Rendiconti
Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL
Memorie di Matematica e di Scienze Fisiche e Naturali
100° (1982), Vol. VI, fasc. 16, pagg. 171-182.

GIANCARLO WICK (*)

Dalla molecola d'idrogeno alle particelle elementari (**)

È un compito assai gradito ringraziare anzitutto questa Accademia per aver voluto onorarmi in modo così lusinghiero. È per me quasi imbarazzante ricordare la lista dei nomi illustri delle persone che sono state così onorate.

Il mio secondo compito, secondo la consuetudine, è quello di illustrare per voi la mia « opera scientifica ». Parole grosse, che mi permetterò di interpretare in un senso un po' lato, prendendo cioè i miei lavori a pretesto per un discorso più ampio, nel quale i problemi di cui mi sono occupato si inseriscono nel quadro generale dell'evoluzione della fisica di cui sono stato testimone dal 1930 sino ad oggi.

L'inizio della mia carriera scientifica fu dominato da due circostanze. L'interesse di molti fisici si stava allora spostando dal campo della fisica atomica e molecolare a quello della fisica del nucleo. I miei primi lavori rispecchiano questa transizione, oscillando tra questioni di spettroscopia degli alcalini (in collaborazione con Segrè) e problemi connessi, e questioni riguardanti le proprietà della materia nucleare oppure la teoria dei Fermi della radiazione beta. La seconda circostanza fu la fortuna di essere riuscito abbastanza presto a farmi accettare come assistente da Fermi. L'ambiente dell'Istituto in via Panisperna fu per me assai stimolante; questo, e i numerosi contatti di Fermi con il mondo della fisica internazionale mi permisero talvolta di venire a conoscenza di problemi interessanti quando erano ancora sul nascere.

(*) Scuola Normale Superiore - Pisa.

(**) Conferenza tenuta nella Sede Accademica il 19 Maggio 1981 in occasione del solenne conferimento della Medaglia Matteucci per la fisica.

ISSN: 0392-4106 0392-4130

Il primo problema che Fermi mi propose di studiare nacque da una corrispondenza di Fermi con Otto Stern; inoltre era un problema a cavallo tra la fisica molecolare e quella nucleare; come vedete, un chiaro esempio delle due circostanze sopra ricordate.

Era allora opinione prevalente fra i teorici che il protone, particella « elementare » (così si diceva) come l'elettrone e dotato anch'esso di spin 1/2 dovesse avere proprietà del tutto analoghe, salvo il diverso valore della massa. Per intenderci, quasi esattamente quello che oggi si dice del mesone *mu*. Per verificare queste idee Stern si era proposto di misurare direttamente il momento magnetico intrinseco del protone; il metodo da lui ideato si basava, in analogia colle note esperienze di Stern e Gerlach, sulla misura della deflessione, in un campo magnetico inomogeneo, di un raggio molecolare di H_2. Una inevitabile complicazione del metodo stava nel fatto che il momento magnetico di una molecola dipende dal suo stato di rotazione e consta inoltre di due parti, una dovuta ai protoni e una seconda parte dovuta alla nuvola elettronica, la quale deve in qualche modo accompagnare i protoni nella loro rotazione intorno al baricentro della molecola. Per questa seconda parte esisteva una formula, accettata a quanto pare a occhi chiusi dai consulenti teorici di Stern. La sua validità pareva infatti evidente; per usarla bastava sapere la distanza quadratica media degli elettroni dell'asse di rotazione. Mediante un valore fornitogli da Hans Bethe, Stern poteva calcolare per sottrazione il contributo alla deflessione dovuto al momento intrinseco dei protoni.

