
ENRICO FERMI, LA SCIENZA TRA GENIO E CASO¹

MARCO M. MASSAI

Dipartimento di Fisica 'E.Fermi', Università di Pisa

Introduzione

La figura di Enrico Fermi, con la sua vicenda scientifica ed umana, è certamente molto conosciuta, anche da un pubblico di non specialisti. Sono noti i suoi principali contributi alla fisica teorica, vere pietre miliari nello sviluppo di modelli fisici, e alla tecnologia nucleare, che hanno rappresentato un caso unico, sia per la quantità e la qualità delle idee proposte dal fisico italiano, sia per la sua capacità di inventare soluzioni originali in una varietà incredibile di problemi; la realizzazione della prima pila atomica alla fine del 1942, a Chicago, rappresenta bene la sintesi delle sue conoscenze, sia teoriche che sperimentali, e delle sue capacità organizzative [1].

Fermi partecipò al Progetto Manhattan che permise agli Stati Uniti di costruire le prime bombe atomiche, nel 1945; bombe che furono sganciate sulle città giapponesi di Hiroshima e Nagasaki, il 6 ed il 9 agosto dello stesso anno provocando la distruzione, più ancora, la polverizzazione quasi istantanea di quello che restava di città che avevano già subito bombardamenti convenzionali. Ma che portarono soprattutto all'uccisione di centinaia di migliaia di persone, in parte annientate dall'enorme energia liberata dalle ancora inesplorate profondità dell'atomo, in parte uccise lentamente, anno dopo anno, dai mille tipi di tumore generati dall'esposizione alle radiazioni.

Ma andando a cercare nei numerosi lavori di Fermi, ed in particolare in quello svolto a Roma nell'anno 1934, si trovano due episodi singolari che possiamo considerare emblematici e che portano a guardare al lavoro di uno scienziato da un diverso punto di vista, meno scontato e più problematico.

Infatti, un ricercatore che nel suo lavoro inizialmente decide di puntare in una direzione, a volte può scegliere di cambiare obiettivo strada facendo, spinto spesso da non sicure intuizioni; può raggiungere quindi risultati che talvolta sembrano incomprensibili, se interpretati con gli schemi che ha a disposizione e che si possono mostrare inadeguati. Ecco che allora può provare a cambiare punto di vista e imboccare nuove strade. Bene, io credo che questo percorso non sia stato finora né potrà, forse, mai essere completamente codificato.

Thomas Kuhn, a metà del Novecento, ha elaborato un complesso ed articolato schema con il quale ha proposto di interpretare molte delle scoperte che hanno caratterizzato gli ultimi tre secoli di sviluppo della scienza; ha introdotto il concetto di *paradigma*

1 Lezione tenuta al Liceo Scientifico "XXV aprile" di Pontedera il 14 dicembre 2012.

scientifico come insieme di idee e concezioni, di connessioni tra di esse, che caratterizza in un periodo storico, la spiegazione di una serie di fenomeni all'interno di una data disciplina. Ha di conseguenza usato il termine di *rivoluzione scientifica* proprio come sostituzione di un paradigma entrato in crisi in un periodo di *scienza normale*. Tuttavia, una cosa è trovare uno schema interpretativo di ciò che è già scritto nei libri di storia, ben altro è immaginare e prevedere quali possano essere le prossime *crisi del paradigma* e da quale angolo dell'orizzonte della conoscenza possano arrivare i primi segnali [2].



Figura 1. Enrico Fermi

Fermi in via Panisperna

Fermi arrivò a Roma, nel 1926, già famoso come fisico teorico per alcuni lavori fatti fin da giovanissimo, avendo vinto la Cattedra di Fisica Teorica, la prima bandita in Italia. Tuttavia, i suoi impegni nel Regio Istituto di Fisica, diretto da Orso Mario Corbino, hanno a che fare con la fisica dell'atomo che, seppur ancora lungi dall'essere esplorata fino in fondo, stava rapidamente lasciando il campo alle nuove e misteriose domande che venivano dai recenti esperimenti sul nucleo.

