

COMPRENDERE

Progetto editoriale a cura di Comin & Partners. Marzo 2025 Numero 6

Nucleare: uno stranamore?

IL RITORNO DEL NUCLEARE

Tra crisi climatica e innovazione tecnologica, l'energia dell'atomo torna al centro della scena come risposta stabile e sostenibile alle nuove sfide

GEOPOLITICA E SICUREZZA

L'atomo resta crocevia di tensioni, proliferazione e nuove minacce alla sicurezza internazionale tra risorse strategiche e vulnerabilità globali

ECONOMIA E SOSTENIBILITÀ

Costi elevati e competitività si intrecciano alla transizione green. La gestione delle scorie e l'indipendenza energetica definiranno il futuro dell'energia

ACCETTAZIONE E CULTURA

Miti, paure e disinformazione frenano l'adozione consapevole dell'atomo. Cultura e comunicazione sono chiavi per superare diffidenze e pregiudizi

VERSO E OLTRE L'ATOMO

Idrogeno, rinnovabili e collaborazioni globali si affiancano all'energia dell'atomo, componendo un sistema integrato per il domani

Nucleare: uno stranamore?

COMPRENDERE

COMPRENDERE

Rivista quadrimestrale
N.6 - Marzo 2025

Rivista iscritta al n. 113/2023
del Registro della Stampa
del Tribunale di Roma

Numero chiuso in redazione
il 28 marzo 2025

Rivista distribuita gratuitamente
in edizione limitata

Palazzo Guglielmi
Piazza dei SS. Apostoli 73
00187 Roma
T+39 06 89169407

Galleria San Fedele
Via Agnello 20
20121 Milano
T+39 02 87042400

Bruxelles
c/o MUST & Partners
Rue Montoyer, 1
1000 Brussels (Belgium)
T (+32) 2 50 24 960

Sede legale
Via Giorgio Vasari 14
00196 Roma



Coordinatore Scientifico
GIULIO SAPELLI

Direttore Editoriale
GIANLUCA COMIN

Direttore Responsabile
LELIO ALFONSO

**Art Director e
Coordinatore di Redazione**
ELISA RUSSO

Comitato Editoriale
GIULIO SAPELLI
GIOVANNI CASTELLANETA
GIANLUCA COMIN
ELENA DI GIOVANNI
GIANLUCA GIANSAnte
LELIO ALFONSO
FEDERICO FABRETTI

Redazione
ALESSANDRO ANTONELLI
GAETANO FEBBRAIO
VALERIO GRECO
BEATRICE PECCHIARI
ELISA RUSSO
ANDREA VALLONE

Graphic Design
TIZIANO GROSSI

Stampa
LITOSTAMPA VENETA S.R.L



Indice

Lettera da Hiroshima di ALBERTO MORAVIA	7	IL RITORNO DEL NUCLEARE	
Terrori e speranze convenzionali di GIULIO SAPELLI	8	Two suns in the sunset dei PINK FLOYD	33
Il solco della storia di LELIO ALFONSO	12	Dal rifiuto all'accettazione: come è cambiata l'idea di nucleare di FRANCESCA SALVEMINI	34
Il futuro energetico dell'Italia passa dal nucleare di GILBERTO PICCHETTO FRATIN	14	La rivoluzione della medicina nucleare: atomi per la salute di MARIA LUISA DE RIMINI	38
Le leggi dell'atomo di GIOVANNI GUZZETTA	18	La fisica che spinge oltre i confini della Terra di ANTONIO ZOCCOLI	44
Incubo atomico o mito nucleare? di MAURIZIO ZINNI	22	La fisica delle particelle e l'origine dell'universo di LAURA LUIGIA MARTINI	48
Il nucleare che verrà di GIUSEPPE ZOLLINO	26		
L'atomica, specchio dell'inconscio di GIOVANNI BIASSONI	28	GEOPOLITICA E SICUREZZA	
		La liberazione del mondo di H.G. WELLS	55
		L'era del nucleare o della geopolitica del nucleare? di FRANCESCO SASSI	56
		Se la Russia attacca le centrali ucraine di GREGORY ALEGI	60
		La Corea del Nord e l'atomica: una crisi senza fine di AXEL BERKOFKY	64

ECONOMIA E SOSTENIBILITÀ

Pro o contro la bomba atomica di ELSA MORANTE	69
Il prezzo del nucleare: chi paga per l'energia del futuro di STEFANO CINGOLANI	70
Il paradosso europeo: un futuro senza nucleare? di ANTONIO GOZZI	74
L'atomo nella transizione energetica di ALESSANDRO DODARO	76
L'economia circolare nella gestione dei rifiuti radioattivi di VIVIANA CRUCIANI	80

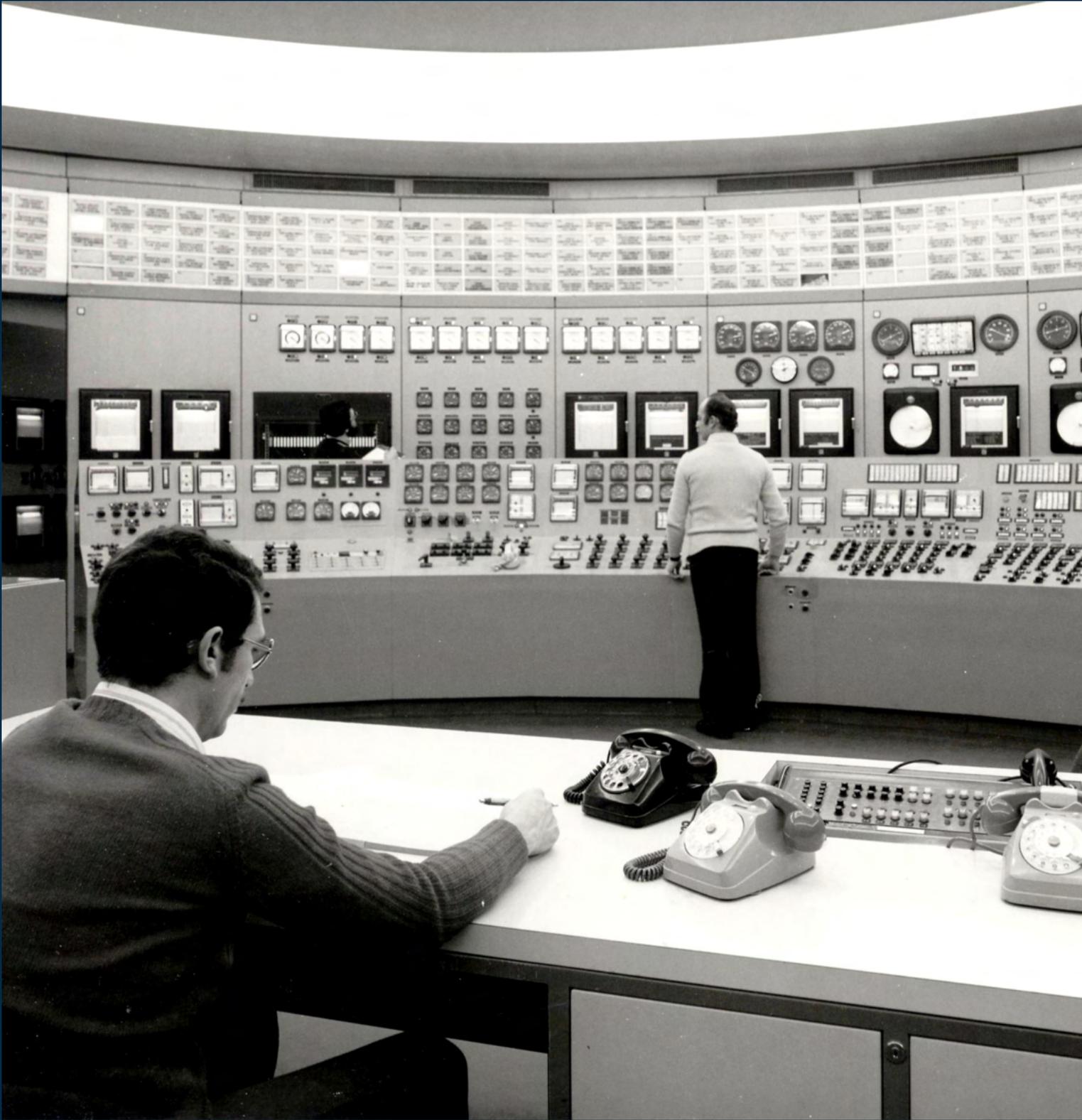
ACCETTAZIONE E CULTURA

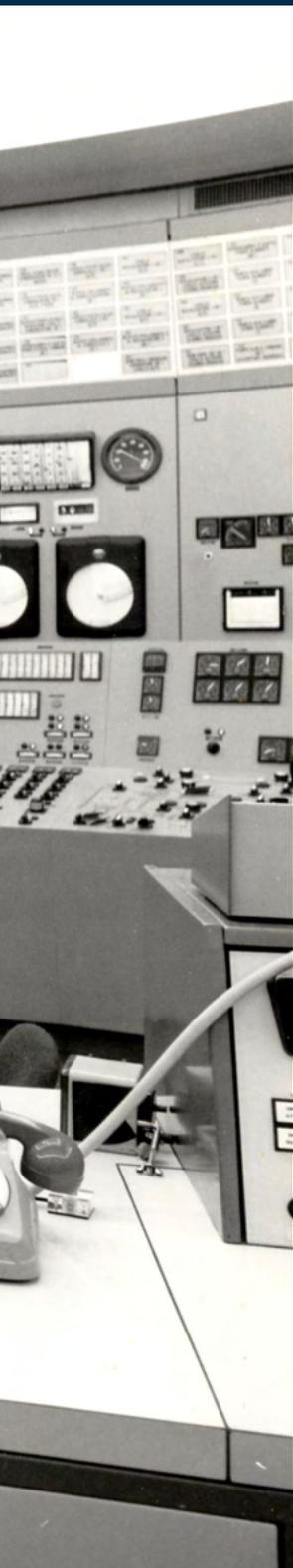
Uomo del mio tempo di SALVATORE QUASIMODO	85
Il dibattito che non si spegne: prospettive per l'Italia di STEFANO MONTI	86
Il grande equivoco: nucleare, scetticismo o accettazione di MATTEO CAROLI	92
Dal silenzio alla consapevolezza: educare al nucleare di MASSIMO SIDERI	96

VERSO E OLTRE L'ATOMO

Il mito della caverna di PLATONE	101
L'era nucleare e superconduttiva di DAVIDE MALACALZA	102
Nucleare indispensabile di DAVIDE TABARELLI	106
L'energia nucleare nel contesto internazionale di LUCA ROMANO	110
Oltre il tabù: perché l'Italia torna a parlare di nucleare di GIANLUCA COMIN	114







Lettera da Hiroshima Alberto Moravia

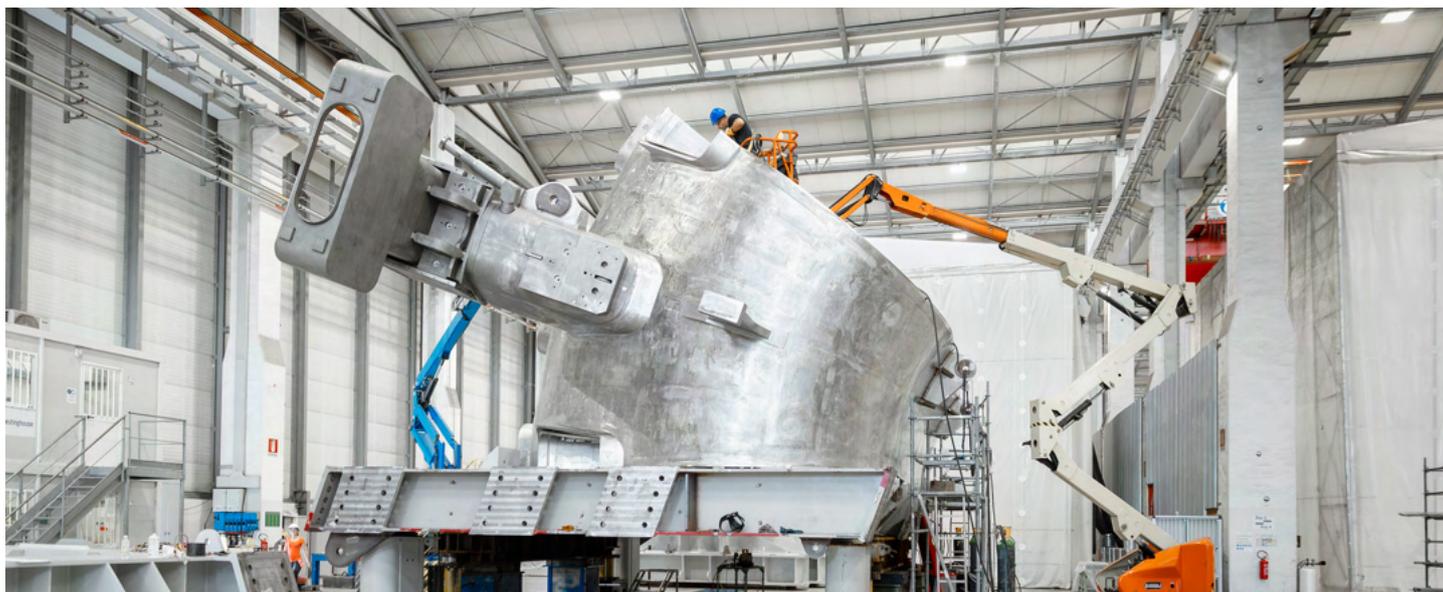
Carissimo, eccomi ad Hiroshima ed ecco l'ultima novità: non sono più quel tale individuo a nome Alberto Moravia, non sono più italiano, europeo, ma soltanto membro della specie. E per giunta membro di una specie destinata, a quanto pare, ad estinguersi al più presto.

[...]

Debbo dire che scoprire ad un tratto di essere soprattutto e soltanto membro della specie non è piacevole. È un fatto dimenticato e rimosso da milioni di anni. Un salto indietro nella preistoria, anzi in qualche remota epoca geologica. Anche perché la scoperta, come ti ho già accennato, è unicamente di segno negativo: scopro di essere membro della specie perché la specie sta per perire.

Terrori e speranze convenzionali

Giulio Sapelli



Il lavoro analitico e creativo raccolto in questo numero di **COMPNDERE** rende manifesto uno sforzo corale della redazione della rivista per promuovere una sorta di necessaria e sempre più urgente “razionalizzazione” della questione nucleare. Un tema che si pone nel frastagliato mondo, tanto delle relazioni internazionali, quanto delle angosce collettive odierne in ogni latitudine e longitudine. Ogni tentativo di sottrarre un tema misterioso alla superficialità di sguardi approssimativi e terrificanti conduce sempre all’agnizione. Per quanto mutevole nel profondo psichico, esso determina il sorgere e il risorgere d’interminabili percorsi angosciosi, che l’intellettuale deve seguire e arginare.

Comprendere compie, come si annuncia sempiternamente nel Suo titolo (perché comprendere è ben diverso da conoscere) anche con questo numero un'operazione culturalmente complessa e poliedrica. Intende offrire una visione a tutto tondo della questione nucleare e riportarla alla sua origine: la storia dell'Ingegno umano individuale e collettivo. Gli usi civili eccezionali derivanti dall'atomo ne sono una dimostrazione e relegano l'elemento militare, troppo spesso evocato, così come quello energetico, non sempre percepito nella sua forma più benefica. Piuttosto che relegarli ai margini, il tentativo è di collocarli nel loro giusto contesto, consentendo un approccio guidato dalla ragione, anziché offuscato dall'angoscia.

Ma veniamo al tema del nucleare e della pace e della guerra, che è ora emerso potentemente alla ribalta di questi anni.

Raymond Aron – un maestro che mai come in questi tempi mi appare vicino e consolatore e stimolatore di sempre nuove fatiche, il cui lascito è duplice per un paradosso caratteristico, come accade per quel pensiero allo stesso tempo audace e modesto che è proprio dei Grandi – ambiva a presentare una teoria generale delle relazioni internazionali, in cui la questione della minaccia e della deterrenza termonucleare non poteva essere ignorata. Nella pluralità dei centri decisionali con cui la questione via via si manifestava, la “bomba atomica” diventava per Raymond Aron il punto di partenza di un percorso analitico che lo portò a definire le “sei questioni fondamentali per lo studio delle costellazioni diplomatiche”. Tra queste, le questioni oggettive: determinazione del campo, configurazione dei rapporti di forza in questo campo, tecnica della guerra.

Le questioni soggettive o “ideologico-politiche” riguardano il reciproco riconoscimento – o la sua assenza – tra le unità di guerra, i rapporti tra politica interna ed estera, e il significato e finalità di quest'ultima.

In terzo luogo, l'analisi dei sistemi internazionali – intesi come gruppi organizzati in base alla competizione tra le loro unità – porta alla distinzione tra sistemi pluripolari e bipolari. La specificità delle relazioni internazionali e la differenza fondamentale tra politica estera e politica interna, tra il modello ideale di condotta diplomatico-strategica e quello di condotta civica, costituivano il punto di forza di una analisi distintiva che dovremmo continuare ad usare anche oggi. In questo costrutto analitico, esiste una chia-

ra differenza tra la “politica del potere” in un contesto dominato dal rischio del ricorso alla forza da parte tra unità concorrenti, e l’uso del potere coercitivo da parte dello Stato all’interno di una comunità, dove ne detiene il monopolio. Una differenza che altro non è che quella tra i conflitti e le tensioni interstatali – come le guerre – e l’impiego della forza all’interno dello Stato che, seguendo la sempiterna stella polare di Clausewitz, altro non è che l’insieme delle violenze politiche tra gruppi intra-statali.

Ciò che rende straordinariamente utile l’insegnamento di Aron in questi tempi di rapido mutamento tecnologico – in cui la natura dell’arma atomica, tra fusione e fissione, e il suo impiego per scopi civili diventano sempre più urgenti – è il realismo calmo, avvolgente e rassicurante, contenuta nella sua analisi.

Prima ancora di Clausewitz, il maestro di Aron è Tucidide, che impone di immergere sempre la teoria nella storia: i sistemi sono per loro natura indefiniti, tanto nelle dimensioni teoriche quanto in quelle belliche e materiali. Da qui emerge una sociologia storica dei sistemi internazionali che può divenire anche sociologia storica dei sistemi antropologici viventi e delle angosce che questi determinano.

Le origini e le dinamiche della prima guerra mondiale, studiate non solo da Aron ma, più di recente, con grande finezza dal grande storico australiano Sir Christopher Munro Clark in *The Sleepwalkers: How Europe Went to War in 1914*¹ mostrano come nella maggioranza dei casi i conflitti divampino con forza inaspettata a causa di un fallimento diplomatico o di una sorpresa tecnica. Eventi che, sebbene possano sembrare fortuiti, si combinarono per generare catastrofi indesiderate, dando luogo a vere e proprie “guerre iperboliche” del tutto imprevedute.

Un tema di straordinaria attualità.

Anche la deterrenza nucleare, dunque, non è una scienza esatta. Non solo perché, secondo la concezione clausewitziana della guerra, la volontà gioca un ruolo determinante, ma soprattutto perché, come si è osservato, «è impossibile, eliminare un pericolo senza aumentarne un altro».

La minaccia suprema è, in teoria, altamente dissuasiva ma nella pratica poco credibile, poiché implica un esito suicida. Al contrario, la minaccia anti-forza – resa ancor più efficace dalla recente rivoluzione nella precisione – è molto più credibile, ma meno deterrente. Se si tenta di rafforzarne l’efficacia dissuasiva, si fini-



¹ Sir Christopher Munro Clark, *The Sleepwalkers: How Europe Went to War in 1914*, London: Allen Lane, 2012.

sce per aumentare il rischio di escalation, la versione nucleare di quella che Clausewitz chiamava l'ascesa agli estremi. Ciò avviene introducendo, accanto alle armi strategiche, le armi nucleari tattiche, oggi al centro dell'attenzione mediatica, ma con una volontà applicativa pressoché inesistente.

Ecco che emerge un'antinomia: tutto ciò che aumenta la probabilità dell'escalation rafforza la deterrenza ma, al tempo stesso, rende più difficile limitare un conflitto, qualora dovesse scoppiare. Più la deterrenza gioca un ruolo a livello globale, più si rafforza la stabilità al livello superiore; e tuttavia, minore è la stabilità ai livelli inferiori, meno i Grandi saranno tentati di ricorrere all'arma suprema, sentendosi liberi di usare le armi convenzionali, come bene dimostrano le proliferanti guerre di oggi.

Così continuiamo a placare i nostri terrori di un conflitto nucleare combattendo guerre convenzionali. Pare non vi sia scelta.

Non resta allora che concentrare sempre di più la nostra attenzione su ciò che ci allontana dalla guerra: il nucleare energetico e le sue applicazioni mediche e il suo immenso e misterioso potenziale computazionale, che spalanca prospettive infinite.

Aspettando Godot.



VLADIMIRO: Quando ci penso... mi domando... come saresti finito... senza di me... in tutto questo tempo... (Recisamente) Non saresti altro che un mucchietto d'ossa, oggi come oggi; ci scommetterei.

ESTRAGONE: (punto sul vivo) E con questo?

VLADIMIRO: (stancamente) È troppo per un uomo solo. (Pausa. Vivacemente) D'altra parte, a che serve scoraggiarsi adesso, dico io. Bisognava pensarci secoli fa, verso il 1900.

ESTRAGONE: Piantala. Aiutami a togliere questa schifezza.

VLADIMIRO: Tenendoci per mano, saremmo stati tra i primi a buttarci giù dalla Torre Eiffel. Eravamo in gamba, allora. Adesso è troppo tardi. Non ci lascerebbero nemmeno salire. (Estragone si accanisce sulla scarpa). Ma cosa fai?

ESTRAGONE: Mi tolgo le scarpe. Non t'è mai capitato, a te?

VLADIMIRO: Quante volte t'ho detto che bisogna levarsele tutti i giorni! Dovresti darmi retta.

ESTRAGONE: (debolmente) Aiutami!

VLADIMIRO: Hai male?

Samuel Beckett, *Aspettando Godot*, Atto I

Il solco della storia

Lelio Alfonso

Cosa c'entra parlare di vinili in un numero di "Comprendere" dedicato all'energia nucleare? Seguitemi, solco dopo solco, in questa traccia un po' data-ta, ma che va oltre – spero – l'autobiografia.

Anno 1979, al Madison Square Garden di New York va in scena una delle molte tappe di un tour musicale anomalo, in un crescendo di partecipazione. Quelle serate tra il 19 e il 22 settembre diventeranno un disco tra i più iconici – e belli, va detto – del panorama "impegnato" dell'epoca, dal titolo esplicito: "No Nukes".

Per me, allora diciassettenne, ascoltare gli appelli in parole e musica di Jackson Browne, Crosby Still Nash e Young, i Doobie Brothers e altre decine di star della West Coast e del rock a stelle e strisce schierate contro una paura che affondava le sue radici negli anni bui della seconda guerra mondiale e degli esperimenti atomici negli atolli del Pacifico era un modo per manifestare, per schierarmi. Anche perché quella paura era tornata prepotentemente davanti agli occhi del mondo solo pochi mesi prima e proprio negli Stati Uniti, a Three Mile Island, con una fuga radioattiva imparagonabilmente più limitata rispetto a quella che avrebbe poi colpito Chernobyl, ma in grado comunque di smuovere una grande ondata emotiva. E il fatto che partisse proprio da oltreoceano, punto di riferimento quasi obbligato – in un'epoca ancora non globalizzata dalle reti digitali – per i giovani di tutto il mondo, ne aumentava e alimentava la portata.

Mentre scrivo, ascolto in sottofondo quei brani, dai titoli espliciti e con un accompagnamento, tipico delle registrazioni live, di applausi e grida. Sembrano anni lontani, e non solo anagraficamente, se messi a confronto con la possibilità di immaginare oggi un'energia nucleare pienamente sicura e in grado di liberarci dal gioco senza futuro dello sfruttamento fossile e la fragilità sostenibile delle varie alternative. Ma eravamo solo giovani e sognatori, allora? No, non credo. La ricerca, all'epoca, non aveva ancora saputo garantire quella nuova generazione di energia nucleare che oggi sembra a portata di mano, in pochi anni. Ed era naturale che il futuro lo immaginassimo in modo tranchant, senza sfumature possibilistiche.

La puntina di diamante che, solco dopo solco, passa da “Plutonium is forever” a “Before the deluge”, fino a “Teach your children” accompagna un altro ricordo di un paio di anni dopo, il tentativo fallito – da parte dei Radicali – di raccogliere le firme per quel primo referendum contro il nucleare che si sarebbe poi tenuto nel 1987, mentre si faceva strada anche il movimento dei Verdi. Anche qui la mobilitazione era stata grande e, nonostante l’incostituzionalità del quesito proposto, era chiaro come non ci fosse spazio, in quel periodo, per affrontare compiutamente l’argomento, rimasto poi nell’alternanza tra oblio e vampate revisionistiche nei decenni successivi.

Una nota a margine, che è ben altro dall’essere considerata episodica, è l’allineamento temporale – quasi fatalistico – tra i due appuntamenti referendari italiani promossi per rallentare nel primo caso e impedire, nel secondo, una politica nucleare nel Paese.

Pensateci: 1986 incidente di Chernobyl – 1987 referendum; 2011 incidente di Fukushima – 2011 referendum. Solo dati statistici? Non credo.

Sappiamo bene come l’opinione pubblica “respiri” e formi la sua “coscienza” indistinta attraverso gli eventi più recenti e le prese di posizione maggiormente amplificate, per toni e gesti. Fermo restando il rispetto democratico dell’esito del voto, è chiaro che se oggi si proponesse, attraverso un quesito ragionato e comprensibile, l’adozione o meno di una nuova politica energetica basata sull’utilizzo del nucleare, non è difficile immaginare che l’esito potrebbe essere molto diverso e comunque non quasi totalitario come nel passato.

Anche per queste ragioni abbiamo deciso di dedicare il numero di “Comprendere” che state leggendo ad un tema che in passato è stato enormemente divisivo e ancora oggi necessita di una profonda e corretta conoscenza.

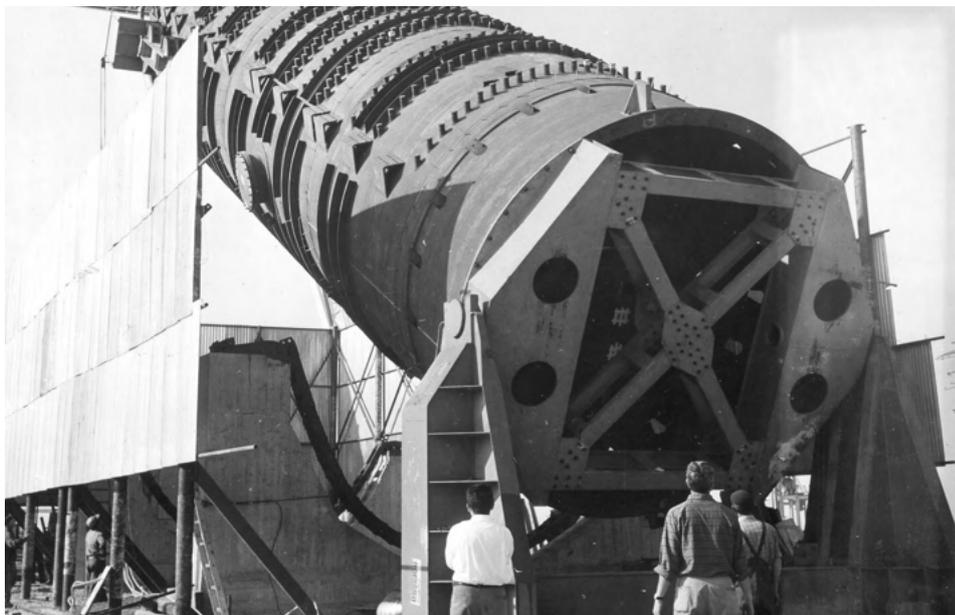
Di certo la strada intrapresa interseca quelle della tecnologia, della sostenibilità, della geopolitica, dell’economia. E diversamente da quel disco, da quegli anni, da quelle convinzioni giovanili, il “no” può lasciare spazio ad un’altra colonna sonora.

Il futuro energetico dell'Italia passa dal nucleare

di **Gilberto Pichetto Fratin**

L'Italia si trova oggi davanti a una scelta strategica cruciale: garantire la sicurezza energetica del Paese, contenere i costi dell'energia per famiglie e imprese e raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione. In questo scenario, il nucleare rappresenta un tassello fondamentale del nostro futuro energetico. Sono convinto che a partire dai primi anni '30 il nucleare sarà una realtà operativa anche in Italia. È un percorso che dobbiamo intraprendere con determinazione, ripartendo da una solida base normativa e industriale. Dopo oltre quarant'anni di assenza da questo settore, è necessario un piano strutturato che tenga conto di innovazione tecnologica, sostenibilità economica e consenso sociale.

L'Italia non può affrontare questa sfida da sola. In un contesto europeo in cui l'energia nucleare è già un pilastro della strategia energetica di molti Paesi, il nostro ritardo non è più sostenibile. La Francia, ad esempio, ha costruito la sua indipendenza energetica proprio grazie a una solida infrastruttura nucleare, garantendosi un'energia a basso costo e a bassa emissione di CO₂. La Germania, che ha scelto di dismettere il nucleare, si trova oggi in una situazione di maggiore vulnerabilità rispetto agli shock energetici. Il ritorno dell'Italia al nucleare non è solo una questione di sostenibilità ambientale, ma anche di competitività industriale e di sicurezza geopolitica. L'Unione Europea sta riconoscendo sempre più il ruolo del nucleare nella transizione energetica, tanto che la tassonomia verde ha incluso que-



sta fonte tra le tecnologie sostenibili. Le alleanze tra Paesi europei a favore dell'energia nucleare si stanno rafforzando, e l'Italia deve essere parte attiva di questo processo. Abbiamo già avviato il percorso normativo per il ritorno dell'energia nucleare in Italia. La legge delega approvata dal Consiglio dei Ministri costituirà il primo passo di un iter articolato. Questa legge definirà i pilastri per la reintroduzione dell'energia nucleare, con un quadro chiaro su autorizzazioni, regolamentazione e criteri di installazione.

Entro l'autunno, mi auguro che il provvedimento venga approvato, permettendoci poi di lavorare sui decreti attuativi. Saranno necessari 12 mesi per finalizzare le regolamentazioni su *permitting*, certificazioni, formazione del personale specializzato e individuazione delle migliori soluzioni tecnologiche. È un percorso che stiamo affrontando con pragmatismo, ponendo l'Italia nelle condizioni di adottare le migliori pratiche a livello internazionale. Il rilancio del nucleare in Italia non può prescindere da una forte sinergia tra istituzioni, industria e ricerca.

Stiamo assistendo alla nascita di alleanze strategiche che vedono protagoniste realtà d'eccellenza come l'ENEA, che da anni lavora sulle nuove frontiere della tecnologia nucleare, e la newco tra Enel, Ansaldo Nucleare e Leonardo, creata per sviluppare competenze industriali nel settore. Questa collaborazione rappresenta un passo decisivo per il posizionamento dell'Italia nel mercato internazionale dell'energia nucleare.



L'industria italiana ha già una forte esperienza nella componentistica avanzata per il nucleare, esportando tecnologia in diversi Paesi. Ora si tratta di fare un salto di qualità, puntando su una filiera nazionale in grado di progettare e realizzare impianti di nuova generazione. L'Italia oggi guarda al futuro del nucleare con un approccio innovativo. Non si tratta di tornare ai vecchi impianti, ma di puntare su tecnologie avanzate, sicure ed efficienti. In particolare, gli *Small Modular Reactors* (SMR) rappresentano una soluzione concreta: reattori compatti, più sicuri, con un ridotto impatto ambientale e integrabili con le altre fonti energetiche.

