

Enrico Fermi

Significato di una scoperta

Il navigatore italiano sbarcato nel nuovo mondo

NEUTRON INTENSITY IN THE PILE AS RECORDED BY A GALVANOMETER
FIRST SELF-SUSTAINING CHAIN REACTION



AIN - ENEA

Enrico Fermi. Significato di una scoperta

Enrico Fermi
Significato di una scoperta

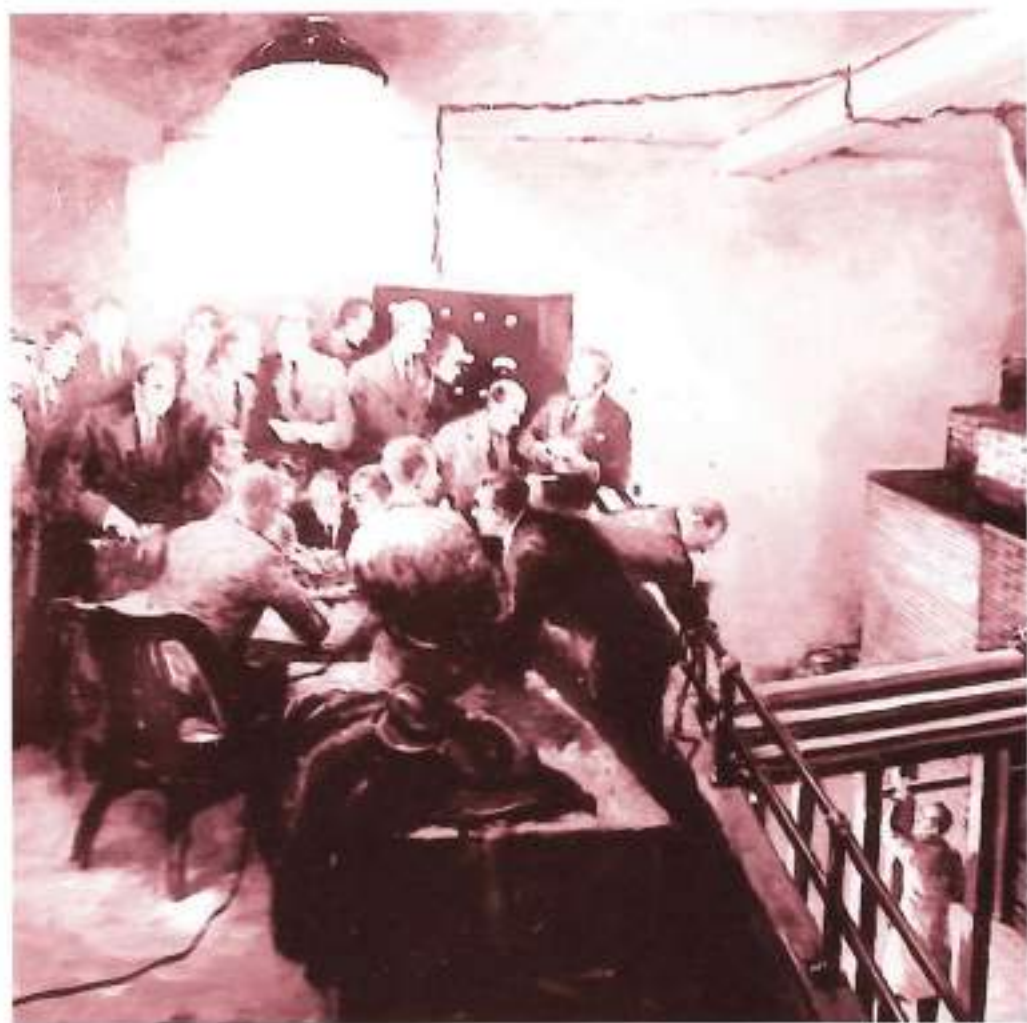
2001 ENEA
Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente

Lungotevere Thaon di Revel 76
00196 - Roma

ISBN 88-8286-022-1

Enrico Fermi
Significato di una scoperta





*« La reazione si sostiene da sola.
La curva è esponenziale »*
annunciò Fermi.

Il gruppo stette ad osservare intensamente
per ventotto minuti:
il primo reattore nucleare del mondo
era entrato in funzione.

**Si ringraziano per avere gentilmente
concesso la riproduzione di alcuni scritti:**

La International Atomic Energy Agency (IAEA) e,
in particolare, la Division of Public Information,
per gli articoli e le foto di L. Meitner, O. Hahn,
S. Allison, H. DeWolf Smyth, E. Wigner e L. Fermi;

La Nicola Zanichelli Editore, per lo stralcio
Storia familiare: i Fermi a Caserta, tratto dal volume
di Emilio Segrè, *Enrico Fermi*, fisico.

Si ringrazia, inoltre, l'Unità Comunicazione
e Informazione dell'ENEA (e, in particolare,
Mauro Ciarrara, Giuliano Ghisu e Diana Savelli)
che ha curato l'edizione del volume
e Luisa Bonolis che ha contribuito al reperimento
del materiale iconografico.

Presentazione

Questo volume è la riedizione, rinnovata ed ampliata, del volume "Enrico Fermi. Significato di una scoperta" edito dal FIEN (Forum Italiano dell'Energia Nucleare) nel 1982 e nel 1992 in occasione, rispettivamente, del 40^{mo} e del 50^{mo} anniversario della pila di Fermi.

Questa opera, a cura dell'Associazione Italiana Nucleare (AIN) e dell'ENEA (Ente per la Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente), acquista un ulteriore particolare significato oggi, nel corso delle celebrazioni del 100^{mo} anniversario della nascita di Enrico Fermi.

Luigi Noè, allora Presidente del FIEN, così concludeva la sua presentazione alla riedizione del volume nel 1992 «... il FIEN auspica che l'Italia, anche attraverso un sereno esame delle scelte compiute nel recente passato, possa restituire piena cittadinanza ad un grande uomo, scienziato insigne, che seppe imprimere un'impronta indelebile sulla strada del progresso dell'umanità».

Ecco, oggi noi compiamo, in modo più esplicito di quanto forse il nostro Paese non abbia ancora fatto, questo inderogabile dovere. Le manifestazioni che quest'anno hanno a più riprese onorato non solo la memoria ma anche il significato sociale ed umano, oltre che scientifico, dell'impresa di Fermi, costituiranno un atto dovuto ad uno dei più grandi scienziati non solo del XX secolo ma della storia dell'umanità.

Le testimonianze qui riportate e gli approfondimenti scientifici che fanno parte delle molteplici discipline che devono essenziali contributi a Fermi, costituiscono aspetti peculiari, anche se non esaustivi, della sua presenza nella storia scientifica dell'epoca moderna.

Alcuni contributi riportati nella prima parte del volume sono la ristampa di articoli di protagonisti e testimoni dell'avventura della fissione nucleare e della prima reazione a catena (Allardice e Trapnell, Wattenberg, Bullio, Lise Meitner, Hahn, Allison, DeWolf Smyth), inclusi la nota originale di Fermi sulle prospettive di applicazione della radioattività artificiale, i ricordi familiari di Laura Fermi ed Emilio Segrè e la rievocazione di Edoardo Amaldi per il ventennale della pila di Chicago nel 1962.

Gli articoli della seconda parte del volume riportano, invece, aggiornamenti sullo stato della fisica e dell'energia nucleare (Bernardini, Cumo, Fornaciari, Ricci, Rubbia, Spezia) e sono preceduti da una ricollocazione illuminante della figura di Fermi nel contesto del XX secolo, ad opera di Giorgio Salvini.

Concludono il volume la presentazione dei "100 fermi della fisica" e un'accurata cronologia dell'opera scientifica di Enrico Fermi (che comprende una interessante serie di foto, alcune delle quali inedite), curate rispettivamente da Alessandro Pascolini e da Luisa Bonolis.

Renato Angelo Ricci

Presidente AIN
Presidente Onorario SIF

Von Enrico Fermi
hmen der theorie
in Versuch & e
Uronen, sowie
in aufbau



Enrico Fermi

10
 Prospettive di
 applicazione
 della radioattività
 artificiale



C. Allardice, E. R. Trapnell

20
 La prima pila

Albert Wattenberg

30
 Quel giorno a Chicago

Laura Fermi

34
 Alcuni ricordi personali

Pietro Bullo

38
 Il "Fermi Team"
 di Chicago

Lise Meitner

42
 Vie giuste e sbagliate nel
 cammino verso la scoperta
 dell'energia nucleare

Emilio Segrè

70
 Storia familiare:
 i Fermi a Coorso

Giorgio Salvini

74
 Enrico Fermi: una guida
 in un secolo tormentato

Renato Angelo Ricci

86
 Enrico Fermi e lo sviluppo
 della Fisica Nucleare

Carlo Bernardini

92
 La fisica di un eccezionale
 fenomenologo: Enrico
 Fermi

Carlo Rubbia

98
 Il contributo di Enrico Fermi
 alla copertura del fabbisogno
 energetico mondiale



$$= \frac{k_0 \cdot \int_0^{\infty} \omega(p) dp}{k \sqrt{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2-p}} dp}$$

la (24) che per
 ra per le if



DEC. 2 1942 START-
OF
ELF-SUSTAINING CHAIN
THE PILE AS RECOR



Otto Hahn

Samuel K. Allison

Henry DeWolf Smyth

Eugene P. Wigner

Edoardo Amaldi

46
Enrico Fermi e la
fissione dell'uranio

50
Verso la reazione
a catena

56
La pubblicazione
del "Rapporto Smyth"

60
Riflessioni sul ventesimo
anniversario del CP-1

64
Vent'anni dalla prima
reazione a catena

Ligo Spezia

Paolo Formaiari

Maurizio Cuomo

Alessandro Pascolini

Luisa Bonolis

104
Tecnologie per la
produzione di energia
nucleare da fissione.
Stato e prospettive

120
Prospettive di sviluppo
dell'energia nucleare da
fissione

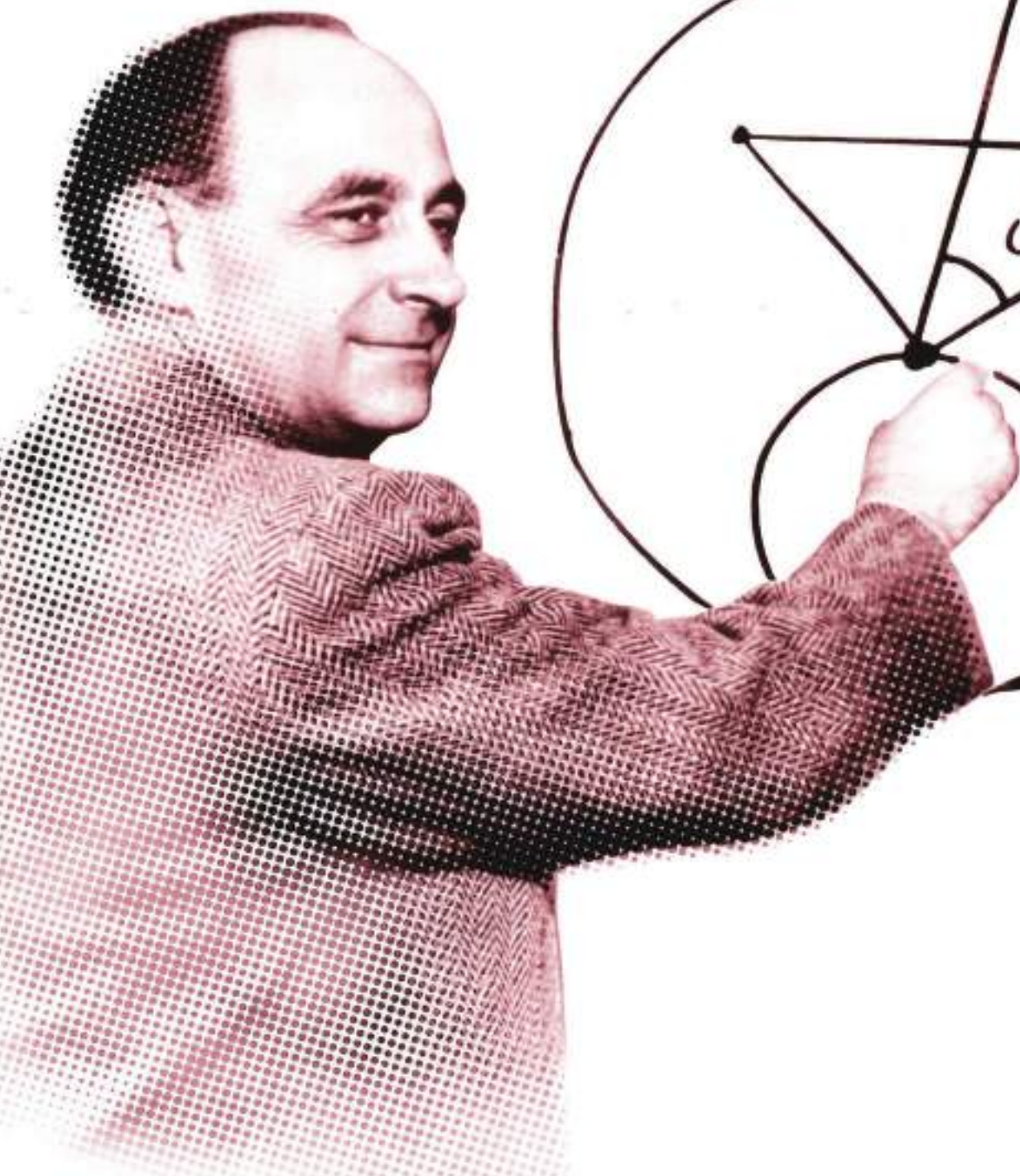
128
Una proposta per il
nuovo nucleare a
sicurezza intrinseca

138
I cento fermi della fisica

140
L'opera scientifica di
Enrico Fermi



Questa conferenza, tenuta da Enrico Fermi a Roma il 29 aprile 1938, presso l'Istituto di Sanità Pubblica, ha il valore di testimonianza diretta. Essa fornisce infatti la misura, in termini comprensibili anche ai non iniziati, dei risultati delle ricerche di fisica nucleare condotte dal gruppo di fisici che, sotto la guida di Fermi, passò alla storia della scienza con il nome di "Scuola di Fisica romana". Il lavoro scientifico che portò il gruppo di Roma, nel 1934, a pochi passi dalla scoperta della fissione e che, comunque, creò le premesse di tale scoperta, trova riscontro negli articoli di Lise Meitner e di Otto Hahn, pubblicati in questo stesso volume.



Prospettive di applicazione della radioattività artificiale

Lo studio dei fenomeni radioattivi ebbe origine circa quaranta anni or sono con la scoperta di Becquerel delle radiazioni emesse dai sali di uranio. Subito dopo la prima scoperta fu un succedersi di fondamentali ricerche sulla natura delle nuove radiazioni e sulle proprietà chimiche degli elementi che le emettono. Queste ricerche sono legate principalmente ai nomi dei coniugi Curie, scopritori del radio, e di Ernest Rutherford. Per opera di questi pionieri degli studi radioattivi fu precisata la natura fisica dei raggi α , β e γ e fu riconosciuta l'esistenza di vere e proprie famiglie di elementi radioattivi che vengono generati uno dall'altro per successive disintegrazioni.

Le nuove radiazioni scoperte dovevano ben presto dimostrarsi di eccezionale interesse scientifico non solo quale oggetto di studio in sé, ma anche come metodo potentissimo per investigare la struttura dell'atomo. Infatti le particelle α , data la grande energia di cui sono dotate, attraversano gli atomi che incontrano sul loro percorso; essendo cariche elettricamente esse permettono così di studiare le caratteristiche del campo elettrico nell'interno degli atomi e di dedurne la distribuzione delle cariche elettriche interatomiche.

Nel 1913 Rutherford riassumeva i risultati delle sue classiche ricerche condotte con questo metodo nel modello di atomo a sistema planetario che da lui porta il nome. Il nucleo carico di elettricità positiva occupa in questo modello una posizione centrale analoga a quella del sole nel sistema planetario, mentre gli elettroni negativi corrispondono ai pianeti e si avvolgono in orbite più o meno complesse attorno al nucleo. Nello stesso anno Bohr dava i criteri fondamentali per la descrizione dei movimenti e delle proprietà di questo infinitesimo sistema planetario originando così quella teoria dell'atomo che, attraverso una elaborazione durata circa un ventennio, permette oggi di intendere fin nei dettagli le proprietà dei sistemi atomici e molecolari arrestandosi solo dove la complessità dei problemi matematici rende troppo complicata la discussione quantitativa dei fenomeni.

Questo rapido sviluppo degli studi sopra la struttura dell'atomo determinò forse un certo rallentamento nell'interesse dei fisici per i fenomeni che hanno sede nel nucleo atomico. La situazione determinatasi può trovare un riscontro in un analogo sviluppo degli studi di astronomia. Anche in questa scienza l'interesse si rivolse dapprima al calcolo del moto dei pianeti attorno al sole che i metodi della meccanica celeste permisero di seguire fin nei più minuti dettagli. Solo in un secondo tempo, dopo che il moto dei pianeti fu completamente descritto e compreso, gli astronomi rivolsero la loro attenzione alle proprietà interne del sole considerato non solamente come centro di attrazione per i pianeti, ma come oggetto di studio in sé.

Accadde analogamente nella fisica che il rallentarsi dell'interesse per i problemi relativi al moto e alle proprietà del sistema di elettroni che circonda il nucleo positivo che si determinò quando almeno i problemi fondamentali in questo campo ebbero trovato soddisfacente soluzione, determinò un intensificarsi degli studi sopra la struttura interna del nucleo; studi che, nel paragone astronomico, corrispondono a quelli della fisica solare e dell'astrofisica.

I fenomeni radioattivi sono la forma più appariscente dei fenomeni nucleari; si è riconosciuto infatti da tempo che le radiazioni α e β vengono originate da specie di esplosioni durante le quali i nuclei degli elementi più pesanti perdono alcune delle loro particelle trasmutandosi in nuclei meno complessi.

L'intensificarsi degli studi di fisica nucleare al quale abbiamo ora accennato, fu facilitato poi dagli enormi progressi che, dal tempo della prima scoperta, erano stati frattanto compiuti dalla tecnica per l'osservazione delle radiazioni radioattive. Si pensi che i primi studi sulle proprietà dei raggi α erano in gran parte eseguiti con lo spintariscopio e cioè con un piccolo schermo fluorescente sul quale lo sperimentatore osservava al microscopio le minutissime scintilline prodotte dall'urto di una particella α contro lo schermo. Le osservazioni erano eseguite talvolta per lunghe ore nella più assoluta oscurità, richiedendo un'attenzione continua e faticosissima da parte dell'osservatore. Oggi possiamo invece osservare e rendere percettibile all'uditorio e contare automaticamente l'arrivo di una sola particella α o β , mediante un apparecchio semplicissimo, il contatore.

Esso è costituito da un tubetto di alluminio, lungo pochi centi-

metri e grosso come il coperchio di una penna stilografica, chiuso ermeticamente; lungo l'asse vi è un filo metallico teso fra due tappi isolanti: il tubetto è portato, per mezzo di una batteria di pile, ad un potenziale di un migliaio di volt rispetto a terra; il filo è in comunicazione con un amplificatore ed è connesso con la terra attraverso una resistenza estremamente elevata.

Se un raggio β , ad esempio, attraversa questo apparecchio, gli ioni che esso produce nel suo passaggio innescano una microscopica scarica sul filo; la scarica si spegne subito ma l'amplificatore riceve da essa un impulso che viene fortemente amplificato; tanto che un numeratore, del genere di quelli usati per contare le conversazioni telefoniche, lo registra facendo scattare un numero. Contemporaneamente il fenomeno è reso visibile all'uditorio dall'accensione di una lampada a neon che manda un lampo di luce rossastra.

Se io avvicino al contatore una sostanza radioattiva, anche assai debole, si sentono subito i battiti del numeratore, accompagnati dai lampi della lampada al neon.

Si pensi che ciascun impulso corrisponde in questo caso al passaggio di un solo elettrone attraverso il contatore.

Quando io tolgo la sostanza radioattiva, i colpi frequenti cessano, ma ogni tanto si sente tuttavia un impulso: esso è dovuto alle radiazioni cosmiche, che non è possibile schermare efficacemente dato il loro alto potere penetrante e che costituiscono una specie di fondo rispetto al quale non è difficile distinguere quello che è dovuto alle radiazioni delle sostanze in studio.

Un altro potente mezzo di indagine è stata la camera di Wilson, nella quale – sfruttando il fatto che gli ioni presenti in una massa di aria satura di vapor d'acqua diventano centri di condensazione del vapore – si possono vedere e fotografare le scie di particelle α e β che l'attraversano.

I nuclei delle sostanze radioattive si disintegrano spontaneamente per modo che dall'esame di questo fenomeno si possono trarre indirettamente alcune conclusioni sulla loro struttura interna. È ben noto però che gli agenti fisici e chimici ordinari non hanno alcuna influenza sulle modalità della disintegrazione radioattiva; di modo che il fisico deve limitarsi ad osservare ciò che accade senza poter produrre o variare i fenomeni a seconda della necessità della sua ricerca. Di qui numerosi

tentativi diretti a trovare procedimenti per produrre artificialmente fenomeni nucleari con la possibilità di poterne cambiare le condizioni in modo da facilitare lo studio.

Il primo ad ottenere risultati concreti in questo campo fu ancora il Rutherford che nel 1919 inaugurò la tecnica dei cosiddetti “bombardamenti nucleari”. Essa consiste nel lanciare contro un nucleo un proiettile dotato di una energia relativamente enorme quale ci è dato da quelle stesse particelle α che vengono emesse spontaneamente con velocità grandissime nelle disintegrazioni radioattive. Se una di queste particelle colpisce il nucleo di un elemento leggero essa arriva a modificarne la struttura provocando una “reazione nucleare”.

Il caso che una particella α colpisca un nucleo in questi bombardamenti è tuttavia estremamente raro; e ciò non solo per la estrema piccolezza del bersaglio, ma anche perché il nucleo da colpire è carico di elettricità positiva al pari della particella α che costituisce il proiettile; e quindi il bersaglio respinge il proiettile. Per queste ragioni nei primi esperimenti gli effetti del bombardamento poterono essere constatati soltanto in pochi casi e attraverso difficoltà sperimentali grandissime. Ma già queste prime osservazioni permisero di constatare che in seguito al bombardamento avvenivano delle vere e proprie catastrofi nucleari tali da trasformare il nucleo colpito nel nucleo di un elemento diverso da quello originario.

In molti casi il nuovo nucleo prodotto per effetto della disintegrazione è identico ad uno dei nuclei di qualcuno degli elementi chimici esistenti in natura; per molti anni anzi si ritenne che ciò accadesse di regola. La dimostrazione che talvolta le cose vanno in modo differente fu portata soltanto nel 1933 grazie ai lavori di Joliot e di sua moglie Irene Curie. Essi scoprirono che nel bombardamento con particelle α di alcuni elementi leggeri venivano a prodursi degli elementi dotati di proprietà radioattive analoghe a quelle degli elementi radioattivi naturali; i nuovi elementi radioattivi così prodotti però non coincidevano con nessuno degli elementi radioattivi naturali dai quali differiscono sia per le proprietà chimiche, poiché si tratta di solito di elementi leggeri (alluminio, azoto, silicio), mentre le sostanze radioattive naturali sono tutte rappresentate da elementi pesanti, sia anche per la natura delle particelle emesse e per i periodi di disintegrazione.

Con queste scoperte ebbero inizio gli studi sopra la produzione artificiale di nuovi elementi radioattivi. Abbiamo detto un momento fa che la principale ragione per cui è bassa l'efficienza dei bombardamenti con particelle α consiste nel fatto che il nucleo bersaglio e la particella proiettile sono entrambi carichi di elettricità positiva e quindi si respingono con forze relativamente enormi. Per questa ragione pensai essere conveniente sostituire come proiettile alle particelle α , una particella elettricamente neutra, e cioè il neutrone. Le sorgenti di neutroni da me usate erano costituite da piccoli tubetti di vetro riempiti di polvere di berillio e di emanazione di radio, che mi vennero generosamente preparati dal Laboratorio di Fisica di questo Istituto di Sanità. Sono ben lieto di questa occasione per ringraziare pubblicamente l'Istituto di Sanità e in particolare i proff. Marotta e Trabacchi per questa preziosa collaborazione che mi ha reso possibili le ricerche in questo campo.

Il successo si delineò fin dalle prime esperienze e si poterono subito ottenere sostanze radioattive artificiali in quantità facilmente misurabili. Si riscontrò subito anche che non solo gli elementi leggeri, ma la maggioranza degli atomi, qualunque sia il loro peso atomico, possono venire disintegrati dai neutroni. Perfino l'uranio, il più pesante degli elementi, dà origine, sotto l'azione del bombardamento neutronico, ad una serie di corpi radioattivi artificiali diversi da quelli che se ne ottengono per disintegrazione naturale. Tra di essi si trovano almeno due nuovi elementi chimici, l'ausionio e l'esperio, aventi numero atomico più grande di tutti gli elementi conosciuti in natura.

Prima di dimostrare con una facile esperienza come la radioattività artificiale possa effettivamente venire prodotta, accennerò ad un semplice artificio che rende assai più efficace il bombardamento neutronico.

Nel 1935 nel nostro Laboratorio fu osservato un fenomeno che permette di aumentare notevolissimamente il rendimento della produzione di sostanze radioattive artificiali con neutroni. I neutroni vengono emessi dalle sorgenti con velocità grandissime; vi è però un modo estremamente semplice per rallentarli in seguito. Esso consiste nel circondare la sorgente da cui escono i neutroni, con una grossa massa di paraffina o di acqua o in genere di una sostanza contenente molto idrogeno. I neutroni colpiscono gli atomi di idrogeno e ad ogni urto cedono ad essi una

buona parte della loro energia così che, dopo una ventina di urti, la loro energia è ridotta a meno di un decimilionesimo dell'energia iniziale. Questi neutroni lenti seguitano a vagare nell'interno dell'acqua o della paraffina ed hanno così una elevata probabilità di colpire i nuclei della sostanza da trasformare.

L'efficienza dei neutroni lenti per produrre sostanze radioattive artificiali è in molti casi enormemente maggiore di quella dei neutroni veloci; e l'esaltazione delle attivazioni che si possono così ottenere arriva ad essere di un centinaio di volte.

Questi fenomeni si possono dimostrare sperimentalmente in modo facile. Come elemento del quale produrre la radioattività artificiale sceglieremo il rodio; oltre a dare effetti di notevole intensità, esso presenta il vantaggio di produrre elementi radioattivi di vita molto breve; per modo che basta un breve periodo di irradiazione per mostrare il fenomeno.

La sorgente di neutroni, preparata come ho già detto, si trova alla distanza di una decina di metri dal contatore; una massa di piombo interposta impedisce che i raggi (che vengono emessi dalla sorgente insieme ai neutroni) raggiungano il contatore mascherando il fenomeno che mostrerò.

La laminetta di rodio che, avvicinata al contatore prima dell'attivazione, non produce su di esso nessun effetto, viene ora avvicinata alla sorgente di neutroni, la quale è stata a sua volta collocata nell'interno di un grosso blocco di paraffina allo scopo di rallentare i neutroni col procedimento che ho sopra descritto. Trascorsi un paio di minuti riprendiamo la laminetta di rodio e avviciniamola di nuovo al contatore. Il gran numero di impulsi, bene udibili in tutta la sala, rivela la radioattività acquistata dal rodio.

Come ho detto questa attivazione è di durata effimera; man mano che il tempo passa la sua intensità diminuisce e tra una diecina di minuti sarà scomparsa del tutto.

Altre sostanze, a differenza del rodio, richiedono bensì un tempo più lungo per essere irradiate; però la loro radioattività dura un tempo più lungo che può essere di ore, di giorni o anche di mesi. Così per esempio il radiosodio ha una vita media di 15 ore, il radioarsenico di circa un giorno, uno dei radioiridi di circa due mesi ecc.

Esperienze del tipo che ho descritto hanno permesso di formarsi un quadro relativamente completo del meccanismo di produzione dei corpi radioattivi artificiali. Tuttavia il numero di neutroni che si possono ottenere dalle sorgenti che vi ho mostrato è relativamente molto piccolo (dell'ordine di dieci milioni al secondo). Ne segue che le quantità di elementi radioattivi che si possono produrre con esse, pur essendo sufficienti al loro studio data la estrema delicatezza dei mezzi di osservazione, non sarebbero però bastanti per la maggior parte delle applicazioni di carattere pratico.

Sorge così il problema di realizzare sorgenti di neutroni di intensità enormemente maggiore. Questo scopo si può raggiungere sostituendo alle sostanze radioattive naturali, quali sorgenti di particelle per effettuare i bombardamenti atomici, degli ioni di opportune sostanze ai quali viene impressa la grande energia necessaria per mezzo di una forte differenza di potenziale.

Due vie sono state finora seguite per imprimere agli ioni le enormi velocità occorrenti. Una è quella impiegata nell'apparecchio che si chiama "ciclotrone": in esso si impiega un artificio assai ingegnoso: gli ioni vengono lanciati in un campo magnetico tra i poli di un enorme elettromagnete: essi sono deviati dal campo magnetico in una traiettoria a spirale e pertanto attraversano un gran numero di volte un certo piano diametrale, dove incontrano un forte salto di potenziale, dal quale vengono accelerati. Questa differenza di potenziale cambia sincronicamente con ritmo opportuno; in modo che, sebbene essa sia di poche decine di migliaia di volt, ad ogni mezzo giro degli ioni, essa imprime una nuova accelerazione che, sommandosi alle precedenti, fa sì che, alla fine della spirale, gli ioni abbiano assunto una velocità come se si fossero mossi in un tubo alle cui estremità fosse applicata una differenza di potenziale di vari milioni di volt. Incontrando una piastra di berillio essi producono la reazione nucleare che genera i neutroni.

Un altro metodo è quello di accelerare gli ioni in un tubo di scarica convenientemente lungo, il quale abbia, ad esempio, un estremo a terra e l'altro estremo ad un potenziale di almeno un milione di volt.

L'impianto in corso di costruzione in questo Istituto è stato progettato in questa seconda forma e consiste in un generatore dell'alta tensione, costituito da un insieme di grossi condensatori e di lampade

raddrizzatrici che hanno la funzione di decuplicare all'incirca la tensione iniziale di centomila volt prodotta da un trasformatore.

Il generatore alimenta la parte superiore del tubo di scarica. Questo grosso corpo, isolato da terra da colonne di isolatori di porcellana, contiene la sorgente di ioni, che in questo caso saranno di idrogeno pesante, e tutti i servizi elettrici ad essa inerenti. L'energia arriva a questa specie di piccola centrale elettrica a mezzo di una cinghia isolante che mette in movimento un alternatore. L'estremo inferiore del tubo, che riceve il fascio di ioni accelerati, si trova in una cabina sottoposta alla camera che contiene gli apparecchi e porta la piastra di berillio da cui sono ottenuti i neutroni. Tale parte del tubo è immersa in una grande vasca d'acqua contenente in soluzione l'elemento sul quale si vuole agire.

Dopo la irradiazione, la soluzione viene portata nel laboratorio chimico, dove subisce le necessarie operazioni di concentrazione che, in generale, sono assai semplici e rapide.

I fenomeni di radioattività artificiale che si potranno ottenere da questa installazione sono gli stessi che si producono con le sorgenti di emanazione più berillio, usate nelle prime esperienze; ma, naturalmente, cambia l'ordine di grandezza del numero dei neutroni prodotti, e quindi quello delle sostanze che si possono preparare.

Con sorgenti di emanazione più berillio, anche se contengono, come quelle che io ho sempre impiegato, l'emanazione ricavata da un grammo di radio, le sostanze prodotte sono sempre in quantità tale che per apprezzarle occorre il contatore, o almeno una sensibile camera di ionizzazione. Con un apparecchio come quello che si sta montando qui non è esagerato prevedere che dalla placca di berillio vengano emessi neutroni come se vi fosse una sorgente delle solite, nella quale si fosse messa l'emanazione di qualche chilogrammo di radio: si capisce quindi che è legittimo sperare che si possano preparare giornalmente sostanze radioattive di attività equivalente a quella di qualche grammo di radio.

Prima di terminare questa conferenza, mi piace accennare brevemente a quelle che si prevedono fra le più importanti applicazioni delle sostanze radioattive artificiali.

È da prevedere senz'altro che le sostanze radioattive artificiali troveranno un impiego terapeutico analogo a quello delle sostanze radioattive naturali. Per questo scopo potranno probabilmente venire

sfruttate le possibilità offerte dalla grande varietà di elementi radioattivi che si possono produrre artificialmente e che permetteranno di porre le sostanze attive in forme chimiche che possano essere adatte al raggiungimento di determinati effetti.

Ma anche indipendentemente da queste possibilità, l'uso delle sostanze radioattive artificiali in quantità rilevanti renderà possibili, io spero, anche molte interessanti ricerche nel campo della biologia e della chimica, usando i radioelementi come "indicatori". Consideriamo per esempio il radiofosforo; esso è chimicamente identico al normale fosforo, del quale è isotopo. D'altra parte le sue proprietà radioattive permettono di riconoscerne la presenza e di dosarne la quantità col semplice uso di una camera di ionizzazione. Mescolando quindi fosforo radioattivo al fosforo contenuto negli alimenti, si può seguire il comportamento di questo elemento in un essere vivente come è stato già dimostrato dalle belle ricerche iniziate da Hevesy a Copenhagen e proseguite da Segrè e Artom a Palermo.

Il comportamento sia biologico che chimico di molti elementi potrà così venire seguito durante lo svolgimento dei processi chimici o vitali con sole misure di radioattività effettuate dall'esterno senza alterare o disturbare comunque i processi in atto. Io ritengo che ricerche di questo genere troveranno un ambiente particolarmente adatto in questo Istituto di Sanità ove sono riuniti, accanto al laboratorio di Fisica che produrrà le sostanze radioattive artificiali, anche dei laboratori, ottimamente e modernamente attrezzati, di Chimica, Biologia e Batteriologia.

Mi sia pertanto concesso di concludere questa conferenza con la espressione della speranza che i progetti in corso permetteranno di realizzare qui in una forma costruttiva quella collaborazione tra Fisica, Chimica e Biologia che è così frequentemente auspicata dai cultori di tutte e tre queste scienze; le quali, pur avendo nomi diversi ed essendo per una necessaria divisione del lavoro coltivate da persone diverse, non sono in realtà altro che capitoli della unica grande scienza della natura.

Gli scienziati presenti allo storico esperimento del 2 dicembre 1942 con la prima "pila" nucleare del mondo:

Harold M. Agnew
Samuel K. Allison
Herbert L. Anderson
Wayne Arnold
Hugh M. Barton
Thomas Brill
Robert F. Christy
Arthur H. Compton
Enrico Fermi
Richard J. Fox
Seewart A. Fox
Dorot K. Froman
Alvin C. Graves
Crawford H. Greenewalt
Norman Hilberry
David L. Hill
William H. Hinch
W. Rudolph Kanne
Philip G. Koontz

Herbert E. Kubitschek
Harold V. Lichtenberger
George Miller
George D. Monk
Robert G. Nobles
Warren E. Nyer
Wilcox P. Overbeck
Howard J. Parsons
Gerard S. Pawlicki
Leon Sayvets
Leo Seren
Louis A. Slotin
Frank H. Spedding
William J. Sturm
Leo Szilard
Albert Wattenberg
Richard J. Watts
George L. Wall
Eugene F. Wigner
Marvin H. Wilkening
Volney C. Wilson
Leona Woods Marshall (Libby)
Walter H. Zinn

Nota introduttiva degli autori

La ragione per cui, nell'autunno 1946, fu compilato il resoconto che segue è da ricercarsi nel fatto che nessuno dei rapporti dettagliati sul "Progetto Plutonio" narrava come era avvenuta la prima reazione nucleare a catena autosostenentesi.

Questo resoconto, pur essendo stato preparato per un comunicato stampa del Manhattan Engineer District e, cioè, per scopi giornalistici e non scientifici, contiene delle notizie fondamentali per la storia di quell'importantissimo evento.

Abbiamo pensato che l'esperimento, che fu portato a termine con successo il 2 dicembre 1942, fosse di tale significato che avrebbe dovuto essere descritto mentre era ancora vivo nella mente di coloro che vi presero parte. Questo resoconto è stato ricostruito attraverso i ricordi personali di più di una dozzina dei 42 scienziati presenti nel campo di "squash" dello Stagg Field, il 2 dicembre.

Un'altra preziosa fonte di informazioni è stato il nastro sul quale venne registrata l'intensità di neutroni all'interno della prima "pila".

La lista di coloro che erano presenti è stata tratta dall'etichetta del fiasco di Chianti che il dr. E. R. Wigner aveva portato per brindare alla riuscita dell'esperimento; la maggior parte dei presenti aveva firmato l'etichetta del fiasco, che era stato lasciato al dr. A. Wattenberg come ricordo.

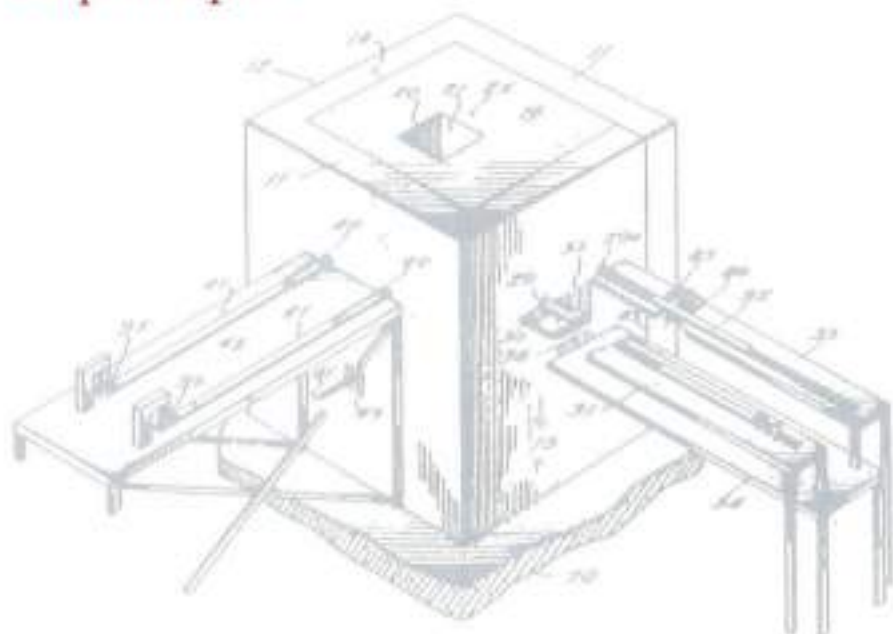
Questa fu la sola testimonianza scritta di chi aveva preso parte all'esperimento. A ciascuno degli scienziati che avevano firmato l'etichetta fu chiesto di ricordare chi altro era presente, e la lista di 42 nomi che ne risultò fu giudicata completa.

Desideriamo ringraziare i dottori H. L. Anderson, A. H. Compton, E. Fermi, N. Hilberry, H. V. Lichtenberg, L. W. Marshall, R. G. Noble, W. J. Sturm, A. Wattenberg e W. H. Zinn per l'aiuto fornitoci; va ascritto a loro merito se il resoconto da noi compilato è degno dell'avvenimento del 2 dicembre; le eventuali inesattezze od omissioni sono nostre.

17 novembre 1949

Corbin Allardice, Edward R. Trapnell

La prima pila



Pur non essendo presenti, fecero parte del gruppo di Fermi anche:

Cari C. Gamertsfelder
Robert E. Johnson
August C. Knuth

George M. Maronde
Anthony J. Matz
Henry W. Newson
Theodore Petry
David P. Rudolph

Corbin Allardice ed Edward R. Trapnell erano, dalla primavera del 1946, consiglieri civili in pubbliche relazioni del Maggiore Generale L.R. Groves, ancora al comando del "Manhattan Project". Nel novembre dello stesso anno furono trasferiti alla United States Atomic Energy Commission (USAEC), quando questa fu creata sotto il controllo dell'autorità civile, e continuarono ad occuparsi dell'informazione al pubblico.

Allardice passò più tardi, quale "Atomic Energy Adviser", alla Banca Mondiale (International Bank for Reconstruction and Development), negoziando con il prof. Felice Ippolito, allora Segretario Generale del CNRN, il Progetto ENSI (Energia Nucleare Sud Italia) che condusse, nel 1958, alla costruzione, con un finanziamento della Banca, della centrale elettronucleare del Garigliano da parte della Società ElettroNucleare Nazionale (SENN) del gruppo IRI.

Il 2 dicembre 1942 l'uomo provocò, per la prima volta, una reazione nucleare a catena autosostenente e riuscì a controllarla. Nel settore occidentale dello "Stagg Field" di Chicago, nel tardo pomeriggio di quel giorno, un piccolo gruppo di scienziati assistette all'avvento di una nuova era per la scienza. Questo storico avvenimento ebbe luogo in quello che era stato un campo per il gioco dello *squash-rackets*.

Precisamente alle 15,25, ora di Chicago, lo scienziato George Weil estrasse dalla "pila" la barra di controllo rivestita di cadmio: con questo gesto l'uomo liberò e controllò l'energia dell'atomo.

Il sorriso illuminò il volto di coloro che assistevano all'esperimento, non appena si resero conto di quello che era avvenuto e si udì un sommesso mormorio di soddisfazione. Era un tributo al Premio Nobel Enrico Fermi, al quale, più che ad ogni altro, era dovuto il successo dell'esperimento.

Enrico Fermi era nato a Roma il 29 settembre 1901 ed aveva compiuto, per molti anni, esperimenti con l'uranio. Nel 1934 egli bombardò l'uranio con i neutroni e produsse quelli che sembravano essere l'elemento 93 (l'uranio è l'elemento 92) e l'elemento 94. Comunque, dopo più attento esame, si ebbe l'impressione che la natura fosse impazzita: parecchi altri elementi erano presenti, ma nessuno di essi si adattava ad essere inserito accanto all'uranio, nel sistema periodico, dove Fermi sapeva che sarebbero dovuti stare, se si fosse trattato degli elementi transuranici 93 e 94.

Solo cinque anni più tardi tutti si resero conto, Fermi compreso, che egli aveva effettivamente rea-

lizzato la fissione dell'uranio e che questi elementi appartenevano alla parte centrale del sistema periodico.

A Fermi fu conferito il Premio Nobel nel 1938 per il suo lavoro sugli elementi transuranici. Egli e la sua famiglia si recarono in Svezia per ricevere il premio. La stampa fascista lo riprese severamente per non aver indossato la divisa fascista e per non aver salutato romanamente nel ricevere il premio. Fermi e la sua famiglia non tornarono più in Italia. Dalla Svezia, avendo con sé la maggior parte dei suoi effetti personali, Fermi si recò a Londra e indi in America, dove si stabilì definitivamente.

L'italiano, moderno esploratore dell'ignoto, era a Chicago in quella fredda giornata di dicembre del 1942. Un profano che avesse gettato uno sguardo nel locale in cui Fermi stava lavorando, sarebbe stato colpito da uno strano spettacolo: al centro dell'ambiente, che misurava 30 piedi per 60, ricoperta su tutti i lati, tranne uno, dal tessuto grigio di un involucro per pallone aerostatico, vi era una pila di mattoni neri e legname, quadrata alla base e a forma di sfera appiattita in cima. Fino a metà altezza i lati erano verticali, mentre la parete superiore era a cupola a forma di arnia. Durante la costruzione di questa "pila" (nome dato, da allora, a tutti i dispositivi simili) che, sebbene rozza nell'aspetto, era assai complessa, circolava fra gli scienziati questa battuta: «Se la gente vedesse quello che stiamo facendo con un milione e mezzo dei suoi dollari penserebbe che siamo matti; ma se sapesse perché lo facciamo, ne sarebbe certa».

Nell'ambito del favoloso programma della bomba atomica di cui l'esperimento della pila di Chicago era una delle tappe fondamentali, il successo ottenuto il 2 dicembre rappresentava un altro passo avanti verso la soluzione di quel "puzzle" che era l'energia atomica.

I dirigenti del gruppo che si dedicava al progetto della bomba trassero ispirazione dalla riuscita degli studi sulla reazione a catena, riuscita che fu, inoltre, estremamente rassicurante, se si considera che il Manhattan Engineer District dell'Esercito si era già spinto molto avanti in varie direzioni. Infatti, erano già in corso negoziati volti alla stipulazione di contratti per la costruzione, su scala industriale, di reattori nucleari e, ad Oak Ridge (Tennessee), era già stato acquistato del terreno ed impegnati milioni di dollari.

Tre anni prima dell'esperimento del 2 dicembre si era scoperto che quando un atomo di uranio viene bombardato dai neutroni, esso talvolta si spezza e si scinde. Più tardi si era trovato che con la fissione di un atomo di uranio vengono emessi altri neutroni che si rendono disponibili per un'ulteriore reazione con altri atomi di uranio.

Tutto ciò implicava la possibilità di una reazione a catena, simile sotto alcuni aspetti alla reazione che produce l'energia solare. I fatti indicarono in seguito che, se si fosse potuto mettere insieme, in condizioni appropriate, una sufficiente quantità di uranio, ne sarebbe risultata, in pratica, una reazione a catena autosostenentesi.

Questa quantità di uranio necessaria per provocare una reazione a catena in condizioni appropriate, è conosciuta con il nome di massa critica o, più comunemente, con quello di dimensione critica della singola pila.

Per tre anni il problema della reazione a catena era stato costantemente studiato. Circa un anno dopo Pearl Harbour, fu finalmente costruita una pila di dimensione critica. Funzionava! La reazione nucleare a catena era finalmente una realtà.

Anni di studio e ricerche scientifiche stavano alle spalle della dimostrazione di questa prima reazione nucleare a catena, la cui storia infatti risale almeno all'autunno del 1938. In quell'anno, due scienziati tedeschi, Otto Hahn e Fritz Strassman, che lavoravano all'Istituto Kaiser Wilhelm di Berlino, trovarono del bario nel materiale residuo da un esperimento in cui essi avevano bombardato l'uranio con neutroni provenienti da una sorgente di radio-berillio.

La scoperta provocò un'enorme impressione nel laboratorio, a causa della differenza di massa atomica fra il bario e l'uranio.

Precedentemente, in materiali residuati da simili esperimenti, si erano trovati altri elementi diversi dall'uranio, ma essi differivano dall'uranio soltanto per una o due unità di massa; il bario differiva di circa 98 unità di massa. Il problema era da dove provenisse questo elemento; sembrava che l'atomo di uranio, bombardato da un neutrone, si fosse diviso in due elementi diversi aventi ciascuno circa metà della massa dell'uranio.

Prima di pubblicare i risultati del lavoro nella rivista scientifica tedesca "Die Naturwissenschaften",

Hahn e Strassman presero contatto con Lise Meitner che, essendo sfuggita al controllo nazista, stava lavorando con Niels Bohr a Copenaghen, in Danimarca.

La Meitner si interessò moltissimo a detto fenomeno e cercò immediatamente di analizzare matematicamente i risultati dell'esperimento; ella considerò che il bario e gli altri elementi residui fossero i risultati di una fissione, o rottura dell'atomo di uranio; ma quando sommò le masse atomiche degli elementi residui, trovò che questo totale era inferiore alla massa atomica dell'uranio.

Non vi era che una sola spiegazione: l'uranio si scinde formando due elementi, ciascuno dei quali pesa circa, ma non esattamente, la metà della sua massa originaria; quindi, una parte della massa dell'uranio scompare. La Meitner e suo nipote, O.R. Frisch, formularono l'ipotesi che la massa che era scomparsa doveva essersi trasformata in energia. Secondo le teorie avanzate nel 1905 da Albert Einstein, in cui la relazione fra massa ed energia era espressa dall'equazione

$$E = mc^2$$

(l'energia è uguale alla materia quando quest'ultima sia moltiplicata per la velocità della luce elevata al quadrato) questa emissione di energia sarebbe nell'ordine di 200 MeV per ogni atomo fissionato.

Einstein stesso, quasi trentacinque anni prima, aveva affermato che questa teoria poteva essere provata studiando ulteriormente gli elementi radioattivi. Bohr aveva in progetto un viaggio in America per discutere altri problemi con Einstein, che aveva trovato asilo presso l'Istituto di Studi Avanzati di Princeton; egli venne quindi in America e il principale argomento che discusse con Einstein fu il rapporto di Meitner e Frisch; Bohr arrivò a Princeton il 16 gennaio 1939 e parlò ad Einstein ed a J.A. Wheeler, che erano stati suoi allievi.

Da Princeton la notizia passò di bocca in bocca ai fisici vicini, compreso Enrico Fermi che si trovava a Columbia; Fermi ed i suoi collaboratori cominciarono immediatamente a lavorare per trovare il forte impulso di ionizzazione che avrebbe dovuto derivare dalla fissione ed il conseguente rilascio di energia. Prima che gli esperimenti fossero terminati, tuttavia, Fermi lasciò Columbia per partecipare

ad una Conferenza di fisica teorica all'Università "George Washington" di Washington D.C.

Qui Fermi e Bohr si scambiarono delle informazioni e discussero il problema della fissione. Fermi accennò alla possibilità che durante il processo di fissione potessero venire emessi neutroni; nel corso di questa conversazione, le loro idee sulla possibilità di una reazione a catena cominciarono a concretarsi.

Prima che la Conferenza finisse, si ottenne la conferma sperimentale della deduzione di Meitner e Frisch da quattro laboratori degli Stati Uniti (Carnegie Institution di Washington, Columbia, John Hopkins e Università di California); più tardi si seppe che analoghi esperimenti di conferma erano già stati effettuati da Frisch e Meitner il 15 gennaio: Frédéric Joliot-Curie, in Francia, confermava pure i risultati e li pubblicava nel fascicolo del 30 gennaio della rivista scientifica francese "Comptes Rendus".

Il 27 febbraio 1939, il canadese Walter H. Zinn e l'ungherese Leo Szilard, che lavoravano entrambi all'Università di Columbia, iniziarono una serie di esperimenti per trovare il numero dei neutroni emessi dalla fissione dell'uranio; contemporaneamente, Fermi ed i suoi collaboratori Herbert L. Anderson e H.B. Hanstein iniziarono delle ricerche sullo stesso problema. I risultati di questi esperimenti furono pubblicati, fianco a fianco, nel fascicolo di aprile della "Physical Review" e dimostrarono che, dal momento che l'uranio emette neutroni addizionali quando avviene la fissione, una reazione a catena era possibile.

I dati sull'emissione di neutroni raccolti da Fermi, Szilard, Anderson ed Hanstein costituirono passi estremamente significativi verso la realizzazione della reazione a catena.

Un ulteriore impulso alle ricerche sul reattore ad uranio fu dato dalla scoperta del plutonio avvenuta presso il Radiation Laboratory di Berkeley (California) nel marzo 1940. Questo elemento, sconosciuto in natura, è formato dall'uranio 238 per cattura di un neutrone e quindi deve subire due successivi cambiamenti nella struttura atomica con l'emissione di particelle beta; il plutonio, si credeva, avrebbe subito la fissione come l'U-235, l'isotopo raro dell'uranio.

Nel frattempo a Columbia, Fermi e Zinn con i loro collaboratori stavano mettendo a punto il pro-

getto preliminare di un reattore ad uranio con possibilità di effettivo funzionamento; fra l'altro, essi dovevano trovare un materiale moderatore adatto a rallentare i neutroni che si spostavano con velocità relativamente alte.

Nel luglio del 1941 ebbero inizio gli esperimenti con l'uranio, al fine di ottenere le misure del fattore di riproduzione, chiamato k , che costituiva la chiave del problema della reazione a catena; se questo fattore poteva essere reso sufficientemente superiore ad uno, una reazione a catena poteva avvenire in una massa di materiale di dimensioni pratiche; se fosse rimasto, invece, inferiore ad uno, la reazione a catena sarebbe stata un sogno irrealizzabile.

Poiché impurità nell'uranio e nel moderatore avrebbero catturato neutroni e li avrebbero resi inutilizzabili per ulteriori reazioni e poiché i neutroni sarebbero scappati dalla pila senza incontrare gli atomi di U-235, non si sapeva se si sarebbe mai potuto ottenere per k un valore maggiore dell'unità.

Fortuna volle che il realizzare un fattore maggiore di uno fosse un problema complesso e difficile; se gli scienziati di Hitler avessero scoperto il modo di controllare i neutroni ed avessero ottenuto un valore di k tale da permettere la reazione a catena, essi sarebbero stati sulla buona via per produrre la bomba atomica per i nazisti.

Uno dei primi problemi da risolvere era quello del miglior modo di disporre l'uranio nel reattore; Fermi e Szilard suggerirono di sistemare l'uranio in una matrice di materiale moderatore, formando così un reticolo cubico di uranio; questa sistemazione sembrava la più atta a favorire l'incontro di un neutrone con un atomo di uranio.

Di tutti i materiali che possedevano le proprietà moderatrici necessarie, la grafite era il solo che si potesse ottenere, in quantità sufficiente, col grado di purezza desiderato.

Lo studio sul reattore a reticolo uranio-grafite fu iniziato a Columbia nel luglio del 1941, ma fu dopo la riorganizzazione del progetto uranio, avvenuta nel dicembre del 1941, che Arthur H. Compton venne incaricato di questa fase del lavoro, sotto la direzione dell'Ufficio di Ricerca Scientifica e Tecnica e fu deciso che il programma relativo avrebbe dovuto svolgersi presso l'Università di Chicago. Di conseguenza, all'inizio del 1942, i gruppi di Columbia e Princeton furono trasferiti a

Chicago, ove era stato impiantato il Laboratorio Metallurgico. Il gruppo sperimentale di fisici nucleari, diretto da Fermi, si preoccupava soprattutto di riuscire ad ottenere una reazione a catena; la divisione di chimica, organizzata da F.H. Spedding (più tardi diretta, a turno, da S.K. Allison, J. Franck, W.C. Johnson e T. Hogness), si occupava della chimica del plutonio e dei metodi di separazione mentre il gruppo teorico, diretto da E.P. Wigner, della progettazione di pile di produzione. Comunque, i problemi venivano ad intrecciarsi e lo studio dei vari aspetti scientifici e tecnici del processo di fissione veniva affidato ai gruppi meglio attrezzati per un determinato compito.

A Chicago il lavoro sulle pile di dimensioni subcritiche continuò. Nel luglio 1942, i dati ottenuti grazie a queste pile sperimentali erano tanto progrediti da permettere di scegliere un progetto di una pila di prova di dimensioni critiche. A quel tempo, le matrici di stampaggio degli ossidi d'uranio erano progettate da Zinn e fabbricate dietro suo ordine; ciò aveva un'importanza essenziale, poiché l'intera costruzione della pila dipendeva dalla forma e dalla dimensione dei pezzi di uranio.

Era necessario usare uranio sotto forma di ossido perché non esisteva uranio metallico avente il grado di purezza desiderato; sebbene parecchi fabbricanti avessero tentato di produrlo, non fu che a novembre che si poté averne a disposizione una considerevole quantità.

A metà novembre, la Westinghouse Electric Manufacturing Company, la Metal Hydrides Company e F.H. Spedding, che lavorava presso lo Iowa State College ad Ames (Iowa), avevano già consegnato diverse tonnellate di metallo purissimo che era stato posto nella pila, il più vicino possibile al centro.

Il programma per l'approvvigionamento del materiale moderatore e degli ossidi di uranio era diretto da Norman Hilberry; R.L. Doan dirigeva il programma di approvvigionamento di uranio metallico puro.

Sebbene le matrici per stampare gli ossidi d'uranio fossero state progettate in luglio, fu necessario compiere ulteriori misurazioni per ottenere adeguate informazioni sul controllo della reazione, per rivedere le stime sulla dimensione critica finale

della pila e per sviluppare altri dati. Trenta pile sperimentali subcritiche furono costruite prima che la pila definitiva potesse essere completata.

Nel frattempo, a Washington, Vannevar Bush, direttore dell'Ufficio di Ricerca Scientifica e Tecnica, aveva raccomandato al Presidente Roosevelt che fosse istituita, nell'ambito dell'Esercito, una speciale organizzazione tecnica del genio militare che assumesse la piena responsabilità dello sviluppo del programma relativo alla bomba atomica. Nel corso dell'estate, venne creato il Manhattan Engineer District e, nel settembre 1942, il maggiore generale L.R. Groves ne assunse il comando.

La costruzione della pila principale a Chicago cominciò in novembre; l'esecuzione del progetto iniziò con la lavorazione dei blocchi di grafite, con la produzione di pastiglie di ossido di uranio e con la progettazione degli strumenti. I due gruppi di Fermi per la costruzione, l'uno diretto da Zinn e l'altro da Anderson, lavoravano quasi giorno e notte; W.C. Wilson dirigeva il lavoro concernente la strumentazione.

Le stime originarie nei riguardi delle dimensioni critiche della pila erano pessimistiche; come ulteriore precauzione si decise di racchiudere la pila in un involucro per pallone, entro il quale potesse essere fatto il vuoto, onde evitare la cattura dei neutroni da parte dell'aria. Questo involucro venne costruito dalla Goodyear Tire and Rubber Company; esperti nella progettazione di involucri per aeromobili più leggeri dell'aria, nutrono dei dubbi sulla aerodinamicità di un involucro quadrato; d'altra parte, norme di sicurezza vietavano di far sapere alla Goodyear lo scopo a cui sarebbe servito l'involucro e così il nuovo pallone quadrato dell'Esercito fu oggetto di molti frizzi.

L'involucro venne appeso lasciando un lato aperto; al centro del pavimento fu posto uno strato circolare di mattoni di grafite; sia questo che ogni successivo strato della pila fu circondato con una cornice di legno; strati alterni contenevano l'uranio. Con siffatta struttura si formò una pila di uranio e grafite di forma quasi sferica.

Gli impianti per la lavorazione dei mattoni di grafite furono installati nel settore occidentale; per settimane questa officina produsse mattoni di grafite. Questo lavoro fu compiuto, sotto la direzione del gruppo di Zinn, da meccanici provetti diretti dallo

specialista August Knuth. In ottobre, Anderson ed i suoi collaboratori si unirono agli uomini di Zinn.

Nel descrivere questa fase di lavoro, Albert Wattenberg, membro del gruppo di Zinn, disse: «Abbiamo capito quello che provano i minatori delle miniere di carbone; dopo otto ore di lavorazione della grafite sembravamo truccati per una rappresentazione di negri; una prima doccia non riusciva a togliere che la superficie dello strato di polvere di grafite che si era formato; circa mezz'ora dopo la prima doccia, la polvere accumulatasi nei pori della pelle cominciava ad affiorare. Camminare per la stanza dove tagliavano la grafite era come camminare su un pavimento preparato per ballare: la grafite, come sapete, è un lubrificante secco ed il pavimento di cemento, coperto di polvere di grafite, era sdruciolevole».

Prima che la struttura della pila fosse per metà terminata, le misurazioni indicavano che la dimensione critica con cui la pila avrebbe potuto autosostenersi era inferiore a quanto era stato previsto nel progetto.

Un giorno dopo l'altro, la pila progrediva verso la sua forma definitiva e man mano che essa andava completandosi cresceva la tensione nervosa degli uomini che vi lavoravano. Logicamente e scientificamente essi sapevano che questa pila avrebbe dovuto autosostenersi: tutti i dati lo indicavano. Ma bisognava dimostrarlo coi fatti. Con l'avvicinarsi del momento ansiosamente atteso, gli scienziati dedicarono sempre maggiore attenzione ai dettagli, alla accuratezza delle misurazioni e all'esattezza del lavoro di costruzione.

Chi guidava il progetto e l'intera costruzione della pila era la vivace intelligenza di Fermi, che i suoi collaboratori hanno descritto come «completamente fiducioso in se stesso, ma assolutamente privo di presunzione».

I calcoli di Fermi, basati sulle misurazioni prese sulla pila parzialmente finita, erano così esatti che, già nei giorni precedenti il suo completamento e la dimostrazione del 2 dicembre, egli era quasi in grado di precisare il punto esatto in cui il reattore si sarebbe autosostenuto. Ma, malgrado tutta la loro cura e la loro fiducia, ben pochi nel gruppo sapevano quali alte poste erano state giocate sul loro successo. A Washington, il Manhattan District era andato avanti nei negoziati con la E.I. Du Pont de

Nemours & Company per la progettazione, la costruzione e l'esercizio di un impianto basato sui principi della pila di Chicago, allora non ancora sperimentata. Gli stabilimenti della Handford Engineer a Pasco, Washington, che erano costati 350 milioni di dollari, dovevano esserne il risultato.

A Chicago, nel primo pomeriggio del 1° dicembre, le prove indicavano che la dimensione critica si stava rapidamente avvicinando; alle 16 il gruppo di Zinn fu sostituito dagli uomini che lavoravano con Anderson: poco dopo, l'ultimo strato di blocchi di grafite e di uranio fu posto sulla pila. Zinn, che doveva rimanere sul posto, ed Anderson fecero diverse misurazioni sull'attività all'interno della pila. Essi erano sicuri che, una volta estratte le barre di controllo, la pila si sarebbe autosostenuta. Entrambi, comunque, furono d'accordo che se le misurazioni avessero indicato che la reazione si sarebbe autosostenuta quando le barre di controllo fossero state estratte, non avrebbero iniziato il funzionamento della pila fino a che Fermi e gli altri del gruppo non fossero stati presenti. Di conseguenza, le barre di controllo furono bloccate e ogni altro lavoro fu rimandato al giorno seguente.

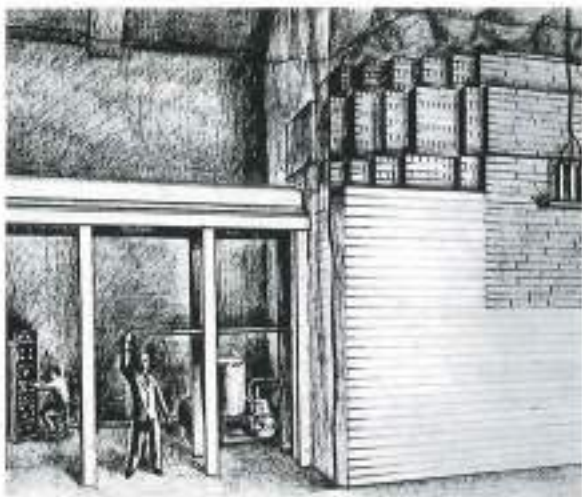
Quella sera gli uomini che avevano lavorato alla pila si erano passati la parola che l'esperimento avrebbe avuto luogo il mattino seguente.

Alle 8 e 30 circa del mattino di mercoledì 2 dicembre, il gruppo cominciò a riunirsi nello "squash court".

All'estremità nord vi era un balcone alto circa 3 metri sopra il pavimento del locale: Fermi, Zinn, Anderson e Compton si raggrupparono intorno agli strumenti all'estremità est del balcone; gli altri osservatori affollarono il piccolo balcone. R.G. Nobles, uno dei giovani scienziati che avevano lavorato alla pila, si espresse così: «La cabina di controllo era circondata dai 'grossi calibri', i 'piccoli calibri' rimanevano un po' indietro».

Nel locale, proprio sotto il balcone, era George Weil che aveva il compito di azionare l'ultima barra di controllo.

Nella pila vi erano tre dispositivi di controllo: un primo dispositivo era costituito da barre automatiche, che potevano essere controllate dal balcone; un secondo era costituito da una barra di sicurezza da usare in caso di emergenza; attaccata ad un'estremità di questa vi era una fune che correva lungo tutta la pila e portava un grosso peso all'estremità



A sinistra - Bozzetto della pila CP-1 disegnato sulla base delle descrizioni dei presenti, in mancanza di foto. Il segreto di Stato vietava, infatti, che le attrezzature del Metallurgical Laboratory fossero fotografate. L'uomo in basso aziona a mano una barra di controllo

Sotto - Quadro dipinto da Gary Sheenan riprodotte la scena dello Stagg Field di Chicago il 2 dicembre 1942. Il quadro si trova alla Chicago Historical Society

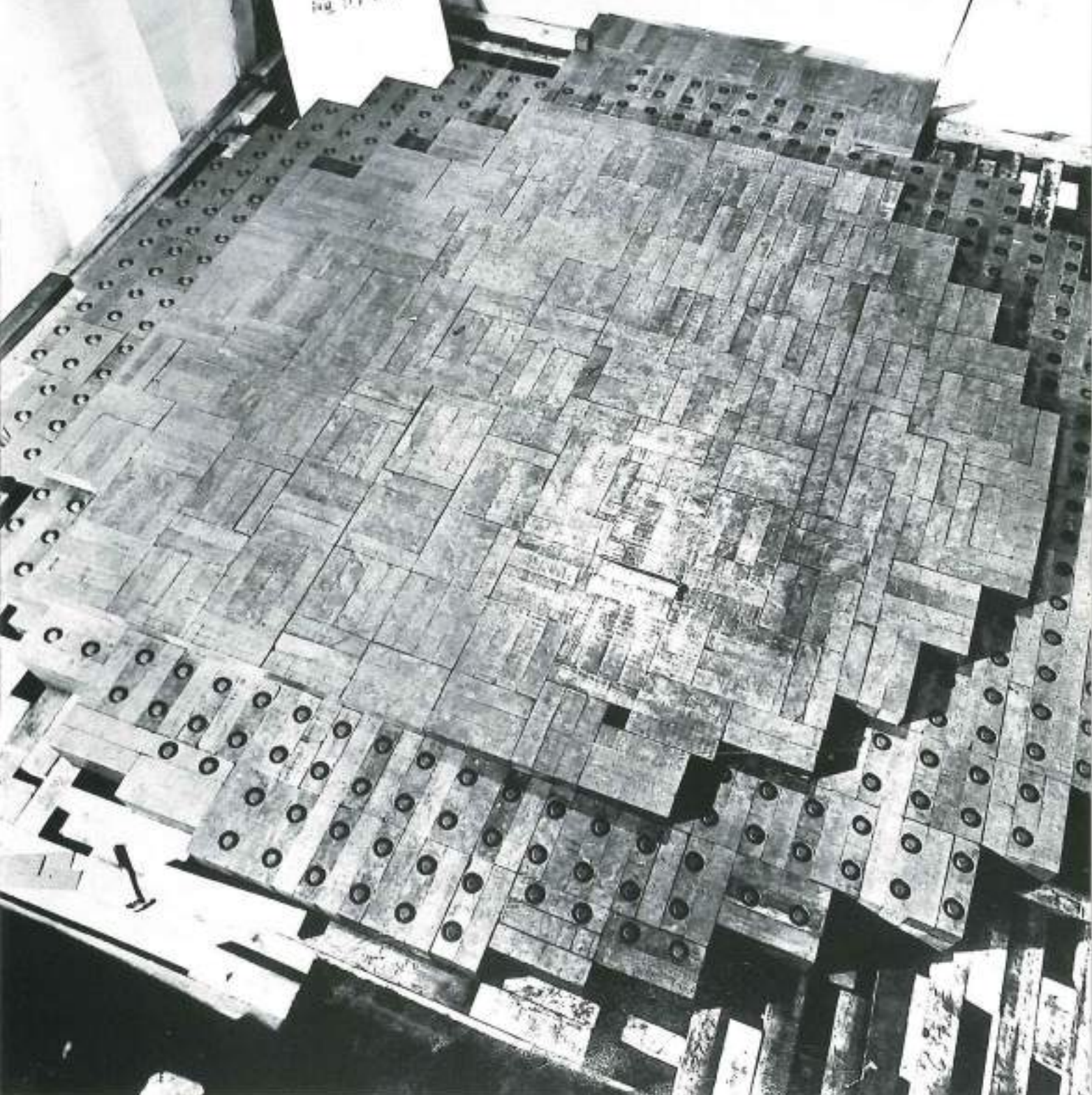


A sinistra -Il fiasco di Chianti che fu stappato per festeggiare la prima reazione nucleare a catena controllata, con le firme di 27 dei presenti. Il fiasco fu affidato al Chicago Museum of Science and Industry e poi trasferito all'Argonne National Laboratory per essere sottoposto ad uno speciale trattamento per conservare la paglia

Nella pagina accanto - La pila CP-1 in fase di assemblaggio: si tratta del 19° strato dei mattoni di grafite contenenti sfere di uranio. Complessivamente, gli strati erano 55

POSITIVELY
NO SMOKING
IN THIS ROOM

LAYER 19-15
HEIGHT
WIDTH
LENGTH
AMOUNT
FLOOR
NO. 17



opposta; la barra venne estratta dalla pila e legata al balcone con un'altra fune: Hilberry era pronto a tagliare questa fune con un'ascia nel caso che accadesse qualcosa di inaspettato, o nel caso che le barre automatiche di sicurezza non funzionassero; il terzo dispositivo, una barra manovrata da Weil, manteneva realmente sotto controllo la reazione fino a quando non fosse ritirata nella misura opportuna.

Poiché questo esperimento era nuovo e diverso da tutto quanto era mai stato fatto prima, non si fece completo affidamento sulle barre di controllo manovrate meccanicamente; pertanto, vi era una "squadra di controllo del liquido" composta da Harold Lichtenberger, W. Nyer e A.C. Graves, sulla piattaforma sovrastante la pila; essi erano pronti ad inondare la pila con una soluzione di sale di cadmio nel caso di mancato funzionamento delle barre di controllo.

Ciascuno gruppo provò la prima parte dell'esperimento. Alle 9 e 45 Fermi ordinò che si estraessero le barre di controllo manovrate elettricamente. L'operatore addetto al controllo manovrò l'interruttore e si udì funzionare un piccolo motore; tutti gli occhi erano rivolti alle luci che indicavano la posizione delle barre.

Immediatamente il gruppo che era sul balcone si volse a guardare i contatori il cui ticchettio era aumentato in seguito all'estrazione delle barre; gli indicatori di questi contatori rassomigliavano ad orologi, le cui lancette indicavano il conteggio dei neutroni; accanto ad essi era un registratore, il cui indice tremolante tracciava l'attività dei neutroni all'interno della pila.

Poco dopo le 10, Fermi ordinò che la barra di emergenza chiamata "zip" fosse estratta e legata. «Zip fuori» disse Fermi. Zinn ritirò "zip" e la legò alla ringhiera del balcone. Weil stava pronto alla barra di controllo "vernier" che era graduata per indicare il numero di piedi e di pollici che rimanevano all'interno della pila.

Alle 10 e 30 Fermi, senza togliere gli occhi dagli strumenti, disse tranquillamente: «Tiralà fino a 13 piedi, George». Il ticchettio dei contatori divenne più rapido e l'indice del diagramma salì; furono studiati tutti gli strumenti e fatti i calcoli. «Non ci siamo - disse Fermi - il tracciato arriverà fino a questo punto e si arresterà a questo livello». Egli

indicava un punto nel diagramma. In pochi minuti l'indice arrivò fino al punto indicato e non salì oltre; sette minuti più tardi, Fermi ordinò che si estraesse la barra di un altro piede.

Di nuovo aumentarono i battiti dei contatori e l'indice del diagramma puntò verso l'alto; ma il ticchettio era irregolare. Presto si arrestò al nuovo livello e così fece anche la linea tracciata dall'indice; la pila non si autososteneva ancora.

Alle 11 la barra fu estratta per altri sei pollici; il risultato fu identico: un aumento di velocità, seguito da un arresto al nuovo livello raggiunto.

Quindici minuti più tardi, la barra fu ulteriormente ritirata e alle 11 e 25 fu mossa di nuovo. Ogni volta che nei contatori aumentava la velocità del ticchettio, l'indice saliva di pochi punti. Fermi prevedeva correttamente ogni movimento degli indicatori; sapeva che il momento era vicino. Egli volle di nuovo controllare tutto, indi la barra automatica di controllo fu inserita nuovamente, senza aspettare che agisse il dispositivo automatico.

La linea del grafico cadde, i contatori rallentarono all'improvviso.

Alle 11 e 35 circa la barra automatica di controllo venne estratta e fissata. La barra di controllo fu regolata e "zip" estratta. I contatori salirono con ticchettio rapido, sempre più rapido; era come il ritmo veloce di un treno sui binari; l'indice del diagramma cominciò a salire; il piccolo gruppo guardava ed aspettava, teso, affascinato dall'indice che continuava a salire.

Poi, all'improvviso, l'incantesimo fu rotto come da uno scroscio di tuono. Tutti ne rimasero agghiacciati e respirarono poi di sollievo, quando capirono che la barra automatica era scattata: il punto di sicurezza a cui la barra operava automaticamente, era stato posto troppo in basso.

«Ho fame - disse Fermi - andiamo a mangiare». Forse, come un grande allenatore, anche Fermi sapeva quando i suoi uomini avevano bisogno di riposo. Fu un'interruzione del lavoro diversa dal solito; la conversazione non fu brillante; i presenti evitarono di parlare della posta in gioco. Fermi, sempre poco loquace, aveva da dire ancora meno del solito, ma appariva profondamente fiducioso.

Il suo gruppo ritornò nel cortile alle 14. Venti

minuti più tardi, la barra automatica fu nuovamente sistemata e Weil si tenne pronto alla barra di controllo. «Pronti, George» disse Fermi e Weil portò la barra al punto determinato. Gli spettatori ripresero a guardare ed aspettare; a guardare il movimento dei contatori ed il diagramma, ed aspettare il risultato ed a calcolare, in base agli indicatori, l'aumento della velocità della reazione.

Alle 14 e 50 la barra di controllo fu estratta di un altro piede; i contatori scoppiarono quasi e l'indice del grafico uscì dalla carta. Ma la meta agognata non era ancora raggiunta; i rapporti del conteggio e la scala del grafico dovettero essere cambiati.

«Tiralà fuori di sei pollici» disse Fermi alle 15 e 20. Di nuovo si verificò il cambiamento di velocità a cui successe il livellamento. Cinque minuti più tardi Fermi ordinò: «Tiralà fuori di un altro piede». Weil ritirò la barra.

«Questa volta ce la fa» disse Fermi a Compton che gli era accanto. «Ora si sosterrà da sola; la linea salirà e continuerà a salire; non si livellerà più».

Fermi misurò la velocità dell'aumento dei neutroni per la durata di un minuto e, scuro in volto, prese a fare silenziosamente altri calcoli sul regolo.

Un minuto dopo calcolò di nuovo la velocità. Se la velocità era costante e rimaneva tale, significava che la reazione si sosteneva da sola; le sue dita manovrarono il regolo con la velocità del lampo; in maniera caratteristica, capovolsse il regolo e annotò alcune cifre sul dorso d'avorio; tre minuti dopo calcolò nuovamente la velocità di aumento nel conteggio dei neutroni.

Il gruppo sul balcone si era ora raccolto per poter vedere gli strumenti; quelli di dietro allungavano il collo per essere sicuri di non perdere il momento preciso in cui si faceva la storia. Dal fondo si sentiva William Overbeck che faceva il conteggio dei neutroni attraverso un sistema di segnalazione. Leona Marshall (la sola donna presente), Anderson e William Sturm registravano le letture degli strumenti. Da quel momento il ticchettio dei contatori si fece troppo veloce per l'orecchio umano; era come un ronzio costante. Fermi, impassibile, tranquillo, continuava a fare i suoi calcoli.

«Non potevo vedere gli strumenti – disse Weil – dovevo guardare costantemente Fermi, in attesa di ordini. Il suo volto era immobile; gli occhi correvano veloci da un quadrante all'altro; la sua espression-

ne era tanto calma da parere dura. Ma all'improvviso tutto il suo viso si illuminò in un aperto sorriso; egli chiuse il regolo...

«La reazione si sostiene da sola – annunciò tranquillamente, gioiosamente – la curva è esponenziale».

Il gruppo stette ad osservare intensamente per ventotto minuti: il primo reattore nucleare del mondo era entrato in funzione. Il movimento dell'indice verso l'alto tracciava una linea sottile sul diagramma; non vi era cambiamento che indicasse un livellamento. L'esperimento era riuscito.

«Ok, dentro 'zip'» disse Fermi a Zinn che controllava quella barra. Erano le 15 e 53. Bruscamente, i contatori rallentarono, l'ago scivolò giù attraverso la carta. Tutto era finito.

L'uomo aveva provocato una reazione a catena autosostenentesi e l'aveva arrestata; egli aveva liberato l'energia del nucleo dell'atomo ed aveva controllato quell'energia.

Subito dopo che Fermi ebbe dato ordine di fermare il reattore, il fisico teorico di origine ungherese Eugene Wigner gli venne vicino con un fiasco di Chianti; durante tutto l'esperimento Wigner aveva tenuto il fiasco nascosto dietro la schiena.

Fermi sturò il fiasco e fece portare dei bicchieri di carta, così che tutti potessero bere; versò un po' di vino nei bicchieri e in silenzio, solennemente, senza brindisi, gli scienziati portarono il bicchiere alle labbra; erano il canadese Zinn, gli ungheresi Szilard e Wigner, l'italiano Fermi, gli americani Compton, Anderson, Hilberry e una ventina di altri. Bevvero al successo e alla speranza di essere stati i primi a riuscire.

Un piccolo gruppo fu lasciato a rimettere a posto ogni cosa, a bloccare i comandi, a controllare tutti gli apparecchi. Mentre il gruppo degli scienziati stava per lasciare il settore occidentale, una delle guardie chiese a Zinn: «Che cosa sta succedendo Dottore? È avvenuto qualcosa là dentro?»

La guardia non aveva sentito il messaggio che Arthur Compton aveva trasmesso con una telefonata interurbana a James B. Conant ad Harvard. Il loro codice non era stato stabilito in precedenza.

«Il navigatore italiano è sbarcato nel Nuovo Mondo» disse Compton. «Come si sono comportati gli indigeni?» chiese Conant. «Molto amichevolmente.»

