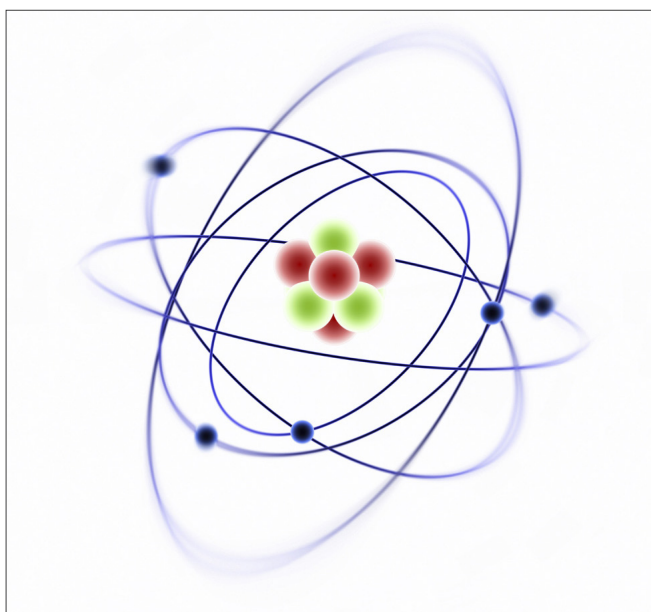




NICOLA SEMPRINI CESARI  
DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA  
NICOLA.SEMPRINICESARI@UNIBO.IT

# IL MODELLO STANDARD DELLE PARTICELLE ELEMENTARI: IL MODERNO ATOMISMO?

*Il Modello Standard sembra accordarsi con le anticipazioni dell'atomismo democriteo, declinate da Dalton in unità materiali indivisibili interagenti per mezzo di forze newtoniane. Le impressionanti analogie non rendono però meno rilevanti le differenze, occultate in concetti di spazio, tempo, particella e forza, radicalmente trasformati dalla teoria della relatività e dalla meccanica quantistica.*



**I**l desiderio di ricondurre la molteplicità e la mutevolezza del reale alla varietà di aggregazioni di enti irriducibili ed eterni accompagna la nostra cultura da quasi 2.500 anni. Tuttavia, fino alle soglie del XIX secolo, l'atomismo - formulato già da Leucippo e Democrito nel V secolo a.C. - mantenne lo 'status' di sistema filosofico fondato a priori an-

che quando fu ripensato da scienziati saldamente radicati ai metodi delle scienze sperimentali quali G. Galilei, C. Huygens, R. Boyle, R. Hooke e i Bernoulli. Fu solo agli inizi dell'Ottocento - con l'opera di J. Dalton - che l'atomo fu collegato a fatti sperimentalmente osservabili ed acquisì il carattere di concetto scientifico.

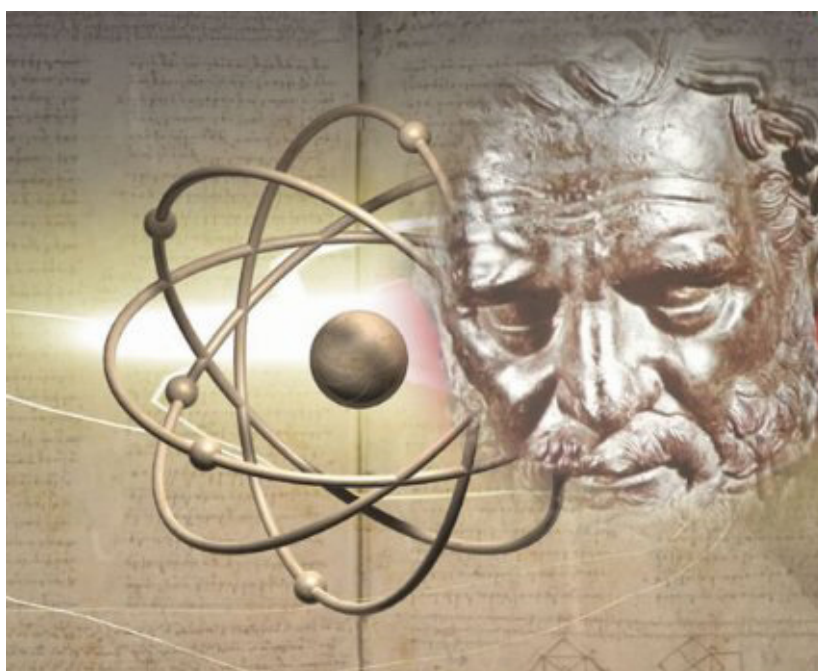
Nel prosieguo del secolo la base empirica dell'atomismo si ampliò costantemente sia nelle scienze chimiche che fisiche, pur emergendo alcune decisive difficoltà che ne ostacolarono il percorso.

