

## CAPITOLO 2

### L'uso del formalismo della matrice $S$ in Italia

#### 2.1 Introduzione

Anche la ricerca italiana nell'ambito della fisica teorica delle alte energie, tra la fine degli anni cinquanta e per buona parte degli anni sessanta, fu fortemente indirizzata verso l'introduzione di un nuovo formalismo, quello della matrice  $S$ , che permettesse di interpretare l'enorme abbondanza di dati sperimentali provenienti dagli acceleratori di particelle dell'epoca. Inoltre, era l'unico modo, sebbene fenomenologico, di descrivere le interazioni forti e quindi risultava il programma di ricerca di punta in molti dipartimenti di fisica teorica in Italia, in uniformità ovviamente con le correnti più avanzate di ricerca internazionale.

Il panorama italiano tra la fine degli anni cinquanta e il 1970 era piuttosto ampio e articolato. In questo capitolo viene riportata un'analisi qualitativa degli articoli apparsi su "Il Nuovo Cimento" (in particolare tra il 1958 e il 1970) dove emergono tutta una serie di risultati significativi in relazione sia allo sviluppo della teoria della matrice  $S$  in sé, sia al semplice uso del suo formalismo nell'interpretazione dei risultati sperimentali connessi alla fisica nucleare italiana. Questo resoconto sarà affiancato da una serie di interviste originali a quattro dei maggiori protagonisti della fisica teorica dell'epoca: a Marcello Cini, fondamentale per i suoi studi pionieristici sulle relazioni di dispersione, a Tullio Regge per la definizione di particolari poli della matrice  $S$ , che portano il suo nome (essenziali per la definizione del programma del bootstrap di Chew), a Daniele Amati per lo sviluppo del modello multiperiferico, il quale permetteva tra le altre cose di interpretare attraverso una speciale dinamica proprio i poli di Regge; e infine, a Gabriele Veneziano che introdusse le ampiezze duali, alla base dei modelli duali e di quella che sarà poi la teoria delle stringhe.

Dai loro contributi non emergerà solo un quadro generale del fondamentale apporto degli scienziati italiani alla fisica teorica degli anni sessanta, ma anche un giudizio storico complessivo sul senso del programma della matrice  $S$  in quegli anni, sul suo valore epistemologico all'interno della fisica teorica del Novecento e sul significato del suo abbandono, forse prematuro, già a metà degli anni sessanta.

## 2.2 Gli articoli apparsi su “Il Nuovo Cimento” tra il 1958 e il 1970

Il numero di articoli che sono apparsi sulla rivista italiana nell’arco di dodici anni, tra il 1958 e il 1970, vedono coinvolti ben 55 fisici teorici italiani, impegnati in diverse realtà universitarie, che hanno prodotto un totale di circa sessanta lavori nell’ambito della teoria della matrice S.

Un simile risultato, che può in prima approssimazione apparire modesto, è tutt’altro che trascurabile, perché riguarda un’unica rivista, per giunta italiana, che era stata espressione di buona parte delle pubblicazioni scientifiche internazionali nella prima metà del Novecento, ma già verso la fine degli anni sessanta cedeva il passo ad altre riviste specializzate straniere.

Inoltre, l’analisi è focalizzata al caso di soli autori italiani, e comunque, relativa a un singolo argomento di fisica teorica, che rappresentava all’epoca un filone fortemente battuto in Italia, ma non il solo; infatti, in parallelo la teoria quantistica dei campi comunque non era stata naturalmente abbandonata e continuava a essere sviluppata.

La data iniziale del 1958 è indicativa, ed è finalizzata a includere una serie di lavori di Tullio Regge, importanti nella chiarificazione dell’apporto italiano al panorama di ricerca internazionale sulla teoria della matrice S.

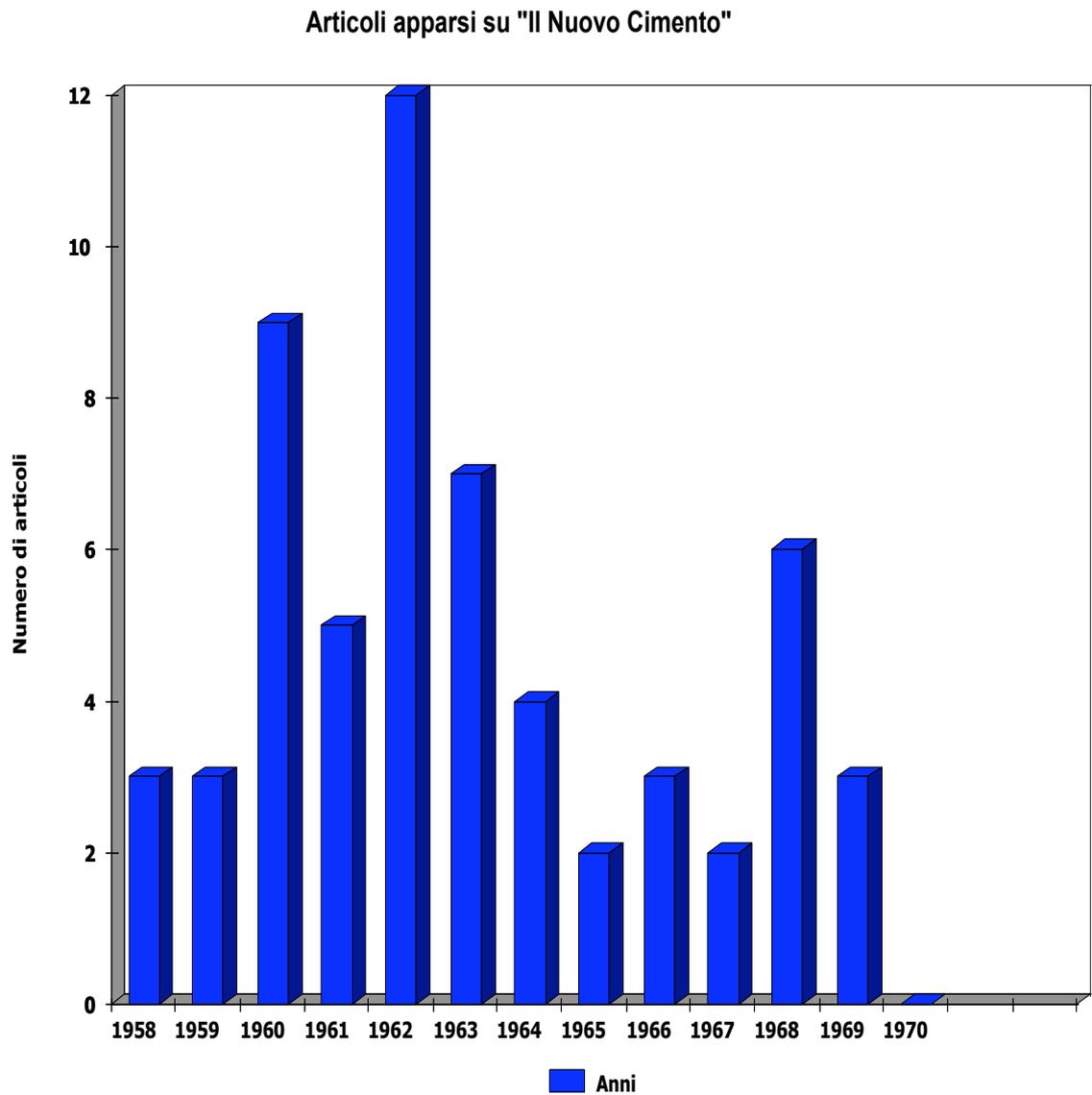
La concentrazione maggiore di articoli si addensa tra il 1961 e il 1963 (grafico 1). Nel 1962 vengono scritti 12 articoli; i maggiori contributi sono quelli di Amati, Fubini, Cini, De Alfaro e Prospero (grafico 3). Dopo un calo nel numero di pubblicazioni durante la metà degli anni sessanta<sup>1</sup>, vi è una ripresa di interesse verso il 1968, grazie soprattutto ai lavori di Gabriele Veneziano, dello stesso Fubini e di altri. (Nel grafico 4 viene riportato inoltre il confronto tra il numero di pubblicazioni presenti su “Il Nuovo Cimento” e quelle pubblicate su “Physical Review”, relativamente a: Amati, Cini, Fubini, Regge e Veneziano).

Il gruppo che risulta maggiormente attivo negli anni sessanta si raccoglie a Torino (grafico 2 e tabella 1) intorno a Tullio Regge e a Sergio Fubini (quest’ultimo lavorò in quegli anni anche a Padova), qui sono coinvolti altri tredici fisici, che pubblicano un

---

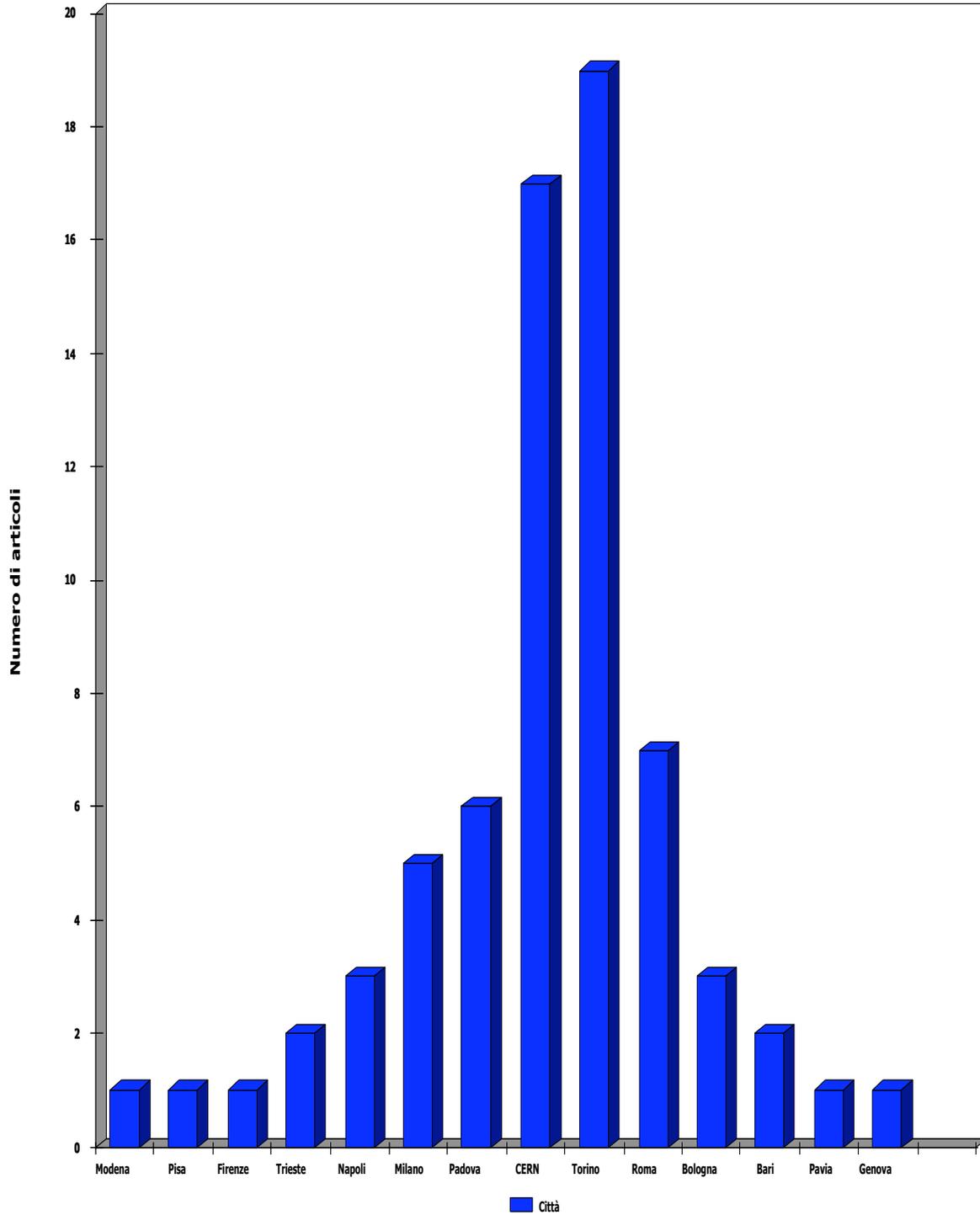
<sup>1</sup> E’ da notare che nel 1964 M. Gell-Mann insieme a G. Zweig aveva introdotto il concetto di quark, e quindi successivamente l’interpretazione delle interazioni forti fornita dalla teoria dei campi quantistici, nella sua nuova forma della cromodinamica, ritornò in auge, ridimensionando la teoria antagonista della matrice S.

totale di diciannove articoli. In effetti, l'apporto del gruppo di Torino viene a essere fondamentale: per esempio, lo sviluppo delle nuove tecniche di analisi di funzioni di variabili complesse, nell'ambito delle ricerche del Dipartimento di Fisica Teorica di Torino, è alla base di un avanzamento di tutto il formalismo della matrice S.



**Grafico 1:** Articoli apparsi sulla rivista "Il Nuovo Cimento" tra il 1958 e il 1970, su argomenti connessi con la teoria della matrice S.

### Articoli apparsi su "Il Nuovo Cimento"



**Grafico 2:** Lavori distribuiti per i differenti centri di ricerca in Italia: si includono anche gli articoli degli scienziati italiani che in quel periodo lavoravano al CERN (Ginevra) e all'ICTP (Trieste). I Particolari relativi ai differenti autori si trovano nella tabella 1 seguente.

<b>Tabella 1: Analisi per città dei contributi dei vari autori</b>								
<b>Città</b>	<i>Torino</i>	<i>Milano</i>	<i>Roma</i>	<i>Genova</i>	<i>Ginevra (Cern)</i>	<i>Firenze</i>	<i>Modena</i>	<i>Bari</i>
<b>Autori</b>	Ascoli	Cirelli	Cassandro	Rebolia	Fubini	Altarelli	Cosenza	Prosperi
	Bottino	Lanz	Cini	Viano	Vitale	Borghese		
	De Alfaro	Montaldi	Sartorio		Stanghellini	Buccella		
	Bosco	Prosperi	Jona-Lasinio		Duimio	Colocci		
	Favella		Toller		Cini			
	Fubini		Cosenza		Veneziano			
	Longoni		Amaldi Jr.		Toller			
	Minardi		Biancastelli					
	Molinari		Francaviglia					
	Predazzi		Di Vecchia					
	Regge		Sciarrino					
	Reineri							
	Rossetti							
<b>Numero totale di articoli</b>	19	5	7	1	17	1	1	1

<b>Tabella 1: Analisi per città dei contributi dei vari autori</b>						
<b>Città</b>	<i>Napoli</i>	<i>Pavia</i>	<i>Trieste (Ictp)</i>	<i>Padova</i>	<i>Pisa</i>	<i>Bologna</i>
<b>Autori</b>	Cosenza	Stabilini	Della Selva	Fubini	Ciafaloni	Stanghellini
	Stroffolini		Odorico	Ceolin	Menotti	Bertocchi
			Masperi	Paccanoni		
				Tonin		
<b>Numero totale di articoli</b>	3	1	2	6	1	3

**Tabella 1:** Analisi per città dei contributi dei vari autori.

Nella seconda metà degli anni cinquanta si sviluppò poi la tecnica delle relazioni di dispersione che è alla base del formalismo della matrice S, utilizzato (nella forma delle doppie rappresentazioni di Mandelstam) proprio da Chew nel suo modello di bootstrap adronico. Alla base della loro validità stavano certe proprietà di analiticità delle ampiezze

d'urto quantistico. E' storicamente importante notare che Marcello Cini<sup>2</sup> (che lavorò prima al Cern di Ginevra e poi a Roma) aveva ricavato le relazioni di dispersione, senza saperne niente, quando ancora lavorava nell'industria in un settore che studiava i cuscinetti a sfera. Occupandosi di proprietà di solidi elastici, in particolare della gomma, aveva trovato (il lavoro fu pubblicato sul "Journal of Applied Physics" nel 1950; **1**) una relazione tra la *costante di elasticità* e la *dissipazione*, cioè, tra la parte reale e la parte immaginaria del *modulo di elasticità*.

Cini fece ciò indipendentemente da altri lavori; per esempio, ignorando del tutto quello dei fisici olandesi Kramers e Krönig del '27 (**3 e 2**), su delle relazioni di dispersione che descrivevano il comportamento dell'indice di rifrazione complesso. Il metodo delle relazioni di dispersione si diffuse rapidamente alla metà degli anni cinquanta. Cini e Fubini lo usarono subito per formulare la fisica dell'interazioni pione-nucleone, e in particolare, per descrivere una serie di risonanze.

