

Ritorno a Chicago: Enrico Fermi e la nascita della fisica delle alte energie nel secondo dopoguerra (1946-1954)

Giulio Maltese¹

Introduzione: Fermi e gli “anni Cinquanta”

Nella storia della fisica delle particelle, non molto dopo la fine della Seconda Guerra Mondiale cominciò un periodo al quale ci si può genericamente riferire come agli “anni Cinquanta”. Durò dal 1947 al 1963, e attraverso di esso “la fisica delle particelle elementari divenne adulta e passò attraverso ai trionfi e ai dolori della sua adolescenza. Cominciato con la scoperta dei pioni carichi nei raggi cosmici, il periodo finì con la consapevolezza che i costituenti fondamentali degli adroni sono i quarks. Questi anni videro l’affermazione della teoria quantistica dei campi nell’elettrodinamica quantistica (QED) rinormalizzata, solo per vederla rigettata come schema teorico per le interazioni forti e deboli. Videro anche il concetto di simmetria emergere come caratteristica fondamentale della fisica, per assistere poi alla sua caduta nella rivoluzione della parità. I ricercatori scoprirono particelle così diverse da ogni altra particella allora nota da coniare per esse l’appellativo “strane” trovando poi proprietà inaspettate nel comportamento di interazioni note da tempo. Gli anni Cinquanta furono un periodo di scompiglio intellettuale, dove nella fisica teorica cambiarono mode e atteggiamenti.”²

Enrico Fermi fu uno dei personaggi principali della prima metà di questo periodo. Dei quasi sedici anni che trascorse negli Stati Uniti dalla fuga dall’Europa nel dicembre 1938 fino alla sua morte prematura nel 1954, le sue imprese scientifiche più note sono la realizzazione della prima reazione a catena (2 dicembre 1942) e il test della prima bomba atomica (16 luglio 1945), avvenute rispettivamente presso il Metallurgical Laboratory di Chicago e nel deserto di Alamogordo, vicino al laboratorio di Los Alamos, nel New Mexico. Nella seconda impresa Fermi fu uno dei membri più importanti del più incredibile gruppo di fisici mai radunato in tutta la storia della scienza. Questi eventi hanno segnato in maniera indelebile non solo la fisica, ma anche le relazioni tra i Paesi e le sorti dell’umanità nella seconda metà del Novecento. Questa è forse la ragione per cui le imprese di Fermi negli anni del dopoguerra, pur se confrontabili con quelle appena menzionate, sono di quelle molto meno note.

Fermi “fisico americano” non finisce dunque col lampo di Alamogordo. Esiste un Fermi più “nascosto,” che sul finire del 1945 da Los Alamos torna a Chicago e lì diviene in breve tempo uno dei membri più influenti della più grande e potente comunità scientifica del mondo. Nel periodo 1946-1954 Fermi influenzò cospicuamente la nascita e la rapida crescita della fisica delle alte energie. Fu un’influenza manifestatasi sotto diversi aspetti, che vanno dal ruolo di Fermi come didatta e fondatore della “Scuola di Chicago,” da cui uscirono molti importanti

¹ Gruppo di Storia della Fisica del Dipartimento di Fisica, Università “La Sapienza,” Roma. Questo lavoro è tratto dalla relazione su invito presentata al XXI Congresso Nazionale di Storia della Fisica e dell’Astronomia, a cura della Società Italiana degli storici della Fisica e dell’Astronomia, Cosenza, Università della Calabria, 6-8 giugno 2001. La ricerca è stata compiuta col parziale supporto dell’Ambasciata Italiana negli Stati Uniti, che qui desidero ringraziare. Ringrazio altresì la direzione e il personale del Department of Special Collections della University of Chicago Library per avermi assistito nella ricerca che ho compiuto sull’Archivio Fermi tra la primavera e l’estate 2001. Nel lavoro verranno usate le seguenti abbreviazioni: *EFP*, Enrico Fermi Papers, Department of Special Collections, University of Chicago Library; *AA*, Archivio Amaldi, Dipartimento di Fisica, Università “La Sapienza,” Roma; *FNM*, *Enrico Fermi, Note e Memorie*, Accademia Nazionale dei Lincei e University of Chicago Press, Roma e Chicago, 1965; *PR*, *Physical Review*; *PQ*, *Pions to Quarks: Particle Physics in the 1950s*, a cura di L. M. Brown, M. Dresden, L. Hoddeson, Cambridge University Press, Cambridge, 1989.

² L. M. Brown, M. Dresden, L. Hoddeson, “Pions to quarks: particle physics in the 1950s,” in: *PQ*, p. 3.

scienziati, a contributi decisivi alla teoria, come l'interpretazione dell'esperimento di Conversi, Pancini e Piccioni o l'ardita ipotesi, formulata nel 1949 assieme a Yang, della natura composta dei pioni. Membro influente della comunità dei fisici, Fermi fu presidente della Società Americana di Fisica nel 1953. Nel periodo 1947-1950 fu membro del General Advisory Committee (GAC) dell'Atomic Energy Commission (AEC). In queste e altre funzioni Fermi fu un forte e convinto sostenitore dello sviluppo della fisica delle alte energie, e spinse costantemente verso la realizzazione di acceleratori di particelle e calcolatori elettronici, che considerava entrambi come gli strumenti più naturali e necessari dei fisici delle particelle. Come fisico sperimentale, servendosi del sincrociclotrone di Chicago da 450 MeV, Fermi condusse col suo gruppo un'indagine importantissima, che terminò con la scoperta della prima risonanza pione-nucleone (la cosiddetta "3-3") e contribuì a riportare il concetto di isospin e, più in generale, il concetto di simmetria, al centro dell'attenzione nello studio delle interazioni forti.

Fermi nutriva notevole interesse verso tutti gli aspetti della fisica delle particelle elementari o "fondamentali," come preferiva denominarle. Insegnò fisica a una generazione di giovani scienziati, molti dei quali hanno avuto un ruolo fondamentale nella rivoluzione che ha segnato le sorti della fisica degli ultimi cinquant'anni. Prese attivamente parte al dibattito sull'apparente inadeguatezza della teoria di fronte al crescente numero di nuovi e sorprendenti fatti che gli esperimenti portavano continuamente alla luce all'inizio degli "anni Cinquanta." In quei tempi di confusione la sua visione pragmatica della fisica teorica fu particolarmente utile per lo stato in cui allora la disciplina versava. I suoi ultimi studenti a Chicago conobbero soprattutto "questo" Fermi. È di questo Fermi che mi propongo di tratteggiare un profilo.

1 - "Non è mai tardi per andar più oltre, non è mai tardi per tentar l'ignoto"

Nel 1945, a 44 anni, e alla vigilia della partenza da Los Alamos, Fermi è il più grande fisico dei neutroni del mondo. Domina la materia a tal punto da considerare i neutroni, come scrive nel testo di una conferenza, "un po' i suoi parenti."³ Eppure, all'apice della sua fama come fisico dei neutroni e "oracolo" del laboratorio di Los Alamos, Fermi decide di cambiare l'argomento della sua ricerca e di avventurarsi nel nascente settore della "fisica nucleare delle alte energie," come si diceva allora, che avrebbe dato origine alla moderna fisica delle particelle elementari. Nel fare ciò Fermi dà luogo a un cambiamento paragonabile a quello che, nel 1932, aveva compiuto col passaggio alla fisica nucleare, giudicando la fisica atomica oramai "matura." Tutti conosciamo i risultati di quel cambiamento, anticipato in una lettera di Fermi del settembre 1932 al suo amico e discepolo Segrè: "programmi di lavoro per l'anno venturo non ne ho affatto [e] non so nemmeno se tornerò a camera di Wilsoneggiare, oppure se diventerò di nuovo teorico [...] Certo, il problema di attrezzare l'Istituto a lavorare sui nuclei si fa sempre più urgente, se non vogliamo ridurci troppo in uno stato di dormiveglia intellettuale."⁴ Nel suo *Enrico Fermi, fisico*, Segrè racconta che Fermi usava ripetere un verso di D'Annunzio, qui riportato come titolo del paragrafo, per giustificare un cambiamento di attività come quello che aveva in mente: "Nel frattempo si poteva continuare a fare fisica nucleare fino a che non fossero pronti gli strumenti per attaccare le particelle elementari, ma prima o poi il trapasso si imponeva se si voleva restare all'avanguardia della fisica. Intanto bisognava cominciare a prepararsi studiando lo studiabile e apprestando gli strumenti necessari per il futuro lavoro. Fermi, Allison ed io parlavamo di tutte

³ E. Fermi, "Conferenze di Fisica Atomica," *FNM*, vol. 2, lavoro n. 240, p. 756.

⁴ E. Fermi a E. Segrè, 30 settembre 1932, *EFF*, box 11.

queste cose scendendo le scoscese pareti del Cañon de Frijoles e poi camminando lungo il fiume verso il Rio Grande in uno strano ed esotico panorama di rovine indiane, rocce dai colori vivissimi, cactus e *piñones*.⁵

Per la verità, Fermi pensava da tempo alla fisica nucleare delle alte energie. Fin dal 1944, mentre partecipava ad Hanford alla messa in opera del primo reattore per la produzione di plutonio, Fermi aveva comunicato a Leona Marshall di avere l'intenzione di costruire un betatrone una volta finita la guerra. Se alla fine un betatrone non si rivelò la macchina più adatta per la ricerca che Fermi aveva in mente, il suo scopo era tuttavia chiaro: voleva dedicarsi alla fisica delle particelle, "per scoprire tutto ciò che c'era da sapere sulle forze nucleari."⁶

Fermi lasciò Los Alamos con la famiglia il 31 dicembre 1945. Egli era stato nominato "Charles H. Swift Distinguished Service Professor of Physics" presso l'Institute for Nuclear Studies dell'Università di Chicago. Tuttavia, come ha scritto Leona Marshall, "alla fine della guerra, i fisici che tornarono all'Università di Chicago per dar vita all'Institute for Nuclear Studies si trovarono di fronte a un dipartimento di fisica con nudi scaffali."⁷ L'edificio dell'Istituto non c'era ancora, come Fermi scrisse a Segrè nel giugno 1946: "Durante l'inverno e la primavera ho praticamente lavorato sempre alle Argonne e mi aspetto che continueremo allo stesso modo finché non avremo un inizio di un edificio nostro, probabilmente intorno a un anno da adesso;"⁸ di fronte a un tale stato di cose "era ragionevole [...] che ci rivolgessimo all'eccellente reattore ad acqua pesante che si trovava presso il laboratorio delle Argonne, col suo elevato flusso di neutroni termici, per investigare aspetti che avevamo dovuto lasciare da parte nel perseguire gli obiettivi dei piani dei tempi di guerra."⁹ Insieme a Leona Marshall e ad altri collaboratori, nel 1946-1947 Fermi si dedicò alla fisica dei neutroni, dando importanti contributi allo studio della diffrazione neutronica da parte di sostanze cristalline e investigando l'esistenza d'una interazione neutrone-elettrone.¹⁰

L'attività sperimentale alle Argonne cominciò a diminuire allorché Fermi divenne sempre più preso dalla sua attività di insegnamento e, come lui stesso ebbe in seguito a dire, di "studente" della nuova fisica teorica.

2 - La "Scuola di Chicago"

Nella sua lettera a Segrè del 24 giugno 1946, Fermi menzionava anche la sua attività di insegnante: "ho tenuto un corso ufficiale e anche un po' di insegnamento non ufficiale a un piccolo gruppo di studenti."¹¹ La sua era in realtà una sottostima. Segrè, infatti, racconta che "presto si sparse la voce che Fermi stava formando una nuova scuola e una straordinaria costellazione di studenti si raccolse a Chicago."¹² Le parole di Segrè descrivono bene cosa accadde: molti studenti straordinari giunsero a Chicago, ansiosi di imparare la fisica da Fermi. E Fermi, come indicato dalla Tabella 1, tenne non meno di ventitré corsi tra il 1946 e il 1953. Come il suo studente Chen Ning Yang ebbe poi a ricordare, "le lezioni di Fermi erano estremamente lucide. Per ogni argomento aveva l'abitudine di cominciare sempre dall'inizio, faceva esempi semplici ed evitava per quanto possibile i "formalismi" (usava ripetere per scherzo che il formalismo complicato era per "gli alti prelati"). La semplicità dei suoi

⁵ E. Segrè, *Enrico Fermi, fisico*, Zanichelli, Bologna, 1987, p. 170.

⁶ L. Marshall Libby, *The Uranium People*, Charles Scribner's sons, New York, 1979, p. 108.

⁷ L. Marshall, introduzione ai lavori nn. 227-231, 234 e 235, *FNM*, vol. 2, p. 578.

⁸ E. Fermi a E. Segrè, 24 giugno 1946, *EFP*, box 11.

⁹ L. Marshall, introduzione ai lavori nn. 227-231, 234 e 235, *FNM*, vol. 2, p. 578.

¹⁰ Si veda *FNM*, vol. 2, lavori nn. 226-231 e 234-235.

¹¹ E. Fermi a E. Segrè, 24 giugno 1946, *EFP*, box 11.

¹² E. Segrè, *Enrico Fermi*, cit., p. 171.

ragionamenti creava l'impressione di una totale mancanza di sforzo. Ma questa impressione era falsa: la semplicità era il risultato di un'accurata preparazione e di una ponderata valutazione delle possibili diverse alternative di esposizione.¹³

Fermi creò una specie di "dottorato in fisica del tardo pomeriggio," ancora descritto da Yang: "Era abitudine di Fermi riservare a un piccolo gruppo di studenti lezioni informali una o due volte la settimana. Il gruppo si riuniva nel suo studio e lo stesso Fermi o qualcuno degli studenti proponeva un argomento. Fermi allora cercava nei suoi quaderni di appunti, tutti corredati da indici accurati, per trovare le sue note sull'argomento e quindi passava all'esposizione." Ho ancora gli appunti di queste lezioni serali del periodo ottobre 1946 – luglio 1947. Esse coprivano in quest'ordine i seguenti argomenti: teoria della struttura interna e dell'evoluzione delle stelle, struttura delle nane bianche, idea di Gamow-Schönberg sulle supernovae (raffreddamento neutrinico dovuto a cattura elettronica da parte dei nuclei), geometria riemanniana, relatività generale e cosmologia, modello di Thomas-Fermi dell'atomo, stato della materia ad altissima temperatura e densità, fattore 2 di Thomas, scattering di neutroni da parte di orto e para idrogeno, radiazione di sincrotrone, effetto Zeeman, "effetto Johnson" del rumore nei circuiti, condensazione di Bose-Einstein, sistemi moltiplicemente periodici e condizione di quantizzazione di Bohr, teoria di Born-Infeld delle particelle elementari, breve descrizione dei fondamenti della meccanica statistica, rallentamento dei mesoni nella materia, rallentamento dei neutroni nella materia, [...] Il fatto che Fermi avesse tenuto negli anni appunti dettagliati su diversi argomenti in fisica, che andavano dalla fisica teorica pura alla fisica sperimentale, da problemi semplici come le migliori coordinate da usare per il problema dei tre corpi a argomenti profondi come la relatività generale, fu un'importante lezione per noi tutti. Imparammo che quella era la fisica. Imparammo che la fisica non dovrebbe essere solo materia per specialisti; la fisica deve essere costruita dalle fondamenta, mattone dopo mattone, strato dopo strato. Imparammo che l'astrazione viene dopo un dettagliato lavoro fondazionale, non prima.¹⁴

Questo metodo d'insegnamento, che Amaldi definisce "caratteristico e personale" era da Fermi già usato sin dai primi anni di insegnamento in Italia, come lo stesso Amaldi, Persico e Segrè hanno ricordato. In particolare, Segrè, primo studente di Fermi in Italia, ha scritto: "Le sue conferenze erano assolutamente improvvisate e informali. Il pomeriggio ci si trovava all'Istituto e qualche brano di conversazione gli forniva il soggetto delle conferenze. Se chiedevamo per esempio che ci chiarisse il problema della capillarità Fermi improvvisava un meraviglioso discorso sulla matematica applicata alla capillarità [...] altre volte il livello era molto superiore e Fermi ci spiegava l'ultimo articolo letto: così ci familiarizzammo con i famosi articoli di Schrödinger sulla meccanica ondulatoria [...] Il suo insegnamento riguardava quasi essenzialmente la fisica teorica ed egli non faceva differenza tra futuri teorici o futuri sperimentatori. Lui stesso, prima di tutto fisico teorico, si occupava del lavoro sperimentale. Le sue conoscenze e le sue curiosità abbracciavano tutto il campo della fisica, e leggeva coscienziosamente parecchie pubblicazioni. Preferiva i problemi concreti e diffidava delle teorie troppo astratte e generiche, ma qualsiasi problema in ogni ramo della fisica – meccanica classica, spettroscopia, termodinamica, teoria degli stati solidi e altri ancora – lo affascinava ed eccitava la sua ingegnosità ed il suo senso della fisica [...] Un lato curioso del lavoro di Fermi era la lentezza misurata con cui procedeva, anche quando si trattava di cose facili. Un osservatore semplice di spirito avrebbe potuto chiedersi perché perdesse tanto tempo in problemi di algebra elementare, ma tuttavia quando si presentavano difficoltà che avrebbero arrestato una persona meno capace, egli riusciva a risolverle senza mutar ritmo.

