

Capitolo 6

La danza delle particelle

Si lavorava su LEP, e tanto, ma già si sapeva di dover andare oltre. E oltre c'era una macchina che ormai aveva un nome: Large Hadron Collider, e uno scopo: scommettere che sulla strada della fisica delle particelle non c'era un deserto quasi infinito da attraversare, ma che, al contrario, ad attendere gli scienziati c'era la SUSY.

Questo capitolo, avviso subito i lettori, è dedicato soprattutto al percorso di scoperte e teorie che avrebbe portato i fisici alla ragionevole conclusione di dover - e poter - costruire una macchina ancora più grande. Pur temendo che, se le circostanze fossero state maligne, avrebbe potuto essere inutile. È un capitolo difficile, per i non iniziati, ma vale la pena di provare.

La statua raffigurata nella Fig. 6.1 è stata donata al CERN dalla Commissione per l'Energia Atomica indiana nel 2003, in occasione dell'ammissione dell'India al Consiglio del CERN come Osservatore. Rappresenta Shiva mentre sostiene la creazione del Cosmo con la sua danza (detta *Ananda Tandava*) e lo conduce verso il suo destino finale. Il tamburo nella mano destra per scandire il ritmo con cui tutte le cose evolvono e la fiamma nella sinistra per dissolvere l'Universo alla fine del suo percorso.

Il pensiero filosofico dell'Occidente sottolinea piuttosto la permanenza del Cosmo, pur nello scorrere degli eventi. Il pensiero atomistico, che più di altri ha influenzato la scienza moderna, attribuiva il flusso delle cose al moto di oggetti immutabili, gli atomi. Ed

attribuiva, correttamente pensiamo noi, all'immutabilità degli atomi il fatto che le specie animali e vegetali restino immutate, pur nell'alternarsi del ciclo della vita e della morte.



Figura 6.1:

La fisica delle particelle è nata proprio dal desiderio di individuare i 'semi delle cose', secondo la definizione di Lucrezio, scendendo via via dalla materia continua, come appare ai nostri sensi, ai cristalli, le molecole, gli atomi, i nuclei.

La Meccanica Quantistica e la scoperta, a partire dall'ultimo dopoguerra, di particelle che non risiedono in permanenza negli atomi o nei nuclei, ha modificato drasticamente la visione classica dello spazio e del tempo come delle cornici neutrali, un palcoscenico in cui si rappresenta il divenire delle cose.

Secondo la Meccanica Quantistica, lo spazio vuoto, lo stato in cui non ci sono nè particelle nè radiazione, è soggetto a continue fluttuazioni di energia in cui, localmente,

particelle di tutti i tipi appaiono e scompaiono. La danza di Shiva potrebbe essere una suggestiva rappresentazione pittorica della situazione.

In grande, l'energia del vuoto è costante (la poniamo uguale a zero per convenzione) ma se guardiamo all'interno di una regione microscopica di spazio, l'energia contenuta in questa regione fluttua nel tempo rispettando tuttavia una regola, fissata dalla fisica dei quanti: maggiore è la fluttuazione di energia, minore è il tempo in cui la fluttuazione si sviluppa. In termini più precisi, il tempo è inversamente proporzionale all'energia della fluttuazione¹.

Nelle fluttuazioni sono create particelle di ogni tipo: lo spazio vuoto *conosce* la teoria completa del mondo, anche le particelle che non abbiamo mai visto né ipotizzato. Le particelle più pesanti appaiono su tempi più brevi, in accordo con la regola di prima.

Al contrario dell'energia, la carica elettrica, nella fisica dei quanti, è conservata anche localmente, per cui nella danza che le particelle quantistiche eseguono nel vuoto, le particelle elettricamente cariche sono create e distrutte in coppia, ciascuna insieme alla propria antiparticella, elettrone-positrone, protone-antiprotone, e via dicendo.

Questa visione del vuoto ci mostra sotto una nuova luce le reazioni che si producono nella macchina ideata da Touscheck, i collisori elettrone-positrone. L'elettrone e il positrone cedono la loro energia ad una fluttuazione del vuoto e rendono possibile che una coppia di particelle dal vuoto si trasformi in due particelle reali, che sono poi osservate nei nostri apparati. Siamo ben lontani dai primi tentativi di smontare la materia per vedere 'di cosa sono fatti gli atomi'. In un certo senso, la coppia elettrone-positrone presente all'inizio *interroga il vuoto* sulla natura delle particelle elettricamente cariche esistenti fino all'energia disponibile nei fasci.

