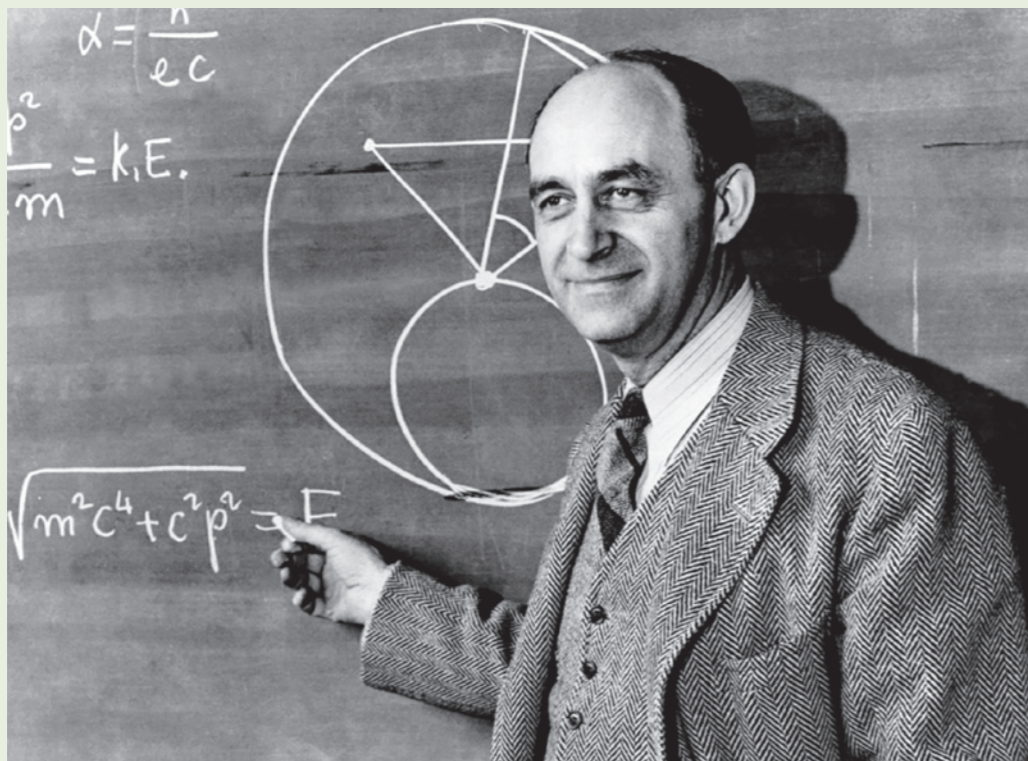


PERCORSO II

DALLA FISSIONE DELL'ATOMO AL NUCLEARE

DOCUMENTO **Enrico Fermi**

Enrico Fermi nasce a Roma nel 1901. La sua produzione scientifica inizia nel 1921 e termina con la sua morte nel 1954. All'inizio della sua attività, la fisica conosce due sole forze fondamentali della natura, la gravitazione e l'elettromagnetismo, e due sole particelle elementari costituenti la materia, i nuclei di idrogeno (protoni) e gli elettroni. A metà degli anni Cinquanta le forze fondamentali sono diventate quattro, con l'aggiunta delle interazioni nucleari forte e debole, e le particelle elementari note sono ormai una trentina. In poco meno di trent'anni la concezione della materia subisce un mutamento così radicale e inusitato da rendere tale periodo, per la rapidità e la quantità delle conoscenze acquisite, forse unico nella storia del pensiero scientifico occidentale. Le ricerche di Fermi segnarono profondamente questo trentennio, non solo per la quantità e l'importanza dei risultati ottenuti ma soprattutto per il loro ruolo storico. Esistono infatti traguardi scientifici di enorme valore che giungono al termine di lunghe e pazienti ricerche e che coronano un ben definito progetto iniziale, ma ci sono anche scoperte apparentemente meno straordinarie che obbligano a inattese risistemazioni del sapere acquisito, scardinano principi metodologici e conoscenze unanimemente accettate e imprimono alla ricerca direzioni nuove e del tutto imprevedute. Nel suo itinerario di scienziato [...] Fermi raggiunse entrambi gli obiettivi.

