

SFRUTTAMENTO INDUSTRIALE DELLA ENERGIA ATOMICA

PROBLEMI E PROSPETTIVE

In un precedente articolo (1) abbiamo riferito sullo stato delle trattative internazionali per l'uso pacifico della energia atomica, allo scopo di dare la possibilità ai nostri lettori di inquadrare e valutare meglio gli accordi dell'Euratom.

La piena comprensione, però, delle clausole del trattato richiede anche una conoscenza almeno generica dei problemi tecnici ed economici che condizionano le applicazioni industriali della energia atomica. Raccogliamo, perciò, in questo articolo, alcuni dati e informazioni che possano orientare i lettori in una materia tanto nuova e destinata, forse, a caratterizzare la nostra epoca, e tratteremo [1°] di alcuni concetti fondamentali di fisica atomica e dei reattori nucleari; [2°] del contributo che l'energia atomica può offrire allo sviluppo economico; [3°] di alcuni problemi particolari della nascente industria atomica.

I.

CONCETTI DI FISICA NUCLEARE E REATTORI NUCLEARI

STRUTTURA DELL'ATOMO

Secondo le attuali concezioni della fisica, possiamo distinguere nell'atomo una **corteccia elettronica** periferica ed un **nucleo** centrale, il cui diametro è solo una decimillesima parte del diametro totale, ma in cui è concentrata tutta la massa dell'atomo e le cariche elettriche, che, nell'atomo totale, risultano neutralizzate da altrettante cariche negative degli elettroni della corteccia.

Il nucleo atomico, a cui è legato lo sfruttamento della energia nucleare, alla sua volta risulta di due specie di particelle elementari: i **protoni**, con una carica elettrica elementare e una massa elementare, e i **neutroni**, privi di carica elettrica, con una massa di molto poco superiore a quella del protone.

Conseguentemente, ogni nucleo atomico risulta caratterizzato da due numeri interi: il **numero atomico Z**, dato dal numero dei protoni e quindi elettroni della corteccia elettronica, che determina la natura specifica dell'atomo, e il numero di **neutroni, N**, o,

(1) Cfr. M. REINA, *Trattative internazionali per l'uso pacifico della energia atomica*, in *Aggiorn. Sociali*, (luglio) 1957, pp. 413 sgg. La prima parte del presente articolo è stata redatta in collaborazione col prof. Mario Viganò S. J., ordinario di cosmologia alla Facoltà filosofica « Aloisianum » di Gallarate. Cfr. anche L. DE BROWER, *Réacteurs nucléaires et production d'énergie*, in *Revue des questions scientifiques*, (Parigi) 20 gennaio 1957, pp. 63-99.

come si preferisce ordinariamente, il numero di massa $A = Z + N$, corrispondente al numero totale delle particelle nucleari, molto prossimo alla massa del nucleo (2).

In realtà, però, la massa totale del nucleo non risulta esattamente uguale alla somma delle masse dei singoli protoni e neutroni, che entrano a formare il nucleo, ma leggermente inferiore: la differenza Δm , costituisce un dato molto importante, perchè da essa dipende, la stabilità del nucleo, in quanto rappresenta quella parte della massa che si è convertita in energia di legame, secondo la relazione di Einstein $m c^2 = E$, dove c sta ad indicare la velocità della luce, il cui valore elevato spiega come ad una piccolissima variazione di massa possano corrispondere energie elevatissime: la disintegrazione totale di un grammo di materia darebbe origine a 25 milioni di kWh.

Ne segue che i protoni e neutroni non possono unirsi a formare il nucleo in un rapporto qualunque, ma secondo leggi determinate, e che i nuclei così formati potranno essere più o meno stabili. Siccome, per uno stesso numero di protoni, si possono avere un numero diverso di neutroni, si hanno per una stessa specie chimica, diversi atomi differenti tra loro per il peso atomico e nel grado di stabilità del nucleo: questi atomi si dicono isotopi e sono di solito mescolati tra loro negli elementi naturali in rapporti costanti.

Così si conoscono due isotopi stabili dell'idrogeno: l'idrogeno ordinario costituente più del 99,98% dell'idrogeno naturale, il cui nucleo consta di un solo protone, l'idrogeno pesante, presente nella proporzione di circa 0,014% nell'idrogeno naturale, il cui nucleo è costituito da un protone e da un neutrone; ed uno instabile, il tritio, del nucleo formato da un protone e due neutroni, che spontaneamente emette un elettrone negativo, trasformandosi in un isotopo dell'elio. Dell'uranio si conoscono, tra naturali e artificiali, 14 isotopi, tutti costituiti da 92 protoni e da un numero di neutroni variabile da 135 a 149, quindi, con un numero di massa compreso tra 227 e 240. Per il nostro problema sono particolarmente interessanti l' U^{238} , che costituisce la massima parte dell'uranio naturale (88,28%) e l' U^{235} , presente solo per il 0,71% nell'uranio naturale, e l' U^{233} che, come vedremo, si forma dal torio nei reattori nucleari.

RADIAZIONI E FISSIONE NUCLEARE

Parecchi nuclei, in particolare quelli più pesanti e quindi più complessi, risultano instabili in quanto tendono ad emettere spontaneamente particelle e a trasformarsi in altri nuclei più semplici: **radioattività naturale.**

(2) Un nucleo può essere rappresentato compendiosamente con una lettera, simbolo dell'elemento chimico, e con due numeri, uno in basso a sinistra della lettera che indica il numero atomico e una in alto a destra che indica il numero di massa: così l'atomo di uranio 238 può essere rappresentato come segue ${}_{92}U^{238}$ dove U sta per uranio, 92 è il numero atomico e 238 il numero di massa.

Questo fenomeno, noto già alla fine del secolo scorso, e accompagnato da notevole produzione di energia, sul principio sfuggiva completamente al controllo dei fisici. Solo più recentemente, verso il 1919, e, in più larga scala, dopo il 1930, si arrivò alla **disintegrazione artificiale** di molti nuclei e alla creazione di nuovi nuclei, parte stabili e parte radioattivi, bombardando gli atomi con particelle diverse, tra le quali si dimostrarono particolarmente efficaci i **neutroni**, ottenuti da preparati di radio e berillio. Ma, se questi procedimenti ebbero enorme importanza teorica, si era **assolutamente lontani da ogni applicazione industriale** per il loro rendimento assolutamente minimo.

