

Le ultime lezioni di Fermi

RENATO ANGELO RICCI

Introduzione

“...Nel preparare queste note, sono stato gratificato dal fatto di incontrare frequentemente sezioni che sono così uniche nel loro linguaggio e nella loro trattazione da evocare in me, ancora, la figura di Fermi intento ad esporle, durante quelle mattinate deliziose nella magnifica cornice di Villa Monastero sul Lago di Como...”.

Con queste parole B. T. Feld presentava la pubblicazione delle “Lectures on Pions and Nucleons”, per gli Atti della Scuola Internazionale di Fisica di Varenna, lezioni tenute da Enrico Fermi [1] per il II corso su “Questioni relative alla rivelazione delle particelle elementari...”, diretto da G. Puppi nel 1954, giusto pochi mesi prima della sua morte.

Queste lezioni, raccolte dagli studenti del corso ed editate appunto da B. T. Feld, sono state ristampate e tradotte in italiano dalla Società Italiana di Fisica nel 1983 in occasione della celebrazione del XXX anniversario della Scuola intitolata al nome di Fermi un anno dopo la sua morte [2] *“...non sono certo nella forma — come dice ancora Feld — in cui Fermi stesso le avrebbe scritte per la pubblicazione, essendo diversi i suoi metodi di presentazione orale e scritta. Tuttavia, nella loro forma presente, esse illustrano (tenendo conto dei limiti di coloro che le hanno trascritte ed editate) le qualità uniche di Fermi come espositore e docente.”*

Non si potrebbe meglio presentare non solo questa serie di lezioni, che fu l’ultima, ma anche le altre precedenti e, in particolare, quelle che Fermi tenne a Chicago, come il corso di “Fisica Nucleare” del 1949-50 e raccolte nel volume ben noto “Nuclear Physics” (the University Chicago Press) da J. Orear, A. H. Rosenfeld e R. A. Schluter, o le note manoscritte relative ai corsi di Termodinamica e Statistica e di Meccanica Quantistica

tenuti da Fermi rispettivamente nel 1951-52 e nel 1954 e pubblicate dall'Università di Chicago, con la prefazione di Emilio Segrè, le prime nel 1966 e le seconde nel 1961.

Nel caso del testo di Fisica Nucleare siamo quindi in presenza, come per le lezioni alla Scuola di Varenna, di note prese e riprodotte da altri, (nel caso specifico da Orear, Rosenfeld e Schluter, di cui citiamo in seguito la prefazione), mentre negli altri due casi le note sono di Fermi stesso e costituiscono l'ultima versione delle sue presentazioni ed esposizioni, in seguito all'evoluzione dei contenuti durante vari anni di insegnamento. Un discorso a parte merita infine il volume "Elementary Particles", direttamente curato da Fermi e stampato nel 1951 dalla Yale University, presso la quale egli aveva tenuto un corso di 6 lezioni, dedicato agli studenti e ai fisici sperimentali, che forma il contenuto del libro. E che, specificamente, come vedremo, lo stesso Fermi ritiene importante (noi diremmo fondamentale) per la comprensione di argomenti spesso di tipo specialistico e altamente teorico.

Del resto, Fermi, proprio in quell'occasione, tenne un altro ciclo di 6 lezioni per il pubblico, alle quali probabilmente si ricollegano le conferenze italiane di Fisica atomica, cui accenneremo in seguito.

È quindi con un senso di grande rispetto oltre che di grande ammirazione che ci si può avvicinare a questa "eredità culturale" di Enrico Fermi, non inferiore a quella relativa alle sue fondamentali scoperte ed invenzioni. Fermi era indubbiamente dotato di grandi doti esplicative che, insieme con le sue geniali intuizioni teoriche e la notevole attitudine sperimentale, ne facevano un maestro capace di esprimere qualità eccezionali di reinterpretazione e di presentazione, a profitto soprattutto di chi deve imparare.

Nella prefazione alle "Notes on Quantum Mechanics", Emilio Segrè spiega bene questa peculiarità di Fermi. Nell'augurarsi che le note siano apprezzate particolarmente dai giovani fisici delle generazioni successive "*che non hanno mai avuto contatti diretti con Fermi e per i quali egli non è altro che un nome tra i grandi fisici del secolo*" e che sia di gran giovamento per essi avere tra le proprie mani "*un manuale su un argomento così importante come la meccanica quantistica scritto da un tale maestro*", egli precisa:

"...esse (le note) non possono essere interpretate in alcun modo come la presentazione finale della meccanica quantistica da parte di Fermi, quale egli avrebbe potuto dare in un testo più elaborato. Heisenberg, Pauli, Dirac, de Broglie, Jordan, Kramers, tanto per menzionare alcuni dei creatori della meccanica quantistica, hanno tutti presentato la loro propria versione in libri a giusto titolo famosi. Le note di Fermi non possono essere confrontate con questi testi. Esse sono scritte in uno spirito e con uno scopo completamente diversi... Negli ultimi dieci o quindici anni della sua vita raramente egli lesse un libro di fisica. Egli andava al passo con gli sviluppi scientifici essenzialmente acquisendo i risultati delle ricerche e ricostruendoli personalmente... È quasi certo che egli non consultò alcun testo di meccanica quantistica nel compilare queste note... (le quali) ...furono chiaramente preparate solo per le lezioni e che la loro distribuzione al di là della classe di studenti non era prevista dall'autore".

Soprattutto di queste "lezioni", intese in senso stretto, si tratterà in questo articolo. E, tuttavia, sarà opportuno citare per lo meno due altre serie di esposizioni scientificamente

didattiche di Fermi, quali le “Conferenze di Fisica Atomica” [5], tenute nel 1950 a Roma e a Milano e, più indietro, il corso di Fisica dei Neutroni [4], tenuto a Los Alamos nel 1945.

Le 9 Conferenze di Fisica Atomica, 6 a Roma e 3 a Milano, vennero tenute da Fermi durante il suo soggiorno in Italia nell'autunno del 1950, dopo 11 anni di assenza, accogliendo un invito della Fondazione Donegani. Esse furono registrate e poi redatte in sequenza da Sebastiano Sciuti e Lucio Mezzetti (Le particelle elementari), Ettore Pancini (Teorie sull'origine degli elementi), Nestore B. Cacciapuoti (La ricerca di un'attrazione tra elettrone e neutrone), Mario Ageno (Orbite nucleari), Giuseppe Morpurgo (Nuovi sviluppi dell'elettrodinamica quantistica), Carlo Salvetti (Il Neutrone e analogie ottiche nelle proprietà dei neutroni) e Piero Caldirola (Il monopolio di Dirac).

Seguite, allora, come si può immaginare e come afferma G. Castelnuovo nella presentazione del volume edito dall'Accademia dei Lincei “...da un pubblico numeroso che affollava l'aula dell'Istituto di Fisica di Roma e la grande sala della Società Montecatini a Milano”, tali conferenze possono ben essere considerate lezioni mirabili sulla evoluzione della fisica moderna e su vari aspetti di fondamentale rilevanza, come si può comprendere dai titoli degli argomenti trattati.

Per quanto riguarda il corso di Fisica dei Neutroni, tenuto da Fermi nell'autunno del 1945 come parte del programma dell'Università di Los Alamos, esso consiste di 30 lezioni (solo alcune tenute, in sua assenza, da R. F. Christy e da E. Segrè) che ci interessano qui per due motivi.

Il primo è che esse costituirono un corso vero e proprio a beneficio di giovani fisici (Segrè parla di una trentina fra matricole e *graduates*) che presero nota delle lezioni che furono poi redatte, così come altre di Fermi, senza la sua revisione. Siamo quindi in piena atmosfera pedagogica, sia pure nel contesto di una comunità ancora chiusa quale quella di Los Alamos nel periodo di conclusione della guerra.

Questo corso di Fisica dei Neutroni, del resto, che fu curato da I. Halpern e revisionato da B. T. Feld, costituisce anch'esso un saggio dello stile didattico di Fermi e contiene buona parte del materiale poi apparso in testi più convenzionali, per esempio nel corso di Fisica Nucleare già citato.

Il secondo motivo è che questa serie di lezioni si rifà ad informazioni originali dell'epoca e, pertanto, segrete. La I parte, contenente la fisica dei neutroni, senza riferimento alle reazioni a catena, fu subito liberata dalla segretezza e fatta circolare; la II parte venne liberata e pubblicata nel 1962. Se ne parlerà in connessione con il testo di Fisica Nucleare.

Questa sintetica introduzione ci permette di ribadire un concetto essenziale, che giustifica il compito di tentare la presentazione delle ultime lezioni di Fermi. Parafrasando Segrè diremo che e perchè si conosce “...il grande interesse di Fermi per l'insegnamento che pensiamo non sia irriverente per la sua memoria.... (presentarle) ...a beneficio degli studenti”.

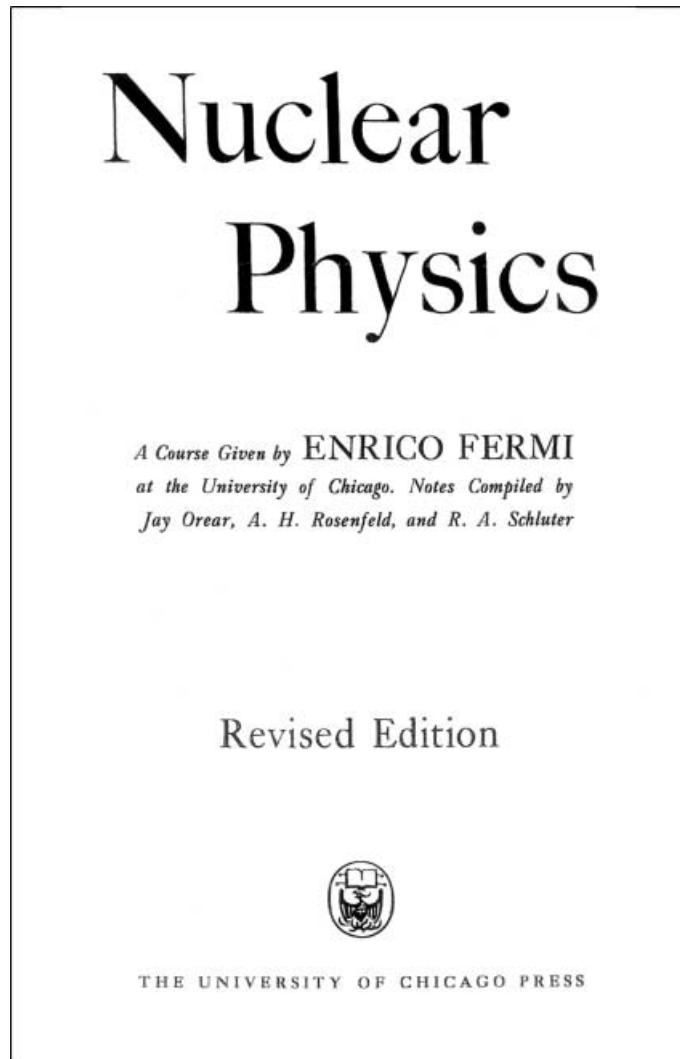


Figura 1. – Copertina del volume che riporta il corso di Fisica Nucleare di Enrico Fermi (1949-50).