Infatti, la scoperta del neutrone fatta da Chadwick nel 1932, aveva sì chiarito alcune questioni riguardanti la massa e la carica nucleare, ma aveva aperto un nuovo campo di ricerca, la fisica nucleare. Per studiare i misteri dell'atomo è necessario essere forniti di strumenti relativamente semplici, visto che le energie in gioco sono dell'ordine dell'elettronvolt, per i gusci esterni, e del keV (migliaia di elettronvolt) per quelli più interni; quindi, luce e raggi X sono le 'sonde' giuste per ricavare informazioni sul sistema 'atomo'.

Invece, per studiare il nucleo diventa necessario disporre di 'sonde' ben più energetiche, sia perché le energie di legame dei costituenti nucleari sono molto maggiori, sia perché la repulsione coulombiana dovuta alla carica positiva del nucleo rende sempre più difficile avvicinarsi al nucleo stesso. I gruppi che al mondo in quei primi anni Trenta stanno studiando il nucleo utilizzano o protoni o particelle alfa, entrambi con carica positiva. In particolare, nel Laboratorio dei coniugi Irene Curie e Frederic Joliot, a Parigi, si sta sperimentando l'utilizzo delle particelle alfa, con carica + 2, prodotte dal decadimento di alcune sostanze naturali che essendo instabili, danno luogo a quel fenomeno chiamato 'radioattività', già noto da anni, ma ben lungi dall'essere compreso.

E' grande la sorpresa, tra gli scienziati nucleari, quando i coniugi Joliot-Curie (questo è il cognome che entrambi prenderanno) scoprono che in alcune sostanze stabili, se bombardate con particelle alfa energetiche, si assiste alla nascita di nuovi elementi radioattivi: è una scoperta da Premio Nobel che infatti verrà loro assegnato nel 1935, e che prende il nome di 'radioattività artificiale'. E' la prima volta che l'uomo raggiunge, seppure per via fisica e non chimica, il traguardo della trasmutazione degli elementi, così a lungo sognato, inutilmente cercato per secoli, dagli alchimisti. E' possibile adesso mutare la natura di un elemento. Il segnale che ciò è avvenuto nel bersaglio sottoposto al bombardamento di alfa è infatti proprio la presenza di elementi chimici non presenti all'inizio.

Tuttavia, questo segnale è debole, le quantità in gioco sono piccolissime e sono necessari tecniche raffinate e chimici molto in gamba per rivelarne la presenza. Le modalità con le quali viene riconosciuta questa trasmutazione artificiale del nucleo sono o nel decadimento beta, nel quale viene emesso un elettrone (in alcuni casi, un positrone), o nel decadimento alfa. Nel primo caso, la segnatura è caratteristica: si trova la presenza di elementi nuovi, con la stessa massa atomica, ma con uno Z variato di una unità. E' quindi concettualmente facile riconoscere se siamo davanti a radioattività artificiale: basta aspettare che i nuovi isotopi, instabili, seguendo leggi di natura ancora imperscrutabili, mutino la loro identità decadendo beta dando origine a nuovi elementi.

La scoperta dei Joliot-Curie apre uno scenario nuovo: quanti sono gli elementi instabili che si possono formare? Quali sono le forze responsabili di queste reazioni nucleari? E quali sono i meccanismi con i quali agiscono? Ci vorranno ancora molti anni di ricerche sempre più complesse e nuovi modelli teorici per rispondere a queste domande.

Il bombardamento neutronico

E Fermi, a Roma, agli inizi del 1934, sta per dare risposte ad entrambe. Inizia infatti a costruire la strumentazione necessaria ad eseguire i primi esperimenti sul nucleo. Sono necessarie fondamentalmente tre cose: i proiettili, da sparare sul nucleo, i bersagli, che devono essere il più puri possibile per non sovrapporre la risposta di due sostanze

