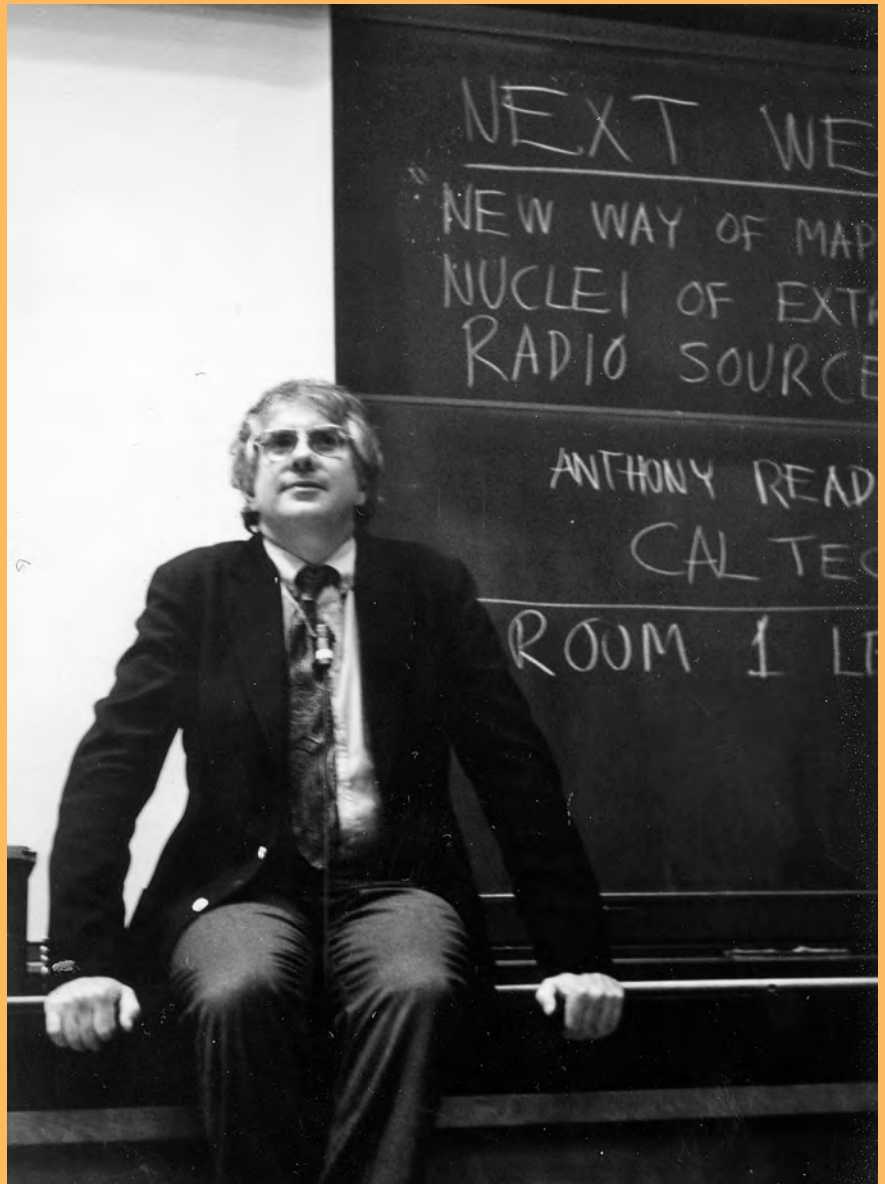


Bella e impossibile

Tentativi di una grande unificazione

di Davide Meloni

“Presentiamo una serie di ipotesi e speculazioni che conducono inevitabilmente alla conclusione che $SU(5)$ sia il gruppo di *gauge* del mondo”. Con questa frase piena di ottimismo, Howard Georgi e Sheldon Lee Glashow aprirono il loro articolo fondamentale del 1974 e, con questo, la stagione delle teorie di grande unificazione (Gut). Questa stagione è ancora aperta, dato che la teoria proposta inizialmente, pur essendo bella e semplice, purtroppo era anche sbagliata. L'idea di una teoria Gut ha come fondamento il principio che al di sopra di una certa scala di energia tutte le interazioni tra particelle sono dettate da una sola forza, la cui intensità è fissata dal valore di un'unica costante di accoppiamento (vd. in *Asimmetrie* n. 18 p. 4, ndr). Contrariamente a quanto accade nel modello standard, dove ci sono tre gruppi di simmetria con tre distinte costanti di accoppiamento, il gruppo di simmetria di una teoria Gut è unico. Tuttavia, dato che alle energie alle quali conduciamo gli esperimenti attuali sperimentiamo tre forze distinte (debole, elettromagnetica e forte) e non una sola, tale principio di “simmetria Gut” non può essere valido a tutte le energie: in gergo tecnico si dice che la simmetria è “rotta”. Il prototipo di teoria Gut proruppe in modo vigoroso nel panorama scientifico con il lavoro di Howard Georgi e Sheldon Lee Glashow già citato, chiamato per questo motivo il “modello di Georgi-Glashow”, basato sul gruppo di simmetria noto come $SU(5)$, che in “matematica” rappresenta il gruppo delle matrici speciali unitarie in cinque dimensioni (vd. in *Asimmetrie* n. 16 p. 11, ndr). L'ottimismo di Georgi e Glashow, in effetti, poteva all'epoca essere giustificato. Dal punto di vista matematico, il gruppo $SU(5)$ è sufficientemente grande da poter “ospitare” il modello standard, il che rappresenta una *sine qua non* per ogni teoria accettabile delle interazioni fondamentali ad alta energia. E, cosa altrettanto importante, tutte le particelle del modello standard sono



