

in particolare quelle scalari. Sfortunatamente le masse di alcune di esse risultano colossali (fino a  $10^{17}$  eV e più grandi; si veda [79]) cosicché si dovrà aspettare forse molti decenni, se non di più, prima che sia risolta la questione dell'esistenza di queste particelle. Ma questo problema non dovrebbe influire sulla sorte delle teorie di gauge in generale in quanto alcune questioni e regioni inesplorate rimangono sempre. È più importante sottolineare che le teorie di gauge, che tengono conto anche delle interazioni forti, sono ben lungi dal considerarsi univoche e, in generale, si trovano ancora ad uno stadio iniziale della loro formulazione\*). A seconda delle diverse teorie, in particolare per la presenza di quarks di nuovi sapori, si ottengono diverse caratteristiche anche per le interazioni deboli (nonché per la non conservazione della CP-invarianza [79, 81]). Lo sviluppo delle teorie di gauge rappresenta oggi la direzione principale nella microfisica, ma sarebbe ingenuo pensare che su questa via non si incontrino sorprese e difficoltà nuove.

Ora vorrei fare un'osservazione particolare. Prima che fosse stata formulata la teoria unificata delle interazioni deboli ed elettromagnetiche, la teoria delle interazioni deboli conduceva a degli « infiniti » (cioè non era rinormalizzata) e spesso ricorreva a « tagli » sul limite superiore di varie espressioni in funzione dell'energia  $E$  e, il che è lo stesso, della lunghezza  $l = \hbar c/E$ . In questa situazione si alimentavano le ipotesi sull'esistenza di una lunghezza fondamentale  $l_f \sim 10^{-17}$  cm. Ora non esistono più ragioni per introdurre questa lunghezza. Ma ciò significa che la valutazione della lunghezza fondamentale si è spostata nella regione delle lunghezze gravitazionali  $l_g = \sqrt{G\hbar/c^3} \sim 10^{-33}$  cm (si veda il § 19)? Penso che questa conclusione sia assai prematura a priori (bisogna notare che la differenza tra le stime  $l_f \sim 10^{-17}$  e  $l_g \sim 10^{-33}$  cm è di 16 ordini!); quindi, per quanto siano rilevanti gli ultimi successi riportati dalla teoria delle interazioni deboli, ciò non esclude affatto la possibilità che esista una lunghezza fondamentale  $l_f \gg l_g \sim 10^{-33}$  cm (si veda anche il § 19).

Lo sviluppo dei modelli a quarks, della cromodinamica quantistica, delle teorie unificate delle interazioni deboli ed elettromagnetiche (e di quelle forti e gravitazionali) anche se è iniziato una ventina d'anni fa, negli ultimi cinque anni è stato particolarmente rilevante, ha riportato successi e generato grandi speranze. In generale, dopo un periodo di « stasi » o di minimo relativo nella microfisica è iniziata un'altra svolta e ora vi regnano entusiasmo e fantasia. Ma solo in fu-

\*) La teoria di gauge delle sole interazioni forti (cromodinamica quantistica) è andata invece molto in avanti. In generale, in questo quadro è possibile capire e descrivere il comportamento dei quarks che a piccole distanze (nel protone, diciamo) si comportano quasi come fossero particelle libere ma non possono allontanarsi a grandi distanze (queste proprietà spesso si chiamano rispettivamente libertà asintotica e confinamento). Una delle conseguenze sostanziali degli schemi teorici già formulati consiste anche nel fatto che le caratteristiche dei sistemi macroscopici, soprattutto a temperatura molto alta, possono essere legate alle « particelle elementari » [63].

turo si potrà valutare oggettivamente e a fondo l'importanza di quanto è stato già ottenuto, il vero posto e il significato dell'attuale tappa di sviluppo. Fra l'altro, alcuni di coloro che stanno costruendo una microfisica nuova hanno forse ragioni reali per trarre delle conclusioni sicure già oggi. L'autore del presente libro non lavora attualmente nella microfisica e, perciò, non può considerare il suo parere sufficientemente fondato e competente. Tuttavia, vorrei notare che nel preparare la presente edizione ho dovuto leggere un gran numero di articoli (alcuni di essi menzionati sopra) e ho avuto un'impressione del tutto diversa da quella che avevo avuto dopo la conoscenza dei temi e dei filoni di ricerca di moda negli anni passati. Penso che esista, nei ragioni sufficienti per ritenere che quarks, gluoni, campi di gauge, ecc. non rappresentino la moda di turno, una « speranza fisica » o un successo temporaneo, bensì qualcosa di fondamentale anche se non di definitivo.

