

Introduzione

1. La fisica delle particelle

La fisica delle particelle elementari e' la parte piu' avanzata e di frontiera dell'indagine sulla struttura microscopica della materia, un soggetto di ricerca che e' stato al centro degli interessi dei fisici negli ultimi cento anni.

Lo scopo dichiarato di questa ricerca e' quello di costruire una descrizione economica, in termini di concetti e principi fondamentali, e coerente, da un punto di vista logico e matematico, di tutta la vasta fenomenologia sperimentale che si e' andata via via accumulando riguardo alle proprieta' fisiche e alla dinamica dei costituenti ultimi della materia. Contrariamente a quella che era l'opinione della maggior parte dei fisici fino a circa trenta anni fa, negli ultimi decenni si e' dimostrato che una simile descrizione e' in effetti possibile. Il cosiddetto Modello Standard dei costituenti e delle loro interazioni rappresenta infatti una sintesi concettuale e matematica straordinariamente efficace e potente, basata com'e' su un numero molto limitato di idee e leggi generali, e tuttavia capace di rendere conto in modo quantitativo della stragrande maggioranza dei dati raccolti in migliaia di esperimenti, e di interpretarli in un contesto unificato e sorprendentemente semplice, anche se non necessariamente in tutto e per tutto intuitivo. Al tempo stesso, dietro a questa sintesi straordinaria restano diverse zone d'ombra, che rinforzano la convinzione, piuttosto diffusa nella comunita' dei fisici, che anch'essa sia destinata a lasciare il posto, prima o poi, a nuove idee e nuove leggi.

La sintesi teorico-fenomenologica rappresentata dal Modello Standard e' un risultato di eccezionale valore concettuale, e di considerevole importanza anche pratica, con forti implicazioni per diversi altri campi di ricerca, come l'astrofisica e la cosmologia: occorre tuttavia ricordare che la fisica e' prima di tutto una scienza sperimentale. Come invariabilmente accaduto in fisica per tutti gli altri momenti di sintesi, nessuna delle idee centrali del Modello Standard avrebbe mai potuto vedere la luce se non ci fosse stato il vincolo dei dati sperimentali a guidare la creativita' dei costruttori di modelli: poche delle scoperte sperimentali importanti sono state guidate dalla teoria, molte delle costruzioni teoriche piu' importanti sono state originate dai risultati, spesso inattesi, degli esperimenti.

In queste note, che di certo non possono ne' vogliono rappresentare un'introduzione teorica all'argomento, non viene neanche dato molto spazio agli aspetti piu' sperimentali del settore, come le caratteristiche di acceleratori e rivelatori usati per fare gli esperimenti, le sofisticate tecniche di calcolo, o i metodi statistici di analisi dei dati. Il loro scopo e' solo quello di aiutare a cogliere le idee fondamentali e la base quantitativa della nostra attuale comprensione della struttura elementare della materia, cercando via via di indicare *perche'* e' interessante misurare certe grandezze, e *che cosa e'* necessario fare per misurarle .

2. Riduzionismo

Il punto di vista filosofico generalmente (anche se non universalmente!) condiviso, che sta alla base dell'attività di ricerca in fisica delle particelle, si chiama *riduzionismo*. In un certo senso, e senza alcuna pretesa di essere rigorosi, esso può essere considerato l'evoluzione moderna dell'atteggiamento *meccanicista*, prevalente negli ambienti di ricerca fra il '700 e l'inizio dell'800, secondo il quale era possibile dare una descrizione dettagliata dell'universo meccanico allora conosciuto (il sistema solare) in base a pochi principi (le leggi del moto di Newton, la legge di gravitazione universale) e a poche costanti universali. Nel corso degli ultimi due secoli, il quadro osservativo che stava alla base del meccanicismo si è, come è noto, enormemente dilatato, costringendo i fisici ad una profonda e traumatica revisione dei paradigmi concettuali che fanno da cornice alla descrizione matematica dei fenomeni naturali. Questa revisione si è realizzata in diversi passi e lungo diverse direzioni:

