

## LA RIVOLUZIONE CULTURALE DI ENRICO FERMI

---

### Indice

1	<a href="#">Un ragazzo prodigio</a>	3
2	<a href="#">Nuove visioni del mondo: relatività e meccanica quantistica</a>	4
3	<a href="#">Fermi all'università: studente-professore</a>	10
4	<a href="#">Fermi a via Panisperna: un modo diverso di pensare e di insegnare</a>	12
5	<a href="#">La svolta: nasce la fisica nucleare italiana</a>	15
6	<a href="#">Fermi e i neutroni lenti</a>	17
7	<a href="#">Insegnare, calcolare, giocare</a>	19
8	<a href="#">Lecture consigliate</a>	21

### Introduzione

A due passi dal Viminale, vicino alla centralissima Via Nazionale e a poche centinaia di metri dalla stazione Termini di Roma c'è una via che dovrebbe essere considerata uno dei luoghi più importanti della cultura italiana del '900.

Quello che accadde al Regio Istituto di Fisica di via Panisperna negli anni a cavallo tra il 1927 e il 1935 circa può essere considerato infatti una vera e propria rivoluzione culturale: un nuovo modo di concepire la fisica.



L'artefice di tale innovazione è il massimo fisico italiano del '900 e uno dei più grandi di tutti i tempi: *Enrico Fermi*, di cui il 29 settembre 2001 si è celebrato il centenario della nascita. Il prestigio della scuola di fisica romana che si è creata intorno a Fermi dura tuttora, grazie anche all'opera di Edoardo Amaldi, l'unico tra i "ragazzi di via Panisperna" rimasto in Italia dopo la seconda guerra mondiale.

Il nome di Fermi è uno dei più ricorrenti quando si sfoglia un testo di fisica moderna, ed è legato ad almeno tre grandi capitoli della fisica: la statistica quantica delle particelle di *spin* sem-

intero (i “fermioni”), il *decadimento beta* e le interazioni deboli (la “lagrangiana di Fermi”, la “costante di Fermi”); la *radioattività artificiale indotta dai neutroni* e le sue applicazioni alla fissione nucleare (la “pila di Fermi” e la bomba atomica).

Come accade spesso per i fuoriclasse della scienza, il premio Nobel non rende giustizia al suo immenso contributo alla fisica: Fermi lo ha vinto per le scoperte sulla radioattività indotta dai neutroni, ma se tre fisici diversi avessero prodotto quei tre risultati, avrebbero meritato un premio Nobel ciascuno.

Anche nei campi non direttamente aperti da lui, Fermi ha saputo cimentarsi ai massimi livelli. È il caso della *relatività generale* (le “coordinate di Fermi”); dei modelli atomici (l’atomo “di Thomas-Fermi”); della fisica dei raggi cosmici; delle prime simulazioni numeriche (modello “di Fermi-Pasta-Ulam”). Altri scienziati hanno sviluppato tecniche di calcolo o nuovi modelli grazie a semplici osservazioni o intuizioni di Fermi. Egli ha poi sfiorato altri due risultati fondamentali: *il principio di esclusione di Pauli* e la prima fissione del nucleo, realizzata inconsapevolmente dal suo gruppo.

Per la scienza italiana il suo ruolo è poi doppiamente rivoluzionario; non solo Fermi è stato il primo fisico italiano a lasciare contributi fondamentali dopo Galileo Galilei e Alessandro Volta, ma ha inventato un nuovo stile per fare e insegnare fisica, creando una scuola e introducendo la fisica come la si fa oggi in un Paese ancora scientificamente arretrato e conservatore, come era l’Italia del periodo fascista.

Il coinvolgimento di Fermi nella creazione di ordigni atomici offre spunti di riflessione attuali e tuttora aperti sul ruolo della scienza nella società, soprattutto nel contesto della cosiddetta *era “post-accademica” della scienza* in cui ci troviamo, ma non ne offusca la grandezza di scienziato.

Il genio di autodidatta che possedeva Fermi è un dono che appartiene a pochi, ma l’abilità del leader e del caposcuola; l’attitudine a muoversi sempre vicino al nocciolo dei problemi fisici e di intuirne gli aspetti più profondi senza apparente

sforzo; la capacità rarissima di eccellere sia come teorico che come sperimentale (ma anche come tecnico e ingegnere) sono caratteristiche di un modello da seguire, attualissimo e ineguagliato, a un secolo dalla sua nascita e a mezzo secolo dalla sua prematura scomparsa.

## 1 Un ragazzo prodigio

“Ho studiato con passione la matematica perchè la considero necessaria per intraprendere lo studio della fisica, alla quale io voglio esclusivamente dedicarmi”. È già molto sicuro di sé il giovane *Fermi* che, da completo autodidatta, ha assimilato a diciassette anni gran parte della matematica e della fisica che uno studente medio affronta in diversi anni di studio universitario.



Ancora più piccolo, praticamente un ragazzino, chiacchierando con un amico di famiglia, l'ingegner Adolfo Amidei, Enrico pone domande con ingenuità e acume veramente disarmanti: “È vero che esiste un ramo della geometria in cui senza ricorrere alla nozione di misura si trovano importanti proprietà geometriche?” (si riferisce alla geometria proiettiva). Una delle cose più sconcertanti è la memoria di Enrico: al ragazzo basta leggere un libro una sola volta, lo ricorda e lo assimila, giudicando da solo quali argomenti saltare senza compromettere la comprensione del testo. E quando afferma: “Non ho incontrato nessuna difficoltà”, dice sul serio, spesso ha svolto anche tutti gli esercizi.



Il compagno di scuola Enrico Persico ricorda il suo amico come un ragazzo fuori del comune:

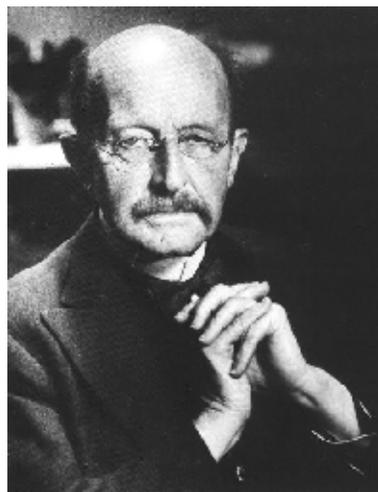
“Quando lo incontrai per la prima volta aveva quattordici anni; mi accorsi con meraviglia di avere un compagno di scuola non soltanto 'bravo in scienze', come si diceva, ma anche dotato di un'intelligenza completamente diversa [...] Prendemmo l'abitudine di fare lunghe passeggiate da un capo all'altro di Roma, parlando di argomenti di ogni genere con l'irruenza tipica della gioventù. Ma in queste conversazioni di adolescenti Enrico introduceva una precisione d'idee, una sicurezza di sé e un'originalità che non cessavano di stupirmi. Inoltre in matematica e fisica dimostrava di conoscere molti argomenti non compresi nei nostri studi. Conosceva questi argomenti non in modo scolastico, ma in maniera tale da potersene servire con la massima abilità e consapevolezza. Già allora per lui conoscere un teorema o una legge scientifica significava soprattutto conoscere il modo di servirsene”.

Ansioso di capire in fretta i fenomeni che osserva, il giovane Fermi costruisce da solo rudimentali modelli teorici. Avrebbe conservato anche da adulto questa abitudine di riottenere risultati noti partendo da poche premesse e sviluppando poi autonomamente il discorso, per esercizio o per puro divertimento intellettuale. Uno dei problemi che più lo affascina è il moto della trottola. Amidei gli spiega che avrebbe capito meglio la fisica che c'è dietro se avesse studiato la meccanica razionale che, a sua volta, richiede una certa domestichezza con l'analisi matematica. Lo indirizza quindi verso testi di matematica più aggiornati e recenti rispetto a quelli che Enrico si diverte a sfogliare e talvolta a comprare alle bancarelle dell'usato.

Adolfo Amidei ha visto giusto, prima ancora dei genitori: dopo averli convinti a iscrivere Enrico all'università di Pisa per partecipare anche al concorso di ammissione alla prestigiosa Scuola Normale Superiore, Fermi entra alla Normale alla sua maniera. I commissari che devono giudicare il suo compito non possono crederci: come può un ragazzo di diciassette anni svolgere il tema “Caratteri distintivi dei suoni e loro cause” scrivendo l'equazione differenziale alle derivate parziali che descrive una verga vibrante e sviluppandola in serie di Fourier? Una simile argo-

mentazione sarebbe forse stata sufficiente per uscire dalla scuola con il diploma, piuttosto che per entrarvi! Avranno la conferma diretta della maestria del ragazzo convocandolo di persona.

La Normale ha così un nuovo allievo: è un esperto conoscitore della fisica e della matematica, già in grado di insegnare. È il 1918, la rivoluzione culturale di Enrico Fermi è iniziata.



