

# Block Notes Matematico

## Le dimensioni extra nascoste, la particella di Higgs ed il vuoto quantomeccanico, supersimmetria e teoria delle stringhe

ing. Rosario Turco<sup>1</sup>, prof. Maria Colonnese,

In questo lavoro divulgativo, prosieguito tematico dedicato alla Fisica, vengono illustrate molte problematiche contemporanee, poco conosciute al grande pubblico ed in qualche modo complesse da spiegare da parte degli stessi fisici. Gli autori spiegano anche un'ipotesi che potrebbe giustificare la non localizzazione della particella di Higgs.



Figura 1 - De Chirico ed il "tempo relativo"

Sono mostrati, con un linguaggio accessibile e semplice, molti dei concetti oggi dibattuti sui modelli fisici e sulle nuove strade percorse per la conoscenza sull'universo. Il lavoro è, quindi, un' esplorazione sul noto e sul meno noto, cercando anche di comprendere eventuali "sentieri matematici" utili.

La storia della Fisica e gli argomenti da essa affrontata ne fanno una delle più affascinanti materie scientifiche esistenti, alla pari di una gemma o di un capolavoro artistico, umano o naturale, e che ha influenzato pensieri ed opere di ogni uomo, in qualsiasi tempo.

L'articolo degli autori sulla *congettura di Yang & Mills* o del "gap di massa" è da considerarsi complementare a questo lavoro, *concepito senza* la pretesa di essere esaustivo o rigoroso e ci si scusa in anticipo con i lettori, più eruditi sull'argomento, per eventuali "voli pindarici" fatti solo a beneficio della sintesi e della facilità di comprensione. Molti degli argomenti qui trattati avrebbero bisogno di una più ampia trattazione, con una descrizione matematica rigorosa e suggeriamo, dopo averne appreso i concetti, di fare ulteriori approfondimenti su testi orientati in tal senso.



[mailto:rosario\\_turco@virgilio.it](mailto:rosario_turco@virgilio.it)



<sup>1</sup> Rosario Turco è un ingegnere elettronico presso Telecom Italia (Napoli) ed ideatore di "Block Notes Matematico" insieme alla prof. Maria Colonnese del Liceo Classico "De Bottis" di Torre del Greco, provincia di Napoli

## INDICE

.....	
La filosofia greca: l'inizio della Fisica.....	4
Le dimensioni extra nascoste .....	5
Dimensioni arrotondate e la Matematica .....	7
Le tre dimensioni classiche .....	7
Le dimensioni arrotondate.....	8
Le brane.....	8
Gli aspetti chiave del modello quantistico .....	9
La Fisica delle particelle elementari.....	10
Teoria elettrodebole e interazione debole .....	12
Interazione forte .....	15
Le repliche pesanti delle particelle e le generazioni.....	17
La chiave di volta: la simmetria interna .....	18
La simmetria e le forze.....	18
Il meccanismo di Higgs.....	19
Elettromagnetismo attraverso il meccanismo di Higgs.....	21
Teorie di campo efficace, particelle virtuali, vuoto quantomeccanico.....	21
Considerazioni sulla Particella di Higgs e sui gravitoni.....	22
Teoria di Grande Unificazione (GUT) .....	23
Problema della gerarchia.....	23
Limiti strutturali dell'atomo ed i gravitoni: le nuove idee di frontiera .....	24
La supersimmetria come soluzione al problema della gerarchia .....	26
La Materia oscura.....	28
La teoria delle stringhe e la TOE.....	28
Teoria delle stringhe applicata alle brane.....	30
<i>Riferimenti</i> .....	32

## FIGURE

Figura 1 - De Chirico ed il "tempo relativo" .....	1
Figura 2- Democrito .....	4
Figura 3 – un cubo.....	5
Figura 4 – un ipercubo .....	5
Figura 5 – Alcune ipersfere.....	6
Figura 6 - Spazio di Calabi-Yau.....	7
Figura 7 – Fermioni e Bosoni.....	10
Figura 8 – il Fermilab.....	10
Figura 9 – Interno CERN verso l'LHC .....	10
Figura 10 – Tavola periodica di Mendeleev.....	11
Figura 11 – Diagramma di Feynman.....	11
Figura 12 - decadimento beta di un neutrone.....	13
Figura 13 – processo di annichilimento .....	14
Figura 14 – le tre generazioni del Modello standard e i colori.....	15
Figura 15 – Portatori delle interazioni.....	15
Figura 16 – Le forze, da chi sono trasportate e su chi agiscono.....	17
Figura 17 – tavola della numerazione barionica .....	24
Figura 18 – Tavola della composizione barionica in quark .....	25
Figura 19 – Immaginario di due atomi vicini che interagiscono.....	26

## TABELLE

Tabella 1 – Adroni e loro formule.....	17
Tabella 2 – Tabella dei Mesoni .....	17
Tabella 3 – Tabella dei Barioni .....	17
Tabella 4 - Esempi di supercompagni .....	27

## La filosofia greca: l'inizio della Fisica

Gli antichi greci, a partire da *Parmenide di Elea*, allievo di *Senofane* ed *Empedocle*, consideravano con l' "eleatismo" il mondo del divenire come apparente ed ingannevole nei sensi; concetti ripresi, in qualche modo, anche da *Aristotele* e *Platone*.



Figura 2- Democrito

*Democrito* fu, ad esempio, colui che iniziò a parlare sia di *vuoto* che di *atomo* (dal greco *indivisibile*), come l'elemento naturale più piccolo e indivisibile della materia: una sorta di numero primo della materia, un building block LEGO! *Democrito* è da considerarsi uno dei primi padri della Fisica.

Oggi sappiamo che, in realtà, esistono nell'atomo sottostrutture ulteriori; ma la profondità concettuale dei greci permane ed è esaltata nei nostri confronti dalla loro distanza temporale storica e soprattutto dalla logica, loro unico strumento di analisi del mondo reale.

I fisici del novecento hanno avuto, quasi tutti, una formazione classica; si racconta che *Heisenberg* nel riflettere sulle pagine del "Timeo" di *Platone* sia, poi, arrivato al famoso "principio di indeterminazione".

I filosofi greci, in realtà, non avevano torto. I cinque sensi del nostro corpo: vista, tatto, olfatto, udito e palato, spesso cadano in errore, in modo anche banale.

Ad esempio il nostro udito non è capace di sentire suoni a determinate frequenze basse o a quelle alte.

I nostri occhi non sempre interpretano bene le distanze: oggetti distanti tra loro sembrano vicini (stelle e luna) o si sovrappongono o si ottiene la visione prospettica, tanto cara agli artisti. Non solo, ma la nostra vista non può andare oltre certe distanze enormi, esempio le distanze galattiche, né a distanze molto piccole e microscopiche.

Per superare i limiti umani, nei secoli, gli uomini hanno ideato strumenti come lenti, cannocchiali, microscopi, radioscopi, lenti gravitazionali etc. per poter "vedere" oltre ed iniziare a comprendere; a volte con risultati che permettevano anche di curare difetti umani (miopia, etc) e ciò ha creato sempre un *progresso indotto* sulle altre attività umane e sullo stato sociale in generale.

Ma più si va oltre e più ci si rende conto che esiste un nuovo limite da superare: il mondo dell'estremamente piccolo o il mondo dell'estremamente grande hanno oggi bisogno di nuove tipologie di esperimenti e strumenti, tali da poter convalidare o scartare una congettura fisica, validare un modello o una teoria.

Ma se l'uomo ha dei limiti, sia nel mondo reale dell'estremamente piccolo che in quello dell'estremamente grande, allora è possibile che, ancor oggi, in questi mondi esistano modelli, congetture, leggi naturali e fisiche non ancora verificate e soprattutto non ancora comprese.

## Le dimensioni extra nascoste

Da quando *Einstein* ha scoperto la relatività ristretta e quella generale, in fisica si è iniziato a parlare delle 4 dimensioni o di spazio-tempo. Un punto nello spazio è individuabile non solo da almeno tre valori coordinate (x,y,z) ma anche da un istante temporale t. Un esempio banale è di riferirsi allo stesso oggetto in un posto ma in epoche diverse.

In realtà per l'individuazione di un punto nello spazio serve anche una metrica, per comprendere con precisione e ripetibilità, la distanza tra due punti (e nel tempo) e occorre conoscere anche il tipo di geometria in gioco (euclidea, non euclidea).

L'importanza della geometria non euclidea è nata nel momento in cui l'uomo ha levato gli occhi dal piano del foglio e si è posto davanti ad un mappamondo: è vero che la linea retta su un piano è la minima distanza (vedi Teorema di Pitagora) e ciò è vero su una scacchiera se il Re deve raggiungere un pedone che va a promozione; ma su un mappamondo (geometria sferica) la minima distanza che deve seguire una nave o un aereo è una curva minima, la cosiddetta *geodetica*.

In realtà potrebbero esistere anche altre dimensioni, oltre alle 4 dello spazio-tempo, che i nostri sensi non vedono, né avvertono, né la natura tradisce attraverso evidenti fenomeni fisici. E tutto ciò potrebbe avvenire tranquillamente sotto il nostro naso, sia nel mondo estremamente piccolo sia in quello estremamente grande.

Sono quelle che, oggi, vengono dette *dimensioni extra* e sono, di fatto, dimensioni nascoste ai nostri sensi.

In realtà ognuno di noi affronta sempre problemi a più dimensioni: ad esempio se sappiamo che vi sono persone di varia età, che passano varie ore davanti alla TV, alcune delle quali leggono per qualche ora dei libri, altre che vanno per qualche ora in palestra, allora siamo di fronte ad un problema a 4 dimensioni o variabili.

Le variabili o le dimensioni potrebbero essere *e* (l'età), *otv* (le ore passate davanti alla TV), *ol* (le ore per leggere un libro), *op* (le ore passare in palestra); quindi matematicamente lo possiamo esprimere con una n-pla (*e, o<sub>tv</sub>, o<sub>l</sub>, o<sub>p</sub>*).

Ad esempio questi problemi sono affrontati da prodotti software denominati *Datawarehouse*, che sono in grado di fare analisi su una grossa quantità di dati memorizzati e trarre previsioni di comportamento, di tendenza etc.

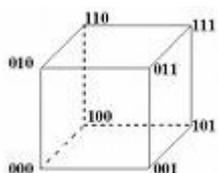


Figura 3 – un cubo

Se, invece, dovessimo rappresentare un cubo, potremmo indicare i suoi vertici con una 3-pla: (0,0,0), (0,0,1), (0,1,0), (0,1,1), (1,0,0), (1,0,1), (1,1,0), (1,1,1) ed un cubo lo sapremmo anche rappresentare graficamente.

Per un oggetto geometrico come l'*ipercubo*, già a 4 dimensioni spaziali abbiamo difficoltà a



rappresentarlo geometricamente; ma almeno algebricamente sapremmo farlo con una 4-pla e disporremo anche dei metodi matematici per manipolarlo.

Ve lo immaginate un ipercubo? Date un'occhiata alla figura 4.

Figura 4 – un ipercubo

Un ulteriore **metodo geometrico** è quello di osservare la *proiezione dell'oggetto multi-dimensionale su un piano*, in pratica scalando di qualche dimensione: è una sorta di proiezione su una parete, ottenendone un'ombra.

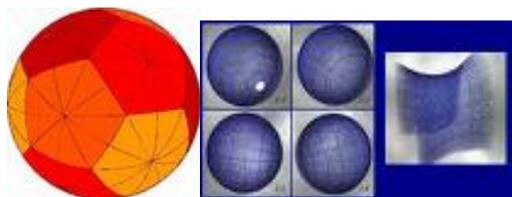


Figura 5 – Alcune ipersfere

Ad esempio una sfera nel tempo la possiamo far passare, mentalmente, attraverso un piano dal basso verso l'alto. Quello che nel tempo otterremmo sul piano è un insieme di cerchi (sezioni) che iniziano pian piano con dimensioni piccole, poi arrivano alla dimensione massima e iniziano poi a diminuire fino a sparire.

Lo stesso potremmo immaginare di fare con una *ipersfera*<sup>2</sup>, difficile da immaginare.

Il mondo reale non è a due dimensioni. Un foglio di carta per quanto sottile possa essere ha pur sempre uno spessore, anche se fosse della dimensione di un atomo o minore! Una parete dipinta non è un piano, perché esiste almeno lo spessore di vernice e così via.

Questo discorso porta a comprendere che, in realtà, c'è sempre qualche dimensione trascurabile rispetto alle altre; nello stesso tempo c'è sempre qualche altra dimensione che è molto grande rispetto alle altre.

Spesso non ce ne rendiamo conto: il fatto è dovuto alla *eccessiva capacità di sintesi* del nostro cervello che cerca ovunque modelli semplificati, lineari e simmetrici, ma che d'altra parte è stata "l'arma vincente dell'evoluzione umana".

Un capello lo "sintetizziamo mentalmente" ad una linea, ma ha uno spessore. Una capocchia di spillo lo sintetizziamo con un punto, ma è una sfera.