Giuseppe Bruzzaniti, *Enrico Fermi. Il genio obbediente*, Einaudi, Torino 2007

1. A quali ambiti di ricerca si dedica il fisico Enrico Fermi?
2. Quale contributo apporta al contesto scientifico a lui contemporaneo?

FISICA**La pila atomica**

Da una lettera di Enrico Fermi al collega Edoardo Amaldi del 28 agosto 1945.

Dalla lettura dei giornali di qualche settimana fa avrai probabilmente capito a quale genere di lavoro ci siamo dedicati in questi ultimi anni. È stato un lavoro di notevole interesse scientifico e l'aver contribuito a troncare una guerra che minacciava di tirar avanti per mesi o per anni è stato indubbiamente motivo di una certa soddisfazione. Noi tutti speriamo che l'uso futuro di queste nuove invenzioni sia su base ragionevole e serva a qualche cosa di meglio che a rendere le relazioni internazionali ancora più difficili di quello che sono state fino ad ora. I giornali hanno pubblicato un certo numero di dettagli sul lavoro di questi ultimi anni e tali dettagli, naturalmente, non sono più segreti. Ti interesserà sapere, se non lo sai già dai giornali italiani, che verso la fine del 1942 abbiamo costruito a Chicago la prima macchina per produrre una reazione a catena con uranio e grafite. È diventato d'uso comune chiamare queste macchine «pile». Dopo la prima pila sperimentale molte altre ne sono state costruite di grande potenza. Dal punto di vista della fisica, come ti puoi immaginare, queste pile rappresentano una ideale sorgente di neutroni che abbiamo usato tra l'altro per molte esperienze di fisica nucleare e che probabilmente verranno usate ancora di più per questo scopo ora che la guerra è finita.

Edoardo Amaldi, *Da via Panisperna all'America*, Editori Riuniti, Roma 1997

1. In che senso i risultati delle ricerche di Fermi ebbero un importante ruolo storico?
2. Che cos'è la pila atomica secondo la descrizione di Fermi stesso, che la costruì?

STORIA**La bomba atomica**

Racconto del primo test nucleare condotto dagli scienziati del Progetto Manhattan, promosso dagli Stati Uniti. Tre settimane dopo il test, la mattina del 6 agosto 1945, per volontà del neopresidente statunitense Truman fu sganciata la bomba su Hiroshima: la popolazione della città sperimentò sopra di sé lo spettacolo dirompente che i fisici avevano osservato a distanza di sicurezza. Nell'esplosione persero la vita circa centomila persone.



1. Ground Zero: il luogo sulla superficie terrestre perpendicolare a quello che sarebbe stato l'epicentro dell'esplosione atomica.

2. Trinity: nome in codice che venne assegnato al test nucleare, avvenuto nel poligono di Alamogordo, nello stato del Nuovo Messico.

3. Oppenheimer: fisico statunitense, direttore del Progetto Manhattan, che aveva portato alla realizzazione della bomba atomica.

4. Leslie Groves: responsabile militare del Progetto Manhattan.

5. TNT: sigla dell'esplosivo comunemente chiamato tritolo.

16 luglio 1945. Il conto alla rovescia era iniziato alle 05:09:45. Se tutto andava secondo i piani, esattamente venti minuti più tardi avrebbero girato un interruttore per innescare la detonazione della prima bomba atomica del mondo. Nel sito la tensione per l'attesa era palpabile. Un cumulo di terra sopra la lastra di cemento armato che faceva da tetto – il tutto sostenuto da travi in legno massiccio – proteggeva ulteriormente la struttura in cui si trovavano. Situato a una decina di chilometri più a sud della torre di dieci metri che sosteneva la bomba, il rifugio era ritenuto sicuro, quale che fosse la potenza dell'esplosione a Ground Zero.¹ Il piccolo gruppo che soprintendeva al progetto Trinity,² come era stato chiamato, comprendeva George Kistiakowsky, il responsabile dell'esplosione, Kenneth Bainbridge, l'uomo che aveva scelto e approntato il sito e, ovviamente, J. Robert Oppenheimer.³