## 2 Nuove visioni del mondo: relatività e meccanica quantistica

La maturazione di *Fermi* segue di pari passo lo sviluppo della fisica moderna. I primi venticinque anni della sua vita, infatti, vedono la nascita di due tra le più grandi rivoluzioni concettuali nella storia della scienza: la relatività e la meccanica quantistica. Le idee alla base di queste teorie non riguardano solo la fisica, ma invadono l'intera concezione del mondo. Il loro potere innovativo è paragonabile a quello dell'invenzione della ruota, della rivoluzione copernicana, delle teorie darwiniane, della meccanica di *Newton*: nuovi strumenti pratici e concettuali per conoscere.

**I quanti di energia di Planck** Il primo "rivoluzionario" ad aprire la carrellata di idee nuove è, ironia della storia, un conservatore: il tedesco Max Planck. La formula per l'*energia* in una cavità a temperatura fissata (ottima approssimazione di *corpo nero*) è uno degli anelli mancanti per completare le conoscenze dei fisici di fine '800. La maggiorparte dei contemporanei di Planck ritiene infatti che la fisica abbia raggiunto una sorta di "saturazione" e che nulla di profondo (se non pochi dettagli, come il *corpo nero*) sia rimasto da spiegare.

Nel 1900 Planck ottiene una formula con cui può prevedere il comportamento della radiazione di corpo nero per la prima volta a tutte le *frequenze*. Tale comportamento era ben noto invece sperimentalmente da molto tempo. La chiave sta in due idee inedite: l'energia nella cavità non assume tutti i valori possibili tra uno iniziale e uno finale, ma è distribuita in "pacchetti" o *quanti*; la seconda idea è che l'energia di un quanto è proporzionale alla frequenza  $\hat{I}\frac{1}{2}$  della radiazione e il coefficiente di tale proporzionalità dev'essere una nuova costante universale, oggi nota come *costante di Planck* ( $h=6,63 \cdot 10^{-27}$  erg). L'energia di un quanto è quindi  $E = h\hat{I}\frac{1}{2}$  e solo multipli interi di  $E$  sono permessi:  $E$ ,  $2E$ ,  $3E$ , ecc.

Inizialmente Planck non vede molto al di là della porta che egli stesso ha sfondato con la sua scoperta, considerata dapprima solo una trovata ingegnosa in grado di riprodurre fedelmente i dati osservati. Anzi, per anni cercherà invano di recuperare l'ipotesi dei quanti dalla *fisica classica*, dove l'energia e tutte le grandezze variano con continuità.

**I quanti di luce di Einstein** La prima applicazione importante non legata al corpo nero della quantizzazione dell'energia viene nel 1905 da un altro tedesco, uno sconosciuto impiegato dell'ufficio brevetti di Berna: *Albert Einstein*. Il fisico tedesco spiega teoricamente l'effetto fotoelettrico, ma la sua idea va ben oltre e coinvolge, o meglio, travolge tutta la fisica. Einstein applica l'ipotesi dei quanti direttamente al campo elettromagnetico, le cui oscillazioni, nella

visione classica di *Maxwell*, sono l'essenza delle *onde elettromagnetiche*.



Einstein, a differenza di Planck, è consapevole dell'enormità che sta postulando: a una radiazione di *lunghezza d'onda*  $\hat{I}$  e *frequenza*  $\hat{I}_{\frac{1}{2}}$  sono associati anche un *impulso*  $p = -h/\hat{I}$  e un'energia  $E = h\hat{I}_{\frac{1}{2}}$ . Oltre alle usuali proprietà ondulatorie, la luce possiede quindi anche caratteristiche corpuscolari! Solo più tardi i quanti di luce di Einstein verranno chiamati *fotoni*. Ma la vecchia e obsoleta concezione corpuscolare della luce cara a Newton è molto lontana: le "particelle" di luce di Einstein viaggiano, appunto, alla *velocità della luce*. Per questo devono essere addirittura prive di massa.

**La relatività ristretta** Quest'ultima bizzarra conclusione deriva dall'altro capolavoro di Einstein del suo anno di grazia 1905: la teoria della relatività ristretta (o speciale). Le equazioni di Maxwell, mirabile sintesi formale dell'elettromagnetismo, hanno il difetto piuttosto grave di cambiare forma se le si scrive in diversi *sistemi di riferimento* inerziali (ovvero in moto rettilineo uniforme l'uno rispetto all'altro). Ciò significa che le leggi dell'elettromagnetismo cambiano se le si "guarda" da un sistema inerziale diverso. Non vale quindi il principio di relatività di Galileo (le leggi fisiche sono le stesse in sistemi inerziali), che si applica infatti solo alla meccanica.



È il danese *Hendrik Antoon Lorentz* a trovare "a mano", come artificio matematico, le leggi corrette di trasformazione da un sistema inerziale all'altro per sostituire le inefficaci trasformazioni galileiane. Ma, come mostrato anche da Fitzgerald, le *trasformazioni di Lorentz* prevedono dei fenomeni assurdi nella vita quotidiana: la *contrazione delle lunghezze* e la *dilatazione dei tempi* e non spiegano il problema dell'*etere*.

Einstein invece, spinto solo da esigenze di semplicità, logica ferrea e onestà intellettuale, deriva le trasformazioni di Lorentz da principi primi. Non vuole rinunciare a un'idea bella e semplice come il *principio di relatività*, allora lo estende a tutte le leggi fisiche (ma il principio è ancora ristretto ai sistemi inerziali) e assume in più la costanza della velocità della luce e di tutte le *onde elettromagnetiche*, a prescindere dal moto della sorgente o dell'osservatore. La fiducia di Einstein in questi principi è totale e coerente. Egli ne accetta le conseguenze, per gli altri inconcepibili, senza troppi problemi: se le barre appaiono contratte di un fattore dipendente dalla velocità e gli intervalli temporali appaiono invece dilatati dello stesso fattore, ciò non è un paradosso, ma una semplice conseguenza degli assiomi della teoria, in cui la simultaneità di eventi perde ogni significato, se non nello stesso riferimento.

La fisica classica ritorna solo come caso particolare: quando le velocità sono piccole rispetto alla velocità della luce  $c$ . Infatti, sebbene gli effetti relativistici ci siano sempre, a qualsiasi ve-

locità  $V$ , essi sono in genere irrilevanti visto che dipendono dal rapporto  $V/c$ , sempre estremamente piccolo nei “lentissimi” fenomeni classici e nella vita quotidiana. Tra le altre conseguenze spettacolari della teoria, ci sarà la fin troppo celebrata formula dell’equivalenza tra *massa* ed *energia*:  $E = mc^2$ , la quale stabilisce che anche a una particella ferma e non soggetta a forze è associata un’energia “di riposo”.

### Il moto browniano e le teorie atomiche

Non contento di aver sradicato in pochi mesi idee scontate da secoli come l’esistenza di uno spazio e un tempo assoluti e la natura ondulatoria della luce, Einstein (ancora nel 1905!) trova il tempo e il modo di concentrarsi su un altro problema: la natura del moto caotico di particelle in sospensione (*moto browniano*). Interpreta il fenomeno in termini di urti con le molecole del liquido, dando una svolta decisiva ai futuri sviluppi della *teoria del rumore* e delle fluttuazioni, ma soprattutto alle nascenti teorie atomiche.

Infatti, i modelli atomici di quel periodo sono piuttosto carenti. Uno dei più celebri (oggi di sola importanza storica) è quello di Thomson, secondo cui gli elettroni sarebbero disseminati in una distribuzione uniforme di carica positiva (*modello a panettone*).

### L’atomo di Rutherford



Il primo modello realistico di atomo arriva nel 1911 dall’Inghilterra: Ernest Rutherford formula l’ipotesi che la carica positiva dell’atomo sia distribuita in una regione enormemente più piccola dell’atomo stesso: il nucleo. Gli elettroni orbitano a mo’ di pianeti intorno al nucleo seguendo le leggi classiche di *Newton*. Rutherford sa bene che è la stessa fisica classica a stabilire i limiti del suo modello. Infatti, una carica accelerata (come è un elettrone quando orbita

su un’ellisse) deve perdere energia e cadere spiraleggiando sul nucleo, contro l’evidenza sperimentale della stabilità degli atomi. Il modello di Rutherford poi non spiega la presenza delle righe negli spettri.

### Einstein: teorie quantistiche e principio di equivalenza

Nel frattempo, nel 1907, *Einstein* aveva dato un altro contributo fondamentale alle teorie quantistiche trovando una formula per il calore specifico dei solidi. La legge classica di Dulong e Petit non è in grado di prevedere quei calori specifici tendenti a zero che si misuravano a basse temperature, mentre la formula di Einstein è più generale e comprende il caso classico come limite di alta temperatura.