¹³ C. N. Yang, introduzione al lavoro n. 239, *FNM*, vol. 2, p. 673.

¹⁴ C. N. Yang, introduzione al lavoro n. 239, *FNM*, vol. 2, pp. 673-674.

Dava l'impressione di un rullo compressore che avanza lentamente ma che non può essere fermato. [...] Scoperto il metodo lo incasellava nella memoria e lo adattava spesso a problemi che sembravano molto diversi da quelli che avevano motivato la sua ricerca.”¹⁵

Molti studenti di Fermi vinsero il premio Nobel per la fisica: C. N. Yang e T. D. Lee (1957), O. Chamberlain (1959), J. Steinberger (1988), J. I. Friedman (1990). In aggiunta a questi nomi dobbiamo menzionare J. W. Cronin (1980), giovane studente all'Institute of Nuclear Physics negli ultimi anni di Fermi e M. Gell-Mann (1969), che tra il 1952 e il 1954 fu uno dei professori più giovani dell'Institute for Nuclear Studies. Occorre infine ricordare Emilio Segrè, il quale condivise il premio Nobel nel 1959 con Chamberlain. I suoi studenti erano ben consapevoli del privilegio di studiare sotto la guida di un cotale insegnante. Tsun Dao Lee ricorda: “Fermi mi dedicò [...] per tre anni, un pomeriggio intero alla settimana, un trattamento davvero straordinario;” secondo Chamberlain “Enrico Fermi era, credo, la persona più intelligente che io abbia mai incontrato. Per molto tempo mi dedicò parecchie ore alla settimana per aiutarmi nella mia ricerca necessaria per conseguire il titolo di Ph.D. Quando avevo qualche difficoltà egli trovava il modo di aggirarla [...] da lui ho imparato che anche i metodi più semplici possono dare risposte alle domande difficili.” Nel 1954, a studi oramai ultimati, così gli scriveva: “ti sono molto grato per il tempo e la fatica che mi hai dedicato in passato. Se sono diventato un fisico decente è soprattutto grazie al tuo insegnamento.”¹⁶ Secondo Steinberger “i corsi di Fermi [...] erano un modello di semplice e trasparente organizzazione dei concetti più importanti. Egli spiegava a quelli di noi che avevano finito i corsi e lavoravano alla tesi di Ph.D. come attaccare una varietà di problemi semplici e generali in differenti campi della fisica radunandoci insieme uno o due pomeriggi a settimana [...] proponendo un problema e poi, magari in seguito, elaborandone la soluzione.”¹⁷ Nelle parole di Friedman troviamo l'atmosfera che si respirava all'Institute for Nuclear Studies: “È difficile dare il senso di eccitazione che pervadeva il Dipartimento a quell'epoca. La brillantezza di Fermi, le sue lezioni stimolanti e di chiarezza cristallina che impartiva in numerosi corsi e seminari, i molti fisici importanti che venivano a trovarlo, le pionieristiche ricerche sullo scattering pione-protoni svolte col nuovo ciclotrone, tutto contribuiva a creare un'atmosfera speciale. Fui davvero fortunato ad essere spettatore del miglior modo di fare fisica in uno stadio così iniziale dei miei studi. Ebbi anche il grande privilegio di avere Fermi come “tutor” e ricordo d'essere stato sopraffatto dalla sensazione della fortuna d'aver avuto l'opportunità di lavorare con un così grande uomo. Fu un'esperienza molto stimolante, che segnò il mio modo di concepire la fisica.”¹⁸

Più ancora d'un insegnante, Fermi era, con le parole di Gell-Mann, “il mesone che teneva insieme l'Istituto.” Al suo funerale, Sam K. Allison, suo amico prima ancora che collega, così parlò: “Siamo qui per onorare la memoria di Enrico Fermi, professore di fisica [...] in questa Università nell'ultimo decennio. Cercherò di esprimere lo stato d'animo dei suoi colleghi dell'Istituto per gli studi nucleari. In

¹⁵ P. de Latil, *Fermi: la vita, le ricerche le testimonianze*, Edizioni Accademia, Milano, 1974, pp. 170-171; si veda anche: E. Segrè, *Autobiografia di un fisico*, Il Mulino, Bologna, 1995, pp. 66-67; E. Amaldi, “Commemorazione del Socio Enrico Fermi;” E. Persico, “Commemorazione di Enrico Fermi;” F. Rasetti, “Enrico Fermi e la Fisica Italiana,” in: C. Bernardini e L. Bonolis (a cura di), *Conoscere Fermi*, Società Italiana di Fisica, Bologna, 2001, p. 27, 39, 50.

¹⁶ O. Chamberlain, discorso tenuto in occasione del conferimento del premio Nobel, The Nobel Foundation, 1960, <http://www.nobel.se.physics>; O. Chamberlain a E. Fermi, 2 febbraio 1954, *EFP*, box 11.

¹⁷ J. Steinberger, “A particular view of particle physics in the fifties,” in: *PQ*, pp. 307-308.

¹⁸ Autobiografia di J. I. Friedman, <http://www.nobel.se.physics>.

realtà questo Istituto è il suo Istituto, perché fu lui la sua massima fonte di stimolo intellettuale. Era Enrico che partecipava a ogni seminario e con incredibile acume metteva alla prova criticamente ogni idea o scoperta nuova. Era Enrico che arrivava per primo al mattino e se ne andava per ultimo la sera, colmando ogni giornata della sua energia mentale e fisica.”¹⁹ Nella Tabella 2 è riportato un elenco di studenti che si trovarono con lui a Chicago. Non è difficile riconoscere nei loro nomi alcuni di coloro che maggiormente hanno contribuito alla rivoluzione della fisica nella seconda metà del Novecento.

Secondo V. L. Telegdi, “si può concepire [...] che qualche altro fisico (o gruppo di fisici) avrebbe potuto raggiungere gli stessi risultati che Fermi raggiunse alla Columbia e a Chicago (incluso la realizzazione della prima reazione a catena), ma pensare che un altro uomo o donna avrebbe potuto avere lo stesso ruolo di Fermi come insegnante (nel più generale senso della parola) sfida i limiti dell’umana immaginazione. Attraverso l’influenza esercitata dai suoi studenti, Fermi rivoluzionò l’insegnamento della fisica negli Stati Uniti e, probabilmente, in tutto il mondo occidentale.”²⁰ Possiamo ben concordare con queste parole; di passaggio, è anche opportuno osservare che tutti i premi Nobel citati sopra vennero conferiti per scoperte riguardanti il campo delle particelle. Ne possiamo ragionevolmente inferire che il primo grande contributo di Fermi alla fisica delle particelle fu la creazione della “Scuola di Chicago.”

3 - Fermi e l'esperimento di Conversi, Pancini e Piccioni

Nel 1934-1935 il fisico giapponese Hideki Yukawa propose una teoria delle forze nucleari nella quale ipotizzava l’esistenza d’una nuova particella (che sarebbe stata chiamata negli anni successivi ora “Yukone” ora “mesotrone”) che giocava il ruolo di quanto del campo della forza nucleare e avrebbe dovuto avere una massa μ pari a circa $200m_e$ (dove m_e è la massa dell’elettrone). Nel 1936-1937 Carl Anderson e Seth Neddermeyer osservarono nei raggi cosmici una specie di “elettrone pesante,” con un valore della massa simile a quello della particella ipotizzata da Yukawa. Nella primavera del 1937 venne per la prima volta avanzata l’ipotesi che la particella osservata da Anderson e Neddermeyer avrebbe potuto essere la particella di Yukawa. Seguì un periodo (1938-1943) durante il quale i fisici cercarono di misurare in modo sempre più accurato le proprietà del mesotrone, come il tempo medio di vita e le modalità di decadimento, cercando di far rientrare i risultati delle loro misure nel quadro della teoria di Yukawa, e incontrando però in quest’opera difficoltà sempre maggiori. Fu attraverso una serie di abili esperimenti, portati avanti negli anni 1943-1946, che i fisici italiani Marcello Conversi, Ettore Pancini e Oreste Piccioni giunsero infine a dimostrare che il mesotrone si comportava in un modo che non poteva essere spiegato nel quadro della teoria di Yukawa. Secondo questa teoria, nell’attraversare la materia, i mesotroni carichi positivamente dovrebbero decadere piuttosto che essere assorbiti dai nuclei, poiché la repulsione coulombiana impedisce loro di raggiungere il nucleo, anch’esso carico positivamente. D’altra parte, i mesotroni negativi dovrebbero “preferire” l’assorbimento al decadimento. Mentre nell’esperimento di Conversi, Pancini e Piccioni (CPP) i mesotroni positivi dei raggi cosmici si comportavano effettivamente come previsto dalla teoria, e i mesotroni negativi venivano assorbiti dal ferro, di nuovo in accordo con la teoria, i mesotroni

¹⁹ S. K. Allison, “Enrico Fermi 1901-1954,” *Physics Today*, n. 8, 1955, p. 9.

²⁰ Biografia di M. Gell-Mann’s, Santa Fe Institute, <http://www.santafe.edu>; V. L. Telegdi, “Enrico Fermi in America,” in: *Symposium dedicated to Enrico Fermi on the occasion of the 50th anniversary of the first reactor*, Atti dei Convegni Lincei, vol. 104, pp. 71-90, Roma, 1993, p. 71.

negativi non venivano assorbiti da un elemento leggero come il carbonio.²¹ Immediatamente, Conversi, Pancini e Piccioni comunicarono questo risultato a Edoardo Amaldi, che si trovava a Washington, ormai al termine di un viaggio di tre mesi negli Stati Uniti. Amaldi ritenne importante informare subito Fermi di un risultato così strano: “Penso che ti possa interessare conoscere gli ultimi dati di M. Conversi, E. Pancini, O. Piccioni sulla morte dei mesoni dei due segni, separati con magneti: vengono osservati gli elettroni di disintegrazione emessi con almeno un microsecondo di ritardo rispetto al passaggio del mesone [...] se ne può concludere che nel Fe decadono solo i positivi e che nel C decadono sia i positivi che i negativi, con circa la stessa probabilità.”²² Fermi si rese subito conto dell'importanza della questione, e cominciò a lavorarci sopra, come testimonia la sua successiva lettera ad Amaldi: “Mille grazie della tua lettera da Washington in cui mi comunichi i risultati delle esperienze di Conversi, Pancini e Piccioni sulla disintegrazione dei mesotroni negativi nella grafite e nel ferro. Teller e io abbiamo fatto alcuni calcoli e discussioni sul significato di queste esperienze e le conclusioni sono riassunte nel manoscritto che ti accludo. Sarebbe nostra intenzione di pubblicare questo manoscritto o qualche cosa di simile come una lettera alla Phys. Rev. e naturalmente vorremmo avere il permesso di Conversi, etc. di citare i loro risultati.”²³ Per inciso, in questa vicenda troviamo due generazioni di fisici italiani, dai “giovani” Pancini, Conversi e Piccioni, all'ex “ragazzo di Via Panisperna” Amaldi per finire con Fermi, *leader* di quel grande gruppo, oramai disperso. Essi si trovarono coinvolti nell'eseguire, nel divulgare la notizia e nell'analizzare la portata di quello che oggi è generalmente considerato l'esperimento che dette origine alla fisica delle alte energie.²⁴

Ben presto, il risultato sperimentale dei fisici italiani divenne uno stimolante argomento di ricerca all'Institute for Nuclear Studies di Chicago. Jack Steinberger, allora giovane studente, così ricorda quei giorni: “Per me, la fisica delle particelle cominciò nel 1947, quando ero un *graduate student* all'Università di Chicago. Enrico Fermi fece un seminario sui risultati dell'esperimento di Conversi, Pancini e Piccioni [...] Era un esperimento bello e importante, e la spiegazione di Fermi era straordinariamente lucida, ed anche stimolante ed eccitante.”²⁵ Fermi (che già si era cimentato con lo studio dell'assorbimento anomalo dei raggi cosmici in aria nel 1939) si dedicò ad analizzare l'esperimento di Conversi, Pancini e Piccioni, insieme a Teller. Apparve subito che il risultato ottenuto da Conversi e colleghi indicava l'esistenza di un'interazione molto debole tra i mesoni dei raggi cosmici (“ μ ”) e i nucleoni. Teller ricorda che anche “Weisskopf era arrivato a una conclusione simile e preparammo perciò una breve nota per corrispondenza.”²⁶ L'analisi di Fermi, Teller e Weisskopf dimostrò che il tempo di cattura dei mesotroni da parte dei nuclei non era inferiore al tempo di decadimento naturale di queste particelle, cioè 10^{-6} s. Ciò era in disaccordo con le previsioni della teoria per un fattore che andava da 10^{10} a 10^{12} . L'interazione tra i mesoni- μ e i nucleoni appariva dunque molto più debole di quanto richiesto dalla teoria di Yukawa. In un secondo e più dettagliato lavoro, Fermi e Teller cercarono una spiegazione alternativa per l'effetto scoperto da Conversi e colleghi. Essi ipotizzarono che il tempo di cattura dei mesotroni da parte del carbonio

²¹ Per maggiori dettagli si veda A. Pais, *Inward Bound: Of Matter and Forces in the Physical World*, Oxford University Press, Oxford, 1986, capitolo 18.

²² E. Amaldi a E. Fermi, 28 novembre 1946, *EFP*, box 9.

²³ E. Fermi a E. Amaldi, 3 gennaio 1947, *EFP*, box 9.

²⁴ M. Conversi, E. Pancini, O. Piccioni, “On the Disintegration of Negative Mesons,” *PR*, vol. 71 (1947), pp. 209-210. Il lavoro fu pubblicato il 1° febbraio 1947.

²⁵ J. Steinberger, “A particular view of particle physics in the fifties,” in: *PQ*, p. 307.

²⁶ E. Teller, introduzione ai lavori nn. 232 e 233, *FNM*, vol. 2, p. 615. Il lavoro congiunto era: E. Fermi, E. Teller, V. Weisskopf, “The decay of negative mesotrons in matter,” *PR*, vol. 71 (1947), pp. 314-315, anche in *FNM*, vol. 2, lavoro n. 232.

fosse così lungo che molti mesoni riuscivano a decadere durante il processo di cattura. Fermi e Teller studiarono pertanto in dettaglio il meccanismo di cattura. Essi trovarono che il tempo di cattura è molto più breve (da 10^{-9} a 10^{-13} s) rispetto al tempo medio di vita dei mesoni- μ (2×10^{-6} s), e l'ipotesi di identificare i mesoni- μ con i mesotroni si rivelò infine insostenibile.²⁷

L'esperimento CPP fu uno dei due temi principali (l'altro fu il cosiddetto "Lamb shift," che dette inizio alle indagini culminate nel 1949 con la creazione della nuova elettrodinamica quantistica) alla Shelter Island Conference (2-4 giugno 1947), il primo d'una serie di tre congressi organizzati da J. R. Oppenheimer e dedicati alla fisica teorica e alle implicazioni teoriche dei risultati sperimentali allora noti. Vi era una certa preoccupazione per la difficoltà di conciliare l'alto tasso di produzione di mesoni- μ nell'alta atmosfera e la debole interazione che queste particelle mostravano di avere con la materia nell'attraversarla. Oppenheimer si lanciò addirittura a ipotizzare che questa situazione potesse preludere a un'inadeguatezza nell'"ordinario formalismo della meccanica quantistica."²⁸ I lavori di Fermi, Teller e Weisskopf furono i primi a evidenziare la discrepanza tra il valore del tempo medio di vita osservato nel caso del mesone- μ negativo e il valore che tale quantità avrebbe dovuto assumere se il mesone- μ fosse effettivamente stata la particella portatrice dell'interazione nucleare. Questi lavori furono molto importanti nell'indurre Marshak e Bethe a formulare una nuova teoria, alla stessa Shelter Island Conference, in cui avanzarono la cosiddetta "ipotesi dei due mesoni," secondo la quale il mesone- μ studiato da Conversi e colleghi non era la particella di Yukawa, ma semplicemente un suo prodotto di decadimento. Questa ipotesi venne in breve tempo confermata dalla scoperta nei raggi cosmici del mesone- π , o mesone-pi o "pione" da parte di Powell e collaboratori a Bristol.²⁹ La fisica nucleare delle alte energie era cominciata.

