L'ENERGIA INVISIBILE

Il nucleare come progresso e come responsabilità

a cura di
Angela Bracco
Miriam Focaccia

200 ALESSANDRO VOLTA

Egea

Realizzato in collaborazione con
Fondazione Alessandro Volta
in occasione del bicentenario della morte di Alessandro Volta

Nell'ambito di

200VOLTeVOLTA

Con il sostegno di

Copertina: Cristina Bernasconi, Milano
Impaginazione: Corpo4 Team, Milano

Copyright © 2026 Fondazione Alessandro Volta

Realizzazione a cura di EGEA S.p.A.
EGEA S.p.A.
Via Salasco, 5 – 20136 Milano
Tel. 02 5836 5751 – Fax 02 5836 5753
egea.edizioni@unibocconi.it – www.egeaeditore.it

ISBN pdf 979-12-229-8293-9
ISBN epub 979-12-229-8332-5

Indice

Introduzione V

Parte I
Dove tutto ha avuto inizio 1
1. La nascita del nucleare in Italia: Enrico Fermi 1
2. Scuola e ricerca a via Panisperna 3
3. Il primo reattore nucleare 11
4. Il progetto Manhattan 17

Parte II
La radioattività dalla natura alla cura, dalla terra allo spazio 21
1. Che cos'è la radioattività 21
2. La radioattività e le sue interazioni con la materia 26
3. Le applicazioni della radioattività 28
4. L'energia dal cuore dell'atomo 44

Parte III
Scienza e coscienza: la sicurezza internazionale e il controllo degli armamenti 67
1. La scienza dopo Hiroshima 67
2. Fermi: la responsabilità dall'interno 69
3. Dagli scienziati atomici ai movimenti per il disarmo 71
4. Edoardo Amaldi: ricostruire, cooperare, disarmare 75
5. Ottant'anni dopo 76

Bibliografia scelta 79

Le Autrici 81

Introduzione

Quando abbiamo iniziato a scrivere questo testo ci siamo rese conto che la difficoltà principale era proprio quella di decidere quali argomenti non trattare nonostante il loro grande valore e l'interesse soprattutto da parte degli addetti ai lavori.

Una grande mancanza è la descrizione della ricerca di base nell'ambito del nucleare e subnucleare che attualmente è condotta nei grandi laboratori nel mondo tra cui il Centro Europeo per la Ricerca Nucleare, il CERN, e anche nello spazio. La ricerca di base dà oggi ottimi risultati volti a interpretare l'origine dell'universo e le tecnologie di punta sviluppate per condurre gli esperimenti sono in gran misura alla base delle varie applicazioni per la nostra vita.

Del resto, questo concetto è apparso chiaro anche quando abbiamo trattato storicamente la fissione nucleare. Il grande entusiasmo era dovuto al fatto che questo processo fisico ci svelava proprietà del cuore dell'atomo che sono state interpretate con modelli matematici con contenuti validi ancora oggi. E poi le varie applicazioni, a cui parecchia enfasi è data in questo testo, sono nate dopo.

Anche la parte storica è stata limitata al minimo. La storia ha molto fascino poiché permette di comprendere aspetti importanti della ricerca come il contesto culturale, i mezzi tecnici ed economici e gli sviluppi dettati dalla necessità di approfondire. Questi approfondimenti, motivati dalla curiosità intellettuale, portano spesso a risultati inattesi ma di grande impatto.

Sulla questione dell'utilizzo delle scoperte scientifiche, in qualsiasi campo esse siano, abbiamo scelto di evidenziare lo sforzo fatto per dare la giusta consapevolezza dei problemi in caso di cattivo uso, ma messaggio principale è che la scienza deve progredire.

Auspichiamo che le riflessioni indotte dalla lettura di questo testo portino il lettore ad approfondire con altre letture questi importanti argomenti.

Parte I
Dove tutto ha avuto inizio

1. La nascita del nucleare in Italia: Enrico Fermi

Il Novecento è stato un secolo che ha vissuto profonde trasformazioni: politiche, culturali, sociali e scientifiche. La tecnologia ha modificato profondamente il modo di vivere della società contemporanea: l'elettricità ha illuminato le città, le industrie hanno aumentato le proprie capacità produttive, i trasporti hanno rivoluzionato i collegamenti e gli spostamenti, la medicina ha raggiunto traguardi straordinari, il rapporto tra l'essere umano e la natura è stato radicalmente trasformato. L'intero secolo è stato caratterizzato da una crescente domanda di energia: produrre e controllare nuove forme di energia ha rappresentato una delle grandi sfide della modernità.

È a partire dall'inizio del Novecento che gli studiosi hanno iniziato a interrogarsi sulla struttura più intima della materia e a comprendere che l'atomo non è un'entità indivisibile e immutabile, ma una struttura complessa capace di custodire quantità di energia un tempo impensabili.

Quando nel dicembre del 1942 Enrico Fermi guidò la prima reazione nucleare controllata della storia, si concluse un percorso scientifico iniziato molti anni prima nei laboratori di Roma, mentre nuovi scenari di ricerca si aprirono. Da quel momento l'energia racchiusa nel nucleo dell'atomo cessò di essere una semplice ipotesi teorica per diventare una realtà concreta, con straordinarie capacità di trasformare profondamente la politica, l'economia, la guerra e persino il modo in cui gli esseri umani guardavano al proprio futuro.

Comprendere la figura di Fermi significa ripercorrere alcune delle tappe più importanti della storia della fisica del Novecento: dalle ricerche degli anni Trenta condotte a Roma, nell'Istituto di Fisica di via Panisperna, passando per la realizzazione del primo reattore nu-

cleare, costruito a Chicago e attivato nel dicembre del 1942, sino al suo coinvolgimento nel progetto Manhattan, lo scienziato italiano naturalizzato statunitense contribuì in maniera determinante a questa trasformazione destinata a modificare in profondità il corso della storia contemporanea.

Se, da un lato, la liberazione dell'energia contenuta nel nucleo dell'atomo apriva scenari drammatici con la costruzione delle bombe atomiche e l'inizio dell'epoca della deterrenza nucleare e della corsa agli armamenti, dall'altro, quella stessa energia poteva essere messa a disposizione dell'umanità e utilizzata per scopi pacifici.

L'energia nucleare, al centro di una delle più profonde riflessioni etiche del Novecento, aveva mostrato come una scoperta scientifica potesse trasformarsi, simultaneamente, in strumento di progresso o di distruzione. Gli scienziati dovettero confrontarsi pubblicamente, come mai prima di allora, con la questione della responsabilità morale delle proprie scoperte e delle proprie scelte. La discussione, che si aprì a partire dalla conclusione della Seconda guerra mondiale, coinvolse gli scienziati, ma anche i politici, le organizzazioni internazionali e intellettuali, oltre che l'opinione pubblica.

Tra le tappe fondamentali di questa nuova stagione culturale e politica e del dibattito sul controllo internazionale dell'energia atomica, vanno ricordati il Rapporto Franck del giugno 1945, le riflessioni di Niels Bohr sulla necessità di una cooperazione globale, la creazione dei movimenti per il disarmo nucleare e, successivamente, delle Conferenze Pugwash (Nobel per la Pace 1995).

Enrico Fermi, pur mantenendo sempre un atteggiamento pragmatico e lontano da ogni forma di militanza ideologica, partecipò a tale dibattito, dedicando alcune delle proprie riflessioni del dopoguerra alle prospettive dell'energia atomica come risorsa per lo sviluppo civile dell'umanità.

Del resto, la vicenda scientifica di Enrico Fermi coincide in larga misura con quella dell'ingresso dell'umanità nell'era nucleare, e mostra come la ricerca scientifica, le istituzioni, la politica e la società si siano intrecciate in una delle vicende più significative del Novecento.

Questa storia, ancora oggi, continua a interrogare il nostro presente.

2. Scuola e ricerca a via Panisperna

Quando Enrico Fermi, fresco di laurea dall'Università di Pisa, tornò a Roma nel 1922, il Regio Istituto di Fisica di via Panisperna, che oggi ospita il Museo storico della fisica e Centro studi e ricerche «Enrico Fermi» (CREF), possedeva già una lunga storia alle spalle[1].

Inaugurato nel 1881, all'indomani dell'Unità d'Italia, l'Istituto di via Panisperna si era affermato come uno dei principali centri della fisica italiana. Nel 1918, la direzione era passata a Orso Mario Corbino, fisico siciliano di straordinaria energia e capacità organizzativa.

Corbino, professore, senatore, ministro, imprenditore nel settore dell'energia elettrica e protagonista della politica della ricerca italiana, svolse un ruolo decisivo nel trasformare l'Istituto in un ambiente capace di competere con le più importanti scuole europee. Fu lui a individuare in Enrico Fermi il giovane destinato a guidare una nuova stagione della fisica italiana. A partire dal loro primo incontro, ne divenne il principale sponsor e protettore.

Nato a Roma il 29 settembre 1901, Fermi aveva mostrato fin da ragazzo capacità eccezionali per la matematica e la fisica. Dopo gli studi alla Scuola Normale Superiore di Pisa e un rapido percorso di perfezionamento in Germania e nei principali centri della fisica europea, si era già imposto all'attenzione della comunità scientifica internazionale per l'originalità delle sue ricerche.

Dopo un incarico a Firenze tra il 1924 e il 1926 per insegnare fisica matematica e meccanica razionale, nel novembre del 1926, a soli venticinque anni, venne chiamato a ricoprire la prima cattedra italiana di fisica teorica. L'istituzione stessa di una cattedra dedicata alla fisica teorica rappresentava un segnale importante: la fisica del Novecento richiedeva una stretta integrazione tra teoria e laboratorio. Le rivoluzionarie scoperte sulla struttura dell'atomo, sulla meccanica quantistica e sulla natura della materia stavano modificando profondamente il volto della disciplina.

---

[1] Istituito con una legge speciale nel 1999, con Antonino Zichichi Presidente, il CREF è il più giovane ente pubblico di ricerca italiano vigilato dal Ministero dell'Università e della Ricerca. La sua missione è duplice: da un lato promuovere una ricerca interdisciplinare, articolata in diverse linee di indagine nell'ambito della fisica; dall'altro, attraverso il Museo Enrico Fermi, custodire e diffondere la memoria dello scienziato e dell'ambiente scientifico di via Panisperna, offrendo uno spazio di autentica libertà intellettuale e favorendo un dialogo continuo tra storia, scienza e società.

Figura 1 I ragazzi di via Panisperna

Da sinistra: Oscar D'Agostino, Emilio Segrè, Edoardo Amaldi, Franco Rasetti ed Enrico Fermi.
Fonte: Fondo Zanchi, Archivio del Dipartimento di Fisica, Sapienza Università di Roma.

Fermi incarnava perfettamente questa nuova figura di scienziato: possedeva una straordinaria capacità matematica, ma allo stesso tempo manteneva un forte interesse per gli aspetti concreti ed empirici della ricerca. Tale caratteristica avrebbe rappresentato una delle chiavi del suo successo negli anni successivi.

Attorno a lui, a partire dal 1927, iniziò a raccogliersi un gruppo di giovani e brillanti studiosi destinati a entrare nella storia della scienza italiana. Edoardo Amaldi, Emilio Segrè, Bruno Pontecorvo, Ettore Majorana, Oscar D'Agostino, insieme al compagno di studi a Pisa, Franco Rasetti: sotto la leadership scientifica di Fermi questo gruppo, noto come «i ragazzi di via Panisperna», costituì una delle scuole di fisica più brillanti del Novecento (*Figura 1*).

All'inizio degli anni Trenta il loro interesse si concentrò progressivamente sullo studio del nucleo atomico, che rappresentava una delle frontiere più promettenti e meno conosciute della fisica contemporanea. Se la struttura generale dell'atomo era ormai stata chiarita grazie

ai lavori di Ernest Rutherford e di Niels Bohr, molte domande aperte restavano però sulla natura del nucleo, sulle forze che ne garantivano la stabilità e sui processi responsabili delle trasformazioni radioattive. Era noto che quasi tutta la massa dell'atomo era concentrata in un nucleo estremamente piccolo e denso, attorno al quale si muovevano gli elettroni.

Proprio a via Panisperna, nell'ottobre del 1931, venne organizzato il primo Congresso internazionale di fisica nucleare, promosso dalla Fondazione Volta. Dopo il Congresso internazionale dei fisici tenutosi a Como nel 1927 per celebrare il primo centenario della morte di Alessandro Volta (*Figura 2*), fu Fermi ad avere l'idea di riunire a Roma i fisici più autorevoli per fare il punto sulla situazione: vi parteciparono circa quarantacinque scienziati, e tra loro i nomi più prestigiosi nell'ambito della fisica nucleare e della meccanica quantistica.

Il congresso rappresentò una sorta di manifestazione programmatica: il futuro della fisica passava attraverso lo studio del nucleo. Oltre

Figura 2 Il Congresso internazionale dei fisici a Como, 1927

che momento di scambio e confronto sui temi aperti dell'epoca, questa fu l'occasione, per il gruppo romano, di presentarsi sulla scena internazionale.

Solo un anno dopo, nei laboratori di Cambridge, James Chadwick scoprirà una nuova particella che aggiungerà un tassello fondamentale alla comprensione della materia: il neutrone.

Il gruppo di Roma partecipava alla febbrile attività internazionale, con Fermi ormai pienamente inserito nella cerchia degli scienziati che stavano trasformando la fisica classica. Alla fine del 1933 su *La Ricerca Scientifica*, poi all'inizio del 1934 su *Il Nuovo Cimento*, apparve il suo «Tentativo di una teoria di raggi β».

La scoperta di Irène Curie e del marito Frédéric Joliot, annunciata nel gennaio del 1934, sul fenomeno della radioattività artificiale indotta da particelle alfa, vale a dire nuclei di elio carichi positivamente, era destinata a rivoluzionare la fisica e dette ai ricercatori romani l'occasione aspettata di cominciare nuove importanti ricerche sperimentali.

Quando Fermi venne a conoscenza di quella scoperta, intuì immediatamente che si poteva compiere un passo ulteriore: utilizzare il neutrone, la particella priva di carica scoperta appena due anni prima, come proiettile per provocare reazioni nucleari. A differenza delle particelle cariche, infatti, il neutrone non risentiva della repulsione elettrica del nucleo e poteva penetrarvi con maggiore facilità.

Perché nessuno aveva tentato prima questa strada? La risposta era legata alle difficoltà tecniche: produrre sorgenti di neutroni era un'impresa complessa. Fermi, tuttavia, non si lasciò scoraggiare, procurandosi tutto il necessario: sorgenti neutroniche, campioni da irradiare, contatori Geiger-Müller, schermature di piombo e la camera a nebbia costruita da Rasetti nel 1933.

Proprio la costruzione di sorgenti neutroniche era uno degli aspetti più importanti degli esperimenti del 1934. Esse erano formate da piccole fialette di vetro contenenti polvere di berillio e radon, un gas radioattivo. Il radon emetteva particelle alfa che, colpendo il berillio, producevano neutroni.

La scelta del radon fu particolarmente intelligente: il gas permetteva di ottenere sorgenti più intense rispetto ad altre soluzioni, come quelle al polonio-berillio. Queste fialette venivano poi inserite in tubi di vetro lunghi, così da poterle maneggiare con maggiore sicurezza.

Poiché il radon decadeva rapidamente, le sorgenti dovevano essere preparate e rinnovate spesso. Anche se emettevano molti raggi gamma, Fermi capì che questi non avrebbero disturbato gli esperimenti e proprio tale intuizione, che permise di usare sorgenti molto potenti, fu decisiva per la scoperta.

Iniziò così a bombardare con neutroni gli elementi della tavola periodica, partendo dal platino (numero atomico 78) e procedendo in ordine decrescente. Quando arrivò all'alluminio e al fluoro, il contatore registrò finalmente un segnale inequivocabile: i nuclei erano diventati radioattivi. Era il 25 marzo 1934.

La notizia si diffuse rapidamente nella comunità scientifica e raggiunse anche Lord Rutherford che, nell'aprile dello stesso anno, scrisse ironicamente a Fermi: «Caro Fermi, [...] mi congratulo con te per essere riuscito a fuggire dalla sfera della fisica teorica...».

Nel giro di pochi mesi Fermi e il suo gruppo irradiarono circa sessanta elementi della tavola periodica, identificando oltre quaranta nuovi isotopi radioattivi. I risultati suscitarono grande entusiasmo tra i fisici di tutto il mondo.

Fino a quel momento, tutte le reazioni nucleari conosciute, sia naturali sia indotte artificialmente, producevano soltanto piccole variazioni del numero atomico e del peso atomico degli elementi coinvolti. Era quindi naturale aspettarsi che anche il bombardamento sistematico con neutroni desse origine a nuclei molto simili a quelli di partenza, collocati nelle immediate vicinanze dell'elemento originario nella tavola periodica.

Entro l'estate del 1934 il gruppo era arrivato a irradiare gli elementi più pesanti allora conosciuti: il torio e l'uranio (numero atomico 92). Fu proprio durante questi esperimenti che emerse un risultato inatteso. Il bombardamento dell'uranio produceva sostanze radioattive difficili da identificare, che non sembravano appartenere ad alcun elemento con numero atomico compreso tra 86 e 92 e che presentavano tempi di decadimento differenti. I tentativi di isolarle chimicamente portarono Fermi a formulare una prudente ipotesi: forse si trattava di elementi mai osservati prima, con numero atomico superiore a 92, i cosiddetti *elementi transuranici*.

In realtà, quella spiegazione si sarebbe rivelata errata. Il fenomeno osservato era qualcosa di completamente nuovo: il nucleo dell'uranio, colpito dal neutrone, non dava origine a elementi più pesanti, ma si spezzava in frammenti molto più leggeri. Era la fissione nucleare. I

prodotti della reazione non dovevano quindi essere cercati oltre l'uranio, bensì molto prima nella tavola periodica, tra elementi di massa decisamente inferiore.

Fino ad allora l'intensità della radioattività prodotta veniva valutata soltanto in modo qualitativo, distinguendola genericamente come forte, media o debole. Dopo l'estate del 1934 il gruppo decise di eseguire misurazioni più rigorose e sistematiche. Durante questi esperimenti emerse un'osservazione sorprendente: i risultati cambiavano a seconda della superficie su cui venivano eseguite le misure. Legno e marmo, per esempio, producevano effetti diversi.

Fermi comprese che alcuni materiali ricchi di idrogeno, come il legno o la paraffina, erano in grado di rallentare i neutroni. Per verificare questa intuizione collocò un blocco di paraffina tra la sorgente neutronica e il campione da irradiare. L'effetto fu sorprendente: l'attività radioattiva aumentò sensibilmente. I neutroni rallentati, o neutroni lenti, risultavano infatti fino a cento volte più efficaci nell'innescare reazioni nucleari rispetto ai neutroni veloci. Era il 22 ottobre 1934.

Naturalmente nessuno, nel laboratorio di via Panisperna, poteva ancora immaginare fino in fondo gli sviluppi futuri di quelle ricerche. L'obiettivo immediato rimaneva la comprensione della struttura del nucleo e delle sue trasformazioni. Tuttavia, per la prima volta, iniziava a delinearsi la possibilità concreta di accedere all'enorme quantità di energia racchiusa all'interno della materia. Era una prospettiva che avrebbe cambiato il corso del Novecento.

Pochi anni più tardi proprio i neutroni lenti avrebbero reso possibile la costruzione del primo reattore nucleare della storia, entrato in funzione a Chicago il 2 dicembre 1942, aprendo inoltre la strada a numerose applicazioni nel campo della fisica nucleare.

Le scoperte compiute nel 1934 consacrarono definitivamente Fermi sulla scena scientifica internazionale e gli valsero, appena quattro anni più tardi, il premio Nobel per la Fisica.

Fra tutti gli elementi studiati dal gruppo romano, l'uranio rappresentava quello più affascinante e, allo stesso tempo, più misterioso. Bombardandolo con neutroni lenti, Fermi osservò la formazione di numerosi prodotti radioattivi che sembravano appartenere a elementi ancora sconosciuti.

L'interpretazione appariva naturale. Poiché l'uranio occupava l'ultimo posto della tavola periodica allora conosciuta, si pensò che l'as-

sorbimento di un neutrone producesse nuclei ancora più pesanti, i già citati elementi transuranici. Per diversi anni questa spiegazione sembrò convincente e venne accettata dalla comunità scientifica.

Non tutti, però, erano persuasi. La chimica tedesca Ida Noddack suggerì un'ipotesi radicalmente diversa: forse il nucleo dell'uranio non stava diventando più pesante, ma si stava frammentando in nuclei molto più leggeri. L'idea apparve così rivoluzionaria da essere quasi ignorata: nessuno immaginava che un nucleo atomico potesse letteralmente spezzarsi.

Solo nel 1938 gli esperimenti di Otto Hahn e Fritz Strassmann, interpretati teoricamente da Lise Meitner e Otto Frisch, avrebbero dimostrato che proprio questo fenomeno – la fissione nucleare, ovvero la spaccatura del nucleo di uranio in due parti (quasi uguali in massa) – era realmente avvenuto negli esperimenti iniziati anni prima a via Panisperna.

Quando un neutrone lento viene assorbito da un nucleo, si forma un nucleo composto, cioè un nucleo temporaneamente eccitato. L'energia in eccesso non rimane concentrata in un solo punto, ma si distribuisce tra tutti i nucleoni. Per questo motivo, nessuna singola particella ha abbastanza energia per uscire dal nucleo.
A questo punto, però, può avvenire un altro fenomeno: il nucleo può deformarsi. Secondo il modello a goccia, infatti, il nucleo si comporta in modo simile a una goccia di liquido. Come descritto da Lise Meitner, una fluttuazione della superficie può portare a una deformazione sempre più marcata, fino a far assumere al nucleo una forma allungata, simile a un manubrio.
Se la deformazione diventa abbastanza grande, la repulsione elettrostatica tra i protoni delle due estremità supera la tensione superficiale che tiene unito il nucleo. A quel punto il nucleo si rompe in due frammenti di massa simile: è questo il processo che prende il nome di fissione nucleare.

In questo contesto è importante sottolineare che, negli anni successivi, Otto Hahn fu insignito del premio Nobel, ma non Lise Meitner, sua collega fino a poco tempo prima, che era dovuta fuggire all'estero per motivi razziali. Questo «Nobel mancato», non solo nell'ambito scientifico, è riconosciuto come una grande ingiustizia.

La radioattività osservata a Roma derivava dalla divisione del nucleo di uranio in frammenti più piccoli accompagnata dall'emissione di enormi quantità di energia. Fermi aveva aperto la porta della fissione nucleare

senza riconoscerla fino in fondo; mancava ancora il quadro teorico necessario per interpretare correttamente quei risultati.

Nell'estate del 1938 a Fermi giunse, informalmente, la notizia che sarebbe stato insignito del premio Nobel. Il 14 luglio, su *Il Giornale d'Italia*, veniva pubblicato «Il manifesto degli scienziati razzisti». Poche settimane dopo, a settembre, sarebbero entrate in vigore le leggi razziali. L'Italia fascista stava iniziando uno dei momenti più drammatici della propria storia. Gli ebrei italiani vennero colpiti duramente: esclusi dalla scuola, dall'università, dagli impieghi pubblici e dalla vita civile.

