

## L'interazione elettromagnetica V (15/02/2006)

Non possiamo seguitare a girare attorno all'argomento. Bisogna parlare in modo diretto della teoria elettromagnetica d'oggi, che prende il nome di *elettrodinamica quantistica*. Infatti, questa è stata la prima teoria quantistica dei campi di forza, e anche le successive (per l'interazione nucleare debole, per la nucleare forte, come pure i tentativi di costruire una teoria quantistica del campo gravitazionale) hanno sempre preso come modello la *QED* (useremo l'abbreviazione standard scelta da Feynman: "Quantum Electro Dynamics", in voluto equivoco con: "Quot Erat Demonstrandum").

Dobbiamo dunque tornare a discutere un concetto sgradito a molti, ma che rappresenta la chiave di volta di tutta la QED: le particelle virtuali. Ci occorre la base della Meccanica Quantistica: il Principio d'Indeterminazione di Heisenberg, che si può scrivere come segue

$$\Delta E \times \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

Rivediamo il suo significato, prima in modo semplice e poi in modo più complesso. Anzitutto, *DE* rappresenta l'energia (non importa di che cosa) che possiamo misurare in un esperimento, e *Dt* è il tempo minimo necessario a una qualsiasi apparecchiatura sperimentale per misurare quell'energia. Ovviamente, *h* è la costante di Planck, = 6,6260693 x 10<sup>-34</sup> in unità MKS. Ragioniamo.

La formula afferma che, più rapida è la misura, meno precisa è la determinazione dell'energia. In particolare, se fissiamo il tempo di misura *Dt*, non riusciremo a misurare un *DE* minore a *h/4πDt*. Che cosa significa tutto ciò? Che in natura non è possibile scambiare un'energia *DE* in un tempo minore di *Dt*. Ma non è proprio così semplice. Proviamo a cambiare un po' il significato del PdI, sempre senza forzare troppo, e affermiamo che, se in natura esiste un qualsiasi fenomeno fisico di durata inferiore a *Dt* durante il quale viene scambiata una quantità di energia pari a *DE*, nessuna apparecchiatura avrà il tempo materiale di misurare qualcosa. O, meglio ancora, che il risultato d'ogni misura sarà sempre nullo, anche se il fenomeno si è verificato proprio mentre il misuratore era attivo.

Fino a questo punto, non credo che ci saranno forti obiezioni di principio; abbiamo semplicemente posto una limitazione alla capacità di misurare, dovuta alla "granulosità" della natura. Per intenderci: se facessimo tre righe di aritmetica (neppure di matematica) scrivendo la lunghezza d'onda di un fotone, la sua energia e il tempo che impiega il fotone a passare davanti a un misuratore fermo, ci renderemmo conto che pretendere di misurare meglio di quanto consentito dal PdI sarebbe come pretendere di misurare *mezzo fotone*, il che è impossibile perché il fotone è il "granello più piccolo" di energia, e non si può spezzare in due. Perciò, se ammettiamo l'esistenza dei fotoni, il PdI ne segue come conseguenza inevitabile. È fisica classica con in più la quantizzazione della luce. Perfino Newton avrebbe potuto essere d'accordo.

Ma, ovviamente, la MQ nasconde dappertutto un serpente velenoso. Infatti, se noi non possiamo misurare, la natura ne approfitta immediatamente per far succedere ogni genere di cosa. Rileggiamo il PdI in modo più complesso. Che è il seguente: "in violazione al principio di conservazione dell'energia, è possibile *prendere in prestito* (da chi? forse dal *vuoto*?) una quantità di energia *DE* a patto che *la si restituisca* entro un intervallo di tempo *Dt*". In questo modo, noi non ce ne possiamo accorgere, e la conservazione dell'energia non è formalmente violata. Per esempio, se si preleva abbastanza energia (*DE* = 2 m<sub>el</sub> c<sup>2</sup>) per produrre una coppia elettrone/positrone virtuali, queste due particelle possono vivere fino a 3 x 10<sup>-22</sup> secondi prima di svanire nel nulla, e durante questo tempo possono percorrere una distanza fino a 10<sup>-11</sup> cm. Sembra poco, ma è 100 volte il raggio di un nucleo atomico. Un fotone virtuale, in media fa in tempo a percorrere una distanza pari alla propria lunghezza d'onda; se il PdI *pescava dal vuoto* un fotone virtuale rosso, quest'ultimo ce la fa a percorrere quasi un millesimo di millimetro prima di dover sparire. Ma se viene *pescato* un fotone virtuale di energia molto più bassa, per esempio nelle bande radio, ecco che saliamo a distanze che vanno da centimetri a chilometri, tanto maggiori quanto minore è l'energia.