Tuttavia, non fidandosi troppo della teoria, Stern aveva, da buon sperimentatore, escogitato un metodo indipendente per separare i due effetti, variando la composizione orto-para del raggio molecolare. Nella sua lettera a Fermi, Stern annunciava ora di aver ottenuto due risultati entrambi sorprendenti. Il momento dovuto alla rotazione non aveva affatto il valore calcolato; inoltre, una volta effettuata la separazione dei due effetti, come ho detto sopra, il valore ottenuto per il momento magnetico intrinseco del protone era circa due volte e mezzo più grande di quello suggerito dall'analogia coll'elettrone. Naturalmente, delle due sorprese la seconda era quella più importante; realmente una scoperta fondamentale, che ancora oggi costituisce una importante pietra di paragone per qualsiasi modello del protone. Ma anche la prima sorpresa aveva la sua importanza; giustamente Stern si preoccupava di una discrepanza colla teoria, che poteva generare dei dubbi sull'intera esperienza.

Sono ancora oggi grato a Fermi per avermi affidato il problema, sapendo che di molecole mi ero un po' occupato, prima con Heitler e poi con Hund a Lipsia. Messo sull'avviso dal risultato sperimentale mi accorsi abbastanza rapidamente che la formula accettata a occhi chiusi sin allora era sbagliata: il problema nascondeva una trappola, Stern aveva avuto ben ragione a non fidarsi! Una volta capito questo, dedussi una nuova formula, connessa con il cosidetto « parama-

gnetismo molecolare di van Vleck ». Nella valutazione di questa formula ebbi utili consigli da Ettore Majorana. Il risultato, anche se non troppo preciso, risultò compatibile colle misure di Stern e il mistero scomparve.

Mi sono forse dilungato eccessivamente su questo episodio; ma esso fu per me molto importante: mi attirò la stima di Fermi e per un po' di tempo fu la base della mia reputazione. Non solo, ma avendo attirato la mia attenzione sul problema fondamentale del momento anomalo del protone, mi indusse qualche tempo dopo a formulare, in modo a dire il vero alquanto grossolano, l'ipotesi dell'esistenza di una profonda relazione tra il momento anomalo del protone e la esistenza di un'*interazione forte* di scambio tra protone e neutrone. In questa discussione mi riferii al « principio di Ampère » secondo il quale ogni momento magnetico è l'effetto di correnti. Più tardi altri diedero a questa idea una forma più precisa in base a nuove idee, come il campo mesonico di Yukawa, l'idea di « minimal interaction » secondo Gell-Mann, ecc. Tuttavia non ho ragione di vergognarmi se in quel mio primo rozzo tentativo non potei ottenere nulla di più che un grossolano ordine di grandezza. In realtà una valutazione quantitativa del momento anomalo è rimasta per lungo tempo un osso assai duro; oggi poi, dopo l'introduzione dei quarks e, come se non bastasse, di ulteriori possibili strutture, sappiamo quanto complicato sia il problema e quanto lontane dalla realtà fossero, nella loro innocenza, le idee di quegli anni ormai lontani.

Di quegli anni ricordo volentieri un lavoro fenomenologico sulle proprietà della materia nucleare, il cui scopo, per suggerimento di Fermi, era di tentare una valutazione più precisa delle costanti dell'interazione tra neutrone e protone; in questa discussione fenomenologica delle energie di legame dei nuclei introdussi un termine rappresentante l'energia superficiale, idea poi ripresa in modo più completo e preciso da Weizsäcker.

Ricordo anche come, avendo seguito da vicino lo sviluppo delle idee di Fermi sulla radioattività beta, e dopo aver letto della scoperta, da parte della coppia Curie-Joliot, dei radioelementi che emettono positroni, ebbi occasione di applicare la teoria di Fermi a questo fenomeno estendendo al campo che descrive i neutrini la interpretazione di Dirac degli stati di energia negativa; in questo lavoro vi è anche la previsione del fenomeno della cattura K e la formula che ne determina la probabilità. Com'è noto, il fenomeno fu poi osservato da Alvarez.

