

https://farid.ps/articles/physics_beyond_the_standard_model/it.html

Fisica oltre il Modello Standard

Nel 2012, con la conferma della scoperta del bosone di Higgs al Large Hadron Collider del CERN, il Modello Standard (SM) era, in teoria, completo. Ogni particella prevista era stata trovata. Le sue equazioni avevano superato ogni test sperimentale con una precisione straordinaria.

Tuttavia, l'atmosfera nella fisica non era di chiusura, ma di incompletezza. Come le leggi di Newton prima di Einstein o la fisica classica prima della meccanica quantistica, il Modello Standard era troppo efficace nelle scale che possiamo testare, ma incapace di rispondere a domande più profonde. Era una mappa quasi perfetta, ma solo di una piccola parte del paesaggio.

Gravità: La forza mancante

L'omissione più evidente è la gravità.

- L'SM descrive tre delle quattro forze fondamentali conosciute: elettromagnetismo, forza debole e forza forte.
- La gravità, descritta dalla **relatività generale (RG)** di Einstein, è completamente assente.

Questo è più di una semplice dimenticanza. La relatività generale tratta la gravità come la curvatura dello spazio-tempo, un campo geometrico liscio, mentre l'SM tratta le forze come campi quantistici mediati da particelle. I tentativi di quantizzare la gravità nello stesso modo generano infiniti che non possono essere rinormalizzati.

Il Modello Standard e la RG sono come due sistemi operativi diversi: brillanti nei loro rispettivi domini, ma fondamentalmente incompatibili. Riconciliarli è forse la sfida più grande della fisica odierna.

Masse dei neutrini

L'SM prevede che i neutrini non abbiano massa. Tuttavia, esperimenti, a partire dal rivelatore Super-Kamiokande in Giappone (1998) e confermati a livello globale, hanno dimostrato che i neutrini oscillano tra sapori (elettronico, muonico, tau). Le oscillazioni richiedono massa.

Questa fu la prima prova confermata di fisica oltre il Modello Standard. La scoperta valse il Premio Nobel nel 2015 a Kajita e McDonald.

I neutrini sono estremamente leggeri, almeno un milione di volte più leggeri dell'elettrone. Le loro masse non sono spiegate dall'SM, ma potrebbero suggerire nuova fisica, come il **meccanismo a bilancia**, neutrini sterili o connessioni con l'universo primordiale. In alcuni

scenari, i neutrini pesanti a bilancia consentono la **leptogenesi**, dove si crea un'asimmetria di leptoni nell'universo primordiale, che poi si trasforma nell'**asimmetria materia-antimateria** osservata.

Materia oscura

La materia visibile descritta dall'SM costituisce meno del 5% dell'universo. Il resto è invisibile.

- La **materia oscura** (~27% dell'universo) si rivela solo attraverso la gravità: le galassie ruotano più velocemente di quanto la materia visibile permetta, gli ammassi di galassie deviano la luce più del dovuto, e il fondo cosmico a microonde richiede una massa invisibile aggiuntiva.
- Nessuna delle particelle dell'SM può spiegarla. I neutrini sono troppo leggeri e veloci. La materia ordinaria è troppo scarsa.

Le teorie propongono nuove particelle: WIMP (particelle massive a interazione debole), assioni, neutrini sterili o qualcosa di più strano. Ma nonostante decenni di ricerche – rivelatori sotterranei, esperimenti con collisionatori, studi astrofisici – la materia oscura rimane sfuggente.

Energia oscura

Ancora più misteriosa è l'**energia oscura**, la forza che guida l'espansione accelerata dell'universo.

- Scoperta nel 1998 attraverso osservazioni di supernove, l'energia oscura costituisce ~68% dell'universo.
- In linea di principio, potrebbe essere spiegata come l'"energia del vuoto" dei campi quantistici. Ma i calcoli ingenui della QFT prevedono una densità di energia del vuoto di 120 ordini di grandezza troppo grande, la peggiore previsione nella fisica.

Questo **problema della costante cosmologica** è forse il conflitto più acuto tra la teoria dei campi quantistici e la gravità. Il Modello Standard non ha nulla da dire sull'energia oscura. È un vuoto enorme nella nostra comprensione del cosmo.

Il problema della gerarchia

Un altro enigma profondo risiede nel bosone di Higgs stesso.

La massa del Higgs è misurata a 125 GeV. Ma le correzioni quantistiche dovrebbero spingerla verso la scala di Planck (10^{19} GeV), a meno che non si verifichino cancellazioni miracolose. Perché è così leggera rispetto alle scale energetiche naturali della gravità?

Questo è il **problema della gerarchia**: il Higgs sembra essere finemente regolato in modo anomalo. I fisici sospettano nuova fisica, come la **supersimmetria (SUSY)**, che potrebbe stabilizzare la massa del Higgs introducendo particelle partner che cancellano le correzioni

pericolose. (I dibattiti sulla **naturalità** includono idee che vanno da soluzioni dinamiche a ragionamenti **antropici** in un possibile “paesaggio” di vuoti.)