Tali sintesi ci ha portato alle bellissime leggi della fisica newtoniana, cioè di tutto ciò del "mondo reale facilmente osservabile" con gli strumenti disponibili, ma quando ci spostiamo nel estremamente piccolo o nell'estremamente grande non abbiamo più tanti strumenti a disposizione, né la natura fornisce indizi, né riusciamo a immaginare cosa ci possa essere.

Soprattutto la domanda da porsi è perché le leggi fisiche che conosciamo come la gravità, la relatività etc dovrebbero privilegiare un mondo a 3-dimensioni? Ne siamo certi?

Einstein aveva già eliminato dall'elettromagnetismo di Maxwell l'*etere* (quindi una qualsiasi forma di spazio o mezzo trasmissivo) e dichiarato come privilegiata la velocità della luce ritenendola costante; questo vuol dire che la relatività è valida in ogni spazio-tempo multi-dimensionale.

<sup>2</sup> In geometria una **ipersfera** è l'analogo di una sfera in più di 3 dimensioni. Una ipersfera di raggio  $r$  nello spazio euclideo  $n$ -dimensionale consiste di tutti i punti che hanno distanza  $r$  da un dato punto fissato, chiamato centro dell'ipersfera. Il "volume" di tale ipersfera è dato da:

$$V_n(r) = \frac{\pi^{\frac{n}{2}}}{\Gamma(\frac{n}{2} + 1)} r^n \quad \text{dove } \Gamma \text{ denota la funzione gamma. La "area superficiale" dell'ipersfera è invece data da: } S_n(r) = \frac{2\pi^{\frac{n}{2}}}{\Gamma(\frac{n}{2})} r^{n-1}$$

È interessante notare come, al tendere del numero di dimensioni ad infinito, superficie e volume tendano a zero indipendentemente dal raggio:

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} S_n(r) = \lim_{n \rightarrow +\infty} V_n(r) = 0$$

## Dimensioni arrotolate e la Matematica

I primi tentativi di ragionare sulle dimensioni furono fatti da matematici contemporanei di Einstein: uno dei primi fu *Theodor Kaluza* che propose una quarta dimensione oltre il tempo, senza dare ottime motivazioni. Un tentativo molto più concreto fu dovuto a *Oskar Klein*, che propose una dimensione extra arrotolata su sé stessa e di grandezza pari alla costante di Planck ( $10^{-33}$  cm). La scelta ricadeva sulla costante di Planck perché consentiva di figurare in modo naturale in una teoria quantistica della gravità e la gravità è in relazione con la forma dello spazio.

La costante di Planck è 24 volte più piccola della dimensione di un atomo e 19 volte più piccola di un protone.

Cosa comporta una dimensione piccola arrotolata? Dipende dal punto di vista e dalle dimensioni dell'osservatore, in quello che potremmo definire il “*mondo di Kaluza-Klein*” a 4 dimensioni spaziali: le tre che conosciamo ed una arrotolata.

Supponiamo che un microbo vive sopra un tubo di gomma per innaffiare il giardino. Se esso gira attorno alla sezione della pompa, dopo un certo un certo tempo si ritrova al punto di partenza; presto però imparerà che se vuole evitare di tornare al punto di partenza l'unica possibilità è di andare verso la dimensione maggiore, ovvero la lunghezza del tubo.

Se, invece, fossimo noi a vivere nel “mondo di Kaluza-Klein”, sopra il tubo, con una nostra visibilità grossolana non prenderemo neppure in considerazione di girare in tondo sul tubo ma ci avvieremo lungo la dimensione maggiore; ma questo semplicemente perché “quel dettaglio minuscolo” ci sfuggirebbe: di conseguenza il mondo di Kaluza-Klein ci apparirebbe sempre a 3 dimensioni.

In un mondo bidimensionale, la dimensione arrotolata potrebbe essere arrotolata lungo tutta l'altra dimensione; in tal caso potremmo avere un cerchio per ogni punto della dimensione più grande.

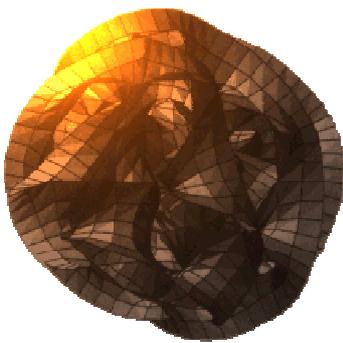


Figura 6 - Spazio di Calabi-Yau

Se il mondo è tridimensionale e con una dimensione arrotolata, allora si avrà un cerchio per ogni punto del piano.

Ma perché solo cerchi? Potrebbero essere *tori*, dove due dimensioni potrebbero essere arrotolate, etc.

In pratica si tratta di affrontare lo studio degli *spazi compatti* e delle *varietà di Calabi-Yau* (il matematico italiano *Eugenio Calabi* e il cinese *Shing Tung Yau*), un settore matematico ricco di potenzialità.

## Le tre dimensioni classiche

Cosa comporta comportano le tre dimensioni classiche sulle leggi della Fisica? Prendiamo in considerazione la gravità: nella meccanica classica essa è inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra due masse e, quindi, legata al concetto delle 3 dimensioni. Perché? Perché il *numero delle dimensioni determina la velocità con cui si diffonde la gravità*.

Immaginiamo un corpo sferico puntiforme. Il numero di linee di forze di gravità che escono dal punto sono uniformemente distribuite radialmente in ogni direzione e la densità di esse determina l'intensità con cui si fa sentire la gravità sui corpi adiacenti.

Se il corpo massivo aumenta il suo volume, le linee di forza di gravità che escono dal suo centro diminuiscono di densità man mano che aumenta il volume, perché in contrano la superficie oltre a quanto succedeva prima; per cui la densità delle linee di forza tende a diminuire e la gravità è più debole.

Il numero di linee di forza è sempre lo stesso, quello che varia è la loro densità; in particolare la superficie della sfera dipende dal quadrato del raggio per cui la densità diminuisce con l'aumentare del quadrato del raggio.

Quello che stiamo affermando è che la legge *dell'inverso del quadrato* è una conseguenza delle 3 dimensioni.

## Le dimensioni arrotolate

Cosa succede alla gravità nelle dimensioni arrotolate? Per semplificare e comprendere il concetto, pensiamo ad un tubo per innaffiare un giardino. Se pompiamo acqua fortemente nel tubo che succede? Succede che buona parte dell'acqua viene prima proiettata violentemente verso la parete del tubo, quasi all'inizio del tubo, e solo dopo aver urtata la parete l'acqua prosegue, poi, nella direzione longitudinale maggiore.

Nel caso di una dimensione arrotolata, ad una distanza piuttosto piccola, le linee di forza della gravità si comportano allo stesso modo: a breve distanza o dimensione piuttosto piccola si diffondono radialmente in tutte le direzioni, per poi prolungarsi nella dimensione maggiore in modo lineare. Se si riuscisse a misurare la gravità a queste dimensioni si otterrebbe una verifica di tale effetto, che rispetto ai fenomeni a dimensioni maggiori, è comunque trascurabile, ma esiste. Questo spiegherebbe il fatto che non ce ne sia evidenza naturale.

Con la *teoria delle stringhe* finora ci si era occupati solo delle dimensioni paragonabili alla costante di Planck, ma in realtà potrebbero essere dimensioni molto minori.

## Le brane

Nessuno ci può ancora confermare se le piccole dimensioni sono arrotolate a cerchio o in altra forma; ma potrebbero anche essere delle *brane* (da *mem-brane*).

Il concetto di brane è recente e risale al 1995; dovuto al fisico *Joe Polchinski*. Un primo esempio sono state le *p-brane* (la p deriva da "playful physicist" o fisici ludici), che rappresentavano un oggetto che si estende a distanza infinita lungo una sola dimensione. Le p-brane furono dedotte dalla teoria della relatività e sono superfici capaci di intrappolare forze e particelle.

L'attuale concezione delle brane è leggermente diversa ed è legata ad un'altra idea, cioè se le dimensioni extra molto piccole non sono affatto arrotolate, ma sono, invece, dimensioni che terminano ad una dimensione finita. Poiché le dimensioni che spariscono nel nulla sono potenzialmente pericolose (ci ricordano le colonne d'Ercole, dopo di che finiva il mondo ...) evidentemente ci sono dei confini o dei limiti contro cui tali dimensioni terminano (come un vicolo cieco che termina contro un muro). Che succede alla energia e alle particelle al confine? Incontrano una brana (il confine).

Il volume del mondo multi-dimensionale è detto *bulk*, ed è massiccio; mentre una brana all'interno del bulk è piatta (in certe dimensioni) e sottile. Rispetto alla brana è possibile definire sia delle direzioni giacenti sulla brana, che direzioni fuoriuscenti dalla brana verso il bulk.

Le brane fanno sì che, in un mondo multi-dimensionale, non tutta la materia è libera di muoversi come vuole: intrappolano particelle e energia, in virtù di leggi fisiche. Le dimensioni della brana, quindi, sono quelle dimensioni entro cui sono collocate le forze, le particelle e l'energia intrappolata. Non si sa perché sono privilegiate le 3 dimensioni. Anche l'Universo ha molte dimensioni, come il bulk. Se, ad esempio, anche la luce fosse intrappolata in una brana tridimensionale questo spiegherebbe perché la vediamo in un sistema tridimensionale.

Non tutto è confinato su una brana. La gravità, ad esempio, secondo la relatività è intrecciata col supporto spazio-tempo; quindi si diffonde in ogni direzione. Se fosse confinata su una brana dovremmo abbandonare la teoria della relatività. Le brane devono interagire col bulk, non fosse altro per la sola gravità. Oltre alla gravità, nel bulk ci sono particelle e forze che potrebbero ulteriormente interagire con le brane, creando una sorta di interconnessione.

Questo significa che l'Universo potrebbe contenere brane multiple che interagiscono tra loro almeno tramite la gravità (*multiversi*). Al momento esistono molte teorie diverse su come tutto ciò sia possibile.

## Gli aspetti chiave del modello quantistico

In [1] abbiamo già affrontato la relatività ed il modello quantistico. In essi abbiamo visto che di fondamentale importanza sono i seguenti aspetti:

- il *Principio di indeterminazione di Heisenberg*: “il prodotto della incertezza della posizione e della quantità di moto è maggiore della costante di Planck”. Questo principio comporta innanzitutto che in meccanica quantistica l'ordine di misurazione di due grandezze è importante; inoltre se esiste tale incertezza allora per l'osservabilità di un fenomeno (come un raggio di luce, o un altro oggetto classificabile tra i processi fisici osservabili su piccola scala) occorrono grosse quantità di moto. La costante di Planck è  $h=6,582 \times 10^{-25}$  GeVs.
- La *relatività* oltre a tutte le conseguenze esposte in [1], comporta che  $E=mc^2$ ; per cui se la quantità di moto  $q = m v$  è alta, ne conseguono alte energie in gioco (ecco perché sono necessari gli acceleratori di particelle).
- Il dualismo *onda-particella di De Broglie*: la lunghezza d'onda di una particella è inversamente proporzionale alla sua quantità di moto. Maggiore è la quantità di moto, minore è la scala dimensionale del fenomeno in gioco.
- La meccanica quantistica divide le particelle in *bosoni* (da Sathyendra Nath Bose) e *fermioni* (da Enrico Fermi): tutte le particelle fondamentali (elettrone, quark, protone, nucleo) sono di questo tipo. Tutto ciò dipende dallo *spin intrinseco* della particella; ad esempio il fotone è un bosone con spin intrinseco 1. Lo spin assume valori interi 0, 1, 2 , ... I fermioni hanno uno spin intrinseco frazionario  $\frac{1}{2}$  o  $\frac{3}{2}$ .
- *Il principio di esclusione di Pauli*: due fermioni dello stesso tipo in termini di spin devono stare in posti diversi.. Gli elettroni sono fermioni e se con lo stesso spin devono stare su livelli energetici (orbite) differenti. I fotoni sono bosoni, infatti più fasci di luci li possiamo collineare e dirigere in una stessa direzione.

Fermioni e Bosoni			
Fermions		Bosons	
Leptons and Quarks	Spin = $\frac{1}{2}$	Spin = 1*	Force Carrier Particles
Baryons (qqq)	Spin = $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2} \dots$	Spin = 0, 1, 2...	Mesons (q $\bar{q}$ )

## Figura 7 – Fermioni e Bosoni

L'energia in fisica viene misurata in elettronvolt (eV), che rappresenta l'energia fornita ad un elettrone libero quando passa in una differenza di potenziale di 1 Volt. Si usano le sue potenze  $\text{GeV}=10^9 \text{ eV}$  oppure  $\text{TeV}=10^{12} \text{ eV}$ .

Il principio di indeterminazione suggerisce che le distanze piccole sono sondabili solo ad alte energie. La *lunghezza di scala debole*  $10^{-16} \text{ cm}$  è la lunghezza minima a cui è osservabile per qualcosa con energia di 250 GeV. L'acceleratore al Fermilab e l'LHC (Large Hadron Collider), il collisore di adroni, nei prossimi anni esploreranno processi fisici a dimensioni ancora minori.

L'altra grandezza importante è l'*energia della scala di Planck* di  $10^{19} \text{ GeV}$ . Questa energia è importante e rilevante per la gravità. Ad esempio la costante di gravità è inversamente proporzionale al quadrato della energia di scala di Planck.