Di un altro tipo di problema fui indotto a occuparmi nei miei primi anni a Roma dal contatto quotidiano colle ricerche sulla radioattività indotta da neutroni; in particolare lo studio dei neutroni lenti poneva ovvi problemi riguardanti la diffusione dei neutroni termici nella paraffina, il mezzo « moderatore » allora generalmente usato. Fermi stesso, negli intervalli di tempo fra un'esperienza e l'altra, aveva inventato un modo approssimato ma efficace di trattare il rallentamento (più tardi soprannominato « age theory »); inoltre aveva discusso la diffusione dei neutroni termici, anche qui facendo approssimazioni ancora più dra-

stiche. Io allora non prendevo parte al lavoro sperimentale; pensai di rendermi utile studiando la diffusione in un modo più sistematico mediante l'equazione di Boltzmann. Credo di essere stato il primo a far questo genere di calcolo, che anni dopo divenne una specie di industria, dopo l'invenzione dei reattori. Usando il metodo delle quadrature di Gauss per approssimare il termine che nell'equazione di Boltzmann rappresenta l'effetto degli urti, riuscii ad ottenere un'ottima approssimazione con dei calcoli relativamente molto semplici. Alcuni anni più tardi ritornai sul problema con nuovi risultati e poi con Verde studiai l'equazione più complicata che descrive contemporaneamente la diffusione e il rallentamento dei neutroni. Nello stesso tempo però il mio interesse fu attirato da un altro genere di problemi, dimodoché il mio lavoro cominciò a spostarsi lentamente verso lo studio dei mesoni, o mesotroni, come venivano allora chiamati. A Roma le idee di Yukawa sull'interpretazione delle forze nucleari come manifestazioni di un nuovo campo vennero accolte dapprima con un certo scetticismo. Ebbi però occasione di notare che la relazione di Yukawa tra massa del mesone e raggio d'azione delle forze nucleari poteva anche considerarsi come una manifestazione del principio di indeterminazione. Non detti molto peso all'osservazione, ma ne feci cenno in una conversazione con Niels Bohr, pensando che la cosa lo potesse divertire come un altro esempio di applicazione di un'idea da lui più volte usata. Bohr prese la cosa più sul serio di quel che non mi aspettassi e mi incoraggiò a pubblicare la mia osservazione in una lettera diretta al « Nature ».

Al mio interesse in tali questioni contribuirono numerose discussioni riguardanti da un lato la scoperta, da parte di Carl Anderson, di particelle di massa intermedia tra elettrone e protone, e d'altra parte lo studio degli sciami elettronici di alta energia. Ricordo come in quegli anni scrivessero sovente a Fermi, o venissero a Roma per discutere con lui e Rasetti vari esperti sui raggi cosmici come Rossi, Bernardini e Occhialini da Firenze, e Cocconi da Milano. Queste discussioni riguardavano il presunto comportamento di elettroni relativistici, la validità o meno delle formule dedotte dalla teoria della radiazione (Bethe e Heitler, ecc.) e le numerose idee, in parte geniali in parte sbagliate che in varie parti del mondo venivano avanzate a questo proposito. Ricordo in particolare la grande utilità che ebbe per un po' nelle nostre discussioni un articolo di Heisenberg e Euler, una vera miniera di dati importanti e di utili suggerimenti.

Di qui ebbe origine per me un periodo di lavoro che ricordo con particolare piacere, e che rappresentò, sempre per me beninteso, il vero inizio della transizione dalla fisica nucleare a quella delle alte energie. L'occasione fu l'invito (poco prima dell'inizio della seconda guerra mondiale!) da parte di Gilberto Bernardini a collaborare con lui in una serie di ricerche su raggi cosmici. Bernardini riprendeva forse un progetto di Bruno Rossi di utilizzare le mie conoscenze teoriche nell'analisi della produzione di « sciami » elettronici da parte dei mesotroni (oggi: mesoni mu) che costituiscono la « componente dura » della radiazione cosmica

