

Alla ricerca dei costituenti minimi della materia: le particelle elementari?

Carlo M. Becchi, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Genova

Riassunto

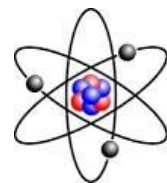
Si intende fornire un quadro storico breve, ma aggiornato agli ultimi eventi, della ricerca dei costituenti minimi della materia, dagli atomi, alle particelle e ai loro componenti¹.

Gli inizi.

La curiosità umana e l'interesse alla costituzione della materia e segnatamente ai processi che la coinvolgono, come, per esempio, la combustione, diedero origine, nella seconda metà del '600 alla chimica moderna². Fu Boyle, col suo libro *The Sceptical Chymist*, a introdurre i concetti di elemento chimico e di composto affermando che la materia è formata da atomi di specie diverse. Durante l'800 si precisarono le idee circa la natura degli atomi le cui proprietà chimiche sono determinate da un numero intero Z , detto appunto numero atomico. Si scoprì tra l'altro che gli atomi sono piccolissimi; il loro raggio, dell'ordine di un decimo di milionesimo di millimetro, fu stimato da Loschmid del 1865³.

La classificazione delle specie atomiche e delle loro proprietà che ha portato alla famosa sintesi di Mendeleev⁴ si è col tempo arricchita anche a causa della scoperta degli isotopi (1907)⁵, cioè di atomi con le stesse proprietà chimiche, ma con massa diversa. La scoperta degli isotopi portò alla classificazione degli atomi in funzione di due numeri interi, il peso A e il numero Z .

Il modello atomico sviluppato nel 1911 da Rutherford⁶ dopo la scoperta dell'elettrone da parte di Thomson (1897)⁷, prevede un nucleo di carica positiva, circondato da elettroni orbitanti. Nel nucleo, il cui raggio è circa centomila volte più piccolo di quello dell'atomo, è concentrata quasi tutta la massa atomica.



Questo modello appena proposto ha posto seri problemi fra cui prima di tutto quello della stabilità; secondo la fisica classica gli elettroni orbitanti intorno al nucleo perderebbero energia per irraggiamento finendo sul nucleo. La soluzione di questi problemi ha dato origine alla meccanica quantistica. In

¹ Seminario tenuto il 26 marzo 2013 presso il Palazzo Ducale di Genova.

² <http://it.wikipedia.org/wiki/Chimica>

³ http://en.wikipedia.org/wiki/Johann_Josef_Loschmid

⁴ http://it.wikipedia.org/wiki/Tavola_periodica_degli_elementi

⁵ <http://www.treccani.it/enciclopedia/isotopi/>

⁶ http://it.wikipedia.org/wiki/Modello_atomico_di_Rutherford

⁷ http://it.wikipedia.org/wiki/Joseph_John_Thomson

particolare la stabilità dell'atomo è spiegata in termini qualitativi in base al principio d'indeterminazione di Heisenberg. Attualmente la meccanica quantistica, tramite l'equazione di Schroedinger, rende ampiamente conto di tutte le proprietà atomiche, in particolare, oltre che delle dimensioni, dell'energia di legame atomico. L'energia necessaria per estrarre un elettrone da un atomo corrisponde tipicamente a quella acquisita da un elettrone attraversando una differenza di potenziale elettrico dell'ordine del Volt. Per questa ragione qualche Volt è il tipico ordine di grandezza della tensione di una pila elettrica. Inoltre è molto utile in fisica atomica l'uso di un'unità di energia particolare, l'*elettronvolt*, abbreviata in eV che è appunto l'energia acquistata da un elettrone attraversando una differenza di potenziale elettrico di un Volt. Nella fisica subatomica si usano i multipli di questa unità: KeV, MeV, GeV e TeV, ciascuna mille volte più grande della precedente.

Il successo della meccanica quantistica ha spinto la ricerca dei costituenti ultimi della materia verso lo studio della struttura dei nuclei atomici.

