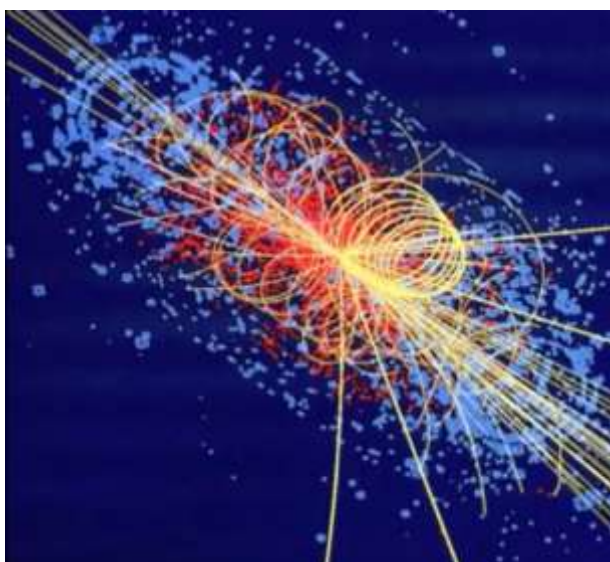


Carmine Vona



# Il Perché' delle Cose



Scontro frontale tra due raggi di protoni – Fonte: CMS detector - CERN

Saggio 3

## Fisica delle Particelle

Parte I e II

Una raccolta di saggi di natura scientifica presentati in forma semplice per i non “addetti ai lavori”

Con il patrocinio del Comune di Moschiano



E del Forum dei Giovani di Moschiano

2026





## Il Perché delle Cose - Compendio

*Non è un mistero che moltissime volte tutti noi siamo intimoriti quando ci troviamo di fronte a trattati o semplici pubblicazioni scientifiche soprattutto perché spessissimo i loro autori fanno ricorso a formule astruse e/o linguaggi difficili da comprendere e che spesso ottengono l'effetto opposto e ci allontanano invece che avvicinarci alla materia trattata. Fortunatamente di tanto in tanto c'è qualcuno che, soprattutto in base alla propria esperienza, si rende conto di questa limitazione e si adopera per rendere il tutto più alla portata di quelli che non hanno tanta dimestichezza con la matematica, fisica, e scienza in generale.*

*È il caso di Carmine Vona, Moschianese d'origine, Dottore in Fisica ed affermato ex professore e dirigente di importanti Istituti Finanziari a livello mondiale che, con l'aiuto delle sue nipoti, ha cercato di spiegare a studenti giovanissimi, a livello concettuale, teorie molto complicate con la speranza che, quando questi studenti proseguiranno negli studi, saranno meglio equipaggiati per affrontare le sfide che li attendono.*

*Il Perché delle Cose è una serie di saggi di natura scientifica il cui obiettivo è quello di spiegare in maniera elementare i concetti fondamentali di alcune teorie e misteri della scienza ai "non addetti ai lavori" o, in generale, a persone che hanno scarse conoscenze scientifiche, senza far ricorso alla matematica avanzata. Alcune versioni preliminari di questi saggi sono state redatte dalle nipoti del dott. Carmine Vona, sotto la guida del consulente scientifico del ginnasio/liceo (High School) che esse frequentavano, e, successivamente, estese ed arricchite dal dott. Vona in modo da renderle autosufficienti. Altri saggi sono il risultato del lavoro congiunto del dott. Vona e delle sue nipoti, alle quali il dott. Vona cercava di spiegare, in termini a loro accessibili, teorie scientifiche molto avanzate.*

*L'opera completa è costituita da 8 saggi su vari argomenti scientifici e 2 "addendum"*

- Saggio 1 – Definizione, Origini e Caratteristiche dei Buchi Neri nell'Universo*
- Saggio 2 – Il Corpo Umano – Parte I e Parte II*
- Saggio 3 – Fisica delle Particelle – Parte I e Parte II*
- Saggio 4 – Teoria della Relatività*
- Saggio 5 – Meccanica Quantistica – Parte I e Parte II*
- Saggio 6 – Entanglement, Meccanica Quantistica e Informatica Quantistica*
- Saggio 7 – Intelligenza Artificiale (IA): Che cosa è? Come funziona?*
- Saggio 8 – Addendum al Saggio sulla IA: Premi Nobel 2024 per la Fisica e Chimica*
- Saggio 9 – Il Ruolo della Matematica nelle Scienze (Che cosa è la Matematica)*
- Saggio 10 – Addendum al Saggio "Il Ruolo della Matematica nelle Scienze"  
(Come spiegare l'equazione EFE di Einstein a un(a) ragazzo/a di 13-14 anni)*

*Ringraziamo quindi gli autori dei saggi per aver voluto condividere il loro lavoro con tutti noi, nella speranza che esso possa istigare, soprattutto nei più giovani, quella curiosità intellettuale fondamentale per l'avanzamento della cultura e del progresso e di cui tutti noi abbiamo bisogno.*

*Carmine Manfredi*

### Versione Digitale

Una versione digitale di questo documento in formato PDF può essere trovata alla URL <https://www.prolococaputo.org/il-perche-delle-cose> oppure usando il QRC a lato.





“A Moschiano, alle sue radici ed alla sua comunità, con l’augurio che questi scritti possano essere un piccolo seme di conoscenza e memoria condivisa”



## **Saggio 3**

### **Fisica delle Particelle -Parte I e Parte II**

#### Teoria del Modello Standard dell'Atomo

A cura di Sophia Vona e Carmine Vona

Redatto nel 2018 AD

## Note Biografiche sugli Autori:

Sophia Vona

Al tempo della compilazione di questo saggio, Sophia Vona frequentava il Liceo presso la High School di Charlotte, N.C, USA.

Carmin Vona

Nato a Moschiano (AV) e laureato in Fisica presso l'Università Federico II di Napoli, il Dott. Vona ha insegnato Esercizi di Fisica presso la stessa Università e Fisica Generale all'Università di Natal in Brasile prima di trasferirsi negli Stati Uniti dove, con il titolo di Vicepresidente Esecutivo e Chief Information Officer (CIO), per decenni è stato a capo del Dipartimento di Tecnologia della Bankers Trust Company, una delle più prestigiose banche di Wall Street. Il Dott. Vona ha anche conseguito la docenza in Computer Science presso l'Università dello Stato di New York (USA) ed ha insegnato Linguaggi di Programmazione all'International Computer Institute di New York.

Cari concittadini,

Siamo lieti di proporre il terzo saggio della serie “Il Perché delle Cose” del Dott. Carmine Vona e delle sue nipoti dedicato alla Fisica della Particelle.

In esso i nostri amici Moschianesi di New York ci portano in un viaggio all'interno dell'atomo e ci spiegano che, contrariamente a quanto i nostri antenati per migliaia di anni hanno sempre creduto, non solo l'atomo non è indivisibile, ma consiste di molteplici particelle, almeno 17, quasi tutte rinchiuso nella parte centrale chiamata “nucleo”. In sostanza, per dirla in termini un po' più “formali”, gli autori cercano di presentare a tutti noi, ma soprattutto ai ragazzi, un po' di fisica nucleare.

Quando si considera che in molte Università per accedere ad un corso di Fisica Nucleare c'è bisogno di avere già una laurea in Fisica, si potrebbe concludere che leggere questo saggio non è alla portata di tutti.

Invece, dopo averlo io stesso letto, vi assicuro che, oltre ad essere di relativamente facile lettura, ho provato grande soddisfazione dalla possibilità presentatami di incrementare la mia conoscenza circa la struttura dell'atomo e le sue caratteristiche. Il mio unico rammarico, anzi, è quello di non aver avuto l'opportunità di leggere scritti come questo quando frequentavo il Liceo. Infatti, se l'avessi avuto allora, vi assicuro che ne avrei tratto enormi benefici. Non solo sarei stato in una posizione ottimale per comprendere più rapidamente e con qualche anno di anticipo cose che mi sarebbero servite negli anni successivi, ma, soprattutto, avrei avuto occasione di internalizzare nozioni di fisica, chimica e biologia aventi a che fare con reazioni chimiche, cellule, proteine, batteri, virus e altri microrganismi di varie specie molto più facilmente.

A solleticare la mia curiosità nel leggerlo, c'è poi stata l'analogia tra l'anima degli esseri umani e le particelle del tipo “bosone” e le domande che la giovane Sophia pone al nonno.

Sono certo che i giovani lettori di questo saggio troveranno questa analogia, a dir poco, intrigante e potranno apprendere cose che saranno preziosissime in futuro per loro, specialmente per coloro che abbiano intenzione di proseguire i loro studi Universitari in qualsiasi disciplina o corso di laurea sia esso ad indirizzo scientifico o meno.

Vi invitiamo pertanto a prestare attenzione a quanto scritto in questo saggio ed a fare tesoro delle cose che via via apprenderemo perché come diceva Socrate “Esiste un solo bene, la conoscenza, ed un solo male, l'ignoranza”.

Buona lettura.

Dott. Sergio Pacia  
Sindaco di Moschiano

## Preambolo

*Oggi pochi ricordano che nel 2008, dopo quella dell'anno 2000, in tutto il mondo si diffuse una nuova e strana paura. Questa volta era ancora più raccapricciante perché questa paura era generata interamente dall'uomo ed attribuibile ad un "congegno infernale" da lui costruito: stiamo parlando del Large Hadron Collider (LHC) del CERN (Consiglio Europeo Ricerche Nucleari) di Ginevra in Svizzera, che, una volta attivato, avrebbe ricostruito alcune delle condizioni esistenti nell'Universo al tempo della sua nascita, vale a dire, temperature ambientali misurate in miliardi o anche trilioni di gradi centigradi. Fomentato da notizie allarmanti e non veritiere, si diffuse tra la gente "comune" una arcana ed infondata paura che questi LHC potessero andare fuori controllo e causare la completa distruzione del pianeta Terra.*

*Il problema era che, eccetto per un limitatissimo gruppo di scienziati addetti ai lavori, la stragrande maggioranza della popolazione mondiale, incluse persone con istruzione a livello universitario, aveva scarsissime conoscenze di ciò che un LHC fosse, a cosa servisse e come funzionasse. Chiaramente conoscere i dettagli di questa macchina non è una cosa che ci si può aspettare dalla gente comune; ma che anche gran parte delle persone con istruzione a livello universitario si accodasse a questa visione medioevale e apocalittica fu certamente una sorpresa.*

*Capire come e di cosa noi e l'Universo che ci circonda siamo fatti è sempre stato un pallino dell'uomo nel corso dei secoli e questo ha dato luogo ad innumerevoli dibattiti e scuole filosofiche. Da Democrito in poi, l'uomo si è sempre chiesto: fino a quando posso continuare a dividere la materia? In altre parole, quanto "piccola" è davvero la cosa più piccola che possa esistere?*

*La Fisica delle Particelle cerca di dare una risposta a questo quesito. Ma farlo in forma semplice non è facile perché richiede una buona dose di conoscenze matematiche e fisiche di base. Purtroppo, spesso, il modo come queste discipline vengono insegnate a scuola, con formule matematiche astruse e nozioni teoriche, non sempre aiuta.*

*La nostra speranza, è che, una volta il lettore (soprattutto quelli più giovani e desiderosi di accrescere le loro conoscenze) abbia acquisito familiarità con i concetti di base della "Fisica delle Particelle", eventi come quelli del 2008 riguardanti il LHC, anche se non completamente comprensibili, almeno non siano visti come precursori di catastrofi, ma piuttosto come passi necessari dell'uomo per capire sempre di più di cosa siamo fatti, da dove veniamo e dove andiamo.*

*Carmine Manfredi*

## Contents

Parte I.....	1
1.0 Prefazione .....	2
2.0 Introduzione.....	2
3.0 Scoperta di Nuove Particelle Tramite Acceleratori di Particelle ad Alta Energia .....	5
3.1 Acceleratori di Particelle più Avanzati e Particelle di Nuova Generazione .....	6
4.0 Fisica delle Particelle .....	8
4.1 Caratteristiche, Proprietà e Attributi di Fermioni e Bosoni.....	10
4.1.1 Fermioni .....	10
4.1.2 Bosoni.....	11
4.1.3 Altre Particelle.....	13
4.2 Il Corpo e l'Anima dell'Atomo .....	13
4.3 Sommario delle Proprietà delle Particelle Comprese nel Modello Standard.....	14
5.0 Domande Sconcertanti Senza Risposte dal Modello Standard.....	16
5.1 Forze Fondamentali della Natura .....	17
5.2 Come le Forze Fondamentali Interagiscono con le Particelle .....	19
5.2.1 Come la Forza Elettromagnetica Interagisce con le Particelle.....	19
5.3 Formulazione Finale della Teoria del Modello Standard.....	20
5.3.1 Il Lagrangiano della Teoria del Modello Standard .....	21
5.4 Carenze della Teoria del Modello Standard .....	23
5.4.1 Domande di Sophia e il suo Video sulla Teoria del Modello Standard .....	24
Parte II.....	28
Nota 1. Modello dell'atomo Secondo Kelvin e Modello dell'Atomo Secondo Bohr.....	29
Nota 2. Spin.....	31
Nota 3. Decadimenti (Decays) .....	34
Nota 4. Legge di Gravitazione e Forza di Gravitazione .....	37
Nota 5. Definizione dell'Isotopo .....	37
Nota 6. Lagrangiano .....	39
Nota 7. Acceleratori di Particelle e Laboratori CERN .....	43
Nota 8. Relazione tra Decadimenti e Weak Force .....	45

Nota 9.	Ioni e Ionizzazioni .....	46
Nota 10.	La Forza Forte (“Strong Force”) .....	46
Nota 11.	Adroni .....	47
Nota 12.	Tavola delle Interazioni tra Forze e Particelle.....	47
Nota 13.	Grand Unification Theory (GUT) .....	47
Nota 14.	Perché le Particelle di II e III Generazione non Sono Stabili .....	50
Nota 15.	Parole per Misurare Entità Fisiche Molto Grandi o Molto Piccole .....	51
Nota 16.	Riconoscimenti e Ringraziamenti.....	53

## Parte I

## 1.0 Prefazione

La prima versione del presente saggio è stata compilata dalla studentessa Sophia Vona, matricola della Charlotte, N.C., High School, con la supervisione del consulente scientifico della scuola. L'obiettivo didattico della scuola è di introdurre i giovani studenti a materie e teorie scientifiche avanzate. Agli studenti più meritevoli vengono assegnati argomenti specifici che dovranno sviluppare tramite ricerche degli argomenti stessi su Internet per poi redigere un saggio.

Il saggio iniziale di Sophia è stato ampliato e arricchito dal co-autore per far sì che tutti gli argomenti siano illustrati in modo sufficientemente dettagliato al fine di renderlo più comprensibile e pienamente fruibile da parte degli studenti più giovani che potrebbero non avere (e probabilmente non hanno) sufficienti conoscenze di base per comprendere teorie scientifiche molto avanzate. Mentre il saggio fa riferimento a formule ed equazioni matematiche avanzate, gli autori hanno cercato di spiegare i concetti alla base di queste formule ed equazioni, riducendo al minimo i dettagli tecnici. Gli autori utilizzano anche un linguaggio e una terminologia familiari agli studenti delle scuole elementari e medie e, quando necessario, semplificano argomenti complessi e sacrificano il rigore scientifico a favore di un linguaggio più semplice, sperando che ragazzi di 12-15 anni non si perdano nei dettagli matematici più avanzati. Per i lettori un po' più sofisticati, gli autori hanno fornito spiegazioni e/o dettagli tecnici nelle Note raggruppate nella Parte II del saggio.

## 2.0 Introduzione

Fin dall'inizio delle civiltà, gli esseri umani sono sempre stati incuriositi dalla possibile esistenza di una particella fondamentale che potrebbe essere l'elemento costitutivo della materia che vediamo intorno a noi sulla Terra e nell'Universo. Circa 2.400 anni fa, il filosofo Democrito e altri suoi contemporanei, mentre studiavano la materia presente sulla Terra, giunsero alla conclusione che, se prendiamo un pezzo di materia (qualsiasi materia) e lo tagliamo a metà e poi continuiamo ancora a tagliarla a metà (cioè, prendere la metà e tagliarla di nuovo, e ancora e ancora ...), raggiungeremmo un punto in cui scopriremo un pezzo di materia che non può più essere tagliato. Quel pezzo di materia che non può più essere tagliato fu chiamato **Atomo** [dal greco  $\alpha\text{-}\tau\epsilon\mu\nu\omega$  (pronuncia: a-temno); cioè, "non tagliabile", "indivisibile"]. L'Atomo, quindi, era considerato una particella fondamentale ed elementare; insomma, era la componente più piccola della materia. Questo concetto è durato fino alla fine del XIX secolo, quando, nel 1897, si scoprì che rompendo il guscio esterno di un Atomo, si troveranno al suo interno pezzi di materia ancora più piccoli, chiamati Elettroni [vedi Nota 1].

La Figura 1, sotto, mostra l'atomo di idrogeno, che è composto di 1 elettrone e 1 protone. Si è anche scoperto che l'elettrone porta in sé una carica elettrica negativa, indicata dal segno "-", mentre il Protone porta in sé una carica elettrica positiva, indicata dal segno "+".

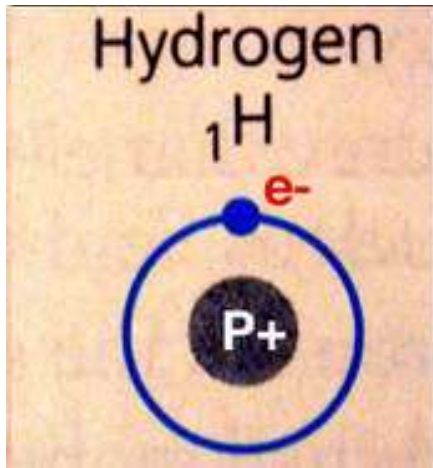


Figura 1: Configurazione dell'atomo di idrogeno (Fonte: Wikipedia?)

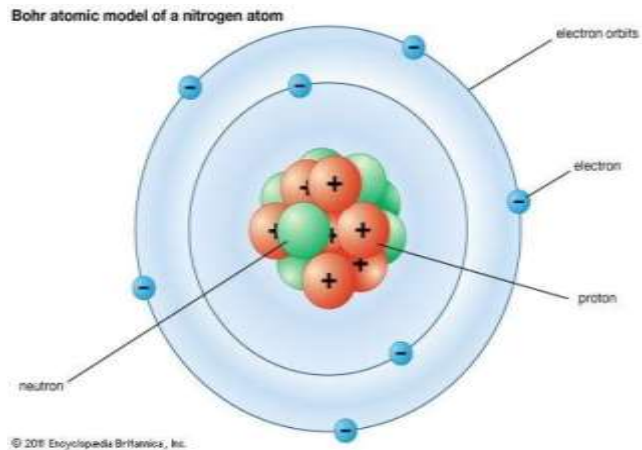


Figura 2: Configurazione dell'atomo di Azoto (Fonte: Enciclopedia Britannica)

La Figura 2, sopra, mostra l'immagine di un atomo più complesso, l'atomo di Azoto, con 7 elettroni, ciascuno con carica elettrica negativa, che orbitano attorno al Nucleo. In uno spazio minuscolo, al centro dell'atomo, c'è il Nucleo dell'atomo che è composto di 7 Protoni, ciascuno con carica elettrica positiva e 7 altre particelle (palline verdi nella Figura 2 sopra) senza cariche elettriche, chiamate Neutroni.

L'idea che l'atomo fosse una particella fondamentale ed elementare durò quasi 2.400 anni (da circa 460 a.C. al 1897 d.C.). Dopo la scoperta dell'elettrone (nel 1897) e per almeno 13 anni successivi, gli scienziati non avevano idea di com'era formato l'interno di un atomo. Alcuni dei migliori scienziati di quel tempo avevano avanzato ipotesi, per esempio la teoria del "Plum Pudding" e la teoria dell'anguria, su come potrebbe essere l'interno dell'atomo. Ma queste ipotesi si rivelarono errate e fu solo nel 1910 che gli scienziati iniziarono a capire la configurazione della materia all'interno di un atomo. E anche allora, ci vollero altri 22 anni prima che gli scienziati scoprissero prima il Nucleo (Rutherford, 1910), poi il Protone (Rutherford, 1920) e poi il Neutrone (Chadwick, 1932). [Vedi Nota 1 per una descrizione più dettagliata di come alcuni scienziati pensavano che l'interno di un atomo potesse apparire prima del 1910; come Ernest Rutherford scoprì il Nucleo nel 1910 e come Niels Bohr perfezionò la scoperta di Rutherford]. Il lato sinistro della Figura 3, sotto, è un'altra immagine dell'atomo che mostra gli elettroni, portatori di carica elettrica negativa, in orbita attorno a un minuscolo nucleo. Il lato destro della Figura 3, sotto, mostra le particelle che compaiono quando il guscio esterno del nucleo è rotto, cioè, protoni e neutroni (che sono anche chiamati nucleoni). Per un po' di tempo, dopo la loro scoperta, si è pensato che protoni e neutroni fossero particelle fondamentali ed elementari. Tuttavia, circa 30 anni dopo, si è scoperto che protoni e neutroni non sono particelle fondamentali ed elementari. Infatti, nel 1964, è stato scoperto che il guscio esterno di un protone o di un neutrone può essere a sua volta rotto e, quando gli scienziati l'hanno fatto, sono comparse particelle più piccole, chiamate **Quark**.

