

LE RELAZIONI DI DISPERSIONE DALL'OTTICA ALLA FISICA DELLE PARTICELLE

MARCELLO CINI

Dipartimento di Fisica, Università La Sapienza, Roma
INFN sezione di Roma

1. Nella seconda metà degli anni cinquanta si afferma, nel settore della fisica teorica delle alte energie, una "filosofia"* interpretativa dei processi dinamici delle particelle elementari, basata sull'uso delle cosiddette relazioni di dispersione, che presenta caratteristiche paradigmatiche (nel senso di Kuhn [1]) assai differenti da quelle possedute dal corpo di modelli, schemi, teorie che fino ad allora gli esperti del settore avevano elaborato o stavano sviluppando. Avremo occasione più avanti di discutere in dettaglio queste differenze. Per ora è sufficiente accennare in modo assai sommario di che si tratta.

Nell'approccio tradizionale si tentava di dedurre dalle equazioni d'onda (alla Schrödinger) che determinano l'evoluzione delle ampiezze di probabilità per i differenti processi d'urto - ricavate a loro volta da funzioni Hamiltoniane più o meno complicate descriventi i relativi campi quantizzati interagenti - previsioni quantitative in forma di funzioni esplicite delle variabili rilevanti (energie, angoli, ecc.). Nell'approccio "dispersivo" viceversa, ci si accontenta per lo più di verificare la validità di relazioni - talvolta dedotte in modo più o meno diretto da una qualche forma del principio di causalità, altre volte ipotizzate in base a criteri di plausibilità - che connettono l'ampiezza di probabilità incognita per un dato valore dell'energia, a opportune medie ponderate delle stesse o di altre ampiezze, parimenti incognite, sull'intero spettro di tutti i possibili valori dell'energia.

Grosso modo, si sostituisce dunque alla ricerca di soluzioni esplicite, anche se necessariamente approssimate, di equazioni date, la verifica della validità di relazioni fra funzioni incognite, alle quali vengono talvolta attribuiti valori empirici ricavati più o meno direttamente dall'esperienza, talvolta assegnate forme analitiche assunte a priori per tentativi, delle quali si vuole verificare la consistenza. Si tratta, chiaramente, di paradigmi differenti, nel senso che nei due approcci sono diverse non soltanto le tecniche di calcolo o le ipotesi di partenza, ma la concezione stessa di ciò

* Questo termine traduce il termine americano "philosophy", che è usato, in modo un po' snobistico, per indicare uno schema interpretativo, nell'ambito di un particolare settore della scienza, che caratterizza una data scuola, o tendenza di moda.

che si intende per "previsione" o per "spiegazione" di un dato fenomeno; sono diverse, in altre parole, le scelte di ciò che si assume come dato e di ciò che si intende sottoporre a verifica. Ci troviamo perciò di fronte a un processo - l'affermazione di un nuovo paradigma - che, secondo Kuhn, non può essere spiegato secondo una logica puramente interna a una data disciplina.

Ci si può domandare dunque se siano esistiti, ed eventualmente quali siano stati, fattori esterni alla fisica che hanno contribuito a una rapida affermazione della *filosofia dispersiva* in quel settore e in quel momento e in che modo abbiano esercitato la loro azione all'interno della comunità dei fisici. Le relazioni di dispersione, come formalismo matematico utilizzabile per la verifica della consistenza di dati sperimentali nei processi di diffusione, erano già note fin dal 1926, anno in cui Kramers e Krönig le avevano esplicitamente ricavate per i processi di diffusione e di assorbimento di onde elettromagnetiche da parte degli atomi. Esse, tuttavia, erano state in seguito utilizzate soltanto a livello empirico come strumento per l'interpretazione di particolari spettri, e nessun tentativo venne fatto successivamente di costruire su di esse uno schema interpretativo alternativo alla nascente, e ancora controversa, meccanica quantistica.

L'interrogativo che precede va dunque completato domandandosi: perché la svolta paradigmatica avviene, con quelle caratteristiche, nel 1955 e nel campo della fisica delle particelle di alta energia, e non trent'anni prima, nella fisica atomica?

2. M. Goldberger, il fisico americano che più di tutti contribuì all'affermazione del nuovo paradigma, così ne spiega il successo in una relazione tenuta nel 1961 al Congresso Solvay di Bruxelles [2]: "La teoria della dispersione fu inventata nel 1926 da Kramers e Krönig utilizzando come base essenzialmente l'elettrodinamica classica e i primi elementi della nascente meccanica quantistica. E' ragionevole assumere che il loro lavoro non fu rigorosamente proseguito perché i fisici erano troppo attivamente impegnati nella soluzione di problemi pratici di meccanica quantistica. La rinascita della teoria avvenne nel 1946, quando Krönig sollevò la domanda se il principio di causalità non ponesse qualche restrizione sulla struttura della matrice S di Heisenberg-Wheeler. Anche in questo caso l'entusiasmo per l'elettrodinamica quantistica seguito alla scoperta del Lamb-shift, spinse la gente a trascurare l'osservazione di Krönig. L'argomento fu ripreso ancora attorno al 1951 da Wheeler, Toll, Wigner, van Kampen e altri. Il primo tentativo di studiare il problema nel quadro della teoria quantistica dei campi fu fatto nel 1954 da Gell-Mann, Goldberger e Thirring. Poiché a quell'epoca non c'era in giro niente che potesse distrarre i fisici, ne seguì un'esplosione di

attività, come appare evidente anche al più superficiale lettore di riviste negli ultimi anni."

