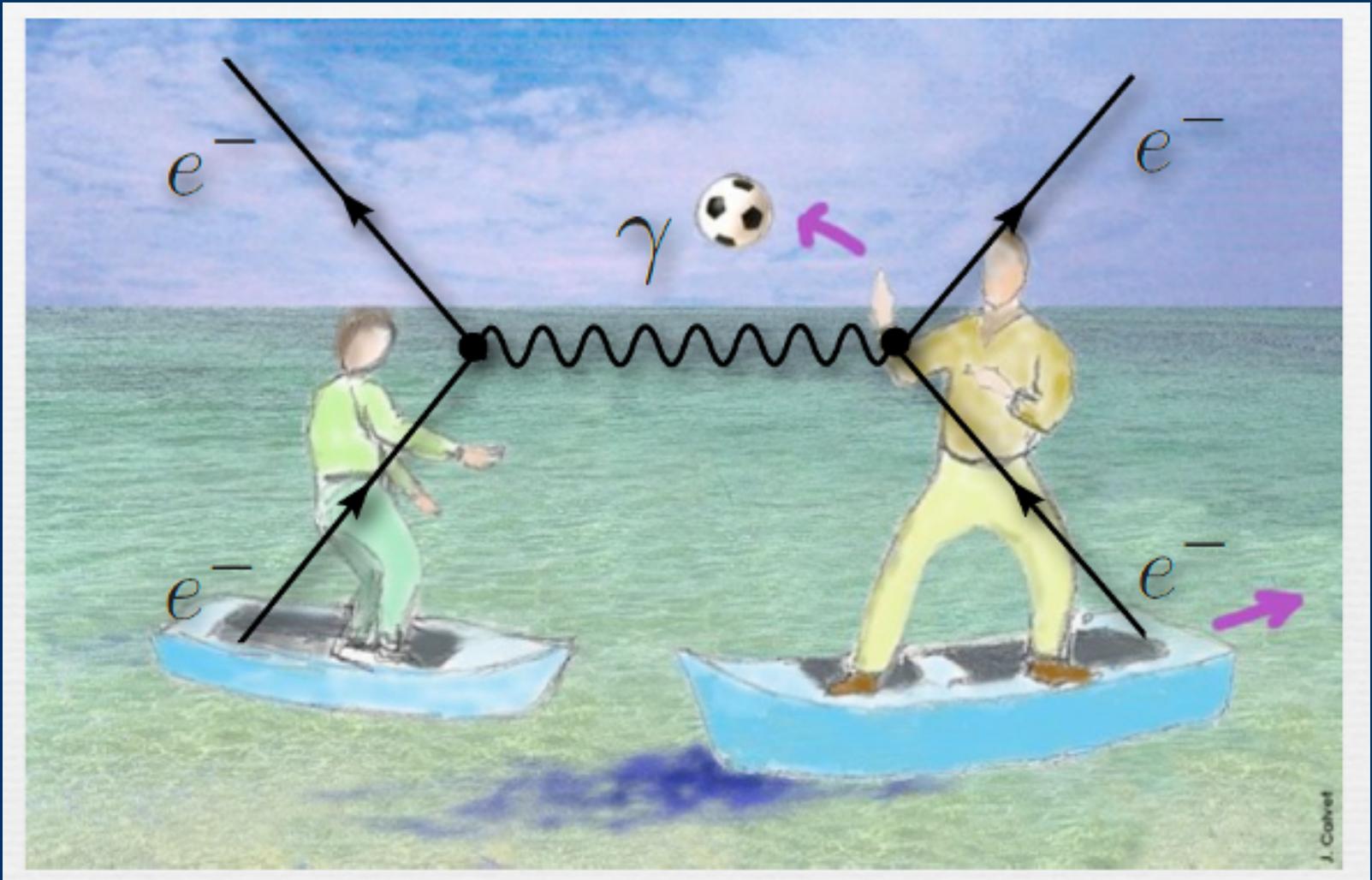
Le Forze Fondamentali

Nella meccanica quantistica le forze sono viste come risultanti dallo scambio di opportune particelle, i bosoni di gauge.

Forza elettromagnetica (mediata dal fotone γ).

Forza debole (mediata dalle particelle W^+ , positiva, W^- , negativa e Z_0 , neutra).

Forza forte (mediata dagli 8 gluoni, ognuno dei quali ha un "colore").



Le Forze Fondamentali

Nei diagrammi di Feynman come quello mostrato nella precedente slide, la probabilità che la reazione avvenga è proporzionale ad una costante α (elevata ad una potenza pari a due volte il numero di vertici che compaiono nel diagramma).

La costante in questione, quindi, quantifica la “forza della forza” e permette di comparare le varie interazioni fondamentali.