### § 15. Fenomeni non lineari nel vuoto nei campi elettromagnetici superforti

I problemi fisici sopra elencati differiscono enormemente, e ciascuno di essi potrebbe essere diviso in altri problemi più particolari e specifici. Ma non vogliamo aumentare il numero di problemi, o ottenere un ordine perfetto nella classificazione ecc.; tutto ciò sarebbe in contrasto con l'obiettivo, assai più modesto, di abbracciare con uno sguardo fugace la situazione generale in fisica. Perciò la discussione seguente sui processi nei campi elettromagnetici superforti fornisce solo un esempio di problema più specifico ma assai rilevante.

Abbiamo già parlato al § 6 del comportamento particolare della materia nei campi magnetici superforti. A differenza del campo magnetico, un forte campo elettrico in generale distrugge l'atomo. Così, se l'intensità  $\mathcal{E}$  del campo elettrico esterno è dello stesso ordine di grandezza che l'intensità del campo del nucleo (del protone) alla distanza del raggio atomico  $a_0 = \hbar^2/me^2 \approx 5 \cdot 10^{-9}$  cm, cioè se

$$\mathcal{E} \sim \frac{e}{a_0^2} \sim \frac{e^3 \hbar^2}{\hbar^4} \sim 10^7 \text{ u.e.s./cm} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ /cm}, \quad (15)$$

l'atomo di idrogeno si distrugge molto rapidamente. Infatti questa distruzione (ionizzazione dell'atomo nel campo elettrico esterno) avviene anche in campi più deboli, ma per campi  $\mathcal{E} \ll 10^8 - 10^9$  V/cm l'atomo di idrogeno ha una durata sufficientemente lunga. L'atomo d'uranio sarà « spogliato », cioè privato di tutti gli elettroni molto rapidamente soltanto in campi dell'ordine di  $10^9 Z^3 \sim 10^{15}$  V/cm (la carica del nucleo dell'uranio  $eZ = 92e$  e il raggio dello strato  $K$  per l'uranio vale  $a_{0Z} \sim \hbar^2/me^2 Z \sim 10^{-10}$  cm per cui il campo del nucleo su questo strato è dell'ordine di  $eZ^2/a_0^2$ ). In campi elettrici ancora più forti gli elettroni degli atomi più pesanti « non resistono », ossia si distaccano



dai nuclei e vengono accelerati dal campo; per di più, « non resiste » il vuoto stesso! Il fatto è che il vuoto reale (fisico) non significa « vacuità », ma viene polarizzato dal campo e quest'ultimo può generare dal vuoto diverse coppie di particelle e le più facili a prodursi sono quelle più leggere, cioè le coppie elettrone-positrone. Vi è un'intensa produzione di coppie nel campo  $\mathcal{E}_0$  il cui lavoro alla distanza della lunghezza d'onda Compton  $\hbar/mc \sim 3 \cdot 10^{-11}$  cm è dell'ordine di grandezza dell'energia di quiete della coppia  $2mc^2 \sim 10^6$  eV  $\sim 10^6$  erg. Di qui  $e\mathcal{E}_0\hbar/mc \sim mc^2$ , ossia

$$\mathcal{E}_0 \sim \frac{m^2 c^3}{e\hbar} \sim 10^{14} \text{ u.e.s./cm} \approx 3 \cdot 10^{16} \text{ V/cm.} \quad (16)$$

Le coppie possono essere prodotte rapidamente, anche se non a ritmo catastrofico, anche in campi più deboli. Pertanto un campo  $\mathcal{E}_0 \sim 10^{14}$  V/cm già consentirebbe di osservare la produzione di coppie anche nel vuoto. In campi così forti, e talvolta in quelli più deboli, si verifica tutta una serie di altri effetti interessanti. È importante sottolineare che le particelle di grande energia  $E$  possono generare coppie in un campo elettromagnetico di  $E/mc^2$  volte più piccolo del campo (16) (si veda [82]); in effetti nel sistema di riferimento legato alla particella il campo è di  $E/mc^2$  volte più forte che nel sistema di laboratorio).

Attualmente nel fuoco del fascio di luce laser si ottengono campi con  $\mathcal{E} \sim 10^9 - 10^{10}$  V/cm (si veda il § 7). Per ottenere valori  $\mathcal{E} \sim 10^{14}$  V/cm è necessario che la potenza del laser e del flusso di energia elettromagnetica nel fuoco del fascio di luce laser sia aumentata di 10 ordini, il che sembra irrealizzabile nell'ambito della fisica odierna. Ma per gli elettroni di energia  $E \sim 20$  GeV, che è stata già raggiunta,  $E/mc^2 \sim 4 \cdot 10^4$ , e la produzione di fotoni e coppie da parte di questi elettroni nel fuoco del laser di campo  $\mathcal{E} \sim 10^9$  V/cm avverrà allo stesso modo che per l'elettrome a riposo in un campo  $\mathcal{E} \approx 4 \cdot 10^{13}$  V/cm.