4 - Arriva la *Big Science*

Gli anni del dopoguerra portarono una nuova dimensione nell'organizzazione scientifica: la *Big Science*. "Per la fisica delle particelle, e per la scienza in generale, il periodo [1947-1963] fu un'epoca di transizione, in cui le energie vennero ri-dirette dai problemi della guerra alle preoccupazioni della pace. Traendo profitto dalla loro partecipazione ai progetti del radar e della bomba atomica [...] i fisici organizzarono ed eseguirono progetti cooperativi di ricerca su scala mai vista prima, e fecero leva sul prestigio accumulato coi loro successi di guerra per ottenere i fondi necessari. La fisica delle particelle elementari, allora significativamente chiamata 'fisica nucleare delle alte energie' servì come prototipo per altri progetti a larga scala, come i programmi spaziali di Stati Uniti e Unione Sovietica."³⁰ I fisici avevano buon gioco nel chiedere risorse e stanziamenti aggiuntivi, poiché "la diffusa percezione era quella dello scienziato non come individuo, ma come membro d'una casta, lo

²⁷ E. Fermi e E. Teller, "The capture of negative mesotrons in matter," *PR*, vol. 72 (1947), pp. 399-408, anche in *FNM*, vol. 2, lavoro n. 233.

²⁸ R. E. Marshak, "Particle physics in rapid transition: 1947-1952," in: L. M. Brown, L. Hoddeson, (a cura di): *The Birth of Particle Physics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1983.

²⁹ R. E. Marshak e H. A. Bethe, "On the Two-Meson Hypothesis," *PR*, vol. 72 (1947), pp. 314-315; C. M. G. Lattes, H. Muirhead, G. P. S. Occhialini, C. F. Powell, "Process involving Charged Mesons," *Nature*, vol. 159 (1947), pp. 694-697; si veda anche R. E. Marshak, *Meson Physics*, McGraw-Hill, New York, 1952, pp. 194-195.

³⁰ L. M. Brown, M. Dresden, L. Hoddeson, "Pions to quarks: particle physics in the 1950s," in: *PQ*, p. 3.

sciavano dell'era atomica, dispensatore del bene e del male.”³¹ Grandi progetti erano necessari alla fisica delle alte energie, un settore ove divenne ben presto chiaro che, per studiare quello che Oppenheimer chiamava “lo zoo sub-nucleare” era necessario avere i fasci di particelle intensi e controllabili che solo gli acceleratori potevano fornire.

Non appena i costi di acceleratori e rivelatori iniziarono a salire, “lo scenario degli esperimenti di punta si spostò dai laboratori delle università ai grandi laboratori internazionali [...] Questi drammatici cambiamenti segnarono l'inizio del passaggio alla *big science* nella fisica delle particelle. In parte questa transizione fu basata sui cospicui progressi che fisici e ingegneri avevano raggiunto durante la seconda guerra mondiale. I grandi progressi nella tecnica delle microonde, nell'elettronica, nella tecnologia del vuoto e del freddo, e nei mezzi di calcolo, raggiunti nei programmi portati avanti al MIT Radiation Laboratory o nel Progetto Manhattan, vennero massicciamente utilizzati dai fisici delle particelle nel disegno e nella costruzione di acceleratori e rivelatori. [...] la prassi del tempo di guerra, quando le industrie fornivano materiali e sviluppo per la messa a punto di armi, fu adattata alle esigenze della ricerca nel periodo post-bellico [...] Il Manhattan Engineering District (MED) costituì il paradigma per i grandi e ben finanziati progetti di ricerca e la rete di cooperazione tra i maggiori fisici americani e le autorità militari continuò nel dopoguerra e sostenne la fisica delle particelle. Ad esempio, [...] il generale Leslie Groves, capo militare del MED, sponsorizzò il completamento del ciclotrone di Lawrence da 184 pollici. Direttamente dal MED nacquero e crebbero le tre agenzie federali che fornirono il grosso del sostegno finanziario alla fisica delle particelle americana nel dopoguerra: l'Atomic Energy Commission (AEC), l'Office for Naval Research (ONR), e la National Science Foundation (NSF).”³²

Nel far decollare questi ambiziosi programmi la generazione dei fisici che “era divenuta adulta” con la meccanica quantistica giocò un ruolo determinante. Di essa facevano parte personaggi come Hans A. Bethe, Julius R. Oppenheimer, Enrico Fermi, Ernest O. Lawrence, Isidor I. Rabi, per citarne solo alcuni. Essi erano gli “eccezionali scienziati e sognatori che dopo la seconda guerra mondiale resero le alte energie il settore dominante in fisica.”³³ Nel far questo, essi avevano una forte motivazione. La partecipazione ai progetti militari aveva richiesto agli scienziati di lavorare in progetti di scienza applicata, con ciò allontanandosi dalla scienza pura; per dirla con Johann Von Neumann, essi erano divenuti “scienziati migliori e uomini più impuri.”³⁴ Quando la guerra finì, molti degli scienziati che avevano lavorato nei laboratori militari, e in special modo i fisici nucleari che avevano lavorato al Metallurgical Laboratory e a Los Alamos, “cercarono il modo per divenire nuovamente uomini e scienziati più puri. Una strada per la redenzione era garantire e dimostrare gli usi pacifici dell'energia atomica [...] una seconda strada consisteva nell'esplorare i segreti del mondo subnucleare. In molti fisici l'esperienza degli anni di guerra aveva rinforzato la convinzione che solo la fisica pura – la fisica fatta per l'amore della fisica – era fisica “di base” o “fondamentale” e [pertanto] “buona.” La fisica delle alte energie forniva un terreno fertile sia per la purificazione che per la “buona” fisica. “Molti dei membri del GAC [la “General Advisory Committee”

³¹ A. Pais, *Inward Bound*, cit., p. 471.

³² L. M. Brown, M. Dresden, L. Hoddeson, “Pions to quarks: particle physics in the 1950s,” in: *PQ*, pp. 10-11.

³³ S. Schweber, “A Historical Perspective on the Rise of the Standard Model,” in: L. Hoddeson, L. M. Brown, M. Riordan, M. Dresden, (a cura di): *The Rise of the Standard Model. Particle Physics in the 1960s e 1970s*, Cambridge University Press, Cambridge, 1997, p. 646.

³⁴ J. Von Neumann a O. Veblen, May 21, 1943, citata in S. Schweber, “A Historical Perspective on the Rise of the Standard Model,” cit., p. 657.

dell'AEC, della quale Fermi fu membro dal 1947 al 1950] e [...] molti di quelli che servirono nell'ONR – le entità che decidevano dei finanziamenti alla fisica delle alte energie del dopoguerra – erano fisici nucleari che erano stati a Los Alamos. Il loro supporto alla fisica delle alte energie fu importante per la crescita di questo settore. In verità questi uomini – Bacher, Rabi, Oppenheimer, Lawrence, Fermi e così via – furono tra i sostenitori più convinti della fisica delle alte energie, e la spettacolare fioritura che si ebbe in questo campo deve molto alla loro efficacia come proponenti [...] Essi erano anche uomini che sapevano come muoversi tra il mondo scientifico e quello politico, e i loro sforzi politici e diplomatici nelle commissioni governative resero possibile la costruzione di laboratori e ne permisero il susseguente finanziamento. Essi appartenevano a una tradizione che era stata plasmata da Niels Bohr, e per loro la fisica delle alte energie era anche un veicolo per la cooperazione scientifica internazionale.”³⁵

È possibile cogliere alcuni riflessi di questo generale stato di cose nella vita di due dei protagonisti della fisica di quegli anni. Come molti altri scienziati, Fermi e Segrè tornarono alle loro case al principio del 1946. In febbraio Segrè scriveva a Fermi da Berkeley: “noi siamo ora installati nella vecchia casa, senza telefono. Il tornare nella civilizzazione specialmente dopo la mancanza d'acqua non è spiacevole. Al Radiation [Lab] ci sono orgie di ingegneria d'alta classe, ma per ora praticamente nulla per il detecting end delle macchine. Il Radiation assomiglia molto a Los Alamos e ai progetti di guerra ed è ancora più industriale di Los Alamos. Mi pare che continuo essenzialmente sui soldi di Groves [...] Al Dept. per ora la vita è pacifica sebbene un po' sonnolenta. Io non so ancora che cosa mi metterò a fare. Il dovere mi tirerebbe verso il detecting end delle grandi macchine; la mia inclinazione verso l'85 [l'astato] e problemi di radioattività; il necessario camminare sulle uova per ogni cosa verso l'orticoltura [la posizione di Segrè era ancora lungi dall'essere stabile].”³⁶ Anche Fermi si rendeva conto dei cambiamenti che la nuova organizzazione della scienza portava con sé. Nel gennaio del 1946 così scriveva a Edoardo Amaldi e Gian Carlo Wick: “Anche in America la situazione della fisica ha subito cambiamenti molto profondi per effetto della guerra. Alcuni sono per il meglio: ora che la gente si è convinta che con la fisica si possono fare le bombe atomiche tutti parlano con indifferenza di cifre di vari milioni di dollari. Fa impressione che dal lato finanziario la maggiore difficoltà consisterà nell'immaginare abbastanza cose con cui spendere [...] Ci sono, naturalmente, anche degli inconvenienti molto seri. Il più serio di tutti sono i segreti militari. A questo proposito si spera che una buona parte dei risultati scientifici che ancora sono tenuti segreti potrà prossimamente venir pubblicata ma per il momento la cosa procede assai lentamente. Un altro inconveniente è che buona parte dell'opinione pubblica è convinta che i risultati della ricerca scientifica durante la guerra sono stati dovuti in buona parte alla superorganizzazione del lavoro scientifico. E quindi ne concludono che una simile superorganizzazione sia il modo migliore di promuovere il progresso scientifico anche in tempo di pace. L'opinione corrente della maggioranza dei fisici è che questo sarebbe uno sbaglio. Ma naturalmente ci sono sempre i candidati al posto di superorganizzatore che pensano diversamente. Infine molti fisici si stanno occupando molto più attivamente di politica che di scienza e passano il loro tempo a Washington in piacevoli conversari con senatori e congressmen.”³⁷

³⁵ S. Schweber, “A Historical Perspective on the Rise of the Standard Model,” cit., p. 657 e 646.

³⁶ E. Segrè a E. Fermi, 7 febbraio 1946, *EFP*, box 11.

³⁷ E. Fermi a E. Amaldi e G. C. Wick, 24 gennaio 1946, *EAP*, box E1; anche in: E. Amaldi, *Da via Panisperna all'America*, a cura di G. Battimelli e M. De Maria, Editori Riuniti, 1997, pp. 166-167.

Fermi non era dunque incondizionatamente favorevole ai cambiamenti portati dalla metamorfosi della scienza nel dopoguerra. Egli aveva anche profonde preoccupazioni. Più precisamente, vedeva la scienza dibattersi in una vera e propria crisi. Così si esprimeva in un discorso del 1947: “Vorrei discutere con voi la crisi che la scienza attraversa da due anni a questa parte. In larga misura questa crisi è dovuta all’improvvisa consapevolezza, di parte dell’opinione pubblica e del Governo, del tremendo ruolo che la Scienza può avere nelle cose umane. L’importanza di questo ruolo era già nota. Ma il drammatico impatto portato dalla costruzione della bomba atomica lo ha portato nella pubblica consapevolezza in maniera così vivida che gli scienziati si sono trovati, inaspettatamente e talora contro la propria volontà, ad essere sotto i riflettori [...] C’è una grande penuria di uomini di scienza ben preparati [...] Ora le iscrizioni di studenti nei dipartimenti scientifici sono tornate a essere abbondanti. Spero che ben pochi di questi studenti siano attratti dal nuovo fascino che la scienza ha acquistato. La professione del ricercatore deve tornare alla sua tradizione di ricerca per l’amore di scoprire nuove verità. Poiché in tutte le direzioni siamo circondati dall’ignoto e la vocazione dell’uomo di scienza è di spostare in avanti le frontiere della nostra conoscenza in tutte le direzioni, non solo in quelle che promettono più immediati compensi o applausi.”³⁸

Fermi era consapevole che per far sì che la fisica delle particelle “tornasse alla sua tradizione di ricerca per l’amore di scoprire nuove verità” erano necessari nuovi e grandi strumenti: acceleratori e computer. Abbiamo già visto che egli stava pensando a un betatrone fin dal 1944. Sin dall’autunno del 1945 si cominciarono a far piani per dotare l’Institute of Nuclear Studies di un betatrone da 100 MeV comprandolo dalla General Electric. Ci si attendeva che questa macchina fosse in grado di produrre mesoni, allo scopo di investigare la natura delle forze nucleari. Il progetto di costruzione della macchina fu gravato da parecchie difficoltà; inoltre, divenne in seguito evidente che una macchina da 100 MeV che accelerava elettroni non era in grado di produrre i mesoni necessari alle investigazioni desiderate. Venne perciò proposto di modificare il progetto originario, trasformando il betatrone in partenza in una macchina che potesse operare sia come betatrone che come sincrotrone. Infine, il betatrone di Chicago cominciò a operare, sia pure parzialmente, durante l’anno 1950-1951 e venne soprattutto impiegato per ricerche sui raggi gamma. Esso non si rivelò così decisivo per la fisica che Fermi aveva in mente, per la quale era molto più indicato un sincrociclotrone come quello di Berkeley. Un progetto per la costruzione di un sincrociclotrone partì a Chicago nel 1947, e Fermi fu uno dei principali proponenti. La macchina cominciò a operare nella primavera del 1951 e per un po’ fu il più potente acceleratore di particelle del mondo. Capace di accelerare protoni fino a 450 MeV, questa macchina consentì a Fermi e al suo gruppo di realizzare le fondamentali esperienze di scattering di pioni su nucleoni.

Fermi aveva sempre avuto grande interesse per il calcolo numerico. Nel 1928 aveva calcolato la soluzione dell’equazione differenziale del modello atomico di Thomas-Fermi servendosi di un piccolo calcolatore da tavolo. Nel 1945 aveva mostrato vivo interesse per le macchine calcolatrici elettromeccaniche allora in uso a Los Alamos e aveva proposto un problema da risolvere con esse.³⁹ Col sopraggiungere dell’era della *Big Science*, Fermi realizzò prontamente che i computer elettronici erano i naturali strumenti di lavoro per analizzare i dati prodotti dagli acceleratori e per aiutare a dipanare la complessità delle teorie delle forze nucleari. Egli espresse la sua fiducia nelle nuove macchine in un discorso del 1947 sul futuro della fisica nucleare: “La teoria è impotente di fronte a un nuovo problema se non è sostenuta dall’esperienza. Per questo motivo, vi sono ora grandi speranze di progressi ulteriori. Nuovi esperimenti saranno ora possibili con lo sviluppo di ciclotroni

³⁸ E. Fermi, discorso tenuto presso lo Union College nel Commencement Day dell’anno 1947, *EFFP*, box 53.

