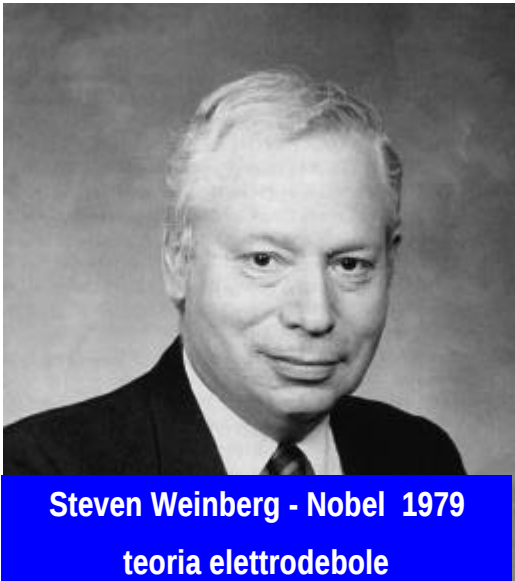




Il riduzionismo

Se uno va in giro chiedendo perché le cose sono come sono, e quando gli danno una spiegazione basata su qualche principio scientifico chiede perché quel principio è vero e, come un bambino maleducato continua a chiedere **perché, perché, perché...** prima o poi qualcuno gli darà del **riduzionista**.

Persone diverse danno significati diversi a questa parola, ma credo che le varie concezioni personali del riduzionismo abbiano tutte in comune un certo senso della gerarchia, l'idea che **certi concetti siano meno fondamentali di altri ai quali sono riducibili**.

Fisici saggi e Fisici maghi



Nei loro momenti migliori i fisici teorici tendono a recitare una di queste due parti: o sono dei *saggi* o sono dei *maghi*.

Il **fisico-saggio** ragiona sui problemi della sua disciplina in modo ordinato, affidandosi ad alcune idee fondamentali su come dovrebbe essere la natura...

Ma ci sono anche i **fisici-maghi**, che hanno l'aria di non ragionare affatto e di saltare tutti i passi intermedi arrivando subito a un **nuovo modo di vedere la natura**. Di solito gli autori dei manuali di fisica sono costretti a rifare il lavoro dei maghi in modo da farli somigliare a dei saggi - altrimenti nessun lettore capirebbe quella fisica...

Teoria ed esperimento

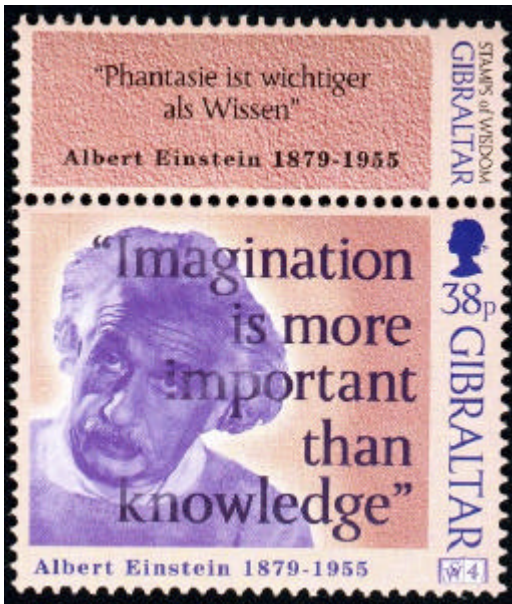


- ❑ Ci sono anche degli esperimenti che ci mettono di fronte a delle **assolute sorprese**, non previste da nessun teorico
- ❑ Poi ci sono gli esperimenti che ci mettono di fronte a una **sorpresa quasi completa** - che scoprono, cioè, effetti la cui possibilità era stata presa in esame, ma solo come eventualità logicamente ammissibile che nessun argomento forte induceva a prevedere.
- ❑ C'è anche un'altra classe interessante di esperimenti: quelli in cui si sono trovati **effetti previsti dai teorici e tuttavia scoperti accidentalmente**, dato che gli sperimentatori non conoscevano le

previsioni - o perché i teorici non avevano abbastanza fede nella propria teoria

- ❑ E poi ci sono gli esperimenti che si fanno anche se si conosce già la risposta, e anche se la previsione teorica è così ben confermata che non è ragionevole dubitare della teoria, perché i fenomeni sono in sé così affascinanti
- ❑ E infine possiamo immaginare una categoria di esperimenti che confutino teorie ben consolidate, comprese fra quelle su cui in fisica c'è un consenso canonico

bellezza 1



La **semplicità** fa invece parte di quello che intendo per bellezza; ma è una semplicità delle idee, non una semplicità di tipo meccanico, misurabile contando le equazioni o i simboli.

