

Introduzione alla Teoria Quantistica dei Campi e alla Fisica delle Particelle Elementari

La Teoria Quantistica dei Campi

In tutte le usuali trattazioni della teoria quantistica una cosa di solito viene data per scontata: che lo spazio-tempo soggiacente alla Meccanica Quantistica sia il classico spazio euclideo quadridimensionale (3 dimensioni spaziali + 1 temporale). In altre parole lo spazio fisico è considerato come un usuale spazio tridimensionale ed il tempo è un parametro unidimensionale assoluto che scorre in avanti e indietro, determinando l'evoluzione temporale dei sistemi fisici.

Naturalmente questa non è la situazione tipica di una teoria relativistica, in cui spazio e tempo sono strettamente legati. Uno dei primi problemi che furono affrontati in seguito alla creazione della Meccanica Quantistica, fu dunque quello di darle una formulazione covariante "ambientandola" nello spazio-tempo relativistico (ovvero della sua unificazione con la Teoria della Relatività), nonché quello della sua generalizzazione a sistemi con un numero arbitrario di gradi di libertà: queste novità furono alcuni elementi che portarono alla creazione del filone di ricerca comunemente noto come Teoria Quantistica dei Campi.

L'equazione di Schroedinger *non* è relativisticamente invariante: se prendiamo una funzione d'onda dipendente dalle coordinate in uno spazio di Minkowski e operiamo una trasformazione di Lorentz, la funzione d'onda risultante non obbedisce più all'equazione di Schroedinger.

Fu P.A.M. Dirac a tentare una prima unificazione con il suo articolo del 1927 "Quantum Theory of the Emission and Absorption of Radiation" ([3]). In questo articolo Dirac pervenne ad un'equazione per un elettrone in un campo elettromagnetico, che di fatto rappresentava un'unificazione della Meccanica Quantistica con la Relatività Speciale.

In realtà - come si può vedere - l'equazione di Schroedinger ammette diverse riformulazioni relativisticamente invarianti, che hanno un diverso significato fisico.

La più semplice è l'*equazione di Klein-Gordon*, che rappresenta particelle scalari (campo scalare) neutre nel caso di soluzione reale, cariche nel caso di soluzione complessa.

Un'altra è appunto l'*equazione di Dirac*, che rappresenta particelle con spin (campo spinoriale) neutre nel caso di soluzione reale, cariche nel caso di soluzione complessa. Le soluzioni dell'equazione di Dirac sono dette anche *spinori*, perché tengono conto di un ulteriore numero quantico, lo *spin* delle particelle, che era stato introdotto nel 1925 da Uhlenbeck e Goudsmith per differenziare alcune orbite elettroniche che erano osservate negli esperimenti dell'epoca. Nelle soluzioni all'equazione di Dirac si ritrova tra l'altro anche la simmetria particella/antiparticella precedentemente ipotizzata dallo stesso Dirac (su cui torneremo in seguito).

Nel 1929 si pervenne ad una forma primitiva di *elettrodinamica quantistica*, una teoria sull'interazione luce/materia (luce intesa nel senso più generale di radiazione elettromagnetica), una sorta di prima versione di Teoria Quantistica dei Campi. Fin dall'inizio, però, la teoria presentava dei problemi quando si trattava di eseguire alcuni calcoli: molte quantità risultavano essere infinite.

Negli anni '50 Feynman, Schwinger e Tomonaga modificarono significativamente il formalismo canonico della quantizzazione ed arrivarono (indipendentemente) ad una nuova descrizione quantistica dell'elettrodinamica (conosciuta come *QED*), che risolveva il problema di come eseguire i calcoli, ed aveva uno straordinario accordo sperimentale. In particolare Feynman ebbe l'idea degli integrali di cammino, che prendeva spunto direttamente dalla teoria variazionale di Hamilton-Jacobi, ed era una sorta di reinterpretazione "quantistica" dei principi variazionali classici. Inoltre i calcoli venivano effettuati in maniera perturbativa mediante i cosiddetti diagrammi di Feynman, necessari a calcolare i valori dei contributi nelle interazioni di una particella con un'altra.