Il nostro Paese vanta eccellenze industriali nel settore: aziende italiane sono già coinvolte in progetti internazionali, contribuendo allo sviluppo di reattori di ultima generazione. Dobbiamo far crescere ulteriormente un sistema di competenze che è rimasto fermo per troppi anni. Per questo, investiremo nella formazione di ingegneri e tecnici specializzati, affinché l'Italia possa essere protagonista in questo settore. Il nucleare sarà parte di un mix energetico equilibrato e diversificato. Accanto alle fonti rinnovabili, che continueranno a crescere, avremo bisogno di una fonte stabile e programmabile come il nucleare per garantire continuità di approvvigionamento e stabilità della rete. Ma la transizione energetica non si può realizzare senza una visione pragmatica. Le sole rinnovabili non bastano: l'energia eolica e solare, pur essenziali, dipendono da fattori climatici e non offrono la costanza necessaria per un sistema industriale avanzato come quello italiano. Il nucleare, invece, garantisce energia pulita, senza emissioni di CO₂, e a costi stabili nel tempo.

Un altro aspetto cruciale riguarda la gestione delle scorie nucleari. Oggi in Italia produciamo già rifiuti a bassa e media intensità radioattiva, principal-

Gilberto Pichetto Fratin è Ministro dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica ed esponente di Forza Italia. Laureato in Economia e Commercio all'Università di Torino, ha esercitato come dottore commercialista e docente di ragioneria. Attivo in politica sin da giovane, ha ricoperto incarichi di amministrazione locale e regionale in Piemonte, entrando in Forza Italia nel 1995. È stato Senatore della Repubblica e, dal 2021, Viceministro dello Sviluppo Economico nel Governo Draghi. Il 22 ottobre 2022 ha giurato come Ministro nel Governo Meloni e, con il suo dicastero, è attualmente al lavoro per la reintroduzione dell'energia nucleare nel mix energetico nazionale.



mente di origine medica, che necessitano di una gestione sicura e centralizzata. Il nostro obiettivo è individuare soluzioni che garantiscano sicurezza e sostenibilità, come già avviene nei Paesi che hanno una filiera nucleare consolidata. Per le scorie ad alta attività, la prospettiva è quella di collaborare con i partner europei e adottare soluzioni avanzate di stoccaggio e trattamento. Il nucleare è una tecnologia sicura e regolamentata da standard stringenti, e il nostro approccio sarà basato sulla massima trasparenza e sulla condivisione con i cittadini. Il ritorno del nucleare non è una questione ideologica, ma una necessità concreta per l'indipendenza energetica dell'Italia. La Francia, la Cina, gli Stati Uniti e altri Paesi stanno investendo massicciamente in questa tecnologia. Non possiamo restare indietro.

Oggi vedo una crescente responsabilità nel dibattito politico, anche tra le forze di opposizione. È un tema su cui dobbiamo lavorare con spirito di collaborazione, evitando pregiudizi e guardando ai dati e alla scienza. Mi auguro che il confronto in Parlamento possa migliorare ulteriormente il testo della legge delega e portare l'Italia verso un futuro energetico più sicuro, stabile e sostenibile.

L'energia nucleare di nuova generazione rappresenta una grande opportunità per il nostro Paese. Abbiamo le competenze, le risorse e la volontà politica per farlo. A partire dai primi anni '30 l'Italia tornerà ad avere il nucleare. Ne sono convinto.

Le leggi dell'atomo

di **Giovanni Guzzetta**

Il 28 febbraio scorso, il Consiglio dei Ministri su proposta del Presidente del Consiglio e del Ministro dell'ambiente Pichetto Fratin ha approvato la «*Delega al Governo in materia di energia nucleare sostenibile*».

Inizia così un percorso che potrebbe portare l'Italia a riprendere la propria politica nucleare. Si tratta di una decisione di significativa portata politica. Innanzitutto, perché destinata a scatenare un dibattito a dir poco vivace. Il tema è tra quelli sensibili. Sul nucleare l'Italia si è in passato divisa, anche nelle urne referendarie.

Ma nella situazione attuale non si può prescindere da una discussione, sperabilmente laica e ispirata al pragmatismo.

La politica energetica è forse quella che maggiormente oggi definisce la capacità di governare il futuro, non solo a livello domestico ma anche e soprattutto sul piano planetario. La filiera di approvvigionamento energetico va ben oltre i confini nazionali, quale che sia la fonte che si considera. Secondo i dati dell'International Energy Agency (IEA), l'Italia nel 2023 dipendeva al 79,8% dalle importazioni nette di energia (in particolare gas, di cui siamo il maggior consumatore al mondo). Sempre secondo l'IEA, la nostra dipendenza dall'estero ci colloca al terzo posto in Europa e al nono nel mondo.

L'esposizione oltrefrontiera solleva questioni di sicurezza dell'approvvigionamento e di rilevanza dei costi talmente evidenti che non è necessario spendere molte parole. Nel terremoto epocale che attraversa l'assetto geo-

Giovanni Guzzetta è professore ordinario di Diritto costituzionale presso l'Università di Roma "Tor Vergata". Accademico di riconosciuto prestigio, ha alle spalle una lunga esperienza nell'ambito delle riforme istituzionali e della legislazione elettorale. Tra i suoi incarichi istituzionali di rilievo, è Consigliere giuridico del Ministro dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, incaricato di redigere il quadro giuridico per la disciplina organica del nucleare sostenibile. È stato Componente del CLEP, Presidente della Corte costituzionale di San Marino, Capo di Gabinetto del Ministro della PA, Vice-presidente del Consiglio di Presidenza della Giustizia amministrativa. È coordinatore di un Master in Lobby e processi decisionali e di un Master in Diritto dell'intelligenza artificiale e dell'innovazione tecnologica. È avvocato e Partner dello studio legale associato Legal Protection. Autore di numerosi saggi e pubblicazioni, nonché editorialista di vari quotidiani, Guzzetta è da anni protagonista del dibattito pubblico su temi di diritto costituzionale, amministrativo, europeo, governance e qualità delle istituzioni.

politico mondiale, la voce energia (che significa anche materie prime per lo sviluppo delle tecnologie) è probabilmente uno dei principali *driver* delle scelte strategiche degli stati e del loro posizionamento nelle relazioni internazionali. Con tutto il seguito di conflitti, anche armati, che rigurgitano in ogni angolo del mondo. A ciò si aggiungano le pressioni derivanti dalle minacce del cambiamento climatico, che già da sole basterebbero a dare la misura della drammatica attualità delle questioni.

In tutto questo scenario, la domanda mondiale di energia cresce esponenzialmente, come segno della diffusione del benessere, della consapevolezza ambientale, ma anche come portato dell'altra grande rivoluzione tecnologica: l'intelligenza artificiale (i consumi dei *data center* sono già paragonabili a quelli dell'industria pesante). La crucialità di questi problemi è pari forse solo alla diffusione della consapevolezza che di essi ormai si ha, tanto da collocare queste considerazioni al limite della banalità.

Ce n'è abbastanza, però, per comprendere che un dibattito non era ragionevolmente eludibile. E non a caso il nucleare è stato oggetto di rinnovato interesse in numerosi paesi negli ultimi anni (IEA, *World Energy Outlook 2024*, 16 e 158), soprattutto tra quelli maggiormente dipendenti dall'estero.

D'altronde, in questa direzione vanno anche le raccomandazioni provenienti dai consessi internazionali e sovranazionali, soprattutto in vista del contrasto ai cambiamenti climatici: dalla conferenza Onu sul cambiamento climatico (COP 28) alla stessa IEA, fino all'Unione europea.

Quanto a quest'ultima, oltre all'ormai noto regolamento Tassonomia, si segnala il recentissimo *Net Zero Industry Act* (Reg. 2024/1735), il quale prevede espressamente, tra le "tecnologie a zero emissioni nette" oggetto della disciplina, anche le "tecnologie per l'energia da fissione nucleare, comprese le tecnologie del ciclo del combustibile nucleare".

Di fronte a un contesto così problematico e articolato, chiunque abbia onestà intellettuale non può che salutare positivamente la scelta di riaprire un dibattito troppo a lungo rimasto congelato in un quadro storico, tecnologico e politico ormai superato sotto ogni punto di vista.

Tale dibattito, prima sul disegno di legge delega all'esame del Parlamento e poi sulla fase attuativa dello stesso, potrà consentire, infatti, di confrontarsi con scelte decisive per il nostro futuro.

Il Ddl, infatti, pone implicitamente una serie di domande con cui il decisore politico e i cittadini non possono non confrontarsi.

Qual è il mix energetico più adeguato per raggiungere l'obiettivo, condiviso da tutti, di zero emissioni nette entro il 2050?

Posto che tutte, nessuna esclusa, le tecnologie presentano vantaggi e svantag-



gi (in termini di sicurezza, di possibile sviluppo tecnologico e disponibilità, di costi, di occupazione del suolo, di approvvigionamento delle fonti di produzione e delle materie prime, di efficienza, di continuità di erogazione dell'energia a fronte dell'“intemittenza” di alcune fonti, di storage, di smaltimento, ecc. ecc.), quali scelte politico-strategiche sono le più adeguate all'Italia?

È meglio puntare tutte le *fiches* su un'unica tipologia di fonte o è opportuno tenere aperto un paniere che consenta più flessibilità? E come dev'essere composto questo mix energetico?

Da questo punto di vista, se si vuole evitare un approccio puramente ideologico e irrazionale, occorre un'operazione verità. In questa materia nessun pasto è gratis e ogni soluzione ha i suoi rischi e i suoi costi, non solo economici. Così come è indubitabile che ogni fonte di energia abbia la sua lobby e il suo grumo di interessi, pronti a scagliarsi contro gli altri.

Compiere scelte che siano veramente nell'interesse generale è straordinariamente complesso. Rifutare questo dibattito, oltre che controproducente, è anche piuttosto sospetto.



Incubo atomico o mito nucleare?

di **Maurizio Zinni**

Negli ultimi anni, il moltiplicarsi delle tensioni internazionali e l'esplosione di conflitti a carattere regionale che vedono coinvolte potenze dotate di un arsenale nucleare hanno reso nuovamente attuale nell'opinione pubblica mondiale il cosiddetto "incubo atomico".

L'immaginario collettivo sull'energia nucleare si è nutrito tra seconda metà del Novecento ed inizio del nuovo millennio di un flusso ormai canonizzato di immagini-simbolo, su tutte il fungo atomico. Questo ha iniziato a popolare gli incubi di intere generazioni sin da quel periodizzante 6 agosto 1945, data della distruzione della città giapponese di Hiroshima. Eppure simili riferimenti sono per buona parte frutto della finzione, della fantasia o dell'intuizione di registi e scrittori, più in generale di artisti che hanno usato la loro ispirazione per immaginare quello che non era mai stato (il primo e unico conflitto che abbia visto impiegati ordigni atomici su obiettivi militari è stata la Seconda guerra mondiale) e che pure, in determinati momenti della storia della Guerra fredda, era sembrato così vicino e probabile.

Questo non vuol dire che la paura atomica sia stata solamente il parto di fantasie in punta di penna. Comprendere la genesi e l'evoluzione di questo sentimento profondamente radicato nella coscienza collettiva significa ripercorrere le fasi della storia della scienza atomica e, più in generale, i grandi snodi della Guerra fredda giacché entrambe le vicende si intersecano divenendo inscindibili l'una dall'altra. La prima di queste si sviluppa dal 1945 al 1949, anno in cui l'Unione Sovietica fece detonare la sua prima bomba

Maurizio Zinni insegna Storia contemporanea e Storia dei partiti politici e dei movimenti sociali presso l'Università di Roma Sapienza. I suoi interessi di ricerca riguardano i rapporti fra culturale e politica nel XX e XXI secolo, in particolare lo studio delle icone moderne e dei media come fonti della storia contemporanea. Tra le sue pubblicazioni *Fascisti di celluloido. La memoria del ventennio nel cinema italiano (1945-2000)* e *Schermi radioattivi. L'America, Hollywood e l'incubo nucleare da Hiroshima alla crisi di Cuba* entrambi editi da Marsilio. Nel 2021 ha pubblicato con Alessandro Volterra il volume *Il leone, il giudice e il capestro. Storia e immagini della repressione italiana in Cirenaica (1928-1932)* con l'editore Donzelli.

atomica ponendo fine all'egemonia americana sulle armi nucleari. In questo periodo si passò molto rapidamente dallo shock causato dalla notizia della bomba su Hiroshima e Nagasaki alla comprensione del nuovo ruolo che il nucleare avrebbe svolto nel nuovo scenario bipolare.

La seconda fase coincide con il momento più buio nelle relazioni fra le due superpotenze, la guerra di Corea. Da un lato, l'atomica come arma di offesa venne vista, al di qua e al di là della cortina di ferro, come fonte di nuove angosce e timori; dall'altro, conseguentemente, come l'unico strumento di difesa. Si stabilì così un rapporto per molti versi ambiguo con la bomba e le sue plurime incarnazioni: arma di distruzione ma anche, apparentemente, unico baluardo per evitarla (il paradosso alla base del concetto di deterrenza). Proprio allora ebbe inizio la corsa agli armamenti e la proliferazione dei test su ordigni sempre più potenti, come la bomba all'idrogeno.

Negli stessi anni, parallelamente, si cercò di esorcizzare la paura della distruzione atomica tramite la campagna internazionale sull'uso pacifico e a fini civili dell'energia atomica, inaugurata dal discorso alle Nazioni Unite del presidente Dwight D. Eisenhower l'8 dicembre 1953, da lui stesso definito un appello per un «Piano Marshall atomico» fonte di ricchezza e progresso. Gli isotopi radioattivi divennero per l'opinione pubblica mondiale l'altra faccia della medaglia nucleare.

Nel 1954, una nuova paura si affiancò a quella fino ad allora predominante della distruzione atomica, un incubo molto più "misterioso" e letale perché difficile da vedere e da cui sembrava impossibile difendersi: quello delle radiazioni. Esso venne "scoperto" dall'opinione pubblica a seguito delle conseguenze disastrose ed inaspettate dei test sulla bomba all'idrogeno effettuati proprio quell'anno nel Pacifico da parte degli Stati Uniti. La terza fase, che giunge fino alla fine degli anni Cinquanta, vide così fondersi due minacce equivalenti ma di origine opposta (quella del nucleare nemico e quella del nucleare amico) nell'oramai onnipresente incubo del fallout radioattivo. Nell'immaginario pubblico, alle devastazioni portate dalle esplosioni atomiche si sommarono i timori più reconditi, per certi versi inconsci e per questo più inquietanti, di danni genetici, di degenerazioni, di mutazioni del regolare ordine naturale in grado di generare mostri. Le radiazioni divennero il reagente per scatenare le ansie più profonde della società rispetto alla paura nucleare.

Proprio al tornante tra anni '50 e '60 si manifestarono i primi grandi segnali di diffidenza e critica della politica nucleare allora in atto, quando una oramai matura e diffusa coscienza pacifista e antinuclearista si affermò in



Occidente e nel resto del mondo dovendo fare i conti con uno dei momenti più aspri del confronto fra Stati Uniti e Unione Sovietica. Nei giorni della crisi missilistica di Cuba (ottobre 1962), la paura dell'olocausto nucleare raggiunse l'acme dando origine ad appelli per un deciso e non più procrastinabile cambio di rotta nelle relazioni fra blocchi, pena il completo annichilimento del genere umano. Negli anni della distensione, la paura della guerra termonucleare rimase un potente monito che spinse le due superpotenze a regolamentare gli esperimenti e la proliferazione di testate sempre più potenti. Contemporaneamente, gli sviluppi tecnologici e gli investimenti pubblici furono alla base di politiche economiche che vedevano nel nucleare una possibile alternativa alle tradizionali fonti di energia.



La recrudescenza delle tensioni tra Est ed Ovest alla fine degli anni Settanta non fece altro che riportare in auge una narrazione pubblica sul nucleare e sulle radiazioni le cui origini risalivano a trenta anni prima. Il nucleare nel corso degli anni Ottanta divenne nuovamente sinonimo di morte di massa e di sofferenze indicibili. L'incidente alla centrale di Chernobyl del 26 aprile 1986 sancì in maniera oramai definitiva agli occhi di molti l'impossibilità per l'uomo di poter controllare l'atomo e la sua forza. Anche l'ultimo mito positivo dell'*atomic age*, le potenzialità creatrici e progressive di un uso accorto del nucleare per usi civili veniva spazzato via dal vento che in quei giorni portò l'incubo radioattivo a minacciare la tranquillità delle case e delle tavole di molte famiglie europee.

Il nucleare che verrà

di **Giuseppe Zollino**

Prima di parlare del nucleare che verrà, vorrei fare un cenno a quel che non è stato. Il Piano Energetico Nazionale del 1975 prevedeva dieci centrali nucleari, ciascuna con due reattori da 1.000 megawatt. Un piano simile a quello realizzato in Francia. I dieci siti erano stati individuati, la costruzione avviata a Montalto di Castro, e si era pronti a partire a Trino Vercellese su un sito diverso da quello della centrale Enrico Fermi, già esistente.

Poi intervenne lo sciagurato referendum del 1987, indetto dopo l'incidente di Chernobyl, incidente che sarebbe stato impossibile in tutte le centrali allora in esercizio nel mondo occidentale. Non vi era perciò alcuna ragione tecnico-scientifica per fermare quelle esistenti né tantomeno per interrompere i piani in corso. Infatti, dei 173 reattori nucleari in funzione all'epoca nei Paesi dell'attuale UE più Regno Unito e Svizzera, vennero spenti solo i quattro italiani (compreso Caorso che aveva appena cinque anni di vita) e i piani di costruzione di nuovi impianti seguitarono. Se avessimo portato avanti anche il nostro, con 20 gigawatt nucleari installati, oggi il nostro mix di generazione elettrica sarebbe simile a quello della Francia: il prezzo dell'energia elettrica sarebbe la metà di quello attuale e le emissioni di CO₂ otto volte minori.

A scuola ci insegnavano che studiare la storia serve a evitare di ripeterne gli errori. La storia del nucleare in Italia è straordinaria dal punto di vista della scienza e della tecnologia. Pessima per le decisioni politiche, dettate spesso da scelte ideologiche con ingenti danni economici e ambientali. Abbiamo bisogno ora di un nuovo programma nucleare: è indispensabile per assicu-

Giuseppe Zollino è professore di Tecnica ed Economia dell'Energia e di Impianti Nucleari all'Università di Padova dal 2001 ed è autore di oltre 90 pubblicazioni nel campo delle tecnologie e degli scenari energetici. Ha già ricoperto importanti incarichi in ambito europeo: ha lavorato a lungo alla Commissione ITRE del Parlamento Europeo, responsabile di molti dossier sull'energia, ed è stato delegato italiano nel Comitato Energia del 7° Programma Quadro, collaborando con la Commissione Europea sui programmi di sviluppo di tecnologie energetiche innovative. È stato presidente di Sogin S.p.A., la società di Stato incaricata dello smantellamento di vecchi impianti e centrali nucleari.

rare al Paese energia continua, pulita e non sottoposta al giogo del prezzo variabile del gas; garantendo, con un mix di nucleare e rinnovabili, prezzi in bolletta nettamente inferiori a quelli che si avrebbe se si optasse per un mix con sole rinnovabili, e pure stabili nel tempo, cosa impossibile scegliendo un mix di rinnovabili e gas. Su questo non ci sono dubbi: le simulazioni di sistema che tengono conto dei reali profili orari della generazione fotovoltaica ed eolica e della domanda elettrica dimostrano che nel mix ottimale circa la metà dell'energia elettrica dovrebbe essere nucleare.

Per arrivare all'ambito traguardo non dobbiamo inventare nulla: abbiamo a disposizione sul mercato reattori affidabilissimi, sostenibilissimi, sicuri, quelli di terza generazione e terza generazione evoluta. Per intenderci, si tratta esattamente della tecnologia oggetto di un esteso rapporto del Centro Comune di Ricerca della Commissione europea, che conclude: «non vi è alcuna evidenza scientifica che l'energia nucleare, in tutta la filiera, rappresenti un rischio per l'uomo e per l'ambiente superiore a quello rappresentato da qualsiasi tecnologia a fonte rinnovabile». Un riscontro oggettivo e inoppugnabile che ha supportato l'inclusione del nucleare di terza generazione nell'elenco delle tecnologie sostenibili, meritevoli dello stesso trattamento riservato sinora solo alle fonti rinnovabili.

Ora dobbiamo rapidamente mettere a punto in Italia il quadro regolatorio, conforme alla normativa europea e alle migliori pratiche internazionali. In Parlamento è già approdata una proposta di legge di iniziativa popolare e presto vi arriverà quella approvata in Consiglio dei Ministri. Occorre calendarizzarle al più presto con l'auspicio che siano discusse costruttivamente e votate anche da una larga parte dell'opposizione.

Come in ogni settore tecnologico, anche per il nucleare, in qualsiasi momento si decidesse di partire, vi sarebbero nuove tecnologie, migliori per uno o più aspetti, in fase di sviluppo, che gli sviluppatori riterrebbero disponibili "a breve".

Tuttavia il nucleare ci serve ora. Pertanto, quello che verrà avviato per primo in Italia, mi auguro entro i prossimi 2-3 anni, non potrà che esser basato sui reattori che già oggi vengono realizzati e pianificati in Europa e nel mondo, cioè quelli di terza generazione. Di che taglia? Lo decideranno gli investitori, valutando costi, modalità di finanziamento, tempi di costruzione, ecc.

E le altre tecnologie attualmente in via di sviluppo, quarta generazione e poi fusione? Si vada avanti sino a quando saranno commercialmente disponibili, cioè in grado di alimentare una centrale elettrica che lavori in modo affidabile e continuo per non meno di 7.500-8.000 ore all'anno e a quel punto saranno prese in considerazione anch'esse.

L'atomica, specchio dell'inconscio

di **Giovanni Biassoni**

La scoperta dell'energia nucleare, con la conseguente invenzione dell'ordigno atomico, non rappresenta solo la rivoluzione bellica e tecnologica più importante del Novecento, ma anche un trauma profondo di tutto il senso collettivo dal secondo dopoguerra ad oggi.

Negli anni '60 due intellettuali italiani hanno riflettuto profondamente su quest'epocale stravolgimento del senso stesso della convivenza umana: lo psicoanalista Franco Fornari e l'antropologo italiano Ernesto De Martino, pensatori contemporanei fra loro che ci offrono prospettive diverse ma complementari sul delicato rapporto che intercorre tra le pulsioni di vita e di morte nei fenomeni bellici, in particolar modo nell'era atomica.

Dopo essersi formato come psicologo dell'età infantile, Franco Fornari unisce i suoi studi di psicologia con l'interesse per la plemologia, dedicando al tema della guerra le due opere più importanti e complesse della sua attività intellettuale: *Psicanalisi della guerra* (1964) e *Psicanalisi della guerra atomica* (1966), saggi in cui sviluppa la sua teoria della guerra come "istituzione psicopatologica". Per l'intellettuale romagnolo ogni guerra è un'istituzione nella misura in cui istituisce una struttura sociale riproducibile nel tempo; psicopatologica perché si basa su una paranoia originaria, quella dell'ineluttabilità della morte, che mistifica e fallisce in partenza gli obiettivi di conquista e difesa che si propone celando dietro ad essi i propri impulsi meramente distruttivi. La guerra in questo senso è soprattutto un rituale atto a espellere il male dalla

comunità e a relegarlo nell'immagine di un nemico esterno ad essa. Una strutturazione istituzionalizzata della paranoia che prende il nome di *guerra* e consente ad ogni gruppo di scaricare le proprie tensioni interne su un altro gruppo, in un circolo vizioso paranoide che fino ad oggi non è mai stato spezzato.

Con l'avvento dell'arma atomica l'umanità tocca il punto più estremo della propria condizione paranoide e "l'istituzione guerra" entra in uno stato di crisi irreversibile: la doppia difesa da un pericolo interno e uno esterno che la guerra tradizionale prometteva alla psiche diventa irrealizzabile di fronte ad un dispositivo che ha la capacità di eliminare in un colpo solo entrambi i contendenti. Franco Fornari non vede nell'atomica solo un dispositivo pantoclastico ma anche un'opportunità di guardare finalmente la guerra per quello che rappresenta realmente: una difesa dal *Terrificante Interno* presente in ognuno di noi. «Ogni guerra cela una funzione conscia ed una inconscia. La parte visibile di questo iceberg rappresenta la difesa da un pericolo esterno mentre l'altra, quella nascosta, è inconscia e riguarda un'operazione di autodifesa e di sicurezza di fronte a terribili realtà fantasmatiche, che potremmo chiamare "Terrificante Interno"». Una presenza distruttiva interna che nasce insieme a noi e ha bisogno di essere proiettata su un nemico esterno per non esercitare contro di sé la propria distruttività. La bomba atomica diventa simbolo estremo di questa proiezione ma anche la sua possibile negazione; il paradosso che fa implodere le contraddizioni tra pulsioni di



vita e pulsioni di morte, tra amico e nemico, tra razionalità scientifica e follia collettiva. Il culmine è il *kathekon* (forza frenante) del progresso che rischia non solo di paralizzare ma di resettare l'intera storia dell'esistenza umana.

Se la guerra tradizionale implica una proiezione distruttiva sul nemico del *Terrificante Interno*, l'arma nucleare porta tale logica ad implodere su sé stessa, generando almeno tre tipi di scenari: il primo, quello della distruzione totale che soddisfa le pulsioni di morte presenti nell'inconscio umano. Il secondo, quello della deterrenza che invece realizza un equilibrio e una pace prima irrealizzabile: il nemico che non può più essere vinto non viene più combattuto. Infine, la paralisi dell'immaginazione rispetto al pericolo atomico: la rimozione del fenomeno e la conseguente deresponsabilizzazione individuale del cittadino.

Per Franco Fornari, l'era atomica mette in crisi non solo la guerra ma l'immaginazione stessa, creando da una parte l'impossibilità di concepire la nostra responsabilità verso una catastrofe così totalizzante; dall'altra, l'impossibilità di ignorare il pericolo per via della nostra stessa natura morale che si esprime in un sentimento di "colpa riparativa". La colpa nei confronti della nostra aggressività è infatti, per lo psicanalista, tanto originaria quanto le pulsioni di vita e di morte e si lega a un'altra forza che emerge come forza equilibratrice rispetto alle pulsioni distruttive: quella dell'amore che ci costringe «a conservare l'altro come parte costitutiva del me». Se l'aggressività si esprime nella formula "mors tua vita mea", l'amore si realizza nel "vita tua vita mea" e si coniuga in un atteggiamento di "responsabilità riparativa" verso l'oggetto d'amore che si rischia di distruggere. Ciò a cui possiamo affidarci è proprio questa risposta affettiva mossa dalla colpa che reagisce al rischio di annientamento di entrambi i partner del rapporto, ma più diventiamo estranei al nostro mondo per incapacità di immaginarlo e più il senso di spaesamento, impotenza e paranoia reciproca sembra prendere il sopravvento avvicinandoci all'abisso.

Se Franco Fornari analizza la guerra atomica da un punto di vista sostanzialmente interno alla psiche umana, Ernesto De Martino affronta la questione su un piano storico ed esistenziale, focalizzandosi anch'egli sulla centralità dell'elaborazione del lutto. In una delle sue opere più importanti, *La Fine Del Mondo* (1977), l'intellettuale napoletano affronta questo tema attraverso il concetto di crisi della presenza: un momento dello spirito umano causato da un lutto o da una situazione di smarrimento esistenziale in cui l'Esserci rischia di perdere il controllo sul proprio destino e soprattutto sul

Giovanni Biassoni si laurea in Lettere e Filosofia alla Sapienza di Roma in triennale con una tesi sul concetto di guerra giusta in Sant'Agostino e consegue la laurea magistrale in scienze filosofiche a RomaTre con una tesi dedicata a Ernesto De Martino e al suo concetto di apocalisse culturale. In questi anni si è occupato di rap e formazione attraverso la promozione di laboratori creativi di scrittura in metrica presso cooperative sociali e scuole di Roma, in particolare Spazio Incontro Scholè, nel ruolo di educatore. Attualmente collabora con "Equilibri Magazine", la rivista per lo sviluppo sostenibile della Fondazione Mattei, e con la rivista "Comprendere" nel ruolo di ricercatore e articolista.

sensu della propria esistenza. L'antropologo affronta il tema della fine del mondo non tanto da un punto di vista cosmologico ma soprattutto come rischio estremo di dissoluzione del senso collettivo. Da questo punto di vista la minaccia nucleare non rappresenta solo la possibilità di un auto-annientamento totale da parte dell'umanità, ma il collasso del significato culturale e simbolico dell'esistenza umana, nonché il culmine di una crisi della presenza ormai globalizzata. Una crisi che però non è un fatto del tutto nuovo secondo Ernesto De Martino: nella sua ricerca sottolinea come, dalla notte dei tempi, ogni comunità storica fa i conti con questo rischio.

Ogni fine del mondo è in realtà sempre e soltanto una fine del "nostro" mondo ma viene percepita da ogni gruppo in forma universale. L'arma atomica estremizza questo fatto e lo porta al parossismo. Questa nuova forma di potenza pantoclastica sembra infatti rendere vana ogni categoria etica, politica e filosofica che ha guidato la civiltà umana nel corso dei secoli, rischiando di minare alla base ogni possibilità di senso passato, presente e futuro. Il progresso tecnologico ha ormai raggiunto un punto in cui può addirittura annullare sé stesso e tutto ciò che ha faticosamente prodotto; l'umanità, attraverso la tecnica e la scienza, ha ormai gettato le basi per la sua cancellazione, rischiando di portare con sé non solo miliardi di corpi inermi ma anche millenni di usi, costumi, tradizioni e culture che hanno dato senso al nostro viaggio sulla terra. Il problema del senso è alla base di tutto il rapporto tra umanità ed esistenza, un'esistenza scissa in contenuti naturali e culturali costantemente in dialogo e conflitto fra loro. Un *unicum* in natura, quello della specie umana, caratterizzata proprio dal fatto di non aderire a nessun ambiente e a nessun istinto predeterminato, la cui condizione esistenziale dipende strettamente dalla possibilità di dar senso a ciò che gli accade. Di fronte alla minaccia della fine del mondo, Ernesto De Martino ricorda che l'umanità ha sempre risposto cercando delle narrazioni che potessero re-integrare un nuovo senso possibile.

Nelle culture arcaiche i riti servivano proprio a scongiurare questa possibilità, permettendo agli individui di rinnovare costantemente il proprio rapporto con il sacro e dunque con l'ordine prima cosmico e poi mondano. L'antropologo considera la strategia della deterrenza nient'altro che un gigantesco esorcismo politico che tenta di tenere il genio chiuso dentro la lampada; l'atomica un dispositivo apocalittico non solo da un punto di vista distruttivo ma soprattutto nel senso etimologico di apocalisse come rivelazione: un'arma che minaccia di rivelare tutte le contraddizioni della psiche umana nella sua costante scissione fra pulsioni di vita e pulsioni di morte.

Il ritorno del nucleare



Two suns in the sunset Pink Floyd

In my rear view mirror the sun is going down
Sinking behind bridges in the road
And I think of all the good things
That we have left undone
And I suffer premonitions
Confirm suspicions
Of the holocaust to come.

The wire that holds the cork
That keeps the anger in
Gives way
And suddenly it's day again.
The sun is in the east
Even though the day is done.
Two suns in the sunset
Could be the human race is run.

