

Capitolo primo Le armi nucleari

L'avvento delle armi nucleari è stato un evento epocale, con impatto pervasivo su tutta la società umana, tanto segnare l'inizio di un'"era atomica". La distruzione pressoché istantanea di Hiroshima colse di sorpresa e scosse profondamente tutto il mondo, che pure stava sperimentando la più micidiale guerra mai combattuta nella storia.

Le armi nucleari sono le uniche vere armi di distruzione di massa, e alle usuali forme di luttu e distruzione aggiungono i danni dovuti alle radiazioni e alla contaminazione radioattiva su territori vasti e per tempi lunghi; anche se durante la seconda guerra mondiale bombardamenti strategici con armi convenzionali hanno prodotto distruzioni analoghe a quelle di Hiroshima e Nagasaki, per esempio a Tokyo e a Dresda, va osservato che in questi casi furono necessari centinaia o migliaia di aerei ed enormi quantità di esplosivi per compiere la distruzione, mentre un solo aereo e un unico ordigno bastarono nel caso dei bombardamenti nucleari.

La loro enorme potenza, assolutamente senza precedenti, crea di fatto una differenza anche qualitativa con ogni altro strumento bellico e rende impossibili forme di difesa e di profilassi e vacui i programmi di protezione civile. Molti popoli per tutta la guerra fredda vissero nella quotidiana paura di una guerra nucleare totale, con le sue terribili conseguenze globali. Il pubblico si sentì indifeso anche perché privo degli strumenti culturali per comprendere la natura delle armi nucleari, mentre aveva avuto esperienza delle altre armi nella tradizione o ne intuiva facilmente l'effetto, come nel caso di armi tossiche e infettive. Le armi atomiche entrarono così nell'immaginario collettivo, con riverberi in tutte le arti, e "atomico" acquistò la valenza semantica di uno stato di potenza irresistibile, nei contesti più disparati.

In effetti lo *status* speciale delle armi nucleari non è dovuto solo alla singolarità tecnologica ma è anche frutto di una convenzione (Shelling 1994); infatti la concezione pubblica del ruolo degli armamenti è soprattutto un fenomeno storico e culturale, diretto da considerazioni sociali e politiche. Ciò che rende un'arma "speciale" non sono solo le sue caratteristiche fisiche ma anche il contesto strategico, normativo e culturale, inclusi gli atteggiamenti di una data civiltà riguardo ai conflitti; così è stato nel passaggio dalle armi di bronzo a quelle di ferro, con l'introduzione delle artiglierie (~400 a. C.), la diffusione medievale della balestra, la comparsa delle armi da fuoco individuali, fino all'impiego delle armi chimiche nella prima guerra mondiale.

È quindi cruciale il valore politico delle armi nucleari: esse sono diventate simbolo e metafora di potenza mondiale, un motivo di orgoglio nazionale e un'aspirazione per paesi che vogliono affermarsi localmente o globalmente, anche se in parallelo il loro "fascino" iniziale è andato via via perdendosi presso l'opinione pubblica mondiale.

Nel corso degli anni le armi nucleari hanno trovato la loro via all'interno della dottrina e delle strutture militari delle maggiori potenze, diversificandosi e moltiplicandosi per adattarsi alle esigenze strategiche e tattiche fino a divenire un elemento determinante della politica estera e militare dei paesi nucleari e a indirizzare in modo significativo, direttamente o indirettamente, l'evoluzione delle relazioni internazionali di tutto il mondo.

La corsa agli armamenti nucleari ha creato all'interno delle potenze nucleari nuovi gruppi di potere scientifico-industriale-militare attorno allo sviluppo e alla produzione di ordigni e dei loro vettori, gruppi su cui spesso la stessa politica ha un limitato controllo effettivo.

Accanto a questo impatto globale sulla storia e società contemporanee, la realizzazione della bomba nei vari paesi ha creato nuovi rapporti fra la comunità scientifica e la società, con implicazioni sul modo di far ricerca, ponendo agli scienziati problemi etici cui non erano preparati e imponendo loro una revisione dei rapporti di lealtà verso i propri governanti a fronte di una più profonda responsabilità nei confronti di tutta l'umanità, anticipando problemi etici della ricerca in altri settori che presentano una dualità di impieghi, sia civili che militari.

Tutte queste problematiche sono emerse già in tutta la loro evidenza man mano che nei vari paesi procedevano le ricerche verso il controllo dell'energia liberata nella fissione nucleare, e tuttora non hanno trovato una definitiva soluzione, andando ad aumentare il fardello di problemi cruciali che il secolo XX ha lasciato in eredità.

Nonostante l'impegno di grandi personalità della cultura, della scienza e delle religioni, l'azione di organizzazioni civili in tutto il mondo, i limiti operativi delle armi, gli enormi costi per la creazione delle forze armate necessarie e per il mantenimento degli arsenali, i pericoli intrinseci, e la cessazione della stessa guerra fredda, non si è ancora riusciti a bandire definitivamente tali armi e procedere alla loro eliminazione, a differenza di quanto si è invece raggiunto con i bandi delle armi biologiche e chimiche (vedi capitolo settimo). Serve un profondo cambiamento culturale nel concepire le relazioni fra i paesi e il concetto stesso di sicurezza, poiché, come osservò Einstein nell'agosto 1945, *la prima bomba atomica ha distrutto ben più che la città di Hiroshima. Ha fatto esplodere le nostre superate idee politiche, quali le abbiamo ereditate* (Nathan and Norden 1960).

1. Le reazioni di fissione e fusione nucleari

Gli studi sulla struttura della materia hanno chiarito che gli elementi chimici sono caratterizzati a livello fondamentale da atomi, che sono composti di un piccolissimo nucleo centrale, che contiene praticamente tutta la massa ed è carico di elettricità positiva, e di una nuvola di elettroni carichi di elettricità negativa in moto attorno al nucleo; la carica totale dell'atomo è nulla. I nuclei sono a loro volta costituiti da un insieme di particelle di due tipi, molto simili fra loro a parte la carica elettrica: i protoni elettricamente carichi e i neutroni (simbolo n), neutri.

La struttura elettronica degli atomi è responsabile delle proprietà chimiche della materia, mentre nel nucleo agiscono delle forze, molto più intense di quelle elettriche, che garantiscono la solidità del nucleo stesso a fronte della repulsione elettrostatica fra i protoni e sono alla base dei vari processi nucleari.

Il primo fenomeno nucleare a venir conosciuto, sul finire del secolo XIX, è stata la radioattività naturale: alcuni nuclei atomici si trasformano spontaneamente in altri nuclei emettendo radiazioni energetiche. I decadimenti radioattivi principali sono di 3 tipi:

- alfa (α) con emissione di un nucleo di elio (simbolo He, costituito da due protoni e due neutroni),
- beta (β) con emissione di un elettrone e un neutrino,
- gamma (γ) con emissione di un fotone (radiazione elettromagnetica di altissima energia).

Il decadimento radioattivo di un nucleo avviene in modo casuale con una probabilità fissa caratteristica del processo. Il tempo di dimezzamento misura il tempo necessario affinché decada il 50% dei nuclei radioattivi; ad esempio, dopo 10 tempi di dimezzamento rimane meno di un millesimo dell'isotopo iniziale. Più piccolo è il tempo di dimezzamento, prima la sostanza radioattiva si trasforma. I tempi di dimezzamento variano enormemente a seconda delle specie nucleari, da

milionesimi di secondo a miliardi di anni. Va osservato che praticamente ogni cosa nell'universo e sulla terra, compreso il nostro corpo, contiene una piccola frazione di nuclei radioattivi e che nelle reazioni fra nuclei si possono creare nuove specie nucleari artificiali che sono radioattive. L'unità di misura di radioattività è il becquerel, simbolo Bq, dal nome del suo scopritore (Henri Becquerel): 1 Bq corrisponde a una disintegrazione al secondo. Speciali sostanze radioattive hanno attualmente largo impiego in medicina, sia per diagnosi che per terapie, e per analisi non distruttive industriali e di beni artistici.

Un dato elemento chimico si presenta in natura con un numero fisso di protoni, uguale al numero di elettroni nella corteccia atomica, ma con un numero variabile di neutroni; queste specie sono dette isotopi dell'elemento e hanno le stesse proprietà chimiche, ma differenti caratteristiche nucleari, tanto che alcuni isotopi dello stesso elemento possono essere stabili e altri radioattivi. I nuclei sono così individuati dal numero di protoni (Z) e dal numero di massa (A), dato dal numero totale di protoni e neutroni. Ad esempio, l'elemento più pesante, l'uranio (Z=92, simbolo U), si presenta in natura come una miscela di tre isotopi differenti, tutti instabili, ma con un tasso di decadimento estremamente piccolo, mentre l'elemento più leggero, l'idrogeno (Z=1, simbolo H), si presenta in tre isotopi, di massa 1, 2 (deuterio, simbolo D) e 3 (trizio, simbolo T), i primi due stabili e il terzo radioattivo (Tabella 1).

Tabella 1. Isotopi dell'idrogeno e dell'uranio naturale

isotopo	frazione percentuale	tempo di dimezzamento
Z=1 H-1	99,985	stabile
Z=1 H-2 o D	0,015	stabile
Z=1 H-3 o T	tracce	12,3 anni
Z=92 U-238	99,2745	4,468 10^9 anni
Z=92 U-235	0,72	7,038 10^8 anni
Z=92 U-234	0,0055	2,455 10^5 anni

Le forze nucleari sono estremamente intense e i singoli processi nucleari coinvolgono quantità di energia tipicamente milioni di volte superiori a quelle dei processi chimici, come illustrato dagli esempi in Tabella 2 [nota1].

Tabella 2. Energia rilasciata in alcuni processi chimici e nucleari

combustione di un atomo di carbonio	4,2 eV
esplosione di una molecola di tritolo (TNT)	11 eV
radioattività alfa	4 MeV
fusione nucleare deuterio-trizio	17,6 MeV
fissione dell'uranio	235 MeV

La fissione nucleare, scoperta alla fine del 1938, è un processo tipico dell'uranio e dei nuclei ancora più pesanti (plutonio, americio,...): il nucleo fissile, a seguito dell'assorbimento di un neutrone, si mette a vibrare fino a spaccarsi in due nuclei di massa intermedia (compresi fra il selenio e il tantalio), emettendo una grande quantità di energia (Tabella 2) mentre i nuclei "figli" rilasciano alcuni neutroni.

Poiché gli atomi sono per lo più vuoti e le forze nucleari attive fra nuclei e neutroni hanno un cortissimo raggio d'azione, di un fiotto di neutroni lanciato contro un blocco di materiale fissile solo una frazione interagisce con i nuclei fissili; a seguito dell'interazione sono possibili più fenomeni competitivi con la fissione, quali

l'urto senza assorbimento e l'assorbimento senza fissione, ogni processo caratterizzato da una probabilità ben definita, che dipende fortemente sia dalla composizione isotopica del materiale che dall'energia dei neutroni incidenti. Per U-235, U-233 e plutonio (simbolo Pu) la probabilità di fissione è sempre superiore a quella di assorbimento e cresce notevolmente al diminuire dell'energia dei neutroni, mentre nell'U-238 i neutroni iniziano a produrre fissione praticamente solo al di sopra di 1 MeV di energia, e con probabilità sempre inferiore a quella degli altri materiali fissili. La fissione nucleare può avvenire anche spontaneamente, senza interazione con neutroni: è un processo estremamente raro nell'uranio, ma abbastanza significativo nel Pu-240 da richiedere, come vedremo, lo sviluppo di una specifica tecnologia per l'innescò di bombe al plutonio.

Altre reazioni nucleari altamente energetiche sono date dal processo inverso, in cui nuclei leggeri si fondono a formare nuclei più pesanti, spesso con emissione di neutroni. La fusione di deuterio e trizio in elio raggiunge una densità di energia per unità di massa 4 volte quella della fissione di elementi pesanti e 40 milioni di volte l'esplosione di TNT [nota 2].

Tabella 3. Reazioni di fusione di isotopi dell'idrogeno ed elio

Reazione	Energia prodotta
$D+D \rightarrow H+T$	4,0 MeV
$D+D \rightarrow He-3 + n$	3,3 MeV
$D+He-3 \rightarrow He-4 + H$	18,3 MeV
$T+T \rightarrow He-4 + 2n$	11,3 MeV
$D+T \rightarrow He-4 + n$	17,6 MeV

Mentre la fissione avviene a condizioni normali, e anche spontaneamente, fusioni nucleari si hanno solo se il combustibile è portato a temperature e pressioni eccezionali. Questo poiché solo allora i due nuclei acquisiscono sufficiente energia cinetica da giungere tanto vicini che le forze nucleari, intense ma a cortissimo raggio d'azione, possano legarli in un unico nucleo, vincendo la repulsione elettrostatica agente fra le loro cariche elettriche, entrambe positive, che li spinge invece ad allontanarsi l'uno dall'altro. In pratica, per avere una probabilità significativa che avvenga la reazione, occorre raggiungere temperature dell'ordine di centinaia di milioni di gradi e altissime pressioni.

Queste condizioni estreme si trovano solo nelle stelle, la cui sorgente di energia sono appunto le reazioni di fusione, che vi realizzano via via la sintesi degli elementi presenti nell'universo dall'idrogeno originario fino al ferro [nota 3]. Ad esempio, nel centro del sole, grazie all'enorme forza gravitazionale, la densità del materiale è altissima, oltre 150.000 kg/m^3 (ossia 150 volte quella dell'acqua a temperatura normale) e fusioni avvengono a temperature di circa 16 milioni di gradi, abbastanza lentamente da non farlo esplodere. Invece, in una bomba il combustibile deve raggiungere una temperatura di 200 milioni di gradi e una densità di decine di tonnellate per metro cubo [nota 4]. L'unico mezzo per creare in una bomba le condizioni necessarie all'innescò di reazioni di fusione è un'esplosione nucleare a fissione, che pertanto costituisce la prima fase di ogni arma nucleare.

La reazione di fissione a catena

L'energia emessa in una singola fissione nucleare è minima a livello macroscopico, ma se una massa significativa di materiale subisce fissione contemporaneamente

l'energia liberata è enorme e genera un'esplosione di immane potenza: in 1 kg d'U-235 ci sono $2,58 \times 10^{24}$ nuclei e nella loro fissione simultanea l'energia prodotta raggiunge quasi 20 milioni di kilowattora, equivalente a quella dell'esplosione di circa 18 mila tonnellate (18 kton) di tritolo [nota 5]. Per ottenere un tale effetto occorre la presenza nella massa fissile di un numero di neutroni liberi ancora più alto di 10^{25} , ossia significativamente superiore a 10^{23} per centimetro cubo, dato che solo una parte di essi produce una fissione. Non esiste la possibilità di fornire un tale impulso di neutroni dall'esterno, ma è la fissione stessa che può generarli in tempi brevissimi se procede a cascata (reazione a catena), ossia se in ogni fissione vengono prodotti più neutroni e i nuovi neutroni inducono via via nuove fissioni in un processo di moltiplicazione geometrica. Ad esempio, se ogni fissione produce due neutroni in grado di produrre nuove fissioni, a partire dal primo neutrone si giunge a $1,2 \times 10^{24}$ neutroni in 80 generazioni.

Le condizioni per una reazione a catena sono molto stringenti:

1. in ogni fissione deve venir generato più di un neutrone,
2. i neutroni devono interagire con i nuclei fissili; anche se questi materiali sono molto densi, gli atomi sono quasi del tutto vuoti e i neutroni possono sfuggire,
3. a seguito dell'interazione si deve produrre fissione e non uno dei processi competitivi,
4. i neutroni non devono venir assorbiti da impurità.

Il parametro caratteristico della reazione a catena è il fattore di moltiplicazione dei neutroni (simbolo k) dato dal rapporto fra il numero di neutroni nella generazione corrente e quello nella generazione precedente. A seconda che k sia minore, uguale o maggiore di 1, si è in condizione sottocritica, critica o supercritica; la reazione a catena si spegne per k minore di 1, rimane stazionaria se k è uguale a 1 e continua a crescere esponenzialmente nel caso supercritico.

In pratica i punti cruciali sono due: limitare al minimo le perdite di neutroni dovute ai vari fattori, in particolare la dispersione attraverso la superficie del materiale, e disporre di materiale che interagendo con i neutroni generati dalla catena di reazioni subisca fissione liberando nuovi neutroni. Poiché l'energia tipica dei neutroni prodotti è di circa 2 MeV ("neutroni veloci", velocità di circa 20.000 km/s) e diminuisce rapidamente per interazioni col materiale, l'U-238, che a tali energie assorbe neutroni senza fendersi, non può sostenere una reazione a catena, mentre U-235, U-233 e plutonio sono in grado di farlo, dato che per essi la fissione è circa 4 volte più frequente della cattura neutronica, come si vede nella Figura 1.

Figura 1. Frequenza dei processi di fissione e di assorbimento neutronico per vari nuclei interagenti con neutroni termici e veloci, espressa mediante la sezione d'urto [nota 6].

La probabilità di fissione dell'U-235 è così grande per interazioni con neutroni in equilibrio termodinamico con l'ambiente ("neutroni termici" di velocità attorno a 2 km/s ed energia 0,025 eV), che in tali condizioni basta la piccola frazione di U-235 nell'uranio naturale per sostenere una reazione a catena, purché appunto i neutroni veloci di fissione vengano rallentati prima di interagire con altro materiale fissile. I neutroni perdono rapidamente energia urtando nuclei di elementi leggeri, e diventano termici, in media, dopo 26 urti con l'idrogeno, 31 con deuterio e 118 con carbonio.

La fissione a catena con neutroni termici richiede la costruzione di grandi "pile" di materiali "moderatori" (grafite, acqua o acqua pesante, in cui il deuterio sostituisce l'idrogeno) al cui interno sono inserite opportunamente barre di uranio naturale, se il

moderatore è acqua pesante o grafite, o leggermente arricchito in U-235 (fra il 2,5 e il 5%, *Low-Enriched Uranium* - LEU), in moderatori ad acqua per compensare l'assorbimento di neutroni. L'idrogeno è il moderatore più efficace, e più economico, ma tende ad assorbire neutroni per trasformarsi in deuterio, la grafite deve venir purificata dalle impurezze che assorbono neutroni, per cui il moderatore ideale è la relativamente costosa acqua pesante. L'U-238 non può venir utilizzato come moderatore poiché, quando l'energia dei neutroni scende sotto i 0,2 MeV (e quindi ben prima di rallentare a velocità termica) la probabilità che esso li assorba senza produrre fissione diviene altissima rispetto a ogni altro processo. La reazione a catena con neutroni termici procede lentamente, sia per il tempo di rallentamento che per la bassa velocità finale dei neutroni: l'intervallo di tempo fra fissioni successive è in media 40 microsecondi.

Questa modalità è alla base dei reattori nucleari, ove la reazione viene mantenuta in condizione critica o leggermente sottocritica con barre mobili di controllo composte da materiali che assorbono neutroni, rallentando così la reazione a catena secondo necessità. L'energia prodotta nel reattore viene trasferita ai generatori di elettricità con un mezzo refrigerante, lo stesso moderatore se si tratta di acqua o acqua pesante, o gas o acqua per i reattori a grafite [nota 7].

La prima reazione a catena auto-sostenuta artificiale venne prodotta il 2 dicembre 1942 a Chicago sotto la direzione di Enrico Fermi nella "pila" sperimentale CP1 costituita da blocchetti di uranio naturale immersi in una struttura di grafite, che raggiunse la potenza massima di 200 W. La potenza tipica di un impianto elettronucleare attuale è di 4 GW che comporta un consumo di circa 20 tonnellate di LEU all'anno. Esistono anche reattori "veloci" che non moderano i neutroni emessi e usano uranio arricchito al 20-30% o plutonio; i compatti reattori navali usano per la gran maggioranza uranio arricchito fino anche al 97,3%.

Val la pena ricordare che reazioni di fissione a catena sono avvenute anche naturalmente. Nel 1972 si è scoperto che in un giacimento di uranio a Oklo (Gabon) 1950 milioni di anni fa si sono prodotte reazioni a catena intermittenti per più di 150.000 anni, generando circa 500 GJ di energia, il calore rilasciato da un reattore nucleare da 4 GW in circa 5 anni di funzionamento. Sono stati individuati 17 reattori naturali, che hanno consumato fra 5 e 6 tonnellate di uranio. Il fenomeno è stato reso possibile da una concomitanza eccezionale di fattori: allora il minerale conteneva una frazione più alta di U-235 (3% contro lo 0,7% attuale), il minerale era molto ricco di uranio e privo di sostanze assorbitorie di neutroni ed era presente acqua in grado di servire da moderatore.

2. Tecnologie necessarie per un'arma a fissione

Per produrre un'esplosione mediante fissione nucleare occorre che la reazione a catena si mantenga supercritica fino alla fissione simultanea di una massa significativa di materiale fissile, il che richiede almeno una cinquantina di iterazioni; va osservato che il 95% dell'energia viene rilasciata nelle ultime 3-4 generazioni.

Man mano che la reazione procede, aumentando esponenzialmente il numero di fissioni nell'unità di tempo, viene liberata energia in quantità crescente che riscalda il materiale a temperature sempre più alte, fino a farlo passare dalla fase solida a quella liquida, per poi vaporizzarlo e infine trasformarlo in un plasma, a seguito dell'espulsione degli elettroni dagli atomi [nota 8]: la densità del materiale e, conseguentemente, la frequenza degli urti neutrone-uranio (o -plutonio) diminuiscono, e viene meno la condizione di criticità. Per ottenere un'esplosione significativa è quindi necessario che la reazione a catena proceda più velocemente

della dispersione del materiale fissile: in pratica le generazioni necessarie devono compiersi in meno di un microsecondo.

Poiché, come abbiamo visto, con neutroni termici ogni generazione richiede circa 40 microsecondi, è assolutamente impossibile realizzare una bomba rallentando i neutroni di fissione, ma si devono utilizzare i neutroni veloci come sono emessi, dato che in tale caso in circa mezzo microsecondo subisce fissione una quantità di materiale sufficiente per un'esplosione significativa. I neutroni veloci producono fissione in U-235 ogni circa 10^{-8} s (4.000 volte più velocemente dei neutroni termici) e in circa 0,56 microsecondi la catena procede per 56 generazioni e produce 2×10^{24} neutroni, in grado di generare istantaneamente un'esplosione da 20 kton.

Per compensare la bassa frequenza di fissioni prodotte da neutroni veloci si deve impiegare o U-235 quasi puro o Pu-239, in una quantità superiore a un certo valor minimo (massa critica) e con una densità abbastanza elevata (densità critica) per evitare la perdita di neutroni attraverso la superficie. La massa critica dipende dal tipo di materiale fissile, dalla sua purezza e dalla struttura della bomba. Dal punto di vista teorico un'esplosione nucleare è possibile con una massa infinita di uranio arricchito in U-235 al solo 6%; la soglia di attenzione dell'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica (IAEA) è per una concentrazione di U-235 del 20% (*Highly Enriched Uranium* - HEU), mentre le armi attuali usano uranio arricchito sopra il 90% (*Weapon Grade Uranium* - WGU) o Pu-239 quasi puro, entrambi in forma metallica.

La massa critica può venir molto ridotta circondando l'esplosivo con del materiale che rifletta indietro i neutroni che fuoriescono e ritardi l'espansione del materiale attivo. Per esempio, uno spesso strato d'uranio naturale attorno al nucleo di una bomba riduce la massa critica di una sfera di U-235 puro da 52 a 15 kg e di Pu-239 da 10 a 4 kg [nota 9]. Altri materiali utilizzabili quali borraggio-riflettore sono l'oro, il tungsteno e il renio, anche combinati con il berillio, che è un ottimo riflettore, ma troppo leggero per rallentare efficacemente l'espansione [nota 10]. La massa critica di una sfera di uranio arricchito al 20% con un riflettore di 5 cm di berillio è di 400 kg.

Il prerequisito essenziale per la realizzazione di una bomba a fissione è quindi la disponibilità di quantità supercritiche di uranio altamente arricchito o plutonio, materiali fortunatamente rarissimi o non esistenti in natura.

Acquisizione di materiale fissile: arricchimento dell'uranio

Il processo di arricchimento dell'uranio nell'isotopo U-235 è estremamente difficile e delicato e richiede lo sviluppo di tecniche specifiche basate su tecnologie avanzate in vari settori industriali. Va subito osservato che la stessa tecnologia di arricchimento può venir utilizzata per obiettivi militari (per ottenere HEU o WGU) ma anche a scopi civili (per la produzione di LEU per impianti elettronucleari) e costituisce quindi un punto cruciale di contatto fra gli usi pacifici e quelli militari dell'energia nucleare.

Ogni processo di arricchimento parte da uranio con basso tasso di U-235 (per esempio uranio naturale) e produce da una parte uranio arricchito e dall'altra uranio impoverito, che contiene un residuo di U-235 fra 0,2% e 0,3% (*Depleted Uranium* - DU). I parametri fondamentali che caratterizzano i vari processi di arricchimento sono il fattore di separazione e la capacità di arricchimento; il fattore di separazione misura il guadagno ottenuto ed è dato dal rapporto dell'abbondanza relativa dei due isotopi nel prodotto arricchito rispetto a quella del residuo impoverito. Poiché il fattore di separazione è tipicamente molto piccolo, per raggiungere alti arricchimenti il processo va iterato molte volte e gli impianti di produzione vanno strutturati in molteplici stadi successivi.

La capacità di un processo, o impianto, di arricchimento di uranio si misura in unità di lavoro di separazione (*Separative Work Units - SWU*): il numero di SWU necessarie per produrre una certa quantità di uranio arricchito a un prescelto tasso finale dipende dal tasso del materiale iniziale e da quello dell'uranio impoverito residuo. Ad esempio, partendo da uranio naturale (allo 0,72%) e lasciando l'uranio impoverito allo 0,2%, sono necessari circa 230 kg d'uranio naturale e 220 SWU per produrre 1 di WGU al 93% impiegabile per una bomba; bastano invece 7,5 kg d'uranio naturale e 6,5 SWU per 1 kg di LEU al 4% utilizzabile per reattori elettronucleari [nota 11].

Tabella 4. Efficienza di alcune tecnologie di arricchimento dell'uranio (Harney et al. 2006).

Tecnologia	fattore di separazione	numero di stadi per WGU al 90%	energia richiesta kWh/SWU
Diffusione gassosa	1,0040 – 1,0045	3500 – 4000	2500
Centrifugazione	1,2 – 1,5	40 – 90	100 – 200
Aerodinamica	1,015 – 1,030	540 – 1100	3600 – 4000

Diversi metodi di arricchimento sono stati studiati e variamente sviluppati, tutti estremamente lenti ed enormemente dispendiosi per la messa a punto della tecnologia, che di regola impone anche l'impiego di materiali speciali, e per consumi energetici [nota 12]. I metodi finora impiegati con successo si basano sulla differenza di massa degli isotopi U-235 e U-238: tale differenza è minima (3 parti su 238) e quindi impone un'estrema accuratezza in ogni fase del processo.

Attualmente due tecniche sono in uso: la diffusione gassosa e la centrifugazione; la prima ha avuto una grande espansione fino agli anni '80, con alcuni impianti ancora attivi in USA e in Francia, ma in via di chiusura, mentre ora è assolutamente dominante la centrifugazione, che richiede impianti più compatti e presenta consumi molto inferiori, a parità di resa (Tabella 4).

Entrambi i processi utilizzano come materiale di lavoro il gas esafluoruro d'uranio (UF_6), che è l'unico composto dell'uranio che sia fluido a temperature ragionevoli; poiché il fluoro possiede un unico isotopo, le differenze di massa del UF_6 sono dovute unicamente all'uranio. Il suo impiego presenta notevoli difficoltà, con la sua famigerata reputazione di divoratore di vetro, metalli e pazienza umana: è tossico, altamente corrosivo, solidifica appena la temperatura scende sotto i 57 °C, reagisce rapidamente con molte sostanze, inclusa l'acqua, a formare composti solidi e la sua stessa produzione a partire dall'ossido d'uranio (*yellowcake*) richiede una serie di reazioni chimiche ad altissima temperatura in impianti speciali (Harney et al. 2006). Una volta arricchito, l'esafluoruro di uranio viene convertito con processi chimici in ossido d'uranio per usi civili o in uranio metallico a scopi militari.

Il metodo della **diffusione gassosa** si basa sul fatto che in un gas miscela di due componenti le molecole più leggere si muovono con velocità media maggiore di quelle più pesanti e quindi urtano più frequentemente le pareti del contenitore: se queste hanno pori del diametro di una frazione di micron (che lasciano passare singole molecole ma non un flusso continuo di gas) le molecole più leggere e veloci hanno maggiore probabilità di attraversare le pareti. I diffusori per l'uranio contengono al loro interno dei cilindri coassiali fatti di una membrana cribrosa (Figura 2) che viene appunto attraversata prevalentemente dalla componente con U-235; per aumentare la frequenza degli urti si fa diffondere il gas UF_6 ad alta

pressione: il gas che fuoriesce dalla membrana arricchito leggermente (dello 0,43%) in U-235, viene nuovamente compresso e il processo si ripete. Per ottenere uranio militare sono necessari 3500-4000 stadi disposti in cascata e opportunamente accoppiati; per la produzione di quantità significative si richiedono molte cascate in parallelo. Questa tecnica pone notevoli problemi tecnologici (Zentner et al. 2005), in particolare per la manifattura e il mantenimento delle membrane porose, data anche l'alta corrosività del UF_6 , e richiede enormi quantità di energia [nota 13].

Figura 2. Schema di un diffusore per l'arricchimento dell'uranio.

La diffusione gassosa è stata sviluppata durante la seconda guerra mondiale dagli inglesi e impiegata nel progetto Manhattan (vedi Capitolo Secondo) per bassi arricchimenti: impianti pienamente operativi per produzione militare e civile sono stati realizzati in USA (1945), URSS (1951), UK (1954), Francia (1964), Cina (1964) e Argentina (1986); la diffusione gassosa è rimasto l'unico metodo di arricchimento impiegato da USA e Francia sia per usi militari che civili e fino al 1976 ha fornito oltre il 90% di tutto l'uranio arricchito dei paesi occidentali.

La **centrifugazione** per la separazione dell'uranio richiede ultracentrifughe dalle prestazioni eccezionali: la miscela di UF_6 gassoso viene immessa in un contenitore cilindrico verticale (in cui viene precedentemente fatto il vuoto) al cui interno un rotore, alimentato da un motore elettrico, ruota ad alta frequenza raggiungendo velocità tangenziali fra 400 m/s e 700 m/s [nota z4] in modo da generare forze centrifughe circa 100.000 volte la gravità; le molecole di UF_6 si separano a seconda della loro massa, e quelle con l'isotopo 238 vengono spinte verso l'esterno; un gradiente termico induce una circolazione assiale del gas che muove le molecole leggere verso l'alto, aumentando la separazione delle due componenti e quindi l'efficienza della centrifuga.

Figura 3. Schema di una centrifuga per l'arricchimento dell'uranio.

L'arricchimento prodotto da una singola centrifuga cresce con la lunghezza del rotore e la velocità tangenziale, ma queste non si possono aumentare sia per problemi tecnici (precisione e qualità dei componenti, durata e qualità delle sospensioni) sia per limiti fisici dovuti alle velocità critiche di ogni sistema rotante, che portano a deformarlo: superando una prima velocità critica un cilindro rotante si piega verso l'esterno a forma di banana; oltre una seconda velocità critica assume una configurazione a "S" e via via in forme sempre più complesse. Poiché più i rotori sono lunghi, prima incontrano le velocità critiche, per evitare deformazioni le prime generazioni di centrifughe limitavano la lunghezza (tipicamente 50 cm) in modo da operare in regime sottocritico, raggiungendo capacità di circa 1 SWU/anno; in seguito si sono realizzate centrifughe supercritiche, in grado di superare almeno la prima velocità critica: le ultime TC-21 dell'Urenco [nota 15] raggiungono i 3 m di lunghezza e la capacità di circa 100 SWU/anno.

La tecnologia è in continuo sviluppo alla ricerca di prestazioni sempre più avanzate a consumi sempre più ridotti, risolvendo varie sfide tecniche dei componenti critici [nota 16]. Nonostante le alte prestazioni raggiunte (fattore di separazione fra 1,2 e 1,5) gli impianti di produzione richiedono migliaia di centrifughe, organizzate in pochi stadi per la produzione di LEU, ma fino a 110 stadi per WGU; per la produzione dei 20-25 kg di WGU necessari per una bomba 1.000 centrifughe da 1,5 m di lunghezza devono lavorare in una cascata di 30 stadi continuamente per un anno alla velocità di almeno 400 m/s (Pascolini, 2008).

Figura 4. Una cascata di centrifughe in un impianto dell'Urenco.

Le ultracentrifughe necessarie per arricchire l'uranio sono state considerate nel programma nucleare tedesco nella seconda guerra mondiale e messe a punto nel dopoguerra in URSS, inizialmente con la collaborazione di scienziati tedeschi: il primo impianto pilota fu completato nel 1953 e la prima struttura industriale divenne operativa nel 1957. Scienziati tedeschi rientrati in Germania hanno portato la tecnologia in occidente (1960), dando origine alle strutture industriali di produzione inglesi, olandesi e tedesche; altri paesi che hanno realizzato successivamente impianti operativi sono Cina, Giappone, Pakistan, Brasile, India e Iran.