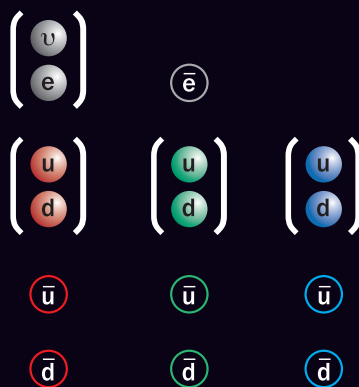
raggruppate nelle sole “rappresentazioni” (vd. approfondimento), denominate 10 e 5. In particolare, la 5 contiene tre copie del quark down (che risente della forza forte e pertanto è anche detto “tripletto di colore”) e

a.
Sheldon Glashow, che assieme a Howard Georgi lavorò al modello Georgi-Glashow.

Rappresentazioni fondamentali

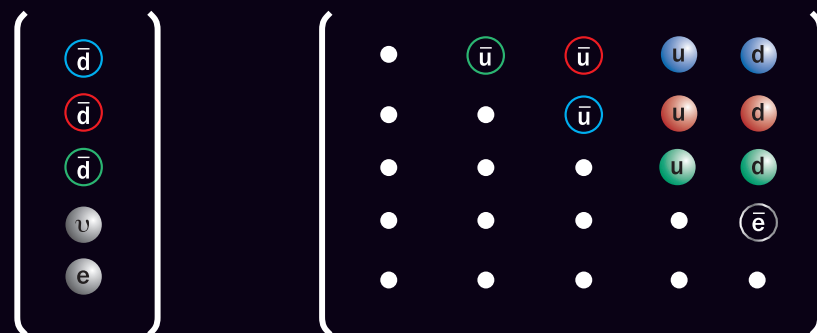
1.

I 15 fermioni (leptoni e quark) della prima generazione nel modello standard sono raggruppati in 4 “doppietti” del gruppo SU(2) (tra parentesi) e 7 singoletti. Nel modello di grande unificazione basato sul gruppo SU(5) tutti questi fermioni trovano posto in due sole rappresentazioni, la 5 e la 10, e non c'è spazio per nessun altro fermione non previsto nel modello standard. Una struttura del tutto analoga si realizza per la seconda e per la terza generazione.



modello standard

Gli elementi di un gruppo di simmetria devono soddisfare delle precise leggi di moltiplicazione che identificano la simmetria in questione. Una rappresentazione di tale gruppo è una “realizzazione” di queste relazioni moltiplicative in termini di matrici quadrate. Nel caso di SU(5), la rappresentazione che chiamiamo “fondamentale” è costituita da matrici 5x5. Queste matrici, a loro volta, agiscono su vettori o matrici con un numero preciso di componenti, che ne identifica la dimensione. Ad esempio, la rappresentazione 5 di SU(5) è un vettore a cinque componenti (da cui il nome “5”), quello mostrato in basso a sinistra nella fig. 1, che sono il quark down destrorso in tre copie (perché i quark sono



modello GUT SU (5)

particelle esistenti in tre copie associate a tre distinti colori), l'elettrone e il neutrino. La rappresentazione 10, invece, è una matrice 5x5 (quella mostrata in basso a destra

nella fig. 1) che ha solo dieci componenti indipendenti e che sono tre copie del quark down sinistrorso, sei copie del quark up (destrorso e sinistrorso) e il positrone.