La moglie di Enrico, Laura Capon, era di ascendenza ebraica. Le nuove disposizioni mettevano direttamente a rischio il futuro della famiglia e rendevano sempre più difficile immaginare una prosecuzione della carriera scientifica in Italia. Molti dei protagonisti della fisica europea stavano già lasciando il continente. L'ascesa dei totalitarismi stava provocando una migrazione senza precedenti di intelligenze verso gli Stati Uniti, destinata a modificare profondamente gli equilibri della ricerca mondiale. A quel punto, i Fermi compresero che la decisione non poteva più essere rimandata e la notizia del Nobel accelerò i preparativi di un viaggio già pianificato.

Da tempo, infatti, Enrico guardava con interesse agli Stati Uniti. Fin dagli anni Trenta aveva soggiornato più volte presso l'Università del Michigan, ad Ann Arbor, dove era entrato in contatto con una comunità scientifica dinamica, ben finanziata e in rapida crescita. Rispetto all'Europa, gli Stati Uniti offrivano opportunità di ricerca sempre maggiori e un sistema universitario capace di attrarre studiosi provenienti da tutto il mondo.

Il Nobel offriva il pretesto perfetto per lasciare l'Europa senza destare sospetti. Il 6 dicembre partirono dalla stazione Termini per Stoccolma, dove Enrico, il 12 dicembre, ricevette dalle mani del re di Svezia il premio Nobel per la Fisica «per le dimostrazioni dell'esistenza di nuovi elementi radioattivi prodotti mediante irradiazione neutronica e per la scoperta delle reazioni nucleari provocate dai neutroni lenti». A quel punto, invece di fare ritorno a Roma, la famiglia Fermi proseguì il viaggio verso gli Stati Uniti. Lasciavano dietro di sé una realtà politica e un'Europa sempre più cupa.

3. Il primo reattore nucleare

I Fermi giunsero a New York il 2 gennaio 1939. Enrico aveva accettato una cattedra alla Columbia University e il giorno del suo arrivo fece domanda di naturalizzazione, che fu accettata l'11 luglio 1944.

Davanti a lui si apriva un mondo completamente nuovo, caratterizzato da risorse scientifiche senza precedenti e da un clima internazionale destinato a essere rapidamente travolto dalla guerra. Tra il 1933 e il 1941 più di cento fisici, in maggioranza ebrei, lasciarono l'Europa per sfuggire alle persecuzioni razziali e alla difficile e pericolosa situazione politica creata dal nazifascismo. Tra di loro c'erano scienziati del calibro di Hans Bethe, Johann Von Neumann, Edward Teller, Eugene Wigner. Fu così che il baricentro della fisica si spostò dall'Europa agli Stati Uniti. Ciò contribuì anche a influenzare le sorti della guerra con l'invenzione della bomba atomica.

A New York, due settimane dopo l'arrivo di Fermi, giunse il grande fisico danese Niels Bohr portando la notizia della scoperta della fissione dell'uranio. Una scoperta che certamente era stata alla portata del gruppo di Fermi nel corso dei celebri esperimenti del 1934, ma che era sempre sfuggita sia per insufficienti conoscenze di chimica, necessarie per analizzare correttamente i prodotti di reazione, sia per circostanze fortuite.

Ora che il processo fisico della fissione era finalmente stato interpretato correttamente, Fermi fu tra i primi a rendersi conto delle sue conseguenze. Per la prima volta apparve chiaro il significato più profondo delle ricerche condotte negli anni precedenti. L'energia racchiusa nel nucleo atomico non era soltanto un concetto teorico: poteva essere liberata concretamente.

Fermi fu tra i primi a ipotizzare che, nell'atto di fissione di un nucleo provocato da un neutrone, altri neutroni potevano essere emessi e che, se questi fossero stati in numero sufficiente e fossero stati a loro volta capaci di provocare degli atti di fissione, si sarebbe potuta avere una «reazione a catena». Se fosse stato possibile controllare il processo, si sarebbe aperta la strada a una nuova fonte di energia. Se invece la reazione fosse diventata incontrollata, si sarebbe potuta costruire un'arma di potenza mai vista prima.

In entrambi i casi si trattava di una questione di enorme interesse e la guerra che stava per travolgere l'Europa conferiva a queste prospettive

un'urgenza del tutto nuova. Fermi si trovava in una posizione privilegiata per indagarla a fondo, data la sua esperienza a Roma con i neutroni che considerava, come ebbe a dire in seguito, «un po' i miei parenti».

Proprio alla Columbia University, con il contribuito, non privo di contrasti, del fisico ungherese Leo Szilard, Fermi giunse, tra il 1939 e il 1941, a padroneggiare completamente il fenomeno di fissione e a valutare la fattibilità di una reazione a catena facente impiego di uranio naturale.

Ciò che riuscì a dimostrare sperimentalmente è che nella fissione indotta da neutroni si producono effettivamente più neutroni di quelli consumati. Il surplus è però molto piccolo, e dipende fortemente dalla geometria dell'apparato, dalla purezza dell'uranio e dalla sostanza usata come «moderatore». Quest'ultima serve per rallentare i neutroni (come la paraffina negli esperimenti di via Panisperna), riducendone cioè la velocità a valori tali da massimizzare la probabilità di fissione una volta che il neutrone «lento» sia stato catturato dal nucleo di uranio. I neutroni lenti interagiscono per più tempo, rispetto a quelli veloci, col nucleo, e hanno quindi più probabilità di causarne la rottura.

Nel corso delle sue ricerche, Fermi si rese conto che, come moderatore, l'acqua non andava bene: assorbiva troppi neutroni. Nell'estate del 1939 lui e Szilard giunsero indipendentemente a comprendere che il carbonio, sotto forma di grafite, aveva migliori possibilità di riuscita. Per dimostrarlo occorrevano notevoli quantità di grafite, ma i costi erano insostenibili. Fu a quel punto che entrarono in gioco le capacità di Szilard di intessere rapporti politici al di fuori della ristretta cerchia dei fisici.

Non bisogna scordare il drammatico contesto storico di riferimento. Molti scienziati emigrati dalla Germania e dall'Europa centrale temevano infatti che il regime nazista potesse sviluppare per primo un'arma nucleare.

Tra questi vi era lo stesso Szilard, il quale riuscì a convincere Albert Einstein – il massimo fisico vivente, dal 1933 riparato a Princeton – a firmare, nell'agosto del 1939, la celebre lettera indirizzata al presidente Franklin Delano Roosevelt. Nella missiva, il capo di Stato americano veniva informato delle potenzialità delle ricerche che si stavano svolgendo alla Columbia, mentre veniva segnalato il pericolo rappresentato dalle ricerche tedesche sull'uranio e si invitava il governo americano a sostenere programmi di studio in quel settore.

La lettera di Einstein, unitamente a ulteriori pressioni, permise ai fisici della Columbia di ottenere il finanziamento necessario all'acquisto delle prime quattro tonnellate di grafite, che furono consegnate nei primi mesi del 1940. Il punto cruciale era capire se il carbonio, sotto forma di grafite, potesse essere usato come moderatore, cioè per rallentare i neutroni senza «mangiarne» troppi, in una reazione a catena con uranio naturale.

Ecco allora che Fermi, utilizzando le stesse tecniche di cui era diventato esperto a Roma, costruì al settimo piano del Pupin Laboratory della Columbia una prima struttura verticale di blocchetti di grafite, con una sorgente neutronica alla base e delle lamine di rodio poste a diverse distanze come rivelatori. Le lamine venivano irradiate; quindi, si misurava rapidamente la radioattività indotta, perché il rodio aveva una vita media molto breve. Il risultato fu incoraggiante: la grafite sembrava compatibile con una reazione a catena basata su uranio naturale.

Quasi contemporaneamente, venne inoltre confermata l'intuizione di Bohr secondo la quale solo l'uranio-235 subiva fissione con neutroni lenti. Il problema è che questo isotopo rappresenta solo il 7 per mille dell'uranio naturale, mentre separarlo dal più comune uranio-238 era tecnicamente difficilissimo. Mentre Bohr e molti altri propendevano per separare l'uranio-235 e usare quindi uranio «arricchito», Fermi e Szilard erano certi di riuscire a ottenere una reazione a catena con uranio naturale e grafite.

Gli esperimenti alla Columbia proseguirono per tutto il 1940 e il 1941. Di quell'epoca il contributo teorico più importante di Fermi riguarda un modello in base al quale è possibile conoscere le proprietà del flusso di neutroni punto per punto nel sistema costituito dall'uranio e dalla grafite. Grandezza fondamentale di tale teoria è il fattore di riproduzione o moltiplicazione, indicato come k, che è il rapporto tra i neutroni prodotti in una fissione e la somma di quelli assorbiti o perduti nella generazione precedente. Se k è minore di 1, i neutroni diminuiscono progressivamente e la reazione si spegne. Se k è uguale a 1, la reazione si mantiene stabile. Se k è maggiore di 1, la reazione cresce.

Nell'estate del 1941 venne eseguito il primo esperimento su un sistema uranio-grafite di dimensioni rilevanti: questa fu la prima vera «pila esponenziale» di Fermi, ovvero una struttura subcritica, cioè

non ancora capace di sostenere da sola una reazione a catena, ma utile per misurare il fattore di moltiplicazione neutronica. Il valore ottenuto fu infatti 0,87, quindi ancora troppo basso. Fermi capì però quali erano i problemi tecnici: bisognava ridurre tutti gli assorbimenti inutili di neutroni. Il gruppo continuò quindi a lavorare per ridurre le impurità, l'umidità e migliorare la disposizione dell'uranio nella grafite.

Nel frattempo, il contesto internazionale stava cambiando rapidamente. Fin dall'ottobre 1939 era stato creato un «Comitato per l'uranio» sotto la supervisione di Lyman Briggs. Il progetto venne in seguito riorganizzato più volte: già nel giugno 1940 nacque il National Defense Research Committee, con l'obiettivo di mobilitare la scienza a scopi bellici. All'inizio, però, i lavori di Fermi non sembravano ancora avere una priorità militare o strategica: un reattore appariva più utile per produrre energia o forse per la propulsione dei sottomarini, non ancora quale elemento centrale per costruire una bomba.

L'8 dicembre 1941, a seguito dello storico attacco a sorpresa della flotta giapponese contro la base navale di Pearl Harbor, gli Stati Uniti dichiararono guerra al Giappone, entrando ufficialmente nella Seconda guerra mondiale. Un paio di giorni prima, il 6 dicembre, il presidente Roosevelt aveva già ordinato il massimo sforzo verso la produzione di un ordigno nucleare.

L'obbiettivo si poteva centrare attraverso due strade: preparare uranio arricchito con uranio-235; oppure utilizzare un altro esplosivo nucleare, il plutonio. Qui il ruolo di Fermi si rivelò cruciale.

Nell'estate del 1940 a Berkeley era stato prodotto il primo elemento transuranico, il nettunio-239, che vive solo 2,3 giorni prima di decadere formando, appunto, il plutonio-239. In base a considerazioni teoriche, era probabile che il plutonio desse luogo a fissione, se bombardato con neutroni lenti. Se, allora, si fosse potuta realizzare una reazione a catena facente uso di uranio naturale, si sarebbe accumulata nel reattore anche una certa quantità di plutonio-239, che avrebbe potuto essere separato chimicamente dall'uranio del reattore e usato come esplosivo nucleare.

Nel dicembre del 1940 Emilio Segrè – uno dei «ragazzi di via Panisperna», emigrato in California fin dal 1938 – e Fermi discussero a lungo l'ipotesi di realizzare, sfruttando il ciclotrone di Berkeley, una quantità di plutonio-239 sufficiente a studiarne le proprietà fisiche. Gli

esperimenti mostrarono che non solo il plutonio-239 era fissionabile, ma aveva una vita media molto lunga, cosa che ne avrebbe consentito la separazione e l'accumulo.

Il progetto di Fermi di realizzare una reazione a catena con uranio naturale divenne perciò fondamentale: non serviva solo a dimostrare una reazione a catena, ma poteva diventare il mezzo per produrre plutonio in quantità sufficienti. Nel 1942 Fermi montò una nuova pila esponenziale: il valore di *k* salì a 0,918. Non era ancora sufficiente, ma la strada era quella giusta.

A quel punto il grande fisico americano Arthur H. Compton, che nel frattempo era divenuto responsabile del lavoro relativo alla reazione a catena, decise di spostare il progetto a Chicago, presso la sua università. Fermi si trasferì definitivamente nella città dell'Illinois nell'aprile del 1942.

Qui ottenne un valore di *k* molto vicino a 1, cioè 0,995: era ormai realistico pensare a una pila critica vera e propria. Bisognava ingrandire la struttura e compattarla il più possibile, perché i neutroni non dovevano disperdersi all'esterno. Era anche necessario migliorare la purezza della grafite e usare uranio metallico, più denso dell'ossido. In questo modo Fermi era convinto che il fattore di moltiplicazione effettivo potesse raggiungere il valore critico.

Infatti, nel giugno 1942 gli esperimenti rivelarono i primi valori di *k* maggiori di 1. Si valutò che nel giro di pochi mesi i quantitativi di uranio e di grafite che continuavano ad arrivare sarebbero stati sufficienti ad assemblare una struttura che avrebbe permesso una reazione a catena autosostenuta.

Fu allora che Roosevelt autorizzò il coinvolgimento diretto dei militari: il generale Leslie G. Groves diede subito al progetto massima priorità e mise in moto l'organizzazione industriale necessaria. Nell'agosto dello stesso anno venne creato il Manhattan Engineer District, così chiamato perché i suoi primi uffici si trovavano a New York. Da quel momento il programma atomico entrò in una fase nuova: non era più solo una grande impresa scientifica, ma un progetto politico, militare e industriale su larga scala.

In queste vicende, Fermi ebbe un ruolo di primo piano, anche se, dopo l'entrata in guerra degli Stati Uniti, in quanto cittadino italiano, aveva acquisito formalmente lo status di «straniero nemico». Nonostante ciò, il suo coinvolgimento non venne mai messo in discussione.

La costruzione della pila iniziò il 6 novembre 1942 nello Stagg Field, un vecchio stadio da football ormai in disuso. La struttura era composta da strati alternati di grafite e uranio, con la prima che serviva da moderatore e il secondo come materiale fissile. Erano presenti barre di controllo di cadmio (un potente assorbitore di neutroni), usate per tenere il flusso di neutroni sotto il livello di criticità: in pratica il freno della reazione. Fermi organizzò il lavoro in due squadre, una di giorno e una di notte, e fece predisporre diversi sistemi di sicurezza tra cui, oltre le barre di emergenza, anche secchi con soluzione di solfato di cadmio da versare sulla pila in caso estremo.

Nella notte del 1° dicembre la configurazione finale era pronta. Il giorno successivo, 2 dicembre 1942, Fermi prese la direzione dell'esperimento di fronte ad alcune decine di spettatori. Diede disposizione di togliere a poco a poco dalla pila le barre rivestite di cadmio. Man mano che le barre venivano estratte, Fermi misurava il flusso di neutroni e lo confrontava con i suoi calcoli. A un certo punto annunciò: «La pila è critica». La pila venne lasciata funzionare per ventotto minuti, a una potenza massima di 0,5 watt. Per la prima volta nella storia, una reazione nucleare a catena autosostenuta veniva prodotta e controllata dall'essere umano.

In seguito, lo Stagg Field venne demolito. Oggi l'area è un sito d'importanza storica in cui campeggia la celebre opera d'arte monumentale intitolata *Nuclear Energy* dello scultore britannico Henry Moore. Di fronte al monumento è murata una targa che recita: «Il 2 dicembre 1942 l'essere umano raggiunse qui la prima reazione a catena auto-sostenuta dando così inizio al rilascio controllato di energia nucleare».

In occasione degli ottant'anni dalla costruzione della pila di Fermi, il Politecnico di Milano ha conferito la laurea magistrale *honoris causa* in Nuclear Engineering a Rafael Mariano Grossi, dal 2019 Direttore Generale dell'International Atomic Energy Agency (IAEA). L'IAEA, all'interno della famiglia delle Nazioni Unite, è l'organismo internazionale per la cooperazione nel campo nucleare. L'Agenzia collabora con i suoi 175 Stati membri e numerosi partner in tutto il mondo per promuovere l'uso sicuro e pacifico delle tecnologie nucleari, ed è stata selezionata dal Comitato Nobel per il conferimento del premio Nobel per la Pace 2005, «per gli sforzi volti a prevenire l'uso dell'energia nucleare per scopi militari e per garantire che l'energia nucleare per scopi pacifici sia utilizzata nel modo più sicuro possibile» (*Figura 3*).

Figura 3 Inaugurazione della targa sullo Stagg Field, 2 dicembre 1947

Fonte: U.S. Department of Energy, Historian's Office.

Il significato dell'esperimento fu enorme: Fermi aveva dimostrato che una reazione a catena controllata era possibile non solo in teoria, ma anche nella pratica. Pochi mesi dopo gli eventi del dicembre 1942 la pila venne trasferita al laboratorio delle Argonne, a un'ora di macchina da Chicago. Lì Fermi continuò le sue ricerche, compiendo le prime scoperte sull'utilizzo dei neutroni per studiare i solidi cristallini, un filone di studi che ebbe grande impulso dopo la guerra.

Ma la pila costituiva anche il primo strumento mediante il quale, su scala più grande, si sarebbe potuto produrre plutonio da utilizzare per scopi militari. Negli anni 1943-1944 fu creato l'impianto di produzione di plutonio di Hanford (stato di Washington), al cui avvio Fermi contribuì.

4. Il progetto Manhattan

In uno scenario internazionale dominato dalla guerra e dalla paura che la Germania arrivasse per prima alla bomba, la pila di Chicago segnò il passaggio definitivo dalla fisica nucleare come ricerca di laboratorio allo sviluppo dell'energia nucleare e del progetto atomico moderno.

Il contesto entro il quale maturò l'esperimento del 2 dicembre 1942 era profondamente diverso da quello che aveva fatto da sfondo alle ricerche di via Panisperna: nei primi anni Trenta la fisica nucleare era una disciplina di frontiera; neanche dieci anni dopo, era diventata una questione strategica per la sicurezza nazionale degli Stati Uniti e degli Alleati.

Da qui ebbe origine il progetto Manhattan. Avviato ufficialmente nel 1942 sotto la direzione militare del generale Leslie Groves e quella scientifica del fisico J. Robert Oppenheimer, il programma rappresentò la più grande impresa scientifica e tecnologica mai realizzata fino ad allora. Decine di migliaia di persone furono coinvolte in una rete di laboratori, impianti industriali e centri di ricerca distribuiti sul territorio americano. Per la prima volta nella storia la ricerca scientifica veniva organizzata secondo modalità che ricordavano la produzione industriale. Fisici, chimici, ingegneri, matematici, tecnici e operai collaboravano all'interno di una struttura rigidamente coordinata, sostenuta da investimenti economici enormi e protetta dal più assoluto segreto.

Fermi si trasferì a Los Alamos, situato su un altopiano nel deserto del New Mexico, nel settembre del 1944 e fu nominato dallo stesso Oppenheimer «Direttore Aggiunto» del laboratorio. Venne creata una nuova divisione, detta «Divisione F» (da «Fermi»), che venne posta sotto la sua giurisdizione: quando emergeva un problema teorico o sperimentale particolarmente difficile, il parere di Fermi rappresentava spesso il punto di riferimento per l'intero gruppo.

Il progetto procedeva rapidamente: mentre a Oak Ridge, Tennessee, e a Hanford, Washington, si producevano i materiali fissili necessari alla costruzione delle bombe, a Los Alamos si lavorava alla progettazione degli ordigni e alla comprensione dei meccanismi che avrebbero consentito di ottenere un'esplosione nucleare.

Nel luglio del 1945 il programma raggiunse il proprio culmine: alle 5:30 del mattino del 16 luglio, nel deserto di Alamogordo, venne effettuato il primo test nucleare della storia. Venne fatta esplodere la prima bomba atomica al plutonio. L'esperimento, denominato Trinity, dimostrò che la bomba funzionava.

Fermi assistette all'esplosione da una postazione distante circa 14 chilometri. Racconta Segrè che: «subito dopo l'esplosione, Fermi si alzò in piedi e fece cadere a terra alcuni

pezzetti di carta, come dei coriandoli. Dalla distanza della sorgente e dalla grandezza dello spostamento dei pezzi di carta calcolò l'energia dell'esplosione e il risultato ottenuto si dimostrò una buona approssimazione della misura finale ottenuta con mezzi assai più elaborati e complessi».

Poche settimane più tardi, il 6 agosto 1945, una bomba all'uranio venne sganciata sulla città giapponese di Hiroshima. Tre giorni dopo una seconda bomba, al plutonio, colpì Nagasaki.

Le conseguenze furono devastanti: decine di migliaia di persone morirono immediatamente. Molte altre subirono gli effetti delle radiazioni nei mesi e negli anni successivi. Il Giappone annunciò la propria resa incondizionata il 15 agosto e la Seconda guerra mondiale giunse alla conclusione.

Alla fine della guerra, Fermi accettò l'offerta di tornare a Chicago per lavorare al costituendo Institute for Nuclear Studies. Aveva 44 anni ed era il più grande esperto di neutroni al mondo. Già nel 1944 aveva espresso il desiderio di costruire, a guerra finita, un acceleratore di particelle, per compiere studi sui nuclei. Una volta tornati a Chicago, però, i fisici dovettero attendere che nuovi strumenti e nuove macchine venissero costruite.

Nell'attesa, Fermi continuò la ricerca iniziata alle Argonne sulla fisica dei neutroni, sfruttando il reattore come sorgente. Con Leona Marshall e altri fece una serie di lavori eleganti ed efficaci, per mezzo dei quali mostrò le potenzialità offerte dai neutroni per investigare la struttura dei solidi cristallini.

Il mondo della fisica uscì trasformato dagli anni della guerra, in particolare a causa dell'ingente sforzo prodotto dagli Stati Uniti in vari settori della ricerca scientifica e tecnologica. Il progetto nucleare costò intorno ai tre miliardi di dollari, solo l'1 per cento delle spese di guerra degli Stati Uniti, ma una cifra immane rispetto ai bilanci della ricerca scientifica di quell'epoca.

I recenti sviluppi della fisica delle particelle, poi, dimostravano che, per progredire ancora, si doveva passare alla produzione di macchine acceleratrici sempre più potenti e così costose che non potevano più essere appannaggio di una sola istituzione scientifica, ma dovevano essere condivise tra più università riunite in consorzi, che cominciarono quindi a formarsi nell'immediato dopoguerra. Era l'inizio della cosiddetta

Big Science, che all'inizio mutuò organizzazione e aspetti progettuali dai grandi progetti militari degli anni di guerra.

I fisici nucleari che, come Fermi, erano stati la spina dorsale dei programmi militari americani, tornati nelle loro istituzioni accademiche, si rivelarono tenaci sostenitori dello sviluppo della fisica delle alte energie, contribuendovi non solo da un punto di vista scientifico, ma anche organizzativo e politico.

Per parte sua, Fermi fu membro del General Advisory Committee della Atomic Energy Commission dal 1947 al 1950. Durante tale periodo, partecipò alle riunioni che si tenevano a Washington con cadenza più o meno bimestrale, ogni volta preparandosi con scrupolo.