Altri due metodi di arricchimento hanno portato alla produzione di WGU impiegato per la realizzazione di armi nucleari: la separazione elettromagnetica e la tecnica aerodinamica.

La **separazione elettromagnetica** (*Electromagnetic Isotope Separation - EMIS*) si basa sul principio fisico che ioni della stessa energia, ma di massa differente, in un campo magnetico percorrono traiettorie diverse: precisamente, gli ioni più pesanti (U-238) vengono deflessi in misura minore di quelli leggeri (U-235), per cui posizionando in modo opportuno i collettori degli ioni all'interno del campo magnetico si possono separare le due componenti isotopiche. Ioni positivi di uranio vengono prodotti a partire da tetracloruro di uranio metallico (UCl_4) [nota 17] in una sorgente collocata all'interno di un forte campo magnetico in cui viene generato il vuoto: gli ioni vengono accelerati ad alta velocità da un forte campo elettrico e percorrono traiettorie circolari all'interno del "calutrone" (Figura 5). L'EMIS permette di produrre WGU da uranio naturale in due soli passaggi; tuttavia richiede un migliaio di calutroni per produrre quantità significative di HEU dato che il processo è lento e il recupero del materiale fra cicli di produzione successivi richiede molto tempo.

Figura 5. Schema di un calutrone impiegato nel progetto Manhattan.

Il problema principale del metodo è la bassissima efficienza: meno della metà del UCl_4 viene tipicamente convertita in ioni di uranio e meno della metà degli ioni prodotti viene effettivamente raccolta, mentre il resto si deposita sulle pareti della camera a vuoto. Il metodo venne comunque utilizzato dagli USA per la produzione del WGU per la bomba sganciata su Hiroshima, impiegando 1100 calutroni per tre anni, ma venne abbandonato non appena messa a punto la diffusione gassosa. Il programma EMIS dell'URSS dette scarsissimi risultati e venne abbandonato in favore di metodi più efficienti. Il programma nucleare iracheno (1982 – 1990) basato su EMIS non riuscì a entrare in produzione per problemi tecnici e gli impianti vennero distrutti dopo la Guerra del Golfo.

Metodi **aerodinamici** si basano sul principio della separazione della miscela isotopica di gas mediante enormi forze centrifughe; a differenza della centrifugazione, è il flusso di gas a muoversi ad altissima velocità e venir costretto a ruotare o vorticare da apparati fissi: la forza centrifuga impone alle molecole più massive traiettorie con raggi di curvatura maggiori, permettendo la separazione isotopica. Per ottenere flussi alle velocità necessarie si mescola una piccola frazione di UF_6 (2 - 4%) con un gas leggero (96 - 98% di idrogeno o elio); il gas risultante compresso e accelerato a velocità supersoniche (~400 m/s) viene lanciato in diffusori che lo costringono appunto a una stretta rotazione o a un moto vorticoso.

Il metodo è stato inizialmente sviluppato in Germania (anni '60) e applicato negli anni '80 in Sud Africa (moto vorticoso) per la produzione di WGU impiegato nelle

proprie armi e di LEU per scopi civili. L'impianto sudafricano è stato chiuso nel 1995 in quanto non competitivo commercialmente per la bassa resa (la componente arricchita era 1/20 del flusso iniziale) e l'enorme energia richiesta. Il metodo tedesco basato sulla rotazione del getto è più efficiente (resa $\frac{1}{4}$) ma il programma successivamente sviluppato in Brasile (1967 – 1990) non ha dato risultati accettabili ed è stato abbandonato.

Accanto alle tecnologie basate sulla differenza di massa degli isotopi U-235 e U-238, sono stati studiati metodi che sfruttano il loro diverso comportamento chimico, come la preferenza per differenti stati di ossidazione e la conseguente produzione di composti chimici differenti; queste tecniche sono state sviluppate in Francia (1968 – 1988) e in Giappone (1972 – 1992), ma sono state abbandonate al livello di impianti pilota a favore di altri metodi, pur essendo stati ottenuti risultati incoraggianti.

Una tecnologia a lungo studiata (dagli anni '70) in molti paesi e con diversi approcci che sembra recentemente giunta a livello di produzione industriale è l'arricchimento mediante **laser**, basata sulla differenza fra gli spettri atomici dei due isotopi e la possibilità che un laser di una precisa lunghezza d'onda ecciti solo gli atomi di U-235, permettendone la separazione dal materiale di partenza. Almeno quattro metodi sono stati studiati e sviluppati a vario livello (Zentner et al. 2005) e nel febbraio 2012 una sussidiaria delle General Electric e Hitachi (Global Laser Enrichment) sta attendendo la licenza dal governo americano per un grande impianto di produzione di LEU mediante una tecnica (*Separation of Isotopes by Laser Excitation* - SILEX) originariamente sviluppata da ricercatori australiani. SILEX si inserisce nel tradizionale ciclo del combustibile utilizzando UF_6 e può arricchire anche uranio impoverito: un possibile processo consiste nella foto-dissociazione di UF_6 a UF_{5+} solido per la sola componente U-235 [nota 18]. Oltre ad alta efficienza il metodo promette costi d'impianto e di produzione notevolmente inferiori alle altre tecnologie.

Acquisizione di materiale fissile: produzione di plutonio

Un'alternativa all'arricchimento dell'uranio è fornita dalla produzione di plutonio [nota 19], e precisamente dell'isotopo Pu-239, un elemento artificiale di numero atomico 94, radioattivo (tempo di dimezzamento di 24.400 anni) e più fissile del U-235 [nota 20]. Il plutonio viene generato a partire da U-238 in seguito all'assorbimento di un neutrone e successivi decadimenti radioattivi [nota 21].

Come risulta dalla Figura 1, i neutroni lenti vengono assorbiti facilmente dal U-238, dando origine alle trasformazioni che portano alla produzione di plutonio, il quale quindi è una componente sempre presente del materiale esausto dei reattori nucleari: un impianto da 1 GWe moderato ad acqua genera annualmente circa 250 kg di plutonio [nota 22]. Finché il plutonio rimane nel reattore può assorbire un altro neutrone e diventare Pu-240 o subire fissione; tipicamente il plutonio nel materiale esausto di un impianto elettronucleare è una miscela di vari isotopi con numeri di massa fra 239 e 242: 50-60% di Pu-239 e 25% di Pu-240 (*Reactor-grade Plutonium* – RPu).

Per le armi nucleari si preferisce un'alta purezza dell'isotopo 239 (94% *Weapon-grade Plutonium* – WPu) in quanto meno radioattivo ma soprattutto meno soggetto a fissione spontanea [nota 23]. Per questo motivo gli impianti elettronucleari ove il combustibile rimane fino al suo massimo utilizzo non sono ideali per la produzione di plutonio militare, anche se in alcuni paesi gli stessi impianti sono stati impiegati per entrambi gli scopi: i reattori dedicati alla produzione di plutonio sono di potenza relativamente bassa, usano uranio naturale, e quindi sono moderati ad acqua pesante

o a grafite; le barre di combustibile vengono estratte frequentemente in modo che solo 1/7 del U-235 subisca fissione: in questo modo la produzione di Pu-239 raggiunge i 0,3 g per MW-giorno e si riduce sia la presenza di isotopi con più neutroni sia la radioattività del materiale esausto da trattare.

La tecnologia dei reattori a grafite (raffreddati ad acqua, come in USA, URSS e Cina o a gas, come in UK, Francia e Corea del Nord) è matura e ben nota con 110 unità di potenza superiore a 100 MWt impiegate in parte o unicamente a scopi militari. I reattori moderati ad acqua pesante (*Heavy Water Reactor* – HWR) hanno una produzione di plutonio superiore a ogni altro impianto [nota 24], e poiché l'acqua pesante ha un minimo assorbimento di neutroni sono particolarmente versatili e possono utilizzare come combustibile uranio naturale o leggermente arricchito, plutonio, combustibile esausto dei reattori moderati ad acqua e anche torio/U-233. Esistono più configurazioni di HWR, a seconda del mezzo usato come refrigerante; i più comuni (come i CANDU) sono raffreddati da acqua pesante in tubi a pressione (Figura 6) e permettono l'estrazione degli elementi di combustibile in piena produzione, minimizzando quindi la generazione di Pu-240 e di altri isotopi pesanti, riducendo in tale modo anche i problemi legati all'estrazione del plutonio dal combustibile esausto.

Figura 6. Schema di un reattore CANDU.

Reattori HWR sono stati utilizzati per la produzione di plutonio e trizio a scopi militari da USA, URSS, Francia, India, Israele e Pakistan; una quarantina di CANDU sono impiegati in vari paesi per la produzione di energia elettrica e numerosi reattori ricerca sono basati sulla tecnologia HWR.

Poiché il materiale esausto prodotto da un reattore è altamente radioattivo, l'estrazione del plutonio avviene con manipolazione a distanza e protezioni di spesso cemento armato in gran parte delle fasi dell'operazione. Molte tecniche di riprocessamento sono state sviluppate a scopo militare o civile in vari paesi; in quella attualmente più diffusa (PUREX) [nota 26] il materiale esausto, una volta liberato dal rivestimento, viene tagliato in piccoli pezzi e poi dissolto in acido nitrico; il plutonio e l'uranio vengono estratti in un solvente organico mescolato all'acido nitrico usando colonne miscelatrici a flusso pulsato (fra 30 e 120 cicli al minuto) in due o più fasi successive, per una migliore decontaminazione dai residui altamente radioattivi. Si procede quindi alla separazione dei composti dell'uranio da quelli del plutonio ed eventualmente alla separazione del Pu-239 dagli altri isotopi mediante centrifugazione.

Per l'uso militare, il plutonio deve venir trasformato in forma metallica mediante successive reazioni chimiche e può venir infine lavorato metallurgicamente senza schermature protettive, data la sua bassa radioattività; è solo pericoloso se inalato o ingerito. Nel processo di riprocessamento vanno anche prese cautele per evitare il crearsi di condizioni di criticità.

Figura 7. Interno dell'impianto di Hanford per la separazione del plutonio (USDOE).

Il plutonio metallico impiegato nelle armi, per le sue complesse proprietà chimiche e fisiche e la radioattività subisce modifiche strutturali nel tempo non ancora completamente conosciute, comportando problemi per il controllo dell'efficienza delle testate al plutonio nei depositi (Grant Cooper 2000).

Il plutonio viene recuperato dalle scorie nucleari anche a scopo civile in forma di ossido, quale combustibile degli impianti elettronucleari mescolato con ossidi di uranio (combustibile MOX); per questa ragione si stanno accumulando in vari paesi centinaia di tonnellate di plutonio, che pongono un serio pericolo per la

proliferazione delle armi nucleari, dato che il materiale può venir purificato e convertito in forma metallica, e reso di qualità militare (vedi Capitolo Terzo par.***).

limit notis justs*

3. La bomba atomica (“bomba A”)

Una volta acquisito il materiale fissile, per produrre un’arma militarmente utile occorre creare le condizioni perché la reazione a catena esplosiva avvenga con sicurezza con la potenza voluta, ma solo una volta deciso il suo impiego. I problemi principali da risolvere sono:

- mantenere il materiale fissile in condizione sottocritica ($k < 1$) prima della detonazione,
- portare il materiale fissile in condizione supercritica ($k > 2$) mantenendo bassa la densità di neutroni,
- introdurre un consistente impulso di neutroni nella massa supercritica quando ha raggiunto la condizione ottimale,
- impedire la dispersione della massa finché non abbia subito fissione la quantità di materiale fissile necessaria per produrre un’esplosione della potenza voluta.

Dal punto di vista operativo, occorre infine che le dimensioni dell’ordigno siano abbastanza piccole da poterlo lanciare sul bersaglio con opportuni vettori, aerei, missili, razzi, proiettili d’artiglieria. Queste condizioni sono in conflitto fra loro e la loro ottimizzazione richiede vaste competenze scientifiche e tecniche in molti campi.

Particolarmente delicato è il sistema d’innesco. Il rischio da evitare è una pre-detonazione, dovuta all’instaurarsi nel materiale ancora sottocritico di una reazione a catena generata dal fondo di neutroni comunque presenti nella massa, o per fissione spontanea, o per reazioni nucleari prodotte da impurità, o per la radiazione cosmica. Una reazione che inizi quando $k = 0,99$ può portare a un’esplosione in grado solo di distruggere la bomba prima del raggiungimento della condizione supercritica. In pratica l’innesco deve portare a un riassetto del materiale in una struttura supercritica il più rapidamente possibile. Ci sono due approcci fondamentali: l’incastro e l’implosione.

Innesco a incastro

Nella tecnica “a incastro”, una massa non critica (proiettile) viene “sparata” ad alta velocità con un’esplosione convenzionale entro un’altra massa non critica (bersaglio), in modo creare una massa supercritica (Figura 8). Al raggiungimento della condizione supercritica, una piccola massa di berillio viene esposta a un’intensa sorgente alfa (polonio-210) per produrre un intenso fiotto di neutroni a iniziare la reazione esplosiva. Per evitare la pre-detonazione, il proiettile e il bersaglio sono rivestiti da un involucro di boro che assorbe neutroni, il quale viene rilasciato all’impatto.

Figura 8. Schema del principio di un innesco a incastro per una bomba nucleare a uranio (Schroerer 1984).

Con questa tecnica venne costruita la bomba *little boy*, impiegata a Hiroshima; nonostante la loro bassa efficienza, che comporta l’impiego di grandi quantità di materiale fissile, il basso rapporto resa/peso, la limitata affidabilità e gravi problemi di sicurezza contro urti e cadute, armi con innesco a incastro vennero costruite per

proiettili d'artiglieria e rimasero nell'arsenale operativo americano per il teatro europeo fino al 1992, quando vennero definitivamente radiate; anche gli ordigni nucleari sudafricani utilizzarono innesco a incastro.

L'innesco a incastro è abbastanza semplice, richiedendo essenzialmente competenze di artiglieria convenzionale, e le armi di questo tipo sono praticamente state sviluppate senza la necessità di test di prova; gli esperti ritengono che sia alla portata anche di un piccolo gruppo di terroristi, come vedremo nel capitolo terzo.

Innesco a implosione

La tecnica "dell'implosione" si basa sul fatto che un aumento di densità del materiale fissile riduce il cammino libero dei neutroni, aumentando la frequenza delle fissioni: una compressione di un fattore due trasforma una massa solida leggermente sottocritica in una configurazione di quasi quattro masse critiche.

Figura 9. Schema di un innesco a implosione per una bomba nucleare a uranio o plutonio (Schroerer 1984).

Il materiale fissile in una configurazione sottocritica al centro di uno strato di materiale riflettente e ritardante viene circondato da cariche di esplosivo chimico di alta potenza disposte in modo tale che la loro detonazione in un ordine ben stabilito trasformi le onde d'urto divergenti generate dalle singole esplosioni in un'onda d'urto convergente verso l'interno a comprimere il materiale fino a raggiungere una densità supercritica (Figura 9); una volta superata la densità critica, la reazione a catena viene iniziata da una sorgente di neutroni. Si possono raggiungere pressioni fino a qualche milione di atmosfere, in grado di aumentare la densità di uranio (o plutonio) metallico tipicamente di un fattore fra 2 e 3.

L'innesco a implosione è estremamente più veloce di quello a incastro, impiegando fra 1 e 4 microsecondi, ed è indispensabile per una bomba a plutonio; infatti sia il Pu-239, e soprattutto la frazione di Pu-240 sempre presente, sono fissili spontaneamente e nel tempo necessario per un innesco a incastro possono generare una pre-detonazione a bassa potenza. Un altro vantaggio è dato dal fatto che la reazione procede più veloce e può evolvere per più stadi prima che la bomba venga dissolta, garantendo efficienze più alte; viene così notevolmente ridotta la massa critica e si sono rese possibili bombe di piccole dimensioni, dato che in schemi avanzati bastano pochi kg di esplosivo per comprimere il nocciolo fissile. Inoltre, nel caso del plutonio, viene modificata la struttura cristallina del materiale a una fase più densa accelerando ulteriormente la fissione.

L'ingegneria militare ha notevolmente sviluppato la tecnica dell'implosione preparando il materiale fissile in forma di sfera o ellissoide o cilindro cavi e creando "lenti" di esplosivo sempre più semplici ed efficaci. Le armi a implosione sono molto più sicure, affidabili e inviolabili di quelle a incastro, ma presentano una maggiore complessità tecnica e richiedono alte precisioni nella disposizione delle cariche esplosive convenzionali e di tutto il sistema meccanico ed elettronico per ottenere un'onda d'implosione delle caratteristiche e simmetria necessarie. Per questi motivi è estremamente improbabile la realizzazione da parte di gruppi terroristici di un ordigno al plutonio, che impone appunto un innesco a implosione.

L'innesco a implosione venne provato nella prima esplosione atomica, *trinity*, il 16 luglio 1945 nel deserto di Alamogordo nel Nuovo Messico; un ordigno identico (*fat man*) fu sganciato su Nagasaki il successivo 9 agosto [nota 16].

Attualmente, molti ordigni impiegano contemporaneamente sia U-235 che Pu-239 come materiale fissile e per produrre l'impulso iniziale di neutroni si usa un

generatore pulsato, un piccolo acceleratore di ioni con un bersaglio di ioduro metallico, controllabile con alta precisione.

La tecnica a implosione con l'esplosivo nucleare di forma cava permette di accrescere notevolmente la potenza delle armi a fissione e al contempo di miniaturizzarle, ricorrendo alla produzione di grandi quantità di neutroni con la reazione di fusione di 2-3 grammi di deuterio e trizio, iniettati in forma gassosa al centro della massa fissile. Basta la fissione di meno dell'1% del materiale per far raggiungere agli isotopi dell'idrogeno temperature di 20-30 milioni di gradi, sufficienti per la loro fusione in elio con la liberazione di un gran numero di neutroni di alta energia (7 volte quella dei neutroni emessi nella fissione), che non solo hanno maggior probabilità di produrre fissione e con ciclo temporale più breve, ma liberano per ogni fissione più neutroni secondari (in media 4,6 rispetto a 2,9 nel plutonio).

In questo modo si aumenta l'efficienza, avvicinandosi al limite teorico del 25%, e la resa globale (fino a circa 500 kton), si permette un significativo risparmio di materiale fissile e si evitano i pericoli di pre-detonazione e di esplosione indotta da esplosioni nucleari in prossimità; un piccolo contributo energetico viene anche dalla reazione di fusione. Queste armi a fissione potenziata (*boosted*) sono state sviluppate a partire dal 1950 e si ritiene che attualmente questo schema sia adottato per tutti gli ordigni operativi. Va osservato che il trizio è radioattivo e si trasforma spontaneamente in He-3 (tempo di dimezzamento di 12,3 anni) per cui le ampole di trizio vanno regolarmente sostituite, tipicamente ogni due anni.

4. Armi a fusione termonucleare ("bomba all'idrogeno" o "bomba H")

La fusione di deuterio e trizio in elio, per la sua alta resa energetica, attrasse subito l'attenzione degli scienziati impegnati nel progetto dell'arma nucleare americana e fin dal 1942 si considerò la possibilità della produzione di un'arma in cui la fusione fosse la principale sorgente di potenza. La realizzazione di un tale ordigno apparve immediatamente molto difficoltosa e il progetto venne accantonato per concentrare l'impegno sull'arma a fissione. Subito dopo la fine della seconda guerra mondiale ripresero le ricerche per un ordigno a fusione, anche se la comunità scientifica era divisa sull'opportunità di tale sviluppo [nota 17]. Un'arma a fusione presenta due vantaggi immediati: non esiste una massa critica per la fusione e pertanto non c'è limite alla potenza raggiungibile, e i materiali fissili rari possono venir sostituiti da deuterio, largamente disponibile.

Come abbiamo osservato, all'interno di una bomba a fissione potenziata si innesca la fusione di alcuni grammi di D e T a temperature di alcune decine di milioni di gradi essenzialmente per produrre neutroni ad aumentare il tasso di fissioni e la resa dell'arma. Ma una vera arma termonucleare richiede la fusione di una massa significativa (dell'ordine di decine di kg) per produrre energia in enorme quantità e non solo neutroni. La predisposizione del combustibile di fusione presenta due problemi: il primo è legato al trizio, che è estremamente raro in natura e la cui produzione tramite reazioni su deuterio, litio (Li) o boro (B) richiede intensi flussi di neutroni, e quindi reattori nucleari dedicati; il secondo riguarda l'individuazione di metodi per portare gli isotopi dell'idrogeno (normalmente gassosi) alle altissime densità necessarie.

In pratica si rinuncia al processo D-T per basare l'arma sulle reazioni di fusione del deuterio (vedi Tabella 3), anche se sono meno energetiche e richiedono temperature di 100-200 milioni di gradi e altissime pressioni. Il ricorso a criostati viene evitato utilizzando un composto del deuterio, il deuteruro di litio (Li D), solido a temperatura ambiente, , comunque divenuto il combustibile unico delle armi termonucleari. Le altissime temperature necessarie possono venir raggiunte solo

mediante l'esplosione di una bomba a fissione, che pertanto costituisce il primo essenziale stadio delle bombe H.

Il combustibile LiD, pur essendo solido, ha una densità estremamente lontana da quella necessaria per l'innesco dei processi di fusione, per cui occorre che esso venga opportunamente compresso prima di venir raggiunto dall'onda di calore. Questa condizione cruciale venne risolta negli USA da Stanislaw Marcin Ulam [nota 18] ed Edward Teller [nota 19] e nell'URSS da Yakov Borisovich Zel'dovich [nota 20] e Andrei Dimitrievich Sakharov [nota 21], che trovarono il modo di far comprimere il combustibile termonucleare dalla radiazione X emessa dall'esplosione a fissione: i raggi X emessi nel primo centesimo di microsecondo raccolgono la maggior parte dell'energia termica della fissione e trasmettono un'enorme pressione. I dettagli della configurazione Teller-Ulam (Zel'dovich-Sakharov) sono ancora segreti, e rimangono alla base delle moderne armi termonucleari [nota 22].

Nello schema base di un sistema a fissione-fusione-fissione, a un estremo dell'ordigno c'è una bomba a implosione potenziata con un nucleo fatto di una speciale sequenza di Pu-239, U-235, berillio, uranio naturale, inneschi di fusione a deuterio e trizio. I raggi X prodotti dalla reazione di fissione vengono focalizzati da una schiuma di stirene (essenzialmente carbonio e idrogeno) sull'elemento a fusione all'altro estremo dell'ordigno, protetto dall'onda d'urto da uno schermo d'uranio (238 o 235). L'onda di pressione della radiazione attraverso la schiuma comprime il LiD (tipicamente la densità aumenta di un fattore 1000 [nota 23]) assieme a ulteriore materiale fissile, inserito al suo interno; questo materiale diviene supercritico e la sua fissione contribuisce a portare il deuterio alle condizioni ottimali di fusione.

La fusione del deuterio produce con circa la stessa frequenza sia He-3 che T, e questi elementi vengono "bruciati" nelle reazioni D-T e D-He-3, aumentando la resa dell'arma; ulteriore trizio viene prodotto nel deuterio di litio nella reazione esotermica $\text{Li-6} + \text{n} \rightarrow \text{T} + \text{He-4}$, utilizzando i neutroni provenienti dai processi di fissione e fusione. Per l'involucro dell'arma e del contenitore del materiale di fusione si può usare uranio naturale o impoverito, in cui nuove fissioni vengono indotte dai neutroni di alta energia generati dalle reazioni di fusione (Figura 10). Si possono così costruire armi a più stadi e tarare gli effetti bilanciando i contributi di fusione e fissione.

La molteplicità dei processi coinvolti e gli stretti margini temporali per evitare la dissoluzione dell'ordigno prima di ottenere lo svolgimento ottimale delle varie fasi richiedono per queste armi vaste competenze scientifiche e la padronanza di tecnologie raffinate in molti campi e notevole potenza di calcolo per lo studio della propagazione dei raggi X e la progettazione del sistema d'ignizione del secondario

Figura 10. Disegno schematico della bomba a fusione americana W87 da 300 kton, sviluppata per i missili MX e attualmente utilizzata nei missili Minuteman III (Cox 1999).

Concepite inizialmente come un mezzo per superare i limiti di potenza delle bombe a fissione, le armi a fusione sono via via divenute l'armamento preferito anche per basse potenze per la loro sicurezza, leggerezza ed economia di materiali fissili rari.

In un processo di continui miglioramenti tecnici negli ultimi 50 anni, variando la quantità e i tipi di materiale fissile e di fusione e l'architettura della bomba, si sono potuti selezionare gli effetti dell'esplosione, modulare potenza e tipo d'azione, per ogni impiego militare immaginabile, e sono stati prodotti ordigni di varia dimensione, anche per proiettili di artiglieria da 280 mm, e armi a potenza variabile [nota 24]. Esistono bombe di potenza inferiore a 0,01 kton, mentre nel 1961 è stato

fatto esplodere dall'URSS un ordigno di 58 Mton [nota 25]. L'efficienza delle prime bombe era molto bassa ma è andata sempre crescendo: rispetto al peso dell'ordigno si è passati da una resa di 0,003 kton per kg nel 1945 a valori attuali dell'ordine di 18 kton per kg. Un'indicazione dell'aumento di efficienza delle armi è sintetizzata nella Tabella 5, che presenta la quantità di materiale fissile impiegato in testate americane di vari tipi e la loro resa (IPFM 2011).

Tabella 5. Quantità di materiale fissile e resa di tipiche testate americane.

	Plutonio	HEU	Resa	Esempi
Quantità significativa per la IAEA	8 kg	25 kg		
Armi a incastro di 1 ^a generazione	-	50 - 60 kg	20 kt	Hiroshima
Armi a implosione di 1 ^a generazione	5 - 6 kg	15 - 18 kg	20 kt	Nagasaki (6 kg di Pu)
Armi a uno stadio di 2 ^a generazione	4 - 5 kg	12 kg	40 - 80 kt	armi potenziata
Armi a due stadi di bassa resa	3 - 4 kg Pu e 4 - 7 kg HEU		100 - 160 kt	W76
Armi a due stadi di media resa	3 - 4 kg Pu e 15 - 25 kg HEU		300 - 500 kt	W87/W88
Armi a due stadi di alta resa	3 - 4 kg Pu e oltre 50 kg HEU		1 - 10 Mt	B83

Una classe di armi termonucleari a due stadi di bassa potenza è stata sviluppata negli anni '60 e '70 per produrre soprattutto intensi fasci letali di neutroni, 6 volte più delle armi di stessa potenza, e di energia fino 7 volte maggiore; queste "bombe al neutrone" (*Enhanced Radiation Weapons ERW*) sono state concepite come armi tattiche anti-carro e per sistemi antimissile balistico [nota 26]. Per ottenere neutroni energetici, queste armi utilizzavano quale combustibile di fusione una decina di grammi di gas D-T ed evitavano fissioni successive per non depauperare il flusso di neutroni; la potenza di un tipico ordigno ERW (l'americano Mk 79) era di 1 kton, per $\frac{3}{4}$ dovuta a fusione.

Nello sviluppo delle armi nucleari crescente attenzione è stata rivolta a garantire la loro sicurezza (una testata 'sicura' non genera un'esplosione nucleare né causa dispersione di plutonio in tutte le situazioni diverse dalla deliberata detonazione), affidabilità (in una testata 'affidabile' tutti i suoi sottosistemi agiscono nel modo previsto quando viene detonata) e inviolabilità (una testata nucleare perfettamente 'inviolabile' anche se catturata da un gruppo esperto non può produrre in alcun modo un'esplosione nucleare). A tal fine sono stati introdotti sistemi multipli di controllo e anti-manomissione (incluse le chiavi crittografiche PAL), selezionati esplosivi convenzionali speciali per i detonatori e ottimizzate le configurazioni meccaniche ed elettriche globali (Elliott 2005). Il mantenimento di arsenali nucleari sicuri, affidabili e inviolabili richiede verifiche costanti dello stato dei vari componenti delle armi, con eventuali sostituzioni e riparazioni, ed è una voce importante delle spese militari dei paesi con tali forze [nota 27].

Attualmente, le testate nucleari di USA, UK e Francia hanno potenze inferiori a 500 kton; la Russia schiera testate più potenti, fino a 1 Mton, mentre i missili cinesi installati prima degli anni '90 sono armati con testate da 3,3 a 5 Mton; le armi di Israele, India e Pakistan, che non forniscono dati sulle proprie forze, hanno quasi certamente potenze inferiori ai 100 kton (SIPRI 2010).

5. Effetti delle esplosioni nucleari

Ogni esplosione consiste nel rilascio estremamente rapido di una grande quantità di energia in uno spazio limitato, con un conseguente aumento della temperatura e della pressione; i materiali presenti vengono trasformati in gas compressi ad alta temperatura, che si espandono rapidamente creando un'onda d'urto che devasta l'ambiente circostante.

Un'esplosione nucleare presenta notevoli differenze fondamentali rispetto a una detonazione convenzionale: vi è anzitutto un'enorme differenza di potenza, con temperature e pressioni estremamente più alte, una frazione significativa dell'energia viene emessa sotto forma di radiazioni non solo luminose e termiche ma anche ionizzanti altamente penetranti, l'onda d'urto acquista componenti sia statiche che dinamiche, e, infine, il materiale coinvolto diviene in parte radioattivo e continua a emettere radiazioni anche per lunghi tempi.

Lo sviluppo di un'esplosione nucleare e i suoi effetti dipendono, oltre che dalla sua potenza e dal tipo di arma, dall'ambiente in cui avviene l'esplosione (in aria, a grande altezza, al suolo, sottacqua,...), dalle specifiche condizioni meteorologiche e dall'orografia e geologia del terreno. Va comunque osservato che l'area di distruzione delle armi cresce meno lentamente della potenza esplosiva, per cui le armi piccole risultano più efficienti di quelle più grandi. La differenza essenziale fra bombe A e bombe H è dovuta agli effetti della fissione del terziario, che comporta intense ricadute radioattive, mentre i fenomeni fondamentali restano invariati [nota 28]. Tutte le esplosioni nucleari hanno infatti in comune effetti distruttivi sia immediati che ritardati; i primi (l'onda d'urto, la radiazione termica e quella ionizzante immediata) producono enormi distruzioni nel giro di secondi o minuti, mentre quelli ritardati (ricaduta radioattiva e altri possibili effetti ambientali) infliggono danni su tempi che possono durare ore ma pure qualche secolo, e coinvolgere anche luoghi molto distanti dall'esplosione. Per semplicità considereremo solo il caso di esplosioni atmosferiche.

Dalla palla di fuoco alla nube radioattiva

L'enorme energia prodotta nella breve durata dell'esplosione (tipicamente $0,8 \mu\text{s}$) riscalda i materiali di cui è composta l'arma (incluso l'80% degli esplosivi nucleari originari) fino a temperature di centinaia di milioni di gradi, trasformandoli in un plasma altamente energetico di ioni positivi ed elettroni liberi con pressione milioni di volte quella atmosferica. Grandi quantità di energia sono emesse dal plasma come raggi-X, che vengono assorbiti in qualche metro d'aria, portando alla formazione di una massa d'aria estremamente calda (fino a un milione di gradi) e incandescente, una "palla di fuoco" che emette energia termica nella forma di radiazioni elettromagnetiche nei campi infrarosso, visibile e ultravioletto.

Contemporaneamente alla liberazione dei raggi-X, i materiali della bomba iniziano a espandersi a velocità supersonica comprimendo e riscaldando l'aria circostante. Questo impulso genera l'onda d'urto distruttiva e ulteriore radiazione termica: infatti l'interazione dell'aria riscaldata dall'onda di compressione con la palla di fuoco generata dai raggi-X genera l'emissione di luce visibile e infrarossa, dando origine al caratteristico doppio impulso luminoso delle esplosioni nucleari.

La palla di fuoco generata da un'esplosione da 1 Mton è visibile fin oltre 1.200 km di distanza dal punto zero (intercetta a terra della verticale per il punto di esplosione) e a 80 km appare molte volte più brillante del sole a mezzogiorno. La palla di fuoco si

espande e si innalza, riducendo la propria temperatura: dopo un minuto essa cessa di emettere luce e può raggiungere fino a 10 km di altezza.

Nella palla di fuoco i materiali sono in forma gassosa; quando essa si raffredda, i gas condensano o sublimano a formare una nuvola di particelle solide di frammenti della bomba e di gocce d'acqua dell'aria aspirata nella palla di fuoco nella sua ascensione. La palla assume la tipica forma "a fungo" e la parte centrale a ciambella viene sottoposta a un violento moto circolare interno (Figura 11). Aria fredda è trascinata nella nuvola calda portando all'interno frammenti e detriti, che diventano in parte radioattivi.

Figura 11. Schema della nube radioattiva generata da un'esplosione nucleare (Glasstone, Dolan 1977).

Figura 12. La nuvola radioattiva sopra Nagasaki raggiunse oltre 18 km di altezza.