la coppia elettrone-neutrino (che risente solo della forza elettrodebole e quindi è chiamato “doppietto debole”), mentre la 10 contiene tutte le altre particelle del modello standard. Questo significa che, ad esempio, tutte le particelle della 5 hanno interazioni identiche laddove sia valida la simmetria SU(5); e analogamente per le particelle nella 10. Questa assegnazione viene replicata tre volte per tener conto delle famiglie di fermioni oggi conosciute.

Un primo successo di SU(5) fu quello di aver spiegato in modo molto semplice il valore frazionario della carica elettrica del quark down, pari a 1/3 della carica dell'elettrone. Altrettanto impressionante fu la predizione del valore del cosiddetto “angolo di Weinberg”, un numero che

nel modello standard non ha alcuna spiegazione, mentre in SU(5) risulta semplicemente dettato dalle sue proprietà gruppali. Questi primi successi dettero una spinta decisiva allo studio delle implicazioni di SU(5) in altri settori delle interazioni fondamentali. Tuttavia, a uno scrutinio più attento e preciso, la teoria bella per la sua semplicità ed eleganza mostrò alcune crepe, che successivamente ne decretarono il fallimento, per lo meno nella sua versione originaria. In primo luogo, questo modello non prevede affatto l'unificazione completa delle tre costanti di accoppiamento del modello standard in una sola costante. In effetti, partendo dai valori delle costanti alla scala elettrodebole ed estrapolandoli

ad alta energia, si osservano incroci di due costanti alla volta, ma mai di un unico punto in cui tutte e tre assumono simultaneamente lo stesso valore. In altri termini, non esiste una scala di energia alla quale le tre costanti di accoppiamento abbiano lo stesso valore. Un altro dei punti critici deriva dal fatto che SU(5) prevede l'esistenza di 24 mediatori della forza, 12 dei quali sono quelli noti del modello standard (il fotone, i tre bosoni vettori W[±] e Z, gli otto gluoni), mentre i restanti 12 sono nuove particelle la cui massa è dettata dal valore della scala di energia a cui la simmetria viene rotta. Oltre a essere supermassivi, questi 12 bosoni di gauge possono anche mediare il decadimento del protone (vd. in Asimmetrie n. 20 p.

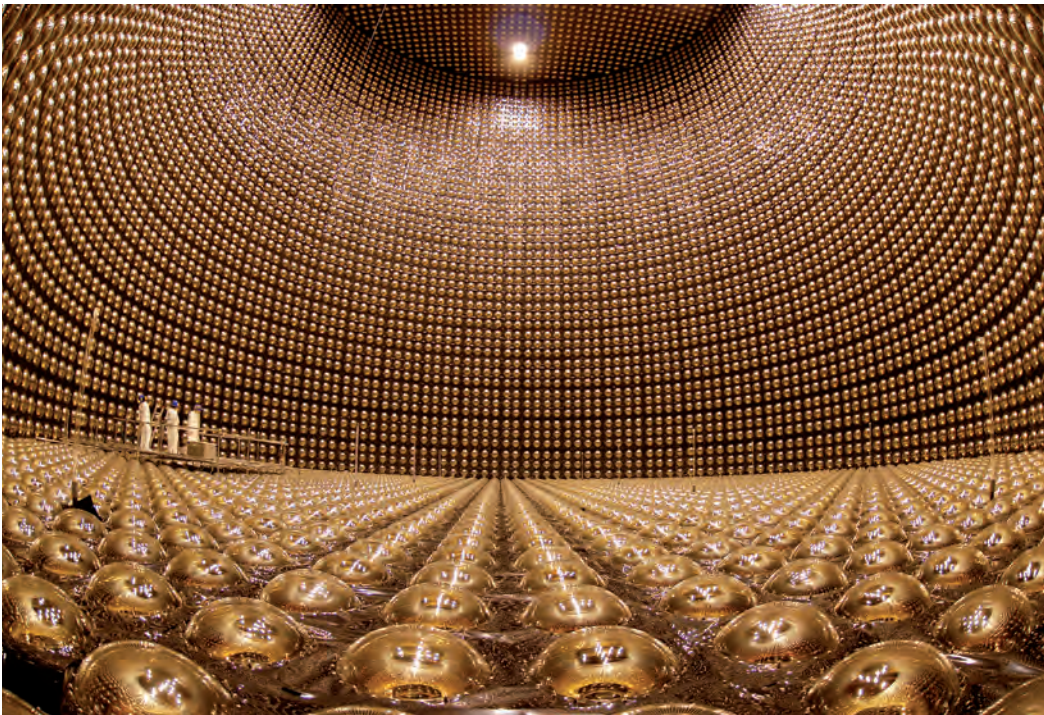
27, ndr) in un tempo troppo breve se confrontato con i limiti sperimentali, a meno che la loro massa non risulti superiore ai 10^{16} GeV. Ma il modello di Georgi-Glashow stesso ha difficoltà a giustificare un valore così alto.