Poco prima il generale Leslie Groves⁴ – ritenendo di non dover stare insieme a Oppenheimer, se mai fosse avvenuta una catastrofe – si era portato con la sua jeep otto chilometri a sud, al campo base, lasciando al bunker il suo luogotenente. La maggior parte dei fisici che avevano lavorato al progetto Trinity era a Campania Hill, che si trovava a una trentina di chilometri a nord-ovest di Ground Zero. Alcuni, tra cui Enrico Fermi e Emilio Segrè, erano quindici chilometri più vicino, al campo base. Lì, per proteggerli, erano state scavate delle trincee poco profonde; sarebbero state sufficienti? Tutti pensavano di sì; ma quanto sarebbe stata grande l'esplosione? E non avrebbe potuto risolversi in un completo fallimento?

Pochi giorni prima i fisici più esperti avevano iniziato a scommettere sulla potenza dell'esplosione; partecipare costava un dollaro. Kistiakowsky riteneva che sarebbe stata equivalente a un migliaio di tonnellate di TNT:⁵ una stima al ribasso, come avrebbe scoperto quando, salito in cima al bunker dopo l'esplosione, sarebbe stato buttato a terra dall'onda d'urto che l'aveva raggiunto pochi secondi dopo. Hans Bethe, capo della divisione teorica, aveva detto 8000, mentre un preoccupato Oppenheimer aveva optato per un modesto 300.

L'interruttore venne girato alle 05:29:45. Molti hanno raccontato le loro impressioni su ciò che accadde subito dopo, un evento poi descritto come più luminoso di mille soli. Dal campo base, Isidor Rabi ricordò che: "All'improvviso ci fu un enorme lampo di luce, la luce più luminosa che io abbia mai visto e credo che nessuno abbia mai visto. Era esplosa, divampata, e in qualche modo si faceva strada attraverso di noi. Era una visione che non si percepiva solo con gli occhi". Il lampo era stato di tale intensità da suscitare attimi di paura irrazionale. "Per un momento mi passò per la testa l'idea che l'atmosfera potesse incendiarsi, causando la fine del mondo, per quanto sapessi che ciò non era possibile" ha ricordato Segrè.

Fermi, senza dubbio, tra i fisici era quello maggiormente responsabile dell'evento che, nel deserto del New Mexico, cambiò il mondo. Non c'è niente che documenti i suoi pensieri di quell'istante, ma sappiamo cosa stava facendo. A un estraneo sarebbe parso stravagante, ma chiunque lo conoscesse sapeva che agiva sempre con uno scopo. Alcuni secondi dopo l'esplosione Fermi si alzò e cominciò a strappare un grande foglio di carta in piccoli pezzi, che poi lanciò sollevando la mano. Quaranta secondi più tardi,

6. chiloton: unità di misura dell'energia sviluppata da un'esplosione. Un chiloton equivale all'incirca alla quantità di energia liberata nella detonazione di mille tonnellate di tritolo.

quando arrivò il fronte dell'onda d'urto, i pezzetti di carta furono sospinti un po' più in là. Dopo aver misurato a passi la distanza del punto in cui erano atterrati, circa due metri e mezzo, consultò un grafico che aveva preparato. Poco dopo, disse agli astanti che stimava la potenza dell'esplosione equivalente, più o meno, a dieci chiloton⁶.

Poche ore dopo, Fermi salì su uno speciale carro armato, foderato di piombo, diretto verso Ground Zero per raccogliere il materiale necessario a una più attenta valutazione di ciò che era accaduto. Le accurate misurazioni richiesero una settimana e portarono alla conclusione che la potenza dell'esplosione era di circa venti chiloton, un valore vicino alla stima fatta da Fermi entro un minuto dall'esplosione. Nessuno dei fisici ne fu sorpreso.

Il lancio dei pezzi di carta divenne ben presto un aneddoto che andò ad aggiungersi al folklore su Fermi, che lo voleva capace di stimare l'entità di qualsiasi fenomeno fisico con i mezzi più semplici. Come sempre, lui aveva avuto ragione. I suoi colleghi di Roma erano soliti scherzare dicendo che Fermi era infallibile, come il Papa. Si era presto conquistato, infatti, il soprannome di "Papa della fisica", appellativo che conservò, meritatamente, per tutta la vita.