L'onda d'urto

L'onda di alta pressione generata dall'espansione supersonica del plasma assorbe fino al 50% dell'energia dell'esplosione. L'onda d'urto così generata presenta componenti sia statici che dinamici: quello statico si comporta come un muro di aria altamente compressa che frantuma ogni oggetto al suo passaggio spostandosi a velocità maggiore di quella del suono, seguito da una fase di depressione; quello dinamico è dato da fortissimi venti associati al passaggio del fronte d'urto, con velocità di punta di oltre 3.000 km/ora. Onde d'urto secondarie vengono generate dalla riflessione al suolo dell'onda primaria. Gli effetti cumulativi delle onde d'urto e dei venti producono pressioni dinamiche fino a 2 milioni pascal (~20 atmosfere), effetti che diminuiscono nel tempo e con la distanza dal punto dell'esplosione: si noti che basta una sovrappressione di 35.000 pascal (1/3 di atmosfera) con i venti associati di 250 km/h per distruggere una casa di mattoni e di 70.000 pascal per demolire un edificio di cemento armato; sovrappressioni di 35.000 pascal bastano per la rottura dei timpani auricolari e sopra i 100.000 pascal si hanno serie lesioni intratoraciche, quali rotture vascolari nei polmoni, emorragie, edema ed embolia aerea (Walker, Cervený 1996).

Esiste un'importante differenza fra gli effetti meccanici prodotti da un'esplosione nucleare e una di alto esplosivo convenzionale. Un'esplosione ordinaria è istantanea, non coinvolge globalmente le strutture colpite e quindi in generale produce solo danni parziali e localizzati. Invece, nel caso nucleare si ha la combinazione di altissimi massimi di pressione, di grandi azioni dinamiche dei venti e di una lunga durata della fase di compressione dell'onda d'urto: ciò produce una distorsione massiva e completa delle strutture, fino alla distruzione completa, analogamente a quanto può causare un forte e prolungato terremoto (Glasstone, Dolan 1977).

La radiazione termica

Nelle esplosioni in aria circa il 35% dell'energia totale viene emessa dalla palla di fuoco come radiazione termica che si propaga, come abbiamo osservato, in due impulsi: il primo, più intenso ma più breve (decimi di secondo), è soprattutto costituito da radiazione ultravioletta emessa direttamente dalla palla di fuoco; l'aria fortemente ionizzata ai bordi della palla di fuoco diviene poi temporaneamente opaca per qualche frazione di secondo fino al secondo impulso di luce visibile e infrarossa, che dura una decina di secondi e comprende il 99% della radiazione termica totale.

Questo secondo impulso è la causa principale di danni agli occhi (temporanei o permanenti) e di ustioni cutanee di vario grado, che possono portare fino alla morte,

per gli individui esposti fino a distanze considerevoli, mentre i materiali combustibili danno origine a incendi che si possono diffondere e conflagrare [nota 29]. Dato il grande numero di ustionati e del trattamento intensivo e lungo che queste ferite richiedono, gli effetti termici sui sopravvissuti costituiscono il problema sanitario più grave conseguente a un attacco nucleare. Danni da radiazione termica sono sempre presenti in ogni esplosione nucleare e diventano quello principale per esplosioni superiori a 10 kt.

La radiazione nucleare iniziale

Caratteristica specifica delle esplosioni nucleari è l'emissione di intense radiazioni nucleari e la produzione di materiale radioattivo, con i conseguenti effetti sugli esseri viventi. I processi di fissione e fusione emettono immediatamente un'enorme numero di neutroni e di raggi gamma; ulteriori raggi gamma vengono prodotti in reazioni con i materiali dell'atmosfera circostante, dal decadimento di nuclei eccitati e da processi di cattura neutronica. Materiali attivati nella palla di fuoco producono anche radiazioni alfa e beta che vengono assorbite entro pochi metri, mentre gli impulsi di neutroni e di raggi gamma percorrono distanze considerevoli e producono effetti temibili negli organismi viventi: il principale rischio associato alla radiazione iniziale è appunto la sindrome da irradiazione acuta (*acute radiation syndrome* – ARS) per esposizione di tutto il corpo (vedi appendice al capitolo). Dopo un minuto la palla di fuoco si innalza tanto che la radiazione iniziale non raggiunge più il suolo e pertanto non interagisce più con la biosfera.

Sebbene la radiazione nucleare costituisca solo circa il 5% dell'energia totale dell'esplosione, essa può causare una considerevole percentuale di morti e feriti, dato che la protezione dai neutroni e dai raggi gamma non è facile. Ad esempio, a una distanza di 1,6 km da un'esplosione di 1 Mton la radiazione nucleare sarebbe fatale a gran parte delle persone protette da uno schermo di 60 cm di calcestruzzo.

La ricaduta radioattiva (*fallout*)

I materiali polverizzati della bomba e del suolo, divenuti radioattivi all'interno della nuvola, alla fine della fase turbolenta iniziano a cadere sotto l'effetto della gravità e costituiscono la così detta "ricaduta radioattiva" (*fallout*). Contribuiscono al *fallout* i frammenti di fissione altamente instabili, l'uranio, plutonio e trizio non coinvolti nella fissione-fusione e i materiali attivati dall'intenso flusso iniziale di neutroni: sono tipicamente presenti circa 300 radionuclidi di una quarantina di elementi differenti, con tempi di dimezzamento estremamente vari; le radiazioni più pericolose sono le gamma emesse dal materiale al suolo e le beta depositate sulla pelle, dato che le particelle alfa vengono assorbite in aria e non penetrano l'epidermide; radiazioni beta contribuiscono anche a irradiazione interna da emettitori ingeriti, inalati o penetrati nel corpo; uranio e plutonio decadono alfa e sono dannosi solo se ingeriti o inalati.

La radioattività residua è quindi molto complessa, e assorbe circa il 10% dell'energia totale delle bombe a fissione e il 5% di quelle a fusione. La contaminazione radioattiva residua dipende da molti fattori, in particolare dal tipo e dalla potenza dell'esplosione, dall'altezza dell'esplosione e di quella raggiunta dalla nube nell'atmosfera, dalle condizioni atmosferiche e dai venti, e il fenomeno è particolarmente presente nel caso di esplosioni al suolo, che coinvolgono una grande quantità di materiale.

La radiazione residua si distingue in una componente immediata e una differita. Il *fallout* immediato si deposita entro un giorno dall'esplosione, è composto dalle particelle più pesanti e grosse (fra 0,01 e 1 cm di diametro) ed è estremamente radioattivo, dato il breve lasso di tempo dall'attivazione; il fenomeno è essenzialmente locale, coinvolgendo una zona entro qualche centinaio di chilometri dal punto zero. Nel caso di esplosioni in aria senza iniezione di materiali del suolo

nella palla di fuoco il *fallout* immediato è molto ridotto, dato che le particelle di dimensioni maggiori si formano attorno a centri di condensazione di polveri dei detriti solidi: a Hiroshima e Nagasaki non vi fu contaminazione radioattiva al di fuori delle due città, mentre il *fallout* dall'ordigno di 15 Mt testato nell'atollo di Bikini il 1° marzo 1954 causò una grave contaminazione su un'area di più di 18.000 km quadrati (Figura 13).

Figura 13. Stima dei contorni della dose totale in Rem (equivalenti a milliSievert) 96 ore dopo il test di Bikini (Schroeer 1984).

Le particelle più minute vengono trasportate nell'alta atmosfera ove possono permanere a lungo e distribuirsi su vastissime zone, a seconda dei processi fisici conseguenti all'interazione della nube radioattiva con l'atmosfera. Il *fallout* differito, che inizia dopo le prime 24 ore dall'esplosione, è composto da queste particelle, che sono meno radioattive dato che parte del materiale decade nel corso del tempo. L'intensa sperimentazione atmosferiche di armi nucleari, particolarmente intensa nei periodi 1952-58 e 1961-62, ha generato un *fallout* diffuso su tutto il mondo, e rimane una componente dell'esposizione individuale a radiazioni ionizzanti, con una radioattività residua in lenta diminuzione [nota 30].

Effetti globali immediati

I vari effetti concorrono simultaneamente a produrre localmente vittime e distruzione, cancellando ogni forma di vita superiore, su aree di km quadrati, anche nel caso di potenze limitate. La Tabella 6 sintetizza per le varie potenze dell'esplosione l'area ove i singoli effetti immediati causano la morte delle persone esposte: la radioattività è l'effetto dominante per esplosioni di bassa potenza, mentre al di sopra di 10 kton diventa largamente dominante quello termico.

Tabella 6. Area di devastazione mortale per i vari effetti (in km²)

Effetto \ Potenza	1 kton	10 kton	100 kton	1 Mton	10 Mton
meccanico	1,5	4,9	17,7	71	313
termico	1,3	11,2	74,2	391	1583
radioattivo	2,9	5,7	11,5	22	54

Dal punto di vista medico, sono particolarmente gravi le patologie generate da più cause concomitanti (danni da radiazioni nucleari, ustioni e ferite dall'onda d'urto), che si stimano riguardare il 65-70% dei sopravvissuti.

L'esperienza di Hiroshima e Nagasaki prova che le gravi alterazioni fisiche e psicologiche dei sopravvissuti a un attacco nucleare non si rimarginano per tutta la vita, essendosi questi dovuti confrontare con sintomi legati al rivivere i momenti dell'esplosione e avendo subito stigma a causa dei segni lasciati dalle bruciature e dalle cicatrici. Una sindrome psicologica dei sopravvissuti è caratterizzata da isolamento sociale, insonnia, incubi, sintomi ansiosi, depressivi e somatoformi (disturbi da stress posttraumatici – DSPT), fatica cronica, introversione e deficit di memoria (Lifton 1967), sintomi correlati a quelli della sindrome da irradiazione acuta (ARS). La relazione fra sintomi della ARS e sintomi somatici da DSPT è stata riscontrata anche in uno studio condotto a 17-20 anni di distanza dall'evento (Yamada, Izumi 2002). È stata anche dimostrata una relazione fra esposizione a

radiazioni ionizzanti e aumentato rischio di schizofrenia e disturbi psicotici e cognitivi.

I danni immediati di un'esplosione nucleare sono incommensurabili con quelli di altre armi convenzionali: un calcolo realistico delle vittime immediate prodotte da una bomba tipica degli arsenali attuali (potenza 300 kton) esplosa a 1.000 m d'altezza su Trafalgar Square a Londra prevede 240.000 morti e 410.000 feriti e 1.100.000 morti e 2.200.000 feriti se sul centro di Mumbai (Evans, Kawaguchi 2009).

Un ruolo importante è giocato dal fattore tempo: mentre un'azione nucleare si consuma in qualche minuto, gravi attacchi convenzionali richiedono ore e permettono alla popolazione di prendere precauzioni, reagire e fuggire dalle zone esposte. Per questi motivi non esistono contromisure passive e forme efficaci di protezione civile contro un attacco nucleare. Neppure i silo iper-rinforzati dei missili intercontinentali (ICBM) americani e russi sono al sicuro da un attacco nucleare, tanto che i due paesi hanno sviluppato forme di difese attive (*anti-ballistic missile* – ABM) e creato piattaforme missilistiche su sommergibili (SLBM) per garantire la sopravvivenza di forze di reazione a un attacco nucleare.

Fra gli effetti globali sull'ambiente e sul clima, va considerata in particolare l'azione di indebolimento dello strato di ozono stratosferico a causa della produzione di ossidi d'azoto nell'atmosfera e del loro trasporto a grandi altezze dalla nube radioattiva.

L'impulso elettromagnetico (EMP)

I raggi gamma prodotti in grande quantità in un'esplosione nucleare collidono con le molecole dei gas atmosferici e le ionizzano, liberando elettroni e generando ioni positivi. Queste cariche elettriche libere interagendo con il campo magnetico terrestre generano fortissimi campi elettromagnetici di brevissima durata (poche decine di microsecondi) e di uno spettro molto ampio, da un decimo a un centinaio di megahertz. In esplosioni a bassa quota l'EMP ha effetti localizzati, mentre i raggi gamma da detonazioni a grandi altezze possono viaggiare per centinaia di chilometri prima di iniziare a ionizzare l'aria e quindi l'EMP che viene generato coinvolge un'area molto vasta sotto l'esplosione: un solo ordigno di qualche Mton esplodendo a 300 km di altezza può produrre un campo elettrico di 25.000 V/m su un'area grande come tutti gli Stati Uniti.

Questi campi non hanno effetto sugli esseri viventi, ma, essendo intensi soprattutto nella regione delle radiofrequenze, sono in grado di danneggiare calcolatori, apparecchiature elettroniche ed elettriche e la rete elettrica, oltre che disturbare seriamente i segnali radio e radar. L'interruzione delle esplosioni atmosferiche ha impedito una conoscenza dettagliata degli effetti dell'impulso elettromagnetico, ma sono state comunque sviluppate bombe speciali deputate a massimizzare l'EMP al fine di distruggere le strutture di comunicazione e comando e controllo del nemico.

Esplosioni multiple e guerra nucleare

Gli effetti finora considerati riguardano l'esplosione di una singola bomba e si basano sulle informazioni molto precise raccolte a Hiroshima e Nagasaki e nel corso delle esplosioni di prova eseguite dalle potenze nucleari. La situazione diviene molto più incerta se si considerano scenari di guerra con scambi significativi di salve nucleari, in quanto è sicuro che si avrebbero effetti sinergici fra le varie esplosioni e l'instaurarsi di condizioni ambientali affatto nuove: i livelli di distruzione sarebbero estremamente più complessi con conseguenze non più solo locali e limitate nel tempo, ma di dimensioni regionali o addirittura globali e con evoluzioni difficilmente prevedibili.

Tali scenari sono stati comunque studiati in relazione alle dottrine militari di reazione massiccia sviluppate durante la guerra fredda. Ad esempio, uno scenario (anni '80) stimava che 50 bombe da 1 Mton contro le 18 principali città americane avrebbero prodotto 21 milioni di morti entro 30 giorni dalle esplosioni, e lo stesso numero di armi impiegate contro l'Unione Sovietica circa 25 milioni di decessi. Un recente modello (Doty 2009) conclude che meno di 250 bombe bastano per distruggere un quarto della popolazione di Russia, USA, UK, Francia e Germania. A queste vittime vanno aggiunti altri milioni di decessi e ulteriori devastazioni dei trasporti, forniture di energia, comunicazioni, scorte alimentari e presidi medici, oltre alla dissoluzione di governi, commercio, ordine sociale e vita civile, mentre aumentano nel tempo morti e vittime dall'esposizione alle radiazioni, destinate ad attenuarsi lentamente solo nel corso di secoli, con enormi disturbi psicologici nei sopravvissuti in un caos inimmaginabile e con il rischio di una totale disgregazione sociale.

Sono stati studiati anche gli effetti climatici globali di una guerra nucleare con l'impiego di 10.000 Mton (solo una frazione delle armi schierate negli anni '80) giungendo alla previsione di una grave contaminazione radioattiva di gran parte della terra, di una distruzione fino al 50% dello strato di ozono atmosferico, che protegge dalle radiazioni ultraviolette, e una riduzione della temperatura di una decina di gradi, con gravissime ripercussioni su tutta la biosfera, per cui si introdusse la metafora di "inverno nucleare" [nota 31].

Questi risultati catastrofici, basati sui modelli climatici ancora primitivi dell'epoca, incontrarono diffidenza e molte riserve. La disponibilità di modelli climatici e tecniche di simulazione molto più avanzati ha permesso recentemente nuovi calcoli più accurati; dati pubblicati nel 2007-2008 indicano che anche in una limitata guerra nucleare regionale, per esempio fra India e Pakistan, con lo scambio di 50 bombe della potenza dell'ordigno impiegato a Hiroshima (15 kton), verrebbero innalzate nella stratosfera enormi quantità di detriti in polvere e vi resterebbe per decine di anni, causando un notevole raffreddamento a livello mondiale, che produrrebbe gravissimi danni all'agricoltura globale, con conseguenti terribili carestie su scala planetaria e il rischio di pandemie di varie malattie (Starr 2009).

6. I test nucleari

Come abbiamo visto nel paragrafo precedente, le esplosioni nucleari presentano delle novità assolute rispetto a precedenti esperienze belliche, con effetti complessi e dipendenti da molti fattori: per raccogliere le informazioni necessarie ai comandi militari per prevedere i risultati di un'esplosione nelle varie condizioni ambientali, le potenze nucleari hanno condotto nei primi anni dell'era atomica varie campagne di test nell'atmosfera a varie quote, in mare e al suolo (Glasstone, Dolan 1977), a complemento delle previsioni teoriche e dell'analisi degli eventi a Hiroshima e Nagasaki.

I test nucleari, ossia le esplosioni sperimentali eseguite in modo controllato e incruento nel proprio territorio o in spazi aperti e disabitati, in modo specifico o simultaneo permettono il raggiungimento anche di altri obiettivi:

- la verifica di fattibilità di nuovi concezioni per armi;
- la messa a punto e verifica di nuovi modelli di ordigni;
- lo studio della proprietà della materia nelle speciali condizioni di supercriticità e alle temperature e pressioni dell'esplosione;
- la verifica dell'efficienza e resa delle armi in condizioni marginali;
- la verifica dello stato operativo delle armi della riserva;
- la taratura di codici per simulazioni del comportamento delle armi;

- lo sviluppo di tecnologie per applicazioni civili.

Le armi nucleari sono “*sophisticated but non complicated*” (come dice Sidney David Drell, scienziato ed esperto di questioni militari) nel senso che mentre i principi di funzionamento sono immediati, la strumentazione necessaria per farle funzionare in modo sicuro e affidabile, ottenendo gli effetti programmati, e per renderle inviolabili è estremamente complessa e richiede una varietà di tecnologie avanzate.

Una tipica arma termonucleare attuale è composta di circa 6000 parti, di cui solo 300 riguardano il complesso dei componenti nucleari, comprendente sia il primario a fissione che il secondario a fusione. La messa a punto degli ordigni richiede quindi lo sviluppo delle tecnologie necessarie per la funzionalità dei singoli componenti, processi che richiedono anche serie di misure ed esperimenti, fino al raggiungimento delle caratteristiche previste. Tutte le parti non nucleari vengono ovviamente studiate in laboratori con i metodi specifici delle tecniche individuali; anche l’innesco a incastro si basa essenzialmente su competenze di artiglieria e può essere messo a punto senza esplosioni di prova, come è effettivamente successo; solo lo sviluppo delle armi a implosione e, a maggior ragione, termonucleari richiede anche di provare effettivamente esplosioni a piena potenza, per verificare il corretto accoppiamento delle onde d’urto prodotte dalle lenti di esplosivo con la compressione del materiale fissile e il preciso sviluppo dei vari stadi delle armi con componenti a fusione.

Osserviamo che le esplosioni in mare e nell’atmosfera, mentre sono state indispensabili per verificare gli effetti militari effettivi, permettono solo un limitato corredo di strumentazione per misure dettagliate dei processi nucleari e di verifica del comportamento dei vari apparati che costituiscono gli ordigni; per raccogliere queste informazioni sono più adeguate le esplosioni sotterranee, che presentano l’ulteriore vantaggio di minime (o nulle) dispersioni di materiale radioattivo nell’ambiente. Per questi test si possono utilizzare gallerie dismesse di miniere o, preferibilmente, pozzi scavati *ad hoc*, i quali richiedono una tecnologia più avanzata di quella corrente nell’industria petrolifera, dato che si tratta di scavare pozzi larghi un paio di metri e profondi fin oltre un kilometro, e di procedere dopo il test al recupero di campioni nella camera di scoppio, oltre che di disporre adeguatamente la strumentazione di analisi e misura. Le esplosioni sotterranee, a seconda della loro potenza e della profondità del pozzo, creano una caverna che può crollare producendo un cratere di subsidenza in superficie. A queste esplosioni sono sempre associati segnali sismici caratteristici.

Mantenere l’arsenale nucleare sicuro, inviolabile e affidabile rimane una necessaria priorità per gli stati con armi nucleari, ed è inoltre loro interesse estendere al massimo la vita operativa degli ordigni. A tal fine si è fatto ricorso a qualche test di campioni delle varie classi di armi, anche per controllare l’efficacia di interventi di restauro e di sviluppi ingegneristici significativi dei vari componenti e per verificare il comportamento in condizioni speciali, come per esempio, la sicurezza nel caso dell’esplosione di una sola lente d’esplosivo (“sicurezza puntuale”).

Esperimenti idrodinamici, idronucleari e subcritici e simulazioni

Fino dalla fine degli anni ’40 gli ingegneri nucleari per studiare e giudicare il comportamento e l’affidabilità delle bombe a implosione sono ricorsi a completare le informazioni delle esplosioni nucleari a piena potenza con esperimenti in cui vengono fatti detonare apparati di prova che riproducono le condizioni di una vera bomba. Questi esperimenti si dicono idronucleari se impiegano materiali fissili, altrimenti si usa l’espressione generica di idrodinamici; il termine è dovuto al fatto che l’esplosione è sufficiente a portare il materiale campione allo stato fluido.

Negli esperimenti idrodinamici si usa U-238 e Pu-242 al posto dei corrispondenti isotopi fissili e si studia il comportamento della bomba dall’innesco all’inizio della

reazione a catena, per controllare il funzionamento della fase di compressione e la regolarità spaziale e temporale dell'implosione, utilizzando varie tecniche diagnostiche, incluso illuminamento con raggi-X o neutroni.

In un test idronucleare (Cochran, Paine 1995) si fa implodere del materiale fissile, ma non si mantiene la condizione di ipercriticità tanto da raggiungere un'esplosione di piena potenza: l'energia rilasciata va da misure piccolissime, anche inferiori a milligrammi equivalenti di TNT, a qualche kilogrammo equivalente fino pochi kton. In queste condizioni il materiale raggiunge la temperatura di fusione, ma non quella di sublimazione e non si crea un plasma. Per evitare una piena esplosione si sostituisce parte del nocciolo nucleare con materiale non fissile conservando le dimensioni geometriche; lo sviluppo della catena neutronica viene misurato con precisione e scalato per determinare quello della bomba completa [nota 32]. In pratica la strumentazione e procedure per un esperimento idronucleare non differisce da un test sotterraneo a piena potenza, per cui ricadono nel bando del CTBT.

Esperimenti sottocritici, ossia su materiale nucleare in condizioni di non raggiungere la criticità e iniziare una reazione a catena, permettono di studiare della risposta dei materiali fissili a onde di compressione di diversa potenza e le loro proprietà –anche non-nucleari– in situazioni eccezionali.

Per lo studio dei regimi fisici che si susseguono nelle armi a fusione, trasporto della radiazione, implosione del secondario, ignizione e resa, si fa ricorso anche a processi di fusione inerziale: piccole pastiglie, per lo più sferiche e a più strati, contenenti deuterio e trizio vengono illuminate istantaneamente da intensissimi impulsi laser da molte direzioni in modo da raggiungere per compressione densità temperature sufficienti a innescare le reazioni di fusione. Il più grande di questi apparati, l'enorme *National Ignition Facility*, si trova nel laboratorio americano di Livermore concentra sul bersaglio l'impulso di 192 giganteschi laser operanti nell'ultravioletto, fino a energie superiori a 1 MJ. Ricerche sulla fusione inerziale vengono anche svolte per lo sviluppo di una nuova fonte energetica in diversi paesi.

La sperimentazione mondiale

Circa 2400 ordigni nucleari sono stati impiegati dal 1945 in poi nelle esplosioni di prova, nell'atmosfera o sotto terra, per una potenza equivalente a quella di oltre 510 Mton. Residui radioattivi delle esplosioni atmosferiche (in particolare cesio-137 e stronzio-90) sono tuttora rilevabili in tutte le parti del mondo. Attualmente Cina, Francia, Russia, India, Pakistan, UK e USA sono unilateralmente impegnati in una moratoria delle esplosioni nucleari.

Tabella 7. Esplosioni sperimentali nucleari eseguiti dalle potenze nucleari (Norris, Kristensen 2003).

Paese	test atmosferici	energia (Mton)	test totali	energia (Mton)	data ultimo test
Cina	23	21,9	45	23,4	29 luglio 1996
Corea del Nord	-	-	2	<0,01	25 maggio 2009
Francia	45	10	210	14	27 gennaio 1996
India	-	-	6	<0,05	13 maggio 1998
Israele	-	-	-	-	
Pakistan	-	-	5 o 6	<0,025	30 maggio 1998
UK	21	8	45	8,9	26 novembre 1991
URSS	219	247	969	285	24 ottobre 1990
USA	215	141	1125	179	22 settembre 1992

Nel corso degli anni '90 le potenze nucleari sono venute via via sospendendo i test, sia per pressioni della società civile e vincoli pattizi (vedi capitolo quarto), sia perché il controllo della qualità degli arsenali e i necessari interventi di conservazione riguardano soprattutto le componenti convenzionali delle armi, mentre per la parte nucleare sono state messe a punto simulazioni computerizzate, basate sull'enorme quantità di informazioni raccolte negli anni precedenti, le precise conoscenze scientifiche raggiunte dai laboratori nucleari militari sui diversi processi coinvolti in un'esplosione nucleare; i dettagli mancanti possono essere ottenuti da specifici esperimenti di laboratorio, in particolare idrodinamici o sottocritici. Le ultime campagne di esplosioni sperimentali di alcuni paesi avevano essenzialmente lo scopo di verificare la correttezza delle previsioni delle simulazioni al computer, rese possibili dagli enormi sviluppi *hardware* e *software* dell'informatica e delle capacità dei calcolatori paralleli (Goodwin, Mara 2004).

Test esplosivi a piena potenza rimangono invece necessari per la messa a punto di nuove classi di ordigni (Garwin 2010, NAS 2002), per cui la moratoria ventennale della sperimentazione da parte delle maggiori potenze è un segnale che esse hanno rinunciato a significativi sviluppi qualitativi dei propri arsenali.

Impieghi pacifici delle esplosioni nucleari

I dati della Tabella 7 includono anche le esplosioni (sotterranee) nell'ambito di programmi per scopi pacifici: 28 dal 1961 al 1974 per il *Plowshare* americano e 239 dal 1965 al 1988 per i programmi n. 6 ("impiego di tecnologie di esplosivi nucleari nell'interesse dell'economia nazionale") e n. 7 ("esplosioni nucleari pacifiche per l'economia nazionale") sovietici; anche il primo test indiano fu presentato come "pacifico".

I possibili impieghi pacifici delle esplosioni nucleari esplorati riguardavano in particolare:

- scavi di grandi dimensioni per creare porti, canali e bacini artificiali;
- stimolare l'estrazione di gas e petrolio;
- creare cavità per immagazzinare petrolio, gas e rifiuti;
- estinguere incendi in campi petroliferi o di gas;
- propulsione spaziale;
- estrarre petrolio da schisti bituminosi;
- produrre energia elettrica facendo fondere fluoruri sotterranei;
- frantumare minerali di rame e fosfati in cave e miniere;
- produzione di elementi transuranici;
- studio dei materiali in condizioni estreme;
- studi geologici profondi del mantello terrestre.

Naturalmente, esplosioni classificate come pacifiche hanno fornito spesso anche informazioni utili a scopi militari.

Problemi di contaminazione radioattiva e analisi di costi/benefici hanno portato alla rinuncia ai programmi considerati, che comprendevano anche il taglio di un nuovo collegamento in Centro-America fra Atlantico e Pacifico e la creazione di un canale fra il mare Artico e il Caspio attraverso i fiumi Pechora, Kama e Volga; le uniche applicazioni effettive furono la creazione in Kazakistan di un bacino artificiale per la regolazione del fiume Chagan nel 1965, lo spegnimento di grandi incendi in campi di pozzi di gas in Uzbekistan, sfuggiti al controllo per anni, la raccolta di informazioni geologiche e scientifiche. Le ricerche americane e russe hanno prodotto notevoli informazioni su una tecnologia che al tempo sembrava promettente, ha dato qualche risultato e ora viene proibita dal bando di ogni esplosione nucleare (CTBT, vedi capitolo quarto).

7. Tecnologie di distruzione delle armi nucleari [nota 33]

Come vedremo nel capitolo terzo, la folle corsa alle armi nucleari che ha caratterizzato il confronto militare nella guerra fredda ha portato, fra l'altro, alla produzione di un numero esorbitante di ordigni di vario tipo e potenza: 70000 americani, 55000 russi, 1200 inglesi, 1260 francesi e 750 cinesi; di questi, circa 2400 sono stati distrutti dal 1945 in poi nelle esplosioni di prova, in vari ambienti e condizioni. L'attenuarsi del clima di ostilità fra est e ovest ha portato dalla metà degli anni '80 a consistenti diminuzioni del numero delle armi nucleari delle superpotenze, sia per decisioni unilaterali, che per accordi bilaterali, e anche Francia e UK hanno ridotto recentemente in modo significativo le proprie forze nucleari.

È così in corso un processo di smantellamento di decine di migliaia di ordigni nucleari, il quale, per poter portare a un'effettiva definitiva riduzione degli arsenali, deve rendere gli esplosivi nucleari inutilizzabili per nuove armi. Mentre è facile eliminare in modo convenzionale i componenti non fissili degli ordigni, l'HEU e il plutonio non si degradano naturalmente a elementi non fissili, ma conservano le loro potenzialità distruttive. Meno problemi pongono il deuterio e trizio, che acquistano valore militare solo in presenza di armi a fissione.

Dal punto di vista operativo, il processo di smantellamento delle armi a fissione e la messa in sicurezza del loro esplosivo nucleare, sia esso HEU o plutonio, evolve in quattro fasi:

- smontaggio dai vettori, trasporto in centri di smantellamento e separazione dei componenti dell'arma;
- immagazzinamento temporaneo del materiale fissile estratto;
- trattamento del materiale fissile per ridurne/eliminarne il possibile riutilizzo a scopo militare;
- smaltimento sicuro per tempi lunghi e protezione dei residui dei vari trattamenti potenzialmente riutilizzabili per armi.

Ciascuna di queste fasi pone problemi di sicurezza e di trasparenza con aspetti sia scientifici che organizzativi e politici a vari livelli, problemi in gran parte ancora aperti e non affrontati con la necessaria urgenza.

L'eliminazione ed il controllo puntuale dell'HEU è di cruciale importanza anche nella prospettiva anti-terroristica, in quanto, come vedremo, la disponibilità di un centinaio di kg di HEU può permettere a un gruppo determinato di produrre un'esplosione nucleare analoga alla bomba su Hiroshima.

Metodi di eliminazione dell'HEU

Esiste un metodo immediato per l'eliminazione dell'HEU: la sua riduzione a LEU mediante miscelamento con uranio a basso tenore di U-235. Il LEU così prodotto può venir utilizzato quale combustibile negli impianti elettronucleari, recuperandolo in questo modo per un impiego economicamente utile. Al fine di non sprecare le risorse impiegate per l'arricchimento, conviene miscelare l'HEU con materiale arricchito all'1,5%, piuttosto che con uranio naturale o impoverito; un'ulteriore ragione di questa scelta mira alla diluizione delle componenti di U-234 e U-236 presenti nel materiale fissile delle bombe in seguito ai vari riprocessamenti cui è di solito sottoposto; tale diluizione è imposta dalle condizioni previste dalle norme internazionali di commercializzazione per i combustibili elettronucleari.

La procedura di conversione avviene attraverso più fasi, schematizzate in Figura 14. Anzitutto l'HEU in forma metallica viene isolato dagli altri componenti dell'ordigno e ridotto in trucioli. I trucioli metallici sono quindi riscaldati e convertiti in un ossido di HEU (U_3O_8), che subisce una purificazione chimica da eventuali contaminanti. L'ossido di HEU viene successivamente trasformato in esafluoruro di

HEU (UF_6), che riscaldato assume la fase gassosa. La diluizione avviene appunto in fase gassosa miscelando l'esafluoruro di HEU con l'esafluoruro di LEU all'1,5% in modo da ottenere esafluoruro di LEU al 4,4%, che poi è raffreddato a fase solida; successivamente il materiale viene defluorizzato e ridotto a ossido di LEU (UO_2). Verificata la qualità commerciale, eventualmente corretta con qualche intervento, si procede alla produzione delle pastiglie del combustibile per reattori.

In questo processo, partendo da 1.000 kg di HEU (sufficiente per 40 bombe) e 29.517 kg di LEU all'1,5% (prodotto a partire da 86.181 kg di uranio naturale) si ottengono 30.517 kg di LEU al 4,4%, quanto serve al funzionamento di un impianto da 1 GWe per un anno e mezzo. Naturalmente, la diluizione può arrestarsi a tenori di U-235 più alti, al fine di produrre LEU per reattori di ricerca o per reattori ad alta temperatura.

Figura 14. Schema delle fasi di diluizione di HEU a LEU per combustibile elettronucleare.

Metodi di eliminazione del plutonio

Il plutonio separato presenta problematiche maggiori dell'HEU per quanto riguarda l'abbattimento delle sue potenzialità militari, dato che, a differenza dell'HEU, non può venir diluito con suoi isotopi non fissili, dato che tutti i suoi isotopi sono in grado di produrre una reazione a catena esplosiva [nota 34]. L'eliminazione del plutonio è soprattutto importante quale azione anti-proliferazione e per il consolidamento del disarmo nucleare, data la relativa difficoltà del suo impiego da parte di terroristi.

