

Fermi e l'elettrodinamica quantistica

MARCELLO CINI

1 – La quinta Conferenza Solvay del 1927 segna la definitiva accettazione da parte della comunità dei fisici della meccanica quantistica non relativistica —nella formulazione di Born, Heisenberg e Jordan [2] e con l'interpretazione di Bohr— come teoria corretta e definitiva dei fenomeni che si svolgono al livello degli elementi costitutivi della realtà materiale. Così Wolfgang Pauli [3] rievocava, sei anni dopo, quella svolta:

“Con il principio di indeterminazione di Heisenberg [...] la fase iniziale dello sviluppo della teoria giunse al termine. La teoria conduce alla soluzione del problema a lungo cercata, e fornisce una descrizione corretta e completa dei fenomeni che la riguardano. La soluzione è ottenuta a costo di abbandonare la descrizione causale e spazio-temporale classica della natura.”

Era l'affermazione, per usare la terminologia di Thomas Kuhn [4], di un nuovo “paradigma” che dava inizio a un lungo periodo di “scienza normale”, fondato sull'applicazione del formalismo e delle sue regole interpretative ai problemi della struttura della materia (fisica atomica e molecolare, fisica dello stato solido e fisica nucleare). Queste regole si possono riassumere molto schematicamente nella “condizione di quantizzazione” per le variabili dinamiche di un sistema che le trasforma, da variabili numeriche, in enti matematici che non soddisfano alla proprietà commutativa del prodotto. La relazione fondamentale fra variabili coniugate classiche nota come parentesi di Poisson, diventa in questo modo la “relazione di commutazione” fondamentale fra le corrispondenti variabili coniugate quantistiche.

Enrico Fermi non aveva partecipato alla fase di costruzione della nuova teoria. Nell'inverno del 1923, si era recato, con una borsa del Ministero della Pubblica Istruzione, a Göttingen presso Max Born, ma da quel soggiorno non aveva tratto molto profitto. “Non è facile capirne il perché — scrive Emilio Segrè [5] nella nota biografica introduttiva della raccolta delle Note e Memorie di Fermi pubblicata dall'Accademia dei Lincei— ma è

probabile che il suo amore per i problemi concreti e la sua diffidenza per le questioni troppo generali l'abbiano distolto dalle speculazioni, a quel tempo certo alquanto nebulose e peggio ancora miste di filosofia, che dovevano però portare alla meccanica quantistica". È anche possibile, aggiunge Segrè [6], che a Gottinga "i fisici suoi coetanei e quindi giovanissimi, come Heisenberg, Pauli, Jordan ecc. tutti uomini di eccezionale abilità, che avrebbero dovuto costituire la compagnia dei suoi, pari, non abbiano riconosciuto il valore di Fermi, e lo abbiano involontariamente lasciato in disparte."

Più profittevole fu invece il successivo soggiorno a Leida, dove si recò per lavorare con P. Ehrenfest, che riconobbe rapidamente il valore di Fermi e incoraggiò il timido italiano. Fatto sta che i lavori di Heisenberg sulla meccanica delle matrici del 1924-25 non apparvero abbastanza chiari a Fermi, che, solo più tardi, attraverso la meccanica ondulatoria di Schrödinger, giunse a una piena comprensione della meccanica quantistica. Anche il primo contributo fondamentale di Fermi alla conoscenza del mondo atomico — la statistica, che porta il suo nome [7], delle particelle che ubbidiscono al principio di Pauli — era nata (febbraio 1926) al di fuori della nuova meccanica e certo prima che egli se ne fosse impadronito. È probabile che l'approccio di Heisenberg — fondato sulla sostituzione delle variabili numeriche classiche con matrici che non soddisfano alla proprietà commutativa del prodotto — gli sia apparso troppo astratto per il suo profondo senso fisico. Sia come sia, "le memorie di Schrödinger — è sempre Segrè che scrive — furono le prime ad essere veramente capite e suscitavano immenso entusiasmo. Fermi le spiegò ben presto, prima ai suoi studenti e amici, poi a Corbino e più tardi ne parlò anche al Seminario Matematico."

Ma su questa fase dell'attività di Fermi altri si soffermeranno più compiutamente.

2 – La situazione era assai differente per quanto riguardava la soluzione dei problemi che coinvolgevano il campo elettromagnetico e la sua interazione con le particelle cariche della materia. L'estensione del paradigma quantistico ai sistemi relativistici con infiniti gradi di libertà infatti presentava difficoltà assai maggiori di quelli che dovevano essere affrontati per applicare le regole della meccanica quantistica alla soluzione dei "rompicapo" della "scienza normale". Essa richiedeva di affrontare problemi concettuali non risolti al fine di formulare uno schema teorico adeguato — l'elettrodinamica quantistica — per interpretare un nuovo settore della realtà fisica. Questa impresa durò vent'anni — dal 1927 al 1947 — attraverso un percorso tutt'altro che lineare: proposte in parte mutuamente incompatibili si trovavano a confrontarsi via via che nuove proposte venivano avanzate. A questo lungo processo di costruzione della teoria Fermi contribuì significativamente nel '29, intervenendo con la consueta lucidità e chiarezza di pensiero nel dibattito — che si era aperto nel '27 con i lavori fondamentali di Dirac [8] e di Jordan [9] — allo scopo da un lato di mettere in evidenza la natura delle difficoltà che impedivano lo sviluppo di una teoria completa e coerente e dall'altro di individuare i problemi concreti che, nonostante queste difficoltà, avrebbero potuto ugualmente essere affrontati e risolti. L'importanza del contributo di Fermi, tuttavia, va oltre questi chiarimenti. È infatti trasferendo al problema del decadimento beta l'impostazione originale da lui data alla formulazione dell'elettrodinamica quantistica, che Fermi riuscì a fornire nel '33, utilizzando l'idea del neutrino di Pauli, la teoria di questo fenomeno che porta il suo nome. Conviene dunque,