I nuclei

Negli anni intorno al 1930 iniziarono le ricerche vere e proprie sulla costituzione dei nuclei. Il passo fondamentale fu la scoperta del *neutrone* dovuta a Chadwick⁸ nel 1932. In base a questa scoperta i nuclei atomici furono visti come aggregati di particelle di due soli tipi, il *protone*, cioè il nucleo più piccolo con la carica opposta all'elettrone, e il neutrone. I nuclei differiscono unicamente per il numero dei protoni (Z) e quello dei neutroni ($A-Z=N$), dove A è il peso atomico.

Sorse peraltro un problema nuovo; mentre gli atomi sono tenuti legati da forze di tipo elettrico, qual è la natura delle forze che aggregano in nuclei? Il primo tentativo di risposta venne da Yukawa che nel 1935⁹ sulla base della teoria Quanto-Relativistica dei campi di forze sviluppata da Dirac nel 1928¹⁰, ipotizzò l'esistenza di una nuova particella "*elementare*", il mesone. Il modello di Yukawa assimilava i nuclei a gocce di un liquido formato da protoni e neutroni. Questo modello rendeva conto delle dimensioni nucleari e del valore delle energie di legame per costituente che sono alcuni milioni di volte più grandi di quelle atomiche. Il valore dell'energia di legame è all'origine del notevole impegno rivolto alla costruzione di centrali nucleari ed è apparso in tutta evidenza dopo lo scoppio degli ordigni nucleari alla fine della seconda guerra mondiale. Le interazioni nucleari che coinvolgono la particelle di Yukawa furono chiamate "*interazioni forti*" a causa della loro intensità.

In realtà il quadro teorico, nella sua straordinaria semplicità, non teneva conto dall'esistenza della *radioattività (beta)* scoperta nel 1896 da Becquerel¹¹. Nel 1934 la radioattività beta fu interpretata da Fermi, sulla base della teoria quanto-relativistica di Dirac, come la trasmutazione del neutrone in una coppia protone-elettrone. Peraltro, in base ai principi fondamentali della meccanica, che impongono la conservazione di energia e momento della quantità di moto, la coppia protone-elettrone deve essere accompagnata da un'altra particella neutra, al tempo di Fermi del tutto ipotetica, che fu chiamata

⁸ http://it.wikipedia.org/wiki/James_Chadwick

⁹ http://it.wikipedia.org/wiki/Hideki_Yukawa

¹⁰ http://it.wikipedia.org/wiki/Paul_Dirac

¹¹ http://en.wikipedia.org/wiki/Henri_Becquerel

“*neutrino*”. In base alla interpretazione di Fermi il decadimento nucleare di tipo beta è una manifestazione di una nuova interazione che coinvolge protone-neutrone ed elettrone-neutrino, molto meno intensa di quella elettromagnetica e con raggio particolarmente corto. L’interazione ipotizzata da Fermi è detta *interazione debole*.

Le interazioni significative a livello subatomico sono quindi tre, quella nucleare forte, quella elettromagnetica e quella debole. Ovviamente la gravità agisce anche a quel livello, ma in forma talmente debole da risultare inapprezzabile.

La teoria delle forze in ambito Quanto-Relativistico e le idee di Dirac.

Recentissime false “scoperte” hanno richiamato l’attenzione del pubblico sull’impossibilità decretata dalla relatività di Einstein di inviare segnali e compiere azioni a distanza con velocità superiori a quella della luce. Questa impossibilità implica un vincolo sulla natura delle forze scambiate fra corpi non a diretto contatto come quelle di origine gravitazionale o elettromagnetica o anche quelle ipotizzate da Yukawa. Il vincolo impone il collegamento delle forze ai cosiddetti “*campi*” che altro non sono che attributi dinamici dello spazio. In questi termini infatti Maxwell nel 1864¹² propose la sua teoria dell’elettromagnetismo e Einstein, nel 1916¹³, quella del campo di gravità. In particolare il campo di gravità ha una diretta interpretazione geometrica dato che corrisponde a una vera e propria deformazione delle distanze.