La *lunghezza della scala di Planck* è di  $10^{-33} \text{ cm}$ . Sono dimensioni molto piccole corrispondente a energie molte elevate.



Figura 8 – il Fermilab

E' l'energia massima applicabile parlando ancora in termini di teoria classica della gravità. Dopo tale energia occorre una teoria della gravità quantistica.

Un tentativo della Teoria delle stringhe è proprio quello di riuscire a spiegare bene sia la gravità che la teoria quantistica. Una grande sfida!

E' l'energia della scala di Plank che determina la gravità. Potrebbe essere anche l'energia per cui (la gravità) determina l'interazione nucleare forte.



Figura 9 – Interno CERN<sup>3</sup> verso l'LHC<sup>4</sup>

Nel modello standard delle particelle, che andremo a esaminare, il termine standard fa riferimento ad un modello che comprende solo le particelle note e verificate.

Ad esempio nel seguito escluderemo la "*particella di Higgs*", particella prevista ma non trovata ancora in nessun esperimento.

## La Fisica delle particelle elementari

Iniziamo brevemente dall'atomo: è costituito da un nucleo piccolo contenente protoni, costituiti da cariche elettriche positive, e neutroni (elettricamente neutri). Poi ci sono gli elettroni, cariche elettriche negative. Nell'insieme l'atomo, come somma algebrica delle cariche, è neutro. I più grandi, come massa, sono i protoni, poi i neutroni ed infine gli elettroni. L'elettrone non ha parti costituenti, è stabile, ed è caratterizzato da massa e carica. Gli elementi trovati in natura furono in

<sup>3</sup> CERN: in origine Comitato Europeo per la Ricerca Nucleare

<sup>4</sup> LHC: un anello di ~26 Km con magneti superconduttori a 1.9o K per accelerare due fasci di protoni (collisioni pp) fino a 7+7=14 TeV (1 TeV =  $10^{12} \text{ eV} \sim 1.6 \text{ erg}$ )

generale classificati in base a proprietà come peso atomico e numero atomico (numero di neutroni) ottenendo la classica Tavola di *Mendeleev*.

1 H																	2 He																																
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne																																
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar																																
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr																																
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe																																
55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn																																
87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Ha	106 Sg	107 Ns	108 Hs	109 Mt																																									
<table border="1"> <tr> <td>*</td> <td>57 La</td> <td>58 Ce</td> <td>59 Pr</td> <td>60 Nd</td> <td>61 Pm</td> <td>62 Sm</td> <td>63 Eu</td> <td>64 Gd</td> <td>65 Tb</td> <td>66 Dy</td> <td>67 Ho</td> <td>68 Er</td> <td>69 Tm</td> <td>70 Yb</td> <td>71 Lu</td> </tr> <tr> <td>**</td> <td>89 Ac</td> <td>90 Th</td> <td>91 Pa</td> <td>92 U</td> <td>93 Np</td> <td>94 Pu</td> <td>95 Am</td> <td>96 Cm</td> <td>97 Bk</td> <td>98 Cf</td> <td>99 Es</td> <td>100 Fm</td> <td>101 Md</td> <td>102 No</td> <td>103 Lr</td> </tr> </table>																		*	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	**	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr
*	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu																																		
**	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr																																		

Figura 10 – Tavola periodica di Mendeleev

Non ci addentreremo nel seguito sulla teoria elettromagnetica vista in [1], ma solo sugli aspetti moderni del Modello standard.

Nel diciannovesimo secolo furono spiegati l'elettricità ed il magnetismo come effetto di campi di forze; mentre precedentemente per poter spiegare tali forze si parlava di *azione a distanza*. In ogni caso la cosa straordinaria è il dover comprendere come tali effetti avvengono quasi istantaneamente tra corpi anche molto distanti nell'universo.

L'elettrodinamica quantistica (*QED*) studia le particelle e rappresenta la teoria quantistica dei campi applicata all'elettromagnetismo.

La *QED* attribuisce la forza elettromagnetica ad uno scambio di particelle ovvero i *fotoni o quanti di luce*: un elettrone ( $e^-$ ) durante la sua traiettoria emette un fotone ( $\gamma$ ); quest'ultimo procede fino a quando incontra un secondo elettrone, al quale fornisce energia e forza elettromagnetica, per poi sparire (Vedi diagramma di Feynman). Il fotone è, quindi, colui che *media* la forza elettromagnetica tra elettroni. I due elettroni, per reazione, cambiano traiettoria.

In generale le forze elettromagnetiche possono essere attrattive o repulsive a seconda del tipo di cariche: nel caso precedente sono in gioco cariche di ugual segno e quindi forze repulsive.

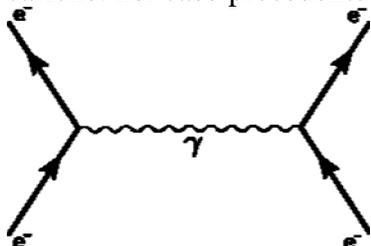


Figura 11 – Diagramma di Feynman

Il fotone è definito *bosone di gauge*. Il termine gauge nell'800 veniva usato per gli ambienti ferroviari: "*railroad gauge*", per indicare la distanza tra le rotaie.

I bosoni deboli e i gluoni sono altri esempi di bosoni di gauge, che comunicano interazioni deboli e forti, rispettivamente.

Non tutti i processi della QED comportano la distruzione del fotone. Il processo quantistico visto prima era per le *particelle interne*, come i fotoni che vengono creati nel processo e poi distrutti;

esistono, tuttavia, anche *particelle esterne*, non create da processi, come fotoni reali o particelle reali, che entrano ed escono in regioni di spazio, dove interagiscono.

La QED ipotizza che sono eternamente esistenti dei campi di forza che possono creare e distruggere particelle, ovunque nello spazio-tempo e in qualsiasi istante. Le particelle, quindi, sono viste come “eccitazione” del campo quantistico; mentre il vuoto, assenza di particelle, come la presenza di un campo costante. Il modello QED formula, quindi, un’ *interazione locale dei campi* sulle particelle; il che vuol dire che le interazioni possibili sono solo quelle tra particelle in uno stesso luogo.

Come mai allora è evidente un’interazione anche a grossa distanza? In realtà ciò è dovuto al *principio di sovrapposizione degli effetti*: avvengono più interazioni a catena a partire da una stessa causa, tra zone diverse; poiché tali interazioni avvengono alla velocità della luce (enorme ma finita) l’effetto è quasi istantaneo.

La QED ipotizza l’esistenza delle particelle e delle antiparticelle (materia e antimateria), ritenendo essenziali entrambe. Fu Paul Dirac a ipotizzarne l’esistenza come conseguenza dell’accorpamento della relatività nella QED.

Un modo per convincersi perché le antiparticelle sono legate alla relatività è un ragionamento semplificato del tipo: le particelle sono in grado di andare avanti e indietro nello spazio; allora ingenuamente la relatività ristretta, poiché siamo in un contesto spazio-tempo, ci può portare a dire che le “particelle” dovrebbero essere in grado di andare avanti o indietro nel tempo (anche se non è proprio così): le antiparticelle danno giustificazione degli effetti che si avrebbero se le particelle potessero tornare indietro nel tempo o meglio le antiparticelle sostituiscono le particelle quando si ritorna indietro nel tempo. Questo giustifica anche altre cose: se materia e antimateria si incontrano scoppia tutto; difatti è dal Big Bang che si originò la materia dell’universo attuale che conosciamo. Se facessimo incontrare materia e antimateria torneremo indietro nel tempo al Big Bang.

Ad esempio ad un elettrone corrisponde particella con ugual massa e carica, ma con carica di segno opposto, il *positrone*. Quando due particelle del genere si incontrano si *annichiliscono* (danno luogo a carica 0) e nel fare questo sprigionano una energia  $E=mc^2$ , ovvero la massa sparita si è trasformata in energia.

Gli elettroni, i positroni e i fotoni sono le particelle più semplici e verificabili del modello standard.

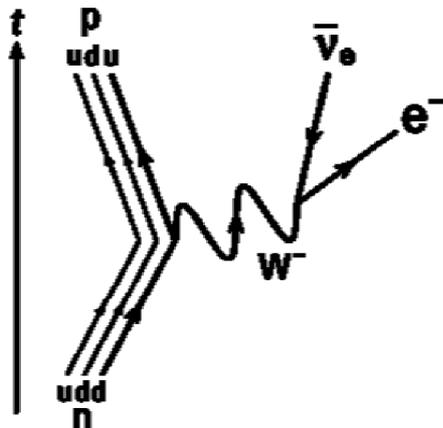
## **Teoria elettrodebole e interazione debole**

L’interazione debole spiega determinate *forme di decadimento*, come quella del potassio-40, e degli stessi neutroni.

I processi nucleari cambiano la forma del nucleo ed il numero di neutroni, rilasciando una grande energia che può essere sfruttata in modalità creative (esempio i reattori nucleari) o distruttive (bomba atomica). L’interazione debole è anche fonte di vita: l’irraggiamento e l’illuminazione della Terra sarebbe impossibile se il Sole, grazie all’interazione debole, non provocasse il processo di trasformazione di idrogeno in elio. L’interazione debole si ha anche durante la creazione degli elementi chimici pesanti, ad esempio durante lo scoppio di una supernova.

Negli anni 60 *Sheldon Glashow*, *Steven Weiberg* e *Abdus Salam*, ognuno per proprio conto, lavorarono attorno alla *teoria elettrodebole*, che giustificava l’interazione debole e permetteva di capire l’interazione elettromagnetica.

La teoria elettrodebole afferma che lo scambio di *bosoni di gauge deboli* produce l'interazione debole.



**Figura 12 - decadimento beta di un neutrone in un protone, un elettrone e un antineutrino elettronico tramite un bosone W.**

Ci sono 3 *bosoni di gauge deboli*; due sono carichi elettricamente:  $W^+$  e  $W^-$  ( $W$  = weak).

Il terzo bosone è indicato con  $Z$  (zero = elettricamente neutro).

Come nel caso dello scambio di fotoni, lo scambio dei bosoni di gauge deboli produce forze attrattive o repulsive a seconda delle cariche deboli.

Solo le particelle portatrici di cariche deboli sono soggette all'interazione debole.

Sebbene esista una analogia tra interazione elettromagnetica (caso dei fotoni) e interazione debole, sussistono però delle differenze importanti.

Una delle differenze sorprendenti a carico della interazione debole è “*la rottura della simmetria di parità*” (*C.N. Yang, T.D. Lee*); ovvero date due particelle specularmente simmetriche, esse hanno comportamento diverso.

In natura esistono molte cose, invece, soggette all'invarianza di parità: ad esempio sappiamo che l'uomo ha il cuore a sinistra; però se l'avesse avuto a destra ci aspetteremmo che funzionasse in modo analogo in termini di processo biologico. Nel caso delle particelle ci si sarebbe atteso che non ci fosse differenza per le leggi fisiche. Elettromagnetismo, gravità e teoria elettrodebole non permettono di ipotizzare di per sé una tale cosa. Perché questo succede allora? La risposta è lo *spin intrinseco fermionico*. E' un po' come le viti filettate che si riescono ad avvitare solo in un verso e a svitare nell'altro, così è per le particelle: possono essere *destrorse* oppure *sinistrorse* (esempio elettrone, protone, quark, leptoni etc). Tale proprietà è detta *chiralità* (dal greco *cheir* = mano). Ebbene *le particelle sinistrorse* sono soggette *all'interazione debole*: un elettrone sinistrorso è soggetto all'interazione debole, mentre un elettrone destrorso no; è una violazione della simmetria di parità. Gli elettroni emergenti dal decadimento di un neutrone sono sinistrorsi.

L'interazione debole ha anche un'altra particolarità il *decadimento beta*: *può mutare una particella da un genere all'altro*, fermo restando la carica elettromagnetica. Nella figura precedente l'interazione di un bosone di gauge debole  $W^-$  con un neutrone provoca il decadimento del neutrone ( $n$ ) in un protone ( $p$ ). Tuttavia poiché neutrone e protone hanno masse differenti, allora devono nascere altre particelle in modo che siano rispettate:

- la legge di conservazione della carica,
- la legge di conservazione dell'energia,
- la legge di conservazione della quantità di moto

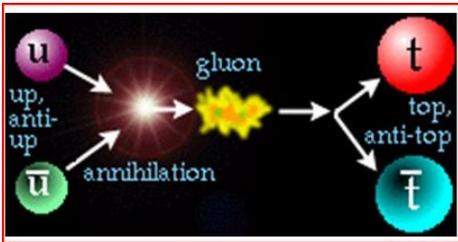
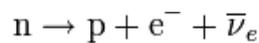


Figura 13 – processo di annichilimento

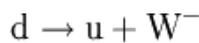
Non dimentichiamo che per ogni particella trovata esiste sempre la sua antiparticella con segno opposto di carica; ovviamente sono create o distrutte insieme (vedi figura accanto).

Nel seguito una lettera barrata come  $\bar{u}$ ,  $\bar{d}$  etc rappresentano antiparticelle (es: anti-quark up etc); inoltre in fisica si usa  $u$  per up,  $d$  per down,  $q$  per quark.

