

Angelo Baracca

La nascita della proliferazione: da Hiroshima all'immediato dopoguerra

Con un'Appendice di introduzione alla fisica e alla tecnologia nucleari

[Estratti dal libro: A. Baracca, *A Volte Ritornano, Il Nucleare: La Proliferazione Nucleare Ieri, Oggi e Soprattutto Domani*, Jaca Book, 2005. Per uso didattico]

Il “fungo” che il mattino del 6 agosto del 1945 si sollevò sulla città giapponese di Hiroshima aprì un'era completamente nuova per l'umanità. Fatichiamo a rendercene conto, a percepirlo concretamente nella nostra vita quotidiana, perché avere vissuto per alcuni decenni sotto l'incubo continuo dell'“equilibrio del terrore” e del possibile olocausto globale che poteva scatenarsi senza che neppure potessimo sapere come e perché, ha sicuramente portato il freudiano “disagio della civiltà” ad un limite intollerabile, che doveva necessariamente essere rimosso per consentire di sopravvivere. Credo che, anche se vi sono stati tentativi interessanti, nessuno abbia ancora cercato di valutare appieno e ricostruire in tutta la sua portata il peso che l'era nucleare ha avuto negli incubi collettivi, nel malessere, nei disagi sociali e individuali dell'umanità nella seconda metà del secolo XX°: e come essa si ripercuote in parte anche sul disorientamento delle nuove generazioni, ora che l'incubo nucleare è stato addirittura occultato, ma grava più che mai. Né questo è il nostro scopo nel presente saggio: mentre contiamo di contribuire per lo meno a ... scoperciare la pentola!

Come per tutto il resto di questo lavoro, non ci proponiamo di ricostruire puntualmente le tappe della nascita e dello sviluppo dell'era nucleare: ci limiteremo a riassumere, senza ambizioni di completezza, quegli aspetti che possono servire a fornire un quadro sufficiente per comprendere la sostanza degli sviluppi successivi ed attuali della proliferazione delle armi nucleari.

1.1 – I primi passi della fisica del nucleo: fin dall'inizio l'interesse per l'energia.

Credo si possa affermare senza tema di smentita che il “peccato originale” che ha segnato la comparsa dell'energia nucleare agli occhi dell'opinione pubblica mondiale abbia pesato, e pesi fortemente, su tutta la fisica, fondamentale e applicata, e la tecnologia legate a questo settore, e ne abbia segnato in modo sostanziale il destino. Vale forse la pena spendere due parole per sottolineare il fatto singolare che questa polarizzazione ha addirittura preceduto le ricerche che durante la seconda guerra mondiale condussero alla bomba atomica, anche se questa realizzazione, e il suo uso, l'hanno irrimediabilmente sancita. Anche se questa “divagazione” ci prenderà un po' di tempo, pensiamo che sia importante per collocare pienamente, in tutta la sua importanza, il comparto nucleare nella storia del passato mezzo secolo e nel mondo in cui viviamo.

Fin dai primi studi sulle proprietà dei nuclei atomici e delle particelle che li compongono, i maggiori fisici insistettero soprattutto sulle enormi quantità di energia che era possibile ottenere dai nuclei. Era infatti chiaro, anche prima di ottenere un'interpretazione fisica della struttura e delle proprietà dei nuclei, che per tenere legati al loro interno i protoni carichi positivamente, doveva agire una *forza nucleare* capace di vincere la repulsione elettrica, quindi molto più intensa di questa: per questo motivo un nucleo deve racchiudere un'energia molto più grande di quella racchiusa negli elettroni dell'atomo esterni al nucleo (v. Appendice 1.1). Questo argomento venne utilizzato dai fisici come argomento propagandistico sugli organi di informazione e verso l'opinione pubblica. Nel 1930 Eddington scrisse che l'energia sub-atomica contenuta in una tazza d'acqua avrebbe potuto fornire l'energia per una centrale per un anno.

È opportuno situare storicamente questi fatti. Si era all'inizio degli anni '30 del secolo scorso, e sul mondo gravava ancora la terribile recessione economica causata dal Grande Crollo del 1929. Negli Stati Uniti questa situazione pesava enormemente anche sul mondo della ricerca scientifica e

dell'educazione: vi erano stati tagli drastici ai fondi per le Università. Ebbene, è singolare che proprio in questo contesto Ernest O. Lawrence, all'Università di Berkeley in California, riuscì a raccogliere somme considerevoli per il suo progetto di un nuovo acceleratore di particelle cariche, il *ciclotrone*. Lawrence fu una figura singolare di scienziato, ed anticipò un atteggiamento nuovo: fu forse più un *manager* che un fisico (e certamente un fisico applicato, un costruttore di macchine, anche se lavorò in campi fondamentali), riuscì a “spillare” quattrini a destra e a manca, “fiutando” dove tirava il vento e “vendendo” spregiudicatamente le sue idee nuove e le sue macchine. Bisogna tenere conto che, se pure la crisi imperversava e mieteva vittime tra le imprese e le forze economiche tradizionali (era pur sempre una crisi di sovrapproduzione), cominciavano a delinearsi sia pure confusamente le linee e le strategie per una ripresa e una ristrutturazione profonda del capitalismo: pochi anni dopo vi sarebbe stata la prima proposta esplicita e organica di ristrutturazione dell'economia con il “Nuovo Corso” (*New Deal*) lanciato da Roosevelt, anche se ci volle la seconda guerra mondiale per catalizzarla (le guerre sono anche scelte per superare delle crisi, come si conferma drammaticamente anche ai nostri giorni, e la seconda guerra mondiale lo fu per gli USA in modo particolare¹) e solo nel dopoguerra si sviluppò realmente con il neocapitalismo e la società dei consumi. Il ritmo incessante dell'innovazione tecnico scientifica sarebbe diventato il motore per promuovere un continuo rinnovamento delle merci, dei prodotti e dei settori, per evitare, o ammortizzare, la vocazione mortale del capitalismo con le crisi di sovrapproduzione. Ma agli inizi degli anni '30, in piena recessione, vi erano settori imprenditoriali che erano alla ricerca di campi nuovi, sui quali si potesse puntare per una ripresa ed un'uscita dalla crisi, ed erano disposti ad investire in quelle direzioni. Da un lato l'industria elettrica cercava di realizzare alti voltaggi; dall'altra il nucleo dell'atomo come tale si presentava come un settore assolutamente nuovo, forse capace di aprire nuove strade e prospettive.

Fu proprio dalle industrie elettriche della California che Lawrence riuscì ad ottenere i finanziamenti necessari per costruire i suoi ciclotroni². Altri finanziamenti egli ottenne dalle “Fondazioni Filantropiche” che i magnati dell'industria statunitensi avevano fondato³ (in particolare la *Carnegie Institution*, o la *Rockefeller Foundation*), per il motivo che gli investimenti fatti per questi fini non cadevano sotto le grinfie del fisco, dando così il doppio vantaggio di finanziamenti *tax-free* che potevano aprire prospettive allettanti nel medio-lungo periodo: basti pensare che i colleghi di Lawrence al Caltech (*California Institute of Technology*) a Pasadena riuscirono a fondare il “*Kellog Radiation Laboratory*”, grazie appunto ai generosi finanziamenti di quel magnate, il “re dei cornflakes”, il cui nome spesso ci dà il buon giorno a colazione; mentre un fisico che diede contributi fondamentali allo studio del nucleo, Merle Tuve, lavorava direttamente nella *Carnegie Institution*⁴. Ulteriori finanziamenti Lawrence riuscì ad ottenere “vendendo” il ciclotrone come strumento per la cura del cancro mediante le particelle cariche accelerate, alle quali sottopose anche sua madre (del resto, nei primi anni della radioattività questa veniva propagandata come un benefico stimolante): egli brevettò sia il ciclotrone, che gli isotopi artificiali che produsse. In ogni caso, Lawrence fu soprattutto un costruttore di ciclotroni, costantemente proteso a realizzare macchine sempre più grandi e di maggiore energia: ma quando si metteva a fare ricerca fisica fondamentale con le particelle accelerate, egli combinava dei veri pasticci, mettendo in imbarazzo i

¹ Si può vedere ad esempio il bel libro recente di Jacques R. Pauwels, *Il Mito della Guerra Buona*, DataneWS, 2003: sulla base di un'amplessima documentazione e con uno stile agile e coinvolgente, l'autore rivede il ruolo degli Stati Uniti sulla scena internazionale a cavallo della seconda guerra mondiale, riferendolo alla necessità di uscire dalla recessione con gli investimenti militari, e agli interessi economici della grandi *corporations*, le quali fecero spudoratamente e cinicamente affari tanto con Hitler, come con Churchill e con Stalin.

² Per una ricostruzione dettagliata si può vedere A. Baracca, R. Livi, E. Piancastelli e S. Ruffo, “La fisica del nucleo negli anni '30 e le premesse della ‘Big Science’ negli Stati Uniti”, in G. Battimelli, M. De Maria, A. Rossi, *La Ristrutturazione delle Scienze tra le Due Guerre Mondiali*, Editrice Universitaria di Roma – La Goliardica, 1985, Vol. 2, pp. 367-421.

³ Per una ricostruzione storica si può vedere R. Seidel, “L'evoluzione della politica scientifica delle fondazioni filantropiche negli USA tra le due guerre mondiali: il caso delle scienze fisiche”, nel volume citato nella nota precedente, pp. 55-78.

⁴ Rimandiamo per dettagli al lavoro citato nella nota 2.

suoi stessi amici e colleghi⁵; e soprattutto mancò alcune scoperte fondamentali (le trasmutazioni artificiali dei nuclei e la radioattività artificiale) che vennero fatte dai fisici inglesi Cockroft e Walton con un acceleratore di particelle di energia minore. Si può ancora ricordare per inciso che a Berkeley nel 1932 Urey scoprì il deuterio, e il chimico Lewis preparò i primi campioni dell'isotopo (Appendice 1.1.e), che Lawrence utilizzò nei suoi esperimenti con il ciclotrone.

Non vogliamo dilungarci oltre su questa storia, limitandoci a ricordare l'uso spregiudicato che Lawrence fece degli organi d'informazione, soprattutto approfittando dell'occasione dell'Esposizione Universale di Chicago del 1933, in occasione della quale aveva messo sotto pressione tutto lo staff di Berkeley. L'Esposizione risultò una grande cassa di risonanza per Lawrence, il cui battage pubblicitario non trascurò di sottolineare che il bombardamento con deuterio era riuscito a liberare “circa mille per cento dell'energia immessa” negli esperimenti. Le speculazioni sull'uso futuro dell'energia immagazzinata nel nucleo dell'atomo fiorirono sulla stampa.

Del resto, è forse naturale che, nella logica dello sviluppo capitalistico in cui si inserisce la ricerca scientifica pura e applicata, le prospettive dell'enorme energia che il nucleo atomico poteva dischiudere costituissero l'aspetto più stimolante e promettente. Sono convinto che la polarizzazione su questo aspetto abbia influito considerevolmente non solo sulle linee di ricerca e le applicazioni, ma anche sul tipo di sviluppo che le conoscenze sul nucleo atomico hanno avuto successivamente.

1.2 – L'interesse per l'energia nucleare ... “esplode”

Comunque sia, non vi è dubbio che alla fine degli anni '30 l'interesse per le applicazioni militari, la realizzazione di una super-arma, polarizzò totalmente l'attività dei fisici, i loro legami sempre più stretti e diretti con il potere politico, ed i finanziamenti nel settore⁶. Esiste ormai una letteratura vastissima su queste vicende, soprattutto dopo che molto materiale segreto è stato declassificato, per cui qui ci limiteremo a pochi cenni sommari, senza alcuna pretesa di sistematicità e completezza⁷.

La realizzazione della bomba: il “Progetto Manhattan”

Fermi aveva realizzato nel 1934 la fissione dell'uranio ed aveva poi scoperto le proprietà dei neutroni “lenti” (o “termici”, Appendice 1.1.q), ma non aveva interpretato correttamente l'eccezionale risultato ottenuto. L'interpretazione corretta della fissione dell'uranio bombardato con neutroni lenti venne fornita nel 1938 dall'esperimento dei tedeschi Hahn e Strassmann, interpretato da Lise Meitner e dal nipote Otto Frisch, rifugiati in Svezia dalle persecuzioni naziste⁸. Verso il 1939 ci si rese conto della possibilità di realizzare una reazione a catena nell'uranio. Può essere

⁵ Fu quanto avvenne con il citato Merle Tuve, che invece condusse alcune delle più accurate e fondamentali misure sperimentali sulle proprietà delle particelle nucleari (v. Appendice 1.1.d), avvalendosi di un acceleratore meno potente. Si da il caso che Lawrence e Tuve, due figure tanto diverse, erano nati nello stesso paese nel 1901 e furono amici e compagni di scuola. Nel 1932 Tuve mise in guardia personalmente Lawrence per i risultati errati che sosteneva di avere trovato e che stava pubblicando, e si trovò infine a dover prendere posizione pubblicamente per smentirlo (si può vedere l'articolo citato in nota 2, e A. Baracca, “‘Big Science' vs. 'little science': laboratories and leading ideas in conflict. Nuclear physics in the thirties and forties”, *Physis*, Vol. 30, 1993 (Nuova Serie), fasc. 1-2, pp. 373-90, e *Organon*, n. 25, 1989/1993, pp. 39-54). Quando il fisico britannico Inglis visitò il laboratorio di Lawrence annotò: “Vidi lo spirito del Radiation Laboratory quando parlai della struttura del nucleo ai loro seminari; tutti erano così concentrati nella produzione di energie sempre più alte che ebbi l'impressione che il mio argomento fosse molto lontano dai loro interessi”.

⁶ Il già ricordato Merle Tuve dopo la guerra abbandonò completamente la fisica nucleare “perché si era trasformata da uno sport in un *business*”, e si oppose attivamente alle nuove forme della *Big Science*: queste sue scelte sollevarono polemiche, oggi completamente dimenticate, anche se potrebbero avere una certa attualità. Forse è per questo che Tuve è oggi completamente ignorato nei manuali di fisica nucleare, malgrado i contributi fondamentali che fornì.

⁷ Tra i tanti possibili riferimenti, ci limitiamo a segnalare il seguente studio, non per un particolare rigore storico, ma perché è centrato proprio sugli aspetti sociali, politici e morali, ed inquadra in maniera viva, efficace e in termini facilmente accessibili le principali figure scientifiche e molti aspetti interessanti delle ricerche e della realizzazione della bomba: Pietro Greco, *Hiroshima, la Fisica Conosce il Peccato*, Roma, Editori Riuniti, 1955.

interessante osservare che in quel momento la Francia era all'avanguardia nelle ricerche sulla fissione dell'uranio, con i coniugi Frédéric Joliot e Irène Curie (Premi Nobel 1934 per la scoperta della radioattività artificiale: la madre di Irène, Maria, era stata anch'essa Premio Nobel⁹), che avevano un diretto impegno politico nella sinistra: con la fulminea invasione nazista Joliot passò a dirigere la resistenza e le ricerche si trasferirono in Gran Bretagna, che acquistò temporaneamente la *leadership*, ma la perse nel corso del 1940 (su queste vicende ritorneremo nel prossimo capitolo). È opportuno ricordare che anche in Unione Sovietica, dopo la notizia della scoperta della fissione, si avviarono nel 1939 ricerche parallele rilevanti, anche se ebbero scarso impatto fuori dal paese: Kurchatov, Khlopin, Zel'dovich, Khariton ed altri seguirono gli sviluppi delle ricerche occidentali e incominciarono a studiare la fissione, il problema degli isotopi dell'uranio, la possibilità di una reazione a catena¹⁰, anche se molti fisici sovietici rimasero inizialmente scettici sulla possibilità di utilizzare l'energia nucleare.

Intanto l'allarme che i nazisti potessero realizzare per primi una bomba nucleare venne fatto proprio da Szilard e comunicato a Roosevelt nella famosa lettera che Szilard convinse Einstein a scrivere il 2 agosto del 1939 (il testo completo è riportato nel saggio citato di Pietro Greco, pp. 87-88). Dopo varie titubanze venne istituito un "Comitato per l'Uranio" e infine – poco prima che Roosevelt cogliesse l'attesa palla al balzo dell'attacco giapponese a Pearl Harbour per entrare nel conflitto¹¹ – venne avviato il "Progetto Manhattan", la più grande impresa tecnico-scientifico-militare che fosse mai stata tentata, che raccolse migliaia di scienziati e tecnici delle varie discipline a lavorare su un unico progetto, la realizzazione della bomba atomica. Le residue lentezze nell'avviare il progetto vennero vinte dall'energica azione di due tecnici messi a capo di due sezioni per la ricerca scientifica e la sicurezza nazionale, Vannevar Bush e James Conant. Il "*Manhattan District*" venne posto per la prima volta sotto la direzione di un militare, il Gen. Leslie Groves, il che creò non pochi problemi per gli scienziati, abituati alla "libertà della ricerca". Bisogna riconoscere, purtroppo, che la contraddizione durò poco, e la professione della "scienziato militare" si è ormai affermata: il "Progetto Manhattan" e i successivi sviluppi delle armi nucleari hanno svolto un ruolo fondamentale in questo cambiamento¹². Tutto il progetto fu coperto dal più assoluto

⁸ Interessanti notizie su Lise Meitner, una delle rarissime donne impegnate all'epoca con non poche difficoltà nella ricerca scientifica, si trovano, oltre che nel saggio citato di Pietro Greco, in Margareth Wertheim, *I Pantaloni di Pitagora: Dio, le Donne e la Matematica*, Torino, Instar Libri, 1996, pp. 250-56.

⁹ Ivi, pp. 218-27.

¹⁰ David Holloway, *Stalin and the Bomb: the Soviet Union and Atomic Energy, 1939-1956*, Yale University Press, New Haven and London, 1994, pp. 50 e segg.

¹¹ È ormai provato storicamente in modo inequivocabile che Roosevelt fece di tutto per provocare un attacco giapponese a Pearl Harbour, fino al punto di destituire un ammiraglio e di indebolire la flotta, per avere il pretesto per rovesciare il sentimento dominante nell'opinione pubblica contrario all'entrata in guerra: si veda il ponderoso studio di Robert B. Stinness, *Il Giorno dell'Inganno*, Milano, Il Saggiatore, 2001. A proposito dell'intervento e del ruolo degli USA è opportuno raccomandare il saggio citato di Jacques R. Pauwels, che smaschera il mito secondo cui gli USA sarebbero scesi in guerra per uno spirito antinazista e dimostra in modo irrefutabile che gran parte degli imprenditori nutrivano grandi simpatie per Hitler, le maggiori imprese statunitensi (Du Pont, Union Carbide, Westinghouse, General Electric, Singer, Kodak, ITT, ecc.) collaborarono attivamente con la Germania nazista anche a guerra iniziata (Ford fornì camion, ed ESSO benzina, senza la quale non sarebbero stati possibili né il *blitzkrieg*, p. 31, né l'invasione dell'URSS, p. 58). Washington avrebbe voluto che il confronto in URSS durasse il più possibile, causando il logoramento di entrambi i contendenti (p.57), tanto che nel 1942 non volle aprire un secondo fronte, quando invece sarebbe stato il momento più opportuno per lo sbarco in Francia (pp. 71 e segg.: e per dimostrarne l'impossibilità vennero mandati al massacro alcune migliaia di canadesi in uno sbarco a Dieppe, che era uno dei porti più difesi dei nazisti, p. 74). In questo quadro, anche la guerra al Giappone aveva per gli USA lo scopo di sloggiarlo dall'Estremo Oriente asiatico, per stabilirvi il proprio controllo (pp. 59-60). Stanno emergendo anche i legami diretti della famiglia Bush con i nazisti e con l'olocausto (Toby Rogers, "How the Bush family wealth is linked to the Jewish holocaust", <http://globalresearch.ca/articles/ROG309A.html>; Ben Aris e Duncan Campbell, "How Bush's grandfather helped Hitler's rise to power", *The Guardian*, 25 settembre 2004), e nel dopoguerra della CIA con i nazisti (F. Ferri, "L'eredità nazista", *Guerre&Pace*, n. 25, p. 43, e "La CIA uncinata", *Guerre&Pace*, n. 30, p. 45; Jaques R. Pauwels, cit., p. 126; Jerry Meldon, "How the CIA opened the door to ex-nazis", <http://globalresearch.ca/articles/MEL305A.html>).

¹² Anche se bisogna ricordare precedenti "illustri", in particolare il ruolo diretto del Premio Nobel per la chimica Fritz Haber, che promosse e diresse la costituzione dell'arsenale tedesco di aggressivi chimici ed il loro uso effettivo nella

segreto, un'altra condizione che non si accordava molto con la mentalità e le tradizioni degli scienziati: ma da allora anche questa ulteriore contraddizione è stata digerita. Può essere interessante ricordare come la proposta di non pubblicare i risultati delle ricerche sull'uranio fosse stata avanzata nel 1939 proprio da alcuni scienziati preoccupati della possibilità che i nazisti potessero esserne favoriti (con Szilard ancora in prima fila), ma non era stata facilmente accettata: per esempio, Joliot pubblicò i suoi risultati, e così continuarono a fare i fisici sovietici.

