

Sfide per la fisica teorica

Alberto Lerda

*Dipartimento di Scienze e Innovazione Tecnologica, Università del Piemonte Orientale
& Istituto Nazionale di Fisica Nucleare - Sezione di Torino*

La scoperta del bosone di Higgs al Large Hadron Collider (LHC) del CERN di Ginevra nel 2012, e la rivelazione delle onde gravitazionali da parte della collaborazione LIGO-Virgo nel 2015, rappresentano indubbiamente i due eventi più importanti dell'ultimo decennio nel campo della fisica.

Per anni il bosone di Higgs è stato infatti la tessera che mancava per completare il Modello Standard delle interazioni fondamentali e spiegare l'origine della massa delle particelle elementari osservate negli esperimenti. Le onde gravitazionali, invece, sono state una delle più affascinanti predizioni sulla natura dello spazio-tempo della teoria della Relatività Generale di Albert Einstein fin dalla sua pubblicazione nel 1916. Entrambe le scoperte sono quindi una straordinaria conferma della validità delle due principali costruzioni, il Modello Standard e la Relatività Generale, che hanno costituito il paradigma della fisica teorica nel XX secolo. Tuttavia, oggi sappiamo con certezza che né il Modello Standard né la Relatività Generale possono fornire la spiegazione finale di tutti i fenomeni fisici e che è necessario trovare una loro estensione ed eventualmente farne una sintesi. Cerchiamo di capire perché.

Il Modello Standard

Tre delle quattro interazioni fondamentali che conosciamo, cioè l'interazione elettromagnetica, l'interazione nucleare debole e l'interazione nucleare forte, sono spiegate dal Modello Standard

(MS), formulato da Sheldon Glashow, Steven Weinberg e Abdus Salam (premi Nobel per la Fisica nel 1979). Negli anni questo modello è stato ripetutamente confermato con numerosi esperimenti ad altissima precisione, culminati nel 2012 con la scoperta del bosone di Higgs, la cui esistenza era stata teorizzata nel 1964 da Robert Brout, François Englert e Peter Higgs (questi ultimi premiati con il Nobel per la Fisica nel 2013). Nel MS le particelle elementari sono distinte in due grandi categorie: quelle che costituiscono la materia propriamente detta, divise in quarks e leptoni, e quelle che invece mediano le forze e per questo sono chiamate **mediatori**. Fra questi troviamo ad esempio il fotone, che trasmette le interazioni elettromagnetiche, e il gluone, che è responsabile delle interazioni forti. In aggiunta a questi elementi, c'è il bosone di Higgs, l'unico scalare del MS, il cui ruolo è essenzialmente dare massa alle particelle. Tutto ciò è riassunto schematicamente nella figura 1.

Il paradigma fondamentale su cui si basa il MS è la teoria quantistica dei campi, e in particolare le cosiddette teorie di gauge. In questo schema, ogni particella elementare, sia essa una particella di materia o un mediatore di forze, è rappresentata da un campo quantistico, cioè da una funzione dello spazio e del tempo che descrive le fluttuazioni dovute alla creazione o alla distruzione della particella elementare rispetto al vuoto. Le proprietà di tutti questi campi sono codificate in una Lagrangiana, una specie di funzione dei campi, che descrive la loro dinamica e le regole con cui essi interagiscono.

La Lagrangiana del MS riassume in modo com-

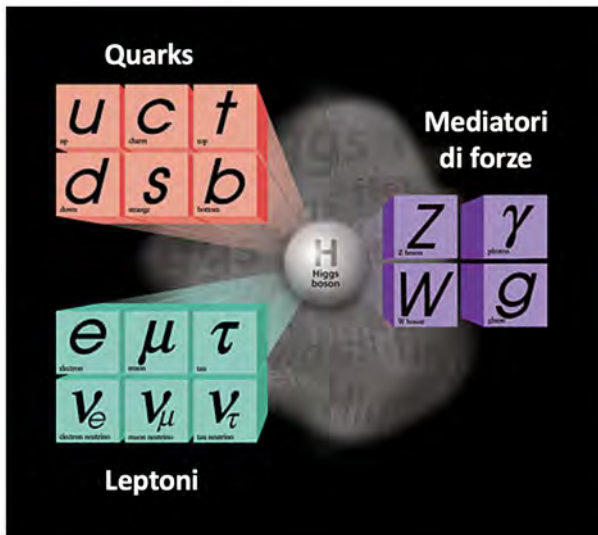


Figura 1: Le particelle del modello standard (immagine adattata da Wikipedia).

patto tutta la fenomenologia delle interazioni elettromagnetiche, deboli e forti e, come abbiamo accennato, è stata confermata sperimentalmente con altissima precisione. Essa è formulata in modo coerente con la meccanica quantistica, rispetta le regole della teoria della relatività ristretta ed è invariante per le cosiddette trasformazioni di gauge, ovvero quelle trasformazioni che cambiano i campi associati alle varie particelle con parametri dipendenti dal punto dello spazio-tempo in cui avvengono. Le trasformazioni di gauge del MS sono di tipo particolare e formano un gruppo di simmetria detto $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$. La richiesta di avere invarianza per trasformazioni di questo tipo vincola notevolmente la forma e la struttura della Lagrangiana, ma non la determina in modo univoco. Per esempio, la scelta delle regole con cui le particelle si trasformano, o la scelta dei parametri che determinano l'intensità degli accoppiamenti, sono in larga misura arbitrarie.