Like the moment when the brakes lock
And you slide towards the big truck
"Oh no!"
(Grido) "Daddy, Daddy!"
You stretch the frozen moments with your fear.
And you'll never hear their voices
And you'll never see their faces
You have no recourse to the law anymore.

And as the windshield melts
My tears evaporate
Leaving only charcoal to defend.
Finally I understand the feelings of the few.
Ashes and diamonds
Foe and friend
We were all equal in the end.

Dal rifiuto all'accettazione: com'è cambiata l'idea del nucleare

di **Francesca Salvemini**

Di fronte alle sfide poste dai cambiamenti climatici e dalla necessità di ridurre le emissioni di gas serra, il nucleare sta vivendo un ritorno inaspettato, trasformandosi da simbolo di catastrofe a possibile alleato nell'innovazione energetica. Inoltre, nel panorama globale attuale, caratterizzato da crisi geopolitiche e instabilità dei mercati energetici, il nucleare offre un'importante garanzia di sicurezza degli approvvigionamenti. Negli ultimi decenni, l'immaginario collettivo legato all'atomo è stato fortemente segnato da eventi – da Chernobyl a Fukushima – che han-

no alimentato il timore di incidenti irreparabili e la diffidenza verso questa tecnologia. In realtà i dati ci dicono che il nucleare è già oggi una delle tecnologie più sicure in assoluto, oltre che la più pulita (in termini di emissione di gas serra nell'intero ciclo di vita) e con il minor impiego di superficie. Il panorama energetico globale e quello geopolitico hanno spinto istituzioni, industria e opinione pubblica a riconsiderare il ruolo dell'energia nucleare, cercando di separare l'eredità del passato dalle opportunità offerte dalle nuove soluzioni tecnologiche.

Il percorso di trasformazione dell'immagine del nucleare, specie in Italia, non può essere ridotto a un semplice cambio di opinione, ma si configura in *primis* come un complesso processo culturale e istituzionale. In origine, l'entusiasmo per l'era atomica aveva promosso il nucleare come promessa di progresso e modernità, ma la realtà si è poi scontrata con la percezione del rischio e la gestione delle scorie radioattive. La crisi energetica e la necessità di ridurre le emissioni di carbonio stanno portando ad una nuova visione: quella di un atomo rivisitato, capace di garantire un approvvigionamento energetico stabile e, nel rispetto di rigorosi standard di sicurezza, di contribuire a un futuro a basse emissioni.

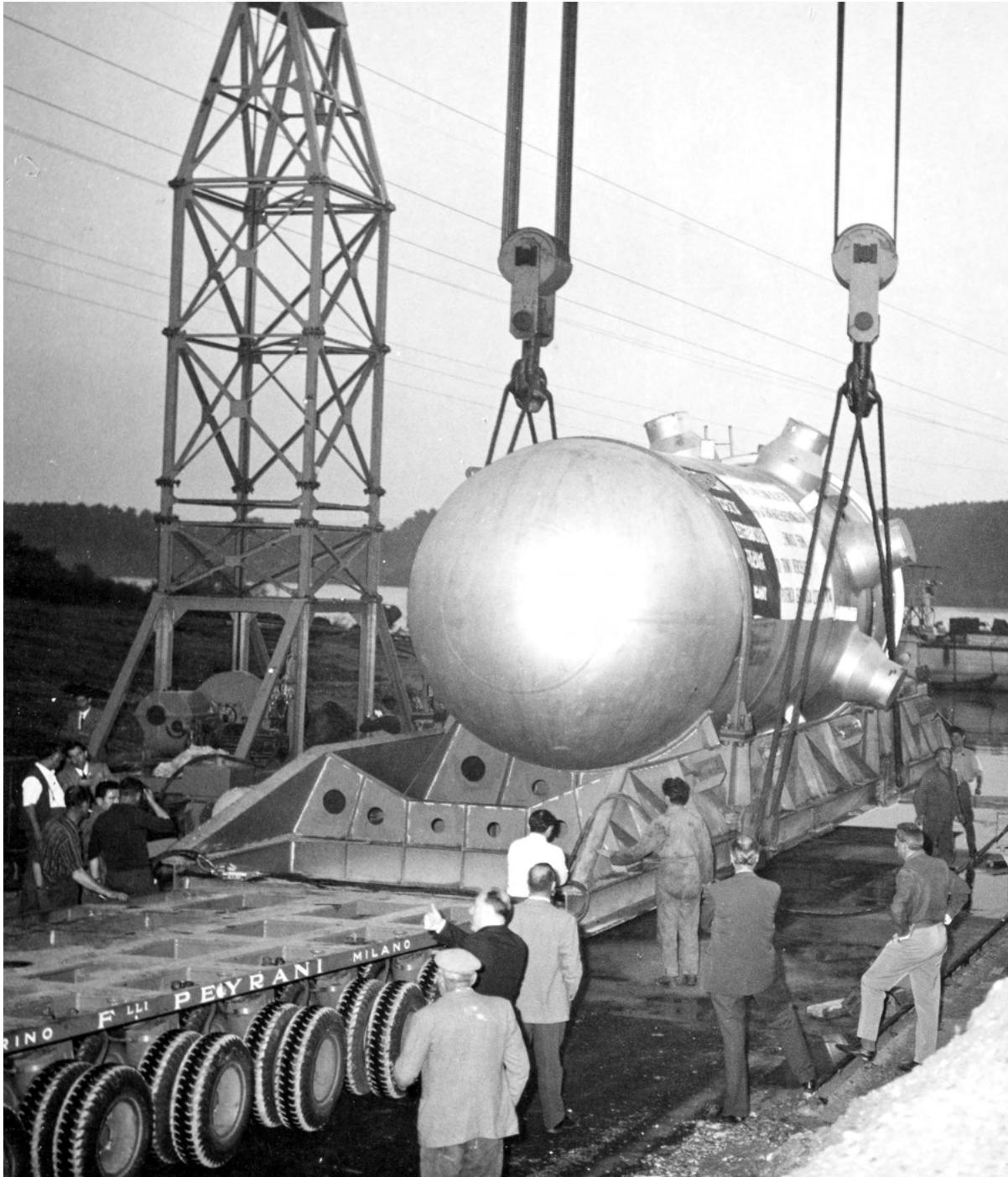
Le innovazioni tecnologiche hanno svolto un ruolo decisivo in questo rinnovato rapporto. La progettazione e lo sviluppo dei reattori di nuova generazione (in particolare la terza generazione avanzata e la quarta generazione), caratterizzati da sistemi di sicurezza passivi e da una maggiore efficienza nella gestione del combustibile, ha ridotto sensibilmente il margine d'errore e il rischio di incidenti. Le nuove tecnologie modulari (SMR - *Small Modular Reactor*) prospettano maggiore integrazione nel sistema produttivo, impatto ridotto sull'occupazione di suolo, maggiore flessibilità e minori rischi di investimento. Parallelamente, la ricerca nel campo della fusione nucleare, pur

ancora nelle fasi sperimentali, offre la prospettiva di una fonte di energia pressoché inesauribile. Questi progressi stanno contribuendo a creare un clima di maggiore fiducia e a favorire un dialogo costruttivo tra scienza, politica e società sul tema nucleare.

Il cambiamento della percezione pubblica è strettamente legato anche alla qualità dell'informazione e alla capacità dei media di comunicare con chiarezza le innovazioni e le normative introdotte nel settore nucleare. La memoria degli eventi incidentali del passato, pur rimanendo un elemento di consapevolezza, non deve più essere interpretata esclusivamente come una condanna incondizionata della tecnologia, ma come una lezione che ha spinto verso standard più rigorosi e una regolamentazione più attenta. Questo è valido non soltanto per il nucleare, ma per tutte le tecnologie, senza distinzioni, perché ogni tecnologia ha un rischio intrinseco calcolato nell'intero ciclo di vita, in base al quale si scopre che il nucleare, pur includendo gli eventi di Chernobyl e Fukushima, è tra le fonti più sicure di tutte, incluse le rinnovabili¹.

Le istituzioni di formazione, dalla scuola secondaria fino all'università, gli istituti di ricerca e le autorità di regolamentazione hanno un ruolo fondamentale nel rinnovare il dibattito sul nucleare. La collaborazione internazionale, mirata a condividere *best practice* e sviluppare *standard*

¹ ourworldindata.org/safest-sources-of-energy



Francesca Salvemini è Capo della Segreteria Tecnica del Ministro dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, incarico che ricopre dal gennaio 2023. In questo ruolo ha guidato l'aggiornamento del Piano Nazionale Energia e Clima e coordinato la Piattaforma Nazionale per un Nucleare Sostenibile. È membro di comitati strategici, quali quello per i Green Bond, il Comitato di Indirizzo del Fondo Italiano per il Clima e il Board europeo sulle materie prime critiche. In precedenza, ha maturato una vasta esperienza nel settore energetico, lavorando nel Gabinetto di Mario Monti come Commissario Europeo per il Mercato Interno, presso l'Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas, e nel Gabinetto del Ministro dello Sviluppo Economico durante il secondo governo Berlusconi. Ha ricoperto incarichi di responsabilità nel mercato elettrico italiano e in Sogin, dove si è occupata del decommissioning e della chiusura del ciclo del combustibile nucleare.

comuni, è ormai considerata indispensabile per garantire non solo la sicurezza degli impianti, ma anche la legittimità della scelta nucleare come opzione per la transizione energetica. In Europa si sta assistendo a una crescente sinergia tra progetti di ricerca e investimenti nei reattori modulari (l'Alleanza Industriale Europea sugli SMR nasce proprio con questo obiettivo), capaci di adattarsi alle esigenze locali e di integrarsi in un sistema energetico diversificato. Tale dinamica dimostra come l'energia nucleare possa essere reinterpretata in chiave innovativa, contribuendo in maniera significativa alla sostenibilità ambientale. Il passaggio dal rifiuto all'accettazione non è dunque una mera vicenda di opinioni, ma può essere il risultato di un percorso evolutivo che ha coinvolto e coinvolgerà trasformazioni tecnologiche, riforme normative e un ripensamento culturale. Il nucleare, pur non essendo la panacea per i problemi energetici e climatici del nostro tempo, offre una soluzione complementare alle energie rinnovabili, capace di garantire stabilità e continuità nella produzione di elettricità e indipendenza dagli approvvigionamenti.

Tutti questi aspetti sono stati considerati nelle attività portate avanti dal governo italiano e dal Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, prima con l'istituzione delle Piattaforma Nazionale per un Nucleare Sostenibile, che ha fornito

le basi tecnico-scientifiche e la consapevolezza delle grandi competenze italiane sul nucleare, nonostante l'assenza dalla produzione elettro-nucleare da quasi 40 anni; poi con l'inserimento dell'ipotesi di scenario nucleare nell'aggiornamento del PNIEC – Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima, trasmesso a Bruxelles il 3 luglio 2024.

Infine, tutta la conoscenza acquisita è stata riversata nel disegno di legge-delega per l'abilitazione della fonte nucleare, approvato il 28 febbraio scorso dal Consiglio dei ministri, che prevede attività specifiche sull'informazione alla popolazione, la formazione a tutti i livelli, il coinvolgimento degli stakeholder e la comunicazione scientificamente corretta sul ruolo e sulla sicurezza delle tecnologie nucleari per la transizione energetica, la decarbonizzazione e la sicurezza degli approvvigionamenti.

In conclusione, l'evoluzione dell'idea di nucleare testimonia come la percezione di una tecnologia possa subire una trasformazione profonda attraverso innovazioni concrete e una gestione sempre più attenta e consapevole dei rischi. La sfida resta aperta: dimostrare che, con rigore e trasparenza, il nucleare può essere integrato in un sistema energetico moderno e resiliente, capace di affrontare le urgenze climatiche e le sfide del momento senza rinunciare al progresso tecnologico e alla competitività del Paese.

La rivoluzione della medicina nucleare: atomi per la salute

intervista a **Maria Luisa De Rimini** a cura di **Gaetano Febbraio**

Negli ultimi decenni, la medicina nucleare ha trasformato il panorama diagnostico e terapeutico, offrendo strumenti sempre più avanzati per individuare e curare patologie oncologiche, neurologiche e cardiologiche. In questa intervista, Maria Luisa De Rimini, esperta di riferimento nel settore e Presidente dell'Associazione Italiana di Medicina Nucleare, Imaging Molecolare e Terapia, ci guida attraverso le più recenti evoluzioni della medicina nucleare, le sue applicazioni cliniche e le prospettive future di una disciplina destinata a rivoluzionare il modo in cui affrontiamo la diagnosi e il trattamento di numerose malattie.

Come è evoluta la medicina nucleare e quali sono stati i momenti chiave della ricerca?

La medicina nucleare utilizza sorgenti radioattive non sigillate per fini diagnostici e terapeutici. A differenza di altre tecniche di imaging impiega radiofarmaci, cioè farmaci marcati con isotopi radioattivi, che permettono di ottenere immagini dettagliate sul funzionamento degli organi e sulle loro patologie. Questa disciplina fornisce, infatti, dati funzionali e metabolici degli organi in esame, consentendo non solo diagnosi di malattia, ma anche precoci informa-



zioni prognostiche, in considerazione del fatto che spesso le alterazioni funzionali precedono l'evidenza di quelle morfologico-strutturali.

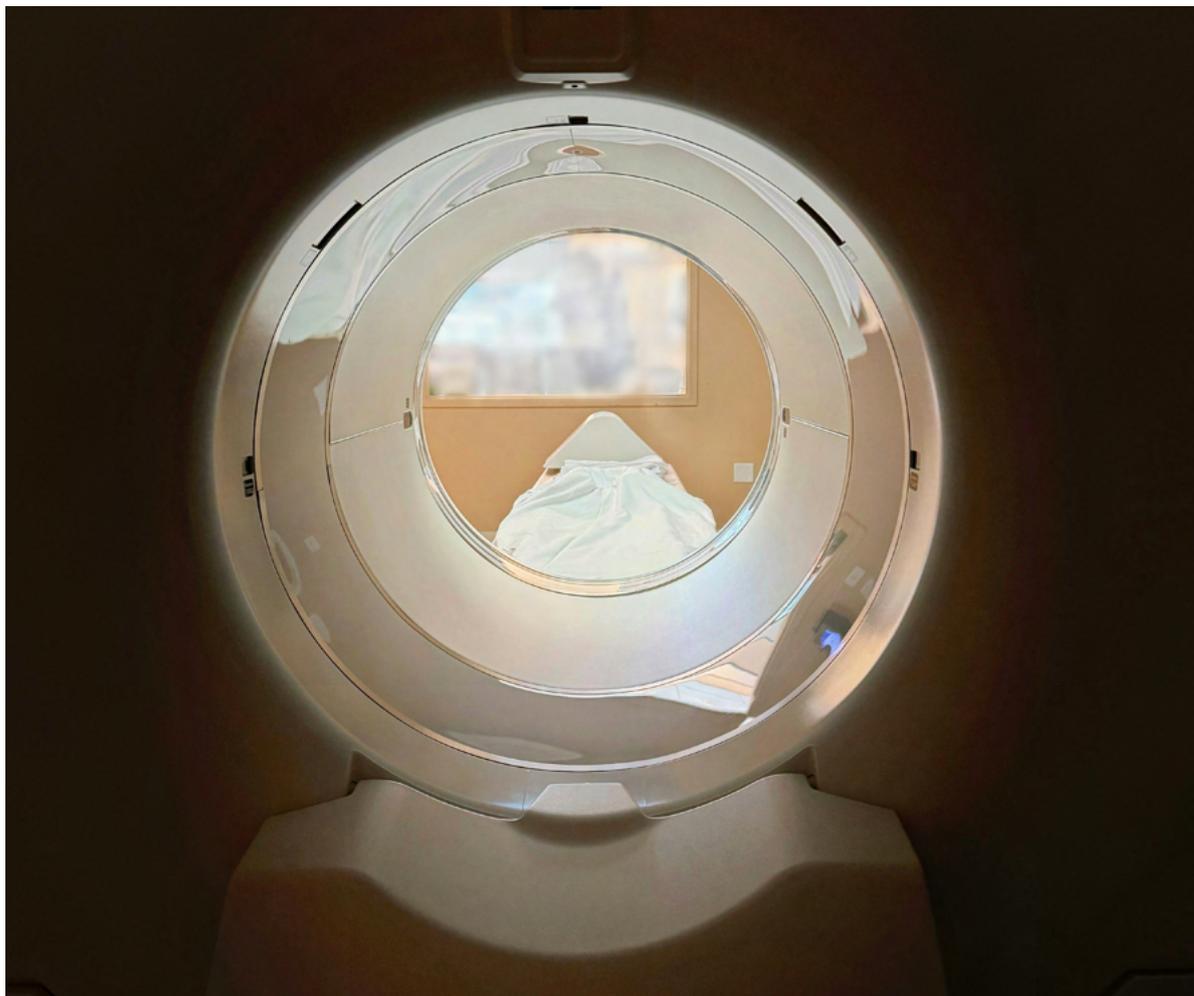
In linea di massima in diagnostica si impiegano radioisotopi con decadimento gamma e beta+, mentre per la terapia quelli a decadimento beta- e, più recentemente radioisotopi con decadimento alfa, per i quali è descritto un notevole potenziale terapeutico.

Negli ultimi decenni, gli spazi dell'imaging molecolare e della terapia medico nucleare si sono ulteriormente ampliati grazie all'uso di nuovi radiofarmaci e all'introduzione di tecnologie avanzate e multimodali. Tra questi, ad esempio, la tomografia a emissione di positroni (PET/TC) con Fluoro18-desossi-glucosio (18F-FDG), un tracciante radiometabolico, è un riferimento essenziale nella definizione di potenziali caratteri di aggressività di un tumore. Allo stesso tempo, l'introduzione di radiofarmaci innovativi oggi rende possibili diagnosi accurate e selezione di trattamenti mirati per tumori che esprimono caratteristiche biologiche differenti dal precedente. Tra questi, ad esempio, alcuni tumori neuroendocrini, studiati con radiofarmaci che identificano in essi una patologica espressione dei recettori della somatostatina.

Quali vantaggi offrono i radiofarmaci rispetto alle tecniche tradizionali?

Oltre l'accuratezza, uno dei maggiori vantaggi è la personalizzazione della diagnosi e della terapia in rapporto alle caratteristiche biologiche del singolo tumore, che sono riconosciute con grande precisione.

Per una particolare tipologia di carcinoma prostatico, ad esempio, il target studiato con la PET-PSMA è proprio l'espressione di questo antigene di membrana: Prostate-Specific Membrane Antigen – PSMA, per cui la PET è, capace di identificare con precisio-



ne quel tumore ed esprimere per quel paziente il più corretto criterio di eleggibilità allo specifico trattamento mirato con radioligandi.

Quanto indicato rappresenta il più straordinario approccio medico nucleare, la teragnostica, secondo cui se un tumore esprime un bersaglio identificabile con un radiofarmaco diagnostico, può essere curato con quella medesima molecola, questa

volta, legata a un radioisotopo per uso terapeutico. È evidente che questo approccio identifica il più interessante esempio di medicina personalizzata sulle caratteristiche del singolo paziente ed assicura un effetto tumoricida mirato direttamente alle cellule malate, dove si internalizza, risparmiando le cellule sane.

La medicina nucleare è, inoltre, centrale anche in patologie neurologi-

Maria Luisa De Rimini è dirigente medico e Direttore dell'UOC di Medicina Nucleare dell'Ospedale dei Colli - Monaldi di Napoli, nonché Presidente dell'Associazione Italiana di Medicina Nucleare, Imaging Molecolare e Terapia. Si è laureata in Medicina e Chirurgia nel 1979 presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II, specializzandosi successivamente in Malattie dell'Apparato Cardiovascolare, Medicina Nucleare e Radiodiagnostica. Attualmente è Professore presso l'Università degli Studi della Campania, all'interno della Scuola di Specializzazione in Cardiologia. Nel corso della sua carriera ha partecipato a numerosi congressi scientifici nei settori della Medicina Nucleare, Radiologia, Oncologia e Cardiologia.

che, oggi in particolare nei disturbi cognitivi dove consente diagnosi differenziale tra le differenti forme di demenza. Nella diagnosi dell'Alzheimer la PET-amiloide, permette diagnosi di malattia più precocemente grazie alla capacità di individuare i depositi di amiloide nel cervello, principali indicatori di malattia.

Qual è il ruolo della medicina nucleare in Italia e con quali istituzioni collabora?

L'Associazione Italiana Medicina Nucleare, Imaging Molecolare e Terapia (AIMN) ha come riferimenti Istituzionali il Ministero della Salute e l'Istituto Superiore di Sanità. Collabora con altre associazioni scientifiche mediche e non mediche, producendo procedure e documenti utili per i pazienti e per aggiornare normative e protocolli di sicurezza. Il Decreto Lgs.101/2020 ha modificato i criteri di accesso ai trattamenti con radiofarmaci e limitato l'obbligo di degenza protetta alla terapia con radioiodio, ad esempio, consentendo di eseguire altri trattamenti terapeutici con radioligandi con accessi esterni, ad esempio il day hospital. Questa possibilità ha migliorato il potenziale di gestione di queste cure, consentendo ai pazienti di tornare a casa non appena le condizioni cliniche lo permettono.

Come viene garantita la sicurezza dei pazienti?

Le normative in vigore hanno mi-

gliorato la gestione della sicurezza radiologica. A questo si associa, grazie alle nuove tecnologie, l'utilizzo di dosi più basse di radioattivo, riducendo l'esposizione dei pazienti, particolarmente utile in quelli pediatrici, più sensibili agli effetti delle radiazioni.

Su questo tema, AIMN ha sviluppato diversi protocolli specifici per garantire la sicurezza dei trattamenti e migliorato la comunicazione con i pazienti, fornendo istruzioni dettagliate su precauzioni e norme da seguire dopo la somministrazione di radiofarmaci.

Qual è l'impatto ambientale della medicina nucleare?

Il settore opera nel rispetto di normative ambientali rigorose. Le principali attenzioni riguardano la gestione delle deiezioni dei pazienti trattati, poiché nelle prime ore successive alla somministrazione la radioattività è più elevata. Sono state ad esempio introdotte linee guida per lo smaltimento corretto dei rifiuti radioattivi e per ridurre al minimo il loro impatto ambientale.

L'Associazione Italiana Medicina Nucleare, Imaging Molecolare e Terapia ha collaborato con l'Associazione Italiana dei Fisici Medici per sviluppare procedure di sicurezza ambientale. Queste includono istruzioni chiare per i pazienti su come comportarsi dopo il trattamento, per ridurre al minimo l'esposizione a chi li circonda.

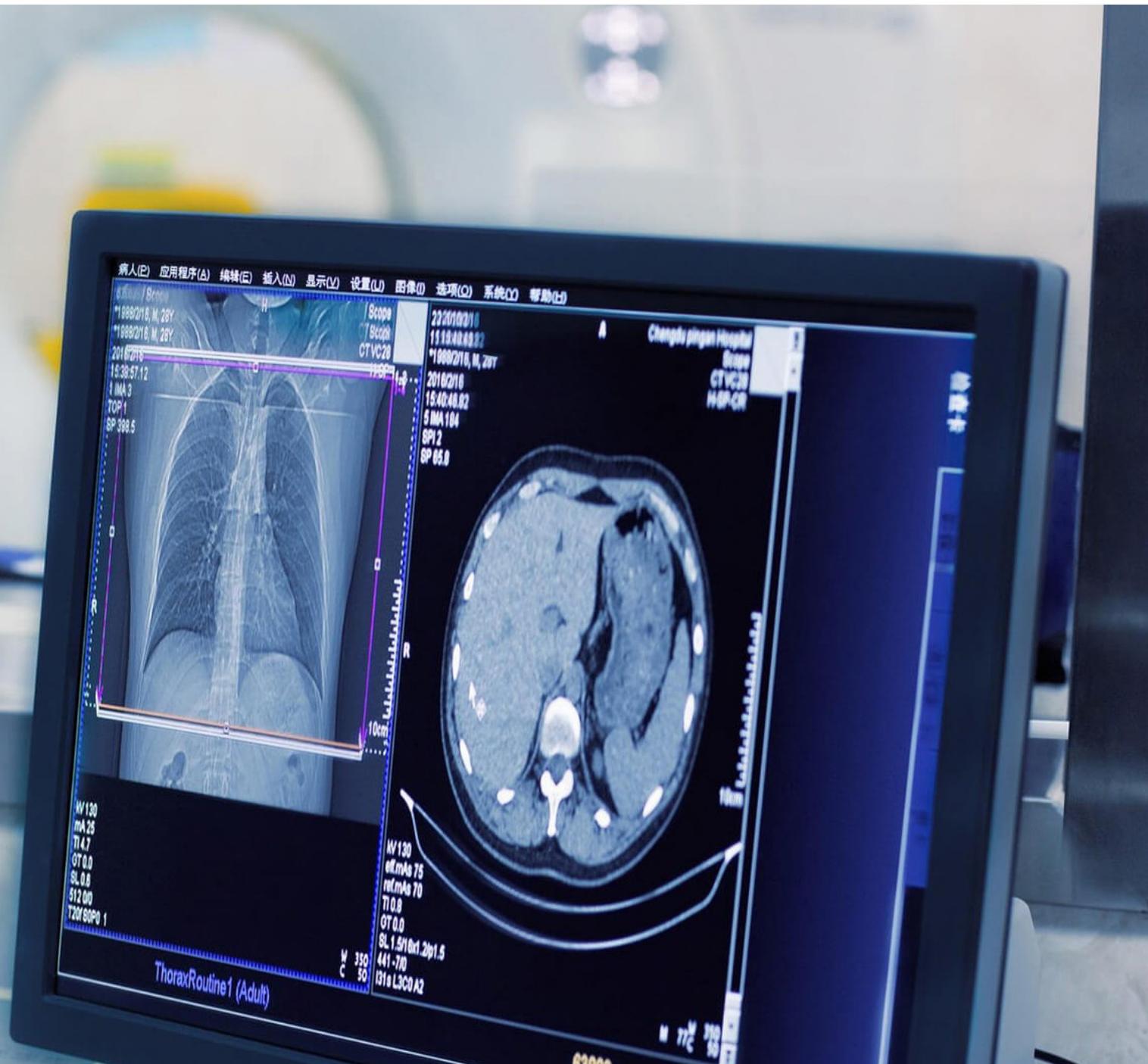
Quali sono le prospettive future della medicina nucleare?

Il futuro della medicina nucleare, come per ogni disciplina medica, è legato alla ricerca scientifica e all'innovazione tecnologica. Un'area di grande interesse è lo studio del microambiente tumorale, dove la terapia con radioligandi potrebbe rivoluzionare le terapie oncologiche, permettendo di colpire le cellule tumorali con precisione senza indurre danni ai tessuti sani.

Attualmente questi trattamenti sono disponibili solo per alcune patologie, come già indicato, ma l'obiettivo è estenderli ad altri tumori, cosiddetti "big killer" per incidenza e prognosi sfavorevole, con personalizzazione dei trattamenti per cure ancora più efficaci e adattabili alle esigenze di ogni paziente.

Anche nel trattamento dell'Alzheimer, la medicina nucleare ha un ruolo cruciale sia in termini diagnostici, sia per validare la risposta terapeutica ai nuovi farmaci attesi per la cura di questa patologia. La Food and Drug Administration (FDA) negli Stati Uniti ha infatti riconosciuto nella PET-amiloide lo strumento affidabile di monitoraggio di questa risposta terapeutica.





La fisica che spinge oltre i confini della Terra

intervista ad **Antonio Zoccoli**

L'Italia è tra i protagonisti della ricerca in fisica fondamentale grazie al lavoro dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), impegnato nello studio della materia, delle particelle elementari e dell'universo. L'INFN è al centro di importanti scoperte scientifiche, dalla rilevazione del bosone di Higgs alle onde gravitazionali, fino alle applicazioni in medicina e fusione nucleare. L'Istituto guida inoltre progetti innovativi con un impatto globale. In questa intervista, il Presidente Antonio Zoccoli approfondisce le sfide e le prospettive della ricerca scientifica nel nostro Paese.

Qual è il ruolo dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare e quali sono le principali sfide per il futuro?

L'INFN è un punto di riferimento mondiale nella fisica nucleare, delle particelle e delle astroparticelle. Le nostre ricerche spaziano dalla comprensione della struttura fondamentale della materia a quella del nostro universo. Tra le principali attività di ricerca dell'INFN vi sono lo studio delle onde gravitazionali, dei neutrini, della materia oscura e del bosone di Higgs. La scoperta di quest'ultimo, avvenuta nel 2012, grazie anche ai nostri scienziati e

Antonio Zoccoli, Presidente dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) dal luglio 2019, è professore di fisica all'Università degli Studi di Bologna, già membro della giunta esecutiva e del consiglio direttivo dell'INFN. Dal 2022 è presidente della Fondazione ICSC che gestisce il Centro Nazionale di ricerca High Performance Computing, Big Data e Quantum Computing. Svolge attività di ricerca sperimentale nel campo della fisica fondamentale, nucleare e subnucleare, ed è stato membro di diverse collaborazioni internazionali, al Rutherford Lab, nel Regno Unito, al CERN a Ginevra, in Svizzera, e al laboratorio DESY ad Amburgo, in Germania. Dal 2005 è membro della collaborazione ATLAS al CERN, che insieme alla collaborazione CMS ha annunciato la prima osservazione del bosone di Higgs, nel luglio 2012.

alle nostre scienziate che operano al CERN, ha portato alla conquista di un premio Nobel e ha rappresentato un passo fondamentale per comprendere l'origine della massa delle particelle elementari. Un elemento centrale della nostra attività è l'utilizzo di tecnologie e infrastrutture all'avanguardia, come gli acceleratori e i rivelatori, strumenti che permettono di studiare le particelle fondamentali osservando i prodotti di collisioni ad altissima energia. Partecipiamo, per esempio, attivamente agli esperimenti condotti al Large Hadron Collider (LHC) del CERN di Ginevra, il più grande acceleratore di particelle al mondo.

Un altro ambito in cui siete molto attivi è la ricerca in fisica astroparticellare. Quali progressi si stanno facendo in questo campo?

Gli esseri umani hanno da sempre cercato di osservare e studiare l'universo circostante. Grazie alla ricerca e al progresso tecnologico, abbiamo ampliato le nostre capacità osservative, inizialmente limitate alla luce visibile, includendo le altre lunghezze d'onda della radiazione elettromagnetica, dai raggi X, agli ultravioletti, ai gamma. Alla radiazione elettromagnetica, si sono poi aggiunti altri messaggeri provenienti dallo spazio: i raggi cosmici, i neutrini, fino alle onde gravitazionali, rivelate per la prima volta dalle collaborazioni scientifiche degli interferometri LIGO e Virgo, nel

2015. Anche di questa scoperta, che ha aperto una nuova finestra osservativa sul nostro universo ed è stata premiata con il Nobel nel 2017, l'INFN è stato tra i protagonisti. Le onde gravitazionali, che sono, appunto, un altro campo di ricerca di punta dell'INFN, sono increspature dello spaziotempo generate da eventi cosmici estremi, come la fusione di buchi neri o l'esplosione di supernovae, e ci forniscono informazioni complementari rispetto alla radiazione elettromagnetica, permettendoci di comprendere meglio l'evoluzione dell'universo. Un ulteriore settore chiave è lo studio dei neutrini – particelle subatomiche, prive di carica elettrica, che ci aiutano a comprendere i processi di fusione nucleare nelle stelle, come il nostro Sole – che l'INFN conduce in larga parte nei suoi Laboratori sotterranei del Gran Sasso, centro di riferimento mondiale per queste ricerche e per le ricerche sulla materia oscura.

Cosa ritiene sia essenziale per il progresso della ricerca in fisica fondamentale?

