

P
ARTICLE

E
SCAPE

R
OOM

PER me si va ne la fisica recente

Gruppo Physics4Teenagers

Dipartimento di Fisica, Università di Pavia - INFN Sezione di Pavia

Festival della Scienza di Genova 21 ottobre-1 novembre 2021

PHYSICS
for
TEENAGERS

“E quindi uscimmo a rivelar le particelle”

 el mezzo del festival della scienza
vi ritrovate per una escape oscura,
ché del saper volevate esperienza.

Oh! quanto a dir qual'era è cosa dura
esta escape room pavese, aspra e forte
che di fisica scaccia la paura!

Tant'è amara che poco è più morte;
ma per capir bene che vi trovai,
spiegherò alcune cose ch'i v'ho scorte.

Io non ti so ben dir se ne uscirai
tante n'avrai di prove a quel punto
che la verace via suderai.

Indice

1	Come è fatto il mondo che ci circonda?	1
1.1	Le prime idee	1
1.2	La prima risposta è negativa	2
1.3	A forma di panettone	3
1.4	Incredibilmente vuoto	3
1.5	Un aiuto dall'alto	4
1.6	C'è ma non si vede	6
1.7	“Three quarks for Muster Mark”	7
1.8	L'ultimo tassello	9
1.9	Ἡ πρώτη ἀπάντηση εἶναι ἀρνητική	10
2	Non finisce qui	11
2.1	La materia oscura?	11
2.2	La massa dei neutrini	11
2.3	La forza di gravità	12
2.4	Cosa ci riserva il futuro?	13
	Conclusione	15
	Ringraziamenti	16

Capitolo 1

Come è fatto il mondo che ci circonda?

Al giorno d'oggi accettiamo facilmente l'idea di vivere in un mondo in cui non tutto ciò che ci circonda è possibile vederlo con i nostri occhi. La rete Wi-Fi di casa, il "campo" del nostro cellulare, il segnale trasmesso dal telecomando della nostra auto sono solo alcuni esempi quotidiani, ma ce ne sarebbero tanti altri: dalle grandi galassie lontane fino ai piccoli atomi all'interno del nostro corpo.

L'idea che possa esistere una dimensione della realtà non visibile all'uomo è frutto del lavoro di importanti personaggi per l'umanità: dai filosofi greci Aristotele e Democrito, agli scienziati del XX secolo Thomson, Rutherford, Bohr e Heisenberg. Grandi uomini dal grande intuito accomunati dal desiderio di scoprire la risposta ad una sola grande domanda: come è fatto il mondo che ci circonda?

La stessa risposta che forse stai cercando anche tu all'interno di queste righe, e allora mettiti pure comodo perché sta per iniziare un viaggio che entrerà all'interno della materia attraversando i secoli dell'umanità.

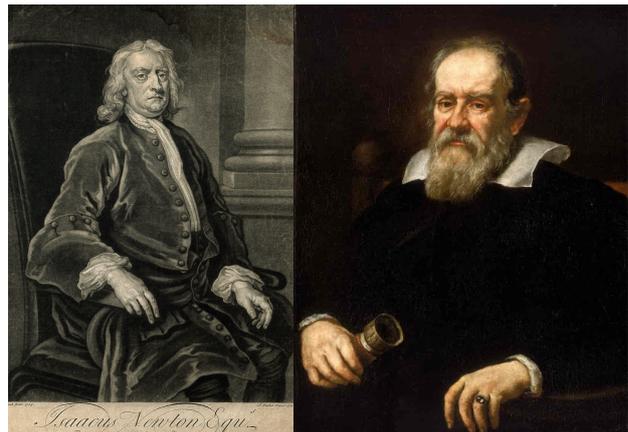
Buona lettura.

1.1 Le prime idee

Da sempre l'uomo si è interrogato su cosa ci fosse all'origine della vita e delle cose che ci circondano. Importanti filosofi greci come Talete (640 - 545 a.C.), Anassimandro (610 - 546 a.C.), Pitagora (580 - 495 a.C.), Eraclito (535 - 475 a.C.), Anassagora (496 - 428 a.C.) hanno cercato di dare la risposta a questa domanda così complicata ipotizzando che la risposta potesse essere in elementi concreti (l'acqua per Talete, l'aria per Anassimene, i numeri per Pitagora) o addirittura in enti astratti (l'*apeiron* di Anassimandro, il divenire di Eraclito, i Semi di Anassagora).

Fra tutti questi illustri filosofi quello che ha gettato le basi per la fisica che oggi conosciamo fu **Democrito** (460 - 370 a.C.) che ipotizzò che alla base di tutto ci fossero gli **atomi**: ipotetici e minuscoli costituenti elementari della materia. La sua teoria è sopravvissuta ai secoli ed è stata più volte ripresa ed elaborata da altri importanti filosofi dell'umanità a partire da Tito Lucrezio Caro (nel suo *De Rerum Natura*) fino ad arrivare ad **Isaac Newton** (1642 - 1726). Quest'ultimo era fermamente convinto che i corpi fossero formati da particelle indivisibili. Gli atomi che Newton descrive sono dotati di proprietà meccaniche e si uniscono tra loro per creare particelle più complesse.

Le proprietà meccaniche che compongono gli atomi sono: forma, grandezza, solidità e inerzia. Secondo Newton, gli atomi originano strutture corpuscolari (con livelli di complessità diverse) in cui vi sono spazi vuoti. Da ciò deriva la teoria secondo la quale la struttura dei corpi è formata sia da parti solide, sia da vuoto ("pori"). Newton sviluppa il concetto di densità e afferma che:



Se tutte le particelle solide di ogni corpo sono della medesima densità e non sono rarefatte allora deve esistere tra loro uno spazio vuoto.

Proprio grazie a questa sua convinzione egli teorizza che anche la luce sia costituita da particelle. Newton è stato quindi il padre della teoria corpuscolare della luce che verrà ripresa solamente agli inizi del 1900 e in cui nascerà poi il moderno termine di **fotone**. Con questa teoria fu possibile spiegare i diversi colori, le leggi della riflessione e della rifrazione.

Prima di andar avanti nel nostro viaggio è doveroso fermarsi su uno scienziato che non ha direttamente un coinvolgimento nel mondo della fisica delle particelle ma che indirettamente, con il suo pensiero, ha cambiato l'idea che si aveva di scienza e che di fatto ha sancito il passaggio dalla scienza intesa come filosofia alla scienza intesa come matematica e come materia sperimentale: **Galileo Galilei**. Egli con il suo **metodo scientifico** ha gettato le basi di quello che è il "fare ricerca" moderno e di tutta la concezione che oggi abbiamo di scienza. Come vedrai nel resto dell'opuscolo il grande motore di tante scoperte sono stati gli esperimenti e in fin dei conti Galilei è il padre del concetto di esperimento.