Questo approccio determino' un'interpretazione dei campi quantistici - ed in particolare dello stato di vuoto - che si dimostro' influente su tutte le teorie che seguirono. Alla base c'e' l'idea che il principio di indeterminazione energia-tempo di Heisenberg permette per tempi molto brevi delle grandi fluttuazioni di energia, che costituiscono violazioni locali del principio di conservazione dell'energia. Al vuoto puo' dunque corrispondere una continua attivita' di creazione ed assorbimento di particelle *virtuali*, anche se cio' e' ammesso soltanto per tempi brevi, poiche' oltre un certo tempo limite - ovvero oltre un certo livello di energia - le particelle diventerebbero osservabili e *reali*. Questo ha permesso di interpretare le interazioni di campo (in questo caso la forza elettromagnetica) come scambio di particelle virtuali (nel nostro caso fotoni), che in generale saranno chiamati *bosoni*. Piu' precisamente, in Teoria Quantistica dei Campi ad ogni punto dello spazio-tempo e' associato un'oscillatore lineare, rappresentato formalmente da un'operatore di creazione/distruzione, la cui attivita' per quanto osservato non e' mai nulla: ogni campo e' descritto da un particolare "tipo" di oscillatori, caratterizzati da una certa costante di accoppiamento. Il vuoto quantistico dunque e' qualcosa di altamente dinamico: possiede un certo livello di energia, detto *energia di punto zero*, che non e' nullo, e da' origine alle fluttuazioni virtuali (una conferma sperimentale di questo e' data ad esempio dall'*effetto Casimir*, la forza attrattiva misurata tra due condensatori scarichi). Inoltre in presenza di apporti energetici esterni una particella virtuale puo' diventare osservabile, e dunque nella Teoria Quantistica dei Campi il numero di particelle non e' costante.

Ma anche in questa interpretazione si ripropongono gli stessi problemi. L'interazione dell'elettrone con i suoi fotoni virtuali piu' prossimi produce nella teoria delle divergenze (anomalia che era presente anche nell'elettrodinamica classica, il cosiddetto "problema dell'auto-energia dell'elettrone"). Per far fronte a questo problema nella QED veniva utilizzata la procedura della *rinormalizzazione* (che era stata usata con successo per la prima volta da Bethe nel 1947 per calcolare esplicitamente il *Lamb shift* nello spettro dell'atomo di idrogeno). Tuttavia, nonostante in questo campo dal punto di vista del formalismo matematico siano stati fatti notevoli passi avanti, manca tuttora una piena giustificazione fisica di questa procedura.

Facciamo allora un passo indietro: l'approccio canonico consisteva nel considerare i campi classici, derivati da modelli lagrangiani (nel nostro caso il campo elettromagnetico), ed applicare ad essi procedure di "quantizzazione". Ora, un campo classico dipende dalle coordinate spaziali, e come tale puo' essere assimilato ad un sistema fisico con un'infinita' continua di gradi di liberta'.

In altri termini, mentre considerando un sistema classico ad uno (o ad n) gradi di liberta' ed applicando la quantizzazione si ottiene la Meccanica Quantistica ad uno (o ad n) gradi di liberta', quantizzando un sistema continuo si ottiene (o si dovrebbe ottenere) la Teoria Quantistica dei Campi. In questo senso la Teoria Quantistica dei Campi dovrebbe essere una generalizzazione ad infiniti gradi di liberta' della Meccanica Quantistica. Per questo in Teoria Quantistica dei Campi le lagrangiane e le hamiltoniane sono sostituite rispettivamente dalla densita' di lagrangiana e dalla densita' di hamiltoniana.

Naturalmente il passaggio da un numero finito ad un numero infinito di gradi di liberta' della teoria e' tutt'altro che irrilevante dal punto di vista matematico anzi produce in realta' delle importanti conseguenze. La piu' importante e' il cosiddetto *teorema di Stone-von Neumann*: si puo' dimostrare che nel caso della Meccanica Quantistica con un numero finito di gradi di liberta' l'insieme degli osservabili fisici ammette una sola realizzazione come oggetto algebrico, mentre nel caso di infiniti gradi di liberta' questa realizzazione (in termini matematici *rappresentazione*) in generale non e' unica. Questo fatto ha delle implicazioni notevoli sui fondamenti della fisica: nel caso di infiniti gradi di liberta' la presenza di diverse rappresentazioni dell'algebra degli osservabili fisici equivale alla presenza di *regole di superselezione* che limitano la validita' del principio di sovrapposizione quantistico all'interno di settori ben definiti, ma che consentono di trattare nella stessa teoria sistemi

fisici con numeri quantici differenti che in generale hanno il significato di “cariche”. In altre parole soltanto nel caso infinito-dimensionale sono effettivamente presenti diversi settori di superselezione corrispondenti a cariche fisiche differenti, il che permette di superare i limiti teorici del principio di sovrapposizione quantistica rilevati in [11].