- scoperta di nuovi tipi di forza (elettromagnetismo, forze nucleari)
- concetto di campo come nuovo paradigma concettuale
- scoperta della struttura granulare della materia (elettrone, fotone, nucleo)
- cambiamento delle leggi della dinamica (teoria della relatività, meccanica quantistica)

In seguito a questa revisione, che si è compiuta nei primi decenni del '900, il quadro di riferimento per la costruzione di modelli e teorie è profondamente mutato. Con il passare del tempo, e non senza contrasti, è infine emerso un nuovo paradigma, quello della *teoria quantistico-relativistica dei campi*, che costituisce la base concettuale e matematica del Modello Standard: questo è il motivo per cui si ritiene comunemente che una conoscenza elementare di questo soggetto sia oggi necessaria per tutti coloro che intendono affrontare lo studio della fisica delle particelle. L'aspetto più interessante di questa disciplina, che possiamo a buon diritto considerare il linguaggio moderno della fisica delle particelle, è la sua capacità unificatrice: uno stesso ed unico sistema di concetti e di leggi è in grado di dare una descrizione compiuta e quantitativamente assai accurata di una moltitudine di fenomeni disparati e apparentemente diversi, effettivamente *riducendo il problema a quello della dinamica di pochi tipi di costituenti, che interagiscono attraverso pochissimi tipi di interazioni*.

3. Costituenti e interazioni

Il punto di vista riduzionista porta dunque a identificare un *livello ultimo* nella struttura della materia, che deve essere chiaramente inteso come *quello attualmente osservabile*, e non in senso assoluto: futuri sviluppi nelle tecniche sperimentali e nella teoria potranno benissimo mettere in evidenza nuovi livelli di struttura e nuovi modi di interazione.

Questo punto dovrebbe risultare chiaro dal confronto con le analoghe situazioni ad altri livelli di struttura: considerando la materia a *livello molecolare*, in cui ci si trova di fronte a milioni di specie molecolari diverse, si arriva a identificare una sottostruttura, costituita dal *livello atomico*: poichè esistono solo un centinaio di specie atomiche diverse, delle quali qualunque molecola è costituita, la riduzione del livello di complessità è evidente. Il successivo livello di struttura, quello dei costituenti atomici, porta da un lato ad evidenziare un primo costituente elementare, l'*elettrone*, dall'altro a mettere in luce un nuovo grado di complessità nell'altro costituente atomico, il *nucleo*: il processo di riduzione sembra temporaneamente arrestarsi, perchè si osservano migliaia di specie nucleari diverse. Ma il problema è solo apparente, perchè anche il nucleo risulta essere una struttura composta: la scoperta degli unici due costituenti, *protoni* e *neutroni*, collettivamente chiamati *nucleoni*, effettivamente riduce il problema della complessità del livello nucleare. L'indagine sulla struttura dei nucleoni, che non sono particelle elementari, segna l'inizio della fisica delle particelle propriamente detta.

Nella visione moderna, la materia dell'intero universo è costituita da *fermioni*, particelle puntiformi a spin $\frac{1}{2}$, che interagiscono fra loro attraverso lo scambio di *bosoni*, particelle puntiformi a spin intero, secondo regole fissate dal complesso dei principi della meccanica quantistica, della teoria della relatività, e di ulteriori principi di simmetria, riconducibili, per quel che oggi si può dire, alla invarianza rispetto a trasformazioni di gauge locali. I fermioni fondamentali si raggruppano in due categorie a seconda delle interazioni cui partecipano: *leptoni*, che sentono le interazioni deboli ed elettromagnetiche, e *quark*, che sentono anche l'interazione di colore. Ci sono 3 famiglie di leptoni, ognuna costituita da una particella carica e dal corrispondente tipo di neutrino; parallelamente esistono 3 famiglie di quark, ognuna costituita da una particella a carica positiva e una a carica negativa, ciascuna delle quali può esistere in tre sottostati distinti, chiamati stati a differente *colore*. Quindi in totale ci sono 6 leptoni e $3 \times 6 = 18$ quark: per ognuna di queste particelle esiste, in accordo con l'equazione di Dirac, la corrispondente antiparticella, i cui numeri quantici hanno valore opposto.

