

Nascita dell'energia nucleare: La pila di Fermi

CARLO SALVETTI

1. – Il “Puzzle” dell'uranio e la scoperta della “fissione”

Nei giorni immediatamente precedenti il Natale 1938, due chimici tedeschi Hahn e Strassmann, dell'Istituto di Chimica della Kaiser Wilhelm Gesellschaft (nel seguito KWI) di Berlino-Dalhem scoprono, con immenso stupore ma senza ombra di dubbio, che l'uranio (numero atomico $Z = 92$) colpito da neutroni termici di una sorgente radio-berillio dà luogo alla produzione di atomi di bario ($Z = 56$). Fenomeno per loro inspiegabile dato che nelle precedenti quasi decennali ricerche di irraggiamento con neutroni le reazioni (n, γ), e conseguente successiva emissione β , davano luogo ad elementi contigui con numero atomico $Z + 1$, ma mai con numeri atomici così lontani, nella scala di Mendelejev, come Ba e U con Z distanti di ben 36 posti.

I risultati ottenuti dai due chimici tedeschi con raffinate tecniche di precipitazione e cristallizzazione frazionate erano tuttavia incontrovertibili: un ulteriore controllo provò che nella stessa soluzione di sali di U erano presenti anche atomi di lantanio ($Z = 57$) prodotti dal decadimento β del Ba.

La scoperta di Hahn e Strassmann apriva un nuovo capitolo della straordinaria vicenda scientifica dell'irraggiamento dell'U iniziata con la pubblicazione su “Nature” del giugno 1934 del famoso articolo di Fermi e del suo gruppo romano “Possible Production of Elements of Atomic Number Higher than 92” ⁽¹⁾ nel quale, sia pure con molte cautele,

⁽¹⁾ Articolo riprodotto con n. 99 nell'opera (2 voll.): “Enrico Fermi — Note e Memorie” a cura dell'Accademia dei Lincei e della University of Chicago Press, 1962. Seguendo una notazione introdotta da Segrè nella sua biografia di Fermi si citeranno nel seguito tali Memorie con la notazione FNM seguita dal numero d'ordine.

si suggeriva l'ipotesi della creazione di elementi transuranici: vero e proprio puzzle scientifico nel quale si erano cimentati per quasi cinque anni i maggiori fisici e radiochimici europei ⁽²⁾.

Otto Hahn (futuro Premio Nobel proprio per questa scoperta) non poteva purtroppo più contare in quei giorni sul consiglio della sua stretta collaboratrice ed amica Lise Meitner, una fisica austriaca che lavorava con lui fin dal 1935, ma che essendo ebrea aveva dovuto lasciare il KWI sin dal luglio 1938, rifugiandosi a Stoccolma dove aveva ripreso la sua attività di ricerca.

Hahn, che non voleva rinunciare al suo giudizio, decise di scriverle una lettera chiedendone i lumi ("Forse tu puoi suggerire qualche fantastica spiegazione") e inviandole successivamente la copia carbone del dattiloscritto dell'articolo da lui inviato il 22 dicembre alla rivista tedesca "Naturwissenschaften" e che comparirà nel fascicolo del 6 gennaio 1939.

L'attesa risposta sarebbe arrivata con qualche giorno di ritardo dovuto al fatto che proprio in quei giorni la Meitner si trovava in vacanza in una stazione sciistica della Svezia Meridionale in compagnia del nipote Otto Frisch, fisico anch'egli, esule da Vienna nell'Istituto di Niels Bohr a Copenhagen.

La vacanza di sci doveva rivelarsi poi oltremodo fortunata e fruttuosa. Zia e nipote colpiti dalla stranezza dei risultati berlinesi si misero immediatamente e animatamente a discutere giungendo alla conclusione che si trattava della scissione del nucleo di U in due frammenti di massa intermedia, uno dei quali era il bario. Il fenomeno secondo loro era del tutto compatibile con il modello a goccia di Bohr del nucleo atomico. L'energia di legame del neutrone catturato avrebbe fornito al nucleo composto $U + n$ l'energia necessaria per innescare una serie di oscillazioni tanto violente da produrre un allungamento della "goccia" tale da farle assumere una configurazione instabile a forma di "manubrio" da ginnastica (fig. 1): le due quasi sfere alle estremità si sarebbero allontanate per repulsione elettrostatica sotto forma di frammenti con la conseguente liberazione di una notevole quantità di energia. Questa sarebbe stata fornita a spese della differenza di masse ΔM fra il nucleo di U e la somma delle masse dei due frammenti: in base al diagramma di Aston, ΔM doveva essere positivo. Con il semplice uso della famosa equazione di Einstein $E = \Delta M \cdot c^2$. Zia e nipote stimarono che l'energia liberata dalla scissione dell'U sarebbe stata dell'ordine di circa 200 MeV valore molto elevato dato che il difetto di massa ΔM era pari a circa 1/5 della massa di un nucleone. Frisch e Meitner potevano così spiegare i risultati dei chimici del KWI di Berlino, anticipando in tal modo i risultati a cui sarebbero giunti molti mesi più tardi, con metodi teorici molto più raffinati, Bohr e Wheeler in un famoso articolo pubblicato su "Physical Review" l'1 settembre 1939 ⁽³⁾.

⁽²⁾ In particolare i lavori di Ida Noddack, una chimica tedesca nota per avere scoperto con il marito nel 1925 il nuovo elemento renio e il gruppo francese di Irène Curie e Frédéric Joliot (entrambi Premi Nobel) in collaborazione con lo jugoslavo Pavel Savitch: per ulteriori ragguagli si veda il capito di U. Amaldi del presente volume.

⁽³⁾ Giorno dello scoppio della seconda guerra mondiale, come mi fece personalmente rilevare lo stesso Wheeler molti anni dopo in occasione delle celebrazioni 1989 della National Academy of Sciences USA del 50° anniversario della scoperta della fissione. Incidentalmente voglio ricor-

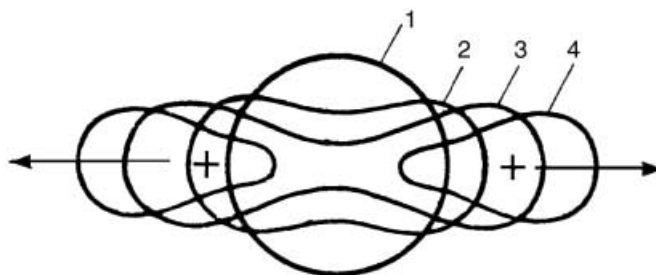


Figura 1. – Il meccanismo della fissione secondo il modello a goccia di Bohr. (Da Enrico Fermi, Conferenza di Fisica Atomica, Fondazione Donegani, Acc. Naz. dei Lincei, Roma 1950.)

Terminata la vacanza e comunicata la loro interpretazione a Hahn essi concordarono di pubblicarla sulla rivista inglese “Nature” non prima però di aver sentito il parere di Niels Bohr, il grande “Santone” della fisica: cosa che Frisch, rientrato a Copenhagen si affrettò a fare, il 3 gennaio, comunicandolo alla zia Lise e mettendosi subito a scrivere un articolo a doppia firma per “Nature”. Senonchè, per una comunicazione di tale importanza, il tempo a disposizione era pochissimo perché Bohr sarebbe partito il giorno 7 gennaio per gli Stati Uniti per partecipare a un convegno di fisica teorica a Washington. Vedremo poi come questo viaggio fosse destinato ad avere curiose ed imprevedibili conseguenze. Fu così che in tutta fretta Frisch gli portò in visione la sera del 6, vigilia della partenza di Bohr, una prima bozza che poi battè nella notte frettolosamente a macchina in tempo per potergliela consegnare il 7 mattina alla partenza del treno per Göteborg, destinazione per l'imbarco. In questo breve incontro Frisch informò Bohr anche di volere immediatamente effettuare una conferma sperimentale della fissione con “metodi fisici” dato che quelli puramente “chimici” come quelli usati dai due tedeschi, erano tradizionalmente non sempre credibili agli occhi dei fisici.

Al momento della partenza, Bohr, senza esserne richiesto, gli promise di non fare alcuna menzione ai colleghi americani dell'articolo di “Nature” a doppia firma, fino alla conferma dell'avvenuta pubblicazione: vedremo poi come questa promessa fosse destinata a restare lettera morta.

Nel frattempo, il giorno precedente, era apparso il famoso articolo di Hahn e Strassmann su “Naturwissenschaften”. Partito Bohr, Frisch iniziò immediatamente il suo esperimento consistente nel rivelare i frammenti di scissione sfruttando l'intensa ionizzazione prodotta in una camera di ionizzazione ad aria collegata tramite un amplificatore lineare ad un oscilloscopio.

Come vedremo questa apparecchiatura doveva costituire un modello standard per successivi esperimenti di altri ricercatori, specie americani. L'apparecchiatura era pronta

dare che fu questa l'ultima partecipazione ad un convegno scientifico USA di Edoardo Amaldi, scomparso nel dicembre successivo (c.s.).

la sera del 13 gennaio e a Frisch, come previsto, appena iniziato l'irradiamento con neutroni termici di una foglia di U apparvero sullo schermo catodico impulsi verticali, provocati dai frammenti di scissione, che per altezza sovrastavano quelli numerosissimi del "fondo" prodotti dalle particelle \mathcal{R} dell'U.

Lavorando tutta la notte, il mattino del 14 Frisch era certo di avere raggiunto la conferma "fisica" della scoperta dei due chimici tedeschi, subito comunicata telefonicamente alla zia a Stoccolma.

Frisch e la Meitner decisero a questo punto di inviare a "Nature" non uno ma ben due articoli. Il primo a doppia firma con il titolo "Disintegrazione dell'uranio con neutroni: un nuovo tipo di reazione nucleare" e l'altro a firma di Frisch dal titolo "Evidenza fisica della divisione dei nuclei pesanti sotto bombardamento neutronico".

Gli articoli, spediti da Frisch alla rivista il 6 gennaio, apparvero rispettivamente sui numeri di "Nature" dell'11 e 16 febbraio: in essi per la prima volta viene usato il termine fissione che poi rimarrà per sempre al posto del tedesco "spaltung" e dell'inglese "splitting" ⁽⁴⁾.

2. – Bohr e Fermi in USA: gli strani fatti del gennaio 1939

Enrico Fermi con l'intera famiglia (la moglie Laura e i figli Nella e Giulio) lasciò definitivamente Roma il 6 dicembre 1938, diretto a Stoccolma per ricevere il 10 dicembre il Premio Nobel dalle mani di Re Gustavo V. Dopo la cerimonia e una breve sosta di un paio di giorni a Copenhagen, ospiti dei Bohr, il 24 dicembre i Fermi si imbarcarono a Southampton sul "Franconia" diretti a New York, dove allo sbarco, il 2 gennaio, trovarono ad attenderli George Pegram, direttore del dipartimento di Fisica della Columbia University e Gabriello Giannini, un italiano residente a New York fin dal 1929, che si era occupato del deposito in USA del brevetto di Fermi e collaboratori sui neutroni lenti. Sulla traversata atlantica di Bohr conviene invece spendere qualche parola in più. Bohr si era imbarcato a Göteborg sul "Drottningholm" col figlio diciannovenne Erik e col giovane teorico belga Leon Rosenfeld diretto anch'egli alla conferenza di Washington: non appena a bordo Bohr non si trattenne dal raccontare subito a Rosenfeld le notizie sulla fissione e l'interpretazione che ne avevano dato la Meitner e Frisch, fatto questo di cui avrebbe dovuto poi pentirsi per le ragioni che vedremo.