1.2 La prima risposta è negativa

Dal XVIII al XIX secolo si è assistito in generale a grandi trasformazioni sociali, politiche, culturali ed economiche soprattutto con la Rivoluzione Francese e le grandi "rivoluzioni" scientifica e industriale. Tuttavia la nostra attenzione si sofferma su un piccolo aspetto della scienza di questi secoli: l'elettricità. Ancora una volta tutto nasce già dalle conoscenze degli antichi. I Greci avevano notato curiose manifestazioni come la capacità di un pezzo di ambra - *electron* in greco - di attrarre oggetti leggeri dopo essere stato strofinato con un panno di lana. Però lo studio di ciò che oggi chiamiamo **elettricità** è senza dubbio una prerogativa dei tempi moderni. Arriviamo allora al 1700 e tra i pionieri annotiamo **Benjamin Franklin** (1706-1790), con le sue investigazioni sui fulmini e l'invenzione del parafulmine; **Alessandro Volta**, (1745-1827) con le sue scoperte sulla conduzione elettrica e la prima pila; **Luigi Galvani** (1737-1798) con lo studio degli effetti dell'elettricità sugli esseri viventi. Già da allora si distinguevano elettricità vetrosa e resinosa - in termini moderni, carica positiva e negativa - e si parlava di alcuni concetti tutt'oggi ancora presenti come, appunto, la carica o la tensione.

Ma questo fu solo l'inizio. La possibilità di avere corrente continua grazie ai primi generatori permise di realizzare studi sempre più complessi e di addentrarsi nello studio dell'elettricità. Ci furono così grandi fisici sperimentali come **Charles Augustin de Coulomb** (1736-1806) a cui si deve la famosa legge di attrazione tra cariche, **André-Marie Ampère** (1775-1836) i cui esperimenti furono così importanti tanto che l'unità di misura dell'intensità di corrente elettrica prende il suo nome e **Georg Simon Ohm** (1789-1854) famoso per le sue due leggi sulla resistenza. Ma anche grandi fisici teorici che formalizzarono la teoria e diedero una interpretazione ad alcuni fenomeni: **Carl Friedrich Gauss** (1777-1855) a cui si devono i teoremi sul calcolo del flusso di un campo elettrico, **Micheal Faraday** (1791-1867) che formulò proprio il concetto di campo elettrico con cui spiegò la famosa gabbia di Faraday e **Hans Christian Ørsted** (1777-1851) che scoprendo la correlazione tra campo elettrico e campo magnetico unificò i due fenomeni sotto il nome di elettromagnetismo.

Tutti questi importanti fisici hanno contribuito allo studio dell'elettricità da un punto di vista macroscopico. Capire che cos'è l'elettricità da un punto di vista microscopico costituirà la tappa del nostro prossimo viaggio. Vedremo che, incredibilmente, questo richiamerà la teoria atomica di Democrito di due millenni prima.

1.3 A forma di panettone

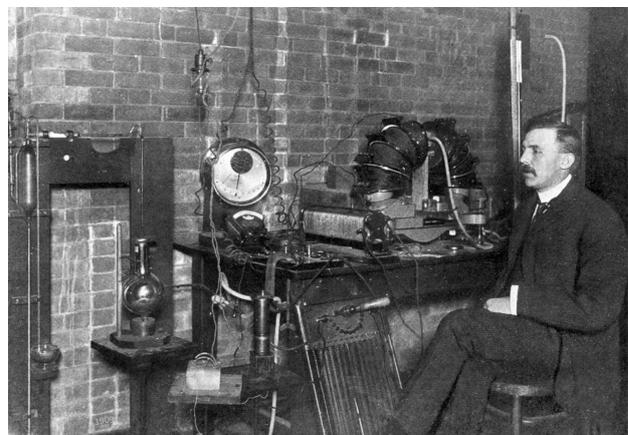
1897, Inghilterra. Non si aveva idea di come fosse fatta la materia. Sempre studiando i fenomeni elettrici, nel 1860 il fisico inglese Crookes aveva scoperto i raggi catodici: un fascio di corrente elettrica (di segno negativo) all'interno di tubi riempiti di gas ai cui capi veniva applicata alta tensione. Fu solamente il fisico britannico **Sir Joseph John Thomson** (1856-1940), che, attraverso diversi esperimenti con i tubi di Crookes, dimostrò che i raggi catodici erano costituiti da singole particelle, e non atomi o molecole come si credeva. Thomson riuscì anche a stimare in maniera accurata il rapporto tra la carica e la massa di tale particella, che lui chiamò "corpuscolo" e che oggi si chiama **elettrone**. È interessante notare come, leggendo il discorso di accettazione del premio Nobel per la fisica del 1906, Thomson non usò mai la parola *electron*, ma lo chiamava appunto *corpuscle* (il padre del moderno termine fu George Stoney, fisico irlandese, che lo utilizzò nel 1891). L'importanza di tale scoperta fu proprio la misura del rapporto carica/massa. Quando poi **Robert Millikan** (1868-1953), con il suo famoso esperimento della goccia d'olio, riuscì a misurare il valore della carica dell'elettrone fu possibile ricavare la sua massa. Thomson, che misurò anche la massa degli atomi, scoprì che la massa dell'elettrone costituisce una piccolissima parte rispetto a quella dell'atomo. Come conseguenza di questa osservazione egli ipotizzò (si veda il suo libro *Elettricità e materia*, 1904) che l'atomo in realtà fosse un grande contenitore di elettroni. Questo contenitore, poiché l'atomo è globalmente neutro, doveva però avere una carica opposta a quella dell'elettrone, quindi positiva. Il nome che Thomson pensò di usare per il contenitore di elettroni, da allora usato per l'intero modello, è *plum pudding* (il plum pudding è un dolce natalizio tradizionale britannico, preparato con frutta secca e mandorle, una via di mezzo tra un panettone e un budino). Ed ecco come nasce il termine che in italiano conosciamo come **modello a panettone**: gli elettroni, carichi negativamente, sono incastonati all'interno di una distribuzione omogenea di carica positiva proprio come dei canditi nel panettone.

1.4 Incredibilmente vuoto

Nel 1909, un brillante allievo di Thomson, **Ernest Rutherford**, (1871-1937) investigò la struttura dell'atomo usando i mezzi a disposizione della fisica sperimentale.

Lo fece all'interno del suo laboratorio sparando su una sottile lamina d'oro dei proiettili molto più pesanti degli elettroni, detti raggi alfa. Oggi sappiamo che tali raggi in realtà sono nuclei di atomi di elio a cui sono stati strappati via gli elettroni; all'epoca però si conoscevano solo le loro caratteristiche macroscopiche, come la massa e la carica.

Rutherford si accorse con gran sorpresa che, in una piccola frazione dei casi, questi proiettili venivano respinti all'indietro, come se l'atomo contenesse qualcosa di compatto, duro e pesante di segno positivo. Nel 1911, Rutherford arrivò alla conclusione che il modello di Thomson, ormai comunemente accettato dalla società scientifica, fosse incompatibile con le



sue osservazioni. Quei risultati potevano essere spiegati solo postulando che l'atomo possedesse un nucleo carico positivamente ben distinto dagli elettroni, molto più pesante di essi e davvero piccolissimo.

Attraverso il numero esiguo di particelle alfa respinte, Rutherford stimò che il nucleo dell'atomo di oro fosse più piccolo di un milionesimo di milionesimo di centimetro, cioè 10^{-12} cm, valore che risulta piuttosto vicino a quello delle moderne misure delle dimensioni nucleari. Siccome questo valore è diecimila volte più piccolo di un tipico atomo, le dimensioni degli atomi non vanno attribuite al nucleo (sebbene esso contenga gran parte della massa dell'atomo), ma alla distribuzione degli elettroni attorno ad esso. Ancora più importante è quindi la conclusione che l'atomo in sostanza è globalmente vuoto!