prima di parlare più in dettaglio di questo contributo, accennare brevemente al contesto entro il quale esso va collocato.

Il problema fondamentale da affrontare era quello di spiegare le proprietà corpuscolari del campo elettromagnetico (l'esistenza dei fotoni) e delle sue interazioni con le particelle elettricamente cariche della materia, introducendo i principi della meccanica quantistica nella sua descrizione classica fornita dalle equazioni di Maxwell. Fin dall'inizio questo problema fu affrontato da due punti di vista radicalmente differenti: quello di Jordan e quello di Dirac. Jordan [8] parte dalle proprietà *ondulatorie* del campo elettromagnetico per mostrare che, trattando le ampiezze delle onde stazionarie della radiazione in una cavità come variabili dinamiche quantistiche, il campo acquista proprio quelle proprietà corpuscolari che Einstein aveva trovato fin dal 1905 utilizzando il formalismo della termodinamica statistica. In altri termini, Jordan dimostra che le proprietà corpuscolari delle onde elettromagnetiche derivano dalle condizioni di quantizzazione imposte sulle ampiezze delle onde cioè dalla non commutabilità delle variabili dinamiche del campo. Per Jordan, dunque, nel limite classico non ci sono particelle, ma solo l'ente fisico classico dotato di estensione spaziale e di continuità: il campo con le sue proprietà ondulatorie. Questa visione caratterizza tutto il successivo sviluppo delle ricerche di Jordan, in contrasto radicale con quella che guiderà Dirac nella sua successiva formulazione della teoria.

Per quest'ultimo infatti, la meccanica quantistica aveva le sue basi nel formalismo hamiltoniano della meccanica classica. E poiché questo formalismo è profondamente radicato nella teoria del moto dei corpi materiali (piuttosto che nella teoria dell'elettromagnetismo) è necessario, per costruire una corretta teoria quantistica del campo elettromagnetico, partire dalla natura *corpuscolare* della radiazione. Coerentemente con questa impostazione Dirac inizia il suo lavoro del '27 [7] partendo dalla descrizione quantistica di un insieme statistico di particelle non interagenti tra loro ognuna delle quali ubbidisce all'equazione di Schrödinger per una particella singola in presenza di una perturbazione comune. In questa descrizione tuttavia il numero di particelle dotate di una data energia è soltanto un valore medio sull'insieme statistico, che può essere un numero reale qualsiasi. Se si vuole invece che questi numeri rappresentino valori effettivi possibili, cioè possano essere soltanto numeri interi, occorre imporre che essi soddisfino le condizioni di quantizzazione, cioè che diventino variabili che non commutano. Sono dunque i numeri di particelle di energia determinata che diventano variabili quantistiche.

Con ciò esse acquistano automaticamente —è questo il punto essenziale del procedimento di Dirac— la proprietà delle particelle identiche (bosoni) che soddisfano la statistica di Bose-Einstein. E poiché i fotoni sono, per l'appunto, bosoni, questo procedimento fornisce un metodo per trattare correttamente i processi di emissione e di assorbimento di fotoni da parte delle particelle cariche della materia senza avere ancora introdotto alcun riferimento esplicito al campo elettromagnetico classico. È soltanto per ottenere l'espressione esplicita delle probabilità di questi due processi che Dirac, nell'ultimo paragrafo del suo lavoro, introduce l'espressione della hamiltoniana classica di un sistema atomico in interazione con il campo elettromagnetico, e deriva da questa il valore della costante che lega l'ampiezza del campo con il corrispondente numero di fotoni. In questo modo l'autore dimostra, *a posteriori*, che “il punto di vista ondulatorio è consistente con

il punto di vista dei quanti di luce, e fornisce il valore del coefficiente di interazione nella teoria quantistica della radiazione.”

Questi due punti di vista radicalmente diversi conducono Jordan e Dirac a sviluppare la teoria in direzioni che appaiono divergenti. Jordan infatti, nei suoi lavori successivi, dimostra che anche per spiegare l'esistenza delle particelle che ubbidiscono alla statistica di Fermi-Dirac (fermioni) è possibile partire da una descrizione ondulatoria che assume proprietà corpuscolari quando si impone alle ampiezze di soddisfare a condizioni di quantizzazione che le rendono variabili non commutabili. Per Jordan [10] dunque “la formulazione naturale della teoria quantistica degli elettroni sarà costruita in modo che la luce e la materia saranno introdotte contemporaneamente come onde interagenti nello spazio tridimensionale.” Dirac, al contrario, continuò a sviluppare la sua ricerca convinto che il procedimento da lui inventato potesse essere applicato esclusivamente al campo elettromagnetico, perché, come ebbe occasione di spiegare nel '32, “non possiamo supporre che il campo sia un sistema dinamico dello stesso tipo delle particelle materiali.”