Vediamo ora come la necessità di campi dinamici, cioè caratterizzati da proprie leggi di evoluzione nel tempo, è legata all’esistenza del limite sulla velocità di cui si è detto sopra. Il punto cruciale è che le forze non possono essere considerate in modo rigido, cioè dipendenti solamente dalla distanza dalle sorgenti come la legge di gravità di Newton a quella delle forze elettriche di Coulomb. Infatti se così fosse e si spostassero a un certo istante le sorgenti del campo, per esempio le cariche elettriche, l’effetto di quest’azione raggiungerebbe istantaneamente i punti lontani dalle cariche mentre invece esso deve propagarsi nello spazio con velocità non superiore a quella della luce. Di conseguenza le forze devono dipendere da proprietà locali dello spazio, i campi appunto, che devono propagarsi come fanno le onde su una corda elastica o sulla superficie di un liquido. Peraltro, oltre a ubbidire alle leggi della relatività, queste onde devono soddisfare quelle della meccanica quantistica che impone, come è ben noto, la trasmissione dell’energia sotto forma di “*quanti*”. Dirac mostrò che i quanti di energia portati da un campo non sono altro che particelle la più nota delle quali è il fotone ipotizzato da Einstein nel 1905 nella sua interpretazione dell’effetto foto-elettrico¹⁴. L’argomento di Dirac si basa sul fatto che in relatività energia e quantità di moto sono strettamente collegate.

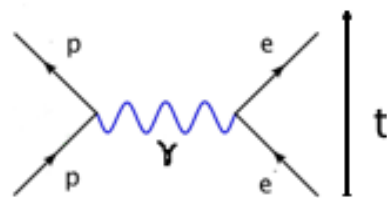
Molto rozzamente possiamo riassumere quanto risulta dalla teoria di Dirac dicendo che le forze in una *teoria quanto-relativistica* sono *scambiate* tramite *particelle puntiformi dette anche bosoni intermedi*.

¹² http://it.wikipedia.org/wiki/James_Clerk_Maxwell

¹³ http://it.wikipedia.org/wiki/Relativit%C3%A0_generale

¹⁴ http://it.wikipedia.org/wiki/Effetto_fotoelettrico

A titolo di esempio in figura è schematizzato un processo d'interazione *elementare* elettromagnetica con scambio di un fotone fra elettrone e protone. Il tempo cresce dal basso verso l'alto.



Reciprocamente Dirac afferma che a ogni particella corrisponde un campo. Nel caso di particelle con massa, il raggio di azione del campo di forze risulta inversamente proporzionale al valore **m** della massa stessa secondo la formula:

$$R = h / (2\pi mc),$$

dove **c** è la velocità della luce e **h** la costante di Planck che è la costante di proporzionalità fra l'energia **E** del quanto e la sua frequenza **v**:

$$E = hv$$

Per questa ragione la particella ipotizzata da Yukawa doveva avere massa pari a circa 300 masse elettroniche cioè a 1/6 di quella del protone o del neutrone. Un'altra conseguenza del dualismo particella-campo e della natura del campo quale attributo dello spazio, è la necessità che per ogni particella con carica, come l'elettrone, ne esista un'altra con carica opposta. Infatti la neutralità dello spazio esclude ogni preferenza per un segno particolare della carica. Questa particella viene chiamata "*anti-particella*", ed è un costituente dell'*anti-materia*. Le particelle interagendo con le anti-particelle possono annichilarsi, per esempio, in fotoni, o invece i fotoni in prossimità di nuclei atomici possono trasformarsi in coppie particella-antiparticella. Si tratta di processi che dominano l'interazione dei *raggi cosmici*, particelle di alta energia di origine cosmica, con l'atmosfera terrestre. Un paradosso quantistico che si affianca al dualismo onda-corpuscolo consiste nel fatto che le particelle, sebbene puntiformi, possono avere proprietà rotatorie (in inglese *spin*=trottola), che appaiono nel trasporto di un proprio momento della quantità di moto.

Un altro aspetto della teoria quanto-relativistica è costituito dalle *simmetrie* che caratterizzano i campi, fra queste le simmetrie di "*gauge*" che agiscono indipendentemente in punti diversi sono associate a *bosoni intermedi vettoriali* come i fotoni.