Paradigmatico è il caso della teoria cinetica dei gas. Fortemente voluta da J.P. Joule e sviluppata sistematicamente nei lavori di R. Clausius e J.C. Maxwell, era ispirata al più esplicito atomismo. Fondata sulla semplice ipotesi che i gas - e con essi la materia - fossero costituiti da corpuscoli massivi, rigidi e di varia forma, interagenti attraverso urti governati dalle ben note leggi newtoniane del moto, ottenne risultati eccezionali poiché fornì un'interpretazione meccanica della temperatura e della pressione, spiegò l'ipotesi di Avogadro e la relazione di queste gran-



dezze all'interno dell'equazione di stato dei gas rarefatti, chiarì l'equazione di diffusione dei gas, ecc.

Una lunga serie di successi che non fu però in grado di occultare la persistente incapacità della teoria cinetica di prevedere correttamente i calori specifici dei gas poliato-



mici. Né di convincere coloro che si opponevano all'inevitabile interpretazione in chiave cinetica del secondo principio della termodinamica che perdeva così la natura di legge causale per retrocedere a semplice effetto statistico in linea di principio violabile. Né di assicurare coloro che, applicando il teorema di equipartizione alla radiazione di cavità, ottenevano un valore infinito della sua energia.

A tali obiettivi fallimenti, si deve aggiungere che l'atomismo era il prodotto di una più generale concezione meccanicistica della natura che entrò profondamente in crisi negli ultimi due decenni dell'Ottocento (l'esperimento di Michelson e Morley del 1887 esclude l'esistenza dell'etere e con essa l'interpretazione in chiave meccanicista dell'elettromagnetismo proposta da J.C. Maxwell).

Infine alcune precisazioni e distinguo di natura concettuale. Persino un atomista convinto come Maxwell rimarcava come la teoria cinetica dei gas coinvolgesse in modo assai marginale la struttura dell'atomo. Lucidamente, osservava che il suo funzionamento richiedeva l'ipotesi che nel corso degli urti gli atomi mantenessero la loro forma, ovvero fossero rigidi, proprietà che non escludeva un'eventuale struttura interna, come d'altra parte suggerito dai complessi sistemi di righe luminose studiate

dall'allora nascente spettroscopia atomica.

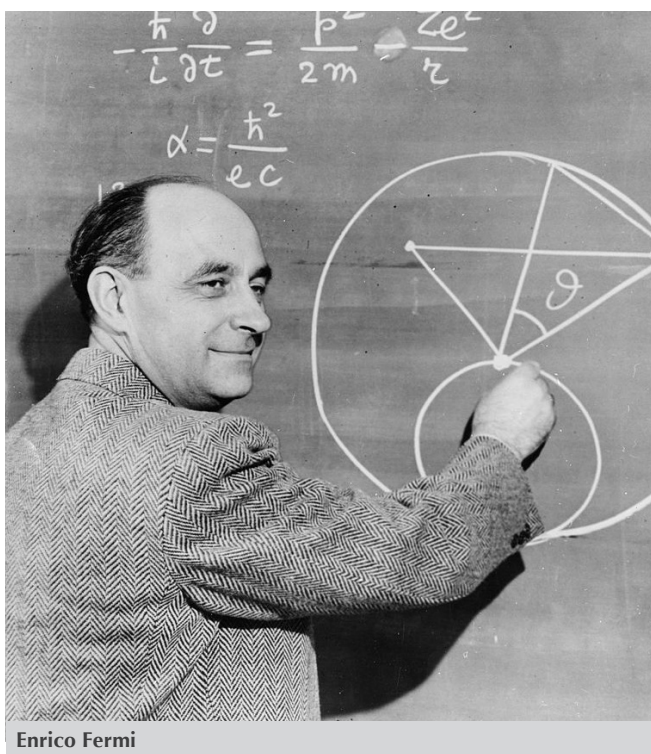
Alla fine dell'Ottocento, anche quella parte della comunità scientifica più favorevole all'atomismo, doveva ammettere che - almeno nell'accezione daltoniana di porzione ultima ed irriducibile di materia - rimaneva ancora al di fuori

della reale portata dei fenomeni accessibili alla fisica ed alla chimica. Tuttavia, sia pure in forma embrionale, nei laboratori erano già disponibili gli strumenti tecnici necessari per sondare gli atomi, occorreva solo acquisirne consapevolezza, un fatto che avvenne nel primo decennio del Novecento e che mutò in modo radicale l'intera prospettiva.