L'asimmetria materia-antimateria

L'SM include una certa violazione CP, ma non abbastanza per spiegare perché l'universo attuale è pieno di materia invece di quantità uguali di materia e antimateria. Come accennato sopra, meccanismi come la **leptogenesi** (spesso legati all'origine delle masse dei neutrini a bilancia) offrono un percorso convincente in cui la fisica oltre l'SM inclina la bilancia.

Un'immagine bellissima ma incompleta

Il Modello Standard è talvolta chiamato “la teoria più riuscita della fisica”. Le sue previsioni corrispondono agli esperimenti fino a 10-12 decimali. Spiega quasi tutto ciò che vediamo negli acceleratori di particelle e nei laboratori.

Ma è incompleto:

- Ignora la gravità.
- Non può spiegare le masse dei neutrini.
- Non può rendere conto della materia oscura né dell'energia oscura.
- Lascia enigmi profondi come il problema della gerarchia e l'asimmetria materia-antimateria irrisolti.

I fisici si trovano ora di fronte a un momento familiare nella storia. Proprio come la meccanica di Newton ha lasciato il posto alla relatività, e la fisica classica alla meccanica quantistica, il Modello Standard deve infine cedere il passo a qualcosa di più profondo.

Il Santo Graal: Una teoria unificata

L'obiettivo finale è una **Grande Teoria Unificata (GUT)** o addirittura una **Teoria del Tutto (ToE)**: un quadro che unifica le quattro forze, spiega tutte le particelle e funziona coerentemente dalle scale più piccole (gravità quantistica) a quelle più grandi (cosmologia).

Questo è il Santo Graal della fisica moderna. È per questo che i ricercatori spingono i collisori a energie più alte, costruiscono rivelatori di neutrini massicci, mappano il cosmo con telescopi e inventano nuove matematiche audaci.

I capitoli successivi esploreranno i principali candidati:

- **Supersimmetria (SUSY)** – una simmetria tra particelle di materia e di forza.
- **Teoria delle stringhe e teoria M** – dove le particelle sono stringhe vibranti, e il gravitino emerge naturalmente.
- **Dimensioni extra** – dall'idea iniziale di Kaluza-Klein ai modelli moderni Randall-Sundrum.
- **Altri approcci** – come la gravità quantistica a loop e la sicurezza asintotica.

Ognuna di queste idee non è nata come dogma, ma come scienza al suo meglio: notare crepe, costruire nuove teorie e testarle contro la realtà.

Supersimmetria: La prossima grande simmetria?

La fisica ha una lunga storia di unificazione attraverso la simmetria. Le equazioni di Maxwell hanno unificato elettricità e magnetismo. La relatività speciale ha unificato spazio e tempo. La teoria elettrodebole ha unificato due delle quattro forze fondamentali. Ogni progresso è derivato dalla scoperta di una simmetria nascosta nella natura.

La supersimmetria – o SUSY, come la chiamano affettuosamente i fisici – è la proposta audace che la prossima grande simmetria collega due categorie di particelle apparentemente distinte: **materia e forze**.

Fermioni e bosoni: Materia contro forza

Nel Modello Standard, le particelle si dividono in due grandi famiglie:

- **Fermioni (spin 1/2):** Includono quark e leptoni, i mattoni della materia. Il loro spin semi-intero significa che obbediscono al principio di esclusione di Pauli: due fermioni identici non possono occupare lo stesso stato. Questo spiega perché gli atomi hanno gusci strutturati e perché la materia è stabile.
- **Bosoni (spin intero):** Includono fotoni, gluoni, bosoni W e Z, e il Higgs. I bosoni mediano le forze. A differenza dei fermioni, possono accumularsi nello stesso stato, il che spiega l'esistenza dei laser (fotoni) e dei condensati di Bose-Einstein.

In breve: i fermioni formano la materia, i bosoni trasportano le forze.

L'ipotesi della supersimmetria

La supersimmetria propone una simmetria che collega fermioni e bosoni. Per ogni fermione noto, esiste un partner bosonico. Per ogni bosone noto, un partner fermionico.

- Quark → **squark**
- Leptoni → **sleptoni**
- Gluoni → **gluini**
- Settore gauge/Higgs → **neutralini** (miscele di bino, wino, higgsini; neutri) e **charginos** (miscele di wino, higgsini; carichi)

(“Fotino” e “zino” sono soprannomi più vecchi per stati propri di gauge; gli esperimenti cercano in realtà gli **stati propri di massa** menzionati sopra.)

Perché proporre un tale raddoppio radicale del mondo delle particelle? Perché SUSY promette soluzioni eleganti ad alcuni dei problemi più profondi lasciati dal Modello Standard.

Risolvere il problema della gerarchia

Uno dei maggiori richiami di SUSY è la sua capacità di affrontare il **problema della gerarchia**: perché il bosone di Higgs è così leggero rispetto alla scala di Planck.

Nel Modello Standard, le correzioni quantistiche delle particelle virtuali dovrebbero spingere la massa del Higgs verso valori enormi. La supersimmetria introduce sparticolari le cui contribuzioni cancellano queste divergenze. Risultato: la massa del Higgs è naturalmente stabilizzata, senza regolazioni fini (almeno negli spettri SUSY "naturali").

SUSY e la grande unificazione

Un'altra motivazione per SUSY viene dall'unificazione delle forze.