diverse, ed i rivelatori di radioattività, strumenti ancora rudimentali ma che certo non si comprano sul mercato; vanno costruiti in Laboratorio ed essi stessi rappresentano un importante campo di ricerca. Ma Fermi, a Roma, ha tra i suoi collaboratori Franco Rasetti, già compagno di studi a Pisa, amico, ed uno dei maggiori fisici sperimentali in Italia, nonostante non abbia ancora 33 anni. Inoltre, nel gruppo che prenderà il nome di 'Ragazzi di via Panisperna', ci sono anche Emilio Segré, di 4 anni più giovane e futuro Premio Nobel, ed Edoardo Amaldi. Solo pochi mesi dopo arriverà un ragazzo poco più che ventenne, Bruno Pontecorvo, che segnerà la storia della fisica, e non solo di essa, con una serie incredibile di idee rivoluzionarie e con una vita ricca di svolte clamorose. Il gruppo ha tuttavia bisogno di un chimico, e Oscar D'Agostino che lavorava proprio a Parigi dai Joliot-Curie, verrà richiamato a Roma da Fermi.

Tutto è pronto per iniziare un'avventura scientifica che ancora nessuno si immagina. Ma c'è bisogno di un'idea nuova e questa viene proposta da Fermi: utilizzare al posto di proiettili carichi che necessitano di grandi energie per avvicinarsi al nucleo, proiettili neutri, proprio come i neutroni appena scoperti, che permettono anche di raggiungere nuclei pesanti, cioè elementi ad alto numero atomico, di fatto irraggiungibili con i protoni o con le alfa. L'idea è buona, ma ha le sue controindicazioni: le sorgenti di neutroni vanno costruite e non sono molto intense. Inoltre i neutroni non possono essere né accelerati né diretti. Questo comporta che i flussi di neutroni saranno deboli, e così anche i segnali, e quindi l'apparato sperimentale deve essere completamente ridisegnato.

Ma ormai il dado è tratto e agli inizi del '34 Fermi ed il suo gruppo cominciano un lavoro sistematico: bombardare con neutroni la maggior parte degli elementi della tavola periodica, cominciando con il primo, l'idrogeno. Non succede nulla: i rivelatori rimangono silenziosi, o meglio, emettono il solito rumore di fondo che li caratterizza e che deve essere ben misurato per poter distinguere il vero segnale. Non accade niente neanche per i successivi elementi che sono il litio, il berillio, il boro etc. C'è nel gruppo una certa sfiducia perché potrebbe essere sbagliata proprio la strada, nuova, che hanno scelto, quella dei neutroni; oppure il segnale potrebbe essere così debole che il rumore degli strumenti riesce a sopraffarlo. Visto lo scetticismo che si stava impadronendo del gruppo, quindi, la sorpresa è ancora maggiore e la soddisfazione grande, quando arrivano le prime indicazioni che là, al centro degli atomi di fluoro, qualcosa è cambiato. Il segnale è dato dal contatore Geiger che col suo ticchettio segnala il passaggio di una particella carica: o è una particella alfa che si è staccata dal nucleo che si è trasformato in azoto, oppure è l'elettrone del decadimento beta, che indica che un neutrone nel nucleo di fluoro è diventato un protone con l'emissione di un elettrone; e qualcos'altro che però non è ancora possibile rivelare, ma che Pauli ha già immaginato nel 1930 e che è stato battezzato neutrino. Comunque sia è un successo: adesso, Fermi ha dimostrato che l'uso dei neutroni è altrettanto efficace di quello delle alfa e può quindi proseguire lo studio sistematico di tutti gli altri elementi disponibili [3].

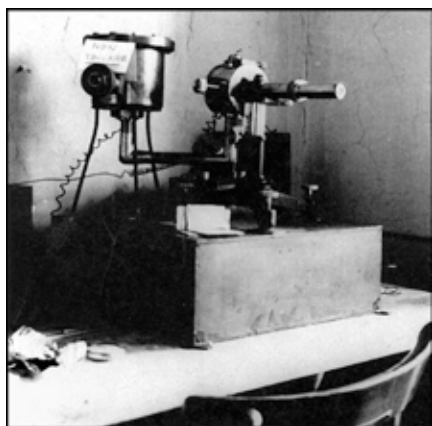


Figura 2a. Camera a ionizzazione



Figura 2b. Elettromagnete trocoidale

Strani segnali dall'uranio

In poche settimane la tavola di Mendeleev è completata e anche l'ultimo elemento, l'uranio, viene sottoposto al bombardamento con neutroni.