Albert Wattenberg

Quel giorno a Chicago



Albert Wattenberg fu uno dei giovanissimi fisici che parteciparono all'esperimento del 2 dicembre 1942 e alla sua preparazione. In questa relazione, presentata all'Accademia dei Lincei nel 1962, in occasione della commemorazione del 20° anniversario della pila CP-1, egli non ha dato solo una testimonianza di valore storico e scientifico, ma ha anche e soprattutto messo in evidenza una costante della personalità scientifica di Enrico Fermi: il ruolo insostituibile esercitato come guida, docente, animatore nell'ambito dei fisici nucleari che ebbero il privilegio di lavorare con lui e soprattutto in quel gruppo di fisici che si era formato, prima alla Columbia University di New York e poi al Metallurgical Laboratory di Chicago e al quale si dovettero molti dei successivi sviluppi dell'energia nucleare.

Enrico Fermi fu un docente favoloso ed un grande fisico sperimentale. Aveva un'intuizione ed una abilità teorica che gli permettevano di risolvere i problemi importanti e di tralasciare quelli secondari. È vero che molte persone hanno contribuito agli avvenimenti che ebbero luogo il 2 dicembre 1942, ma non c'è alcun dubbio che questa data commemora Enrico Fermi.

Sono certo che tutti conoscono la storia e l'importanza dei primi lavori del gruppo di Roma, di Amaldi, D'Agostino, Fermi, Pontecorvo, Rasetti e Segrè. Molti, sono certo, hanno anche letto più volte la storia degli sviluppi generali che portarono alla prima pila. Invece di ripetere queste cose, preferirei parlare di alcune circostanze particolari.

Vorrei descrivere gli esperimenti che hanno portato alla prima pila, gli avvenimenti del giorno in cui la pila entrò in funzione, e vorrei dire qualcosa sui giorni che seguirono.

Il gruppo della Columbia University di New York, e precisamente Anderson, Feld, Weil e Zinn, sotto la guida di Fermi, aveva sviluppato una tecnica molto precisa per studiare la possibilità di costruire una pila a reazione a catena.

Fu costruita una pila sperimentale di circa 3 metri per 3 ed alta 4 metri, di quelle che venivano chiamate pile esponenziali, nella quale si effettuarono misure della distribuzione dei neutroni.

Mentre eravamo alla Columbia, Fermi lavorava con noi e prese parte a queste misure. Più tardi, quando ciò non gli fu più possibile, egli arrivava al Laboratorio e guardava i numeri che avevamo misurato e i calcoli finali. Voleva vederli entrambi. Voleva che facessimo il calcolo completo cosicché

potessimo ben comprendere ciò che stavamo facendo. Teneva sempre ad ottenere i numeri di partenza per poi controllare personalmente i calcoli finali. Nell'aprile del 1942 ci trasferimmo dalla Columbia all'Università di Chicago. I risultati degli ultimi esperimenti erano stati scoraggianti. La grafite e l'ossido di uranio che adoperavamo non erano abbastanza puri. In effetti, con quei materiali, persino una pila ingrandita all'infinito non avrebbe mai potuto produrre una reazione a catena.

Appena giunti a Chicago arrivò della nuova grafite, circa quattromila blocchi, e noi costruimmo una nuova pila esponenziale. Circa un mese dopo il nostro arrivo, ottenemmo la prima indicazione sicura che era possibile realizzare una reazione di neutroni a catena autosostenentesi. Ma la pila avrebbe dovuto essere di volume enorme. Per la precisione, avremmo avuto bisogno di circa 50 milioni di kg di grafite.

In giugno ottenemmo per la prima volta dell'ossido nero di uranio, che era migliore dell'ossido marrone che avevamo usato fino ad allora. Quasi contemporaneamente, ottenemmo della grafite più pura. Con l'ossido nero di uranio il risultato fu assai incoraggiante, in quanto avremmo potuto costruire una pila con circa 400.000 kg di grafite. Una tale quantità di grafite e di uranio poteva essere pronta per dicembre. Su questa base, si cominciarono a costruire gli edifici del Laboratorio di Argonne, fuori Chicago.

Comunque, i mesi che seguirono ci riservarono molte delusioni. Le nostre speranze avevano alti e bassi esattamente come le misure delle pile esponenziali. In quelle venti settimane, realizzammo circa venti pile esponenziali. Ogni volta che ne costruivamo una, dovevamo spostare circa 10.000 mattoni di grafite in due giorni. Poi dovevamo effettuare misure per due giorni. Allo stesso tempo, dovevamo dirigere gli operai non specializzati che tagliavano, piallavano e bucarono la grafite e che fabbricavano i piccoli mattoni di ossido di uranio.

La prima delusione fu dovuta al fatto che solo parte della grafite era pura, mentre altre parti erano impure. Tutta la grafite doveva essere controllata e tenuta separata. Comunque, le nostre speranze si riaccesero quando ci fu detto che l'uranio metallico sarebbe arrivato alla fine dell'estate.

Finalmente, arrivò il primo carico di uranio metallico per le prove. Consisteva in cubetti di circa due centimetri di lato. Cominciammo a mettere insieme i cubi in gruppi di circa otto pezzi. Quando i pezzi di uranio furono raggruppati cominciarono a fumare ed il nostro prezioso materiale andò così perduto durante la combustione, con nostro grande sconforto. Si trattava di uranio sotto forma di metallo sinterizzato che bruciava molto lentamente.

Comunque, un sempre maggiore quantitativo della grafite in arrivo era di buona qualità ed alla fine arrivò dell'uranio metallico incombustibile.

Durante questo periodo, Fermi continuava ad istruirci come fisici e tenne per noi delle lezioni una sera la settimana per tutti i mesi di settembre e di ottobre. Fu una serie di lezioni meravigliose sulla teoria delle pile, durante le quali egli derivò le formule per il tasso di aumento del flusso di neutroni; in questi corsi egli sviluppò i procedimenti che debbono essere usati per mettere in funzione una pila per la prima volta. Nel corso del mese di ottobre divenne evidente che il nuovo edificio per la prima pila non sarebbe stato completato per dicembre. Dopo tre settimane, ottenemmo l'autorizzazione a montare la pila sotto le tribune del campo sportivo dell'Università di Chicago: lo Stagg Field.

Il 16 novembre il dr. A.C. Graves mise in posizione il primo strato di grafite. Ogni giorno Fermi ci diceva esattamente quale tipo di materiale dovevamo mettere in ogni parte dei singoli strati. Egli stesso effettuava i calcoli dettagliati per ottenere il massimo dal materiale a nostra disposizione. Ci diceva anche esattamente dove piazzare le barre di controllo. Era necessario mettere il materiale impuro all'esterno ed il materiale migliore al centro per ottenere il rendimento massimo del materiale disponibile.

La pila consisteva di circa 40.000 mattoni di grafite e circa 20.000 pezzi di uranio. Secondo il progetto, doveva essere approssimativamente una sfera di otto metri di diametro. Noi continuavamo a mettere al suo posto la grafite ed al tempo stesso a costruire la pila. Ogni notte si prendevano misure sulla densità dei neutroni. Alla fine della prima settimana, le misure indicavano che la pila avrebbe funzionato. La settimana seguente arrivò un quantitativo di ottimo uranio metallico. Era stato prepara-

to dai chimici dell'Università dello Iowa. Ciò significava che la pila, invece di essere sferica, sarebbe stata piatta nella parte superiore; invece dei 68 strati previsti, avrebbe funzionato con circa 55 strati.

Il 30 novembre la pila aveva raggiunto 53 strati. Le misure fatte quella notte confermarono che la pila sarebbe diventata critica con due strati di più, ma senza barre di controllo. Il giorno seguente, il 1° dicembre, Fermi ci disse di aggiungere altri quattro strati e si fece promettere da Zinn e da Anderson di non estrarre le barre quella notte.

La mattina seguente, il 2 dicembre, quelli del nostro gruppo che avevano costruito la pila, compreso il gruppo della strumentazione sotto la guida del dr. Wilson, oltre ai dottori Compton, Hilberry, Wigner e pochi altri, ci riunimmo sul soppalco situato sul lato nord della pila. Verso le nove e mezzo del mattino tutte le barre di controllo furono estratte dalla pila, eccetto una che il dr. George Weil doveva manovrare a mano. Fermi disse a Weil di estrarre parzialmente la barra dalla pila e di mantenerla in una posizione che egli aveva già calcolato. Gli strumenti indicavano che il numero dei neutroni nella pila prima aumentava e poco dopo si stabilizzava. Fermi fece un calcolo su un piccolo regolo e ripeté questo tipo di operazione alcune volte, manifestando soddisfazione.

Desidero qui spiegare che ci sono due metodi per misurare la distanza dal punto critico di una pila: il primo consiste nel misurare l'attività, ovvero quando l'attività è stabilizzata, l'altro metodo è quello di misurare il tasso iniziale di aumento del flusso di neutroni. C'era qualche incertezza nel valore di una delle costanti usate nella formula per il tasso di aumento. Da queste prime misure Fermi ottenne il valore della costante. Era il valore che aveva sperato.

Fermi chiese quindi a Weil di estrarre di altri quindici centimetri la barra. Alle persone a lui vicine disse che la pila era ancora sottocritica e che l'attività si sarebbe stabilizzata a quel livello. Stava ora cercando di controllare se le sue formule dessero dati corretti. L'attività della pila saltò e andò esattamente al livello che Fermi aveva previsto.

A questo punto, l'attività era divenuta troppo elevata per alcuni degli strumenti e, come in ogni altro esperimento, c'erano altri strumenti che non si

comportavano come dovevano. Di conseguenza, ci volle del tempo per riparare o modificare parte della strumentazione. Dopo di che, Fermi disse a Weil di estrarre la barra di altri quindici centimetri. La pila era ancora subcritica. Comunque, appena l'attività incominciò a stabilizzarsi, ci fu un forte colpo. Accadde che una barra di sicurezza automatica, collegata a una camera di ionizzazione, era entrata in funzione e si era inserita nella pila. Erano a questo punto le undici e mezzo e Fermi disse: «Andiamo a mangiare un boccone».

Dopo mangiato, tutte le barre, eccetto una, furono estratte. L'ultima fu rimessa nella posizione alla quale Fermi aveva fatto le misure durante la mattinata e la strumentazione fu ricontrollata. La barra fu poi rimessa nella posizione in cui si trovava prima che fossimo andati a mangiare, e ciò per controllare nuovamente che niente fosse cambiato nella pila. Finalmente, alle tre e venticinque Fermi disse a Weil: «Questa volta tiriamo fuori la barra di altri trenta centimetri». Egli spiegò a Compton che la pila si sarebbe ora autosostenuta: in altri termini, l'attività non si sarebbe stabilizzata e avrebbe continuato a salire.

Dopo un minuto Fermi lesse uno strumento e fece un rapido calcolo. Dopo un altro minuto lesse di nuovo lo strumento ed effettuò altri calcoli. Dopo tre minuti lesse di nuovo lo strumento ed effettuò di nuovo un calcolo. Stava controllando se il valore della costante nella sua formula fosse il medesimo sia per una pila capace di autosostenersi che per una pila subcritica. Egli voleva anche essere certo che l'attività stesse continuando a salire e che non si sarebbe stabilizzata.

Tutto stava funzionando secondo le sue previsioni e sul suo volto apparve un sorriso. Poi annunciò: «La reazione è autosostenuta. La curva è esponenziale».

Lasciò quindi salire l'attività della pila per circa ventotto minuti e questa continuò ad aumentare costantemente. Poi fece inserire tutte le barre di controllo nella pila e questa si spense. Fermi era riuscito a provocare e controllare una reazione nucleare a catena. L'avvenimento fu appropriatamente festeggiato con un fiasco di Chianti, sfortunatamente troppo piccolo. Nei giorni seguenti

Fermi cominciò subito ad utilizzare la pila quale strumento per molti usi: per studiare le caratteristiche delle pile, per effettuare ricerche di fisica nucleare e anche per analizzare materiale da usare nelle pile future.

Nei primissimi giorni si presentò il problema di come dovevamo far funzionare la pila. Cercavamo di farla funzionare sia lasciandola andare su e giù lentamente, sia tenendo ben fermo il livello dell'attività. Le difficoltà che sorsero in questa operazione erano dovute in parte agli strumenti, ed in parte agli effetti dei cambiamenti della pressione atmosferica.

La pila si rivelò il barometro più grande e più sensibile del mondo. Studiammo anche la dipendenza di un reattore dalla temperatura aprendo semplicemente tutte le porte e le finestre all'aria fredda di Chicago. Misurammo anche la radiazione presente nell'ambiente della pila.

Ai primi di gennaio stavamo già insegnando al personale come far funzionare altre pile. Fu un periodo di enorme progresso.

Anche Fermi usò la pila per misurare la sezione d'urto per neutroni per circa dieci elementi. Infatti, sembrava che egli provasse la più grande gioia quando usava la pila per condurre degli esperimenti che prima gli avrebbero portato via molto tempo.

Fermi era affascinato dalla possibilità di usare la pila come strumento per esperimenti.

Gli avvenimenti del 2 dicembre non solo segnarono l'avvento di una reazione a catena del nucleo atomico, ma innescarono anche una reazione a catena nella nostra tecnologia.

Fermi produsse inoltre una reazione a catena fra i fisici a causa della sua meravigliosa personalità e del suo genio come scienziato e maestro. Egli ebbe una profonda influenza sui fisici con i quali venne a contatto, ed anche sui loro studenti. I risultati di tale influenza sono molto evidenti tra i fisici che ho incontrato in Italia (*).

Quattro colleghi e allievi di Fermi hanno ricevuto il Premio Nobel.

(*) Albert Wattenberg, proprio in quel 1962, aveva passato alcuni mesi in Italia per una serie di ricerche presso i Laboratori Nazionali di Frascati dell'ENEA, allora denominato CNEN (Comitato Nazionale per l'Energia Nucleare).

Laura Fermi

Alcuni ricordi personali



Quella di Laura Fermi, moglie dello scienziato, è una testimonianza insostituibile con riferimento a quanto avvenne a Chicago al Metallurgical Laboratory in quanto rende l'atmosfera e le condizioni del tutto eccezionali in cui lavoravano Fermi e i suoi collaboratori nella preparazione dell'esperimento del 2 dicembre 1942. Inoltre, come si vede da questo articolo e come più ampiamente risulta dal libro "Atomi in famiglia", Laura Fermi non fu solo una testimone del "privato" del maestro, ma seppe giudicare anche del significato scientifico dell'opera del marito, riferendone con una semplicità divulgativa davvero esemplare.

Non sapevo nulla a quell'epoca del lavoro che si svolgeva presso il Laboratorio Metallurgico di Chicago durante la guerra. L'ultima notizia eccitante che mi fosse giunta, in materia scientifica, era stata quella concernente la fissione: erano gli inizi del 1939 e noi Fermi ci trovavamo solo da qualche settimana a New York, dove eravamo andati a stabilirci per sfuggire all'Italia fascista. Le notizie sulla fissione, che si diffusero rapidamente, a seguito di un viaggio negli Stati Uniti di Bohr, ci entusiasmarono molto, perché sembrava che avrebbero messo fine una volta per tutte ad un episodio increscioso, le cui conseguenze erano rimaste a lungo incerte. Quasi quattro anni prima, nella primavera del 1934, Fermi ed i suoi collaboratori, a Roma, avevano bombardato l'uranio con neutroni, ed avevano ottenuto vari prodotti radioattivi, almeno uno dei quali non erano riusciti assolutamente ad identificare. Pensarono che se il risultato fosse stato l'emissione di raggi beta avrebbe potuto trattarsi di un elemento non esistente in natura, di numero atomico 93. Effettuarono analisi chimiche, ma benché anche queste indicassero apparentemente l'elemento 93, essi si resero conto che mancavano di sufficiente esperienza nel trattamento di piccolissime dosi di sostanze radioattive, da poter essere completamente sicuri dei risultati ottenuti.

Il direttore del Laboratorio di Fisica, il professor Orso Mario Corbino, durante un suo discorso ufficiale pronunciato in presenza del Re, affermò che, benché Fermi avesse ragione nel voler procedere ad ulteriori esperimenti prima di annunciare la scoperta, la produzione dell'elemento 93 poteva considerarsi ormai cosa certa. La stampa fascista annunciò la scoperta senza porre riserve e i giornali di tutto il mondo divulgarono la notizia. La conseguente leggera reazione di incredulità dimostrata dagli scien-

ziati stranieri infastidi a tale punto Fermi, come mai lo vidi in vita sua, né prima né poi. Negli anni che seguirono, vari scienziati ripeterono gli esperimenti romani; Otto Hahn e Lise Meitner, all'inizio, confermarono i risultati di Fermi ma poi sorsero nuovi dubbi. Con la scoperta della fissione, ad opera di Hahn e Strassmann la "misteriosa attività" venne identificata con quella di un isotopo del bario, e sembrò che un certificato di morte fosse ormai stato scritto per l'elemento 93; per quanto ne sappiamo, nessuno in quel momento intuì che l'elemento 93 sarebbe risorto nel giro di pochi mesi, e questa volta per sempre, come stadio intermedio tra l'uranio e il plutonio, e si sarebbe chiamato Nettunio.

Poco dopo aver appreso della fissione, seppi anche da Fermi che gli era accaduto di accertare che durante il processo di fissione poteva esservi emissione di neutroni, e che tale ipotesi, che era stata esaminata con Bohr durante un incontro teorico, aveva suscitato grande interesse. Poi si mise a spiegarmi il principio della reazione a catena. Ma ad un certo momento, durante le settimane seguenti, la famosa cappa della segretezza calò sull'attività atomica. Una segretezza che gli stessi fisici, incluso Fermi, rispettarono a malincuore, rinnegando le loro tradizioni, appena capirono quali implicazioni belliche potesse avere l'energia nucleare.

Io fui tagliata fuori da qualsiasi informazione riguardante il lavoro di Fermi e, dunque, non potevo sapere che allo scopo di tentare di realizzare una reazione a catena, Fermi e Leo Szilard avevano concepito l'idea di costruire una "pila". È vero che una volta, in mia presenza, qualcuno menzionò di aver visto una montagna di carbone nell'edificio di fisica, ma non diedi molta importanza alla cosa e Fermi mi disse di dimenticarmela. Null'altro trapelò dopo questo episodio.

Io non avevo nulla contro la segretezza, così come era osservata alla Columbia University.

A casa, Fermi non parlava mai troppo del suo lavoro, tranne nei rari momenti in cui si entusiasma delle sue ricerche: come quella volta che aveva capito che i neutroni, attraversando elementi leggeri, divenivano più efficienti nell'indurre radioattività ed aveva così portato il suo contributo alla scoperta dei neutroni lenti. Avrebbe avuto un

maggior motivo di entusiasmo se avesse potuto prevedere che i neutroni lenti sarebbero diventati il suo interesse principale per almeno quindici anni, e che sarebbero stati il tramite per raggiungere il rilascio controllato di energia nucleare.

Più che direttamente da Fermi, avevo acquisito nozioni di fisica atomica durante le passeggiate domenicali che di solito facevamo con altri fisici nella campagna romana. Prima o poi gli uomini si mettevano a parlare di contatori e di sorgenti, dello strano comportamento dei neutroni, oppure delle "teste" e delle "code" dei loro prodotti radioattivi, come chiamavano nel loro gergo le attività che decadono rapidamente o quelle che duravano più a lungo.

Le passeggiate mi mancarono più della fisica.

Nella primavera del 1942 Fermi si trasferì a Chicago, dove tutto il lavoro concernente la reazione a catena si svolgeva sotto la direzione di Arthur Compton.

Per lui la vita si fece più facile: per parecchi mesi aveva fatto il pendolare fra New York e Chicago ma, essendo uno straniero e per giunta di un Paese nemico, gli era stato imposto di procurarsi permessi speciali per i suoi viaggi, nonostante il fatto che viaggiasse per servire lo zio Sam e lo sforzo bellico.

A Chicago la segretezza era più organizzata, molto più tangibile che alla Columbia University. Vi erano guardie in tutti i Laboratori del Progetto Metallurgico, alcuni ricercatori erano forniti di guardie del corpo, alle mogli venivano fatte conferenze sui gravi pericoli dei discorsi sbadati, bisognava rispettare certe regole; un numero incredibilmente vasto di gente, trovandosi riunita per uno stesso scopo, accettò questa inevitabile segretezza.

Fermi era abilissimo nel custodire segreti ed io non riuscii mai a cavar fuori dalla sua bocca qualcosa che riguardasse il progetto, nemmeno il segreto meno importante, e cioè che al Laboratorio Metallurgico non c'erano metallurgisti.

Con il tempo, quando ci fummo sistemati ed io incontrai più gente, fui io a riferirgli i pettegolezzi esterni: «Dicono che al Met Lab (*) state lavorando

(*) Abbreviazione di Metallurgical Laboratory

ad una cura per il cancro» gli dissi un giorno e la sua unica risposta fu: «Ah sì, è questo che dicono?». E un'altra volta: «La gente che vive vicino ai West Stands dice che ogni tanto le loro case tremano e che ciò è dovuto ad una macchina costruita da voi fisici». «Davvero?» rispose Fermi. Non mi ricordo di aver provato irritazione a queste risposte evasive. Esse facevano parte di un gioco in cui io cercavo, senza molta convinzione, di ottenere informazioni e invariabilmente finivo sconfitto. Però una volta mi infuriai.

Era una serata del 1942, all'inizio di dicembre e nevicava. Ricevemmo gente a casa nostra e, dato che ci avevano sconsigliato di riunirci con il solito gruppo per motivi di sicurezza, tutti i nostri ospiti figuravano come persone che lavoravano al Met Lab, con le loro consorti. A mano a mano che entravano, scuotendosi la neve di dosso, quelli fra loro che erano scienziati si congratulavano con Fermi, senza spiegare il perché. Per tutta la serata essi si comportarono come se condividessero con lui il segreto di qualche scoperta, ma si rifiutarono di darmi spiegazioni. Fermi appariva soddisfatto, ma come sempre teneva la bocca chiusa. Io sentivo che quel rifiuto da parte degli uomini di farmi partecipare alla loro gioia, a casa mia, era molto poco gentile. Cominciai ad insistere e finalmente mi dissero che «Fermi aveva affondato un ammiraglio giapponese con la sua nave». Ancora oggi non so attraverso quali calcoli il mio informatore giungesse a paragonare la reazione a catena con una simile impresa navale. E solo poco dopo la fine della guerra seppi della prima "pila" atomica, quando Fermi portò a casa una copia ciclostilata dello "Smyth Report", ancora non pubblicato.

Il quadro che ho ora in testa dell'esperimento con la "pila" è frammentario, e sarebbe per me difficile dire quello che appresi da Fermi e quello che invece seppi dai suoi collaboratori. Fermi parlava più spesso di dettagli non molto importanti, piuttosto che del suo ruolo nella costruzione della "pila".

Ad esempio, gli piaceva ricordare il divertimento provato, a spese della Goodyear Tire and Rubber Company, quando aveva ordinato un pallone di forma cubica. Il pallone doveva servire ad avvolgere la "pila", al fine di permettere l'estrazione dell'aria, ma questo fatto era un segreto che non doveva esse-

re rivelato alla società, la quale costruì il pallone ritenendo che l'Esercito avrebbe fatto volare un pallone quadrato. A parte lo scherzo, il pallone costituiva una chiara indicazione della vigilanza costante durante quei quasi quattro anni di lavoro attorno alla "pila" e dello sforzo di prevedere le difficoltà e di essere preparati ad affrontarle. Anche dopo aver accertato che una "pila" funzionante ad uranio naturale era realizzabile, e dopo che ne ebbero all'incirca valutato le dimensioni, i fisici sapevano che le dimensioni finali sarebbero dipese dalla purezza dei materiali. Un blocco di uranio, oppure di grafite, di minore purezza di quella desiderata avrebbe significato la necessità di una "pila" più grande. Ma esisteva un limite materiale: e cioè l'altezza del soffitto del vano in cui si costruiva la "pila". Per superare questa difficoltà Fermi insistette affinché, se necessario, fosse estratta dalla "pila" l'aria con il suo azoto assorbitore di neutroni. Ecco perché ci voleva il pallone. L'effetto dell'aria sulla "pila" era già stato studiato da Fermi e dal suo gruppo alla Columbia University.

Del giorno della prova finale, il 2 dicembre, ebbi varie descrizioni, dato che i testimoni non erano riluttanti a ricordarlo. Erano tutti d'accordo su un punto: Fermi era rimasto calmo mentre dirigeva l'esperimento, forse il più calmo fra tutti i presenti.

A volte ho pensato che nei commenti dei suoi amici ci fosse una punta di critica per la sua imperturbabilità in un tale momento, come se un po' di ansia fosse stata più appropriata della sua sicurezza.

Da parte mia si trattava certo di ipersensibilità, ma non potei fare a meno di pensare ad un'osservazione espressami nell'autunno del 1942 da un fisico, che era per sua natura pessimista. Dopo avermi esortata a non preoccuparmi per il mio destino, mi

disse: «Se Enrico salterà in aria, salterai anche tu». Questo mi portò ad affrontare con Fermi il problema del pericolo insito nell'esperimento della "pila", eseguito com'era nel cuore di una grande città. Si vede che mi aspettavo una risposta in chiaro oscuro, giacché quella che mi diede lui mi parve molto arzigogolata e poco esauriente. Quando era stata costruita la "pila", mi disse, egli ed il suo gruppo avevano preso attente misure per tutte le conseguenze possibili e si erano resi conto fino in fondo del comportamento della "pila" stessa.

Non si aspettavano sorprese dalla "pila" ed erano certi che, una volta dato l'avvio alla criticità, essa si sarebbe comportata nel migliore dei modi. Purtroppo, avendo a che fare con una cosa del tutto nuova, quale la liberazione di energia nucleare, non potevano scartare l'eventualità che un fenomeno impreveduto venisse a disturbare l'esperimento.

Il rischio che correvano consisteva in questo elemento imponderabile.

Allo scopo di ridurre al massimo tale rischio presero tutte le precauzioni possibili ed immaginabili. Grandi quantità di cadmio erano a portata di mano per spegnere la "pila", qualora fosse andata fuori controllo. Le barre di sicurezza automatiche però erano tarate per scattare ad un livello troppo basso di attività, come risultò evidente quando entrarono in funzione con uno scatto secco, che Fermi interpretò come il segnale di pausa «per andare a mangiare un boccone».

L'esperimento fu condotto lentamente e con estrema cautela, passo passo, mentre Fermi controllava ripetutamente se la "pila" si comportasse secondo i calcoli. Fu così che la semplice operazione di rimuovere tutti i controlli e dare l'avvio alla "pila" durò per tutta la mattinata, e parte del pomeriggio della storica giornata del 2 dicembre 1942.

Pietro Bullio

Il "Fermi Team" di Chicago

Nel quarto anniversario
dell'esperimento di Chicago
(2 dicembre 1946)
sono riuniti all'Università
alcuni esponenti del "team"
di Fermi.

In alto:

N. Hilberry, S. Allison, T. Brill,
R. Nobles, W. Nyer, M. Wilkinson

Al centro:

H. Agnew, W. Starn,
H. Lichtenberger, L. Woods, L. Szilard

In basso:

E. Fermi, W. Zinn, A. Wattenberg,
H. Anderson





Articolo scritto nel 1982, in occasione del quarantesimo anniversario della pila CP-1.

«E non dimentichiamo Gus, il carpentiere. Senza di lui chissà se Fermi e noi altri saremmo riusciti a mettere insieme il reattore», così osservarono alcuni membri del "Fermi Team", incontrandosi ad uno dei primi anniversari dello storico evento del 2 dicembre 1942.

Anche se alle 15,25 di quel pomeriggio invernale era stato raggiunto per la prima volta il rilascio controllato dell'energia dalla fissione degli atomi, non vi erano né giornalisti, né macchine da presa, né registratori magnetici a documentare un avvenimento che giustamente è stato chiamato «la data di nascita dell'età atomica».

Naturalmente, tutto era "top secret" in quello che faceva parte di un progetto che aveva il nome in codice di "Metallurgical Laboratory". Ogni persona che entrava od usciva dal ben sorvegliato "racquets court", sotto le tribune occidentali dello Stagg Field, lo stadio dell'Università di Chicago, doveva presentare il suo tesserino, ma non vi era nessun registro di presenze.

Calcolando i capi del progetto, gli scienziati, gli ingegneri, gli operai specializzati e gli assistenti amministrativi, si ritiene che esattamente 50 persone potevano dire di far parte del "Fermi Team".

Uno o due tra gli scienziati può essere stato lontano dal reattore al momento della criticità, cioè quando fu raggiunta la reazione a catena. Vi erano probabilmente altri visitatori nella stanza a quel momento perché, all'interno del progetto segreto, vi era molta eccitazione man mano che l'ora cruciale si stava avvicinando.

C'era anche una donna nel gruppo, Leona Woods, anch'essa specialista in fisica. Dopo essere stata per molti anni Leona Woods Marshall, professore di Fisica alla New York University, ora ha il nome di Leona Woods Marshall Libby, in quanto è vedova del secondo marito Willard Libby. Fu lei a dire, quando la curiosa Laura Fermi, quella sera, le si rivolse con solidarietà femminile per sapere il perché tutti entrando a casa sua, dopo essersi scossa la neve di dosso, si rivolgessero al marito e gli facessero le loro congratulazioni, che nel pomeriggio «Fermi aveva affondato un ammiraglio giapponese».

Com'è noto, l'unico "record" delle presenze dell'avvenimento è rappresentato dal fiasco di Chianti Bertolli che il dr. Eugene P. Wigner, che è stato per tanti anni alla Princeton University e membro del General Advisory Committee della United States Atomic Energy Commission (USAEC), aveva tirato fuori da dietro la schiena e che 27 dei presenti firmarono sulla paglia che lo fasciava. Ora il prezioso fiasco è gelosamente custodito dal dr. Albert Wattenberg.

E il carpentiere? Si tratta di August C. Knuth, detto Gus, che dette direttamente i suoi consigli a Fermi ed a Walter Zinn, l'amico e scienziato che è stato per anni alla testa della Combustion Engineering. Knuth doveva calcolare con esattezza gli effetti delle parti pesanti del reattore sulla struttura di supporto in legno che teneva il reattore stesso al suo livello. Egli vive ancora a Chicago.

Non pochi, invece, sono quelli che non ci sono più (11 persone), a cominciare da Enrico Fermi, portato via da un tumore a soli 53 anni nella sua casa di Chicago il 28 novembre 1954.

Gli 11 scomparsi sono:

Arthur H. COMPTON, Premio Nobel. Era il direttore del Metallurgical Laboratory. È lui che disse al telefono la famosa frase, in un codice improvvisato, a James B. Conant, che era a Harvard: «Il navigatore italiano è sbarcato nel Nuovo Mondo». Alla fine della guerra tornò all'insegnamento e, dopo aver scritto il noto libro *Atomic Quest*, morì in California nel 1962;

Louis A. SLOTIN, che fu trasferito al Laboratory di Los Alamos, nel New Mexico, dove morì nel 1946 per una esposizione alle radiazioni in uno dei pochissimi incidenti fatali che siano mai avvenuti durante l'intera storia dell'era atomica;

Wayne ARNOLD, che era un giovane fisico che stava preparando il suo Ph. D. quando fu chiamato al Metallurgical Laboratory e fu vittima molto giovane di un incidente automobilistico;

Samuel K. ALLISON, che ha diretto per anni l'Enrico Fermi Institute for Nuclear Studies di Chicago;

Alvin C. GRAVES del Los Alamos Scientific Laboratory;

George M. MARONDE, che si era ritirato a Park Forest, nell'Illinois;

George D. MONK JR., che lavorò per anni alla USAEC;

Wilcox P. OVERBECK, che era alla Du Pont de Nemours & Company nell'impianto di Savannah River ad Augusta, Georgia;

Frank H. SPEDDING, che insegnava al Department of Chemistry della Iowa State University ad Ames;

Leo SZILARD, il famoso scienziato e grande amico che con Fermi ebbe il brevetto per la CP-1 in data 17 maggio 1955 (dopo la domanda che era stata presentata allo US Patent Office il 19 dicembre 1944, su consiglio di Einstein, che dal 1939 seguiva il loro lavoro, come scrisse il presidente Franklin Delano Roosevelt quello stesso anno). Dirigeva l'Enrico Fermi Institute for Nuclear Studies a Washington, D.C.

I 39 superstiti sono:

Harold M. AGNEW, per molti anni al Los Alamos Scientific Laboratory;

Herbert L. ANDERSON, già all'Enrico Fermi Institute for Nuclear Studies di Chicago;

Hugh M. BARTON JR., già ai Radiation Laboratories della Phillips Petroleum Company;

Thomas BRILL, che ha lavorato per anni alla Minneapolis Honeywell Company;

R.F. CHRISTY del California Institute of Technology, dove ha operato nel Kellogg Radiation Laboratory;

Richard J. FOX dell'Oak Ridge National Laboratory;

Stewart A. FOX, ritiratosi a Lyons, Illinois;

Darol K. FROMAN del Los Alamos Scientific Laboratory (che non era però in servizio attivo al momento della criticità del reattore);

Carl C. GAMERTSFELDER della General Electric Company, attivo presso gli Hanford Laboratories di Richland, Washington;

Crawford GREENEWALT, poi presidente della Du Pont de Nemours & Company di Wilmington, Delaware;

Norman HILBERRY dell'Argonne National Laboratory (divenne presidente dell'American Nuclear Society - ANS);

David L. HILL della Physical Science Corp. di New York City;

William H. HINCH della ECI Engineering Consultants di Denver, Colorado;

Robert E. JOHNSON dell'Argonne National Laboratory;

W.R. KANNE della General Electric Company a San José, California;

August C. KNUTH, il già ricordato carpentiere;

P.G. KOONTZ di Los Alamos;

Herbert E. KUBITSCHER di Argonne;

Harold V. LICHTENBERGER della Combustion Engineering;

Leona WOODS, specialista in fisica, l'unica donna del gruppo;

Anthony J. MATZ di Argonne;

George MILLER, ora a West Covina, California;

Henry W. NEWSON del Dept. of Physics della Duke University a Durham, North Carolina;

Robert G. NOBLES di Argonne;

Warren E. NYER della Phillips Petroleum Company di Idaho Falls;

Howard J. PARSONS della Hughes Aircraft Company di Fullerton, California;

Gerald S. PAWLICKI di Argonne;

Theodore PETRY di Chicago;

David P. RUDOLPH, per molti anni al Chicago Operations Office della United States Atomic Energy Commission;

Leon SAYVETS della Society of Brothers di Rifton, New York;

Leo SEREN di Elmhurst, Illinois;

William J. STURM dell'Argonne National Laboratory;

Albert WATTENBERG della Columbia University di New York. È l'attuale custode del famoso fiasco di Chianti;

R.J. WATTS di Los Alamos;

George L. WEIL, per molti anni consulente nucleare a Washington D.C.;

Eugene Paul WIGNER, Premio Nobel, della Princeton University nel New Jersey;

Marvin H. WILKENING del New Mexico Institute of Mining & Technology a Socorro, New Mexico;

Volney C. WILSON della General Electric Co. a Schenectady, New York;

Walter H. ZINN, per anni alla guida delle attività nucleari della Combustion Engineering a Windsor, Connecticut.

Lise Meitner

Vie giuste e sbagliate
nel cammino verso la scoperta
dell'energia nucleare



Lise Meitner, fisico, dopo aver collaborato con Hahn, dovette lasciare la Germania nel 1938 per sfuggire alle persecuzioni razziali. Dalla Svezia restò in corrispondenza con i colleghi tedeschi e diede l'apporto determinante, nel 1939, assieme al nipote O. R. Frisch, che lavorava a Copenaghen nell'Istituto del grande Niels Bohr, all'interpretazione degli effetti, in termini di liberazione di energia, del bombardamento del nucleo di uranio con neutroni lenti. Quell'interpretazione che allo stesso Fermi era sfuggita negli anni precedenti. La Meitner rievoca quella vicenda scientifica in questo articolo scritto nel 1962 in occasione del 20° anniversario della Pila CP-1 di Enrico Fermi.

Il 2 dicembre 1942, Enrico Fermi riuscì a portare a criticità, ovvero a mettere in funzione, il primo reattore nucleare.

Non a caso fu Fermi il primo che riuscì a risolvere un problema allora considerato molto complicato, pur essendo in sostanza semplice. Sia nel campo sperimentale che teorico, egli era uno dei fisici più dotati della nostra epoca, sempre pronto ed in grado di affrontare problemi nuovi e difficili con i ragionamenti più semplici e, pur non disponendo di attrezzature adeguate, ad adottare od escogitare metodi sperimentali (sempre nel modo più semplice) con stupefacente capacità di analisi del problema in questione.

Alla base della riuscita di Fermi nella costruzione del primo reattore ci fu naturalmente la scoperta, fatta da Otto Hahn e da Fritz Strassmann, della fissione dell'uranio mediante bombardamento neutronico di uranio naturale. Visto alla luce delle nostre conoscenze attuali, il cammino che condusse a tale scoperta fu incredibilmente lungo e per certi aspetti non giusto. Eppure, anche nel seguire il sentiero tortuoso che alla fine portò alla reale spiegazione degli eventi, il pioniere fu Fermi.

Poco dopo la scoperta del neutrone, ad opera di James Chadwick, e della radioattività artificiale, di Irene Curie e Frédéric Joliot, Fermi riconobbe quanto fossero utili i neutroni a causa della mancanza di carica elettrica, ai fini della penetrazione in nuclei atomici più pesanti e dell'innescare di reazioni nucleari. Con un gruppo di suoi giovani collaboratori, alcuni dei quali erano stati suoi allievi, bombardò tutti gli elementi possibili con i neutroni, riuscendo ad ottenere una serie di nuovi isotopi radioattivi, inclusa una rappresentanza di elementi più pesanti. Parve che i risultati più interessanti si

ottenessero bombardando l'elemento allora ritenuto più pesante, l'uranio. Fermi ne dedusse che ciò conduceva ad elementi con numeri atomici 93 e 94, ossia agli elementi transuranici.

Giudicai quegli esperimenti talmente affascinanti che, appena "Nuovo Cimento" e "Nature" pubblicarono resoconti su di essi, convinsi Otto Hahn a rinnovare la nostra collaborazione diretta, da qualche anno interrotta, allo scopo di studiare quei problemi.

Ecco perché nel 1934, dopo un intervallo di oltre 12 anni, ricominciammo a lavorare insieme, poco dopo anche con la collaborazione particolarmente preziosa di Fritz Strassmann.

Chiaramente, non è che in parte non fossimo influenzati dall'assunto di Fermi, ossia che nel caso dell'uranio si sarebbero formati solo elementi di numero atomico più elevato, ed il comportamento del torio rafforzò la nostra fiducia nella ipotesi seguente: quando bombardammo il torio 232 con neutroni rallentati, trovammo non solo torio 233 beta-emittente con un periodo radioattivo di 26 minuti, il che era già stato osservato da Fermi, ma inoltre, senza possibilità di dubbio, anche protoattinio 233 beta-emittente con un periodo di circa 25 giorni, sulla cui esatta identificazione chimica non avevamo motivo di dubitare. Tuttavia, fui molto sconcertata nello scoprire, nell'uranio, una catena così lunga di disintegrazioni successive beta, ossia cariche nucleari che crescevano continuamente pur restando invariata la massa.

La mia preoccupazione ci indusse ad esaminare attentamente l'uranio sotto bombardamento di neutroni lenti. Fummo in grado di dimostrare chimicamente, senza possibilità di dubbio, la formazione di uranio 239 beta-emittente con un periodo di circa 23 minuti. Scoprimmo che si trattava di un processo di risonanza con energia di 25 ± 10 V.

La dimostrazione dell'emissione di radiazione beta era la prova della formazione dell'elemento 93, che chiamammo "ekarhenium" e che più tardi venne battezzato nettunio. Ma i nostri mezzi di sperimentazione erano troppo deboli perché ci potessimo permettere di fare ricerche sulle sue proprietà chimiche o sul periodo radioattivo. La nostra grande difficoltà stava nel fatto che nel corso di questo tentativo dovevamo esaminare l'intera quantità di uranio bombardato, dal quale era stato precedentemen-

te e meticolosamente estratto l'uranio X, mentre la ricostituzione di uranio X tendeva rapidamente a coprire l'attività dell'uranio 239 (che ha un periodo di 23 minuti).

Le nostre precipitazioni, risultanti dal bombardamento con neutroni veloci, furono condotte in modo da assicurare che l'uranio, il protoattinio ed il torio restassero nel filtrato. Il risultato ci portò a ritenere che stessimo ottenendo qualche conferma della natura transuranica degli elementi precipitati. Questo è il motivo – e sbagliammo – per il quale dapprima non esaminammo mai i filtrati delle nostre precipitazioni, anche durante gli esperimenti con neutroni lenti. Lo facemmo solo dopo che Curie e Savitch ebbero dichiarato, nel loro primo rapporto in materia, di aver scoperto un nuovo isotopo del torio nel corso dei loro esperimenti. Disgraziatamente noi ripetemmo l'esperimento compiuto dagli studiosi francesi solo fino al punto di cercare un isotopo del torio nel nostro filtrato e fummo sicuramente in grado di stabilire che non ve n'era nessuno.

Scrivemmo ad Irene Curie dei nostri risultati negativi ed una postilla al susseguente rapporto pubblicato da Curie e Savitch, che conteneva una descrizione del loro notevole prodotto con periodo di 3,5 ore, confermò le nostre scoperte.

Gli studiosi francesi deducevano dalle loro ricerche, sia pure con molte esitazioni, che il prodotto da 3,5 ore era un elemento transuranico che, tuttavia, entro certi limiti, si comportava in maniera molto simile a quella della terra rara lantanio. Oggi sappiamo che quel prodotto di 3,5 ore era, a quanto pare, un miscuglio di bario e di lantanio. Può essere di qualche interesse il fatto che seppi da Van Hevesy che Irene Curie gli aveva una volta detto, nel 1938, che talora riteneva di avere tutti gli elementi chimici nel suo uranio bombardato.

Quando fu pubblicato il lavoro sul prodotto da 3,5 ore, ormai io avevo lasciato la Germania (nel luglio 1938) e dopo un breve soggiorno in Olanda mi ero stabilita a Stoccolma, dove Manne Siegbahn aveva messo a mia disposizione dei locali per lavorare nel nuovo Istituto.

Hahn e Strassmann, i quali giustamente consideravano significativi e degni di conferma i risultati

francesi, ripeterono gli esperimenti allo scopo di ottenere il prodotto da 3,5 ore, al fine di identificarlo chimicamente. Le loro attente sperimentazioni portarono alla conclusione che non si trattava di una sostanza chimicamente omogenea, bensì di una mistura di radioisotopi beta-attivi, come pure degli isotopi dell'attinio beta-emittenti che ne derivano.

La separazione dei radioisotopi fu ottenuta mediante precipitazioni di bario aggiunto. Tuttavia, quando Hahn e Strassmann tentarono poi di separare questi radioisotopi dal vettore bario, essi scoprirono con loro grande stupore che era impossibile, benché i radioisotopi conosciuti, il torio X e il mesotorio I potessero essere separati dal bario usando gli stessi metodi; perfino, come avevano potuto constatare loro stessi, in infime quantità. La conclusione poteva essere una sola: i "radioisotopi" erano in realtà isotopi del bario. Vorrei chiarire che, data la intensità estremamente bassa della preparazione da identificare, la determinazione di questa prova fu un vero capolavoro di radiochimica, la quale, all'epoca, non avrebbe potuto essere ottenuta da nessun'altro all'infuori di Hahn e di Strassmann.

A Natale del 1938, Hahn mi scrisse raccontando i risultati dei loro ultimi esperimenti, che avevano stupito sia Strassmann che lui stesso. Io in quel periodo mi trovavo a Kungälv, sulla costa occidentale svedese, per trascorrere qualche giorno di vacanza natalizia con O.R. Frisch, che era venuto da Copenaghen.

Molto comprensibilmente la lettera di Hahn rivelava la sua grande eccitazione: egli chiedeva il mio parere, come fisica. Nel leggere la lettera anch'io provai una grande agitazione e meraviglia, ma anche – per dire il vero – una certa perplessità.

Conoscevo troppo bene le grandi capacità e abilità di Hahn e di Strassmann per poter dubitare anche per un secondo della giustezza dei loro inaspettati risultati. Risultati che, e ne resi conto, aprivano un campo scientifico totalmente nuovo e dimostravano quanto eravamo andati fuori strada nel corso nel nostro lavoro precedente.

Quando provai a comunicare a Frisch queste notizie vitali, dovetti prima interromperlo nella discussione di un suo piano per un grande magnete, che voleva a tutti i costi descrivermi. Infine, fummo presi ambedue dal mio problema e ci convinchemmo che ci trovavamo al cospetto di un procedimento

totalmente diverso dalla separazione di un nucleone o di una particella alfa.

A poco a poco il nuovo procedimento diventò comprensibile grazie al modello nucleare della goccia d'acqua di Bohr, secondo il quale la tensione superficiale stabilizza il nucleo in presenza di piccole deformazioni.

Nel corso della discussione arrivammo al quadro seguente: se nel nucleo di uranio a carica elevata (in cui la tensione superficiale è molto diminuita a causa della reciproca repulsione dei protoni) il moto collettivo del nucleo è reso abbastanza violento dal neutrone catturato, il nucleo può essere stirato per tutta la sua lunghezza, formando una specie di strozzatura al centro e finendo per dividersi in due nuclei, più o meno di uguale misura e più leggeri, i quali, per conseguenza della loro reciproca repulsione, poi si distanziano con notevole forza.

Evocando questa immagine, riuscimmo anche a calcolare che l'energia liberata si aggirava attorno ai 200 MeV.

Data la somiglianza tra questo processo e quello della suddivisione delle cellule, lo battezzammo (su suggerimento di Frisch) "fissione" e mettemmo in luce la sua novità adoperando nel titolo del nostro rapporto l'espressione *Un nuovo tipo di reazione nucleare*.

Quel rapporto apparve in condizioni piuttosto anomale, ossia a seguito di conversazioni telefoniche. Frisch era tornato a Copenaghen ed io a Stoccolma, prima che ci fosse possibile mettere a punto i termini definitivi della nostra comunicazione. Ci accordammo anche, al telefono, sulla dimostrabilità della grande energia liberata nel processo di fissione, sia misurando la ionizzazione prodotta da particelle di fissione ad alta energia - proposta da Frisch e poi da lui sviluppata - sia avvalendoci del mio suggerimento di raccogliere i prodotti di fissione mediante il loro rinculo, come poco dopo fu fatta da Joliot.

Il 16 gennaio 1939 inviammo due lettere a "Nature": contenevano la nostra spiegazione sul processo di fissione e la dimostrazione sperimentale di Frisch dell'elevata energia degli atomi più leggeri così formati. Non chiedemmo la pubblicazione urgente e quindi gli articoli uscirono solo l'11 ed il 18

febbraio rispettivamente. Nel frattempo, erano successe varie cose impreviste. Bohr era andato in America ed il 26 gennaio aveva fatto una relazione alla American Physical Society a Washington sul lavoro di Hahn e Strassmann, che intanto era stato pubblicato, e sulla nostra spiegazione del processo, comunicata da Frisch a Bohr dopo il suo ritorno da Kungälv (vale la pena di dire che Bohr espresse subito la sua meraviglia per il fatto che i teorici non avessero previsto il processo).

Alcuni sperimentatori americani abbandonarono rapidamente la riunione, ancora prima che Bohr avesse finito di parlare, per andare subito a dimostrare sperimentalmente l'energia di ionizzazione dei prodotti di fissione prevista secondo le nostre dichiarazioni e subito pubblicarono le loro conclusioni in un quotidiano, ancora prima che Bohr sapesse che tale conferma era stata ottenuta da Frisch.

Niels Bohr lo venne a sapere solo più tardi, da una lettera del figlio, e in seguito, intrattenendosi con giornalisti americani, sostenne fermamente che si doveva riconoscere a Frisch il merito di essere stato il primo ad ottenere una prova.

Pare che durante il corso della conversazione fu sorprendentemente detto che Frisch era il genero di Bohr. La cosa era sbalorditiva se non altro perché Bohr non ha mai avuto una figlia e a quei tempi Frisch era scapolo.

Non voglio concludere questo scritto senza ricordare quanto abbia sperato che la nuova fonte di energia appena scoperta sarebbe stata usata solamente a scopo pacifico.

Durante la guerra, dicevo al mio amico di Stoccolma, Oskar Klein: «Spero che non riusciranno a costruire una bomba atomica, ma temo che invece sarà proprio così».

I miei timori si rivelarono fondati, prova ne è la condizione in cui si trova oggi il mondo!

Comunque nutro ancora la speranza che la conferenza di Pugwash, che si sta svolgendo ora a Cambridge, ed altri tentativi analoghi, porteranno finalmente alla soluzione dei complicatissimi problemi in questione. Questa speranza, certamente, sarebbe stata condivisa da Fermi.

Otto Hahn

Enrico Fermi e la fissione
dell'uranio



Otto Hahn è, con Strassmann, lo scopritore della fissione dell'uranio (1938). In questo articolo, scritto nel 1962 per la commemorazione del 20° anniversario della Pila di Fermi, il Premio Nobel tedesco Hahn colloca nel giusto valore gli esperimenti di Roma del 1934 come l'evento scientifico che diede l'avvio a quell'intenso periodo di sperimentazioni fisiche dalle quali nacque poi la possibilità di sfruttare l'energia da fissione nucleare.

La richiesta di commemorare l'evento del 2 dicembre 1942 mi procura una strana sensazione. In verità nulla mi collega direttamente a quella importante data, visto che i contatti scientifici della Germania con gli altri paesi – prima con l'Inghilterra e poco dopo con l'America – ebbero termine, almeno per quanto riguarda la ricerca nucleare, allo scoppio della seconda guerra mondiale, nel settembre 1939.

I periodici occidentali non pubblicarono più niente che riguardasse la fissione dell'uranio, la quale era stata annunciata nel gennaio 1939. Quando poco dopo fu dimostrato che nella fissione dell'uranio si liberavano dei neutroni in più, il mondo scientifico capì che l'imbrigliamento dell'energia nucleare tramite una "reazione a catena" era entrato a fare parte delle cose possibili. Durante la guerra, ogni processo utilizzabile per indebolire o annientare il nemico ha precedenza sulle possibili utilizzazioni benefiche. Anche allora fu così e si parlò della possibilità di una bomba atomica (*).

Ricordo molte conversazioni che ebbi con il mio amico Fritz Strassmann. Parlavamo dei nostri timori che potesse essere costruita una bomba. Ci consolavamo con il pensiero che sarebbero passati probabilmente altri vent'anni o più prima che l'umanità potesse impadronirsi di una tale arma e che dunque il suo sfruttamento nel corso della guerra attuale era da escludersi.

Allora non avevamo sentore del successo di Enrico Fermi e dei suoi numerosi collaboratori, ed eravamo contenti di poter continuare a pubblicare il nostro lavoro unicamente scientifico per spiegare i molti processi che intervengono durante la scissione del nucleo di uranio. Non ho dunque veramente nessun titolo per commemorare il giorno in cui il reattore di Fermi divenne "critico", ossia il giorno in cui si dimostrò la possibilità di una rea-

(*) A questo riguardo, vedere l'articolo di S. Flugge su "Naturwissenschaften", 27, 402-410 (1939).

zione a catena, cosa che rendeva possibile l'effettivo sfruttamento delle energie assopite nei nuclei atomici.

Premesso ciò, ho delle buone ragioni per ricordare il nome di Enrico Fermi. Nel 1934 Fermi ci fornì il motivo per decidere, io e la mia collega ed amica di molti anni, Lise Meitner, di verificare i suoi esperimenti di irraggiamento dell'uranio con i neutroni. Erano nate delle controversie in merito all'interpretazione degli esperimenti di Fermi. Egli aveva avuto la brillante trovata di usare neutroni privi di carica per provocare trasformazioni nucleari artificiali invece delle particelle alfa, di carica positiva o dei protoni, fino ad allora impiegati.

Con i suoi colleghi, aveva dunque bombardato con neutroni praticamente tutti gli elementi della scala periodica, fino all'uranio, ottenendo trasformazioni nucleari artificiali durante le quali il nucleo, ingrandito dal neutrone, fu tramutato nell'elemento successivo più alto con emissione di radiazione beta.

Dato che nel corso dell'irraggiamento dell'uranio Fermi aveva individuato anche delle specie nucleari artificiali, ne aveva dedotto che si erano formati uno, o anche diversi elementi, collocati al di là dell'uranio, dunque elementi transuranici. Conclusione che fu però osteggiata dal mio ex collega A.V. Grosse, il quale per primo era riuscito a produrre protoattinio puro. Grosse e Agruss non credevano nella presenza di specie atomiche con carica nucleare più alta di 93, ma ritenevano che le specie sulle quali riferiva Fermi fossero forme dell'elemento 91, ovvero isotopi del protoattinio.

Dato che sia Lise Meitner sia io stesso conoscevamo bene le proprietà del protoattinio e dato che vari anni prima avevo scoperto un isotopo beta-emittente del protoattinio, l'uranio Z, ci interessava molto riprodurre gli esperimenti di Enrico Fermi, allo scopo di verificare se avesse ragione Fermi oppure Grosse, cioè se le nuove specie nucleari artificiali corrispondevano agli elementi con un numero atomico maggiore di 92, o all'elemento 91, il protoattinio.

Impiegando l'uranio Z come tracciante con l'elemento 91, Lise Meitner ed io riuscimmo a dimostrare senza possibilità di equivoci che le sostanze di Fermi non erano isotopi del protoattinio e che dunque la supposizione che si trattasse di elementi

posti al di là dell'uranio, ovvero elementi transuranici, erano giustificate (gli elementi torio 90 e attinio 89 erano stati esclusi in precedenza).

La nostra spiegazione del processo fu dunque la seguente: quando l'uranio viene sottoposto al bombardamento di neutroni, i nuclei di uranio assorbono un neutrone e si crea un isotopo artificiale dell'uranio con una massa più grande di un'unità. Perciò un neutrone nel nucleo è convertito in un protone. Emettendo una particella beta l'isotopo dell'uranio si trasforma in un isotopo dell'elemento 93, ossia in un elemento transuranico. Fermi ed i suoi collaboratori scoprirono non solo uno, ma diversi beta-emittenti formatisi simultaneamente, compresi due prodotti di vita media di 10 e 40 secondi rispettivamente. Tutti gli esperimenti con altri elementi del sistema periodico indicarono che doveva trattarsi dunque di isotopi a vita breve dell'uranio, i quali evidentemente poi si trasformavano in ulteriori prodotti artificiali.

Lise Meitner ed io confermammo e svilupparammo gli esperimenti del gruppo Fermi. Fu constatato che si trattava di procedimenti estremamente complessi e, in collaborazione con Fritz Strassmann, elaborammo in un periodo di quattro anni, due serie estensive di elementi transuranici artificiali con cariche nucleari che dovevano andare dall'ecarenio 93 all'ecaplantino 96.

Una serie iniziò con l'isotopo di uranio di vita media di 10 secondi di Fermi e l'altra con il prodotto da 40 secondi. Dato che i prodotti di trasformazione risultanti da questi isotopi erano tutti precipitabili con una soluzione fortemente acida mediante del solfato di idrogeno, gli elementi "transuranici" erano in buon accordo, in quanto alle loro proprietà chimiche, con l'ipotesi dell'ecarenio 93 e con gli omologhi del platino metallico, ecaosmio 94, ecairidio 95 ed ecaplantino 96.

Eppure, tutta la struttura dei nostri elementi "transuranici" dipendeva dall'errore quasi tragico rappresentato dall'interrogativo sollevato dagli isotopi fermiani a vita breve (10 e 40 secondi) dell'uranio. La conclusione cui arrivò Fermi quando svolse il suo irraggiamento neutronico dell'uranio, nel 1934, era giusta e ugualmente giusta sembrava essere la nostra lunga serie di trasformazioni. Fermi non poteva sapere che nel caso dell'uranio sottoposto al bombardamento di neutroni si sviluppa un processo

completamente differente da quello che ha luogo negli elementi più bassi della scala periodica. Furono necessari altri esperimenti – che all'inizio servirono solo ad accrescere la confusione – prima che si arrivasse ad una corretta interpretazione di ciò che accadeva durante gli irraggiamenti dell'uranio.

Mi limiterò ad una descrizione molto breve dei nostri tentativi continuamente sbagliati e del successo finale. Lise Meitner ed io scoprimmo, avvalendoci della tecnica dei traccianti sotto determinate condizioni di irraggiamento, oltre alle sostanze da 10 e 40 secondi ritenute da Fermi essere isotopi dell'uranio, anche un prodotto artificiale di vita media di 23 minuti, che fummo in grado di identificare senza equivoci come un genuino isotopo dell'uranio. Dal momento che emetteva radiazioni beta esso doveva necessariamente trasformarsi nell'elemento 93, ecarenio. Data la debolezza della nostra sorgente di radiazioni, non ci fu possibile, malgrado i nostri sforzi, scoprire questo ecarenio. Comunque in quei giorni la cosa non ci interessava particolarmente, essendo convinti che possedevamo già forme di ecarenio come prodotti di trasformazione degli isotopi fermiani a vita breve dell'uranio.

Anche in questo caso si verificò una ripetizione dell'equivoco quasi tragico, relativo a questi prodotti, per il quale saremmo andati incontro ad una serie di difficoltà, con il prodotto di trasformazione dell'isotopo dell'uranio di vita media di 23 minuti. Separando ripetutamente questo isotopo e quindi arricchendo il suo ignoto prodotto di trasformazione, probabilmente avremmo scoperto l'ecarenio in via di formazione e constatato, con meraviglia, che non possedeva nessuna delle proprietà che eravamo costretti ad attribuirgli basandoci sulle nostre trasformazioni fermiane. McMillan e Abelson scoprirono il vero elemento 93 dopo che fu scoperta la fissione dell'uranio. I suoi scopritori lo chiamarono nettunio.

Ma torniamo al 1938. Il numero di nuclidi artificiali risultati direttamente o indirettamente dall'irraggiamento dell'uranio si accrebbe ancora quando Strassmann ed io, nell'esaminare un prodotto di vita media di tre ore e mezza descritto da Curie e Savitch, riuscimmo a dimostrare l'esistenza di non meno di quattro nuove sostanze, che dovemmo descrivere tutte come isotopi artificiali del radio. A

giudicare dalle loro reazioni chimiche poteva trattarsi solo di radio oppure di bario, aggiunto per farle precipitare.

Naturalmente quest'ultimo fu escluso, sulla base di tutta l'esperienza di fisica nucleare accumulata fino a quel momento.

Ma ora finalmente potevamo eseguire gli esperimenti che portarono alla chiarificazione. Tentammo di separare il nostro "radio" artificiale dalla zavorra inerte di bario per cristallizzazione frazionata, volendo ottenere strati più sottili per studiare la radiazione beta. Il risultato è ben noto: benché ricorressimo alle tecniche più diverse, a noi familiari da tempo, non riuscimmo a separare il "radio" dal bario ed esperimenti con traccianti di isotopi naturali del radio, quali il mesotorio, il torio X ed il nostro "radio" artificiale, finalmente ci portarono forzatamente a concludere che quest'ultimo non era affatto radio, bensì bario.

Nel corso del bombardamento neutronico l'uranio si era scisso in elementi di peso medio, uno dei quali era il bario e l'altro poco dopo si rivelò essere il kripton, ambedue gli elementi essendosi manifestati sotto forma di numerosi isotopi. La prima

spiegazione di questa scissione la fornirono Lise Meitner e O.R. Frisch. A seguito dei loro suggerimenti, oggi il processo viene definito "fissione".

All'inizio di questo breve racconto ho dichiarato che veramente non c'entravo affatto con il 2 dicembre 1942, il giorno in cui il reattore nucleare di Fermi divenne "critico". È la pura verità. Comunque, i miei colleghi Lise Meitner e Fritz Strassmann, ed io stesso, con Fermi avemmo molto da fare. I prodotti di trasformazione a vita breve di Fermi, ritenuti essere isotopi dell'uranio, furono il punto di partenza di quattro anni di lavoro comune. E malgrado il fatto che, una volta chiarificato il vero processo, questi isotopi a vita breve dell'uranio si rivelassero un'illusione inevitabile a quell'epoca, cionondimeno lo sforzo sistematico ci portò finalmente al successo. Non fosse stato per Fermi, forse Hahn, Meitner e Strassmann non si sarebbero mai interessati di uranio.

Perciò oggi la nostra gratitudine a Enrico Fermi è motivata forse non tanto dal suo reattore quanto dai suoi esperimenti nell'utilizzare neutroni privi di carica allo scopo di provocare processi nucleari artificiali.

Samuel K. Allison

Verso la reazione a catena



Samuel Allison, dell' Enrico Fermi Institute for Nuclear Studies dell'Università di Chicago, era tra i collaboratori di Fermi negli anni del "Metallurgical Project" di Chicago. Partecipò, come chimico e come esperto di materiali, alla realizzazione della prima "pila" e degli "esperimenti critici" che la precedettero e descrisse quella sua esperienza in questo articolo pubblicato nel 1962.

Nel corso degli ultimi 20 anni sono apparsi molti resoconti degli eventi che condussero alla prima reazione nucleare a catena. Il primo fra questi fu il famoso *Rapporto Smyth*, nel 1945, ma da allora sono stati messi in circolazione anche il libro del professor Arthur H. Compton, *Atomic Quest* e quello del generale Groves, *Now It Can Be Told* (Ora si può raccontare). Ora è uscito *The New World* (Il nuovo mondo) di R.G. Hewlett e O.E. Anderson Jr., redatto sotto gli auspici del Comitato di consulenza storica della Commissione statunitense per l'Energia Atomica (USAEC), un trattato esauriente e dotto, opera di storici esperti che poterono consultare migliaia di documenti pertinenti. Data dunque l'esistenza di questi documenti redatti con scrupolosità, sarebbe futile voler fornire, in un articolo breve come questo, un resoconto particolareggiato.

Ormai la cosa è di dominio pubblico: la prima reazione a catena autosostenentesi ebbe luogo, in tempi di segretezza bellica, in un assemblaggio di grafite, uranio metallico e ossido di uranio.

La costruzione della "pila" faceva parte del programma del cosiddetto "Metallurgical Project", più tardi finanziato dal Genio dell'Esercito degli Stati Uniti. Si era costituito un gruppo di fisici di primo piano, fra i quali c'era anche Enrico Fermi, che aveva ottenuto aiuti finanziari pressoché illimitati. Le righe che seguono non pretendono assolutamente di essere un resoconto adeguato delle loro attività fino al 2 dicembre 1942, tutt'altro: non sono che osservazioni casuali fatte da un partecipante, comprendenti qualche dettaglio molto modesto che riuscirà però a dare – lo spero – un tocco personale a una relazione peraltro puramente basata sui fatti.

Il primo compito importante che mi fu affidato nell'ambito del programma consisteva nel ripetere, con variazioni minime, alcuni esperimenti eseguiti da Fermi e dal suo gruppo alla Columbia University. Avevamo deciso di adoperare il vecchio ciclotrone di Chicago come sorgente di neutroni per studiare la diffusione dei neutroni nella grafite

con e senza reticolo di uranio incorporato. Altri, più saggi di noi, sapevano che con un vecchio ciclotrone del 1937, quale era il nostro, avremmo perso quasi tutto il nostro tempo per la manutenzione e poco tempo ci sarebbe rimasto per la misurazione della diffusione.

Più o meno inaspettatamente, certo senza nessuna sollecitazione da parte mia, arrivò da Washington un grammo di radio, sotto forma di sorgente mista di neutroni, e ci fu possibile utilizzare il ciclotrone per altri progetti.

Mi recai più volte a New York per mettermi in contatto con il gruppo di Fermi. Si erano riuniti e stavano sperimentando una pila esponenziale sottocritica a polvere di ossido di uranio, pressata in contenitori di alluminio disposti in una matrice di grafite. Il fattore di riproduzione di neutroni, k , che avrebbe dovuto superare l'unità, era 0,88. Fermi considerava ciò non molto incoraggiante, ma continuò con gli stessi materiali, ottenendo qualche progresso. In particolar modo, non era soddisfatto della qualità dell'ossido, e gli avvenimenti successivi provarono che i suoi sospetti erano giustificati. Inoltre, comprimendo fortemente la polvere di ossido si potevano ottenere vantaggi notevoli, e dunque Anderson e Zinn si misero in cerca di una vecchia pressa che servisse allo scopo. Un vantaggio del metodo di pressare l'ossido fino ad ottenerne dei mattoni, sarebbe stato quello di poter fare a meno dei contenitori, che assorbivano parte dei preziosi neutroni. I vantaggi presentati dai mattoni ad alta densità erano talmente evidenti che decisi di impiegarli per la prima "pila", a Chicago.

La polvere di ossido di uranio adoperata alla Columbia e a Chicago veniva estratta da pechblenda canadese, e consisteva soprattutto del residuo di una separazione nella quale era stato massimizzato il recupero del radio. Fermi chiese ad alcuni chimici della Columbia di analizzarla, e la lista di impurità risultò così lunga che ci apparve un buon saggio del sistema periodico. Comunque, il primo quantitativo di ossido spedito alla Columbia aveva una particolarità positiva: si lasciava pressare magnificamente in magnifici, solidi, mattoni. Ma a Chicago il programma incontrò difficoltà, mentre lavoravamo con un quantitativo di ossido canadese speditoci circa un anno dopo. I mattoni erano molto



1

1- Un "reattore subcritico", uno dei tanti realizzati dal gruppo di Fermi alla Columbia University e a Chicago per ricavarne sperimentalmente i dati necessari alla costruzione e all'utilizzazione della pila CP-1

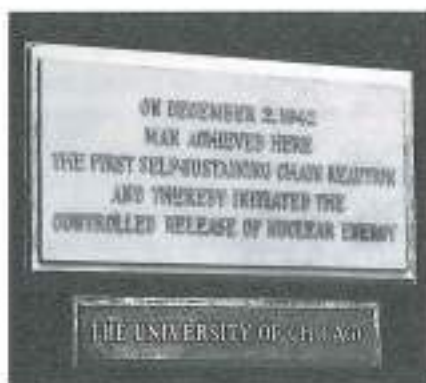
2 - I blocchetti di grafite con visibili gli alloggiamenti per l'uranio, utilizzati per la pila di Chicago

3 - La targa che fu posta sul luogo della prima pila dopo la demolizione dello Stagg Field

4 - L'esterno dello stadio dell'Università di Chicago (Stagg Field), sotto le cui tribune fu costruita la Pila CP-1



2



3



4

meno solidi di quelli della Columbia, e spesso si rompevano al solo toccarli. Erano tanto delicati che dovemmo fare un passo indietro, e racchiuderli in contenitori di alluminio con pareti sottili, tenuti insieme con l'aiuto di nastro adesivo, che a quell'epoca era un prodotto ancora relativamente nuovo.

Le difficoltà di compattamento che avemmo a Chicago diedero luogo a qualche osservazione scherzosa, ma poco lusinghiera, da parte di quelli della Columbia; tuttavia un grosso sforzo, fatto allo scopo di scoprire le cause delle difficoltà mediante il raffronto dei procedimenti, non portò ad alcun risultato.

In quel periodo, mentre a Chicago la compressione dell'ossido era quasi terminata, mi fermai a Princeton durante uno dei miei viaggi sulla costa orientale degli Stati Uniti: fui immediatamente e fermamente aggredito da Wigner e da Creutz.

Wigner era certo che la proporzione di grafite e uranio determinata da Fermi alla Columbia non fosse quella migliore e, in particolare, sosteneva che i mattoni di Fermi erano troppo grandi. Ne avevo portato uno con me da Chicago, e quando Wigner lo vide disse che era troppo grande e che bisognava tagliarlo in due.

Mi lanciai in un resoconto strappalacrime delle difficoltà incontrate durante la compressione a Chicago, di come riuscivamo a malapena a compattare i pezzi e dissi che si sarebbero ridotti in polvere se si fosse tentato di segarli.

Durante il mio monologo non avevo notato che Creutz era sparito silenziosamente, portando con sé il mio campione. Pochi minuti dopo lo riportò, accuratamente segato in due con le due parti intatte. Tornai a casa e tagliammo tutti i nostri preziosi pezzi compressi secondo la tecnica di Wigner.

Quando fu completata la prima pila esponenziale di Chicago e quando fu misurata l'attenuazione del flusso di neutroni mediante fogli di indio piazzati lungo il suo asse nel modo raccomandato, il k risultò essere di 0,91.

Enrico Fermi arrivò dalla Columbia per dare la sua approvazione ufficiale e chiese tutti i dati originali concernenti i fogli di metallo, il loro spessore, la loro posizione, e il loro tasso di conteggio. Naturalmente, glieli fornimmo volentieri. Si rinchiuse in ufficio e dopo poche ore convocò alcuni di noi ad un piccolo seminario. Dopo qualche preliminare,

annunciò che il k era 0,93. Piuttosto sorpreso, dissentii e dissi che era 0,91. Solo un'altra volta mi capitò di vedere Fermi tanto seccato.

Egli si piccava sempre di essere il più cauto di tutti; ora si trovava in una situazione in cui un collaboratore si mostrava più prudente nei confronti del proprio risultato di quanto fosse stato Fermi nel valutarlo. Fece qualche osservazione dura, poi tornò a sorridere, e scoprimmo che io mi ero basato su un vecchio valore del coefficiente di diffusione della grafite, valore che Fermi aveva abbandonato.

Dapprima le notizie di un k superiore trovato a Chicago ebbero un effetto deprimente per quelli della Columbia, come se una nuova soluzione tecnica li avesse superati, loro che al programma avevano dato vita.

Ma presto si giunse alla spiegazione: i canadesi avevano ulteriormente raffinato l'ossido, tra la spedizione alla Columbia e quella a Chicago. Benché fosse impuro, secondo i criteri di giudizio moderni, l'ossido di Chicago era molto migliore di quello della Columbia; soprattutto, era privo di una certa impurità catramosa che bastava a spiegare le più alte qualità di compattamento del materiale della Columbia.

Ormai era stato deciso di concentrare a Chicago tutto lo sforzo diretto alla reazione a catena, ed infatti, poco dopo, Fermi e il suo gruppo giunsero dalla Columbia. Erano diventati professionisti nell'arte della "pila" esponenziale, campo in cui io ero solo un principiante, perciò lasciai il montaggio della pila e della relativa grafite ai nuovi venuti.

Stava diventando sempre più evidente che la difficoltà critica consisteva nell'ottenere, in quantità sufficiente, composti di uranio ad alta purezza e grafite. I nostri primi tentativi di produrre un uranio metallico puro non erano stati molto soddisfacenti.

Data la sua alta efficienza nel generare raggi X mediante bombardamento di elettroni, la Westinghouse Lamp Works ne aveva prodotto un certo numero di grammi per prove come bersaglio per tubi a raggi X.

Sfortunatamente, in occasione di quell'esperimento si scoprì che il punto di fusione del metallo puro era di almeno 600 °C inferiore a quello definito in letteratura.

Il procedimento della Westinghouse comportava una riduzione fotochimica del nitrato di uranile

in una soluzione contenente fluoruro di potassio e zucchero. Il fluoruro (KUF_2) che precipitava veniva fuso e l'uranio recuperato per elettrolisi del sale fuso. Il metallo risultante era il migliore che si potesse ottenere durante quel primo stadio del progetto, ma il procedimento era troppo difficile da applicare su scala sufficiente a produrre le quantità volute.

Un altro metodo, in base al quale l'ossido di uranio veniva ridotto in polvere di uranio mediante riscaldamento con idruro di litio e successiva sintesi in ammassi di metallo, fornì un materiale molto scadente, in parte rivelatosi piroforico quando i contenitori furono aperti all'aria.

Non bastava dunque trovare un procedimento per produrre l'uranio, era altresì necessario sviluppare ed usare tecniche analitiche sufficientemente fini, da controllare la purezza fino alle elevate specifiche richieste.

I vecchi metodi analitici usati per il boro erano inadeguati, il Bureau of Standards ne stava studiando di nuovi. A Princeton stavano sperimentando metodi per la produzione di cadmio.

Decisi di dedicarmi al problema dei materiali puri, e ciò apparve logico, dato che in quel periodo il professor Compton mi chiese di presiedere la sezione chimica del progetto, il quale si stava allargando rapidamente.

La fretta e la confusione erano incredibili. Dagli inglesi avevamo imparato un sistema per produrre l'uranio per riduzione del tetrafluoruro con calcio o magnesio.

Il dr. Alexander Smith rinunciò al pensionamento e ci organizzò un piccolo stabilimento pilota per la produzione del fluoruro dal nitrato.

Fu fatto un gran balzo in avanti quando Compton riuscì a convincere la Mallinckrodt Chemical Company ad adottare, per la purificazione del nitrato di uranio, il metodo rischioso dell'estrazione con etere.

Furono stipulati contratti con varie aziende per la produzione dell'uranio, ma i metodi di analisi all'inizio non furono loro rivelati.

Per alcuni mesi pubblicai un rapporto analitico settimanale che forniva i resoconti dei risultati ottenuti analizzando dei preparati di uranio realizzati a Chicago, al Bureau of Standards, a Princeton, a Saint Louis, ad Ames e in molti altri luoghi, dove

l'analisi e la produzione erano in corso. Ad alcune aziende non piacque che i loro procedimenti analitici fossero resi noti ai loro concorrenti, ma l'urgenza di andare avanti fece accantonare qualsiasi protesta.

Di uguale importanza era la purezza della grafite. Era molto difficile far capire ai grandi produttori di grafite, il cui prodotto era risultato perfettamente soddisfacente per gli elettrodi nell'industria dell'acciaio, perché migliaia di tonnellate dovevano essere preparate secondo gli standard della grafite per terminali di arco da impiegare in analisi spettroscopica.

Nessuno si era mai preoccupato prima della presenza di boro nella grafite; nessuno sapeva quanto boro contenesse la grafite commerciale. Ricordo un estenuante viaggio, con Norman Hilberry, per andare alla Speer Graphite Company, la quale si trovava in una remota plaga della Pennsylvania nord-occidentale.

Questa azienda, piuttosto piccola, aveva accettato di compiere alcuni degli esperimenti da noi richiesti per la produzione di grafite, allo scopo di abbassare il contenuto di boro. Mi ricordo l'eccitazione quando arrivò dalla Speer il primo carico di grafite, nel maggio 1942, e il k salì a 0,995, pur usando ancora dell'uranio non rispondente agli standard.

Naturalmente, sto descrivendo il progetto, in rapida evoluzione, solo per grandi linee. I chimici separavano il plutonio in quantità dell'ordine dei microgrammi dai materiali irradiati nel ciclotrone dell'Università di Washington.

Altri scoprivano quotidianamente nuovi prodotti di fissione, o studiavano gli effetti della dislocazione nella grafite causati dal bombardamento di neutroni veloci. I fisici cercarono e trovarono nuovi emittenti ritardati di neutroni e misurarono la curva di decadimento della somma di tutti i prodotti di fissione. Furono realizzati reticoli contenenti proporzioni variabili di uranio e grafite, per sperimentare l'effetto sul k. I biologi cominciarono a vagliare i danni alla salute provocati da neutroni lenti, in modo da poter progettare lo schermo del reattore. Arrivarono nel Laboratorio voci di una conferenza-fiume tenuta a Berkeley, durante la quale si era discussa la possibilità di una reazione termonucleare, benché non ne fosse stata data notizia ufficiale.

Giornalmente scoppiavano accese discussioni se si dovessero raffreddare i reattori con gas o con

liquidi. Esaminato a posteriori, il programma del Metallurgical Project appare concepito nella maniera più efficiente per arrivare al traguardo: ma a chi si trovava coinvolto nell'agitazione di quei giorni, pareva che ci fossero periodi lunghi in cui non si progrediva e, almeno secondo me, regnava un senso di confusione quasi insostenibile: c'era molta fretta e temevamo che i nostri avversari in guerra fossero molto più avanti di noi. Finalmente, il 2 dicembre 1942, disponemmo a Chicago di quantità sufficienti di grafite, uranio e ossido di uranio, di purezza soddisfacente, tanto che quando l'ultimo carico fu inserito nella struttura del reattore e Fermi ordinò che venisse estratta la barra di controllo, il flusso neutronico salì esponenzialmente con la derivata positiva di secondo tempo che Wigner sosteneva di vedere.

Ma quel giorno si svolgevano molte riunioni, e

solo pochi ebbero il tempo per assistere.

In un'altra stanza il comitato di revisione della Du Pont era in piena seduta e stava ascoltando le dichiarazioni dei membri del progetto. Ad esempio John Marshall, il quale aveva lavorato tanto quanto gli altri per la realizzazione della "pila", si era momentaneamente allontanato per andare allo stabilimento della Metal Hydrides; in molti uffici, poi, si parlava dei progetti per i futuri reattori.

Quel giorno tornai a casa tardi, come al solito, stanco, come al solito, e dato che non mi era permesso dire una sola parola che riguardasse il lavoro a mia moglie e alla mia famiglia, mi buttai a letto per recuperare le forze necessarie per affrontare il caos che mi attendeva, come al solito, il mattino successivo.

Henry DeWolf Smyth

La pubblicazione
del "Rapporto Smyth"



L'autore è l'uomo che ha dato il nome al celebre rapporto con il quale il Governo degli Stati Uniti ha consentito per la prima volta all'opinione pubblica mondiale, nell'agosto 1945, di ricevere una sommaria e ben dosata informazione su quello che era avvenuto negli anni precedenti, dal 1942, nei laboratori segreti del "Manhattan Project" per la costruzione della bomba e per le successive applicazioni energetiche. In questo articolo, scritto nel 1962, l'autore svolge alcune considerazioni politiche ed etiche sui problemi dell'informazione aperti dalla scoperta di Fermi. DeWolf Smyth è stato, tra l'altro, Governatore per gli Stati Uniti nel Consiglio dei Governatori dell'IAEA.

