

L'ENERGIA NUCLEARE

Aspetti scientifici e morali

Per trattare il problema dell'uso dell'energia nucleare da un punto di vista morale, era indispensabile un'esposizione scientifica sulla natura e sugli effetti immediati e potenziali dello sfruttamento di questo tipo di energia. Abbiamo quindi affidato il compito di esporci i dati più attendibili sull'argomento a due competenti, all'ingegnere nucleare Giuseppe Volta, dirigente di una azienda chimica, per quanto riguarda la parte fisica, e al dr. Angelo Serra, dell'Istituto di Biologia Generale e Centro di Studi di Genetica Umana dell'Università di Milano, per quanto riguarda la parte biologica.

Ne riportiamo testualmente la trattazione, necessariamente breve, data la natura della nostra Rivista, ma arricchita di note illustrative e orientative per eventuali approfondimenti del problema.

I

ASPETTI SCIENTIFICI DEL PROBLEMA

I pericoli che le radiazioni ionizzanti possono rappresentare per l'umanità hanno sollevato l'interesse di organismi internazionali e dell'opinione pubblica. L'O.N.U., come risultato di un dibattito tenuto dal 31 ottobre al 10 novembre 1955, costituì un **Comitato** per lo studio e la raccolta di tutte le informazioni possibili intorno agli effetti delle radiazioni sull'uomo (1). Il Comitato ha riferito nel giugno 1958 con un **Rapporto** (2), che fu anche oggetto di una seduta della 2ª Conferenza Internazionale per gli usi pacifici dell'energia nucleare a Ginevra nel settembre 1958 (3). E a

(1) *Corriere della Sera*, 2 nov. 1958.

(2) ONU, *General Assembly Resolution*, 913, 3 dicembre 1955.

(3) ONU, *Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiations. General Assembly, 13th Session, Official Records, Supplement n. 17 (A/3838)*, New York, 1958.

Ginevra stessa, il 1° novembre 1958, dopo anni di proposte, tentativi e polemiche, si è aperta la **Conferenza** per la sospensione degli esperimenti nucleari bellici (4).

La stampa d'altra parte, sia pure in termini raramente esatti, ha attirato frequentemente e continua di tanto in tanto ad attirare l'attenzione del pubblico sul problema degli effetti delle radiazioni ionizzanti e sulle sue ripercussioni in campo politico (5).

Sotto lo stimolo delle circostanze, anche le scienze medico-biologiche stanno cercando di affrettare il passo onde chiarire questo complesso problema di biologia umana per parecchi lati ancora molto oscuro.

Riassumiamo qui gli elementi fisici e biologici essenziali per una esatta comprensione del problema.

LE RADIAZIONI IONIZZANTI E LORO SORGENTI

Le radiazioni ionizzanti.

Si possono definire **radiazioni ionizzanti** quelle che interagiscono con la materia che incontrano, provocando in essa, direttamente o indirettamente, alterazioni atomico-molecolari con produzione di frammenti elettricamente carichi (ioni ed elettroni).

I tipi di radiazione in ordine progressivo di potere penetrante sono:

a) **Le particelle α** , costituite da nuclei di elio, dotati di carica elettrica; hanno un piccolo potere di penetrazione, tanto che per le energie comuni sono fermate da pochi cm di aria e da frazioni di mm, dell'ordine di alcuni decimi, di tessuto vivente. Contemporaneamente però provocano un'intensa ionizzazione nella piccola profondità colpita.

b) **Le particelle β** , costituite da elettroni, cioè di particelle

(4) LEBEDINSKY A. B., *Proceedings of the 2nd United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy*, Geneva, 1958, Session D/9.

(5) Uno spoglio anche affrettato della stampa periodica di questi ultimi anni farebbe incontrare parecchi titoli impressionanti. Ne riportiamo alcuni del 1957: *Drammatiche rivelazioni scaturite da un'inchiesta: i rischi delle esplosioni atomiche accertati da scienziati giapponesi* (Il Popolo di Milano, 24 gennaio 1957); *La nube atomica sopra la California* (Il Giorno, 31 maggio 1957); *Alterano lo stampo umano le radiazioni nucleari* (Il Giorno, 5 giugno 1957); *I neonati minuscoli di Cheltenham preoccupano le autorità inglesi* (Corriere di Informazione, 11-12 marzo 1957).