Una delle caratteristiche essenziali del MS è che le interazioni fra le particelle sono locali, cioè sono rappresentate da prodotti di campi valutati nello stesso punto dello spazio-tempo. L'assunzione che le interazioni siano locali va di pari passo con l'ipotesi che le particelle siano puntiformi, cioè che si possano avvicinare arbitrariamente le une alle altre e che quindi non esista una distanza minima sotto la quale non possano andare.

Le interazioni descritte nella Lagrangiana clas-

sica del MS vengono modificate a livello quantistico da processi nei quali vengono prodotte particelle virtuali intermedie che si formano e si ricombinano fra loro. Queste correzioni quantistiche sono descritte dai cosiddetti diagrammi a *loop*, il cui contributo non sempre è semplice da calcolare, specie quando il numero di *loop* è alto. Siccome nel MS le particelle possono avvicinarsi le une alle altre a distanze sempre più piccole (al limite nulle), per il principio d'indeterminazione di Heisenberg, esse possono accedere a energie sempre più grandi (al limite infinite). Di conseguenza, i diagrammi a *loop* sono in genere divergenti, cioè producono contributi infiniti, e per dar loro un significato preciso e rigoroso è necessario ricorrere alla cosiddetta procedura di rinormalizzazione. È stato dimostrato da Gerardus 't Hooft e Martinus Veltman (premi Nobel per la Fisica nel 1999) che le teorie di gauge come il MS sono rinormalizzabili e forniscono risultati finiti per tutte le grandezze fisiche. Nel corso di questa rinormalizzazione, le costanti di accoppiamento che regolano l'intensità delle interazioni cessano di essere costanti e diventano funzioni dell'energia a cui il processo è valutato. In particolare, la costante di accoppiamento delle interazioni forti diventa sempre più piccola al crescere dell'energia e quindi le interazioni forti diventano sempre più deboli, un fenomeno noto come **libertà asintotica** scoperto da David Politzer, David Gross e Frank Wilczek (premi Nobel per la Fisica nel 2004).

Il MS è dunque una teoria pienamente consistente a livello quantistico, descrive accuratamente tre delle quattro interazioni fondamentali ed è assai radicata nelle osservazioni sperimentali. Anche se sembra funzionare alla perfezione, il MS non può però essere considerato una teoria fondamentale per molti motivi. *In primis* perché non descrive la forza di gravità, che è la quarta interazione fondamentale. Come abbiamo accennato in precedenza, il MS può essere estrapolato fino a una scala di energia infinita, o comunque molto elevata (che chiameremo **scala ultravioletta**), dove le forze gravitazionali diventano forti e non possono più essere trascurate. Pertanto, nel regime delle alte energie il MS deve necessariamente essere sostituito da una teoria più generale che incorpori anche la gravità. Anche prescindendo da quest'aspetto, il MS presenta

numerose altre criticità. Per quanto molto solido dal punto di vista teorico, è una costruzione poco elegante dal punto di vista formale poiché richiede diverse scelte *ad hoc* come, per esempio, quella del gruppo di simmetria di gauge o quelle dei molti (circa una ventina) parametri della sua Lagrangiana. Inoltre, il MS non è in grado di spiegare fenomeni assai rilevanti, come quelli della materia oscura o dell'energia oscura, che insieme costituiscono circa il 95% dell'Universo.

A livello più tecnico ma non per questo meno importante, c'è poi il cosiddetto problema della gerarchia, legato al valore della massa del bosone di Higgs, che sperimentalmente risulta essere circa $125 \text{ GeV}/c^2$, cioè dello stesso ordine di grandezza della massa di altre particelle, e quindi molto piccola rispetto alla scala ultravioletta fino a cui la teoria in principio è valida. Nel MS la massa del bosone di Higgs viene calcolata in modo perturbativo, cioè dapprima si ricava il contributo dominante direttamente dalla Lagrangiana classica, e successivamente si calcolano le correzioni dovute a diagrammi a *loop*. Per consistenza, queste correzioni dovrebbero essere via via sempre più piccole e meno importanti a mano a mano che il numero di *loop* aumenta. Però, la necessità di ricorrere alla procedura di rinormalizzazione per rimuovere le divergenze nei *loop*, fa sì che queste correzioni siano in realtà molto grandi, perché proporzionali alla scala ultravioletta. Pertanto, solo assumendo che anche il primo termine della serie perturbativa sia anch'esso molto grande, è possibile rendere consistente l'intera costruzione e alla fine ottenere come risultato un valore piccolo per la massa del bosone di Higgs. Infatti, solo combinando fra loro numeri molto grandi è possibile ottenere un risultato finito e piccolo; se invece si hanno termini sia grandi che piccoli, i primi chiaramente dominano. Per fare questo, però, è necessario un aggiustamento molto particolare e delicato dei numerosi parametri della Lagrangiana del modello che, per quanto non impossibile *a priori*, è altamente innaturale. Questo è il cosiddetto problema del *fine-tuning* che affligge in MS.