È l'elemento più pesante, il suo nucleo contiene 92 protoni ed un numero di neutroni che dipende da quale isotopo si considera: per esempio, 143, nel caso del ^{235}U , e 146, nel caso del ^{238}U .

Il gruppo di Fermi registra anche in questo caso una certa attività dei rivelatori: il ticchettio dei Geiger è inconfondibile. La spiegazione che viene data è la stessa che nel caso di altri elementi: il neutrone, assorbito dal nucleo, lo rende instabile e quindi tende a trasformarsi in un protone, emettendo un elettrone per garantire la conservazione della carica nella reazione. Ma un protone in più significa, nel caso dell'uranio, una cosa sola: la formazione dell'elemento n. 93, che in natura non esiste.

È solamente un'ipotesi, ma per adesso è la sola. Sarebbe una scoperta clamorosa, raggiunta con pochi strumenti ed in pochi mesi di lavoro. Altre idee non vengono in mente ai membri del gruppo di via Panisperna e quindi decidono di pubblicare il lavoro sulla prestigiosa rivista *Nature*, anche se Fermi nutre ancora alcuni dubbi [4]. Non solo, c'è anche l'evidenza sperimentale di un altro elemento, il n.94 che potrebbe essere creato dal bombardamento del torio. Ma anche le pressioni del Direttore dell'Istituto spingono a darne notizia al resto del mondo; e sono già pronti i nomi per i due nuovi elementi: Ausonio ed Esperio, in onore di antiche popolazioni italiche, in ottemperanza ad un nazionalismo esasperato che è diffuso dal potere politico, ormai invasivo.

La notizia fa scalpore nel mondo scientifico, ma l'autorevolezza che Fermi si è conquistato in anni di intenso lavoro, lo mette al riparo da critiche immediate. Anzi, dopo pochi mesi, altri ricercatori confermano i suoi risultati [5], [6]. Eppure, c'è qualcuno che ha letto con attenzione il suo lavoro e che non è d'accordo.

E' Ida Noddack, una chimica tedesca che studia la radioattività artificiale. Ha avuto da poco notizia che anche un fisico ceco a Praga, O. Koblíček, ha identificato l'elemento n.93, in maniera del tutto indipendente da Fermi, e lo ha battezzato Bohemio, in omaggio alla sua terra. Ma la Noddack ha dei forti dubbi sulla spiegazione che viene portata a supporto della scoperta, non è convinta, lei chimica, che l'identificazione del nuovo elemento sia rigorosa. Invece, ha un'idea nuova, molto diversa, su cosa sia successo in realtà al nucleo dell'uranio dopo che ha assorbito il neutrone incidente; ma è un'idea veramente rivoluzionaria che introduce una nuova modalità, per il nucleo, per raggiungere una maggiore stabilità: la fissione, la rottura in due pezzi più piccoli [7].

Ida Noddack ipotizza che il nucleo di uranio, una volta assorbito il neutrone, si scinda in due nuclei più leggeri, a loro volta necessariamente instabili, che con decadimento beta o alfa, danno un segnale simile a quello che Fermi ha interpretato come decadimento dell'elemento n.93; questo, per adesso, torna ad essere una ipotesi, una speranza dei ricercatori. La chimica tedesca pubblica, ancora su *Nature*, la sua idea che supporta con considerazioni di carattere fisico e chimico. Ma per adesso la dimostrazione che ha ragione non è accessibile agli sperimentatori, anche per la quantità estremamente piccola degli atomi interessati. Manca infatti una strumentazione che possa, misurando l'energia dei prodotti di decadimento, caratterizzare in maniera non ambigua la reazione studiata, indipendentemente dal numero di atomi prodotti. Ci vorranno ancora alcuni anni, nuovi strumenti e nuove teorie per spiegare i risultati ottenuti. Solamente alla fine del 1938, proprio mentre Fermi dopo aver ritirato a Stoccolma il Premio Nobel si sta trasferendo con la famiglia negli Stati Uniti, Otto Hahn e Fritz Strassmann, di Berlino, pubblicano la notizia che durante il bombardamento dell'uranio è stata rivelata la presenza di bario nei prodotti di decadimento; ed il bario non era assolutamente presente all'inizio. E sarà ancora una donna, una grande scienziata, Lise Meitner, che era dovuta fuggire da Berlino e rifugiarsi in Svezia perché ebrea, a dare la corretta interpretazione dei risultati dei due scienziati tedeschi.