È difficile immaginare una società tanto primitiva, una tirannia a tale punto assoluta da essere totalmente priva di riguardi per l'opinione pubblica. Certamente, il pubblico può essere rappresentato da una ristretta cerchia di individui potenti intorno ad un capo, oppure da una tumultuosa folla di contadini affamati. Comunque, il problema di cosa dire e in che modo dirlo è ineliminabile. Né possono i due aspetti della questione rimanere del tutto distinti.

Nelle città-stato dell'antica Grecia, che spesso consideriamo la culla della democrazia, le informazioni si diffondevano soprattutto per comunicazione orale. I liberi cittadini di Atene (che nel momento della maggiore potenza delle città erano poi solo 50.000 circa) erano sempre informatissimi.

Negli Stati più grandi invece era impossibile raggiungere velocemente tutti i cittadini. Un grosso cambiamento fu apportato dall'invenzione della stampa, rendendo possibile la comunicazione diretta in paesi di dimensioni vastissime. Certo, c'erano scarti di tempo che in seguito furono molto ridotti dalla invenzione del telegrafo e praticamente del tutto eliminati dalle trasmissioni radio. Oggi dal punto di vista tecnico il problema non esiste più: il popolo di un Paese può essere informato in continuazione. La sola questione, dunque, rimane questa: cosa è giusto dire?

Un dogma basilare per tutti coloro che credono nella democrazia, è che la gente deve sapere tutta la verità, il più rapidamente possibile. In una democrazia vigorosa e vitale, la forza del Paese può essere valutata dalle reazioni del popolo alle notizie cattive, oppure a quelle buone. Winston Churchill dimostrò di averlo capito molto bene, con il suo famoso discorso a base di «sangue, sudore e lacrime».

Eppure, indubbiamente, un elemento essenziale al successo di un Governo democratico è il compromesso pragmatico. Quando sono in corso negoziati

delicati, quando si sta combattendo una guerra disperata, ci sarà sempre qualche informazione che deve rimanere segreta.

Molti tipi di informazioni rientrano chiaramente nella classe "mantenere segreto", oppure in quella "rivelare completamente". Ma alla fine della seconda guerra mondiale ci si trovò di fronte ad una massa di notizie di uso prettamente bellico, che però potevano tornare utili anche in tempo di pace: si trattava di decidere. Non solo, ma – e questo è ancora più importante – una rivoluzione nella tecnologia militare come quella determinata dalle armi nucleari poteva certamente influenzare le principali decisioni politiche di interesse sia per gli uomini di governo che per il pubblico in generale.

Prima della fine della seconda guerra mondiale, molti dei responsabili del progetto della bomba atomica negli Stati Uniti riconobbero l'importanza di rilasciare un rapporto su tutto il progetto. In parte, ciò poteva essere ritenuto necessario per giustificare il finanziamento con denaro pubblico del progetto stesso, ma fu considerato anche più importante fornire una chiarificazione dell'enorme cambiamento portato nella politica mondiale dalla scoperta delle bombe atomiche.

Stranamente, la necessità di diramare un rapporto esauriente fu riconosciuta anche dai responsabili della segretezza. Sostennero che il numero di persone che avevano a che fare con la produzione delle bombe era talmente vasto e tanto spettacolari erano le scoperte, che mantenere una totale segretezza sarebbe stato impossibile. Giunsero alla conclusione che una rivelazione ufficiale abbastanza approfondita avrebbe segnato una linea di demarcazione che avrebbe permesso di escludere qualsiasi altra, non ufficiale e non pienamente ponderata, diffusione di notizie.

Secondo me, gli eventi dimostrarono poi che quella decisione fu giusta. Comunque è interessante rilevare che la proposta di una informazione ufficiale ed esauriente venne appoggiata sia da coloro che volevano informare al massimo, sia da coloro che, al contrario, volevano dire il meno possibile.

Senza dubbio, l'opportunità di redigere un rapporto pubblico sulla bomba atomica fu chiara a molti che lavoravano al progetto. Ricordo che ne parlai con Arthur H. Compton e, poco dopo, con il dr. Conant, nell'autunno del 1943, quando mi tro-

vavo al Laboratorio Metallurgico dell'Università di Chicago. Parlammo poi dell'idea con il dr. Bush ed il generale Groves, e nel marzo 1944 mi chiesero di assumermi il compito della preparazione di un rapporto. Durante tutto il periodo della sua redazione, si continuò ad essere incerti sull'opportunità o meno di pubblicare tale documento.

All'inizio fu deciso di redigerlo in modo molto dettagliato. Poi, a mano a mano che si procedeva, furono stabiliti criteri su cosa si doveva o non si doveva includervi. Tali criteri si traducevano in ordini che mi venivano impartiti. La bozza finale fu poi attentamente rivista, paragrafo per paragrafo, dal dr. R.C. Tolman, per accertare che tutto ciò che era stato scritto corrispondesse agli ordini. Furono ottenuti vari altri permessi, come è descritto nel libro *The New World* di Anderson e Hewlett.

La decisione finale sulla diffusione del rapporto fu presa dal presidente Truman, su consiglio del segretario Stimson, del dr. Bush, del generale Groves e di altri, nell'agosto 1945, poco dopo il bombardamento di Hiroshima e di Nagasaki.

Per quanto possa essere lusinghiero, per me, che questo rapporto sia comunemente noto come il *Rapporto Smyth*, la cosa è anche un poco imbarazzante. Durante la fase preparatoria, non fu mai certo che sarebbe comparso il nome di un autore: inoltre, il titolo, piuttosto roboante, della versione ufficiale, era nato come sottotitolo; il titolo avrebbe dovuto essere *Atomic Bombs*. Ma, per ragioni di segretezza, questo titolo semplice ed esplicativo fu omesso durante la preparazione della versione stampata e il progetto di aggiungerlo con un timbro, all'ultimo momento, non fu mai realizzato.

Qualsiasi uomo di coscienza deve a volte riflettere su decisioni alle quali ha contribuito, domandandosi se esse furono giuste o sbagliate.

Naturalmente, a me questo è capitato spesso, durante i sedici anni trascorsi da quando fu pubblicato il mio rapporto, ma mai prima d'ora ho espresso commenti per scritto. Ma dato che quest'anno cade il ventesimo anniversario della prima reazione nucleare a catena, e dato che il caso vuole che negli ultimi mesi siano stati pubblicati quattro libri (1)

(1) *Now It Can Be Told* di Leslie R. GROVES; *Men and Decisions* di Lewis L. STRAUSS; *L'aventure atomique* di Bertrand GOLDSCHMIDT; *The New World* di Richard G. HEWLETT e Oscar E. ANDERSON

che trattano dello sviluppo dell'energia nucleare, ritengo sia questo il momento giusto per dire qualche parola. Prima che venisse varato il progetto per la bomba atomica statunitense, nel 1940, il mondo scientifico conosceva i principi sui quali si basava il progetto. Si sapeva che i neutroni provocavano la fissione dell'uranio, liberando gigantesche quantità di energia. Si sapeva che i neutroni, provocando la fissione, si riproducevano e che, perciò, una reazione moltiplicantesi a catena avrebbe potuto verificarsi, con forza esplosiva. Era noto che l'isotopo 235 dell'uranio era più prontamente fissionabile del più comune isotopo 238.

Si conoscevano i principi di tutti i processi di separazione isotopica, adoperati in seguito. Era anche stato previsto che il plutonio si sarebbe formato per assorbimento di un neutrone da parte dell'U-238 e che presentava capacità di fissione paragonabili a quelle dell'U-235.

Ma si ignorava se queste nozioni avrebbero potuto essere sfruttate per costruire una bomba atomica utilizzabile militarmente. La risposta a questo interrogativo venne dal bombardamento di Hiroshima, il 6 agosto 1945. Fu questa la grande rivelazione: la bomba era fattibile.

Appurato questo fatto, accertata la conoscenza ormai mondiale dei concetti basilari, non vi era più dubbio che qualsiasi grande paese industriale, avvalendosi di talenti competenti in campo scientifico e ingegneristico, potesse riuscire a costruire bombe atomiche. Era solo una questione di tempo.

Perciò la possibilità che le armi atomiche restassero per sempre possesso esclusivo degli Stati Uniti non era semplicemente pensabile. La decisione su cosa si doveva o non si doveva pubblicare era legata alla valutazione di un bilancio tra vantaggi derivanti dalla comprensione, da parte dell'opinione pubblica, delle implicazioni militari, pacifiche e politiche, che presentava l'energia atomica, e il rischio della probabile rapidità con la quale altri paesi avrebbero potuto costruire armi nucleari. Inoltre, l'importanza del fattore rapidità dipendeva dal giudizio politico sull'atteggiamento tenuto da altri paesi nei confronti degli Stati Uniti, nel periodo post-bellico.

Un altro fatto che non fu possibile prendere in debita considerazione nel 1945, è quello della valutazione di quanto fosse opportuno rivelare. Io, comunque, superai ogni dubbio sull'opportunità di

far circolare il rapporto, quando venni a conoscenza delle attività svolte dalle varie spie all'interno del progetto. Anzi, ritengo che sia del tutto impossibile stabilire in che misura lo sviluppo delle armi atomiche in altri paesi sia dipeso dalle informazioni diramate dagli Stati Uniti, e in qual misura dall'attività di spionaggio. È probabile che nessuna delle due fonti abbia avuto un valore risolutivo; ciò che contò fu la conoscenza dei concetti di base e la sicurezza che il successo era a portata di mano. In ogni modo c'era da compiere un grandissimo sforzo ingegneristico e industriale. Ed ora, nel 1962, non pare più molto importante il fatto che negli altri paesi il successo poteva essere stato ritardato di qualche mese, o anche di un anno o due, mantenendo una rigorosa segretezza, di fronte al fatto che esso era comunque raggiungibile. Nessuna informazione ufficiale riguardante la bomba ad idrogeno fu mai diffusa dagli Stati Uniti. Malgrado ciò, l'URSS riuscì a costruirla molto rapidamente.

Non si deve credere, però, che il rapporto ufficiale contenesse le istruzioni per la costruzione dell'Arma. Come esempio dei molti segreti fondamentali non rivelati, posso citare la natura delle barriere per la diffusione gassosa nell'arricchimento dell'uranio a Oak Ridge e l'anomalia dell'assorbimento dello xeno, che rischiò di mandare all'aria il funzionamento dello stabilimento per la produzione di plutonio ad Hanford. Sono informazioni di importanza enorme per chi si propone di costruire armi atomiche, ma di poco conto ai fini della comprensione di tutto lo schema nonché degli scopi e della potenzialità del progetto nel suo insieme.

Per rendersi conto di quali grandi vantaggi potessero derivare agli Stati Uniti e al mondo in generale dalla descrizione esauriente del progetto della bomba atomica, è necessario esaminare i fatti che accaddero poi e valutare in che misura avrebbero potuto essere diversi se si fosse tentato di mantenere la segretezza totale.

Negli anni che seguirono la guerra, il fatto di discutere pubblicamente la bomba atomica e i problemi ad essa connessi diventò un fatto molto comune e generalizzato. La prima questione importante era a carattere interno: il controllo civile dello sviluppo futuro dell'energia nucleare. Le discussioni sfociarono nell'approvazione della legge McMahon, che istituiva una Commissione civile per l'energia

atomica. È difficile stabilire come questi dibattiti avrebbero potuto aver luogo, se fossero state messe a disposizione meno informazioni. Tanto più che, anche in tal modo, forse solo la natura drammatica dei fatti portò la gente ad assorbire tutto quello che era stato reso noto; le decisioni furono così prese in sede legislativa, dopo aperte discussioni, piuttosto che per decisione inappellabile dell'esecutivo. Eppure, io dubito che qualcuno possa pensare oggi che il programma nucleare, anche quello inteso allo sviluppo degli armamenti, avrebbe potuto essere organizzato meglio come progetto del tutto segreto sotto una direzione militare.

Un'altra importante attività di quel periodo fu il tentativo di istituire il controllo internazionale sulle armi atomiche. Il "Piano Baruch" venne bocciato, ma la discussione mondiale che esso provocò si rivelò certamente utile: ebbene, quella discussione non sarebbe stata pensabile senza una base di informazioni sicure.

L'esame di tutte le fasi inerenti alle armi nucleari, gli esperimenti, la ricaduta radioattiva e le implicazioni politiche di queste scoperte è continuato, sulla base di molte informazioni successive rivelate nel corso degli ultimi quindici anni. A uno come me, convinto che la speranza di pace nel mondo moderno dipende da un pubblico informato e attento, la quantità di informazione distribuita sembrò più vicina al minimo indispensabile che al massimo auspicabile.

L'energia nucleare si è ad un certo momento rivelata più cara di quanto si era inizialmente sperato (2), ma essa assicura al mondo una riserva di energia di grande importanza futura. È probabile che gli impianti nucleari apporteranno contributi di rilievo alle risorse energetiche mondiali durante il prossimo decennio. Nella misura in cui il rapporto ufficiale può aver accelerato questi sviluppi, la sua pubblicazione fu certamente un fatto commendevole.

In conclusione, io credo che coloro che furono responsabili della pubblicazione del mio rapporto hanno reso un grande servizio sia agli Stati Uniti che al mondo intero.

(2) Smyth scriveva nel 1962, nel periodo del petrolio a buon mercato (ndr).

Eugene P. Wigner

Riflessioni sul ventesimo
anniversario del CP-1



Eugene Wigner, Premio Nobel per la fisica, ci fornisce in questo articolo del 1962 una serie di considerazioni sulle conseguenze politiche ed economiche della scoperta di Fermi. Il giudizio e le conclusioni non sono solo quelle di un fisico, ma anche e soprattutto di un intellettuale capace di trarre conclusioni più ampie – non senza raffigurarsene i limiti – da un evento che influisce in maniera così determinante sui futuri destini dell'umanità.

All'epoca, ai membri del programma nucleare di Chicago la scoperta di una reazione nucleare a catena non apparve così importante come essa ci appare oggi. Il nostro lavoro teorico, basato su costanti nucleari ottenute sia negli Stati Uniti sia all'estero, ci convinse, già nel dicembre 1941, che la reazione a catena si poteva ottenere con una quantità sufficiente di materiali della giusta purezza. Infatti, la "pila" di Fermi cominciò a funzionare meno di 24 ore dopo l'arrivo dei materiali necessari.

Le nostre convinzioni circa la possibilità di reazioni a catena ottenute con uranio naturale si basavano solo sul nostro lavoro teorico. Ricordo chiaramente una delle nostre riunioni, che avvenne nel giugno 1942, durante la quale il direttore del nostro progetto, il Premio Nobel dr. Arthur H. Compton, che aveva sempre controllato il lavoro da vicino, si congratulò con Fermi per aver dimostrato sperimentalmente la possibilità di una reazione autosostenentesi. La dimostrazione era stata effettuata grazie ad un'altra scoperta di Fermi, quella della "pila esponenziale", che richiede molto meno materiale della pila autosostenentesi.

Si usa anche oggi la pila esponenziale per misurare le proprietà di moltiplicazione dei neutroni; la sua affidabilità venne accertata con sicurezza alla fine dell'aprile 1942. Così avvenne anche per l'affidabilità del lavoro teorico, svolto soprattutto da G. N. Plass e da A. M. Weinberg.

Di conseguenza la reazione a catena dello Stagg Field non sorprese molto i membri del progetto di Chicago. Fu anche detto, per scherzo, a proposito del tanto citato fiasco di Chianti che venne stappato il 2 dicembre, ma che era stato acquistato allo scopo nel marzo, che ci era voluto più acume nel prevedere la scomparsa del Chianti dai negozi che nel ritenere che presto sarebbe servito. Forse oggi diamo troppo peso all'ultimo esperimento dello Stagg Field? Oggi credo di no. Forse impercettibilmente allora, ma più chiaramente in retrospettiva, lo scopo principale e tutto l'atteggiamento verso il

progetto parvero mutare quando la linea tracciata dalla scrivente della camera di ionizzazione cambiò da convessa verso l'alto a convessa verso il basso.

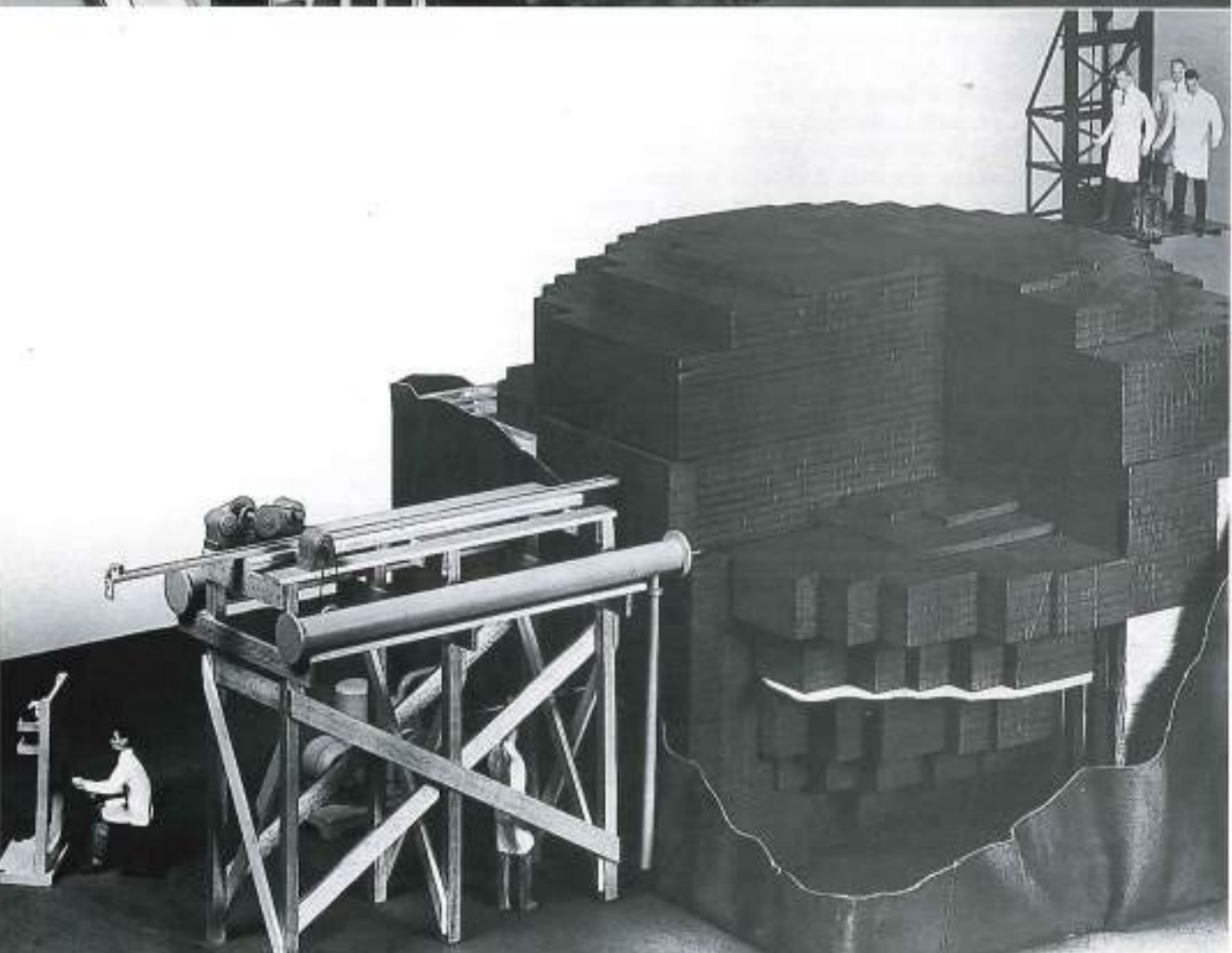
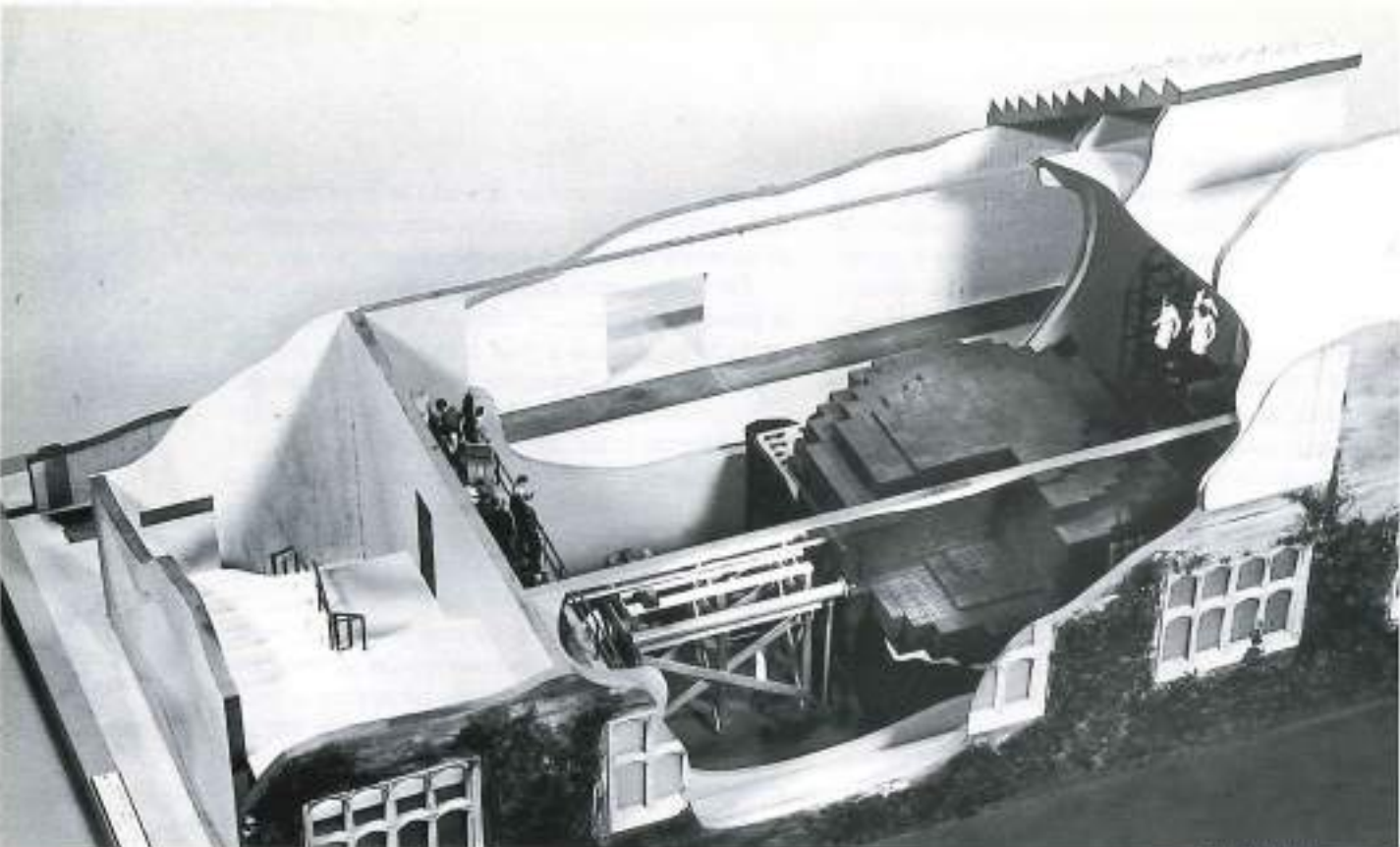
Dei due obiettivi del progetto di Chicago, e cioè la prova della reazione a catena, e la sua realizzazione su larga scala, il primo era stato raggiunto. In seguito, le forze e l'inventiva dei membri del progetto poterono essere incanalate verso il secondo obiettivo, con tutte le sue difficoltà e le sue promesse.

La scoperta della reazione a catena fu paragonata spesso all'arrivo di un navigatore su un nuovo continente. A me sembra che sia più calzante il paragone dell'incontro di due fori scavati uno verso l'altro partendo dai lati opposti di una montagna. Anche questo è un avvenimento che tutti prevedono; tuttavia è un momento grandioso quello in cui viene perforato l'ultimo diaframma ed appare la luce. L'obiettivo cambia all'improvviso: prima si trattava di perforare una montagna, ora c'è da costruire un tunnel.

Mi domando se in quel memorabile 2 dicembre ci rendessimo conto della vastità e della natura dei cambiamenti che l'energia nucleare avrebbe apportato al nostro mondo. Forse sul piano intellettuale ce ne rendemmo conto, ma non completamente. Si era creata un'atmosfera troppo esaltata perché la nuova conoscenza non ci potesse toccare nel subconscio. Inoltre, per almeno due motivi sbagliammo nel valutare gli effetti del nuovo fuoco. Capimmo che ne sarebbero rimasti coinvolti sia il mondo economico sia quello politico.

Dal punto di vista economico, pensammo che il risultato principale sarebbe stato quello di creare un'energia a minor costo. Ma fino ad oggi questo obiettivo ci è sfuggito. Esso comunque ha meno importanza di quanto supponessimo allora. L'effetto principale fu invece piuttosto indiretto, e cioè: un rinnovato concetto del significato della scienza, l'emergere della ricerca scientifica in quanto fattore determinante nell'economia mondiale e in quanto strumento per migliorare il rendimento di quasi ogni tipo di impresa. Ci aspettavamo un effetto del genere, ma la sua portata sorpassò ogni nostra aspettativa. Certo, anche molti altri progetti realizzati durante la guerra contribuirono alla rivalutazione del lavoro scientifico.

Ma l'effetto generale di avere portato ad un riconoscimento dei poteri della scienza sovrasta anche l'importantissimo effetto specifico del pro-



getto uranio: quello di aver stimolato l'impiego dei traccianti nucleari. Quest'ultimo ha contribuito decisamente allo sviluppo di innumerevoli nuovi prodotti.

Il significato di questi due risultati – uno indiretto, di eccezionale importanza, e uno diretto, il quale tuttavia esula dagli scopi principali che si prefigge la scienza nucleare – non deve portarci a trascurare il principale scopo manifesto della energia nucleare: la produzione di energia. È vero che fino ad ora non siamo riusciti a sostituire le fonti convenzionali di energia ed è altresì esatto che il nostro obiettivo si è alquanto spostato: mentre prima si trattava di competere con le vecchie fonti di energia, ora si tratta di assicurare una fonte di energia permanente.

Noi riteniamo che l'energia nucleare durerà più delle nostre attuali fonti di energia, in modo da giustificare la parola "permanente". È un'impresa meritevole, degna dei nostri migliori sforzi, anche se forse non sempre ci sarà possibile sostenere l'attuale ritmo di sviluppo.

In campo politico, le nostre previsioni si sono rivelate anche più errate. Noi speravamo, e in realtà ci contavamo, che la terribile natura degli armamenti nucleari avrebbe avuto un effetto pacificante per i governi di tutti i paesi. Speravamo che gli Stati avrebbero accantonato le aspirazioni conflittuali per sottomettersi alla legge e alla giustizia di una comunità più vasta.

Il nostro obiettivo, la nostra speranza, che pure allora erano sinceri, ora sembrano suoni provenienti da un vecchio disco consumato.

Dobbiamo ammettere che erano frutto di un equivoco sull'effetto della natura degli armamenti nucleari rispetto ai grandi temi della pace e della guerra. Tali temi sono governati, piuttosto, dalle divergenti volontà degli Stati. Da un lato c'è il loro atavico impulso ad allargare i loro confini, dall'altro, il desiderio di creare un'atmosfera felice e pacifica per i loro sudditi e, contemporaneamente, la paura degli effetti di un conflitto nei riguardi delle loro rispettive posizioni.

Gli armamenti nucleari non hanno cambiato di molto il bilanciamento fra il rischio che un conflitto comporta per uno Stato e l'intensità del suo desiderio di espansione e di pace. Non sembra dunque che l'esistenza degli armamenti nucleari abbia convinto tutti i governi ad adottare un atteggiamento reciprocamente più comprensivo, anche per quelle che possono essere le reali aspirazioni dei loro cittadini.

Dobbiamo renderci chiaramente conto e dobbiamo riconoscere che i problemi politici necessitano di un'analisi motivazionale molto più approfondita di quella che ci è stato possibile delineare qui. Abbiamo comunque imparato che tale analisi è necessaria, essendo doveroso basare le decisioni su di essa, piuttosto che su argomenti apparentemente plausibili, ma non sufficientemente approfonditi.



Le tribune dello Stagg Field, stadio dell'Università di Chicago, sotto le quali fu costruita la pila CP-1

Nella pagina accanto, sopra: plastico con spaccato delle tribune dello Stagg Field con all'interno la pila CP-1

Sotto: plastico della pila

Edoardo Amaldi

Vent'anni dalla prima reazione
a catena



In questa relazione, presentata all'Accademia Nazionale dei Lincei il 2 dicembre 1962, in occasione della celebrazione del 20° anniversario della pila di Chicago, Edoardo Amaldi – che di Fermi fu collaboratore negli anni della Scuola di Fisica romana di Via Panisperna, e che nel dopoguerra, ripresi i contatti scientifici con il maestro, fu tra quelli che posero le basi per la rinascita degli studi di fisica nucleare nel nostro Paese – delinea i termini della rivoluzione, non solo tecnologica e industriale, ma anche scientifica e culturale, avviata dagli studi e dalle scoperte di alcuni grandi della fisica, tra cui Enrico Fermi.

Dopo aver ascoltato il collega ed amico Albert Wattenberg esporre, con tanta semplicità e vivezza, la cronaca degli esperimenti che dovevano portare Fermi e collaboratori a realizzare a Chicago, il 2 dicembre 1942, la prima reazione nucleare a catena controllata, appare naturale cercare di inquadrare, sia pure per sommi capi, le conseguenze di quel risultato quali ci appaiono oggi, dopo vent'anni, e di tentare qualche previsione di massima sul loro sviluppo negli anni a venire.

Un primo dato orientativo che, anche se di natura per così dire "contabile", può servire a dare una sia pur grossolana valutazione dell'entità di tali conseguenze, è il numero di reattori nucleari esistenti oggi nel mondo. Secondo una recente pubblicazione, i reattori nucleari in funzione nei diversi paesi del mondo sono, nel 1962, oltre 270; di questi, 120 sono reattori di ricerca, di potenza variabile fra 1 e 250.000 kW, 21 sono reattori per prove di materiali e ricerche speciali, 30 sono reattori sperimentali di potenza, e 49 infine sono prototipi o centrali elettronucleari di potenza, delle quali non poche comprendono più di un reattore.

Mi astengo, per ovvie ragioni, dall'addentrarmi in una descrizione più dettagliata, come in realtà si dovrebbe fare, di questa classificazione dei reattori.

Ma anche le poche grandi categorie che ho ricordato sono sufficienti a far intravedere la molteplicità degli impieghi che può avere un reattore nucleare: esso può essere impiegato direttamente o indirettamente per ricerche di tipo fondamentale nei campi della fisica, della chimica e della biologia, o può essere costruito in vista di ben determinate applicazioni, come la produzione di energia, la diagnostica o la terapia medica, la produzione di mutazioni di interesse agricolo. Nel campo della ricerca fisica fondamentale l'uso dei reattori di ricerca ha contribuito nel passato, contribuisce oggi e segui-

terà a contribuire ancora per molti anni, in modo essenziale, allo sviluppo delle nostre conoscenze sulle proprietà dei corpi solidi e liquidi, sulle reazioni nucleari provocate da neutroni e raggi gamma, sulla spettroscopia nucleare e, attraverso queste ultime, sulla struttura dei nuclei.

Esso, inoltre, ha permesso di affrontare non pochi problemi fondamentali relativi alle proprietà delle particelle elementari, rendendo possibili, per esempio, misure di precisione della interazione fra neutrone ed elettrone, della vita media e dello spettro delle particelle beta emesse nel decadimento del neutrone e il riconoscimento dei dettagli di tale processo con particolare riguardo alle deviazioni dalla conservazione della parità.

Infine si deve ricordare che è mediante un grande reattore che negli Stati Uniti, nel 1956, è stata osservata per la prima volta una reazione nucleare provocata da neutrini, fenomeno questo che ha aperto un nuovo capitolo della fisica delle particelle elementari: la fisica dei neutrini, la cui portata e il cui significato, sul piano delle nostre conoscenze del mondo fisico, è ancora difficile poter chiaramente stimare. È tuttavia probabile che in non molti anni sarà possibile, per esempio, scoprire nuove proprietà di nebulose o ammassi stellari, non già dallo studio della loro luce o delle loro radio-onde, ma dall'osservazione dei neutrini che esse emettono continuamente.

Nel settore della chimica sta nascendo un capitolo completamente nuovo, consistente nello studio delle reazioni chimiche che hanno luogo quando, anziché dalle molecole, si parte da atomi o radicali prodotti per mezzo di irraggiamento.

Qui basti ricordare due esempi attualmente allo studio: la fissazione dell'azoto partendo da azoto atomico e la produzione di polimeri partendo da radicali prodotti per irraggiamento. Sempre nel campo della chimica, l'avvento dei reattori nucleari ha aperto la via all'analisi per attivazione, la quale, fra l'altro, ha dato l'avvio alla cosmochimica, ossia alla nuova scienza che studia la composizione della materia del cosmo.

In biologia i problemi affrontati con la tecnica dei radioisotopi prodotti per mezzo di reattori nucleari, sono molteplici, come è facile riconoscere dalla vastità della corrispondente letteratura. A solo

titolo di esempio, basti ricordare lo studio e la chiarificazione del processo clorofilliano per mezzo del carbonio marcato, lo studio dei virus per mezzo del fosforo marcato, la sintesi degli amminoacidi e lo studio, tutt'ora in corso, del codice genetico servendosi ancora del carbonio marcato.

Questi cenni ad alcuni dei molti problemi di ricerca fondamentale che è stato possibile affrontare e spesso risolvere grazie all'esistenza di reattori nucleari, sono sufficienti, anche se brevissimi, a dare un'idea di quale sia stato, in questi 20 anni, e quale seguirà ad essere in avvenire l'apporto alla nostra cultura, si potrebbe forse dire alla nostra visione dei mondi naturali; tale apporto scaturisce e seguita a scaturire da tutto un complesso di attività di natura scientifica, tecnica e tecnologica la cui prima radice è senza dubbio da ricercare nello storico evento che oggi commemoriamo.

Passando dall'esame dei problemi di ricerca fondamentale, a problemi di carattere applicativo, quello che desta maggiore interesse in tutti i paesi del mondo è la produzione di energia per mezzo di centrali elettronucleari.

Questo argomento ancora assai dibattuto, soprattutto sul piano economico, è giunto, attraverso un primo periodo di eccessivo ottimismo e una successiva fase di più cauta considerazione, ad una stabilizzazione solo in tempi relativamente recenti. Come è noto, questi cambiamenti di visuale furono determinati da circostanze in parte esterne e in parte interne all'ambito dell'energia nucleare.

Il riconoscimento della assai maggior consistenza complessiva, rispetto a quanto si ritenesse o fosse noto prima, delle fonti di energia di tipo tradizionale esistenti nel mondo, provocò un abbassamento del costo del kWh termico, il quale, insieme ad una più realistica valutazione dei costi del kWh elettronucleare, contribuì a fare allontanare nel tempo la data prevista per il raggiungimento della competitività dei costi.

Per ciò che riguarda la situazione attuale, io non posso certo entrare nei dettagli di questo vivo e importante problema e pertanto mi limiterò a riferire le conclusioni di alcuni studi condotti recentemente in sede di Comunità Europea e di Comitato Nazionale per l'Energia Nucleare (CNEN).

Si può oggi dire che non vi è alcun dubbio che il kWh nucleare raggiungerà la competitività con

quello prodotto con metodi tradizionali in un tempo non troppo lungo. La valutazione della data in cui si verificherà questa circostanza non è però facile da stabilire: si può, tuttavia, ragionevolmente prevedere che la parità dei costi sarà raggiunta nel corso del quinquennio 1965-1970 e che nel corso dei decenni 1970-1980 il kWh elettronucleare comincerà ad offrire un utile netto rispetto a quello prodotto con metodi tradizionali (*).

Per ciò che riguarda il contributo dell'energia di origine nucleare alla produzione globale di energia nel quadro della Comunità Europea, si prevede che essa debba intervenire per coprire quella frazione della richiesta che altrimenti dovrebbe essere soddisfatta con combustibili tradizionali a costi più elevati.

Secondo i dati della Comunità Europea, alla fine del 1965 ci saranno, nei paesi della Comunità, 2.000 MW di potenza elettrica installata di origine nucleare, corrispondenti a circa il 3,45% della potenza termoelettrica installata prevista per quell'epoca per la corrispondente rete globale. Nel quinquennio 1965-1970 circa la metà dell'aumento di potenza installata, ossia 7.600 MW, sarà di origine nucleare, e nel decennio 1970-1980 ben due terzi dell'aumento, ossia 32.000 MW, saranno di necessità sopperiti da centrali elettronucleari.

Nei limiti di incertezza di simili valutazioni si può quindi stimare che, attorno al 1980, i paesi della Comunità disporranno di una potenza nucleare installata superiore a 40.000 MW elettrici netti, corrispondenti al 35% della potenza elettrica termica installata prevista per quell'epoca. Di conseguenza, l'energia che sarà prodotta nel 1980 dalle centrali nucleari supererà di oltre il 10% il totale dell'energia elettrica prodotta nel 1960.

Passando dal quadro della Comunità Europea alla situazione del nostro Paese, si può dire che quando nel 1964 saranno entrate in funzione le tre centrali elettronucleari al Garigliano, a Latina e a Trino Vercellese, la potenza elettronucleare installata ammonterà a 550 MW, corrispondenti a circa il 9% della potenza termoelettrica installata in Italia e al 27% della potenza elettronucleare che si prevede sarà installata nel 1965 nel complesso dei paesi della Comunità.

(*) Il prof. Amsaldi è stato un ottimo profeta (ndr).

Se invece della potenza installata, si considera l'energia prodotta in Italia nel 1964, si può prevedere che le tre centrali elettronucleari produrranno complessivamente il 5% dell'energia elettrica globale (75 miliardi di kWh).

È forse bene fare ancora notare che la maggior incidenza dell'energia elettronucleare che si avrà in quegli anni in Italia rispetto alla media della Comunità, è giustificata dalla particolare situazione deficitaria del nostro Paese per ciò che riguarda le fonti tradizionali di energia.

Se si volge lo sguardo verso l'avvenire, credo che si possa dire che nel periodo che va dal 1964 al 1970 sarà necessario costruire nel nostro Paese una seconda generazione di reattori nucleari capaci di fornire una potenza elettrica netta che, secondo diverse stime, oscilla tra 1.000 e 1.500 MW elettrici.

I reattori di questa nuova generazione dovranno essere assai perfezionati rispetto a quelli attualmente in costruzione i quali, al pari degli altri attualmente esistenti o in avanzata costruzione nel mondo, non riescono ancora a risolvere il problema della competitività dei costi.

Se poi si tiene conto che per questa seconda generazione di reattori è più che mai necessario fare in modo che i materiali e il lavoro italiano assorbano la frazione più elevata possibile dei costi capitali, si giunge a riconoscere l'assoluta necessità, ancora per parecchi anni, di investimenti cospicui in ricerche d'ingegneria e tecnologia nucleare, circostanza questa che non può far meraviglia data la giovanissima età di questo settore.

La soluzione più ragionevole sembra consistere nel prevedere una spesa annua per ricerche applicate pari ad un'alta percentuale degli investimenti nella costruzione di centrali.

Altre applicazioni dei reattori, che si collegano in parte con quella della produzione di energia elettrica, e cui posso accennare solo fugacemente, sono la propulsione navale e la produzione di materiali fissili. Quest'ultimo costituisce, notoriamente, uno degli aspetti più nuovi ed interessanti di questa fonte di energia, in quanto si possono costruire reattori che trasformano i materiali cosiddetti fertili, in materiali fissili, i quali possono poi, a loro volta, essere impiegati in altri reattori, provocando, attraverso questo processo, un aumento di un fattore certa-

mente superiore a 100, della consistenza delle fonti di energia nucleare.

Vorrei invece accennare ad un aspetto che spesso viene trascurato di queste applicazioni dell'energia nucleare: si tratta delle conseguenze indirette che lo sviluppo di grandi reattori provoca in campi assai lontani, determinando spesso, anche se in modo non appariscente, una loro rapida evoluzione.

Gli esempi di conseguenze indirette sono moltissimi; qui basti ricordare l'impulso dato all'automazione, ai servomeccanismi e sistemi di controllo che, a causa del loro impiego nei reattori nucleari, sono stati necessariamente portati a livelli di sicurezza senza precedenti; l'impulso alla produzione di metalli sinterizzati (come per esempio il SAP), di materiali ceramici, di carburi ed idruri di metalli poco conosciuti alla tecnologia tradizionale.

Ma non sono soltanto i metodi di progettazione e le tecnologie che dal campo dell'energia nucleare si diffondono, per così dire, in altri settori della tecnica moderna.

L'enorme quantità di lavoro, lo sforzo intellettuale e manuale imposto dalla ricerca della soluzione di problemi di fisica, di matematica applicata, di chimica, d'ingegneria e tecnologia, fatto per la costruzione dei reattori nucleari, determina la formazione di tecnici a tutti i livelli, parte dei quali, attraverso i movimenti del mercato del lavoro, si diffondono verso campi tradizionali, portandovi una metodologia già raffinata e una mentalità aggressiva, che favoriscono l'individuazione di soluzioni nuove di vecchi problemi.

Accanto alle applicazioni dei reattori nucleari di tipo industriale di cui ho parlato ora, ve ne sono altre che vorrei qui ricordare in quanto rivestono un'importanza del tutto particolare per la vita dell'uomo, sia come individuo sia come essere organizzato socialmente.

Nel campo della medicina, ricorderò la cura del cancro della tiroide con lo iodio radioattivo, lo studio della circolazione sanguigna per mezzo del sodio radioattivo e lo studio del metabolismo del glucosio, degli amminoacidi e delle proteine.

In agricoltura, i radioisotopi trovano un vastissimo impiego per lo studio di innumerevoli problemi di fisiologia vegetale, di concimazione e difesa delle piante; a mezzo dell'irraggiamento con neutroni e

raggi gamma vengono provocate mutazioni di interesse agricolo; notevoli successi sono stati ottenuti nel settore degli arachidi, dei grani, degli orzi e dei fruttiferi. Un'altra applicazione assai promettente che è attualmente allo studio, soprattutto negli Stati Uniti, è la desalinizzazione delle acque del mare ottenuta, per distillazione, grazie all'impiego di reattori capaci di produrre - a basso costo - grandi quantità di calore a relativamente bassa temperatura.

È chiaro quale sarebbe l'importanza di una soluzione economicamente accettabile di questo problema, dato che essa aprirebbe la via ad una sostanziale modifica delle condizioni di vita in vaste zone da secoli aride.

Ho voluto ricordare in modo specifico questo esempio non soltanto per la sua attualità, ma anche perché, come è stato messo chiaramente in rilievo in occasione della II Conferenza di Ginevra del 1958, questa è una delle tante applicazioni dell'energia nucleare che possono contribuire ad accelerare l'evoluzione di molti paesi ancora in via di sviluppo.

Accanto a queste straordinarie e innumerevoli applicazioni pacifiche dell'energia nucleare non possiamo tuttavia dimenticare l'esistenza delle armi atomiche, la loro entità numerica, il loro potere distruttivo e il conseguente peso di preoccupazioni e di timori che esse esercitano, si può dire quotidianamente, sulla vita della maggior parte degli uomini coscienti.

Esaminato da questo punto di vista, si può dire che lo sviluppo dell'energia nucleare ha posto l'umanità di fronte a un problema di una gravità eccezionale, si potrebbe dire di fronte a un bivio: da un lato, vi è la via tradizionale della soluzione dei problemi controversi fra paesi o gruppi di paesi con la forza, via che oggi può portare a distruzioni e sofferenze umane senza precedenti; dall'altro, la via, a mio giudizio l'unica via ragionevole, di rendere per sempre impossibile l'impiego di armi nucleari e, al tempo stesso, di sviluppare e cercare di godere noi stessi e contribuire a far godere gli altri di tutti gli aspetti positivi dell'energia nucleare.

Se una simile soluzione fosse adottata, come forse sembra oggi lecito sperare, non solo cesserebbe la paura della guerra atomica che continuamente ci opprime, ma ne deriverebbe un beneficio economico del tutto eccezionale in quanto le poderose

scorte di materiali fissili altamente concentrati, ora immobilizzate, potrebbero essere impiegate per produrre reazioni a catena controllate a scopi pacifici.

Personalmente, posso dire di considerare come un aspetto altamente positivo della nostra attuale vita nazionale, il fatto che il nostro Paese non si sia imbarcato nella costruzione di armi nucleari; e questo non solo per ragioni di principio, ma anche perché, come si vede accadere in altri paesi, l'esistenza di un programma militare di questo tipo risulta di grave danno per lo sviluppo delle applicazioni pacifiche dell'energia nucleare, sia per il suo enorme costo, sia perché esso assorbe un'alta percentuale del personale scientifico e tecnico disponibile.

Siamo così portati ad esaminare le origini di questo periodo della storia della scienza e della tecnica. Siamo così riportati al dicembre 1942 ed anzi, ancora prima, all'epoca fra il 1926 e il 1938, quando Fermi lavorava in Italia ed aveva cominciato a creare qui a Roma una vivace Scuola di fisica moderna.

Fra pochi momenti, tutti potranno vedere alcuni degli strumenti e dei dispositivi sperimentali usati a quell'epoca per quelle ricerche sui neutroni, i cui risultati costituiscono una premessa essenziale dell'esperimento fatto a Chicago nel 1942.

Come tutti potranno vedere, si tratta di piccoli, modesti strumenti che, se confrontati con le tecniche sperimentali attuali, ci appaiono quasi rudimentali. È forse utile ricordare che a quell'epoca, al di fuori di un ristretto ambiente che si interessava a queste ricerche, si sentiva spesso dire che era un peccato che all'Istituto di Fisica dell'Università di Roma si concentrassero tutti gli sforzi su problemi di così poco interesse dal punto di vista applicativo.

E questo giudizio negativo seguì ad affiorare, di quando in quando, pure negli anni successivi ed anche ad alto livello, fino a quando le esplosioni di Hiroshima e Nagasaki non rivelarono a tutto il mondo a qual grado di sviluppo fossero giunti gli studi e le applicazioni delle reazioni nucleari.

Questo tipo di errore non sarà oggi più commesso: tutti oggi hanno presente la rapidità con cui si svolgono questi cicli della storia, attraverso i quali si passa da modeste esperienze di laboratorio e dalla loro discussione critica, a grandiose realizzazioni industriali. Tutti oggi sanno come sia breve il passo

dalla ricerca fondamentale alla ricerca applicata e come sia difficile cercare di fare previsioni di quale sia la via, fra le tante aperte alla curiosità e alla intraprendenza umana, che porterà, nel giro di pochi decenni, a risultati di importanza generale.

La successione delle seguenti date costituisce per noi tutti un ammonimento per il futuro: nel 1911 Rutherford dimostra l'esistenza del nucleo atomico e nel 1919 provoca la prima disintegrazione nucleare; nel 1932 Chadwick scopre il neutrone; negli anni successivi, Fermi e collaboratori contribuiscono, con le loro ricerche all'Istituto di Fisica dell'Università

di Roma, alla scoperta di molte proprietà dei neutroni e del loro modo di interagire con la materia, le quali, insieme alla scoperta della fissione fatta da Hahn e Strassmann nel 1939, dovevano fornire le premesse indispensabili all'esperimento fatto a Chicago il 2 dicembre 1942: a solo trenta anni dal primo indizio della esistenza del nucleo e a dieci anni dalla scoperta del neutrone.

E per ciò che riguarda l'avvenire, purché sia evitata la via delle distruzioni, si può prevedere che in poco più di dieci anni le applicazioni pacifiche dell'energia nucleare avranno determinato modifiche sostanziali nelle condizioni di vita delle popolazioni.

Emilio Segrè

Storia familiare: i Fermi a Caorso



Emilio Segrè, che fu tra i collaboratori di Fermi presso l'Istituto di Fisica dell'Università di Roma di Via Panisperna, è stato insignito nel 1959, assieme a O. Chamberlain, del Premio Nobel per la fisica avendo dimostrato sperimentalmente nel 1955 l'esistenza dell'anti-proton. Questo brano è tratto dal suo volume "Enrico Fermi, fisico. Una biografia scientifica", Zanichelli Editore, Bologna.

Enrico Fermi nacque a Roma il 29 settembre 1901. I Fermi erano originariamente contadini del Piacentino. Venivano da una prospera regione agricola e la storia di Fermi ha una certa somiglianza con quella di Verdi e non soltanto per la vicinanza geografica dei luoghi d'origine, per quanto il musicista fosse assai più vicino del fisico alle origini contadine.

Stefano Fermi, il nonno di Enrico, era stato il primo della sua famiglia a non lavorare la terra colle proprie mani. Con lavoro indefesso riuscì ad elevarsi da contadino alla modesta posizione di fattore o intendente al servizio del duca di Parma e serbò con fierezza, fino a tardissima età, gli argentei bottoni della sua uniforme.

È facile indovinare che Stefano era un accanito lavoratore, frugale e parsimonioso come molti contadini e desideroso di migliorare la sua posizione, intelligente, ma di mentalità ristretta.

Da piccolo, Enrico conobbe questo nonno severo e lo ricordava bene. Nonostante il suo accanito lavoro Stefano rimase relativamente povero.

Quando morì a 87 anni, nel 1905, lasciò in tutto una casa e un po' di terra a Caorso in provincia di Piacenza.

La moglie di Stefano Fermi, Giulia Bergonzi, aveva 12 anni meno di lui essendo nata nel 1830. Era una tipica donna cresciuta in campagna nel 1800 italiano. Aveva una famiglia numerosa, a cui accudiva lavorando tutto il giorno; nel tempo che le restava andava in chiesa e leggeva i Promessi Sposi e un libro di preghiere. Era amatissima da figli e nipoti che allevava religiosamente secondo i precetti della Chiesa e tutti rimasero devoti cattolici salvo Alberto, il padre di Enrico.

I nipotini visitavano la nonna ogni tanto ed ella rimpiangeva che non avessero seguito le sue tradizioni religiose, ma era rispettosissima della decisione e volontà dei genitori dei bimbi. A loro ella dava sempre piccoli regali, per esempio monetine d'argento, che rappresentavano una spesa non indifferente per il suo bilancio di ferrea economia.

Alberto Fermi, il secondo figlio di Stefano e padre di Enrico, nacque a Bergonure in provincia di Piacenza il 3 aprile 1857, sotto il dominio austriaco. Fu allevato nell'austera parsimonia di una famiglia in cui il desiderio di elevazione sociale e quindi la necessità di istruirsi era in conflitto col desiderio di guadagnare il più presto possibile. Non so fino a che livello Alberto abbia seguito scuole regolari. Probabilmente frequentò le scuole secondarie all'Istituto tecnico. Non sembra sia mai andato all'Università. Alberto deve avere avuto qualche impiego anche prima del 1882, anno in cui entrò al servizio della compagnia ferroviaria "Alta Italia".

La madre di Fermi, Ida de Gattis, era nata a Bari il 10 aprile 1871. Non ho notizie sulla sua famiglia. Prima di sposarsi faceva la maestra e continuò ad insegnare anche dopo, per molti anni. Al tempo del loro matrimonio, nel 1898, Alberto Fermi aveva 41 anni e la sposa 27. I Fermi vissero dapprima in un appartamento in Via Gaeta 19, presso la Stazione ferroviaria di Roma. Dopo dieci anni si trasferirono in Via Principe Umberto 133. Enrico nacque in Via Gaeta, ma crebbe in Via Principe Umberto, in uno di quei palazzoni costruiti a Roma subito dopo il 1870.

Durante l'estate del 1919 fu molto contento di tornare (da Pisa, dove dall'autunno 1918 frequentava la Scuola Normale - ndr) in famiglia a Roma e di ritrovare l'amico Enrico Persico. Passò anche un po' di tempo a Caorso, vicino Piacenza, nella casa del nonno. Decise allora di mettere in ordine le sue nozioni di fisica e approfittò delle vacanze per farlo.

Durante l'estate, tra Roma e Caorso riempì di appunti un libriccino rilegato in cuoio, comprato a Vienna, che ancora si conserva tra le carte di Fermi all'Università di Chicago.

Evidentemente lo conservò per tutta la vita e non lo lasciò in Italia al tempo dell'emigrazione. Devo aggiungere che non avevo mai visto questo libretto durante la vita di Fermi. Il libretto è diviso in varie parti ed è scritto a matita quasi senza cancellature come era sua abitudine.

Questo libretto ci dà un'immagine netta della preparazione di Fermi e della sua maturità intellettuale nel 1919, cioè tra i 18 e i 19 anni. Le prime 28 pagine contengono un sommario di dinamica analitica e sono datate da Caorso (Piacenza) il 12 luglio 1919.



Pisa 1920. Enrico Fermi insieme a (da sinistra) Giovanbattista Pacella, Gaetano Gotti e Luigi Fantappiè

La famiglia Fermi a Caorso, dov'era la casa di famiglia dei nonni di Enrico e dove lui amava andare. Al centro (in piedi) Ida De Gattis (madre di Enrico), alla sua destra Maria (sorella di Enrico), alla sua sinistra il fratello Giulio, all'estrema destra Enrico vestito da marina-retto. Seduto all'estrema sinistra c'è Alberto Fermi, padre di Enrico. Gli altri sono zii e zie



In esse svolge la teoria di Hamilton e Jacobi spingendosi molto avanti con estrema concisione ma con pari chiarezza. Non ci sono indicazioni delle fonti: Fermi disse più volte in seguito di aver studiato le lezioni di meccanica celeste di Poincaré e può darsi che ciò sia avvenuto a quel tempo.

Seguono 25 pagine sulla teoria elettronica della materia, che sono datate "Roma, 29 luglio 1919" e contengono un'esposizione, al solito estremamente succinta, dell'argomento. In esse si tratta la teoria di Lorentz, la relatività ristretta, la teoria del corpo nero, il diamagnetismo e il paramagnetismo. Per questa parte c'è anche una bibliografia che contiene molti dei libri fondamentali, in particolare Richardson, *Electron Theory of Matter*, che sappiamo essere stato studiato a fondo da Fermi. Vi sono anche menzionati i primi lavori di Bohr sullo spettro dell'idrogeno, che probabilmente a quel tempo in Italia erano poco conosciuti e considerati.

La parte successiva, 19 pagine, è datata "Roma, 19 agosto 1919" e contiene maggiori particolari sulla teoria del corpo nero, seguendo Planck. Segue una bibliografia estesa sugli elementi radioattivi e loro costanti, tratta dal libro di Rutherford *Radioactive Substances and their Radiations*, in cui non ci sono commenti ed è datata da Caorso il 7 settembre 1919.

Il capitolo successivo, da pagina 81 a 90, è dedicato al teorema di Boltzmann della teoria cinetica dei gas ed è datato "14 settembre 1919". Vi troviamo la solita succinta e chiara esposizione della teoria

con qualche applicazione. Il metodo usato per stabilire il teorema è quello stesso di Boltzmann, di analisi degli urti.

Concludono il libretto, di 102 pagine in tutto, due bibliografie, tratte da un libro di Townsend sulle proprietà elettriche dei gas e sulla fotoelettricità. Gli ultimi appunti sono datati da Roma il 29 settembre 1919 e sono seguiti da un indice.

Il libretto mostra in embrione molte delle caratteristiche dell'autore. La scelta della materia è fatta con una sicurezza di giudizio sorprendente, qualora si pensi all'età dell'autore e al fatto che si tratta essenzialmente di un autodidatta. Un'altra caratteristica interessante è che Fermi, pur non avendo mai paura delle difficoltà matematiche, non le cerca e non s'interessa di questioni matematiche.

Che una teoria sia matematicamente facile o difficile non lo preoccupa; quello che importa è se illumina o meno dei punti essenziali di fisica. Se è facile tanto meglio, ed è molto preferibile; ma se non è, si rassegna alle difficoltà matematiche. Si nota anche una considerevole differenza tra le parti in cui predomina la struttura logica, che sono svolte da mano già maestra, e le parti bibliografiche dove si scorge la mancanza di esperienza di valutazione critica dei molti lavori citati.

Tutto sommato si deve rimanere meravigliati che uno studente del secondo anno di università (Fermi si era iscritto nell'autunno del 1918) abbia composto un libretto didattico che farebbe onore a un maestro di lunga esperienza, sia scientifica sia didattica.

Giorgio Salvini

Enrico Fermi: una guida
in un secolo tormentato



GLI INIZI DEL SECOLO VENTESIMO

È appena trascorso questo ultimo secolo, che contiene tante speranze e tante contraddizioni umane. Facciamone un brevissimo profilo scientifico.

Dopo la guerra franco-tedesca del 1870-71, vennero all'Europa quarantacinque anni senza grandi conflitti. Si soffriva, la società era tormentata e scontenta per le profonde differenze di cultura e di censo: si preparavano gli atroci contrasti sociali esplosi durante la guerra mondiale 1914-1918. Ma le frontiere e le speranze di un futuro migliore erano aperte. E molti uomini di cultura pensavano, nelle università e nei luoghi d'incontro e di studio, di avere in mano le chiavi scientifiche che potevano spiegare la natura del nostro Pianeta e del nostro Universo.

Proprio all'inizio del secolo XX, tra il 1900 ed il 1902, nacquero sei futuri grandi fisici, che ereditarono i risultati di Maxwell, Planck, Einstein, deBroglie, Bohr, e che portarono verso una nuova verità e comprensione la visione della materia che forma la nostra Terra, e poi della luce, delle stelle, d'ogni radiazione in tutto il nostro Universo sensibile. I nomi che qui ricordo sono:

Werner Karl HEISENBERG, 1901-1976

Wolfgang PAULI, 1900-1958

Paul Adrien DIRAC, 1902-1984

Ernest Pascual JORDAN, 1902-1980

Enrico FERMI, 1901-1954

Eugene WIGNER, 1902-1995.

La rivoluzione culturale di cui sto parlando avvenne tra il 1922 ed il 1935.

Andiamo adesso con ordine per giustificare queste mie affermazioni. Mi limiterò alla fisica, anche se ritengo che la rivoluzione abbia investito anche la chimica, la biologia, e tutta la vita sociale.

Nel 1890-1905 c'erano effettivamente per gli umani delle ottime ragioni per essere contenti. Le scienze nuove e solidamente consistenti, quali l'elettricità, il magnetismo, l'ottica, la termodinamica, sembravano aver svelato i fondamentali segreti del nostro mondo. L'affrancamento dalla fatica

umana prima con macchine termiche e poi con generatori e motori elettrici, la natura della luce come onda elettromagnetica e, poco dopo, la larga visione delle onde elettromagnetiche e della radio, che potevano coprire ed affratellare tutto il Pianeta, erano grandi obiettivi ormai raggiunti.

Su queste basi e su questi successi alcuni pur brillanti fisici dell'epoca pensarono che ormai la fisica "era arrivata", cioè era giunta ad un suo successo di spiegazione finale. Essi non sapevano che si era solo all'inizio, e che ci attendeva una fondamentale ed inattesa serie di progressi e sorprese teoriche e sperimentali: quella rivoluzione prodotta dai sei autori ora citati, che tra poco presenteremo.

Vediamo dunque i passi essenziali di questa marcia in avanti.

Negli anni 1900-1915 si progredì intensamente su due linee della fisica, quasi indipendenti e poi confluenti in una coerente rappresentazione.

L'una è l'analisi dello spazio, del tempo, della luce, che portò nel 1905, per merito essenzialmente di Albert Einstein, a quella teoria della relatività speciale che ha tra l'altro fissato per sempre le relazioni tra massa ed energia totale E di ogni particella della materia di massa m : $E = mc^2$ ove si indica con c la velocità della luce nel vuoto [1].

L'altra è la comprensione dell'intima struttura della materia. Le esperienze famose di Rutherford e di altri (1911) avevano chiarito la struttura degli atomi: un nucleo centrale di un diametro di millesimi di milionesimo di centimetro, contornato da una nuvola di elettroni [2].

Questi elettroni erano in numero di uno per l'idrogeno, sino a novantadue per l'atomo più pesante, l'uranio. Le dimensioni di questo piccolo sistema solare col nucleo che ho detto al centro, erano tra dieci e cento milionesimi di centimetro. Insomma, l'atomo appariva come un minuscolo sistema solare essenzialmente vuoto, con al centro un nucleo di enorme densità relativa.

Nel 1913-14, per merito essenziale di Bohr e successivamente di Sommerfeld (i sei fisici citati erano ancora *teen-ager*), venne proposto un nuovo modello di atomo, che tenne conto dei raggiungimenti in meccanica classica e relativistica, e delle recenti scoperte di Planck e di Einstein sull'esistenza di un quanto fondamentale di azione, da allora indicato con h (che ha le dimensioni di un'azione, energia \times tempo) [2]. A questo si aggiunge la rivoluzionaria

e pure rigorosamente vera proposta di deBroglie (1923) che ogni particella elementare è anche un'onda (si propaga con un caratteristico moto ondoso) di lunghezza pari ad h/p , ove per p si intende la quantità di moto della particella [2].

Siamo davanti a risultati di grande valore, anche se parziali e piuttosto enigmatici, perché non avevano ancora una coerente e consistente base teorica. Ma insomma, si chiedevano i fisici, cosa sono queste particelle, elettroni, fotoni, protoni. Sono onde o corpuscoli?

UNA RAPPRESENTAZIONE NUOVA DEL MONDO FISICO

È su queste basi, solide ma concettualmente insufficienti, che si mosse il rinnovamento del pensiero di cui ho detto e che ci portò ad una visione nuova del mondo fisico.

Questo rinnovamento poté apparire dapprima una ricerca critica eccessiva, quasi un tormento gratuito della curiosità umana sempre insoddisfatta; ma esso divenne presto, quando le crepe vennero messe a nudo e le rocce fondamentali del nostro sapere vennero alla luce, un passo avanti enorme, irreversibile, della sapienza umana.

Sì, tenetevi saldi, poiché il volo verso il mondo nuovo era tale che anche scienziati notevoli, giovani ed anziani, fecero fatica ad accettarlo.

Siamo dunque oltre il 1913-15, l'anno del modello atomico, presto superato, di Bohr e Sommerfeld; e siamo oltre la teoria della relatività speciale di Einstein, ormai generalmente accettata. La meditazione scientifica si avvia su due nuove strade, valide anche se non confluenti in una rappresentazione unitaria.

Una è la teoria della relatività generale, che con una nuova analisi delle forze gravitazionali apre o chiude o comunque descrive il nostro Universo. Di questa nuova apertura iniziata da Einstein non parleremo in questa nota. Indichiamo un testo che elegantemente sottolinea il valore fondamentale delle nuove idee [3].

L'altra strada è quella aperta essenzialmente dai sei giovani autori che ho già citato precedentemente (Heisenberg, Pauli, Dirac, Jordan, Fermi, Wigner), ai quali è giusto aggiungere almeno i nomi dei più anziani Max Born (1882-1970) e Erwin Schrödinger

(1887-1961). Ma sia chiaro che alla nuova apertura ha contribuito una falange di giovani fisici, con lavori indimenticabili.

La nuova via può prendere come inizio un lavoro di Heisenberg del 1925. Riporto, perché è esemplare, la presentazione di questo lavoro fatta da Enrico Persico nel suo trattato *Fondamenti della Meccanica Atomica* [2]. Egli dice: «Il nuovo indirizzo fu inaugurato da Heisenberg con una nota pubblicata nel luglio 1925 [4]. L'idea fondamentale in essa espressa è che alcune delle quantità inerenti al modello atomico, quali le coordinate di un elettrone dell'atomo in un dato istante, la durata di una rivoluzione orbitale eccetera non sono mai state direttamente misurate. Dato che i ragionamenti fondati su di esse conducono alle note difficoltà, è lecito dubitare che queste quantità abbiano un effettivo significato fisico e siano in avvenire misurabili. Altre quantità invece (per esempio frequenze emesse, intensità eccetera) sono direttamente osservabili. Perciò, invece di cercare un modello geometrico e meccanico che permetta di ricavare i valori delle quantità osservabili da una struttura non osservabile, è meglio proporsi di collegare direttamente tra loro le quantità osservabili, senza far intervenire nessun modello».

È merito dei ragazzi di Gottinga (così vennero chiamati i giovanissimi fisici dell'università di Gottinga che aprirono le nuove vie) l'aver indicato nel 1922-25 il modo per realizzare questo obiettivo. Infatti le relazioni dirette fra grandezze osservabili non sono in genere esprimibili con i mezzi ordinari dell'algebra e perciò l'idea di Heisenberg fu di utilizzare un algoritmo matematico già noto, che non aveva ancora avuto applicazioni nel campo fisico, e cioè l'algebra delle matrici.

Questo metodo fu ampiamente sviluppato da Heisenberg, Born e Jordan, e condusse a ritrovare i risultati già noti dal modello di Bohr e Sommerfeld, ma anche a nuovi risultati più esattamente concordanti con l'esperienza.

Ma c'è dell'altro in quel miracoloso periodo del 1925-1927.

Dice ancora Persico: «L'intima ragione per cui non è possibile fondare la meccanica atomica su un modello meccanico senza perdere in coerenza logica o in precisione è stata messa in luce in un successivo lavoro di Heisenberg (1927) [5]. In esso si stabilisce il cosiddetto "principio di indeterminazione" che è,

si può dire, la chiave di tutta la meccanica atomica, e che ha permesso di porre la meccanica quantistica nella sua vera luce».

Si possono dare immagini approssimative di questa nuova situazione onda-corpuscolo. Ma rassegniamoci: siamo davanti ad una rappresentazione nuova del mondo microscopico. I quanti elementari che costituiscono la realtà non sono più un insieme di precisi puntolini, come se al di sotto dei nostri sensi ci fosse una realtà così precisa come i pianeti e le stelle nel nostro universo. La meccanica quantistica è una visione nuova, indeterminata nei valori dinamici di ogni singola particella, ma rigorosamente ordinata e descritta nella sua struttura di insieme. Essa è da accettare, se vogliamo spiegare la nostra realtà, l'esistenza dello stato solido, le proprietà dell'elio, la spettroscopia, la natura delle stelle [2] [3] [5].

Siamo dunque davanti ad una realtà fisica che sappiamo sostanzialmente calcolare e prevedere. Ma forse non siamo ancora arrivati ad una comprensione completa della meccanica quantistica, e quindi della struttura del mondo nella sua essenza. Ritengo opportuno riportare qui un pensiero del 1965 del grande Richard Feynman, che mi permetto di condividere anche oggi [3]: «La teoria della relatività è stata ormai, pur faticosamente, capita da molti fisici. Ma penso di poter affermare con sicurezza che nessuno capisce sino in fondo la meccanica quantistica».

UNA ECDISI. GUERRA E PACE

Fatemi fare una pausa, in questa gloriosa vicenda che cambia il nostro mondo scientifico. Penso ad un serpente od un insetto che cambiano il loro assetto con una muta (ecdisi, dal greco uscire), lasciando la vecchia pelle per sempre; ma il serpente è sempre lui, guizzante e splendido. Così noi siamo arrivati ad una evoluzione forte ed inattesa del nostro conoscere, ad un nuovo segno della potenza creatrice e continua del nostro essere uomini.

Ma in questa magnifica fase di muta si inserisce, purtroppo, nel 1914-18, una guerra violenta, barbarica, in cui i giovani francesi, inglesi, tedeschi e italiani si sgozzano nelle trincee con mazze e fucili, e si affogano in mare.

È superiore ad ogni commento questa coinci-

denza di una grande elevazione dell'uomo, insieme ad una sua elementare triviale tragedia. Non posso non dirlo, non ricordare questa duplice natura dell'uomo. Ci dovremo tornare ancora, quando i fisici, nel 1939-45, con Enrico Fermi, saranno, volenti o no, immersi nella più atroce vicenda di questo secolo, la seconda guerra mondiale. Adesso torniamo a noi, parliamo direttamente di Enrico Fermi.

ENRICO FERMI. LE NUOVE STATISTICHE

Enrico Fermi nacque in Roma il 29 settembre del 1901. Egli ci lasciò troppo presto, ed ancora con un lungo programma di lavoro davanti a sé, il 29 novembre 1954.

Enrico Persico, che è stato suo amico dall'età di quattordici anni, dice [6] che egli scoprì presto, con sorpresa, di avere un compagno di scuola che non era soltanto molto bravo, ma che aveva una intelligenza assolutamente diversa da quella dei migliori studenti che egli conosceva: «Io scopersi che eravamo di fronte ad un genio straordinario». Non ricorderò qui le biografie di altri autori, E. Amaldi e F. Rasetti. Esse si ritrovano nel libro *Conoscere Fermi* [6] scritto per questo centenario.

Fermi seguì la Scuola Normale di Pisa e si laureò nel 1922. Durante gli anni dell'Università egli pubblicò i suoi primi lavori su problemi di elettromagnetismo e di relatività generale, due rami della fisica che erano abbastanza coltivati in Italia.

Questa ampia attività non gli impedì di partecipare ai giochi goliardici dell'Università, e di coltivare il suo amore per la montagna, che non lo abbandonerà mai.

Poco dopo la laurea il fisico italiano Orso Mario Corbino, che aveva ben capito il valore di Enrico, lo mandò con due borse di studio a Gottinga, e poi a Leida. A Gottinga c'era una scuola di fisica molto attiva [7], sotto la guida di Max Born, ed egli incontrò là Dirac, Heisenberg, Jordan, Pauli, cioè la squadra che apriva la nuova meccanica quantistica con il metodo delle matrici, già noto ai matematici.

Per ragioni non facili a capirsi, lo scambio di idee tra Fermi e gli altri giovani non fu particolarmente produttivo. Invece il periodo successivo in Leida risultò molto utile, e Fermi venne particolarmente apprezzato da Paul Ehrenfest, un grande

maestro della meccanica statistica. I risultati positivi di questa visita emersero quando egli ritornò in Italia e ricoprì un insegnamento di fisica matematica in Firenze.

Ritornando alla eclissi di cui ho parlato prima, vorrei ribadire che essa produsse enormi conseguenze, e fu veramente irreversibile verso le superate precedenti idee. Essa condusse a nuove scoperte e cancellò i paradossi, indicando nuove vie alla fisica, all'astronomia, alla biologia. Ricordiamo brevemente [7]:

- la struttura dell'idrogeno, dell'elio, degli atomi e delle molecole. Un immenso contributo di chiarezza venne con l'equazione di Schrödinger, che Enrico Fermi e K. Heisenberg immediatamente apprezzarono [2] [5];
- alcuni aspetti delle generali simmetrie che dominano il mondo quantistico [2] [7];
- la distribuzione degli elettroni negli atomi più complessi, ed in particolare nello stato solido (F. Bassani, [6]).

Nell'analisi dei fatti sperimentali emerse nel 1925 un nuovo principio, per merito del ventiquattrenne Wolfgang Pauli. Esso poteva solo spiegarsi con la nuova meccanica, e porta chiarezza alla struttura ed alla architettura di tutti gli atomi. Questo principio, che correttamente si chiama "Principio di esclusione di Pauli", esclude che due elettroni possano occupare la stessa posizione dinamica in uno stesso atomo.

Debbo dire che questo principio era stato formulato quando l'atomo di Bohr-Sommerfeld era ancora accettato: infatti questo modello era sufficiente per un primo enunciato.

Di ritorno a Firenze nel 1926, Fermi balzò su questo principio di Pauli con la sua grande capacità di sintesi, e pubblicò la teoria statistica di un gas di particelle che obbediscano appunto al principio di Pauli. Egli diede le nuove regole statistiche che vanno sotto il nome di "Statistica di Fermi-Dirac". Infatti Dirac scoprì quelle stesse regole un anno dopo Fermi, ma riuscì a collocare queste statistiche e queste particelle nel quadro generale della nuova meccanica quantistica. Queste sono le particelle che in tutta la letteratura scientifica sono chiamate oggi "fermioni".

In quegli anni 1926-27 Fermi era noto solo ad un gruppo ristretto di matematici e fisici, ma la sua

fama crebbe rapidamente dopo che il suo valore venne apprezzato da fisici stranieri (F. Rasetti, *Biografia di Fermi*, [6]).

Nel settembre 1927 si tenne in Como un incontro internazionale di fisica, dedicato alla celebrazione di Alessandro Volta nel centenario della sua morte. L'intero gotha della fisica mondiale era presente, con una dozzina di premi Nobel, e con tutti i riconosciuti maestri della meccanica quantistica.

Arnold Sommerfeld, il grande maestro della scuola di Monaco, dimostrò insieme ai suoi collaboratori che gli strani fenomeni degli elettroni nei metalli possono essere immediatamente interpretati nel quadro della nuova statistica di Fermi-Dirac.

Fu un trionfo per Fermi, e molti italiani si meravigliarono che questo giovane italiano fosse già così ben noto in Germania. Nemo propheta in Patria, potremmo dire. Ma ricordiamo giustamente che, grazie ancora all'interesse del grande Corbino, Fermi venne chiamato nel 1926 a coprire una cattedra di Fisica teorica nella Università di Roma. La prima cattedra in Italia a portare questo nome.

GLI ANNI DI ROMA, ALL'ISTITUTO DI VIA PANISPERNA

Qui esplose la potenza e la rapidità creativa di Enrico Fermi. Negli stessi anni 1933-34 egli scopre per via sperimentale il comportamento dei neutroni lenti e lo spiega, e formula la teoria della disintegrazione beta dei nuclei radioattivi. Una teoria che presto raggiunge il rango di un fenomeno fondamentale del nostro Universo.

Intorno al 1931 Fermi ed il suo gruppo avevano concluso che il futuro della fisica atomica era abbastanza limitato: la teoria poteva spiegare una larga parte dei fenomeni osservati, ed ormai il massimo interesse doveva dedicarsi alla parte interna dell'atomo, il nucleo, che ha la massima densità, ed un diametro centomila volte inferiore,

Occorre dire che molte proprietà del nucleo erano già note. Era chiaro che la maggior parte dei nuclei esistenti in natura sono stabili. Altri sono però radioattivi, cioè spontaneamente si trasformavano in atomi di elementi diversi, cambiando il valore della loro carica elettrica. Il processo ha luogo attraverso l'espulsione di una particella alfa,

cioè un nucleo di elio, o attraverso l'espulsione di un elettrone, la particella beta. Entrambi i fenomeni erano accompagnati dalla emissione di radiazione elettromagnetica, nella forma di raggi gamma.

Tutto questo poteva dimostrare che il nucleo, come l'atomo, è uno stato composto. Era abbastanza ovvio, a quel tempo, pensare che protoni ed elettroni fossero i costituenti essenziali del nucleo. Ma le conoscenze teoriche erano ormai sufficientemente avanzate per rendere molto difficile ammettere la presenza degli elettroni dentro il nucleo.

È a questo punto (febbraio 1932) che James Chadwick rivelò l'esistenza nel nucleo di una nuova particella, cui venne dato il nome di neutrone [2] [7]. Esso aveva carica zero, ed una massa non diversa da quella del protone. Majorana fu forse il primo a suggerire che il nucleo fosse composto solo di neutroni e protoni.

Tutte le difficoltà relative alla presenza di elettroni dentro il nucleo furono dunque cancellate, ma una nuova ne emerse: come era allora possibile l'emissione di elettroni dal nucleo?

Pauli suggerì timidamente l'ipotesi che gli elettroni potessero essere creati nello stesso momento della loro emissione, insieme ad un'altra particella leggera di carica neutra, quella che Fermi più tardi chiamerà neutrino. Quanto al modo in cui questo potesse avvenire, questo era un problema difficile, che Fermi risolse [6] [7] [8].

Infatti, nell'autunno del 1933, Enrico Fermi presentò al suo gruppo di via Panisperna un articolo, da lui scritto nelle prime ore del mattino dei giorni precedenti.

Esso era ormai completo in tutti i dettagli matematici, ed era basato sulle ipotesi assunte da Pauli per l'emissione dei raggi beta. Questa era ormai una teoria che dava spiegazione precisa dei fatti sperimentali. Il fatto fondamentale era l'assunzione che un neutrone si può trasformare in un protone più un elettrone più un neutrino (oggi diciamo antineutrino): $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$, con un nuovo tipo di interazione.

Solo poche teorie della fisica moderna sono state così immediatamente prolifiche di risultati.

La teoria di Fermi è coerente con le nostre conoscenze attuali. Essa copre non soltanto i processi usuali del decadimento beta (la trasformazione di un neutrone in un protone, con la creazione di un elettrone e di un antineutrino), ma anche varie tra-

sformazioni tra particelle instabili che si osservarono in questi anni¹.

La scoperta delle interazioni deboli è forse il più importante contributo di Fermi al progresso teorico del secolo scorso. È sufficiente per una sua immortalità nella storia della fisica. Ma già alcuni mesi dopo egli fece una scoperta, questa volta sperimentale, di uguale importanza: la radioattività prodotta dall'urto dei neutroni sui nuclei, ed il particolare contributo dei neutroni lenti.

Irene Curie e Federico Joliot riuscirono a creare nuclei radioattivi per urto con particelle alfa [3] [7]. Fermi ed il suo gruppo pensarono che i neutroni potevano essere molto più efficienti; infatti, l'assenza di una carica elettrica poteva permettere ai neutroni di superare la barriera elettrica anche nel caso dei nuclei più pesanti.

