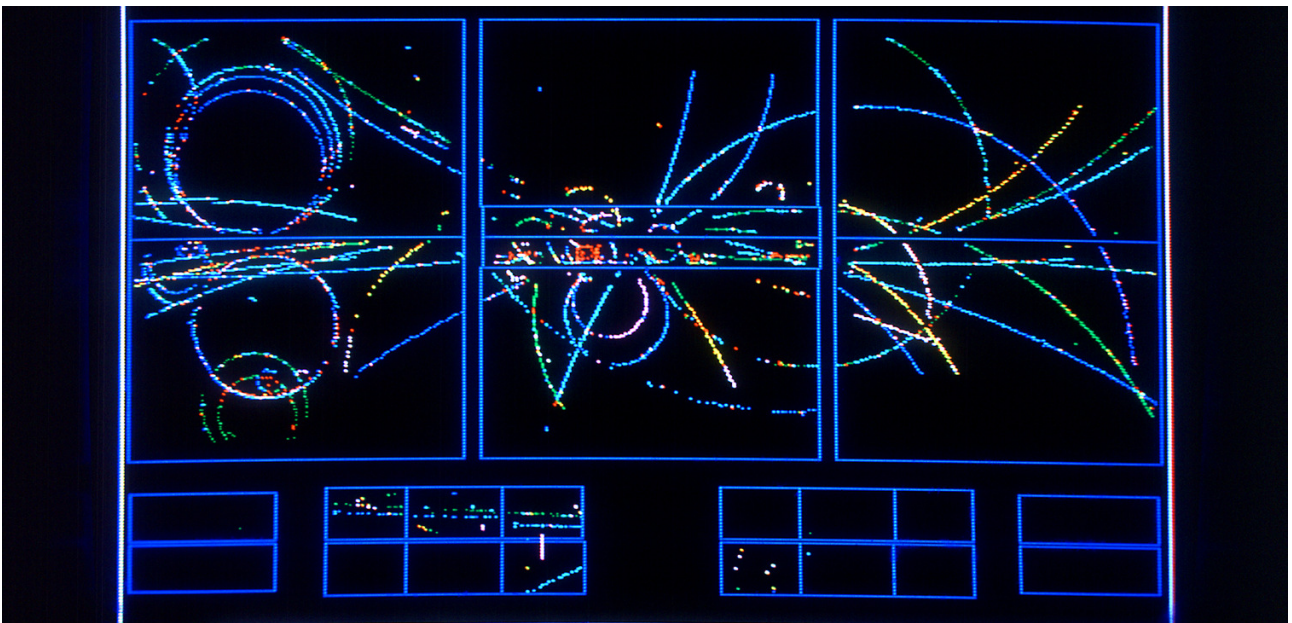


LICEO SCIENTIFICO “G.GALILEI”  
MACERATA

# MATERIALE DIDATTICO



# IL MODELLO STANDARD

# E OLTRE

# CENNI DI FISICA DELLE PARTICELLE

Prof. Angelo Angeletti

# CENNI DI FISICA DELLE PARTICELLE: IL MODELLO STANDARD E OLTRE<sup>[i]</sup>

## 1 - Particelle fondamentali

---

La ricerca dei costituenti ultimi e indivisibili della materia, iniziata dai filosofi greci, continua ininterrotta da oltre venticinque secoli. Si è convinti che ogni cosa esistente in natura abbia origine da un numero limitato di costituenti fondamentali; questi elementi per tradizione sono le *particelle elementari*, e rappresentano le più piccole e le più semplici unità di materia fisicamente concepite. Il concetto di "elementare" ha subito però notevoli mutazioni; nuove scoperte e nuove teorie hanno spesso mostrato che l'oggetto ritenuto elementare era in realtà formato da qualche cosa ancora più fondamentale e più semplice. Oggi l'elementarità è semplicemente attribuita a *ogni elemento di materia di cui al momento attuale non se ne conosce una struttura*.

Nel 1869 Mendeleev classificava i 63 elementi allora noti creando la tavola periodica degli elementi; gli 88 elementi noti all'inizio degli anni Trenta, e quindi tutta la materia conosciuta, potevano essere descritti mediante quattro particelle considerate elementari e a simmetria sferica: il *protone*, l'*elettrone*, il *neutrone* e il *fotone*.

Questo schema incominciò a mutare con l'introduzione dello spin, con la teoria della relatività (che dimostrò la possibilità di creare una particella dal nulla purché si abbia a disposizione sufficiente energia) e con le *antiparticelle*<sup>[ii]</sup> di Dirac.

L'apparente semplicità della materia fu ulteriormente scossa dall'introduzione del *neutrino*, dalla scoperta (1932) del *positrone* (l'elettrone positivo) che confermava la teoria di Dirac sulle antiparticelle, dai primi *mesoni* (1936) prodotti dai *raggi cosmici*<sup>[iii]</sup> e soprattutto dalla scoperta di numerose altre particelle.

---

<sup>[i]</sup> Alcune parti sono tratte dal libro di CAFORIO A. e FERILLI A., Nuova Physica 2000, vol. 3, Le Monnier, 2000

<sup>[ii]</sup> La teoria di Dirac, oggi largamente confermata sperimentalmente, afferma che in natura oltre alle particelle esistono le antiparticelle. Le antiparticelle presentano la stessa massa, carica elettrica opposta e in genere tutte le proprietà intrinseche uguali, oppure di segno opposto, rispetto a quelle delle corrispondenti particelle. Generalmente le particelle sono distinte dalle antiparticelle, solo alcune (per esempio il fotone) sono tali che particella e antiparticella coincidono. Quando una particella interagisce con la sua antiparticella avviene l'annichilazione delle due con produzione di radiazione elettromagnetica; per esempio un positrone si annichila con un elettrone emettendo energia sotto forma di radiazioni elettromagnetiche di alta frequenza, l'energia che si sviluppa da queste interazioni è uguale alla somma degli equivalenti delle masse dei due corpuscoli, cioè pari a  $2 \cdot 0,511 \text{ MeV} = 1,022 \text{ MeV}$  da cui segue che la frequenza del fotone emesso  $\nu = E/h = 2,5 \cdot 10^{20} \text{ Hz}$ .

<sup>[iii]</sup> La genesi dei raggi cosmici non è ancora perfettamente chiarita: alcuni provengono dal Sole altri da galassie molto lontane. In genere si tratta di particelle, soprattutto protoni, con energia dell'ordine anche di centinaia di GeV e che arrivano sulla Terra da tutte le direzioni dello spazio. Appena la radiazione primaria raggiunge l'atmosfera terrestre, interagisce con gli atomi e con i suoi costituenti, originando una cascata di particelle che chiamiamo raggi cosmici.

La costruzione di grandi acceleratori<sup>[iv]</sup> portò alla scoperta di un gran numero di particelle; i costituenti della materia divennero così numerosi e con evidenti tracce di struttura interna che non poterono più essere considerati elementari. Inoltre, negli acceleratori, la possibilità ipotizzata dalla relatività di creare nuove particelle divenne una realtà; dalla collisione ad altissima energia fra corpuscoli se ne possono ottenere altri.