La discussione tra Bohr e Rosenfeld sull'interpretazione teorica della fissione continuò per tutta la traversata in modo intenso ed esclusivo come era costume di Bohr (egli si era fatto addirittura installare una lavagna nel salotto della cabina) nonostante il mare molto agitato e i conseguenti problemi.

All'arrivo a New York, all'una del pomeriggio del giorno 16 gennaio, essi trovarono ad attenderli Enrico e Laura Fermi e John Archibald Wheeler, giovane teorico di Princeton,

⁽⁴⁾ Secondo la Meitner il termine fissione sarebbe stato suggerito a Frisch da un giovane biologo americano, William A. Arnold, suo coetaneo, a Copenhagen come vincitore di una borsa della Fondazione Rockefeller. Richiesto da Frisch come i biologi chiamassero la suddivisione in due parti della cellula avrebbe risposto "fissione binaria". Restò quindi solo il termine fissione.

che aveva lavorato con Bohr. Dopo lo sbarco padre e figlio Bohr, insieme con i Fermi, se ne andarono in città per i fatti loro, mentre Wheeler rientrò a Princeton in compagnia di Rosenfeld. Bohr, memore della promessa a Frisch, si guardò bene dal menzionare sia a Fermi che a Wheeler la scoperta di Hahn e Strassmann e conseguente interpretazione. Senonchè egli si era dimenticato di farne menzione a Rosenfeld: sicchè questi, data la novità e l'importanza dei fatti, ne parlò a Wheeler appena saliti sul treno che li portava a Princeton. Si dà che quella stessa sera (lunedì 16 gennaio) era prevista a Princeton una riunione del cosiddetto Journal Club (una sorta di seminario settimanale informale e informativo sulle novità della Fisica), di cui Wheeler era responsabile. Così egli decise di dare subito la parola a Rosenfeld sull'argomento: quale migliore occasione ci poteva essere per metterne al corrente i colleghi? "L'effetto delle mie parole sui fisici americani fu spettacolare" ricorderà in seguito Rosenfeld. Non meno spettacolari furono la sorpresa e il disappunto di Bohr quando il giorno dopo, arrivando a sua volta a Princeton, apprese i fatti: contro la promessa di non divulgare la notizia prima della pubblicazione dei lavori di Meitner e Frisch egli si trovava così ad essere involontariamente l'araldo della fissione in USA! Cercò di rimediare buttando giù in tutta fretta (in 3 giorni, si fa per dire...) ⁽⁵⁾ una breve nota per "Nature" (700 parole in tutto) sulle conclusioni raggiunte durante la traversata con Rosenfeld: ma lo scopo ultimo del breve articolo era quello di mettere in rilievo la priorità dell'interpretazione di Frisch e Meitner, prima che le notizie provenienti da Princeton si diffondessero.

Fermi alla Columbia rimase all'oscuro della notizia della fissione finchè a fine settimana rientrarono da Princeton due fisici della Columbia: I. I. Rabi e W. E. Lamb jr., anch'essi futuri Premi Nobel: da uno di essi (o da entrambi) ⁽⁶⁾ nel giro di poche ore Fermi apprese la notizia della fissione (chiamata ancora splitting) dell'U. È curioso che proprio Fermi, che tanto aveva lavorato (e sofferto) sul problema dell'U sia stato l'ultimo, fra i fisici europei emigrati negli USA, a sapere della fissione. Comunque, anche a detta della moglie Laura, ne fu molto scosso: "non c'era venuto in mente" le disse, pensando forse anche al discorso Nobel che aveva tenuto a Stoccolma, poco più di un mese prima ⁽⁷⁾.

Sta di fatto che da quel momento la questione della fissione dell'uranio diventa l'idea fissa di Fermi e il filo conduttore dei primi anni della sua attività americana. Ci è parso pertanto opportuno, per le conseguenze che ne derivarono, descrivere con un certo dettaglio, come già si è fatto per la fissione, le vicende che caratterizzarono le ricerche di Fermi nella prima metà del 1939.

⁽⁵⁾ La lentezza di Bohr nel parlare e nello scrivere era proverbiale tra i fisici.

⁽⁶⁾ Non è chiaro da chi... esistono diverse versioni.

⁽⁷⁾ Va sottolineato che Fermi aveva ricevuto il Premio per i suoi lavori di radioattività artificiale e per i neutroni lenti e *non* per i transuranici. Questi (chiamati ausonio e esperio) sono solo brevemente citati nel discorso Nobel di Fermi, pronunciato prima della scoperta di Hahn e Strassmann. Alla indispensabile correzione del testo del discorso, Fermi provvide successivamente con una stringata nota a piè di pagina (vedi biografia di Segrè, pag. 101).

3. – Molta fisica e grande eccitazione alla Columbia

A meno di un mese dal suo sbarco a New York, gli ultimi giorni del gennaio 1939 sarebbero stati per lui molto intensi. Ancora ignaro dell'esperimento di Frisch, il 25 gennaio, alla vigilia della conferenza di fisica teorica di Washington, Fermi progetta con John R. Dunning, responsabile della fisica nucleare ai Pupin Laboratories della Columbia e con il di lui giovane laureando Herbert Anderson, che lo seguirà nelle ricerche neutroniche fino alla pila di Chicago, una conferma "fisica" della fissione.

Le apparecchiature standard tipo Frisch (camera di ionizzazione e amplificatore lineare) erano già disponibili perché costruite da Anderson per la sua tesi. Il gruppo dovette però rinunciare ad usare, come originariamente previsto, il ciclotrone della Columbia e ripiegare su una sorgente neutronica assai meno intensa, quella tradizionale Ra + Be.

Partito Fermi per Washington, Anderson si mette immediatamente al lavoro e la stessa sera, alle nove, vede anch'egli sull'oscilloscopio i "picchi" di Frisch: eccitatissimo li mostra a Dunning che, sembra, ne abbia subito informato Fermi a Washington. La conferenza di Washington (26-28 gennaio) sostenuta congiuntamente dalla George Washington University (GWU) e dalla Carnegie Institution (presieduta da Vannever Bush, di cui dovremo più tardi occuparci) organizzata annualmente da George Gamow (ma di fatto da Edward Teller) era alla sua quinta edizione e avrebbe dovuto svolgersi sul tema della fisica delle basse temperature. Se non che, Gamow, pochi minuti prima della seduta inaugurale apprende da Bohr le novità europee sulla fissione e decide lì per lì di far tenere a lui la prima relazione. Sebbene Bohr, come noto, non fosse un grande oratore pare che il suo intervento abbia letteralmente galvanizzato l'uditorio: non è difficile immaginarlo. A Bohr fa seguito Fermi che, con la sua straordinaria chiarezza, illustra il significato della fissione e riferisce dell'esperimento della Columbia.

Nel frattempo due fisici nucleari della Carnegie, Roberts e Hafstad, eccitatissimi per quanto avevano sentito, schizzano letteralmente fuori dalla sala e corrono al loro laboratorio per effettuare un esperimento tipo Frisch, utilizzando l'acceleratore Van de Graaf dell'Atomic Physics Observatory (APO) della Carnegie. Senonché il solito diavoleto degli acceleratori, ancora una volta, ci aveva messo la coda: il filamento della sorgente era bruciato e il tubo a vuoto dell'acceleratore perdeva. Tutto ciò provocò un inevitabile ritardo sicché i fisici della Carnegie (Hafstad andato a sciare nel week-end era stato sostituito da Meyer) poterono, non senza una punta di orgoglio, mostrare i "picchi" di fissione ai vari partecipanti, solo sabato 28 sera dopo la tradizionale cena di chiusura della conferenza.

È facile intravedere anche dalle poche righe di una lettera alla moglie Margrethe cosa passasse quella sera per la testa a Bohr, non ancora informato della pubblicazione dei risultati di Frisch.

Si trattava comunque della terza conferma fisica della fissione. Ma non c'è tre senza quattro: a Washington nessuno sapeva che a Parigi, il 26 gennaio, Joliot, che nel frattempo aveva letto l'articolo di *Naturwissenschaften* del 6 gennaio, aveva osservato anch'egli con lo stesso metodo di Frisch, i frammenti di fissione.

La conferenza di Washington con l'eclatante notizia della fissione non poteva passare

inosservata alla stampa e così sabato 28 gennaio compaiono articoli sull' Evening Star di Washington, sul New York Times e un flash d'agenzia dell'Associated Press. Quello stesso giorno il gruppo dei fisici californiani di Berkeley, (Alvarez, Abelson, Oppenheimer) apprendono con comprensibile eccitazione la notizia dal San Francisco Chronicle: Alvarez chiede immediatamente raggiugli a Gamow che lo informa dell'esperienza dell'APO e inizia una intensa discussione con Oppenheimer che ne intravede le conseguenze e prospetta inquietanti panorami. Fra vari fisici nucleari nel frattempo maturava il convincimento che i frammenti di fissione non fossero gli unici prodotti dal bombardamento neutronico dell'U perché a causa dell'eccessivo numero di neutroni rispetto ai nuclei stabili con lo stesso Z , i neutroni in eccesso dovrebbero essere emessi sia istantaneamente sia in ritardo. Se i neutroni fossero stati in numero maggiore di uno sarebbe stato possibile in una opportuna struttura e con una quantità sufficiente di U, una reazione a catena con produzione di energia e, forse anche, in certe condizioni addirittura in forma esplosiva⁽⁸⁾.

Sta di fatto che terminata la conferenza di Washington Fermi rientra la mattina stessa di domenica 29 a New York, fa venire immediatamente Anderson alla Columbia e gli propone un esperimento inteso a dimostrare la presenza di neutroni secondari prodotti dalla fissione. Esperimento concettualmente semplicissimo. Il dispositivo consisteva in un grosso contenitore ripieno d'acqua (ricordo della fontana di pesci rossi di via Panisperna?) avente in posizione centrale un grosso bulbo sospeso con una sorgente neutronica $Rn + Be$. L'intercapedine tra la sorgente e la parete del bulbo poteva contenere dell'ossido di U. L'esperimento consisteva nel misurare l'eventuale incremento di attività indotta dai neutroni termici in un rivelatore neutronico (una sottile lamina di rodio, ricordo anch'esso degli esperimenti romani) posto nel recipiente a diverse distanze dal bulbo-sorgente.

Un aumento dell'attività del Rh con il bulbo riempito di ossido di U, sarebbe stata la prova dei neutroni secondari, come di fatto si verificò.

Mentre l'esperienza di Fermi era stata assemblata in uno scantinato del Pupin, curiosamente sette piani più sopra nello stesso edificio, due altri fisici Zinn e Szilard si accingevano a montare un esperimento, con tecniche differenti, ma con lo scopo anch'esso di rivelare i neutroni secondari. Walter Zinn, un fisico canadese associato di ricerca e Leo Szilard, fisico di origine ungherese, entrambi destinati ad occupare un posto di grande rilievo nel successivo sviluppo nucleare in USA.