Ancora Einstein, ancora nel 1907, formula il *principio di equivalenza* e getta le basi della *relatività generale*, che estende il *principio di relatività* anche ai sistemi di riferimento non inerziali. Appare subito chiaro che una tale teoria deve essere anche una teoria della gravitazione. Il prezzo concettuale da pagare è alto: si deve abbandonare la geometria euclidea (in cui il parallelismo delle rette o il fatto che la somma degli angoli interni di un triangolo è  $180^\circ$  sono concetti familiari da secoli) per ammettere che la geometria dello spazio può essere non-euclidea, contro la concezione di spazio e tempo accumulatasi in più di 300 anni di fisica, almeno per quanto riguarda le grandi scale di distanza. Einstein ha già pronte le basi filosofiche e concettuali per questa rivoluzione: i primi a introdurre delle geometrie non euclidee erano stati i matematici Nikolai Ivanovich Lobachevskij e Bernhard Riemann. Mentre gli strumenti dell’analisi tensoriale, senza i quali Einstein non avrebbe potuto formalizzare la sua teoria in delle equazioni utili alla scienza, gli erano stati forniti dai matematici italiani Gregorio Ricci Curbastro e Tullio Levi Civita.

### Bohr e l’atomo quantistico



Anche per la visione del mondo microscopico alcuni fisici europei, lavorando indipendentemente, stanno preparando il colpo di grazia. Nel 1913 il danese *Niels Bohr* formula il primo modello quantistico di atomo. Gli elettroni non possono trovarsi dappertutto, ma solo a certe distanze multiple del “raggio” dell’atomo d’idrogeno. Il problema della stabilità dell’atomo di Rutherford viene provvisoriamente risolto con un’intuizione tipica dello stile di Bohr: l’atomo emette o assorbe radiazione a una *frequenza*  $\hat{I}_{\frac{1}{2}} = \hat{I}E/h$  soltanto in occasione di un salto dell’elettrone da un’orbita all’altra ( $\hat{I}E$  è il salto energetico tra le due orbite permesse), altrimenti non ci sono perdite di energia. Bohr parla infatti di stati stazionari.



Dal momento che anche nell’atomo di Bohr gli elettroni si muovono su delle orbite (circolari per semplicità), è evidente che il problema della stabilità e della perdita di energia è soltanto aggirato: per quale ragione fisica gli stati dovrebbero essere stazionari? Perché gli elettroni scambiano energia solo nei salti e non la perdono nelle loro orbite? Questa è solo una delle tante lacune della cosiddetta *vecchia teoria dei quanti*, fondata dai “padri” Planck, Einstein, Bohr e Arnold Sommerfeld, che lavora con Bohr alla quantizzazione dell’atomo. Eppure il modello funziona brillantemente: le righe degli spettri osservate in laboratorio corrispondono con grande precisione alle frequenze previste dalla formula di Bohr.

**La relatività generale** Nel frattempo, l’instancabile *Einstein* procede i suoi studi alla disperata ricerca delle equazioni del campo grav-

itazionale. Diversamente dalla genesi fulminea e pressoché completa della *relatività ristretta*, stavolta il percorso di Einstein verso la *teoria generale* è molto più lungo e tormentato, non privo di errori e ripensamenti. Con l’aiuto del matematico Marcel Grossmann, Einstein impara il formalismo degli spazi di Riemann e del calcolo tensoriale di Ricci e Levi Civita. Solo grazie a questo linguaggio matematico, nel 1915 Einstein può estendere il *principio di relatività* a tutti i sistemi di riferimento. Le equazioni del campo gravitazionale corrispondono a uno scenario inedito e inaudito: lo *spazio-tempo* (concetto emerso già nella teoria ristretta, grazie anche all’opera del matematico Hermann Minkowski) è ora un continuo quadridimensionale non-euclideo (se non in piccole regioni) e la geometria è stabilita dalla particolare distribuzione della materia-energia. Anche una forma di pura energia è sorgente di campo gravitazionale e modifica lo spazio-tempo circostante!

**La meccanica matriciale** Siamo quindi nel 1915, e intanto sul fronte della fisica atomica le cose non vanno altrettanto bene. La *fisica classica* viene messa ripetutamente in crisi dagli esperimenti, mentre i calcoli della vecchia teoria dei quanti sono sempre più insoddisfacenti. Dovranno passare circa dieci anni prima di sbrogliare la matassa e di inserire la vecchia teoria dei quanti in uno schema più completo e rigoroso.



I primi a realizzare questo compito sono dei ragazzi coetanei di Fermi: *Werner Heisenberg*, *Wolfgang Pauli*, Pascual Jordan, e il loro maestro *Max Born*. La spinta verso una meccanica quantistica completa viene soprattutto da Heisenberg, il quale capisce che il moto degli elettroni va affrontato da un’ottica radi-

calmente diversa: bisogna concentrarsi esclusivamente sulle grandezze che possono essere misurate, tutto il resto non ha significato fisico. Questa linea guida lo porta nel 1925 a delle equazioni inconsuete.



È Born ad accorgersi che l'algebra soggiacente al modello di Heisenberg non è commutativa:  $ab$  non è uguale a  $ba$ . Ciò vuol dire che  $a$  e  $b$  non possono essere numeri, ma devono essere quelle tabelle di numeri che i matematici chiamano *matrici*. I fisici non sono abituati a questo formalismo, ma non possono negare il successo della *quantenmechanik*.



L'articolo in cui compare la prima meccanica quantistica completa è firmato da Heisenberg, Born e Jordan.

### Il principio di Heisenberg

Un dossier di Angelo Mastroianni, aggiornato al 26.09.2002



Heisenberg completerà il suo capolavoro nel 1927, con le *relazioni di indeterminazione* che modificano il concetto di misura minando il metodo sperimentale direttamente alle fondamenta. Secondo il principio di Heisenberg non è possibile misurare con precisione arbitraria posizione e velocità di una particella. Non si tratta di un'impossibilità tecnica o tecnologica, risolvibile in un lontano futuro quando i fisici sperimentali saranno in grado di sondare l'infinitamente piccolo. È qualcosa di più profondo, è un'impossibilità di principio. Col senno di poi l'idea appare addirittura ovvia: ogni interazione che si può immaginare di fare con un sistema microscopico per misurarlo perturba inevitabilmente il sistema stesso, cambiandone irrimediabilmente lo stato. Questo non succede con gli "enormi" oggetti della fisica classica e della vita di tutti i giorni.

Le conseguenze del principio di indeterminazione di Heisenberg sono devastanti. Si può finalmente dire addio alle insoddisfacenti orbite planetarie di Rutherford, perché il concetto stesso di orbita non ha più senso. Infatti, ciò che rende unica una traiettoria, che si trova risolvendo le *equazioni di Newton*, è la conoscenza simultanea di posizione e velocità iniziali di una particella. Ma è proprio ciò che in meccanica quantistica non si può avere!

**La meccanica ondulatoria** La storia non finisce qui, presto toccherà a un altro "protagonista" della *fisica classica* andare in profonda crisi: il concetto di particella. Infatti un filone

di ricerche parallelo e solo inizialmente antagonista a quello della cosiddetta “scuola di Göttingen” di Heisenberg, Born e Jordan parte da un’intuizione di Louis De Broglie.



Il francese fa un’ipotesi complementare a quella dei *quanti di luce* di Einstein e altrettanto sconvolgente: non solo la luce ha proprietà corpuscolari, ma anche la materia ha proprietà ondulatorie! Nasce quello che si chiamerà *dualismo onda-particella*. La formula di base è la stessa che aveva proposto Einstein per l’impulso dei quanti di luce. De Broglie postula che una particella di impulso  $p$  abbia una *lunghezza d’onda* associata data da  $\lambda = h/p$ .



Nel 1926 l’austriaco *Erwin Schrödinger* sfrutta l’ipotesi di De Broglie per ricavare l’equazione

fondamentale della dinamica quantistica: l’equazione d’onda che porta il suo nome. Molti fisici, Fermi è tra questi, tirano un sospiro di sollievo: il linguaggio di Schrödinger è quello familiare delle equazioni alle derivate parziali. Sono le sue equazioni, non quelle di Heisenberg, a diffondersi più rapidamente nella comunità scientifica.

Schrödinger stesso si premura di dimostrare l’equivalenza delle due teorie. Le procedure di calcolo di Schrödinger non sono comunque meno innovative e originali: i livelli energetici degli atomi si trovano ora risolvendo un *problema agli autovalori*, mentre l’impulso è diventato una derivata rispetto alle coordinate.

**Onde o particelle?** Ma che fine ha fatto l’*elettrone*, la particella per il cui moto si è creata questa nuova meccanica? È una particella o un’onda? Come si conciliano concetti come la massa e la carica elettrica, tipici delle particelle, con la *lunghezza d’onda* e la delocalizzazione tipici delle onde? Se due particelle sono in realtà due onde, allora possono interferire? Tempo un anno, e gli esperimenti di Davisson e Germer daranno una risposta positiva a questa domanda: sì, esiste la *diffrazione* degli elettroni e la loro interferenza, proprio come per le onde. È difficile da accettare, ma gli elettroni passano attraverso due fenditure ... contemporaneamente!