La spiegazione in realtà non spiega nulla. Sarebbe ingenuo accettare la distrazione come categoria interpretativa dei fenomeni sociali. La spiegazione di Goldberger è solo giustificazionismo *a posteriori*. Non gli interessa capire le differenze che caratterizzano l'affermarsi di due paradigmi sostanzialmente differenti, l'uno (il formalismo della meccanica quantistica) negli anni '25-'27, l'altro (le relazioni di dispersione) nel '55, nonostante che il secondo fosse già potenzialmente disponibile nei suoi strumenti matematici trent'anni prima. Anzi, nell'affermare che i fisici dell'epoca erano impegnati a risolvere problemi pratici di meccanica quantistica, Goldberger sottilmente fa intendere che non c'è nulla da capire di molto profondo. In realtà nel '26 la comunità dei fisici ha scelto un paradigma fondato sulla convinzione che una teoria fisica dovesse essere in grado di fornire previsioni quantitative, anche se probabilistiche, dei risultati sperimentali, ricavabili univocamente dalle soluzioni di equazioni dinamiche generali valide per tutti i sistemi fisici. Viceversa nel '55 all'interno di una comunità di fisici assai differente per formazione, cultura e ruolo sociale, si afferma un paradigma che accoglie come teoria fisica "qualunque contributo che conduca a correlazioni fra esperimenti non individuate in precedenza"[3]. E' questa differenza che va analizzata e spiegata.

Prima di accennare ai possibili fattori "esterni" che possono essere stati determinanti, nelle due diverse situazioni, conviene tuttavia esaminare più in dettaglio le differenti caratteristiche metodologiche ed epistemologiche che lo stesso formalismo matematico assume nelle proposte di Kramers del '26 e in quelle successive, fino a quelle di Goldberger del '55.

3. La teoria classica della dispersione sviluppata da Lorentz, Ewald e altri alla fine dell'ottocento spiega la dipendenza dell'indice di rifrazione di un mezzo isotropo omogeneo dalla frequenza della radiazione incidente come conseguenza delle oscillazioni forzate che gli elettroni degli atomi eseguono sotto l'influenza del campo elettromagnetico di tale radiazione. Per effetto di tali oscillazioni gli atomi emetteranno onde sferiche diffuse in tutte le direzioni e, di conseguenza parte dell'energia dell'onda incidente risulterà assorbita dal mezzo. Ciò equivale a rappresentare il coefficiente di polarizzazione dell'atomo (e perciò anche l'indice di rifrazione) mediante un numero complesso la cui parte reale è legata all'ampiezza dell'oscillazione forzata indotta, mentre la parte immaginaria è proporzionale al coefficiente di assorbimento. Rappresentando gli elettroni degli atomi come oscillatori armonici di frequenza opportuna questa teoria spiegava abbastanza bene, sulla base delle equazioni di Maxwell dell'elettromagnetismo le leggi della

dispersione e dell'assorbimento per frequenze sufficientemente lontane dalle righe di assorbimento fornendo per queste grandezze espressioni esplicite della frequenza dell'onda incidente. Ciò che si propone Kramers [4] tuttavia, non è di calcolare esplicitamente queste grandezze ricavando per esse espressioni di validità più generale. Egli infatti non dispone ancora nel '26 di una teoria completa dell'interazione fra radiazione ed elettroni atomici, e il moto stesso degli elettroni nell'atomo è descritto da un modello (sostanzialmente ancora quello di Bohr) tutt'altro che definitivo, anche se definitivamente superiore al semplice modello classico dell'oscillatore armonico. Perciò egli si accontenta di generalizzare la relazione fra parte reale e parte immaginaria del coefficiente di polarizzazione che la teoria classica della dispersione permette di scrivere (perché in tal caso le espressioni di queste grandezze sono note) al caso più generale in cui esse non sono più espresse da funzioni note esplicitamente. Tale generalizzazione infatti utilizza, soltanto la relazione quantistica, già nota, fra ampiezza di transizione di dipolo e intensità della corrispondente riga di assorbimento ammettendo per di più che lo spettro possa contenere un intervallo continuo di assorbimento.

Fatto questo, Kramers dimostra, ed è questo il punto centrale del lavoro, che la relazione così ottenuta traduce matematicamente il principio, del tutto generale, di causalità secondo il quale l'elettrone non può riemettere radiazione diffusa prima che l'onda incidente lo colpisca. Va sottolineato a questo punto che, nonostante la generalità di tale principio la relazione ottenuta, non viene affatto presentata come sostitutiva di una teoria dinamica completa. Al contrario, in mancanza di tale teoria la relazione stessa poggia su dubbie fondamenta. "Non ci possiamo vantare - egli afferma - di aver dimostrato la validità di tale formula sulla base della meccanica quantistica: non abbiamo fatto altro che fornire degli argomenti formali in favore della plausibilità di questa formula." Questo conferma che, secondo la regole della comunità, perché la formula possa essere accettata essa deve essere almeno in linea di principio riconducibile nell'ambito di una teoria completa. La causalità da sola non basta: tale condizione indubbiamente vera, va soddisfatta all'interno di una precisa teoria dinamica generale, fondata su equazioni di evoluzione temporale valide per un sistema fisico qualsiasi. Non è dunque "a causa dei problemi pratici da risolvere" che i fisici non assumono, a quell'epoca le relazioni di dispersione come fondamento di uno schema interpretativo differente nonostante l'abbondanza di dati sperimentali spettroscopici a loro disposizione, che potrebbero esser introdotti nelle relazioni al posto delle grandezze incognite. E' perché non si accontentano di una interpretazione dei fenomeni fisici basata semplicemente sulla loro (auto)consistenza, ma pretendono una capacità previsionale quantitativa nel

quadro di una teoria unitaria, che le relazioni di dispersione rimangono relegate entro limiti assai ristretti di utilizzabilità, mentre tutti gli sforzi vengono diretti a completare l'edificio concettuale della meccanica quantistica e a dedurne tutte le possibili conseguenze.