Tullio Regge invece, tra tanti altri lavori, si dedicò anche alle proprietà di analiticità delle ampiezze di diffusione nel quadro della teoria dei potenziali in meccanica quantistica. In questo ambito sviluppò una trattazione di grandissima originalità, estendendo il momento angolare al campo complesso per una classe molto ampia di potenziali centrali. L'applicazione della teoria del momento angolare complesso di Regge alla fisica delle particelle ebbe importantissimi successi. Ne derivarono dei concetti fondamentali, come quello di polo e di traiettoria di Regge, che sarebbero stati trasportati poi nello studio delle interazioni nucleari e avrebbero dato un impulso fondamentale al programma di Chew dei primi anni sessanta.

Cini e Fubini formularono nel 1959-60, uno schema teorico, detto *approssimazione a strisce* (**4**, pag.37), per trattare le interazioni dei pioni e dei nucleoni nel quadro di una autoconsistenza della fisica delle basse energie. Questi lavori portarono al *modello multiperiferico* sviluppato principalmente da Amati, Fubini e Stanghellini (**5**), che era importante sia da un punto di vista fenomenologico sia da un punto di vista teorico. Era un modello in cui si cercava di sommare tutti i diagrammi a scala della teoria perturbativa e inoltre queste tecniche permettevano anche di ottenere il comportamento alla Regge del modello.

Dalla metà degli anni cinquanta in poi la ricerca torinese in fisica era totalmente integrata nel quadro internazionale, sia teorico che sperimentale. Nei primi anni sessanta il gruppo di Torino contribuì potentemente alle ricerche sulle proprietà di analiticità delle

---

<sup>2</sup> Marcello Cini si laureò in ingegneria nel 1946, lavorò all'industrie RIV dalla fine del 1946 alla fine del 1949, ma intanto nel novembre del 1947 si era laureato in fisica.

ampiezze quantistiche attaccando il problema con tutti i metodi a disposizione. A. Bottino, A. M. Longoni e Regge (6) per esempio trattarono in modo completo la teoria del momento angolare complesso e altri aspetti della teoria dell'urto in meccanica quantistica. Di proprietà di analiticità si occuparono anche V. de Alfaro, E. Predazzi e C. Rossetti (7), studiando modelli per rappresentare il comportamento asintotico delle ampiezze a grande energia ed angolo fisso.

Nella seconda metà degli anni cinquanta la teoria dei campi, come abbiamo detto, appariva incapace di descrivere le interazioni forti tra nucleoni per mezzo del campo pionico. Inoltre a partire da quel periodo si trovarono adroni semistabili e risonanze che testimoniavano la complessità dell'interazione forte, a differenza dell'elettrodinamica.

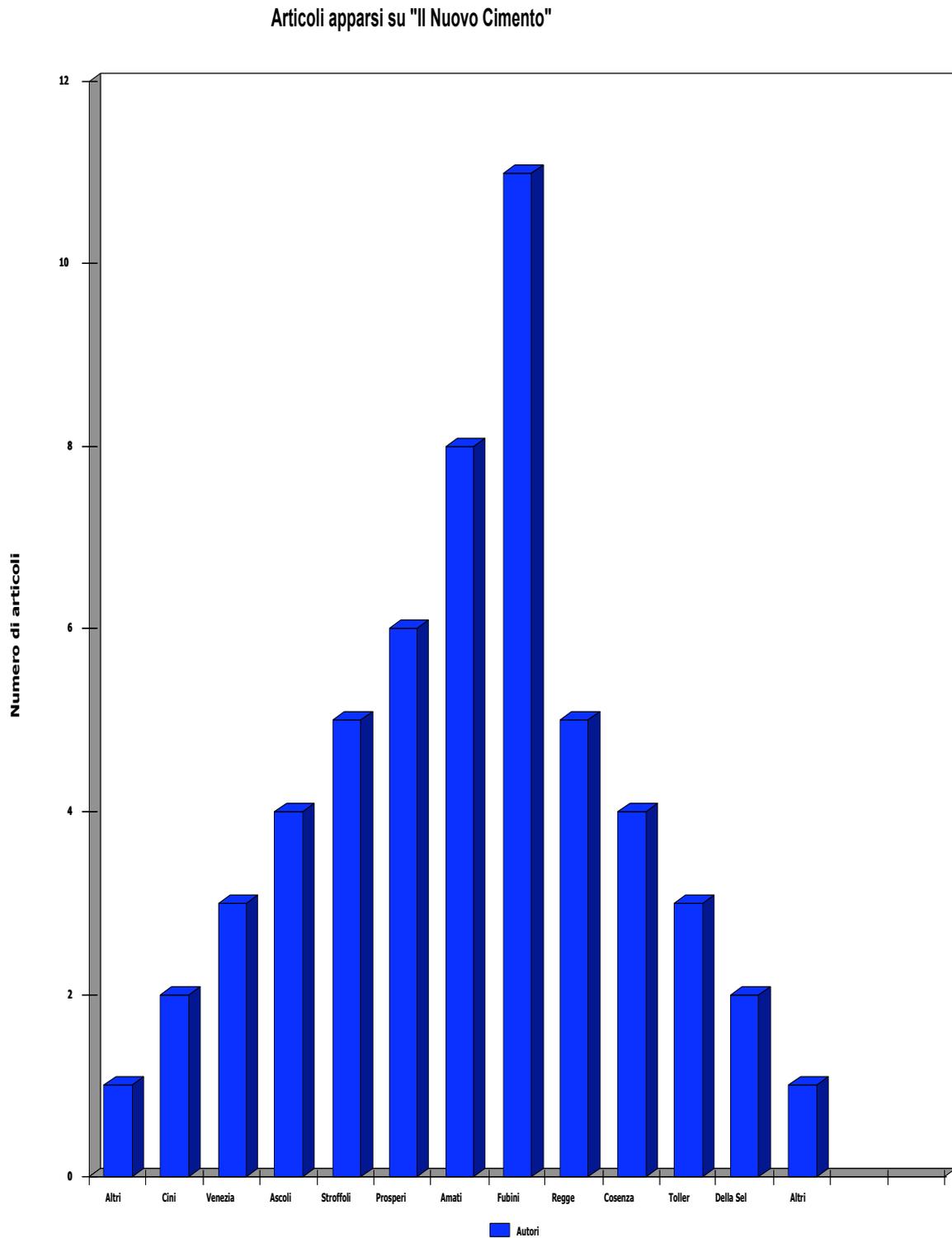
In assenza di uno schema di interazione valido, per alcuni anni la teoria dei campi fu messa da parte. Le interazioni forti tra adroni vennero trattate usando proprietà generali delle ampiezze d'urto, quali le proprietà di unitarietà, analiticità e crossing (appunto le basi della teoria della matrice S) il cui primo passo furono le relazioni di dispersione. Si arrivò anche a teorizzare l'idea che i soli principi generali menzionati spiegassero, in uno schema di autocompatibilità (bootstrap), tutto l'edificio delle particelle e risonanze adroniche che gli esperimenti andavano rivelando.

Le relazioni di dispersione portarono due diversi tipi di sviluppi. I primi di natura fenomenologica; in effetti, la tecnica delle relazioni di dispersione permetteva connessioni tra parametri fisici e favoriva la creazione di schemi di approssimazione. Dall'altra parte fiorì tutta una serie di studi che tendeva a dimostrare l'esistenza di relazioni di dispersione partendo da principi fondamentali di causalità e da proprietà generali di analiticità delle ampiezze d'urto.

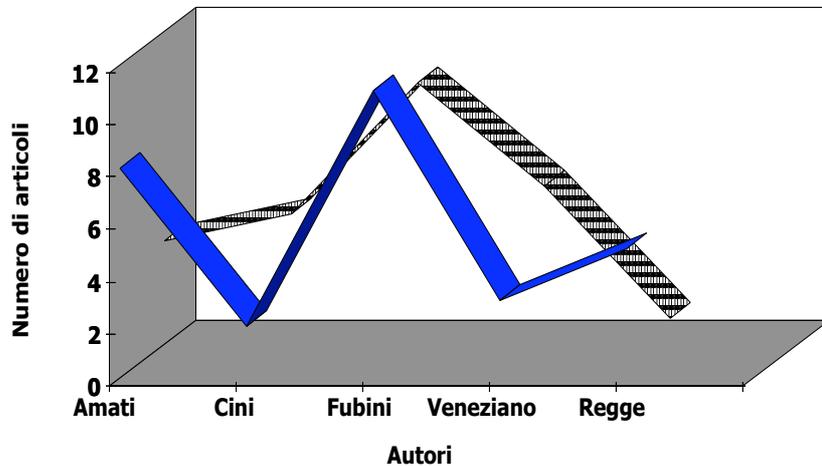
Regge, con la teoria del momento angolare complesso, stabilì il comportamento delle ampiezze per grandi valori del momento trasferito nel quadro della meccanica quantistica non relativistica. Ci volle un po' di tempo perché i fisici delle particelle ne assimilassero le implicazioni. La teoria fu oggetto di immenso interesse e popolarità a partire dal 1961, quando i risultati furono reinterpretati da Chew sulla base del crossing, principio considerato valido nelle teorie relativistiche, in modo da fornire il comportamento delle ampiezze d'urto a grande energia e momento trasferito costante, cioè in regione cinematicamente permessa.

Il risultato inoltre stabiliva, mediante le *traiettorie di Regge*, una relazione tra il comportamento ad alta energia e le masse e momenti angolari di risonanze e particelle: prima relazione tra fisica di bassa energia (particelle e risonanze) e alta energia

(andamento asintotico delle ampiezze). Inoltre, conseguenze di quegli sviluppi furono la dualità tra alte e basse energie, il modello di Veneziano e quindi, indirettamente, i modelli duali e le stringhe.



**Grafico 3:** Numero di articoli divisi per autore.



**Grafico 4:** Confronto tra gli articoli pubblicati su “Il Nuovo Cimento” (tratto continuo) e quelli pubblicati su “Physical Review” (tratto a righe) di 5 differenti autori.

Infatti, nel 1968 il ventiseienne Gabriele Veneziano elaborò l’idea di un’ampiezza d’urto che realizzava la dualità tra risonanze e comportamento alla Regge e aveva le proprietà di crossing richieste dalle teorie relativistiche (8). Una ampiezza analoga ma non identica (che risultò poi corrispondere a una teoria di stringhe chiuse) fu proposta quasi contemporaneamente dal fisico argentino Miguel Virasoro (9).

Lavorando al MIT negli Stati Uniti, Fubini e Veneziano (10 e 11) svilupparono poi il modello duale mostrando che lo spettro del modello era generato da una famiglia numerabile di oscillatori armonici che furono poco dopo (H.B. Nielsen, Y. Nambu, D. Susskind) interpretati come i modi d’oscillazione di una corda relativistica (la *stringa*). I modelli duali, nati come teoria di matrice S, erano dunque interpretabili nel quadro della teoria quantistica dei campi.

Altri gruppi di ricerca in Italia si dedicarono allo studio della matrice S, a Milano per esempio A. Scotti, G.M. Prospero e L. Lanz furono quelli che maggiormente lavorarono su questi argomenti.

In effetti, tra coloro che interagirono direttamente con il gruppo di Chew, presso il *Lawrence Radiation Laboratory* di Berkeley, vi furono proprio Scotti e Prospero (12, pag. 77).

Scotti entrò nel laboratorio dal 1960 e non a caso si occupò di applicazioni della teoria della matrice  $S$ . Prosperini ne fece parte dal giugno del 1961, al giugno del 1962, e di quel periodo sono molto noti, i suoi lavori (**13** e **14**) sulla continuazione analitica della matrice  $S$ , assunta come funzione di variabile complessa, e in particolare, come dipendente dal momento angolare, e poi, ancora, sull'unicità della continuazione analitica della matrice  $S$ , in condizioni asintotiche (cioè, per grossi valori del momento angolare).

Un gruppo di ricerca importante si riunì anche a Roma, dove oltre a Cini (proveniente dal CERN), in quegli anni lavorarono anche P. Di Vecchia, A. Sciarrino, G. Cosenza, M. Toller e altri. Ma molti fisici italiani che si occuparono di teoria della matrice  $S$  lavorarono negli anni sessanta anche in contesti di ricerca internazionali. In particolare fu fondamentale il contributo di Amati al CERN di Ginevra, o anche i lavori degli stessi R. Stoeffolini, B. Vitale.

Gli autori italiani che in quegli anni lavorarono al CERN sulla teoria della matrice  $S$ , furono nove, producendo diciassette articoli, di cui ben otto erano di Amati. Importanti sono i suoi studi sull'applicazione delle proprietà del crossing, la quale permetteva di legare tra loro canali di reazione differenti, e come detto, sui modelli *multiperferici*: in particolare quindi su quei modelli che permettevano di sviluppare una teoria delle interazioni forti di alta energia, riconducibile, attraverso appunto un meccanismo definito *periferico*, a una somma di processi di bassa energia.

Amati nel 1960 scrisse inoltre una serie di lavori (**15**) con E. Leader e B. Vitale al CERN sulla teoria dello scattering nucleone-nucleone a bassa energia in cui gli autori descrivevano un modello dell'interazione basato sulle rappresentazioni bidimensionali di Mandelstam, in una forma che era stata leggermente modificata da Cini e Fubini (**16**). L'idea nuova era quella di tener conto di tutte le singolarità presenti nella regione fisica delle energie permesse da quel tipo di interazione. E sfruttando la condizione di crossing, ricavano informazioni sul canale nucleone-nucleone da quello nucleone-antinucleone, caratterizzando quest'ultimo mediante dei contributi intermedi rappresentati dalla produzione di due pioni con bassi valori del momento angolare.

Questo breve panorama sulla fisica teorica italiana degli anni sessanta è solo parte del contributo complessivo che la ricerca italiana fornì al contesto internazionale, ed è funzionale soprattutto a introdurre le interviste ad alcuni dei protagonisti dell'epoca, da cui si evincerà un giudizio storico complessivo sulla fisica di quegli anni e sui perché di una *rivoluzione mancata*.

## 2.3 Le Interviste

Come si è visto Marcello Cini, Tullio Regge, Daniele Amati e Gabriele Veneziano sono stati tra i principali protagonisti della fisica teorica italiana degli anni sessanta. Ci è sembrato quindi utile ricostruire direttamente insieme a loro gli accadimenti di quegli anni, un *excursus* storico e teorico essenziale per formulare un giudizio complessivo sia sul loro contributo allo sviluppo della teoria della matrice S, sia per una valutazione dell'impatto epistemologico di questa teoria all'interno di un quadro più ampio della storia della scienza. Ciascuna intervista sarà accompagnata da brevi riferimenti ad alcuni dei problemi teorici discussi dagli autori.

Ma perché la scelta è caduta su questi grandi personaggi di un recente passato della fisica italiana?

Marcello Cini, perché è stato indirettamente uno dei padri delle relazioni di dispersione, le quali erano essenziali per implementare un programma di matrice S. Inoltre, in quanto storico e anche filosofo della scienza, il suo punto di vista risulterà fondamentale per dare maggiore profondità alla comprensione, anche in termini sociologici, di un nodo cruciale nella fisica teorica del dopo guerra.

Tullio Regge ci ha raccontato invece le ricerche che lo portarono alla definizione di speciali poli della matrice S: i *poli di Regge*. Questi lavori ritenuti essenziali da Chew e da altri per la costruzione di un effettivo programma di bootstrap, proiettarono Regge, inizialmente inconsapevole dell'importanza dei suoi studi, ai vertici del panorama della fisica teorica del tempo.

Con Daniele Amati abbiamo discusso dei suoi lavori con Fubini e Stanghellini, relativi al modello multiperiferico. Un modello che consentiva di giustificare e ritrovare mediante una certa dinamica il comportamento alla Regge della teoria. Il contributo di Amati sarà essenziale anche per valutare molte delle idee sostenute dallo stesso Chew.

Infine, Gabriele Veneziano ci tragherà dalle teoria della matrice S alla teoria delle stringhe, mostrando come avvenne questo passaggio storico e spiegando come andò spegnendosi negli anni settanta la teoria della matrice S in favore della nascente cromodinamica quantistica, che restituiva alla teoria dei campi il ruolo di paradigma dominante.

### 2.3.1 Intervista a Marcello Cini

*Alla fine degli anni quaranta lei è stato tra i primi a introdurre le relazioni di dispersione: qual era il contesto teorico in cui aveva sviluppato i suoi studi?*

A quell'epoca il mio personale coinvolgimento comincia in un campo della fisica assai meno nobile. Nel 1949, infatti, lavorando in un laboratorio di una industria interessata all'utilizzazione di sospensioni di gomma, avevo studiato la possibilità di trovare correlazioni fra il *modulo di elasticità* e il *coefficiente di smorzamento* delle oscillazioni in questo materiale. Dopo aver tentato senza successo di utilizzare diversi modelli meccanici *visco-elastici* 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*<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Il rapporto tra causalità, analiticità e relazioni di dispersione può essere schematizzato come segue. Il principio di causalità prevede che un effetto non può precedere la causa. Per cui, come sottolineato da Cini, sia che si tratti del problema meccanico analizzato da lui nel 1949 (1) (risposta di un mezzo elastico a una sollecitazione), sia che si parli di ottica (indice di rifrazione complesso), sia che si studi come un atomo che interagisce con un'onda elettromagnetica, problema analizzato nel 1924 da Kramers e Krönig (2 e 3), che per primi introdussero le relazioni di dispersione, sono tutti casi in cui si deve tener presente un principio di causalità.