Si sa inoltre, come chiarito da Bohr e Rosenfeld in [1] che non ha senso misurare esattamente il valore di un campo quantistico (ad esempio il campo elettromagnetico) in un punto dello spazio-tempo. In altre parole un campo quantistico non può assumere un valore puntuale esatto ma ha senso soltanto come una media spazio-temporale effettuata su un volume finito avente buone proprietà di regolarità. Dal punto di vista matematico un campo quantistico non sarà pertanto una *funzione* dello spazio-tempo (come un campo classico) ma una *distribuzione*. Seguendo questa idea negli anni '50 Garding e Wightman arrivarono ad una prima formulazione “costruttiva” della Teoria dei Campi, enunciando una serie di assiomi - motivati da requisiti fisici di base - che caratterizzavano in maniera matematica precisa gli oggetti della teoria. Si trattava dunque di trovare modelli concreti che soddisfacessero tale assiomatica (v. [8]).

Nel formalismo della Teoria dei Campi lo spazio di Hilbert dove vivono le funzioni d'onda è sostituito dallo *spazio di Fock*, che contiene le funzioni d'onda di stati con un numero arbitrario di particelle. Su questo spazio agiscono i campi quantistici (che possono essere pensati come una sorta di generalizzazione ad infiniti gradi di libertà delle funzioni d'onda) che - come abbiamo accennato - sono operatori che fanno passare da uno stato con un certo numero di particelle ad un altro. Tuttavia tale definizione matematica sussiste soltanto nel caso irrealistico di campi liberi, mentre il caso interagente viene interpretato usualmente grazie alla teoria dello scattering. In altre parole nella Teoria Quantistica dei Campi manca ancora oggi una comprensione precisa proprio dell'oggetto fondamentale della teoria, ovvero il campo quantistico interagente, nonostante fisici e matematici abbiano continuato a fare ricerca sull'argomento da oltre 70 anni. In pratica tuttora sembra impossibile trattare i campi quantistici senza ricorrere alla teoria delle perturbazioni, ai diagrammi di Feynman ed alla rinormalizzazione.

La Fisica delle Particelle Elementari

Parallelamente all'indagine matematica, in tutto il Novecento si ebbe un notevole avanzamento delle conoscenze riguardanti i costituenti ultimi della materia, reso possibile grazie all'aumento del potere risolutivo dei dispositivi sperimentali. La Meccanica Quantistica diventò a mano a mano il riferimento teorico per cercare di spiegare i diversi fenomeni microscopici osservati in natura, che venivano interpretati da una prospettiva più intuitiva ed empirica. Questi sono infatti gli anni in cui nasce la fisica delle particelle elementari: vengono osservati per la prima volta il neutrone, il positrone, ... Quest'ultimo era l'antiparticella dell'elettrone, cioè un elettrone dotato di carica elettrica positiva (o se si vuole un elettrone che si muove “all'indietro nel tempo”). L'esistenza dell'antimateria era stata predetta teoricamente dallo stesso Dirac, e costituisce un grande successo della fisica teorica. Alcune particelle erano state ipotizzate teoricamente, come ad esempio i neutrini, ipotizzati da Pauli nel 1930 per salvare il principio di conservazione dell'energia a livello di certe reazioni nucleari.

È qui il caso di fare una riflessione sull'utilizzo quasi alchemico – eppure efficace – che viene fatto dei principi fondamentali della fisica, in quell'ambito nebuloso al confine tra fisica sperimentale e speculazione teorica, dove per far quadrare i dati sperimentali con le conoscenze a disposizione e le previsioni teoriche, si rende necessario ipotizzare l'esistenza di nuove entità che poi devono essere a loro volta sottoposte al test dell'osservazione sperimentale.

