
FORZE FONDAMENTALI E UNIFICAZIONE *

SOMMARIO

1. Gli inizi: gravità terrestre e celeste
2. Elettromagnetismo classico
3. Meccanica Quantistica: atomi e nuclei
4. Modello Standard: particelle elementari e loro interazioni elettro-deboli e forti
5. Relatività Generale: problemi con la Meccanica Quantistica, stringhe e M-teoria
6. Cosmologia, inflazione e CMB

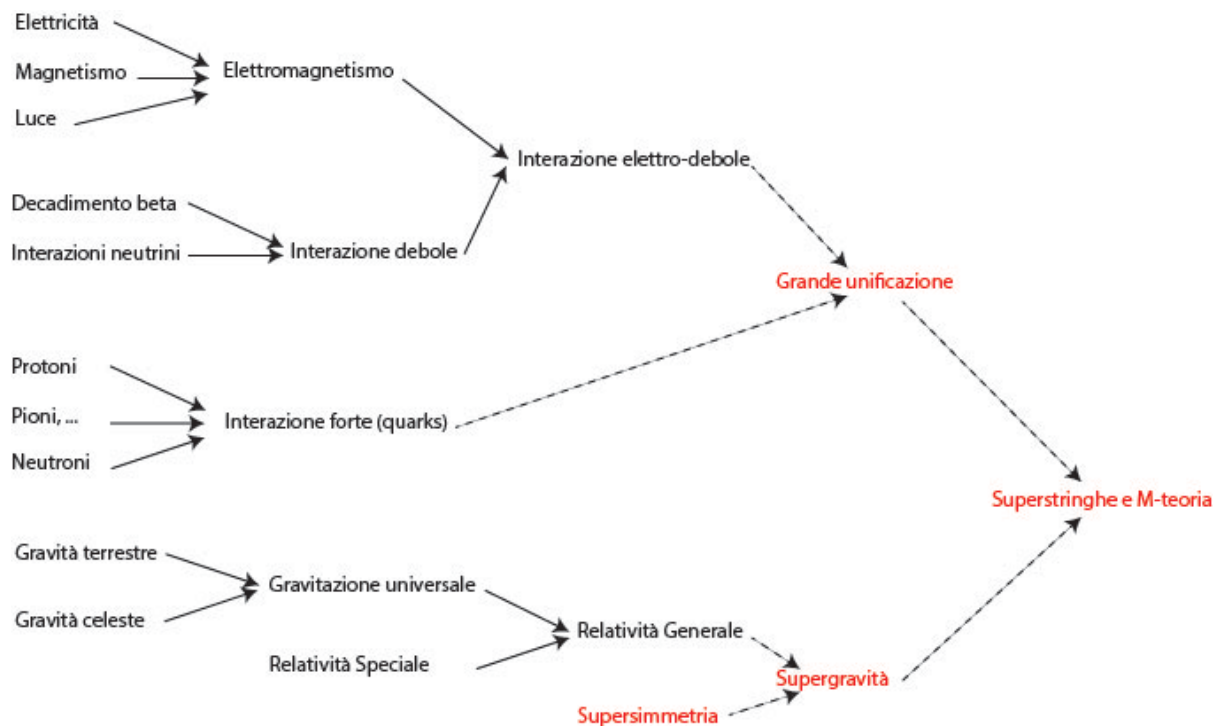


Fig. 1 – Unificazione delle interazioni fondamentali (in rosso le teorie in attesa di verifiche sperimentali)

* Augusto Sagnotti, Professore Ordinario di Fisica Teorica, Scuola Normale Superiore e INFN, Piazza dei Cavalieri 7, 56126 Pisa.

1. Gli inizi: gravità terrestre e celeste

Gli inizi della Fisica moderna vengono comunemente associati ai contributi di Galileo Galilei. In questa discussione, dedicata all'emergenza del concetto di *forza fondamentale*, all'identificazione di gravità, elettromagnetismo e altre forze e allo stato attuale del progetto di una loro unificazione (Fig. 1), basterà ricordare brevemente il suo contributo alla definizione del metodo di ricerca scientifica. Si tratta di una sapiente alternanza di esperimenti e tentativi di inquadrarli in leggi matematiche, teorie appunto, per estrarne nuove predizioni da sottoporre al vaglio di nuovi esperimenti, che ha regolato per quattro secoli lo sviluppo della Fisica. Questo procedimento richiedeva, e richiede tuttora, l'identificazione di contesti semplificati in cui i sistemi oggetto di indagine siano dominati da pochi gradi di libertà. Nella storia che ci accingiamo a narrare questa strada porta naturalmente dai corpi macroscopici ad atomi, nuclei e particelle elementari, e in questo contesto si può ben parlare di riduzionismo. Ma mi preme sottolineare che la riduzione a pochi gradi di libertà accompagna la comprensione di ogni fenomeno fisico, anche perché aiuta la mente umana a visualizzarlo e consente alla Matematica di darne conto in modo non eccessivamente complicato. La stessa problematica si ripresenta in sistemi con grandissimi numeri di particelle, per i quali la Termodinamica coinvolge infatti pochi concetti globali come temperatura, pressione e volume.

