

## La candela

Intorno a dieci anni fa dedicai ben tre puntate di questa rubrica al tema della simmetria, senza esaurirlo. Mi erano anzi rimasti gli appunti di uno sviluppo del discorso, che poi ho sempre lasciato da parte; come avrete già capito, ora ho deciso di provare a riprenderlo.

Nel numero di febbraio 1994 avevo affrontato il tema dell'invarianza delle leggi fisiche per inversioni spaziali, e da lì vorrei oggi ripartire. Spero quindi non dispiaccia se copio qui di seguito un brano di quella puntata, per inquadrare l'argomento.

\* \* \*

[...] In sostanza sto dicendo in termini divulgativi quello che un fisico esprime così: “le leggi della meccanica e dell'elettromagnetismo sono invarianti per inversioni spaziali.” Per ragioni su cui non posso trattenermi, i fisici dicono anche, più brevemente, che “la parità si conserva.”

Si può esprimere la stessa idea sfruttando un tema fantascientifico: la comunicazione con intelligenze extraterrestri. Se riuscissimo un giorno a stabilire un contatto a distanza, certamente cominceremmo a trasmetterci informazioni sulle rispettive culture; ma incontreremmo una grave difficoltà non appena tentassimo di definire destra e sinistra. Non voglio dire che sarebbe difficile spiegare la distinzione (che anzi sarebbe certo già nota anche agli alieni); bensì che non sapremmo come essere certi che noi e loro siamo d'accordo su che cosa è destra e che cosa è sinistra.

Non potremmo ricorrere a esempi naturali o artificiali, perché potrebbe darsi benissimo, vista l'invarianza delle leggi fisiche per inversioni, che il loro mondo fosse speculare al nostro. Stando così le cose, il solo modo per risolvere il problema sarebbe di scambiarsi un oggetto destro o sinistro, come il bullone di Faussone. Questo sarebbe molto più facile di quanto si può credere a prima vista: dato che la comunicazione avverrebbe per mezzo di onde elettromagnetiche, basterebbe usare la polarizzazione circolare. Ma a scopo di esercizio intellettuale supporremo che ciò non sia permesso.

Fino a circa quarant'anni fa tutto lasciava credere che l'invarianza per inversioni spaziali fosse una legge universale della fisica; il che è quanto dire che senza lo scambio di oggetti materiali non ci sarebbe stata nessuna speranza di spiegare ai nostri amici di un altro mondo che cosa intendiamo per destra o sinistra. Poi è successo qualcosa... di cui parleremo un'altra volta, perché per il momento non influisce sul discorso che voglio fare.

\* \* \*

Fine della citazione, che come avete visto terminava con una promessa finora non mantenuta. Ma eccomi qua. . .

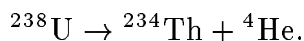
La convinzione che l'invarianza per inversioni spaziali fosse una legge fisica universale era così forte, che si era quasi trasformata in una credenza *a priori*: "non c'è nessuna ragione perché la destra sia distinta dalla sinistra, quindi *deve* esserci invarianza." Si tratta, come vedete, di un impiego del famoso *principio di ragion sufficiente* di Leibniz, che aveva già mostrato la sua validità all'inizio del secolo scorso: dire che non c'è nessuna ragione perché due sistemi di riferimento inerziali siano distinguibili ci porta dritti filati al principio di relatività.

Il guaio è che la realtà se ne infischia dei nostri argomenti *a priori*: infatti mentre il principio di relatività è risultato vero, abbiamo dovuto riconoscere che l'equivalenza fra destra e sinistra è valida solo per certi tipi di fenomeni, o d'interazioni. Giusto 50 anni fa (sopra c'era scritto 40, ma sono passati dieci anni!) andava maturando l'evidenza che l'equivalenza non sussista per l'interazione debole, e perciò per tutti i fenomeni in cui quel tipo d'interazione è importante.

Ma che cos'è l'interazione debole? Non ho la pretesa di poterlo spiegare in poche parole, e mi limito a pochi richiami su dati di fatto e a qualche affermazione a carattere teorico che debbo lasciare senza giustificazione.

Cominciamo dalla scoperta della radioattività, vecchia ormai di oltre un secolo (Becquerel, 1896). Fin dai primordi si distinsero tre forme di radioattività, che vennero designate con le prime tre lettere dell'alfabeto greco:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ . Una volta visto che all'interno dell'atomo c'è un nucleo (Rutherford, 1911) non ci volle molto a capire che la prima e la seconda consistono nell'emissione di particelle cariche dal nucleo: positive nel primo caso, negative nel secondo. Si vide anche che le particelle  $\alpha$  non erano altro che nuclei di Elio ( ${}^4\text{He}$ ), dotati quindi di carica  $+2e$ , mentre le particelle  $\beta$  erano semplici elettroni, anche se di energia spesso molto più alta di quella che si riusciva a dargli con gli apparati di laboratorio di quei tempi. Quanto alla radioattività  $\gamma$ , si concluse che consisteva nell'emissione di *fotoni*, anche in questo caso di energia molto alta, fino a milioni di eV.