Oltre alla semplicità c'è un'altra qualità che può rendere bella una teoria fisica: il **senso di inevitabilità** che essa ci sa dare. A volte, ascoltando un brano musicale o un sonetto, proviamo un intenso piacere estetico quando ci rendiamo conto che in quell'opera non c'è niente da cambiare, che non c'è nemmeno una nota o una parola che vorremmo diversa.

Einstein: «L'aspetto più attraente della teoria sta nella sua **completezza logica**. Se una sola delle conclusioni che se ne ricavano

si dimostra errata, essa dev'essere abbandonata; appare impossibile modificarla senza distruggere l'intera struttura».

bellezza 2

Possiamo trovare lo stesso senso di inevitabilità nell'attuale modello standard delle interazioni forti ed elettrodeboli che agiscono sulle particelle elementari.

E c'è un carattere comune che dà alla relatività generale e al modello standard gran parte della loro **semplicità e inevitabilità**: entrambi obbediscono a dei **principi di simmetria**.

Abbiamo una simmetria delle leggi di natura quando, cambiando in certi modi il punto di vista dal quale osserviamo i fenomeni naturali, scopriamo che queste leggi non cambiano; tali simmetrie vengono spesso chiamate principi di *invarianza*.

bellezza 3: simmetria

Oggi è universalmente accettata l'idea che i principi della relatività ristretta possano essere combinati con la meccanica quantistica solo passando attraverso la **teoria quantistica** dei campi, o qualcosa di molto simile, e questo è proprio il tipo di rigidità logica che dà a una teoria veramente fondamentale la sua bellezza: la meccanica quantistica e la relatività ristretta sono quasi incompatibili, e il fatto che siano riconciliate dalla teoria del campo quantizzato **impone delle restrizioni molto forti al modo in cui le particelle possono interagire l'una con l'altra.**

Tutte le simmetrie ricordate finora impongono soltanto dei limiti al tipo di forza e di materia che una teoria può ammettere, ma di per sé non *richiedono* l'esistenza di un particolare tipo di materia o di forza.

bellezza 4: $\Rightarrow$ forze



Ma in questo secolo, e specialmente negli ultimi decenni, i principi di simmetria sono ascesi a un nuovo livello d'importanza: "ora esistono simmetrie che dettano l'esistenza stessa di tutte le forze naturali conosciute". La simmetria che sta alla base della teoria elettrodebole è un po' più recondita; non ha a che fare col cambiamento del nostro punto di vista nello spazio o nel tempo, ma col cambiamento del nostro punto di vista riguardo all'identità dei vari tipi di

particella elementare.

perdita di identità



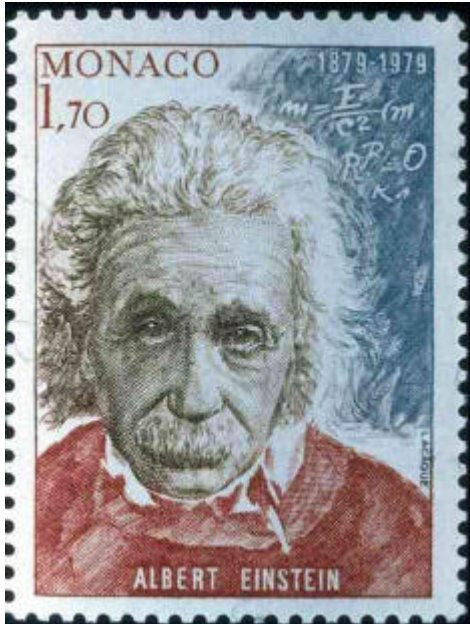
Come è possibile che una particella sia in uno stato quantico nel quale non si trova né qui né lì in modo definito o che non abbia uno spin definito, né orario né antiorario, così è possibile, grazie alle meraviglie della meccanica quantistica, che una particella si trovi in uno stato nel quale non è in modo definito né un elettrone né un neutrino finché non misuriamo una proprietà che distingua il primo dal secondo, come la carica elettrica.