Nello studio dei gravi su piani inclinati, l'accurata levigazione degli stessi consentì a Galilei di evidenziare il moto uniformemente accelerato, grazie all'ulteriore accortezza di servirsi di corpi piccoli, quelli che si possono ben schematizzare come *punti materiali*. Ad esempio, la salita di una carriola su una tavola inclinata è favorita dalla riduzione dell'effettiva forza di gravità, parte della quale viene appunto assorbita dalla tavola, ma l'essenza del fenomeno si può ben comprendere schematizzando la carriola con un singolo punto materiale.

Isaac Newton, come è noto, fece tesoro dei risultati di Galilei. La sua famosa equazione dinamica

$$m \mathbf{a} = \mathbf{F}$$

dà conto, in linea di principio, di tutta la dinamica macroscopica in un contesto deterministico. Qui m è la massa della particella e la forza \mathbf{F} è tutto quanto dà luogo ad accelerazione. Questo è vero in particolare per la forza di gravità nei pressi della superficie terrestre. In questo caso $\mathbf{F} = m \mathbf{g}$, e quindi punti materiali di diverse masse hanno la stessa accelerazione. Questa forma di universalità è una manifestazione del "principio di equivalenza" e, come vedremo, avrà un ruolo chiave nella Relatività Generale.

La legge di Newton contiene una prima realizzazione di un legame molto profondo tra *simmetrie continue* e *leggi di conservazione* di opportune "cariche" che fu compreso appieno, nei primi anni del Novecento, dalla matematica tedesca Emmy Noether. La qualifica è molto importante: una trasformazione di simmetria può essere in generale discreta o continua, e le leggi di conservazione emergono solo nel secondo caso. Esempi di trasformazioni discrete sono

la parità, corrispondente all'inversione di tutte le coordinate spaziali, e l'inversione temporale, mentre le rotazioni nello spazio sono un classico esempio di trasformazioni continue. In un sistema fisico invariante sotto rotazioni si conserva il momento angolare totale, mentre ad esempio in un sistema invariante per traslazioni temporali si conserva l'energia.

Newton procedette ben oltre, proponendo una legge per l'attrazione gravitazionale tra due punti materiali: una forza diretta lungo la loro congiungente e d'intensità

$$F = \frac{G m_1 m_2}{r^2}$$

Questa semplice legge di forza è regolata dalla costante universale G , è proporzionale al prodotto delle masse ed è inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza. Newton derivò da questa espressione le leggi di Keplero dei moti planetari, nei quali sole e pianeti sono ben schematizzati come punti materiali. Inoltre, riuscì a collegare g , l'intensità dell'accelerazione di gravità sulla superficie terrestre, alla costante G , alla massa M_T della terra e al suo raggio R_T . La relazione risultante,

$$g = \frac{G M_T}{R_T^2}$$

riconduce la gravità terrestre a quella celeste, e può ben dare un'idea di ciò che i fisici intendono per unificazione. Di conseguenza, la sola gravitazione universale resta di diritto nel catalogo delle interazioni fondamentali.

2. Elettromagnetismo classico

Nel XIX secolo fece la sua piena comparsa, in un gran numero di ricerche, il secondo tipo di interazione presente in Natura che si manifesta a scale macroscopiche. Questo avviene in fenomeni apparentemente complicati e diversi, che comprendono l'elettrizzazione per strofinio, il comportamento di circuiti elettrici in corrente continua, i magneti permanenti, le interazioni magnetiche tra correnti, e anche l'induzione elettromagnetica che è alla base dei motori elettrici. Il primo risultato di rilievo, in questo senso, fu l'identificazione della forza di Coulomb tra due cariche elettriche puntiformi in quiete, la cui intensità

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

rivela chiaramente una suggestiva analogia con la formula di Newton che abbiamo appena descritto. Vedremo a breve che questo riflette proprietà profonde e interessanti.