Nell'estate del 1949 Fermi tornò in Italia dopo quasi undici anni per prendere parte a un congresso sulla fisica dei raggi cosmici che si tenne a Como, in settembre.

Nel 1954 si recò in Europa dove tenne dei corsi, molto apprezzati, alle scuole estive di Les Houches in Francia e di Varenna in Italia. Durante il viaggio cominciò a soffrire seriamente per i disturbi di quella che al suo ritorno a Chicago si rivelò una malattia incurabile.

Morì nella sua casa di Chicago domenica 28 novembre 1954, all'età di 53 anni, a causa di un cancro allo stomaco.

Parte II
La radioattività dalla natura alla cura, dalla terra allo spazio

1. Che cos'è la radioattività

La radioattività è il fenomeno mediante il quale nuclei atomici instabili si trasformano spontaneamente, emettendo particelle o radiazioni ad alta energia.

La radioattività naturale venne scoperta a Parigi nel 1896 da Henri Becquerel e poi studiata da Marie Curie. Esiste tuttavia anche la radioattività artificiale, largamente utilizzata nella medicina, nella ricerca scientifica e nell'industria, ottenuta attraverso reazioni nucleari prodotte in laboratorio. Nel 1934 i coniugi Irène Curie, figlia di Marie, e Frédéric Joliot dimostrarono che, bombardando alcuni elementi con particelle alfa, era possibile produrre isotopi radioattivi non presenti in natura. Nello stesso anno, Fermi e il gruppo di via Panisperna, utilizzando i neutroni, produssero isotopi radioattivi per molti altri elementi, specialmente più pesanti, che la tecnica usata a Parigi non permetteva di ottenere.

La stabilità di un nucleo dipende, tra gli altri fattori, dall'equilibrio tra il numero di protoni e quello dei neutroni che lo compongono. Quando tale equilibrio non è favorevole, il nucleo tende a trasformarsi in una configurazione più stabile attraverso un processo chiamato *decadimento radioattivo*.

La velocità con cui avviene questa trasformazione è descritta dall'*emivita*, cioè dal tempo necessario affinché decada la metà dei nuclei radioattivi presenti in un campione. Il decadimento di ogni singolo nucleo è un evento casuale e non è possibile prevedere esattamente quando avverrà. È però possibile determinare, su un grande numero di nuclei, la probabilità con cui il processo si verifica nel tempo. L'emivita è una proprietà caratteristica di ciascun radioisotopo e, in condizioni ordinarie, non dipende da fattori esterni come la temperatura, la pressione o l'ambiente chimico.

Le emivite possono variare enormemente: da piccolissime frazioni di secondo fino a intervalli paragonabili all'età dell'Universo. Lo iodio-131, per esempio, ha un'emivita di circa otto giorni, mentre il potassio-40, una delle principali fonti di radioattività naturale presente anche nel corpo umano, ha un'emivita di circa 1,42 miliardi di anni. I radioisotopi impiegati in medicina e nell'industria hanno generalmente emivite comprese tra poche ore e alcuni giorni o mesi. A parità di quantità di nuclei presenti, quanto più breve è l'emivita, tanto maggiore è l'attività radioattiva del campione.

La radioattività non è dunque un fenomeno estraneo o eccezionale, ma una componente fondamentale e inevitabile del mondo naturale. La vita sulla Terra si è sviluppata in presenza di una costante esposizione alle radiazioni provenienti dal suolo, dall'atmosfera, dallo spazio e dagli stessi organismi viventi, adattandosi ad esse e, in alcuni casi, sfruttandone indirettamente gli effetti.

I processi radioattivi hanno contribuito alla formazione e all'evoluzione dell'ambiente terrestre e potrebbero avere avuto un ruolo anche nella storia della vita. Per questa ragione la radioattività continua a essere studiata nell'ambito della ricerca fondamentale. Le teorie nucleari prevedono l'esistenza di circa settemila differenti nuclei atomici e, nei laboratori di fisica nucleare europei, nordamericani e asiatici, si conducono esperimenti finalizzati alla produzione e allo studio di nuovi isotopi radioattivi.

L'obiettivo principale di queste ricerche è comprendere le forze e le interazioni che agiscono all'interno del nucleo, nonché le proprietà che permettono di ricostruire i processi attraverso i quali si sono formati gli elementi chimici. Questi studi, oltre ad ampliare la nostra conoscenza della materia, hanno applicazioni particolarmente importanti in campo medico.

Alla ricerca condotta nei laboratori terrestri si affiancano le osservazioni astronomiche. Il James Webb Space Telescope, per esempio, permette di studiare diverse fasi della storia dell'Universo: dalle prime sorgenti luminose successive al Big Bang alla formazione delle stelle, delle galassie e dei sistemi planetari, fino all'osservazione di ambienti che potrebbero presentare condizioni compatibili con la vita.
Anche la rivelazione delle onde gravitazionali ha confermato l'esistenza di eventi cosmici estremamente energetici, come la fusione di stelle di neutroni, nei quali possono formarsi alcuni degli elementi più pesanti, tra cui oro, platino e uranio. L'Italia partecipa in

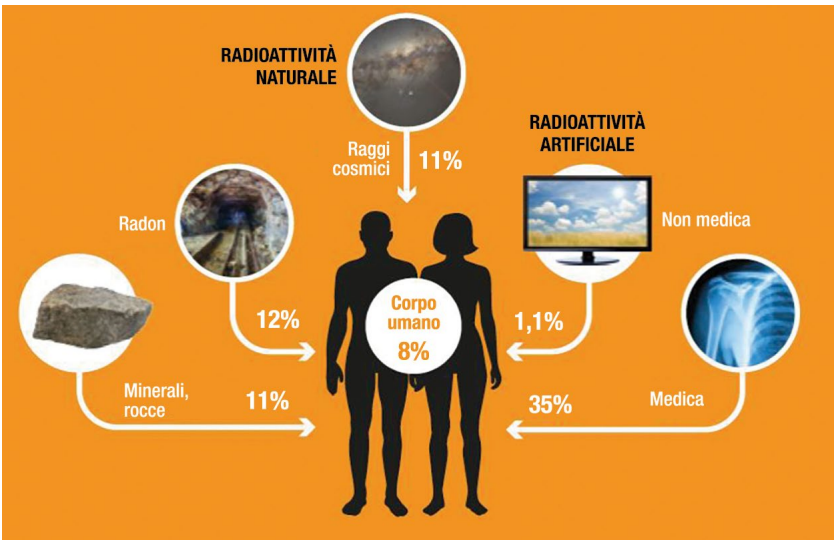
modo significativo a questo settore di ricerca, anche attraverso il progetto dell'Einstein Telescope, destinato allo studio delle onde gravitazionali con una sensibilità molto superiore rispetto agli strumenti attuali.

Grazie alla ricerca di base, l'umanità ha progressivamente imparato a comprendere e utilizzare le proprietà dei materiali radioattivi, sviluppando al tempo stesso strumenti sempre più efficaci per proteggersi dagli effetti delle esposizioni più intense.

La radioattività è infatti una presenza costante nella vita quotidiana (*Figura 4*). L'esposizione varia a seconda dell'ambiente e delle attività svolte: aumenta, per esempio, durante un viaggio in aereo o ad alta quota, mentre negli ambienti sotterranei e nei piani più bassi degli edifici può essere maggiore a causa della presenza di radon. Anche il corpo umano è naturalmente radioattivo, perché contiene milioni di atomi instabili, tra cui quelli del potassio-40.

I decadimenti radioattivi che avvengono all'interno della Terra contribuiscono inoltre alla produzione del calore geotermico. Senza questa

Figura 4 Valori medi di sorgenti significative di radiazione a cui il corpo umano è esposto



fonte di energia, insieme al calore residuo derivante dalla formazione del pianeta, l'interno terrestre si sarebbe raffreddato molto più rapidamente, modificando profondamente l'evoluzione geologica e le condizioni che hanno reso possibile la vita.

Nelle profondità della crosta terrestre sono ancora presenti radioisotopi primordiali, cioè nuclei formatisi prima della nascita della Terra e sopravvissuti fino a oggi grazie alla loro lunghissima emivita. Tra questi vi sono l'uranio-235, l'uranio-238 e il torio-232. Dal loro decadimento si originano altri isotopi radioattivi, tra cui il radon-222, un gas che può migrare attraverso rocce e terreni e raggiungere la superficie.

Il radon può essere presente nelle acque sotterranee, nei suoli, nelle grotte e negli ambienti chiusi a contatto diretto con il terreno. Quando si accumula oltre determinate concentrazioni, può rappresentare un rischio per la salute. Per questa ragione, le autorità nazionali svolgono attività di monitoraggio e mappatura della sua presenza nell'aria e nell'acqua, individuando le aree nelle quali sono necessari interventi di prevenzione, come una migliore ventilazione degli edifici.

Nonostante l'esistenza di una normativa internazionale rigorosa sulla gestione delle sostanze radioattive, il termine «radioattivo» continua spesso a suscitare timore. Nell'immaginario collettivo, la radioattività è associata soprattutto agli incidenti nelle centrali nucleari, alle scorie a lunga vita e ai rischi legati al trasporto e all'impiego dei materiali radioattivi.

Questa percezione ha contribuito a rendere molti Paesi particolarmente prudenti nell'investire in nuove tecnologie fondate sulla scienza nucleare. Tuttavia, distinguere tra le diverse forme, intensità e modalità di esposizione è essenziale per valutare correttamente i rischi. La radioattività naturale di fondo, l'impiego controllato di radioisotopi in medicina e una grave contaminazione ambientale rappresentano infatti condizioni profondamente diverse.

La comprensione dei fenomeni radioattivi ha permesso di sviluppare applicazioni estremamente vantaggiose. Le moderne tecnologie consentono di produrre, controllare e utilizzare i radioisotopi non soltanto nel settore energetico, ma anche come strumenti di analisi, monitoraggio e diagnosi e, soprattutto, per migliorare la salute umana.

Oggi si conoscono ventotto elementi che possiedono radioisotopi naturali presenti sulla Terra fin dalle sue origini. Altri nuclei radioattivi

vengono prodotti continuamente attraverso processi naturali, come il decadimento dell'uranio e del torio o l'interazione tra la radiazione cosmica e gli atomi dell'atmosfera.

Un esempio importante è il carbonio-14, che si forma quando le radiazioni ad alta energia provenienti dallo spazio interagiscono con l'atmosfera terrestre. Una volta prodotto, entra nel ciclo del carbonio e viene assorbito dagli organismi viventi. Quando un organismo muore, lo scambio di carbonio con l'ambiente cessa e la quantità di carbonio-14 presente nei suoi resti comincia a diminuire secondo un ritmo determinato dalla sua emivita, pari a circa 5730 anni. Misurando il carbonio-14 residuo è quindi possibile stimare l'età di materiali organici appartenenti al passato. Questo principio è alla base della datazione radiometrica, che ha assunto un ruolo fondamentale in archeologia, geologia e paleontologia.

I radioisotopi costituiscono anche preziosi traccianti per ricostruire il clima e l'ambiente del passato. Le variazioni nei rapporti tra isotopi di elementi appartenenti al gruppo degli attinidi, come torio e uranio, osservate nei sedimenti dell'Atlantico centrale e dell'Oceano Australe, possono fornire indicazioni sui cambiamenti avvenuti nella circolazione oceanica. In questo modo la fisica nucleare contribuisce allo studio dei sistemi climatici e della loro evoluzione.

Anche l'industria e l'agricoltura utilizzano numerosi metodi di analisi e monitoraggio basati sulla fisica nucleare. Radioisotopi e fasci di particelle prodotti attraverso reazioni nucleari possono essere impiegati per studiare la composizione dei materiali, individuare difetti nei manufatti, controllare lo spessore dei prodotti, seguire il movimento di sostanze all'interno di un sistema e verificare l'efficienza dei processi produttivi.

La radioattività non deve perciò essere considerata soltanto come una fonte di rischio. È un fenomeno naturale che ha accompagnato l'intera storia della Terra e della vita e che, grazie alla ricerca scientifica, è diventato anche uno strumento di conoscenza e di progresso. Comprenderne le proprietà significa imparare a valutarne correttamente i pericoli, ma anche riconoscere le numerose applicazioni che essa rende possibili nella medicina, nell'industria, nell'agricoltura, nella protezione dell'ambiente e nello studio dell'Universo.

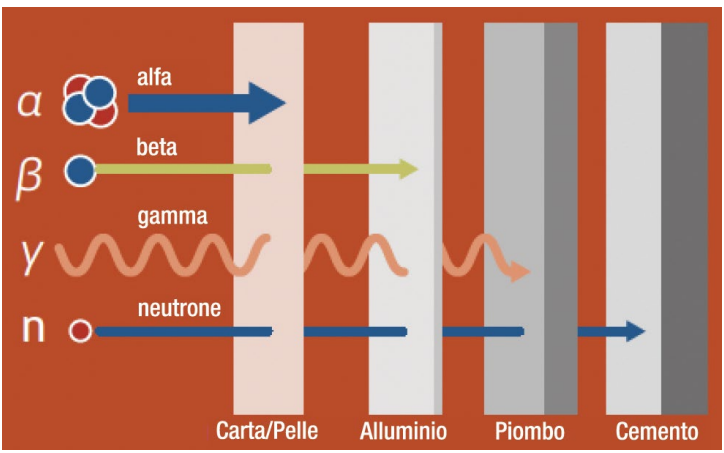
2. La radioattività e le sue interazioni con la materia

Le radiazioni ad alta energia, associate ai fenomeni radioattivi, possono penetrare nella materia e interagire con gli atomi e le molecole che la compongono (*Figura 5*). Quando una radiazione attraversa un materiale, può trasferire parte della propria energia agli elettroni atomici, portandoli temporaneamente a livelli energetici più elevati. Nel ritornare allo stato iniziale, gli elettroni rilasciano l'energia assorbita, talvolta sotto forma di luce.

Questo fenomeno è stato sfruttato, per esempio, negli orologi prodotti nella prima metà del Novecento, i cui numeri e le cui lancette venivano rivestiti con vernici luminescenti contenenti radio-226. Le radiazioni emesse dal radio eccitavano il materiale presente nella vernice, provocando una luminosità persistente e rendendo possibile leggere l'ora anche al buio. Soltanto in seguito furono pienamente riconosciuti i gravi rischi connessi alla lavorazione e all'impiego incontrollato di queste sostanze.

Se l'energia trasferita è sufficientemente elevata, la radiazione può espellere completamente uno o più elettroni dagli atomi. Si formano così particelle elettricamente cariche, chiamate ioni: per questa ragione si parla di radiazioni ionizzanti. Il processo di ionizzazione può alterare la struttura dei materiali, rompere i legami chimici e provocare la degradazione delle molecole interessate.

Figura 5 Potere di penetrazione delle radiazioni



Gli effetti sono particolarmente importanti nella materia biologica. Quando le radiazioni interagiscono con le cellule, possono danneggiare direttamente biomolecole fondamentali, come il DNA, oppure produrre sostanze chimicamente molto reattive capaci di alterarne la struttura. Il danno può essere riparato dalla cellula, ma può anche determinare mutazioni genetiche, comprometterne il funzionamento o provocarne la morte.

Proprio questa capacità distruttiva viene utilizzata, in condizioni accuratamente controllate, nella cura dei tumori. La radioterapia impiega radiazioni ionizzanti per danneggiare il DNA delle cellule tumorali e impedirne la proliferazione. Nelle terapie con particelle, come quelle basate su protoni o altri ioni, l'energia può essere depositata con particolare precisione nella regione occupata dal tumore, cercando di limitare il più possibile il danno ai tessuti sani circostanti. Un effetto potenzialmente pericoloso diventa così, grazie alla conoscenza scientifica e al controllo tecnologico, un importante strumento terapeutico.

Gli effetti biologici delle radiazioni dipendono soprattutto dalla dose assorbita, dal tipo di radiazione, dalla durata dell'esposizione e dagli organi interessati. Dosi molto elevate possono provocare danni gravi e persino letali. Migliaia di persone morirono per le conseguenze immediate e successive dei bombardamenti atomici di Hiroshima e Nagasaki del 1945. Nel 1986, in seguito all'incidente nella centrale nucleare di Černobyl', ventotto persone morirono nei mesi successivi per gli effetti dell'esposizione acuta alle radiazioni, mentre nella popolazione delle aree contaminate emersero ulteriori problemi sanitari.

Queste esposizioni eccezionali non devono però essere confuse con la normale radioattività di fondo, proveniente dai raggi cosmici, dalle rocce, dal suolo, dall'aria e dagli stessi radionuclidi presenti nel corpo umano. Gli organismi viventi convivono con questa radiazione naturale da miliardi di anni e possiedono meccanismi capaci di riparare molti dei danni prodotti nelle cellule. Quando la dose è bassa, soltanto un numero limitato di cellule viene colpito e il danno può generalmente essere corretto o eliminato dall'organismo.

Quando invece l'esposizione aumenta, cresce anche il numero di cellule interessate e i sistemi naturali di riparazione possono non essere più sufficienti. La pericolosità delle radiazioni non dipende quindi dalla sola presenza della radioattività, ma dalla quantità di energia assorbita e dalle condizioni nelle quali avviene l'esposizione. Come accade

per molte altre sostanze e forme di energia, è la dose a determinare la differenza tra una condizione tollerabile, un'applicazione utile e un possibile danno.

La necessità di proteggere i lavoratori e la popolazione portò, nel 1928, alla fondazione del Comitato internazionale per la protezione dai raggi X e dal radio, un organismo indipendente formato da esperti del settore. Successivamente esso assunse il nome di Commissione internazionale per la protezione radiologica, o ICRP.
La Commissione elabora i principi fondamentali e le raccomandazioni internazionali in materia di radioprotezione. Tali indicazioni costituiscono la base delle normative adottate nei diversi Paesi per regolare l'esposizione professionale e quella della popolazione generale. Gli standard di sicurezza stabiliscono limiti, procedure di controllo e misure di prevenzione destinati a ridurre le esposizioni non necessarie e a garantire che l'impiego delle radiazioni avvenga soltanto quando i benefici attesi siano superiori ai possibili rischi.

3. Le applicazioni della radioattività

3.1 *Medicina nucleare*

Le tecniche sviluppate nell'ambito della fisica nucleare hanno contribuito in modo determinante al miglioramento della salute umana, mettendo a disposizione della medicina strumenti capaci di osservare il funzionamento dell'organismo, individuare precocemente numerose patologie e intervenire in maniera sempre più precisa nel loro trattamento. A queste applicazioni cliniche si aggiungono metodi analitici estremamente sofisticati, oggi indispensabili nella ricerca biomedica e nello sviluppo di nuovi farmaci e vaccini.

Il contributo della fisica nucleare alla medicina è spesso poco evidente al grande pubblico. Eppure, le particelle subatomiche e i raggi gamma emessi dai nuclei instabili vengono utilizzati quotidianamente per visualizzare strutture interne del corpo, seguire i processi biologici nei tessuti viventi, trattare malattie gravi come i tumori e, in alcuni casi, alleviare il dolore.

Per individuare e produrre radioisotopi adatti all'impiego clinico è necessaria una conoscenza approfondita delle reazioni e della struttura nucleare. È altrettanto importante comprendere il modo in cui questi isotopi interagiscono con le molecole biologiche: le proteine, tra cui enzimi e anticorpi, i lipidi che costituiscono le membrane cellulari e, naturalmente, il DNA.

La medicina nucleare nasce dunque dall'incontro di discipline diverse. Fisici nucleari, medici, chimici, biologi, farmacologi e ingegneri collaborano alla produzione degli isotopi, alla preparazione dei radiofarmaci, alla progettazione degli strumenti di rivelazione e alla definizione delle procedure diagnostiche e terapeutiche. La complessità di questo percorso mostra come una scoperta maturata nella ricerca fondamentale possa trasformarsi, attraverso una lunga catena di competenze, in uno strumento direttamente utilizzabile nella cura dei pazienti.

Anche i fasci di particelle ad alta energia prodotti mediante acceleratori vengono impiegati sempre più frequentemente nelle terapie oncologiche e nello studio della struttura e del comportamento della materia biologica a livello molecolare. Lo sviluppo di farmaci e vaccini destinati al trattamento di patologie complesse, tra cui le malattie neurodegenerative e le infezioni virali, dipende in misura crescente da tecniche analitiche che hanno le proprie radici nella fisica nucleare.

La realizzazione di queste applicazioni richiede strutture dotate di apparecchiature complesse, capaci di produrre fasci di particelle ad alta energia, manipolare in sicurezza materiali radioattivi e generare intensi campi magnetici. Non sorprende, quindi, che molte attività di ricerca medica di frontiera siano condotte all'interno di grandi laboratori nazionali e internazionali originariamente dedicati alla fisica nucleare e delle alte energie. In questi centri vengono sviluppate nuove tecnologie che, dopo una fase di sperimentazione, possono essere trasferite agli ospedali e alla pratica clinica.

Ogni anno vengono eseguite numerosissime procedure di fisica medica che impiegano radiazioni, particelle accelerate o radioisotopi per comprendere, diagnosticare e curare i tumori. Queste tecniche sono ormai una componente essenziale dell'assistenza sanitaria e hanno contribuito a migliorare sia la possibilità di guarigione sia la qualità della vita dei pazienti.

In Italia numerosi centri oncologici utilizzano la *radioterapia*, nella quale fasci di radiazione elettromagnetica penetrante vengono prodotti mediante acceleratori di elettroni e indirizzati verso la regione occupata dal tumore. L'energia depositata nei tessuti danneggia il patrimonio genetico delle cellule malate, compromettendone la capacità di dividersi e proliferare.

Il trattamento viene pianificato con grande precisione, cercando di concentrare la dose nella massa tumorale e di limitare l'esposizione dei

tessuti sani circostanti. L'efficacia della radioterapia dipende quindi non soltanto dalle caratteristiche fisiche della radiazione, ma anche dalla qualità delle immagini diagnostiche, dalla ricostruzione tridimensionale del tumore e dalla capacità di adattare il trattamento all'anatomia del singolo paziente.

Accanto alla radioterapia convenzionale si è sviluppata l'*adroterapia*, che utilizza fasci di particelle cariche, come protoni e ioni pesanti, accelerati a elevate energie. Queste particelle possono depositare una parte considerevole della propria energia in una regione ben definita del tessuto, permettendo di colpire il tumore con particolare accuratezza. Tale caratteristica è importante soprattutto quando la massa tumorale si trova in prossimità di organi delicati o in pazienti pediatrici, per i quali è essenziale ridurre quanto più possibile l'irradiazione dei tessuti sani.

In Italia operano importanti strutture specializzate nell'adroterapia. Presso i Laboratori Nazionali del Sud dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), a Catania, è stata installata la prima struttura per il trattamento di melanomi oculari aggressivi con fasci di protoni. A Trento è presente un centro specializzato nella protonterapia, mentre a Pavia si trova il Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica, una delle strutture più avanzate a livello internazionale. Questi centri rappresentano un esempio concreto del passaggio dalla ricerca condotta sugli acceleratori di particelle alla cura dei tumori.