Ma le particelle sono proprio onde? Ormai i fisici non si stupiscono più di nulla, neanche dell’interpretazione che Born dà alla *funzione d’onda*: le particelle non sono delle vere onde, ci sono però delle “onde di probabilità” che possono interferire proprio come le onde meccaniche o elettromagnetiche. È ancora un’altra grossa novità, ma stavolta dietro c’è qualcosa di noto: l’*indeterminazione* di Heisenberg. Non è possibile sapere dove si trova una particella e seguirla nella sua traiettoria (non esiste più alcuna traiettoria); né si può sperare di trovarla in un determinato punto (la probabilità è zero). Ci si deve accontentare della probabilità di avere la particella in un certo volume dello spazio. Quanto al passaggio simultaneo dell’elettrone in due fenditure, la spiegazione è semplice ed elegante, una volta accettato di rinun-

ciare alla visione classica del mondo: l'elettrone "vive" delocalizzato in una sovrapposizione di stati e finché non si sceglie un suo stato con una misura, l'elettrone ha una certa probabilità di passare in entrambe. Una versione suggestiva di questo principio è quella della celebre metafora del *gatto di Schrödinger*.

La cosiddetta *interpretazione di Copenhagen* ha tra i suoi uomini simbolo uno dei padri fondatori della teoria dei quanti: *Niels Bohr*. Il suo principio di complementarità afferma che il comportamento particellare è solo una delle due essenze complementari, assieme a quello ondulatorio, che la Natura non ci mostra mai contemporaneamente.

### La teoria di Dirac



Nel 1925 c'è addirittura una terza versione della meccanica quantistica, più rigorosa e assiomatica, pubblicata dall'inglese *Paul Audrien Maurice Dirac*. L'opera di Dirac dà alla meccanica quantistica la veste matematica e concettuale che unifica la visione matriciale e ondulatoria, ed è ancora oggi insegnata nelle università. Dirac estende poi alla fisica quantistica le dovute correzioni della *relatività*, creando nel 1928 la teoria quantistica relativistica che prevede l'esistenza dello *spin* (inserito "a mano" nella teoria non relativistica come grado di libertà aggiuntivo), e delle *antiparticelle*.

## 3 Fermi all'università: studente-professore

"[...] All'istituto fisico sto a poco a poco diventando l'autorità più influente. Anzi, uno di questi giorni dovrò tenere, davanti a diversi magnati, una conferenza sulla teoria dei quanti, di cui sono sempre un propagandista".

"[...] Io sto facendo il conferenziere, il relativista, il fisico [...] In questi giorni ho avuto un po' da fare perchè ho dovuto scrivere la mia conferenza sulla relatività".

A giudicare da queste lettere all'amico Persico risalenti ai tempi dell'università, le parole di *Fermi*, come quando i due erano compagni di scuola, non suonano come quelle di uno studente alle prese con lo studio o gli esami. Piuttosto sembra di sentire un esperto ricercatore o un professore. E infatti, autoironia a parte, a 21 anni Fermi è davvero un'autorità in fisica relativistica e quantistica, riconosciuto anche fuori dall'ambiente di Pisa. La laurea in fisica e il diploma della Normale aggiungeranno pochi dettagli alle sue conoscenze già complete, mirate allo stretto necessario per essere in grado di affrontare qualsiasi problema autonomamente. C'è una certa somiglianza anche tra le impressioni di Persico ai tempi della scuola e quelle del compagno di università, *Franco Rasetti*, inizialmente iscritto a Ingegneria:



"Dopo l'inizio delle lezioni nell'autunno del 1918 incontrai Enrico Fermi, anche lui studente del primo anno iscritto a fisica e che quindi frequentava molti dei miei corsi. Mi sembrò subito una persona straordinaria per il suo aspetto maturo e per la sua prodigiosa conoscenza e comprensione della matematica e della fisica. Diventammo amici stretti e io imparai da lui [...] molta più fisica di quanto non avessi appreso dai professori. Fu certamente grazie all'influenza di Fermi che presi la decisione, quando ero iscritto al terzo anno, di lasciare ingegneria e di diventare uno studente di fisica".

Ma non si deve pensare a Fermi come a un "seccione" dedito esclusivamente allo studio (anche

se, diversamente dall'onnisciente Rasetti, la fisica rimarrà l'unico interesse culturale di Fermi). Assieme al fondatore Rasetti, Fermi è membro della Società Antiprossimo, di cui è facile indovinare gli scopi ... rischiando una volta addirittura l'espulsione. Raramente la moglie di Fermi, Laura Capon, sentirà i due amici raccontare storie di Pisa non legate agli scherzi o alla vita goliardica, ma al solo studio.

Fermi riesce a precorrere i tempi in ogni sua attività scientifica: tutti gli aspetti del grande didatta, caposcuola e inventore di nuovi approcci alla ricerca che avrebbero caratterizzato il Fermi adulto, nonché l'esperienza, sono già presenti nel Fermi universitario, come ricorda ancora Rasetti:



“Alla fine del 1920 alla facoltà di fisica di Pisa furono ammessi tre studenti, Nello Carrara (reduce di guerra), Enrico Fermi e Franco Rasetti. A causa della prima guerra mondiale [...] i tre, che avevano circa venti anni, erano allora gli unici laureandi. Il professor Luigi Puccianti, direttore del laboratorio di fisica, lasciò loro libertà di iniziativa in misura raramente concessa agli studenti in Italia o altrove. Avevano il permesso di utilizzare in ogni momento i laboratori [...] per compiere qualsiasi esperimento. Da quel momento in poi Carrara e Rasetti che [...] avevano riconosciuto l'immensa superiorità di Fermi nelle conoscenze di matematica e fisica, presero a considerarlo loro guida naturale, rivolgendosi a lui, invece che ai professori, per istruzioni e consigli. I tre studenti trascorsero felicemente alcune settimane aprendo gli armadi degli strumenti [...] tentando semplici esperimenti. [...] Fermi stabilì che quello dei raggi X era il campo che offriva le migliori possibilità di ricerche originali, e propose che tutti e tre cominciasse a imparare la tecnica relativa. [...] Il

primo compito che Fermi assegnò al gruppo fu quello di realizzare una fotografia di Laue [...] i tre studenti furono elettrizzati dal risultato”.

Fermi dev'essere già noto anche a livello internazionale se un suo piccolo saggio del 1923 compare in un libro sulla *relatività ristretta*, accanto ai contributi di illustri fisici italiani e stranieri. I suoi primi articoli scientifici di rilievo riguardano concetti di relatività ristretta, ma nel 1922 si cimenta anche con la *relatività generale*, con l'articolo “Sui fenomeni che avvengono in vicinanza di una linea oraria”. È l'unico grande lavoro di Fermi nella teoria gravitazionale di *Einstein*, le coordinate in esso introdotte sono ancora oggi importanti e note come “coordinate di Fermi”.

Impegnato e piuttosto isolato nei suoi studi relativistici, in una lettera del 1922 a Persico, Fermi ironizza sull'andamento della sua tesi di laurea, vista quasi come una perdita di tempo che lo distoglie dai suoi studi teorici: “Come fisico la mia principale attività consiste nel non far nulla, perchè ho pensato che in fondo la statistica di Boltzmann non esclude in modo assoluto che la mia tesi possa farsi da sé, per movimenti termici [...] Bisogna pure però che un momento o l'altro mi metta a lavorarci sul serio”.

Fermi poi è impegnato anche in un altro lavoro teorico (dimostrazione di un teorema di calcolo delle probabilità da applicare al moto delle comete) per la tesi di diploma alla Normale. Potrà apparire strano che questo brillante e promettente teorico scelga una tesi di laurea un po' sottotono rispetto a quel fermento di idee nuove che stavano invadendo la fisica e di cui lui è sempre aggiornato meglio di chiunque altro. La sua tesi di laurea ha infatti carattere sperimentale e riguarda la realizzazione di immagini di sorgenti a raggi X. Ancora lo stesso scarso entusiasmo si nota in un'altra lettera a Persico: “In questi giorni ho avuto e ho parecchio da fare per la mia tesi che, fra parentesi, è venuta una porcheria delle più solenni. Essenzialmente sarà costituita dalle seguenti parti: introduzione con cenno storico e riassunto dello stato attuale della questione; parte teorica [...] sulla riflessione dei raggi X; parte sperimentale consistente nell'ottenere [...] fotografie dell'anticatodo alla Lockyer. Come vedi il programma è molto modesto.

In compenso ha il pregio di essere ormai quasi completamente eseguito”.

Perchè Fermi, che è in grado di svolgere una tesi su qualunque argomento di fisica, non sceglie la teoria dei quanti o l'amata relatività? Commentando la scelta di Fermi, Rasetti ne chiarisce le ragioni e riassume lo stato della fisica italiana nel primo ventennio del '900:

“A quell'epoca in Italia la fisica teorica non era considerata una disciplina da insegnare nelle università e una tesi in quel campo avrebbe rappresentato uno scandalo almeno per i membri più anziani della facoltà. I fisici erano essenzialmente fisici sperimentali e solo una tesi sperimentale sarebbe stata accettata da loro come una vera tesi di fisica. L'argomento più affine alla fisica teorica, la meccanica razionale, era insegnata dai matematici che la consideravano un settore di matematica applicata, mostrando il più completo disinteresse per le sue implicazioni fisiche. Questo spiega perchè argomenti come la teoria dei quanti non avevano preso piede in Italia: rappresentavano una terra di nessuno fra la fisica e la matematica. Fermi fu il primo a colmare questa lacuna”.