3 – Il passo successivo è rappresentato da due lavori di Heisenberg e Pauli [11] nei quali i due autori tentano di dare una formulazione paradigmatica alla teoria. Essi partono da una hamiltoniana del campo elettromagnetico in interazione con particelle materiali che soddisfino i principi della relatività, trattando il primo con il metodo di Dirac e queste ultime con quello di Jordan e si propongono di fornire un metodo per affrontare la soluzione dei problemi concreti che coinvolgono i fenomeni di questo settore della fisica. Essi si imbattono però subito in difficoltà di diverso tipo. La prima deriva dalla necessità di descrivere il campo elettromagnetico mediante i potenziali vettore e scalare (che non sono completamente determinati dalle componenti elettrica e magnetica del campo). La condizione di Lorentz che li lega è infatti incompatibile con le regole di commutazione che le variabili quantistiche corrispondenti devono soddisfare. È una difficoltà alla quale Fermi darà, come vedremo subito, una soluzione originale nei suoi lavori considerando la condizione di Lorentz come un vincolo sugli stati del sistema anziché una relazione fra le variabili. Una seconda difficoltà nasce dal valore infinito dell'energia della radiazione nello stato fondamentale e dalla energia coulombiana infinita delle particelle cariche puntiformi. Gli autori non si mostrano troppo preoccupati, perché, dicevano, si tratta di costanti infinite che scompaiono nel calcolo della differenza di energia tra due livelli del sistema mediante la teoria delle perturbazioni. Né si mostrano preoccupati di quello che sarebbe potuto accadere negli ordini più elevati di approssimazione. Infine essi accennano alle difficoltà che nascono dagli stati ad energia negativa dell'equazione di Dirac utilizzata per descrivere le particelle in accordo con la teoria della relatività. Nel complesso, tuttavia, essi, pur ammettendo che “c'è una lunga strada da percorrere per arrivare a una teoria definitiva” si dichiarano convinti che progressi sostanziali saranno possibili secondo le linee proposte. Jordan non è dello stesso parere. Egli infatti, in un articolo [12] immediatamente successivo al loro, giudica chiaramente inadeguata la teoria proposta. “Appare chiaro — si legge — che questa teoria di Maxwell quantizzata soffre di difficoltà e difetti fondamentali”. Infatti —egli osserva a ragione— “l'energia propria dell'elettrone è una quantità infinita variabile e rappresenta un ostacolo così serio e pre-

occupante da rendere praticamente impossibile ogni applicazione pratica della teoria". In sostanza —continua Jordan— "le difficoltà che dobbiamo oggi affrontare hanno una natura totalmente differente da quelle del periodo pre-quantistico, quando non esisteva alcuna base solida per rispondere alla domanda "perché esistono gli elettroni?". Non si tratta più dell'esistenza degli elettroni, ma sono ora il modo e la natura della loro interazione con il campo di radiazione che restano ancora senza soluzione e ci pongono indubbiamente difficili enigmi."

4 – Pressoché contemporanea è la formulazione dell'elettrodinamica quantistica che Enrico Fermi presenta in una serie di Note all'Accademia dei Lincei [13-15] (la data di ricezione del primo lavoro di Heisenberg è il 19/3/29 mentre quella della prima Nota di Fermi è il 5/5/29). Secondo la testimonianza di Amaldi [16], Fermi cominciò a lavorare su questo problema nell'inverno 1928-29 e non studiò a lungo il lavoro di Heisenberg e Pauli. La sua teoria differisce sia da quella di Dirac che da quella di Jordan, anche se il suo approccio è anch'esso nel quadro del formalismo hamiltoniano.

Il suo obiettivo è di "affrontare il problema della costruzione di una elettrodinamica quantistica per il caso, che praticamente è il più importante, in cui nel campo ci sono anche delle cariche elettriche." "Una soluzione parziale di questo problema —prosegue Fermi— è stata data da Dirac nel suo fondamentale lavoro sopra la teoria dell'irraggiamento. L'elettrodinamica di Dirac è però incompleta per il fatto che essa considera soltanto il campo elettromagnetico di radiazione e cioè un campo che si possa rappresentare come somma di onde elettromagnetiche piane. In realtà il campo elettromagnetico che si produce in vicinanza di un corpuscolo elettrico in movimento è alquanto più complicato, per modo che la teoria di Dirac corrisponde alla realtà soltanto per quanto riguarda le regioni dello spazio abbastanza lontane dai corpuscoli elettrici che generano il campo. Per esempio, non si potrebbe trattare, per mezzo di essa, il problema dell'interazione tra due elettroni dello stesso atomo o di atomi vicini tenendo conto che il campo si propaga dall'uno all'altro per potenziali ritardati; similmente non si può trattare, con la teoria di Dirac, il problema della teoria quantistica della massa elettromagnetica, ecc."