Con un lavoro intenso, anzi febbrile, i "ragazzi" furono capaci di creare e misurare quaranta nuovi isotopi radioattivi. Ma presto essi osservarono l'innatteso effetto di alcune sostanze, come l'acqua e la paraffina: esse col solo essere intorno e vicine producevano un aumento della radioattività dell'elemento bombardato con neutroni.

In meno di un giorno Fermi trovò la spiegazione di questo fenomeno. Esso è dovuto al rallentamento dei neutroni quando essi urtano contro i nuclei di idrogeno contenuti in quelle sostanze. I neutroni lenti hanno una larga sezione d'urto di risonanza contro molti nuclei atomici. Sappiamo che i neutroni lenti sono una chiave fondamentale per l'accesso all'energia nucleare.

Emersero così numerose nuove scoperte, ed in particolare essi investigarono anche l'elemento uranio. Senza esserne consci, essi produssero la scissione del nucleo uranio. La fissione o scissione fu dimostrata soltanto quattro anni dopo, da Hahn e

¹ Debbo aggiungere che nella sua analisi della teoria di Fermi, il ben noto fisico e storico della fisica A. Pais ([7], p. 417 e seguenti), ricorda che Fermi fu il primo ad usare la seconda quantizzazione di particelle di spin semintero. Egli osserva che la famosa costante di Fermi calcolata nel 1933 aveva già un valore vicino a quello attuale e che la necessità dell'esistenza del bosone W era contenuta nella nota di Fermi. Per quanto riguarda questo ultimo punto, io sono in accordo con quel che Pais ci dice. Ho collaborato con Carlo Rubbia, che ha ricevuto il Premio Nobel per la scoperta dei bosoni pesanti. Durante quegli anni sapevamo che la teoria delle interazioni deboli richiedeva fermamente la presenza dei bosoni intermedi sin dall'inizio, per una effettiva sua consistenza.

Strassmann. Ci si può chiedere se la storia del mondo sarebbe stata diversa, se i ragazzi di via Panisperna avessero scoperto la fissione nel 1935. Questa mancata scoperta della fissione rattristò Fermi. Questo era un ammonimento che la natura ha in sé continue sorprese, e può celare i suoi segreti anche agli uomini migliori. Ritornerò su questo punto.

Fermi continuò a lavorare sui neutroni sino a che lasciò l'Italia. Nel 1935 scrisse un esteso articolo, con Edoardo Amaldi, sulla diffusione dei neutroni ed il loro assorbimento selettivo in vari elementi. Un importante lavoro apparve sulla "Ricerca scientifica" [6] [8] nell'agosto del 1936. In esso Fermi espose la teoria del rallentamento e della diffusione dei neutroni.

Questo lavoro è il punto di partenza per tutti gli studi successivi, e divenne la base dei calcoli riguardanti i moderatori per la costruzione della prima pila atomica nel 1940-42.

L'Istituto di Fisica di Roma portò quindi un notevole contributo allo sviluppo della fisica mondiale. Per questi risultati Fermi ricevette il Premio Nobel nel 1938, ed egli si recò a Stoccolma con la sua famiglia per ricevere il Premio.

NEGLI STATI UNITI. L'ENERGIA NUCLEARE E LA GUERRA

Il viaggio a Stoccolma fu l'occasione per Fermi e la sua famiglia per lasciare l'Italia e sbarcare definitivamente negli Stati Uniti. La moglie di Fermi, la nostra indimenticabile Laura Fermi Capon, era ebrea, e nessuna garanzia di protezione dalle leggi razziali poteva essere ormai creduta. Questo sbarco avvenne il due gennaio 1939 (l'Italia non era ancora in guerra). Fermi era nel mezzo della sua carriera scientifica, e non poteva aspettarsi che sarebbe stato presto coinvolto in eventi storici e scientifici di importanza al di sopra di ogni previsione. Essi discendevano direttamente da quella proprietà dell'uranio che era sfuggita, per occasionali circostanze, ai ragazzi di via Panisperna.

Infatti, come ho già detto, nel 1939 Otto Hahn e Fritz Strassman scoprirono (una scoperta non prevista e di prima, decisiva grandezza) che nei prodotti del bombardamento neutronico dell'uranio c'era del bario. Questo portò rapidamente a stabilire

che il nucleo di uranio poteva scindersi in almeno due grossi frammenti nucleari, con liberazione di neutroni liberi. Questi neutroni a loro volta potevano liberare altri neutroni con la scissione di altri nuclei di uranio. Iniziava così una catena di scissioni che poteva arrivare a tutta una massa di uranio. Dalla massa dell'uranio si liberava dunque una grande energia, che poteva essere utilizzata per usi pacifici, ad esempio per generare elettricità, mettendo in moto turbine con un intenso fluido caldo. Ma si poteva anche arrivare ad un processo istantaneo, con emissione di immense, nuove energie distruggenti: la bomba atomica (E. Amaldi, [6]).

Il passo decisivo verso la realtà di queste nuove drammatiche possibilità fu compiuto con la famosa pila atomica (*Atomic Pile*). Il due dicembre 1942 si raggiunse il nuovo storico obiettivo: il reattore di uranio e grafite divenne attivo, nel senso che alle due e venti del pomeriggio la pila divenne critica, emettendo energia. Essa fu lasciata critica (la reazione a catena si era innescata) per 28 minuti con una potenza di circa mezzo watt, e venne poi spenta per non renderla troppo radioattiva e pericolosa.

Questo esperimento, diretto e controllato da Enrico Fermi in collaborazione con i migliori fisici dell'epoca, tra i quali è particolarmente da ricordare L. Szilard, si può considerare il primo passo fondamentale nello sviluppo dell'energia atomica, ed è ora ricordato con una statua bronzea di H. Moore eretta sul posto dove avvenne (C. Salvetti, [6]).

Enrico Fermi partecipò a tutte le vicende successive, che portarono alla prima bomba atomica sperimentale e seguì, in forma meno diretta, gli studi per la bomba ad idrogeno, una reazione di fusione nucleare di illimitata energia, innescata dalla bomba ad uranio [9] [6].

Le coscienze dei maggiori scienziati e politici furono turbate dalla nuova situazione. In una lettera al presidente dell'Università di Chicago Fermi ([9], p. 162) scrisse: «La nuova arma (la bomba ad idrogeno) è talmente distruttiva che in caso di guerra tra due potenze munite entrambe di bombe atomiche, entrambi i belligeranti, anche il vincitore, si troverebbe con le proprie città distrutte [...] Occorre esaminare con energia e speranza la possibilità di un onesto accordo internazionale».

Nel 1949, riferendosi alla nuova bomba ad idrogeno, Rabi e Fermi scrissero ([9], p. 169): «Il fatto

che la capacità di distruzione di quest'arma sia illimitata, fa sì che la sua stessa esistenza e la conoscenza del modo di costruirla rappresentino un pericolo per l'intera umanità. È ineluttabilmente un male sotto qualsiasi punto di vista. Per queste ragioni ci pare importante che il Presidente degli Stati Uniti dichiari al mondo intero che in base a principi etici fondamentali noi giudichiamo che sia un grave errore procedere allo sviluppo di quest'arma».

Sappiamo invece, a distanza di cinquanta anni, come queste armi si sono sviluppate, sino ai gravissimi pericoli di oggi.

RITORNO ALLA RICERCA FONDAMENTALE

Dopo la caduta della Germania e del Giappone, Enrico Fermi, nell'estate del 1945, decise di tornare a lavorare nel campo della ricerca fondamentale, e passò all'Università di Chicago.

Ritornò quindi alla sua antica vita di ricercatore. Ricordo solo alcune tappe essenziali del suo lavoro successivo, permettendomi di insistere in particolare sul suo interesse per il nostro Paese, e sull'ultimo suo periodo di vita in Varenna.

Il nostro Paese (l'ho visto durante la guerra del 1940-43, alla quale ho preso parte, e nella mia clandestinità intorno a Milano nel 1943-45), era distrutto e disorientato. È degno di memoria il fatto che, pur clandestini e nascosti, i fisici di Milano, ed io ero con loro, mantennero acceso l'interesse per la ricerca, cioè per un futuro migliore. Ma la cosa storicamente degna di memoria fu una ricerca di vari anni sui raggi cosmici dei fisici dell'Università di Roma Conversi, Pancini, Piccioni. Essa permise di concludere che i mesoni μ che accompagnano la radiazione cosmica non erano quei mesoni (i pioni) previsti per spiegare le forze nucleari, ma erano particelle di natura diversa, privi o quasi di forza nucleare [10]. Ricordo che l'esistenza dei pioni era stata prevista dal fisico giapponese Yukawa sin dal 1936. Ma queste particelle, osservate nei raggi cosmici a Roma, i muoni di oggi, fanno parte, insieme agli elettroni e ad altre particelle cariche o neutre, della famiglia dei leptoni, e non delle particelle nucleari o adroniche.

Fermi ed altri teorici colsero immediatamente nel 1947 l'importanza di questa nuova ricerca, ed il suo significato per l'intelligenza delle proprietà

delle forze nucleari. Ho ricordato con qualche orgoglio questa ricerca dei tre romani, anche se non ne ho merito, perché essa è nata sotto i bombardamenti, nascosta a Roma nei sotterranei di un Liceo, ed è un documento della inarrestabile curiosità umana e della voglia di conoscere e di capire.

Quegli anni del dopoguerra di Fermi, dal 1946 al 1954, l'anno della sua morte precoce, sono stati di intensa attività ed includono: la prima analisi sperimentale dei livelli di eccitazione del nucleone (protoni o neutroni); una originale proposta sull'origine della radiazione cosmica; una prima analisi della possibile struttura complessa dei mesoni nucleari [6] [8].

IL NUOVO CONTRIBUTO DI FERMI ALL'ITALIA

Voglio adesso ricordare il contributo che Enrico Fermi ci portò negli anni della ricostruzione del nostro Paese. Egli infiammò le ricerche fisiche italiane con le sue lezioni e conferenze a Milano, a Roma ed in altre città nel 1949, e si interessò ai nostri laboratori di ricerca, che trovò in uno stato più originale e vivace di quanto potesse prevedere. Tanto da volere anche per l'Italia, come per i paesi europei vincitori dell'ultima guerra, nuovi laboratori con nuovi acceleratori di particelle. Debbo ricordare che già nel 1948 Fermi [11] aveva espresso dagli Stati Uniti questo auspicio per il nostro Paese.

Infatti egli scrisse il 27 aprile al nostro Primo Ministro De Gasperi. Si augurava che si stanziassero 500 milioni di Lire a favore della ricerca scientifica italiana. Questo avrebbe permesso di aprire nuovi laboratori sperimentali con macchine nuove. La somma poi stanziata fu la metà, duecentocinquanta milioni, e questo permetteva di continuare le ricerche, ma non di aprire decisamente nuove iniziative.

Ma ormai la ricerca italiana voleva andare a nuovi sviluppi, oltre i raggi cosmici. Fu un fenomeno di unità scientifica, di cui il nostro Paese può essere ancora orgoglioso. Il nostro ricordo va in particolare ai fisici Edoardo Amaldi e Gilberto Bernardini, come certo a molti altri.

Questi due fisici riuscirono nel 1952 a concentrare i fondi disponibili per le università italiane su un problema nazionale unitario, anziché disperderli su



ENRICO FERMI e JAMES FRANCK nel 1931 a Berlino.

Franck, valente fisico tedesco, aveva lavorato Göttinga, che verso la fine degli anni 20 era diventata il centro della matematica mondiale. Sulla scia di lunga tradizione di interdisciplinarietà tra fisica e matematica vi avevano operato, per la fisica teorica, Max Born, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli e Paul Wigner (tutti futuri premi Nobel) e, per la fisica sperimentale, due eccezionali ricercatori, Robert Pohl e lo stesso Franck. L'ascesa al potere di Hitler ebbe come risultato un esodo senza precedenti che portò al depauperamento della scienza in Germania. Molti accademici non protestarono contro le discriminazioni razziali ritenendo che il regime non sarebbe durato a lungo. Molti altri, soprattutto tra gli ebrei, compresero che cosa si preparava e abbandonarono subito la Germania: tra loro, Max Born e i premi Nobel Fritz Haber e James Franck, che sarebbero stati seguiti a breve scadenza dai non ebrei Hermann Weyl, Richard Courant e Erwin Schrödinger.

Nel 1945 Franck fu incaricato da Arthur Compton di presiedere un Comitato formato da vari scienziati del Metallurgical Laboratory di Chicago con il compito di affrontare l'interrogativo sull'utilità di un impiego militare degli ordigni nucleari. Il Rapporto Franck, prodotto dal Comitato, oltre a sottolineare il rischio di affrettare la corsa agli armamenti, metteva chiaramente in evidenza come la possibilità di generare «un'ondata di orrore e di repulsione» nel resto del mondo potesse superare «i vantaggi militari e il risparmio di vite americane ottenuti con l'impiego senza preavviso di bombe atomiche contro il Giappone».

una distribuzione di varie ricerche interessanti, ma minori. Nacquero così i Laboratori Nazionali del Sincrotrone, da farsi presto e bene in una sede da scegliere, con concorsi ed offerte dalle altre regioni italiane. La scelta della sede cadde su Frascati, nel Lazio, e gli studi e la preparazione della nuova macchina iniziarono nel 1953.

Come è noto, la macchina con i servizi ed i laboratori accesi entrò in funzione e cominciò le ricerche nel 1958, in un tempo che fu considerato molto breve, se si pensa che nel 1953 la nuova sede era ancora un campo di barbatelle, senza elettricità e senza condutture elettriche [12].

Ma se questa prontezza fu possibile, ciò non si deve solo all'ispirazione che veniva dai nostri maestri maggiori, ma anche al consiglio pratico di Enrico Fermi, che esaminò e discusse i nostri progetti. Su questo voglio essere un poco esplicito. Come testimone diretto ed interessato, ed anche per assolvere ad un debito di gratitudine [13].

Nelle indimenticabili giornate di Varenna a Villa Monastero (R. Ricci, [6]) ci furono due conferenze o rendiconti scientifici sui lavori per l'elettrosincrotrone: una di Enrico Persico, sulla teoria dell'iniezione degli elettroni nella camera a vuoto (la cosiddetta ciambella) del sincrotrone e l'altra, presentata da chi scrive, sul progetto generale della macchina, e sullo stato di avanzamento [13].

Siamo nel 1954 a Varenna, nel mese di agosto, e queste due sono le ultime conferenze alle quali Enrico Fermi assistette in vita. Non stava bene, e poco dopo rientrò negli Stati Uniti.

Ebbene, Enrico Fermi ascoltò con attenzione le due lezioni, e fece i commenti e le raccomandazioni per i quali gli siamo debitori. Il gruppo sincrotrone era presente a Varenna con Persico, i giovani ricercatori Carlo Bernardini e Fernando Amman, e con me.

Analizzando la relazione di Persico, e ricapitolando i numeri da lui riportati, egli concluse che, per il buon successo della nostra macchina, era importantissimo fare una iniezione alla massima possibile energia degli elettroni prodotti dall'acceleratore elettrostatico. In quel momento eravamo ancora incerti sull'acceleratore più conveniente, ed il suo giudizio ed il suo consiglio furono essenziali.

Ma questo non fu il solo consiglio fermiano, in quelle magiche giornate. Infatti il concorso tra molte città italiane con la scelta di Frascati, aveva

lasciato un residuo disponibile per la ricerca con nuove iniziative. In questa situazione erano, in particolare, le province di Pisa e Lucca. Fermi esaminò insieme a Gilberto Bernardini ed a Marcello Conversi il problema, ed infine il suo consiglio fu preciso: «Fate con questi fondi un calcolatore elettronico».

Iniziò anche da questo suggerimento, che Conversi colse al volo, l'attività dei fisici italiani sui calcolatori elettronici, a Pisa, poi a Bologna ed a Roma. È da dire che Enrico Fermi usciva in quei mesi da un periodo intenso di pensiero sulla funzione e sul futuro dei calcolatori elettronici applicati alla ricerca scientifica (G. Gallavotti, M. Falcioni, A. Vulpiani, [6]). Nel 1951-54 egli ebbe lunghe discussioni con J. Pasta ed S. Ulam e, sulla base di precisi risultati ottenuti, giunse alla conclusione che sarebbe stato interessante fare lavorare il computer su problemi specifici riguardanti l'andamento asintotico - quindi per tempi lunghi - di alcuni pur semplici sistemi fisici non lineari. Questa conclusione è oggi pienamente confermata, e da quel primo lavoro nacque una linea di ricerche che non mancò di sorprese. Diciamo che questa linea ha aperto la strada alla nascita di concetti fertili e nuovi sulla teoria della complessità e del caos.

GLI ULTIMI GIORNI DI FERMI

Quando Fermi tornò d'urgenza negli Stati Uniti, si vide che la sua salute era ormai compromessa. Riporto qui quanto Emilio Segrè scrisse nel suo libro su Enrico Fermi [9]: «Trovai Fermi all'ospedale assistito dalla moglie Laura. Era perfettamente conscio della situazione e ne parlava con socratica serenità. L'impressione della visita, per il dolore della realtà presente e per la stupefacente forza d'animo con cui Fermi l'affrontava, mi sconvolse, e quando dopo qualche tempo uscii dalla stanza quasi venni meno».

Fermi sopravvisse all'operazione solo alcune settimane. Tornò a casa e cercò di rivedere le note di un suo corso di fisica nucleare. All'ospedale mi aveva detto che questa sarebbe stata l'ultima sua fatica se le forze gli fossero bastate, ed infatti l'ultimo suo scritto è una pagina dell'indice di questo corso. Morì il 29 novembre 1954, due mesi dopo il suo cinquantaquattresimo compleanno. Voglio

ricordare un commento di Eugene Wigner: «La sua accettazione della morte è stata ad un livello eroico» («*On an heroic scale was his acceptance of death*») ([7], p. 485).

L'IMPORTANZA DELLA RICERCA SCIENTIFICA. UN MONITO AI PAESI CIVILI

Enrico Fermi può essere considerato tra i più grandi e devoti allievi della natura in questo ultimo nostro secolo. Il nostro mondo, nella terra e nei cieli, appare nel suo carattere più profondo a pochi geni e persone fortunate, per ricordarci la sua originalità, che ci può prendere di sorpresa, rovesciando ogni nostra intuizione, teorica o matematica.

Enrico Fermi, grande teorico e grande sperimentale, ebbe una diretta esperienza di ciò che non ancora sappiamo e non sappiamo di non sapere; sicché solo l'osservazione sperimentale può portarci al nuovo, rivelarci la verità.

Voglio ricordare tre esempi della sua vita, e proverò ad estrarre da essi un ammonimento per noi.

Il primo è il sorprendente risultato che apparve a Fermi sperimentale nel 1933, mentre studiava in laboratorio il comportamento dei neutroni sui nuclei. Egli capì dall'esperienza il loro inatteso comportamento, dovuto al loro rallentamento in acqua e in altre sostanze idrogenate ed all'aumento della sezione d'urto a bassa energia.

Il secondo caso è la scissione dell'uranio in due o tre frammenti pesanti. Essa apparve di sorpresa, pur dopo anni di misura a Roma ed in altre sedi, e soltanto nel 1939, per merito di Hahn e Strassmann.

Queste due "sorprese" sperimentali, come già abbiamo detto, sono alla base della nostra civiltà e della nostra energia nucleare, e del buono e del cattivo che ne è seguito.

La terza è una sorpresa di alto interesse teorico e matematico. Contrariamente a quello che Fermi pensò per lungo tempo, un sistema non lineare non è sempre e semplicemente ergodico. In altri termini, esso ricorda le sue condizioni iniziali anche per lungo tempo o per sempre. La dimostrazione empirica

che venne data da Fermi e dai suoi collaboratori, insieme ad un teorema fondamentale di Kolmogorov, sono di grande importanza, ed hanno aperto la via al nostro moderno concetto di caos ([6], p. 279 e segg.).

Provo a dedurre qualcosa da questi ed altri esempi. Io credo che noi siamo ancora lontani dall'aver capito il nostro Universo e le sue leggi generali. Siamo anzi all'inizio della nostra conoscenza scientifica. Questo può anche essere dimostrato dal fatto che in questi ultimi trent'anni abbiamo avuto continue splendide sorprese dalle nostre più avanzate ricerche sperimentali: ad esempio la rottura delle simmetrie che consideravamo più solide; la scoperta della particella J/ψ ad una massa inattesa; i nuovi superconduttori; i buchi neri estesi; le esplosioni di raggi gamma di grande energia; la ancora incerta origine del nostro Universo, dopo alcuni anni di eccessiva sicurezza.

La chiave per capire di più è continuare senza pregiudizi la ricerca sperimentale, che resta insostituibile, accompagnata da meditazione matematica e teorica. Fortunato quel paese che mantiene la curiosità di sapere ed interroga la natura, preparando coraggiosamente gli strumenti per questo necessari. Siamo agli inizi del sapere.

La curiosità degli uomini in tutte le direzioni non si fermerà. Sicché dobbiamo difendere la ricerca scientifica fondamentale ed i laboratori per essa, perché anche in essi è il nostro futuro. Tutta la vita di Fermi ce lo ha dimostrato.

Mi permetto di insistere su questo punto, anche perché temo che in questi ultimi anni sia un po' calata la sensibilità e la disponibilità del nostro Paese verso la ricerca fondamentale.

Senza dimenticare naturalmente di analizzare il buono ed il cattivo che può essere contenuto nell'impiego pratico delle scoperte, combattendo contro l'uso di esse per fini non benefici e civili, e per ogni abuso o prevaricazione, studiando le vie per la pace tra i popoli e gli uomini, curando le scuole per educare le nuove generazioni all'altruismo e all'importanza del conoscere.

È un compito difficile ed immenso. Ma è qualcosa per cui vale la pena di esistere.

Note bibliografiche

- [1] C. MOLLER, *The Theory of Relativity*, Oxford, Clarendon Press, 1952
A. EINSTEIN, *The Meaning of Relativity*, Princeton University Press, 1950
- [2] E. PERSICO, *Fondamenti della Meccanica Atomica*, Zanichelli Editore, Bologna, 1940
- [3] BRIAN GREENE, *L'Universo elegante*, Giulio Einaudi Editore, 2001. È chiaro che siamo davanti ad una nuova appassionata ricerca. Essa rimase latente negli anni 1940-60. Ma è ormai in movimento, e cerca una sintesi tra le forze gravitazionali e le forze nucleari ed elettrodeboli. Una sintesi ancora lontana. Ma questo secolo porterà sicuramente a delle oggi imprevedibili novità culturali.
- [4] W. HEISENBERG, "Z. S. f. Phys", 879, 1925
- [5] W. HEISENBERG, *The Physical Principles of the Quantum Theory*, Dover Publications, 1930
- [6] C. BERNARDINI e L. BONOLIS, *Conoscere Fermi*, Editrice Compositori, Bologna, 2001. Sono riportate venti note di protagonisti della fisica italiana che illustrano l'attività scientifica di Fermi.
- [7] A. PAIS, *Inward Bound*, Clarendon Press, Oxford, 1986
- [8] *Lavori di Enrico Fermi. Note e Memorie* (collected Papers), Accademia Nazionale dei Lincei e University of Chicago Press. Due volumi (per circa 2000 pagine) commentati dai suoi allievi e contemporanei
- [9] E. SEGRÈ, *Enrico Fermi, fisico*, Editore Zanichelli, Bologna, 1971, II edizione, 1987
- [10] M. CONVERSI, E. PANCINI, O. PICCIONI, "Phys. Rev.", n. 71, pag. 209, 1947
- [11] M. DE MARIA, *Un fisico da Via Panisperna all'America*, "Le Scienze", Collana "I grandi della Scienza", Anno II, numero 8, 1999
- [12] A cura di G. SALVINI, *L'elettroscintillazione ed i Laboratori di Frascati*, articolo scritto dagli autori della realizzazione, Zanichelli Editore, Bologna, 1962
- [13] Fascicolo dedicato alla memoria di Enrico Fermi, Supplemento al volume secondo, serie decima del "Nuovo Cimento", n. 1, 1955

Renato Angelo Ricci

Enrico Fermi e lo sviluppo
della Fisica Nucleare



Estratto dal discorso tenuto all'Accademia dei Lincei il 10 dicembre 1992 in occasione del cinquantesimo anniversario della pila di Chicago.

Già al tempo di Fermi, la data reale della fisica nucleare e del suo sviluppo come disciplina autonoma, veniva situata nei primi anni trenta con la scoperta del neutrone (Chadwick, 1932), nel senso che il "problema nucleare" veniva posto chiaramente in uno schema fondamentale: protoni + neutroni + interazione forte (Heisenberg, Majorana, Wigner). Ciò era conseguenza dello sviluppo moderno della fisica atomica, aperto da Rutherford nel 1911, e delle scoperte succedute a quella del "nucleo atomico": la quantizzazione della carica nucleare (Moseley, 1913) e della massa (Aston, 1919) e la prima reazione nucleare indotta $\alpha + {}^{14}\text{N} \rightarrow \text{p} + {}^{12}\text{O}$ (Rutherford, 1919). Lo si riassume con una breve affermazione: «Tutti i nuclei sono costituiti da Z protoni e da N neutroni. Il numero di massa A è dato da $A = Z + N$...».

Sto citando l'inizio del famoso corso di Fisica Nucleare (*Nuclear Physics*) basato sulle lezioni tenute da Enrico Fermi all'Università di Chicago nel 1949 [1]. È questo il primo passo per cercare di comprendere le caratteristiche generali del legame nucleare da una parte e quelle della struttura nucleare dall'altra. Peraltro, l'investigazione del nucleo procedeva da allora su due fronti e cioè la ricerca dell'interazione basica nucleone-nucleone che doveva evolversi verso la fisica delle particelle elementari, e il tentativo di comprendere il nucleo per sé stesso, nelle sue proprietà sia statiche che dinamiche, così come esse vengono rivelate dalle reazioni e dai decadimenti nucleari. Questa separazione era già "in fieri" negli anni 50, anche se le lezioni di Fermi includono ancora tutte insieme le forze nucleari, i neutroni, i raggi cosmici, i mesoni, le proprietà e i decadimenti nucleari.

Vorrei citare, per essere più chiaro, Victor Weisskopf riguardo all'evoluzione delle due branche derivanti dalla divisione della fisica nucleare originale. La citazione è derivata dalle parole iniziali del *Retiring Presidential Address* dell'American Physical Society (APS, 1959) dedicato a problemi di struttura nucleare: «Soltanto sei anni e mezzo fa si tenne a Glasgow una conferenza internazionale di fisica nucleare, nella quale la fisica delle particelle elementari e la fisica della struttura nucleare vennero entrambe discusse. Fu l'ultima in cui questi due campi della fisica venivano considerati come un testo unico. Da allora, la fisica nucleare si è divisa in

due rami definiti, l'uno riguardante la natura e le proprietà delle particelle elementari e l'altro interessato alle strutture e alla dinamica dei nuclei atomici. Oggi questi due campi sono lontani uno dall'altro come lo sono la fisica dello stato solido e la fisica nucleare. È questo un fatto spiacevole dal punto di vista degli specialisti, poiché entrambi sono ricchi dei più entusiasmanti sviluppi».

E, a proposito del comportamento nucleare: «Fortunatamente, e in qualche modo sorprendentemente, il nucleo può essere descritto piuttosto accuratamente come un sistema di neutroni e protoni ben definiti con certe forze fra di essi. L'origine mesonica di queste forze non sembra giocare un ruolo essenziale nel comportamento nucleare a più bassa energia. Quindi la teoria della struttura nucleare non è interessata alla teoria della forza nucleare in se stessa; si assume per certo che tale forza esista e le sue proprietà sono accettate come un fatto sperimentale».

Da allora un insieme considerevole di proprietà nucleari può ancora essere descritto da un sistema di nucleoni interagenti con forze di scambio (portate dai mesoni), come al tempo di Fermi.

Naturalmente, oggi si devono considerare anche gradi di libertà subnucleonici e in un moderno libro di fisica nucleare si può trovare una frase di questo tipo: «... il nucleo è, ovviamente, composto sostanzialmente da neutroni e protoni (nucleoni) che hanno dimensioni di circa 1 fm e in moto rispetto ad un campo medio prodotto da tutti i nucleoni ... è inoltre noto che i nucleoni sono costituiti di quark che interagiscono scambiando gluoni è quindi scopo ultimo della fisica nucleare collegare i fenomeni noti del mezzo nucleare ai quark e ai gluoni e alla corrispondente teoria, la cromodinamica quantistica (QCD)» [2].

Siamo, pertanto, di nuovo di fronte agli aspetti basilari da cui siamo partiti. Dopo sessanta anni noi estendiamo la nostra comprensione delle proprietà nucleari includendo in modo specifico i gradi di libertà subnucleonici e trattiamo l'ambiente nucleare come strumento essenziale per verificare questioni primarie fondamentali.

In effetti noi sappiamo che l'adrone più leggero, il pione, ha un ruolo preminente non solo nella fisica delle particelle elementari ma anche nella fisica nucleare.

Ciò ha aperto la via per l'esplorazione di piccole strutture nel nucleo usando particelle sonda con grandi impulsi per ottenere lunghezze d'onda abbastanza piccole da "vedere" tali correlazioni intime. Vi sono attualmente almeno tre tipi di sonde possibili, dovute agli

acceleratori moderni: innanzi tutto elettroni di alta energia poichè essi interagiscono con i nuclei tramite la forza elettrica ben conosciuta e perchè essi agiscono come particelle puntiformi senza possedere essi stessi una struttura interna.

In secondo luogo si possono usare collisioni protone-antiprotone a moderate energie per investigare sia le teorie di scambio mesonico che i modelli a quark poichè essi sono sistemi interagenti come nucleoni tramite scambio di mesoni ma composti l'uno di tre quark e l'altro di tre antiquark interagenti per scambio di gluoni.

In terzo luogo, vi è oggi la possibilità di impiantare in un nucleo una impurità barionica sostituendo ad un singolo nucleone una particella strana (iperone Σ e Λ) per formare un ipernucleo e provare, tramite il comportamento nucleare noto, l'interazione nucleone-iperone. Infine, gli aspetti più spettacolari delle esplorazioni del sistema nucleare con l'avvento dei moderni acceleratori sono i cosiddetti "effetti nucleari di quark" collegati con il confinamento dei quark nel mezzo nucleare e con il possibile deconfinamento del "plasma di quark-gluoni" dai nuclei in condizioni estreme di compressione e riscaldamento.

Il primo è un risultato degli esperimenti di diffusione di leptoni ad alta energia su nuclei, eseguito al CERN dalla Collaborazione Europea Muonica (il cosiddetto effetto EMC) con muoni e a SLAC con elettroni. Questi esperimenti hanno rivelato che la distribuzione dei quark nei nuclei pesanti è significativamente diversa da quella in deuterio, cioè nei nucleoni liberi, poichè il deutone è un sistema poco legato.

Il secondo è una prospettiva aperta nel campo delle questioni fondamentali della QCD dalle collisioni di ioni pesanti a energie relativistiche usando il sistema nucleare come una "fabbrica" del plasma di quark-gluoni che potrebbe essere deconfinato quando, a causa delle altissime densità (3-5 volte la densità nucleare normale) e densità di energia (≈ 3 GeV/m³) raggiunte, i nucleoni, agenti come un pacchetto di quark e gluoni, verrebbe talmente compressi da essere "schizzati fuori" in forma di plasma.

Il problema in questo caso è in che modo rivelare questa vera e propria forma nuova di materia, al di là della regione della materia "normale" nucleare e adronica (figura 1), poichè l'intero processo di formazione e ricombinazione di plasma di quark-gluoni

dura circa 10^{-22} s, cioè proprio il tempo impiegato dalla luce per attraversare un nucleo.

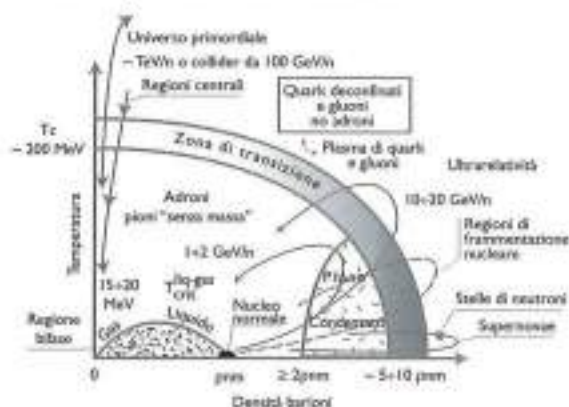


Figura 1 — Diagramma di fase della materia nucleare. La zona di confine rappresenta la transizione dalla fase nucleare e adronica a quella di plasma di quark-gluoni (esperimenti di laboratorio) o viceversa (evoluzione dell'Universo). La densità è espressa in unità nucleari $\text{pnn} = 10^{15} \text{ g/cm}^3$

Vi sono solo vie indirette per seguire questa ricerca: rivelare i leptoni e i fotoni provenienti dal primo stadio del decadimento del plasma o gli adroni, incluse le particelle "strane" e gli antibarioni che riflettono la composizione in quark-antiquark del plasma quando questo ricondensa in adroni durante la "fase congelata". Tornando allo sviluppo della fisica nucleare, vorrei ricordare l'inizio della fisica nucleare in Italia. Il Gruppo di Fermi iniziò a Roma il lavoro sui neutroni, una ricerca tipica di fisica nucleare, nello stesso tempo in cui iniziava la storia delle interazioni deboli, con il contributo prestigioso della scuola italiana, così come quella delle forze nucleari forti, se ci si ricorda la parte importante avuta in tal caso da Ettore Majorana. Probabilmente si deve ammettere che il punto di partenza della separazione tra fisica nucleare e fisica delle particelle fu proprio allora. La fisica dei neutroni con le relative implicazioni sulla fissione nucleare e sulle reazioni connesse con la struttura nucleare da una parte e il decadimento beta e lo sviluppo delle interazioni deboli e forti sulla base di teorie di campo dall'altra, aprirono la strada alle due branche specifiche ciascuna con il proprio dominio di indagine.

Dal punto di vista operativo, questa distinzione si ricollegava alla cosiddetta fisica delle "basse" e "alte energie", considerando come energia tipica di confine la soglia di produzione del pione. Ovviamente, importanti "effetti tunnel" erano sempre pos-

sibili e hanno permesso, nel corso della storia degli ultimi 30 anni, di penetrare e ridurre fortemente tale barriera. Ho già discusso dei fenomeni nucleari a energie intermedie connessi con gradi di libertà subnucleonici nei nuclei. Ricorderò inoltre la scoperta importantissima della violazione di parità nelle interazioni deboli con il contributo essenziale di un tipico esperimento nucleare di bassa energia, cioè la misura dell'asimmetria nel decadimento beta dei nuclei polarizzati di ^{60}Co , condotta da C.S. Wu e collaboratori [3]. Vi sono, naturalmente, altri esempi significativi. Ciò che voglio sottolineare è che, pur nei limiti del proprio dominio, la fisica nucleare presenta un'ampia varietà di fenomeni e di possibili indagini a causa della posizione cruciale in cui si trova il nucleo tra i "costituenti primari" (particelle elementari) e i "sistemi materiali complessi" (materia condensata) (figura 2).

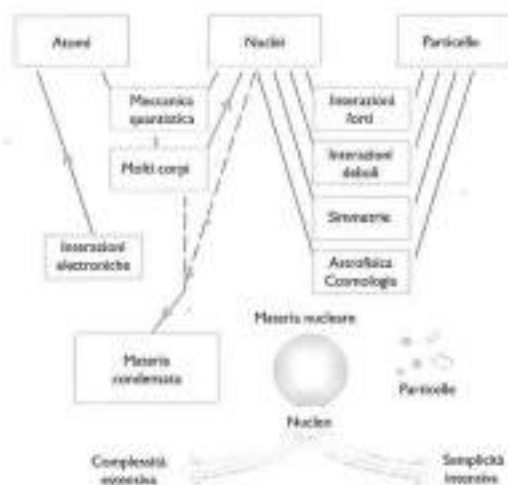


Figura 2 - Posizione della Fisica Nucleare e sue correlazioni con i problemi fondamentali della fisica

Fondamentalmente, la separazione della fisica delle particelle elementari dalla fisica dei nuclei è stata considerata come parte di una necessaria evoluzione legata al grado di "intensività" in confronto alla "estensività" di una data scienza o disciplina. Sto usando le espressioni introdotte da V. Weisskopf [4] nel 1968 e usate per spiegare tale distinzione rifacendosi appunto alla «... interessante e strana posizione ... (della fisica nucleare) ... tra la fisica delle particelle elementari (intensiva) e le altre parti della fisica (ad es. la fisica atomica, più estensiva)» con entrambe le caratteristiche.

Io userò qui i termini "semplicità" e "complessità" (invece di intensivo e estensivo) per ricordare la relazione con i punti di vista "riduzionista" e "olistista", derivabili da considerazioni epistemologiche. È questa la ragione per cui la fisica nucleare, a causa delle sue molteplici e complicate implicazioni, è stata anche indicata con l'anagramma di "*nuclear physics*" (rispetto a *nuclear physics*), cioè "fisica non chiara". In effetti, il nucleo è un oggetto a due facce con una varietà di proprietà contraddittorie che rendono questo stadio specifico di materia (più del 99% della materia dell'Universo) troppo piccolo per essere considerato un pezzo microscopico di una materia nucleare a molti corpi e troppo grande per derivare tutte le sue proprietà dal moto semplice dei suoi costituenti primari. D'altra parte, i nuovi sviluppi nella comprensione dei legami tra proprietà collettive ed elementari e nell'esplorazione dei problemi fondamentali all'interno del nucleo, evidenziano nuovi aspetti comuni della fisica nucleare e subnucleare in relazione alla struttura intima della materia dell'Universo. Vi sono due strade (quella nucleare e subnucleare) per avvicinarsi alla materia primordiale dell'Universo primitivo" (figura 3).



Figura 3 - Problemi fondamentali legati alla materia primordiale dell'Universo primitivo e strade per affrontarli, nucleare e subnucleare

La "strada subnucleare" comporta l'aggiunta di sempre maggiore energia in regioni di dimensioni sempre decrescenti; ciò avviene attraverso l'interazione tra adroni individuali con un numero ristretto di quark. Il problema maggiore è il "confinamento"

dei costituenti elementari. D'altra parte, la "strada nucleare" alla materia adronica primordiale, perseguita dalle collisioni nucleo-nucleo, è collegata alla possibile osservazione di interazioni di quark a molti corpi. Energie sempre più elevate vengono immerse in volumi contenenti molti nucleoni e, assieppando in tal modo un gran numero di quark e gluoni a densità sempre più grandi (compressione), ne permette la fuoriuscita sotto forma di "plasma di quark e gluoni". È questa la forma di materia corrispondente all'Universo primordiale subito dopo il big-bang, da cui le particelle elementari e in seguito i nuclei atomici hanno avuto origine.

Inoltre, l'interfaccia comune tra fisica dei nuclei e fisica delle particelle che deriva da tale schema è, da una parte, che il nucleo stesso può essere usato come laboratorio per evidenziare alcune peculiarità sub-nucleari e, dall'altra, che si possano identificare effetti sub-nucleari nel comportamento nucleare a causa di gradi di libertà più elementari (mesoni, quark, gluoni).

Torno ancora ad un'altra proiezione della presentazione di Fermi del "mondo nucleare" noto (come appare dalla carta degli isotopi) alla situazione presente. Il diagramma di stabilità nucleare è di fatto composto di una moltitudine notevole di nuclei che o sono stabili (circa 300) o "quasi stabili" e radioattivi (ad oggi 2200 sono stati sintetizzati, ma potenzialmente se ne possono produrre più di 6000) (figura 4), che dovrebbero comunque essere "stabili" rispetto al decadimento istantaneo per effetto delle forze nucleari (cioè per emissione di protoni o neutroni o, in competizione, di particelle α). Ciò è collegato a due significativi e probabilmente importanti problemi che, dal punto di vista specifico della struttura nucleare, potrebbero non essere stati previsti al tempo di Fermi. Il primo è la domanda di ciò che avviene quando vi sia un grande cambiamento nel numero relativo di neutroni e protoni rispetto a quelli esistenti nei nuclei stabili (ricordiamo che, a tutt'oggi, conosciamo solo 1/3 di tutte le specie nucleari che potremmo sintetizzare tramite reazioni con ioni pesanti). La meccanica quantistica stabilisce che solo un numero limitato e predeterminato di neutroni e protoni può essere collocato in ciascuna orbita di specifica energia e proprietà prodotta da un "campo medio" tipico del modello a strati. Dalla loro scoperta negli anni 40, si è imparato molto di questi orbitali. Tuttavia qual-

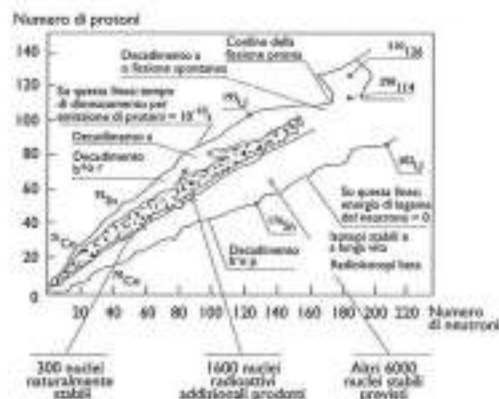


Figura 4 - Carta degli isotopi. Il diagramma mostra l'isola dei nuclei conosciuti e stabili e le nuove specie nucleari previste (da D.A. Bromley, Proc. Int. Conf. Nucl. Phys., Firenze, 1983)

cosa di nuovo potrebbe essere scoperto in situazioni estreme relative ai numeri di occupazione e alle diverse orbite dovute a valori "esotici" di Z o N , così come da forti stiramenti e deformazioni del campo medio nucleare, a causa del numero eccessivo di neutroni e protoni. Nuclei esotici probabilmente esistono in natura in oggetti astrofisici come, per esempio, stelle di neutroni. Sulla Terra essi devono essere creati da reazioni nucleari.

I fasci di ioni presenti, disponibili da circa 30 anni, hanno aperto questa nuova era. Un aspetto particolare è quello riguardante la fissione spontanea che limita la regione di stabilità per i nuclei molto pesanti. È noto che un grande interesse si è rivolto, negli anni 70, alla previsione di nuove regioni di relativa stabilità molto al di là dell'intervallo naturale coperto dalla carta N, Z normale.

Due isole di questi nuclei "superpesanti" sono state, in particolare, ipotizzate a $Z=114$ (oggi si tende più a $Z=120$) e $Z=126$, secondo le estrapolazioni di calcoli di modello a shell a nuovi "numeri magici". Fino ad oggi sono stati trovati $Z=103, 106, 108, 110$ e 112 . Vi è qualche indicazione (piuttosto incerta) per $Z=114$ e $Z=118$.

Il processo di fusione, che è considerato lo strumento principale per la sintesi di questi nuclei, è in effetti limitato al crescere dell'energia e della massa dei nuclei interagenti. Ciò è dovuto alla instabilità immediata dei sistemi composti rispetto alla fissione e/o ai processi competitivi "profondamente inelastici", in cui l'energia è sostanzialmente dissipata attraverso decadimenti binari seguenti il particolare

canale d'eccitazione in entrata. Poiché ho menzionato la fissione, la mia considerazione finale sarà rivolta ad un altro *flash back* concernente un'altra pietra miliare nella storia della fisica. La scoperta del neutrone e della sua interazione con la materia ha permesso di arrivare non solo alla nostra conoscenza basilare della struttura nucleare e delle forze nucleari che agiscono all'interno del nucleo, ma anche alle indagini più estese della dinamica delle reazioni nucleari e della radioattività artificiale. Per questa ragione il neutrone è stato considerato per lungo tempo una delle sonde migliori delle proprietà nucleari malgrado le difficoltà sperimentali di produrre fasci intensi di neutroni con intervalli confortevoli di energia.

Un caso particolare, quello dei processi di cattura radioattiva (le reazioni n, α) aperti dal gruppo di Roma, fu la chiave per la teoria del nucleo composto elaborata da Niels Bohr [5] e per i fenomeni di fissione [6].

Il concetto di formazione del nucleo composto a seguito dell'assorbimento di energia nel canale d'entrata (interazione) da parte di neutroni, fotoni, particelle cariche, soprattutto ioni pesanti (oggi), e il suo decadimento (termodinamico o statistico) nel canale d'uscita è tutt'ora un aspetto basilare della dinamica nucleare.

Questo meccanismo abbastanza unico deriva dal principio di esclusione di Pauli per fermioni e dai dettagli dell'interazione nucleone-nucleone che rende il cammino libero medio del nucleone vicino alla superficie di Fermi, a bassa energia di eccitazione, più lungo del raggio nucleare.

Con il processo "inverso" di fusione nelle reazioni di ioni pesanti, la fissione continua ad essere un aspetto essenziale dell'alternanza tra moto collettivo e individuale nei nuclei. È una questione peculiare che lega alla storia della fissione il concetto di scissione nucleare accompagnata dalla emissione di particelle capaci di indurre e mantenere lo stesso processo. È quindi la scoperta del fatto che, in nuclei come l'U-235, la fissione è seguita da neutroni secondari che possono innescare una reazione a catena che conduce ad un continuo e autosostenente rilascio di una grande quantità di energia, che costituisce la pietra miliare del controllo della più potente forma di energia offerta alla specie umana. Per questo, anche se talvolta lo si dimentica, la pila di Chicago, enunciata come «evento amiche-

vole» («... lo sbarco è stato sicuro, gli indigeni amichevoli ...») rappresenta, malgrado le prospettive di tremende applicazioni militari, il primo e finora unico esempio del modo di controllare e usare a scopi pacifici l'energia liberata in un processo nucleare e di fornire all'umanità una fonte importante di benessere e di progresso. D'altro canto, è in questo contesto che i fatti basilari della fisica nucleare sono stati raggiunti.

Sappiamo, infatti, che il tempo di permanenza dei neutroni lenti nel nucleo (come deriva dagli esperimenti di Roma e cioè 10^{-10} s) è maggiore del tempo di attraversamento (10^{-20} s) di un fattore così grande che il nucleo composto continua ad essere un concetto cruciale nell'analisi delle reazioni nucleari. Così la coesistenza del moto di particella indipendente con i fenomeni di multi-corpi del nucleo composto sembra essere una proprietà abbastanza generale da aspettarsi in una vasta classe di sistemi quantici.

Tali sistemi a temperatura zero possono essere sempre o solidi (sistemi classici) o liquidi quantistici (sistemi di Fermi) che esibiscono gradi di libertà di particelle indipendenti.

Tale problema è collegato a quello più importante già citato delle diverse fasi della materia nucleare che sono d'interesse attuale. Una volta ancora la profondità di tali idee, originate al tempo di Fermi, ha un significato rinnovato nella scienza moderna e non solo in fisica nucleare.

Come Fermi ebbe a dire [6]: «Solo un ulteriore sviluppo della teoria, così come un aumento della precisione dei dati sperimentali, potranno indicare se tali modificazioni si renderanno necessarie».

Riferimenti bibliografici

- [1] *Nuclear Physics, Corso di E. Fermi* scritto da J. ORRER, A.H. ROSENFELD e R.A. SCHLUTER, Università di Chicago, 1950
- [2] *Nuclei, nucleoni, quark. Nuclear Science in the 1990's*, DOE/NSF Nuclear Science Advisory Committee, December 1990
- [3] C.S. Wu et al., "Phys. Rev.", n. 105, 1957, p. 1413
- [4] W.F. WATSON, *Proceedings of a Panel on Future of Nuclear Structure Studies*, Dubna, 1-3 July 1968, Vienna, 1969
- [5] N. Bohr, "Nature", n. 137, 1936, p. 344
- [6] E. Fermi, *Tentativo di una teoria dei raggi β* , "Nuovo Cimento", n. 11, 1934, p. 1

Carlo Bernardini

La fisica di un eccezionale
fenomenologo: Enrico Fermi



Enrico Fermi si trasformò da bambino in adulto in un momento imprecisato della sua vita in cui tutti, di solito, abbiamo ancora pensieri infantili.

Era una specie insolita di "enfant prodige", nel senso che queste parole designano generalmente un artista precoce piuttosto che uno scienziato; nel suo caso, il talento per la matematica e la fisica si manifestò ad una età in cui tutti gli scolari del mondo combattono ancora (spesso soccombendo) con i primi teoremi di Euclide. Né sapremmo dire se il talento di Fermi fosse il frutto della sua istintiva passione per la razionalità o viceversa. Ma forse è impossibile ricostruire le cause occasionali della sua piena realizzazione scientifica con l'idea di riproporre a modello di eventuali giovani epigoni; dobbiamo accontentarci di pensare che è possibile che un uomo raggiunga livelli intellettuali molto superiori alla media senza che riusciamo poi a capire e trasmettere ad altri come e perché.

Dopo le letture - precocissime - del manuale in latino del gesuita Andrea Caraffa, del 1840, e della Meccanica di Poisson e quella di Appel, Fermi ebbe un incontro decisivo con l'enorme trattato di Orest Danilovich Chwolson, un professore russo di San Pietroburgo; l'edizione francese di cui Fermi disponeva in Italia era uscita, in 9 volumi, tra il 1904 e il 1914 per i tipi della Librairie Hermann a cura dei fratelli E. ed F. Cosserat e di E. Davaux e conteneva, nell'ultimo tomo, ampi paragrafi sulla relatività speciale di Einstein e sullo spettro del corpo nero di Planck, ma soprattutto sulla teoria elettronica della materia di H.A. Lorentz.

Non è difficile identificare in questo testo e nel successivo *Electron Theory of Matter* di O. Richardson (così come nel libro di Rutherford sulla radioattività) molti tratti della peculiare mentalità del Fermi fisico teorico, fortemente ancorato a forme semiclasiche di realismo.

L'inizio della sua attività scientifica è precisamente di questo tipo; pur avendo studiato le novità quantistiche sulla "bibbia" dell'epoca, il libro di Arnold Sommerfeld *Atombau und spektallinien*, incomincia a pubblicare, già da studente, su relatività e meccanica analitica. Il problema che attrae l'attenzione dei "teorici" dell'epoca è quello della massa delle particelle cariche, la "massa elettroma-

gnetica"; e Fermi si cimenta con esso, sino a contribuire, ad appena 22 anni, all'appendice di un celebre libro di A. Kopff, *I fondamenti della relatività einsteiniana*. Ma un contributo più memorabile di questo periodo (anche se isolato, forse il solo esempio esplicito di "competenza" fisico-matematica, non più esibita successivamente in quel campo), sarà quello dell'identificazione di un sistema di coordinate nello spazio-tempo (successivamente esteso e perfezionato da A.G. Walker, da cui le "coordinate di Fermi-Walker") che semplifica molto l'interpretazione della relatività generale in prossimità di una linea oraria.

Di questo stesso periodo è l'interesse per i problemi dell'invarianza adiabatica, rilevanti sia in meccanica analitica classica che nella meccanica quantistica à la Bohr-Sommerfeld: da questi problemi e dalla questione dell'ergodicità si formeranno le idee di Fermi sulla termodinamica di non-equilibrio che, alla fine della sua vita, lo porterà ad investigare con J. Pasta e S. Ulam su un sistema di oscillatori non-lineari accoppiati che verrà simulato da un computer di Los Alamos: Fermi non farà a tempo a vedere che alcune sue previsioni giovanili sui sistemi ergodici saranno smentite da questo risultato: il lavoro sarà completato dopo la sua morte.

Questi lavori testimoniano già il fatto che la predilezione di Fermi va ai problemi aperti, ben formulati ma non ancora risolti: l'osservazione riguarda il fatto che egli fosse tiepido per le questioni più di "fondamento", per così dire; non nel senso che non ne capisse l'importanza, piuttosto nel senso che ad essi preferiva il valore "pratico" di strumenti risolutivi di qualche problema importante non risolto.

All'età di 23/24 anni sembra occuparsi contemporaneamente di problemi che riguardano la radiazione e la meccanica statistica. Un suo contributo anticipa un metodo approssimato di calcolo dei processi radiativi negli urti tra le cariche che sarà più compiutamente sviluppato da Weizsäcker e Williams anni dopo; ma le considerazioni sull'entropia di sistemi che contengono particelle identiche portano alla statistica che prenderà il nome di Fermi-Dirac (perché Dirac la trovò indipendentemente di lì a poco): curiosamente, la statistica adatta ai "fermioni" nascerà prima e senza il "principio

di Pauli" che la determina, quasi a conferma dell'osservazione che Fermi non ama le "questioni di principio" manifestando una sua resistenza a qualificarle tali; secondo una nomenclatura introdotta di recente da Rudolph Peierls, il fenomenologo puro ha la tendenza a dichiararsi contento se può mostrare che "tutto avviene come se..." ma esita ad assiomaticizzare la ragione che intravede.

Sta di fatto che dallo studio dell'entropia di sistemi a bassa temperatura Fermi ricava la sua distribuzione statistica dei fermioni che, dal 1926 in poi, dominerà la scena nella teoria dei metalli, nell'astrofisica delle stelle nane bianche e poi delle stelle di neutroni, nel modello a goccia del nucleo e nel cosiddetto "atomo di Thomas Fermi" o "atomo statistico" con il quale si otterranno risultati molto importanti sulla struttura degli atomi con molti elettroni.

La nuova meccanica quantistica sta entrando – siamo al 1926 – in scena, ad opera di De Broglie, Heisenberg, Born, Schrödinger, Dirac, Pauli e Jordan.

La forma di Heisenberg, caldeggiata da grandi conoscitori della matematica come Born e Jordan, sembra non piacere a Fermi che, allievo della scuola matematica italiana, si trova più a suo agio con l'equazione di Schrödinger, una buona equazione alle derivate parziali, al posto di quelle fastidiose matrici che Heisenberg usa al posto delle osservabili classiche.

Fermi è dunque ancora a suo agio con la quantizzazione semiclassica: l'atomo statistico parte da un sapiente ibrido di suddivisione in celle dello spazio delle fasi degli elettroni atomici combinata con una "regola di riempimento" che altro non è che il principio di Pauli (compreso lo spin) per gli elettroni legati: questo determina la densità degli elettroni legati in funzione del potenziale atomico che, a sua volta, sarà determinato da un'equazione di Poisson.

Sarà un successo: l'elettrone esterno è ora al bordo di una buca di potenziale nota, assai realistica nonostante l'apparente crudezza del modello. Per qualche anno, molti atomi verranno "calcolati" in questo modo.

Ma la fisica di punta non è lì: degli atomi ormai si sa praticamente tutto perché la spettroscopia è una tecnica di grande precisione (come tutte le misure ottiche) e la teoria non relativistica di

Schrödinger risolve i problemi se si ha la capacità di "calcolare". È dei nuclei che non si sa granché; per di più, ci lavorano in pochi: gli inglesi (Rutherford, Chadwick, Feather, Ellis, Soddy e altri), i francesi (la famiglia Curie-Joliot), i tedeschi (Bothe, Becker, Hahn, Meitner, Frisch e altri).

Gli italiani non ci sono ma, appena si rendono conto del fatto che la frontiera è là, Fermi e Franco Rasetti (gli anziani), con la benedizione di Corbino, entrano in campo con i loro "giovani" (Segrè, Amaldi, Pontecorvo).

L'occasione d'oro arriva con le prime trasmutazioni, prodotte con bombardamento di particelle alfa su nuclei leggeri dai coniugi Joliot-Curie.

Grande emozione in tutto il mondo, i fisici diventano alchimisti nucleari lì dove i chimici avevano fallito tentando con reazioni atomiche.

Mentre la ricerca nucleare decolla in via Panisperna, Fermi fa – quasi con la mano sinistra (ma tutto ciò che faceva era oggetto della massima cura) – altre cose memorabili: sulla "Review of Modern Physics" spiega a tutti l'elettrodinamica quantistica, che non è una sua creatura ma che diventa accessibile (a detta dei più importanti teorici, da Bethe a Weisskopf) dopo la sua rivisitazione.

La comprensione della meccanica quantistica genera, per analogia, l'idea che le interazioni deboli nascano da accoppiamenti "corrente-corrente" che hanno la capacità di creare e distruggere particelle.

Il formalismo detto della "seconda quantizzazione" sembra particolarmente congeniale a Fermi per la sua flessibilità, che gli consente di scrivere interazioni ad hoc, plasmate sul processo così come lo si osserva: è il paradiso del fenomenologo.

Fermi elabora la teoria del decadimento beta basandosi sull'idea del neutrino di Pauli e, da lì in poi, questa teoria, che egli stesso considererà uno dei risultati più importanti della sua vita, sarà a lui riferita in tutte le sue varianti, fino ai nostri giorni.

I coniugi Joliot-Curie hanno avuto un risultato notevole, con le particelle alfa; ma esse sono nuclei di elio elettricamente carichi e non ce la fanno a raggiungere nuclei di atomi pesanti a causa della repulsione coulombiana.

Chadwick ha scoperto il neutrone, l'idea di nucleo è molto cambiata. Ci sono reazioni in cui vengono fuori neutroni energetici; neutri e quindi non respinti da nuclei pesanti, l'uranio incluso.

Fermi è affascinato dall'idea di produrre per bombardamento i primi transuranici.

Perché non provare a indurre trasmutazioni con neutroni anziché con le particelle alfa? L'idea è spontanea, a quei tempi un po' meno. Ma il gruppo, i ragazzi di via Panisperna, cioè Fermi, assecondato da Rasetti e da tutti i suoi, ci si butta. Di lì a poco, i risultati ci sono; interessanti ma non poi sorprendenti; per giunta, un po' erratici.

Dipendono dalle condizioni in cui si fa l'irraggiamento: sul tavolo di legno, su quello di marmo, fa differenza.

Nella storia raccontata dai presenti c'è che Fermi decide di provare a filtrare i neutroni della sorgente di radio-berillio fornita da Giulio Cesare Trabacchi dell'Istituto di Sanità senza sapere perché. In realtà, molti hanno osservato che, in un convegno di poco precedente era stato constatato che la paraffina aveva un forte potere diffusore sui neutroni e che questo inevitabilmente li rallentava. È vero che, all'epoca, il processo di trasmutazione era visto più come un processo "violento", di urto, con grosso trasferimento di energia al nucleo; sicché nessuno avrebbe prefigurato che i neutroni più lenti potessero essere più efficaci. In qualche punto della storia - ma con rapida intuizione (CIF = "con intuito fenomenale", diceva per gioco Fermi stesso) - Fermi ebbe l'idea che le trasmutazioni avvenissero nel decadimento di un nucleo sbilanciato dalla cattura di un neutrone in più del naturale.

E i neutroni sono tanto più facilmente catturati quanto più lentamente passano e indugiano nella zona in cui percepiscono le forze nucleari, attrattive. L'intuizione è giusta e travolgente: le misure confermano, compresa la leggendaria prova dell'acqua nella "fontana dei pesci rossi", che diventerà parte del folklore associato a via Panisperna.

Da lì, nascono molte cose: la produzione di isotopi adatti alla radiochimica e alla medicina nucleare ha una rilevanza applicativa enorme. I neutroni diventano pian piano uno strumento diagnostico formidabile, e il loro impiego pratico non cesserà mai più sino ai giorni nostri.

Ma Fermi e i suoi vogliono i transuranici: se l'uranio cattura un neutrone e non lo risputa, può bene trasformarsi nell'elemento 93 per decadimento beta. I segnali che vengono dai campioni irraggiati

sono confusi. Sotto, c'è qualcosa di grosso: Orso Mario Corbino si fa prendere dall'entusiasmo e si lascia scappare che probabilmente di transuranici ce ne sono due, l'ausonio e l'esperio (da lui così battezzati: pare che la superstizione corrente fosse «mai dare nome a un nuovo elemento finché la scoperta non è confermata da altri»).

Ma l'ausonio e l'esperio non c'erano, c'era ben altro, come Ida Noddack aveva tentato di suggerire e come Otto Hahn e Fritz Strassmann scopriranno di lì a poco a Berlino Dahlem e Lise Meitner e Otto Frisch interpreteranno quasi immediatamente. C'è la fissione, questo processo cospicuamente esotermico che non rientrava nelle aspettative dei fisici nucleari dell'epoca, di cui Niels Bohr dirà tuttavia «come è che non lo abbiamo capito prima?».

Fermi è ormai in America, alla Columbia University, dopo avere preso il Nobel per i neutroni lenti; apprende là la notizia e subito si mobilita per capire il fenomeno. Di lì a poco si capisce che le reazioni di fissione producono, oltre ai frammenti, più di due neutroni per fissione, in media; il che consente di pensare alla possibilità di reazioni a catena, come nei combustibili e negli esplosivi.

C'è la guerra. Gli Stati Uniti c'entreranno tardi, dopo Pearl Harbor. Roosevelt è stato sollecitato già nel 1939 da Einstein a fare qualcosa perché i tedeschi potrebbero costruire un nuovo ordigno di inusitata potenza: nella sua lettera al Presidente, Einstein cita Fermi e Leo Szilard come depositari del know-how. Ma il progetto Manhattan per la realizzazione di una bomba atomica partirà assai lentamente e così il laboratorio segreto di Los Alamos. Intanto, Fermi realizzerà il reattore CP-1 (Chicago Pile - 1), con il quale si dimostrerà la fattibilità di reazioni controllate, già alla fine del 1942. Subito dopo, tutti a Los Alamos a realizzare la bomba in tempi record, prima dei tedeschi.

La competenza di Fermi è universalmente riconosciuta, il suo apporto inestimabile. Fermi viene coinvolto nell'apparato decisionale e si prende responsabilità a cui non era aduso e che tuttavia non rifiuta, pur sentendone il peso: non è da lui riversare sugli altri i problemi etici che lo toccano, sicché non possiamo dire come ha vissuto i tragici eventi legati alla fine della guerra; ma non si può affermare certo che fosse scarsamente sensibile,

tant'è che quando Teller premerà per la realizzazione di bombe all'idrogeno, egli, insieme con Isidor Rabi, metterà in guardia l'amministrazione americana sul pericolo di imboccare una strada troppo pericolosa per l'umanità.

Più che legittimamente, Fermi vuole ora tornare alla ricerca pura, ai raggi cosmici, all'astrofisica, alle particelle elementari, agli acceleratori, alle simulazioni con i computer che lo sforzo bellico ha reso disponibili a Los Alamos. La fisica si sta riempiendo di novità, a ritmo sostenuto.

I mesoni fanno la loro comparsa come mediatori di forze nucleari, e qui l'esperimento italiano di M. Conversi, E. Pancini e O. Piccioni ha aiutato molto a dipanare la dicotomia di particelle di massa quasi uguale di cui una simile all'elettrone ma assai più pesante e l'altra invece coinvolta nelle interazioni forti: il mesone μ e il mesone π . Fermi percepisce subito l'importanza del risultato e ne dà una interpretazione adeguata.

Ma poi si occupa anche di molte e diversissime altre cose: del meccanismo di accelerazione dei raggi cosmici, della struttura delle galassie, del primo stato eccitato del nucleone, la risonanza 33, e infine dello studio mediante simulazione al computer del problema dell'equipartizione dell'energia e del "teorema ergodico": mentre si occupa di quest'ultima analisi, muore, ad appena 53 anni, il 29 novembre 1954.

C'è tanta scienza nel nome di Fermi (le coordinate di Fermi e Walker, i fermioni, l'atomo di Thomas - Fermi, la statistica di Fermi - Dirac, il livello di Fermi, la "Fermi motion", la superficie di Fermi, la regola d'oro di Fermi, il "fermi \rightarrow fm = 10^{-13} cm", la costante di Fermi delle interazioni deboli, eccetera).

Forse nessun altro fisico ha riempito del suo nome i manuali a tal punto. In parte, ciò è anche dovuto al fatto che era un grande maestro e che aveva la capacità di semplificare la comprensione delle cose più difficili della fisica contemporanea. Tuttavia, rifuggiva dall'uso delle forme più astratte della matematica e preferiva raggiungere per via diretta i risultati concreti, i numeri.

Non che avesse difficoltà con le tecniche formali: appena laureato, si era cimentato - come abbiamo detto - con un problema di relatività generale

nel quale aveva lasciato per sempre il suo nome - le coordinate di Fermi e Walker - scoprendo al tempo stesso che la sua inclinazione era molto più indirizzata verso i problemi associati a esperimenti immediatamente possibili che non verso descrizioni e congetture molto al di là della realtà tangibile.

Lo stesso spirito cercava di infondere nei suoi allievi, che apprezzavano la sua sollecitazione e che ancora oggi ne parlano con gratitudine deferente. Questo vuole dire che Fermi era, sì, un fisico teorico, ma di quel tipo particolare che va sotto il nome di "fenomenologo", cioè creatore di modelli interpretativi capaci di ricondurre un particolare evento fisico a manifestazione di leggi generali note e consolidate.

Il fenomenologo è, in un certo senso, un conservatore razionale, convinto della adeguatezza delle idee già esistenti nel costituire un sistema di principi, poco interessato a modificare i principi stessi quando questi hanno già dimostrato di poter fornire la chiave interpretativa di un vasto e disparato numero di fenomeni.

Forse, quella del fenomenologo è la figura più essenziale ad un ambiente di ricerca organizzato in forma di laboratorio, cioè in un ambiente in cui idee e strumenti sono fortemente interagenti; nel necrologio che Enrico Persico scrisse per la commemorazione pisana del gennaio 1955 si parla (e chi meglio di Persico avrebbe potuto farlo?) del "suo personalissimo stile di lavoro": «è assai raro» dice Persico «trovare in un fisico quel perfetto equilibrio di attitudini sperimentali e teoriche che ebbe Fermi. La sua abilità sperimentale non consisteva nel saper costruire apparecchiature complicate o eseguire misure di alta precisione: consisteva piuttosto nel saper riconoscere, al momento opportuno, quale era l'esperienza decisiva, nel saperla progettare nel modo più semplice ed efficace, e nell'eseguirla con energia e pazienza, senza perdere né tempo né fatica in tutto ciò che non era essenziale. Il suo lavoro sperimentale» prosegue Persico «è sempre intimamente legato al lavoro teorico».

Non si potrebbe dire meglio di così; ma questo spiega a sufficienza perché Fermi, in fondo, non legasse molto con i teorici tedeschi - Heisenberg, per esempio - durante la sua permanenza a Göttingen, troppo presi dal rigore formale, nello stile di Max Born e di Arnold Sommerfeld.

Con costoro, legò assai di più Ettore Majorana, che per l'astrazione e le questioni di principio non aveva alcuna diffidenza e si muoveva a suo agio nel formalismo appena introdotto da Heisenberg e poi da Dirac.

Fermi è un grandissimo genio "pragmatista", forse il più grande come genio, probabilmente unico come pragmatista, che abbiamo mai avuto. Il confronto con altre figure della scienza di tutti i tempi mostra soprattutto che la comparazione è sterile e inutile: non ha senso che gli scienziati siano tutti come Fermi, ma è estremamente significativo che il nostro Paese abbia avuto un personaggio

come lui nella sua cultura, a dispetto di una "cultura dominante" assai lontana da ciò che Fermi è stato.

Nelle recenti celebrazioni del centenario della sua nascita molti suoi allievi e colleghi hanno riferito della sua attività in ogni campo della fisica; nessuna voce ha smentito la sua straordinaria levatura internazionale, tutti hanno concordato sulla sua straordinaria razionalità.

Per noi italiani, una fortuna inestimabile, unita alla responsabilità di esserne perfettamente consci come comunità intellettuale.

Novembre 2001

Carlo Rubbia

Il contributo di Enrico Fermi
alla copertura del fabbisogno
energetico mondiale



Le ricerche condotte da Enrico Fermi sul neutrone (scoperto da Chadwick nel 1932) ed iniziate proprio qui a Roma nel 1934, hanno dischiuso nuovi e smisurati orizzonti alla fisica nucleare, non solo per la conoscenza della struttura del nucleo, ma anche per le innumerevoli applicazioni concrete nei più diversi settori della ricerca, ivi compreso lo sfruttamento dell'enorme potenziale energetico racchiuso nel cuore dell'atomo.

Nel gennaio di quello stesso anno, Irene Curie e Frederic Joliot erano riusciti a produrre artificialmente nuovi tipi di radioelementi mediante bombardamento con particelle alfa. Tuttavia, utilizzando come proiettili nuclei di elio con pochi MeV di energia cinetica, non era possibile trasmutare atomi con un numero atomico superiore a 20; di conseguenza, solo una parte degli elementi leggeri poteva essere trasmutata. Risultati simili si ottenevano utilizzando nuclei di idrogeno (protoni).

Utilizzando i neutroni, Fermi ed i suoi collaboratori riuscirono a trasmutare persino gli elementi più pesanti del sistema periodico. Per inciso, per questo lavoro gli fu assegnato il Premio Nobel nel 1938. Il neutrone possiede alcune qualità che lo rendono particolarmente adatto ad essere utilizzato come "proiettile" nelle reazioni atomiche. Sia il nucleo dell'elio che quello dell'idrogeno sono dotati di cariche elettriche. Le elevate forze elettriche di repulsione che si sviluppano quando una particella carica di elettricità si avvicina ad un nucleo deviano il "proiettile". Poiché il neutrone non possiede carica elettrica, procede indisturbato nella sua traiettoria fino all'impatto con il nucleo. Per questo i fasci di neutroni possono attraversare ampi spessori di materia subendo ridotte attenuazioni.

I neutroni possono trasformare i nuclei leggeri in elementi differenti, mediante reazioni di tipo (n,p) , (n,α) e così via. Tuttavia, specialmente per quanto riguarda gli elementi pesanti, non vi è emissione di materia ed il surplus di energia si manifesta sotto forma di radiazioni gamma. Non verificandosi variazioni di carica, si ottiene un isotopo della stessa sostanza iniziale, spesso instabile, causando attivazione radioattiva. Circa sei mesi dopo i primi esperimenti di irraggiamento neutronico, Fermi ed i

suoi collaboratori fecero casualmente una scoperta che si sarebbe dimostrata di enorme importanza. Chandrasekhar ricorda una conversazione avuta con Fermi, durante la quale lo scienziato descriveva la sua scoperta:

«Le racconterò come feci la scoperta che credo sia la più importante della mia carriera. Stavamo lavorando molto intensamente sui neutroni e i risultati che ottenevamo erano incomprensibili. Un giorno, andando al laboratorio, pensai che avrei dovuto osservare l'effetto di assorbimento dei neutroni da parte del piombo [...]. Quando, finalmente, stavo per cominciare le misure, mi dissi: "no quello che voglio qui non è un pezzo di piombo, ma uno di paraffina". Fu proprio un'ispirazione improvvisa, senza una ragione premeditata. Ne presi subito un pezzo, che trovai lì per lì, e lo misi dove sarebbe dovuto andare il piombo».

Fermi ed i suoi collaboratori si accorsero in tal modo che, facendo passare i neutroni attraverso della paraffina o dell'acqua, il fascio uscente aveva una intensità molto più elevata (fino ad un fattore 10^6). Studi accurati del fenomeno mostrarono che i neutroni venivano rallentati dall'impatto con i nuclei di idrogeno presenti in quelle sostanze, e che i neutroni così rallentati erano molto più efficaci. Fermi sviluppò velocemente una semplice teoria nella quale veniva evidenziato il noto effetto $1/v$ di cattura neutronica. Furono così sviluppati i concetti oggi noti come "letargia" e "l'età di Fermi", che si riferiscono alla distanza tra la creazione e la termalizzazione in un processo di diffusione. Fermi ed i suoi collaboratori osservarono inoltre che un effetto maggiore si verificava in corrispondenza di date velocità, e che tali velocità erano diverse a seconda delle sostanze. Tale fenomeno venne paragonato a quello della risonanza in ottica ed in acustica.

Praticamente tutti gli elementi, fatto salvo l'idrogeno e l'elio, potevano essere attivati in questo modo. Centinaia di nuove sostanze radioattive vennero così ottenute, delle quali circa la metà dovute a cattura diretta e la restante metà al decadimento degli elementi attivati. L'applicabilità pratica di queste scoperte fu per Fermi un obiettivo costante, in particolar modo la possibilità di utilizzare gli isotopi di attivazione come traccianti per i processi chimici, fisici e biologici, che egli stesso poi brevettò.

La struttura generale che Fermi individuò nel 1934 assunse un interesse particolare agli inizi del 1935,

quando venne applicata all'allora ultimo elemento della Tavola degli Elementi, l'uranio ($Z=92$). Com'è oggi noto, la fissione costituisce il fenomeno principale risultante dalla cattura neutronica dell'uranio 235. A quei tempi la straordinaria attivazione dell'uranio associata ai frammenti di fissione venne erroneamente interpretata - non solo da Fermi, ma anche da F. Joliot e I. Curie a Parigi e da Hahn e Meitner a Berlino - come formazione di elementi transuranici. Per l'occasione vennero persino conati due nomi - ausonio ($Z=93$) ed esperio ($Z=94$) - derivati da due antichi popoli italici.

È lecito domandarsi per quale ragione il gruppo di scienziati romani non comprese di trovarsi di fronte al fenomeno della fissione. Amaldi ricorda come ad un certo punto un campione di torio ed uranio attivato da neutroni fu posto direttamente in una camera a ionizzazione e come, per eliminare la sua naturale attività, venisse sovrapposta al campione una sottile lastra di alluminio, in modo da rendere invisibili i frammenti della fissione che si propagano solo per $\approx 10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ nella materia. Se la fissione fosse stata scoperta allora, le armi nucleari sarebbero state create molto prima, e la storia dell'energia nucleare e delle sue enormi applicazioni militari e, probabilmente, il corso della seconda Guerra Mondiale sarebbero stati molto diversi.

Fu solo quattro anni più tardi che Otto Hahn e Fritz Strassmann, dopo lunghe e faticose ricerche, individuaronero questo nuovo fenomeno che nessuno era stato in grado di teorizzare. I loro tentativi di separare chimicamente gli elementi transuranici prodotti dal bombardamento neutronico di uranio e torio indicavano che ci si trovava di fronte ad una miscela di isotopi β radioattivi piuttosto che ad una singola sostanza chimicamente omogenea. In particolare, essi osservarono che in questa miscela si trovavano anche isotopi di bario derivanti dalla fissione dell'uranio. Fino ad allora, si pensava che l'attivazione dei neutroni producesse elementi che differivano di una o due unità atomiche dal materiale bombardato: ma la differenza tra bario ed uranio è di ben 98 unità atomiche!

All'inizio del 1939, la natura di questo fenomeno venne interpretata - con il modello a goccia di Bohr - da Lise Meitner e O. R. Frisch come dovuta ad una deformazione estrema del nucleo con la scissione di quest'ultimo in due gocce minori, ad una

distanza tale da essere sottoposte esclusivamente alla intensa forza repulsiva di Coulomb, liberando un'energia dell'ordine di 200 MeV. A causa della sua estrema somiglianza con la duplicazione delle cellule viventi, a questo fenomeno venne dato il nome di "fissione". Vale la pena ricordare come Bohr espresse una forte delusione per il fatto che questo fenomeno non fosse stato previsto dai fisici teorici!

Questi esperimenti vennero ripetuti in diversi laboratori e già nella metà del gennaio 1939 F. Joliot e I. Curie in Francia ottennero e pubblicarono gli stessi risultati. L'esistenza del fenomeno della fissione divenne a questo punto universalmente riconosciuta.

Quando, non molto tempo dopo, venne scoperto che, assieme alla straordinaria quantità di energia pari a 200 MeV, venivano liberati anche alcuni neutroni, l'intera comunità scientifica comprese che - mediante una reazione a catena - l'impiego della immensa quantità di energia celata nel nucleo dell'atomo era divenuta una realtà.

Nel gennaio del 1939, poco dopo l'assegnazione del premio Nobel, Fermi si trasferì definitivamente negli Stati Uniti, dove assunse la carica di docente alla Università della Columbia fino al 1942, anno in cui si trasferì a Chicago.

La notizia della scoperta della fissione lo raggiunse all'arrivo negli Stati Uniti e la sua prima relazione americana, intitolata *La fissione dell'uranio* porta la data del mese seguente. A questa fece seguito la relazione scritta in collaborazione con Herbert Anderson e Leo Szilard dal titolo *Produzione ed assorbimento dei neutroni*, nella quale fornisce la relativa sezione d'urto e dimostra che il numero di neutroni emessi è maggiore del numero di quelli assorbiti, condizione necessaria per una reazione a catena.

È importante ricordare come Fermi a quell'epoca fosse molto interessato sia al muone (μ) come possibile candidato alla particella di Yukawa delle forze nucleari sia alla misurazione della sua vita media effettuata da Bruno Rossi.

Le difficoltà crescenti nelle comunicazioni tra Stati Uniti ed Italia impedirono agli scienziati americani di apprezzare pienamente il lavoro svolto a Roma sulle stesse tematiche da Gilberto Bernardini e Gian Carlo Wick prima e Conversi, Pancini e Piccioni in seguito.

In tempo di guerra ogni processo in grado di indebolire o sconfiggere il nemico ha la meglio sui suoi possibili usi pacifici, cosa che avvenne puntualmente quando si profilò all'orizzonte la possibilità di realizzare la "bomba nucleare". Fu allora che Einstein scrisse la celebre lettera al Presidente Roosevelt, nella quale venivano chiaramente indicate tutte le potenziali implicazioni belliche della recente scoperta e questa lettera segnò la fine della libera circolazione dell'informazione scientifica e l'avvio al coinvolgimento delle forze militari. Gli eventi che ebbero a seguire furono resi noti solo molto tempo dopo.

Nel marzo del 1940, il concetto di reattore nucleare ricevette nuovo impulso dalla scoperta del plutonio, avvenuta nel laboratorio di radioattività dell'Università di Berkeley. Questo nuovo elemento, non esistente in natura, viene prodotto dalla cattura neutronica dell'U-238 come decadimento del nettunio 239. Il Pu-239, così come l'U-235, essendo un isotopo dispari, era previsto che fosse fissile.