Sarà il primo passo verso la realizzazione della bomba atomica. In poche settimane, in quegli inizi del drammatico 1939, Enrico Fermi e Leo Szilard alla Columbia University riprodurranno, stavolta in maniera consapevole, la fissione del nucleo di uranio. Anche Joliot-Curie, a Parigi, dove si erano accumulate la maggiori competenza al mondo nel campo della fisica nucleare, riuscirà a riprodurre la reazione; e si accorrerà, inoltre, che questa provoca la fuoriuscita dal nucleo di altri neutroni. Questo fatto verrà correttamente interpretato come l'indizio che si possa realizzare una reazione a catena [8]. Il fatto poi che in queste reazioni si liberi anche una enorme quantità di energia, apre improvvisamente la possibilità, almeno teorica, di realizzare una nuovo tipo di bomba. Ma questa è un'altra storia.

Fermi nel 1934 questo sviluppo non lo aveva ancora immaginato.

La scoperta dell'elemento n.93, in quegli anni, cade lentamente nell'oblio.

Ma il destino aveva in serbo per Fermi ed il suo gruppo un'altra clamorosa scoperta che verrà subito confermata da tutta la comunità internazionale e che lo porterà all'assegnazione del Nobel nel 1938.



Figura 3. Ida Noddack

La sorpresa dei neutroni lenti

Nell'estate del 1934, a Roma, la produzione del primo elemento artificiale non è seguita da esperimenti convincenti e Fermi se ne sta gradualmente allontanando. Si dedica al perfezionamento della sua teoria per spiegare il decadimento beta, così tante volte osservato e misurato in laboratorio. Nel frattempo, gli altri membri del gruppo portano avanti sistematicamente il miglioramento delle misure con i neutroni. Ma nuovi problemi sorgono nel tentativo di riprodurre le numerose reazioni nucleari che avevano portato in pochi mesi alla produzione della metà degli isotopi radioattivi artificiali prodotti nel mondo.

Con il rientro dalle vacanze estive, si aggrega al gruppo un giovanissimo fisico, pisano di origine ma che si era laureato l'anno prima a Roma, Bruno Pontecorvo. Viene messo subito a lavorare, con Edoardo Amaldi, alla riproduzione dei primi esperimenti compiuti prima dell'estate, per eseguire misure più accurate. I due giovani fisici (Amaldi ha solo 5 anni più di Pontecorvo) non riescono tuttavia ad eseguire misure stabili. Pur in presenza dello stesso apparato, e cioè, stessa sorgente di radioberillio, stesso bersaglio, l'argento, stessi contatori Geiger, i risultati quantitativi sono molto instabili e cambiano anche di un ordine di grandezza, apparentemente senza una spiegazione razionale.

In effetti, non era possibile immaginare un fenomeno così misterioso, seppur semplice, almeno nella spiegazione che ne darà Fermi di lì a poche settimane. Il numero

dei conteggi dei Geiger sembra dipendere da certe condizioni sperimentali che nulla possono avere a che fare con un fenomeno nucleare: il materiale con cui è fatto il tavolo che sorregge l'apparato, la presenza nei dintorni di un secchio d'acqua... Un vero e proprio rompicapo, almeno fino al 20 ottobre del 1934. Quel giorno, infatti, il problema troverà una spiegazione, razionale seppure mai pensata prima.