Va notato che nella trattazione delle interazioni reali un processo elementare come quello indicato sopra in figura va iterato un numero indeterminato di volte. Spesso questo crea notevoli problemi dato che quanto risulta dall' iterazione può apparire completamente diverso dal processo elementare. Il risultato finale può, per esempio, annullarsi o, al contrario, generare effetti come il confinamento di cui parleremo fra breve, o, infine, al crescere dell'energia, risultare inconsistente con i principi generali della relatività indicando che la descrizione del processo elementare va corretta. In conclusione una trattazione esatta di un processo di interazione della teoria quantistica dei campi è quasi sempre difficile e foriera di sorprese. Con l'eccezione della teoria attuale delle interazioni forti, la QCD di cui parleremo fra poco, tutti i modelli delle interazioni elementari, elettrodinamica quantistica compresa, sono incompleti sopra un'energia che dipende dal modello, in elettrodinamica questa energia è enorme.

La situazione degli anni 30 del '900.

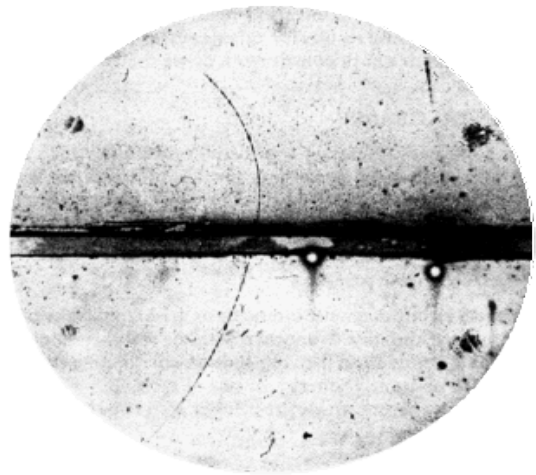
Come si è già detto all'inizio degli anni '30 i nuclei vennero identificati con stati di aggregazione e interazione di protoni e neutroni, particelle che furono chiamate "barioni", cioè costituenti *pesanti*, mentre elettrone e neutrino, quest'ultimo ipotetico, sono detti "leptoni", cioè costituenti *leggeri*. I costituenti elementari sono dunque barioni e leptoni e le rispettive antiparticelle. D'altra parte ai campi di forza elettromagnetici e forti, erano associati rispettivamente il fotone e il mesone π , ipotetica particella di massa intermedia.

La semplicità dello schema impose l'idea delle "particelle elementari". Quelle allora note o di cui si era ipotizzata l'esistenza sono inquadrata nella tabella qui a lato. Le particelle della prima riga, che hanno interazioni nucleari forti ed elettromagnetiche, oggi sono chiamate "adroni", quelle della seconda riga, leptoni e fotone, hanno interazioni deboli e/o elettromagnetiche. Restano fuori schema le particelle associate alle interazioni deboli e gravitazionali.

mc^2	937 MeV	938 MeV	140 MeV
carica	1	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
	p protone	n neutrone	π mesone
mc^2	0	500 keV	0
carica	0	-1	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν neutrino	e elettrone	γ fotone

Le scoperte sperimentali nel periodo 1930-50.

In questo quadro la fisica si rivolse alla ricerca delle particelle ipotizzate e di altre eventuali. Per questo si studiarono i prodotti della radioattività naturale e delle interazioni dei raggi cosmici con la materia. La necessità di alte energie era dovuta al fatto che per produrre una particella con massa m è necessaria un'energia superiore a $E=mc^2$. L'antiparticella dell'elettrone, il positrone, fu scoperta da Anderson nel 1932¹⁵, nei prodotti delle interazioni dei raggi cosmici (figura a lato). Nel 1937 lo stesso Anderson insieme a Neddermeyer scoprì con metodi analoghi una particella 200 volte più pesante dell'elettrone che Yukawa ritenne fosse il π .