Il successivo sviluppo della fisica nucleare permise di capire che la radioattività  $\alpha$  consisteva in sostanza nella frammentazione di un nucleo: per es. nel caso dell'uranio 238 si ha



In fondo niente di diverso dalla dissociazione di una molecola. . .

Quanto alla radioattività  $\gamma$ , si poteva interpretare anch'essa secondo schemi già familiari dalla fisica atomica e molecolare: un nucleo che si trovasse in uno stato eccitato (per es. perché risultato di un'emissione  $\beta$ : v. fra poco) tornava nello stato fondamentale emettendo un fotone di energia pari alla differenza di energia dei due stati.

Il vero problema fu posto ai fisici nucleari dalla radioattività  $\beta$ ; vediamo perché. A prima vista sembrerebbe facile interpretare questa forma di radioattività come emissione di un elettrone contenuto nel nucleo, e così si credette in un primo tempo, quando si pensava che i nuclei fossero costituiti di protoni ed elettroni. Esempio: l'isotopo 14 dell'azoto doveva consistere di 14 protoni e 7 elettroni, per rendere ragione della massa e della carica del nucleo.

Ho citato questo esempio perché fu decisivo come prova contro il modello a protoni ed elettroni. Secondo tale modello infatti quel nucleo, essendo composto di 21 particelle di spin  $1/2$ , avrebbe dovuto essere un *fermione*. Ma è possibile riconoscere se un nucleo è fermione o bosone studiando lo spettro di una molecola (nel nostro caso  $N_2$ ): il lavoro di Heitler e Rasetti attorno al 1930 mostrò che  $^{14}N$  è un *bosone*. Poco dopo (1932) Chadwick scopriva l'esistenza del *neutrone*, che risolveva il problema:  $^{14}N$  essendo formato di 7 protoni e 7 neutroni è effettivamente un bosone, e tutto va a posto.

Dunque la radioattività  $\beta$  era qualcosa di nuovo: un neutrone si trasformava in un protone! Vediamo infatti un esempio molto semplice: il decadimento  $\beta$  del trizio, isotopo 3 dell'idrogeno. La reazione è:



(il punto interrogativo lo spiego tra un momento). Dato che  ${}^3\text{H}$  è formato di un protone e due neutroni, mentre  ${}^3\text{He}$  contiene due protoni e un neutrone, è evidente che un neutrone si è appunto convertito in protone, emettendo l'elettrone che bilancia la carica.

Il punto interrogativo sta a ricordare che il processo non può essere completamente descritto dallo schema che ho indicato: dev'essere coinvolta anche un'altra particella. Non sto a spiegare gli argomenti che portarono Pauli (1931) a quest'idea, ma sta di fatto che egli propose l'esistenza di una nuova particella, che doveva essere neutra (altrimenti sarebbe stata vista facilmente) e di massa assai piccola (per le caratteristiche del bilancio energetico del processo). Di qui il nome "neutrino," coniato da Fermi per significare "neutro come il neutrone, ma molto più piccolo." Non è forse superfluo sottolineare che questa è l'unica parola italiana che è rimasta stabilmente in uso nella fisica dell'ultimo secolo.

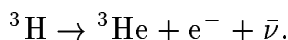
In realtà Fermi fece ben di più che proporre un nome spiritoso: inventò (1934) la prima *teoria dell'interazione debole* (ed è per questo che ce ne stiamo occupando...). Ma prima di proseguire il discorso, voglio aprire una piccola parentesi etimologica. È ovvio che il nome "neutrone" venne coniato per assonanza con "protone"; ma nelle principali lingue europee diverse dall'italiano protone si dice "proton" e ricalca esattamente l'origine greca:  $\pi\rho\omega\tau\omicron\nu$  = "primo." Solo in italiano la desinenza "-one" fa pensare a un accrescitivo, e può quindi suggerire per contrasto un diminutivo in "-ino" per una cosa piccola.

\* \* \*

Affrontiamo ora la questione centrale: perché si dice “interazione debole”? La teoria di Fermi era costruita sulla falsariga di quella elettromagnetica (elettrodinamica quantistica: QED) che all’epoca era già ben sviluppata e aveva riscosso notevole successo nello spiegare parecchi fenomeni. Le differenze principali tra la nuova teoria di Fermi e QED sono due.