4. Nei trent'anni successivi il quadro non muta. I tentativi di ampliare la sfera di validità e quindi di applicabilità delle relazioni di dispersione, mantengono ferma la condizione che tale validità debba essere *dimostrata* all'interno di una precisa teoria dinamica. Il suggerimento di Krönig [5] del '46' viene appunto lasciato cadere perché egli, rinunciando a un riferimento preciso a una teoria dinamica proponeva di assumere come *postulato* le relazioni di dispersione per l'ampiezza di diffusione. "Come è noto – egli scrive – la diffusione della luce monocromatica dagli atomi è governata da una relazione fra parte reale e parte immaginaria dell'ampiezza di diffusione. Questa relazione è una diretta conseguenza della ovvia condizione che un campo elettromagnetico, nullo nel punto dove si trova l'atomo per tutti gli istanti $t < 0$, non possa dare origine a onde diffuse prima dell'istante $t = 0$. In analogia ci si potrebbe aspettare che un centro di forza, interagente con le onde associate alle particelle materiali, non possa dare origine a onde diffuse prima dall'istante $t = 0$ se l'onda incidente è nulla nel punto ove si trova il centro diffusore prima di questo istante. *Sembrerebbe pertanto ragionevole postulare per la diffusione delle particelle una connessione tra parte reale e parte immaginaria dell'ampiezza di diffusione dello stesso tipo che in ottica.*" (Corsivo mio)

Risale a quell'epoca il mio personale coinvolgimento in questo problema. Esso comincia in un campo della fisica assai meno nobile. Nel '49, infatti lavorando in un laboratorio di una industria interessata all'utilizzazione di sospensioni di gomma, avevo dovuto studiare la possibilità di trovare correlazioni fra modulo di elasticità e coefficiente di smorzamento delle oscillazioni in questo materiale. Dopo aver tentato senza successo di utilizzare diversi modelli meccanici viscoelastici per interpretare i dati sperimentali disponibili, aggirai il problema cercando di studiare le proprietà generali di un sistema lineare qualsiasi. Trovai che la condizione di causalità (nessuna deformazione prima che venga applicata la sollecitazione esterna) conduceva a una relazione integrale fra parte reale (modulo di elasticità) e parte immaginaria (coefficiente di smorzamento) del coefficiente di elasticità complesso che lega la deformazione alla sollecitazione [6]. Si trattava, come è chiaro, anche se in forma un po' diversa, della stessa relazione trovata nel '26 per l'indice di rifrazione di un mezzo isotropo omogeneo, relazione che a me, tuttavia, non era nota a quel tempo. Detto per inciso non lo era, evidentemente, nemmeno al *referee* del Journal of Applied

Physics che accettò il mio lavoro per la pubblicazione senza far menzione dei lavori di Kramers e Krönig. Ciò che mi interessa sottolineare è la sostanziale identità concettuale del ragionamento seguito nei due casi. Partendo infatti dall'inadeguatezza di uno specifico modello a spiegare i dati sperimentali, si cerca di generalizzare una relazione fra grandezze note al caso in cui tali grandezze siano supposte incognite sulla base del principio di causalità. La validità di tale generalizzazione tuttavia, è sempre subordinata alla validità del quadro teorico (nel mio caso: linearità del sistema) entro il quale essa è stata dedotta.

Tre anni dopo, avendo lasciato il laboratorio in questione per occuparmi di fisica delle particelle mi posi il problema di utilizzare lo stesso principio di causalità per lo studio dei processi d'urto in meccanica quantistica. Anche in questo caso si trattava di trovare relazioni che fossero conseguenza di tale principio nell'ambito di questa teoria.

Mi arrestai subito contro la difficoltà derivante dall'impossibilità di costruire, per sovrapposizione di funzioni d'onda di Schrödinger monocromatiche, pacchetti d'onda a scalino, tali cioè da permettere una definizione precisa dell'istante di impatto del pacchetto sul centro diffusore, e da consentire quindi l'uso della condizione che l'onda diffusa fosse nulla prima di tale istante. Non proseguii il mio tentativo perché nel frattempo un fisico olandese, van Kampen, aveva pubblicato un lavoro [7] nel quale, constatata la stessa impossibilità, si limitava a ricavare proprietà matematiche così generali delle ampiezze di diffusione da far ritenere il risultato di scarsa utilità nei problemi fisici. Altre difficoltà sorgevano se, in luogo dell'equazione di Schrödinger si usava l'equazione di Klein-Gordon per particelle relativistiche. I tentativi di Toll e Wheeler[8], e ancora di van Kampen [9], in questa direzione non fanno altro che confermare, da un punto di vista più generale, la validità delle relazioni di dispersione per i fotoni, cioè, sostanzialmente, ritrovano i risultati di Kramers e Krönig del '26.

5. Si arriva così al lavoro di Gell-Mann, Goldberger e Thirring del '54 [10], che da Goldberger viene considerato come l'inizio della svolta. In realtà non è così, perché esso è ancora tutto orientato nella direzione della ricerca di una dimostrazione nell'ambito di una teoria dinamica accettata: in questo caso la teoria relativistica dei campi quantizzati. Tant' vero che gli autori, partiti per dimostrare la validità delle relazioni di dispersione per particelle dotate di massa, devono ripiegare alla fine sul caso di particelle di massa nulla perché si accorgono che nel caso generale la dimostrazione non si può fare. Ancora una volta vengono ritrovate relazioni di dispersione per i fotoni, pur generalizzandone al massimo il campo di validità dal punto di vista della trattazione del bersaglio diffusore (essi sono in grado in tal modo di

utilizzare le relazioni trovate per lo studio dell'effetto Compton gamma-protone).