Forza delle Interazioni

Forza forte: 1

Forza elettromagnetica: 10^{-2}

Forza debole: 10^{-5}

Forza gravitazionale: 10^{-38}

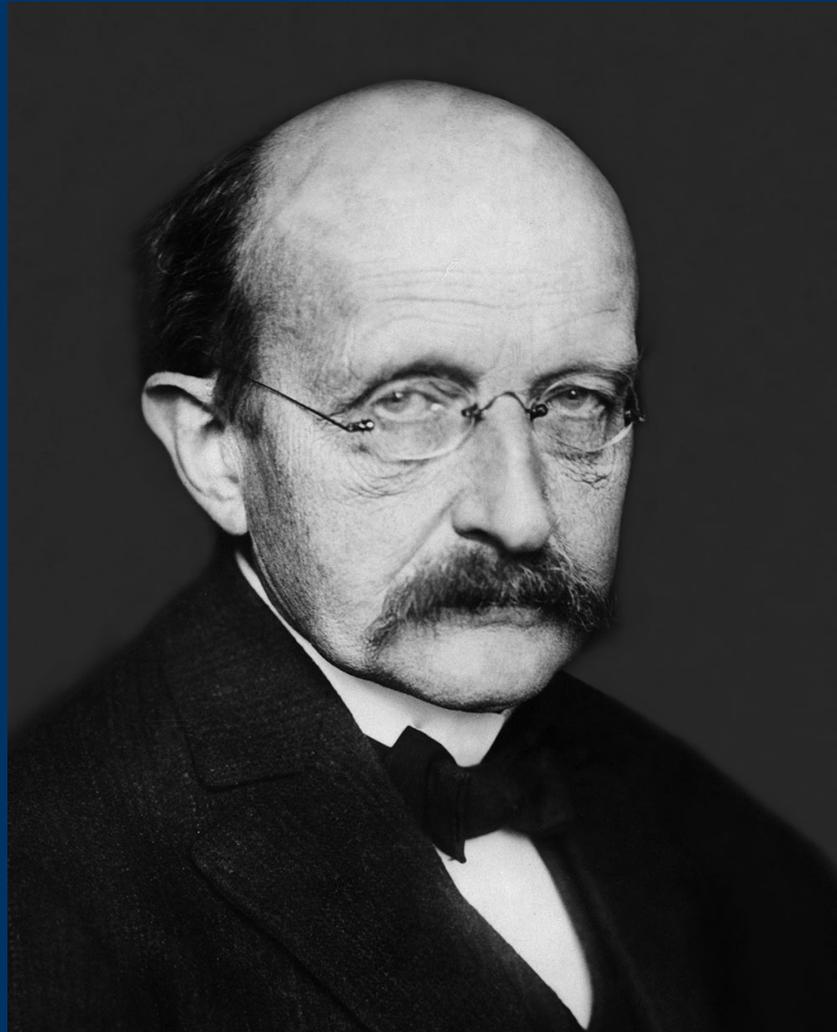
Una Strana Gravità

Dunque la gravità, nel mondo “ordinario” (in realtà ovunque, tranne che nei primi istanti dopo il Big Bang o al centro dei buchi neri), è la più debole tra le forze. Sembra che sia la più forte solo perchè le forze nucleari agiscono a corto raggio e la forza elettromagnetica è quasi zero perchè le cariche negative compensano quelle positive.

Una Strana Gravità

La gravità è così debole in condizioni “ordinarie” ma in condizioni estreme (Big Bang o buchi neri) la α gravitazionale tende ad 1, per cui essa diviene la forza più forte e i conti si complicano enormemente.

Cominciamo dunque ad apprezzare il fatto che la gravità ha qualcosa di anomalo rispetto alle altre interazioni fondamentali.



Unità di Planck

All'inizio del secolo scorso, Max Planck scoprì che, combinando opportunamente le costanti c (velocità della luce), G (costante gravitazionale di Newton) ed h (costante quantistica di Planck), si possono ottenere delle unità “naturalì” di lunghezza (lunghezza di Planck, 10^{-35} m), tempo (tempo di Planck, 10^{-44} s), energia/massa (massa di Planck, 10^{19} GeV).

Unità di Planck

Si è poi scoperto che tali unità sono fondamentali per comprendere la gravità in condizioni estreme.

Esplorando distanze minori della lunghezza di Planck e/o considerando tempi minori del tempo di Planck, le fluttuazioni quantistiche sono tali da rendere la distanza tra due punti una quantità fluttuante statisticamente.

Sulla stessa scala di distanze e tempi, come già detto, la α gravitazionale diviene pari ad 1. Quindi la gravità diventa la forza più forte e tra l'altro è impossibile fare calcoli usando diagrammi di Feynman.