³⁹ Si veda l’introduzione di N. Metropolis al lavoro n. 256, *FNM*, vol. 2, p. 861.

giganti, come quello recentemente entrato in funzione a Berkeley e altre grandi macchine acceleratrici in costruzione presso numerose Istituzioni. Queste macchine permetteranno di studiare in laboratorio particelle con energie vicine a quelle delle particelle dei raggi cosmici. Sembra ragionevole aspettarsi che le investigazioni compiute in laboratorio possano offrire importanti suggerimenti per esplorare le proprietà del nucleo. Molti fisici sperano che sia addirittura possibile produrre artificialmente mesotroni e dimostrare con esattezza la loro connessione con la teoria delle forze nucleari postulata da Yukawa. Il problema del nucleo, però, non verrà risolto dalla sola conoscenza delle forze. Molti nuclei sono di estrema complessità e contengono centinaia di neutroni e protoni tenuti strettamente insieme, cosicché anche se le leggi della loro dinamica venissero comprese, la loro applicazione a un sistema così complesso costituirebbe un formidabile problema matematico. La sua complessità è tale che le speranze di trovare soluzioni esatte coi convenzionali metodi d'analisi sono molto piccole e sembra più probabile che dovranno essere usati metodi numerici. Vorrei sottolineare l'importanza che, a questo proposito, avranno i calcolatori elettronici. L'Eniac, un modello iniziale di questo tipo di macchine, è stato sviluppato a Philadelphia durante la guerra, e ora sta funzionando bene. Vi sono già alcuni risultati promettenti circa la sua applicazione a problemi di fisica nucleare. Ma gli uomini responsabili dello sviluppo dell'Eniac non riposano sugli allori e il lavoro va avanti speditamente per costruire ciò che può essere propriamente chiamato un cervello elettronico matematico. Ripongo grandi speranze nell'aiuto che i fisici saranno in grado di derivare da questi molto promettenti sviluppi.⁴⁰

Quando nel 1952 Fermi e il suo gruppo, così come anche altri gruppi negli Stati Uniti, cominciarono a ottenere risultati dai loro esperimenti di scattering pione-nucleone, Fermi usò intensivamente il MANIAC I, primo di una serie di tre calcolatori elettronici messi a punto da Nick Metropolis a Los Alamos, per elaborare i risultati sperimentali e trovare gli spostamenti di fase che meglio descrivevano la situazione sperimentale. Ben presto Fermi imparò molto bene a scrivere il codice dei problemi che voleva sottomettere al MANIAC: tra le sue carte d'archivio vi sono numerosi diagrammi di flusso e programmi scritti da lui medesimo. Nel 1953-1954 egli si interessò al progetto di dotare l'Institute of Nuclear Studies di un grosso calcolatore elettronico. Una proposta venne sottomessa all'AEC nella primavera del 1954 e venne considerata favorevolmente. Ciò portò alla stesura d'una proposta più dettagliata, sottomessa nel luglio del 1954. "George" – questo doveva essere il nome del computer di Chicago – doveva iniziare a operare nella primavera del 1955. Tuttavia, Fermi morì nell'autunno del 1954, poco dopo essere tornato dal suo ultimo viaggio in Italia. "George," l'ultimo computer "fatto in casa," cioè non acquistato da una ditta costruttrice, entrò in funzione nel 1957 presso il Laboratorio Nazionale delle Argonne. È molto probabile – anche se ne manca, per quanto ne sappia, la certezza documentale - che questo computer fosse quello progettato inizialmente dal gruppo Fermi di Chicago.

Nell'occasione del viaggio in Italia del 1954, venne chiesto a Fermi da parte di Marcello Conversi e Giorgio Salvini – entrambi dell'Università di Pisa – la sua opinione su come spendere un cospicuo finanziamento di cui l'Università di Pisa poteva disporre in quel periodo. Questa è la ricostruzione del fatto come risulta da un'intervista di molti anni dopo a Salvini: "Ecco l'immagine della situazione: passeggiamo a Varenna dopo il bagno, Gilberto Bernardini, Fermi e io [...] E Gilberto Bernardini fu quello che trattò il tema e disse a Enrico della situazione finanziaria [...] e gli chiese esplicitamente un consiglio per questa somma. Enrico Fermi, col suo modo, passeggiò un pochino insieme a noi; poi ad un certo punto alzò la testa e disse: fate un calcolatore elettronico. Ci disse qualche parola di illustrazione [fu poi

⁴⁰ E. Fermi, "The future of nuclear physics," discorso tenuto in occasione del conferimento della Medaglia Franklin da parte del Franklin Institute, 16 aprile 1947, *EFP*, box 53.

Conversi a portare avanti questa cosa]. Mi ricordo Gilberto Bernardini che disse: sì Enrico, questo è un consiglio che mi sembra d'oro. Vale tanto oro quanto pesa. E Fermi rispose: allora non ha peso, quindi non vale nulla.”⁴¹

E invece il consiglio pesava, eccome. In una successiva lettera al rettore dell'Università di Pisa Fermi confermò il suo suggerimento: “Caro Professore, in occasione del mio soggiorno alla scuola di Varenna i professori Conversi e Salvini mi hanno accennato la possibilità che l'Università di Pisa possa disporre di una somma veramente ingente destinata a favorire il progresso e lo sviluppo della ricerca in Italia. Interrogato circa le varie possibilità di impiego di tale somma, quella di costruire in Pisa una macchina calcolatrice elettronica mi è sembrata, tra le altre, di gran lunga la migliore. Essa costituirebbe un mezzo di ricerca di cui si avvantaggerebbero in modo, oggi quasi inestimabile, tutte le scienze e tutti gli indirizzi di ricerca. Mi consta che l'Istituto di Applicazioni del Calcolo, diretto dal Prof. Picone, ha in corso di acquisto una macchina del genere. Non mi sembra però che questa circostanza diminuisca il bisogno che di tale macchina verrà ad avere un centro di studi come l'Università di Pisa. L'esperienza dimostra che la possibilità di eseguire con estrema speditezza e precisione calcoli elaborati crea ben presto una sì grande domanda di tali servizi che una macchina sola viene presto saturata. A questo si aggiungono i vantaggi che ne verrebbero agli studenti e agli studiosi che avrebbero modo di conoscere e di addestrarsi nell'uso di questi nuovi mezzi di calcolo.”⁴²

Secondo Metropolis, che lavorò con lui sul MANIAC, “Fermi si era ben presto reso conto delle potenzialità dei calcolatori elettronici; il suo interesse agiva da stimolo per coloro che lavoravano nel campo; ma era il suo approccio diretto e la sua completa partecipazione che ebbero il più grande effetto sullo sviluppo della nuova disciplina. La sua curiosità andava oltre il problema di calcolo in esame; egli sollevava questioni generali sulla struttura logica dei computers e le sue osservazioni erano sempre acute e penetranti [...] È infine da menzionare che Fermi, nell'estate del 1952, pose la questione della fattibilità in maniera automatica dello *scanning* delle tracce delle particelle nelle emulsioni fotografiche della loro acquisizione nonché della loro misura ed analisi. Solo una formulazione iniziale di questo problema fu possibile, ma era chiaro che Fermi aveva previsto l'ingente sforzo che in seguito sarebbe stato dedicato a questo problema.”⁴³

Fermi fu membro del GAC – la commissione di consulenza dell'AEC – dal 1947 al 1950. In questo ruolo, ebbe il compito di esprimere un parere su progetti che implicavano richieste di finanziamento. Tra queste, le più imponenti erano quelle relative a progetti di acceleratori di particelle, poiché nuove idee consentivano di costruire macchine sempre più potenti ed era ormai chiaro gli acceleratori di particelle avrebbero ben presto preso il sopravvento sui raggi cosmici come “produttori” di particelle. Nel 1941 Kerst aveva inventato il betatrone, e nel 1945 il principio della stabilità di fase, proposto da Vekser e McMillan, aveva consentito di giungere a energie relativistiche e venne ben presto impiegato nel sincrociclotrone per protoni da 184” realizzato a Berkeley, nonché in numerosi sincrotroni per elettroni con energie vicine a 300 MeV.

Nel 1947 venne posta sul tappeto da Lawrence la proposta di costruire un sincrotrone per protoni da 6 GeV al Radiation Lab, in aggiunta alle altre macchine a quel tempo già completate o in corso di realizzazione a Berkeley (il sincrociclotrone da 184” già menzionato, un sincrotrone per elettroni da 330 MeV e un acceleratore

⁴¹ Intervista di R. Vergara Caffarelli a G. Salvini, 1991, www.fondazionegalileogalilei.it.

⁴² E. Fermi a E. Avanzi, 11 agosto 1954, pubblicata in: G. De Marco, G. Mainetto, S. Pisani, P. Savino, “The Early Computers of Italy,” *IEEE Annals in the History of Computing*, vol. 21 (1999), pp. 28-36, p. 32; G. De Marco, G. Mainetto, S. Pisani, P. Savino, “E il computer sbarcò in Italia,” *Sapere*, ottobre 1997, pp. 64-77, p. 66.

⁴³ N. Metropolis, introduzione al lavoro n. 256, *FNM*, vol. 2, p. 861.

lineare).⁴⁴ La realizzazione di tutte queste macchine venne sostenuta dal MED e dal suo successore, l'AEC "a un livello pari a trenta volte il budget del laboratorio nel periodo pre-bellico."⁴⁵ Nel novembre del 1947 "Fermi pose in discussione la necessità di macchine ancor più energetiche prima che quelle in costruzione al Radiation Laboratory di Berkeley venissero completate e i loro *range* di energia venissero opportunamente esplorati ed espresse la preoccupazione che 'sarebbe nocivo per la scienza se [il GAC] avesse dato un parere favorevole a quello che appariva come un progetto poco fondato."⁴⁶ Infine, l'AEC decise di finanziare una macchina più piccola (ed eventualmente espandibile) a Berkeley, e un altro sincrotrone per protoni a Brookhaven, sulla East Coast. Il "Bevatrone" di Berkeley (che raggiunse infine i 6.2 GeV) e il "Cosmotrone" di Brookhaven (3 GeV) cominciarono a funzionare, rispettivamente, all'inizio del 1954 e nella primavera del 1953; queste due macchine avrebbero dominato la scena degli acceleratori negli anni '50.

5 - Contributi alla fisica teorica

Non appena completò la sua attività sperimentale sui neutroni alle Argonne, Fermi tornò a dedicarsi alla fisica teorica. Nel febbraio 1948 scriveva: "Per qualche mese mi sono ritirato dal lavoro attivo in fisica sperimentale, e sono diventato un fisico teorico o, almeno, uno studente di fisica teorica. Questa è una pratica che ho da molti anni, di interrompere per un po' il lavoro sperimentale e dedicarmi a imparare e capire cosa è stato fatto nel frattempo."⁴⁷

Ben presto apparvero nuovi e importanti contributi. Nell'estate del 1949, assieme al suo allievo Yang, Fermi preparò un lavoro nel quale gli autori mettevano in discussione che il pione fosse una particella elementare e avanzavano l'audace ipotesi che essa fosse in realtà uno stato legato di un sistema nucleone-antinucleone.⁴⁸ Questo modello rendeva conto del tripletto di isospin del pione nonché della sua inusitata parità negativa. Gli autori, peraltro, si rendevano conto di proporre un'idea piuttosto temeraria, come Yang ricordò: "Come detto esplicitamente nel lavoro, non ci illudevamo che ciò che proponevamo corrispondesse alla realtà [...] Fermi [tuttavia] riteneva che la questione che sollevavamo fosse degna di essere pubblicata."⁴⁹ Oggi sappiamo che nessuna delle particelle menzionate è elementare. Il problema sollevato da Fermi e Yang divenne ben presto il "modello di Fermi-Yang" del pione ed esercitò un'importante influenza sullo sviluppo della fisica, dando luogo a un filone di ricerche. Il modello di Fermi-Yang ispirò direttamente Sakata, il quale nel 1956 generalizzò la loro idea per includere la stranezza prendendo l'iperone lambda come il terzo componente di una terna (formata anche dal protone e dal neutrone) di particelle che, insieme alle loro antiparticelle, dovevano essere i costituenti fondamentali degli adroni. I colleghi di Sakata a Nagoya svilupparono questa idea, osservando che il gruppo di simmetria SU(3) era l'appropriata

⁴⁴ La proposta iniziale di Lawrence riguardava una macchina da 10 GeV, cifra in seguito ridotta a 5 GeV "per evitare l'impressione di avidità" e venne infine aumentata a 6 GeV su consiglio di E. McMillan e W. Panofsky, i quali sostennero che 6 GeV, "l'energia ritenuta necessaria per la produzione di nucleoni, potesse essere un obiettivo scientificamente più ragionevole," R. Seidel, "The postwar political economy of high-energy physics," in: *PQ*, p. 498.

⁴⁵ *Ibidem*.

⁴⁶ *Ibidem*.

⁴⁷ E. Fermi a J. Stearns, 2 febbraio 1948, *EFP*, box 11.

⁴⁸ E. Fermi e C. N. Yang, "Are mesons elementary particles?," *PR*, vol. 76 (1949), p. 1739, anche in *FNM*, vol. 2, lavoro n. 239.

⁴⁹ C. N. Yang, introduzione al lavoro n. 239 in *FNM*, vol. 2, p. 674.

generalizzazione del gruppo di isospin SU(2), che era la base del modello di Fermi-Yang. Quest'ultimo avrebbe influenzato anche i modelli dei quark negli anni '60.⁵⁰

Successivamente, Fermi affrontò il problema di preparare un semplice ma affidabile quadro teorico per interpretare i dati sperimentali che di lì a poco avrebbero cominciato a venire fuori dagli acceleratori. Gli esperimenti iniziali sembravano indicare che i mesoni-pi erano particelle pseudoscalari, che interagivano col campo nucleonico attraverso un accoppiamento "di gradiente" (pseudovettoriale). Questa situazione portava a conseguenze che erano esattamente il contrario di quanto accadeva in QED, dove l'intensità dell'interazione elettrone-fotone diminuisce all'aumentare dell'energia, con ciò assicurando la convergenza delle sezioni d'urto radiative ad alte energie. La piccolezza del valore della costante di accoppiamento nell'interazione elettrone-fotone ($\alpha=2\pi e^2/hc \approx 1/137$) è un'altra caratteristica che porta a sezioni d'urto finite in QED nel limite relativistico. Queste due caratteristiche giustificano l'uso che si fa in QED della teoria dell'accoppiamento debole e l'applicazione dei metodi perturbativi standard anche alle energie relativistiche dell'elettrone. Nella teoria del mesone-pi, invece la situazione era opposta a quella descritta, poiché a causa della natura dell'interazione tra mesoni-pi e nucleoni, l'intensità dell'interazione mesone-nucleone aumenta all'aumentare dell'energia. Inoltre, la costante d'accoppiamento tra mesone e nucleone è molto più grande della corrispondente costante d'accoppiamento in QED. Come Marshak scrisse nel suo testo sui mesoni del 1952 – il primo libro sui mesoni ad essere pubblicato – "ne dovrebbe seguire che, ad alte energie, processi di produzione multipla di mesoni dovrebbero verificarsi con apprezzabile probabilità e i metodi basati sulla teoria delle perturbazioni dovrebbero rivelarsi inadeguati."⁵¹ Per tutti questi motivi, Fermi ritenne opportuno mettere da parte le teorie perturbative e seguire un altro approccio.

Anderson ricorda: "Nel 1949-1950 Fermi cominciò a prepararsi per gli sviluppi nella fisica delle alte energie che cominciavano ad emergere da Berkeley [dove il ciclotrone da 170 pollici aveva cominciato a funzionare nel novembre 1946 e nel 1948 aveva prodotto i primi mesoni artificiali], e presto sarebbero stati prodotti da molti altri laboratori. In particolare, egli cominciò a preparare sé stesso, i suoi collaboratori e gli studenti a Chicago per gli esperimenti che di lì a poco sarebbero stati in grado di fare con i mesoni-pi usando il nuovo ciclotrone ormai in fase di completamento all'Institute for Nuclear Studies. Fermi [...] aveva bisogno di un quadro teorico nel quale collocare le informazioni che andava raccogliendo [...] per questo motivo sviluppò procedure semplificate per calcolare gli ordini di grandezza delle quantità di interesse, come le sezioni d'urto dei processi importanti. La sua posizione era che se le teorie mesoniche erano comunque inadeguate, non valeva la pena di perdere tempo con esse cercando di usarle per calcolare alcunché in maniera esatta. I metodi di Fermi furono una manna per gli sperimentali, che avevano difficoltà a seguire i metodi sofisticati usati dai teorici per esporre le loro teorie."⁵² Fermi paragonò una volta lo sforzo di organizzare i dati sperimentali disponibili in un quadro teorico al lavoro che uno avrebbe potuto fare ai tempi di Lorentz, prima della meccanica quantistica, per spiegare gli spettri degli atomi.⁵³

⁵⁰ Si veda L. M. Brown, M. Dresden, L. Hoddeson, "Pions to quarks: particle physics in the 1950s," in: *PQ*, p. 18; L. M. Brown, M. Riordan, M. Dresden, L. Hoddeson, "The Rise of the Standard Model: 1964-1979," in: L. Hoddeson, L. M. Brown, M. Riordan, M. Dresden, (a cura di): *The Rise of the Standard Model. Particle Physics in the 1960s e 1970s*, cit., p. 10; E. Segrè, *Enrico Fermi*, cit., p. 174.