Per esempio nel caso analizzato da Cini non era possibile che una risposta del mezzo elastico (supposto in regime di risposta lineare) precedesse una sollecitazione, così come si doveva sempre imporre nei calcoli (Kramers e Krönig) che l'onda *scatterata* non precedesse l'onda incidente. E' possibile vedere che ciò matematicamente comporta l'analiticità delle funzioni che descrivono il processo in questione.

Brevemente per rendere l'idea immaginiamo (17, pag. 57) che vi sia un segnale luminoso che viaggia alla velocità della luce e supponiamo che questo raggiunga un osservatore (a distanza  $l$  dalla sorgente) all'istante  $t = 0$  (il che è equivalente a pensare, per esempio, al momento in cui un'onda elettromagnetica è *scatterata* da un determinato potenziale). Rappresentiamo per semplicità questo segnale con una opportuna funzione  $f(t)$ ; è chiaro che l'osservatore per un principio di causalità non potrà vedere nessun segnale prima del tempo  $\frac{l}{c}$  impiegato dalla luce a raggiungerlo. Ciò può essere schematizzato con una condizione sulla  $f(t)$ , per cui  $f(t) = 0$  per  $t \leq 0$ .

Se si calcola la trasformata di Fourier  $f(\omega)$  della  $f(t)$  si ottiene:

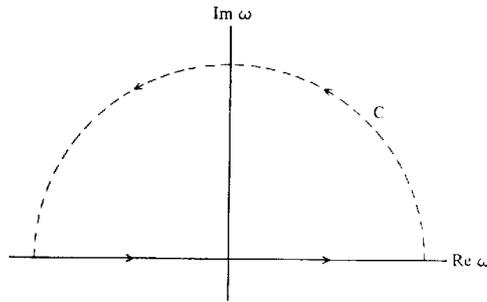
$$f(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^+ f(t) e^{i\omega t} dt$$

Poiché  $f(t) = 0$  per  $t \leq 0$  allora:

$$f(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^+ f(t) e^{i\omega t} dt$$

Se ora ci estendiamo al piano complesso  $\omega$  (guardando alla  $f(\omega)$  come una funzione complessa di variabile complessa), nel semipiano superiore ( $\text{Im} \omega > 0$ ; vedere il contorno di integrazione  $C$  in figura 1) l'integrando nell'espressione precedente ha una decrescita esponenziale determinata da un fattore del tipo:  $e^{-\text{Im} \omega t}$ . E' possibile far vedere allora che la funzione  $f(\omega)$  è analitica nel semipiano superiore della variabile complessa  $\omega$ . Ciò comporta che è possibile applicare i teoremi connessi con le funzioni analitiche, come il *Teorema di Cauchy*. Il risultato di questa applicazione consente di ricavare una relazione di dispersione.

(cioè che nessuna deformazione poteva prodursi prima che venga applicata la sollecitazione esterna) conduceva a una relazione integrale fra la parte reale (*modulo di elasticità*) e la parte immaginaria (*coefficiente di smorzamento*) del coefficiente di elasticità complesso che lega la deformazione alla sollecitazione. Si trattava, anche se in forma un po' diversa della stessa relazione trovata nel 1926 da Kramers e Krönig 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



**Figura 1:** Contorno di integrazione nel piano complesso \_

Per cui:

$$f(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_C \frac{f(\omega') d\omega'}{(\omega' - \omega)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^+ \frac{f(\omega') d\omega'}{(\omega' - \omega)}$$

che si riduce all'espressione:

$$f(\omega) \equiv \text{Re } f(\omega) + i \text{Im } f(\omega) = \frac{1}{\omega} \text{P} \int_0^+ \frac{f(\omega') d\omega'}{(\omega' - \omega)} \quad (\text{La } P \text{ indica che l'integrale è inteso al valor principale}).$$

Poiché le grandezze fisiche devono essere reali dobbiamo imporre che per valori reali di  $\omega$  :

$$f^*(\omega) = f(\omega)$$

e cioè:

$$\text{Re } f(\omega) = \text{Re } f(\omega)$$

$$\text{Im } f(\omega) = -\text{Im } f(\omega)$$

da cui la relazione di dispersione che lega la parte reale alla parte immaginaria (che descrivono processi fisici differenti) della stessa funzione  $f(\omega)$ :

$$\text{Re } f(\omega) = \frac{2}{\omega} \text{P} \int_0^+ \frac{\omega' \text{Im } f(\omega') d\omega'}{(\omega'^2 - \omega^2)};$$

Dal teorema ottico inoltre (supponendo di trattare il caso fisico di uno scattering in "avanti") si ricava l'ulteriore uguaglianza:

$$\text{Re } f(\omega) = \frac{2}{\omega} \text{P} \int_0^+ \frac{\omega' \text{Im } f(\omega') d\omega'}{(\omega'^2 - \omega^2)} = \frac{2}{\omega^2} \text{P} \int_0^+ \frac{\omega'^2 \sigma_t(\omega') d\omega'}{(\omega'^2 - \omega^2)};$$

Perciò in principio la sezione d'urto totale  $\sigma_t$ , che compare nell'ultimo integrale determina completamente attraverso la relazione di dispersione sia  $\text{Im } f(\omega)$  sia  $\text{Re } f(\omega)$ .

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.

Tre anni dopo, avendo lasciato il laboratorio delle industrie RIV 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 fronte ripido, 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 (**18 e 19**), aveva pubblicato un lavoro nel quale constatava la *stessa* impossibilità, e si limitava a ricavare delle 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.

### ***In che consisteva il lavoro di Kramers e Krönig?***

La teoria classica della dispersione sviluppata da Lorentz, Swald e altri alla fine dell'Ottocento spiegava 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. In questa interpretazione, per effetto di tali oscillazioni gli atomi emettevano onde sferiche diffuse in tutte le direzioni e, di conseguenza, parte dell'energia dell'onda incidente risultava assorbita dal mezzo. Ciò equivaleva a rappresentare il coefficiente di polarizzazione dell'atomo (e perciò anche l'indice di rifrazione) mediante un numero complesso la cui parte reale era legata all'ampiezza dell'oscillazione forzata indotta, mentre la parte immaginaria era 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 propose di fare Kramers (**3**) tuttavia, non era di calcolare esplicitamente queste

grandezze ricavando per esse espressioni di validità più generale. Egli infatti non disponeva ancora nel 1926 di una teoria completa dell'interazione fra radiazione ed elettroni atomici, e il moto stesso degli elettroni nell'atomo veniva descritto ancora 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 accontentò di generalizzare la relazione fra parte reale e parte immaginaria del coefficiente di polarizzazione che la teoria classica della dispersione permetteva di scrivere (perché in tal caso le espressioni di queste grandezze sono note) al caso più generale in cui esse non erano più espresse da funzioni note esplicitamente.

Fatto questo, Kramers dimostrò - ed è questo il punto centrale del lavoro - che la relazione così ottenuta traduceva matematicamente il principio, del tutto generale, di *causalità*, secondo il quale l'elettrone non poteva riemettere radiazione diffusa prima che l'onda incidente lo colpisse. Va sottolineato che, nonostante la generalità di tale principio, la relazione ottenuta non venne affatto presentata come sostitutiva di una teoria dinamica completa. Al contrario, in mancanza di tale teoria la relazione stessa poggiava su dubbie fondamenta.

Questo confermava il fatto che secondo le regole della comunità scientifica di allora, perché certe nuove idee potessero essere accettate, queste dovevano essere al meno in linea di principio riconducibile nell'ambito di una teoria completa. La causalità da sola non bastava. Tale condizione indubbiamente vera andava soddisfatta all'interno di una precisa teoria dinamica generale, fondata su equazioni di evoluzione temporale valide per un sistema fisico qualsiasi.

Nei trent'anni successivi il quadro non mutò. I tentativi di ampliare la sfera di validità e quindi di applicabilità delle relazioni di dispersione, mantenevano ferma la condizione che tale validità dovesse essere dimostrata all'interno di una precisa teoria dinamica. Un suggerimento di Krönig del 1946 (20) venne appunto lasciato cadere perché egli, rinunciando a un riferimento preciso costituito da una possibile teoria dinamica, proponeva di assumere come *postulato* le relazioni di dispersione per l'ampiezza di diffusione<sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup> "Come è noto - dice Krönig nel suo articolo del 1946 (20) - 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 dell'istante  $t = 0$  se l'onda incidente è nulla nel punto ove si trova il centro diffusore prima di questo istante. Sembrerebbe 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."

***Ma qual era il significato epistemologico dell'introduzione dell'approccio delle relazioni di dispersione?***

Nella seconda metà degli anni cinquanta si affermò nel settore della fisica teorica delle alte energie, una filosofia interpretativa dei processi dinamici delle particelle elementari, basata appunto sull'uso delle relazioni di dispersione, che presentava caratteristiche paradigmatiche, per dirla alla Kuhn, assai differenti da quelle possedute dal corpo di modelli, schemi e teorie che fino ad allora gli esperti del settore avevano elaborato o stavano sviluppando.

Nell'approccio tradizionale si tentava di dedurre dalle equazioni d'onda alla Schödinger, 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 accontentava 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 connettessero 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 sostituiva dunque alla ricerca di soluzioni esplicite, anche se necessariamente approssimate, di equazioni date, la verifica della validità di relazioni fra funzioni incognite alle quali venivano talvolta attribuiti valori empirici ricavati più o meno direttamente dall'esperienza; talvolta assegnate forme analitiche assunte a priori per tentativi, delle quali si voleva verificare la consistenza. Si trattava, chiaramente, di paradigmi differenti, nel senso che nei due approcci erano diverse non soltanto le tecniche di calcolo o le ipotesi di partenza, ma la concezione stessa di ciò che si intendeva per "previsione" o per "spiegazione" di un dato fenomeno: erano diverse, in altre parole, le scelte di ciò che si assumeva come dato e di ciò che si intendeva sottoporre a verifica. Ci si trovava perciò di fronte a un processo - l'affermazione di un nuovo paradigma - che, secondo per esempio l'interpretazione kuhniana, non poteva mai essere spiegato secondo una logica puramente interna a una data disciplina.

***Come mai le relazioni di dispersione usate già nel 1926 da Kramers e Krönig furono messe da parte per poi rispuntare solo trent'anni dopo, come strumenti ritenuti decisivi nella fisica teorica delle alte energie? Ci sono, come ha accennato lei, ragioni storiche o sociologiche esterne alla pura ricerca scientifica?***

M. Goldberger<sup>5</sup>, il fisico americano che più di tutti contribuì all'affermazione del nuovo paradigma basato appunto sulle relazioni di dispersione alla fine degli anni cinquanta, cercò di spiegarci in una relazione tenuta nel 1961 al Congresso Solvay di Bruxelles<sup>6</sup> il perché

---

<sup>5</sup> Goldberger insieme a Gell-Mann e Thirring nel 1954 ( 22), svilupparono un lavoro che riprendeva in una chiave più moderna le relazioni di dispersione, che inizialmente fu considerato come l'inizio di una svolta. In realtà non fu così, perché pur essendo orientato nella direzione della ricerca di una dimostrazione delle validità delle relazioni di dispersione nell'ambito della teoria quantistica dei campi, di fatto non risolveva una serie di problemi teorici. Tant'è vero che gli autori, partiti per dimostrare la validità delle relazioni di dispersione per particelle dotate di massa, dovettero ripiegare alla fine sul caso di particelle di massa nulla perché si accorsero che nel caso generale la dimostrazione non si poteva fare. Ancora una volta vennero 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 furono in grado in tal modo di utilizzare le relazioni trovate per lo studio dell'effetto Compton). Nello stesso anno Goldberger scrisse introdusse le relazioni di dispersione usando una definizione di causalità (detta di *microcausalità*) che però non aveva niente a che vedere con la nozione classica intuitiva introdotta nel 1926 e nei successivi tentativi. La sua dimostrazione infatti si basava sull'ipotesi che due operatori di campo definiti in punti diversi dello spazio-tempo avessero commutatore nullo se i due punti distavano 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 era perfettamente consapevole e infatti affermò nella relazione del 1961 (23):

“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 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 i 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, la condizione sul commutatore gioca un ruolo fondamentale in tutte le derivazioni delle relazioni di dispersione”.

<sup>6</sup> Goldberger sostenne che (23):

“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

di questo silenzio teorico durato circa trent'anni. La sua spiegazione in realtà non spiegava nulla. Lui ingenuamente accettava la *distrazione* come categoria interpretativa dei fenomeni sociali e scientifici, che avrebbe portato a distogliere i fisici per più di trent'anni dall'usare le relazioni di dispersione. Probabilmente a Goldberger non interessava capire le differenze che caratterizzavano l'affermarsi di due paradigmi sostanzialmente differenti, l'uno (il formalismo della meccanica quantistica negli anni tra il 1925 e il 1927), l'altro (le relazioni di dispersione) nel 1955, nonostante che il secondo fosse già potenzialmente disponibile nei suoi strumenti matematici trent'anni prima.

In realtà nel 1926 la comunità dei fisici scelse 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 1955 all'interno di una comunità di fisici assai differenti per formazione, cultura e ruolo sociale, si affermò un paradigma che accogliesse come teoria fisica qualunque contributo che conducesse a correlazioni fra esperimenti non individuate in precedenza, come sostenne lo stesso Chew a una conferenza tenuta a Ginevra nel 1958. Chew, nel suo rapporto introduttivo della sessione dedicata alle *interazioni dei nucleoni* (24), mi ricordo che fornì un lungo elenco di applicazioni delle relazioni di dispersione, teorizzando proprio questo nuovo atteggiamento<sup>7</sup> molto pragmatico.

Non è dunque “a causa dei problemi pratici da risolvere”, come sostenne Goldberger, che i fisici non assunsero, prima degli anni cinquanta le relazioni di dispersione come fondamento di uno schema interpretativo differente, nonostante l'abbondanza di dati sperimentali spettroscopici a loro disposizione, che potevano essere introdotti nelle relazioni al posto delle grandezze incognite. E' perché non si accontentarono di una interpretazione dei

---

restrizione alla 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 oscurare 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”.

<sup>7</sup> “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” (24, pag.94).

fenomeni fisici basata semplicemente sulla loro (auto)consistenza ma pretesero di analizzarli nel quadro di una teoria unitaria, relegando le relazioni di dispersione entro dei limiti assai ristretti di utilizzabilità, mentre tutti gli sforzi vennero diretti a completare l'edificio concettuale della meccanica quantistica.

*Nei primi anni sessanta la teoria dispersiva integrata nell'ambito della teoria della matrice  $S$  sembrava diventare il paradigma dominante nell'ambito delle interazioni forti delle particelle. I congressi di Ginevra del '58, Kiev del '59, Rochester del '60 presentarono un quadro preciso di questo sviluppo. Come avvenne questa transizione dal vecchio al nuovo paradigma? E' possibile dire che questo salto appare anche come risultato di uno scontro tra la tradizione culturale dell'ambiente dei fisici europei e l'atteggiamento pragmatico di quelli americani?*

Sì, in parte è vero. In Europa si era sviluppato un filone della teoria dei campi con un impronta fortemente matematica, in parte emarginata dal settore più prestigioso della fisica. Ma un aspetto ancora più sintomatico di come avvenne una transizione netta con l'affermarsi delle relazioni di dispersione fu a proposito dello sviluppo della teoria della *sorgente fissa*. Nata in America, fu immediatamente abbandonata dai suoi padri, uno dei quali era proprio Chew<sup>8</sup>, il quale diventò invece rapidamente il più acceso fautore del nuovo paradigma. Al contrario ad essa ci interessammo da subito Sergio 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 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 1954 - 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

---

<sup>8</sup> L'altro era il fisico Francis Low. Chew e Low nell'ambito di un modello semplificato di teoria dei campi - la cosiddetta teoria di sorgente fissa - avevano studiato delle equazioni che 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 ecc.) e alla struttura del nucleone, rimanendo in un riferimento teorico sufficientemente dominabile (25).

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 1956 già polarizzata nella direzione del nuovo paradigma i nostri risultati (26) non destarono molta attenzione e noi stessi perdemmo presto interesse alla cosa.

Due anni dopo, alla Conferenza di Ginevra del 1958, Aage Bohr, il figlio di Niels Bohr, cresciuto a Copenhagen, in quello che era stato il centro culturale della fisica europea, cercò di presentare un nuovo tentativo<sup>9</sup> (27), che se pure infruttuoso, si proponeva 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, a detta dello stesso Goldberger, era assai oscuro. Ma questo tentativo del giovane Bohr non venne perseguito oltre.