Leo Szilard, caratteristico prodotto della Mitteleuropa, personaggio singolare, geniale, scontroso, disordinato nella vita scientifica e privata, brillante, pieno di immaginazione, insofferente alla routine della vita accademica, era un tipico free-lance. A New York era arrivato dopo una lunga peregrinazione da Budapest a Berlino (dove aveva ottenuto brillanti risultati nel campo della termodinamica) e, dopo l'ascesa al potere di Hitler,

⁽⁸⁾ Come Fermi affermò una decina di anni più tardi nel corso di una conferenza a Milano: "fu allora che mi accorsi che un fenomeno di questo tipo avrebbe potuto fare uscire la fisica nucleare dal ristretto campo della ricerca pura trasformandola in quella delle *cose grosse*". (Conferenze Donegani, Ed. Acc. dei Lincei, 1950, pag. 97).

in Inghilterra dove conseguì importanti risultati nel campo della radioattività artificiale: celebre rimane il metodo di rivelazione di radionuclidi di Szilard e Chalmers. Sempre in Inghilterra aveva depositato diversi brevetti; fra questi, singolare quello richiesto e depositato segretamente presso l'Ammiragliato Britannico sulle reazioni nucleari del tipo $(n, 2n)$ che secondo la sua fantasiosa intuizione avrebbero permesso di realizzare reazioni a catena per esplosivi nucleari.

A New York Szilard alloggiava in un piccolo albergo, il Crown Hotel (dove aveva soggiornato al suo arrivo anche la famiglia Fermi), situato nei pressi della Columbia University che egli aveva preso a frequentare saltuariamente facendo così conoscenza dei fisici del Pupin, Fermi compreso, che presto ne apprezzarono le osservazioni e le brillanti intuizioni.

Mentre Zinn stava bombardando l'U con neutroni da 2,5 MeV prodotti da un piccolo acceleratore alla ricerca di neutroni secondari, Szilard suggerì di impiegare neutroni termici. Mancavano tuttavia per la sorgente di neutroni due ingredienti essenziali: il radio e il berillio; a quest'ultimo provvide direttamente Szilard con un cilindretto cavo di Be metallico di sua proprietà che si era appena fatto arrivare (18 febbraio) dall'Inghilterra. Quanto al radio la faccenda era più complicata perché esso era di fatto disponibile sul mercato, ma la filiale di New York dell'Union Minière belga chiedeva la somma di 125 dollari al mese per il noleggio. Szilard non si perse d'animo e pensò di ricorrere al finanziamento di un amico benestante, Lewis Strauss (che nel dopo guerra sarebbe diventato Presidente della Commissione Atomica Americana) il quale già in passato aveva finanziato alcune invenzioni di Szilard, tra cui un acceleratore pulsato: Strauss però, stanco delle continue richieste di denaro dell'amico, rifiutò il sussidio.

Szilard non si perse d'animo e con la sua consueta abilità nel cercare fondi, li ottenne da un certo Benjamin Liebowitz che, senza fiatare, gli staccò un assegno di 2000 dollari. Tuttavia i negoziati con gli uffici dell'Union Minières andavano per le lunghe anche perché Szilard non possedeva alcuna posizione ufficiale. Fu così che premette sulla Columbia ed ottenne una affiliazione sotto forma di ricercatore associato con un contratto a tempo per tre mesi. Ai primi di marzo ebbe finalmente la sospirata sorgente sotto forma di 2 g di radio e gli esperimenti con Zinn poterono così iniziare. L'attesa era resa ancor più spasmodica dalla notizia trasmessagli da un altro collega ungherese, Edward Teller fisico della GWU: e cioè che due fisici dell'APO, Roberts e Meyer, stavano per pubblicare sul "Physical Review" la rivelazione di neutroni ritardati conseguenti alla fissione.

Nel frattempo nel febbraio del '39 Bohr a Princeton, dopo una serie di discussioni con Placzek e Rosenfeld, con sottili argomenti teorici, arriva alla conclusione che soltanto l'isotopo raro U-235, presente nell'U naturale nella proporzione 1/139, subisce la fissione con neutroni termici, mentre l'isotopo abbondante U-238, come del resto il Th-232, si può fissionare solo con neutroni veloci.

Egli spiega anche la natura del cosiddetto assorbimento di risonanza dell'U-238 dei neutroni in fase di rallentamento dall'emissione come veloci fino alle energie termiche (i cosiddetti neutroni epitermici).

Intanto alla Columbia i due team Fermi-Anderson e Szilard-Zinn provano l'esistenza di almeno 2 neutroni secondari per fissione. Ma a Parigi, al glorioso Istituto del Radio,

Federico Joliot, in collaborazione con l'austriaco Von Alban e il russo Kowarsky, utilizzando una poltiglia di ossidi di U e acqua, precede i gruppi della Columbia pubblicando su i "Comptes Rendus", il 3 marzo, risultati coerenti con quelli dei fisici della Columbia ("più di un neutrone" per ogni neutrone assorbito).

Questi importanti risultati rinfocolavano in Szilard la sua vecchia idea sulle reazioni ($n, 2n$): che si sarebbe dovuto quindi mantenere il segreto sulle ricerche sull'U per paura di allertare i tedeschi. In questo senso egli si era già attivato proponendo che il segreto dovesse essere rigorosamente osservato anche fuori dagli Stati Uniti; celebre rimase un suo appassionato appello alla segretezza a Joliot (⁹).

La questione della segretezza si proponeva urgentemente anche perché nel frattempo erano pronti per la pubblicazione su "Physical Review" due distinti articoli dei gruppi della Columbia.

Fu così che il Preside della Facoltà di Fisica della Columbia, George Pegram, convocò una riunione il 16 marzo mattina con Fermi e Szilard: ad essa su insistenza di quest'ultimo, partecipò anche Eugene P. Wigner, esule ungherese, professore di fisica teorica all'Advanced Studies di Princeton. Sulla segretezza i quattro fisici discussero a lungo, con Fermi fortemente contrario: alla fine decisero di parlarne con Bohr, che per ragioni di tradizione ed etica scientifica sapevano essere fortemente contrario. Nel frattempo si convenne allo scopo di "prendere data" di inviare i due articoli alla "Physical Review" chiedendo all'editore di ritardarne la pubblicazione (¹⁰).

Oltre al problema della segretezza i quattro fisici si interrogarono sul futuro delle ricerche: Wigner in particolare espresse con molta determinazione la sua insofferenza alle varie incognite ed incertezze che gravavano sul futuro del loro lavoro chiedendo con molta fermezza che della loro attività, e non solo del problema della segretezza, venissero informate e investite le Autorità Governative, al fine anche di ottenerne un coinvolgimento ed un aiuto finanziario. Ma a chi rivolgersi? Pegram, che aveva conoscenze al Ministero della Marina, propose questo canale e poiché Fermi sarebbe stato a Washington la sera stessa per un seminario scientifico, venne deciso che egli avrebbe fatto da tramite con la Marina nella capitale. Pegram senza altri indugi scrisse una breve lettera all'ammiraglio Hooper, assistente tecnico del capo delle operazioni navali, in cui, oltre ad una lusinghiera presentazione di Fermi (professore alla Columbia, Premio Nobel etc.), si prospettava in termini molto prudenti la possibilità di utilizzare l'U come esplosivo estremamente potente. Fu questo il primo, e per qualche tempo, l'unico contatto dei Fisici con l'amministrazione americana. Purtroppo la missione di Fermi non doveva conseguire i risultati sperati, sia per l'assenza dell'ammiraglio alla conferenza che Fermi tenne il 18 mattina al Ministero

(⁹) Secondo Bertrand Goldschmidt mai avevano ricevuto all'Istituto del Radio di Parigi un telegramma di siffatta lunghezza.

(¹⁰) Tale ritardo doveva durare ben poco: sul numero di Nature del 18 marzo usciva infatti un articolo sui neutroni secondari del gruppo di Joliot che superava così di fatto tutti gli argomenti di Szilard. Da notare che sulla stessa rivista Nature apparve il 22 aprile un secondo articolo dei tre francesi in cui si quantificava in 3,5 il numero di neutroni rilasciati per ogni neutrone assorbito.

della Marina, sia forse per l'eccessiva cautela usata da Fermi sulle effettive possibilità di successo del progetto. L'esperienza di Fermi non fu tuttavia del tutto inutile perché grazie all'entusiasmo di un giovane fisico dell'Ufficio Ricerche Navali della Marina, presente alla conferenza, il Ministero stanziò la somma di 1500 dollari per le ricerche della Columbia: non era certo un gran che, ma le ricerche dei vari gruppi potevano proseguire per il momento senza gravare solo sulle modeste dotazioni universitarie.

4. – Il cerchio si allarga...

Nel frattempo su tutta l'intera faccenda dell'U si andavano manifestando due diverse e contrapposte linee di pensiero: Bohr, coerente con le sue recenti deduzioni sul "235", sosteneva che una reazione a catena, anche di tipo esplosivo, sarebbe stata possibile solo con la separazione di notevoli quantità dell'isotopo raro dell'U. Egli era però molto scettico sulla possibilità di realizzare la bomba, per le immense difficoltà connesse alla separazione isotopica dell' U-235 dovute alla sua rarità e alla piccolissima differenza percentuale di massa con l'U-238. Fermi invece era ostinatamente convinto che una reazione a catena si sarebbe potuta ottenere con U naturale, un moderatore (grafite) di sufficiente purezza e con neutroni termici.

Va detto incidentalmente che anche Dunning era dell'idea di Bohr, ossia dell'uso del U-235 e stava sollecitando alcuni specialisti di separazione isotopica tra i quali Alfred O.C. Nier, fisico dell'università di Minneapolis⁽¹¹⁾, a cimentarsi su questo problema. Il conflitto fra questi due indirizzi venne inaspettatamente pubblicamente alla luce il 29 aprile nel corso della annuale conferenza primaverile dell'American Physical Society, tant'è che il corrispondente scientifico del New York Times ne fece oggetto di un esteso servizio da Washington. Il problema della scelta strategica fra i due indirizzi era stato dunque posto ed era destinato a influire e condizionare pesantemente le future scelte rendendo più difficile il lavoro di Fermi. Non è che questi non vedesse i vantaggi del possibile impiego del "235", tant'è che sembra che egli pure abbia sollecitato Nier, ma si rendeva conto non solo delle difficoltà tecniche connesse con l'arricchimento dell'U, ma dell'enorme sproporzione tra gli ingenti mezzi richiesti e le scarsissime risorse allora disponibili. Comunque sia, Fermi ritorna alla Columbia pieno di fiducia sulla via dell'U naturale. A detta di Anderson, Fermi gli avrebbe detto: "fermati a lavorare con me, vedrai: noi saremo i primi a realizzare una reazione a catena". Parole poco credibili in bocca a un uomo controllato come Fermi, non fosse per l'autorevolezza della fonte.

Intanto nel mese di aprile, Szilard attivissimo e bravissimo in questo tipo di attività, era riuscito a procurarsi, da una ditta canadese (la Eldorado Radium Corporation) più di 200 kg di ossido di uranio. Fu così possibile in giugno progettare con Fermi e Anderson una nuova esperienza sui neutroni secondari in scala più significativa. Restava però sempre il problema della cattura passiva di risonanza che rischiava di alterare in modo

⁽¹¹⁾ Nier aveva per primo misurato il rapporto 1/139 di abbondanza relativa dei due principali isotopi dell'U: un terzo isotopo U-234 è presente in misura irrilevante dell'ordine di 1/17000.