Negli ultimi due anni gli allarmi sulla stampa italiana si sono diradati per ritornare più acuti e precisi in occasione della prevista esplosione sperimentale francese nel Sahara. Questa esplosione può toccare direttamente gli italiani data la possibilità che lo scirocco porti nell'Italia sabbia del Sahara resa radioattiva dall'esplosione. Si può vedere a questo proposito: DIMIO, *La bomba del Sahara*, in *La Stampa*, 3 settembre 1959. Sulla esplosione nel Sahara c'è stata pure una interrogazione alla Camera il 2 settembre da parte dei socialisti MAZZALI, BASSO e VECCHIETTI.

cariche di massa piccolissima (8.000 volte meno delle particelle α). Come per le particelle α la loro energia può variare notevolmente; in ogni caso però il potere penetrante, che è circa proporzionale all'energia, è molto maggiore di quello delle particelle α . Sono assorbite da qualche metro d'aria e da un cm di tessuto vivente.

c) **I raggi X**, radiazioni elettromagnetiche prodotte usualmente da apparecchiature elettriche apposite e usate per terapia, diagnostica e radiografie industriali. Il loro comportamento è uguale a quello dei raggi γ , ma il loro potere di penetrazione è di regola inferiore.

d) **I raggi γ** , radiazioni elettromagnetiche della stessa natura dei raggi X e della luce, dotate di alta energia e di massa nulla. Come le particelle α e β provengono dal nucleo atomico (per questo sono chiamate con nome diverso dai raggi X, che provengono dalla corteccia elettronica dell'atomo). Essi hanno potere penetrante molto maggiore dei raggi α e dei raggi β e, a pari energia di una particella β capace di attraversare un cm di tessuto vivente, essi sono capaci di attraversarne cm 200.

e) **I neutroni**, costituenti del nucleo atomico, che possono essere liberati con notevole quantità di energia. Non hanno carica elettrica e per questo hanno alto potere penetrante in generale. Possono entrare in nuclei di elementi stabili provocandone l'eccitazione e la disintegrazione, cioè rendendoli radioattivi. La capacità di assorbire neutroni è una proprietà caratteristica di ciascun tipo di nucleo, variabile da elemento a elemento e nota solo sperimentalmente.

f) **I raggi cosmici**, gruppo di radiazioni di alta energia ed estremamente penetranti, originate dalle particelle pesanti che provengono dagli spazi cosmici. Queste particelle pesanti, o componenti primari, sono assorbite nello strato superiore dell'atmosfera e danno luogo a radiazioni di diverso tipo, ciascuna con un proprio potere ionizzante.

Le predette radiazioni si differenziano notevolmente per il modo di interagire con la materia che incontrano. I raggi X e γ interagiscono o al momento della loro cattura da parte di un atomo con produzione di effetto fotoelettrico o con produzione di coppie di elettroni, o venendo diffusi nel percorso per effetto Compton, seguendone in ogni caso la ionizzazione della materia immediatamente circostante il punto di interazione.

I raggi α e β e i neutroni invece interagiscono ripetutamente con la materia che incontrano, subendo deviazioni e rallentamento finchè vengono catturati e ionizzando la materia lungo tutto il tragitto. Da ciò dipende che l'azione dei primi interessa, come è già stato indicato, notevoli spessori del corpo irradiato, quella dei secondi soltanto le zone superficiali.

Le principali sorgenti di radiazioni ionizzanti.

Le radiazioni a cui l'uomo è o può essere sottoposto hanno duplice origine: naturale o artificiale.

1. Le sorgenti naturali sono:

a) Gli spazi cosmici, da cui derivano le radiazioni cosmiche.

b) Gli elementi radioattivi con i loro prodotti di decadimento radioattivi e gli isotopi radioattivi degli elementi stabili distribuiti non uniformemente nella crosta terrestre e nei materiali di costruzione delle case, particolarmente il radio, l'uranio, il torio e il potassio 40, e inoltre il radon dell'aria. Da questi provengono soprattutto le radiazioni γ che, insieme con le radiazioni cosmiche, costituiscono il così detto « fondo esterno ».

c) I radioisotopi contenuti naturalmente nell'uomo, rappresentati in modo preponderante dal potassio 40, dal carbonio 14, dal radio e dal radon incorporati nei vari tessuti dell'organismo, dove giungono e si accumulano attraverso l'alimentazione e la respirazione. Da questi sono emesse le radiazioni che costituiscono il così detto « fondo interno ».

La dose dell'irraggiamento di fondo assorbita e accumulata da un individuo dalla nascita fino ai 30 anni (periodo che in media precede la generazione) e biologicamente efficace, è valutata in base a ricerche inglesi, statunitensi e svedesi (6) intorno a 1-3 rem (7) per le radiazioni cosmiche, a 2 - 4,3 rem per le altre radiazioni del fondo esterno e a 0,5 rem per quelle del fondo interno.