Contemporaneamente infatti, in una sessione differente della stessa Conferenza, Chew espose *senza* perifrasi il nuovo punto di vista che si andava affermando, completamente alternativo alla teoria dei campi<sup>10</sup>. Nel 1961 in ogni caso il confronto tra i due punti di vista era ormai risolto a favore della “linea americana” accolta dalla grande maggioranza dei fisici più giovani<sup>11</sup>.

---

<sup>9</sup> La discussione (27, pag. 213-214) che seguì alla presentazione di questo tentativo fu di grande interesse. R. Oppenheimer colse 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 deterioro, ma soltanto sottolineare che la differenza è assai grande...”.

Peierls appoggiò le intenzioni che stavano dietro alla proposta di Bohr:

“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 ciò che succede se qualcuno degli assiomi del formalismo attuale è sbagliato. Sappiamo che le relazioni dispersione possono essere derivate da una teoria di campo con la condizioni di causalità microscopica. Forse che sarebbero invalidate se questa condizione non fosse soddisfatta pur restando la teoria fisicamente ragionevole?”.

N.N. Bogoliubov commentò il tutto appellandosi 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...”.

<sup>10</sup> Chew sostenne (27, pag. 93):

“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 una teoria affermata 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”.

<sup>11</sup> L'atteggiamento di alcuni dei fisici più anziani per quanto critico verso certi nuovi radicalismi si manifestò in molte circostanze solo come una pura espressione di rammarico verbale. Per esempio è interessante riportare l'intervento di G. Wentzel (già presente nell'appendice 2 del primo capitolo) nella discussione dell'intervento di Goldberger alla Conferenza Solvay del 1961 (23):

***Come cambiò la ricerca in quegli anni? Qual è il suo giudizio storico complessivo sui cambiamenti teorici a cavallo degli anni sessanta?***

Ci furono una serie di trasformazioni delle condizioni nelle quali si svolgeva la ricerca in fisica negli anni che vanno dal dopoguerra al 1960. Infatti, negli anni fra il 1950 e il 1955 si verificò un salto nel processo di espansione quantitativa e qualitativa di tutti i fattori che caratterizzano il complesso di questa disciplina. Per esempio, il numero di pagine annuali di “Physical Review”, stazionarie attorno alle 3000 fino al 1950, divennero circa 6000 nel 1953, più di 7000 nel 1956 e quasi 8500 nel 1958. Esplose il numero dei congressi e dei partecipanti a essi. Nel 1949 a Parigi ci fu un unico congresso, senza limiti di invito, riuniti 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 1956 a Ginevra invece c'erano ben duecento fisici con inviti selezionati, che partecipavano a un congresso esclusivamente dedicato alla fisica dei *mesoni*  $\pi$ .

Dietro a queste manifestazioni c'era lo sviluppo degli acceleratori di alta energia. E' del 1948 l'entrata in funzione del ciclotrone di Berkeley con il quale furono prodotti artificialmente i primi mesoni  $\pi$ , appena scoperti nella radiazione cosmica. Fra il 1950 e il 1960 entrarono in funzione altri acceleratori. Si creò una spinta reciproca fra fisici teorici e fisici sperimentali. Questi ultimi sfornavano una massa enorme di dati grezzi che stimolavano la moltiplicazione di tentativi parziali e *ad hoc* intesi a stabilire qualche correlazione tra di essi. I primi esercitavano pressioni perché si raggiungessero energie sempre più elevate senza precise indicazioni di che cosa cercare. Tanti i primi che i secondi si facevano vicendevolmente garanti dell'importanza del loro lavoro di fronte all'*establishment* politico e all'opinione pubblica.

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

---

“...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”.

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, la stipulazione di contratti di ricerca da parte delle forze armate ruotavano tutti attorno agli stessi personaggi prestigiosi. Non a caso Goldberger diventò, negli anni sessanta, uno dei consiglieri scientifici del Presidente Lyndon Johnson, e decine di altri fisici, “particellari” e di “alta energia”, professionalmente dediti cioè a una delle branche apparentemente più lontane da ogni applicazione pratica, entrarono a far parte di organizzazioni di consulenza del Pentagono. E' dunque una scelta di linea politica, oltre che una opzione ideologico-culturale, che contribuì a realizzare certe svolte.

Se si confronta poi il 1926 con il 1955 si possono notare importanti somiglianze iniziali nelle condizioni all'interno della fisica, ma grandi differenze all'esterno di essa. Queste ultime tuttavia si ripercossero a loro volta sull'interno della comunità scientifica fino a modificare profondamente contenuti e finalità della ricerca. Nel 1926 una grande massa di dati spettroscopici era disponibile ma le relazioni di dispersione non furono estesamente utilizzate per correlarli.

I fisici, nel 1926, 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 era un gran male. Anche nel 1955 c'era una gran massa di dati “spettroscopici” disponibili, per così dire. Si trattava però di una spettroscopia assai più costosa quella delle particelle, che comportava un impiego ingente di uomini e capitali.

Nel 1955 perciò si ribattezzò “teoria” ciò che serviva a correlare in qualche modo i dati esistenti, perché le macchine c'erano e bisognava farle girare, e i fisici c'erano e dovevano pubblicare.

### 2.3.2 I poli di Regge e l'intervista a Tullio Regge

Come breve introduzione all'intervista di Tullio Regge, ricordiamo in sintesi alcuni aspetti teorici connessi alle sue ricerche. A cavallo della fine degli anni sessanta Regge scrisse una serie di articoli estremamente importanti che derivavano da precedenti ricerche nell'ambito della teoria dei potenziali per descrivere processi di scattering non relativistico. In particolare, nel suo articolo più importante di quegli anni, quello del 1959 (28), Regge affrontò il problema dell'estensione analitica in un piano complesso del momento angolare (come già in precedenza sottolineato).

Un particolare vantaggio dell'approccio della matrice  $S$  consisteva nel fatto di descrivere lo scambio di intere gruppi o famiglie di adroni in modo naturale associando a loro uno speciale tipo di poli. Tutti gli adroni venivano visti appartenere a sequenze i cui membri avevano proprietà identiche, eccetto che per le loro masse e per il loro *spin*. Le masse e gli *spin* crescevano con regolarità in ciascuna sequenza e queste sequenze erano infinite. Quando il quadrato della massa di ciascun adrone era espresso in funzione dello *spin*, si ottenevano approssimativamente degli andamenti lineari.

Il modo in cui queste configurazioni erano incorporate nel quadro teorico della matrice  $S$  era basato appunto su un formalismo proposto originariamente da Tullio Regge e le sequenze di adroni erano note come *traiettorie di Regge*<sup>12</sup>. In quegli anni i fisici identificarono

---

<sup>12</sup> Vediamo brevemente come nasceva il concetto di polo di Regge e perché era ritenuto fondamentale nel contesto relativistico della fisica nucleare. Il punto di partenza era l'espansione dell'ampiezza d'onda parziale di un processo di scattering nella teoria del potenziale:

$$f(E, \cos \vartheta) = \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) f_l(E) P_l(\cos \vartheta).$$

Continuando il momento angolare  $l$  a valori complessi, l'ampiezza poteva essere scritta come un integrale nel piano complesso  $l$ . Inoltre, Regge aveva mostrato che nel limite  $\cos \vartheta \rightarrow 1$ , che è ovviamente non fisico, l'ampiezza poteva essere scritta come una somma di poli in  $l$ , la posizione dei quali dipendeva analiticamente su  $E$  (l'energia). Questi poli erano chiamati appunto *poli di Regge*, e l'ampiezza di scattering diventava:

$$f(E, \cos \vartheta) \text{ per } (\cos \vartheta \rightarrow 1) \sim \sum_{l=0}^{\infty} \frac{\rho_n(E)}{\sin \pi \alpha_n(E)} P_{\alpha_n(E)}(\cos \vartheta),$$

dove  $l$  era posto per convenzione  $\equiv \alpha(E)$ .

Questi aspetti assumevano comunque un senso non fisico nell'ambito della teoria dei potenziali, invece diventavano fisicamente rilevanti quando li si generalizzavano ad ampiezze di scattering relativistico. Infatti, scrivendo l'espressione dell'ampiezza in termini della matrice  $T$  (dove la matrice  $T$ , detta di *reazione*, è semplicemente una ridefinizione utile della matrice  $S$ . E' definita sugli stati  $i$  (iniziale) e  $f$  (finale) di un sistema di particelle interagenti, a partire dalla matrice  $S$ , nella maniera seguente:  $\langle f|S|i \rangle = \langle f|I|i \rangle + i \langle f|T|i \rangle$ ), era possibile definire una funzione di variabili complesse (che erano le variabili di Mandelstam  $t$  ed  $s$ ) nel modo seguente:

alcuni dei membri di queste traiettorie; per cui molte particelle non furono viste come entità diverse e a sé stanti, ma come stati eccitati di membri di masse minori, in analogia con gli stati eccitati di un atomo. In questo senso un adrone era visto come una struttura che poteva esistere in vari stati eccitati di breve vita a cui corrispondevano alti valori del momento angolare (o dello *spin*) e dell'energia (o della massa). Incorporare il formalismo di Regge nel quadro della teoria della matrice S fu un grande avanzamento per una descrizione unitaria dei fenomeni adronici.

$$T(s, t) = \sum_{l=0}^{\infty} (2l + 1) T_l(t) P_l(\cos \theta);$$

I poli della funzione analitica  $T(s, t)$  come funzione della variabile complessa  $s$ , erano interpretate come delle risonanze (particelle instabili). La parte reale rappresentava il quadrato della massa, mentre la parte immaginaria la sua "durata"  $\Gamma$  (vedi figura 2).

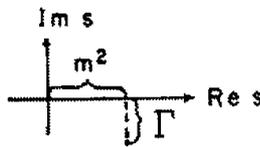


Figura 2: Posizione di un polo nel piano complesso della variabile  $s$ .

Nel caso relativistico vi era un nuovo ingrediente però, il *crossing*. Sebbene nella teoria di Regge la regione in cui dominavano i poli di Regge era *non fisica*, cioè  $\cos \theta > 1$  (la regione fisica invece era quella compresa tra 1 e -1), invece nel caso relativistico l'angolo di scattering in un canale, per grandi valori, diventa proporzionale alla variabile energia del canale incrociato.

$$\cos \theta_s \approx t$$

$$\cos \theta_t \approx s$$

La regione  $\cos \theta > 1$  corrispondeva perciò allo scattering ad alta energia del canale incrociato e l'applicazione delle tecniche di Regge rendeva possibile scrivere l'ampiezza in questa regione come somma di poli di Regge.

$$T(s, t) \text{ per } (s \gg t) \sim \sum_n \frac{\rho_n(E)}{\sin \pi \alpha_n(E)} s^{\alpha_n(t)}$$

La funzione  $\alpha_n(t)$  rappresentava quindi una traiettoria di Regge. Per ciascun valore intero di  $\alpha_n(t_j) = j$ , (cioè per ogni valore di  $t$  per cui  $\alpha_n(t)$  è un intero) l'ampiezza considerata doveva avere un polo in  $t$ , corrispondente allo scambio di una particella con *spin*  $j$  e massa  $m^2 = t_j$ . Lo scambio di questa intera famiglia di particelle si esprimeva dicendo che un "reggeone", o traiettoria di Regge  $\alpha_n(t)$ , era stato scambiato. Questo reggeone scambiato determinava il comportamento asintotico nel canale  $s$ , attraverso il fattore  $s^{\alpha_n(t)}$ . L'espressione precedente corrispondeva per  $t < 0$  alla forma asintotica dell'ampiezza nel canale  $s$ , e per  $t > 0$  a una famiglia di stati legati (*poli di Regge*). La traiettoria  $\alpha_n(t)$  interpolava per  $t > 0$  i momenti angolari degli stati legati e determinava per  $t < 0$  la potenza del comportamento asintotico della diffusione crossata. Questo legame tra comportamento asintotico e famiglia di stati legati (o risonanze) scambiati era un concetto importante, che era stato assai utilizzato per parametrizzare e collegare diffusioni ad alta energia. Una delle ipotesi di Chew era che tutti i poli della matrice S dovessero necessariamente essere poli di questo tipo (*principio di massima analiticità di seconda specie*).

## Intervista a Regge

*Come sono nate le sue ricerche sui poli della matrice  $S$  e sull'estensione complessa del momento angolare?*

Io mi sono laureato a Torino nel 1952 con il professor Verde, il quale successivamente mi consigliò di studiare i lavori di Jost<sup>13</sup> (29 e 30) sulla matrice  $S$ . Ho letto questi articoli e mi sono interessato a quegli aspetti teorici, cominciando ad aggiungere qualcosa. Ho pubblicato alcuni lavori: adesso ci riderei a rileggere i miei primissimi articoli, del resto ero abbastanza giovane, mi sono laureato a 21 anni.

Poi sono andato alla scuola di Les Houches in Francia nel 1953, quindi a Rochester in America nel 1954 dove ho conseguito il *PhD*, e nel 1956 sono tornato in Italia. Successivamente ho incontrato alla scuola di Varenna Kurt Symanzik che mi invitò a Monaco di Baviera perché avevano costituito il Max Planck Institut, che adesso non c'è più. Io avrei lavorato sotto la direzione di Heisenberg. Ho accettato, e nel 1958, con mia moglie ci siamo trasferiti per sei mesi a Monaco di Baviera. In quel contesto ho avuto l'idea di fare la continuazione analitica della matrice  $S$  nel momento angolare anziché nel numero d'onda che invece era la tecnica usata da Jost.

*Quali sono le origini di questa idea di continuazione analitica nel momento angolare?*

All'inizio l'idea era puramente formale, poi a Monaco Symanzik mi fece leggere il libro di Sommerfield in cui l'autore usava questa tecnica, che tra le altre cose scoprii che era impiegata per interpretare la propagazione di onde nel contesto della descrizione di antenne, in quanto permetteva la somma di vari momenti angolari, mediante un'integrazione nel piano complesso del momento angolare.

Allora mi resi conto che se la funzione che rappresentava per esempio un'ampiezza in un processo di scattering aveva solo dei poli, se si prendevano i residui, la somma era fatta,

---

<sup>13</sup> I lavori a cui si riferisce Regge sono principalmente due lavori scritti da Jost tra il 1946 e il 1947 sui poli della matrice  $S$ :

- 1) R. Jost, *Bemerkungen zu der Vorstehenden Arbeit*, "Physica", (1946) 12, p. 509-10.
- 2) R. Jost, *Über die falchen Nullstellen der Eigenwerte der  $S$ -Matrix*, "Helvetica Physica Acta", (1947) 20, p. 77-82.

proprio come faceva Sommerfield. Questa tecnica risultava molto utile nel caso di scattering da potenziali che sono infiniti per così dire, dove la riflessione è totale. Quindi ho subito trovato che l'idea di passare dal momento angolare come proprietà analitica all'integrazione in un piano complesso era molto interessante e nel fare quel passaggio ho incontrato dei poli. Ho capito che questi poli venivano dalla continuazione analitica di stati legati e allora ho scritto un lavoro<sup>14</sup> lì, quando ero in Germania (31 e 32). In seguito ne ho pubblicato un altro<sup>15</sup> più esplicativo su questo tema, che cadde sotto gli occhi di Chew e da lì che scattò un'enorme attenzione su di me e su i miei lavori.

Perché nella trasformazione che avevo descritto nei lavori del 1958 si poteva valutare molto bene l'andamento asintotico nel coseno dell'angolo di scattering. Però in quel momento non fui immediatamente cosciente della portata della mia ricerca. Pensavo fino ad allora che l'intervallo di valori che potesse assumere il coseno andasse solo da  $-1$  a  $1$ . In ampiezze relativistiche invece si poteva passare al canale incrociato, per cui un coseno maggiore di  $1$  in valore assoluto, voleva dire che si stava descrivendo in qualche modo lo scattering del canale incrociato. E' la così detta proprietà del *crossing*. Quindi per valori del coseno maggiori di uno, comunque si andava a finire in una regione fisica, perché si stava semplicemente descrivendo il momento trasmesso nel canale incrociato, che poteva essere anche infinito.

Chew fu colpito molto da questo mio lavoro e io mi ritrovai a essere al centro dell'attenzione: ero uno sconosciuto assoluto in una città di provincia e all'improvviso fui propulso in una realtà completamente nuova. Mi hanno allora invitato a un congresso in America, e passando prima per Parigi per prendere l'aereo per gli Stati Uniti, lì all'aeroporto, incontrai nuovamente Symanzik che sorridendomi mi disse "sei fuori dal canile": voleva dirmi in qualche modo che avevo acquisito una certa notorietà. Dopo alcuni anni sono ritornato in America, perché mi chiamarono a Princeton. Avevano apprezzato questi miei lavori sui poli, ma soprattutto Wheeler, che mi aveva fatto lavorare alcuni anni prima alle oscillazioni di un buco nero<sup>16</sup>, mi voleva lì.