Fermi ed i suoi collaboratori condussero alla Columbia University, negli anni 1940-41, una serie di importanti attività di ricerca propedeutiche alla dimostrazione della "reazione a catena", che ebbe luogo a Chicago nel dicembre del 1942. Ricerche simili venivano effettuate nello stesso periodo in diverse altre nazioni e in particolare in Germania, sotto il forte impulso di von Weizsäcker e Werner Heisenberg. La soluzione a questo problema richiese tutta l'esperienza accumulata da Fermi in tanti anni di ricerche. Due problemi cruciali ed insidiosi andavano risolti:

1. il rallentamento dei neutroni nella pila è di norma un processo molto veloce, dell'ordine di centinaia di microsecondi. Qualsiasi tipo di dispositivo meccanico per il controllo della criticità sarebbe risultato troppo lento per tenere testa al montare della reazione a catena. Fortunatamente l'esistenza di neutroni "ritardati", dovuti alla emissione neutronica di frammenti di fissione a vita breve, soltanto lo 0,7% nel caso dell'uranio, lascia un tempo sufficiente per una efficace azione di controllo.

2. era noto all'epoca che il processo di fissione da parte dei neutroni termici era dovuto alla componente U-235, pari solo allo 0,71% dell'uranio naturale. L'arricchimento era considerato un processo complesso e molto costoso. D'altro canto, l'U-238, componente predominante dell'uranio natura-

le, presenta una forte cattura neutronica, producendo Np-239 e quindi Pu-239. Quindi nell'uranio il meccanismo di rallentamento implica un tasso troppo elevato di cattura neutronica per garantire la criticità. Infatti, tutti i tentativi fatti in Germania da Heisenberg, volti al raggiungimento della criticità attraverso una miscela omogenea di uranio e grafite fallirono. L'idea chiave avuta da Fermi e Szilard fu di impiegare una struttura discreta composta da piccoli ed isolati elementi di uranio in una matrice di grafite. In questo modo i neutroni veloci emessi nella fissione dell'uranio venivano completamente rallentati all'interno della grafite pura, "sfuggendo" alla cattura dell'U-238 e rientrando negli elementi di uranio solo dopo un completo rallentamento.

Nell'estate del 1942 i progressi sui sistemi sotto-critici avevano raggiunto livelli così avanzati (erano stati costruiti ben 30 sistemi di questo tipo) che fu deciso di procedere alla realizzazione di un sistema critico. Fu finalmente raggiunta la necessaria purezza delle circa 400 t di grafite (40.000 mattoni). Anche l'uranio era disponibile sotto forma di 20.000 mattoni. La costruzione della pila CP-1 richiese un mese di tempo e la criticità venne raggiunta il 2 dicembre del 1942.

Fermi e Szilard ottennero il brevetto per il CP-1 nel 1955. La loro presentazione, tenuta nel 1944, costituisce una magnifica lezione sulla fisica del reattore nucleare, la cui lettura consiglio vivamente.

Il CP-1 funzionò quel giorno per 28 minuti, con un picco di potenza di 0,5 watt. Pochi mesi dopo, un secondo esperimento di accensione fu effettuato ad Argonne, in un sistema (in cui fu raggiunta una potenza di 110 watt) che fu il precursore dei reattori costruiti da DuPont ad Hartford destinati alla produzione del plutonio. Le applicazioni pacifiche dell'energia nucleare emersero solo molto tempo dopo, in occasione della Conferenza "Atomi per la pace", tenutasi a Ginevra nel 1958.

Tutto era tenuto allora in totale segretezza nel laboratorio di Metallurgia, un laboratorio senza metallurgisti: non vi erano giornalisti, telecamere o registratori che documentassero la "nascita dell'era nucleare". Mi domando se le trenta persone che vi lavoravano furono in grado di afferrare, nell'esaltazione del momento, la dimensione e la natura dei cambiamenti che l'energia nucleare avrebbe di lì a poco prodotto a livello mondiale.

Fermi ebbe così a commentare più tardi: «L'evento non fu particolarmente spettacolare. Non ci furono fusibili in fiamme né lampi di luce. Ma noi sapevamo che la produzione di energia atomica su larga scala sarebbe stata solo questione di tempo.

Ovviamente nei tre anni di conflitto che seguirono, gli ulteriori sviluppi dell'energia atomica vennero finalizzati alla creazione di un'arma efficace.

Noi ci auguravamo che la realizzazione di centrali nucleari e la produzione di radioisotopi per usi scientifici e medici divenissero al più presto gli obiettivi principali ma, sfortunatamente, la fine della guerra non vide l'instaurarsi di rapporti fraterni tra le nazioni. La segretezza che ritenevamo una indesiderata necessità durante il periodo bellico, sembrava purtroppo necessaria anche in tempi di pace.

I problemi posti dalla situazione mondiale non possono essere risolti solo dagli scienziati, ma da tutta la popolazione. Forse arriverà un tempo nel quale tutti i progressi scientifici e tecnologici verranno utilizzati a vantaggio del genere umano, senza che si debba più avere a temere la loro potenziale distruttività».

Oggi, sessanta anni dopo il primo esperimento di criticità, si potrebbe tentare di interpretare questi eventi e le loro implicazioni in una più ampia prospettiva storica.

Nel corso del tempo il significato della scienza in tutti i suoi aspetti - non solo per quello che attiene alla fisica, ma anche a tutte le altre discipline, come ad esempio la biologia - ha subito un profondo mutamento, passando dal ruolo di pura conoscenza a fattore determinante per l'economia e le politiche mondiali.

La celebre lettera scritta da Einstein al Presidente Roosevelt potrebbe essere considerata la linea di demarcazione di questo cambiamento. Gli scienziati odierni sono pienamente coinvolti nel mondo politico ed economico ed è indispensabile venire a patti, facendo tesoro degli errori commessi nel passato, con questa nuova dimensione della ricerca scientifica.

L'obiettivo costante e attualmente primario della ricerca sull'energia nucleare è la produzione di energia ad un costo accettabile. In tale costo devono essere inclusi non solo il prezzo dei combustibili e degli impianti, ma anche i costi indiretti per la popolazione e l'ambiente.

Finora non si è riusciti a sostituire le fonti energetiche convenzionali, che hanno una durata limitata, con altre fonti più durature. Per quanto riguarda la crescente domanda di energia, oltre alla fonti fossili, solo due fonti energetiche conosciute sono in linea di principio in grado di coprire questa domanda: l'energia nucleare e l'energia solare.

Personalmente ritengo che entrambe debbano essere sviluppate con vigore a livello planetario. Tuttavia l'utilizzo di energia nucleare non implica necessariamente l'uso degli attuali reattori nucleari, per le seguenti ragioni fondamentali:

1. le riserve di U-235, che non sono maggiori di quelle del petrolio o del gas naturale, anche al livello attuale di sfruttamento, che copre il 6% del fabbisogno energetico mondiale;
2. il grado di sicurezza delle centrali, che deve essere migliorato: il livello di rischio ritenuto accettabile dalla società moderna è molto minore che nel periodo della "Guerra Fredda";
3. il problema della gestione dei rifiuti radioattivi, che ha raggiunto proporzioni tali da causare seria preoccupazione, soprattutto per quanto riguarda la componente la cui radioattività permane per alcuni millenni. Anche se non potremo essere accusati di persona, non è questo il tipo di eredità da lasciare alle generazioni future.

Vi sono a priori tre processi nucleari molto conosciuti che potrebbero coprire il fabbisogno energetico mondiale per molte centinaia di secoli al livello attuale di consumo. In questo ordine di scala temporale la distinzione tra energie rinnovabili e non rinnovabili è irrilevante. Sono tutte basate su reazioni di fertilizzazione, cioè sul processo in cui il combustibile è generato da un elemento naturale. Questi processi erano già noti al tempo delle scoperte di Fermi appena menzionate.

Uno di questi processi è la fusione, e deriva direttamente dall'idea di produrre reazioni nucleari con particelle cariche. In questo processo, il litio naturale viene trasformato, con l'ausilio di un neutrone, in un isotopo dell'idrogeno, il trizio che, a sua volta, reagisce con il deuterio per produrre energia e un neutrone.

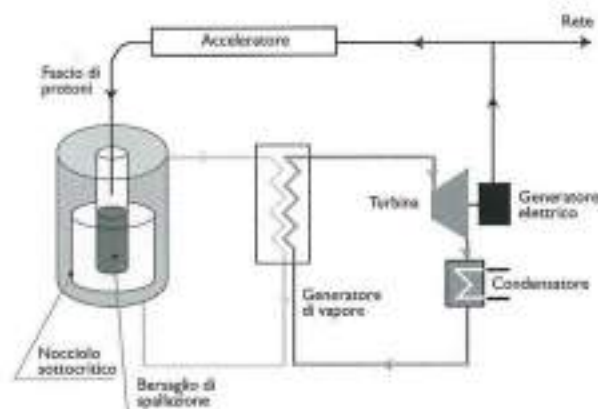
Gli altri due processi sono basati sulla trasformazione - sempre con l'ausilio di un neutrone - dell'U-238 (99,3% dell'uranio naturale) o del torio naturale (Th-232) rispettivamente in Pu-239 e U-233, elementi fertili che assicurano la fissione.

Fermi aveva piena consapevolezza dell'importanza del fenomeno della fertilizzazione per il futuro dell'energia nucleare: «Il Paese che per primo sarà in grado di creare un reattore autofertilizzante acquisterà un grande vantaggio nello sviluppo dell'energia nucleare» (Argonne, 1945).

Oggi, quasi sessant'anni più tardi, sono totalmente d'accordo con le sue affermazioni, ma cancellerei il termine "reattore". Il problema principale, che sono sicuro Fermi aveva ben chiaro, è quello relativo all'economia neutronica, cioè al raggiungimento della criticità ($k=1$), a cui lavorò incessantemente per tre anni, dal 1940 al 1942, e su cui altri fallirono, come ad esempio Heisenberg.

Invero, per assicurare sia la fertilizzazione che la fissione, sono necessari due neutroni (e non uno) per ogni ciclo di Fermi. La criticità ($k=1$) diviene molto più difficile da ottenere. È questa la ragione per cui solo i reattori veloci con plutonio e sodio fuso (Super-Phoenix) - nonostante i gravi problemi di sicurezza associati - hanno un margine di possibilità di realizzare un'effettiva fertilizzazione.

L'uranio naturale ed il torio con neutroni termici (i cui vantaggi sono stati ampiamente dimostrati dal lavoro di Fermi) sono esclusi, in quanto non in grado di raggiungere permanentemente le condizioni di criticità ($k=1$) in una configurazione povera di U-235. In questo caso, neutroni addizionali debbono provenire da una sorgente esterna. Come chiaramente evidenziato da Lawrence già sessant'anni fa, un acceleratore ad alta energia è il "complemento" più promettente per sostenere la fissione nucleare. Dai tempi di Fermi la tecnologia degli acceleratori ha compiuto progressi enormi, al CERN ed altrove, ed oggi un sistema sottocritico ($k<1$) sostenuto da un acceleratore è divenuto una alternativa realistica. La reazione di spallazione, provocata per esempio da un protone da 1 GeV, produce almeno 50 neutroni per protone, corrispondenti ad un costo energetico di 20 MeV/neutrone, invece dei 200 MeV/neutrone prodotti dalla fissione. I sistemi sottocritici guidati da un acceleratore (Accelerator Driven Systems, ADS) possiedono inoltre l'ulteriore vantaggio di bruciare anche gli elementi transurani a lunga vita presenti nelle scorie dei reattori ordinari, e di transmutare i residui di fissione a



Schema concettuale dell'ADS (Accelerator Driven System), sistema sottocritico guidato da un acceleratore

lunga vita (tipo Tc-99) in elementi stabili, risolvendo così il problema dei rifiuti di lunga vita.

A fronte di questi nuovi sviluppi, così come avvenne per i reattori critici, la comunità dei fisici dovrebbe delineare le fenomenologie di base, con il sostegno di una serie di esperimenti specifici, prima che si possa procedere a livello ingegneristico e industriale. Allo stesso tempo, è necessario un ampio sostegno politico, oltre alla dedizione e all'entusiasmo degli scienziati.

Tornando a Fermi, vorrei ricordare le parole pronunciate da Edoardo Amaldi, che ebbe la fortuna di conoscerlo, in occasione della commemorazione tenutasi all'Accademia dei Lincei nel 1955: «Il suo lavoro scientifico è stato di una portata così vasta e determinante che coloro che non hanno avuto la possibilità di conoscerlo non possono avere di lui un'immagine veritiera.

I suoi familiari, i suoi amici e coloro che lo hanno conosciuto personalmente sanno come fosse difficile separare in Enrico Fermi i vari aspetti dello scienziato, del ricercatore, dell'insegnante e dell'uomo, poiché erano strettamente legati l'uno all'altro. La sua semplicità e il suo modo di essere, la sua serenità di fronte ai problemi dell'esistenza, la totale mancanza di pregiudizi e la pacatezza del suo comportamento erano qualità dell'uomo ancora più eccezionali perché affiancate alle sue straordinarie doti di scienziato».

Ugo Spezia

Tecnologie per la produzione
di energia nucleare da fissione.
Stato e prospettive



LO SVILUPPO DELLA DOMANDA DI ENERGIA NUCLEARE

L'evoluzione storica e i limiti degli studi previsionali

L'energia nucleare ha fornito nel 2000 il 17% dell'elettricità prodotta nel mondo, il 25% nei paesi OCSE e il 35% nei paesi dell'Unione Europea. Anche nel periodo successivo al disastro di Chernobyl la potenza nucleare complessivamente in funzione nel mondo è cresciuta del 40%, passando da 250.000 a 350.000 MWe. Si tratta di un'affermazione evidente, ma che ha comunque disatteso le ottimistiche previsioni di crescita fatte a cavallo fra gli anni settanta e ottanta.

Il fatto che taluni possano oggi parlare della tecnologia nucleare come di una tecnologia in declino dipende prevalentemente dagli studi previsionali condotti in passato che, per diversi motivi, hanno sistematicamente sovrastimato la domanda di potenza nucleare installata. L'origine di questi errori di valutazione è legata agli effetti delle crisi petrolifere del 1973-74 e del 1979-80, che condussero a prevedere un rapido riorientamento della domanda elettrica verso il nucleare.

Nel corso degli anni settanta l'attività di progettazione e costruzione delle centrali nucleari ebbe in effetti un forte impulso, il prezzo di mercato dell'uranio crebbe notevolmente e le compagnie elettriche attuarono strategie contrattuali volte a garantirne l'approvvigionamento a lungo termine. Ma il deterioramento della situazione economica dei paesi industrializzati all'inizio degli anni ottanta provocò una flessione della domanda di elettricità e scoraggiò tanto gli investimenti in generale quanto quelli nel settore energetico. Come conseguenza, i fabbisogni di potenza installata previsti non furono raggiunti, e in molti paesi si registrò un'eccedenza di capacità produttiva.

I programmi realizzativi per tutti i tipi di centrali furono quindi procrastinati, e talvolta cancellati. La ripresa del mercato prevista per i primi anni novanta non si è concretizzata anche a causa degli avvenimenti che hanno scosso l'Europa centrale e orientale, con l'emergere di paesi che sono divenuti essi stessi venditori di uranio e di servizi collegati al ciclo del combustibile. Lo sviluppo del settore

nucleare è stato infine condizionato anche dall'opposizione ambientalista, rafforzata in seguito agli incidenti di Three Mile Island e di Chernobyl, e manifestatasi in alcuni paesi con il sistematico ricorso al contenzioso legale, che ha ritardato la realizzazione delle installazioni previste.

A fronte della caduta dei prezzi dei combustibili fossili registrata a partire dalla metà degli anni ottanta e perdurata per tutti gli anni novanta, la competitività economica degli impianti nucleari di nuova costruzione ha finito col risentire pesantemente degli ingenti costi di capitale, dei costi supplementari associati al miglioramento della sicurezza e ai ritardi prolungati in fase realizzativa.

In alcuni paesi gli investimenti nei grandi impianti elettrici sono stati ostacolati anche dal sorgere di barriere finanziarie come diretta - anche se indesiderata - conseguenza delle politiche governative e istituzionali. Negli Stati Uniti la regolamentazione dei prezzi imposta dalla State Public Utility Commission, che ha ritardato l'inizio dell'ammortamento degli impianti all'effettiva entrata in servizio degli stessi, ha di fatto scoraggiato gli investimenti su larga scala e ha provocato una drastica variazione delle tariffe. La situazione si è aggravata ulteriormente per effetto dei ritardi introdotti dalla variazione delle prescrizioni tecniche e dal contenzioso legale. In alcuni paesi la privatizzazione del sistema elettrico, con l'introduzione della libera concorrenza nella produzione elettrica, ha notevolmente aumentato il rischio finanziario associato ai nuovi investimenti scoraggiando, almeno nel breve termine, il finanziamento privato dei grandi impianti elettrici, siano essi a combustibile fossile o di tipo nucleare. Presi nel loro insieme, tutti questi fattori hanno spinto a rivedere verso il basso le previsioni concernenti il contributo nucleare alla produzione elettrica a medio e a lungo termine. Ma nonostante tutto, i riscontri storici sono complessivamente positivi, e ad attestarlo stanno i livelli raggiunti dalla componente nucleare nella produzione di elettricità nei paesi del mondo industriale.

I fattori di condizionamento della domanda

A meno di una prolungata fase di recessione dell'economia mondiale, esiste ampio accordo da parte degli esperti sul fatto che la domanda di ener-

gia, e in particolare di elettricità, continuerà ad aumentare sia nei paesi sviluppati sia in quelli in via di sviluppo. La complessa interazione dei fattori in gioco impedisce tuttavia di formulare previsioni precise relative tanto alla domanda energetica globale quanto ai mezzi per soddisfarla.

I fattori demografici giocano un ruolo particolarmente importante nei paesi in via di sviluppo, dove il tasso di natalità è elevato e l'età media della popolazione relativamente bassa rispetto ai paesi sviluppati. Tuttavia, il ritmo al quale questi paesi riusciranno a sviluppare la loro economia dipende in larga misura dalle politiche e dalle prestazioni economiche delle nazioni più sviluppate, che costituiscono i mercati di sbocco e le principali fonti di tecnologia e di capitali necessari per sostenere lo sviluppo. La domanda reale di energia dipenderà anche dall'efficienza con cui l'energia sarà utilizzata.

Nei paesi industrializzati occidentali i rendimenti energetici hanno subito un costante miglioramento, ma ulteriori progressi in questo campo dipenderanno dalla capacità, dalla volontà e dalla convenienza di investire in questa direzione.

Il petrolio e il gas naturale sono destinati a rimanere componenti determinanti dell'infrastruttura energetica mondiale. Entrambe queste fonti resteranno però caratterizzate da gravi squilibri regionali tra offerta e domanda, e l'approvvigionamento potenzialmente soggetto a interruzioni a seguito di avvenimenti politici non controllabili da parte dei paesi consumatori, come la storia recente ha ripetutamente dimostrato.

Sulle decisioni di politica energetica è in forte crescita anche l'influenza delle politiche ambientali. Sul fronte dell'approvvigionamento si tende a privilegiare - nei limiti del possibile - lo sviluppo delle risorse rinnovabili a basso costo, come ad esempio l'energia idroelettrica, anche se questa forma di energia - come del resto le altre forme di energia rinnovabile non ancora giunte ad un analogo livello di sviluppo - non è esente da inconvenienti, e genera anzi problemi ambientali che in taluni paesi (ad esempio la Svezia) sono stati giudicati inaccettabili.

Le spinte a ridurre la dipendenza dalle fonti fossili potranno in futuro dominare le scelte politiche, in particolare per quanto riguarda la produzione di energia elettrica, dove questa riduzione può essere conseguita più facilmente che nel settore dei

trasporti.

Negli ultimi anni si sono intensificate anche le spinte originarie dalle preoccupazioni per le potenziali conseguenze climatiche della crescita del tasso di CO₂ nell'atmosfera.

Allo stato attuale sembra che gran parte dei paesi industriali - anche se non tutti - adotterà una politica prudente, imperniata sul risparmio e sulla diversificazione dalle fonti fossili.

I paesi sviluppati sono meglio attrezzati tecnicamente e finanziariamente per trarre pieno profitto dalle opzioni tecnologiche di punta, come il nucleare.

Per contro, numerose nazioni in via di sviluppo dispongono ancora di un potenziale considerevole nella valorizzazione delle loro risorse naturali. Peraltro, queste opzioni non sono sempre le più redditizie, e l'utilizzazione dei combustibili fossili rappresenta ancora il mezzo più rapido per migliorare le condizioni di vita in paesi come la Cina, l'India e l'Indonesia. In questi paesi, come in molti altri paesi dell'Asia, dell'Africa e in America, ci si attende tuttavia che il ruolo del nucleare possa crescere sensibilmente nel prossimo futuro.

Le previsioni di sviluppo

Le previsioni di sviluppo elaborate dalla NEA stimano nel lungo termine una crescita asintotica della quota elettronucleare sul totale delle forniture elettriche a valori del 20-25% nell'America del Nord e del 40-60% nella zona europea dell'OCSE e in Giappone.

Ma, al di là dei risultati degli studi previsionali, l'avvenire dell'energia nucleare rimane una questione di scelte, scelte che saranno determinate dai governi nazionali autonomamente o di concerto, e che potranno essere influenzate - ma certamente non bloccate - dalle preoccupazioni della pubblica opinione.

La scelta degli elettroproduttori tenderà a vertere sulla soluzione meno costosa per soddisfare la domanda prevista, nel rispetto del quadro previsionale, regolamentare e istituzionale locale. Le azioni dell'industria potranno essere influenzate dalla regolamentazione, oppure determinate dalle forze del mercato, influenzate a loro volta dalle politiche governative di ordine fiscale e ambientale.

Le proiezioni elaborate in campo internazionale corrispondono a una serie di valutazioni dell'evoluzione in termini di crescita della produzione elettrica e della potenza nucleare, nell'ipotesi che l'economia mondiale e le politiche governative continuino a seguire il trend dell'ultimo decennio. Queste proiezioni potrebbero essere radicalmente modificate verso il basso o verso l'alto da avvenimenti e decisioni tendenti a favorire o a sfavorire la crescita economica, l'utilizzazione dell'elettricità e dell'energia nucleare stessa. Nel lungo termine le prospettive dell'energia nucleare dipenderanno in larga misura dal progresso tecnologico, in particolare per quanto riguarda lo sviluppo di reattori capaci di utilizzare con maggiore efficienza le risorse uranifere e di facilitare la penetrazione dell'energia nucleare anche nel mercato delle applicazioni non elettriche.

LA DISPONIBILITÀ E GLI IMPIEGHI DEL COMBUSTIBILE NUCLEARE

Le risorse uranifere e i servizi del ciclo del combustibile

Le risorse uranifere cosiddette "conosciute", stimate come recuperabili a costi inferiori ai 130 dollari per chilogrammo di uranio (\$/kgU), si mantengono a circa 3,6 milioni di tonnellate; di queste, 2,5 milioni di tonnellate sono stimate recuperabili a meno di 80 \$/kgU.

Esistono inoltre stime globali dei quantitativi di uranio suscettibili di esistere sotto forma di "risorse non scoperte", stime basate in larga misura su prove indirette e su estrapolazioni geologiche. Si valuta che queste cosiddette "risorse speculative" si collochino fra 9,6 e 12,1 milioni di tonnellate, recuperabili a un costo inferiore o uguale a 130 \$/kgU, cui si aggiungono 0,7 milioni di tonnellate la cui esistenza è prevista in modo più affidabile per analogia con giacimenti esistenti e con caratteristiche geologiche ben definite. Benché la localizzazione e lo sviluppo di queste risorse richiedano tempo, esse consentono grosso modo di triplicare le riserve conosciute di uranio, e su questa base non esistono preoccupazioni sull'approvvigionamento di medio termine.

Anche in tema di servizi di conversione, di arricchimento e di fabbricazione del combustibile l'offerta ha da tempo sorpassato la domanda.

Durante gli anni novanta i prezzi di mercato di questi servizi si sono fortemente ridotti sotto la spinta della concorrenza e dell'eccesso di offerta, situazione che dovrebbe perdurare ancora per un decennio. La situazione del mercato si è complicata quando molti paesi, al fine di assicurare l'alimentazione dei loro reattori, decisero - anche se non si trattava della via più economica - di sviluppare e sfruttare capacità proprie. Questa scelta, combinata con gli scostamenti di cui si è detto fra le previsioni di sviluppo della domanda e lo sviluppo reale, ha condotto all'attuale eccesso di capacità.

Per quanto riguarda il ritrattamento del combustibile esaurito, allo stato attuale solo la Francia, il Regno Unito e di recente anche la Russia offrono servizi su scala industriale. Per motivi politici ed economici alcuni paesi (USA, Canada, Svezia, Italia) hanno deciso di non ritrattare il combustibile irraggiato nei reattori civili. Ma la maggior parte dei paesi europei ha deciso di ritrattare o di far ritrattare il proprio combustibile, sia per ragioni di ordine tecnologico (come nel caso del combustibile di alcuni reattori a gas) sia nel quadro delle rispettive politiche di gestione delle scorie, o comunque per ragioni economiche. Recentemente anche il Giappone ha deciso di dotarsi di uno stabilimento di ritrattamento su scala industriale.

La capacità di ritrattamento esistente e prevista in Francia, Gran Bretagna, Russia e Giappone è lontana da quella necessaria per ritrattare tutto il combustibile irraggiato prodotto nel mondo occidentale. Ma la situazione è più equilibrata se si tiene conto dei paesi che non prevedono il ricorso al ritrattamento.

Non esiste una necessità imperativa nel breve termine di ritrattare il combustibile esaurito per recuperare l'uranio e il plutonio fissili, dato che il combustibile irraggiato proveniente dai reattori ad acqua può essere confinato in modo sicuro e senza problemi di corrosione per diversi decenni. L'interesse economico verso il ritrattamento dipende dal prezzo dell'uranio e dal costo dei servizi di arricchimento, che determinano il valore dell'uranio e del plutonio recuperato. Le condizioni correnti del mercato di questi due materiali fissili hanno ridotto i vantaggi economici del riciclo, ma nel lungo periodo questa operazione potrebbe diventare conveniente per uno sfruttamento ottimale del con-

tenuto energetico dell'uranio.

In tema di confinamento del combustibile irraggiato e delle scorie, nella maggior parte dei paesi che hanno affrontato il problema si sono incontrate difficoltà nella localizzazione e nell'accettazione di siti idonei. In molti paesi l'opposizione della popolazione locale è giunta anche ad ostacolare le ricerche geologiche necessarie per dimostrare se determinati siti si prestino o meno a questo uso. Questi ostacoli non si sono rivelati critici, dal momento che la tecnologia in quanto tale è semplice, e che la necessità materiale di individuazione dei siti non è urgente e non sarà mai molto importante.

L'esempio delle soluzioni di confinamento e smaltimento adottate o in via di adozione in alcuni paesi (USA, Svezia, Germania, Spagna ecc.) potrà fare molto per dissipare irrazionali preoccupazioni, talvolta strumentalmente stimulate nella pubblica opinione.

A condizione che esista la necessaria volontà politica, questo problema può essere risolto entro il prossimo decennio in tutti i paesi che impiegano l'energia nucleare.

I combustibili nucleari avanzati

Il ritrattamento del combustibile esaurito ha condotto a un accumulo di scorte di plutonio fissile per le quali non esiste ancora un impiego pianificato. I trattati sul disarmo nucleare hanno inoltre avuto l'effetto di rendere disponibili ulteriori ingenti quantitativi di uranio e plutonio fissili.

Questa circostanza ha convinto diversi paesi a riconsiderare l'uso nei reattori termici di combustibili a base di ossidi misti (MOX) di uranio e plutonio.

Diversi elettroproduttori impiegano attualmente questo combustibile e prevedono di utilizzarlo più intensamente in futuro.

È ormai tecnicamente dimostrata la possibilità e la capacità di estrarre dalle risorse uranifere più energia di quanta non ne possa derivare dall'insieme delle riserve mondiali di carbone, petrolio e gas naturale nel loro complesso.

Nell'ipotesi (teorica) di utilizzarle per l'alimentazione di reattori surgeneratori a plutonio, le risorse conosciute nell'area dei paesi ad economia di mercato equivalgono a 4.500 miliardi di tonnellate

di carbone, dato che va confrontato con i circa 700 miliardi di tonnellate di carbone tecnicamente ed economicamente recuperabili e con i 200 miliardi di tonnellate equivalenti di carbone che corrispondono alle riserve accertate di petrolio e gas naturale.

Il consumo totale di energia dei paesi ad economia di mercato equivale attualmente a circa 8 miliardi di tonnellate equivalenti di carbone all'anno. I progetti dell'industria nucleare prevedono un aumento significativo della fabbricazione di combustibili MOX destinati ai reattori termici, nei quali l'introduzione di quote del 30% di questi combustibili rappresenta una soluzione fattibile, sicura e suscettibile di dare sensibili vantaggi economici al crescere del prezzo dell'uranio e al ridursi del costo di fabbricazione dei combustibili MOX.

Esistono attualmente progetti di installazione di impianti per la fabbricazione di combustibili MOX per una capacità complessiva di circa 500 tonnellate/anno.

Questi impianti permetteranno tuttavia di riciclare solo una piccola frazione del plutonio prodotto annualmente dai reattori termici in esercizio nel mondo, ma una parte importante del plutonio che si prevede di recuperare attraverso il ritrattamento del combustibile irraggiato.

LE STRATEGIE PROGETTUALI, REALIZZATIVE E GESTIONALI

Le strategie gestionali e il miglioramento dei risultati di esercizio

L'evoluzione delle esigenze di sicurezza ha condotto dagli anni cinquanta ad oggi allo sviluppo di reattori sempre più complessi, dotati di sistemi di sicurezza ridondanti, con un incremento dei costi reali che, in numerosi paesi, ha ridotto la competitività del nucleare a fronte della riduzione dei prezzi dei combustibili fossili iniziata a partire dalla metà degli anni ottanta.

Alla riduzione della competitività ha contribuito anche il basso tasso di disponibilità delle centrali nucleari delle prime generazioni. In effetti, quando un reattore funziona con un tasso di disponibilità del 60% rispetto all'80% fissato come obiettivo, è come se aumentasse di quasi un quarto la quota

corrispondente ai costi di investimento sul costo dell'unità di elettricità prodotta.

In queste condizioni non sorprende che il settore nucleare sia impegnato in primo luogo a massimizzare le prestazioni delle centrali esistenti e a prolungarne la vita utile, nonché a trovare il modo di ridurre i costi di investimento legati alle nuove installazioni.

Per tutti gli esercenti nucleari una delle prime priorità è quella di ottenere dalla centrale le migliori prestazioni possibili adottando strategie gestionali ottimizzate, basate sulla presenza di personale preparato e qualificato e sulla programmazione e pianificazione meticolosa delle operazioni.

È così divenuta pratica corrente far coincidere la ricarica, la manutenzione, la sostituzione dei componenti e le ispezioni di sicurezza, in modo da ridurre al minimo la durata di indisponibilità programmata (periodi di fermata) della centrale.

Si è adottata una politica di manutenzione preventiva fondata sulla sostituzione programmata di determinati componenti a frequenze calcolate per evitare i guasti durante il funzionamento della centrale.

La vita utile e l'affidabilità dei diversi componenti sono state migliorate grazie a modifiche di progetto e all'attuazione di efficaci programmi di accertamento della qualità che permettono di garantire che tutti i pezzi siano correttamente testati prima della loro entrata in servizio.

In certi casi è possibile diminuire la frequenza degli arresti non programmati migliorando la strumentazione e i sistemi di pilotaggio del reattore, in modo tale da ridurre il numero degli arresti inutili imposti dalla necessità di mantenere margini di sicurezza eccessivi, volti a bilanciare l'imprecisione dei sistemi di controllo.

Grazie all'impegno del *management*, affiancato da una pianificazione e da una formazione appropriate e da una costante vigilanza, è stato possibile migliorare notevolmente le prestazioni dei reattori, riducendo considerevolmente la frequenza e la durata degli arresti non programmati.

L'esperienza francese ha portato a ridurre da 1,75 a 0,3-0,4 il numero medio di arresti non programmati per 1000 ore di operazione.

Nel corso degli anni è inoltre diminuita la durata degli arresti programmati e si è ridotta considere-

volmente la radioesposizione degli operatori.

L'esperienza tedesca ha ridotto da 50 a 35 giorni la durata media delle fermate per la ricarica del combustibile, e da 6 a 0,5 Sv-uomo/impianto-anno l'esposizione del personale alle radiazioni.

La maggior parte dei paesi è in tal modo riuscita a migliorare in modo significativo i risultati di esercizio iniziali degli impianti, conseguendo una riduzione notevole della quota dei costi di investimento sui costi di produzione unitari.

La standardizzazione e la serializzazione dei progetti

La seconda priorità per gli esercenti è ridurre per quanto possibile gli elevati costi di investimento tipici dei nuovi impianti nucleari.

In passato si è ritenuto che uno dei modi per ridurre i costi di investimento consistesse nell'aumentare progressivamente la taglia delle centrali, cosa che inizialmente doveva determinare una diminuzione dei loro costi unitari (vale a dire il costo per kW di potenza elettrica). La potenza unitaria per reattore è così passata nel tempo da qualche centinaio a 1500 MWe.

La potenza massima delle unità è attualmente limitata dalla tecnologia dei materiali ma anche dalle caratteristiche della rete collegata, dal momento che concentrare la produzione elettrica in un piccolo numero di unità molto grandi può nuocere, in caso di fermata non programmata, alla stabilità globale e all'affidabilità della rete, anche se le unità in questione hanno fattori di disponibilità molto elevati.

Così, mentre paesi come la Francia, il Giappone, la Germania e la Gran Bretagna - che dispongono di reti estese - hanno puntato decisamente sulle grandi centrali, in altri paesi sta crescendo l'interesse per i vantaggi associati agli impianti di taglia più piccola, che potrebbero compensare la mancata applicazione a questi reattori delle economie di scala.

Aldilà delle considerazioni sulla taglia degli impianti, il mezzo principale per ridurre i costi di investimento è la standardizzazione del progetto, tratto distintivo dei programmi francesi, canadesi e giapponesi.

La standardizzazione permette di ripartire i

costi del progetto, delle attrezzature necessarie alla fabbricazione, dell'analisi di sicurezza e delle procedure di autorizzazione; ne deriva una diminuzione della parte relativa a queste voci di spesa sui costi di ciascuna unità presa individualmente.

La scelta di progetti provati e standardizzati tutela dall'insorgenza di problemi imprevisti durante la costruzione e l'esercizio e semplifica notevolmente le procedure di autorizzazione, limitandole nel caso ideale a un esame dei fattori specifici del sito. L'adozione di progetti standardizzati permette di sfruttare l'esperienza pregressa e di evitare i problemi ricorrenti, beneficiando di equipaggiamenti e componenti testati e di ridotte giacenze di magazzino per le parti di ricambio. La costruzione in serie apporta i vantaggi della standardizzazione e sfrutta inoltre quelli associati alla fabbricazione su scala più vasta dei diversi componenti e al processo d'apprendimento che interviene nella pianificazione e nella gestione della costruzione delle diverse unità.

La concentrazione degli impianti

In alcuni paesi la semplice adozione di un programma realizzativo coerente, con reattori di modello normalizzato, internazionalmente accettati e suscettibili di rapida autorizzazione, ha migliorato enormemente le caratteristiche economiche delle nuove centrali nucleari in rapporto a quelle della prima generazione, soprattutto nel caso di installazione di più reattori in un medesimo sito.

La costruzione pianificata e coordinata di più reattori nello stesso sito ha permesso infatti di sfruttare un certo numero di vantaggi significativi:

- il costo per l'acquisizione del sito e quello delle linee di trasmissione necessarie per la connessione alla rete non crescono proporzionalmente alla potenza installata in quel sito;
- è sufficiente una sola domanda per far approvare il piano del sito e delle linee di trasmissione, con un'importante economia di tempo e di denaro per l'autorizzazione preventiva all'apertura del cantiere in accordo alle prescrizioni nazionali in materia di regolamentazione e di pianificazione;
- i reattori impiantati in un medesimo sito possono beneficiare di installazioni e servizi comuni, come ad esempio le strade o le ferrovie di accesso, la

distribuzione idrica, le unità amministrative e altre ancora in relazione alla gestione del personale;

- a condizione di attenersi a un programma predefinito, è possibile assicurare alle maestranze e alle imprese una continuità di impegno e creare in tal modo una riserva di manodopera sperimentata e qualificata capace di facilitare le fasi costruttive;
- la continuità di impiego delle maestranze in fase di costruzione può contribuire ad accrescere la produttività del personale, sopprimendo l'effetto disincentivante del licenziamento al termine del lavoro.

L'installazione di più reattori in un medesimo sito permette inoltre di:

- conseguire economie di ordine tecnico, relative agli impianti di stoccaggio del combustibile fresco e irraggiato;
- ridurre le scorte di pezzi di ricambio in rapporto alle necessità delle stesse unità dislocate separatamente;
- ridurre il fabbisogno complessivo di servizi in materia di sicurezza e manutenzione, contribuendo a una utilizzazione più efficace delle competenze specialistiche del personale di esercizio.

Molti paesi, fra cui il Canada, la Francia e il Giappone, hanno registrato riduzioni del 20% e oltre dei costi associati alla costruzione di un secondo e di altri reattori in uno stesso sito, allorché queste operazioni si inscrivevano in un programma coerente.

La riduzione dei tempi di costruzione

Gli interessi passivi sul capitale impegnato durante la costruzione di una centrale nucleare possono raggiungere una quota considerevole del costo complessivo di impianto. Si sono rilevate in proposito importanti differenze - tanto fra diversi paesi che in uno stesso paese - nell'iter di sviluppo della costruzione di un reattore, e sono stati attentamente studiati i metodi volti a garantire che la costruzione progredisca in modo regolare ed efficace fino al completamento più rapido.

Come per l'esercizio e la manutenzione dei reattori, tanto una gestione corretta quanto una pianificazione e una programmazione meticolosa sono prerequisiti essenziali. Ogni aspetto del processo di costruzione deve essere analizzato impiegando le più avanzate tecniche di pianificazione assistita al

calcolatore, aiutandosi con modelli in scala per anticipare i problemi prima che essi si pongano nella pratica. Oltre all'applicazione dei metodi classici di analisi dei percorsi critici per garantire la pronta disponibilità di materiali, componenti e manodopera, occorre prestare attenzione ad ogni possibilità di utilizzazione delle tecniche di prefabbricazione, al fine di limitare il volume dei lavori da realizzare in sito e di ridurre al minimo i rischi di interruzione per intemperie.

Ovunque possibile è utile introdurre tecniche automatizzate per effettuare le operazioni meccaniche e i controlli di qualità.

Grazie a una pianificazione preventiva rigorosa e all'adozione dei principi della standardizzazione si possono eliminare i costosi effetti delle modifiche progettuali successive all'inizio della costruzione.

Applicando estensivamente queste pratiche, e stabilendo buone relazioni di lavoro, oggi è possibile costruire una centrale nucleare da 1000 MWe in soli cinque anni (o meno, in certi casi).

La riduzione dei tempi di salita a piena potenza

La rapidità dell'avviamento e del raggiungimento della piena potenza delle nuove centrali riveste grande importanza, in quanto le entrate provenienti dalla vendita di elettricità nei primi anni di vita dell'impianto hanno un valore superiore - in termini di attualizzazione - a quelle che verranno più tardi durante la vita utile della centrale.

Alcuni reattori hanno impiegato diversi anni per arrivare alla piena produzione nominale. Tuttavia, le prestazioni ottenute con i reattori ad acqua sono soddisfacenti, e i tempi necessari per raggiungere la piena potenza sono stati ridotti in modo considerevole nei reattori di modello provato.

Il prolungamento della vita utile delle centrali

Dal momento che i costi d'investimento delle centrali nucleari sono elevati, e che i costi legati al combustibile e all'esercizio sono relativamente bassi, è importante utilizzare al meglio le centrali esistenti.

Come accennato in precedenza, il primo obiettivo degli esercenti è quello di ottenere dalle centrali in esercizio il valore più alto possibile del fattore di

utilizzazione, riducendo al minimo i periodi di fermata, programmati o no che siano.

A questo proposito va attualmente emergendo una nuova possibilità di sfruttare con maggiore efficacia il capitale immobilizzato per la costruzione dell'impianto. Numerose centrali nucleari stanno per raggiungere la fine della vita utile prevista in fase di progetto. Vita utile che era stata determinata sulla base di ipotesi tecniche particolarmente conservative e adottando margini di sicurezza considerevoli, che riflettevano lo stato delle conoscenze e dell'esperienza di venti e più anni fa.

Oggi si sta constatando che molti dei reattori esistenti sono in grado di continuare a funzionare in buone condizioni di sicurezza ben oltre la durata della vita teorica inizialmente prevista. Se fosse realmente così, l'energia elettrica prodotta oltre la vita utile teorica dell'impianto avrebbe un costo di produzione estremamente basso.

Il dibattito internazionale sulla possibilità di prolungare la vita utile delle centrali in esercizio va crescendo, a fronte delle valutazioni relative agli investimenti supplementari eventualmente necessari e alla loro possibile schedulazione, e ci si chiede in particolare se la gestione del reattore e del suo ciclo del combustibile durante la vita utile programmata possa influire sulla fattibilità o sui costi del suo prolungamento.

Apparentemente nulla impedisce a priori di ritenere che si possa prolungare la vita dei reattori ad acqua di nuova progettazione ben oltre i 40 anni, fino a 60 anni e più. Si è dunque ben lontani dalla vita di 20-30 anni che numerosi paesi avevano prudentemente assunto come ipotesi nelle loro pianificazioni iniziali.

L'EVOLUZIONE TECNOLOGICA DEGLI IMPIANTI

I reattori ad acqua di tipo avanzato

Dal momento che i reattori raffreddati ad acqua costituiscono attualmente più del 90% del parco installato, e che questa dominazione tecnologica sembra destinata a permanere, non sorprende che i progettisti continuino a basarsi su questo tipo di concezione per analizzare le possibilità di migliora-

mento tecnico-economico. Ai modelli di concezione migliorata si dà usualmente il nome di "reattori di tipo avanzato", denominazione che copre una vasta gamma di perfezionamenti che vanno dalle modifiche minori apportate ai modelli esistenti a revisioni più radicali dell'intera struttura del reattore e delle sue modalità di esercizio.

All'atto pratico, tutti i paesi che hanno avviato programmi nucleari sono attualmente impegnati ad applicare strategie gestionali perfezionate ai reattori esistenti.

Numerosi paesi hanno adottato configurazioni impiantistiche migliorate per i programmi realizzativi in corso. Si tratta di miglioramenti derivanti dall'evoluzione delle centrali, che integrano i progressi conseguiti a livello di interfaccia uomo-macchina e che fanno appello alle tecnologie più recenti riguardanti i materiali. I progetti sono stati infine migliorati per semplificare la costruzione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti, onde recuperare efficienza in termini di disponibilità e di costi di investimento.

I reattori ad acqua di tipo avanzato commercialmente disponibili sono per la maggior parte impianti di grande potenza, conformemente alla tendenza generale in questo senso osservata negli anni ottanta e novanta. I reattori canadesi ad acqua pesante in pressione da 300 e 700 MWe costituiscono delle eccezioni.

Tuttavia durante gli anni novanta sono stati sviluppati negli Stati Uniti, in Svezia, in Giappone e in Gran Bretagna modelli di reattore ad acqua leggera di tipo avanzato caratterizzati da una potenza ridotta. Alcuni di essi si ispirano essenzialmente alle tecniche attuali, ma si avvalgono dei vantaggi associati alla concezione modulare e ai dispositivi di sicurezza passiva.

Altri innovano più radicalmente la tecnologia e integrano nuovi principi concettuali che possono richiedere una fase sperimentale su grandi prototipi prima di essere trasferiti al contesto industriale. Gli obiettivi generali - ridurre i costi di produzione dell'elettricità nucleare mantenendo o aumentando il livello di sicurezza - sono comuni a tutti i progetti.

Qualunque sia il tipo di reattore, le modifiche apportate per semplificarlo e per aumentarne l'affidabilità si traducono spesso anche in un miglioramento delle sue caratteristiche di sicurezza.

Gli esperti sono persuasi che i grandi reattori

raffreddati ad acqua di tipo avanzato attualmente proposti beneficeranno dell'esperienza accumulata su scala internazionale, e che oltre la prospettiva di una affidabilità e di una disponibilità considerevolmente superiori, essi presenteranno costi di investimento unitari (costi per kW) significativamente più bassi delle centrali di concezione più vecchia di potenza comparabile.

In Giappone si ritiene attualmente che un reattore ad acqua bollente di tipo avanzato possa costare il 20% in meno dei suoi predecessori.

I reattori di piccola e media potenza

Come già notato, la tendenza in atto nella maggior parte dei paesi dell'OCSE è quella di sviluppare e costruire reattori nucleari sempre più potenti, con unità che raggiungono i 1500 MWe.

Questa tendenza è stata alimentata dalla prospettiva di una riduzione dei costi unitari delle centrali (vale a dire del costo per kW di potenza), conformemente ai principi consolidati di economia di scala che si applicano nell'impiantistica. Tuttavia le centrali di grande potenza hanno anche controindicazioni, perché difficilmente possono essere inserite nelle reti elettriche di piccole dimensioni non interconnesse, tipiche di molti paesi.

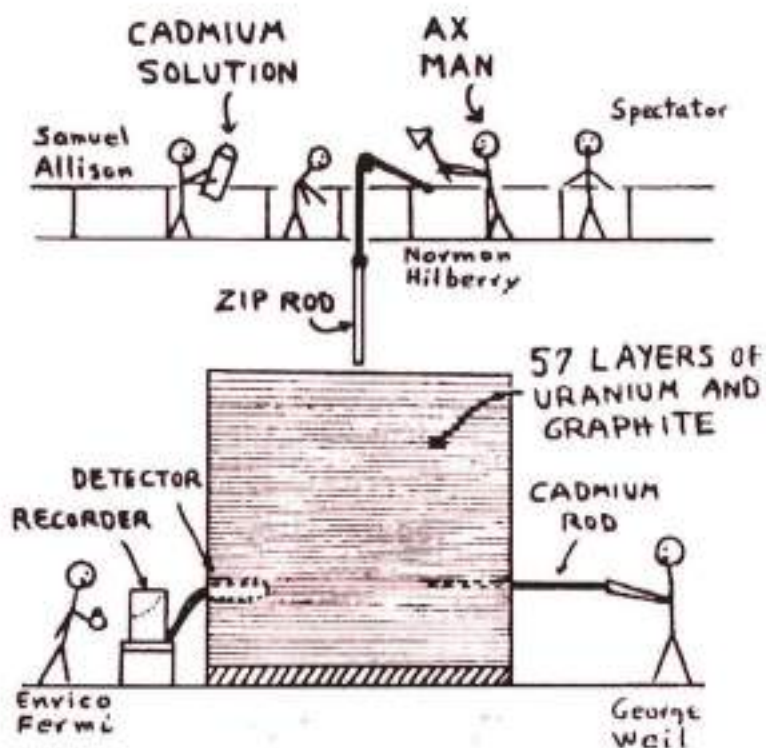
In questi paesi i piccoli reattori offrono la possibilità di rispondere meglio alla crescita della domanda di elettricità aumentando in modo progressivo la capacità di produzione. Essi, inoltre, si prestano meglio alle tecniche di costruzione modulare e alla prefabbricazione dei componenti.

Negli ultimi quindici anni sono stati sviluppati una quindicina di progetti concettuali di piccoli reattori basati sull'adozione di dispositivi di sicurezza passiva, nel tentativo di rendere più comprensibile e accettabile la tecnologia all'opinione pubblica nei paesi in cui le preoccupazioni relative alla sicurezza ostacolano lo sviluppo dell'energia nucleare.

Tutti questi progetti hanno come obiettivo comune la semplificazione dei sistemi di sicurezza grazie a misure quali l'adozione di sistemi passivi per la refrigerazione d'emergenza e per l'asportazione del calore residuo.

Queste misure consentono l'eliminazione dei sistemi di sicurezza più complessi tipici dei reattori ad acqua di grande potenza.

La riduzione dei costi che ne risulta può com-



THE FIRST REACTOR

December 2, 1942

Raymond Murray

Vignetta - realizzata da Raymond Murray della North Carolina State University in base alla descrizione fatta dai partecipanti - rappresentante l'esperimento condotto il 2 dicembre 1942 con la pila CP-1. Vicino ai vari dispositivi sono riportati i nomi di coloro che li manovravano. La "zip rod" era una barra di sicurezza di cadmio (potente assorbitore di neutroni) appesa ad una fune collegata ad una puleggia. In caso di pericolo sarebbe stata calata immediatamente. I contenitori di cadmio in soluzione sarebbero stati rovesciati in caso di pericolo. La barra di cadmio veniva estratta segmento per segmento e a ogni arresto veniva misurata l'attività neutronica. Fermi confrontava i risultati con le previsioni basate sulle misure precedenti. Quando si arrivò all'ultimo segmento Fermi era certo che la criticità sarebbe stata raggiunta. Infatti, quando la barra di cadmio fu del tutto estratta, la pila divenne critica e la prima reazione a catena autosostenentesi ebbe luogo. La pila venne lasciata funzionare per ventotto minuti a una potenza massima di 0,5 watt.

pensare in parte la perdita dei vantaggi derivanti dalle economie di scala. Allo stato attuale non esistono reattori di questo tipo in esercizio o in costruzione, ma l'esperienza già acquisita nell'esercizio dei reattori lascia pensare che il fattore di disponibilità dei piccoli reattori potrebbe essere superiore a quelli dei reattori di più grande potenza, in ragione della loro maggiore semplicità e del numero più ridotto dei componenti.

Gli studi condotti in diversi paesi sembrano indicare che i reattori di piccola e media potenza potrebbero produrre elettricità a costi poco diversi da quelli delle grandi centrali da 1000 MWe o più, una volta valutati i vantaggi associati alla semplificazione del progetto, alla costruzione modulare e in serie e alla riduzione dei tempi di costruzione.

I fattori che giocano a sfavore dei piccoli reattori sono i maggiori costi di esercizio e manutenzione, risultanti dal numero più elevato di unità, e la perdita dei vantaggi derivanti dalle economie di scala.

Resta il fatto che i piccoli reattori di tipo avanzato, e specialmente quelli concepiti sulla base di principi più originali, devono ancora raggiungere lo stadio della dimostrazione.

Prima di poter determinare con certezza le loro caratteristiche economiche e la possibilità di ottenere una autorizzazione generalizzata è necessario costruire prototipi e farli funzionare.

Attualmente i paesi che hanno in corso programmi di investimento importanti si attengono ai modelli di grande potenza, dei quali hanno già sperimentato le buone prestazioni e sui quali hanno accumulato una lunga esperienza di esercizio.

Sembra dunque più probabile che le prospettive più interessanti per lo sviluppo delle centrali di bassa e media potenza possano collocarsi nelle nazioni industriali avanzate in cui, come in Italia, i programmi nucleari sono stati fermati, oppure nei paesi dotati di piccole reti elettriche.

La molteplicità dei modelli di reattore a bassa potenza è in sé un ostacolo a una loro rapida accettazione. Resta inoltre da dimostrare che, nelle condizioni economiche che prevalgono attualmente nel mondo, i piccoli reattori possano essere economicamente competitivi a fronte delle centrali nucleari di elevata potenza, o che possano competere, nel campo della produzione di elettricità e calore, con i piccoli impianti classici e - qualora disponibili - con

le fonti rinnovabili. Nondimeno, le preoccupazioni attualmente concernenti l'impatto ambientale associato alla crescente utilizzazione dei combustibili fossili, così come l'inevitabile incremento dei fabbisogni energetici dei paesi in via di sviluppo, potrebbero effettivamente favorire il futuro delle piccole centrali nucleari.

I reattori ad alta temperatura

Le proprietà del fluido refrigerante utilizzato nei reattori ad acqua impongono di mantenere la temperatura massima dell'acqua a 300 °C circa. Questa condizione limita il rendimento termico della produzione di elettricità a un livello inferiore a quello tipico delle più moderne centrali a combustibile fossile. Dato il basso costo del combustibile nucleare, non si tratta di un problema importante, ma la possibilità di raggiungere temperature più elevate contribuirebbe ad accrescere la produzione elettrica per un dato investimento, offrendo inoltre in prospettiva la possibilità di utilizzare il calore di origine nucleare nei processi industriali ad alta temperatura.

I reattori avanzati moderati a grafite e raffreddati a gas (AGR) messi a punto nel Regno Unito hanno compiuto un passo in questa direzione, con temperature massime del refrigerante (anidride carbonica) comprese fra 350 e 650 °C, livello comparabile a quello raggiunto nei reattori veloci raffreddati a sodio liquido. Inoltre i reattori a gas ad alta temperatura (HTGR) utilizzando come refrigerante l'elio sono progettati per raggiungere temperature collocate fra i 750 e i 950 °C.

Gli impianti dimostrativi costruiti finora sono prototipi di bassa e media potenza, che si prestano bene alla costruzione modulare e offrono un gran numero dei vantaggi descritti in precedenza.

Inoltre, essi presentano coefficienti di reattività fortemente negativi, l'aumento della temperatura del nocciolo provoca modificazioni nelle caratteristiche dei materiali che riducono il livello di potenza, da cui deriva una buona capacità di autostabilizzazione. In caso di guasto delle pompe primarie la crescita di potenza è meno rapida che nei sistemi raffreddati ad acqua, grazie alla inerzia termica della grande massa di grafite che serve da moderatore.

Il combustibile è di tipo ceramico, stabile ad alta

temperatura, privo di guaine metalliche che possono danneggiarsi; inoltre, l'utilizzazione di combustibili misti composti di torio e di uranio permette di ottenere tassi di combustione elevati, grazie alla conversione in pila di una parte del torio in uranio 233 fissile.

Le attività di sviluppo dei reattori ad alta temperatura hanno subito un rallentamento nel corso dell'ultimo decennio poiché il loro mercato potenziale non si è concretizzato, mentre la necessità di disporre di processi ad alta temperatura per la produzione di idrogeno e di gas di sintesi non si è ancora fatta sentire, a causa del protrarsi di un periodo in cui i combustibili fossili sono stati disponibili in grande quantità e a basso prezzo. Ma la tecnologia HTGR è stata ampiamente dimostrata e resta una possibile opzione per il futuro.

I reattori che migliorano lo sfruttamento del combustibile

Nei paesi industriali avanzati sono attualmente in fase di sviluppo molti progetti di reattore con l'obiettivo specifico di pervenire a una migliore utilizzazione del combustibile.

Tra queste realizzazioni si può citare il reattore francese a spettro neutronico variabile, il reattore ad acqua leggera tedesco-svizzero a conversione elevata, il reattore di tipo avanzato ad acqua bollente moderato ad acqua pesante (ATR) in corso di messa a punto in Giappone e il progetto canadese di utilizzare in tandem i reattori ad acqua leggera e quelli ad acqua pesante. In quest'ultimo progetto si utilizza il combustibile irraggiato nei reattori ad acqua leggera, troppo impoverito in uranio 235 per servire ulteriormente in questi reattori, per alimentare i reattori ad acqua pesante in pressione, più efficienti nell'economia neutronica, e che funzionano attualmente con combustibile a ossido di uranio naturale (non arricchito).

L'abbondanza dell'uranio sul mercato mondiale ha creato una situazione che non incita a spingere ancora le ricerche nella direzione di una migliore economia dell'uranio, e l'interesse verso i diversi tipi di reattore dipenderà largamente dalle economie che essi permetteranno di ottenere nei costi totali di fabbricazione e di gestione del combustibile. Tuttavia la messa a punto di reattori a ciclo uranio-

torio e di reattori al plutonio raffreddati con sodio liquido (FBR) continua a suscitare interesse. La maggiore attrattiva del reattore veloce è legata alla sua capacità di accettare in ingresso uranio impoverito, proveniente sia dai residui degli impianti di arricchimento sia dal ritrattamento del combustibile irraggiato nei reattori termici, e di convertirlo in plutonio. In linea di principio il reattore veloce può produrre (generare) il quantitativo di plutonio necessario per garantire indefinitamente il suo funzionamento, e inoltre un quantitativo di plutonio sufficiente a costituire la prima carica di un altro reattore veloce surgeneratore.

Questo processo di conversione permette di moltiplicare per 60 la quantità di energia estraibile dall'uranio naturale.

È stato dimostrato che i combustibili utilizzati nei reattori veloci possono raggiungere tassi di bruciamento (*burn-up*) molto più spinti di quelli tipici degli attuali reattori termici. È anche possibile ridurre considerevolmente i quantitativi di combustibile che occorre fabbricare e ritrattare in seguito, al fine di recuperare il plutonio necessario per sostenere il ciclo del combustibile del surgeneratore. Questo vantaggio, coniugato con la totale non necessità di combustibile nuovo e di servizi di arricchimento, consente di compensare abbondantemente i costi aggiuntivi relativi alla gestione del combustibile al plutonio, e può portare ad importanti economie nei costi di esercizio.

Purtroppo, il funzionamento dei surgeneratori - nella concezione giunta allo stadio di prototipo industriale con il Superphenix - è fondato su una doppia batteria di scambiatori di calore (sodio-sodio e sodio-acqua), complicazione impiantistica che aumenta i costi di investimento e che ha prodotto problemi di affidabilità.

Tanto la tecnologia dei reattori veloci a ossido quanto il loro ciclo del combustibile hanno raggiunto il livello di prototipo industriale dimostrativo, ma è opinione diffusa che non si avrà nel breve termine una significativa affermazione di questa nuova filiera. Si tratta di una conseguenza della crescita più lenta del previsto della domanda di potenza nucleare installata e delle previsioni indicanti la disponibilità di risorse uranifere per buona parte del XXI secolo per i reattori termici. Resta così tempo in abbondanza per migliorare il progetto, al fine di

ridurre i costi di investimento e di venire a capo dei problemi tecnici incontrati nella parte tecnologica dei prototipi dimostrativi realizzati.

I miglioramenti del ciclo del combustibile

I perfezionamenti metodologici hanno permesso di migliorare tutti gli aspetti del comportamento del combustibile, e in particolare il tasso di bruciamento, ovvero la quantità di energia estratta dal combustibile prima che se ne renda necessaria l'estrazione dal reattore.

Normalmente i reattori ad acqua leggera operano con tassi di bruciamento in pila di 33.000 MWd/t, ma sono stati messi a punto combustibili di tipo avanzato capaci di raggiungere tassi di burn-up superiori a 50.000 MWd/t.

L'obiettivo di questi miglioramenti è quello di ridurre i costi totali del ciclo del combustibile e della produzione di elettricità di origine nucleare.

I combustibili a tasso di bruciamento elevato devono avere un arricchimento più spinto in uranio 235, ed esigono pertanto quantitativi maggiori di uranio naturale.

In compenso i loro costi di fabbricazione e di ritrattamento per kg di combustibile restano invariati, e in tal modo il costo netto del combustibile per unità di energia prodotta diminuisce.

I combustibili a elevato tasso di burn-up offrono un vantaggio secondario, legato alla possibilità di effettuare le ricariche a intervalli di tempo più prolungati, oppure di ricaricare il reattore a intervalli identici, ma sostituendo una parte minore degli elementi del nocciolo all'atto di ciascuna ricarica.

L'una e l'altra opzione possono accrescere la disponibilità globale del reattore, consentendo di diminuire i costi unitari grazie a un aumento della produzione associato a investimenti di capitale invariati. La messa a punto di combustibile migliorato a ossido di uranio per impiego nei reattori termici si accompagna allo sviluppo dei combustibili a ossidi misti di uranio e plutonio (MOX) destinati ad alimentare gli attuali reattori ad acqua. L'impiego di combustibili MOX si va già espandendo nei reattori termici, e lo sviluppo di combustibili MOX ad alto tasso di burn-up avanza di pari passo con quello dei combustibili a ossido di uranio.

I progressi tecnici hanno interessato tutti gli stadi del ciclo del combustibile nucleare.

Nel corso degli anni l'attenzione si è concentrata in particolare sul processo di arricchimento dell'uranio, che rappresenta una voce importante nei costi del combustibile.

Il processo di arricchimento per diffusione gassosa, grosso consumatore di energia e largamente adottato nei primi anni del nucleare civile, continua ad occupare una posizione preponderante negli Stati Uniti e in Francia.

Regno Unito, Olanda e Germania hanno collaborato allo sviluppo del processo per ultracentrifugazione, che richiede molta meno energia.

In molti paesi ci si è recentemente applicati alla ricerca di miglioramenti di quest'ultima tecnologia e alla messa a punto di altre tecniche di separazione basate sull'impiego del laser, la cui fattibilità è stata dimostrata, ma che non hanno ancora raggiunto lo stadio industriale.

Lo smaltimento del combustibile irraggiato e delle scorie

Contrariamente a quanto è avvenuto nella maggior parte degli stadi del ciclo del combustibile nucleare, non esiste tuttora (se si eccettuano alcune iniziative nascenti in Russia) un mercato commerciale per lo stoccaggio del combustibile nucleare irraggiato o per lo smaltimento di questo combustibile o delle scorie provenienti dal ritrattamento.

Per questo i costi di questi stadi della parte terminale del ciclo del combustibile nucleare devono essere stimati sulla base di studi teorici.

Esiste una grande varietà di tecniche diverse per lo stoccaggio del combustibile irraggiato e per il suo incapsulamento prima del confinamento. Esiste ugualmente una vasta gamma di progetti concernenti i depositi in formazioni geologiche costituite da matrici argillose, da formazioni saline o da rocce granitiche. È quindi inevitabile che le stime dei costi futuri differiscano in modo significativo. Ma ancora una volta da ciò non bisogna dedurre - come purtroppo si è fatto in passato e si continua a fare - che il settore nucleare sia incapace di determinare i costi relativi alla chiusura del ciclo del combustibile.

A condizione di conoscere precisamente e con chiarezza le prescrizioni da rispettare riguardo l'immobilizzazione delle scorie, è possibile concepire e valutare con sufficiente precisione le installazioni

appropriate.

Anche tenendo conto dell'incertezza relativa alle specifiche che saranno fissate, il grado di incertezza attuale, a valle dell'esperienza acquisita sul piano internazionale, è troppo piccolo per influire sensibilmente sui costi totali della produzione di elettricità da fonte nucleare. In estrema sintesi, i volumi dei rifiuti radioattivi sono piccoli rispetto a quelli tipici dei rifiuti industriali, e le possibilità di sistemazione sono vaste.

Ne deriva che i costi associati alla soluzione definitiva di questo problema non possono che essere una piccola frazione di quelli della rimanente parte del ciclo del combustibile.

LE RAGIONI DELLA TECNOLOGIA NUCLEARE

Gli aspetti tecnologici

I dati e le informazioni esistenti circa la diffusione dell'energia nucleare a livello internazionale mostrano come sia falsa la tesi che, a valle del disastro di Chernobyl, si tratti di una tecnologia ormai abbandonata.

È invece vero che dopo quel drammatico evento la potenza nucleare in funzione in 32 paesi del mondo è aumentata del 40%, raggiungendo gli attuali 350.000 MWe, e che attualmente sono in costruzione 44 nuovi impianti in 15 paesi diversi per una potenza complessiva di 33.700 MWe, che rappresenta circa il 10% della potenza in esercizio.

Come si è detto, lo sforzo per la messa a punto di tecnologie radicalmente nuove si è affievolito nell'ultimo decennio a causa dell'aumento dei costi di sviluppo, di autorizzazione e di dimostrazione, e a causa della contrazione delle prospettive di sbocco per le nuove installazioni.

Ciò ha convinto i principali costruttori ad accordare priorità al miglioramento - talvolta anche sostanziale - delle configurazioni impiantistiche mature e alla loro evoluzione attraverso cambiamenti ispirati all'esperienza acquisita.

Considerazioni analoghe possono essere espresse per la tecnologia dei reattori veloci a metallo liquido, verso la quale si sta registrando un calo di interesse dettato principalmente dall'abbondanza e dal basso costo del combustibile nucleare.

Le esperienze condotte e i prototipi realizzati

hanno tuttavia consentito a diversi paesi di padroneggiare anche questa tecnologia innovativa che, pur non rivestendo interesse economico nell'immediato, è oggi disponibile per gli sviluppi di medio e lungo termine.

Le principali eccezioni al calo di interesse per le configurazioni impiantistiche innovative riguardano i reattori di piccola e media potenza, per i quali sono possibili nuovi importanti sbocchi, soprattutto in considerazione dei sensibili vantaggi apportati dalla semplificazione e dalla modularità.

Una delle principali difficoltà del settore nucleare resta tuttavia quella di reperire i fondi per finanziare lo sviluppo e l'evoluzione di tecnologie che richiedono lunghi periodi prima che possano essere conseguiti benefici commerciali.

I costi dei progetti a tecnologia avanzata - e non solo in campo nucleare - sono elevati perché per raggiungere il necessario grado di confidenza sulla loro sicurezza, sulla loro affidabilità e sulla loro vita economica occorre mettere a punto prototipi dimostrativi in piena scala. Nel passato questo problema è stato meno acuto, in quanto i governi hanno sostenuto i progetti più avanzati sia singolarmente sia nel quadro della cooperazione. Il fatto che da qualche anno gli operatori pubblici tendano ad appoggiarsi all'industria privata per finanziare i settori tecnologici di punta solleva serie preoccupazioni per il futuro dei progetti di sviluppo più costosi e prolungati, suscettibili di produrre effetti economici solo a lungo termine.

Gli aspetti economici

La maggior parte delle decisioni relative agli investimenti nel settore energetico è spesso assunta individuando le soluzioni più vantaggiose sulla base di considerazioni e di criteri di comparazione strettamente finanziari, che tengono conto della futura possibile evoluzione dei prezzi dei combustibili e di tutte le incertezze relative alla sicurezza dell'approvvigionamento.

I dati relativi alle 440 centrali attualmente in funzione nel mondo e gli studi condotti in campo nazionale e internazionale sugli impianti commissionati nella seconda metà degli anni novanta dimostrano che l'energia elettronucleare è competitiva in termini di convenienza economica immediata rispetto all'elettricità prodotta nelle centrali ter-

moelettriche convenzionali. Da un recente studio condotto dall'ENEL risulta che i nuovi impianti termoelettrici avranno, rispetto al nucleare, costi di produzione più elevati del 15% per le centrali a carbone, del 34% per le centrali a ciclo combinato gas-vapore e del 37% per quelle a olio combustibile.

La Francia, che conta attualmente su una copertura nucleare pari al 77% del proprio fabbisogno, registra oggi il costo del kWh più basso d'Europa e il più stabile rispetto alle fluttuazioni del prezzo dei combustibili fossili, un incremento dell'autosufficienza energetica dal 22% al 50% dal 1973 ad oggi, una esportazione netta di energia elettrica per 15 miliardi di franchi all'anno (65 TWh/anno) e un fatturato estero dell'industria nucleare pari a circa 12 miliardi di franchi all'anno.

Ma esistono anche altri argomenti e altri vantaggi più generali associati all'energia nucleare che - adeguatamente divulgati - potrebbero contribuire a controbilanciare le reticenze della pubblica opinione. Se l'elettricità nucleare rappresenta la soluzione meno costosa per la copertura del carico di base, la sua utilizzazione può produrre anche effetti quali il miglioramento della bilancia dei pagamenti dei paesi importatori di combustibili fossili, la stabilizzazione dei prezzi dei combustibili fossili sui mercati internazionali, il contributo alla crescita economica nazionale (superiore a quello che si otterrebbe investendo nelle tecnologie legate ai combustibili fossili) e l'assenza delle conseguenze negative per l'ambiente che sono proprie delle centrali termoelettriche. È stata altresì ampiamente dimostrata l'esistenza di ingenti ricadute tecnologiche ed economiche delle attività svolte nel comparto nucleare. Si tratta in questo caso di vantaggi che non sono legati alle installazioni, ma che interessano settori commerciali e industriali diversi come conseguenza delle attività di punta condotte dall'industria nucleare.

Gli aspetti ambientali

Tenendo conto dell'attenzione prioritaria che la comunità internazionale sta oggi accordando agli effetti ambientali e alla necessità di ridurre le emissioni dei gas che vi contribuiscono, si può constatare l'esistenza di un rinnovato interesse internazionale all'idea di valutare un bilancio dei costi e dei benefici per la collettività associati all'energia nucleare, con particolare riferimento anche a quelli

che non compaiono nelle valutazioni strettamente economiche.

Le analisi economiche classiche rendono sufficiente conto dell'insieme dei costi associati all'approvvigionamento di elettricità di origine nucleare e dimostrano che i costi esterni per l'ambiente e per la salute, tanto in caso di normale esercizio quanto in caso di situazioni incidentali ipotetiche, sono molto bassi in rapporto ai costi diretti della produzione. Altrettanto non si può dire per le centrali a combustibile fossile, anche quando esse sono equipaggiate con dispositivi di desolfurazione e di denitrificazione, poiché non esiste alcun modo praticabile per limitare le emissioni di anidride carbonica.

Il nucleare presenta gli indubbi vantaggi che derivano dalla caratteristica di non emettere ossidi di zolfo, di azoto e anidride carbonica, ma solo scarichi termici (comuni del resto a tutti gli impianti termoelettrici) e deboli tracce di radioattività (qualche per cento del fondo naturale), emissione, quest'ultima, dalla quale non sono esenti gli impianti a carbone o gli impianti geotermici.

Le centrali nucleari sono in effetti gli unici impianti di generazione termica capaci di assicurare il pieno controllo e il totale contenimento di tutte le scorie generate dal processo di produzione, rendendo possibile sotto questo profilo un funzionamento a impatto ambientale pressoché nullo.

L'esperienza condotta dai paesi che hanno fatto estensivo ricorso al nucleare per la produzione di energia elettrica dimostra che i vantaggi ambientali non sono solo teorici. Uno studio recentemente condotto dal CEA dimostra che la mancata realizzazione del programma nucleare francese si sarebbe tradotta nel 2000 in un forte incremento delle emissioni di SO₂ (+0,5 Mt/anno, ovvero +30% rispetto ai livelli attuali), NO_x (+0,7 Mt/anno, ovvero +40%) e CO₂ (+340 Mt/anno, ovvero +90%). In Francia il livello di emissione di CO₂ era nel 1973 di 530 Mt/anno, mentre oggi è ridotto a 387 Mt/anno.

Negli ultimi vent'anni l'energia nucleare ha evitato a livello mondiale l'emissione di oltre 4 miliardi di tonnellate di carbonio come anidride carbonica.

Gli aspetti di sicurezza

L'esperienza condotta a livello mondiale in quarant'anni di sviluppo della tecnologia dei reattori nucleari di progettazione e costruzione occidentali

ha dimostrato ampiamente la loro elevatissima sicurezza.

In condizioni di normale funzionamento le emissioni di una centrale nucleare sono praticamente nulle, mentre nell'unico incidente di rilievo avvenuto a un impianto elettronucleare occidentale - quello occorso nel 1979 alla centrale nucleare statunitense di Three Mile Island - il sistema di contenimento del reattore (progettato all'inizio degli anni settanta) ha resistito alla fusione di oltre il 60% del nocciolo senza alcun impatto esterno di qualche significato sanitario.

Pur essendo gli impianti nucleari in esercizio nei paesi occidentali sufficientemente sicuri, le specifiche di progetto che si sono diffuse nell'ultimo decennio a livello internazionale consentono fin d'ora di realizzare impianti capaci di impedire qualsiasi contaminazione esterna anche nelle peggiori condizioni incidentali.

I nuovi criteri di sicurezza elaborati per i reattori dell'ultima generazione sono stabiliti sulla base di un approccio su tre livelli:

- la riduzione della frequenza di accadimento e della severità degli incidenti attraverso l'aumento dei margini di progetto e la semplificazione dell'impianto;
- l'introduzione di sistemi atti a prevenire il danneggiamento del nocciolo anche in caso di incidente;
- l'adozione di sistemi di contenimento in grado di impedire ogni fuoriuscita di radioattività anche in caso di danneggiamento del nocciolo.

I nuovi requisiti di sicurezza riducono a un evento ogni 100 mila anni la probabilità di danneggiamento del nocciolo, e a un evento ogni milione di anni la probabilità che un ipotetico individuo residente alla recinzione della centrale possa assumere una dose di qualche significato sanitario. Questi requisiti equivalgono ad affermare il principio che il rischio di danno di origine

nucleare per un individuo della popolazione deve essere inferiore all'1% del rischio derivante dalle altre principali attività industriali: nessuna altra attività industriale, per quanto rischiosa, è stata mai assoggettata a restrizioni analoghe.

Il problema delle scorie radioattive non è dissimile da quello di tutti gli altri rifiuti tossici e nocivi prodotti dalle attività industriali, con la differenza che questi ultimi (arsenico, cadmio, piombo, cromo, mercurio, vanadio) danno luogo a composti che sono stabili e che sono talora dispersi nell'ambiente, mentre l'industria nucleare ha programmato fin dall'inizio il pieno controllo e il trattamento delle proprie scorie.

La maggior parte dei rifiuti nucleari consiste in materiali a basso livello di radioattività, usualmente comparabile con la radioattività naturale. I rifiuti ad alta attività si riducono a pochi metri cubi all'anno per centrale.

Opportunamente condizionati, i rifiuti radioattivi di tutti i tipi possono essere sistemati in depositi temporanei per alcuni decenni, prima di essere collocati in depositi definitivi entro formazioni geologiche stabili. Depositi di questo tipo sono già funzionanti in alcuni paesi e sono in costruzione in altri.

Conclusioni

A fronte della situazione e delle prospettive tecnologiche delineate in precedenza, è evidente il ruolo che l'energia nucleare è destinata a giocare in futuro nel soddisfacimento del fabbisogno energetico mondiale. Ma la cosa più necessaria è assicurare una corretta informazione sull'energia nucleare come fattore di sviluppo sostenibile, al fine di acquisire in prospettiva quell'accettazione diffusa da parte dell'opinione pubblica che è già patrimonio consolidato nella grande maggioranza dei paesi industriali avanzati.

Novembre 2002

Paolo Fornaciari

Prospettive di sviluppo
dell'energia nucleare da fissione



LO STATO ATTUALE DELL'ENERGIA NUCLEARE

L'energia nucleare, nata negli Stati Uniti per iniziativa del nostro Enrico Fermi, si è sviluppata in Europa a partire dagli anni 60 e 70, particolarmente dopo la guerra del Kippur (1973), per poi migrare anche in Estremo Oriente.

Il numero totale di unità nucleari attualmente in esercizio nel mondo è 440 per un totale di 351 GWe; 30 nuove unità sono in costruzione (47% di tipo PWR, 21% BWR 11% WWR e il resto equamente diviso tra GCR, PHWR e RBMK) e 24 ulteriori unità sono già state ordinate (tabella 1).

Le unità in esercizio sono così distribuite: Europa occidentale 153 (128 GWe), Nord America 118 (107 GWe), Asia 92 (66 GWe), Europa orientale e paesi dell'ex Unione Sovietica 69 (46 GWe), America Latina 6 (4 GWe) ed Africa 2 (2 GWe).

Le unità in costruzione sono così ripartite: Asia 15 (12 GWe), Europa orientale e paesi dell'ex Unione Sovietica 14 (11 GWe) e America Latina 1 (0,7 GWe).

Il Giappone prevede di aumentare la propria potenza nucleare installata dagli attuali 44 GWe a 70 GWe nel 2010 e la Cina di mettere in esercizio nei prossimi venti anni 30 GWe a fronte degli attuali 2,17 in esercizio e 4,4 in costruzione.

Altre decisioni sono attese da Taiwan, Nord e Sud Korea, India, Pakistan e Iran.

L'Asia è, pertanto, attualmente l'area del mondo maggiormente interessata all'energia nucleare per il

rilevante incremento demografico e le conseguenti necessità energetiche, costituendo un mercato molto interessante sia per le industrie occidentali che giapponesi.

LE TENDENZE

L'abbondanza delle risorse energetiche mondiali, la grande fiducia nei benefici ottenibili con il mercato "globale" e con le privatizzazioni nel settore energetico, i bassi prezzi dell'energia, hanno indotto negli anni scorsi ad un facile ottimismo.

L'opinione prevalente dei massimi esperti ed analisti energetici internazionali, quali Neil Atkinson, Peter Davies, Robert Mabro, Peter Odell e Marcello Colitti, è stata fino a tre anni fa che nei prossimi decenni non ci sarebbero state tensioni sui mercati, essendo l'offerta di olio combustibile e gas naturale largamente sufficiente a soddisfare le necessità mondiali. Anzi si era vagheggiata una "nuova era" a bassi prezzi del petrolio ed anche Zaki Yamani, il potente Ministro del petrolio e delle risorse minerarie dell'Arabia Saudita negli anni 60, aveva erroneamente preconizzato la fine dello strapotere dell'OPEC (l'Organizzazione dei Paesi Produttori ed Esportatori di Petrolio).