Ma nel 1946 un gruppo italiano formato da Conversi, Pancini e Piccioni mostrò che la particella non ha interazioni nucleari forti e quindi va inquadrata tra i leptoni, le fu assegnato il simbolo μ . Il vero mesone π con interazione nucleare forte fu scoperto nel 1947 da un gruppo diretto da Powell con la

¹⁵ <http://it.wikipedia.org/wiki/Positrone>

partecipazioni di Occhialini e Lattes. Sempre fra i prodotti delle interazioni dei raggi cosmici furono scoperte da Powell (1949) altre particelle che partecipano alle tre interazioni subatomiche, alcune classificabili fra i mesoni, altre fra i barioni, e con la strana proprietà di essere prodotte in coppie. Per questa ragione le nuove particelle furono chiamate “*strane*”. In particolare le particelle strane di tipo K interagendo debolmente si disintegrano in particelle π mostrando un comportamento asimmetrico rispetto alla riflessione dello spazio detta *violazione della parità*¹⁶. Questo fenomeno appare come una violazione di *simmetria sinistra-destra*. Un’analoga violazione evidente nelle creature viventi è però originata dalla scelta puramente casuale di uno tra i due isomeri del glucosio effettuata dalla vita ai suoi inizi. Al contrario il modo di disintegrazione del mesone K discende dalle proprietà di un’interazione fondamentale, quella nucleare debole.

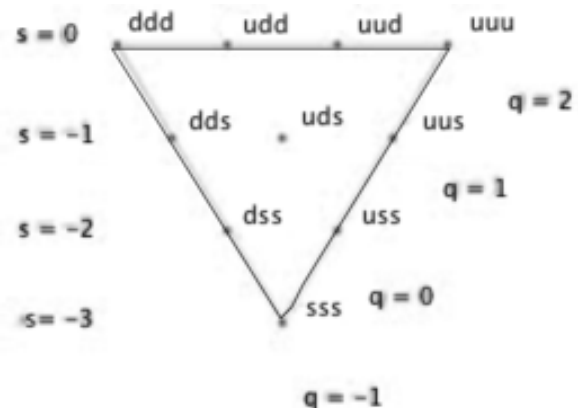
Il neutrino, o meglio, l’anti-neutrino, fu scoperto nel 1956 da Cowan e Reines tra le emissioni radioattive di una centrale nucleare¹⁷.

In conclusione la semplice teoria dei primi anni ’30 è stata confermata negli aspetti fondamentali, ma è risultata assai arricchita e complicata dalle scoperte dei primi 20 anni di ricerche. Ancora più ricco e complesso è il quadro che emerse dopo l’introduzione degli *acceleratori*.

L’avvento degli acceleratori e la scoperta di nuovi adroni.

I raggi cosmici di alta energia, fortunatamente per la nostra salute, sono assai rari, almeno sulla superficie della terra. Per questo si ricorre agli acceleratori che sono in grado di produrre in laboratori attrezzati fasci intensi di particelle con alte energie. Queste energie sono ottenute facendo passare, con tecniche diverse, particelle cariche, elettroni, protoni o nuclei atomici, attraverso salti di potenziale elettrico superiori a centinaia di milioni di Volt¹⁸. Dal sincrociclotrone di Chicago del 1947 all’attuale LHC del CERN l’energia disponibile è aumentata circa mezzo milione di volte e il panorama si è trasformato in modo radicale. Negli anni ’50 furono scoperti nuovi barioni e mesoni in gran numero, talmente grande che fu giocoforza considerare gli adroni come sistemi composti.

In particolare i barioni mostrano una forte tendenza a formare gruppi di otto e dieci come in una tavola periodica adronica. A questo punto si pose il problema di individuare i *componenti* degli adroni. Si pensò a tre particelle distinte, una elettrica-mente positiva e due negative, una delle quali con stranezza. Inoltre, in base alla struttura della tavola periodica barionica, si ritenne che i barioni fossero formati da tre componenti e quindi che i componenti stessi dovessero avere cariche



¹⁶ http://it.wikipedia.org/wiki/Parit%C3%A0_%28fisica%29

¹⁷ <http://it.wikipedia.org/wiki/Neutrino>

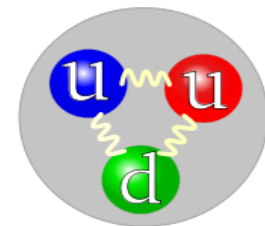
¹⁸ http://it.wikipedia.org/wiki/Acceleratore_di_particelle

elettriche pari a multipli di $1/3$ della carica elettronica. Nella figura sono indicati i componenti di un gruppo di 10 adroni.