---

<sup>14</sup> Nel 1958 Regge pubblicò due articoli:

- 1) T. Regge, *Analytic properties of the scattering matrix*, "Il Nuovo Cimento" (1958 a) 8, p. 671-9.
- 2) T. Regge, *On the analytic behaviour of the eigenvalue of the S-matrix in the complex plane of the energy*, "Il Nuovo Cimento" (1958 b) 9, p. 295-302.

<sup>15</sup> T. Regge, *Introduction to complex orbital momenta*, "Il Nuovo Cimento" (1959) 14, p. 951-76.

<sup>16</sup> A Rochester Regge lavorò alle rappresentazioni di particelle di spin elevato e sviluppò un lavoro di relatività generale sulla stabilità della metrica di Schwarzschild che fu molto apprezzato da John Wheeler (4, pag. 30).

### ***Che ne pensava Heisenberg dei suoi lavori?***

Le posso raccontare un aneddoto su Heisenberg. Quando ero a Monaco, la sera aspettavo sempre mia moglie che finisse di lavorare con il suo gruppo. In una di quelle occasioni bussò invece alla mia porta proprio Heisenberg. Mi disse: “sono venuto per sapere di che cosa si sta occupando in questo istituto”. Sorpreso e anche un po’ intimorito da questa domanda, rivoltami da uno come Heisenberg oltretutto, cominciai a parlare dei miei lavori sul momento angolare. Heisenberg quasi un po’ indispettito notò che le mie erano spiegazioni puramente matematiche. Voleva invece che gli giustificassi fisicamente e in maniera elementare tutto quel formalismo e quelle proprietà di analiticità. Sono riuscito fortunatamente ad dare la risposta giusta, imitando un po’ il suo modo di ragionare e cioè, inventando al momento un *gedankenexperiment*, un esperimento mentale. Ho immaginato un’onda esponenziale entrante in un processo di scattering con un potenziale che decresceva esponenzialmente e ho spiegato ad Heisenberg come si poteva ricavare da tutto ciò una condizione di analiticità. Lui fu contento, e da allora ha sempre parlato bene di me. Per fortuna è andata bene.

### ***Lei ha mai lavorato con Chew? L’ha conosciuto? Qual è in generale il suo giudizio sulle idee del fisico americano?***

Non ho lavorato mai con Chew direttamente, ma ci conosciamo benissimo. Io ho discusso con lui tante volte, ho ascoltato in passato alcune sue lezioni ma è ormai da tanto tempo che non ho più sue notizie: già venti anni fa Chew era praticamente scomparso dalla scena della fisica teorica. Lui aveva sviluppato a Berkeley in California una teoria sulla costruzione della matrice S, che poi non ha attecchito granché. L’ultima volta che l’ho visto ero seduto in un ufficio al CERN, forse nei primi anni ottanta. Ero appena tornato dall’America: Chew è passato per caso, ci siamo incontrati, salutati e da allora non l’ho più rivisto.

Del resto io non mi sono occupato più della teoria della matrice S. Successivamente mi sono dedicato soprattutto alla relatività. Mi colpì molto tutto il frastuono che allora provocò il mio lavoro sui poli, sembrava che tutto dovesse passare per quei concetti. Persino Landau in un incontro al CERN, mi disse: “Qui c’è la soluzione di tutto”. Non era completamente vero, c’erano stati tanti contributi anche di altri, che poi messi insieme spiegavano solo alcune cose.

La questione che nessuno poteva prevedere è che a quanto pare la mia interpretazione dal punto di vista fenomenologico funziona tuttora ancora benissimo. Ci sono traiettorie che interpolano benissimo molti dati sperimentali.

***Quindi una certa interpretazione non è stata completamente abbandonata?***

No, non è stata abbandonata. Infatti, ci sono molti ricercatori che mi hanno confessato che attualmente per quanto concerne il *fitting* di sezioni d'urto ad altissima energia, le uniche cose che sembrano funzionare ancora, sono i miei poli e le *ampiezze di Veneziano*. Alla fine la natura è giustiziera, chissà chi potrà prevedere cosa andrà bene e cosa non andrà bene un domani.

***Non pensa che negli anni settanta si siano fatte delle scelte teoriche strategiche per andare verso una teoria più fondamentale a scapito della teoria della matrice S, che di fatto non aveva prodotto previsioni in contraddizione con i dati sperimentali?***

Sì, da un certo lato mi dispiace perché anche nell'ambito del programma della matrice S si tentava di andare a fondo e non di fare semplice fenomenologia. E' anche vero però che l'unico giudizio complessivo che si può dare su questi poli, è che sono molto utili fenomenologicamente. Ma non forniscono una immagine della realtà che c'è dietro; questo purtroppo non lo si può dire. Prendere un'ampiezza d'urto a una data energia, poi svilupparla in onde parziale e quindi vedere una serie di proprietà e correlazioni, non significa spiegare cosa c'è dietro. Capire la teoria fondamentale che è alla base, è un'altra cosa.

***Ma i sostenitori del programma di Chew in qualche modo si fermavano proprio a quel livello di realtà. Sembrava che per loro effettivamente era tutto lì: nei poli e in quant'altro emergeva da un certo formalismo, basti pensare all'idea introdotta da Chew di "democrazia nucleare".***

Io non ho mai trattato di democrazia nucleare, e di alcune interpretazioni diciamo un po' filosofiche della teoria della matrice S. Allora ero più che altro interessato a fare della matematica e poi mi è andata bene così, non posso certo protestare. Certamente la visione di Chew aveva un senso. Probabilmente quell'interpretazione riprendeva nozioni di teoria dei campi in una maniera un po' semplificata. Io non dico che sia stato tutto sbagliato, però si è

fermata lì. Se una certa interpretazione non ha una funzione maieutica e permette quindi di scoprire connessioni con dei risultati ottenuti per altre vie, dopo un po' diventa insostenibile.

Anche lo stesso Heisenberg, per esempio, ad un certo punto della sua vita ha fatto le scelte sbagliate; ha tirato fuori la sua teoria unitaria che poi è colata a picco. Io assistei a un durissimo attacco di Lee proprio contro Heisenberg alla conferenza di Rochester nel 1960. Insomma Heisenberg aveva fatto la sua parte, ma la fisica pone problemi che una sola persona forse non è in grado di affrontare. Li incontrò perfino Einstein.

***La teoria della matrice  $S$  ha portato storicamente alle teorie duali e quindi alla teoria delle stringhe, forse in questi risultati rivive in qualche modo?***

Sì, ma al di là di questo, probabilmente se qualcuno si mettesse ora a lavorarci sopra, con qualche ingrediente in più si potrebbero ottenere dei nuovi risultati, forse migliori. In ogni caso il valore di certe idee va contestualizzato storicamente: nel 1953 quando Chew fece una serie di lezioni a Les Houches era ascoltativissimo e sicuramente in quegli anni fu uno dei personaggi chiave nella fisica teorica del tempo.

### 2.3.3 Intervista a Daniele Amati

*Qual è stato il suo contributo teorico alla teoria della matrice S negli anni sessanta?*

Il mio contributo è stato un lavoro che ha avuto un notevole impatto. Fu il frutto di una collaborazione con Fubini e Stanghellini<sup>17</sup> nel 1962 (5).

La matrice S se vuole è da un punto di vista teorico quasi come un'ammissione di ignoranza. Esistono delle proprietà generali che la caratterizzano, come la simmetria di crossing, l'analiticità, ecc. Vista come una funzione analitica la matrice S deve avere delle singolarità, i *poli*, che rappresentano stati legati (particelle), e tagli continui tra due stati legati. Questi poli possono trovarsi sia nel canale  $s$ , un polo formato, oppure nel canale  $t$ , un polo scambiato. Quindi la domanda che ci si poneva allora era se fosse possibile determinare la matrice S dalla conoscenza dei soli poli. La risposta era no, se un polo nel canale  $s$  non era anche un polo nel canale  $t$ , ma era qualcosa che nel canale  $t$  aveva una sua particolare forma. Successivamente però fu sviluppata l'idea che i poli scambiati non erano effettivamente particelle, ma erano poli di Regge e allora c'è stato un modo per proporre la matrice S in una forma più coerente. Ciò è avvenuto alla fine degli anni 1950. L'idea era che quando veniva scambiata una particella in un canale questa era interpretata come un polo di Regge; cioè, aveva una certa forma che era leggermente diversa da quella di una particella scambiata.

*Era un assioma dire che tutti i poli della matrice S fossero poli di Regge?*

Sì, era un assioma. Noi che eravamo però un po' vivaci, nel senso che volevamo capire da dove potevano venir fuori questi particolari poli, avevamo sviluppato una teoria, il *modello multiperiferico*, nella quale facevamo vedere che una certa dinamica di un processo li generava. Nella nostra interpretazione i poli di Regge non erano introdotti in una forma assiomatica ma venivano generati da una particolare dinamica. Questi poli apparivano nella descrizione di una *diffusione elastica*. Ma una diffusione elastica poteva essere anche correlata, come un'*ombra*, a una diffusione di tipo *anelastico*. Cioè, se c'era uno scattering anelastico, ce ne doveva essere anche uno elastico. Con Fubini e Stanghellini avevamo quindi

---

<sup>17</sup> D. Amati, A. Stanghellini, S. Fubini, *Theory of High-Energy Scattering and Multiple Production*, "Il Nuovo Cimento", Dicembre 1962, Vol. XXVI, N.5.

formulato una teoria dell'*anelastico* la cui ombra aveva proprio la forma dei poli di Regge. Noi abbiamo capito qual era il modello anelastico che dava a livello elastico i poli di Regge.

Questa ha dato luogo a polemiche. Inizialmente era stata anche vista male. Nell'interpretazione precedente non doveva esistere per forza una dinamica per giustificare i poli di Regge, che erano al contrario introdotti come un assioma. Invece poi fu accettata. Per cui in questa interpretazione i poli di Regge erano equivalenti a uno scambio non di una particella elementare ma di uno stato legato. Avevamo capito che in una situazione dinamica le particelle sono stati legati, cioè non si comportano esattamente come una particella: lo scambio di uno stato legato portava proprio a un polo di Regge. Questo risultato fu più o meno accettato dopo una serie di polemiche durate vari anni.

Una matrice  $S$  che venisse dalla teoria dei campi in realtà non era facilmente utilizzabile nell'ambito delle interazioni forti, perché faceva uso di *tecniche perturbative*. Quindi il nostro lavoro fu un modo per introdurre dentro la teoria dei campi delle proprietà che non erano perturbative. Infatti, in un certo senso uno stato legato non era interpretato come un concetto perturbativo. L'importanza di quel modello era anche dovuta al fatto che si tentava per la prima volta di studiare soprattutto processi anelastici. Di fatto avevamo spostato l'attenzione della ricerca, perché fino ad allora quando si discuteva della teoria dello scattering si parlava quasi sempre di scattering elastico, che era più semplice da studiare; invece lo studio di una dinamica che unificasse le cose ci permetteva di andare a guardare anche le caratteristiche anelastiche di un processo, quindi le particelle che venivano prodotte, quante se ne producevano e così via. In qualche modo questa dinamica collegava le varie caratteristiche della matrice  $S$ .

Dunque i poli di Regge erano interpretati come stati legati scambiati. Ma si era anche capito che non era possibile scambiare solo stati legati in entrambi i canali  $s$  e  $t$ , perché scambiare due stati legati in un canale era equivalente a scambiare un taglio nel canale incrociato. In qualche modo il tentativo di risoluzione di questo problema generò alla fine degli anni 1960 il modello di Veneziano per le interazioni forti, che fu un nuovo *boom* della teoria della matrice  $S$ . L'idea di Gabriele Veneziano era che la matrice  $S$  assumesse una speciale forma matematica chiusa in cui delle ampiezze perfettamente *duali* avevano solo poli di Regge nel canale  $s$  e solo poli di Regge nel canale  $t$ .

### ***Qual era la sua posizione negli anni sessanta rispetto alle idee di Chew?***

Chew era un “religioso”, nel senso che sosteneva le sue visioni teoriche quasi come se fosse una religione<sup>18</sup>. Infatti mi ricordo che quando presentammo il lavoro di cui abbiamo parlato (5), nel quale venivano fuori oltre ai poli anche dei *tagli*, fu rifiutato da “Physics Letters”. Chew era ovviamente a noi ostile. Lui sosteneva che poiché i poli di Regge sono frutto di una visione teorica, non poteva esistere alcun modello che ci forzasse ad avere anche dei tagli. Invece dal nostro punto di vista la validità di quel modello che dava dei poli doveva essere tale anche nel momento in cui il modello stesso prevedeva l’esistenza di tagli.

In generale Chew era contrario a qualsiasi modello che derivasse dalla teoria dei campi e che potesse in qualche modo fornire spiegazioni, perché per lui non c’era nulla da spiegare. La teoria dei campi era considerata qualcosa di irrazionale, c’era solo questa assiomatica della matrice S e basta. Questa era la sua posizione dogmatica e di molti fisici degli anni sessanta.

### ***Quindi lui non era isolato in questa sua visione?***

Assolutamente no. Chew era un vero e proprio “papa”. Era importantissimo e fu in ogni caso un personaggio chiave.

***La mia immagine di Chew era quella di un personaggio importante ma che poi per le sue idee radicali si fosse isolato dalla comunità dei fisici del tempo.***

Certo! Ma solo quando la sua religione si dimostrò falsa. Ma nei primi anni Sessanta Chew era il personaggio cruciale. Era quello che stabiliva il dogma da seguire, e molti lo seguivano. Poi “mori” quando si capì che i concetti connessi alla teoria della matrice S erano estremamente utili ma non costituivano un dogma inattaccabile. Chew non ha mai voluto modificare le sue idee, e infatti per questo è scomparso. Quando qualcuno vive completamente per un’idea, se questa idea tramonta, egli scompare insieme a lei.

Inoltre, si scoprì l’esistenza di una struttura ancor più elementare della materia, i *quark*, che erano in netta contraddizione con l’idea di Chew di democrazia nucleare.

---

<sup>18</sup> Anche il noto fisico americano Murray Gell-Mann ricostruendo la storia della matrice S in *Particle Theory: from S-Matrix to Quarks* (in M.G. Doncel, *Symmetries in Physics*) usa il termine “Chuvian religion” per descrivere l’approccio dogmatico di Chew alla teoria della matrice S.

La teoria della matrice S è morta a causa delle esperienze che hanno mostrato come non tutto è descrivibile in termini di scambi di stati legati, ma che esistono delle componenti fondamentali. In realtà è morta una certa idea della matrice S: quella di una teoria della matrice S completamente assiomatica, per così dire; cioè, di una teoria che potesse spiegare tutto in termini di particelle e non di come sono fatte le particelle. Invece le esperienze che hanno confermato la presenza di strutture puntiformi al loro interno, i quark, hanno riportato l'attenzione alla teoria dei campi.

***Fritjof Capra alla fine degli anni settanta su “American Journal of Physics”<sup>19</sup> ha scritto un articolo dal titolo: Quark physics without quarks: A review of recent developments in S-matrix theory (33), in cui sosteneva che i quark potevano essere interpretati e giustificati anche all'interno del framework della matrice S. Che ne pensa di questa idea?***

In realtà tutto può essere fatto, ma la vera novità della filosofia del *bootstrap* degli anni sessanta era che non doveva esistere il concetto di *elementarietà*. L'idea era che da qualsiasi parte si tirasse il bandolo di una matassa, questa si sarebbe svolta completamente, e in un certo senso la matassa era sempre la stessa. Invece con i quark, che avevano uno *status* differente rispetto a tutte le altre particelle, questo non poteva accadere.

E' vero anche che se si pensasse ai nucleoni o ai pioni come particelle fondamentali, ci si potrebbe chiedere il perché dell'esistenza anche dei quark, che non sono così naturali da concepire, perché hanno una struttura puntiforme che li rende unici. Ma questo porterebbe poi ad arrampicare sugli specchi per risolvere tutta un'altra serie di problemi teorici.

L'aspetto attraente della teoria della matrice S consisteva proprio nel rifiutare qualsiasi idea di *fondamentalismo*, per cui non penso che abbia molto senso cercare di mettere insieme una visione del tipo matrice S con quella della struttura a quark.

Certamente qualcuno potrebbe anche dimenticarsi dell'esistenza delle molecole per esempio, e sviluppare quindi delle teorie strane che descrivano direttamente un livello di realtà successivo, come potrebbe essere quello della vita organica; ma sicuramente quando si parla di molecole un certo tipo di descrizione dei fenomeni diventa molto più semplice. Così quando parliamo di quark diventa tutto molto più chiaro.