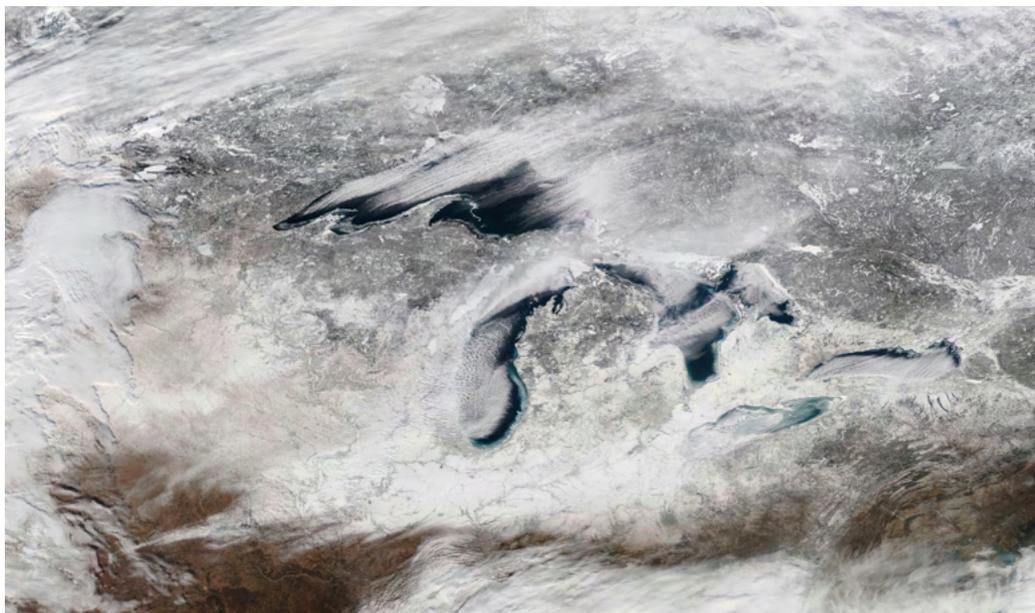
Sono tre gli elementi essenziali: personale qualificato, supportato da adeguati investimenti e risorse per la ricerca, infrastrutture all'avanguardia e tecnologie avanzate. Il nostro Istituto opera in grandi infrastrutture di ricerca come il CERN, i Laboratori Nazionali del Gran Sasso e l'osservatorio sottomarino per neutrini KM3NeT al largo di Capo Passero, in

Sicilia. Stiamo anche lavorando, in particolare con il Ministero dell'Università e della Ricerca, affinché si realizzi in Italia il progetto *Einstein Telescope*, un futuro rivelatore di onde gravitazionali che vorremmo costruire in Sardegna e che sarà in grado di osservare un volume di universo almeno mille volte maggiore rispetto ai rivelatori attuali.

Negli ultimi anni si è parlato della fusione nucleare come possibile soluzione energetica pulita e illimitata, e della stessa fissione. Qual è il contributo dell'INFN a questi progetti?

L'INFN, collaborando con enti nazionali come l'ENEA e partner internazionali, partecipa a progetti sulla fusione, dove uno dei problemi principali riguarda la resistenza dei materiali alle alte temperature e all'azione dei neutroni veloci, che bombardano le pareti del reattore, alterandone le proprietà e degradando le strutture con il passare del tempo. La nostra ricerca è volta a comprendere come migliorare le prestazioni dei materiali, studiando soluzioni avanzate per ovviare a questo problema. Inoltre, contribuiamo allo sviluppo di tecniche diagnostiche avanzate per monitorare il plasma nei reattori sperimentali.

Nel campo della fissione, l'INFN guarda con attenzione allo studio di reattori di quarta generazione a neutroni veloci, che offrono maggiore sicurezza ed efficienza, riducendo le scorie radioattive e migliorando il ciclo del



combustibile. In Italia, dove un referendum aveva portato alla chiusura delle centrali nucleari, si è recentemente riaperto il confronto sul tema e vi sono aziende come ENI ed ENEL e istituti accademici che possono contribuire al dibattito perché partecipano a studi e ricerche nel campo.

Un altro settore di grande rilievo è la medicina nucleare. Qual è il ruolo dell'INFN in questo ambito?

L'INFN gioca un ruolo fondamentale nella medicina nucleare, lavorando in due ambiti principali: la radioterapia e i radiofarmaci. La radioterapia impiega acceleratori di particelle per colpire con precisione i tumori, specialmente in zone delicate. L'INFN ha collaborato alla realizzazione di acceleratori di particelle come quello del CNAO, il Centro Nazionale di



Adroterapia Oncologica di Pavia, uno dei soli sei centri al mondo che utilizza sia protoni sia ioni carbonio per i trattamenti oncologici, e collabora con il centro di radioterapia di Trento, sviluppando anche rivelatori per migliorare la precisione dei fasci, oltre a ospitare nei suoi Laboratori Nazionali del Sud il progetto CATANA per il trattamento del melanoma oculare.

Per quanto riguarda il settore dei radiofarmaci, invece, dove si utilizzano isotopi radioattivi, sia per il trattamento, sia per la diagnostica – come nella PET, che individua le cellule tumorali tramite il metabolismo del glucosio – l'INFN sta facendo ricerca anche in ambiti emergenti come la teragnostica e la Boron Neutron Capture Therapy (BNCT), tecniche che integrano diagnosi e terapia. Queste attività, pur non essendo il core tradizionale dell'Istituto, contribuiscono alla ricerca oncologica e alle terapie personalizzate.

La fisica delle particelle è un campo affascinante ma è spesso percepito come distante dalla vita quotidiana. Come avvicinare il grande pubblico a questi temi?

Viviamo in un'epoca tecnologicamente avanzata, ma la diffidenza verso la scienza è ancora diffusa. È necessario combattere la disinformazione, che ancora oggi avvolge la ricerca e le nuove tecnologie, e favorire una migliore comprensione scientifica. È fondamentale far comprendere alle nuove generazioni l'im-

portanza della ricerca e dell'innovazione, poiché il futuro dipenderà da chi saprà padroneggiare le tecnologie emergenti, come l'intelligenza artificiale e le tecnologie quantistiche.

L'INFN investe molto nella formazione di giovani ricercatori e ricercatrici. Come si può contrastare la fuga di cervelli?

Il nostro sistema formativo è di altissimo livello e promuove la crescita di scienziate e scienziati competitivi a livello internazionale. Il fatto che molti giovani lascino il Paese testimonia la qualità della formazione dei nostri atenei. Ma al contempo dobbiamo essere anche noi attrattivi, per i nostri cervelli e per quelli internazionali. Per farlo, dal momento che dobbiamo compensare il fatto che i nostri salari sono inferiori rispetto ai salari medi offerti dalle istituzioni estere, dobbiamo investire maggiormente nelle infrastrutture di ricerca per offrire laboratori all'avanguardia e un ambiente professionale che sia competitivo. Gli investimenti dei fondi del PNRR del Ministero dell'Università e della Ricerca per il potenziamento delle infrastrutture di ricerca vanno proprio in questa direzione. Un ulteriore aspetto fondamentale, poi, è il supporto alla vita familiare, come avviene in altri Paesi, per rendere più agevole la scelta di restare o venire in Italia. Solo così potremo garantire un futuro solido alla ricerca scientifica nel nostro Paese.

La fisica delle particelle e l'origine dell'universo

di **Laura Luigia Martini**

Se la fisica delle particelle ci aiuta a comprendere la struttura fondamentale della materia, rappresenta anche la chiave per svelare alcuni dei più grandi misteri dell'universo primordiale. Dallo studio dei componenti infinitesimali della realtà, emerge infatti una narrazione che attraversa i confini dello spazio e del tempo, connettendo ciò che accade nei laboratori agli eventi che hanno dato origine al cosmo. In questo approfondimento di Laura Luigia Martini ci accompagna nel cuore pulsante del Modello Standard, tra bosoni e fermioni, illustrando le scoperte che hanno rivoluzionato la nostra visione della fisica contemporanea.

Governata dai principi della meccanica quantistica, la fisica delle particelle è quella branca della fisica che si applica ai costituenti microscopici nonché alle interazioni fondamentali della materia e della radiazione, sia da un punto di vista teorico che sperimentale. Tale disciplina è altresì nota come “fisica delle alte energie”, con riferimento agli studi delle particelle non presenti in natura bensì create in appositi acceleratori. In questo mondo dell'infinitamente piccolo, per il dualismo onda-particella, le particelle elementari possono manifestare un comportamento



ondulatorio o corpuscolare a seconda di come vengono osservate, mentre dal punto di vista squisitamente matematico esse sono semplicemente descritte come funzioni d'onda, ossia vettori di stato nello spazio di Hilbert. Le particelle si dividono inoltre in due famiglie: i fermioni e i bosoni. I fermioni sono particelle di materia, tutti riconducibili a quark e leptoni, hanno spin semintero poiché soggetti alla statistica di Fermi-Dirac, secondo il teorema spin-statistica, e seguono il principio di esclusione di Pauli per cui due fermioni identici non possono contemporaneamente occupare lo stesso stato quantico. La seconda famiglia è costituita dai bosoni, che si distinguono in mesoni, particelle instabili composte da un quark e un antiquark, e da bosoni di gauge, appartenenti al gruppo dei bosoni vettori, particelle mediatrici delle forze fondamentali della natura. I bosoni hanno spin intero poiché soggetti alla statistica di Bose-Einstein, secondo il teorema spin-statistica, e non obbediscono al principio di esclusione di Pauli, ovvero più bosoni possono occupare lo stesso stato quantico. In virtù della proprietà dei bosoni di gauge di mediare tra le diverse forze fondamentali, è possibile identificare il fotone come bosone per l'interazione elettromagnetica, i due bosoni carichi cosiddetti W e Z per l'interazione debole e i gluoni per l'interazione forte. Quanto alla descrizione della fisica delle particelle, essa è contenuta

nella teoria quantistica dei campi, (teoria che unifica meccanica quantistica, teoria dei campi classica e relatività ristretta), altrimenti detta Modello Standard. Il Modello è certamente una delle maggiori conquiste della fisica teorica moderna: oltre a classificare ogni particella elementare di cui si ha contezza, esso descrive tutte le interazioni fondamentali note ad eccezione dell'interazione gravitazionale. Mi riferisco all'interazione elettromagnetica, ovvero all'interazione tra oggetti dotati di carica elettrica e responsabile del campo elettromagnetico che ha natura ondulatoria e che si propaga nello spazio alla velocità della luce, all'interazione nucleare debole, che governa le forze che intervengono nei decadimenti nucleari e ha un raggio d'azione finito comparabile alle scale delle lunghezze subatomiche, e all'interazione nucleare forte, descritta dalla teoria della Cromodinamica Quantistica (QCD), la forza più intensa conosciuta, dotata di una proprietà definita "carica di colore" che tiene uniti i quark, i costituenti fondamentali della materia.

Il Modello Standard include 24 particelle costituenti la materia e prevede anche l'esistenza di un bosone scalare conosciuto come Bosone di Higgs, di cui argomenterò a seguire. Certamente tra gli studiosi di una così importante ma complessa teoria, non mancano i detrattori, per cui

Laura Luigia Martini è un ingegnere nucleare laureato al Politecnico di Milano, con un Executive MBA e un master in ESG presso SDA Bocconi. Ha oltre 25 anni di esperienza nei settori industriali e dei servizi, specializzandosi in strategia di mercato e sviluppo del business per aziende pubbliche ad alta tecnologia. Esperta di gestione dati, telecomunicazioni e automotive, è una leader multiculturale con ruoli dirigenziali globali. Collabora con SDA Bocconi come Senior Executive Fellow in strategia aziendale ed ESG. Scrive per «Rinnovabili.it», Fondazione Marisa Bellisario, «Il Nuovo Giornale Nazionale» e Tota Pulchra in Vaticano.

si evidenzia da più parti come il Modello Standard sia intrinsecamente carente, non ci consenta di unificare l'interazione nucleare forte con quella elettrodebole, non tenga conto dell'espansione accelerata dell'universo, non sia inclusivo della teoria della gravità, forza che del resto non è compatibile con la meccanica quantistica nella trattazione della relatività generale. E ancora: il modello non spiega l'asimmetria barionica, ovvero la quasi totale assenza di antimateria nell'universo, non fa luce sull'oscillazione dei neutrini e quindi sulla loro massa, non prevede alcuna plausibile particella di materia oscura.

Insomma, il Modello Standard non è una Teoria del Tutto, molto ci sarà ancora da scoprire, e tuttavia esso costituisce la migliore approssimazione esistente oggi della realtà così come dimostrata dalle evidenze sperimentali e il suo campo di applicazione va dalla materia ordinaria, alle stelle, agli atomi, ai nuclei e ai loro componenti... inclusi noi!

E dal momento che la densità delle energie presenti, per esempio, negli acceleratori di particelle è del tutto paragonabile a quella dell'universo primordiale, molte delle questioni che la fisica delle particelle pone ci portano proprio a comprendere meglio l'universo, le sue origini e forse anche ad intuirne il destino. Sembra un paradosso, eppure la fisica dell'infinitamente piccolo è strettamente correlata alla fisica dell'infinitamente grande, ovvero alla cosmologia. A cominciare dal campo di Higgs, ed ecco come.

Peter Higgs, Professore emerito dell'Università di Edimburgo, noto per i suoi studi sulle particelle subatomiche, ottenne nel 2013 il Premio Nobel per la scoperta del bosone che da lui prende il nome. L'ipotesi dell'esistenza di tale bosone risale al 1964, in seno alla teoria secondo la quale, immediatamente dopo il Big Bang, si sarebbe creato un campo scalare complesso con la funzione di conferire massa diversa alle diverse particelle elementari.

E così, come in meccanica quantistica il fotone è associato al campo elettromagnetico, il bosone di Higgs è la particella associata al campo scalare complesso di Higgs, è un bosone dalla vita molto breve (dell'ordine del milionesimo di millesimo di secondo), essendo scalare ha spin zero ed è quella particella dotata di massa che prova l'esistenza del campo di Higgs. Si tratta sostanzialmente di una parte fondamentale del Modello Standard e, dopo 50 lunghi anni, è stato scoperto il 4 luglio 2012, grazie al Large Hadron Collider (LHC), il grande acceleratore di particelle installato presso il CERN di Ginevra, centro di eccellenza mondiale proprio nello studio della fisica delle particelle.

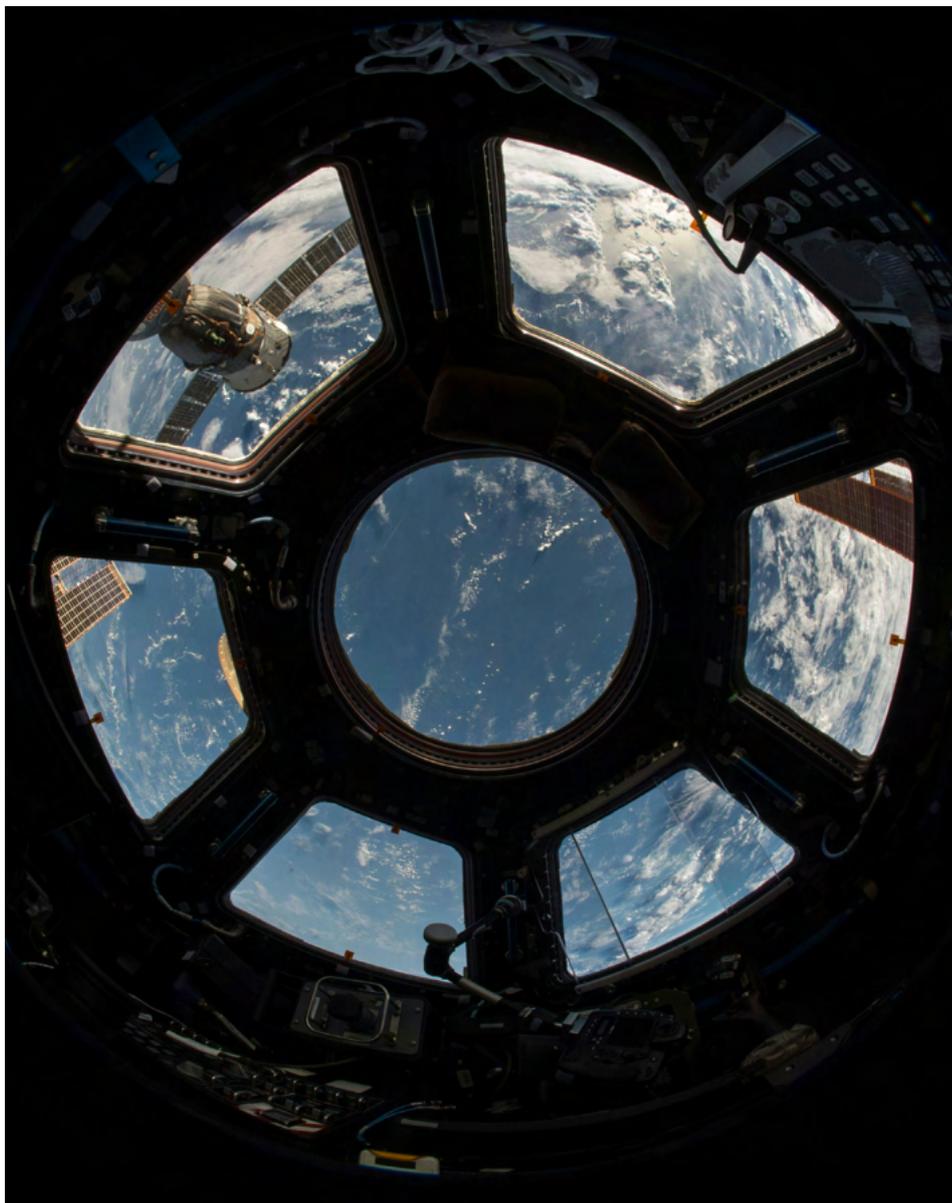
Durante l'esperimento sono stati fatti collidere protoni che viaggiavano a velocità prossima a quella della luce, l'uno in verso opposto all'al-

tro, dentro un tubo vuoto di 27 km di diametro. In quelle condizioni la massa di un protone, che a riposo è di 1 Gev, diviene di 6.500 Gev, un numero gigantesco. Nell'urto devastante i protoni si rompono, liberando i rispettivi quark che a loro volta collidono. Secondo la formula della relatività di Einstein $E=mc^2$, l'energia liberata durante l'urto si può trasformare in massa inerziale e grande energia equivale a particelle di grande massa. Per questo motivo la fantomatica particella di Higgs non si trovava: la massa ad essa associata (~125 Gev) era talmente grande che solo la grande energia sprigionata dall'LHC poteva intercettarla.

La scoperta del bosone di Higgs ci dimostra che la materia non ha di per sé una massa. La massa è invece una proprietà acquisita dalle particelle elementari quando si è formato il campo di Higgs, cioè immediatamente dopo il Big Bang. Le particelle elementari, gli elettroni, i quark, ecc. sono prive di massa, ma interagendo con il campo di Higgs che pervade tutto l'universo, acquisiscono masse diverse a seconda della loro maggiore o minore interazione con il campo.

Per questo Leon Lederman, fisico vincitore del Premio Nobel, nel 1993 scrisse un libro dal titolo popolare *La particella di Dio: se l'Universo è la risposta, qual è la domanda?*.

Il libro fornisce una breve storia della fisica delle particelle, a partire dal filosofo greco presocratico Demo-



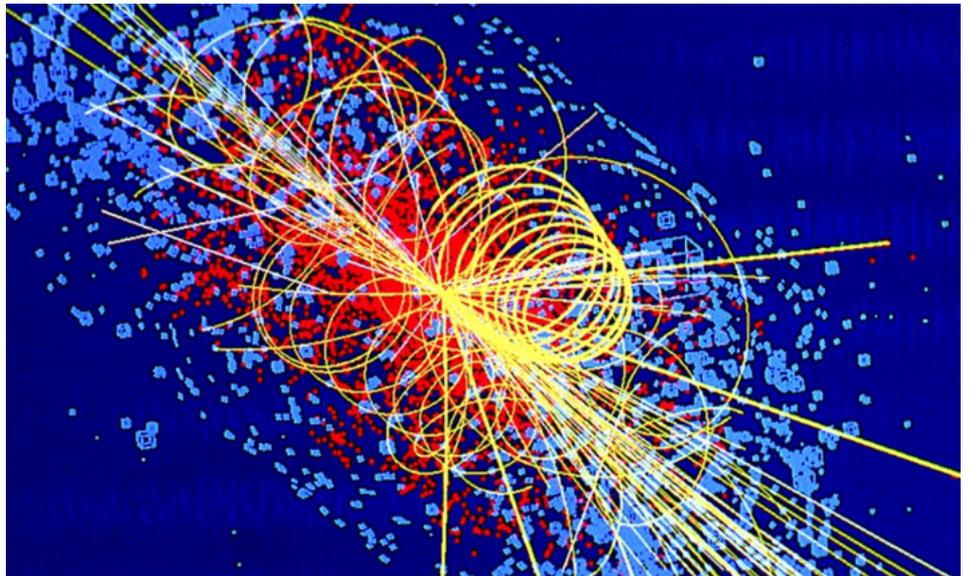
crito, proseguendo attraverso Isaac Newton, Michael Faraday, Ernest Rutherford fino alla fisica quantistica nel XX secolo. Riguardo il bosone di Higgs, allora solo teorizzato, Le-

derman disse: «è così centrale per lo stato della fisica odierna, così cruciale per la nostra comprensione finale della struttura della materia, eppure così sfuggente, che gli ho dato un soprannome: la Particella di Dio».

Ma cosa ha a che fare tutto questo con la produzione di energia, sempre più importante oggi per assicurare a tutti noi un futuro sostenibile e geopoliticamente autosufficiente in un clima di instabilità globale? Premesso che gli elettroni sono fermioni, ma che unità subatomiche composte da più particelle elementari (come protoni e neutroni) e gli stessi nuclei atomici possono comportarsi come bosoni o fermioni in funzione del loro spin totale, la fisica delle particelle fornisce gli strumenti teorici e sperimentali per comprendere le interazioni che sono alla base

delle reazioni nucleari generatrici di energia, migliorando altresì la sicurezza e l'efficienza di tali reazioni. Quanto al bosone di Higgs, esso non è direttamente coinvolto nei processi di produzione energetica, ma conferisce massa alle particelle elementari, per cui la comprensione delle proprietà del campo di Higgs influenza direttamente le forze che governano le reazioni all'interno del nucleo atomico.

Insomma, siamo davanti alla chiave di volta della ricerca scientifica nucleare e subnucleare, all'anello di congiunzione tra particelle elementari e infinito, alle basi per la produzione più sicura di energia da fonte nucleare, a quel sapere che ci apre le porte dell'origine dell'Universo e oltre. Se non lo è, somiglia molto al Sacro Graal!



Geopolitica e sicurezza



La liberazione del mondo

H.G. Wells

“Se possedessimo questa conoscenza,” disse, “pensate a ciò che potremmo realizzare! Non solo saremmo in grado di sfruttare l’uranio e il torio; non solo avremmo una fonte di energia così potente che un uomo potrebbe tenere nel palmo della mano la forza necessaria per illuminare un’intera città per un anno, affrontare una flotta da guerra o spingere uno dei nostri grandi transatlantici attraverso l’Atlantico; ma avremmo anche una chiave capace, finalmente, di accelerare il processo di disintegrazione in tutti gli altri elementi, dove il decadimento è ancora così lento da sfuggire alle nostre più fini misurazioni. Ogni singolo frammento di materia solida nel mondo diventerebbe un serbatoio disponibile di forza concentrata. Vi rendete conto, signore e signori, di cosa significherebbe tutto questo per noi?”

Il capo annuì. “Oh! Continua, continua.”

“Significherebbe un mutamento nelle condizioni umane che posso paragonare solo alla scoperta del fuoco, quella prima rivelazione che sollevò l’uomo al di sopra della bestia.”

L'era del nucleare o della geopolitica del nucleare?

di **Francesco Sassi**

Mai, negli ultimi quattro decenni, si è sentito così tanto parlare di energia nucleare come negli ultimi tre anni. La crisi energetica, iniziata con le ripercussioni della pandemia da Covid-19, divenuto strumento di ambizioni geopolitiche in Ucraina, nel Medio Oriente, e ora anche al di là dell'Atlantico, pone quesiti di natura strutturale al nostro Paese e all'intera Unione Europea.

Possiamo fare a meno, in Europa, dell'energia nucleare? I nuovi reattori costruiti sul suolo nazionale ed europeo saranno in grado di proteggerci dalla volatilità ormai cronica dei

prezzi? Riusciranno i giganti dell'energia del nostro Paese nel realizzare queste infrastrutture, assicurare minori costi energetici ad imprese e settori produttivi, riducendo anche i costi delle bollette dei cittadini? Infine, sarà il nucleare l'energia che consentirà all'Italia di raggiungere i suoi obiettivi di neutralità carbonica?

Sulla risposta a queste domande si gioca una parte consistente del futuro energetico, produttivo, climatico e geopolitico dell'Italia e dell'Europa. Mentre raccolgo queste considerazioni, a Roma il governo si appre-

sta a portare in Parlamento un piano per approvare un definitivo ritorno all'energia nucleare in Italia. Quando potrebbe essere messo in funzione il primo reattore? Non prima del 2030 dicono i più speranzosi, mentre appare decisamente più fattibile, e già sufficientemente sfidante, un obiettivo al 2035.

Il governo è intenzionato a mettere in pratica un piano d'azione di lungo corso. Le cordate economiche, industriali ed energetiche che vorrebbero intestarsi la (rin)corsa al nucleare italiano non mancano. Cosa potrebbe intralciare questo percorso in discesa? Una variabile ormai divenuta necessaria per interpretare qualsivoglia ambizione degli Stati, così come delle grandi e medie potenze: la geopolitica dell'energia. L'Agenzia Internazionale dell'Energia (AIE), organismo internazionale deputato alla sicurezza energetica dell'Occidente, afferma in un recente report che «il mercato, la tecnologia e le fondamenta politiche sono al loro posto per una nuova era di crescita dell'energia nucleare nei prossimi decenni».¹ La domanda di elettricità cresce a ritmi costanti, spinta da veicoli elettrici, data center e intelligenza artificiale. Per rispondere a questa richiesta, la generazione da nucleare raggiungerà nuove vette nel corso del 2025, grazie ad una flotta mondiale che conta poco meno di 420 reattori. Sempre secondo gli scenari AIE, non è possibile pensare ad una

transizione energetica senza l'utilizzo di energia nucleare per stabilizzare sistemi energetici che, in futuro, saranno sempre più dipendenti da fonti intermittenti.

Eppure, il revival mondiale del nucleare è tutt'altro che globale. Nell'epoca della frammentazione delle *supply chain*, del *decoupling* dalle dipendenze di materie prime, manifattura e tecnologie, e infine della messa in dubbio delle alleanze che hanno sorretto l'intero architrave delle relazioni internazionali, anche questa rinascita del nucleare è de-globalizzata. Dei 52 reattori la cui costruzione è iniziata dopo il 2017, 25 sono di fabbricazione cinese. Altri 23 adottano invece modelli e design russi. I due imperi di cui i policymaker europei sono maggiormente preoccupati sullo scacchiere internazionale sono i fautori di oltre il 90% dei reattori costruiti negli ultimi anni. Nei fatti, “revival del nucleare” è una locuzione in mandarino e scritta in cirillico.

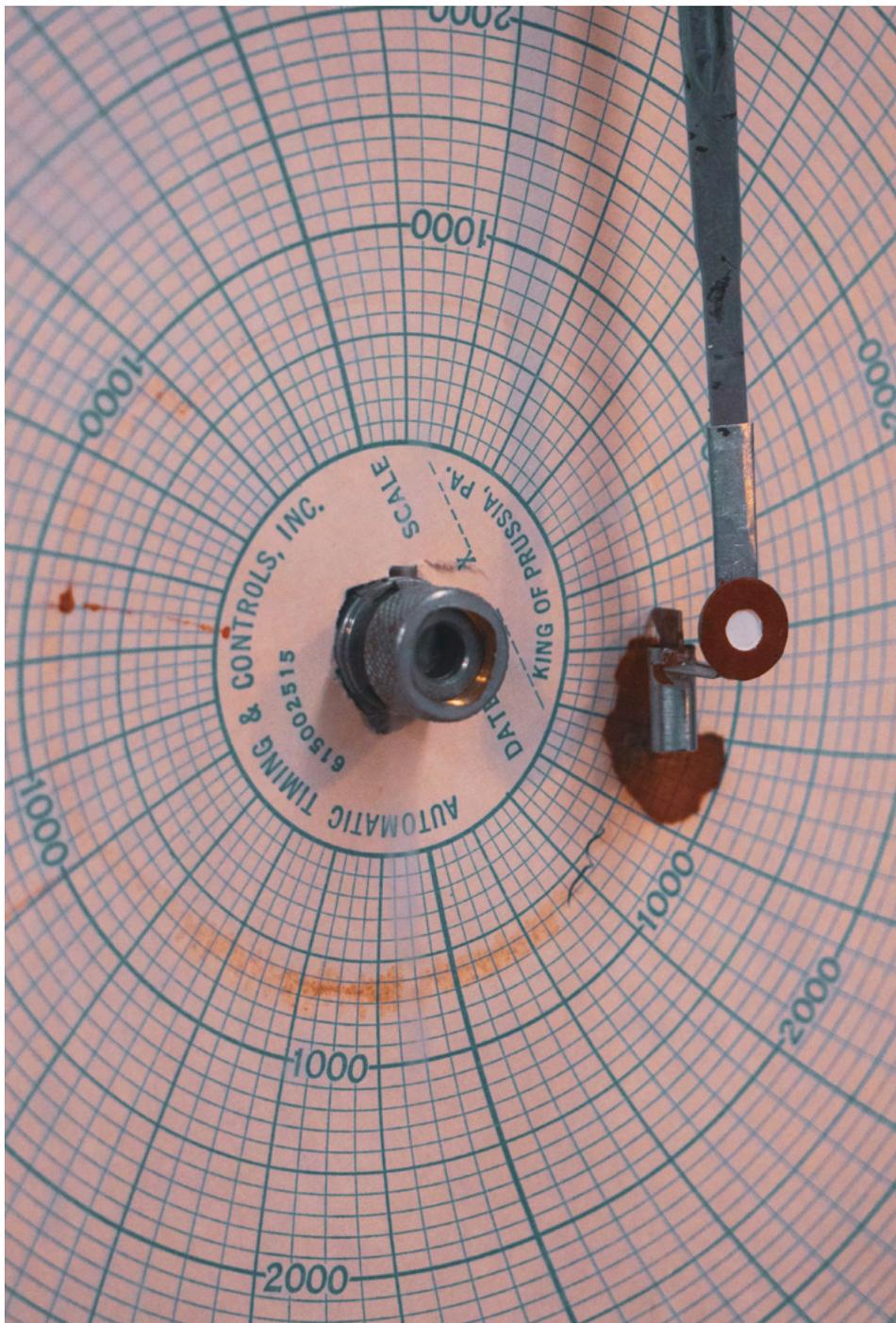
Al resto dell'Occidente, UE inclusa, e dell'Asia rimangono soltanto le briciole di un mercato mondiale che fatica a decollare, nonostante le promesse di triplicare la generazione da nucleare durante le ultime Conferenze delle parti sui cambiamenti climatici. Se Pechino e Mosca hanno dimostrato di pensare a un ritorno dell'atomo come a una moda tutt'altro che passeggera, Stati Uniti, Fran-

¹ International Energy Agency, *The Path to a New Era for Nuclear Energy*, IEA, 2025.

cia e Corea del Sud arrancano sul mercato internazionale, dove tanto valgono il *know-how* tecnologico, le capacità economiche, ma soprattutto quelle diplomatiche.