Sento Adriano che grida: «Fermi tutti! Qui si sostiene che il fotone virtuale “*può*” spuntare fuori, ma non che “*debba*” farlo per forza!» No, *deve*! Perché? Sempre per il PdI: un modo diverso di scriverlo è il seguente

$$\Delta\vec{E} \times \Delta\vec{B} \geq \frac{h}{4p}$$

Stavolta, le due lettere *E* e *B* col simbolo di vettore sopra non hanno più niente a che vedere con l'energia, ma rappresentano il campo elettrico e magnetico. C'è un'incertezza anche nella misura dei campi elettrici e magnetici. Ma ricordiamo che l'incertezza non è esattamente *nella misura*, ma nella vera e propria *esistenza*. Il concetto si potrebbe esprimere in un altro modo: in ogni punto dello spazio, né il campo elettrico né quello magnetico possono mai essere esattamente uguali a zero, poiché altrimenti il PdI non sarebbe rispettato. Vale a dire che dovunque c'è sempre una perturbazione al campo elettrico e magnetico di origine quantistica, e cos'è la perturbazione se non un'onda elettromagnetica virtuale?

D'altra parte, possiamo benissimo tornare al PdI com'era scritto all'inizio della prima pagina, con l'energia e il tempo. Per intervalli di tempo sempre più piccoli, e quindi per energie sempre maggiori, in ogni punto dello spazio *debbono* esistere particelle virtuali di massa sempre maggiore, altrimenti il PdI sarebbe violato (nel senso che il prodotto dell'*energia abusiva* per l'intervallo di tempo sarebbe minore di  $h/4p$ ). Ci si può chiedere che effetto abbiano queste particelle: possiamo stare tranquilli. Tanto maggiore è l'energia, tanto più breve è la vita di queste particelle virtuali di grande massa, tanto minore è la distanza che possono percorrere, e in ultima analisi tanto minore è l'effetto che possono causare. Infatti i fotoni virtuali, che possono avere lunghezza d'onda qualsiasi, esercitano la loro azione di disturbo fino all'infinito, anche se il loro effetto diminuisce con quadrato della distanza stessa. A distanze molto piccole (abbiamo visto quanto) si percepisce anche l'effetto degli elettroni e positroni virtuali, che sono gli oggetti più leggeri che percepiscono l'interazione elettromagnetica, e così via per le particelle virtuali di massa sempre maggiore. Che però ci sono, e ogni tanto hanno un qualche genere d'influenza sulla materia *reale*, come vedremo meglio le prossime volte.

Da ultimo, ricordo che è verissimo che noi non possiamo rivelare *direttamente* una particella virtuale; è però anche vero che le particelle virtuali agiscono su quelle *reali*, e noi possiamo misurare le perturbazioni indotte dalle particelle virtuali su quelle reali. Per esempio, misuriamo la deviazione del momento magnetico di *ogni* particella reale rispetto a quel che sarebbe senza particelle virtuali. Oppure, misuriamo addirittura l'effetto Casimir, che non è neppure *microscopico* ma *macroscopico*. E ci sono tanti altri tipi di misura che confermano la *presenza di qualcosa che s'interpreta molto bene col modello delle particelle virtuali*.

La prossima volta vedremo in che modo, per mezzo delle particelle virtuali, la QED giunge a spiegare l'interazione elettromagnetica senza bisogno di *forze a distanza*.