1. – Gli insegnamenti di Fermi dal 1945 al 1950

1.1. *La Fisica Nucleare* (fig. 1). – Il testo —classico ormai— di “Fisica Nucleare” nelle edizioni redatte da Orear, Rosenfeld e Schluter (nel 1949 e nel 1950) rappresenta un corso completo che spazia dalle proprietà dei nuclei atomici alle interazioni della radiazione con la materia e ai decadimenti radioattivi, fino alle forze nucleari e alle teorie mesoniche, con particolare attenzione poi alla fisica dei neutroni e dei raggi cosmici. Esso costituisce una pietra miliare non solo per i contenuti e la corrispondente esposizione ancora così

moderna, ma anche perchè si colloca in un periodo cruciale, quello che prepara e precede la separazione “concettuale” tra fisica nucleare intesa come fisica dei nuclei e fisica delle particelle elementari, detta anche “subnucleare”. Come ebbe ad osservare V. Weisskopf nel 1960, questa separazione prelude alla distinzione tra fisica “intensiva” (tipicamente riduzionista, come la fisica delle particelle) e fisica “estensiva” (olistica, che privilegia la complessità, tipica, della materia condensata) con la fisica nucleare a far da spartiacque. Ciò spiegherebbe la “necessità” di una evoluzione tale da allontanare, a partire dalla metà degli anni 50, lo studio delle proprietà strutturali e dinamiche dei nuclei da quello delle particelle elementari e delle loro interazioni primarie [8].

Tale distinzione si è andata attenuando nell’ultimo decennio, vuoi per la specifica introduzione dei gradi di libertà subnucleonici nello studio dei comportamenti nucleari, vuoi per la chiamata in causa dell’ambiente nucleare per decifrare questioni fondamentali quali la struttura a quark e i problemi del loro deconfinamento.

Eppure Fermi, nel suo corso di Fisica Nucleare del 1949, pur intravedendo tale separazione (le strutture subnucleoniche erano allora limitate al campo mesonico), mantiene il carattere unitario della descrizione della statica e dinamica nucleare, inclusi i decadimenti radioattivi α , β , γ con i processi che s’inquadrano nel problema delle forze nucleari intese come interazione nucleone-nucleone, già accennando alla teoria mesonica (forze di scambio) e dedicando un intero capitolo alla fenomenologia dei mesoni (il problema verrà poi ripreso più compiutamente nel corso di Varenna sui pioni e i nucleoni).

A ciò si aggiunga l’allargamento del corso ad un capitolo dedicato ai raggi cosmici, che prelude ad una trattazione più specifica delle particelle elementari.

Alcuni esempi significativi.

Nell’introdurre la natura di scambio delle forze nucleari, Fermi spiega (traduco dall’inglese):

“Dall’elettrostatica sappiamo che due particelle si attraggono o si respingono secondo la legge di Coulomb. Seguendo una trattazione classica, diciamo che la forza deriva da un campo di potenziale $\phi = e/r$ di una delle particelle. Tuttavia, se vogliamo tener conto della natura corpuscolare della luce, noi possiamo descrivere questa interazione dicendo che una particella “emette” un fotone che viene assorbito dall’altra.” Semplice e illuminante.

E così prosegue:

“Analogamente, l’interazione di due nucleoni può essere parzialmente (si noti il “parzialmente” e si ricordino le interazioni residue, oltre a quelle di campo medio) interpretata tramite il modello di un nucleone che “emette” un quanto che viene assorbito dal secondo nucleone. Questi quanti sono chiamati mesoni, e noi li chiameremo mesoni π , in questa discussione. La ragione di questa nomenclatura è che noi conosciamo sperimentalmente che i nucleoni interagiscono”. Meglio di così!

In ogni caso, tutta la parte riguardante le proprietà di insieme dei nuclei (1° capitolo) e quella dei decadimenti radioattivi (3°, 4° e 5° capitolo) nonchè il capitolo (8°) sulle reazioni nucleari è già un corso “classico” di fisica nucleare.

La prima parte si rifà sostanzialmente al modello a goccia liquida (specie nucleari, carta dei nuclidi, formula semiempirica delle masse, energia di legame, comportamento

isobarico, momenti elettrici e magnetici, eccesso neutronico...) e rinvia al capitolo sulle reazioni nucleari, nel quale si introduce il modello del nucleo composto (in particolare con esplicito riferimento alle fenomenologie delle risonanze nella sezione d'urto n, γ) e il modello a gas statistico (che è poi il modello di Fermi) progenitore del modello a strati.

“...Vari modelli del nucleo —dice Fermi— evidenziano differenti proprietà del nucleo. Non si possono spiegare tutte le proprietà nucleari con un solo singolo modello”. (Lo diciamo ancora oggi, malgrado i progressi nelle descrizioni microscopiche complessive delle strutture nucleari).

“...Considereremo il modello statistico o a gas, quindi il modello a goccia liquida applicato alla fissione e finalmente il modello a strati...”.

Ancor oggi sono convinto che per spiegare il modello a gas di Fermi con i concetti di temperatura nucleare, energia di Fermi e di densità dei livelli energetici, le pagine di quel corso sono esemplari (capitolo 8°).

Il modello a strati, che Fermi indica come *“orbit model of the nucleus”*, viene introdotto fenomenologicamente con una chiara giustificazione delle “orbite nucleari”, un argomento di non facile digestione da parte degli studenti, vista la “compattezza” dell’edificio nucleare che, tra l’altro, giustifica il concetto di modello a goccia. Eccola:

“Questo modello descrive il nucleo in termini di orbite nucleoniche in modo all’incirca simile alla descrizione dell’atomo in termini di orbite elettroniche.

Il modello orbitale è valido se le collisioni sono abbastanza rare, cosicchè un nucleone possa muoversi attraverso il nucleo senza collisioni. Questa condizione a prima vista non sembra essere soddisfatta in un nucleo poichè a 20 MeV la sezione d’urto di diffusione n-p è dell’ordine di 0,3 barn e, per la nota densità dei nucleoni, il cammino libero medio è soltanto circa 1/3 del raggio nucleare. Tuttavia, vi sono due fattori che sono ignorati da questi calcoli ed essi rendono l’ipotesi orbitale non tanto inattendibile:

- 1- *Quando un nucleone ne incontra un altro si trova ad attraversare una buca di potenziale. Se il nucleone incontra altri nucleoni ravvicinati tra loro, le buche di potenziale possono essere talmente ravvicinate da sovrapporsi e dar luogo ad un unico potenziale approssimativamente uniforme.*
- 2- *Il nucleo è un sistema degenere in cui gli stati di più bassa energia sono, per la maggior parte del tempo, occupati. Una collisione tra nucleoni può avvenire solo se essa risulta nel trasferimento di entrambi i nucleoni in stati vuoti. Il principio di esclusione di Pauli impedisce a due nucleoni della stessa specie di occupare lo stesso stato”.*

È questa una chiarissima illustrazione della validità del moto quasi indipendente di un nucleone nel nucleo (allungamento del cammino libero medio a causa del principio di Pauli e assorbimento in prima approssimazione in un potenziale medio (centrale) delle interazioni fra il nucleone “orbitante” e il resto dei nucleoni).

Altro esempio significativo l’illustrazione dell’accoppiamento “spin-orbita” introdotto da M.G. Mayer per spiegare i “numeri magici” relativi alle chiusure degli strati nucleari

maggiori trovati empiricamente ($N, Z = 2, 8, 20, 50, 82, 126$ da confrontare con quelli derivati dai calcoli quantistici per un potenziale rettangolare: 2, 8, 20, 40, 70, 112, 168).

“...Supponiamo che l'accoppiamento spin-orbita separi i livelli energetici corrispondenti a valori differenti di J ($J = l + s$) e cioè, per esempio, $1g$ si separa in $1g_{9/2}$ e $1g_{7/2}$. Assumiamo che il livello con J maggiore sia più stabile e cioè che giaccia più in basso. Questa ipotesi non è contraria ad alcun fatto noto riguardante il nucleo (si noti l'enunciazione “galileiana”). Allora lo strato chiuso di numero 40, per esempio, deve essere modificato come segue (fig. 2, tratta dall'originale):

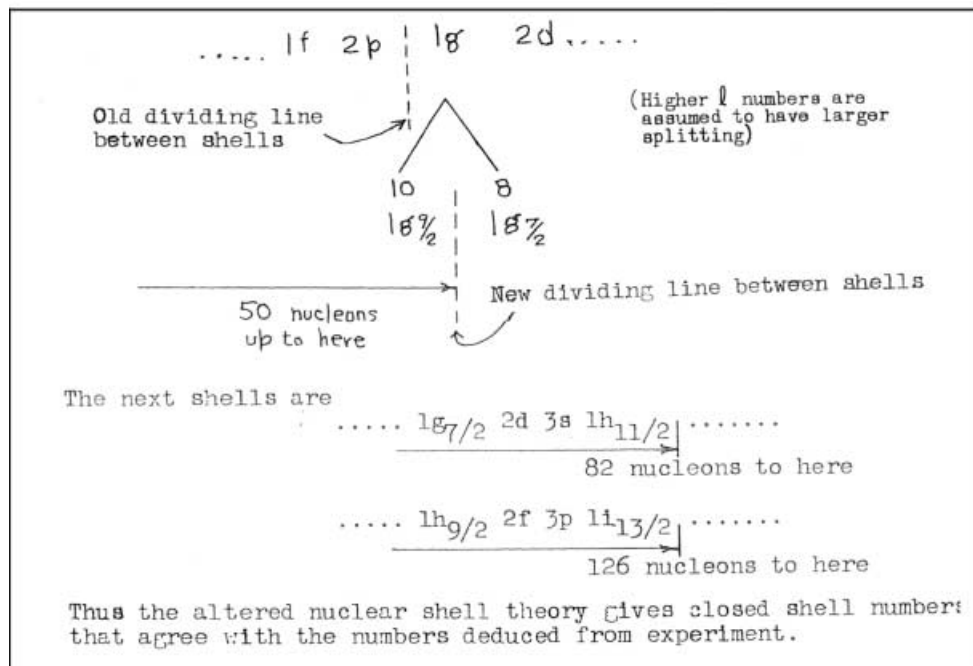


Figura 2.