Nella geopolitica del nucleare, infatti, valgono tanto gli assi strategici e le visioni di lungo corso quanto la capacità di tener testa agli impegni finanziari e lo sviluppo di nuove tecnologie, come i tanto discussi piccoli reattori nucleari che appaiono in scala alle ambizioni europee del settore. Privati di sostegno politico ed economico in Europa, i Paesi UE che guardano al nucleare come fonte di energia presente e futura sono costretti a fare da soli. La Francia è il candidato prediletto per un Rinascimento del nucleare in Europa. L'Eliseo vorrebbe nuovi sei reattori nella sua flotta già entro la metà del prossimo decennio. Eppure, la Corte dei conti francese dice che le finanze della più grande azienda del nucleare europeo, EDF, non sono in grado di sostenere uno sforzo pari a 67 miliardi di euro: oltre 10 per un singolo reattore sul territorio di un Paese che già oggi ne ospita più di 55. Flamanville EPR, l'ultimo entrato in funzione, si stima sia costato 23,7 miliardi di euro all'azienda di proprietà statale.

La Corte dei conti di Parigi non si ferma qui. A dimostrazione di come la geopolitica dell'energia si intreci magistralmente con le dinamiche di crescente protezionismo a livello



Francesco Sassi è ricercatore in geopolitica dell'energia e sicurezza energetica. Dopo un dottorato di ricerca in Geopolitica-Scienze politiche all'Università di Pisa, oggi è ricercatore per la società di consulenza e centro di ricerca RIE. Si occupa di analizzare le politiche e le strategie in campo di sicurezza energetica e la diplomazia energetica dei principali attori globali.

Ha pubblicato ricerche e studi per diverse riviste italiane e straniere, collabora al Focus su Sicurezza Energetica dell'Osservatorio di politica internazionale del Parlamento italiano.



globale, e con le tensioni che serpeggiano anche tra gli stessi europei, avvisa che o EDF ridurrà i propri investimenti all'estero, dando priorità quindi alla sicurezza e transizione francese, o la strategia nucleare di Macron rischia di fallire.

Alla lettura del rapporto e alla visione del caos politico che aleggia a Parigi, dove l'esecutivo imbastito da Macron non riesce a trascinare il Pa-

ese fuori dalla crisi economica, il governo Laburista inglese, Paese dove EDF sta realizzando uno dei suoi reattori fuori dal territorio nazionale, sta pianificando una svolta a U epocale. Una delegazione britannica, guidata dal Ministro dell'energia, Ed Miliband, dovrebbe visitare Pechino nel mese di marzo per riavviare una collaborazione energetica tra Regno Unito e Cina.

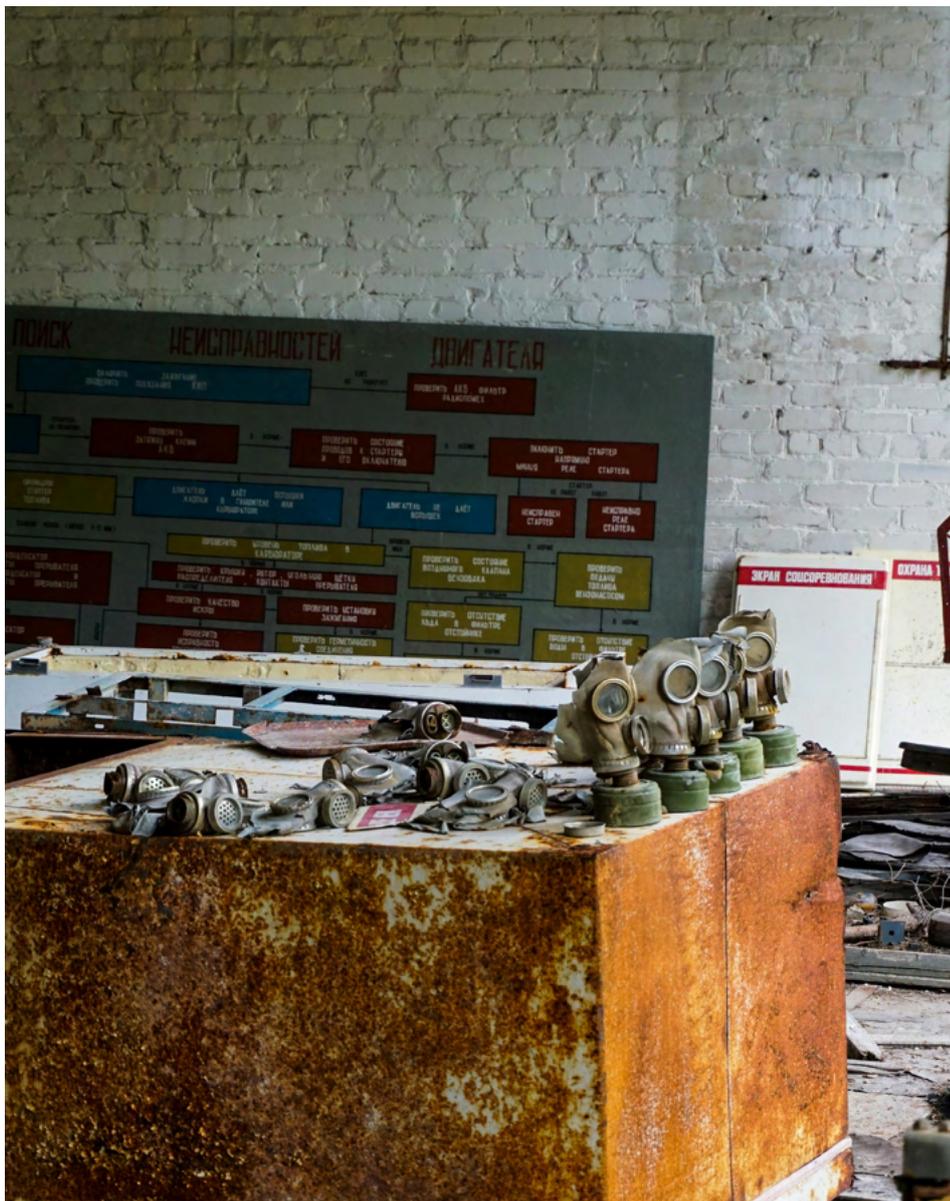
Se la Russia attacca le centrali ucraine

di **Gregory Alegi**

Energia a basso costo o arma potentissima? Garanzia di forniture stabili o di pericolo continuo? Entrambe le cose, perché se c'è qualcosa di intrinsecamente duale è l'energia atomica. Con qualche approssimazione, il dibattito sulle centrali nucleari è da sempre interamente compreso in questo perimetro. Un binomio tornato alla ribalta con l'invasione russa dell'Ucraina: da un lato con le centrali atomiche che forniscono il 55% dell'elettricità del paese, dall'altro con le recriminazioni per la restituzione di oltre 1.700 testate e vettori alla Russia dal 1994. Nell'odierno

clima di guerra tiepida, ad alimentare le paure atomiche non sono più gli errori umani (come a Three Mile Island nel 1979 e a Chernobyl nel 1986) o gli eventi naturali (come lo tsunami di Fukushima nel 2011), ma una precisa volontà politico-militare. Dalla fuga di radioattività alla distruzione delle strutture, c'è dunque un inatteso rovesciamento della prospettiva che fa rimpiangere la tranquillità fornita dalle atomiche e temere che gli indiscriminati attacchi missilistici russi trasformino in obiettivi le centrali ucraine, ormai in prima linea.

Gregory Alegi studia difesa, strategia, politica USA e storia militare. Insegna Storia e politica degli Stati Uniti alla LUISS e Studi strategici presso l'UNINT. Nel 2024 ha curato *Uscire dal labirinto. Ustica dalla A alla Z* (LoGisma, 2024) e la voce "Aeronautiche e aerospaziali, tecnologie" dell'Enciclopedia Treccani. Tra i suoi saggi più recenti, "Le ragioni della non partecipazione: la fine dei partiti e l'«impasse» della politica", (2024), "Un'Unione più completa: l'esperienza USA come modello per l'UE e il timore di un Atlantico più largo" (2023), "Il sistema politico degli Stati Uniti (1787-2021)" (2022). Scrive sul «Il Sole 24 Ore», «AirPress» e «Startmag».



Che il rilascio graduale di energia a fini pacifici sia l'altra faccia di quello istantaneo è indicato dalla scelta degli Stati Uniti – il paese che per primo trovò le applicazioni pratiche dell'energia sprigionata da uranio e plutonio – di concentrare i programmi atomici civili e militari in un'unica agenzia, prima la Atomic Energy Commission (1946-74) e poi

il Department of Energy (dal 1977). In questo strano mosaico, al DOE fa capo la National Nuclear Security Administration, l'ente al quale la furia antistatalista di Elon Musk ha tagliato oltre 300 dipendenti prima di scoprirne la responsabilità nella gestione delle scorie radioattive, nella costruzione dei reattori dei sommergibili atomici e persino del contrasto al terrorismo e alla proliferazione atomica. Alle competenze del DOE manca solo la protezione delle centrali atomiche in senso militare, affidata appunto alle forze armate, anche perché negli Stati Uniti l'attacco terroristico per via di superficie è abbastanza improbabile.

Il conflitto in Ucraina ha però sdoganato uno scenario del tutto diverso, nel quale le centrali atomiche sono state in qualche modo parificate a infrastrutture critiche di tipo "normale", e dunque obiettivo di attacchi da parte delle forze armate russe. Lo scopo è duplice: privare l'avversario dell'energia elettrica, con effetti a caduta sull'intera vita nazionale, ma anche trasformarle in una specie di "bombe-non bombe" o di armi atomiche "passive".

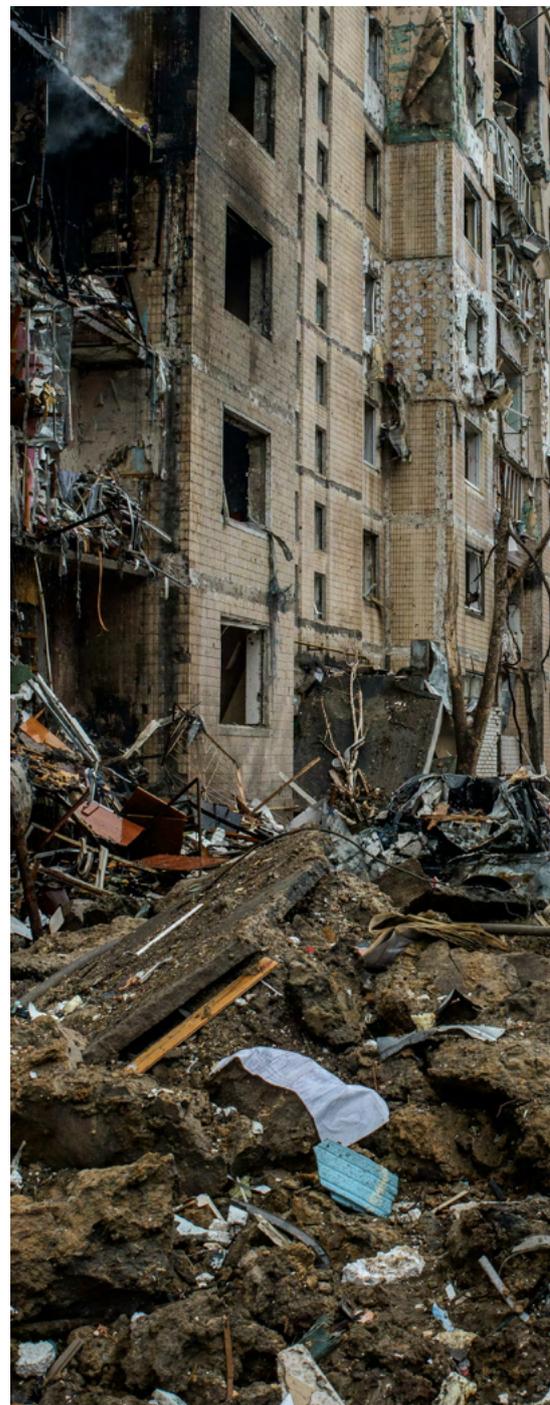
Sotto il profilo strategico, è un salto di qualità considerevole: persino negli anni più bui della guerra fredda, le centrali nucleari non erano considerate obiettivi da colpire. Questo valeva sia in Occidente sia, per quanto noto, in URSS, dove l'approccio circa l'impiego dell'armamento nucleare

era molto più possibilista.

La protezione fisica dagli attacchi da parte di attori statuali nel corso di operazioni militari tradizionali su larga scala impone considerazioni di sicurezza del tutto inedite rispetto alle minacce di tipo terroristico, innanzitutto per la distanza dalla quale è possibile colpire. I terroristi sono infatti una minaccia "prossima", che richiede l'ingresso nella struttura o tutt'al più il lancio di razzi di piccole dimensioni.

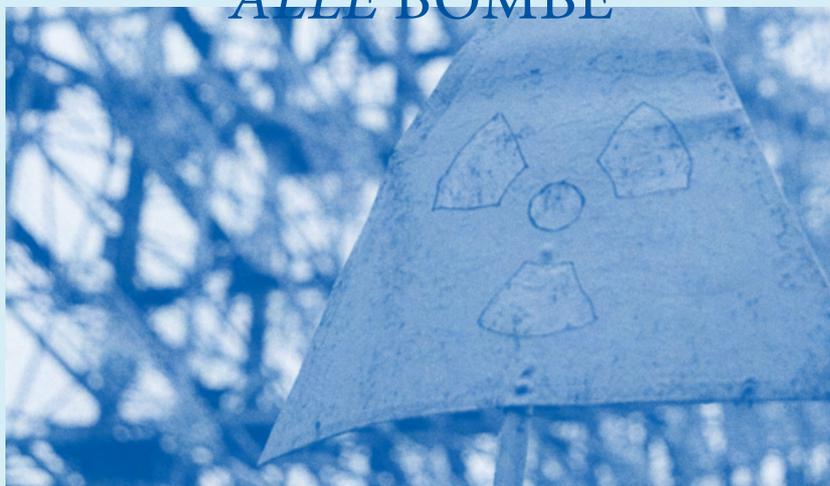
Le forze armate regolari e gli attori statuali in genere possono invece agire da grande distanza, come indicano gli attacchi missilistici di Iran e Houthi contro Israele. Allo stesso modo, il contrasto dei primi può avvenire con intelligence e forze di sicurezza, mentre fermare i missili balistici richiede sofisticate reti di sensori spaziali e missili superficie-aria. Sdoganare gli attacchi alle centrali (anziché alle reti elettriche) impone dunque di immaginare una protezione sistemica, una sorta di "Iron dome", in grado cioè di creare una "calotta" all'interno della quale sono protette anche le centrali nucleari.

Ci si potrebbe chiedere se la possibilità di attacchi *cyber* – si pensi all'uso di Stuxnet contro il programma atomico iraniano nel 2006 – non renda superflui quelli convenzionali. La guerra in Ucraina e la tensione con l'Iran rendono la domanda più che mai attuale.





DALLE CENTRALI ALLE BOMBE



I Paesi più esposti al rischio di attacchi contro le centrali nucleari sono quelli che hanno più centrali. Ma perché le hanno? La diffusione delle centrali corrisponde quasi sempre a un disegno strategico, legato allo sviluppo di un deterrente atomico nazionale.

Non stupisce dunque che il maggior produttore di energia nucleare siano gli USA, seguiti da Francia, Cina e Russia, così come sono produttori di energia nucleare le altre potenze atomiche riconosciute: Regno Unito, India e Pakistan. Pur non avendo centrali, si ritiene che Israele e Corea del Nord posseggano circa un centinaio di testate ciascuna.

I Paesi dell'ex URSS posseggono una sessantina di centrali, delle quali 37 in Russia e 15 in Ucraina, più un'altra ventina nei Paesi dell'ex Patto di Varsavia, delle quali 11 nella sola ex Cecoslovacchia. Tale diffusione non era legata all'indipendenza energetica. Ieri come oggi, la Russia e le repubbliche (ex) sovietiche sono ricchissime di fonti fossili e dunque ma anche grandi esportatrici. Nella corsa agli armamenti, il numero di centrali delle potenze nucleari si rispecchiava in quello delle bombe.

Proprio per questo, il ricorso all'energia atomica serviva per le esigenze militari: il combustibile produceva il materiale da arricchire per le bombe e testate dell'arsenale strategico sovietico. Da tale premessa si comprende perché certe soluzioni tecniche degli impianti sovietici, compresa Chernobyl (oggi in Ucraina), servissero per massimizzare la produzione di materiale fissile, anche a scapito della sicurezza. Altrettanto vale per la Francia, il cui programma nucleare civile nacque nel 1960 per alimentare la *force de frappe*. Oggi è il secondo produttore mondiale di energia atomica, con 56 centrali e oltre 61 MW installati.

La Corea del Nord e l'atomica: una crisi senza fine

intervista a **Axel Berkofsky** a cura di **Beatrice Pecchiari**

Da decenni, il programma nucleare della Corea del Nord rappresenta una delle crisi geopolitiche più complesse, durature e irrisolte del panorama internazionale. Nonostante trattati, sanzioni economiche e ripetuti tentativi di negoziazione, Pyongyang continua a portare avanti lo sviluppo di armi nucleari, considerandole uno strumento indispensabile di deterrenza, controllo regionale e sopravvivenza del regime. Axel Berkofsky analizza le ambizioni strategiche nordcoreane, il delicato ruolo giocato da Cina e Russia, e il rischio di una possibile escalation militare in un contesto già instabile.

Le ambizioni nucleari della Corea del Nord risalgono a decenni fa: «Il Paese firmò un accordo con l'Unione Sovietica nel 1959, pochi anni dopo ottenne da Mosca supporto per la costruzione di un reattore di ricerca vicino alla città di Yongbyon, oggi il principale centro di produzione di materiali fissili. All'inizio l'energia nucleare civile faceva parte dell'equazione, poi è diventato abbastanza chiaro che la Corea del Nord puntava ad ottenere la tecnologia per mettere in piedi un programma di armi nucleari tattiche» spiega Axel Berkofsky, Professore Associato presso l'Università di Pavia e Co-Di-



rettore dell'Asia Centre presso l'ISPI. Un'ambizione, di fatto, mai abbandonata: *«Nel 1985 la Corea del Nord aderisce, sotto la pressione sovietica, al Trattato di non proliferazione (TNP) ma ha continuato a operare con strutture nucleari clandestine sotterranee e ha impedito l'ingresso degli osservatori dell'Agenzia internazionale per l'energia atomica (IAEA) fino al 1992. Si è ritirata dal trattato nel 2003».*

Un ulteriore tentativo per indurre la Corea del Nord a rinunciare al suo programma nucleare è stato fatto tra il 2003 e il 2009 con i dialoghi a sei

che hanno coinvolto gli Stati Uniti, le due Coree, il Giappone, la Russia e la Cina: *«La Corea del Nord avrebbe rinunciato allo sviluppo del proprio programma nucleare e di quello missilistico e in cambio avrebbe ricevuto energia, aiuti e assistenza economica da parte di Giappone e Corea del Sud. Un accordo che non ha mai funzionato perché il nucleare è per la Corea del Nord una garanzia per la sopravvivenza del regime e una leva strategica nei rapporti all'interno dell'Asia Orientale».* Per capire la portata di questo programma nel contesto asiatico e globale occorre guardare ai test: *«Dal 2006 ad oggi, la Corea del Nord ha condotto sei test nucleari, sviluppando testate sempre più potenti. Nell'ultimo test – che risalirebbe al 2017 – si sospetta sia stata impiegata una testata termonucleare a due stadi. Questo ci dice che il Paese è in grado di miniaturizzare le testate per poterle installare sui missili».*

Nonostante le dichiarazioni lo scenario è ben diverso: *«Nel 2018, la Corea del Nord ha annunciato che non avrebbe più condotto test nucleari e che avrebbe chiuso il sito di Punggye-ri, ma secondo l'IAEA avrebbe iniziato a ripristinare i tunnel di prova nel 2022. Il Paese continua, di fatto, a produrre materiale fissile, plutonio e uranio altamente arricchito, che, secondo gli esperti, dovrebbe essere sufficiente per un numero di testate compreso tra 20 e 60. In linea teorica esiste una minaccia nucleare coreana ma il contrattacco di Stati Uni-*

ti, Giappone e Corea del Sud porterebbe alla distruzione della Corea del Nord».

Il regime ha degli obiettivi ben precisi rispetto al suo programma: «Lo sviluppo di testate nucleari è un asset per la sopravvivenza del regime, perché rappresenta uno strumento di deterrenza, soprattutto rispetto agli Stati Uniti. La rinuncia allo sviluppo di programmi missilistici e nucleari porterebbe a un cambio di regime, al collasso e alla riunificazione. È illusorio che la Corea del Nord sotto Kim possa abbandonare la sua strategia. È questa la ragione per cui i tentativi di de-nuclearizzazione della Corea del Nord sono falliti».

Nemmeno le sanzioni internazionali hanno funzionato: «Cina e Russia violano continuamente le sanzioni ONU. La Russia sta aiutando attivamente la Corea del Nord a sviluppare i programmi missilistici e nucleari. Nel 2024 hanno firmato un trattato di partenariato strategico globale. Mentre la Cina facilita illecitamente l'esportazione di milioni di barili di petrolio verso la Corea del Nord e le permette di guadagnare dai lavoratori nordcoreani impiegati in Cina, nonostante una risoluzione del Consiglio di sicurezza dell'ONU vieti questa pratica, che al regime di Pyongyang frutta 500 milioni di dollari all'anno. In generale,



Axel Berkofsky è professore associato presso l'Università di Pavia e Co-Direttore dell'Asia Centre presso l'ISPI. È inoltre membro del Comitato Esecutivo dell'European Japan Advanced Research Network (EJARN) con sede a Stoccolma e affiliato alla ricerca presso l'Istituto Europeo di Studi Giapponesi della Stockholm School of Economics. Ha pubblicato numerosi articoli, saggi e interventi su riviste, giornali e riviste ed ha tenuto conferenze e insegnato in numerosi think tank, istituti di ricerca e università in Europa e in Asia. I suoi interessi di ricerca includono le politiche estere e di sicurezza giapponesi e cinesi, la storia cinese, la sicurezza asiatica e le relazioni tra UE e Asia.



la Corea del Nord dipende dalla Cina, che, almeno non ufficialmente, non fornisce alla Corea del Nord tecnologia per armi nucleari, a differenza dell'Iran e della Russia e sta mettendo pressione, seppur implicitamente, per evitare una possibile invasione della Corea del Sud. La Cina si trova tra l'incudine e il martello: il programma missilistico coreano trattiene gli Stati Uniti in Asia, la Corea del Nord è dunque

uno "stato cuscinetto". Il crollo della Corea del Nord e la sua riunificazione trasformerebbero la penisola in un alleato degli Stati Uniti nella regione».

Resta, tuttavia, il rischio di proliferazione: «Oggi, come in passato, la Corea del Nord ha fornito tecnologia nucleare ad altri stati e gruppi terroristici. Per citarne alcuni: Hamas ha probabilmente utilizzato la granata a razzo F-7 di Pyongyang per i suoi attacchi contro Israele; agli Houthi ha fornito i missili Scud C e Burkan-1. Ma l'esempio più evidente è quello dell'Iran, che condivide con la Corea del Nord tecnologie di difesa, soprattutto per i missili balistici. Grazie alle esportazioni di missili nordcoreani, l'Iran è in grado di raggiungere tutti i suoi obiettivi strategici regionali, compresi Israele e l'Arabia Saudita e sta producendo droni ad alta tecnologia, missili da crociera e artiglieria convenzionale a cui la Corea del Nord è o potrebbe essere interessata».

Lo scenario verso la *de-escalation* è improbabile: «La Corea del Nord non abbandonerà i suoi piani, forte, anche, delle relazioni militari e di sicurezza che intrattiene con Russia e Cina. Viviamo in una "crisi" permanente, con un rischio di *escalation*. Lo dimostrano l'invio delle truppe nordcoreane in Russia e una sempre più aperta ostilità verso la Corea del Sud.

Tuttavia, per ora, la Cina non sembra propensa a sostenere un'aggressione militare nordcoreana in Asia».

Economia e sostenibilità





Pro o contro la bomba atomica Elsa Morante

La nostra bomba è il fiore, ossia l'espressione naturale della nostra società contemporanea, così come i dialoghi di Platone lo sono della città greca; il Colosseo dei romani imperiali; le Madonne di Raffaello, dell'Umanesimo italiano; le gondole, della nobiltà veneziana; la tarantella, di certe popolazioni rustiche meridionali; e i campi di sterminio, della cultura piccolo borghese burocratica già infetta da una rabbia di suicidio atomico. Non occorre, ovviamente, spiegare, che per cultura piccolo borghese s'intende la cultura delle attuali classi predominanti, rappresentate dalla borghesia (o spirito borghese) in tutti i suoi gradi. Concludendo, in poche, e ormai, del resto, abusate parole: si direbbe che l'umanità contemporanea prova la occulta tentazione di disintegrarsi.

Il prezzo del nucleare: chi paga per l'energia del futuro

di **Stefano Cingolani**

Quando Greta Thunberg ha sdoganato l'energia nucleare un brivido è sceso lungo le schiene degli ambientalisti puri e duri. Era il 2022 e tutta l'Europa viveva con ansia lo choc energetico provocato dall'invasione russa dell'Ucraina. La *pasionaria* verde in realtà era stata più cauta; rispondendo a una domanda di una giornalista tedesca, aveva detto: «Se abbiamo centrali già attive, penso sia un errore chiuderle per concentrarsi sul carbone». La Germania, che aveva deciso di spegnere gli impianti dieci anni prima, ha aumentato l'uso del carbone. La Svezia ancora pro-

duce circa il 40% dell'elettricità con i suoi dieci reattori atomici e nel 2009 ha abrogato il risultato del referendum che nel 1980 aveva bocciato il nucleare. Per quanto ellittica, la dichiarazione dell'attivista svedese ha contribuito a cambiare in gran parte l'opinione comune sull'uso pacifico dell'energia atomica.

Qualcosa si è messo in moto anche in Italia, l'unico paese dell'Unione europea dove il *no-nuke* comanda per lo più indisturbato dal 1987 a favore degli idrocarburi e soprattutto del gas: “Il metano ti dà una mano”

era il mantra che la tv mandava in continuazione nelle case degli italiani dagli anni '80 fino agli anni '90, una campagna efficace visto che il metano in Italia ha decisamente sconfitto l'uranio.

È realistica questa svolta, che tempi avrà e che costi? E ancora: chi paga? Davvero basteranno incentivi presi da bilanci statali che hanno ormai spazi sufficienti solo per la normale amministrazione? O non dovremmo pensare a soluzioni diverse su base europea? Sono domande che non hanno risposta, ma sono senza dubbio sul tappeto anche nei Paesi che ancora tengono accese le vecchie centrali e in quelli che vogliono tornare in campo con soluzioni nuove di breve e di più lungo periodo come la fusione che ha già dato significativi risultati di laboratorio (l'Eni vanta primi significativi successi in collaborazione con MIT), ma la cui applicazione industriale resta una chimera per almeno una generazione. Partiamo dai costi, anche se le questioni più spinose riguardano la si-

curezza e la necessità di cambiare un atteggiamento largamente diffuso nell'opinione pubblica sia nella destra a trazione oil&gas sia nella sinistra "rinnovabile". Per questo occorre fare i conti con il passato e in Italia con il gioco di interessi che ha sconfitto i nuclearisti in due referendum nel 1987 e nel 2011, sempre a ridosso di due clamorosi incidenti: quello di Chernobyl nel 1986 e quello di Fukushima nel 2011.

Per confrontare il costo di generazione dell'elettricità, si utilizza il metodo del "costo livellato dell'elettricità" espresso in dollari per megawattora (\$/MWh). Si calcola come il rapporto fra le spese complessive della costruzione e del funzionamento dell'impianto (cioè la somma dei costi per la costruzione, compresi gli oneri finanziari dell'ammortamento del capitale, più i costi operativi per la durata della vita produttiva, il funzionamento, il combustibile e la manutenzione), divise per la quantità di elettricità prodotta. Secondo l'Agenzia internazionale

Costi delle tecnologie in Europa

UNIONE EUROPEA	LCOE		
	USD/MWh		
	2023	2030	2050
NUCLEARE	170	135	125
CARBONE	290	n.a.	n.a.
GAS CCGT	205	260	n.a.
SOLARE FOTOVOLTAICO	50	35	25
EOLICO ONSHORE	60	55	50
EOLICO OFFSHORE	70	45	35

Agenzia Internazionale per l'Energia

dell'energia il nucleare costa meno del carbone, del gas e del petrolio, ma più dell'eolico onshore e offshore e del solare.

Uno studio della banca d'affari francese Lazard porta a conclusioni tutto sommato in linea. Una stima del governo inglese basata sui costi della centrale nucleare di Hinkley Point in costruzione (verrà ultimata nel 2031 e verrebbero spesi 35 miliardi di sterline) mostra che sono convenienti rispetto all'uso degli idrocarburi o del carbone, ma tre volte più alti rispetto a sole e vento. Il problema delle rinnovabili è che hanno comunque bisogno di altre fonti per fare da base e impedire interruzioni nelle giornate senza sole e senza vento. Il problema del nucleare è che i costi di costruzione e di gestione, a cominciare dalla sicurezza, continuano a crescere e i tempi ad allungarsi di molti anni.

Nel momento in cui è diventato centrale ridurre la dipendenza energetica da aree instabili, decisamente pericolose, da governi nemici o ricattatori, il nucleare torna ad avere un ruolo fondamentale anche se considerato soltanto come complementare alle fonti rinnovabili tra le quali non dimentichiamo l'acqua, molto importante in particolare in Italia. Dunque è davvero prioritario rispondere alla classica domanda chi paga (e quanto paga).

Però nella colonna dei più dobbiamo inserire sia gli eventuali risparmi

nella bolletta elettrica delle famiglie e delle imprese sia i vantaggi industriali in termini di occupazione e valore aggiunto. L'Italia non ha perduto una importante e ricca filiera che lavora soprattutto per l'estero. Si tratta di medie e talvolta piccole imprese. Ma non solo.

C'è uno "sportello nucleare" all'Enel che gestisce centrali nucleari in Spagna, America Latina e Slovacchia, all'Ansaldo, alla Snam, a Leonardo, alla Edison.

La nuova frontiera sembra essere la piccola centrale, i mini reattori modulari (SMR) da collocare per lo più a ridosso delle aziende energivore. L'Enel, l'Ansaldo e Leonardo, il gruppo della difesa, hanno siglato un accordo non per produrre, ma per valutare tutte le iniziative necessarie. Nel mondo sono al lavoro colossi come Rolls Royce, GE Hitachi, Westinghouse. Grandi la metà di un campo di calcio, più sicuri anche perché più facili da gestire, gli SMR costano meno, tuttavia ce ne vorranno molti e non potranno sostituire le grandi centrali.

Uno studio dell'Università di Padova sottolinea i loro vantaggi come la flessibilità, la standardizzazione, la compatibilità sia con la rete elettrica esistente sia con la futura fusione. Attualmente esistono 70 progetti di sviluppo nei Paesi Ocse pari a 6,66 miliardi di euro che di qui al 2035 dovrebbero diventare quasi 13 miliardi. Non proprio un grande mercato tale

Stefano Cingolani è un giornalista e scrittore italiano, specializzato in politica estera ed economia. Dopo aver studiato filosofia ed economia a Roma, inizia la carriera giornalistica nella stampa comunista, contribuendo all'Unità con le prime pagine dedicate all'economia negli anni '70. Successivamente passa al «Mondo» e al «Corriere della Sera», dove lavora per 16 anni, ricoprendo il ruolo di inviato da New York e Parigi. Collabora regolarmente con «Il Foglio».



da attrarre spontaneamente investitori privati. Pagheranno quindi gli stati o gli utilizzatori?