Per scrivere le equazioni dell'elettrodinamica quantistica Fermi [13] cerca per prima cosa di porre le equazioni dell'elettrodinamica classica in una forma che si presti ad essere tradotta in forma quantistica. Per fare questo, invece di prendere come variabili che descrivono il campo elettromagnetico i valori dei potenziali scalare e vettore in ogni punto dello spazio, prende i coefficienti, funzioni del tempo soltanto, dello sviluppo di essi in integrale di Fourier. Per quanto riguarda le particelle esse vengono descritte dalle loro posizioni nello spazio. Accanto alle coordinate, vengono introdotti nella teoria i momenti coniugati ad esse.

"Avendo scritto le equazioni dell'elettrodinamica e del movimento delle cariche in forma canonica —conclude Fermi al termine della prima nota— resta immediata la loro traduzione in equazioni della meccanica quantistica. Basta per questo considerare l'espressione della hamiltoniana come un operatore, in cui i momenti, secondo l'ordinaria regola, siano equivalenti all'operazione di derivazione rispetto alla coordinata corrispondente e di moltiplicazione per $(-h/2\pi i)$."

La semplicità, la chiarezza e il rigore di questa esposizione sembrano quasi occultare le profonde difficoltà che ostacolano l'ulteriore sviluppo della teoria.

5 – Nella nota immediatamente successiva [14] “Sulla teoria quantistica delle frange di diffrazione” Fermi ritorna sulla originaria teoria di Dirac —senza occuparsi del “raffinamento della teoria” da lui proposto nella nota precedente— per dimostrare che essa tiene conto correttamente dei fenomeni di interferenza (tipicamente ondulatori) e dunque che “si può ben dire che essa comprende in sé tutte le proprietà della radiazione”. Colpisce anche qui la semplicità dell'impostazione.

“Gli elementi del problema —leggiamo— sono: un atomo emittente A , che funziona da sorgente di luce, un interferometro, che possiamo schematicamente pensare costituito da un insieme di schermi opachi, di superfici riflettenti oppure che delimitano mezzi di differente indice di rifrazione, infine un altro atomo B che, assorbendo più o meno intensamente la luce emessa da A , ci indica in quali regioni dello spazio la luce emessa da A arriva con intensità maggiore (frange chiare) e in quali essa arriva con intensità minore (frange scure). Naturalmente, secondo il criterio fondamentale della teoria di Dirac, i due atomi A e B e il campo di radiazione dovranno venir considerati come un unico sistema, che deve venir trattato con i metodi della meccanica quantistica.” Come si vede, non si parla di fotoni, ma solo di stati quantici delle differenti componenti armoniche della radiazione. L'atomo A è inizialmente eccitato e l'atomo B sta nello stato fondamentale di energia minima. Il calcolo dimostra che la probabilità di eccitazione di B in funzione del tempo dipende dalla sua posizione secondo la teoria classica delle onde stazionarie. “In questo modo —conclude— riscopriamo i risultati della teoria classica dell'interferenza delle onde.”

La stessa semplicità formale contraddistingue il lavoro seguente [15] dedicato alla generalizzazione della teoria al caso di cariche in moto relativistico. “È noto —commenta Fermi— che recentemente anche Heisenberg e Pauli hanno trattato il problema della elettrodinamica quantistica. Siccome però i metodi seguiti da questi autori sono essenzialmente diversi dai miei, credo non inutile pubblicare anche i miei risultati.” Non è solo modestia. Per capire quanto la pubblicazione non sia stata “inutile” basta confrontare le otto pagine delle due Note di Fermi con le più di ottanta pagine dei due lavori di Heisenberg e Pauli.

Le sue conclusioni sono improntate a un pragmatico ottimismo. “Naturalmente —leggiamo— come abbiamo già accennato, anche questa teoria conserva in sé due difetti fondamentali, che però più che di origine elettrodinamica, possono considerarsi derivanti dalla non completa conoscenza della struttura elettronica. Essi sono la possibilità che ha l'elettrone di Dirac di passare a livelli energetici con energia negativa, ed il fatto che l'energia intrinseca ha valore infinito se si ammette l'elettrone esattamente puntiforme.”

È appunto a quest'ultimo problema che Fermi dedica il lavoro successivo sul Nuovo Cimento dei primi mesi del '31 [17]. È utile esaminarne alcuni aspetti metodologici, nonostante che esso non sia più attuale, perché essi mostrano ancora una volta come l'approccio di Fermi al problema sia improntato a considerazioni di carattere fisico, più che a ragionamenti formali astratti.

Dopo aver brevemente richiamato il fatto ben noto che “L’energia del campo elettrostatico prodotto da una carica elettrica puntiforme è infinita”, e aver osservato che “non è possibile eliminare questa difficoltà alterando il valore dell’energia per una costante additiva infinita, perché il termine infinito non è costante, ma varia al variare degli stati quantici”, Fermi ricorda ancora che “L’artificio che si presenta per primo per cercare di evitare questi inconvenienti, consiste nel tentare di introdurre anche nell’elettrodinamica quantistica qualcosa di equivalente ad un raggio finito dell’elettrone.”