- Calcolando le costanti di accoppiamento delle forze forte, debole ed elettromagnetica a energie più alte, si osserva che, nel Modello Standard, si incontrano quasi, ma non del tutto, in un unico punto.
- Con SUSY, grazie ai contributi delle sparticolari, gli accoppiamenti convergono splendidamente intorno a 10^{16} GeV.

Ciò suggerisce che a energie estremamente elevate, le tre forze potrebbero fondersi in una sola **Grande Teoria Unificata (GUT)**.

SUSY come candidato per la materia oscura

La supersimmetria fornisce anche un candidato naturale per la **materia oscura**.

Se SUSY è corretta, una delle sparticolari dovrebbe essere stabile ed elettricamente neutra. Un candidato principale è il **neutralino più leggero**, una miscela di bino, wino e higgsini.

I neutralini interagirebbero solo debolmente, adattandosi al profilo dei WIMP (particelle massive a interazione debole). Se scoperti, potrebbero spiegare il 27% mancante della materia dell'universo.

Ricerche sperimentali di SUSY

Per decenni, i fisici speravano che le particelle supersimmetriche apparissero appena sopra le scale energetiche già esplorate.

- **LEP (CERN, anni '90)**: Nessuna particella SUSY fino a ~ 100 GeV.
- **Tevatron (Fermilab, anni '90-2000)**: Nessuna sparticolare.
- **LHC (CERN, anni 2010-2020)**: Collisioni protone-protone fino a **13,6 TeV** (design: **14 TeV**). Nonostante ricerche massicce, nessuna evidenza di squark, gluini o neutralini fino a scale di diversi TeV.

L'assenza di scoperte SUSY al LHC è stata deludente. Molte delle versioni più semplici di SUSY, come il "Modello Standard supersimmetrico minimo" (MSSM), sono ora fortemente vincolate. Gli spettri "naturali" sono spinti verso masse più alte, il che implica più regolazioni fini se SUSY esiste vicino alla scala dei TeV.

Tuttavia, SUSY non è stata esclusa. Modelli più elaborati prevedono sparticolari più pesanti o più sottili, forse fuori dalla portata del LHC, o con interazioni troppo deboli per essere facilmente rilevate.

La bellezza matematica di SUSY

Oltre alle sue motivazioni fenomenologiche, SUSY ha una profonda eleganza matematica.

- È l'unica estensione possibile delle simmetrie dello spazio-tempo coerente con la relatività e la meccanica quantistica.
- Le teorie supersimmetriche sono spesso più calcolabili: domano gli infiniti e rivelano strutture nascoste nella QFT.
- Nella teoria delle stringhe, SUSY è essenziale per la coerenza: senza di essa, la teoria contiene tachioni e altre patologie.

Anche se la natura non realizza SUSY a energie accessibili, la sua matematica ha già arricchito la fisica.

Lo stato della supersimmetria

Oggi, SUSY occupa una posizione curiosa.

- Rimane uno dei quadri più convincenti per la fisica oltre il Modello Standard.
- Risolve il problema della gerarchia, supporta l'unificazione e offre un candidato per la materia oscura.
- Tuttavia, non sono ancora state trovate prove sperimentali.

Se il LHC e i suoi successori non trovano nulla, SUSY potrebbe realizzarsi solo a scale energetiche ben oltre la nostra portata – o forse la natura ha scelto un percorso completamente diverso.

Un metodo, non un dogma

La supersimmetria illustra il metodo scientifico in azione.

I fisici hanno identificato problemi: la questione della gerarchia, l'unificazione, la materia oscura. Hanno proposto una nuova simmetria audace che li risolve tutti. Hanno progettato esperimenti per testarla. Finora, i risultati sono negativi – ma ciò non significa che l'idea sia stata uno spreco. SUSY ha affinato i nostri strumenti, chiarito ciò che cerchiamo e guidato generazioni di ricerche.

Come l'etere o gli epicicli prima di essa, SUSY potrebbe rivelarsi un trampolino verso una verità più profonda, che sopravviva come ultima parola o meno.

Teoria delle stringhe e teoria M

La fisica oltre il Modello Standard è spesso motivata da correzioni: risolvere il problema della gerarchia, spiegare la materia oscura, unificare gli accoppiamenti gauge. La teoria delle stringhe è diversa. Non inizia con un puzzle particolare. Inizia invece con la matematica – e finisce per riformulare tutta la nostra concezione di spazio, tempo e materia.

Origini: Una teoria nata dal fallimento

La teoria delle stringhe, sorprendentemente, non è iniziata come una teoria di tutto, ma come un tentativo fallito di comprendere la forza nucleare forte.

Alla fine degli anni '60, prima che la QCD fosse completamente sviluppata, i fisici cercavano di spiegare lo zoo dei hadroni. Notarono schemi nei dati di scattering che suggerivano che le risonanze potessero essere modellate da stringhe vibranti.

Il "modello di risonanza duale", introdotto da Veneziano nel 1968, descriveva le interazioni forti come se gli adroni fossero eccitazioni di minuscole stringhe. Era elegante ma rapidamente abbandonato una volta che la QCD emerse come la vera teoria della forza forte.