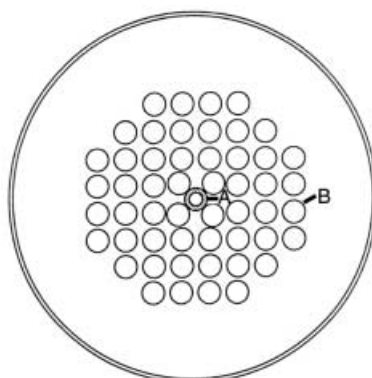


Figura 2. – La prima struttura moltiplicante eterogenea di Fermi (Columbia University, 1939). A) Sorgente di foto-neutroni di 2,3 g di Ra e 250 g di berillio; B) uno dei 52 tubi di 5 cm di diametro e 60 cm di altezza riempiti di U_3O_8 . (Da FNM 132.)

inaccettabile i risultati dell'esperimento, basato anch'esso sull'attivazione di un rivelatore di neutroni, in presenza o in assenza di uranio: questa volta, a differenza delle precedenti, la rivelazione dei neutroni consisteva nell'attivazione del manganese disciolto sotto forma di solfato in un grosso contenitore d'acqua di 540 litri (metodo di Szilard-Chalmers).

Il problema della cattura dei neutroni epitermici sembrava insormontabile. Anderson racconta (FNM 132) che bastarono una ventina di minuti a Fermi per trovare una soluzione: Questa consisteva nel concentrare l'ossido di U in blocchi separati (struttura eterogenea) anziché distribuirlo omogeneamente nell'acqua (come i Francesi del gruppo Joliot): ciò avrebbe ridotto drasticamente la cattura dei neutroni in fase di rallentamento. Questo accorgimento, che derivava dalla grande padronanza di Fermi del comportamento dei neutroni, costituì un "turning point" fondamentale nella storia dell'energia nucleare: senza di esso non si sarebbe mai giunti, con l'uranio naturale alla reazione a catena autosostenentesi. La struttura eterogenea assunse la configurazione di fig. 2 l'ossido di U era contenuto in 52 tubi metallici.

I risultati, ottenuti dal confronto dell'attività indotta nel Mn dai neutroni termici in presenza o assenza di U vennero pubblicati, senza più alcun riguardo al segreto, su "Physical Review" del 3 luglio con le tre firme A.F.S. L'effetto della presenza dell'U era effettivamente positivo e fu valutato in 1,2 neutroni secondari per neutrone assorbito: con una ulteriore correzione teorica della cattura di risonanza "questo numero dovrebbe arrivare a 1,5" notano gli autori, ed aggiungono: "Da questi risultati possiamo concludere che una reazione a catena si potrebbe sostenere in un sistema in cui i neutroni fossero rallentati senza troppe catture fino alle energie termiche dove sarebbero catturati dall'U piuttosto che da un altro elemento".

Un'altra conclusione del lavoro fu che a causa dell'assorbimento dell'idrogeno dell'acqua, era dubbio se questa potesse essere utilizzata come moderatore per una reazione a catena con U naturale: sarebbero state necessarie, in ogni caso, ulteriori misure.

La novità del metodo è che si tratta di un “esperimento integrale” nel quale, anziché misurare separatamente i 4 fattori ϵ, η, p, f (che costituiscono il fattore di moltiplicazione k_{∞} , vedi saggio di Augusto Gandini in questo volume) perché affetti da troppi errori di misura, si cerca il risultato globale della moltiplicazione neutronica. Quella delle misure integrali sarà anche in seguito il “cavallo di battaglia” delle ricerche di Fermi, fino alle cosiddette esperienze esponenziali con U-grafite che ne saranno l'esempio più significativo e produttivo.

Da notare che questo fu il primo e ultimo articolo a firma congiunta Fermi-Szilard: il diverso modo di concepire l'esperienza, ma soprattutto la distribuzione del carico di lavoro nell'esecuzione, rendeva difficile poter lavorare insieme. Nonostante le grandi differenze di carattere, prevalse la stima reciproca e la collaborazione continuerà fruttuosamente per anni. Ne è una prova l'intensa corrispondenza dopo che Fermi era partito per quella che Segrè definisce “la sua amata Ann Arbor (Michigan)” per un corso estivo di fisica mesonica. Fu uno scambio di lettere molto fruttuoso nel corso del quale i due arrivarono a due stime indipendenti dei quantitativi necessari in una struttura per la reazione a catena: più elevata e più realistica quella di Szilard (50 t di carbone e 5 di U). Circa la disponibilità dei materiali occorrenti egli comunicava a Fermi di aver ottenuto dalla National Carbon Company l'offerta di forniture di notevoli quantità di grafite “ a un prezzo ragionevole” (il solito Szilard!...).

Entrambi, nello scambio di lettere, pensavano a strutture U-grafite eterogenee: Fermi a spessi strati di grafite alternati a strati di U, Szilard a quella, che doveva alla fine essere la soluzione vincente, a blocchetti di U immersi in mattoni di grafite; struttura che in analogia con i cristalli fu chiamata reticolo U-grafite

Nella calda estate newyorkese Szilard, tentò di convincere Pegram per nuovi esperimenti; ma questi, soprattutto per l'assenza di Fermi, decise di rinviare ogni cosa all'autunno.

5. – Storia di una lettera

Szilard, lasciato solo a New York, riprende le sue meditazioni su come coinvolgere nel progetto il governo americano, avendo ormai perduto la fiducia sia nella Navy, sia in un possibile sostegno dell'industria privata. In questa sua determinazione egli è sostenuto da Teller, che è a New York per un corso estivo alla Columbia, e da Wigner spesso in visita alla Columbia. Una tra le maggiori preoccupazioni della “triade” ungherese (o la “cospirazione ungherese”, come Tuve amava definirla) era che i tedeschi potessero mettere le mani sulle grandi quantità di U prodotto nel Congo Belga dalla Union Minière: essi avevano infatti saputo dell'embargo posto dal Governo di Berlino sull'U delle miniere di Joachimstal nella ex Cecoslovacchia, il che era un chiaro segno che anche i tedeschi avevano imboccato la via dell'U.

Dopo diverse elucubrazioni e contatti con alcuni esponenti Newyorkesi di rilievo i tre arrivarono alla conclusione che il modo più efficace per coinvolgere l'amministrazione USA sarebbe stato di inviare un segnale al massimo livello, cioè al Presidente Roosevelt. Già, ma come arrivarci? I tre erano ben consci di essere dei signori “nessuno” nelle

alte sfere di Washington: era quindi indispensabile poter avere l'avallo di una autorità scientifica indiscussa. Venne così fuori il nome di Einstein. Questi era però in vacanza a Peconic, una piccola località del nord di Long Island e non fu facile localizzarlo. Fu così che il 16 luglio Szilard e Wigner (che fungeva da autista perché Szilard non sapeva guidare) poterono incontrarlo nella sua casetta di campagna e parlargli degli esperimenti della Columbia. Einstein, che non aveva mai sentito parlare della possibilità di una reazione a catena, cadde letteralmente dalle nuvole: "daran habe ich gar nicht gedacht!" (Non ci avevo mai pensato!) A questo punto pare che la sua spregiudicatezza scientifica e il suo entusiasmo per le cose nuove abbiano avuto il sopravvento: non solo Einstein si dichiarò pronto a collaborare ma, alla fine della giornata, aveva già concertato, con i due giovani colleghi, una prima stesura, in tedesco, della lettera a Roosevelt.

Al ritorno a New York, mentre Wigner partiva in vacanza per la California, Szilard si poneva il problema di come far pervenire la lettera al presidente. Di grande aiuto gli fu Alexander Sachs, Vice Presidente della Lehman Corporation, che consigliò alcuni cambiamenti sostanziali del testo.

Sachs che era in termini molto amichevoli con Roosevelt, per essere stato un suo attivo sostenitore nella campagna elettorale, si offrì di consegnare personalmente la lettera al Presidente. Fu così che Szilard dovette tornare ad incontrare Einstein (questa volta con Teller come autista) per le necessarie modifiche. Il testo finale in inglese, approvato da Einstein, fu firmato e datato 2 agosto 1939 e rispedito a Szilard che lo ricevette alcuni giorni dopo.

Alexander Sachs, ricevette il testo definitivo solo il 15 agosto: consapevole dell'enorme quantità di carte che arrivavano sullo scrittoio del Presidente, era intenzione di Sachs di consegnare la missiva personalmente a Roosevelt, o meglio di dargliene lettura a viva voce: in questa prospettiva si diede immediatamente da fare per ottenere una udienza. Senonchè, come insegna la storia, il diavolo, quando può, ci mette la coda: questa volta nella fattispecie di Adolf Hitler. L'1 settembre 1939 alle 4.45 del mattino le armate tedesche invadono la Polonia: Francia e Inghilterra dichiarano guerra alla Germania il giorno 3. C'era quindi di che tenere occupato, con priorità assoluta, il Presidente degli Stati Uniti e di rinviare quindi l'incontro, di cui tra l'altro non conosceva l'oggetto, con l'amico "Alex".

Da quel giorno in poi gli eventi in USA furono determinati, anzi addirittura scanditi, dai tempi della politica e dagli eventi bellici. Lo stesso accadde per il progetto "uranio" e di conseguenza per le attività di Fermi.

A questo punto è doverosa una avvertenza. La descrizione, anche sommaria degli avvenimenti che portarono alla prima reazione a catena provocata dall'uomo, esigerebbe un testo di lunghezza non compatibile con l'estensione di questo capitolo. Ci vediamo pertanto costretti, scusandoci col lettore, a riassumere gli eventi successivi condensandoli in ordine puramente cronologico.

6. – A Washington qualcosa comincia a muoversi...

Come prima conseguenza Sachs fu ricevuto da Roosevelt soltanto l'11 ottobre: il colloquio, al quale partecipò anche il generale E. M. Watson autorevole membro dello staff presidenziale, ebbe un esito positivo e fu decisa la creazione di un Comitato Consultivo per l'uranio (Uranium Committee UC) sotto la presidenza di Lyman J. Briggs, direttore del National Bureau of Standards e come tale considerato una specie di rappresentante dei fisici americani nell'amministrazione⁽¹²⁾. Del Comitato facevano parte lo stesso Sachs e due esperti militari oltre ai fisici che Briggs avrebbe nominato.

Briggs convocò una prima riunione dell'UC il successivo 21 ottobre: ad essa parteciparono anche Roberts dell'APO (in rappresentanza di Tuve) e i tre ungheresi Szilard, Wigner e Teller⁽¹³⁾.

In un'atmosfera di marcato scetticismo da parte dei rappresentanti delle forze armate, Szilard illustrò le prospettive della reazione a catena e marcatamente degli aspetti militari, sottolineando la necessità di disporre di notevoli quantitativi di U e di grafite, problema a suo dire prioritario per una migliore conoscenza delle proprietà nucleari del carbonio. Egli tuttavia si astenne dal fare una specifica richiesta di fondi. A questo punto uno dei due rappresentanti militari tagliò corto chiedendo bruscamente: “ma insomma quanti soldi vi servono?” Teller, preso alla sprovvista, rispose “6.000 dollari” al che l'altro militare concluse “Sta bene, li avrete”. Le conseguenze della riunione furono purtroppo come era da aspettarsi. Roosevelt, ricevuto il rapporto, ordinò: “Agli atti” e agli atti il rapporto rimase fino all'anno successivo.