Rutherford ipotizzò quindi l'idea che l'atomo fosse una specie di piccolo sistema planetario, dove gli elettroni si comportano come satelliti che ruotano velocemente intorno al nucleo posto al centro: da qui il nome **modello planetario dell'atomo**. Il modello di Thomson quindi venne presto sostituito da questo, le evidenze sperimentali non lasciavano adito a dubbi.

Poiché il nucleo ha carica positiva venne ipotizzata l'esistenza di una particella, carica appunto positivamente, detta **protone** la cui massa è 2000 volte maggiore di quella dell'elettrone. Questa scoperta illuse di aver risolto il problema inerente alla struttura dell'atomo ma in realtà aprì le porte ad altre domande: se nei nuclei ci sono i protoni, come mai nei diversi elementi con numero atomico (cioè numero di protoni) uguale a Z , corrisponde una massa pari spesso a circa il doppio di quella attesa ($2Z$)? Rutherford ipotizzò che nel nucleo fossero presenti, accanto a Z protoni, anche Z nuove particelle con massa molto simile a quella del protone ma elettricamente neutre (sempre per motivi di conservazione della carica atomica). L'evidenza sperimentale di questa nuova particella arrivò tra il 1930 e il 1932. La ripetizione degli esperimenti di Rutherford aveva portato a scoprire che tutte le sostanze di basso numero atomico, dopo essere state bombardate con particelle alfa, emettevano protoni, tranne il litio e il berillio. Nel tentativo di scoprire le ragioni di questa anomalia **James Chadwick** (1891-1974) osservò che il berillio emetteva una nuova radiazione molto penetrante in grado di attraversare anche lamine di piombo. A causa di questa suo elevato potere di penetrazione questa particella doveva quindi essere neutra (una particella neutra che attraversa la materia infatti non risente dell'attrazione coulombiana e può penetrare più in profondità, come succede per i raggi gamma, cioè i fotoni). Continuando a sperimentare notò che la paraffina (sostanza cerosa usata principalmente nella fabbricazione di candele, isolanti elettrici, ...) sottoposta alla radiazione emessa dal berillio eccitato, emetteva protoni ad alta energia (espulsi dai nuclei di idrogeno presenti nella cera). I dati in suo possesso relativi all'energia dei protoni in uscita non erano compatibili con una descrizione di un urto tra raggi gamma e nucleo. Chadwick concluse quindi che la radiazione emessa dal berillio era formata da particelle neutre con massa simile a quella del protone: fu così che venne scoperto il **neutrone**.

1.5 Un aiuto dall'alto

Vuoi sapere qual è il segreto per gli esperimenti in fisica delle particelle? L'intuito e la fantasia! Rutherford sparò particelle alfa contro una lastra d'oro, Chadwick usò addirittura la paraffina, ma gli esperimenti originali non finiscono di certo qui. Ma andiamo con ordine. Dopo la scoperta di Thomson diversi esperimenti dimostrarono che l'aria è sempre, sia pure debolmente, ionizzata, cioè contiene una piccola percentuale di elettroni liberi e di ioni positivi (atomi che hanno perso uno o più elettroni). Poiché gli elettroni e gli ioni positivi tendono spontaneamente a ricombinarsi (per pura e semplice attrazione coulombiana), qualcosa deve agire sulla materia per ionizzarla in continuazione. Una possibile spiegazione per questa radiazione ionizzante è la **radioattività** appena scoperta agli inizi del Novecento da **Henri Becquerel** (1852-1908) e dai coniugi **Pierre**

Curie (1859-1906) e **Marie Curie** (1867-1934). In natura infatti sono presenti nuclei instabili che decadono emettendo spontaneamente particelle: alfa (nuclei di elio), beta (elettroni) o gamma (fotoni). Tali particelle, essendo molto energetiche, interagiscono con l'aria e riescono a ionizzarla. Tuttavia le radiazioni emesse da questi nuclei non sono l'unica componente ionizzante. Tale conferma si ebbe il 7 agosto del 1912 quando un pallone aerostatico si sollevò dalla città di Aussig in Austria arrivando fino alla quota di 5000 metri. A bordo il fisico **Victor Hess** (1883-1964), con degli strumenti per misurare la ionizzazione, scoprì che essa risultava maggiore rispetto a quella registrata al suolo. La conclusione di Hess fu:

I risultati delle mie osservazioni si spiegano meglio assumendo che una radiazione ionizzante entri dall'alto nella nostra atmosfera.

Grazie al suo esperimento e alla sua deduzione Victor Hess ricevette, nel 1936, il premio Nobel per la scoperta di questa radiazione proveniente dallo spazio: i **raggi cosmici**. Chiarire la natura di questa misteriosa radiazione richiese più di venti anni. I raggi cosmici arrivano nell'alta atmosfera però non raggiungono direttamente la superficie della Terra.

Queste particelle (radiazione primaria) interagiscono ad alta quota (a circa 15-20 km di altezza) con gli atomi dell'aria formando una sciame di particelle secondarie. Gran parte di quest'ultima radiazione è assorbita nell'atmosfera e solo una piccola frazione arriva al suolo. Capire la natura di queste particelle è stato un bel rompicapo per i fisici della prima metà del ventesimo secolo, che non ne conoscevano le proprietà. Negli anni successivi sono state scoperte altre componenti della radiazione cosmica: il **muone** (particella carica negativa con una massa pari a 200 volte quella dell'elettrone) e il **pione** (carico o neutro con una massa pari a 280 volte quella dell'elettrone). La caccia ad altre di queste particelle continuerà per



anni, ed è così che comincia a nascere la fisica della particelle. Ad oggi lo studio di questa radiazione cosmica continua e affascina i fisici, infatti importanti laboratori sono installati sulle più alte catene montuose del mondo o addirittura nello spazio. Quel che Victor Hess aveva fatto più di 100 anni fa su un pallone aerostatico, si continua a fare oggi usando tecnologie moderne e persino i satelliti.

Una svolta si ebbe nel 1932, quando **Carl David Anderson** (1905-1991) scoprì nella radiazione cosmica una particella particolare, che aveva la stessa massa dell'elettrone, ma carica elettrica positiva. Un elettrone positivo insomma! Sorpreso? Sicuramente lo furono anche i fisici del tempo.

L'esperimento di Anderson era molto semplice ma per spiegarlo dobbiamo fare una premessa riguardante l'interazione tra particelle cariche e campo magnetico. Infatti una particella carica con una certa velocità immersa in un campo magnetico (non parallelo al vettore velocità) tende a curvare rispetto alla sua direzione iniziale. Questo perché la particella risente di una forza, la **forza di Lorentz**, la cui relazione è data da

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (1.1)$$

dove q è la carica della particella, v la sua velocità e B il campo magnetico. Il simbolo di moltiplicazione tra v e B prende il nome di prodotto vettoriale e dà come risultato un vettore che è perpendicolare ai due vettori v e

B . Proprio perché la forza è perpendicolare, questa non causa una variazione della velocità, ma solamente una deflessione della sua traiettoria: la forza di Lorentz svolge il ruolo di una forza centripeta. Possiamo eguagliare la forza in (1.1) con la generica forza centripeta $F_c = m \frac{v^2}{r}$ per ottenere il raggio di curvatura

$$r = \frac{mv}{qB}$$

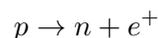
Dopo questa premessa l'esperimento di Anderson risulterà molto più chiaro: egli infatti notò che alcune particelle curvavano nella stessa direzione delle altre particelle positive e, misurando il raggio di curvatura, ricavò un valore della massa uguale a quelle dell'elettrone. Ecco come Anderson capì che si trovava di fronte ad un elettrone positivo.