Sull'importanza dell'accoppiamento spin-orbita ritorneremo più avanti a proposito del corso di Varenna.

Ci interessa ora una digressione sulla fisica dei neutroni, argomento principe della didattica di Fermi. Nel corso di Fisica Nucleare, come già accennato, Fermi dedica un capitolo intero (il 9°) ai neutroni, rifacendosi al corso di Fisica dei Neutroni tenuto a Los Alamos nel 1945, quest'ultimo ovviamente molto più dettagliato perchè contiene, a beneficio degli studenti, una parte di nozioni più generali di fisica nucleare, quali la carta degli isotopi e i modelli nucleari utilizzabili per le reazioni con neutroni.

Per il resto basta scorrere gli argomenti specifici considerati nell'uno e nell'altro testo, partendo dalle sorgenti di neutroni naturali (radioattive) e artificiali (reazioni indotte da particelle accelerate da ciclotrone), e dedicando ampio spazio alle collisioni da neu-

troni, allo scattering e alla teoria di diffusione e, in particolare, al rallentamento e alla distribuzione dei neutroni lenti nella materia fino alla fissione nucleare. Si è già detto come questa parte nel 1945 fosse limitata per ragioni di segretezza; nel corso di Fisica Nucleare appare già compiutamente la Teoria delle Reazioni a Catena e viene riportato l'articolo di Fermi "Elementary Theory of the Chain-reacting Pile", ripreso da "Science" del 10 gennaio 1947 e riguardante la relazione presentata il 21 giugno 1946 al Congresso dell'American Physical Society.

La fig. 3 mostra copia della prima pagina di tale articolo, così come si presenta nel testo del 1949.

Un cenno ora alla parte più specificatamente dedicata alle proprietà e alle interazioni delle particelle cariche, in particolare elettroni, e ai raggi cosmici.

Il capitolo 2° è una classica esposizione delle interazioni della radiazione con la materia (perdita d'energia, assorbimento, polarizzazione, ionizzazione, diffusione, assorbimento fotoelettrico, diffusione Compton, formazione di coppie) e segue la trattazione tipica ben nota dei corsi universitari di Fisica Superiore d'un tempo, oggi sparse più o meno in corsi più specializzati.

Il capitolo sui Raggi Cosmici (il 10°) che chiude il volume è una mirabile sintesi di un argomento che stava allora entrando nella didattica universitaria e che costituiva un campo d'indagine aperto e foriero di ulteriori prospettive, essendo sostanzialmente all'origine (molti di noi lo ricordano perfettamente, così come ricordano testi tipici al riguardo, come quello di L. Janossy "Cosmic Rays" del 1948, o di D. J. X. Montgomery "Cosmic Ray Physics" del 1949) della fisica delle particelle elementari e della sua separazione dalla fisica nucleare.

"Questo campo si sta espandendo molto rapidamente —dice Fermi— molti fatti sono noti ma le teorie attuali per spiegarli sono per lo più tentative. Per brevità ci prenderemo molte libertà e considereremo fatti e teorie meglio accertati di quanto non lo siano in realtà...".

È comunque il capitolo sui mesoni (il 7°) che, anche se breve e sintetico, apre alla "nuova fisica". Questo aspetto si rivelerà più chiaro nel discutere il corso di Varenna del 1954.

Qui riportiamo le parole di Fermi che introducono le proprietà dei mesoni note dagli esperimenti: *"In questa sezione discuteremo brevemente alcuni fatti noti sui mesoni e li riassumeremo in una tabella..."* (la tabella citata, p. 133 del testo, riporta le proprietà note allora dei pioni π^\pm e π^0 e dei muoni μ^\pm).

"...Per mesoni intendiamo particelle instabili di massa maggiore di quella dell'elettrone e minore di quella del nucleone..."

...I mesoni sono stati ipotizzati da Yukawa nel 1935 e poco dopo i mesoni μ (essi verranno chiamati ' μ ' o muoni da qui in poi) furono osservati come particelle secondarie nella radiazione cosmica.

...Nel 1948 i mesoni π (pioni) furono creati artificialmente bombardando diversi bersagli nel ciclotrone di Berkeley... Durante il periodo 1949/50, si è trovata ragionevole evidenza dell'esistenza del pione neutro π^0 ..."

È chiara già la distinzione che Fermi fa tra pione e muone, il primo essendo la particella

Elementary Theory of the Chain-reacting Pile

(Reprinted by permission from *Science* Jan. 10, 1947)

Enrico Fermi

Institute for Nuclear Studies, University of Chicago

THE RESULTS AND THE METHODS DISCUSSED in the following outline of the theory of a chain-reacting pile working with natural uranium and graphite have been obtained partly independently and partly in collaboration by many people who participated in the early development work on the chain reaction. Very important contributions to the theoretical ideas were given by Szilard and Wigner. Many physicists contributed experimental results that helped to lead the way, among them, H. L. Anderson and W. H. Zinn, first at Columbia University and later at the Metallurgical Laboratory of the University of Chicago; R. R. Wilson and E. Creutz, at Princeton; and Allison, Whitaker, and V. C. Wilson, at the University of Chicago. The production of the chain reaction was finally achieved in the Metallurgical Laboratory directed by A. H. Compton.

ABSORPTION AND PRODUCTION OF NEUTRONS IN A PILE

We consider a mass, "the pile," containing uranium spread in some suitable arrangement throughout a block of graphite. Whenever a fission takes place in this system, an average number (ν) of neutrons is emitted with a continuous distribution of energy of the order of magnitude of 1,000,000 EV. After a neutron is emitted, its energy decreases by elastic collisions with the atoms of carbon and to some extent also by inelastic collisions with the uranium atoms. In the majority of cases the neutrons will be slowed down to thermal energies. This process requires about 100 collisions with carbon atoms. After the energy of the neutron is reduced to thermal value, the neutron keeps on diffusing until it is finally absorbed. In several cases, however, it will happen that the neutron is absorbed before the slowing-down process is completed.

The neutron may be absorbed by either the carbon or the uranium. The absorption cross-section of carbon for neutrons of thermal energy is quite small, its value being approximately $.005 \times 10^{-24}$ cm.² For graphite of density 1.6, this corresponds to a mean free path for absorption of about 25 m.¹ It is believed that the absorption cross-section follows the $1/v$ law, and consequently the absorption cross-section, which is already quite small at thermal energies, becomes practically negligible for neutrons of higher energy. It is therefore a sufficiently

This paper, presented at the Chicago meeting of the American Physical Society, June 21, 1946, is based on work performed under Contract No. W-7401-eng-37 with the Manhattan District at the Metallurgical Laboratory, University of Chicago.

good approximation to assume that absorption by carbon during the slowing-down process can be neglected.

The absorption of a neutron by uranium may lead either to fission or to absorption by a (n, γ) process. We shall refer to this last possibility as the process of resonance absorption. The relative importance of fission and resonance absorption in the different energy intervals is not the same. In this respect we can consider roughly three intervals:

(1) Neutrons with energy above the fission threshold of U^{235} —We can call these conventionally "fast neutrons." For fast neutrons the most important absorption process is fission, which normally takes place in the abundant isotope U^{238} . Resonance absorption is smaller but not negligible.

(2) Neutrons of energy below the fission threshold of U^{235} and above thermal energy—We shall refer to these neutrons as "epithermal neutrons." For epithermal neutrons the most important absorption process is the resonance capture. The cross-section for this process as a function of energy is quite irregular and presents a large number of resonance maxima that can be fairly well represented by the Breit-Wigner theory. In practical cases the resonance absorption becomes important for neutron energy below about 10,000 EV and increases as the energy of the neutrons decreases.

(3) Neutrons having thermal agitation energy or "thermal neutrons"—For thermal neutrons both the resonance and fission absorption processes are important. In this energy range both cross-sections follow approximately the $1/v$ law, and therefore their relative importance becomes practically independent of the energy. Let σ_f and σ_a be the cross-sections for fission and resonance absorption for neutrons of energy kT , and η be the average number of neutrons emitted when a thermal neutron is absorbed by uranium. Then η differs from ν , since only the fraction $\sigma_f/(\sigma_f + \sigma_a)$ of all the thermal neutrons absorbed by uranium produces a fission. It is, therefore,

$$\eta = \nu\sigma_f/(\sigma_f + \sigma_a). \quad (1)$$

The preceding discussion leads one to conclude that only a fraction of the original fast neutrons produced will end up by producing a fission process. For systems of finite size, further losses of neutrons will be expected by leakage outside the pile.

Limiting ourselves for the present to systems of practically infinite dimensions, we shall call P the probability that a fast neutron ultimately is absorbed by the fission

Figura 3. – Prima pagina dell'articolo di E. Fermi sulla "Teoria della Pila Atomica" (1947).

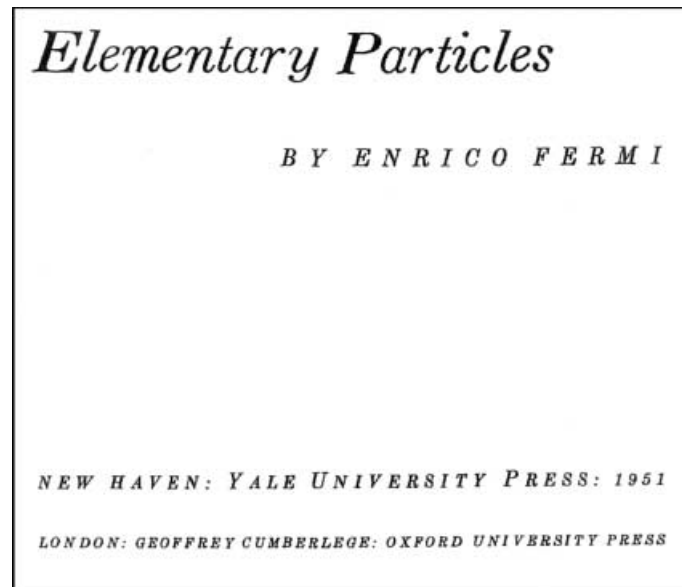


Figura 4. – Copertina del volume di Enrico Fermi sulle “Particelle Elementari” (1951).

di Yukawa, soggetto a interazione forte, il secondo soggetto a interazione debole, anche se considerati entrambi nell’ambito di forze di scambio nucleari.