Tutti i fermioni, carichi e neutri, leptoni e quark, sono soggetti all'*interazione elettrodebole*, che rappresenta l'unificazione dell'interazione debole e di quella elettromagnetica: questa interazione avviene tramite lo scambio (ossia, l'emissione e l'assorbimento) di bosoni vettoriali (particelle a spin 1) neutri (fotone e Z^0) e carichi (W^+ e W^-). Le caratteristiche dinamiche di questa interazione sono fissate, in modo piuttosto controintuitivo, sia da una speciale *simmetria di gauge locale*, sia dalla *rottura spontanea* di questa simmetria, a causa (si pensa) di una ulteriore, e per ora non evidenziata, componente scalare (a spin 0) dell'interazione, nota come *campo di Higgs*. Tutti i fermioni e 3 dei bosoni possiedono una massa (il cui valore non nullo, nel caso dei neutrini, è osservato per ora solo indirettamente, ed è comunque assai piccolo) la cui origine risulterebbe appunto dall'interazione con il campo di Higgs. Il

quarto bosone, il fotone, ha viceversa massa nulla. L'interazione elettrodebole, che a basse energie si presenta separata in due interazioni efficaci distinte, *elettromagnetica* e *debole*, e' caratterizzata dalla violazione di diverse leggi di conservazione: il tipo di quark, anche chiamato *flavor*, la parita', la coniugazione di carica e il time reversal. In particolare, la non conservazione del flavor si osserva in due modalita' a intensita' diversa: la prima, dominante, nella quale il processo con cambiamento di flavor del leptone o del quark avviene all'interno della famiglia di appartenenza, la seconda, relativamente soppressa, in cui il processo coinvolge due famiglie diverse.

L'interazione di colore, sentita dai soli quark, avviene tramite lo scambio di 8 bosoni vettoriali (a spin 1) privi di massa, i *gluoni*, che agiscono cambiando lo stato di colore dei quark coinvolti, e lasciandone inalterati gli altri numeri quantici. Caratteristica tipica di questa interazione e' il *confinamento* permanente di quark e gluoni, che rende impossibile l'osservazione di questi ultimi nello stato di particelle libere, e lascia come stati osservabili solo quelli a colore totale nullo: un'altra proprieta' controintuitiva del Modello Standard. L'origine del confinamento, per quanto quasi certamente riconducibile a proprieta' fondamentali dell'interazione di colore, non e' a tutt'oggi chiarita in modo soddisfacente. Una conseguenza caratteristica della forte intensita' dell'interazione di colore e del confinamento dei costituenti e' quella di dare luogo a una moltitudine di *stati legati*, formati da coppie quark-antiquark e da triplette di quark, tutti a colore totale nullo e chiamati collettivamente *adroni*: gli stati quark-antiquark, che hanno sempre spin intero, vengono chiamati *mesoni*, mentre gli stati di 3 quark, sempre a spin semi-intero, si chiamano *barioni*. Tutti questi stati, essendo a colore totale nullo, non sentono in prima approssimazione l'interazione di colore: tuttavia, cosi' come avviene per l'interazione elettromagnetica, che da' luogo a interazioni residue fra atomi o molecole neutre (forze di van der Waals), fra gli stati adronici "bianchi" rimane un'interazione residua, che per esempio e' responsabile della stabilita' dei nuclei atomici.

L'interazione gravitazionale, per quel che si puo' dire, non ha effetti misurabili sui processi elementari, alla scala di struttura e di energia accessibile oggi.