È bastato invece che i "dieci fratelli", gli sceicchi arabi, con l'appoggio delle grandi compagnie petrolifere (le "sette sorelle", come le chiamava Enrico Mattei) ritrovassero coesione e unità di intenti, per-

Tabella 1 - Reattori nucleari in esercizio e in costruzione nel mondo

Area	Numero di reattori per area geografica			Tipo	Numero di reattori per tipo		
	In esercizio	In costruzione	Conn. → 2002		In esercizio	In costruzione	Conn. → 2002
Europa occidentale	153	-	-	PWR	209	8	8
Europa or. ed ex URSS	69	14	3	BWR	92	2	1
Nord America	118	-	-	WWR	50	10	3
America Latina	6	1	2	GCR	34	-	-
Asia	92	15	10	PHWR	32	6	3
Africa	2	-	-	RBMK	18	1	-
				Altri	5	3	-
Totale	440	30	15	Totale	440	30	15

PWR - Reattore ad acqua in pressione di progetto occidentale e giapponese; BWR - Reattore ad acqua bollente; WWR - Reattore ad acqua in pressione di progetto sovietico; GCR - Reattore a gas grafite; PHWR - Reattore ad acqua pesante di progetto canadese; RBMK - Reattore moderato a grafite e raffreddato ad acqua, di progetto sovietico (tipo Chernobyl); Conn. → connessione entro

ché il taglio produttivo di 4,3 milioni di barili al giorno, deciso dall'OPEC a Vienna nel marzo 1999 e puntigliosamente confermato poi nel successivo Vertice di novembre, facesse volare il prezzo del petrolio, nel breve volgere di soli 20 mesi, da 8 a 36 dollari al barile.

Sono poi intervenuti alcuni eventi straordinari e imprevedibili, che hanno concorso a riaprire un problema ignorato da diversi anni.

Non era bastato lo shock petrolifero sopra citato, non è bastata la "guerra sul clima" per il rifiuto del Presidente Bush di ratificare il Protocollo di Kyoto, non è neppure bastato il quadruplicarsi del prezzo del gas naturale - il combustibile più usato in California per la produzione di energia elettrica - nel breve giro di dodici mesi.

È stata necessaria la grave crisi energetica in California, evento incredibile per uno Stato da sempre all'avanguardia della scienza e della tecnologia - crisi dovuta a trascuratezza nel provvedere alla sicurezza e alla diversificazione degli approvvigionamenti energetici - per costringere gli Stati Uniti a ripartire, dopo venti anni, con un ingente programma di costruzione di nuove centrali elettriche.

Il 17 maggio 2001 il Presidente americano George W. Bush jr., sollecitato dalla suddetta crisi energetica in California, ha presentato al Convention Center di St. Paul (Minnesota) il nuovo Piano Energetico Nazionale, predisposto nel breve volgere delle sei settimane concesse dalla *Task Force* guidata dal Vice Presidente USA Richard Cheney. Un programma che prevede la costruzione nei prossimi 20 anni di 1300 o forse 1900 nuove centrali elettriche, una alla settimana, a carbone e nucleari.

Altri paesi hanno mostrato, negli ultimi tempi, interesse per un rilancio dell'energia nucleare. Tra essi il Regno Unito, la Francia e la Finlandia.

Dopo l'annuncio del Primo Ministro del Regno Unito Tony Blair, dato il 25 giugno, del rilancio dell'energia nucleare in Gran Bretagna, il 6 settembre scorso l'Amministratore Delegato della BNFL, Norman Askew, intervenendo al Simposio Annuale della nuova World Nuclear Association (già Uranium Institute), ha detto: «BNFL è pronta a competere nel Regno Unito per il rilancio dell'energia nucleare». Ed ha altresì aggiunto: «L'energia nucleare continuerà a giocare un ruolo significativo in Gran Bretagna nella generazione di base dell'energia elettrica. Senza il contributo del nucleare questo Paese non potrebbe avere una generazione di energia continua, sicura, diversificata e rispettosa dell'ambiente».

La decisione annunciata verrà formalizzata in un "Nuclear Summit" entro i prossimi mesi. Senza nuove centrali nucleari, il contributo del nucleare nel Regno Unito cadrebbe infatti dall'attuale 23% al 5% entro il 2020. Inoltre le riserve di gas del Mare del Nord stanno esaurendosi e il Paese dovrebbe dipendere pesantemente dall'importazione dall'estero, subire la volatilità dei prezzi e non potrebbe rispettare gli impegni del Protocollo di Kyoto.

BNFL prevede di realizzare nei prossimi dieci anni 10 centrali nucleari di tipo AP600 o AP1000 - avendo recentemente acquisito la Società USA Westinghouse -, centrali che hanno un minor costo d'impianto e più ridotti tempi di costruzione.

Anche il Rapporto Charpin, Dessault e Pellat, predisposto nel luglio 2000 su richiesta del Primo Ministro Jospin, si esprime a favore del proseguimento del programma nucleare francese, indicando un vantaggio economico del nucleare nel confronto con le centrali a gas e ciclo combinato da 2 a 8 cFF/kWh, nella ipotesi "stabilità" e da 8 a 15 cFF/kWh nell'ipotesi "tension" del prezzo del gas (tabella 2).

In Finlandia è stata decisa la costruzione della quinta centrale nucleare. Le ragioni che hanno indotto la TVO finlandese a questa scelta sono: l'aumento della domanda elettrica, prevista crescere del 20% nei prossimi 15 anni, la competitività economica, l'autonomia energetica ed il rispetto dell'ambiente in relazione agli impegni derivanti dal Protocollo di Kyoto. Il costo della generazione nucleare in Finlandia è minore di quello delle centrali a carbone del 7,5%, di quelle a gas del 20% e del 38% rispetto a quelle ad olio combustibile.

Tabella 2 - Costo medio attualizzato per filiera (dati EdF) - Ipotesi stabilità

Intervallo di tempo (anni)	Ciclo combinato a gas		Nucleare	
	2000-50	2020-50	2000-50	2020-50
cFF/kWh	14,7	14	12,7	13,0

Molti messaggi e dichiarazioni in favore del nucleare sono stati lanciati.

John B. Ritch II, già Ambasciatore USA presso le Organizzazioni Internazionali di Vienna, oggi Presidente della World Nuclear Association, ha affermato nel marzo 1999: *«The reality is that, of all energy forms capable of meeting the world's expanding needs, nuclear power yields the least and most easily managed wastes»*.

Loyola de Palacio, Vice Presidente della Commissione Europea, ha affermato: «Sarebbe imprudente rinunciare al nucleare. Senza energia nucleare l'Europa non sarà in grado di rispettare gli impegni del Protocollo di Kyoto» e ne ha giudicato «irresponsabile l'abbandono».

Una conferma è pervenuta dalla Conferenza «Western Europe without Nuclear Energy?» del Consiglio Mondiale dell'Energia (WEC), che si tenuta a Zurigo, in Svizzera, il 6 e 7 giugno 2001. «Yes, we can» ha detto alla Conferenza Bertrand Barré dell'EdF francese, *«Western Europe is wealthy enough to afford – like USA do – buying hydrocarbons even when their prices soar. Too bad for the developing countries. Too bad also for our grandchildren. I do not consider it a desirable future»*.

Il Presidente della Commissione Europea Romano Prodi ha scritto in un articolo pubblicato sulla rivista "Energia" nel settembre 2000: «La questione della generazione per mezzo delle centrali nucleari merita di essere esaminata attentamente».

Le nove potenze, che includono Canada, Giappone, Brasile, Sud Africa, Francia, Korea ed Argentina, hanno firmato sei mesi fa a Parigi un accordo, "the nuclear pact". Il progetto, denominato "Generation IV International Forum", parla in questi termini: *«Nuclear power will play a major part in meeting future global energy needs as fossil fuel use is heavily cut under the Kyoto Protocol on climate change»*.

In contrasto con queste tendenze, il Libro Verde della Commissione Europea, distribuito per commenti alla fine del 1999, suggerisce una politica energetica basata sul risparmio (anche attraverso l'imposizione fiscale), sulle nuove energie rinnovabili e sulla importazione di gas dalla Russia.

Il documento, forse per la presenza determinante di Verdi in alcuni Governi europei, definisce l'energia nucleare *«undesirable and in doubts»* e la pone all'ultimo posto nel confronto dei costi di generazione dell'energia elettrica, addirittura dopo l'ener-

gia eolica, benché sovvenzionata, in chiaro contrasto con altri rapporti internazionali più eminenti.

Il Libro Verde basa le previsioni energetiche future su quelle del Rapporto *World Energy Outlook* dell'Agenzia Internazionale per l'Energia (IEA), pubblicato nel 2000, ma predisposto prima della crisi petrolifera del 1999/2000.

Il Rapporto, a fronte di un aumento del fabbisogno energetico globale del 40-50% da oggi al 2020, prevede che i combustibili fossili continueranno ad essere le principali fonti energetiche, con il petrolio che mantiene l'attuale aliquota di circa il 40% con una previsione ottimistica del prezzo del barile di 21,40 \$ fino al 2010 e di 27 Euro fino al 2020, il carbone e il nucleare in leggero declino e il gas naturale in rapida crescita. In questa ipotesi, stante l'attuale declino dei pozzi petroliferi occidentali (Nord America e Mare del Nord), solo un raddoppio della produzione OPEC (da 30 a 65 Mb/g) potrebbe consentire di fronteggiare la rilevante domanda mondiale di petrolio indicata in 115 Mb/g nel 2020 contro gli 80 attuali. Ma tale raddoppio è assai improbabile, direi praticamente impossibile.

ALCUNE RIFLESSIONI

I combustibili fossili

Carbone - Il carbone è economico, abbondante e disponibile in paesi politicamente più affidabili rispetto a quelli dell'OPEC. In Europa è la seconda fonte per importanza, dopo il nucleare, nella generazione di energia elettrica, e la prima a livello mondiale.

Gas naturale - Per il gas, stella sorgente del portafoglio energetico mondiale per la produzione di energia elettrica, è prevista un'espansione straordinaria nei prossimi decenni, dal 20% attuale al 35% nel 2010 e al 50% nel 2020. Esiste tuttavia a livello europeo la preoccupazione che una eccessiva importazione di gas algerino o siberiano possa ridurre nei prossimi venti anni l'autosufficienza energetica del Vecchio Continente dall'attuale 50% al 30%. Peraltro, se è vero che a parità di energia prodotta il metano produce nella combustione il 25-30% in meno di carbonio rispetto al petrolio ed il 40-50% in meno rispetto al carbone, è altrettanto vero che la

molecola di metano ha un effetto 20-30 volte più efficace, nei confronti dell'effetto serra, di quello dell'anidride carbonica. Sono pertanto sufficienti pochi percento di perdite di gas nelle fasi di trivellazione, estrazione, trasporto e distribuzione, per riequilibrare gli effetti inquinanti del metano a quelli degli altri combustibili fossili, mentre le perdite sono almeno un ordine di grandezza superiori.

Confronto economico tra l'energia nucleare e i cicli combinati

Nei paesi occidentali si è diffusa una grande fiducia nei benefici ottenibili con l'impiego delle centrali elettriche a gas a ciclo combinato.

Questa tecnologia - suggerita in Italia da Franco Reviglio, allora Presidente dell'ENI, fin dai primi anni 80 - presenta elevati rendimenti (dal 38% delle vecchie policombustibili al 58%, con un aumento del 50%). Ma alcuni cambiamenti degli ultimi anni hanno modificato le prospettive di tale tecnologia.

Il 1999 ed il 2000 (in particolare i primi nove mesi) sono stati caratterizzati da un'eccezionale pressione al rialzo sui prezzi dell'energia, quale non si verificava da venti anni. Il prezzo internazionale del petrolio, a cui sono indicizzati i contratti di approvvigionamento di gas naturale e i prezzi di gran parte dei combustibili impiegati nella generazione di elettricità, è aumentato da 11 dollari al barile del gennaio del 1999 a 35 dollari nel novembre 2000.

Anche per il gas l'aumento di prezzo è stato rilevante: in California tale prezzo è passato in 12 mesi da 2,5 a 9,66 \$/MBTU. Questi aumenti del costo del combustibile rendono meno competitive le centrali elettriche a gas a ciclo combinato.

Ma andiamo a confrontare i costi di produzione dell'energia elettrica con diverse fonti.

Come risulta dai dati riportati nella tabella 3, secondo il rapporto OECD/NEA *Projected Costs for Generating Electricity - Update 1998*, al tasso di interesse del 10% l'energia nucleare è competitiva solo in Francia e in Giappone, mentre con un tasso del 5% è competitiva nella maggior parte dei paesi industrializzati.

In realtà la riduzione del tasso di interesse sul capitale intervenuta in questi ultimi anni, unitamente al rilevante aumento del prezzo degli idrocarburi, hanno spostato completamente il confronto.

Nel 1999 il costo medio di produzione negli Stati Uniti (che tiene conto dei costi di combustibile, esercizio e di manutenzione) è stato pari a 3,52 centesimi di dollaro a kWh per quelle a gas, mentre per le centrali nucleari è stato di 1,83 centesimi soltanto (per confronto il costo del kWh prodotto con centrali a carbone e a petrolio è stato, rispettivamente, di 2,07 e 3,24 centesimi di dollaro); in Francia il costo di produzione è stato pari a 3,9 centesimi di dollaro a kWh per le centrali a gas e 1,5 per le centrali nucleari. Per la quinta centrale nucleare finlandese si è parlato di 2,5-3 centesimi di dollaro a kWh.

Non risulta quindi conveniente sostituire le cen-

Tabella 3 - Costi di generazione elettrica (US mills/kWh)

Paese	Interesse al 5%			Interesse al 10%		
	Carbone	Gas	Nucleare	Carbone	Gas	Nucleare
Canada	29,2	30,0	24,7	37,0	33,0	39,6
Finlandia	31,8	35,9	37,3	39,1	41,1	55,9
Francia	46,4	47,4	32,2	59,5	53,3	49,2
Korea	34,4	42,5	30,7	45,0	47,0	48,3
Spagna	42,2	47,9	41,0	54,7	54,4	63,8
Turchia	39,8	30,7	32,8	48,7	33,9	51,8
Stati Uniti	25,0	23,3	33,3	34,7	23,6	46,2
Brasile	35,4	28,5	33,1	43,2	32,7	46,7
Cina	31,8	n.a.	25,4	40,0	n.a.	39,0
India	33,0	n.a.	32,8	40,2	n.a.	51,0
Russia	46,3	35,4	26,9	55,3	39,0	46,5

trali nucleari con nuove centrali a gas e ciclo combinato, nonostante il minor costo capitale di queste ultime (600 \$/kW).

Tenuto conto del minor costo d'impianto e di esercizio (ca. 15 lire/kWh), le centrali a gas ciclo combinato risultano competitive con quelle nucleari per prezzi del petrolio inferiori a 15 \$/b (tabella 4).

Con i prezzi del petrolio e del gas attuali, destinati tra l'altro a crescere in futuro, il costo della generazione nucleare è nettamente competitivo già oggi, per le centrali esistenti, con un margine di 60 e 100 lire/kWh rispetto a quello delle centrali a ciclo combinato e policombustibili a gas e di 20 lire/kWh rispetto a quello delle centrali a carbone.

La sicurezza dell'energia nucleare

Per quanto riguarda la sicurezza, un importante passo in avanti è stato fatto alla XXIII Conferenza Generale IAEA del settembre 1989, con il passaggio dalla precedente posizione probabilistica ad una nuova impostazione deterministica: *«the final goal is to limit the radioactivity release, even in case of the most severe accident, to a level so low that no evacuation be necessary outside the nuclear plant site boundary»*.

Questo concetto, proposto da delegati francesi e italiani, è stato condiviso dal rappresentante tedesco Klaus Toepfer, allora Ministro per l'Energia della Germania, oggi responsabile del Programma Ambiente delle Nazioni Unite.

Gli studi condotti da quella data hanno avuto anche questo obiettivo.

Per quanto riguarda le scelte tecnologiche, bisogna ricordare che, negli anni 90, negli Stati Uniti e in Europa sono stati sviluppati nuovi progetti di reattori nucleari a maggior sicurezza.

Un contributo molto importante è stato dato dall'EPRI, il prestigioso Centro di Ricerca delle maggiori Società elettriche americane di Palo Alto in California e in Europa dal progetto franco-tedesco EPR e dal Gruppo Europeo EURG.

Tenuto conto anche di altri progetti innovativi sviluppati in Russia, Italia, Canada, Giappone e Sud Korea, si può ritenere che all'inizio del nuovo Millennio esistano numerosi progetti di reattore nucleare ad elevate caratteristiche di sicurezza e di rispetto dell'ambiente, approvati dai rispettivi Enti

di Controllo. Tra essi: l'AP600, lo SBWR, il COMBUSTION 80+ e il BWR 90, approvati dalla US NRC, mentre è in corso di autorizzazione il PWR 1000. E in Europa l'EPR, della Framatome-Siemens.

Ma già attualmente i dati parlano chiaro: un recente studio dell'Istituto Svizzero Paul Sherrer riporta che il numero di morti per incidenti in campo energetico negli ultimi dieci anni è stato di oltre 18.000, di cui oltre un terzo dovuto al petrolio e gli altri due terzi a energia idraulica, carbone e gas, a fronte dei 48 morti nell'incidente alla centrale nucleare di Chernobyl.

L'impatto ambientale

Il quantitativo totale di anidride carbonica scaricata nell'atmosfera dall'inizio della rivoluzione industriale è pari a circa mille miliardi di tonnellate, di cui il 40% rilasciato negli ultimi 20 anni.

Se non viene modificato il trend attuale, se cioè non vengono attuate misure di contenimento e riduzione, tale quantitativo sarà, nel 2010, pari a 28/30 Gt.

Non possiamo continuare a bruciare combustibili fossili e a rilasciare nell'atmosfera miliardi di tonnellate di gas nocivi prodotti dall'uomo come se nulla fosse.

Lester Turow, il famoso economista del MIT vincitore di un Premio Nobel, ha scritto recentemente su un quotidiano USA: *«For electricity we have a solution at hand: the solution calls nuclear*

Tabella 4 - Costo del combustibile

	1995	2000	2001 (previsioni)
Prezzo del petrolio (\$/b)	18	27	36
Prezzo del gas (lire/m ³)	195	370	700
Cambio lira/dollaro	1629	2275	2400

Costo combustibile (lire/kWh) per centrali elettriche

Policombustibili a carbone	34	42	45
Policombustibili a petrolio	50	107	233
Policombustibili a gas	53	123	158
Ciclo combinato a gas	36	83	143
Nucleari	17	20	25

energy - a clean way to generate electricity that does not cause global warming. Yet there is nothing the green movement likes less than nuclear power. In Europe, closing nuclear power plants is at the centre of Green Party political platforms. The Green should admit they have been wrong.

Le fonti fossili sono responsabili, oltre che della dispersione di milioni di tonnellate di anidride carbonica in atmosfera, anche dell'inquinamento dei mari come conseguenza degli incidenti nel trasporto di petrolio. Negli ultimi 30 anni è affondata in media una superpetroliera all'anno con la dispersione in mare di circa 3 milioni di tonnellate di olio combustibile. Per non parlare di altri gravi disastri ecologici, con centinaia di migliaia di morti, da Mexico City (esplosione in un deposito gas), Bophal in India (incendio in un impianto chimico), Cubatao in Brasile e Jesse in Nigeria (oleodotti), Cleveland in USA (gas liquido), e dei nostri Vajont e Seveso.

L'energia nucleare è rispettosa dell'ambiente più di qualsiasi altra fonte energetica conosciuta, non emettendo gas serra, concentrando, confinando e contenendo i propri rifiuti radioattivi, laddove le sorgenti fossili diluiscono, scaricano e disperdono rilevanti quantità di gas inquinanti ed occupano maggior spazio per produrre la stessa quantità di elettricità.

Per quanto riguarda le scorie radioattive, esistono già oggi in molti paesi soluzioni realizzate per l'interim storage - cioè il deposito temporaneo - (La Hague in Francia, Ahaus e Gorleben in Germania, Oskarshamn in Svezia, El Cabril in Spagna, Olkiluoto in Finlandia ecc.) e sono in corso di realizzazione o già costruite soluzioni definitive, come quelle svedesi e finlandesi o di Yucca Mountain (Nevada) negli Stati Uniti.

Il solo modo per far fronte alle future necessità energetiche mondiali, evitando nel contempo problemi di inquinamento, è di espandere l'uso dell'energia nucleare.

LA DOMANDA FUTURA DI ENERGIA

L'energia è sempre stata di vitale importanza per lo sviluppo sociale ed economico dell'umanità e per il miglioramento della qualità della vita.

Nel corso degli ultimi cento anni la popolazione

mondiale è aumentata di 5 volte e potrebbe raggiungere nell'anno 2050 i 10 miliardi di persone. Nello stesso lasso di tempo la domanda mondiale di energia è aumentata di 10 volte a causa di un notevole miglioramento del livello di vita medio.

Il consumo di energia non è uniforme in tutto il Pianeta: un quinto della popolazione mondiale consuma più dell'80% dell'energia totale; alcuni paesi in via di sviluppo hanno un consumo pro capite di energia di un ordine di grandezza inferiore rispetto a quello dei paesi industrializzati.

Due miliardi di persone, un terzo della popolazione mondiale, non hanno accesso ad energia commerciale e sono obbligati a disboscare le proprie foreste per scaldarsi e cucinare. Un miliardo di persone non dispone di energia elettrica o di acqua potabile. Il problema che si presenta all'umanità alla vigilia del Terzo Millennio non è solo una sfida economica, energetica o ambientale, ma è soprattutto una sfida etica: si tratta di fornire a tutti, e non solo a pochi, l'energia necessaria a garantire uno sviluppo dignitoso, sostenibile e solidale nel rispetto dell'ambiente.

Il mondo si trova davanti ad un bivio. Il vero problema non è costituito dal possibile esaurimento delle risorse energetiche di cui al best seller del Club di Roma *I limiti allo sviluppo* di 30 anni fa e forse neppure dal temuto "global warming" che ha aperto la recente controversia tra Europa e Stati Uniti, ma dal progressivo allargamento nelle differenze dei livelli di vita tra i paesi ricchi del Nord e quelli poveri del Sud del Pianeta e dall'inevitabile aumento del prezzo delle fonti energetiche, in particolare petrolio e gas naturale.

Ci sarà bisogno di energia, di molta energia negli anni a venire.

Per i prossimi 20 anni il Consiglio Mondiale dell'Energia (WEC) prevede un fabbisogno energetico complessivo del 40-50% in più rispetto a quello attuale e una crescita anche maggiore per quello elettrico.

Il consumo energetico mondiale da oggi alla metà del prossimo secolo è valutabile in almeno 600-700 miliardi di tep e, se si usassero solo idrocarburi, si consumerebbe più del doppio di tutte le riserve economicamente estraibili oggi accertate (300 Gtep).

Tutte le fonti, nessuna esclusa, e quindi carbone,

petrolio, gas naturale, energia idraulica e nucleare, dovranno essere impiegate, non potendo le nuove energie rinnovabili, per il costo elevato e la loro intermittente natura, far fronte alle necessità future in modo significativo per molti decenni.

L'energia nucleare non è dunque una opzione per i paesi più ricchi, ma una inevitabile necessità per tutti. Solo lasciando ai paesi del Terzo Mondo, come suggeriva il Presidente francese Mitterand al Congresso Mondiale dell'Energia di Cannes (1986), la disponibilità delle fonti energetiche di più facile uso per loro a prezzi accessibili, si potranno evitare carestie, conflitti e migrazioni epocali.

IL MESSAGGIO DI FERMI

Desidero concludere questo excursus sulle prospettive dell'energia nucleare con il messaggio, quasi un testamento, lasciato da Enrico Fermi pochi mesi prima della scomparsa, in occasione della sua ultima visita in Italia. Era già provato nel fisico da un male incurabile che lo prostrava, ma ciò non gli impedì di lanciare un augurio di pace e di speranza.

«L'era atomica è sorta come risultato degli studi di vari scienziati in Italia, in Francia, in Inghilterra, negli Stati Uniti, in Danimarca, in

Germania e in altri paesi. E lo spirito di cooperazione continua nel mondo di oggi come lo dimostra l'intesa per le ricerche sull'energia nucleare tra Norvegia e Olanda con sede ad Oslo e il Consiglio Europeo delle Ricerche Nucleari con sede a Ginevra che accentra le ricerche e le conoscenze scientifiche di diversi paesi europei che vi aderiscono. I risultati di queste ricerche saranno messi a disposizione di tutti. Per esempio gli isotopi radioattivi prodotti in Inghilterra, negli Stati Uniti, in Canada e altrove, vengono usati oggi in tutto il mondo negli ospedali, nell'industria, in agricoltura, nei luoghi più disparati come la Finlandia o la Nuova Zelanda.

L'era atomica ha solo 12 anni di età e noi siamo soltanto all'inizio. Siamo appena alla soglia dei benefici che ci verranno dall'opera di centinaia di migliaia tra scienziati e laboratori nel campo atomico. Si ritiene che i depositi di uranio ora conosciuti nel mondo ci potranno fornire energia sufficiente per parecchie migliaia di anni, energia che sarà a disposizione di tutti i popoli della Terra perché l'atomo è internazionale, nessuna nazione o gruppo di nazioni detiene il monopolio dell'uranio, il monopolio della scienza atomica o il monopolio degli impianti atomici».

Ottobre 2001

Maurizio Cumo

Una proposta per il nuovo nucleare
a sicurezza intrinseca



REQUISITI, SCOPI E PROSPETTIVE DEL PROGETTO

Nel 1987 è apparso sulla rivista "Le Scienze" un articolo [1] che esponeva le linee di sviluppo ed i primi risultati di una ricerca/progetto dell'Istituto di Impianti Nucleari dell'Università "La Sapienza" di Roma per un reattore nucleare a sicurezza intrinseca denominato MARS (Multipurpose Advanced Reactor inherently Safe). Tale reattore era stato concepito come uno dei primi esemplari della seconda era nucleare preconizzata da un movimento ispirato dal prof. Alvin Weinberg - pioniere americano dell'energia nucleare ed ora Distinguished Fellow alle Oak Ridge Associated Universities, di cui si riporta nel seguito un breve scritto -, insieme al reattore PIUS (Process Inherent Ultimate Safety) degli svedesi e al reattore MHTGR (Modular High Temperature Gas Reactor) degli americani, seguendo linee diverse.

La seconda generazione di reattori punta sul requisito essenziale della sicurezza intrinseca, intesa come sicurezza basata su leggi ineludibili di natura e non su sistemi di protezione che, per intervenire, abbisognano di sensori e di attuatori alimentati da energia e/o avviati dall'intervento di operatori.

Il progetto MARS, iniziato nel 1983, quattro anni prima dell'infuocato evento di Chernobyl, si è sviluppato nell'arco di tutti questi anni e non è ancora concluso, perché i requisiti posti alla sua base sono estremamente esigenti. Seguendo infatti la filosofia di Weinberg, si è partiti dal principio che, per essere accettata ed estesamente utilizzata, una nuova tecnologia debba rispettare la natura e i suoi equilibri. Per un impianto nucleare, questo significa che durante la sua vita produttiva l'impatto radiologico sulla popolazione circostante deve essere comparabile alla deviazione standard del fondo radioattivo naturale e che il peggiore incidente concepibile deve avere una probabilità non maggiore di quella di essere colpiti da un meteorite che piombi sulla Terra.

Come chiarito in un secondo articolo apparso su "Le Scienze" [2], è questo che l'impianto MARS offre, ma non solo questo. Rinviando ad un'analisi più dettagliata i proposti sistemi a sicurezza intrinseca, gli altri requisiti che il reattore soddisfa sono:

- modalità e tecnologie di fabbricazione ben note in Italia e ben collaudate nel mondo: questo significa che non si corrono rischi di insuccessi tecnici e di incertezze economiche nell'impresa; il suo combustibile è quello dei reattori ad acqua pressurizzata in comune commercio e ovunque fabbricato;

- smontabilità e sostituibilità di tutti i componenti del reattore: questo significa che il reattore è costruibile tutto in officina, con tempi brevi e costi bassi, e che la sua vita è allungabile a piacere con semplice sostituzione dei pezzi che abbiano superato la vita tecnica;
- mantellamento finale rapido e totale, essendo tutto il reattore scomponibile in pezzi di metallo imbullonati da riciclare o fondere a fine vita e, in piccola parte, da confinare in un deposito di rifiuti a media attività [3];
- modularità dell'impianto: la ridotta potenza di ciascun modulo, corrispondente a circa 200 MWe, aumenta le prospettive di mercato, anche per le piccole aziende che producono energia elettrica; la possibilità di aggregare nel tempo più moduli, con costi limitati, consente di aumentare gradualmente la potenza delle stazioni, seguendo la domanda esterna di energia;
- cogenerazione elettricità/calore: molti paesi hanno il problema dell'acqua, che diverrà sempre più impellente, ed un'offerta calibrata per la dissalazione dell'acqua di mare e la produzione di elettricità è una loro esigenza primaria. Altre comunità possono avere necessità di teleriscaldamento;
- ultima, ma non la meno importante, la competitività economica del chilowattora prodotto (più in generale, dell'energia prodotta), vale a dire la redditività di impresa, senza la quale cadrebbe ogni possibilità di affermazione. Questo obiettivo è centrato mediante la grande semplicità del progetto, con l'eliminazione di sistemi di sicurezza attivi ridondanti e con l'allungamento della vita utile dell'impianto, garantito dalla sostituibilità dei pezzi obsoleti.

Si tratta, in sintesi, di un reattore costituito essenzialmente da componenti metallici imbullonati, smontabili e sostituibili, che offre una lunghissima vita tecnica di esercizio e facili e brevi operazioni di smantellamento a fine vita, totalmente a sicurezza passiva, modulare e costruibile in serie, basato su componenti affidabili e collaudatissimi della più diffusa filiera di reattori a livello mondiale, quella dei reattori ad acqua pressurizzata, lanciata dalla Westinghouse e ripresa da diversi altri costruttori.

Prima di passare ad un sommario esame delle soluzioni sviluppate, conviene soffermarsi un momento sugli scopi e sulle prospettive di questo progetto.

La spinta ideale è evidentemente la ricerca di nuova energia sicura, abbondante e non inquinante, a costi competitivi. La fonte nucleare, che ora produce il 6% dell'elettricità mondiale con oltre 400 reattori in funzione e diverse decine in costruzione, si basa su risorse

Introduction to MARS

Alvin M. Weinberg (April 3, 1997)

That the First Nuclear Era has ended in much of Europe and America is no longer arguable. In Italy, for example, all operating reactors have been shut down (but Italy imports substantial amounts of nuclear generated electricity from France). In America, no civilian nuclear plant has been ordered for twenty years, and development of the fast breeder, which many saw as a key to the long-term future of nuclear fission, has been stopped.

This tragic state of affairs was anticipated by Enrico Fermi in 1944. Speaking extemporaneously at a meeting of the "New Piles Committee" at the University of Chicago's "Metallurgical Laboratory" (code name for the wartime plutonium project), Fermi pointed out «The public may not accept an energy source that is encumbered by vast amounts of radioactivity, and that produces a nuclear explosive, which might fall into hostile hands».

Yet the case for continuing, even expanding nuclear energy remains strong. The world's almost 6×10^9 people now use 13 Tera Watts-year of energy each year. Of this 76% came from fossil fuel, 18% from renewable resources and 6% from 433 nuclear reactors. By the year 2100, the world's population may double – where will humankind get the energy needed to support, say, 11 billion people? Most experts regard renewables as unable to meet the need by themselves though all agree that research on renewables and conservation ought to continue.

As for fossil fuels, these will eventually run out; moreover, the observed increase in CO_2 from 285 parts per million (ppm) to about 370 ppm – cannot be regarded with equanimity – even if CO_2 is not as strongly implicated in global warming as current global circulation models predict. As Roger Revelle once pointed out, the doubling of CO_2 in the atmosphere constitutes a geo-physical experiment on a massive scale, and the consequences, both direct (on the biota) and indirect (on the climate) are poorly understood.

This humankind must preserve the nuclear option. It must create a Second Nuclear Era, an era in which the public's confidence in nuclear energy has been restored. If Fermi's skepticism is correct, and I believe he was right, then a Second Nuclear Era will have to allay the public's fear of radioactivity from nuclear reactors, and its fear of hydrogen bombs.

Of these twin fears, I judge the latter, requiring changes in the very structure of international relations to be the more difficult.

On the other hand, the fear of radioactivity does admit of technical fixes, quite independent of institutional changes. Of the two aspects of possible radioactive pollution caused by reactors, waste disposal and reactor accident, I regard the latter as the more central, even though squabbles over radioactive wastes appear daily in the press. If the criteria for secure disposal of radioactivity is that no member of the public is likely to receive a yearly dose greater than 30 mrem (the standard deviation of the natural background in Italy), then this criteria has already been exceeded by all of the proposed methods of disposing of radioactive wastes. In other words, despite the fear engendered by the words "radioactive wastes", I do not believe this fear is rational. Properly sequestered radioactive wastes pose no hazard to the general public.

I cannot say the same for reactors. As the two reactor accidents, Three Mile Island (TMI) and Chernobyl, demonstrate, a malfunctioning reactor can pose a serious threat (even though TMI caused no discernible biological harm).

The public's reaction to TMI and Chernobyl was immediate and drastic. This reaction led designers to ask «Can reactors be designed for which the probability of melt-down is zero?» And if such reactors were the technical basis for a Second Nuclear Era, would this not eliminate one of the public's concerns about reactors? When these ideas were first discussed by David Lilienthal in 1980, the reactor community could not answer this question. But once the question was raised, ideas for "super-safe" reactors emerged. Central to the discussion was the notion of inherent safety—i.e., a reactor whose safety was ensured not by engineered, active systems, but by inherent passive systems that depended on well-recognized natural laws.

One result of these preliminary investigations was to sharpen the definition of "zero" probability. Ordinary pre-TMI Light Water Reactors had core-melt probabilities, as determined by Probabilistic Safety Analysis, of 10^{-4} /RY. In Sizewell-B, a PWR built in England, the core-melt probability was reduced to $\approx 10^{-6}$ /RY. Yet the issue cannot be decided by PSA, the public does not distinguish between a core melt every 10,000 years/reactor, and one ten times less frequent. It has seemed to me that publicly acceptable reactors must have features that, in the public's mind, represent a transparent, easily understood improvement over existing reactors.

Several reactors that embody inherently safe features have been proposed. These include the Westinghouse APWR, and the General Electric ABWR; these are in the class of incrementally improved LWR's. In the class of inherently safe reactors there is the small gas-cooled HTGR of General Atomic and the PIUS reactor of ABB. Of these I would consider only PIUS to be truly inherently safe.

Prof. Maurizio Cumo and his colleagues have proposed another approach to inherent safety in the MARS (Multipurpose Advanced "inherently" Safe Reactor). The distinguishing feature of MARS is its pressurized envelope, containing water at low enthalpy but high pressure. This ingenious feature makes MARS invulnerable to pipe rupture and other Loss of Coolant Accidents – but more important, it makes such accidents "impossible" by a device that is transparent. To take care of other accidents, Prof. Cumo and his colleagues have resorted to engineered active features – such as an automatic secondary safety system, and a valve operated residual heat removal system.

The calculated probability of core melt in MARS is 10^{-7} /RY – three orders of magnitude lower than the 10^{-4} /RY characteristic of most of the world's light water reactors. But more than this, the core melt scenario does not lead to breach of containment, and therefore MARS can be located in populated areas.

A probability of 10^{-7} /RY is the same as the probability that a city-destroying bolide will strike New York City. In effect, "zero probability" is being defined as equal to the probability of a natural occurring mega-disaster. This definition of zero is in a sense consistent with Prof. Cumo's suggestion to define "zero exposure" in terms of the standard deviation of the natural background.

MARS is an original idea that deserves full investigation. I hope that, in publishing their ideas, Prof. Cumo and his colleagues will generate the support that obviously will be needed to bring MARS into being. Future generations, dependent as they will be on nuclear energy, will be grateful to the inventors of MARS for offering this original approach to inherently safe reactors.

accertate di uranio che, allo stato attuale delle prospezioni, consentirebbero alla potenza attualmente installata circa un secolo di vita, contro i circa 40 anni valutati per le centrali ad olio combustibile e i 60 per le centrali alimentate a gas naturale.

Nonostante queste prospettive e una mantenuta competitività economica del nucleare e nonostante lo spettro dell'effetto serra (la figura 1) [4] illustra la riduzione di CO₂ che l'introduzione del nucleare ha portato a livello mondiale), la prima reazione che il pubblico generalmente avverte verso i reattori nucleari della prima generazione è legata alla pericolosità degli incidenti che in essi si possono verificare e pertanto alla loro sicurezza.

L'esigenza di sicurezza favorisce i principi di sicurezza intrinseca, perché incontrovertibili e facilmente intuibili anche dai non addetti ai lavori. Il principio ispiratore della sicurezza intrinseca ha, tra i suoi capisaldi, il ricorso a sistemi e componenti di sicurezza di tipo passivo (cioè non energizzati o preenergizzati) piuttosto che a componenti attivi (cioè da energizzare nel momento in cui ne è richiesta la funzione [5]).

Ben consci di ciò, i progettisti di reattori nell'ultimo decennio hanno aumentato la percentuale di componenti di sicurezza passivi, arrivando a chiamare *Advanced Passive* alcuni progetti che, tuttavia, si basano ancora, ampiamente, su una filosofia progettuale tradizionale.

Il motivo di questa scelta, per così dire graduale, è semplicemente spiegabile se si pensa alla naturale riluttanza verso le innovazioni, specie in paesi che possiedono un numero rilevante di reattori in funzione della prima generazione, in cui la maggioranza dei sistemi di sicurezza è di tipo attivo e la cui vita utile termina fra il 2010 e il 2020.

In questi paesi l'introduzione di impianti basati su filosofie di sicurezza più stringenti potrebbe indurre l'opinione pubblica a chiedere di fermare i più vecchi impianti esistenti.

Diversa è la situazione se l'evoluzione dei criteri di progetto ai fini della sicurezza è graduale, permettendo agli esemplari della prima generazione di giungere tranquillamente al termine della propria vita tecnica.

I motivi di prudenza di questi paesi non trovano riscontro in Italia che, paese unico al mondo, ha già fermato tutte le sue centrali della prima generazione. Proprio in Italia, dunque, assume particolare valenza il progetto del reattore MARS che, superando ampiamente l'approccio riscontrabile nei suddetti progetti

evolutivi che si limitano ad una semplice riduzione del numero di componenti attivi, punta decisamente al ricorso sistematico a componenti passivi con funzioni di sicurezza, i quali, fatto assolutamente innovativo, sono altresì quasi esclusivamente di tipo statico e quindi assai meno suscettibili di malfunzionamenti di qualsiasi altro componente immaginabile.

L'elettricità prodotta nei primi tre anni di vita sarebbe sufficiente a ripagare il costo dell'intera esperienza realizzativa, che avrebbe una grande valenza in termini scientifici e commerciali, tenuto conto dell'ampiezza del mercato internazionale potenzialmente interessato a questo tipo di applicazioni.

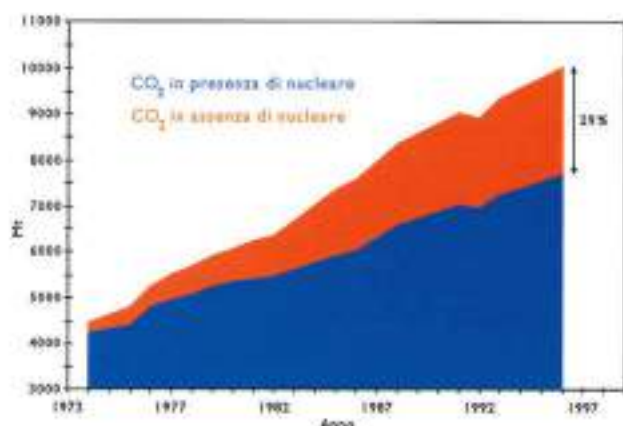


Figura 1 - La produzione di energia elettrica da fonte nucleare ha consentito, sin dalla sua introduzione, una sensibile riduzione delle emissioni di anidride carbonica (prima responsabile dell'effetto serra) in atmosfera. Nel 1996 il 17% dell'energia elettrica prodotta nel mondo è derivata da energia nucleare; questo ha consentito di limitare le emissioni di anidride carbonica a circa 7500 milioni di tonnellate invece di circa 10000 milioni di tonnellate che sarebbero state emesse se tutta l'energia elettrica prodotta fosse stata derivata da fonte fossile (con un incremento pari a circa il 29%) [4]

La ricerca di una maggiore sicurezza è stata quindi la prima spinta ideale del progetto, che vuole essere un piccolo passo nel lungo cammino che la scoperta dell'energia nucleare lascia ancora intravedere [6].

LO SCHEMA DI IMPIANTO

Il MARS è un reattore nucleare a fissione moderato e refrigerato ad acqua pressurizzata, appartenente alla ben sviluppata filiera dei PWR (Pressurized Water Reactors). Le principali caratteristiche del reattore sono riportate in tabella 1.

Il nocciolo è alloggiato in un recipiente metallico in pressione (*pressure vessel*) al quale sono collegate le tubazioni del circuito di refrigerazione primario (figura 2). Questo circuito contiene una pompa ed un generatore di vapore attraverso il quale il calore generato nel nocciolo del reattore viene trasferito al circuito secondario per l'utilizzazione, che può riguardare sia la produzione di energia elettrica, sia la produzione di calore per usi industriali (dissalazione, teleriscaldamento ecc.), sia la produzione combinata di energia elettrica e di calore (cogenerazione).

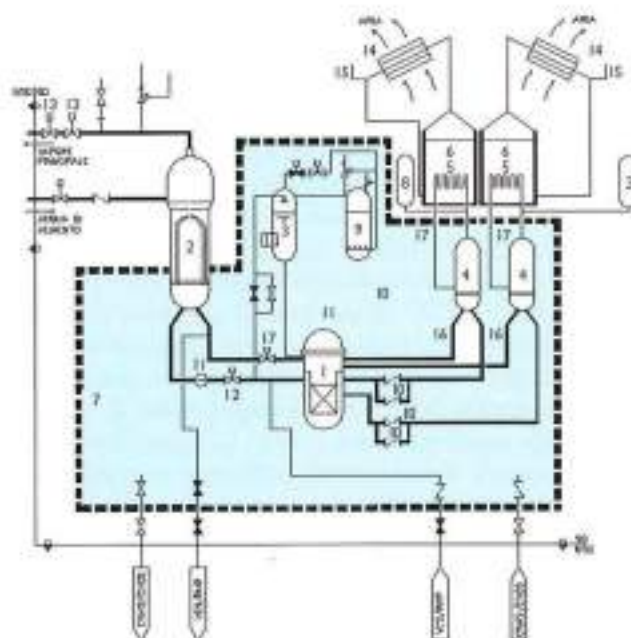
Tabella 1 – Caratteristiche principali del reattore MARS

Potenza nominale	600 MWth
Temp. di ingresso refrigerante nel pressure vessel	214 °C
Temp. di uscita refrigerante dal pressure vessel	254 °C
Pressione nominale	75 bar
Numero di elementi di combustibile	89
Reticolo dell'elemento di combustibile	17 x 17
Numero di barrette di combustibile per elemento	264
Diametro esterno barrette di combustibile	0,95 cm
Lunghezza attiva barrette di combustibile	260 cm
Spessore guaina barrette di combustibile	0,63 mm
Interasse tra barrette di combustibile	1,26 cm
Diametro tubi guida barre di controllo	1,224 cm
Spessore tubi guida barre di controllo	0,4 mm
Diametro barre di controllo	0,978 cm
Densità lineare media di potenza nel nocciolo	98,2 W/cm
Flusso termico medio nel nocciolo	32,9 W/cm ²
Densità volumetrica media di potenza nel nocciolo	56,5 kW/litro

Nel nocciolo del reattore MARS sono conservate le caratteristiche tipiche (geometria degli elementi di combustibile, materiali ecc.) dei reattori della filiera PWR, mentre sono state ridotte la pressione e la temperatura di esercizio, le densità di potenza lineare e volumetrica ed il flusso termico nel nocciolo. Questo ha consentito di aumentare i margini di sicurezza rispetto a fenomeni termofluidodinamici indesiderati (quale ad esempio, la crisi termica) e di realizzare un reattore molto stabile, sia da un punto di vista termico che neutronico.

A fronte di uno schema di funzionamento quasi tradizionale, nel progetto del reattore sono introdotte notevoli semplificazioni impiantistiche (riduzione del numero di circuiti e componenti) che permettono di ridurre i costi di realizzazione dell'impianto e le possibili fonti di malfunzionamenti, riducendo inoltre la produzione di rifiuti radioattivi (molti dei quali, come filtri e materiali di manutenzione, aumentano enormemente con la complessità dei circuiti).

Sono stati, inoltre, affrontati in modo originale, e facendo affidamento solo su ineludibili leggi naturali, i due aspetti cardine della sicurezza nucleare: spegni-



1. Reattore
2. Generatore di vapore
3. Pressurizzatore
4. Scambiatore primario del circuito di refrigerazione di sicurezza
5. Scambiatore secondario del circuito di refrigerazione di sicurezza
6. Piscina
7. Contenitore pressurizzato per la protezione del circuito primario (CPP)
8. Pressurizzatore circuito intermedio del circuito di refrigerazione di sicurezza
9. Serbatoio di scarico del pressurizzatore
10. Valvole del sistema di refrigerazione di sicurezza
11. Pompa primaria
12. Valvole di intercettazione circuito primario
13. Valvole di intercettazione linea vapore
14. Condensatore del sistema di refrigerazione di sicurezza
15. Collegamento con l'atmosfera
16. Circuito primario del sistema di refrigerazione di sicurezza
17. Circuito intermedio del sistema di refrigerazione di sicurezza

Figura 2 – Schema del circuito di refrigerazione del reattore MARS: i sistemi rilevanti ai fini della sicurezza sono tutti e solo quelli dell'isola nucleare. Connesso al recipiente in pressione vi è il sistema di refrigerazione di sicurezza (SCCS); tutto il circuito primario è racchiuso all'interno di un contenitore pressurizzato (CPP)

mento della reazione a catena e rimozione del calore residuo di decadimento radioattivo.

I sistemi di spegnimento della reazione a catena non si sono mai mostrati elementi critici ai fini della sicurezza nei reattori della prima generazione di tipo PWR, ciò nondimeno questa funzione è fondamentale per evitare catastrofi nucleari; per questo motivo nel MARS è presente, oltre ad un sistema di spegnimento del tutto simile a quello dei reattori classici di tipo PWR, anche un sistema aggiuntivo di tipo completamente passivo, denominato ATSS (*Additional Temperature-actuated Scram System*), il cui principio di funzionamento è riportato in figura 3 insieme ad un dettaglio del relativo sistema di sgancio delle barre di spegnimento. Il sistema interviene autonomamente, senza bisogno di fonti di energia esterna o di interventi dell'operatore o del sistema di supervisione di impianto, ogni qualvolta la temperatura all'interno del nocciolo supera (per qualsiasi ragione) un valore prefissato.

In questo modo viene garantito lo spegnimento della reazione a catena prima che l'innalzamento di temperatura possa causare fenomeni di crisi termica e quindi la temuta fusione del nocciolo (evento accaduto nell'impianto PWR americano di Three Miles Island).

La refrigerazione del nocciolo del reattore è una funzione fondamentale per la sicurezza nucleare:

essa deve essere garantita in qualunque situazione ed anche dopo lo spegnimento della reazione nucleare destinata alla produzione del calore utile, per rimuovere il calore di decadimento prodotto dalla radioattività dei prodotti della fissione. Nei reattori di prima generazione è presente una molteplicità di sistemi di refrigerazione con funzioni di emergenza, ridondanti e diversificati ed alimentati da sistemi elettrici anch'essi ridondanti, per assicurare che almeno un sistema sia sempre disponibile. Nel MARS, oltre al circuito di refrigerazione operante in condizioni normali, è presente un sistema di refrigerazione di emergenza totalmente passivo, denominato SCCS (*Safety Core Cooling System*), schematizzato in figura 4.

Questo entra in funzione automaticamente ove si verifichi una alterazione delle condizioni di funzionamento sicuro per l'impianto, garantendo l'asportazione del calore prodotto nel nocciolo. Nel sistema non sono presenti pompe né altri elementi attivi, ma un solo elemento passivo inserito in altri componenti esclusivamente statici.

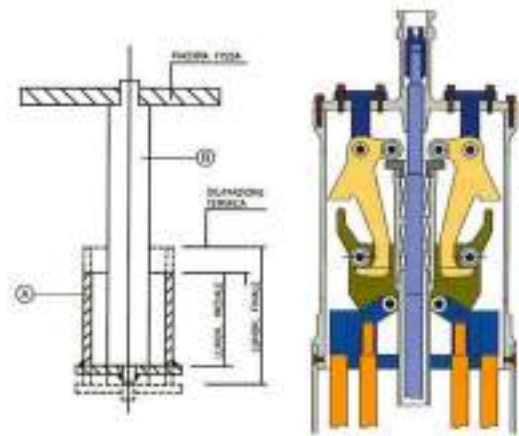


Figura 3 - Sistema passivo di spegnimento della reazione a catena (ATSS) del MARS. Il sistema basa il suo funzionamento su un sensore, costituito da due aste cilindriche coassiali, realizzate con due materiali di diverso coefficiente di dilatazione termica, inserito nel nocciolo al posto di una barretta di combustibile. Al variare della temperatura all'interno del nocciolo varia anche la lunghezza relativa delle due aste e, nel caso in cui tale temperatura raggiunga valori superiori a quelli previsti nel progetto, il diverso allungamento delle due aste aziona un leveraggio che causa lo sgancio, ed il conseguente inserimento nel nocciolo, per gravità, di barre di spegnimento della reazione a catena.

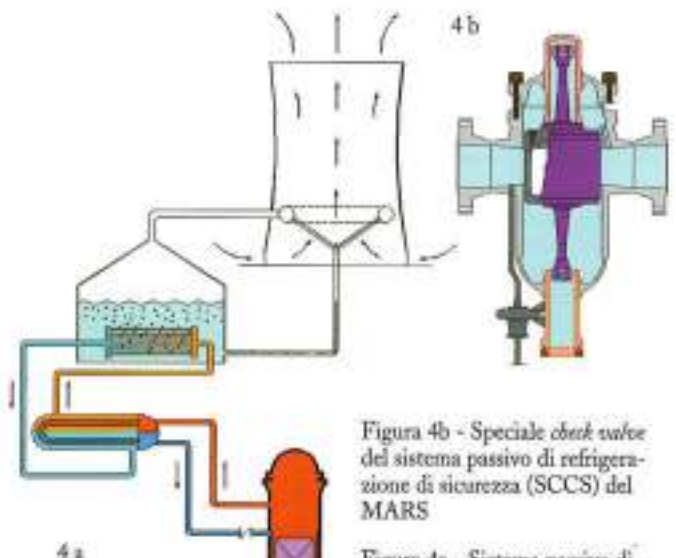


Figura 4b - Speciale *check valve* del sistema passivo di refrigerazione di sicurezza (SCCS) del MARS

Figura 4a - Sistema passivo di refrigerazione di sicurezza (SCCS) del MARS. Nel sistema

il calore generato nel nocciolo viene trasferito all'esterno attraverso tre circuiti posti in serie (che realizzano una doppia barriera tra il refrigerante primario e l'ambiente esterno), nei quali il fluido refrigerante del nocciolo circola per effetto della circolazione naturale dovuta alla differenza di peso tra colonne di acqua che si trovano a differente temperatura.

Uno degli incidenti più temuti negli impianti nucleari è il cosiddetto LOCA (*Loss of Coolant Accident*), che consiste nella perdita, attraverso una rottura nel circuito primario, del refrigerante del nocciolo; in tali condizioni risulta difficile garantire in modo efficace l'asportazione del calore residuo in esso prodotto. Negli impianti della prima generazione questo incidente viene fronteggiato prevedendo circuiti dedicati in grado di introdurre, attraverso sistemi di pompaggio o serbatoi pressurizzati, acqua all'interno del nocciolo (sistemi di iniezione); nel MARS si è invece provveduto ad eliminare alla fonte ogni possibilità di fuoriuscita di refrigerante dal circuito primario racchiudendo quest'ultimo all'interno di un secondo circuito, denominato CPP (*pressurized Containment for Primary loop Protection*) schematizzato in figura 5, riempito con acqua alla stessa pressione di quella del circuito primario.

Questo permette di eliminare gli stati di sollecitazione presenti sul circuito primario (gli unici che possono causare un cedimento improvviso dello stesso), azzerando praticamente la probabilità di una sua rottura attraverso la quale, peraltro, non si avrebbero perdite di refrigerante in quanto all'interno ed all'esterno del circuito primario si trova acqua alla stessa pressione.

L'annullamento di questa differenza di pressione ha inoltre consentito l'adozione di collegamenti flangiati (con tenuta garantita attraverso guarnizioni saldate) per tutti i componenti del circuito primario, impossibili nei reattori di prima generazione proprio a causa delle possibili perdite dai collegamenti.

Questa soluzione tecnologica comporta sostanziali vantaggi, che vanno dalla semplicità di montaggio dell'impianto in cantiere (con conseguente riduzione dei costi) alla semplicità di manutenzione dei componenti che possono essere smontati e portati in officina, evitando così agli addetti le dosi radiologiche conseguenti ad operazioni dirette sul circuito primario, fino alla grande e definitiva semplificazione delle operazioni di smantellamento finale dell'impianto.

La smontabilità del circuito primario è stata estesa a tutti i componenti, compreso il *pressure vessel* ed il generatore di vapore (che è addirittura smontabile per parti per la sostituzione del solo fascio tubiero), i quali possono, quindi, essere smontati e sostituiti con operazioni quasi routinarie.

Questo consente, di fatto, di prolungare per tempi lunghissimi la vita tecnica dell'impianto, mentre negli impianti della prima generazione essa è limitata a 30-40 anni proprio per motivi di invecchiamento dei compo-

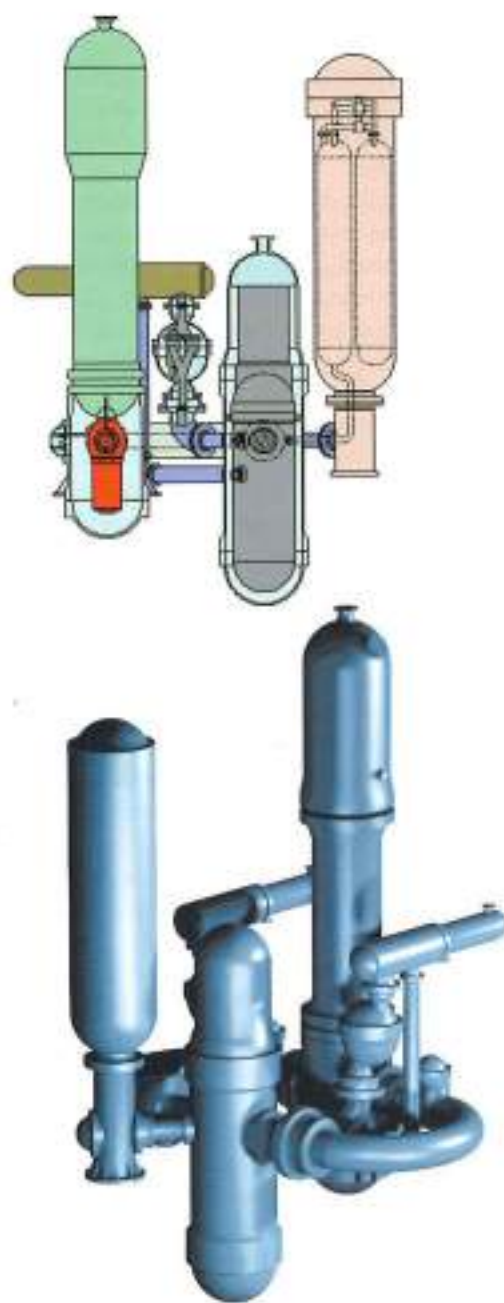


Figura 5 - L'intero circuito primario del MARS è racchiuso all'interno di un secondo circuito riempito con acqua alla stessa pressione del refrigerante primario (75 bar) ma a bassa temperatura (70 °C). Ciò elimina tutte le sollecitazioni sulle pareti del circuito primario dovute alla pressione

nenti principali (in particolare, del *pressure vessel* e del generatore di vapore). Una lunga vita tecnica ha un'enorme ricaduta sulla competitività economica dell'impianto in quanto, come noto, negli impianti nucleari l'80% circa del costo di produzione dell'energia (elettrica o termica che sia) è dovuto al costo di costruzione dell'impianto.

Il capitale investito nella costruzione dell'impianto deve essere restituito ai finanziatori entro un arco di tempo economicamente significativo (di solito 20 anni) mentre per tutto il restante periodo di vita dell'impianto l'energia può essere prodotta a costi ridottissimi; negli impianti di prima generazione la prossimità della vita tecnica con il tempo di restituzione limita fortemente questo vantaggio, che invece risulta molto accentuato nel caso del MARS.

Ciò permette di ripagare ampiamente il maggior costo di costruzione per unità di potenza dovuto all'effetto scala della taglia che, pur con le semplificazioni impiantistiche introdotte, è stato valutato dell'ordine del 20% rispetto al costo dei grandi impianti della prima generazione.

Grande importanza nel progetto MARS è stata, inoltre, attribuita alla protezione sanitaria del personale ed all'impatto ambientale in termini di produzione di rifiuti e di rilasci radioattivi. L'impianto risulta estremamente compatto e di dimensioni assai poco invasive sotto il profilo ambientale (figura 6).

Inoltre, il suo impatto sulla popolazione circostante in termini di dosi radioattive è inferiore alle variazioni del fondo naturale di radioattività (dovuto ai materiali radioattivi contenuti nella crosta terrestre).

Il MARS produce un volume di rifiuti radioattivi pari a un decimo di quelli prodotti da un impianto della prima generazione, a parità di potenza.

L'elemento essenziale per l'accettazione sociale di un impianto nucleare (ma questo dovrebbe essere vero per qualunque installazione industriale e, ancora più in generale, per qualunque attività produttiva) resta, però, la quantificazione della sua sicurezza, espressa in termini di probabilità di incidente e di entità delle conseguenze ad esso associate.

Analisi approfondite condotte utilizzando tecniche sofisticate ed internazionalmente riconosciute valide, che consentono di escludere la possibilità di dimenticanze, hanno mostrato (figura 7) che la probabilità di incidenti che comportino il danneggiamento, anche solo parziale, del nocciolo (evento che potrebbe dare inizio a rilasci di radioattività anche semplicemente all'interno dell'im-

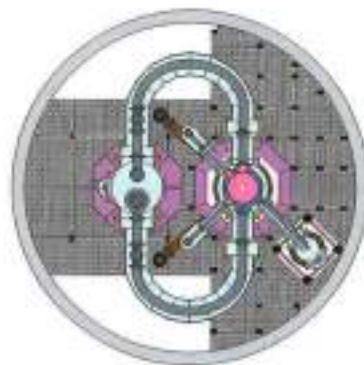
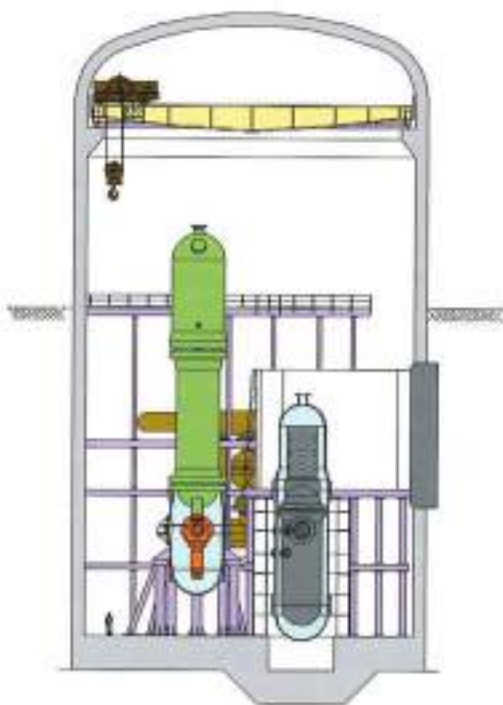
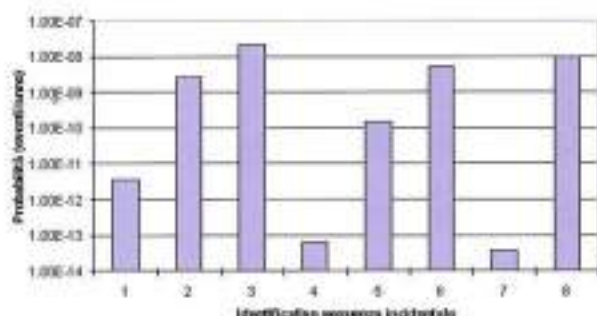


Figura 6 - L'edificio reattore del MARS ha un diametro di 27 metri ed un'altezza di 45 metri, di cui 25 sotto il livello del terreno rendendo, così, l'impatto paesaggistico dell'impianto molto limitato. Tutte le strutture interne all'edificio, siano esse di supporto di componenti o piani di servizio, sono realizzate in profilati di acciaio imbullonati. Questo permette una semplice rimozione di tutto quanto contenuto nell'edificio

pianto) è inferiore alla probabilità di eventi ultracatastrofici ritenuti impensabili dal comune buon senso quale, ad esempio, la caduta sulla Terra di un grande meteorite in grado di causare un milione di morti [7].



- 1 - Arresto con rallentamento pompa primaria
- 2 - Valvole pressurizzatore bloccate aperte
- 3 - Riduzione capacità di asportazione del calore da parte del generatore di vapore
- 4 - Perdita di energia elettrica
- 5 - Perdita di reagenti dai circuiti ausiliari
- 6 - Rottura tubi del generatore di vapore
- 7 - Bloccaggio pompa primaria
- 8 - Rottura linea vapore

Figura 7 - La massima probabilità di danneggiamento del nocciolo del reattore MARS è pari ad un evento ogni 50 milioni di anni ($2 \cdot 10^{-8}$ eventi/anno), mentre la probabilità che un grande meteorite colpisca la terra causando un milione di morti è pari ad un evento ogni 10 milioni di anni ($1 \cdot 10^{-7}$ eventi/anno) [2]

Ciò nonostante, il recipiente in pressione del reattore è stato progettato per resistere, senza dar luogo ad alcun rilascio di radioattività all'esterno dell'impianto, addirittura ad una fusione di gran parte del nocciolo, rendendo così praticamente nulla la probabilità di rilasci incontrollati di radioattività.

Settembre 2001

Riferimenti bibliografici

- [1] M. CAIRA, M. CUMO, A. NAVIGLIO, *I reattori nucleari supercritici*, "Le Scienze", n. 223, gennaio 1987
- [2] M. CAIRA, M. CUMO, A. NAVIGLIO, L. SORABELLA, *Reattori per la seconda era nucleare*, "Le Scienze", n. 368, aprile 1999
- [3] M. CUMO, *Safety in Nuclear Plants and Waste Disposal*, Roma, Accademia Nazionale dei Lincei, 8-9 marzo 2000
- [4] G. CARTA, *La domanda di energia nel mondo nel periodo 1973-1996*, ENEL, Roma, marzo 1998
- [5] M. CUMO, voce *Nucleari, Tecnologie*, pagg. 336-341 della collana del Novecento dell'Istituto Enciclopedico Italiano
- [6] A.M. WEINBERG, *Continuing the Nuclear Dialogue - Selected Essays*, American Nuclear Society, La Grange Park, Illinois, USA, 1985
- [7] C.R. CHAPMAN, D. DAVID, *Impacts on Earth by Asteroids and Comets: Assessing the Hazard*, "Nature", Vol. 367, gennaio 1994

Il progetto è stato descritto nei dettagli nel volume *600 MWth MARS Nuclear Power Plant - Design Progress Report 1997* e in un CD-ROM del 2001 (*600 MWth MARS Nuclear Power Plant - Design Progress Report 2001*), entrambi a cura dell'Università "La Sapienza".



Alessandro Pascolini



Sopra: la superficie di Fermi dell'alluminio

Nella pagina accanto: la superficie di Fermi del lantanio

Se i grandi scrittori danno il nome alle cose, i grandi scienziati danno il loro nome alle cose, ed una misura della loro grandezza si desume anche dal numero di cose che portano il loro nome. E la grandezza di Enrico Fermi viene riflessa dai tanti contesti in cui il suo nome compare, con una frequenza che nessun altro grande scienziato del XX secolo può avvicinare. Faremo un rapido elenco, probabilmente incompleto, di vari "fermi" nella fisica indicando il contesto in cui compaiono, a conferma dell'ampiezza della cultura scientifica del nostro.

Innanzitutto:

i fermioni, particelle che obbediscono alla statistica di Fermi-Dirac ed al principio di esclusione di Pauli; includono quark, elettroni, neutrini, nucleoni, nuclei ...

In meccanica quantistica:

le regole d'oro di Fermi per le probabilità di transizione fra due stati nell'unità di tempo

Nel decadimento beta:

il diagramma di Fermi, la transizione di Fermi e le regole di selezione di Fermi

Nelle interazioni deboli:

la costante universale di Fermi e la teoria di Fermi

Nella fisica atomica:

il modello e l'equazione di Thomas-Fermi

Nella fisica molecolare:

la risonanza di Fermi

In meccanica statistica:

la statistica e la funzione di distribuzione di Fermi-Dirac, l'energia di Fermi, l'impulso di Fermi, la temperatura di Fermi, la condensazione di Fermi

Nella fisica a molti corpi, dai nuclei, ai solidi, ai plasmi, alle stelle:

il gas di Fermi, il liquido di Fermi, la superficie di Fermi, la pressione di Fermi

Nello stato solido:

la buca di Fermi, la sfera di Fermi, la velocità di Fermi, il vettore d'onda di Fermi

Nella fisica dei reattori:

l'età di Fermi, la pila di Fermi

Nei raggi cosmici:

il meccanismo di Fermi, il pianerottolo di Fermi

Nella relatività generale:

le coordinate di Fermi, la derivata di Fermi, il trasporto di Fermi, il coefficiente di rotazione di Fermi, il principio di equivalenza debole di Fermi

Nelle particelle elementari:

il campo fermionico, gli antifermioni, il modello di Fermi-Yang

Nella ricerca di extra-terrestri:

il paradosso di Fermi

Esiste inoltre:

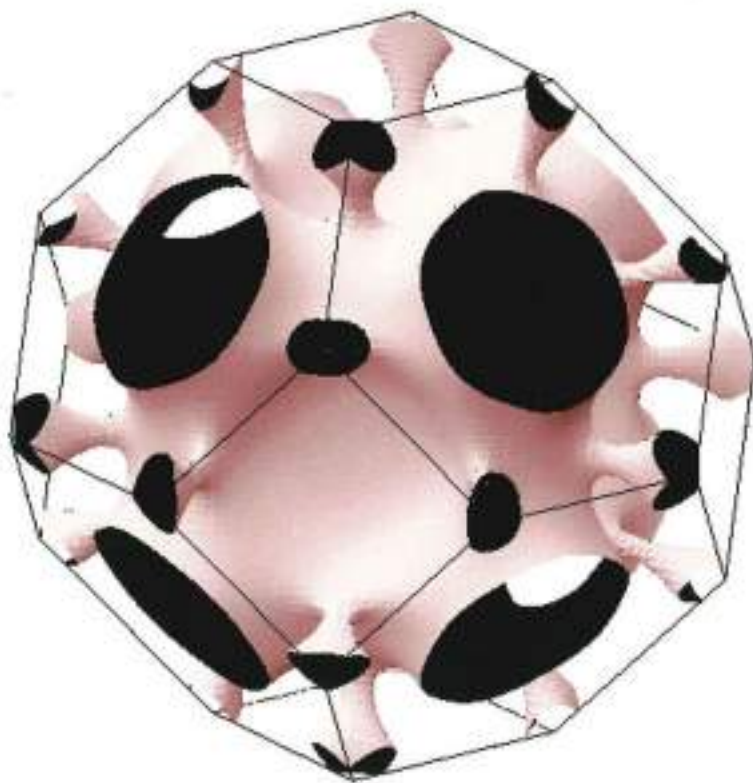
il *fermio*, l'elemento radioattivo artificiale di numero atomico 100.

Ma certamente il termine più significativo è proprio

il *fermi*, l'unità di misura del microcosmo coincidente con il femtometro, un milionesimo di miliardesimo di metro, che è approssimativamente la dimensione lineare di un protone.

Ma Enrico Fermi ha anche dato il nome a "cose" fondamentali della fisica:

il pione, il muone e soprattutto il neutrino, la particella proposta da Pauli per spiegare il decadimento beta e descritta nella teoria di Fermi delle interazioni deboli. I neutrini svolgono un ruolo fondamentale nelle ricerche di frontiera, nella fisica delle particelle, nell'astrofisica, nella cosmologia.



Luisa Bonolis

L'opera scientifica di Enrico Fermi



1901-1917 Enrico Fermi nasce a Roma il 29 settembre 1901. Durante l'infanzia il suo unico amico compagno di giochi è il fratello Giulio, di un anno più grande di lui, con il quale si diverte a costruire giocattoli meccanici, piccoli motori elettrici, modelli di aeroplani. A dieci anni si iscrive al ginnasio liceo Umberto I e molto presto sviluppa un forte interesse per la fisica e la matematica. Secondo quanto racconta Emilio Segrè, all'età di dieci anni il giovanissimo Fermi si interroga sul significato della frase: «l'equazione $x^2 + y^2 = r^2$ rappresenta un cerchio»; per il resto della vita lo considererà uno dei suoi maggiori sforzi intellettuali. Nel 1915, poco dopo la drammatica morte dell'amatissimo fratello Giulio, Fermi fa amicizia con Enrico Persico, compagno di scuola di suo fratello.

Il grande interesse per la fisica accomuna i due ragazzi, che iniziano a fare insieme esperimenti come misurare con precisione l'accelerazione di gravità a Roma, la densità dell'acqua marcia, il campo magnetico terrestre. Spesso fanno lunghe passeggiate per la città, durante le quali il giovane Persico scopre con meraviglia l'intelligenza del tutto singolare del suo compagno: «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».

Nel corso di una di queste scorribande per la città il giovane Fermi scopre su una bancarella di piazza Campo dei Fiori un trattato di fisica matematica di circa 900 pagine, *Elementorum Physicae Mathematicae, Volumen Primum et Secundum* [Elementi di Fisica matematica, Volumi Primo e Secondo], scritto in latino nel 1840 da Andrea Caraffa, un gesuita professore di fisica al Collegio Romano.

Si impegna a fondo nello studio di quest'opera, che tratta di meccanica dei mezzi continui, acustica, ottica e astronomia. Le numerose annotazioni in margine al testo e i foglietti pieni di calcoli ritrovati all'interno costituiscono una prima chiara traccia della naturale tendenza di Enrico Fermi a riformulare a modo proprio problemi già risolti da altri con procedimenti diversi. Con lo studio di questo testo Fermi prosegue in quella che sarà la sua formazione culturale di autodidatta; le sue capacità straordinarie, la sua forte personalità e il suo infallibile istinto lo porteranno in pochi anni a padroneggiare i campi di ricerca più avanzati della fisica dell'epoca, come la relatività e la teoria dei quanti, nel più totale isolamento rispetto all'ambiente scientifico italiano. Durante gli anni del liceo, Fermi ha un interlocutore importante nell'ingegner Adolfo Amidei, amico e collega del padre, appassionato di matematica e fisica, che contribuisce alla sua formazione scientifica prestandogli numerosi trattati di livello universitario come la *Geometria analitica* di L. Bianchi e *l'Analisi infinitesimale* di U. Dini, il *Calcolo geometrico secondo l'Ausdehnungslehre* di H. Grassman, preceduto dalle *Operazioni di logica deduttiva* di G. Peano e in particolare il *Traité de Mécanique* [Trattato di Meccanica] di S. D. Poisson, un classico della meccanica razionale, ricco di approfondimenti legati ai metodi matematici per la fisica, che esercita una profonda influenza nella formazione scientifica del giovane Fermi.

*Elementorum
Physicae Mathematicae,
Volumen Primum
et Secundum*



Enrico Fermi a quattro anni tra il fratello Giulio e la sorella Maria (1905)



Fermi studente a 16 anni (1917)

“Ho studiato con passione la matematica perché la consideravo necessaria per lo studio della fisica alla quale io voglio esclusivamente dedicarmi”



Orest Danilovich Chwolson, *Traité de Physique*, 9 volumi (Parigi, 1904-1914)

Il quaderno di appunti



Enrico Persico, Enrico Fermi e la sorella Maria con i genitori a Niederdorf (Bolzano)

1918 In luglio Fermi, saltando il terzo anno, consegue la licenza liceale e ad Amidei che gli chiede quali siano le sue preferenze risponde:

«Ho studiato con passione la matematica perché la consideravo necessaria per lo studio della fisica alla quale io voglio esclusivamente dedicarmi». È lo stesso Amidei a suggerire al giovane Fermi di partecipare al concorso per entrare alla Regia Scuola Normale Superiore di Pisa. I vantaggi sono diversi: una borsa di studio che include anche le spese per l'alloggio e il vitto, uno stretto contatto con i professori, un'importante biblioteca e insegnamenti supplementari e integrativi, oltre a un ambiente più sereno rispetto a quello familiare dove si era creata un'atmosfera di lutto dopo la morte di Giulio. Per preparare l'esame di ammissione alla Normale, Fermi studia il *Traité de Physique* [Trattato di Fisica] di Orest Danilovich Chwolson. Alla fine di luglio crive all'amico Persico: «La lettura dello Chwolson procede celermente e calcolo di averlo finito tra un mese o un mese e mezzo perché ho trovato circa 1000 pagine da saltare perché le conosco».

Si tratta di un gigantesco trattato in 9 volumi, dove c'è tutta la fisica delle grandi svolte, ci sono tutti i nomi che rappresentano la transizione dalla fisica classica alla nuova fisica: oltre a Einstein e Planck, vi figurano Wien, Poincaré, Lorentz, Abraham, Minkowski, Ehrenfest, von Laue, Rayleigh, Sommerfeld; e, ben citati, Volterra e Levi-Civita, che Fermi avrebbe incontrato ben presto.

Di questo testo parla con ammirazione Einstein a Salisburgo, in un congresso del 1909, lodandone con l'aggettivo "eccellente" lo stile e la completezza, sia per l'illustrazione della teoria che per quella degli esperimenti. Con lo studio dello Chwolson, è la fisica con i suoi problemi che finalmente lo attrae; il 18 agosto Fermi scrive di nuovo a Persico: «La lettura dello Chwolson procede rapidamente e prevedo che fra tre o quattro giorni sarà finita; è uno studio che sono molto contento di aver fatto perché ha approfondito molto le cognizioni di fisica che già avevo e mi ha insegnato molte cose di cui non avevo nemmeno un'idea». Il tema da lui svolto per l'esame di ammissione alla Scuola Normale ("Caratteri distintivi dei suoni e loro cause") lascia sbalorditi i commissari per la profondità della trattazione e per la perfetta padronanza degli strumenti matematici. In autunno Fermi si iscrive all'Università di Pisa come allievo interno della Scuola Normale.

1919 Dalle lettere scritte all'amico Persico è possibile ricostruire l'intensa attività di studi che Fermi porta avanti durante questi anni universitari al di fuori del curriculum universitario. Legge la *Théorie des Tourbillons* [Teoria dei vortici] di Henri Poincaré e il *Traité de Mécanique Rationnelle* [Trattato di Meccanica razionale] di Paul Appell, che lo stimola a interessarsi particolarmente ai metodi della meccanica analitica, studia testi di chimica come *Theoretische Chemie* [Chimica teorica] di Walter Nernst e il *Lehrbuch der Allgemeinen Chemie* [Manuale di Chimica generale] di Wilhelm Ostwald. Tra le carte di Fermi conservate a Chicago si trova un quaderno di appunti che risale all'estate del 1919 nel quale sono annotati una serie di argomenti oggetto dei suoi studi recenti. Si va dalla meccanica analitica di Hamilton e Jacobi, alla teoria di Lorentz, alla relatività ristretta, alla teoria del corpo nero. C'è una bibliografia che contiene molti dei libri fondamentali, in particolare il testo di O. Richardson *Electron Theory of Matter* [Teoria elettronica della materia], dalla cui lettura trae lo spunto

per il primo articolo sulla relatività, e il libro di Ernest Rutherford *Radioactive Substances and their Radiations* [Elementi radioattivi e loro radiazioni], da cui trae un'estesa bibliografia sugli *Elementi radioattivi e loro costanti*, e la serie di memorie di Tullio Levi-Civita sulla relatività generale. Nel quaderno di appunti si trovano menzionati i primi lavori di Bohr sullo spettro dell'idrogeno, certamente poco conosciuti e considerati all'epoca in Italia. È un completo autodidatta e già si muove con grande sicurezza nei campi più diversi della fisica e della matematica, dando consigli all'amico Persico e suggerendogli i testi da leggere o i problemi su cui cimentarsi.

1920 I fisici con cui Fermi viene in contatto a Pisa sono Luigi Puccianti, direttore dell'Istituto di Fisica di Pisa e titolare della cattedra di fisica sperimentale e Giovanni Polvani, suo aiuto, con cui stringe anche amicizia. Tra i suoi colleghi vi sono Franco Rasetti e Nello Carrara, con i quali Fermi inizia a fare esperimenti nel laboratorio di fisica al quale il direttore Puccianti aveva dato loro libero accesso. Fermi ha le idee ben chiare su quali esperimenti eseguire per fare ricerche originali e mostra subito le sue doti di leader del piccolo gruppo, come ricorda Rasetti: «Carrara e io, che nell'anno precedente avevamo ormai riconosciuto la superiorità di Fermi per le sue conoscenze di matematica e fisica, lo consideravamo fin da allora il nostro capo naturale e ci rivolgevamo a lui e non ai professori per avere istruzioni e consigli».

Fermi ha già studiato a fondo quello che allora è considerato il testo sacro della meccanica quantistica, *Atombau und Spektrallinien* [Struttura dell'atomo e linee spettrali] di A. Sommerfeld grazie al quale padroneggia la teoria quantistica dell'atomo meglio di ogni altro in Italia. Gli stessi professori lo considerano l'autorità indiscussa sulla teoria di Bohr-Sommerfeld: «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 sostenitore» scrive Fermi al suo amico Enrico Persico il 30 gennaio 1920.