“Se si cerca di far questo, però, – continua Fermi – ci si trova di fronte a difficoltà assai maggiori di quelle che si incontrano nel corrispondente problema classico; così che non sembra possibile, almeno con lo schema attuale dell’elettrodinamica quantistica, fare la teoria di un elettrone di raggio finito conservando la invarianza relativistica. Ha tuttavia un certo interesse studiare fino a che punto può costruirsi una teoria delle masse elettromagnetiche, poiché in essa si presentano alcune caratteristiche differenze dalla teoria classica.” È a questo punto che si apprezza l’originalità dell’approccio di Fermi alla quale abbiamo accennato.

“Per introdurre in modo analiticamente semplice l’ipotesi che l’elettrone abbia estensione finita – spiega – osserviamo che, se così è, le varie parti dell’elettrone verranno a trovarsi in punti di egual fase, rispetto ad onde di lunghezza d’onda grande rispetto alle dimensioni elettroniche, mentre onde di lunghezza d’onda dell’ordine delle dimensioni elettroniche, o più piccola, avranno fase differente nei diversi punti dell’elettrone. Si comprende allora assai facilmente, e calcoli immediati lo confermano, che l’elettrone verrà a interagire tanto meno intensamente con le diverse onde, quanto più piccola è la loro lunghezza d’onda, poiché, per onde assai brevi, le diverse parti dell’elettrone agiscono in disaccordo.”

Da questa impostazione fisicamente chiara deriva come conseguenza che “l’elettrone interagisce con le componenti armoniche di alta frequenza del campo come se avesse una carica elettrica efficace più piccola di quella che determina l’interazione con le componenti armoniche di bassa frequenza, e che naturalmente coincide con l’ordinario valore della carica elettronica quale è dato da misure statiche o quasi statiche.” C’è in questa osservazione una interessante anticipazione della “rinormalizzazione della carica elettrica” che verrà poi introdotta nella formulazione della elettrodinamica quantistica di Feynman, Schwinger e Tomonaga attualmente accettata come “definitiva”.

Dopo aver pubblicato nel ’32, sulla “Review of Modern Physics” una esauriente monografia [18] nella quale la teoria viene presentata in forma sistematica —una monografia sulla quale hanno imparato l’elettrodinamica quantistica, nell’immediato dopoguerra, generazioni di giovani ricercatori (tra i quali io stesso)— Fermi dedica il suo ultimo lavoro [19] sull’argomento, in collaborazione con Hans Bethe, nel 1933. Si tratta, non a caso, di un calcolo di natura applicativa nel quale, usando i metodi da lui sviluppati, le due formule di Bethe e di Møller per la diffusione fra due elettroni sono riderivate e confrontate tra loro.

6 – Ci rimane ora da commentare brevemente (rimandando ad un altro contributo l’approfondimento di questo argomento) la connessione tra le ricerche di Fermi sull’elet-

trodinamica quantistica e la sua teoria dell'emissione beta del '33. Racconta Rasetti [20] che “per capire il contributo fondamentale portato da Fermi con la sua teoria del decadimento beta, si deve sottolineare che l'idea del neutrino (avanzata da Pauli nel dicembre del '30) era rimasta fino ad allora una ipotesi abbastanza vaga, e che la costruzione di una teoria formale non era mai stata tentata. Quando Pauli aveva avanzato il suo suggerimento si credeva che gli elettroni esistessero già nel nucleo, e l'ipotetica particella neutra veniva per analogia immaginata come un'altra componente del nucleo di massa piccola ma finita. Solo vaghi accenni alla possibilità che l'elettrone venisse creato, con il neutrino, nel processo di decadimento beta, si trovano nei Proceedings della Conferenza Solvay del '33”.

Ma sentiamo cosa dice in proposito lo stesso Fermi [7]. Dopo aver dichiarato che l'ipotesi dell'esistenza del neutrino sta alla base della teoria che intende presentare, e aver ricordato la difficoltà di spiegare in modo soddisfacente come le particelle leggere possano venir legate in modo stabile all'interno di un nucleo, Fermi così prosegue:

“La via più semplice per la costruzione di una teoria che permetta una discussione quantitativa dei fenomeni in cui intervengono gli elettroni nucleari, sembra in conseguenza doversi ricercare nella ipotesi che gli elettroni non esistano come tali nel nucleo prima della emissione beta, ma che essi, per così dire, acquistino esistenza nell'istante stesso in cui vengono emessi; *allo stesso modo come un quanto di luce emesso da un atomo in un salto quantico non si può in alcun modo considerare preesistente nell'atomo prima del processo di emissione.* In questa teoria dunque il numero totale degli elettroni e dei neutrini (*al pari del numero totale dei quanti di luce nella teoria della radiazione*) non sarà necessariamente costante, potendosi avere dei processi di creazione e di distruzione delle particelle leggere⁽¹⁾.”

E ancora: “Cercheremo poi un'espressione dell'energia di interazione tra le particelle leggere e quelle pesanti che consenta la trasformazione di un neutrone in protone e viceversa, in modo tale però che alla trasformazione da neutrone a protone sia di necessità connessa la creazione di un elettrone, che si osserva come particella beta e di un neutrino; mentre alla trasformazione inversa da protone a neutrone sia connessa la scomparsa di un elettrone e di un neutrino; *così come nella teoria della irradiazione a un certo salto quantico dell'atomo è connessa l'emissione di un quanto di luce, mentre al salto quantico opposto è connesso l'assorbimento di un quanto*⁽¹⁾.”