Le caratteristiche fondamentali delle particelle sono la massa, la carica, lo spin, la vita media e, se si tratta di particelle instabili, il modo più tipico di decadimento.

La massa - In fisica delle particelle le masse vengono espresse in unità energetiche<sup>[v]</sup> dai valori delle energie a riposo equivalenti alle masse secondo la relazione  $E = mc^2$ . Un altro aspetto molto importante è che una particella può decadere solo in un'altra di massa più piccola. Vale il principio di conservazione della massa-energia.

La carica elettrica - Tutte le particelle note o sono neutre o possiedono una carica elettrica. Non si conoscono processi nei quali la carica non si conservi.

Lo spin - In termini classici lo spin può essere assimilato ad una rotazione della particella intorno ad un proprio asse; viene misurato in unità di  $\hbar$  e può assumere solo valori interi (0,  $\pm 1$ , ...) e le particelle si chiamano *bosoni* o seminteri ( $\pm 1/2$ ,  $\pm 3/2$ ; ...) e le particelle si chiamano *fermioni*.

La vita media - La vita media di una particella può essere definita come *l'intervallo di tempo medio misurato da un orologio che viaggia con la particella fra la produzione e il decadimento spontaneo della particella in altre di massa minore*. Esistono particelle stabili (con vita media infinita [???) o talmente lunga che non è possibile misurare con le tecniche attuali) e particelle instabili (con vita media finita e misurabile con le tecniche attuali). La maggior parte delle particelle è instabile e decade in particelle stabili. Dal principio di indeterminazione si ha che  $t \approx \frac{h}{mc^2}$  e quindi la vita media di una particella è inversamente proporzionale alla sua energia.

Oggi si ritiene che esista un numero ristretto di particelle elementari che con le loro interazioni vengono descritte dal *Modello Standard*.

## 2 - Modello standard delle interazioni fondamentali

---

Le idee fondamentali riguardanti le particelle che attualmente chiamiamo elementari sono riassunte nel cosiddetto Modello Standard. Secondo tale modello, le particelle si dividono in due classi:

- i *fermioni* che rappresentano i costituenti della materia;

---

<sup>[iv]</sup> Gli acceleratori di particelle sono macchine costruite per creare nuove particelle.

<sup>[v]</sup> A tale scopo si usa come unità di misura l'elettronvolt (eV) che, si ricorda, è l'energia che possiede un elettrone accelerato da un potenziale di 1 Volt;  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ . Vengono utilizzati più frequentemente i multipli dell'eV: MeV ( $=10^6 \text{ eV}$ ) e GeV ( $=10^9 \text{ eV}$ ), valori tipici delle masse delle particelle; solo di recente si è giunti all'utilizzo del TeV ( $=10^{12} \text{ eV}$ ).

- i *bosoni vettori* che sono i portatori (quanti) delle forze agenti fra le particelle.

Nella tabella 1 sono elencati i fermioni e alcune loro caratteristiche; hanno tutti spin  $\frac{1}{2}$  in unità di  $\hbar$  e si possono raggruppare in tre famiglie, ognuna delle quali comprende otto unità di materia e otto di antimateria per un totale di 48 (!) particelle elementari (?) diverse<sup>[vi]</sup>.

Tabella 1 - I fermioni				
	Leptoni		Quark	
1 <sup>a</sup> generazione	E (elettrone) 0,511 MeV	$\nu_e$ (neutrino elettronico) < 7 eV	u (up) 3,5 MeV	d (down) 3,5 MeV
2 <sup>a</sup> generazione	$\mu$ (muone) 105,7 MeV	$\nu_\mu$ (neutrino muonico) < 0,25 MeV	c (charme) 1,8 GeV	s (strange) 520 MeV
3 <sup>a</sup> generazione	$\tau$ (tau) 1,777 GeV	$\nu_\tau$ (neutrino tauonico) < 31 MeV	t (top) 172 GeV	b (bottom) 5,2 GeV
Carica elettrica	-1	0	+2/3	-1/3
Carica di colore	incolore	incolore	rosso verde blu	rosso verde blu
Forza di colore (forte)	No	no	si	Si
Forza elettromagnetica	Si	no	si	Si
Forza debole	Si	si	si	Si

Nella tabella 2 sono elencati i bosoni vettori, tutti a spin intero, sono chiamati anche *particelle di campo* e sono responsabili della formazione delle particelle complesse, in pratica di quasi tutta la materia che ci circonda.

Tabella 2 - I bosoni vettori

<sup>[vi]</sup> Ci sono diversi fisici che ritengono che i fermioni non siano particelle elementari, ma che abbiano una struttura. Per il momento non ci sono però indizi in questo senso.

Forza	Raggio di azione	Intensità	Bosone portatore	Massa a riposo (GeV/c <sup>2</sup> )	Spin	Carica elettrica	Bosoni vettori
Forte	$< 10^{-15}$ m	1	Gluoni	0	1	0	non osservati, confinati nelle particelle
Debole	$< 10^{-18}$ m	$\sim 10^{-13}$	W <sup>+</sup> W <sup>-</sup> Z <sup>0</sup>	81 81 92	1	+1 -1 0	Osservati
Elettromagnetica	infinito	$10^{-2}$	Fotone	0	1	0	Osservato
Gravitazionale <sup>[vii]</sup>	infinito	$10^{-38}$	gravitone	0	2	0	Ipotizzato

### 3 - I Fermioni

I fermioni prendono il nome dallo scienziato italiano Enrico Fermi. Nel Modello Standard ve ne sono due tipi: i leptoni e i quark.

#### I leptoni

Dal greco λεπτος che significa sottile, leggero, sono particelle subatomiche che si ritiene siano puntiformi (o quanto meno con un diametro inferiore a  $10^{-19}$  m) e fondamentali. Essi sono suddivisi in tre famiglie: gli elettroni, i muoni, le particelle tau, e i loro rispettivi neutrini (vedi tabella 1).

Tutti i leptoni conosciuti hanno carica negativa o neutra. Ci sono sei tipi di leptoni: tre con carica negativa e tre con carica neutra.

L'elettrone, il muone e il tau si differenziano per la loro massa. In tal senso, una delle sfide più importanti della fisica moderna riguarda proprio la ricerca del motivo di questa differenza in massa. Il Modello Standard prevede l'esistenza di una particella molto massiva (il bosone di Higgs) che determinerebbe, a seconda dell'interazione con i leptoni, la loro massa. È stato appena completato (marzo 2007) al CERN di Ginevra il più potente acceleratore di particelle al mondo: LHC (= Large Hadron Collider)<sup>[viii]</sup> con il quale si spera di osservare, seppure indirettamente, il bosone di Higgs.