Gli studi compiuti da gruppi di lavoro americani e russi (Holdren, Velikhov 1997) hanno individuato come obiettivo per la messa in sicurezza del plutonio militare la sua trasformazione in una forma che presenti la stessa inaccessibilità del plutonio presente nel combustibile esausto dei reattori commerciali. In pratica sono stati considerati possibili solo tre metodi:

- immagazzinare definitivamente il plutonio in strutture di massima sicurezza sotto continua sorveglianza;
- mescolare il plutonio con uranio e fabbricare combustibile MOX da utilizzare nei reattori elettronucleari;
- immobilizzare il plutonio con scorie altamente radioattive.

Strutture della massima sicurezza sono state predisposte in Russia presso Majak (Siberia) e in Nevada, rafforzando la *Device Assembly Facility* costruita negli anni '80 per preparare gli ordigni dei test nucleari; in questo modo il plutonio viene protetto dai rischi di dispersione, diversione e furto, ma rimane disponibile per venir lavorato e utilizzato per nuove armi nucleari in tempi brevi e a costi limitati. Impianti di questo tipo sono comunque utili per il deposito temporaneo degli esplosivi nucleari in attesa di eliminazione.

Impiegando i due ultimi metodi il plutonio finisce mescolato in modo inestricabile con materiali altamente radioattivi, in modo che sia molto costoso e difficile da recuperare. La prima fase di questi processi consiste nella separazione del nucleo di plutonio metallico dagli altri componenti dell'arma nucleare, nella sua polverizzazione e riduzione a ossido PuO_2 .

Le successive fasi per la produzione di MOX (Figura 15) sono: la miscelatura con ossido di uranio UO_2 (10 parti a 1); la compressione della polvere e la sua cottura a formare pastiglie ceramiche cilindriche, che poi vengono inserite in lunghi tubi metallici a formare elementi di combustibile, che contiene 4-5% di plutonio. Una volta utilizzato in un reattore, il combustibile MOX esausto contiene ancora 2/3 del plutonio, dato che l'uranio-238 produce nuovo plutonio che viene consumato solo in parte; il plutonio si trova comunque mescolato a scorie altamente radioattive, che

richiederebbero processi chimici e manipolazione a distanza per il suo eventuale recupero.

Va detto che la fabbricazione di combustibile MOX è molto più rischiosa e costosa di quella del LEU e il suo maneggio richiede maggiori salvaguardie e procedure di sicurezza negli impianti di produzione; continuano studi e prove per individuare le tecnologie di produzione ottimali.

Figura 15. Schema del processo di eliminazione del plutonio delle bombe mediante trasformazione in MOX e seguente irradiazione.

La velocità di eliminazione del plutonio come combustibile MOX per reattori ad acqua leggera è più lenta di quella dell'HEU, poiché per ragioni di sicurezza solo un terzo del combustibile di tali reattori può essere MOX, per cui un impianto da 1 GWe impiega tre anni a eliminare 1 t di plutonio. Più efficienti si prospettano reattori veloci in grado di utilizzare combustibile con maggior concentrazione di plutonio: il reattore dimostrativo russo BN-800 da 800 MWe attualmente in costruzione dovrebbe poter irradiare annualmente 1,6 t di plutonio come MOX.

Non tutto il plutonio d'origine militare può venir utilizzato per produrre MOX, in particolare a causa della presenza di contaminanti; in tal caso l'unica possibilità rimane l'immobilizzazione del PuO_2 in scorie radioattive.

Nel metodo d'immobilizzazione, l'ossido di plutonio viene vetrificato o reso in forma ceramica insieme a prodotti di fissione altamente radioattivi: nel primo caso il vetro contiene meno del 10% di plutonio, mentre la ceramica può immobilizzarne percentuali maggiori. La vetrificazione è una tecnologia già sviluppata per il trattamento delle scorie altamente radioattive e correntemente impiegata in Belgio, Cina, Francia, Giappone, Russia, UK e USA, ma presenta limiti per l'applicazione al plutonio, poiché il vetro è instabile dal punto di vista termodinamico e su tempi geologici può cristallizzare, perdendo le capacità di contenimento. La ceramizzazione sembra più stabile chimicamente su tempi lunghi, permette l'immagazzinamento di maggior quantità di materiali altamente radioattivi e la sua produzione non presenta problemi di sicurezza.

Il Dipartimento dell'Energia americano ha scelto per l'eliminazione di parte del plutonio militare una forma ceramica, lo *synroc*, una miscela di vari minerali e leghe. Un altro metodo d'immobilizzazione allo studio propone la produzione di pastiglie di MOX di qualità inadeguata all'uso come combustibile, le quali vanno mescolate con barre di combustibile esausto altamente radioattivo in contenitori comuni. Ricerche in corso sono dedicate allo studio di barriere radioattive che rendano insormontabili le difficoltà del recupero del plutonio comunque immobilizzato.

Appendice al capitolo primo

Effetti biologici delle radiazioni ionizzanti

L'impatto biologico delle radiazioni è dovuto al trasferimento di energia agli atomi e molecole delle cellule viventi, che possono così venir danneggiate: accanto a un meccanismo diretto di rottura del DNA cellulare, le radiazioni danno origine a prodotti chimici reattivi, inclusi radicali liberi, che si combinano col DNA e con membrane cellulari e nucleari ed enzimi, alterando le funzioni cellulari.

La gravità dei danni dipende dall'intensità, dalla natura e dalla velocità di deposizione delle radiazioni e dalla sensibilità della specifica cellula: le cellule possono riparare danni prodotti da piccole dosi di radiazione, mentre alte dosi possono distruggere completamente un gran numero di cellule, alterando profondamente i tessuti biologici e interi organi, fino a causare la morte

dell'individuo esposto. I vari tipi di radiazione hanno diversi effetti biologici, le particelle massive (in particolare neutroni) sono più efficaci delle radiazioni elettromagnetiche (inclusi i raggi gamma) e degli elettroni (raggi beta). Inoltre, a parità di dose, più è rapido l'irraggiamento più severe risultano le conseguenze. Le cellule più sensibili sono quelle che si dividono più velocemente, come quelle del midollo osseo o delle gonadi, mentre quelle del sistema nervoso centrale, che non si dividono, sono più resistenti.

L'unità di misura dell'esposizione alle radiazioni è il gray: 1 Gy corrisponde all'assorbimento di 1 joule di energia per kilogrammo di massa. Per tener conto delle differenti risposte biologiche, in dosimetria si usa come unità di dose efficace il sievert (Sv), che si ottiene moltiplicando la dose in gray per coefficienti caratteristici delle varie radiazioni (1 per elettroni e raggi X e gamma, 2 per protoni, fra 5 e 20 per neutroni a seconda dell'energia, 20 per raggi alfa) e del tipo di tessuti colpiti (0,01 per la pelle; 0,05 per fegato, esofago, tiroide, mammella, vescica; 0,12 per il midollo osseo, colon, stomaco, polmone; 0,2 per le gonadi).

Ogni persona è esposta a radiazioni, sia di origine naturale, sia dovute a sorgenti artificiali, con notevoli variazioni a seconda delle località e delle attività svolte. La radiazione naturale in Europa varia a seconda delle località da 2,2 mSv a 4,6 mSv all'anno; la principale fonte naturale è l'inalazione di radon negli edifici in muratura, e quella artificiale sono i trattamenti medici. La Tabella 1 presenta i valori medi mondiali delle dosi individuali generate dalle varie fonti, secondo l'ultimo rapporto UNSCEAR (2008). Va osservato che in alcune località mondiali la radiazione naturale raggiunge i 260 mSv all'anno, senza apparenti conseguenze sanitarie per la popolazione, né effetti su piante e animali. Per i lavoratori la dose massima permessa è di 100 mSv in 5 anni e per interventi in situazioni d'emergenza il limite internazionale è posto a 500 mSv.

Tabella 1. Dosi medie annuali individuali di radiazioni ionizzanti secondo la sorgente in mSv (UNSCEAR 2008).

Sorgente	dose media annuale	intervallo di variabilità individuale	commenti
Sorgenti di esposizione naturali			
Inalazione di radon nelle abitazioni	1,26	0,2 – 10	in alcuni edifici può essere molto maggiore
Terrestre esterna	0,48	0,3 – 1	in alcune zone può essere molto maggiore
Ingestione	0,29	0,2 – 1	
Radiazione cosmica	0,39	0,3 – 1	cresce con l'altitudine
Totale sorgenti naturali	2,4	1 – 13	gruppi consistenti di popolazione ricevono fra 10 e 20 mSv/anno
Sorgenti di esposizione artificiali			
Diagnostica medica (non terapia)	0,6	0 – molte decine	dipende dalle specifiche diagnosi
Test nucleari atmosferici	0,005	dosi maggiori nei siti dei test	il massimo valore 0,11 mSv nel 1963
Esposizione occupazionale	0,005	0 – 20	la dose media totale dei lavoratori arriva

			a 0,7 mSv, dovuta per la maggior parte al radon nelle miniere
Incidente di Chernobyl	0,002	nel 1986 per 300.000 soccorritori la media fu di 150 mSv e per 350.000 residenti più di 10 mSv	il massimo nell'emisfero nord fu di 0,04 mSv nel 1986
Ciclo del combustibile nucleare (per il pubblico)	0,0002	fino a 0,02 mSv per residenti entro 1 km da alcune centrali	
Totale sorgenti artificiali	0,6	da 0 a qualche decina	le dosi individuali dipendono soprattutto da trattamenti medici e prossimità ai siti di test o incidenti nucleari

Gli effetti di alte dosi sono sia acuti che differiti. Effetti ritardati di dosi superiori a 200 mSv includono la formazione di cataratte oculari e l'induzione di leucemia e cancro in vari organi, mesi e anni dopo l'esposizione. Effetti acuti si manifestano, a dosi fra 0,3 e 1 Gy, come incapacità immediata transitoria, che impedisce lo svolgimento di attività normali e comporta ipotensione, vomito e diarrea. A dosi superiori su tutto il corpo e assorbite in qualche minuto, si manifesta la sindrome da irradiazione acuta (ARS), che si differenzia nelle sub-sindromi emopoietica, gastrointestinale e neuro-vascolare (Walker, Cervený 1996).

La sub-sindrome emopoietica compare nel giro di due settimane a seguito di dosi immediate superiori a 0,7 Gy (sintomi leggeri anche a partire da 0,3 Gy) ed è dovuta a danni agli organi che producono il sangue (in particolare il midollo osseo); comporta il blocco della generazione di globuli bianchi e piastrine, che a sua volta causa emorragie incontrollate ed aumenta la suscettibilità a infezioni. Il trattamento medico consiste nella somministrazione di piastrine e la prevenzione di infezioni e interventi di ripristino del midollo osseo.

La sub-sindrome gastrointestinale si manifesta entro una settimana a seguito di dosi immediate superiori a 10 Gy (qualche sintomo a partire da 6 Gy) con distruzione delle cellule delle pareti intestinali e comporta eccessiva perdita di liquidi, disidratazione e disequilibrio elettrolitico in tutto il corpo. La sopravvivenza oltre due settimane, estremamente rara, richiede, oltre al trattamento della contemporanea sub-sindrome emopoietica, la prevenzione della disidratazione e il bilanciamento elettrolitico.

A dosi ancora superiori (oltre a 50 Gy, con sintomi da 20 Gy) si ha la sub-sindrome neuro-vascolare e consiste in un danno irreversibile al sistema nervoso centrale con edema endocraniale, meningite e vascolite e collasso del sistema circolatorio; comporta letalità sicura entro 3 giorni; non vi sono trattamenti possibili, se non palliativi dei dolori. Nel caso di intense esposizioni acute alla cute, in particolare da raggi-X o beta, si può creare, eventualmente oltre alla ARS, una complessa sindrome patologica specifica, la sindrome cutanea da radiazione (CRS), che comporta infiammazioni, eritema, desquamazione della pelle, distruzione dei follicoli piliferi, fino a ulcerazioni e necrosi dei tessuti esposti.

Capitolo secondo

Origine delle armi nucleari e programmi nella seconda guerra mondiale

Le armi nucleari sono strettamente legate alla seconda guerra mondiale e il loro impiego suggellò con un immenso massacro questo cruento conflitto con le sue decine di milioni di morti e devastazioni senza precedenti, segnando il culmine del coinvolgimento dei civili come bersaglio strategico di operazioni militari.

La fissione nucleare dell'uranio venne scoperta a Berlino nel dicembre 1938 dai radiochimici Otto Hahn e Fritz Strassmann e interpretata in termini fisici in Svezia da Lise Meitner e Otto Frisch, che individuarono l'enorme quantità di energia emessa in ogni reazione. Niels Bohr [nota 1] portò da Copenhagen la notizia comunità scientifica mondiale venne informata nel gennaio 1939 da in un convegno a New York e subito i fisici nucleari in tutto il mondo iniziarono a studiare il nuovo, inaspettato fenomeno [nota 2]; la fisica nucleare era un campo di assoluta avanguardia con molti problemi ancora aperti e la fissione aggiungeva ulteriori problematiche del massimo interesse scientifico. Bohr nel febbraio 1939 dimostrò che il processo di fissione riguardava solo l'isotopo raro U-235 e nel giro di pochi mesi formulò con John A. Wheeler una teoria soddisfacente della fissione nucleare nell'ambito del suo modello del nucleo descritto come una "goccia" che può vibrare e ruotare.

Nel marzo 1939 i gruppi di Enrico Fermi [nota 3] a New York e di Frédéric Joliot [nota 4] a Parigi osservarono sperimentalmente che in ogni fissione venivano emessi in media più di due neutroni, aprendo la possibilità dell'innescò di una reazione a catena con conseguente emissione di enormi quantità di energia. Ciò trasformava la ricerca nucleare da uno studio di valore puramente scientifico, con qualche ricaduta di interesse medico, a importanti prospettive applicative.

Nella grave situazione mondiale del 1939 fu chiaro agli scienziati che l'energia nucleare avrebbe potuto portare a un'arma di indicibile potenza distruttrice e i governi dei principali paesi ne furono informati [nota 5]; ricerche con più o meno esplicite finalità militari iniziarono in Francia, Germania, Giappone, Regno Unito, Stati Uniti e Unione Sovietica [nota 6].

Un esame degli aspetti essenziali dei vari programmi è utile per comprendere la portata non solo militare dell'energia nucleare e acquisire elementi critici a fronte dei successivi sviluppi delle politiche nucleari nei vari paesi.

Le prime ricerche si indirizzarono ovunque allo studio dettagliato dei vari processi indotti da neutroni sull'uranio, per misurare sperimentalmente le grandezze fisiche fondamentali della fissione, anche al fine di verificare la teoria di Bohr e individuare le condizioni per ottenere una reazione a catena ("formula dei quattro fattori") [nota 7] e prevedere la massa critica (Weart 1976 e 1977).

A quel tempo i fisici nucleari mondiali costituivano una piccola comunità, in stretto contatto fra di loro, anche se in aperta competizione scientifica, e per alcuni mesi i ricercatori lavorarono liberamente secondo l'usuale prassi scientifica, mantenendo la comunicazione dei risultati, ma, al crescere della loro valenza militare, le ricerche cominciarono a venir istituzionalizzate e continuarono coperte dal segreto ed esposte ad azioni di spionaggio.

1. Iniziative francesi sulla fissione

A Parigi il laboratorio di Irène Curie e Frédéric Joliot era uno dei principali centri mondiali di ricerca di fisica nucleare, ove si era scoperta la radioattività artificiale, e Joliot iniziò uno studio sistematico sulla fissione con la collaborazione di due profughi recentemente naturalizzati francesi, Hans von Halban, austriaco, e Lew Kowarski, russo. Essi scoprirono ben presto che i neutroni lenti sono particolarmente

efficaci a produrre fissioni; per rallentare i neutroni veloci emessi nella fissione, usarono prima idrogeno, quindi carbonio (grafite e ghiaccio secco) e infine acqua pesante, che riconobbero come moderatore ideale.

Joliot informò delle prospettive della fissione il ministro francese per gli armamenti, Raul Dautry, responsabile anche del *Centre national de la recherche scientifique* (CNRS), che dimostrò un immediato interesse anche nella prospettiva dell'impiego per la propulsione dei sommergibili. Dautry non ritenne di costituire una particolare struttura ufficiale per le ricerche sulla fissione, che rimasero nelle mani del gruppo di Joliot, e acquistò (marzo 1940) praticamente tutte le scorte mondiali esistenti di acqua pesante (185,5 kg) dall'unico produttore del tempo, la compagnia norvegese *Norsk Hydro* a Vemork, vincendo la concorrenza tedesca [nota 8].

Intanto Joliot aveva preso contatto con i dirigenti della compagnia belga *Union Minière du Haut-Katanga*, proprietaria delle ricchissime miniere congolese d'uranio, che controllava la maggior parte della produzione mondiale d'uranio e di radio, attirando la loro attenzione sull'interesse commerciale dell'uranio, che allora era un sottoprodotto della separazione del radio, impiegato in medicina [nota 9]: l'uranio veniva solo utilizzato per la decorazione di ceramiche e nell'industria dei cristalli. Joliot propose un accordo fra la compagnia e il CNRS per lo sfruttamento industriale della fissione e ottenne 5 tonnellate di ossido d'uranio nel giugno 1939 e altre 3 nell'aprile 1940: nessun gruppo di ricercatori al mondo disponeva allora di tante risorse materiali per le ricerche sulla fissione, il che contribuì ai rapidi progressi dei francesi.

Francis Perrin nel maggio del 1939 aveva trovato una stima della massa critica di una bomba a neutroni veloci (circa 40 tonnellate di ossido d'uranio) e per una a neutroni lenti (circa 5 tonnellate) [nota 10]. Nell'ottobre 1939 i francesi ottennero empiricamente un'espressione approssimata della formula dei quattro fattori, che depositarono all'*Académie des Sciences*, ove verrà tenuta segreta fino alla fine della seconda guerra mondiale, e registrarono tre brevetti sulla reazione a catena per impieghi civili e militari [nota 11].

La collaborazione con l'Inghilterra

All'invasione tedesca della Francia (giugno 1940) von Halban e Kowarski, per ordine di Dautry, portarono l'acqua pesante e un grammo di radio in Inghilterra e si unirono al gruppo di ricerca britannico al *Cavendish Laboratory* a Cambridge, mentre le scorte di uranio francesi vennero nascoste in Marocco. Joliot rimase in Francia a completare la costruzione del ciclotrone del suo laboratorio, diventando uno dei capi della resistenza contro i nazisti.

A Cambridge von Halban e Kowarski con un gruppo, includente oltre a inglesi ebrei tedeschi e profughi austriaci, si dedicarono allo sviluppo di un reattore ad acqua pesante, sia nella prospettiva di una fonte energetica, sia per la produzione di elementi transuranici fissili (plutonio) in alternativa all'U-235, che appariva estremamente difficile da separare; nell'autunno 1940 riuscirono a produrre, primi al mondo, una reazione a catena divergente, ossia attiva finché sostenuta da una sorgente neutronica esterna, bombardando con neutroni uranio naturale disciolto in acqua pesante, e nel corso del 1941 analizzarono varie configurazioni operative per un possibile reattore, con differenti moderatori e vari sistemi di controllo, in collaborazione con l'industria chimica *Imperial Chemical Industries* (ICI), con cui raggiunsero accordi per i futuri sfruttamenti industriali [nota 12].

Le attività per un reattore ad acqua pesante vennero trasferite alla fine del 1942 a Montreal, sotto la direzione di von Halban e di John Douglas Cockcroft, nell'ambito di un accordo anglo-americano-canadese. Per volontà americana, gli scienziati francesi (il gruppo si era arricchito di Pierre Auger, Bertrand Goldschmidt e Jules

Guéron) non parteciperanno allo sviluppo finale della bomba e le attività a Monreal si limitarono allo sviluppo di tecnologie nucleari a scopi civili. Sotto la direzione di Kowarski venne realizzato a Chalk River ZEEP, il primo reattore fuori degli USA, che divenne critico il 5 settembre 1945, lanciando la linea degli impianti elettronucleari canadesi CANDU ad acqua pesante.

Alla liberazione della Francia (agosto 1944) i francesi chiesero di visitare il loro paese e di riprendere i contatti con Joliot: ciò venne considerato inaccettabile dagli americani, che tentarono impedirlo e di trattenerli in America a tempo indeterminato; il permesso finalmente concesso dagli inglesi, che comunque avevano obblighi verso i francesi, creò una grave crisi nei rapporti anglo-americani alla fine del 1944, che portò quasi alla rottura. Gli scienziati francesi si risentirono del trattamento loro riservato e nel corso del 1945 abbandonarono le attività anglo-canadesi, con l'approvazione degli americani che non volevano che essi acquisissero troppe competenze.

Il generale Charles de Gaulle creò nell'ottobre 1945 il *Commissariat à l'énergie atomique* (CEA), la prima autorità nucleare civile al mondo, con Joliot alto commissario e Dautry amministratore generale. Immediatamente iniziarono le attività per la realizzazione di un reattore nucleare ad acqua pesante e ossido di uranio, secondo lo schema di ZEEP; il primo reattore francese, El-1 o ZOE, divenne critico il 15 dicembre 1948. Le competenze tecnico-scientifiche acquisite saranno alla base del successivo imponente sviluppo nucleare civile francese e della *force de frappe*, sviluppate autonomamente data la totale chiusura americana e le resistenze alla collaborazione da parte inglese, dal 1947 fino al 1955.

2. I programmi nucleari tedeschi

La Germania fu il primo paese a istituire uno specifico programma militare basato sulla fissione, notevolmente dotato di uomini e mezzi, secondo soltanto a quello americano. Tuttavia i tedeschi non riuscirono a produrre un'arma nucleare, né un reattore, e neppure raggiunsero una reazione a catena autosostenuta. Questo sia per carenze scientifiche e organizzative, ma soprattutto perché il programma non raggiunse mai una dimensione adeguata.

Nella primavera 1939 due istituzioni tedesche vennero sollecitate da parte di scienziati a considerare le possibili applicazioni militari della fissione nucleare: Paul Harteck e Wilhelm Groth di Amburgo le segnalavano al generale Erich Schumann, direttore dell'agenzia per gli armamenti dell'esercito (*Heereswaffenamt*, HWA), mentre Georg Joos di Gottinga si rivolse al consiglio delle ricerche del Reich (*Reichsforschungsrat*, RFR), afferente al ministero della cultura (*Kulturministerium*), cui facevano capo le università; il RFR costituì un "club dell'uranio" (*Uranverein*) comprendente i maggiori fisici tedeschi. Intanto, nel giugno 1939, Siegfried Flügge discusse in un articolo le condizioni per sostenere una reazione a catena e vari aspetti della massa critica (suggerì 4,2 t di ossido d'uranio in polvere).

L'Uranverein

Allo scoppio della guerra (settembre 1939), l'HWA prese sotto il suo controllo le ricerche sull'uranio, innescando quelle tensioni interne che contribuiranno al fallimento del programma tedesco, che di fatto cambierà più volte istituzioni responsabili e dirigenti. Schumann incaricò Kurt Diebner, un fisico dell'agenzia, di dirigere le ricerche, con l'assistenza di Erich Bagge; gli scienziati dell'*Uranverein* vennero formalmente mobilitati, e il centro scientifico fu posto all'*Institut für Physik* a Berlino-Dahlem, requisito nell'ottobre 1939 alla *Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft* (KWG). Il lavoro fu diviso in tre filoni, la realizzazione di un reattore (*Uranium-maschine*),

l'acquisizione di acqua pesante e la produzione di uranio, e la separazione degli isotopi; vennero impegnati nove differenti gruppi distribuiti in tutta la Germania, che coinvolsero un centinaio di ricercatori. Da quel momento venne impedita la pubblicazione dei risultati delle ricerche tedesche sull'uranio.

Un filone di ricerche indipendente venne intrapreso da Manfred von Ardenne nel suo laboratorio privato a Berlino con finanziamenti del Ministero delle poste, avvalendosi dell'importante collaborazione di Fritz Houtermans. La dispersione e frammentazione del programma, con limitato scambio di informazioni e animosità fra i vari gruppi, saranno un'ulteriore causa del suo fallimento. Una limitazione strumentale verrà dalla mancanza di un ciclotrone con cui eseguire le precise misure necessarie dei parametri nucleari fondamentali [nota 13].

D'altra parte la Germania, oltre a poter contare su una significativa classe di scienziati e ingegneri esperti in molti campi, su laboratori di ricerca e università ben dotati di strumentazione di base, possedeva una solida infrastruttura tecnologica con ottime competenze in molti campi; nelle prime fasi del conflitto aveva acquisito le miniere di uranio ceche e si era impadronita delle scorte di ossido d'uranio della *Union Minière* in Belgio (almeno 600 t) e le società Auer [nota 14] e Degussa avevano sviluppato le tecnologie per il trattamento e la metallurgia dell'uranio.

Werner Heisenberg [nota 15], uno dei massimi fisici teorici dello scorso secolo, sviluppò una sua teoria della fissione, che presentò all'*Uranverein* in due seminari nell'inverno 1939-1940. Queste relazioni determinarono l'indirizzo di tutta la ricerca tedesca durante guerra; giungevano alle conclusioni, corrette, che un reattore a fissione controllata era possibile con grafite e/o acqua pesante quale moderatore e che uranio fortemente arricchito nell'isotopo 235 poteva diventare un potente esplosivo, ma presentavano gravi carenze e profonda incomprendimento delle condizioni sia per una bomba che per un reattore.

In particolare, per quest'ultimo, ritenne praticamente inutilizzabile la grafite come moderatore, in quanto avrebbe richiesto una quantità enorme di uranio, e indicò come unica soluzione l'acqua pesante, allora disponibile in minime quantità in Germania; la sua teoria venne sviluppata solo per un reattore eterogeneo infinito costituito da strati piani alterni di uranio e di moderatore; egli erroneamente indicò tale configurazione come ideale (a Berlino venne sviluppato un prototipo appunto a strati piani) per passare in seguito a preferire una configurazione a sfere concentriche, un cui prototipo venne realizzato a Lipsia. Un ulteriore errore fu la sua convinzione che un reattore a uranio naturale o poco arricchito moderato ad acqua pesante si autostabilizzi in seguito all'innalzamento della temperatura, mentre invece sono necessarie barre di controllo di materiali in grado di assorbire neutroni [nota 16].

Heisenberg considerava possibile una reazione esplosiva in un sistema di uranio fortemente arricchito (alcune tonnellate) in acqua pesante di dimensioni superiori a un certo raggio critico: il programma tedesco non giungerà a una corretta teoria della bomba basata sui neutroni veloci, né a una ragionevole determinazione della massa critica [nota 17]. Il coinvolgimento di Heisenberg nell'*Uranverein* non venne accolto positivamente da parte di altri membri del comitato, creando tensioni che continueranno per tutta la durata delle ricerche.

Misure di Walther Bothe su grafite (in realtà non purificata sufficientemente) esclusero definitivamente la grafite come moderatore [nota 18]. Per l'acqua pesante, anziché sviluppare un impianto in Germania, come suggerito da Harteck, si preferì far ricorso all'impianto di Vermork nella Norvegia occupata, impianto che verrà ripetutamente bombardato dagli inglesi e sabotato dalla resistenza [nota 19]. Durante la fase vittoriosa della guerra, i militari tedeschi non esercitarono particolare pressione sul progetto uranio; il maggior risultato fu la pila subcritica di Lipsia, divenuta operativa alla fine del 1941, che nel maggio successivo dimostrerà la

moltiplicazione di neutroni [nota 20], mentre scarsi progressi si avevano per l'arricchimento dell'uranio.

Un'alternativa all'U-235, basata sull'uso di transuranici, venne proposta da Carl Friedrich von Weizsäcker: inizialmente suggerì l'uso dell'elemento 93 (nettunio), inutilizzabile in quanto decade troppo rapidamente. Nell'agosto 1941 Houtermans individuò come buon materiale fissile l'elemento 94 (plutonio) producibile attraverso il nettunio dall'U-238 in un reattore, che quindi poteva fornire sia energia che materiale per la bomba; inoltre ottenne una buona espressione per la formula dei quattro fattori, valida anche per una struttura tridimensionale del reattore. Per la mancanza di acceleratori in grado di produrre intensi flussi di neutroni, i tedeschi non riuscirono a produrre neppure la minima quantità di plutonio necessaria per prime misure delle sue proprietà, e la "via del plutonio" rimase puramente teorica.

Alla fine del 1941, con l'esercito tedesco impantanato in Russia, l'aggravarsi della situazione al fronte e la dichiarazione di guerra degli Stati Uniti, Hitler ordinò la mobilitazione generale dell'economia tedesca e l'HWA decise la revisione di tutti i suoi programmi, puntando a risultati sicuri in tempi brevi. Nel dicembre 1941 Schumann informò l'*Uranverein* che avrebbe continuato i finanziamenti solo nella certezza di ottenere un'arma risolutrice nell'immediato futuro.

I risultati delle ricerche vennero esaminati criticamente nel corso di una conferenza nel febbraio 1942: a parte la separazione isotopica, le varie ricerche stavano facendo significativi progressi, ma una bomba –che era il principale obiettivo del progetto– non era realizzabile entro un anno o due.

La decisione definitiva sul programma venne presa in una conferenza dal 4 al 6 giugno 1942, in cui erano presenti il nuovo ministro degli armamenti, Albert Speer, e il maresciallo Erhard Milch; gli scienziati fecero presente che era possibile la produzione di energia in una pila a uranio, con la parallela generazione di materiale fissile esplosivo per armi nucleari; si poteva puntare allo sviluppo di un reattore per propulsione navale; mancava una previsione precisa della massa critica per una bomba, né si era individuato un metodo di separazione dell'U-235 senza la realizzazione di impianti enormi e quindi praticamente impossibili. Speer concluse che la fissione nucleare non avrebbe potuto influire sul corso della guerra, ma che la prospettiva di un'arma nucleare era importante per il futuro; il lavoro doveva continuare a scala ridotta, con l'obiettivo primario di sviluppare una pila a uranio per la produzione di energia e pertanto il programma andava trasferito a un'istituzione civile.

L'HWA dette priorità agli sviluppi aeronautici e missilistici, tagliò i fondi al progetto uranio, rinunciò al controllo dell'*Institut für Physik* e aprì in alternativa all'*Uranverein* un proprio laboratorio a Gottow, vicino a Berlino, ove Diebner iniziò la costruzione di una grande pila subcritica usando 500 litri di acqua pesante con una distribuzione dell'uranio in cubi, che era risultata immediatamente migliore degli schemi di Heisenberg.

Gli scienziati così ottennero finanziamenti permanenti, ancorché limitati, per una ricerca interessante, il sostegno da parte del regime, una riabilitazione ideologica, a fronte degli scarsi progressi, una proroga per il progetto, senza doversi impegnare per la realizzazione immediata di una bomba con altissima probabilità di fallire.

Verso l'*Uranium-maschine*

Al ritiro dell'esercito dal controllo del progetto uranio, si innescò un conflitto fra le varie istituzioni: il Ministero dell'istruzione assunse il controllo delle ricerche, sotto la direzione di Abraham Esau; la KWG reclamò il suo istituto di Berlino ottenendo l'appoggio di Speer, che convinse Hitler a nominare Hermann Göring capo del RFR; la *Deutsche Physicalische Gesellschaft* si battè per il sostegno alla ricerca e per dare spazio ai propri membri, in particolare Heisenberg: nel luglio '42 Heisenberg divenne

direttore dell'istituto di Berlino e, nel 1943, Walter Gerlach rimpiazzò Esau come plenipotenziario delle ricerche sul reattore, col difficile compito di coordinare le attività di Heisenberg e di Diebner, in rapporti sempre più conflittuali e in competizione per le risorse.

Le ricerche sulla separazione dell'U-235, condotte a Berlino da Bagge e a Monaco da Klaus Clusius, inventore di un metodo per la separazione termica in fase gassosa [nota **] ("tubi di Clusius"), davano risultati insoddisfacenti; nel 1943 Harteck propose lo sviluppo di ultracentrifughe accoppiate, che rimasero tuttavia allo stadio di progetto. Di fatto i tedeschi non riuscirono a separare una quantità di U-235 neppure sufficiente per misure corrette delle sue proprietà.

Durante l'inverno 1944 Heisenberg diresse la costruzione a Dahlem di una grande pila (esperimento B-VII) con 1,5 t d'acqua pesante e con 1,5 t di uranio distribuito a blocchi, essendosi finalmente convinto della superiorità di questo schema. A causa dei crescenti bombardamenti alleati sulla capitale, a metà del '44 Speer ordinò a tutti i gruppi di ricerca di trasferirsi lontano da Berlino. Il gruppo e i materiali di Dahlem vennero trasferiti in un laboratorio predisposto in una caverna a Haigerloch nella Germania sud-occidentale; Gerlach e Diebner si rifiutarono di portarvi anche le proprie scorte di uranio e acqua pesante e si installarono a Stadtilm, in Turingia; il KWI per la chimica, diretto da Hahn, si spostò a Tailfingen, sempre nella Germania meridionale, e il gruppo di Harteck a Celle, a nord di Hannover.