Un altro serio problema riguarda la stabilità del MS. Applicando la procedura di rinormalizzazione e usando i valori sperimentalmente misurati della massa del bosone di Higgs e del quark top, si può dimostrare che a energie pros-

sime alla scala ultravioletta, il potenziale del MS sviluppa un minimo più profondo di quello elettrodebole in cui ci troviamo. Quest'ultimo quindi non sarebbe stabile perché avrebbe la possibilità di decadere nel nuovo minimo energeticamente più favorevole. In realtà, come indicato in figura 2, il MS non è del tutto instabile, poiché i valori della massa del bosone di Higgs e del quark top lo collocano nella cosiddetta regione di meta-stabilità. Questo vuol dire che il vuoto del MS potrebbe sì decadere, ma per raggiungere la configurazione energeticamente più favorevole impiegherebbe un tempo enorme, addirittura maggiore della vita dell'universo!

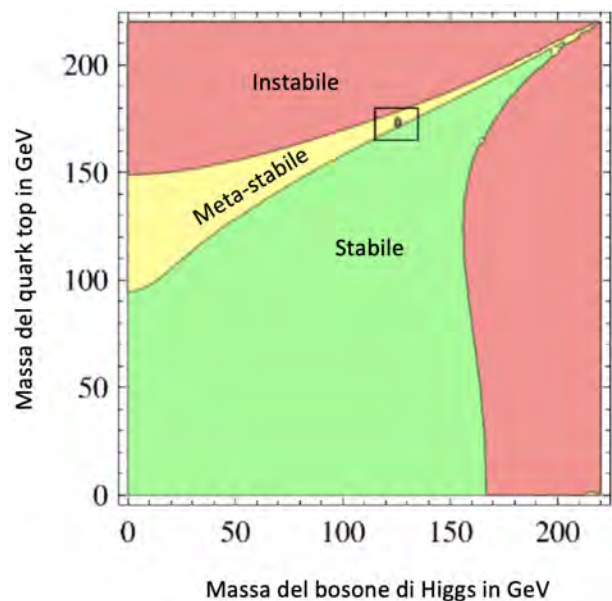


Figura 2: Regioni di stabilità (verde), meta-stabilità (giallo) e instabilità (rosa) del vuoto del MS in dipendenza dalle masse del bosone di Higgs e del quark top. I valori sperimentali della massa del bosone di Higgs e del quark top pongono il MS, evidenziato dal riquadro, all'interno della regione di meta-stabilità (immagine adattata da G. Degrassi et al., JHEP 08 (2012) 098).

Tutta questa analisi è basata sull'assunzione che il MS possa essere estrapolato ad energie elevate senza variazioni, ovvero senza la comparsa di nuova fisica. Questa assunzione sembra al momento confermata dalle osservazioni sperimentali, che infatti non hanno rivelato alcun segnale di nuova fisica oltre il MS, anche se è molto innaturale pensare che non ci sia proprio nulla di nuovo fino alla scala ultravioletta. La situazione, comunque la si voglia considerare, è del tutto

insoddisfacente perché, indipendentemente dalla scoperta o meno di segnali di nuova fisica, è chiaro che il MS così come lo conosciamo non può essere considerato una teoria fondamentale.

La Relatività Generale

Con la teoria della relatività ristretta, pubblicata nel 1905, Albert Einstein ha unificato i concetti di spazio e tempo della fisica classica, sostituendoli con lo spazio-tempo quadridimensionale. Questo spazio-tempo, tecnicamente chiamato spazio-tempo di Minkowski, è un'entità rigida, una sorta di palcoscenico vuoto che ospita la materia facendole semplicemente da sfondo. Con la teoria della Relatività Generale (RG) del 1916, invece, le cose cambiano radicalmente: lo spazio-tempo si deforma, curvandosi in base alla materia in esso contenuta. Quando è presente della materia, infatti, lo spazio-tempo non è più piatto come quello di Minkowski ma diventa curvo, e la curvatura che acquisisce è direttamente legata alla materia presente. Più massa c'è e più lo spazio-tempo si curva! Tutto ciò è riassunto nelle famose equazioni di Einstein, che stabiliscono un legame preciso fra la curvatura dello spazio-tempo e la materia in esso contenuta, fornendo così un'interpretazione geometrica dell'interazione gravitazionale.

Poche settimane dopo la pubblicazione della RG, il fisico tedesco Karl Schwarzschild risolse esplicitamente le equazioni di Einstein nel caso di uno spazio-tempo occupato da una massa M sfericamente simmetrica, ottenendo quella che oggi è conosciuta come la metrica di Schwarzschild. La caratteristica principale di questa soluzione è che alcune componenti della metrica si annullano o diventano infinite quando ci si pone a una particolare distanza dalla massa M , detta raggio di Schwarzschild, definita da

$$R_S = \frac{2GM}{c^2}, \quad (1)$$

dove G è la costante di Newton e c è la velocità della luce. Supponiamo ora che una massa M sia uniformemente distribuita in una sfera di raggio R minore del suo raggio di Schwarzschild R_S , e chiediamoci cosa succede a una distanza r compresa fra R e R_S . Con considerazioni di fisica classica è facile verificare che un oggetto posto

ad una distanza r da M è in grado di vincere la sua forza di attrazione gravitazionale, solo se la sua velocità v soddisfa la relazione