Un fenomeno totalmente nuovo venne, invece, per la prima volta prodotto sperimentalmente da **Fermi** a Roma (3), bombardando uranio con neutroni. Si ottenne, tra diversi altri fenomeni di disintegrazione, una **fissione**, che poi si trovò essere dovuta all' U^{235} , in cui il nucleo si spezza in due parti all'incirca uguali, che costituiscono due atomi di peso atomico medio, in genere **radioattivi**. Il fenomeno è accompagnato da grande **emissione di energia**, e, quel che è essenziale ai fini dello sfruttamento tecnico, da **emissione di neutroni molto veloci**, in media due e mezzo, per ogni atomo fissionato.

Si poté allora pensare alla possibilità di un **processo a catena**, cioè di una massa di uranio in cui, una volta iniziato il processo di fissione, questo continuasse spontaneamente, in virtù dei neutroni emessi nel processo stesso, con un fenomeno molto simile alla combustione o alla esplosione.

COMBUSTIBILI NUCLEARI

Non ogni neutrone, che colpisce un nucleo, produce una fissione, anzi questo è un caso piuttosto eccezionale. Si può, infatti, avere semplicemente un **urto elastico**, con cessione di parte della energia al nucleo urtato, e conseguente riduzione della velocità del neutrone: questo fenomeno viene sfruttato nei moderatori.

Può invece aversi **assorbimento del neutrone da parte del nucleo**, con conseguente emissione di energia sotto forma di raggi gamma e particelle varie, e trasformazioni radioattive. Questo fenomeno va accuratamente tenuto presente nel calcolo di un reattore, perchè i neutroni assorbiti sono perduti ai fini del mantenimento del processo a catena.

Finalmente si può avere **la fissione**.

I diversi processi dipendono, oltre che dalla natura del nucleo colpito, in misura notevole anche dalla **velocità dei neutroni**. Neutroni veloci, quali vengono emessi nel processo di fissione, possono produrre la fissione dell' U^{238} e di qualche

(3) La scoperta del processo di fissione nucleare è oggi comunemente attribuita ai tedeschi *O. Hahn* e *F. Strassmann*, che nel 1939 riuscirono ad interpretare il fenomeno già ottenuto da Fermi a Roma.

altro atomo radioattivo, mentre sono pochissimo efficaci sull' U^{235} , che invece viene fissionato in modo notevole dai neutroni lenti.

Per il funzionamento dei reattori, bisogna che, in media, per ogni nucleo fissionato, almeno un neutrone emesso riesca a fissionare un altro nucleo, anzi, una volta raggiunto la fase di regime normale, il numero dei neutroni efficaci ai fini della fissione, deve essere esattamente uno per ogni nucleo fissionato: a questa regolazione si giunge disponendo del materiale assorbente presente nel reattore (4).

Del resto, non ogni neutrone assorbito è inutile: vi sono dei **materiali detti fertili** che, sotto il bombardamento neutronico, danno luogo ad altri elementi fissili: tali sono l' U^{238} che dà origine al Pu^{239} il torio che dà U^{233} (5).

In definitiva, **gli elementi fissili sono** l' U^{235} , contenuto in piccola percentuale nell'uranio naturale, il Pu^{239} e l' U^{233} , particolarmente sensibili ai neutroni lenti, e l' U^{238} con pochi altri, sensibili all'azione dei neutroni veloci.

REATTORI NUCLEARI

I reattori sono gli impianti in cui viene prodotto il processo di fissione nucleare a catena; strutturalmente sono costituiti da una parte centrale, il reattore propriamente detto, e da un sistema per portare all'esterno il calore e per sfruttarlo industrialmente.

Nella progettazione dei reattori si deve anzitutto tener conto del **tipo di combustibile nucleare** che sarà impiegato: se si impiegano materie fissili particolarmente sensibili ai neutroni lenti, quali l' U^{235} o l' U^{233} , sarà necessario disporre di materiali atti a rallentare i neutroni: queste sostanze, dette **moderatori**, possono essere grafite, acqua ordinaria, acqua pesante ecc.

Un altro problema decisivo nella progettazione dei reattori di potenza, destinati cioè alla produzione di energia industriale, è la scelta del **materiale da impiegare per trasportare il calore sviluppato nel reattore** ai vaporizzatori, destinati ad azionare le turbine. Bisogna, infatti, tener conto ad un tempo delle proprietà termiche e di quelle nucleari del fluido usato: si ricorre di fatto a gas sotto pressione, acqua ordinaria sotto pressione, acqua pesante, metalli fusi.

Secondo i combustibili e i sistemi di raffreddamento adottati,

(4) Se non si verificasse questa condizione, se cioè tutti i neutroni liberati nella fissione di un nucleo fissionassero altri nuclei, si avrebbe *una esplosione*, cioè si svilupperebbero enormi quantità di energia, e il processo di fissione sfuggirebbe a ogni controllo.

(5) I materiali fertili si possono definire « materiali fissili in potenza », perchè, posti in speciali reattori, possono essere trasformati in elementi fissili, ed essere sfruttati per la produzione di energia nucleare. Gli unici elementi fertili, esistenti in natura, sono il torio che è il solo costituente del torio naturale e l'uranio 238 che costituisce l'elemento principale dell'uranio naturale.

si possono così avere vari tipi di reattori: attualmente ne sono in progettazione e in fase di avanzata costruzione almeno una **dozzina**, ma quelli entrati in uso si riducono, per ora, a due tipi fondamentali: uno ad uranio arricchito in U^{235} , con moderazione e raffreddamento ad acqua naturale sotto pressione: è il tipo particolarmente usato in **America**; un altro a uranio naturale, con moderatore a grafite e raffreddamento a anidride carbonica sotto pressione: è il tipo adottato in **Gran Bretagna**, perchè particolarmente utile alla produzione di plutonio per usi militari, e perchè risparmia il costoso processo di arricchimento dell'uranio naturale (6).