Nel '55, quasi contemporaneamente, appaiono alcuni lavori che fanno fare passi avanti importanti alla teoria dei campi quantizzati, aprendo la via a successivi sviluppi che si collocano in una linea di continuità con il paradigma dominante. Il più importante è quello di Lehmann Symanzik e Zimmermann [11], che riformulano la teoria in modo da ricavare espressioni delle ampiezze di diffusione in funzione degli operatori di campo (che per ipotesi soddisfano le equazioni del moto) tali da permettere una analisi delle loro proprietà matematiche senza bisogno di conoscere le soluzioni esplicite delle equazioni. Di qui prende avvio un filone di ricerca in teoria dei campi che impegnerà negli anni successivi un certo numero di fisici teorici, prevalentemente europei, caratterizzato da un rigore logico formale assai elevato, ma al tempo stesso da un sempre maggior distacco dalla fisica sperimentale.

Un formalismo concettualmente analogo anche se di scopi assai più limitati, veniva proposto in America da G. Chew e F. Low [12] nell'ambito di un modello semplificato di teoria dei campi - la cosiddetta teoria di sorgente fissa - che si prestava, per la sua maggiore agilità, ad essere studiato in dettaglio assai più facilmente della teoria relativistica corrispondente. Queste equazioni permettevano di investigare, sia pure all'interno di una teoria utilizzabile entro un intervallo limitato di energia, tutta una serie di fenomeni relativi alla fisica dei pioni (diffusione, fotoproduzione) e alla struttura del nucleone, rimanendo in un riferimento teorico sufficientemente dominabile. In questa fase fui coinvolto anche io per qualche tempo, lavorando in collaborazione con Sergio Fubini [13].

La via scelta da Goldberger nel suo lavoro dello stesso anno [14] sulle relazioni di dispersione per la diffusione pione-nucleone è invece concettualmente assai diversa. Il suo riallacciarsi al lavoro in collaborazione con Gell-Mann e Thirring dell'anno precedente è più formale che sostanziale. Infatti egli compie due operazioni. La prima è quella di proporre l'uso di relazioni di dispersione per particelle dotate di massa diversa da zero sulla base di un argomento di plausibilità che non è una dimostrazione rigorosa. La seconda è quella di usare una definizione di causalità che non ha più niente a che vedere con la nozione classica intuitiva introdotta nel '26 e nei successivi tentativi. La sua dimostrazione infatti si basa sull'ipotesi che due operatori di campo definiti in punti diversi dello spazio-tempo abbiano commutatore nullo se i due punti distano fra loro più della distanza che la luce potrebbe percorrere nell'intervallo di tempo che li separa.

Questa è una proprietà formale, ma niente di più. E' infatti oscuro il significato di tale condizione in termini di misure fisiche. La parentela con la

condizione di causalità classica (nessuna onda può venire diffusa prima dell'istante di arrivo dell'onda incidente) è solo formale. Goldberger ne è perfettamente consapevole Egli infatti afferma nella relazione del '61: "La base teorica della relazione di Kramers e Krönig è l'osservazione che la misura di due componenti degli operatori del campo elettromagnetico, effettuata in punti separati da una distanza di genere spaziale non possono interferire a vicenda* .

In realtà già questa affermazione, che appare estremamente ragionevole, si traduce matematicamente in una forma (annullamento del commutatore) che appare più lontana dalla fisica di quanto vorremmo. Per la corrispondente situazione che coinvolge bosoni dotati di massa, gli operatori di campo usati per la loro descrizione non hanno più una interpretazione classica. L'affermazione che la condizione di annullamento del commutatore ha qualcosa a che vedere con la misura o con la causalità è tutt'altro che chiara.

E' appena necessario sottolineare che questa situazione è ancora più oscura nel caso dei campi di Fermi. Tuttavia, *qualunque sia il suo significato* (corsivo mio), la condizione sul commutatore gioca un ruolo fondamentale in tutte le derivazioni delle relazioni di dispersione".

E' dunque chiaro che questo atteggiamento introduce un salto paradigmatico rispetto a tutta la tradizione precedente. Le relazioni di dispersione vengono qui introdotte come strumenti che non traggono legittimità da una teoria accettata e da postulati fisici intuitivi o evidenti, ma si autogiustificano sulla base di analogie formali.

Una dimostrazione matematicamente rigorosa della relazione proposta da Goldberger verrà solo più di un anno dopo, alla fine del '56 e sarà un fisico-matematico russo, N. Bogoliubov, a darla [15]. Anche se il problema del significato fisico della condizione di causalità utilizzata (annullamento del commutatore) è, come si è detto, del tutto accantonato, le relazioni di dispersione, in un caso particolare almeno, hanno ora un fondamento formalmente ineccepibile. E' tuttavia necessario sottolineare il dato storicamente importante che la valanga di applicazioni e di generalizzazioni della relazione di Goldberger appare prima che Bogoliubov ne fornisca una giustificazione valida.