$$v^2 \geq \frac{2GM}{r}. \quad (2)$$

Dal confronto fra (1) e (2) possiamo dedurre che quando $r \leq R_S$ si può sfuggire all'attrazione gravitazionale di M solo con una velocità maggiore di quella della luce. Siccome però nulla può andare più veloce della luce, nessun oggetto ad una distanza r minore del raggio di Schwarzschild è in grado allontanarsi, rimanendo per sempre intrappolato intorno a M . Si ha cioè un buco nero (termine coniato da John A. Wheeler nel 1967). In altre parole, un oggetto le cui dimensioni fisiche sono inferiori al suo raggio di Schwarzschild forma una singolarità nello spazio-tempo circondata da una zona dalla quale nulla, nemmeno la luce, può uscire. Il confine di questa zona è chiamato orizzonte degli eventi. Un ipotetico viaggiatore potrebbe attraversare questo confine senza problemi (a parte il fatto che sentirebbe una forza gravitazionale tremenda), ma, una volta superato il limite, non potrebbe mai più tornare indietro!

Da un punto di vista quantistico, però, un buco nero non è completamente nero, poiché l'orizzonte degli eventi emana una radiazione, scoperta da Stephen Hawking a metà degli anni '70, che è caratterizzata da una temperatura inversamente proporzionale alla massa del buco nero. Il fatto che, usando considerazioni quantistiche, si possa associare una temperatura ai buchi neri è piuttosto sorprendente, e rende evidente un'altra proprietà inattesa, e cioè che i buchi neri si comportano come oggetti termodinamici e, in particolare, hanno un'entropia. L'entropia è una grandezza termodinamica che misura essenzialmente il numero di configurazioni microscopiche corrispondenti a un dato stato macroscopico. Essa dà quindi un'idea quanto ordine (o disordine) è presente in un sistema e, in base al secondo principio della termodinamica, non può mai diminuire spontaneamente. Tipicamente, per i sistemi di particelle che costituiscono la materia ordinaria, l'entropia è proporzionale al loro volume; per i buchi neri, invece, l'entropia è proporzionale all'area A dell'orizzonte degli eventi, come fu dimostrato da Jacob Beckenstein e, indipenden-

temente, da Hawking negli anni '70. Più precisamente, l'entropia di Beckenstein-Hawking di un buco nero è

$$S_{\text{BH}} = k \frac{A}{4\ell_{\text{P}}^2} \quad (3)$$

dove k è la costante di Boltzmann e $\ell_{\text{P}} = \sqrt{\hbar G/c^3}$ è la cosiddetta lunghezza di Planck, essendo \hbar la costante di Planck ridotta.

L'esistenza di un'entropia associata a un buco nero pone una serie di problemi interpretativi di non poco conto. Dal punto di vista termodinamico l'entropia è legata al numero delle configurazioni microscopiche che sono accessibili al sistema. Tuttavia, in base a quanto detto sopra, sembra che le proprietà del buco nero di Schwarzschild dipendano esclusivamente dalla massa M . In verità le equazioni di Einstein ammettono soluzioni di buco nero più generali di quella di Schwarzschild che dipendono da più parametri, ma un teorema, noto come teorema *no-hair*, letteralmente senza capelli, asserisce che tutte le possibili metriche che descrivono un buco nero possono dipendere solo dalla loro massa, dalla loro carica elettrica e dal loro momento angolare di spin. Se questo è vero, sorge spontanea la domanda: da dove vengono tutti i diversi stati microscopici a cui un buco nero macroscopico può corrispondere? In altre parole, qual è l'origine microscopica e statistica dell'entropia dei buchi neri? Rispondere a questa domanda non è semplice.

La RG, dunque, prevede l'esistenza dei buchi neri ma non riesce a spiegare cosa succede al loro interno, dove lo spazio-tempo diventa singolare. La RG, inoltre, è una teoria puramente classica della gravità e non è valida alle corte distanze (per esempio alla scala subatomica) dove necessariamente la meccanica quantistica entra in gioco. D'altra parte, sappiamo dal MS che alla scala subatomica, le interazioni elettromagnetiche, deboli e forti sono molto più intense della forza gravitazionale, che quindi può essere trascurata, ma che a scale più piccole dell'ordine della scala di Planck, l'intensità della forza gravitazionale diventa del tutto paragonabile a quella delle altre forze ed occorre necessariamente tenerne conto. È quindi logico aspettarsi che una formulazione quantistica per la gravità si possa trovare solo nel contesto di una teoria che unifichi tutte le interazioni fondamentali.

Rendere la RG una teoria quantistica compatibile con il MS o, equivalentemente, incorporare in quest'ultimo la forza di gravità, è stato uno dei principali problemi per la fisica teorica moderna e numerosi sono stati i tentativi per risolverlo. Uno di questi consiste nel trattare la RG come una teoria di campo. Come il MS, anche la RG può essere descritta usando una Lagrangiana (detta di Hilbert-Einstein) che permette di ricavare le equazioni di Einstein. Sembrerebbe, dunque, che esistano tutti i presupposti per poter applicare la stessa procedura usata nelle teorie di campo, cioè promuovere la metrica a un campo quantistico e interpretare le fluttuazioni sul vuoto come gravitoni, ovvero i mediatori della forza di gravità. In effetti, procedendo in questo modo si possono ricavare senza grosse difficoltà le regole di accoppiamento fra gravitoni e costruire diagrammi per le interazioni gravitazionali in perfetta analogia con quelli delle interazioni di gauge del MS. Tuttavia, ci sono delle differenze significative fra i due casi, la più importante delle quali è che la RG non è rinormalizzabile, cioè non si possono eliminare in modo consistente i contributi divergenti nei diagrammi a *loop*.