Il legame con tutto il lavoro precedente non potrebbe essere più esplicito. Vale comunque la pena aggiungere, senza entrare in dettaglio, che la storia ha dimostrato cinquant'anni dopo, con l'unificazione dell'elettrodinamica quantistica e delle interazioni deboli da parte di Weinberg e Salam e con la conferma sperimentale della sua validità da parte di Rubbia, quanto profondo fosse in realtà il legame fra le due teorie. Ma questa è un'altra storia.

⁽¹⁾ Corsivi miei.

7 – Non ci interessa procedere oltre nella esposizione delle successive vicende dello sviluppo dell'elettrodinamica quantistica. Mi sembra invece utile concludere con alcune osservazioni che discendono da un esame con l'occhio dello storico dei diversi elementi della sua fase iniziale che abbiamo schematicamente ricostruito. Abbiamo infatti mostrato come gli approcci adottati dai fisici —Jordan, Dirac, Heisenberg e Pauli, Fermi— che hanno maggiormente contribuito a impostare il problema della formulazione di una soddisfacente teoria dell'elettrodinamica quantistica siano stati caratterizzati da sostanziali differenze metodologiche ed epistemologiche. Sorge spontanea allora la domanda: Si tratta soltanto di differenze dovute a fattori caratteriali e psicologici o a pregiudizi filosofici puramente individuali, oppure è possibile tentare di rintracciarne almeno in parte l'origine nel diverso contesto culturale e sociale nel quale essi si sono trovati ad operare?

So bene che per la maggior parte degli scienziati impegnati a portare avanti la ricerca nella propria disciplina si tratta di una domanda priva di senso, perché senza risposta verificabile, o, al massimo, di una domanda senza alcun interesse. Non è così, tuttavia, per chi è convinto che la storia non è né lo svolgersi di un disegno predeterminato, né puro frutto della contingenza. Se si accetta questa premessa, infatti, diventa compito delle discipline storiche —da quelle più generali che studiano l'evoluzione delle società a quella particolare che si occupa delle vicende che hanno caratterizzato lo sviluppo della scienza— tentare di ricostruire, nel modo più accurato possibile, il contesto che crea i vincoli entro i quali, sia pure con ampio margine di aleatorietà e di imprevedibilità, vengono incanalati gli eventi singolari che segnano le tappe dei processi della storia.

In particolare, per quanto riguarda la scienza, occorre tener presente che la creatività e la genialità del singolo scienziato sono solo un aspetto, sia pure fondamentale, del suo processo di crescita, l'altro essendo costituito dal vincolo dell'accettazione da parte della comunità —fondata sul principio della *peer evaluation*— di ogni proposta radicale di innovazione del patrimonio di conoscenze condivise che caratterizzano l'identità della disciplina. Ed è proprio nel giudicare se la proposta deve essere accettata o respinta che entrano in gioco, oltre ai controlli tecnici di compatibilità con quel patrimonio, anche criteri generali di opportunità mutuati, più o meno esplicitamente, dal contesto socioculturale circostante.

Da questo punto di vista è utile ricordare la diversa accoglienza che la nuova meccanica quantistica ebbe in Inghilterra e in Germania, ricollegabile —secondo Paul Forman [21]— alle profonde differenze che esistevano allora fra l'ambiente nel quale venivano formati i fisici inglesi e quello della comunità dei fisici tedeschi. Osserva a questo proposito questo autore che “soltanto in Germania l'indeterminismo della teoria fu immediatamente riconosciuto e bene accolto da un numero significativo di fisici, per lo più come espressione del desiderio di ottenere un pubblico riconoscimento più favorevole per la loro disciplina. In Inghilterra, al contrario, dove i fisici non erano stati sottoposti a critiche da parte dell'ambiente intellettuale, e dunque il tema della causalità non era diventato una questione controversa, le conseguenze epistemiche della nuova teoria non furono notate, e il suo formalismo fu adottato acriticamente nei suoi aspetti più congeniali.”

In altri termini, si può dire che questa differenza fra ambienti culturali favorì in Inghilterra un approccio alla nuova meccanica caratterizzato dalla ricerca di una continuità con la tradizione classica, mentre in Germania vennero sottolineati gli elementi di rottura rispetto ad essa [22]. In particolare, per Dirac la teoria classica rimaneva, e rimase di fatto nella sua ricerca degli anni successivi, l'unico modello in grado di fornire un'indicazione sul modo di costruire la nuova teoria, mentre per i fisici tedeschi l'unico ponte fra la fisica classica e la nuova fisica era costituito dal principio di corrispondenza di Bohr, che semplicemente garantiva la validità *approssimata* della prima, per la descrizione delle proprietà dei corpi macroscopici. Le basi di partenza per la costruzione della nuova elettrodinamica quantistica non potevano dunque essere più distanti.