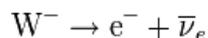
I processi mediati da  $W^+$  e  $W^-$  si dicono processi di corrente di carica debole in quanto i bosoni possono aumentare o diminuire di un'unità la carica elettrica della particella generata dal processo rispetto a quella della particella iniziale. Essi possono inoltre cambiare il sapore delle particelle coinvolte. I processi in cui interviene  $Z$  sono detti processi di corrente debole neutra e non implicano né un cambiamento di carica elettrica né di sapore. Il bosone  $W$  è maggiormente conosciuto per il suo ruolo nelle reazioni nucleari, che avvengono tramite decadimento beta dei neutroni del nucleo atomico, per il quale un neutrone è convertito in un protone con l'emissione di un elettrone (che in questo contesto è detto particella beta) e un antineutrino:



Il neutrone e il protone non sono particelle fondamentali, bensì composte da tre quark; in particolare il neutrone è formato da due quark down e un quark up ( $ddu$ ) e il protone da due quark up e un quark down ( $uud$ ). A questo livello, il decadimento beta è dato dunque da un quark  $d$  che cambia sapore e diventa un quark  $u$  con l'emissione di un  $W^-$ :



il quale a sua volta decade immediatamente in un elettrone e un antineutrino elettronico:



I processi che coinvolgono  $Z$ , lasciando inalterata la carica e il sapore delle particelle, sono di più difficile osservazione e richiedono l'utilizzo di acceleratori di particelle e sofisticati rivelatori. La prima evidenza di processi di corrente neutra, ottenuta nella camera a bolle Gargamelle al CERN nel 1973, segue di quarant'anni le teorie sul decadimento beta.

Dal decadimento beta del neutrone nasce anche il *neutrino* ( $\nu_e$ ), che è neutro e non decade; difatti inizialmente i rilevatori di cariche elettriche non lo rilevarono. Tuttavia nel 1930 Wolfgang Paoli si rese conto che dovesse esistere un'altra particella, detta neutrino, altrimenti si sarebbe ottenuto una violazione della legge di conservazione dell'energia. Successivamente l'esistenza del neutrino è stata verificata.

Si conosce dell'esistenza del neutrino sinistro ma non di quello destro (mai prodotto nei collisori). Nell'universo, a causa dei processi solari, esistono oltre ai fotoni anche i neutrini: siamo continuamente passati da una continua corrente di neutrini.

Leptons $spin = 1/2$			Quarks $spin = 1/2$		
Flavor	Mass $GeV/c^2$	Electric charge	Flavor	Approx. Mass $GeV/c^2$	Electric charge
$\nu_l$ lightest neutrino*	$(0-0.13)\times 10^{-9}$	0	<b>u</b> up	0.002	2/3
<b>e</b> electron	0.000511	-1	<b>d</b> down	0.005	-1/3
$\nu_\mu$ middle neutrino*	$(0.009-0.13)\times 10^{-9}$	0	<b>c</b> charm	1.3	2/3
$\mu$ muon	0.106	-1	<b>s</b> strange	0.1	-1/3
$\nu_\tau$ heaviest neutrino*	$(0.04-0.14)\times 10^{-9}$	0	<b>t</b> top	173	2/3
$\tau$ tau	1.777	-1	<b>b</b> bottom	4.2	-1/3

Figura 14 – le tre generazioni del Modello standard e i colori

In figura le tre strisce orizzontali, a righe di due, rappresentano le tre generazioni di particelle che i fisici hanno trovato. L sta per sinistrorso (L=left), R per destrorso (R=right), F sta per “sapori” (F=flavours).

Ogni colonna ha particelle con ugual carica (0 e 0, -1 e -1 etc,) corrispondente a differenti “sapori”.

La figura precedente divide i quark anche secondo dei colori: le prime due righe per il rosso, le seconde due righe per il verde e le terze due righe per il blu.

Le particelle sono suddivise in *Leptoni* e *Quarks*; in seguito vedremo che mentre i Leptoni sono quelli soggetti all’interazione debole, i Quarks sono soggetti all’interazione forte.

Riassumendo le interazioni deboli agiscono solo sulle particelle sinistrorse e trasformano le particelle (decadimento beta); ma l’interazione debole ha un’altra particolarità: *diminuisce precipitosamente a distanze molto piccole* ( $10^{-16}$  cm), con un comportamento molto diverso dalla gravità e dall’elettromagnetismo. Nella gravità la forza diminuisce con il quadrato della distanza, nell’elettromagnetismo il fotone trasmette la forza anche a grande distanza. Per cui questo rendeva difficile una teoria che comprendesse tutte e tre le interazioni. In buona sostanza mancava qualcosa, un qualche tipo di interazione. Successivamente con la formulazione di Glashow, Weiberg e Salam della teoria dell’interazione debole, si comprese che tale effetto alle piccole distanze è *dovuto alle masse non nulle dei bosoni di gauge deboli*.

I “portatori” delle interazioni  
 $\gamma$  e g sono senza massa, mentre  $W^\pm$  e Z sono molto pesanti

Unified Electroweak $spin = 1$			Strong (color) $spin = 1$		
Name	Mass $GeV/c^2$	Electric charge	Name	Mass $GeV/c^2$	Electric charge
$\gamma$ photon	0	0	<b>g</b> gluon	0	0
$W^-$	80.39	-1	} Interazioni forti		
$W^+$ W bosons	80.39	+1			
$Z^0$ Z boson	91.188	0			
} Interazioni deboli					

Figura 15 – Portatori delle interazioni

Occorre ricordarsi quanto abbiamo detto precedentemente sulle energie di scala debole o quella di Plank. Ad esempio il bosone di gauge debole ha una massa che in energia è circa 100 GeV, quindi trasmette l’interazione debole solo a particelle che si trovano ad una distanza inferiore di  $10^{-16}$  cm. Oltre queste distanze la forza trasmessa è troppo piccola per produrre effetti.

La massa è la ragione per cui l’effetto avviene solo a brevi distanze ed è debole per agire a distanze maggiori. I fotoni e i gravitoni, particelle che trasmettono la gravità, non hanno massa; difatti si spostano alla velocità della luce e trasmettono energia e quantità di moto a distanze ragguardevoli. Il meccanismo che dà luogo alla massa dei bosoni di gauge debole è detto *meccanismo di Higgs*, che vedremo in seguito.

## Interazione forte

L’interazione forte è l’ultima forza del Modello standard spiegabile, attraverso la *Teoria Quantistica Cromodinamica (QCD)*, con lo scambio dei *bosoni di gauge forti*.

I bosoni di gauge forti sono detti *gluoni* (da glue = colla), perché trasmettono una forza incredibile che lega saldamente le particelle che risentono della loro azione (ad esempio nel nucleo).

L'interazione forte giustifica come mai cariche dello stesso segno confinate insieme, non fanno esplodere il nucleo.

Negli anni 50 i fisici individuarono molte particelle; ad esempio alcune sono:

- $\pi$ , particelle pioni;
- $\eta$ , particelle eta;
- $\Delta$ , particelle delta

Tutte queste particelle vennero raggruppate col nome di adroni (dal greco hadròs = grosso), più massive dell'elettrone e paragonabili ad un protone; ma non si comprendeva perché erano così tante. Poi con *Murray Gell-Mann* si comprese che non erano particelle fondamentali, ma una combinazione di particelle fondamentali che vennero denominati quark.<sup>5</sup>

Gell-Mann sostenne che ci fossero tre tipi di quark (vedi figura precedente): up, down e strange e che gli adroni si ottenessero come combinazioni di quark o di quark e *antiquark*. L'ipotesi fu talmente fortunata che non solo si verificò facilmente, ma consentì addirittura di prevedere anche gli adroni non ancora trovati.<sup>6</sup>

L'interazione forte fu capita solo anni dopo. Essa è così forte che le particelle fondamentali come i quark sono fortemente legati ed è quindi difficile studiarli separatamente. Talvolta i quark sono chiamati dai fisici con i colori: rosso, verde e blu (classificazione nella figura precedente). Di solito questi quark colorati si trovano insieme ad altri quark e antiquark, in modo da formare combinazioni neutre di colori. In pratica in queste combinazioni le cariche di quark e antiquark si compensano, come avviene nella luce bianca dove si ha una compensazione dei colori dello spettro di luce (vedi figura precedente).

Allo stato attuale si conoscono solo *due combinazioni neutre (senza colore) di adroni stabili*:

- Un *quark ed un antiquark* legati tra loro (*Mesoni*);
- *Tre quark* legati tra loro (*Barioni*).

Il protone, ad esempio, ha due quark up e uno down. Dalla figura delle tre generazioni di particelle precedente si vede che la carica totale =  $2 \cdot \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$ . Il neutrone ha, invece, un quark up e due down; per cui la carica totale è:  $\frac{2}{3} - 2 \cdot \frac{1}{3} = 0$ .

C'è sempre una compensazione delle cariche che interessano l'interazione forte. In particolare *la forza di colore* si fa sentire solo a grandi distanze.

<b>Adrone</b>	<b>Formula</b>
Pione	$\pi^+ = u\bar{d}$
Protone	$p = uud$

<sup>5</sup> Oggi sappiamo che esistono 6 tipi di quark. Il nome quark, come capita spesso con gli americani, è tratto da versi senza senso del romanzo *Finnegans Wake* di Joyce: "Three quarks for Muster Mark! Sure he hasn't got much of a bark. And sure any he has it'a all beside the mark". Su una cosa siamo d'accordo sui quark: "sono tre e sono difficili da capire!". Mah! ☺

<sup>6</sup> Più fortunato di così! Si dice che lo stesso Gell-Mann non credesse a fondo alla sua stessa teoria. Ottenne per essa il Nobel nel 1969.

Neutrone	$n = udd$
Barione	$qqq$
Mesone	$q\bar{q}$

**Tabella 1 – Adroni e loro formule**

Gli esperimenti di *diffusione profondamente anelastica* di *Friedman-Kendal-Taylor* allo SLAC<sup>7</sup> hanno mostrato che i quark non solo esistono, ma non sono mai isolati: si trovano sempre insieme ad altri quark e gluoni.

Mesoni					
Simbolo	Nome	Quark	Carica	Massa	Spin
$\pi^+$	pione	$ud$	1	0.140	0
$K^-$	kaone	$su$	-1	0.494	0
$\rho^+$	rho	$ud$	1	0.770	1
$B^0$	B-zero	$db$	0	5.279	0
$\eta_c$	eta-c	$cc$	0	2.980	0

**Tabella 2 – Tabella dei Mesoni**

Barioni					
Simbolo	Nome	Quark	Carica	Massa	Spin
$P$	Protone	$uud$	1	0.938	$\frac{1}{2}$
$p^-$	Antiprotone	$u-u-d$	-1	0.938	$\frac{1}{2}$
$n$	neutrone	$udd$	0	0.940	$\frac{1}{2}$
$\Lambda$	Lambda	$uds$	0	1.116	$\frac{1}{2}$
$\Omega$	Omega	$sss$	-1	1.672	$\frac{3}{2}$

**Tabella 3 – Tabella dei Barioni**

## Le repliche pesanti delle particelle e le generazioni

Finora abbiamo anche visto che le particelle sono suddivise in quark e leptoni (dal greco *leptòs* sottile o minuto). Tutti i quark e leptoni stabili più leggeri hanno sempre repliche più pesanti. Ad esempio il *muone* è una replica pesante dell'elettrone. A che servono? Non si sa ancora. Il Modello standard ha ancora delle cose da svelare. Come ad esempio anche il problema della *Materia oscura*.

Prima abbiamo sorvolato su altre cose, che qui riprendiamo. Riguardiamo la figura precedente delle tre generazioni di particelle, leptoni e dei gluoni. A parità di carica, se si scorre lungo una colonna da una generazione alla successiva c'è un aumento di massa. Nella prima generazione si trovano un elettrone sinistrorso ed uno destrorso (non riportato), un quark up sinistrorso ed uno destrorso; infine un neutrino sinistrorso. La prima generazione contiene la cosiddetta *materia stabile*.

La seconda generazione e la terza sono materia non esistente allo stato naturale, ma si trova solo nei collisori a seguito di esperimenti o nell'Universo a seguito di analoghi processi. Ancora non è stata spiegata l'esistenza delle tre generazioni. La figura successiva riassume le forze in gioco, da chi sono trasportate e su chi agiscono.

	Gravity	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong
Carried By	Graviton (not yet observed)	$W^+ W^- Z^0$	Photon	Gluon
Acts on	All	Quarks and Leptons	Quarks and Charged Leptons and $W^+ W^-$	Quarks and Gluons

**Figura 16 – Le forze, da chi sono trasportate e su chi agiscono**

<sup>7</sup> SLAC = Stanford Linear Accelerator Center

## La chiave di volta: la simmetria interna

Sappiamo dalla matematica che le simmetrie sono delle trasformazioni che possiamo operare su degli oggetti senza che nulla cambi. Quelle che di solito a cui pensiamo sono le simmetrie spaziali: ad esempio un triangolo equilatero se lo ruotiamo di  $180^\circ$  ha sempre la stessa forma, sebbene i vertici si siano spostati.