nell'atmosfera; questo progetto era andato in fumo per la forzata emigrazione di Rossi. Bernardini aveva ora concepito l'idea, davvero ardimentosa in quegli anni, di organizzare una spedizione a Cervinia, stabilendo anche un laboratorio a 3.500 m.s.l.m. alla Testa Grigia (*). Scopo delle ricerche era lo studio della complessa fenomenologia connessa colla penetrazione nell'atmosfera della componente dura; secondo ipotesi già avanzate da Yukawa e altri, i mesoni dovevano in parte decadere in elettroni e neutrini, dando origine a sciami elettronici (componente molle). Un'ulteriore sorgente di sciami era prevista negli urti (interazione elettromagnetiche) dei mesoni cogli elettroni delle molecole dell'aria. Si voleva inoltre, mediante un magnete ideato da Bernardini, misurare l'eccesso dei mesoni positivi su quelli negativi. La mia parte, in questo lavoro, fu quella di compiere valutazioni teoriche di vari effetti per un eventuale confronto, con i dati. Ricordo di aver riempito vari quaderni di rozzi calcoli alla Montecarlo sulle proprietà separatrici di quel magnete (oggi si farebbe assai meglio con una calcolatrice elettronica) e di altri calcoli sul potere frenante dell'aria, tenendo conto anche dell'effetto di densità allora recentemente suggerito da Fermi; la progettazione e la messa in opera dei contatori elettronici e della rimanente apparecchiatura fu naturalmente il lavoro di Bernardini e del gruppo di giovani sperimentatori di cui si era circondato; ricordo Cacciapuoti, Conversi, Piccioni; più tardi Pancini e un altro teorico, Ferretti, si unirono al gruppo. Ma per divertimento, anch'io presi parte al lavoro sperimentale, per quella parte che non richiedeva particolari abilità tecniche.

Ricorderò solo brevemente che in questa prima spedizione a Cervinia vennero ottenuti, nonostante le difficoltà del momento, buona parte dei risultati che ci eravamo prefissi, in particolare l'osservazione dell'assorbimento anomalo dei mesoni nell'atmosfera e per conseguenza una delle prime misure della vita media del mesone mu; per il rapporto di equilibrio tra la componente molle (elettronica) e quella dura si trovò un valore inaspettatamente più piccolo di quello previsto. Questo risultato era tuttavia corretto, sebbene non fossimo allora in grado di apprezzarne la ragione. Solo anni dopo si doveva scoprire che il mesone della componente dura ha spin un mezzo e decade in un elettrone e *due* neutrini; perciò nel decadimento solo un *terzo* (e non un mezzo come noi avevamo supposto) dell'energia del mesone si converte in sciami. Ricorderò ancora che allo studio dell'eccesso positivo della componente mesonica effettuato in questa spedizione e al metodo impiegato allo scopo si ricollegano gli importanti risultati ottenuti più tardi da un gruppo di discepoli di Bernardini (Pancini, Piccioni e Conversi).

Ma quando questo avvenne io mi trovavo ormai in America; e poiché il

(*) L'Osservatorio continuò a funzionare per vari anni anche finita la guerra.