8 – È facile rintracciare dunque nella diversità dei contesti culturali, l'origine dei differenti approcci adottati dagli autori sopra citati [23]. La prima questione riguarda il contrasto fra Dirac e Jordan sul problema dell'esistenza delle particelle materiali. La seconda riguarda la descrizione dello stato di un sistema di N particelle in uno spazio astratto a $3N$ dimensioni piuttosto che nell'ordinario spazio tridimensionale della nostra esperienza quotidiana. Per Dirac questi problemi non esistono. Educato nella tradizione di Newton e di Hamilton, vissuto nella Cambridge dove Whittaker insegnava meccanica analitica, le particelle di materia erano il suo punto di partenza. Non era dunque un problema scientifico spiegarne l'esistenza. Né era un problema il dover descrivere lo stato di un sistema mediante le coordinate Lagrangiane nello spazio delle configurazioni.

Per Jordan, invece, l'esistenza degli elettroni era un problema fondamentale che aveva profonde radici nel problema filosofico della "liquidazione del materialismo". Scriveva infatti Jordan a questo proposito: "Le nuove concezioni sorte dagli esperimenti di fisica quantistica e dalle loro elaborazioni teoriche portano alla liquidazione dell'immagine materialista del mondo sviluppata dalla scienza occidentale classica, che a sua volta deriva dalla filosofia materialista dei Greci."

E ancora: "Prima credevamo che in natura esistessero radiazioni ondulatorie e radiazioni corpuscolari, e la nostra intuizione classica ci portava a rappresentarle come cose differenti irreconciliabili. Ora vediamo che la natura conosce in realtà soltanto un tipo di radiazione, che da un lato mostra proprietà corrispondenti alla rappresentazione classica ondulatoria e dall'altro tutte le proprietà che classicamente attribuiamo ai raggi corpuscolari." Sia la natura corpuscolare, che quella ondulatoria della radiazione sono dunque conseguenza di una teoria che la rappresenta nello spazio ordinario. La conclusione è che, "grazie alle osservazioni, uno degli aspetti più visibili della rappresentazione materialista del mondo è liquidato una volta per sempre, mentre la teoria positivista ne esce giustificata e confermata in modo decisivo." Non si tratta, si badi bene, di vuote chiacchiere filosofiche. Queste affermazioni dimostrano infatti che sia il problema dell'esistenza delle particelle, che quello della loro rappresentazione nello spazio tridimensionale ordinario, problemi inesistenti nel contesto culturale britannico, per gli esponenti della scuola tedesca sono problemi importanti, che devono essere risolti attraverso una descrizione unitaria della realtà.

Non è questa l'unica differenza fra le due formulazioni della teoria che discende dalla differenza di contesto culturale nel quale gli scienziati delle due scuole lavorano. Ce n'è almeno un'altra, anch'essa fondamentale. Si tratta dell'importanza attribuita alla relatività. Era ovvio per tutti che l'interazione fra particelle cariche e campo elettromagnetico doveva essere invariante rispetto alle trasformazioni di Lorentz. Appare tuttavia chiaro che per Dirac —dopo il primo lavoro nel quale la scelta di un'approssimazione non relativistica è giustificata dalla necessità di non affrontare simultaneamente troppe difficoltà— la costruzione di una teoria esplicitamente invariante per trasportare nella meccanica quantistica le trasformazioni di Lorentz diventa, coerentemente con la strategia formale della meccanica classica, un obiettivo prioritario. La fedeltà a questo principio euristico è d'altronde premiata dal successo della sua equazione relativistica per l'elettrone, un successo che dimostrava come anche una proprietà apparentemente non relativistica come lo spin, discendesse in realtà da una rigorosa applicazione dei vincoli della relatività speciale.

La direzione scelta dai fisici della scuola tedesca per procedere alla costruzione della teoria è, anche in questo caso, radicalmente diversa. Se il mondo quantistico non ha nulla a che vedere con quello classico, la relatività diventa soltanto un formalismo da usare quando è necessario, quando cioè le velocità in gioco sono comparabili con quella della luce. Anzi, le complicazioni che la sua introduzione può produrre rischiano di oscurare la semplicità dei fenomeni quantistici, considerati più fondamentali. Sia come sia, non si può non sottolineare che questo atteggiamento metodologico impedì ai fisici di cultura tedesca di compiere, negli anni successivi, passi avanti significativi per sbloccare la situazione di stallo che si venne a creare verso la metà degli anni '30. Soltanto dieci anni dopo, quando vennero ripresi i due lavori di Dirac del 1932 che impostavano l'elettrodinamica in forma rigorosamente relativistica, la soluzione del problema venne, come sappiamo, indipendentemente trovata da Tomonaga in Giappone e da Feynman e da Schwinger [24] negli Stati Uniti.

9 – In Italia, come abbiamo visto, fu Fermi a importare e a diffondere la nuova meccanica quantistica. È tuttavia importante sottolineare, per ricostruire l'ambiente culturale nel quale questa attività si svolse, che il settore disciplinare maggiormente impegnato in ricerche di livello internazionale era allora quello dei fisici matematici, con personaggi come Volterra e Levi-Civita, strettamente legati al gruppo di Berlino di Einstein, Planck e Schrödinger. Questo forse spiega anche perché, come abbiamo visto, fu attraverso lo studio delle memorie di Schrödinger che Fermi si impadronì del formalismo e del contenuto fisico della meccanica quantistica.

È probabilmente l'assenza di un retroterra culturale derivante da una forte comunità di fisici impegnati nello studio dei problemi del mondo dei quanti che permise a Fermi di esercitare il suo ruolo di leader imprimendovi i tratti della sua personalità, caratterizzata da un atteggiamento pragmatico, libero da interessi epistemologici, finalizzato essenzialmente a utilizzare ed applicare i nuovi strumenti teorici allo studio dei fenomeni fisici più svariati.