G. Segrè - B. Hoerlin, *Il Papa della fisica. Enrico Fermi e la nascita dell'era atomica*,

Raffaello Cortina Editore, Milano 2017

1. Dal testo si evince che gli scienziati del progetto Manhattan erano pienamente consapevoli della potenza della bomba da loro costruita?
2. In che modo le ricerche di Fermi influirono non solo sugli sviluppi della fisica, ma anche sulla storia e sulla mentalità del secondo Novecento?

LETTERATURA ITALIANA

La scomparsa di Majorana

In questo saggio del 1975 Leonardo Sciascia argomenta la sua tesi sulla scomparsa del giovane fisico Ettore Majorana, che la sera del 25 marzo 1938 si era imbarcato a Napoli sul traghetto per Palermo lasciando due lettere nelle quali preannunciava la propria "scomparsa". Lo scrittore ipotizza che Majorana si sia ritirato in un convento dopo avere intuito le disastrose conseguenze che sarebbero potute derivare dalla scoperta della fissione dell'atomo.

Ha precisamente visto la bomba atomica? I competenti, e specialmente quei competenti che la bomba atomica l'hanno fatta, decisamente lo escludono. Noi non possiamo che elencare dei fatti e dei dati, che riguardano Majorana e la storia della fissione nucleare, da cui vien fuori un quadro inquietante. Per noi incompetenti, per noi profani. [...] Nel 1932, sei mesi prima che Heisenberg¹ pubblicasse il suo lavoro sulle forze di scambio, Majorana, come abbiamo visto, aveva enunciato la stessa teoria tra i colleghi dell'Istituto romano e respinto la loro esortazione a pubblicarla. Quando Heisenberg

1. Heisenberg: Werner Heisenberg fu un famoso fisico tedesco; conseguì il premio Nobel nel 1932.



2. Amaldi: Edoardo Amaldi, fisico nucleare italiano (1908-1989).

3. Rutherford: Ernest Rutherford, considerato uno dei padri della fisica nucleare.

4. Ida Noddack: fisica tedesca, fu la prima a elaborare l'idea della fissione nucleare.

5. Segrè: Emilio Gino Segrè, premio Nobel per la fisica nel 1959.

la pubblica, il suo commento è che aveva detto tutto quel che si poteva dire sull'argomento e «probabilmente anche troppo». [...]

Questi dati mostrano una profondità e prontezza di intuizione, una sicurezza di metodo, una vastità di mezzi e una capacità di rapidamente selezionarli, che non gli avrebbero precluso di capire quel che altri non capiva, di vedere quel che altri non vedeva – e insomma di anticipare, se non sul piano delle ricerche e dei risultati, sul piano della intuizione, della visione, della profezia. Amaldi² dice: «alcuni dei problemi da lui trattati, i metodi seguiti nella loro trattazione e, più in generale, la scelta dei mezzi matematici per affrontarli, mostrano una naturale tendenza a precorrere i tempi che in qualche caso ha quasi del profetico». E Fermi, conversando con Giuseppe Cocconi nel 1938, dopo la scomparsa: «Perché, vede, al mondo ci sono varie categorie di scienziati. Persone di secondo e terzo rango, che fan del loro meglio ma non vanno molto lontano. Persone di primo rango, che arrivano a scoperte di grande importanza, fondamentali per lo sviluppo della scienza. Ma poi ci sono i geni, come Galileo e Newton. Ebbene, Ettore Majorana era uno di quelli. Majorana aveva quel che nessun altro al mondo ha; sfortunatamente gli mancava quel che invece è comune trovare negli altri uomini: il semplice buon senso». [...]