Tra gli altri tipi di reattori allo studio, sembrano particolarmente promettenti i **reattori rigeneratori**, ossia quelli in cui, la quantità di combustibile, formato per la trasformazione di elementi fertili, valga a compensare, almeno per un buon tratto di tempo, il combustibile consumato, e quelli a **raffreddamento a metallo liquido**, particolarmente sodio e bismuto, che permette di raggiungere temperature più elevate. Destano interesse i **reattori a neutroni veloci**, quindi senza moderatore, dove fungerebbe direttamente da combustibile l' U^{238} (7).

Riassumendo i problemi di natura tecnico-economica e di sicurezza che caratterizzano la progettazione e costruzione dei reattori sono: a) la preparazione e il rifornimento dei combustibili nucleari; b) la scelta del moderatore e del sistema di raffreddamento; c) la valutazione della resistenza del materiale alle temperature del reattore e all'influsso dell'intenso flusso neutronico; d) sistemi di sicurezza sia per quanto riguarda il regolare funzionamento dei reattori, sia per quanto concerne l'effetto delle emanazioni radioattive sulle persone addette alla centrale e sulle regioni circostanti specialmente in riguardo allo

(6) Questi due tipi di reattori sono stati raccomandati nel rapporto finale dei « Tre Saggi » (i Professori Louis Armand, francese, Franz Etzel, tedesco e Francesco Giordani, italiano, incaricati dai Ministri degli esteri della Piccola Europa, di determinare la quantità di energia nucleare che può essere prodotta nel più breve tempo possibile nei paesi dell'Euratom) insieme ad altri tre reattori, che sono però, ancora allo studio e in fase di progettazione e che sono variazioni dei due tipi accennati nel testo.

(7) Si potrebbe pensare anche di giungere allo sfruttamento della energia atomica, oltre che per fissione, anche per fusione, partendo cioè da nuclei leggeri, praticamente dall'idrogeno, che, unendosi a formare nuclei più pesanti, liberano ingenti quantità di energia. E' questo il processo attuato in natura nel sole e nelle stelle, e che è già entrato nel dominio dell'uomo, purtroppo, nella bomba ad idrogeno. Ma per ottenere un processo di fusione controllabile in un reattore, si frappongono gravi difficoltà tecniche: basti pensare che si dovrebbero sviluppare temperature dell'ordine di un milione di gradi. Tuttavia, non sembra impossibile neppure questo, anzi, l'Università di California ha annunciato che i *mesoni*, particelle atomiche di recente scoperta, possono permettere di ottenere la fusione nucleare a temperature meno elevate, e prima della conferenza atomica di Ginevra, nel 1955, si era riconosciuto che lo sfruttamento industriale della fusione degli atomi di idrogeno non è troppo lontano.

smaltimento delle abbondanti sostanze radioattive prodotte dalle fissioni. A questo problema è connesso quello tecnico-economico del trattamento di questo materiale per il ricupero di elementi molto preziosi sia come materiale fissile, plutonio e U^{233} , sia come isotopi radioattivi diversi che trovano svariati impieghi nella scienza, nella medicina e nell'industria. Infine, c'è il grave problema economico dei grandi investimenti di capitali, e quello della preparazione dei tecnici per questo campo totalmente nuovo della scienza e della ingegneria.

II.

ENERGIA ATOMICA E SVILUPPO ECONOMICO

E' ormai giunto il momento di precisare quale sia il **contributo specifico che l'energia atomica** potrà offrire al progresso economico e sociale della umanità; a questo proposito si può senz'altro affermare che, prescindendo dalla importanza e dalle conseguenze vastissime dell'impiego della energia atomica, il processo di fissione nucleare è economicamente importante sotto due aspetti: 1) **come sorgente di energia**; 2) **come fonte di isotopi radioattivi**.

L'ATTUALE PROBLEMA ENERGETICO

Recenti studi hanno dimostrato che il progresso economico e sociale è strettamente legato alle disponibilità e al consumo di energia, e che l'insufficiente disponibilità energetica è una delle cause principali che ostacolano il miglioramento delle condizioni di vita di molti Paesi.

L'America del Nord, che senza dubbio è il paese che gode il più alto tenore di vita, è anche quello che produce e consuma più energia: con una popolazione pari al 6,9% della popolazione mondiale, produce il 40,4% della energia mondiale e ne consuma il 40,5%. L'Europa, invece, con il 16,5% della popolazione mondiale, consuma il 23,8% della energia mondiale, mentre l'Africa, l'Asia e l'America Latina, che insieme rappresentano i 2/3 della popolazione mondiale, dispongono appena di un quinto della energia mondiale (8).

Inoltre, risulta che esiste una stretta correlazione tra produttività e quindi reddito nazionale, e la **quantità di energia a disposizione di ogni lavoratore**: non è quindi possibile pensare un programma di sviluppo economico, che non sia alimentato da un corrispondente aumento di disponibilità energetiche. D'altra parte, le migliorate condizioni di vita provocano un aumento della domanda di energia per i trasporti, per i servizi domestici, ecc. Di qui le **continue ascese** della curva che rappresenta il consumo di energia nel mondo in questi ultimi decenni: per i **paesi dell'OECE, dal 1948 al 1955**, l'incremento annuale del consumo di energia primaria è stato del **4,8%** e si prevede che il consumo

(8) ANGELOPOLUS A., *L'atomo unirà il mondo? Aspetti economici, sociali e politici dell'era atomica*, Einaudi, Torino, 1956, p. 32.

totale di energia sarà, nel 1975, di 1.200 milioni di tonnellate di carbone, contro il consumo di 730 milioni nel 1955 (9).

A questo necessario e grandioso incremento della domanda di energia fanno, però, riscontro fattori, che limitano le disponibilità energetiche mondiali e creano una situazione di tensione e di allarme.