Relatività Generale e Meccanica Quantistica

Abbiamo quindi visto come la gravità sia una forza decisamente anomala.

Il problema fondamentale è la non compatibilità della Teoria della Gravitazione (Relatività Generale) con la Meccanica Quantistica.

Infatti in Relatività Generale la distanza tra due punti dati è una quantità che può variare a seconda della distribuzione di masse circostanti (secondo la famosa metafora del telo elastico).

Relatività Generale e Meccanica Quantistica

La distanza tra due punti infinitamente vicini (espressa dal cosiddetto “tensore metrico”), però, varia in maniera deterministica con la concentrazione di massa circostante.

Secondo la Meccanica Quantistica, invece, il tensore metrico, quindi la distanza tra due punti molto vicini, dovrebbe variare in maniera casuale, secondo una ben determinata distribuzione statistica.

Relatività Generale e Meccanica Quantistica

Dunque Relatività Generale e Meccanica Quantistica sono mutualmente incompatibili, in quanto la Meccanica Quantistica si applica quando si considerano eventi che avvengono su scale di distanza subatomiche. La Relatività Generale si applica su scala macroscopica e per concentrazioni di massa tali che un corpo che risentisse della loro azione si muoverebbe a velocità dell'ordine di quella della luce.

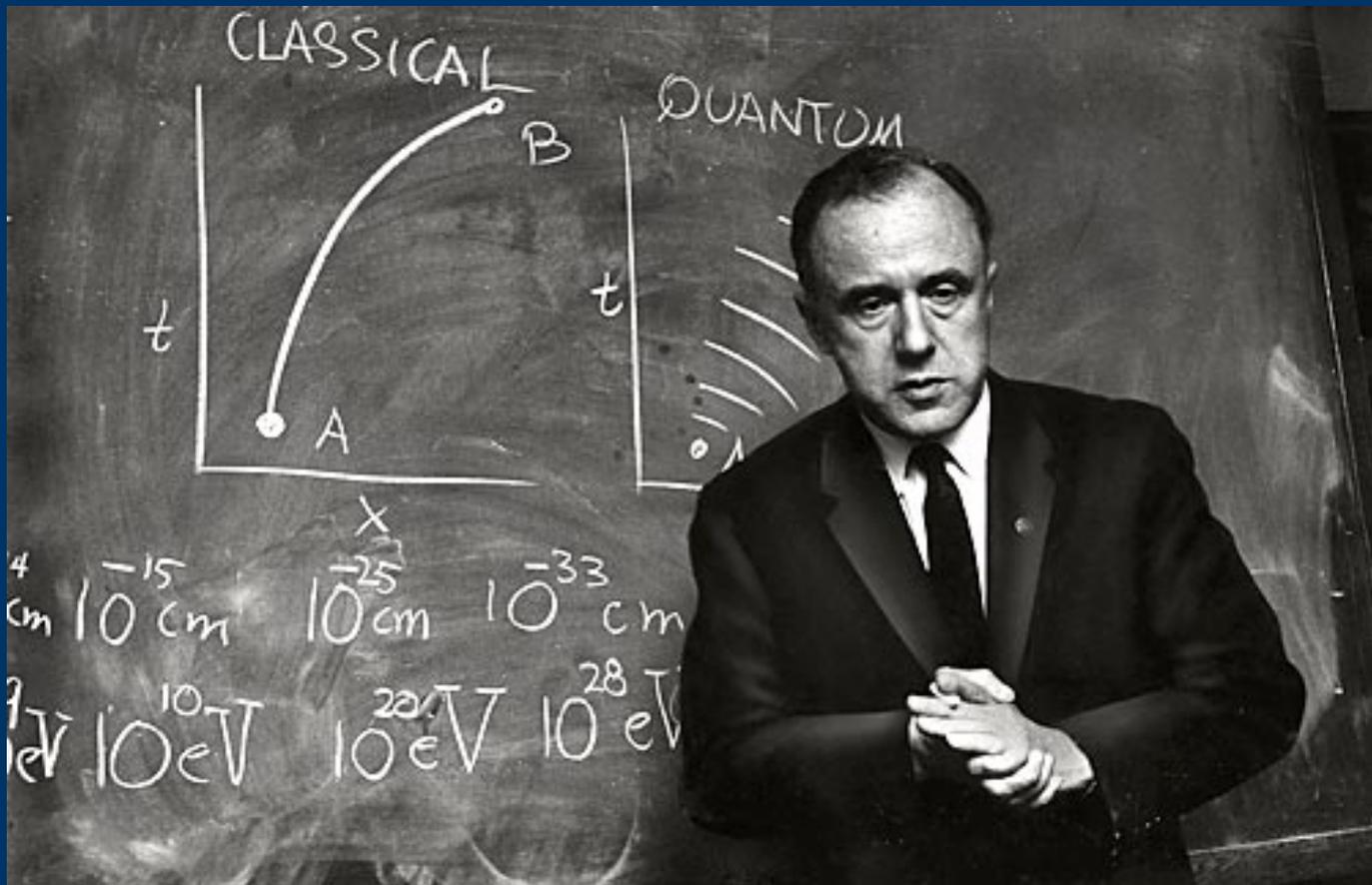
Relatività Generale e Meccanica Quantistica