Per evitare violazioni del *principio di esclusione di Pauli*, uno dei cardini della meccanica quantistica, fu proposto che ciascuna delle tre particelle possieda uno fra tre valori diversi di una nuova carica detta "colore." Più di recente la scoperta di nuovi adroni ha mostrato che i loro costituenti devono appartenere a sei diverse specie ciascuna con tre possibili colori. Dato che, non ostante ricerche accurate, non si è mai trovata alcuna particella con carica frazionaria, i fisici furono costretti ad ammettere che i costituenti non esistono allo stato libero. Questo fatto apparve evidentemente molto anomalo e anche deludente e suggerì a Gell-Mann, che tra i primi studiò il problema della costituzione degli adroni, di assegnare agli ipotetici costituenti il nome di una specie di ricotta tedesca, cioè "quark"¹⁹.

L'ipotesi dell'esistenza della carica colore da peraltro spazio all'attraente ipotesi che le interazioni forti siano dovute allo scambio di "bosoni vettoriali intermedi" simili al fotone, ma in interazione reciproca in base al colore, secondo un modello sviluppato da Yang e Mills nel 1954²⁰. Il modello, come anche l'elettrodinamica, è basato su una particolare simmetria detta "simmetria di gauge" che impone che le particelle intermedie, dette anche "bosoni di gauge" siano prive di massa. Seguendo l'ipotesi che le interazioni forti siano associate a una teoria di gauge basata sul colore, cioè di una "cromo-dinamica quantistica" o QCD, nel 1973, Gross, Politzer e Wilczek²¹ mostrarono con argomenti di un certo rigore che le forze generate dalle cariche colore appaiono deboli quando la distanza fra i quark diventa piccola. In seguito, nel 1974, Wilson²² mostrò che quando la distanza fra i quark cresce è verosimile che le forze crescano senza mai ridursi. Nel caso di forze attrattive, per liberare un quark da un adrone ci vorrebbe energia infinita e si avrebbe "confinamento" dei quark. Sarebbe dunque questa la ragione per cui i quark non sono mai stati trovati. Anche i quanti del campo di forze, detti "gluoni" (sarebbe "colloni" in italiano) interagiscono nello stesso modo e quindi rimangono confinati negli adroni.

La previsione che i quark a corte distanze si comportino come particelle libere è stata ampiamente confermata da oltre 20 anni di esperimenti. Nella figura a lato si schematizza la struttura del protone. Vi appaiono tre quark, due di tipo **u** e uno di tipo **d**, che sono legati dallo scambio di gluoni e hanno tre colori diversi. In conclusione la teoria della QCD spiega il paradosso degli adroni che sono composti senza componenti. Fortunatamente per i fisici è sfuggito al pubblico il fatto che, alla luce della QCD, nessuna nuova fonte di energia emerge dallo studio degli



adroni. Anzi agire su un aggregato di quark costa molta energia che va dispersa.

Le interazioni deboli.

¹⁹ [http://it.wikipedia.org/wiki/Quark_\(particella\)](http://it.wikipedia.org/wiki/Quark_(particella))

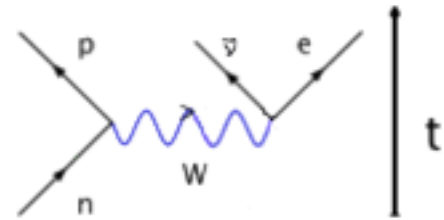
²⁰ http://it.wikipedia.org/wiki/Teoria_quantistica_di_Yang-Mills

²¹ http://it.wikipedia.org/wiki/Libert%C3%A0_asintotica

²² http://en.wikipedia.org/wiki/Color_confinement

Come si è detto, le interazioni deboli furono descritte inizialmente da Fermi. Il modello di Fermi del 1934 è sopravvissuto indenne fino agli anni '60, modulo adattamenti dovuti a scoperte più recenti, come la violazione della simmetria destra-sinistra, quella per *riflessione del tempo* e l'introduzione dei quark. Ma quando, utilizzando gli acceleratori, si iniziò a studiare le interazioni deboli alle alte energie fu subito chiaro che il modello da risultati insensati quando l'energia cresce e risulta incompatibile con l'elettromagnetismo. Il modello originale si basava su un campo di forze associato a un ulteriore tipo di bosoni vettoriali intermedi che avrebbero dovuto essere carichi e avere una massa pari a circa cento masse protoniche.