Già nel 1921, parlando delle ricerche atomiche di Rutherford³, un fisico tedesco aveva avvertito: «Viviamo su un'isola di fulmicotone»; ma aggiungeva che, grazie a Dio, ancora non avevano trovato il fiammifero per accenderla. Perché quindici anni dopo un genio della fisica, trovandosi di fronte alla virtuale, anche se non riconosciuta, scoperta della fissione nucleare, non potrebbe aver capito che il fiammifero c'era già ed essersene allontanato – poiché mancava di buon senso – con sgomento, con terrore? È storia ormai a tutti nota che Fermi e i suoi collaboratori ottennero senza accorgersene la fissione (allora scissione) del nucleo di uranio nel 1934. Ne ebbe il sospetto Ida Noddack⁴ ma né Fermi né altri fisici presero sul serio le sue affermazioni se non quattro anni dopo, alla fine del 1938. Poteva benissimo averle prese sul serio Ettore Majorana, aver visto quello che i fisici dell'Istituto romano non riuscivano a vedere. E tanto più the Segrè⁵ parla di «cecità». «La ragione della nostra cecità non è chiara nemmeno oggi» dice. Ed è forse disposto a considerarla come provvidenziale, se quella loro cecità impedì a Hitler e Mussolini di avere l'atomica.

Leonardo Sciascia, *La scomparsa di Majorana*, Adelphi, Milano 1997

1. La vicenda della scomparsa di Majorana non fu mai chiarita e di tanto in tanto torna alla ribalta. Perché, a tuo parere, la figura di questo professore di Fisica all'Università di Napoli, straordinariamente abile nel calcolo matematico, desta tuttora forti suggestioni?
2. Qual è il punto di vista Sciascia sulla scomparsa di Majorana? Quali ragioni avrebbero indotto il fisico a sparire?

L'esplosione dell'ordigno

Le righe finali della *Coscienza di Zeno* contengono una cupa profezia della catastrofe che sarà provocato da un esplosivo di incomparabile potenza, paragonabile a quella di una bomba atomica. Anche se il romanzo è anteriore di oltre due decenni agli eventi di cui parlano i testi riportati, la Prima guerra mondiale aveva diffuso l'idea di una distruzione di immani proporzioni.

1. ordigni: armi o congegni tali da provocare allarme o diffidenza.

2. legge... creatrice: la legge della selezione naturale, per cui l'organo si adegua all'uso che ne viene fatto.

3. gas velenosi: erano stati già usati nella Prima guerra mondiale.

4. nessuno udrà: nessuno farà a tempo a udire l'esplosione perché tutti moriranno.

Qualunque sforzo di darci la salute è vano. Questa non può appartenere che alla bestia che conosce un solo progresso, quello del proprio organismo. Allorché la rondinella comprese che per essa non c'era altra possibile vita fuori dell'emigrazione, essa ingrossò il muscolo che muove le sue ali e che divenne la parte più considerevole del suo organismo. La talpa s'interrò e tutto il suo corpo si conformò al suo bisogno. Il cavallo s'ingrandì e trasformò il suo piede. Di alcuni animali non sappiamo il progresso, ma ci sarà stato e non avrà mai leso la loro salute. Ma l'occhialuto uomo, invece, inventa gli ordigni¹ fuori del suo corpo e se c'è stata salute e nobiltà in chi li inventò, quasi sempre manca in chi li usa. Gli ordigni si comperano, si vendono e si rubano e l'uomo diventa sempre più furbo e più debole. Anzi si capisce che la sua furbizia cresce in proporzione della sua debolezza. I primi suoi ordigni parevano prolungazioni del suo braccio e non potevano essere efficaci che per la forza dello stesso, ma, oramai, l'ordigno non ha più alcuna relazione con l'arto. Ed è l'ordigno che crea la malattia con l'abbandono della legge che fu su tutta la terra la creatrice.² La legge del più forte sparì e perdemmo la selezione salutare. Altro che psico-analisi ci vorrebbe: sotto la legge del possessore del maggior numero di ordigni prospereranno malattie e ammalati.