<sup>[vii]</sup> La forza di gravità non è inserita nel Modello Standard. In questa (e in molte altre) trattazione viene inserita per completezza.

<sup>[viii]</sup> È stato progettato per ottenere collisioni tra protoni e tra ioni pesanti. La sua entrata in funzione, inizialmente prevista per la fine del 2007, è stata spostata alla primavera del 2008 per un incidente

Nel 1998 è stato dimostrato che i neutrini hanno una massa grazie all'osservatorio Super-Kamiokande situato in Giappone.

## I quark

La gran quantità di particelle "elementari" scoperte nell'immediato dopoguerra, ha portato alla necessità di ricercare unità più elementari. Questa ricerca ha portato alla costruzione del modello a quark<sup>[ix]</sup> che risulta molto efficace per descrivere la materia. Con esso si riesce a descrivere il quadro della materia nucleare mediante un numero assai ridotto di costituenti, forse veramente elementari. Questo modello non solo spiega con notevole successo la struttura di certe particelle, ma fornisce una serie di previsioni teoriche in accordo con i fatti sperimentali.

Nel 1964 M. Gell-Mann, e indipendentemente G. Zweig, considerarono ogni adrone (praticamente tutte le particelle conosciute soggette alla forza nucleare forte) formato dalla combinazione di tre unità di materia chiamate quark e indicate nel modello iniziale con i simboli  $u$  (up),  $d$  (down),  $s$  (strange). Oggi i quark sono sei come i leptoni.

Naturalmente la previsione teorica dei tre quark implicava quella dei tre anti-quark  $\bar{u}$ ,  $\bar{d}$ ,  $\bar{s}$ . Tutti gli adroni sono quindi particelle costituite da quark, furono classificati in due famiglie:

- i *barioni* (*antibarioni*) che rappresentano uno stato formato dalla combinazione di tre quark (antiquark);
- i *mesoni* che rappresentano uno stato formato dalla combinazione di un quark e di un antiquark.

Ogni struttura realizzata mediante le due norme precedenti portò a una particella esistente in natura; non solo tutte le possibili combinazioni permesse corrispondono a un adrone noto, ma non esistono particelle mancanti. Mentre la materia ordinaria è formata solo dai due quark più leggeri  $u$  e  $d$ , il quark strano  $s$  si trova solo in alcune particelle instabili. Il protone è formato dalla combinazione  $uud$ , il neutrone da  $udd$ .

Il modello con soli tre quark fu messo in crisi dalla scoperta di altre particelle che non potevano essere formate dall'iniziale terzetto. Fu quindi ampliato il modello aggiungendo un quarto quark, chiamato *charm* (fascino) e indicato con la lettera  $c$ . Successivamente è stato necessario ipotizzare l'esistenza di altri due quark chiamati *bottom* (basso) e *top* (alto) indicati con i simboli  $b$  e  $t$ <sup>[x]</sup>.

---

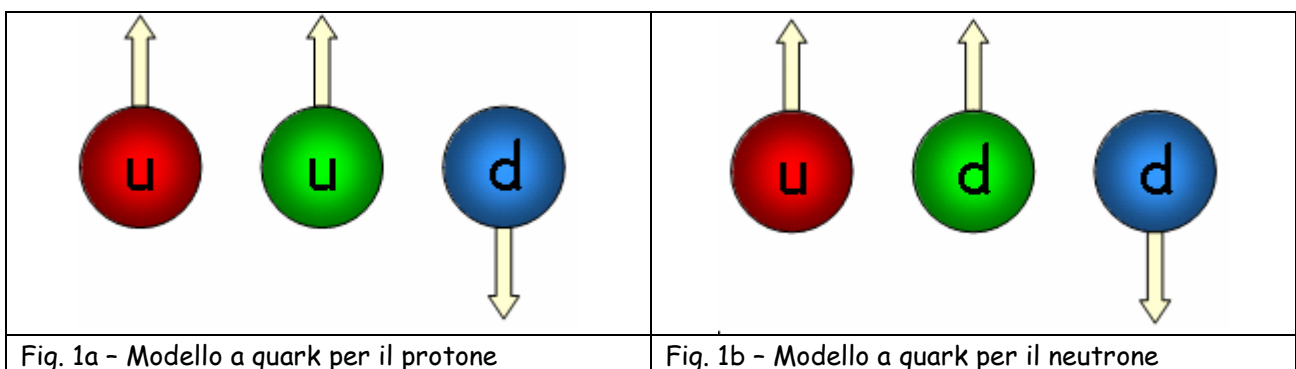
durante la costruzione avvenuto il 6 aprile 2007. Per saperne di più su LHC si può visitare il sito: <http://lhc.web.cern.ch/lhc/>.

<sup>[ix]</sup> Il nome quark deriva da "three quarks for Muster Mark", una frase senza senso contenuta nel romanzo *Finnegans Wake* di James Joyce.

<sup>[x]</sup> Il quark top è stato scoperto nell'aprile del 1994 al Fermilab di Chicago.

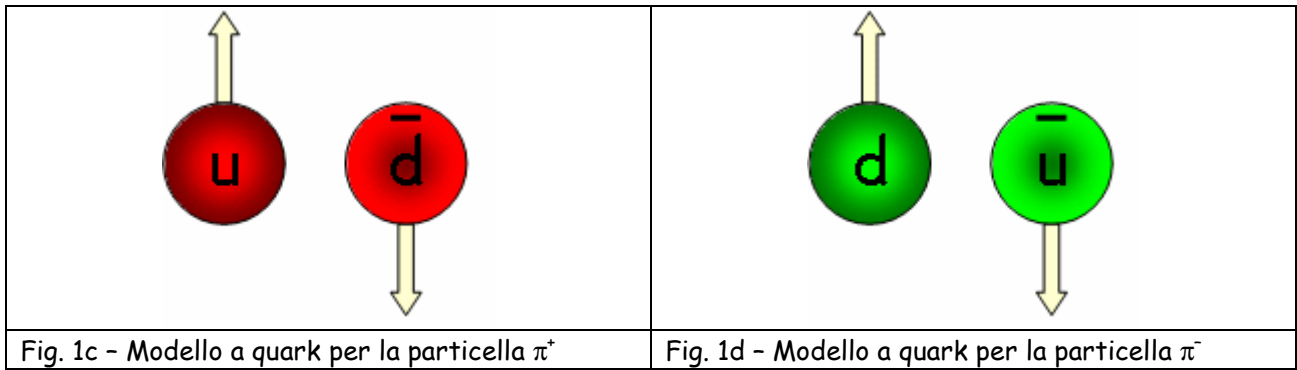
Una caratteristica dei quark è quella di possedere una carica frazionaria. Poiché il protone (uud) ha carica elettrica +1 e il neutrone (udd) ha carica elettrica 0, il quark u deve avere carica elettrica +2/3, mentre il quark d deve avere carica elettrica -1/3<sup>[xi]</sup>.