---

<sup>19</sup> F. Capra, *Quark physics without quarks: A review of recent developments in S-matrix theory*, “American Journal Physics”, (1979) 47 (1), p. 11-23.

***Ma il fatto di introdurre i quark per semplificare dei calcoli all'interno di una teoria può giustificare il loro status ontologico di particelle puntiformi?***

L'introduzione dei quark ha prodotto un notevole miglioramento teorico, inoltre ha semplificato di molto lo studio delle interazioni forti. Poi i quark sono interpretati come puntiformi solo a un certo livello. Oggi capiamo anche che possono esistere diversi livelli: per esempio nella teoria delle stringhe non c'è nulla di fondamentale.

La fisica atomica, per esempio, ci permette una descrizione della materia in funzione degli atomi e va benissimo così, fino a quando non andiamo a guardare con una lente di ingrandimento dentro l'atomo. Il modello a quark è un modello che funziona benissimo. Il modello standard, che è una teoria di campo, anche. In questo contesto teorico possono essere calcolate con grande accuratezza delle correzioni relative che poi si sono osservate sperimentalmente. Questi numeri che si possono calcolare grazie al modello standard non sono calcolabili nell'ambito della teoria della matrice S. Quindi il fatto di introdurre i quark non è stato il frutto di un'operazione fantasiosa ma è un modello che è stato confermato dalle esperienze.

***Nel 1961 al Congresso Solvay, a cui Lei era presente, Chew presentò le sue idee: furono veramente così rivoluzionarie? La comunità come le assorbì?***

Sì, le idee di Chew ebbero un notevole impatto. Certamente c'era anche qualcuno che non le accettava, ma erano tutti teorici che venivano dalla teoria dei campi. La teoria dei campi aveva avuto molto successo con l'elettrodinamica quantistica (*QED*), ma per le interazioni forti era fallita. Finché non vennero fuori i quark, la teoria dei campi era di fatto fallimentare. Proprio per questo si pensò alla teoria della matrice S; cioè, una teoria molto coerente con cui si doveva poter ricavare tutto. Ma questo si rivelò altrettanto falso e quindi a poco a poco sparì.

Il fatto che nell'ambito della teoria della matrice S non ci fosse nulla di fondamentale, come i quark, voleva dire che tutto era in un certo senso "molle", cioè i fattori di forma e altre grandezze della teoria dovevano decrescere come un esponenziale, invece questo non si rivelò vero, anzi il tutto andava giù come una potenza. Fu questo che uccise la teoria della matrice S.

*“Le aspettative dei sostenitori del bootstrap si rivelarono esagerate, il che non impedì a questo atteggiamento autoconsistente di dare utili indicazioni fenomenologiche; in generale la convinzione di possedere una teoria di base (la QCD) ha distolto l’interesse dall’analisi dei dettagli di molti fenomeni adronici, considerati in principio comprensibili, ma difficilmente calcolabili data la complessità della QCD per fenomeni non dominati dalle piccole distanze. Se si volessero analizzare questi fenomeni (che, pur non riflettendo direttamente l’interazione fondamentale, rappresentano il grosso dei dati nelle collisioni ad alte energie) la teoria della matrice S sarebbe ancora lo strumento più valido”.*

***Questo è un Suo giudizio della fine degli anni settanta, tratto dall’Enciclopedia delle Scienze della Treccani (34). E’ ancora attuale?***

Sicuramente. Ma in ogni caso attualmente non importa più a nessuno seguire certe strade. Il 99,9 per cento dei risultati sperimentali ottenuti al CERN non sono nemmeno registrati in banda magnetica. Di solito si producono una marea di particelle, si potrebbe andare a osservare le *correlazioni secondarie*, ma ormai non interessano più molto questo tipo di ricerche.

E’ un po’ come accade per la chimica. Per esempio, c’è molta chimica dietro la “cottura di un pollo”, però è una chimica che non è rilevante e nessuno pensa di andarla a studiare. Quando si bolle un pollo si potrebbe osservare quanto grasso viene sciolto o chissà quante altre cose, ma non appare così rilevante. Certamente se uno volesse capire alcune correlazioni nell’ambito della fisica delle alte energie, potrebbe usare ancora certe tecniche.

La matrice S c’era anche prima degli anni sessanta e poi c’è ancora, c’è sempre stata. In qualche modo ciò che si è superato è la religiosità che gli attribuiva Chew.

Il fatto poi di aver introdotto i quark non cambia nulla per esempio della fisica atomica, che conserva la sua formalizzazione nella quale gli atomi possono essere visti come elementari. E’ irrilevante per la fisica atomica se all’interno degli atomi ci siano neutroni e protoni o che i nuclei abbiano una determinata struttura.

***Quindi ogni livello di realtà conserva una descrizione teorica adatta per quel livello? Per cui una visione riduzionista è sbagliata?***

In un certo senso sì. Se si vuole studiare la fisica atomica, deve essere usato un formalismo adatto alla fisica atomica. Se si vogliono studiare le interazioni forti si devono

usare le formalizzazioni che sono buone per quel livello di realtà. A livello molecolare o in generale nell'ambito della biologia si studiano fenomeni che certo non fanno uso di formalismi che appartengono a livelli più fondamentali. Se qualcuno studia le molecole, non gli importa se esistono o meno i protoni. Devono essere usati gli strumenti necessari per capire le molecole.

***Si può dire che la storia dei programmi della matrice S è la storia di una rivoluzione mancata?***

Sì, una rivoluzione mancata che però è stata anche molto utile. Il punto è che gli si è voluta dare una profondità infinita, ma al di sotto non vi era niente. Questo è stato uno sbaglio epistemologico prima di tutto, a mio avviso. Per quanto attraenti le idee di Chew, comunque rimanevano all'interno di una visione quasi religiosa: erano attraenti proprio come molte posizioni religiose e fondamentaliste. E Chew era il papa di questo fondamentalismo.

La teoria della matrice S in ogni caso rimane uno strumento molto utile per la descrizione di alcuni fenomeni e in qualche modo è resuscitata nella teoria delle stringhe, che nasceva proprio in quell'ambito teorico. Infatti la teoria delle stringhe nacque come una teoria di prima quantizzazione ed era una teoria di matrice S, al di fuori della teoria dei campi.

***All'Università della California nel 1964 era nato un movimento radicale studentesco, lo "Free Speech Movement" (35, p. 232), sullo sfondo di una generale reazione del mondo delle università al periodo maccartista degli anni cinquanta in America: è vero che le idee di Chew avevano anche una valenza politica, come sostiene lo storico David Kaiser (35, pag.240), perché erano il riflesso di un particolare clima culturale venutosi a creare a Berkeley?***

***Si può dare allora una certa interpretazione sociologica alle scelte di fondo della ricerca in quegli anni? E in particolare della visione teorica di Chew?***

Non credo molto a certe interpretazioni sociologiche finalizzate a spiegare i risultati ottenuti dalla fisica. Infatti, a parte Chew, la maggior parte dei fisici furono effettivamente attratti da una specifica linea di ricerca, ma solo per pochi anni, e ciò in ogni caso avviene ogni qual volta viene fuori una teoria fondamentale. Quindi il fatto di collegare queste ricerche a una ideologia mi sembra abbastanza eccessivo. Che ci fosse in quegli anni anche

una qualche posizione ideologica, che poteva essere importante in altri ambiti, sicuramente è vero.

Magari alle volte alcune ideologie vengono sfruttate nell'ambito di certe visioni teoriche; per esempio attualmente si discute molto sul senso dell'Universo e sul principio antropico. Tutto può risultare utile. A un certo punto si possono prendere anche determinate posizioni, ma non credo che alla lunga queste abbiano ripercussioni grosse sulla fisica.

***Anche in Italia la teoria della matrice S era la teoria di punta più studiata in quegli anni?***

Sicuramente, ma come nel resto del mondo. Allora era un po' come oggi: cioè, esistevano dei filoni di ricerca più seguiti rispetto ad altri. Attualmente si studia per esempio la teoria delle stringhe, oppure si fa fenomenologia supersimmetrica. Il mondo della ricerca è molto omogeneo, forse più di quanto fosse prima. Un tempo probabilmente era possibile che dei gruppi mantenessero una certa indipendenza.

La teoria della matrice S riguardava solo le interazioni forti, mentre molti fisici studiavano anche le interazioni deboli, per le quali si usavano altri approcci. Molte ricerche erano completamente ortogonali a quelle che trattavano la matrice S. C'erano poi scienziati di elevatissima classe in tutti e due campi, tipo Gell-Mann, un personaggio chiave della fisica di quegli anni, ma non un ideologo come Chew.

***Gell-Mann sosteneva che prima degli anni sessanta ci si poteva confrontare con Chew, dopo no?***

Sì, è vero. Chew cavalcò un unico cavallo, ma in quegli anni si acquisirono notevoli risultati che rilanciavano la teoria dei campi: era venuta fuori la simmetria  $SU(3)$  e tante altri studi sulle interazioni deboli. Gell-Mann invece mantenne le gambe su più cavalli, e quando quello della matrice S andò fuori strada, lui continuò sull'altro, mentre Chew scomparve dal panorama della ricerca.

***Ma oltre a Chew, non era anche Landau che sosteneva che la teoria dei campi doveva essere rivista se non addirittura abbandonata?***

Landau era un “campista”, che però non visse in pieno quel periodo. In realtà lui aveva trovato che la teoria perturbativa dei campi era inconsistente. Infatti aveva evidenziato l’esistenza di poli nelle ampiezze di scattering che portavano appunto il suo nome: i *poli di Landau*. Ma quello che a lui mancava veramente era l’idea di una teoria di campo asintoticamente libera. Oggi, la diversità fondamentale, rispetto ad allora, sta nel fatto che la teoria di campo del modello standard è asintoticamente libera, cioè ha un “buon comportamento” nell’*ultravioletto*. Mentre Landau si era reso conto di un cattivo andamento della teoria nell’ultravioletto, e aveva sostenuto che qualche cosa doveva cambiare. E in effetti qual cosa è cambiato.

***Quindi Landau pose un problema teorico che è stato poi risolto?***

Sì, ma in un modo completamente fortuito. Cioè la *QCD* (*Quantum Chromo Dynamics*) non è una teoria fondamentale, ma è una sottoparte del modello standard che cessa di essere valida nell’ultravioletto. Per questi valori dell’energie la teoria cambia e diventa asintoticamente libera. Quindi in un certo senso la QCD fornisce una visione teorica corretta nell’*infrarosso*, cioè per masse piccole, e in quell’intervallo di energie il modello standard restituisce la QCD. Per cui si può parlare di una descrizione teorica all’interno della QCD fino a un certo punto, ma poi la teoria diventa altro.

Quindi l’intuizione di Landau era molto giusta in quanto mancava effettivamente qualcosa di fondamentale.

D’altro canto però le teorie asintoticamente libere hanno un *cattivo* comportamento nell’infrarosso. Infatti nell’infrarosso non *vediamo* il “colore” e non vediamo i quark. Non sperimentiamo in pratica il modello standard, ma osserviamo solo stati legati. In effetti la visione teorica più adatta per descrivere l’infrarosso sarebbe più vicina a una descrizione del tipo matrice S piuttosto che al modello standard.

Guardando nell’infrarosso, vedere qual è la vera teoria di campo risulta una cosa molto difficile, perché il colore è schermato e si vedono solo stati legati, che sono “bianchi”, cioè neutri come colore. Quindi la teoria della matrice S non è in assoluto sbagliata ma fornisce una certa visione teorica, così come anche la QCD. Ciò che non è accettabile, è avere posizioni religiose in materia.

E' un po' come descrivere le molecole: è possibile sviluppare teorie che ne descrivano il comportamento, ma è anche vero che se le si osserva più da vicino, ci si accorge che sono fatte di atomi e così via. Quindi quando si scopre che c'è una realtà più fondamentale, non significa che ciò che c'è sopra deve morire. Ogni descrizione è funzionale al livello con cui si studiano le cose. Ci possono essere buone teorie, ma differenti per ogni livello.

***Quindi la storia della scienza è fatta anche da conflitti tra teorie che il tempo dovrebbe appianare restituendoci delle visioni unitarie?***

Io non immagino che si giunga a un'unica visione, piuttosto penso che esista una struttura a scatole cinesi di cui di volta in volta se ne comprendono i limiti. Poi si va oltre fino alla successiva frontiera e così via. Fino ad ora non esistono risultati geniali che permettono di capire fino in fondo tutto. Ciò nonostante *questa cipolla* dà sempre cose più fondamentali, ma questa è anche una speranza, potrebbe non essere così. L'importante è non sostenere a priori che esiste per forza un'unica visione unitaria in cui tutto deve andare in un certo modo.

***Fino a che punto l'osservazione e quindi l'esperimento è rilevante alla giustificazione di una certa visione teorica? Oppure accade il contrario, e cioè che l'esperimento abbia un senso interpretativo e predittivo solo all'interno di una determinata teoria?***

***E' possibile allora che la teoria della matrice  $S$  si stia abbandonata alla fine degli anni sessanta anche per ragioni non strettamente connesse con precise conferme o "smentite" sperimentali?***

Una certa visione teorica è fondamentale per poter sviluppare una qualsiasi azione di critica verso un determinato risultato: infatti, chi è che giudica se una ricerca è buona o cattiva? Le persone che accettano di comune accordo una certo quadro teorico. In ogni caso è importante anche come si osserva la realtà. La Natura ha un numero infinito di parametri, quello che si va a osservare è solo una piccola parte, proprio perché inizialmente è rilevante una nostra immagine di partenza della realtà. La visione teorica fa sempre parte dell'osservazione. Si sperimenta solo sulle cose che si ritengono rilevanti all'interno di un quadro teorico, per cui penso che non esista la realtà come qualcosa che sta lì sempre e in assoluto.

***Quindi il metodo è fondamentale.***

Assolutamente sì, l'osservazione umana è fondamentale: si va a guardare solo quello che si reputa importante e si tralascia tutto il resto. Se si pretende di vedere tutto, probabilmente non si riesce a osservare nulla. Si osservano soltanto quegli aspetti della Natura che sono rilevanti a un proprio progetto, a un programma o a una certa visione: è stato sempre così. L'importante è che questa nostra visione sia scientifica, anche nel caso in cui a un certo punto essa assuma una qualche caratteristica, per così dire, etica o estetica.

***Se si volesse incanalare la teoria della matrice  $S$ , in base ai suoi fondamenti, in un filone storico della fisica alternativo a quello della teoria dei campi, quali "predecessori" storici si dovrebbero considerare?***

Sicuramente l'approccio della termodinamica è quello che più si avvicina in senso storico ai fondamenti della teoria della matrice  $S$ , se proprio si vuole trovare un suo antecedente nella storia della scienza.

### 2.3.4 Le ampiezze duali e l'intervista a Gabriele Veneziano

I poli di Regge rappresentavano in un certo senso una dinamica *complessa* e quindi un contributo nel *continuo*, oltre a quello polare. Ma probabilmente non erano sufficienti a esaurire le singolarità della matrice S imposte dall'unitarietà (34, pag.649). Era possibile che dovessero esistere anche dei *tagli* nelle ampiezze di diffusione, cioè dei contributi singolari continui a partire da particolari soglie anelastiche.

Nonostante negli anni sessanta l'indicazione fenomenologica che i tagli non potessero essere trascurati, il maggior successo della matrice S fu proprio l'uso consistente della *polologia*, ossia dello studio del solo contributo di risonanze e stati legati, tanto che fu proposto alla fine di quegli anni che contributi *non risonanti* potevano essere descritti in media da risonanze. Questa idea chiamata *dualità* (tra risonanze e continuo), fu all'inizio una proposta fenomenologica, che diede però origine a un ricco sviluppo teorico, noto come *teorie duali*, e successivamente alla teoria delle stringhe.

Lo sviluppo ebbe inizio da una forma esplicita per un'ampiezza elastica con soli poli, proposta da Veneziano nel 1968 (8). Essa doveva descrivere delle *traiettorie di Regge lineari*, ossia del tipo  $\alpha(s) = \alpha_0 + \alpha' s$  (dove  $s$  è una variabile di Mandelstam): era possibile dimostrare che questa condizione implicava che vi fossero un numero infinito di poli (particelle) per masse pari a  $M_n^2 = (n - \alpha_0) / \alpha'$  con  $n = 0, 1, 2, \dots$

L'espressione dell'ampiezza descritta da Veneziano era:

$$T(s, t, u) = g^2 [B(\alpha(s), \alpha(t)) + B(\alpha(t), \alpha(u)) + B(\alpha(s), \alpha(u))],$$

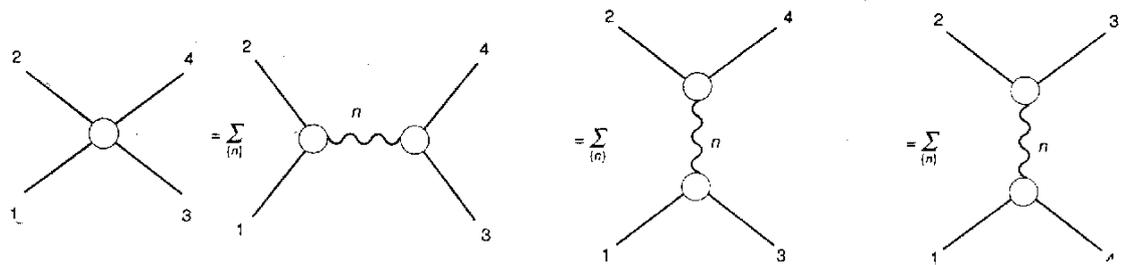
$$\text{con } B(s, t) = \frac{\Gamma(\alpha(s))\Gamma(\alpha(t))}{\Gamma(\alpha(s) + \alpha(t))};$$

dove  $\Gamma$  è la funzione fattoriale (o *gamma di Eulero*).