2. Le sorgenti artificiali si possono ricondurre a tre classi:

a) I materiali radioattivi e gli apparecchi per produzione di radiazioni (tubi per raggi X), impiegati a scopi diagnostici o terapeutici in medicina. E' ancora impossibile una valutazione esatta della dose media di esposizione di una popolazione, dovuta a questo genere di irraggiamento. I risultati di ricerche eseguite

(6) Cfr. Great Britain, Medical Research Council, *The Hazards to Man of Nuclear and Allied Radiations*, London, 1956; United States of America, National Academy of Sciences, *The Biological Effects of Atomic Radiation*, Summary reports, Washington, 1956; SIEVERT R. M., *Exposure of Man to Ionizing Radiations, with Special Reference to Possible Genetic Hazards, in Effect of Radiation on Human Heredity*, WHO, Geneva, 1957, pp. 63-85.

(7) Le grandi difficoltà che si oppongono a una precisa determinazione dell'effetto biologico delle radiazioni dipendente da molti fattori - quali le modalità dell'irradiazione, le proprietà intrinseche del materiale irradiato, lo stato di questo in rapporto a fattori ambientali estranei all'irradiazione - non ha permesso, fino ad oggi, un accordo nello stabilire un'unità di misura della dose assorbita biologicamente efficace. L'unità « rem » è quella più comunemente accettata, che sarebbe, secondo la definizione più recente, la quantità di radiazione che provoca nel tessuto interessato un effetto pari a quello che si avrebbe trasferendo 100 erg di energia in ogni grammo (cfr. Società Italiana di Radiologia Medica e di Medicina Nucleare, *Simposio internazionale sulle grandezze, sulle unità e sui metodi di misura delle radiazioni ionizzanti*, Roma, 14-15 aprile, 1958; RADU GRIGOROVICI E MIRCEA ONCESCU, *On the Necessity of Introducing a New Radiobiological Quantity*, in *Proceedings of the 2nd United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy*, Geneva, 1958, vol. 21, 115-117).

in Danimarca, Inghilterra, Stati Uniti e Svezia indicherebbero però che la dose media ricevuta dalle gonadi (il tessuto geneticamente più importante) si aggira sugli 1-3 roentgen per un periodo di 30 anni (8).

b) Contaminazione ambientale dovuta allo sviluppo industriale dell'energia nucleare (9). La contaminazione ambientale, dovuta allo sviluppo industriale dell'energia nucleare è, oggi, assolutamente trascurabile; ma costituirà il problema più serio di contaminazione nel futuro, sia per l'accumulo di residui radioattivi, sia per gli incidenti agli impianti (10).

Nelle centrali termoelettriche nucleari, quali si vanno e si andranno sicuramente estendendo nel futuro, si « brucia » uranio o torio o plutonio. I residui di questa combustione nucleare sono sostanze radioattive. La quantità di tali sostanze, da cui dovremo in qualche modo difenderci, sarà proporzionale alla energia nucleare prodotta. Se noi supponiamo di avere installato entro il 1975 centrali nucleari per una potenza complessiva di 20.000.000 KW (previsione fatta per i Paesi dell'Euratom), avremo dopo alcuni anni una giacenza di 10^{11} curie di prodotti radioattivi, risultato dell'equilibrio dei prodotti che esauriscono la loro attività e di quelli che si formano (11).

Per aver un'idea dell'entità di questa quantità, basta pensare

(8) Cfr. *Exposure of Man to Ionizing Radiation Arising from Medical Procedures*, in *A Report of the International Commission on Radiological Protection and International Commission on Radiological Units and Measurements* (Trad. italiana della Società Italiana di Radiologia Medica e di Medicina Nucleare, Milano 1958). Vedi anche COURT-BROWN W. M., *Gonad Doses from Diagnostic and Therapeutic Radiology, in Effect of Radiation on Human Heredity*, WHO, Geneva, 1957, pp. 95-99.

(9) Cfr. REINA M., *Trattative internazionali per l'uso pacifico dell'energia atomica*, in *Aggiornamenti Sociali*, (luglio) 1957, pp. 413-420; e *Sfruttamento industriale dell'energia atomica: problemi e prospettive*, *ibidem*, (agosto-sett.) 1957, pp. 457-472.