Negli ultime mesi della guerra i bombardamenti, l'avvicinarsi dei fronti e l'evacuazione degli istituti resero estremamente difficile la prosecuzione delle ricerche. Il reattore ricostruito a Haigerloch (esperimento B-VIII) produsse i migliori risultati mai raggiunti, ma, non ottenendo regolarmente uranio dalle industrie e anche per la mancanza dei materiali trattenuti a Stadtilm, non riuscì a raggiungere una reazione a catena autosostenuta.

L'unico vero contributo all'energia nucleare dei tedeschi sarà lo sviluppo della tecnologia dell'arricchimento isotopico tramite centrifugazione, che verrà utilizzata a pieno dai russi prima e successivamente in tutto il mondo.

I principali scienziati tedeschi impegnati nel progetto e i materiali presenti a Haigerloch, Tailfingen e Stadtilm vennero catturati (23 aprile-3 maggio 1945) dalla missione militare americana *Alsos*, istituita dal generale Leslie Groves per raccogliere informazioni sul programma nucleare tedesco, ma soprattutto con l'obiettivo di evitare che scienziati e materiali tedeschi finissero in mano ai francesi o ai russi. Bagge, Diebner, Gerlach, Hahn, Harteck, Heisenberg, Horst Korsching, Max von Laue (premio Nobel per la fisica 1914), von Weizsäcker e Karl Wirtz furono tenuti segretamente in una villa presso Cambridge dal 3 luglio 1945 al 3 gennaio 1946 e tutte le loro conversazioni vennero spiate, per una ricostruzione del programma tedesco [nota 21].

Vennero così confermati i limitati risultati delle ricerche della Germania, gli errori della loro teoria del reattore e la mancanza di una chiara comprensione della fisica e della tecnologia della bomba, come già scoperto da Samuel Goudsmit, fisico capo scientifico dell'*Alsos*, dai documenti di von Weizsäcker trovati nel suo studio all'università di Strasburgo, nel dicembre 1944 [nota 22]. Gli scienziati tedeschi rimasero comunque convinti fino alla notizia della bomba su Hiroshima di essere stati più avanti degli alleati sia dal punto di vista teorico che sperimentale.

3. Il programma inglese

Dopo un iniziale scetticismo sulle effettive possibilità di un'arma nucleare, gli inglesi giunsero rapidamente a individuare gli aspetti essenziali di una bomba a fissione e i suoi possibili effetti, nonché i passi necessari per la sua produzione; lanciarono un

preciso programma, che fino al 1942 rimase il più avanzato al mondo, coinvolgendo l'industria per le necessarie installazioni. L'impossibilità di realizzare gli impianti in Inghilterra, sottoposta ai bombardamenti tedeschi, spinse gli inglesi a cercare la collaborazione del Canada e degli USA; superate varie difficoltà nei rapporti con gli alleati, nel corso del 1943 il programma inglese per la bomba confluì in quello americano, mentre le ricerche inglesi per un reattore elettronucleare proseguirono in Canada, con la collaborazione di scienziati francesi. Alla fine della guerra non ottennero dagli americani la sperata collaborazione per lo sviluppo di una propria arma nucleare, che verrà quindi sviluppata in modo indipendente.

L'impulso iniziale

Gli scienziati inglesi non contribuirono alle prime ricerche sulla fissione, nonostante la vaste competenze in fisica nucleare e la disponibilità di acceleratori e di strumentazione adeguata. Il fisico premio Nobel 1937 George Paget Thomson dell'*Imperial College of Science and Technology*, a seguito delle pubblicazioni del gruppo francese, alla fine di aprile 1939 informò il governo inglese delle prospettive militari ed economiche della fissione, raccomandò l'acquisizione del controllo dell'uranio belga e suggerì di intraprendere un programma di ricerche. Venne coinvolto il *Committee on the Scientific Survey of Air Defence* di sir Henry Tizard [nota 23], che, pur personalmente scettico sulle effettive prospettive della fissione, affidò a Thomson il compito di seguire le ricerche, richiedendo a Marcus Laurence Elwin Oliphant di Birmingham di studiare la produzione di uranio metallico.

L'inizio del programma inglese sulle armi nucleari si deve ai risultati delle ricerche teoriche condotte a Birmingham da due rifugiati: il tedesco Rudolph Ernst Peierls e l'austriaco Otto Frisch, che il 19 marzo 1940 presentarono a Tizard due brevi ma convincenti memorandum: "sulle proprietà di una superbomba radioattiva" e "sulla costruzione di una superbomba basata sulla reazione nucleare a catena dell'uranio". Essi sostenevano la possibilità di una reazione a catena esplosiva in U-235 metallico puro indotta da neutroni veloci con una massa critica di un solo kg, proponendo un metodo di arricchimento dell'uranio basato sulla diffusione termica. Descrivevano un meccanismo a incastro per la detonazione dell'arma e ne esploravano gli effetti. Preoccupati per le informazioni sugli sviluppi tedeschi, raccomandavano azioni urgenti per produrre un'arma da usare come deterrente contro un possibile arsenale nucleare nazista.

Questi memorandum, rendendo possibile la prospettiva di un'arma all'uranio, data la piccola quantità di U-235 necessaria, e fornendo precise indicazioni sui principali problemi da affrontare e indicazioni per la loro soluzione, convinse il Ministero per la produzione aerea (MAP) a costituire un comitato referente a David R. Pye, direttore della ricerca scientifica del MAP, per "investigare le possibilità dell'uranio a contribuire allo sforzo bellico".

Il comitato MAUD e il Directorate Tube Alloys

Il comitato venne chiamato MAUD, la sua direzione fu affidata a Thompson e le ricerche vennero condotte in quattro università: a Liverpool il premio Nobel per la fisica James Chadwick diresse le misure delle costanti fisiche fondamentali, con Frisch, il profugo polacco Joseph Rotblat [nota 24] e un gruppo di Bristol; a Birmingham Peierls sviluppava la teoria della bomba, dal 1941 anche col profugo tedesco Klaus Fuchs, e il gruppo del premio Nobel per la chimica Walter Norman Haworth affrontava i problemi della chimica dell'uranio e dei suoi composti; a Oxford Franz Eugen Simon, profugo tedesco, dirigeva lo sviluppo della separazione dell'U-235 per diffusione gassosa; a Cambridge si studiava la separazione isotopica con centrifughe e i francesi sviluppavano la loro pila ad acqua pesante con l'obiettivo di una reazione a catena autosostenuta; oltre ai gruppi universitari fin dall'inizio

venne coinvolto il complesso industriale ICI, inizialmente per collaborare con Haworth alla produzione di esafluoruro di uranio e uranio metallico, e quindi nella prospettiva dello sviluppo di un impianto di arricchimento a diffusione e della realizzazione di un reattore per la produzione di energia elettronucleare [nota 25].

Nonostante la dispersione delle attività e le difficoltà dovute alla situazione bellica, i lavori procedettero spediti, con buona comunicazione e collaborazione fra i diversi gruppi e grande efficienza organizzativa.

Nell'autunno del 1940, nell'ambito della missione di Tizard [nota 26], Cockcroft prese contatto a Washington con scienziati americani impegnati sulla fissione, informandoli delle attività inglesi e sollecitando collaborazione.

Il 7 luglio 1941 il Comitato MAUD presentò al governo due documenti: "uso dell'uranio per una bomba" e "uso dell'uranio come fonte d'energia", in cui si esaminavano in modo dettagliato i problemi e le prospettive per l'impiego della fissione: per lo sviluppo di energia elettronucleare confermavano la via "francese" del reattore a uranio naturale e acqua pesante; per la bomba proponevano un piano industriale per l'arricchimento dell'uranio mediante diffusione gassosa e un progetto di un impianto pilota, definivano la tecnologia per la realizzazione di un'arma a U-235 puro, individuando una massa critica di 10 kg, ed esaminando i suoi effetti, stimati equivalenti a un'esplosione di 1,8 kton; unico punto sottovalutato –per mancanza di misure sul nuovo elemento– la possibilità di impiegare plutonio quale materiale fissile [nota 27].

Il rapporto indicava chiaramente gli altissimi costi dell'impresa e come fosse impossibile produrre dei prototipi per verificare la fattibilità della bomba; riteneva comunque possibile produrre un'arma in due anni. Su quest'ultimo punto dissentiva Patrick Blackett per il quale erano necessari almeno cinque anni e considerava impossibile, dati gli altri impegni bellici, la realizzazione in Inghilterra degli impianti, che andavano costruiti negli USA, con la loro collaborazione.

I rapporti del Comitato MAUD furono presentati formalmente al direttore Pye, che li fece avere al ministro e li trasmise allo *Scientific Advisory Committee* (SAC) del MAP per una revisione. Nel frattempo Thomson, per evitare i tempi burocratici, aveva fatto arrivare i rapporti direttamente a Maurice Pascal Alers (lord Hankey), ministro del Gabinetto di guerra, sensibilizzato anche dal presidente dell'ICI. Intanto (agosto 1941) Winston Churchill venne informato direttamente dal suo consulente scientifico Frederick Alexander Lindemann (dal 1941 lord Cherwell), che insisteva per mantenere lo sviluppo dell'impianto di arricchimento in Inghilterra o al più in Canada, ma non in USA, perché "chi ha l'impianto domina il mondo".

Il 5 settembre Churchill riferì sulle ricerche atomiche al Consiglio dei capi di stato maggiore, insistendo sulla necessità di non restare fermi nello sviluppo di nuovi armamenti; il Consiglio raccomandò un'azione immediata sotto il massimo segreto. A livello governativo vennero considerate anche le prospettive post belliche della bomba, che anche se non pronta in tempo per il corrente conflitto, comunque avrebbe garantito a UK e USA di "*policing and controlling the world*".

Il SAC presentò le sue conclusioni il 25 settembre 1941 a John Anderson, Lord President of the Council e membro del gabinetto di guerra: approvavano il progetto del reattore con la raccomandazione di mantenerlo sotto controllo pubblico e di svilupparlo in collaborazione con USA e Canada. Per la bomba erano favorevoli a un deciso e urgente sviluppo in tre fasi: la prima fase dedicata a misure delle proprietà dell'U-235, a ricerche sulla teoria della bomba e alla realizzazione in Inghilterra di un prototipo a 20 stadi dell'impianto di separazione a diffusione gassosa; la seconda fase per la costruzione dell'impianto completo di diffusione in Nord America (gli elementi costruiti in USA e montati in Canada) sotto il controllo politico inglese, essendo impossibile proteggere da bombardamenti tedeschi una grande struttura industriale in UK; nella terza fase la costruzione e il test della bomba.

Il SAC stimava i tempi necessari superiori a due anni ma inferiori a cinque. Attirava inoltre l'attenzione sulla radioattività prodotta dall'esplosione, raccomandando studi più dettagliati sugli effetti immediati e su tempi lunghi [nota 28].

Per la continuazione delle ricerche e lo sviluppo del programma Churchill istituì il *Directorate Tube Alloys* nell'ambito del *Department of scientific and industrial research* (DSIR) sotto la direzione di Wallace Alan Akers (direttore della ricerca alla ICI) e la supervisione a livello governativo di Anderson [nota 29]. La nuova istituzione iniziò a operare in autunno con gli scienziati che avevano fatto parte del MAUD, e che in parte non apprezzarono la nuova struttura calata dall'alto, a differenza della libera convergenza e collaborazione così fruttuosa del MAUD.

Durante il 1942 e 1943, in attesa della definizione dei rapporti con Canada e USA, in Inghilterra le attività continuarono senza il necessario innalzamento dalla fase di ricerca di base al conseguente stadio di sviluppo pre-industriale e in mancanza di un preciso obiettivo. La principale attenzione fu dedicata allo sviluppo della tecnologia della diffusione gassosa, affrontando gli svariati problemi tecnici che essa comporta sia per l'individuazione e produzione delle membrane, sia per il progetto e la costruzione dei compressori in condizioni di alto vuoto e corrosione, sia per la caratterizzazione e la preparazione dell'esafluoruro di uranio. La dispersione delle attività a questo stadio si rivelò infruttuosa e crebbe il ruolo delle industrie coinvolte, in particolare l'ICI.

Vennero studiati anche altri metodi di arricchimento, la chimica dell'uranio e la produzione e trattamento dell'uranio metallico e la produzione di acqua pesante, mentre continuavano le misure delle proprietà fisiche dei materiali e gli studi e calcoli per la teoria della bomba. Tuttavia queste attività, condotte, come vedremo, senza contatti con gli USA, rimasero in larga parte arretrate rispetto ai contemporanei sviluppi in America; comunque, le competenze acquisite risulteranno utili per lo sviluppo del reattore a Montreal e contribuiranno in modo significativo alla soluzione di vari delicati problemi del progetto Manhattan, una volta trasferiti gli scienziati britannici a Los Alamos.

I rapporti con l'America

Vannevar Bush [nota 30] e James Conant [nota 31], responsabili del programma atomico americano, rimasero impressionati dai rapporti MAUD e dalle relazioni sulle attività inglesi riportate da George B. Pegram e Harold Clayton Urey (premio Nobel per la chimica 1934) dopo la loro visita in Inghilterra nell'ottobre 1941, proposero ad Anderson la creazione di un progetto congiunto anglo-americano e convinsero il presidente Franklin Delano Roosevelt a scrivere in tal senso a Churchill. Da parte inglese vi furono riserve, perché gli USA, all'epoca ancora neutrali, non sembravano offrire garanzie di riservatezza [nota 32], il programma americano appariva poco determinato e alcuni responsabili inglesi pensavano di poter mantenere il pieno controllo sull'energia nucleare. Da parte inglese fu offerta piena collaborazione a livello scientifico ma si propose di mantenere i due programmi separati.

Nel corso del 1942 Akers, Simon, von Halban e Peierls visitarono i laboratori americani e poterono verificare il notevole impulso dato alla ricerca atomica dopo l'entrata degli USA in guerra e l'enorme coinvolgimento sia a livello scientifico che industriale, ben superiore per uomini, strutture e mezzi rispetto al loro *tube alloys*; gli unici campi in cui gli inglesi rimanevano momentaneamente più avanzati era lo studio teorico della bomba e dei suoi effetti e la tecnologia del reattore. Una differenza fondamentale nello sviluppo di sistemi a neutroni lenti stava nelle loro prospettive: puramente come sorgente di energia per von Halban e gli inglesi e soprattutto come generatore di plutonio per armi per gli americani, che preferivano l'approccio di Fermi, basato su una pila a uranio naturale e grafite.

Mentre gli scienziati, rendendosi conto della superiorità americana, spingevano per una rapida fusione dei due programmi, i dirigenti del *tube alloys* cercavano di mantenere un ruolo speciale per l'UK e salvaguardare anche gli aspetti economici futuri. Alla fine del luglio 1942 il *Tube alloys consultative council* (TACC) decise di trasferire negli USA la costruzione dell'impianto pilota inglese a diffusione e i ricercatori inglesi impegnati sugli studi di arricchimento, la creazione di uffici di collegamento fra i due progetti, il mantenimento delle ricerche teoriche e sulla chimica in Inghilterra.

Nell'estate 1942 vennero definite con i canadesi le condizioni per lo sviluppo delle ricerche del gruppo di von Halban a Montreal; il trasferimento avvenne nel dicembre e le ricerche si avviarono solo nel corso della primavera successiva. Il 5 agosto 1942 Anderson comunicò a Bush le proposte del TACC, approvate da Churchill, chiedendo l'inserimento di un membro inglese nel comitato direttivo del progetto americano S-1. Annunciò l'intenzione di trasferire il gruppo di von Halban in Canada per svilupparvi la pila ad acqua pesante. Propose inoltre una commissione congiunta sull'energia atomica per definire gli sviluppi post-bellici, con l'eventuale inserimento dell'URSS e di altri paesi. Bush rispose accettando alcune proposte minori, ma di non ritenere opportuno al momento l'impianto pilota e l'inserimento di inglesi nel Comitato S-1, giudicando assolutamente premature le problematiche post-belliche e le implicazioni internazionali.

Di fatto il progetto americano a questo punto era molto evoluto e stava passando a una fase operativa nelle mani dell'esercito, e gli americani erano convinti che un programma congiunto poteva ritardare gli sviluppi, dato che i possibili contributi inglesi erano pressoché marginali. Nel dicembre 1942 il *Military Policy Committee* americano decise che la collaborazione UK-USA doveva limitarsi ai soli settori in cui gli inglesi potevano contribuire alla realizzazione della bomba in tempo utile per la guerra, garantendo la massima riservatezza e sicurezza.

I responsabili americani erano preoccupati per l'accordo UK-URSS sullo scambio di informazioni scientifiche e temevano che gli inglesi fossero in realtà interessati a sviluppare una loro potenza nucleare nel dopoguerra, utilizzando il lavoro degli USA. Conant precisò in un comunicato le limitazioni conseguenti alle decisioni prese: limitati contatti fra le industrie impegnate nella costruzione dei rispettivi impianti a diffusione, scambi scientifici sui reattori ad acqua pesante e interruzione di ogni altra informazione.

La collaborazione rimase di fatto bloccata, causando anche ritardi nelle attività del gruppo di von Halban e creando una situazione di incertezza per tutto il progetto inglese, nel dubbio se cercare di ricucire con gli USA o cercare un difficile sviluppo autonomo.

Il programma comune

Sensibilizzato da Anderson, Churchill affrontò il problema della collaborazione UK-USA con Roosevelt e il suo assistente Harry Hopkins nell'incontro di Casablanca (gennaio 1943), ricevendo vaghe rassicurazioni da Roosevelt e promesse da Hopkins. Mentre Bush e gli altri dirigenti americani ribadivano la politica di chiusura agli inglesi, a Washington Roosevelt (25 maggio 1943) promise a Churchill di continuare la collaborazione nel programma atomico e il successivo 20 luglio, sotto le pressanti insistenze di Churchill, impose a Bush di riprendere un totale scambio di informazioni con gli inglesi.

Finalmente, il 19 agosto 1943 a Quebec Churchill e Roosevelt firmarono un accordo sulla collaborazione UK-USA per la ricerca atomica secondo una proposta inglese: impegno dei due governi a non usare la bomba uno contro l'altro, assenso comune per l'uso dell'arma in guerra, vincolo a non trasferire informazioni a paesi terzi senza il consenso di entrambi, rinuncia da parte inglese a ogni diritto

commerciale sulle applicazioni civili, che restavano a discrezione del Presidente USA, e, per quanto riguardava il programma militare, “*full and effective*” collaborazione in un’impresa comune, sotto la direzione di un *Combined Policy Committe* (CPC), composto dal segretario alla guerra americano Henry Lewis Stimson, Bush e Conant per gli USA, per il Regno Unito il maresciallo di campo John Dill, come rappresentante dello stato maggiore, e John Jestyn Llewelin, membro del governo residente negli USA, e Clarence Hove per il Canada [nota 33]. Chadwick venne chiamato come assistente scientifico dei membri inglesi del CPC e a dirigere il gruppo di scienziati inglesi in America. Si giunse così finalmente al programma congiunto auspicato dagli americani, ma rifiutato dagli inglesi, nel 1941, ricercato dagli inglesi, ma respinto dagli americani nel 1942.

L’8 settembre 1943 il CPC a Washington stabilì gli aspetti operativi della nuova fase di ricerche congiunte, definendo le afferenze degli esperti inglesi ai vari progetti americani in corso: esperti inglesi guidati da Akers si incontrarono con tecnici americani per esaminare i problemi della separazione a diffusione gassosa; fisici e chimici inglesi vennero impegnati, sotto la guida di Oliphant, per l’arricchimento magnetico; alla realizzazione finale della bomba a Los Alamos lavorarono, fra gli altri, Frisch, Peierls, Fuchs, Rotblat, Geoffrey Taylor e Bohr, fuggito a Londra da Copenhagen per evitare l’arresto da parte dei nazisti.

Il loro contributo in molti campi, dalla fisica teorica e sperimentale, all’elettronica, agli alti esplosivi e al controllo dell’implosione fu estremamente importante. Gran parte del gruppo inglese di Los Alamos assistette al primo test atomico ad Alamogordo e William George Penney [nota 34] fu fra gli osservatori del bombardamento di Nagasaki e partecipò in seguito alla verifica dei danni di Hiroshima.

La collaborazione anglo-americana procedette fino alla fine della guerra in modo fruttuoso, grazie anche agli ottimi rapporti fra Chadwick e il generale Leslie Groves, capo militare del progetto; l’unico serio incidente di rilievo riguardò i problemi posti dal permesso concesso dagli inglesi ai francesi di visitare la Francia liberata e di avere contatti con Joliot e dagli accordi con von Halban e Kowarski relativi ai loro brevetti.

Il progetto autonomo inglese

Durante il 1944 e 1945 il TACC si riunì due volte negli USA, ove operava la maggior parte dei suoi membri, e una in Inghilterra per elaborare proposte per il futuro del programma inglese nel dopoguerra, dando per scontato che l’UK non potesse rinunciare al raggiungimento sia di armi nucleari che di impianti elettronucleari. A tal fine era essenziale che continuassero ricerche autonome su aspetti fondamentali, non direttamente necessarie per il programma militare congiunto, per non venir meno agli impegni con gli americani. Inoltre dovevano proseguire gli sviluppi sui reattori in Canada, in vista dell’acquisizione di tecnologie e esperienze.

Gli accordi di Hyde Park fra Churchill e Roosevelt (18 settembre 1944) garantivano lo sviluppo di un programma nucleare congiunto sia per le applicazioni economiche che militari anche nel dopoguerra. La prima fase del programma inglese poteva consistere nella creazione di uno stabilimento sperimentale governativo per lo sviluppo scientifico e tecnologico, dotato di strumentazione di ricerca e di un reattore di ricerca da 100 MW a grafite per la produzione di fasci di neutroni per varie applicazioni e per lo sviluppo della tecnologia del reattore. La sede venne individuata ad Harwell, fra Oxford e Cambridge e Cockcroft accettò di dirigere il nuovo centro (luglio 1945).

Il nuovo presidente americano, Harry Spencer Truman, e il nuovo primo ministro inglese, Clement Richard Attlee, si incontrano col presidente canadese Mackenzie King a Washington nel novembre 1945 per definire una politica comune sul futuro dell’energia atomica: proposero la creazione di un speciale commissione atomica

delle Nazioni Unite per il controllo internazionale dell'energia nucleare e rinnovarono un impegno di collaborazione fra i tre paesi. Tuttavia per Truman diveniva difficile conciliare le esigenze di politica interna con l'assistenza scientifica e industriale richiesta dagli inglesi per il proprio sviluppo nucleare; la collaborazione verrà ristretta al solo scambio di informazioni scientifiche di base finché il MacMahon Act (luglio 1946) impose un rigido segreto su tutti gli aspetti relativi all'energia nucleare, militare e civile. Cessò così fino al 1958 ogni collaborazione UK-USA in questi campi, e lo sviluppo nucleare inglese, deciso formalmente nel 1947, avvenne in forma autonoma [nota 35].

4. Ricerche in Unione Sovietica fino al 1945

Lo sviluppo del programma nucleare sovietico è segnato da tre decisioni: nel 1940 l'Accademia delle scienze decise di non chiedere fondi speciali al governo per le ricerche nucleari, nel 1942 il Comitato per la difesa dello stato (GKO) intraprese un programma militare ridotto e, infine, nell'agosto 1945 l'URSS lanciò un programma a tutto campo e senza limitazione di mezzi per l'acquisizione di armi nucleari nel più breve tempo possibile.

Prime ricerche

La notizia della scoperta della fissione trovò immediata attenzione da parte della comunità russa di fisica nucleare, che si era andata formando a partire dai primi anni '30, grazie soprattutto a Abram Fedorovich Ioffe, direttore dell'Istituto fisico-tecnico di Leningrado (LFTI), che nel 1934 aveva creato 4 laboratori di fisica nucleare diretti da Igor Vasil'evich Kurchatov [nota 36], Abram Isaakovich Alikhanov, Lev Andreevich Artsimovich e Dmitrii Vladimirovich Skobel'tsyn. Altri centri importanti di fisica nucleare erano l'Istituto fisico-tecnico ucraino a Khar'kov, diretto da Aleksandr Il'ich Leipunskii, ove avevano lavorato anche importanti fisici stranieri, ma che venne decimato dalle purghe staliniane del 1938, e a Mosca il nuovo Istituto di fisica Lebedev dell'Accademia delle scienze, diretto da Sergej Ivanovich Vavilov, che si espanse sottraendo personale al LFTI.

Altri due istituti di Leningrado verranno a giocare un ruolo importante per il programma nucleare russo: l'Istituto Radium, fondato da Vladimir Ivanovich Verdanskii, che aveva promosso in Russia le ricerche sulla radioattività fin dal 1910, dal 1937 possedeva in ciclotrone (il primo in Europa) e sarà diretto dal 1939 dal radiochimico Vitalii Grigor'evich Kholopin; l'Istituto di chimica fisica (ICF) diretto da Nikolai Nikolaevich Semenov, che negli anni '30 aveva sviluppato reazioni chimiche a catena.

Ricerche sperimentali e teoriche sulla fissione cominciarono immediatamente nei vari centri: al LFTI nell'aprile '39 Lev Rusinov e Georgii Nikolaevich Flerov trovarono che fra 2 e 4 neutroni venivano emessi nella fissione e, in una serie di seminari e articoli (estate 1939 - gennaio 1940), Yakov Borisovich Zel'dovich e Yuli Khariton del ICF affrontarono studi sulle condizioni per una reazione a catena sia esplosiva con U-235, che in un reattore a uranio naturale e acqua pesante. Alla Quarta conferenza di fisica nucleare (Khar'kov, novembre 1939) Leipunskii presentò una rassegna sulla fissione, indicando le ricerche necessarie per il raggiungimento di una reazione a catena.

Nell'aprile 1940 Verdanskii sollecitò il lancio di un programma nazionale per lo studio della fissione e delle sue implicazioni economiche, per l'individuazione delle risorse di uranio e per lo sviluppo di tecniche di separazione isotopica. Un importante risultato venne ottenuto nel giugno 1940 da Flerov e Konstantin Petrzhak con la scoperta della fissione spontanea dell'uranio, un processo cruciale per una

teoria accurata della bomba.

Nello stesso mese, su sollecitazione di Vernadskii, il Presidium dell'Accademia delle Scienze costituì la Commissione uranio, sotto la presidenza di Khlopin, includente, fra gli altri, Vavilov, Pyotr Leonidovich Kapitsa, Vernadskii, Ioffe, Kurchatov e Khariton, con il compito di dirigere le ricerche sulla fissione, in particolare sull'arricchimento isotopico e sulle condizioni per una reazione a catena. La decisione dimostrava l'interesse della massima istituzione di ricerca sovietica per gli sviluppi della fissione, tuttavia essa non accolse la sollecitazione di Kurchatov, e altri, per un programma operativo deciso, mirante anche alla realizzazione delle necessarie strutture e infrastrutture, con l'intervento del governo per finanziamenti speciali, nella prospettiva delle applicazioni economiche e soprattutto militari.

Una lettera di sollecito al governo da parte di Semenov non ebbe risposta e nessun contatto venne cercato con l'Armata rossa, che comunque attraversava notevoli difficoltà dopo le purghe del '38. Intanto, dall'estate 1940 il dipartimento di scienza e tecnologia dei servizi segreti russi (NKGB) sviluppava piani per penetrare nei laboratori occidentali e ottenere informazioni sulla ricerca atomica.

Dalla pausa bellica al rilancio delle ricerche

Le ricerche dei vari gruppi proseguirono fino all'invasione tedesca della Russia (giugno 1941), avvenuta proprio quando il gruppo di Kurchatov cominciava a operare con il nuovo ciclotrone del LFTI. Le esigenze belliche a fronte della grave disfatta iniziale dell'esercito russo e la perdita di enormi risorse e infrastrutture imposero a molti scienziati di dedicarsi ai problemi più urgenti e le ricerche sull'uranio furono sospese.

All'interno del GKO, che venne a esercitare il supremo potere sotto la direzione di Joseph Stalin, fu costituito un Comitato tecnico-scientifico affidato a Sergei Kaftanov, per dirigere la ricerca nazionale e indirizzarla alle necessità militari. Intanto gli istituti scientifici di Mosca e Leningrado vennero evacuati a Kazan o in città degli Urali. Il LFTI si spostò a Kazan e si dedicò allo sviluppo del radar e alla protezione delle navi dalle mine magnetiche; su quest'ultimo tema si impegnò anche Kurchatov.

Nella primavera 1942, mentre era al fronte come ufficiale dell'aeronautica, Flerov ebbe modo di esaminare le riviste straniere giunte all'università di Voronez e si accorse che le pubblicazioni sulla fissione si erano improvvisamente bloccate nella primavera del 1940; ne dedusse che scienziati inglesi e americani svolgevano tali ricerche in segreto e quindi con precisi fini militari e per non agevolare un possibile progetto atomico tedesco. Flerov scrisse direttamente a Stalin segnalandogli l'importanza militare della fissione, il pericolo di una bomba tedesca e le prospettive di una americana, sollecitando la ripresa delle ricerche russe per l'arma nucleare.

La lettera venne trasmessa a Kaftanov, che aveva già ricevuto indicazioni dell'esistenza di un programma tedesco; dopo essersi consultato con alcuni accademici, raccomandò al GKO di far riprendere in modo deciso le ricerche sull'uranio, anche sulla base di conferme sui programmi tedeschi, inglesi e americani ottenuti dalla rete spionistica di Lavrentii Pavlovich Beria, il potente capo dei NDKD e NKGB, e dal servizio segreto militare GRU, che agiva in competizione a Beria.

In un suo memorandum a Stalin e al GKO del marzo 1942 Beria aveva potuto includere il rapporto MAUD, le indicazioni del *Cabinet Scientific Advisory Committee* (settembre 1941) e la conseguente decisione dell'alto comando inglese di procedere alla costruzione della bomba, coinvolgendo anche l'industria.

Verso la fine del 1942 Stalin decise per la ripresa delle ricerche nucleari, e il GKO decretò la costituzione di uno specifico laboratorio nell'ambito dell'Accademia delle scienze. La decisione sovietica avvenne in uno dei momenti più duri della guerra e di massimo pericolo per l'URSS; era chiaro che non era pensabile un'arma risolutrice

per il conflitto in corso, ma Stalin voleva assicurarsi una condizione di parità con le potenze occidentali una volta finita la guerra, o almeno una garanzia contro incertezze future.

Viacheslav Mikhailovich Molotov, vice presidente del KGO, nominò supervisori del programma sull'uranio Kaftanov e Mikhail Molotov, vice premier e commissario politico dell'industria chimica; nel febbraio 1943 deliberò le norme organizzative delle ricerche e affidò la direzione scientifica del nuovo laboratorio a Kurchatov, cui venne subito richiesto un confronto fra i risultati ottenuti dagli scienziati sovietici e le informazioni fornite dallo spionaggio.

Kurchatov rimase sorpreso nell'apprendere che gli inglesi preferivano la diffusione alle centrifughe per arricchire l'uranio, ma ritenne necessario che anche i russi esplorassero questo metodo, data l'autorevolezza degli scienziati inglesi che lo avevano proposto; trovò conferma dai dati di von Halban-Kowarski della possibilità, dai russi solo ipotizzata in via teorica, di produrre un sistema critico usando uranio naturale e acqua pesante, e intuì che il loro apparato era eterogeneo e concluse che per seguire la loro via era necessario sviluppare in URSS la produzione di acqua pesante; si rese conto che in occidente si puntava alla produzione di Pu-239, di cui erano state verificate le proprietà di fissione, e pertanto questa via andava perseguita come la più promettente per la bomba.

Fissato così il programma, Kurchatov si avvalse degli ampi poteri ottenuti dal KGO con un decreto del 12 aprile 1943 per creare un nuovo laboratorio a Mosca (Laboratorio n. 2), reclutando un gruppo di giovani ricercatori, fra cui Anatolii Petrovich Aleksandrov, per la diffusione termica, Alikhanov, responsabile della pila ad acqua pesante, Flerov, Zel'dovich e Isaak Pomerancuk, per lo studio di una pila a grafite, Viktor A. Davidenko e Isaak Konstantinovich Kikoin, per la diffusione gassosa, Khariton, per la teoria della bomba, Artsimovich, per la separazione elettromagnetica e il matematico Sergei Lvovich Sobolev; nel novembre 1943 Leonid Nemenov e P. Glazunov riuscirono a far passare attraverso il blocco di Leningrado due carri ferroviari di strumentazione per la costruzione del ciclotrone del Laboratorio n. 2, con cui fare le misure necessarie sull'uranio e produrre plutonio e studiarne le proprietà; il processo di separazione del plutonio venne affidato a Khlopin e al fratello di Kurchatov, Boris.

Le prime tracce di plutonio furono ottenute nell'ottobre 1944. Data la difficoltà di reperire acqua pesante, nel luglio 1943 Kurchatov decise di dare priorità a una pila eterogenea a grafite, per cui erano state stimate necessarie fra 50 e 100 tonnellate di uranio e dieci volte tanto di grafite pura.