Nel periodo in cui fu creata la teoria quantistica (anni '20) le sole forze conosciute erano quella elettromagnetica e quella gravitazionale. Nei decenni successivi la situazione cambio', furono scoperte nuove particelle elementari, e parallelamente fu ipotizzata la presenza di ulteriori interazioni come la *forza forte* e la *forza debole*, necessarie a dare stabilita' ai nuovi modelli di materia che stavano emergendo. La forza forte e' responsabile del legame protone-neutrone nel nucleo atomico, mentre quella debole e' l'interazione che regola i fenomeni di decadimento come ad esempio il decadimento radioattivo beta.

Gia' nella teoria di Einstein dell'effetto fotoelettrico (1905), la radiazione elettromagnetica era trasportata da particelle non massive (ma dotate di impulso) dette fotoni. Nella teoria quantistica delle particelle elementari - come abbiamo visto - questa ipotesi viene estesa in generale: ogni campo di forza e' mediato da particelle di scambio, dette *bosoni* (ad esempio nel caso del campo elettromagnetico il bosone di interazione e' appunto il fotone). Inoltre, la conoscenza circa le particelle ultime della materia fece un balzo in avanti con la scoperta (preceduta anche qui da ipotesi teoriche, ad opera di Gell-Man) dei *quark*, e l'introduzione di ulteriori numeri quantici (come il *sapore* ed il *colore*) e di relative leggi di conservazione. Nella teoria ed in natura i quark compaiono in 6 sapori differenti (*up, down, charm, strange, top/truth, bottom/beauty*) ed ognuno di essi possiede, oltre alla carica elettrica, una carica di colore (*verde, rosso o blu*). I quark sono tuttora considerati i principali costituenti ultimi della materia: essi sono i mattoni fondamentali di cui sono fatti i protoni ed i neutroni. Un'altra importante classe di particelle materiali e' costituita dai *leptoni*, che sono le particelle soggette alla forza debole. I leptoni sono dotati di un numero quantico chiamato *carica di sapore*, che generalizza la carica elettrica, pertanto la forza debole puo' essere vista come un caso generale che si riduce alla quella elettromagnetica nel caso particolare in cui la carica e' la carica elettrica.

Corrispondentemente fu data una formulazione unificata della forza debole e di quella elettromagnetica con la *teoria elettrodebole* standard (Weinberg, Glashow, Salam, 1967), in cui l'interazione e' descritta da un oggetto chiamato campo di Yang-Mills che nel caso di carica elettrica si riduce al campo elettromagnetico. Per una teoria dell'interazione forte bisognera' attendere la meta' degli anni 1970 con la *cromodinamica quantistica* (QCD), in cui un ruolo analogo e' giocato dalla *carica di colore* dei quark. In entrambi i casi - come gia' succedeva per il campo elettromagnetico - le due nuove forze sono mediate dallo scambio di bosoni tra quark e leptoni.

Per tutte le particelle quantistiche vale dunque una classificazione generale in *bosoni* e *fermioni*, in base allo spin ed al loro comportamento collettivo (in accordo col Teorema di Spin-Statistica): i fermioni, ossia le particelle di cui e' costituita la materia conosciuta, hanno spin semiintero ($1/2, 3/2, \dots$), seguono la *statistica di Fermi-Dirac* e per essi vale il principio di esclusione di Pauli, mentre i bosoni, che rappresentano le particelle virtuali di mediazione delle interazioni che tengono insieme i fermioni, hanno spin intero e seguono la *statistica di Bose-Einstein*.

Ad ognuna delle quattro forze fondamentali oggi conosciute corrisponde uno (o piu') bosoni di interazione:

(1) La forza *elettromagnetica* (a lungo range) tra cariche elettriche, descritta dalle equazioni di Maxwell, e' mediata da bosoni di spin 1 detti *fotoni*. La sua costante di accoppiamento e' la cosiddetta *costante di struttura fine*.

(2) La forza *nucleare debole* (a corto range) agisce su una classe particolare di particelle chiamate *leptoni*, come ad esempio l'elettrone ed il neutrino, ed e' mediata da tre particelle di spin 1 chiamate *bosoni vettori* W^+, W^- e Z^0 i quali, a differenza degli altri bosoni di interazione, hanno massa a riposo diversa da zero.

(3) La forza *nucleare forte* (a corto range) agisce su un'altra classe di particelle chiamate *adroni*, che si dividono in *barioni* (ad esempio il protone ed il neutrone) e *mesoni* (come il pione). Poiche' gli adroni sono fatti di quark, l'interazione forte e' descritta come scambio di *gluoni* (bosoni di spin 1) tra quark. In particolare, i barioni sono costituiti da configurazioni di tre quark, mentre i mesoni da coppie quark-antiquark. Risulta pertanto che i mesoni sono bosoni, anche se non rappresentano nessuna interazione.