Finalmente, nel febbraio del 1940, arrivarono a Fermi i 6.000 dollari destinati all'acquisto di 4 tonnellate della grafite procurata da Szilard, e destinata a quella che allora si chiamò l'*impresa cruciale*, ossia la misura dell'assorbimento dei neutroni nella grafite. Venne assemblata, al settimo piano del Pupin, una “pila” verticale ($91 \times 91 \times 245$ cm) di blocchetti di grafite, con la sorgente neutronica alla base e, a distanze diverse, delle lamine del rodio, come rivelatori di neutroni termici. Si tornava così alle tecniche ben collaudate degli esperimenti romani e alle famose “corse” degli sperimentatori con in mano le lastre di rodio per giungere in tempo ai rivelatori per misurare la radioattività indotta, data la brevissima vita media del rodio, 44 secondi.

Con questo tipo di misure a lui così familiare era tornato anche il buonumore di Fermi confortato dal risultato che la grafite sarebbe stata compatibile con una reazione a catena con l' U_{nat} . Da notare che questa era la prima “esperienza esponenziale” in cui

⁽¹²⁾ Sul ruolo di Briggs nei successivi sviluppi sono stati espressi giudizi discordanti.

⁽¹³⁾ Non sono chiare le ragioni per cui Fermi non partecipò alla riunione: forse risentiva ancora dell'insuccesso della sua riunione presso la Navy. Sta di fatto che anche nelle successive riunioni dell'UC, come pure in altri comitati di carattere governativo, risulta che egli tenesse un atteggiamento freddo e distaccato, ben diverso da quello dei tre ungheresi. Non è escluso anche che egli sentisse intorno a se, come italiano, una certa diffidenza da parte di alcuni ambienti americani; non bisogna infatti dimenticare che nel maggio dello stesso anno, Mussolini aveva firmato il famoso “Patto d'acciaio” con Hitler.

la sezione d'urto di cattura dei neutroni viene misurata, con opportune correzioni per le fughe laterali, per mezzo della attenuazione del flusso neutronico assiale, secondo la sperimentata filosofia delle misure integrali.

Uno sviluppo inatteso si ebbe a fine febbraio quando Nier, a Minneapolis, in seguito alle sollecitazioni a suo tempo ricevute, riesce nell'impresa di separare modeste, ma misurabili quantità di U-235 e U-238: depositate su una lastrina di nichel, Nier le spedisce alla Columbia a Dunning, che subito si affretta a irradiarle con neutroni. Viene così provato che effettivamente è il solo U-235 a subire la fissione termica⁽¹⁴⁾: ma al tempo stesso si riaprono le discussioni tra i fautori delle due vie U naturale e U arricchito. E con esse le perplessità sul successo del metodo grafite-U di Fermi-Szilard. Questi dubbi sono destinati a interferire pesantemente sul futuro lavoro di Fermi.

Un primo segno di questo contrasto emerse infatti nella successiva riunione dell'UC del 27 aprile 1940, alla quale partecipò anche Fermi e che finì in maniera inconcludente, salvo una viva esortazione di Sachs a proseguire su scala adeguata gli esperimenti U-grafite.

Era chiaro che le cose non procedevano bene: ma il problema era di carattere più generale ed investiva la ricerca scientifica in USA: a taluni essa appariva insufficiente e inadeguata ai problemi che la nazione avrebbe dovuto affrontare in relazione ai tragici eventi bellici in Europa; soprattutto dopo il crollo della Francia (giugno 1940) e la minaccia tedesca sull'Inghilterra, molti americani temevano un coinvolgimento del loro paese nel conflitto.

Di ciò era convinto in particolare il Presidente della Carnegie Institution Vannevar Bush; uomo di larghe vedute, ingegnere con notevole esperienza di organizzatore della Ricerca (era stato anche Vice Presidente del MIT). Discutendo con un gruppo di personalità di primissimo ordine tra le quali Frank Jewett, presidente dei laboratori della Bell Telephone e della Accademia Nazionale delle Scienze (NAS), James Bryant Conant, chimico giovane ed energico, presidente dell'Università di Harvard, Karl T. Compton, fisico, presidente del MIT, Bush era convinto che prima o poi gli Stati Uniti sarebbero stati pesantemente trascinati nel conflitto e che ciò avrebbe di conseguenza richiesto una riorganizzazione del settore scientifico e tecnologico per poter predisporre gli strumenti necessari ad una guerra combattuta con mezzi tecnologicamente avanzati.

Persuasi di ciò Bush ed i suoi interlocutori pensarono ad un nuovo organismo, largamente autonomo, alle dipendenze del Presidente, finanziato direttamente dal Governo anziché tramite i militari. Il 12 giugno 1940 nacque così, con l'aiuto determinante di Harry L. Hopkins, segretario al Commercio e uomo di tutta fiducia di Roosevelt, il National Defense Research Council (NDRC), il cui unico fine "era quello di mobilitare la scienza a scopi bellici" (Segrè). Bush, contestualmente nominato presidente, chiamò subito a farne parte James B. Conant: come prima azione i due decisero di assorbire l'esistente Ura-

⁽¹⁴⁾ Con lettera del 14 marzo 1940 Fermi ne dà notizia ad Amaldi (a Roma) nel modo seguente: "La più recente notizia di qui è che i neutroni termici producono la fissione solo nell'isotopo 235 dell'uranio. Nier ha separato con il suo spettrografo di massa circa 0,3 microgrammi di uranio e solo la frazione 235 dava fissioni". Si noti la data: mancavano meno di due mesi alla entrata in guerra dell'Italia...

nium Committee: Briggs, pur conservando la presidenza dell'UC avrebbe però riferito direttamente a Conant.

Ricerca dunque per scopi bellici, questo il mandato del NRDC: ma i lavori di Fermi potevano veramente rivestire un interesse militare? Le prospettive di un reattore nucleare sembravano quelle di produzione di energia e tutt'al più di propulsione per sottomarini, problemi di priorità certo non elevata: così almeno ritenevano Bush e Conant.

La prova si ebbe quando Briggs, in seguito ad una riunione ad hoc dell'UC formulò una richiesta scritta a Bush di 140000\$ (100000\$ per esperimenti su larga scala dei sistemi U-grafite e 40000 per misure di sezioni d'urto). Si vide assegnare solo 40000\$: con ciò Fermi e i fisici della Columbia dovettero rassegnarsi ad aspettare tempi migliori⁽¹⁵⁾.

7. – Tempi di guerra

Un aiuto imprevisto all'indirizzo delle ricerche di Fermi doveva venire dall'altra costa degli Stati Uniti e precisamente da Berkeley (CA). La novità consisteva nella scoperta di un nuovo possibile esplosivo nucleare, il plutonio.

Sommariamente la scoperta avvenne così.

Era noto, fin dalle ricerche dei primi anni '30 di Hahn e Meitner che l'U-238 catturando un neutrone forma un isotopo instabile U-239 che per emissione di un elettrone (con un periodo di 23 min) si trasforma in un nuovo elemento di numero atomico $Z = 93$, chiamato molto più tardi dagli americani (nel 1942) nettunio (Np-239). Esso fu identificato con certezza nell'estate del 1940 a Berkeley dai fisici E. McMillan e P. A. Abelson.

Il Np-239 a sua volta decade, con periodo di 2,3 giorni ed emissione di un elettrone in un nuovo elemento di $Z = 94$ chiamato (da Sold nel 1947) plutonio (Pu-239). Questo elemento costituito da un numero Z pari di protoni e un numero $A - Z$ dispari di neutroni avrebbe presumibilmente potuto avere caratteristiche simili all'U-235, anch'esso pari-dispari, e scindersi sotto l'azione di neutroni termici.

Era pertanto concepibile che, se avesse avuto una vita media sufficientemente lunga, si sarebbe potuto separare con procedimenti chimici e utilizzarlo come esplosivo nucleare: al posto dell'U-235, così difficile da separare: restava però da dimostrare che esso era effettivamente un elemento fissile. In tal caso esso poteva essere prodotto in quantità notevoli in un reattore nucleare. Di questa possibilità parlarono a lungo Fermi e Segrè nel dicembre del 1940 durante la visita di quest'ultimo a Leonia (New Jersey) dove la famiglia Fermi si era trasferita nell'estate 1939⁽¹⁶⁾. È evidente che questa possibilità, se

⁽¹⁵⁾ Meglio era andata per i fisici dell'arricchimento dell'U che, tramite i laboratori di ricerca dell US-Navy, avevano ottenuto 100000\$ per ricerche di separazione isotopica. L'impresa di separare l'U-235 in quantità sufficiente per una bomba (quella che fu poi lanciata su Hiroshima) costituisce uno dei successi più notevoli della scienza e della tecnologia americana del periodo di guerra. Purtroppo non ne potremo qui parlare.

⁽¹⁶⁾ Questo colloquio è riferito in prima persona dallo stesso Segrè a pag. 121 del suo libro più volte citato.

confermata, avrebbe dato un grande impulso alla linea seguita da Fermi e dai suoi amici della Columbia.

Bisognava però provare che il Pu-239 era effettivamente fissile: a tal fine era necessario prepararne una quantità anche minima, ma sufficiente per poterne misurare le proprietà nucleari: il nuovo ciclotrone da 60 pollici del Radiation Laboratory di Berkeley sarebbe stato idoneo allo scopo qualora fosse stato disponibile per l'irraggiamento dell'U. Il caso volle che Ernest O. Lawrence direttore del Radiation Laboratory si trovasse a New York e così il 16 dicembre in una riunione alla Columbia alla quale partecipò anche Pegram venne presa una decisione positiva. Segrè tornato a Berkeley si mise immediatamente al lavoro insieme a G. W. Kennedy e G. F. Seaborg, ottenendo un campione misto di Np e Pu. In seguito, con un metodo messo a punto da Arthur C. Wahl, Segrè e Seaborg riuscirono il 28 marzo 1941, a separare il Pu dal Np. Fu così possibile, su un campione di soli 0,28 microgrammi misurare la sezione d'urto del Pu-239 sia con neutroni termici sia con neutroni veloci.

Successivamente, in maggio, Segrè e Seaborg mostrarono che la sezione d'urto termica per fissione del Pu-239 era ben 1,7 volte maggiore di quella dell'U-235. Era nato così un nuovo esplosivo nucleare, il Pu-239: si trattava ora di produrlo in quantità sufficienti, dato che non era pensabile di poterlo fare con il ciclotrone. Divenne chiaro che le ricerche sulla reazione a catena uranio-grafite di Fermi potevano costituire la soluzione del problema. Da questo punto in poi le ricerche alla Columbia acquistarono una valenza di interesse militare.

All'NDRC rimanevano tuttavia ancora forti perplessità sulla possibilità di ottenere risultati di interesse militare come prospettavano i fisici nucleari che, sempre più numerosi, lavoravano al problema ormai in diversi laboratori degli Stati Uniti. D'altra parte anche gli inglesi, sia pure nelle condizioni consentite dai pesanti bombardamenti tedeschi, stavano organizzando con notevole impegno le ricerche collegate con l'U, aiutati anche dall'emigrazione di fisici europei sfuggiti ai nazisti: tra essi vanno ricordati Otto Frisch, che lavorava a Birmingham con Rudolf Peierls, teorico di origine tedesca che già calcolava le possibili configurazioni e dimensioni di una bomba nucleare, oltre ai francesi (del gruppo Joliot), Goldschmidt, von Halban, Kowarsky i quali avevano portato in salvo in Inghilterra il modesto ma prezioso quantitativo (165 litri) di acqua pesante assemblato da Joliot a Parigi prima dell'occupazione tedesca. Essi pensavano soprattutto a sistemi moltiplicanti U-D₂O.