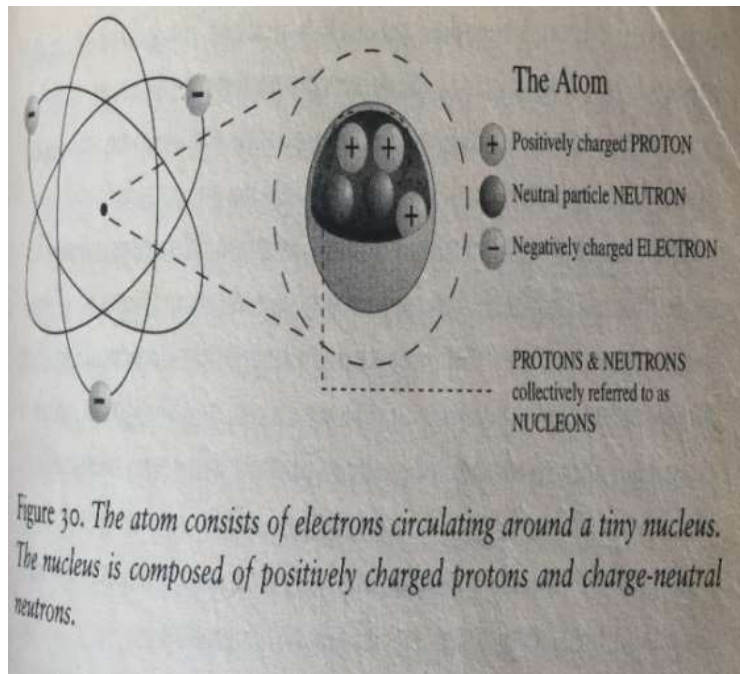


Figura 3: Come appare l'interno di un atomo (Fonte: Warped Passages by L. Randall)

Uno sguardo più attento a questi quark ha anche rivelato che non tutti i quark sono dello stesso tipo. In effetti, si è scoperto che esistono due tipi di Quark: **Up-Quark** e **Down-Quark**. È stato anche scoperto che un protone è composto di 2 up-quark e 1 down-quark. Un Neutrone, invece, è composto di 1 up-quark e 2 down-quark (vedi Figura 4 sotto). È stato anche notato che le particelle elementari appena scoperte chiamate quark si presentano sempre in triplette; cioè, ci sono tre quark in un protone e ci sono tre quark in un neutrone.

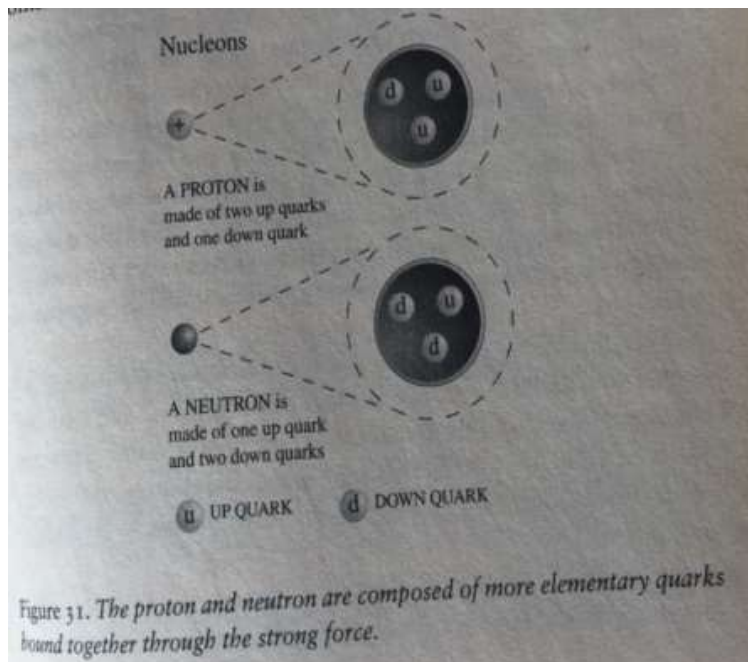


Figura 4: Come appare l'interno di un protone e l'interno di un neutrone (Fonte: Warped Passages by L. Randall)

### 3.0 Scoperta di Nuove Particelle Tramite Acceleratori di Particelle ad Alta Energia

Nell'Introduzione del presente saggio abbiamo usato le parole "rompere il guscio esterno" di un Atomo, il guscio esterno del Nucleo, il guscio esterno del Protone, il guscio esterno del Neutrone, per vedere cosa c'è dentro, come se queste particelle fossero noci. La realtà è che, mentre rompere il guscio esterno di un atomo non è difficile [vedi Nota 9], rompere il guscio esterno di un Nucleo o di un Protone o di un Neutrone è un compito gigantesco. Prima di tutto, queste particelle sono così piccole che è impossibile schiacciarle con un normale schiaccianoci. E anche se potessimo costruire uno schiaccianoci artigianale, la forza necessaria per rompere il guscio esterno di un protone o di un neutrone sarebbe incredibilmente enorme e difficile da ottenere. Infatti, se applicassimo tutta la forza del martello pneumatico più potente del mondo, non sarebbe sufficiente a rompere il guscio esterno di queste particelle. In tal caso, il lettore curioso potrebbe chiedere:

- **Allora, come hanno fatto gli scienziati a rompere il guscio esterno di un protone per affermare che al suo interno ci sono Up-Quark e Down-Quark?**

Il problema è stato risolto utilizzando una tecnica ben nota nelle scienze fisiche e biologiche, ovvero, per misurare un'entità fisica, che è troppo piccola e invisibile all'occhio umano, è necessario utilizzare un dispositivo o un metro che, grosso modo, sia delle stesse dimensioni dell'oggetto che si vuol misurare. Nelle scienze biologiche, infatti, per combattere batteri cattivi (che sono molto piccoli e invisibili) potrebbe essere necessario utilizzare altri batteri (chiamati batteri buoni).

Nel nostro caso, gli scienziati hanno imparato che solo un altro protone è in grado di rompere il guscio esterno di un protone. In altre parole, per rompere il guscio esterno di un protone, bisogna sparargli contro un altro protone. Vediamo come quest'obiettivo è stato raggiunto: gli scienziati hanno preso un fascio (o raggio) di protoni, l'hanno accelerato a una velocità che si avvicina alla velocità della luce e l'hanno fatto scontrare contro un fascio simile di protoni che viaggia nella direzione opposta. Quando ciò accade e due protoni si scontrano frontalmente, è probabile che il

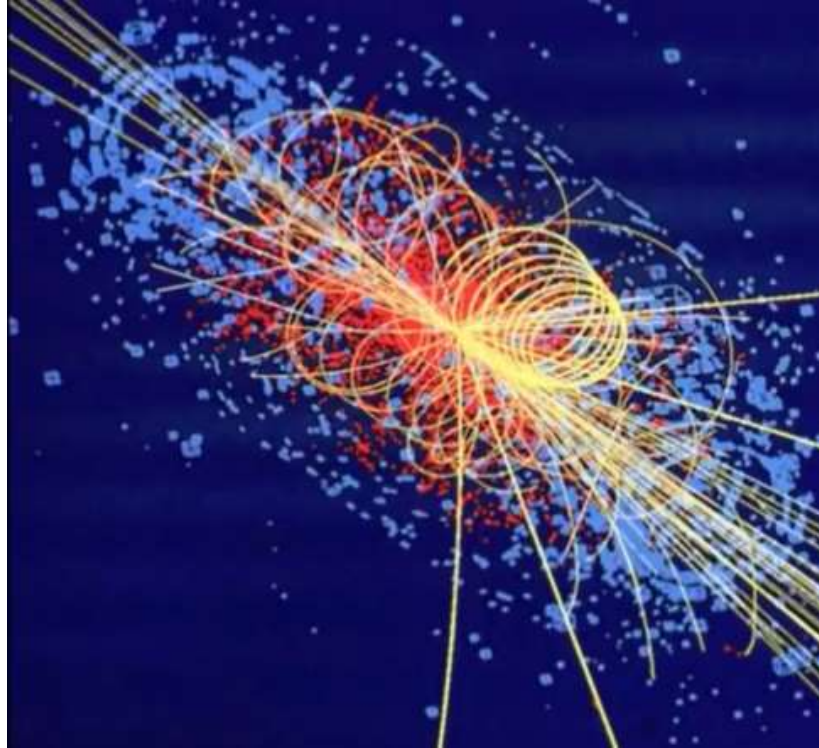


Figura 5: Quello che succede in uno scontro frontale di due raggi di protoni accelerati a velocità  $c$  (Fonte: CMS detector - CERN)

loro guscio esterno si rompa e le componenti che risiedono al loro interno (cioè, i Quark) volano via in tutte le direzioni. La Figura 5 mostra cosa succede quando due fasci di protoni, accelerati alla velocità della luce, si scontrano in una collisione frontale. Le macchine usate per frantumare i protoni e aprirli sono chiamate Acceleratori di Particelle ad Alta Energia.

### 3.1 Acceleratori di Particelle più Avanzati e Particelle di Nuova Generazione

I primi acceleratori di particelle non erano molto potenti. Essi riuscivano ad accelerare un fascio di protoni a circa il 30% della velocità della luce (poco meno di 100.000 Km al secondo). Quando i protoni si scontrano frontalmente a questa velocità, i loro gusci si aprono e vengono fuori up-Quark e down-Quark (chiamati **particelle di prima generazione**). Successivamente, gli scienziati hanno costruito acceleratori di particelle più potenti in grado di accelerare un raggio di protoni al 99,9% della velocità della luce.

Gli acceleratori più recenti (chiamati **Large Hadron Colliders - LHC** [vedi Nota 11]) sono ancora più potenti. Quando questi LHC vengono attivati, generano enormi quantità di energia. Le forze elettriche, presenti nel campo elettrico all'interno del LHC, spingono i Protoni, che continuano ad accelerare fino a

raggiungere il 99,999% della velocità della luce (**c**). La Teoria della Relatività ci dice che nessun oggetto, e nulla in natura, può viaggiare a una velocità superiore a quella della luce. A questo punto un lettore curioso potrebbe porre la seguente domanda:

- **Cosa succede quando un raggio di protoni raggiunge la velocità della luce e il LHC continua a spingere questi protoni (pompando in essi ancora più energia)?**

La Teoria della Relatività fornisce la risposta a questa domanda. Quando un Protone, accelerato dal campo elettrico del LHC, raggiunge la velocità della luce, se il LHC continua a spingerlo, accade qualcosa molto interessante: **la massa del Protone aumenta**. In effetti, la Teoria della Relatività (che studieremo in un prossimo saggio) ci ha dato la seguente equazione:

$$E = mc^2$$

Dove **E** è l'energia della particella, **m** è la massa della particella e **c** è la velocità della luce. Questa equazione (nota come l'equazione di Einstein), in effetti, ci dice che massa ed energia sono due grandezze fisiche intercambiabili. Ciò significa che, se pompamo energia in un corpo di massa **m**, ad esempio un protone, inizialmente il protone inizia a muoversi con velocità accelerata. Se continuiamo a pompare sempre più energia, la velocità del protone continua ad aumentare fino a raggiungere il valore limite di **c** (velocità della luce). Una volta raggiunto questo limite, se continuiamo a pompare energia, l'energia si trasformerà in massa, che si aggiungerà alla massa originale del Protone in movimento, cioè la massa del Protone aumenterà. Questo non è molto diverso da quello che accade quando un agricoltore dà sempre più granoturco a un maiale: il maiale ingrassa. In altre parole, quando i protoni vengono alimentati con enormi quantità di energia da un LHC, l'energia fa "ingrassare" i protoni aumentando la loro massa. L'unica differenza tra un protone e un maiale è che, quando un protone viene alimentato con sempre più energia, può aumentare fino a sei o settemila volte il suo peso normale (un maiale, invece, raramente va oltre due/tre volte il suo peso iniziale). Una volta che i protoni raggiungono queste dimensioni e gli scienziati fanno scontrare questi protoni ingrassati in una collisione frontale, vengono fuori quark più pesanti (chiamati **Charm** e **Strange**). Questi quark più pesanti sono classificati come **particelle di seconda generazione**.

- **E cosa succede se applichiamo ancora più energia a questi protoni già grassi?**

Può sembrare incredibile, ma gli scienziati dei Laboratori del CERN a Ginevra sono riusciti a ottenere acceleratori di particelle ancora più potenti disponendo in serie più acceleratori. In tal modo sono riusciti ad aumentare ancora di più l'energia applicata ai protoni, prima di farli scontrare frontalmente con altri protoni provenienti dalla direzione opposta. Il risultato è stato precisamente quanto gli scienziati avevano previsto e, cioè: 1) i protoni acquisiscono ancora più massa; 2) quando si scontrano frontalmente con i protoni provenienti dalla direzione opposta, si frantumano e vengono fuori i **Top-quark** e **Bottom-quark**. Questi ultimi sono quark molto più pesanti dei loro fratelli di prima e seconda generazione e sono stati classificati come **particelle di terza generazione**. [La Nota 7 fornisce una descrizione più dettagliata dei Laboratori del CERN, dove protoni vengono accelerati a velocità **c** e poi frantumati].

A volte i fisici parlano di quark come se fossero gelati. Per distinguere il gelato alla vaniglia dal gelato al cioccolato, a volte si usa la parola inglese "flavor". Allo stesso modo, gli scienziati distinguono i vari quark dicendo che essi hanno un "flavor" (gusto) diverso. Pertanto, i 6 diversi flavor di quark sono:

1. **Up and down**
2. **Charm and strange**
3. **Top and bottom.**

In altre parole, tutte queste particelle sono chiamate Quark, ma sono disponibili in sei gusti diversi chiamati: up-quark, down-quark, charm-quark, strange-quark, top-quark e bottom-quark. In conclusione, i quark scoperti nella seconda metà del XX secolo sono considerati particelle fondamentali ed elementari.

Nei secoli scorsi, ogni volta che si è scoperta una particella che si considerava elementare (quindi non scomponibile), si è poi sempre scoperto che essa era ulteriormente scomponibile. Ancora una volta, un lettore curioso potrebbe chiedere:

- **Data la storia di queste particelle, è possibile che un giorno scopriremo che anche i quark possono essere scomposti in particelle ancora più piccole?**

Sebbene non ne siamo certi al 100%, abbiamo motivo di credere che sia molto improbabile che i quark possano essere ulteriormente scomponibili. Tuttavia, il ragionamento che ci porta a credere quanto appena affermato va ben oltre lo scopo di questo saggio.

## 4.0 Fisica delle Particelle

Nella Sezione precedente abbiamo illustrato come gli scienziati hanno scoperto le sei particelle fondamentali ed elementari chiamate Quark e perché sono state categorizzate come particelle di I generazione, II generazione e III generazione.

Per rendere più chiara la descrizione delle particelle scoperte nella seconda metà del XX secolo e le loro interazioni, alcuni scienziati hanno iniziato a organizzare tutte le particelle conosciute in un modello che, nel tempo, è stato denominato il **Modello Standard delle Particelle Elementari**.

Il processo di organizzazione delle particelle è iniziato oltre 60 anni fa e per quanto riguarda l'atomo, lo schema proposto è simile alla tabella degli elementi chimici definita da Dmitri Mendeleev nel "Sistema Periodico degli Elementi" [vedi Nota 1, Sistema Periodico degli Elementi del saggio "Il Corpo Umano – Parte II"].

La Figura 6, qui sotto, mostra il Modello Standard delle Particelle Elementari:

## Standard Model of Elementary Particles

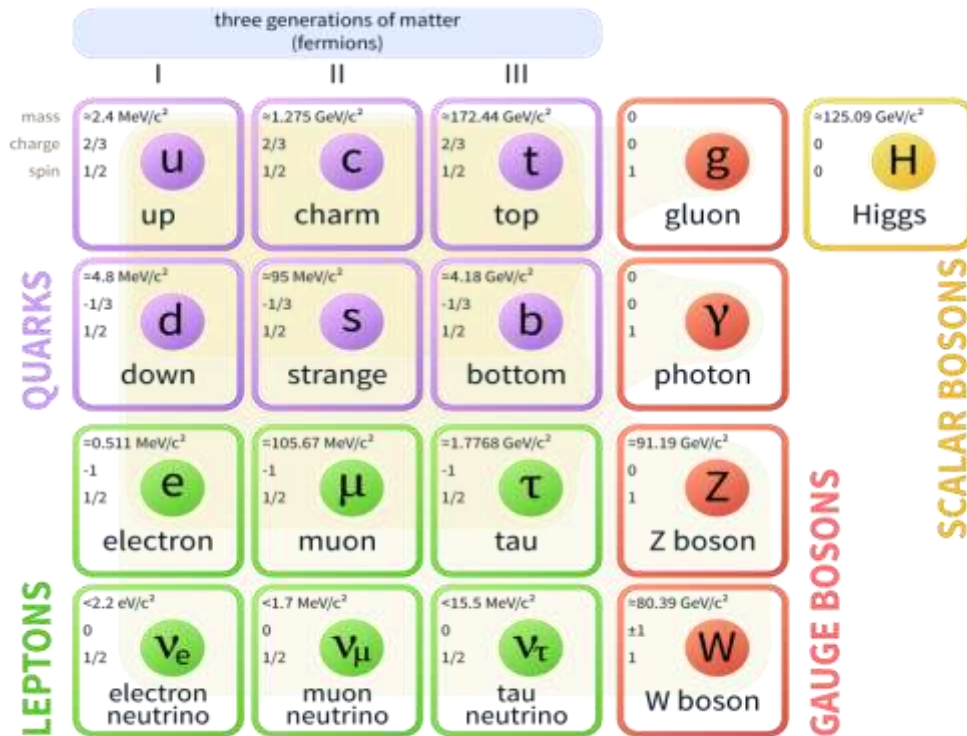


Figura 6: Modello Standard delle Particelle Elementari (Fonte: Wikipedia)

Ciascuna delle particelle comprese nel Modello Standard è caratterizzata da tre attributi, chiamati **Massa**, **Carica elettrica** e **Spin**, che a loro volta determinano le proprietà della particella. Ad esempio, la particella chiamata **up-quark** ha:

- Massa  $m = 2,4 \text{ MeV}/c^2$ ;
- Carica elettrica =  $+2/3$  di **e** [dove **e** è la carica di 1 elettrone, presa come unità di misura];
- Spin =  $1/2$ .

Allo stesso modo, la particella chiamata **gluone** ha:

- Massa  $m = 0$ ;
- Carica elettrica =  $0$ ;
- Spin =  $1$ .

La massa e la carica elettrica sono attributi ben noti ai nostri giovani lettori. Lo spin è un attributo che potrebbe non essere noto, pertanto, invitiamo i nostri giovani lettori a leggere la Nota 2, della Parte II di questo saggio, per comprendere appieno quest'attributo.

Tutte le particelle comprese nelle prime tre colonne del Modello Standard sono chiamate **Fermioni**, nome scelto per onorare il famoso fisico italiano Enrico Fermi. È interessante notare che tutta la materia che vediamo sulla Terra e in ogni altra parte dell'Universo è composta da fermioni. Tutte le particelle

comprese nelle ultime due colonne del Modello Standard sono chiamate **Bosoni**, nome scelto per onorare il famoso fisico teorico indiano Satyendra Nath Bose.

I fermioni comprendono:

- Tutte le particelle di I generazione (prima colonna del Modello);
- Tutte le particelle di II generazione (seconda colonna del Modello);
- Tutte le particelle di III generazione (terza colonna del Modello);

I fermioni, a loro volta, sono suddivisi in due sottocategorie:

- **Quarks** – raggruppati nelle prime due righe del Modello Standard
- **Leptoni** – raggruppati nelle righe 3 e 4 del Modello Standard

I bosoni comprendono tutte le particelle comprese nelle ultime due colonne del Modello Standard.

## 4.1 Caratteristiche, Proprietà e Attributi di Fermioni e Bosoni

Nelle prossime due sezioni (Sezione 4.1.1 e 4.1.2) illustreremo più dettagliatamente attributi, caratteristiche e proprietà di fermioni e bosoni e spiegheremo anche le ragioni per cui sono raggruppati nelle varie categorie e sottocategorie illustrate in Figura 6.

### 4.1.1 Fermioni

Tutti i **fermioni** sono particelle che hanno uno ‘spin’ che li porta a ruotare intorno al loro asse in senso orario e, per questo motivo, sono chiamate “particelle sinistrorse” (particelle che invece ruotano intorno al loro asse in senso antiorario sono chiamate “particelle destrorse”). Lo spin è un attributo intrinseco di tutte le particelle (per una descrizione più dettagliata vedi Nota 2).

In generale, tutte le particelle sinistrorse sono caratterizzate da uno spin di mezzo ( $\frac{1}{2}$ ) numero intero dispari (cioè, il loro numero di spin può essere solo,  $s = 1/2, 3/2, 5/2$ , ecc.). Tutti i ‘flavor’ dei quark, elettroni e neutrini sono particelle fermioniche. Molte particelle chiamate fermioni, anche se non tutte, sono stabili e possono essere trovate nella materia ordinaria. Si può affermare che tutta la materia nell'Universo è composta di fermioni. I fermioni sono particelle che obbediscono al “Principio di esclusione di Pauli”, in base al quale due fermioni identici non possono mai essere trovati nello stesso stato (posto).

I fermioni sono suddivisi in due sottocategorie: Quark e Leptoni.

1. **Quark.** Come tutti i fermioni, i quark sono particelle sinistrorse con spin semi-intero ( $s = \frac{1}{2}$ ). A partire dagli anni '60, queste particelle sono state scoperte usando gli acceleratori di particelle descritti nelle sezioni precedenti. Le prime particelle di questo tipo a essere scoperte furono gli up-quark e down-quark e per questo motivo sono anche chiamati **particelle di prima generazione** e furono posizionati nella prima colonna del Modello Standard (intitolata “particelle di I generazione”). Successivamente, con l'avvento di acceleratori di particelle più potenti, furono scoperti charm-quark

e strange-quark che furono chiamati particelle **di seconda generazione** e posizionati nella seconda colonna del Modello Standard (intitolata, appunto, "particelle di II generazione"). Infine, con l'avvento del LHC furono scoperti i top-quark e bottom-quark che furono chiamati **particelle di terza generazione** e posizionati nella terza colonna del Modello (intitolata, appunto, "particelle di III generazione").