⁵¹ R. E. Marshak, *Meson Physics*, cit., p. 275.

⁵² H. L. Anderson, introduzione ai lavori 241e 242, *FNM*, vol. 2, p. 789.

⁵³ E. Segrè, *Enrico Fermi*, cit., p. 174.

Il metodo di Fermi consisteva nell'assumere che "come risultato delle interazioni molto forti tra nucleoni e mesoni-pi, le probabilità di formazione dei vari possibili numeri di particelle sono essenzialmente determinate dai pesi statistici delle varie possibilità [...] Quando due nucleoni dotati di grande energia nel loro centro di massa collidono, questa energia viene improvvisamente rilasciata in un volume molto piccolo intorno ai due nucleoni [...] questo volume viene dunque a essere "caricato" d'una grande quantità d'energia. Poiché le interazioni del campo dei pioni sono molto forti, ci possiamo aspettare che questa energia si distribuirà rapidamente tra i vari gradi di libertà presenti in questo volume secondo le leggi statistiche. Si può allora calcolare per via statistica la probabilità che in questo piccolissimo volume venga prodotto un certo numero di pioni con una data distribuzione di energia."⁵⁴

La teoria statistica di Fermi non era la prima di questo tipo; prima di lui altri autori, come Heisenberg e Lewis, avevano proposto teorie della produzione multipla di mesoni-pi, per rendere conto dei processi che si verificavano per valori relativistici di energia dei nucleoni.⁵⁵ Il metodo di Fermi fu preso molto seriamente e venne usato per lungo tempo. Allo scopo di metterlo alla prova per alte energie, nel 1953 Fermi fu tra i primi utilizzatori del Cosmotrone da 1.5 BeV, il sincrotrone a protoni che cominciò a operare pienamente a Brookhaven nella primavera del 1953.⁵⁶ Nel 1953 Fermi elaborò anche un abbozzo di teoria statistica per spiegare la produzione di particelle strane nelle collisioni pione-protone.⁵⁷

Vi sono numerosi altri argomenti nella fisica teorica delle particelle ai quali Fermi si interessò e ai quali dette occasionalmente suggerimenti e contributi notevoli. Uno di questi era la natura e le proprietà delle particelle strane. Fermi fu tra coloro che ricevettero il preprint del lavoro di Rochester e Butler che annunciava la scoperta della prima particella-V, lavoro che egli accolse con interesse.⁵⁸ L'interesse per le nuove particelle cominciò a diffondersi all'inizio degli anni Cinquanta e presto divenne uno degli argomenti più inspiegabili di tutta la fisica teorica. Mentre nelle lezioni tenute a Yale nella primavera del 1950⁵⁹ Fermi non fece menzione delle nuove particelle, solamente un anno dopo le prendeva ormai molto sul serio. Durante la seconda delle Rochester Conferences (11-12 gennaio 1952) un giorno intero venne dedicato a questo argomento, e in quell'anno emersero le prime idee sulla natura di queste nuove particelle.⁶⁰ La difficoltà principale stava nel conciliare l'elevato tasso di produzione delle particelle-V (cosa che dimostrava che esse venivano prodotte in processi di cui era responsabile l'interazione forte) coi loro

⁵⁴ E. Fermi, "High Energy Nuclear Events," *Progr. Theor. Theoret. Phys.*, vol. 5 (1950), pp. 570-583, anche in *FNM*, vol. 2, lavoro n. 241, p. 790; si veda anche E. Fermi, "Angular Distribution of the Pions produced in High Energy Nuclear Collisions," *PR*, vol. 81 (1951), pp. 683-687, anche in *FNM*, vol. 2, lavoro n. 242.

⁵⁵ Si veda R. E. Marshak, *Meson Physics*, cit., p. 282ff.

⁵⁶ Si veda: E. Fermi, "Multiple Production of Pions in Pion-Nucleon Collisions," *Academia Brasileira de Ciencias*, vol. 26 (1954), pp. 61-63, anche in *FNM*, vol. 2, lavoro n. 263; "Multiple Production of Pions in Nucleon-Nucleon Collisions at Cosmotron Energies," *PR*, vol. 92 (1953), pp. 452-453; Errata corrige in *PR*, vol. 93 (1954), pp. 1434-1435, anche in *FNM*, vol. 2, lavoro n. 264.

⁵⁷ Si veda: E. Fermi a M. Goldhaber, 16 luglio 1953, *EFP*, box 10; "High-energy collisions," appunti di due lezioni tenute ad Harvard l'8 e il 10 dicembre 1953, *EFP*, box 53.

⁵⁸ G. D. Rochester e C. C. Butler, *Nature*, vol. 160 (1947), p. 855; E. Fermi a G. D. Rochester, 3 dicembre 1947, citata in A. Pais, *Inward Bound*, cit., p. 512.

⁵⁹ E. Fermi, *Elementary Particles*, Yale University Press, 1951.

⁶⁰ Nel 1952 il testo di Marshak (R. E. Marshak, *Meson Physics*, cit.) fu il primo a includere un capitolo sulle nuove particelle. Si veda anche H. A. Bethe e F. De Hoffmann, *Mesons and Fields*, Row, Peterson e Company, New York, 1955, vol. 2, capitolo 51.

tempi di vita medi, piuttosto lunghi, che dimostravano come tali particelle decadessero attraverso l'interazione debole. Nel 1951 Feynman riportò che Fermi e W. Fowler avevano ipotizzato che un'elevata barriera di potenziale tra il nucleone e il pione avrebbe potuto inibire il decadimento dell'iperone lambda senza modificarne il tasso di produzione. In particolare, Fermi osservò che questo caso si sarebbe verificato se l'iperone lambda avesse posseduto uno spin pari, ad esempio, a $13/2$.⁶¹ Anche Feynman preferiva, per spiegare la natura delle particelle-V, l'ipotesi che fossero stati di elevato momento angolare, rispetto all'idea della produzione associata, avanzata nel 1952 da Abraham Pais.⁶² In una visita al Caltech, Fermi e Feynman discussero le due ipotesi e in seguito collaborarono a distanza sull'idea degli stati di elevato momento angolare.⁶³

Nello stesso anno (1951), usando un approccio simile a quello proposto da Fermi nella teoria delle produzioni statistiche, Sachs suggerì che le particelle-V prive di carica non erano altro che uno stato eccitato del neutrone. Per spiegare la lunga vita media di questo stato, Sachs ipotizzò che il nucleone dovesse avere una struttura molto complessa, che prevedeva l'esistenza di molti mesoni-pi in stati virtuali. L'energia di eccitazione era perciò distribuita su molti gradi di libertà e così la probabilità di formazione di quel particolare stato che avrebbe potuto portare alla disintegrazione poteva essere considerevolmente bassa. Poco prima della pubblicazione del suo articolo, Sachs ne mandò copia a Fermi, il quale rispose però di essere troppo impegnato per esaminarlo in dettaglio.⁶⁴ A quell'epoca Fermi era impegnato in complesse ricerche di fluidodinamica che svolse a Los Alamos nell'estate, in collaborazione con Von Neumann.

In seguito, nel 1953, Fermi considerò la questione in maggior dettaglio, confessando al suo ex-studente Uri Haber-Schaim: "sono tuttora molto perplesso a causa delle proprietà di tutte queste particelle e spero fortemente che alcune di esse non siano altro che modi alternativi di disintegrazione [di particelle già note] cosa che ne renderebbe l'interpretazione un po' più facile."⁶⁵ Facendo seguito alle sue prime congetture svolte nel 1951 con Feynman, Fermi abbozzò anche una teoria delle particelle-V considerandole come stati di elevato momento angolare (le regole di selezione cui obbediva il momento angolare avrebbero abbassato il tasso di decadimento di queste particelle).⁶⁶ Più o meno all'epoca in cui si impegnò in questo tentativo (inizio autunno 1953), Gell-Mann lo andò a trovare a Chicago, e gli spiegò la sua teoria della stranezza, che aveva elaborato durante l'estate. "Sembrò molto scettico" ricordò in seguito Gell-Mann "quando gli proposi la spiegazione delle particelle strane come multipletti di spin isotopico. Disse che era sempre più convinto che gli stati di elevato valore del momento angolare dovevano essere la spiegazione giusta."⁶⁷ Un po' frustrato, Gell-Mann ebbe tuttavia l'opportunità di

⁶¹ A. Pais, *Inward Bound*, cit., p. 518; "From the 1940s into the 1950s," in: *PQ*, p. 351. L'osservazione di Feynman reca la data del 7 giugno 1951, ed era una nota a margine delle sue lezioni sulla fisica delle alte energie: R. P. Feynman, "High-energy phenomena and meson theories," appunti inediti delle lezioni tenute al Caltech, gennaio-marzo 1951.

⁶² A. Pais, "Some Remarks on the V-Particles," *PR*, vol. 86 (1952), pp. 663-672.

⁶³ M. Gell-Mann, "Strangeness," in: *Colloque International sur l'Histoire de la Physique des Particules*, Parigi, 21-23 luglio 1982, *Journal de Physique*, vol. 12, Colloque C-8, supplemento al n. 12, dicembre 1982, pp. 395-408, p. 398.

⁶⁴ R. G. Sachs, "On the Nature of the V-Particles," *PR*, vol. 84 (1951), pp. 305-307; si veda anche R. G. Sachs a E. Fermi, 14 giugno 1951 e la risposta di Fermi del 5 luglio, *EFF*, box 11.

⁶⁵ E. Fermi a U. Haber-Schaim, 12 maggio 1953, *EFF*, box 10.

⁶⁶ *EFF*, notebook D1, box 45. La teoria è abbozzata nelle entrate recanti le date 2 e 3 ottobre 1953.

⁶⁷ M. Gell-Mann, "Strangeness," in: *Colloque International*, cit., p. 401.

gettare una fugace occhiata, un paio di giorni dopo, a una lettera che la segretaria di Fermi stava battendo a macchina per inviarla a G. Cocconi, il quale stava investigando sull'ipotesi di Fermi e Feynman relativa agli stati di elevato momento angolare. Nella lettera Fermi avvertiva Cocconi che c'era Gell-Mann a Chicago il quale "stava facendo speculazioni su un nuovo schema basato su multipletti di spin isotopico e che forse questa era la spiegazione giusta delle particelle strane, piuttosto che quella basata sul momento angolare."⁶⁸ Mentre ciò fece riavere Gell-Mann dalla depressione in cui era piombato dopo il colloquio con Fermi di pochi giorni prima, la surrettizia lettura della lettera lo fece arrabbiare un po' nei confronti di Fermi per lo scetticismo che aveva mostrato nei confronti della sua teoria della stranezza.

Fermi, tuttavia, non era ancora pienamente convinto. Nel febbraio 1954, scriveva a Cocconi: "se Pais e Gell-Mann sono nel giusto, la lunga vita media [delle particelle strane] è dovuta a una regola di selezione che consente solo interazioni che coinvolgano coppie di particelle. Non sono convinto che ciò alla fine verrà provato e [ritengo] che l'interpretazione alternativa delle particelle strane come stati di elevato momento angolare sia ancora plausibile." Così, all'apparenza, ancora nel febbraio 1954 Fermi favoriva l'interpretazione della natura delle particelle strane come stati di elevato momento angolare rispetto sia alla teoria della produzione associata di Pais che rispetto alla teoria della stranezza, proposta da Gell-Mann e Nishijima.⁶⁹

In una discussione avvenuta durante una lezione di Gell-Mann all'Università di Chicago nella primavera del 1954, Fermi fece alcune importanti osservazioni che misero Gell-Mann sulla buona strada per giungere all'importante concetto di "mescolanza di particelle," insieme ad Abraham Pais. Dal racconto di Gell-Mann si evince quanto egli temesse le obiezioni di Fermi: "ogni volta che Enrico veniva a un seminario o a una lezione, se c'era qualcosa sulla quale non era d'accordo, interrompeva. La sua interruzione non era cosa da poco; Enrico insisteva finché non si riteneva soddisfatto, cosa che poteva anche non avvenire mai: il seminario allora finiva, Enrico era ancora insoddisfatto, e l'oratore non aveva modo di finire il suo argomento. Se si trattava di un corso, come in questo caso, il corso poteva bloccarsi per una settimana o due, poiché a ogni lezione egli tornava e ricominciava la sua obiezione dal punto in cui l'aveva interrotta nella lezione precedente."⁷⁰

Ora, secondo la teoria della stranezza di Gell-Mann, i kaoni carichi dovevano avere isospin pari a $1/2$. Ciò però implicava che dovevano esistere due distinti mesoni-K neutri, K^0 and \bar{K}^0 , che erano l'uno l'antiparticella dell'altro. Tuttavia, essi dovevano decadere nello stesso modo, e differivano solo per il valore del numero quantico di stranezza ($S=+1$ per K^0 e $S=-1$ per \bar{K}^0). Secondo la ricostruzione più plausibile, Fermi obiettò che, per poter considerare K^0 e \bar{K}^0 come particelle distinte, uno avrebbe dovuto essere in grado di "vedere" questa differenza in laboratorio, per esempio dalla modalità di decadimento o dalla durata della vita media. Per la verità, il nome "particella" doveva essere usato solo per oggetti con un unico tempo di vita medio.⁷¹ Gell-Mann ricorda che Fermi "finalmente venne fuori con un'obiezione

⁶⁸ M. Gell-Mann, "Strangeness," in: *Colloque International*, cit., p. 401, parafrasi di Gell-Mann del contenuto della lettera di Fermi.

⁶⁹ E. Fermi a G. Cocconi, 24 febbraio 1954, *EFFP*, box 9. Si veda anche M. Gell-Mann, "Isotopic spin and new unstable particles," *PR*, vol. 92 (1953), pp. 833-834; T. Nakano e K. Nishijima, "Charge Independence for V-particles," *Progr. Theor. Phys.*, vol. 10 (1953), p. 581. Per un resoconto storico si veda A. Pais, *Inward Bound*, cit., capitolo 20; A. Pais, "From the 1940s into the 1950s," e L. M. Brown, M. Dresden, L. Hoddeson, "Pions to quarks: particle physics in the 1950s," in: *PQ*, p. 351 e pp. 19-21.

⁷⁰ M. Gell-Mann, "Strangeness," in: *Colloque International*, cit., p. 402.