Un altro aspetto dei quark che ha creato diversi problemi ai fisici teorici è stato quello riguardante lo spin. Per ottenere correttamente i valori corrispondenti al momento angolare degli adroni, i quark devono avere uno spin pari a 1/2. Come tutte le particelle con spin semintero finora conosciute esse devono essere inquadrare secondo la logica insita nel principio di esclusione di Pauli. Ciò implica che in uno stesso stato non possono esistere due quark con gli stessi numeri quantici. Nel protone e nel neutrone, che sono formati da tre quark, questo sembra invece non valere. Questa difficoltà fu superata assegnando ai quark un numero quantico supplementare chiamato *colore*. Con l'aggiunta di questo nuovo attributo, ogni quark di un dato "sapore" (tipo, cioè up, down, ecc.) può mostrarsi in tre varietà distinte per il colore, chiamate B (blu, azzurro), G (green, verde) e R (red, rosso) senza mutare o perdere gli altri aspetti. Ai tre colori corrispondono tre *anticolori*. Ovviamente, si tratta solo di far apparire uno stesso oggetto con qualche cosa di diverso: il colore o l'anticolore sono solo etichette che non hanno nulla a che vedere con la policromia del nostro mondo. Con questa ipotesi è salvo il principio di esclusione. Infatti quando i quark si legano per formare un barione, pur se hanno lo stesso sapore, non si trovano nello stesso stato poiché si differenziano per il colore. Anche se la teoria del colore non implica nessuna nuova particella, l'aver applicato questa etichetta cromatica porta a triplicare l'attuale numero dei quark (diciotto particelle elementari).



<sup>[xi]</sup> Questo risultato si ottiene risolvendo il sistema  $\begin{cases} 2u + d = 1 \\ u + 2d = 0 \end{cases}$ , dove u indica la carica del quark up e d quella del quark down.





Per far sì che nella stessa particella non vi siano mai due quark con gli stessi numeri quantici (colore incluso) e per spiegare il meccanismo di formazione degli adroni è necessario aggiungere le due seguenti prescrizioni:

- ogni barione deve contenere un quark di diverso colore (nelle figure 1a e 1b il modello a quark per il protone e il neutrone);
- ogni mesone deve essere formato da una miscela realizzata da un colore con il proprio anticoloro (nelle figure 1c e 1d il modello a quark per le particelle  $\pi^+$  e  $\pi^-$ ).

Con queste norme ogni adrone, nel suo complesso, è "incolore". C'è una certa analogia tra la carica elettrica e la carica di colore, infatti, anche un atomo è costituito da cariche elettriche positive e negative, ma nel complesso è neutro. Inoltre, mentre la prima origina la forza elettromagnetica, che tiene insieme l'atomo, la seconda tiene uniti gli elementi di materia necessari per costruire gli adroni.

La teoria del campo di colore, sviluppata intorno al 1970, viene chiamata *cromodinamica quantistica*. Le forze tra i quark sono trasmesse da una classe di otto particelle dette *gluoni* (dalla parola *glue* = colla). I gluoni servono infatti per "incollare" fra loro i quark. Questi oggetti, non ancora sperimentalmente osservati allo stato libero, svolgono la stessa funzione dei fotoni del campo elettromagnetico.

Non sono stati mai osservati quark liberi. Tale confinamento nelle particelle subnucleari può essere spiegato con la carica di colore; la forza che agisce tra i quark colorati non diminuisce con la distanza ma si mantiene costante. Quando si cerca di separare un quark in un barione l'energia potenziale del sistema aumenta rapidamente fino a raggiungere valori molto elevati e, se non intervengono altri processi, da questa energia si crea una coppia quark e antiquark. Il nuovo quark ripristina la struttura originale del barione, mentre l'antiquark si associa al quark espulso per formare un mesone. I quark isolati non possono essere osservati per la stessa natura della forza forte: qualsiasi tentativo di isolare un quark si traduce nella creazione di uno o più nuovi adroni.



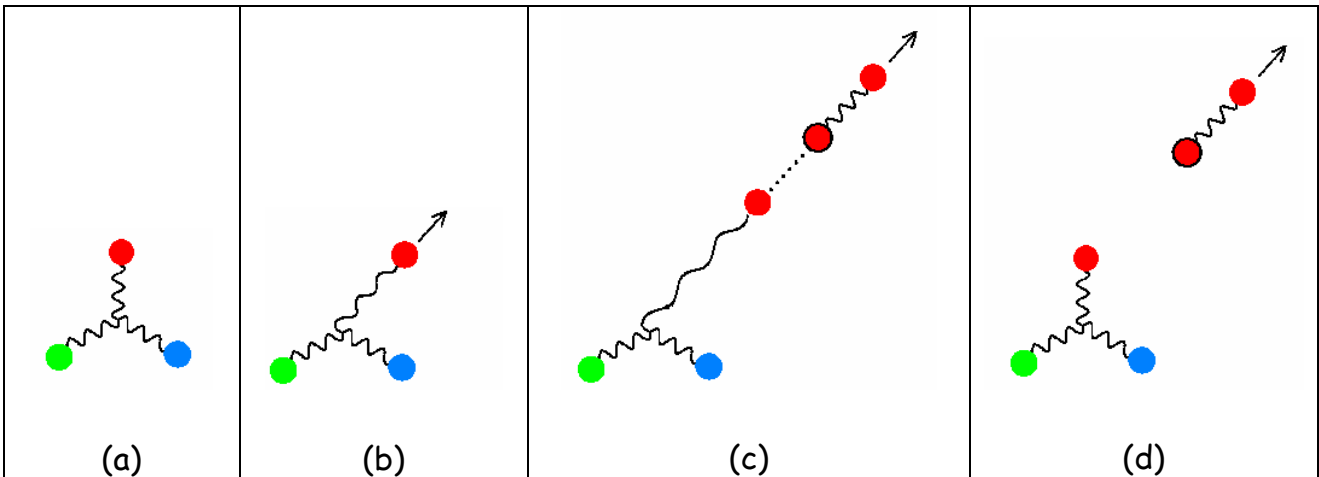


Fig. 2 - Il confinamento dei quark. Quando si cerca di separare un quark in un barione (a), (b), l'energia potenziale del sistema aumenta rapidamente fino a raggiungere valori sufficienti per la creazione di un quark e di un antiquark (c). Il nuovo quark ripristina la struttura originale del barione, mentre l'anti-quark si associa al quark espulso per formare un mesone (d).