Sebbene non vi sia da temere un rapidissimo esaurimento dei giacimenti di carbone e petrolio, tuttavia, le loro risorse vanno diminuendo in modo preoccupante. Inoltre, molte miniere in Europa diventano sempre più difficili ad essere sfruttate, l'accesso ai pozzi di petrolio diventa incerto e rischioso per molti paesi, lo sviluppo delle aree arretrate, in molti casi, è ostacolato dalla mancanza di disponibilità energetiche.

L'Europa soffre, in modo particolare, di questa situazione: essa, che fino al 1827 esportava energia, nel 1955 ne ha importato l'equivalente di 176 milioni di tonnellate di carbone, che rappresenta circa il 20% del suo consumo totale: se non interverranno altri fattori, le importazioni di energia dell'Europa saliranno nel 1975 al 40% del fabbisogno interno, con quale peso per la bilancia dei pagamenti lo si può facilmente immaginare.

Inoltre, bisogna ricordare che, se si dovesse dipendere unicamente dalle sorgenti tradizionali di energia, molti paesi non avrebbero mai serie possibilità di sviluppo economico, essendo situati lontani dalle miniere di carbone, dai pozzi di petrolio o dalle riserve idriche.

IMPIEGHI DELLA ENERGIA ATOMICA

E' facile quindi comprendere il grande servizio che potrà rendere alla continuità e espansione del progresso economico lo sfruttamento, su larga scala, di una nuova fonte di energia, quale l'energia atomica, che non solo assicura un incremento delle disponibilità mondiali di energia, ma presenta caratteristiche, che la rendono particolarmente decisiva per le sorti del progresso economico di molte zone del nostro pianeta.

1) Produzione di energia elettrica.

Il maggiore impiego della energia atomica, nei prossimi vent'anni, sarà per la produzione di energia elettrica (10).

(9) OEEC, *L'Europe face à ses besoins croissants en energie*, Paris, 1956, p. 18 e p. 23.

(10) L'energia elettrica costituisce una delle principali forme di energia, il cui impiego caratterizza l'epoca moderna ed ha importanza decisiva per lo sviluppo economico e industriale. Calcoli fatti per i paesi della Piccola Europa dimostrano che il consumo di energia elettrica tende a raddoppiarsi ogni dieci anni, e che sviluppando al massimo le proprie risorse che si prestano alla produzione di elettricità, potranno far fronte solo per un terzo all'aumento del fabbisogno di elettricità nei prossimi vent'anni.

Il progresso delle ricerche nucleari ha condotto felicemente, come abbiamo visto, alla attuazione di potenti reattori nucleari che possono sostituire le tradizionali centrali termo-elettriche.

I nuovi impianti elettro-nucleari non solo possono consentire così il risparmio del carbone e della nafta, ma presentano notevoli vantaggi che le tradizionali centrali elettriche non avevano.

1. Anzitutto i reattori **consumano quantità minime di combustibili** e sviluppano, in proporzione, enormi quantità di energia. Gli esperti dell'Euratom fanno rilevare che 7 tonnellate di Uranio 235, oppure **2.500 tonnellate** di uranio naturale, possono produrre la stessa quantità di elettricità prodotta da 20 milioni di tonnellate di carbone, e, secondo calcoli e esperimenti più recenti, si può pensare di arrivare presto a un rendimento maggiore: in nuovi tipi di reattori, una tonnellata di uranio naturale potrà fare il lavoro di 1 milione di tonnellate di carbone

2. Anche il **rendimento economico dei reattori sembra giustificare le migliori aspettative**: l'alto rendimento del combustibile è controbilanciato solo in parte dal costo maggiore dei nuovi impianti, rispetto a quelli tradizionali. Secondo calcoli inglesi, gli investimenti di capitale per le centrali elettro-nucleari saranno il doppio di quelli richiesti dalle comuni centrali termo-elettriche, ma il costo unitario della energia prodotta non sarà di molto superiore a quello della energia termoelettrica, e presto sarà inferiore. Già fin d'ora, quindi, l'energia nucleare, potrebbe fare fronte alla concorrenza delle altre fonti di energia, nei paesi che, come quelli dell'Euratom e la Gran Bretagna, devono affrontare gravi spese per il rifornimento dei combustibili, carbone e nafta, e che non possono contare su un ulteriore sfruttamento delle loro risorse idriche (11).

Il programma inglese di sfruttamento industriale della energia atomica prevede che: a) tra il 1965 e il 1970 saranno installate centrali elettro-nucleari per una potenza di circa 5 o 6 milioni di kilowatt; b) dal 1963 non si costruiranno più centrali termo-elettriche alimentate a carbone; c) dal 1965 in poi, ogni anno potranno entrare in azione quattro o cinque centrali nucleari: quanto sarà necessario per soddisfare all'incremento annuale della domanda di energia elettrica. Questo programma consentirà di risparmiare da 60 a 70 milioni di tonnellate di carbone all'anno (12).

3. Da questi vantaggi fondamentali — limitato consumo di combustibile e risparmio dei combustibili tradizionali —, ne seguono altri non meno importanti: il limitato consumo di combustibile nucleare rende irrilevante, ai fini del calcolo economico,

(11) Per i paesi dell'Euratom si calcola che l'energia elettrica prodotta coi reattori nucleari di tipo inglese e americano costerà tra gli 11-14 millesimi di dollaro per kilowattora, mentre le centrali tradizionali produrranno allora energia elettrica al costo di 11-12 millesimi. Poiché si prevede che i costi della energia nucleare diminuiranno, nel 1967 il costo di questa energia sarà già sceso a 8,5-11 millesimi.

(12) *The Economist*, (Londra), 19 gennaio 1957, p. 222, e 26 gennaio 1957, p. 310.

il costo di trasporto dei combustibili stessi, e quindi permette la **massima libertà di scelta nella ubicazione dei reattori**. In questo modo l'energia elettrica potrà arrivare dovunque ve ne sarà bisogno, anche in luoghi che fino ad ora non ne potevano avere.