successivo svolgimento del mio lavoro fu anche determinato in parte dalle mie peregrinazioni in varie università, permettetemi di riassumere queste vicende. Dopo un anno come professore straordinario a Palermo e dopo due a Padova, mi ritrovai con Amaldi a Roma nel '40. Fermi aveva lasciato l'Italia per le note ragioni e anche Rasetti. Amaldi ed io eravamo ormai i due più anziani superstiti del gruppo di via Panisperna; un superstite più giovane era Agnno. Non starò a raccontare come cercassimo, in una situazione abbastanza scoraggiante, di impiegare utilmente il nostro tempo riannodando la fila dei nostri interessi scientifici dell'anteguerra. Terminati gli anni più duri, ricevetti verso la fine del '45 un invito dalla università di Notre Dame, che accettai in parte per sfuggire al senso di isolamento dal resto del mondo della fisica che mi aveva colto in quel momento; sapevo inoltre che a Notre Dame avrei potuto facilmente riprendere contatto con Fermi a Chicago. Due anni più tardi cominciai a ricevere inviti da vari istituti di ricerca americani e finii per accettare quello della Università of California a Berkeley dove mi trasferii nell'estate del '48. Lì ritrovai un vecchio amico in Segré e inoltre per due mesi quella prima estate anche Fermi; incontrai per la prima volta Oppenheimer, da poco divenuto direttore dell'Institute for Advanced Study di Princeton. « Oppie », come lo chiamavano i suoi amici, aveva così abbandonato la cattedra di Berkeley lasciandovi un buco assai difficile da colmare, soprattutto perché vi era a Berkeley un gruppo assai numeroso di studenti teorici, affamati di temi di ricerca ed attirati a Berkeley dalla fama di Oppie, che riusciva a tenerli occupati grazie alla sua proverbiale versatilità e rapidità nell'afferrare i problemi. In questo compito aveva anche l'aiuto del suo allievo Robert Serber, direttore dell'atelier teorico del celebre Radiation Laboratory. Per fortuna, Serber rimase a Berkeley e presto diventammo buoni amici. Inutile dire che tra le circostanze che mi indussero a trasferirmi a Berkeley la prospettiva di trovarmi a lavorare proprio nel centro di ricerche sulle alte energie più attivo del momento ebbe una parte importante.

Tuttavia era destino che dopo solo due anni e mezzo io dovessi abbandonare questa « residenza ideale »; ma, essendomi ormai fatta la reputazione di teorico interessato alle alte energie, fu naturale per me trovare impiego in università dotate di laboratori analoghi al Radiation Lab., e cioè prima al Carnegie I.T. di Pittsburgh e più tardi a Brookhaven. Infine dopo il '64 entrai a far parte della Facoltà della Columbia University, dove rimasi sino al '78.

Come vedete, posso dire di aver girato l'America in lungo e in largo; passerò ora a dire dei problemi di cui mi sono interessato in questi anni. Il mio arrivo a Berkeley coincise con un periodo di grande fermento. Da un lato si era iniziato un nuovo stadio dello sviluppo della elettrodinamica quantistica, di cui dirò più avanti. Da un altro lato nuove tecniche sperimentali stavano aprendo nuovi orizzonti alla ricerca sulle particelle elementari. La tecnica delle emulsioni ultrasensibili Ilford aveva permesso a Powell, Occhialini e Lattes l'identificazione

nella radiazione cosmica del *pione* (secondo la terminologia ora in uso) un nuovo mesone distinto dal mesone *mu* di cui ho detto precedentemente (del mu si sapeva, in base ai risultati di Pancini, Piccioni e Conversi, che non poteva adempiere al ruolo assegnato al mesone della teoria di Yukawa). Il nuovo mesone pi o pione si presentava dunque come il naturale candidato a questo ruolo. Di qui un enorme interesse nello studio ulteriore delle sue proprietà. Il grande ciclotrone di Berkeley (allora il simbolo della fisica delle alte energie!) si presentava come lo strumento ideale per la produzione artificiale dei pioni e il loro studio. E tale esso divenne e rimase per alcuni anni. Sempre a Berkeley anche il sincrotrone di McMillan doveva contribuire potentemente allo studio dei pioni; ben presto le ricerche di Panofski e Steinberger portarono a stabilire in modo sicuro oltre all'esistenza dei pioni carichi anche quello del pione neutrale. Un altro tipo di ricerca reso possibile dal grande ciclotrone e propugnato in particolare da Segrè era lo studio dell'urto protone - protone ad alte energie. L'idea allora corrente, e che si rivelò poi ottimistica, era che un tale studio potesse chiarire definitivamente la legge che regola le « interazioni forti » che determinano le energie di legame dei nuclei. Il clima di entusiasmo prodotto da questa intensa attività sperimentale generava anche un rinnovato interesse nell'ulteriore sviluppo della teoria di Yukawa o teoria pionica delle interazioni nucleari come veniva ora chiamata. Per questo scopo si faceva grande assegnamento, a Berkeley come altrove, sulle nuove tecniche della teoria dei campi quantizzati nate dallo sviluppo della elettrodinamica quantica allo studio di queste tecniche.