Quando, nell'aprile 1944, il Laboratorio n. 2 si spostò alla periferia nord-ovest di Mosca, comprendeva 74 membri, di cui 25 scienziati. Durante tutto il 1944 Kurchatov e Mikhail Georgievich Pervukin non riuscirono a ottenere che piccole quantità dei materiali necessari per il progresso del progetto, mentre languivano le ricerche di minerali d'uranio, e si lamentarono con Beria per la scarsa attenzione del governo, proprio mentre giungevano attraverso i servizi segreti, in particolare da Klaus Fuchs, precise informazioni sugli sviluppi poderosi nei vari laboratori del progetto Manhattan, inclusi il metodo a implosione quale innesco della bomba, e misure precise delle sezioni d'urto di fissione dell'U-235 e del Pu-239. Queste ultime informazioni indirizzarono dalla primavera del '45 le ricerche di Khariton, che precedentemente aveva studiato l'innesco a incastro.

Intanto, con l'avanzata dell'armata rossa verso ovest, l'URSS prese il controllo della produzione ceca di uranio e nel maggio 1945 una speciale missione, composta da agenti del NKVD e scienziati del Laboratorio n. 2 e diretta da Avraamii Zaveniagin, giunse in Germania per raccogliere informazioni e materiali del programma nucleare tedesco. Una trentina di ricercatori tedeschi acconsentirono a trasferirsi in Russia e partecipare al programma nucleare russo, fra cui von Ardenne,

il premio Nobel per la fisica 1925 Gustav Ludwig Hertz, Peter-Adolf Thiessen, direttore del KWI di chimica-fisica e Nikolaus Riehl, direttore delle ricerche della ditta Auer (Oleynikov 2000). Molta strumentazione di laboratorio e impianti industriali tedeschi finirono in Russia come preda di guerra, ma fu soprattutto importante per il programma nucleare sovietico l'acquisizione del controllo di ricchi giacimenti di uranio e il reperimento di oltre 240 tonnellate di ossido d'uranio, che permetteranno al programma russo di guadagnare oltre un anno nella costruzione della prima pila.

Nonostante le acquisizioni di scienziati, materiali e uranio tedeschi e la creazione di un nuovo laboratorio per la metallurgia dei materiali fissili, il NII-9, il programma russo continuò lentamente fino all'agosto '45. Nonostante le informazioni di Fuchs sul fatto che gli americani avevano prodotto la bomba e ne avrebbero provato un prototipo il 10 luglio, i capi russi non si resero conto a pieno del ruolo che la bomba avrebbe svolto nella politica internazionale, probabilmente influenzati dalla diffidenza di Beria che tali informazioni fossero manipolazioni degli americani e per il suo discredito degli scienziati russi. Quando a Potsdam il 25 luglio 1945 Truman informò Stalin che gli USA avevano una nuova arma di enorme potenza, Stalin dette l'impressione di minimizzare il fatto.

La situazione cambierà drasticamente solo dopo le bombe su Hiroshima e Nagasaki, quando l'acquisizione al più presto della bomba diverrà per Stalin il primo e assoluto obiettivo dell'Unione Sovietica.

5. I programmi giapponesi per la bomba

A differenza degli altri paesi in cui furono gli scienziati a promuovere l'interesse dei governi alle prospettive militari della fissione, in Giappone furono istituzioni di ricerca dell'esercito e della marina imperiali a coinvolgere scienziati in programmi miranti all'arma nucleare; le attività giapponesi si possono dividere in cinque fasi:

1. studi scientifici liberi sul fenomeno fisico (1939-40),
2. indagini preliminari da parte dei militari (1940-42),
3. analisi di fattibilità da parte di un comitato di scienziati sotto gli auspici della marina (luglio 1942-marzo '43),
4. il progetto *Ni-go kenkyu* a Tokyo finanziato dall'esercito (autunno 1942-aprile '45),
5. il progetto *F-go kenkyu* a Kyoto finanziato dalla marina dall'estate 1943 alla resa del Giappone.

Mentre la prima fase avvenne al di fuori di ogni intento applicativo, le altre miravano precisamente alla produzione di un'arma nucleare; va precisato che non si tratta di articolazioni di un unico programma, ma iniziative largamente indipendenti e disarticolate, spesso in competizione.

Prime ricerche scientifiche e indagini militari

Principale centro di queste attività fu l'Istituto di ricerche fisiche e chimiche Riken di Tokyo, creato nel 1917 per fornire supporto scientifico alle industrie, ma con spazio per ricerche di base. Negli anni '30 Yoshio Nishina portò a Riken dall'Europa le tematiche e i metodi della fisica più avanzata, e rinnovò lo stile di ricerca, rendendolo democratico e aperto.

Nishina lanciò ricerche di fisica nucleare sia teoriche che sperimentali, per le quali acquisì nel 1937 un ciclotrone da 26 pollici, il secondo al mondo dopo quello americano di Ernest O. Lawrence; la costruzione di un nuovo ciclotrone da 60 pollici, sulla base dei disegni forniti da Lawrence, continuò fra grandi difficoltà durante tutta la guerra; primi esperimenti a prestazioni ridotte furono possibili dall'estate 1944.

Ricerche di fisica teorica e sperimentale avanzate si svolgevano anche alle università di Kyoto, col gruppo di Bunsaku Arakatsu, a Osaka, con Seishi Kikuchi, e a Nagoya, da Shoichi Sakata, Hideki Yukawa e Mitsuo Taketani. Sia Kyoto che Osaka si dotarono di acceleratori elettrostatici e di piccoli ciclotroni per ricerche di fisica nucleare [nota 37]. La disponibilità di acceleratori permise ai fisici nucleari giapponesi di inserirsi immediatamente nella ricerca sulla fissione e di procedere alla pari con i maggiori centri mondiali. A Riken si misurarono le sezioni d'urto di fissione dell'uranio e del torio con neutroni veloci e nel 1940 venne scoperto l'isotopo U-237. A Kyoto il gruppo di Arakatsu studiò processi di fotofissione di uranio e torio e nel 1940 determinò in 2,6 il numero medio di neutroni emessi nella fissione dell'uranio.

All'inizio dell'estate 1940, il generale Takeo Yasuda, capo dell'Istituto di ricerche di tecnologia aeronautica dell'esercito, incontrò casualmente in treno Nishina, che lo informò della scoperta della fissione nucleare e delle possibili applicazioni militari. Yasuda ordinò al tenente colonnello Tatsusaburo Suzuki, suo aiutante, di indagare sulle possibilità di produrre un'arma a fissione. Suzuki si consultò con Ryokichi Sagane, un ricercatore di Riken che era stato suo professore all'università, e nell'ottobre 1940 presentò a Yasuda un rapporto in cui riteneva sufficienti le disponibilità di uranio nei paesi occupati dal Giappone, ma senza una determinazione della massa critica.

Yasuda non riconobbe particolare priorità al programma atomico e solo nell'aprile 1941 ordinò a Suzuki di rivolgersi a Riken per ricerche approfondite, che vennero affidate a Nishina nel giugno 1941. All'inizio del 1942 Yasuda discusse del progetto con Hideki Tojo, allora primo ministro e ministro della guerra, ricevendone l'approvazione; ciò segnò l'inizio formale del programma dell'esercito, in seguito denominato "ricerca Ni-go" (*Ni-go kenkyu*) [nota 38].

Le prospettive della fissione attirarono anche l'attenzione della marina; il capitano Yoji Ito dell'Istituto di ricerche tecniche della marina (KGK) di Tokyo, nell'autunno 1941 lanciò uno studio sulle possibili applicazioni militari. Nel marzo 1942 presentò al KGK un rapporto: era molto probabile che gli americani stessero sviluppando l'energia atomica e quindi anche il Giappone doveva interessarsi alla questione; la fissione nucleare poteva in particolare servire per la propulsione navale.

Dopo la sconfitta di Midway (giugno 1942) l'ammiraglio Isoroku Yamamoto, comandante della flotta, ordinò al KGK di sviluppare armi "epocali"; Ito presentò due progetti: un "raggio della morte" basato su magnetroni di alta potenza, e la produzione di armi nucleari. Quest'ultimo progetto fu affidato a un Comitato fisica formalmente costituito da Ito sotto la direzione di Nishina. Il Comitato fisica, composto da 11 scienziati di altissimo livello, si riunì 8 volte dal 18 luglio 1942 al 6 marzo 1943, giungendo alle seguenti conclusioni: una bomba atomica è in principio possibile; il Giappone non possiede uranio, e servono prospezioni minerarie nei territori occupati; una bomba giapponese non è fattibile prima di 10 anni, e solo al prezzo di 1/10 dell'energia elettrica e metà del rame disponibile in Giappone; neppure gli USA o la Germania potrebbero realizzarla nei tempi della guerra. A questo punto Ito sciolse il Comitato invitando gli scienziati a dedicarsi a ricerche più urgenti, in particolare per il radar e il "raggio della morte".

I progetti Ni-go e F-go

Con l'aggravarsi della situazione militare crebbe anche l'attenzione per il progetto Ni-go, fino allora condotto senza senso d'urgenza. Nel dicembre 1942, Nishina chiese a Hidehiko Tamaki di determinare la massa critica per uranio arricchito a vari livelli. Tamaki presentò i suoi risultati il 3 febbraio 1943; secondo i suoi calcoli, per una bomba della potenza di 18 mila tonnellate di esplosivo convenzionale sarebbero

bastati 11,1 kg di uranio arricchito al 10% in 30 litri d'acqua; per raggiungere tale quantità di uranio arricchito riteneva sufficienti 200 kg di uranio naturale.

I calcoli erano completamente errati, e non tenevano conto dell'efficienza di un impianto di arricchimento realizzabile all'epoca [nota 39]. La sottovalutazione della massa critica rendeva comunque plausibile uno sforzo per la produzione dell'arma nucleare.

Il problema centrale del progetto appariva quindi l'arricchimento dell'uranio, per il quale venne scelta la diffusione termica gassosa (tubo di Clusius) a partire da esafluoruro di uranio, risultando impraticabili gli altri metodi. Il programma di arricchimento fu affidato a due giovani ricercatori: Masa Takeuchi per l'impianto e Kunihiko Kigoshi per la produzione dell'esafuoruro di uranio; a loro disposizione l'edificio 49 di Riken, una struttura di legno a due piani per 330 metri quadri complessivi, e una decina di tecnici dell'aeronautica. I calcoli teorici venivano compiuti da Taketani, imprigionato come sovversivo, sotto la sorveglianza della polizia.

Nel marzo 1944 Takeuchi riuscì a completare il tubo di Clusius: un sistema di tubi di rame concentrici alti 5 metri, quello interno riscaldato a 400 °C e quello esterno raffreddato ad acqua. La produzione di esafluoruro di uranio procedette con difficoltà: al luglio 1944 erano stati ottenuti 170 g con i quali Takeuchi iniziò gli esperimenti di diffusione e nel febbraio 1945 la sostanza prodotta venne esaminata con il ciclotrone da 26 pollici, col deludente risultato che non era avvenuto alcun arricchimento isotopico.

Nel bombardamento di Tokyo del 13 aprile 1945 venne incendiato l'edificio 49 e il tubo fu distrutto. Un nuovo apparato venne costruito all'università di Osaka, ma non fu possibile utilizzarlo per mancanza di acqua ed elettricità a causa dei bombardamenti.

Intanto, indipendentemente dal KGK, l'Ufficio della flotta iniziò a interessarsi alla fissione: il tenente-comandante Tsutomu Murata chiese ad Arakatsu di condurre ricerche per il loro Ufficio, e nel maggio 1943 iniziò ufficialmente a Kyoto il progetto "F-go" (*F-go kenkyu*).

Arakatsu impegnò il ciclotrone per le misure e affidò a Yukawa e a Minoru Kobayashi lo studio della massa critica. Kobayashi stimò che una sfera di U-235 puro di raggio fra 10 e 20 cm potesse raggiungere la condizione di criticità ed esplodere, ma non produsse calcoli relativi alla potenza di una tale bomba. Per l'arricchimento dell'uranio, Arakatsu promosse lo sviluppo del metodo della centrifugazione; il progetto di una ultracentrifuga fu completato nel luglio 1945, scegliendo il duralluminio come principale materiale dell'apparato. Ma le scorte di duralluminio vennero distrutte dai bombardamenti americani e non si poté costruire neppure un prototipo.

I problemi di chimica per l'esafuoruro di uranio furono affidati a Shinji Sasa, mentre Takuzo Okada si occupò della produzione di uranio metallico. Il 21 luglio 1945 vi fu il primo –e ultimo– incontro formale degli scienziati del progetto F-go con i committenti della marina: Yukawa presentò una relazione sulle ricerche nucleari mondiali, basate su informazioni ottenute da paesi neutrali, Arakatsu i calcoli teorici sulla massa critica e Okada un campione stabile di uranio metallico, lungo e largo 3 centimetri e spesso un millimetro. Gli ufficiali della marina informarono che non c'era minerale uranifero e la conferenza fu l'ultima azione del progetto, 25 giorni prima della resa del Giappone.

Cause del fallimento

L'approvvigionamento di uranio rimase problematico per tutta la durata del conflitto. A programma già avanzato, nella primavera del 1943, Nishina disponeva di un solo kilogrammo di ossido d'uranio e per la produzione dell'esafuoruro Kigoshi

riuscì a racimolare da varie fonti altri 45 kg di composti differenti d'uranio [nota 40]. Anche la marina per il programma F-go riuscì a procurarne solo limitate quantità: 45 kg di ossido d'uranio di varia purezza vennero recuperati da laboratori di ceramica dell'area di Kyoto e nella primavera del 1945 Arakatsu ricevette 90 kg di ossido d'uranio, acquistato al mercato nero di Shanghai. La scarsità di uranio rimandò un progetto di pila atomica per dimostrare la reazione a catena; comunque non esistevano impianti per produrre grafite pura, e nel 1944 erano disponibili solo minime quantità di acqua pesante, adeguate per esperimenti e non le tonnellate necessarie anche per un piccolo reattore.

Entrambi i progetti giapponesi furono estremamente deboli anche in risorse umane, dati anche i molteplici impegni richiesti dalle esigenze della guerra: il progetto di Kyoto non ebbe mai più di 20 scienziati impegnati contemporaneamente e Nishina poteva contare su una trentina di ricercatori principali e un centinaio disponibile solo per consulenze e assistenza. Inoltre i ricercatori lavoravano con scarso entusiasmo, rendendosi conto dell'impossibilità di raggiungere risultati significativi: Nishina si impegnava sia per patriottismo, sia per salvare giovani scienziati dal fronte e con loro un possibile rilancio della ricerca scientifica dopo la fine della guerra.

Il fallimento dei programmi giapponesi era comunque inevitabile, data la carenza di risorse strategiche, l'inadeguata base industriale, l'assenza di una gestione efficace e di coordinamento delle ricerche, l'ostilità dei militari verso gli scienziati civili e la feroce rivalità fra l'esercito e la marina imperiali.

Dopo il bombardamento di Hiroshima, Nishina e Arakatsu furono inviati sul posto il 10 agosto e conclusero che si trattava effettivamente di un'esplosione nucleare; il 14 Nishina si recò a Nagasaki. All'amarrezza per la terribile distruzione si univa per gli scienziati giapponesi l'umiliazione che i loro colleghi americani avessero compiuto ciò che essi giudicavano assolutamente irraggiungibile da chiunque. Dopo la resa, gli scienziati giapponesi continuarono le investigazioni sui danni provocati dalle bombe, prima autonomamente e poi con esperti americani.

Gli americani non sospettarono dell'esistenza del programma nucleare giapponese, di cui verranno a conoscenza solo dopo l'occupazione militare nel corso di indagini sulle attività scientifiche del Giappone durante la guerra.

6. Il programma americano e le prime bombe

Il programma nucleare americano fu, come è noto, l'unico ad avere successo durante la seconda guerra mondiale. Nacque su sollecitazione di rifugiati europei nella prospettiva di creare un deterrente al programma militare nazista, si sviluppò nell'ambito della politica di Vannevar Bush per la creazione di strutture tecnico-scientifiche a sostegno delle forze armate americane, passando attraverso successivi stadi di complessità, inglobando, dopo alterne forme di collaborazione e chiusura, le competenze inglesi, fino a un deciso piano industriale senza limitazioni, sotto la direzione militare.

Per raggiungere in tempo un impiego bellico diretto, tutti gli approcci alla bomba vennero esplorati e perseguiti. Anche dal punto di vista politico vi fu un'evoluzione, dall'obiettivo iniziale dissuasivo all'impiego a scopo coercitivo per forzare la resa del Giappone e nella prospettiva di un controllo del riassetto strategico-politico del mondo una volta uscito dalla guerra.

L'Advisory Committee on Uranium

Ricerche sulla fissione iniziarono negli USA immediatamente dopo l'annuncio recato da Bohr nel gennaio 1939; Fermi alla Columbia University di New York con la

collaborazione di Leo Szilard [nota 41] e alcuni studenti, intraprese misure delle proprietà fondamentali del nuovo processo e puntò alla realizzazione di una reazione a catena con il più semplice approccio disponibile: uranio naturale e grafite quale moderatore [nota 42]. Alla Columbia operava anche il gruppo di John Dunning, interessato invece allo studio dell'isotopo U-235.

Il primo contatto con i militari avvenne nel marzo 1939, quando Fermi, su iniziativa di Pegram, preside della facoltà, illustrò le prospettive dell'energia nucleare e le ricerche correnti a un gruppo di ufficiali della marina e dell'esercito e a scienziati del *Naval Research Laboratory* (NRL); questi ultimi si dimostrarono particolarmente interessati, anche nella prospettiva della propulsione sottomarina.

Un'azione più decisa venne da parte di Szilard, che nel luglio del 1939 convinse l'economista Alexander Sachs della necessità che gli americani prendessero con forza l'iniziativa nel campo delle applicazioni militari della fissione, per contrastare gli sviluppi dei tedeschi. Sachs suggerì che Albert Einstein [nota 43], con la sua autorevolezza, scrivesse una lettera al presidente Roosevelt sui rischi e le potenzialità della fissione.

La lettera venne preparata il 2 agosto del 1939 con il contributo di Edward Teller e Eugene Wigner, anch'essi come Szilard fisici rifugiati ungheresi; l'11 ottobre Sachs la presentò a Roosevelt insieme a un documento tecnico di Szilard. Subito il Presidente formò un comitato consultivo sull'uranio (*Advisory Committee on Uranium - ACU*), affidandone la direzione a Lyman James Briggs del *National Bureau of Standards* [nota 44].

Nel corso dei primi mesi del 1940 l'ACU fornì finanziamenti agli esperimenti di Fermi sulla reazione a catena e a studi condotti in diversi laboratori per la separazione dell'U-235 mediante centrifugazione, anche col sostegno della *Carnegie Institution*, un'istituzione scientifica privata politicamente influente, presieduta da Bush. Il coinvolgimento di Bush sarà di fondamentale importanza: egli si proponeva di istituzionalizzare al più alto livello politico una stretta integrazione della ricerca e della tecnologia americana con le esigenze della difesa. Il 2 giugno 1940 ottenne da Roosevelt la creazione del *National Defense Research Council* (NDRC), per lo sviluppo della ricerca finalizzata ad applicazioni militari, direttamente collegato al Presidente degli USA.

Il NDRC, sotto la presidenza di Bush, assistito da Conant, ebbe il controllo sia dei laboratori militari che delle ricerche presso le varie università. Anche l'ACU confluì nel NDRC, acquisendo una veste istituzionale e liberandosi dalla dipendenza dai militari per i finanziamenti; Bush lo ristrutturò, lasciando la direzione a Briggs, rimuovendo la presenza dei militari, dato che i contatti con i militari passavano attraverso il NDRC, ampliando la partecipazione di scienziati [nota 45] e rafforzando le condizioni di sicurezza con l'esclusione dal comitato degli scienziati di origine straniera e bloccando la pubblicazione dei risultati.

Nel nuovo contesto, si intensificò la ricerca di uranio, ancora di disponibilità limitata negli USA, e l'acquisizione di grafite di alta purezza, si sostennero le misure dei parametri fisici fondamentali, lo sviluppo degli esperimenti di Fermi per la reazione a catena e, in vari centri, studi di fattibilità della separazione isotopica mediante centrifugazione, diffusione gassosa e diffusione termica in fase liquida; iniziarono anche investigazioni teoriche, dirette da Gregory Breit, dell'università delle Wisconsin, coinvolgendo anche Teller.

Nel febbraio 1941 il chimico Glenn Seaborg utilizzando il grande ciclotrone di Berkeley produsse una frazione di microgrammo dell'elemento 94 (che chiamerà plutonio) e ne individuò le caratteristiche specifiche; il suo gruppo, comprendente anche Emilio Segrè, rifugiato dall'Italia, trovò sperimentalmente che il nuovo elemento era soggetto a fissione quasi due volte più frequentemente dell'U-235.

Va osservato come la disponibilità di un grande apparato strumentale abbia fornito agli americani la certezza che il plutonio costituiva un'alternativa all'U-235, mentre ciò era solo un'ipotesi per i tedeschi e una previsione teorica per gli inglesi. La scoperta suscitò l'interesse per la fissione del direttore di Berkeley, Ernest Orlando Lawrence, (premio Nobel 1939 per la realizzazione del ciclotrone), che immediatamente espresse a Bush la sua insoddisfazione per la lentezza con cui procedevano le ricerche; nominato consulente di Briggs riuscì a far finanziare le ricerche sul plutonio e la produzione di alcuni microgrammi di U-235.

Intanto, nella primavera 1941, un comitato della *National Academy of Sciences* (NAS), presieduto dal fisico Arthur Holly Compton [nota 46] dell'università di Chicago [nota 47], sottopose a revisione il programma uranio, su richiesta di Bush: il rapporto del comitato considerava solo la fissione con neutroni lenti, che poteva portare a produzione di energia, utile militarmente per la propulsione navale; raccomandava un'intensificazione delle ricerche per dimostrare la reazione a catena; giudicava importante l'arricchimento isotopico e la produzione di plutonio, ma non era in grado di suggerire metodi operativi a tal fine.

Un deciso cambiamento di prospettiva venne dalle informazioni fornite dagli inglesi sul loro programma, raccolte anche da una missione scientifica americana, con Conant, che aveva visitato i laboratori inglesi e partecipato alle riunioni del MAUD nel corso del mese di marzo. Nell'estate seguente Oliphant spiegò a scienziati americani le prospettive dell'impiego di neutroni veloci per la realizzazione di una bomba e discusse con Lawrence l'uso del ciclotrone quale possibile separatore isotopico e le potenzialità del plutonio. Questi contatti con gli inglesi impressero un senso di urgenza al programma americano e lo indirizzarono in una precisa prospettiva militare.

La Sezione S-1 dell'*Office of Scientific Research and Development*

Nella primavera del 1941 varie ricerche promosse dal NDRC in più campi stavano raggiungendo uno stadio di sviluppo ingegneristico e promettevano applicazioni industriali, esulando così dalla fase di ricerca su cui aveva competenza il NDRC stesso: Bush promosse allora la creazione di una nuova agenzia con un'ampia autorità su tutte le attività scientifiche e tecnologiche governative per scopi bellici, facente direttamente capo a Roosevelt, l'*Office of Scientific Research and Development* (OSRD), e ne divenne direttore, passando la presidenza del NDRC a Conant; il NDRC stesso venne incorporato nella nuova istituzione, col compito di individuare e proporre ricerche e programmi di sviluppo.

L'ACU passò sotto il controllo dell'OSRD come Sezione S-1, sotto la stretta supervisione di Conant. Briggs rimase come direttore, con Pegram come vice; vennero cooptati nuovi membri e create due sottosezioni: una per la produzione di energia sotto Pegram e una per le ricerche teoriche sotto Fermi, mentre fu affidata a Urey, chimico della Columbia, la direzione dei gruppi impegnati sulla separazione isotopica.

In luglio Bush e Conant ricevettero una bozza, pressoché definitiva, del rapporto MAUD, che li convinse di accelerare le ricerche. In ottobre, Bush chiese al comitato della NAS, opportunamente rafforzato, un esame tecnico dei risultati degli inglesi, in particolare sulla massa critica e la potenza di una bomba a U-235 con neutroni veloci, e la delineazione di un progetto schematico di un impianto di arricchimento. Il comitato confermò (6 novembre 1941) le conclusioni degli inglesi sulla fattibilità della bomba con neutroni veloci e la realizzabilità della separazione di una sufficiente quantità di U-235, anche se furono più prudenti sulle stime della massa critica, sulla potenza dell'esplosione e sui tempi necessari, e raccomandò di accelerare tutte le ricerche e di coinvolgere competenze industriali per la definizione di un impianto pilota di arricchimento dell'uranio.

Intanto Bush aveva ottenuto una decisione sullo sviluppo del programma americano al massimo livello politico: il 9 ottobre illustrò a Roosevelt e al vicepresidente Henry A. Wallace il rapporto MAUD, con le stime inglesi dei costi e dei tempi necessari per una bomba, presentando i problemi ancora aperti, nonché le informazioni disponibili sul possibile programma tedesco. I politici rimasero seriamente colpiti e Roosevelt affidò a Bush il compito di analizzare nel tempo più breve possibile le possibilità concrete di una bomba a fissione e di definire i costi relativi, riservandosi di decidere sulla base di tali informazioni sulla costruzione degli impianti necessari.

Roosevelt destinò uno speciale fondo presidenziale a coprire il fabbisogno finanziario e impose uno stretto segreto su tutta l'operazione, riservando a sé ogni decisione sulle implicazioni politiche, assistito da uno stretto gruppo di consulenti, includente Bush, Compton, Wallace, il segretario alla guerra Stimson e il capo di stato maggiore dell'esercito George Catlett Marshall. Un primo problema politico era la definizione delle relazioni con la Gran Bretagna, e il presidente auspicava larga collaborazione, non escludendo la possibilità di un programma congiunto. Come abbiamo visto, in questa fase gli inglesi fornirono molte informazioni scientifiche, ma non ritennero di unificare i programmi.

Alla luce del nuovo quadro politico e delle indicazioni del comitato della NAS, Bush ristrutturò il programma atomico, mettendolo direttamente sotto il controllo dell'OSRD, cui solo competeva la definizione di contratti di ricerca e industriali: alla Sezione S-1, sotto

Briggs, rimase il compito di fare proposte per la parte scientifica attraverso Conant; la pianificazione della progettazione e la realizzazione degli impianti industriali pilota fu affidata a un *Planning Board* di tecnici, sotto la direzione di Eger V. Murphee, un giovane ingegnere chimico, vice-presidente della *Standard Oil Development Company*; Urey divenne responsabile della separazione isotopica mediante diffusione e centrifughe e delle ricerche con l'acqua pesante; a Lawrence venne affidata la produzione di campioni di plutonio e lo sviluppo della separazione magnetica e la progettazione dei "calutroni"; infine, Compton doveva occuparsi della teoria della bomba e della reazione a catena per la produzione di plutonio.

Nel gennaio 1942 Compton decise di concentrare le ricerche della reazione a catena creando a Chicago un *Metallurgical Laboratory* (Met Lab), lasciando a Berkeley lo sviluppo della teoria dei neutroni veloci, sotto Robert Julius Oppenheimer [nota 48] e della chimica del plutonio, sotto Seaborg.

L'entrata in guerra degli USA dette un deciso impulso al programma, con l'obiettivo di produrre armi in tempo utile per il loro impiego bellico.

Il Manhattan Engineer District

Il 23 maggio 1942 vi fu un esame delle ricerche, che mise in evidenza i progressi raggiunti e portò a ritenere necessario perseguire tutte le quattro strade verso la bomba: i tre metodi di separazione isotopica (diffusione, centrifugazione e magnetico) e la produzione di plutonio; tutte le vie erano infatti promettenti, ma nessuna era assolutamente certa. Poiché ciascuna linea richiedeva la creazione di grandi impianti industriali e di laboratori dedicati, con l'impegno di centinaia di milioni di dollari, Bush ottenne dal Presidente che l'esercito si facesse carico della produzione finale della bomba.

Il compito venne affidato al genio militare (*Corps of Engineers*) e il progetto venne denominato *Manhattan Engineer District* (MED). Al fine di circoscrivere e bilanciare il ruolo dell'esercito, Bush ottenne la costituzione di un *Military Policy Committee* –massimo organo politico-militare del programma– ove entrò come presidente, con Conant come sostituto; gli altri membri furono l'ammiraglio William Purnell, per la marina, e il generale Wilhem Delp Styer, per l'esercito [nota 49].

Nel settembre 1942 il generale del genio Leslie Groves venne nominato capo militare del progetto. La sua azione apparve subito estremamente risoluta: riuscì a ottenere immediatamente la priorità assoluta per l'acquisizione di materiali e manodopera [nota 50] e acquisì un'area di circa 230 km quadrati nel Tennessee (Oak Ridge) e di oltre 1700 km quadrati nello stato di Washington (Hanford) per la costituzione dei siti segreti ove costruire gli impianti destinati alla produzione dei materiali fissili, la cui realizzazione affidò alla *Du Pont de Nemours* (febbraio 1943); preoccupato di salvaguardare al massimo il segreto del progetto, impose alle ricerche un regime di compartimentazione e di gerarchizzazione burocratica, creando fra il personale scientifico tensioni e insoddisfazione diffusa [nota 51].

Gli sviluppi delle ricerche sulle tecniche di arricchimento già a novembre permisero a Groves e Conant di sospendere lo sviluppo delle centrifughe, tecnica risultata ancora lontana dalla fase applicative, e di decidere la costruzione degli impianti definitivi di diffusione gassosa e separazione magnetica, senza passare attraverso impianti-pilota, accelerando i tempi del programma, anche nel timore di venir anticipati dalla Germania.

Una tappa importante fu raggiunta a Chicago il 2 dicembre 1942, quando la pila dimostrativa CP1 [nota 52], costruita sotto la direzione di Fermi con l'assistenza di Wigner per i calcoli teorici, produsse la prima reazione a catena auto-sostenuta, confermando la possibilità di generare per tale via plutonio per la bomba. CP1 venne mantenuta in funzione per 10 giorni a potenze fra mezzo Watt e un massimo di 200 W, prima di venir smantellata e i materiali riutilizzati per un prototipo più grande, la pila CP2 nel nuovo laboratorio nella foresta di Argonne, destinato a studi scientifici e sviluppi tecnici per definire i progetti dei reattori di produzione effettiva di plutonio. Ad Argonne nel maggio 1944 divenne critica la prima pila ad acqua pesante, sviluppata da Fermi e Wigner: la CP3 impiegava 6,5 t di acqua pesante e raggiunse la potenza massima di 300 kW.

Per passare dalla pila reticolare di Fermi a un reattore di produzione era necessario sviluppare uno schema ingegneristicamente pratico e operativo, che permettesse il facile recupero dell'uranio irradiato, e individuare metodi per il raffreddamento dell'impianto e per il controllo della reazione. La configurazione scelta per il primo reattore-prototipo della potenza di 1 MW consisteva di un cubo di 1500 t di grafite attraversato da 1248

canali per i tubi di alluminio contenenti gli elementi di uranio, con raffreddamento ad aria compressa.

Figura 1. Disegno artistico della pila CP1 a Chicago, che produsse la prima reazione di fissione a catena artificiale auto-sostenuta.

Il 28 dicembre 1942 Roosevelt approvò la transizione dalla fase di ricerca in laboratori scientifici nell'ambito dell'OSRD a uno sforzo di produzione globale da parte di industrie private sotto il controllo dell'esercito, con impegni dell'ordine del mezzo miliardo di dollari. Nel giro di qualche mese anche tutti i contratti di ricerca e sviluppo nell'ambito dell'OSRD vennero trasferiti all'esercito; il comitato S-1 venne praticamente svuotato di ogni ruolo significativo, e Conant e Richard Chace Tolman, un fisico teorico di Caltech, rimasero gli unici consulenti scientifici di Groves.

Il passaggio dalla fase di concezione degli apparati e dalle prime prove in laboratorio alla costruzione effettiva degli impianti industriali per l'arricchimento dell'uranio incontrò notevoli difficoltà, dovute all'alta qualità necessaria, ben al di sopra degli standard industriali dell'epoca, sia dei materiali speciali da produrre, in particolare per le membrane per la diffusione gassosa, sia di ogni componente degli strumenti, in particolare per il vuoto e l'isolamento elettrico da mantenere nei calutroni.

Risultò impraticabile ottenere mediante diffusione gassosa un arricchimento superiore al 20%, per cui alla fine si procedette in cascata: l'arricchimento finale fino al 90% avveniva in calutroni "beta", che ricevevano materiale poco arricchito prodotto dagli altri apparati, grandi calutroni "alfa", unità a diffusione e colonne per la separazione termica in fase liquida, sviluppata fin dal 1940 da Philip Abelson al NRL di Anacostia, realizzate per far fronte a ritardi nella realizzazione degli impianti per la diffusione.

Il centro di Oak Ridge (denominato *Clinton Engineer Works*) per la produzione di uranio arricchito si sviluppò rapidamente fino a raggiungere oltre 42.000 abitanti impegnati nella costruzione e l'uso dei vari impianti. Quando l'attività raggiunse il pieno regime, all'inizio del 1945, l'impianto Y-12 per la separazione elettromagnetica, distribuito su vari edifici, comprendeva 1100 calutroni raggruppati in 9 grandi unità "alfa" e 6 unità "beta", per una produzione giornaliera di 204 grammi di uranio arricchito [nota 53].