La prima è che QED fa intervenire elettroni e fotoni: un elettrone può emettere o assorbire un fotone; poi ci sono altri processi di cui per brevità non parlo, perché non entrano in gioco nell’analogia che sto presentando. Invece la teoria di Fermi coinvolge 4 particelle: neutrone, protone, elettrone e neutrino (in realtà un antineutrino, ma preferisco evitare i dettagli).

La seconda sta nella “forza” dell’interazione. Questa forza (che non posso meglio definire, purtroppo) si manifesta nella “facilità” con cui avvengono i processi di cui l’interazione è causa. Per es. un atomo eccitato emette un fotone, e di regola ciò avviene in tempi brevissimi, attorno al nanosecondo. Invece l’esperienza mostra che i tempi coinvolti nel decadimento  $\beta$  sono parecchio più lunghi: il decadimento del trizio che ho citato sopra ha una vita media di 12 anni, e non è neppure il più lento. Visto che l’ho richiamato, ne approfitto per scrivere la reazione nel modo corretto:



Ecco perché si deve assumere che l’interazione di Fermi sia più debole di quella elettromagnetica. Nei 70 anni che sono trascorsi abbiamo imparato molto di più sul rapporto tra queste due interazioni, che sono anche state unificate (interazione “elettrodebole”). Ma questo è accaduto dopo la scoperta della non-conservazione della parità, per cui posso fare a meno di parlarne. Meno male, penserete voi, altrimenti qui non si finisce più!

\* \* \*

Saltiamo dunque a circa 50 anni fa, quando cominciavano a essere conosciute diverse nuove particelle (che anzi allora si chiamavano “strane” per un motivo che purtroppo non posso spiegare). In tutti i casi si trattava di particelle instabili, che dopo un tempo più o meno lungo si trasformavano (decadevano) in altre. Intendiamoci: lungo per modo di dire, visto che le vite medie erano ben minori di un microsecondo! Comunque, in molti casi c’erano buone ragioni per ritenere che il decadimento fosse dovuto all’interazione debole.

A proposito: dimenticavo di dire che era stato da poco scoperto che anche il neutrone isolato è instabile: anch’esso subisce un decadimento  $\beta$ , con vita media di circa 15 minuti, secondo la reazione



(la misura di questa vita media fu una delle tesine per la mia laurea).

Tornando alle particelle strane, in quegli anni si raccoglievano dati sulle loro modalità di decadimento (diedi anch'io il mio piccolo contributo, con la determinazione del modo di decadimento di quello che oggi si chiama mesone K). Tali dati, messi insieme, mostravano delle apparenti contraddizioni, che portarono due fisici cinesi che lavoravano in USA, Tsung-Dao Lee e Cheng-Ning Yang, a proporre l'ipotesi rivoluzionaria che l'interazione debole non fosse invariante per inversioni spaziali, come fino allora era stato automaticamente supposto, per il criterio di ragion sufficiente che ho ricordato all'inizio. Ma stavolta la "ragion sufficiente" c'era...

Non solo: Lee e Yang furono anche in grado di proporre un esperimento diretto, che fu eseguito agli inizi del 1957 e confermò pienamente l'ipotesi; tanto che in quello stesso anno a Lee e Yang fu assegnato il Nobel.

L'esperimento fu realizzato da un gruppo guidato da una scienziata anch'essa cinese: Chien-Shiung Wu. Ora cerchiamo di farci un'idea di com'era congegnato.

Ridotto all'osso (i fisici sperimentali mi perdonino) si tratta di questo: un campione di  $^{60}\text{Co}$  viene posto al centro di una bobina percorsa da corrente, così che il campo magnetico orienta tutti i nuclei del campione. Notate che nei nuclei orientati tutti i poli N dei magnetini nucleari si troveranno da una parte, e tutti i poli S dalla parte opposta: ciononostante la configurazione così costruita è *simmetrica*. Si tratta della stessa questione dell'ago di Mach, per la quale avevo dato una risposta nel gennaio 1995. Non che io possa pretendere che chi legge se la ricordi, né mi azzardo a chiedere di ripescare quel numero di nove anni fa; l'ho detto solo per scusarmi se non ripeto daccapo la spiegazione.

Ma continuiamo con l'esperimento. Il  $^{60}\text{Co}$  è radioattivo  $\beta$ ; data la simmetria della disposizione iniziale rispetto al piano della bobina, se l'interazione debole rispettasse l'invarianza per inversioni spaziali anche i prodotti di decadimento dovrebbero avere una distribuzione simmetrica rispetto allo stesso piano. Si osserva invece che gli elettroni emessi sono più abbondanti da una parte della bobina che dall'altra. Questo prova che l'interazione debole viola l'invarianza, proprio come Lee e Yang avevano supposto.