4. Inoltre le risorse mondiali di minerali, da cui si ottengono i combustibili nucleari, sono abbondanti e si può ritenere che la nuova fonte di energia sia praticamente inesauribile, o almeno **sufficiente per parecchi secoli**.

Sembra così che l'**energia nucleare**, anche solo come **energia marginale**, cioè di integrazione delle sorgenti energetiche tradizionali, potrà assicurare le condizioni indispensabili per continuare lo sviluppo economico in molte regioni che cominciavano a soffrire per carenza di energia, e permetterà a molte regioni, fino ad ora tenute al margine del progresso economico, il guardare con maggiore fiducia all'avvenire.

2) Propulsione di navi.

Le possibilità di impiego della energia nucleare non sono però limitate alla produzione di energia elettrica. Essa potrà anche servire alla **propulsione di mezzi di trasporto marittimi**, consentendo anche in questo settore, notevole risparmio dei **combustibili tradizionali e altri non trascurabili vantaggi**, quali una maggiore autonomia delle navi, una maggiore disponibilità di spazio per il carico commerciale, una maggiore celerità dei servizi, perchè le navi non saranno più costrette a sostare a lungo nei porti per le periodiche operazioni di rifornimento dei combustibili, ecc.

Le prime realizzazioni pratiche in questo settore sono state attuate negli Stati Uniti, che hanno varato, nel 1954, il primo sottomarino a propulsione atomica, cui se ne è aggiunto uno pochi mesi fa. Per il 1960, i cantieri americani saranno in grado di costruire sei sommergibili atomici all'anno (13).

A questi successi della propulsione atomica nella marina da guerra, non corrispondono, però, uguali successi nella **marina mercantile**: la prima nave mercantile americana a propulsione atomica è ancora in cantiere, e **notevoli difficoltà devono ancora essere superate prima che si possa lanciare un vasto programma di costruzione di navi atomiche per le flotte mercantili**. Il notevole costo delle apparecchiature per la propulsione nucleare e il fatto che la soluzione tecnica di alcuni particolari problemi non è ancora stata trovata, rendono incerta la valutazione della **convenienza economica** di questo nuovo sistema di navigazione.

Sembra comunque che le prime realizzazioni interesseranno le **navi di grande tonnellaggio, e destinate a lunghi viaggi**, quali le petroliere giganti.

(13) *Atomo per la pace* (notiziario quindicinale), vol. 3, n. 7, p. 11.

Ad ogni modo, gli studi che certamente condurranno, alla soluzione di queste difficoltà procedono con intensità sia negli Stati Uniti che in Gran Bretagna.

SFRUTTAMENTO INDUSTRIALE DEGLI ISOTOPI RADIOATTIVI

Le **proprietà dei corpi radioattivi**, emissione di radiazioni capaci di penetrare la materia e anche di agire profondamente su di essa, erano note, in parte, fin dal principio del secolo, ma le applicazioni di tali proprietà sono state fino ad oggi ristrette quasi esclusivamente alla medicina (per la cura del cancro), perchè la loro disponibilità era **assai limitata**. Ora questa limitazione non esiste più: i reattori nucleari producono, come sottoprodotto, per ogni Watt di potenza termica generata, circa 1 Curie di sostanza radioattiva. **Questa quantità è veramente enorme**: si pensi che il radio, sparso in tutto il mondo, fino ad oggi, per scopi e usi terapeutici e scientifici, era dell'ordine di poche centinaia di Curie: oggi, con un reattore di 200.000 Watt di potenza, si possono ottenere sostanze radioattive dell'ordine di 200.000 Curie! (14) Si capisce allora come gli impieghi industriali degli isotopi radioattivi, fino a ieri neppure pensabili, siano oggi possibili e convenienti.

Tra l'altro, **costosi processi di trasformazione**, richiedenti altissime temperature e pressioni, possono essere sostituiti con la semplice esposizione delle materie da trasformare alle radiazioni di speciali isotopi.

Nella industria delle materie plastiche, gli isotopi possono servire ad aumentare di molto la resistenza al calore e alla pressione del polietilene, permettendone un più vasto impiego negli impianti elettrici. Nella vulcanizzazione della gomma, i radioisotopi rendono più facile il processo, sostituendo lo zolfo e altri prodotti chimici, e rendendo inutili le alte temperature finora richieste. Il germanio, trattato con gli isotopi, migliora le sue qualità per l'impiego nei transistori, speciali valvole che hanno una enorme importanza negli apparecchi elettronici.

Vastissimo è pure l'impiego degli isotopi negli **strumenti di misura e controllo** di molti processi industriali, che permettono di migliorare la qualità dei prodotti e di ridurre i costi di produzione.

Tra i più importanti di questi apparecchi sono da ricordare gli **spessimetri atomici** che consentono di misurare con continuità, senza cioè interrompere il processo produttivo, lo spessore dei laminati metallici e plastici, della carta da stampa, ecc. Si calcola che questi apparecchi abbiano già consentito **un risparmio di circa 500 milioni di dollari**. Importanti pure sono le applicazioni degli isotopi nelle raffinerie di petrolio e nel controllo degli oleodotti.

Nella **industria alimentare** gli isotopi troveranno un importante impiego nel migliorare e rendere più economico il processo di con-

(14) BOLLA G., *Problemi della energia nucleare in Italia*, in *Rivista internazionale di scienze economiche e commerciali*, ottobre 1956, p. 310.

servazione dei prodotti alimentari. I prodotti trattati con gli isotopi potranno essere trasportati più facilmente, senza ricorrere ai carri refrigeranti e dureranno più a lungo.

L'agricoltura, grazie all'impiego degli isotopi, potrà migliorare i sistemi di coltura e combattere più efficacemente i parassiti e le malattie delle piante.

Anche la medicina si avvantaggerà da una maggiore disponibilità degli isotopi, tra l'altro, oltre alle bombe al cobalto, che impiegano cobalto radioattivo per la terapia del cancro, sarà possibile attuare attrezzature portatili per radiografie, ove il complicato dispositivo di emissione dei raggi X è sostituito da una minuscola capsula di tulio o cesio radioattivo che emette raggi gamma di grande penetrazione (15).