Nonostante questo serio problema, l'approccio diagrammatico alle interazioni gravitazionali si è recentemente rivelato molto utile nello studio delle onde gravitazionali. Come abbiamo accennato all'inizio, l'esistenza delle onde gravitazionali, ovvero di perturbazioni della metrica dello spazio-tempo che si propagano alla velocità della luce, è una delle più affascinanti predizioni delle equazioni di Einstein. Tali onde possono essere causate dalla collisione di due oggetti molto massicci, quali ad esempio due buchi neri ma, poiché la loro intensità è estremamente piccola, è assai difficile osservarle. Tuttavia, grazie alla straordinaria precisione raggiunta dagli interferometri della collaborazione LIGO-Virgo che sono in grado di misurare variazioni di lunghezze anche 10.000 volte più piccole del raggio del protone, per la prima volta nel settembre 2015 è stato rivelato un segnale di onde gravitazionali prodotte dalla collisione di due buchi neri. Come indicato nella figura 3, che si riferisce appunto alla prima onda gravitazionale osservata, si possono distinguere tre fasi: una fase in cui i due buchi neri spiraleggiano uno intorno all'altro (*inspiral*), una fase in cui avviene la vera e propria fusio-

ne (*merger*), e infine una fase di rilassamento (*ring-down*).

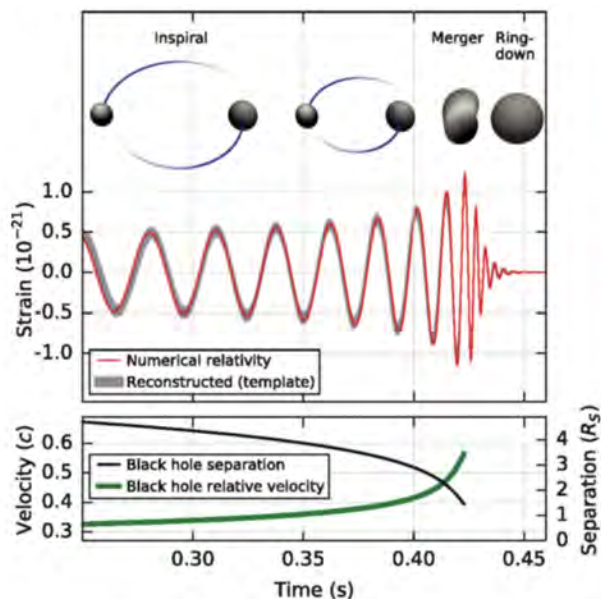


Figura 3: Segnale di onda gravitazionale prodotta dalla fusione di due buchi neri e osservata dalla collaborazione LIGO-Virgo nel settembre 2015 (immagine tratta da B.P. Abbott et al., Phys. Rev. Lett. 116 (2016) 061102).

Nella fase di *inspiral*, dove il segnale appare più regolare, è possibile usare l'approccio diagrammatico perturbativo alla RG a cui abbiamo accennato e trattare i due buchi neri come semplici particelle massive che interagiscono efficacemente scambiandosi gravitoni secondo le regole lagrangiane della RG. Questo è possibile perché in base al teorema *no-hair* i buchi neri sono caratterizzati da pochissimi parametri, massa, carica e spin, proprio come le particelle del MS. Nella fase di *merger*, invece, le forze gravitazionali diventano così intense da richiedere un'analisi delle equazioni di Einstein che al momento è possibile solo con metodi numerici. Infine, nella fase del *ring-down* giocano un ruolo importante i cosiddetti modi quasi-normali, ovvero i modi di vibrazione dissipativi, per determinare i quali occorre risolvere complicate equazioni differenziali. È evidente, quindi, che le onde gravitazionali pur essendo una predizione classica della RG, mettono al contempo in risalto i limiti di questa teoria che da sola non è in grado di descrivere i fenomeni gravitazionali nel regime quantistico.

Una possibilità per superare definitivamente questi problemi è cambiare paradigma.

La Teoria delle Stringhe

Una delle proposte più interessanti e a tutt'oggi più accreditate per realizzare l'unificazione quantistica di tutte le interazioni fondamentali, inclusa la gravità, è la teoria delle stringhe. La caratteristica essenziale di tale teoria è l'ipotesi che i costituenti fondamentali della materia e i mediatori delle forze non siano oggetti puntiformi, ma oggetti unidimensionali come delle piccole corde, dette stringhe, la cui lunghezza tipica è dell'ordine della lunghezza di Planck ℓ_P . A ogni stringa è associata una torre di particelle, corrispondenti alle diverse frequenze di vibrazione della corda, con massa e spin crescenti al crescere della frequenza di vibrazione. Tra le particelle più leggere troviamo il fotone e i bosoni vettori responsabili della trasmissione delle interazioni deboli e forti, ma anche una particella di spin 2 identificabile come il gravitone, la particella mediatrice della forza gravitazionale. Contenendo i mediatori di tutte le forze, la teoria delle stringhe realizza in modo automatico e naturale l'unificazione quantistica di tutte le interazioni fondamentali.