(4) La forza *gravitazionale* (a lungo range) classicamente e' descritta dalle equazioni di Einstein. La sua costante di accoppiamento e' la *costante di Newton-Cavendish*. Nella sua versione quantistica si ipotizza che sia mediata da bosoni non massivi di spin 2 detti *gravitoni*, che tuttavia non sono stati mai osservati sperimentalmente: dunque la forza gravitazionale resta esclusa dalla teoria quantistica delle interazioni fondamentali.

LEPTONI				QUARK			
nome della particella	simbolo	massa di riposo (MeV)	carica elettrica	nome della particella	simbolo	massa di riposo (MeV)	carica elettrica
neutrino elettronico	ν_e	circa zero	0	su	u	310	+2/3
elettrone	e^-	0,511	-1	giù	d	310	-1/3
neutrino elettronico muone	ν_μ	circa zero	0	incanto strano	c	1500	+2/3
muone	μ^-	106,6	-1		s	505	-1/3
neutrino tauonico	ν_τ	< 164	0	alto / verità	t	22 500; particella ipotetica	+2/3
tau	τ^-	1784	-1	basso / bellezza	b	\approx 5000	-1/3

forza	raggio d'azione	intensità a 10^{-13} cm rispetto alla forza forte	portatore	massa di riposo (GeV)	spin	carica elettrica	note
gravità	infinito	10^{-38}	gravitone	0	2	0	ipotizzato
elettromagnetismo	infinito	10^{-2}	fotone	0	1	0	osservato direttamente
debole	inferiore a 10^{-16} cm	10^{-13}	bosoni vettori deboli W^+	81	1	+1	osservato direttamente
			W^-	81	1	-1	osservato direttamente
			Z^0	93	1	0	osservato direttamente
forte	inferiore a 10^{-16} cm	1	gluoni	0	1	0	confinati permanent.

Tutte le interazioni finora introdotte (esclusa la gravità) sono formulate per mezzo del campo di Yang-Mills, che si affermò come lo strumento chiave per unificare la trattazione delle forze tra le particelle fondamentali dopo che nel 1971 il fisico olandese Gerardus 't Hooft dimostrò la sua rinormalizzabilità (il che avviene come vedremo in condizioni di "rottura di simmetria"). Ora, il campo di Yang Mills funziona grazie ad un principio fondamentale, chiamato *principio di gauge*, il quale postula l'esistenza di una qualche forma di simmetria globale (cioè che agisce identicamente su tutti i punti dello spazio-tempo) che può agire anche soltanto localmente lasciando invariata la lagrangiana del sistema. In altre parole in tutte le interazioni incontrate finora un certo numero di particelle possono essere scambiate senza che questo cambi la forma delle equazioni del moto. Queste simmetrie possono essere identificate con un gruppo di trasformazioni geometriche, dunque una teoria di gauge dipende unicamente dalla scelta di un tale gruppo di simmetrie. Storicamente la prima teoria fisica che presentava una simmetria di gauge fu l'elettromagnetismo, ma l'importanza di questa proprietà delle equazioni di Maxwell non fu immediatamente compresa. Tuttavia dopo l'avvento della meccanica quantistica, Weyl, Fock e London scoprirono che questa invarianza per una trasformazione di fase complessa, cioè una simmetria di gauge U(1) spiegava l'effetto di un campo elettromagnetico sulla funzione d'onda di una particella quantistica elettricamente carica, creando di fatto la prima teoria di gauge. Successivamente, negli anni cinquanta, Chen Ning Yang e Robert Mills estesero l'invarianza di gauge dell'elettromagnetismo, utilizzando un gruppo di simmetria *non-abeliano* (ossia non-commutativo) SU(2), il che trovò applicazione nella teoria di campo dell'interazione debole. Infine fu trovata una teoria di gauge per l'interazione forte, che fu chiamata *cromodinamica quantistica* poiché è una teoria di gauge per l'azione del gruppo SU(3) sulle terne di colore dei quark. In conclusione la forza elettromagnetica corrisponde alla scelta del gruppo U(1) (ovvero alla simmetria di scambio della componente elettrica e magnetica del campo), la forza debole ad SU(2) (che permette lo scambio di 2 particelle), mentre la forza forte ad SU(3) (che permette di scambiare le 3 particelle di colore diverso). Tali trasformazioni geometriche sono assimilabili grosso modo a delle rotazioni, e se ne può considerare anche la composizione. Ad esempio la teoria elettrodebole corrisponde alla scelta del gruppo di simmetria SU(2)×U(1).