(10) A Windscale, il 10 ottobre 1957, un reattore a uranio naturale e raffreddato ad aria (reattore adibito esclusivamente alla produzione di plutonio per bombe nucleari) ebbe una violenta ossidazione di elementi di combustione con fuoriuscite, attraverso i filtri dimostratisi insufficienti, di una notevole quantità di prodotti di fissione, in particolare iodio 131. Si conta che siano stati dispersi nell'atmosfera 20.000 curie di iodio 131, 600 curie di cesio 137, 9 curie di stronzio 90. (E' da tener presente che lo iodio 131 ha vita media - cioè si riduce a metà della quantità iniziale - di 8 giorni, mentre il cesio 137 di 33 anni e lo stronzio di 20 anni). Lo iodio 131 raggiunse una concentrazione superiore a quella ammissibile nel latte su un'area di circa 500 km², area sulla quale furono adottate misure di sicurezza (quattro giorni dopo l'incidente!) per proibire il consumo di questo alimento per parecchi giorni. In misurazioni non pericolose tracce dei prodotti di fissione sono caduti su tutta l'Europa come risulta da una mappa esposta alla esposizione di Ginevra. In conseguenza di questo incidente tutte le disposizioni di sicurezza per i centri nucleari in Inghilterra sono state aggiornate. Si veda per un'informazione completa: DUNSTER, HOWELLS, TEMPECTON, *District Survey Following the Windscale Incident*, October 1957, in *Proceedings of the 2nd United Nations Intern. Conference on the Peaceful uses etc.*, cit. P/316.

(11) SADDINGTON, *Radioactive Waste Disposal*, London, 1958.

che, supponendola sciolta uniformemente nel mare, porterebbe l'acqua di questo a una concentrazione uguale a quella stabilita come limite massimo dalle norme attuali. Questa, però, è un'ipotesi assurda; qualunque cosa avvenga, la loro distribuzione non può essere che estremamente irregolare, in dipendenza anche della selettività che gli organismi viventi hanno per le varie sostanze.

Parte di queste sostanze radioattive si troverà « chiusa » nella centrale nucleare; parte, come sottoprodotto degli stabilimenti, che rigenerano il combustibile, sarà immagazzinata in qualche modo; parte andrà inevitabilmente dispersa. In linea di principio, queste sostanze radioattive sono perfettamente controllabili mediante contenitori a perfetta tenuta. Tuttavia, **tre cose congiurano contro una totale sicurezza**: l'economia, gli incidenti, il tempo.

Un esame più approfondito dei problemi di smaltimento dei residui radioattivi è fuori luogo qui. Basta aver messo in chiaro l'esistenza e le dimensioni di questo problema che dovrà essere affrontato presto.

E' doveroso accennare che la possibilità di sfruttare a fini industriali il principio su cui si basa la bomba H (fusione dell'idrogeno) eliminerà in gran parte questo problema. Ma le speranze di arrivare a questo traguardo sono lontane, e intanto si continuerà a fabbricare centrali ad uranio.

c) Contaminazione ambientale dovuta ad esplosione di bombe nucleari (12). Esistono due tipi di bombe nucleari: la **bomba A** (o bomba nominale) e la **bomba H**. La bomba A corrisponde alle bombe sganciate sul Giappone e si valuta che la sua potenza sia pari a 20.000 tonnellate di trinitrotoluolo, l'esplosivo delle bombe tradizionali. Questa cifra serve da misura nel campo delle bombe nucleari. La bomba H, per così dire standard, è di potenza **500 volte superiore alla bomba A**.

E' da notare però che per la bomba A esiste **un limite fisso di potenza**, legato al principio su cui si basa (scoppio di una massa « critica » di plutonio o di uranio); mentre per la bomba H (che si basa sulla fusione dell'idrogeno) **non esiste un limite teorico di potenza**. Lo scoppio della bomba H è innescato da una bomba A, come lo scoppio di una bomba tradizionale era innescato dalla spoletta.

Quando **una bomba nucleare esplode** viene sprigionata una quantità enorme di energia istantaneamente, e il materiale della bomba è trasformato in una bianca palla di gas, a temperatura uguale a quella del sole, che rapidamente si espande. Da questo globo di fuoco **si riversa in tutte le direzioni** un intenso irraggiamento di luce, calore e radioattività, mentre l'espansione provoca una tremenda onda di urto.

(12) I dati che seguono come pure la tabella, sono presi in buona parte dall'opuscolo *Nuclear Weapons*, manuale per la difesa civile, H.M.S.O., Londra 1956.

Le tre manifestazioni dell'energia sviluppata, cioè luce e calore, radioattività e onda d'urto, producono effetti diversi a seconda dell'altezza dello scoppio rispetto alla superficie terrestre e della distanza dal punto dello scoppio. La misura del rischio derivante dalle radiazioni emesse all'atto dell'esplosione dipende principalmente dalla potenza della bomba. La misura del rischio, invece, proveniente dalla radioattività sospesa nella sfera di fuoco e che raggiunge sotto forma di nubi cariche di prodotti radioattivi la stratosfera, da dove lentamente è depositata sulla terra, dipende prevalentemente dall'altezza dello scoppio.

Il maggior rischio per questa radioattività si ha con le bombe H scoppiate a livello del suolo. Si parla, perciò, di bombe H « pulite », quando sono fatte scoppiare in condizioni tali da provocare il minor quantitativo possibile di radioattività residua.