Nella sua formulazione odierna, la teoria delle stringhe comprende in realtà cinque modelli diversi, ciascuno dei quali però può essere interpretato come un particolare aspetto di un'unica teoria fondamentale, detta teoria M (dove M sta per madre). I cinque modelli di stringa hanno una caratteristica in comune: sono consistenti quantisticamente solo se definiti in uno spazio-tempo con 10 dimensioni! L'esistenza di 6 dimensioni in eccesso (solitamente dette dimensioni extra) rispetto alle 4 a cui siamo abituati nella RG, è una delle predizioni più significative e anche più sconcertanti della teoria delle stringhe. Fin da subito questo fatto ha suscitato un acceso dibattito sulla possibilità o meno di usare la teoria delle stringhe per descrivere il mondo reale a 4 dimensioni. Tuttavia, quello che all'apparenza sembra un serio problema risulta in realtà essere una fantastica opportunità che apre nuovi orizzonti interpretativi e ispira nuove idee, quali ad esempio la compattezza e i cosiddetti *brane-worlds*.

Uno dei modi possibili per spiegare come la fisica quadridimensionale possa emergere da uno spazio-tempo con 10 dimensioni è di pensare che

le 6 dimensioni extra, anziché essere estese come quelle ordinarie, siano di lunghezza finita, cioè siano compatte. In altre parole, ad ogni punto dello spazio-tempo quadridimensionale viene fatto corrispondere uno spazio interno a 6 dimensioni, che può avere anche una struttura molto complicata (come in figura 4), e non può essere rivelato se non da molto vicino perché piccolo.

Spazio a 6 dimensioni

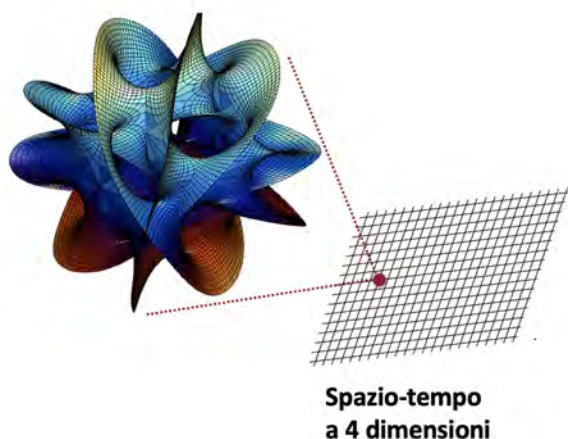


Figura 4: Lo spazio-tempo a 10 dimensioni può essere visto come il prodotto di uno spazio-tempo a 4 dimensioni e di uno spazio interno a 6 dimensioni.

Un'altra possibilità è che lo spazio-tempo che vediamo sia soltanto un'ipersuperficie a 4 dimensioni immersa in un universo più grande a 10 dimensioni. L'esistenza di configurazioni di questo tipo, dette brane (per indicare che sono generalizzazioni multidimensionali delle membrane bidimensionali), è effettivamente prevista dalla teoria M e permetterebbe di spiegare in modo naturale la differenza che osserviamo fra le forze elettrodeboli e forti e la forza gravitazionale. Le prime infatti potrebbero sondare solo le dimensioni longitudinali alla brana che descrive l'universo quadridimensionale che conosciamo, mentre la gravità sarebbe in grado di penetrare l'intero spazio-tempo, rivelando la sua natura multidimensionale, come schematicamente indicato in figura 5.

La presenza di dimensioni extra può avere non solo importanti conseguenze sulle caratteristiche delle interazioni gravitazionali a corte distanze (per esempio potrebbe portare a una deviazione dalla ordinaria legge di gravitazione di Newton),

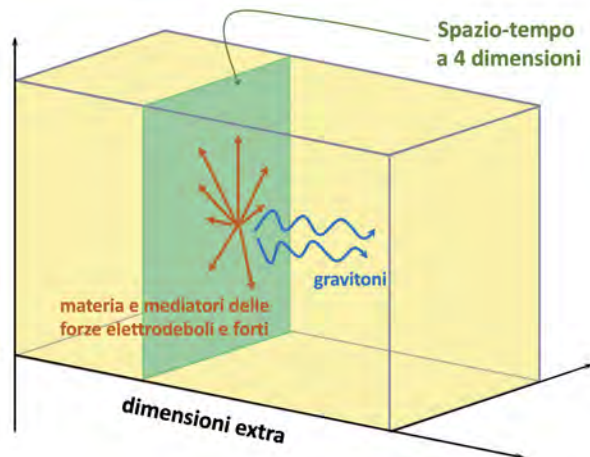


Figura 5: Lo spazio-tempo quadridimensionale visto come una brana immersa in uno spazio con dimensioni extra. Mentre le forze elettrodeboli e forti, descritte dalla teoria di gauge del MS, sarebbero confinate lungo la brana, i gravitoni potrebbero vedere anche le dimensioni extra.