### **Il nuovo quadro sperimentale**

Le ricerche che profilavano il nuovo quadro sperimentale si collocavano lungo due diverse direttrici. La prima - iniziata con la scoperta dell'elettrone (J.J. Thomson, 1897), proseguita con i celebri esperimenti di Rutherford (1910-20), e terminata con la scoperta del neutrone (J. Chadwick, 1932) - portò alla comprensione della struttura dell'atomo. Un risultato di capitale importanza, che rivelò l'esistenza di un nucleo estremamente compatto, formato da protoni e neutroni, che attraverso l'interazione elettromagnetica legava a sé un numero di elettroni 'orbitanti' tale da neutralizzare la carica elettrica complessiva.

L'atomo aveva dunque una sua struttura interna e le unità materiali indivisibili cui pensava Dalton dovevano probabilmente identificarsi con l'elettrone, il protone ed il neutrone che lo costituivano.



Enrico Fermi

Non solo, la coesistenza dei protoni all'interno del compatto volume nucleare indicava la presenza di un'intensissima forza attrattiva capace di superare la mutua repulsione coulombiana. Era la prima evidenza empirica dell'*interazione forte*, un'interazione a *corto raggio* attiva all'interno del nucleo che doveva operare su protoni e neutroni ma non sugli elettroni e che andava ad aggiungersi alle già note interazioni a *lungo raggio* gravitazionali ed elettromagnetiche.

La seconda direttrice - iniziata con la scoperta della radioattività da parte di A.H. Becquerel (1896), proseguita con gli studi dei coniugi Curie e terminata con i fondamentali contributi di E. Rutherford e dei chimici F. Soddy, K. Fajans - portò, sul finire degli anni Venti, all'identificazione dei processi di trasmutazione nucleare sottostanti il fenomeno della radioattività. Tra questi assumeva particolare rilievo il decadimento del neutrone in protone ed elettrone (*decadimento beta*) poiché chiariva che all'interno del neutrone operava una nuova e relativamente debole interazione naturale a cortissimo raggio capace di trasformarlo in protone.

La descrizione teorica dell'*interazione debole* mise

a dura prova l'immaginazione dei fisici. In primo luogo non si capiva da dove provenisse l'energia che accompagnava i processi deboli nel nucleo. Poi si scoprì che la distribuzione delle velocità dell'elettrone emergente dal decadimento beta richiedeva l'introduzione nel gioco di una nuova particella elettricamente neutra di piccolissima massa (W. Pauli) che E. Fermi chiamò *neutrino*. Infine, lo stesso E. Fermi propose nel 1934 una trattazione teorica delle interazioni deboli fondata sull'idea rivoluzionaria che il protone, l'elettrone e il neutrino finali non preesistessero all'interno del neutrone ma piuttosto venissero generati nel momento stesso del decadimento [1]. L'esistenza di un processo capace di generare una nuova particella quale il neutrino, suggerì che il mondo delle particelle elementari doveva estendersi ben al di là dei componenti dell'atomo e del nucleo e che la chiave per accedervi doveva essere quella dell'energia: due capisaldi che orienteranno la ricerca nella fisica delle particelle elementari fino ai nostri giorni.

Quasi subito seguirono nuove conferme. Nel 1932 C. Anderson individuò nei raggi cosmici l'*elettrone positivo*, in accordo con la previsione di Dirac che ad ogni particella dovesse corrispondere una antiparticella di uguale massa e spin ma carica interna opposta. Nel 1936, ancora nei raggi cosmici, C. Anderson e S. Neddermeyer individuarono il *muone*, simile all'elettrone ma più massivo ed instabile (erroneamente identificato con il mediatore dell'interazione forte predetto da H. Yukawa nel 1935).

Il secondo dopoguerra impresso alla fisica delle particelle uno sviluppo vertiginoso. Gli Stati Uniti assunsero il ruolo di grande superpotenza economica, industriale e scientifica traendo profitto dal massiccio esodo di scienziati europei. E. Lawrence - inventore del ciclotrone - poté disporre di finanziamenti sempre più ingenti con i quali costruire acceleratori sempre più grandi in accordo con il principio che l'energia della collisione fosse il parametro determinante per la scoperta di nuove particelle. Il Radiation Laboratory di Berkeley diede avvio a quelle im-





prese tecnico-scientifiche-finanziarie, governate da composite comunità di scienziati attraverso le strategie gestionali delle grandi imprese commerciali, che oggi indichiamo con il termine *'big science'*, un modello di ricerca che con i suoi pregi e difetti tende a diffondersi anche in altre aree della scienza. I cospicui investimenti furono compensati da un profluvio di nuove particelle. Tra il 1950 ed i primi anni Sessanta ne furono scoperte oltre 100, quasi tutte fortemente interagenti e perciò chiamate *adroni* (dal greco *'adros'*, forte), quasi tutte assai instabili, raggruppabili nel sottoinsieme dei *mesoni* - (dal greco *mesos*, di mezzo) di spin intero e massa tendenzialmente inferiore al protone - e dei *barioni* - (dal greco *baris*, pesante) di spin semintero e massa superiore al protone.