Esiste però anche la *simmetria interna*. Ad esempio se abbiamo un candelabro con tre candele e scambiamo di posto due candele, il sistema è ancora identico. Se abbiamo due palline rosse identiche, una per mano, è perfettamente identico se le scambiamo tra loro.

In determinati casi nella fisica delle particelle si può sfruttare la simmetria interna, scambiando tra loro particelle di massa e carica uguale (questa è detta *simmetria di sapore*) o per altre caratteristiche uguali (non necessariamente tutte uguali, ma solo quelle di interesse).

Che vuol dire questo? Ad esempio elettrone e muone hanno stessa carica ma non la stessa massa, per cui non esiste una vera simmetria di sapore. Tuttavia là dove è insignificante la massa allora scambiare elettrone e muone per ragionamenti e speculazioni teoriche o calcoli è possibile. In altri casi la differenza di massa è così piccola che i calcoli che si otterrebbero, con lo scambio di particelle, sarebbero lo stesso validi ai fini delle previsioni ottenibili. E' lo stesso di ciò che accade in teatro con tre riflettori di luce rossa, verde e blu. Se l'obiettivo è di ottenere luce bianca, basta orientarli tutti in un unico punto del palco, indipendentemente dal loro posizione e dal loro colore.

In Fisica questa *simmetria interna delle particelle* è strettamente legata alla *simmetria delle forze*.

In entrambi i casi non si riconoscerebbe alcuna differenza. Ritornando all'esempio dei riflettori, se qualcuno sposta i riflettori, rispetto a prima che produceva luce bianca, non ce ne accorgeremmo perché otteniamo ancora luce bianca. Questo almeno finché non alziamo gli occhi in alto a vedere l'effettiva posizione dei fari. C'è difatti un legame tra colori e forze ed è alla base della spiegazione dell'interazione forte e di termini come "*cromodinamica quantistica*".

## La simmetria e le forze

Le tre interazioni: elettromagnetica, debole e forte sono tutte caratterizzate da simmetria interna. Per comprendere la simmetria interna occorre esaminare la *polarizzazione dei bosoni di gauge*.

Il concetto della polarizzazione della luce vi dovrebbe essere già noto: chi ha gli occhiali da sole polarizzati sa che fungono da filtro: eliminano il riverbero, perché fanno passare solo la luce polarizzata verticalmente, eliminando le componenti di luce polarizzate orizzontalmente.

La polarizzazione della radiazione elettromagnetica, o *elicità*, è una caratteristica delle onde elettromagnetiche e dei fotoni e indica la direzione dell'oscillazione del campo elettrico rispetto alla propagazione dell'onda.

Un'analogia è il mare che oscilla perpendicolarmente nella direzione dell'onda: è a questo che è dovuto il "beccheggio" di una barca!

Nella meccanica quantistica ad ogni onda che oscilla è associato un fotone; poi ogni fotone ha diverse possibili polarizzazioni, ma quella che utilizzerà è quella che farà sì che l'oscillazione dell'onda è perpendicolare alla direzione del moto del fotone.

In pratica il fotone per fare questo ha molte possibilità: esistono infiniti piani di oscillazione perpendicolari ad un altrettanto infinito numero di piani per la direzione dell'onda trasversale. Per

il fotone non può esistere una terza direzione di polarizzazione, perché la teoria quantistica ci porterebbe a equazioni senza senso.

Ebbene, non ci crederete, ma il modello matematico di simulazione più semplice è proprio quello di considerare la polarizzazione fittizia o inesistente, cioè nella direzione della propagazione (*propagazione longitudinale* che è inesistente) e questo anche perché la relatività non privilegia nessuna direzione. Il modello matematico è accettato solo perché con la “direzione spuria” si ottengono facilmente dei risultati che si possono “ripulire” ottenendo, poi, i risultati corretti.

In Fisica però per ottenere questo *nella teoria delle forze è associata la simmetria interna*, che ha il ruolo di eliminare i risultati assurdi senza rinunciare alla simmetria della relatività.

Come tutto ciò avvenga a causa della simmetria è complesso a spiegarsi teoricamente, ma illustreremo la cosa con un’analogia. Supponiamo di disporre di una macchina automatica che è in grado di fare magliette con maniche destra e sinistra, lunghe o corte. Ma non disponiamo di un meccanismo che controlli che le maniche siano tutte della stessa misura in una maglia. Che succederà? Avremo metà delle maglie buone, l’altra metà è da buttare. Come faremo a distinguere quelle da buttare? Dalla simmetria!

Ritorniamo all’esempio del riflettore che produce luce bianca, non potevamo distinguere i riflettori di colore singolo, ma ottenevamo la luce bianca. In natura accade lo stesso: la combinazione delle particelle è coerente con le simmetrie interne previste dalla teoria delle forze. Fin qua abbiamo parlato avendo in mente soprattutto i fotoni.

La simmetria interna associata alle forze non riguardano solo i bosoni di gauge ma anche le particelle con cui essi interagiscono per diffondere l’interazione. Questo lo si comprende, intuitivamente, per due motivi: stiamo innanzitutto parlando di insiemi di particelle che costituiscono un oggetto (adrone) e che determinate simmetrie non sarebbero una trasformazione se riguardassero solo parte di un oggetto.

La simmetria interna, in base alla quale si possono eliminare le polarizzazioni spurie dei gluoni *postula la interscambiabilità dei quark e dei gluoni*. L’unico modo per preservare la simmetria è di mescolare insieme quark e gluoni. Ad esempio per l’interazione debole la simmetria tratta come equivalenti i tre bosoni di gauge deboli. Tratta anche come equivalenti elettrone e neutrino, quark up e down.

## **Il meccanismo di Higgs**

C’è una cosa che non abbiamo volutamente evidenziato prima, quando parlavamo della polarizzazione e dei fotoni: essi sappiamo che viaggiano alla velocità della luce, ad alta energia, ed hanno massa nulla. Gli adroni sono, invece, fatti di particelle con massa piccola ma non nulla: i gluoni hanno massa.

I fisici si resero conto che occorre fare distinzione se siamo ad alta energia (o piccole distanze per la teoria quantistica e la relatività) o a bassa energia (o grandi distanze), una cosa che inizialmente fu anche difficile da comprendere.

Ad alta energia, la quantità di moto è enorme ed i bosoni di gauge potrebbero essere assimilati come particelle a massa nulla (analogamente ai fotoni) e, quindi, la simmetria interna è importante ed è possibile dire che non esiste la terza direzione di polarizzazione ed usare il modello matematico che ripulisce la “direzione spuria”.

La cosa è diversa però alle basse energie. In tal caso la polarizzazione nel caso dei bosoni di gauge deboli o gluoni (ma anche per i quark e i leptoni), è sperimentalmente verificato che richiede anche la terza direzione di polarizzazione, proprio per l'esistenza della massa, il che significa che la simmetria interna non è conservata (“*rottura spontanea della simmetria interna*”).

C'è anche un altro motivo per cui ciò è vero. Se il bosone di gauge debole fosse privo di massa non sarebbe mai in quiete e viaggerebbe alla velocità della luce; invece può anche stare fermo e quando una particella è ferma, potenzialmente, tutte le direzioni sono equivalenti e, quindi, sono possibili tutte e tre le polarizzazioni. E così è effettivamente ciò che succede in natura; per cui per i gluoni si rompe la simmetria interna!

La rottura della simmetria interna potrebbe non esservi ancora evidente; lo possiamo comprendere con un'analogia. Supponiamo di essere stati invitati ad una cena e tutti i convitati sono attorno ad un tavolo rotondo e a relativamente ad ogni ospite ci sono un bicchiere a destra ed uno a sinistra. Potenzialmente tutti potrebbero sceglierne uno qualsiasi (il *galateo* vorrebbe che prendessimo con “gentil e raffinato gesto” quello a destra, ma ipotizziamo che alla Natura le “convenzioni umane” poco interessano!).

I bicchieri, sinistro e destro rispetto a noi, costituiscono un sistema con una simmetria interna: li potremmo scambiare fra loro e il sistema rimane equivalente. Solo un evento esterno può modificare tale simmetria: è la nostra sete che ci porta a prendere un bicchiere. Nell'istante in cui uno solo dei convitati prende un bicchiere, ad esempio quello a destra, anche tutti gli altri sono costretti a prendere quello a destra altrimenti qualcuno rimarrebbe senza (Non dite che è capitato!); ed ecco che la simmetria è sparita.

Quindi la terza direzione di polarizzazione per i bosoni di gauge debole è presente, perché c'è la massa (il famoso *gap di massa*) ed in sostanza alle basse energie c'è una rottura spontanea della simmetria interna relativa alle interazioni deboli, che rende possibile anche la terza direzione di polarizzazione.

Nel 1964 tutto questo fu formulato da *Peter Higgs*: *la teoria delle forze poteva considerare bosoni di gauge massivi mantenendo una simmetria interna alle alte energie, ma eliminandola alle basse energie*.

Questo è il **meccanismo di Higgs**: un meccanismo che prevede la rottura spontanea della simmetria interna delle interazioni nucleari deboli e alle basse energie. Alla forza nucleare debole è associata una coppia di campi, chiamati *campi di Higgs*.

Se i campi della teoria quantistica sono sorgenti di particelle ovunque nello spazio (ovviamente dipende dal tipo di campo: un campo elettronico produce elettroni etc), un campo di Higgs produce particelle di Higgs (la stampa l'ha denominata “*particella di Dio*”, anche *Leon Lederman* nel suo libro [3]).

Come i quark, i leptoni e le particelle pesanti, le *particelle di Higgs* sono pesanti, ma finora non se ne sono trovate negli esperimenti del LHC. Perché? Le risposte potrebbero essere diverse: essendo particelle pesanti come massa, occorre esplorare quantità di energie elevate, più di quello che oggi è esplorabile; oppure non esistono perché il modello non è del tutto esatto e qui occorrerebbe trovare nuove idee verificabili. E' difficile propendere per una o l'altra ipotesi, in assenza di evidenze o di tracce significative.

Su cosa si basa l'idea della loro esistenza? Alla forza nucleare debole supponiamo siano associati due campi di Higgs:  $Hs1$  e  $Hs2$ , con valori non nulli anche in assenza di particelle. Questa è una novità; finora si considerava, ad esempio, che i campi quantistici creano e distruggono particelle e che sono nulli in assenza di particelle. Adesso si ipotizza che si comportano come quelli elettromagnetici della fisica classica; in tal caso immagineremo il campo come capace di portare cariche, una per ogni punto oppure, per dirla in altro modo, immagineremo cariche esploratrici in ogni punto che manifesterebbero l'esistenza del campo nello spazio.

Se ipotizziamo, quindi, che almeno uno dei due campi di Higgs  $Hs1$  non è nullo ed è portatore di carica debole, significa che la carica debole è potenzialmente ovunque nello spazio (almeno quelle esploratrici come una sorta di "vernice" presente in ogni punto) e che i bosoni di gauge deboli possono interagire con questa carica debole. La carica debole blocca, come una "vernice", i bosoni di gauge deboli nel momento che tentano di trasmettere la forza a distanze grandi. Il campo di Higgs si frappone e influisce sui bosoni di gauge deboli.

Nel vuoto la carica debole è sparsa in maniera "sottile", perché dagli esperimenti fatti i bosoni, i quark e i leptoni a breve distanza si muovono liberamente, ma aumentando la distanza sono bloccati. Per cui i bosoni deboli riescono a esercitare forze solo a breve distanze (a distanza breve corrisponde alta energia e quindi si comportano come se non avessero massa); mentre a distanze grandi dimostrano di avere una massa.

Perché avviene la simmetria interna e poi la rottura della simmetria? Il ragionamento fatto finora sui due campi porta ad un'altra idea. Se i due campi  $Hs1$  e  $Hs2$  fossero nulli, si avrebbe una situazione di simmetria interna: l'uno è scambiabile con l'altro. Se uno dei campi è diverso da zero c'è la rottura della simmetria interna e l'intercambiabilità dei campi di Higgs! Purtroppo non sono state trovate le "particelle di Dio".

## **Elettromagnetismo attraverso il meccanismo di Higgs**

Un'altra proprietà del *meccanismo di Higgs* è che è capace di spiegarci perché l'elettromagnetismo sia una forza speciale, nessuno s'immaginava fino a qualche anno fa che ci fosse ancora qualcosa di nuovo da dire sull'elettromagnetismo.

Con la formulazione della teoria elettrodebole Glashow & co mostrarono che l'Universo iniziò la sua evoluzione ad alta temperatura ed energia e che esistevano solo 3 bosoni di gauge deboli, più un altro bosone neutro ma con una forza di interazione diversa. Il fotone non c'era. La presenza del quarto bosone fu dedotta da indizi fisici e matematici complessi. Il fotone di oggi è una combinazione di due dei quattro bosoni di partenza; difatti il fotone è l'unico bosone soggetto alla forza elettrodebole ma refrattario alla carica debole nel vuoto: si muove senza impaccio nel vuoto e difatti è privo di massa. Non risente dei campi di Higgs non nulli, come W e Z. Il fotone ha un'origine che si può spiegare solo se si mettono insieme in una sola teoria la forza nucleare debole e elettromagnetica, cioè la *teoria elettrodebole*. Da qui si arriva poi *alla simmetria*.