Vale la pena sottolineare il ruolo determinante che giocò in questa impresa uno stuolo di scienziati e tecnici tedeschi, italiani e dell'Europa Orientale, molti dei quali ebrei, fuggiti negli USA dai regimi totalitari del Vecchio Continente: dagli italiani Enrico Fermi¹³ (il vero cervello di tutta l'impresa) ed Emilio Segrè, a Leo Szilard, Edward Teller, Eugene Wigner, Hans Bethe, Victor Weisskopf, e tanti altri. I soli fisici di prestigio che non accettarono di lavorare nel progetto furono Max Born, Isidor Rabi, e Franco Rasetti, uno dei "ragazzi di Via Panisperna", rifugiato in Canada, il quale dopo la guerra abbandonò la fisica e cambiò radicalmente il proprio campo di attività.

L'impresa si prospettava assai ardua, ed occorreva sperimentare tutte le strade. Era chiaro che per realizzare una bomba nucleare a fissione con l'uranio era necessario "arricchirlo" nel contenuto dell'isotopo fissile U-235, che costituisce appena lo 0.7 % dell'uranio naturale¹⁴ (v. Appendice 1.1.n): iniziò la costruzione di un gigantesco impianto per l'arricchimento dell'uranio a Oak Ridge, sfruttando la piccolissima differenza nella velocità di diffusione di un composto gassoso, l'esaffluoruro di uranio, UF₆, nel caso che sia costituito dall'isotopo 235 o 238 (nel secondo caso le molecole gassose sono un po' più pesanti, e quindi attraversano un setto poroso con velocità leggermente minore). Ma non vi era nessuna sicurezza di un esito positivo e nei tempi brevi necessari, per cui si cercarono tutte le strade possibili. Fu così che Enrico Fermi realizzò il 12 dicembre 1942 nei sotterranei dell'Università di Chicago la "Pila Atomica", cioè il primo reattore nucleare, nel quale la reazione a catena nell'U-235 avveniva in forma controllata: cosa che Fermi ottenne inserendo le barre di uranio in un moderatore di grafite, che in proporzione opportuna assorbiva i neutroni in eccesso, regolando così l'andamento della reazione (Appendice 1.1.q). La prima realizzazione concreta dell'era nucleare fu dunque un reattore per produrre energia in forma controllata? Neanche per sogno! La "Pila di Fermi" non riscatta il "peccato originale" dell'energia nucleare, poiché non era affatto progettata per produrre energia, ma per produrre un elemento che non esiste in natura, il plutonio (Pu, prodotto e individuato da Lawrence nel 1940), che si presentava come il candidato più idoneo per realizzare una bomba nucleare, poiché subisce la fissione ad opera di neutroni e può generare una reazione a catena senza bisogno di un processo di arricchimento come per l'uranio: infatti il plutonio si forma quando l'isotopo 238 dell'uranio assorbe un neutrone e subisce una successione di trasmutazioni, cosicché nel reattore, mentre l'U-235 sostiene la reazione a catena, l'intenso flusso neutronico produce Pu dall'U-238 (Appendice 1.1.o).

È opportuno ricordare che nel frattempo anche i fisici sovietici erano giunti alla conclusione che l'uranio-235 è l'isotopo fissile, avevano studiato le condizioni per innescare la reazione a catena, avevano affrontato il problema della massa critica, avevano capito l'importanza della compressione del materiale fissile per mezzo di un'esplosione convenzionale per innescare la reazione, avevano stabilito la necessità dell'arricchimento dell'uranio ed avevano incominciato a studiare varie possibilità, orientandosi verso una netta preferenza per il processo di centrifugazione¹⁵; nel 1940 era

prima guerra mondiale: si veda ad esempio il saggio citato di Pietro Greco.

¹³ Si possono vedere: Michelangelo De Maria, *Fermi: un fisico da Via Panisperna all'America*, n. 8 della serie "I grandi della scienza", *Le Scienze*, Milano, 1999; Giulio Maltese, *Enrico Fermi in America*, Zanichelli, Bologna, 2003; Giovanni Battimelli e Michelangelo De Maria (a cura di), *Edoardo Amaldi, da via Panisperna all'America*, Roma, Editori Riuniti, 1997. Interessante il libro fotografico di Giovanni Battimelli, *L'eredità di Fermi. Storia fotografica dal 1927 al 1959 dagli archivi di Edoardo Amaldi*, Roma, Editori Riuniti, 2003.

¹⁴ È interessante osservare che gli USA, mentre fornivano gli aiuti bellici alla Gran Bretagna, in grave crisi di liquidità, su una base di "Prestito-Affitto" (*Lend-Lease*), cioè un credito praticamente illimitato e soprattutto dietro l'impegno a smantellare nel dopoguerra il sistema protezionista di tariffe del *Coomonwealth*, il Belgio "pagò" invece le forniture americane con l'uranio e altri minerali della propria colonia congolese: Jacques R. Pauwels, cit., p. 50.

¹⁵ David Holloway, *Stalin and the Bomb*, citato, pp. 52-56.

stata costituita una Commissione sul Problema dell'Uranio¹⁶. Dal 1941 avevano ricevuto informazioni di *intelligence* da Londra sui progressi del progetto britannico e sulla possibilità di realizzare una bomba¹⁷, ma queste notizie giunsero a Mosca nella fase cruciale dell'invasione nazista. La decisione di avviare un progetto nucleare venne presa alla fine del 1942 proprio mentre infuriava la battaglia decisiva di Stalingrado¹⁸ (riprenderemo le ricerche sovietiche nel Par. 1.4).

Negli Stati Uniti entrambe le strade, l'arricchimento dell'uranio e la produzione di plutonio, arrivarono a compimento. Per l'estate del 1945 si era ottenuto uranio arricchito sufficiente per una bomba, e plutonio per due bombe: almeno una andava testata, sia perché il congegno di innesco del plutonio era più delicato, sia per verificarne gli effetti, su alcuni dei quali gravavano preoccupanti interrogativi. L'isotopo 240 del plutonio, che si forma nel reattore insieme all'isotopo fissile 239, possiede una piccola probabilità di subire la fissione "spontanea", che rischia di innescare troppo presto la bomba durante l'implosione, diminuendo drasticamente l'efficienza dell'esplosione: il meccanismo "a cannone", adottato per l'uranio, non era adatto, occorre che le masse subcritiche venissero unite molto più velocemente, e venne così sviluppato il meccanismo "a implosione" (v. Appendice 1.1.p). Quanto ai possibili effetti dell'esplosione nucleare, alcuni calcoli avevano prospettato il rischio che essa potesse "ignire" tutta l'atmosfera terrestre: il dubbio terribile, per quanto remoto, non arrestò il test.

Avvenne così il primo test nel deserto di Alamogordo, il 16 luglio 1945, che costituì materialmente l'oggetto (la "mela") del "peccato originale" (Oppenheimer, che era il direttore del progetto, esclamò testualmente "La fisica ha conosciuto il peccato"), che venne consumato con spaventoso cinismo il 6 agosto del 1945 sulla città di Hiroshima, e tre giorni dopo su Nagasaki: i due ordigni, trasportati da bombardieri, erano costituiti l'uno di uranio arricchito e l'altro di plutonio. Da almeno un anno era divenuto chiaro che i nazisti non avrebbero realizzato la bomba, e nel maggio del 1945 vi era stata la resa della Germania¹⁹. Tra gli scienziati del "Progetto Manhattan" si era sviluppata una forte corrente favorevole ad interrompere la realizzazione della bomba, che per molti aveva avuto come unica motivazione la minaccia nazista. Ma ormai il "nemico" per Washington era cambiato, ed era costituito dall'Unione Sovietica²⁰. La costruzione della bomba proseguì: non si può purtroppo registrare che un solo caso di un fisico che abbandonò il Progetto per motivi di coscienza, Joseph Rotblatt, insignito del Premio Nobel per la Pace nel cinquantenario di Hiroshima (mentre è il caso di ricordare la prima vittima diretta della fissione nucleare, a parte cioè i ricercatori deceduti per tumori contratti soprattutto nella fase iniziale, in cui non erano ben noti gli effetti delle radiazioni: il 21 maggio 1945 Louis Slotin, sperimentando il meccanismo di unione di due emisferi di plutonio per raggiungere la massa critica, innescò inavvertitamente la reazione a catena ed assorbì una dose letale di radiazione, che lo portò alla morte nove giorni dopo tra atroci sofferenze²¹).

Le bombe sul Giappone

Molti scienziati chiedevano comunque che la bomba non venisse usata: Szilard fu di nuovo il più attivo, raccogliendo anche firme ad una petizione in tal senso, e cercando di incontrare Roosevelt. Ma questi morì il 12 aprile 1945: il "*Manhattan Project*" era così segreto che il

¹⁶ Ivi, pp. 62, 68.

¹⁷ Ivi, p. 82.

¹⁸ Ivi, p. 89.

¹⁹ O meglio, le molte rese della Germania, un aspetto interessante della doppiezza statunitense discusso dal citato Jacques R. Pauwels (Cap. 15): per cui la data riportata nei libri di testo non ha in realtà molto senso.

²⁰ Pauwels, cit., discute in modo efficace il progetto degli alleati di un armistizio separato con la Germania, per sferrare poi un attacco comune contro l'URSS, per scacciarla dall'Europa Orientale, e possibilmente cancellare anche l'esperienza sovietica (Cap. 14). Il progetto, per quanto appaia allucinante, fu molto concreto: non fu possibile realizzarlo solo perché l'Armata Rossa godeva delle simpatie delle truppe americane in Europa, anche per la propaganda sviluppata opportunisticamente poco prima dagli stessi Stati Uniti per giustificare il rovesciamento dell'alleanza con i nazisti.

²¹ Per una ricostruzione dettagliata si può vedere un articolo scritto nel 1961 da Barbara Moon, riprodotto nel volume di John May, *Il Libro Greenpeace sull'Era Nucleare*, Frassinelli, 1991, pp. 73-85.

vicepresidente e successore, Harry Truman, non ne conosceva neppure l'esistenza. Il fisico James Frank stilò un rapporto, firmato da Szilard e da altri 5 fisici, in cui chiedeva che non si usasse la bomba e proponeva un controllo internazionale su queste armi. Intanto il Segretario alla Guerra nominò un *Interim Committee*, di cui facevano parte Vannevar Bush e James Conant, con il compito di elaborare una linea di condotta, che a sua volta nominò un sotto-comitato scientifico composto da Robert Oppenheimer, Enrico Fermi, Ernest Lawrence e Arthur Compton: è da sottolineare il ruolo e il peso politico che da questo momento in poi assunsero gli scienziati, ma non sembra sia stato propriamente un ruolo di pace! Infatti i quattro "saggi" si pronunciarono il 15-16 giugno in maniera abbastanza pilatesca: pur rivendicando di "non avere nessuna particolare competenza nella soluzione di problemi politici, sociali e militari, che sorgono con la scoperta dell'energia atomica" (come se la decisione di spingere il progetto e di aderirvi non fosse stata una decisione politica, sociale e militare assunta proprio in base ad una particolare competenza scientifica), essi riconoscevano l'obbligo di "salvare vite americane" e concludevano: "non vediamo nessuna alternativa accettabile all'impiego militare diretto"!

Ma perché furono realmente sganciate le bombe su Hiroshima e Nagasaki? È ormai assodato storicamente che l'obiettivo di queste stragi non era il Giappone, ma l'Unione Sovietica²². Per gli USA, date le simpatie per il nazismo, lo scopo principale dell'entrata in guerra era stata la sconfitta del Giappone: Roosevelt aveva chiesto ripetutamente a Stalin (ovviamente senza risultato, visto lo stato dell'URSS) di aprire un secondo fronte col Giappone, ma nel 1945 si augurava invece che ciò non avvenisse, per escludere l'URSS da qualsiasi trattativa di pace in Asia. Così Truman cercò di indurre al più presto il Giappone alla resa: "Per mettere fine alla guerra col Giappone senza dover fare troppi sacrifici, Truman aveva un certo numero di opzioni tutte attraenti. [...] Truman e i suoi consiglieri, tuttavia, non scelsero nessuna di queste possibilità: decisero, invece, di metter fuori combattimento il Giappone con l'atomica. Questa fatale decisione ... offriva agli americani notevoli vantaggi. [...] L'esperienza fatta a Potsdam [dove Truman aveva ricevuto la notizia del *Trinity test* di Alamogordo, con il quale aveva cercato di intimidire Stalin] aveva convinto Truman che solo una vera dimostrazione del potere di questa nuova arma avrebbe reso docile Stalin"²³. Ma il Giappone non si arrese, e l'8 agosto l'Armata Rossa attaccò le truppe giapponesi in Manciuria. "Questo rese Washington estremamente impaziente; già il giorno successivo alla dichiarazione di guerra sovietica, il 9 agosto 1945, una seconda bomba fu sganciata, questa volta sulla città di Nagasaki"²⁴. Come vedremo nel paragrafo seguente, Truman inaugurò la strategia nucleare che innescò la logica della Guerra Fredda.

Prima di concludere vale la pena di commentare brevemente la posizione piuttosto anomala di Niels Bohr sulla bomba atomica e l'azione, forse troppo prematura, che egli tentò di svolgere nel 1944. Quando i nazisti nel 1943 invasero la Danimarca Bohr, ebreo per parte di madre, con l'aiuto della resistenza riuscì a passare nella neutrale Svezia, e di qui i servizi segreti inglesi riuscirono a trasportarlo rocambolescamente in Gran Bretagna nel vano bombe di un piccolo aereo, in cui rischiò di morire soffocato. Qui egli venne informato dei progressi nella fabbricazione della bomba, che egli riteneva ancora irrealizzabile. Bohr intuì le gravissime implicazioni di un'arma così spaventosa nel dopoguerra, comunicò le sue profonde preoccupazioni ai colleghi di Los Alamos quando vi fu inviato nel novembre 1943 come consulente della direzione britannica, ed elaborò l'idea di una collaborazione attiva con i sovietici, che riuscì a fare arrivare al Presidente Roosevelt, il

²² Jacques R. Pauwels, cit., Cap. 17.

²³ Ivi, pp. 151-52 (per maggiori dettagli v. il saggio specifico di Gar Alperovitz, *Atomic Diplomacy: Hiroshima and Potsdam. The Use of the Atomic Bomb and the American Confrontation with Soviet Power*, 1965; nuova edizione Harmondsworth, Middlesex, 1985). Del resto vi era stato un tragico e non meno cinico precedente, quando Dresda era stata investita da una tempesta di fuoco, provocata da 750.000 bombe che avevano causato un numero imprecisato di vittime superiore comunque ad Hiroshima, solo per mandare un avvertimento a Stalin e frenare l'avanzata dell'Armata Rossa in Europa, ivi, Cap. 12. Anche il bombardamento di Tokyo, il 9 e 10 marzo 1945, aveva causato più vittime che Hiroshima (Jacques R. Pauwels, cit, p. 154).

²⁴ Jacques R. Pauwels, cit, p. 154. Raccomandiamo l'accurata discussione delle scelte politiche di Truman nel classico Luigi Cortesi, *Storia e Catastrofe*, 1984, nuova edizione Manifestolibri, Roma, 2004, Cap. IV, "L'Asso nella Manica".

quale recepì le sue preoccupazioni e gli fece sapere che ne avrebbe discusso con Churchill. Bohr fece comunque di tutto per incontrare anche Churchill direttamente, riuscendoci solo nel maggio 1944: ma l'incontro fu un tragico insuccesso! Riuscì ad incontrare anche Roosevelt in agosto, prima che questi incontrasse Churchill in settembre. I due statisti, però, non solo ribadirono che il progetto nucleare doveva rimanere segreto, ma manifestarono sospetti che Bohr potesse diventare responsabile di fughe di notizie verso Mosca: Churchill andò oltre, suggerendo ai suoi collaboratori che Bohr era una persona pericolosa e “dovrebbe essere messo sotto controllo, o almeno bisogna fargli capire che sta rasentando crimini gravissimi”. Dopo la fine della guerra Bohr non si arrese, e nel 1950 inviò anche una lettera aperta alle Nazioni Unite, senza però nessun risultato.

Anche Robert Oppenheimer, il direttore scientifico del "Progetto Manhattan", cercò di convincere gli USA e la Gran Bretagna del grave pericolo di una corsa agli armamenti nel dopoguerra e dell'occasione storica che la bomba forniva per una politica globale di cooperazione. Vediamo come andarono le cose.

1.3 – Le incertezze dell'immediato dopoguerra, la strategia nucleare, la fine delle prospettive di controllo internazionale sulle armi nucleari e l'inizio della Guerra Fredda

La diplomazia nucleare americana e l'esordio della Guerra Fredda

La guerra si chiudeva con l'assoluto monopolio nucleare degli USA, anche se in quel momento tutte le bombe che erano state costruite erano state esplose. Si aprì un breve periodo cruciale per tutta la storia successiva, tanto per l'assetto del mondo come per quello degli armamenti nucleari, strettamente legati tra loro. È importante tenere conto del fatto che allora era radicata negli Stati Uniti la convinzione che il vantaggio accumulato in questo campo non fosse facilmente colmabile, e che l'Unione Sovietica non avrebbe potuto realizzare la bomba con tanta facilità e in tempi brevi. Truman cercò di utilizzare questa supremazia in modo energico e spregiudicato per intimidire Stalin, ottenendo però risultati molto discutibili: l'atteggiamento di Truman fu paradigmatico proprio del ruolo delle armi nucleari nell'innescare l'irrigidimento e la contrapposizione tra i due blocchi ed i meccanismi della Guerra Fredda.

Dopo la parentesi della forzata alleanza con l'URSS, la contrapposizione aveva ben presto ripreso il sopravvento. In aperta violazione degli accordi presi negli incontri fra i tre grandi sugli assetti politici dell'Europa, Washnigton e Londra avevano proceduto ad una politica dei fatti compiuti. Il primo avvenne con la liberazione dell'Italia, dove i partigiani vennero unilateralmente disarmati e neutralizzati politicamente (negoziandone anche l'eliminazione con i nazisti²⁵), consentendo che il primo capo del governo fosse Badoglio, vecchio collaboratore di Mussolini, ed “estromettendo i russi da ogni ruolo significativo nella riorganizzazione dell'Italia”²⁶ (ma anche i canadesi, che avevano avuto un ruolo importante nella campagna d'Italia). Non diversamente andarono le cose in Francia e più tardi in Grecia. Dopo l'allucinante progetto di un armistizio e un'alleanza con i nazisti contro l'Armata Rossa dopo il suicidio di Hitler, e dopo la resa della Germania, Truman rinviò la conferenza di Potsdam a quando il test della bomba atomica fosse stato pronto, contando che l'atomica avrebbe consentito di dettare le condizioni all'URSS. Anche dopo Hiroshima “Stalin aveva un'indubbia volontà d'intavolare ... un dialogo tra uguali ... e ciò si evidenzia dal ragionevole approccio che fu tenuto nei confronti delle sistemazioni postbelliche di Austria e Finlandia. L'Armata Rossa si sarebbe ritirata da questi paesi senza lasciarsi dietro dei regimi comunisti. Non fu Stalin, ma Truman che, nel 1945 (ed in seguito), mancò nel dimostrare il suo interesse per un dialogo tra uguali. Con la pistola nucleare alla cintura, il presidente americano non pensava di dover trattare quei ragazzi del Cremino, che non avevano quest'arma, come uguali. [...] Vista dalla parte sovietica, la diplomazia nucleare americana non sembrava altro che un ricatto. Sebbene inizialmente intimidito, in seguito Stalin rifiutò di sottostarvi e Truman non fu più in grado di raccogliere i frutti della sua politica nucleare. [...] Contrariamente a questa condotta da Guerra

²⁵ Ivi, cit., p. 129.

²⁶ Warren F. Kimball, *FDR and Allied Grand Strategy, 1944-1945*, in Charles F. Brower (Ed), *World War II in Europe: The Final Years*, New York, 1998, p. 20; Jacques R. Pauwels, cit., Cap. 9.

Fredda sarebbe stato molto più accettabile per Stalin un ritiro negoziato dell'Armata Rossa dai paesi occupati, ritiro che avrebbe lasciato le strutture capitalistiche del paese pressoché intatte, come mostrava il caso finlandese. [...] Stalin concluse che la miglior difesa contro la minaccia nucleare sarebbe stata quella di disporre l'Armata Rossa il più vicino possibile alle linee americane nei paesi liberati e/o occupati dell'Europa orientale e centrale. [...] nel 1944 e 1945 Stalin non aveva dato avvio ad alcun cambiamento sociale e politico nei paesi che erano stati liberati o occupati ... e vi aveva perfino consentito certe attività antisovietiche ed anticomuniste. [...] Tutto questo cambiò rapidamente sotto la pressione della diplomazia nucleare americana. Regimi comunisti ed incondizionatamente prosovietici furono installati dovunque e l'opposizione non fu più tollerata. [...] senza la diplomazia nucleare di Truman, l'Europa forse non sarebbe mai stata divisa da una cortina di ferro"²⁷.