Rasetti rimbrotta i giovani e li prende in giro accusandoli di non saper ripetere la misura, in fondo così semplice. Ma Fermi non si fida di questa spiegazione che si basa sulla inesperienza dei giovani, anzi è certo che loro hanno fatto bene il loro dovere. Quindi la soluzione sta in qualcosa che è celato negli ancora misteriosi fenomeni che avvengono alle dimensioni nucleari, per le quali un atomo è grande quanto una montagna per un topolino.

Quel giorno, sabato, Fermi ha un'intuizione geniale che certo viene dalla sua profonda conoscenza di tutti i fenomeni della fisica, dalla Relatività Generale alla Meccanica Quantistica, dalla Meccanica Statistica alla Fisica Nucleare. Forse le sue conoscenze in tutti questi campi portano un contributo alla formulazione dell'ipotesi sul rallentamento dei neutroni negli urti con nuclei leggeri.

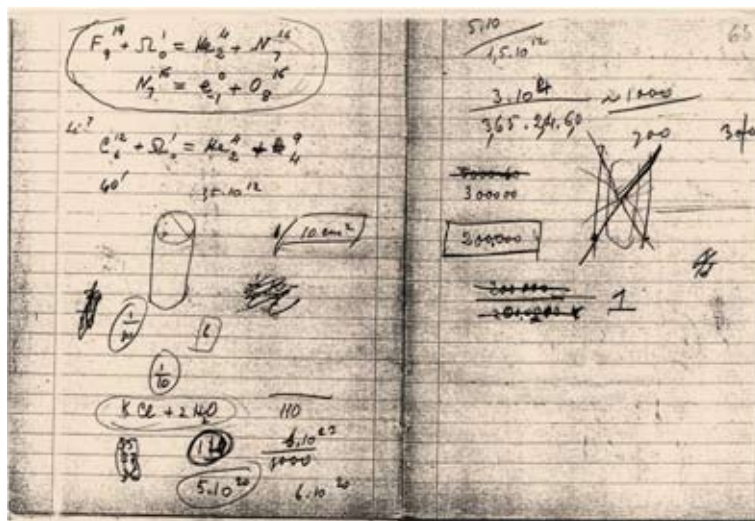


Figura 4a. Appunti di Fermi

Questa è la spiegazione che Fermi dà per primi ai suoi allievi e colleghi: quando i neutroni molto energetici urtano nuclei di idrogeno che hanno praticamente la loro stessa massa, per le semplici leggi di conservazione dell'impulso e dell'energia, devono perdere parte della loro energia cinetica, cosa che non avviene nell'urto con nuclei più pesanti, come il ferro, contro i quali il neutrone quasi rimbalza, cambiando il suo impulso ma cedendo ben poca energia al nucleo. Proprio come una pallina rimbalza elasticamente quando urta una parete o il pavimento, mentre la palla da biliardo urtando una sua simile perde molta della sua energia, e rallenta. Il modello è semplice, ma Fermi è in grado di verificare con pochi conti anche quantitativamente che cosa succede quando in un materiale gli urti tra un neutrone ed i numerosi nuclei, sono

molteplici. Ma questa spiegazione non basta; bisogna anche considerare che un neutrone rallentato impiega più tempo nel passare accanto al nucleo e quindi la probabilità che da questo venga assorbito aumenta di conseguenza.

Ecco, adesso il modello è completo. Certo, servono conti più precisi, verifiche, controlli sperimentali accurati, ma l'idea è quella giusta. Fermi la comunica ai suoi ragazzi ed il lunedì successivo viene fatta una comunicazione alla rivista *La Ricerca Scientifica* [9]. E' la scoperta che verrà premiata con il Premio Nobel quattro anni dopo. E questa scoperta ancora per qualche tempo permette al gruppo di Fermi di rimanere sulla frontiera della ricerca a fronte dei gruppi, americani in particolare, i quali dispongono dei nuovi strumenti che si dimostreranno cruciali per proseguire lo studio del nucleo, gli acceleratori di particelle.



Figura 4b. Il lavoro sui neutroni lenti

Infatti, la bassa intensità delle sorgenti naturali che viene superata di ordini di grandezza dall'energia ed intensità delle nuove macchine viene compensata dall'aumento della probabilità di interazione, descritta bene dalla grandezza sezione d'urto (che ha le dimensioni di una superficie!) la quale aumenta al diminuire dell'energia del neutrone, come Fermi aveva ipotizzato. In altre parole, è come se i neutroni, rallentando, diventassero più grandi!