Riportiamo qui a lato lo schema di un'interazione debole elementare, del tutto analogo a quello di un'interazione elettromagnetica, in cui un bosone vettoriale intermedio W viene scambiato fra barioni e leptoni. Se il processo viene visto come l'emissione di un W da parte di un neutrone che si trasforma in protone, è chiaro che il W emesso deve avere carica negativa per compensare la carica positiva del protone. La massa del W rende conto della distanza di interazione fra barione e leptone.



La difficoltà che si incontrava nell'applicazione di questa teoria era dovuta alla massa del bosone vettoriale, non alla sua carica, come si è visto a proposito della QCD. Però è noto che in un gas di particelle cariche, detto plasma, i fotoni si comportano come particelle massive perché non si ha simmetria di gauge. Dopo un suggerimento di Anderson, nel 1964 Englert e Brout²³ mostrarono come questo fenomeno si presenti in certe condizioni anche in teorie relativistiche. La stesse idee furono elaborate da altri autori, in particolare Higgs²⁴ mostrò che nelle teorie più semplici appaiono altre particelle massive di tipo "scalare" cioè prive di proprietà rotatorie o spin.

Il modello elaborato da Higgs fu pressoché integralmente inserito in quello proposto nel 1967-68 da Glashow, Salam e Weinberg²⁵ per le interazioni deboli ed elettromagnetiche. Nel "modello elettro-debole" le due forze appaiono come differenti aspetti della stessa interazione, cioè vengono unificate. Il modello prevede l'esistenza dei bosoni intermedi carichi e massivi, i bosoni W , implicitamente previsti dalla teoria di Fermi, e un altro bosone intermedio, lo Z , neutro e massivo, oltre ovviamente al fotone. Il modello elettro-debole ha in primo luogo il merito puramente teorico di superare le inconsistenze del modello di Fermi con l'elettrodinamica e alle alte energie, ma al momento in cui fu presentato indicava anche un certo numero di novità suscettibili di conferma sperimentale. La prima conferma venne dalla scoperta di un'interazione fra neutrino e neutrone mediata dallo Z analoga a quella fra barioni e leptoni del modello di Fermi mediata dal W . La conferma sperimentale dell'esistenza di questa nuova interazione fu fornita dal CERN nel 1974 e diede la spinta definitiva all'assegnazione del premio Nobel per la Fisica del 1979 ai tre autori del modello. I bosoni intermedi W e Z sono stati scoperti da Rubbia e

²³ http://it.wikipedia.org/wiki/Meccanismo_di_Higgs

²⁴ http://it.wikipedia.org/wiki/Bosone_di_Higgs

²⁵ http://en.wikipedia.org/wiki/Electroweak_interaction

van der Meer nel 1983 al CERN. Sembra che recentemente si sia vista, sempre al CERN, traccia di una particella interpretabile come uno scalare di Higgs, ma la conferma di questa interpretazione richiederà lunghe e accurate analisi. In ogni caso l'esistenza o meno di questa particella non ha particolare rilevanza per la teoria elettro-debole nel senso che il meccanismo di generazione della massa dei bosoni vettori intermedi non implica necessariamente l'esistenza di particelle di tipo Higgs.

La situazione attuale.