Le attività inglesi erano dirette e coordinate da fisici di grande prestigio come Chadwick, Oliphant, G. P. Thomson, Cockroft e altri. Essi erano convinti che la bomba si potesse realizzare con l'U-235 (in quanto ignoravano il Pu), pur essendo altrettanto convinti che lo sforzo richiesto per un programma di arricchimento dell'U-235 non sarebbe stato compatibile con le risorse disponibili in Gran Bretagna. Di qui la pressione inglese sugli americani per un programma a grande respiro mirato alla bomba, da realizzare in tempi rapidi essendo la loro maggiore preoccupazione, che i tedeschi potessero arrivarci per primi.

Dal canto suo Lawrence, sempre più coinvolto in questi problemi, informato dei progressi inglesi, insofferente alla conduzione dell'UC da parte di Briggs, (accusato di ecces-

sivo burocratismo), nel marzo 1941, investe con una certa brutalità (“gli inglesi sono più avanti di noi”) il dubbioso Bush. Questi prende allora l’iniziativa di chiedere a Jewett, presidente della NAS, una “valutazione complessiva del progetto U” da parte dell’Accademia, Jewett forma immediatamente un comitato di valutazione (Review Group) di cui vengono chiamati a fare parte Lawrence, William D. Coolidge, ex direttore delle ricerche della General Electric, nonché, come presidente, Arthur Compton, fisico professore all’Università di Chicago e Premio Nobel per l’effetto quantistico che porta il suo nome.

Il 17 maggio Compton trasmette a Jewett e questi a Bush il rapporto del Review Group riferente alcune possibili opzioni tra le quali principalmente la reazione a catena (non solo nella versione U-grafite, ma anche U-Be oppure U-D₂O). Quanto alla bomba, considerate entrambe le opzioni U-235 o Pu (da produrre con reazione a catena), il rapporto stimava che non fosse realizzabile prima del 1945: importante è che per la prima volta in un documento venga menzionato l’utilizzo di una pila per produrre il Pu e vengano raccomandati i finanziamenti necessari al proseguimento degli esperimenti intermedi di Fermi.

A tali conclusioni si era giunti tuttavia attraverso passaggi molteplici e spesso contrastanti (NDRC, NAS, e altri); inoltre il mandato della NDRC riguardava soltanto la ricerca scientifica e difficilmente avrebbe potuto estendersi alla collaborazione industriale indispensabile per lo sviluppo a scopo militare, divenuto ora impellente anche in relazione all’evolversi della situazione militare in Europa: l’invasione della Russia da parte delle armate tedesche è del 22 giugno 1941.

Bush pensava ad un nuovo organismo, più autorevole del NDRC, che fosse emanazione diretta del presidente degli Stati Uniti. Venne così creato con decreto di Roosevelt il 28 giugno 1941 l’“Office of Scientific Research and Development” (OSRD), di cui Bush divenne direttore, mentre Conant lo sostituiva come presidente del NDRC e l’UC diventava una sezione S1 dell’OSRD.

Nei mesi successivi si susseguirono una serie di riunioni e di contatti con il Review Committee della NAS, fino a un terzo ed ultimo rapporto datato 27 novembre 1941, trasmesso a Roosevelt e da lui approvato.

Il rapporto costituì le basi delle discussioni del S1 convocato da Bush a Washington il 6 dicembre.

La decisione più importante fu una completa riorganizzazione e riassegnazione dei compiti:

1. Arold Urey alla Columbia avrebbe sviluppato l’arricchimento dell’U con il metodo della diffusione gassosa.
2. Lawrence a Berkeley avrebbe diretto i lavori di arricchimento con il metodo della separazione elettromagnetica.
3. Eger V. Murphree, direttore delle ricerche dello Standard Oil del New Jersey, avrebbe sviluppato il processo di arricchimento con ultracentrifughe.
4. Compton a Chicago sarebbe stato genericamente responsabile degli studi teorici e del progetto della bomba.

È evidente l'influenza degli inglesi ascoltati ora attentamente a Washington.

Come si vede nessuna menzione al Pu e al sistema U-grafite di Fermi: le cose dovevano poi andare ben diversamente per entrambi i progetti, come dimostreranno gli eventi successivi grazie soprattutto all'incondizionato appoggio di Compton.

La riunione del S1 era stata convocata sabato 6 dicembre, e si concluse con l'intesa di riprendere i lavori nel giro di un paio di settimane.

Ma domenica 7 dicembre 1941 i giapponesi sferrarono il loro attacco a sorpresa sul Pearl Harbour: gli Stati Uniti entrarono in guerra contro il Giappone ed i suoi alleati Germania e Italia. Fermi acquistava così automaticamente lo stato di "straniero nemico".

Da questo momento gli eventi del "progetto uranio" prendono uno sviluppo enorme e tumultuoso imposto dallo sviluppo della bomba: essi richiederebbero una trattazione adeguata, ma purtroppo eccessiva. Nel seguito dovremo quindi attenerci alle sole ricerche di Fermi.

8. – Gli ultimi esperimenti alla Columbia: Fermi si trasferisce a Chicago

Fermi, nel corso del '41, aveva proseguito le sue misure, mentre Szilard si impegnava sempre più, e con notevole successo, a procurare materiali (U e grafite) in quantità sempre maggiori e di purezza sempre più elevata. Fermi intanto progetta esperimenti subcritici su grande scala per determinare le dimensioni critiche del sistema U-grafite, estendendo ad una struttura siffatta il metodo della diffusione dei neutroni già utilizzato con successo nella colonna di grafite. Nei mesi di agosto e settembre del '41 cominciano ad arrivare i materiali necessari fino a raggiungere un quantitativo di 6 ton di ossido di U (sotto forma di $U_3 O_8$) e di trenta ton di grafite in blocchetti.

Date le dimensioni e il peso dei materiali non si potevano utilizzare i normali laboratori ai vari piani del Pupin, finché Pegram trovò alla fine di settembre un locale di dimensione adatta (la sala Schermerhorn della Columbia). Fu così montata una grande struttura a forma di parallelepipedo di 11 piedi ($\approx 3,55$ m) \times 8 ($\approx 2,44$ m) costituita da blocchetti di grafite e da ossido di U compattato in scatolette di latta stagnata di forma cubica di 8 pollici (20 cm) di lato. Alla base era collocata la sorgente di neutroni di forte intensità (2g di Ra + Be); i neutroni erano rivelati per attivazione di lamine di In opportunamente distribuiti nella struttura.

Nasceva così la prima "pila esponenziale" di Fermi: in base ai suoi calcoli con la teoria da lui elaborata fu possibile misurare il fattore di moltiplicazione k_∞ che risultò pari a 0,87.

Il risultato è riportato in un rapporto segreto del 26 marzo 1942 che porta oltre quelle di Fermi e Anderson, anche le firme di Bernard Feld, George L. Weil e Walter H. Zinn (vedi FNM 150).

Il risultato non era gran che incoraggiante essendo il k_∞ il 13% inferiore al valore minimo accettabile, ma Fermi progettava nuove disposizioni sperimentali che consentissero miglioramenti dei risultati, a cominciare dall'eliminazione delle scatolette di latta e della conseguente eliminazione del Fe assorbitore di neutroni.

Fermi monta così una nuova pila esponenziale (vedi saggio di Augusto Gandini in questo volume): l'U questa volta era inserito negli alloggiamenti della grafite sotto forma di cilindretti (che approssimavano la forma sferica ideale) di diametro e d'altezza pari a 7,52 cm e del peso di 1795 g. Per aumentare l'efficienza del sistema e ridurre l'assorbimento passivo dovuto all'idrogeno dell'acqua, l' U_3O_8 veniva pressato e deumidificato mediante riscaldamento fino a 250°C.

Inoltre l'intera struttura fu interamente racchiusa, con una certa difficoltà, in un rivestimento di lastre in acciaio saldate. Questo accorgimento permise di ridurre l'umidità della pila e l'assorbimento dell'azoto dell'aria, mediante un vuoto parziale. Con queste modalità il risultato fu conforme alle attese con un $k_\infty = 0,918$ come registrato in un rapporto dell'aprile del '42 (v. FNM 151). Fu questa l'ultima esperienza esponenziale di Fermi alla Columbia.

Nel frattempo era necessario dare un rapido seguito alle decisioni prese nella riunione del S1 del 6 dicembre. Il comitato si riunisce il 18 dicembre sotto la presidenza di Conant e con la partecipazione di Compton che fissa alcuni concetti per i gruppi a lui affidati in un memorandum a Conant del 20 dicembre e stilato in codice. Anzitutto sostiene la fattibilità di una bomba al Pu, la cui massa critica dovrebbe essere circa la metà di quella a U-235: la difficoltà dovrebbe consistere nella necessità di remotizzazione di un impianto di produzione industriale, data la forte radioattività dei prodotti di fissione, Compton formula anche una tabella dei tempi previsti:

1. 1 giugno 1942: acquisizione dei dati fondamentali per la reazione a catena.
2. 1 ottobre 1942: realizzazione della reazione a catena.
3. 1 ottobre 1943: impianto pilota per la produzione di Pu.
3. 31 dicembre 1944: produzione massiva di Pu.

È chiaro che questa valutazione dei tempi, alquanto ottimistica, era anche intesa a mandare un segnale forte a Conant e Bush che la bomba sarebbe stata disponibile in tempo per influire sulle sorti del conflitto.

Compton fece un preventivo delle spese stimando in 1,2 milioni di dollari, cifra che egli propose con una certa esitazione abituato com'era alle modeste dotazioni universitarie, ammontanti a poche migliaia di dollari all'anno. Nessun cenno invece al problema di coordinare e possibilmente riunire in un'unica sede le attività disperse fra Columbia, Princeton, Chicago e Berkeley, tema quest'ultimo che fu oggetto di animata riunione nel mese di gennaio fra i diretti interessati. Finalmente il 24 gennaio '42, in una contrastatissima riunione in casa Compton a Chicago, con la partecipazione di Szilard, Lawrence e Alvarez, fu deciso, soprattutto per la caparbia ostinazione di Compton, di concentrare ogni attività afferente al progetto Pila-Pu all'Università di Chicago. Con il nome convenzionale di Laboratorio Metallurgico (Met Lab) Fermi, informato della decisione ne fu tutt'altro che contento, anche perché gli esperimenti di Columbia avevano assunto oramai dimensioni considerevoli. Comunque la decisione era presa. Fermi, che nel frattempo aveva inviato a Chicago alcuni fra i suoi collaboratori più giovani, fu costretto per qualche mese a fare il "pendolare" fra New York e Chicago (con tutte le difficoltà

che il suo stato di “straniero nemico” comportava), finchè alla fine di aprile, si trasferì definitivamente a Chicago⁽¹⁷⁾.