## **Teorie di campo efficace, particelle virtuali, vuoto quantomeccanico**

In fisica a volte incontrerete il termine "*Teoria di campo efficace*". Vuol dire che il livello di risoluzione scelto per il problema su cui si indaga è efficace; ovvero che è adatto alle dimensioni e alle energie che siamo in grado di esplorare con i mezzi tecnologici odierni. Ovviamente fatta una scelta escludiamo dall'analisi cose che la risoluzione non intercetta, ma lo abbiamo fatto per scelta perché tali cose non ci interessano al momento. E' un'astrazione fisica, in sostanza.

Un altro termine che si incontra è *gruppo di rinormalizzazione* (Kenneth Wilson); consiste nel fatto che per ogni scala di distanza si possono fare dei calcoli, per poi normalizzarli ad un'altra distanza

ancora etc. Questo serve per avere un metodo sia per confrontare risultati, sia per verificare, ad esempio, se una teoria che è adatta a grandi distanze può integrarsi con una a basse distanze. Le cose viste prime sono due ottimi strumenti per i fisici per estrapolare teorie dai dati (i matematici direbbero congetture). Con queste due tecniche si studiano i processi fisici e si ottiene evidenza sia degli effetti quantomeccanici che della *particelle virtuali*.

Le particelle virtuali sono come le analoghe particelle reali e rendono, quindi, conto degli effetti quantistici. I risultati sperimentali convalidano tale metodo.

Le particelle virtuali possono essere di uguale massa della particella reale ma di energia diversa. Non esistono nella realtà, ma si produce un effetto come se esistessero realmente. Non è detto che debbano essere 1:1 possono anche essere 1:N; in altri termini ad una particella reale, in processo di teoria di campo efficace possono essere associabili una o più particelle virtuali.

Una particella virtuale può avere energia diversa da quella reale, a causa del fatto che esiste solo per un istante e per il principio di indeterminazione (che esiste per noi umani ma non per la natura che è deterministica) può, quindi, avere energia qualsiasi, anche nulla.

Un esempio di particella virtuale: un fotone, può dar luogo ad un percorso (o processo) tale da sdoppiarsi in due particelle virtuali: un elettrone e un positrone, per poi magari ridare un fotone, che a sua volta si potrebbe ritrasformare in due virtuali e così via. L'importante è che esse esistono solo per un istante.

In pratica questo è un effetto virtuale, del *vuoto quantomeccanico*: la particella virtuale non esiste, ma nel processo fisico emerge dal vuoto, prende in prestito dell'energia dal vuoto, esiste per un attimo e sparisce o portando con sé l'energia o trasferendola ad altre particelle nel processo fisico e che stanno da qualche altra parte. Nel fare questo la particella virtuale esercita una influenza quantistica sul campo e sulle particelle reali. Il vuoto quantomeccanico è quindi un vuoto dove, in assenza di particelle stabili, appaiono e scompaiono istantaneamente delle particelle virtuali.

Quali sono gli effetti che producono le particelle virtuali? In fisica esiste il cosiddetto *principio anarchico* (Jonathan Flynn): un principio che sostiene che “se sono possibili N percorsi (processi) allora saranno percorsi tutti”. Ogni percorso dà difatti un contributo quantistico e peserà nel risultato finale dell'intensità di interazione della particella reale con tutte le particelle intermedie, compreso le particelle virtuali.

C'è un comportamento diverso tra interazione debole e interazione forte. In una interazione debole maggiore è il numero dei percorsi (come se fossero degli intoppi) minore è l'energia o la forza che può trasmettere una particella reale. In sostanza le particelle virtuali indeboliscono la forza elettrica della particella reale o come si dice gli effetti quantomeccanici “schermano” la carica elettrica reale. Questo è vero non solo per il fotone ma anche per tutti i bosoni di gauge intermediari di forze che interagiscono con particelle virtuali e modificano la propria intensità complessiva d'interazione. L'intensità dell'interazione debole difatti diminuisce con la distanza.

Diverso accade per l'interazione forte: si intensifica! La cosa è dovuta ai gluoni. Un gluone si potrebbe sdoppiare in altri gluoni virtuali e la forza aumenta.

## **Considerazioni sulla Particella di Higgs e sui gravitoni**

Ma chi provoca la rottura della simmetria dei campi di Higgs? Probabilmente la presenza di una massa minima a cui è associata un'energia. Di solito la rottura spontanea avviene difatti ad una energia di 250 eV. E' un po' come un sistema di assi cartesiani x,y che potrebbero rappresentare i

campi: finché abbiamo il punto  $x=0, y=0$  c'è la simmetria; se consideriamo  $x=5, y=0$  s'è rotta la simmetria.

Forse la massa deforma il campo? Relatività e meccanica quantistica con la gravità? Un po' come i *gravitoni* che non sono stati trovati? Poiché la massa si fa sentire solo a grandi distanze e basse energie, c'è un legame con la gravità?

L'ipotesi degli autori di questo articolo è che *la particella di Higgs, prevista massiva, non esiste perché è una particella virtuale*, il che giustificerebbe come corretto il meccanismo di Higgs e le previsioni. La particella non è reale ma in grado di modificare uno dei campi di Higgs: la sua presenza e sparizione istantanea, con rimpiazzo di altre particelle virtuali nel vuoto quantomeccanico, altera uno dei due campi di Higgs,  $H_{s1}$  e  $H_{s2}$ , e rompe definitivamente la simmetria interna.

Molto probabilmente la “rottura di simmetria interna” provoca a queste distanze anche la presenza di un effetto di gravità ed i gravitoni a loro volta sono particelle virtuali. La “particella di Dio” non è visibile, ma onnipresente; è tale da produrre effetti visibili ed è virtualmente, nell'ambito di una teoria di campo efficace, un vero atto di fede.

## **Teoria di Grande Unificazione (GUT)**

Georgi e Glashow nel 1974 introdussero una teoria che permette l'unificazione delle tre forze (interazione elettromagnetica, interazione debole e interazione forte) in un'unica forza, da qui il nome di *Teoria di Grande Unificazione (GUT)*.

Nella simmetria d'interazione forte sono intercambiabili tre colori di quark, nella simmetria d'interazione debole sono interscambiabili coppie di particelle diverse; mentre le interazioni della simmetria unificata sono possibili tutti i tipi di particelle che sono interscambiabili (quark, leptoni del modello standard).

La teoria sostiene che inizialmente nell'Universo, ad alte temperature ed energie, esisteva una sola forza, da cui sono discese le attuali tre a causa della rottura della simmetria interna e del meccanismo di Higgs. Quindi postula che ad alte energie vale una sola forza. Verifiche sperimentali sono state condotte per verificare che ad alte energie se i diagrammi delle forze convergessero. I risultati confermano un tale meccanismo.

Inoltre Georgi e Glashow, ad effetto, per dimostrare l'attendibilità della GUT mostrarono che essa prevede il *decadimento dei protoni*, cosa che il Modello standard non poteva prevedere.

Nel Modello standard un quark è diverso da un leptone, perché essi sono distinti in base alla forza a cui sono soggetti; ma nella GUT la forza è sempre la stessa, per cui un quark è sostituibile con un leptone. Ma se il numero netto di quark nell'Universo non rimane lo stesso, poiché un protone è fatto da tre quark, se uno si trasforma il protone decade. Questo suggerirebbe che tutta la materia è instabile, solo che nel protone il tempo di decadimento potrebbe essere molto lungo, anche di gran lunga superiore all'Universo. Attualmente molti esperimenti sono finalizzati alla verifica del decadimento di un protone.

## **Problema della gerarchia**

Il Modello standard, visto finora, concorda benissimo con tutti i risultati sperimentali: il meccanismo di Higgs funziona correttamente e spiega come il vuoto consente la nascita continua di particelle virtuali che rompono la simmetria interna e danno conto della massa dei bosoni W e Z. Infine disponiamo di una teoria molto suggestiva come la GUT. Cos'è che non va ancora?

Un piccolo particolare: Nel Modello standard le masse di scala debole calcolate teoricamente non concordano con quelle pratiche: la massa reale è maggiore. Da dove spunta?

Per superare questo inghippo si deve arrivare a nuove teorie, quello del problema della gerarchia in ambito GUT, che ci porta a conclusioni oltre i campi di Higgs.

Qua la gerarchia è intesa tra le particelle discendenti del Modello standard da quelle di origine della GUT: un po' come se pensando a due fratelli ci aspettassimo che siano simili nelle caratteristiche generali: somiglianza, altezza etc; ma poi rimaniamo sbalorditi se sono completamente diversi in altezza, peso, colore dei capelli e comportamento.

In pratica il problema nasce perché la GUT vuole un'unica forza genitrice dalla interazione debole e dall'interazione forte e considera tale unificazione alle alte energie (scale di GUT). Ebbene partendo dalla interazione debole del Modello standard alla scala debole abbiamo una particella di Higgs massiva ma non eccessivamente; ma quando poi cerchiamo di passare alla scala di Plank e alla GUT (ne esistono tra l'altro diverse di teorie GUT) abbiamo una corrispondente particella di Higgs molto più massiva, ma di una quantità veramente più grande per un fattore  $10^{14}$ . Non solo ma poi dobbiamo fare i conti anche con le particelle virtuali e i loro contributi quantomeccanici che si aggiungono per tutti i percorsi.

Per cui attualmente i fisici parlano di un procedimento di "sintonia fine" che occorre poi operare sui risultati finali; ma per la verità, per ammissione degli stessi fisici, è barare con sé stessi. Anche perché attualmente non esistono metodi o idee migliori. Ma questo non è solo un problema della GUT ma anche del Modello standard.

Questo è il motivo per cui gli autori pensano che la particella di Higgs sia semplicemente una particella virtuale cosa che, forse, bypassa completamente il problema della gerarchia.

### Limiti strutturali dell'atomo ed i gravitoni: le nuove idee di frontiera

Il fisico italiano *Massimo Corbucci* (vedi "Scienza e Conoscenza") ha proposto una tavola periodica degli elementi tenendo conto proprio dei barioni. In questo modo si scopre che esiste un "out-out", un assenza di barioni nella parte in nero della figura; il che comporta che, a causa dei meccanismi visti prima del vuoto quantomeccanico, un atomo potrebbe non riuscire ad avere un numero maggiore di 112 elettroni e protoni. Infatti sono stati disastrosi gli esperimenti sia di creare l'atomo 113 (non si è riusciti ad effettuare la "fusione nucleare" di Bismuto 83 e Zinco 30) che di trovare la particella di Higgs.

Copyright 1999 © DOTT. MASSIMO CORBUCCI																	
Riproduzione Vietata																	
p	n	$\Lambda^0$	$\Sigma^+$	$\Sigma^0$	$\Sigma^-$	$\Xi^0$	$\Xi^-$										
$p^9$	$n^{10}$	$\Lambda^{11}$	$\Sigma^{12}$	$\Sigma^{13}$	$\Sigma^{14}$	$\Xi^{15}$	$\Xi^{16}$	$\Delta^{++}$	$\Delta^+$	$\Delta^0$	$\Delta^-$	$\Sigma^*$	$\Sigma^{*0}$	$\Sigma^{*-}$	$\Xi^{*0}$	$\Xi^{*-}$	$\Omega^-$
$p^{17}$	$n^{18}$	$\Lambda^{29}$	$\Sigma^{30}$	$\Sigma^{31}$	$\Sigma^{32}$	$\Xi^{33}$	$\Xi^{34}$	$\Delta^{37}$	$\Delta^{38}$	$\Delta^{39}$	$\Delta^{40}$	$\Sigma^{41}$	$\Sigma^{42}$	$\Sigma^{43}$	$\Xi^{44}$	$\Xi^{45}$	$\Omega^{46}$
$p^{35}$	$n^{36}$	$\Lambda^{47}$	$\Sigma^{48}$	$\Sigma^{49}$	$\Sigma^{50}$	$\Xi^{51}$	$\Xi^{52}$	$\Delta^{55}$	$\Delta^{56}$	$\Delta^{57}$	$\Delta^{58}$	$\Sigma^{59}$	$\Sigma^{60}$	$\Sigma^{61}$	$\Xi^{62}$	$\Xi^{63}$	$\Omega^{64}$
$p^{53}$	$n^{54}$	$\Lambda^{65}$	$\Sigma^{66}$	$\Sigma^{67}$	$\Sigma^{68}$	$\Xi^{69}$			$\Delta^{70}$	$\Delta^{71}$	$\Delta^{72}$	$\Sigma^{73}$	$\Sigma^{74}$	$\Sigma^{75}$	$\Xi^{76}$	$\Xi^{77}$	$\Omega^{78}$
$p^{84}$	$n^{85}$	$\Lambda^{79}$	$\Sigma^{80}$	$\Sigma^{81}$	$\Sigma^{82}$	$\Xi^{83}$			$\Delta^{86}$	$\Delta^{87}$	$\Delta^{88}$	$\Sigma^{89}$	$\Sigma^{90}$	$\Sigma^{91}$	$\Xi^{92}$	$\Xi^{93}$	$\Omega^{94}$
									$\Delta^{95}$	$\Delta^{96}$	$\Delta^{97}$	$\Sigma^{98}$	$\Sigma^{99}$	$\Sigma^{100}$	$\Xi^{101}$	$\Xi^{102}$	$\Omega^{103}$

Figura 17 – tavola della numerazione barionica

La tavola di sopra è sovrapponibile a quella di Mendeleev e dalla sovrapposizione si vede da quanti e quali barioni è costituito il nucleo dell'atomo. Tale tavola mostra 103 barioni e l'ordine in cui sono messi nel nucleo: 46 sono di spin  $\frac{1}{2}$  e 57 a spin  $\frac{3}{2}$ . Anche c'è una rottura di simmetria interna. L'area nera se corrisponde al vuoto quantomeccanico, dove è la particella di Higgs, a maggior ragione essa non è una particella reale. In particolare lo spin dei quark ha una funzione di regolazione dell'assorbimento di massa dal vuoto quantomeccanico. Gli spin antiparalleli assorbono meno massa rispetto a quelli paralleli e sono sulla sinistra dell'atomo, quelli  $\frac{1}{2}$  a destra.