Così come va notato che la maggior parte delle applicazioni e generalizzazioni successive non verrà mai dimostrata, e talvolta addirittura

* Questa ricostruzione del fondamento teorico della relazione di KK è solo una interpretazione di trent'anni dopo, del significato fisico che a tale relazione si può attribuire. Essa è tuttavia finalizzata a stabilire una continuità tra le relazioni di KK e quelle di Goldberger che in realtà è storicamente inesistente.

qualcuna sarà utilizzata anche quando esempi particolari ne invalidano la generalità. Dall'esame dei fatti, oltre che per mia memoria diretta, appare chiaro dunque che, sull'affermazione straordinariamente rapida del nuovo paradigma, solo assai marginalmente ha influito la dimostrazione di Bogoliubov, arrivata in tempo ormai soltanto a tranquillizzare qualche scrupolo piuttosto che ad esercitare una funzione determinante nella svolta. Va aggiunto soltanto che Bogoliubov ha una posizione del tutto autonoma in questa svolta. La sua preparazione di fisico-matematico di eccezionale levatura e vastissima cultura gli permette di collocarsi al disopra dell'operazione di lancio del nuovo "prodotto" effettuata dal gruppo americano che egli contribuisce da un lato a nobilitare con il suo contributo rigoroso, mantenendo dall'altro un certo distacco. Il ruolo della scuola russa meriterebbe un discorso più approfondito, che tuttavia non possiamo affrontare qui.

Alla conferenza di Ginevra del '58 Chew, nel suo rapporto introduttivo della sessione dedicata alle interazioni dei nucleoni [16], fornisce già un lungo elenco di applicazioni delle relazioni di dispersione raggruppate in quattro principali filoni. E' interessante sottolineare l'atteggiamento estremamente pragmatico da lui teorizzato: "Credo che un atteggiamento ragionevole da tenere in questa sessione sia assumere che le relazioni di dispersione rappresentano una particolare congettura sulle proprietà di analiticità delle ampiezze di diffusione. Questa congettura può non essere consistente con la teoria dei campi locali, ma conduce a previsioni sperimentali definite e non banali. Penso che il nostro compito principale in questa sessione sia di esaminare quali di queste previsioni siano state finora formulate teoricamente e in che misura esse siano state verificate. Lasciamo il significato fisico delle relazioni di dispersione a una sessione differente".

Negli anni successivi, fino al '61 la "teoria dispersiva" assume un ruolo dominante nell'ambito delle interazioni forti delle particelle diventando il paradigma dello studio delle "proprietà di analiticità della matrice S". I congressi di Ginevra del '58, Kiev del '59, Rochester del '60 presentano un quadro preciso di questo sviluppo e non è il caso di insistervi ulteriormente. A questo punto conviene accennare brevemente ad alcuni degli sviluppi degli anni successivi che anch'essi si collocano ormai nel quadro concettuale del nuovo paradigma, anche se lo strumento matematico assume nuove forme.

Tipico è l'esempio dei poli di Regge. Una proprietà particolare di analiticità delle ampiezze di diffusione ottenuta dal fisico italiano Tullio Regge nello studio rigoroso delle soluzioni dell'equazione non relativistica di Schrödinger viene assunta come valida, sulla base di una semplice

analogia, per le ampiezze di diffusione relativistiche, che ormai non fanno più alcun riferimento ad una teoria dinamica che le genera.

Esemplare a questo proposito la risposta che dà Chew (anche in questo caso figura *leader* dell'operazione) nel '62 alla domanda di Heisenberg [17] sulle possibili implicazioni di questa ipotesi nei confronti della teoria dei campi: "Non capisco la teoria dei campi abbastanza bene da poter avere una opinione attendibile a questo proposito."

Inoltre la proposta in questione diventa essa stessa il postulato di partenza e dà origine a previsioni sperimentali che, tuttavia sono spesso in un rapporto assai problematico con la "teoria". Il postulato di partenza, infatti, è supposto valere solo "asintoticamente", cioè per valori "sufficientemente" elevati dell'energia delle particelle incidenti, e qualunque discrepanza fra esperienza e previsioni può essere sempre attribuita al fatto che l'energia effettivamente raggiunta non è ancora abbastanza elevata.

Il nuovo paradigma avrà tuttavia vita breve. Con il successo del modello a *quark* degli adroni e sfruttando la proprietà di *asymptotic freedom* dei centri di diffusione a elevati impulsi trasferiti all'interno di essi (i *partoni* di Feynman) rinasce la speranza di poter sviluppare una teoria dei campi per le particelle, in grado di fornire previsioni attendibili. E' questo il filone che diventerà vincente dando origine alla Quantum Chromo Dynamics. Alla fine degli anni '70 tutto l'approccio della matrice S si sgretola come un castello di carte. Conviene tuttavia, a questo punto, fermarsi per tentare di cominciare a fare un primo ordine di considerazioni sui diversi fattori che possono spiegare la fenomenologia dei fatti nella loro evoluzione storica.

5. La transizione al paradigma delle relazioni di dispersione appare sempre più chiaramente come risultato di uno scontro tra la tradizione culturale dell'ambiente dei fisici europei e l'atteggiamento pragmatico di quelli americani. Non è difficile fondare questa affermazione su elementi precisi.

Si è già accennato al fatto che nello stesso anno '55 appaiono, oltre alla linea proposta da Golberger, altri contributi che aprono potenzialmente la via a sviluppi più coerenti con il paradigma fino ad allora dominante. Si è anche sottolineato come il filone della teoria dei campi si sia sviluppato prevalentemente in Europa pagando il prezzo di una graduale autonomizzazione come disciplina separata sostanzialmente emarginata dal settore più prestigioso della fisica.