I *radioisotopi* vengono utilizzati in medicina da molti decenni. Ogni anno milioni di procedure basate sul loro impiego vengono eseguite in oltre diecimila ospedali nel mondo. Soltanto in Europa se ne effettuano almeno dieci milioni, e la domanda è destinata ad aumentare con lo sviluppo di nuovi radiofarmaci e di terapie sempre più personalizzate. Presso i Laboratori Nazionali di INFN, in provincia di Padova, c'è una nuova infrastruttura per fasci di ioni radioattivi che è anche specializzata nella produzione di nuovi radioisotopi per uso medico.

Le principali applicazioni dei radioisotopi sono due. Nella diagnostica, un radioisotopo introdotto nell'organismo emette radiazioni che possono essere rivelate dall'esterno, permettendo di ricostruirne la distribuzione e di osservare il funzionamento di uno specifico organo. Nella terapia, invece, vengono selezionati isotopi capaci di emettere radiazioni sufficientemente energetiche da danneggiare e distruggere le cellule malate.

Alcune radiazioni possono essere impiegate anche per sterilizzare dispositivi e materiali sanitari, eliminando microrganismi patogeni senza ricorrere a temperature elevate o a sostanze chimiche che potrebbero danneggiare gli strumenti.

Affinché il radioisotopo raggiunga con sufficiente selettività il tessuto desiderato, viene generalmente legato a una molecola biologicamente attiva. Il composto così ottenuto prende il nome di *radiofarmaco*. La molecola vettore riconosce un determinato processo biologico o una specifica struttura cellulare, mentre l'isotopo permette di localizzarla attraverso la radiazione emessa oppure di esercitare direttamente un effetto terapeutico.

La progettazione di un radiofarmaco richiede quindi la collaborazione tra numerose competenze. Gli ingegneri e i fisici si occupano della produzione degli isotopi mediante reattori o acceleratori; i chimici studiano il modo di incorporarli nelle molecole; i biologi analizzano il loro comportamento nelle cellule; i medici ne valutano l'efficacia diagnostica o terapeutica e ne stabiliscono la corretta somministrazione.

La disponibilità dei radioisotopi costituisce un elemento essenziale per il funzionamento della medicina nucleare. Negli ultimi anni si sono verificate carenze di alcuni isotopi medicali, dovute anche alla progressiva chiusura di reattori di ricerca ormai obsoleti.

Uno degli isotopi più importanti è il tecnezio-99m, largamente utilizzato nella diagnostica per immagini. Le sue caratteristiche fisiche lo rendono particolarmente adatto alla pratica clinica: emette radiazioni facilmente rivelabili e possiede un'emivita abbastanza breve da limitare la durata dell'esposizione del paziente. Tuttavia, proprio la breve emivita impedisce di accumularne grandi quantità e richiede una rete di produzione e distribuzione continua ed efficiente.

Per rispondere alla crescente domanda sono in fase di sviluppo reattori dedicati e metodi alternativi di produzione mediante acceleratori. La ricerca sulle reazioni nucleari ha infatti permesso di individuare nuovi percorsi per ottenere isotopi medicali anche senza ricorrere esclusivamente ai grandi reattori di ricerca. Acceleratori più compatti, soluzioni ingegneristiche diverse e procedure più efficienti di separazione e lavorazione degli isotopi potrebbero rendere la produzione maggiormente distribuita, ridurre la dipendenza da pochi impianti e garantire una fornitura più stabile agli ospedali.

Le procedure diagnostiche rappresentano oltre il 90 per cento delle applicazioni cliniche dei radioisotopi. Esse si basano sulla capacità delle diverse sostanze di concentrarsi selettivamente in alcuni organi o tessuti. La tiroide, per esempio, assorbe i composti contenenti iodio; il cervello utilizza grandi quantità di glucosio; il potassio è particolarmente presente nei muscoli, mentre il fosforo costituisce una componente essenziale delle ossa. Anche elementi come il cobalto, presente nella vitamina B12, e il rame, coinvolto in numerosi processi biologici, possono essere impiegati nella preparazione di molecole diagnostiche.

Marcando queste sostanze con un isotopo radioattivo è possibile seguirne il percorso all'interno dell'organismo. Il medico può così studiare la funzione del cervello, del cuore, dei polmoni, del fegato e di altri organi, osservare il flusso sanguigno, analizzare il metabolismo dei tessuti e monitorare la crescita o il rimodellamento delle ossa.

La medicina nucleare fornisce quindi informazioni diverse rispetto a quelle ottenute dalle tecniche che mostrano soprattutto la struttura anatomica. Essa permette di osservare il funzionamento degli organi e di individuare alterazioni metaboliche o fisiologiche che possono precedere la comparsa di modificazioni visibili nella loro forma.

La diagnosi viene generalmente ottenuta attraverso sistemi computerizzati che rilevano le radiazioni emesse dal radiofarmaco e ne ricostruiscono la distribuzione nell'organismo. La quantità somministrata deve essere appena sufficiente a fornire le informazioni necessarie. Si scelgono preferibilmente isotopi a breve emivita, in modo che l'attività diminuisca rapidamente e che il radiofarmaco venga eliminato dall'organismo in tempi relativamente brevi.

La dose viene mantenuta sufficientemente bassa da non produrre effetti dannosi significativi. Il procedimento risulta così poco invasivo e consente di acquisire immagini successive nel tempo, utili non soltanto per individuare eventuali anomalie, ma anche per seguire processi fisiologici dinamici e valutare la risposta a una terapia.

Tra le tecniche di imaging nate anche grazie alla conoscenza delle proprietà dei nuclei atomici vi è la risonanza magnetica. Essa utilizza intensi campi magnetici e impulsi a radiofrequenza per studiare il comportamento magnetico di alcuni nuclei, in particolare quelli dell'idrogeno o di altri elementi non radioattivi introdotti per questi scopi.

Poiché l'idrogeno è contenuto nelle molecole d'acqua e nei tessuti biologici, la risonanza magnetica permette di ricostruirne la distri-

buzione nell'organismo. Attraverso l'elaborazione dei segnali raccolti è possibile ottenere immagini tridimensionali e ad alta risoluzione di organi come il cervello, il cuore, il fegato e la colonna vertebrale.

A differenza delle tecniche basate sui raggi X o sui radioisotopi, la risonanza magnetica non utilizza radiazioni ionizzanti. È diventata una procedura ospedaliera di routine e nel mondo sono oggi operative decine di migliaia di apparecchiature. La sua storia rappresenta un altro esempio di come lo studio delle proprietà fondamentali della materia possa condurre ad applicazioni mediche inizialmente imprevedibili.

È difficile offrire in poche pagine una descrizione completa delle applicazioni della fisica nucleare alla medicina. È tuttavia significativo concludere ricordando una terapia innovativa che richiama direttamente gli studi condotti da Fermi sull'interazione dei neutroni con la materia: la terapia per cattura neutronica del boro, nota come BNCT.

La tecnica utilizza un isotopo stabile del boro, il boro-10, incorporato in una molecola capace di accumularsi preferenzialmente nelle cellule tumorali. Dopo la somministrazione del farmaco, la regione interessata viene irradiata con neutroni.

Quando un nucleo di boro-10 cattura un neutrone, avviene una reazione nucleare che produce particelle ad alta energia, tra cui una particella alfa. Queste particelle percorrono distanze molto brevi nei tessuti e depositano la propria energia prevalentemente all'interno della cellula che contiene il boro. In linea di principio, ciò permette di distruggere selettivamente le cellule tumorali, limitando il danno a quelle sane circostanti.

L'efficacia della terapia dipende dalla capacità del farmaco di trasportare una quantità sufficiente di boro nelle cellule malate e dalla disponibilità di fasci neutronici con caratteristiche adatte all'impiego clinico. Per questa ragione la BNCT richiede ancora una stretta collaborazione tra fisica nucleare, chimica, biologia e medicina.

La tecnica è studiata soprattutto per tumori difficili da trattare, tra cui alcuni tumori cerebrali, epatici e melanomi maligni. È ancora oggetto di ricerca e sperimentazione in diversi centri del mondo, compresi alcuni progetti italiani. In Italia due impianti per la BNCT sono in fase di realizzazione a Pavia e a Caserta.

Dagli studi sui neutroni avviati da Fermi negli anni Trenta si è così sviluppato un percorso scientifico che continua ancora oggi. Le stesse particelle che permisero di comprendere la struttura del nucleo e di

aprire la strada all'energia nucleare possono essere impiegate, in condizioni accuratamente controllate, per colpire cellule malate e contribuire alla cura dei tumori. È uno degli esempi più significativi della duplice possibilità racchiusa nella conoscenza scientifica e della responsabilità che accompagna ogni sua applicazione.

3.2 *Radiografie per i prodotti industriali*

In ambito industriale è spesso necessario osservare l'interno di componenti e apparecchiature senza smontarli né danneggiarli. Le tecniche radiografiche permettono di ottenere immagini della struttura interna di oggetti anche molto voluminosi, individuando difetti, alterazioni e anomalie che non sarebbero visibili dalla superficie.

Questi metodi appartengono al campo delle prove non distruttive, fondamentali per verificare la qualità dei materiali, controllare i processi di produzione e valutare lo stato di conservazione di impianti e macchinari. La tecnica più adatta viene scelta in base alle dimensioni dell'oggetto, alla sua composizione e al tipo di informazione che si desidera ottenere. Accanto ai tradizionali raggi X si utilizzano raggi gamma, neutroni e, più recentemente, muoni.

I raggi gamma possono essere impiegati in modo simile ai raggi X, ma presentano una maggiore capacità di penetrazione. Questa caratteristica consente di esaminare componenti metallici spessi e strutture difficilmente accessibili, come tubazioni, serbatoi, saldature e parti interne di grandi macchinari.

La *radiografia gamma* è una tecnica di ispezione non distruttiva che permette di individuare crepe nascoste, difetti nelle saldature, ostruzioni, corrosione e danni provocati dall'usura. Può quindi essere utilizzata sia durante la produzione, per verificare la qualità di un componente, sia nel corso della sua vita operativa, per riconoscere precocemente eventuali condizioni di deterioramento.

La sorgente di radiazione è costituita da una piccola quantità di materiale radioattivo racchiusa all'interno di una capsula metallica sigillata e opportunamente schermata. Rispetto agli apparecchi a raggi X, che richiedono un'alimentazione elettrica, queste sorgenti sono più facilmente trasportabili e possono essere utilizzate anche in cantieri, impianti industriali o luoghi nei quali non è possibile installare apparecchiature di grandi dimensioni.

La *radiografia con neutroni* è una tecnica più recente, ma in rapido sviluppo. Il suo principio è simile a quello delle radiografie ottenute con raggi X o raggi gamma: un fascio attraversa l'oggetto da esaminare e un rivelatore registra il modo in cui viene attenuato dai diversi materiali. Acquisendo immagini da più direzioni è possibile estendere il metodo alla tomografia e ottenere una ricostruzione tridimensionale della struttura interna.

I neutroni interagiscono con i nuclei atomici in maniera profondamente diversa rispetto ai raggi X, che interagiscono soprattutto con gli elettroni. Per questo motivo le due tecniche forniscono informazioni complementari.

I raggi X vengono generalmente assorbiti in misura maggiore dagli elementi pesanti e sono quindi particolarmente adatti a visualizzare strutture metalliche dense. I neutroni, invece, possono attraversare molti metalli con relativa facilità, ma vengono attenuati da alcuni elementi leggeri, tra cui l'idrogeno. Questa proprietà rende la radiografia neutronica particolarmente utile per esaminare componenti nei quali materiali leggeri sono racchiusi all'interno di strutture metalliche. È possibile, per esempio, osservare la distribuzione di acqua, combustibili, lubrificanti, adesivi e materiali plastici all'interno di motori, tubazioni e dispositivi complessi.

I neutroni possono inoltre rivelare crepe, porosità e difetti presenti nei materiali compositi avanzati e negli oggetti ceramici, per i quali le tradizionali radiografie a raggi X non sempre forniscono immagini sufficientemente chiare. La loro elevata capacità di penetrazione consente di analizzare oggetti di grandi dimensioni, come motori, turbine e pale impiegate negli impianti energetici e aeronautici.

Uno degli sviluppi più interessanti è la possibilità di ottenere immagini neutroniche in tempo reale mentre un'apparecchiatura è in funzione. In questo modo non si osserva soltanto la struttura statica del componente, ma anche il movimento dei fluidi al suo interno. È possibile seguire, per esempio, la distribuzione del carburante in un motore, il comportamento di un lubrificante o il passaggio dell'acqua attraverso un sistema. Queste informazioni permettono di comprendere meglio il funzionamento dei dispositivi, migliorarne la progettazione e individuare eventuali anomalie prima che provochino un guasto.

La produzione dei fasci neutronici richiede tuttavia strutture specializzate, come reattori di ricerca o acceleratori. Per questa ragione la tec-

nica è meno facilmente accessibile rispetto alle radiografie tradizionali, ma il progresso degli acceleratori compatti potrebbe in futuro renderne più diffuso l'impiego industriale.

Ogni minuto migliaia di muoni attraversano ciascun metro quadrato della superficie terrestre. Si tratta di particelle elementari simili agli elettroni, ma dotate di una massa circa 200 volte maggiore e di una vita estremamente breve. Possono essere prodotti artificialmente negli acceleratori di particelle, ma raggiungono continuamente anche la superficie terrestre come conseguenza delle interazioni tra i raggi cosmici e le molecole dell'atmosfera.

I muoni possiedono una capacità di penetrazione molto superiore a quella dei raggi X e possono attraversare grandi spessori di roccia, cemento e metallo. Misurando il numero di particelle che riescono a superare un oggetto da diverse direzioni, è possibile ricostruire la distribuzione della materia al suo interno. Le regioni più dense assorbono o deviano un numero maggiore di muoni, mentre gli spazi vuoti ne lasciano passare una quantità superiore.

Questa tecnica viene chiamata *muografia* e può essere considerata una sorta di radiografia naturale su grandissima scala. Presenta il vantaggio di utilizzare particelle già presenti nell'ambiente, senza dover produrre artificialmente un fascio di radiazione. I muoni, inoltre, attraversano la materia depositando una quantità relativamente limitata di energia.

Uno dei primi impieghi della muografia fu in archeologia, per studiare l'interno delle piramidi senza perforarne le pareti. Posizionando appositi rivelatori all'interno o intorno alle strutture, è stato possibile individuare cavità e ambienti nascosti che non erano accessibili attraverso i metodi tradizionali.

Con il tempo, questa tecnica è stata applicata a numerosi altri settori. La muografia può essere utilizzata per osservare la struttura interna dei vulcani, per ricostruire la distribuzione delle rocce e individuare eventuali condotti o cavità. Può inoltre contribuire al controllo di gallerie, miniere, grandi edifici, dighe e aree sotterranee.

Un'applicazione particolarmente importante riguarda l'ispezione dei depositi di materiali radioattivi e degli impianti nucleari. Dopo l'incidente avvenuto nel 2011 nella centrale nucleare di Fukushima, provocato dal terremoto e dal successivo tsunami, la muografia

è stata impiegata per studiare l'interno di alcuni reattori danneggiati. L'elevato livello di radioattività rendeva estremamente difficile l'accesso diretto delle persone e limitava anche l'impiego di dispositivi convenzionali. Attraverso la misura dei muoni cosmici, è stato possibile ottenere informazioni sulla distribuzione dei materiali all'interno dei reattori e individuare la posizione del combustibile nucleare danneggiato. In questo caso, una particella scoperta e studiata nell'ambito della ricerca fondamentale è diventata uno strumento essenziale per affrontare una situazione concreta, nella quale quasi nessun altro metodo di osservazione sarebbe stato praticabile.

3.3 *Scienze forensi e patrimonio culturale*

Che cosa hanno in comune un'opera d'arte falsificata, un prodotto contraffatto e un reperto archeologico di origine incerta? In tutti questi casi, le tecniche analitiche sviluppate nell'ambito della fisica nucleare possono contribuire a identificarne la composizione, ricostruirne la provenienza e stabilirne l'autenticità.

L'indagine scientifica svolge oggi un ruolo essenziale nel lavoro delle forze dell'ordine. Allo stesso tempo, costituisce uno strumento fondamentale per lo studio delle civiltà del passato, permettendo di ricavare informazioni sull'origine, l'età, i materiali e le tecniche di produzione di opere d'arte e oggetti archeologici.

I metodi basati su processi nucleari trovano quindi applicazione sia nelle scienze forensi sia nello studio e nella conservazione del patrimonio culturale. In entrambi gli ambiti contribuiscono a rispondere a domande apparentemente semplici, ma spesso molto complesse: chi ha realizzato un determinato oggetto? Dove è stato prodotto? Con quali materiali e attraverso quale procedimento? È autentico oppure si tratta di una falsificazione?

Queste tecniche utilizzano fasci di particelle subatomiche o nucleari, oppure radiazioni elettromagnetiche ad alta energia, per analizzare la materia. Quando la radiazione interagisce con il campione può provocare fenomeni caratteristici, talvolta vere e proprie reazioni nucleari, i cui prodotti vengono rivelati e misurati.

I segnali ottenuti permettono di identificare gli elementi presenti e, in alcuni casi, di stabilirne la distribuzione all'interno del campione. È così possibile ricostruire la composizione di un materiale, produrre immagini bidimensionali o tridimensionali della sua struttura e confrontarne le caratteristiche con quelle di altri oggetti di origine nota.

Le informazioni raccolte possono fornire indicazioni sulla provenienza geografica o culturale di un reperto, sulla fonte delle materie prime, sul metodo di fabbricazione e sull'epoca nella quale è stato realizzato. Nel caso di prodotti industriali o commerciali, la composizione può inoltre permettere di ricondurre un campione a uno specifico produttore o luogo di provenienza.

Uno dei principali vantaggi di queste tecniche è la possibilità di eseguire analisi estremamente sensibili senza danneggiare gli oggetti esaminati. Questa caratteristica è particolarmente importante quando si lavora con opere uniche, fragili o di grande valore. In molti casi l'analisi è completamente non distruttiva; in altri richiede soltanto quantità minime di materiale, prelevate in punti non visibili.

Un esempio significativo dell'impiego delle tecniche nucleari nelle scienze forensi riguarda un'indagine sul prelievo illecito di sabbia lungo la costa settentrionale della Giamaica. La sabbia può sembrare un materiale uniforme, ma la sua composizione dipende dalle rocce, dai sedimenti e dai processi geologici caratteristici del luogo dal quale proviene. Ogni spiaggia possiede quindi una sorta di impronta chimica e mineralogica, che può essere confrontata con quella di altri campioni. Attraverso l'*analisi per attivazione neutronica*, i campioni vengono irradiati con neutroni. Alcuni nuclei presenti nel materiale assorbono un neutrone e si trasformano temporaneamente in isotopi radioattivi. Misurando le radiazioni caratteristiche emesse durante il loro decadimento è possibile identificare e quantificare con grande precisione gli elementi presenti.

Nel caso della spiaggia giamaicana, l'analisi neutronica permise di distinguere i campioni provenienti dal luogo nel quale la sabbia era stata sottratta da quelli raccolti in altre spiagge potenzialmente coinvolte. Fu così possibile collegare il materiale trasferito al sito di origine e ricostruire il percorso del prelievo illegale. A distanza di anni, la sabbia fu riportata nel luogo dal quale era stata sottratta e la spiaggia poté essere ricostituita.

Nel campo dei beni culturali, le tecniche nucleari permettono di studiare opere d'arte e reperti archeologici senza comprometterne l'integrità. Attraverso l'analisi dei pigmenti è possibile, per esempio, riconoscere i materiali utilizzati da un artista, individuare restauri successivi e scoprire eventuali sostanze che non erano disponibili nell'epoca alla quale l'opera viene attribuita.

La presenza di un pigmento moderno in un dipinto apparentemente antico può costituire un indizio di falsificazione. Al contrario, la corrispondenza tra i materiali impiegati e quelli documentati in un determinato periodo storico può sostenere l'autenticità dell'opera, pur non rappresentando da sola una prova definitiva. Anche ceramiche, monete, statue e oggetti metallici possono essere studiati attraverso la loro composizione. L'identificazione degli elementi presenti permette di risalire alle materie prime utilizzate e, in alcuni casi, alle miniere o alle regioni dalle quali esse provenivano. Queste informazioni aiutano a ricostruire le rotte commerciali, gli scambi culturali e le conoscenze tecnologiche delle civiltà del passato.

Le tecniche di imaging consentono inoltre di osservare l'interno di un oggetto, rivelando strutture nascoste, crepe, riparazioni e modalità di assemblaggio. È possibile riconoscere, per esempio, se una statua sia stata fusa in un unico pezzo oppure prodotta unendo più parti, o se all'interno di un manufatto siano presenti elementi aggiunti in epoche successive.

Tra gli studi che hanno suscitato maggiore attenzione, anche al di fuori dell'ambiente scientifico, vi è quello dedicato alla Lupa capitolina, uno dei simboli più noti della città di Roma. La scultura bronzea raffigura la lupa che, secondo la leggenda, avrebbe allattato Romolo e Remo, i mitici fondatori della città (*Figura 6*). Se le figure dei due gemelli sono generalmente considerate un'aggiunta rinascimentale, probabilmente risalente al XV secolo, per lungo tempo la statua della lupa è stata invece attribuita all'età etrusca e datata al V secolo a.C. Questa interpretazione la rendeva una delle più importanti testimonianze artistiche anteriori all'espansione di Roma.

Figura 6 La Lupa capitolina con Romolo e Remo

Durante i lavori di restauro condotti all'inizio del XXI secolo fu possibile osservare più attentamente anche l'interno della statua. L'esame mise in evidenza alcuni dettagli relativi alla tecnica di fusione, che era stata realizzata in un unico getto, secondo un procedimento che alcuni studiosi ritengono caratteristico dell'età medievale. A queste osservazioni si aggiunsero analisi basate sulla datazione al carbonio-14 di residui organici collegati al processo di fusione. I risultati suggerirono una possibile realizzazione della statua tra l'Alto e il Pieno Medioevo, e non in epoca etrusca.

Le tecniche nucleari non sostituiscono l'indagine storica, ma aggiungono nuove informazioni che devono essere valutate insieme agli altri dati disponibili. La scienza può stabilire la composizione di un materiale, misurare l'età di un campione o ricostruire una tecnica di produzione; spetta poi al confronto tra discipline differenti inserire questi risultati in una ricostruzione storica più ampia.

3.4 *Missioni spaziali*

Le sonde inviate a esplorare le regioni più remote e oscure del Sistema Solare non possono sempre fare affidamento sull'energia del Sole. Allontanandosi dalla nostra stella, infatti, la quantità di radiazione disponibile diminuisce rapidamente e i pannelli fotovoltaici diventano progressivamente meno efficienti. Per le missioni dirette verso Giove e gli altri pianeti esterni è quindi necessario disporre di fonti energetiche autonome, affidabili e capaci di funzionare per molti anni.

Il problema si presenta anche sulla superficie della Luna e di Marte. La notte lunare dura circa due settimane terrestri, durante le quali i pannelli solari non producono energia. Su Marte, invece, l'inverno, la distanza dal Sole e le frequenti tempeste di polvere possono ridurre considerevolmente la luce disponibile. Rover, strumenti scientifici e sistemi telecomandati devono tuttavia continuare a funzionare anche in queste condizioni.