Un'idea sugli effetti immediati delle esplosioni nucleari si può avere dalla seguente tabella, dove è riportata una valutazione media dei danni, a diversa distanza, per i due tipi standard di bombe, dovuti rispettivamente all'onda di urto, alla radiazione termica e all'irraggiamento γ immediato. Si fa l'ipotesi che le bombe scoppino nelle condizioni tali da creare il maggior danno: cioè bomba A in aria, bomba H a livello del suolo.

EFFETTO	DISTANZA MEDIA A CUI È SENTITO L'EFFETTO	
	BOMBA A	BOMBA H
Dovuto all'onda d'urto <i>Distruzione totale o irreparabile di un edificio normale.</i> <i>Effetto lieve.</i>	metri 1.000 metri 4.500	metri 8.000 metri 30.000
Dovuto all'irraggiamento termico <i>Scottature letali</i> <i>Scottature di 3° grado</i> <i>Scottature di 1° grado</i>	metri 700 metri 1.500 metri 4.500	metri 6.000 metri 12.000 metri 30.000
Dovuto alle irradiazioni su persone all'aperto <i>Morte del 50%</i> <i>Rischio insignificante</i>	metri 1.000 metri 3.500	metri 4.500 metri 6.000

Circa la **contaminazione radioattiva residua**, dovuta a una bomba H, la « Atomic Energy Commission » Americana rendeva noto che, in seguito a una esplosione sperimentale nel Pacifico il 1° marzo 1954, era stata contaminata un'area a forma di sigaro lunga più di 300 Km. e larga 60 Km. Ai margini di quest'area le persone avrebbero assorbito, in tre giorni, una dose di 300 rem, dose tale da provocare la morte in proporzione del 10%. La dose naturalmente sarebbe aumentata avvicinandosi al punto dell'esplosione, fino a diventare, a 100 Km., **superiore alla dose letale**.

Ulteriori indagini, in seguito ad altre esplosioni (13), hanno dimostrato che i prodotti di fissione radioattiva di media « vita media » non si distribuiscono uniformemente sulla superficie terrestre, ma sono già sensibili, dopo 5 giorni dall'esplosione, anche a migliaia di Km. di distanza, aumentandovi notevolmente le radiazioni γ .

Sembrano, invece, **più uniformemente distribuiti** due prodotti di lunga « vita media », lo stronzio 90 e il cesio 137, la cui caduta aumenterà probabilmente da 3 a 5 volte quella già esistente sulla superficie terrestre. Al presente, tuttavia, non è ancora possibile stimare le dosi ricevute dal tessuto umano, in seguito a queste « piogge » di materiali radioattivi, derivati dalle esplosioni nucleari (14).

GLI EFFETTI BIOLOGICI DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI

I primi studi sull'argomento risalgono al tempo stesso della scoperta dei raggi X (1895) e della radioattività naturale (1896). Ma il rapido sviluppo della radiobiologia iniziò soltanto nel 1927, anno in cui apparvero due pubblicazioni: una di L. J. Stadler e l'altra di M. J. Muller, nella quale era dimostrata la **trasmissibilità ai discendenti di modificazioni indotte dai raggi X** nel grano-turco e nella drosophila. Nei circa trent'anni che seguirono si sperimentò su vegetali (15) e su animali (16) con ogni genere di radiazioni, per cercare di comprendere il tipo degli effetti pro-

(13) Cfr. SIEVERT R. M., *cit.*

(14) Sulla base dei dati che precedono e tenuto conto che si valutano a circa 20.000 le bombe A e H immagazzinate in questo momento, la guerra nucleare si prospetta come una distruzione radicale di paesi e di popolazioni. Una valutazione per es. dell'Amministrazione Federale per la difesa civile degli Stati Uniti, calcola, per il primo giorno di una eventuale guerra, 36 milioni di morti e 57 milioni di feriti, nell'ipotesi di un bombardamento con 200 bombe H. Cfr. RUSSEL, *Prima dell'Apocalisse*, Milano, 1959, p. 27.

(15) Cfr. *Symposium on the Effects of Ionizing Radiation on Plants*, in *Quarterly Review of Biology*, 32, 1-56, 1957.

(16) Cfr. TIMOFEEFF N. W. e RESOVSKY C., *Mutabilità sperimentale in Genetica*, Hoepli, Milano, 1939; KAPPERT M., *Experimentell ausgelöste Mutationen*, in *Vererbungslehre*, Frankfurt/Oder, 1943, pp. 189-195; *Advances in Radiobiology*, in *Proceedings of the 5th International Conference on Radiobiology*, Stockholm, August, 1956.

dotti, la loro entità, le modificazioni che si verificano nella materia vivente nell'interazione con le radiazioni e il meccanismo che porta alla comparsa dell'effetto osservato.