La scoperta in realtà non destò grandissimo scalpore solamente perché il celebre fisico **Paul Dirac** (1902-1984), sulla base di considerazioni puramente teoriche, aveva già previsto l'esistenza di particelle di **antimateria** e l'antielettrone aveva anche già un nome: il **positrone**. Anderson, senza conoscere la teoria di Dirac, aveva scoperto la prima particella di antimateria e per questo condivise il premio Nobel con Victor Hess.

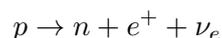
Sicuramente ti starai facendo diverse domande sull'antimateria, ma il nostro viaggio è ancora lungo e non è ancora il tempo di parlarne perché *vuolsi così colà dove si puote ciò che si vuole, e più non dimandare*.

1.6 C'è ma non si vede

Dirac non fu il solo a prevedere l'esistenza di una particella prima della sua scoperta sperimentale. Nel 1931 il fisico teorico **Wolfgang Ernst Pauli** (1900-1958) ipotizzò l'esistenza di un'altra particella che mise a dura prova i fisici sperimentali per molti anni prima di essere rivelata. L'ipotesi di Pauli nacque come diretta conseguenza dello studio del **decadimento beta**. Si tratta di un particolare tipo di decadimento radioattivo, nel quale alcuni nuclei, caratterizzati da un eccesso di protoni rispetto ai neutroni, risultano instabili e decadono trasformandosi in nuclei diversi. Pertanto quel che accade è che un protone si trasforma spontaneamente in un neutrone emettendo un positrone (è cosa facilmente comprensibile applicando la legge di conservazione della carica elettrica)



Tuttavia sperimentalmente ci si accorse presto di una apparente violazione dell'energia del sistema. Infatti positrone e neutrone emergevano con energia inferiore a quella aspettata, parte dell'energia sembrava pertanto sparire nel nulla. Lo stesso discorso valeva per la quantità di moto delle due particelle finali: la loro somma vettoriale sembrava violare il principio di conservazione della quantità di moto. Infatti se un protone decadde in solo due particelle queste dovrebbero viaggiare in direzioni opposte lungo la stessa retta. Il neutrone e il positrone emergevano invece formando un angolo tra loro, come se al decadimento partecipasse una terza particella invisibile. Questa particella doveva essere senza carica e con massa molto molto piccola: le fu quindi dato il nome di **neutrino**. Pertanto il decadimento beta completo risulta



A causa delle sue proprietà il neutrino è una particella estremamente sfuggente che interagisce pochissimo con la materia e per questo motivo i fisici sperimentali hanno impiegato ben 26 anni per trovarla. Essa fu scoperta, nel 1956, dai fisici Clyde Cowan e Fred Reines nel corso di un esperimento eseguito presso un reattore nucleare a fissione.

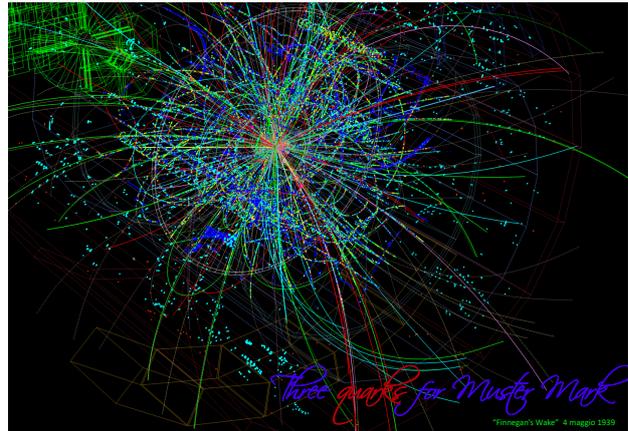
1.7 “Three quarks for Muster Mark”

L'atomo ormai sembra non avere più segreti vero? Un nucleo centrale con protoni e neutroni e gli elettroni che ruotano intorno. Ma i fisici non si sono fermati qui e hanno continuato per anni a studiare il nucleo per capire se davvero protoni e neutroni fossero elementari o se fossero composte da altre particelle. Per continuare la caccia però gli esperimenti diventavano sempre più grandi ma soprattutto richiedevano sempre maggiore energia. La tecnica usata era molto simile a quella di Rutherford nel 1909: sparare particelle contro un bersaglio e studiare i risultati di queste collisioni. Per riuscire però a scoprire come fossero fatti protoni e neutroni erano necessarie energie molto elevate. Sono nati così i primi **acceleratori di particelle**: grandi macchinari in cui alcune particelle venivano accelerate fino a raggiungere grandi velocità per farle collidere. Oggi, per raggiungere energie ancora maggiori, si fanno collidere non contro un bersaglio fisso (come fece Rutherford che sparò raggi alfa contro una lamina d'oro) ma contro altre particelle a loro volta accelerate. Un urto tra due oggetti che si dirigono l'uno verso l'altro, infatti, sprigiona una energia maggiore rispetto a quella di un urto contro un bersaglio fisso. Ma perché raggiungere alte energie? La risposta ce la suggerisce **Albert Einstein** (1879-1955) con la sua famosa formula che sancisce un forte legame tra energia e massa

$$E = mc^2$$

Avere più energia nelle collisioni permette di scoprire particelle con masse sempre maggiori.

Nel 1962 a Stanford, in California, venne costruito un acceleratore lineare di 3 km, lo SLAC (*Stanford Linear Accelerator Center*), in cui per anni sono stati eseguiti esperimenti in cui venivano accelerati elettroni ad alta energia (50 GeV, cioè 50 miliardi di elettronvolt¹) contro protoni e neutroni. Dagli innumerevoli dati raccolti si notò che gli elettroni urtavano contro oggetti puntiformi ed elettricamente carichi che si trovavano all'interno dei nucleoni (protoni e neutroni). Così quelle particelle che erano ritenute indivisibili si sono rivelate a loro volta composte di nuove entità che vennero chiamate **quark**. In meno di 30 anni, dal 1968 al 1995 vennero scoperti tutti e sei i quark oggi conosciuti: **up**, **down**, **charm**, **strange**,



top e **bottom**. Questi quark si combinano in maniera diversa, come in un puzzle, per creare molte delle particelle conosciute. Le particelle formate da quark si chiamano **adroni**; tra esse, quelle formate da tre quark prendono il nome di **barioni**, quelle formate da solo due quark, invece, si chiamano **mesoni**. Un protone, ad esempio, è costituito da due up e un down, mentre un neutrone è la combinazione di due down e di un up. Dunque per formare protoni e neutroni occorrono tre quark e fu questo che ispirò **Murray Gell-Mann** (1929-2019), l'ideatore di questa teoria, per il nome da dare a tali particelle. Durante le sue serate di lavoro gli capitò di imbattersi nella frase di Joyce, tratta dal romanzo “Finnegan’s Wake”, *Three quarks for Muster Mark!*. Era