Nella teoria elettrodebole la forma delle leggi naturali resta invariata se nelle equazioni sostituiamo ovunque gli elettroni e i neutrini con questi stati misti che non sono né una cosa né l'altra; ma essi interagiscono è necessario rimescolare contemporanea-

mente anche le famiglie di questi altri tipi come il quark su e il quark giù o il fotone e le sue sorelle, le particelle W positiva e negativa e la particella Z, che non ha carica.

Possiamo immaginare che ogni particella abbia un piccolo quadrante, con una lancetta che può essere puntata su tacche con le scritte «elettrone», «neutrino», «fotone», «W», o anche su una qualsiasi posizione intermedia; la simmetria interna dice che le leggi naturali assumono la stessa forma se facciamo ruotare in certe maniere le tacche del quadrante.

bellezza come rigidità



Noi stiamo andando in cerca di qualcosa di universale, di qualcosa che governi i fenomeni fisici in tutto l'universo, di quelle che chiamiamo leggi della natura.

Non vogliamo scoprire una teoria capace di descrivere tutti i tipi immaginabili di interazioni fra le particelle della natura; quella in cui **speriamo** è una teoria che ci consenta, **con rigidità**, di **descrivere solo le interazioni - gravitazionali, elettrodeboli e forti - realmente esistenti**. Nelle teorie fisiche questo tipo di rigidità è parte integrante di ciò che consideriamo bellezza.

bellezza come inevitabilità



La bellezza che scopriamo in teorie fisiche come la relatività generale o il modello standard somiglia molto alla bellezza che alcune opere d'arte possiedono grazie alla sensazione di inevitabilità che ci danno - la sensazione che non ci sia nemmeno una nota, una pennellata o un verso da cambiare.

Non c'è una formula logica che stabilisca una linea di divisione netta fra una bella teoria esplicativa e un semplice elenco di dati, ma quando vediamo questa differenza la riconosciamo - esigiamo dai nostri principi semplicità e rigidità prima di essere disposti a prenderli sul serio. Dunque il nostro senso estetico non è solo un

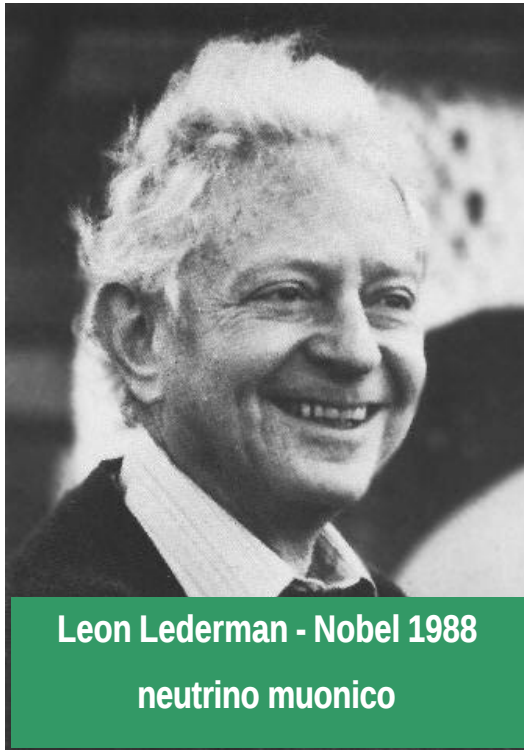
mezzo volto a trovare delle spiegazioni scientifiche e a giudicare se sono valide - è parte integrante di ciò che intendiamo per spiegazione.

Ma il numero delle particelle, di per sé, non ha importanza: come ha detto **Abdus Salam**, **la natura non è avara di particelle o di forze, ma di princìpi.**

La cosa che interessa è avere un insieme di princìpi semplici ed economici che spieghino perché le particelle sono quello che sono; non avere ancora una teoria completa del tipo che vogliamo è seccante, ma quando l'avremo non c'importerà molto sapere quanti sono i tipi di particella o di forza che descriverà purché li descriva in modo bello, come conseguenze necessarie di princìpi semplici.