Gli anni settanta sono stati dominati dalla ricerca dell'unificazione delle forze. Dopo la scoperta delle correnti neutre e la dimostrazione della consistenza matematica della

¹secondo una costante di proporzionalità universale rappresentata dalla costante h introdotta da Max Planck nel 1901

teoria di Weinberg e Salam, sembrava a portata di mano la derivazione, a partire da un unico principio di simmetria, di una teoria che unifichi tutte le interazioni che agiscono a livello subatomico (elettromagnetiche, deboli e nucleari). Furono ipotizzati dei modelli concreti di questa idea, cui fu dato il nome di Grande Unificazione, per distinguerla dall'unificazione delle sole forze elettromagnetiche e deboli realizzata nella teoria di Weinberg e Salam. Questi tentativi si scontrarono con una difficoltà di fondo, per superare la quale fu ipotizzato il *deserto ad alta energia*.

La difficoltà stava nel fatto che le teorie di Grande Unificazione necessariamente devono includere in un unico schema le particelle sensibili alle interazioni nucleari, i quark, e quelle sensibili solo alle forze elettromagnetiche e deboli, l'elettrone, il suo neutrino e le altre particelle di questo tipo (collettivamente indicate col nome di *leptoni*). Ci devono essere interazioni che trasformano tra loro le particelle di queste due categorie. Ma in Natura, commistioni di questo tipo non sono mai state osservate.

Per capire meglio di cosa si tratta, possiamo fare l'esempio dell'atomo di idrogeno: un sistema composto da un elettrone e da un protone, e confrontarlo con un sistema molto simile, il positronio, il sistema composta da un elettrone e da un positrone. Il positronio ha carica elettrica nulla e niente ci vieta di pensare che, rispettando la conservazione della carica elettrica, si possa trasformare in pura radiazione elettromagnetica - fotoni. Difatti, questo è proprio quello che fa il positronio, come era stato previsto fin dai primi lavori di Dirac.

Cosa impedisce all'atomo di idrogeno, anch'esso elettricamente neutro, di seguire lo stesso, o un simile, destino? Per spiegare la stabilità degli atomi dobbiamo ipotizzare l'esistenza di una grandezza che caratterizza i componenti del nucleo, il 'numero barionico', il numero di protoni e neutroni presenti, e assumere che essa sia assolutamente conservata nelle reazioni subatomiche e subnucleari. Non ci sono fondamenti teorici per questa legge, come succede per la conservazione della carica elettrica. Solo l'evidenza empirica

dell'estrema stabilità della materia.

Ora, mettendo insieme leptoni e quark, le teorie di Grande Unificazione, rimuovevano proprio questa barriera, mettendo in forse la stabilità della particella più leggera del mondo subnucleare, il protone.

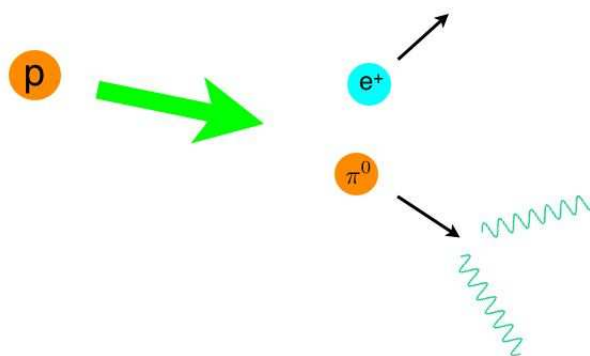


Figura 6.2: Secondo la teoria di Georgi e Glashow, il protone si dovrebbe disintegrare producendo un positrone e radiazione elettromagnetica. La radiazione è costituita da due fotoni che originano dalla disintegrazione rapida di un mesone π^0 .

Il primo ad esplorare la via della Grande Unificazione è stato Abdus Salam, insieme al fisico indiano Yogesh Pati. Nella loro teoria, il protone doveva essere instabile, ma con una durata di vita che poteva essere anche molto lunga, dipendendo dalla massa delle (ipotetiche) particelle che avrebbero mediato le interazioni che confondono i leptoni con i quark.

La figlia di Salam, al tempo, si prese un rimprovero perchè, sulla scorta delle affermazioni sentite in casa dal suo papà, aveva messo in dubbio la stabilità della materia di cui parlava la sua insegnante a scuola.

La teoria di Pati e Salam fu seguita da una teoria dovuta a Howard Georgi e Sheldon Glashow. Le idee di Pati e Salam venivano inserite in un elegante contesto matematico, che permetteva di stimare la massa delle nuove particelle. Per ottenere l'unificazione delle

forze elettromagnetiche e deboli con le forze nucleari, occorre ipotizzare per queste particelle una massa di 15 ordini di grandezza superiore alla massa del protone (uno seguito da 15 zeri, ovvero mille milioni di milioni di volte). Il protone, secondo Georgi e Glashow, si sarebbe dovuto disintegrare in un positrone accompagnato da radiazione elettromagnetica, ma con una lunghezza di vita di molto superiore e alla vita dell'Universo e comunque compatibile con gli esperimenti piú avanzati dell'epoca².