⁷¹ Si veda: J. W. Cronin, "The Discovery of CP Violation," in: L. Hoddeson, L. M. Brown, M. Riordan, M. Dresden, (a cura di): *The Rise of the Standard Model*, cit., pp. 114-115; A. Pais, *Inward Bound*, cit., p. 521; V. L. Fitch e J. L. Rossiter, "Elementary particle physics in the second half of the twentieth century," in: L. M. Brown, A.

apparentemente conclusiva. Disse: ‘posso scrivere $K^0 = A + iB$, dove A e B sono entrambi campi reali con un comportamento definito rispetto all’operazione di coniugazione di carica, e in ogni caso uno ha una particella neutra che è la sua stessa anti-particella.’” Gell-Mann, che aveva già dovuto rispondere a un’obiezione del genere postagli da un *referee* anonimo alcuni mesi prima, attendeva a piè fermo l’obiezione: “sì, è vero, rispose, ma nella produzione di particelle strane, a causa della conservazione della stranezza, sono le particelle K^0 e K^{0*} che hanno importanza; nel processo di decadimento, se i prodotti di decadimento sono fotoni o pioni o entrambi, allora sono le tue particelle A e B che hanno importanza e che hanno differenti vite medie.”⁷²

Questo fu il seme da cui germogliò l’idea delle misture di particelle. Un anno dopo, Gell-Mann e Pais analizzarono l’intero argomento alla luce del comportamento della varie particelle in gioco sotto l’operazione di coniugazione di carica. Essi furono portati ad avanzare la congettura che, nella misura in cui ci si occupa del decadimento, le “vere” particelle da considerare avrebbero dovuto essere K_1 e K_2 (le particelle che Fermi aveva chiamato originariamente A e B, rispettivamente), che avevano vite medie ben definite e diverse tra loro, e comportamento definito sotto coniugazione di carica. K^0 e K^{0*} , invece, combinazioni lineari di K_1 e K_2 , avendo valore di stranezza ben definito, dovevano essere prese in considerazione nel processo di produzione.⁷³ Inoltre, solo K_1 decade in $\pi\pi^+$, mentre così non è per K_2 , la quale ha una vita media più lunga – circa 100 volte più lunga, assumendo che il decadimento avvenga nella modalità $K_2 \rightarrow \pi^- + \pi^+ + \gamma$. D’altra parte, le particelle K^0 e K^{0*} , avendo valore di stranezza ben definito, sono oggetti “reali” finché ci si limita a considerare i fenomeni in cui esse vengono prodotte. Il concetto di mistura di particelle venne ben presto confermato da esperimenti eseguiti nel 1955 a Brookhaven e fu una delle prime e più interessanti lezioni di fisica che la natura impartì all’uomo servendosi dei kaoni neutri.⁷⁴

Tornando agli anni dell’immediato dopoguerra, va ricordato che nel 1947 Fermi assegnò come tesi a Steinberger il compito di analizzare la distribuzione di energia degli elettroni emessi nel decadimento di muoni. Ben presto risultò chiaro che il muone decadeva in un elettrone e due altre particelle più leggere – probabilmente neutrini. Questo fu il terzo processo (dopo il decadimento beta e la cattura muonica) che mostrava di avere la stessa costante di accoppiamento, come G. Puppi, J. Tiomno e J. A. Wheeler dimostrarono, e a sua volta ciò condusse all’idea dell’esistenza di un’interazione debole universale. In questo contesto, Fermi, come riportato da Yang e Tiomno, fu il primo a ipotizzare l’esistenza di una qualche forma di legge di conservazione dei nucleoni: in un seminario tenuto all’inizio del 1949 Fermi propose che, per eliminare processi che non venivano osservati sperimentalmente, come $n + p \rightarrow e + \nu$; $n \rightarrow e^+ + \mu^- + \nu$ “si poteva proporre che oltre alla conservazione della carica un’altra legge di conservazione dovesse essere soddisfatta.”⁷⁵

Pais, B. Pippard (a cura di), *Twentieth Century Physics*, 1995, vol. 2, p. 658. Mi è gradito ringraziare il prof. J. W. Cronin, che prese parte alla lezione qui ricordata e mi ha dato delle informazioni di prima mano sulla discussione tra Gell-Mann e Fermi.

⁷² M. Gell-Mann, “Strangeness,” in: *Colloque International*, cit., p. 402.

⁷³ M. Gell-Mann e A. Pais, “Behavior of Neutral Particles under Charge Conjugation,” *PR*, vol. 97 (1955), pp. 1387-1389.

⁷⁴ Si veda anche A. Pais, *Inward Bound*, pp. 521-522; L. M. Brown, M. Dresden, L. Hoddeson, “Pions to quarks: particle physics in the 1950s,” in: *PQ*, pp. 22-23; W. Chinowsky, “Strange Particles,” in: *PQ*, p. 334 e p. 338.

⁷⁵ C. N. Yang e J. Tiomno, “Reflection Properties of Spin 1/2 Fields e a Universal Fermi-Type Interaction,” *PR*, vol. 79 (1950), pp. 495-498, p. 496; C. N. Yang, introduzione al lavoro n. 239, *FNM*, vol. 2, p. 674; J. Steinberger, “A particular view

Un'altra questione molto importante che Fermi contribuì a sollevare fu la possibile esistenza d'una interazione spin-orbita nel modello a shell dei nuclei, un suggerimento che egli dette a Maria Maria Goeppert Mayer, che nel 1948-1949 lavorava coi "numeri magici nucleari," i quali descrivevano l'esistenza di configurazioni di neutroni o di protoni stranamente stabili qualunque fosse il numero di nucleoni dell'altro tipo. Maria Mayer ricevette nel 1963 il premio Nobel per l'invenzione del modello nucleare a shell e nella sua Nobel Lecture riconobbe l'importanza del suggerimento di Fermi: "a quell'epoca Enrico Fermi si interessava ai numeri magici. Ebbi il grande privilegio di lavorare con lui non solo all'inizio, ma anche dopo. Un giorno, nel lasciare il mio ufficio, Fermi chiese: 'c'è nessuna indicazione dell'esistenza d'un accoppiamento spin-orbita?' Solo se uno avesse lavorato intensamente coi dati come avevo fatto io avrebbe potuto rispondere: 'sì, certo, e questo spiegherà ogni cosa.'"⁷⁶

Va infine menzionata la questione della conservazione della parità, che venne risolta da due studenti di Fermi, C. N. Yang e T. D. Lee. Yang ha riportato che Fermi era "sempre molto interessato alla questione della conservazione della parità." Segrè si è spinto a dire che Fermi potrebbe aver avuto qualche sospetto sulla conservazione della parità, poiché di frequente asseriva "cripticamente" che "nessuno aveva mai rovesciato lo spazio, cambiando una mano destra in una sinistra." Se è impossibile sapere cosa Fermi intendesse dire esattamente, si può discernere un suo indiretto contributo a questa scoperta nelle parole di Pais su come Yang e Lee condussero l'analisi della conservazione della parità: "Lee e Yang affrontarono la sfida [...] con una sistematica ricerca sullo stato delle conoscenze sperimentali circa la validità dell'invarianza per riflessioni dello spazio e per coniugazione di carica. E la loro conclusione fu che c'era un gruppo di interazioni per il quale queste invarianze non erano mai state verificate [...] Il lavoro di T.D. e di Frank [...] fu caratterizzato da sensibilità e bravura, da intuito fisico e dominio dei formalismi. Sia il fisico teorico sia il fisico sperimentale cercano il loro parere. In questo essi hanno più di un legame col Fermi degli ultimi tempi."⁷⁷

6 - Scattering dei pioni e struttura del nucleone

Nel 1951 Fermi tornò alla fisica sperimentale, come ricorda il suo amico e collega H. L. Anderson: "nella primavera del 1951 il grande sincrociclotrone di Chicago cominciò a funzionare. Poteva accelerare protoni a 450 MeV e con essi si potevano produrre pioni in grande quantità. La macchina era stata costruita con l'idea che Fermi ne sarebbe stato il principale utilizzatore, e quando fu finalmente completata, Fermi passò molto tempo a familiarizzarsi con essa, misurando l'intensità e l'energia dei fasci di pioni."⁷⁸

In occasione dell'inaugurazione del ciclotrone, si tenne a Chicago una "International Conference on Nuclear Physics and the Fundamental Particles," dal 17 al 22 settembre 1951. Parteciparono circa duecento scienziati, quaranta dei quali giunsero dall'estero. Il convegno coincise quasi col cinquantesimo compleanno di

of particle physics in the fifties," in: *PQ*, p. 308.

⁷⁶ M. Goeppert Mayer, "The shell model," in: *Nobel Lectures, Physics, 1963-1970*, Elsevier, Amsterdam, 1972, pp. 20-37, p. 29; "On Closed Shells in Nuclei. II," *PR*, vol. 75 (1949), pp. 1969-1970, p. 1970; E. Segrè, *Enrico Fermi*, cit., p. 175; C. N. Yang, introduzione al lavoro n. 239, *FNM*, vol. 2, p. 674.

⁷⁷ A. Pais, *Inward Bound*, cit., pp. 532-533; C. N. Yang, introduzione al lavoro n. 238, *FNM*, vol. 2, p. 673; si veda anche: Proceedings of the International Conference on Nuclear Physics and the Physics of Fundamental Particles. University of Chicago, 17-22 settembre 1951, p. 2 e 109; E. Segrè, *Autobiografia di un fisico*, cit., p. 346.

⁷⁸ H. L. Anderson, introduzione al lavoro n. 246, *FNM*, vol. 2, p. 825.

Fermi, che fu celebrato senza troppe formalità da alcuni dei suoi vecchi amici al tavolo della colazione. Fermi presentò il primo dei lavori del congresso. Cominciò col dare una lista di 21 particelle “fondamentali,” esprimendo la convinzione dell’esistenza degli antinucleoni, che non erano ancora stati scoperti. Si dichiarò inoltre convinto che “filosoficamente, almeno alcune di queste 21 particelle sono lungi dall’essere elementari. Per essere elementare una particella deve essere priva di struttura. Probabilmente alcune di queste 21 particelle non sono oggetti privi di struttura. Esse possono perfino avere una qualche struttura geometrica, se ha senso parlare di geometria in regioni spaziali così piccole.”⁷⁹

Gli esperimenti iniziali col sincrociclotrone miravano alla misura della sezione d’urto totale di pioni negativi e positivi attraverso bersagli di idrogeno liquido. I primi risultati, ottenuti con pioni negativi, sembrarono indicare che il pione si comportava come una particella pseudoscalare, cosa che consentì di far giustizia di numerose teorie mesoniche. Ulteriori risultati ottenuti con pioni negativi, mostrarono che l’interazione tra pioni e protoni era forte e aveva un raggio d’azione dell’ordine della lunghezza d’onda Compton del pione. Ciò confermava che i pioni dovevano avere un ruolo di primo piano nelle interazioni nucleari. La vera sorpresa venne però dal paragone tra le sezioni d’urto totali tra pioni positivi e negativi. Consideriamo i processi:

- (A) $\pi + p \rightarrow \pi + p$ (scattering elastico)
- (B) $\pi + p \rightarrow \pi^0 + n$ (scattering con scambio di carica)
- (C) $\pi + p \rightarrow \gamma + n$ (cattura radiativa)
- (D) $\pi^+ + p \rightarrow \pi^+ + p$ (scattering elastico)

Le misure relative ai π^+ cominciarono intorno alla metà del dicembre 1951 e ben presto portarono a delle novità. Infatti, i risultati mostrarono che $\sigma(\pi^+)$ (dove σ è la sezione d’urto) era 2-3 volte più grande di $\sigma(\pi^-)$. Questo era un risultato sorprendente, a causa del maggior numero di processi che coinvolgevano pioni negativi (A, B, C) rispetto alla reazione D, l’unica concernente i π^+ . Secondo Anderson: “questa anomalia rese Fermi assai perplesso. Ricordo il giorno [21 dicembre] in cui misurammo questa sezione d’urto. Fermi stava ai contatori. Aveva un contasecondi in una mano, un regolo calcolatore nell’altra, e il calcolatore da tavolo faceva il suo caratteristico rumore meccanico. Fermi fissava con attenzione le luci lampeggianti degli indicatori per scoprire ogni possibile malfunzionamento. Dopo aver registrato ogni conteggio, calcolava il valore della sezione d’urto che ne derivava. Continuava a scuotere la testa poiché il risultato veniva così stranamente alto. C’era così poco da fare per me che mi misi comodo e cominciai a guardare la posta. Proprio quel giorno era arrivato il preprint di un lavoro di Keith Brueckner sullo scattering dei pioni da parte dei nuclei. ‘Enrico,’ dissi, dopo aver guardato una delle curve, ‘qui c’è un tizio che apparentemente pensa che la sezione d’urto dei π^+ debba essere più alta di quella dei π^- .’ Fermi replicò in maniera sprezzante: ‘perché dovrebbe saperne qualcosa?’. ‘Ma Enrico’ insistei, prendendo l’iniziativa di ridurre un po’ la curva di Brueckner, ‘questo Brueckner dice che dovremmo ottenere circa 120 millibarns per la sezione d’urto.’ ‘Stiamo ottenendo anche più di quel valore,’ Fermi ammise. ‘Fammi dare un’occhiata a quel lavoro.’ Poi: ‘Prenderesti il mio posto per 20 minuti mentre vado nel mio ufficio?’ Suppongo che Fermi andò a consultare la sua ‘Memoria Artificiale’ poiché dopo 20 minuti tornò con un largo sorriso. ‘Le sezioni d’urto saranno nel rapporto 9:2:1 per lo scattering di $\pi^+:\pi^0:\pi^-$,’ annunciò [doveva cioè valere la relazione: $\sigma(D):\sigma(B):\sigma(A)=9:2:1$]. Questo sarebbe stato in effetti il caso se

⁷⁹ E. Fermi, “Fundamental Particles,” Proceedings of the International Conference on Nuclear Physics and the Physics of Fundamental Particles. University of Chicago, 17-22 settembre 1951; anche in: *FNM*, vol. 2, pp. 825-828, p. 826.

l'interazione dominante che si aveva fosse stata nello stato di spin isotopico pari a $3/2$.⁸⁰

Fu così che venne imboccato il percorso che avrebbe gettato non poca luce sui processi di scattering pione-nucleone e sul comportamento delle forze nucleari. Il concetto di spin isotopico (o isospin), che era stato introdotto nel 1932 da Heisenberg, fu di colpo portato alla ribalta. Si capì che, nella misura in cui si può trascurare il contributo dell'interazione elettromagnetica, l'isospin si conserva nei processi che coinvolgono le forze nucleari. Ciò a sua volta dava qualche segnale sull'esistenza di simmetrie e sulla possibilità di organizzare gli adroni in multipletti di isospin. I risultati di scattering ottenuti da Fermi per il processo (D), interpretati alla luce della teoria di Brueckner, mostravano che lo scattering era dominato dallo stato in cui l'isospin totale T del sistema pione-nucleone e il momento angolare J valevano entrambi $3/2$. La scoperta di un picco pronunciato nella curva di $\sigma(\pi^+)$ in funzione dell'energia, centrato a 155 MeV (nel riferimento del centro di massa) fu la prima traccia dell'esistenza d'una risonanza nucleare, anche se ci vollero alcuni anni prima che ciò fosse inequivocabilmente dimostrato, poco dopo la morte di Fermi. La risonanza sarebbe in seguito stata chiamata "risonanza 33" o " Δ ," un multipletto con valori di carica pari a Δ^{++} , Δ^+ , Δ^0 , Δ^- . Il suo ruolo nello scattering πN (pione-nucleone) è quello d'una vera e propria particella, che si forma in base alla reazione $\Delta \rightarrow \pi + N$. A parte il valore del momento angolare totale ($3/2$), di isospin ($3/2$), e di parità (pari) essa possiede anche un valore definito di massa ($1232 \text{ MeV}/c^2$) e un tempo di vita caratteristico (10^{-23} s), con ciò mostrando tutte le proprietà di una particella instabile. La Δ fu la prima d'una lunga serie di risonanze nucleari, che sarebbero state scoperte in seguito, a energie differenti. Essa ebbe un grande impatto sullo sviluppo della fisica teorica fornendo, tra le altre cose, indicazioni circa l'esistenza di una natura composta dei nucleoni.