Tuttavia, la teoria delle stringhe si rifiutò di morire. Nascoste nelle sue equazioni c'erano caratteristiche notevoli che sembravano puntare ben oltre la fisica nucleare.

La scoperta sorprendente: Il gravitino

Quando i teorici quantizzarono le vibrazioni delle stringhe, scoprirono che lo spettro includeva inevitabilmente una **particella senza massa con spin 2**.

Questo fu scioccante. La teoria dei campi quantistici aveva dimostrato che una particella senza massa con spin 2 è unica: deve essere il quanto della gravità, il **gravitino**.

Come notò successivamente John Schwarz: *"Ma emerse un fatto sorprendente: la matematica della teoria delle stringhe conteneva inevitabilmente una particella senza massa con spin 2 – un gravitino."*

Ciò che era iniziato come una teoria degli adroni aveva accidentalmente prodotto il mattonone della gravità quantistica.

L'idea centrale: Stringhe, non punti

Al centro della teoria delle stringhe, le particelle puntiformi sono sostituite da minuscoli oggetti unidimensionali: stringhe.

- Le stringhe possono essere **aperte** (con due estremità) o **chiuse** (anelli).
- Diversi modi di vibrazione della stringa corrispondono a diverse particelle.
 - Una vibrazione particolare può apparire come un fotone.
 - Un'altra come un gluone.
 - Un'altra come un quark.
 - E un modo, inevitabilmente, come il gravitino.

Questo semplice cambiamento – da punti a stringhe – risolve molti degli infiniti che affliggono la gravità quantistica. La dimensione finita della stringa sfuma le interazioni che altrimenti esploderebbero a distanza zero.

Supersimmetria e superstringhe

Le prime versioni della teoria delle stringhe avevano problemi: contenevano tachioni (instabilità) e richiedevano caratteristiche non realistiche. La svolta arrivò con l'introduzione della **supersimmetria**, portando alla **teoria delle superstringhe** negli anni '70 e '80.

Le superstringhe eliminarono i tachioni, incorporarono i fermioni e portarono una nuova coerenza matematica.

Ma c'era un problema: la teoria delle stringhe funziona solo in dimensioni superiori. Specificamente, **10 dimensioni dello spazio-tempo**.

- Le quattro che vediamo (tre spaziali, una temporale).
- Altre sei, compattate o avvolte su scale minuscole, invisibili agli esperimenti attuali.

Questa idea, per quanto radicale possa sembrare, non era del tutto nuova. Negli anni '20, la **teoria di Kaluza-Klein** aveva già suggerito che dimensioni extra potevano unificare gravità ed elettromagnetismo. La teoria delle stringhe rianimò e ampliò enormemente questa idea.

Le cinque teorie delle stringhe

A metà degli anni '80, i fisici scoprirono che la teoria delle stringhe non era unica, ma si presentava in **cinque versioni distinte**:

1. **Tipo I** – Stringhe aperte e chiuse, incluse stringhe orientate e non orientate.
2. **Tipo IIA** – Stringhe chiuse, orientate, non chirali.
3. **Tipo IIB** – Stringhe chiuse, orientate, chirali.
4. **Eterotica $SO(32)$** – Stringhe chiuse con una costruzione ibrida.
5. **Eterotica $E_8 \times E_8$** – Una versione altamente simmetrica, cruciale successivamente per connettersi alla fisica delle particelle realistica.

Ciascuna sembrava matematicamente coerente, ma perché la natura dovrebbe sceglierne una?

La prima rivoluzione delle superstringhe

Nel 1984, Michael Green e John Schwarz dimostrarono che la teoria delle stringhe poteva automaticamente cancellare le anomalie quantistiche – qualcosa che le teorie dei campi quantistici dovevano progettare con cura. Questa scoperta scatenò la **prima rivoluzione delle superstringhe**, con migliaia di fisici che si rivolsero alla teoria delle stringhe come candidata per una teoria unificata di tutte le forze.

Fu il primo quadro serio in cui la gravità quantistica non era solo coerente, ma inevitabile.

La seconda rivoluzione delle superstringhe: Teoria M

A metà degli anni '90, si sviluppò una seconda rivoluzione. Edward Witten e altri scoprirono che le cinque teorie delle stringhe diverse non erano rivali, ma limiti diversi di una singola teoria più profonda: la **teoria M**.

Si ritiene che la teoria M esista in **11 dimensioni** e includa non solo stringhe, ma oggetti di dimensione superiore chiamati **brane** (abbreviazione di membrane).

- Brane a 1 dimensione = stringhe.
- Brane a 2 dimensioni = membrane.
- Brane di dimensione superiore fino a 9 dimensioni spaziali.

Queste brane diedero origine a nuove possibilità ricche: interi universi potrebbero esistere come 3-brane fluttuanti in uno spazio di dimensione superiore, con la gravità che si diffondono nel volume mentre le altre forze rimangono confinate. Questa immagine ispirò modelli moderni di dimensioni extra come **Randall-Sundrum**.