Una proprietà di cui godono le teorie di gauge non-abeliane e dunque in particolare le teorie di Yang-Mills è la cosiddetta *libertà asintotica*, ossia il fatto che l'interazione tra le particelle diventa arbitrariamente debole a distanze sempre più piccole, ovvero, equivalentemente, ad energie arbitrariamente elevate. Questo si supposeva essere una caratteristica fondamentale dell'interazione forte, e ciò decretò il successo delle teorie di gauge come formalismo unificato capace di descrivere le interazioni fondamentali.

Un'altra proprietà fondamentale della cromodinamica quantistica è il fenomeno del *confinamento* dei quark, che è legato alla libertà asintotica ma si situa al suo estremo opposto: mentre la libertà asintotica fa sì che due quark dentro un adrone si comportano come oggetti liberi, tentando di separarli accade che la forza gluonica attrattiva cresce enormemente. In pratica non è possibile trovare quark isolati, ma soltanto adroni costituiti da coppie o triplette di quark in modo che la carica di colore complessiva sia neutra. Tuttavia il confinamento è stato osservato negli esperimenti ma non è ancora stato dimostrato teoricamente: uno dei *millennium prizes* proposti dall'Istituto Matematico Clay è riservato a chiunque riesca a fornire una dimostrazione analitica di questo fatto.

In ogni caso, grazie al campo di Yang-Mills, e' andato via via delineandosi un quadro unificato della materia e delle interazioni in termini di particelle elementari, comunemente noto con il nome di Modello Standard, che comprende la teoria della forza forte, di quella elettrodebole, e prevede l'esistenza di tutte le particelle effettivamente osservate in laboratorio. Queste sono classificate in tre famiglie (o *generazioni*) di 4 fermioni ciascuna (2 leptoni - uno carico ed il suo corrispondente neutro - e 2 quark):

- a) elettrone (e), neutrino elettronico (ν_e), quark *up* (u) e *down* (d)
- b) muone (μ), neutrino muonico (ν_μ), quark *strange* (s) e *charm* (c)
- c) tauone (τ), neutrino tauonico (ν_τ), quark *top* (t) e *bottom* (b)

A queste si aggiungono le tre famiglie corrispondenti di anti-particelle: poiche' ogni sapore di quark conta come 3 particelle in totale abbiamo 48 fermioni.

Infine ci sono 12 bosoni: 8 gluoni (g), il fotone (γ) e i 3 bosoni per l'interazione debole (W^+ , W^- , Z). In tutto dunque si contano 60 particelle. L'ultimo quark presente nel modello, il quark *top* e' stato osservato al Fermilab di Chicago nel 1995.

Pur essendo largamente verificato sperimentalmente con ottima precisione, ed accettato dalla comunita' scientifica, il Modello Standard non e' esente da problematiche e critiche di vario genere. Innanzitutto, esso contiene 19 costanti arbitrarie, tra cui le masse delle particelle, che non sono ricavate teoricamente ma determinate sperimentalmente. Per superare questa lacuna, lo schema e' stato successivamente ampliato incorporando la proposta di Higgs per spiegare la massa delle particelle. Questa ipotesi consiste nell'introduzione di un meccanismo, basato sulla nozione di *rottura spontanea di simmetria*, mediante il quale e' possibile calcolare la massa di tutte le particelle elementari presenti nel Modello Standard. Si puo' dimostrare che la rottura spontanea di simmetria non si verifica in una teoria quantistica con un numero finito di gradi di liberta' (a causa dell'*effetto tunnel*), ma e' un fenomeno proprio del caso di infiniti gradi di liberta', ovvero della Teoria Quantistica dei Campi. Tuttavia, questa ipotesi prevede l'esistenza di un ulteriore campo (il *campo di Higgs*), mediato da un'ulteriore particella, detta *bosone di Higgs*, la cui massa non viene predetta dalla teoria, e che non e' ancora mai stata osservata sperimentalmente. La ricerca del bosone di Higgs e' uno degli obiettivi principali degli esperimenti attualmente in fase di completamento presso l'LHC (Large Hadron Collider), al CERN di Ginevra, il piu' grande e potente acceleratore di particelle finora realizzato.