L'ERA ATOMICA

Si può quindi concludere che il processo di fissione nucleare, sia come fonte di energia, sia come metodo per la produzione di abbondanti quantità di isotopi radioattivi, è destinato a **influire profondamente sullo sviluppo economico mondiale**. Il suo influsso non si limiterà a una sola industria, ma si estenderà a quasi tutte le industrie, da quelle basi come l'industria elettrica, a quella dei trasporti soprattutto marittimi, alle industrie chimica e meccanica, alla agricoltura e alla medicina. L'influsso benefico della energia atomica arriverà anche là dove, finora, non era possibile far sentire i benefici del progresso tecnico, ai paesi lontani dalle fonti energetiche, e renderà possibile sistemi di produzione finora impensabili.

Sta avvenendo qualche cosa di simile, e forse in proporzioni assai maggiori, a quello che è avvenuto nel secolo scorso, in seguito allo sfruttamento del **carbone**, e nella prima metà del nostro secolo, con lo sviluppo dell'industria de' **petrolio e dell'energia elettrica**. Come carbone, petrolio e elettricità hanno determinato un ampio movimento di trasformazioni economica tale da incidere profondamente sul modo di vivere individuale e sociale, così l'energia atomica trasformerà ulteriormente e caratterizzerà lo sviluppo economico e sociale della nostra epoca.

III.

PROBLEMI PARTICOLARI

DELLA NASCENTE INDUSTRIA ATOMICA

L'inizio dell'era atomica, come ogni periodo di transizione, è accompagnata dal sorgere di problemi nuovi, dovuti, nel nostro caso, al fatto che le ricerche nucleari sono state fino ad ora il monopolio di pochi Stati e vincolate da esigenze di carattere militare.

(15) Vedi *Radioisotopi e progresso*, allegato a *L'Atomo per la pace*, vol. 3, n. 6.

Di questi problemi ci interessano particolarmente quelli relativi alla impostazione dei programmi di sfruttamento industriale dell'energia atomica in paesi che, come l'Italia, sono stati finora al margine di questo grande movimento, e quelli relativi alla creazione di una industria atomica privata.

APPROVVIGIONAMENTO DI COMBUSTIBILI NUCLEARI

Il primo problema che si pone per attuare un programma industriale atomico, è quello di ottenere la disponibilità di combustibile nucleare e in particolare di elementi fissili, che, come abbiamo visto, sono indispensabili per il funzionamento dei reattori.

Le materie prime esistenti in natura, da cui si possono ottenere gli elementi fissili sono l'uranio e il torio. I grandi produttori occidentali di uranio sono il *Canada*, il *Congo Belga*, gli *Stati Uniti* e l'*Unione Sud-Africana*; seguono alcuni *Possedimenti Francesi* e il *Portogallo*. Il torio invece si trova nel *Brasile*, in *India* e nel *Madagascar*.

Allo stato attuale delle cose lo sfruttamento di tale miniere sembra assicurare più che sufficienti disponibilità dei preziosi minerali.

Non è però pensabile un **libero mercato** di tali minerali, perchè la loro importanza strategica per la produzione di esplosivi nucleari ne fa oggetto di strettissima sorveglianza da parte dei governi interessati (16). In genere, poi, i grandi produttori di questi minerali sono già impegnati a lunghi contratti con gli Stati Uniti e la Gran Bretagna. **L'accesso quindi, a queste fonti più che un problema economico, è un problema politico** (17).

(16) Gli *esplosivi nucleari* sono elementi fissili di un dato grado di purezza, detto *purezza critica*; l'esplosione, però, si determina solo quando si raggiunge una determinata massa o quantità di esplosivo, detta *massa critica*. Naturalmente massa critica e purezza critica sono dati segreti, ma è comprensibile che con la diffusione dei reattori nucleari (che, come abbiamo visto, sono pure convertitori e possono servire per la produzione di elementi fissili), ogni paese possessore di reattori, può facilmente aumentare le sue disponibilità di esplosivi nucleari, o può facilmente venirne in possesso, se ancora non li possedesse. Da qui la necessità e la preoccupazione che lo sviluppo degli impieghi industriali della energia atomica sia accompagnata da sistemi di controllo e sicurezza collettiva, che assicuri che i combustibili nucleari non siano impiegati per la costruzione di bombe atomiche.

(17) E' interessante seguire lo sviluppo dei contratti internazionali per i rifornimenti di minerali di Uranio: nel 1964 scadranno i contratti attualmente in vigore tra Unione Sud Africana e Gran Bretagna e Stati Uniti e già si prevede, per la loro rinnovazione, una forte competizione tra le potenze nucleari (*The Economist*, 11 maggio 1957, p. 519). La Gran Bretagna, che fino al 1956 ha soddisfatto tutte le sue forniture di uranio, tramite la « Combined Development Agency » (organizzazione comune tra Stati Uniti, Canada e Gran Bretagna, la quale aveva stipulato contratti con il Congo Belga, Australia e Sud Africa), ora sta negoziando direttamente coi fornitori in Australia, Rhodesia e Canada (*Notiziario dell'Energia Atomica*, Ufficio stampa britannico, n. 6, p. 3).

Ma la disponibilità delle materie prime è solo il primo passo verso lo sviluppo di una industria atomica. Il trattamento, infatti, dei minerali di uranio per ottenere combustibili nucleari, è un processo difficile. Per la realizzazione di una **centrale di separazione isotopica** occorrono parecchi anni, personale specializzato e ingenti disponibilità di energia. E', quindi, necessario, anche in questa fase di approvvigionamento dei combustibili nucleari, la cooperazione con paesi che posseggono tali impianti. Praticamente solo gli Stati Uniti sono in grado di offrire abbondante materiale fissile a chiunque voglia intraprendere lo sfruttamento industriale della energia atomica. Si pensi che gli impianti americani attualmente possono fornire combustibili nucleari a un prezzo pari alla metà o anche a un terzo del prezzo che essi avrebbero, se fossero prodotti in Europa, senza contare che l'Europa non sarebbe in grado di far funzionare una centrale di separazione o di arricchimento dell'Uranio, se non entro tre o quattro anni.