¹L'energia delle particelle negli acceleratori si misura in eV. Un elettronvolt è la variazione di energia cinetica di un elettrone che viene accelerato da una differenza di potenziale di 1 Volt

$$\Delta E_{\text{cinetica}} = L = q\Delta V = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1 \text{ V}$$

una frase che nel romanzo a volte non significava nulla altre invece poteva avere molti altri significati ma quel "three" intrigò a tal punto Gell-Mann che utilizzò la parola "quark" per dare un nome alle sue particelle. Dalla struttura interna del protone e del neutrone si comprende una caratteristica importante dei quark: essi hanno carica frazionaria! Conoscendo la carica del protone e del neutrone è possibile (attraverso semplici calcoli algebrici) trovare il valore della carica del quark up e del quark down (rispettivamente $+2/3$ e $-1/3$ della carica elementare dell'elettrone). In poco più di mezzo secolo i grandi misteri intorno al nucleo, che erano presenti prima di Rutherford, hanno trovato una risposta. Restava però ancora un capitolo da scrivere: cosa tiene legato il nucleo? I protoni infatti sono carichi positivamente e pertanto risentono della repulsione coulombiana

$$F_{\text{Coulomb}} = \frac{Kq^2}{r^2}$$

Come fanno a rimanere quindi all'interno del nucleo? Ci deve essere una forza che li tiene legati. Potrebbe essere quella gravitazionale?

$$F_{\text{gravitazionale}} = \frac{Gm^2}{r^2}$$

Tuttavia calcolando il loro rapporto

$$\frac{F_{\text{Coulomb}}}{F_{\text{gravitazionale}}} = \frac{\frac{Kq^2}{r^2}}{\frac{Gm^2}{r^2}} = \frac{Kq^2}{Gm^2} = \frac{9 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \cdot (1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C})^2}{6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2} (1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg})^2} = 1,2 \cdot 10^{36}$$

si vede che la forza di repulsione è ben 36 ordini di grandezza maggiore rispetto a quella di attrazione gravitazionale. Ci deve pertanto essere un'altra forza in grado di tenere legati i protoni all'interno del nucleo: la **forza nucleare forte**. Questa interazione avviene tra i quark che formano i protoni e i neutroni e permette di tenere incollato il nucleo. Per questo la particella mediatrice di questa forza, ovvero un bosone (ancora qualche riga di pazienza e capirai cosa sono i bosoni) si chiama **gluone** (da *glue*, colla).

Alla luce di quanto è stato detto, dunque, le vere particelle indivisibili di Democrito non sono gli atomi ma sarebbero i quark, almeno fino ad oggi. Il condizionale è d'obbligo in quanto non è detto che questi rappresentino il limite di divisibilità della materia, per ora la scienza ci dice questo ma con l'avanzare del progresso scientifico nulla può essere dato per certo.

Dall'esperimento di Rutherford costruito sopra un tavolo del suo laboratorio si è arrivati a costruire grandi acceleratori di particelle, tutto per amore della conoscenza e per rispondere sempre alla solita domanda che tormenta l'uomo da millenni: "Di cosa è fatta la materia che ci circonda?". Ad oggi infatti le ricerche continuano ed esistono altri acceleratori, oltre SLAC (ancora attivo dal 1962), addirittura più grandi come il **Large Hadron Collider** situato presso il CERN (*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*) a Ginevra: un acceleratore circolare lungo 27 km posto a 100 metri di profondità. Al CERN, dagli anni '70 in poi, sono innumerevoli le particelle scoperte: tra le più importanti vale la pena citare i **bosoni W e Z** scoperti nel 1983 (Nobel per la Fisica nel 1984) e il **bosone di Higgs** scoperto nel 2012 (Nobel per la Fisica nel 2013).

Ritorna il termine bosoni! Ma non è ancora stato spiegato cosa sono queste strane particelle. Ora è arrivato il momento di scoprirlo: i bosoni sono le particelle mediatrici delle interazioni. Proviamo a far luce su questa frase. Come fanno due elettroni a respingersi? Sicuramente una risposta ormai consolidata è quella che considera l'esistenza di un campo di forze che modifica le proprietà dello spazio. Due elettroni interagiscono tra di loro respingendosi perché la presenza di ognuna di esse introduce un campo elettrico che modifica lo spazio circostante. Oppure, il Sole riesce ad attrarre la Terra perché la sua presenza crea un campo gravitazionale, o ancora un magnete ne attrae un altro perché crea un campo magnetico. Nella fisica delle particelle però il

campo di forze può essere anche visto attraverso la presenza di una particella mediatrice che viene scambiata nell'interazione tra altre particelle. Pertanto due elettroni interagiscono perché semplicemente si scambiano una particella mediatrice, quella responsabile della forza elettromagnetica. Ecco che questa particella prende il nome di **bosone** e nel caso dell'interazione elettromagnetica essa è il fotone che già conosciamo.

In fisica esistono quattro **interazioni fondamentali**: elettromagnetica, debole, forte e gravitazionale. Ognuna di queste quattro forze, nella teoria, ha il suo bosone mediatore: il fotone, appunto, per quella elettromagnetica, bosoni W e Z per quella debole e, come già detto, il gluone per la forza forte. Ancora non si sa nulla circa l'esistenza dell'eventuale bosone che media le interazioni gravitazionali, ossia il gravitone.

1.8 L'ultimo tassello

Il nostro viaggio nel mondo delle particelle alla scoperta del Modello Standard è quasi finito: abbiamo compreso come è fatta la materia che ci circonda, come è fatto il nucleo e anche come sono fatte le particelle all'interno del nucleo. Addirittura ci siamo spinti ad esplorare particelle provenienti dallo spazio e ci siamo imbattuti nella "lontana" antimateria, salvo poi scoprire (con i decadimenti beta) che questa è più vicina di quanto potessimo immaginare. Ma oltre alle particelle abbiamo anche scoperto le forze che servono a tenere insieme la materia che ci circonda e abbiamo anche compreso come due particelle possano interagire scambiandosi un bosone. Ma c'è qualcosa che ancora manca per completare il quadro.

“Cosa conferisce massa alle particelle?”.

La risposta è il bosone di Higgs. La teoria, formulata nel 1964 dai fisici teorici *Francois Englert* e *Peter Higgs*, prevede che tutte le particelle acquisiscano massa grazie alle loro interazioni con il campo di Higgs: più una particella interagisce con questo campo più è massiva. I fotoni invece sono privi di massa perché non interagiscono. Questo meccanismo prende il nome di **Meccanismo di Higgs**. Nella storia dell'universo, le particelle hanno interagito con il campo di Higgs solo 10^{-12} secondi dopo il Big Bang. Prima della transizione di questa fase, tutte le particelle erano prive di massa e viaggiavano alla velocità della luce. Dopo che l'universo si è espanso e raffreddato, le particelle hanno interagito con il campo di Higgs e questa interazione ha dato loro massa. La scoperta del bosone di Higgs è stata annunciata il 4 luglio 2012 dai due esperimenti ATLAS e CMS situati presso il CERN.