Figura 2. Veduta del laboratorio Y-12 a Oak Ridge per la separazione elettromagnetica (1944).

Per l'impianto per la diffusione gassosa K-25 venne costruito un fabbricato di quattro piani lungo oltre 800 m esteso su un'area di quasi 180.000 metri quadrati; la superficie totale dei diaframmi porosi raggiungeva migliaia di metri quadri.

Figura 3. Veduta del laboratorio K-25 a Oak Ridge per la diffusione gassosa (1945).

Per la separazione termica in fase liquida venne realizzato, secondo il progetto di Abelson, l'impianto S-50 di 2142 colonne di rame-nichel alte 48 piedi (14,63 m), in un altro enorme edificio.

Nel sito X-10 a Oak Ridge entrò in funzione il 4 novembre del 1943 il reattore-prototipo da 1 MW, per una produzione iniziale di tracce di plutonio per lo studio delle tecniche di separazione.

Figura 4. Schema del reattore sperimentale costruito a Oak Ridge.

Nella primavera del 1943 sul sito di Hanford iniziarono i lavori per 3 reattori da 250 MW con moderatore a grafite raffreddati ad acqua e per gli imponenti impianti di separazione del plutonio, incontrando varie difficoltà per carenza di manodopera e di materiali. Il primo reattore raggiunse la criticità il 27 settembre 1944 [nota 54], seguito dagli altri due entro dicembre; il 2 febbraio 1945 venne separata una prima quantità di plutonio sufficiente per lo studio delle sue proprietà, per raggiungere la piena produzione nei mesi successivi.

Figura 5. Veduta del laboratorio di Hanford nel 1945

Il laboratorio di Los Alamos

Mentre si sviluppavano le attività per la produzione di materiali fissili, Conant e Bush si convinsero della necessità di creare un laboratorio specifico per la trasformazione dell'uranio e plutonio in una bomba utilizzabile praticamente dai militari. Oppenheimer si convinse che un tale obiettivo richiedeva una piena collaborazione di tutti gli esperti nei vari campi scientifici e tecnologici rilevanti, superando quindi, perché controproducente, la compartimentazione delle ricerche imposte al Met Lab; per garantire comunque il necessario stretto segreto sul progetto, propose di costruire il laboratorio in un luogo estremamente isolato e sorvegliato rigorosamente, lasciando al suo interno una totale libertà di comunicazione. L'idea venne accettata da Groves, che alla fine di novembre 1942 acquistò il sito di Los Alamos, una *mesa* remota fra le montagne del *Sangre de Cristo* nel Nuovo Messico, affidando le costruzioni e l'urbanizzazione del laboratorio al genio militare di Albuquerque e all'università della California la responsabilità di procurare i materiali e assumere il personale.

Oppenheimer, nominato direttore del nuovo laboratorio, convinse Conant e Groves che era necessario che il laboratorio fosse civile e non militare, anche per la resistenza della maggioranza degli scienziati necessari ad accettare la disciplina e la gerarchia militari. In questo modo riuscì ad attrarre esperti di tutti i vari campi necessari, e ottenere strumentazione e acceleratori da molte università e laboratori americani. Alla fine del 1943 iniziarono ad arrivare anche gli inglesi con Bohr. La popolazione di Los Alamos raddoppiava ogni nove mesi, fino a raggiungere i 5.000 abitanti nel 1945, oltre al personale militare di supporto e sorveglianza.

I compiti del laboratorio comprendevano lo studio sperimentale delle proprietà fisiche e chimiche dei materiali fissili e la loro purificazione, trasformazione in metallo e la seguente metallurgia, man mano giungevano da Oak Ridge e Hanford, lo sviluppo della teoria della bomba con la determinazione della massa critica e dell'efficienza in varie configurazioni, l'individuazione del meccanismo d'innescò, e la previsione degli effetti, la definizione della struttura fisica dell'ordigno e dei vari componenti per la costruzione finale di "un'arma militarmente pratica", inclusi gli studi di balistica e aerodinamica.

Il laboratorio venne articolato in quattro divisioni dirette da Hans Albrecht Bethe del MIT (teoria), Robert F. Bacher di Cornell (fisica sperimentale), Joseph William Kennedy di Berkeley (chimica e metallurgia) e il capitano di marina William Sterling Parsons (armamenti).

Oppenheimer, nonostante le restrizioni militari, fece in modo di mantenere lo stile di un'istituzione scientifica, con ampi scambi di informazioni fra i vari settori, e di rendere gratificante il lavoro di ricerca.

Le ricerche erano ad ampio raggio: Teller iniziò gli studi per una bomba a fusione e Seth Henry Neddermeyer di Caltech propose il metodo dell'innesco a implosione, che prometteva di ridurre fortemente la massa critica e migliorare l'efficienza. All'inizio tale tecnica sembrava impossibile da realizzare, ma la diffidenza venne superata da calcoli del matematico John von Neumann, ungherese di origine, allora a Princeton; la scoperta (estate 1939) della fissione spontanea del Pu-240 e la conseguente impossibilità di utilizzare l'innesco a incastro per la bomba a plutonio dettero altissima priorità agli studi sull'implosione per i quali Oppenheimer creò una sotto-divisione dedicata, sotto la direzione del chimico di Harvard George Bogdan Kistiakowsky, di origine russa, coinvolgendo anche le divisioni di Bacher e di Bethe.

Figura 6. Il S-Site a Los Alamos dedicato allo sviluppo della tecnica dell'implosione.

Dal settembre 1944 Fermi divenne con Pearson assistente alla direzione del laboratorio, che si arricchì di competenze tecniche per passare dalla ricerca alla fase di produzione, anche con la collaborazione di industrie e centri esterni.

Nel corso del 1944 gli ingegneri di Pearson misero a punto i detonatori e i congegni di armamento e definirono i limiti di dimensione e peso dei modelli delle bombe a incastro (*little boy*) e a implosione (*fat man*); vennero costruite delle imitazioni dei due modelli e iniziarono lanci di prova in una base aerea da B-29 modificati, al fine di ottimizzarne l'aerodinamica.

Nel corso della primavera 1945 i vari problemi tecnici trovarono soluzione e la fornitura di materiali si fece continua, sufficiente a produrre una bomba a uranio e tre a plutonio.

La bomba all'uranio *little boy*

Il 3 luglio 1945 venne completata a Los Alamos *little boy*, una bomba a U-235 arricchito fino all'89% (con un media dell'80%) per una quantità totale di 2,4 masse critiche, 64,1 kg. La detonazione era basata sulla tecnica a incastro, usando come contenitore la canna di un cannone antiaereo lungo 180 cm e cordite per esplosivo; il proiettile, un cilindro lungo 16 cm e largo 10 cm, conteneva il 40% della massa, mentre il bersaglio era un cilindro cavo lungo e largo 16 cm, circondato da un borraggio-riflettore di carburo di tungsteno contenuto un cilindro di acciaio; la velocità di innesco prevista era di 300 m/s per raggiungere la supercriticità in 1,35 ms. *Little boy* era lunga 3 m, con un diametro di 70 cm, sufficientemente piccola per adattarsi all'alloggiamento per le bombe di un aereo B-29, e aveva un peso totale di circa 4.000 kg.

Figura 7. La prima bomba all'uranio arricchito *little boy* destinata a Hiroshima.

La bomba al plutonio *fat man*

Fat man era composto da una serie di sfere concentriche: partendo dal centro, l'inziatore di neutroni di polonio-berillio, la massa di plutonio, il borraggio-riflettore di uranio naturale, uno strato di alluminio e infine la corona di lenti esplosive. Il nucleo fissile di una lega plutonio in fase delta con 3% di gallio per avere una densità sottocritica pesava 6,2 kg; la compressione implosiva fece passare il plutonio alla più densa fase alfa, ad accrescere la resa, e l'onda d'urto attivò anche la sorgente di neutroni. Il riflettore di uranio pesava 120 kg e contribuì con fissioni veloci a circa il 20% della resa della bomba. Per l'implosione si impiegarono 2.500 kg di alto esplosivo suddiviso in 32 lenti assemblate con altissima precisione, attivate da uno speciale detonatore sincronizzato elettronicamente. L'arma aveva alette stabilizzatrici

e una conchiglia esterna di protezione a forma d'uovo, del diametro di 150 cm e lunga circa 365 cm; il peso complessivo era circa 4.900 kg.

Figura 8. La bomba a implosione *fat man* utilizzata per il bombardamento di Nagasaki.

Il *Trinity test*

Mentre non vi erano dubbi sulla bomba a uranio con l'innesco a incastro, la tecnica di implosione era del tutto nuova e i test preliminari sui vari componenti non avevano dato rassicurazioni sufficienti. Perciò, avendo a disposizione abbastanza plutonio, venne affidato a Kenneth Tompkins Bainbridge, un fisico di Harvard, lo svolgimento di un test finale dell'intera bomba a plutonio ("*Trinity test*"), sia per verificare il controllo dell'implosione, ma anche per misurare il rilascio di energia nucleare e fornire un'esperienza diretta dei vari effetti dell'esplosione. Bainbridge scelse la località *Jornada del Muerto*, nel poligono di tiro dell'aeronautica nel deserto del Nuovo Messico; predispose una torre alta 30 m, cui appendere la bomba, e costruì tre bunker di osservazione a 8 km di distanza in differenti direzioni e un campo base, lontano ulteriori 8 km, ove assistettero all'evento, fra gli altri, anche Bush, Conant e Groves.

Figura 9. Preparazione finale dell'ordigno del *Trinity test*.

La bomba esplose alle 5 e 29 del mattino del 16 luglio 1945, con una potenza di 22 kton e un'efficienza del 17%.

Nessuno dei testimoni della prima esplosione nucleare era preparato a ciò che avvenne realmente: al bagliore iniziale e alla prima silenziosa palla di fuoco, al calore silenzioso della radiazione termica, "come uno schiaffo violento su entrambe le guance", all'onda d'urto che spazzava il suolo del deserto, al rimbombo dell'onda sonora a lungo ripetuta dagli echi, alla nuvola di detriti a forma di fungo.

Il successo del test venne comunicato a Stimson allora alla conferenza di Potsdam; Stimson informò Truman e Churchill, e Truman disse informalmente a Stalin che gli USA avevano una nuova arma di enorme potenza. Stalin, che era ampiamente informato sul progetto americano, rispose a tono, raccomandando di farne buon uso contro i giapponesi.

L'*Interim Committe*

Mentre gli scienziati e i tecnici affrontavano e risolvevano i problemi scientifici e tecnici, e l'Air Force sviluppava le procedure per il bombardamento, si dovette decidere sull'uso delle bombe e le prospettive dell'energia nucleare nel dopoguerra.

Già dall'estate 1944 apparve chiaro che la guerra in Europa si sarebbe conclusa prima che la nuova arma fosse disponibile e la missione *Alsos* confermava la debolezza del programma atomico tedesco. Veniva così meno la motivazione iniziale del programma anglo-americano quale deterrente a un'arma nucleare della Germania [nota 55] e il *Military Policy Committee* diresse automaticamente il lavoro nella prospettiva di un impiego dell'arma contro il Giappone; poiché gli alleati ignoravano l'esistenza del programma nucleare giapponese, le bombe non si inquadravano in una strategia dissuasiva, ma sarebbero servite a scopo coercitivo per forzare i giapponesi alla resa. Roosevelt e Churchill nel loro promemoria di Hyde Park (settembre 1944) convennero sull'impiego iterato delle armi contro il Giappone fino alla sua resa.

Su suggerimento di Bush, agli inizi di maggio 1945 Stimson, con l'approvazione del nuovo presidente Truman, istituì un *Interim Committee* di consulenti [nota 56] per le decisioni finali riguardo all'uso delle armi e per delineare un programma per gli sviluppi futuri e la politica atomica interna e internazionale.

Questi temi, e più in generale le implicazioni sociali e politiche dell'energia nucleare e le conseguenze dell'uso effettivo della bomba, erano da mesi argomento di analisi e discussione da parte degli scienziati del Met Lab, che concretizzarono le loro opinioni nei rapporti dei gruppi di lavoro diretti da Zay Jeffries (novembre 1944) e da James Franck [nota 57] (giugno 1945), e in documenti redatti da Szilard (Pascolini 2009).

In particolare il rapporto Franck affrontava l'uso della bomba, sconsigliando l'impiego diretto di questo "mezzo di distruzione indiscriminata contro l'umanità", e suggerendo di avvisare il Giappone della bomba e di dimostrarne la potenza e gli effetti devastanti a osservatori internazionali in qualche area disabitata.

Uno *Scientific Panel*, composto da Compton, Fermi, Lawrence e Oppenheimer, creato per fornire suggerimenti all'*Interim Committee*, riferì i diversi pareri degli scienziati, ma considerò necessario un uso militare diretto dell'arma, dopo contatti con tutti gli alleati. Per il futuro, essi auspicavano una cooperazione internazionale aperta per uno sviluppo comune dell'energia nucleare civile.

Hiroshima e Nagasaki

La mattina del 6 agosto 1945, alle 8 e 15 l'ordigno all'uranio arricchito *little boy* fu sganciato su Hiroshima esplodendo 580 m sopra la città con una potenza tra 12 e 15 kton e un'efficienza attorno all'1,3%. Il 9 agosto 1945, alle 11 e 02 del mattino, la bomba a plutonio *fat man* esplose 503 m sopra Nagasaki; la sua potenza fu superiore a 22 kton.

A Hiroshima e Nagasaki vennero distrutti o gravemente danneggiati oltre il 70% degli edifici e praticamente tutti i servizi pubblici, incluse le reti tranviarie, idriche, elettriche e fognarie. In entrambe le città vi furono molti decessi immediati e moltissimi feriti, gran parte dei quali non sopravvissero nei mesi successivi; le stime delle vittime sono incerte: le prime valutazioni contavano a Hiroshima 68.000 decessi e 76.000 feriti e a Nagasaki 38.000 decessi e 21.000 feriti; stime più recenti vedono a tutto il 1945 fra 90.000 e 140.000 morti a Hiroshima e fino a 70.000 a Nagasaki.

La tabella 1 riassume i dati sulle prime vittime di Hiroshima e Nagasaki, includendo i decessi avvenuti a causa delle radiazioni nei primi mesi successivi alle esplosioni (Glasstone, Dolan 1977): emerge chiaramente il carattere indiscriminato dell'arma, dato che l'unico parametro che conta è la distanza dall'ipocentro, per cui non c'è selezione fra le vittime.

Tabella 1. Vittime a Hiroshima e Nagasaki a seconda della distanza dall'ipocentro.

Distanza dall'epicentro	popolazione	% decessi	% feriti
Hiroshima			
0 – 1,0 km	31.200	86	10
1 – 2,5 km	144.800	27	37
2,5 – 5 km	80.300	2	25
totale	256.300	27	30
Nagasaki			
0 – 1,0 km	30.900	88	6
1 – 2,5 km	27.700	34	29
2,5 – 5 km	115.200	11	10
totale	173.800	22	12

Il Giappone si arrese il 15 agosto, per un intervento diretto e assolutamente irrituale dell'imperatore Hirohito, a fronte dei conflitti interni al governo e le forze armate giapponesi, e la seconda guerra mondiale terminò.

Il successo del programma americano per l'arma nucleare fu dovuto a vari fattori:

- il pieno sostegno politico al massimo livello,
- l'impegno coerente e coordinato di molti scienziati di altissimo profilo, in grado di coprire la totalità dei molteplici aspetti scientifici rilevanti,
- la collaborazione di grandi industrie con personale altamente specializzato in grado di affrontare e risolvere problematiche tecnologiche assolutamente nuove,
- l'ampia disponibilità di materiali e di risorse tecniche,
- un grande impegno finanziario (circa 2 miliardi di dollari del tempo) con notevole agilità amministrativa,
- il lavoro di circa 100.000 persone con vari livelli di specializzazione e responsabilità,
- una direzione centrale determinata, con articolazioni operative modificate agilmente al mutare dello stadio di evoluzione del programma,
- la collaborazione fra comunità scientifica, mondo industriale, forze armate e alta burocrazia.

Infine ha largamente giovato la sospensione di fatto del controllo democratico sul programma, tenuto segreto al parlamento, a parte del governo, incluso il vicepresidente Truman, alla stampa e all'opinione pubblica.

Note capitolo primo

[nota 1] A livello atomico e nucleare conviene misurare l'energia in elettronvolt (eV) e suoi multipli (1 MeV = 1.000.000 eV); 1 eV equivale a $1,6 \cdot 10^{-19}$ joule, ovvero a $3,822 \cdot 10^{-20}$ calorie, e quindi è estremamente piccolo a scala macroscopica: per un battito d'ali una farfalla impiega circa 1000 MeV.

[nota 2] Nel calcolo della densità di energia occorre tener presente che nella reazione di fusione D+T sono coinvolti solo 5 nucleoni, mentre nella fissione dell'uranio ve ne sono 236 e 227 nell'esplosione di una molecola di TNT. L'energia prodotta dalla fusione di 1 kg di deuterio equivale a quella prodotta da una centrale da 4 GW operante per 32 ore, ovvero all'esplosione di 40.000 tonnellate di TNT.

[nota 3] I vari processi di fusione nucleare sono esotermici fino alla sintesi del ferro. La produzione per fusione di elementi più pesanti del ferro richiede energia anziché liberarla e quindi non può avvenire spontaneamente. Questi elementi sono generati da altri tipi di reazioni nucleari e nelle esplosioni stellari delle supernove.

[nota 4] Ricordiamo che gli isotopi di idrogeno a temperatura ambiente sono gassosi e liquefanno solo a circa -250 °C. L'ordigno della prima esplosione termonucleare (*Mike*, 31 ottobre 1952) utilizzando deuterio liquido pesava 62 tonnellate, essenzialmente dovute all'enorme impianto criogenico.

[nota 5] L'effetto delle armi nucleari viene misurato esprimendo l'energia generata in termini di migliaia di tonnellate di tritolo necessarie per produrre esplodendo la stessa energia (kiloton o kton): per definizione, l'esplosione di 1 kton di TNT rilascia l'energia di 10^{12} cal ($4,184 \cdot 10^{12}$ J), ovvero $1,16 \cdot 10^6$ kWh), corrispondente alla fissione di 0,057 kg di uranio ($1,45 \cdot 10^{23}$ nuclei).

[nota 6] La sezione d'urto misura la probabilità che avvenga un dato processo ed è definita come la superficie apparente che il proiettile deve colpire per dar luogo alla reazione; viene pertanto misurata in unità di 10^{-24} cm², chiamata barn.

[nota 7 Informazioni essenziali sui reattori nucleari si trovano, ad esempio, in Pascolini (2006) e in Charpak et al. (2005).

[nota 8] Un gas si trova nello stato di plasma se gli atomi che lo compongono sono tutti ionizzati, ossia hanno perso gli elettroni della loro corteccia divenendo elettricamente carichi, e gli elettroni si muovono liberi. La creazione di un plasma richiede la fornitura al gas di molta energia, per cui si mantiene solo a temperature molto elevate. Nel caso del plutonio, il metallo fonde a 641 °C, vaporizza a 3235 °C e la completa ionizzazione di un suo atomo richiede 785,150 eV di energia (Cochran 1994).

[nota 9] Altri materiali prodotti artificialmente in reattori nucleari sono stati provati come esplosivi: U-233 (massa critica nuda 16 kg), nettunio-237 (massa critica nuda 73 kg), americio-241 (massa critica nuda 60 kg), ma non risulta siano stati utilizzati per armi nucleari effettive.

[nota 10] L'uranio naturale e il berillio, oltre a riflettere i neutroni fuoriuscenti, agiscono anche come generatori di neutroni: l'uranio a seguito di fissioni spontanee o indotte, il berillio con la reazione $n + \text{berillio-9} \rightarrow \text{berillio-8} + 2n$.

[nota 11] Per una definizione rigorosa di SWU e la sua espressione in funzione dei tassi di arricchimento e impoverimento finali vedi IPFM (2010b: Appendix B).

[nota 12] Un esame delle tecniche di arricchimento, dei loro sviluppi e impieghi nei vari paesi, con analisi critiche delle problematiche di ciascun metodo e delle tecnologie sussidiarie è presentato nel rapporto di Zentner et al. (2005).

[nota 13] Il più grande impianto mondiale di diffusione, operativo in Francia per la produzione commerciale, della capacità di 10 milioni di SWU/anno richiede una potenza di 2400 MW fornita da quattro reattori nucleari dedicati.

[nota 14] Le velocità massime raggiungibili dipendono dal materiale di cui è fatto il rotore: 425 m/s per leghe di alluminio, 525 m/s per speciali leghe ("maraging") di acciaio e 700 m/s per fibra al carbonio.

[nota 15] L'Urenco è una compagnia commerciale anglo-olandese-tedesca operante dal 1971 nel settore del combustibile dei reattori nucleari, incluso l'arricchimento dell'uranio. Possiede quattro impianti, in Germania, Olanda, Gran Bretagna e USA.

[nota 16] La criticità degli stessi sistemi computerizzati di controllo delle centrifughe è stata resa evidente dall'attacco cibernetico operato nel corso del 2009-2010 contro un impianto iraniano. Sembra infatti certo (Albright et al. 2010) che la distruzione di un migliaio di centrifughe iraniane avvenuta in tale periodo sia stata causata da un attacco informatico operato con *Stuxnet* (Falliere et al. 2011), un "worm" informatico completamente autonomo nell'autoreplicarsi e propagarsi in rete progettato per riprogrammare in modo nascosto e invisibile i parametri di funzionamento delle centrifughe, alterandone le frequenze di rotazione.

[nota 17] Nella sorgente il UCl_4 viene riscaldato elettricamente per trasformarlo in vapore e le sue molecole successivamente bombardate con un fascio di elettroni per produrre gli ioni positivi di uranio da lanciare nel campo magnetico.

[nota 18] Gli aspetti tecnici del metodo SILEX sono mantenuti segreti.

[nota 19] Un esame delle tecniche di produzione del plutonio, dei loro sviluppi e impieghi nei vari paesi, con analisi critiche delle problematiche di ciascun metodo e delle tecnologie sussidiarie è presentato nel rapporto di Zentner et al. (2005).

[nota 20] A parità di energia prodotta, attualmente il plutonio risulta circa tre volte meno costoso dell'U-235.

[nota 21] Nell'interazione di neutroni di bassa energia con U-238 è molto frequente il loro assorbimento con la produzione di U-239 che si trasforma per radioattività beta in nettunio-239, con tempo di dimezzamento di 23 minuti. Il nettunio è un nuclide instabile e decade beta in Pu-239 con un tempo di dimezzamento di 2,36 giorni. Per una rassegna delle proprietà del plutonio vedi Grant Cooper (2000).

[nota 22] Nei reattori civili moderati ad acqua circa 2/3 del Pu-239 prodotto subisce fissione contribuendo alla resa del reattore, per cui la produzione netta è inferiore a 0,1 g di plutonio per MW-giorno. I reattori commerciali CANDU ad acqua pesante producono, a parità di potenza, una quantità doppia di Pu-239 con solo un 25% di isotopi più pesanti dato che le barre esauste vengono cambiate continuamente e non solo una volta ogni uno o due anni, come per i reattori ad acqua.

[nota 23] Mentre il Pu-240 produce 900 neutroni per grammo al secondo, il Pu-239 ne produce 0,02. L'odierna tecnologia permette comunque la confezione di ordigni efficienti usando qualsiasi miscela di isotopi del plutonio, anche RPu.

[nota 24] Ad esempio il HWR indiano CIRUS di 40 MW, funzionando al 70%, produce in un anno 10,2 t di combustibile esausto che contiene circa 9,3 kg di plutonio di qualità militare.

[nota 25] Il metodo PUREX venne sviluppato nel 1950 negli USA con un primo impianto di produzione a Savannah River (1954); dal 1956 sostituì tecniche meno efficienti in uso ad Hanford (il primo impianto di riprocessamento americano) e in seguito venne impiegato in URSS, India, Germania, Francia e Giappone.

[nota 16] Anche la prima bomba a fissione russa RDS-1 (1949) fu basata, per volontà di Lavrenti Beria, capo dei servizi segreti sovietici e direttore del programma nucleare, sullo stesso schema di "fat man", fornito ai sovietici da Klaus Fuchs e da altri scienziati impegnati a Los Alamos.

[nota 17] Sul dibattito in USA sulla bomba a fusione vedi York (1989) e, per la storia delle prime armi termonucleari americane e russe Rhodes (1995).

[nota 18] Stanislaw Marcin Ulam (1909–1984), di una ricca famiglia ebrea polacca naturalizzato americano, ottenne il dottorato in matematica a Leopoli nel 1933. Diede importanti contributi alla teoria degli insiemi e alla topologia. Dal 1935 al 1939 visitò l'Istituto di Studi Avanzati a Princeton e Harvard e nel 1940 passò all'università del Wisconsin. Tutta la famiglia di Ulam, con la sola eccezione di un fratello, fu vittima dell'Olocausto. Nel 1943 si unì al progetto per la bomba atomica a Los Alamos, ove continuò le ricerche che portarono alla bomba a fusione, risolvendo con Teller le principali problematiche della nuova arma. Ulam fu anche promotore del progetto "Orion" per la propulsione nucleare di veicoli spaziali. A Los Alamos, sviluppò il "metodo Monte-Carlo" che fornisce soluzioni a problemi matematici utilizzando un metodo di campionatura statistica con numeri casuali. Ottenne anche dei risultati fondamentali nello studio dei fenomeni non lineari e della complessità. Nel 1965 fu nominato direttore del Dipartimento di matematica dell'università del Colorado.

[nota 19] Edward Teller (1908–2003), americano di origine ungherese, si laureò in ingegneria chimica a Karlsruhe, per intraprendere quindi studi di fisica teorica a Monaco, a Copenhagen con Niels Bohr e a Lipsia con Werner Heisenberg. All'avvento del nazismo lasciò l'università di Gottinga, ove lavorava con James Franck e si trasferì prima a Copenhagen, poi a Londra e infine a Washington, compiendo ricerche teoriche di fisica quantistica molecolare e nucleare. Nel 1943 raggiunse Los Alamos per il programma della bomba atomica, sostenendo la via delle armi termonucleari. Dal 1949 le sue attività si concentrarono sulla bomba ad idrogeno e fu uno dei principali sostenitori della campagna politica in favore di tale arma, in contrapposizione con larga parte della comunità scientifica americana. Nel 1953 divenne professore di fisica a Berkeley e direttore associato del Laboratorio Nazionale Lawrence a Livermore. Teller è stato un influente consulente scientifico del governo e delle forze armate americane sostenendo sempre la necessità di una forte politica militare nucleare da parte degli USA.

[nota 20] Yakov Borisovich Zel'dovich (1914–1987) a diciassette anni cominciò a lavorare come assistente all'istituto di fisica di Leningrado per divenire in seguito accademico e professore all'università di Mosca senza mai conseguire un regolare titolo di scuola secondaria superiore. Con Yuli Khariton nel 1939-40 ricercò i principi di base delle reazioni di fissione a catena. Nel 1943 entrò nel programma nucleare militare sovietico e nel 1946 diventò capo del dipartimento teorico del laboratorio segreto Arzamas-16, ove diresse gli studi teorici della prima bomba atomica sovietica e poi di quella all'idrogeno. Nel corso di questo lavoro pose le basi dell'idrodinamica delle radiazioni e della fisica della materia ad alte pressioni. Dopo gli studi sulla fisica delle particelle negli anni cinquanta, nelle successive fasi della sua carriera si dedicò all'astrofisica, divenendo un leader degli studi per collegare la fisica delle particelle alla cosmologia.

[nota 21] Andrei Sakharov (1921–1989) laureatosi in fisica a Mosca nel 1942, fino al 1945 lavorò come ingegnere in fabbriche di munizioni, per completare successivamente gli studi di fisica nucleare all'Istituto Lebedev dell'Accademia delle Scienze dell'URSS. Dal 1948 al 1962 la sua attività fu dedicata allo sviluppo degli armamenti nucleari e ai preparativi e alla realizzazione degli esperimenti nucleari. Nel 1964 cominciò a interessarsi ad argomenti di biologia e ad affrontare le problematiche morali inerenti al lavoro militare, che rese pubbliche in un articolo, *Progresso, coesistenza pacifica e libertà intellettuale*, che gli costò nel 1968 la rimozione dal lavoro di massima sicurezza e i conseguenti privilegi. Dal 1969 riprese a lavorare all'Istituto Lebedev su problemi di fisica teorica fondamentale. Dal 1970 in poi si impegnò nella difesa dei diritti dell'uomo e delle vittime dei processi politici, guadagnando il premio Nobel per la pace nel 1975. Nel 1980, dopo aver denunciato l'invasione sovietica in Afghanistan, fu inviato in esilio a Gorky e continuò a essere perseguitato dal KGB. Mikhail Gorbaciov lo liberò e gli fu permesso di fare ritorno a Mosca nel 1986, dove fu eletto membro del Congresso dei Deputati del Popolo.

[nota 22] Solo nel corso degli anni '80 venne reso noto che per la compressione del materiale si ricorreva ai raggi-X prodotti dalla fissione, senza precisare il metodo.

[nota 23] In pratica tutta l'energia di un ordigno in grado di distruggere una città viene impiegata per comprimere alcune decine di kilogrammi di materiale.

[nota 24] Un panorama dettagliato delle varie armi prodotte dagli USA fino ai primi anni '80 si trova in Cochran et al. (1984).

[nota 25] La "bomba zar", la più grande arma nucleare mai costruita al mondo, a tre stadi, era stata progettata sotto la direzione di Sakharov per una potenza di 100 Mton, ma il borraggio di uranio dello stadio terziario venne sostituito con uno di piombo, riducendo la potenza del 50% ed eliminando il 97% della ricaduta radioattiva. Il risultato fu la bomba "più pulita" mai testata, con il 97% dell'energia proveniente da reazioni di fusione. Se questa bomba avesse avuto potenza completa, l'effetto sarebbe stato tremendo, aumentando in particolare del 25% la ricaduta radioattiva totale mondiale dall'invenzione della bomba atomica; il lampo di luce sarebbe stato visibile alla distanza di 1000 km, nonostante il cielo nuvoloso. Una bomba di questa potenza è priva di ogni significato militare, ma fu voluta da Nikita Crusciov per provocare il maggior impatto politico possibile. Il test fu condotto da un bombardiere strategico Tu-95 (*Bear A*) adeguatamente modificato, alle ore 11:32 del 30 ottobre 1961 (ora di Mosca), nella baia Mityushikha del poligono nucleare dell'isola di Novaya Zemlya nell'Artico.

[nota 26] Nell'impiego anti-missile, per distruggere le testate nucleari nemiche prima del loro rientro nell'atmosfera non si può contare su effetti meccanici (onda d'urto) o radiazione termica, per cui rimangono efficaci solo i raggi-X e i neutroni a distanze che crescono con la loro energia. Negli impieghi tattici, armi ERW presentano il vantaggio teorico di minori devastazioni del campo di battaglia e ridotta ricaduta radioattiva, rendendo così agibile la zona colpita.

[nota 27] Si veda ad esempio il piano di gestione e cura della riserva nucleare americana (U.S. National Nuclear Security Administration 2010). Notiamo che il criterio attuale americano di sicurezza richiede che la probabilità di una detonazione non voluta di un'arma nucleare sia inferiore, per anno e per arma, a un milionesimo in condizioni normali e a un milionesimo in caso di incidenti. Un esame delle procedure di sicurezza e affidabilità si trova nel rapporto del NAS Committee (2002).

[nota 28] Per analisi dettagliate degli effetti delle armi nucleari di differenti caratteristiche nelle varie condizioni vedi Glasstone and Dolan (1977) e Walker and Cerveny (1996).

[nota 29] A Hiroshima e Nagasaki la radiazione termica risultò potenzialmente fatale per persone all'aperto senza particolari protezioni fino a 1.800 m di distanza dal punto zero.

[nota 30] Gli isotopi radioattivi principali componenti del *fallout* sono lo iodio-131, il cesio-137 e lo stronzio-90. Lo iodio viene assorbito dalla tiroide e si concentra nel latte; poiché decade rapidamente (tempo di dimezzamento 8,1 giorni) è importante solo in prossimità dell'esplosione. Di lunga durata, e quindi distribuiti su vaste zone, sono il cesio (tempo di dimezzamento 30 anni), che tuttavia non ha particolari effetti biologici, e lo stronzio (tempo di dimezzamento 28 anni), pericoloso perché viene assorbito nelle ossa per la sua somiglianza chimica con il calcio. Attualmente la radioattività residua

del *fallout* storico contribuisce a circa 0,17% della dose annuale media personale (UNSCEAR 2008); il contributo più importante al momento viene dal carbonio-14, che ha un lunghissimo tempo di dimezzamento (5730 anni).

[nota 31] Studi degli effetti di una guerra nucleare si trovano, ad esempio, in Schroerer (1984); per considerazioni più recenti si veda Charpak et al. (2005).

[nota 32] Nel caso di esperimenti idronucleari per verificare la sicurezza delle armi, si usa un nucleo completo, ma si fa detonare l'esplosivo convenzionale delle lenti di implosione in un solo punto, per assicurarsi che un'esplosione accidentale non generi una piena deflagrazione nucleare (Cochran 1994).