Di solito le due condizioni sono mutualmente esclusive, nel senso che su scala macroscopica si applica la Relatività Generale (o la Gravità Newtoniana, ottima approssimazione per velocità molto minori di c) e non la Meccanica Quantistica ma su scala subatomica si applica la Meccanica Quantistica e non la Relatività Generale, essendo trascurabile la concentrazione di massa.



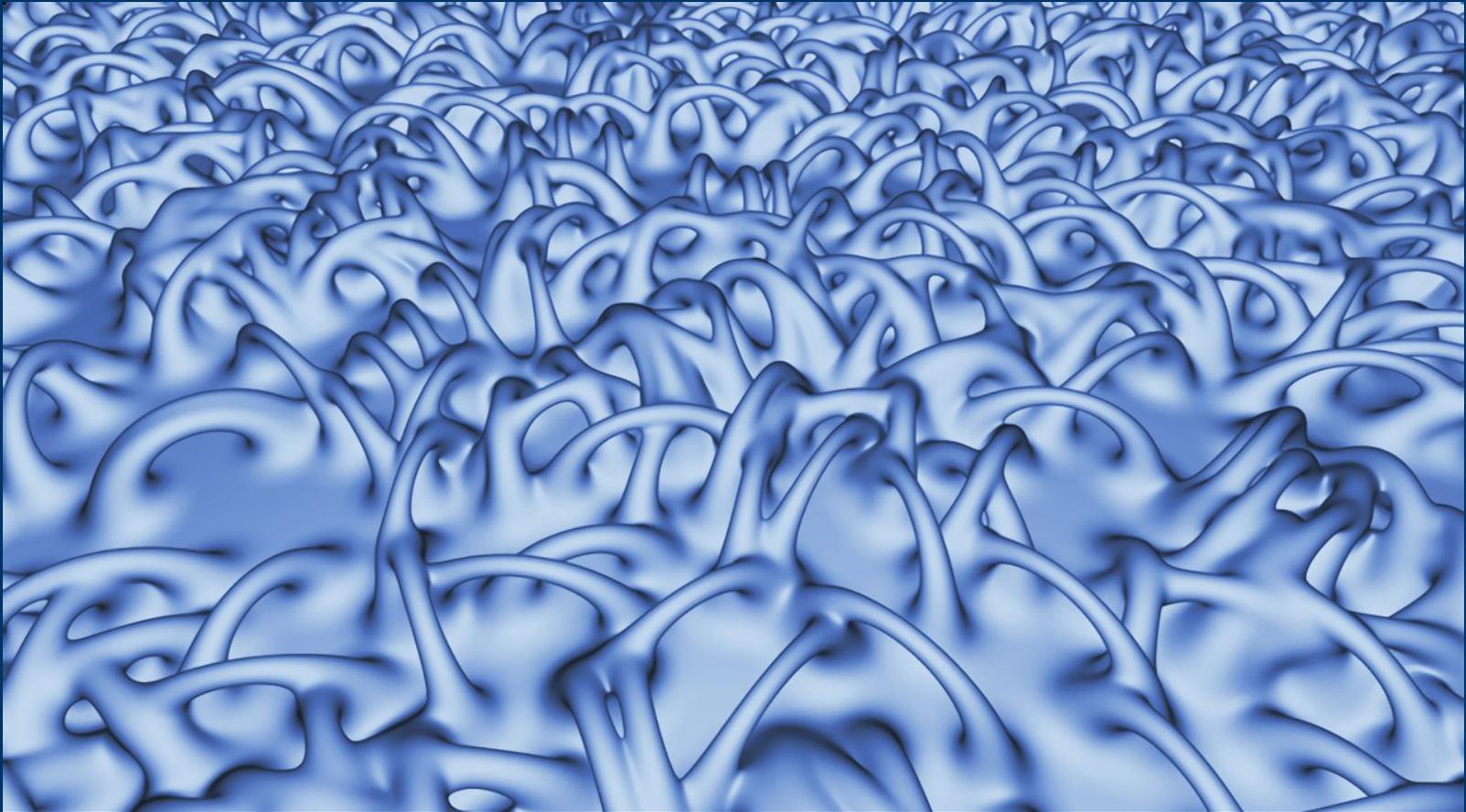
Gravità Quantistica

Solo nei primi istanti dopo il Big Bang e al centro dei buchi neri si hanno concentrazioni di massa che tendono ad infinito su scale di distanza che tendono a zero. In tali condizioni la teoria giusta sarebbe la Gravità Quantistica, ovvero una generalizzazione della Relatività Generale, ove il tensore metrico (che codifica la distanza tra due punti infinitamente vicini) vari casualmente secondo una distribuzione statistica descritta dalla Meccanica Quantistica.