	Fermioni			Bosoni	
Quark	carica $2/3$ spin $1/2$	u	c	g	H
	$-1/3$ $1/2$	d	s	γ	
Leptoni	-1 $1/2$	e	μ	Z	
	0 $1/2$	ν_e	ν_μ	W	
	0 $1/2$	ν_τ			

A questo punto il viaggio all'interno della fisica delle particelle è (quasi) ultimato. La teoria del Modello Standard è completa e riesce a descrivere tre delle quattro interazioni fondamentali e come sono formate tutte le particelle ad esse collegate. Tutte le parole in figura ti sono ormai note e le abbiamo già incontrate. Gli unici termini che abbiamo omesso di spiegarti sono i **fermioni** e i leptoni. Per spiegarti il primo dobbiamo introdurre il concetto di spin di una particella, esso non è altro che il suo momento angolare. I fermioni hanno spin semi-intero ($1/2$, $3/2$) mentre i bosoni hanno spin intero (0 , 1 , 2). Con **leptoni** invece si indicano tutti i fermioni che non sentono la forza forte, quindi ad esempio elettroni e neutrini, ma non i quark, come ti sarà ormai chiaro.

1.9 Come è fatto il mondo che ci circonda?

Tutte le particelle che hai incontrato hanno la loro collocazione all'interno del Modello Standard tranne il positrone. È giunta quindi l'ora di metterlo al suo posto.

Anche le corrispondenti particelle di antimateria sono perfettamente incasellate in uno schema speculare al Modello Standard. Per ogni particella di materia esiste una corrispondente particella di **antimateria** la cui sola differenza riguarda alcune proprietà dette numeri quantici. La carica elettrica è un numero quantico e infatti l'elettrone ha carica negativa e il positrone positiva. Ma ci sono altri numeri quantici, come il numero leptonico. Un neutrino per esempio ha numero leptonico $+1$, il corrispondente antineutrino avrà numero leptonico -1 . La massa non è un numero quantico, quindi ogni particella ha la stessa massa della propria antiparticella.

Quindi l'antimateria esiste ed è l'immagine speculare del mondo fatto di materia! Essa esiste non solo al CERN ma addirittura in alcuni ospedali in giro per il mondo. L'antimateria è alla base di un esame diagnostico molto importante come la PET: la Tomografia a Emissione di Positrone. La tecnica utilizzata sfrutta l'annichilazione antimateria-materia: quando una particella incontra la sua antiparticella si annichila con essa, ed entrambe scompaiono producendo energia, in particolare due fotoni in direzione opposta che costituiscono quindi il segnale di riconoscimento di questo fenomeno.

		Antifermioni		
Anti-quark	carica spin	$-2/3$ $1/2$	$-2/3$ $1/2$	$-2/3$ $1/2$
		\bar{u}	\bar{c}	\bar{t}
Anti-leptoni		$+1/3$ $1/2$	$+1/3$ $1/2$	$+1/3$ $1/2$
		\bar{d}	\bar{s}	\bar{b}
		1 $1/2$	1 $1/2$	1 $1/2$
		\bar{e}	$\bar{\mu}$	$\bar{\tau}$
		0 $1/2$	0 $1/2$	0 $1/2$
		$\bar{\nu}_e$	$\bar{\nu}_\mu$	$\bar{\nu}_\tau$

Capitolo 2

Non finisce qui

Il Modello Standard è una teoria completa, confermata sperimentalmente, che descrive le particelle elementari e le loro interazioni. Eppure non è in grado di spiegare alcune osservazioni e alcuni fenomeni. Per questo motivo, dopo la scoperta del bosone di Higgs, si è aperta una nuova era della fisica, la cosiddetta **fisica oltre il Modello Standard**. Ti regaliamo adesso un piccolissimo assaggio delle domande che affasciano i fisici ai giorni nostri, nella speranza che possano conquistare anche te.

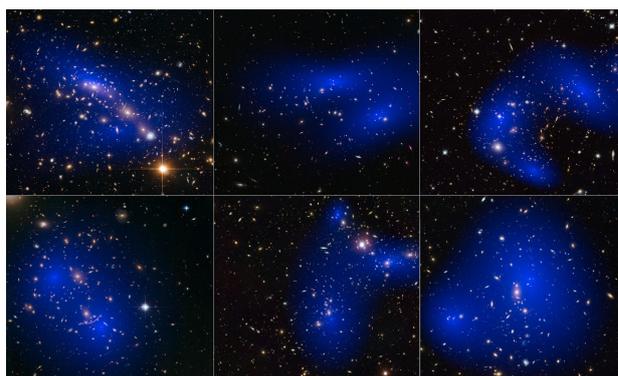
2.1 La materia oscura?

Le particelle del Modello Standard che hai conosciuto nello scorso capitolo sono i mattoni fondamentali della materia. Tu sei fatto di cellule, a loro volta fatte di atomi, formati da elettroni, neutroni e protoni. Insomma un bel mix di elettroni, quark up e quark down. Lo stesso vale per il foglio (o lo schermo) su cui stai leggendo. Eppure solamente il 4% dell'intero Universo è formato da queste particelle. Tutto il resto è un mistero. La gran parte di questo (quasi il 70% del totale) è chiamato energia oscura. Sappiamo fin dai tempi dell'astronomo Edwin Hubble (1889-1953) che il nostro Universo si espande, ma non a velocità costante: responsabile dell'accelerazione nell'espansione è proprio l'energia oscura.

Il 26% rimanente è chiamato **materia oscura**. L'unica dimostrazione sperimentalmente della sua esistenza si ha attraverso effetti gravitazionali come il *lensing*, ovvero la deviazione della luce rispetto alla traiettoria rettilinea per la presenza di una massa. Tale deviazione risulta maggiore rispetto a quello che si avrebbe considerando solamente il contributo dovuto alla massa visibile. Deve quindi esistere una materia non visibile, cioè che non interagisce elettromagneticamente. Gli astrofisici hanno inoltre notato che tale materia non risente neanche della interazione debole e forte.

I fisici non sanno quali particelle formano questa materia e moltissime ipotesi sono state suggerite. Si pensa possano esserci molti buchi neri non ancora individuati, oppure degli oggetti compatti chiamati MACHO (MASSIVE Compact Halo Object) o delle particelle elusive non interagenti note come WIMPs (Weakly Interactive Massive Particles). Nessuna di queste ipotesi ha ancora trovato conferma.

In queste sei immagini di galassie la materia oscura è rappresentata come un alone blu. È possibile determinare la sua presenza in quella zona con i ragionamenti spiegati precedentemente.



2.2 La massa dei neutrini

I neutrini rientrano tra le particelle elementari chiamate leptoni. Esistono in tre sapori, uno per ogni famiglia: elettronico, muonico e tauonico. Ma questo va in conflitto con la predizione del Modello Standard,

secondo cui i neutrini avrebbero massa nulla.