**TAVOLA DELLA COMPOSIZIONE BARIONICA IN QUARK**

Barioni a spin 1/2								Barioni a spin 3/2									
p	n	$\Lambda^0$	$\Sigma^+$	$\Sigma^0$	$\Sigma^-$	$\Xi^0$	$\Xi^-$	$\Delta^{++}$	$\Delta^+$	$\Delta^0$	$\Delta^-$	$\Sigma^*$	$\Sigma^{*0}$	$\Sigma^{*-}$	$\Xi^{*0}$	$\Xi^{*-}$	$\Omega^-$
uud	udd	uds	uus	uds	dds	uss	dss	$\Delta^{++}$	$\Delta^+$	$\Delta^0$	$\Delta^-$	$\Sigma^*$	$\Sigma^{*0}$	$\Sigma^{*-}$	$\Xi^{*0}$	$\Xi^{*-}$	$\Omega^-$

↓   ↑
↑   ↑

Quark a spin anti-paralleli
Quark a spin paralleli

**Figura 18 – Tavola della composizione barionica in quark**

Corbucci ipotizza, inoltre, che questo è anche legato alla gravità e che i gravitoni non esistono.

In realtà il ragionamento che si potrebbe fare è il seguente: la gravità è un effetto della massa (“una illusione” se vogliamo dirla come dei maghi della relatività) : non viaggia nello spazio perché è insita nella massa. Esperimenti dimostravano che la gravità è più veloce della luce: la luce viaggia fuori della massa, la gravità è nella massa.

In generale, se si ipotizza:

- l'esistenza del vuoto quantomeccanico
- l'istantaneità della gravità
- la virtualità della particella di Higgs , che nasce e muore all'istante e di continuo nel vuoto quantomeccanico
- la virtualità dei i gravitoni, che si comportano allo stesso modo, nel vuoto quantomeccanico

ecco che tutte queste coincidenze, troppe per i fisici e per un “Dio che non gioca a dadi”, comportano che la gravità, attraverso i gravitoni, particelle da considerare a questo punto di massa nulla, passano come in un “portale”, il vuoto quanto meccanico, da un atomo all'altro e si trasmettono attraverso la materia stessa, anche a velocità superiore della luce (principio di indeterminazione di Heisenberg).

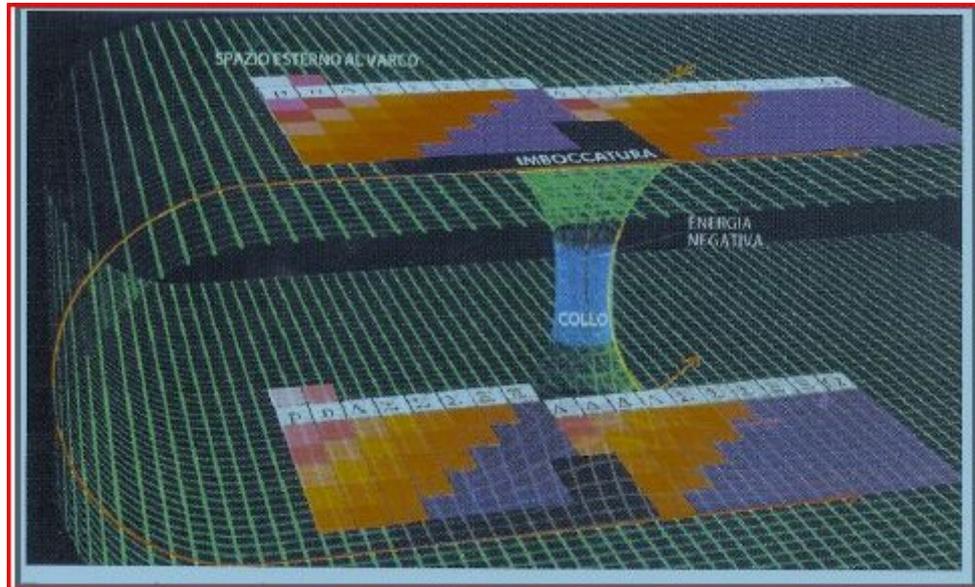


Figura 19 – Immaginario di due atomi vicini che interagiscono

## La supersimmetria come soluzione al problema della gerarchia

E' una nuova teoria di simmetria che consente lo scambio di bosoni e fermioni. E' ancora solo una ipotesi da verificare. I fisici considerano che sia possibile per due motivi:

- la teoria delle superstringhe, che incorpora la supersimmetria e sembra idonea a riprodurre le particelle del Modello standard; senza di essa la teoria delle stringhe non riuscirebbe a descrivere bene l'Universo;
- la supersimmetria risolve il problema della gerarchia

Chiaramente è una teoria più complessa. Se la natura effettivamente usa questa strada, non si sa ancora.

In un mondo supersimmetrico (o tutto simmetrico) ogni particella ha un "partner" supersimmetrico o *supercompagno*, col quale è intercambiabile in una trasformazione supersimmetrica.

Le trasformazioni possibili sono bosone->fermione o fermione->bosone. Avevamo visto che i fermioni sono caratterizzati da spin frazionario e i bosoni da uno spin intero. Gli spin interi ad esempio sono associabili a rotazioni nello spazio, mentre quelli frazionari sono solo una caratteristica della meccanica quantistica.

Le equazioni che descrivono queste trasformazioni sono sempre uguali e le previsioni sarebbero anche identiche a prima di iniziare la trasformazione. Questo rende la supersimmetria un po' strana: "tutto cambia per nulla cambiare" tranne il fatto che scambia particelle tra loro diverse; per cui non sembra una vera simmetria. Ma negli anni 70 è stato dimostrato che possa esistere una simmetria del genere che scambi cose tra loro differenti.

Volendo fare un'analogia supponiamo di giocare a biglie con un amico. Noi abbiamo biglie rosse e l'amico biglie verdi e in quantità uguale. Se ci sono sempre due biglie al variare del diametro, una rossa e una verde, allora il gioco è a pari condizioni. Se, invece, le biglie rosse sono di diametro più grande delle verdi noi saremmo troppo avvantaggiati. Nel caso della supersimmetria dovremmo avere sempre bosoni e fermioni appaiati e di uguali caratteristiche come massa e carica. In tal caso esiste la simmetria. Questa supersimmetria è una simmetria spazio-temporale. Difatti intuitivamente

fermioni e bosoni hanno spin diverso per cui nella trasformazione supersimmetrica devono compensare questo agendo sullo spazio e sul tempo!

La supersimmetria d'altra parte è una teoria economica: basta associare una particella ad un'altra, una volta scelte le combinazioni giuste. Ma il Modello standard ha un numero di bosoni e fermioni non uguale. Se l'Universo fosse effettivamente supersimmetrico, allora necessariamente devono esistere altre particelle; in tal caso dovrebbero esistere un numero doppio di particelle di quelle attualmente note. Difatti tutte le particelle del Modello standard, quark e leptoni, ma anche i bosoni di gauge, dovrebbero essere associati a supercompagni bosonici, che non sono stati scoperti.

I compagni supersimmetrici vengono chiamati *sleptoni*, *squark*, *selettroni* etc (con una "s" prima) oppure *w-ino* etc. Un esempio in tabella.

<i>leptoni</i>	<i>sleptoni</i>
<i>elettrone</i>	<i>selettrone</i>
<i>quark</i>	<i>squark</i>
<i>top</i>	<i>stop</i>
<i>bosone di gauge</i>	<i>gaugino</i>
<i>fotone</i>	<i>fotino</i>
<i>bosone W</i>	<i>w-ino</i>
<i>bosone Z</i>	<i>z-ino</i>
<i>gluone</i>	<i>gluino</i>
<i>gravitone</i>	<i>gravitino</i>

Tabella 4 - Esempi di supercompagni

La supersimmetria porta al fatto che la particella di Higgs sia leggera e preserva la gerarchia.

Il problema vero nel Modello standard è sintetizzabile nella domanda: come mai la particella di Higgs ha massa leggera se a tale massa concorre il pesante contributo quantistico delle particelle virtuali?

*L'estensione del Modello standard con la supersimmetria* ha il vantaggio che il contributo quantico è dovuto sia alle particelle che ai supercompagni. I fermioni sono positivi e i bosoni negativi per cui i contributi si compensano e non sono esagerati. Ovviamente ogni particella virtuale ha il suo supercompagno in questo ragionamento. In questo modo la "sintonia fine" e i calcoli truccati spariscono di colpo e dà ragione di una massa leggera per la particella di Higgs, ma non spiega ancora perché non si trova quest'ultima, visto che la teoria la considera reale.

Qual è l'altro problema della supersimmetria? Come giustificare la rottura della supersimmetria; soprattutto è da notare che il mondo attuale non è supersimmetrico. L'unico ragionamento possibile è che la supersimmetria viene rotta quando la coppia non ha una massa analoga. Ma d'altra parte neanche può essere esatta del tutto, altrimenti si sarebbero trovate le stesse massa delle particelle del Modello standard, mentre occorre postulare, in base agli esperimenti, che i compagni supersimmetrici abbiano masse maggiori rispetto a quelle note.

La rottura della supersimmetria dovrebbe portare a interazioni con *cambio di sapori*: si trasformano quark o leptoni in quark o leptoni di un'altra generazione. Molto ancora si deve affinare su questa teoria.

## La Materia oscura

La supersimmetria affascina anche per un altro motivo: potrebbe essere candidata a spiegare la *Materia oscura*, che rappresenta la materia non luminosa che è nell'universo e scoperta a causa del suo influsso gravitazionale. In realtà i fisici non sanno cosa è esattamente. Una superparticella che non decade e con massa e intensità d'interazione corrette potrebbe assumere il ruolo della materia oscura. La supersimmetria ha qualche elemento a favore, ma finora a suo svantaggio c'è sempre che la particella di Higgs non è stata trovata, né i compagni supersimmetrici. D'altra parte le energie che servirebbero per questo sono notevoli e non ancora raggiungibili.

## La teoria delle stringhe e la TOE

La relatività generale è importante per oggetti estesi e massivi, come stelle e galassie, ma la sua influenza sull'atomo è trascurabile; mentre alle scale di lunghezza dell'atomo è di importanza notevole la meccanica quantistica.

Uno dei problemi fondamentali è sempre stato che meccanica quantistica e relatività non sono armoniosamente connesse, anzi funzionano bene su scale di lunghezze molto diverse; ad esempio alla distanza di Planck ( $10^{-33}$  cm) non c'è un modo di accordarle in modo semplice.

Nella meccanica classica la gravità Newtoniana è proporzionale alle masse coinvolte e inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza. Su scala atomica le masse sono piccole, però la piccolissima distanza tra esse fa aumentare la gravità enormemente, quindi la gravità è di interesse della teoria quantistica. Nella relatività generale, però, i campi gravitazionali sono uniformi e immersi nello spazio-tempo, che si incurva con gradualità. Nella meccanica quantistica, alla scala di distanza di Plank, qualunque tecnica che possa misurare la quantità di moto è soggetta ad una grande indeterminazione (principio di indeterminazione di Heisenberg); non solo ma per sondare effettivamente l'atomo a queste grandezze occorre una energia notevole e si provocherebbero processi dinamici, forse, incontrollabili perché si avrebbe l'apparizione e la sparizione istantanea e continua di particelle virtuali ad alta energia nel vuoto quantomeccanico (rappresentando una sorta di pentolone che ribolle pericolosamente!) e qualunque speranza di applicare la relatività fallirebbe. Questo è anche uno dei motivi, si dice, che gli esperimenti finalizzati alla ricerca della particella di Higgs siano stati sospesi per evitare situazioni pericolose non ancora sotto il dominio degli studiosi.

Inoltre i campi gravitazionali alla scala di Plank non sono né trascurabili né affatto uniformi e anziché trovare una geometria che si incurva gradualmente, ci sarebbero fluttuazioni spazio-tempo ed una geometria ad "anse e a spirali" (simile a dei "tornado"; questo ad esempio è un altro spunto matematico-geometrico da prendere in considerazione). La gravità ha un effetto così preponderante alla scala di Plank che i calcoli fatti solo come meccanica quantistica sono errati.