Schiuma Spazio-Temporale

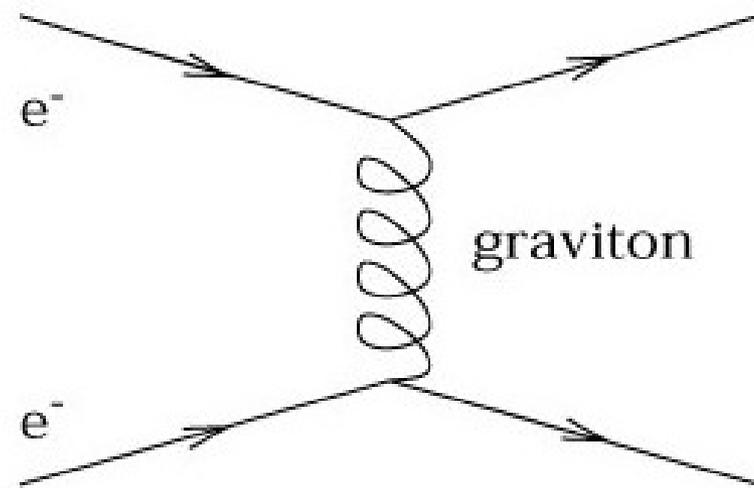
Nella prima metà del secolo scorso iniziarono i tentativi di costruire una teoria della Gravità Quantistica. Pioniere fu il grande fisico statunitense John Archibald Wheeler. E' sua l'espressione "schiuma spazio-temporale" che descrive lo spazio-tempo secondo la Gravità Quantistica. Infatti il telo elastico cui si paragona lo spazio-tempo in Relatività Generale diventa una sorta di schiuma, in cui la distanza tra due punti molto vicini fluttua statisticamente.



Perché è Così Complicato?

E' intuitivo che trattare matematicamente una schiuma spazio-temporale sia impresa niente affatto facile.

Abbiamo già visto come alla scala di Planck la gravità divenga la forza predominante. Ma, soprattutto, il problema sta nel comportamento dei diagrammi di Feynman che descrivono interazioni in cui compaiano i gravitoni (mediatori della forza di gravità, analoghi ai fotoni).



Perchè è Così Complicato?

La forza di gravità ha una dipendenza inversa dal quadrato della distanza (se diminuisco la distanza di $1/10$, la forza si moltiplica per 100 e così via) e in un diagramma di Feynman le particelle coinvolte arrivano a distanza zero l'una dall'altra, quindi la forza diviene infinita.

Perchè è Così Complicato?

A causa della forza infinita, la probabilità che una certa reazione (descritta dal corrispondente diagramma di Feynman) avvenga diventa pari ad infinito, il che è (ovviamente) un risultato fisicamente assurdo.

Rinormalizzazione

Il problema di cui sopra sussiste anche per le interazioni elettromagnetiche, deboli e forti. Tuttavia, grazie ad un procedimento di calcolo detto “rinormalizzazione”, nel caso del Modello Standard delle Particelle Elementari (in cui la gravità non compare) il problema si supera.

La gravità non è però rinormalizzabile. Ciò è dovuto al fatto che il valore della costante α gravitazionale è proporzionale all'inverso del quadrato della distanza minima raggiunta tra particelle in un diagramma di Feynman e diventa quindi infinita. Nel caso del Modello Standard, invece, le α per le altre tre forze non dipendono da tale distanza (o ne dipendono in maniera favorevole).



Spazio-Tempo Discreto

Da quanto detto in precedenza risulta intuitivo il fatto che la schiuma spazio-temporale cominci a farsi sentire quando si esplorino distanze minori della lunghezza di Planck. Per distanze maggiori le fluttuazioni quantistiche si mediano a zero.

Negli anni '30 del secolo scorso, il fisico sovietico Matvei Bronstein (rinchiuso in un gulag e fucilato durante le purghe staliniane) prevede un tale comportamento con un ragionamento semplice, brillante e in anticipo sui tempi.

Spazio-Tempo Discreto

Bronstein fece infatti notare che, se vogliamo studiare la gravità con una risoluzione migliore della lunghezza di Planck, dobbiamo ovviamente impiegare una sonda che abbia dimensioni minori della lunghezza di Planck.