#### 4 - I bosoni vettori: i quanti *mediatori* delle interazioni fondamentali

In natura sono stati scoperti quattro tipi di interazioni:

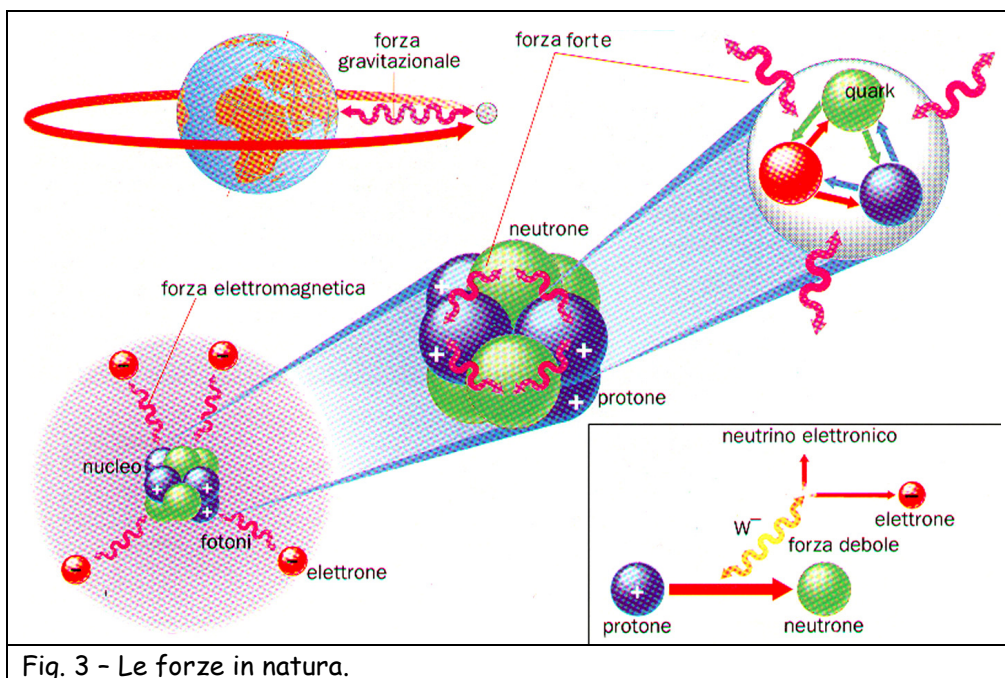


Fig. 3 - Le forze in natura.

- l'interazione gravitazionale, cui partecipano tutte le particelle che hanno massa;
- l'interazione elettromagnetica, cui partecipano tutte le particelle che hanno carica elettrica;
- l'interazione nucleare forte responsabile della stabilità dei nuclei atomici
- l'interazione nucleare debole responsabile del decadimento di alcune particelle.

Nel Modello Standard ogni interazione tra le particelle si svolge attraverso lo scambio di una particella intermedia, un bosone, chiamato anche *quanto mediatore*.

Dal principio di indeterminazione  $\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar$  e dalle relazione di Einstein  $E=mc^2$ , si ricava che  $\Delta m \sim \frac{\hbar}{c^2 \cdot \Delta t} = \frac{\hbar}{c \cdot \Delta s}$ , dove  $\Delta s = c \cdot \Delta t$  è il raggio d'azione della particella: la massa di un quanto mediatore è inversamente proporzionale al raggio d'azione.

### L'interazione gravitazionale

L'interazione gravitazionale, che è probabilmente la forza più familiare, non è compresa nel Modello Standard perché i suoi effetti sono piccolissimi nei processi tra le particelle. Anche se la gravità agisce su ogni cosa, è una forza molto debole quando non ha a che fare con grandi masse.

La teoria della gravitazione è la Relatività Generale che però non è una teoria quantistica; è questo che fa sì che per il momento nel Modello Standard siano descritte solo le altre tre interazioni.

### L'interazione elettromagnetica

Molte delle forze che sperimentiamo ogni giorno sono dovute all'interazione elettromagnetica nella materia. Come ci ha insegnato Maxwell, elettricità e magnetismo sono diverse facce di una stessa interazione, l'elettromagnetismo. La particella mediatrice dell'interazione elettromagnetica è il fotone.

L'interazione fra due cariche elettriche non si esplica in modo diretto e istantaneo, bensì viene trasmessa con velocità finita (quella della luce) a seguito dell'emissione e dell'assorbimento dei fotoni creati e assorbiti dalle cariche. Per esempio, quando due elettroni in moto relativo interagiscono (vedi figura 4), il primo elettrone emette un fotone e conseguentemente cambia direzione e velocità; tale fotone viene successivamente assorbito dal secondo elettrone. Il fotone scambiato è una particella *virtuale* in quanto non può essere operativamente individuata. Il fotone reale, quello della radiazione luminosa, possiede un'esistenza tanto lunga da poter essere sperimentalmente rivelato. Una particella virtuale non può apparire allo stato libero.

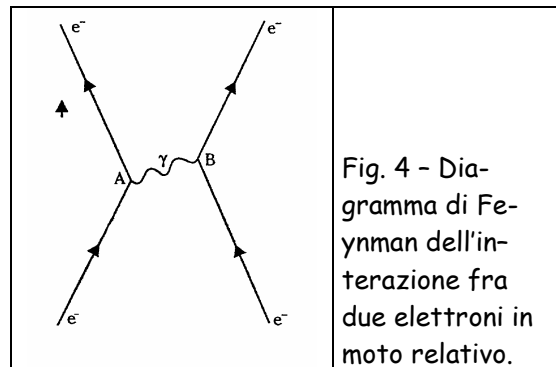


Fig. 4 - Diagramma di Feynman dell'interazione fra due elettroni in moto relativo.

Negli atomi ci sono un numero uguale di protoni ed elettroni, quindi sono elettricamente neutri; ma *che cosa tiene insieme gli atomi a formare le molecole, se questi non hanno carica elettrica?*

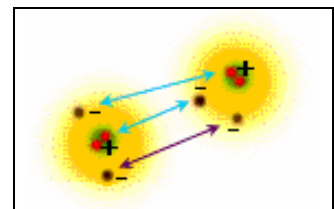


Fig. 5 - Forza elettromagnetica residua.

Negli atomi ci sono un numero uguale di protoni ed elettroni, quindi sono elettricamente neutri; ma *che cosa tiene insieme gli atomi a formare le molecole, se questi non hanno carica elettrica?*

Gli elementi carichi di un atomo possono interagire con gli elementi carichi di un altro atomo ed è questo che permette ai diversi atomi di legarsi insieme. Viene chiamata *forza elettromagnetica residua*.

### L'interazione nucleare forte

A causa della repulsione elettromagnetica tra i protoni, che hanno cariche uguali, ci si aspetterebbe che il nucleo di un atomo esplodesse. Invece esistono molti nuclei atomici stabili. Da dove viene l'energia necessaria a contrastare la repulsione elettromagnetica? Come detto sopra, i quark hanno una carica di colore e tra particelle dotate di carica di colore agisce l'interazione forte; la particella mediatrice dell'interazione forte è stata chiamata *gluone* (dall'inglese "glue" = colla).

Gli adroni però non hanno carica di colore, ma i quark che li costituiscono sì, perciò i quark di un protone possono legarsi con i quark di un altro protone (o di un neutrone), anche se i protoni (e i neutroni) di per sé stessi non hanno carica di colore. Questa viene chiamata *forza di colore residua*, ed è sufficientemente intensa da superare la repulsione elettromagnetica tra i protoni.