2. **Leptoni.** I leptoni sono anch'essi particelle elementari sinistrorse con spin semi-intero ( $s = \frac{1}{2}$ ). I primi membri di questa famiglia sono due particelle chiamate elettroni e neutrini, scoperte molto prima dei quark. Anche se queste due particelle sono state scoperte molto prima degli up-quark e down-quark, sono state classificate come particelle di prima generazione e, di conseguenza, sono state collocate nella prima colonna a sinistra del Modello Standard. Poiché alcune delle loro proprietà, caratteristiche o attributi sono diversi dalle proprietà, caratteristiche o attributi dei quark (ad esempio, elettroni e neutrini non sentono la strong force), a causa delle loro piccole masse, sono stati chiamati Leptoni [dal greco "lepton" che significa "piccolo"] e formano una sottocategoria dei fermioni. I leptoni sono ulteriormente suddivisi in due classi:

Leptoni carichi, caratterizzati dal fatto di portare in sé una carica elettrica negativa ("-"), sono chiamati elettroni;

Leptoni neutri, caratterizzati dal fatto che, elettricamente parlando, sono neutri e pertanto sono chiamati neutrini.

I leptoni carichi possono combinarsi con altre particelle non elementari per formare particelle composte o anche elementi. Ad esempio, gli elettroni possono combinarsi con i protoni per formare atomi. I neutrini, invece, raramente interagiscono con altre particelle elementari o particelle composte e, di conseguenza, sono molto difficile da rilevare.

#### 4.1.2 Bosoni

**Bosoni.** A differenza dei Fermioni, che costituiscono tutta la materia presente nell'Universo e obbediscono al Principio di Esclusione di Pauli, i Bosoni sono portatori di forza che funzionano come una specie di "colla" che tiene insieme più fermioni, formando così la materia che vediamo intorno a noi. Inoltre, poiché i bosoni non sono soggetti al Principio di Esclusione di Pauli, non vi è alcuna restrizione sul numero di bosoni che possono occupare lo stesso spazio. Tutti i bosoni hanno il loro spin rappresentato da un numero intero (cioè,  $s = 0, 1, 2, 3$ , ecc.). I bosoni sono talvolta chiamati anche "particelle messaggere" perché si comportano come mediatrici nelle interazioni tra particelle. I bosoni sono particelle fugaci e, per questo, estremamente difficili da osservare in esperimenti di laboratorio. Basti pensare che alcuni di essi perdono la loro efficacia su distanze talmente brevi da essere quasi inimmaginabili. Altrettanto breve e fugace è la loro vita. Basti pensare, ad esempio, che il bosone W (Weak Force) perde la sua forza e, quindi, non è più efficace, a distanze maggiori di un Atto-metro, vale a dire un milionesimo di milionesimo di milionesimo di metro, cioè a  $10^{-18}$ m, oppure, espresso in forma

numerica, 0,000.000.000.000.000.001m. Lo stesso vale per la durata della sua vita: quando il bosone W è efficace, la durata della sua vita è inferiore a uno Yocto-secondo, vale a dire un milionesimo di milionesimo di milionesimo di secondo, cioè inferiore a  $10^{-24}$  secondi, in forma numerica: 0,000.000.000.000.000.000.001sec. [Per una lista di parole nuove che sono state inventate per rappresentare distanze e tempi così brevi vedi Nota 15]. A queste distanze e con questi tempi di vita, il lettore avrà ora capito perché scoprire un bosone in laboratorio è un'impresa molto impegnativa. A questo punto un lettore attento potrebbe porre la domanda:

- **Ma se queste particelle sono così labili e fugaci, come hanno fatto gli scienziati a pensare che potessero esistere e poi addirittura scoprirle nei loro esperimenti di laboratorio?**

Per trovare una risposta a questa domanda le menti più raffinate della comunità scientifica mondiale si cimentarono per parecchi anni. Le particelle fermioniche che gli scienziati avevano scoperto, lasciate a sé stesse, avrebbero costituito un'ammucchiata di materia passiva, inerte e disorganizzata. Invece, gli scienziati notavano che i fermioni non erano per niente disorganizzati. Al contrario! I quark, per esempio, si univano fra di loro metodicamente per formare protoni e neutroni; protoni si univano a elettroni per formare atomi; protoni, neutroni ed elettroni si univano fra di loro per formare atomi pesanti, etc., etc. La domanda più specifica, pertanto, sarebbe:

- **Chi o che cosa fa sì che particelle, come i quark o anche Protoni e Neutroni, si tengano unite all'interno del nucleo di un atomo?**

Gli scienziati (alcuni per la loro spiccata intuizione, altri usando la loro fantasia, altri ancora semplicemente per caso) inizialmente cominciarono a ipotizzare l'esistenza di altre particelle (che poi furono chiamate **bosoni**) aventi la capacità di facilitare e/o portare a termine azioni di sinergia per cui due o più fermioni, con l'aiuto dei bosoni, si organizzavano per **dar vita** a una particella composta. Per esempio, 3 quark si univano con l'aiuto dei bosoni per **dar vita** a un protone; due o più particelle semplici o composte si organizzano ulteriormente per **dar vita** a un atomo, e così via. Nelle scienze, però, non è sufficiente "ipotizzare" o "fantasticare" o "affidarsi al caso". Bisogna poi verificare, con prove obbiettive e/o esperimenti di laboratorio, che questi bosoni veramente esistono. Col tempo gli scienziati, tramite esperimenti di laboratorio, hanno avuto conferma della loro esistenza! La conferma sperimentale più recente di una di queste ipotesi è il bosone di Higgs. Ipotizzata da Peter Higgs molti anni fa (e inizialmente nemmeno presa sul serio), la sua esistenza è stata confermata al CERN di Ginevra nel 2012 e al suo autore, Peter Higgs, in quello stesso anno, è stato conferito il premio Nobel. [Per vedere un'animazione di come funzionano gli acceleratori del CERN, cliccare sul seguente Link:

<https://home.cern/about/accelerators>].

### 4.1.3 Altre Particelle

**Altre particelle.** Nel XX secolo gli scienziati hanno scoperto molte altre particelle. Per ragioni che saranno chiarite più avanti in questo saggio, fra le altre particelle scoperte, vogliamo far cenno al **muone**. Il muone ha una carica elettrica identica a quella dell'elettrone, però è molto più grasso e pesa circa 200 volte più dell'elettrone e, inoltre, scompare dopo una vita molto breve trasformandosi ("decadendo" sarebbe la parola corretta – vedi Nota 3) in un elettrone.

## 4.2 Il Corpo e l'Anima dell'Atomo

Quando ero bambino, il sacerdote di Moschiano, il Rev. Pietro Puntone, che m'insegnava catechismo per la preparazione alla mia prima comunione, mi spiegò che l'essere umano è composto di due componenti: **corpo** e **anima**. Il corpo, mi spiegò il sacerdote, è la parte materiale dell'essere umano ed è costituito da carne, ossa, capelli, pelle, ecc., cioè materia che può essere esplorata attraverso le nostre capacità sensoriali (vista, udito, tatto, sapore e odore). L'anima, invece, è la parte spirituale dell'essere umano e non può essere esplorata attraverso le nostre capacità sensoriali. Il Rev. Puntone continuò dicendo che, senza l'anima, il corpo sarebbe semplicemente un'ammucchiata di materia passiva, inerte e disorganizzata, non molto diversa da qualsiasi altro agglomerato inorganico di materia. Inoltre, spiegò che l'anima è la componente che **dà vita al corpo**, consentendo così al corpo di svolgere una serie di funzioni organizzate e ben strutturate (per es., camminare, parlare, ecc.), comprese capacità avanzate, come quelle di pensare e di formulare concetti astratti. Quando io chiesi:

- **Di cosa è composta l'anima?**
- **Come appare?**
- **Potrei vederla o toccarla?**

Il Rev. Puntone mi ammonì di non fare domande impertinenti, poiché l'anima è un dono di Dio all'umanità con funzioni superiori e somigliante a Dio stesso. Pertanto, dovevo accettarla "in fede" senza fare domande. "Se proprio vuoi sapere come appare" - aggiunse – "pensala come un'ombra; la tua stessa ombra".

Mentre studiavo la Fisica delle Particelle, mi è venuto in mente che la relazione tra fermioni e bosoni, per molti aspetti, assomiglia alla relazione tra corpo e anima spiegatami dal Rev. Puntone. Infatti, senza i bosoni, i fermioni sarebbero semplicemente un'ammucchiata di particelle, materia passiva, inerte, disorganizzata e senza alcuna forma. Sono i bosoni che fanno sì che i fermioni si organizzino e si uniscano per formare particelle composte. Ad esempio, sono i gluoni (bosoni) che legano e tengono insieme i tre quark che compongono Protoni e Neutroni e sono, ancora una volta, i gluoni che legano e tengono insieme Protoni e Neutroni all'interno del nucleo degli atomi. Allo stesso modo, come vedremo in dettaglio più avanti, è il fotone (un altro bosone) che fa sì che due particelle aventi una carica elettrica simile si respingano vicendevolmente. E ancora (come vedremo in dettaglio più avanti), è il bosone W che fa sì che gli atomi si dividano e si trasformino in diversi tipi di materia. L'idea che la relazione tra fermioni e bosoni sia come la relazione tra corpo e anima di un essere umano, come promulgata dalla religione cattolica, per quanto intrigante possa apparire, non può essere, però, accettata "in fede" dalla

scienza. Nel mondo della scienza, se i bosoni esistono e hanno funzioni simili a quelle dell'anima, vogliamo sapere:

- **Di cosa sono costituiti;**
- **Che tipo di attributi, caratteristiche e proprietà hanno;**
- **Inoltre, vogliamo vederli (se non direttamente con i nostri occhi, almeno indirettamente attraverso i loro effetti su altre particelle).**

Nelle sezioni che seguono spiegheremo come gli scienziati hanno studiato le particelle che sono state scoperte e i criteri che hanno seguito per organizzarle nella rappresentazione del Modello Standard. Abbiamo già spiegato come gli scienziati si sono mossi per scoprire le varie particelle elementari e fondamentali, spiegheremo ulteriormente come queste particelle interagiscono tra loro. Tutto ciò è stato oggettivamente e razionalmente dimostrato con esperimenti di laboratorio, senza fare ricorso alla "fede" o a "credenze varie".

### **4.3 Sommario delle Proprietà delle Particelle Comprese nel Modello Standard**

In questa Sezione illustreremo ulteriormente il lavoro svolto negli anni '70 da molti scienziati che hanno studiato caratteristiche, proprietà e attributi delle varie particelle comprese nel Modello Standard, sottolineando somiglianze e ragioni per cui sono state collocate nelle varie categorie (o famiglie) indicate nel Modello Standard. L'obiettivo di questi studi era di:

- **Chiarire e spiegare come le varie particelle coesistessero all'interno dell'atomo;**
- **Comprendere i meccanismi attraverso i quali queste particelle elementari o anche composte si uniscano fra loro;**
- **Determinare perché gli atomi di alcune sostanze decadono spontaneamente.**

Per facilitare il compito del lettore replichiamo qui sotto la Figura 6.

## Standard Model of Elementary Particles

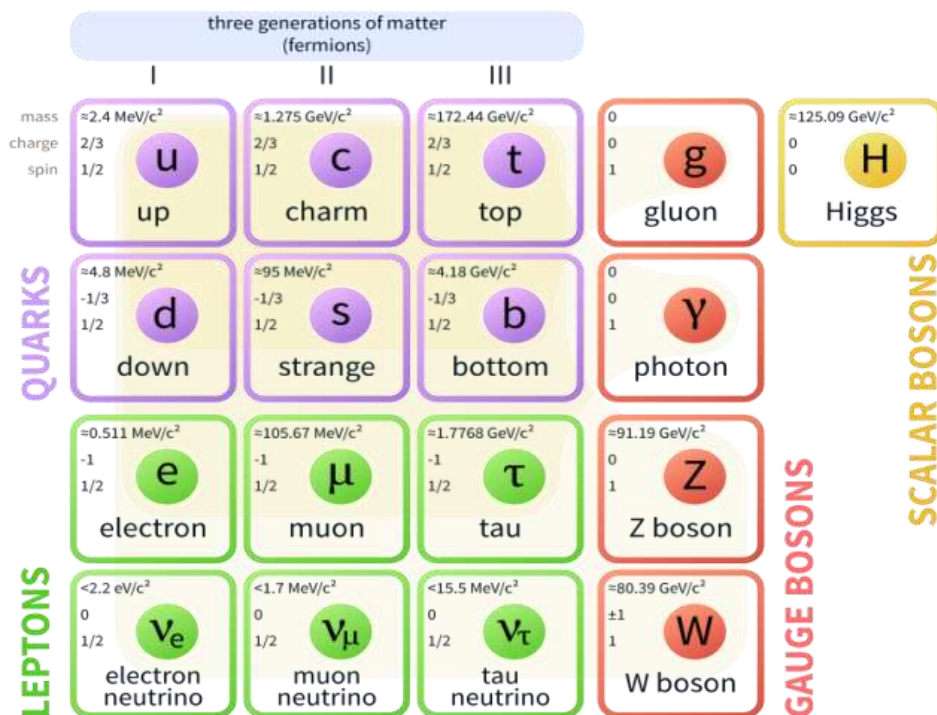


Figura 6a: Modello Standard (Fonte: Wikipedia)

Tutte le particelle fondamentali scoperte e/o ipotizzate fino alla fine degli anni '70 sono classificate nel Modello Standard in cinque colonne come segue:

1. Particelle di I generazione (colonna 1 Figura 6a);
2. Particelle di II generazione (colonna 2 Figura 6a);
3. Particelle di III generazione (colonna 3 Figura 6a);
4. Bosoni (vettori) (colonna 4 Figura 6a);
5. Bosoni scalari (colonna 5 Figura 6a).

Le prime tre generazioni di particelle sono ulteriormente suddivise in quark (righe 1 & 2) e leptoni (righe 3 & 4).

Riassumendo:

1. **Le particelle di 1<sup>a</sup> generazione** sono quelle che si trovano nella colonna 1 della Figura 6a. Esse condividono le seguenti caratteristiche: sono stabili e si trovano nella materia ordinaria. Inclusive in questa categoria troviamo particelle che erano note molto prima che gli scienziati iniziassero a lavorare con gli acceleratori di particelle (i.e., gli elettroni e i neutrini che appartengono alla sottocategoria dei leptoni) e le particelle che sono state scoperte con la prima generazione di acceleratori (gli Up-Quark e i Down-Quark). Facciamo anche notare che, delle quattro particelle comprese nella prima colonna del Modello Standard, solo i due quark subiscono la Strong Force.

- 2. Le particelle di 2<sup>a</sup> generazione** sono quelle che si trovano nella colonna 2 della figura 6a. Le due particelle quark (chiamati Charm e Strange) sono state scoperte utilizzando acceleratori più avanzati e anch'essi, come i loro fratelli della prima generazione, sono soggetti alla Strong Force. Le altre due particelle (Muone e Muone-neutrino) sono leptoni e, come i loro fratelli della prima generazione, non sono soggetti alla Strong Force. Tutte e quattro le particelle nella colonna di seconda generazione condividono le seguenti caratteristiche: non sono stabili e non sono presenti nella materia ordinaria.
- 3. Le particelle di 3<sup>a</sup> generazione** sono quelle che si trovano nella colonna 3 della figura 6a. Le prime due di queste particelle (Top-quark e Bottom-quark) sono state scoperte utilizzando gli acceleratori più avanzati oggi esistenti (il Large Hadron Collider o LHC) e, come tutti i quark, sono soggetti alla Strong Force. Le altre due particelle (note come Tau e Tau-neutrino) sono Leptoni e, come tutti i Leptoni, non sono soggette alla Strong Force. Tutte e quattro le particelle condividono le seguenti caratteristiche: non sono stabili e non sono presenti nella materia ordinaria.

In aggiunta a quanto detto prima, nella colonna 4 della figura 6a del Modello Standard troviamo 4 tipi di bosoni:

- 1. Gluon (Gluoni);**
- 2. Photon (Fotoni);**
- 3. Z-boson (Z-Bosoni);**
- 4. W-boson (W-Bosoni).**

Queste quattro particelle sono anche chiamate "bosoni vettoriali" o "particelle messaggere". Vedremo più avanti perché a queste particelle sono stati dati questi nomi.

Nel Modello Standard troviamo una quinta colonna contenente un bosone solitario, conosciuto con il nome dello scienziato che per primo ne ipotizzò l'esistenza: il bosone di Higgs. Questo è l'unico bosone non vettoriale e per questo motivo, a volte, viene chiamato "bosone scalare". Il bosone di Higgs è anche noto come "**particella di Dio**" perché è il bosone responsabile della creazione della materia. C'è anche un altro bosone chiamato Gravitone, che è il "messaggero" della Forza Gravitazionale, ma poiché questa Forza è molto debole, non gioca alcun ruolo nel modo in cui le particelle si tengono insieme all'interno dell'atomo e, per questo motivo, non è incluso nel Modello Standard.

Un lettore attento avrà forse già capito che la categorizzazione delle varie particelle si basa sugli attributi, sulle caratteristiche e sulle proprietà di ciascuna particella. Una metodologia, questa, non molto diversa da quella seguita da Mendeleev, quando creò per la prima volta la Tavola Periodica degli Elementi, alla fine del XIX secolo.

## **5.0 Domande Sconcertanti Senza Risposte dal Modello Standard**

Nelle sezioni precedenti abbiamo illustrato come gli scienziati, a partire dalla seconda metà del XX secolo, bombardando protoni con altri protoni, scoprirono non meno di dieci particelle fermioniche e ipotizzarono una mezza dozzina di particelle bosoniche che, insieme alle particelle fermioniche, **danno**

**vita** agli atomi delle varie sostanze che conosciamo. Come abbiamo affermato in precedenza, molti scienziati hanno contribuito alla scoperta di alcune delle particelle elementari e fondamentali e gli stessi scienziati hanno identificato attributi, caratteristiche e proprietà delle particelle stesse e poi hanno contribuito alla formulazione del Modello Standard sopra descritto negli anni '50, '60 e '70 del secolo scorso. Tuttavia, nonostante i progressi ottenuti, gli scienziati non riuscivano a spiegare completamente, tramite il Modello Standard, tutti i fenomeni degli atomi di alcune sostanze. Alcune delle domande più sconcertanti includono quanto segue:

- Se il guscio di un atomo (e molto di più il guscio di un nucleo) è così difficile da rompere, perché alcuni nuclei di atomi lasciano uscire delle particelle spontaneamente? Ad esempio, il Potassio-40 (una sostanza che riscalda il nucleo della Terra) emette spontaneamente particelle *beta* e, su un periodo molto lungo, si trasforma ("decade" sarebbe la parola più appropriata) in Calcio-40. Allo stesso modo l'Uranio, attraverso una serie di decadimenti, alla fine si trasforma in Piombo. In effetti, anche il muone, che abbiamo elencato sopra come particella fondamentale, emette spontaneamente due tipi di neutrini e, nel processo, si trasforma in un elettrone.
- C'erano, infine, altre domande alle quali gli scienziati non sapevano dare risposte:
  - **Come si tengono insieme queste particelle fondamentali e quali forze, se ce ne sono, le legano insieme all'interno di un atomo?**
  - **Esiste una teoria della fisica delle particelle che descriva le interazioni di questi elementi costitutivi fondamentali della materia?**
  - **Le particelle che non sono stabili e non possono essere trovate nella materia ordinaria (ad esempio, particelle di 2<sup>a</sup>, 3<sup>a</sup> generazione e Bosoni), appartengono alla stessa famiglia di particelle stabili o no?**
  - **Se appartengono alla stessa famiglia, sono anche essi coperti dalla stessa teoria della fisica delle particelle?**

Stephen Weinberg ha formulato una risposta a queste domande e ha chiamato la sua ipotesi "Teoria del Modello Standard". Per i suoi contributi su quest'argomento e altre ricerche, nel 1979 è stato insignito del Premio Nobel.

Per comprendere la Teoria del Modello Standard, dobbiamo prima introdurre e spiegare le 4 forze fondamentali della natura. Alcune di queste forze sono ben note ai nostri lettori (ad esempio, la forza gravitazionale). Altre forze (ad esempio, la Strong Force e la Weak Force) potrebbero non essere così ben note. Poiché queste svolgono un ruolo essenziale nella Teoria del Modello Standard, dobbiamo introdurle e spiegarle, prima ancora di entrare nel merito della Teoria del Modello Standard e della sua equazione (chiamata LAGRANGIANO).