Ancora più sintomatica la vicenda, nonostante l'orizzonte assai più limitato di tale formalismo, della "teoria di sorgente fissa". Nata, come si è visto, in America, fu immediatamente abbandonata dai suoi padri, uno dei quali, Chew, diventò rapidamente il più acceso fautore del nuovo paradigma. Ad essa ci interessammo subito invece Fubini ed io, vedendo in questo

modello la possibilità di trovare altre relazioni oltre a quelle di dispersione che dovessero essere soddisfatte dalle soluzioni esatte (non conosciute per l'impossibilità di risolvere esplicitamente le equazioni del moto). Fatto questo, il passo successivo doveva essere, secondo noi, quello di utilizzare le relazioni trovate per riuscire a determinare soluzioni approssimate esplicite che godessero delle stesse proprietà generali delle soluzioni esatte. Ciò avrebbe rappresentato un passo avanti notevole rispetto alle soluzioni approssimate note fino a quel momento che violavano in genere le relazioni stesse.

E' interessante sottolineare che Walter Thirring - il coautore con Goldberger e Gell-Mann del famoso lavoro del '54 - si dichiarò, in uno scambio di corrispondenza che avemmo in proposito, d'accordo con noi, piuttosto che con la tendenza che andava prevalendo, a un uso indiscriminato delle relazioni di dispersione. Egli stesso negli anni successivi andò accentuando il suo interesse per la teoria dei campi (un modello esattamente risolubile da lui inventato ebbe molta notorietà) abbandonando praticamente il settore della fisica delle particelle.

Questo punto di vista non fu tuttavia portato avanti. Alla Conferenza di Ginevra del '56 già polarizzata nella direzione del nuovo paradigma i nostri risultati [18] non destarono molta attenzione e noi stessi perdemmo presto interesse alla cosa. Né dall'interno dell'ambiente dei fisici italiani, né dall'esterno provenivano infatti sollecitazioni a mantener aperta una linea di ricerca diversa da quella che andava affermandosi.

Due anni dopo, alla Conferenza di Ginevra del '58, fu ancora un europeo, Aage Bohr [19], il figlio di Niels Bohr, cresciuto a Copenaghen, in quello che era stato il centro culturale della fisica europea, a fare un tentativo sia pure infruttuoso, di rilanciare il vecchio paradigma, cercando di fondare la dimostrazione delle relazioni di dispersione sul principio classico di causalità (macroscopica) invece che sulla condizione di causalità microscopica, il cui significato fisico era, come abbiamo visto dalle stesse parole di Goldberger, assai oscuro.

La discussione che seguì alla presentazione di questo tentativo è di estremo interesse. Oppenheimer coglie perfettamente, con una terminologia Kuhniana *ante-litteram* la differenza fra i due paradigmi: "... Questo accade, mi sembra, in un mondo assai differente da quello in cui vivono Goldberger, ed altri. Non voglio sostenere che sia un mondo deteriore, ma soltanto sottolineare che la differenza è assai grande...".

Peierls appoggia le intenzioni che stanno dietro alla proposta: "Il vantaggio del metodo di Bohr, se si riesce a superare le difficoltà matematiche, è di riuscire a vedere in modo assai più trasparente ciò che si fa... Soprattutto mi sembra importante usare questo tipo di ragionamento per

vedere che succede se qualcuno degli assiomi del formalismo attuale è sbagliato. Sappiamo che le relazioni di dispersione possono essere derivate da una teoria di campo con la condizione di causalità microscopica. Forse che sarebbero invalidate se questa condizione non fosse soddisfatta pur restando la teoria fisicamente ragionevole?”. Bogoliubov tuttavia si appella alla necessità dell’ancoraggio a una matematica rigorosa: “l’intuizione fisica è un’ottima cosa quando l’energia e l’impulso mantengono valori reali, ma perde completamente di validità quando si va nel piano complesso...”. Il tentativo non venne perseguito oltre.

Contemporaneamente, in una sessione differente della stessa Conferenza, Chew espone senza perifrasi il punto di vista che si va affermando [20]: "In questa situazione dobbiamo essere ancor più "liberali" del solito nel definire che cosa si intende per "successo di una teoria". Penso che dobbiamo considerare un determinato contributo come teoria affermata (successful) se esso conduce a correlazioni fra esperimenti non individuate in precedenza. Alcune teorie possono esprimere le loro previsioni in termini di parametri tradizionali come le masse delle particelle e le costanti di accoppiamento, mentre altre possono sembrare fenomenologiche perché usano la posizione di una risonanza o il valore di un’ampiezza di diffusione a una particolare energia. Le teorie con il minor numero di parametri, sono, evidentemente, le più soddisfacenti, ma nell’attuale stato di confusione sul concetto di particella elementare, non riesco a pensare ad alcun altro criterio assoluto per giudicare del valore di una teoria".

Nel ‘61 il confronto tra i due punti di vista è ormai risolto a favore della “linea americana” accolta, anche per le ragioni sopra accennate, dalla grande maggioranza dei fisici più giovani. L’atteggiamento di alcuni dei più anziani è tuttavia bene espresso - come pura manifestazione di rammarico verbale - dall’intervento di G. Wentzel nella discussione del rapporto di Goldberger alla conferenza Solvay [21]: “Abbandonare completamente la teoria dei campi a favore di uno schema di relazioni di dispersione, mi sembra un atteggiamento analogo ad abbandonare la meccanica statistica a favore della termodinamica fenomenologica. Crediamo nella meccanica statistica come teoria più completa anche se soltanto in casi semplici si riesce a calcolare effettivamente una funzione di partizione. Se il calcolo è troppo difficile da fare ci accontentiamo della termodinamica a costo di introdurre una quantità maggiore di dati sperimentali. Ciò nonostante nessuno si sognerebbe di fare a meno della meccanica statistica come teoria più fondamentale. Allo stesso modo spero che anche la teoria dei campi, in una forma o nell’altra, manterrà la sua superiorità concettuale".

Come si sa, l’auspicio di Wentzel si è realizzato non molti anni dopo.