L'esame di laurea rappresenta emblematicamente già lo stile del Fermi maturo: semplice ed essenziale, tradisce le aspettative degli amici e dei parenti venuti a sentirlo. Non mostra la sua profonda sapienza in fisica, come aveva fatto all'esame di ammissione alla Normale e durante tutto il corso di laurea. Fermi espone la sua tesi e risponde alle domande, senza sbalordire, e ottenendo un ovvio centodieci e lode.

## 4 Fermi a via Panisperna: un modo diverso di pensare e di insegnare



Negli anni '20 c'è a Roma uno dei pochi personaggi del mondo accademico italiano in grado di seguire, sia pure da lontano e senza contributi diretti, il grande fermento che stava portando alla “nuova fisica”: è Orso Mario Corbino, il direttore dell'Istituto di Fisica di via Panisperna. Influyente personalità in ambito istituzionale e industriale, Corbino è troppo preso da impegni politici per stare nel “giro” della ricerca, ma il suo formidabile fiuto per la fisica gli consente di rimanere abbastanza aggiornato.

Il direttore ha ben chiaro il quadro dei pochi fisici validi in Italia: conosciuto *Fermi*, non tarda a scoprirne il genio e capisce subito che deve trovare il modo di tenerlo a Roma. Sa bene che non gli capiterà facilmente un altro fenomeno come Fermi e che mentre in Europa i fisici teorici stanno cambiando la concezione stessa della realtà fisica, nel Paese dove con Galileo tutto era cominciato neanche esiste la cattedra di fisica teorica. Affiancandogli poi un fisico sperimentale, avrebbe potuto creare il nucleo di un'equipe di prima classe per il rilancio del suo istituto e della fisica italiana. Uno sperimentale di tale livello esiste, pronto allo scopo: *Franco Rasetti*.



Nel giro di pochi anni a partire dal primo incontro con Fermi (avvenuto nel 1922) e dopo che questi avrà frequentato ambienti più attivi come Gottingen e Leiden (grazie a borse di studio ottenute col suo appoggio) Corbino realizza il suo grande progetto: nel 1926, dopo qualche esperienza accademica a Roma e Firenze, Fermi è il primo professore di Fisica Teorica in Italia. Il concorso, inutile dirlo, è solo una formalità per Fermi che a 25 anni è ormai un'autorità mondiale grazie al lavoro sulla statistica quantica. Rasetti è chiamato come assistente di Corbino e nel 1930 avrà la cattedra di Spettroscopia. Naturalmente due persone, sia pure di grande valore, non bastano. Allora Corbino, che insegna Fisica alla facoltà di Ingegneria, continua la sua opera di "reclutamento" tra i suoi studenti, cercando qualcuno che volesse cambiare corso per cogliere l'irripetibile opportunità di studiare con Fermi.



Un dossier di Angelo Mastroianni,  
aggiornato al 26.09.2002

Tre ragazzi iscritti a Ingegneria capiscono di potersi meglio realizzare professionalmente come fisici: Emilio Segrè, Edoardo Amaldi ed *Ettore Majorana* in tempi diversi passeranno a Fisica. Sono i primi "ragazzi di via Panisperna" o "ragazzi di Corbino", i fondatori della scuola di fisica di Roma, tuttora esistente e prestigiosa grazie a loro, nonostante la cronica "fuga dei cervelli" che, iniziata proprio da loro, affligge ancora oggi la ricerca italiana.

In seguito si sarebbero aggiunti in qualità di studenti, collaboratori o visitatori, tanti altri futuri personaggi di primo piano del mondo della fisica: Oscar D'Agostino (chimico), Bruno Pontecorvo, Giulio Racah, Bruno Ferretti, Gian Carlo Wick, Mario Ageno, Ugo Fano, Giovanni Gentile jr, Gilberto Bernardini, Enrico Persico, Bruno Rossi, Giuseppe Occhialini e altri ancora. Quando la fama della scuola di Roma si diffonde anche all'estero, arrivano in visita o per brevi periodi di studio molti fisici stranieri: Hans Bethe, George Placzek, Felix Bloch, Rudolf Peierls, Edward Teller, Sam Goudsmith, Eugene Feenberg.

Una volta presa la cattedra, Fermi può finalmente trasmettere a degli studenti il suo personalissimo stile di apprendimento, introducendo dei metodi tuttora diffusi nelle università: rompe con la tradizione della vecchia fisica matematica insegnando come ottenere i risultati con argomenti di fisica, di plausibilità e di valutazione degli ordini di grandezza, quasi nascondendo la sua profonda conoscenza della matematica. Per la prima volta qualcuno non spiega ciò che la fisica matematica aveva prodotto nei secoli precedenti, ma cosa la fisica sta sfornando in quegli stessi anni. Così fa l'amico Persico a Firenze (dove nasce un'altra prestigiosa scuola di fisica diretta da Antonio Garbasso), così faranno Bruno Ferretti e tutti gli altri suoi successori alla cattedra di Fisica Teorica a Roma, così farà Ettore Majorana a Napoli, così si cerca di fare oggi.

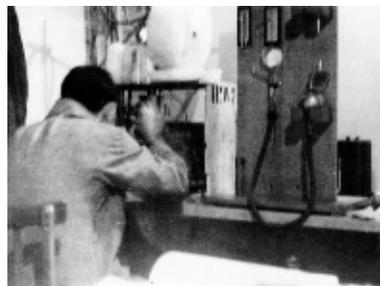
L'atmosfera dell'Istituto e i metodi informali del maestro-amico Fermi sono ben descritti dalle parole di Rasetti: "La personalità unica di Fermi, la poca differenza di età fra docenti e discepoli, l'affinità negli interessi scientifici e persino nelle

ricreazioni al di fuori dell'attività universitaria, creavano tra i membri dell'Istituto un'amicizia personale e un affiatamento che raramente hanno legato un gruppo di ricercatori. Nulla vi era di formale nel modo in cui Fermi ci insegnava le teorie fisiche più recenti, prima di tutte la nuova meccanica quantistica [...] Si tenevano riunioni che si potrebbero chiamare seminari, ma senza alcun orario o altro schema prestabilito, su argomenti suggeriti sul momento da una domanda che uno di noi faceva a Fermi, o da qualche risultato sperimentale che avevamo ottenuto e che si trattava di interpretare, o infine da un problema che Fermi stava studiando o che aveva risolto o che cercava di risolvere [...] Fermi procedeva [...] col suo passo non troppo rapido ma costante, non accelerando nei passaggi facili e neppure rallentando sensibilmente davanti a[ll]e difficoltà [...] Spesso non ci accorgevamo al momento se Fermi stesse esponendo teorie già a lui o ad altri ben note, o se stessimo assistendo ad un nuovo passo che egli faceva [...] Abbiamo così veduto più volte nascere una nuova teoria, che Fermi sviluppava, per così dire, pensando ad alta voce”.



Un simile approccio didattico sarebbe oggi improponibile in Italia, soprattutto per l'assenza di un "Fermi" nel terzo millennio, ma anche per l'elevato numero di studenti che frequentano oggi gli istituti di fisica. Il ruolo di maestro è evidente non solo nelle lezioni e nei seminari di fisica, ma anche nell'attività di laboratorio, per la quale Fermi è coadiuvato dall'insostituibile

Rasetti. Ancora Rasetti ricorda come Fermi si muove in fisica sperimentale con pari competenze e dimestichezza che in fisica teorica: Fermi "amava soprattutto alternare i due tipi di attività" raggiungendo i massimi livelli in entrambe, caso rarissimo nella storia della fisica.



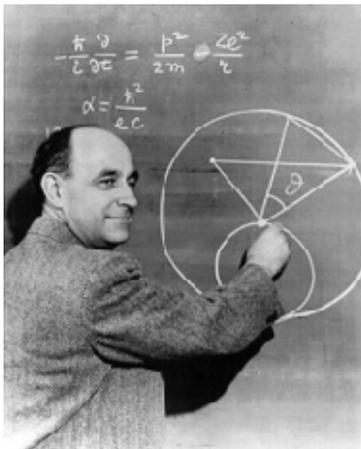
"Fermi partecipava agli esperimenti e all'interpretazione teorica dei risultati. Egli non era, né sarà mai, uno sperimentatore raffinato nelle tecniche di precisione, ma aveva un'intuizione acutissima di quali fossero gli esperimenti cruciali per risolvere un determinato problema, e andava dritto allo scopo senza curarsi di particolari inessenziali. Analogamente, nella teoria egli si avvaleva di qualunque mezzo lo portasse più direttamente al risultato, servendosi della sua padronanza dei mezzi analitici se il caso lo richiedeva, altrimenti ricorrendo a calcoli numerici, incurante di eleganze matematiche”.