9. – Chicago è al centro dei lavori

Intanto il gruppo del Met Lab era cresciuto numericamente a causa anche del trasferimento a Chicago di Seaborg e dei suoi giovani colleghi di Berkeley in seguito alla decisione di Compton di affiancare alle attività del gruppo di Fermi quelle del gruppo Pu: a Chicago infatti erano già disponibili alcuni campioni di Pu (ottenuti per irraggiamento di 150 kg di nitrato di uranile col ciclotrone dell'Università di Saint Louis) in quantità sufficiente per le misure indispensabili per sviluppare la fase industriale di produzione. Per il progetto di tale impianto, per decisione di Washington, era stata incaricata una Società di ingegneria di Boston, la Stone e Webster: l'arrivo dei primi ingegneri, assolutamente impreparati, non fu bene accolto a Chicago, sia per la loro impreparazione e la conseguente difficoltà ad intendersi con i fisici, sia forse anche per il timore di questi ultimi di essere scavalcati e finire in subordine. A fine estate serpeggia nel gruppo un notevole malumore di cui si fa interprete tra gli altri Leo Szilard, sempre più preoccupato per i ritardi e timoroso che i fisici tedeschi potessero arrivare per primi alla bomba. Ci volle tutta la pazienza e l'autorevolezza di Compton per sedare la pacifica rivolta.

Per l'intero progetto U, al quale lavoravano ormai diverse Università ed istituzioni sparse negli Stati Uniti, considerato che lo stato di guerra rendeva più difficile le comunicazioni e quindi la gestione, si poneva la necessità di una condotta più autorevole ed efficiente. A tali conclusioni era giunto anche Vannevar Bush, il quale pensava ad un coinvolgimento delle forze armate e alla designazione di un Ufficiale di grado elevato delegato a dirigere il progetto. Ne parlò al generale Sommerville responsabile dei rifornimenti dell'esercito: quest'ultimo si mise a cercarlo fra gli alti gradi del Corps of Engineers, il più tecnico dei Corpi militari, corrispondente al nostro Genio Militare e lo individuò nella persona del colonnello Leslie Richard Groves. Il 17 settembre 1942 Sommerville lo fece nominare responsabile del progetto Bomba, senza neppure interpellare Bush, che, informato a cose fatte, si infuriò. Fu comunque una scelta felice; Groves aveva tutti i titoli (Laurea in Ingegneria, due anni di specializzazione al MIT) e un'esperienza di primissimo ordine: da poco come Vice Capo Costruzioni dell'Esercito aveva ultimato la costruzione del Pentagono a Washington.

Groves scoprì di avere avuto un predecessore nella persona di un colonnello della

⁽¹⁷⁾ Non si può dire che il processo U-grafite godesse di molti favori a Washington. Ancora il 23 maggio 1942, in una speciale riunione dei capi programma della S1 convocata da Conant per individuare il metodo più promettente per costruire la bomba, per passare quindi allo stadio di impianto pilota e poi al successivo sviluppo industriale, la pila U-grafite si trovò a competere con ben tre metodi di arricchimento del 235 (ultracentrifughe, diffusione gassosa, separazione elettromagnetica) e con la pila U-D₂O (da sempre sostenuta da Urey). Conant tentò anche di stimare l'impegno finanziario: comunque l'ordine di Roosevelt era di procedere e di non badare ai soldi!

Sezione Staccata di New York del Genio Militare, incaricato in agosto di coordinare le allora modeste attività del progetto U affidate ai militari. Costui aveva creato all'uopo un ufficio a New York con il nome volutamente anodino di "Manhattan Engineer District"; nome che Groves conservò nel seguito, tant'è che il progetto U venne poi sempre citato come "Manhattan Project".

Promosso generale, Groves nominò suo vice il Col. Kenneth D. Nichols, valido rappresentante a Washington del vecchio Manhattan District. Groves dette subito prova del suo attivismo: il 18 settembre inviò Nichols a New York per acquistare una partita di 1250 ton di pitchblenda, contenuta in 2000 fusti di acciaio, con un contenuto del 65% di ossido di U, spedita dall'Unione Minière in USA nel 1940, per sottrarla ai tedeschi e ancora giacente in un deposito all'aperto a Staten Island. Il 19 settembre Groves fa assegnare dal responsabile della Direzione delle Produzioni di Guerra la qualifica di massima priorità (AAA) alle attività del Manhattan District. Lo stesso giorno conclude l'acquisto di una vasta area (circa 25.000 ettari) nel Tennessee Orientale, chiamata Sito X, che poi verrà destinata, con il nome di Oak Ridge, ai grandi impianti di arricchimento dell'U-235 di diffusione gassosa.

Pochi giorni dopo, su iniziativa di Bush, Groves fu convocato per esporre le sue idee e per ricevere direttive di massima da un comitato di alto livello (Military Policy Committee) costituito, oltre che dallo stesso Bush, dal Segretario alla Guerra Stimson, dal Capo di Stato Maggiore Marshall (quello del Piano omonimo), da Conant e da alcuni alti ufficiali. Il progetto U passava da quel momento nelle mani del massimo organismo della condotta strategica degli USA in guerra.

10. – La Pila

Intanto Fermi a Chicago aveva ripreso su larga scala la costruzione di pile esponenziali per le quali erano state messe a sua disposizione vasti locali, prima utilizzati per il gioco dello squash, ubicati sotto le gradinate occidentali dello stadio (Stagg Field) dell'Università. Già i primi risultati erano incoraggianti tanto che in maggio si ottenne un $k_{\infty} = 0,995$.

Migliorando la qualità della grafite e puntando all'U metallico più denso e quindi più efficiente dell'ossido si sarebbe potuto sperare in $k_{\infty} > 1$. Fu allora che Fermi, convinto della possibilità della reazione a catena cominciò a pensare ad una pila che potesse divenire critica.

Essa sarebbe stata di dimensioni considerevoli e di forma sferica, per ridurre al massimo le fughe di neutroni in periferia e quindi ottenere un fattore di moltiplicazione effettivo (k_{eff}) più prossimo al k_{∞} (vedi saggio di Augusto Gandini in questo volume). Date le incognite connesse con il funzionamento del primo reattore nucleare non era a priori pensabile di poterla costruire allo Stagg Field in piena città: così almeno si pensava al Met Lab. Un sito adatto fu trovato da Compton ad una ventina di miglia a Sud-Ovest di Chicago, nella foresta di Argonne: il sito fu acquisito, per un rapido intervento del Col. Nichols, e i lavori appaltati alla Stone e Webster.

A metà agosto il gruppo di Fermi ottenne, con una struttura a grafite ed ossido di

U, un k_∞ prossimo a 1,04. Un ulteriore miglioramento di circa l'1% del valore di k_∞ si sarebbe ottenuto eliminando l'assorbimento dell'azoto dell'aria. A differenza delle precedenti esperienze di Columbia non era possibile inscatolare questa grande struttura per operare in atmosfera rarefatta: fu così deciso (pare che l'idea sia stata di Anderson) di racchiudere l'intera struttura in un involucro del tipo pallone aerostatico di forma cubica, di otto metri di lato: i tecnici della Goodyear Rubber Co. stupiti dell'insolita forma, eseguirono l'ordine senza porre domande imbarazzanti sul possibile uso.

Tra la metà di settembre e la metà di novembre Anderson e Zinn (responsabile dei materiali) montarono un'altra ventina di pile esponenziali, provando via via i materiali che arrivavano, la grafite sotto forma di sbarre, mentre l'ossido di U, da inserire negli appositi fori praticati nelle sbarre di grafite, veniva compresso sotto forma di "pseudo sfere", ossia di cilindri con le basi sostituite da semicalotte sferiche.

Il taglio delle sbarre della grafite per ricavare blocchi del peso di quasi 10 kg ciascuno, comportava un lavoro faticoso: si arrivò a produrre a regime circa 14 ton al giorno. Da segnalare il 5 ottobre una rapida visita del Gen. Groves per raccogliere l'opinione di Fermi e degli altri fisici del Met Lab, circa il sistema di raffreddamento delle future pile plutonigene di Hanford, per le quali stava trattando con il colosso industriale chimico Du Pont De Nemours. Groves partì da Chicago molto soddisfatto del lavoro del Met Lab, convinto, come egli poi ammise, che "il metodo del Pu ci offre le più grandi possibilità di successo per produrre materiale da bombe". Tutto sembrava quindi procedere per il meglio finché si verificò un fatto imprevisto, ossia uno sciopero di durata imprevedibile del personale della Stone e Webster impegnato nella costruzione dell'edificio della pila di Argonne, che contrattualmente avrebbe dovuto essere completato entro il 20 ottobre.

Ai primi di novembre, qualche giorno prima dell'inizio della costruzione della pila, si pose così il grave problema di dove costruirla. Fermi affrontò decisamente la situazione con Compton proponendo di montarla nelle stesse palestre di squash dello Stagg Field, purtroppo ubicate in un quartiere popoloso a poca distanza dal centro di Chicago.

Si trattava di una decisione davvero difficile: infatti, nelle precedenti esperienze esponenziali, anche con un $k_\infty \geq 1$, date le dimensioni ridotte, non si sarebbe mai potuto raggiungere la criticità. Non così per la pila, per la quale, nonostante i numerosi sistemi automatici di controllo, con un $k_\infty > 1$ qualcuno temeva che si potesse innescare una reazione a catena divergente con tutte le disastrose conseguenze del caso.

Ma Fermi era convinto del fatto suo: i neutroni ritardati (a suo tempo scoperti da Roberts all'APO nel 1939) avrebbero rallentato, secondo la teoria, la dinamica della reazione purché il k_{eff} fosse stato solo di poco superiore a 1. Una volta di più la padronanza di Fermi della fisica neutronica e la sua dimestichezza con i problemi ingegneristici si dimostrarono decisivi⁽¹⁸⁾: Compton si convinse e dette l'OK alla costruzione della pila

⁽¹⁸⁾ Che Fermi possedesse doti notevoli di ingegnere-tecnologo è provato in maniera evidente anche dai suoi contributi al Manhattan Project successivi alla pila di Chicago, sui quali esiste un'ampia bibliografia, a cominciare dal libro di Segrè: ma ciò che è più rimarchevole sono la sua capacità e prontezza nell'utilizzare le sue doti.

allo Stagg Field. Temendo un rifiuto, ad ogni buon conto si astenne dall'informare il Presidente dell'Università di Chicago.

L'assemblaggio della pila cominciò il 6 novembre 1942 (FNM 181). Fermi organizzò il lavoro su due squadre: una, per il turno di giorno diretta da Walter Zinn (che conservava la responsabilità sull'approvvigionamento dei materiali), l'altra, per il turno di notte, sotto la guida di Herbert Anderson, Volney Wilson, dinamico e giovane allievo di Compton, fu nominato da Fermi responsabile della strumentazione e del sistema di controllo della pila.

La pila sarebbe sorta sotto la gradinata, di fronte ad una balconata prima usata per gli spettatori del gioco dello squash: la balconata si mostrò utile fin dall'inizio, per esempio per il montaggio del famoso "pallone cubico" della Goodyear, la cui faccia frontale fu lasciata libera per consentire il montaggio della pila. Si iniziò con un primo strato di forma circolare di blocchi di sola grafite, che costituì il riflettore della base. Il resto della struttura venne eretto alternando uno strato di sola grafite (grafite inerte) con due strati di grafite (attiva) contenenti blocchetti di ossido di U. Si forma così un mezzo moltiplicante U-grafite con reticolo a celle cubiche. Lo strato esterno della pila, dovendo funzionare da riflettore dei neutroni, era di sola grafite inerte: tutta la struttura veniva sostenuta da una robusta impalcatura di legno eretta man mano che il montaggio procedeva.

L'assemblaggio dei blocchi si mostrò una operazione, oltretutto faticosa (si raggiunse un ritmo di quasi 2 strati al giorno) anche molto delicata perché bisognava curare l'allineamento con molta precisione per lasciare liberi gli alloggiamenti (orizzontali) delle 10 barre di controllo: queste erano costituite da lamine di cadmio (forte assorbitore di neutroni) fissate su strisce di legno di 4 m di lunghezza. Esse erano manovrate a mano ed estratte solo quando si effettuavano le misure: normalmente restavano completamente inserite e bloccate con lucchetti le cui chiavi avevano solo Anderson e Zinn.