I nuovi adroni andavano ad aggiungersi ai già noti elettrone, positrone, muone e neutrino (allora si scoprì che i neutrini che accompagnavano i processi deboli di elettroni e muoni erano diversi) che costituivano un gruppo di particelle soggette all'interazione debole ed elettromagnetica ma non a quella forte, con masse relativamente ridotte e per questo detta famiglia dei *leptoni* (dal greco *'leptos'*, leggero).

La *proliferazione degli adroni* tenne in scacco la fisica fino al 1964, quando M. Gell-Mann e G. Zweig formularono il *modello a quark* [2]. La semplice ipotesi che gli adroni fossero costituiti da tre tipi di particelle ancor più piccole dette *quark* (nome di fantasia che Gell-Mann trasse dai *Finnegans Wake* di J. Joyce) tenute assieme dall'interazione forte, fu capace di spiegare l'intera fenomenologia allora nota. Interpretando i mesoni ed i barioni come stati legati *quark-antiquark* e *quark-quark-quark* rispettivamente, si capì che le numerosissime particelle instabili osservate negli acceleratori altro non erano che la manifestazione di una complessa *spettroscopia* degli atomi di quark.

Prendeva così forma il caratteristico assetto dell'attuale Modello Standard delle particelle elementari (MS), ripartito nelle famiglie dei leptoni non forte-

mente interagenti (elettrone, muone, neutrino elettronico e neutrino muonico) e dei quark fortemente interagenti (quark up, down e strange) e permanentemente segregati all'interno degli adroni (l'impossibilità di osservare quark liberi sembra essere una delle proprietà più caratteristiche dell'interazione forte e prende il nome di *confinamento*).

Le successive indagini sperimentali hanno puntualmente confermato questo quadro richiedendo al più il semplice aggiornamento dell'elenco dei leptoni e quark previsti inizialmente da Gell-Mann e Zweig. Così, sul fronte dei quark, l'osservazione del mesone *J/psi* si risolse nell'introduzione di un nuovo quark *charm* (previsto teoricamente da S. Glashow, J. Iliopoulos e L. Maiani, il mesone fu osservato nel 1974 da S. Ting presso il Brookhaven National Laboratory), l'osservazione del mesone *Upsilon* condusse all'introduzione di un nuovo quark *bottom* (previsto teoricamente da M. Kobayashi e T. Maskawa, il mesone fu osservato nel 1977 da L. Lederman presso il Fermilab) ed infine i prodotti del decadimento debole rivelarono il gigantesco quark *top* (atteso con certezza, fu osservato dall'esperimento CDF nel 1995 presso il Fermilab). Sul fronte dei leptoni, si aggiunse una terza particella pesante detta *tau* (osservata nel 1977 da M. Perl presso lo Stanford Linear Accelerator Centre) e l'atteso *neutrino tau* che lo accompagna nei processi deboli (osservato nel 2000 presso il Fermilab).

### Il nuovo quadro teorico

Gli strumenti teorici adeguati a descrivere i processi della fisica delle particelle scaturirono nella sintesi delle due grandi rivoluzioni concettuali del Novecento: la teoria della relatività ristretta (TRR) e la meccanica quantistica (MQ). La TRR - formulata da A. Einstein nel 1905 - codificava i concetti di spazio e tempo necessari per trattare fenomeni con velocità in gioco prossime a quella della luce. La MQ - che raggiunse il suo assetto definitivo tra il 1925 ed il 1926 con il lavori di W. Heisenberg, E. Schroedinger e M. Born - stabiliva, invece, le leggi meccani-

che valide nel caso di corpuscoli con dimensioni inferiori all'atomo. Data la taglia subnucleare e le velocità relativistiche delle particelle elementari, la descrizione teorica andava a collocarsi proprio nella difficile regione di intersezione delle due teorie.

I primi progressi furono compiuti tra il 1925 ed il 1927 con l'introduzione di alcuni metodi generali per *quantizzare* il campo elettromagnetico (W. Heisenberg, M. Born, P. Jordan, W. Pauli e P. Dirac. Vedi anche il lavoro di rassegna di E. Fermi su cui si sono formate generazioni di fisici [3]). Tali metodi conseguivano il doppio risultato di accordare la TRR e la MQ e di descrivere con facilità il processo di emissione e assorbimento di fotoni, che sembrava adattarsi alla descrizione dei processi di mutua conversione tra particelle. Tale generalizzazione fu inizialmente ostacolata dal *problema delle energie negative*, ma qualche anno dopo la teoria dell'elettrode di Dirac (1928) chiarirà che il problema celava un fatto fisico di eccezionale rilevanza: l'esistenza dell'antimateria, confermata nel 1932 dalla scoperta del positrone.