6. Voglio a questo punto fare qualche considerazione sul contesto che ha favorito la nascita del nuovo paradigma e dei fattori che ne hanno permesso l'affermazione così rapidamente, nonostante la diffusa, anche se non sistematica, resistenza manifestata in diversi settori della comunità scientifica. Cominciamo prima di tutto ad esaminare alcuni dati relativi alle trasformazioni subite dalle condizioni materiali nelle quali si svolge la ricerca in fisica negli anni che vanno dal dopoguerra al '60 si vede subito che negli anni fra il '50 e il '55 si verifica un salto nel processo di espansione quantitativa e qualitativa di tutti i fattori che caratterizzano il complesso di questa disciplina.

Il numero di pagine annuali delle Physical Review, stazionarie attorno alle 3000 fino al '50, diventano 5700 nel '53, 7200 nel '56, 8400 nel '58. Esplode il numero dei Congressi e dei partecipanti ad essi. Nel '49 a Parigi un unico congresso, senza limiti di invito, riunì poco più di un centinaio di fisici di tutto il mondo a discutere di argomenti che andavano dalla relatività generale all'elettrodinamica quantistica, dai raggi cosmici alla fisica dei nuclei. Fra i lavori presentati un paio si riferivano alla fisica dei mesoni. Nel '56 a Ginevra duecento fisici con inviti selezionati partecipavano a un congresso esclusivamente dedicato alla fisica dei mesoni p.

Dietro a queste manifestazioni c'è lo sviluppo degli acceleratori di alta energia. E' del '48 l'entrata in funzione del ciclotrone di Berkeley da 380 MeV con il quale furono prodotti artificialmente i primi mesoni appena scoperti nella radiazione cosmica. Fra il '50 e il '60 entrano in funzione sette acceleratori di energia compresa fra 300 MeV e 25 GeV⁽²⁴⁾. Si crea una spinta reciproca fra fisici teorici e fisici sperimentali. Questi ultimi sfornano una massa enorme di dati grezzi che stimola la moltiplicazione di tentativi parziali e *ad hoc* intesi a stabilire qualche correlazione tra di essi; i primi esercitano pressioni perché si raggiungano energie sempre più elevate senza precise indicazioni di che cosa cercare. Tanto i primi che i secondi si fanno vicendevolmente garanti dell'importanza del lavoro gli uni degli altri di fronte all'*establishment* politico e all'opinione pubblica.

Non è qui la sede per fare considerazioni più esaurienti sull'interazione fra lo sviluppo degli acceleratori e dei grandi laboratori in quegli anni e la produzione di tecnologia avanzata negli Stati Uniti. Mi basta sottolineare che proprio negli anni che precedono immediatamente la svolta paradigmatica che stiamo analizzando assistiamo a un mutamento qualitativo e quantitativo dello sviluppo della fisica strettamente connesso con l'affermarsi del duplice ruolo internazionale degli Stati Uniti, di esportatori di tecnologia avanzata a livello di divisione internazionale del lavoro da un lato, e dall'altro di produttori di tecnologia avanzata per le applicazioni militari necessarie al mantenimento del loro dominio imperialista.

E' in questo quadro che appare dunque come elemento non secondario dell'affermazione del nuovo paradigma l'adozione sul piano pratico, da parte dei suoi "leaders" di una strategia del successo che ben si accompagna, nella più genuina tradizione americana, dal pioniere al businessman, al pragmatismo ideologico enunciato sul piano teorico.

L'abbondanza dei finanziamenti che soprattutto negli USA in questi anni si riversano sul mondo della fisica permette infatti ai fisici più importanti integrati nel sistema di potere politico-amministrativo, di esercitare un potere enorme sull'intera corporazione, anche a livello internazionale.

L'organizzazione dei congressi, il sistema di accettazione dei lavori sulle principali riviste, l'organizzazione di scuole di perfezionamento, l'assegnazione di ben remunerati incarichi di ricerca, e di posti part-time, la stipulazione di contratti di ricerca da parte delle forze armate, ruotano tutti attorno agli stessi personaggi prestigiosi. Non a caso Goldberger diventa, negli anni '60, uno dei consiglieri scientifici del Presidente, e decine di altri fisici, "particellari" e di "alta energia", professionalmente dediti cioè ad una delle branche apparentemente più lontane da ogni applicazione pratica, entrano a far parte di organizzazioni di consulenza del Pentagono, in particolare del "Jason group" dell'Institute for Defense Analysis. E' dunque una scelta di linea politica, oltre che una opzione ideologico-culturale, che contribuisce a realizzare la svolta che stiamo discutendo. Non meccanico adeguamento di un ambiente che passivamente recepisce la pressione esercitata da mutate circostanze socio-economiche esterne, ma identificazione attiva da parte di una leadership all'interno di tale ambiente dei propri interessi - nel senso più lato - con l'affermazione degli obiettivi di sviluppo e della scala di valori della società americana di quegli anni.

7. In conclusione, se si confronta il 1926 con il 1955 si notano importanti somiglianze iniziali nelle condizioni all'interno della disciplina, ma grandi differenze all'esterno di essa. Queste ultime tuttavia si ripercuotono a loro volta all'interno della comunità scientifica fino a modificare profondamente contenuti e finalità della ricerca. Nel '26 una grande massa di dati spettroscopici era disponibile ma le relazioni di dispersione non furono estesamente utilizzate per correlarli. Heisenberg [22] ne spiega bene, retrospettivamente, le ragioni: "si cercava *la teoria* e non era facile ricostruire la teoria dalle relazioni di dispersione."