Il tipo di bellezza che troviamo nelle teorie fisiche è di un genere molto ben delimitato; posso dire, nella misura in cui riesco ad esprimerla per mezzo di parole, che **è la bellezza della semplicità e**

dell'inevitabilità - la bellezza di una struttura perfetta, quella in cui tutte le parti si adattano l'una all'altra, in cui niente può essere cambiato, la bellezza della rigidità logica. È classica e asciutta, come quella che troviamo nelle tragedie greche.



Leon Lederman - Nobel 1988

neutrino muonico

i teorici visti dagli sperimentali 1

Nella disciplina della fisica delle particelle ci sono **teorici e sperimentatori**. Io appartengo a questa seconda categoria.

In generale, la fisica progredisce come effetto **dell'interazione di queste due categorie**.

Nell'eterno rapporto di amore-odio fra teoria ed esperimento c'è una specie di punteggio. Quante scoperte sperimentali importanti sono state predette dalla teoria? Quante sono state le vere e proprie sorprese? Per esempio, l'elettrone positivo (positrone) è stato anticipato dalla teoria, e così pure il pione, l'antiprotone e il neutrino. Il muone, il leptone tau e ypsilon sono stati delle sorprese.

Un esame più approfondito indica più o meno un pareggio in questa futile controversia. Ma chi tiene il conto?

i teorici visti dagli sperimentali 2



Richard Feynman Nobel 1965
Q.E.D.

Una nuova particella è prevista quando una sintesi dei dati esistenti da parte di un teorico perspicace sembra rendere necessaria la sua esistenza. Molto spesso essa non esiste, e quella particolare teoria ne soffre. Se essa soccombe o no, dipende dalle capacità di reazione del teorico.

Il punto essenziale è che vengono effettuati entrambi i tipi di esperimenti: quelli designati a controllare una teoria e quelli designati a esplorare un nuovo dominio. Naturalmente, è spesso molto più divertente *confutare* una teoria. Come ha scritto Thomas Huxley, «La grande tragedia della scienza, il brutale assassinio di una bella ipotesi da parte di un brutto fatto».

i teorici visti dagli sperimentali 3

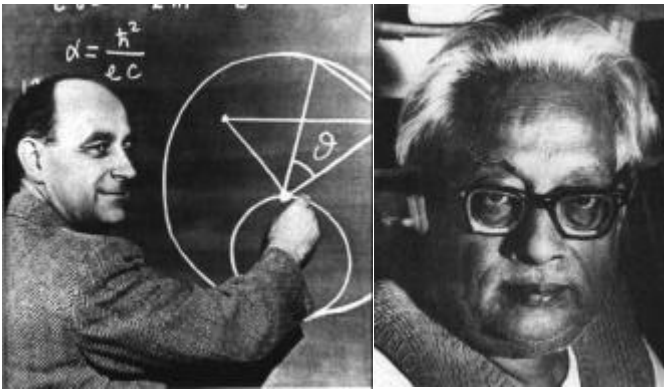
I buoni teorici spiegano il già noto e predicono i risultati di nuovi esperimenti. L'interazione fra teoria ed esperimento è una delle gioie della fisica delle particelle

Oggigiorno abbiamo due gruppi di fisici che perseguono il comune obiettivo di capire l'universo, ma con una grande differenza di prospettiva culturale, capacità e abitudini di lavoro.

I teorici hanno la tendenza ad arrivare tardi al lavoro, partecipano a faticosissimi convegni su qualche isola greca o sulle montagne svizzere, si prendono lunghe vacanze e molto più spesso sono impegnati a casa, a portare fuori la spazzatura. Hanno la tendenza a preoccuparsi dell'insonnia. Si dice che un teorico sia andato tutto preoccupato dal medico del laboratorio: «Dottore, mi aiuti! Dormo

benone tutta la notte e abbastanza bene al mattino, ma mi giro e mi rigiro per tutto il pomeriggio».

i teorici visti dagli sperimentali 4



E. Fermi e N. Bose

L'unico vero pericolo che può correre un teorico è quello di **pungersi con la matita** mentre cerca di infilzare un errore che si annida nei suoi calcoli.