Il dibattito interno agli USA sulle armi nucleari

Intanto negli Stati Uniti si sviluppò un dibattito non solo sul futuro e lo statuto internazionale delle armi nucleari, ma in generale sulla struttura e il tipo di controllo sull'intero comparto della ricerca in fisica nucleare, in cui rientravano molti aspetti assai delicati, dal ruolo dei militari alla cooperazione con gli alleati in questo settore. La collaborazione con la Gran Bretagna aveva zoppicato durante la guerra ed anche ora stentava a decollare, per responsabilità di entrambe le parti (vi ritorneremo brevemente nel prossimo capitolo).

Siamo negli ultimi mesi del 1945. Per valutare i termini del dibattito e il suo sviluppo è importante tenere presente appunto che si intrecciavano aspetti diversi, che non erano stati in alcun modo distinti durante la guerra, e che forse non erano ancora del tutto chiari, ma che avrebbero poi segnato tutto lo sviluppo successivo dell'energia nucleare ed il suo statuto internazionale: da un lato le armi nucleari, e dall'altro sia la ricerca fondamentale nel settore, sia le applicazioni "civili" (che allora erano di là da venire!)²⁸.

Il Segretario alla Guerra, Henry Stimson, era convinto che lo sviluppo delle relazioni con l'URSS sarebbe dipeso in larga misura da come gli USA avrebbero gestito il problema delle armi nucleari e, supponendo che le conoscenze di base per realizzare la bomba non sarebbero rimaste segrete molto a lungo, propose di condividere le conoscenze sugli usi pacifici dell'energia nucleare con i sovietici. Su questa proposta si manifestarono pareri opposti. Favorevole era il Sottosegretario di Stato, Dean Acheson, che in un memorando al Presidente Truman argomentò che lo sviluppo congiunto della bomba tra Stati Uniti, Gran Bretagna e Canada (nel 1943 vi era stato l'accordo segreto di Quebec per non comunicare informazioni ad altri paesi, v. Cap. 2) sarebbe apparsa ai sovietici come un'alleanza Anglo-Americana contro di essi, e che Mosca avrebbe reagito vigorosamente per ristabilire un equilibrio se Washington avesse mantenuto "una politica di esclusione". D'altra parte, nel settembre il Senatore McMahon avanzò la proposta di mantenere il monopolio statunitense in tutto il settore nucleare, e in ottobre il Dipartimento della Guerra presentò una proposta di legge per mettere questo settore sotto il controllo dei militari.

Questo dibattito si rifletté nel Messaggio di Truman al Congresso del 3 ottobre 1945, la prima presa di posizione ufficiale di un Presidente sugli usi pacifici dell'energia nucleare e il suo controllo. Diceva Truman che "La speranza della civilizzazione risiede in accordi internazionali che mirino, se possibile, alla rinuncia all'uso ed allo sviluppo della bomba atomica, e dirigano ed incoraggino l'uso dell'energia atomica e di tutta l'informazione scientifica futura verso fini pacifici e umanitari", e proponeva di avviare "discussioni con la Gran Bretagna e il Canada, e poi con altre nazioni [includendo presumibilmente l'URSS, N.d.A.], in uno sforzo per giungere ad accordi sulle condizioni perché la cooperazione possa sostituire la rivalità nel campo dell'energia Atomica". Egli

²⁷ Jacques R. Pauwels, cit., p. 155-57.

²⁸ Molte delle notizie che seguono sono tratte soprattutto da due articoli: Leonard Weiss, "Atoms for Peace", *Bulletin of the Atomic Scientists*, n. 59-6 (novembre-dicembre 2003); Peter L. Lavoy, "The enduring effects of Atoms for Peace", *Arms Control Today*, dicembre 2003. Un'agile cronologia delle tappe della proliferazione è fornita da: Roberto Fieschi, Giovanni Rampini e Armando Sternieri, *Alle Radici della Proliferazione Nucleare: una Cronologia*, "Quaderni" del Forum per i Problemi della Pace e della Guerra, Anno VIII, n. 4, Firenze, 1995.

sottolineava però che le discussioni non dovevano riguardare le informazioni sulla fabbricazione delle bombe, ma piuttosto "i termini in cui la collaborazione internazionale e lo scambio di informazione scientifica potrebbe procedere con sicurezza" (egli chiarì poi che non aveva mai pensato ad una collaborazione con la Gran Bretagna che consentisse a questa l'installazione del complesso industriale necessario per costruire la bomba, e che la collaborazione era da intendersi solo per i dati puramente scientifici). Truman proponeva anche la creazione di una Commissione per l'Energia Atomica statunitense (AEC) per dirigere la ricerca nucleare e mantenere il controllo sui materiali fondamentali per lo sviluppo dell'energia nucleare, sia pacifica che militare: l'AEC avrebbe dovuto "interferire il meno possibile con la ricerca e le imprese private".

Il successivo incontro di Truman con i primi ministri britannico e canadese sfociò nella Dichiarazione Congiunta del 15 novembre 1945, che auspicava un controllo internazionale dell'energia nucleare, sostenendo che né le contromisure né il segreto fornivano una difesa adeguata dal potere distruttivo della bomba. Truman era disposto a negoziare direttamente anche con l'URSS, ma il Segretario di Stato, James Byrnes, favorì la proposta di Vannevar Bush di spostare il dibattito alle Nazioni Unite. In un incontro a Mosca i sovietici concordarono sulla creazione di una Commissione dell'ONU sull'energia atomica.

Per quanto riguarda gli scienziati, è interessante segnalare che nel novembre del 1945 venne fondato dal gruppo più vivace di Chicago il *Bulletin of the Atomic Scientists*, che rimane ancora oggi una sede di informazione, discussione e intervento sui pericoli delle armi nucleari, il loro controllo e la loro eliminazione.

Il "Piano Baruch"

Alla fine del 1945 la prima sessione dell'Assemblea Generale delle Nazioni Unite adottò una risoluzione in favore del controllo internazionale dell'energia nucleare e dell'eliminazione delle armi nucleari.

Arriviamo così al 1946. Per elaborare una proposta politica statunitense da presentare all'ONU, Byrnes chiese ad Acheson di dirigere un Comitato, composto da Bush, Conant, McCloy e il Gen. Leslie Groves, che si avvalese di un *Board* di consiglieri diretto da David Lilienthal e che includeva Oppenheimer. Il 16 marzo 1946 il *Board* presentò un rapporto, da cui venne il "rapporto Acheson-Lilienthal", che fu un compromesso tra il parere del *Board* per un controllo internazionale immediato su tutte le attività atomiche e la posizione di Acheson per una maggiore gradualità nell'abbandono dell'autorità degli Stati Uniti. Il rapporto considerava che lo sviluppo dell'energia atomica e delle bombe era in larga misura interdipendente, che non ci si doveva quindi fidare dello sviluppo di un programma nucleare in nessun paese dato che un programma pacifico può fornire materiale fissile per realizzare bombe, e tuttavia un regime di ispezioni internazionali basate sulla buona fede era destinato a fallire a causa delle rivalità globali:

"Abbiamo concluso unanimamente che non vi è nessuna prospettiva di sicurezza contro la guerra nucleare in un sistema di accordi internazionali per bandire queste armi controllato solo da un sistema basato su ispezioni e simili metodi polizieschi. Il nocciolo della difficoltà è dato dalle rivalità nazionali nello sviluppo dell'energia atomica facilmente convertibile a scopi distruttivi. [...] Un sistema di ispezioni sovrapposto ad *uno sfruttamento per altri versi incontrollato dell'energia atomica da parte dei governi nazionali* non costituirà una garanzia adeguata."²⁹

Per diffondere il rapporto al resto del mondo, Truman incaricò un uomo d'affari di Wall Street, Bernard Baruch. Questi era un uomo dotato di forte personalità e presunzione, apportò modifiche significative al rapporto e decise di promuoverlo come suo: eliminò la nozione di una proprietà internazionale dei mezzi per produrre i materiali nucleari, poiché non era in sintonia con gli ambienti impesariali, aggiunse il concetto di sanzioni immediate per le violazioni, e stabilì che gli USA non avrebbero rinunciato alle proprie bombe (che nel giugno 1946 ammontavano a nove) ed

²⁹ "A report on the international control of atomic energy", Government Printing Office, Washington, DC, 16 marzo 1946.

avrebbero continuato a fabbricarne finché non fossero state stabilite e rese effettive garanzie che nessun altro paese poteva dotarsi di tali armi. Truman esitò ad accettare queste modifiche, e lo fece perché Baruch minacciò di abbandonare. Così il 14 giugno 1946 quest'ultimo presentò alla Commissione dell'Energia Atomica delle Nazioni Unite la sua versione del piano, noto da allora come "Piano Baruch", che proponeva di sottomettere le armi nucleari al controllo di un'Autorità Internazionale e la loro successiva eliminazione, ed anche di eliminare il diritto di veto degli Stati membri permanenti del Consiglio di Sicurezza. Vale la pena di riportare i passi salienti:

“Gli Stati Uniti propongono la creazione di un'Autorità Internazionale per lo Sviluppo Atomico, alla quale dovrebbero essere affidate tutte le fasi dello sviluppo e dell'uso dell'energia atomica [...]

Una volta che ci sia accordati su un sistema adeguato di controllo dell'energia atomica, che includa la rinuncia alla bomba come arma, e lo si sia reso operativo, e si siano stabilite giuste punizioni per le violazioni delle regole di controllo che devono essere stigmatizzate come crimini internazionali, proponiamo che:

1. la fabbricazione di bombe atomiche si arresti;
2. le bombe esistenti siano eliminate secondo i termini del trattato; e
3. l'Autorità sia in possesso di tutta l'informazione sul *know-how* per la produzione dell'energia atomica.”³⁰

Un'analisi circostanziata si trova nel saggio *Storia e catastrofe* di Luigi Cortesi³¹:

“Ciascuno dei punti proposti si prestava, e si presta, a drastiche obiezioni. I poteri di controllo e di ispezione dell'Autorità internazionale avrebbero leso la sovranità degli Stati; la loro applicazione all'Unione Sovietica avrebbe in ultima analisi vietato a questa ogni genere di ricerca anche a fini non bellici, mentre gli Stati Uniti sarebbero rimasti i soli a detenere le bombe [...]; la richiesta di abolizione del veto contraddiceva gli accordi già presi [...]. Gli Stati Uniti non presentarono né allora né mai un progetto preciso circa le 'fasi di transizione' che avrebbero portato al loro disarmo atomico. [...] la lunga preparazione del 'piano Baruch' non era mai stata accompagnata da informazioni e consultazioni con i russi [...].”

L'Unione Sovietica, che stava procedendo nella realizzazione della bomba, vide il piano Baruch come un tentativo di congelare la situazione e legittimare l'egemonia nucleare statunitense (Stalin poi aveva una vera paranoia contro una cospirazione internazionale giudaica per controllare il mondo: molti dei protagonisti americani erano ebrei) e, rifiutando anche il concetto di ispezioni invasive come una minaccia alla propria sovranità, avanzò una sua proposta che capovolgeva l'ordine delle fasi del progetto statunitense, prevedendo la messa al bando della produzione e dell'uso di armi nucleari e la distruzione di tutte le bombe esistenti. Il 24 settembre 1946 vi fu una risposta diretta di Stalin³². Baruch comunque rifiutò di negoziare il suo piano e pretese un voto entro la fine dell'anno (più tardi Truman confessò ad Acheson che la scelta di Baruch era stata "il peggiore errore che abbia mai fatto"): il piano fu approvato dalla Commissione per l'Energia Atomica dell'ONU, con l'astensione della Polonia e dell'Unione Sovietica, ma fu poi bloccato dal veto di quest'ultima nel Consiglio di Sicurezza. La prospettiva di un controllo internazionale delle armi nucleari tramontava definitivamente, e la storia dell'era nucleare ne rimaneva segnata profondamente per sempre!

Il "McMahon Act"

Non bisogna però trascurare il fatto che nel frattempo, un mese dopo la presentazione del piano Baruch, nel luglio 1946 era stata approvata negli Stati Uniti la legge che aveva proposto McMahon,

³⁰ Il testo completo si trova in: http://cnsdl.miiis.edu/npt/npt_3/baruch/baruch.htm.

³¹ Luigi Cortesi, *Storia e Catastrofe*, 2004, cit., pp. 152-161. Segnaliamo anche un recente articolo del direttore di Los Alamos, Raul Robinson, "Revisiting the Baruch Plan", *Nature*, n. 432, 2004, pp. 441-42.

³² Ivi, p. 156.

che istituiva una rigida politica del segreto sull'intero settore nucleare, militare e civile, per proteggere il monopolio americano e negare a chiunque altro il trasferimento della tecnologia nucleare, prevedendo la pena di morte per il passaggio di segreti militari ad altri paesi. Per dirigere la politica nucleare del paese veniva istituito un Comitato misto del Congresso, il *Joint Committee on Atomic Energy*, e veniva vietato ogni scambio di informazioni relative all'utilizzazione industriale dell'energia nucleare (rimase ancora preclusa a lungo la collaborazione con Londra, anche per il timore di Washington di un'invasione sovietica, ed ancor più dopo che emerse il caso di spionaggio di Fuchs nel 1950, v. Par. 1.4 e 2.1), prevedendo la pena di morte per la comunicazione di dati ad un paese straniero. I sostenitori dello sviluppo di un settore privato nello sviluppo nucleare³³ non furono soddisfatti del "*McMahon Act*", che comunque rimase il cardine della politica di Washington fino al 1953 (quando venne lanciato il programma dell'"Atomo per la Pace", v. Cap. 3: la legge verrà infatti modificata nel 1954).

D'altra parte, queste vicende si inserivano nell'ulteriore deterioramento dei rapporti tra i due blocchi. Nell'autunno del 1946 riprese la guerra civile in Grecia. Il 12 maggio 1947 il presidente esponeva davanti al Congresso la "dottrina Truman", che enunciava la netta contrapposizione tra due "modi di vita alternativi", uno fondato su libere istituzioni e garanzie delle libertà umane e l'altro fondato sul totalitarismo e l'oppressione. Nel 1947 fu varato il "Piano Marshall" che, "mentre serviva a mantenere a pieno regime la macchina dell'industria americana, contribuiva a rendere la parte occidentale della Germania e dell'Europa in generale più dipendenti dagli Stati Uniti e ad integrare più strettamente questa parte del mondo nel nuovo sistema economico"³⁴, arginando anche la forza dei partiti comunisti occidentali che radicava nelle condizioni di povertà lasciate dalla guerra; "i crediti del Piano Marshall furono offerti anche all'Unione Sovietica, ma a condizioni che, come gli americani ben sapevano, erano totalmente inaccettabili in quanto richiedevano ai sovietici di abiurare l'eresia comunista e di tornare nel seno della vera fede capitalista."³⁵ Non furono i sovietici, ma gli americani a volere la Germania divisa: Mosca puntava su una Germania unita e forte, che pagasse i colossali danni di guerra, cosa che Washington impedì perché questo pagamento (più che legittimo e meritato) avrebbe indebolito le potenzialità del mercato tedesco e rafforzato l'URSS. Ma intanto gli USA fecero razzia di tutto quello che potevano confiscare nella zona orientale prima di lasciarla ai sovietici, tra cui "tutto quello che era possibile saccheggiare dalla fabbrica dei razzi V-2 a Nordhausen: non solo razzi, ma anche documenti tecnici con un valore stimato tra i 400 e i 500 milioni di dollari, come pure 1.200 tedeschi esperti in tecnologia dei razzi, uno dei quali fu il noto [uomo delle SS] Wernher von Braun."³⁶ Il rastrellamento degli scienziati nazisti faceva parte di un piano preciso, chiamato "Operazione Paperclip", e raccolse veri e propri criminali di guerra, salvandoli dai (pur edulcorati) processi ai dirigenti nazisti. von Braun era uno dei più brillanti ingegneri dell'epoca, di appena 32 anni, che nel centro di Peenemünde alle dipendenze delle SS aveva realizzato il razzo V2: egli venne internato temporaneamente, con l'idea di rilanciare il programma missilistico nella base statunitense di Fort Bliss³⁷ (vi ritorneremo nel Par. 4.2).

Tra il 1948 e il 1949 la tensione tra i due blocchi salì alle stelle con il "blocco di Berlino", imposto dai sovietici per forzare gli USA sulla Germania, che però si risolse per loro in una sconfitta. Con l'aiuto di Washington, dopo una guerra civile sanguinosa la monarchia greca nel 1948 sconfisse l'opposizione comunista (che in realtà non ebbe aiuti da Mosca, ma dalla Jugoslavia). Intanto negli Stati Uniti si scatenava un clima di paranoia anticomunista, con indagini e

³³ Può essere interessante ricordare che ne faceva parte la senatrice repubblicana Clare Booth Luce, che fu poi ambasciatore in Italia, in un'epoca in cui gli USA svilupparono nel nostro paese una politica di ingerenza pesante e gravata ancora da molti interrogativi inquietanti.

³⁴ Jacques R. Pauwels, cit., p. 205.

³⁵ Ibidem.

³⁶ Ivi, pp. 197, 170. Vedi anche : Linda Hunt, "US coverup of Nazi scientists", *Bulletin of the Atomic Scientists*, aprile 1985, p. 24.

³⁷ *L'alliance du Pentagone avec les nazis. "Operation Paperclip": des V" a la Lune*, Réseau Voltaire, 5 gennaio 2005: <http://www.reseauvoltaire.net/article14657.html>.

interrogatori di scrittori, artisti e dirigenti statali; e in Unione Sovietica le grandi epurazioni del 1948-49.

Era “scoppiata” la Guerra Fredda: e le armi nucleari avevano giocato un ruolo importante e ne sarebbero divenute uno dei meccanismi e degli strumenti principali. D'altra parte, la Guerra Fredda non fu una necessità: “per un lungo periodo di tempo, anche dopo che gli americani ebbero chiarito che non avrebbero permesso all'URSS di raccogliere i frutti dello sforzo bellico, i leader sovietici rimasero pronti a collaborare. Questo atteggiamento produsse risultati positivi sia riguardo alla Finlandia che all'Austria”³⁸. La Guerra Fredda fu voluta dal capitale statunitense: “con la sconfitta della Germania e del Giappone, un nuovo conflitto – una qualsiasi nuova guerra nei confronti di chicchessia – sarebbe stato una benedizione, in quanto avrebbe reso possibile mantenere alto il livello delle spese per forniture militari e sostenere il boom indotto dalla precedente guerra. Grazie al nuovo conflitto, il riarmo sarebbe continuato, dopo il 1945, a funzionare come una dinamo keynesiana nei confronti dell'economia americana”³⁹. Senza queste premesse è difficile capire il ruolo che la proliferazione nucleare ha giocato nei decenni successivi.

1.4 – La proliferazione “originaria”: dal monopolio al duopolio nucleare. La bomba sovietica

Negli Stati Uniti si costruirono altri reattori nucleari, sempre però militari, ossia con l'esclusivo scopo di produrre plutonio. Il compito prioritario dell'AEC era la fabbricazione di bombe, ma il suo primo direttore, Lilienthal, nominò un Gruppo Consultivo Industriale e avviò un programma di ricerca sui reattori di potenza. I grandi laboratori di Los Alamos, Oak Ridge e Argonne incominciarono a lavorare su reattori sperimentali, occupandosi sia di armi che di energia nucleare. Nel luglio del 1946 ripresero i test nucleari, che proseguiranno quasi ininterrottamente nell'atmosfera fino al 1963 (v. Par. 4.1) e sotterranei fino al 1991 (Cap. 5), per un totale complessivo di circa 940.

Nel 1947 (quando il numero di testate statunitensi superò le trenta) il Congresso autorizzò le ricerche per realizzare un sommergibile nucleare e un aereo azionato da energia nucleare. Quest'ultimo si dimostrò irrealizzabile per il peso della schermatura del reattore, mentre il primo sommergibile nucleare, il *Nautilus* (varato nel 1954 e rimasto famoso per avere attraversato il Polo Nord sotto la banchisa polare), fu azionato da un reattore ad acqua pressurizzata (PWR), che usava acqua ordinaria sia come moderatore che come refrigeratore, progettato da Alvin Weinberg e Eugene Wigner e realizzato ad Oak Ridge. Quel tipo di reattore, insieme al reattore ad acqua bollente (BWR), realizzato più tardi, contenevano le basi ingegneristiche su cui si sarebbe sviluppata l'industria nucleare statunitense: ma per questo si rese necessario un profondo cambiamento della struttura e dell'organizzazione che erano state date al settore, come vedremo nel Cap. 3 (mentre sui sommergibili nucleari ritorneremo nella Scheda 5.1).