Sebbene non tutto ancora sia perspicuo, tali ricerche hanno permesso di stabilire alcuni principi, che offrono una base per prevedere, almeno nelle grandi linee, quali potrebbero essere i rischi e il loro ordine di grandezza per l'uomo.

Alcuni principi di radiobiologia.

1. Ogni radiazione ionizzante, per la sua proprietà di interagire con la materia, da cui è assorbita, ionizzandola, è capace di **indurre nelle cellule viventi delle modificazioni chimiche al livello submolecolare e molecolare** della loro organizzazione (microeventi). A questo seguono, direttamente o indirettamente, date le strette relazioni tra le strutture cellulari, delle alterazioni più o meno profonde del meccanismo biochimico, le quali portano alla comparsa delle deviazioni fisiologiche e morfologiche visibili (macroeventi) nelle cellule, tessuti e organi.

2. Le cellule colpite dalle radiazioni possono essere quelle « **germinali** », destinate alla formazione dei gameti, dalla cui fusione origina un nuovo organismo, oppure quelle non germinali, dette « **somatiche** ». In ogni caso i microeventi possono interessare o solo le strutture citoplasmatiche o solo le strutture nucleari o tutte e due.

Gli effetti macroscopici sono un risultato delle possibili combinazioni dei microeventi. I più importanti sono tuttavia quelli che interessano le strutture nucleari tanto delle cellule somatiche (« **effetti genetici somatici** ») che delle cellule germinali (« **effetti genetici gametici** »). Come effetti somatici si debbono considerare, con molta verosomiglianza, **le leucemie e altre forme neoplastiche da irradiazione** ed inoltre le così dette « **macchie** », cioè zone di tessuto di ampiezza più o meno considerevole, secondo il momento ontogenetico in cui è avvenuta la irradiazione, di struttura genetica diversa. Agli effetti gametici si deve ascrivere un'immensa serie di caratteri e particolarmente di forme morbose ereditarie.

3. Le modificazioni di maggior rilievo del materiale nucleare ereditario, visibile in alcuni particolari momenti della vita delle cellule sotto forma di piccoli corpi detti « **cromosomi** », riguardano il **numero** di questi che, ordinariamente fisso, aumenta o diminuisce, e la loro **struttura** che varia in seguito a rotture, delezioni, inversioni, traslocazioni (« **mutazioni cromosomiche** »). Altre ancora avvengono in punti particolari dei cromosomi, detti « **geni** » - le minime unità da cui dipende la comparsa dei caratteri, secondo la concezione classica - che subiscono un cambiamento (« **mutazioni geniche** »), il quale non può essere controllato citologicamente, ma solo attraverso lo studio dei discendenti in cui passa.

E' precisamente alle « mutazioni cromosomiche », che avvengono nelle cellule somatiche adulte, che sembrano doversi attribuire le diverse manifestazioni cancerose da irradiazione; mentre quelle che avvengono o nelle cellule germinali materne o nelle cellule embrionali, sembrano la causa delle anomalie riscontrate nello sviluppo dei feti irradiati e della comparsa di modificazioni « letali », che conducono alla morte del feto.

Ed è importante notare che esperimenti condotti sui ratti per studiare l'influsso delle radiazioni sullo sviluppo dell'embrione (17) indicano che il rischio degli effetti da irradiazione (soprattutto malformazioni - come l'anencefalia, l'idrocefalia, la microcefalia, la spina bifida - e la morte precoce dell'embrione) è massimo durante il periodo dell'organogenesi; periodo che durante la gravidanza umana è così precoce che può essere ancora insospettato.

Ma più temibili sono le « mutazioni geniche », che avvengono nelle cellule germinali, poichè possono essere trasmesse ai discendenti. Per queste soprattutto valgono i principi che seguono.

4. I « geni » possono mutare spontaneamente: la frequenza delle « mutazioni spontanee » è però piccola. In un moscerino (la drosophila), per esempio, si calcola che nel periodo di una generazione muta 1 gene ogni 100.000-200.000; nel topo invece 1 ogni 35.000-100.000. Nell'uomo (18) per 16 geni finora studiati si è calcolato che la frequenza di mutazione per generazione varia fra 1 su 20.000 e 1 su 45.000. Ciò significherebbe che, in ogni generazione, approssimativamente 1 gamete su 2.100 subisce una mutazione nell'uno o nell'altro dei punti dei cromosomi (« loci »), dove esistono l'uno o l'altro dei 16 geni.

D'altra parte la frequenza delle mutazioni cresce straordinariamente quando l'organismo è sottoposto a irradiazioni di elevata energia, quali le radiazioni X, γ , β , α e neutroni, pur variando da gene a gene.