Ma si calcola facilmente che una tale sonda, data la densità che dovrebbe avere, collasserebbe in un buco nero, disconnettendosi dallo spazio-tempo circostante.

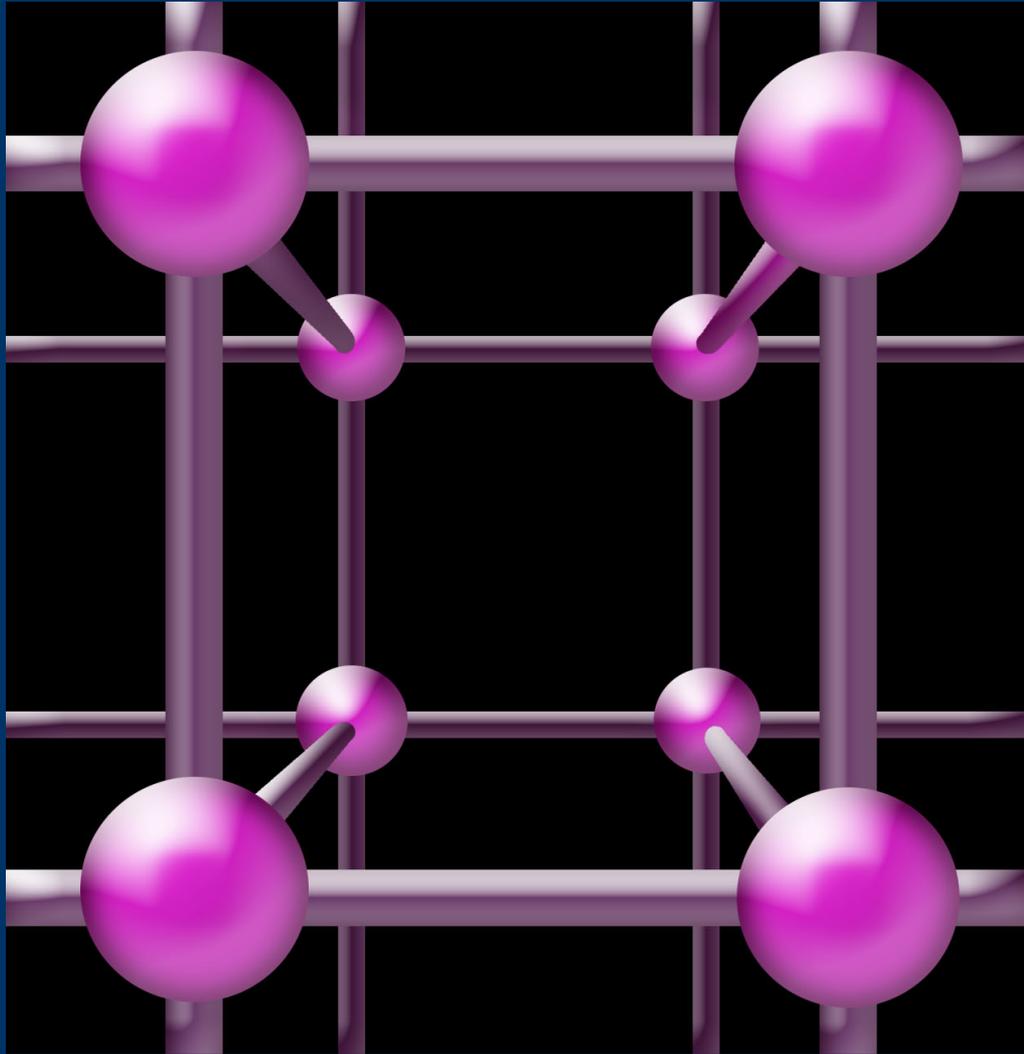
Spazio-Tempo Discreto

Non ha allora senso osservare con una risoluzione maggiore della lunghezza di Planck che quindi rappresenta la minima lunghezza misurabile.

E' dunque possibile che lo spazio-tempo non sia continuo ma consista in un reticolo di punti, posti ad una distanza reciproca pari alla lunghezza di Planck.

Vedremo in seguito le conseguenze sperimentali (avverse alla sperimentazione) di questo fatto fondamentale.