Ma il monopolio nucleare degli Stati Uniti durò meno di quanto essi pensavano: si innescò immediatamente, insomma, parallelamente alla *proliferazione verticale*, ossia la realizzazione di nuovi ordigni all'interno degli USA, anche la *proliferazione orizzontale*, ossia l'acquisizione di armi nucleari da parte di altri paesi, in primo luogo l'URSS.

La prima bomba a fissione sovietica esplose infatti il 29 agosto del 1949 (gli Stati Uniti potevano già contare su 235 testate!). Era una testata di plutonio, ed era una copia della prima bomba americana del 1945. Nel 1944 era giunto a Los Alamos con la missione britannica il fisico Klaus Fuchs, e fu messo a lavorare sul meccanismo di implosione: egli passò sistematicamente informazioni ai servizi segreti sovietici, e nel giugno 1945 fornì le informazioni cruciali su questo meccanismo. Questo naturalmente mise i sovietici sulla strada ed abbreviò i tempi: ma non alleggerì in modo sostanziale la mole di lavoro teorico e sperimentale.

Anche per l'URSS la realizzazione della bomba atomica costituì un'enorme impresa⁴⁰, resa più difficile dallo stato disastroso del paese dopo la guerra. Essa coinvolse qualche centinaio di migliaia

³⁸ Ivi, p. 217.

³⁹ Ivi, p. 215.

di persone, dall'estrazione e lavorazione dell'uranio, fino alla fase della ricerca e della fabbricazione, in cui fu impegnato qualche migliaio di tecnici e scienziati: si dovette costruire l'intero sistema industriale di questo settore. L'impresa fu centralizzata e segreta per la struttura stessa del regime sovietico. Il padre del programma nucleare sovietico, Kurchatov, nel 1943 avviò la realizzazione del reattore e creò un gruppo per studiare la bomba. La ricerca di giacimenti di uranio iniziò in Asia e fu lenta: si avvale poi delle miniere tedesche e cecoslovacche quando l'Armata Rossa occupò questi paesi. Anche la fase dell'estrazione e purificazione del metallo causò ritardi. Vi furono anche dei dissidi: Kapitsa non era d'accordo sull'impostazione del progetto e propose che i sovietici seguissero un progetto autonomo, quindi abbandonò l'impresa⁴¹.

Nel 1944 divenne operativo un ciclotrone per produrre plutonio. Per l'arricchimento dell'uranio le informazioni di Fuchs fecero scegliere il processo di diffusione gassosa, abbandonando una prima idea dei sovietici di sviluppare la centrifugazione: questo fu probabilmente un errore, dato che la centrifugazione si è rivelata successivamente una tecnica più efficace (oggi seguita da tutti i paesi che vogliono arricchire l'uranio: Iraq, Iran, Pakistan). Fino all'estate del 1945 i progressi furono lenti. Per sperimentare e mettere a punto in dettaglio le tecniche rivelate da Fuchs per realizzare la bomba, ripetendo tutti i calcoli (l'URSS non disponeva ancora di calcolatori elettronici e i calcoli venivano eseguiti da grandi gruppi di donne con calcolatrici elettriche), le misure e gli esperimenti, era stato allestito nel 1946 negli Urali il laboratorio chiamato Arzamas. Il 25 dicembre 1946 il reattore sperimentale di Kurchatov divenne critico: le sue dimensioni erano simili alla "Pila di Fermi". Nel 1947 venne messa a punto la tecnica di separazione del plutonio dall'uranio. Nel giugno 1948 venne realizzato a Cheliabinsk il primo reattore di produzione del plutonio (era un reattore a gas grafite: l'industria sovietica non poteva produrre acqua pesante): nel giugno 1949 vi era sufficiente plutonio per la prima bomba e vennero fabbricati i due emisferi.

Durante queste ricerche non si prestò molta attenzione ai danni delle radiazioni sulla salute, né ai danni sull'ambiente: tra il 1948 e il 1951 furono esposte alle radiazioni 124.000 persone senza avvertirle, e vennero scaricati nei fiumi 76 milioni di metri cubi di scorie radioattive ad alta e media attività⁴².

Gli scienziati di Arzamas avevano ricevuto un trattamento privilegiato rispetto alle disastrose condizioni del paese. Anche se erano consapevoli che, sotto il regime di Stalin e il controllo diretto di Beria sul progetto, rischiavano molto in caso di insuccesso, essi erano convinti che l'Unione Sovietica aveva bisogno della bomba per difendersi: malgrado gli stretti controlli, si stabilì ad Arzamas uno spirito di amicizia e collaborazione⁴³.

Mentre si realizzava la bomba al plutonio aveva proceduto la messa a punto della tecnica di arricchimento dell'uranio, che nel 1951 incominciò a produrre uranio arricchito oltre il 90 %. Ancor prima del test del 1949 i fisici sovietici si erano resi conto che lo schema della bomba al plutonio poteva venire notevolmente migliorato, e dal 1948 avevano incominciato a lavorare anche su una testa di peso metà e potenza doppia, di uranio e plutonio con la tecnica "a cannone", che fu testata nel 1951: se anche Fuchs non avesse fornito le informazioni, i sovietici sarebbero quindi giunti comunque alla bomba, solo un paio di anni più tardi. Si pensi che i britannici vi riuscirono solo nel 1952, malgrado avessero avuto novanta fisici a Los Alamos durante la guerra (Par. 2.1). I paesi che l'hanno realizzata successivamente hanno usufruito di concreti aiuti delle due potenze nucleari, per cui si è trattato realmente di casi di proliferazione orizzontale indotta, o almeno assistita.

1.5 – La "bomba H"

La bomba H statunitense

⁴⁰ Le informazioni che seguono sono tratte in gran parte da David Holloway, *Stalin and the Bomb*, cit., in particolare i Capitoli 5, 7, 9 e 10.

⁴¹ Ivi, pp. 138 e segg.

⁴² Ivi, pp. 194-95.

⁴³ Ivi, pp. 201-5.

L'idea di un ordigno nucleare che utilizzasse la reazione di fusione nucleare risaliva ai primi anni della guerra, ma la realizzazione della "bomba H" negli USA procedette dapprima lentamente e incontrò poi alcune difficoltà.

Nel 1948 ebbe la priorità la realizzazione di una bomba *boosted* ("spinta"), che utilizzava la fusione nucleare ma si basava ancora su un'esplosione a fissione: l'implosione del plutonio per innescare la fissione accende la fusione di una piccolissima quantità di deuterio e trizio (appena un paio di grammi), la quale emette un flusso di neutroni che aumentano l'efficienza della reazione di fissione principale. Una bomba *boosted* fu testata il 24 maggio 1951. Nell'Appendice 7.1 forniremo maggiori dettagli su queste testate, le quali presentano grandi vantaggi, consentendo di realizzare bombe più compatte e leggere, e sono risultate fondamentali per lo sviluppo degli arsenali nucleari e dei sistemi di lancio.

Ma il test sovietico del 1949 rilanciò negli Stati Uniti il progetto della bomba H⁴⁴: l'uso della reazione di fusione nucleare apriva la possibilità di realizzare testate praticamente senza limiti di potenza (allora veniva chiamata la "Super"), e questo era importante in una fase in cui le bombe venivano trasportate da bombardieri. È però degno di nota il fatto che il *General Advisory Committee* dell'AEC (di cui facevano parte Oppenheimer, Fermi e Rabi) espresse un parere contrario⁴⁵, sostenendo che un impegno degli Stati Uniti a non realizzare la "Super" avrebbe potuto indurre una simile rinuncia da parte dell'URSS. Ma Truman, con i suoi consiglieri, decise altrimenti.

Teller, che può esserne considerato il padre, seguiva inizialmente uno schema di "Super" piuttosto semplice: l'esplosione di una bomba a fissione doveva generare la temperatura sufficiente per innescare la fusione di una massa di idrogeno. Tuttavia Ulam eseguì dei calcoli che dimostrarono che questa Super non avrebbe funzionato⁴⁶: ci si rese conto che se la massa di idrogeno non veniva preventivamente compressa in modo notevole, la fusione non si sarebbe propagata con sufficiente velocità e in tutta la massa, e l'esplosione sarebbe stata un "flop". Da questa idea nacque il "meccanismo di Teller-Ulam" che consisteva schematicamente nell'utilizzare con un'apposita geometria i raggi X emessi dall'esplosione a fissione per provocare la compressione della massa di idrogeno prima che si inneschi in essa la fusione nucleare (bomba termonucleare a due stadi: ne discuteremo in maggiore dettaglio il funzionamento nell'Appendice 7.1).

La "bomba H" venne sperimentata con successo negli Stati Uniti il 1° novembre del 1952: aveva una potenza di 10,4 mt (megatoni, un milione di tonnellate di esplosivo convenzionale equivalente), circa 700 volte la potenza della bomba di Hiroshima, e vaporizzò l'isola Elugelab nel Pacifico, di un miglio di diametro. In quel momento gli USA avevano mille testate nucleari a fissione, l'URSS 50⁴⁷. È interessante osservare che la prima bomba H non era una testata trasportabile, ma un oggetto che pesava 60 tonnellate e doveva solo confermare il funzionamento del dispositivo. Nel 1954 furono testate sei varianti della bomba all'idrogeno.

La bomba H sovietica

In Unione Sovietica la realizzazione della bomba H procedette in modo del tutto diverso⁴⁸: se la prima bomba a fissione era stata una copia di quella americana, la bomba a fusione fu invece un progetto originale; le informazioni fornite da Fuchs, che non lavorò su questo progetto, furono

⁴⁴ Una ricostruzione dettagliata si trova nello studio di Richard Rhodes, *Dark Sun: the Making of the Hydrogen Bomb*, New York, Simon & Schuster, 1995.

⁴⁵ David Holloway, citato, pp. 300-301.

⁴⁶ Ivi, p. 302; si può vedere anche lo studio di German A. Goncharov eseguito dopo l'apertura degli archivi in Russia: "Thermonuclear milestones", *Physics Today*, novembre 1996, pp. 44-61. Daniel Hirsch e William G. Mathews, "The H-bomb: who really gave away the secret", *Bulletin of the Atomic Scientists*, Vol. 46, n. 1 (January/February), 1990, basandosi su un documento di Bethe del 1952 desecretato, avevano sostenuto che i sovietici avrebbero scoperto il meccanismo della compressione dall'analisi della ricaduta radioattiva del test americano, ma questa tesi è contestata in modo convincente nel volume di David Holloway (v. oltre).

⁴⁷ Manlio Dinucci, cit., p. 43.

⁴⁸ David Holloway, cit., Cap. 14.

inutili. I sovietici incominciarono a lavorare sulla bomba all'idrogeno nel 1946. Kurchatov incaricò dei calcoli il gruppo di Tamm all'Università di Mosca: fu Andréi Sacharov che nel 1948 propose una struttura a "Layer Cake" (torta a strati), ponendo strati alterni di deuterio e trizio (Ginzburg poi propose deuterio e litio) e di uranio-238 in una bomba a fissione: si trattava di un meccanismo in qualche modo intermedio tra la testata *boosted* e la bomba all'idrogeno, poiché la fusione innescata dalla fissione provoca a sua volta la fissione dell'U-238. I servizi segreti statunitensi non riuscirono mai ad avere informazioni attendibili su queste ricerche, cosicché fu una grande sorpresa l'esplosione della prima bomba termonucleare sovietica il 12 agosto del 1953, appena nove mesi dopo quella statunitense (lo stesso anno morì Stalin): la bomba H sovietica era già compatta e in linea di principio trasportabile. È da segnalare che negli USA nell'autunno del 1952 una commissione aveva proposto di posporre il test della bomba H, perché i sovietici avrebbero potuto dedurre il meccanismo di Teller-Ulam della compressione dall'analisi dei detriti radioattivi: ma i fisici sovietici avevano compreso l'importanza della compressione prima del test americano⁴⁹. Il meccanismo di Sacharov presentava molti limiti, e i sovietici passarono in modo autonomo ad uno schema che era una vera bomba termonucleare a due stadi, che fu testata con successo il 22 novembre 1955. Dal 1953 avevano a disposizione anche calcolatori elettronici. Sembra ormai chiaro che, se anche gli Stati Uniti avessero sospeso la realizzazione della bomba H, Stalin e Beria non si sarebbero fermati, convinti ormai della potenza dei nuovi ordigni.

Intanto, il 3 ottobre 1952 era esplosa anche la prima bomba nucleare a fissione britannica (Cap. 2). La corsa agli armamenti nucleari era incominciata. E la politica seguita fino allora dagli Stati Uniti del segreto atomico aveva ricevuto il colpo finale: il Presidente Eisenhower, eletto nel 1952, incaricò i propri collaboratori di studiare una nuova strategia. Vedremo questi sviluppi nel Cap. 3.

---o0o---

APPENDICE

Struttura e proprietà dei nuclei: introduzione elementare alla fisica nucleare

Per fornire una base di comprensione per qualsiasi lettore, tratteremo in questa Appendice tutte le proprietà del nucleo atomico e le loro applicazioni che è necessario conoscere per comprendere gli argomenti trattati in questo saggio. Partiremo dalle nozioni più elementari: chi le possiede già può naturalmente saltare i paragrafi che risultino superflui.

a - Scoperta del nucleo e scoperta del neutrone

L'esistenza del nucleo all'interno degli atomi venne stabilita dagli esperimenti di Rutherford⁵⁰ del 1911-14, che stabilirono la "struttura planetaria" dell'atomo: un nucleo centrale carico positivamente, in cui è concentrata quasi tutta la massa dell'atomo, circondato da elettroni esterni, carichi negativamente (l'atomo nel suo complesso è elettricamente neutro) e molto più leggeri. Il nucleo dell'atomo più leggero, l'idrogeno (H), è costituito quindi dalla particella che porta la carica positiva elementare, il *protone*: la sua massa è 1846 volte più grande di quella dell'elettrone. Le dimensioni del nucleo sono molto piccole rispetto ai raggi delle orbite degli elettroni esterni, cioè alle "dimensioni" dell'atomo: gli atomi sono praticamente ... "vuoti".

Per una quindicina d'anni non fu possibile spiegare dal punto di vista fisico la struttura e la stabilità dei nuclei in termini delle particelle allora note, l'*elettrone* ed il *protone*. Il passo avanti fondamentale fu la scoperta di Chadwick nel 1932 del *neutrone*, una particella elettricamente neutra, di massa praticamente uguale a quella del protone. Da allora il nucleo si suppone costituito di protoni e di neutroni: vediamo come.

b - Elementi chimici: proprietà chimiche e proprietà nucleari

In natura esistono 92 *elementi chimici*, ossia sostanze pure costituite da 92 specie diverse di atomi. Questi 92 tipi di atomi hanno un numero crescente di elettroni esterni; da 1 per l'atomo più semplice,

⁴⁹ Ivi, p. 312 (in cui si contesta la tesi di Daniel Hirsch e William G. Mathews, cit.).

⁵⁰ Ai primi del '900 era stato proposto un modello dell'atomo "a panettone": poiché la scoperta dell'elettrone nel 1897 aveva stabilito la natura corpuscolare della carica elettrica negativa, mentre non vi era una simile evidenza per la carica positiva, Thomson propose che gli atomi fossero costituiti da una carica positiva diffusa, entro la quale sarebbero inseriti gli elettroni, come l'uvetta nel panettone. Rutherford bombardò una sottile foglia metallica con le particelle alfa, scoperte con la radioattività (v. oltre), e si avvide che queste urtando gli atomi subiscono deviazioni che possono essere molto grandi (a volte rimbalzano all'indietro) e che non si possono spiegare sulla base della carica positiva diffusa, ma richiedono che essa sia concentrata nel centro dell'atomo, in un *nucleo* molto piccolo, che contiene quasi tutta la massa dell'atomo (tra le 2.000 e le 5.000 volte la massa complessiva degli elettroni esterni).

l'idrogeno (H), a 92 per l'atomo più complesso, l'uranio (U): il numero di elettroni di un atomo (quindi di un dato elemento chimico) si chiama il suo *numero atomico*, e si indica con Z (vedremo che si sono scoperti elementi artificiali con $Z > 92$, chiamati *transuranici*, che però sono instabili).

Per capire la specificità delle proprietà del nucleo è necessario precisare subito un aspetto fondamentale: *tutte le proprietà chimiche di un elemento (formazione di molecole, reazioni chimiche, processi metabolici negli organismi viventi) dipendono unicamente dagli elettroni esterni dei suoi atomi*. Questo fatto riveste un'importanza fondamentale per quanto riguarda l'energia nucleare ed i suoi effetti: si pensi che, se gli atomi di uno stesso elemento chimico possono avere nuclei diversi, con diverse proprietà (e vedremo che è così), l'organismo vivente non è in grado di distinguerli e selezionarli, poiché i processi metabolici e vitali sono di natura chimica, e pertanto dipendono solo dagli elettroni esterni degli atomi, che per un dato elemento sono un numero determinato. Aggiungiamo, per inciso e per completezza, che le proprietà chimiche dei 92 elementi presentano delle regolarità e delle periodicità che si rappresentano nella classificazione in periodi nella *Tavola di Mendeleev degli elementi*, e si spiegano in base alla disposizione degli elettroni, al crescere del loro numero Z , in strati successivi, secondo regole che si interpretano mediante le leggi della *Meccanica Quantistica* (v. la nota 53).

c - Forza nucleare ed energia nucleare

Ritorniamo al nucleo, per comprenderne alcune proprietà fondamentali. Poiché gli atomi sono elettricamente neutri, tutti i nuclei degli atomi di un dato elemento chimico, di numero atomico Z (contenenti cioè Z elettroni esterni) devono contenere lo stesso numero Z di protoni. A che servono allora, e quanti devono (o possono) essere i neutroni? Per capirlo evidenziamo subito un punto fondamentale. I protoni sono carichi elettricamente dello stesso segno, quindi si respingono tra loro: come può allora il nucleo risultare stabile? In altre parole, che cosa tiene legati tra loro i Z protoni all'interno del nucleo, superando la loro forza repulsiva? Non si sfugge alla conclusione che *all'interno dei nuclei devono agire forze attrattive, e molto più intense delle forze elettriche*: esse si chiamano appunto *forze nucleari*.

Ne segue subito un'altra conseguenza fondamentale: *se le forze nucleari sono molto più intense delle forze elettriche, anche le energie in gioco nei processi che avvengono all'interno dei nuclei devono essere molto più grandi delle energie in gioco nei processi (elettrici) che coinvolgono gli elettroni esterni*. In altre parole, *l'energia in gioco in ogni singolo processo nucleare è molto maggiore (circa un milione di volte) dell'energia chimica in gioco in ogni singolo processo elettronico* (raccoltiamo nella Scheda 1.1 le principali nozioni sulle unità di misura dell'energia). Ecco una delle caratteristiche principali dell'energia nucleare, che fin dall'inizio l'ha resa tanto attraente dal punto di vista energetico e militare, ha impresso un percorso specifico al suo studio e al suo sfruttamento, ed ha catalizzato su di essa tutto l'insieme di interessi economici, politici e militari: questo ha contribuito, per scelte che via via sono state compiute e cercheremo di chiarire, al particolare statuto internazionale che tutto il comparto nucleare (scientifico, tecnico e militare) ha ricevuto, e che lo rende oggi un settore così delicato, ambiguo e cruciale per l'umanità e il suo futuro (si vedano in particolare i paragrafi 2.5 e 3.8).

SCHEDA 1.1

Unità di misura dell'energia

L'energia. Qui e in vari punti di questo saggio può essere importante conoscere le unità di misura che si usano per l'energia. L'unità di misura che forse ha il significato più intuitivo è la *caloria (cal)*, cioè la quantità di calore che si deve fornire a 1 grammo di acqua per aumentare la sua temperatura di 1°C (o la *kilo-caloria*, uguale a mille calorie, necessarie per riscaldare di 1°C un chilogrammo di acqua). Quando venne stabilita, verso la metà dell'Ottocento, l'equivalenza tra calore ed energia, si dovettero unificarne le unità di misura. L'unità di misura dell'energia nel Sistema Internazionale (SI) di unità di misura è il *joule (J)*: in termini concreti e intuitivi, occorre ad esempio l'energia di 1 J per sollevare di 1 metro una massa di 100 grammi ($E = m \cdot g \cdot h$, dove $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ è l'accelerazione di gravità sulla superficie terrestre: per $m = 100 \text{ g} = 0,1 \text{ kg}$ ed $h = 1 \text{ m}$, approssimando $g \approx 10 \text{ m/s}^2$, si ottiene $E = (0,1 \text{ kg}) \cdot (10 \text{ m/s}^2) \cdot (1 \text{ m}) = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 1 \text{ J}$). Si determina sperimentalmente che $1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J}$ (si potrebbe dire, ad esempio, che una massa di 100 grammi che cada da un'altezza di 4.186 metri sarebbe in grado di riscaldare di 1°C 1 kg d'acqua).