La ricerca di una sempre maggiore simmetria, e le questioni legate alla sua rottura, sono centrali all'interno del dibattito intorno al Modello Standard. Ad esempio le tre generazioni di fermioni sono tutte molto simili tra loro, e a causa della loro massa maggiore, le particelle della seconda e della terza generazione sono piu' instabili e tendono a decadere nelle particelle piu' leggere costituite da elementi della prima famiglia. Ad alte temperature compaiono sorprendenti somiglianze non solo tra le tre generazioni di fermioni ma anche tra le forze fondamentali: secondo la teoria la forza debole e quella elettromagnetica diventano una sola (l'interazione elettrodebole), ed i bosoni risultano privi di massa, mentre a temperature piu' basse la simmetria si rompe ed i bosoni acquistano una massa. E' interessante notare che in fisica situazioni analoghe di creazione/rottura di simmetria al variare della temperatura si trovano gia' in fenomeni naturali noti come il ferromagnetismo o la cristallizzazione.

Nella teoria standard ogni interazione possiede una qualche particolare simmetria (U(1), SU(2), SU(3)), ma queste sono tra loro tutte differenti. Diversi tentativi sono stati fatti di semplificare la teoria facendo ricorso ad una qualche simmetria di ordine superiore, ma cio' e' stato possibile soltanto a scale di energia molto elevate (molto al di la' di quelle accessibili agli esperimenti), avendo tra l'altro come effetto collaterale la creazione di nuove particelle. Nelle cosiddette GUT (*Grand unification theories*, teorie della grande unificazione) i gruppi SU(3), SU(2) e U(1) vengono considerati come sottogruppi di un unico gruppo di simmetria più grande, che a basse energie si riduce al prodotto SU(3)xSU(2) xU(1) per rottura spontanea di simmetria. Nella prima e piu' semplice di queste teorie, il gruppo di unificazione e' SU(5): questa scelta introduce 12 nuove particelle bosoniche, il che porta a 24 il numero totale di bosoni. Le energie a cui avviene l'unificazione della simmetria sono molto superiori a quelle accessibili agli esperimenti, tuttavia tutte le GUT hanno in comune una previsione verificabile, che non e' presente nel Modello Standard: il *decadimento del protone*. Poiche' in queste teorie sotto certe circostanze un quark puo' mutare in un elettrone o in un neutrino, questo implica che il protone e' instabile (sebbene cio' si avverta su scale temporali molto lunghe). Ma questo non e' mai stato osservato sperimentalmente: in particolare gli esperimenti effettuati nell'osservatorio giapponese Super-Kamiokande hanno stabilito un limite inferiore per il tempo di dimezzamento del protone pari a 6.7×10^{32} anni, il che falsifica la maggior parte delle GUT piu' semplici, tra cui SU(5). Inoltre nelle GUT le energie che intervengono sono molto grandi, dunque ci si aspetta che a tali livelli sopraggiungano anche effetti gravitazionali, che - come abbiamo visto - non vengono presi in considerazione nel modello.

Gli esperimenti di Super-Kamiokande hanno anche sancito una prima deviazione sperimentale dal Modello Standard, con la scoperta del fenomeno dell'*oscillazione dei neutrini* fra sapori diversi. Questo implicava che i neutrini hanno una massa (e dunque che viaggiano ad una velocita' inferiore a quella della luce, e possono esistere con spin destrorso e sinistrorso). Per questo motivo i fisici hanno aggiornato il Modello Standard introducendo una massa per i neutrini, il che ha aggiunto altri 9 parametri liberi nella teoria, oltre ai 19 gia' presenti.

Un'altra possibile estensione del Modello Standard e' rappresentata dalla teoria della *supersimmetria* (nota anche come SUSY, da SuperSYmmetry). Questa ipotesi prevede che ogni particella ha un partner supersimmetrico, piu' precisamente ogni fermione un superpartner bosonico, ed ogni bosone un superpartner fermionico, legati tra loro da una certa relazione tra gli spin. La teoria permette di spiegare alcune questioni insolte del modello standard (come quella della materia oscura, di cui parleremo tra breve), tuttavia introducendone altre. Le particelle supersimmetriche finora non sono mai state osservate sperimentalmente, ma sono tra gli obiettivi dell'LHC.