Queste considerazioni preludono alla stesura, questa volta direttamente a cura di Fermi, del testo sulle Particelle Elementari del 1950 [9].

1.2. *Le “Particelle Elementari” (1950-51)*. – Nell’aprile del 1950 Fermi tenne alla Yale University 6 lezioni per il pubblico e 6 per studenti di fisica. Queste ultime furono da lui stesso raccolte ed ampliate e costituiscono il contenuto del suo famoso volume “Elementary Particles”, pubblicato dalla Yale University Press nel 1951 [9] (vedi fig. 4).

Nella prefazione lo stesso Fermi afferma: “...Molti degli articoli teorici sul tema delle particelle elementari e delle loro interazioni sono molto difficili da leggere, eccetto che per un piccolo gruppo molto specializzato di fisici teorici. Questo libro non è scritto per tale gruppo. Esso ha lo scopo invece di rendere accessibile ad un più ampio numero di studenti e, io spero, ad una larga schiera di fisici sperimentali, alcuni dei più significativi risultati delle teorie di campo delle particelle elementari, che potranno essere compresi, almeno in modo semi-quantitativo, senza eccessivi apparati matematici...”.

Non c’è dubbio che, oltre ad essere chiaro lo scopo, un simile “trattato” diventasse di grande utilità e consultazione. Esso, d’altra parte, costituisce non solo uno strumento didattico fondamentale (basti citare oltre ai capitoli specifici sulla quantizzazione e sull’interazione dei campi a partire dall’esempio base del campo elettromagnetico, le appendici relative alla seconda quantizzazione, alla misurabilità dei campi, all’invarianza

relativistica e alle relazioni fra costanti d'accoppiamento) ma anche una lezione anticipatrice di problemi allora passibili solo di speculazioni. Che le "speculazioni" di Fermi fossero tuttavia fondate e illuminanti è illustrato, ad esempio, dal capitolo su "Pions, Nucleons and Antinucleons", in particolare sull'annichilazione degli antinucleoni (allora non ancora scoperti). Usiamo le sue parole:

"Tutte le teorie correnti delle particelle elettricamente cariche hanno una proprietà di simmetria secondo la quale per ogni particella esiste una controparte con carica opposta e le altre proprietà invariate. Ciò è vero in particolare per la teoria dell'elettrone di Dirac, che è stata stabilita prima della scoperta del positrone. Nella maggior parte delle discussioni riguardanti i nucleoni si suppone che queste particelle obbediscano ad una equazione simile a quella di Dirac. Se questa ipotesi è corretta, devono esistere protoni negativi ed anche anti-neutroni. L'antiprotone, qui indicato con \bar{P} , ha la massa del protone e carica negativa e momento magnetico uguale ed opposto a quello del protone.

L'anti-neutrone, indicato con \bar{N} , ha la massa del neutrone, carica nulla e momento magnetico uguale ed opposto a quello del neutrone ordinario. Poichè non è stata trovata evidenza sperimentale di queste due particelle, non possiamo essere sicuri che esse esistano realmente. È tuttavia interessante fare qualche congettura su quali potrebbero essere le loro proprietà. In questa discussione prenderemo come guida il caso abbastanza simile del comportamento di elettroni e positroni".

Fermi discute quindi il processo di annichilazione con rilascio di energia $2Mc^2$ e introduce, dovendo considerare anche gli anti-neutroni, non solo l'interazione del nucleone con il campo elettromagnetico (emissione di due fotoni con impulso uguale ed opposto) ma anche quella causata dall'accoppiamento nucleone-pione, nel qual caso si ha l'emissione di due pioni con impulso uguale ed opposto.

È questo il caso più generale dell'annichilazione *nucleone-antinucleone* che, tra l'altro, Fermi dimostra, con facile e chiara esposizione, essere più probabile del decadimento elettromagnetico: "...in primo luogo perchè la costante di accoppiamento e_2 , relativa all'espressione della probabilità, inverso della vita media, di decadimento pionico

$$\frac{1}{\tau y} = \frac{e_2^4 n}{16\pi M^2 c^3},$$

è molto più grande della costante di accoppiamento elettromagnetico e che dà

$$\frac{1}{\tau_{em}} = \frac{\pi e^4 m}{N^2 c^3}.$$

In realtà è probabile che la frequenza di annichilazione con emissione di pioni sia anche più veloce di quanto indicato, poichè l'energia totale disponibile nel processo di annichilazione è sufficiente a produrre più di due pioni, cosicchè altri processi possono essere operativi, dando luogo ad una più alta probabilità di transizione".

Passando ai numeri — come usava Fermi per dare concretezza alle affermazioni teoriche — assumendo per la densità dei nucleoni $n = 7 \cdot 10^{37}$ (quella all'interno del nucleo) si trova $1/\tau_{em} = 1,5 \cdot 10^{17}$ e $1/\tau y = 1,5 \cdot 10^{20}$, mille volte maggiore. "Questo valore

—spiega Fermi— è certamente sottostimato. Da esso si ricaverebbe che un protone negativo, attraversando un nucleo di diametro 10^{-12} cm con velocità c avrebbe una probabilità di annichilazione di meno di 1 per cento”.

È la produzione multipla di pioni che aumenta di molto questa stima. È grosso modo ciò che si è verificato più tardi, per esempio con gli esperimenti con antiprotoni al LEAR del CERN.

Un compendio dell’evoluzione apertasi con la specificità della fisica delle particelle, presente nel testo qui esaminato, è illustrata da Fermi nelle “Conferenze di Fisica Atomica” [4] già citate. La prima e la seconda conferenza, curate, come si è detto, da Morpurgo e Mezzetti, trattano appunto delle Particelle elementari. La chiarezza e la preveggenza di Fermi sono illustrate innanzitutto nell’introduzione al concetto di “elementarità” e alla descrizione critica del problema della proliferazione delle particelle considerate elementari.

Citiamo (dal testo originale in italiano):

“...L’argomento che tratterò oggi riguarda le “particelle elementari”. Ma se voi mi domandate che cosa si intenda per particelle elementari, resterei imbarazzato in quanto il termine “elementare” va inteso in senso piuttosto relativo alle nostre conoscenze.... In generale, si potrebbe dire quindi che, ad ogni stadio della scienza, si chiamano elementari le particelle di cui non si conosce la struttura e che si possono pertanto considerare come punti.... Nell’ambito di queste considerazioni...se ne può fare anche un’altra, che riguarda il numero delle particelle”.

Qui Fermi fa l’esempio chimico di atomo considerato elementare da mettere a confronto con altri atomi di specie diverse, via via sempre più numerosi.

Per cui:

“...la confidenza...nella elementarità dell’atomo andrebbe gradualmente diminuendo perchè un numero così elevato di particelle sarebbe in contraddizione con il concetto stesso di elementarità. Anche per le particelle elementari (Fermi ne elenca nove, inclusi il protone, il neutrone e il mesone π , oltre all’elettrone, al muone e al fotone, aggiungendo poi il neutrino) che oggi si conoscono, si sta verificando una situazione non interamente dissimile...”.

Che il numero di particelle elementari sia stato per lungo tempo un problema per la fisica “riduzionista” è noto. La casistica attuale si basa sulle 3 famiglie di quark e leptoni (6×3 colori +6) con relative antiparticelle (48 particelle) costituenti ultimi della materia, cui vanno aggiunte le particelle trasmettentrici delle interazioni di campo (il fotone per l’interazione elettromagnetica, i bosoni intermedi $W^{\pm}Z^0$, per l’interazione debole, 8 gluoni per l’interazione forte più eventualmente il quanto di interazione gravitazionale (in totale 61).

Il problema dell’unificazione delle forze, che al tempo degli ultimi anni di vita di Fermi era ancora “in fieri”, richiede inoltre l’ulteriore passo della particella di Higgs.

Evoluzioni ulteriori a parte (simmetria, supersimmetria, teoria delle stringhe) forse possiamo immaginare quale sarebbe oggi il contributo di Fermi per far meglio comprendere “a studenti e a fisici sperimentali” questo impressionante sviluppo della fisica di frontiera.

2. – Le ultime lezioni a Chicago

2'1. *Termodinamica e Statistica, Meccanica Quantistica.* – Gli anni 1950-54 caratterizzano gli insegnamenti di Enrico Fermi all'Università di Chicago con particolare riguardo alle lezioni di Termodinamica e Statistica e di Meccanica Quantistica che, come abbiamo già rilevato, sono “firmate” dalle sue note manoscritte.

Non ci inoltreremo nel dettaglio se non per evidenziare alcuni particolari esempi che denotano non solo quella che doveva essere la chiarezza espositiva ma la straordinaria capacità sintetica di enucleare gli aspetti essenziali senza, peraltro, penalizzare la precisione e la completezza degli argomenti. In fig. 5 è riportato l'inizio delle note relative al III principio della termodinamica. Ogni commento sarebbe addirittura irrispettoso, così come ogni traduzione dall'inglese.

Estremamente interessanti, inoltre, sono le note dedicate alla “Materia in condizioni non usuali”.

Si pensi a come tale argomento oggi sia di grande attualità in considerazione delle ricerche e delle conoscenze acquisite sulle transizioni di fase e sulle equazioni di stato dei sistemi non solo a livello atomico-molecolare ma a livello nucleare e particellare. Basti citare il problema delle fasi nucleari, adroniche e di plasma di quark-gluoni investigato con reazioni da ioni pesanti relativistici.

Il diagramma temperatura-pressione illustrato da Fermi nella pagina riportata in fig. 6 che fa passare dalla materia condensata ordinaria attraverso il gas di elettroni e di elettroni e protoni al gas di neutroni variando temperature e pressioni fino a *limiti unusuali*, è parente dei diagrammi di fase che oggi si descrivono per le transizioni di fase della materia nucleare fino alle *condizioni estreme* del deconfinamento del plasma di quark e gluoni.

Per non parlare dei problemi riguardanti il confinamento magnetico del plasma di ioni nei processi di fusione termonucleare controllata e quelli relativi all'astrofisica.

A proposito di queste lezioni di termodinamica, vale la pena citare ancora B. T. Feld che, nella presentazione delle lezioni di Fermi a Varenna, così si esprime:

“La grandezza di Fermi come docente risiedeva nel fatto che egli faceva poca o punta distinzione fra l'insegnamento e la ricerca fisica.