La potenza. Quando si considera una qualsiasi macchina, non interessa tanto l'energia che essa sviluppa o consuma, quanto piuttosto l'energia al secondo: un'utilitaria che percorra 1.000 km richiede più energia di un bolide di formula 1 che percorra 1 km, ma è evidente che il secondo consuma molta più energia della prima per ogni secondo. L'energia per ogni secondo si chiama *potenza*, e si esprime nell'unità di misura chiamata *watt (W)*: $1 \text{ W} = 1 \text{ J} / 1 \text{ s}$, cioè 1 J al secondo.

Unità pratiche dell'energia. Oltre alle unità di misura dell'energia che abbiamo discusso, per trattare certi processi in cui sono in gioco energie molto grandi o energie molto piccole è risultato comodo introdurre delle unità di misura pratiche, in termini delle quali i valori numerici risultino più maneggevoli. Ci sono moltissime unità pratiche (come ad esempio i *Tep*, o i *Mtep* usati quando si trattano i fabbisogni energetici di un paese, cioè l'energia equivalente alla combustione rispettivamente di una tonnellata, o di un milione di tonnellate di petrolio).

Multipli e sottomultipli. Prima di discutere quelle più utili per noi, facciamo anche una parentesi per definire i simboli che si usano per i multipli (mille, un milione, un miliardo, ecc) e i sottomultipli (un millesimo, un milionesimo, ecc.) delle unità. Questi simboli sono i seguenti

Sottomultipli		Multipli	
m (milli)	1/mille (10^{-3})	k (chilo)	mille (10^3)
μ (micro)	1/un milione (10^{-6})	M (mega)	un milione (10^6)
n (nano)	1/un miliardo (10^{-9})	G (giga)	un miliardo (10^9)
p (pico)	1/mille miliardi (10^{-12})	T (tera) P (peta)	mille miliardi (10^{12}) 10^{15}

Torniamo alle unità pratiche dell'energia più importanti per noi.

Kilotoni e megatoni. Nel campo delle armi nucleari, la potenza liberata dalle esplosioni si esprime in *kilotoni (kt)* o in *megatoni (Mt)*, definiti come l'energia liberata dall'esplosione rispettivamente di mille tonnellate, o di un milione di tonnellate di esplosivo convenzionale (chimico) equivalente. Per avere un'idea, l'ipotetica fissione completa di 1 kg di uranio-235 libererebbe un'energia di $8 \cdot 10^{13}$ J, equivalente all'esplosione di circa 20.000 tonnellate di tritolo.

Elettronvolt e mega-elettronvolt. Invece, in ogni singolo processo che avviene al livello degli atomi, dei nuclei e delle molecole l'energia in gioco è estremamente piccola rispetto alle energie tipiche dei processi macroscopici: questi infatti coinvolgono numeri enormi di atomi o di molecole, per fissare le idee dell'ordine di grandezza del *numero di Avogadro*, che è il numero di molecole contenute in 2 grammi di idrogeno molecolare (H_2), o in 18 grammi d'acqua (H_2O), ed è un numero enorme, con 23 zeri ($6 \cdot 10^{23}$, seicentomila miliardi di miliardi). Nei singoli processi atomici o molecolari sono in gioco energie dell'ordine di 10^{-19} J (numero decimale del tipo 0,... seguito da 19 zeri prima della prima cifra diversa da zero: un decimo di un miliardesimo di un miliardesimo). Per definire un'unità di misura pratica di queste energie, poiché nei processi atomici e molecolari sono in gioco elettroni, è risultato utile riferirsi all'energia acquistata da un elettrone che venga accelerato attraverso la differenza di potenziale di 1 Volt: questa unità viene chiamata *volt elettrone* (ma ormai si usa il termine americano *elettronvolt, eV*). Poiché una carica elettrica q accelerata attraverso la differenza di potenziale ΔV acquista un'energia $E = q \cdot \Delta V$, l'elettronvolt vale in J (la carica elettrica dell'elettrone vale $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb)

$$1 \text{ eV} = e \cdot 1 \text{ V} = (1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}) \cdot (1 \text{ V}) = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J.}$$

Le energie in gioco nei singoli processi atomici o molecolari sono di solito dell'ordine dell'eV, o delle decine di eV.

Abbiamo visto che invece nei singoli processi nucleari sono in gioco energie dell'ordine di un milione di volte più grandi di quelle in dei processi atomici: per questi si usa un multiplo dell'eV, il *mega-elettronvolt (MeV)*, che vale un milione di eV

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J.}$$

Le energie in gioco nei singoli processi nucleari sono di solito dell'ordine del MeV, o delle decine o centinaia di MeV.

Raccogliamo in una tabella le principali unità di misura dell'energia che qui ci interessano ed i fattori di conversione dall'una all'altra.

TABELLA : fattori di conversione tra varie unità di misura dell'energia

	joule	cal	kwh	eV	MeV
joule (J)	1	0,239	$2,8 \cdot 10^{-7}$	$6,2 \cdot 10^{18}$	$6,2 \cdot 10^{12}$
caloria (cal)	4,186	1	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{19}$	$2,5 \cdot 10^{13}$
kilowattora (kwh)	$3,6 \cdot 10^6$	$8,6 \cdot 10^5$	1	$2,25 \cdot 10^{25}$	$2,25 \cdot 10^{19}$
elettronvolt (eV)	$1,6 \cdot 10^{-19}$	$3,8 \cdot 10^{-20}$	$4,5 \cdot 10^{-26}$	1	10^{-6}
MeV	$1,6 \cdot 10^{-13}$	$3,8 \cdot 10^{-14}$	$4,5 \cdot 10^{-19}$	10^6	1
kilotone (kt)	$4,1 \cdot 10^{12}$	$\approx 10^{12}$			
megatone (mt)	$4,1 \cdot 10^{18}$				

d - Neutroni e stabilità dei nuclei

Passiamo ora ad esaminare la natura e le proprietà di questa forza nucleare attrattiva e la stabilità dei nuclei. Qui entrano in gioco i neutroni. Vi è un concetto fisico che può risultare un poco ostico: se si prescinde dalla carica elettrica, protone e neutrone sarebbero una stessa particella, che viene chiamata *nucleone*, la quale genera su un altro nucleone una forza nucleare sempre attrattiva. L'*interazione elettrica* e l'*interazione nucleare* sono quindi molto diverse, sia per l'intensità, sia per le forze che generano: l'*interazione elettrica* genera una repulsione tra due protoni, mentre non genera nessuna forza tra due neutroni, o tra un protone e un neutrone; per l'*interazione nucleare*, invece, *due protoni, o due neutroni, o un protone e un neutrone si attirano sempre con la stessa forza*⁵¹, *molto più intensa della repulsione elettrica*. Vediamo allora perché i neutroni sono necessari a garantire la stabilità dei nuclei, e in che modo.

e - Numero dei neutroni, isotopi di un elemento

La forza nucleare possiede ulteriori proprietà importanti, alle quali accenniamo brevemente. Mentre la forza elettrica ha raggio d'azione praticamente infinito (cioè agisce tra due cariche anche quando esse sono molto lontane tra loro, anche se la sua intensità diminuisce con la distanza), la forza nucleare ha un raggio d'azione molto piccolo, cioè agisce solo quando le particelle nucleari si trovano a distanze molto piccole: un protone o un neutrone esercitano l'attrazione nucleare solo sui protoni ed i neutroni che si trovano dentro il nucleo, e nelle loro immediate vicinanze. Questa proprietà ha alcune conseguenze di importanza fondamentale.

In primo luogo, i soli protoni non sarebbero in grado di legarsi vincendo la repulsione elettrica: i neutroni sono dunque essenziali per fornire la "colla" nucleare mancante.

Ma, in secondo luogo, le proprietà delle forze nucleari sono tali che i neutroni non riescono comunque a tenere insieme un numero di protoni maggiore di 92. In altre parole, le proprietà chimiche degli elementi dipendono dall'interazione elettrica tra gli elettroni esterni al nucleo, ma *il fatto che esistono solo 92 elementi chimici (atomi, o meglio nuclei, stabili) dipende dalle proprietà delle forze nucleari, che non consentono nuclei stabili con più di 92 protoni*.

Ma vi è un'altra proprietà di fondamentale importanza. Se per un dato elemento chimico il numero di protoni nel nucleo è fissato ed uguale al numero atomico Z (numero di elettroni), il numero dei neutroni non è invece fissato in modo rigido. Risulta anzi, per le proprietà delle forze nucleari, che per ogni elemento chimico Z possono esistere un certo numero di nuclei diversi, che differiscono tra di loro per il numero dei neutroni: essi si dicono *isotopi* di quell'elemento. Il numero totale dei Z protoni e degli N neutroni di un isotopo determinato si chiama la sua *massa atomica*⁵², o *numero di massa* $A=Z+N$ (abbiamo visto che la massa dell'atomo è praticamente concentrata nel suo nucleo). Per un generico elemento chimico, che indichiamo col simbolo X , di numero atomico Z , l'isotopo con numero di massa A viene indicato con il simbolo



Noi comunque useremo spesso per semplicità il simbolo dell'elemento chimico seguito dal numero di massa dell'isotopo ($X-A$), come specificheremo meglio tra breve.

Per ciascun elemento chimico Z esiste un numero relativamente limitato di isotopi, per i quali il numero dei neutroni può variare di alcune unità. Prima di procedere facciamo alcuni esempi per spiegarci meglio.

L'elemento chimico più semplice è l'idrogeno (H), che ha un solo elettrone esterno ($Z = 1$), e il cui nucleo è costituito solo da un protone ($N = 0$, $A = 1$). L'idrogeno si presenta in natura con due isotopi stabili: quello testé specificato, ${}^1_1 H$, che costituisce la quasi totalità dell'idrogeno presente in natura, e il *deuterio* (0,015 % dell'idrogeno naturale), che si indica con il simbolo D, il cui nucleo è composto da un protone e un neutrone ($N = 1$, $A = 2$), e corrisponde a ${}^2_1 H$. Un terzo isotopo, il *trizio*, è prodotto artificialmente ed è instabile: si indica con il simbolo T, il suo nucleo è composto da un protone e due neutroni ($N = 2$, $A = 3$), e corrisponde a ${}^3_1 H$; come vedremo, il trizio ha una grande importanza per le armi nucleari (Appendice 7.1).

L'elemento successivo è l'elio (He), con $Z = 2$ (due protoni): esso si presenta come He-4, il cui nucleo è composto da due protoni e due neutroni ($N = 2$, $A = 4$), ${}^4_2 He$, ma presenta anche il rarissimo isotopo He-3, con due protoni e un neutrone ($N = 1$, $A = 3$), ${}^3_2 He$ (si noti che esso possiede, con buona approssimazione, la stessa massa atomica A del trizio, ma il nucleo di quest'ultimo è composto di un neutrone e due protoni).

⁵¹ Questa proprietà fu verificata dagli esperimenti molto accurati eseguiti nel 1935 da Merle Tuve, il cui ruolo controcorrente abbiamo ricordato nel Par. 1.1.

⁵² A volte chiamata *peso atomico*: il termine è improprio, poiché il peso è la forza $p=mg$ che una massa m subisce per effetto della gravità, e quindi dipende dal particolare campo gravitazionale in cui la massa m è immersa ($g=9,8 \text{ m/s}^2$ è l'accelerazione gravitazionale nel campo gravitazionale della Terra, sulla Luna è più piccola).

Come ultimo esempio passiamo all'elemento naturale più pesante, l'uranio (U), con $Z=92$, che riveste una grande importanza nell'energia nucleare, civile e militare: l'uranio presente in natura è composto per il 99,3 % dall'isotopo U-238, con $A=238$, ${}^{238}_{92}\text{U}$, il cui nucleo contiene 92 protoni e 146 neutroni; e per lo 0,7 % dall'isotopo U-235, con $A=235$, ${}^{235}_{92}\text{U}$, con 92 protoni e 143 neutroni, che è l'isotopo importante per gli usi militari ed energetici.

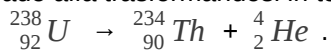
f - Isotopi instabili (radioisotopi), decadimenti radioattivi naturali e artificiali

Per ogni elemento chimico (cioè numero di protoni Z determinato) solo pochi numeri diversi di neutroni (in genere uno o due isotopi) possono dare configurazioni nucleari stabili (ad esempio, per l'idrogeno solo l'isotopo fondamentale e il deuterio). Gli altri numeri possibili di neutroni (gli altri isotopi) non garantiscono di solito la stabilità della struttura nucleare, cioè danno luogo a configurazioni instabili (nel caso dell'idrogeno, il trizio). Questi isotopi instabili tendono a portarsi in una configurazione di energia minore più stabile, cioè a diseccitarsi, o a disintegrarsi: quando questa configurazione stabile viene raggiunta attraverso l'espulsione di particelle dal nucleo (disintegrazione), essa corrisponde ad un isotopo di un elemento chimico diverso da quello di partenza (Z diverso); altre volte, come vedremo, essa corrisponde solo ad una semplice diseccitazione, una redistribuzione interna dei protoni e dei neutroni in una configurazione più stabile, con emissione della sola energia di eccitazione. Accade a volte che si arrivi alla configurazione di energia più bassa possibile, e quindi definitivamente stabile, attraverso una catena di diseccitazioni successive (cioè di isotopi intermedi di elementi diversi). Gli isotopi instabili sono chiamati *radioisotopi*, e i processi che li portano verso stati più stabili si chiamano *decadimenti radioattivi*⁵³, poiché avvengono mediante l'emissione di particelle ed energia (a volte, come si è detto, solo di energia).

Gli isotopi naturali (cioè quelli esistenti in natura: vedremo che le cose possono essere molto diverse per gli isotopi creati artificialmente) presentano tre tipi di decadimenti radioattivi, che hanno ricevuto storicamente i nomi di *decadimenti alfa*, *beta* e *gamma*. Analizziamoli separatamente.

1) *Decadimento alfa*. Il radioisotopo decade (si disintegra) emettendo quella che storicamente era stata chiamata una *particella alfa*, composta di due protoni e due neutroni (corrispondente quindi ad un nucleo di elio, He-4), la quale ovviamente si porta via anche una determinata quantità di energia. Quello che rimane è chiaramente un nucleo di un elemento diverso da quello iniziale: poiché escono due protoni, il nucleo si trasforma nel nucleo di un elemento di numero atomico $Z-2$; l'isotopo corrispondente è quello con due neutroni in meno di quello iniziale ($N-2$), quindi in totale di numero di massa $A-4$.

Facciamo un esempio: il decadimento alfa interessa per lo più nuclei di elementi pesanti. L'U-238, isotopo dell'uranio che abbiamo citato, decade alfa trasformandosi in torio



2) *Decadimento beta*. In questo processo il radioisotopo si diseccita emettendo un elettrone. Ma i nuclei atomici non contengono elettroni: com'è dunque possibile che possano emetterne? Il problema fu risolto da Enrico Fermi, il quale stabilì anche che questo processo radioattivo non è dovuto né alle forze elettriche né a quelle nucleari, ma ad un nuovo tipo di interazione, che è stata chiamata *interazione debole*, essendo di intensità inferiore ad entrambe le precedenti⁵⁴. Questa interazione è responsabile della disintegrazione del neutrone, che è una particella instabile che decade in un tempo medio di 15 minuti in un protone ed un elettrone (le masse delle particelle sono compatibili con questo processo): $n \rightarrow p + e$. Si deve osservare che quando sono all'interno dei nuclei stabili i neutroni non possono decadere: questo è dovuto ad una proprietà fondamentale di queste particelle, il *principio di esclusione di Pauli*, che vieta a due particelle *identiche* (due elettroni, o due neutroni, o due protoni) di trovarsi in un medesimo stato. Secondo la meccanica quantistica le particelle in un sistema fisico legato (come un atomo, un nucleo, o una molecola) hanno a disposizione livelli energetici discreti: due particelle *identiche* non possono dunque trovarsi sul medesimo livello⁵⁵. In un nucleo stabile i neutroni non possono disintegrarsi perché i protoni che risulterebbero dal decadimento

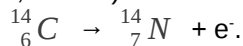
⁵³ Questo termine deriva dal fatto che questi fenomeni furono scoperti alla fine dell'800 da Becquerel per il *radio*: egli si avvide, quasi casualmente, che il radio emette delle radiazioni, a quel tempo misteriose, che impressionano una lastra fotografica, da cui appunto il nome *radioattività*.

⁵⁴ Con questa, i fisici attualmente riconoscono la presenza in natura di quattro interazioni fondamentali: l'*interazione gravitazionale*, l'*interazione debole*, l'*interazione elettromagnetica* e l'*interazione nucleare* (che viene anche chiamata *interazione forte*, perché è la più intensa di tutte). Uno dei sogni dei fisici è di elaborare una teoria nella quale tutte le interazioni fondamentali siano unificate, cioè siano ricondotte a manifestazioni di un'unica interazione fondamentale. La prima unificazione venne realizzata alla fine del XIX° secolo dalla teoria elettromagnetica di Maxwell, che unificava appunto i processi elettrici e magnetici. Einstein, dopo la formulazione della teoria della relatività generale che riconduceva l'interazione gravitazionale alle proprietà geometriche dello spazio quadri-dimensionale, si sforzò di formulare una teoria unificata dei processi gravitazionali ed elettromagnetici, ma non vi riuscì: ancora oggi l'interazione gravitazionale è quella che presenta le più grosse difficoltà in questa direzione. Negli anni '80 si giunse invece ad una teoria unificata delle interazioni elettromagnetiche e deboli (*teoria elettrodebole* di Weinberg, Glashow e Salam, Premio Nobel 1979).

trovano tutti i livelli di energia inferiore per i protoni già occupati. Un nucleo eccitato può disintegrarsi secondo il decadimento beta perché il protone che risulta trova un livello libero in cui andare, mentre l'elettrone viene espulso.

In un decadimento beta il numero di neutroni del nucleo diminuisce di un'unità ($N - 1$), mentre il numero dei protoni aumenta di un'unità (un neutrone si trasforma in protone): per cui il nucleo risultante è l'elemento $Z + 1$, e precisamente il suo isotopo con lo stesso valore di A del nucleo di partenza.

Facciamo un esempio. Il carbonio-14 ($Z = 6, A = 14$) decade beta, trasformandosi in azoto



Questo processo è alla base del metodo di datazione di un reperto organico, utilizzato ad esempio in archeologia e in geologia.

Vi sono alcuni aspetti ulteriori importanti del decadimento beta. In primo luogo, quello discusso si chiama propriamente decadimento *beta-meno* (β^-). Ma esiste anche il decadimento *beta-più* (β^+), nel quale viene invece emesso un *elettrone positivo*, o *positrone*, cioè una particella che ha la stessa massa dell'elettrone, ma la stessa carica di segno opposto, cioè positiva. In questo decadimento è un protone a disintegrarsi in un neutrone più un positrone, per cui il nucleo di partenza si trasforma nell'elemento $Z - 1$, nell'isotopo con lo stesso valore di A .

Un secondo aspetto importante è che quando si studiò il bilancio energetico di questi processi ci si avvide che gli elettroni (o i positroni) emessi non hanno la stessa energia: sembrava cioè che l'energia non fosse conservata nel decadimento. La questione fu invece risolta ipotizzando l'esistenza e l'emissione di una nuova particella, di massa zero, che porta con se parte dell'energia liberata nel decadimento: questa particella venne chiamata *neutrino*, e la sua esistenza venne di fatto verificata sperimentalmente più tardi (oggi si conoscono addirittura vari tipi diversi di neutrini, e ad essi si attribuisce un ruolo molto importante nelle teorie astrofisiche e cosmologiche). In particolare, per motivi sui quali non ci addentriamo, nel decadimento β^- vengono emessi un elettrone ed un anti-neutrino, e nel decadimento β^+ vengono emessi un positrone ed un neutrino.

3) *Decadimento gamma*. Vi sono degli isotopi che corrispondono semplicemente ad una configurazione interna eccitata, i quali decadono in una configurazione energetica stabile emettendo l'energia di eccitazione sotto forma di sola radiazione elettromagnetica (un *fotone*, in questo caso un *raggio gamma*). Poiché, come abbiamo visto, le energie in gioco nei processi nucleari sono molto più grandi di quelle nei processi atomici, i fotoni emessi nei decadimenti gamma dei nuclei hanno energie molto grandi: per la relazione di Einstein tra l'energia E e la frequenza f (numero di vibrazioni al secondo) di un fotone – $E = hf$, dove $h = 6 \cdot 10^{-34}$ J·s è la costante di Planck – questo comporta che i raggi gamma hanno frequenza molto alta⁵⁶.