Già la settimana successiva, i Joliot-Curie ripetono a Parigi con successo l'esperimento di Fermi, confermando in pieno anche il modello da lui proposto. E stavolta la scoperta non viene messa in dubbio e va ad accrescere la stima che Fermi ed il suo gruppo, in quel magico, incredibile 1934, si erano già conquistati; anche se pochi mesi prima avevano mancato l'altra grande scoperta, la fissione del nucleo, che dovrà aspettare altri quattro anni per essere realizzata.

Conclusioni

Non credo si possano trarre delle conclusioni univoche dall'analisi di questa vicenda, tanto singolare essa appare anche a chi studia la Storia della Scienza. Ben pochi casi, infatti, possono essere trovati simili a quanto è accaduto a Fermi ed al suo gruppo, in quei pochi mesi del 1934.

Qualcuno può riconoscere l'esclusivo contributo del caso, imprevedibile, che ha prima negato e poi permesso allo scienziato italiano la scoperta da Premio Nobel. Ma non può essere solo la fortuna: nel caso di Fermi, osservando il suo percorso scientifico prima e dopo l'avventura di via Panisperna, emerge senza dubbio la sua genialità, unitamente alla sua dedizione al lavoro sistematico, continuo, metodico, ma mai passivo.

Sempre, infatti, deve essere pronto lo scienziato a cogliere le connessioni, i legami o le contraddizioni tra un'osservazione ed un'altra, tra i dati che a prima vista appaiono incoerenti, contraddittori persino. E che forse celano una nuova verità nascosta.

E proprio in questa tensione tra la ricerca del nuovo e la conferma del già conosciuto, tra la fiducia nel lavoro svolto da tanti altri colleghi e la speranza di raggiungere la fama attraverso l'idea rivoluzionaria, che si colloca il lavoro dello scienziato; ma spesso è facile scivolare verso uno dei due estremi. E allora, in un caso si va alla ricerca della scoperta clamorosa, e qui la fortuna, il caso sono sempre in agguato, con il loro contributo imprevedibile. Nell'altro, la condanna all'anonimato, all'oblio, è probabile.

Ma, forse, il caso, che qualcuno chiama destino, è sempre lì, pronto, o a sottrarre all'appassionato scienziato l'occasione della futura gloria o, al contrario, a fornirgli inaspettatamente l'occasione per scrivere il proprio nome nella storia.

BIBLIOGRAFIA

- [1] MASSAI M., *Enrico Fermi, tra scienza, storia ed etica*, Atti di Pianeta Galileo, 2011.
- [2] KUHN T., *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, Einaudi, Torino 1979.
- [3] *Radioattività indotta da bombardamento di neutroni*, La Rivista Scientifica, Vol. I, n.5, 15 marzo 1934.
- [4] FERMI E., *Possible Production of Elements of Atomic Number Higher than 92*, Nature 133, 16 June 1934.
- [5] BJERGE T., WESTCOTT C.H., *Radioactivity induced by Bombardment with Neutrons of Different Energies*, Nature 134, 04 August 1934.
- [6] *Element beyond Uranium*, Nature 137, 958-959, 6 June 1936.
- [7] NODDACK I., *On element 92*, Zeitschrift fur Angewandte Chemie, vol. 47, Settembre 1934.
- [8] VON HALBAN H., JOLIOT F., KOWARSKI L., *Liberation of Neutrons in the Nuclear Explosion of Uranium*, Nature 143, 470-471, 18 March 1939.
- [9] *Azione di sostanze idrogenate sulla radioattività prodotta da neutroni*, La Rivista Scientifica, Vol. II, n.14, 15-31 Ottobre 1934.

Immagini in parte dalla Collezione Fermi del Dipartimento di Fisica di Roma:
<http://www.phys.uniroma1.it/DipWeb/museo/collezione%20Fermi/collFermi.htm#beta>