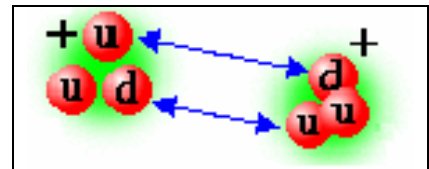


Fig. 6 - Forza di colore residua

### L'interazione nucleare debole

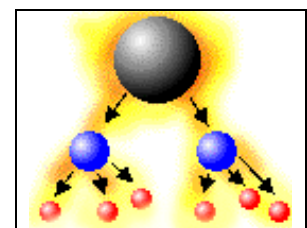
Infine l'interazione debole è responsabile del fatto che tutti i quark e tutti i leptoni di massa maggiore decadono per produrre i quark più leggeri ed elettroni.

La somma delle masse delle particelle prodotte dal decadimento debole è sempre inferiore alla massa della particella di partenza; per questo motivo la materia stabile che ci circonda contiene solo elettroni e i quark più leggeri (up e down).

Quando un quark o un leptone cambia tipo (per esempio un muone diventa un elettrone), si dice che cambia *sapore*. Tutti i cambiamenti di sapore sono dovuti all'interazione debole. Le particelle mediatrici dell'interazione debole sono i bosoni  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ .

Poiché il raggio d'azione dell'interazione debole è estremamente piccolo la massa dei quanti doveva essere notevolmente grande. Le particelle  $W^\pm$  (da *weak interaction*) e  $Z^0$  sono state trovate nel 1983 da un gruppo di ricercatori (circa 200) diretti dall'italiano Carlo Rubbia<sup>[xii]</sup> presso un acceleratore di particelle del CERN di Ginevra. I bosoni carichi  $W^+$  e  $W^-$  hanno una massa di circa 81 GeV.

Nonostante le notevoli differenze tra la forza elettromagnetica e la forza debole, è stata mostrata una stretta parentela fra le due interazioni. Questa affinità, convalidata dalla scoperta del quanto mediatore  $Z^0$  da parte dello stesso Rubbia, tende ormai a considerare le due interazioni come la manifestazione di un'unica forza chiamata *elettrodebole*.



ulteriori decadimenti non sono possibili

Fig. 7 - Una particella che decade sparisce e al suo posto appaiono due o più particelle.

<sup>[xii]</sup> Per aver progettato e diretto la ricerca che ha condotto a questa scoperta Rubbia ha ricevuto il premio Nobel per la fisica nel 1984; insieme a lui ha ricevuto la stessa onorificenza anche l'olandese S. Van der Meer, per l'alto contributo tecnologico alla ricerca.

Nella figura 8 viene spiegato con un esempio lo scambio dei mediatori delle forze.



Fig. 8 - Mediatori delle forze. Immaginiamo di vedere una scena del genere: una persona improvvisamente cerca di afferrare un qualche oggetto invisibile e viene spinta indietro dall'impatto. Si può immaginare che abbia preso un pallone invisibile di cui si vedono gli effetti sul giocatore.

I giocatori che si scambiano il pallone sono le particelle materiali, il pallone è la particella mediatrice di forza. Quelle che chiamiamo comunemente "forze" sono gli effetti dei mediatori sulle particelle materiali.

La teoria dei quanti mediatori viene chiamata anche teoria dei campi e il suo successo ha indotto i fisici a ritenere che anche la forza gravitazionale deve essere trasmessa, per giustificare il raggio d'azione infinito, da una particella di massa nulla che viene chiamata *gravitone*. Già da alcuni anni in diversi laboratori sono stati approntati esperimenti che dovrebbero rilevare tali particelle; i risultati sono per ora negativi a causa della debolezza dell'interazione gravitazionale. Inoltre, per analogia con le altre interazioni deve valere anche il dualismo onda-corpuscolo e quindi alla gravità vengono associate anche delle onde gravitazionali prodotte da masse accelerate. Importanti esperimenti per la rilevazione delle onde gravitazionali vengono svolti in tutto il mondo e alcuni molto promettenti anche in Italia<sup>[xiii]</sup>.

## 5 - Le teorie di unificazione

II *Modello Standard*, pur essendo privo di incoerenze concettuali, non soddisfa pienamente i fisici, soprattutto perché:

[<sup>xiii</sup>] Un'antenna gravitazionale è in funzione da alcuni anni presso i Laboratori dell'INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare - <http://www.infn.it/indexit.php>) di Frascati e un'altra, denominata VIRGO (<http://www.ego-gw.it/>), nata da una collaborazione italo-francese con tecnologia d'avanguardia, sta per entrare in funzione a Cascina (vicino Pisa). La debolezza delle onde gravitazionali (l'effetto del passaggio di un'onda gravitazionale è quello di produrre delle variazioni di lunghezza dell'ordine di  $10^{-18}$  m) le rende però di difficile rilevazione.

- le particelle considerate fondamentali, piuttosto numerose, sono distribuite in tre famiglie, quando ne basterebbe una sola per costruire tutta la materia ordinaria (quella con cui abbiamo a che fare ordinariamente);
- rimane ancora completamente da chiarire se, oltre alle prime tre famiglie, ne possano esistere altre;
- non si riesce a spiegare la distribuzione delle masse, in particolare quella dei mediatori delle forze, alcuni dei quali sono a massa nulla, mentre altri hanno masse molto grandi.

Tutti questi problemi, e molti altri che tralascieremo, in questi ultimi anni hanno indotto i fisici ad elaborare nuovi modelli, soprattutto perché molti sono convinti che, in qualche modo, si arriverà a costruire una "legge onnicomprensiva" che possa riuscire a rendere conto di ogni fenomeno naturale. Una "teoria del tutto" che possa unificare tutte le interazioni fondamentali.

In questa direzione il maggiore consenso è stato per ora ottenuto dalla GUT (*Grand Unified Theory*), elaborata nel 1974 da Glashow e poi completata da Salam e Weinberg<sup>[xiv]</sup>. Queste idee, che hanno come matrice la teoria del big bang sono essenzialmente basate sul presupposto che le forze appaiono diverse in conseguenza di una serie di transizioni che hanno diviso le forze fondamentali man mano che l'Universo si raffreddava dopo la grande esplosione. Se si potessero ripristinare le condizioni che hanno dato origine all'Universo, probabilmente sparirebbe ogni differenziazione fra le interazioni e le loro manifestazioni materiali e il mondo ritornerebbe nuovamente in uno stato altamente simmetrico. Il risultato sperimentale raggiunto da Rubbia con la scoperta dei bosoni  $W^-$ ,  $W^+$  e  $Z^0$  viene visto come un chiaro segnale che le idee della GUT sono esatte.