La funzione  $B(s, t)$  aveva poli per valori interi ( $n \geq 0$ ) di una delle sue due variabili, con residui che erano polinomi di grado  $n$  nell'altra variabile. Quindi per esempio un polo per  $s = M_n^2 = (n - \alpha_0) / \alpha'$  aveva un *residuo polinomiale* in  $\alpha(t)$  e  $\alpha(u)$ . Perciò a causa della linearità delle traiettorie, i residui erano polinomi di grado  $n$  in  $t$  e  $u$ , e cioè polinomi di grado

$n$  (per come erano definite  $t$  e  $u$ ) di grado  $n$  in  $(\cos \square)$ . Questi potevano essere decomposti in *polinomi di Legendre* (con  $l \square n$ ) che andavano a indicare una serie risonante con momento angolare  $l = 0, 1, \dots, n$ .

Questo era il primo esempio di una ampiezza perfettamente duale, nel senso che essa poteva essere considerata come una somma (infinita) di soli poli in una qualsiasi delle sue variabili, ossia di sole risonanze in uno qualsiasi dei tre processi descritti dall'ampiezza, come rappresentato nella figura seguente (figura 3), già mostrata nel primo capitolo.



**Figura 3:** Rappresentazione di un'ampiezza di Veneziano.

## Intervista a Gabriele Veneziano

*Nel Suo famoso articolo del 1968 (8) Lei introduceva per la prima volta il concetto di ampiezze duali : qual è la storia di quella ricerca e del suo contesto teorico? Che prospettive aprì?*

La storia è abbastanza lunga: quel lavoro è nato nel contesto della teoria della matrice  $S$  ed è stato il coronamento di circa un anno di attività che si è svolta all'Istituto Weizmann in Israele e in collaborazione con Marco Ademollo che era ad Harvard. In quel periodo avevamo studiato certe proprietà della matrice  $S$  che derivavano da alcune ipotesi: una era che la teoria di Regge dovesse descrivere l'andamento ad alte energie della matrice  $S$  e l'altra era la proprietà di dualità. Mettendo insieme la dualità e l'andamento asintotico alle alte energie, secondo la teoria di Regge, eravamo giunti a dei risultati che realizzavano un meccanismo di

bootstrap. Usando questo approccio avevamo poi ottenuto dei dati di certe risonanze, e in particolare di alcuni mesoni.

Da questi studi era emersa una struttura abbastanza semplice come soluzione approssimata del bootstrap. Se vogliamo il mio lavoro è stato un po' un coronamento di una serie di ricerche, nel senso che questa soluzione approssimata è diventata una soluzione esatta.

### ***Perché era considerata inizialmente approssimata?***

Perché alcune equazioni le si riusciva a risolvere solo con un certo grado di precisione. Per quanto avevamo già capito che il livello di precisione aumentava se si tenevano conto anche di termini *subdominanti* ad alta energia, cioè se per esempio si aggiungevano altre risonanze ecc.

Forse il motivo ultimo per cui la soluzione era solo approssimata, è che non imponevamo la *simmetria di crossing*, e questo è stato l'ingrediente in più, decisivo, per arrivare a una forma chiusa ed esatta, che in un certo senso era perfetta.

### ***Come si è arrivati a definire quel tipo di ampiezze?***

Se si studiava la parte immaginaria dell'ampiezza di scattering, considerando gli elementi della matrice  $S$  come entità complesse, si osservava che quella parte aveva una forma piuttosto semplice: si trattava quindi di capire qual era il numero complesso la cui parte immaginaria aveva quelle proprietà e che al tempo stesso verificasse la simmetria di crossing. Se vogliamo quello è stato il passo decisivo per arrivare alla *funzione beta*. Viceversa, dalla funzione beta, se si prendeva solo la parte immaginaria e nel limite di grandi energie, si riottenevano i risultati precedenti.

C'è stato un piccolo salto logico nel cercare di concentrarsi non sulla parte immaginaria della matrice  $S$  ma sull'intera matrice, vista come una matrice di numeri complessi. Una volta imposta poi la simmetria di crossing e avendo l'andamento ad alte energie dettato dalla teoria di Regge, se vogliamo, la dualità e tutte le proprietà di bootstrap diventavano automatiche.

Per un po' di tempo si sospettava che ci dovesse essere qualche soluzione semplice però, solo a posteriori qualcuno può dire che non era difficile trovarla; in realtà il cammino non è stato così facile.

### ***Dal punto di vista fisico cosa significava quell'espressione che avevate trovato?***

Lì per lì era giusto una soluzione matematica di un problema ben definito che imponeva esattamente certe proprietà della matrice  $S$ , pur trascurandone delle altre. Per esempio, la matrice  $S$  doveva essere *unitaria*, invece questa proprietà non era soddisfatta dal modello nella sua versione originale. Quindi rappresentava una soluzione ancora non perfetta per tutti i postulati della matrice  $S$ . Successivamente quando la formula è stata generalizzata, si è capito pian piano cosa c'era al di sotto del formalismo matematico e come migliorare e correggere quell'espressione per soddisfare l'unitarietà. Un paio di anni dopo si è capito anche che la matrice  $S$  descriveva la *condizione di stringa*.

### ***Quest'ultimo passaggio come è avvenuto?***

E' avvenuto in vari passi. Il primo passo è stato quello di capire quale fosse lo *spettro della teoria*, cioè qual era l'interpretazione giusta dei livelli energetici definiti da questa matrice  $S$ . Infatti, la sua struttura evidenziava l'esistenza di determinati livelli energetici, e quindi di particolari *autovalori* e *autostati* dell'energia. Però finché non c'è stato un lavoro scritto da me e da Sergio Fubini (10), e poi in parallelo anche da Mandelstam, non si era capito che questi livelli erano altamente *degeneri*, cioè che esistevano molti stati in corrispondenza di ogni energia.

Quindi in seguito nel descrivere questa moltitudine di stati, Nambu da una parte e Fubini, Gordon e io (36) dall'altra abbiamo descritto gli stati in termini di oscillatori armonici, di infiniti oscillatori armonici. A questo punto sia Nambu che Susskind hanno cominciato a subodorare che c'era dietro una struttura tipo *corda vibrante*, perché appunto una corda vibrante avendo una *armonica principale* e poi delle *armoniche superiori*, si può vedere proprio come un insieme di oscillatori armonici. Inizialmente questa interpretazione era solo descritta in un senso intuitivo, dopodiché principalmente Nambu e poi anche Goto in Giappone, indipendentemente, sono partiti da zero postulando il concetto di stringa ed hanno dimostrato effettivamente quelle che erano delle semplici intuizioni.

***Quindi Nambu e altri riportarono in un certo senso quelle ampiezze nell'ambito di una interpretazione interna alla teoria dei campi?***

Non era proprio una teoria di campo. Fino a quel momento era ancora un approccio di matrice  $S$ ; cioè, fino a che non è stata poi formulata una *teoria di stringa*, l'approccio era di pura matrice  $S$ . In un secondo momento il tutto si è interpretato in termini di stringhe e allora la formulazione somigliava un po' di più a quella di una teoria dei campi. Ma non era veramente una teoria dei campi.

Infatti, ciò che caratterizza le stringhe rispetto a una teoria dei campi tradizionale, è che risulta difficile descrivere ciò che è al di fuori di un contesto, che si definisce di *mass shell*, mentre in teoria dei campi si può sempre parlare di processi che coinvolgono particelle virtuali. Per il momento invece, nella teoria delle stringhe, ancora si è obbligati a pensare ad ampiezze *on shell*, cioè, che descrivono solo particelle reali, le quali costituiscono gli stati iniziali e finali di un certo processo fisico.

***Quindi la teoria attuale delle stringhe è di quanto più vicino c'è alle interpretazioni date dalla teoria della matrice  $S$ , cioè come di una teoria che descrive solo particelle "reali"?***

Sì, cioè anche con la riformulazione in termini di stringhe in qualche modo la teoria ha mantenuto la sua origine di matrice  $S$ . Non ha tradito le sue origini, sebbene poi negli anni ottanta e novanta c'è stato un tentativo di costruire una teoria dei campi di stringa (*string field theory*), la quale ha dato certi risultati, ma per ora non è uno strumento completamente valido, quanto quello più tradizionale di un approccio tipo matrice  $S$ .

Può darsi che un giorno si arrivi a capire tutto in termini di una teoria di campo, però dove i campi sono funzionali di una stringa, che è qualcosa in più. Ma per il momento non ci siamo ancora.

***Qual era l'atmosfera della fisica teorica di quegli anni, c'era effettivamente una rivalità tra i sostenitori della teoria della matrice  $S$  e quelli della teoria dei campi?***

Sì, c'era una certa rivalità. Forse alla fine degli anni Sessanta sembrava aver avuto il sopravvento la teoria della matrice  $S$ , perché la teoria dei campi da un lato sembrava avere problemi con le interazioni deboli, nel cercare di elevare la *teoria di Fermi* a livello di una

teoria dei campi *rinormalizzabile*, e dall'altro lato per le interazioni forti era nel buio più totale. Infatti allora era quasi inconcepibile costruire una teoria di campo che comprendesse un campo per ciascuna particella che interagiva *fortemente*, anche perché in quel periodo se ne scoprivano quasi una ogni mese. Poi c'erano da interpretare delle risonanze, o anche le ricorrenze di Regge con *spin* molto elevato. Era difficile quindi pensare a una teoria dei campi che contenesse per esempio campi di spin tipo  $11/2$ : per quanto anche ora non si saprebbe come fare!

Naturalmente è possibile dire a posteriori che sono stati risolti molti dei problemi di allora, per esempio con l'idea del *confinamento*, la teoria dei campi la si costruisce in termini di quark e non in termini di pioni, mesoni e stati a spin elevati. Tutte queste particelle sono ora viste come stati legati di particelle più elementari su cui si basa la teoria dei campi.

Ma a quei tempi in cui quest'idea del confinamento era molto lontana, sembrava che non ci fosse alternativa a un approccio di matrice S, che quindi era la teoria in auge. Per quanto è anche vero che i *modelli duali*, che così si chiamavano prima di diventare una teoria delle stringhe, erano visti con un certo sospetto. Avevamo un po' di difficoltà a farli accettare perché per i *campisti* questi modelli erano considerati troppo vicini a un approccio del tipo matrice S, però dall'altra parte, per gli affezionati della matrice S erano modelli un po' strani. Chew per esempio voleva costruire un bootstrap che facesse ancora meno ipotesi. Quindi questi modelli non furono accettati subito. Forse sono stati compresi veramente solo quando sono stati interpretati proprio in termini di una teoria di stringhe. Fin quando si parlava invece solo di una matrice S che aveva certi requisiti molti non erano per niente convinti.

***E' vero che in Europa c'era una maggiore tendenza a sviluppare la teoria dei campi, cioè una scelta teorica in qualche modo più conservativa, mentre in America vi era una apertura maggiore verso un approccio completamente alternativo?***

Anche nella stessa fisica teorica americana c'erano questi due campi un po' in concorrenza. Si tendeva a dire che c'era la *costa Est* che era più *campista* e la *costa Ovest* che era più vicina all'approccio della matrice S. Questo ovviamente è vero in parte, per esempio una persona come Weinberg, credo che si sia formato in una scuola di matrice S ma poi ha fatto lavori in teoria dei campi con molto successo. Non so se c'era una vera differenza qualitativa da quel punto di vista. Io del resto essendo stato un po' paracadutato in quel contesto americano e venendo da Israele dove avevo lavorato alla fine degli anni sessanta, forse non ho avvertito bene il polso di ciò che succedeva in Europa. Sicuramente c'era la

scuola di Amati, Fubini e Stanghellini per la matrice  $S$ , ma c'era anche nell'ambito della teoria dei campi, per esempio la scuola di Cabibbo. Le ricerche che univano un po' i due campi erano quelle relative all'*algebra delle correnti*. Lo studio di queste correnti faceva un po' da ponte tra le due cose. Tra l'altro è stata la ricerca sull'algebra delle correnti che poi ha dato luogo ai lavori di Fubini sulla *superconvergenza* e che a sua volta ha generato i programmi di bootstrap e dei modelli duali di cui ho parlato.

### ***In che consisteva questa idea di superconvergenza?***

Il concetto di superconvergenza era una idea che ebbe Fubini: se una certa ampiezza di scattering andava a zero molto rapidamente all'aumentare dell'energia allora doveva valere una certa relazione detta appunto di superconvergenza, cioè un certo vincolo che si doveva imporre sempre sulla parte immaginaria dell'ampiezza per garantire che l'ampiezza di scattering andasse effettivamente a zero rapidamente. Questo per esempio si dimostrava essere il caso di teorie alla Regge, ma non solo. Perché questo tipo di descrizione si applicava anche a certe ampiezze che anziché andare a zero con le potenze tipiche di Regge, andavano con qualche potenza in meno dell'energia ed erano più sopresse a causa di certi numeri quantici. Per tutte queste particolari ampiezze valeva una regola di somma di superconvergenza. Tutto ciò costituiva già una specie di bootstrap.

Se vogliamo il bootstrap che abbiamo sviluppato nei nostri lavori è un po' una generalizzazione di questa superconvergenza. Per queste ampiezze che venivano sopresse ad alta energia si poteva costruire una regola di somma che portava a sua volta a delle relazioni interpretabili come un bootstrap, quindi come un sistema di relazioni *autoconsistenti*.

Le cose in seguito sono cambiate radicalmente quando da un lato si impose l'idea dei quark e dall'altro, con le *teorie di gauge* e con la *QCD* si raggiunsero notevoli risultati. Tutto ciò a fatto pendere l'ago della bilancia nuovamente verso le teorie dei campi.

### ***Il fatto di aver abbandonato la teoria della matrice $S$ in favore della teoria dei campi è dovuto realmente a qualche esperimento cruciale?***

Il problema è sostanzialmente questo: sia la teoria dei campi che la teoria della matrice  $S$  hanno in un certo senso lo stesso scopo e cioè quello di calcolare la matrice  $S$ , che poi rappresenta proprio ciò che è possibile misurare. Questa in fin dei conti era l'idea di Heisenberg, cioè che ci si doveva dedicare solo alle cose che si potevano "osservare".

La differenza è che nella teoria dei campi si arriva a costruire la matrice S con certe regole, date dai diagrammi di Feynman ecc., mentre nella teoria della matrice S si cerca di arrivare alla matrice S per altre vie e cioè mediante un procedimento in qualche modo *autoreferenziale*. Ora la matrice S che veniva fuori per esempio dalle stringhe, usata per descrivere le interazioni forti, era diversa dalla matrice S che veniva fuori dalla *cromodinamica quantistica* attraverso la teoria dei campi, ed effettivamente i dati sperimentali hanno favorito la cromodinamica quantistica.

***Ma non erano livelli di energia indagati diversi, quello della cromodinamica e quello della matrice S?***

In un certo senso sì, però la matrice S, quella dei modelli duali e delle stringhe doveva essere valida in principio anche alle alte energie, anzi era una teoria di alte energie: basti pensare all'uso dei poli di Regge per esempio.

E' però anche vero che la cromodinamica faceva previsioni solo ad alte energie, ma se si prendevano i dati ad alte energie o a grandi momenti trasferiti, si vedeva una notevole differenza tra le previsioni delle due teorie. In particolare i modelli di matrice S nati dalle stringhe davano una forte soppressione di eventi con grandi impulsi trasferiti, mentre i dati mostravano un andamento molto meno drastico. Insomma i dati mostravano che c'erano delle strutture puntiformi dentro i protoni e i neutroni, cosa che non era prevista nella teoria delle stringhe, almeno in quella tradizionale. Quindi direi che la teoria della matrice S è stata abbandonata per motivi di confronto con i risultati sperimentali.