ma anche implicazioni cosmologiche di carattere più ampio. L'esistenza di brane in uno spazio-tempo a più dimensioni permette infatti di studiare le proprietà termodinamiche dei buchi neri che, come abbiamo accennato nella sezione precedente, derivano dalle correzioni quantistiche alla gravità e non trovano spiegazione nell'ambito della RG. In particolare, usando le brane è possibile spiegare l'entropia dei buchi neri, data in eq. (3), ed identificare i microstati che questa entropia conteggia. In questo contesto, infatti, i buchi neri quadridimensionali vengono realizzati con sistemi di brane che si estendono nello spazio a 10 dimensioni arrotolandosi nelle dimensioni extra. Queste configurazioni appaiono come buchi neri classici nelle 4 direzioni visibili, ma hanno proprietà microscopiche diverse a seconda di come le brane sono arrotolate. Ad un singolo buco nero quadridimensionale con una certa area dell'orizzonte degli eventi corrispondono quindi tante configurazioni 10-dimensionali che si possono contare con opportune tecniche matematiche. In questo modo è dunque possibile associare a un buco nero un'entropia che risulta essere proporzionale all'area dell'orizzonte degli eventi, proprio come ipotizzato da Bekenstein e Hawking. Questa derivazione dell'entropia dei buchi neri a partire da un conteggio di stati microscopici di brane arrotolate è uno dei risul-

tati più significativi della teoria delle stringhe nell'ambito della gravità quantistica.

La ricerca recente ha anche ipotizzato che i buchi neri possano essere delle *fuzzballs*, cioè delle palle disordinate costituite da oggetti fondamentali unidimensionali, ovvero da stringhe! In questo approccio, i singoli microstati del buco nero corrisponderebbero a soluzioni con una geometria regolare, mentre la singolarità dello spazio-tempo caratteristica dei buchi neri emergerebbe da un processo di media sui possibili microstati, cioè da una specie di fenomeno collettivo. Un'altra linea di pensiero sempre ispirata dalla teoria delle stringhe prevede che l'orizzonte degli eventi, invece di essere solo una superficie che un ipotetico osservatore potrebbe attraversare senza subire conseguenze (se non quella di non poter più tornare indietro), sarebbe in realtà un *firewall*, un muro di energia che distruggerebbe qualunque oggetto cercasse di oltrepassarlo. Queste proposte sono al momento solo speculazioni astratte, ma in futuro potrebbero essere assai rilevanti perché le *fuzzballs* o i *firewalls* danno origine a segnali di onde gravitazionali diversi da quelli calcolati a partire dal modello classico di buco nero previsto dalla RG. Gli stessi esperimenti che hanno portato alla conferma della teoria di Einstein potrebbero quindi permetterci in futuro di superarla, permettendoci così di esplorare il regime in cui la gravità diventa quantistica e di discriminare fra le varie ipotesi finora formulate.

Corrispondenza Gauge/Gravità

Una delle più interessanti conseguenze della teoria delle stringhe è la corrispondenza (o dualità) fra teorie di gauge e teorie di gravità. Come abbiamo visto, le teorie di gauge sono l'architettura su cui è costruito il MS delle particelle elementari e sono naturalmente definite sulle brane presenti nella teoria delle stringhe. Queste brane però hanno anche la proprietà di curvare lo spazio-tempo in cui sono immerse e quindi, secondo i principi della RG, sono sorgenti di campi gravitazionali. Nel 1997 Juan Maldacena riuscì a dimostrare che la teoria di gauge definita su un insieme di brane e la teoria di gravità che esse determinano deformando lo spazio-tempo, sono equivalenti tanto da poter usare l'una per cal-

colare quantità specifiche dell'altra e viceversa. Questo risultato ottenne subito un'ampissima risonanza e ancora oggi, dopo oltre venticinque anni, l'articolo di Maldacena è il più citato nella letteratura scientifica per quanto riguarda la fisica delle alte energie.

La corrispondenza di Maldacena è abbastanza semplice da formulare quando si considera la zona nelle immediate vicinanze delle brane dove lo spazio-tempo a 10 dimensioni viene percepito come il prodotto di due spazi a 5 dimensioni: uno che assume la forma di una sfera pentadimensionale, e l'altro che ricade in una classe ben nota in matematica detta spazio di Anti-de Sitter (AdS), in onore del matematico olandese Willem de Sitter. Il bordo di questo spazio di AdS è uno spazio-tempo piatto a 4 dimensioni che viene identificato con lo spazio-tempo di Minkowski sul quale è definita la teoria di gauge prodotta dalle eccitazioni a bassa energia delle stringhe.

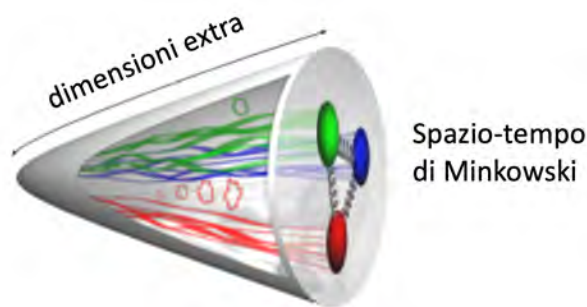


Figura 6: Nella corrispondenza olografica di Maldacena lo spazio-tempo di Minkowski su cui sono definite le teorie di gauge che descrivono le interazioni fondamentali del MS è il bordo di uno spazio più ampio in cui è presente una forma particolare di gravità che descrive la geometria di Anti-de Sitter.