4. Lo studio sperimentale del Modello Standard

Cosi' come accade per lo studio della struttura atomica e molecolare, il mezzo piu' semplice per raccogliere informazioni sulle proprieta' di costituenti e interazioni e' quello di porli in collisione. Come si ricordera', ci sono due esperimenti-tipo per mettere in evidenza gli aspetti salienti della struttura atomica:

quello di Franck e Hertz, nel quale tramite il bombardamento degli atomi (bersaglio) con elettroni accelerati (proiettile), viene osservata la *struttura a livelli* energetici, che si manifesta in una variazione dell'interazione elettrone-atomo, e quindi della perdita di energia dei proiettili e della corrente misurata,

in corrispondenza dei livelli stessi. In sostanza, l'atomo viene eccitato ai livelli energetici superiori a quello fondamentale dal campo elettromagnetico che accompagna l'elettrone accelerato; la struttura a livelli si osserva tramite la variazione della *sezione d'urto totale* per la collisione elettrone-atomo; e' anche possibile osservare il *decadimento* degli stati eccitati, che si diseccitano emettendo fotoni di varie energie, la cui osservazione fornisce informazioni equivalenti o complementari a quella della sezione d'urto

quello di Rutherford, nel quale particelle α di alta energia (proiettile) collidono con atomi d'oro (bersaglio); dall'andamento della *sezione d'urto differenziale* si traggono indicazioni sulla presenza di costituenti puntiformi all'interno dell'atomo. In sostanza, quel che si misura e' il *fattore di forma* della distribuzione di carica elettrica nell'atomo, che viene sondata dal campo elettromagnetico del proiettile: questo tipo di esperimenti e' dunque equivalente all'osservazione della struttura atomica con un microscopio ad alto potere risolutivo

Una situazione del tutto analoga si ha per cio' che riguarda la maggior parte degli esperimenti in fisica delle particelle: lo studio di reazioni e decadimenti costituisce il principale mezzo di indagine della struttura subnucleare. Poiche' la scala di energia dei livelli subnucleari e' molto elevata, occorrono proiettili con alta energia, e quindi piccola lunghezza d'onda, il che spiega la necessita' di sviluppare sofisticate tecniche di accelerazione e rivelazione. Accanto alle sonde di tipo elettromagnetico, che sono versioni ad energia piu' alta di quelle adoperate in fisica atomica, si utilizzano anche quelle che hanno origine dagli altri campi, legati alle interazioni deboli e forti.

I due esperimenti-tipo menzionati sopra non sono i soli ad essere interessanti, perche' non e' solo lo studio delle proprieta' dei costituenti ad essere importante, ma anche quello delle proprieta' delle interazioni: proprieta' di simmetria, validita' o violazione di leggi di conservazione, esistenza di nuovi costituenti elementari sono altri campi di ricerca assai attivi.