⁵⁵ Il principio di esclusione applicato agli elettroni esterni dell'atomo spiega le proprietà chimiche degli elementi. Infatti, anche gli elettroni possono trovarsi solo in determinati livelli energetici discreti. Poiché essi ubbidiscono al principio di esclusione, due elettroni non possono occupare lo stesso stato quantico (in realtà la cosa è un po' più complessa, per il fatto che l'elettrone si comporta come una minuscola trottola, cioè possiede un momento angolare intrinseco, o *spin*, che può avere solo due valori, cioè l'elettrone può ruotare solo in uno dei due sensi con momento angolare di valore definito: su ogni livello, o stato, quantico si possono trovare al massimo due elettroni con valori opposti dello spin). Ne segue che all'aumentare del numero Z di elettroni degli atomi, essi devono andare a occupare livelli di energia via via crescente: essi riempiono così via via strati successivi, ciascuno dei quali può contenere un numero massimo determinato di elettroni, e questo spiega la periodicità delle proprietà chimiche dei 92 elementi (*Tavola Periodica di Mendeleev*). L'elemento chimico per il quale uno strato elettronico viene completato corrisponde al riempimento di un periodo della tavola di Mendeleev. L'elettrone aggiuntivo che fa passare all'elemento chimico successivo deve disporsi su un nuovo strato, aprendo così un nuovo periodo della tavola di Mendeleev: le proprietà chimiche di questo elemento risultano analoghe a quelle degli elementi che aprono il periodo precedente e quello successivo della tavola, poiché anche questi hanno un elettrone singolo in un nuovo strato e gli strati inferiori pieni. Allo stesso modo, anche gli elementi chimici successivi presentano proprietà analoghe a quelli corrispondenti dei periodi precedente e seguente, poiché acquistano via via 2, 3, 4, ecc. elettroni in un nuovo strato, mentre gli strati inferiori sono completi.

⁵⁶ La radiazione elettromagnetica copre tutti i valori possibili delle frequenze. Al crescere della frequenza la radiazione elettromagnetica si classifica grosso modo nelle seguenti porzioni: onde radio, microonde, raggi infrarossi, radiazione visibile (luce), raggi ultravioletti, raggi X e raggi gamma. La relazione di Einstein comporta che i quanti del campo elettromagnetico possiedono un'energia che aumenta proporzionalmente alla frequenza: questo determina gli effetti fisici, o biologici, della radiazione elettromagnetica. I raggi infrarossi riescono ad aumentare solo il moto di agitazione termica delle molecole, per cui hanno un effetto termico. I raggi ultravioletti raggiungono un'energia sufficiente ad eccitare i livelli elettronici delle molecole, e possiedono anche un'azione sterilizzante: come esempio, quando siamo al sole sentiamo caldo per effetto della componente infrarossa della radiazione solare, mentre la "tintarella" ci è data dai raggi ultravioletti, i quali attivano le molecole della melanina (ma possono anche avere effetti cancerogeni limitati agli strati cutanei). I raggi X e gamma rientrano nelle *radiazioni ionizzanti*, perché possiedono energie sufficienti a strappare elettroni dagli atomi: v. Par. *h*.

4) *Radioattività artificiale*. Come abbiamo detto, i tre modi di decadimento precedenti sono quelli dei radioisotopi naturali. Ma dalla nascita dell'era nucleare si sono prodotti un gran numero di *radioisotopi artificiali*, i quali cioè non esistono in natura. Questi radioisotopi hanno composizioni e configurazioni interne molto anomale, e decadono spesso secondo altri processi: uno comune, e particolarmente pericoloso, è l'emissione di neutroni.

g - Tempo di dimezzamento di un campione radioattivo

La disintegrazione di un nucleo instabile è, secondo la meccanica quantistica, un processo per il quale non si può prevedere il momento esatto in cui avverrà, ma si può solo assegnare la *probabilità* che esso avvenga: per cui dopo un certo periodo di tempo si può dire solo qual è la probabilità P che il nucleo si sia disintegrato (ed allora la probabilità che sia ancora intatto è $1 - P$). Può succedere insomma che un isotopo molto instabile (con alta probabilità di disintegrarsi) dopo un certo tempo non si sia ancora disintegrato, mentre un altro isotopo molto meno instabile (con una probabilità più piccola di disintegrarsi) si sia già disintegrato. È un po' la storia dei numeri del lotto. Quando si parla di probabilità bisogna riferirsi a grandi numeri. Se si considera un campione di dimensioni macroscopiche composto di un dato radioisotopo, si può pensare che esso contenga un numero di nuclei dell'isotopo dell'ordine di grandezza del numero di Avogadro, cioè un numero estremamente grande: le leggi della probabilità ci dicono allora con sufficiente certezza (a meno di fluttuazioni, che sono però relativamente molto piccole quando i numeri in gioco sono molto grandi) la frazione dei nuclei originari che si sono disintegrati dopo un dato tempo. Si ottiene così una *legge di decadimento esponenziale*, sulla quale non entriamo in dettagli: il numero di nuclei instabili non decaduti nel campione (riferiti al loro numero totale iniziale) diminuisce con il tempo secondo una legge esponenziale. La maggiore o minore rapidità con cui si disintegra un determinato radioisotopo si esprime definendo, da questa legge di decadimento, il *tempo (o periodo) di dimezzamento* τ , che è il tempo necessario perché si disintegrino la metà dei nuclei contenuti inizialmente in un determinato campione radioattivo⁵⁷.

Per esempio, il trizio ha un tempo di dimezzamento di circa 12 anni: se ad un certo istante si ha un campione di 1 g di trizio, dopo 12 anni la metà dei nuclei si è disintegrata, e ne resta quindi mezzo grammo. Vi sono radioisotopi con un tempo di dimezzamento brevissimo, dell'ordine di minuti o di secondi, quindi molto instabili, e radioisotopi con tempo di dimezzamento estremamente lungo (anche superiore all'età dell'universo): ad esempio, il plutonio si dimezza in un tempo di ben 24.000 anni, l'U-238 in ben 4,5 miliardi di anni.

h - Radiazioni ionizzanti e loro effetti biologici

Abbiamo detto che la pericolosità biologica dei processi nucleari è dovuta al fatto che il funzionamento dell'organismo si basa su processi chimici e non è quindi in grado di distinguere e selezionare i diversi isotopi degli elementi chimici: esso quindi assorbe indifferentemente isotopi naturali e stabili, o radioisotopi eventualmente presenti. Ma la disintegrazione di questi ultimi libera energie dell'ordine di un milione di volte maggiore delle energie in gioco nei processi chimici, e quindi nei processi metabolici. Tale energia viene emessa o sotto forma di radiazione elettromagnetica, o come energia delle particelle espulse nei decadimenti radioattivi: quando tali radiazioni (raggi X e gamma) e particelle (elettroni, particelle alfa, neutroni) interagiscono con i tessuti di un organismo vivente, sono in grado di spezzare legami chimici e molecole, e di ionizzare gli atomi (per questo si chiamano radiazioni ionizzanti). Le cellule viventi colpite possono venire uccise, oppure possono subire modifiche dei meccanismi di divisione e replicazione cellulare, dando luogo a mutazioni genetiche e/o all'insorgenza di tumori o leucemie; se vengono lesionate le cellule riproduttive, delle ovaie o dei testicoli, la prole può ereditare anomalie. Se viene colpito il materiale genetico vengono indotte mutazioni. Dal punto di vista biologico e sanitario le radiazioni ionizzate hanno quindi effetti cancerogeni, mutageni, o teratogeni (procreazione di esseri affetti da deformazioni e mostruosità).

L'intensità delle radiazioni a cui è sottoposto un determinato soggetto, o presenti in un ambiente, dipende dall'*attività* della sorgente radioattiva, cioè dal numero di radiazioni che essa emette al secondo: questa si esprime in un'unità molto semplice chiamata *Becquerel (Bq)*: l'attività di 1 Bq corrisponde a un decadimento al secondo dei nuclei del campione, cioè ad una radiazione emessa al secondo⁵⁸ (per le

⁵⁷ Se all'istante $t=0$ un campione contiene un numero N_0 di nuclei radioattivi il cui tempo di dimezzamento sia τ , il numero $N(t)$ di essi non ancora decaduti dopo un intervallo di tempo t diminuisce con la legge esponenziale:

$$N(t) = N_0 e^{-0,693 \cdot t / \tau} .$$

Quanto più lungo è il tempo di dimezzamento τ , tanto più lento è il decadimento, e tanto più lento il ritmo a cui N diminuisce.

⁵⁸ Viene ancora usata spesso una vecchia unità di misura dell'attività, il *Curie (Ci)*: $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$, cioè 37 miliardi di disintegrazioni al secondo (un numero che può sembrare strano, ma fu scelto perché corrisponde all'attività di un grammo di *radio*). Poiché si tratta di un'unità piuttosto grande, si usano spesso i sottomultipli, come il *milli-Curie (1*

considerazioni probabilistiche fatte al paragrafo precedente si tratta naturalmente di un numero medio). L'attività di una data sorgente radioattiva dipende da un lato dalla sua consistenza, cioè dal numero totale di radioisotopi che essa contiene, e dall'altra dalla rapidità (la probabilità) con cui questi si disintegrano: essa è cioè inversamente proporzionale al tempo di dimezzamento del radioisotopo.

Le diverse radiazioni e particelle ionizzanti possiedono proprietà molto diverse, e provocano quindi effetti diversi. Le *particelle alfa* (nuclei di elio) sono molto pesanti e vengono arrestate da un foglio di carta o dagli strati cutanei superficiali. Gli *elettroni* (raggi beta) sono invece molto leggeri, dotati di carica elettrica, e penetrano più in profondità, interagendo con gli elettroni esterni degli atomi e delle molecole. I fotoni (*raggi X* e *gamma*) sono invece pura radiazione elettromagnetica, priva di massa, e sono in grado di eccitare fortemente i livelli elettronici e quelli nucleari. I *neutroni* sono molto pericolosi, perché non hanno interazioni con le cariche elettriche, possono penetrare direttamente nei nuclei, provocando disintegrazioni e trasmutazioni.

Per valutare gli effetti biologici e sanitari è fondamentale distinguere l'*esposizione esterna*, quando il soggetto o l'organo si trova in presenza di sorgenti radioattive o a radiazioni che lo colpiscono dall'eterno, dall'*esposizione interna*, consistente invece nell'inalazione di sostanze radioattive disperse nell'ambiente, o nella loro ingestione quando entrano nella catena alimentare attraverso il terreno, le acque, le piante e gli animali. Nei due casi gli effetti delle diverse radiazioni ionizzanti sono molto differenti, e in certi casi opposti. Nel caso di *esposizione esterna* le particelle alfa possono generare tumori cutanei, mentre le altre radiazioni possono modificare molecole biologiche o cellule interne all'organismo, generando diversi tipi di tumori e leucemie. Nel caso di *esposizione interna*, invece, le particelle alfa diventano estremamente pericolose, poiché vengono assorbite completamente dai tessuti interni (ad esempio, gli alveoli polmonari), provocando tumori in organi vitali (v. Tabella).

Radiazione	Rischio interno	Rischio esterno
Alfa	Elevato	Basso
Beta (elettroni)	Moderato	Moderato
Gamma	Basso	Elevato
Neutroni	Basso	Elevato

I diversi organi interni presentano sensibilità diversa alle radiazioni. Vi sono radioisotopi di elementi che per i meccanismi metabolici si concentrano in determinati organi e sviluppano lì i loro effetti. Alcuni esempi particolarmente importanti sono i seguenti. La tiroide assorbe lo iodio, per cui se è presente l'isotopo I-131, radioattivo con un tempo di dimezzamento di circa una settimana, esso si concentra in quest'organo e provoca tumori alla tiroide: si tratta, ad esempio, di una delle conseguenze sanitarie più gravi dell'incidente di Chernobyl. Lo stronzio si concentra invece nelle ossa, e se è presente l'isotopo radioattivo Sr-90, questo provoca tumori e leucemie (il midollo osseo produce i globuli rossi del sangue).

Aggiungiamo un esempio che esamineremo in maggiore dettaglio nel Cap. 6, il problema così attuale e drammatico del cosiddetto *uranio depleto*, DU (o *uranio impoverito*), cioè quello che rimane dopo il processo di arricchimento dell'uranio naturale, o il ritrattamento del combustibile esaurito delle centrali nucleari. Esso è dotato di radioattività alfa, per cui la sua presenza nell'ambiente circostante, ed anche la sua manipolazione con determinate precauzioni e protezioni, possono risultare relativamente innocue. Il problema è invece completamente diverso quando l'esplosione di un proiettile a DU produce particelle microscopiche radioattive: la loro inalazione, o la dispersione in matrici ambientali o biologiche legate alla catena alimentare o ai cicli delle acque, provoca invece il deposito del DU nei tessuti interni, dove si sommano sinergicamente la radiotossicità e la fortissima tossicità chimica dell'uranio.

i - Dose di radiazione assorbita e equivalente di dose

La *protezionistica* è la disciplina che si occupa di stabilire e misurare le quantità di radiazioni assorbite da un organismo, o da un organo interno, per cercare di determinarne le conseguenze sanitarie. La quantità che abbiamo definito poco sopra, l'*attività*, è riferita alla sorgente radioattiva, cioè misura il flusso di radiazioni che essa emette: è un primo dato molto importante per stabilire la pericolosità di una sorgente o di un ambiente radioattivo (per esempio, ai tempi dell'incidente di Chernobyl, e in caso di incidente ad un reattore nucleare con fuoriuscita di radioattività, o nel caso del *fall-out* radioattivo dei test nucleari, è importante sapere il flusso di radiazioni presenti in un ambiente). Per quanto riguarda invece il soggetto che è esposto a radiazioni ionizzanti, bisogna determinare in primo luogo la quantità di esse che viene effettivamente arrestata, e quindi assorbita, all'interno dell'organismo, e soprattutto l'effetto fisico che queste radiazioni assorbite generano.

Si definisce così in primo luogo la *dose di radiazioni assorbita*, cioè l'energia che le radiazioni cedono effettivamente all'organismo, o all'organo esposto: la dose assorbita si esprime in un'unità di misura detta

$mCi = 10^{13} Ci$, il *micro-Curie* ($1 \mu Ci = 10^6 Ci$), ecc.

gray (Gy), che corrisponde all'energia di 1 J assorbita da 1 kg di materia⁵⁹. È il caso di fare un'osservazione che aiuta a capire meglio i meccanismi con cui agiscono le radiazioni. Di solito l'energia ceduta ad un organo da un flusso di radiazioni è estremamente piccolo dal punto di vista macroscopico: per esempio, l'innalzamento di temperatura dell'organo è di solito assolutamente trascurabile. Il problema però è che questa energia viene ceduta in singole interazioni con atomi, molecole o nuclei, in quantità che, come abbiamo visto, sono molto grandi rispetto alle energie in gioco nei comuni processi chimici.

Il concetto di dose non tiene però conto né dei diversi effetti dei vari tipi di radiazione, né della diversa sensibilità dei vari organi. Questi effetti differenziati si introducono attraverso appositi fattori, sui quali non ci dilunghiamo, portando all'*equivalente di dose*, che si misura in *sievert* (Sv), che è sempre un'energia per unità di materia, corretto però quantitativamente nel modo suddetto⁶⁰.

All'aumentare della dose assorbita gli effetti su un organismo diventano sempre più rapidi e devastanti, e al di sopra di certi limiti si verifica la morte sicura in un tempo molto breve (abbiamo accennato alla morte di Louis Slotin durante il "progetto Manhattan).

La protezione cerca di stabilire dei *limiti di dose*, secondo il concetto che se l'equivalente di dose assorbito è al di sotto di certi limiti, gli effetti biologici sarebbero limitati o trascurabili (oggi si è diffusa la logica del "rischio accettabile"); si distinguono in particolare limiti di dose per la popolazione in generale, o per i lavoratori addetti, per i quali i limiti consentiti sono più elevati. Secondo il parere di chi scrive, si tratta di una procedura, forse necessaria per la diffusione dei processi nucleari (in particolare per accertamenti medici), ma discutibile. Nel caso di sostanze cancerogene non esiste infatti una soglia: abbassando la dose di solito diminuisce la probabilità di contrarre un tumore, ma essa rimane comunque diversa da zero. Oggi si sta diffondendo quello che viene chiamato il "principio di precauzione", che ha un grande valore visto il crescente bombardamento di sostanze nocive a cui sono soggetti gli organismi viventi e l'ambiente naturale. Nel caso delle radiazioni ionizzanti, in particolare, non è ancora ben stabilito l'effetto delle piccole dosi di radiazioni. Si tenga presente che i limiti di dose vengono stabiliti riferendosi soprattutto ai due grandi "esperimenti" fatti sugli esseri umani, ossia le bombe di Hiroshima e Nagasaki, e la continua revisione dell'analisi delle conseguenze di queste esplosioni ha condotto nel corso degli anni a periodiche correzioni dei limiti di dose, sempre verso il basso!

1 - L'energia di legame dei nuclei: fissione di nuclei pesanti e fusione dei nuclei leggeri

Con questo chiudiamo l'argomento della radioattività e ritorniamo alle proprietà dei nuclei e alle loro applicazioni, per introdurre ulteriori aspetti, e discutere processi di importanza fondamentale per il presente saggio, cioè la *fissione* e la *fusione* dei nuclei.

Finora non ci siamo interrogati sulla natura e le proprietà dell'energia di legame dei nuclei, ma ora è necessario dire qualcosa di più. I nucleoni sono trattenuti all'interno del nucleo da un'*energia di legame*, che corrisponde all'energia che occorrerebbe fornire al nucleo per separare tra loro tutti i protoni e i neutroni (essa non si definisce solo per i nuclei: vi è ad esempio l'energia di legame degli elettroni esterni negli atomi, o l'energia necessaria per estrarre un elettrone da un metallo, o semplicemente per fare uscire una palla da una buca nel terreno). Vediamo intanto il modo peculiare in cui si manifesta, e si misura, l'energia di legame di un nucleo. Da quanto abbiamo detto in precedenza, risulta chiaro che l'energia di legame nei nuclei è molto più grande di quella degli elettroni nell'atomo. La relazione di Einstein tra massa ed energia citata nella Scheda 1.2 comporta allora che un'energia di legame così grande si manifesti in un *difetto di massa* $\Delta m = E/c^2$ tutt'altro che indifferente: esso si misura come differenza tra la somma delle masse di tutti i protoni e i neutroni liberi e la massa del nucleo, in cui una piccola frazione della massa si è trasformata in energia di legame (quando l'energia di legame è più piccola, come nella struttura degli atomi e delle molecole, il corrispondente difetto di massa è così piccolo che non può essere misurato).

L'energia di legame (o il corrispondente difetto di massa) varia da un nucleo all'altro, con un andamento generale che ha grandi conseguenze pratiche. Per comprenderle è necessario fare un'ulteriore distinzione. L'energia di legame dei nuclei aumenta al crescere del numero totale dei nucleoni (cioè al crescere di A): è abbastanza intuitivo infatti che per tenere "incollati" un numero maggiore di nucleoni occorra più energia. Si va dal valore zero per il nucleo dell'idrogeno, costituito da un solo protone, a circa 2.000 MeV per il nucleo più pesante, l'U-238. Questo vale per l'*energia di legame totale* dei nuclei. Ma la stabilità di un nucleo non è in realtà determinata da questa: non tutti i nucleoni di un nucleo infatti sono legati con la stessa energia, i nucleoni più esterni sono meno legati di quelli interni (che risentono della forza nucleare attrattiva da tutte le parti), e sono quindi i più soggetti a sfuggire dal nucleo (si può fare un paragone con l'evaporazione delle molecole dalla superficie dell'acqua, poiché le molecole superficiali sono meno legate di quelle all'interno⁶¹; analogamente, gli elettroni esterni in un atomo hanno energie di legame diverse, quelli negli strati interni sono più legati di quelli negli strati esterni). Bisogna allora definire l'*energia di legame per nucleone*, cioè l'energia necessaria per strappare un *nucleone* da un nucleo. Un nucleo instabile (radioattivo) presenta una

⁵⁹ Precedentemente si usava l'unità detta *rad*: 1 rad = 100 Gy.

⁶⁰ Precedentemente si usava l'unità detta *rem*: 1 rem = 100 Sv.

⁶¹ In effetti questo paragone non è affatto peregrino, poiché esiste un "modello a goccia" dei nuclei.

piccola energia di legame per nucleone, il che significa che un nucleone può sfuggire abbastanza facilmente: quando il nucleo si disintegra, dà luogo ad un nucleo più stabile perché dotato di una maggiore energia di legame per nucleone (cioè i suoi nucleoni sono più legati). Il fatto che a volte escano gruppi di nucleoni, come nel decadimento alfa, è dovuto al fatto che questi gruppi sono strutture particolarmente stabili all'interno dei nuclei.