La questione diventerà ancora più importante se, in futuro, l'essere umano sarà in grado di realizzare insediamenti permanenti sulla Luna o su Marte. Una base abitata avrà bisogno di energia continua per il supporto vitale, le comunicazioni, il riscaldamento, le attività scientifiche e industriali e la produzione delle risorse necessarie alla sopravvivenza.

In questi ambienti, una delle soluzioni più promettenti è rappresentata dall'energia nucleare, la fonte più concentrata di energia og-

gi disponibile. Le tecnologie nucleari possono essere impiegate nello spazio con funzioni differenti: per produrre elettricità, generare calore e, in prospettiva, alimentare sistemi di propulsione. Il calore è particolarmente importante, perché le basse temperature dello spazio e delle superfici planetarie possono compromettere il funzionamento delle apparecchiature e mettere in pericolo eventuali equipaggi.

Finora sono state impiegate principalmente due forme di energia nucleare. La prima sfrutta il calore liberato dal decadimento spontaneo di nuclei radioattivi; la seconda utilizza invece l'energia prodotta dalla fissione all'interno di un piccolo reattore.

Le cosiddette *batterie nucleari*, più propriamente definite generatori termoelettrici a radioisotopi, o RTG, vengono utilizzate nell'esplorazione spaziale da diversi decenni. Non si tratta di reattori nucleari: al loro interno non avviene una reazione a catena controllata. L'energia viene liberata in modo continuo dal naturale decadimento del radioisotopo e convertita in corrente elettrica attraverso dispositivi termoelettrici.

La caratteristica principale degli RTG è l'affidabilità: non possiedono complesse parti meccaniche in movimento e possono resistere alle condizioni estreme dello spazio, fornendo energia in modo costante per periodi molto più lunghi rispetto alle normali batterie chimiche. Queste ultime, oltre ad avere una densità energetica inferiore, richiederebbero masse troppo elevate per sostenere missioni della durata di molti anni. Per questo motivo gli RTG sono particolarmente adatti alle sonde prive di equipaggio dirette verso i pianeti esterni o verso regioni nelle quali l'energia solare non è sufficiente. La loro produzione elettrica diminuisce lentamente nel tempo, seguendo il decadimento del materiale radioattivo, ma può continuare per decenni.

La seconda possibilità consiste nell'utilizzo di piccoli reattori a fissione. A differenza degli RTG, questi dispositivi producono energia attraverso una reazione nucleare a catena controllata. Possono quindi raggiungere potenze molto maggiori e sostenere apparecchiature che richiedono quantità più elevate di elettricità.

I reattori spaziali furono studiati già negli anni Sessanta e Settanta. Nell'Unione Sovietica questo settore conobbe uno sviluppo particolarmente intenso. Alcuni reattori furono utilizzati per alimentare i sistemi radar dei satelliti RORSAT, impiegati per il riconoscimento

oceanico e per il controllo dei movimenti dei sottomarini militari statunitensi e della NATO.
Tra i progetti sovietici più avanzati vi fu poi il reattore TOPAZ, sviluppato negli anni Settanta e lanciato in orbita terrestre nel 1987. Il sistema era raffreddato mediante un metallo liquido, costituito da una lega di sodio e potassio, che permetteva di raggiungere una temperatura operativa di circa 610 °C. Il combustibile era formato da circa dodici chilogrammi di uranio altamente arricchito, utilizzato sotto forma di diossido di uranio. Il reattore nel suo complesso pesava circa 320 chilogrammi e sviluppava una potenza termica di 150 kilowatt. L'energia termica veniva trasformata in elettricità mediante un sistema di conversione termoionica. L'efficienza raggiungeva circa il 5 per cento, con una potenza elettrica compresa tra 5 e 10 kilowatt e un periodo di funzionamento previsto di circa dodici mesi.
Per aumentare l'efficienza della reazione veniva impiegato un riflettore di berillio, capace di rinviare verso il nocciolo una parte dei neutroni prodotti dalla fissione. Intorno al reattore erano collocati cilindri rotanti costituiti in parte da berillio e in parte da materiali in grado di assorbire i neutroni. Ruotando questi cilindri era possibile modificare il numero di neutroni che ritornavano verso il combustibile, controllando così la reazione e permettendo l'accensione o lo spegnimento del reattore. La configurazione rappresentava una soluzione relativamente semplice e sicura per regolare un impianto destinato a operare senza interventi diretti nello spazio.

Le future missioni con equipaggio richiederanno sistemi energetici molto più potenti rispetto a quelli utilizzati dalle attuali sonde automatiche. La costruzione di insediamenti sulla Luna o su Marte comporterà la necessità di alimentare grandi infrastrutture, laboratori, veicoli, sistemi di comunicazione e impianti destinati alla produzione di acqua, ossigeno e combustibile.

Le prime basi potranno aver bisogno di potenze dell'ordine dei kilowatt, mentre insediamenti più grandi e attività industriali potrebbero richiedere sistemi capaci di produrre centinaia di kilowatt o persino megawatt. L'energia sarà necessaria anche per la propulsione e il trasporto di carichi di grandi dimensioni, oltre che per eventuali attività minerarie extraterrestri.

I pannelli solari potranno continuare a svolgere un ruolo importante, soprattutto per i piccoli carichi e nelle località favorevolmente illuminate. Tuttavia, i reattori nucleari possono garantire una produzione continua indipendente dal ciclo giorno-notte, dalla distanza dal Sole e dalle condizioni atmosferiche.

Sulla Luna, un reattore potrebbe mantenere operative le basi durante le lunghe notti. Su Marte, potrebbe assicurare energia anche durante

le tempeste di polvere, quando l'efficienza dei pannelli solari si riduce drasticamente. Potrebbe inoltre fornire il calore necessario per proteggere persone e macchinari dalle bassissime temperature.

Nel 2014 la NASA avviò lo sviluppo di un piccolo reattore denominato Kilopower, progettato per fornire una fonte di energia affidabile e di lunga durata alle future missioni spaziali. L'obiettivo era realizzare differenti configurazioni capaci di produrre da 1 a 10 kilowatt di potenza elettrica e di funzionare per almeno dieci anni. Il combustibile previsto era costituito da uranio altamente arricchito in forma metallica, legato con molibdeno. Il peso complessivo del sistema risultava confrontabile con quello dei precedenti reattori spaziali sovietici. La versione più grande, progettata per produrre circa 10 kilowatt di elettricità, avrebbe dovuto raggiungere una massa di circa 1.800 chilogrammi. Un sistema di questa potenza potrebbe contribuire al funzionamento di una piccola base e sostenere le attività di un equipaggio composto da quattro-sei astronauti.
Nel 2018 il progetto fu sottoposto con successo a una serie di prove a terra, dimostrando la possibilità di controllare il reattore e produrre energia nelle condizioni previste. L'idea è quella di realizzare dispositivi relativamente piccoli e modulari. Più reattori potrebbero essere collocati nella stessa area e funzionare in modo coordinato, aumentando progressivamente la potenza disponibile. Una configurazione di questo tipo consentirebbe di adattare il sistema alle esigenze della missione e di mantenere una certa produzione energetica anche in caso di guasto di uno dei moduli.

Negli ultimi anni sono proseguiti gli studi su piccoli reattori destinati ad alimentare basi lunari o marziane, attività minerarie nella fascia degli asteroidi e, in prospettiva, grandi veicoli spaziali diretti verso destinazioni molto lontane.

Fino a tempi relativamente recenti, portare in orbita un carico utile comportava costi estremamente elevati. Ogni chilogrammo aggiuntivo rappresentava un problema e rendeva difficile immaginare il trasporto nello spazio di sistemi energetici complessi. La progressiva diminuzione dei costi di lancio e lo sviluppo di nuovi veicoli stanno però modificando rapidamente questa situazione. Per i sistemi di energia nucleare ciò potrebbe rappresentare un punto di svolta, rendendo possibile il trasporto di reattori più potenti, schermature adeguate e infrastrutture destinate al loro funzionamento.

L'impiego dell'energia nucleare nello spazio richiederà naturalmente elevati standard di sicurezza. I reattori dovranno essere progettati in modo da rimanere inattivi durante il lancio e da entrare in funzione soltanto dopo aver raggiunto la destinazione prevista. Sarà inoltre necessario proteggerli dagli urti, dalle variazioni termiche e dalle altre

condizioni estreme dell'ambiente extraterrestre. La stessa attenzione dovrà essere dedicata alla gestione dei materiali radioattivi e alla protezione degli equipaggi. Tuttavia, per le missioni di lunga durata e per la realizzazione di insediamenti permanenti, la continuità dell'approvvigionamento energetico sarà una condizione indispensabile.

La possibilità di esplorare stabilmente lo spazio dipenderà quindi non soltanto dai sistemi di trasporto, ma anche dalla capacità di produrre energia una volta raggiunta la destinazione. Le fonti nucleari, grazie alla loro elevata densità energetica e alla possibilità di funzionare indipendentemente dalla luce solare, potrebbero rappresentare uno degli strumenti fondamentali di questa nuova fase.

4. L'energia dal cuore dell'atomo

Il cambiamento climatico, alimentato dalle ingenti emissioni di gas serra derivanti dall'uso dei combustibili fossili, costituisce una minaccia non soltanto per l'ambiente, ma anche per il progresso economico e sociale dell'umanità.

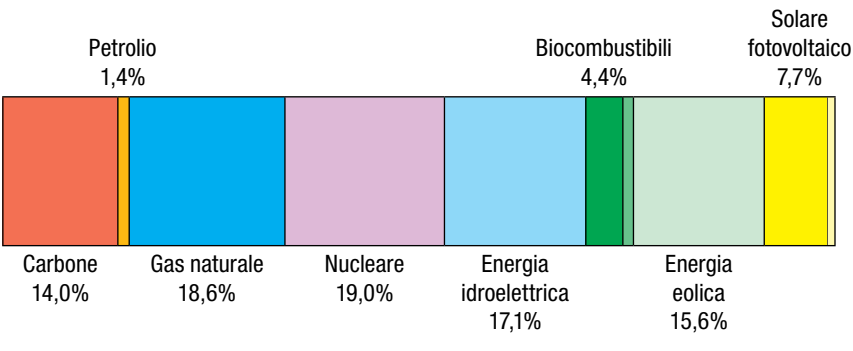
Per questa ragione, tutte le tecnologie in grado di garantire una produzione energetica a basse emissioni di carbonio devono essere valutate con attenzione e senza preclusioni.

Tra queste, l'energia nucleare costituisce oggi una delle principali fonti di elettricità associate a minori emissioni di gas serra. Grazie all'elevata densità energetica del combustibile nucleare, è infatti possibile produrre grandi quantità di energia utilizzando quantità relativamente limitate di risorse e di territorio. Il nucleare può quindi contribuire a garantire un approvvigionamento energetico stabile, affidabile e accessibile, riducendo al tempo stesso le emissioni responsabili dei cambiamenti climatici.

La maggior parte delle nazioni riconosce ormai la gravità della crisi climatica. Alcuni paesi prevedono un'espansione della produzione nucleare, che considerano uno degli strumenti necessari per raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione; altri ritengono invece possibile costruire sistemi energetici a basse emissioni affidandosi prevalentemente alle fonti rinnovabili. Queste ultime sono infatti numerose e comprendono: l'energia solare, eolica, geotermica, idroelettrica e le tecnologie per lo sfruttamento dell'energia marina.

Al di là delle differenti strategie nazionali, l'energia nucleare continua a rappresentare una componente significativa del sistema energe-

Figura 7 Produzione di energia elettrica per fonte in Europa, 2023



tico mondiale e potrebbe vedere crescere il proprio ruolo nei prossimi decenni (*Figura 7*).

La realizzazione e la gestione di una centrale nucleare richiedono, tuttavia, tecnologie avanzate, istituzioni solide e un livello elevato di preparazione scientifica e tecnica. Molti paesi in via di sviluppo non dispongono ancora delle competenze e dell'esperienza necessarie per sostenere autonomamente un programma nucleare. Diventa quindi fondamentale che le nazioni dotate di un'industria consolidata favoriscano la condivisione delle conoscenze, la formazione del personale e il trasferimento responsabile delle tecnologie, nel rispetto dei più rigorosi standard di sicurezza internazionali.

Per molti decenni, una parte significativa del movimento ambientalista si è opposta all'impiego dell'energia nucleare, richiamando soprattutto i rischi associati alle tecnologie sviluppate nella seconda metà del Novecento. Il problema della gestione dei rifiuti radioattivi a lunga vita e gli incidenti, per quanto rari, verificatisi nel corso della storia hanno alimentato una diffusa diffidenza e sono ancora oggi tra i principali argomenti utilizzati contro nuovi investimenti nel settore.

Queste preoccupazioni non possono essere ignorate. Al tempo stesso, la ricerca scientifica e tecnologica ha prodotto importanti progressi nella sicurezza degli impianti, nei sistemi di controllo, nell'efficienza dei reattori e nella gestione del combustibile nucleare. Le nuove generazioni di centrali sono progettate per prevenire gli incidenti e limitarne le conseguenze anche attraverso sistemi di sicurezza passiva, in grado di intervenire senza la necessità di un'azione umana immediata. L'energia

nucleare non è dunque una tecnologia priva di problemi, ma una risorsa in continua evoluzione, il cui possibile contributo alla lotta contro i cambiamenti climatici deve essere valutato alla luce delle conoscenze e delle tecnologie attuali, e non soltanto sulla base delle esperienze del passato.

4.1 *La produzione di energia nucleare*

Esistono due principali processi attraverso i quali è possibile produrre energia mediante reazioni nucleari. Il primo, legato alle scoperte e alle ricerche di Enrico Fermi, sfrutta la scissione di un nucleo atomico pesante: è il processo della fissione nucleare. Il secondo si basa invece sull'unione di due nuclei più leggeri, che danno origine a un nucleo più pesante: è il processo della fusione nucleare.

In entrambe le reazioni, una parte dell'energia associata ai legami che tengono uniti i nucleoni, cioè i protoni e i neutroni che costituiscono il nucleo atomico, viene liberata sotto forma di energia cinetica dei nuclei e delle particelle prodotte. Sia nel caso della fissione sia della fusione vengono emessi anche neutroni e in entrambi i processi viene prodotta radiazione elettromagnetica ad alta energia, in particolare raggi gamma. La fissione è inoltre una sorgente di neutrini, le particelle neutre molto elusive che ci arrivano anche dal Sole e che hanno la proprietà di interagire per forza debole, un tipo di interazione introdotta da Fermi per interpretare il processo fisico del decadimento beta.

L'energia cinetica delle particelle generate nelle reazioni nucleari viene progressivamente trasformata in calore. Nelle centrali nucleari a fissione, questo calore viene utilizzato per produrre vapore, azionare una turbina e generare infine energia elettrica, secondo un principio non molto diverso da quello delle centrali termoelettriche convenzionali. Ciò che cambia è la fonte da cui il calore viene ricavato: non la combustione di materiali fossili, ma una reazione che coinvolge direttamente i nuclei atomici.

La massa complessiva dei prodotti di una reazione nucleare può infatti risultare leggermente inferiore a quella dei nuclei iniziali. Questa differenza, chiamata *difetto di massa*, viene convertita in energia in accordo con il principio di equivalenza massa-energia introdotto da Einstein. Anche una variazione estremamente piccola di massa può così liberare una quantità molto elevata di energia.

Finora, soltanto la fissione è stata impiegata con successo e su vasta scala nelle centrali per la produzione di energia elettrica, comprese quelle di elevata potenza. La fusione nucleare, al contrario, non è ancora utilizzata per la produzione commerciale di elettricità. In numerosi paesi sono in corso intense attività di ricerca, con l'obiettivo di sviluppare reattori a fusione capaci di produrre più energia di quanta ne sia necessaria per avviare e mantenere la reazione. La possibilità di controllare la fusione e di sfruttarla come fonte energetica rappresenta ancora oggi una delle più importanti e complesse sfide della fisica e dell'ingegneria nucleare.

4.2 *La fusione nucleare*

L'energia nucleare può essere prodotta attraverso reazioni di fusione, nelle quali due nuclei atomici leggeri si uniscono per formarne uno più pesante, liberando energia. Questo processo è possibile perché il nucleo prodotto possiede una massa leggermente inferiore alla somma delle masse dei nuclei iniziali: la differenza viene convertita in energia.

È attraverso la fusione nucleare che il Sole e le altre stelle producono la loro energia. Al centro del Sole, una serie di reazioni trasforma progressivamente nuclei di idrogeno, cioè protoni, in nuclei di elio. L'idea di riprodurre sulla Terra un processo analogo risale ormai a circa un secolo fa, quando si comprese che l'unione di nuclei leggeri poteva sprigionare quantità enormi di energia. Trasformare questo principio in una fonte energetica controllata si è però rivelato estremamente complesso.

I nuclei atomici possiedono infatti una carica elettrica positiva e tendono perciò a respingersi. Per avvicinarli abbastanza da consentire alla forza nucleare di unirli è necessario fornire loro una grande quantità di energia. Nelle reazioni considerate più adatte alla produzione energetica, il combustibile deve essere portato a temperature dell'ordine di cento milioni di gradi. In queste condizioni, l'energia cinetica dei nuclei diventa sufficientemente elevata da permettere ad almeno una parte di essi di superare la repulsione elettrostatica e fondersi.

Tra le diverse reazioni possibili, quella che può avvenire con maggiore probabilità alle temperature raggiungibili oggi sperimentalmente coinvolge due isotopi dell'idrogeno: il deuterio e il trizio. Il nucleo del deuterio è formato da un protone e un neutrone, mentre quello del trizio contiene un protone e due neutroni. Dalla loro fusione si formano

un nucleo di elio-4, costituito da due protoni e due neutroni, e un neutrone molto energetico.

La maggior parte dell'energia liberata dalla reazione viene trasportata dal neutrone, che, non essendo elettricamente carico, sfugge al confinamento magnetico e colpisce i materiali che circondano il plasma. In un futuro reattore, questa energia dovrebbe essere assorbita da un mantello esterno e trasformata in calore, utilizzato successivamente per produrre vapore e generare elettricità.

Uno dei motivi del grande interesse per la fusione è la disponibilità del deuterio, presente nell'acqua naturale e quindi ricavabile anche dall'acqua di mare. Il trizio è invece molto più raro. È un isotopo radioattivo con un'emivita di circa 12,3 anni e si forma naturalmente in quantità minime attraverso l'interazione dei raggi cosmici con i nuclei dell'atmosfera. Viene prodotto anche in alcuni reattori a fissione, in particolare in quelli che utilizzano acqua pesante, ma le quantità disponibili non sarebbero sufficienti ad alimentare un futuro sistema energetico basato sulla fusione.

Per questa ragione, i futuri reattori dovranno produrre autonomamente il trizio di cui hanno bisogno. Il metodo più promettente consiste nel far interagire i neutroni generati dalla fusione con un mantello contenente litio. Il bombardamento del litio-6 produce trizio ed elio-4, mentre il litio-7 può contribuire alla produzione di trizio attraverso una reazione che richiede neutroni sufficientemente energetici. In natura, tuttavia, il litio è costituito per circa il 92,5 per cento da litio-7 e soltanto per il 7,5 per cento da litio-6. Lo sviluppo di sistemi capaci di produrre, estrarre e riciclare il trizio all'interno del reattore rappresenta quindi una delle principali sfide ancora da risolvere.

Alle temperature necessarie per la fusione, gli atomi del combustibile perdono i loro elettroni e la materia assume lo stato di plasma: un insieme di nuclei ed elettroni liberi, elettricamente carichi e in rapidissimo movimento. Nessun materiale solido potrebbe contenere direttamente un plasma a una temperatura di cento milioni di gradi. Esso deve quindi essere mantenuto lontano dalle pareti della camera a vuoto e confinato per un tempo sufficiente affinché possa avvenire un numero significativo di reazioni.

La possibilità di produrre energia mediante la fusione dipende soprattutto da tre grandezze: la temperatura del plasma, la sua densità e il tempo durante il quale esso rimane confinato. Il loro prodotto costitui-

sce il cosiddetto *triplo prodotto di fusione* ed esprime, in termini generali, la capacità di un sistema di raggiungere le condizioni necessarie per una produzione energetica significativa.

È inoltre importante distinguere tra il punto di pareggio e l'accensione. Il pareggio viene raggiunto quando l'energia prodotta dalle reazioni di fusione eguaglia quella fornita direttamente al combustibile per riscaldarlo. L'accensione è una condizione ancora più avanzata, nella quale il plasma viene mantenuto caldo in larga parte dall'energia liberata dalle stesse reazioni, soprattutto attraverso i nuclei di elio prodotti. Questo confronto non comprende necessariamente tutta l'energia elettrica utilizzata dall'impianto per alimentare magneti, laser, sistemi criogenici e altre apparecchiature: ottenere un guadagno energetico nel plasma non significa quindi avere già realizzato una centrale capace di produrre elettricità netta.

Esistono due principali strategie per creare e confinare il plasma. La prima impiega campi magnetici e prende il nome di *confinamento magnetico*. In questo caso il plasma ha una densità relativamente bassa, ma viene mantenuto per tempi relativamente lunghi all'interno di una configurazione magnetica. La seconda strategia, chiamata *confinamento inerziale*, comprime una quantità minuscola di combustibile fino a raggiungere densità elevatissime, mantenendo però le condizioni di fusione soltanto per una frazione millesimale di secondo.

Nel confinamento magnetico si sfrutta il fatto che le particelle elettricamente cariche del plasma sono sensibili ai campi magnetici. Potenti elettromagneti collocati attorno alla camera di fusione guidano il moto delle particelle e impediscono, per quanto possibile, che esse entrino in contatto con le pareti. La camera ha generalmente una forma toroidale, simile a quella di una grande ciambella.

Le due configurazioni più studiate sono il tokamak e lo stellarator. Il tokamak fu sviluppato nell'Unione Sovietica durante gli anni Cinquanta e utilizza una combinazione di campi magnetici prodotti da bobine esterne e da una corrente elettrica che attraversa il plasma. È oggi il dispositivo maggiormente utilizzato nella ricerca sulla fusione. Lo stellarator impiega invece bobine dalla geometria più complessa per generare il campo magnetico necessario al confinamento. Questa soluzione è più difficile da progettare e costruire, ma presenta il vantaggio potenziale di funzionare in modo continuo senza richiedere una grande corrente indotta nel plasma.

Negli ultimi decenni sono stati costruiti numerosi tokamak avanzati, molti dei quali utilizzano magneti superconduttori. Il progetto più importante è ITER, il grande impianto sperimentale internazionale in costruzione a Cadarache, nel sud della Francia. La costruzione del complesso scientifico è iniziata nel 2010, mentre l'assemblaggio della macchina ha preso avvio nel 2020. Al progetto partecipano sette membri: Cina, Unione Europea, India, Giappone, Corea del Sud, Federazione Russa e Stati Uniti, per un totale di 33 nazioni.
Obiettivo di ITER è dimostrare la possibilità di ottenere e controllare un plasma in combustione su una scala mai raggiunta in precedenza. Il progetto mira a produrre 500 megawatt di potenza termica da fusione fornendo al plasma 50 megawatt di potenza esterna per il riscaldamento, raggiungendo quindi un guadagno pari almeno a 10 per impulsi della durata di alcune centinaia di secondi[1].
La realizzazione di ITER ha incontrato ritardi e difficoltà tecniche dovuti alla straordinaria complessità dell'impianto. La programmazione aggiornata prevede l'avvio delle attività di ricerca nella prima metà degli anni Trenta, il raggiungimento della piena energia magnetica nel 2036 e l'inizio delle operazioni con deuterio e trizio nel 2039. ITER dovrà inoltre sperimentare appositi moduli contenenti litio, i Test Blanket Modules, destinati a verificare differenti tecnologie per la produzione del trizio all'interno di un futuro reattore.