Spesso i pezzi meccanici o i circuiti elettrici del gruppo sono inadeguati. In quel caso Fermi non disdegna di andare in officina per fabbricarsi letteralmente a mano ciò che occorre, senza pretendere una precisione estrema (tipica invece di Rasetti), ma giusto il necessario per effettuare misure con un ragionevole errore sperimentale.

L'intuizione acutissima di cui parlava Rasetti è effettivamente una delle armi vincenti di Fermi. Quando vuole spiegare come sia riuscito a capire qualcosa senza apparente sforzo, quasi per giustificarsi di fronte ai compagni sconcertati dice col suo tipico sorrisetto, ma senza scomporsi troppo: "C.I.F.! Con Intuito Formidabile". Anche questo gergo inventato dà un'idea dell'atmosfera e dello spirito di gruppo creatosi a via Panisperna: l'infalibile Fermi è il "Papa"; il potente Corbino il "Padreterno"; il numero due, l'eclettico Rasetti, è il "Cardinal Vicari-

o” (ma anche il “Venerato Maestro”); l’ipercritico Majorana è il “Grande Inquisitore”; ci sono poi il “Basilisco” Segrè, la “Divina Provvidenza” Giulio Cesare Trabacchi (che dall’Istituto Superiore di Sanità fornisce i materiali per gli esperimenti), il “Cucciolo” Amaldi; il “Sig. Nord” Lo Surdo, l’odioso e antiquato successore di Corbino (morto prematuramente nel 1937) alla direzione dell’Istituto. Segrè racconta che addirittura i ragazzi prendevano la cadenza di Fermi nel parlare e chi fosse a conoscenza di questo fatto li poteva riconoscere solo dalla parlata!

Un aspetto fondamentale nell’esperienza di Fermi è l’uso del calcolo numerico. Fermi è un fisico puro e preferirà sempre usare la fisica e non la matematica per arrivare ai risultati. Di fronte a un simile atteggiamento da parte di un fisico “normale”, molti potrebbero storcere il naso. Effettivamente, la matematica è qualcosa di più per la fisica che un semplice strumento. D’altra parte però, davanti al genio fenomenologico di Fermi, non c’è fisico teorico o sperimentale che non rimanga per lo meno sconcertato dall’apparente semplicità dei suoi ragionamenti. Quando questo approccio non è possibile, o quando i calcoli sono troppo complessi per il suo inseparabile regolo calcolatore, Fermi ricorre volentieri al calcolo numerico che alla fine degli anni ’20 comincia a implementarsi sulle prime calcolatrici. L’equazione di Thomas-Fermi per gli atomi a molti elettroni è uno dei primi problemi che Fermi si diverte (è la parola giusta) a risolvere in questo modo.



Pochi scienziati hanno il privilegio di essere i

Un dossier di Angelo Mastroianni,  
aggiornato al 26.09.2002

fondatori di una tradizione o di una scuola vincente, neanche il grande Einstein vi riuscì. Fermi invece ne ha creato addirittura due! Esporterà infatti negli Stati Uniti la “rivoluzione culturale” avviata a via Panisperna, quel modo unico di fare fisica confondendo quasi la didattica con la ricerca. L’esperienza e la maturità saranno stavolta dalla sua parte e anche a Chicago, una volta sparsa la voce dell’arrivo di Fermi, accorreranno giovani da tutte le parti del mondo per studiare con il leggendario Fermi. Tra i suoi studenti più celebri, i premi Nobel Tsung Dao Lee, Chen Ning Yang, Murray Gell Mann. Il racconto di Yang ricorda molto da vicino quello di Rasetti sulla didattica di Fermi:

“Per ogni argomento aveva l’abitudine di cominciare sempre dall’inizio, faceva esempi semplici ed evitava per quanto possibile i formalismi. (Usava ripetere per scherzo che il formalismo era per ‘gli alti sacerdoti’). La semplicità dei suoi ragionamenti creava l’impressione di una totale mancanza di sforzo da parte sua. Ma quest’impressione è falsa. La semplicità era il risultato di un’accurata preparazione e di una ponderata valutazione delle possibili diverse alternative di esposizione. [...] Aveva l’abitudine di riservare a un piccolo gruppo di studenti già laureati lezioni informali e non preparate in precedenza. Il gruppo si riuniva nel suo studio e lo stesso Fermi o qualcuno del gruppo proponeva un argomento specifico di discussione. Fermi allora cercava all’interno dei suoi quaderni di appunti, tutti corredati di indici accurati, per trovare le sue note sull’argomento e quindi passava all’esposizione. [...] Metteva sempre in risalto la parte più essenziale e pratica dell’argomento; la sua impostazione era quasi sempre intuitiva e geometrica più che analitica”.

## 5 La svolta: nasce la fisica nucleare italiana

Alla fine degli anni ’20, la “rivoluzione culturale” di *Fermi* è ormai pienamente avviata. Le ricerche del gruppo in fisica atomica e *spettroscopia* sono sempre meglio inquadrare negli schemi della neonata meccanica quantistica.

<http://www.torinoscienza.it/>  
© 2002 Provincia di Torino

tica, grazie anche al completo controllo delle teorie da parte di Fermi e al suo potente metodo statistico (modello atomico di Thomas-Fermi) dal quale aveva estratto delle tabelle numeriche di grande utilità per tutto il gruppo (eccetto per *Majorana*, spesso restio a collaborare con gli altri e sempre una spanna al di sopra dello stesso Fermi quando si trattava di calcolare qualcosa).

Come spesso accade quando si naviga in mari incontaminati, le loro conoscenze di fisica atomica raggiungono presto una sorta di “saturazione”: è rimasto poco da scoprire. Non deve stupire che tale sensazione di esaurimento dei compiti sia presente nel gruppo già nel 1929, con la meccanica di *Heisenberg* e *Schrödinger* vecchia di soli tre o quattro anni. L’avvento della meccanica quantistica aveva consentito agli studiosi di fisica atomica di mettere al loro posto in breve tempo quasi tutte le varie tessere del mosaico che la spettroscopia, scienza assai più vecchia, stava studiando da tempo.

Dal discorso che il direttore Corbino pronuncia in occasione della riunione annuale della Società Italiana per il Progresso delle Scienze (SIPS) nel 1929 emerge chiaramente la consapevolezza che il futuro della fisica italiana è nell’esplorazione del nucleo piuttosto che dell’atomo:

“Molte possibilità sono aperte sulla via dell’aggressione del nucleo atomico, il più seducente campo della fisica di domani [...] La sola possibilità di nuove grandi scoperte in fisica risiede perciò nell’eventualità che si riesca a modificare il nucleo interno dell’atomo. E questo sarà il compito veramente degno della fisica di domani”.



Il ruolo di Fermi nel passaggio alla fisica nucleare è determinante, c’è lui (insieme a *Rasetti*) dietro le nuove direttive stabilite da Corbino, le

quali prevedono una politica della ricerca assolutamente innovativa per l’epoca: attrezzare opportunamente i laboratori per le nuove ricerche; istituire borse di studio per la formazione dei giovani all’estero; concentrare le risorse che il governo distribuisce abbondantemente (ancora per poco).



Il primo evento ufficiale che mostra alla comunità mondiale dei fisici la scuola di Roma, è il congresso internazionale di fisica nucleare, ideato e organizzato da Fermi per fare il punto sulle conoscenze della fisica del nucleo e discutere dei problemi aperti. Nelle lettere di invito Fermi chiede esplicitamente di porre l’accento sulle problematiche non risolte e di alimentare il dibattito su di esse.

È in quel congresso che Fermi e *Wolfgang Pauli* “inventano” il *neutrino*: *Niels Bohr*, in una delle sue tipiche “rottture” radicali con il pensiero classico, cercava di giustificare le stranezze del *decadimento beta* mettendo in dubbio il “sacro” principio della conservazione dell’energia. Pauli confida a Fermi in privato che se si vuole salvare la conservazione dell’energia bisogna ammettere l’esistenza di una particella neutra simile al non ancora scoperto *neutrone*, ma molto più leggera. Per distinguerlo dal neutrone, Fermi inventa uno stile di nomenclatura oggi usuale: il suffisso “ino”: la particella di Pauli se esiste non può essere un neutrone, ma un “neutrino”.

Solo nel 1933, un anno dopo la scoperta del neutrone da parte di James Chadwick, Pauli comunica ufficialmente la sua idea e subito dopo Fermi, sfruttando l’ipotesi del neutrino, sfodera il suo capolavoro assoluto di fisica teorica: *Tentativo di una teoria dei raggi beta*, articolo inizialmente rifiutato dalla rivista “Nature” perché troppo astratto, ma poi diventato un modello

per le future teorie quantistiche dei campi. Lo stesso Fermi è orgoglioso della sua teoria, che pone le basi della fisica delle interazioni deboli con un approccio rivoluzionario: il neutrino non è presente nel nucleo e poi emesso assieme agli “elettroni beta”, piuttosto viene “creato”, così come i *quanti di luce* non risiedono nell’atomo, ma vengono emessi alla frequenza di Bohr all’atto della diseccitazione. Prima di Fermi solo *Paul Dirac* aveva pensato di applicare questo metodo alle particelle materiali, anche se Fermi è costretto a fare l’ipotesi di neutrino a massa nulla, per le sue usuali esigenze di semplicità di approccio. Come certamente avrà auspicato Fermi, le eventuali complicazioni sarebbero venute dopo. Infatti, tuttora si discute sulle proprietà del neutrino e della sua massa, grazie anche al contributo di uno dei “ragazzi di via Panisperna”: Bruno Pontecorvo.