I fondamentali esperimenti del fisico inglese Michael Faraday e altri sono riassunti in un insieme di equazioni di rara eleganza, note come equazioni di Maxwell:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 4 \pi \rho, \nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \nabla \times \mathbf{B} = \frac{4 \pi}{c} \mathbf{J} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

Mi limiterò qui ad osservare che le quantità coinvolte, oltre alla velocità della luce c , sono il campo elettrico \mathbf{E} , il campo magnetico \mathbf{B} , la densità di carica elettrica ρ e la densità di corrente elettrica \mathbf{J} . Alla loro base troviamo il concetto nuovo e sottile, ma molto importante, di campo. I campi elettrici e magnetici sono generati da cariche e correnti, e a loro volta determinano le forze su altre cariche tanto tenui da non disturbarle. Il punto sul quale vorrei richiamare l'attenzione è l'ultimo termine presente nell'ultima equazione. Il fisico scozzese James Clerk Maxwell lo introdusse *per pure ragioni di consistenza matematica*, e i suoi effetti sono sotto i nostri occhi. L'aggiunta di questo termine porta infatti alla propagazione per onde nello spazio vuoto, alla velocità della luce c , di tutti i fenomeni elettromagnetici. Questi includono anche la luce visibile in una piccola porzione dello spettro di lunghezze d'onda, e pertanto si può ben dire che la luce del sole raggiunge la terra proprio grazie al termine aggiuntivo!

3. Meccanica Quantistica: atomi e nuclei

La teoria di Newton, e ancor più l'eleganza delle equazioni di Maxwell, diedero ai nostri antenati di fine Ottocento l'illusione che tutti i fenomeni fisici fossero ormai compresi. I tentativi di applicare queste leggi al mondo microscopico causarono però un brutto risveglio. Il primo problema che appariva insolubile aveva a che fare, al netto delle schematizzazioni, con il colore dei corpi caldi. Se mettiamo un tronco di legna sul fuoco, sappiamo bene che quando inizia ad ardere diventa rossastro e poi tende al biancastro. Nel passare dal rossastro al biancastro la lunghezza d'onda dominante della luce emessa deve quindi diminuire, in corrispondenza con l'aumento della temperatura. Il fisico tedesco Max Planck riuscì nel 1900 a dar conto di questo fenomeno, a fronte del quale la Fisica Classica, ovvero la combinazione delle teorie di Newton e Maxwell con la Termodinamica, impazziva, ma al prezzo di introdurre un'altra costante fondamentale, h . Questa costante, detta conseguentemente "costante di Planck", non segnala una nuova forza, ma nuove leggi della dinamica che solo nel mondo macroscopico si riducono alla legge di Newton. La nuova dinamica è detta Meccanica Quantistica, e portarla alla sua forma attuale ha richiesto l'intera prima metà del secolo scorso e brillanti contributi di moltissimi scienziati.

Le novità concettuali più importanti della Meccanica Quantistica discendono da un'analisi critica dei processi di misura nel mondo microscopico. Questa implica ad esempio il famoso principio di indeterminazione di Heisenberg,

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

che fissa un limite inferiore per la precisione di misure simultanee di posizione e quantità di moto per una particella, soppiantando l'idea classica di punto materiale. In tal modo le particelle acquistano attributi delle onde, e viceversa le onde elettromagnetiche acquistano attributi delle particelle. Solo le probabilità di possibili eventi, e non più le traiettorie, restano oggetto di predizione, insieme a caratteristiche generali come i possibili spettri delle energie disponibili. La costante h ha conseguenze drammatiche sulla nostra comprensione della Natura:

come notò ben presto il fisico danese Niels Bohr, essa implica la stabilità degli atomi e la natura discreta degli spettri di emissione e assorbimento dei gas, in accordo con una serie di sorprendenti osservazioni di fine Ottocento. Tradotto in termini meno tecnici, un gas può emettere luce, ma questa porta il suo sigillo, nel senso che se la luce viene analizzata con opportuni strumenti essa rivela la presenza di speciali lunghezze d'onda o *linee spettrali*.