La sua celebre capacità di trovare il modello semplice e chiaro per comprendere un'idea apparentemente complicata può riscontrarsi tanto nei suoi lavori che nelle sue lezioni. L'abilità nel richiamare, per la soluzione di qualche nuovo problema, un esempio appropriato da non importa quale campo in cui il problema sia già stato risolto egli l'applicava in senso inverso alle sue lezioni: gli esempi usati nel suo corso di termodinamica erano spesso escursioni eccitanti lungo le frontiere della fisica nucleare”.

Vale la pena qui di ricordare, in connessione con questo corso, il volumetto “Termodinamica” di Fermi, edito da P. Boringhieri nel 1958, che molti di noi hanno consultato e ne hanno poi tratto preziosi suggerimenti per i corsi di Fisica Generale tenuti all'Università. Esso era ricavato dalle lezioni del corso “Thermodynamics”, tenuto da Fermi nel 1936 alla Columbia University.

46 - Third law of Thermodynamics 46a

Entropy constant
 Nernst "theorem" - "The entropy at absolute zero is equal to zero for all substances."
 Comments - Not meaningless when several states are possible at $T=0$.
 Statistical meaning
 $S = k \ln \Omega$
 Ω = number of states should be ≥ 1 or at least a small number - For substance with N atoms
 $S \leq Nk$
 $\ln \Omega \leq N$ Comments.
 Consider assembly of atoms with r -fold degenerate ground state

$$\Omega = \frac{N!}{\left[\left(\frac{N}{r}\right)!\right]^r} \quad \ln \Omega = N \ln r$$
 hence No Nernst unless $r=0$
 However coupling of atoms orientation at low temperature blocks these degree of freedom
 Nuclear orientations - Discussion
 Specific heats must vanish at low temperatures

- 113 -

Figura 5. - Note manoscritte di E. Fermi sul "III Principio della Termodinamica" (corso tenuto a Chicago nel 1951-52).

Veniamo ora alle lezioni di Meccanica Quantistica. Le note manoscritte sono, come già detto, del 1954, meno di un anno prima della sua morte, come ricorda Emilio Segrè nella prefazione. Rammentando come nei primi tempi a Roma Fermi spiegasse in seminari privati ai suoi studenti gli articoli di Schrödinger e di Dirac appena apparsi, in "...modo più familiare" Segrè ritiene vi siano probabilmente note e appunti raccolti da studenti delle Università di Roma, Columbia e Chicago.

Ma è nel 1954 quando "...Fermi dette ancora un corso di meccanica quantistica"... che ..."questa volta...preparò lui stesso le note per gli studenti, scrivendo le linee guida delle sue lezioni su fogli di matrice di ciclostile e distribuendo le copie agli studenti prima di ogni lezione...".

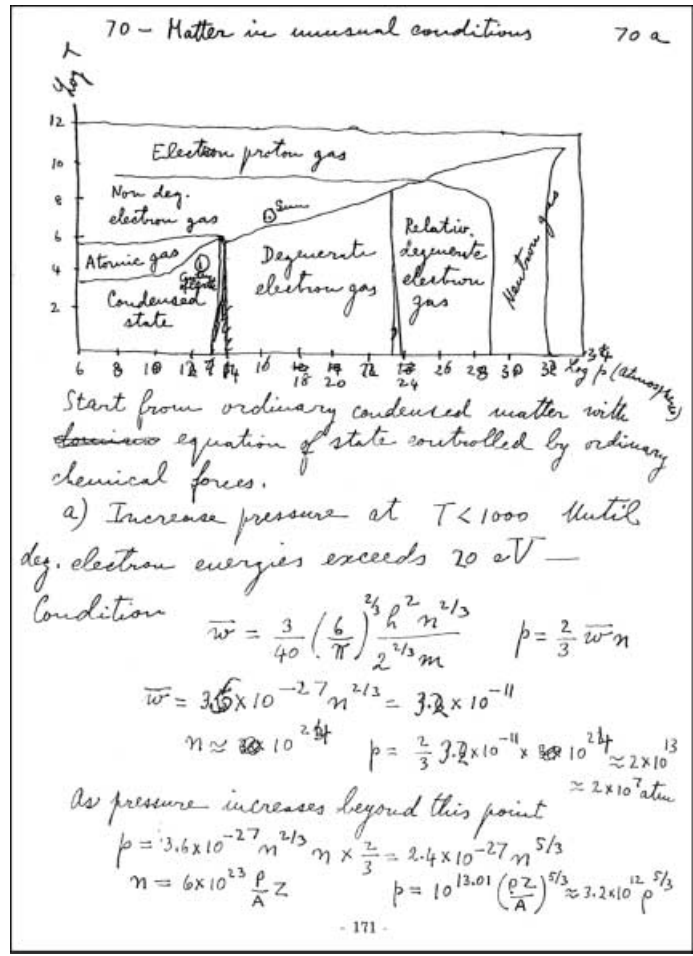


Figura 6. – Note manoscritte di E. Fermi sulla “Materia in Condizioni Inusuali”.

In fig. 7 è riportata la pagina introduttiva delle note con le analogie tra ottica e meccanica alla base del binomio onda-corpuscolo, con i corrispondenti riferimenti ai teoremi di Maupertuis e di Fermat.

Di qui ci si muove fino alla introduzione dell’equazione di Schrödinger dipendente dal tempo e al metodo WKB (Wentzel, Kramers, Brillouin) attraverso gli esempi del problema ad una dimensione e dell’oscillatore lineare. Le forze centrali e l’atomo di idrogeno sono illustrate dimostrando in modo semplice la separazione tra moto relativo e moto del centro di massa, analogamente alla meccanica classica.

Un bell’esempio di chiara illustrazione è quello riguardante il Principio d’indeterminazione di cui vengono riportate in fig. 8 le pagine descrittive che non hanno bisogno di commento.

Quantum Mechanics
E. Fermi Physics 341
Winter 1954 1-1

1- Optics - Mechanics analogy:

Dictionary	
Mass point	Wave packet
Trajectory	Ray
Velocity (V)	Group velocity (V)
No simple analog	Phase velocity (v)
Potential function of position U(x)	Refractive index (or v) function of position
(1) Energy (W) $W=W(v)$	Frequency (v) (dispersive medium) $v=v(x)$

First: Trajectory = Ray
 ↓ ↓
 from Maupertuis from Fermat

(2) $\int \sqrt{W-U} ds = \min$; ~~(3)~~ $\int \frac{ds}{v} = \min$ (3)

Proof of Maupertuis:
 $\delta \int \sqrt{W-U} ds = \int (\sqrt{W-U} \delta ds - \frac{\delta U}{2\sqrt{W-U}} ds) = 0$
 use $\delta ds = \int \frac{dx}{ds} \delta dx$, $\delta U = \int \frac{\partial U}{\partial x} \delta x$
 and part. integr., Find minimum equations
 $\frac{d}{ds} (\sqrt{W-U} \frac{dx}{ds}) = -\frac{1}{2\sqrt{W-U}} \frac{\partial U}{\partial x}$
 use $V = \sqrt{\frac{2}{m}} \sqrt{W-U}$, $dt = \frac{ds}{V} = \sqrt{\frac{m}{2}} \frac{ds}{\sqrt{W-U}}$

$\rightarrow m \frac{d^2 x}{dt^2} = -\frac{\partial U}{\partial x}$ Therefore: (3) is true because of eq. of motion

Proof of Fermat
 $\int \frac{ds}{v} = \min \rightarrow v \int \frac{ds}{v} = \min \rightarrow \int \frac{ds}{\lambda} = \min \rightarrow$ No of waves = $\frac{W}{h}$
 means: no of waves stationary: hence positive interference.

- 1 -

Figura 7. – Note manoscritte di E. Fermi sulla “Meccanica Quantistica” (corso tenuto a Chicago nel 1954).

3. – L’ ultima lezione. Varenna 1954

Nel volume pubblicato dalla SIF nel 1984 [2] (fig. 9) e riferentesi all’inaugurazione dei Corsi del 1983 da me tenuta, come Presidente, accompagnata, come già accennato, dalla celebrazione del 30^{mo} anniversario della Scuola Internazionale di Fisica, fondata da Giovanni Polvani e intitolata a Enrico Fermi, sono riportati gli interventi di Gianni Puppi, di Antonio Rostagni e di Gilberto Bernardini, testimoni di quegli eventi.

Phis 341-1954 13-1

13- Uncertainty principle

Definite x means $\psi(x) = \delta(x-x')$
 Fourier has all comp with eq. amplitude
 Hence no momentum limitation

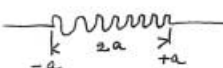
(1) $\delta x = 0 \rightarrow \delta p = \infty$

Definite $p = p' \rightarrow \psi = e^{i p' x / \hbar}$ $|\psi|^2 = 1$
 hence

(2) $\delta p = 0 \rightarrow \delta x = \infty$

Interm. case $\psi(x) = \begin{cases} e^{i k x} & |x| < a \\ 0 & |x| > a \end{cases}$

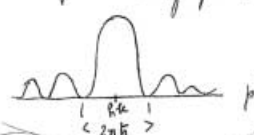
(3) $\delta x = a$



From (12-18)

$$\int_{-a}^a e^{-i p' x / \hbar} e^{i k x} dx = \int_{-a}^a e^{i(k - \frac{p'}{\hbar})x} dx = \frac{\sin((k - \frac{p'}{\hbar})a)}{k - \frac{p'}{\hbar}}$$

Prof distrib of p' is $\propto \frac{\sin^2((k - \frac{p'}{\hbar})a)}{(k - \frac{p'}{\hbar})^2}$



Therefore

(4) $\delta p' = \frac{\pi \hbar}{a}$

Phis 341-1954 13-2

(3) + (4) $\delta x \delta p \approx \hbar$
 (Uncertainty principle)
 Quantitatively one proves that for any ψ

(6) $\delta x \delta p \geq \frac{\hbar}{2}$ (see Pais - Quantum Theory, p. 110 ff, p. 118)

For discussion of examples Schiff pp. 7 to 15
 x + p are complementary according to (5)

Complementarity of time (t) and energy (E)

(7) $\delta t \delta E \approx \hbar$
 has various meanings.

1) Freq. of short duration phenomenon (lasting δt) has broad band ($\delta \omega$). Find as (3) + (4)

(8) $\delta t \delta \omega \approx 1$

In wave mech. $E = \hbar \omega$, hence (7).
 States of a system of short life cannot have energy more sharply defined than corresponds to (7).

2) Discussion of measurement procedures has shown that in order to measure energy accurately (δE) a time of at least $\delta t \approx \hbar / \delta E$ is needed.
 All this will be discussed more sharply later

Figura 8. - Note manoscritte di E. Fermi di Meccanica Quantistica relativa al Principio di Indeterminazione.