Esempi notevoli: Kaluza-Klein e Randall-Sundrum

- **Kaluza-Klein (anni '20):** Propose una quinta dimensione extra per unificare gravità ed elettromagnetismo. L'idea fu accantonata per decenni, ma la teoria delle stringhe la rianimò in una forma più grandiosa. Le dimensioni extra compattate rimangono una caratteristica centrale dei modelli di stringhe.
- **Randall-Sundrum (1999):** Propose dimensioni extra "deformate", in cui il nostro universo è una 3-brana incorporata in dimensioni superiori. La gravità si propaga nel volume, spiegando perché è più debole delle altre forze. Tali modelli prevedono possibili segnali nei collisori di particelle o deviazioni dalla legge di Newton a distanze molto brevi.

Indizi sperimentali e sfide

La teoria delle stringhe fa affermazioni audaci, ma testarle è straordinariamente difficile.

- **Dimensioni extra:** Potrebbero rivelarsi attraverso segnali di energia mancante o **eccezioni di Kaluza-Klein** – potenzialmente per **gravitini o persino campi del Modello Standard**, a seconda della configurazione. I vincoli dei collisori raggiungono tipicamente la gamma dei **multi-TeV**.
- **Gravitini:** Si prevede una particella senza massa con spin 2, ma rilevare un singolo gravitino è oltre la tecnologia fattibile. Effetti indiretti, come deviazioni nelle onde gravitazionali, sono possibili.
- **Supersimmetria:** La teoria delle stringhe richiede SUSY a una certa scala, ma il LHC non ha ancora trovato sparticolari.
- **Cosmologia:** L'universo primordiale, l'inflazione e il fondo cosmico a microonde possono contenere impronte della fisica delle stringhe, sebbene i risultati finora siano inconcludenti.

Nonostante le sfide, la teoria delle stringhe ha fornito un terreno fertile per la matematica, ispirando progressi in geometria, topologia e dualità come AdS/CFT (che collega la gravità in dimensioni superiori alla teoria dei campi quantistici senza gravità).

La bellezza e la controversia

I sostenitori sostengono che la teoria delle stringhe è il percorso più promettente verso una teoria unificata: include la gravità quantistica, unifica tutte le forze e spiega perché deve esistere un gravitino.

I critici sostengono che senza conferme sperimentali, la teoria delle stringhe rischia di scollegarsi dalla scienza empirica. Il suo vasto “paesaggio” di soluzioni possibili (fino a 10^{500}) rende difficile estrarre previsioni uniche.

Entrambe le parti concordano su una cosa: la teoria delle stringhe ha cambiato il modo in cui pensiamo alla fisica, fornendo un nuovo linguaggio per l'unificazione.

Verso una teoria del tutto

Se la supersimmetria è il prossimo passo oltre il Modello Standard, la teoria delle stringhe è il passo successivo: una candidata per la tanto ricercata **Teoria del Tutto**.

La sua affermazione più audace non è solo che include il Modello Standard e la gravità, ma che questi sono conseguenze inevitabili di stringhe vibranti in dimensioni superiori. Il gravitino non è un'aggiunta – è integrato.

Resta da scoprire se la natura ha scelto questo percorso.

Esplorare le frontiere: Esperimenti oltre il Modello Standard

Le teorie sono la linfa della fisica, ma gli esperimenti sono il suo battito cardiaco. La supersimmetria, la teoria delle stringhe e le dimensioni extra sono costruzioni matematiche bellissime, ma vivono o muoiono per le prove. Se devono essere più che speculazioni, devono lasciare impronte nei dati.

I fisici hanno ideato modi ingegnosi per cercare queste impronte – nei collisori, nel cosmo e nella struttura stessa dello spazio-tempo.

Collisori: Caccia a sparticole e gravitini

Il Large Hadron Collider (LHC) al CERN è l'acceleratore di particelle più potente al mondo, che fa collidere protoni a energie fino a **13,6 TeV** (design: **14 TeV**). È stato lo strumento principale dell'umanità per esplorare la fisica oltre il Modello Standard.

Supersimmetria al LHC

- **Ricerca di sparticole:** Gli esperimenti ATLAS e CMS hanno esaminato i dati alla ricerca di squark, gluini e neutralini/charginos. Questi apparirebbero spesso come firme di “energia mancante”, poiché le particelle SUSY sfuggono alla rilevazione.
- **Risultati:** Nessuna particella SUSY confermata è stata trovata fino alla scala di diversi TeV. Ciò ha escluso molte delle versioni più semplici di SUSY e spinge la SUSY “naturale” verso territori più pesanti e più finemente regolati.

Gravitini e dimensioni extra

- **Modi di Kaluza-Klein:** Se esistono dimensioni extra, **gravitini o persino campi del- l'ISM** potrebbero apparire come eccitazioni massive di KK, rilevabili come risonanze nei canali dileptonici, difotonici o dijet.
- **Segnali Randall-Sundrum:** Le dimensioni extra deformate potrebbero produrre risonanze di gravitini con schemi angolari caratteristici di spin 2.
- **Risultati:** Le ricerche dell'LHC non hanno trovato prove finora, ma hanno spinto i limiti alla gamma dei **multi-TeV**, restringendo la dimensione, la deformazione e la geometria delle dimensioni extra.