## 5.1 Forze Fondamentali della Natura

Ci sono quattro forze fondamentali in natura:

- **Forza di gravità.** Questa è la forza scoperta da Newton [vedi Nota 4] nel XVII secolo secondo la quale due masse, non importa quanto grandi o piccole, si attraggono sempre a vicenda. Questa forza, se confrontata con le altre tre forze, è veramente debole (sì, molto, molto, molto ... più debole anche della Weak Force che già di per sé è una Forza Debole!). Di conseguenza, gioca un ruolo molto trascurabile nel modo in cui le particelle all'interno di un atomo si tengono insieme (vedi Nota 12). Per questo motivo, il Modello Standard non se ne occupa. A volte gli scienziati descrivono questa forza come una "forza vincolante" perché è in grado di tenere insieme gli oggetti come se fossero incollati. Per esempio, pensi il lettore a un essere umano che sembra essere incollato alla superficie della Terra: questo avviene per effetto della forza gravitazionale. Senza la forza gravitazionale, spinto dalla forza centrifuga, causata sia dal movimento di rotazione sia dal movimento di rivoluzione della Terra, l'essere umano sarebbe scagliato nello spazio profondo.
- **Weak Force** (Forza Debole). Questa è una forza che è sentita solo dalle particelle sinistrorse (mancine). Pertanto, solo i Quark e i Leptoni sperimentano la Forza Debole ed è attraverso le interazioni di queste particelle con la Forza Debole che gli scienziati sono stati in grado di spiegare alcune forme di decadimento spontaneo [ad esempio, il decadimento del Potassio che riscalda il nucleo della Terra o il decadimento dei neutroni] [vedi Nota 3 e Nota 8]. Come detto sopra, la Weak Force influenza tutti i fermioni del Modello Standard e influenza anche il bosone di Higgs. A differenza delle altre forze, la Forza Debole non produce legami vincolanti, né coinvolge energia vincolante. Ciò è in contrasto con le altre tre forze. In effetti, la gravità produce legami vincolanti (anche se su scala astronomica), la forza elettromagnetica produce legami vincolanti a livello atomico e la Strong Force – Forza Forte-- produce legami vincolanti all'interno dei nuclei. L'effetto più evidente della Forza Debole è la sua capacità di trasformare le particelle elementari, ad esempio, cambiare il flavor dei quark: infatti cambiando il flavor di uno dei due down-quark all'interno di un Neutrone in un up-quark, permette al Neutrone, dopo aver emesso un elettrone, di trasformarsi in un Protone. Questa trasformazione è chiamata "decadimento" [vedi nota 3].  
Ricordiamo anche che la Weak Force (Forza Debole) perde la sua forza e, quindi, non è più efficace, a distanze molto, molto, ... molto brevi, cioè a distanze di 1 Atto-metro. Quando la Forza Debole è efficace, lo farà solo per un periodo di tempo molto, molto, ... molto breve. In altre parole, il messaggero della forza, (cioè, il bosone W) ha una vita molto, molto, molto, ... breve, cioè, inferiore a 1 Yocto-secondo [vedi Nota 16].
- **Forza elettro-magnetica.** Questa è la forza che influenza e regola tutte le interazioni tra particelle che trasportano una carica elettrica (ad esempio, elettrone-elettrone, elettroni-protoni, ecc.).
- **Strong Force** (Forza Forte). Questa è la forza che lega insieme i Quark (che sono gli elementi costitutivi di Protoni e Neutroni) e lega anche Protoni e Neutroni (che sono gli elementi costitutivi dei Nuclei). Si chiama "forte" perché è, davvero, molto forte [vedi Nota 10].

## 5.2 Come le Forze Fondamentali Interagiscono con le Particelle

La Teoria del Modello Standard descrive come le 4 Forze, illustrate in precedenza nella Sezione 5.1, interagiscono con le particelle fondamentali. Nella Sezione 5.2.1 descriveremo come funzionano le cose nel caso delle forze elettromagnetiche.

### 5.2.1 Come la Forza Elettromagnetica Interagisce con le Particelle

Per esperienza sappiamo che due elettroni, viaggiando su una traiettoria di collisione, si respingono a vicenda. Un lettore curioso può porre la seguente domanda intrigante:

- **Quale è la causa scatenante che costringe due elettroni in rotta di collisione a respingersi?**

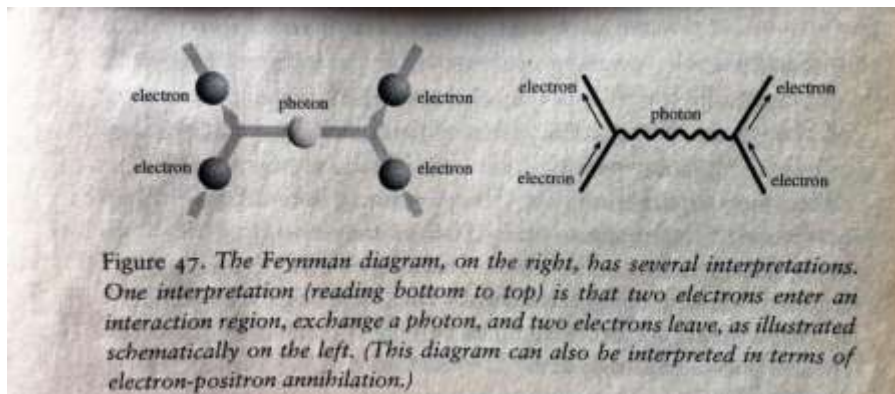


Figura 7: due elettroni in rotta di collisione si respingono a vicenda (Fonte: Wikimedia Commons – Feynman Diagrams)

Il modo in cui funzionano le cose è che due elettroni (provenienti dal basso nella figura 7) viaggiando su traiettorie di collisione, quando percepiscono la presenza di un altro elettrone nelle vicinanze, si scambiano un fotone. Il fotone comunica la forza elettromagnetica a entrambi gli elettroni e poi scompare. Sotto l'effetto della forza elettromagnetica, comunicata dal fotone, i due elettroni cambiano traiettoria e si allontanano l'uno dall'altro (invece di scontrarsi "l'uno con l'altro"). In altre parole, il fotone agisce come un messaggero che comunica la forza elettromagnetica all'altro elettrone e poi scompare. È il fotone che trasmette, o media, la forza elettromagnetica tra i due elettroni per poi scomparire.

In conclusione: la forza elettromagnetica interagisce con le particelle fondamentali tramite il fotone, che funge da messaggero della forza.

L'esempio del fotone, messaggero che funge da mediatore e trasmette la forza elettromagnetica, ci induce a domandarci:

- **Possiamo dire che le altre forze funzionano allo stesso modo?**
- **Possiamo dire che ciascuna delle 4 forze della natura ha il proprio messaggero che trasmette (o funge da mediatore nel trasmettere) la forza?**

La risposta è: **Si!** Ciascuna delle quattro forze fondamentali della natura ha la sua particella messaggera. Queste particelle messaggere sono state ipotizzate per la prima volta quando gli scienziati stavano costruendo il Modello Standard. Successivamente, queste particelle elementari sono state effettivamente scoperte in laboratorio lavorando con l'LHC. Tutte queste particelle messaggere, o mediatrici di forze, fanno parte della famiglia dei **bosoni** e sono illustrate nella tabella che segue:

<b>FORZA</b>	<b>MESSAGGERO (Bosone)</b>
Forza Gravitazionale	Gravitone
Strong Force (Forza Forte)	Gluone
Forza Elettromagnetica	Fotone
Weak Force (Forza Debole)	Bosone W e Bosone Z

Queste “particelle messaggere” appartengono alla categoria di particelle chiamate **Bosoni**. In conclusione: ciascuna delle 4 forze fondamentali della natura agisce su alcune delle particelle fondamentali, chiamate fermioni, attraverso il proprio messaggero [la Nota 12 fornisce un riepilogo delle più importanti interazioni tra le 4 forze fondamentali e le varie particelle]. Ricordiamo ancora una volta che questi bosoni hanno vita brevissima e il loro effetto si fa sentire solo su distanze così piccole che gli scienziati hanno dovuto inventare parole nuove per descriverle. Ricordiamo pure che l’effetto di uno di questi bosoni è così strabiliante (perché è il bosone che dà massa ai fermioni) che è stato chiamato “**la particella di Dio**”.

Nel corso degli anni gli scienziati hanno sospettato che le 4 forze fondamentali della natura non fossero indipendenti l'una dall'altra. In effetti, hanno sospettato che queste quattro forze fossero figlie di una forza comune. Famosi scienziati (Einstein fra loro) hanno cercato una Teoria della Grande Unificazione (GUT) [vedi Nota 13], che identificasse la madre di queste 4 forze e spiegasse le loro origini comuni. Nonostante alcuni passi avanti, finora, non ci sono completamente riusciti. [Vedi Nota 13 per ulteriori informazioni sull'argomento].

### 5.3 Formulazione Finale della Teoria del Modello Standard

La Teoria del Modello Standard di Weinberg parte dalla categorizzazione di tutte le particelle elementari che si trovano all'interno dell'Atomo (vedi Figura 6) e le presenta in un'immagine che ricorda la Tavola Periodica degli Elementi. Descrive le interazioni delle particelle fondamentali e come queste particelle sono influenzate dalle 4 forze fondamentali della natura descritte in precedenza. La Teoria del Modello Standard prende in considerazione non solo le interazioni delle particelle di prima generazione, come elettroni, up-quark e down-quark, che sono stabili e si trovano nella materia ordinaria, ma anche le interazioni delle particelle di seconda e terza generazione (quelle particelle più pesanti non presenti nella materia ordinaria e che sono altamente instabili). Infine, prende in considerazione i bosoni e descrive il ruolo che essi svolgono nel tenere insieme tutte le particelle elementari all'interno dell'atomo o il ruolo

che essi svolgono nelle trasformazioni (o decadimento) delle particelle stesse o degli atomi e perfino nella creazione della materia. La formulazione matematica di questa teoria è descritta nella Sezione seguente.

### 5.3.1 Il Lagrangiano della Teoria del Modello Standard

Noi tutti sappiamo che, quando i fisici scoprono relazioni tra due o più entità e/o regole che governano il comportamento di un sistema, amano esprimere queste relazioni/regole con formule matematiche, che chiamano equazioni. Queste equazioni sono anche chiamate **leggi della fisica** [ad esempio, legge gravitazionale di Newton [vedi Nota 4], equazioni di campo di Einstein (EFE), equazione della meccanica quantistica di Schrödinger, equazioni dell'elettromagnetismo di Maxwell, ecc.]. È attraverso queste leggi (o equazioni) della fisica che gli scienziati possono simulare un sistema e, quindi, studiare e prevederne il comportamento.

Ebbene, quando Stephen Weinberg ha proposto la Teoria del Modello Standard, anche egli ha escogitato un'equazione che esprime le relazioni tra tutte le componenti fondamentali dell'atomo e le quattro forze fondamentali della natura. A questa equazione Weinberg ha dato il nome di **Lagrangiano del Modello Standard** (chissà perché non l'ha chiamato il Weinberg del Modello Standard?). Tutte le interazioni fra le particelle fondamentali e tre delle quattro forze fondamentali che tengono insieme queste particelle (la forza gravitazionale è stata trascurata in quanto troppo debole) sono rappresentate nella funzione chiamata il Lagrangiano.

Quando Sophia, la giovane studentessa che stava studiando la Teoria del Modello Standard, vide per la prima volta l'equazione lagrangiana, si agitò moltissimo e fu sul punto di abbandonare il suo progetto. Poi, però, non si arrese: rinunciò a cercare di capire immediatamente i dettagli matematici e si concentrò nella comprensione dei concetti basilari usati frequentemente nella fisica elementare. Proviamo a spiegare questi concetti.

In fisica diciamo che conosciamo lo stato o "status" di un sistema (un sistema potrebbe essere una singola particella o un conglomerato di particelle, come le 17 particelle elementari che si trovano nell'atomo) se conosciamo la sua **posizione iniziale** e **velocità**. In altre parole, se sappiamo dove si trova un atomo inizialmente (la sua posizione) e dove sta andando (la sua velocità), allora possiamo prevedere dove sarà, istante per istante, in qualsiasi momento successivo. In fisica elementare abbiamo anche imparato che, se conosciamo l'energia totale di un sistema, possiamo costruire un'equazione da cui derivare posizione e velocità del sistema. [Esempi elementari su come trovare lo stato di un sistema partendo dalla sua energia e/o dalla sua equazione energetica sono illustrati nella Nota 6]. Il sistema che qui stiamo considerando, cioè l'atomo, è più complesso, perché è composto di molte particelle, ma il concetto è lo stesso. Qui, ad altissimo livello e senza entrare nei dettagli, mostreremo come costruire l'equazione lagrangiana che ci fornisce l'energia totale dell'intero Atomo, a partire dall'energia delle singole particelle fondamentali che lo compongono. L'energia totale dell'intero Atomo è data dall'equazione:

$$\mathbf{L} = \mathbf{E}_k - \mathbf{U}_p$$

Dove  $\mathbf{L}$  è l'energia totale dell'intero sistema (l'atomo),  $\mathbf{E}_k$  è la sua energia cinetica e  $\mathbf{U}_p$  è la sua energia potenziale. Nel nostro caso, guardando la Figura 6a, il nucleo dell'Atomo è composto da molte particelle, quindi, l'energia totale dell'Atomo deve essere la somma delle energie di tutte le particelle costituenti. Nella 1ª riga dell'equazione (vedi Figura 8, sotto), scritta in formato compatto, troviamo l'energia dei Bosoni; nella 2ª riga troviamo l'energia dei leptoni; nelle righe successive troviamo l'energia di tutte le altre particelle, tutte scritte in formato compatto. Quando sommiamo tutte queste energie, otteniamo l'energia totale dell'Atomo. Il risultato è una complessa equazione matematica, che Stephen Weinberg ha chiamato il **Lagrangiano** del Modello Standard, mostrata nella Figura 8 qui sotto. Una volta che conosciamo questa equazione, tutto ciò che resta da fare è risolverla per trovare lo stato (cioè, posizione, velocità, ecc.) dell'atomo.

$$\begin{aligned}
\mathcal{L} = & -\frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} - \frac{1}{8}\text{tr}(\mathbf{W}_{\mu\nu}\mathbf{W}^{\mu\nu}) - \frac{1}{2}\text{tr}(\mathbf{G}_{\mu\nu}\mathbf{G}^{\mu\nu}) && \text{(U(1), SU(2) and SU(3) gauge terms)} \\
& +(\bar{\nu}_L, \bar{e}_L)\bar{\sigma}^\mu iD_\mu \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix} + \bar{e}_R\sigma^\mu iD_\mu e_R + \bar{\nu}_R\sigma^\mu iD_\mu \nu_R + (\text{h.c.}) && \text{(lepton dynamical term)} \\
& -\frac{\sqrt{2}}{v} \left[ (\bar{\nu}_L, \bar{e}_L)\phi M^e e_R + \bar{e}_R\bar{M}^e\bar{\phi} \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix} \right] && \text{(electron, muon, tauon mass term)} \\
& -\frac{\sqrt{2}}{v} \left[ (-\bar{e}_L, \bar{\nu}_L)\phi^* M^\nu \nu_R + \bar{\nu}_R\bar{M}^\nu\phi^T \begin{pmatrix} -e_L \\ \nu_L \end{pmatrix} \right] && \text{(neutrino mass term)} \\
& +(\bar{u}_L, \bar{d}_L)\bar{\sigma}^\mu iD_\mu \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} + \bar{u}_R\sigma^\mu iD_\mu u_R + \bar{d}_R\sigma^\mu iD_\mu d_R + (\text{h.c.}) && \text{(quark dynamical term)} \\
& -\frac{\sqrt{2}}{v} \left[ (\bar{u}_L, \bar{d}_L)\phi M^d d_R + \bar{d}_R\bar{M}^d\bar{\phi} \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} \right] && \text{(down, strange, bottom mass term)} \\
& -\frac{\sqrt{2}}{v} \left[ (-\bar{d}_L, \bar{u}_L)\phi^* M^u u_R + \bar{u}_R\bar{M}^u\phi^T \begin{pmatrix} -d_L \\ u_L \end{pmatrix} \right] && \text{(up, charmed, top mass term)} \\
& +(\overline{D_\mu\phi})D^\mu\phi - m_h^2[\bar{\phi}\phi - v^2/2]^2/2v^2. && \text{(Higgs dynamical and mass term)} \quad (1)
\end{aligned}$$

Figura 8: Lagrangiano scritto in forma compatta (Fonte: *Standard Model of Particle Physics*, by Cottingham and Greenwood)

Se provassimo ad esplicitare ulteriormente le singole componenti (che nella Figura 8 sono state riportate in forma compatta) nei loro dettagli (cioè, fornire i dettagli matematici sull'energia cinetica e l'energia potenziale di ciascuna particella fondamentale), ciò che verrebbe fuori è un'orrenda equazione che solo persone con una vasta conoscenza della matematica possono gestire. Sophia non ha tale conoscenza, ma si affida alle persone che tale conoscenza ce l'hanno e hanno trovato le soluzioni all'equazione. Le soluzioni di questa orrenda equazione ci dicono come le 17 particelle mostrate nella Figura 6 sono tenute insieme all'interno dell'atomo. Le soluzioni di questa equazione ci dicono pure come le 3 forze della natura, con l'apporto delle particelle mediatrici (cioè, i bosoni), fanno sì che tutte le particelle fermioniche si uniscano insieme per formare tutta la materia che vediamo intorno a noi e nell'intero Universo. Quando risolviamo questa equazione, troveremo anche le spiegazioni a molti fenomeni che, fino a diversi decenni fa, gli scienziati non erano in grado di spiegare. Ad esempio, dalla soluzione di questa equazione, ora sappiamo perché, come e quando il Potassio decade spontaneamente in Calcio; perché, come e quando l'Uranio decade in Piombo; ecc. In altre parole, la Teoria del Modello Standard

e la sua equazione Lagrangiana ci hanno permesso di fornire risposte a tutte quelle domande sconcertanti illustrate nella Sezione 5.0.

## 5.4 Carenze della Teoria del Modello Standard

Nonostante l'elevato grado di accuratezza di molte previsioni della Teoria del Modello Standard, ci sono alcune domande e fenomeni che la Teoria del Modello Standard non è stata ancora in grado di spiegare. Prendiamo, ad esempio, la particella chiamata **muone**. Questa particella era stata scoperta molto prima che il Modello Standard fosse formulato. Il muone è stato scoperto per la prima volta più di 60 anni fa mentre si studiavano i raggi cosmici; lo si ritrova misteriosamente quando gli scienziati, usando il LHC del CERN, rompono il guscio esterno del protone. Ebbene, questa particella è ancora un mistero. Quando fu scoperta per la prima volta, durante lo studio dei raggi cosmici, questa particella fu analizzata scrupolosamente e si scoprì che aveva le seguenti proprietà:

- **Ha una carica negativa (come l'elettrone);**
- **Ha una massa che è circa 200 volte la massa dell'elettrone (cioè, è 200 volte più pesante dell'elettrone);**
- **Ha una vita molto breve (2,2 milionesimi di secondo);**
- **Decade in un elettrone alla fine della sua vita.**

Ebbene, questa stessa particella, con le stesse caratteristiche, compare quando, usando acceleratori ad alta energia, si rompono i gusci esterni dei protoni bombardandoli con altri protoni; in questo caso, però, la Teoria del Modello Standard non riesce a spiegare:

- **Da dove proviene il muone?**
- **Come fa ad arrivare dove lo si trova?**
- **Perché decade in un elettrone?**

Ci sono altri fenomeni che la Teoria del Modello Standard non riesce a spiegare, ma sono troppo complicati per questo saggio elementare e, quindi, non li riportiamo. Dobbiamo attendere ulteriori perfezionamenti del Modello Standard o una nuova teoria più avanzata per avere risposte alle suddette domande.

In effetti, una nuova teoria chiamata **TEORIA DELLE STRINGHE** (Strings Theory) è già stata identificata, ma successivamente ha creato dubbi fra gli scienziati. In ogni caso, la Teoria delle Stringhe va oltre lo scopo di questo saggio. In futuro potremmo sviluppare un nuovo saggio chiamato **Strings Theory Essay**. Poiché la Teoria del Modello Standard spiega virtualmente tutte le "domande sconcertanti" sollevate nella Sezione 5.0, la accetteremo così com'è e ci fermeremo qui. Aggiungeremo questo saggio quando, in futuro, gli scienziati perfezioneranno la Teoria del Modello Standard o troveranno una nuova teoria, che potrebbe soppiantare del tutto la Teoria del Modello Standard.

### 5.4.1 Domande di Sophia e il suo Video sulla Teoria del Modello Standard

Incuriosita dall'analogia tra l'anima degli esseri umani e i bosoni, Sophia ha posto una serie di domande che riportiamo qui a titolo di cronaca.

- **Quali sono stati i punti salienti che hanno portato a paragonare l'anima degli esseri umani con i bosoni?**

Risposta: A me sembra che queste due entità (anima degli esseri umani e bosoni) abbiano parecchie cose in comune:

1. Entrambe sono inaccessibili alle capacità sensoriali degli esseri umani. I nostri sensi sono abituati a percepire e anche a misurare il passaggio del tempo, ma solo fino a qualche decimo di secondo. Se però un'entità, come il bosone W, ha una vita che dura meno di 1 Yocto-secondo, allora è ovvio che i nostri sensi non riescano a percepirlo e tanto meno a misurarlo. Gli scienziati hanno dovuto inventare il Large Hadron Collider per misurare la vita del bosone W.
2. Sia l'anima, sia alcuni (ma non tutti) bosoni hanno massa  $m = 0$ . Pertanto, se ponessimo su una bilancia un bosone, come il gluone, l'ago della bilancia non si muoverebbe (a indicare che il suo peso è uguale a zero). Ciò è esattamente uguale a quello che teologi, scrittori, poeti e anche il Rev. Pietro Puntone ci hanno sempre detto dell'anima.
3. Come le anime, più particelle bosoniche possono occupare lo stesso spazio. Anche qui teologi, scrittori e poeti ci hanno sempre detto che più anime possono occupare lo stesso posto (si pensi a Caronte, nocchiero dell'Acheronte nella Divina Commedia, che trasporta centinaia di anime 'prave' all'inferno con una barchetta così piccola che cominciò a traballare quando Dante mise piede su di essa). Nel caso dei bosoni, il Principio di Esclusione di Pauli ci assicura che più bosoni possono occupare lo stesso spazio, esattamente come l'anima degli esseri umani. Ricordo molto bene che il Rev. Puntone mi diceva che l'anima di un defunto poteva entrare nella stanza dove io dormivo, anche se la stanza era chiusa a chiave. Infatti, "l'anima può attraversare anche un muro di cemento armato", diceva il Rev. Puntone. Un fisico direbbe che, se l'anima è capace di fare ciò, è perché non obbedisce al Principio di Esclusione di Pauli, esattamente come i bosoni!
4. Infine, il punto forse più importante: quando teologi, poeti, scrittori e anche il Rev. Puntone ci assicurano che è l'anima che **dà vita al corpo umano**, viene naturale pensare che anche i bosoni esercitano una simile funzione. Basti pensare ai gluoni che con le loro azioni organizzano e tengono insieme più quark, **dando vita** così a protoni e neutroni. E sono gli stessi gluoni che organizzano e tengono insieme protoni e neutroni **dando vita** così agli atomi. E sono poi i bosoni della forza elettromagnetica (cioè, i fotoni) che **danno vita** prima ai composti chimici, poi alle cellule, poi alle proteine e ..... così via in una lunga catena alla cui estremità troviamo esseri viventi, come gli esseri umani, le piante, i batteri, i virus, etc., etc. E che dire del bosone di Higgs? Questo è il bosone che dà massa (quindi **dà vita**) ai fermioni, che a loro volta costituiscono il corpo umano. Non per niente gli stessi scienziati l'hanno chiamato "**la particella di Dio**". Purtroppo, è anche vero che, a volte, questi bosoni organizzano i fermioni e i loro prodotti derivati in modo tale da dar vita a entità

malefiche, come virus, batteri, etc., etc., che causano pandemie mondiali. Un esempio di tale pandemia è il virus della “febbre spagnola” scatenatasi circa un secolo fa; un esempio più recente è il virus denominato Covid-19. Tuttavia, possiamo consolarci considerando che gli scienziati delle scienze mediche hanno imparato a decifrare il DNA di questi virus malefici e sono in grado di sviluppare vaccini che ci aiutano a combatterli.