Tornando ai risultati di Fermi, occorre osservare che essi fornirono ai teorici uno strumento – l'isospin – indipendente dalla teoria delle perturbazioni, la quale mal si applicava alle interazioni nucleari, poiché l'intensità dell'interazione rendeva inutili i metodi perturbativi, che si erano invece rivelati così utili nella QED. Secondo Pais: "relazioni come la $\sigma(D):\sigma(B):\sigma(A)=9:2:1$ giunsero come una benedizione; finalmente i teorici avevano qualcosa da offrire ai loro colleghi sperimentali. Inoltre, poiché l'isospin non aveva nulla a che fare con la teoria delle perturbazioni, poteva servire da guida affidabile a ciò che aveva bisogno di spiegazione da parte di metodi teorici alternativi. L'isospin da solo non basta, ovviamente, a spiegare perché a una certa energia un certo stato predomina, come mostravano gli esperimenti di Chicago. La simmetria aiuta, ma fino a un certo punto. Il nuovo "trend" nella fisica teorica delle particelle, che emerse all'inizio degli anni Cinquanta come risultato degli esperimenti che avevano messo in luce il ruolo dell'isospin si può meglio comprendere forse se si paragona la Lorentz-invarianza astruendo dalla teoria di Maxwell-Lorentz con l'invarianza di isospin considerata facendo astrazione dalla teoria mesonica. Nel primo caso le equazioni che avevano rivelato l'invarianza vennero viste sotto una nuova luce: divennero più semplici da interpretare e più semplici da manipolare. Nel caso dei mesoni, d'altro canto, l'isospin sopravvisse anche quando la validità delle equazioni fornite dalle teorie mesoniche [...] divenne altamente dubbia. L'invarianza di isospin, dapprima introdotta nella teoria fenomenologica dei potenziali nucleari, e poi incorporata nella teoria di Yukawa, divenne un'invarianza "autonoma," in attesa d'una dinamica peraltro assolutamente necessaria. Questo tipo di sviluppo sarebbe occorso ancora negli anni a venire: si

⁸⁰ H. L. Anderson, "Meson Experiments with Enrico Fermi," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 27 (1955), pp. 269-272, p. 270.

parte dalle equazioni dinamiche, se ne estraggono alcune caratteristiche generali, e ci si dimentica poi del punto di partenza.”⁸¹

Ben presto tre lettere furono mandate alla *Physical Review*, che le ricevette il 21 gennaio 1952.⁸² Gli esperimenti di Fermi sollevarono l'interesse dei teorici, i quali speravano che essi avrebbero fornito la chiave per comprendere il comportamento delle forze nucleari. Richard Feynman, che allora si trovava in Brasile, ebbe uno scambio di lettere con Fermi, e mandò previsioni basate su differenti teorie mesoniche, circa le sezioni d'urto dei processi nucleone-pione. Nella sua replica Fermi usò un metodo basato sull'analisi degli spostamenti di fase. Il metodo non era nuovo, ma “l'adozione di esso da parte di Fermi fece rifiorire l'interesse nei suoi confronti, e la tecnica venne in seguito largamente usata.”⁸³ Al secondo convegno Rochester, tenutosi l'11 e il 12 gennaio 1952, Fermi “era molto eccitato per i nuovi risultati sperimentali e per la sua lettera a Richard P. Feynman sugli spostamenti di fase.”⁸⁴ Riferendo al congresso l'interpretazione che Brueckner aveva dato dei suoi stessi risultati, Fermi asserì che “si possono [...] interpretare i risultati sperimentali postulando l'esistenza d'un largo livello di risonanza $T=3/2$ nella banda d'energia 100-200 MeV, con la conseguenza che praticamente tutto lo scattering è dominato dallo stato $T=3/2$ in questo intervallo d'energia.”⁸⁵ Tuttavia, anche se aveva inizialmente sviluppato in dettaglio le conseguenze dell'ipotesi della risonanza, in pubblico Fermi fu molto più cauto e addirittura scettico circa l'esistenza d'una risonanza.⁸⁶

La cautela di Fermi era perfettamente adeguata alle circostanze, secondo quanto riportato da R. E. Marshak: “poco dopo Rochester II, C. N. Yang mise in luce un'ambiguità nell'analisi degli spostamenti di fase negli esperimenti di scattering πN [vedi più avanti], e ci vollero diversi anni prima che l'esistenza della risonanza pione-nucleone $T=3/2, J=3/2$ [...] venisse confermata con certezza. [...] È però corretto dire che dopo Rochester II il concetto di invarianza di isospin nell'interazione πN , e di conseguenza la ricerca di altre simmetrie, andò a occupare il primo posto nella ricerca teorica in fisica delle particelle. Inoltre, i metodi sviluppati per cercare la conferma della risonanza Δ furono largamente usati per investigare altre risonanze adroniche negli anni successivi. La determinazione che il pione era una particella pseudoscalare, che l'interazione pione-nucleone era isospin-invariante, e che il primo stato eccitato del nucleone possedeva numeri quantici pari a $T=3/2, J=3/2$ sembrava fornire un ragionevole punto di partenza per una teoria dinamica dell'interazione forte πN . Vi erano grandi speranze di poter emulare i successi della QED, anche se il

⁸¹ A. Pais, *Inward Bound*, cit., pp. 486-487.

⁸² H. L. Anderson, E. Fermi, E. A. Long, R. Martin, D. E. Nagle, “Total cross section of negative pions in hydrogen;” E. Fermi, H. L. Anderson, A. Lundby, D. E. Nagle, G. B. Yodh, “Ordinary and exchange scattering of negative pions by hydrogen;” H. L. Anderson, E. Fermi, E. A. Long, and D. E. Nagle, “Total cross section of positive pions in hydrogen;” *PR*, vol. 85 (1952), p. 934, 935 e 936. Anche in: *FNM*, vol. 2, lavori nn. 248, 249, 250.

⁸³ H. L. Anderson, introduzione ai lavori nn. 251 e 255, *FNM*, vol. 2, p. 844; E. Fermi, “Letter to Feynman,” 18 gennaio 1952, *FNM*, vol. 2, lavoro n. 251, pp. 844-846. Si veda anche R. Feynman a E. Fermi, 19 dicembre 1951, *FFP*, box 9.

⁸⁴ C. N. Yang, “Particle physics in the early 1950s,” in: *PQ*, p. 41. La lettera di Fermi a Feynman venne riprodotta come Appendice 3 negli atti della conferenza.

⁸⁵ E. Fermi, in “Proceedings of Second Rochester Conference, Jan. 1952,” note a cura di A. M. L. Messiah e H. P. Noyes, p. 26.

⁸⁶ H. Anderson, “Early history of physics with accelerators,” in *Colloque International sur l'Histoire de la Physique des Particules*, cit., pp. 101-161, p. 130 e segg.; si vedano anche i “Proceedings of Second Rochester Conference, Jan. 1952,” cit., p. 31 e segg. e p. 37 e segg.

bosone che mediava la forza era pseudoscalare e non vettoriale e la simmetria complessiva era SU(2) e non U(1). I teorici tentarono di ripercorrere la strategia di rinormalizzazione che era stata impiegata nella QED, ma, sfortunatamente, sottovalutarono l'importanza del ruolo che l'invarianza di gauge gioca nella QED [...] divenne ben presto chiaro che il grande valore della costante d'accoppiamento πN era essenziale per l'approccio perturbativo caratteristico della QED.⁸⁷

Il passo successivo era ottenere informazioni più dettagliate sui processi di scattering. Per fare ciò occorre fare misure della distribuzione angolare dei pioni diffusi. Ci si aspettava che, a basse energie, solo gli stati di momento angolare s e p fossero importanti. Ne seguiva allora che doveva valere la seguente relazione tra la sezione d'urto differenziale e l'angolo di scattering:

$$(1) \quad d\sigma / d\Omega = a + b \cos \theta + c \cos^2 \theta$$

Assumendo per il pione spin pari a 0, e sapendo che i nucleoni hanno spin 1/2, si hanno tre possibili stati: $s_{1/2}$, $p_{1/2}$ and $p_{3/2}$, poiché lo spin totale può essere 1/2 e 3/2. Questi tre stati possono esistere in uno dei due possibili stati di spin isotopico $T=1/2$ e $T=3/2$. Abbiamo così sei differenti stati e sei spostamenti di fase $\alpha_1 \dots \alpha_6$ da determinare. Per ogni energia, venivano compiute misure a tre angoli per ognuno dei tre processi $\pi^+ \rightarrow \pi^+$, $\pi^- \rightarrow \pi^0$, $\pi^- \rightarrow \pi^-$; ciò dava nove valori sperimentali per le sezioni d'urto, che, sebbene affetti da errore sperimentale, consentivano di determinare i sei spostamenti di fase, che a loro volta avrebbero dato importanti informazioni sul processo di scattering e sull'esistenza della risonanza pione-nucleone. Fermi aveva analizzato in precedenza i dati in termini di spostamenti di fase servendosi di calcolatrici da tavolo. La complessità e la ripetitività dei calcoli e l'abbondanza di risultati, che cominciavano ad affluire anche da altri laboratori (Columbia e Carnegie), consigliava però di rivolgersi a un computer. Proprio in quel periodo divenne operativo il primo di una serie di tre computer elettronici realizzati da Nick Metropolis. Il loro nome era MANIAC (MAtheMatical Numerical Integrator and Computer), e il MANIAC I, il capostipite, entrò in funzione a Los Alamos il 15 marzo 1952. Fermi, con la sua passione per i computer, propose di servirsi del MANIAC per calcolare gli spostamenti di fase.⁸⁸ Dal punto di vista matematico, si era deciso di usare un "fit" mediante il metodo dei minimi quadrati per trarre il massimo vantaggio dai dati disponibili. Il problema era quindi trovare i sei spostamenti di fase $\alpha_1 \dots \alpha_6$ che rendono minimo M nell'equazione seguente:

$$(2) \quad M(\alpha_1 \dots \alpha_6) = \sum_{i=1}^9 [\sigma_i(\text{calcolato}) - \sigma_i(\text{misurato})]^2 / \epsilon_i^2$$

dove gli ϵ_i sono gli errori sperimentali nella misura delle sezioni d'urto σ_i .

Come ricorda Anderson, "il MANIAC affascinava Fermi, ed egli era ansioso di mettervi sopra le mani. Ora aveva un problema da sottoporre alla macchina. Metropolis gli insegnava come fare, ed egli poneva alla macchina i suoi quesiti, osservava la macchina mentre li macinava, e ne raccoglieva le risposte man mano che venivano fuori."⁸⁹ Il MANIAC trovò il "set" di spostamenti di fase. Il fatto è che ne trovò più di uno. "Per alcuni anni" ricorda ancora Anderson "gli esperti di fisica

⁸⁷ R. E. Marshak, "Scientific impact of the first decade of the Rochester conferences (1950-1960)," in: *PQ*, pp. 651-652.

⁸⁸ Si veda H. L. Anderson, "Meson Experiments with Enrico Fermi," cit., p. 271; N. Metropolis, introduzione al lavoro n. 256, *FNM*, vol. 2, p. 861.

⁸⁹ H. L. Anderson, "Meson Experiments with Enrico Fermi," cit., p. 271.

dei pionieri parlarono di possibili soluzioni differenti. C'era la soluzione di Fermi e la soluzione di Yang; poi un'altra, chiamata soluzione di Fermi-Metropolis, poi la soluzione di Steinberger e infine la soluzione di Bethe-De Hoffmann.⁹⁰ Fermi lavorò con foga nei suoi due ultimi anni di vita per venire a capo del problema degli spostamenti di fase. Passò le estati del 1952 e del 1953 a Los Alamos a lavorare col MANIAC; nel periodo 1952-1954 corrispose inoltre intensamente con Metropolis da Chicago. Nell'autunno del 1953 il lavoro di Fermi venne ripreso e ampliato da Hans Bethe, Frederick De Hoffmann, Nick Metropolis and E. Alei, i quali fecero uso dei nuovi dati che cominciavano a venire fuori da altri laboratori. Vennero impiegate varie tecniche per distinguere il significato fisico delle varie soluzioni trovate dal MANIAC. Non molto dopo la morte di Fermi si giunse a stabilire che "la soluzione di Bethe-De Hoffmann, che in realtà era la scelta originale di Fermi opportunamente estesa nella regione delle alte energie, era con ogni probabilità quella corretta."⁹¹

7 - Epilogo: la visione di Fermi della fisica teorica e la fisica negli anni Cinquanta

Abbiamo sinora seguito Fermi in numerosi aspetti del suo lavoro nella fisica delle particelle: la sua motivazione iniziale alla realizzazione di una scuola di fisica, la sua opinione rispetto ai nuovi strumenti, il suo lavoro teorico e i suoi esperimenti sullo scattering pione-nucleone. Per completare questa rassegna occorre ora esaminare la sua attitudine rispetto alla fisica teorica delle particelle elementari nel contesto della crisi alla quale la fisica teorica sembrava andare incontro all'inizio degli anni Cinquanta.

Anzitutto, abbiamo il Fermi teorico. Il suo approccio alla fisica teorica era pragmatico e molto caratteristico, come ha ricordato Anderson: "Abbiamo discusso a lungo [...] su come [...] gli sperimentatori siano scarsamente ispirati dalla teoria e su come i teorici riescano talora ad anticipare alcuni degli sviluppi nell'elaborare alcune loro idee. Ma voglio menzionare un altro tipo di teorico, a causa della mia familiarità col lavoro di Fermi. Egli era il tipo di teorico che non lavora affatto in questo modo. Se voi esaminate tutti i lavori teorici di Fermi, e ve ne sono alcuni molto importanti, come sapete, essi partirono sempre dalla necessità di spiegare qualche fatto sperimentale. [...] Alla fine di quasi ogni lavoro in cui lui fece qualche sviluppo teorico, c'era sempre un calcolo per mostrare che la teoria era in accordo con l'esperimento."⁹²

In secondo luogo, abbiamo in Fermi un teorico "disincantato." Allorché si rese conto delle gravi difficoltà in cui versavano le teorie mesoniche, Fermi fu ben presto portato a ritenere che c'era qualcosa di profondamente sbagliato in esse e che non valeva la pena di usarle in lunghi calcoli che potevano benissimo portare a risultati lontani dalla realtà fisica. Questa fu la motivazione per la teoria di Fermi delle produzioni statistiche multiple di mesoni che usò come guida nelle sue investigazioni sperimentali. Questa attitudine di Fermi cominciò a emergere fin dal 1951, quando

⁹⁰ H. L. Anderson, introduzione ai lavori nn. 257 e 258, *FNM*, vol. 2, p. 871.

⁹¹ H. L. Anderson, introduzione ai lavori nn. 257 e 258, *FNM*, vol. 2, p. 871. Si veda anche H. L. Anderson, "Meson Experiments with Enrico Fermi," cit., p. 272; F. De Hoffmann, N. Metropolis, E. Alei, H. A. Bethe, *PR*, vol. 95 (1954), p. 1586; H. L. Anderson, E. Fermi, R. Martin, D. E. Nagle, "Angular distribution of pions scattered by hydrogen," *PR*, vol. 91 (1953), pp. 155-168 (anche in *FNM*, lavoro n. 257); E. Fermi, M. Glicksman, R. Martin, D. E. Nagle, "Scattering of negative pions by hydrogen," *PR*, vol. 92 (1953), pp. 161-163 (anche in *FNM*, lavoro n. 259); E. Fermi, N. Metropolis, E. Alei, "Phase shift analysis of the scattering of negative pions by hydrogen," *PR*, vol. 95 (1954), pp. 1581-1585 (anche in *FNM*, lavoro n. 260).

⁹² H. L. Anderson, in: L. M. Brown, L. Hoddeson, (a cura di): *The Birth of Particle Physics*, cit., p. 268.

era già al lavoro sullo scattering pione-nucleone. Nell'ottobre di quell'anno, di fronte a un pubblico di tremila persone riunite nella Chicago Civic Opera House per celebrare il ventesimo anniversario dell'Institute of Physics di Chicago, pronunciò un discorso nel quale affermò che "quando la teoria di Yukawa fu proposta, vi era la fondata speranza che le particelle coinvolte, protoni, neutroni e mesoni-pi potessero essere considerati legittimamente come particelle elementari. Questa speranza perde ora sempre di più il suo fondamento, man mano che nuove particelle elementari vengono scoperte [...] certo, è possibile che presto qualcuno venga fuori con una soluzione al problema del mesone, e che i risultati sperimentali confermeranno così numerosi dettagli della teoria che ciascuno si convincerà che la teoria è quella giusta. Cose del genere sono accadute nel passato. Possono accadere ancora. Tuttavia, non credo che possiamo fare conto su ciò, e credo che dobbiamo prepararci a uno sforzo lungo e intenso."⁹³

Come molti altri, Fermi era insoddisfatto delle teorie mesoniche e la sua preoccupazione cresceva col numero di nuove particelle che venivano scoperte in continuazione. Come detto in precedenza, nel secondo convegno Rochester (gennaio 1952) un intero giorno venne dedicato alle nuove particelle. Significativamente, la relazione di Marshak si intitolava "Essere o non essere (esterrefatti)." A quell'epoca Fermi aveva già dato per conto suo l'ostracismo al termine "particelle elementari" e per questo motivo la sessione sulle nuove particelle ebbe per titolo "Megalomorfi," per indicare particelle dotate d'una molteplicità strutturale.⁹⁴ All'inizio degli anni Cinquanta Fermi era ormai convinto che la fisica teorica andava verso una nuova rivoluzione, come era stato all'epoca della nascita della meccanica quantistica, circa venticinque anni prima. Egli dubitava che la meccanica quantistica continuasse a valere all'interno di una regione (che egli chiamava "contatto") di dimensioni paragonabili al raggio d'azione delle forze nucleari, cioè 10^{-13} cm, e riteneva che la fisica dovesse limitarsi a cercare di spiegare ciò che si verificava al di fuori di tale regione. Al già ricordato convegno internazionale di Chicago del settembre 1951 disse: "È desiderabile organizzare i dati sperimentali in modo tale da mostrare il più chiaramente possibile le caratteristiche che giungono dalle interazioni tra particelle elementari che avvengono nella "zona di contatto," ovvero entro 10^{-13} cm. Ciò può essere fatto assumendo la validità della meccanica quantistica al di fuori della "zona di contatto" (ci sono pochi dubbi secondo me che ciò accada) e usandola per rimuovere dallo scenario fenomeni che non dipendono da ciò che accade nel volume racchiuso all'interno nella "zona di contatto". Il risultato è un'espressione compressa di risultati sperimentali, in cui la natura delle interazioni fondamentali tra particelle può essere compresa più facilmente." E aggiunse: "nella regione corrispondente a 10^{-13} cm ci sono i leoni, che ci mangeranno se cerchiamo di entrarvi."⁹⁵ Come abbiamo visto, anche Oppenheimer aveva mostrato un punto di vista simile al convegno di Shelter Island nel 1947. Yang ha osservato che nel periodo 1945-1955 "I fisici nati prima del 1905 mostravano di avere riserve [...] sull'applicabilità o meno della meccanica quantistica all'interno di regioni di dimensioni dell'ordine 'del raggio dell'elettrone' [...] Dall'altra parte, nello stesso periodo, I fisici più giovani, quelli della mia generazione, sembravano preoccuparsi assai poco della questione della validità della meccanica quantistica."⁹⁶

Fermi espresse più volte l'ipotesi che la rivoluzione cui secondo lui la fisica andava incontro avrebbe infine richiesto la costruzione d'una nuova matematica e d'una nuova geometria, all'interno della regione che egli chiamava "contatto": "forse l'introduzione d'una dimensione finita per le particelle elementari o addirittura una

⁹³ E. Fermi, "The Nucleus," *Physics Today*, vol. 5 (marzo 1952), pp. 6-9, anche in *FNM*, vol. 2, lavoro n. 247, p. 834.