O magari un po' gli uni un po' gli altri? Un'incertezza che getta un'ombra pesante sul successo dell'operazione dei mini reattori.

Il ritorno al nucleare o il suo rilancio là dove non è stato abbandonato, richiede un approccio sovranazionale, cioè l'impegno dell'Unione europea attraverso un vero e proprio piano nucleare all'interno del più ampio piano energetico, tale da offrire la cornice da riempire a seconda delle esigenze dei singoli Paesi, con una base finanziaria comune da ripartire a seconda delle necessità.

La Francia ad esempio avrà un onere inferiore e potrà fare anche da capofila (bisogna onestamente accettare la sua superiorità in questo campo). Ma ci sarebbe spazio per soluzioni multiple. Il finanziamento va fatto sul mercato non a carico dello striminzito bilancio europeo o dei bilanci nazionali.

Un fondo sovrano energetico garantito da Bruxelles e dalla Banca centrale europea, con un'importante "finestra" sul nucleare, potrebbe emettere bond appetibili e con un ottimo rendimento.

Wishful thinking? Forse, ma non si dice che la necessità è la madre dell'invenzione?

Il paradosso europeo: un futuro senza nucleare?

di **Antonio Gozzi**

L'energia nucleare rappresenta una risorsa fondamentale per la transizione energetica, eppure i primi documenti della nuova Commissione Europea, incluso il *Clean Industrial Deal*, non la menzionano. A meno che, con ipocrisia e mancanza di coraggio, non la si voglia includere sotto la generica dizione "altre energie pulite". Ignorare questa opportunità significa trascurare una soluzione strategica per affrontare la crescente domanda di elettricità, destinata ad aumentare con la diffusione della mobilità elettrica, dei data center, dell'intelligenza artificiale e dei

sistemi di raffrescamento e riscaldamento in tutto il mondo. Le fonti rinnovabili sono essenziali, ma non sufficienti a garantire una fornitura stabile, soprattutto in Italia, dove limiti territoriali e ambientali ne ostacolano l'espansione su larga scala. L'intermittenza delle fonti rinnovabili rende indispensabile una fonte energetica programmabile e stabile: il nucleare può garantire questa sicurezza, contribuendo alla competitività del sistema produttivo e alla decarbonizzazione. Il Governo italiano ha già varato un decreto delegato sulla questione, mentre



Antonio Gozzi è Presidente di Duferco, multinazionale attiva nei settori siderurgico, energetico, ingegneristico, logistico e dello shipping, con oltre 2.500 dipendenti in 30 Paesi. Dal 2012 al 2018 ha presieduto Federacciai, di cui è attualmente Presidente dal giugno 2022. Special Advisor di Confindustria dal 2024 per autonomia strategica europea, Piano Mattei e competitività, è anche Presidente di Interconnector Energy Italia e della Virtus Entella. Membro dell'Esecutivo dell'Aspen Institute e del Comitato Tecnico Energia di Confindustria, ha fondato Gmedia, editore del settimanale Piazza Levante.

l'opinione pubblica, soprattutto tra i giovani, dimostra un'apertura crescente verso questa tecnologia. Inoltre, il nucleare potrebbe favorire la produzione di idrogeno a costi contenuti, risolvendo una delle principali sfide per l'industria.

È essenziale affrontare il tema con un approccio razionale, basato su dati concreti. Il nucleare di quarta generazione offre impianti più sicuri ed efficienti, con costi competitivi se valutati sulla base della produzione effettiva: mentre il fotovoltaico e l'eolico operano per 1.400 e 2.500 ore l'anno rispettivamente, il nucleare garantisce 8.700 ore di produzione continua. Inoltre, il costo dell'energia non si limita alla generazione, ma include anche trasporto e distribuzione. In Italia, le fonti rinnovabili sono concentrate nel Sud e necessitano di infrastrutture per alimentare le aree industriali del Nord, con un impatto significativo sui costi di rete.

Il nucleare, grazie alla sua stabilità, ridurrebbe questa dipendenza.

Le imprese siderurgiche italiane stanno già collaborando con EDF, Edison e Ansaldo Nucleare per sviluppare gli SMR. Nell'attesa di costruire impianti nazionali, l'acquisto di energia nucleare dalla Francia consentirebbe all'Italia di produrre acciaio totalmente decarbonizzato. Gli *Small Modular Reactors*, con potenze comprese tra 250 e 300 MW, possono contribuire alla sicurezza energetica dei distretti industriali, assicurando continuità di approvvigionamento.

Tuttavia, la regolamentazione europea attuale non consente la realizzazione di contratti a lungo termine (PPA) per il nucleare. Occorre prevedere corridoi di connessione dedicati a questa esigenza. Inoltre, l'energia importata non gode ancora di certificati di origine verdi, nonostante il nucleare sia stato incluso nella tassonomia europea. È necessario correggere queste distorsioni normative per valorizzare appieno il contributo dell'energia nucleare alla transizione energetica.

L'Italia ha l'opportunità di assumere un ruolo guida nella decarbonizzazione e nella sicurezza energetica. Superare pregiudizi ideologici e basarsi su dati scientifici e innovazioni tecnologiche è essenziale per garantire un futuro sostenibile e competitivo. Il nucleare non è solo un'opzione tra molte, ma una componente imprescindibile per la crescita e la sicurezza energetica del Paese.

L'atomo nella transizione energetica

di **Alessandro Dodaro**

Negli ultimi anni si è rafforzato e ampliato il dibattito sull'urgenza di misure per contrastare il riscaldamento globale di origine antropica, un elemento che, secondo la comunità scientifica, è la principale causa del cambiamento climatico. Il modo più efficace per rispondere a questa necessità, almeno teoricamente, è azzerare il ricorso alle fonti che emettono gas climalteranti per la produzione di energia.

All'atto pratico, però, si tratta di una sfida molto complicata: ancora oggi, nel mondo, le principali fonti di produzione di energia sono fossili, e

l'Italia non fa eccezione: nel 2024 il ricorso a materie prime fossili si attesta al 53% del fabbisogno nazionale.

Alla lenta crescita delle fonti rinnovabili si aggiunga che gli esperti del settore energetico prevedono un aumento della domanda nei prossimi anni dovuto a fattori quali la crescente industrializzazione dei Paesi in via di sviluppo, la graduale sostituzione del gas naturale nelle applicazioni non elettriche con un combustibile climaticamente neutro, l'elettificazione del trasporto su strada, la riduzione dell'uso di combustibili fossili

nei settori difficili da decarbonizzare (acciaio, cemento, vetro e carta) e lo sviluppo esponenziale di nuovi settori ad alto consumo energetico come Intelligenza Artificiale e *High Performance Computing*.

Come affrontare la sfida del Green Deal Europeo che obbliga gli Stati Membri a raggiungere l'obiettivo Net Zero Emission entro il 2050?

Ipotizzare una produzione 100% da fonti rinnovabili è un sogno irrealizzabile non solo per i tempi e i costi (in Italia, nell'ultimo triennio, la loro produzione ha avuto un incremento di circa un punto percentuale annuo: azzerare il 53% di produzione da fonti fossili, anche a parità di fabbisogno, è un'utopia), ma anche per gli evidenti limiti di continuità di produzione e per la necessità di sistemi di accumulo, che dovrebbero garantire una produzione superiore al 30% del fabbisogno nazionale e avere un'efficienza tale da non sprecare troppa dell'energia accumulata.

Nel mondo molti Paesi ricorrono all'energia nucleare per garantire la produzione di base, in modo continuo e affidabile, come complemento della quota da fonti rinnovabili. Dopo un periodo di stasi nella realizzazione di nuovi impianti, inoltre, grazie anche ai risultati del Technical Expert Group che ha inserito il nucleare nella Tassonomia europea, i programmi nucleari dei Paesi che utilizzano questa fonte si sono rivitalizzati e si è riaperto il dibattito

anche in quei Paesi che, come l'Italia, hanno abbandonato il ricorso a questa fonte.

Oltre al contributo nel contrasto ai cambiamenti climatici, a rendere appetibile l'energia nucleare, sono i continui progressi sia in termini di sicurezza che di utilizzo delle risorse: i reattori nucleari della III Generazione, che sono entrati in esercizio o sono in corso di realizzazione, sono infatti caratterizzati dalla presenza delle cosiddette sicurezze passive. A differenza dei reattori della Generazione precedente, nei nuovi reattori i sistemi di sicurezza sono azionati da fenomeni fisici, come la gravità o la convezione naturale, che si innescano spontaneamente in presenza di determinate condizioni anche in caso di malfunzionamento. Tali sistemi sono in grado di contenere e di bloccare sul nascere le cause di potenziali incidenti senza interventi attivi.

Se ci sono "difetti" nella III Generazione, questi riguardano i costi dell'investimento iniziale (che necessita di molti anni per essere riasorbito) e l'incertezza sui tempi di realizzazione (con conseguenze sulle tempistiche di rientro dell'investimento); inoltre questi reattori non possono utilizzare grandi quantità di combustibile riprocessato (cioè prodotto miscelando combustibile fresco con combustibile esausto) e ciò rende antieconomico il riprocessamento con conseguente utilizzo delle risorse non efficiente.



Per superare le problematiche su tempi e costi, la ricerca scientifica del settore si è dedicata alla “miniaturizzazione” dei reattori nucleari: gli *Small Modular Reactors* (SMR) di cui si sente parlare sono reattori derivati dalla III Generazione, di taglia variabile da qualche a poche centinaia di MW (a fronte dei 1.500-2.000 MW dei reattori tradizionali), che sono ormai *ready to market*. La perdita dell’effetto scala dovuta alla riduzione delle dimensioni si può recuperare con la produzione di serie dei componenti che saranno prodotti in fabbriche dislocate sul territorio e trasportati sul sito di realizzazione del reattore.

Questi reattori, però, come accade per i cugini della III Generazione, mantiene un uso non efficiente del combustibile: dopo averne bruciato una piccola parte, infatti, il combustibile viene scartato e si deve ricor-

rere a combustibile fresco. La svolta si avrà con i reattori di quarta generazione, ancora in fase di studio: questi potranno utilizzare grandi quantità di combustibile riprocessato, rendendo da una parte economicamente conveniente l’operazione e dall’altra permettendo il recupero di tutto il combustibile bruciato nei reattori di III Generazione e negli SMR: il combustibile esausto si trasforma da rifiuto in materia prima per produrre energia, chiudendo il ciclo e rendendo il nucleare sostenibile anche in termini di consumo delle risorse.

Per accelerare i tempi sulla dimostrazione dei reattori di quarta generazione sono allo studio, in analogia con gli SMR, gli *Advanced Modular Reactor* (AMR), di piccola taglia, derivati dalla quarta Generazione: ci sono diversi prototipi in fase di progettazione e si ritiene che i primi reattori possano essere disponibili a partire dal 2030.

Alessandro Dodaro, laureato in Ingegneria Nucleare, è Direttore del Dipartimento Nucleare dell’Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l’energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA). Il dipartimento si occupa di tutte le tecnologie in campo nucleare, spaziando dallo sviluppo della produzione di energia (sia fissione che fusione) alle radiazioni ionizzanti dalla metrologia alla gestione dei rifiuti, smantellamento e questioni di sicurezza. Ricopre il ruolo di Program Manager italiano nell’ambito del Programma Europeo per l’Energia da Fusione e coordina, lato ENEA, le attività per la realizzazione del Divertor Tokamak Test facility; inoltre, dal 2015 è operatore di due dei principali reattori di ricerca nazionali TRIGA RC1 e RSV TAPIRO.



In quest'ambito l'Italia ha competenze riconosciute a livello internazionale: fra i nove progetti selezionati dalla European SMR Industrial Alliance, costituita dalla Commissione Europea con l'obiettivo di facilitare e accelerare lo sviluppo, la dimostrazione e l'implementazione degli SMR in Europa, gli unici due progetti AMR hanno il cuore italiano (EU-SMR-LFR, proposto da Ansaldo Nucleare, SCK-CEN, ENEA e RATEN; e European LFR AS, proposto dalla newcleo, con cui ENEA ha stipulato un accordo di collaborazione per realizzarne un prototipo elettrico, senza combustibile nucleare, presso il proprio Centro del Brasimone).

Coerentemente con il proprio mandato, l'ENEA opera come aggregazione dei soggetti impegnati nel settore nucleare, mettendo a disposizione competenze e un eccellente parco di laboratori e facilities sperimentali, per favorire l'innovazione e il trasferimento tecnologico alle filiere industriali per aumentarne la capacità competitiva e le prospettive di un mercato che crescerà a livello globale. Concludendo, se non ci si lascia fuorviare da preconetti ideologici, risulta evidente che l'unica soluzione per la decarbonizzazione è puntare a un mix energetico equilibrato che veda tutte le fonti *low carbon* cooperare: solo con un gioco di squadra e un obiettivo comune si può vincere la partita.

L'economia circolare nella gestione dei rifiuti radioattivi

di **Viviana Cruciani**

Sogin, insieme alla sua controllata Nucleco, è impegnata da sempre in una strategia di economia circolare insita nella sua mission originaria di smantellamento (*decommissioning*) degli impianti nucleari e di gestione dei rifiuti radioattivi.

La strategia di economia circolare adottata si basa sulla minimizzazione dei rifiuti, il riutilizzo di edifici e impianti per non costruirne di nuovi e l'efficientamento dei consumi energetici.

Nell'ottica di minimizzare la produzione e gestione dei rifiuti radioattivi i progetti di *decommissioning* utiliz-

zano tecnologie e processi innovativi per massimizzare la decontaminazione dei materiali prodotti dagli smantellamenti e allo stesso tempo recuperare quelli convenzionali, in particolare ferro e calcestruzzo.

Nella centrale di Caorso, ad esempio, per gestire le resine e i fanghi radioattivi prodotti durante l'esercizio dell'impianto abbiamo progettato un intervento di trattamento mediante incenerimento presso un impianto estero che ha consentito una riduzione del loro volume iniziale di oltre il 90%, evitando la costruzione

Viviana Cruciani è laureata in Chimica Industriale, e ha ottenuto successivamente un Master di II Livello in “Tecnologie Nucleari e delle Radiazioni Nucleari”. Da vent’anni è in Sogin. La prima esperienza nel 2004 è negli impianti Ipu e Opec del centro di Casaccia come responsabile dei laboratori di chimica e radiochimica. Dal 2011 al 2019 ha fatto parte della Direzione Disattivazione Centro Sud e poi della Direzione Centrali dove si è occupata del coordinamento di tutti i progetti di decommissioning. Nel 2020 diventa Responsabile Disattivazione dell’impianto FN di Bosco Marengo. Dal 2021 è Responsabile Disattivazione della Centrale nucleare di Caorso, la più grande fra quelle in dismissione.

di nuovi depositi temporanei e assicurando volumi complessivi minori dei rifiuti destinati al futuro stoccaggio nel Deposito Nazionale.

Per fornire un dato complessivo, nella sola centrale di Caorso l’obiettivo è quello di permettere il recupero di oltre il 95% dei materiali provenienti dalle operazioni di disattivazione. Anche nelle varie fasi del processo di approvvigionamento, nell’ottica della Life Cycle Perspective, Sogin tiene conto di criteri ambientali e sociali per individuare beni e servizi che riducano al minimo il loro impatto ambientale e aumentino i benefici sociali lungo tutto il loro ciclo di vita. Questo avviene, ad esempio, con l’applicazione in fase di gara o di affidamento dei lavori di prescrizioni che consentano di selezionare sul mercato operatori ispirati a principi di sostenibilità ambientale.

In questo contesto, Sogin ha adottato anche un applicativo per garantire la tracciabilità dei dati sui rifiuti in modo da preservare la conoscenza dell’intero percorso gestionale di ogni singolo materiale.

Inoltre, la realizzazione di modelli virtuali 3D, come ad esempio quello sviluppato per i sistemi e componenti presenti all’interno dell’edificio reattore, consente di realizzare gli interventi di smantellamento con un approccio sostenibile in quanto, già nella fase di progettazione si possiedono le informazioni necessarie sui radionuclidi presenti e dunque

su come intervenire per “segregare” i materiali potenzialmente contaminati da quelli rilasciabili, evitando così possibili *cross contamination*, con conseguenziale aumento delle quantità di rifiuti radioattivi.

Un altro esempio di gestione sostenibile dei rifiuti è la strategia Sogin di riutilizzare edifici esistenti, laddove possibile, per non costruirne di nuovi. Nella centrale di Caorso questo obiettivo è stato pienamente centrato adeguando ai più moderni standard di sicurezza i depositi già presenti riutilizzando le medesime volumetrie per lo stoccaggio temporaneo dei rifiuti radioattivi.

Al riguardo, va sottolineato che il processo di *decommissioning* nucleare presuppone la necessità di continuare ad avere le stesse competenze professionali, anche se con finalità diverse, utilizzate durante l’esercizio di questi impianti.

Durante la dismissione di una centrale nucleare, infatti, sono ugualmente necessarie competenze di ingegneria, di procurement e costruzione, oltre a tutte quelle collegate alla manutenzione degli impianti, che continuano, di fatto, ad essere operativi, pur non producendo più energia elettrica. Per smantellare è dunque necessario: da un lato costruire facilities dedicate, come depositi temporanei o apparecchiature e strumenti, spesso di natura prototipale, realizzati talvolta per svolgere anche una sola operazione. E, dall’al-

tro, preservare professionalità altamente qualificate, compito affidato alla Radwaste Management School, il centro di formazione del Gruppo Sogin, impegnata in un processo strutturato di trasferimento delle competenze agli operatori del futuro e per rispondere alla crescita della domanda di conoscenza nel settore.

Per quanto riguarda l'aggiornamento tecnologico e l'efficientamento dei consumi energetici, Sogin è sottoposta ad un regime di controllo dei consumi inseriti ogni anno nella Dichiarazione Ambientale.

In particolare, nella centrale di Caorso Sogin ha avviato negli ultimi anni un programma di sostituzione delle lampade alogene con quelle a led e di parti di impianto come, ad esempio, i ventilatori per estrarre l'aria dalle zone radiologicamente classificate, che ha consentito una notevole riduzione dei consumi.

A breve sostituiranno anche il trasformatore di cantiere con uno di taglia inferiore e il quadro di media tensione compresi i Quadri Power Center. In questo ambito, fra i progetti che mirano al miglioramento ambientale, all'efficientamento energetico con un risparmio economico, a Caorso installeremo impianti di depurazione delle acque reflue più piccoli, tenuto conto delle minori esigenze che richiedono le operazioni di dismissione rispetto a quando la centrale era in esercizio. Inoltre, è in corso la sostituzione





delle caldaie di riscaldamento con impianti più efficienti e mirati alle necessità attuali.

Infine, un ulteriore elemento chiave dell'economia circolare adottata da Sogin è la consapevolezza sociale e politica e dunque la sensibilizzazione dei nostri stakeholder sia interni che esterni. In questo senso, promuoviamo campagne informative sviluppate con l'obiettivo di aumentare la consapevolezza sulle pratiche sostenibili e sui benefici derivanti dall'economia circolare.

Maggiori informazioni sono disponibili nel Bilancio di Sostenibilità del Gruppo Sogin, consultabile sul sito sogin.it, che rappresenta il principale strumento informativo per tutti gli stakeholder, attraverso il quale rendicontiamo annualmente la nostra performance economica, sociale e ambientale.

Oltre a misurare gli impatti delle nostre attività sulla società e sull'ambiente, il bilancio di sostenibilità offre un quadro completo delle pratiche aziendali ed evidenzia il nostro impegno a promuovere una cultura responsabile, anche nell'ottica della strategia più complessiva di valorizzazione di questi siti.

Accettazione e cultura





Uomo del mio tempo Salvatore Quasimodo

Sei ancora quello della pietra e della fionda,
uomo del mio tempo. Eri nella carlinga,
con le ali maligne, le meridiane di morte,
t'ho visto – dentro il carro di fuoco, alle forche,
alle ruote di tortura. T'ho visto: eri tu,
con la tua scienza esatta persuasa allo sterminio,
senza amore, senza Cristo. Hai ucciso ancora,
come sempre, come uccisero i padri, come uccisero
gli animali che ti videro per la prima volta.
E questo sangue odora come nel giorno
Quando il fratello disse all'altro fratello:
«Andiamo ai campi». E quell'eco fredda, tenace,
è giunta fino a te, dentro la tua giornata.
Dimenticate, o figli, le nuvole di sangue
Salite dalla terra, dimenticate i padri:
le loro tombe affondano nella cenere,
gli uccelli neri, il vento, coprono il loro cuore.

Il dibattito che non si spegne: prospettive per l'Italia

intervista a **Stefano Monti**

Dopo decenni di opposizione e dibattiti, il nucleare torna al centro della discussione in Italia, spinto dalla necessità di garantire sicurezza energetica, indipendenza strategica e una transizione ecologica sempre più urgente. Stefano Monti, Presidente dell'Associazione Italiana Nucleare, analizza il percorso intrapreso dal nostro Paese dal referendum del 1987 a oggi, evidenziando il contributo dell'industria nucleare italiana nel panorama internazionale e le sue potenzialità. Uno sguardo che abbraccia le prospettive future, tra innovazione tecnologica, sostenibilità e nuove sfide globali.

Come ritiene che il sentiment del Paese sul tema sia cambiato negli anni?

Il referendum del 1987 è un capitolo fondamentale della storia italiana, ma è spesso frainteso. Non ha abrogato l'utilizzo dell'energia nucleare, bensì alcune disposizioni di legge che, di fatto, hanno reso impossibile la produzione di energia nucleare nel Paese. A seguito di quel voto, i reattori nucleari esistenti furono dismessi e venne interrotta la costruzione di un grande impianto a Montalto di Castro, così come altri progetti già in fase avanzata. Guardando indietro,

si potrebbe dire che abbiamo perso un'opportunità significativa.

Quella decisione fu presa sulla scia dell'incidente di Chernobyl, ma dietro c'erano anche interessi economici importanti, come quello del gas. Su questi aspetti preferisco non entrare in polemica. Il dibattito si è riaperto nel 2007-2008, con l'esigenza di garantire il *baseload* e la sicurezza dell'approvvigionamento energetico, ancora prima che la questione del cambiamento climatico diventasse centrale.

Tuttavia, nel 2011 un secondo referendum ha nuovamente bloccato tutto, sull'onda emotiva dell'incidente di Fukushima-Daiichi, che però – va ricordato – non ha causato vittime dovute all'incidente nucleare. Decine di migliaia sono state invece le vittime per il terremoto di magnitudo 9 (un evento che ha persino spostato l'asse terrestre) e il conseguente Tsunami.

L'industria e la ricerca del settore hanno continuato a svilupparsi?

Assolutamente sì. L'Italia ha mantenuto un ruolo di primo piano a livello internazionale nel settore nucleare. Ansaldo Nucleare ed Enel hanno contribuito al completamento di quattro dei sei reattori nucleari entrati in esercizio in Europa dagli anni '90: le unità 1 e 2 di Cernavoda, in Romania, e le unità 3 e 4 di Mochovce, in Slovacchia. Altre aziende italiane hanno partecipato alla realizzazione del secondo reattore nucleare europeo

ad acqua pressurizzata (EPR) a Flamanville, in Francia, mentre Ansaldo Nucleare ha collaborato alla costruzione del primo reattore nucleare di terza generazione AP1000 in Cina. Inoltre, la stessa Ansaldo, insieme a partner internazionali di primissimo livello, ha recentemente ottenuto il contratto per l'ingegneria, l'approvvigionamento e la costruzione delle unità 3 e 4 di Cernavoda.

Molte altre imprese italiane operano in progetti nucleari all'estero, tra cui Walter Tosto, SIMIC, SIET, Tectubi Raccordi e ATB, tutte associate all'Associazione Italiana Nucleare. L'Italia è il secondo fornitore di componenti e sistemi per il grande reattore sperimentale a fusione ITER, in costruzione nel sud della Francia, e vanta la seconda industria nucleare manifatturiera dell'Unione Europea, con 70 aziende, circa 10.000 addetti e oltre 4 miliardi di euro di ricavi ogni anno.

In ambito nazionale, oltre alla ricerca di base e all'uso medico del nucleare, il settore si è distinto anche nel *decommissioning* degli impianti dismessi, grazie al lavoro di SOGIN, e sta attualmente investendo nel riutilizzo dei rifiuti radioattivi come combustibile per i nuovi reattori raffreddati a piombo, sviluppati da Ansaldo Nucleare e dalla start-up Newcleo.

Tutto ciò rappresenta una solida base per la ripartenza del nucleare in Italia, sia con reattori modulari di piccola taglia (*Small Modular Reactors*) ad acqua, sia con soluzioni più



avanzate, come quelle di Newcleo e ENEA, impegnate nello sviluppo di reattori modulari avanzati (AMR - *Advanced Modular Reactors*) di IV generazione a piombo.

Quali sono i fattori che riportano il nucleare al centro del dibattito?

Oggi la questione si è riaperta per due ragioni principali: la crisi climatica e quella energetica. Circa il 70% delle emissioni di CO₂ derivano dalle attività antropiche legate al settore energetico, e il mondo continua a dipendere per l'80% dai combustibili fossili. Le fonti rinnovabili, pur in crescita, coprono ancora una percentuale limitata del fabbisogno globale. Nel frattempo, la domanda di energia continua ad aumentare, soprattutto nei Paesi emergenti, che fanno ancora largo uso di carbone e gas.

La guerra in Ucraina ha reso evidente quanto sia strategico diversificare il mix energetico per ridurre la dipendenza da fornitori esterni e rendersi meno vulnerabili a crisi cicliche. In questo contesto, il nucleare rappresenta una delle opzioni per rafforzare la sicurezza energetica europea e garantire una maggiore indipendenza. C'è poi il tema della competitività: i costi dell'energia in Europa sono elevati e molto volatili, come sottolineato anche nel rapporto Draghi. Questo penalizza la nostra economia e riduce il nostro margine di innovazione. L'Europa ha sempre puntato su due pilastri: energia e innovazione. Oggi sono entrambi compromessi. Dobbiamo reagire a questa deriva e – come sottolineato dallo stesso Draghi – il nucleare è parte della ricetta per affrontare la crisi energe-

tica. È anche necessaria una forte innovazione del settore. Infine, per affrontare il cosiddetto “trilemma energetico” – ovvero garantire prezzi sostenibili per cittadini e industrie, sicurezza dell’approvvigionamento e indipendenza energetica e decarbonizzazione – abbiamo bisogno di un mix completo di fonti energetiche sostenibili. E in questo mix, il nucleare ha un ruolo fondamentale

Quali vantaggi offre il nucleare rispetto alle rinnovabili?

Il nucleare garantisce una produzione continua e programmabile, eliminando il problema dell’intermittenza che caratterizza le fonti rinnovabili. Inoltre, ha il vantaggio di poter essere utilizzato anche per la produzione di calore e idrogeno, contribuendo alla decarbonizzazione dell’industria e dei cosiddetti settori *hard to abate*.

A differenza delle rinnovabili, che richiedono una rete distribuita e complessi sistemi di stoccaggio e trasmissione, il nucleare è un’energia concentrata, con costi di sistema molto più bassi. Inoltre, il nucleare genera calore, un elemento fondamentale per molte applicazioni industriali, cosa che le rinnovabili non possono fare direttamente.

Dal punto di vista economico, il nucleare ha sicuramente costi iniziali elevati per la costruzione degli impianti, ma una volta realizzato, il costo del combustibile è estremamente basso e quindi le fluttuazioni

di prezzo incidono poco sul costo del kWh. Se i tempi e i costi di costruzione vengono ben gestiti, il nucleare consente di stipulare contratti a lungo termine con una previsione stabile del costo del kilowattora per decenni, offrendo sicurezza energetica e competitività alle imprese.

Infine, le rinnovabili richiedono materiali rari e componenti tecnologici spesso importati, mentre il nucleare ha bisogno di molti meno materiali critici e garantisce una filiera industriale che possiamo controllare quasi interamente in Europa. L’unico elemento che dobbiamo importare è l’uranio, ma possiamo facilmente rivolgerci a fornitori affidabili come Canada, Australia e Kazakistan, con cui abbiamo già ottimi rapporti commerciali.

In sintesi, il nucleare non è un’alternativa alle rinnovabili, ma il loro complemento ideale, garantendo continuità, stabilità e indipendenza energetica, soprattutto in un contesto in cui il gas, da cui oggi dipendiamo, è soggetto a forti fluttuazioni di prezzo e rischi geopolitici.

Come è cambiata la percezione pubblica negli ultimi anni e quali fattori influenzano oggi l’accettazione sociale?

L’accettazione sociale del nucleare è un’infrastruttura fondamentale, tanto quanto quelle fisiche. All’IAEA (Agenzia Internazionale per l’Energia Atomica), si lavora proprio per accompagnare i Paesi che non han-

no mai avuto un programma nucleare, supportandoli nella creazione di un consenso informato. Un esempio emblematico è quello degli Emirati Arabi Uniti, che in soli dieci anni sono riusciti a connettere in rete quattro reattori di grande potenza. Questo dimostra che, con la giusta pianificazione e un adeguato coinvolgimento delle parti interessate, il nucleare può essere integrato con successo anche in contesti nuovi.

Oltre alla tecnologia, esistono altre “infrastrutture immateriali” che sono essenziali per il successo di un programma nucleare: la formazione di risorse umane qualificate, un’industria specializzata e, soprattutto, il consenso della popolazione.

In una democrazia, non si può prescindere dallo stakeholder engagement: è essenziale coinvolgere cittadini, imprese e istituzioni per costruire un progetto condiviso e sostenibile nel lungo periodo.

La difficoltà principale è che, senza un’adeguata accettazione collettiva, diventa complicato pianificare e realizzare investimenti strategici a lungo termine. Dobbiamo però guardare oltre le percezioni del momento e riflettere sul destino energetico del Paese e dell’Europa.

Il nucleare non è solo una questione di produzione energetica, ma anche di industria, posti di lavoro e competitività economica. Ignorare questi aspetti significa mettere a rischio la nostra indipendenza energetica e la stabilità del sistema produttivo.



Per superare le diffidenze, servono campagne di informazione trasparenti e basate sulla scienza, non su interessi di parte. In Europa si sono investiti trilioni di Euro nelle rinnovabili, ma senza risolvere il trilemma energetico.

Riguardo la percezione pubblica della sicurezza nucleare, i dati certificati dalle agenzie internazionali parlano chiaro: il nucleare ha il tasso di fatalità più basso tra tutte le fonti di energia. A Fukushima-Daiichi, per esempio, non ci sono state vit-

Stefano Monti è un ingegnere nucleare con oltre 40 anni di esperienza nel settore. Attualmente è Presidente dell'Associazione Italiana Nucleare (AIN) e della European Nuclear Society, la più grande associazione nucleare in Europa, che riunisce più di 12.000 professionisti del mondo accademico, dell'industria, dei centri di ricerca e delle autorità di sicurezza. Ha lavorato per oltre dieci anni presso la International Atomic Energy Agency di Vienna, ricoprendo anche il ruolo di Head of Nuclear Power Technology Development. Inoltre, è stato responsabile della Divisione Metodi per la Sicurezza dei Reattori e del Ciclo del Combustibile dell'ENEA.

time dirette legate all'incidente nucleare, mentre ogni anno le emissioni dei combustibili fossili causano milioni di morti premature a causa, per esempio, degli incidenti durante l'estrazione del carbone o durante il trasporto e l'utilizzo del gas naturale, o per cedimento di dighe di impianti idroelettrici o per inquinamento atmosferico causato dal bruciamento di fossili.