1921 È probabile che risalga più o meno a questo periodo la lettura del libro di Hermann Weyl, *Raum, Zeit, Materie* [Spazio, tempo, materia], pubblicato nel 1921, che costituisce un'introduzione di straordinaria chiarezza fisica e matematica alla teoria della relatività e da cui Fermi in particolare apprende la potenza dei metodi variazionali in fisica matematica, mentre approfondisce e perfeziona lo studio della relatività. Dopo lo studio della meccanica quantistica Fermi, infatti, si dedica a fondo alla relatività e nel corso del terzo anno di università pubblica sul "Nuovo Cimento" i suoi primi lavori su problemi di elettromagnetismo. Nel primo (*Sulla dinamica di un sistema rigido di cariche elettriche in moto traslatorio*) si trova l'interessante risultato secondo cui, per i sistemi materiali del tipo considerato, l'inerzia del corpo è rappresentata da un tensore.

Nel secondo articolo (*Sull'elettrostatica di un campo gravitazionale uniforme e sul peso delle masse elettromagnetiche*) si discute l'effetto di un campo gravitazionale uniforme statico su di un sistema di cariche elettriche. Trova così che il peso del sistema aumenta proporzionalmente alla massa elettromagnetica.

"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 sostenitore"



Enrico Fermi (a destra) a Pisa davanti alla Scuola Normale Superiore. Da sinistra: Renato Gardini, normalista, matematico; Giovan Battista Pacella, matematico; Gaetano Gotti, letterato; Luigi Fantappiè, matematico e portiere della Normale (1920)

Le prime pubblicazioni



Franco Rasetti, Nello Carrara ed Enrico Persico sulle Alpi Apuane

L'apparato formale presente in queste prime due Note è quello caratteristico dei fisici matematici di quegli anni, ma l'attenzione di Fermi è già rivolta a concetti e risultati più vicini alla fisica. Secondo quanto affermato da Persico, il metodo di lavoro di Fermi consisteva nel fatto che egli «prende i dati di un determinato problema, li elaborava lui stesso e poi confrontava i suoi risultati con quelli ottenuti dagli autori dei saggi. A volte, nella realizzazione di questo tipo di lavoro, egli poneva nuovi problemi e li risolveva oppure, addirittura, correggeva le soluzioni errate se erano ormai universalmente accettate. Nacquero così le sue prime pubblicazioni».

«Sto facendo il relativista...»



Giugno 1922. Brano della tesi di laurea di Enrico Fermi



Franco Rasetti, Nello Carrara ed Enrico Persico in una gita sulle Alpi Apuane

1922 Nel mese di gennaio Fermi scrive a Persico: «Sto facendo il relativista».

La relatività costituisce appunto una sua grande passione di questo periodo, nel quale sviluppa il suo programma di ricerca in piena autonomia. Dopo lo studio delle relazioni fra campo gravitazionale ed elettromagnetico sotto condizioni piuttosto restrittive, Fermi avverte la necessità di una trattazione più sistematica di questo e di altri problemi simili. Nel frattempo si è impadronito a fondo dei metodi del calcolo tensoriale che, sviluppato dai matematici Gregorio Ricci Curbastro e Tullio Levi-Civita, costituisce la struttura matematica alla base della relatività generale. Il più notevole dei suoi risultati in relatività si trova nell'articolo *Sopra i fenomeni che avvengono in vicinanza di una linea oraria* nel quale Fermi dimostra un teorema di considerevole interesse per le applicazioni, la cui importanza consiste appunto nel semplificare alcune dimostrazioni di relatività generale. Questa memoria viene successivamente citata nei più importanti trattati di calcolo differenziale assoluto, primo fra tutti le famose *Lezioni di calcolo differenziale assoluto*, di Levi-Civita, pubblicate nel 1925. In questo studio Fermi, per trattare in modo generale e sistematico i problemi che coinvolgono campi gravitazionali ed elettromagnetici, introduce un sistema di coordinate spazio-temporali (le cosiddette coordinate di Fermi) particolarmente efficace nel descrivere l'evoluzione temporale di fenomeni che avvengono in una piccola regione di spazio (una importante estensione viene successivamente fatta dal fisico matematico britannico A. G. Walker nel 1932, per cui nella letteratura scientifica si parla generalmente di coordinate di Fermi-Walker). Fermi dimostra inoltre un teorema di calcolo differenziale assoluto secondo il quale in prossimità di una linea oraria lo spazio si comporta come se fosse euclideo. Questo lavoro ha nel tempo una considerevole risonanza: ancora oggi le coordinate di Fermi sono menzionate e impiegate in molti trattati di relatività generale. Il 7 luglio si laurea in fisica cum laude e ottiene il diploma della Scuola Normale. La sua tesi di laurea riguarda una ricerca sperimentale sulle immagini di diffrazione dei raggi X. Riguardo ai motivi di questa scelta Rasetti ricorderà anni dopo: «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 soltanto 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 della matematica applicata, mostrando il più completo disinteresse per le sue

implicazioni fisiche. Questo spiega perché 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». Tuttavia Fermi ha già maturato una grande passione per la fisica sperimentale, come testimonia ancora Rasetti: «Egli fu fin dall'inizio un fisico completo per cui la teoria e l'esperimento avevano lo stesso peso, anche se per molti anni la sua fama fu fondata principalmente sui suoi contributi teorici. Ma non è stato mai, neanche per un momento, uno di quei fisici teorici che, per usare un'espressione molto usata più tardi dal gruppo di Roma, non sapevano "distinguere l'acciaio dall'alluminio"». Comunque l'anno precedente Fermi ha pubblicato su "Il Nuovo Cimento", un lungo articolo teorico sulle proprietà dei raggi X, *I raggi Röntgen*, nel quale dimostra di padroneggiare perfettamente l'intera letteratura sull'argomento. A questo punto Fermi, che ha già maturato un ben definito stile scientifico e ha manifestato una chiara tendenza a seguire un programma di ricerca del tutto personale, dimostra ormai una padronanza non comune sia della fisica teorica che della fisica sperimentale.

1923 È notevole il fatto che a quest'epoca Fermi sia già abbastanza noto, almeno in alcuni ambienti, tanto che la sua partecipazione è richiesta all'appendice dell'edizione italiana del libro di A. Kopff, *I fondamenti della relatività einsteiniana*. La maggior parte dei dodici saggi contenuti nella stessa appendice, scritti dai più noti fisici e matematici italiani della generazione più anziana, sono molto scettici e ostili alla teoria di Einstein. Fermi, uno dei pochi a dare un contributo favorevole, spicca nettamente per la sua capacità di individuare gli sviluppi fisici più interessanti. Nel breve saggio: *Le masse nella teoria della relatività*, nel quale sottolinea come «La grandiosa importanza concettuale della teoria della relatività» e il dibattito filosofico sui fondamenti cui aveva dato luogo «hanno forse un po' distolto l'attenzione da un altro suo risultato che, per esser meno clamoroso e, diciamo pure, meno paradossale, ha tuttavia nella fisica conseguenze non meno degne di nota, ed il cui interesse è verosimilmente destinato a crescere nel prossimo svilupparsi della scienza. Il risultato a cui accenniamo è la scoperta della relazione che lega la massa di un corpo alla sua energia». Dopo aver sottolineato le potenziali quantità di energia contenute in un grammo di materia in base alla relazione $E = mc^2$, Fermi prosegue: «Non appare possibile che, almeno in un prossimo avvenire, si trovi il modo di mettere in libertà queste spaventose quantità di energia, cosa del resto che non si può che augurarsi, perché l'esplosione di una così spaventosa quantità di energia avrebbe come primo effetto di ridurre in pezzi il fisico che avesse la disgrazia di trovare il modo di produrla». Al suo ritorno a Roma Fermi conosce Orso Mario Corbino, direttore dell'Istituto di Fisica. Corbino è un personaggio molto influente sia in politica - era stato Ministro della Pubblica Istruzione - sia nella comunità scientifica italiana. Corbino intuisce il talento di Fermi e decide di appoggiarne la carriera. Gli fa ottenere una borsa di perfezionamento all'estero con la quale Fermi si reca a Göttingen presso Max Born. Là conosce Werner Heisenberg e Pascual Jordan, ma non stabilisce particolari legami con questo ambiente rimanendo piuttosto in disparte. Molti anni dopo Heisenberg ricorderà che Fermi all'epoca gli era sem-

“Non appare possibile che, almeno in un prossimo avvenire, si trovi il modo di mettere in libertà queste spaventose quantità di energia”



Enrico Persico, Maria e Enrico Fermi sul Monte Cavo (1923)



Enrico Fermi con la futura moglie Laura Capon. I due si conobbero nel 1924 e si sposarono quattro anni dopo.

Considerazioni sulla quantizzazione dei sistemi che contengono degli elementi identici

brato «sempre un po' triste e introverso, e non era molto facile entrare in contatto con lui. Tuttavia, mi piaceva perché mi sembrava un fisico molto diverso dagli altri». Ricordando l'abilità matematica di Born e il seminario da lui tenuto per un ristrettissimo gruppo di giovani ricercatori, Heisenberg parla ancora di Fermi: «Ricordo che Fermi, che prendeva parte a questo seminario, era un po' infelice; non gli piacevano quelle sottigliezze matematiche, prove di convergenza e roba simile. Per esempio parlavamo del teorema che in un intorno infinito di una soluzione periodica esistono sempre soluzioni che non sono periodiche; odiava esattamente questo tipo di sottigliezze matematiche. Intendo dire che Fermi pensava "Questa non è fisica". [Al contrario] Born pensava: Insomma, noi dobbiamo fare del nostro meglio; una dimostrazione negativa, una dimostrazione che qualcosa non funziona, è altrettanto buona che una dimostrazione positiva». Fermi, che possiede una preparazione matematica di altissimo livello, avrà sempre un atteggiamento molto pragmatico nei confronti dell'uso di questo strumento, rifuggendo dai virtuosismi tecnici e in generale dall'uso di ipotesi non strettamente necessarie. Nel 1923 Fermi pubblica una serie di lavori sulla meccanica analitica, in particolare l'articolo *Dimostrazione che in generale un sistema meccanico normale è quasi ergodico* che viene molto apprezzato da Paul Ehrenfest, uno dei maggiori esperti, con Einstein, di meccanica statistica e il cui lavoro ha all'epoca profonde implicazioni per i fondamenti della meccanica. Nel primo di questi lavori, *Il principio delle adiabatiche ed i sistemi che non ammettono coordinate angolari*, scritto dopo appena un mese di soggiorno a Göttingen, Enrico Fermi definisce i limiti di validità del principio delle adiabatiche di Ehrenfest, applicabile a un sistema meccanico in cui le forze oppure i vincoli vengano continuamente modificati in funzione del tempo ma lentissimamente in confronto ai periodi propri del sistema ossia, secondo l'espressione di Ehrenfest, "adiabaticamente". Nel secondo articolo scritto durante il suo soggiorno a Göttingen, *Alcuni teoremi di meccanica analitica importanti per la teoria dei quanti*, Enrico Fermi mostra come sia possibile utilizzare il principio di Ehrenfest per quantizzare sistemi atomici a tre corpi, come la molecola di idrogeno ionizzata (composta da due protoni e un elettrone orbitale) o l'atomo di elio (il nucleo e i due elettroni orbitali). Ehrenfest consegna a George Eugene Uhlenbeck, che si recava a Roma, una lettera per Fermi nella quale gli pone un certo numero di domande. Fermi e Uhlenbeck saranno grandi amici per tutta la vita. Probabilmente in seguito a queste circostanze, Fermi deciderà di andare a Leida con una borsa Rockefeller nel settembre 1924. Tornato a Roma, scrive una breve memoria dal titolo *Sulla probabilità degli stati quantici*, che può essere considerata a tutti gli effetti il suo primo contributo importante alla meccanica quantistica.

1924 In questo periodo Enrico Fermi pubblica una teoria semiclassica della radiazione di frenamento (*Über die Theorie des Stosses Zwischen Atomen und Elektrisch Geladenen Teilchen* [Sulla teoria degli urti tra atomi e particelle cariche]) che ha qualche successo qualitativo, anche se bisognerà aspettare molti anni per vederne il perfezionamento ad opera di von Weizsäcker e Williams (da cui il metodo dei "quanti virtuali" prenderà il nome) i quali lo useranno per importanti applicazioni. Il metodo, nella versione di Fermi, viene criticato da

Bohr che sottolinea le discrepanze con i risultati sperimentali relativi alla distribuzione degli elettroni emessi negli urti. Il lavoro *Sopra la teoria di Stern della costante assoluta dell'entropia di un gas perfetto monoatomico*, pubblicato l'anno precedente, presenta un certo interesse storico perché è la prima indicazione delle riflessioni di Fermi su questi argomenti, in particolare sulla suddivisione dello spazio delle fasi in celle di volume h^3 . Ma è soltanto con il lavoro *Considerazioni sulla quantizzazione dei sistemi che contengono degli elementi identici* che Fermi arriva a porsi il problema della ricerca di un "principio mancante" per spiegare il comportamento di particelle identiche che obbediscono alle condizioni della meccanica quantistica di Bohr-Sommerfeld e in particolare per spiegare l'annullarsi dell'entropia allo zero assoluto. Per avere un'idea del modo di ragionare di Fermi con particelle identiche nell'ambito della quantizzazione semiclassica, si può pensare al modello dell'atomo di elio in cui i due elettroni sono in opposizione agli estremi del diametro di un'orbita circolare e ruotano con uguale velocità; se le particelle fossero distinguibili il periodo del sistema corrisponderebbe a una rotazione completa di entrambi gli elettroni, mentre dopo mezzo periodo il sistema ritorna esattamente nello stesso stato grazie all'identità dei due elettroni. Perciò nel calcolo dell'azione quantizzata secondo Bohr e Sommerfeld la periodicità che conta è quella dello stato e non quella del sistema. Almeno due anni prima di scrivere il suo famoso lavoro sulla statistica del gas ideale Fermi anticipa senza saperlo il principio di Pauli, anche se per molecole generiche, quando, nel sommario conclusivo alle *Considerazioni sulla quantizzazione dei sistemi che contengono degli elementi identici* scrive: «[L'insuccesso delle regole di Sommerfeld per il calcolo del valore assoluto dell'entropia di un gas è evitato quantizzando il moto di molecole identiche] solo nel caso che in ogni cella sia contenuta una sola molecola, mentre se il gas è una miscela di due specie di molecole e lo si quantizza racchiudendo le molecole in celle, per modo che in ciascuna cella siano contenute due molecole, però di specie diversa, si ottiene ancora il risultato esatto». Non appena il "principio di esclusione" verrà enunciato da Pauli (gennaio 1925) egli ne comprenderà immediatamente le ragioni profonde che giustificano la sua statistica, a cui arriverà appunto partendo da basi diverse e da un punto di vista relativamente indipendente dallo sviluppo della nuova meccanica quantistica. Il 2 luglio il fisico indiano Satyendra Nath Bose introduce un nuovo tipo di statistica per i quanti di luce. A distanza di poco più di una settimana Albert Einstein applica la statistica di Bose a un gas di particelle libere e nel suo articolo dell'8 gennaio 1925 deduce che la materia deve esibire proprietà ondulatorie con un argomento indipendente da quello di Louis de Broglie che nella sua tesi di laurea, discussa il 25 novembre del 1924, era stato il primo ad associare alla materia un comportamento ondulatorio.

Tra il settembre e il dicembre di quest'anno Enrico Fermi soggiorna a Leida, usufruendo di una borsa di studio della Fondazione Rockefeller ottenuta grazie a Vito Volterra, il grande matematico, professore di fisica matematica a Roma e in quegli anni presidente dell'Accademia dei Lincei. Ehrenfest è un grande maestro, grazie alla sua profonda conoscenza della fisica e alla sua grande disponibilità. D'altra parte i problemi al tappeto a Leida - meccanica statistica e spettroscopia - sono particolarmente congeniali a Fermi. Oltre al contatto con Ehrenfest, noto per i suoi fondamentali contributi alla meccanica quantistica e soprannominato



Leida, 1924. Gerhard Dieke, Samuel Goudsmit, Jan Tinbergen, Paul Ehrenfest, Ralph de Laer Kronig ed Enrico Fermi

“la coscienza della fisica”, Fermi conosce di persona scienziati come Hendrick Lorentz e Albert Einstein (secondo la sua stessa testimonianza quest'ultimo prova per lui “una simpatia vivissima”) e farà amicizia con alcuni giovani fisici come Samuel Goudsmit e Jan Tinbergen, che successivamente diventerà un economista. Fermi rimarrà sempre in stretto rapporto con l'ambiente scientifico olandese. A parte l'amico Enrico Persico, con il quale ha una lunga amichevole consuetudine, Fermi non ha in Italia, tra i fisici in senso stretto, interlocutori competenti con cui discutere delle sue ricerche sulla meccanica quantistica e sulla teoria della relatività, anche se matematici importanti dell'epoca, come Tullio Levi-Civita, un assoluto esperto in Italia nel campo della relatività, e in qualche misura anche Vito Volterra, si accorgono della sua brillante competenza ed entrano in contatto con lui. I soggiorni all'estero costituiscono il suo primo contatto con fisici impegnati in problemi d'avanguardia, in istituti di ricerca dove la fisica «si fa e non si apprende solo dalle pubblicazioni». È anche un'occasione preziosa per misurarsi con figure a livello internazionale.

Il principio di esclusione di Pauli



Firenze, 1925. Enrico Fermi, Nello Carrara, Franco Rasetti e Rita Brunetti



Firenze, 1925. Enrico Fermi

1925 È un anno di cruciale importanza per la fisica. Nel gennaio 1925 Pauli pubblica il suo famoso articolo sul principio di esclusione e appaiono i due fondamentali lavori di Einstein sulla statistica quantistica dei gas. Nell'estate dello stesso anno Heisenberg, Born e Jordan gettano le basi della nuova meccanica quantistica - o meccanica delle matrici - che Fermi non riesce ad apprezzare trovando la formulazione troppo astratta. A causa della sua particolare formazione matematica l'algebra delle matrici e la matematica degli operatori in generale non gli sono particolarmente congeniali; assai più congeniali gli sono invece le equazioni alle derivate parziali. Questo forse spiega come mai Fermi accetti rapidamente la versione di Schrödinger della meccanica ondulatoria e consideri con diffidenza la formulazione di Heisenberg; naturalmente finché non ne sarà dimostrata la completa equivalenza da Born, Jordan e Dirac. In ottobre Uhlenbeck e Goudsmit annunciano la scoperta dello spin dell'elettrone. Dall'autunno del 1924 fino ai primi mesi del 1926 Fermi insegna meccanica teorica e fisica matematica all'Università di Firenze dove ritrova l'amico Rasetti, che all'epoca è assistente universitario. Insieme realizzano una serie di esperimenti originali dedicati all'effetto di un campo magnetico variabile sulla polarizzazione della radiazione di risonanza del mercurio (*Effect of an Alternating Magnetic Field on the Polarisation of the Resonance Radiation of Mercury Vapour* [Effetto di un campo magnetico alternato sopra la polarizzazione della luce di risonanza]). Rasetti ricorda che questa seconda incursione di Enrico Fermi nel campo sperimentale dopo anni di lavoro teorico «dimostra la sua inventiva nel lavoro con una metodica sconosciuta e costituiscono il primo esempio di ricerca degli spettri atomici con metodi di radiofrequenze, che saranno ampiamente utilizzati anni dopo». Pubblica due articoli di carattere divulgativo nel “Periodico di Matematiche” una rivista diretta dal matematico Federigo Enriques il quale era dell'opinione che la rivista si dovesse occupare anche di fisica moderna a livello elementare (*Sui principi della teoria dei quanti*, un articolo sulla nuova meccanica quantistica, e *Sopra la teoria dei corpi solidi*). Nel 1926 scriverà per la stessa rivista *Problemi di chimica, nella fisica*

dell'atomo. Fermi ormai ha al suo attivo circa trenta pubblicazioni, la maggior parte di fisica teorica, che vanno dalla relatività alla meccanica statistica, alla fisica nucleare.

1926 Vince a Roma il primo concorso a cattedra di Fisica teorica bandito in Italia. Esce l'articolo *Sulla quantizzazione del gas perfetto monoatomico*, il celebre lavoro nel quale Fermi formula la teoria di un gas ideale di particelle che obbediscono al principio di esclusione di Pauli. Più tardi Fermi racconterà a Segrè che la divisione dello spazio delle fasi in celle finite era un problema che lo aveva occupato molto a fondo e se Pauli non avesse enunciato il principio di esclusione ci sarebbe arrivato a partire dalla costante assoluta dell'entropia, un problema di cui si era interessato fin dal gennaio 1924, quando aveva scritto il lavoro sulla quantizzazione di sistemi contenenti particelle identiche. Subito dopo aver letto l'articolo di Pauli, Fermi si rende conto di possedere tutti gli elementi per formulare una teoria del gas ideale soddisfacente il principio di Nernst allo zero assoluto. Lo stesso Bruno Pontecorvo ricorda che «Fermi già da tempo accarezzava l'idea di questo lavoro: gli mancava però il principio di Pauli. Appena quest'ultimo venne formulato, mandò in stampa il suo articolo». Fermi era arrivato molto vicino al principio di esclusione, tanto che, come ricorda Pontecorvo «era molto amareggiato per non essere riuscito da solo a formulare il principio di Pauli». Come è noto Paul Adrien Maurice Dirac sviluppa questo tipo di statistica indipendentemente da Fermi. Il lavoro di Dirac *On the Theory of Quantum Mechanics* [Sulla teoria della meccanica quantistica] viene presentato alla Royal Society il 26 agosto 1926, mentre la prima breve nota di Fermi era stata presentata all'Accademia dei Lincei già il 7 febbraio di quell'anno. Tuttavia il lavoro di Fermi, che pure viene pubblicato in versione tedesca non sembra produrre effetti immediati sulla comunità scientifica internazionale. Il motivo è che la sua formulazione è basata su procedimenti della vecchia fisica quantistica, apparentemente lontana dai nuovi più recenti interessi. D'altra parte, come ricorda Amaldi: «[...] l'unificazione della meccanica delle matrici e della meccanica ondulatoria era stata realizzata in poche settimane tra il mese di marzo e il mese di aprile del 1926». Lo stesso Dirac ricorderà molti anni dopo che nel leggere il lavoro di Fermi non si era reso conto di quanto fosse importante perché gli era sembrato in qualche modo avulso dai problemi di base della teoria quantistica. È necessario sottolineare che il lavoro di Dirac risulta fondamentale nel collegare le due possibili scelte di simmetria delle funzioni d'onda con le due statistiche quantiche. Sulla base delle date in cui pervengono gli articoli alle varie riviste scientifiche, la prima applicazione della statistica di Fermi-Dirac viene fatta in ambito astrofisico. Il 10 dicembre dello stesso anno R. H. Fowler presenta alla Royal Society un lavoro intitolato *Dense Matter* [Materia densa] in cui mostrava che un gas di elettroni all'interno di una nana bianca deve essere un "gas di Fermi" degenerare. L'importanza della statistica di Fermi per gli elettroni in un metallo viene messa in luce da un articolo di Pauli di poco successivo (10 febbraio 1927), *Sulla degenerazione del gas e il paramagnetismo*, in cui «La statistica quantica del gas perfetto monoatomico che è dovuta a Fermi [...] viene estesa al caso in cui gli

La statistica di Fermi



Enrico Fermi a Caorso, nel viale della villa di famiglia, 1926

atomi del gas possiedano spin e alla magnetizzazione di un tale gas.» In questo lavoro Pauli considera appunto gli elettroni di conduzione all'interno di un metallo come un gas perfetto degenerare. Come è noto, in onore di Fermi, tutte le particelle che obbediscono a questo tipo di statistica, come gli elettroni, i protoni e i neutroni, vengono attualmente chiamate fermioni. Il nome di Fermi verrà anche adoperato, nell'abbreviazione corrente *Fermi motion*, per descrivere la distribuzione della quantità di moto in un nucleo, considerato un esempio di gas degenerare di nucleoni. La nozione è importante perché questo moto contribuisce all'energia totale disponibile nelle collisioni fra una particella e un nucleo.

Nei primi mesi del 1926 compare sugli "Annalen der Physik" il primo lavoro di Schrödinger sulla meccanica ondulatoria. Al suo ritorno da Firenze a Roma per le vacanze estive Fermi trova Pontremoli e Persico che studiano e discutono questa nuova formulazione della meccanica quantistica che fa uso di equazioni differenziali alle derivate parziali e quindi appare alla maggior parte dei fisici molto più accessibile rispetto alla "strana" matematica delle matrici utilizzata da Heisenberg. Una gran parte delle discussioni verte sulla possibilità di trovare qualche collegamento, per quanto vago, tra le idee, così inusuali, della meccanica ondulatoria e i concetti che avevano guidato il lavoro dei fisici atomici fino a pochi mesi prima. Da queste discussioni nasce il lavoro *Il principio delle adiabatiche e la nozione di forza viva nella nuova meccanica ondulatoria*, che Fermi scrive insieme con Persico.

L'atomo di Thomas-Fermi



Emilio Segrè, Enrico Persico, Enrico Fermi al mare (Ostia, 1927)



Aula dove insegnava Enrico Fermi a via Panisperna

1927 Dopo aver sviluppato la statistica di un gas di particelle che obbediscono al principio di esclusione di Pauli, Fermi applica lo stesso metodo per calcolare il potenziale efficace che agisce sugli elettroni di un atomo considerandoli come un gas di fermioni allo zero assoluto mantenuto intorno al nucleo dall'attrazione coulombiana. Da questa applicazione importante nasce il lavoro *Un metodo statistico per la determinazione di alcune proprietà dell'atomo*, oggi noto come "metodo di Thomas-Fermi". Fermi non sa che L. H. Thomas è arrivato alle stesse conclusioni circa un anno prima, pubblicandole su una rivista non molto diffusa. L'espressione approssimata per lo schermo del potenziale coulombiano dovuto agli elettroni nel loro insieme, introdotta dal potenziale efficace del modello di Thomas-Fermi, ha poi avuto applicazioni nella fisica dei solidi in tutta la seconda metà del secolo XX. A questo punto Fermi ha acquistato una discreta fama nella comunità scientifica internazionale, al punto che Einstein, in una lettera a Lorentz del mese di giugno fa il nome di Fermi e Langevin come possibili relatori, in sua vece, per la statistica quantistica al quinto Convegno Solvay che si sarebbe tenuto in ottobre. Nel settembre del 1927, in occasione delle celebrazioni del centenario della morte di Alessandro Volta, viene organizzato un congresso internazionale di fisica a Como. Vi partecipano tutti i grandi della fisica mondiale ed è un evento particolarmente ricco di soddisfazioni e di riconoscimenti per Fermi. In questa sede Arnold Sommerfeld presenta infatti una relazione in cui riesce a spiegare per la prima volta il contributo al calore specifico da parte degli elettroni di un metallo utilizzando la nuova statistica. Arnold Sommerfeld illustra una serie di importanti risultati che mostrano l'importanza della nuova statistica di Fermi per l'interpretazione del comportamento degli

elettroni nei metalli, assolutamente inspiegabile in base alle teorie classiche. Lo stesso Fermi mette in evidenza come, a questo punto, sia ormai del tutto chiaro che esistono due tipi di particelle, quelle che obbediscono alla statistica di Bose-Einstein, come nel caso dei quanti di luce (attualmente chiamate bosoni), e quelle che obbediscono al principio di esclusione di Pauli, come gli elettroni e i protoni (attualmente chiamate fermioni) e che seguono appunto la statistica di Fermi-Dirac. Nel concludere il suo intervento Fermi si sofferma sull'importanza di affrontare il problema «di costruire una teoria dei metalli capace di rendere conto delle forze che tengono insieme la compagine del metallo», pur sottolineando le difficoltà di questo programma di ricerca a partire dal quale si svilupperà nel 1900 il campo di studi che sarà alla base della Fisica dello stato solido.

Quando Fermi si stabilisce all'Università di Roma come titolare della cattedra di Fisica teorica, non esiste alcun gruppo di ricerca. Persico ormai è a Firenze, Corbino è assorbito dai suoi impegni e dall'attività didattica, ma lancia un appello ai suoi migliori studenti di ingegneria perché si trasferiscano a Fisica. Intorno a Fermi si forma il primo nucleo di una scuola italiana di fisica moderna. Su interessamento di Corbino, Rasetti viene trasferito a Roma, mentre Emilio Segrè, Edoardo Amaldi e Ettore Majorana all'epoca sono ancora studenti, ma la «velocità della formazione di un giovane fisico alla scuola di Fermi era incredibile», come ricorda Emilio Segrè. Più tardi si unirà al gruppo anche Bruno Pontecorvo. Fermi è un insegnante nato. La grande chiarezza e la nettezza dell'esposizione derivano non soltanto dalle sue profonde conoscenze e dalla sua eccezionale lucidità, ma anche dal lavoro autonomo fatto all'epoca in cui era studente. Ama tenere lezioni di fisica elementare perché attribuisce una grande importanza a una buona preparazione in fisica classica. Il suo corso di fisica matematica costituisce una specie di enciclopedia contenente elementi di elettrodinamica, di teoria della relatività, di teoria della conduzione del calore, di teoria dell'elasticità e della diffusione.

1928 Nel corso di quest'anno Fermi pubblica una serie di articoli in cui utilizza il modello di Thomas-Fermi per calcolare le proprietà degli atomi che variano con regolarità al variare del numero atomico. Fermi continuerà sempre ad applicare il suo metodo statistico ad una numerosa serie di problemi appartenenti a campi molto diversi; molto più in là lo utilizzerà anche per eventi nucleari ad alte energie. Nel 1928 Fermi pubblica il brillante manuale *Introduzione alla fisica atomica* che riempie una lacuna importante nella manualistica universitaria in lingua italiana.

1929 Nel 1927 Dirac pubblica i primi lavori in cui estende sistematicamente le regole di quantizzazione dei sistemi meccanici ai campi elettromagnetici. Nel rivolgere i suoi interessi verso l'elettrodinamica quantistica, questa nuova frontiera della fisica teorica, Fermi si scontra con tutti i problemi che nascono dalla necessità di spiegare le interazioni del campo elettromagnetico con le particelle cariche della materia applicando i principi della meccanica quantistica, con il conseguente problema dell'emissione e assorbimento dei fotoni. Nell'appro-



Istituto di fisica di via Panisperna.
Biblioteca



Enrico Fermi, Werner Heisenberg,
Wolfgang Pauli. Congresso di Como
(1927)

Introduzione alla fisica atomica



Enrico Fermi (1928)

Elettrodinamica quantistica



Ettore Majorana

fondire lo studio dei lavori di Dirac durante l'inverno 1928-1929 Fermi decide, come fa spesso, di riformulare la teoria seguendo un approccio matematico a lui più familiare. Successivamente lavora a lungo per trovare una soluzione alle ben note difficoltà relative alle divergenze dell'elettrodinamica quantistica che nascono dalla self-energia dell'elettrone puntiforme e riempie interi quaderni di calcoli, senza successo. Alcuni risultati interessanti si trovano tuttavia nei lavori *Sopra l'elettrodinamica quantistica, Le masse elettromagnetiche nella elettrodinamica quantistica, Quantum Theory of Radiation* [Teoria quantistica della radiazione]. Nel corso di queste ricerche personali, Fermi comunica regolarmente i suoi risultati ad allievi e amici, come Amaldi, Majorana, Racah, Rasetti e Segrè. Ogni giorno, alla fine del lavoro, li raduna intorno al tavolo e in loro presenza inizia con l'elaborare prima la formulazione di base dell'elettrodinamica quantistica e poi prosegue facendo, una dopo l'altra, una lunga serie di applicazioni dei principi generali a particolari problemi fisici. Questo metodo, caratteristico di Fermi, di lavorare su un problema teorico "in pubblico" (per così dire) e di insegnare allo stesso tempo, gli permette di esprimere ad alta voce quello che sta pensando. Nel frattempo, nello scrivere i risultati alla lavagna, non salta mai un passaggio, procede lentamente, a velocità uniforme e senza esitazioni, ma facendo sistematici progressi, indipendentemente dalla difficoltà della trattazione. Tutto questo lavoro sull'elettrodinamica viene riassunto da Fermi in una serie di lezioni che tiene all'Istituto Poincaré di Parigi nel 1929 e, in forma più completa, alla scuola estiva di Ann Arbor all'Università del Michigan nel 1930. Di queste lezioni viene fatta una traduzione sia in francese che in inglese. L'articolo di Fermi *Quantum Theory of Radiation* [Teoria quantistica della radiazione] pubblicato nella "Review of Modern Physics" del 1932, che fornisce le prime nozioni di teoria dei campi, è una monografia su cui generazioni di ricercatori hanno imparato l'elettrodinamica. Da Hans Bethe viene considerato un «esempio insuperabile di come si possa esporre con semplicità una materia così complessa». Eugene P. Wigner commenta a proposito: «Nessuno che non conoscesse a fondo tutte le complicazioni della teoria avrebbe potuto scriverlo e nessuno avrebbe potuto evitare più abilmente tutte le complicazioni». Wigner e Victor Weisskopf si adopereranno per rendere rigorosa una regola di calcolo delle probabilità di transizione spontanea tra stati quantici che Fermi ricava con una matematica assai spregiudicata e che da lì in poi verrà chiamata *Fermi's golden rule* [Regola d'oro di Fermi].

La camera a nebbia



Enrico Fermi e Enrico Persico in montagna (1930)

1930 Come già era emerso nel caso dei suoi lavori sulla relatività, in generale Fermi rifugge da riflessioni di tipo puramente epistemologico e adotta un'impostazione pragmatica secondo cui egli si ritiene soddisfatto quando un formalismo matematico è in grado di spiegare i dati sperimentali. Un'eccezione è costituita dal dibattito intorno alla corretta interpretazione del principio di indeterminazione. Nell'articolo *L'interpretazione del principio di causalità nella meccanica quantistica* Fermi cerca di precisare in che senso in meccanica quantistica non si possono determinare gli eventi futuri e mostra con chiarezza che la nuova teoria non è caratterizzata tanto dall'indeterminazione dello sviluppo temporale degli eventi, quanto dall'incertezza implicita necessariamente nella

descrizione dello stato fisico. Il lavoro scaturisce anche da animate discussioni con i matematici Guido Castelnuovo, Tullio Levi-Civita e Federigo Enriques seguite a una serie di conferenze tenute da Fermi sulla meccanica quantistica al Seminario matematico dell'Università. In questo periodo soggiorna a Roma il fisico tedesco Hans Bethe che rimane molto colpito dalla semplicità del metodo di lavoro di Fermi: «Egli era in grado di arrivare al nocciolo di qualsiasi problema, per quanto complicato fosse, spogliandolo dalle difficoltà matematiche e dall'inutile formalismo. Con l'aiuto di questo tipo di approccio era in grado, spesso in non più di mezz'ora, di risolvere il problema di fisica più complesso. Certamente, in questo modo non otteneva una soluzione matematica completa, ma dopo aver discusso con lui di quell'argomento, chiunque aveva chiaro qual era la via per la soluzione matematica. Questo metodo mi colpì in maniera particolare, poiché io ero uscito dalla Scuola di Monaco di Sommerfeld che, in tutti i suoi lavori, partiva sempre dalla soluzione matematica completa di un problema. Educato nello spirito della Scuola di Sommerfeld, io supponevo che bisognasse attenersi sempre al seguente metodo: scrivere l'equazione differenziale del problema (di solito l'equazione di Schrödinger), applicare poi le proprie capacità matematiche per cercare una soluzione quanto più possibile precisa ed elegante e solo dopo discutere la soluzione. Finalmente, nella discussione si sarebbero trovate le sue particolarità qualitative e, quindi, si sarebbe capito l'aspetto fisico del problema». Più avanti Bethe precisa: «Fermi era un buon matematico. Egli era in grado, se necessario, di fare i calcoli matematici più complessi, ma prima di ogni cosa egli doveva convincersi che ne valesse la pena». Nel 1932 Fermi e Bethe pubblicheranno insieme un articolo (*Über die Wechselwirkung von Zwei Elektronen* [Interazione di due elettroni]) in cui l'interazione fra particelle cariche viene descritta in termini di scambi di fotoni, mostrando così che la teoria quantistica dei campi introduce in fisica un nuovo modo di concepire le forze.

Intorno a Fermi e Franco Rasetti, abilissimo fisico sperimentale, che Fermi conosceva bene e con cui aveva lavorato fin dai tempi dell'università, si raccoglie ormai il gruppetto di giovanissimi fisici Emilio Segrè, Edoardo Amaldi e Ettore Majorana. Secondo la testimonianza di Franco Rasetti, Fermi è ben deciso a imparare le tecniche della fisica nucleare, molti anni prima che il suo nome diventi famoso in questo campo. Questa decisione viene messa in atto a partire dal 1930, quando i membri del gruppo di Roma iniziano a fare lunghi soggiorni presso i maggiori centri di ricerca all'estero per acquisire conoscenze relative a tecniche sperimentali allora sconosciute in Italia. Rasetti va da Robert Millikan a Pasadena e successivamente passa un anno a Berlino-Dahlem da Lise Meitner, Segrè va da Otto Stern ad Amburgo e da Pieter Zeeman ad Amsterdam, e Amaldi fa un soggiorno da Peter Debye a Lipsia. Lo stesso Fermi comincia a dedicare una notevole quantità di tempo a questi problemi sebbene il lavoro teorico di quel periodo stia seguendo delle linee completamente diverse. Come primo passo, nell'inverno a cavallo fra il 1930 e il 1931, Fermi si dedica alla costruzione e al funzionamento di una camera a nebbia, con l'aiuto di Edoardo Amaldi. Il punto debole del Dipartimento di Fisica di Roma è propriola mancanza di strumentazione e la mancanza di efficienza dell'officina per costruire gli apparati. È possibile soltanto costruire strumenti molto semplici, e anche questi con un notevole



Edoardo Amaldi, Franco Rasetti, Emilio Segrè (1930)



Enrico Fermi e Franco Rasetti. Congresso di Fisica Nucleare a Roma (1931)

dispendio di tempo e di fatica. Queste circostanze inducono Fermi ad adottare metodi del tipo "fai da te" che sono caratteristici del suo modo di lavorare, sia a livello teorico che sperimentale. La camera a nebbia viene costruita e utilizzata, ma le tracce di particelle alfa osservate sono di bassa qualità a causa dell'inefficienza del meccanismo di espansione e della difficoltà di eliminare le vecchie tracce. Non vengono nemmeno fatti tentativi di fare fotografie.

Il Congresso di fisica nucleare a Roma



Niels Bohr e Enrico Fermi sulla via Appia. Convegno di Fisica Nucleare a Roma (1931)



Enrico Fermi e Arnold Sommerfeld. Sullo sfondo Orso Mario Corbino e Giulio Cesare Trabacchi. Congresso di Fisica Nucleare a Roma (1931)

1931 Nella primavera del 1931 le difficoltà incontrate a livello pratico inducono Fermi ad abbandonare il progetto della camera a nebbia e a dedicarsi di nuovo esclusivamente al lavoro teorico, pur continuando a partecipare all'attività sperimentale che si svolge nell'Istituto di via Panisperna. Secondo quanto ricorda Rasetti «l'attività sperimentale negli anni 1927-31 si svolse quasi interamente nel campo della spettroscopia atomica e molecolare [...] anche perché ne conoscevamo bene la tecnica e avevamo strumenti adeguati». Ma a partire dal 1929 Fermi e Rasetti cominciano appunto a rendersi conto che il futuro sta ormai nel campo della fisica nucleare. A quell'epoca si conosce l'esistenza di processi di decadimento che avvengono con l'emissione di una particella α o di una particella β , accompagnati da emissione di raggi γ . Nel 1928 il fisico russo George Gamow, all'epoca a Göttingen, e, indipendentemente, Ronald W. Gurney e Edward R. Condon a Princeton, avevano pubblicato una teoria secondo la quale il processo di decadimento α è una conseguenza dell'effetto "tunnel", un processo quantomeccanico secondo il quale le particelle α riescono a penetrare attraverso la barriera di potenziale coulombiana del nucleo e a penetrare in una regione che sarebbe loro proibita da un punto di vista classico. Il nucleo deve essere dunque una struttura composta, tenuto insieme da forze ancora sconosciute. Fino alla scoperta del neutrone, all'inizio del 1932, si continuerà a ritenere che i nuclei di tutti gli elementi siano composti di protoni e elettroni, sebbene ipotesi sull'esistenza di una particella neutra pesante fossero state avanzate da Rutherford già nel 1920. Il confinamento degli elettroni in un volume delle dimensioni del nucleo e lo spettro continuo delle velocità con cui i raggi β (elettroni) vengono emessi dal nucleo, portano a una serie di risultati paradossali, tra cui quello dell'apparente non conservazione dell'energia, ipotesi presa seriamente in considerazione da Bohr: l'aspetto più eclatante del decadimento nucleare β è infatti che l'elettrone emesso non possiede l'energia totale liberata nella transizione. Secondo Pauli «Bohr è su una strada completamente sbagliata» e propone che insieme all'elettrone vengano emesse una o più particelle neutre, che saranno dette (su proposta di Fermi) "neutrini". In ogni disintegrazione β l'energia liberata nel processo si ripartisce tra elettrone e neutrino in modo che l'energia dell'elettrone possa assumere tutti i valori da zero fino a un certo massimo. Questa ipotesi viene formulata informalmente da Pauli in una lettera scritta il 4 dicembre 1930. Proprio per fare il punto sulle questioni ancora irrisolte in fisica nucleare, Fermi ha l'idea di organizzare un Congresso internazionale dedicato al tema *La Fisica nucleare*, che si tiene a Roma dall'11 al 17 ottobre del 1931. La presenza degli scienziati più eminenti nel campo della fisica nucleare conferisce all'evento una enorme importanza scientifica. Nel corso delle discussioni avvenute durante i lavori del congresso Bohr tocca lo scottante argomento degli

elettroni "nucleari" che si ritiene debbano essere necessariamente contenuti nei nuclei per spiegare la loro presenza nei processi di decadimento. Questo "atto di fede" comporta un vero e proprio cambio di identità per gli elettroni nucleari, che vengono necessariamente a perdere le loro caratteristiche meccaniche. «Non sarebbe quindi sorprendente» afferma Bohr «scoprire che questo tipo di processi non obbedisce ai principi di conservazione dell'energia e dell'impulso, la cui formulazione si basa essenzialmente sull'idea di particelle materiali». In questa occasione Wolfgang Pauli avanza di nuovo, nel corso di conversazioni private, l'ipotesi dell'esistenza di una nuova particella «neutra, leggera e molto penetrante per salvare il principio della conservazione dell'energia nel decadimento β », come lui stesso racconta molti anni dopo a Franco Rasetti. Sembra che proprio in questa circostanza Fermi abbia coniato il termine "neutrino" per denotare la particella fantasma emessa insieme all'elettrone nel decadimento beta. Una particella che sarà scoperta soltanto nel 1956.

1932 Una serie di scoperte e di eventi significativi contribuisce a focalizzare fortemente l'attenzione di una parte importante della comunità dei fisici sui fenomeni nucleari e sulle nuove possibilità di ricerca in questo campo. Possibilità che si amplificano enormemente grazie allo sviluppo, alla disponibilità e all'uso produttivo di nuovi acceleratori di particelle. Tutto comincia a gennaio: l'americano Harold Urey annuncia la scoperta di un isotopo pesante dell'idrogeno, da lui battezzato "deuterio". In febbraio James Chadwick dimostra l'esistenza di una nuova particella nucleare, il neutrone. In aprile John Cockcroft e Ernest Thomas Walton riescono ad ottenere la prima disintegrazione nucleare bombardando nuclei leggeri con protoni artificialmente accelerati. In agosto Carl Anderson individua nelle immagini di tracce lasciate da raggi cosmici l'esistenza di una nuova particella, l'elettrone carico positivamente, subito denominata "positrone". È la conferma sperimentale dell'esistenza dell'antiparticella dell'elettrone prevista dalla teoria relativistica dell'elettrone di Dirac. Immediatamente Patrick Blackett e Giuseppe Occhialini cercano e trovano non soltanto le tracce dei positroni nelle emulsioni già esposte, ma individuano anche eventi in cui è più evidente la creazione della coppia elettrone-positrone sotto l'effetto di radiazione γ ad altissima frequenza. Quella stessa estate Ernest Lawrence, Stanley Livingston e Milton White utilizzano per disintegrare nuclei il ciclotrone ideato da Lawrence, uno strumento che nel giro di pochi mesi sarà in grado di generare circa 5 MeV.

Al ritorno di Rasetti da Berlino-Dahlem nell'autunno del 1932, si decide di dare inizio a un programma di ricerche in fisica nucleare. Gli strumenti vengono progettati e fatti poi costruire da ditte esterne. Viene realizzata una camera a nebbia, simile a quelle usate a Berlino dalla Meitner, che funziona subito alla perfezione; utilizzando una tecnica speciale per la preparazione di grossi cristalli singoli di bismuto viene costruito uno spettrometro a cristalli per raggi γ (*Uno spettrografo per raggi "gamma" a cristallo di bismuto*) e vengono realizzati vari tipi di contatori di Geiger-Müller. Rasetti, che ha appreso a Dahlem le tecniche per la preparazione di sorgenti radioattive, mette a punto una sorgente di neutroni al



Congresso di Fisica Nucleare a Roma (1931). In prima fila: O. Stern e P. Debye, O.W. Richardson, R. A. Millikan e M. Curie, G. Marconi, N. Bohr, F.W. Aston e W. Bothe, B. Rossi e L. Meitner

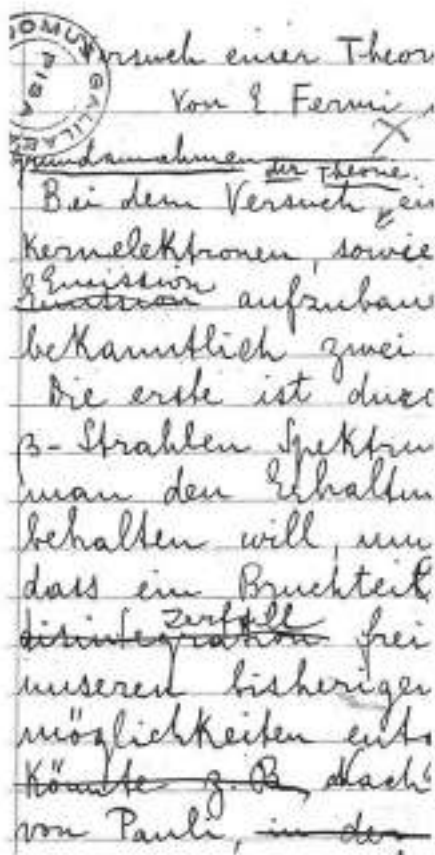
Neutroni, positroni e ciclotroni



Franco Rasetti, Enrico Fermi ed Emilio Segrè in toga accademica (1932)

polonio-berillio. Questi sviluppi vengono resi possibili da una consistente dotazione di fondi messi a disposizione dal Consiglio Nazionale delle Ricerche. Per la fine del 1933 la strumentazione nucleare sarà adeguata per fare ricerche secondo linee diverse.

La teoria del decadimento beta



Versuch einer Theorie
von E. Fermi
~~Grundannahmen der Theorie.~~
Bei dem Versuch ~~zu~~
Kernelektronen, sowie
~~Emission~~
~~Strahlung~~ aufzubauen
bekanntlich zwei
Die erste ist durch
 β -Strahlen-Spektren
man den Erhaltung
behalten will, um
dass ein Bruchteil
~~disintegration~~ ^{Zerfall} frei
unserer bisheriger
Möglichkeiten exist
~~Könnte z.B. nach~~
von Pauli, in der

Manoscritto in tedesco sulla teoria dei raggi beta (*Versuch einer Theorie der β -Strahlen*) 1933

1933 Nell'ottobre di quest'anno Fermi partecipa al settimo Congresso Solvay: la fisica nucleare ha fatto passi da gigante a livello sperimentale e il modello del nucleo composto di protoni e neutroni è abbastanza ben stabilito attraverso il lavoro di Werner Heisenberg, Dmitri Iwanenko ed Ettore Majorana. Sono presenti tutti i più importanti fisici nucleari del mondo, come James Chadwick, Patrick Blackett, Ernest Rutherford, Lise Meitner, Frédéric Joliot e Irène Curie, Ernest Lawrence (unico americano invitato) insieme ad alcuni fisici teorici, come Niels Bohr, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli, Paul Adrien Maurice Dirac e George Gamow. In quest'occasione Pauli presenta di nuovo la sua idea del neutrino, che per la prima volta compare negli atti del congresso. Tuttavia è ancora una ipotesi abbastanza vaga e in ogni caso non esiste ancora una teoria formale del processo di decadimento β . Due mesi dopo Fermi completa il suo celebre lavoro *Tentativo di una teoria dei raggi β* , in cui applica la teoria quantistica dei campi alla radioattività β : l'emissione di un elettrone è simile all'emissione di luce da parte di un atomo eccitato - né la particella β né il quanto di luce sono contenuti dentro l'atomo prima dell'emissione - ma l'emissione della particella β non è dovuta all'interazione elettromagnetica, bensì a una nuova classe di forze, che molto più tardi sarà conosciuta come interazione debole. Secondo la teoria elettroni e neutrini possono essere creati e distrutti, ogni transizione da neutrone a protone deve essere accompagnata dalla creazione di un elettrone e di un neutrino all'atto del processo di disintegrazione. In questo modo Fermi bandisce formalmente gli elettroni dal novero dei costituenti del nucleo e apre un nuovo campo della fisica delle particelle elementari, la fisica delle interazioni deboli. Inoltre chiarisce definitivamente che il neutrone non è un sistema legato protone-elettrone, come molti avevano pensato in un primo momento e spazza via ogni dubbio relativo alle congetture di Bohr sulla non conservazione dell'energia nei processi di decadimento. L'articolo compare su "La ricerca scientifica", ma in realtà Fermi aveva deciso di annunciare i risultati della sua teoria in una lettera a "Nature". Il manoscritto era stato respinto e gli era stato risposto che conteneva troppe speculazioni astratte ed era «troppo lontano dalla realtà fisica». Segrè ricorda che «Fermi era pienamente consapevole dell'importanza del suo lavoro e disse che pensava che quello sarebbe stato il suo capolavoro, ricordato dalla posterità». I risultati di Fermi aprono nuove prospettive alle ricerche già in atto sulle forze nucleari. In quegli stessi anni un gruppo di giovani ricercatori si sta aggregando a Firenze sotto la protezione di Antonio Garbasso, direttore dell'Istituto di Fisica, anche lui, come Corbino, personaggio molto influente a livello istituzionale. Nel 1928 Gilberto Bernardini era divenuto assistente di Enrico Persico, che due anni prima aveva vinto insieme a Fermi la cattedra di Fisica teorica e che in quegli anni insegnava la nuova meccanica quantistica. Nel 1928 si era trasferito a Firenze, dopo essersi laureato a Bologna, il ventitreenne Bruno Rossi. Nel 1929, grazie alla sua intuizione, viene individuato un promettente

programma di ricerca a lungo termine: la fisica della radiazione cosmica. Vengono subito costruiti dei contatori Geiger-Müller posti in coincidenza per studiare il potere penetrante delle particelle ionizzanti associate alla radiazione cosmica e il giovane Rossi realizza il suo famoso circuito elettronico a coincidenze multiple, che consentiva di osservare impulsi simultanei (coincidenze) fra più di due contatori Geiger-Müller permettendo di individuare la traiettoria dei singoli corpuscoli della radiazione penetrante. Ancora discussa è in quel momento la questione se questi corpuscoli rappresentino il fenomeno primario, proveniente dallo spazio cosmico, oppure siano generati nell'alta atmosfera per effetto di una radiazione di altra natura. La scoperta di una eventuale dipendenza dell'intensità della radiazione penetrante dalla latitudine geomagnetica (effetto latitudine) avrebbe corroborato l'ipotesi del fenomeno primario. Rossi aveva previsto che in questo caso il campo magnetico terrestre avrebbe dovuto determinare anche un "effetto Est-Ovest", cioè un'asimmetria nell'intensità dei raggi cosmici rispetto al piano del meridiano magnetico terrestre. Fra il 1930 e il 1931 Rossi effettua esperimenti per scoprire tale effetto, il cui esito negativo viene attribuito da Rossi all'assorbimento da parte dell'atmosfera. Nel corso di una delle sue frequenti visite a Roma, Rossi discute con Fermi il problema dell'assorbimento e nel 1933 pubblicano insieme l'articolo *Azione del campo magnetico terrestre sulla radiazione penetrante*. L'interpretazione di Rossi si rivelerà corretta: i raggi cosmici primari sono per lo più protoni che perdono la maggior parte della loro energia attraverso collisioni nucleari. Sulla base di queste ipotesi Rossi decide di organizzare una spedizione in Africa, che fornirà poi conferma dell'effetto Est-Ovest, ma a causa di quelle che lo stesso Rossi definisce «difficoltà di carattere logistico» la spedizione viene battuta sul tempo da T. H. Johnson e L. Alvarez, un giovane allievo di Arthur Compton, che scoprono simultaneamente e annunciano prima di lui questi risultati.

1934 Nel mese di gennaio del 1934 Irène Curie e Frédéric Joliot annunciano la scoperta di nuovi radioisotopi ottenuti artificialmente bombardando i nuclei di elementi leggeri con particelle α . Fermi intuisce immediatamente che i neutroni possono essere validamente utilizzati come proiettili per indurre la radioattività artificiale: essendo privi di carica non sono soggetti alla repulsione coulombiana esercitata dai nuclei bersaglio. È l'occasione per iniziare esperimenti su larga scala. Verso la fine di marzo vengono irradiati diversi elementi la cui attività viene misurata per mezzo di un contatore Geiger-Müller. Dopo una serie di tentativi infruttuosi fatti con la sorgente di polonio-berillio, Rasetti parte per il Marocco e Fermi inizia a bombardare in modo sistematico gli elementi del sistema periodico di numero atomico crescente utilizzando una sorgente neutronica più intensa costituita da radon e berillio. Sorgenti di questo tipo erano già state fornite da Giulio Cesare Trabacchi, dell'Istituto di Sanità (proprio per questo soprannominato dai membri del gruppo "La divina Provvidenza") e utilizzate con lo spettrometro a raggi gamma. Finalmente il contatore di Geiger-Müller registra alcuni conteggi irradiando il fluoro e l'alluminio. Secondo l'interpretazione data subito da Fermi il nucleo dell'alluminio assorbe un neutrone emettendo una particella α (nucleo di elio) trasformandosi in sodio che a sua volta decade

Neutroni lenti a via Panisperna



Oscar D'Agostino, Emilio Segrè, Edoardo Amaldi, Franco Rasetti ed Enrico Fermi davanti all'Istituto di Fisica a via Panisperna (1934)

trasformandosi in calcio con emissione di una particella β (elettrone). Il 25 marzo 1934 esce sulla rivista del CNR, la "Ricerca Scientifica", l'articolo *Radioattività provocata da bombardamento di neutroni-I*, il primo di una lunga serie di lavori che vedranno Fermi protagonista, insieme al suo gruppo, di un filone di ricerca i cui esiti sono per ora assolutamente insospettati. Per procedere più rapidamente Fermi chiede ad Amaldi e Segrè di lavorare con lui. Rasetti è richiamato dal Marocco e il chimico Oscar D'Agostino, appena tornato per le vacanze di Pasqua dal laboratorio dei Joliot-Curie, dove aveva appreso le tecniche di radiochimica, è sollecitato a unirsi al gruppo. In poco tempo vengono irradiati con neutroni una sessantina di elementi e in almeno quaranta di questi vengono scoperti, e spesso identificati, nuovi elementi radioattivi. I risultati ottenuti dal gruppo dei "ragazzi di via Panisperna" dimostrano tutti i vantaggi del lavoro di équipe, introdotto per la prima volta proprio a Roma. La grande importanza di questi risultati è immediatamente evidente. Il 24 aprile Ernest Rutherford, il padre della fisica nucleare, si complimenta con Fermi per il successo degli esperimenti: «Mi congratulo con lei per il successo della sua fuga dalla sfera della fisica teorica. Sembra proprio che lei abbia trovato una buona linea di ricerca per cominciare». Nel procedere con il bombardamento sistematico, Fermi e il suo gruppo, all'inizio dell'estate, arrivano a irradiare il torio (numero atomico 90) e l'uranio (numero atomico 92), ma la naturale attività di questi elementi ostacola l'identificazione dei nuovi radionuclidi artificiali ottenuti. Fermi e il suo gruppo dimostrano che l'attività di tali radionuclidi non è dovuta ad alcuno degli isotopi di elementi compresi fra il piombo e l'uranio, cioè con numero atomico compreso fra 86 e 92. Il gruppo è convinto di avere prodotto e identificato due elementi transuranici che vengono battezzati "esperio" e "ausonio" e accantona la possibilità che il nucleo di uranio possa scindersi in "molti grandi pezzi" ciascuno dei quali può essere un isotopo di elementi noti ma lontani dall'uranio e dal torio nella tavola periodica. Questa ipotesi, esplicitamente avanzata dalla chimica tedesca Ida Noddack in un suo articolo del 1934 regolarmente inviato a Fermi, implica un tipo di reazione nucleare completamente nuovo e viene rapidamente accantonata. Altri quattro anni di ricerche portate avanti nei laboratori più importanti dell'epoca saranno necessari per svelare l'enigma dei "transuranici".

Nell'autunno del 1934 Fermi assegna ad Amaldi e Bruno Pontecorvo, appena laureato, il compito di stabilire una scala quantitativa delle attività indotte negli elementi bombardati. I due si trovano subito di fronte a una serie di problemi perché l'intensità della radioattività ottenuta sembra dipendere dal materiale su cui vengono posti la sorgente e l'elemento da irradiare, come ricorda Amaldi: «Certi tavoli con sopra uno spettroscopio avevano proprietà miracolose; l'argento irradiato su quei tavoli diventava molto più attivo rispetto a quando veniva irradiato su altri tavoli di marmo nella stessa stanza». Per chiarire il mistero vengono eseguite osservazioni sistematiche a partire dal 18 ottobre, come risulta dal taccuino B1, conservato alla Domus Galilaeana, dove vengono registrati i dati di questo periodo. In particolare Amaldi effettua una serie di misure all'esterno e all'interno di una sorta di casetta di piombo, il cosiddetto "castelletto", le cui pareti hanno 5 cm di spessore che serve da schermo per le radiazioni. I risultati mostrano chiaramente che, mentre all'esterno la capacità di attivazione decresce rapidamente con l'aumento della distanza fra sorgente ed elemento irradiato,



Il "Segno Romano", una camera a ionizzazione utilizzata dal gruppo Fermi

all'interno la diminuzione è molto più lenta. I dati relativi a queste misure sono registrati a pagina 3 del taccuino B1. A questo punto, per misurare l'assorbimento del piombo viene preparato un cuneo di questo materiale da inserire tra la sorgente di neutroni e il rivelatore con l'idea di confrontarne l'assorbimento rispetto a un mattoncino di piombo dello stesso spessore. La mattina del 22 ottobre i membri del gruppo sono impegnati con gli esami e Fermi decide di procedere da solo per risolvere l'"enigma del piombo". In quel momento soltanto Enrico Persico, in visita da Firenze, si trova con lui ed è lui stesso a continuare ad annotare le misure fatte da Fermi sulle pagine 8 e 9 del taccuino B1. Anni dopo Fermi racconterà a Subrahmanyam Chandrasekhar che al momento di collocare il cuneo di piombo, senza alcun particolare motivo, aveva deciso di mettere al suo posto un pezzo di paraffina. Subito dopo la scoperta Fermi propone la corretta spiegazione del fenomeno: i neutroni rallentati fino all'energia dell'agitazione termica delle molecole attraverso le collisioni elastiche con i nuclei di idrogeno della paraffina passano più tempo nelle vicinanze dei nuclei bersaglio diventando più efficaci nell'indurre la radioattività artificiale. La sera stessa il gruppo scrive una lettera per la "Ricerca Scientifica" (*Azione di sostanze idrogenate sulla radioattività provocata dai neutroni-I*) in cui annuncia la sensazionale scoperta: «Uno spessore di alcuni centimetri di paraffina interposto fra la sorgente e l'argento invece di diminuire l'attivazione la aumenta». La scoperta dell'effetto dei neutroni lenti apre una nuova fase nel programma di ricerca del gruppo che si concentra ormai sul problema degli effetti derivanti da questo fenomeno. La scoperta ha immediate applicazioni pratiche nella possibilità di produrre isotopi radioattivi artificiali da utilizzare per esempio come traccianti a scopi fisici, chimici e biologici. Nei giorni immediatamente successivi Orso Mario Corbino convince Fermi e i suoi collaboratori a prendere un brevetto.

1935 A partire da quest'anno il gruppo comincia a disperdersi. Segrè si trasferisce a Palermo, dove ha vinto la cattedra di fisica sperimentale, Pontecorvo lavora con Gian Carlo Wick e poi si sposta a Parigi dai Joliot-Curie nella primavera del 1936, mentre D'Agostino inizia a lavorare nell'Istituto di chimica del CNR. Durante l'estate Rasetti visita il laboratorio di Robert Millikan a Pasadena dove studia un acceleratore lineare ad alto voltaggio e il Radiation Laboratory a Berkeley dove si trova la nuova macchina acceleratrice ideata da Ernest Lawrence. Il ciclotrone produce fasci di neutroni di intensità incredibilmente più elevate rispetto a quelle ottenibili con le sorgenti naturali di cui dispongono i fisici romani. Rasetti trascorre l'anno accademico 1935-36 alla Columbia University, mentre Amaldi e Fermi restano i soli a fare ricerca sulle proprietà dei neutroni lenti, lavorando «con un'ostinazione incredibile», come ricorda lo stesso Amaldi, forse proprio per reagire a un'atmosfera che si fa sempre più plumbea. In Germania è in pieno sviluppo la politica di persecuzione degli oppositori e delle minoranze etniche e l'espansionismo di Hitler fa pesare sull'Europa la prospettiva di un conflitto generale, mentre l'Italia, con aspirazioni colonialiste, si sta preparando alla guerra d'Etiopia e viene perciò isolata dalla Società delle Nazioni con le sanzioni. «Si iniziava alle otto del mattino e, praticamente senza intervallo, andavamo avanti fino alle sei, sette di sera e anche oltre. Le misure

Dear Fermi,

I have to thank you for your
in sending me an account of your recent
in causing temporary radioactivity in f
elements by means of neutrons. Your res
of great interest, and no doubt later we
able to obtain more information as to the
mechanism of such transformations. It is
clear that in all cases the process is as
appears to be the case in the observation
Joliot's.

I congratulate you on your success
from the sphere of theoretical physics
to have struck a good line to start with
be interested to hear that Professor Dirac
doing some experiments. This seems to be
surgery for the future of theoretical phys

Congratulations and best wishes,

Yours sincerely,

Rutherford

Sent me along 9.10.1934

Lettera di E. Rutherford a Fermi
(23 aprile 1934)

**"Si iniziava alle otto del mattino
e, praticamente senza intervallo,
andavamo avanti fino alle sei,
sette di sera e anche oltre..."**



Edoardo Amaldi, Gian Carlo Wick
ed Enrico Fermi al mare a Ostia, 1935

venivano realizzate in base a un preciso programma [...]. Esse duravano tre-quattro minuti e si ripetevano per molte ore e anche per molti giorni se questo era necessario a risolvere il problema impostato. Risolto un problema, ne affrontavamo immediatamente un altro, senza interruzione, senza ombra di dubbio».

L'età di Fermi



Enrico Fermi (1936)

1936 Nel giro di pochi mesi, a cavallo con l'anno precedente, Fermi e Amaldi pubblicano una serie di lavori su "La Ricerca Scientifica" che culminano con un ampio articolo inviato a "Physical Review" nel quale si illustrano una serie di risultati conclusivi dello studio sistematico sull'assorbimento e la diffusione di neutroni lenti. Il problema della diffusione viene affrontato da Fermi utilizzando alcune variabili che lo semplificano notevolmente: in particolare la "letargia" che è una misura logaritmica dell'energia del neutrone e che permette una rappresentazione grafica unidimensionale della successione di collisioni elastiche che portano il neutrone alla termalizzazione. Fermi sviluppa un'equazione di diffusione in cui si danno valutazioni importanti della distanza che un neutrone raggiunge a partire dal punto in cui è stato creato fino alla completa termalizzazione: la misura di questa distanza è affidata a un parametro che di lì in poi verrà chiamato "età di Fermi" (*Fermi's age*). Da queste ricerche emerge un nuovo interessante fenomeno: il forte assorbimento, da parte di molti elementi, di neutroni la cui energia cinetica cade in alcune bande di energia caratteristiche del nucleo bersaglio. In seguito alla scoperta di queste risonanze Bohr propone nell'aprile del 1936 il cosiddetto "modello del nucleo composto", secondo il quale le reazioni nucleari possono suddividersi in due fasi: nella prima la collisione tra un neutrone e un nucleo pesante dà luogo alla formazione di un nucleo composto che sopravvive per un tempo relativamente lungo e successivamente si decompone secondo un processo che non ha alcuna relazione con il primo stadio e nel quale tuttavia si conservano l'energia totale, la parità e il momento angolare. La ragione principale della stabilità dello stato composto è che l'energia inizialmente concentrata nella particella in entrata viene suddivisa fra tutte le altre particelle del nucleo bersaglio. Soltanto quando questa energia, a causa di una fluttuazione, si concentra di nuovo su un'altra particella, quest'ultima riesce a sfuggire dando luogo a uno stato finale che non conserva alcuna "memoria" della situazione iniziale.

L'acceleratore da 200 keV

1937 Nel gennaio del 1937 Fermi rimane privo del sostegno politico e scientifico di Corbino, che muore all'improvviso di polmonite. La sensazione della fine di un'epoca viene profondamente avvertita da tutti i membri dell'Istituto e in effetti il cambio di direzione dell'Istituto - il successore di Mario Corbino è Antonino Lo Surdo, e non Fermi, come ci si sarebbe aspettato - e la situazione politica, che si sta deteriorando rapidamente, fanno presagire la catastrofe imminente. Nel frattempo Fermi riesce a far approvare insieme a Domenico Marotta, direttore dell'Istituto di Sanità Pubblica, una proposta per realizzare un acceleratore del tipo Cockcroft-Walton da 1 MeV, in grado di accelerare particelle fino a un'energia di un milione di Volt. Ormai si stanno diffondendo nei maggiori laboratori acceleratori lineari e ciclo-troni che permettono di disporre di sorgenti

artificiali di neutroni, molto più intense rispetto a quelle fino a quel momento utilizzate a Roma, come i tubetti contenenti emanazione di radio e polvere di berillio. Nel giugno del 1937 Fermi e il suo gruppo realizzano un prototipo in scala ridotta, da 200 keV, nei locali dell'Istituto di Fisica che nel frattempo si è trasferito da via Panisperna alla nuova città universitaria. La descrizione dell'impianto per la produzione di neutroni a mezzo di ioni di deuterio accelerati a 200 keV è contenuta nell'articolo *Un generatore artificiale di neutroni*, pubblicato sulla "Ricerca Scientifica". L'acceleratore da 1 MeV verrà completato due anni dopo, quando Fermi ormai avrà lasciato l'Italia. Nel gennaio dello stesso anno Fermi presenta al CNR una dettagliata proposta per la costituzione di un Istituto nazionale di radioattività, nella quale fa notare come l'Italia, che fino a quel momento ha avuto una posizione preminente in questo campo di ricerca, stia perdendo decisamente terreno rispetto ai laboratori dotati di macchine acceleratrici che forniscono sorgenti la cui intensità è «migliaia di volte superiore a quelle ottenibili partendo dalle sostanze naturali» e prosegue: «È chiaro come queste circostanze rendano vano pensare a un'efficace concorrenza con l'estero, se anche in Italia non si trova il modo di organizzare le ricerche su un piano adeguato». Nel corso di una sua visita a Ernest Lawrence nell'estate del 1937 Fermi esamina concretamente la possibilità di realizzare in Italia un ciclotrone "economico". Ma nel luglio 1937 muore improvvisamente Guglielmo Marconi, che nella sua veste di presidente del CNR e dell'Accademia d'Italia era stato un valido sostenitore del gruppo, nonostante le sue numerose richieste per ottenere fondi per la ricerca non fossero del tutto in consonanza con l'idea che Mussolini aveva riguardo al ruolo della scienza nello Stato fascista. Ecco cosa scriveva il Duce a un suo aiutante già nel 1930: «Le rimetto questa doglianza che mi è stata consegnata da S.E. Marconi, Pres. del CNR, nonché dell'Accademia d'Italia. Credo che gli si possono dare 570.000 dal fondo delle spese impreviste e non un soldo di più. Salvo a vedere se questo Consiglio debba ancora funzionare». Il 1937 è anche l'anno della morte di Ernest Rutherford, Fermi lo ricorda in una breve nota pubblicata su "Nature".



Robert Oppenheimer, Enrico Fermi ed Ernest Lawrence a Berkeley (1937)

1938 Nel maggio del 1938 il CNR respinge definitivamente la proposta di Fermi per l'Istituto nazionale di radioattività adducendo la limitata disponibilità di fondi e poco dopo gli assegna un contributo che Fermi giudica del tutto insufficiente per realizzare qualsiasi progetto, in particolare l'idea del ciclotrone. È evidente ormai che la più importante istituzione scientifica italiana non è in grado di mettere a disposizione di Fermi e dei suoi collaboratori i mezzi necessari per proseguire ricerche che possano competere con quelle portate ormai avanti nei laboratori più avanzati. Nel frattempo la situazione politica sta precipitando. In marzo è avvenuta l'annessione dell'Austria alla Germania nazista (*Anschluss*) e soprattutto nel mese di luglio inizia anche in Italia la campagna antisemita con la pubblicazione del *Manifesto della Razza*. Nei mesi successivi vengono promulgate le leggi razziali: comincia l'espulsione degli ebrei da tutti gli impieghi statali, dalle università e dalle accademie, oltre all'esclusione degli allievi ebrei dalle scuole pubbliche. La moglie di Fermi, Laura Capon, è ebrea e all'inizio di settembre i coniugi Fermi decidono di emigrare.

**Le leggi razziali
e il premio Nobel**



Fermi mentre riceve il premio Nobel dal re Gustavo V (Stoccolma, 1938)



Gilberto Bernardini, Edoardo Amaldi, Enrico Fermi ed Enrico Persico in gita a San Martino di Castrozza (1938)

La fissione dell'uranio

Il 10 novembre Fermi riceve l'annuncio ufficiale del conferimento del premio Nobel e decide di proseguire direttamente per gli Stati Uniti dopo il soggiorno a Stoccolma per la cerimonia di conferimento del premio. Nel corso dei suoi precedenti soggiorni negli Stati Uniti Fermi aveva maturato una profonda simpatia per quel Paese, come ricorda Emilio Segrè: «Lo attiravano i laboratori attrezzati, gli abbondanti mezzi di ricerca, l'entusiasmo che sentiva nella nuova generazione di fisici» e prosegue sottolineando come la decisione di emigrare fosse «più l'esecuzione di un piano a lungo meditato che una decisione improvvisa determinata dalle circostanze». Il 10 dicembre Fermi riceve a Stoccolma il premio Nobel per la fisica: «Per aver dimostrato l'esistenza di nuovi elementi radioattivi prodotti dall'irradiazione mediante neutroni e per la scoperta, legata alla precedente, delle reazioni nucleari provocate da neutroni lenti». Nella "Nobel Lecture" Fermi menziona l'ipotesi dei transuranici - ausonio ed esperio - e cita le ricerche di Otto Hahn e Lise Meitner i quali avrebbero identificato elementi fino al numero atomico 96. Ma nel frattempo una incredibile catena di avvenimenti si era messa in moto: Otto Hahn, un valente radiochimico, e Fritz Strassmann, esperto di analisi chimiche, avevano individuato la presenza di bario radioattivo negli elementi prodotti bombardando l'uranio con neutroni e il 22 dicembre 1938 inviano un articolo alla rivista "Naturwissenschaften" in cui annunciano la scoperta.

Nelle bozze della "Nobel Lecture", *Artificial radioactivity produced by neutron bombardment* [Radioattività artificiale prodotta da bombardamento di neutroni] pubblicate nel 1939, Fermi aggiungerà una nota menzionando la scoperta: «È necessario riesaminare tutti i problemi relativi agli elementi transuranici, considerando che molti di loro potrebbero rivelarsi i prodotti della fissione dell'uranio».

1939 Fermi arriva a New York il 2 gennaio e molto presto viene a conoscenza della scoperta della fissione dell'uranio. L'articolo di Hahn e Strassmann è pubblicato in gennaio ma, come ricorda Segrè, «la notizia di queste sensazionali scoperte si diffuse a voce, per lettera e per telegramma mentre il lavoro procedeva e prima che fosse stato pubblicato qualsiasi risultato». Infatti nel frattempo Hahn era rimasto in contatto epistolare con Lise Meitner, anche lei ebrea e appena fuggita dalla Germania in circostanze avventurose. Proprio la Meitner lo aveva convinto, ai tempi della scoperta della radioattività indotta da neutroni, ad approfondire le ricerche riprendendo una collaborazione che risaliva ad anni addietro, quando avevano scoperto l'elemento 91, il protoattinio. La lettera di Hahn, con le stupefacenti notizie della presenza di bario nei prodotti del bombardamento dell'uranio con neutroni, raggiunge la Meitner in vacanza in Svezia insieme a suo nipote Otto Frisch, collaboratore di Niels Bohr. I due interpretano correttamente i risultati e fanno una stima della quantità di energia liberata nel processo di fissione. Al suo ritorno a Copenhagen Frisch trova Bohr in partenza per gli Stati Uniti e gli comunica la notizia. Quest'ultimo arriva a New York verso la metà di gennaio e in poco tempo la notizia si diffonde fino a raggiungere Fermi. All'epoca, Herbert Anderson sta mettendo a punto una camera di ionizzazione collegata con un amplificatore lineare per la sua tesi sulla diffusione dei neutroni ottenuti con il

ciclotrone appena entrato in funzione alla Columbia University. Anderson prova subito a bombardare l'uranio con neutroni lenti. Ecco quanto racconta lo stesso Anderson: «Vedemmo gli impulsi prodotti dalla fissione dell'uranio sullo schermo del mio oscilloscopio a raggi catodici il 25 gennaio 1939». Il giorno dopo, nel corso della VI Conferenza di Fisica teorica tenuta a Washington, Fermi avanza l'ipotesi che in una reazione così violenta i nuclei possano emettere neutroni che, a loro volta, sarebbero in grado di provocare una nuova fissione. Una dimostrazione del processo di fissione viene organizzata per i partecipanti al convegno. «Di ritorno alla Columbia Fermi sapeva a quali domande voleva trovare una risposta.

Venivano emessi neutroni nella fissione dell'uranio? Ed eventualmente in che quantità? Come si poteva fare in modo che questi neutroni producessero ulteriori fissioni?» e soprattutto, aggiunge Anderson, «era possibile sviluppare una reazione a catena?» Fermi insiste sulla necessità di effettuare misure quantitative e un mese dopo il suo arrivo alla Columbia University, insieme a un gruppo di lavoro di cui fanno parte Anderson e J.R. Dunning (suo relatore), firma il suo primo articolo "americano", *The Fission of Uranium* [Fissione dell'uranio] in cui vengono riportate le sezioni d'urto per neutroni lenti e neutroni veloci. In questa fase Fermi si concentra sul problema dell'emissione di neutroni, piuttosto che sugli aspetti più direttamente connessi con la reazione a catena (*Production of Neutrons in Uranium Bombarded by Neutrons* [Produzione di neutroni nell'uranio bombardato con neutroni]). La questione della produzione di neutroni nell'uranio bombardato con neutroni è oggetto di alcune ricerche pubblicate nel 1939 sul "Physical Review".

In seguito sarà impossibile seguire il lavoro di Fermi attraverso la letteratura periodica pubblica. Le relazioni vengono dichiarate "top secret". Nel lavoro *Simple Capture of Neutrons by Uranium* [Cattura semplice di neutroni da uranio] Anderson e Fermi analizzano il problema della cattura di neutroni lenti da parte dell'U-238 che, secondo la scoperta fatta da O. Hahn e L. Meitner, si trasforma in U-239 per cattura di un neutrone decadendo dopo circa 23 minuti in un elemento che deve avere numero atomico 93 e massa 239. Nella primavera Fermi, Anderson e Leo Szilard pubblicano *Neutron Production and Absorption in Uranium* [Produzione e assorbimento di neutroni in uranio]: il numero di neutroni emessi dall'uranio sotto l'azione dei neutroni lenti è maggiore di quelli assorbiti.