Insieme alla presenza di un notevole numero di parametri liberi necessari per rendere conto delle masse delle particelle, un'altra incompletezza fondamentale del Modello Standard riguarda la presenza della cosiddetta *materia oscura*, ossia quella materia - di natura differente rispetto a quella ordinaria - che dovrebbe essere presente nello spazio a causa degli effetti gravitazionali osservati su una moltitudine di fenomeni astronomici, non riconducibili alle stime di quantita' di materia "visibile" attualmente contenuta nell'universo. Il termine "oscura" si riferisce al fatto che questo tipo di materia non emette alcun tipo di radiazione elettromagnetica, in particolare luce. Secondo le piu' recenti misure, tale materia dovrebbe costituire circa il 30% dell'energia dell'universo, e circa il 90% della massa. Esistono varie ipotesi - per lo piu' di natura cosmologica - per spiegare la presenza e la natura di questo tipo di materia ma, a causa delle difficolta' sperimentali, nessuna di queste e' universalmente accettata dalla comunita' scientifica.

Le questioni cosmologiche ci danno lo spunto per introdurre quello che piu' volte abbiamo citato e che rappresenta senza dubbio il problema teorico principale, che ci riporta al punto da cui siamo partiti: il Modello Standard non include la gravita'. A differenza delle altre tre forze, la gravita' e' descritta classicamente, geometricamente, non quantisticamente. I tentativi di trattare la gravita' con i metodi della teoria quantistica (le cosiddette teorie di *gravita' quantistica*) conducono a delle contraddizioni matematiche: calcolando l'interazione di un elettrone con un campo gravitazionale, come risultato si ottiene una probabilita' infinita. In altre parole, la quantum gravity non e' rinormalizzabile.

Ma i problemi di unificazione vanno oltre questi aspetti meramente tecnici. Le due teorie differiscono tra loro nei concetti fondamentali, a partire dalle stesse nozioni di spazio, tempo e di interazione. Nella Teoria Quantistica dei Campi, che pure include la Relativita' Ristretta, lo spazio-tempo e' semplicemente l'ambiente dove vivono le particelle/onde che rappresentano la materia e le interazioni, secondo un'interpretazione dei campi quantistici che in ultima analisi poggia sull'idea di probabilita' e di caso. Nella Relativita' Generale invece esso e' qualcosa di altamente dinamico, un soggetto che si curva in presenza della massa, determinando il campo gravitazionale: dunque il concetto di campo e' radicalmente diverso nelle due teorie. Inoltre non c'e' spazio per il caso nell'universo della Relativita' Generale: la curvatura dello spazio-tempo e' espressa in termini puramente geometrici, e vige il piu' assoluto determinismo.

Bibliografia:

- [1] N.Bohr, L.Rosenfeld: *Field and charge measurements in quantum electrodynamics*, Phys. Rev. 78 n.6 (1950), 794-798.
- [2] A.Borga: *Alcuni aspetti matematici della teoria algebrica dei campi*, tesi di laurea, Universita' degli Studi di Roma "La Sapienza", a.a.2004-2005.
- [3] P.A.M.Dirac: *Quantum theory of the emission and absorption of radiation*, Proc. Roy. Soc. A114 (1927), p.243.
- [4] S.Doplicher: *Scienza e conoscenza, la prospettiva della fisica*, Associazione Cultura e Sviluppo Alessandria, 2007.
- [5] R.P.Feynman: *QED*, Adelphi, 1985.
- [6] M.Kaku: *Hyperspace*, Anchor Books, 1994.
- [7] I.Licata: *Osservando la sfinge: la realta' virtuale della fisica quantistica*, Di Renzo Editore, 2003.
- [8] M.Reed, B.Simon: *Methods of modern mathematical physics, vol.I-II*, Academic Press, 1974-75.
- [9] P.Scaruffi: *Thinking about thought*, Writers Club Press, 2003.
- [10] E.Segre: *Personaggi e scoperte della fisica contemporanea*, Mondatori, 1976.
- [11] G.C.Wick,A.Wightman,E.P.Wigner: *The intrinsic parity of elementary particles*, Commun. Math. Phys. 88 (1952), 101-105.