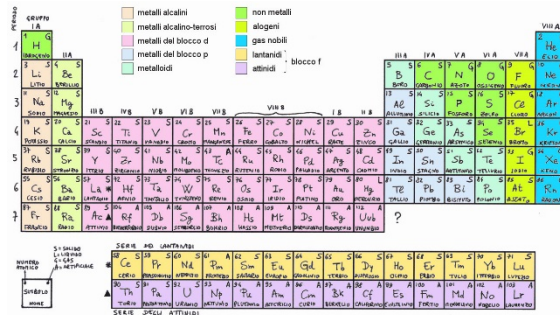


Fig. 2 – Tavola periodica degli elementi

Con l'aggiunta del *principio di esclusione* formulato dal fisico tedesco Wolfgang Pauli, che introduce una sorta di effettiva repulsione a corto raggio tra elettroni e altri *fermioni* se *identici*, la Meccanica Quantistica fornisce un'elegante giustificazione concettuale della tavola periodica (Fig. 2). Gli atomi contengono nella loro zona centrale dei nuclei, tanto piccoli rispetto al tutt'uno quanto una pallina da tennis rispetto ad un campo di calcio. I nuclei sono carichi positivamente, in quanto contengono un certo numero di particelle pesanti di carica positiva, dette *protoni*, oltre ad alcune particelle neutre dette *neutroni*. Mi limiterò qui a dire, al costo di essere impreciso, che gli elettroni che compensano la carica dei protoni riempiono orbitali disponibili intorno al nucleo, iniziando da quello di energia inferiore, in accordo con il "principio di Pauli". La struttura degli orbitali occupati più esterni determina le proprietà chimiche degli elementi.

Una nuova formulazione della Meccanica Quantistica, equivalente ma molto suggestiva, è emersa negli anni Quaranta del secolo scorso grazie al fisico americano Richard Feynman. Essa associa ad una particella tutti i possibili cammini, e ad ognuno di essi un numero complesso $a+ib$, dove a e b sono due numeri reali e i è l'unità immaginaria. Le probabilità della Meccanica Quantistica emergono in tal modo da una somma su questi cammini, che includono la traiettoria classica della teoria di Newton.

Le speranze di giungere, nello studio dei nuclei, ad un livello di comprensione simile a quello ottenuto per gli atomi si rivelarono ben presto poco realistiche. Anzitutto, questi sistemi coinvolgono interazioni molto intense tra molte particelle, mentre negli atomi dominano quelle tra il nucleo e i singoli elettroni. Di conseguenza, le forze che tengono insieme i nuclei appaiono estremamente complicate. Inoltre i due tipi di particelle presenti, *protoni* e *neutroni*, si sono rivelati dei composti di altre particelle elementari dette *quarks*. Protoni e neutroni interagiscono tra loro, fortemente e in numeri consistenti, nei nuclei, e sono tenuti insieme da un nuovo tipo di forza. La nuova forza è detta *interazione forte*, è circa cento volte più intensa delle forze

elettrostatiche ma si manifesta solo a distanze confrontabili con le dimensioni dei nuclei, che tiene insieme contrastando la repulsione elettrostatica tra i protoni. Quando i protoni diventano un centinaio o poco più, infatti, la repulsione elettrostatica prevale, i nuclei stabili cessano di esistere e la tavola di Medeleev termina. Esistono inoltre trasformazioni dei nuclei, poco frequenti, che coinvolgono l'emissione di nuove particelle leggere ed elusive, dette *neutrini*, la cui esistenza fu ipotizzata da Pauli. Questo fenomeno venne associato da Enrico Fermi ad una nuova forza fondamentale molto meno intensa, detta appunto *interazione debole* (Fig. 3).

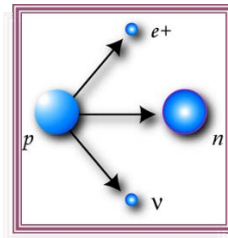


Fig. 3 – Un protone (p) si trasforma in un neutrone (n), un positrone (e^+) e un neutrino (ν).

4. Modello Standard: particelle elementari e loro interazioni elettro-deboli e forti

Galilei identificò un primo principio fondamentale della dinamica, i cui effetti sono giornalmente sotto i nostri occhi: nulla distingue due sistemi di riferimento “inerziali” in moto relativo rettilineo e uniforme. Grazie a questo principio, ad esempio, riusciamo a spostarci agevolmente su aerei che viaggiano a quasi 1000 Km/h, senza avvertirne il movimento in tratti privi di turbolenza! Le equazioni di Maxwell sembrano violarlo, a meno che le regole di trasformazione tra due sistemi inerziali non siano profondamente alterate nel caso di velocità prossime a quella della luce. Ad esempio, se avanziamo a velocità ordinarie lungo un treno con velocità v e il treno avanza con velocità V , un osservatore a terra ci vede procedere con velocità $v+V$. Ebbene, mettendo a frutto una serie di contributi precedenti, Einstein si rese conto che la formula corretta è in realtà

$$\frac{v + V}{1 + \frac{vV}{c^2}}$$

Questa espressione si riduce al risultato precedente per velocità molto minori di c (che è circa un miliardo di Km/h!), ma è semplice verificare che, se noi (o il treno) ci muovessimo alla velocità della luce, o in altri termini se v o V fosse uguale a c , il risultato sarebbe sorprendentemente ancora c . La velocità della luce costituisce pertanto una barriera impenetrabile, e può essere raggiunta solo da particelle di massa nulla. Un'altra conseguenza di questa analisi è la famosa relazione che lega la massa e l'energia di riposo di una particella

$$E_0 = m c^2$$

e viene spesso associata, in modo inquietante, alle esplosioni nucleari. Queste e altre modifiche racchiuse nella Relatività Speciale rendono le equazioni di Maxwell perfettamente compatibili con il principio di Galilei, e mescolando spazio e tempo tra loro nel collegare diversi sistemi di

riferimento in un certo senso li unificano nello spazio-tempo. Esse predicono anche una serie di altri fenomeni apparentemente esotici che sono stati verificati con altissima precisione.