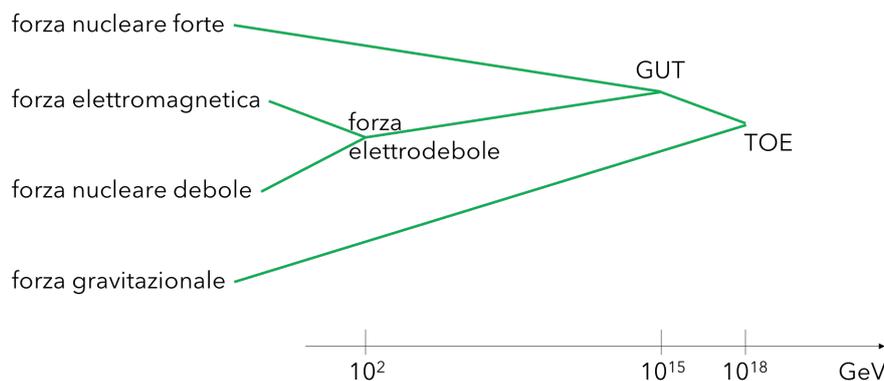
I neutrini vengono prodotti anche in una reazione di fusione nucleare, quindi il Sole ne produce moltissimi. È possibile calcolare il numero di neutrini elettronici prodotti dal Sole e, grazie a dei rivelatori di particelle, contare quelli che raggiungono la Terra. Si osserva così, sorprendentemente, che solo un terzo di quelli attesi giunge a noi. Che fine fanno gli altri?

Per risolvere questo problema, noto come **problema dei neutrini solari**, è necessario ripensare alle assunzioni del Modello Standard. Un neutrino elettronico si può scrivere come combinazione di tre stati di diverso tipo: tipo 1, tipo 2 e tipo 3. E lo stesso vale per il muonico e il tauonico. La differenza tra neutrini elettronici, muonici e tauonici consiste nella diversa percentuale di stati di tipo 1, tipo 2 e tipo 3 che li compongono. I neutrini elettronici prodotti dal Sole, nel loro viaggio verso la Terra, cambiano continuamente la percentuale di tipo 1, tipo 2 e tipo 3 e, per questo motivo, oscillano tra una famiglia e un'altra. Ecco spiegato il motivo per cui a Terra si osserva un numero di neutrini elettronici inferiore a quello emesso dal Sole: la parte mancante si è solamente trasformata in neutrini di un'altra famiglia (muonico o tauonico). Ciò che distingue gli stati di tipo 1, di tipo 2 e di tipo 3 è la massa. Una diversa combinazione dei tre tipi conferisce una diversa massa al neutrino: questo spiega non solo perché i neutrini hanno massa diversa ma anche perché non possono avere massa nulla (non si osserverebbe alcuna oscillazione).

Cercheremo di spiegarlo attraverso un esempio. Immagina di avere tre diversi aromi per fare delle caramelle (gli aromi corrispondono al tipo mentre i neutrini corrispondono alle caramelle). Puoi combinare gli aromi in tre modi diversi, questo conferisce il sapore alla caramella e ti permette di distinguere una dall'altra. Il Sole, nel nostro esempio, produce un unico sapore di caramelle. Durante il viaggio verso la Terra la percentuale degli aromi cambia, quindi potremo rivelare anche caramelle di diverso sapore.

2.3 La forza di gravità

Finora ti abbiamo detto che il Modello Standard è una teoria completa, che riesce a spiegare la forza elettromagnetica, quella nucleare forte e quella debole. Queste più quella gravitazionale, in un determinato intervallo di energia, sotto i 10^2 GeV, sono quattro forze distinte caratterizzate ciascuna da una propria equazione con dei precisi parametri. Per valori di energia compresi tra 10^2 GeV e i 10^{15} GeV i parametri delle forze elettromagnetica e di quella debole coincidono, quindi esse sono descritte nello stesso modo: si parla di forza elettrodebole. Anche se queste due forze sembrano molto diverse alle energie della vita quotidiana, sopra l'energia di unificazione, la teoria elettrodebole le modella come due aspetti differenti della stessa forza. Si è avuta evidenza di questa unificazione in un qualunque acceleratore di particelle in cui si superi questo determinato valore di energia.



Per valori di energia compresi invece tra 10^{15} GeV e 10^{18} GeV si possono considerare unificate anche la forza elettrodebole e la forza nucleare forte. Tuttavia, ad oggi, non si ha evidenza sperimentale di questa unificazione poiché l'energia massima raggiunta in un acceleratore di particelle è di 10^{13} GeV. Questa è, ad oggi, quindi solo una teoria che prende il nome di GUT (*Grand Unified Theory*).

Infine per valori di energia maggiori di 10^{18} GeV si avrebbe l'unificazione anche della forza gravitazionale. Anche questa quindi rimane solamente una affascinante teoria che prende il nome di TOE (*Theory Of Everything*).

Così come Goku e Vegeta possono acquistare l'energia necessaria per la fusione e diventare Gogeta, la forza elettromagnetica e la forza nucleare debole, ad una certa energia, diventano una forza sola: la forza elettrodebole.

Ma poiché i fisici della particelle non sono SuperSayan semplici ma di secondo livello unificano anche la terza, la nucleare forte.

E la forza gravitazionale che è rimasta fuori? Sebbene sia la forza più vecchia e Newton e la sua mela risalga al XVIII secolo, rimane la più misteriosa. Stiamo provando a raggiungere il Super Sayan di terzo livello, ma l'energia necessaria per questa fusione è ordini di grandezza superiore. La forza elettrodebole è unificata, ma per includere anche la forza gravitazione bisognerebbe arrivare attorno a 10^{18} GeV, energia nota come **scala di Planck**. A causa di questa enorme differenza si parla di un problema di gerarchia. Infine le altre tre forze nel Modello Standard hanno il loro portatore (ricordi? fotone, gluone, bosoni W e Z), mentre del portatore della forza gravitazionale, il misterioso gravitone, non c'è alcuna traccia. Questo è quindi un altro limite del Modello Standard che spinge i fisici a cercare nuove teorie e continuare gli esperimenti.