In conclusione, nel contesto della domanda di Sophia, sembra che l'unica grandissima differenza tra le anime degli esseri umani e i bosoni sia che le prime, secondo i teologi e secondo il Rev. Puntone, devono essere accettate “in fede” o “per fede”, mentre l'esistenza dei secondi è stata confermata scientificamente con esperimenti di laboratorio.

Un'altra domanda di Sophia:

- **Sembra che gli scienziati siano riusciti a pensare all'esistenza dei bosoni ancor prima di averli visti o scoperti in laboratorio. La domanda è: “Come fanno gli scienziati a pensare all'esistenza di qualcosa che non hanno mai visto e di cui non hanno prove”?**

Risposta: Osservando fenomeni naturali, eventi, fatti o cose, gli scienziati cercano sempre di scoprire il “perché” di questi fenomeni. A volte partono da indizi, altre volte mancano anche gli indizi. Quando gli scienziati non sono in grado di collegare razionalmente **causa** ed **effetto** di un fenomeno, spesso avanzano ipotesi basate su indizi (se esistono). Nell'avanzare le loro ipotesi alcuni scienziati fanno uso delle loro spiccate qualità intuitive, altri fanno appello alla loro fantasia, tutti fanno appello alle loro esperienze passate, qualcuno si affida anche al caso. Col tempo poi, tramite esperimenti di laboratorio, cercano di avere conferma della loro ipotesi. Questo è esattamente ciò che è avvenuto con le particelle elementari chiamate bosoni, prima ipotizzati e poi scoperti in laboratorio tramite l'uso di apparecchiature avanzate, come il LHC.

Probabilmente, il processo non è molto diverso da quello seguito dai teologi che hanno ipotizzato l'esistenza dell'anima, senza averla mai vista e senza aver prove scientifiche concrete della sua esistenza. La differenza tra i teologi e gli scienziati è che, mentre i primi non sono mai riusciti a dare prove concrete e razionali dell'esistenza dell'anima, gli scienziati sono riusciti a confermare le loro ipotesi con prove obiettive suffragate da esperimenti condotti in laboratorio. Vogliamo anche sottolineare che questa è la principale differenza tra teologi e scienziati, quando s'indaga su fenomeni naturali. Quando i teologi s'imbattono in fenomeni che non possono essere spiegati razionalmente, spesso affermano che questi sono le manifestazioni della “Volontà di Dio” e, come tali, devono essere accettati “in fede”. Invece, quando gli scienziati s'imbattono in fenomeni che non possono essere spiegati razionalmente e oggettivamente verificati, spesso (se non sempre) mettono in discussione le teorie esistenti e non si fermano finché non trovano una teoria nuova che spieghi razionalmente e certifichi oggettivamente e scientificamente il fenomeno in questione.

Teniamo a precisare che, mentre i bosoni possono svolgere un ruolo simile a quello che l'anima svolge sul corpo umano, la scienza non permetterebbe mai che essi siano accettati “in fede” o “per fede”. Se

questi bosoni veramente esistono, allora la loro esistenza deve essere obbiettivamente e scientificamente dimostrata con esperimenti di laboratorio. Inoltre, le loro caratteristiche, proprietà e attributi devono essere studiati e adeguatamente compresi. Quando si parla di bosoni, è proprio questo che gli scienziati hanno fatto nei laboratori in varie parti del mondo (principalmente al CERN in Svizzera).

Ultima domanda di Sophia. Visto che gli scienziati sono riusciti a scoprire i bosoni, cioè, particelle che:

- Come l'anima, non hanno massa, quindi se poste su una bilancia, l'ago della bilancia non si muove, perché il loro peso è zero;
- Come le anime, più particelle bosoniche possono occupare lo stesso posto;
- Come le anime, queste particelle bosoniche non sono accessibili alle nostre capacità sensoriali;
- Come le anime, le particelle bosoniche danno vita a una catena molto lunga di fermioni, fino a creare entità molto complesse come il corpo umano;

➤ **È possibile che un giorno gli scienziati riescano a dimostrare scientificamente che l'anima degli esseri umani esiste e, magari, anche riprodurla nei loro laboratori?**

Da cattolico credente, la mia prima reazione nel rispondere a questa domanda è stata quella di rispondere allo stesso modo in cui il Rev. Puntone rispose a me quasi 80 anni fa, e cioè: "Sophia, non fare domande impertinenti; l'anima è un dono di Dio all'uomo e devi accettarla **per fede**". D'altra parte, mi sono chiesto: ma tutte le cose che vediamo intorno a noi sono un dono di Dio, eppure questo non impedisce ai nostri scienziati di investigare tutto ciò che esiste nell'Universo, comprese le leggi della fisica che governano l'esistenza delle cose. Perciò, non c'è nessun motivo per cui gli scienziati non possano o debbano investigare anche l'anima umana e quindi ho risposto alla domanda di Sophia in questo modo:

Sophia, se l'anima umana veramente esiste (ed io credo che esista!), prima o poi, gli scienziati la scopriranno e ne daranno prove scientifiche obbiettive, così come hanno fatto con i bosoni. Quello che non so dirti è quando ciò avverrà. Può essere domani, o il prossimo secolo, o il prossimo millennio, o ancora più in là, ma sii certa che ci arriveranno. Al che Sophia ha ribattuto con un'altra domanda:

➤ **Se gli scienziati non riusciranno a scoprire l'anima, allora vorrà dire che non esiste. In tal caso, la mia domanda è: "Come fanno i teologi a dire che è l'anima che dà vita al corpo"?**

La risposta a quest'ultima domanda dipende dalla fede e credenze di chi risponde. La mia risposta è la seguente: l'anima descritta dai teologi è semplicemente un'ipotesi sulla quale è fondata tutta la dottrina cattolica; se questa ipotesi venisse meno, allora i teologi dovrebbero formulare una nuova ipotesi e rivedere l'intera teoria della dottrina cattolica (così come farebbero gli scienziati se scoprissero che una loro ipotesi non è più valida). Un teologo direbbe che l'anima non è "semplicemente un'ipotesi", ma un'ipotesi suffragata da Dio e come tale è, quindi, realtà. Un mio professore di fisica (del quale io sono stato assistente) probabilmente avrebbe risposto in questo modo alla suddetta domanda: l'anima descritta dai teologi è semplicemente una fantasia, sulla quale essi poi hanno costruito tutta la dottrina cattolica, senza alcun radicamento nelle scienze. [Avvertimento per il lettore: il mio professore era ateo].

Quando la prima versione di questo saggio è stata completata (qualche anno fa), Sophia ha registrato un video presentato ai suoi compagni di classe in cui spiega la Teoria del Modello Standard. Se il lettore di questo saggio desidera vedere il video registrato da Sophia, basta cliccare sul Link che segue.

<https://www.youtube.com/watch?v=19tQXI3gueg>

## **Parte II**

## Nota 1. Modello dell'atomo Secondo Kelvin e Modello dell'Atomo Secondo Bohr

Nel saggio abbiamo illustrato il progresso fatto dagli scienziati e i loro sforzi per scoprire le componenti fondamentali della materia:

1. Postulando prima l'esistenza dell'Atomo (Democrito, circa 400 a.C.);
2. Poi, più di 2000 anni dopo a partire dal 1897, scoprendo che all'interno dell'Atomo risiedono altre particelle chiamate elettrone, protone, neutrone;
3. Poi, a partire dal 1960 attraverso l'utilizzo di acceleratori di particelle, scoprendo che protoni e neutroni sono a loro volta composti da particelle ancora più piccole.

Può essere interessante sapere che, quando l'elettrone fu scoperto per la prima volta (1897), molti scienziati si chiedevano quale fosse la composizione del resto dell'atomo e dove esattamente, all'interno dell'atomo, risiedessero gli elettroni. Ad esempio, era noto che l'atomo, nella maggior parte degli elementi, è elettricamente neutro. Poiché era anche noto che gli elettroni portano in sé una carica elettrica negativa ("−"), allora bisognava presumere che all'interno dell'Atomo dovevano esserci cariche elettriche positive equivalenti ("+") che neutralizzavano le cariche negative degli elettroni. Ma, ci si chiedeva:

- **Dove si trovano queste cariche elettriche positive?**
- **Sono esse stesse particelle, come l'elettrone, ciascuna contenente in sé una carica positiva ("+")?**
- **Oppure, la carica positiva totale è diffusa in tutta la massa della materia presente all'interno dell'atomo?**

Molti famosi scienziati studiarono il problema cercando di determinare com'era composto l'interno di un atomo. Nell'anno 1900, il fisico inglese J. J. Thomson (nominato cavaliere Lord Kelvin dalla regina Victoria) ipotizzò e formulò la teoria del Plum Pudding Model dell'atomo. Secondo questa teoria, gli elettroni portatori di carica elettrica negativa (e aventi una massa relativamente bassa) sono distribuiti a caso in tutto l'atomo e la materia che costituisce l'atomo, a sua volta, possiede una carica elettrica positiva distribuita uniformemente in essa. Un'analogia altrettanto appropriata potrebbe essere il modello dell'anguria, dove i semi dell'anguria (l'equivalente degli elettroni) sono sparsi a caso nella polpa dell'anguria che ha al suo interno una carica elettrica positiva diffusa.



Figura 8a: L'interno dell'atomo simile a un'anguria

L'ipotesi del "plum pudding model" (e anche il modello dell'anguria) fu smentita pochi anni dopo (circa 1910), quando Ernest Rutherford dimostrò che la carica elettrica positiva dell'atomo e la sua massa non sono distribuite uniformemente in tutto l'atomo, ma sono concentrate in un minuscolo nucleo nel suo centro. Rutherford fece questa scoperta quando, bombardando una sottile lamina d'oro con particelle alfa ( $\alpha$ ), notò che alcune particelle  $\alpha$  gli rimbalzavano quasi in faccia, mentre quasi tutte le altre particelle attraversavano indisturbate gli atomi di oro (cioè, si muovevano in linea retta) e solo qualche particella deviava leggermente dal suo percorso rettilineo (vedi Figura 10, sotto). Dall'analisi di questo esperimento, Rutherford concluse che l'intera massa dell'atomo e qualsiasi carica elettrica positiva associata con l'atomo stesso doveva trovarsi in un minuscolo nucleo nel suo centro. Il fisico Niels Bohr poi perfezionò le conclusioni di Rutherford postulando che l'Atomo rassomiglia a un sistema solare in miniatura. Il piccolissimo Nucleo è al centro dell'atomo e gli elettroni orbitano attorno ad esso in orbite fisse, proprio come il Sole occupa il centro del sistema solare con i pianeti che gli girano attorno (vedi Figura 11). In pratica, secondo il modello di Bohr, l'atomo è un'immensa caverna vuota con un nucleo piccolissimo al centro nel quale risiedono tutta la sua massa e le cariche elettriche positive con gli elettroni che gli girano intorno a distanza notevole.

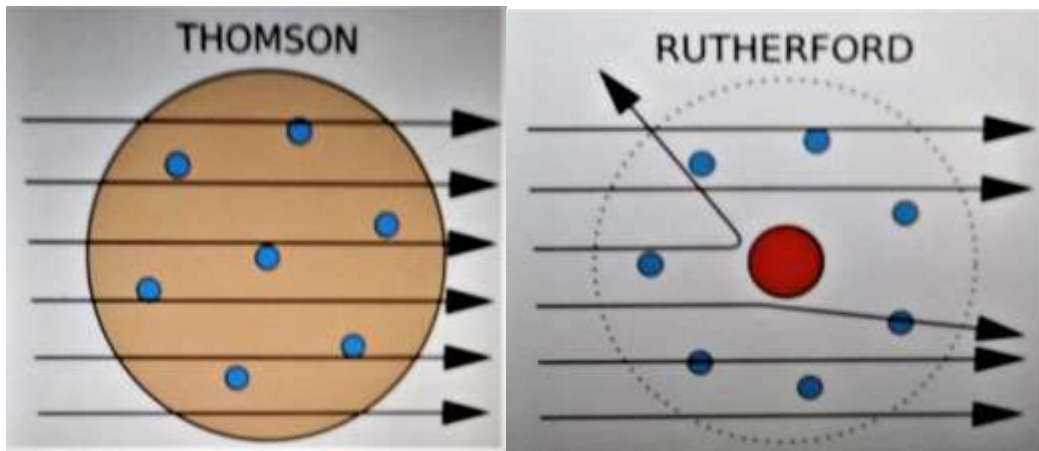


Figura 9: Modello dell'atomo secondo Thomson (Lord Kelvin)      Figura 10: Modello dell'atomo secondo Rutherford  
(Fonte: Wikipedia)

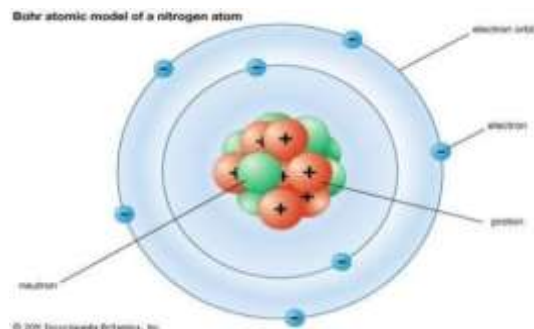


Figura 11: Configurazione dell'atomo di Azoto secondo il modello di Bohr (Fonte; E. Britannica)

## Nota 2. Spin

Tutte le particelle descritte in questo saggio hanno un attributo chiamato "spin", a volte chiamato anche "spin intrinseco". Quest'attributo viene spesso utilizzato dagli scienziati per determinare le proprietà di una particella e anche per determinare a quale categoria la particella appartiene. In questa Nota 2 forniremo una breve spiegazione di cosa s'intende per "spin".

Quando gli scienziati cominciarono a studiare particelle in movimento in un campo magnetico, notarono che gli elettroni orbitanti attorno al nucleo di un atomo generavano un minuscolo campo magnetico (da non confondere con il campo magnetico attribuibile alla loro rivoluzione attorno al nucleo), come se stessero ruotando attorno al proprio asse. Nell'osservare questo fenomeno gli scienziati pensarono che queste particelle si comportassero come "trottole" (in inglese, "spinning top") che ruotavano intorno a sé stesse e, per questo motivo, usarono per la prima volta la parola "spin" (ruotare intorno a sé stesso). Si è poi scoperto che questa interpretazione è sbagliata.

In primo luogo, le particelle non sempre hanno un asse di simmetria ben definito attorno al quale possono ruotare. In secondo luogo, perché, anche quando le particelle hanno un asse di simmetria ben definito, non ruotano per niente. Tuttavia, la parola "spin" è rimasta, anche se queste particelle non si comportano come trottole ruotanti intorno ai loro assi.

In fisica esiste un concetto chiamato "simmetria" di una particella che spesso ci dice molto sulle caratteristiche della stessa particella. La "simmetria", però, va oltre lo scopo di questo saggio e noi non ci addentriamo nei suoi dettagli. Diciamo semplicemente che ciò che è importante sapere su queste particelle è come esse appaiono quando le facciamo ruotare. Una particella che appare sempre la stessa quando la ruotiamo, in senso antiorario, attorno a un qualsiasi asse e per un numero qualsiasi di gradi, si dice che è una particella con spin  $s = 0$ . Prendiamo una particella che ha la forma di una sfera perfetta, (per esempio, una particella che assomiglia a una pallina di un cuscinetto a sfere): ebbene questa è una particella con spin "s = 0" (vedi Figura 12). Ciò significa che, se abbiamo un Osservatore fisso che guarda tale particella, e facciamo ruotare la particella stessa in senso antiorario di qualsiasi numero di gradi attorno al suo asse, all'Osservatore la particella appare sempre la stessa.



Figura 12: Particella che appare sempre la stessa, comunque la si ruota in senso antiorario, ha Spin  $s = 0$

Consideriamo ora una particella che somiglia a una freccia (vedi Figura 13). A un Osservatore fisso che guarda tale particella, essa non appare più la stessa se comincia a ruotare intorno al suo asse in senso antiorario: la particella apparirà la stessa solo quando avrà compiuto una rotazione completa di  $360^\circ$  gradi intorno al suo asse di rotazione. Ebbene, una particella che si comporta in questo modo, cioè, appare la stessa dopo una rotazione di  $360^\circ$ , ha Spin  $s = 1$  (vedi Figura 13).



Figura 13: Particella che dopo una rotazione completa ( $360^\circ$ ) antioraria appare la stessa ha Spin  $s = 1$

Altro esempio di particella con Spin  $s = 1$ : consideriamo una particella che assomiglia all'asso di spade in un mazzo di carte da gioco (vedi Figura 13a). Per un Osservatore fisso che guarda la particella della Figura 13a, l'asso di spade non appare lo stesso se l'immagine viene ruotata in senso antiorario anche di soli pochi gradi dalla sua posizione iniziale. Solo se l'immagine esegue una rotazione completa di  $360^\circ$  gradi, l'asso di spade appare lo stesso.



Figura 13a: Particella che dopo una rotazione completa ( $360^\circ$ ) antioraria appare la stessa ha Spin  $s = 1$

Se a un Osservatore fisso, la particella appare la stessa dopo aver compiuto una rotazione completa di  $360^\circ$  gradi in senso antiorario, allora diciamo che quella particella ha spin  $s = 1$  e diciamo anche che tale particella è destrorsa.

Consideriamo ora una particella che assomiglia a una freccia a doppia punta, come potrebbe essere la regina di spade in un mazzo di carte da gioco della Figura 14. Se, a un Osservatore fisso che la guarda, tale particella appare la stessa dopo aver compiuto metà di una rotazione completa (cioè, una rotazione

di 180° gradi) in senso antiorario, allora diciamo che quella particella ha spin  $s = 2$  e diciamo anche che tale particella è destrorsa.



Figura 14: Particella che dopo metà di una rotazione completa (180°) antioraria appare la stessa ha Spin  $s = 2$

Allo stesso modo, se abbiamo una particella, a forma di triangolo equilatero, che appare la stessa, all'Osservatore fisso che la guarda, dopo averla ruotata attorno al suo asse di 120° (cioè, 1/3 di rotazione completa) e 240° (cioè, 2/3 di una rotazione completa) e 360° (rotazione completa), allora diciamo che una tale particella ha uno spin  $s = 3$  ed è anche una particella destrorsa (vedi Figura 15).



Figura 15: Particella che dopo una rotazione completa (360) appare la stessa 3 volte ha Spin  $s = 3$

Similmente una particella che, in una rotazione completa di 360°, appare la stessa 4 volte ha Spin  $s = 4$ ; una particella che, in una rotazione completa di 360°, appare la stessa 5 volte ha Spin  $s = 5$ ; una particella che, in una rotazione completa di 360°, appare la stessa 6 volte ha Spin  $s = 6$ ; etc.

Domanda per il lettore:

- **Che forma geometrica potrebbe avere una particella che ha Spin  $s = 5$ ?**

È interessante notare che tutti i bosoni sono particelle destrorse, cioè, ruotano in senso antiorario, e il loro spin è un numero intero (cioè,  $s = 0$ ;  $s = 1$ ;  $s = 2$ ;  $s = 3$ ; etc.). È anche interessante notare che i bosoni non obbediscono al principio di esclusione di Pauli. Ciò significa che più di un bosone può occupare lo stesso posto contemporaneamente.

Poi ci sono particelle che appaiono uguali, solo se compiono due rotazioni complete (cioè  $720^\circ$  gradi) in senso orario. La Figura 16 è un esempio di tale particella. Particelle aventi queste caratteristiche hanno uno spin  $s = \frac{1}{2}$  e sono chiamate particelle sinistrorse. Tutte le particelle fermioniche sono particelle sinistrorse (cioè, ruotano in senso orario) e il loro spin è  $\frac{1}{2}$  di un numero intero dispari (cioè,  $s = \frac{1}{2}$ ;  $s = \frac{3}{2}$ ;  $s = \frac{5}{2}$ ; ecc.). Protoni, neutroni ed elettroni, per esempio, sono tutte particelle fermioniche aventi spin  $s = \frac{1}{2}$ . Una caratteristica molto importante di tutte le particelle fermioniche è che obbediscono al Principio di Esclusione di Pauli. [Il principio di esclusione di Pauli afferma che due fermioni dello stesso tipo, cioè, aventi lo stesso spin, non possono mai essere trovati contemporaneamente nello stesso posto].