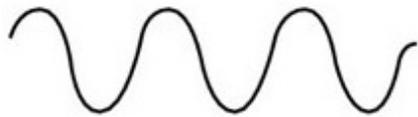


Teoria delle Stringhe

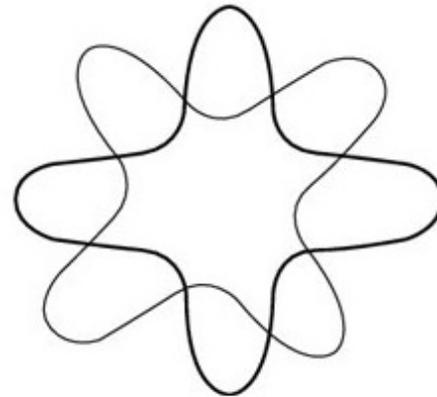
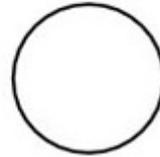
La Teoria delle Stringhe nacque, nei primi anni '70 del secolo scorso, come teoria delle interazioni forti (l'idea era di descrivere gli adroni come composti da quark congiunti a due a due da una stringa elastica, come in effetti si verifica se approssimiamo con stringhe elastiche le linee di forza dell'interazione forte).

Si scoprì poi che la Teoria delle Stringhe può essere una teoria unificata di tutte le forze e particelle (compresa la gravità, quindi tale teoria è, fra le altre cose, una teoria quantistica della gravità).

Open strings



Closed strings



Teoria delle Stringhe

Teoria che unifica tutte le forze: Le stringhe aperte rappresentano le particelle elementari (leptoni, quark), le stringhe chiuse rappresentano i bosoni mediatori delle quattro forze fondamentali (il fotone, le W e Z per le interazioni deboli, gli 8 gluoni per le interazioni forti ed il gravitone).

Teoria che unifica tutte le particelle: Ogni tipo di particella (i fermioni di cui la materia è composta e i bosoni vettori delle forze) corrisponde a una diversa onda sinusoidale stazionaria con cui una stringa può vibrare.

Teoria delle Stringhe

Nella Teoria delle Stringhe (almeno allo stato attuale) si assume che lo spazio-tempo sia continuo. Tuttavia le stringhe hanno lunghezza o diametro dell'ordine della lunghezza di Planck e non ha quindi alcun senso fisico misurare lunghezze ancora minori.

Le particelle non arrivano mai a distanza minore della lunghezza di una stringa e il problema degli infiniti è risolto. Si spera di poter arrivare ad una teoria in cui un “condensato di stringhe” costituisca l'ossatura di uno spazio-tempo discreto, nel quale si muovano ed interagiscano le stringhe non “condensate”.