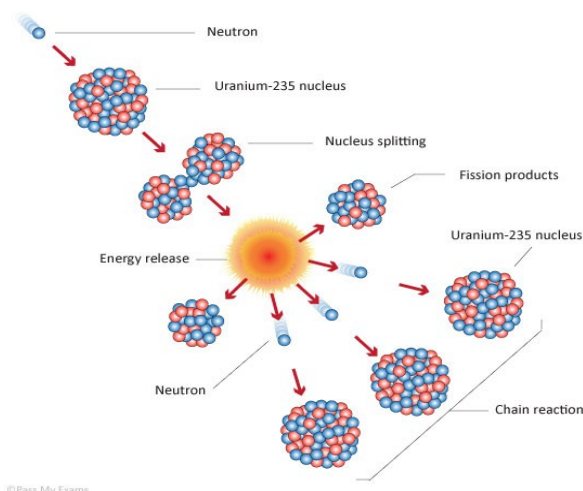
L'energia di legame per nucleone ha un andamento caratteristico con la massa A dei nuclei: essa infatti risulta massima per i nuclei degli elementi di numero di massa intermedio (attorno ad $A = 60$, nella regione del ferro, $Z = 26$), che sono quindi i nuclei più stabili. Mentre diminuisce sia al diminuire che al crescere di A.

Da questo deriva una conseguenza di enorme importanza: si libera energia in due processi, o quando due nuclei leggeri si fondono insieme formando un nucleo più pesante, oppure quando un nucleo pesante si spezza generando due nuclei di massa intermedia. Il primo processo si chiama *fusione nucleare*, il secondo *fissione nucleare*.

m - Fissione dell'uranio, reazione a catena

Se un nucleo pesante si spezza in due nuclei più leggeri, l'energia di legame per nucleone nei nuclei finali è maggiore che nel nucleo iniziale: il processo, chiamato *fissione*, libera quindi energia. Esso si verifica quando un nucleo di U-235, o di Pu-239 assorbe un neutrone: la fissione di un nucleo libera un'energia di circa 200 MeV. Questi isotopi si dicono *fissili*. Poiché la divisione del nucleo avviene in modo più o meno casuale, i due isotopi finali non hanno in generale una struttura stabile, ma sono isotopi altamente radioattivi, che spesso non esistono in natura.

La fissione presenta un'altra proprietà fondamentale. Ogni nucleo che si spezza genera, oltre a generare i due nuclei più leggeri, emette un numero di neutroni tra 2 e 3 (a seconda, ovviamente, di come il processo avviene, cioè di quali nuclei finali esso genera). Questo fatto ha reso possibile la *reazione a catena*: se più di uno, in media, dei neutroni emessi va a spezzare altri nuclei, il numero di fissioni si moltiplica vertiginosamente, cioè la reazione a catena *diverge* (si dice che il *fattore di moltiplicazione* dei neutroni è maggiore di uno). Una condizione fondamentale perché la maggior parte dei neutroni prodotti provochi altre fissioni anziché sfuggire dal materiale fissile è che la massa di questo sia superiore ad una determinata *massa critica*.



Il processo di reazione a catena *non controllata* (fattore di moltiplicazione dei neutroni *molto* maggiore di uno) viene realizzato ed utilizzato nelle *bombe nucleari a fissione*. La massa critica di uranio o di plutonio dipende dal grado di arricchimento e da varie caratteristiche fisiche e geometriche della testata: i valori delle masse critiche sono segreti, ma si aggirano su qualche kg; essi dipendono anche dalla densità del materiale, ossia da un'eventuale compressione a cui venga sottoposto.

Per capire l'enorme potere esplosivo di una bomba nucleare si può eseguire un semplice calcolo dell'energia liberata dall'ipotetica fissione completa di 1 kg di uranio (supposto puro, cioè solo U-235: v. sottoparagrafo n). In 1 kg di uranio vi sono all'incirca $2,5 \cdot 10^{24}$ atomi; se ogni fissione libera 200 MeV, si ottiene un'energia totale ($1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$, v la Tabella nella Scheda 1.1)

$$E = (200 \text{ MeV}) \cdot (2,5 \cdot 10^{24}) = 5 \cdot 10^{26} \text{ MeV} = (5 \cdot 10^{26} \text{ MeV}) \cdot (1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J/MeV}) \approx 8 \cdot 10^{13} \text{ J}.$$

Questa energia sarebbe sufficiente a portare ad ebollizione circa 200 milioni di litri d'acqua inizialmente alla temperatura ambiente (il calcolo si esegue in modo semplice, ricordando che per innalzare di 1°C la temperatura di 1 kg d'acqua, cioè 1 litro d'acqua, occorre $1 \text{ kcal} = 4186 \text{ J}$).

n - Uranio naturale e uranio arricchito

Il ragionamento precedente è estremamente semplificato, perché si riferisce al solo isotopo U-235, che costituisce appena lo 0,7 % dell'uranio naturale. L'isotopo U-238, che costituisce il 99,3 % dell'isotopo naturale, invece non è fissile, quando assorbe un neutrone non si spezza⁶², ma subisce un processo diverso (v. sottoparagrafo seguente). La presenza dell'U-238 sottrae quindi neutroni alla reazione a catena. Perché questa si realizzi è quindi necessario *arricchire* l'uranio nel suo contenuto di U-235. Questo arricchimento venne realizzato durante il "Progetto Manhattan" mediante il processo di "diffusione gassosa" del composto UF₆ nell'impianto di Oak Ridge (Par. 1.2); oggi è più efficiente un processo di "centrifugazione", con una serie molto grande di ultracentrifughe: è così che il Pakistan ha arricchito l'uranio, e che forse lo sta facendo l'Iran; Saddam Hussein aveva cercato negli anni '80 di acquisire questa tecnologia.

Il grado di arricchimento richiesto è diverso a seconda degli usi dell'uranio. Per le bombe è necessario uranio altamente arricchito (*weapon grade*), mentre per i reattori nucleari, in cui la reazione a catena deve semplicemente autosostenersi ma non divergere (fattore di moltiplicazione dei neutroni uguale a uno), il grado di arricchimento necessario è molto più basso (vi sono anche reattori ad uranio naturale, v. sottoparagrafo q).

o - Il plutonio

Prima di analizzare le applicazioni militari e civili della reazione a catena è importante specificare che cosa accade all'isotopo U-238 quando assorbe un neutrone. Essi si trasforma infatti nell'isotopo U-239, che è anch'esso instabile, e attraverso due decadimenti beta si trasforma in un nuovo elemento che non esiste in natura ("transuranico"), l'isotopo 239 del *plutonio*: ${}_{94}^{239}\text{Pu}$. Questo isotopo Pu-239 è estremamente importante, perché è fissile e può quindi dar luogo alla reazione a catena. L'altro aspetto importante è che, trattandosi di un diverso elemento chimico, risulta relativamente molto più semplice separare il plutonio che si forma dall'U-238 in una massa di uranio (è semplice dal punto di vista chimico, ma estremamente complesso dal punto di vista tecnico, anche per la presenza di altissimi livelli di radioattività dei prodotti di fissione, e per la grandissima tossicità del plutonio!). Inoltre il plutonio fornisce un miglior rapporto resa/peso rispetto all'uranio e richiede una massa critica minore (anche se presenta altre difficoltà, v. oltre) Questo spiega perché già nel "Progetto Manhattan" si seguirono entrambe le strade, l'arricchimento dell'uranio e la produzione di plutonio. Questa si ottiene infatti nei reattori nucleari (v. oltre), dove si realizza la reazione a catena nell'isotopo U-235, mentre l'altissimo flusso di neutroni trasforma l'U-238 in Plutonio.

Occorre dire che tutta la questione è in realtà un po' più complessa, poiché si ha anche formazione dell'isotopo Pu-240, che non è fissile (v. sez. p). Si parla allora anche di plutonio *weapon grade*, cioè per uso nelle bombe. I reattori nucleari militari sono realizzati a questo scopo. Di fatto, tutti i paesi che hanno realizzato armi nucleari sono passati attraverso reattori nucleari. Non ci dilungheremo su questi aspetti. Vedremo comunque nell'Appendice 7.1 che con le tecniche attuali di realizzazione delle bombe in realtà qualsiasi tipo di plutonio può venire utilizzato.

p - Reazione a catena incontrollata: schema di una bomba nucleare a fissione

Il problema di base per realizzare una bomba a fissione è di avere una massa di uranio altamente arricchito o di plutonio che non sia critica (altrimenti la bomba potrebbe esplodere spontaneamente), ma di farla divenire critica al momento dell'innesco: questo richiede un *iniziatore*, cioè una sorgente di neutroni che inneschi la reazione a catena nel momento preciso in cui si raggiunge la massa critica. Le vere strutture delle testate nucleari sono segrete, ma si conoscono i criteri fondamentali. Discutiamo per ora solo lo schema molto generale di una testata a fissione: ritorneremo su ulteriori dettagli e sviluppi più recenti nell'Appendice 7.1. Vi sono due schemi di base, sviluppati fin dalle prime bombe.

a) Nel meccanismo detto a *cannone* due masse subcritiche di materiale fissile poste agli estremi di un cilindro vengono "sparate" l'una contro l'altra da un'esplosione di esplosivo convenzionale, generando così una massa totale critica (Fig. 1.1): questa tecnica fu utilizzata per *Little Boy*, la testata all'uranio che distrusse Hiroshima.

b) La tecnica a *implosione* è più sofisticata e complessa, ma anche più sicura: essa si rese necessaria fin dall'inizio nelle testate al plutonio, per la probabilità, sia pur piccolissima, del suo isotopo Pu-240 di subire la fissione spontanea (cioè di spezzarsi spontaneamente), la quale può causare l'innesco precoce della reazione a catena, cosa che comprometterebbe l'efficienza e la potenza dell'esplosione. Così questa tecnica fu sperimentata nel primo *Trinity test* del 16 luglio 1945, e usata per *Fat Man*, la bomba sganciata su Nagasaki. La testata ha una simmetria sferica: al centro è posta una massa subcritica di plutonio o di uranio (chiamata *pit*), circondata da uno strato di esplosivo chimico (Fig. 1.2). Questo viene fatto esplodere uniformemente, generando un'onda d'urto sferica verso l'interno, che comprime la massa di materiale fissile (implosione), portandolo alla criticità (aumentando la densità, aumenta la frazione dei neutroni assorbiti al suo interno).

⁶² In realtà l'U-238 subisce la fissione ad opera di neutroni di energia molto alta.

Anche se le tecniche di base sono relativamente semplici, una testa nucleare è un sistema estremamente complesso, composto da migliaia di componenti. Vi sono stati grandi trasformazioni nelle tecniche delle prime testate nucleari, che discuteremo nell'Appendice 7.1.

q - Reazione a catena controllata: reattori nucleari ("termici")

I reattori nucleari "di potenza" sfruttano invece la reazione a catena *controllata* nell'uranio, facendo in modo che ogni fissione produca *esattamente* un'altra fissione (quando questo avviene il reattore si dice "critico", il fattore di moltiplicazione dei neutroni è uno) in modo che l'energia venga liberata gradualmente: essa viene assorbita come energia termica in un fluido ed utilizzata per muovere una turbina e un alternatore, e generare energia elettrica. Questo equilibrio viene creato e mantenuto mediante "barre di controllo", costituite da materiali (come cadmio, o boro) che possiedono un'elevata capacità di assorbire i neutroni prodotti nella fissione: si fanno uscire lentamente le barre di controllo dal "nocciolo" del reattore che contiene l'uranio, aumentando così la potenza prodotta e il flusso di neutroni, finché si raggiunge la situazione di criticità; se invece le sbarre vengono abbassate, avviene il fenomeno opposto (Fig. 1.3). Per fare avvenire la fissione nell'U-235 è però necessario anche "rallentare" i neutroni: questo si ottiene usando una sostanza chiamata "moderatore" (acqua, acqua pesante, grafite, berillio). I neutroni urtano contro le molecole del moderatore, scambiando con esse l'alta energia che possiedono, e divenendo neutroni "termici" (in equilibrio termico con la materia circostante): per questo motivo questi tipi di reattori nucleari si chiamano *reattori termici*. Per "accendere" un reattore si fornisce una piccola fonte di neutroni che avviano le reazioni di fissione, e si regolano gradualmente le sbarre di controllo finché il reattore diviene "critico". L'energia liberata nella reazione a catena viene raccolta come energia termica in un liquido refrigerante (di solito acqua) che, circolando in un circuito idraulico, trasferisce questo calore all'esterno, dove esso viene utilizzato per fare ruotare una turbina, collegata a un alternatore che genera energia elettrica. Sui reattori elettronucleari ritorneremo nell'Appendice 3.1.

Vi sono in commercio attualmente diversi tipi di reattori. I più diffusi sono i *reattori ad acqua leggera*, sviluppati negli USA, che utilizzano uranio leggermente arricchito. L'acqua funziona da liquido refrigerante, cioè trasferisce il calore prodotto nel reattore all'esterno, per azionare la turbina. Si distinguono quelli ad acqua bollente (BWR, *Boiling Water Reactor*) e ad acqua pressurizzata (PWR, *Pressurized Water Reactor*), nei quali l'acqua è mantenuta ad una pressione sufficientemente alta da non raggiungere l'ebollizione.

I canadesi hanno sviluppato un reattore (CANDU, *Canadian Deuterium Uranium*) che usa l'acqua pesante (D₂O, cioè di deuterio anziché di idrogeno normale) sia come moderatore che come refrigerante: poiché questa ha, rispetto all'acqua normale, maggiore capacità di rallentare i neutroni e minore tendenza ad assorbirli, in questi reattori vi è un flusso più alto di neutroni, per cui essi possono utilizzare l'uranio naturale. La maggiore presenza di U-238 li rende adatti a produrre Pu-239: l'India e il Pakistan hanno utilizzato reattori di questo tipo (anche per produrre il trizio per le bombe).

I sovietici hanno sviluppato i reattori RBMK (tristemente famosi dopo l'incidente di Chernobyl) ad uranio leggermente arricchito, moderati a grafite e raffreddati ad acqua leggera.

La Francia e la Gran Bretagna avevano sviluppato filiere di reattori raffreddati a gas e moderati a grafite.

Dopo l'incidente di Chernobyl si sono avviati molti progetti di reattori di nuova generazione, più sicuri. Sono entrati in funzione e sono in fase di realizzazione reattori perfezionati, mentre modelli realmente nuovi sono previsti tra un decennio o due.

r - Reattori nucleari "veloci" (autofertilizzanti: "breeders")

La fissione del Pu-239 avviene senza bisogno di rallentare i neutroni (neutroni veloci), ed emette un numero di neutroni in media maggiore dell'U-235. Nacque così l'idea di costruire *reattori veloci* al plutonio i quali, oltre ad essere più compatti per l'assenza del moderatore, offrivano un'ulteriore prospettiva allettante. Se infatti si circonda il nocciolo di plutonio con un mantello di uranio naturale, ricco di U-238, il flusso neutronico oltre a sostenere la reazione a catena nel plutonio genera plutonio nel mantello: nasceva così l'idea allettante di produrre più plutonio di quanto ne bruci la reazione a catena, per cui tali reattori sono stati battezzati *autofertilizzanti*, o *surgeneratori* (*breeders*). Questi progetti hanno implicazioni militari, dato che il plutonio è il materiale ideale per fabbricare le bombe. Inoltre questi reattori risultano complessi e costosi: è necessario un refrigerante che abbia una notevole capacità termica e presenti un basso assorbimento di neutroni, e si è scelto il sodio liquido, che però si infiamma violentemente se entra in contatto con l'aria. La Francia è il paese che con più decisione si era lanciata nella realizzazione di reattori veloci, con un chiaro collegamento con lo sviluppo della "force de frappe": costruì un prototipo, *Phoenix* (dal nome del leggendario uccello che rinasceva, appunto, dalle proprie ceneri), ed il grande *Superphoenix*, che è però stato chiuso per i gravi incidenti. Il fallimento ha sbarrato notevolmente la strada ai reattori veloci (v. Cap. 8).

s - Ciclo del combustibile nucleare, scorie radioattive e plutonio

Tutto il programma, militare e civile, che riguarda l'energia nucleare si fonda sul cosiddetto "ciclo del combustibile nucleare", al quale dedichiamo solo un breve cenno. Dal minerale uranifero si estrae uranio naturale allo stato puro. Questo viene sottoposto ai processi di arricchimento. Abbiamo visto che il grado di

arricchimento è molto diverso per gli usi civili e militari: tuttavia lo sviluppo di questa tecnica per scopi civili presenta una intrinseca ambiguità, poiché apre la strada ad ulteriori arricchimenti per scopi militari (è quello che attualmente viene contestato all'Iran, e costituisce anche lo scandalo che è esploso per la Corea del Sud). L'uranio utilizzato nei reattori "si esaurisce", nel senso che diminuisce il suo contenuto di U-235: esso deve quindi venire sostituito periodicamente. Ma il combustibile spento presenta un'altissima radioattività, e contiene, oltre ai prodotti di fissione, plutonio generato dall'U-238. Il *ritrattamento del combustibile esaurito* consiste nella separazione dell'U-235 residuo e del plutonio dai rifiuti veri e propri, altamente radioattivi: esso può venire eseguito dopo un tempo sufficiente perché la sua attività si abbassi, ma è comunque un processo estremamente pericoloso (oggi solo la Francia e la Gran Bretagna gestiscono impianti di ritrattamento: a parte ovviamente quelli sviluppati da paesi come l'India per realizzare la bomba), che produce *scorie radioattive* e plutonio. Paesi come il Giappone e la Germania hanno accumulato notevoli quantitativi di plutonio dal ritrattamento del combustibile delle loro centrali in Francia e Gran Bretagna (Par. 7.6: l'associazione ambientalista *Greenpeace* ha organizzato spettacolari manifestazioni per contestare il trasporto del combustibile esaurito in Germania e del plutonio in Giappone). Dovremo riprendere questo problema, che ha risvolti preoccupanti. È necessario ricordare ancora che le scorie radioattive non provengono solo dalla "coda" del ciclo del combustibile, ma da tutto il ciclo di funzionamento delle centrali nucleari, e dal loro smantellamento (v. Appendice 3.1).

t - Bombe termonucleari (a fusione)

Accenniamo infine alle applicazioni della fusione nucleare. Questo processo, a differenza dalla fissione⁶³, avviene in natura ed ha anzi un funzione fondamentale nell'universo, poiché ha luogo all'interno delle stelle e fornisce loro l'energia che irradiano. Il motivo è relativamente semplice. Abbiamo visto che le forze nucleari, che sono responsabili del processo di fusione di nuclei leggeri, agiscono su distanze molto piccole, per cui l'innesco della fusione richiede che i due nuclei si avvicinino a distanze piccolissime: ma per farlo essi devono superare la repulsione elettrica tra le cariche positive dei nuclei, e questo richiede che acquistino velocità (energie cinetiche) molto grandi. L'energia media delle particelle dovuta al moto di agitazione termica aumenta con la temperatura: per raggiungere energie sufficienti a superare la repulsione elettrica occorrono temperature di decine di milioni di gradi, quali esistono appunto nei nuclei delle stelle. Di qui l'idea (che abbiamo illustrato nel Par. 1.5) di usare un'esplosione nucleare a fissione per innescare la fusione di una massa di nuclei leggeri: discuteremo in maggiore dettaglio le testate a fusione a due stadi nell'Appendice 7.1.

u - Il sogno della fusione nucleare controllata

Quasi parallelamente alla realizzazione della bomba a fusione nacque anche l'idea di realizzare la reazione di *fusione nucleare controllata*, per costruire *reattori a fusione* che promettevano di fornire energia in quantità praticamente illimitata, poiché il deuterio è contenuto in piccole frazioni ma in enormi quantità nell'acqua dei mari. Il problema fondamentale da risolvere consiste nella generazione della temperatura sufficiente ad innescare la fusione di nuclei leggeri in uno spazio contenuto (vi sono in realtà moltissimi problemi fisici e tecnici estremamente complessi da studiare e risolvere: alcuni di essi presentano implicazioni militari, come analizzeremo in dettaglio nel Cap. 9). Nessun materiale può ovviamente resistere a queste temperature, per cui si sono cercati meccanismi di confinamento senza bisogno di pareti materiali. D'altra parte gli atomi acquistano energie tali che negli urti essi vengono spogliati di tutti gli elettroni, per cui il materiale in cui si vuole innescare la fusione assume lo stato di un *plasma*, un quarto stato della materia (dopo quelli solido, liquido e gassoso) costituito da nuclei nudi e da elettroni liberi.