Tutti i teorici scrivono libri di divulgazione scientifica. E perché non dovrebbero?

Hanno tanto di quel tempo libero!

I teorici hanno la tendenza a essere arroganti.

Una volta, a un convegno, mi trovai a sedere a tavola vicino a Fermi. Preso da reverenziale timore alla presenza del grand'uomo, gli chiesi che cosa pensasse di ciò che avevamo appena sentito a proposito delle prove dell'esistenza di una particella chiamata «K-zero-two». Egli mi fissò per un istante, poi disse: «**Giovanotto, se**

riuscissi a ricordare i nomi di tutte queste particelle sarei stato un botanico».

i teorici visti dagli sperimentali 5



Simon van der Meer, Carlo Rubbia 1984
bosoni W e Z della interazione debole

I teorici possono essere persone cordiali, entusiaste, con cui gli sperimentatori (come noi, nient'altro che idraulici ed elettricisti) amano conversare e da cui amano imparare

Una parte significativa dei miei esperimenti è stata suggerita dagli articoli di questi sapienti e dalle discussioni con loro. Alcuni teorici sono molto meno amabili, dal momento che **la loro acuta intelligenza si mescola con una curiosa insicurezza** che fa pensare a ciò che Salieri dice del giovane Mozart nel film *Amadeus*: «Signore, perché hai incarnato un così eccelso compositore nel corpo di uno stronzo?».

Naturalmente, i teorici tendono a ricevere una parte indebita del merito delle scoperte. La triade teorico-sperimentatore-scoperta è stata occasionalmente paragonata alla triade contadino-maiale-tartufo. Il contadino porta il maiale in una zona dove si possono trovare dei tartufi. Il maiale cerca diligentemente i tartufi. Finalmente ne trova uno e, proprio quando sta per divorarlo, il contadino glielo porta via.

Simmetria di gauge (calibro)



Abdus Salam - Nobel 1979

teoria elettrodebole

Una teoria delle interazioni che sia coerente deve soddisfare due criteri: essere una **teoria quantistica** dei campi e incorporare la **relatività ristretta** e la **simmetria di gauge**.

La gravita einsteiniana, ben distinta da quella newtoniana, è stata generata dal desiderio di leggi fisiche che fossero uguali per tutti gli osservatori, in quiete o su sistemi accelerati e caratterizzati da campi gravitazionali.

La teoria della relatività possiede una simmetria intrinseca che implica l'esistenza di una forza naturale: in questo caso, della gravità.

Analogamente, anche la simmetria di gauge, che implica l'imposizione di un'invarianza più astratta alle equazioni pertinenti, genera, a seconda dei casi, l'interazione debole, quella forte e quella elettromagnetica.

tre famiglie e non più di tre

I dati sulle Z^0 al CERN suggeriscono un'altra conclusione: è molto improbabile che ci sia una quarta o una quinta generazione di particelle. Perché? Che cosa autorizza questi scienziati che lavorano in Svizzera, fra montagne imbiancate di neve, laghi ed eccellenti ristoranti, a fare questa proibizione?

C'è un bell'argomento a favore. La Z^0 ha molti modi di decadimento, ciascuna opportunità di decadimento apre a una via per raggiungere la pace eterna. La somma totale di tutte queste vie determina il tempo di vita.

Si noti che non tutte le Z^0 hanno la stessa massa. La teoria dei quanti ci dice che, se una particella è instabile - non vive per sempre -, allora la sua massa deve essere in certa misura indeterminata (relazioni di Heisenberg).

Il numero di Z^0 prodotte è zero se la somma delle energie degli e^+ ed e^- alla collisione è significativamente inferiore a 91,175 GeV, la massa media delle Z^0 . L'operatore alza l'energia della macchina fino a che un basso conteggio di Z^0 viene registrato da ciascuno dei rivelatori. Se si incrementa l'energia della macchina, cresce anche il conteggio.