5. L'aumento della frequenza delle mutazioni è direttamente proporzionale alla dose di radiazione impiegata e, a parità di dose, è uguale qualunque sia il tipo di radiazione: raggi X molli, X normali, X duri, γ , β , α . I raggi α però, dato il piccolo potere di penetrazione, riescono difficilmente a raggiungere i cromosomi delle cellule germinali. I neutroni, invece, sembra abbiano un potere di indurre mutazioni di 1/3 più debole dei precedenti.

(17) Cfr. RUSSELL L. B., *Radiation Biology*, New York, 1954, pp. 861-918; O'BRIEN J. P., *Vertebrate Radiobiology: Embriology*, in *Annual Review of Nuclear Science*, 6, 423-453, 1956.

(18) Cfr. KEMP T., *Genetics and Disease*, Copenhagen, 1951, pp. 62-74; NEEL J. V., and SCHULL W. J.: *Human Heredity*, University of Chicago Press, 1957, pp. 136-155; VERSCHUER O. (von), *Strahlenschädigung der Erbanlagen und Mutationsrate des Menschen*, in *Fortschritte der Medizin*, 75, 717-735, 1957; NACHSTHEIM H., *Atomenergie und Erbgut*, in *Münchener Medizinische Wochenschrift*, 99, 1283-1290, 1957.

Inoltre non esiste una « soglia » al di sotto della quale non possa esserci mutazione. Una qualsiasi minima dose è capace di provocarla.

6. Una data dose ha lo stesso effetto indipendentemente dal tempo, in cui è applicata: un effetto prodotto da una data dose, ad es. di 100 r, può essere ottenuto sia mediante un'unica applicazione di essa sia mediante una serie di piccole dosi comunque diluite nel tempo. E' sotto questo aspetto, soprattutto, che si differenziano gli effetti genetici dalle reazioni fisiologiche alle radiazioni, le quali provocano effetti somatici. Per queste, infatti, la concentrazione nel tempo ha molta importanza. Così, una dose di raggi X capace di provocare eritema, se frazionata nel tempo, può restare completamente senza effetto.

7. Le mutazioni indotte nell'ambito di una data specie sono dello stesso tipo delle mutazioni spontanee; ciò che varia, dunque, in seguito all'irraggiamento non è la qualità delle mutazioni, ma solo la quantità. In altre parole, tutte le mutazioni, che appaiono spontaneamente nella specie umana, tendono ad aumentare con l'aumentare delle radiazioni nell'ambiente.

8. Tutti gli organismi sono capaci di subire mutazioni indotte. Il tipo di tessuto irradiato, la natura e lo stato fisiologico delle cellule e altri fattori accessori (temperatura, agenti chimici) possono tuttavia far variare la frequenza delle mutazioni radioindotte.

9. I geni mutati (« mutanti ») sono per la massima parte dannosi all'organismo, rendono cioè il soggetto che li porta meno atto degli altri a resistere all'ambiente, quando non ne alterino addirittura in modo patologico le ordinarie attività fisiologiche, a cui possono seguire delle anomalie anche morfologiche.

10. I geni così mutati possono essere di tipo dominante, manifestare cioè la loro presenza quando sono in semplice dose (per esempio, nell'uomo, il gene per il nanismo, per l'aniridia, per il retinoblastoma); oppure **di tipo recessivo,** manifestare cioè la loro presenza solo quando sono in doppia dose (per esempio il gene della microftalmia, dell'albinismo, dell'ittiosi congenita, della microcefalia); oppure **di tipo recessivo incompleto,** manifestare cioè la loro presenza quando sono in semplice dose, ma in modo assai più attenuato di quando sono in doppia dose (per esempio, il gene della microcitemia).

Benchè non si sia ancora in grado di dare per l'uomo una frequenza relativa dei tre tipi, sembra che la **massima parte sia di tipo recessivo.** Perciò tali mutazioni possono restare molto tempo nascoste nella popolazione fino a quando non si incontrino due genitori, ciascuno dei quali porta il gene mutato nei suoi gameti.

Estroapolazioni all'uomo.

I principi sopra elencati, dai quali risulta chiaramente quali possono essere i pericoli dell'irradiazione di un organismo vivente, sono stati, in massima parte, ricavati da osservazioni ed esperienze condotte sui vegetali e sugli animali. In base ad essi, si è cercato di fare qualche estroapolazione all'uomo (19).