Sono anni cruciali per la fisica italiana e un altro successo clamoroso viene sfiorato da un esponente della scuola di Fermi: *Ettore Majorana*. Ma Ettore rifiuta di pubblicare la sua teoria sulle forze di scambio, oggi note come “forze di Majorana”. Stavolta il proverbiale intuito di Fermi, che aveva colto subito l’importanza dell’idea, non è sufficiente: Ettore non vuole saperne, preferirà i consigli di *Heisenberg*, dopo i quali accetterà di pubblicare la teoria correggendone una analoga presentata dallo stesso Heisenberg. Viene da pensare quali e quante grandi scoperte sarebbero potute venire da una maggiore interazione tra questi due straordinari teorici, ma l’eccezionale intuito fenomenologico di Fermi e la profondità di pensiero di Majorana non si incontreranno mai.

## 6 Fermi e i neutroni lenti

Appena scoperto il *neutrone*, nel 1932, *Fermi* e *Rasetti* iniziano un programma di ricerca in fisica nucleare e, quando nel 1934 i coniugi francesi *Frederic Joliot* e *Irene Curie* scoprono la radioattività artificiale, Fermi trova subito il modo di sfruttare il neutrone in fisica sperimentale. I francesi avevano bombardato alcuni elementi leggeri con particelle  $\alpha$  (nuclei di Elio) emesse per radioattività naturale. Le emissioni conseguenti al bombardamento avevano il comportamento tipico della radioattività: era, appunto, radioattività artificiale o indotta. L’intuizione di Fermi è di quelle ovvie, col senno di poi: i neutroni sono particelle neutre, mentre le particelle  $\alpha$  sono cariche e nel bombardamento interagiscono con le cariche dei nuclei bersaglio. Se si usassero i neutroni come proiettili, il bombardamento sarebbe senz’altro più efficace. Non sentendo la barriera di carica offerta dal bersaglio, i neutroni possono penetrarvi meglio e indurre la radioattività anche negli elementi pesanti, a cui i francesi avevano dovuto rinunciare. Grazie alle competenze del gruppo, soprattutto di *Rasetti*, Fermi dispone già di attrezzature per costruire il suo “cannone” a neutroni. I primi esperimenti, per chissà quale errore sistematico, non danno però risultati positivi, e *Rasetti* accantona momentaneamente le misure andando in vacanza in Marocco. Non così Fermi, che rimane solo a bombardare i vari elementi della tavola periodica. Con ordine e sistematicità giunge al numero 9, il Fluoro, ed ecco apparire una reazione dalla quale emergono degli elettroni. Fermi interpreta tale emissione come *decadimento beta*: ha prodotto la radioattività artificiale con i neutroni, come aveva previsto. Scrive subito una comunicazione per la rivista “*Ricerca Scientifica*”, nel cui titolo mette il numero “1”, consapevole che quello è solo l’inizio di un’epoca d’oro. Richiama *Rasetti* dal Marocco e chiede la collaborazione dei suoi ex allievi *Amaldi* e *Segrè*.



A questo punto il gruppo inventa un modo di comunicare i risultati (oggi prassi usuale grazie a internet) del tutto nuovo in Italia: Ginestra Giovane in Amaldi, moglie di Edoardo, lavora alla redazione di “Ricerca Scientifica” e contribuisce alla diffusione nei principali laboratori di fisica di quelli che oggi si chiamerebbero “preprint”. Loro forse non se ne rendono conto, ma c’è un’altra prassi oggi normale che stanno introducendo nella ricerca in fisica: il lavoro di equipe. Sono i primi in Italia, tra i primi al mondo, a lavorare in questo modo. Arriveranno a pubblicare una decina di lettere o brevi articoli con i quali aggiornano la comunità scientifica dei loro progressi nell’indurre la radioattività in tutti gli elementi della tavola periodica.

Naturalmente non sono tutte rose e fiori. Nell’estate del 1934, il gruppo inizia a scontrarsi con una serie di difficoltà. Sorgono addirittura delle tensioni quando Fermi rimprovera severamente Amaldi e Segrè per avergli dato per certa l’interpretazione di alcune reazioni che poi non erano più riusciti ad ottenere. La riproducibilità delle misure è uno dei cardini su cui si poggia il metodo sperimentale e uno scienziato corretto e scrupoloso come Fermi non poteva accettare di aver comunicato a un convegno un risultato sbagliato dei “suoi” ragazzi.

Giunti poi all’uranio, l’elemento 92, i ragazzi incorrono in altre incredibili disavventure: prima di tutto non si accorgono di aver realizzato, per primi al mondo, la fissione del nucleo (nonostante le indicazioni della tedesca Ida Noddak). Interpretano poi i prodotti di reazione come risultato della creazione di due elementi nuovi di numero atomico maggiore di 92. Un po’ frettolosamente vengono battezzati “transurani-

ci”, Corbino annuncia i loro nomi “Ausonio” ed “Esperio”, in omaggio ai popoli italici cari al regime fascista. Anche questo scatenerà le ire di Fermi, giustamente diffidente sulla natura dei transuranici (e anche sui nomi!).



Il giovane Bruno Pontecorvo, fresco di laurea con Rasetti, viene incaricato di cercare di capire cosa sta accadendo, e di mettere un po’ d’ordine nelle misurazioni. Anche Pontecorvo riceve la sua dose di rimproveri per aver “scoperto” che le misure dipendono dal ... tavolo! Proprio così: sui tavoli di marmo la radioattività indotta è diversa da quella che, a parità di altre condizioni, si induce su dei tavoli di legno. Anche Amaldi inizia una serie di misure sistematiche entro certi “castelletti” di piombo. Ma toccherà di nuovo a Fermi risolvere gli enigmi e avviare un nuovo campo della fisica.

Rimasto solo a fare le misure, con gli amici Enrico Persico e *Bruno Rossi* che osservano, Fermi ha un’intuizione più o meno inconscia: sostituisce un cuneo di piombo, da inserire tra la sorgente di neutroni e il bersaglio, con un pezzo di paraffina (una sostanza ricca di Idrogeno e molto usata in laboratorio).

L’effetto è strabiliante: i contatori Geiger impazziscono, l’induzione di radioattività è enormemente più efficace. Ancora problemi? Ancora incongruenze sperimentali? A Fermi basta la pausa del pranzo per capire che stavolta è tutto a posto: i neutroni filtrati dalla paraffina sono molto più efficaci perché sono rallentati dagli urti con gli atomi di Idrogeno. Hanno quindi più tempo per interagire con i nuclei e generare la radioattività. L’ipotesi di Fermi verrà confermata ponendo l’apparato in altre sostanze ricche d’Idrogeno, come l’acqua.

Una prima rudimentale verifica avviene nell'acqua della vasca dei pesci nel giardino dell'Istituto. Anche il mistero dei tavoli viene spiegato dall'ipotesi di Fermi: alcuni neutroni, prima di raggiungere il bersaglio, dal cannone rimbalzano sul tavolo, dove vengono "intrattenuti" più o meno efficacemente a seconda della presenza di Idrogeno: il legno contiene più Idrogeno del marmo, ecco spiegata la maggiore induzione di radioattività sui tavoli di legno.

Chiacchierando molti anni dopo con l'astrofisico indiano Subramanyan Chandrasekhar sulla psicologia della scoperta, lo stesso Fermi confesserà di non saper bene cosa lo spinse quel 20 ottobre 1934 a prendere quella decisione che gli avrebbe dato il premio Nobel per la fisica nel 1938:



“Stavamo lavorando molto intensamente sulla radioattività indotta dai neutroni e i risultati che stavamo ottenendo erano incomprensibili. Un giorno, appena arrivato in laboratorio, mi venne in testa che avrei dovuto esaminare l'effetto prodotto da un pezzo di piombo piazzato davanti ai neutroni incidenti. E contrariamente alle mie abitudini, misi un grande impegno nel preparare un pezzo di piombo lavorato con grande precisione. Ero chiaramente insoddisfatto di qualcosa: cercai ogni scusa per tentare di rinviare la disposizione di quel pezzo di piombo al suo posto. Quando finalmente con grande riluttanza stavo per collocarlo, mi dissi: 'No! Non voglio questo pezzo di piombo, ciò che voglio è un pezzo di paraffina'. Andò proprio così, senza nessuna premonizione e nessun precedente ragionamento conscio. Presi immediatamente un pezzo di paraffina che trovai sul momento a portata di mano e lo collocai dove avrebbe dovuto essere disposto il pezzo di piombo”.