Il problema per riuscire in questa sintesi dei fenomeni e della varietà delle forze, è puramente energetico; per verificare il rapporto di parentela fra la forza elettromagnetica e quella debole è stato necessario portare i protoni negli acceleratori a una energia intorno ai 100 GeV, la grande unificazione prevede una perfetta simmetria tra le tre forze a circa  $10^{15}$  GeV. Come mostrato in figura 9 man mano che aumenta l'energia in gioco le forze tendono a confluire, proprio come prevede la GUT. Nell'ipotesi della "teoria del tutto", anche la forza gravitazionale si dovrebbe unire alle altre e per avere ciò si ritiene che si debbano raggiungere energie dell'ordine di  $10^{19}$  GeV.

E' bene premettere che la speranza di raggiungere le energie necessarie per verificare sperimentalmente anche solo la GUT è per ora vana. Gli ordini di grandezza sono infatti al di fuori delle attuali possibilità tecnologiche e forse anche al di fuori di quelle future. Basti pensare che l'energia di  $10^{15}$  GeV supera di gran lunga i limiti dei

---

<sup>[xiv]</sup> Per le ricerche sulla unificazione delle forze fondamentali questi fisici sono stati insigniti del premio Nobel.



più grandi acceleratori di particelle, anche in fase di progetto<sup>[xv]</sup>. Poiché la verifica sperimentale sembra completamente preclusa, i fisici stanno cercando qualche prova indiretta per confermare la validità della teoria; conferme arriverebbero se si riuscisse ad evidenziare il decadimento protone.

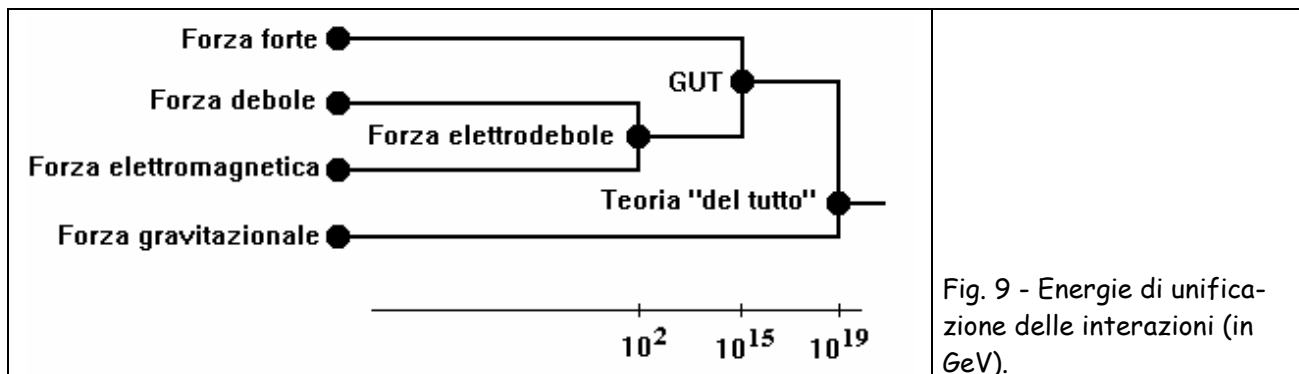


Fig. 9 - Energie di unificazione delle interazioni (in GeV).

Il decadimento del protone è un fenomeno non ancora osservato, ma previsto da alcuni modelli della GUT. Per quanto ne sappiamo oggi il protone è stabile e questo è dovuto alla conservazione del numero barionico (in qualunque processo elementare il numero dei barioni si conserva) e, essendo il protone il barione più leggero, non può decadere. Tuttavia, molti modelli teorici della GUT, prevedono processi di non conservazione del numero barionico, tra cui, appunto, il decadimento del protone. Quindi analizzando il decadimento protonico è possibile ricavare informazioni sulle teorie di grande unificazione. Per questo motivo nel mondo sono attivi diversi esperimenti che hanno come obiettivo quello di misurare la vita media del protone. Attualmente esistono solo dei limiti sperimentali per i diversi possibili tipi di decadimento, tutti molto maggiori della vita stimata per l'universo (circa  $1,4 \cdot 10^{10}$  anni). Ad esempio, uno dei modi di decadimento maggiormente studiato è:  $p \rightarrow e^+ + \pi^0$ , con un limite inferiore per la vita media parziale pari a  $1,6 \cdot 10^{33}$  anni.

Diversi fisici hanno elaborato teorie GUT dette di supersimmetria. Queste teorie suppongono che ogni particella che osserviamo ha una particella "ombra" (in inglese, "shadow"), massiva: per esempio, per ogni quark ci dovrebbe essere un corrispondente "squark" (shadow-quark) che lo segue dappertutto. Nessuna particella della supersimmetria è ancora stata osservata, ma dall'autunno 1995 al CERN cercano, con esperimenti sotterranei, l'"ombra" del bosone W, mentre al Fermilab si stanno cercando i corrispondenti "ombra" di quark

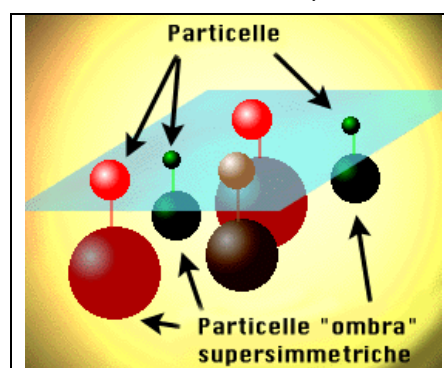


Fig. 10 - Particelle supersimmetriche

<sup>[xv]</sup>LHC, quando sarà operativo, potrà accelerare protoni ad un'energia di 7 TeV, per una energia totale nel centro di massa, per ogni collisione protone-protone, di 14 TeV; per le collisioni fra ioni pesanti, come gli ioni di piombo, si raggiungerà un'energia di collisione di 1150 TeV, valori ben lontani da quelli richiesti per la GUT.

e gluoni. Una delle particelle della supersimmetria, il "neutralino" potrebbe essere quella che compone la materia oscura mancante<sup>[xvi]</sup>.

Come se non bastasse, recenti osservazioni svolte dal satellite WMAP (<http://map.gsfc.nasa.gov/>) hanno evidenziato una accelerazione nell'espansione dell'Universo; ciò ha portato all'ipotesi che debba esistere una sorta di "gravità negativa", chiamata anche "energia oscura". Non si sa molto sulla sua natura, ma che dovrebbe costituire il 74% dell'Universo, contro il 22% della materia oscura e il 4% della materia ordinaria.

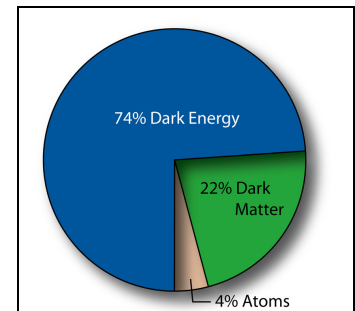


Fig. 11 - I risultati del satellite WMAP.