Dice G. Puppi:

“...La Scuola era nata in un periodo in cui ancora non c'era grande proliferazione di scuole...in un momento giusto dal punto di vista della sua affermazione.

Il primo anno (direttore nel 1953 fu appunto G. Puppi) tutto era centrato sulle tecniche di rivelazione delle particelle elementari e come complemento ai corsi sui raggi cosmici e l'anticipazione sulla fisica dei pioni, che poi sarebbe stato l'argomento dell'anno dopo. Direi che è andata piuttosto bene, tanto da incoraggiare la SIF a ripetere l'esperimento l'anno dopo e a chiedermi, per ragioni di continuità, di dirigere e organizzare anche il secondo corso. Questo corso è rimasto un evento memorabile...perchè una serie di congiunzioni astrali ha creato intorno ad esso un carisma particolare, oltre al fatto che obiettivamente in quel momento è stata fatta una specie di summa teologica di quello che si sapeva sulla fisica dei pioni, che è servito per molto tempo come riferimento.



Figura 9. – Copertina del volume pubblicato dalla SIF per il trentennale della Scuola di Varenna che riproduce il corso di Fermi (“Lectures on Pions and Nucleons” Varenna 1954).

Ma poi la morte di Fermi ha riverberato su questo secondo anno una luce particolare e, quando si parla di Scuola di Varenna, viene in mente il secondo anno ed Enrico Fermi...

Quel secondo anno vide dunque la lezione di Fermi “Lectures on Pions and Nucleons” di cui si è detto [1]. Queste lezioni, la cui traduzione italiana è riportata nel volume del trentennale citato [2] (vedi fig. 9), iniziano con il concetto di spin isotopico e la descrizione del sistema a due nucleoni, che coinvolgono non solo la produzione di mesoni e lo scattering, ma ancora specifiche questioni nucleari come quelle derivanti dalla diffusione

di nucleoni polarizzati da potenziale nucleare (distinguendo tra distribuzione della densità di particelle nei nuclei leggeri e quella nei nuclei pesanti). Esempio tipico l'accoppiamento spin-orbita, come evidenziato nella discussione sul corso di Fisica Nucleare.

Cito:

“...Ciò che abbiamo imparato dagli effetti di polarizzazione è questo: vi è buona evidenza che l'accoppiamento 1s (spin-orbita) della fisica nucleare convenzionale persista essenzialmente con la stessa forza ad energie maggiori: questo fatto può essere presumibilmente legato all'origine primaria dell'accoppiamento 1s già presente in forma latente nelle forze nucleone-nucleone...”

Per ciò che riguarda la parte più specifica relativa alla “summa della fisica dei pioni”, sentiamo Gilberto Bernardini, anche lui nel suo intervento per il trentennale di Varenna.

“...La tematica del secondo corso di Varenna, sempre guidato da Puppi, fu sulla “rivelazione delle particelle elementari e le loro interazioni”. Le prime due lezioni di quel corso furono di Fermi ed Heisenberg; e quella di Fermi su “Pioni e Nucleoni”.

Credo che in lui sia stato spontaneo estendere alle interazioni fra i nucleoni mediate dai pioni i concetti dell'Elettrodinamica Quantistica sulla quale, fra l'altro, egli aveva nel 1932 scritto un articolo che, per l'influenza che ha esercitato nel seguito, Pontecorvo ha recentemente ricordato come la “Bibbia Romana”.

Per esempio, credo che per questa correlazione abbia fra l'altro detto che già nel 1938 G. C. Wick aveva dimostrato che nei limiti delle dimensioni nucleari la presenza ‘virtuale’ del pione era possibile solo se la sua massa era almeno duecento volte quella dell'elettrone.

Disse anche come l'interazione fra nucleoni si dovesse attribuire a delle pseudo-cariche che, emettendo dei pioni, ne vincolano impulsi ed energie, similmente a come fanno i fotoni reali o virtuali fra le cariche elettriche. E parlando di cariche e delle connesse costanti d'interazione confrontò quella classica dell'elettrodinamica

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\hbar c} = \frac{1}{137}$$

cui corrisponde l'energia coulombiana di due cariche ad una distanza r

$$H(r) = -\frac{e^2}{4\pi r}$$

con quella nucleonica

$$\frac{g^2}{4\pi\hbar c} \simeq 10$$

che interviene nel potenziale di Yukawa

$$H(r) = -\frac{g^2}{4\pi r} \exp[-kr]$$

con $k = m_\pi c/h$; essendo m_π la massa del pione”.



Figura 10. – Foto di gruppo dei partecipanti alla Scuola di Varenna del 1954.

Del resto le “illuminazioni” anche didattiche di Fermi sono innumerevoli. Ed è interessante ricordare [8] un aneddoto raccontato da A. D. Bromley nella sua relazione d’apertura alla Conferenza Internazionale di Fisica Nucleare a Firenze nel 1983. Bromley, riandando ad un suo incontro con Fermi negli anni 50, ad un Congresso a Rochester in cui Fermi stesso aveva riportato i risultati del lavoro con i suoi studenti di Chicago sullo scattering dei muoni, ed in particolare su una risonanza da essi appena scoperta e cioè la risonanza Δ (nucleone eccitato), così si esprimeva:

“Conoscendo che io ero un fisico nucleare...Fermi commentò: Anche voi dovrete tener conto di questo in fisica nucleare... Come sempre —aggiunge Bromley— Fermi aveva ragione”.

Noi oggi sappiamo che, per esempio, per spiegare le sezioni d’urto di fotoassorbimento del deutone, occorre incorporare non soltanto gli effetti di scambio mesonico, ma anche la risonanza Δ ”.

Dell’atmosfera di quel corso di Varenna, oltre che delle lezioni di Fermi, molti furono partecipi. In fig. 10 è riportata la foto di gruppo nella quale, oltre a Fermi, al centro in prima fila, si riconoscono Rostagni, Borsellino, Caldirola, G. Bernardini, Puppi, Occhialini, Conversi, B. Rossi, Heisenberg, Steinberger,... ed altri che, accanto a quei maestri ne ricorderanno oggi la fortuna di esserne allievi.

Di quelle lezioni citeremo qui ancora, come esempio del modo di introdurre didatticamente un argomento di fisica, le pagine che descrivono lo spin isotopico. Eccole (nella traduzione italiana):

“La notazione dello spin isotopico fu inventata da Heisenberg all’inizio degli anni ’30. Subito dopo la scoperta del neutrone. Il neutrone mostrava delle proprietà simili

a quelle del protone, e l'idea era che potessero essere descritti come stati diversi della stessa particella. Quindi possiamo dire che un particolare nucleone, che indicherò col simbolo N , può avere due forme p o n , protone o neutrone. L'idea, a questo stadio, è puramente formale e potrebbe essere adattata, anche se probabilmente in maniera non redditizia, per distinguere due qualsivoglia oggetti. Al passare del tempo la fruttuosità della notazione divenne evidente, perchè le proprietà dei nucleoni sono tali da rendere la notazione più valida che non un semplice meccanismo formale. Tuttavia, solo per un momento lasciate che persegua le conseguenze puramente formali di questa notazione. Ci troviamo di fronte a quella che generalmente è denominata una variabile dicotomica, cioè una variabile che può assumere essenzialmente due valori. Se rappresentiamo, come di solito, una funzione di una variabile dicotomica come una striscia verticale che contiene i due valori a e b , $f = \left| \frac{a}{b} \right|$, allora questa è una funzione che per la prima delle variabili prende il valore a e per la seconda il valore b .

C'è in fisica una notevole esperienza riguardo al comportamento di queste funzioni di variabili dicotomiche.

Queste furono incontrate per la prima volta quando Pauli elaborò la teoria dello spin $1/2$, che è pure una variabile dicotomica. Lo stato può essere specificato dicendo che lo spin è 'up' o 'down'. Ci sono certi operatori standard lineari che operano su variabili di questo tipo, ed essi sono essenzialmente gli operatori di Pauli. Si può considerare di aggiungere l'operatore unitario $\begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$ ai tre operatori di Pauli:

$$\begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix}.$$

Si ottiene quindi una lista di quattro operatori che sono lineari ed hanno le seguenti proprietà. Essi e le loro combinazioni lineari sono tutti i possibili operatori lineari su qualsiasi funzione di una variabile dicotomica, Che questa sia uno spin o una variabile che ci dice se la particella è un protone o un neutrone non fa alcuna differenza. Definiremo:

$$2\tau_1 = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix}; \quad 2\tau_2 = \begin{vmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{vmatrix}; \quad 2\tau_3 = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix}.$$

I fattori 2 qui introdotti si mostreranno convenienti in seguito. Qual è, per esempio, il significato dell'operatore $2\tau_1$ se applicato al protone p ?

La funzione che rappresenta lo stato del protone è in questa notazione.

$$p = \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \end{vmatrix}.$$

In maniera analoga introdurremo un'altra funzione $n = \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix}$, che definisce il neutro-

ne. Ora,

$$\begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix} p = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix} = n$$

significa un'operazione lineare con coefficienti indicati dalla matrice quadrata $\begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix}$ applicata alla funzione $\begin{vmatrix} 1 \\ 0 \end{vmatrix}$ e questo dà come risultato $\begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix}$. Così, si vede che $2\tau_1$ cambia p in n e, come può essere mostrato, cambia anche n in p . $2\tau_1$ è quindi l'operatore che scambia un protone e un neutrone tra loro. In maniera analoga si può mostrare il significato operazionale degli altri".

Qui Fermi si riferisce al sistema a 2 nucleoni.

L'estensione di questi concetti, così come di altri, a campi diversi e l'esemplificazione chiara e precisa che ne fa da supporto, fu la grande prerogativa di Fermi e le lezioni di Varenna ne lasciano una testimonianza indelebile.

4. – Conclusioni

Nel fermarci qui senza aver avuto la pretesa di illustrare al meglio le lezioni di Fermi negli ultimi anni della sua vita, che furono anche quelli maggiormente dedicati all'insegnamento, ma almeno di rendere un doveroso omaggio alla sua memoria, concluderemo con alcuni riferimenti che ne evidenziano comunque la sua coerente attività di grande Maestro.

Dice Emilio Segrè [10], a proposito dell'attività di Fermi presso l'Istituto di Studi Nucleari di Chicago, a partire dalla fine del 1945:

“L'Istituto di studi nucleari era dedicato alla ricerca più che all'insegnamento e non rilasciava diplomi, ma Fermi, come la maggioranza dei professori dell'Istituto, era anche titolare di una cattedra universitaria e teneva corsi regolari in quella sede. Qui insegnò normali corsi di fisica: termodinamica, meccanica statistica, fisica nucleare, meccanica quantistica, fisica dello stato solido. A sua insistente richiesta insegnò anche il corso elementare di fisica generale.