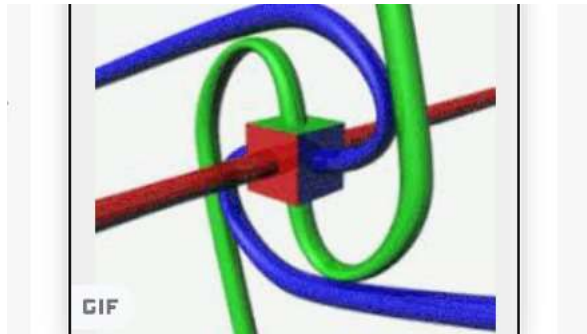


Figura 16: Esempio di una figura avente spin  $s = \frac{1}{2}$  (ha bisogno di 2 rotazioni complete in senso orario per apparire la stessa)

Fonte : ?

### Nota 3 Decadimenti (Decays)

Il decadimento è un processo spontaneo mediante il quale un atomo o una particella subatomica si trasforma in uno o più atomi o in una o più particelle emettendo altre particelle, o fotoni, o radiazioni. Quando una particella è coinvolta nel fenomeno di decadimento, diciamo che siamo di fronte al “Decadimento di Particelle”. Quando un atomo è coinvolto nel fenomeno di decadimento, diciamo invece che siamo di fronte al “Decadimento Radioattivo” (o semplicemente “radioattività”). Come abbiamo spiegato nel saggio, quando gli scienziati cominciarono a studiare i “decadimenti”, si chiedevano:

- **Ma come è possibile che una particella come il neutrone, che ha un guscio così duro, lasci scappare dal suo interno un pezzo di sé stesso (cioè, un elettrone) spontaneamente e, così facendo, trasformarsi in una particella diversa?**

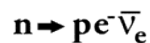
Cerchiamo di capire il perché di questo fenomeno esaminando alcuni esempi di decadimento di particelle e decadimento radioattivo.

**Il decadimento di particelle** è un processo spontaneo di una particella subatomica instabile che si trasforma in due o più particelle diverse. Il decadimento di particelle può essere mediato da una o più

forze fondamentali. È interessante notare che la maggior parte dei decadimenti di particelle sono mediati dalla weak force (Forza Debole). In altre parole, la weak force agisce sulla particella (questo è ciò che intendiamo per "mediare") e la costringe a perdere un pezzo di sé stesso o acquisirne uno nuovo. Esaminiamo, qui di seguito, due esempi di "decadimento di particelle".

Il primo esempio di decadimento di particelle mediato dalla weak force è noto come “**Neutron Beta Decay**”. Ecco cosa succede: all'interno di ogni protone ci sono due up-quark e un down-quark. Ogni up-quark porta in sé una carica elettrica positiva uguale a  $+2/3e$  (dove  $e$  è l'unità di misura delle cariche elettriche), mentre il down-quark porta in sé una carica elettrica negativa uguale a  $-1/3e$ . Pertanto, la carica elettrica totale del protone è  $+1e$  data da  $(2/3 + 2/3 - 1/3 = +1)$ . Al contrario, all'interno di ogni neutrone ci sono un up-quark e due down-quark. Pertanto, la carica elettrica totale del Neutrone è 0, data da  $(2/3 - 1/3 - 1/3 = 0)$ . Sotto l'influenza della weak force (il bosone  $W$ ), i quark possono cambiare flavor da “down” a “up”, provocando l'espulsione di un elettrone (chiamata anche emissione beta) e un antineutrino. Quando ciò accade, quello che rimane all'interno del neutrone, sono due up-quark e un down-quark. La carica elettrica totale ora è  $+1e$ , data da  $(2/3 + 2/3 - 1/3 = +1)$ . Ciò significa che il Neutrone originale non è più un Neutrone, ma si è trasformato in un Protone. Questo processo è chiamato **Neutron Beta Decay**.

Di seguito è riportata un'illustrazione visiva del Neutron Beta Decay (ripresa da “The Particle Adventure” su Internet). La formula che segue è una rappresentazione di questo decadimento:



In effetti, la formula ci dice che un neutrone ( $n$ ) decade in un protone ( $p$ ), un elettrone ( $e^-$ ) e un antineutrino ( $\bar{\nu}_e$ ). Quando gli scienziati osservarono questo esperimento per la prima volta, notarono che il decadimento del neutrone dava luogo a un protone, un antineutrino e una terza particella che non sapevano cosa fosse e, pertanto, la chiamarono particella Beta ( $\beta$ ). Solo in seguito, gli scienziati si accorsero che la particella beta non era altro che un elettrone.

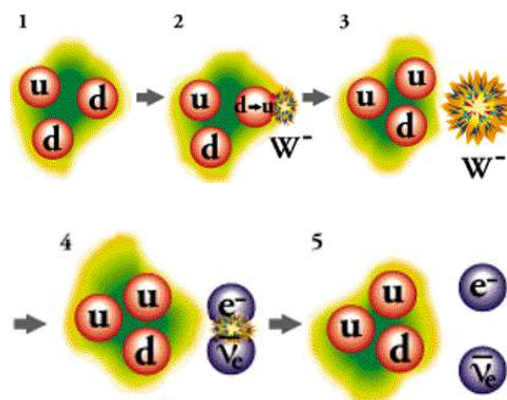


Figura 17: Fonte: The Particles Adventure (Internet)

- Fotogramma 1: Il neutrone (carica elettrica = 0) composto da 1 up-quark e 2 down-quark.
- Fotogramma 2: Uno dei down-quark viene trasformato in un up-quark dal bosone  $W^-$  della weak force (Forza Debole). Poiché il down-quark ha una carica di  $-1/3$  e l'up-quark ha una carica di  $+2/3$ ,

ne consegue che questo processo è mediato dalla particella virtuale  $W^-$ , che trasporta al suo interno una carica elettrica negativa (-1), (quindi il principio di conservazione della carica elettrica è rispettato!).

- Fotogramma 3: Il nuovo up-quark espelle il bosone  $W^-$ . Ciò che rimane sono 2 up-quark e 1 down-quark. In altre parole, il neutrone originale ora è diventato un protone.
- Fotogramma 4: un elettrone e un antineutrino emergono dal bosone  $W^-$  virtuale.
- Fotogramma 5: il protone, l'elettrone e l'antineutrino si allontanano l'uno dall'altro.

Le fasi intermedie del processo sopra descritto si verificano in circa un milionesimo di milionesimo di milionesimo di secondo, (cioè,  $10^{-27}$  secondi o 0,000.000.000.000.000.000.000.001Sec.) e, ovviamente, non sono osservabili.

Un altro esempio di decadimento delle particelle fondamentali è il muone. Anche il muone, che è una particella fondamentale, decade e si trasforma in un elettrone emettendo almeno due tipi di neutrini.

**Il decadimento radioattivo** (noto anche come decadimento nucleare o radioattività) è un processo mediante il quale il nucleo di una sostanza emette particelle alfa [nucleo di elio], oppure emette particelle beta [elettroni], oppure, a volte, assorbe elettroni e si trasforma spontaneamente in uno o più nuclei diversi. Il decadimento radioattivo è un processo casuale. Ciò significa che è impossibile prevedere quando un particolare atomo decadrà, indipendentemente da quando l'atomo si è formato. L'espressione che i fisici usano per indicare questa imprevedibilità è "**processo stocastico**" (cioè, casuale).

I primi processi di decadimento scoperti furono il decadimento alfa ( $\alpha$ ), il decadimento beta ( $\beta$ ) e il decadimento gamma ( $\gamma$ ). Il decadimento alfa si verifica quando il nucleo espelle una particella alfa (nucleo di elio). Questo è il processo più comune di emissione dal nucleo. Il decadimento beta si verifica in due modi: (i) decadimento beta-meno ( $\beta^-$ ) è ciò che abbiamo descritto in Figura 17; è chiamato decadimento beta del neutrone e si verifica quando il nucleo emette un elettrone e un antineutrino in un processo che trasforma un neutrone in un protone; (ii) decadimento beta-plus ( $\beta^+$ ), avviene quando il nucleo emette un positrone e un neutrino in un processo che trasforma un protone in un neutrone.

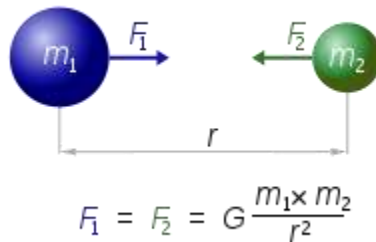
Un altro tipo di decadimento radioattivo si verifica quando il nucleo di un atomo si rompe in due o più "frammenti". Questo decadimento, chiamato "fissione spontanea", si verifica quando un nucleo pesante (come l'Uranio o il Potassio) instabile si divide spontaneamente in due nuclei più piccoli, occasionalmente in tre. In generale, il nucleo originale porta all'emissione di raggi gamma, neutroni o altre particelle.

- Esempio 1: l'Uranio attraverso una serie di decadimenti, alla fine, si trasforma in Piombo-206.
- Esempio 2: Un isotopo del Potassio, chiamato Potassio-40, il 90% delle volte decade emettendo una particella beta ( $\beta^-$  è in realtà un elettrone) e un antineutrino trasformandosi in Calcio-40 [vedi Nota 5 per la definizione di "isotopo"]. È interessante notare qui che il decadimento del Potassio-40 è ciò che riscalda il nucleo della Terra. Il 10% delle volte, il Potassio-40 decade in Argon-40 ( $^{40}\text{Ar}$ ) catturando un elettrone e con l'emissione di un raggio gamma e l'emissione di un neutrino.

I più noti fra i 29 elementi chimici radioattivi presenti sulla Terra sono l'Uranio e il Torio.

#### Nota 4. Legge di Gravitazione e Forza di Gravitazione

Si racconta che una mela caduta dall'albero sulla testa di Newton sia stata la fonte della sua ispirazione; probabilmente Newton ha semplicemente visto una mela cadere. In ogni caso, questo episodio lo ha indotto ad indagare su cosa causasse la caduta della mela e l'analisi di questo evento lo ha portato a formulare la teoria della gravitazione detta "legge di Newton della gravitazione universale":



Dove:

**F** è la forza che due oggetti aventi massa **m<sub>1</sub>** e **m<sub>2</sub>** esercitano l'uno sull'altro;

**G** è la costante gravitazionale;

**m<sub>1</sub>** è la massa del primo oggetto;

**m<sub>2</sub>** è la massa del secondo oggetto;

**r** è la distanza tra i centri dei due oggetti.

#### Nota 5. Definizione dell'Isotopo

Gli isotopi sono atomi dello stesso elemento che hanno lo stesso numero di protoni (cioè, lo stesso numero atomico), ma diversi numeri di neutroni. Essi hanno le stesse proprietà chimiche, a causa della stessa configurazione elettronica, ma differenti proprietà fisiche. Il numero di protoni all'interno del nucleo di un atomo è chiamato **numero atomico** ed è uguale al numero di elettroni che orbitano attorno all'atomo. La parola isotopo deriva dal greco isos (ἴσος "uguale") e topos (τόπος "luogo"), che significa "stesso luogo"; questo indica che diversi isotopi di un singolo elemento occupano la stessa posizione (i.e., "stesso luogo") nella tavola periodica degli elementi.

Ad esempio, l'idrogeno ha tre isotopi: idrogeno-1, idrogeno-2 e idrogeno-3. Il primo isotopo, chiamato anche **proteo**, è di gran lunga l'elemento più abbondante in natura e può essere rappresentato anche dal simbolo <sup>1</sup>H. Questo isotopo dell'idrogeno ha un elettrone che ruota intorno al nucleo e il suo nucleo contiene solo 1 protone (vedi Figura 1 in Sezione 2.0). Il secondo isotopo (idrogeno-2) è anche chiamato **deuterio** o idrogeno pesante (D o <sup>2</sup>H). Questo isotopo dell'idrogeno ha un elettrone che ruota intorno al nucleo e il suo nucleo contiene 1 protone e 1 neutrone. Il terzo isotopo (Idrogeno-3), chiamato anche **Trizio** (T, o <sup>3</sup>H), ha un peso atomico di circa 3. Il suo nucleo, costituito da un protone e due neutroni, ha

il triplo della massa del nucleo dell'idrogeno-1. A differenza dei suoi fratelli, il trizio è un elemento radioattivo.

Un secondo esempio: Elio-3 ed Elio-4 sono due isotopi dell'elemento Elio, con numeri di massa 3 e 4 rispettivamente. Si noti che entrambi gli isotopi hanno 2 elettroni che ruotano intorno al nucleo. Tuttavia, i loro nuclei sono diversi: il nucleo di Elio-3 ha 2 protoni e 1 neutrone, mentre il nucleo di Elio-4 ha 2 protoni e 2 neutroni (vedi Figure 18 e 19).

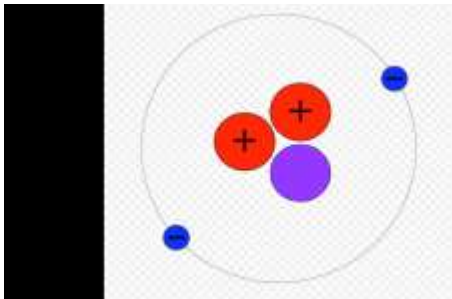


Figura 18: Isotopo dell'Elio-3

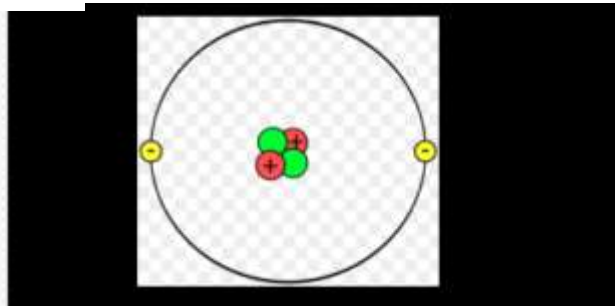


Figura 19: Isotopo dell'Elio-4

Allo stesso modo, Carbonio-12, Carbonio-13 e Carbonio-14 sono tre isotopi dell'elemento Carbonio con numeri di massa 12, 13 e 14, rispettivamente. Il numero atomico del Carbonio è 6, il che significa che ogni atomo di carbonio ha 6 protoni; quindi, il numero di neutroni contenuti nel nucleo di ciascuno di questi isotopi è 6, 7 e 8, rispettivamente.

**Notazioni.** Illustriamo qui di seguito alcune notazioni normalmente usate per designare gli isotopi di un elemento chimico. In una delle notazioni, un isotopo è, normalmente, designato dal nome del particolare elemento seguito da un trattino e dal numero di massa (ad esempio Elio-3, Elio-4, Carbonio-12, Carbonio-14, Uranio-235 e Uranio-239). Quando invece del nome si utilizza il simbolo chimico dell'elemento, ad es. "C" per carbonio, allora normalmente si usa la notazione standard (nota come "notazione AZE", dove A è il numero di massa, Z il numero atomico ed E il simbolo dell'elemento). Nella notazione AZE: 1) il numero di massa (numero di nucleoni) è illustrato da un apice in alto a sinistra del simbolo chimico; 2) il numero atomico è illustrato da un pedice in basso a sinistra del simbolo chimico (es.  ${}^3_2\text{He}$ ,  ${}^4_2\text{He}$ ,  ${}^{12}_6\text{C}$ ,  ${}^{14}_6\text{C}$ ,  ${}^{235}_{92}\text{U}$  e  ${}^{239}_{92}\text{U}$ ). Poiché il numero atomico è implicito nel simbolo dell'elemento, normalmente la notazione AZE viene semplificata, usando solo il numero di massa con l'apice e si trascurava il pedice del numero atomico (ad esempio:  ${}^3\text{He}$ ,  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{14}\text{C}$ ,  ${}^{235}\text{U}$  e  ${}^{239}\text{U}$ ).

Si noti anche che la pronuncia comune della notazione AZE è diversa da come è scritta:  ${}^4_2\text{He}$  è comunemente pronunciato come elio-quattro invece di quattro-due-elio e  ${}^{235}_{92}\text{U}$  come Uranio duecento trentacinque invece di duecento trentacinque-novanta due-uranio.

**Proprietà chimiche e molecolari degli isotopi.** Un atomo neutro ha un numero di elettroni che è uguale al numero dei protoni. Cosicché diversi isotopi di un dato elemento hanno tutti lo stesso numero di elettroni e condividono una struttura elettronica simile. Poiché il comportamento chimico di un atomo

è in gran parte determinato dalla sua struttura elettronica, isotopi diversi mostrano un comportamento chimico quasi identico.

La principale eccezione a questo comportamento è l'**effetto cinetico** dell'isotopo: a causa delle loro masse maggiori, gli isotopi più pesanti tendono a reagire un po' più lentamente degli isotopi più leggeri dello stesso elemento. Questo è di gran lunga più pronunciato per il protio ( $^1\text{H}$ ), il deuterio ( $^2\text{H}$ ) e il trizio ( $^3\text{H}$ ), perché il deuterio ha il doppio della massa del protio e il trizio ha tre volte la massa del protio. Queste differenze di massa influenzano anche il comportamento dei rispettivi legami chimici, modificando il centro di gravità (massa ridotta) dei sistemi atomici. Tuttavia, per gli elementi più pesanti la differenza di massa relativa tra gli isotopi è molto inferiore, cosicché gli effetti cinetici, dovuti alla differenza di massa, sul comportamento chimico degli isotopi sono generalmente trascurabili. (Gli elementi pesanti hanno anche relativamente più neutroni rispetto agli elementi più leggeri, quindi il rapporto tra la massa nucleare e la massa elettronica collettiva è leggermente maggiore.)

## Nota 6. Lagrangiano

La lettera **L**, nell'equazione  $L = E_k - U_p$ , sta per **LAGRANGIANO** e, quando questa equazione è completamente estrapolata, **L** è davvero un'equazione molto complessa. L'equazione rappresenta l'energia totale posseduta dal sistema (nel nostro caso il sistema è l'atomo). Nel saggio abbiamo detto che lo stato, o status, di un sistema è conosciuto se sappiamo la sua posizione iniziale e la sua velocità. In altre parole, se conosciamo posizione iniziale e velocità di un sistema, allora sapremo (o meglio, potremo calcolare) dove si trova il sistema in qualsiasi istante successivo. Al che Sophia ha posto la seguente domanda:

- **Se quello che ci occorre per sapere dove si trova il sistema è posizione iniziale e velocità, perché tiriamo in ballo la sua energia e poi l'equazione suddetta (chiamata Lagrangiano) che rappresenta l'energia del sistema?**

La risposta a questa domanda è molto semplice: spesso è facile calcolare l'energia di un sistema ed esprimerla con un'equazione. Da questa equazione poi possiamo calcolare posizione e velocità del sistema, istante per istante. Questa equazione fondamentale descrive lo stato (status) dell'atomo istante dopo istante. In effetti, lo stato dell'atomo cambia istante per istante a causa delle interazioni fra le particelle contenute nel suo interno; l'equazione **L** ci permette di calcolare la massima energia possibile contenuta nell'atomo e da qui possiamo calcolare posizione, velocità e altri parametri. L'unico problema è che questa equazione **L** è davvero ostica e richiede una vasta conoscenza di matematica, perciò, noi non ci soffermeremo a risolverla, ma ci limiteremo solo a illustrare il concetto, che è alla base di questa equazione, che è relativamente semplice ed è usato frequentemente nella fisica elementare. Spiegheremo questo concetto utilizzando tre esempi.

Con il primo esempio, senza introdurre formule fisiche o equazioni matematiche, illustreremo i legami che esistono tra posizione, velocità ed energia. In quest'esempio il sistema è un'automobile che va da

New York a Washington. Noi semplificheremo le cose assumendo che l'auto viaggi a velocità costante e trascureremo altre forze (per es., attriti, gravità, etc.) che potrebbero influenzare la velocità dell'auto. Il secondo esempio, invece, è più rigoroso dal punto di vista scientifico. In esso parleremo di energia cinetica e potenziale, introdurremo le formule fisiche che ci consentono di misurare sia l'energia cinetica sia quella potenziale e da lì deriveremo equazioni che ci permettono di calcolare, istante per istante, posizione e velocità del sistema.

Nel terzo esempio, sulla base delle conoscenze acquisite attraverso gli esempi precedenti, mostreremo poi com'è stato costruito il Lagrangiano e come può essere sfruttato.

**Primo esempio.** Supponiamo di avere un'automobile, inizialmente situata a New York, che sta per iniziare un viaggio con destinazione Washington. Sappiamo che la distanza tra le due città è di 400 chilometri. Se l'auto si muove a una velocità di 67Km/h, allora, non solo sappiamo che dopo sei ore l'auto sarà a Washington, ma sappiamo anche che, dopo due ore di viaggio, l'auto avrà percorso 1/3 del tragitto e sarà al confine meridionale dello Stato del NJ (distanza tra New York e il confine meridionale del NJ = 133 Km). Dopo quattro ore di viaggio l'auto sarà a Baltimora (distanza tra New York e Baltimora = 266 Km), ecc. Il punto è che, quando conosciamo la posizione iniziale e la velocità (implicita nella velocità c'è anche la direzione), allora si può determinare, istante per istante, dove si trova l'auto.