Micro-buchi neri

Alcune teorie suggeriscono che se la gravità diventa forte alla scala dei TeV, minuscoli buchi neri potrebbero formarsi nelle collisioni dell'LHC, evaporando in raffiche di particelle. Nessun evento del genere è stato osservato.

Esperimenti di precisione: Testare la gravità su scale piccole

Se esistono dimensioni extra, la legge di gravità di Newton potrebbe rompersi a distanze brevi.

- **Esperimenti di bilanciamento di torsione ("Eöt-Wash"):** Testano la legge dell'in- verso del quadrato fino a scale **submillimetriche** – attualmente **decine di micron (~50 μm)**.
- **Risultati:** Non sono state rilevate deviazioni. Questi esperimenti **escludono** un'ampia classe di scenari di dimensioni extra con lunghezze caratteristiche **superiori a $\sim 10^{-4}$ m** (a seconda del modello).

Questi esperimenti da tavolo sono notevolmente sensibili, esplorando scale inaccessibili ai collisori.

Onde gravitazionali: Una nuova finestra sulla gravità quantistica

La scoperta delle onde gravitazionali da parte di LIGO nel 2015 ha aperto una nuova frontiera.

- **Polarizzazioni extra / propagazione modificata:** Alcuni modelli di gravità quantistica o dimensioni extra prevedono deviazioni dalla RG (polarizzazioni aggiuntive, dispersione o attenuazioni modificate).
- **Spettroscopia di attenuazione:** Il "ronzio" dei buchi neri dopo una fusione può rivelare deviazioni sottili dalla RG.
- **Onde gravitazionali primordiali:** Le increspature del Big Bang potrebbero portare impronte della fisica delle stringhe, rilevabili da futuri osservatori come LISA o il Telescopio Einstein.

Finora, le osservazioni sono coerenti con la RG entro le incertezze attuali, ma una maggiore precisione potrebbe rivelare sorprese.

Cosmologia: L'universo come laboratorio

Il cosmo stesso è l'acceleratore di particelle definitivo.

- **Fondo cosmico a microonde (CMB):** Piccole fluttuazioni mappano l'universo primordiale. Alcuni modelli di stringhe prevedono firme specifiche, come non gaussianità o caratteristiche oscillatorie.
- **Inflazione:** La rapida espansione dell'universo potrebbe essere stata guidata da campi legati alla teoria delle stringhe. Rilevare modi B primordiali nel CMB sarebbe un indizio potente.
- **Ricerche di materia oscura:** I neutralini di SUSY sono i principali candidati per la materia oscura. Esperimenti come XENONnT, LUX-ZEPLIN e PandaX cercano WIMP tramite rinculi nucleari.
- **Assioni:** La teoria delle stringhe prevede anche particelle simili agli assioni, che potrebbero essere rilevate tramite cavità risonanti o osservazioni astrofisiche.

Finora, il cielo è silenzioso. La materia oscura rimane non rilevata, e i dati cosmologici si adattano al modello Λ CDM senza chiare impronte di stringhe.

Stato attuale: Vincoli, non conferme

Decenni di ricerche non hanno confermato SUSY, dimensioni extra o segnali di stringhe. Ma l'assenza di prove non è prova di assenza:

- SUSY potrebbe esistere a scale oltre la portata dell'LHC o in spettri meno evidenti; i risultati nulli finora **favoriscono versioni più finemente regolate ("meno naturali")** se SUSY è vicina alla scala dei TeV.
- Le dimensioni extra potrebbero essere più piccole, più deformate o altrimenti nascoste alle sonde attuali.
- La teoria delle stringhe potrebbe lasciare impronte rilevabili solo nell'universo molto primordiale, accessibili solo attraverso la cosmologia.

Alcune **anomalie di precisione** (ad esempio, la misura del **(g-2)** del muone e alcune tensioni nella **fisica dei sapori**) rimangono **intriganti ma irrisolte**; motivano un continuo scrutinio senza ancora sovvertire l'SM.

Ciò che gli esperimenti hanno fatto è **restringere lo spazio dei parametri**. Ci hanno detto dove SUSY non è, quanto piccole devono essere le dimensioni extra e quanto fortemente la materia oscura può o non può interagire.

La strada davanti

I futuri esperimenti promettono di esplorare più a fondo:

- **LHC ad alta luminosità (HL-LHC):** Raccoglierà $\sim 10\times$ più dati, esplorando SUSY fino a masse più alte e processi rari.
- **Future Circular Collider (FCC-hh):** Proposta per un collisore da 100 TeV, abbastanza potente da esplorare scale energetiche dove potrebbe emergere la fisica GUT.

- **LISA (anni 2030):** Osservatorio di onde gravitazionali basato nello spazio, sensibile ai segnali primordiali dell'universo primordiale.
- **Rivelatori di materia oscura di nuova generazione:** Con sensibilità ai segnali deboli, potrebbero finalmente catturare un WIMP o un assione.

La scienza come viaggio

La storia sperimentale della fisica oltre il Modello Standard non è di fallimento, ma di processo.

- I risultati nulli escludono modelli semplici e affinano le nostre teorie.
- Ogni vincolo ci guida verso quadri più raffinati e predittivi.
- L'assenza di SUSY o dimensioni extra alla scala dei TeV non uccide le idee – le spinge verso nuovi territori.