Solo in un secondo momento l'approvvigionamento dei combustibili nucleari potrebbe essere, per ciascuna nazione, più facile e autonomo. Abbiamo visto, infatti, che i reattori stessi possono servire da trasformatori di materie fertili in materie fissili. Si calcola che i reattori a uranio naturale potranno, dopo un periodo iniziale di funzionamento di circa due o tre anni, fornire considerevoli quantità di plutonio. Secondo i calcoli inglesi, quando saranno in funzione le centrali elettro-nucleari già progettate della potenza di circa 6 milioni di kilowatts, i reattori atomici potranno mettere annualmente a disposizione circa 4 tonnellate di plutonio all'anno (18).

Resta comunque certo che lo sfruttamento industriale della energia atomica non può avvenire che sotto il segno della cooperazione internazionale.

Questa conclusione si impone pure se si considerano i problemi relativi alla costruzione dei reattori nucleari. E' assurdo, infatti, che si faccia a meno di una preziosa esperienza fatta da altri e si voglia compiere da soli un percorso lungo e difficile.

In questo campo, però, la situazione è diversa da quella che abbiamo descritto per i combustibili nucleari. Se gli Stati Uniti sono i soli produttori, in vasta scala, di materie fissili, non sono più soli nel campo dei reattori nucleari: anche la Gran Bretagna ha una propria esperienza in questo settore.

Per di più, le posizioni inglese e americana sono tra loro concorrenziali: essi hanno, infatti, tipi diversi di reattori da offrire (il reattore inglese è a uranio naturale, quello americano a uranio arricchito). Si profila, quindi, un'interessante competizione per la conquista del mercato dei reattori. Gli inglesi hanno perciò accolto con soddisfazione l'ordine ricevuto dal Giappone di un reattore ad uranio naturale raffreddato a gas e l'interesse che gli industriali tedeschi mostrano per i loro reattori (19).

(18) *Where plutonium comes*, in *The Economist*, 30 marzo 1957, pp. 1107-1108.

(19) *The Economist*, 1 giugno 1957, p. 815. L'industria americana prevede, entro il 1966 la vendita di attrezzature nucleari per il valore

Se, infatti, gli americani possono offrire una esperienza più differenziata nel campo dei reattori, perchè il loro programma nucleare è impostato sullo studio di diversi tipi di reattori, gli inglesi, invece, pur avendo un unico tipo di reattore, sono riusciti a *perfezionarlo notevolmente* e soprattutto hanno già in *funzione centrali elettro-nucleari industriali*, e possono quindi offrire dati e esperienze più certe.

Data questa situazione la *costituzione dell'Euratom avrà un'importanza particolare*: i sei paesi europei, collegati tra loro, avranno una forza contrattuale notevole e potranno ottenere a condizioni favorevoli la collaborazione delle due grandi potenze atomiche, che hanno il massimo interesse a non essere escluse dal mercato europeo (20).

INDUSTRIA ATOMICA E INIZIATIVA PRIVATA

Il passaggio dello sfruttamento della energia atomica dallo Stato alla iniziativa privata, negli Stati Uniti e in Gran Bretagna, pone altri interessanti problemi che meritano di essere conosciuti, perchè sono un caso particolare del sempre vivo problema della funzione della iniziativa privata e dei rapporti tra essa e quella pubblica.

La situazione può essere riassunta brevemente nei termini seguenti.

Le ricerche nel dominio nucleare sono state principalmente condotte sotto la pressione di esigenze militari, e finanziate col danaro pubblico. A queste ricerche, però, hanno dato un valido contributo anche enti privati, come università e società commerciali. Queste ultime hanno potuto, così, fare preziose esperienze, **la cui utilizzazione, tuttavia, ai fini di attività commerciale privata, fu loro severamente interdetta per motivi di sicurezza nazionale.**

Ora, però, che si apre il campo all'applicazione industriale di molte scoperte nucleari, le grandi aziende, che hanno lavorato per il governo, si trovano in posizione di notevole vantaggio sulle altre, potendo facilmente sfruttare la loro esperienza in questo campo e presentarsi per l'acquisto di brevetti e patenti. Senza un **intervento dei pubblici poteri per regolare l'uso e la cessione di questi brevetti**, si creerebbero situazioni di privilegio ingiustificate, e monopoli contrari al bene pubblico e alla vera libertà di iniziativa.

di un miliardo di dollari. Gli Stati Uniti potranno contribuire i quattro sestimi delle attrezzature nucleari di cui è prevista la costruzione nel prossimo decennio (*Atomo per la Pace*, vol. 3, n. 5, n. 3).

(20) Non sono di questo parere alcuni francesi, i quali credono che, almeno per la Francia, non esista una vera necessità o convenienza di partecipare all'Euratom, perchè essa può, da sola e con accordi bilaterali, essere in posizione migliore per sviluppare la propria industria atomica, senza compromettere la propria indipendenza e sovranità in questo settore. Vedi MAUBERT JEAN, *L'Euratom*, in *Revue de l'Action Populaire*, marzo 1956, pp. 310-316.

Perciò, sia in **America** che in **Gran Bretagna** si vuole che le informazioni utili allo sviluppo della industria atomica siano concesse in modo da evitare gli inconvenienti suaccennati, e da favorire chiunque voglia seriamente impegnarsi nello sfruttamento pacifico della energia atomica. Si tende, perciò, a esigere che patenti e brevetti siano concessi sotto la condizione che i concessionari siano tenuti a cederne l'uso a chiunque voglia entrare nella nuova industria (21).

Tuttavia, le misure concrete che regolano questa materia **non devono scoraggiare la piena partecipazione della iniziativa privata** in questo nuovo campo di ricerche e di applicazioni industriali, perchè è necessario che i capitali privati siano gradualmente attratti alla nuova industria, anche per sollevare l'onere dello Stato. Incoraggiamenti concreti sono particolarmente necessari perchè **rischi notevoli** gravano ancora su ogni iniziativa in questo settore.