Accanto ai sistemi basati esclusivamente sulla fusione, sono stati proposti anche reattori ibridi fusione-fissione. In questi progetti, i neutroni ad alta energia prodotti dal plasma di fusione verrebbero assorbiti da un mantello contenente materiali fertili, come uranio-238 o torio-232, oppure elementi transuranici separati dal combustibile nucleare esaurito. I neutroni indurrebbero reazioni di fissione nel mantello, aumentando la produzione complessiva di energia.
Un sistema di questo tipo potrebbe inoltre essere utilizzato per trasmutare e fissionare una parte degli attinidi a lunga vita presenti nei rifiuti nucleari, riducendone potenzialmente la quantità e la radiotossicità a lungo termine. I sistemi ibridi sono ancora oggetto di studi teorici e sperimentali e ad oggi rappresentano una possibilità di ricerca, non una tecnologia prossima all'applicazione industriale.

La fusione nucleare conserva, dunque, un potenziale straordinario: si basa sull'utilizzo di combustibili disponibili in grandi quantità per produrre energia senza emissioni dirette di anidride carbonica. Inoltre, i rifiuti radioattivi prodotti sono meno persistenti di quelli associati alla fissione. Tuttavia, il passaggio dagli esperimenti scientifici a una centrale capace di produrre elettricità in modo continuo, affidabile ed economicamente sostenibile richiede ancora progressi decisivi.

[1] I 500 megawatt indicano la potenza sviluppata dalle reazioni nel plasma e non l'energia elettrica netta erogata dall'intero impianto.

I risultati ottenuti negli ultimi anni hanno dimostrato che l'accensione e il guadagno energetico nel combustibile non appartengono più soltanto alla teoria. Rimane però aperta la sfida più difficile: trasformare reazioni che durano pochi secondi, o frazioni infinitesime di secondo, in una tecnologia industriale capace di contribuire concretamente alla produzione energetica mondiale.

Dimostrare la possibilità di produrre e controllare un plasma in combustione rappresenterebbe un passaggio fondamentale, ma non ancora sufficiente per lo sfruttamento industriale della fusione. Un futuro impianto dovrà infatti funzionare in modo affidabile per lunghi periodi, produrre autonomamente il proprio trizio, estrarre il calore generato dai neutroni, trasformarlo in elettricità e consentire la manutenzione dei componenti sottoposti a intense radiazioni.

Il successore ideale di ITER è identificato nel progetto DEMO, il prototipo europeo di una centrale dimostrativa a fusione studiato dal consorzio EUROfusion. A differenza di ITER, DEMO dovrà produrre energia elettrica e immetterla nella rete, dimostrando anche la possibilità di mantenere un ciclo del trizio sostanzialmente autosufficiente. Il progetto europeo prende in considerazione una potenza elettrica netta indicativa compresa tra 300 e 500 megawatt. DEMO si trova ancora nella fase di progettazione e ricerca tecnologica; le sue caratteristiche definitive e le sue tempistiche dipenderanno dai risultati ottenuti da ITER e dallo sviluppo dei materiali, dei mantelli al litio e dei sistemi di manutenzione. L'obiettivo generale della strategia europea rimane quello di arrivare alla produzione dimostrativa di elettricità da fusione intorno alla metà del secolo.

Una delle sfide più difficili riguarda anche i materiali destinati a costituire la prima parete e le strutture interne del reattore. Questi componenti dovranno sopportare temperature elevate, forti sollecitazioni meccaniche e un bombardamento continuo di neutroni ad alta energia. Per studiare e qualificare questi materiali è in corso la realizzazione di IFMIF-DONES, la Demo Oriented Neutron Source, presso Escúzar, nell'area di Granada, in Spagna. L'impianto utilizzerà un acceleratore ad alta intensità per dirigere nuclei di deuterio contro un bersaglio di litio liquido, producendo un flusso intenso di neutroni con caratteristiche simili a quelle previste nelle future centrali a fusione. I campioni sottoposti a questo bombardamento permetteranno di valutare la resistenza e l'evoluzione dei materiali destinati a DEMO e agli impianti successivi. L'Italia partecipa a IFMIF-DONES attraverso gli enti di ricerca ENEA e INFN. L'entrata in funzione dell'infrastruttura è attualmente prevista tra il 2034 e il 2035.

La seconda grande e difficile via verso la fusione controllata è il confinamento inerziale. In questo caso, una piccola capsula contenente

deuterio e trizio viene colpita da fasci laser estremamente potenti. Il rapido riscaldamento dello strato esteriore provoca la sua espansione verso l'esterno e, per reazione, la violenta compressione del combustibile verso il centro. La densità e la temperatura aumentano fino a creare, per un tempo brevissimo, le condizioni necessarie alla fusione. Il plasma rimane confinato grazie alla propria inerzia, prima che la capsula abbia il tempo di disgregarsi.

Un ipotetico reattore a confinamento inerziale dovrebbe ripetere questo processo molte volte al secondo, introducendo continuamente nuove capsule e trasformando il calore prodotto in energia elettrica. Non sarebbe quindi sufficiente ottenere l'accensione in un singolo esperimento: bisognerebbe anche produrre capsule in grande quantità e a costi contenuti, colpirle con estrema precisione, sviluppare laser molto efficienti e proteggere la camera dalle continue esplosioni microscopiche e dal flusso di neutroni.

Il principale impianto dedicato a questo tipo di ricerca è il National Ignition Facility (NIF) del Lawrence Livermore National Laboratory, negli Stati Uniti. Nel dicembre 2022 il NIF ha ottenuto per la prima volta più energia di fusione di quella fornita direttamente dai laser alla capsula. Il risultato è stato successivamente ripetuto e migliorato: nell'aprile 2025 un esperimento ha prodotto 8,6 megajoule di energia di fusione a fronte di 2,08 megajoule di energia laser arrivata sul bersaglio, raggiungendo un guadagno sul bersaglio superiore a quattro.
In Europa presso il centro CEA-CESTA, vicino a Bordeaux, viene utilizzato il Laser Mégajoule ad alta potenza per studiare la materia in condizioni estreme e la fusione a confinamento inerziale, principalmente nell'ambito del programma francese di simulazione per la difesa. Anche presso l'Extreme Light Infrastructure, costituita da tre grandi laboratori rispettivamente nella Repubblica Ceca, in Ungheria e in Romania, sono stati realizzati laser di potenza elevatissima, fino a 10 petawatt, con i quali si conducono studi sull'interazione tra laser e plasma che potrebbero contribuire al progresso delle tecnologie di fusione inerziale.

4.3 *La fissione nucleare e il reattore a fissione*

Come si scoprì a partire dalla fine degli anni Trenta e come descritto nella prima parte di questo libro, quando un nucleo molto pesante, come quello dell'uranio-235, formato da 92 protoni e 143 neutroni, viene bombardato con neutroni lenti, può catturare uno di questi neutroni. Si forma così un nucleo di uranio-236 in uno stato fortemente instabile, che si scinde in due nuclei più leggeri, tra questi bario-141 e kripton-92. Nel

processo vengono inoltre liberati generalmente due o tre neutroni che, nelle condizioni opportune, possono essere assorbiti da altri nuclei di uranio-235, provocandone a loro volta la fissione e dando così origine a una reazione a catena capace di autosostenersi e di crescere rapidamente.

L'uranio, l'elemento più pesante presente in natura in quantità significative, possiede nel proprio nucleo una proporzione di neutroni rispetto ai protoni maggiore di quella caratteristica dei nuclei più leggeri. Quando il nucleo si divide, una parte di questi neutroni in eccesso viene quindi liberata. I frammenti prodotti dalla fissione sono inoltre, nella maggior parte dei casi, instabili e radioattivi: essi contribuiscono pertanto alla produzione di energia non soltanto attraverso la grande energia cinetica con cui si allontanano l'uno dall'altro, ma anche mediante i successivi decadimenti radioattivi.

Ricordiamo inoltre che la cattura di neutroni da parte dei nuclei di uranio non conduce necessariamente alla fissione. In alcuni casi può dare origine, attraverso una successione di trasformazioni nucleari, a elementi con numero atomico superiore a quello dell'uranio. È questo, in particolare, il caso del plutonio-239, prodotto a partire dall'uranio-238 mediante la cattura di un neutrone e due successivi decadimenti beta. Gli studi condotti anche da Fermi e Segrè contribuirono in modo decisivo alla scoperta e alla comprensione degli elementi transuranici; il plutonio-239, il cui nucleo contiene due protoni in più rispetto all'uranio, si sarebbe poi rivelato un importante materiale fissile.

La fissione libera una quantità di energia per unità di massa enormemente superiore a quella ottenibile mediante la combustione di fonti chimiche tradizionali. La fissione completa di un chilogrammo di uranio può liberare, in linea teorica, circa tre milioni di volte l'energia prodotta dalla combustione di un chilogrammo di carbone.

Come descritto in precedenza, la possibilità di sfruttare l'energia prodotta dalle reazioni nucleari per generare elettricità è stata, fin dalle sue origini, oggetto di intensi studi e sperimentazioni, accompagnati dall'impiego di ingenti risorse scientifiche, tecnologiche ed economiche.

Particolarmente importanti sono stati gli studi sulle proprietà dei neutroni liberati durante la fissione. Questi neutroni possiedono inizialmente un'energia molto elevata e, proprio per questo, hanno una probabilità relativamente bassa di essere catturati da un altro nucleo di uranio e provocarne la fissione. Per aumentare tale probabilità è quindi necessario rallentarli.

Nei reattori termici il rallentamento dei neutroni, chiamato *moderazione neutronica*, avviene attraverso una serie di collisioni con nuclei leggeri. Come aveva mostrato Fermi, durante questi urti i neutroni cedono progressivamente parte della propria energia senza essere necessariamente assorbiti. Nei reattori, i materiali impiegati come moderatori sono soprattutto la grafite, costituita da carbonio, l'acqua leggera, cioè l'acqua normale, e la cosiddetta *acqua pesante*, nella quale l'idrogeno è sostituito dal suo isotopo più pesante, il deuterio.

Nella progettazione di un reattore a fissione, la composizione, la geometria e le dimensioni del nocciolo devono essere definite in modo tale da mantenere stabile la reazione a catena. Questa stabilità dipende in maniera estremamente sensibile dal numero di neutroni prodotti e dal numero di nuove fissioni che essi riescono a provocare. La proporzione di materiale fissile presente nel nocciolo, la disposizione del combustibile, il moderatore e i materiali assorbitori devono pertanto essere scelti e regolati con grande precisione.

Il rapporto tra il numero di neutroni presenti in una generazione della reazione a catena e quello della generazione precedente, definito *fattore di riproduzione*, deve essere pari a uno affinché la reazione possa mantenersi stabile e controllata. Se il rapporto è inferiore a uno, il numero di neutroni diminuisce progressivamente e la reazione tende a spegnersi. Se è superiore a uno, il numero di neutroni e delle conseguenti fissioni aumenta. Nel funzionamento ordinario di un reattore, l'obiettivo è quindi mantenere il sistema in una condizione critica stabile, nella quale ogni generazione di neutroni produce, in media, una generazione successiva delle stesse dimensioni.

Gli ingegneri nucleari utilizzano diversi sistemi per controllare il funzionamento del reattore. Questi si basano principalmente sulla capacità di alcuni materiali, come il boro e il cadmio, di assorbire neutroni. Tali materiali sono spesso utilizzati sotto forma di barre, che possono essere inserite più o meno profondamente nel nocciolo.

Le *barre di controllo* regolano la potenza del reattore: quando vengono inserite assorbono un maggior numero di neutroni, riducendo il numero delle fissioni; quando vengono estratte, lasciano invece un numero maggiore di neutroni disponibile per proseguire la reazione a catena.

Durante il funzionamento del reattore, il combustibile fissile viene progressivamente consumato. Contemporaneamente si formano prodotti di fissione ed elementi transuranici, alcuni dei quali presentano

una notevole capacità di assorbire neutroni. Con il passare del tempo, quindi, le condizioni necessarie al mantenimento della reazione a catena tendono a deteriorarsi.

Per compensare questa evoluzione vengono utilizzate le *barre di compensazione*. Quando nel reattore viene introdotto combustibile nuovo, queste barre sono inizialmente inserite in profondità nel nocciolo. Vengono poi estratte gradualmente, in modo da controbilanciare la diminuzione del combustibile fissile disponibile e l'aumento delle sostanze che assorbono neutroni. Quando le barre sono state completamente estratte e non è più possibile compensare in questo modo la perdita di reattività, una parte del combustibile deve essere sostituita.

Un terzo tipo è rappresentato dalle *barre di sicurezza*: in caso di malfunzionamento o di emergenza, esse vengono inserite rapidamente nel nocciolo, assorbendo i neutroni disponibili e interrompendo la reazione a catena di fissione.

Anche il combustibile a base di uranio presenta importanti difficoltà tecniche. I nuclei caratterizzati da un numero dispari di neutroni si comportano diversamente da quelli con un numero pari. Quando un nucleo pesante con un numero dispari di neutroni ne cattura un altro, può formarsi un nucleo particolarmente instabile e quindi più facilmente soggetto alla fissione.

L'uranio-235 è l'unico isotopo dell'uranio presente in natura in quantità apprezzabili che possa essere facilmente sottoposto a fissione mediante neutroni di bassa energia. Tuttavia, l'uranio naturale contiene soltanto circa lo 0,72 per cento di uranio-235. Quasi tutto il resto è costituito da uranio-238, mentre l'uranio-234 è presente soltanto in tracce.

I primi reattori utilizzavano uranio naturale, sia in forma metallica sia sotto forma di ossido. I reattori nei quali viene impiegata acqua pesante o grafite come moderatore possono infatti raggiungere la condizione critica anche con concentrazioni relativamente basse di uranio-235. I reattori che utilizzano acqua leggera richiedono invece un combustibile arricchito.

La normale acqua, pur essendo un efficace moderatore, assorbe infatti una parte dei neutroni. Con la ridotta concentrazione di uranio-235 presente nell'uranio naturale, un numero insufficiente di neutroni rimarrebbe disponibile per sostenere stabilmente la reazione a catena. Per questo motivo, nella maggior parte dei moderni reattori ad acqua leggera, la concentrazione di uranio-235 nel combustibile viene portata a valori generalmente prossimi al 4 per cento.

L'arricchimento dell'uranio costituisce un processo tecnicamente complesso, perché gli isotopi uranio-235 e uranio-238 possiedono proprietà chimiche praticamente identiche. Non è quindi possibile separarli attraverso normali reazioni chimiche: è necessario sfruttare la loro piccola differenza di massa, corrispondente alla presenza di tre neutroni in più nel nucleo dell'uranio-238.
Per effettuare la separazione, l'uranio viene generalmente trasformato in esafluoruro di uranio, un composto che può essere portato allo stato gassoso. Gli isotopi possono quindi essere separati mediante processi di diffusione differenziale, attraverso centrifughe ad alta velocità oppure, più recentemente, mediante avanzate tecnologie laser.

Oltre alla limitata disponibilità dell'uranio-235, un altro problema riguarda la produzione e lo smaltimento delle scorie radioattive. Quando un nucleo di uranio cattura un neutrone, infatti, non necessariamente va incontro alla fissione. Attraverso successive trasformazioni e decadimenti beta possono formarsi nuclei più pesanti, come il plutonio-239, composto da 94 protoni e 145 neutroni, e altri elementi transuranici, tra cui il nettunio e l'americio.

Anche questi elementi sono radioattivi e alcuni dei loro isotopi possiedono tempi di dimezzamento estremamente lunghi, dell'ordine di migliaia o persino milioni di anni. La loro gestione rappresenta quindi una delle principali questioni associate all'impiego dell'energia nucleare.

Una possibile soluzione consiste nell'utilizzare un diverso ciclo del combustibile, basato su reattori nei quali i neutroni non vengono rallentati mediante un moderatore. In questi sistemi, chiamati *reattori a neutroni veloci*, il nocciolo viene progettato in modo da sfruttare anche l'uranio-238, che costituisce la quasi totalità dell'uranio naturale.

Quando l'uranio-238 assorbe un neutrone si trasforma in uranio-239. Questo nucleo instabile decade dapprima in nettunio-239 e successivamente in plutonio-239. Il plutonio-239 è fissile e, come l'uranio-235, può dividersi liberando energia e nuovi neutroni veloci.

In particolari configurazioni, il processo può essere organizzato in modo da produrre una quantità di nuovo materiale fissile superiore a quella consumata. Per questo motivo tali sistemi sono stati definiti *reattori autofertilizzanti* o *breeder*. Il principale vantaggio di questa tecnologia è la possibilità di utilizzare una quota molto più ampia dell'uranio naturale, e non soltanto la piccola frazione costituita dall'uranio-235.

I reattori a neutroni veloci possono inoltre essere impiegati per trasformare o distruggere alcuni degli elementi radioattivi a lunga vita

prodotti nei reattori convenzionali. Questi materiali possono essere reintrodotti nel ciclo del combustibile e sottoposti a ulteriori reazioni nucleari, riducendo così la quantità e la durata della radioattività dei rifiuti da smaltire.

Reattori commerciali e sperimentali basati sull'impiego di neutroni veloci sono stati realizzati in diverse parti del mondo. Alcuni sono operativi in Russia, mentre prototipi e programmi di ricerca sono presenti anche in India e in Cina. In Italia, presso il Centro ENEA del Brasimone, nell'Appennino bolognese, la società Newcleo sta lavorando allo sviluppo di un simulatore destinato allo studio di un reattore di quarta generazione raffreddato a piombo liquido.

Negli ultimi settant'anni, con la crescente diffusione dell'energia nucleare, è stata commercializzata un'ampia varietà di progetti di reattori. La prima generazione comprende le prime unità nucleari, che hanno testato la possibilità di ottenere produzione di elettricità da reazioni nucleari. Nessuna di queste è attualmente in funzione. La maggior parte dell'attuale parco centrali nucleari è costituita dai cosiddetti *reattori di seconda generazione*, che hanno iniziato a funzionare tra la fine degli anni Sessanta e gli anni Novanta.

Negli ultimi due decenni, sono stati costruiti e messi in funzione i primi reattori di terza generazione. L'esperienza acquisita con queste centrali nucleari «pionieristiche» dovrebbe garantire l'efficiente costruzione in serie di nuovi reattori. I reattori di terza generazione dovrebbero avere una vita utile superiore a sessant'anni e un livello di sicurezza molto elevato. Sono più economici, impiegano meno combustibile e producono meno scorie, il che li rende competitivi rispetto ad altre fonti energetiche.

Attualmente sono stati sviluppati e messi in funzione diversi tipi di reattori appartenenti alla terza generazione. Una delle questioni che hanno accompagnato il loro sviluppo riguarda la produzione di plutonio all'interno del combustibile. Circa l'1 per cento del combustibile nucleare esaurito è infatti costituito da isotopi del plutonio, alcuni dei quali fissili.

Un metodo importante per aumentare l'efficienza del ciclo del combustibile e ridurre la quantità di materiali radioattivi da smaltire consiste nel recuperare il plutonio presente nel combustibile esaurito. Questo può essere miscelato con uranio impoverito e trasformato in un com-

bustibile a ossidi misti, indicato con la sigla MOX. Il materiale così ottenuto può essere nuovamente utilizzato in alcuni tipi di reattore, recuperando una parte dell'energia ancora contenuta nel combustibile esaurito.

Le economie di scala hanno condotto alla costruzione di reattori di terza generazione capaci di raggiungere potenze elettriche dell'ordine del gigawatt e oltre. La realizzazione di impianti di dimensioni sempre maggiori dovrebbe, in linea teorica, ridurre il rapporto tra i costi di costruzione e di esercizio e la quantità di energia prodotta. In questo modo diminuisce il costo per unità di elettricità generata. Tuttavia, gli aspetti economici della costruzione e della commercializzazione di impianti tanto grandi rimangono complessi, soprattutto a causa degli elevati investimenti iniziali e dei lunghi tempi di realizzazione.

L'uranio e il plutonio non sono gli unici materiali utilizzabili per produrre energia nucleare. Un'altra possibilità è rappresentata dal torio-232, il cui nucleo contiene 90 protoni e 142 neutroni. Il torio-232 non è direttamente fissile, ma viene definito un materiale fertile, perché può essere trasformato in un isotopo fissile mediante l'assorbimento di neutroni. Dopo la cattura di un neutrone, il torio-232 si converte in torio-233. Attraverso successivi decadimenti radioattivi si forma infine uranio-233, un isotopo fissile in grado di alimentare una reazione a catena.

La fattibilità tecnica dell'impiego del torio nei reattori nucleari è stata studiata fin dagli anni Sessanta in diversi Paesi e attraverso differenti tecnologie. Le ricerche sono state particolarmente significative negli Stati Uniti e in India, Paese che dispone di ingenti riserve di torio. Alcuni moderni progetti di reattori avanzati prevedono la possibilità di utilizzare il torio come parte del combustibile nucleare.

Gli elevati investimenti richiesti per costruire centrali nucleari di potenza e dimensioni sempre maggiori hanno inoltre spinto numerosi Paesi e imprese a considerare lo sviluppo di reattori modulari di piccole dimensioni, indicati con la sigla SMR, dall'inglese *Small Modular Reactor*. Questi reattori sono generalmente progettati per una potenza elettrica inferiore a 300 megawatt.

L'idea è quella di costruire unità relativamente piccole e standardizzate, prefabbricate almeno in parte all'interno di stabilimenti industriali e successivamente trasportate nel luogo di installazione. La produzione in serie potrebbe ridurre i costi e i tempi di costruzione rispetto alle grandi centrali realizzate quasi interamente sul posto.

Gli SMR potrebbero essere impiegati per fornire energia a piccoli siti industriali, comunità isolate o regioni remote, nelle quali una centrale nucleare tradizionale risulterebbe sovradimensionata o difficilmente realizzabile. Potrebbero inoltre essere utilizzati per applicazioni diverse dalla sola produzione di elettricità, come la generazione di idrogeno, il riscaldamento industriale e la desalinizzazione dell'acqua.

La loro potenza più contenuta potrebbe facilitarne anche l'integrazione con le fonti rinnovabili, contribuendo a compensare le variazioni nella produzione di energia solare ed eolica. La struttura modulare dovrebbe inoltre offrire alcuni vantaggi sul piano della sicurezza. Un reattore più piccolo contiene infatti una minore quantità complessiva di materiale radioattivo e può essere progettato per utilizzare sistemi di sicurezza passiva, capaci di intervenire senza la necessità di alimentazione elettrica o di azioni esterne. Queste caratteristiche potrebbero semplificare le procedure di autorizzazione e rendere possibile un impiego maggiormente decentralizzato dell'energia nucleare.