Sophia ha posto la seguente domanda:

- **Ora capisco perché, conoscendo la posizione iniziale e la velocità, posso determinare "dov'è l'auto, istante per istante". Ancora, però, non capisco il nesso tra "energia" e "dov'è l'auto". In altre parole: "Come faccio a sapere dove si trova l'auto, sapendo solo l'ammontare della sua energia"?**

Per cominciare, mettiamoci d'accordo sul fatto che, per muoversi, un'auto ha bisogno di energia e quest'energia è data dalla benzina immagazzinata nel serbatoio del veicolo. Se assumiamo che il chilometraggio dell'auto sia di 1,33 Km per litro di benzina e il serbatoio contenga 200 litri di benzina, allora sappiamo che, dopo aver consumato 100 litri di benzina, l'auto si troverà al confine meridionale dello Stato di NJ (cioè, l'auto avrà percorso 1/3 del tragitto totale e la distanza tra New York e il confine meridionale di NJ è = 133 Km). Dopo aver consumato i restanti 100 litri di benzina, l'auto sarà arrivata a Baltimora (cioè, l'auto avrà percorso 2/3 del tragitto totale, pari a 266 Km) dove rimarrà bloccata, fino a quando non farà rifornimento di carburante. Quindi, istante per istante, c'è un nesso (ed è un nesso molto diretto!) tra l'energia del veicolo e la sua posizione. In altre parole, se conosco l'ammontare dell'energia consumata, allora saprò quanta strada il veicolo ha percorso e, conseguentemente, saprò anche dove si trova l'auto. Si noti inoltre che quanto abbiamo affermato si applica a qualsiasi sistema (l'auto, nel nostro esercizio, è un caso particolare di sistema).

**Secondo esempio.** Nell'esempio precedente abbiamo illustrato, in termini molto semplici, la relazione tra l'energia e la posizione, istante per istante, di un veicolo, senza fare riferimento a formule fisiche o equazioni matematiche. Il secondo esempio è un esercizio più rigoroso (anche se semplice) su come, conoscendo l'energia di un sistema, possiamo determinare tutto ciò che vogliamo sapere sullo stato del sistema. Vogliamo sottolineare, tuttavia, che il concetto di base è lo stesso. In altre parole, se

conosciamo l'energia di un sistema, possiamo dedurre tutto ciò che ci serve per sapere lo stato (o status) del sistema, comprese posizione, istante per istante, e velocità. Nel secondo esempio useremo formule fisiche per l'energia cinetica e potenziale. Da lì deriveremo un'equazione e, quando avremo risolto l'equazione, troveremo tutto ciò che vogliamo sapere sullo stato del sistema. Si noti inoltre che nel secondo esempio, il sistema di cui stiamo parlando è un proiettile.

Supponiamo di voler conoscere lo "stato" di un proiettile sparato in aria dalla canna di una pistola. Per poterlo fare dobbiamo conoscere:

- 1) la sua traiettoria;
- 2) quanto in alto esso arriverà;
- 3) quando toccherà terra;
- 4) dove atterrerà.

In altre parole, vogliamo sapere, istante per istante, dove si trova il proiettile (posizione) e verso dove sta andando (velocità). In generale, quando i fisici parlano di "stato" di una particella, hanno solo bisogno di conoscere la posizione iniziale della particella e la sua velocità. Queste due entità (posizione e velocità) possono essere ottenute studiando l'energia del proiettile (proprio come nel primo esempio dove, dalla quantità di benzina nel serbatoio, abbiamo stabilito il punto esatto in cui si trovava l'auto sulla strada da New York a Washington). Quindi, partiamo dalla formula che ci dà l'energia del proiettile (l'equivalente della benzina dell'esempio 1):

$$L = E_k - U_p$$

Dove,  $L$  è l'energia totale del proiettile;  $E_k$  è l'energia cinetica del proiettile e  $U_p$  è l'energia potenziale dovuta alla forza gravitazionale tra il proiettile la Terra. Dalla fisica elementare sappiamo che l'energia cinetica,  $E_k$ , di una particella in movimento (nel nostro caso il proiettile) è data dalla formula:

$$E_k = 1/2mv^2$$

Dove,  $m$  è la massa e  $v$  è la velocità del proiettile.

La formula per l'energia potenziale dipende dalle forze che agiscono sul proiettile. Nel nostro caso, l'unica forza che agisce sul proiettile è la forza gravitazionale della Terra e la formula per l'energia potenziale è:

$$U_p = mgh$$

Dove,  $m$  è la massa del proiettile in chilogrammi,  $g$  è l'accelerazione dovuta alla gravità (9,8 m/s<sup>2</sup> sulla superficie terrestre) e  $h$  è l'altezza tra la posizione del proiettile in un dato momento e la Terra. Si noti che la forza gravitazionale è rivolta verso il basso (cioè, la forza gravitazionale cerca di riportare il proiettile sulla Terra), mentre il proiettile sta salendo. In altre parole, l'energia cinetica cerca di spingere il proiettile verso l'alto, mentre la forza gravitazionale cerca di portare il proiettile nella direzione opposta (cioè, verso il basso, sulla Terra), quindi, l'energia potenziale deve avere il segno opposto dell'energia cinetica. Pertanto, la formula dell'energia diventa:

$$L = 1/2mv^2 - mgh$$

In sostanza, mentre il proiettile è spinto in alto dall'impulso dato dalla polvere da sparo della pistola, la forza gravitazionale cerca di tirarlo verso il basso e, così facendo, rallenta la velocità del proiettile. A un certo punto, la velocità del proiettile diventa zero e il proiettile smette di salire e poi, sotto l'effetto della forza gravitazionale, inizia a scendere. Se chiedessimo a un matematico di risolvere la suddetta equazione e tracciare il suo grafico, il risultato sarebbe la curva mostrata in Figura 20.

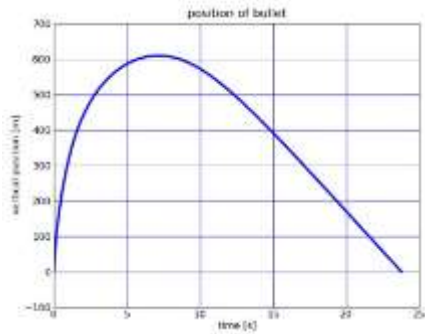


Figura 20: Traiettoria di un proiettile sparato in alto

Questo grafico ci dice, istante per istante, quanto in alto è salito il proiettile (posizione). Dal grafico possiamo anche determinare il punto più alto raggiunto dal proiettile e possiamo anche determinare quando il proiettile cadrà al suolo. In altre parole, le soluzioni dell'equazione ci permettono di sapere, istante per istante, dove si trova il proiettile.

**Terzo esempio.** Il processo utilizzato per trovare il Lagrangiano di un atomo è molto simile a quello che abbiamo appena descritto per il proiettile sparato dalla canna di una pistola. In questo esempio il sistema che desideriamo studiare è un Atomo e, come abbiamo fatto nel secondo esempio, partiamo dalla formula che ci fornisce l'energia totale dell'Atomo:

$$L = E_k - U_p$$

Nel nostro caso, guardando la Figura 6, l'atomo è composto da 17 particelle fondamentali; quindi, l'energia totale dell'atomo deve essere la somma delle energie delle 17 particelle costituenti. Scritta in formato compatto (cioè, senza dettagli), nella prima riga dell'equazione (vedi Figura 21 sotto), troviamo l'energia dei bosoni, dopodiché troviamo l'energia di tutte le altre particelle, scritte in

formato compatto. Pertanto, in formato compatto, il Lagrangiano del Modello Standard è dato da:

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & -\frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} - \frac{1}{8}\text{tr}(\mathbf{W}_{\mu\nu}\mathbf{W}^{\mu\nu}) - \frac{1}{2}\text{tr}(\mathbf{G}_{\mu\nu}\mathbf{G}^{\mu\nu}) && \text{(U(1), SU(2) and SU(3) gauge terms)} \\
 & +(\bar{\nu}_L, \bar{e}_L)\bar{\sigma}^\mu iD_\mu \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix} + \bar{e}_R\sigma^\mu iD_\mu e_R + \bar{\nu}_R\sigma^\mu iD_\mu \nu_R + (\text{h.c.}) && \text{(lepton dynamical term)} \\
 & -\frac{\sqrt{2}}{v} \left[ (\bar{\nu}_L, \bar{e}_L)\phi M^e e_R + \bar{e}_R \bar{M}^e \bar{\phi} \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix} \right] && \text{(electron, muon, tauon mass term)} \\
 & -\frac{\sqrt{2}}{v} \left[ (-\bar{e}_L, \bar{\nu}_L)\phi^* M^\nu \nu_R + \bar{\nu}_R \bar{M}^\nu \phi^T \begin{pmatrix} -e_L \\ \nu_L \end{pmatrix} \right] && \text{(neutrino mass term)} \\
 & +(\bar{u}_L, \bar{d}_L)\bar{\sigma}^\mu iD_\mu \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} + \bar{u}_R\sigma^\mu iD_\mu u_R + \bar{d}_R\sigma^\mu iD_\mu d_R + (\text{h.c.}) && \text{(quark dynamical term)} \\
 & -\frac{\sqrt{2}}{v} \left[ (\bar{u}_L, \bar{d}_L)\phi M^d d_R + \bar{d}_R \bar{M}^d \bar{\phi} \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} \right] && \text{(down, strange, bottom mass term)} \\
 & -\frac{\sqrt{2}}{v} \left[ (-\bar{d}_L, \bar{u}_L)\phi^* M^u u_R + \bar{u}_R \bar{M}^u \phi^T \begin{pmatrix} -d_L \\ u_L \end{pmatrix} \right] && \text{(up, charmed, top mass term)} \\
 & +(\bar{D}_\mu \phi)D^\mu \phi - m_h^2[\bar{\phi}\phi - v^2/2]^2/2v^2. && \text{(Higgs dynamical and mass term)} \quad (1)
 \end{aligned}$$

Figura 21: Lagrangiano del Modello Standard (formato compatto) (Fonte: *Standard Model of Particle Physics*, by Cottingham and Greenwood?)

Se proviamo a esplicitare ciascuno dei termini compatti della suddetta equazione nei loro dettagli, ciò che verrà fuori è un'orrenda equazione che solo persone con una vasta conoscenza di matematica possono gestire. Anzi, ci azzardiamo a dire che, probabilmente, nel mondo non sono molti i matematici in grado di risolvere prontamente questa equazione. Di certo i nostri giovani lettori non hanno questa conoscenza. Sophia ci dice che accetterà la parola di persone che hanno trovato le soluzioni a tale equazione e hanno così spiegato come le 17 particelle mostrate nella Figura 6 sono tenute insieme e, tutte insieme, costituiscono l'Atomo. È attraverso le soluzioni di quest'equazione che abbiamo trovato le risposte alle domande "sconcertanti" illustrate nella Sezione 5.0 del saggio.

## Nota 7. Acceleratori di Particelle e Laboratori CERN

Il CERN (Conseil Européenne pour la Recherche Nucléaire; in inglese: European Organization for Nuclear Research), è un laboratorio di fisica situato a Ginevra, in Svizzera, vicino al confine francese. Il "collider" di particelle ad alta energia più complesso e sofisticato al mondo si trova al CERN. L'obiettivo principale del CERN è la fisica delle particelle - lo studio dei costituenti fondamentali della materia - ma il programma di fisica presso il laboratorio è molto più ampio, spaziando dal nucleare alla fisica delle alte energie, dagli studi sull'antimateria ai possibili effetti dei raggi cosmici sulle nuvole.

Dagli anni '70, i fisici delle particelle hanno cercato di capire la struttura fondamentale della materia utilizzando un'elegante serie di equazioni chiamata Teoria del Modello Standard. Al CERN queste equazioni sono conosciute col nome di **Lagrangiano**; la giovane coautrice di questo saggio, Sophia, le chiama equazioni orribili. La Teoria del Modello Standard illustra come tutta la materia che osserviamo nell'Universo sia costituita da pochi blocchi di base chiamati particelle fondamentali, governati da

quattro forze. I fisici del CERN utilizzano i più potenti acceleratori e rilevatori di particelle al mondo per testare le previsioni e i limiti della Teoria del Modello Standard. Nel corso degli anni la Teoria del Modello Standard ha spiegato sperimentalmente molti fenomeni che prima non potevano essere spiegati e ha predetto con precisione una serie di altri fenomeni, tanto che, oggi, è considerata una teoria della fisica ben collaudata.

Il Modello, però, descrive solo una piccola frazione dell'Universo conosciuto e molte domande rimangono ancora senza risposta. Alcune delle domande senza risposta, attualmente oggetto di indagine al CERN e in altri laboratori in tutto il mondo, includono:

- **Assisteremo a un'unificazione delle forze alle alte energie del Large Hadron Collider (LHC)?**
- **Perché la forza di gravità è così debole?**
- **Perché c'è più materia che antimateria nell'Universo?**
- **C'è una fisica più esotica che aspetta di essere scoperta a energie più elevate?**
- **Scopriremo prove per una teoria chiamata "supersimmetria" all'LHC?**
- **Capiremo ancora meglio il bosone di Higgs, che dà massa alle particelle?**

I fisici del CERN stanno cercando risposte a queste e altre domande. Nella parte restante di questa Nota 7 forniamo ulteriori informazioni sui Laboratori CERN.

#### **La ragnatela di acceleratori al CERN.**

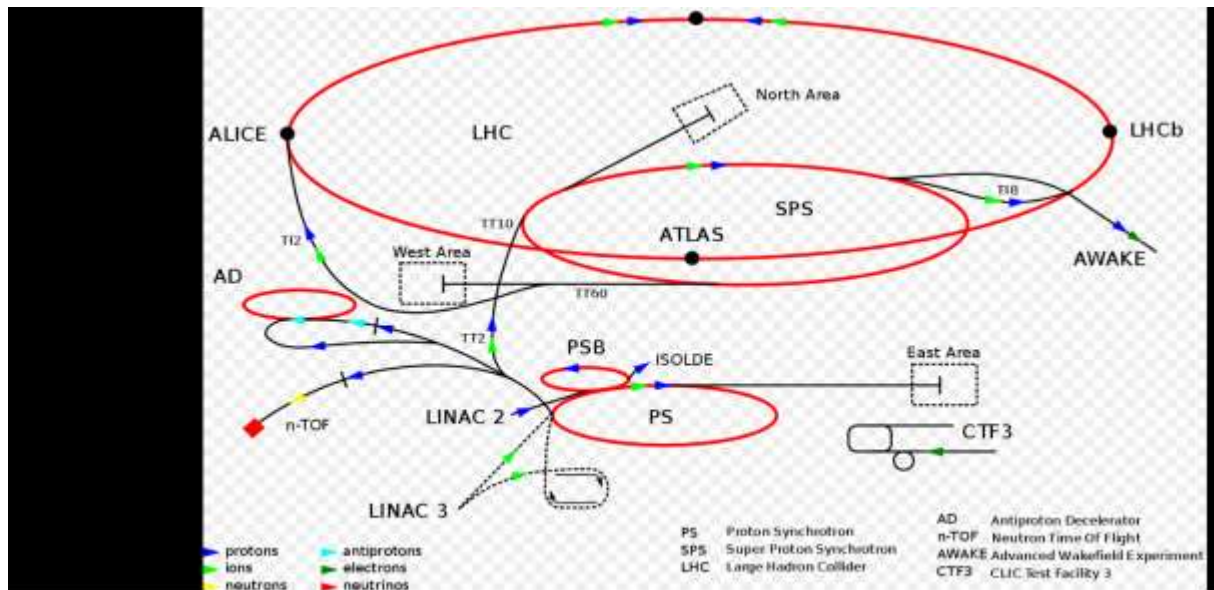
Ciò che gli scienziati hanno costruito al CERN non è solo un acceleratore, ma una serie di acceleratori che lavorano insieme per accelerare le particelle e portarle quasi alla velocità della luce. Per una video animazione di come funzionano questi acceleratori e come accelerano le particelle quasi alla velocità della luce, si raccomanda al lettore di visitare il sito web del CERN nella Sezione "ACCELERATORS" <https://home.cern/about/accelerators>.

Il complesso di acceleratori del CERN è una serie di macchine allineate in serie che accelerano le particelle a energie sempre più elevate. Ogni macchina aumenta l'energia di un fascio di particelle, prima di iniettare il fascio nella macchina successiva. Nel Large Hadron Collider (LHC) - l'ultimo elemento di questa catena - i fasci di particelle vengono accelerati fino ad una energia record di 6,5 TeV (leggi 6,5 Tera eV; o 6,5 trilioni di eV; eV, che sta per electron-Volt, è l'unità di misura dell'energia). La maggior parte dei singoli acceleratori della catena ha proprie sale sperimentali in cui i fasci di particelle vengono accelerati per esperimenti a energie inferiori.

Consideriamo, per esempio, un raggio (o fascio) di protoni. Per cominciare, si parte da una semplice bottiglia di idrogeno gassoso. Si utilizza un campo elettrico molto limitato per rimuovere gli elettroni dagli atomi di idrogeno, producendo così un fascio di protoni. Il primo acceleratore della catena, detto Linac-2, accelera il fascio di protoni all'energia di 50 MeV (leggi 50 mega eV; o 50 milioni di eV). Il fascio viene quindi iniettato nel Proton Synchrotron Booster (PSB), che accelera i protoni fino a 1,4 GeV (leggi 1,4 giga eV; o 1,4 miliardi di eV), seguito dal Proton Synchrotron (PS), che spinge il fascio di protoni fino a 25 GeV. I protoni vengono quindi inviati al Super Proton Synchrotron (SPS) dove vengono accelerati fino a 450 GeV.

I protoni accelerati a 450 GeV vengono infine trasferiti nei due tubi dell'LHC. Il fascio (o raggio) di protoni nel primo tubo circola in senso orario mentre il fascio (o raggio) di protoni nel secondo tubo circola in senso antiorario. Occorrono 4 minuti e 20 secondi perché gli anelli del LHC vengano saturati e poi altri 20 minuti affinché i protoni raggiungano la loro energia massima di 6,5 TeV. I fasci di protoni circolano per molte ore all'interno dei tubi del LHC per raggiungere le condizioni operative di regime. Una volta raggiunte le condizioni di regime, i due raggi di protoni vengono portati in collisione all'interno di quattro rivelatori – detti ALICE, ATLAS, CMS e LHCb - dove l'energia totale nel punto di collisione è pari a 13 TeV (= 6,5+6,5 TeV).

I protoni non sono le uniche particelle accelerate nell'LHC. Ricerche vengono effettuate usando anche ioni di Piombo che vengono immessi nell'LHC [per la definizione di ione vedi Nota 9]. Anche col Piombo si parte da una fonte di piombo vaporizzato che viene immesso nel Linac-3 prima di trasferirlo nell'anello ionico a bassa energia (LEIR). Da lì poi si segue lo stesso percorso dei protoni.



he CERN accelerator complex

Figura 22: Il complesso di acceleratori al CERN [Fonte: CERN Website]

## Nota 8. Relazione tra Decadimenti e Weak Force

La “**Weak Force**” (Forza Debole) è quella che è principalmente responsabile del fenomeno chiamato “**Decadimento**”. Entra in gioco quando due particelle elementari interagiscono tra loro. Quando ciò accade, due particelle, tipicamente ma non necessariamente, fermioni di spin semi-interi, si scambiano un bosone portatore di forza (cioè, un bosone W o Z) e, in tale processo, una particella elementare si trasforma in un'altra particella elementare.

Ad esempio, nella Nota 3 abbiamo descritto il decadimento  $\beta$  del neutrone dove, un down-quark (all'interno di un neutrone) si trasforma in un up-quark, convertendo così il neutrone in un protone e

l'espulsione di un elettrone e di un electron-antineutrino. Il messaggero (o mediatore) di questa trasformazione è il bosone W. È anche interessante notare che la Weak Force perde completamente la sua forza a distanze superiori a 10 milionesimi di milionesimi di milionesimi di metro (circa  $10^{-18}$ m). È altrettanto interessante notare che il messaggero di questa forza, (cioè, il bosone W) ha una vita molto, molto, molto, .... breve (meno di un milionesimo di milionesimo di milionesimo di milionesimo di secondo, cioè, meno di  $10^{-24}$  secondi o meno di uno Yocto-secondo).

## Nota 9. Ioni e Ionizzazioni

Se un atomo perde uno o più elettroni, non è più chiamato "atomo", ma è chiamato "**ione**". Il processo attraverso il quale un atomo perde uno o più elettroni è chiamato **ionizzazione**. Ovviamente, un atomo che ha perso uno o più elettroni, non è più elettricamente neutro. Non è molto difficile spogliare un atomo dei suoi elettroni orbitanti. Quando un atomo entra in collisione con un altro atomo, o con una particella subatomica, o con una molecola, o con uno ione, può perdere uno o più elettroni, diventando così uno ione. A volte gli atomi perdono elettroni semplicemente interagendo con la luce (effetto fotoelettrico). Per un atomo d'idrogeno, composto da un elettrone orbitante legato a un nucleo fatto di un singolo protone, ci vogliono solo circa 14eV di energia per forzare l'elettrone dalla sua orbita, ciò significa che un campo elettrico modesto, generato da una batteria di 15-20 Volt, è in grado di strappare elettroni dagli atomi di idrogeno, lasciando solo protoni nudi.

## Nota 10. La Forza Forte ("Strong Force")

La "**Strong Force**" (Forza Forte) è davvero, davvero forte! Per dare un'idea di quanto sia forte, a una distanza di  $10^{-15}$ m (1 femtometro), la Forza Forte è circa 137 volte più forte dell'elettromagnetismo, un milione di volte più forte della Forza Debole e 1038 volte più forte della forza di gravità. La Forza Forte è la forza che tiene insieme la materia ordinaria perché lega (tiene uniti) i quark in particelle come il protone e il neutrone (chiamati anche adroni – vedi Nota 11). Inoltre, la Forza Forte è quella che lega neutroni e protoni per creare nuclei atomici. Per avere un'idea di quanto forte sia la Forza Forte, basti pensare che la maggior parte della massa di un comune protone o neutrone è costituita dalla energia del campo di forza; i singoli quark contribuiscono solo l'1% circa alla massa di un protone.