Forse traverso una catastrofe inaudita prodotta dagli ordigni ritorneremo alla salute. Quando i gas velenosi³ non basteranno più, un uomo fatto come tutti gli altri, nel segreto di una stanza di questo mondo, inventerà un esplosivo incomparabile, in confronto al quale gli esplosivi attualmente esistenti saranno considerati quali innocui giocattoli. Ed un altro uomo fatto anche lui come tutti gli altri, ma degli altri un po' più ammalato, ruberà tale esplosivo e s'arrampicherà al centro della terra per porlo nel punto ove il suo effetto potrà essere il massimo. Ci sarà un'esplosione enorme che nessuno udrà⁴ e la terra ritornata alla forma di nebulosa errerà nei cieli priva di parassiti e di malattie.

Italo Svevo, *La coscienza di Zeno*, Mondadori, Milano 2020

1. Il romanzo di Svevo, composto tra il 1919 e il 1922 non poteva risentire delle paure diffuse dall'energia atomica. A quale sistema di distruzione di massa si allude nel corso del brano?
2. Come si collega questo finale alla trama del romanzo?



ARTE

Salvador Dalì, *Idillio atomico e uranico melanconico*

Nel quadro *Idillio atomico e uranico melanconico* il pittore surrealista Salvador Dalì si lascia affascinare dalla fisica, non con l'intenzione di rappresentarne artisticamente le leggi, ma di trarne spunto per immaginare nuovi mondi.

Salvador Dalì, *Idillio atomico e uranico melanconico*, 1945.
Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía, Madrid.



«Verrà il giorno in cui l'umanità maledirà i nomi di Los Alamos e Hiroshima». Con questa affermazione Julius Robert Oppenheimer, responsabile del progetto Manhattan per la messa a punto della bomba atomica, fu profeta dell'evento, che diffuse speranze e paure nei confronti del nucleare, anche in ragione del clima di tensione degli anni della guerra fredda. Molti pittori furono impressionati dall'idea di dominare gli elementi più nascosti della natura e di trasporre su tela l'essenza atomica utilizzando colori e forme astratte. Fu attratto da questa prospettiva il pittore spagnolo Salvador Dalì (1904-1989), che nel suo *Idillio atomico e uranico melanconico* (1945) trasfigura con immagini spaventose il lancio dell'atomica: in alto a destra gli elefanti dalle zampe sottili rappresentano gli aerei che sganciarono le bombe; al centro del dipinto l'immagine di un aereo scandisce i tratti di un volto umano; le figure sembrano liquefarsi per effetto dell'esplosione: una di esse, sulla destra, prima di perdere del tutto i tratti umani sembra spirare con un urlo di dolore.

1. Come si collega questo dipinto al tema della distruzione atomica? Metti in evidenza qualche particolare che ti sembra significativo.

EDUCAZIONE CIVICA

Il Trattato di non-proliferazione nucleare

Questo trattato (*Non-Proliferation Treaty* – NPT) è l'unico strumento di portata globale in materia di disarmo e non-proliferazione nucleari. Entrato in vigore nel 1970, conta tra gli Stati aderenti 191 Paesi, tra cui i cinque membri permanenti del Consiglio di Sicurezza, dotati dell'arma nucleare (Stati Uniti, Russia, Cina, Francia e Regno Unito). Le norme di questo importante trattato ruotano attorno a tre pilastri: disarmo, non-proliferazione e usi pacifici dell'energia nucleare.

In particolare, con gli articoli I e II, i Membri dell'NPT si impegnano a non trasferire, ricevere o produrre armi e altri ordigni nucleari, né a offrire o chiedere assistenza per la loro produzione.

L'art. VI costituisce il cardine della norma sul disarmo: «Ciascuna Parte si impegna a concludere in buona fede trattative su misure efficaci per una prossima cessazione della corsa agli armamenti nucleari e per il disarmo nucleare, come pure per un trattato sul disarmo generale e completo sotto stretto ed efficace controllo internazionale.» L'art. IV, infine, garantisce il diritto di ogni Stato parte ad accedere alla produzione e uso pacifico dell'energia nucleare:

«Tutte le Parti si impegnano a facilitare lo scambio più intenso possibile di attrezzature, materiali ed informazioni scientifiche e tecnologiche, per l'uso pacifico dell'energia nucleare, ed hanno diritto a partecipare a tale scambio. Le Parti, in condizioni di farlo, debbono anche collaborare contribuendo, sia individualmente sia assieme ad altri Stati od organizzazioni internazionali, all'ulteriore sviluppo delle applicazioni pacifiche dell'energia nucleare soprattutto nei territori degli Stati non nucleari, che siano Parti del Trattato, tenendo debitamente conto delle necessità delle regioni in via di sviluppo.»