Alcuni progetti prevedono un funzionamento paragonabile, almeno concettualmente, alla sostituzione di una grande batteria. Il modulo del reattore verrebbe trasportato nella località di utilizzo già contenente il combustibile. Al termine del ciclo operativo, l'intera unità o la parte contenente il nocciolo potrebbe essere sostituita e riportata in un impianto specializzato. Il combustibile non verrebbe quindi manipolato o sostituito direttamente nel luogo in cui il reattore produce energia.

Si stanno studiando anche concetti completamente nuovi di piccoli reattori, progettati per funzionare per periodi molto lunghi senza sostituzione del combustibile, in alcuni casi anche per diversi decenni. Nonostante il grande numero di progetti in fase di sviluppo, soltanto pochi SMR sono entrati finora in funzione a livello commerciale o precommerciale.

Tra le prime applicazioni di reattori di piccole dimensioni figurano quelli utilizzati per la propulsione dei rompighiaccio nucleari. Un altro esempio è l'*Akademik Lomonosov*, la prima centrale nucleare galleggiante russa, formata da due moduli e situata nell'Estremo Oriente del Paese. La centrale è stata collegata alla rete elettrica nel 2020.
Anche Rolls-Royce sta sviluppando un piccolo reattore modulare, progettato in modo che i suoi principali componenti possano essere trasportati mediante autocarri o chiatte e assemblati nel luogo prescelto.

4.4 *Reattori di piccole dimensioni per la propulsione nucleare*

Negli ultimi settant'anni, diversi paesi hanno costruito flotte di navi e sottomarini militari alimentati da reattori nucleari compatti, nei quali il calore prodotto dalla fissione viene utilizzato per generare vapore e azionare una turbina. Oggi si sta valutando con crescente interesse la possibilità di estendere questa tecnologia al trasporto marittimo commerciale. Una nave a propulsione nucleare potrebbe infatti operare per molti anni senza necessità di rifornimento, riducendo sensibilmente il consumo di combustibili fossili in un settore che attualmente contribuisce per circa il 3-4 per cento alle emissioni globali di gas serra.

Le possibili applicazioni dell'energia nucleare non si limitano tuttavia alla navigazione. In passato, come abbiamo visto, sia gli Stati Uniti sia l'Unione Sovietica hanno sviluppato sistemi nucleari destinati ai satelliti e alle missioni spaziali. A partire dai primi anni Duemila, il rinnovato interesse per l'esplorazione umana della Luna e di Marte ha determinato nuovi investimenti nella progettazione di reattori di piccole dimensioni, capaci di fornire energia in ambienti nei quali la luce solare è insufficiente o intermittente.

L'Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA) e l'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) hanno sottoscritto un accordo di collaborazione per mettere in comune competenze, infrastrutture e professionalità multidisciplinari. L'obiettivo è la realizzazione di uno Space Nuclear Reactor, un mini-reattore nucleare progettato e costruito in Italia, compatto, leggero, affidabile e sicuro, destinato a produrre l'energia necessaria alle future basi lunari e, in prospettiva, alle missioni verso Marte e lo spazio profondo.
La progettazione dello Space Nuclear Reactor si fonda su alcuni principi essenziali. La modularità dovrebbe consentire di aumentare facilmente la potenza disponibile; la ridondanza dei sistemi fondamentali dovrà garantire elevati livelli di sicurezza; la riduzione del peso e delle dimensioni permetterà il trasporto a bordo di un razzo cargo, contenendo al tempo stesso ingombri, tempi e costi di produzione. Particolare attenzione sarà inoltre dedicata all'affidabilità dei componenti, privilegiando, ove possibile, tecnologie già mature sviluppate dall'industria italiana, da tempo attiva in questo settore.

L'energia nucleare potrebbe essere impiegata nello spazio non soltanto per produrre elettricità, ma anche per la propulsione. In uno dei sistemi allo studio, l'idrogeno liquido viene pompato attraverso un reattore, dove il calore prodotto dalla fissione dell'uranio lo porta a temperature

molto elevate e lo trasforma in gas. Espulso attraverso un ugello, il gas genera la spinta necessaria al movimento del veicolo. La propulsione nucleare termica potrebbe raggiungere un'efficienza sensibilmente superiore a quella dei tradizionali sistemi chimici, riducendo la durata dei viaggi interplanetari e ampliando le possibilità delle future missioni umane.

Un altro settore di particolare interesse riguarda lo sviluppo dei sistemi nucleari azionati da acceleratori, gli Accelerator-Driven Systems, o ADS, studiati anche per la trasmutazione del combustibile nucleare esaurito proveniente dai reattori convenzionali. In questi impianti, un acceleratore produce un'intensa sorgente di neutroni che alimenta un sistema nucleare sottocritico. Le successive catture neutroniche e i decadimenti radioattivi permetterebbero di trasformare alcuni elementi transuranici a lunga vita in nuclei più facilmente gestibili o caratterizzati da tempi di decadimento più brevi.

4.5 *La sicurezza nucleare*

Lo smaltimento dei rifiuti radioattivi e il funzionamento sicuro delle centrali sono sempre stati tra le principali preoccupazioni dei governi e dell'opinione pubblica. Negli ultimi decenni, gli studi condotti nelle università, nei centri di ricerca e nell'industria hanno permesso di individuare soluzioni sempre più avanzate. L'obiettivo è ridurre il rischio, controllarlo e renderlo confrontabile con quello degli altri grandi settori industriali destinati alla produzione di energia.

a. Gestione delle scorie radioattive

La principale obiezione rivolta all'energia nucleare riguarda la gestione del combustibile esaurito. Una parte può essere riprocessata per recuperare il materiale ancora utilizzabile, mentre gli elementi più pericolosi e longevi possono essere trasmutati o «bruciati» nei sistemi nucleari avanzati. Il riciclo, tuttavia, non elimina completamente i rifiuti radioattivi: ciò che non viene riutilizzato deve essere isolato per impedirne la dispersione nell'ambiente. Il combustibile esaurito viene quindi conservato in piscine o contenitori a secco, in attesa del riprocessamento o del trasferimento in un deposito definitivo.

Per i rifiuti ad alta attività e a lunga vita, la soluzione più affidabile è il deposito geologico profondo, costruito in una formazione rocciosa stabile a centinaia di metri dalla superficie. Il sistema si basa su barriere

multiple: il combustibile viene racchiuso in contenitori resistenti, circondato da materiali che limitano il passaggio dell'acqua e infine isolato dalla roccia. Per garantirne la sicurezza per decine di migliaia di anni è necessario comprendere come cambieranno le scorie, i contenitori e le proprietà geologiche. Servono quindi dati nucleari precisi e studi sul comportamento del deposito nel lunghissimo periodo.

Il progetto più avanzato è Onkalo, costruito presso Olkiluoto, in Finlandia. L'impianto si trova nelle fasi finali di collaudo e dovrebbe essere avviato entro la fine del 2026. Progetti analoghi sono in corso in Svezia e in Francia. Negli Stati Uniti è già operativo il Waste Isolation Pilot Plant, scavato in una formazione salina del Nuovo Messico. Esso non accoglie il combustibile delle centrali commerciali, ma rifiuti transuranici provenienti dalle attività nucleari militari e di ricerca statunitensi.

b. Sicurezza degli impianti

Nel corso della storia dell'industria nucleare civile, tre incidenti hanno segnato in modo particolare l'opinione pubblica. Il primo avvenne il 28 marzo 1979 nell'unità 2 della centrale di Three Mile Island, in Pennsylvania, dove guasti ed errori operativi provocarono la fusione parziale del nocciolo. Il reattore venne irrimediabilmente danneggiato, ma i limitati rilasci radioattivi non produssero effetti sanitari rilevabili.

Ben più grave fu l'incidente del reattore numero 4 di Černobyl', avvenuto il 26 aprile 1986 nell'allora Unione Sovietica, oggi Ucraina. Un test condotto in condizioni instabili, insieme ai difetti di progettazione del reattore e a gravi carenze nella cultura della sicurezza, provocò esplosioni e un incendio che disperse materiale radioattivo su vaste aree d'Europa. Il numero di vittime dirette – principalmente a causa di malattia da radiazione acuta – non ha superato le 100. Il numero di vittime successive, dovute a dosi di radiazioni inferiori, è stato stimato tra 4.000 e 20.000, considerando l'intera aspettativa di vita della popolazione colpita.

L'ultimo dei tre grandi incidenti avvenne l'11 marzo 2011 a Fukushima Daiichi, dopo il terremoto e lo tsunami che colpirono il Giappone nord-orientale. L'acqua invase i generatori diesel e gli impianti elettrici, causando il blocco dei sistemi di raffreddamento e la fusione del combustibile in tre reattori. I contenimenti limitarono il rilascio rispetto a Černobyl', ma la contaminazione rese necessaria l'evacua-

zione di un'ampia area. Non si registrarono decessi immediatamente riconducibili all'esposizione alle radiazioni, mentre l'evacuazione ebbe conseguenze sanitarie e sociali rilevanti. Molte restrizioni sono state revocate, ma alcune zone restano difficilmente abitabili e lo smantellamento richiederà diversi decenni.

Questi incidenti hanno determinato profonde modifiche nella progettazione dei reattori, nei sistemi di emergenza e nella formazione degli operatori. I moderni impianti impiegano barriere ridondanti, sistemi passivi e controlli più severi, che riducono la probabilità di un incidente grave e limitano eventuali conseguenze. Nessuna tecnologia complessa, tuttavia, può essere considerata priva di rischi: la sicurezza dipende dalla progettazione, dalla manutenzione, dalla vigilanza e dalla capacità di imparare dagli errori.

È utile ricordare che anche le altre forme di produzione energetica hanno provocato gravi catastrofi. Il 9 ottobre 1963 la frana del Vajont generò un'onda che superò la diga e causò 1.917 vittime. Nel 1975 il cedimento di una serie di dighe nella provincia cinese dell'Henan provocò decine di migliaia di morti, mentre nel 1989 l'esplosione del gas fuoriuscito da un gasdotto nei pressi di Ufa, nella parte occidentale della Russia, investì due treni e uccise centinaia di persone.
Il rischio deve quindi essere confrontato non soltanto attraverso l'impatto emotivo dei singoli eventi, ma anche in rapporto all'energia prodotta. Le analisi che comprendono gli incidenti e gli effetti dell'inquinamento atmosferico collocano il nucleare tra le fonti con il minor numero di vittime per unità di elettricità, su livelli comparabili a eolico e fotovoltaico e molto inferiori a carbone, petrolio e gas.

Garantire il funzionamento sicuro di un parco di reattori nucleari ormai in parte invecchiato è una delle principali sfide dell'industria nucleare. Alcuni impianti operano da quasi cinquant'anni e molti hanno ottenuto licenze estese fino a sessanta o perfino ottant'anni. Non esiste ancora, tuttavia, un'esperienza completa per periodi così lunghi. Sebbene gran parte dei componenti di una centrale possa essere sostituita, ciò non vale per il recipiente del reattore. Lo studio del suo comportamento nel tempo, soprattutto degli effetti dell'esposizione prolungata a intensi flussi di neutroni, richiede quindi l'impiego di metodi e conoscenze della fisica nucleare.

4.6 *La fisica nucleare a supporto della produzione di energia*

Gli studi di fisica nucleare permettono di acquisire i dati e sviluppare i metodi necessari per comprendere e modificare le proprietà dei materiali impiegati nelle tecnologie nucleari. Queste conoscenze sono indispensabili per garantire il funzionamento sicuro delle centrali esistenti e rendere più affidabili il trattamento, lo smaltimento o la trasmutazione dei rifiuti radioattivi.

Anche la progettazione dei reattori avanzati richiede dati precisi sulle principali reazioni nucleari, come l'emissione e la cattura dei neutroni e il decadimento radioattivo di numerosi isotopi. Tali informazioni non riguardano soltanto il comportamento del combustibile, ma anche le interazioni delle radiazioni con i materiali strutturali del reattore, che possono diventare radioattivi.

È quindi necessario conoscere la probabilità delle diverse reazioni e le energie delle radiazioni e delle particelle emesse, in particolare dei neutroni. Nei futuri reattori a fissione e negli impianti a fusione sono infatti previsti flussi neutronici molto intensi. I reattori di quarta generazione, i sistemi azionati da acceleratori, i piccoli reattori modulari e alcune tecnologie di fusione dovranno inoltre operare a temperature elevate, talvolta superiori a 1000 °C. È quindi fondamentale conoscere le proprietà dei materiali utilizzati, affinché possano resistere alle radiazioni, al calore e alle sollecitazioni meccaniche.

Il comportamento delle reazioni nucleari e la diffusione del calore nelle diverse parti di un impianto possono essere riprodotti mediante simulazioni al computer. Per ottenere risultati affidabili servono conoscenze approfondite di fisica nucleare, banche dati accurate e codici di calcolo capaci di descrivere fenomeni complessi. Questi strumenti devono essere verificati sperimentalmente, confrontando le simulazioni con misure eseguite su assemblaggi nucleari che riproducono alcune caratteristiche dei sistemi più avanzati.

Il confronto tra calcolo ed esperimento costituisce quindi un settore essenziale della ricerca nucleare. Particolarmente importanti sono gli studi sulle reazioni indotte dai neutroni, sulle loro probabilità e sulle energie coinvolte. Pur essendo privi di carica elettrica, i neutroni sono particelle relativamente pesanti e, ad alte energie, possono penetrare nei materiali e danneggiarne la struttura. Per studiare questi fenomeni esistono centri internazionali dotati di reattori di ricerca e sorgenti

di neutroni da spallazione, capaci di produrre fasci controllati. Queste infrastrutture consentono di misurare le reazioni nucleari che coinvolgono i neutroni e di analizzare la loro interazione con i combustibili e i materiali destinati ai futuri impianti.

4.7 *Il nucleare tra le altre fonti di energia*

Per gran parte degli ultimi decenni, la produzione nucleare mondiale è cresciuta più lentamente della domanda di elettricità e la sua quota nel mix globale si è mantenuta poco al di sotto del 10 per cento. L'energia nucleare presenta tuttavia due vantaggi importanti: produce elettricità con emissioni di carbonio molto contenute e può funzionare in modo continuo e programmabile, contribuendo alla stabilità delle reti nelle quali aumenta la presenza di fonti rinnovabili intermittenti.

Le prospettive fino al 2050 dipendono dalle scelte politiche, dagli investimenti e dalla capacità dell'industria di realizzare nuovi impianti nei tempi previsti. Anche negli scenari in cui la quota del nucleare rimarrà prossima a quella attuale, l'aumento della domanda elettrica richiederà una crescita considerevole della capacità installata. Essa potrà essere ottenuta prolungando, quando le condizioni di sicurezza lo consentono, la vita dei reattori esistenti e costruendo nuovi impianti, sia di grandi dimensioni sia piccoli reattori modulari. Secondo le proiezioni dell'Agenzia internazionale per l'energia atomica, entro il 2050 la capacità nucleare mondiale potrebbe aumentare di circa la metà nello scenario più prudente e più che raddoppiare in quello più favorevole.

Attualmente nel mondo ci sono 436 reattori, dei quali 93 negli Stati Uniti, 120 in Europa e Regno Unito, 38 in Russia e 15 in Ucraina. A oggi, 59 reattori sono in costruzione: 21 in Cina, 8 in India, 4 in Turchia e 3 in Russia. Un centinaio di reattori si trova inoltre in fase di pianificazione.

La maggior parte dell'espansione si concentrerà probabilmente nelle economie emergenti, soprattutto in Asia. Nuovi paesi stanno preparando programmi nucleari, mentre altri, come Polonia, Repubblica Ceca e Turchia, intendono ampliare o introdurre questa fonte.

La Cina è ormai il principale centro dell'espansione nucleare mondiale. Molti dei reattori avviati negli ultimi anni o in costruzione utilizzano tecnologie cinesi o russe: ciò segnala uno spostamento della leadership industriale dalle economie occidentali verso il continente asiatico.

In Italia, le quattro centrali che hanno prodotto elettricità nucleare sono oggi tutte in fase di dismissione. Latina e Garigliano entrarono in esercizio rispettivamente nel 1963 e nel 1964. La centrale «Enrico Fermi» di Trino iniziò la produzione commerciale nel 1965, mentre Caorso, realizzata negli anni Settanta, entrò in esercizio nel 1981. Garigliano era già stata chiusa nel 1982; Caorso fu fermata nel 1986 e non venne più riavviata, mentre Latina e Trino cessarono l'attività nel 1987, dopo il referendum sul nucleare.

Al sistema nucleare italiano appartenevano anche gli impianti del ciclo del combustibile. Lo stabilimento Fabbricazioni Nucleari di Bosco Marengo, entrato in funzione nel 1973, produsse elementi di combustibile per centrali italiane e straniere. A esso si aggiungevano gli impianti di ricerca EUREX di Saluggia, OPEC e IPU della Casaccia e ITREC di Trisaia-Rotondella. Il loro smantellamento, insieme a quello delle quattro centrali, è ancora in corso e richiede risorse, competenze e tecnologie condivise a livello internazionale. La società pubblica SOGIN si occupa di questi smantellamenti e della realizzazione in futuro di un deposito nazionale per i rifiuti radioattivi.

L'esperienza maturata durante il programma nucleare italiano non è quindi scomparsa: imprese, tecnici e ingegneri hanno continuato a lavorare nella ricerca, nella sicurezza, nella dismissione e nella costruzione di impianti all'estero, conservando un patrimonio di conoscenze utile anche per le scelte future.

Parte III
Scienza e coscienza: la sicurezza internazionale e il controllo degli armamenti

1. La scienza dopo Hiroshima

Il 6 e il 9 agosto del 1945 gli Stati Uniti sganciarono rispettivamente le bombe atomiche Little Boy e Fat Man sulle città giapponesi di Hiroshima e Nagasaki. Con la distruzione delle due città giapponesi si aprì una fase storica inedita, nella quale il rapporto tra scienza, politica e guerra assunse una dimensione fino ad allora sconosciuta.

Per gli scienziati coinvolti nel progetto Manhattan, si pose un dilemma nuovo e complesso: se, durante gli anni della guerra, il timore che la Germania nazista potesse sviluppare un'arma analoga aveva rappresentato una motivazione fondamentale, con la sconfitta del regime hitleriano e la resa incondizionata dell'impero nipponico, occorreva interrogarsi sulle conseguenze politiche, morali e sociali della nuova tecnologia.

Per la prima volta la sopravvivenza delle società moderne sembrava dipendere dalla capacità di controllare una tecnologia sviluppata dagli stessi esseri umani.

La bomba atomica era il risultato di un insieme di scoperte prodotte nel corso di decenni: nessuno degli studiosi che, all'inizio del Novecento, aveva indagato la struttura dell'atomo avrebbe potuto prevedere con esattezza gli sviluppi che ne sarebbero derivati. Tuttavia, una volta compresa la fissione nucleare e divenuta concreta la possibilità di una reazione a catena, il passaggio dalla scoperta scientifica all'applicazione militare fu estremamente rapido.

In questo contesto storico eccezionalmente drammatico, la questione etica divenne prioritaria. Non si trattava solo di chiedersi quale fosse la responsabilità degli scienziati coinvolti nelle ricerche rispetto alle applicazioni che ne seguirono, ma anche di stabilire quale ruolo dovessero avere – ammesso che dovessero averlo – all'interno delle istituzioni po-

litiche e militari, ormai determinanti nel prendere decisioni dalle conseguenze incalcolabili.

Era ormai chiaro come la responsabilità non riguardava più soltanto il singolo ricercatore, ma il rapporto tra la comunità scientifica, lo Stato e l'opinione pubblica.

Nella comunità dei fisici, Hiroshima rappresentò una cesura definitiva: a molti era chiaro che non si sarebbe più potuti tornare indietro e chiudersi nei laboratori considerando l'esperienza della guerra come una semplice parentesi. Le reazioni furono diverse e spesso determinate dalle diverse esperienze vissute durante il conflitto: chi scelse l'impegno pubblico, chi decise di lavorare come consulente dei governi, chi decise di non voler avere più niente a che fare con la fisica. Molti promossero organizzazioni internazionali, campagne di informazione e movimenti per il disarmo.

Niels Bohr fu tra i primi a sostenere che soltanto una politica di apertura reciproca, accompagnata da forme di controllo condiviso, avrebbe potuto impedire che la scoperta dell'energia atomica producesse una corsa agli armamenti. Già nel 1944 il fisico danese ammoniva: «Si sta creando un'arma di potenza senza pari che cambierà completamente tutte le condizioni future della guerra... Se non si riuscirà a raggiungere in tempo utile un qualche accordo sul controllo dell'uso dei nuovi materiali attivi, qualsiasi vantaggio temporaneo, per quanto grande, potrebbe essere superato da una perpetua minaccia alla sicurezza umana».

Nel giugno del 1945, sempre prima di Hiroshima, alcuni scienziati coinvolti nel progetto Manhattan avevano espresso le proprie preoccupazioni in un documento destinato a diventare celebre: il Rapporto Franck. Il testo rappresentò una delle prime grandi riflessioni etiche dell'era atomica e segnò l'inizio di un dibattito che avrebbe accompagnato tutta la seconda metà del Novecento.

La questione centrale non era più come liberare l'energia dell'atomo: la vera sfida consisteva nel decidere come utilizzarla. Il rapporto, con grande lucidità, prevedeva l'inizio di una corsa agli armamenti in considerazione del fatto che l'America non avrebbe potuto tenere a lungo segreta la costruzione dell'ordigno nucleare. Il suggerimento era quello di dare una dimostrazione della potenza della nuova arma alla presenza di osservatori internazionali e in un'area disabitata.

Utilizzare la bomba contro una popolazione civile, benché nemica, avrebbe, a loro avviso, reso più difficile la costruzione di un futuro sistema

di controllo internazionale. Era importante non solo concludere la guerra, ma anche il modo di presentare al resto del mondo la nuova tecnologia.

Il rapporto venne sottoposto all'Interim Committee, il gruppo segretissimo costituito dal Segretario alla Guerra Henry Stimson – con l'approvazione del Presidente Harry S. Truman – per formulare raccomandazioni sull'impiego delle armi atomiche e definire le politiche del dopoguerra, che a sua volta lo trasmise al Scientific Panel, di cui facevano parte J. Robert Oppenheimer, Enrico Fermi, Arthur Compton ed Ernest Lawrence. Si accese un forte dibattito ma, alla fine, l'ipotesi di una dimostrazione non militare venne scartata. Benché il panel scientifico non avesse avuto voce in capitolo rispetto alle città da colpire e non avesse avuto l'ultima parola nella decisione politica finale, il suo parere contribuì al processo che condusse all'impiego dell'arma.

La conclusione fu che nessuna dimostrazione avrebbe garantito di portare il Giappone alla resa e che l'impiego della bomba in un attacco a sorpresa avrebbe probabilmente salvato, nel complesso, più vite americane e giapponesi, imponendo una rapida conclusione del conflitto.