La Meccanica Quantistica porta ad una riproposizione, in un contesto onda-particella, dei punti materiali, che in questa nuova incarnazione prendono il nome di *quanti*. Il quanto di luce è detto *fotone*, e i fotoni sono identici tra loro (come tutte le altre particelle di uno stesso tipo) a parte pochi attributi dinamici. Inoltre, essi sono *bosoni*, e come tali nulla osta che si addensino, e sorgenti luminose macroscopiche ce ne inviano numeri talmente elevati che la natura granulare del fenomeno emerse solo nei primi anni del secolo scorso. I fotoni sono particelle di massa nulla, e questo implica sia la legge di Coulomb che la propagazione delle onde elettromagnetiche alla velocità c . Le interazioni forti e deboli sono invece a corto raggio d'azione a causa di diverse proprietà del vuoto. I loro effetti, limitati a distanze dell'ordine delle dimensioni dei nuclei o anche molto inferiori, sono responsabili del fatto che una loro chiara identificazione risale solo agli anni Settanta del secolo scorso. Le forze forti sono in realtà più intense e complesse, e danno luogo ad un complicato zoo di particelle composte instabili che si disintegrano rapidamente. I loro effetti si avvertono solo a brevissime distanze a causa di un sottile effetto, detto *confinamento*, che rende impossibile produrre individualmente le particelle elementari che ne portano la carica. Queste comprendono i *quarks* e otto portatori di carica, simili sotto certi aspetti ai fotoni, che vengono detti *gluoni*. Le forze deboli sono più semplici da questo punto di vista (anche se violano parità e inversione temporale) perché meno intense. La loro natura a corto raggio riflette la presenza nel vuoto di un condensato, una sorta di melassa cosmica che rallenta ogni particella che la avverte, la cui esistenza è stata rivelata in modo indiretto dalla scoperta del bosone di Higgs al CERN nel 2012. Le particelle elementari note sono anche accompagnate da corrispondenti antiparticelle, con uguale massa e carica opposta (il positrone, antiparticella dell'elettrone, fu scoperto per primo negli anni Trenta del secolo scorso). Tutte queste particelle si presentano in tre famiglie, che si ripetono identiche ma con masse crescenti. Esse riempiono le caselle del Modello Standard delle interazioni deboli, forti ed elettromagnetiche in modo simile, sotto certi aspetti, a quanto avviene per gli atomi e la tavola periodica (Fig. 4). I portatori di forza, oltre al fotone, sono i *bosoni intermedi* W e Z scoperti al CERN nel 1984, gli otto gluoni responsabili dell'interazione forte, e il *gravitone*. Come vedremo, quest'ultima particella ha un ruolo molto importante, ma a differenza delle altre non è stata ancora rivelata.

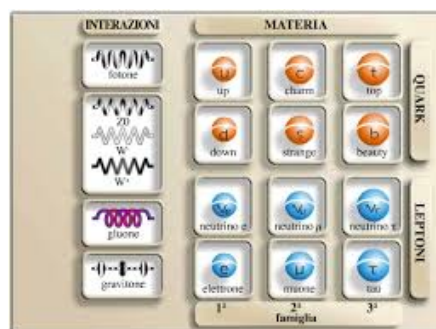


Fig. 4 – Particelle del Modello Standard

Mi preme sottolineare che si parla in realtà di interazioni, e non di forze, perché questo concetto è più generale. Come abbiamo visto (Fig. 3), infatti, in un processo microscopico alcune particelle possono disintegrarsi e altre possono materializzarsi. Fluttuazioni di quantità di moto si traducono infatti, a volte, in fluttuazioni di energia dell'ordine di mc^2 : nulla osta, in Meccanica Quantistica, che una particella di massa m si dematerializzi, se altre prendono con sé la sua carica elettrica e altri attributi.