L'approccio di Fermi alla formulazione dell'elettrodinamica quantistica colpisce appunto, come abbiamo visto, per la sua semplicità, il suo carattere pragmatico e la evidente mancanza di interesse che rivela per le questioni concettuali astratte che, come il dualismo onda-corpuscolo, preoccupavano Jordan e Dirac. Quattro pagine gli sono sufficienti, nella prima nota, per formulare il problema in un quadro strettamente hamiltoniano secondo regole canoniche. Quelle successive sono applicazioni di questo formalismo canonico nei casi in cui funziona. Quando esso fornisce risultati privi di senso Fermi non si preoccupa eccessivamente: un giorno avremo una teoria migliore.

È questa la tesi, in sostanza, con la quale conclude la sua monografia sulla "Review of Modern Physics" [18]: "Possiamo dire in conclusione —scrive— che praticamente tutti i problemi della teoria della radiazione che non coinvolgono la struttura dell'elettrone hanno una soddisfacente spiegazione; mentre i problemi connessi con le proprietà intrinseche dell'elettrone sono ancora molto lontani dalla loro soluzione." Come dire: accontentiamoci per ora di quello che la teoria ci può dare, e usiamola per risolvere i problemi pratici che ci interessano.

Così termina l'interesse di Fermi per l'elettrodinamica, che si sposta su problemi più nuovi dal punto di vista fisico e più stimolanti intellettualmente. Era nello studio del nucleo atomico l'avvenire della fisica quantistica.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] *Electrons et photons*, Rapports du 5e Conseil de Physique, Paris, 1928.
- [2] BORN M., HEISENBERG W. e JORDAN P., *Z. Phys.*, **35** (1925) 557.
- [3] PAULI W., *Handbuch der Physik*, Vol. **24** (Springer Verlag, Berlin) 1933.
- [4] KUHN T., *The Structure of Scientific Revolutions* (The University of Chicago Press) seconda edizione estesa, 1970.
- [5] SEGRÈ E., *Nota biografica*, in *E. Fermi, Note e Memorie*, Vol. **I** (Accademia Nazionale dei Lincei, The University of Chicago Press) 1962, pag. XXVI.
- [6] SEGRÈ E., op. cit., pag. XXXIII.
- [7] FERMI E., *Ric. Sci.*, **4** (2) (1933) 491-495.
- [8] DIRAC P. A. M., *Proc. R. Soc. A*, **114** (1927) 243.
- [9] JORDAN P., ultimo capitolo in BORN M., HEISENBERG W. e JORDAN P., *Z. Phys.*, **35** (1925) 557.
- [10] JORDAN P., *Z. Phys.*, **44** (1927) 1.
- [11] HEISENBERG W. e PAULI W., *Z. Phys.*, **56** (1) 1929; **59** (160) 1930.
- [12] JORDAN P., *Phys. Z.*, **30** (1929) 700.
- [13] FERMI E., *Rend. Acc. Lincei*, **5** (881) 1929.
- [14] FERMI E., *Rend. Acc. Lincei*, **7** (1930) 153.
- [15] FERMI E., *Rend. Acc. Lincei*, **12** (1930) 431.
- [16] AMALDI E., in *E. Fermi, Note e Memorie*, op. cit., pag. 305.
- [17] FERMI E., *Nuovo Cimento*, **8** (1931) 121.
- [18] FERMI E., *Rev. Mod. Phys.*, **4** (1932) 87.
- [19] BETHE H. e FERMI E., *Z. Phys.*, **77** (1932) 296.
- [20] RASETTI F., in *E. Fermi, Note e Memorie*, op. cit., pag. 538.

- [21] FORMAN P., in *The Reception of Unconventional Science*, a cura di S. H. MAUSKOPF (AAS, Westview, Boulder) 1978.
- [22] DE MARIA M. e LA TEANA F., *Fundam. Sci.*, **3** (1973) 2.
- [23] CINI M., *Fundam. Sci.*, **3** (1982) 229.
- [24] TOMONAGA S. I. e SCHWINGER J. in *The Physicist's Conception of Nature*, a cura di J. MEHRA (Reidel, Dordrecht) 1973, pag. 405.

Marcello Cini è stato ordinario di Fisica teorica, poi di Teorie quantistiche e oggi è professore emerito dell'Università "La Sapienza" di Roma. È stato vicepresidente della Società Italiana di Fisica, vicedirettore della rivista internazionale di fisica "Il Nuovo Cimento", direttore del CIRMS. Ha pubblicato, oltre a un centinaio di pubblicazioni su riviste internazionali di fisica e di storia della scienza, alcuni libri tra i quali: "L'ape e l'architetto" (con G. Ciccotti, G. Jona-Lasinio e M. De Maria (Feltrinelli, 1976)); "Un paradiso perduto" (Feltrinelli, 1994); "Quantum Theory without Reduction" (con J. M. Lévy-Leblond, Adam Hilger, 1991); "Dialoghi di un cattivo maestro" (Bollati Boringhieri, Torino, 2001).