Come tutti sanno, il formalismo della elettrodinamica quantistica e più in generale della « teoria dei campi quantizzati » risale al 1929 (Heisenberg-Pauli, Fermi); è anche cosa ben nota, come la portata e le applicazioni concrete di questo formalismo fossero drasticamente limitate dalla difficoltà delle cosidette « divergenze ». Non starò qui a ricordare la storia dell'idea della « rinormalizzazione » che ha permesso di superare in molti casi queste difficoltà. Mi limiterò a fare i nomi di Dirac, per la rinormalizzazione della carica, di Kramers per quella della massa, e quelli di Bethe, Weisskopf, Tomonaga, Feynman, Schwinger e Dyson per lo sviluppo sistematico dell'idea. Per il seguito della mia storia interessano soprattutto le geniali idee di Feynman, introdotte a Berkeley da Serber in una serie di seminari, di cui si fece un gran parlare; le tecniche di calcolo di Feynman aprivano la possibilità pratica di calcolare in teoria delle perturbazioni anche processi di ordine elevato, che con le tecniche tradizionali avrebbero portato a complicazioni mostruose. L'ordinaria teoria delle perturbazioni descrive un qualsiasi processo d'urto come dovuto a una serie di transizioni che portano dallo stato iniziale a quello finale attraverso una successione di stati intermedi virtuali. Una innovazione introdotta da Feynman consiste nell'associare a ogni cosiffatta successione di stati virtuali e transizioni un *diagramma* che la descrive in modo intuitivamente ovvio. La sua sorprendente scoperta: la somma dei ter-

mini corrispondenti a diagrammi topologicamente simili è data da regole (regole di Feynman o di Feynman-Dyson) che rappresentano in generale un enorme semplificazione rispetto alle formule tradizionali. A Berkeley come altrove la difficoltà principale incontrata da molti nello studio dei primi due lavori di Feynman stava nel carattere assai poco ortodosso della deduzione delle sue regole adottata dall'autore; chi era abituato ai metodi classici della teoria dei campi rimaneva insoddisfatto. Un passo nella direzione desiderata era stato fatto da Dyson; ma anche la sua deduzione conteneva lacune importanti. È perciò comprensibile che venisse accolto con un certo sollievo un teorema algebrico da me scoperto poco prima di lasciare Berkeley, teorema che consente di trasformare i prodotti « cronologici » che compaiono nella formulazione di Dyson in una somma di cosiderti prodotti « normali »; con questo teorema la deduzione delle regole di Feynman si completa in poche righe.

Vi sono ancora molte altre osservazioni che si potrebbero fare sulla deduzione delle « regole di Feynman », giacché il problema si ripresenta periodicamente, a mano a mano che le teorie dei campi si complicano. La deduzione di cui ho detto è stata adottata in molti testi come quella più elementare ed economica. Ma questo non è necessariamente vero in tutti i casi; il metodo della integrazione funzionale (un'altra invenzione di Feynman) è considerato preferibile da alcuni autori; ma nonostante il loro interesse, trascurerò tali questioni che mi porterebbero molto lontano. Dirò invece, abbreviando quanto è possibile, dei problemi a cui mi rivolsi successivamente in connessione colla applicazione della teoria dei campi alle interazioni forti.