Un altro grosso problema della matrice S (costruita nell'ambito di una visione di stringa) è che in questa descrizione emergeva l'esistenza di una particella di massa nulla e *spin* 1 e un'altra di massa nulla e *spin* 2, che non esistevano nel mondo delle particelle *adroniche*, ed era molto difficile sbarazzarsi di questi oggetti. Invece nella nuova interpretazione<sup>20</sup> ciò era un pregio, ma nell'ambito delle interazioni forti questo era un grosso difetto.

Quindi, è vero che non è stato facile abbandonare questa strada, perché c'erano un sacco di dati, però si è dovuto ammettere che c'erano delle difficoltà insormontabili probabilmente.

---

<sup>20</sup> Il riferimento di Veneziano è alla teoria delle stringhe in un'ottica più moderna, in cui si considera la teoria non più come modello esclusivo per le interazioni forti ma come una teoria unificata per tutte le interazioni, e quindi anche come un candidato per descrivere la *gravità quantistica*, i *gravitoni* e altre particelle che non siano solo gli *adroni*.

***Forse molti problemi allora insormontabili potevano essere risolti investendo nuove risorse in certe direzioni piuttosto che in altre; così come sono state risolte parte delle difficoltà della teoria dei campi. E' possibile quindi dare anche una interpretazione sociologica alle scelte di una buona parte della comunità dei fisici dell'epoca?***

E' difficile dirlo, ma penso che a posteriori si capisce meglio un po' tutto. Non credo che ci siano state grosse pressioni. Penso che il corso della fisica ha preso un altro cammino dovuto a nuovi risultati che hanno sbloccato la situazione in teoria dei campi, che hanno portato al *modello standard*, il quale funziona molto bene. Per cui non è possibile dire a posteriori che è stato un errore non continuare a fare matrice S.

Anch'io nel 1974 mi sono reso conto che era meglio studiare la cromodinamica quantistica: non lo rimpiango e per dire la verità nessuno mi ha forzato. Bisogna però anche dare atto a due o tre persone, in particolare a Green e Schwartz che hanno continuato coraggiosamente a lavorare sulle stringhe e sono arrivati a una forma di *gravità quantistica*. In ogni caso, secondo il mio punto di vista, loro hanno sempre pensato di usare questa teoria per qualche altra cosa: chi veramente voleva capire le interazioni forti sarebbe stato un po' ingenuo a continuare a fare stringhe. Sicuramente qualcuno avrà pensato anche che queste teorie, essendo così belle, dovevano pur servire a qualcosa, e quindi hanno continuato.

Ora si comprende che le stringhe sono state scoperte cercando di studiare le interazioni forti, le quali, se sono effettivamente ben descritte dalla cromodinamica quantistica, hanno delle strutture tipo stringhe a causa del confinamento. Quindi non è un caso che partendo da certi dati sperimentali sulle interazioni forti si è arrivato a una teoria di stringhe. Il problema è che per questa strada si è arrivati non alla teoria di stringa giusta, ma a una teoria che ha particelle a massa nulla e ha un andamento molto "soffice".

A posteriori sappiamo anche che esiste una teoria di stringhe che soggiace alla cromodinamica quantistica, però le cose non sono così semplici perché questa teoria *effettiva* o *efficace*, come si usa dire, descrive delle stringhe che hanno uno spessore finito, una bella sezione trasversa, mentre le stringhe scoperte negli anni settanta erano degli oggetti matematici molto semplici, elementari.

***Questo come si concilia con il fatto che i quark sono puntiformi?***

Perché i quark sono collegati tra loro da un *tubo di flusso di campo cromoelettrico*, il quale ha in modo naturale uno spessore, una dimensione diciamo. Nella cromodinamica

quantistica c'è una scala di lunghezza fondamentale che va messa a mano nella teoria, che è dell'ordine del *fermi*: questo dà anche le dimensioni di questi tubi di flusso. Se si vuole, tutto ciò è dovuto anche al principio di indeterminazione della meccanica quantistica.

***Quindi è il principio di Heisenberg che permette questa descrizione in termini di stringhe all'interno della cromodinamica?***

Sì, ma si tratta sempre di *stringhe efficaci (effettive)*, che diventano sempre più simili a una stringa matematica, quella descritta dalla teoria di Nambu e Goto, solo se si fa il limite in cui le si considera *molto lunghe*, per cui si può trascurare la dimensione trasversa rispetto a quella longitudinale.

Gli stati *leggeri* a massa nulla descrivono invece stringhe molto corte, dove effettivamente fa molta differenza se si hanno oggetti veramente *unidimensionali* o meno. Viceversa per grandi numeri di occupazione, cioè per *stati eccitati*, si dovrebbe ritrovare una certa corrispondenza e infatti le traiettorie di Regge di stati di alto spin, per esempio, sono interpolate bene dalla stringa che conosciamo, perché probabilmente sono stati dove la dimensione trasversa della stringa è importante.

In generale si può dire che il settore a massa nulla non è quello giusto per la fisica adronica, magari è quello giusto per la gravità e per le altre interazioni.

***Lei ha conosciuto Chew? Che ne pensava della sua visione teorica?***

Sì, io l'ho conosciuto. Chew non ha mai veramente abbandonato le sue idee, anche se a un certo punto lui ha molto apprezzato ciò che veniva dalla teoria delle stringhe. Ha cercato di inserire nel suo programma di bootstrap le idee che venivano dalla teoria delle stringhe, in particolare un certo uso della topologia, per cui invece di organizzare i diagrammi di Feynman secondo il numero di *loop*, si potevano organizzare in base alla loro topologia, per esempio *planare* o non *planare*<sup>21</sup>. Chew aveva assimilato alcune delle idee che si trovavano in vari lavori di Rosenzweig (37). Ma anche questo suo nuovo programma andò un po' spegnendosi.

Inizialmente Chew voleva ricavare in un certo senso il "tutto" dal "nulla" e forse il suo programma era troppo ambizioso. Credo che a un certo punto si fosse reso conto di ciò, per

---

<sup>21</sup> Veneziano: "Pensando ai diagrammi di Feynman, il concetto di *planarità* è chiaro, nel senso che i diagrammi, con i vertici e tutte le strutture che li caratterizzano, possono essere disegnati su un foglio piatto di carta senza salti, come un *network* di strade senza ponti, con degli incroci, ma il tutto si trova sempre su una superficie piana, senza tunnel o ponti, che porterebbero invece a diagrammi non planari. Un network dove le strade sarebbero le particelle e dove gli incroci sarebbero gli accoppiamenti tra particelle".

cui tentò quantomeno di usare alcuni concetti topologici per descrivere in una certa approssimazione la matrice  $S$ . L'idea era di cercare di risolvere il bootstrap in questa approssimazione, che era detta *planare*, e poi in un secondo momento considerare delle piccole correzioni dovute alla *non planarità*. In quanto, nell'approssimazione planare ci sono per esempio solo poli di Regge e tagli di Regge, e c'è una certa semplificazione. Questo incentivò Chew e altri verso un nuovo sforzo teorico in questa direzione, che però come ho detto, si esaurì presto.

## 2.4 Conclusioni

Dal panorama teorico delineato da Cini, Regge, Amati e Veneziano emerge tutta la complessità e l'importanza che negli anni sessanta ebbe la teoria della matrice  $S$ .

Cini ci ha mostrato come la tecnica delle relazioni di dispersione pur essendo stata elaborata già alla fine degli anni venti, fu poi parzialmente abbandonata. Più di venti anni dopo fu ripresa e ritenuta fondamentale all'interno del programma di Chew. Il giudizio sostanziale che Cini attribuisce a questa fase transitoria è che la comunità dei fisici negli anni venti era molto differente per formazione e cultura da quella emergente negli anni sessanta; per cui la prima non intravide (se non per il breve tentativo di Heisenberg) la possibilità di sviluppare una teoria realmente fondamentale e alternativa alla teoria dei campi.

La critica storico-sociologica fornita da Cini è fondata sull'idea che l'affermazione del nuovo paradigma, i cui padri fondatori erano stati principalmente Goldberger e Chew, fosse radicata in un nuovo modello di realtà sociale e culturale che si andava imponendo agli inizi degli anni sessanta e che ebbe delle forti ripercussioni anche sullo sviluppo della ricerca scientifica.

Cini sottolinea nella sua intervista che l'approccio pragmatico del gruppo americano di Berkeley attribuì uno status epistemologico di "teoria" a qualcosa che in realtà non lo era, perché la teoria dispersiva forniva solo una descrizione fenomenologica dei processi di scattering ad alta energia.

L'operazione di *assiomatizzazione* tentata da Chew nel descrivere sostanzialmente un approccio teorico di tipo fenomenologico si rivelò fallimentare. Questo è il secondo punto centrale che emerge dal contributo di Amati. L'atteggiamento quasi religioso del fisico americano produsse una radicalizzazione che evidenziò le debolezze della teoria della matrice  $S$  più che fornire argomentazioni in suo favore. Dal punto di vista epistemologico però Amati

ha evidenziato come l'approccio della teoria della matrice S non era in assoluto errato (vivendo tra l'altro nella teoria delle stringhe). Ma la sua utilità era legata principalmente alla sola descrizione di un certo livello di realtà e quindi di energie. L'interpretazione fondamentale fornita invece dalla *QCD* permetteva di raggiungere un grado di profondità maggiore, elaborando una descrizione elementaristica delle interazioni forti in termini di una teoria di campo, che risultava fortemente predittiva e in ottimo accordo con i dati sperimentali.

Un altro aspetto importante, secondo Amati, consiste nel fatto che la *validazione* di una teoria e la sua accettazione da parte della comunità di scienziati è spesso legata ai principi metodologici che ne sono il fondamento, mediante i quali è possibile pensare agli esperimenti che possano confermare la teoria stessa.

Anche Regge ha sottolineato che l'aspetto metodologico è essenziale nella costruzione di una teoria. In realtà risulta fondamentale decidere all'interno di un programma di ricerca scientifica ciò che si va a osservare della Natura e come lo si osserva. Spesso sfugge al singolo scienziato nella pratica quotidiana della sua attività, la consapevolezza di essere inevitabilmente all'interno di un quadro concettuale (quello che Kuhn definiva paradigma) che comunque ha anche una valenza metafisica. In forme leggermente diverse sia Regge che Amati ripropongono le idee del filosofo Hanson sulla *teoreticità dell'osservazione* (che abbiamo trattato nel nono paragrafo del primo capitolo).

Infine il contributo di Veneziano ci ha permesso di collegare concettualmente la fine del programma di Chew all'emergere della teoria delle stringhe. In un certo senso questo passaggio esprime una forma di convergenza tra approcci in precedenza considerati antitetici. Infatti la teoria delle stringhe che nasceva attraverso i modelli duali di Fubini e Veneziano all'interno del riferimento concettuale della teoria della matrice S, propone un modello di realtà che vorrebbe interpretare in una forma ancora più fondamentale rispetto ai quark gli elementi ultimi con cui costruire la materia e lo spaziotempo.

## Bibliografia al secondo capitolo:

- 1) M. Cini – *The Response Characteristics of Linear Systems* - J. Appl. Phys. 1950 (21), p. 8-10.
- 2) R. Krönig – *On the theory of dispersion of X-rays* - Journal Amer. Op. Soc. 1926 (12), p. 547-57.
- 3) H.A. Kramers – *La diffusion de la lumière par les atomes* – Atti del Congresso Internazionale di Fisica, Como 1927 (2), p. 545-57.
- 4) V. de Alfaro – *Fisica all'Università di Torino 1720-1980* – in C.S. Roero, *La facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali dell'Università di Torino, 1848-1980*, vol. 1, Torino 1999.
- 5) D. Amati, S. Fubini, A. Stanghellini – *Theory of high-energy scattering and multiple production* – Il Nuovo Cimento 1962 (26), p. 896-954.
- 6) A. Bottino, A. M. Longoni, T. Regge – *Potential Scattering for Complex Energy and Angular Momentum* - Il Nuovo Cimento 1961 (23), p. 954.
- 7) V. de Alfaro, E. Predazzi, C. Rossetti – *Analyticity in the Angular Momentum in the Potential Scattering* - Il Nuovo Cimento 1962 (31), p. 42.
- 8) G. Veneziano - *Construction of a Crossing-Symmetric, Regge-Behaved Amplitude for Linearly Rising Trajectories* – Il Nuovo Cimento, 1968 (57 A), pag. 191.
- 9) M.A. Virasoro – *Alternative constructions of crossing-symmetric amplitudes with Regge behavior* – Physical Review 1969 (177), p. 2309-11.
- 10) S. Fubini, G. Veneziano – *Level Structure of Dual-Resonance Models* – Il Nuovo Cimento, 1969 (64 A), pag. 811.
- 11) S. Fubini, G. Veneziano – *Duality in Operator Formalism* – Il Nuovo Cimento, 1970 (67 A), pag. 29.
- 12) A. Garuccio, M. Leone - *La fisica teorica tra Milano e Pavia (1945- 1965)* in G. Giuliani, *Per una storia della fisica italiana 1945-1965 (I)*, a cura di Giuseppe Giuliani – La Goliardica Pavese, Pavia maggio 2002.
- 13) G. M. Prospero – *On the analytic continuation of the S-matrix in angular momentum* – Il Nuovo Cimento 1962 (26), pag. 543.
- 14) G. M. Prospero – *On the uniqueness of the analytic continuation of the S-matrix in angular momentum* – Il Nuovo Cimento, 1962 (24), pag. 957.

- 15) D. Amati, E. Leader, B. Vitale - *Theory of Low Energy Nucleon-Nucleon Scattering I* - Il Nuovo Cimento, 1960 (27), pag. 2276.
- 16) M. Cini, S. Fubini - *General Properties of the fixed Source Meson Theory* - Il Nuovo Cimento 1955 (2), p. 860.
- 17) J. T. Cushing - *Theory construction and selection in modern physics: The S matrix* - Cambridge University Press, Cambridge 1990.
- 18) N.G. Van Kampen - *S-Matrix and Causality Condition. I. Maxwell Field* - Phys. Rev. 1953 (89), p.1072.
- 19) N.G. Van Kampen - *S-Matrix and Causality Condition. II. Non relativistic Particles* - Phys. Rev. 1953 (91), p.1267.
- 20) R. Krönig - *A supplementary condition in Heisenberg's theory of elementary particles* - Physica 1946 (12), p. 543.
- 21) M. Gell-Mann and M.L. Goldberger - *The formal theory of scattering* - Physical Review, 1953 (91), p. 398-408.
- 22) M. Gell-Mann, M. L. Goldberger, W. Thirring - *Use of Causality conditions in quantum theory* - Phys. Rev. 1954 (95), p. 1612-27.
- 23) R. Stoops (ed.) - *The Quantum Theory of Fields* - Proceedings of the Twelfth Solvay Conference on Physics - New York, Interscience Publishers, 1961.
- 24) B. Ferretti (ed.) - Prec. Int. Conf. on High Energy Physics at CERN, Genève 1958.
- 25) G.F. Chew, F. Low - *Effective-range approach to the low-energy p-wave pion-nucleon interaction* - Phys. Rev. 1956 (101), p. 1570-9.
- 26) M. Cini, S. Fubini - *General Properties of the Fixed Source Meson Theory* - Prec. Int. Conf. on High Energy Accelerators and Pion Physics, Genève 1956 p. 111.
- 27) A. Bohr - *Foundation of Dispersion Relations* - in B. Ferretti (ed.) - Prec. Int. Conf. on High Energy Physics at CERN, Genève 1958, p. 213.
- 28) T. Regge - *Introduction to complex orbital momenta* - Il Nuovo Cimento 1959 (14), p. 951-76.
- 29) R. Jost - *Bemerkungen zu der Vorstehenden Arbeit* - Physica - 1946 (12), p. 509-10.
- 30) R. Jost - *Über die fachen Nullstellen der Eigenwerte der S-Matrix* - Helvetica Physica Acta, 1947 (20), p. 77-82.
- 31) T. Regge - *Analytic properties of the scattering matrix* - Il Nuovo Cimento 1958 a (8), p. 671-9.
- 32) T. Regge - *On the analytic behaviour of the eigenvalue of the S-matrix in the complex plane of the energy* - Il Nuovo Cimento 1958 b (9), p. 295-302.

- 33) F. Capra - *Quark physics without quarks: A review of recent developments in S-matrix theory* - American Journal Physics 1979 (47) (1), p. 11-23.
- 34) D. Amati - *Matrice S* - Enciclopedia delle Scienze Fisiche - Treccani, Roma - 7 - p. 645-650.
- 35) D. Kaiser - *Nuclear Democracy: Political Engagement, Pedagogical Reform, and Particle Physics in Postwar America* - The History of Science Society 2002 (93), p. 229-268.
- 36) S. Fubini, D. Gordon, G. Veneziano - *A general treatment of factorization in dual-resonance models* - Physical Review 1969 (29 B), pag. 679-82.
- 37) C. Rosenzweig, G. Veneziano - *Regge couplings and intercepts from the planar dual bootstrap* - Physics Letters 1974 (52 B), p. 335-40.