[nota 33] Il presente paragrafo si basa su materiale elaborato in Pascolini (2008), cui si rimanda per maggiori informazioni e fonti su punti specifici.

[nota 34] Fra gli isotopi del plutonio sembra che sia inutilizzabile a scopi militari solo il Pu-238, che però si produce in minime quantità.

Note capitolo secondo

[nota 1] Niels Bohr (1885–1962), danese, premio Nobel 1922 per la fisica per la teoria atomica moderna, svolse un ruolo fondamentale nello sviluppo della scienza del ventesimo secolo e fu un punto di riferimento per la comunità scientifica mondiale. Bohr contribuì allo sviluppo meccanica quantistica, incluse le ripercussioni epistemologiche estese a tutti i campi della conoscenza umana. il suo istituto a Copenaghen costituì il centro di riferimento per tutti i fisici della generazione antecedente alla seconda guerra mondiale, e la sua autorità morale fece di lui una guida per scienziati di ogni paese e disciplina. Nel 1943, per evitare l'arresto da parte dei nazisti, raggiunse l'Inghilterra, e collaborò al programma atomico anglo-americano, tentando invano di creare una collaborazione mondiale per lo sviluppo pacifico dell'energia nucleare ed evitare la corsa agli armamenti. Le sue idee di un mondo aperto e per nuove relazioni internazionali basate sulla collaborazione divennero un patrimonio della comunità scientifica e vennero espresse in una lettera aperta alle Nazioni Unite (9 giugno 1950).

[nota 2] Alcuni ricercatori erano particolarmente motivati anche dal fatto che si erano precedentemente imbattuti nella fissione ma non erano stati capaci di riconoscerla, ritenendo di aver prodotto elementi transuranici. Successe a Enrico Fermi che nel 1934 aveva bombardato uranio con neutroni lenti, ma successivamente anche a ricercatori di Berlino, Cambridge e Parigi.

[nota 3] Enrico Fermi (1901–1954) era giunto profugo a New York con la famiglia nel dicembre 1938, subito dopo aver ricevuto il premio Nobel per la fisica per le sue ricerche con neutroni a Roma; aveva lasciato l'Italia per sfuggire alle leggi razziali fasciste che colpivano la famiglia in quanto la moglie Laura era di stirpe ebrea, ma anche per la mancanza di strutture di ricerca adeguate ad affrontare i nuovi campi scientifici. Dopo aver partecipato al progetto Manhattan con ruoli di grande responsabilità acquisì la cittadinanza americana e si trasferì a Chicago ove continuò le sue ricerche di fisica nucleare e subnucleare, divenendo uno dei massimi esponenti del mondo scientifico americano.

[nota 4] Jean Frédéric Joliot (1900–1958) con la moglie Irene Curie produsse i primi isotopi radioattivi artificiali anche per applicazioni in chimica, biologia e medicina; per tali ricerche ricevettero il premio Nobel 1935 per la chimica. Nel 1939-1940 Joliot diresse le ricerche francesi sulla fissione nucleare. Nel giugno 1941 prese parte alla formazione del fronte nazionale della resistenza francese, diventandone capo, e nel 1942 aderì al partito comunista. Nel 1944, dopo la liberazione, Joliot fu nominato direttore del *Centre national de la recherche scientifique* e nel 1945 il generale de Gaulle lo fece alto commissario del *Commissariat à l'énergie atomique*; nel 1950 l'incarico gli venne revocato per motivi politici e per la sua ostilità allo sviluppo delle armi nucleari in Francia. Egli fu attivo nel promuovere a livello mondiale azioni per pace e fu uno dei cofirmatari del Manifesto Russel-Einstein (capitolo quarto).

[nota 5] I fisici italiani del gruppo di Edoardo Amaldi, che avevano particolare competenza sui processi nucleari indotti da neutroni, proprio per le possibili implicazioni militari, non informarono il governo fascista e decisero di non impegnarsi nelle ricerche sulla fissione per dedicarsi alla fisica dei raggi cosmici.

[nota 6] Una cronistoria degli avvenimenti nei vari paesi si trova in Pascolini (2004) e una presentazione a livello giornalistico della realizzazione della bomba atomica in Rhodes (1988); per la storia delle ricerche nei vari paesi i testi fondamentali sono: per la Francia Goldschmidt (1962 e 1967),

per la Germania Irving (1982) e Walker (1989), per l'Unione Sovietica Holloway (1994), per il Regno Unito Gowing (1964), per gli USA DeWolf Smyth (1945) e Hewlett and Anderson (1962), per il Giappone Pascolini (2008 b) e Grunden (2005).

[nota 7] La formula dei quattro fattori esprime il fattore di moltiplicazione dei neutroni k come prodotto di quattro parametri fondamentali: il numero di neutroni veloci emessi per ogni neutrone termico assorbito dall'uranio, la frazione di neutroni termici assorbiti, la probabilità di sfuggire alla cattura risonante e il fattore di fissione veloce. Durante il secondo conflitto mondiale vari gruppi ottennero formulazioni più o meno corrette e complete della formula, ma il suo uso pratico non era immediato ed essa giocò ruoli molto differenti nei vari paesi allora impegnati nello sviluppo dell'energia nucleare.

[nota 8] Nel 1940 non esisteva un mercato per l'acqua pesante, usata solo in qualche laboratorio scientifico. La Norsk Hydro a Vemork era controllata da capitale francese e la Francia ottenne, oltre alle scorte esistenti, il potenziamento della produzione e la totalità della produzione futura. L'impianto passò il 3 maggio 1940 sotto controllo tedesco e la sua produzione venne destinata al *Uranverein*. L'impianto divenne obiettivo di azioni di sabotaggio e di bombardamenti aerei inglesi nel corso del 1942-43; nel 1944 il traghetto che trasportava il treno con le scorte di acqua pesante (600 kg) per la Germania venne minato da un commando (20 febbraio) e affondò nel lago di Tinnsjö, e 26 persone annegarono.

[nota 9] Il radio, elemento rarissimo altamente radioattivo, era utilizzato per la cura dei tumori; è presente nel minerale uranifero per un grammo ogni 3 tonnellate di uranio. Nel 1940 costava 25.000 dollari al grammo e l'uranio circa 3 dollari al kg. Il radio verrà sostituito negli impieghi medici a partire dagli anni '50 dal cobalto-60, circa 200 volte più attivo e molto più economico (la quantità equivalente a un grammo di radio costava negli anni '80 circa un dollaro); attualmente nella radioterapia tumorale si usano soprattutto fasci di raggi-X prodotti da acceleratori di elettroni, che permettono un miglior controllo della dose e dell'irraggiamento.

[nota 10] Le previsioni di Perrin (1939) erano assolutamente irrealistiche, e tuttavia questi lavori furono un punto di partenza per i calcoli di Frisch, di Heisenberg e dei giapponesi.

[nota 11] Il gruppo francese depositò i brevetti per prevenire eventuali brevetti stranieri che poi ponessero la Francia in condizione di dipendenza dall'estero. I vantaggi economici dei brevetti erano destinati per l'80% alla ricerca scientifica francese. I brevetti del gruppo francese e gli accordi con l'ICI divennero un problema delicato nei rapporti fra UK e USA durante la guerra e fra UK e Francia alla fine del conflitto. Gli USA non riconobbero alcun diritto ai francesi e il governo inglese non volle accettare la richiesta della Francia libera di scambiare i diritti commerciali con una collaborazione formale nel settore nucleare. Churchill si dimostrò assolutamente contrario a ogni collaborazione con i francesi, annullando la disponibilità di sir John Anderson, responsabile del programma inglese, per un trattamento speciale della Francia nell'ambito della collaborazione internazionale nel settore nucleare. La questione dei brevetti verrà risolta fra Francia e UK nel giugno 1946: agli inglesi i diritti per il loro impero, ai francesi per il resto del mondo; con gli USA si arriverà a un accordo solo nel 1969 con un modesto compenso finanziario ai francesi.

[nota 12] Di fatto gli accordi di Quebec del 1943 fra Roosevelt e Churchill prevedevano che l'energia nucleare dovesse rimanere riservata solo a inglesi e americani e nessuna informazione dovesse giungere ad altri paesi. Il generale Groves voleva assolutamente precludere ogni informazione a Joliot, noto comunista, e temeva che i francesi informassero delle armi nucleari il generale de Gaulle, come in realtà avvenne segretamente l'11 luglio 1944 da parte di Auger e Guéron in occasione di una visita di de Gaulle in Canada.

[nota 13] Alla costruzione di un ciclotrone si dedicava da anni con grande impegno Walther Bothe a Heidelberg; superando molte difficoltà riuscirà a realizzarlo solo nel 1944, troppo tardi perché potesse essere utile per il programma nucleare. Subito dopo l'occupazione tedesca della Francia, Schumann e Diebner si recarono a Parigi con l'intenzione di requisire il ciclotrone del *Collège de France* e portarlo in Germania; ritennero tuttavia più utile mandare un gruppo di lavoro tedesco a Parigi, sotto la direzione di Wolfgang Gentner. Costui era un coraggioso antinazista e contribuì a proteggere Joliot ed evitò che alcunché di militarmente utile pervenisse in Germania.

[nota 14] Per il trattamento dell'ossido d'uranio, tossico se respirato o ingerito, la Auer utilizzava nel suo impianto di Oranienburg 2000 donne del campo di concentramento di Sachsenhausen, anche per non esporre a rischi personale tedesco "puro".

[nota 15] Werner Heisenberg (1901-1976) laureatosi in fisica nel 1923 a Monaco, lavorò con Niels Bohr a Copenhagen fino al 1927, quando ottenne una cattedra di fisica teorica all'università di Lipsia. Nel 1925 giunse a una formulazione della meccanica quantistica, che gli valse il premio Nobel per la fisica nel 1932. Negli anni '30 si dedicò allo studio dei nuclei atomici e delle forze nucleari. La sua partecipazione al programma atomico tedesco ha dato luogo a interpretazioni contrastanti, mentre è certo che non fu filo-nazista (Frayn 2003). Dopo la prigionia in Inghilterra nel 1946 tornò a Gottinga e si impegnò a riorganizzare la ricerca scientifica tedesca e la collaborazione europea. Dal 1957 in poi Heisenberg si interessò alla fisica del plasma e alla teoria delle particelle elementari. Nel 1957 promosse insieme ad altri fisici tedeschi la "Dichiarazione di Gottinga", un impegno a non partecipare ad alcun progetto di armi nucleari.

[nota 16] Per loro fortuna i tedeschi non riuscirono a completare la loro pila, che, per la mancanza di assorbitori di neutroni, non si sarebbe stabilizzata ma avrebbe portato alla fusione dell'uranio e all'ebollizione esplosiva dell'acqua pesante, in un incidente distruttivo.

[nota 17] Alcuni storici ritengono invece che gli scienziati tedeschi avessero sviluppato una corretta teoria della bomba (Walker 1989).

[nota 18] Nella primavera del 1940 Harteck aveva tentato lo sviluppo di una pila basata sul carbonio (ghiaccio secco, molto più facile da purificare che la grafite) come moderatore, ma per mancanza di una quantità sufficiente di uranio non poté dimostrare la praticabilità del suo metodo.

[nota 19] L'attenzione della Germania per il potenziamento dell'impianto norvegese fu un chiaro segnale agli alleati del programma tedesco per la bomba.

[nota 20] Con questo risultato, il programma tedesco verso la reazione a catena in un reattore raggiunse un livello analogo alle contemporanee attività americane, gli esperimenti esponenziali di Fermi, e franco-inglesi, le reazioni divergenti di Cambridge, ma di fatto non riuscì a proseguire significativamente.

[nota **] La diffusione termica si basa sulla trasmissione di calore attraverso un sottile strato di liquido o gas: le molecole più leggere diffondono verso la parete calda e quelle pesanti verso quella più fredda. La separazione termica gassosa è particolarmente semplice, non presentando parti meccaniche in movimento, ma consuma grandi quantità di energia e richiede alte temperature, che possono creare problemi per i composti gassosi. Il metodo funziona per alcuni gas, ma non è efficiente per l'esafluoruro di uranio e nessun tentativo dette risultati utili per arricchire l'uranio. Una variante per la separazione termica in fase liquida servì negli USA per un arricchimento iniziale prima di proseguire con altri metodi più efficienti.

[nota 21] La trascrizione delle registrazioni dei colloqui degli scienziati tedeschi sono state recentemente rese pubbliche; una traduzione italiana commentata si trova in Bernstein (2005).

[nota 22] Mentre non risultano azioni spionistiche tedesche sulle attività degli alleati, gli inglesi erano stati costantemente informati sull'evoluzione delle ricerche in Germania da Paul Rosbaud, un austriaco antinazista che lavorava presso una casa editrice scientifica tedesca ed era così in contatto con il locale mondo scientifico.

[nota 23] Henry Thomas Tizard (1885–1959) sviluppò a Oxford la chimica dei combustibili e del petrolio. Dalla prima guerra mondiale in poi si occupò dell'applicazione della scienza ai problemi militari in parallelo alla carriera accademica. Nel 1933 fu chiamato a dirigere il *Committee on the Scientific Survey of Air Defence* (il "comitato Tizard"), che promosse lo sviluppo del radar e dell'aereo a reazione; Tizard si batté per ottenere al radar la massima priorità e sostenne l'inopportunità dei massicci bombardamenti strategici sulla Germania. Dal 1948 al 1952 fu *Chief Scientific Adviser* al Ministero della difesa occupandosi anche degli "avvistamenti" degli UFO.

[nota 24] Joseph Rotblat (1908–2005), inglese di origine polacca, prese parte alle ricerche del progetto Manhattan. Alla fine del 1944, essendo chiaro che i tedeschi non potevano produrre un'arma nucleare abbandonò il progetto e ritornò in Inghilterra, ove sviluppò la medicina nucleare. Collaborò con Bertrand Russell alla stesura del Manifesto Russell-Einstein per combattere lo sviluppo delle armi nucleari e la corsa agli armamenti e dette origine alle *Pugwash Conferences on World Problems*. Per il suo

impegno per il disarmo nucleare ottenne il premio Nobel per la Pace 1995 assieme alle Pugwash Conferences.

[nota 25] Il comitato MAUD, inizialmente composto da Thomson, Chadwick, Cockcroft, Oliphant, Philip Burton Moon, Patrick Blackett, Charles D. Ellis e Haworth, dovette immediatamente affrontare il fatto che gran parte delle ricerche erano in realtà condotte da scienziati "alieni" (in particolare Frisch, Peierls, Simon, Rotblat), in principio non autorizzati a partecipare ad attività di interesse militare, ma indispensabili per la realizzazione del lavoro. Per superare formalmente il problema, il comitato MAUD venne articolato in un Comitato politico (con Thomson, Chadwick, Cockcroft, Blackett, Ellis, Haworth, Simon e Pye, direttore della ricerca scientifica del MAP) e un Comitato tecnico con gli altri ricercatori e rappresentanti dell'ICI, a cui partecipava anche Frederick Alexander Lindemann, consulente scientifico di Churchill; entrambi i comitati erano presieduti da Thomson e di fatto il lavoro procedeva in comune.

[nota 26] Nell'autunno del 1940 Tizard si recò a Washington per creare un primo contatto fra la ricerca militare inglese e quella americana: gli inglesi fornirono agli americani informazioni su tutte le tecnologie sviluppate a fini bellici –fondamentale fu il magnetron a cavità, un generatore di microonde ad alta potenza per radar ad alta risoluzione.

[nota 27] I due rapporti del Comitato MAUD sono riportati in Gowing (1964).

[nota 28] Il rapporto dello *Scientific Advisory Committee* è riportato in Gowing (1964).

[nota 29] I direttorato si articolò a due diversi livelli: il *Tube alloys consultative council*, per indicazioni su questioni politiche globali, presieduto da Anderson con lord Hankey, lord Cherwell, Edward Appleton, direttore del DSIR e Henry Dale del scientific advisory committee; il *Tube alloys technical committee* sotto Akers con Chadwick, Simon, von Halban, Peierls e Roland Edgard Slade (ICI), per la parte operativa.

[nota 30] Vannevar Bush (1880–1974) sviluppò l'ingegneria elettronica al Massachusetts Institute of Technology, di cui fu vice-presidente. Nel 1938 divenne presidente della Carnegie Institution a Washington, un'istituzione scientificamente e politicamente influente. Il 2 giugno 1940 ottenne da Roosevelt la creazione del National Defense Research Council (NDRC), un ente preposto alla sviluppo della ricerca finalizzata ad applicazioni militari, con il controllo dei laboratori militari e delle ricerche sulla fissione nucleare. Nel 1941 Bush divenne direttore dell'Office of Scientific Research and Development (OSRD) con un'ampia autorità su tutte le attività scientifiche governative per scopi bellici, facente direttamente capo a Roosevelt. L'OSRD oltre a controllare le ricerche nucleari, curò lo sviluppo di oltre 200 progetti militari, compresi radar, sonar, veicoli anfibi. Bush fu il massimo responsabile civile del programma nucleare americano. Dopo la guerra Bush rimase presidente della Carnegie Institution e fece parte di vari comitati di consulenza scientifico-militare.

[nota 31] James Bryant Conant (1893 –1978), chimico, da presidente dell'università di Harvard la riformò a istituzione di ricerca avanzata. Dal 1941 al 1946 fu presidente del *National Defense Research Committee* ed ebbe ampie responsabilità nello sviluppo del programma nucleare americano. Dopo la guerra continuò ad avere importanti incarichi di consulenza per la casa Bianca e vari organi governativi; dal 1953 al 1957 fu alto commissario e ambasciatore americano in Germania.

[nota 32] Va osservato che, mentre gli inglesi avevano riserve sulla conservazione dei segreti nucleari da parte americana, informazioni sui programmi inglesi e gli stessi rapporti MAUD erano stati passati ai servizi segreti sovietici da Fuchs e funzionari inglesi spie per l'URSS.

[nota 33] Il testo dell'accordo di Quebec è riportato in (Gowing, 1964). Va notata l'esclusione della Francia da ogni informazione e dal riconoscimento dei diritti brevettuali a suo tempo concordati con gli inglesi.

[nota 34] William George Penney (1909–1991) studiò matematica a Londra, Madison e Cambridge. Dal 1936 al 1945 insegnò all'Imperial College di Londra, occupandosi in particolare di idrodinamica. Partecipò al programma anglo-americano della bomba atomica e lavorò a Los Alamos, occupandosi in particolare degli effetti e conseguenze dell'esplosione. Fece parte del *Target Committee*, che stilò la lista degli obiettivi giapponesi e fu testimone del bombardamento di Nagasaki, sorvolando la zona su un aeroplano di ricognizione che accompagnava l'attacco. Successivamente condusse delle indagini sul terreno sui danni causati dall'esplosione. Tornato in Inghilterra lavorò al progetto britannico per la costruzione della bomba atomica, e seguì il progetto fino alla effettuazione del test della prima bomba

atomica nel 1952 e della prima bomba H nel 1957. Continuò la sua attività in qualità di direttore della ricerca e dello sviluppo degli armamenti atomici ad Aldermaston. Dal 1954 Penney fu membro consiglio dell'Ente per l'Energia Atomica, diventandone presidente nel 1957. Lasciò la carica di presidente nel 1967 per diventare rettore dell'Imperial College. Nel 1967 venne creato lord col titolo di barone Penney di East Hendred.

[nota 35] La storia ufficiale del programma nucleare inglese del dopoguerra si trova in Gowing (1974).

[nota 36] Igor Vasil'evich Kurchatov (1903–1960), fisico e ingegnere navale, dal 1925 all'istituto fisico-tecnico di Leningrado si occupò di fisica nucleare e vi costruì un ciclotrone (1939). Nel 1944 fu chiamato a dirigere il programma nucleare sovietico, che portò alla costruzione del primo reattore europeo nel 1946 e alla prima bomba a plutonio nel 1949 e alla prima bomba H nel 1953. Successivamente si dedicò alle applicazioni nucleari civili, realizzando il primo impianto elettronucleare mondiale (1954) e il primo reattore nucleare per navi (1959). In questo periodo si battè contro i test nucleari nell'atmosfera.

[nota 37] Il 24 novembre 1945, per ordine del generale Groves i ciclotroni di Riken, di Kyoto e Osaka vennero fatti a pezzi dall'esercito americano e inabissati in mare. Appena giunta notizia in America, un gran numero di scienziati americani, a partire da quelli impegnati nel progetto Manhattan, elevò forti proteste, che vennero a inserirsi nel duro confronto in corso negli USA fra scienziati e militari sul controllo dell'energia atomica e sulla libertà di ricerca.

[nota 38] Altri dipartimenti dell'esercito tentarono di inserirsi nel programma nucleare. Ad esempio, alcuni ufficiali dall'Istituto di ricerca del secondo arsenale dell'esercito di Tokyo (Tonizo), avendo letto in una rivista tedesca di esplosivi un articolo su aspetti fondamentali della fissione, invitarono un fisico dell'università di Kyoto a tenere una lezione sulla fissione nel maggio 1941, e nel giugno 1943 si rivolsero a Nishina. Anche avendo appreso che il programma nucleare era dell'aeronautica, chiesero e ottennero da Nishina di mantenere i contatti e la preparazione di un rapporto, che è stato recuperato recentemente.

[nota 39] La stima della massa critica, e la potenza indicata, che era casualmente prossima a quella della bomba su Hiroshima, erano completamente errate. L'errore di fondo dell'analisi stava nel considerare possibile una bomba a fissione utilizzando un moderatore –in questo caso l'acqua– per rallentare i neutroni. Il sistema considerato era concettualmente analogo a un reattore e si riteneva che una reazione a catena prodotta da neutroni lenti potesse produrre un'enorme esplosione quando il sistema divenisse supercritico, dopo 1/30 o 1/20 di secondo. L'apparato concepito era composto da due masse appena critiche che venivano messe assieme in modo da superare significativamente la criticità; per prevenire l'espansione prematura del sistema la bomba doveva essere installata in un contenitore metallico molto resistente. In realtà un sistema del tipo reattore non può produrre un'esplosione nucleare in quanto, in un tempo molto più breve di 1/30 di secondo, la reazione si spegne per l'espansione del materiale della bomba a causa delle crescenti temperatura e pressione, col risultato della distruzione del contenitore in una piccola esplosione analoga a quella di un esplosivo convenzionale.

[nota 40] Verso la fine del 1944 l'esercito giapponese ottenne attraverso l'ambasciatore a Berlino due tonnellate di pechblenda, un minerale ricco d'uranio, da inviare in Giappone tramite sommergibili. Vi furono due spedizioni, ma nessuna arrivò a destinazione: il primo sommergibile, partito ai primi del 1945, venne affondato in navigazione e il secondo, l'U-234 con 560 kg di ossido d'uranio, partito nel marzo 1945, al momento della resa tedesca si consegnò alle forze americane nell'Atlantico e i due ufficiali giapponesi a bordo commisero suicidio.

[nota 41] Leó Szilárd (1898–1964), fisico ungherese di famiglia ebraica poi naturalizzato americano, a causa delle leggi razziali del governo dittatoriale ungherese dovette completare gli studi a Vienna e a Berlino, ove entrò in amicizia con Einstein e gettò le basi della teoria dell'informazione. All'avvento del nazismo, emigrò in Inghilterra: a Oxford si impegnò in ricerche sugli isotopi radioattivi e concepì l'idea di reazioni nucleari a catena indotte da neutroni. Nel 1937 si trasferì alla Columbia University di New York ove collaborò con Fermi allo studio della fissione nucleare. Convinse Einstein a scrivere a Roosevelt per lo sviluppo della ricerca sulla fissione e partecipò al progetto Manhattan nel Met Lab di Chicago collaborando alla realizzazione della pila atomica, che brevettò con Fermi. Reagendo al controllo militare del programma atomico, collaborò alla stesura del "rapporto Franck" e promosse petizioni per evitare l'impiego della bomba sul Giappone. Dopo la guerra si dedicò a ricerche di biofisica e promosse la creazione dell'istituto Salk per studi biologici e il centro europeo di biologia molecolare (EMBO). Nel dopoguerra diventò uno dei più tenaci

promotori di iniziative per la pace e il disarmo e collaborò alla creazione delle Conferenze Pugwash.

[nota 42] La scelta di Fermi dipese anche dal suo convincimento iniziale che la fissione non fosse limitata all'uranio-235, ma avvenisse anche nell'uranio-238.

[nota 43] Albert Einstein (1879–1955) fu uno dei maggiori scienziati della storia e una delle figure pubbliche preminenti del ventesimo secolo. Nato a Ulm, si laureò al Politecnico federale di Zurigo, e lavorò per alcuni anni all'Ufficio brevetti svizzero. Dal 1908 al 1914 ricoprì vari posti presso le università di Berna, Zurigo e Praga. Nel 1914 fu nominato direttore del *Kaiser Wilhelm Institut für Physik* e professore all'università di Berlino, dove rimase fino al 1933, quando emigrò in America a causa delle persecuzioni politiche e razziali naziste; concluse le sue attività a Princeton come professore di fisica teorica. Del 1905 sono suoi contributi fondamentali alla scienza, la teoria della relatività speciale, la spiegazione del moto casuale delle molecole e la teoria quantistica della luce, ricerche che gli valsero il premio Nobel per la fisica nel 1921. Nel 1916 pubblicò il suo trattato sulla teoria generale della relatività, per dedicarsi quindi alla ricerca di un'unificazione dei concetti basilari della fisica. Fu un pacifista convinto, e fin dallo scoppio del primo conflitto mondiale prese apertamente posizione contro la guerra, rimanendo per tutta la vita un punto di riferimento per il movimento pacifista mondiale. Poco prima di morire firmò con Bertrand Russell un Manifesto in cui metteva in guardia dal pericolo delle armi nucleari e invitava all'azione per porre fine alla corsa agli armamenti (Pascolini, 2005).

[nota 44] Gli altri membri iniziali dell'ACU erano il comandante Gilbert C. Hoover, della marina, e il col. Keith F. Adamson, dell'esercito, esperti di armamenti. L'ACU venne allargato a Sachs, Pegram e Karl Compton, presidente del *Massachusetts Institute of Technology*; Einstein aveva declinato l'invito a farne parte. Alle riunioni del comitato partecipavano gli scienziati impegnati nelle ricerche.

[nota 45] I membri del nuovo ACU furono Pegram, Merle A. Tuve (*Carnegie Institution*), Jesse W. Beams (Università della Virginia), Ross Gunn (NRL) e Harold C. Urey (*Columbia University*).

[nota 46] Arthur Holly Compton (1892–1962) premio Nobel 1927 per lo studio dell'interazione dei quanti di luce con la materia. Negli anni '30 si dedicò alle ricerche sui raggi cosmici. Nel 1941 presiedette il comitato della *National Academy of Sciences* sull'utilizzo della fissione a scopi militari e successivamente diresse il Met Lab di Chicago del progetto Manhattan per la produzione del plutonio. Fu membro dello *Scientific Panel* dell'*Interim Committee* incaricato di decidere sull'impiego delle bombe contro il Giappone e della futura politica nucleare americana.

[nota 47] Gli altri membri del comitato erano: Lawrence, John C. Slater (MIT), John H. van Vleck (Harvard) e William D. Coolidge, un chimico fisico (*General Electric*). Per la seconda revisione si aggiunsero Warren K. Lewis (ingegnere chimico), George B. Kistiakowsky (esperto di esplosivi da Harvard) e Robert S. Mulliken (*Chicago University*).

[nota 48] Robert Julius Oppenheimer (1904–1967) compì la sua formazione superiore dedicandosi alle scienze, alle lingue moderne e classiche, agli studi umanistici e alla filosofia orientale, laureato ad Harvard nel 1925 compì gli studi in Germania e Inghilterra. Nel 1929 tornò negli Stati Uniti; all'università di Berkeley si occupò di problemi teorici avanzati della fisica dei campi quantici. Nel giugno del 1942 Oppenheimer venne nominato direttore scientifico del progetto Manhattan e partecipò alle decisioni relative all'impiego della bomba. Dopo la guerra, Oppenheimer presiedette la Commissione per l'Energia Atomica statunitense e fu consulente del Presidente e dei rami del parlamento americano. Svolse un ruolo fondamentale per la redazione del rapporto Acheson-Lielenthal per il controllo dell'energia nucleare. Si oppose allo sviluppo della bomba all'idrogeno; anche per questo nel 1953 fu accusato di essere simpatizzante del comunismo e vennero revocati i suoi ruoli nell'ambito della politica scientifica e militare. Sarà riabilitato da Kennedy. Concluse le sue attività come direttore dell'Istituto di Studi Avanzati a Princeton; negli ultimi anni si dedicò a problemi di etica intellettuale e morale.

[nota 49] Bush e Conant ritenevano che attraverso di loro gli scienziati potessero sentirsi rappresentati al massimo livello decisionale, garantendo un loro ruolo significativo anche sotto la direzione operativa dei militari.

[nota 50] Il programma nucleare con le sue particolari necessità di materiali speciali e di manodopera specializzata era in chiara competizione con il rimanente enorme sforzo industriale imposto dalla guerra: all'inizio del 1942 Roosevelt aveva sfidato l'industria americana a produrre entro l'anno 60.000

aerei, 45.000 carri armati, 20.000 cannoni antiaerei e navi per 8 milioni di tonnellate di stazza, e durante la primavera erano già stati firmati contratti per oltre 100 miliardi di dollari.

[nota 51] Un'altra causa di insoddisfazione era dovuta alla subordinazione agli ingegneri dell'industria Du Pont de Nemours degli scienziati di estrazione universitaria, fino allora protagonisti assoluti del progetto. A Chicago andarono sviluppandosi tensioni in varie forme dalla fine del 1942, che porteranno alle prese di posizione sugli sviluppi internazionali dell'energia atomica e sull'impiego della bomba espresse nel 1945 dal rapporto Franck.

[nota 52] La pila CP1 era una struttura composta da 400 t di grafite, 6 t di uranio metallico e 58 t di ossido di uranio, distribuiti in blocchi secondo le precise indicazioni di Fermi, con delle barre di controllo del flusso di neutroni fatte di cadmio, il tutto sostenuto da uno scheletro di legno.

[nota 53] Data la difficoltà di approvvigionamento di rame, su cui aveva priorità la marina, le bobine e le barre dei magneti dei calutroni vennero realizzate con l'argento del tesoro federale di Fort Knox.

[nota 54] Il primo reattore di Hanford rivelò un fenomeno inatteso: dopo poche ore di corretto funzionamento, il reattore iniziò a perdere potenza fino all'estinzione della reazione a catena senza alcun motivo apparente. La causa venne identificata in un processo di "avvelenamento" dovuto alla creazione di un prodotto di fissione (il gas xeno-135, isotopo fino allora sconosciuto) in grado di assorbire neutroni più velocemente di quanto il reattore ne producesse. Il problema venne risolto operando il reattore a una potenza più alta di quella prevista, aumentando così il flusso di neutroni. Fortunatamente gli ingegneri avevano previsto un generoso numero extra di canali per gli elementi di combustibile, attirandosi pesanti giudizi di stravagante conservatorismo da parte degli scienziati, per cui fu possibile innalzare la reattività degli impianti.

[nota 55] Venuta meno la minaccia atomica tedesca, Rotblat lasciò la ricerca a Los Alamos, ormai indirizzata alla produzione di armi per impieghi effettivi e non più a scopi dissuasivi.

[nota 56] L'*Interim Committee of the War Department for Recommending Action to the Executive and Legislative Branches of our Government when Secrecy is no longer in full Effect*, presieduto da Stimson, aveva come vicepresidente il suo assistente George L. Harrison, presidente della *New York Life Insurance Company*, e come membri James L. Byrnes, rappresentante personale di Truman, Ralf A. Bard, sottosegretario della marina, William L. Clayton, assistente segretario di stato, Karl T. Compton, capo dell'*Office of Field Service* dell'*Office of Scientific Research and Development* e presidente del MIT, oltre a Bush e Conant.

[nota 57] James Franck (1882–1964) studiò fisica all'università di Berlino. Dopo la prima guerra mondiale fu posto a capo della Divisione di Fisica del *Kaiser Wilhelm Institut für Chemie-Physik* a Berlino Dahlem e nel 1920 Franck divenne direttore dell'Istituto di fisica sperimentale dell'università di Gottinga, ove svolse ricerche che gli valsero il premio Nobel per la fisica del 1925. Il suo laboratorio svolse per la fisica sperimentale e la chimica un ruolo di guida e riferimento a livello mondiale, analogo a quello di Copenhagen per la fisica teorica. Dopo aver tentato di opporsi al nazismo, nel 1933 lasciò la Germania per gli Stati Uniti e nel 1938 divenne professore a Chicago sviluppando ricerche sulla fotosintesi. Durante il secondo conflitto mondiale Franck ricoprì la carica di direttore della Divisione di Chimica del progetto *Manhattan District* a Chicago. Nel 1945 assieme ad altri scienziati del progetto atomico redasse il "Rapporto Franck" sulle implicazioni politiche e sociali dell'energia atomica, nel quale si chiedeva una dimostrazione pubblica della bomba atomica in qualche località disabitata in alternativa al suo utilizzo senza alcun preavviso contro il Giappone.