Bisogna dire che mezzo secolo di ricerche e di investimenti non sono riusciti a realizzare la fusione controllata, né la sua realizzazione sembra realmente alle porte. Le ricerche hanno seguito essenzialmente due strade:

a) *Confinamento magnetico*. Un potente campo magnetico di forma toroidale intrappola il plasma di deuterio e trizio al suo interno (per cui non occorrono pareti) mentre si cerca di raggiungere la temperatura di innesco della fusione. I sovietici furono i primi a seguire questa strada, per cui il nome generale di queste macchine ha un acronimo russo, Tokamak. Nel 1997 il *Joint European Torus* generò una reazione di fusione che produsse il 65 % dell'energia immessa.

b) *Confinamento inerziale*. Questa tecnica fa uso dell'energia direzionale emessa da potenti laser, o fasci di particelle accelerate. Un *pellet* (sferetta) di deuterio e trizio delle dimensioni di un grano di pepe viene colpito simmetricamente dagli impulsi di molti laser di altissima potenza, o dai fasci di particelle: la superficie del *pellet* si trasforma in un plasma, che si espande all'interno, facendo implodere (per cui si parla di "inerzia") il deuterio trizio rimanente fino alla temperatura in cui si innesca la fusione. Un reattore a fusione dovrebbe funzionare con una successione di un gran numero di *pellets*. È necessario fornire al *pellet* un'energia di due milioni di joule in 4 nanosecondi. La tecnica dei laser ha fatto negli anni recenti passi da

⁶³ Recentemente però si sono trovate in Africa tracce di qualcosa che potrebbe avere funzionato come un "reattore a fissione naturale".

gigante, con la realizzazione di *superlaser* (v. Appendice 9.1); gli USA e la Francia stanno realizzando enormi impianti per il confinamento inerziale che usano rispettivamente 192 e 240 laser (v. Parr. 7.1 e 9.2).

Struttura ed evoluzione delle armi nucleari

L'evoluzione delle armi nucleari dal 1945 ad oggi è stata continua e profonda. Non intendiamo naturalmente entrare in eccessivi dettagli (anche perché gli schemi precisi di tutte le testate sono segreti), ma fornire alcuni elementi tecnici che aiutino ad inquadrare meglio la situazione attuale della proliferazione e le sue tendenze.

Per tutti gli anni '50 e nei primi anni '60 del secolo scorso, come abbiamo ricordato, la tendenza fu di costruire armi di potenza maggiore (nel 1962 l'URSS esplose la bomba più potente in assoluto, di ben 59 mt, cioè equivalente a 59 milioni di tonnellate di tritolo!): questo era connesso al fatto che i principali vettori erano i bombardieri strategici, ed alla dottrina predominante a quell'epoca dell'uso delle armi nucleari contro i centri abitati. L'avvento dei missili balistici ed il miglioramento della loro precisione resero possibili attacchi più mirati contro i centri economici e militari dell'avversario, ed ebbe inizio un processo di riduzione delle dimensioni e del peso delle testate, con la produzione di cariche nucleari di potenze più piccole destinate ad una serie di usi strategici selettivi, nonché di armi nucleari tattiche e da campo di battaglia: i proiettili nucleari d'artiglieria, ad esempio, vennero sperimentati per la prima volta nel 1953. Questa evoluzione portò anche ad un miglioramento del rapporto potenza/peso, soprattutto con l'impiego di congegni di fusione nucleare (in particolare il meccanismo del *boosting*, v. oltre).

Oltre a questi sviluppi delle testate nucleari vennero realizzati progressi tecnici meno noti, ma non meno importanti, ad essi collegati, riguardanti la sicurezza, l'affidabilità e la versatilità. Le misure di *sicurezza* miravano a minimizzare i rischi di incidenti durante la manutenzione delle testate ed il loro uso non autorizzato⁶⁴. L'*affidabilità* delle testate fu migliorata in diversi modi, ad esempio creando materiali speciali per prevenire il deterioramento delle varie componenti dell'arma o particolari strutture in grado di sopportare l'enorme accelerazione prodotta all'interno della canna di cannone. La *versatilità* fu migliorata progettando le testate in modo tale che potessero essere facilmente selezionate diverse potenze di esplosione.

1. Le testate nucleari di Prima Generazione

Sono queste tutte le bombe ad uranio o plutonio a pura fissione. Tenendo conto della quantità di esplosivo convenzionale necessaria (sui 300 kg), il peso di ordigni di questo tipo si aggira sui 500 – 1.000 kg. Queste testate, per la loro intrinseca semplicità, costituiscono una delle principali minacce di proliferazione orizzontale (soprattutto per paesi che non siano in grado di fornirsi della tecnologia del trizio, v. oltre). È importante precisare, per quanto segue, che per la potenza sviluppata dall'esplosione nucleare è cruciale ottimizzare i tempi: dopo l'implosione e l'innesco della reazione a catena, *la testata impiega circa 20-30 nanosecondi (miliardesimi di secondo) per smembrarsi per effetto dell'esplosione*: con questo si interrompe ovviamente la reazione a catena, per cui la potenza sviluppata è data dall'energia nucleare liberata fino a quel momento. Per migliorare la situazione si utilizza un involucro riflettore di neutroni, che risulta però molto pesante.

Schema di una bomba nucleare a fissione

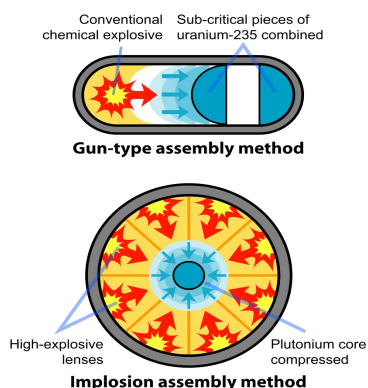
Il problema di base per realizzare una bomba a fissione è di avere una massa di uranio altamente arricchito o di plutonio che non sia critica (altrimenti la bomba potrebbe esplodere spontaneamente), ma di farla divenire critica al momento dell'innesco: questo richiede un *iniziatore*, cioè una sorgente di neutroni che inneschi la reazione a catena nel momento preciso in cui si raggiunge la massa critica. Le vere strutture delle testate nucleari sono segrete, ma si conoscono i criteri fondamentali. Vi sono due schemi di base, sviluppati fin dalle prime bombe (v. figura):

a) Nel meccanismo detto a *cannone* due masse subcritiche di materiale fissile poste agli estremi di un cilindro vengono "sparate" l'una contro l'altra da un'esplosione di esplosivo convenzionale, generando così una massa totale critica: questa tecnica fu utilizzata per *Little Boy*, la testata all'uranio che distrusse Hiroshima.

b) La tecnica a *implosione* è più sofisticata e complessa, ma anche più sicura: essa si rese necessaria fin dall'inizio nelle testate al plutonio, per la probabilità, sia pur piccolissima, del suo isotopo Pu-240 di subire la fissione spontanea (cioè di spezzarsi spontaneamente), la quale può causare l'innesco precoce della reazione a catena, cosa che comprometterebbe l'efficienza e la potenza dell'esplosione. Così questa tecnica fu sperimentata nel primo *Trinity test* del 16 luglio 1945, e usata per *Fat Man*, la bomba sganciata su Nagasaki. La testata ha una simmetria sferica: al centro è posta una massa subcritica di plutonio o di uranio (chiamata *pit*), circondata da uno strato di esplosivo chimico. Questo viene fatto esplodere uniformemente,

⁶⁴ Le due bombe esplose su Hiroshima e Nagasaki ponevano notevoli rischi di detonazione accidentale se il B-29 che le trasportava avesse avuto un incidente al decollo: i componenti critici vennero perciò rimossi dalle testate ed installati quando il bombardiere raggiunse l'alta quota.

generando un'onda d'urto sferica verso l'interno, che comprime la massa di materiale fissile (implosione), portandolo alla criticità (aumentando la densità, aumenta la frazione dei neutroni assorbiti al suo interno).



Anche se le tecniche di base sono relativamente semplici, una testa nucleare è un sistema estremamente complesso, composto da migliaia di componenti.

2. Armi nucleari di Seconda Generazione

Le innovazioni più importanti introdotte agli inizi furono: il meccanismo del *boosting* (spinta) delle bombe a fissione, e le bombe termonucleari a due stadi (fissione-fusione).

• Il meccanismo del “boosting” (il ruolo fondamentale del trizio)

In questo meccanismo viene aggiunto un piccolo componente a fusione nucleare, il quale non contribuisce sensibilmente alla potenza esplosiva, ma ha la funzione di aumentare l'efficienza e la rapidità della fissione nucleare. Non si tratta in alcun modo di una bomba a fusione (termonucleare, bomba H), poiché la quantità di materiale che subisce la fusione nucleare è molto piccola. Lo schema è il seguente.

Il nucleo della testata è costituito dal *pit* (nocciolo) *perfettamente* sferico di plutonio o uranio, circondato dall'alto esplosivo chimico. Nel centro del *pit* si introduce una piccola quantità (sui 2 grammi) di una miscela di deuterio e trizio (DT) poco prima di detonare la testata (ciò perché il trizio è radioattivo, con una vita media di 12 anni e non rimarrebbe inalterato a lungo nelle testate schierate). L'esplosione dell'esplosivo chimico produce l'implosione del *pit*, e la conseguente compressione del DT nel suo centro in una sfera di pochi millimetri di raggio con una densità decine di volte più alta di quella della sua fase solida (con una tecnologia di implosione abbastanza sofisticata: il *pit* deve essere lavorato sfericamente alla perfezione, e la geometria dell'esplosivo chimico accuratamente studiata, per avere una simmetria perfetta dell'esplosione e della compressione). Questo innesca la reazione di fusione nucleare del DT, che per sufficiente compressione è molto veloce (1,5 - 2 nanosecondi). Tale reazione genera un flusso di neutroni *dall'interno* del *pit*, il quale intensifica ed accelera la fissione del plutonio circostante, *moltiplicandone il rendimento di circa un fattore 100 in un tempo di 5 “generazioni” di neutroni, cioè dell'ordine di 10 nanosecondi, minore dei 20-30 nanosecondi che impiega la testata a disintegrarsi*. In tal modo si aumenta notevolmente la quantità di “esplosivo” che subisce la fissione, e quindi si migliora notevolmente la potenza dell'esplosione. Vi sono vari aspetti complessi da realizzare per ottimizzare questi tempi: è molto importante massimizzare la compressione del plutonio, quindi ancora una tecnologia di implosione avanzata; poiché il DT e il plutonio non raggiungono la massima densità nello stesso momento, è essenziale regolare esattamente il generatore di neutroni che innesca la reazione a catena.

Il meccanismo del *boosting* ha consentito di realizzare testate molto compatte ed efficienti, migliorando notevolmente il rapporto potenza-peso: l'intensificazione della reazione a catena dovuta al flusso neutronico dall'interno consente infatti di eliminare alcune componenti molto pesanti, come lo schermo esterno riflettore di neutroni, guadagnando sia in potenza che in leggerezza. Esso consente inoltre di utilizzare qualsiasi tipo di plutonio, e non solo il plutonio *weapon-grade* (che è Pu-239 con percentuali piccolissime degli altri isotopi: un concetto analogo all'uranio *weapon-grade* altamente arricchito in U-235, anche se la tecnica è completamente diversa⁶⁵). A parte alcune difficoltà tecniche cui abbiamo accennato, la costruzione di una testata *boosted* compatta e “lanciabile” può risultare più semplice di quella delle testate di Prima Generazione. Le testate *boosted* inoltre sono più sicure, poiché è praticamente impossibile che avvenga

⁶⁵ L'uranio deve venire arricchito dall'uranio naturale (che contiene appena lo 0,7 % di U-235 fissile) con tecniche artificiali (diffusione gassosa o centrifugazione del UF₆). Invece il plutonio si forma nella reazione a catena quando l'U-238 si trasmuta in Pu-239, e solo successivamente si formano gli altri isotopi del Pu che lo “inquinano”: per ottenere Pu-239 altamente concentrato si estrae il combustibile dal reattore molto “giovane”, in modo che gli altri isotopi non abbiano il tempo di formarsi in quantità apprezzabili.

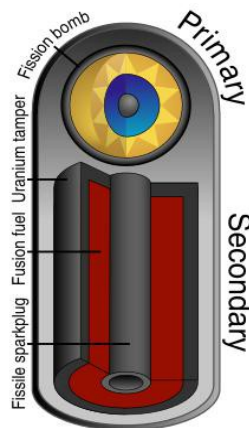
un'esplosione accidentale⁶⁶ (il DT viene inserito poco prima dell'esplosione): l'eventualità che si inneschi accidentalmente una reazione a catena anche in assenza del DT è stata ulteriormente abbassata studiando *pits* ovali anziché sferici.

Aggiungiamo un'osservazione, che risulterà importante anche per le testate termonucleari e per le considerazioni dell'ultimo capitolo. L'importanza e l'uso della miscela di DT sono dovuti al fatto che la temperatura generata direttamente da un'esplosione a fissione è in grado di innescare solo la reazione di fusione nucleare tra il D e il T, mentre altre reazioni di fusione presentano una soglia più alta. *Si capisce quindi l'importanza strategica del trizio.*

• Le testate termonucleari a due stadi (fissione-fusione)

In una bomba ad idrogeno un *primo stadio* è costituito da un'esplosione a fissione *boosted* con trizio che implode, generando la temperatura di milioni di gradi necessaria per "ignire" (dall'inglese *ignition*) un *sistema secondario*, nel quale le reazioni di fusione nucleare producono la maggior parte della potenza. Lo sviluppo di queste testate consentì un progresso di circa 20 volte nel rapporto potenza-peso rispetto alle testate di Prima Generazione.

Le difficoltà iniziali furono dovute al fatto che la "Super (bomba)" a cui pensava Teller non poteva funzionare per il motivo fisico appena discusso: solo una miscela DT potrebbe venire "ignita" da un'esplosione a fissione, ma il trizio è difficile da produrre in ingenti quantità (soprattutto allora) e non si mantiene per il suo decadimento radioattivo, ed è impossibile "ignire" un'altra reazione di fusione in un altro "esplosivo" a fusione più comune (DD, o Li-D) ponendolo semplicemente *accanto* ad una bomba a fissione. Di qui nacque l'idea del "meccanismo di Teller-Ulam", la cui condizione fondamentale consiste nel provocare una forte compressione (implosione) dell'esplosivo a fusione (termonucleare), necessaria perché la reazione di fusione si inneschi e proceda in un tempo breve rispetto a quello del confinamento. Questa implosione viene ottenuta dal confinamento inerziale provocato dai raggi X generati dall'esplosione del primo stadio a fissione. I requisiti ed accorgimenti fondamentali sono quindi: confinare il materiale termonucleare abbastanza a lungo perché esso "bruci" prima che la pressione lo disperda (questo tempo è inversamente proporzionale alla compressione); aumentando la compressione, quindi la densità, si abbassa la temperatura in cui si innesca la fusione nucleare.



Lo schema di base di una *bomba termonucleare a due stadi* è dunque il seguente (v. figura). La bomba a fissione (*primario*, naturalmente *boosted*) ed il contenitore con l'esplosivo termonucleare (*secondario*) sono posti in un recipiente comune (*radiation case*) le cui pareti sono costituite da un materiale pesante opaco ai raggi X, mentre il suo interno (*hohlraum*, cavità) è riempito di un materiale leggero trasparente ai raggi X. L'esplosione del primario emette grandi quantità di raggi X e di neutroni. I raggi X vengono trattenuti in seno allo *hohlraum* e lo trasformano in un plasma estremamente caldo, raggiungendo rapidamente un equilibrio (la radiazione si propaga alla più alta velocità possibile in natura, quella della luce), il quale assicura l'uniformità della pressione e della temperatura in tutti i punti. Il plasma riemette raggi X, i quali colpiscono uniformemente la superficie del secondario: questa vaporizza, e il materiale espulso genera come reazione una pressione verso l'interno che causa l'implosione del materiale termonucleare ad altissime densità (l'*hohlraum* è fondamentale per ottenere l'uniformità della compressione, senza la quale si genererebbero instabilità nell'implosione). Questa fortissima implosione consente di raggiungere la temperatura più elevata necessaria per innescare la fusione della miscela di D-Li che compone il secondario: questa fusione nucleare libera la maggior parte dell'energia della testata. Anche qui c'è un delicato gioco di tempi: la compressione e la "combustione" del secondario possono essere complete prima che l'onda d'urto

⁶⁶ Per inciso, le sei bombe che aveva realizzato il Sudafrica (senza test nucleari) erano del tipo "a cannone", particolarmente poco sicuro: questo riduce in certa misura i meriti del paese di averle smantellate.

meccanica dal primario, che si propaga con velocità molto minore di quella dei raggi X, lo raggiunga e disintegri la testata.

Anche se la costruzione di una bomba di questo tipo richiede una tecnologia relativamente semplice, la comprensione scientifica dei dettagli di quanto accade nel secondario è ancora incompleta: per comprendere più a fondo i processi fisici coinvolti sono importanti le ricerche sulla fusione nucleare controllata; queste vengono presentate come ricerche “pacifiche” per realizzare la fusione controllata per la produzione di energia ad usi civili, ma mentre questa “chimera” si è sempre allontanata nel tempo ed è una prospettiva ancora remota e problematica, queste ricerche rivestono una grande rilevanza per gli aspetti militari, anche se celati all'opinione pubblica. Dopo 50 anni di ricerca e sperimentazione non ci si aspettano comunque progressi significativi per queste testate: questo è forse uno dei motivi tecnici per cui il CTBT (trattato che ha messo al bando i test nucleari: *Comprehensive Test Ban Treaty*) è stato accettato dagli Stati nucleari.

Sono possibili vari accorgimenti ulteriori nello schema di base precedente. L'involucro del secondario può funzionare da “compressore” (*tamper*) che, riemettendo la radiazione, abbassa anche la compressione necessaria: esso esercita anche la funzione di contenere ulteriormente la fusione (*pusher*). Per garantire l'innesco della fusione del secondario, si può porre al suo centro un terzo elemento, la “accensione” (*sparkplug*), costituito da una massa subcritica di materiale fissile (a sua volta *boosted*), il quale viene compresso dall'implosione del secondario, divenendo critico. A questo punto giunge il flusso di neutroni emesso dalla fissione del primario (che si propaga con velocità molto più piccola di quella dei raggi X) e ne innesca la fissione: con un'adeguata progettazione questa può avvenire proprio quando l'esplosivo termonucleare raggiunge la massima densità, per cui la radiazione prodotta dalla fissione aumenta ulteriormente dall'interno la sua compressione, garantendo l'innesco della fusione anche nelle condizioni peggiori. Il *pusher-tamper* che racchiude il secondario può essere un materiale che riflette anche i neutroni. Progressi successivi hanno consentito una più efficiente implosione del secondario, permettendo di eliminare lo *sparkplug* e di ridurre il quantitativo e il peso del *pusher-tamper*. Oppure quest'ultimo può essere costituito di uranio arricchito, in modo da aumentare la potenza della testata, o da renderla più leggera a parità di potenza: in quest'ultimo caso è stato ottenuto un significativo perfezionamento facendo in modo che la compressione esercitata dal primario sia abbastanza alta da rendere critico il *tamper*, in modo che in esso si inneschi una reazione a catena. Questi accorgimenti permettono di capire che *in generale è più difficile costruire una testata di piccola potenza che una di grande potenza*.

A partire dagli anni '50 non è stata introdotta nessun'altra innovazione veramente significativa nella concezione delle armi nucleari.

3. Testate di Terza Generazione ⁶⁷ (speciali, ad effetti potenziati)

Si tratta essenzialmente di una serie di testate speciali, per usi o con effetti specifici: testate a radiazione potenziata, soppressa o indotta, bombe ad impulso magnetico (EMP), bombe ai neutroni, ecc. Queste bombe non hanno mai trovato un uso militare veramente convincente, e non hanno mai avuto quindi un ruolo preciso negli arsenali nucleari. Il loro sviluppo richiede un numero considerevole di test nucleari, per cui queste testate sono quelle che più hanno risentito delle limitazioni del CTBT. Su queste non ci soffermeremo.

Sono state sviluppate mine nucleari e testate trasportabili in uno zaino. La più piccola testata sviluppata dagli Stati Uniti è stata la W-54 (Davy Crockett), un proiettile nucleare sparato da cannoni progettato nei Los

⁶⁷ T.B. Taylor, “Third generation nuclear weapons”, *Scientific American*, Vol. 256, aprile 1987, pp. 30-39.

*Alamos National Laboratories*⁶⁸. Tra il 1956 e il 1963 ne furono prodotte 2.100: furono schierate dal 1961 al 1971. Aveva forma approssimativamente ovoidale, di dimensioni dell'ordine di 40 cm per 25 cm, peso dell'ordine di una ventina di kg, e potenza esplosiva minima dell'ordine di qualche decina di tonnellate di esplosivo equivalente. Anche i sovietici hanno probabilmente sviluppato "testate da valigetta" di questo tipo. La struttura di questo tipo di testate, a pura fissione, potrebbe consistere in una quantità minima di materiale fissile di alta efficienza (plutonio o U-233), una quantità limitata di alto esplosivo ed un sottile riflettore di neutroni di berillio. Anche della B-61 (il tipo di testate a gravità schierate nei paesi europei della NATO) non si sa nulla di preciso, se non schemi del tutto generali: è probabile che siano state eliminate componenti a fissione del secondario; si potrebbe anche ipotizzare che nell'involucro di una testata B-61 sia stata posta una testata "Davy Crockett".

⁶⁸ [Httpwww.brook.edu/FP/projects/nucwcost/davyc.hym](http://www.brook.edu/FP/projects/nucwcost/davyc.hym); Carey Sublette, *Are Suitcase Bombs Possible?*, <http://nuclearweaponarchive.org/News/DoSuitcaseNukesExist.html>.