Anche se non sappiamo come mai ciò possa accadere, abbiamo trovato una risposta al problema degli extraterrestri: basta istruirli a eseguire l'esperimento di Wu, e a disporre una mano in modo che avendo le dita nel verso della corrente, il pollice indichi la direzione di emissione preferenziale degli elettroni. Ciò sarà possibile con una sola delle due mani: quella che noi chiamiamo sinistra. (Se gli extraterrestri non avessero mani come le nostre, esisterebbe ugualmente una caratterizzazione geometrica, anche se meno intuitiva.)

Per inciso: c'è un'altra cosa su cui dovremmo preventivamente accordarci coi nostri amici extraterrestri: come definire il verso della corrente. Ma questo non è un problema: basterebbe descrivere una pila, per es. la classica Daniell con elettrodi Cu-Zn, e dire che secondo la nostra convenzione la corrente nel

circuito esterno va dal rame allo zinco. Assumo che anche su quel lontano pianeta esistano i metalli e tutto ciò che occorre per fare una pila. . .

Ho ancora un chiaro ricordo di quanto fu traumatico per molti fisici, specialmente teorici, il risultato dell'esperimento: sembrava incredibile che una simmetria così naturale, e abbondantemente verificata nella fisica fino allora, dovesse essere rimessa in discussione. Ma poi lo spirito galileiano prevalse: "quello che l'esperienza e il senso ci dimostra, si deve anteporre ad ogni discorso, ancorché ne paresse assai ben fondato." Se a noi sembra naturale che il mondo debba essere simmetrico, ma gli esperimenti ci dicono che così non è, dobbiamo adattare i nostri ragionamenti a quello che l'esperimento dimostra.

\* \* \*

Posso immaginare che chi mi legge, orientato alla chimica o alla biologia piuttosto che alla fisica, si stia domandando: "tutto bene, ma a parte l'interesse intrinseco della storia, ci sono implicazioni per il mondo degli atomi e delle molecole?" Se dovessi spiegare come e perché ci possono essere effetti su atomi e molecole, sarei costretto a parlare di un'altra cosa, venuta fuori alcuni anni dopo: la "corrente debole neutra." Sono sicuro però di poter contare sulla vostra indulgenza, se non ne parlo. . .

Ancora una volta mi rifaccio a quanto scrivevo dieci anni fa, per l'esattezza nel numero di gennaio '95. Stavo allora discutendo le possibili cause dell'omochiralità delle molecole biologiche: problema che avevo già toccato nel febbraio '94. Ecco la mia autocitazione:

*A quanto ne so, il problema non è risolto a tutt'oggi in modo definitivo, ma sono state avanzate alcune ipotesi. La prima è che forse l'asserita invarianza per inversioni non sia del tutto esatta; per ora la lascio da parte.*

È facile immaginare che in dieci anni si siano fatti dei passi avanti. Dato che non si tratta di un argomento su cui mi tengo continuamente informato, ho cercato qualche notizia, e ho potuto apprendere quanto segue (detto molto in breve).

Effetti sulla struttura dei livelli atomici sono stati trovati. Il più semplice da descrivere è l'attività ottica di alcuni atomi (tallio, bismuto, piombo). Si tratta di un effetto assai piccolo (gli angoli da misurare sono microradiani) ma stabilito con sicurezza. È facile capire che se c'è una dissimmetria chirale di singoli atomi, questa si dovrà riflettere nelle loro proprietà chimiche: c'è dunque da aspettarsi che questi elementi possano formare enantiomeri non perfettamente equivalenti. Siamo però ben lontani da una verifica diretta di tale previsione.

Ben più interessante per le implicazioni biologiche è un altro risultato, assai recente (2002). In linea teorica, ci si dovrebbe aspettare delle differenze di energia tra due enantiomeri; ma i calcoli portano a valori estremamente piccoli. Per alcuni complessi con metalli pesanti ho letto stime attorno a  $10^{-10}$  eV, pari a  $10^{-5}$  J/mol; ma le misure dirette sono assai incerte. Sembra tuttavia che ci

siano degli effetti di “amplificazione,” per cui anche differenze di energia così piccole producono conseguenze misurabili su altre proprietà fisiche.

Ricercatori cinesi (ancora una volta, ma questi lavorano a Pechino) avrebbero trovato differenze tra cristalli di L-alanina e D-alanina, misurando suscettività magnetica, risonanza magnetica nucleare, assorbimento di ultrasuoni. Ho scritto “avrebbero” perché pur avendo letto il loro lavoro, non posso dare un giudizio diretto, e non so se sia stato confermato o smentito.

Se riuscirò a saperne di più, non mancherò di darvene notizia.