La corrispondenza di Maldacena è dunque una corrispondenza fra una teoria di gravità nello spazio di AdS e una teoria di gauge definita sul suo bordo (come schematicamente indicato in figura 6). Più precisamente, questa corrispondenza è una relazione che collega una teoria di gauge massimamente supersimmetrica nel regime di accoppiamento forte in spazio piatto con una teoria di gravità in AdS debolmente interagente, o viceversa. Questa corrispondenza è dunque altamente non banale poiché stabilisce un legame fra teorie radicalmente diverse e per di più in regimi opposti!

Tale corrispondenza può anche essere interpretata come una dualità olografica, perché la relazione fra le due teorie è analoga a quella che esiste fra un oggetto tridimensionale ed un suo ologramma. Come l'ologramma, pur essendo definito in un piano bidimensionale, contiene tutta l'informazione sull'oggetto tridimensionale che rappresenta, così la teoria di gauge, pur essendo definita solo sul bordo, ha un contenuto di informazione uguale a quello della teoria gravitazionale, che invece è definita nell'intero spazio-tempo. L'idea di un comportamento olografico della gravità fu avanzata già agli inizi degli anni '90 dal premio Nobel G. 't Hooft (lo stesso che dimostrò la rinormalizzabilità delle teorie di gauge), per spiegare il fatto che l'entropia dei buchi neri è proporzionale non al suo volume ma all'area del suo orizzonte degli eventi come indicato in eq. (3). Nell'ambito della teoria delle stringhe questa idea qualitativa trova per la prima volta una precisa realizzazione quantitativa attraverso la dualità di Maldacena.

La corrispondenza gauge/gravità, in linea di principio, può essere usata in entrambe le direzioni: cioè possiamo usare la conoscenza delle teorie di gauge debolmente interagenti per dedurre le proprietà della gravità nel regime in cui essa è forte, oppure al contrario possiamo usare la nostra conoscenza classica della RG (e delle sue generalizzazioni), che è appropriata per descrivere il regime in cui la gravità è debole, per ricavare informazioni sulle teorie di gauge fortemente interagenti. Entrambi questi punti di vista rappresentano un vero e proprio cambio di paradigma concettuale rispetto al passato! Nonostante i numerosi progressi e i moltissimi lavori che sono stati ispirati dalla proposta originale di Maldacena e più in generale dall'idea della corrispondenza olografica gauge/gravità, sono ancora molte le domande che attendono una risposta. La principale fra queste è chiaramente se questo nuovo modo di interpretare le interazioni di gauge come ologramma di una teoria di gravità in dimensioni più alte sia veramente il modo giusto per ottenere il completamento del MS e descrivere le forze che tengono insieme il nostro Universo.

Concludiamo accennando ad un'altra relazione esistente fra le teorie di gauge e la gravità, le cui radici sono ancora una volta nella teoria delle

stringhe, cioè al legame fra la ampiezze gravitazionali calcolate diagrammaticamente usando le regole della RG e le ampiezze perturbative di una teoria di gauge. Anche se la Lagrangiana di una teoria di gauge e la Lagrangiana di Hilbert-Einstein della RG sono radicalmente diverse, le ampiezze di diffusione che si ricavano da esse soddisfano delle straordinarie relazioni per cui un'ampiezza gravitazionale risulta essere il quadrato (definito in modo opportuno) di un'ampiezza di gauge. Questo fatto è veramente sorprendente ma è stato ampiamente verificato. Recentemente questa relazione è stata utilizzata per riversare in ambito gravitazionale l'enorme quantità di informazioni che abbiamo sulle teorie di gauge al fine di ottenere risultati di altissima precisione sulle ampiezze gravitazionali. La speranza è che procedendo sistematicamente in questo modo si possano ottenere informazioni fondamentali per capire meglio il profilo e la forma delle onde gravitazionali originate da collisioni di buchi neri, o più in generale di oggetti massicci, specie nella fase di *inspiral*.

Ottenere un'estensione consistente del MS che includa la gravità e trovare una teoria pienamente soddisfacente per la gravità quantistica sono le due principali sfide che la fisica teorica delle alte energie dovrà affrontare nel prossimo futuro. Le relazioni finora evidenziate fra le teorie di gauge e le teorie di gravità sono certamente un ottimo punto di partenza per fare ulteriori progressi in questa direzione.



Alberto Lerda: È professore ordinario di Fisica Teorica presso l'Università del Piemonte Orientale e ricercatore associato dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN). Dal 2011 al 2019 è stato presidente della Commissione Scientifica Nazionale per la Fisica Teorica dell'INFN e presidente del Comitato Scientifico Internazionale del "Galileo Galilei Institute for Theoretical Physics" di Firenze. Si occupa di teoria delle stringhe, teorie di campo supersimmetriche, teorie conformi e teorie di gauge. È stato ed è coordinatore di numerosi programmi di ricerca dedicati alla teoria delle stringhe e alle sue applicazioni.