In definitiva, la sfida non è solo tecnologica, ma anche culturale e comunicativa. Per fare scelte consapevoli, il dibattito deve essere guidato da dati oggettivi e da una visione a lungo termine che tenga conto delle reali necessità energetiche del futuro.

Quali sono le principali aree di studio e collaborazione in cui l'Italia è maggiormente coinvolta nel settore nucleare?

Dall'incidente di Chernobyl in avanti, l'Italia ha continuato a lavorare su tutte le tecnologie nucleari avanzate. Oggi, una delle aree di maggiore interesse sono gli SMR, un settore in cui il nostro Paese possiede competenze significative. Io stesso, prima di entrare nell'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica, ho ricoperto ruoli di responsabilità in questo ambito. L'Italia, con il sostegno del governo, della piattaforma nazionale dedicata al nucleare e dell'industria nazionale coinvolta in progetti europei, sta puntando con decisione su questa tecnologia.

L'intero mondo occidentale, tutta-

via, ha accumulato un ritardo di alcuni decenni rispetto a Russia e Cina, che hanno continuato a sviluppare il settore senza interruzioni. In Europa e negli Stati Uniti ci sono diversi progetti in fase avanzata, alcuni dei quali vicini alla certificazione. Riteniamo che sia realistico prevedere l'entrata in funzione dei primi SMR nel mondo occidentale entro il 2030. L'Unione Europea con la cosiddetta SMR Industrial Alliance si è proprio data questo obiettivo.

Questi reattori modulari sono particolarmente interessanti perché, oltre a generare elettricità, possono produrre calore, un aspetto fondamentale per numerose applicazioni industriali. Inoltre, potrebbero contribuire alla produzione di idrogeno, ampliando ulteriormente le possibilità di integrazione nel mix energetico.

Va sottolineato che qualsiasi programma nucleare deve basarsi sulle cosiddette "tre S": *Security*, *Safety* e *Safeguard*. In altre parole, devono essere garantite la sicurezza operativa, la protezione dagli incidenti e la conformità agli standard internazionali di non proliferazione.

L'adozione dell'intelligenza artificiale e di nuovi strumenti digitali potrà rafforzare ulteriormente questi criteri di sicurezza, migliorando la gestione degli impianti e la prevenzione dei rischi.

Il grande equivoco sul nucleare: scetticismo o accettazione

di **Matteo Giuliano Caroli**

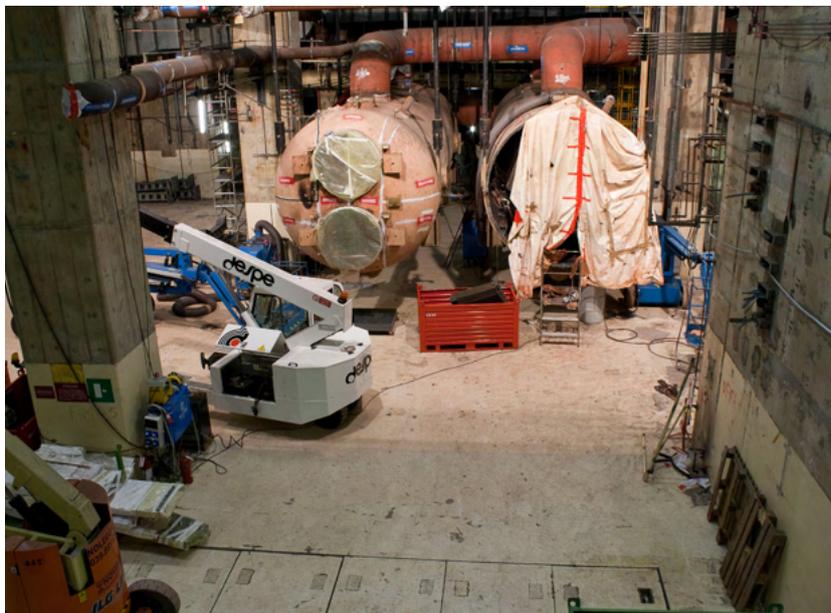
È noto come mutò l'atteggiamento dell'opinione pubblica in Italia dopo l'incidente alla centrale di Chernobyl nel 1986; così come il rapido abbandono della notevole capacità tecnologica e produttiva nucleare che avevamo al tempo, determinato dagli esiti di un referendum popolare. Molto si è discusso su quella vicenda, ma è ancora senza risposta la fondamentale domanda se sia efficace e giusto, anche in democrazia, lasciare al sentimento della popolazione una scelta dove vantaggi e benefici possono essere compresi solo sulla base di complesse analisi tecni-

che. Si tratta di un quesito dai risvolti molto delicati; credo che gli scenari internazionali in atto richiedano una risposta diversa da quella prevalsa sino ad ora. Del resto, da qualche anno, la stessa opinione pubblica sta cambiando l'orientamento di allora. Non c'è ancora un'evidenza statistica di valenza generale, ma diversi sondaggi mostrano una consistente crescita dei favorevoli all'energia nucleare; una maggioranza che chiede informazioni affidabili per valutare meglio vantaggi e svantaggi; i contrari "a prescindere" sono divenuti ormai minoranza.

Cosa è cambiato? In primo luogo, sono passati quarant'anni che significa una generazione e mezzo; quella attuale è forse più consapevole e sicuramente più pragmatica. Significativo, ad esempio, che la maggioranza degli italiani ritenga non sia giusto che movimenti di protesta minoritari possano fermare la realizzazione di un'opera autorizzata secondo tutti i criteri di sicurezza definiti dallo Stato, sia essa una nuova centrale nucleare o un deposito di stoccaggio di prodotti radioattivi. In questi decenni, anche la tecnologia ha compiuto importanti passi in avanti: nucleare non significa più enormi impianti, molto complessi da gestire, da tenere in totale sicurezza, e da dismettere a fine vita. Oggi accelera la efficace realizzabilità dei cosiddetti *Small Modular*

Reactors (SMR), strutture produttive modulari, con potenza complessiva che arriva fino a 300 MW(e), con il sotto-insieme degli *Small reactors* che arrivano fino a 10 MW(e). Sono impianti che possono essere assemblati in un sito produttivo e trasportati per essere installati nell'area dove c'è una specifica domanda di energia. Allo stesso modo, si concretizza la tecnologia degli *Advanced Modular Reactors* (AMR), caratterizzati essenzialmente anche dall'utilizzo di migliori sistemi di raffreddamento e di sicurezza. Proprio la realizzabilità di impianti basati su tecnologie innovative, più sicure e funzionali incontra il favore di quote crescenti di opinione pubblica.

Venuta ormai meno la coltre dell'ideologia "anti", i vantaggi del nucleare così detto "di nuova generazione" sono sempre più condivisi: è una produzione di energia del tutto *carbon free*; è continua e, quindi, ideale per bilanciare le complessità della generazione da fonti rinnovabili. Del resto, è ormai acclarato che l'aumento della capacità produttiva da tali fonti non potrà essere sufficiente per raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione, anche solo considerando l'enorme domanda incrementale rappresentata dagli sviluppi dell'AI. Le nuove tecnologie garantiscono una sicurezza praticamente assoluta dei reattori nucleari; la minore dimensione contribuisce a rendere più facile la dismissione a fine vita. Anche la gestione delle scorie ha fatto progressi notevoli.



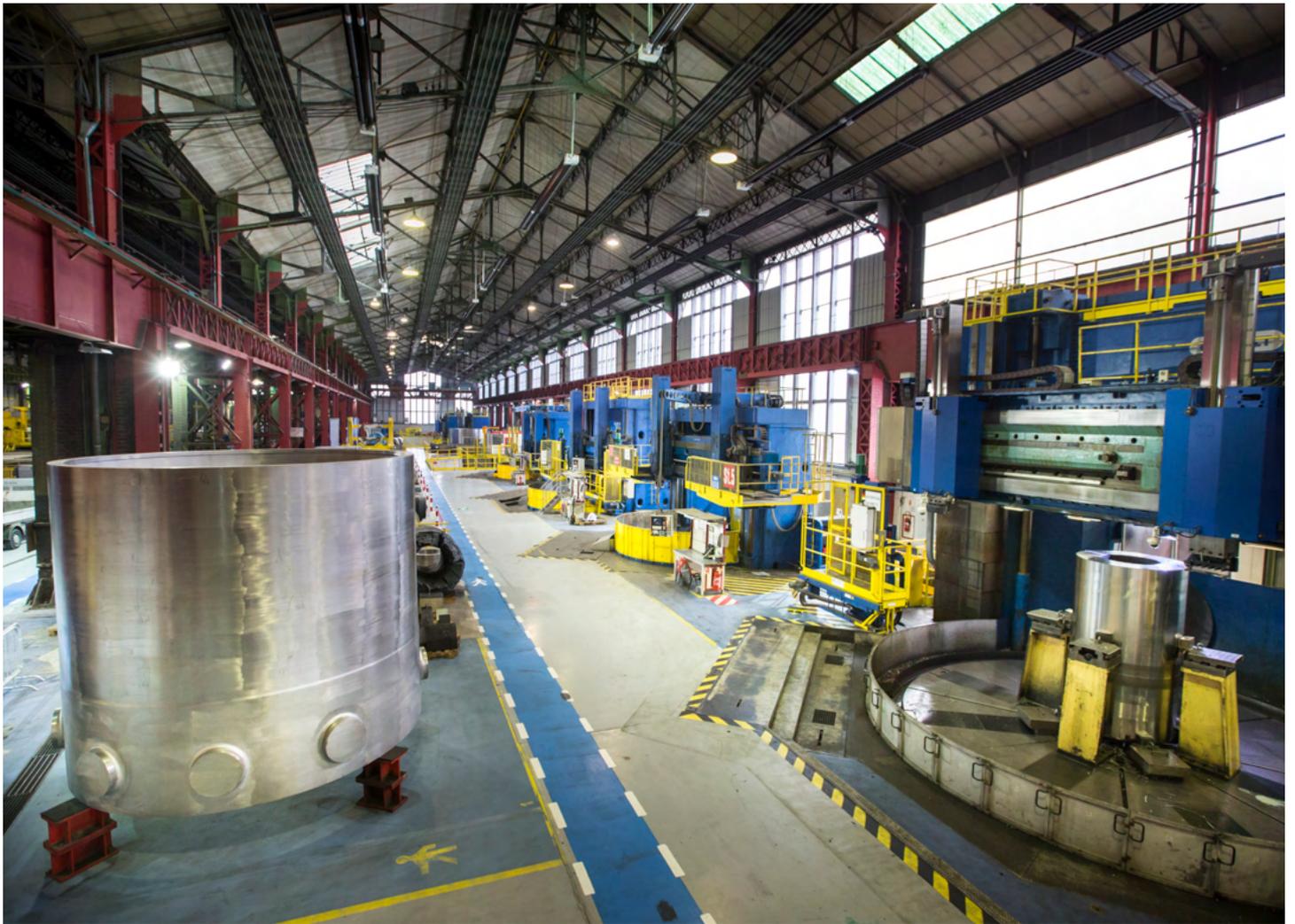
Tra i “non detti” serviti in questi ultimi vent’anni a favorire la crescita “a prescindere” delle installazioni di pannelli solari c’è stato il fatto che gli obiettivi di crescita della potenza da energia solare richiede un’occupazione di spazio non sostenibile e comunque tecnicamente molto difficile da realizzare. In passato, tanto è stato fatto per sfruttare al meglio spazi poco rilevanti, dai tetti di abitazioni, strutture logistiche e commerciali e di capannoni industriali, a zone di nessun rilievo paesaggistico e agricolo. Per raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione dei prossimi anni, tutto questo non è più sufficiente; è essenziale promuovere tecnologie che richiedono strutture produttive che occupano relativamente poco spazio, quali appunto le relativamente piccole centrali nucleari.

Richiamati tutti i vantaggi del nucleare e quindi il suo ruolo fondamentale nella “neutralità energetica”, sarebbe opportuno evitare di assumere a suo favore quell’atteggiamento messianico che ha accompagnato in questa prima parte di secolo lo sviluppo delle rinnovabili. Meglio affrontare con realismo e pazienza i nodi ancora irrisolti. In primo luogo, il business model di un impianto nucleare è molto complesso: nonostante abbiano dimensioni relativamente contenute, gli SMR sono strutture produttive ad alta intensità di capitale e hanno elevati costi di messa in opera; necessitano

quindi di un modello di ricavi molto solido e di un forte controllo sul costo del capitale nel lungo termine. A questo si aggiunge che, anche nel caso delle tecnologie più avanzate, i costi di produzione sono per ora piuttosto elevati; allo stato attuale, non è la produzione nucleare che può migliorare in modo strutturale il problema cruciale per famiglie e imprese di portare il prezzo del kilowattora su valori comparabili almeno a quelli degli altri principali Paesi europei.

Il fatto che la maggioranza degli italiani sia progressivamente più favorevole alla produzione di energia nucleare non significa affatto che lo sia altrettanto con l’ipotesi che una centrale sia collocata nel proprio territorio. Forse nessun’altra struttura come un impianto nucleare suscita l’effetto *nimby* nelle persone, comprese quelle con maggiori capacità di valutazione razionale. Il lavoro per far percepire la sicurezza e i vantaggi anche in termini di impatto ambientale di un reattore nucleare è ancora lungo e complesso e non va sottovalutato. È auspicabile che la nuova stagione che si sta aprendo per l’energia nucleare rappresenti, oltre all’opportunità di riduzione delle emissioni di carbonio e di rafforzamento della sicurezza energetica, anche un’occasione importante in cui nel nostro Paese prevalga l’atteggiamento centrato sulla soluzione di problemi piuttosto che su prese di posizione di sapore ideologico.

Matteo Giuliano Caroli è professore ordinario di gestione delle imprese internazionali e Associate Dean per la sostenibilità e l’impatto alla Luiss Business School, dove è anche direttore dell’area della ricerca applicata e osservatori. La sua attività è focalizzata sui modelli di business e la gestione sostenibile dell’impresa; su questo tema ha recentemente pubblicato: *Organizzazione e ruoli manageriali nella gestione sostenibile dell’impresa*, Rubbettino, 2022; *Economia e gestione sostenibile dell’impresa*, Mc Graw-Hill, 2021, *L’Italia sostenibile – l’economia circolare per la politica industriale del Paese*, Luiss University Press, 2021. È membro di Consigli di amministrazione e di organi di controllo di imprese di grandi dimensioni. Ha anche svolto incarichi rilevanti per Pubbliche amministrazioni centrali e regionali.



Dal silenzio alla consapevolezza: educare al nucleare

di Massimo Sideri

Il 26 aprile del 1986 è la data che cambiò il mondo ma che il mondo scoprì in ritardo, qualche giorno dopo. Chi lo ha vissuto anche a 14 anni, come accadde a me, ne è come rimasto imprigionato con piccoli frammenti indelebili, ricordi, esperienze fuse e confuse con le sensazioni. Nel 2026 saranno 40 anni esatti. E chi lo ha vissuto non dimentica soprattutto una cosa: di quel sabato non si seppe nulla. E anche quando si seppe non si capì tutto, per settimane. Il 26 aprile il «Corriere della Sera» in prima pagina riportava la notizia di un'autobomba a Madrid che aveva

causato cinque morti: il ritorno del terrorismo basco. Il presidente della Repubblica Francesco Cossiga aveva visitato il giorno prima il Muro di Berlino, mentre a Genova c'era stato «un altro morto per il vino al metanolo». Di tutto questo non rimane nulla. Tranne Chernobyl.

Quel giorno, qualche ora prima della stampa del giornale, in piena notte, all'una e ventitré minuti ora UTC+4 – dunque le 23:23 del 25 aprile in Italia – era esploso il reattore numero 4 della centrale atomica Lenin, diventata nota poi solo come la centra-

le di Chernobyl: il peggior disastro nucleare civile della storia. Non ce ne fu traccia nemmeno sui giornali e sui telegiornali di domenica 27 aprile: le “pensioni pericolanti” e il “deficit commerciale” furono le due notizie del giorno (sembrano ancora attuali), mentre in fondo alla pagina un reportage dello storico inviato di guerra Ettore Mo era intitolato: «Con i mujahidin sotto il fuoco dei Mig russi». Poi altre immagini-sensazioni affastellate: i cittadini dei Paesi del Nord Europa che corrono nelle farmacie a fare incetta di pasticche di iodio per rallentare l’assorbimento. Il governo italiano che rassicura sulla “nube nucleare”. Le piogge che, invece, portano i radionuclidi su ortaggi, piante e foraggi, inquinando il latte. Ricordo a Roma lo sversamento di migliaia di litri di latte.

Chernobyl non è stato solo il peggior disastro nucleare civile della storia. Ma è stato anche in assoluto il disastro gestito peggio nella storia dell’umanità. Una macchia che rimane indelebile sulla figura storica di Gorbaciov che pure per la mia generazione fu un grande statista e personaggio, capace di spingere l’URSS verso la Glasnost’, la trasparenza, una lezione che oggi appare un lontano ricordo. L’URSS fece finta di nulla. Un anno dopo l’Italia votò il referendum per bloccare il nucleare. Riprendo questi appunti utilizzati per un ricordo di Chernobyl che ho pubblicato sul «Corriere del-

la Sera» tre anni fa per riflettere su come il ritorno al nucleare, in particolare in Italia, sia un dibattito non solo tecnologico, ma anche culturale e sociale. La stratificazione è stata massiccia. Profonda. Forse anche inconscia. Oggi che la rete e i social network permettono di seguire una guerra in diretta, con aggiornamenti continui su uno smartphone tenuto in tasca che contribuiscono ad anestetizzarci sui fatti gravi, la lentezza con cui prese forma nella nostra mente la nube radioattiva che si muoveva sull’Europa sembra appartenere a un mondo in bianco e nero.

L’informazione era un puzzle da completare più che un flusso di dati continui. I blocchi di notizie impiegavano ore a passare da una ristretta cerchia di persone all’opinione pubblica. Sembra storia (lo è) anche se molti di noi lo hanno vissuto e lo ricordano bene. Il mondo intero, nel frattempo, ha conosciuto anche il terrorismo in diretta live con la scena del secondo aereo sulle Torri Gemelle di New York l’11 settembre del 2001 e il loro collasso. Ma allora non solo la tecnologia dei media era diversa. Era diverso il mondo: l’esplosione era avvenuta al di là della Cortina di ferro, del Muro di Berlino, in pieno territorio dell’Unione delle Repubbliche Socialiste Sovietiche.

L’ampio ricordo, personale eppure collettivo, deve far parte del dibattito ora che il governo Meloni ha uf-

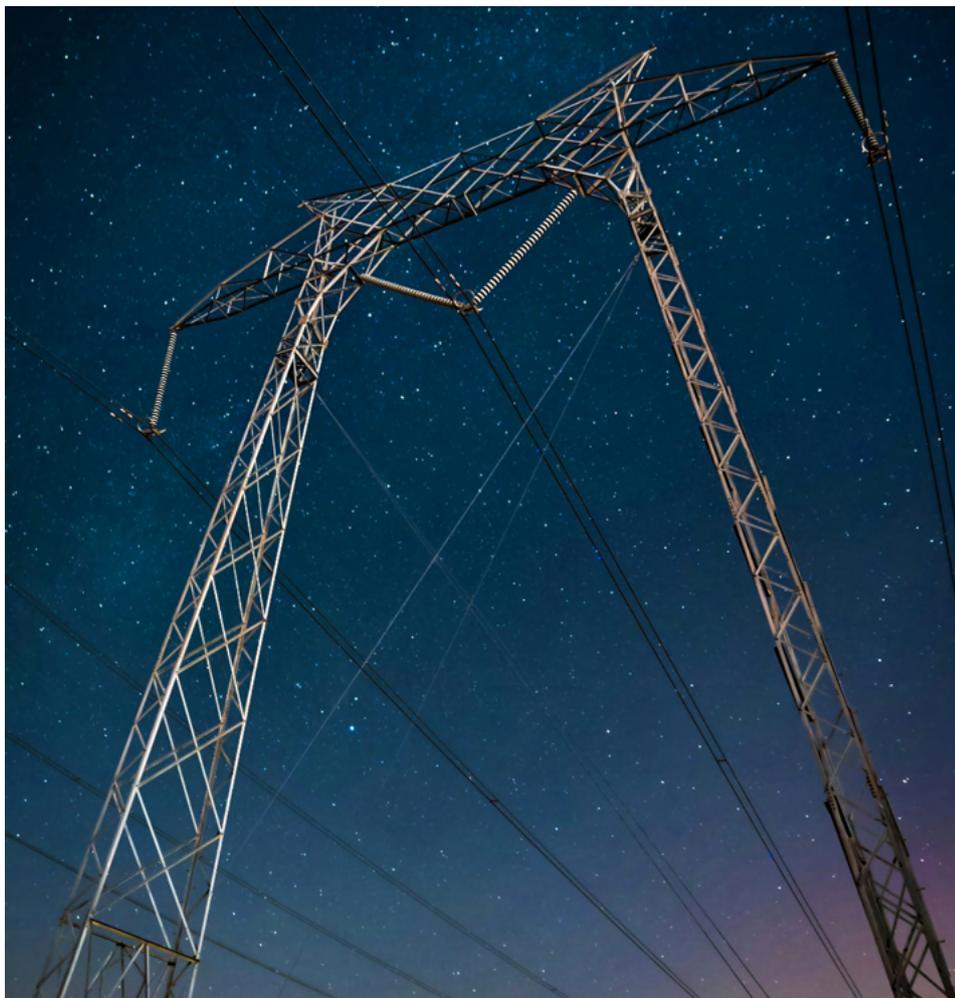
ficialmente tratto il dado atomico. Perché se è vero che non possiamo continuare a vivere con lo spettro di Chernobyl (non stupisce in questo senso il fatto che, secondo alcuni sondaggi che comunque andrebbero approfonditi, i più giovani sarebbero meno avversi a questo ritorno) è anche vero che la lezione di questi quasi 40 anni non può essere messa sotto il tappeto.

È un fatto che la centrale atomica Lenin fosse non solo una vecchia tecnologia ma anche difettosa fin dalla partenza. È anche un fatto che oggi la tecnologia della fissione nucleare (si ricordi solo di passaggio che sia Enrico Fermi che Edoardo Amaldi dopo la Seconda guerra mondiale si fecero ambasciatori del suo uso pacifico) sta entrando in nuove generazioni maggiormente affidabili. Ma non tutto si riduce alla scienza e anche alla razionalità (che senso ha non produrre energia atomica e poi acquistarla a caro prezzo dalla Francia?). Di mezzo c'è sempre la politica. Ed è ancora un fatto inopinabile che in quasi 40 anni di governo di Prima, Seconda e Terza Repubblica, nessuno sia riuscito a sciogliere lo gnommero dei residui radioattivi.

In alcuni casi il cosiddetto *decommissioning* (lo smantellamento delle centrali nucleari) non è riuscito a risolvere il tema del nocciolo di uranio. Il deposito per gestire i rifiuti radioattivi è un dossier che ogni ministro che arriva trova sulla scrivania e



Massimo Sideri è inviato ed editorialista del «Corriere della Sera», testata dove lavora dal 2000 occupandosi di economia, scienza e innovazione. Ha fondato e diretto il mensile «Corriere Innovazione» dal 2017 al 2021, è direttore scientifico della RCS Academy AI & Innovation ed è professore aggiunto di Storia socio-economica dell'Innovazione all'Università Luiss. Ha pubblicato numerosi saggi, fra cui *L'innovatore rampante* (tradotto in inglese per McMillan), *Il Visconte Cibernetico* e *La sindrome di Eustachio* (finalista "Premio Biella Letteratura e Industria"). Laureato cum laude in Economia alla Sapienza di Roma, ha frequentato il biennio dell'Ilg Walter Tobagi. Ha ricevuto l'Assobiotec Media Award.

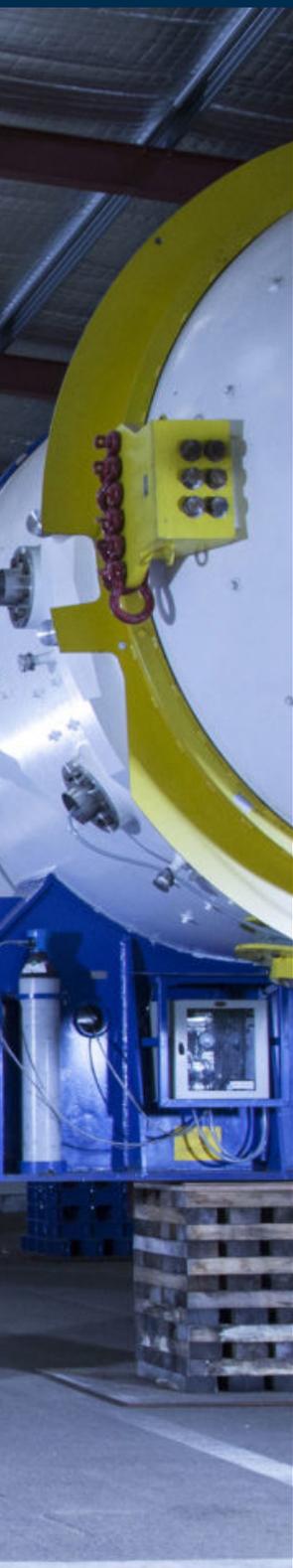


lascia sulla scrivania. In mezzo, spese e sempre meno frammentarie, rimangono tante altre domande che ha senso porsi perché non ci possiamo certo permettere di commettere errori e di non condividere un progetto energetico Paese, quale che sia la forza politica in campo nelle varie successioni temporali: dove stanno andando in parallelo tutte le altre tecnologie legate alle rinnovabili?

Dove stanno andando le altre economie? Qual è la migliore strategia, date le caratteristiche anche geografiche italiane, per raggiungere l'indipendenza energetica? Siamo solo all'inizio di un percorso. E per ora abbiamo solo domande. E qualche furba accelerazione sulle risposte possibili.

Verso e oltre l'atomo





Il mito della caverna *La Repubblica, Platone*

E se lo si costringesse a guardare la luce stessa, non sentirebbe male agli occhi e non fuggirebbe volgendosi verso gli oggetti di cui può sostenere la vista? e non li giudicherebbe realmente piú chiari di quelli che gli fossero mostrati? – È cosí, rispose. – Se poi, continuai, lo si trascinasse via di lí a forza, su per l'ascesa scabra ed erta, e non lo si lasciasse prima di averlo tratto alla luce del sole, non ne soffrirebbe e non s'irriterebbe di essere trascinato? E, giunto alla luce, essendo i suoi occhi abbagliati, non potrebbe vedere nemmeno una delle cose che ora sono dette vere. – Non potrebbe, certo, rispose, almeno all'improvviso. – Dovrebbe, credo, abituarsi, se vuole vedere il mondo superiore. E prima osserverà, molto facilmente, le ombre e poi le immagini degli esseri umani e degli altri oggetti nei loro riflessi nell'acqua, e infine gli oggetti stessi; da questi poi, volgendo lo sguardo alla luce delle stelle e della luna, potrà contemplare di notte i corpi celesti e il cielo stesso piú facilmente che durante il giorno il sole e la luce del sole. – Come no? – Alla fine, credo, potrà osservare e contemplare quale è veramente il sole, non le sue immagini nelle acque o su altra superficie, ma il sole in se stesso, nella regione che gli è propria. – Per forza, disse. – Dopo di che, parlando del sole, potrebbe già concludere che è esso a produrre le stagioni e gli anni e a governare tutte le cose del mondo visibile, e ad essere causa, in certo modo, di tutto quello che egli e i suoi compagni vedevano. [...]

Rifletti ora anche su quest'altro punto. Se il nostro uomo ridiscendesse e si rimettesse a sedere sul medesimo sedile, non avrebbe gli occhi pieni di tenebra, venendo all'improvviso dal sole? – Sí, certo, rispose. – E se dovesse discernere nuovamente quelle ombre e contendere con coloro che sono rimasti sempre prigionieri, nel periodo in cui ha la vista offuscata, prima che gli occhi tornino allo stato normale? e se questo periodo in cui rifà l'abitudine fosse piuttosto lungo? Non sarebbe egli allora oggetto di riso? e non si direbbe di lui che dalla sua ascesa torna con gli occhi rovinati e che non vale neppure la pena di tentare di andar su? E chi prendesse a sciogliere e a condurre su quei prigionieri, forse che non l'ucciderebbero, se potessero averlo tra le mani e ammazzarlo? – Certamente, rispose.

L'era nucleare e superconduttiva

di **Davide Malacalza**

Immaginiamo il futuro del mix energetico italiano facendo un salto in avanti al 2040, nel quadro di uno scenario Net zero. A quel punto, secondo le più autorevoli previsioni, anche ipotizzando un ruolo preminente delle fonti rinnovabili, queste non saranno comunque sufficienti a sostituire il *base load* fornito attualmente da quelle fossili. Quindi, il percorso verso la decarbonizzazione nel rispetto della tassonomia europea potrà diventare concreto solo con il nucleare di nuova generazione. In questo lasso di tempo è prevedibile che si ottengano risultati tangibili per

quanto riguarda lo sviluppo di reattori a fusione nucleare per la produzione di energia. Non era mai accaduto, come in questi ultimi quattro anni, che investimenti privati per oltre 7 miliardi di euro consentissero la creazione di start up per lo sviluppo di questa tecnologia basata su reattori a confinamento magnetico quali gli Stellarator e i Tokamak. Nel mentre, i grandi progetti internazionali in corso di realizzazione – uno è anche italiano e si chiama DTT – e innovative forme di partnership pubblico-privato consentiranno l'implementazione industriale di questa tecnologia.

Davide Malacalza diventa amministratore delegato di Trametal, attiva nella produzione di lamiera da treno al carbonio, dopo la Laurea in Economia e commercio. Negli anni 2000, insieme alla sua famiglia avvia, come azionista, lo sviluppo di una filiera industriale della superconduttività con l'acquisizione dell'Unità Magneti di Ansaldo, ora ASG Superconductors, di cui diventa Presidente. Oltre a confermare l'eccellenza tecnologica – sono di ASG i magneti che hanno consentito la scoperta del Bosone di Higgs al CERN – inizia lo sviluppo di nuovi materiali e sistemi che portano la superconduttività più vicina alle applicazioni industriali. Nel 2024 l'Università di Genova gli ha conferito la laurea honoris causa in Scienza dei materiali.

Il rinnovato spirito di apertura che si registra in Italia sul nucleare è quindi non solo una buona notizia ma soprattutto la piattaforma necessaria per rilanciare lo sviluppo industriale per un Paese come il nostro, notoriamente privo di rilevanti risorse energetiche. In questi ultimi anni l'Italia ha purtroppo vinto di gran lunga il campionato europeo del prezzo più alto dell'energia, quasi il doppio rispetto a Spagna e Germania secondo i dati del think tank Ember, conseguenza del fatto che il 55% dell'energia elettrica italiana proviene da fonti fossili. Al tempo stesso, sappiamo tutti che la filiera del fotovoltaico è di matrice asiatica e non porta grandi benefici in termini di sviluppo industriale al vecchio continente. La storia spesso ha delle accelerazioni improvvise che cambiano radicalmente gli scenari tecnologici con cui confrontarsi, nel caso specifico dell'energia, oltre a sviluppare il nucleare e decarbonizzare, dovremo risolvere le sfide legate all'elettrificazione massiva dei processi tecnologici attuali, e alle nuove esigenze dettate dall'IA e dalla diffusione sempre maggiore dei data center, passando per la mobilità elettrica e le connessioni di rete transfrontaliere. Senza tralasciare la crescente diffusione dell'idrogeno quale vettore energetico.