La Forza Forte è quella che tiene insieme protoni e neutroni (nucleoni) per formare i nuclei degli atomi. La Forza Forte è anche quella che tiene insieme i quark per formare protoni, neutroni. Pertanto, possiamo dire che gli effetti della "strong force" sono osservabili a due livelli di distanza:

1. Da circa 1 a 3 fm, cioè da 1 a 3 femto-metri, lega e tiene insieme protoni e neutroni (nucleoni) per formare il nucleo degli atomi.

2. A meno di circa 0,8 fm, (il raggio di un nucleone), lega e tiene insieme i quark per formare protoni e neutroni, che sono anche chiamati adroni (vedi Nota 11 per la definizione di Adroni).

## Nota 11. Adroni

Hadron (dal greco: ἄδρῶν, - pronuncia hadrós, - "robusto", "spesso") è una particella composta da quark tenuti insieme dalla Forza Forte. Il concetto non è molto diverso dalle molecole che sono tenute insieme dalla forza elettromagnetica. Protoni, neutroni e pioni sono esempi di adroni.

## Nota 12. Tavola delle Interazioni tra Forze e Particelle

La Tabella che segue illustra le interazioni fra le 4 forze fondamentali e le varie particelle:

Forza/Particella e Effetto	Gravita'	Debole	Elettromagnetica	Forte
Agisce su:	Massa e energia	Fa cambiare Flavor ai quark	Particelle con carica elettrica	Nucleo di atomi
Particella interessata:	Tutte	Tutte	Particelle con carica elettrica	Quarks
Particelle mediatrici: i.e.: Bosoni	Gravitone	W e Z	Fotone	Gluone
Livello di forza (quando Agisce su quarks)	$10^{-41}$	$10^{-4}$	1	60
Livello di Forza (quando Agisce su protoni-neutroni)	$10^{-36}$	$10^{-7}$	N/A agli Adroni	

## Nota 13. Grand Unification Theory (GUT)

Molti scienziati, già prima di Einstein, sono stati incuriositi dalla possibilità che le quattro forze fondamentali della natura (Gravitazione, Elettromagnetismo, Forza Debole e Forza Forte) possano davvero essere manifestazioni diverse di una singola forza (cioè, una singola forza che si comporta in modo diverso in condizioni diverse e, pertanto, appare diversa). In effetti, negli annali della fisica c'erano già esempi di forze che inizialmente si pensava fossero separate e che alla fine si è poi scoperto che erano unificate. Ad esempio, prima del XIX secolo si credeva ampiamente che l'elettricità e il magnetismo fossero due cose diverse. Nel 1820, Hans Christian Oersted scoprì la connessione tra elettricità e magnetismo, innescando così decenni di lavoro che culminarono (1865) nella teoria

dell'elettromagnetismo di James Clerk Maxwell, una teoria che unifica le forze elettriche e magnetiche e, in effetti, dice che forze elettriche e forze magnetiche sono due manifestazioni diverse della stessa forza.

Più di 60 anni dopo, circa 1930, Einstein iniziò uno sforzo simile nel tentativo di unificare le uniche due forze fondamentali conosciute all'epoca: la gravità e l'elettromagnetismo. A quel tempo, le altre due forze fondamentali (la Forza Forte, che lega insieme i nuclei atomici, e la Forza Debole che governa il decadimento) non erano ancora state scoperte. Da quel momento in poi, fino alla sua morte, più di 20 anni dopo, Einstein dedicò quasi tutti i suoi sforzi alla ricerca della **madre di tutte le forze**. Oltre tutto, la forza di gravità e la forza dell'elettromagnetismo sono simili in molti aspetti. La forza di entrambi, ad esempio, è inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra due corpi, ed entrambi hanno una portata infinita. Nonostante queste promettenti somiglianze, tuttavia, gli sforzi di Einstein, continuati da altri prima e dopo la sua morte, avvenuta nel 1955, sono stati vani.

Col tempo poi, poiché la Forza gravitazionale è molto, molto più debole delle altre tre forze, i fisici hanno cominciato a pensare che forse la Forza gravitazionale fosse veramente diversa e, quindi, sarebbe stato conveniente concentrarsi nel trovare una teoria di unificazione delle tre forze fondamentali rimanenti, vale a dire: elettromagnetismo, forze deboli e forti.

Le ricerche su questo tema sembravano promettenti quando, nel 1967, Sheldon Glashow, Steven Weinberg e Abdus Salam hanno dimostrato che l'elettromagnetismo e la Forza Debole hanno un'origine comune e appaiono distinte solo a basse energie. Questo perché, a livelli energetici bassi, le particelle che trasportano la Forza Debole, cioè, i bosoni W e Z, hanno masse di  $80,4 \text{ GeV}/c^2$  e  $91,2 \text{ GeV}/c^2$ , rispettivamente, mentre il fotone, che trasporta la forza elettromagnetica, è privo di massa (e questo è il motivo per cui appaiono diverse). A energie più elevate, invece, è possibile facilmente creare i bosoni W e Z con masse sempre più trascurabili e la natura unificata della forza diventa evidente. In altre parole, a energie basse la **forza unificata** appare come una forza elettromagnetica, mentre a energie più elevate appare come una Forza Debole. In altre parole, forza elettromagnetica e Forza Debole sono la stessa cosa, che si presenta con la divisa di Forza elettromagnetica a basse energie e si presenta con la divisa di Forza Debole ad alte energie. Questa forza unificata, cioè la combinazione di elettromagnetismo e Forza Debole, fu chiamata **forza elettrodebole**.

Quando, però, si è cercato di unificare la Forza Elettrodebole con la Forza Forte, nonostante gli sforzi di alcuni dei migliori fisici sulla Terra, una soluzione non è stata ancora trovata. Le forze forti ed elettrodeboli, mentre coesistono pacificamente nel Modello Standard della fisica delle particelle, rimangono pur sempre distinte. Molti ricercatori credono, tuttavia, che a livelli di energia più elevata, le tre interazioni del Modello Standard, e cioè, le interazioni elettromagnetiche, deboli e forti, abbiano una origine comune e, pertanto, le tre forze corrispondenti (Elettromagnetica, Debole e Forte) siano figlie di una unica forza. Questi ricercatori usano il termine **Grand Unification Theory (GUT)** quando si riferiscono all'unificazione di queste tre forze.

Per quanto riguarda poi l'unificazione della forza gravitazionale con le altre tre forze (cioè, forze elettromagnetiche, deboli e forti), il problema è molto più complesso. Se tale Unificazione c'è mai stata

in natura, deve essere stata nelle prime fasi dell'Universo a energie molto maggiori di quelle ottenute con il LHC più avanzato, e quindi difficile da riprodurre anche con i colliders più avanzati inventati fino ad oggi. In altre parole, c'è la possibilità che un'era di grande unificazione sia esistita nei primissimi tempi della vita dell'Universo e, durante quell'era, le quattro forze fondamentali non erano ancora distinte. Se le condizioni esistenti in tale epoca potessero essere riprodotte in un laboratorio, allora potremmo unificare la forza di gravità con le altre tre forze fornendo così una **Theory of Everything (TOE, in italiano Teoria di Tutto)**. Se così fosse si potrebbe pensare che il GUT sia un passaggio intermedio verso una TOE.

Alcuni scienziati, però, partendo dal fatto che le differenze tra forza gravitazionale da un lato e le altre tre forze dall'altro lato sembrano avere caratteristiche irreconciliabili, hanno cominciato a pensare che la Forza di Gravità possa veramente avere una madre diversa.

- **Indovina un po' chi, questi scienziati sospettano, potrebbe essere la madre della Forza di Gravità?**

Risposta: **L'Entropia!!!**

Riportiamo qui di seguito parte di un articolo, scovato da una delle mie nipoti su Internet (mia nipote vagamente ricorda che l'articolo proveniva da **MorningOverview**, ma non ricorda l'autore) che illustra come e perché questi scienziati hanno cominciato a fare ricerche sull'Entropia come possibile madre della Forza di Gravità.

*“Per oltre un secolo, la gravità è rimasta l'elemento anomalo e ostinato della fisica, perfettamente descritta su scale cosmiche ma refrattaria a integrarsi con le regole quantistiche che governano tutto il resto. Un numero crescente di teorici si sta ora chiedendo se la gravità non sia affatto un ingrediente fondamentale della natura, ma piuttosto un effetto collaterale dell'entropia e dell'informazione, un fenomeno emergente che appare solo quando si considerano molti gradi di libertà microscopici nel loro complesso. Se questa idea radicale si dimostrasse valida, potrebbe ridefinire il problema stesso dell'unificazione, spostando la ricerca da una nuova particella o campo ai meccanismi statistici nascosti dello spaziotempo.*

*Invece di trattare la gravità come un'interazione fondamentale da quantizzare, come l'elettromagnetismo, questi approcci la considerano più simile all'elasticità di un cristallo o alla pressione di un gas, un comportamento collettivo che ha senso solo su larga scala. Voglio ripercorrere come questa visione entropica si inserisca nella lunga lotta per conciliare la Relatività Generale di Einstein con la Meccanica Quantistica, cosa potrebbe offrire a una futura teoria unificata e perché molti fisici la considerano ancora una strada intrigante ma non ancora dimostrata, piuttosto che la meta finale.”*

Per il momento tutto quello che possiamo dire è che la Grand Unification Theory (GUT) è ancora da definire e una Theory of Everything (TOE) è molto più lontana.

## Nota 14. Perché le Particelle di II e III Generazione non Sono Stabili

Quando diciamo che le particelle di seconda e terza generazione non si trovano nella "materia ordinaria", dobbiamo spiegare cosa intendiamo dire quando usiamo l'espressione "materia ordinaria". La materia ordinaria è quella che vediamo intorno a noi nelle "condizioni odierne", cioè le condizioni che sperimentiamo nella nostra vita quotidiana di oggi: temperatura, pressione atmosferica, forze gravitazionali, energia (cinetica, potenziale, termica, ecc.) posseduta dalla materia che osserviamo, forze elettromagnetiche, ecc. Per esempio, osservare un treno in movimento a una velocità di 150 miglia l'ora è condizione ordinaria; osservare gli spaghetti cuocere in padella a una temperatura di 100 gradi Celsius è una condizione ordinaria. Ciò che non è ordinario è vedere qualcosa che si muove a una velocità che si avvicina a quella della luce. Ciò che non è normale è vedere qualcosa cuocere a una temperatura di diverse centinaia di migliaia o addirittura milioni di gradi Celsius. Per scovare i quark del tipo charm, strange, top o bottom, gli scienziati hanno dovuto far ricorso ad acceleratori che spingono i protoni a una velocità prossima a quella della luce e questa non è una condizione ordinaria. E quando gli scienziati hanno fatto scontrare due fasci di protoni a queste velocità, l'energia di questi protoni era di circa  $13 \times 10^{12}$  eV (cioè, 13 Tera eV – vedi Nota 15). Energia a questo livello è equivalente a una temperatura di diverse centinaia di migliaia di gradi Celsius: queste non sono condizioni ordinarie nella vita odierna ed è proprio il motivo per cui le particelle di seconda e terza generazione non si trovano nella "materia ordinaria"! Se queste particelle sono mai esistite libere e vaganti nello spazio, deve essere stato in un'era in cui la temperatura dell'Universo era molto, molto più alta di quanto non sia oggi (condizioni odierne). Infatti, noi sappiamo che le temperature dell'Universo all'epoca del Big Bang (BB) e poco dopo erano, presso a poco, le seguenti:

1. Big Bang (BB):  $10^{32}$  °C (leggi 10 Tera gradi Celsius, equivalenti a  $1,18 \times 10^{35}$  eV)
2. 1 secondo dopo il BB:  $1 \times 10^{11}$  °C (leggi 100 giga gradi Celsius, equivalenti a  $1,18 \times 10^{33}$  eV)
3. 14 secondi dopo il BB:  $3 \times 10^9$  °C (leggi 3 giga gradi Celsius, equivalenti a  $3,54 \times 10^{31}$  eV)
4. 4 minuti dopo il BB:  $1 \times 10^9$  °C (leggi 1 giga gradi Celsius, equivalente a  $1,18 \times 10^{31}$  eV)
5. 700.000 anni dopo il BB:  $4 \times 10^3$  °C (leggi 4 mila gradi Celsius, equivalenti a  $3,45 \times 10^{19}$  eV)

È durante questo periodo, man mano che l'Universo si raffreddava, che i quark del tipo charm, strange, top e down vaganti liberamente nello spazio si sono aggregati per formare gli atomi d'idrogeno (H). Si pensi che la temperatura media odierna dell'Universo è di circa 2,73 Kelvin (che è  $-270,42$  °C; o  $-454,76$  °F).

Quindi, deve esserci stata un'era (tra il Big Bang e circa 700.000 anni dopo) in cui la materia era molto più fluida e non si era ancora aggregata in protoni, neutroni, atomi ecc., come li conosciamo oggi. Presumibilmente, durante questa era, avremmo potuto trovare quark del tipo charm, strange, top o down vaganti a ruota libera nello spazio. Se vogliamo scovarli oggi, dobbiamo quindi ricreare le condizioni esistenti in quell'epoca. Questo è esattamente quello che gli scienziati stanno cercando di fare con i "colliders" al CERN e in altri centri di ricerche. Purtroppo, finora, sono stati in grado di

raggiungere solo energie fino a un massimo di circa 10 Tera eV ( $10 \times 10^{12}$  eV), ancora molto lontane dai livelli di energia di  $3,45 \times 10^{19}$  eV esistenti nell'Universo quando queste particelle elementari hanno iniziato ad aggregarsi per creare agli atomi d'idrogeno (H).

In conclusione, quindi, diciamo che le particelle di II e III generazione sono stabili e, quindi, sopravvivono solo a temperature altissime (al di sopra di un miliardo di gradi °C). A temperature più basse, come quelle che sperimentiamo nelle condizioni odierne, queste particelle non sopravvivono e, invece, si aggregano fra di loro per formare protoni, neutroni e atomi. Quindi, quando i fisici dicono "queste particelle non sono stabili", intendono dire che queste particelle "non possono sopravvivere stabilmente nelle condizioni odierne".

## **Nota 15. Parole per Misurare Entità Fisiche Molto Grandi o Molto Piccole**

A volte in fisica è necessario tenere conto di grandi quantità di determinate entità. Ad esempio, quando si misura l'energia, un'unità di misura comune è l'elettrone-Volt (eV). Se la quantità di energia da misurare fosse molto grande, potremmo parlare di centinaia di migliaia di eV o anche di milioni o miliardi o triloni di eV. Gli scienziati hanno inventato alcuni prefissi per designare multipli di 1.000. Quindi, quando vogliamo dire 1.000eV, diciamo invece 1 Kilo-eV; quando vogliamo indicare 1 milione eV, diciamo 1 Mega-eV. Allo stesso modo, quando vogliamo esprimere la temperatura esistente quando è nato l'Universo, al momento del Big Bang (BB), diciamo che la temperatura era di 10 Tera °C (10 Tera gradi Celsius = 10 triloni °C).

### **Riportiamo qui l'elenco dei prefissi utilizzati per designare numeri grandi e il loro significato:**

Kilo è un prefisso di unità decimale nel sistema metrico che denota un fattore di moltiplicazione di mille ( $10^3$  o 1.000). Viene designato nel sistema internazionale di unità con la lettera k, in minuscolo. Il prefisso chilo deriva dalla parola greca χίλιοι (xilioi), che significa "mille".

Mega è un prefisso di unità decimale nei sistemi metrici di unità che denota un fattore di moltiplicazione di un milione ( $10^6$  o 1.000.000). Viene designato nel sistema internazionale di unità con la lettera M. Mega deriva dal greco μέγας (megas), che significa "grande".

Giga è un prefisso di unità decimale nel sistema metrico che denota un fattore di moltiplicazione di un miliardo ( $10^9$  o 1.000.000.000). Viene designato nel sistema internazionale di unità con la lettera G. Giga deriva dalla parola greca γίγας, che significa "gigante".

Tera è un prefisso di unità decimale nel sistema metrico che denota un fattore di moltiplicazione di un trilione, cioè mille miliardi ( $10^{12}$  o 1.000.000.000.000). Viene designato nel sistema internazionale di unità con la lettera T. Tera deriva dalla parola greca τέρας, (pronuncia, teras), che significa "mostro".

Peta è un prefisso di unità decimale nel sistema metrico che denota un fattore di moltiplicazione di mille triloni ( $10^{15}$  o 1.000.000.000.000.000). Viene designato nel sistema internazionale di unità con la lettera P. A volte, per riferirsi a questo numero, è usata la parola "quadrilione".

Exa è un prefisso di unità decimale nel sistema metrico che denota un fattore di moltiplicazione di mille Peta ( $10^{18}$  o 1.000.000.000.000.000.000). Viene designato nel sistema internazionale di unità con la lettera E. Exa deriva dal greco ἕξ, usato come prefisso ἕξά-, che significa sei (come hexa-), perché è uguale alla 6ª potenza di 1000 ( $1000^6$ ).

Zetta è un prefisso di unità decimale nel sistema metrico che denota un fattore di moltiplicazione di mille Exa ( $10^{21}$  o 1.000.000.000.000.000.000.000). Viene designato nel sistema internazionale di unità con la lettera Z. Zetta è evocativo del numero latino septem, che significa "sette". Pertanto, è stato utilizzato per denotare la settima potenza di 1000 ( $1000^7$ ).

Yotta è il prefisso di unità decimale più grande nel sistema metrico, che denota un fattore di moltiplicazione di  $10^{24}$  o 1.000.000.000.000.000.000.000.000; cioè, un milione di milioni di milioni di milioni, o un settilione. Viene designato nel sistema internazionale di unità con la lettera Y. Il nome del prefisso deriva dal greco antico οκτώ (pronuncia, októ), che significa "otto", perché è uguale a  $1.000^8$ .

### **Prefissi Utilizzati Per la Misurazione Di Quantità Molto Piccole**

A volte in fisica è necessario tenere conto di quantità molto piccole di determinate entità. Ad esempio, quando misuriamo il tempo, usiamo il "secondo". Ci sono alcuni fenomeni in natura che avvengono in una frazione di secondo, per esempio un millesimo, milionesimo, miliardesimo di secondo o anche meno. Gli scienziati hanno inventato alcuni prefissi per designare frazioni sempre più piccole. Ad esempio, se succede qualcosa in un decimo di secondo, diciamo 1 deci-secondo. Se succede qualcosa in un milionesimo di secondo, diciamo 1 microsecondo. Se succede qualcosa in un miliardesimo di secondo, diciamo 1 nano-secondo. Allo stesso modo quando si studiano le componenti fondamentali dell'atomo e si desidera misurare le loro dimensioni, o la distanza che separa due particelle, o se si vuole misurare il raggio di un atomo, non si può usare il metro come unità di misura delle distanze. Infatti, nella maggior parte dei casi, i raggi degli atomi neutri isolati variano tra 30 e 300 trilionesimi di metro [che può essere scritto tra  $(30-300) \times 10^{-12}$  metri, oppure tra  $(10-300) \times 0,000.000.000.001$  metri]. Invece di usare questi numeri con tanti decimali si usa il prefisso **pico** (un pico-metro è un trilionesimo di metro o  $10^{-12} = 0,000.000.000.001$  metri). Allo stesso modo, il raggio di un nucleo è circa 10.000 volte più piccolo del raggio dell'atomo ( $10^{-16} = 0,0.000.000.000.000.001$  metri). In questo caso usiamo il prefisso **femto** (un femto-metro è  $10^{-15} = 0,000.000.000.000.001$  metri).

**Riportiamo qui l'elenco dei prefissi utilizzati per designare numeri piccoli e il loro significato:**

<b><u>Deci:</u></b>	$10^{-1}$	0,1 decimo
<b><u>Centi:</u></b>	$10^{-2}$	0,01 centesimo
<b><u>Milli:</u></b>	$10^{-3}$	0,001 millesimo
<b><u>Micro:</u></b>	$10^{-6}$	0,000.001 milionesimo
<b><u>Nano:</u></b>	$10^{-9}$	0,000.000.001 miliardesimo

<b><u>Pico:</u></b>	10 <sup>-12</sup>	0,000.000.000.001 trilionesimo
<b><u>Femto:</u></b>	10 <sup>-15</sup>	0,000.000.000.000.001 quadrilionesimo
<b><u>Atto:</u></b>	10 <sup>-18</sup>	0,000.000.000.000.000.001 Quintilionesimo
<b><u>Zepo:</u></b>	10 <sup>-21</sup>	0,000.000.000.000.000.000.001 Sextilionesimo
<b><u>Yocto:</u></b>	10 <sup>-24</sup>	0,000.000.000.000.000.000.000.001

## Nota 16. Riconoscimenti e Ringraziamenti

La maggior parte delle immagini di questo saggio sono state riprese da Internet o da libri di testo o pubblicazioni ai cui autori noi esprimiamo la nostra profonda gratitudine. In alcuni casi queste immagini sono state adattate al testo dal dott. Carmine Manfredi, al quale vanno i nostri più vivi ringraziamenti. I nostri più vivi ringraziamenti anche alla dottoressa Margherita Pacia per i suoi suggerimenti e contributi alla versione in lingua italiana del saggio.

**Bibliografia:** Enciclopedia Britannica; Wikipedia; A Brief History of Time by Stephen Hawking; Plato.Stanford.Edu; The particle adventure; Byjus.com; *Standard Model of Particle Physics*, by Cottingham and Greenwood; MorningOverview, articolo sulle origini della Forza di Gravità; Google AI, ChatGPT, altri AI; Articoli vari del dr. Hitoshi Murayama, Dennis Overbye, Katrina Miller, Dylan L. McClain, Rashmi Shivni, etc.