Di questa ebbi occasione di occuparmi in una collaborazione a distanza con Francis Low e Geoffrey Chew. Uno dei temi che avevamo discusso più volte era la possibilità di utilizzare la rinormalizzabilità della teoria del campo pionico per impostare un calcolo ragionevole dell'urto pionenucleone. La difficoltà principale stava nel fatto che le tecniche perturbative usate nella rinormalizzazione dell'elettrodinamica quantistica erano evidentemente inadeguate nel caso di una interazione « forte ». Per questa ragione Chew aveva iniziato lo studio di una approssimazione diversa, che, più che per le sue possibili applicazioni all'esperienza (su cui avevo qualche dubbio) mi aveva interessato come un caso ideale per la sua semplicità, sul quale sperimentare i procedimenti della rinormalizzazione. Infatti teoremi e risultati che in altri casi già noti si presentavano come conclusione di calcoli assai complicati ed oscuri, potevano qui venire afferrati nella loro essenza in una forma assai semplice. Ne scrissi a Chew, un po' scusandomi per la mia predilezione per certe questioni di interesse soprattutto pedagogico. Con mia sorpresa Chew mi rispose che il formalismo che io avevo usato nella mia lettera era proprio quello che insieme a Low stavano cercando per arrivare a risultati concreti sul problema dell'urto. Nel frattempo questo aveva raggiunto una fase particolarmente interessante grazie agli esperimenti condotti da Fermi

a collaboratori a Chicago e culminanti nella scoperta di una importante risonanza. A questi risultati Chew e Low poterono applicare i risultati, mentre dal mio canto esposi le mie idee in un articolo riassuntivo sulla teoria mesonica.

Il modello usato da Chew per lo studio dell'urto pionenucleone, nonostante la sua utilità, non mi soddisfaceva completamente per la grossolana semplificazione che esso richiedeva riguardo ai gradi di libertà corrispondenti al nucleone. Il mio interesse fu perciò attratto da altri metodi e in particolare da quello sviluppato da Bethe e Salpeter per lo studio del problema relativistico dei due corpi, e da essi applicato con notevole successo al classico caso degli stati legati dell'atomo di idrogeno. In questo caso i due « corpi » sono il protone e l'elettrone e la loro interazione mutua viene descritta dai successivi termini del nucleo dell'equazione, che rappresentano rispettivamente lo scambio di un fotone, o di due fotoni che si incrociano, o di tre fotoni e così via. Un altro problema analogo è quello del positronio, studiato da vari altri autori. Un problema nucleare analogo sarebbe lo studio del nucleo di deuterio nel qual caso l'equazione di B.-S. verrebbe applicata alla interazione tra un protone e un neutrone mediante lo scambio di uno scambio di uno, due, o più mesoni. Avendo in mente problemi cosiffatti fui indotto alla ricerca di metodi del tutto diversi in un lavoro intitolato « Proprietà dell'equazione di Bethe-Salpeter »; proseguendo in questa direzione, ulteriori precisazioni vennero poi ottenute dal mio allievo R. Cutkoski. Uno dei risultati di questo lavoro poi utilizzati da vari autori consiste in una semplice osservazione sullo spettro di frequenze della trasformata di Fourier dell'ampiezza di B.-S. Da questa discende la possibilità di « ruotare » l'asse dei tempi, sostituendo al tempo relativo t la variabile $u = it$ considerata come una variabile reale. L'equazione integrale diventa così accessibile ai metodi di Fredholm o a metodi calcolo numerico. Un altro risultato abbastanza sorprendente sta nel fatto che in certi casi e nella cosidetta « ladder approximation » l'equazione di B.-S. può venire risolta esattamente mediante una rappresentazione integrale dell'ampiezza che riduce il problema a un'equazione differenziale ordinaria.

Dirò ora, abbreviando, della attività da me svolta dopo che fui invitato a dirigere il gruppo teorico del laboratorio di Brookhaven. Qui dai frequenti contatti cogli sperimentatori impegnati nello studio della produzione di particelle e delle loro interazioni fui indotto a un'attività pedagogica abbastanza intensa, diretta a rendere accessibili agli sperimentali le conseguenze, per esempio, dei principi di simmetria che dominano la fisica delle particelle. Fui anche indotto a dar maggior peso a questioni di natura essenzialmente cinematica, che pur non richiedendo per la loro soluzione idee di grande profondità sono ciononondimeno importanti per la loro utilità nell'analisi dei risultati sperimentali. Così, per esempio, in un lavoro in collaborazione con M. Jacob introdussi un nuovo modo di analizzare il momento angolare risultante di due particelle dotate di spin. Il metodo usato universalmente sino allora consisteva nel considerare il momento angolare