Tenendo conto della QCD e del modello elettro-debole il quadro attuale delle particelle elementari risulta quello esposto nella tabella qui a lato. La parte alta della tabella riguarda i quark, le pseudo-particelle coinvolte dalla QCD che si combinano in adroni, in particolare in p, n e π . La parte bassa riguarda le particelle del modello elettro-debole, cioè in particolare: il fotone, i 6 leptoni oggi noti, i bosoni W e Z e l'ipotetica particella di Higgs. Il modello elettro-debole nella sua forma originale combinato con la QCD forma il "modello standard",²⁶ che è risultato in ottimo accordo con gli esperimenti, in particolare quelli che hanno utilizzato l'acceleratore LEP del CERN. Ovviamente la scoperta della particella di Higgs sembra consolidare la validità del modello. Tuttavia alcuni aspetti del modello, in particolare la grande massa del quark top, non lontana da quella di un atomo d'oro, ne rende poco attendibile la applicabilità alla fisica del top a energie di alcuni TeV. Inoltre l'accostamento dei due modelli QCD ed elettro-debole basati sullo

		Tre generazioni della materia (fermioni)				
		I	II	III		
massa		2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV		
carica		$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$		
spin		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$		
nome		u up	c charm	t top		
Quark		4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ s strange	4,2 GeV $-\frac{1}{3}$ b bottom	0 0 1 g gluone	
					0 0 1 γ fotone	
					0 0 1 Z ⁰ forza debole	
Leptoni		<2,2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e neutrino elettronico	<0,17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ neutrino muonico	<15,5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ neutrino tauonico	91,2 GeV 0 1 W [±] forza debole	Bosoni di gauge
		0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e elettrone	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ muone	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ tauone	80,4 GeV ± 1 1 W [±] forza debole	
					126 GeV 0 0 H Higgs	

scambio dei bosoni intermedi, corrispondenti ai quadrati rossi in figura, indica fortemente la necessità di un nuovo modello, detto di "grande unificazione",²⁷ in cui i bosoni intermedi appaiano come componenti di un unico sistema caratterizzato da una simmetria di gauge completa, in termini matematici detta "semplice". In questo caso tutte le interazioni elementari sarebbero riconducibili a un'unica forza

²⁶ http://it.wikipedia.org/wiki/Modello_standard

²⁷ http://en.wikipedia.org/wiki/Grand_Unified_Theory

Entrambe queste osservazioni hanno generato un gran numero di proposte, le più semplici delle quali si sono però scontrate con grandi difficoltà come, in primo luogo, la stabilità del protone, che è verificata su tempi di vita dell'ordine di un numero di anni con trenta zeri, venti di più dell'età dell'universo. Tuttavia pare che soluzioni teoricamente accettabili siano possibili in modelli che per ogni particella presente nella tabella ne prevedono un'altra con spin diverso, ma collegata alla prima come un'altra faccia della stessa medaglia in un mondo caratterizzato da una simmetria particolare detta "*super-simmetria*". Tuttavia i risultati di LHC non confermano questa ipotesi.

Inoltre va tenuto ben presente che i tentativi di inquadrare la teoria della gravità nell'ambito delle teorie dei campi quantizzati non ha ancora avuto successo.

Per questa ragione ormai da 40 anni si tenta di formalizzare una nuova teoria, detta della "*stringa*",²⁸ in cui gli oggetti elementari non sarebbero puntiformi, ma avrebbero le caratteristiche geometriche di *anelli e segmenti curvilinei*. Essi avrebbero quindi un'infinità di stati possibili di cui le particelle mostrate in tabella, con l'aggiunta del quanto di energia gravitazionale, il "*gravitone*", non sarebbero altro che gli stati con minor massa.

L'interazione elementare della teoria della stringa viene schematizzata come in figura dove le linee che apparivano negli schemi di interazione elementare fra le particelle puntiformi sono sostituite da tubi (o nastri).



La teoria della stringa non ha vita facile, tra l'altro perché in realtà comprende una quantità enorme di modelli possibili e quindi non è predittiva.

Un altro aspetto critico del quadro delle ricerche attuali sui costituenti ultimi della materia è legato al fatto che la materia di cui si è trattato è in realtà una minima parte di quella esistente nell'universo, il resto, la maggior parte, ha solo il nome di "*materia oscura*",²⁹ giustificato dal fatto che ha natura ignota e non è mai stata ne' vista, ne' isolata.

Tutto ciò implica la necessità di un forte invito alla prudenza rivolto alla nutrita schiera dei *divulgatori* delle teorie sui costituenti minimi della materia e delle relative scoperte sperimentali.

²⁸ http://en.wikipedia.org/wiki/String_theory

²⁹ http://it.wikipedia.org/wiki/Materia_oscura