1. Per quale motivo si parla di non proliferazione del nucleare? Qual è il rapporto tra questo trattato e i testi riportati nella prima parte del percorso?
2. Un uso pacifico del nucleare sarebbe quello destinato a produrre energia elettrica.
 - quali problemi crea, tuttavia, l'uso pacifico del nucleare?
 - per quanto ne sai, il nucleare può essere considerato un'energia rinnovabile, da riconsiderare in vista della transizione energetica?

La società italiana di fronte al nucleare: i referendum

L'Italia ha prodotto elettricità da centrali nucleari tra il 1963 e il 1990. Il primo impianto fu quello di Latina, avviato nel '63, il più potente d'Europa per l'epoca. Seguirono le centrali di Sessa Aurunca e Trino Vercellese nei due anni seguenti e quella di Caorso del 1977. Tra gli anni '60 e '70 il nucleare italiano conobbe il periodo di massimo sviluppo: nel 1966 l'Italia era il terzo paese occidentale per potenza nucleare installata.

L'incidente di Chernobyl del 1986 portò però a un drastico cambio di rotta. Risalgono al 1987 i tre referendum abrogativi che, tra il 1988 e il 1990, comportarono la chiusura delle centrali nucleari. Tuttavia nessuno dei tre referendum vietava espressamente l'impiego dell'energia nucleare, tanto che reattori e apparecchiature nucleari continuarono a essere costruite negli istituti di fisica delle università e delle cliniche. In seguito, l'abrogazione nel 2004 di uno dei tre referendum del 1987 e l'incremento generalizzato dei costi dei combustibili fossili indussero le società a riprendere gli investimenti nel settore.

Un secondo referendum si tenne però nel giugno 2011, qualche mese dopo che tre reattori nucleari erano stati gravemente danneggiati da uno tsunami nel sito giapponese di Fukushima. Per quanto l'opinione pubblica in materia di energia nucleare in Italia fosse cambiata con il nuovo millennio, l'esito del referendum non poteva che essere per l'abrogazione: l'abbandono del nucleare fu irreversibile, fino a oggi.

1. In termini generali, come funziona un reattore nucleare? In che modo una centrale nucleare produce energia elettrica?
2. Come alternative al nucleare oggi vi sono i combustibili fossili e le fonti di energia rinnovabili. Qual è la differenza tra questi due sistemi di produzione?
3. Dove si colloca in questo quadro l'energia idroelettrica?

SCIENZE

L'adroterapia

La fissione nucleare non ha causato solo danni (la bomba atomica) o usi controversi (le centrali nucleari), ma si presta anche a usi diagnostici e terapeutici. L'adroterapia è una tecnica di cura dei tumori mediante apparecchiature eroganti adroni (particelle subatomiche il cui nome deriva dal greco *hadròs* "forte") che consentono di aggredire il tumore in sedi non accessibili per altra via, senza danneggiare i tessuti circostanti. Questo trattamento utilizza un acceleratore di particelle detto sincrotrone, la cui funzione è quella di scomporre gli atomi e creare fasci di particelle subatomiche (protoni e ioni carbonio) da indirizzare sulle cellule del tumore per distruggerle. Il sincrotrone in dotazione al CNAO (Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica) di Pavia è l'unico in Italia capace di estrarre dall'atomo anche gli ioni carbonio, che sono le particelle più potenti per il trattamento dei tumori resistenti alla tradizionale radioterapia o non operabili.

1. Qual è l'elemento specifico che distingue questo particolare tipo di trattamento dei tumori dall'uso della radioterapia?
2. Ti sembra che questo impiego dell'energia nucleare rientri a pieno titolo nelle condizioni del *Trattato di non proliferazione*? Spiega il motivo.
3. Qual è la differenza tra un reattore nucleare e un acceleratore di particelle?