Il settore scalare della teoria pone altrettanti problemi teorici. Che SU(5) sia rotta spontaneamente nelle simmetrie del modello standard può avvenire mediante il meccanismo della rottura spontanea che coinvolge le rappresentazioni del bosone di Higgs nella 5 (e nella 24). In particolare, sarebbe naturale attendersi una massa simile per tutte le componenti della 5, due delle quali coincidono con il bosone di Higgs del modello standard. Le altre tre, però, sono particelle “colorate” che, alla stregua dei bosoni di *gauge* supermassivi, possono rendere la vita media del protone troppo rapida, a meno che non siano esse stesse particelle supermassive. Il problema, allora, è quello di trovare un modo naturale per separare la massa del doppietto (intorno ai 100 GeV) da quella del tripletto (intorno a 10^{16} GeV). Nel modello minimale questo risultato è ottenuto al costo di un aggiustamento “fine” tremendo (diremmo “innaturale”) tra i parametri del potenziale dei campi di Higgs. L’uso della 5 di Higgs è anche utile per dare massa ai fermioni con un meccanismo analogo a quello del modello standard. Questi, però, predicono il rapporto tra la massa del quark down e quella del quark strange pari a un improbabile $1/207$ (da confrontarsi con il valore sperimentale pari a ca. $1/20$), per

cui è necessario ampliare il settore scalare introducendo, ad esempio, la rappresentazione 45 di Higgs. Questa, come la 5, contiene un doppietto che aiuta a sistemare le relazioni di massa sbagliate, ma anche dei tripletti colorati che, al solito, necessitano una massa molto elevata. Pur rappresentando una soluzione al problema delle masse, questo meccanismo complica ulteriormente il modello e richiede di assegnare ai parametri del modello dei valori calibrati *ad hoc*, rendendo il tutto molto meno naturale e attraente.

In definitiva, sebbene il modello originario di Georgi e Glashow soffra di importanti difetti, esso offre un prototipo di teoria Gut semplice ed elegante sulla quale innestare nuovi ingredienti capaci di risolvere (o alleviare) parte delle problematiche qui descritte. La supersimmetria (vd. in *Asimmetrie* n. 18 p. 13, ndr) e la formulazione di SU(5) in dimensioni spaziotemporali superiori a 4 forniscono delle possibili scappatoie, in quanto permettono una perfetta unificazione e predicono una vita media del protone più lunga dell’età dell’universo, come gli esperimenti suggeriscono che sia.

Il senso estetico per la bellezza delle teorie rappresenta una guida per molti fisici teorici, a cominciare da Einstein. Ma a volte, come nel caso della Gut SU(5) proposta da Georgi e Glashow, la natura ha dei gusti diversi da quelli dei fisici. O, forse, ha in serbo soluzioni ancora più belle, a cui nessuno ha ancora pensato.



b.
L’esperimento Superkamiokande, in Giappone, consiste in un’enorme cisterna situata in una miniera e contenente 50.000 tonnellate d’acqua. Questo isolamento, progettato per lo studio dei neutrini, permette anche di indagare meglio la vita media del protone.

Biografia

Davide Meloni è ricercatore del Dipartimento di Matematica e Fisica di Roma Tre. Si è laureato e dottorato in fisica presso l’Università La Sapienza di Roma. Ha coperto posizioni da *post-doc* a Granada (Spagna), Würzburg (Germania), Infn sezione di Roma 1 e Dipartimento di Fisica di Roma Tre.