Secondo Georgi e Glashow, ci sarebbe dunque un vero e proprio deserto tra la regione dell'unificazione elettrodebole, popolata dai bosoni intermedi e dal bosone di Higgs, e la Grande Unificazione, un deserto di quasi 13 ordini di grandezza in energia, in cui non si dovrebbe incontrare alcun nuovo fenomeno. In questo scenario, la direzione da prendere non sarebbe quella delle macchine acceleratrici: le energie della Grande Unificazione non sono evidentemente raggiungibili con i collisori, neanche con uno come quello ipotizzato da Fermi, che gira intorno alla Terra, Fig. 3.1. Piuttosto occorre costruire grandi laboratori sotterranei in cui cercare di rivelare l'instabilit  del protone al riparo del rumore di fondo causato dai raggi cosmici.

Nonostante l'eleganza della Grande Unificazione, l'ipotesi del deserto non era facile da mandar gi . Questa ipotesi era basata su un'estrapolazione della fisica per oltre 13 ordini di grandezza.

I fenomeni nucleari sono distanti proprio di circa 13 ordini di grandezza dai fenomeni alla nostra scala, tanti quanti dovrebbero separare i bosoni intermedi dai mediatori delle forze responsabili della instabilit  del protone. Ma l'estrapolazione della fisica del centimetro, la fisica classica di Galileo e Newton, alla fisica del nucleo   fallace. Ci sono in mezzo gli effetti di almeno due rivoluzioni scientifiche: Relativit  e Teoria dei Quanti.

In effetti, alla fine degli anni settanta emersero degli indizi che rendevano poco plausi-

²l'esistenza di questo processo di decadimento renderebbe possibile la trasformazione di un atomo di idrogeno in un fotone ed un mesone π^0 ovvero, in ultima analisi, la trasformazione di un atomo di idrogeno in pura radiazione, violando il principio della stabilit  della materia da cui siamo partiti.

bile la teoria del deserto, ma indicavano piuttosto che una nuova classe di particelle avrebbero potuto, o meglio dovuto, manifestarsi ad energie dell'ordine di mille volte la massa del protone, l'energia indicata col nome di Tera elettroni Volt (Tera= mille miliardi), in breve TeV.

Il primo indizio è collegato alla massa del bosone di Higgs e alle fluttuazioni quantistiche di cui abbiamo parlato all'inizio del Capitolo.

Come capita per il vuoto, anche una singola particella è soggetta a continue fluttuazioni quantistiche, durante le quali emette e riassorbe le particelle con cui comunica, violando per tempi brevi la conservazione dell'energia (si parla in questo caso di emissione e assorbimento di 'particelle virtuali'). Queste fluttuazioni cambiano il valore medio dell'energia della particella e quindi il valore della sua massa. La massa che osserviamo risulta dalla somma di due quantità: la massa che la particella avrebbe in assenza di interazione (la 'massa nuda') e la variazione che risulta dall'effetto delle fluttuazioni.

Ora, per il bosone di Higgs l'effetto delle fluttuazioni risulta essere grosso modo dell'ordine dell'energia di Grande Unificazione, 15 ordini di grandezza superiori alla massa del protone. Mentre ci aspettiamo che il risultato finale, la massa osservata, sia dell'ordine 100 – 800 volte la massa del protone.

Matematicamente non c'è problema: la (non osservabile) massa nuda può saldare la differenza tra la massa attesa e l'effetto delle fluttuazioni. Ma si tratterebbe di un saldo in cui i due effetti si devono compensare con una precisione assolutamente straordinaria: la massa nuda e l'effetto delle fluttuazioni devono compensarsi per fornire un risultato che è 12 – 13 ordini di grandezza inferiore al loro valore.

Non è una cosa di tutti i giorni entrare in un negozio, diciamo, con 100 Euro in tasca e scoprire la cosa che ci piace ne costa 99. Ma se entriamo con un miliardo e l'oggetto che vogliamo costa esattamente 999,99 milioni di Euro, la cosa non può non insospettirci: ci deve essere una cospirazione tra i due eventi, la cifra che abbiamo in tasca e il prezzo

della cosa che desideriamo, che pensavamo fossero indipendenti.

Come fisici, abbiamo imparato a diffidare di situazioni del genere. La prima possibilità è di pensare che le due cose, i soldi a mia disposizione e il prezzo dell'oggetto che desidero, siano in effetti collegati tra loro. In fisica, questo avviene quando c'è una simmetria di cui non abbiamo tenuto conto.

Nel caso di particelle di spin $1/2$ (ad esempio l'elettrone) o 1 (il fotone), la simmetria c'è, e ci dice che *se la massa nuda è zero, la massa fisica deve essere nulla*. Quindi l'effetto delle fluttuazioni deve essere proporzionale alla massa nuda e, se questa è piccola, sarà piccola anche la massa osservata.