Un dossier di Angelo Mastroianni,  
aggiornato al 26.09.2002

Recenti studi tendono a ridimensionare la componente casuale della scoperta, collegando l'intuizione di Fermi, certamente inconscia, alla sua partecipazione a dei seminari in cui si parlava diffusamente (con tanto di interventi dello stesso Fermi) degli effetti della paraffina nel rallentamento.

## 7 Insegnare, calcolare, giocare

Ci sono due cose di cui *Fermi* non può fare a meno: calcolare e insegnare. La sua esigenza di avere sempre il controllo quantitativo di ciò che lo circonda lo porta spesso a fare stime numeriche di ordini di grandezza, non solo nella ricerca, anche in casa, durante le escursioni in montagna, osservando ciò che lo circonda.



Lo farà anche in circostanze difficili, come l'esplosione del primo ordigno atomico nel test di Alamogordo. Fermi presta poca attenzione al bagliore accecante del fungo atomico che illumina il cielo a giorno, è concentrato su una cosa per lui più importante: stimare l'energia della bomba lanciando dei pezzi di carta al passaggio dell'onda d'urto. Quando con i suoi collaboratori a Los Alamos si mette a stimare precisamente l'energia con calcoli più complessi, Fermi sa già che la sua prima stima "artigianale" è sostanzialmente giusta e, come sempre, ha ragione. Persino in ospedale nel 1954 si potrà trovare Fermi, prossimo alla morte, al lavoro alle ultime lezioni (pubblicate postume) oppure a passare il tempo calcolando il flusso del liquido della flebo!

La mania di insegnare, anche in senso lato lo porta spesso a inventare giochi di domande, come quello "delle due lire", in cui chi non

risponde correttamente paga una lira, ma chi fa un'obiezione che risulta sbagliata ne paga due. Inutile dire chi decide se le risposte e le obiezioni sono corrette, nonché chi vince.



Spesso Enrico cercherà di far apprezzare la fisica alla moglie Laura, che aveva studiato Scienze Naturali. Fin dai tempi dell'università, nelle occasioni di svago i due amici Enrico e Franco (*Rasetti*) non perdono occasione per sfoggiare il primo l'infallibilità e il secondo l'onniscienza, divertendosi a provocare le donne della compagnia con domande di cultura generale. Addirittura sembra che Laura soffra di una sorta di complesso di inferiorità: si trova accanto un'infalibile guida montana che di mestiere non fa semplicemente il fisico. Enrico, le hanno detto, è grado di influenzare la fisica ai livelli più alti possibili. Ma di tanto in tanto nota divertita qualche sua piccola "sconfitta", che "non era un buon perdente".

Il gioco è un aspetto importante della personalità di Fermi. Passata l'epoca degli scherzi di Pisa con Rasetti e la Società Antiprossimo, persino nel laboratorio di via Panisperna non si rinuncia al gioco. Nel bel mezzo di importanti misure di radioattività artificiale, consapevoli di stare fondando la fisica dei neutroni, Fermi, Amaldi e gli altri si divertono a gareggiare nei corridoi dell'istituto per portare i campioni dalla stanza del bombardamento con neutroni alla stanza delle analisi il più presto possibile (in modo da minimizzare il pericolo di contaminazione dei campioni). Quando si parla di "ragazzi", non bisogna dimenticare che all'epoca di via Panisperna lo stesso Fermi è ancora molto giovane. C'è solo una persona dalla quale Enrico

accetta di essere battuto senza recriminare: *Ettore Majorana*. Celeberrime le gare di calcolo tra questi due giovani giganti: Fermi col regolo e lavagne intere di formule, Majorana con una penna e un foglio per i pochi passaggi che gli servono.

Fermi manterrà sempre il suo interesse per il calcolo numerico, migliorando e adattando le sue conoscenze ai "nuovi" supercalcolatori elettronici che nascono negli anni '40. Egli stesso userà un calcolatore grafico di sua invenzione. Si ricorderà certamente di Majorana quando, a Los Alamos, Fermi si diventerà a interpretare il ruolo che a Roma era stato di Ettore: sfidare il grande *John Von Neumann* in delle gare di calcolo: Fermi col regolo, Von Neumann al calcolatore.

"Enrico non era un buon perdente", ripete spesso Laura Capon, ma non lo fa mai pesare, anche la sua voglia di primeggiare è un gioco. D'altra parte Fermi è troppo sincero e schietto per nascondere la sua oggettiva superiorità: non sa essere falsamente modesto e nessuno se lo aspetta da lui. Ma contemporaneamente non ama coprirsi di glorie ufficiali, né tantomeno di ricchezze materiali. A volte si rende conto della grande soggezione che incute, a dispetto della sua personalità e del suo aspetto mite. Allora cerca di andare incontro per vincere la timidezza, che il più delle volte è reciproca. Ad esempio, contrariato dalle sue difficoltà con l'inglese, inviterà spesso i suoi studenti americani a correggergli errori di pronuncia o di grammatica, in cambio di alcuni cents per ogni errore segnalato.

Ma quando si tratta di fisica, Fermi non può accettare di sbagliare qualcosa. Nelle rarissime occasioni in cui accade, cerca di riparare in tutti i modi. Un geniale stratagemma adottato durante una lezione è quello di rivolgersi all'uditorio, con le spalle alla lavagna, accendere l'attenzione del pubblico con quei suoi ragionamenti calmi, semplici ed illuminanti che rendono elementare anche i più profondi argomenti di fisica, e nel frattempo cancellare col gomito l'errore, illudendosi di non essere visto...

Un consiglio che dà spesso ai giovani è di dedicarsi a problemi semplici, rimandando le grandi sintesi e i grossi sviluppi formali: "compito

degli studenti è risolvere problemi, compito dei ricercatori è fare domande”.

Enrico Persico, in occasione della commemorazione a Pisa nel 1955, l'anno dopo la morte di Fermi, ci dà un'immagine piuttosto inconsueta del suo amico: “Ancora l'estate scorsa ebbi la fortuna di averlo come compagno di villeggiatura sulle Alpi e in Toscana. Benché fosse già sofferente del male, che poco dopo doveva rivelarsi fatale, era ancora il caro e semplice compagno delle nostre passeggiate giovanili. Anzi, in una gita che facemmo, noi due soli, nell'isola d'Elba, ritrovai in lui una sua vecchia abitudine, che credo pochi conobbero, e che forse farà stupire chi lo ha conosciuto solo superficialmente. Spesso, nei momenti di distensione, camminando o sostando in vista di un bel paesaggio, l'ho udito recitare, come tra sé, lunghi brani di poesia classica, di cui fin dalla giovinezza custodiva nella memoria un ricco tesoro. Temperamento poco incline alla musica, la poesia gli teneva luogo di canto. Il nome di Fermi, per la grande maggioranza degli uomini, resta legato alla pila e all'[...] energia atomica. Per i fisici esso si ricollega [...] a gran parte dei progressi fatti dalla fisica nell'ultimo trentennio. Ma per tutti coloro che conobbero Fermi da vicino e lo ebbero caro, esso è legato al ricordo indimenticabile di un uomo semplice, saggio e buono, della bontà serena dei forti”.



## 8 Letture consigliate

... AA. VV.: *Conoscere Fermi* - Società Italiana di Fisica (2001). Versione on line disponibile al sito <http://www.sif.it/sif/public-books-it.html#fermibook>

... AA. VV.: *Il Nuovo Saggiatore*, 17 (2001)

... E. Amaldi: *From the discovery of neutron to the discovery of nuclear fission* - “Physics Report”, vol. 111(1-4) (1979)

... E. Amaldi: *Personal notes on neutron work in Rome in the '30s and post-war European collaboration in high energy physics* - pubblicato in *History of twentieth century physics* a cura di C. Wiener - Academic Press (1977)

... E. Amaldi (a cura di G. Battimelli e M. De Maria): *Da via Panisperna all'America* - Editori Riuniti (1997)

... F. Cordella, F. Sebastiani: *Il debutto di Enrico Fermi come fisico teorico: i primi lavori sulla relatività (1921-1922/23)* - Quaderno di Storia della Fisica N° 5 (1999)

... F. Cordella, A. De Gregorio, F. Sebastiani: *Enrico Fermi. Gli anni italiani* - Editori Riuniti (2001)

... M. De Maria: *Fermi: un fisico da via Panisperna all'America* - collana “I grandi della scienza”, Le Scienze (1999)

... E. Fermi: *Note e Memorie* vol. I - Accademia Nazionale dei Lincei (1962)

... L. Fermi: *Atomi in Famiglia* - Mondadori (1954)

... P. Greco: *Hiroshima, la fisica conosce il peccato* - Editori Riuniti (1995)

... B. Pontecorvo: *Enrico Fermi* - Studio Tesi (1993)

... M. C. Sassi, F. Sebastiani: *La formazione scientifica di Enrico Fermi* - *Giornale di Fisica*, XL N° 2 (Aprile-Giugno 1999)

... E. Segrè: *Enrico Fermi, fisico* - Zanichelli (1987)

... E. Segrè: *Personaggi e scoperte della fisica contemporanea* - Mondadori (1996)