Questo è uno dei motivi per cui c'era la necessità di una teoria che mettesse insieme gravità e teoria quantistica. La teoria dei campi gravitazionali, ad esempio, prevede che esista il *gravitone*, che trasmetta la gravità tra particelle, una forza intrinsecamente connessa con lo spazio-tempo. I gravitoni di conseguenza devono avere spin diverso dalle altre particelle mediatrici di forza, come il fotone. In realtà il *gravitone è l'unica particella senza massa e spin 2*. Vedremo che questo è un fatto importante per le dimensioni extra.

Ma anche così la teoria dei campi applicata ai gravitoni non riesce a prevedere le sue interazioni a tutte le energie; anzi si arriva a conclusioni sbagliate.

La teoria che ha preso piede è stata, per conseguenza, la *teoria delle stringhe*. Le stringhe sono segmenti di energia, simili a corde vibranti, e monodimensionali.

Sono i mattoncini elementari della materia, che con la loro molteplicità di “modi di vibrazione” danno vita alle particelle a noi note nel Modello standard. Una particella è dovuta alla vibrazione di una stringa e le caratteristiche di vibrazione determinano le caratteristiche della particella.

Le stringhe si estendono in una sola dimensione, sono monodimensionali e si spostano nel tempo; possono essere aperte come un laccio o chiuse con le estremità come un cappio. I loro modi di vibrazione corrispondono ad un numero intero di oscillazioni, su e giù, lungo tutta la estensione della stringa. Nel caso di stringhe aperte le oscillazioni vanno da un capo all'altro e invertono, poi, la direzione con un movimento avanti-indietro; mentre nel caso di stringhe chiuse l'oscillazione su e giù continua in circolo sempre nella stessa direzione.

La modalità di vibrazione determinano: massa, carica e spin. Ci saranno, quindi, molte particelle imparentate come carica e spin, ma con massa diversa. In particolare variando la frequenza delle oscillazioni, dalla frequenza fondamentale alle armoniche superiori, si può passare dalle particelle leggere a quelle pesanti. Poiché le stringhe si possono fare oscillare a frequenze molto elevate, significa anche che a energia molto elevate (non raggiungibili oggi) esistono particelle molto pesanti.

La teoria delle stringhe fu inizialmente introdotta per gli adroni ma portava a conseguenze errate, tipo la previsione del *tachione*. Il tachione (dal greco *tachys* = veloce) è una particella più veloce della luce, difatti inesistente. Se appare nei calcoli significa che il modello pensato è instabile, sicuramente esiste un modello stabile ad energie inferiore dove non esiste il tachione.

Un miglioramento alla teoria fu fatto da *Ramond*, *Neveu* e *Schwartz* che introdussero la versione supersimmetrica delle stringhe: le *superstringhe*. Si notò che questa volta applicata alla gravità quantistica poteva dare delle novità:

- non apparivano i tachioni
- si potevano trattare anche particelle con spin  $\frac{1}{2}$  come i fermioni
- lo spin 2 poteva giustificare il gravitone
- si potevano trattare particelle come i bosoni di gauge
- si potevano trattare situazioni multi-dimensionali

L'ultimo punto era interessante. Come un oggetto puntiforme può muoversi in 4 dimensioni (3 spaziali e 1 temporale), le stringhe, che rispetto al punto hanno una dimensione in più, possono muoversi su molte più dimensioni. Ebbene è stato dimostrato che la teoria delle superstringhe ha senso su 10 dimensioni (9 spaziali ed 1 temporale).

Grosso interesse nacque sulla teoria delle superstringhe nel momento in cui *Green* e *Schwartz* mostrarono il fenomeno delle *anomalie*.

Nella teoria quantistica dei campi inizialmente si pensava che le simmetrie della teoria classica delle particelle fossero sempre conservate; invece *Steven Adler*, *John Bell* e *Roman Jackiw* dimostrarono che ciò non è sempre vero e che la simmetria si rompe nei processi quantomeccanici che richiedono interazioni con particelle virtuali. Tale violazione di simmetria venne detta *anomala*.

Abbiamo già visto che una teoria delle forze che dia spiegazione dei fenomeni deve tener conto della simmetria interna: devono essere simmetrie esatte altrimenti non si elimina la polarizzazione indesiderata del bosone di gauge. Per cui la simmetria associata ad una forza deve essere priva di anomalie, quindi, la somma algebrica di tutti gli effetti sulla simmetria deve essere nulla. Il Modello standard funziona grazie all'intervento di quark e leptoni ed il loro contributo è, difatti, a somma

algebrica nulla. Nel 1983 Luis-Álvarez-Gaume e Edward Witten dimostrarono che le anomalie si verificavano non solo nella teoria quantistica ma anche nella teoria delle stringhe. A seguire Green e Schwarz mostrarono che solo in *una teoria delle stringhe a dieci dimensioni la somma algebrica dei contributi quantomeccanici è nulla*.

Inoltre nel 1985 David Gross, Jeff Harvey, Emil Martinec e Ryan Rohm introdussero le *stringhe eterotiche*. Il termine deriva dal greco heteròiosis = alterazione o ibrido. Si tratta cioè di oggetti ibridi rispetto ai loro progenitori. Nella teoria delle stringhe chiuse di partenza un modo di vibrazione o onda può avvenire in un verso o nell'altro. Nella teoria delle stringhe eterotiche c'è un trattamento diverso tra le onde che viaggiano a sinistra e quelle che viaggiano a destra, il che riconduce alle particelle sinistrorse e destrorse del Modello standard. Questa nuova variante era interessante, perché permetteva una teoria delle forze con assenza di anomalie.

In altri termini la teoria delle superstringhe eterotiche poteva effettivamente considerarsi una estensione del Modello standard, la *TOE (Theory of Everything)*, capace di giustificare sia le forze che tutte le particelle trovate nel Modello standard.

A questo punto la domanda successiva era: “se tale modello prevede dieci dimensioni e nel mondo reale conosciamo solo 4 dimensioni, le altre 6 dimensioni extra dove sono?”. Sono arrotolate e di dimensioni non visibili era la risposta. Ma in una teoria delle stringhe eterotiche in dieci dimensioni, per poter trattare in modo diverso le particelle sinistrorse da quelle destrorse, non andavano bene le dimensioni arrotolate. Per cui la soluzione nel 1985 con Philip Candelas, Gary Horowitz, Andy Strominger fu quella di dire che si potevano considerare le dimensioni extra arrotolate purché compatte (le *varietà di Calabi-Yau*). Le varietà di Calabi-Yau hanno permesso di determinare anche il numero di generazioni delle particelle elementari (purtroppo centinaia). Tuttavia sono in corso ancora studi per determinare quale varietà di Calabi-Yau è quella corretta, perché ce ne sono moltissime. È comunque un argomento difficile, in cui occorre compiere ancora moltissimi passi.

## **Teoria delle stringhe applicata alle brane**

Appena i fisici iniziarono a considerare la teoria delle stringhe anche per le brane, si scoprirono le cosiddette *teorie duali*, ovvero quelle teorie completamente diverse ma che producono gli stessi effetti fisici. Un esempio che vedremo nel seguito è l'equivalenza della teoria delle superstringhe eterotiche a dieci dimensioni con la supergravità a undici dimensioni (che contiene brane e non stringhe); vedremo anche la *Teoria M*.

Le brane sappiamo hanno delle dimensioni minori del bulk e che su esse sono intrappolate particelle e forze che si muovono solo nelle dimensioni delle brane. In altri termini le particelle e le forze intrappolate non possono sconfinare nel bulk.

Le brane però sono oggetti con una identità, sono reali. Possono essere allentate: in questo caso possono vibrare e hanno libertà di movimento; oppure possono essere tese: in questo caso si suppone che siano ferme. Inoltre le brane sono portatrici di cariche e capaci di interagire tramite forze: possono quindi influire sul comportamento delle stringhe e di altri oggetti.

Nel 1989 Jin Dai, Rob Leigh, Joe Polchinski e Petr Horava, lavorando alle equazioni della teoria delle stringhe scoprirono un particolare tipo di brana: la *D-brana*. Per semplificare abbiamo visto prima che le stringhe o sono chiuse o aperte. Se sono aperte le estremità devono stare da qualche parte: ebbene le estremità potevano stare solo nella modalità delle D-brane. Il bulk contiene più brane e, quindi, non è necessario che le stringhe siano sulla stessa brana. La teoria D-brane aveva individuato che tutte le stringhe aperte devono terminare su brane mentre la teoria delle stringhe diceva il numero delle dimensioni e quali proprietà devono avere queste brane.

Alcune brane si estendono in tre dimensioni (3-brane), altre in qualsiasi numero di dimensioni fino ad un massimo di 9. Le 3-brane sono quelle della nostra realtà e che dovremmo essere capaci di osservare.

Le brane possono essere diverse non solo per le dimensioni ma anche per carica, forma e *tensione* (che esamineremo nel seguito).

Inizialmente le brane non vennero introdotte, erano solo una curiosità e comunque pensate ferme e scarsamente interagenti; erano solo una complessità inutile.

Le brane, tra l'altro, erano contro-intuitive: sembravano cozzare col principio che le dimensioni sono equivalenti; mentre le brane richiedono che ci sia una distinzione tra le dimensioni: quelle lungo la brana sono diverse dalle dimensioni esterne alla brana. Le leggi della fisica, invece, sono uguali in tutte le direzioni, di conseguenza perché la teoria delle stringhe sarebbe dovuta essere diversa? Le brane non rispettano questa simmetria. Le dimensioni delle brane però sono confinate, come abbiamo visto all'inizio del lavoro.

Nel 1995 *Joe Polchinski* dimostrò che:

- le brane sono oggetti dinamici;
- fanno parte della teoria delle stringhe, spiegando quali tipi di D-brane sono presenti nella teoria delle superstringhe;
- sono dotate di cariche e quindi soggette a interazioni

La tensione delle brane li fa somigliare alla superficie di un tamburo: sono tese, sotto tensione; il che serve a riportarle nella posizione iniziale di riposo dopo l'interazione. Se la tensione di una brana fosse nulla, una piccola interazione produrrebbe un effetto enorme, perché la brana non offrirebbe resistenza. Se la tensione fosse infinita, al contrario, la brana sarebbe rigida e non dinamica. Invece essendoci una tensione finita allora possono muoversi e fluttuare, rispondere alle forze, come un oggetto dotato di cariche. Le brane hanno tensione non nulla e sono dotate di cariche e, per quest'ultime quindi, interagiscono anche tra loro, con oggetti dotati di cariche e con il campo gravitazionale.

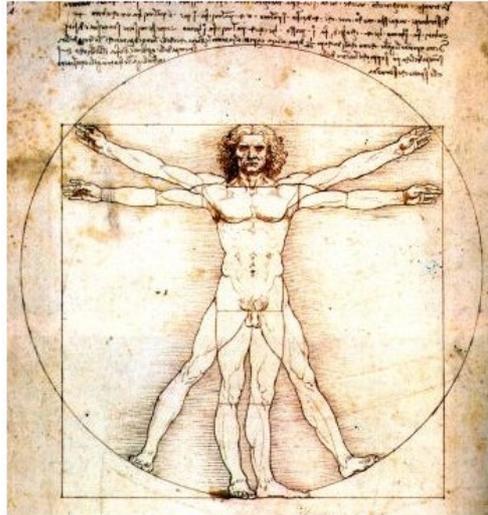
Nello stesso periodo *Andy Strominger*, postulò l'esistenza delle *p-brane*. Andy mostrò che le *p-brane* si avvolgono in un a regione di spazio molto piccola e strettamente e che, inoltre, possono comportarsi come particelle. Joe successivamente mostrò che le *p-brane* erano dimostrabili anche attraverso le D-brane, cioè esisteva un *concetto di dualità*.

## Conclusioni

In questo lavoro è stata affrontata la fisica partendo dalle brane e dimostrando come si arrivasse ad esse, attraverso il Modello standard e la TOE (tutte le particelle e le loro caratteristiche e le forze oggi note).

Un lavoro lungo e non banale, che è passato attraverso la relatività, la meccanica quantistica, la cromatica dinamica, la GUT e la TOE come estensione del Modello standard; sempre con il proposito di rimanere sul concettuale (nessuna formula e procedimento matematico) e tale da tenere viva l'attenzione.

L'escursione sul mondo delle brane e della teoria delle stringhe richiede però un lavoro a parte, completamente dedicato, con ulteriori approfondimenti che gli autori si propongono come ulteriore prosieguo del presente da ritenersi di base.



## *Riferimenti*

- [1] Rosario Turco, Maria Colonnese - Congettura di Yang e Mills o del “gap di massa”
- [2] Lisa Randall - Passaggi curvi – I misteri delle dimensioni nascoste dell’universo
- [3] Leon Lederman con Dick Teresi – La particella di Dio – Se l’universo è la domanda qual è la risposta?
- [4] Albert Einstein, Leopold Infeld – L’evoluzione della Fisica
- [4] Mikio Kaku – Mondi Paralleli
- [6] FritJof Capra – Il Tao della fisica - Adelphi
- [7] RaminusFalcon, FilippoQ - Geometrie non euclidee - wikibook

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.  
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.