2.4 Cosa ci riserva il futuro?

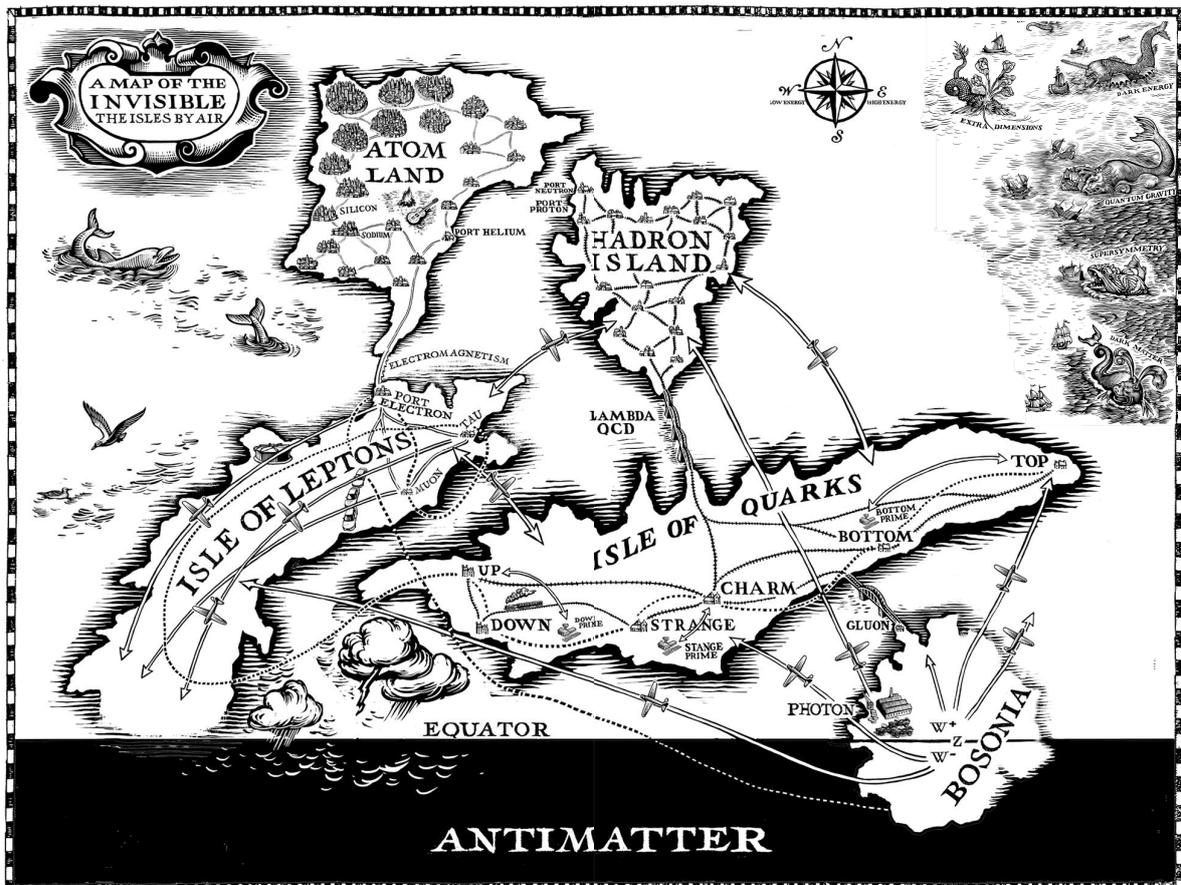
Per i motivi sopra elencati e per tanti altri, come ad esempio l'asimmetria materia-antimateria (come mai nell'Universo osservabile l'antimateria sembra quasi scomparsa, mentre tutto lascia pensare che debba esistere in proporzione uguale alla materia?) , è diventato necessario guardare oltre la teoria del Modello Standard. Questo non vuol dire che questa sia sbagliata o da rifare, ma semplicemente che non è adatta a tutte le scale di energia, così come la legge di composizione delle velocità di Galileo è eccellente per descrivere fenomeni a velocità non relativistiche, ma è errata per sistemi che si muovono con velocità confrontabili con quella della luce.

I fisici hanno proposto diverse teorie che spieghino la materia oscura o provino a risolvere il problema della gerarchia. Una delle teorie più accreditate è la **supersimmetria**: essa è una estensione del Modello Standard in cui ad ogni particella corrisponde una **superparticella** che è identica a quella del Modello Standard ad eccezione dello spin e della massa. Infatti lo spin di tutte le superparticelle diminuisce di $1/2$. Questo ovviamente implica che tutti i bosoni diventano fermioni e viceversa.

carica spin	$\frac{2}{3}$ 0	$\frac{2}{3}$ 0	$\frac{2}{3}$ 0	0 $\frac{1}{2}$	0 $\frac{1}{2}$
Squark	\bar{u}	\bar{c}	\bar{t}	\bar{g}	\bar{H}
	$-\frac{1}{3}$ 0	$-\frac{1}{3}$ 0	$-\frac{1}{3}$ 0	0 $\frac{1}{2}$	
	\bar{d}	\bar{s}	\bar{b}	$\bar{\gamma}$	
Sleptoni	-1 0	-1 0	-1 0	0 $\frac{1}{2}$	
	\bar{e}	$\bar{\mu}$	$\bar{\tau}$	\bar{Z}	
	0 0	0 0	0 0	± 1 $\frac{1}{2}$	
	$\bar{\nu}_e$	$\bar{\nu}_\mu$	$\bar{\nu}_\tau$	\bar{W}	

Per esempio, all'elettrone (fermione) corrisponde un s-elettrone (bosone), al fotone corrisponde un fermione chiamato fotino e così via. Finora gli esperimenti non hanno visto nessuna di queste superparticelle. Ecco perchè si crede che abbiano una massa più grande delle loro rispettive particelle del Modello Standard. Per produrre quindi le particelle supersimmetriche serve più energia. La soluzione più semplice per ottenere ciò è quella di aumentare le dimensioni dell'acceleratore. Per questo motivo al CERN di Ginevra è stato proposto come erede dell'attuale LHC un acceleratore lungo ben 100 km: il **Future Circular Collider**.

Ma i fisici hanno in mente di costruire anche altri acceleratori in cui far collidere particelle diverse (muoni, ioni, ...) per trovare risposta a tutte quelle domande finora ancora aperte.



Conclusione

La nostra esplorazione del mondo delle particelle è finita. Abbiamo attraversato senza sosta i secoli costellati di teorie ed esperimenti in cui l'uomo ha cercato in modi sempre più strani e complessi di trovare la risposta alla domanda fondamentale: "di cosa è fatto il mondo che ci circonda?". Se una descrizione puramente filosofica si è evoluta, attraverso diversi modelli matematici, a volte difficilmente comprensibili, in una teoria in grado di descrivere quasi perfettamente molti aspetti del mondo delle particelle, è grazie ai numerosi scienziati che hanno studiato prima e lavorato poi spinti solo dalla curiosità e dal desiderio di conoscenza tipici degli uomini che non sono fatti *a viver come bruti ma per seguir virtute e canoscenza*.

La scienza, infatti, non insegue la verità assoluta, bensì una fugace certezza. Spesso un progresso in campo scientifico si ottiene grazie a nuovi risultati sperimentali che possono portare a ripensamenti di teorie e modelli precedenti o alla rivalutazione di studi antichi. Nonostante la tecnologia sia determinante per la ricerca e per dare conferma attraverso esperimenti più o meno complessi, i modelli storici rimangono un punto di riferimento imprescindibile per ogni studioso della scienza in quanto mostrano la strada maestra che ogni scienziato deve avere davanti a sé: la curiosità.

Ringraziamenti

Come consuetudine, questa sezione è dedicata a coloro che hanno reso possibile questo progetto e che hanno dato il loro prezioso contributo per riempire le pagine di questo opuscolo. Non stiamo però parlando degli autori e di tutto il gruppo Physics4Teenagers ma dei grandissimi scienziati che abbiamo incontrato nel nostro percorso, perché senza il loro intuito, la loro intraprendenza, determinazione, intelligenza, dedizione ma soprattutto curiosità e passione non esisterebbe la fisica come la conosciamo. Per cui, in rigoroso ordine di comparsa, grazie a Democrito, Galilei, Newton, Franklin, Volta, Galvani, Coulomb, Amperè, Ohm, Gauss, Faraday, Ørsted, Crookes, J.J. Thomson, Millikan, Rutheford, Chadwick, Bequerel, Pierre e Marie Currie, Hess, Anderson, Dirac, Pauli, Einstein, Gell-Man, Eglert, Higgs e a tutti quelli il cui contributo storico e scientifico è sicuramente innegabile ma che per motivi di semplicità non hanno trovato spazio in queste pagine.

E grazie anche a te che hai intrapreso questo viaggio con noi. Ti auguriamo che, nei confronti della scienza, tu possa avere la stessa curiosità e passione che avevano loro e che è anche, un pochino, la nostra.