Piccola Biblioteca 666

CARLO ROVELLI

*Sette brevi lezioni
di fisica*



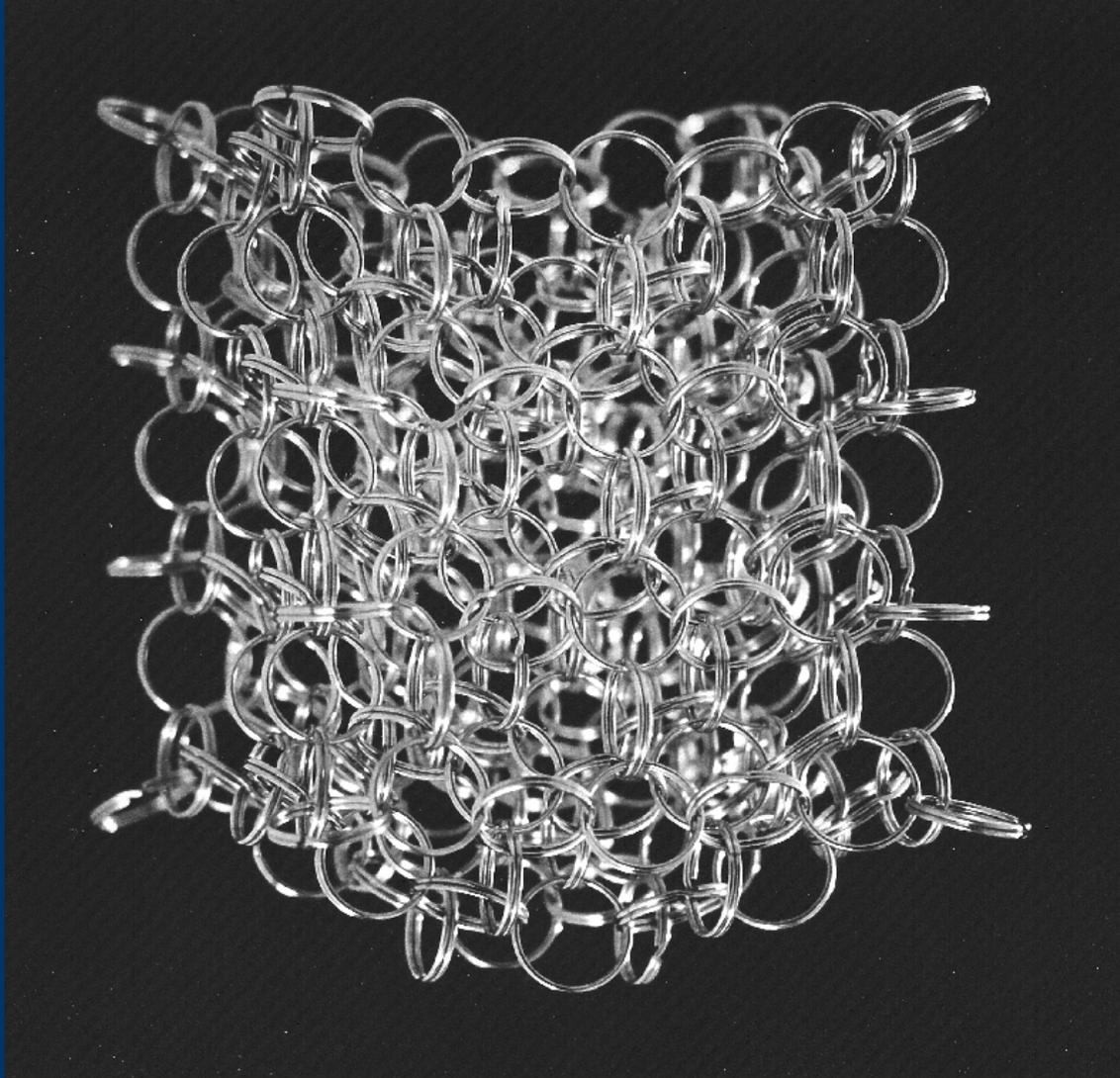
ADELPHI

Gravità Quantistica a Loop

Nella Gravità Quantistica a Loop, teoria elaborata nel corso dei tre ultimi decenni con il fondamentale contributo del veronese Carlo Rovelli (ora professore a Marsiglia), si assume invece che lo spazio-tempo abbia una struttura discreta.

In effetti si trova che lo spazio-tempo sarebbe costituito da un numero infinito di “anelli” (loop) tra loro intrecciati (quindi si risolve il problema degli infiniti). Attenzione: Tali loop non vivono nello spazio-tempo, è lo spazio-tempo ad essere composto da loop intrecciati.





Problemi Sperimentali

Le teorie precedentemente esposte (e altre teorie di Gravità Quantistica) sono ancora a uno stadio embrionale, nonostante decenni di sviluppo.

Bisogna infatti considerare che (almeno allo stato attuale) sono praticamente non verificabili sperimentalmente e senza input sperimentale i teorici faticano a trovare la direzione giusta in cui andare, tra le alternative disponibili. Va poi considerata la difficoltà dei calcoli.



Problemi Sperimentali

Va poi considerato il fatto che la lunghezza di Planck e il tempo di Planck sono straordinariamente piccoli, e la massa di Planck straordinariamente grande, rispetto alle dimensioni accessibili in Fisica delle Particelle.

Ad esempio, anche con il famoso LHC la risoluzione in lunghezza è 10^{15} volte (un milione di miliardi) più grossolana di quella che si dovrebbe ottenere per poter notare l'eventuale struttura a stringhe o a loop dello spazio-tempo. Per ottenere una tale risoluzione sarebbe necessario costruire un acceleratore con dimensioni dell'ordine di quelle della Via Lattea!

Successi Parziali

Con le avvertenze di cui sopra, diremo che le teorie di Gravità Quantistica hanno ottenuto essenzialmente quattro successi (parziali, in quanto le previsioni teoriche sono solo approssimative).

E' stato possibile elaborare teorie di Cosmologia Quantistica, mediante le quali si può dare una (sorta di) ragione al Big Bang (creazione "dal nulla" secondo Alex Vilenkin).

Successi Parziali

Si evita il problema delle singolarità (densità di materia infinita) che si presentano all'istante zero del Big Bang e al centro dei buchi neri. Infatti nessuna particella arriva a distanza minore della distanza di Planck.

Con le equazioni (per ora approssimate) della Teoria delle Stringhe e della Gravità Quantistica a Loop si ottengono dei modelli cosmologici che riproducono i modelli cosmologici classici.

Successi Parziali

Con entrambe le teorie di Gravità Quantistica si riproducono le formule di Hawking-Bekenstein sull'entropia dei buchi neri. Si sa infatti che i buchi neri in realtà neri non sono, perchè (tanto più velocemente quanto più sono piccoli) emettono particelle elementari e dunque progressivamente evaporano. Essi hanno quindi una temperatura e un'entropia che sia la Teoria delle Stringhe che la Gravità Quantistica a Loop hanno permesso di calcolare, ottenendo risultati identici a quelli ottenuti negli anni '70 da Stephen Hawking, impiegando la Gravità Quantistica alla Wheeler.

What Lies Next?