Proprio come l'esperimento della lamina d'oro di Rutherford ha distrutto il modello del budino di prugne, o LIGO ha dissipato i dubbi sulle onde gravitazionali, la prossima grande scoperta potrebbe arrivare improvvisamente – e cambiare tutto.

Verso una teoria del tutto

Per secoli, la fisica è avanzata attraverso l'unificazione. Newton unificò i cieli e la Terra sotto una legge di gravitazione. Maxwell unificò elettricità e magnetismo. Einstein unificò spazio e tempo. La teoria elettrodebole dimostrò che due forze molto diverse sono aspetti di una sola.

Il prossimo passo è il più audace finora: unificare **le quattro interazioni fondamentali** – forte, debole, elettromagnetica e gravitazionale – in un quadro unico e coerente. Questo è il Santo Graal della fisica: la **Teoria del Tutto (ToE)**.

Perché una ToE è importante

Un'unificazione completa non è solo un'eleganza filosofica; affronta problemi pratici e concettuali profondi:

- **Gravità quantistica:** La relatività generale collassa alla scala di Planck (10^{19} GeV). Solo una teoria quantistica della gravità può spiegare i buchi neri e la singolarità del Big Bang.
- **Naturalità e regolazione fine:** Il problema della gerarchia e il problema della costante cosmologica richiedono una spiegazione più profonda.
- **Parametri del Modello Standard:** Perché le particelle hanno le masse e le cariche che hanno? Perché tre generazioni di quark e leptoni? Una ToE potrebbe spiegare questi misteri.
- **Cosmologia:** La materia oscura, l'energia oscura e l'inflazione potrebbero essere tutte legate alla fisica alla scala dell'unificazione.

Una ToE non unificherebbe solo le forze – unificherebbe le scale, dalle stringhe più piccole della teoria quantistica alle strutture cosmiche più grandi.

Supersimmetria e grande unificazione

La supersimmetria (SUSY), se realizzata in natura, fornisce un trampolino verso una ToE.

- **Problema della gerarchia risolto:** Le sparticole cancellano le correzioni divergenti alla massa del Higgs.
- **Accoppiamenti gauge unificati:** Con SUSY, le forze delle tre forze convergono splendidamente a 10^{16} GeV, suggerendo una **Grande Teoria Unificata (GUT)**.
- **Candidato per la materia oscura:** Il neutralino fornisce una spiegazione naturale per la materia oscura cosmica.

Le GUT ispirate a SUSY (come SU(5), SO(10) o E_6) immaginano che a energie ultra-alte, quark e leptoni si unifichino in multipleti più grandi, e le forze si fondono in un unico gruppo gauge.

Ma SUSY non è ancora apparsa negli esperimenti. Se esiste solo a scale oltre la nostra portata, il suo potere unificante potrebbe rimanere allettante ma nascosto.

Teoria delle stringhe: Gravità quantistica e gravitino

La teoria delle stringhe va oltre. Invece di rattoppare il Modello Standard, riscrive le fondamenta:

- **Stringhe, non punti:** Tutte le particelle sono vibrazioni di minuscole stringhe.
- **Il gravitino emerge naturalmente:** L'eccitazione senza massa con spin 2 è inevitabile, il che significa che la gravità quantistica è integrata.
- **Unificazione:** Diversi modi di vibrazione producono tutte le particelle conosciute – quark, leptoni, bosoni gauge, Higgs – in un unico quadro.
- **Dimensioni extra:** La teoria delle stringhe richiede 10 dimensioni dello spazio-tempo; la teoria M ne richiede 11, con dimensioni nascoste compattate o deformate.

In questa visione, l'unificazione non è un caso – è geometria. Le forze differiscono perché le stringhe vibrano in modi diversi, modellati dalla topologia delle dimensioni extra.

Teoria M e mondi di brane

La scoperta che le cinque teorie delle stringhe sono connesse da dualità ha portato alla teoria M, un quadro ancora più grandioso:

- Include stringhe, membrane e brane di dimensione superiore.
- Suggerisce che il nostro universo potrebbe essere una 3-brana incorporata in un volume di dimensione superiore.
- Offre spiegazioni naturali per cui la gravità è più debole (si diffonde nelle dimensioni extra) e come potrebbero esistere più universi in un “multiverso”.

La teoria M è ancora incompleta, ma rappresenta il passo più ambizioso mai tentato verso una ToE.

Altri percorsi verso la gravità quantistica

La teoria delle stringhe e la teoria M non sono gli unici percorsi. I fisici stanno esplorando molteplici quadri, ciascuno con punti di forza diversi:

- **Gravità quantistica a loop (LQG):** Cerca di quantizzare direttamente lo spazio-tempo, prevedendo che lo spazio è discreto alla scala di Planck.
- **Sicurezza asintotica:** Suggerisce che la gravità potrebbe comportarsi bene ad alte energie grazie a un punto fisso non banale.
- **Triangolazioni dinamiche causali (CDT):** Costruisce lo spazio-tempo da blocchi di costruzione geometrici semplici.
- **Teoria dei twistors e amplituhedri:** Nuovi quadri matematici che reimmaginano lo spazio-tempo e le ampiezze di scattering.