Egli ricorda per illustrare il suo punto di vista un lavoro di un vecchio professore di Gottingen, W. Voigt, che prima della teoria di Bohr era riuscito a spiegare l'effetto Zeeman anomalo delle righe D del sodio introducendo opportuni accoppiamenti tra gli oscillatori che rappresentavano le frequenze delle righe spettrali. "Il lavoro di Voigt – dice Heisenberg – era già in un

certo senso, un enorme successo della teoria della dispersione. D'altra parte è difficile immaginare che Voigt con questo approccio avrebbe potuto trovare la teoria di Bohr dell'atomo. In altre parole la teoria della dispersione può funzionare molto bene se si prendono in considerazione poche righe, o poche particelle elementari, isolate dalle rimanenti righe, o particelle. Ma solo raramente questa sarà una buona approssimazione. Negli altri casi dobbiamo considerare l'intero spettro, e perciò dobbiamo prima riuscire a interpretare la struttura dello spettro, o il significato fisico implicito nello spettro stesso... Dobbiamo cercare perciò di descrivere questo spettro e la sua struttura in modo compatto come si fa con l'equazione di Schrödinger per l'atomo di sodio. Io dubito molto che la teoria della dispersione possa condurre in alcun modo a tale descrizione compatta".

Possiamo dunque ribadire che i fisici, nel '26, non erano interessati a quel modo di correlare dati sperimentali abbondanti ma non interpretabili in un quadro unificato. Essi erano poco numerosi, e le apparecchiature poco costose. Se i dati spettroscopici non venivano comunque e rapidamente correlati (non interpretati nel senso detto da Heisenberg) non era un gran male.

Anche nel 1955 c'è una gran massa di dati "spettroscopici" disponibili. E' però una spettroscopia assai più costosa quella delle particelle, che comporta un impiego ingente di uomini e capitali. C'è dunque una forte spinta, oggettiva e soggettiva, a giustificare gli investimenti compiuti producendo dati e utilizzando questi ultimi per richiedere a chi amministra le risorse sociali, investimenti ulteriori.

Nel 1955 perciò si ribattezza teoria ciò che serve a correlare in qualche modo i dati esistenti (v. Chew), perché le macchine ci sono e bisogna farle girare, i fisici ci sono e devono pubblicare. D'altra parte sono gli Stati Uniti che possiedono la maggior parte delle macchine e dei fisici, e per di più l'ideologia dominante negli Stati Uniti si presta particolarmente a far passare, attraverso il meccanismo della competitività sfrenata e della scalata sociale, una concezione utilitaristica e pragmatica, ma frammentaria della scienza, con l'abbandono del suo obiettivo tradizionale di unificazione delle conoscenze.

Vista nel suo sviluppo storico dunque la svolta paradigmatica del 1955 della fisica delle particelle sembra essere stata fortemente condizionata da una pressione sociale tendente ad assicurare "coerenza" tra il funzionamento della corporazione scientifica e i meccanismi di riproduzione allargata del sistema a livello sia produttivo che di rapporti sociali. Condizionata non vuol dire determinata. E' stata infatti la scelta compiuta da un gruppo ristretto di leaders, sulla base di una comune formazione ideologico-culturale e di un

preciso programma di integrazione nelle strutture di potere della società americana, che ha praticamente reso possibile questa operazione.

Bibliografia

- [1] T. S. Kuhn, *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, Einaudi 1966.
- [2] M.L.Goldberger, in: *La Theorie quantique des champs*, 12° Conseil de Physique Solvay - Interscience Publ. 1961, p. 179.
- [3] G.F.Chew, oceedings *1958 Annual Conference High Energy Phys. Geneva*, p. 93.
- [4] H.A.Kramers, *Atti Congr. Fisica Como* (1927); R.Kronig, *J. Amer. Op. Soc.* **12**, 547 (1926).
- [5] R.Kronig, *Physica* **12**, 543 (1946).
- [6] M. Cini, *J.Appl. Phys.* **21**, 8 (1950).
- [7] G. Van Kampen, *Phys. Rev.* **91**, 1267 (1953).
- [8] J. Toll e A. Wheeler, unpublished
- [9] G.Van Kampen, *Phys. Rev.* **89**, 1072 (1953).
- [10] M.Gell-Mann, M.L.Goldberger, W.Thirring, *Phys.Rev.* **95**, 1612 (1954).
- [11] H.Lehmann, K.Svmanzik, Zimmermann, *N. Cim.* **1**, 205 (1955).
- [12]F.Low, *Phys. Rev.* **97**, 1992 (1955); G.F.Chew, F.Low, *Phys. Rev.* **101**, 1570 (1955).
- [13]M.Cini, S.Fubini, *Nuovo Cim.* **2**, 860 (1955); *Nuovo Cim.* **3**, 764 (1956).
- [14] M.L.Goldberger, *Phys.Rev.* **99**, 979 (1955).
- [15] N.N.Bogoliubov, *Intern. Conference Seattle 1956*. V. anche N.N.Bogoliubov, D.Shirkov, *Introduction to the Theory of quantized fields*, Interscience Publ. (1960).
- [16] G.F.Chew, *Proc. Inte. Conf. Genève 1958* p. 94.
- [17] G.F.Chew, *Proc. Inte. Conf. Genève* 1962.
- [18] M.Cini, S.Fubini, *Proc. Inte. Conf. Genève 1956* p. 171.
- [19] A.Bohr, *Proc. Inte. Conf. Genève 1958* p. 213.
- [20] G.F.Chew, *Proc. Inte. Conf. Genève 1958* p. 93.
- [21] G.Wentzel, *12° Conseil Physique Solvay* p. 204.
- [23] W.Heisenberg, *12° Conseil de Physique Solvay* p. 201.