5. Relatività Generale: problemi con la Meccanica Quantistica, stringhe e M-teoria

La Relatività Generale resta, ad un secolo dalla sua scoperta, un grande trionfo della Fisica Teorica e dei principi di simmetria. La sua struttura sublima scoperte che hanno segnato il XIX secolo, e che hanno coinvolto in prima linea matematici tedeschi del calibro di Karl Friedrich Gauss e Bernard Riemann oltre agli italiani Gregorio Ricci-Curbastro, Tullio Levi-Civita e Luigi Bianchi. Le sue equazioni legano il comportamento universale delle particelle in un campo gravitazionale alla natura dello spazio-tempo, che si deforma come un tappeto elastico in presenza di massa (Fig. 5). Esse contengono una serie di predizioni straordinarie, tra cui l'esistenza delle onde gravitazionali che è stata confermata di recente. Sorprendentemente, la struttura di queste equazioni esibisce anche profonde analogie con le equazioni di Maxwell, che sono più semplici solo perché il principio di simmetria che sottende ad esse, e anche alla conservazione della carica elettrica, è più semplice. Negli anni Cinquanta del secolo scorso queste analogie hanno condotto ad una generalizzazione dell'elettromagnetismo, nota come teoria di Yang-Mills, che è alla base delle interazioni deboli e forti. I loro "fotoni" sono appunto i bosoni intermedi e i gluoni. Si parla anche, a volte, di unificazione tra interazioni deboli e elettromagnetiche, perché le due vengono ricondotte, in parte, ad un principio comune di questo tipo, mentre un principio simile ma ben distinto regola le interazioni forti. Si parla invece di Grande Unificazione nei casi in cui vengono proposti principi comuni per le tre interazioni deboli, forti ed elettromagnetiche. Queste ultime teorie hanno un'implicazione drammatica: il decadimento del protone, e quindi di tutta la materia che popola l'Universo. Ma si tratta al momento di speculazioni, e molte ricerche hanno dato, per ora, risultati negativi.



Fig. 5 – La gravità curva lo spazio-tempo

Cerchiamo ora di illustrare la difficoltà che si incontra se si cerca di combinare la Relatività Generale con la Meccanica Quantistica. Anzitutto, l'analogia tra la formula di Coulomb e quella di Newton implica che le corrispondenti particelle, dette *gravitoni*, hanno

massa nulla. Inoltre ad alte energie le interazioni gravitazionali, se descritte dalla Relatività Generale e dalla Meccanica Quantistica, divengono estremamente intense. Questo risultato segue dall'analogia con la legge di Coulomb e dalla relazione di Einstein tra massa ed energia:

$$Q^2 \rightarrow G m^2 \rightarrow G \left(\frac{E}{c^2} \right)^2$$

Il secondo passo riflette il fatto che, in una teoria completa, le masse (e quindi le energie di riposo) saranno in generale sostituite dalle energie di particelle in moto generico. La conseguenza di questo ragionamento semplice e ingenuo è però rilevante. Le interazioni gravitazionali tra particelle, trascurabili alle energie in gioco nei fenomeni atomici o nucleari, diventano in tal modo di intensità confrontabile con quelle elettromagnetiche all'energia di Planck. Si tratta di un'energia enorme, pari a decine di miliardi di miliardi di volte l'energia di riposo di un atomo di idrogeno, ma il problema appare comunque serio. Queste difficoltà hanno anche condotto alcuni a proporre che la Meccanica Quantistica non si applichi in questi termini alla gravità, ma questa opzione sembra del tutto innaturale.

La rapida crescita d'intensità di cui sopra implica, in una formulazione sui cammini à la Feynman, la presenza di singolarità molto difficili da gestire, a meno che esse non si elidano, quasi per magia, nella somma. Questo crea profondi dubbi sulla compatibilità della Meccanica Quantistica con la gravità, e ha portato negli ultimi quarant'anni ad una teoria molto ambiziosa nota come *Teoria delle Stringhe*. Brevemente, si abbandonano le particelle come enti fondamentali sostituendole con piccolissime cordicelle, che interagiscono tra loro in modo meno efficiente ad altissime energie (Fig. 6). Ma una volta introdotte le cordicelle, le teorie risultanti, note come *superstringhe*, richiedono che il nostro Universo contenga altre sei dimensioni spaziali, tanto piccole da essere precluse sia ai nostri sensi che ai più sofisticati strumenti di misura di cui disponiamo.

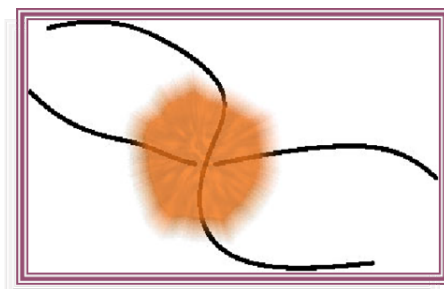


Fig. 6 – Ad altissime energie le stringhe interagiscono in modo meno intenso delle particelle

Esiste un'analogia tra questo fenomeno tanto remoto e un'esperienza comune: quando un'auto entra in galleria la radio perde il segnale, e questo avviene semplicemente perché la sua lunghezza d'onda è maggiore dell'apertura della galleria. Allo stesso modo, poiché le particelle si comportano come onde, ulteriori dimensioni più piccole delle lunghezze d'onda delle particelle che riusciamo a produrre restano inaccessibili ad ogni nostro strumento.