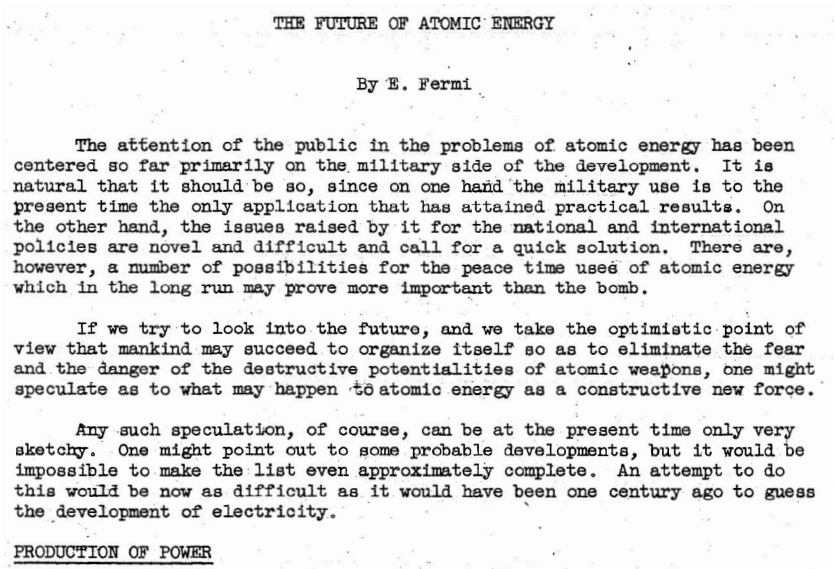
Neppure tra gli scienziati, dunque, esisteva una posizione comune. Fu in questo contesto e da questi dilemmi che nacque l'etica dell'era atomica.

2. Fermi: la responsabilità dall'interno

Il comportamento di Fermi nel dopoguerra conservò il carattere pragmatico che aveva sempre contraddistinto la sua personalità. Preferì continuare a operare come scienziato e come consulente, intervenendo nelle sedi istituzionali nelle quali riteneva che la propria competenza potesse essere utile.

Nel 1946, nel documento *The Future of Atomic Energy*, tornò sul futuro dell'energia nucleare (*Figura 8*). L'attenzione dell'opinione pubblica, osservava, si era concentrata quasi esclusivamente sull'applicazione militare, perché la bomba era il primo risultato concreto e visibile della nuova tecnologia. Tuttavia, nel lungo periodo, gli usi pacifici avrebbero potuto rivelarsi «più importanti della bomba»: tra gli altri, Fermi descriveva la produzione controllata di energia, l'impiego degli isotopi radioattivi nella medicina, nella biologia e nella ricerca chimica, oltre che la possibilità di utilizzare il carbonio 14 come tracciante nei processi della vita.

Figura 8 Prima pagina del saggio di Enrico Fermi *The Future of Atomic Energy*, 1946



THE FUTURE OF ATOMIC ENERGY

By E. Fermi

The attention of the public in the problems of atomic energy has been centered so far primarily on the military side of the development. It is natural that it should be so, since on one hand the military use is to the present time the only application that has attained practical results. On the other hand, the issues raised by it for the national and international policies are novel and difficult and call for a quick solution. There are, however, a number of possibilities for the peace time uses of atomic energy which in the long run may prove more important than the bomb.

If we try to look into the future, and we take the optimistic point of view that mankind may succeed to organize itself so as to eliminate the fear and the danger of the destructive potentialities of atomic weapons, one might speculate as to what may happen to atomic energy as a constructive new force.

Any such speculation, of course, can be at the present time only very sketchy. One might point out to some probable developments, but it would be impossible to make the list even approximately complete. An attempt to do this would be now as difficult as it would have been one century ago to guess the development of electricity.

PRODUCTION OF POWER

Fermi era consapevole che impianti e materiali destinati alla produzione civile potevano essere collegati alla fabbricazione di esplosivi nucleari; il punto, però, non era fermare la ricerca, bensì giungere a un cambiamento profondo nei rapporti tra le nazioni e la costruzione di forme efficaci di controllo internazionale.

La ricerca non poteva essere fermata e una conoscenza acquisita non poteva essere cancellata. Era irrealistico pensare di poter ignorare la fissione nucleare. «Non sarebbe affatto sorprendente – concludeva – se lo stimolo che queste nuove tecniche offriranno alla scienza dovesse produrre risultati ancora più spettacolari di una fonte di energia economica e conveniente, o della terribile capacità distruttiva della bomba atomica».

Dunque, l'energia atomica come una forza potenzialmente rivoluzionaria, il cui futuro dipende non solo dai progressi tecnici, ma anche dalla capacità dell'umanità di controllarla politicamente e usarla in modo pacifico.

Dal 1947 Fermi fece parte del General Advisory Committee della Atomic Energy Commission, l'organismo incaricato di fornire consu-

lenza scientifica al governo americano. Fu all'interno di questa sede che, nel 1949, si trovò nuovamente davanti a una scelta decisiva. Infatti, dopo il primo esperimento atomico sovietico, negli Stati Uniti si aprì la discussione sulla costruzione della bomba all'idrogeno, un'arma termonucleare centinaia di volte potenzialmente più potente di quelle utilizzate nel 1945.

La maggioranza del comitato, che oltre a Fermi comprendeva Oppenheimer, James B. Conant e Isador I. Rabi, si pronunciò contro un programma accelerato per la sua realizzazione. Fermi e Rabi al rapporto aggiunsero una dichiarazione ancora più forte: un ordigno di quella potenza superava qualsiasi obiettivo militare rappresentando di per sé un male, sotto qualsiasi punto di vista, né il suo utilizzo si sarebbe mai potuto giustificare.

Come è noto, il presidente Truman decise comunque di avviare il programma termonucleare a partire dal gennaio del 1950 e a quel punto Fermi tornò per un periodo a Los Alamos per partecipare, con Stanislaw Ulam, ai calcoli sul progetto allora in discussione.

Fermi rimase un uomo delle istituzioni: continuò a svolgere il proprio ruolo tecnico e di ricerca una volta che la decisione politica era stata presa, nonostante avesse espresso il proprio giudizio etico contrario e riconosciuta, di fronte alla bomba termonucleare, l'esistenza di un confine che la potenza tecnica non avrebbe dovuto oltrepassare.

Rifiutava l'idea che la conoscenza scientifica potesse essere cancellata o arrestata. Per lui, la responsabilità non coincideva con il rifiuto della scienza, ma con la consapevolezza che ogni conquista scientifica, una volta entrata nella storia, richiedeva nuove forme di controllo, nuovi strumenti politici e, soprattutto, nuove scelte morali.

3. Dagli scienziati atomici ai movimenti per il disarmo

Dopo Hiroshima e Nagasaki, la riflessione individuale si trasformò rapidamente in azione collettiva. Molti degli scienziati che avevano lavorato al progetto Manhattan ritennero necessario spiegare all'opinione pubblica la natura delle armi atomiche e intervenire nel dibattito politico.

Nel novembre del 1945 fu creata la Federation of Atomic Scientists, poi Federation of American Scientists, con l'obiettivo di promuovere il controllo internazionale dell'energia atomica e l'impiego della scienza e

della tecnologia a beneficio dell'umanità. Ancora oggi essa opera per ridurre i rischi legati alle principali minacce globali e sostiene la necessità che le competenze scientifiche abbiano un ruolo effettivo nei processi decisionali e nella definizione delle politiche pubbliche.

Un mese più tardi, a Chicago, venne fondato il *Bulletin of the Atomic Scientists* da un gruppo di studiosi convinti di non poter rimanere estranei alle conseguenze del proprio lavoro. Il *Bulletin* intendeva coinvolgere gli scienziati nella definizione delle politiche nazionali e internazionali e aiutare il pubblico a comprendere che cosa i bombardamenti atomici significassero per l'umanità. Il suo obiettivo essenziale era, e rimane, prevenire le minacce capaci di mettere a rischio la sopravvivenza umana, fornendo informazioni accessibili e proponendo soluzioni concrete.

Nel maggio del 1946 Albert Einstein promosse l'Emergency Committee of Atomic Scientists, impegnato a raccogliere fondi e a informare il pubblico sui pericoli della corsa nucleare. Convinto che l'energia atomica dovesse essere sottoposta a un controllo internazionale e civile, Einstein sosteneva che i conflitti dovevano essere affrontati attraverso un diritto mondiale, un governo sovranazionale e una forza di polizia internazionale.

L'idea che la nuova minaccia richiedesse risposte sovranazionali divenne così uno dei temi centrali della cultura politica del dopoguerra, coinvolgendo scienziati, medici, filosofi, religiosi e organizzazioni pacifiste. Queste iniziative introdussero anche una nuova forma di partecipazione pubblica: l'autorevolezza degli scienziati derivava dalla conoscenza diretta della tecnologia e dei suoi effetti, che essi cercavano di trasformare in uno strumento di educazione civile. La bomba non era soltanto un'arma più potente delle precedenti, ma una tecnologia capace di modificare la natura stessa della guerra.

Nonostante ciò, la corsa agli armamenti non si arrestò. Nel 1949 l'Unione Sovietica sperimentò la propria bomba atomica; nel 1952 gli Stati Uniti fecero esplodere il primo ordigno termonucleare e, l'anno successivo, anche l'Unione Sovietica annunciò di possedere una tecnologia analoga. Le esplosioni atmosferiche resero visibili i rischi della contaminazione radioattiva, trasformando una questione inizialmente affidata agli esperti in una preoccupazione condivisa da settori sempre più ampi della società.

In questa escalation degli armamenti nucleari si inserisce la lettera di Bohr alle Nazioni Unite del 1950, in cui suggeriva di promuovere un «mondo aperto», fondato sulla piena e reciproca condivisione delle informazioni e sulla cooperazione internazionale, come unica via per costruire fiducia tra le nazioni e garantire la sicurezza comune.

Il 9 luglio del 1955 Bertrand Russell presentò a Londra il manifesto firmato, tra gli altri, da Albert Einstein, Max Born, Frédéric Joliot-Curie, Linus Pauling, Joseph Rotblat e Hideki Yukawa. Il testo chiedeva agli scienziati di riunirsi al di là delle appartenenze nazionali e ideologiche per valutare i pericoli delle armi di distruzione di massa. La frase conclusiva – «Ricordate la vostra umanità, e dimenticate il resto» – divenne uno dei simboli del movimento internazionale contro la guerra nucleare.

Fermi non poté partecipare a questa nuova stagione: era morto pochi mesi prima, nel novembre del 1954. Eppure, la dichiarazione scritta con Rabi contro la bomba H apparteneva allo stesso processo culturale. In entrambi i casi veniva affermato che l'esistenza delle armi termonucleari obbligava gli scienziati a ragionare non soltanto come cittadini di una nazione, ma come membri di una comunità umana esposta a un pericolo comune.

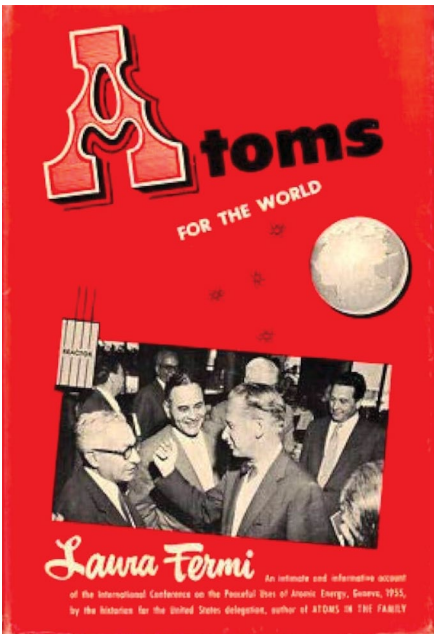
Da quell'appello, noto come Manifesto Russell-Einstein, nacquero nel 1957 le Conferenze Pugwash, che riunirono scienziati provenienti dai due blocchi contrapposti della guerra fredda con l'obiettivo di ridurre il ruolo delle armi nucleari nella politica internazionale. Pugwash trasformò la competenza scientifica in uno strumento di diplomazia parallela: al di fuori dei canali ufficiali, gli studiosi poterono confrontarsi in un clima di relativa imparzialità, condividere informazioni tecniche e mantenere aperto il dialogo anche nei momenti di maggiore tensione. Questo metodo contribuì, spesso dietro le quinte, alla costruzione del clima politico e culturale che rese possibili gli accordi sulla limitazione degli esperimenti nucleari e sulla non proliferazione.

L'esperienza di Pugwash dimostrò così che lo scienziato non è soltanto responsabile delle conseguenze delle proprie scoperte, ma può anche intervenire attivamente per orientarne l'impiego, mettendo il sapere al servizio della sicurezza collettiva. Il riconoscimento del premio Nobel per la Pace nel 1995 sancì il valore di questo nuovo modello di impegno, fondato sul dialogo, sulla cooperazione internazionale e sull'idea che la scienza non possa essere separata dalla responsabilità verso l'umanità.

Parallelamente si svilupparono movimenti diversi per composizione e linguaggio. In Giappone gli *hibakusha*, i sopravvissuti alle esplosioni di Hiroshima e Nagasaki, trasformarono la propria esperienza in testimonianza pubblica. Nel 1956 diedero vita alla Nihon Hidankyo, un'organizzazione nazionale impegnata a raccontare gli effetti umani delle bombe e a chiedere la loro abolizione.
Nel febbraio del 1958 venne fondata in Gran Bretagna la Campaign for Nuclear Disarmament. Le marce di Aldermaston e il simbolo disegnato da Gerald Holtom portarono la protesta nelle strade. Il pacifismo nucleare non era più soltanto un movimento interno alla comunità scientifica, ma diventava una mobilitazione sociale capace di influenzare il linguaggio, l'immaginario e la cultura politica della guerra fredda.

Anche Laura Fermi contribuì alla costruzione di una cultura pubblica dell'era atomica. Nei suoi libri raccontò dall'interno la comunità dei fisici e, con *Atoms for the World*, pubblicato nel 1957 dopo la Conferenza di Ginevra sugli usi pacifici dell'energia atomica (*Figura 9*), descrisse le

Figura 9 Copertina del libro *Atoms for the World* di Laura Fermi (University of Chicago Press, 1957)



aspettative civili legate alla nuova fonte di energia. La sua scrittura rese accessibili a un pubblico ampio questioni che rischiavano di rimanere confinate nei laboratori e negli organismi governativi. In questo modo, la storia dell'atomo entrava nella vita quotidiana e diventava parte di una discussione collettiva sul futuro.

4. Edoardo Amaldi: ricostruire, cooperare, disarmare

In questo contesto, non si può non ricordare la figura di Edoardo Amaldi, uno dei più vicini collaboratori di Fermi in Italia, il quale maturò la propria scelta in un contesto completamente differente da quello dei colleghi impegnati nel progetto Manhattan.

La ricostruzione della fisica italiana fu la prima espressione di questa scelta: Amaldi contribuì alla nascita dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, promosse i laboratori di Frascati e sostenne la formazione di una nuova generazione di ricercatori. Ebbe inoltre un ruolo decisivo nella costruzione del CERN, mostrando come la Big Science, sviluppata durante la guerra attraverso grandi programmi militari, potesse essere riorganizzata su basi civili, europee e cooperative. La scienza diventava così non soltanto uno strumento di conoscenza, ma una pratica capace di ricostruire rapporti di fiducia tra Paesi che pochi anni prima si erano combattuti.

Questa concezione trovò una prosecuzione diretta nel suo impegno pacifista. Fin dall'inizio partecipò alle Conferenze Pugwash, mentre nel 1966 fondò, insieme a Carlo Schaerf, l'International School on Disarmament and Research on Conflicts. La scuola riuniva ricercatori, esperti e funzionari per studiare gli aspetti scientifici, politici e strategici del disarmo. Anche la formazione assumeva così un valore civile.

Tra gli anni Settanta e Ottanta l'impegno degli scienziati per la pace assunse forme sempre più organizzate. Nel 1982 il Manifesto di Erice voluto da Antonino Zichichi richiamò la comunità scientifica alla responsabilità di contrastare il rischio di una catastrofe nucleare e di promuovere il dialogo internazionale. Nello stesso clima, segnato dalla crisi degli euromissili, Amaldi guidò la mobilitazione dei fisici italiani contro una nuova corsa agli armamenti. Da questa esperienza nacque l'Unione degli Scienziati per il Disarmo, destinata a fornire analisi indipendenti sul controllo degli armamenti, sulla non proliferazione e sulla sicurezza internazionale. Amaldi favorì inoltre la creazione, pres-

so l'Accademia dei Lincei, di un gruppo permanente dedicato a questi problemi, il cui lavoro tutt'oggi continua attraverso le biennali Edoardo Amaldi Conferences.

La sua scelta pacifista, d'altronde, non comportò il rifiuto della scienza nucleare: Amaldi continuò a sostenere la ricerca fondamentale, gli acceleratori, le applicazioni civili e le grandi istituzioni scientifiche. Ciò che rifiutava era l'idea che il progresso tecnico dovesse essere inevitabilmente guidato dalla competizione militare.

Le traiettorie di Fermi e Amaldi mostrano come il problema della responsabilità scientifica non ammetta soluzioni semplici. Entrambe le posizioni non erano derivate da un pacifismo astratto, bensì dalla consapevolezza che ogni decisione viene assunta in circostanze storiche concrete.

Entrambi cercarono, in tempi e forme differenti, di rispondere alla trasformazione prodotta dall'energia nucleare. Fermi agì soprattutto all'interno delle istituzioni americane; Amaldi costruì organizzazioni sovranazionali e luoghi di dialogo, convinto che la cooperazione scientifica fosse essa stessa una forma di prevenzione della guerra.

Un punto fondamentale rimane: la conoscenza scientifica non può essere separata dalle condizioni sociali e politiche nelle quali viene utilizzata. Una scoperta non possiede una destinazione inevitabile; può alimentare un'arma, produrre energia, curare una malattia o aprire un nuovo campo di ricerca. La direzione dipende dalle scelte degli esseri umani, dalle istituzioni che essi costruiscono e dai valori che orientano le loro decisioni.

5. Ottant'anni dopo

Nel corso dei decenni gli arsenali, i trattati e gli equilibri internazionali sono cambiati, ma il problema posto nel 1945 non è scomparso. Nel 2025, in occasione dell'ottantesimo anniversario di Hiroshima e Nagasaki, un'assemblea di premi Nobel, esperti e studiosi riunita all'Università di Chicago ha nuovamente richiamato governi, scienziati e società civile alla necessità di ridurre il rischio nucleare, sottolineando come il rischio di un impiego delle armi nucleari sia più elevato che mai.

La fisica teorica argentina Karen Hallberg, segretaria generale delle Conferenze Pugwash, ha affermato che la dichiarazione nata da quell'incontro propone «azioni urgenti e realistiche» per ridurre la crescente minaccia rappresentata dalle armi di distruzione di massa.

Il luogo era particolarmente simbolico: la stessa università nella quale Fermi aveva guidato la prima reazione a catena controllata e nella quale, subito dopo la guerra, erano nate alcune delle prime organizzazioni degli scienziati atomici.

La continuità tra quelle esperienze e gli appelli più recenti non risiede soltanto nella richiesta di nuovi accordi, ma riguarda il ruolo della scienza nella società. Le conoscenze che permettono di costruire tecnologie sempre più potenti impongono, nello stesso tempo, la responsabilità di comprenderne gli effetti, comunicarli e contribuire alla definizione dei limiti.

È questa, forse, l'eredità più profonda dell'era aperta da Fermi: la consapevolezza che il progresso scientifico non può essere separato dalle scelte che ne determinano l'uso.

Bibliografia scelta

Amaldi, E., *Da via Panisperna all'America. I fisici italiani e la Seconda guerra mondiale*, a cura di G. Battimelli, M. De Maria e A. La Rana, Roma, Editori Riuniti, 2022.

Bohr, N., "Open Letter to the United Nations, June 9, 1950", Copenhagen, J.H. Schultz Forlag, 1950; rist. in *Bulletin of the Atomic Scientists*, 6, 7 (June 1950), pp. 213-217 e 219.

Clavarino, L., *Scienza e politica nell'era nucleare. La scelta pacifista di Edoardo Amaldi*, Roma, Carocci, 2014.

Feder, T., "Nobel laureates issue declaration for the prevention of nuclear war", *Physics Today*, 1 ottobre 2025.

Fermi, L., *Atomi in famiglia*, Milano, Mondadori, 1954.

Focaccia, M., *Orso Mario Corbino. Un manager della ricerca all'Istituto fisico di Roma*, Bologna, SIF, 2022.

Forti, F. (a cura di), *Science for Peace: History and Action in the Nuclear Age*, supplemento al *Giornale di Fisica della Società Italiana di Fisica*, 67, 2026

Guerra, F., Robotti, N., *The Lost Notebook of Enrico Fermi*, Cham, Springer, 2018.

Maltese, G., *Enrico Fermi in America. Una biografia scientifica: 1938-1954*, Bologna, Zanichelli, 2003.

NuPECC, *Nuclear Physics in Everyday Life*, a cura di S. Charisopoulos, S. Courtin, J. Gomez Camacho, K. Johnston, M. Lewitowicz, F. de Oliveira, N. Pessoa Barradas, D. Ridikas e V. Wagner, 2022.

Salvetti, C., "Nascita dell'energia nucleare: la pila di Fermi", in *Conoscere Fermi nel centenario della nascita, 29 settembre 1901-2001*, a cura di C. Bernardini e L. Bonolis, Bologna, SIF, 2001, pp. 178-204.

Schwartz, D.N., *The Last Man Who Knew Everything: The Life and Times of Enrico Fermi, Father of the Nuclear Age*, New York, Basic Books, 2017.

Segrè, E., *Enrico Fermi, fisico. Una biografia scientifica*, Bologna, Zanichelli, 1970.
Segrè, G., Hoerlin, B., *The Pope of Physics: Enrico Fermi and the Birth of the Atomic Age*, New York, Henry Holt and Company, 2016.

Sitografia

Unione degli Scienziati Per Il Disarmo: https://www.uspid.org/
Conferenze Pugwash: https://www.pugwash.org/

Le Autrici

Angela Bracco è Presidente del Centro studi e ricerche «Enrico Fermi» (CREF) di Roma e della Società Italiana di Fisica (SIF). Fino al 2025 è stata Professoressa Ordinaria di fisica sperimentale delle interazioni fondamentali all'Università degli Studi di Milano. Autrice di oltre 500 pubblicazioni, si occupa di fisica nucleare sperimentale, in particolare di spettroscopia gamma per la struttura nucleare. Ha presieduto la Commissione Nazionale per la Fisica Nucleare dell'INFN e lo European Collaboration Committee for Nuclear Physics (NuPECC). È stata membro dell'Executive Board della European Physical Society e di panel dell'European Research Council. Fellow dell'American Physical Society, fa parte dell'Academia Europaea, dell'Accademia delle Scienze dell'Istituto di Bologna e dell'Istituto Lombardo – Accademia di Scienze e Lettere di Milano.

Miriam Focaccia è ricercatrice presso il Centro studi e ricerche «Enrico Fermi» (CREF), dove svolge attività di ricerca, coordinamento scientifico e divulgazione. Esperta di storia delle istituzioni scientifiche e autrice di biografie di alcuni protagonisti della scienza post-unitaria, ha approfondito la storia dell'Istituto di Fisica di Roma e l'eredità di via Panisperna, unendo ricerca archivistica, attività museali e public engagement. Dal 2022 coordina il Comitato del Museo Enrico Fermi ed è responsabile scientifica di collaborazioni con università, musei e istituzioni italiane e internazionali. Si occupa altresì del rapporto tra donne e scienza in Italia a partire dal XVIII secolo. Fa parte del Comitato Scientifico del Festival della Scienza di Genova e del Consiglio del Museo di Fisica di Sapienza Università di Roma.