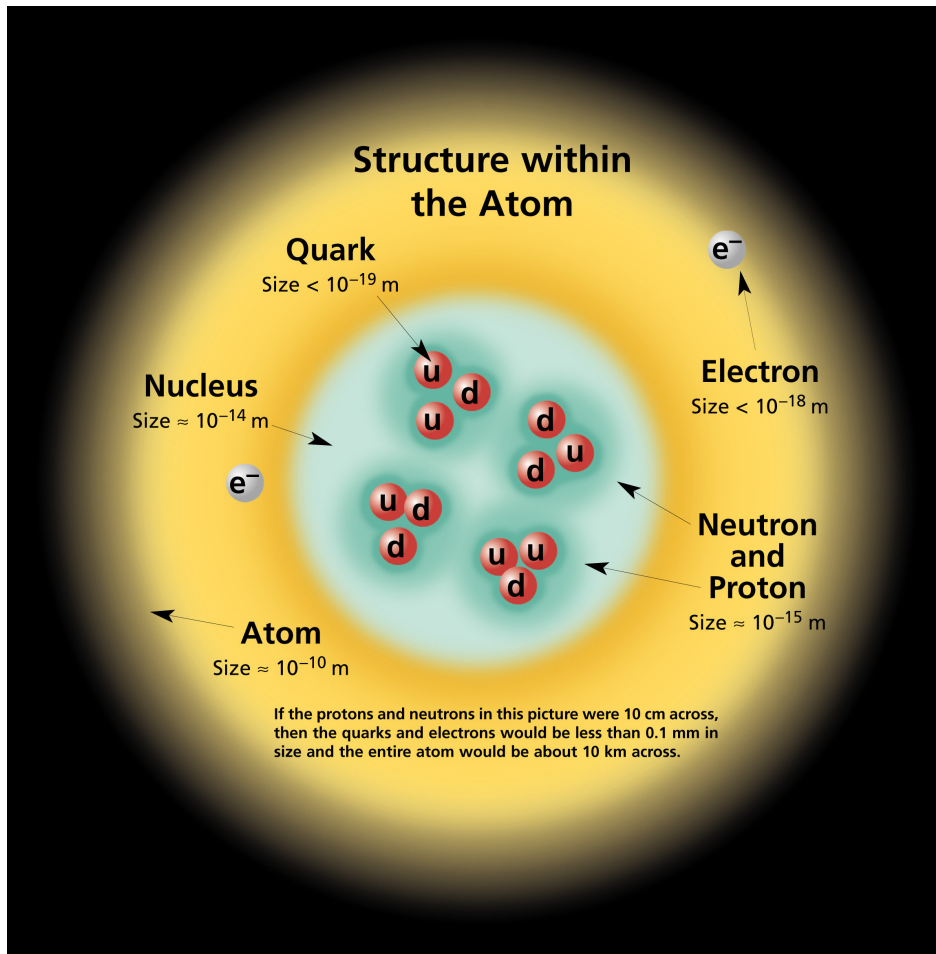
Le pagine seguenti mostrano alcune illustrazioni tratte dal sito, assai ben fatto, del progetto divulgativo Particle Adventure:

<http://particleadventure.org/particleadventure/>

Altri siti divulgativi interessanti per un'introduzione all'argomento:

<http://pdg.web.cern.ch/pdg/particleadventure/>

http://www-sldnt.slac.stanford.edu/alr/standard_model.htm



Atomo, nucleo: la scala delle lunghezze
 Nucleoni: particelle composte
 Elettroni e quark: puntiformi?

PROPERTIES OF THE INTERACTIONS					
Property \ Interaction	Gravitational	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong	
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Fundamental Color Charge	Residual See Residual Strong Interaction Note
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically charged	Quarks, Gluons	Hadrons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	γ	Gluons	Mesons
Strength relative to electromag for two u quarks at: for two protons in nucleus	10^{-41} 10^{-41} 10^{-36}	0.8 10^{-4} 10^{-7}	1 1 1	25 60 Not applicable to hadrons	Not applicable to quarks 20

Le forze fondamentali

FERMIONS			matter constituents spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...		
Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0	u up	0.003	2/3
e electron	0.000511	-1	d down	0.006	-1/3
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0	c charm	1.3	2/3
μ muon	0.106	-1	s strange	0.1	-1/3
ν_τ tau neutrino	<0.02	0	t top	175	2/3
τ tau	1.7771	-1	b bottom	4.3	-1/3

BOSONS			force carriers spin = 0, 1, 2, ...		
Unified Electroweak spin = 1			Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge	Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0	g gluon	0	0
W^-	80.4	-1			
W^+	80.4	+1			
Z^0	91.187	0			

Costituenti e mediatori

Mesons $q\bar{q}$ Mesons are bosonic hadrons. There are about 140 types of mesons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

Esempi di stati mesonici

Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$

Baryons are fermionic hadrons.
There are about 120 types of baryons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
$\bar{p}$	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
Ω^-	omega	sss	-1	1.672	3/2

Esempi di stati barionici