C'è un picco nel conteggio a 91,175, che decresce a circa la metà da ambo i lati, a 89,9 GeV e a 92,4 GeV.

La curva a campana ci da un'ampiezza, che è in effetti un tempo di vita. Ogni possibile modo di decadimento di Z^0 diminuisce la sua durata di vita e aumenta l'ampiezza di circa 0,2 GeV.

Che cosa ha a che fare questo con una quarta generazione? Notiamo che ciascuna delle tre generazioni ha un neutrino a bassa massa (o addirittura zero). Se c'è una quarta generazione con un neutrino a bassa massa, allora Z^0 deve includere, come uno dei suoi modi di

decadimento, il neutrino ν_x e il suo antineutrino $\bar{\nu}_x$ di questa generazione. Questa possibilità aggiungerebbe 0,17 GeV all'ampiezza. L'ampiezza della distribuzione della massa di Z^0 è stata perciò attentamente studiata. Ed è risultata essere esattamente quella che il modello standard delle tre generazioni aveva previsto.

I dati sull'ampiezza di Z^0 escludono l'esistenza di un neutrino a bassa massa di quarta generazione.

Cosa non mi convince?

Io ho una diapositiva che raffigura una divinità in tunica bianca, con tanto di aureola, che guarda una «macchina mondo». Questa macchina ha una ventina di leve, ciascuna delle quali deve essere posizionata su un numero preciso, e un pulsante con sopra scritto PREMERE PER CREARE L'UNIVERSO. Ho avuto l'idea dal graffito di uno studente sopra l'asciugatore elettrico di un bagno: PREMERE PER RICEVERE UN MESSAGGIO DAL PRESIDE.

L'idea è che una ventina di numeri o giù di lì debbano essere specificati per dare inizio all'universo. Ebbene, dodici numeri per specificare le masse dei quark e dei leptoni. Tre numeri per specificare l'intensità delle forze.

Ci servono poi alcuni numeri per mostrare come le forze siano collegate le une alle altre. Poi un numero per far figurare la

violazione della simmetria CP, una massa per la particella di Higgs e poche altre sciocchezze.

Se abbiamo questi numeri fondamentali, tutti gli altri parametri sono derivabili da essi

La nostra richiesta di semplicità ci porta per la verità a non prendere sul serio la richiesta di specificare venti parametri. Non è così che una divinità seria farebbe la «macchina mondo». Un parametro o magari due, non di più.

Un modo alternativo di esprimere l'idea è che la nostra esperienza del mondo fisico ci induce ad aspettarci un'organizzazione più sobriamente elegante. Questo è il vero problema del modello standard

un bigino a mo' di premessa

- ❑ **teoria relativistica**: operiamo con particelle con $v \approx c$ per le quali la massa è energia e l'energia è massa $E = m c^2$
- ❑ **teoria quantistica**: operiamo su dimensioni alle quali vale la relazione di Heisenberg, alle quali le particelle non sono punti materiali, alle quali la esistenza senza osservazione è problematica, mentre la osservazione modifica lo stato
- ❑ **teoria quantizzata dei campi**: i campi quantizzati si esplicano come interazione tra particelle: gli oggetti e i mediatori
- ❑ **simmetrie**: fanno passare dal mondo pensabile al mondo possibile e pongono divieti; ciò che non è vietato, prima o poi accade (bisogna avere la pazienza e l'energia **necessarie**)

- ❑ **simmetrie di gauge** (calibro): sono simmetrie interne alle equazioni quantistiche che estendono l'idea della ameba di Einstein
- ❑ Perché **nasca** una particella le energie in gioco devono essere **maggiori** della sua massa
- ❑ Il **raggio d'azione** di una interazione è inversamente proporzionale alla massa del mediatore
- ❑ La **massa** delle particelle instabili è indeterminata in relazione inversa alla **vita media**.
- ❑ Q.E.D. elettrodinamica quantistica: teoria dei campi quantizzati apre la strada alle particelle mediatrici e alle simmetrie
- ❑ teoria elettrodebole: unione tra teoria debole e QED in una struttura unitaria (simmetrie di gauge)
- ❑ Q.C.D. cromodinamica quantistica: teoria di gauge della interazione forte