⁹⁴ "Proceedings of Second Rochester Conference, Jan. 1952," cit., p. 50.

⁹⁵ E. Fermi, "Fundamental Particles," cit.; anche in: *FNM*, vol. 2, pp. 825-828, p. 827.

⁹⁶ C. N. Yang, "Particle physics in the early 1950s," in: *PQ*, p. 42.

geometria granulare come quella proposta da Heisenberg e Snyder possono essere la chiave della soluzione.⁹⁷ Fermi pertanto mostrava d'essere influenzato dalla cosiddetta "teoria della matrice-S" di Heisenberg, una teoria basata solo su quantità osservabili, che escludeva distanze al di sotto di 10^{-13} cm e intervalli di tempo più brevi di 3×10^{-24} s.⁹⁸

Di fronte a una situazione così sconcertante, Fermi riteneva che la fisica teorica dovesse tornare alle origini dell'investigazione scientifica e dovesse procedere attenendosi strettamente ai dati sperimentali. Al convegno di Chicago espresse la sua visione delle cose: "La ricerca teorica può procedere secondo due percorsi. 1. Raccogli dati sperimentali, studiali, fai ipotesi, fai previsioni e poi controllale. 2. Tira a indovinare; se la natura è gentile e l'indovino è bravo può avere successo. Il programma che io raccomando si trova più vicino al primo percorso." Un mese dopo, alla celebrazione dell'anniversario dell'Istituto di fisica, fu ancora più esplicito: "È difficile dire quale sarà lo sviluppo in futuro. Uno può rivolgersi ai libri sul metodo (dubito che molti fisici lo facciano) dai quali si imparerà che uno deve prendere dati sperimentali, raccogliere dati sperimentali, organizzare dati sperimentali, cominciare a fare ipotesi di lavoro, cercare di stabilire correlazioni, e così via, finché alla fine emerge un pattern e uno non deve far altro che prenderne i risultati. Può darsi che il metodo scientifico tradizionale dei libri di testo sia la guida migliore, in mancanza di nient'altro di meglio."⁹⁹ Le raccomandazioni di Fermi furono prese in considerazione in casi in cui i dati sperimentali erano assolutamente incomprensibili, come nel caso dei mesoni-K: "i fisici più anziani fecero propria l'attitudine generale di Enrico Fermi: raccogliere evidenza sperimentale, ma non fare ipotesi sull'identità di alcuno di questi mesoni-K finché i dati sperimentali non lasciano altre possibilità."¹⁰⁰

Nell'analizzare il ruolo svolto da Fermi nella fisica al principio degli anni Cinquanta, occorre tener presente lo stato della fisica teorica in quegli anni e, in particolare, la sua relazione con la fisica sperimentale: "in anni recenti, quando la teoria ha "richiesto" nuove particelle (come le W e Z), gli esperimenti, obbedienti, le hanno prodotte, ma negli anni Cinquanta gli esperimenti sopravanzavano la teoria producendo una sorpresa dopo l'altra. Né il muone né le particelle strane erano attese, né furono salutate con gioia, [...] poiché distrussero ciò che avrebbe potuto essere l'accordo per una nuova unificazione. Senza il muone, i fisici avevano previsto un sistema chiuso in cui l'elettrone, il protone e l'elettrone erano le particelle costituenti la materia, mentre i fotone e il mesone di Yukawa erano i quanti portatori dell'interazione elettromagnetica e forte. Aggiungete il neutrino per le interazioni deboli e completate il quadro includendo le antiparticelle dei fermioni. Il muone cambiò tutto questo."¹⁰¹

Nello scenario degli anni Cinquanta, in cui la fisica teorica dovette affrontare un numero crescente di eventi imprevedibili che scaturivano dagli esperimenti, un fisico come Fermi, abituato a lavorare coi fisici sperimentali, egli stesso sperimentatore di gran classe, fisico teorico pragmatico, abituato a non perdere mai di vista l'evidenza sperimentale, possedeva in sommo grado le capacità e l'attitudine così necessarie alla fisica di quegli anni. Pertanto, l'influenza esercitata da Fermi può ben essere andata al di là dei contenuti della sua attività di ricercatore, poiché egli di fatto insegnò uno stile, un modo di fare fisica a una generazione di fisici che, con le loro

⁹⁷ E. Fermi, *Elementary Particles*, cit., p. 24.

⁹⁸ Si veda, ad esempio, H. Reichenberg, "The early S-matrix theory and its propagation (1942-1952)," in: *PQ*, p. 552.

⁹⁹ E. Fermi, "Fundamental Particles," cit.; anche in: *FNM*, vol. 2, pp. 825-828, p. 827; "The Nucleus," cit., p. 834.

¹⁰⁰ R. H. Dalitz, "K-meson decays and parity violation," in: *PQ*, p. 435.

¹⁰¹ L. M. Brown, M. Dresden, L. Hoddeson, "Pions to quarks: particle physics in the 1950s," in: *PQ*, p. 4.

scoperte, avrebbero rivoluzionato questa disciplina tra gli anni Cinquanta e i Sessanta. È stato già messo in luce il pragmatismo della generazione di fisici teorici che operarono negli U.S.A. nel dopoguerra, e lo spirito pragmatico di teorie come quella della matrice-*S* e quella basata sulle relazioni di dispersione che, entrambe, giocarono un ruolo importante negli anni Cinquanta.¹⁰² Vi sono molte ragioni che determinarono questo svolgimento dei fatti, e un esame completo è al di fuori della portata di questo lavoro. Si può dire tuttavia che tra queste ragioni l'influenza esercitata da un personaggio come Fermi giocò un ruolo significativo, e il fatto che molti protagonisti delle teorie appena ricordate fossero stati suoi studenti è di per sé rivelatore.

Possiamo chiederci se la rivoluzione in fisica prevista da Fermi si verificò o meno. Col senno di poi possiamo dire "sì e no." Da una parte, non sono stati trovati limiti alla validità della meccanica quantistica. Dall'altra, la fisica teorica ha subito cambiamenti profondi fin dai primi anni Cinquanta e si può in buona sostanza dire che una vera e propria rivoluzione si è verificata con l'introduzione dei quarks, della QCD e della teoria elettrodebole. La teoria quantistica dei campi, la cui validità sembrava, negli ultimi anni di Fermi, confinata all'elettrodinamica quantistica, è tornata di nuovo al centro del palcoscenico dopo che si è ravvisata l'importanza delle teorie di gauge non-abeliane.

Come osservazione conclusiva, è interessante mostrare il punto di vista di Fermi circa una delle questioni che negli anni a venire avrebbero suscitato più di qualche dibattito, nella comunità dei fisici e non solo: l'utilità intrinseca della fisica delle particelle, o, in altre parole, la giustificazione di enormi investimenti di denaro per finanziare la costruzione di strumenti e l'esecuzione di esperimenti sempre più costosi. Fermi era un uomo profondamente legato allo spirito della scienza, e riteneva che "la vocazione d'uno scienziato è di far avanzare le frontiere della conoscenza in tutte le direzioni." Egli aveva una fede incrollabile nell'utilità intrinseca di perseguire comunque la fisica delle particelle, comunque astratta o complessa questa ricerca potesse essere. Ciò è testimoniato dalle parole che pronunciò in un discorso tenuto all'epoca del famoso secondo convegno Rochester, dove anticipò i dibattiti e le discussioni che si sarebbero verificati in futuro: "alcuni di voi possono chiedersi: qual è il vantaggio nel lavorare così duramente solo per raccogliere alcuni fatti che non porteranno alcun piacere ad alcuno se non a un ristretto numero di professori dai lunghi capelli, i quali amano raccogliere cose come queste, e non saranno utili per nessuno perché solo pochi specialisti sono in grado di capirli? Nel rispondere a questa domanda vorrei fare una previsione il cui verificarsi considero ragionevolmente certo. La storia della scienza e della tecnologia ci ha spesso insegnato che i progressi scientifici nelle conoscenze di base hanno sempre prima o poi portato ad applicazioni tecniche e industriali che hanno rivoluzionato il nostro modo di vivere. Mi sembra improbabile che lo sforzo [che stiamo facendo] verso la comprensione della struttura della materia possa rappresentare un'eccezione a questa regola. Ciò che è meno certo, e ciò che tutti noi speriamo ardentemente è che l'uomo presto diventi sufficientemente adulto da far buon uso del potere che egli acquista sulla natura."¹⁰³

Se la visione concernente la fisica delle alte energie è nel corso degli anni forse un po' cambiata, l'ultima affermazione di Fermi è più che mai attuale, e la sua validità non si limita alla fisica, ma abbraccia l'intero regno della conoscenza umana.

¹⁰² Si veda, ad esempio, A. Pickering: "From field theory to phenomenology: the history of dispersion relations," e S. Schweber, "Some reflections on the history of particle physics in the 1950s," in: *PQ*, p. 587 e pp. 671-674.

¹⁰³ E. Fermi, "The Future of Nuclear Physics," Rochester, 10 gennaio 1952, *EFP*, box 53.

Trimestre	Numero	Materia
Inverno 1946	328	Struttura nucleare
Primavera 1946	310	Elettrodinamica I
Autunno 1946	105	Fisica generale I
	371	Problemi particolari in fisica
Inverno 1947	106	Fisica generale II
	372	Problemi particolari in fisica
Primavera 1947	107	Fisica generale III
	373	Problemi particolari in fisica
	403	Ricerca in fisica
Autunno 1947	241	Meccanica quantistica e struttura atomica I
Inverno 1947	242	Meccanica quantistica e struttura atomica II
Inverno 1949	262	Fisica nucleare I
Primavera 1949	263	Fisica nucleare II
Estate 1949	202	Fisica matematica II
	242	Meccanica quantistica e struttura atomica II
	262	Struttura nucleare I
Inverno 1950	242	Meccanica quantistica e struttura atomica II
Autunno 1950	463	Fisica nucleare
Inverno 1951	411	Fisica dei solidi
Primavera 1951	451	Particelle nucleari
Autunno 1951	252	Termodinamica e fisica statistica II
Inverno 1953	463	Fisica nucleare II
Primavera 1953	464	Particelle nucleari

Tabella 1 - Elenco dei corsi ufficiali impartiti a Chicago da E. Fermi nel periodo 1946-1953. Fonte: V. L. Telegdi, "Enrico Fermi in America," in: *Symposium dedicated to Enrico Fermi on the occasion of the 50th anniversary of the first reactor*, Atti dei Convegni Lincei, vol. 104, pp. 71-90, Roma, 1993, p. 81.

Studenti (N=premioNobel)	Periodo di conseguimento del PhD e - ove possibile - titolo della tesi
George W. Farwell	Giugno 1948.
Albert Wattenberg	Giugno 1948.
Chen Ning Yang (N 1957)	Giugno 1948, "On the angular distributions in nuclear reactions and coincidence measurements," <i>PR</i> , 74(1948), 764.
Geoffrey F. Chew	Settembre 1948, "Elastic scattering of high-energy nucleons by deuterons," <i>PR</i> , 74(1948), 809.
Marvin L. Goldberger	Settembre 1948, "Interaction of high-energy neutrons and heavy nuclei," <i>PR</i> 74(1948), 1269
Howard A. Wilcox	Settembre 1948, "Experimental determination of rate of energy loss for slow H ¹ , H ² , He ⁴ , Li ⁶ nuclei in Au and Al," <i>PR</i> 74(1948), 1743.
Harold V. Argo	Dicembre 1948, "Direct determination of the energy of the He ³ nucleus from the D-D reaction," <i>PR</i> 74(1948), 1293.
Lincoln Wolfenstein	Marzo 1949, "Theory of proposed reactions involving polarized protons," <i>PR</i> 75(1949), 1664.
Jack Steinberger (N 1988)	Giugno 1949, "On the range of electrons in meson decay," <i>PR</i> 75(1949), 1136.
David Lazarus	Giugno 1949, "Measurements of elastic constants of some cubic crystals at high pressures," <i>PR</i> 76(1949), 545
Marshall N. Rosenbluth	Giugno 1949, "Electromagnetic interaction of a vector meson with a scalar excited state," <i>PR</i> 76(1949), 951
Rudolph M. Sternheimer	Giugno 1949, "On the compressibility of metallic Cesium," <i>PR</i> 78,(1950), 235.
Allan H. Morrish	Settembre 1949, "Absolute voltage determination of two nuclear resonances below 0.4 MeV" <i>PR</i> , 76(1949), 1651.
Sidney Warshaw	Settembre 1949, "Stopping power for protons in several metals," <i>PR</i> , 76(1949), 1759.
John R. Reitz	Settembre 1949, "Effect of screening on beta-ray spectra and internal conversion," <i>PR</i> , 77(1950), 10.
Harold M. Agnew	Settembre 1949, "Beta-spectra of Cs ¹³⁷ , Y ⁹¹ , Pm ¹⁴⁷ , Ru ¹⁰⁶ , Sm ¹⁵¹ , P ³² , and Tm ⁷⁰ ," <i>PR</i> , 77(1950), 655.
Owen Chamberlain (N 1959)	Dicembre 1949, "Neutron diffraction in liquid sulfur, lead and bismuth," <i>PR</i> , 77(1950), 305.
Walter Selove	Dicembre 1949, "The 5eV neutron resonance in Ag," <i>PR</i> , 77(1950), 557
Richard L. Garwin	Dicembre 1949, "An experimental investigation of the beta-gamma angular correlation in beta decay," Letter to Ed. of <i>PR</i> , 76(1949), 1876.
Tsun Dao Lee (N 1957)	Giugno 1950, "Hydrogen content and energy-productive mechanism of white dwarfs," <i>Astrophys. J.</i> 111(1950), 625.
Uri Haber-Schaim	Agosto 1951, "A deduction of the high energy spectrum of cosmic ray primary nucleons from the observed muon spectrum," <i>PR</i> , 84(1951), 1199.
Jay Orear	Estate 1953
John Rayne	1954

Robert Schluter	1954
Arthur H. Rosenfeld	1954
Horace D. Taft	1954
Jerome I. Friedman (N 1990)	1956 (conferito dopo la morte di Fermi)
Gaurang B. Yodh	1955 (conferito dopo la morte di Fermi)
James W. Cronin (N 1980)	1955 (conferito dopo la morte di Fermi)

Tabella 2 - Elenco di studenti all'Institute for Nuclear Studies di Chicago nel periodo 1946-1954. Molti di essi (tra questi Yang, Chew, Goldberger, Wolfenstein, Chamberlain, Steinberger, Garwin, Lee, Haber-Schaim) ebbero Fermi come *tutor* per il PhD; tutti furono studenti dei suoi corsi. Ove possibile, è stata indicata la data di conseguimento del PhD. Fonti: V. L. Telegdi, "Enrico Fermi in America," in: *Symposium dedicated to Enrico Fermi on the occasion of the 50th anniversary of the first reactor*, Atti dei Convegni Lincei, vol. 104, pp. 71-90, Roma, 1993, p. 81; "Ph.D. Register 1946-1952," *EFP*, box 13; C. N. Yang, introduzione al lavoro n. 239 di FNM, vol. II, p. 674; E. Segrè, *Enrico Fermi, fisico*, cit., p. 171.