Il passo decisivo fu compiuto nel 1934 da E. Fermi in un celeberrimo lavoro sulle interazioni deboli [1]. Anticipando un aspetto chiave delle moderne teorie di campo quantizzato (Quantum Field Theory, QFT), stabilì un'analogia tra le variazioni di energia del campo elettromagnetico che avvenivano per quantità discrete fisicamente identificate con i fotoni, e le variazioni di energia di ipotetici campi materiali (per esempio il campo elettronico) i cui quanti potevano essere identificati con le particelle osservate (per esempio gli elettroni fisici). Si trattava di un approccio rivoluzionario che retrocedeva le particelle elementari da enti eterni ed immutabili a transitorie manifestazioni delle variazioni di stato di certi campi sottostanti. H. Yukawa rivelò l'estrema duttilità di questo approccio: scoprendo la relazione che legava il raggio dell'interazione alla massa dei quanti del campo di forza (1935), poneva le interazioni naturali a corto raggio deboli e forti alla portata delle nascenti QFT.

I notevolissimi progressi rendevano ancor più urgente la soluzione di un problema assai insidioso che si manifestava ogniqualvolta si cercasse di calcolare la probabilità di certi processi elettromagnetici: pur seguendo le regole consolidate, si ottenevano valori infiniti palesemente assurdi, un fatto incomprensibile che minò la credibilità delle QFT per oltre un ventennio (*problema degli infiniti*). Dopo una intuizione di V. Weiskopf - che propose di ridefinire o *rinormalizzare* i valori di carica e massa delle particelle osservate - un primo successo fu ottenuto nel 1947 da H. Bethe che riuscì ad eliminare i valori infiniti e a predire correttamente lo splitting  $2S_{1/2}-2P_{1/2}$  dell'atomo di idrogeno, misurato nello stesso anno con grande precisione da W. Lamb. Oramai i tempi erano maturi, e nel 1948 Feynman, J. Schwinger e I. Tomonaga - in modo del tutto indipendente - proposero le tecniche generali per la rimozione degli infiniti nei processi elettromagnetici. L'anno seguente, F. Dyson dimostrò la sostanziale identità di tali tecniche, che riassunse nella prima consistente *teoria della rinormalizzazione*, capace di rendere la teoria del campo elettromagnetico quantizzato (QED) la più precisa delle teorie fisiche esistenti. Da allora, la rinormalizzabilità è divenuta un requisito irrinunciabile per le teorie di campo quantizzato delle interazioni fondamentali.

La formulazione della QED rappresentò un traguardo cruciale poiché fornì un modello generale per le interazioni naturali. Come già l'elettromagnetismo classico aveva insegnato, due cariche elettriche distanti nello spazio possono influenzarsi attraverso l'azione mediatrice del campo elettromagnetico nel quale sono immerse: la prima carica cede energia al campo che la diffonde nello spazio fino a raggiungere una seconda carica che l'assorbe dando luogo a ciò che chiamiamo interazione. Sulla base di questo meccanismo, sembrò naturale ipotizzare che pure l'interazione debole e forte tra particelle materiali fosse dovuta a specifiche cariche interne 'deboli' e 'forti' che avevano l'effetto di stabilire un accoppiamento a specifici campi 'deboli' e 'forti' i quali - ana-

logamente al campo elettromagnetico - davano luogo alle interazioni stesse. Pur guidati dall'esempio della QED, ci si rese subito conto che l'estensione alle interazioni deboli e forti non poteva essere immediata.

Infatti, una qualunque teoria strutturalmente simile alla QED non avrebbe potuto rendere conto né del processo di cambiamento della carica che accompagnava il processo di irradiazione nelle interazioni forti e deboli (fatto allora noto per le interazioni deboli ma non per quelle forti) né del corto raggio delle stesse (l'introduzione 'a mano' di campi di forza massivi del tipo di Yukawa avrebbe compromesso la rinormalizzabilità della teoria).

Il primo problema fu superato nel 1954 da C.N. Yang e R. Mills con la formulazione delle cosiddette *teorie di gauge* [4], estensioni dell'elettromagnetismo capaci di descrivere processi dove le particelle modificano la propria carica irradiando campi carichi - e quindi autointeragenti - capaci di dare luogo ad una fenomenologia del tutto sconosciuta all'elettromagnetismo classico.