Sebbene nessuno rivaleggi ancora con l'ampiezza unificatrice della teoria delle stringhe, esemplificano la ricchezza della ricerca.

Il ruolo dell'esperimento

Una ToE deve essere infine testabile. Sebbene la scala di Planck sia ben oltre gli esperimenti attuali, i fisici cercano prove indirette:

- **Collisori:** Particelle SUSY, dimensioni extra o micro-buchi neri.
- **Test di precisione:** Deviazioni dalla legge di Newton a scale brevi.
- **Onde gravitazionali:** Polarizzazioni esotiche o echi da dimensioni superiori.
- **Cosmologia:** Impronte dell'inflazione, candidati per la materia oscura o assioni previste dalla teoria delle stringhe.

Finora, la ToE rimane fuori portata, ma ogni risultato nullo pone le possibilità.

La bellezza e la sfida

Una vera ToE non unificherebbe solo la fisica – unificherebbe la **conoscenza umana**. Collegerebbe la meccanica quantistica e la relatività, il micro e il macro, la particella e il cosmo.

Tuttavia, affronta un paradosso: la scala stessa in cui avviene l'unificazione potrebbe essere per sempre fuori dalla portata sperimentale. Un collisore da 100 TeV esplora solo una frazione del percorso verso la scala di Planck. Potremmo dover fare affidamento sulla cosmologia, la coerenza matematica o le firme indirette.

Il sogno rimane vivo grazie alla profonda eleganza dei quadri. Come ha notato Witten, la teoria delle stringhe non è solo "un insieme di equazioni" ma "un nuovo quadro per la fisica".

La scienza come metodo, non dogma

La ricerca di una ToE non riguarda il dichiarare la teoria delle stringhe, SUSY o qualsiasi idea singolare come "vera". Riguarda il **metodo scientifico**:

- Identificare crepe nelle teorie esistenti.
- Proporre nuovi quadri audaci.
- Testarli contro la realtà, scartandoli o raffinandoli secondo necessità.

La storia è lungi dall'essere finita. Ma è proprio questa apertura – il rifiuto di trattare qualsiasi teoria come sacra – che rende la fisica una scienza viva, non un dogma.

L'orizzonte davanti

Il prossimo secolo di fisica potrebbe rivelare:

- Prove di supersimmetria o delle sue alternative.
- Dati cosmologici che confermano o smentiscono le previsioni delle stringhe.
- Una riformulazione più profonda dello spazio-tempo stesso.

O forse la vera ToE è qualcosa che nessuno ha ancora immaginato.

Ma la ricerca stessa – l'impulso a unificare, spiegare, vedere la natura nella sua interezza – è parte dell'umanità tanto quanto le equazioni stesse.

Riferimenti e letture aggiuntive

Supersimmetria e grande unificazione

- Wess, J., & Bagger, J. (1992). *Supersymmetry and Supergravity*. Princeton University Press.
- Baer, H., & Tata, X. (2006). *Weak Scale Supersymmetry: From Superfields to Scattering Events*. Cambridge University Press.
- Georgi, H., & Glashow, S. L. (1974). "Unity of All Elementary-Particle Forces." *Physical Review Letters*, 32(8), 438.

Teoria delle stringhe e teoria M

- Green, M. B., Schwarz, J. H., & Witten, E. (1987). *Superstring Theory* (Vol. 1 & 2). Cambridge University Press.
- Polchinski, J. (1998). *String Theory* (Vol. 1 & 2). Cambridge University Press.
- Witten, E. (1995). "String Theory Dynamics in Various Dimensions." *Nuclear Physics B*, 443(1), 85–126.
- Becker, K., Becker, M., & Schwarz, J. H. (2006). *String Theory and M-Theory: A Modern Introduction*. Cambridge University Press.

Gravità quantistica a loop e alternative

- Rovelli, C. (2004). *Quantum Gravity*. Cambridge University Press.
- Thiemann, T. (2007). *Modern Canonical Quantum General Relativity*. Cambridge University Press.
- Ambjørn, J., Jurkiewicz, J., & Loll, R. (2005). "Reconstructing the Universe." *Physical Review D*, 72(6), 064014.

Frontiere sperimentali

- Aad, G., et al. (ATLAS Collaboration). (2012). "Observation of a New Particle in the Search for the Standard Model Higgs Boson." *Physics Letters B*, 716(1), 1–29.
- Chatrchyan, S., et al. (CMS Collaboration). (2012). "Observation of a New Boson at a Mass of 125 GeV." *Physics Letters B*, 716(1), 30–61.
- Abbott, B. P., et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). (2016). "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger." *Physical Review Letters*, 116(6), 061102.

Racconti popolari accessibili

- Greene, B. (1999). *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*. W. W. Norton.
- Randall, L. (2005). *Warped Passages: Unraveling the Mysteries of the Universe's Hidden Dimensions*. Harper Perennial.
- Rovelli, C. (2016). *Seven Brief Lessons on Physics*. Riverhead Books.
- Wilczek, F. (2008). *The Lightness of Being: Mass, Ether, and the Unification of Forces*. Basic Books.