Campi elettrici superforti esistono in prossimità del nucleo atomico. Così, sulla frontiera del nucleo dell'uranio il campo vale  $\mathcal{E} \sim eZ/R^2 \sim 3 \cdot 10^{16}$  u.e.s./cm  $\approx 10^{19}$  V/cm ( $Z = 92$  e il raggio del nucleo  $R \sim 10^{-12}$  cm). Tuttavia questo campo nel caso del nucleo dell'uranio non può generare ancora coppie; il campo deve essere alquanto aumentato e, come risulta da calcoli quantitativi [83], le coppie possono essere prodotte per i nuclei con  $Z \geq Z_c \approx 170$ . Questi nuclei si possono creare soltanto per un breve tempo per collisione tra due nuclei con  $Z_1 + Z_2 > Z_c$ . Ma anche questo processo presenta un certo interesse, senza parlare della questione della polarizzazione del vuoto e della produzione di coppie per i nuclei superpesanti, la quale è più ricca di implicazioni importanti [49, 63, 83, 84]. Infine, un'impertanza particolare ha il problema della produzione di coppie nell'intorno delle singolarità che hanno le soluzioni cosmologiche che descrivono l'evoluzione dell'Universo (si veda il § 19).

Il vuoto può essere polarizzato non soltanto da un campo elettrico forte ma anche da quello magnetico e, fra l'altro, il valore caratteristico del campo è  $H_0 \sim m^2 c^3 / e\hbar 10^{14}$  Oe (cioè lo stesso che per il campo elettrico  $\mathcal{E}$ ; si veda la formula (16)). Nel campo magnetico  $H$  confrontabile con  $H_0$ , e con maggiore evidenza in un campo  $H > H_0$  il vuoto si comporta come un mezzo anisotropo non lineare e incide fortemente sulla distribuzione delle onde elettromagnetiche (cioè, se usiamo il linguaggio quantistico, sulle traiettorie dei fotoni; si veda, ad esempio, [1b, 82] e la bibliografia là citata). La questione dell'influenza sul vuoto del campo magnetico ha cessato di essere astratta da quando è stato definito che in prossimità della superficie delle pulsar il campo magnetico può assumere valori  $H \sim 10^{13}$  Oe (si veda anche il § 21).

### § 16. Sulla microfisica di ieri, oggi e domani

Tutto finisce, tutto varia, e cambiano non soltanto i soggetti di ricerca del campo che chiamiamo microfisica, ma anche il loro posto occupato nella scienza in generale e nella fisica in particolare. È sufficiente sfogliare alcune riviste di fisica, bollettini di rassegna informativa e pubblicazioni divulgative per vedere quanto segue: il peso specifico dei problemi della microfisica in tutte queste pubblicazioni è stato fortemente ridotto nel corso degli ultimi vent'anni rispetto a quello che decennio precedente. Sfortunatamente non dispongo di cifre esatte\*, ma penso che il rapporto tra il numero di lavori scientifici dedicati alla micro- e quelli dedicati alla macrofisica sia diminuito come minimo di un ordine di grandezza nell'ultimo ventennio. Quanto ad altri indici dell'attività scientifica (numero di studenti laureandi che si specializzano nel campo, numero di conferenze scientifiche, ecc.), il quadro probabilmente è simile.

Ma come si spiega tutto questo?

La causa principale, come penso, è dovuta al fatto che ancora nel passato recente (diciamo, per chiarire le idee, 30-35 anni fa) la microfisica aveva occupato un posto eccezionale nella scienza, e oggi la situazione è cambiata.

La problematica della microfisica affronta questioni fisiche fondamentali, di principio, e quindi assai attraenti per molti scienziati.

\*) In relazione a ciò posso soltanto lamentarmi ancora una volta che da noi si fa poca attenzione all'analisi statistica (e a qualsiasi altra) di tendenze di sviluppo della scienza, del ruolo di varie forme di informazione, ecc. Osservo anche che la diminuzione del peso specifico della microfisica in questione non è dovuta per niente al fatto che la parte principale della fisica atomica e nucleare è stata collocata nell'ambito della macrofisica. È sufficiente ricordare che prima non esistevano in generale settori della microfisica quali la fisica delle alte energie, fisica mesonica, fisica di neutrino, ecc. Tuttavia nelle nostre definizioni rimane alla microfisica il ruolo di avanguardia della fisica (si veda anche il § 10).