Purtroppo però, l'iniziativa privata, anche se stimolata, può mostrarsi refrattaria e rispondere pigramente, come sta accadendo negli Stati Uniti.

(21) *Atoms and Industry*, in *The Economist*, 31 marzo 1956, p. 687. Tra i *problemi particolari* la cui soluzione è ancora oggetto di discussioni e di studio, vi è quello del *regime di proprietà dei combustibili nucleari*. Come abbiamo accennato più sopra, i combustibili nucleari finora sono stati prodotti a fini militari dallo Stato. Ora che l'iniziativa privata ne ha bisogno per le centrali nucleari e per il loro sfruttamento pacifico, ci si chiede se essi debbano essere *ceduti in proprietà privata* alle compagnie che ne curano lo sfruttamento industriale o se debbano essere *ceduti solo in affitto*. L'una e l'altra soluzione della questione ha i suoi pro e i suoi contro. Sembra però abbastanza fondato il parere di coloro che preferiscono che lo Stato e qualche Ente supranazionale ne conservi la proprietà sia per un maggior controllo del loro impiego, sia perchè non sembra affatto necessario che per un loro migliore sfruttamento debbano essere ceduti in proprietà privata alle società private. A favore di un regime di proprietà privata dei combustibili nucleari si è pronunciato recentemente in Italia, l'ing. G. Valerio, Consigliere delegato della Edison (vedi *Mondo Economico*, 22 giugno 1957, p. 10-12).

Un altro problema di particolare interesse per l'incipiente industria atomica è quello dell'*assicurazione contro i rischi degli impianti nucleari*. I rischi derivanti dai reattori nucleari sembrano essere di due tipi:

a) rischi per *danni al reattore stesso*: più facilmente che per altri impianti può accadere che il reattore subisca danni oltre ogni possibilità di riparo;

b) rischi per le *conseguenze di contaminazioni radioattive*, che possono colpire sia gli addetti alle centrali, che intere zone circostanti: edifici, campi, raccolti, acqua, ecc. La valutazione di questi rischi è particolarmente complessa e incerta, perchè è difficile prevedere sia l'entità dei danni, che le spese necessarie per la decontaminazione. Secondo calcoli di Compagnie assicuratrici inglesi, la perdita totale di un reattore potrebbe esporre la compagnia assicuratrice a reclami per 30 milioni di sterline per il reattore stesso, più altri 10 milioni di sterline per danni a terze persone (*The Economist*, 29 giugno 1957, p. 1180).

In America, infatti, data la grande disponibilità di energia, i prezzi sono tali che non giustificano, economicamente, l'immediata costruzione di impianti elettro-nucleari. Quindi, la risposta della iniziativa privata ai ripetuti inviti del Governo, perchè si creino impianti elettro-nucleari, è *piuttosto insoddisfacente*. Per rimediare a questa situazione, vi è chi vorrebbe che lo Stato concedesse maggiori facilitazioni ai privati.

Contro costoro reagiscono, però vivacemente altri, che vedono in questa politica un vero sperpero del pubblico danaro: con tante sovvenzioni l'iniziativa privata sarebbe praticamente a carico dell'erario. Essi, perciò, propongono che lo Stato *direttamente attui un vasto programma di sfruttamento industriale dell'energia atomica*; questo, essi dicono, è anche il modo migliore per stimolare efficacemente l'iniziativa privata.

Inoltre, si fa presente che se per iniziare un programma atomico industriale, si dovesse attendere fino a che ve ne sia la convenienza economica, l'America perderebbe facilmente, a favore della *Gran Bretagna*, il « leadership » internazionale in questo settore. Infatti, gli inglesi sono molto più avanti degli americani nella costruzione di impianti elettro-nucleari, e possono quindi offrire agli altri paesi un'assistenza tecnica più qualificata e interessante (22).

I problemi che qui abbiamo brevemente discusso, in parte sono problemi propri degli Stati Uniti o della Gran Bretagna, in parte sono problemi connessi con l'industria atomica, senza distinzione di luogo. Essi quindi interessano anche l'Italia e tutta la Comunità Europea: e per essi appunto il *Trattato Costitutivo della Comunità Europea della Energia Atomica* offre una soluzione che ci riserviamo d'illustrare in un prossimo articolo.

Mario Reina

(22) Di questi problemi si è occupata a lungo la stampa americana in occasione dei due grandi dibattiti atomici per la approvazione dell'« Atomic Energy Act » del 1954 [vedi *Aggiorn. Sociali*, (luglio) 1957, pp. 413 sgg.], e recentemente, per la successione al posto di T. E. Murray in seno alla « Atomic Energy Commission ». Mr. Murray del Partito Democratico sostiene la necessità di un maggiore impegno governativo nel promuovere direttamente le applicazioni industriali della energia atomica: vedi *The Economist*, 4 maggio 1957, p. 401 e 1 giugno 1957, pp. 790-791; vedi pure FITZGERALD M. J., *Girding For Atomic Power, in America* (New York), 25 maggio 1957, pp. 253-256. Nonostante le lacune accennate nel testo, il programma nucleare americano è grandioso: si prevede che, entro pochi anni, saranno in funzione 24 impianti nucleari per la produzione di energia atomica. Sino ad ora 69 aziende elettriche americane si sono impegnate a costruire 14 reattori elettro-nucleari per una spesa complessiva di 400 milioni di dollari. Il primo impianto elettronucleare che entrerà in funzione sarà quello di Shippingport. La sua costruzione costerà 70 milioni di dollari. Se tutti i 24 impianti attualmente in progetto saranno completati, la loro capacità sarà di circa 1 milione di kw (il programma inglese, come abbiamo detto più sopra, prevede invece centrali elettronucleari per la potenza complessiva di circa 5 o 6 milioni di kw!) (*Atom now ready to go to work*, in *US News and World Report*, 17 maggio 1957, pp. 76-79).