Nel caso delle interazioni deboli invece, il secondo problema trovò un'ardita soluzione a metà degli anni Sessanta con la formulazione del *meccanismo di Brout-Englert-Higgs* (vedi per esempio [5]), ispirato dal fenomeno della superconduttività (un'introduzione didattica di alto livello al fenomeno della superconduttività può essere trovata nella Nobel Lecture di V. L. Ginzburg [6]). Dato che l'azione del mezzo superconduttore sul campo elettromagnetico si riassume nell'acquisizione di una massa efficace che ne altera le proprietà di propagazione, rendendo di fatto l'interazione a corto raggio (effetto Meissner), si immagina che il vuoto sia permeato da *un campo di Higgs* che, funzionando da mezzo superconduttore per i campi di forza deboli, conferisce ai loro quanti una massa efficace e con essa un carattere a corto raggio all'interazione debole.

Alla fine degli anni Sessanta, S. Glashow, S. Weinberg e A. Salam fecero di questo meccanismo il cuore di una teoria di campo quantizzato di gauge dell'inte-

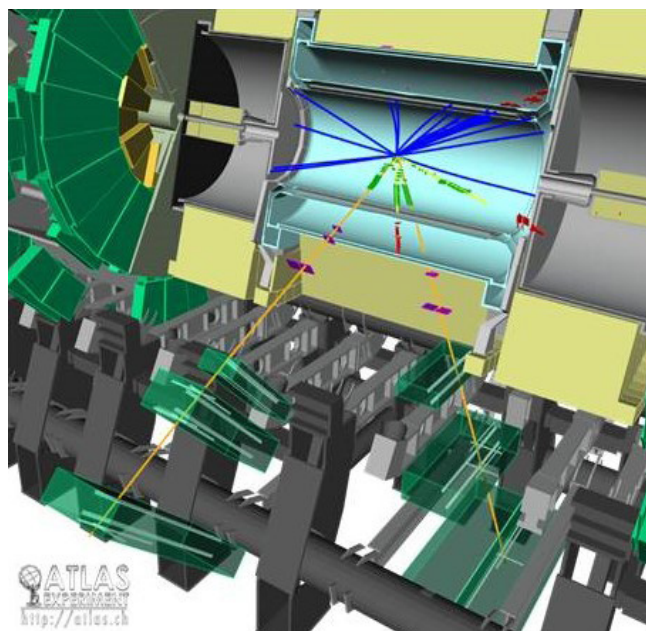


Fig. 1 - Simulazione di un evento di decadimento della particella di Higgs all'interno dell'esperimento ATLAS. Si tratta di un processo composto dove la particella di Higgs decade in due particelle  $Z^0$  (mediatore neutro dell'interazione debole) che a loro volta decadono in elettrone-antielettrone (linee gialle brevi) e muone-antimuone (linee gialle lunghe) (fonte: CERN). Vedi anche Fig. 2.

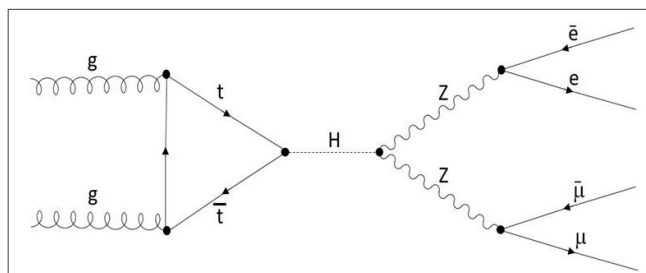
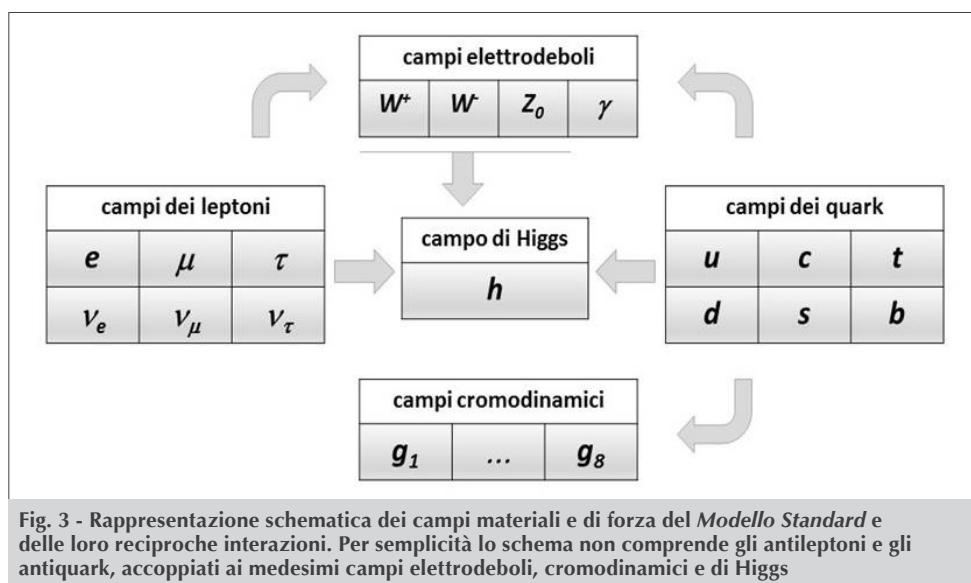