totale nel sistema del baricentro come la risultante della composizione prima dei due spin in uno spin totale e poi di quest'ultimo col momento orbitale relativo delle due particelle. Questa decomposizione, usata per almeno due decenni, non è molto naturale nel caso di particelle quasi relativistiche e, nel caso di fotoni o neutrini è addirittura inapplicabile. Nel lavoro succitato introducemmo un'analisi basata sugli « stati di elicità » delle particelle; un teorema ben noto di teoria dei gruppi permette di costruire stati delle due particelle aventi un momento angolare totale ben definito. L'analisi delle reazioni del tipo $a + b \rightarrow c + d$ (dove a, b, c, d sono particelle dotate di spin qualsiasi), mediante il metodo ora detto è stata in seguito usata sistematicamente in un gran numero di ricerche sperimentali.

Nello stesso ordine di idee, sempre a Brookhaven, analizzai più tardi gli stati angolari di un sistema di tre particelle e poi per suggerimento di Goldberger affrontai la questione delle cosidette « crossing relations », usando a questo scopo la geometria non-euclidea dello spazio delle velocità nella teoria della relatività ristretta. All'inizio degli anni '60 cominciai poi ad interessarmi intensamente della teoria dei gruppi unitari in relazione colla scoperta da parte soprattutto di Gell-Mann della importanza della simmetria SU_3 nei fenomeni delle alte energie. In questo periodo cominciai anche a frequentare regolarmente il Pupin Laboratory di Columbia e a tenervi seminari sugli argomenti sopra ricordati. Il mio trasferimento alla Columbia nel '63-'64 segnò per me l'inizio di una collaborazione assai interessante con T. D. Lee. Il tempo stringe, e pertanto ricorderò solo molto rapidamente alcuni dei problemi così affrontati. Una delle questioni da noi studiate riguarda le cosidette simmetrie discrete della fisica, argomento sul quale i contributi precedenti del prof. Lee sono a tutti ben noti. Il problema del quale ci occupammo era quello del modo in cui queste simmetrie si fondono con altre, problema che dal punto di vista matematico si presenta come quello delle possibili « estensioni » di un gruppo da parte di un altro. In un certo senso tale questione si riconnetteva ad un altro di cui mi ero occupato ancora a Pittsburgh e che non ho prima ricordato: il problema delle regole di « superselezione » di Wigner e Wightman. Il concetto di « estensione minima » di un gruppo, introdotto nel mio lavoro con Lee, costituisce un esempio estremamente semplice e istruttivo dell'idea di estensione e delle sue possibili applicazioni in fisica.

Con Lee mi occupai anche di varie questioni abbastanza spinose di teoria dei campi, in particolare della possibilità di eliminare le divergenze, per esempio dell'elettrodinamica, mediante l'introduzione di campi ausiliari dotati di una metrica negativa.

Infine due questioni abbastanza grosse attirarono la nostra attenzione. Da un lato le teorie alla Higgs e il possibile ruolo di campi scalari nella fisica delle particelle fecero intravedere a Lee la possibilità di stati della materia nucleare aventi valori del tutto anomali della densità e dell'energia di legame. L'esplora-

zione sperimentale di questa possibilità è per ora ancora un problema appena intaccato. Da un altro lato il nostro interesse fu fortemente attirato dai lavori di vari autori sulle notevoli proprietà di certe teorie di campo che posseggono soluzioni note sotto il nome di « solitoni ». A queste si collega anche come è noto lo studio delle proprietà del « vuoto » e delle cosidette rotture spontanee di simmetria. Di tali questioni mi occupai attivamente negli ultimi tre o quattro anni trascorsi alla Columbia, prima di rientrare in Italia; e su queste cose potrei ancora intrattenervi, ma credo ormai di aver abusato della vostra pazienza e pertanto chiuderò questo lungo discorso ringraziando ancora l'Accademia per il gentilissimo invito.