È la condizione necessaria per realizzare una reazione a catena. Questo lavoro mette anche in evidenza l'importanza dell'assorbimento di neutroni alle energie di risonanza e fornisce la chiave di come ridurre le perdite di neutroni causate da questo effetto concentrando l'uranio in blocchi. Questi esperimenti mettono anche in luce un problema fondamentale: l'assorbimento di neutroni termici da parte dell'idrogeno è troppo alto perché l'acqua possa essere un mezzo utilizzabile per rallentare neutroni in una reazione a catena. Questo è il primo e l'ultimo esperimento fatto da Fermi in collaborazione con Szilard, il cui stile di lavoro a livello sperimentale non è affatto congeniale a Fermi. Nei mesi successivi Fermi e altri gruppi di lavoro in diverse università americane studiano i problemi connessi con la fisica della reazione a catena. La maggior parte dei progressi fondamentali per la fisica dei reattori verranno realizzati durante il 1939 e il 1940. Fermi è il primo a informare le autorità militari sulle possibili implicazioni belliche di una eventuale reazione a catena: nel mese di marzo tiene una conferenza al Ministero della Marina in seguito alla quale viene concesso un piccolo finanzia-



Enrico Fermi con la moglie Laura e i figli Giulio e Nella al loro arrivo a New York (2 gennaio 1939)



Fermi al lavoro (USA)

La reazione a catena e l'uranio 235

mento per queste ricerche alla Columbia University. All'inizio dell'estate del 1939 Szilard, insieme a Paul Wigner, ungherese anche lui, convince Albert Einstein a firmare una lettera indirizzata a F. D. Roosevelt, all'epoca Presidente degli Stati Uniti, in cui vengono messe in evidenza le ricerche di Fermi e Szilard negli Stati Uniti e di Joliot in Francia sulla reazione a catena e la quasi certezza di poter «pervenire a questo risultato nell'immediato futuro». Nell'adombrare la possibilità di costruire «bombe di nuovo tipo», Einstein conclude sottolineando la necessità di agire tempestivamente e di «istituire un collegamento permanente fra il governo e il gruppo di fisici che si occupano della reazione a catena in America» in considerazione del fatto che in Germania potrebbero essere in corso ricerche analoghe. Roosevelt istituisce un Advisory Committee on Uranium, per il coordinamento delle ricerche sulla fissione svolte nei diversi laboratori degli Stati Uniti. Fermi e Szilard vengono invitati regolarmente alle riunioni. Il comitato riesce a ottenere una certa quantità di fondi per proseguire le ricerche sulla reazione a catena da parte delle forze armate americane. Durante l'estate Fermi si trasferisce ad Ann Arbor, alla scuola estiva di Fisica teorica, dove era già stato in precedenza. In questo periodo è in contatto epistolare con Szilard. Nel mese di luglio entrambi arrivano indipendentemente alla conclusione che l'acqua non è adatta come moderatore perché l'assorbimento di neutroni termici da parte dell'idrogeno è troppo alto. L'acqua non è quindi un mezzo utilizzabile per rallentare neutroni in una reazione a catena, è meglio tentare con la grafite. Nel frattempo la sua attenzione è attratta dal dibattito molto vivo che riguarda la scoperta di due anni prima, nei raggi cosmici, di particelle instabili alle quali viene attribuita una massa pari a 100-200 volte quella dell'elettrone e una vita media, subito misurata da Bruno Rossi, di circa 2 microsecondi. L'ipotesi è che possa trattarsi del «quanto pesante» postulato da Yukawa come mediatore delle forze nucleari. Nel 1935, dopo aver letto il lavoro di Fermi sul decadimento β , il fisico giapponese Hideki Yukawa, facendo un'analogia tra il campo di forze coulombiano (a raggio d'azione infinito, a cui è associata una particella di massa nulla, il fotone) e campo delle forze nucleari, che decrescono molto rapidamente con la distanza, associa a quest'ultimo una «particella pesante», di massa intermedia fra quella dell'elettrone e quella del protone. La particella individuata nei raggi cosmici da Carl Anderson e Seth Neddermeyer al California Institute of Technology viene battezzata «mesotrone». Al suo ritorno alla Columbia Fermi scrive una breve nota sull'argomento (*The Absorption of Mesotrons in Air and in Condensed Materials* [Assorbimento di mesotroni in aria e materiali condensati]).

1940 Nella primavera di quest'anno viene fornita la conferma sperimentale che il processo di fissione prodotto da neutroni lenti riguarda soltanto l'isotopo raro U-235, presente in minime quantità (0,7%) nell'uranio naturale, insieme al più abbondante U-238. In febbraio Fermi, in visita a Berkeley per un breve ciclo di conferenze, incontra Segrè che non vedeva da due anni. Insieme utilizzano il nuovo ciclotrone da 60 pollici, allora il più potente del mondo, per dimostrare la scissione dell'uranio sotto il bombardamento di particelle alfa (*Fission of Uranium by Alpha-Particles* [Fissione dell'uranio per mezzo di particelle α]). Al suo ritorno alla Columbia Fermi riprende gli esperimenti sull'assorbimento

e la diffusione dei neutroni da parte della grafite insieme all'analisi teorica della reazione a catena, un'estensione delle ricerche già eseguite in Italia sulla moderazione dei neutroni da parte delle sostanze idrogenate (*Production and Absorption of Slow Neutrons by Carbon* [Produzione e assorbimento di neutroni lenti in carbonio]).

I risultati di questo lavoro confermano non soltanto come la grafite sia la scelta più opportuna quale materiale per rallentare i neutroni, ma sono anche della massima importanza perché forniscono una prima base teorica delle tecniche per descrivere il comportamento dei neutroni all'interno di queste sostanze.

Come ricorda Segrè, buona parte della nomenclatura della tecnologia nucleare viene sviluppata all'epoca. Il termine pila per il reattore nucleare, per esempio, deriva dall'inglese *pile*, e si riferisce alla catasta di blocchetti di grafite all'interno della quale viene inserito l'uranio.

Nel frattempo anche altre università stavano lavorando su problemi analoghi e Fermi, considerato il più grande esperto al mondo di fisica dei neutroni, fa ormai da consulente per problemi sia teorici che sperimentali. Nel frattempo, sotto la pressione dell'avanzata di Hitler in Europa, Roosevelt istituisce il National Defense Research Committee (NDRC) con il compito di coordinare le ricerche connesse con i problemi della difesa e organizzare la mobilitazione della comunità scientifica a scopi bellici. L'Uranium Committee viene posto sotto la sua giurisdizione e ne sono esclusi gli scienziati stranieri non naturalizzati come Fermi e Szilard.

1941 Fino all'estate 1941 le ricerche si focalizzano intorno alla possibilità di utilizzare la reazione a catena per la produzione di energia, piuttosto che per la produzione di un ordigno nucleare. A questo scopo Fermi prepara una relazione sui problemi relativi alla produzione di energia atomica e lo presenta all'Uranium Committee il 30 giugno 1941 (*Some Remarks on the Production of Energy by a Chain Reaction in Uranium* [Alcuni commenti sulla produzione di energia mediante reazione a catena in uranio]). È interessante notare che Fermi limita il discorso a una reazione a catena per l'uranio naturale che è in questo momento l'unica forma di uranio disponibile, in cui è prevalente l'U-238 e nel quale l'isotopo fissionabile U-235 è presente in minime tracce. La separazione di questo isotopo dall'U-238 sembra ancora un'impresa irrealizzabile da un punto di vista tecnologico. L'altra via per realizzare la fissione veniva dalla scoperta fatta da Hahn e dalla Meitner i quali avevano dimostrato che l'U-238 si trasforma in U-239 per cattura di un neutrone decadendo dopo circa 23 minuti in un elemento che doveva avere numero atomico 93 e massa 239. Nell'estate del 1940 era stato identificato a Berkeley il primo elemento transuranico, poi chiamato Nettunio (Np-239) che a sua volta decade emettendo elettroni con un periodo di circa due giorni dando luogo a un isotopo di massa 239 dell'elemento di numero atomico 94, il plutonio (Pu-239). Nel dicembre del 1940 Fermi e Segrè discutono della possibilità che il plutonio, preparato in quantità sufficienti, possa essere utilizzato per studiarne le possibilità nucleari ed eventualmente essere utilizzato come esplosivo. In base alla teoria di Bohr e Wheeler sull'energia di legame dei nuclei pari e dispari, ritengono probabile che questo elemento, di peso atomico dispari come l'U-235, possa dare luogo alla fissione se bombardato con neutroni lenti.

Pearl Harbour



Enrico Fermi (USA)



I primi tre strati di grafite del CP-1. Il primo reattore nucleare del mondo, noto come "pila" di Fermi, fu montato sotto lo stadio Stagg Field dell'Università di Chicago (novembre 1942) (per gentile concessione dell'Argonne National Laboratory)

La pila di Fermi



Gli strati 27, 28 e 29 del CP-1. Università di Chicago. 24 novembre 1942 (per gentile concessione dell'Argonne National Laboratory)

Nel giro di pochi mesi Segrè e altri colleghi, insieme a un certo numero di esperti radiochimici, riescono a ottenere una certa quantità di plutonio utilizzando il ciclotrone di Berkeley. Lo studio delle proprietà di questo nuovo elemento dimostra che può costituire un potenziale esplosivo nucleare. Il 1941 finisce con l'attacco dei giapponesi su Pearl Harbor, il 7 dicembre. L'entrata in guerra degli Stati Uniti determina la decisione di accelerare al massimo gli sforzi di ricerca per realizzare un ordigno nucleare sia sul piano finanziario sia sul piano scientifico e tecnico. Nell'estate di quest'anno viene eseguito il primo dei cosiddetti "esperimenti esponenziali" nel corso dei quali viene misurato il "fattore di riproduzione" k , ovvero il numero medio di neutroni prodotti nel corso dei processi di fissione dovuti a una data "generazione" di neutroni. In base alla sua "teoria dell'età", le cui radici risalgono al 1936, Enrico Fermi è in grado di conoscere punto per punto le proprietà del flusso di neutroni all'interno del sistema costituito dall'uranio e dalla grafite. Grandezza fondamentale della teoria è appunto il fattore di riproduzione k . Una reazione a catena può verificarsi soltanto se k è maggiore di 1.

1942 In primavera Fermi si trasferisce a Chicago, insieme a Szilard e agli altri fisici della Columbia University, presso il Metallurgical Laboratory dove inizia la costruzione di un reattore nucleare a uranio naturale e grafite di cui Fermi assume la direzione scientifica. Nel frattempo è costretto a partecipare a riunioni, a stendere relazioni, dare consigli su questioni tecniche, oltre a dirigere, con tatto, gli ingegneri che si scontrano con problemi del tutto nuovi. Invece di fare lui stesso gli esperimenti deve affidare tutto a collaboratori fidati, riservandosi solo l'analisi dei dati. Come racconta lui stesso, gli sembra di «fare fisica per telefono». Vengono ripetuti su scala molto maggiore una serie di esperimenti esponenziali. Allo scopo di accertare la possibilità di una reazione a catena di vergente in un sistema di uranio naturale e grafite vengono realizzate misurazioni di alta precisione del flusso dei neutroni nei vari punti del reticolo di grafite-uranio. Perché sia possibile una reazione a catena divergente è necessario fare molta attenzione alle perdite indesiderate di neutroni, in particolare dalle zone di confine, per ridurre le quali è necessario usare una struttura sufficientemente grande. Per fare il test con una struttura più piccola Fermi ha inventato l'esperimento esponenziale, nel quale viene misurata la diminuzione esponenziale della densità dei neutroni in una colonna di uranio-grafite a base quadrata (*Neutron Production in a Lattice of Uranium Oxide and Graphite (Exponential Experiment)* [Produzione di neutroni in un reticolo di ossido di uranio e grafite (Esperimento esponenziale)]). Il metodo della pila esponenziale viene successivamente utilizzato con successo nell'analisi delle partite di materiali ricevute.

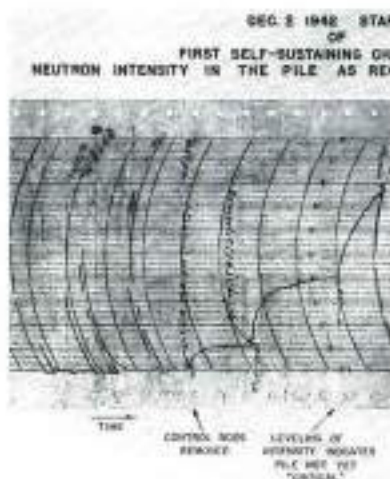
Nel mese di giugno il Presidente Roosevelt decide di procedere con un programma su vasta scala finalizzato alla costruzione di bombe a fissione e affida all'esercito la direzione di quello che verrà chiamato il Progetto Manhattan. Fermi organizza una serie di seminari per lo staff dei fisici che lavorano a Chicago sulla fisica dei neutroni e sulla reazione a catena (*Slowing down and Diffusion of Neutrons; Determination of the Albedo and the Measurement of Slow Neutron Density; The Absorption of Graphite for Thermal Neutrons* [Rallentamento e diffusione dei

neutroni; Determinazione dell'albedo e misura della densità di neutroni lenti; Il potere assorbente della grafite per i neutroni termici]). Secondo la testimonianza di Anderson, questi seminari rappresentano straordinari esempi della sua abilità di insegnante. Fermi propone gli argomenti in forma chiara e semplice, in modo che tutti possano seguire. Grazie alla comprensione raggiunta attraverso queste lezioni il lavoro di gruppo prosegue al massimo delle sue possibilità. In ottobre le quantità di grafite e di ossido di uranio cominciano ad avvicinarsi molto a quella necessaria per la costruzione di una pila destinata a raggiungere lo stato critico. Il progetto iniziale è quello di montare la pila nella foresta delle Argonne, ma uno sciopero ne ritarda a tal punto la costruzione che Fermi propone di utilizzare lo spazio sottostante le gradinate dello stadio dell'Università di Chicago, al centro di una zona densamente abitata. Fermi è talmente sicuro di sé da riuscire a convincere Arthur Compton, responsabile per le ricerche sulla reazione a catena e il generale Leslie Groves, direttore del Progetto Manhattan. La decisione definitiva viene presa il 14 novembre. La mattina del 2 dicembre si decide di procedere al montaggio dell'ultimo strato di uranio e grafite, il 57°, quello che in base ai risultati delle misure e ai calcoli di Fermi avrebbe reso critica la pila innescando la reazione a catena. Sbarre di legno avvolte in sottili fogli di cadmio (un potente assorbitore di neutroni, come Fermi e il suo gruppo avevano scoperto a suo tempo) vengono inserite all'interno della pila per tenere sotto controllo la reazione. Fermi assume la direzione delle operazioni alla presenza di circa quaranta persone, quasi tutti scienziati del Metallurgical Laboratory: ha predisposto una serie di operazioni per raggiungere la soglia critica gradualmente e in modo perfettamente controllabile. L'ultima barra di cadmio viene estratta pezzo dopo pezzo. Ogni volta si procede con la misura dell'aumento del flusso di neutroni. Fermi utilizza il regolo e i grafici per decidere le dimensioni del passo successivo, migliorando di volta in volta la sua capacità di previsione. Il processo converge rapidamente verso il punto critico e le sue capacità di previsione si fanno più accurate. Al momento di fare il passo finale Fermi è perfettamente sicuro che la pila raggiungerà la criticità. In effetti, una volta estratta completamente la barra la pila diventa critica: ha luogo la prima reazione a catena autosostenuta nella storia dell'uomo. La pila viene lasciata in funzione per ventotto minuti, a una potenza massima di 0,5 watt. Leo Szilard, che tanto aveva fatto per spingere a utilizzare l'energia nucleare, commenta: «Questo è un giorno infausto per la storia dell'uomo», mentre Fermi, nel rapporto mensile di dicembre (*Experimental Production of a Divergent Chain Reaction* [Esperimento di produzione di una reazione a catena divergente]) che verrà declassificato soltanto dieci anni dopo, scrive semplicemente: «La struttura per la reazione a catena è stata completata il 2 dicembre e da allora ha continuato a funzionare in modo soddisfacente».

1943 Ciò che più emoziona Fermi non sono tanto le possibilità aperte dal funzionamento della pila circa la produzione di energia nucleare e di ordigni atomici, obiettivi che molti altri si apprestano a perseguire, ma piuttosto le eccezionali possibilità offerte dalla pila in quanto nuovo e straordinario apparato sperimentale. In effetti la pila è uno stupefacente moltiplicatore di neutroni di potenza quasi illimitata; basta cambiare di poco il numero di neutroni e immedia-



Pila esponenziale dell'Università di Chicago (per gentile concessione dell'Argonne National Laboratory)



Prima reazione a catena autosostenuta. Intensità dei neutroni nella pila, registrata da un galvanometro (2 dicembre 1942)

Fisica e passeggiate nei boschi



Enrico Fermi al Lago Michigan.
Foto di Leona Marshall (per gentile
concessione di J. Marshall)

tamente si ottiene un effetto moltiplicativo dell'ordine del milione. La pila permette un'analisi della purezza dell'uranio, uno studio accurato del reticolo uranio-grafite, tutto lavoro per fisici: un nuovo apparato da calibrare, misure da eseguire, nuovi metodi da sviluppare, limiti da esplorare, nuovi effetti da osservare, risultati da interpretare. Per un bel po' di tempo Fermi ha troppo da fare per occuparsi di comitati. Appena tre settimane dopo viene pubblicata la prima relazione sull'attività sperimentale messa in piedi da Fermi insieme ai gruppi di Herbert Anderson e Walter Zinn; seguono una serie di relazioni mensili sullo stato delle ricerche. Dopo tre mesi le potenzialità della pila sono state esplorate in lungo e in largo, ormai si sa come ricostruirla con una serie di miglioramenti: per la fine di maggio la pila di Chicago viene rimontata nel laboratorio di Argonne.

Anderson ricorda bene lo stile di lavoro di Fermi: «Egli cominciava con sicurezza le sue ricerche nella giusta direzione; eliminando gli elementi marginali e individuando subito quelli più importanti, riusciva a estrapolare l'essenza della questione [...] il suo approccio alle cose era sempre il più semplice possibile, e non si impegnava mai in una costruzione più complessa o in misurazioni più precise di quanto non fosse strettamente necessario alla soluzione del problema che gli stava davanti». Del gruppo dei collaboratori di Fermi fa ormai parte, dalla primavera del 1942, anche Leona Woods, che nell'estate del 1943 sposa John Marshall, un membro dello stesso gruppo. Lei stessa racconta come fosse abitudine del gruppo andare ogni giorno, nel tardo pomeriggio, a fare una nuotata al lago Michigan. La domenica pomeriggio vanno tutti a fare un giro in bicicletta o passeggiano nei boschi. In queste occasioni Fermi ama molto dimostrare la sua grande resistenza fisica: la sua capacità di nuotare più lontano, di camminare più a lungo, di arrampicarsi più in alto stancandosi meno degli altri. In genere ci riesce. Nello stesso modo gli piace vincere a "freccette", a "pulci" o a tennis, come generalmente accade. Queste qualità di allegria e mancanza di formalità proprie del carattere di Fermi facilitano il contatto tra lui e i membri giovani del laboratorio. È un compagno incredibilmente piacevole, raramente impaziente, generalmente calmo e vagamente divertito. Non si lancia spontaneamente in discorsi di politica e di economia, né di filosofia e letteratura, è difficile coinvolgerlo in questo tipo di conversazione. Nemmeno le arti visive costituiscono una particolare attrattiva per lui. Una volta, trascinato contro voglia ad una mostra di ritratti, passa tutto il tempo facendo statistiche sul rapporto tra lunghezza delle gambe e statura degli uomini del diciottesimo secolo. Nelle ore di relax parla di cose che lo divertono così come gli vengono in mente. Delinea le idee in modo qualitativo e brevemente, in modo che una volta afferrata l'immagine l'interlocutore provi il desiderio di approfondire l'argomento. Usa lo stesso metodo quando fa lezione, delineando con chiarezza i principi generali, senza dare i dettagli. In questo modo lo studente è attratto dalla sua visione ampia e al tempo stesso catturato dalla curiosità di capire più a fondo i problemi delineati. Sul lavoro Fermi è flessibile e aperto ai suggerimenti. Sostiene di avere meno esperienza tecnica rispetto agli sperimentatori ed è piuttosto lui ad assisterli nel preparare l'attrezzatura. Ma negli stadi successivi dell'esperimento è lui a guidare, per mettere a fuoco i criteri per l'individuazione delle quantità misurabili e dei risultati significativi. Fa una particolare impressione nell'analisi dei dati, come quando insiste che gli integrali si possono calcolare numericamente in un tempo inferiore a quello necessario per cercarli sulle tavole.

1944 Dopo il successo della pila di Enrico Fermi vengono avviati due progetti paralleli per la produzione di materiali fissili: un impianto per la separazione dell'U-235 a Oak Ridge e la costruzione di reattori nucleari destinati alla produzione di plutonio. Fra il 1943 e il 1944 Fermi, Zinn, Marshall e altri fanno molti esperimenti di fisica pura con la pila delle Argonne, i cui risultati rimarranno tuttavia segreti fino a dopo la guerra. Questi esperimenti aprono un nuovo settore di ricerca in cui i neutroni vengono applicati allo studio dei problemi più diversi. Ancora una volta Fermi intuisce le potenzialità offerte dai neutroni e inizia lo studio dello stato solido. Nel corso di queste ricerche viene introdotta la cosiddetta "colonna termica", un dispositivo a cui Fermi teneva particolarmente. Un blocco di grafite pura che, disposta alla sommità della pila, agisce come un selettore di velocità lasciando passare soltanto neutroni lentissimi, in modo da selezionare intensi fasci di neutroni di energia inferiore a quella termica, i cosiddetti "neutroni freddi". I neutroni così filtrati hanno una lunghezza d'onda di de Broglie confrontabile con le distanze interatomiche delle sostanze cristalline e quindi possono essere utilizzati per osservare fenomeni di diffrazione. Questi effetti erano stati già osservati negli anni 30, ma erano molto modesti. Ora Fermi dispone di fasci di neutroni ad alta intensità e molto collimati e li impiega inducendo effetti di interferenza in berillio, bismuto e zolfo (*Production of Low Energy Neutrons by Filtering through Graphite; Slowing down of Fission Neutrons in Graphite* [Produzione di neutroni di bassa energia filtrati da grafite; Rallentamento di neutroni da fissione in grafite]).

Insieme a Segrè Fermi progetta anche un selettore meccanico di velocità con il quale osserva la riflessione e la rifrazione dei neutroni. Con questi lavori Fermi dà così inizio a ricerche sistematiche sulle proprietà ottiche dei neutroni (*A Thermal Neutron Velocity Selector and its Application to the Measurement of the Cross-Section of Boron; Collimation of Neutron Beam from Thermal Column of CP-3 and the Index of Refraction for Thermal Neutrons; Reflection of Neutrons on Mirrors* [Un selettore di velocità per neutroni termici e la sua applicazione per la misura della sezione d'urto del boro; Collimazione di un fascio di neutroni dalla colonna termica del CP-3 e l'indice di rifrazione dei neutroni termici; Riflessione speculare di neutroni]).

Da questa serie di esperienze nasce il metodo di diffrazione a cristalli, che diventerà in seguito uno dei sistemi più efficaci nello studio della struttura dei materiali. Subito dopo la guerra Fermi continuerà a fare esperimenti con i flussi neutronici ottenuti dal reattore CP-3, esperimenti cruciali da cui nascerà un nuovo capitolo della fisica dello stato solido. In questo momento Fermi si trova di nuovo nelle condizioni migliori per fare ricerca, la sua attività preferita, relativamente libero da problemi organizzativi che lo hanno occupato in precedenza; tuttavia le sue competenze sulla fisica dei neutroni e sulla conoscenza della pila sono assolutamente uniche e spesso viene chiamato a fare da «ancora di salvezza», come racconta Arthur Compton, nei vari laboratori dove vengono prodotti i materiali fissili. Verso la fine dell'estate Enrico Fermi si trasferisce stabilmente a Los Alamos, nel New Mexico, dove in precedenza si era recato saltuariamente. Questi laboratori, dove sono in corso ricerche su problemi più strettamente connessi con la costruzione della bomba, costituiscono il centro principale di tutto il Progetto Manhattan.

Diffrazione con i neutroni



Enrico Fermi e Emilio Segrè
a Los Alamos (USA, 1944)

1945 Nella primavera del 1945 più di duemila persone lavorano a Los Alamos.

Sotto la direzione di Robert Oppenheimer, un brillante fisico teorico che aveva introdotto la meccanica quantistica negli Stati Uniti, i migliori fisici teorici e sperimentali si trovano ad affrontare e risolvere una serie di problemi fondamentali per il funzionamento di una bomba a fissione. Oltre a dirigere la cosiddetta "Divisione F" (da Fermi), che contiene quattro gruppi che si occupano di questioni diverse, Fermi ha il ruolo di superconsulente. Secondo la testimonianza di Segrè «Fermi funzionava come una specie di oracolo a cui ogni fisico con problemi difficili poteva rivolgersi e spesso ricevere aiuto». Poco dopo il suo arrivo Fermi inizia a tenere lezioni su molti argomenti e verso la fine del 1945 svolgere un corso regolare di fisica dei neutroni. Gli appunti vengono presi da un certo numero di studenti e stilati mantenendo alla lettera la presentazione di Fermi (*A Course in Neutron Physics* [Lezioni di fisica dei neutroni]).

Durante il soggiorno a Los Alamos fa amicizia con John von Neumann, che ha un ruolo fondamentale nello sviluppo dei primi calcolatori elettronici. Entrambi condividono l'interesse per i computer. Enrico Fermi, da sempre un appassionato di calcoli numerici, nel suo lavoro ha dato costantemente un ruolo importante a questo tipo di applicazioni e quindi apprezza immediatamente le possibilità aperte dai nuovi strumenti. A Los Alamos passa molte ore nella stanza dei computer per studiarli e sperimentarli. Il 16 luglio, ad Alamogordo, viene fatta esplodere la prima bomba atomica della storia. Fermi ha un ruolo centrale nella supervisione di questo esperimento e nella successiva elaborazione dei dati. Fin dal mese di maggio il nuovo Presidente Truman aveva creato una commissione presieduta dal ministro della guerra, l'Interim Committee, con il compito di affrontare la questione di un eventuale uso della bomba atomica. L'Interim Committee era stato affiancato da una commissione scientifica composta da Oppenheimer, Fermi, Lawrence e Compton, i leader scientifici del progetto, che hanno il compito delicato di fornire consigli tecnici sull'uso dell'arma nucleare. Dopo la resa della Germania, avvenuta l'otto maggio di questo anno, gli scienziati impegnati nel Progetto Manhattan sono costretti a porsi concretamente l'interrogativo sull'utilità di un impiego militare degli ordigni nucleari in costruzione a Los Alamos. Nei giorni immediatamente successivi alla fine della guerra con la Germania la responsabilità di affrontare queste questioni era stata affidata da Arthur Compton a un Comitato formato da vari scienziati del Metallurgical Laboratory di Chicago, presieduto da James Franck, un valente fisico tedesco sfuggito alle persecuzioni naziste. In data 11 giugno il Comitato aveva presentato un lungo *memorandum* nel quale si sconsigliava apertamente «l'uso delle bombe nucleari per un attacco precoce contro il Giappone» e si insisteva che fosse data una dimostrazione della bomba atomica ai capi giapponesi in una zona disabitata, prima di farne uso militare. Oltre a sottolineare il rischio di affrettare la corsa agli armamenti il Rapporto Franck metteva chiaramente in evidenza come la possibilità di generare «un'ondata di orrore e di repulsione» nel resto del mondo potesse superare «i vantaggi militari e il risparmio di vite americane ottenuti con l'impiego senza preavviso di bombe atomiche contro il Giappone». Il *memorandum* non aveva avuto alcun riscontro e quindi Szilard, che aveva fatto parte della commissione ed era fortemente convinto che l'uso della bomba atomica contro il Giappone potesse dare il via a una corsa agli armamenti,

aveva fatto una serie di tentativi andati a vuoto per sensibilizzare le massime autorità dello Stato e gli altri scienziati, ma il processo decisionale era ormai inesorabilmente avviato verso l'impiego delle nuove armi nucleari. La sottocommissione scientifica dell'Interim Committee formata da Fermi, Oppenheimer, Lawrence e Compton non era persuasa che una dimostrazione avrebbe assicurato una rapida fine della guerra nel Pacifico. Alla fine di giugno i membri scrivono nel loro rapporto ufficiale all'Interim Committee: «Ci è stato chiesto di fornire un parere sull'impiego iniziale della nuova arma. [...] Le opinioni dei nostri colleghi scienziati non sono unanimi e vanno dalla proposta di un'applicazione puramente tecnica a quella di un'applicazione militare più adatta a indurre i Giapponesi alla resa. [...] Non siamo in grado di proporre alcuna dimostrazione tecnica suscettibile di fare finire la guerra; non vediamo alcuna alternativa accettabile all'impiego militare diretto». Il 6 e il 9 agosto una bomba all'uranio e una bomba al plutonio vengono sganciate rispettivamente sulle città giapponesi di Hiroshima e Nagasaki. Il 15 agosto cessano le ostilità.

1946 Già a partire dall'autunno del 1945 molti degli scienziati che avevano lavorato al Progetto Manhattan si mobilitano per sottrarre ai militari il programma statunitense di sviluppo dell'energia atomica e per indirizzare le ricerche sulla nuova fonte di energia verso scopi pacifici e socialmente utili. Viene fondata la Federation of Atomic Scientists, cui aderiscono molti dei partecipanti al Progetto Manhattan, con lo scopo principale di informare l'opinione pubblica sui problemi dell'energia atomica. Fermi non si iscrive a questa associazione, ma prende immediatamente posizione sulla questione dell'abolizione del segreto militare, una condizione che considera fondamentale per uno sviluppo della ricerca scientifica basato sulla libera circolazione di idee e risultati. Fermi afferma con forza anche la necessità di un «libero sviluppo delle applicazioni dell'energia nucleare al riparo dalla minaccia di un impiego militare delle nuove scoperte». Questi obiettivi naturalmente suscitano la più totale ostilità dei militari e di importanti settori del mondo politico. Va sottolineato che Fermi sostiene la necessità che la produzione di armi resti sotto il controllo dei militari. Nel mese di maggio Fermi viene invitato a parlare in pubblico di energia atomica e sceglie come argomento le applicazioni pacifiche dell'energia atomica (*Atomic Energy for Power* [L'energia atomica come risorsa energetica]). Tra il 1944 e il 1945, fin dai primi stadi dello sviluppo dei reattori, si era fortemente interessato alla possibilità di usarli per produrre energia; in particolare aveva subito considerato la produzione in un reattore di più materiale fissile di quanto ne fosse impiegato, cioè la possibilità di reattori autofertilizzanti (*Discussion on Breeding; Relation of Breeding to Nuclear Properties* [Discussione sull'autofertilizzazione; Relazione tra autofertilizzazione e proprietà nucleari]). In una pila che utilizza uranio naturale questo significa produrre più plutonio rispetto all'U-235 consumato. Enrico Fermi è talmente convinto dell'importanza pratica di sviluppare reattori autofertilizzanti da incoraggiare Zinn, direttore del laboratorio di Argonne, a progettarne e a costruirne uno. Il primo impianto commerciale di questo tipo sarà chiamato "The Enrico Fermi Atomic Power Plant". Dopo la fine della guerra Fermi si trasferisce all'Università di Chicago dove Compton vuole affidargli la direzione

La nascita della big science



Enrico Fermi e Walter Zinn (USA, 1946)

dell'Institute for Nuclear Studies, appena fondato insieme a quello di radiobiologia e a uno per lo studio dei metalli. Alla fine della guerra Fermi è certamente il più grande esperto di neutroni al mondo, ora vuole dedicarsi completamente alla ricerca e rifiuta la carica di direttore chiedendo a Samuel Allison, suo più stretto collaboratore, di occuparsi degli aspetti amministrativi. Gli anni della guerra avevano contribuito alla nascita della cosiddetta *big science*, sia a livello finanziario, sia a livello scientifico e tecnologico, con la costruzione di grandi macchine come reattori nucleari e acceleratori di particelle, sia a livello organizzativo. È un modo completamente inedito di fare ricerca. Nel gennaio 1946 Fermi scrive a Edoardo Amaldi e Gian Carlo Wick (che dal 1939 occupa a Roma la cattedra di Fisica teorica lasciata da Fermi):

«Dal gennaio io mi sono stabilito a Chicago, più o meno definitivamente. [...] Sembra che avremo mezzi piuttosto illimitati e abbiamo cominciato ad usarli ordinando un betatrone da 100 MeV [...]. Anche in America la situazione della fisica ha subito cambiamenti molto profondi per effetto della guerra. Alcuni sono per il meglio: ora che la gente si è convinta che con la fisica si possono fare le bombe atomiche tutti parlano con apparente indifferenza di cifre di vari milioni di dollari. Fa l'impressione che dal lato finanziario la maggiore difficoltà consisterà nell'immaginare abbastanza cose per cui spendere. D'altra parte ci aspettiamo che il numero degli studenti cresca considerevolmente [...]». Intorno a Fermi cominciano a radunarsi molti giovani studenti, borsisti e ricercatori provenienti da Los Alamos o da altri laboratori. Chicago diventa la meta di un gran numero di giovani talenti che accorrono anche da paesi come la Cina, l'India e il Canada. Anche nel corso delle ricerche finalizzate al raggiungimento di obiettivi ben precisi, come nel caso della pila o addirittura a Los Alamos, Fermi crede fermamente nella necessità di mandare avanti in parallelo insegnamento e ricerca, fra i quali non fa una vera e propria distinzione. La sua forza è di rendere partecipi i più giovani del processo di ricerca nel momento stesso in cui lui stesso vi è impegnato in prima persona. Come ricorda Albert Wattenberg, uno dei primi allievi americani di Fermi alla Columbia: «Voleva che i giovani membri del gruppo avessero una chiara comprensione di quello che stavano facendo. [...] voleva che ognuno di noi capisse la successione delle misure che si accingeva a effettuare per stabilire un controllo quantitativo di una reazione nucleare a catena [...] Riduceva al minimo le dimostrazioni e gli argomenti che potevano far deviare il flusso del ragionamento. Sapeva ciò che era importante e ciò che poteva venire trascurato». Chen Ning Yang, futuro premio Nobel, ricorda così le lezioni di Fermi a Chicago: «Per ogni argomento aveva l'abitudine tipica di cominciare sempre dall'inizio, faceva esempi semplici ed evitava per quanto possibile i formalismi. (Usava ripetere per scherzo che il formalismo complicato era per "gli alti prelati"). La semplicità dei suoi 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». Secondo la sua vecchia abitudine romana Fermi raccoglie nel suo studio, una o due volte la settimana, un piccolo gruppo di laureati a cui fa lezione in modo informale. Il tema viene proposto da lui stesso o da uno degli studenti. Gli argomenti sono

i più svariati e la discussione viene mantenuta a un livello elementare. Dalla nuova scuola di fisica teorica fondata da Fermi a Chicago usciranno ricercatori come Owen Chamberlain (premio Nobel con Emilio Segrè per la scoperta dell'antiprotone), Jay Orear, Harold Agnew, Geoffrey Chew, Tsung Dao Lee e Chen Ning Yang (i quali condivideranno il premio Nobel per la scoperta della non conservazione della parità nelle interazioni nucleari deboli). Nel frattempo Fermi si impegna di nuovo a fondo nelle ricerche.

1947 Fermi viene nominato commissario del General Advisory Committee (GAC), un comitato consultivo dell'Atomic Energy Commission, composto da otto scienziati e presieduto da Oppenheimer, che ha il compito di fornire pareri scientifici e tecnici sui programmi civili e militari per lo sviluppo dell'energia nucleare; terrà questa carica fino all'agosto del 1950. La sua presenza a Chicago influenza l'Atomic Energy Commission a scegliere un luogo vicino a questa città come sede permanente dell'Argonne National Laboratory. Uno degli interessi di Fermi riguarda l'uso dei fenomeni di interferenza ottenuti con neutroni per lo studio della struttura dei liquidi e dei solidi. Owen Chamberlain si laurea con lui proprio con una tesi su questi argomenti. Il settore dell'ottica neutronica che Fermi ha cominciato a esplorare prima della guerra riceve ora un forte impulso. I campi di ricerca aperti da Fermi in questo periodo, come ricorda Segrè, «si sono enormemente sviluppati col trascorrere degli anni e formano ora interi nuovi capitoli della fisica dei solidi e dei neutroni». Ma nel frattempo la sua attenzione è di nuovo catturata dal problema dei mesoni. Alla fine del 1946 Edoardo Amaldi lo aveva messo al corrente di un importante esperimento effettuato a Roma da Marcello Conversi, Ettore Pancini, Oreste Piccioni nel corso di quell'anno. I tre avevano trovato che il decadimento e l'assorbimento dei mesotroni avveniva con delle modalità molto diverse da quello che ci si aspettava in base all'ipotesi che queste potessero essere le particelle responsabili delle interazioni nucleari, secondo la teoria formulata dal fisico giapponese Hideki Yukawa nel 1935. Fermi si rende subito conto dell'importanza dei risultati dell'esperimento di Conversi, Pancini e Piccioni e nel giro di pochi giorni, insieme a Edward Teller e Victor Weisskopf, completa un'analisi dettagliata del fenomeno giungendo alla conclusione che i mesotroni dei raggi cosmici non possono essere identificati con la particella di Yukawa, in quanto hanno un'interazione con i nuclei molto più debole (*The Decay of Negative Mesotrons in Matter; The Capture of Negative Mesotrons in Matter* [Decadimento di mesotroni negativi nella materia; Cattura di mesotroni negativi nella materia]). I primi di giugno il risultato dell'esperimento e le sue implicazioni teoriche vengono discussi alla Conferenza di Shelter Island, avanzando importanti congetture. L'enigma viene risolto definitivamente pochi mesi dopo, a Bristol: Cesare Lattes, Giuseppe Occhialini e Cecil Frank Powell, utilizzando la tecnica delle emulsioni fotografiche esposte ai raggi cosmici ad alta quota, scoprono che il "mesotrone" osservato a livello del mare non è altro che il cosiddetto mesone μ (o muone), prodotto del decadimento di una nuova particella, il mesone π (o pione) che è appunto il mesone postulato da Yukawa.

L'esperimento di Marcello Conversi, Ettore Pancini e Oreste Piccioni



Enrico Fermi con la moglie Laura e il figlio Giulio (1947)

S.E. Alcide De Gasperi
Primo Ministro
R O M A

Eccellenza,

mi scrive il Prof. E. Fermi che il Governo Italiano sta proponendo al Prof. Gustave Coleo Nazionale delle Ricerche, che un milione venga assegnato per la ricerca.

Sono lieto che tale proposta sia stata accolta dal Prof. Coleo. Io ho seguito con molta simpatia che ci arrivasse dall'Italia una notizia di questo genere e ancor più con la loro eccitata studiosi italiani per conto di prima classe e dispetto delle

Le pubblicazioni italiane, di scienze esatte, formano ormai gli orgogli americani. Ho udito sul fatto che così notevoli rimangono esterne tanto difficili

Sono sicuro che se il Governo degli studiosi mezzi più spendenti.

Ma voglio ed io ricordavo visita a Umberto l'anno scorso. Alla figlia.

Rispettosi saluti

Lettera di Enrico Fermi a Alcide De Gasperi in cui sollecita da parte del Governo italiano lo stanziamento di fondi per la ricerca (27 aprile 1948)

1948 L'origine dei raggi cosmici era un problema che aveva sempre attirato l'attenzione di Fermi. Nel 1948 lo svedese Hannes Alfvén, che si era sempre interessato dei fenomeni elettromagnetici su scala cosmica, è a Chicago, invitato da Edward Teller, che all'epoca sta ragionando sull'idea che le particelle dei raggi cosmici possano essere accelerate nel passare vicino al sole e vuole proseguire questo discorso con Alfvén. In questa occasione Fermi viene a conoscenza della probabile esistenza di campi magnetici relativamente intensi che attraversano la nostra galassia, e che devono necessariamente essere indotti e trascinati dal materiale interstellare ionizzato in movimento. In un articolo pubblicato nel 1949 (*On the Origin of the Cosmic Radiation* [Origine dei raggi cosmici]) Fermi utilizza appunto questo fenomeno per spiegare che il principale meccanismo di accelerazione consiste nell'interazione delle particelle dei raggi cosmici con i campi magnetici vaganti che occupano lo spazio interstellare. Tuttavia questo modello, in contraddizione con l'evidenza sperimentale, non spiega le più alte velocità raggiunte dai protoni. L'articolo, che ha origine da accese discussioni con Teller, viene scritto da Fermi anche con lo scopo di confutare il punto di vista che le particelle che formano i raggi cosmici siano principalmente di origine solare e che non possano attraversare lo spazio galattico a causa della grande quantità di energia necessaria. Fermi riesce a individuare sia un metodo per spiegare la generazione dei raggi cosmici, sia un meccanismo di accelerazione alle altissime energie osservate sperimentalmente. Queste stesse ipotesi verranno presentate da Fermi in una conferenza tenuta al Congresso Internazionale di Como sulla fisica dei raggi cosmici nel 1949, al suo primo rientro in Italia. I suoi rapporti con gli amici rimasti in Italia erano sempre stati molto stretti. Nel marzo del 1948 Amaldi gli chiede di intercedere presso il presidente del consiglio Alcide De Gasperi per appoggiare una richiesta di aumento degli stanziamenti per la ricerca scientifica in Italia. Dopo la partenza di Fermi, Amaldi si era accollato il duro compito della ricostruzione, mantenendo viva in Italia la tradizione di studi e ricerche avviata al tempo della scuola romana. Negli anni successivi diventerà il protagonista della riorganizzazione e della rinascita della fisica italiana. Nell'aprile del 1948 Fermi scrive ad Amaldi: «Da parecchi mesi ho dedicato quasi tutto il mio tempo a studiare fisica teorica. Non me ne occupavo da tanto tempo che stavo poco alla volta dimenticando quello che avevo saputo e non imparando nulla di nuovo». Contemporaneamente lo informa dei progressi nel campo dell'elettrodinamica quantistica e dei primi mesoni prodotti artificialmente con gli acceleratori di Berkeley. Questo settore di ricerca si era espanso enormemente nel dopoguerra. Inizialmente il centro principale era stato Berkeley, dove nel novembre del 1946 era entrato in funzione il ciclotrone da 184 pollici e, l'anno successivo, un elettrosincrotrone che accelerava elettroni e con il quale furono prodotti i primi mesoni per fotoproduzione. Anche alla Columbia University e a Rochester erano entrate in funzione altre macchine acceleratrici, anche se meno potenti, con le quali si producevano fasci di protoni da 200 MeV. Queste macchine aprivano nuovi orizzonti alla fisica delle particelle elementari. Fermi e gli altri fisici di Chicago erano impazienti di avere a disposizione un grande acceleratore. La costruzione di un sincrociclotrone da 170 pollici comincerà nel 1949 sotto la direzione di Herbert Anderson e John Marshall.

Fermi seguirà molto da vicino questo lavoro e si occuperà di effettuare i calcoli del raggio dell'orbita del fascio emergente, usando un calcolatore grafico di sua invenzione. Prima dell'entrata in funzione di questa macchina Fermi decide appunto di dedicarsi agli studi teorici affrontando lo studio delle nuove teorie delle particelle elementari.

1949 Dopo la notizia dell'esplosione atomica sovietica, nelle alte sfere militari degli Stati Uniti si comincia a discutere la questione dell'elaborazione di un programma per la creazione della bomba all'idrogeno. Fermi e Isidor Rabi, che fanno parte del GAC, esprimono la loro opinione: «Il fatto che la potenza distruttiva di questa arma non abbia limiti rende la sua stessa esistenza, nonché la capacità di costruirla, un pericolo per tutta l'umanità». Durante l'estate Fermi torna in Italia dopo quasi undici anni per partecipare alla conferenza di Como sui raggi cosmici; quindi tiene una serie di lezioni a Roma e a Milano, organizzate dall'Accademia dei Lincei e dalla Fondazione Donegani, dal titolo Conferenze di fisica atomica. È l'occasione per rivedere i vecchi amici e conoscere i giovani fisici della nuova generazione, che per la prima volta incontrano il leggendario Fermi. Alcuni degli argomenti trattati - particelle elementari, orbite nucleari, nuovi sviluppi dell'elettrodinamica quantistica - costituiscono un forte stimolo nell'orientare gli interessi dei fisici italiani verso la fisica delle particelle. Sempre durante l'estate Fermi e Chen Ning Yang, scrivono insieme *Are Mesons Elementary Particles?* [I mesoni sono particelle elementari?]. Lo stesso Yang racconta la genesi del lavoro: «Come abbiamo affermato esplicitamente nell'articolo, non avevamo realmente l'illusione che ciò che stavamo suggerendo potesse effettivamente corrispondere alla realtà. In effetti io ero propenso a seppellire il lavoro nei quaderni di appunti e a non pubblicarlo affatto. Tuttavia Fermi disse che uno studente deve risolvere problemi mentre un ricercatore deve porsi domande; e considerò che il problema che ci eravamo posti valesse la pena di essere pubblicato». Nell'articolo Fermi e Yang suggeriscono che i pioni possano essere particelle composte formate dall'associazione di un nucleone con un antinucleone. Il modello sarà ripreso più tardi da Shoichi Sakata con un certo successo; naturalmente solo più tardi sarà soppiantato dal modello a quark. A Chicago Fermi partecipa attivamente a tutti i seminari e a moltissime discussioni, spesso gettando con una sola osservazione il seme di importanti futuri sviluppi, come ricorda, per esempio, Maria Goeppert Mayer nel suo classico lavoro sull'interazione *spin*-orbita negli *shells* nucleari, quando dice: «Ringrazio particolarmente Enrico Fermi per la sua osservazione "Ci sono indizi di un accoppiamento spin-orbita?", che è all'origine di questo lavoro».

1950 Negli anni 1949-1950 Fermi comincia a preparare se stesso e i suoi colleghi e studenti di Chicago agli esperimenti sulla fisica delle alte energie che molto presto sarebbero stati in grado di fare con il ciclotrone ancora in costruzione nell'Institute for Nuclear Studies e che sarebbe stato in grado di fornire fasci di mesoni. Una parte di queste lezioni appaiono nelle *Lezioni Donegani*; una versione più completa sarà più tardi pubblicata in volume con il titolo *Elementary*

Il primo viaggio in Italia



Enrico Fermi e il matematico Guido Castelnuovo, presidente dell'Accademia dei Lincei (1949)

Le Lezioni Donegani

Nuclear Physics

BY ENRICO FERMI
OF THE UNIVERSITY OF CHICAGO

REVISED EDITION

REVISED EDITION



THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS

1951

Nuclear Physics.
Frontespizio del corso tenuto
da Fermi all'Università di Chicago
(1949/1950)

Particles [Particelle elementari]. Uno degli esempi di questo lavoro preparatorio è rappresentato dall'articolo *High Energy Nuclear Events* [Eventi nucleari di alta energia] scritto come contributo per una rivista giapponese in occasione del 18° anniversario della formulazione della teoria di Yukawa. L'idea nasce dal tentativo di supporre che cosa possa succedere nel corso di collisioni nucleone-nucleone ad altissima energia con produzione multipla di particelle. Nel secondo lavoro su questi problemi (*Angular Distribution of the Pions Produced in High Energy Nuclear Collisions* [Distribuzione angolare dei pioni prodotti in collisioni nucleari di alta energia]) Enrico Fermi confronta i risultati sperimentali con il modello teorico. Per fare queste valutazioni utilizza un metodo statistico. Questo tipo di eventi vengono osservati occasionalmente a livello di raggi cosmici, per il momento l'unica fonte di particelle di altissima energia; ci si aspettava che questi eventi potessero riprodursi in laboratorio disponendo di macchine sufficientemente grandi. Il modello di Fermi è estremamente semplificato e consente di ottenere almeno gli ordini di grandezza delle sezioni d'urto dei processi, un buon modo per cominciare a capire che cosa può accadere. Così commenta Isidor Rabi: «Se Fermi ha ragione dicendo di essere in grado di calcolare che cosa succede ad altissime energie facendo esclusivamente uso di metodi statistici, allora non abbiamo niente da imparare in questo campo». In realtà il modello di Fermi è molto semplificato, proprio come lui vuole che sia, e pur non fornendo risultati dettagliati, che verranno trovati in seguito, tuttavia fornisce dei valori di riferimento con i quali fare i primi confronti dei risultati sperimentali, in modo da rivelare se sta accadendo qualcosa al di fuori della statistica. La sua idea d'altra parte è che le teorie sui mesoni non sono in ogni caso corrette e allora perché prendersi la briga di calcolare qualsiasi cosa in modo esatto? I metodi di Fermi erano una buona ricetta per gli sperimentali, che avevano difficoltà a seguire il modo sofisticato con il quale i teorici operavano.

Il 27 gennaio 1950 Klaus Fuchs confessa di aver passato informazioni segrete sulle armi atomiche ai russi dal 1942 al 1949. Il 30 gennaio Fermi e gli altri commissari del GAC si riuniscono e giungono alla conclusione, di cui viene informato il Presidente Truman, che Fuchs poteva aver fornito ai sovietici informazioni segrete molto importanti anche sulla superbomba all'idrogeno, un progetto a cui si lavorava a Los Alamos fin dai tempi della realizzazione dell'atomica. Il 31 gennaio Truman rende nota la decisione di procedere allo sviluppo della superbomba con la massima priorità. Fermi, che come membro del GAC si era battuto contro la realizzazione della bomba, è tra i primi a rimettersi al lavoro. Nell'estate di quest'anno lavora a Los Alamos dove effettua ricerche per la realizzazione della bomba all'idrogeno. Nel novembre 1951 gli Stati Uniti faranno esplodere la prima bomba all'idrogeno che libera un'energia quasi mille volte superiore a quella della bomba di Hiroshima. Nell'agosto del 1953 anche i sovietici faranno esplodere la loro prima superbomba, seguita nel 1955 dalla prima vera e propria bomba trasportabile all'idrogeno.

Il ciclotrone a Chicago

1951 Finalmente entra in funzione il nuovo sincrociclotrone di Chicago che accelera protoni a 450 MeV con il quale si possono produrre un gran numero di pioni. La macchina era stata costruita con l'idea che Fermi ne sarebbe

stato l'utente principale e nel momento in cui viene completata quest'ultimo passa una gran quantità del suo tempo familiarizzando con le sue operazioni, allineando i fasci di pioni e misurando la loro intensità ed energia. È molto fiero di almeno uno dei suoi contributi alla costruzione. Si tratta del suo carrello, l'apparato per trasportare il bersaglio del ciclotrone. Può essere mosso a piacere intorno alla parte periferica del polo magnetico, controllato dall'esterno dall'azione del campo magnetico sulle correnti che possono essere inviate attraverso gli avvolgimenti a cui sono connesse le ruote. Lo aveva costruito lui stesso nella sua piccola officina e per anni ha funzionato alla perfezione. Nella primavera del 1951 Fermi, insieme a un folto gruppo di studenti e allievi, riprende l'attività sperimentale. Negli ultimi tre anni di vita si concentrerà sull'interazione fra pioni e nucleoni (cioè protoni e neutroni) che costituisce il processo fondamentale delle cosiddette interazioni forti nella teoria di Yukawa. Il nuovo ciclotrone è l'occasione per organizzare una Conferenza internazionale di fisica nucleare e delle particelle elementari, tenuta dal 17 al 22 settembre a Chicago. Circa 200 scienziati vi prendono parte e quaranta di loro provengono da paesi stranieri. Vengono riferiti alcuni risultati interessanti relativi ai primi esperimenti sulla diffusione dei pioni sui protoni dell'idrogeno liquido effettuati durante l'estate. Fermi fa il discorso iniziale sulle particelle elementari (*Fundamental Particles* [Particelle fondamentali]) e partecipa a tutte le discussioni. Il Convegno coincide quasi con il suo cinquantesimo compleanno, che viene festeggiato informalmente con alcuni dei suoi vecchi amici. All'inizio dell'autunno Fermi e il suo gruppo cominciano a investigare sistematicamente la natura dei processi nucleari, studiando gli effetti dell'interazione di un fascio di mesoni μ , prodotti col ciclotrone, contro protoni. In questo periodo Fermi si interessa anche di un problema teorico riguardante l'instabilità di una superficie di separazione fra due fluidi, quando il più pesante viene accelerato dal più leggero (instabilità di Taylor). Questo argomento era stato sviluppato ampiamente a Los Alamos da John von Neumann perché era importante per il metodo di implosione delle bombe atomiche. L'interesse di Fermi ad approfondire l'argomento è testimoniato da tre lavori, due pubblicati nel 1951 (*Excerpt from a Lecture on Taylor Instability Given during the Fall of 1951 at Los Alamos Scientific Laboratory; Taylor Instability of an Incompressible Liquid* [Estratto di una lezione sull'instabilità di Taylor dell'estate 1951 al Laboratorio scientifico di Los Alamos; Instabilità di Taylor di un liquido incompressibile]) e il terzo nel 1953, insieme allo stesso von Neumann (*Taylor Instability at the Boundary of Two Incompressible Liquids* [Instabilità di Taylor alla superficie di separazione di due liquidi incompressibili]).

1952 Il lavoro principale effettuato con il sincrociclotrone da 450 MeV di Chicago consiste nello studio sistematico delle interazioni pione-nucleone. I primi esperimenti misurano per la prima volta le collisioni di pioni positivi e negativi nell'idrogeno liquido. Più tardi viene studiata in dettaglio la distribuzione angolare dei pioni diffusi dall'idrogeno, un lavoro che assorbe molto tempo e a cui Fermi si dedica a lungo. Il primo articolo relativo a questo lavoro (*Total Cross Section of Negative Pions in Hydrogen* [Sezione d'urto totale di pioni negativi in idrogeno]) riguarda misure della sezione d'urto totale per pioni negativi nell'idrogeno e mostra che quest'ultima cresce rapidamente a partire dal basso



Enrico Fermi con Edward Teller (USA)

Esperimenti con i pioni

valore trovato in precedenza da altri (85 MeV). Molte teorie possibili sul mesone che erano state avanzate in precedenza, possono essere scartate a partire da questi dati. Con i pioni negativi, oltre allo *scattering* (diffusione per urto) elastico, nasce la possibilità di uno *scattering* con scambio di carica nel corso del quale il pione negativo si converte nel pione neutro, il protone in neutrone. Nell'articolo *Ordinary and Exchange Scattering of Negative Pions by Hydrogen* [Diffusione con e senza scambio di carica di pioni negativi in idrogeno] è riportato un sorprendente risultato: quest'ultimo processo è circa due volte più frequente nel primo. L'articolo successivo (*Total Cross Section of Positive Pions in Hydrogen* [Sezione d'urto totale di pioni positivi in idrogeno]) riserva una sorpresa ancora maggiore. La sezione d'urto per pioni positivi oltrepassa di gran lunga il massimo trovato per quelli negativi. Inizialmente questo risultato appare particolarmente strano, ma dopo aver letto il *preprint* di un articolo in cui Brückner mette in evidenza l'importanza dello "spin isotopico" (*isospin*), come viene allora chiamato, nelle interazioni pione-nucleone, Fermi riesce immediatamente a collegare i risultati con questo elemento essenziale. L'*isospin* è il numero quantico interno il cui valore permette, per esempio, di considerare il protone e il neutrone come due stati della stessa particella, il nucleone. Fermi congetture che la reazione sia dominata dallo stato di *isospin* $3/2$. Nel qual caso si arriva rapidamente, così come Fermi stesso fa, alla conclusione che i rapporti fra le sezioni d'urto devono essere 9:2:1 per lo *scattering* elastico del pione positivo, lo scambio di carica nello *scattering* e i processi elastici del pione negativo. Pochi mesi dopo, nel corso di un incontro a New York della American Physical Society, fa un annuncio che riguarda l'interazione pione-mesone per il quale ha una serie di risultati e ha trovato una spiegazione che implica un principio importante. Nell'interazione forte tra pione e nucleone si conserva lo spin isotopico. Così una vecchia idea, fino ad allora piuttosto trascurata, assume una nuova importanza. Intanto sono anche comparse significative indicazioni dell'esistenza della prima "risonanza" pione-nucleone, il primo stato eccitato del nucleone, quello che sarà poi chiamato N^* e che farà pensare che i nucleoni abbiano una struttura.

La conferma definitiva giungerà infatti soltanto dopo la morte di Fermi.

Questi esperimenti vengono seguiti con grande interesse dalla comunità dei fisici teorici dell'epoca perché da essi sembra poter venire la chiave per capire le forze nucleari. Si era ragionato molto sulla natura dell'interazione pione-protone; gli esperimenti avrebbero potuto mostrare quale delle molte teorie possibili avrebbe potuto avvicinarsi meglio alla verità. Il problema aveva catturato l'attenzione del brillante giovane teorico americano Richard Feynman, che Fermi conosceva bene dai tempi di Los Alamos. Feynman scrive a Fermi una lettera che contiene alcune predizioni basate su differenti teorie per i mesoni e per le sezioni d'urto pione-nucleone. La risposta di Fermi mostra il suo modo di analizzare i risultati sperimentali e sottolinea l'importanza dell'evidenza sperimentale della conservazione dello *spin* isotopico. Questi esperimenti sono alla ribalta della fisica nucleare del momento e alla terza Conferenza Rochester sulla fisica nucleare delle alte energie l'uditorio è ansioso di ascoltare la relazione di Fermi. Le ricerche condotte da Fermi negli ultimi anni di vita hanno dato inizio a un nuovo capitolo della

fisica teorica e sperimentale. È impossibile avere un'idea globale di tutta la mole della sua attività teorica in base agli articoli pubblicati. Fermi seleziona rigidamente i suoi lavori, pubblicandone solo una parte molto esigua, ma i risultati non pubblicati vengono da lui trascritti in forma riassuntiva e conservati in numerosissimi quaderni che costituiscono quella che lui stesso chiama la sua "memoria artificiale". Il lavoro sperimentale sulle interazioni fra pioni e nucleoni riaccende l'interesse di Fermi per i computer, che cominciano a entrare in funzione proprio in questi anni. Fermi, con il suo spiccatissimo senso pratico e la sua intuizione, riconosce immediatamente le potenzialità dei computer per lo studio di problemi nell'ambito delle discipline fisiche, astrofisiche e della fisica classica.

Nicholas Metropolis, un fisico americano di origine greca, ricorda le sue prime discussioni con Fermi nella sala computer a Los Alamos, dove Fermi aveva passato l'estate del 1945: «Iniziammo a discutere le caratteristiche di alcuni calcolatori elettromeccanici utilizzati per i calcoli scientifici, ma ben presto egli tirò fuori dalla tasca un pezzo di carta sul quale "risultò" scritta una certa equazione, dopo di che mi chiese: "Come potremmo risolverla con la macchina?" Si riferiva alla formula semiempirica, da lui elaborata, delle masse atomiche. Dopo la domanda passò immediatamente all'azione [...]. Per ogni fase del lavoro egli ascoltava il minimo delle spiegazioni dopo di che risolveva il problema impostato in maniera totalmente autonoma». Si trattava dei computer IBM utilizzati all'epoca del progetto Manhattan per fare calcoli riguardanti i problemi di implosione per le bombe a fissione. Nel 1952 a Los Alamos era stato appena completato il MANIAC (acronimo per Mathematical Analyzer, Numerical Integrator and Computer) che per un certo periodo resterà uno dei più potenti calcolatori esistenti all'epoca. Fermi decide subito di utilizzarlo per eseguire l'analisi del gran numero di dati sperimentali raccolti dal suo gruppo per i quali aveva fatto un'analisi preliminare dai risultati dello *scattering* dei pioni negativi nell'idrogeno con un calcolatore da tavolo Marchant. L'analisi viene completata includendo i dati sperimentali sullo *scattering* dei pioni positivi ottenuti dai gruppi della Columbia e della Carnegie University. Il risultato di questi specifici calcoli, insieme a una generalizzazione di queste tecniche, è contenuto nel lavoro *Numerical Solution of a Minimum Problem* [Soluzione numerica di un problema di minimo], frutto della collaborazione tra Fermi e Nicholas Metropolis. Al suo ritorno a Chicago Fermi è un esperto di analisi computazionale e, pieno di entusiasmo per i calcolatori, tiene una serie di lezioni sull'uso e la programmazione dei computer. È in queste circostanze che si appassiona all'uso del metodo Monte Carlo che era stato inventato dai suoi colleghi e amici John von Neuman, Stanislaw Ulam e Nicholas Metropolis. Sviluppato per studiare la diffusione di neutroni in condizioni particolari, viene rapidamente esteso ad altre applicazioni, come progettazione di armi nucleari e calcoli statistici. Bisogna ricordare che nell'estate del 1952, a quanto racconta Metropolis, Fermi si interessa anche alla possibilità di fare elettronicamente sia l'analisi che le misure delle tracce in emulsioni nucleari; nonostante il problema venga da lui formulato in modo molto preliminare, sono già chiare in queste premesse le linee di sviluppo che saranno seguite più tardi da altri.



Enrico Fermi (1952)

1953 Fermi ha ormai raggiunto un enorme prestigio nella comunità dei fisici americani: all'inizio di quest'anno viene eletto presidente dell'American Physical Society. I suoi interessi nel campo dell'astrofisica sono accolti con grande favore dagli astrofisici e gli viene chiesto di tenere una importante conferenza per l'American Astronomical Society nella quale coglie l'occasione per riesaminare le sue precedenti idee sull'origine dei raggi cosmici alla luce dei successivi sviluppi delle conoscenze sull'intensità e il comportamento dei campi magnetici (*Galactic Magnetic Fields and the Origin of Cosmic Radiation* [Campi magnetici galattici e l'origine dei raggi cosmici]). È il primo "non astronomo" a meritare questo onore, di cui è particolarmente orgoglioso. Fermi fa un ultimo esperimento sullo *scattering* dei pioni; ha bisogno di più dati per l'analisi che vuole fare durante l'estate a Los Alamos e scrive l'ultimo articolo della sua vita di argomento sperimentale: *Scattering of Negative Pions by Hydrogen* [Diffusione di pioni negativi in idrogeno]. L'estate successiva scrive, insieme a Metropolis e a E. F. Alei, *Phase Shift Analysis of the Scattering of Negative Pions by Hydrogen* [Analisi in fase della diffusione di pioni negativi in idrogeno].

Questo metodo di analisi dei dati nel seguito diviene il metodo standard di elaborazione dei dati sperimentali per tutti i problemi di questo tipo. Libero dal lavoro sperimentale Enrico Fermi considera la possibilità di lavorare insieme a Chandrasekhar su problemi di interesse astrofisico, in qualche modo correlati ai suoi precedenti interessi sull'origine dei raggi cosmici. La collaborazione con Chandrasekhar nasce in parte dal carattere dell'Institute of Nuclear Studies che cerca di estendere il ventaglio degli argomenti di interesse a campi diversi dalla fisica delle alte energie e delle particelle elementari. Fermi si adopera per incoraggiare e sostenere questa tendenza. Nell'articolo *Magnetic Fields in Spiral Arms* [Campi magnetici nei bracci di spirale] Fermi e Chandrasekhar fanno una stima del campo magnetico nei bracci di una galassia a spirale. Nel corso degli anni 1952-1953 Fermi e Chandrasekhar discutono regolarmente di astrofisica; il tutto confluisce in uno studio esteso della stabilità gravitazionale in presenza di un campo magnetico (*Problems of Gravitational Stability in the Presence of a Magnetic Field* [Problemi di stabilità gravitazionale in presenza di un campo magnetico]). Quest'ultimo lavoro dimostra, in qualche modo, la disponibilità di Fermi a risolvere qualsiasi tipo di problema fisico. Secondo la testimonianza dello stesso Chandrasekhar, la maggior parte dei problemi considerati derivano da suggerimenti di Fermi. Gli anni del dopoguerra vedono una enorme crescita di interesse nei confronti della magnetoidrodinamica, un campo di ricerca in cui le difficoltà nascono principalmente dalla complicazione di visualizzare le opposte tendenze alle quali è soggetto un fluido conduttore in moto in presenza di un campo magnetico. È naturale che Fermi consideri una sfida la comprensione fisica di questo tipo di fenomeni che certamente deve averlo affascinato; d'altra parte era stato il primo a capire l'importanza dei campi magnetici per la struttura e l'evoluzione di una galassia.

Nell'estate del 1952, durante una delle sue frequenti visite a Los Alamos, Fermi discute con il matematico Stanislaw Ulam il tipo di problemi che nel futuro si sarebbero potuti studiare per mezzo dei computer sfruttandone le potenzialità in via di sviluppo. Insieme decidono di fare una selezione di problemi da risolvere euristicamente per mezzo del computer nel tentativo di capire le proprietà delle



Enrico Fermi e la sua moglie
Laura Capon

soluzioni di problemi che non ammettono una forma analitica chiusa. Questo approccio appare particolarmente opportuno per problemi che implicano il comportamento asintotico a lungo termine o "in grande" di sistemi fisici non lineari, per i quali non è possibile fare ricorso alle sole tecniche matematiche dell'analisi classica del XIX e XX secolo. Per di più questi esperimenti di simulazione sui computer hanno il vantaggio di una chiara identificazione delle condizioni, il che non si verifica sempre in un sistema fisico reale o in un modello dove tutte le condizioni presupposte non sono talvolta esplicitamente identificate. Lo stesso Ulam racconta in dettaglio l'intera storia della collaborazione. In questa occasione Fermi esprime spesso la convinzione che le future teorie fondamentali della fisica possano implicare operatori ed equazioni non lineari. Dopo aver a lungo dibattuto sui possibili problemi la cui soluzione avrebbe richiesto una computazione così lunga che non sarebbe stato possibile realizzarla con carta e matita o con le calcolatrici meccaniche in uso sino a quel momento, per cominciare individuano un problema tipico e di facile formulazione, relativo allo studio del comportamento a regime di un sistema dinamico e alla previsione a lungo termine sulla sua evoluzione. Il caso studiato è quello di una molla elastica, con le due estremità fisse, sottoposta a una forza elastica di tipo ideale - in cui lo sforzo è proporzionale alla tensione - ma a cui viene sommato un termine non lineare molto piccolo per tener conto delle correzioni fisiche. Il problema è quello di trovare in che modo questa perturbazione non lineare avrebbe progressivamente alterato, dopo un gran numero di periodi di oscillazione, il ben noto comportamento periodico unimodale di oscillazione in avanti e indietro. La speranza è anche quella che, come i due suppongono, l'intero moto possa, infine, assumere un comportamento termodinamico imitando, forse, quello dei fluidi che sono inizialmente laminari e diventano successivamente sempre più turbolenti per poi convertire il loro moto macroscopico in calore. Per studiare al calcolatore il moto di un mezzo continuo, come una molla, si assume che esso sia composto di un numero finito di particelle; in questo caso vengono scelte 64 particelle, connesse l'una all'altra mediante forze che, oltre a essere lineari rispetto alla loro distanza reciproca, contengono in aggiunta un piccolo termine quadratico non lineare. Per fare uno studio dell'evoluzione temporale, su tempi lunghi, di questo sistema dinamico unidimensionale si calcolano gli spostamenti di ciascuno di questi punti materiali dividendo l'intero moto in brevi intervalli di tempo. Ciascun intervallo corrisponde a un passo nella computazione, e si prosegue iterando molte volte l'esecuzione dei calcoli per ciascun passo corrispondente agli intervalli successivi. Per eseguire questo lavoro numerico con carta e matita occorrerebbero letteralmente migliaia di anni. John Pasta, un fisico arrivato da poco a Los Alamos, assiste Fermi e Ulam nel compito di elaborare un diagramma di flusso, di scrivere un programma e di farlo girare sul MANIAC. A quei tempi, non esistendo insieme di istruzioni, programmi già pronti e procedure automatizzate (cioè che oggi chiamiamo software): l'impresa era enormemente più difficile di quanto non sia adesso. In una sola estate Fermi impara molto rapidamente come programmare i problemi sul calcolatore e non soltanto è in grado di progettarne le linee generali e costruire il cosiddetto diagramma di flusso, ma sa perfettamente effettuare lui stesso la vera e propria codificazione in ogni dettaglio, imparando una serie di piccoli trucchi.

Nel lavoro *Studies of non Linear Problems* [Studio di problemi non lineari] firmato congiuntamente da E. Fermi, J. Pasta e S. Ulam ma pubblicato nel 1955, dopo la morte di Fermi, vengono presentati i risultati di questo primo tentativo. Il lavoro, progettato già nel 1952, viene eseguito al calcolatore l'estate successiva, nel 1953. Ecco cosa racconta Ulam: «La scelta del nostro problema risultò essere molto indovinata. I risultati furono totalmente diversi da quelli che persino Fermi, con la sua grande conoscenza dei moti ondulatori, si era aspettato. Considerata una molla, posta in uno stato di moto sinusoidale puro (la nota era emessa come un singolo tono), l'obiettivo iniziale era quello di stabilire a quale livello di energia si sarebbero potuti sviluppare toni più alti con le armoniche; si voleva verificare, inoltre, se il comportamento del sistema sarebbe stato caratterizzato alla fine dalla presenza di "picchi raggruppati", sia nella forma della molla, che nella distribuzione dell'energia fra le armoniche via via sempre più alte. Non accadde niente di tutto questo. Con nostra grande sorpresa la molla cominciò a suonare una melodia da musica da camera (soltanto fra poche note basse) e, cosa forse ancora più incredibile, dopo l'equivalente di parecchie centinaia di semplici vibrazioni su e giù, essa tornò nuovamente ad assumere l'esatta forma sinusoidale che aveva all'inizio». Tali risultati sembrano quindi non solo interessanti, ma addirittura sorprendenti, nel senso che costituiscono una piccola scoperta nel fornire avvertimenti che le concezioni prevalenti riguardo l'universalità del "mescolamento e termalizzazione" nei sistemi non lineari potrebbero non essere sempre giustificate. Nelle discussioni avvenute prima di programmare il problema e far girare il tutto sul calcolatore avevano deciso di studiarne come secondo passo una versione a due dimensioni e Enrico Fermi aveva suggerito di studiare qualcosa di puramente cinematico: «Immaginate una catena costituita da moltissimi anelli, rigidi, ma liberi di ruotare ciascuno attorno ad ogni altro. Varrebbe la pena di vedere quali forme potrebbe assumere la catena quando fosse lanciata su di un tavolo, studiando semplicemente gli effetti dell'energia iniziale e dei vincoli, in assenza di forze». Questi studi preliminari servivano a costruire modelli per il moto di sistemi dove si potessero verificare "mescolamento" e "turbolenza". Lo scopo era di misurare le velocità di mescolamento e "termalizzazione" (cioè la transizione da uno stato lontano dall'equilibrio a uno stato di equilibrio termico a una data temperatura) delle particelle del sistema, con la speranza che i risultati del calcolo potessero fornire delle indicazioni per una possibile teoria. Si può supporre che un motivo nella scelta dei problemi sia rintracciabile negli antichi interessi di Fermi riguardo alla teoria ergodica. In effetti il suo lavoro giovanile *Dimostrazione che in generale un sistema meccanico normale è quasi ergodico* costituisce un importante contributo a questa teoria. Queste ricerche sull'evoluzione dei sistemi non lineari rappresentano un lavoro pionieristico e costituiscono la prima realizzazione di un esperimento numerico sulla meccanica statistica, aprendo la strada alle ricerche sulla meccanica statistica dell'equilibrio e del non equilibrio. Per spiegare le ragioni di questo comportamento periodico e regolare, una serie di persone hanno cominciato a occuparsi di vibrazioni non lineari facendo interessanti analisi matematiche riguardanti problemi di natura analoga e trovando risultati del tutto peculiari, lavori che hanno continuato a svilupparsi fino ad oggi con le ricerche di dinamica molecolare e le teorie del caos e della complessità.

Non è la prima volta che Fermi e Ulam collaborano; nell'estate del 1950 avevano fatto uno studio del comportamento di una reazione termonucleare in una massa di deuterio. Il problema era di enorme complessità matematica e lo scopo era quello di ottenere, attraverso una schematizzazione, pur a livello discretamente elaborato, una descrizione dell'evoluzione di una serie di processi fisici coinvolti nella propagazione di questo tipo di reazione. Tutto questo lavoro era stato svolto con calcolatrici da tavolo e regoli, ma il successivo lavoro, lungo e molto impegnativo, organizzato ed effettuato al calcolatore sotto la guida di von Neumann, aveva confermato in larga parte, sia qualitativamente sia quantitativamente, il comportamento dei sistemi così come valutato e previsto nella relazione finale compilata da Fermi e Ulam, nella quale si combinavano valutazioni intuitive, equazioni schematizzate e calcoli fatti a mano.

1954 Nel corso di quest'anno la comunità scientifica americana è sconvolta da un grave processo: quello contro Julius Robert Oppenheimer ("Oppie"). Il 7 novembre 1953 il direttore esecutivo del Comitato congiunto del Congresso sull'Energia Atomica, William Liscum Borden, scriveva al direttore della FBI, J. Edgar Hoover, una lettera in cui asseriva che «con tutta probabilità» Oppenheimer non solo era stato, ma continuava a essere un «agente» dell'Unione Sovietica. Immediatamente il Presidente Eisenhower ordina di escludere Oppenheimer dall'accesso ai segreti atomici e alla Atomic Energy Commission di chiarire il caso. Il processo comincia il 13 aprile del 1954 e l'accusatore è un tal avvocato Roger Robb, particolarmente violento. L'accusa è di "comunismo" e rientra perfettamente nella "caccia alle streghe" attivamente perseguita dal senatore del Wisconsin Joseph McCarthy (che ha poi dato il nome al cosiddetto "maccartismo"). Purtroppo gli scienziati chiamati a testimoniare si dividono in accusatori (in verità una minoranza) e difensori (la maggioranza). Tra i principali testimoni di accusa Edward Teller, Louis Alvarez e David Lawrence (che non testimoniò perché gravemente malato). Il processo tocca molti fatti privati e si conclude con un verdetto di condanna che non sarà mai revocato, anche se molti anni dopo John Kennedy assegnerà, e Lyndon Johnson consegnerà, a Oppenheimer il Premio Fermi (1963); Oppenheimer, ormai molto malato, all'epoca è direttore dell'Institute for Advanced Studies di Princeton. Morirà il 18 febbraio 1967 dopo aver rifiutato la riapertura del processo. Anche Fermi testimonia, il 20 aprile 1954. Naturalmente difende la lealtà di Oppenheimer e la sua correttezza verso gli Stati Uniti; ma è particolarmente importante il suo commento sull'escalation nucleare: «La mia opinione all'epoca era che si dovesse mettere fuori legge la superbomba prima che fosse nata. Pensavo più o meno che sarebbe stato più facile mettere fuori legge, attraverso un qualche accordo internazionale, qualcosa che non esisteva». Fermi affronta di nuovo lo studio teorico delle collisioni pione-nucleone e nucleone-nucleone applicando i metodi statistici che aveva utilizzato in precedenza al caso della produzione multipla di pioni alle energie del cosmotrone di Brookhaven (fino a 2,5 BeV) (*Multiple Production of Pions in Pion-Nucleon Collisions; Multiple Production of Pions in Nucleon-Nucleon Collisions at Cosmotron Energies* [Produzione multipla di pioni in urti pione-nucleone; Produzione multipla di pioni in urti nucleone-nucleone all'energia

La scuola di Varenna



Enrico Fermi a Varenna. Lezioni sui mesoni (1954)



Enrico Fermi, Ginestra Amaldi, Edoardo Amaldi ed Enrico Persico (Pera di Fassa, agosto 1954)



Enrico Fermi all'isola d'Elba (1954)

del cosmotrone]). Nel frattempo, in febbraio, riceve la visita di Emilio Segrè che lo mette al corrente dei risultati di alcuni esperimenti recenti sulla polarizzazione dei protoni diffusi effettuati dal suo gruppo a Berkeley. In precedenza si era tentato di fare esperimenti simili a Chicago con risultati negativi, risultati di cui i due avevano già discusso nel novembre dell'anno precedente. I risultati ottenuti da Segrè suscitano l'interesse di Fermi che vuole subito controllare se l'accoppiamento *spin-orbita*, che riveste un ruolo fondamentale nel modello a shell, può anche rendere conto della polarizzazione nella diffusione ad alte energie.

Il calcolo riportato nell'articolo *Polarization of High Energy Protons Scattered by Nuclei* [Polarizzazione di protoni di alta energia diffusi da nuclei] viene effettuato da Fermi sulla sua lavagna dalle dieci della mattina fino a circa mezzogiorno. All'inizio fa una falsa partenza usando l'approssimazione di Born, fornisce un risultato nullo, ma si corregge subito e procede rapidamente mentre Segrè prende appunti che poi utilizza anche per scrivere l'articolo, che sarà completato in pochissimi giorni. Fermi ama molto la semplicità del metodo e dei risultati e ne parla poco dopo a Varenna (*Lectures on Pions and Nucleons* [Lezioni su pioni e nucleoni]). Questa è l'ultima volta in cui Segrè vede Fermi all'opera nel risolvere un problema nel suo tipico stile, a lui così familiare fin dai tempi di Roma. Durante l'estate Fermi torna in Italia per la seconda volta dalla fine della guerra. A Villa Monastero, a Varenna sul lago di Como, tiene un memorabile corso di lezioni sulla fisica dei pioni e dei nucleoni. Come ricorda Bernard Feld: «Qui c'era Fermi al massimo delle sue capacità, che metteva ordine e semplicità nella confusione, che scopriva connessioni tra fenomeni apparentemente non collegati; acume e saggezza fluivano dalle sue labbra, come al solito bianche di gesso, con la sua voce chiara e sonora».

Durante il soggiorno in Italia la sua salute peggiora seriamente. Tornato negli Stati Uniti gli viene diagnosticato un cancro allo stomaco. Muore a Chicago il 28 novembre all'età di 53 anni. Negli ultimi giorni si dedica alla revisione delle note di un corso di lezioni di fisica nucleare; il volume incompiuto sarà pubblicato postumo con il titolo *Nuclear Physics* [Fisica nucleare] a cura di tre suoi allievi.

Coordinamento redazionale e editoriale
Diana Savelli

Redazione
Mauro Ciamarra
Giuliano Ghisu
Giovanna Volta

Consulenza grafica
Eliseu De Castro Leão

Stampato in Italia
© Copyright 2001
by ENEA
Roma
Tutti i diritti riservati

Edito dall'ENEA
Unità Comunicazione e Informazione
Servizio Edizioni e Documentazione
Lungotevere Thaon di Revel 76
00196 Roma
www.enea.it

Stampa: Grafiche Ponticelli SpA

Finito di stampare nel mese di dicembre 2001