Fig. 2 - Rappresentazione attraverso diagramma di Feynmann di uno dei possibili processi di produzione e decadimento della particella di Higgs. Produzione: due quanti del campo forte (gluoni, g) danno ciascuno origine ad una coppia di quark top-antitop (t-tbar) che a loro volta producono una particella di Higgs (H). Decadimento: la particella H decade in una coppia di particelle  $Z^0$  (mediatore neutro dell'interazione debole) che a loro volta decadono in elettrone-antielettrone e muone-antimuone. Vedi anche Fig. 1.

razione debole unificata con quella elettromagnetica [7]. Con la dimostrazione da parte di G. 'tHooft e M. Veltman della sua rinormalizzabilità (1971) si completò la costruzione della *ElectroWeak Theory* (EWT), una pietra miliare della fisica fondamentale, confermata in modo impressionante presso il CERN dall'osservazione dei quanti massivi del campo elettrodebole (C. Rubbia e UA1 Colaboration, 1984 [8]) e dei quanti massivi del sottostante campo di Higgs (esperimenti ATLAS [9] e CMS, 2012, vedi Fig. 1 e 2).



roduzione divulgativa alla QCD di ottimo livello vedi [11]).

## La sintesi del Modello Standard

Il Modello Standard (MS) è la 'summa' delle conoscenze ad oggi acquisite sulle particelle elementari e le loro mutue interazioni, a lungo studiate presso le macchine acceleratrici ed essenzialmente

Agli inizi degli anni Settanta, anche le interazioni forti raggiunsero il loro assetto definitivo nel contesto di una teoria di campo quantizzato con la formulazione della *Quantum Chromodynamics* (QCD). D. Politzer, F. Wilczek e D. Gross (1974) dimostrarono le proprietà eccezionali di questa interazione, debole a piccole distanze (libertà asintotica) ed intensissima a grandi distanze [10]. Nel regime asintotico - dove l'interazione è meno intensa e più facilmente calcolabile - le previsioni sono state puntualmente verificate dagli esperimenti (Petra, DESY, Amburgo e LEP, CERN, Ginevra). Mentre nel regime opposto - dove l'interazione è molto intensa e calcolabile parzialmente per via numerica - si ritiene che la teoria debba dare luogo al fenomeno *del confinamento*, ovvero all'impossibilità di separare tra loro i quark, permanentemente legati all'interno degli adroni (la prova 'ab initio' di tale proprietà è uno dei Millennium Prize del Clay Mathematics Institute). A sua volta, il fenomeno del confinamento dovrebbe determinare la *neutralità di carica forte* dei composti di quark (adroni) e con essa la schermatura della carica stessa all'esterno dell'adrone che sarebbe alla origine del rapido decadere dell'interazione forte con la distanza. In questo modo, il corto raggio dell'interazione forte troverebbe la sua origine in un meccanismo simile a quello che fa decadere con la distanza le forze di Van der Waals (per un'in-

confluite nella EWT e nella QCD (per un'eccellente introduzione divulgativa al MS vedi [12]). Descrive le interazioni deboli, elettromagnetiche e forti ma non quelle gravitazionali, che hanno trovato un'elegantissima formulazione macroscopica nella Teoria della Relatività Generale (A. Einstein, 1916), ma che non è stato ancora possibile conciliare con il mondo microscopico della meccanica quantistica in una teoria di campo quantizzato rinormalizzabile. Formulato nel linguaggio delle teorie di campo quantizzato di gauge, il MS assume l'esistenza di *dodici campi materiali* di spin 1/2 (più altrettanti campi antimateriali), *dodici campi di forza* di spin 1 ed un *campo di Higgs* di spin 0 (vedi Fig. 3) i cui quanti devono essere identificati con le particelle materiali e con i mediatori delle interazioni che vengono osservate negli esperimenti. Assai articolato è il gioco delle interazioni. L'interazione forte richiede otto campi di forza (i cui quanti sono detti *gluoni*) ed opera su sei campi materiali (antimateriali) detti *quark* (*antiquark*) ma non sui rimanenti sei campi materiali detti *leptoni* (e *antileptoni*). L'interazione debole richiede invece tre campi di forza massivi (i cui quanti sono i mediatori  $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z_0$ ) ed ha un carattere *universale*, operando su tutti i campi materiali (e antimateriali) del MS. L'interazione elettromagnetica - unificata con quella debole - richiede un solo campo di forza (il cam-





po elettromagnetico i cui quanti sono i *fotoni*) ed ha un carattere quasi universale, lavorando su tutti i campi ad eccezione dei neutrini che non hanno carica elettrica.