Nei corsi distillava in appunti preparati con cura tutta la sua lunga esperienza didattica e di ricercatore. Alcuni di questi libretti di appunti, per esempio quello sulla meccanica quantistica, erano continuamente riveduti e corretti di anno in anno”.

E vale la pena di ricordare, a proposito, le parole riportate sempre da Segrè, di C. N. Yang (scopritore con T. D. Lee della non conservazione della parità), che fu allievo di Fermi a Chicago poco tempo dopo il suo arrivo negli USA dalla Cina:

“...Come è noto, le lezioni di Fermi erano estremamente chiare. Per ogni argomento aveva l'abitudine caratteristica di cominciare sempre dal principio, esaminando esempi semplici ed evitando il più possibile i formalismi (diceva scherzando che il formalismo complicato era riservato ai 'grandi sacerdoti'). La semplicità stessa del suo modo di

ragionare dava un'impressione di assenza di sforzo, ma questa impressione era errata: la semplicità era frutto di un'accurata preparazione e di un ponderato esame delle varie alternative possibili nell'esposizione...

...Il constatare che Fermi aveva conservato per anni appunti particolareggiati su vari argomenti di fisica, da quelli puramente teorici a quelli puramente sperimentali, da problemi semplici quali la scelta delle coordinate più adatte nel problema a tre corpi a materie profonde quali la relatività generale, fu un insegnamento importante per tutti noi. Imparammo che proprio questa è la fisica. Imparammo che la fisica non deve essere una materia per specialisti; la fisica va costruita dalle fondamenta, mattone per mattone, e strato per strato. Imparammo che le astrazioni vengono dopo l'approfondito lavoro preparatorio, non prima. Queste lezioni ci rivelarono anche l'entusiasmo — invece dell'avversione — di Fermi per i semplici calcoli eseguiti con un calcolatore da tavolo...

E Segrè ancora ricorda come Fermi avesse in mente un progetto da realizzare “da vecchio in pensione”, quello di scrivere un libro “...in cui avrebbe spiegato tutte le questioni di fisica che non vengono mai sviscerate chiaramente, ma tacitamente ammesse o sorvolate con la frase “è noto che”. Credo che avesse intenzioni serie in proposito perchè mi chiese di compilare una lista di questioni che avrei voluto vedere nel suo libro, perchè non le capivo veramente bene. Questo libro, che purtroppo non fu nemmeno cominciato, sarebbe stato una grande lezione per i fisici e forse sarebbe diventato il best seller di tutti i libri di fisica...”.

In mancanza di questo ci limiteremo a dire che in momenti come quelli attuali, in cui si parla e si discute molto sul modo di insegnare, l'esempio di tale Maestro nel dedicarsi veramente e seriamente all'insegnamento, dall'alto della sua statura di scienziato, resta universale.

Così come universale resta la sua figura, malgrado alcune curiose e imperdonabili dimenticanze e perfino contestazioni. Tralascero le penose vicissitudini riguardanti tentativi inqualificabili di togliere il suo nome dall'intitolazione di alcuni licei nel nostro paese.

Ricorderò invece un episodio che mi riguarda personalmente poichè si riferisce ad un intervento in extremis per colmare una grave lacuna in un volume edito da R. Cortina, in una collana “Scienza e Idee”, diretta dall'amico Giulio Giorello. Il libro, di Ernst Peter Fischer, “Aristotele, Einstein e gli altri”, era in corso di traduzione dal tedesco e mi capitò di vederlo su richiesta di Giorello; così ci accorgemmo che tra “...Gli altri” che vanno da Avicenna a Copernico, a Galilei, Keplero, Descartes, Newton, Lavoisier, Faraday, Darwin, Maxwell, Mendel, Boltzmann, Marie Curie, Lise Meitner, Barbara Mc Clintock, Niels Bohr, Pauling, Von Neumann, Max Delbruck, R. Feynmann, mancava — per lo meno — Enrico Fermi. Mi fu richiesto di aggiungere un capitolo come appendice alla edizione italiana che apparve con il titolo “Il grande navigatore” [11] e di cui cito un passo che mi premeva ne illustrasse, a piccolo titolo di riparazione, la geniale comprensione di tutti i fenomeni fisici:

“Questa forma mentale di Fermi, che concepisce la teoria a fondamento della fenomenologia, utilizzando anche i più sofisticati metodi matematici, mai però a scapito della chiarezza fisica, è il segno di una capacità geniale di descrivere le leggi della materia in una prospettiva veramente ‘galileiana’.”

A Fermi resta associato il segno di un ineluttabile destino. Così è espresso nella lapide di porfido imperiale a lui dedicata nell'aula della Villa Monastero, sede della Scuola di Varenna (che lo vide Maestro per l'ultima volta).

HIC

ANIMO TOT INTER RERUM MIRA PACATO

ARCANA NATURAE PRIMORDIA

INTRA ATOMOS VOLVENTIA

DOCTORUM COETUI POSTREMUM APERUI

MEUM UNDE NOMEN IAM IMMORTALE FECERAM

(QUI, L'ANIMO QUIETATO IN FRA TANTE BELLEZZE NATURALI, DISSERRAI PER L'ULTIMA VOLTA, A UNA SCHIERA DI UOMINI DI SCIENZA, GLI ELEMENTI ULTIMI E PIÙ RIPOSTI CHE S'AGITANO ENTRO GLI ATOMI, ONDE IMMORTALE AVEVO GIÀ RESO IL MIO NOME).

APPENDICE

Fermi a Varenna

Il soggiorno di Enrico Fermi a Varenna nel 1954 non fu significativo soltanto per le sue mirabili lezioni già ricordate ma anche per l'impronta da lui lasciata nelle discussioni e analisi conseguenti sulle prospettive della fisica italiana. Giorgio Salvini che ne fu protagonista, soprattutto per quel che riguarda il progetto dell'elettrosincrotrone di Frascati, ne fa un quadro esemplare anche se sintetico nella sua prefazione, menzionando tra l'altro i consigli di Fermi in merito al calcolo elettronico, oltre che sulla fisica degli acceleratori.

In effetti, quel "memorabile" Corso di Villa Monastero fu non solo pregnante in termini culturali, perchè si teneva in un momento determinante per la rinascita della fisica italiana e lo sviluppo della fisica europea ma anche "fondante" in termini di concrete prospettive per l'organizzazione della ricerca. Basta riesaminare i Rendiconti del Corso, che furono pubblicati sul Supplemento al "Nuovo Cimento" n. 1 del 1955, per accorgersi della rilevanza e della specificità degli argomenti trattati, pur nell'ampiezza delle tematiche affrontate. Mi sembra quanto mai opportuno riportare addirittura qui l'Indice del Corso che si spiega da solo senza ulteriori commenti.

INTRODUZIONE	
G. POLVANI - Discorso inaugurale	pag. 4
G. PUPPI - Prolusione	" 8
PARTE PRIMA - Fisica delle particelle elementari.	
<i>SEZIONE I: Questioni relative alla Fisica dei pioni e nucleoni</i>	
pag. 17	
E. FERMI - Lectures on Pions and Nucleons	" 17
W. HEISENBERG - The production of Mesons in very High Energy Collisions	" 96
<i>SEZIONE II: Questioni relative alla fotoproduzione e fenomeni connessi</i>	
pag. 104	
G. BERNARDINI - Lectures on Photoproduction	" 104
B. T. FELD - Photomeson Production from Hydrogen	" 139
B. T. FELD - The Photodisintegration of the Deuteron at High Ener- gies and Associated Phenomena	" 145
S. LOKANATHAN and J. STEINBERGER - Search for the β -Decay of the Pion	" 151
<i>SEZIONE III: Questioni riguardanti i mesoni pesanti prodotti dai raggi cosmici o dal cosmotrone.</i>	
pag. 163	
B. ROSSI - Lectures on Fundamental Particles	" 163
M. CECCARELLI - Results on Heavy Mesons	" 227
A. BONETTI - On the Identification of Charged Hyperons and the Establishment of Their Decay Schemes in Nuclear Emulsions	" 231
C. DILWORTH and B. ROSSI - Comparison of Results on K-Particles Disintegrating at Rest in Cloud Chambers and Photoemulsions	" 239
N. DALLAPORTA - Statistical Evidence Concerning the χ -Meson Decay	" 247
A. DE BENEDETTI, C. M. GARELLI, L. TALLONE and M. VIGONE - Two Examples of a Star Emitting Two Heavy Unstable Particles	" 249
E. AMALDI - On the Measurement of the Mean Life-Time of Strange Particles	pag. 253
R. LEVI SETTI - Unstable Fragments	" 263
<i>SEZIONE IV: Questioni relative all'origine dei raggi cosmici.</i>	
pag. 275	
B. ROSSI - Lectures on the Origin of Cosmic Rays	" 275
U. HABER-SCHAIM - The Energy Spectrum of the Primary Cosmic Radiation.	" 336
PARTE SECONDA - Progetti di macchine acceleratrici.	
<i>SEZIONE I: Progetto di macchina acceleratrice per il Centro Europeo di Ricerche Nucleari</i>	
pag. 339	
E. AMALDI - CERN, the European Council for Nuclear Research	" 339
J. B. ADAMS - The Alternating Gradient Proton Synchrotron	" 355
A. CITRON and M. G. HINE - Experimental Facilities of the CERN Proton Synchrotron	" 375
G. LÜBERS - Theory of Particle Orbits in the Alternating Gradient Synchrotron	" 392
T. G. PICKAVANCE - Synchrocyclotrons and the CERN 600 MeV Machine	" 403
<i>SEZIONE II: Progetto inglese di macchina acceleratrice</i>	
pag. 413	
T. G. PICKAVANCE - Proton Linear Accelerators for Nuclear Research and the A.E.R.E. 600 MeV Project	" 413
<i>SEZIONE III: Progetto francese di macchina acceleratrice</i>	
pag. 423	
H. BRUCK et R. LÉVI-MANDEL - Sur le projet du Synchrotron à protons de Saclay	" 423
<i>SEZIONE IV: Progetto italiano di macchina acceleratrice</i>	
pag. 442	
G. SALVINI - The Italian Design of a 1000 MeV Electronsyn- chrotron. A Comparisons between the Strong and the Weak Focusing	" 442
E. PERSICO - A Theory of the Capture in a High Energy Injected Synchrotron	" 459

Si vede come, accanto alla fisica di frontiera delle particelle elementari, che tuttavia si riallaccia ai fondamenti della fisica non solo subnucleare ma anche nucleare —basta riandare non solo alle lezioni di Fermi, ma anche a tutte le questioni relative ai processi di fotoproduzione— oltre che all’origine dei raggi cosmici, furono poste le basi della costruzione delle macchine acceleratrici che avrebbero fatto decollare il CERN e, oltre alle macchine inglesi e francesi, l’elettrosincrotrone e i Laboratori di Frascati in Italia.