Le misure di flusso neutronico cominciarono una volta raggiunto il 15° strato e vennero poi eseguite da Zinn e Anderson alla fine di ogni turno, sempre nella stessa posizione centrale della pila. Erano effettuate con contatori a trifluoruro di boro, costruiti da Leona Woods, una brillante laureanda di Compton, e calibrati ogni giorno per confronto con lamine di indio irradiate coi neutroni della pila; naturalmente le misure avvenivano con tutte le barre di controllo estratte, almeno nella fase iniziale. Da notare che, oltre alle barre di controllo esisteva un dispositivo di sicurezza consistente in alcune barre, comandate elettromagneticamente dette ZIP, dotate di contrappeso a una delle estremità e trattenute in posizione da un elettromagnete.

A pila funzionante, per lo spegnimento rapido (scram) della reazione bastava interrompere la corrente del solenoide ed esse si sarebbero inserite per gravità: lo scram sarebbe stato provocato da camere di ionizzazione calibrate per alti flussi neutronici, mentre i contatori a BF_3 erano utilizzati per bassi flussi.

Per ulteriore sicurezza una barra ZIP, veniva trattenuta fuori dalla pila mediante una fune legata alla ringhiera della balconata: sarebbe bastato tagliarla per provocare, lo spegnimento rapido (scram) in caso di emergenza.

Infine, come misura estrema di sicurezza, tre dei fisici più giovani, nel giorno della messa in criticità, avrebbero dovuto, in piedi sulla piattaforma dell'elevatore utilizzato

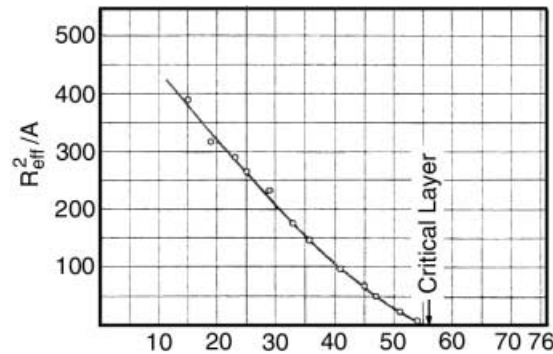


Figura 3. – Approccio alla criticità della pila durante la costruzione (Chicago, nov.-dic. 1942). (Da FNM 181.)

per l'assemblaggio, stare vicino alla sommità della struttura con altrettanti secchi di una soluzione di solfato di Cd, pronti a rovesciarli sulla pila in caso di emergenza estrema.

Man mano che cresceva il numero degli strati aumentava l'intensità A provocata dai neutroni nei contatori e nell'indio. Con una semplice formula (FNM 181) Fermi calcolava il raggio (R_{eq}) di una forma sferica equivalente alla struttura che si stava montando. Per prevedere quando si sarebbe raggiunta la criticità Fermi scelse la grandezza R_{eq}^2/A : con l'approssimarsi della criticità essa avrebbe dovuto tendere a zero. Secondo i suoi calcoli, la struttura sferica avrebbe dovuto raggiungere la criticità al 76° strato.

Mentre era già iniziato il montaggio cominciarono però ad arrivare nuovi materiali con caratteristiche molto migliori. Si trattava di 250 ton di grafite molto pura, prodotta nel frattempo dalla National Carbon Co e di oltre 6 ton (provenienti da Ames-Iowa) di U metallico purissimo sotto forma di cilindretti adatti ad essere inseriti nei fori praticati nella grafite: L'U metallico era comunque preferibile per la maggiore densità rispetto all'ossido. Si trattava dunque di materiali preziosi che avrebbero consentito di migliorare il fattore di moltiplicazione k_{eff} : essi furono pertanto sistemati nella zona centrale della struttura. Con ciò Fermi stimò che non sarebbe stato più necessario l'uso del pallone Goodyear (e relativo vuoto), ma soprattutto che si sarebbero potuti risparmiare una ventina di strati. L'estrapolazione delle sue misure portava a un R_{eq}^2/A prossimo a zero, e quindi un $k_{\text{eff}} = 1$, in una zona compresa tra il 56° e il 57° strato (v. fig. 3). Conformemente la pila non sarebbe stata sferica ma avrebbe assunto la forma approssimativa di un ellissoide di rotazione schiacciato, di semiassi rispettivamente di 388 cm e 309 cm (v. fig. 4).

La configurazione finale prevista fu raggiunta dallo staff di Anderson nella notte dell'1 dicembre. Anderson stesso racconta della tentazione di estrarre l'ultima sbarra di Cd e rendere critica la pila. Ma aveva promesso a Fermi di non farlo: finite le misure e sistemati i soliti lucchetti; quella notte se ne andò a casa a dormire.

Si giunse così al faticoso 2 dicembre: su tale giornata e sui relativi eventi esistono numerose versioni, quasi tutte basate su ricordi personali di persone presenti all'esperi-

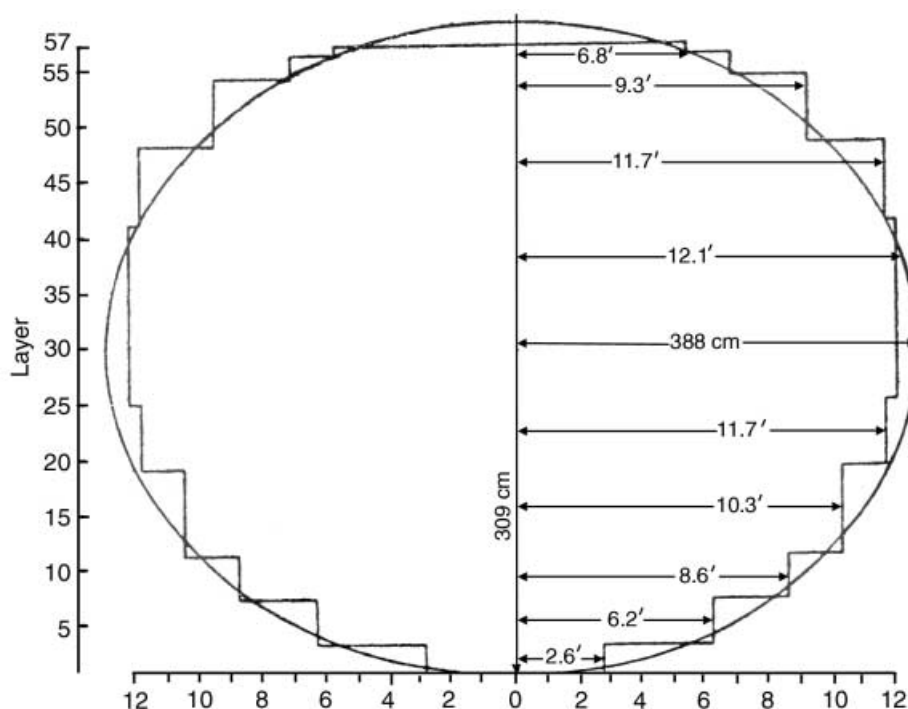


Figura 4. – Sezione verticale della pila di Chicago. (Da FNM 181.)

mento. Essi contengono particolari molte volte descritti ma non sempre in accordo tra loro: ciò è spiegabile sia per il comprensibile stato di emozione dei presenti, sia per il tempo trascorso tra gli eventi e la loro descrizione, resa possibile in molti casi, solo dopo l'abolizione della ferrea disciplina imposta dalle regole di classificazione. Riportiamo perciò di seguito solo le scarse parole che Anderson dedica all'avvenimento (introduzione a FNM 181): “La mattina dopo, 2 dicembre, sul presto dissi a Fermi che tutto era pronto ed egli ne assunse la direzione. Fermi aveva predisposto una sequenza di operazioni per il raggiungimento della criticità. L'ultima barra di Cd venne estratta a mano, segmento per segmento (da George Weil, suo collaboratore ancora dai tempi della Columbia): ad ogni arresto si misurava l'attività neutronica e Fermi confrontava i risultati con le previsioni basate sulle misure precedenti. Il procedimento convergeva rapidamente ed egli dimostrava una crescente fiducia. Sicché quando si arrivò all'ultimo segmento Fermi era certo che la criticità sarebbe stata allora raggiunta. Infatti quando la barra di Cd 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, con un $k_{\text{eff}} = 1,0006$ a una potenza massima di $\frac{1}{2}$ watt.

Abbreviazioni e sigle.

APO	(Atomic Physics Observatory della Carnegie Institution)
FNM	(Fermi, Note e Memorie - Citate a Nota 1, pag. 1)
GWU	(George Washington University)
KWI	(Kaiser Wilhelm Institut)
Met Lab	(Metallurgical Laboratory, nome di copertura della sezione di Chicago del Manhattan Project, diretta da A. H. Compton)
NAS	(National Academy of Sciences)
NDRC	(National Defense Research Council)
OSRD	(Office of Scientific Research and Development)
S1	(ex UC, sezione dell'OSRD)
UC	(Uranium Committee)

Fra le tante opere sull'argomento si consigliano:

DE WOLF SMYTH H., *Atomic Energy for Military Purposes* (Princeton University Press) 1945. È il primo rapporto ufficiale del Governo Americano, pubblicato nell'agosto 1945 all'indomani delle bombe su Hiroshima e Nagasaki.

SEGRÈ E., *Enrico Fermi, Fisico* (Zanichelli Ed.) II° ed. 1987. Una biografia scientifica completa scritta dall'allievo collaboratore ed amico Segrè, anch'egli Premio Nobel per la Fisica. Contiene una ricchissima bibliografia.

FERMI L., *Atomi in Famiglia* (Mondadori Ed.) 1954. Enrico Fermi visto dalla moglie in una affettuosa e arguta biografia.

RHODES R., *The making of the Atomic Bomb* (Simon Schuster Publ.) 1988. La più esauriente e documentata storia della Bomba Atomica americana: ha costituito un prezioso e costante riferimento per l'Autore.

ALLARDICE C. e TRAPNELL E. R., *The first Pile*, U.S. Atomic Energy Commission, Report TID 292. Costruzione e avviamento della I Pila, scritto nel 1946 sulla base dei ricordi di una dozzina dei presenti allo Stagg Field di Chicago il 2 dicembre 1942. (Il Rapporto è stato tradotto e stampato a cura del Forum Italiano dell'Energia Nucleare nel 1982 in occasione del 40° anniversario della Pila di Fermi.)

Symposium dedicated to Enrico Fermi (Roma, Accademia Nazionale dei Lincei) 1993. Scritti di collaboratori di Fermi e di altri esperti internazionali in occasione del 50° anniversario del I Reattore.

DE MARIA M., *Fermi, un Fisico da Via Panisperna all'America*, Collana *I grandi della Scienza* (Le Scienze Ed.) Aprile 1999. Recentissima biografia ricca di documenti e di fotografie d'archivio.

Carlo Salvetti è Professore Universitario, autore e promotore di studi, ricerche e realizzazioni nel campo dell'Energia Nucleare. Ha ricoperto prestigiosi incarichi in Italia, presso il CNEN, e all'estero, come la Presidenza dell'Agenzia Internazionale dell'Energia Atomica delle Nazioni Unite.