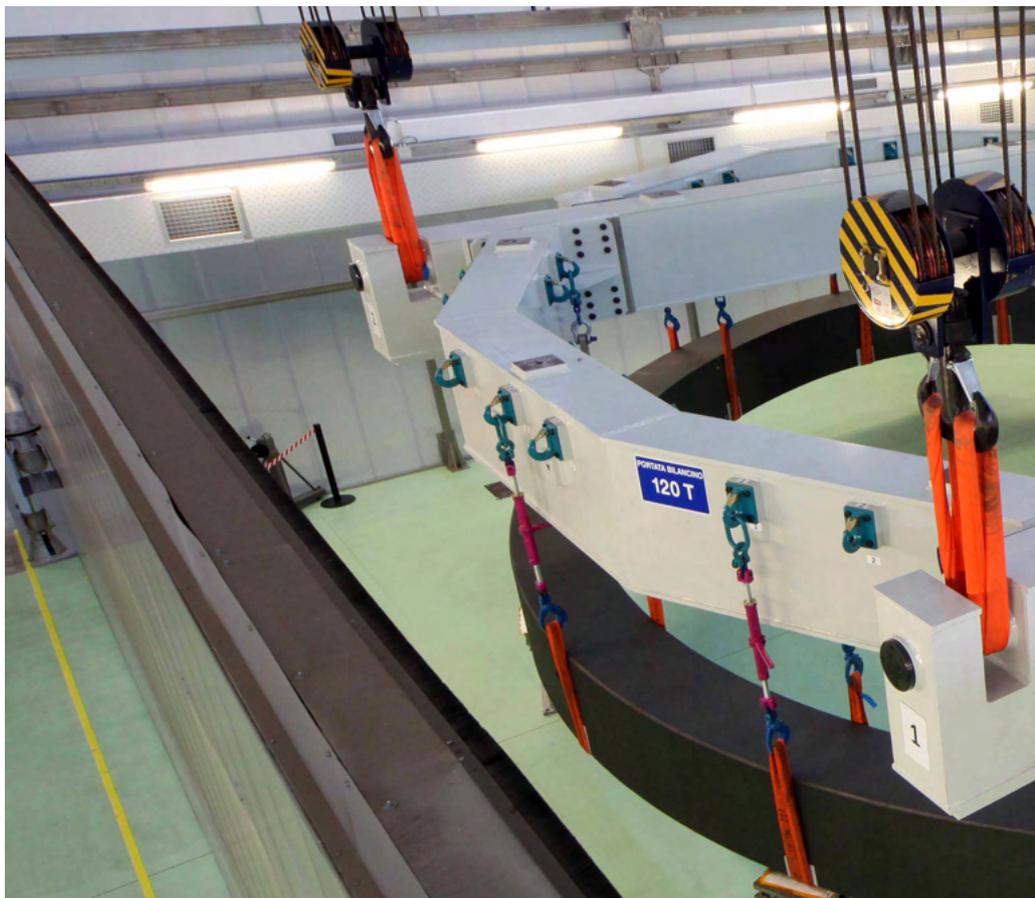
Tutte queste esigenze renderanno non solo obbligatorio produrre energia *green*, ma anche trasportarla e immagazzinarla in modo efficiente

minimizzando le perdite. McKinsey, solo per i data center, prevede che la domanda elettrica al 2030 in Europa passerà da 62 a 150 TWh mentre la domanda complessiva potrebbe crescere fino a 460 TWh. Al tempo stesso nel 2024 gli investimenti dei DSO nelle reti europee sono arrivati a circa 80 miliardi di euro ed è prevedibile che aumenteranno in futuro. Di solito le grandi rivoluzioni sono caratterizzate da un cambio di passo nella tecnologia e nei materiali, e anche nel caso del nucleare come delle reti, la ricerca gioca un ruolo fondamentale. Penso a ITER, il progetto più grande al mondo sulla fusione guidato da Pietro Barabaschi, ma anche al CERN che sotto la guida di Fabiola Gianotti ha approcciato il tema energetico con lungimiranza, contribuendo allo sviluppo di materiali e soluzioni per la trasmissione di energia sempre più evolute e basate sulla superconduttività.

A proposito di superconduttività: scoperta da più di un secolo, è stata lungamente confinata ad applicazioni in ambito scientifico per la necessità di raffreddamento a temperature proibitive. L'evoluzione di applicazioni e materiali nel corso dei decenni l'hanno avvicinata alla vita di tutti i giorni e al settore medicale. Ora, con i temi energetici tornati al centro dell'agenda italiana e globale, si sta verificando una congiunzione temporale di reciproco interesse tra tecnologia nucleare, necessità

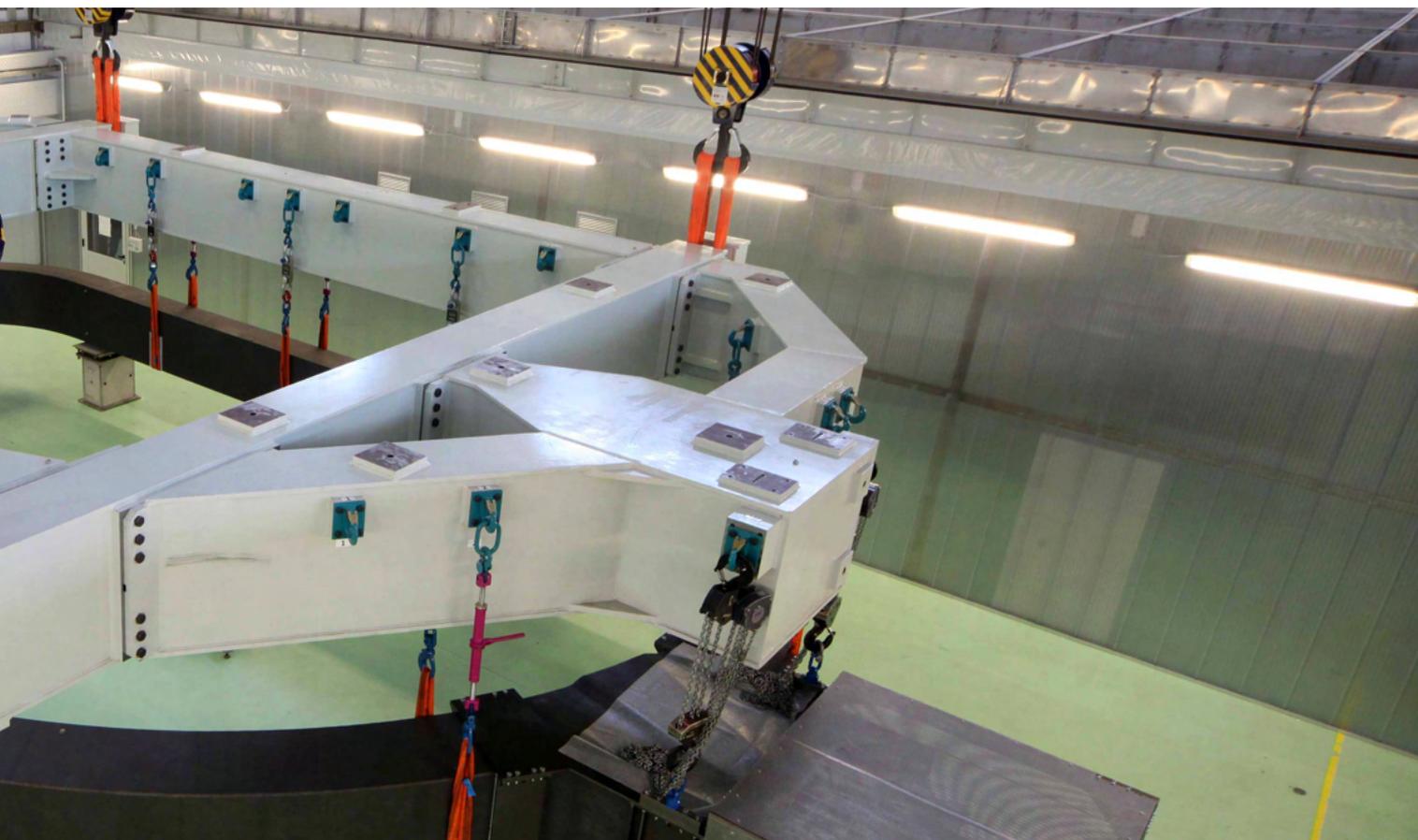
di innovare le reti e questa tecnologia. Esistono materiali e cavi superconduttivi già utilizzabili per la trasmissione di energia in DC a *footprint* ridotto e zero perdite: sono già in funzione al CERN, e in sperimentazione in diversi progetti europei; ASG Superconductors ne sta realizzando uno da 1 GW in Italia con INFN. Con l'aumentare dell'energia nelle reti avere cavi più efficienti e con meno perdite diventa sempre più importante. Non è quindi fantascienza immaginare cavi superconduttivi in MgB2 prodotti e sviluppati in Italia che collegano centrali nucleari, impianti fotovoltaici, connessioni transeuropee e industrie energivore alla rete, piuttosto che cavi dedicati a portare grandi quantitativi di energia in poco spazio. Stiamo parlando di un fattore di riduzione 10, se non superiore in specifici casi, del footprint rispetto alle tecnologie tradizionali. Ad esempio diventa possibile attraversare con minimo impatto ambientale una città o i porti con cavi in grado di trasportare grandi quantità di corrente.

Oltre che per la fusione la superconduttività potrebbe quindi essere presente lungo tutta la filiera energetica: per far funzionare ciclotroni ad altissima energia negli SMNR, per il trasporto e lo storage zero losses. Non ultimo, il superconduttore realizzato in MgB2 – Diboruro di Magnesio – non richiede per la sua produzione l'utilizzo di materiali estratti e monopolizzati da pochi



Paesi ed è perfettamente compatibile per essere utilizzato alla temperatura dell'idrogeno liquido.

Tutto questo per dire che, se saremo capaci di creare un "ecosistema" in primis italiano, ma anche europeo, del nucleare e dell'innovazione energetica, abbiamo grandi prospettive di sviluppo industriale e di nuove tecnologie unendo in filiera grandi *utilities* e aziende con PMI innovative. A conferma di quanto evidenziato si vedono alcuni segnali prodromici di queste nuove opportunità di svi-



luppo, sia a livello di dichiarazioni politiche, penso al piano Draghi piuttosto che alle dichiarazioni della nostra presidente del Consiglio Giorgia Meloni sulla fusione, o al recente discorso di Davos e al Parlamento Europeo della Presidente Von Der Leyen che ha citato il tema delle reti e la necessità di innovazione in Europa. La piattaforma nucleare avviata dal Ministro Pichetto Fratin, insieme al DL approvato mentre sto scrivendo, sono passi necessari per l'Italia, ora non resta che lavorare insieme

per “attaccare i fili”. Concludo con i numeri: oggi il nucleare genera 4 miliardi di euro di ricavi per la filiera industriale italiana, la seconda in Europa. Mentre per la fusione, secondo i dati elaborati dal MIT, lo sviluppo a livello globale potrebbe aumentare il *global GDP* di 68 trilioni di euro in uno scenario conservativo, fino a 175 in quello più aggressivo. Dopo aver “studiato” tanti anni vale la pena per l'Italia, le Istituzioni e le sue aziende giocare in squadra questa partita.

Nucleare indispensabile

di **Davide Tabarelli**

Paradossalmente l'Italia non ha mai abbandonato il nucleare, anche dopo il referendum del 1987 che sancì la chiusura delle poche centrali di cui disponevamo. Erano quattro, Trino Vercellese, Caorso, Latina e Garigliano, e contavano per il 4% della nostra totale produzione elettrica, poca cosa, ma le nostre ambizioni, del piano energetico del 1981, quello dopo la seconda crisi energetica, erano di averne almeno altre cinque ed una, infatti, era in costruzione, quella di Montalto di Castro, poi abbandonata a tre quarti dal completamento. Con il risultato del referendum nettamen-

te contrario, si azzerò la produzione nucleare, ma, parallelamente, cominciarono a salire le importazioni dall'estero e da allora sono state in crescita e diventate un connotato strutturale del nostro bilancio energetico.

Il paradosso è che si tratta in gran parte di energia elettrica importata dalla Francia, potenza originata da centrali nucleari. Certamente il nucleare da noi non è mai stato importante e anche prima del referendum avevamo manifestato le consuete difficoltà, quelle che al giorno d'oggi si evidenziano per la contrarietà anche agli impianti eolici o fotovoltaici.



Oggi siamo il paese che fra quelli industrializzati dipende di più da importazioni elettriche. Già questa è una buona ragione per ritornare al nucleare, o meglio, per ritentare l'entrata nel nucleare, consapevoli delle enormi difficoltà che ci aspettano. C'è stato un altro referendum nel 2011, anche questo contrario, mentre non siamo ancora riusciti a realizzare il deposito per le scorie delle prime centrali, una mancanza che ci è valsa l'infrazione da parte della commissione europea. Occorre comunque insistere e provare a convincere la gente che serve e le motivazioni sono numerose. La prima ha carattere culturale, quasi etico, perché siamo il paese di Enrico Fermi, lo scienziato premio Nobel per la fisica nel 1939 che per primo scoprì come controllare la fissione e così come

impiegare il nucleare per scopi pacifici. Veniva dalla scuola di fisica di Roma, quella che è ancora visibile a tutti al museo di via Panisperna, con entrata dal ministero dell'Interno al Viminale, un luogo che tutti gli italiani dovrebbero visitare. Ma di università prestigiose dove si insegna fisica della materia e ingegneria nucleare ce ne sono diverse, il Politecnico di Milano, quello di Torino, le università di ingegneria di Bologna, Padova, Palermo.

Negli ultimi anni le matricole che si iscrivono ai corsi di ingegneria nucleare sono in costante crescita e diventano laureati che vanno a lavorare all'estero presso le società elettriche di tutto il mondo. Tutta Europa ha bisogno del nucleare, perché il sistema elettrico del continente,



soprattutto della parte nord occidentale, si regge sullo zoccolo duro della potenza di base della Francia, quelle 56 centrali che esportano non solo all'Italia, ma anche alla Germania, che nel 2023 ha chiuso le sue, e alla Gran Bretagna, che ha spento quelle a carbone. Il problema è che le centrali francesi sono tutte di un'età avanzata, oltre i 40 anni e, per quanto si possa allungarne la vita con in-

vestimenti, molte dovranno essere sostituite. Peraltro, la loro età comporta spesso manutenzioni straordinarie e fermate che possono diventare diffuse su tutti gli impianti creando problemi, come accadde nel 2022, per tutti i mercati elettrici europei.

Il nucleare serve a tutto il pianeta terra, perché è l'unica fonte che non emette CO₂ e che, allo stesso tempo,

Davide Tabarelli è presidente e fondatore di NE Nomisma Energia dal 2006, società di ricerca su energia e ambiente. Si laurea in Economia presso l'Università di Modena nel 1985, con lode, con una tesi sui mercati del petrolio. Nel 1986 entra nella sezione Energia di Nomisma, guidando circa 90 studi. Nel corso della propria carriera collabora con il Ministero dell'Industria e il Ministero dell'Ambiente. Dal 2017 al 2020 è membro dell'Advisory Board di ENI sulla transizione energetica, e dal 2024 è Commissario di Acciaierie d'Italia. È professore a contratto ed editorialista de «Il Sole 24 Ore».

ha grande intensità energetica ed è programmabile. Le fonti rinnovabili, quelle che attualmente si riescono a realizzare, l'eolico e il fotovoltaico, sono prive di emissioni, ma sono disperse e intermittenti, non programmabili. L'elettricità, che è un vettore di energia, deve essere sempre disponibile, sempre, tutte le 8.670 ore che compongono un anno, non solo le 2.200 ore medie in cui c'è vento in Italia o le 1.500 ore che c'è sole intenso. Siccome l'elettricità non si può stoccare se non per poche ore e in quantità limitate, allora serve qualcosa che possa essere sempre disponibile, soprattutto di notte o d'inverno quando non c'è il sole e quando il vento non soffia. Per superare l'intermittenza e la dispersione delle nuove rinnovabili, negli ultimi anni si è ripreso a sperare nell'idrogeno, anche questo un vettore che, nelle condivisibili intenzioni, dovrebbe diventare una sorta di stoccaggio. Sono enormi le difficoltà della sua produzione da fonti rinnovabili, attraverso l'impiego di energia elettrica da fotovoltaico o da eolico per fare elettrolisi dell'acqua, la separazione dell'ossigeno dall'idrogeno.

Questo sarebbe indispensabile per quei processi termici di grandi industrie dove è indispensabile molto calore per arrivare alla trasformazione chimica della materia. Si tratta della sabbia per fare il vetro, dell'argilla per produrre ceramica, della polpa di legno per fare la carta, processi in-

dustriali questi che oggi impiegano gas naturale. Il cemento è prodotto fondendo argilla e calcare con carbone di petrolio, mentre l'acciaio è generato fondendo il minerale di ferro con carbone metallurgico.

Ridurre, o eliminare, l'impiego delle fonti fossili in questi processi, chiamati "difficili da abbattere", *hard to abate*, è complesso, da cui il tentativo di usare al loro posto idrogeno prodotto con elettricità da fonti rinnovabili che, teoricamente, sono infinite e pulite. Il problema dei costi altissimi di questo idrogeno cosiddetto verde rende obbligatorio pensare ad altre soluzioni, come quella di realizzare sempre impianti di elettrolisi da alimentare, però, non con elettricità da rinnovabili, dispersa e intermittente, ma con quella da impianti nucleari, di piccole o grandi dimensioni.

Il vantaggio è che l'energia elettrica da nucleare, sempre priva di emissioni di CO₂, ha alta programmabilità ed è disponibile per la gran parte delle ore di un anno.

Per l'Italia si tratta di un'opportunità per continuare a fare ricerca e per portare avanti il tentativo di decarbonizzazione dei nostri settori ad alto impiego di energia fossile. Siamo un paese manifatturiero di grandi competenze, le stesse che hanno consentito di avere grandi eccellenze nella fisica nucleare nella quale dobbiamo rientrare anche con le centrali per la produzione elettrica.

L'energia nucleare nel contesto internazionale

di **Luca Romano**

Una delle argomentazioni che si sentono più di frequente da parte degli oppositori del nucleare è che lo stesso sarebbe ormai in via di abbandono da parte dei Paesi occidentali. Che in qualche modo la via delle rinnovabili sarebbe ormai stata scelta da tutti e che l'Italia, decidendo di tornare a investire sull'atomo, opererebbe una scelta in controtendenza.

In realtà le cose non stanno proprio così: fino al 2023 l'Italia era in effetti l'unico paese al mondo ad aver chiuso anticipatamente il proprio programma nucleare. Nel 2023 è entrata in questo club piuttosto esclusivo anche

la Germania, e fino a qualche anno fa avevano manifestato intenzioni analoghe anche Belgio, Spagna e Svizzera.

Le cose però sono rapidamente cambiate negli ultimi tre anni. In parte a causa della guerra in Ucraina, che ha dimostrato al mondo che sistemi energetici basati su fonti intermittenti, quali solare ed eolico, richiedono l'integrazione con altre fonti complementari, caratterizzate da alta flessibilità e basso CAPEX – il che si traduce in gas naturale, con tutti i problemi che questo comporta in termini di dipendenza; e in par-

te proprio a causa dello spettacolare fallimento della *Energiewende* (la transizione energetica) tedesca, che è costata allo Stato diverse centinaia di miliardi, ma non ha prodotto risultati apprezzabili né in termini di riduzione delle emissioni (l'intensità carbonica della produzione di elettricità in Germania continua ad essere 10 volte superiore a quella francese) né in termini economici – la Germania ha chiuso il 2023 e il 2024 in recessione, e la causa è proprio la crisi della manifattura, dovuta ai costi troppo alti dell'energia. Non proprio un bellissimo spot per chi ha decantato per decenni i bassi costi delle rinnovabili, solitamente guardando solo al lato della produzione e non a tutto il sistema.

Così, se in Germania il cancelliere in pectore Merz promette uno studio del dossier nucleare per valutare una possibile riapertura delle centrali, gli altri Paesi iniziano a sfilarsi dalla crociata contro l'atomo: in Spagna è stata approvata una mozione parlamentare (per ora non vincolante) per cancellare l'uscita dal nucleare (prevista tra il 2028 e il 2035); in Belgio, dove tre dei sette reattori sono già stati chiusi, due di quelli ancora operativi hanno ricevuto un'estensione di licenza almeno fino al 2035 (il governo sta negoziando per ulteriori 10 anni); in Svizzera, l'uscita del nucleare non avverrà almeno fino a quando i reattori esistenti potranno operare in sicurezza, e si è ripreso a

discutere di costruirne di nuovi. Persino un paese storicamente anti-nucleare come la Danimarca sta valutando se cancellare la moratoria contro il nucleare prevista dalla legge danese – sarà che la Danimarca ha uno dei tassi di dipendenza energetica più alti al mondo, e quindi dei prezzi dell'elettricità in bolletta particolarmente alti.

La situazione è quindi quella dei Paesi storicamente meno entusiasti dell'atomo in preda ai ripensamenti, mentre il blocco opposto sembra essere più che mai convinto delle sue scelte: la Francia, nonostante i ritardi e i sovracosti del reattore di Flamanville-3, sta scegliendo i siti per 6 nuovi reattori (che porterebbero il numero totale a 63, più di uno per milione di abitanti); la Svezia ha dichiarato che vuole 10 GW di nuova capacità installata, la Repubblica Ceca ha assegnato l'appalto per due nuovi reattori ai coreani di KHNP, mentre la Polonia costruirà la sua prima centrale con tecnologia americana Westinghouse; la Romania, unico paese in Europa ad utilizzare la tecnologia canadese di reattori ad acqua pesante, sta studiando un meccanismo di finanziamento per due nuove unità; Slovenia e Croazia studiano un raddoppio della centrale di Krsko (situata in territorio sloveno, ma formalmente di proprietà comune); l'Ungheria ha già iniziato la costruzione di nuovi reattori a Paks (di tecnologia russa) e l'UK oltre



Luca Romano è laureato in Fisica (curriculum Astrofisica e Fisica teorica) presso l'Università di Torino e consegue successivamente un master in Giornalismo scientifico e Comunicazione della Scienza presso lo IUSS di Ferrara. Nel 2020 ha aperto la pagina Facebook L'Avvocato dell'Atomo nel tentativo di rivoluzionare l'approccio all'ambientalismo e riportare il tema del nucleare nel dibattito pubblico. Nel 2022 pubblica *L'avvocato dell'atomo. In difesa dell'energia nucleare*, Fazi Editore.

a proseguire col progetto di Sizewell C ha messo in cantiere una legge per velocizzare i progetti nucleari. Persino l'Italia, sebbene con cautela, sembra intenzionata a dotarsi di una normativa che riapre al nucleare – la legge delega è stata approvata in Consiglio dei Ministri e passerà ora alla discussione parlamentare. Anche a livello europeo il nucleare è stato incluso nella Tassonomia della Finanza Sostenibile, nel Net-zero industry act (come tecnologia strategica) e sarà probabilmente incluso tra le tecnologie chiave per lo sviluppo della filiera dell'idrogeno.

Il rischio, d'altra parte, è quello di restare indietro rispetto al resto del mondo: il report presentato dal DOE alla presidenza degli Stati Uniti a novembre parla esplicitamente di un fabbisogno pari a 200 nuovi reattori, per rilanciare la produzione industriale e attirare investimenti sull'AI, e la presidenza Trump sembra intenzionata a mantenere alto il focus sulla produzione energetica.

Il Canada ha già in costruzione nuovi reattori, e nuovi piani di sviluppo nucleare sono stati recentemente annunciati anche da Argentina e Giappone. Al momento della stesura di questo articolo, ci sono 63 reattori nucleari in costruzione nel mondo, oltre la metà dei quali in Cina: tra reattori pianificati e proposti la Cina potrebbe avere nel 2040 la stessa potenza nucleare installata di tutto il resto del pianeta, e già si manifesta

una competizione con la Russia per la fornitura di *know-how* e tecnologia ai Paesi africani e asiatici, i quali a loro volta si stanno affacciando a questo settore.

Chi parla di una storia già scritta e in declino, dunque, sbaglia di grosso; ma lo stesso fa chi pensa che solo le tecnologie future e in via di sviluppo siano la chiave per il progresso tecnologico e la sicurezza energetica. L'urgenza della riduzione delle emissioni climalteranti e l'esigenza di una rapida re-industrializzazione europea impone la considerazione di tutte le tecnologie nucleari disponibili sul mercato: escludere un qualunque sottoinsieme è indice di grave miopia.

Il trend mondiale ormai è chiaro: le politiche 100% rinnovabili hanno fallito e l'acquisto di gas a basso costo da Paesi autocratici in cambio della chiusura di entrambi gli occhi di fronte alle politiche imperialiste degli stessi si è rivelata una pessima idea.

Ora è il momento di dare all'atomo una possibilità, e per farlo seriamente non basta investire su qualche progetto pilota basato su qualche tecnologia sperimentale: serve un piano Messmer europeo, che entro il 2040 ci porti ad essere completamente autosufficienti e in grado di riportare nel nostro continente le industrie che sono fuggite, i cervelli che sono scappati e i capitali che sono stati investiti altrove.

Oltre il tabù: perché l'Italia torna a parlare di nucleare

Gianluca Comin

Si torna a discutere di nucleare. A dodici anni da Fukushima, che fu la causa dello stop al secondo piano nucleare italiano dopo il primo referendum del 1987, il governo ha consegnato al Parlamento una legge delega che, se non ci saranno intoppi, riporterà al Paese le norme necessarie a regolare il settore. La legge è arrivata dopo un approfondito lavoro della “Piattaforma Nazionale per un nucleare sostenibile” che sotto l’egida di Enea (l’Ente di ricerca delle energie alternative che non ha mai abbandonato la ricerca, anche applicata) e di Rse, il centro ricerca economica del Gse ha coinvolto università, imprese private, enti pubblici in una fotografia dello stato dell’arte per sviluppare una roadmap, con orizzonte 2030 e 2050, per seguire e coordinare gli sviluppi delle nuove tecnologie nucleari. A completare il quadro la nascita di una società partecipata da Enel, Ansaldo e Leonardo, che dovrà approfondire tecnologie ed essere pronta ai nuovi reattori non appena la legislazione sarà completata.

A differenza del Piano del decennio scorso, che aveva sposato la tecnologia francese Epr e il modello di centrale di terza generazione in costruzione a Flamanville, il percorso ipotizzato dal ministro Gilberto Pichetto Fratin, non esclude nessuna tecnologia né generazione, con una particolare attenzione alla terza plus e alla quarta, con un orizzonte temporale di 30-40 anni. Questo approccio dovrebbe evitare veti incrociati tra detentori delle diverse

tecnologie e inciampi geopolitici, e soprattutto consentirà all’Italia – che è restata inevitabilmente indietro – di recuperare con l’ultima tecnologia disponibile, non aggiustando e correggendo la più vecchia.

Fin qui tutto bene. I più entusiasti di un ritorno all’era nucleare sono i professori e gli ingegneri, costretti a lavorare nell’ombra in questi anni per tenere viva la fiammella della ricerca. Poi le aziende, Enel, Edison, Eni, Nucleo e altre che stanno scaldando i muscoli o che hanno concentrato le loro competenze all’estero. E poi ci sono i siderurgici, come Duferco, pronti a partecipare al nucleare italiano per garantirsi energia a prezzi competitivi.

E i cittadini italiani? Il tema dell’accettabilità sociale e della comunicazione è centrale. Affrontare un piano nucleare senza aver “preparato il terreno” e promosso una nuova sensibilità nell’opinione pubblica è un sicuro fallimento. Ci sono però, oggi, molti elementi che possono generare fiducia negli operatori e nelle istituzioni. Il primo è la nuova sensibilità sui temi della sostenibilità e dei cambiamenti climatici. Il nucleare è entrato nella tassonomia europea ed è generalmente riconosciuto come la tecnologia che può, assieme alle rinnovabili e agli accumuli/batterie, battere i carburanti fossili. Di questo sono forse più convinti i movimenti giovanili più battaglieri che le storiche associazioni dell’ambientalismo classico. Il secondo: la guerra ucraina e la conseguente crisi del gas ha messo tutti di

fronte al rischio di restare al buio e al freddo. L'eccessiva dipendenza da una risorsa e da un Paese – il gas russo – ha dimostrato la fragilità del nostro sistema. In pochi mesi il governo prima Draghi, ora Meloni, ha garantito risorse alternative, da Paesi però che non garantiscono stabilità eterna. L'unica soluzione per un Paese che non ha risorse naturali proprie è l'indipendenza che può dare il nucleare. Il terzo: dopo anni di critiche all'approccio scientifico oggi pare recuperare nell'opinione pubblica diffusa un certo rispetto per il pensiero scientifico. Il Covid, pur dando voce a sparute minoranze no vax, ha riportato nei cittadini la consapevolezza che ricerca e tecnologia sono fondamentali per il benessere dei cittadini. Il quarto: rispetto al precedente Piano nucleare oggi la comunicazione si è resa più sofisticata. Abbiamo capacità di monitorare le conversazioni online, diffondere in modo massiccio il pensiero e i contenuti, arginando l'uso strumentale della rete.

Basterà tutto questo? Certamente no. L'avvio di una riflessione sul nucleare richiede un approccio sistemico della comunicazione e l'uso delle tecnologie e delle tecniche più sofisticate di coinvolgimento. Metodi che le principali aziende possono mettere in campo con risorse economiche adeguate. Nel decennio scorso, l'Enel si fece carico non solo dell'approccio tecnico e ingegneristico, ma anche di proporre e sostenere un articolato piano di informazione degli stakeholders che è ancora oggi un

modello di comunicazione integrata.

Il cosa fare, dunque, lo sappiamo: analisi continua delle opinioni di diverse categorie di cittadini, studi del linguaggio più adatto a dialogare con i diversi stakeholder, capacità di analizzare i potenziali conflitti, tempestività nel comunicare attivando la maggioranza silenziosa, anche con strumenti come il dibattito pubblico. Quest'ultimo strumento, mutuato dall'esperienza sulle grandi infrastrutture, può essere determinante nel superare gli "stalli" dell'opinione pubblica su posizioni apparentemente inconciliabili. Lo fa consentendo ai partecipanti di esprimere, su un piano razionale ed evitando le dinamiche "muro contro muro", i propri argomenti a favore e contro una scelta, portando perciò il consenso (e il dissenso, dove non sia possibile trovare una mediazione) su un piano razionale e documentato.

Proprio il tema del nucleare in Italia non è nuovo a pratiche di discussione informata.

Più di tutto, dunque, conterà la coerenza e la perseveranza. Gli *stop and go*, i cambi di linea, i messaggi contraddittori sono le pillole avvelenate in un dibattito che può essere certo anche teso e vivace in alcuni momenti, ma anche riflettere una maturità nelle scelte che in molti casi i cittadini italiani mostrano di avere.

Photo credits

pp. 6-7 @Sogin

p. 8 @ITER Organization

pp. 10-11 Jacques-Louis David, *L'incoronazione di Napoleone*, 1805, Museo del Louvre, Parigi

p. 15 @Sogin

p. 16 @Sogin

p. 17 @Sogin

p. 20 @Framatome

p. 21 @Destination nuclear

pp. 24-25 @Sogin

p. 36 @Sogin

p. 39 @Framatome

pp. 82-83 @Sogin

pp. 84-85 Hieronymus Bosch, *Il Giardino delle delizie*, 1480-1490, Museo del Prado, Madrid

p. 93 @Sogin

p. 95 @Framatome

p. 100-101 @Framatome

p. 104-105 @ASG Superconductors SpA

p. 107 @Framatome

p. 108 @Framatome

p. 112 @Framatome

COMPRENDERE