Infine il campo di Higgs, benché assimilabile ad un tredicesimo campo di forza, a causa del suo spin nullo non determina forze sulle particelle ma piuttosto conferisce loro una massa. È in questo modo che i campi non massivi  $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z_0$  acquisiscono la massa efficace che rende l'interazione debole a corto raggio, ed i campi originariamente non massivi dei leptoni e dei quark acquisiscono la massa fisica che li caratterizza. Non si accoppiano invece al campo di Higgs i campi di forza gluonici ed elettromagnetici per cui sia l'interazione forte che quella elettromagnetica dovrebbero avere entrambe un carattere a lungo raggio. In realtà - come spiegato - l'interazione forte assume un andamento a corto raggio a causa del confinamento.

Senza dubbio il MS fa propria la prescrizione daltoniana di ancorare il problema dei componenti ultimi della materia ad una base empirica il più possibile ampia e articolata. Le analogie potrebbero spingersi ben oltre, qualora disponibili a vedere nelle unità indivisibili di Dalton, mutamente interagenti attraverso forze newtoniane, qualcosa di simile ai campi materiali e di forza del MS. Le diversità sono occultate da un linguaggio formale completamente diverso. I concetti originari di *spazio*, *tempo* e *particella* non sono quelli della fisica classica ma quelli codificati dalla teoria della relatività ristretta (spazio e tempo) e dalla teoria dei campi quantizzati (particella). In particolare, le particelle non sono più gli enti eterni ed immutabili postulati dall'atomismo classico ma piuttosto transitorie manifestazioni delle variazioni di energia di certi campi. Sono queste strutture fluide, variabili con la posizione ed il tempo, capaci di occupare e forse costituire tutto lo spazio, che assumono ora il ruolo di enti primari della descrizione in luogo delle particelle.

Il quadro offerto dal MS è ben lungi dall'aver quella semplicità che sembrava conferire all'atomi-

smo daltoniano un carattere definitivo. Occorrono almeno 25 campi fondamentali e 20 parametri liberi per far volare l'intero congegno ed accanto ad evidenti simmetrie vi sono anche imprevedibili ed ancor più rilevanti asimmetrie. Nessuna speculazione teorica avrebbe potuto concepire un simile disegno che è andato precisandosi gradualmente, spesso ripetendo e migliorando lo stesso tipo di esperimento presso macchine acceleratrici sempre più perfezionate. Il quadro, ben consolidato in tutte le sue parti sia sotto il profilo teorico che sperimentale, ha un evidente carattere provvisorio ed indica con chiarezza che il punto di arrivo immaginato da Dalton non è ancora stato raggiunto.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] E. Fermi, *Nuovo Cimento*, 1934, **11**, 1.
- [2] M. Gell-Mann, *Phys. Lett.*, 1964, **8**, 214.
- [3] E. Fermi, *Rev. Mod. Phys.*, 1932, **4**, 87.
- [4] C.N. Yang, R.L. Mills, *Phys. Rev.*, 1954, **96**, 191.
- [5] P.W. Higgs, *Phys. Rev. Lett.*, 1964, **13**, 508.
- [6] V.L. Ginzburg, On Superconductivity and Superfluidity, Nobel Lecture, 8 Dicembre 2003.
- [7] S.M. Bilenky, J. Hosek, *Phys. Rep.*, 1982, **90**, 73.
- [8] UA1 Collaboration, Experimental Observation of Events with Large Missing Transverse Energy Accompanied by a Jet Or a Photon(s) in p anti-p Collisions at  $s^{(1/2)}=540$ -GeV, *Phys. Lett.*, 1984, **139B**, 115.
- [9] ATLAS Collaboration, Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC, *Phys. Lett.*, 2012, **B716**, 1.
- [10] F. Wilczek, *Ann. Rev. Nuc. Part. Sc.*, 1982, **32**, 177.
- [11] H. Fritzsch, Quark, i mattoni del mondo, Bollati Boringhieri, 1983.
- [12] F. Close, The New Cosmic Onion, Taylor & Francis, 1983.