Ma nel caso di una particella di spin zero non ci sono, in generale, simmetrie che obbligano la massa ad essere nulla se la massa nuda lo è, e questa è l'origine del problema.

All'inizio degli anni '70, due fisici teorici del CERN, Julius Wess e Bruno Zumino, scoprirono la possibilità di una simmetria che collegava particelle di spin diverso tra loro, ad esempio spin zero e spin $1/2$. A questa simmetria fu dato il nome di Super Simmetria, termine che, dopo molto parlare, fu abbreviato da John Ellis in SUSY. E dieci anni dopo, diversi fisici, tra cui chi scrive, si accorsero che questa nuova simmetria poteva trasmettere alle particelle di spin zero la buona proprietà delle particelle di spin $1/2$.

La Super Simmetria appariva come una soluzione plausibile per conciliare il bosone di Higgs con l'idea del deserto, a condizione che le nuove particelle fossero lì ad aspettarci, alle energie del TeV.

L'alternativa alla Supersimmetria, anch'essa proposta e studiata negli anni ottanta, era che in Natura esistessero solo particelle elementari con le buone proprietà, ovvero solo particelle con spin $1/2$ e 1 . Il bosone di Higgs, in questo caso, avrebbe dovuto essere lo stato legato di nuovi tipi di quark, cui fu dato il nome curioso di Techniquark, per distinguerli dagli ormai familiari quark che costituiscono il protone e le altre particelle nucleari. In questo caso le fluttuazioni non avrebbero potuto crescere indisturbate per

tutto il supposto deserto. Ad energie dell'ordine della massa dei Techniquarks, il bosone di Higgs si sarebbe decomposto nei suoi costituenti elementari e saremmo tornati ad un mondo popolato solo da particelle di spin $1/2$ e 1 . Questo poteva funzionare, a patto che la soglia per scindere il bosone di Higgs si fosse trovata intorno al fatidico valore di 1 TeV .

Ci furono due sviluppi che resero popolare l'ipotesi di SUSY al TeV .

Il primo fu che, ammettendo questa ipotesi, si otteneva un accordo nettamente migliore tra quanto previsto dalla Grande Unificazione ed i valori osservati delle costanti caratteristiche delle interazioni elettromagnetiche, deboli e nucleari.

Poi, negli stessi anni, osservazioni astronomiche e cosmologiche portarono alla conclusione che la maggior parte della massa presente nell'Universo non è della stessa natura della materia che compone gli oggetti che conosciamo, inclusi noi stessi. Una materia diffusa, presente nelle Galassie al di fuori delle stelle, che non emette luce e per questo è chiamata *materia oscura*, sembra costituire più del 90% della materia necessaria a spiegare la massa delle Galassie, come la possiamo giudicare dalle forze gravitazionali che si esercitano all'interno delle Galassie stesse.

Un colpo di scena straordinario ci aveva riportato indietro ai tempi in cui ci si interrogava su come fosse fatta la materia. Molti fisici avanzarono l'ipotesi che le nuove particelle richieste da SUSY potessero darci la soluzione del problema.

La particella SUSY più leggera, se fosse elettricamente neutra e con una durata di vita dell'ordine dell'età dell'Universo, potrebbe fornire, allo stesso tempo, la spiegazione della materia oscura e la soluzione della piccolezza della massa del bosone di Higgs, rispetto alla scala della Grande Unificazione.

Ma come produrre in laboratorio le particelle SUSY e verificare con certezza queste ipotesi? Con una massa intorno all'energia di un TeV , LEP era fuori discussione per motivi di energia. Ma le particelle SUSY sarebbero state nell'orizzonte di un collisore a protoni nel tunnel di LEP.

All'inizio degli anni ottanta, SUSY e materia oscura avevano fornito un nuovo incentivo per una macchina a protoni con un'energia di un ordine di grandezza superiore a quella di LEP. L'idea di LHC prese quota.

Come abbiamo visto, SUSY non é l'unica soluzione possibile al problema della massa del bosone di Higgs. Ne abbiamo vista una, il Technicolor, e ce ne erano altre. Le spiegazioni avevano una cosa in comune tra loro e con SUSY. In tutti i casi, c'era un meccanismo che tagliava la crescita delle fluttuazioni sopra un'energia dell'ordine del TeV.

Il mantra di quegli anni si poteva riassumere dicendo che tutti credevano alla Grande Unificazione, ma credevano, in aggiunta, che ci dovesse essere qualcosa di nuovo da scoprire nella regione del TeV.

Il deserto c'era ancora, ma la fisica da esplorare era quella, sconosciuta, di SUSY o degli altri modelli. Al deserto si sarebbe pensato dopo.