Un ultimo problema legato al fatto che attualmente non è possibile inserire nel Modello Standard anche la teoria della gravitazione. La migliore teoria che abbiamo oggi per descrivere la gravità è la Relatività Generale, ma questa teoria non è quantistica, nel senso che, per metterla in maniera semplice, non contempla il principio di indeterminazione. Ci sono buone ragioni che fanno pensare che tutte le interazioni in natura siano "quantistiche" al livello fondamentale, anche se alle scale di energia alle quali siamo abituati ciò non viene percepito (ad es. l'elettromagnetismo). Il problema è che, a differenza dell'elettromagnetismo e delle altre due interazioni esistenti in natura, non si riesce a "quantizzare" la relatività generale, nel senso che l'applicazione delle tecniche standard per passare dalla teoria classica a quella quantistica se applicate alla relatività danno dei risultati assurdi. Allora quello che si vorrebbe fare è costruire una teoria tutta nuova che, per metterla di nuovo in maniera semplice, permetta di inglobare il principio di indeterminazione nella gravità e si riduca alla relatività generale laddove essa funziona bene.

Oggi ci sono solo due teorie promettenti su questa strada: la teoria delle stringhe (<http://superstringtheory.com/>) e la cosiddetta "loop quantum gravity" ([http://www.edge.org/3rd\\_culture/smolin03/smolin03\\_index.html](http://www.edge.org/3rd_culture/smolin03/smolin03_index.html)). La teoria delle stringhe sembra ammettere cinque formulazioni abbastanza differenti, ma in realtà queste cinque teorie non sono altro che cinque "versioni" di un'unica teoria sottostante ancora più fondamentale, che oggi viene definita "Teoria M" (M non si sa bene per cosa stia).

Allo stato attuale delle cose, non sembra che le due teorie convergano verso una formulazione onnicomprensiva, ma non lo si può escludere. In alternativa, si deve

---

<sup>[xvi]</sup> La materia oscura, detta anche massa mancante, fu proposta per spiegare la mancanza di massa dello spazio in relazione al valore di gravità. La forza di gravità di Newton dice che massa e gravità sono in relazione. In particolare l'intensità della forza gravitazionale è proporzionale alla massa (un corpo con una grande massa ha anche una forte gravità). Nel 1933, l'astronomo Fritz Zwicky, studiando gli ammassi di galassie, osservò che il valore di gravità negli ammassi era di gran lunga maggiore alla forza gravitazionale prevista in base alla materia visibile. Infatti, c'era massa solo per il 10% della gravità totale dell'ammasso. Questo vuol dire che il 90% della gravità che teneva insieme l'ammasso di galassie non poteva essere spiegato con la materia visibile.



sperare che un qualche tipo di osservazione permetta di selezionare la teoria che la predice in maniera più accurata. La questione, insomma, è ancora aperta.

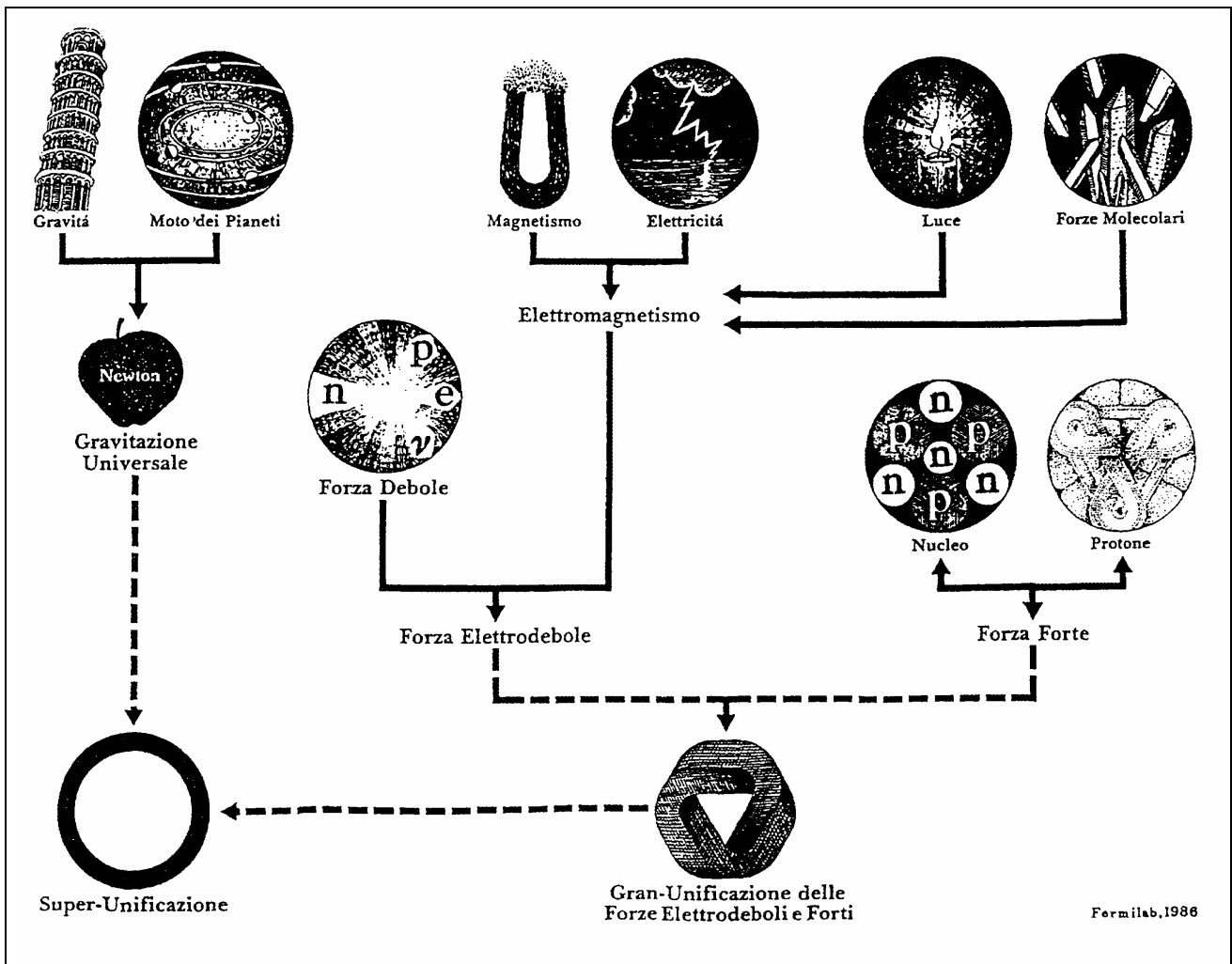


Fig. 11 - Le teorie di unificazione da un poster realizzato dal Fermilab. Le linee continue rappresentano le unificazioni già note e sperimentate, quelle tratteggiate le teorie ancora in fase di studio e che, pur essendo generalmente accettate, non hanno avuto ancora nessuna verifica sperimentale.