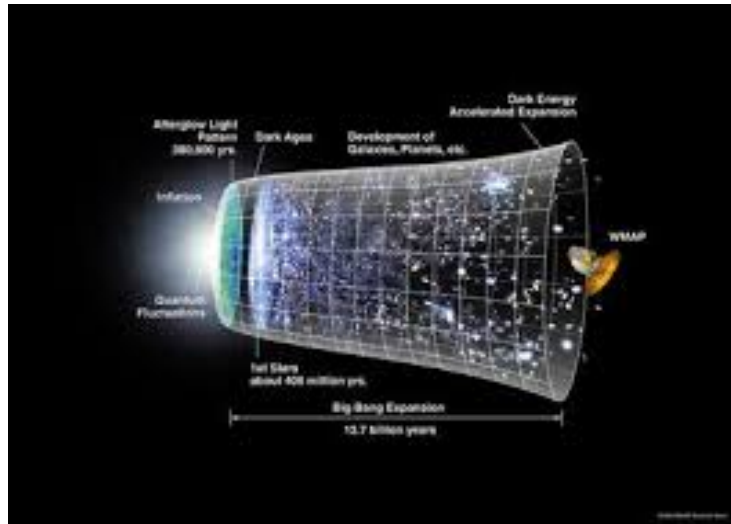


Fig. 7 – Rappresentazione schematica dell'evoluzione cosmologica

Due ingredienti fondamentali di questa storia sono un'importante simmetria nota come *supersimmetria*, in grado di connettere fermioni e bosoni in Fig. 4, e la sua elegante combinazione con la gravità, detta *supergravità*, che definisce il comportamento di queste superstringhe al di sotto dell'energia di Planck. Le ulteriori dimensioni non sono però l'unica complicazione, perché queste teorie coinvolgono anche membrane di diverse dimensioni, uno zoo di oggetti estesi che fluttuano in un vuoto con molte dimensioni. Un grande passo avanti è stato compiuto con l'evidenza di un unico principio che sottende a tutte queste costruzioni, detto M-teoria e la cui identificazione è dovuta in gran parte al fisico americano Edward Witten. Purtroppo si tratta di un principio unico ma molto elusivo, tanto che lo stesso numero totale di dimensioni, dieci o undici, non è del tutto definito. Abbiamo inoltre le equazioni di questa incredibile teoria, ma solo in approssimazioni che non consentono di estrarne informazioni molto dettagliate. Peraltro, anche se le equazioni sono uniche, esiste un'infinità di modi di collegarle al nostro mondo a quattro dimensioni, per cui una "teoria del tutto", paradossalmente, non sembra generare predizioni univoche e verificabili sul nostro Universo.

Lo sviluppo tumultuoso della Fisica nel Novecento ha portato ad esperimenti sempre più complessi, sofisticati, costosi e lunghi, e ad un'inevitabile separazione tra fisici teorici e sperimentali. Anche per questo motivo servirà tempo, molto lavoro e molta umiltà per chiarire se le idee straordinarie che sottendono a queste costruzioni, che hanno già stimolato sviluppi profondi e inattesi in Matematica, meritano anche un posto tra le leggi della Fisica.

6. Cosmologia, inflazione e CMB

Vorrei concludere con un cenno sull'Universo e la sua evoluzione, ovvero sulla Cosmologia (Fig. 7). Anzitutto, è proprio la natura discreta degli spettri atomici, alla quale ho accennato in precedenza, che indica che le altre galassie si allontanano da noi. Le loro stelle emettono luce che ne identifica i componenti, ma se questa viene analizzata si vede che le sue righe spettrali sono "spostate verso il rosso", ovvero corrispondono a lunghezze d'onda maggiori di quelle

che troveremmo, per gli stessi elementi, sulla terra. È una sorta di effetto Doppler cosmico, che presenta analogie con quanto si può verificare nella comune esperienza: il fischio emesso da un treno che si allontana appare infatti più grave di quello che riceveremmo se fosse fermo. Il risultato fornisce quindi un'importante evidenza dell'espansione dell'Universo.