Si può quindi dire che Varenna ’54 segnò la pietra miliare culturale per la nuova “internazionalizzazione” della fisica su scala europea.

È opportuno ricordare che nel 1951 era stato istituito l’INFN riordinato nel 1952, il cui Consiglio Direttivo prese nel 1953 la decisione di costruire l’Elettrosincrotrone da 1000 MeV, costituendo proprio nel 1954 la Sezione Acceleratore a Pisa, sotto la direzione di Giorgio Salvini. Tre anni dopo, nel luglio del 1957, tale Sezione si trasferì a Roma trasformandosi poi in Laboratorio Nazionale di Frascati, dove l’Elettrosincrotrone fu realizzato ed entrò in funzione nel 1959. La relazione di Salvini insieme con quelle di Enrico Persico a Varenna costituiscono quindi in sostanza l’annuncio della prima grande realizzazione sperimentale della fisica italiana del dopoguerra, così come la presentazione di Edoardo Amaldi sulla istituzione e i progetti del CERN e quelle di J.B. Adams, T.G. Pickavance relative al progetto del Sincrociclotrone da 600 MeV chiarivano le prospettive della fisica europea di frontiera.

Poichè tra l’altro l’anno successivo Varenna ospitò il corso di “Struttura nucleare e dei processi nucleari alle basse energie”, sotto la direzione di Carlo Salvetti, che vide la partecipazione, tra gli altri, di A. Bohr, D. Brink, J. Horowitz, I. I. Rabi, A. M. Weinberg, A. De Shalit oltre a M. Cini e S. Fubini, è il caso di collegare ancora una volta a Varenna e all’impronta lasciata da Enrico Fermi le prospettive che si aprivano anche alla fisica nucleare “di bassa energia”. Basta ricordare che negli stessi anni si attivavano le ricerche di fisica dei nuclei presso il Centro Siciliano di Fisica Nucleare a Catania con l’acceleratore Van de Graaff da 2.5 MV (sotto la direzione di Renato Ricamo) e presso l’Istituto di Fisica di Padova con il progetto e poi l’installazione dell’acceleratore di ioni da 5 MV sotto la direzione di Antonio Rostagni.

Le due iniziative dovevano poi sfociare nella realizzazione, all’interno dell’INFN, dei Laboratori Nazionali del Sud (1975) e di Legnaro (1968), con l’inserimento a tutto campo anche della fisica dei nuclei a livello internazionale.

Fermi e la fisica nucleare

In relazione a quanto accennato, mi sembra interessante aggiungere qualche osservazione complementare al capitolo curato in modo eccellente da Ugo Amaldi sull’evoluzione della fisica dei nuclei dagli anni trenta ad oggi. Riprenderò qui due considerazioni che io stesso feci nella mia relazione all’Accademia dei Lincei nel 1992, in occasione del 50^{mo} anniversario del primo reattore a fissione nucleare. La prima si ricollega all’affermazione preliminare di Fermi sulla costituzione del nucleo così come appare nel testo di Fisica Nucleare già citato: *“Tutti i nuclei sono composti da Z protoni + N neutroni. Il numero di massa A è dato da $A = Z + N$. Esaminiamo una carta degli isotopi (alla fine*

del libro...) e notiamo che gli elementi stabili giacciono lungo la curva che inizia con $N/Z = 1...$. Questa affermazione conserva la sua validità ma misura anche il cammino percorso dalla fisica dei nuclei se si pensa che la “mappa nucleare” ai tempi di Fermi e Segrè conteneva circa 800 specie nucleari, mentre oggi se ne conoscono più di 2.500, grazie soprattutto alle reazioni indotte da ioni pesanti e che la sintesi di nuclei “esotici” lontani dalla valle di stabilità con grandi valori di isospin o di nuclei superpesanti (siamo a $Z = 118$) non è più solo una questione “chimica” ma pone nuovi problemi strutturali del sistema nucleare.

La seconda considerazione riguarda la necessità, più o meno evidente, di introdurre i gradi di libertà subnucleonici (quarks interagenti per scambio di gluoni) e di ritenere che “...scopo (ultimo?) della fisica nucleare sia quello di collegare i fenomeni noti del mezzo nucleare ai quarks e ai gluoni e alle corrispondenti teorie, la quantocromodinamica...”.

E tuttavia ancor oggi il grosso delle proprietà strutturali e buona parte della dinamica nucleare possono essere descritte da sistemi di nucleoni interagenti tramite “forze di scambio” (come ai tempi di Fermi), introducendo come gradi di libertà subnucleonici solo quelli relativi ai mesoni ($\pi, \rho...$). E ciò è vero indipendentemente dal modello specifico considerato per estrarre l’interazione “efficace” tra nucleoni: modello a strati, modello collettivo, modello a bosoni interagenti e così via...

D’altra parte, si può osservare che l’immagine del nucleo atomico che emerge, dopo 50 anni di studi intensi, è tuttora complessa, considerato il fatto che esso rappresenta un sistema quantistico da pochi a molti corpi. Lo studio dei sistemi a molti corpi è un tema che unisce gli sforzi di quasi tutte le branche della fisica contemporanea che hanno a che fare con i sistemi quantistici, dai fenomeni macroscopici nella materia condensata attraverso strutture molecolari e atomiche fino ai nuclei e alle particelle elementari. La fisica nucleare ha una posizione speciale in questo sforzo comune poichè essa riguarda sistemi di complessità sufficiente a esibire una varietà di fenomeni collettivi e di simmetrie ma che, tuttavia, sono ancora abbastanza elementari da dar luogo a spettri che esibiscono stati quantici ben definiti che si possono studiare nei minimi dettagli. È ciò che permette l’utilizzo di particolari simmetrie come quelle degli stati bosonici a due nucleoni (fermioni) descritti dal modello a “bosoni interagenti”.

Infine, un’ultima considerazione.

I processi nucleari basilari come quelli legati alle interazioni dei neutroni costituiscono ancora temi di grande attualità.

Per esempio, noi conosciamo che il tempo di residenza dei neutroni lenti nel nucleo (così come evidenziato dagli esperimenti del gruppo di Fermi a Roma e cioè 10^{-18} s) eccede il tempo di transito (10^{-22} s) per un fattore così grande perchè il nucleo composto continui ad essere un concetto cruciale nell’analisi delle reazioni da neutroni. Così la coesistenza del moto di particella indipendente con fenomeni collettivi di molti corpi del sistema composto appare una proprietà assai generale attesa in una grande varietà di sistemi quantici.

Tali sistemi, a temperatura zero, possono essere o solidi (sistemi classici) o liquidi quantistici (e sono i sistemi di Fermi) che esibiscono gradi di libertà di particella indipendente. La questione è riferibile al problema maggiore di fasi diverse della materia

nucleare. Ancora una volta la profondità delle idee originate ai tempi di Fermi e da lui stesso enunciate ha un significato rinnovato (“...c’è qualcosa di nuovo, anzi d’antico...”) nella scienza di oggi e non solo in fisica nucleare.

Come Fermi stesso ebbe a dire al termine del famoso articolo sulla teoria del decadimento β :

“Solo un ulteriore sviluppo della teoria, come un aumento nella precisione dei dati sperimentali, potrà indicare quale modificazione sarà necessaria”.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] FERMI E., *Lectures on pions and nucleons*, in *Proceedings of the International School of Physics, Varenna 1954, Course II*, a cura di G. Puppi; supplemento al vol. II, Serie X del *Nuovo Cimento*, **1** (1955) pag. 17.
- [2] Società Italiana di Fisica, *Celebrazione del trentennale della Scuola Internazionale di Fisica “E. Fermi”* (Editrice Compositori, Bologna) 1984.
- [3] *Nuclear Physics A course given by E. Fermi at the University of Chicago*. Notes compiled by J. Orear, A. H. Rosenfeld and R. A. Schluter (The University of Chicago Press) Riedizione 1950.
- [4] FERMI E., *Notes on Thermodynamics and Statistics* (The University of Chicago Press) 1966.
- [5] FERMI E., *Notes on Quantum Mechanics* (The University of Chicago Press) 1961.
- [6] FERMI E., *Conferenze di Fisica Atomica in Note e Memorie (Collected papers)*, vol. II (Accademia Nazionale dei Lincei, The University of Chicago Press) 1966, pag. 684.
- [7] FERMI E., *A course in neutron physics*, compiled by J. Halpern in *Note e Memorie*, vol. II (Accademia dei Lincei, The University of Chicago Press) 1965, pag. 440.
- [8] RICCI R. A., *Nuclear Physics at the Fermi time and today* Simposio dedicato a E. Fermi, 1992 (Accademia Nazionale dei Lincei, Roma) 1993.
- [9] FERMI E., *Elementary Particles* (Yale University Press, New Haven) 1951.
- [10] SEGRÈ E., *Enrico Fermi Fisico*, II edizione (Zanichelli, Bologna) 1987, pagg. 171-173.
- [11] RICCI R. A., Appendice a E. P. FISCHER *Aristotele, Einstein e gli altri*, edizione italiana (R. Cortina Editore) 1997, pagg. 403-416.

Renato Angelo Ricci, ex allievo della Scuola Normale Superiore di Pisa e di Parigi, ora Professore fuori ruolo di Fisica Nucleare all’Università di Padova. Presidente onorario, già Presidente, della Società Italiana di Fisica, è stato Presidente della Società Europea di Fisica, Vicepresidente dell’INFN; ha diretto ricerche in Fisica Nucleare a Torino, Amsterdam, Napoli, Orsay, Rio de Janeiro, Yale, Firenze e Padova; in particolare è stato tra i fondatori dei Laboratori Nazionali di Legnaro dove ha diretto l’installazione del primo acceleratore italiano per ioni pesanti. Ha partecipato alla scoperta di nuove specie nucleari, alla determinazione di leggi fondamentali di spettroscopia nucleare e ha promosso la partecipazione italiana alle ricerche presso il CERN sulle transizioni di fase della materia nucleare. Vincitore del premio Somaini 2000 per la fisica.