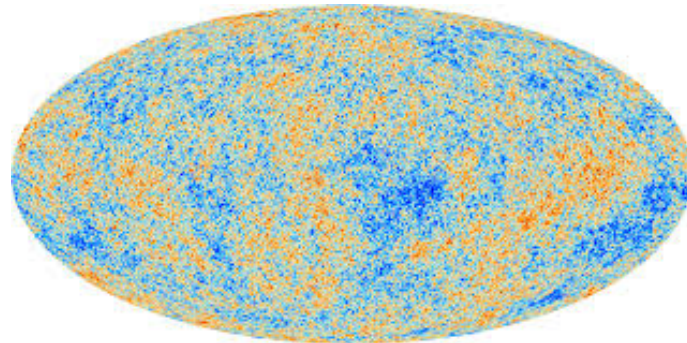


Fig. 8 – Distribuzione angolare delle piccole irregolarità del CMB.

Le equazioni della Relatività Generale ci consentono di seguire l'evoluzione a ritroso nel tempo, e identificano un'epoca in cui tutto era più denso e caldo, al punto tale che gli atomi ionizzati formavano una salsa che intrappolava la luce. In seguito, quando la temperatura si è ridotta, questa luce primordiale ha iniziato a propagarsi liberamente, e oggi ci perviene come un fondo cosmico a microonde, o *CMB*. Questa radiazione fossile, ad una temperatura di appena 2.7 gradi sopra lo zero assoluto (ovvero di circa 270 gradi sotto lo zero Celsius), è stata scoperta quasi per caso alla fine degli anni Sessanta del secolo scorso. Ci giunge in modo essenzialmente identico da tutte le direzioni, consistentemente con l'isotropia e l'omogeneità che associamo all'Universo, a parte piccolissime irregolarità sulle quali tornerò a breve (Fig. 8). Procedendo ancora a ritroso si incontra una singolarità, detta a volte Big Bang, che segna l'origine di questa evoluzione durata circa 14 miliardi di anni. Non si capisce perché radiazione con storie diverse, proveniente da punti in direzioni molto diverse che apparentemente non sono mai venuti in contatto, debba comportarsi in modo tanto regolare.

Questa difficoltà viene oggi superata invocando un'opzione garantita dalla Relatività Generale. Poiché la gravità è una forza attrattiva, l'espansione sembrerebbe inevitabilmente decelerata, come il moto di un sasso lanciato verticalmente che rallenta a causa dell'attrazione terrestre. Einstein si accorse però ben presto che la Relatività Generale consente anche un effetto repulsivo, ottenuto introducendo nelle equazioni un nuovo termine detto *costante cosmologica*. Invocando peculiarità del vuoto, viene ipotizzato che un tale effetto repulsivo si sia innescato nei primi istanti dopo il big Bang, dando luogo ad una vorticoso accelerazione che prende il nome di *inflazione* ma lasciando presto il passo ad un'espansione decelerata. Questa teoria associa tutto l'Universo oggi osservabile ad una regione in origine molto piccola, i cui punti sono stati in contatto causale, amplificata oltremodo dalla fase inflazionaria. Questo passo elimina una serie di difficoltà, suscita alcuni interrogativi profondi, ma conduce anche ad una predizione che ha trovato una conferma importante in studi recenti del CMB. Vorrei

concludere descrivendo brevemente questo risultato, che è anche una prima finestra concreta sulla combinazione di gravità e Meccanica Quantistica con conseguenze osservabili.

La Meccanica Quantistica implica che, a causa del principio di indeterminazione, lo spazio vuoto sia popolato da fluttuazioni incontrollabili. Ebbene, si può dimostrare che l'inflazione stiracchia su distanze cosmiche queste fluttuazioni, cristallizzandole in deformazioni dello spazio-tempo che favoriscono l'aggregazione di massa in certe regioni rispetto ad altre. I loro effetti si traducono anche in una caratteristica delle piccole irregolarità, dell'ordine di una parte per milione, che sono presenti nella temperatura del CMB (Fig. 8). Questo meccanismo viene oggi ritenuto all'origine della formazione delle galassie, e la predizione sulle irregolarità è stata confermata recentemente, con grande precisione, dai dati raccolti dal satellite Planck! Peraltro, lo stesso satellite ha anche rivelato che il nostro Universo è entrato, in epoca recente, in una nuova fase di lieve accelerazione.

V. MUKHANOV, *Physical Foundations of Cosmology*, Cambridge, Cambridge University Press, 2005.

A. SAGNOTTI, *Teoria delle Stringhe*, in *Enciclopedia della Scienza e della Tecnica* (Roma, Istituto dell'Enciclopedia Treccani, 2007).

S. WEINBERG, *The Quantum Theory of Fields*, Cambridge, Cambridge University Press, 1995, 1996, 2000.

Contributo agli Atti del Convegno su “Conoscenza, trascendenza e carità”

Università Lateranense, Roma, 26 maggio 2016