Tutti coloro che si sono impegnati in tali deduzioni riconoscono apertamente che **troppo scarse e frammentarie** sono le attuali conoscenze su alcuni dati fondamentali relativi alla specie umana (numero dei geni, frequenza delle mutazioni spontanee, tipo dei geni mutati, tasso di mutazioni radioindotte) per attribuire a quelle valore definitivo. Per tale motivo il I° Congresso Internazionale di Genetica Umana, tenutosi a Copenhagen nell'agosto del 1956, presentava a circa 600 congressisti la seguente mozione:

« Il danno prodotto dalle radiazioni ionizzanti sul materiale ereditario è reale e dovrebbe essere preso in seria considerazione tanto negli usi militari e pacifici dell'energia nucleare quanto nelle attività mediche, commerciali e industriali in cui sono emessi raggi X o altre radiazioni ionizzanti. Si raccomanda che **siano grandemente estese ed intensificate** ricerche sull'entità e sul tipo del danno e su questioni genetiche connesse, allo scopo di salvaguardare il benessere delle future generazioni » (20).

Ad ogni modo alcuni punti generali si impongono come seriamente accettabili.

1. Le radiazioni ionizzanti del fondo esterno e interno hanno certamente un **influsso nel determinare una parte delle mutazioni spontanee che si osservano nell'uomo**. Evidentemente queste non si possono eliminare.

2. Si calcola che la dose di esposizione necessaria per raddoppiare la frequenza delle mutazioni spontanee nell'uomo (« dose raddoppiante ») - frequenza che si dovrebbe ritenere di vera importanza per dare un effetto medio sensibile in una popolazione abbastanza grande - si aggira intorno ai 30-80 roentgen o, prendendo i limiti estremi, fra 15 e 150 roentgen.

(19) Cfr. EVANS R. D., *Quantitative Inferences Concerning the Genetic Effects of Radiation on Human Beings*, in *Science*, 109, 299-304, 1949; SLATIS H. M., *Current Status of Information on the Induction of Mutations by Irradiation*, in *Science*, 121, 817-821, 1955; PENROSE L. S., *Mutation in Man*, in *Proceedings of the First International Congress of Human Genetics*, Copenhagen, 1956, I, 13-26; MULLER H. J., *Further Studies Bearing on the Load of Mutations in Man*, in *Acta genetica*, 6, 157-168, 1956; CARTER T. C., *Radiation Genetics and Human Populations*, *ibid.*, 197-203; BRANDT A. E., *Integrated Exposure from Radioactive Fallout as a Basis for Estimating Genetic Effects*, *ibid.*, 216-219; MULLER H. J., *Damage from Point Mutations in Relation to Radiation Dose and Biological Conditions*, in *Effect of Radiation on Human Heredity*, WHO, Geneva, 1957.

(20) Resolution of the First International Congress of Human Genetics on the Subject of Radiation Damage, in *Proceedings of the First International Congress of Human Genetics*, Copenhagen, 1956, I, 221.

3. Tale dose non sembra raggiungibile a causa della contaminazione ambientale conseguente ad esplosioni di bombe nucleari. Secondo i rapporti del Comitato inglese e gli studi compiuti negli Stati Uniti, la dose di radiazioni γ a cui sarebbe esposto un individuo in 30 anni, se si continuassero le esplosioni sperimentali con il ritmo attuale, si aggirerebbe tra i 0,026 e i 0,50 roentgen. **Quindi un uso limitato di tali esperimenti non si dovrebbe ritenere ragionevolmente pericoloso.**

4. La « dose raddoppiante » potrebbe, invece, essere raggiunta, o per la particolare composizione del terreno (terreni molto ricchi di radioisotopi) o in seguito alle contaminazioni conseguenti l'impiego industriale dell'energia atomica, o, soprattutto, **nell'uso di tale energia a scopi diagnostico-terapeutici.** Tuttavia l'effetto, che può essere rilevante nel gruppo sottoposto a tale dose, si attenua o anche praticamente si annulla quando il gruppo non si considera separatamente, ma diluito nell'intera popolazione a cui appartiene.

5. Nel caso in cui una data popolazione raggiungesse la « dose raddoppiante », **il numero medio delle mutazioni svantaggiose alla specie certo aumenterebbe,** e quindi aumenterebbe anche il numero dei soggetti che le portano e che le possono trasmettere. Tuttavia, **l'aumento sarebbe così piccolo da poter passare per alcuni geni anche inosservato.** D'altra parte l'effetto dell'accumulo delle nuove mutazioni richiederebbe molte generazioni per poter diventare sensibile.

Tutto ciò va sottolineato, è **valido in senso relativo,** riferendoci cioè alla entità degli effetti su intere popolazioni; ma è pur vero che, ricordando quanto è stato detto nei principi generali, **in senso assoluto** ci sarà sempre un certo numero di individui che dovrà soffrire o morire per mutazioni provocate da un qualsiasi piccolo aumento di irraggiamento al di sopra di quello naturale.

L'esperimento umano.

Recentemente, si è anche tentato un accostamento sperimentale, diretto alla soluzione del problema degli effetti delle radiazioni di alta energia nell'uomo.

1. Il tentativo più imponente è stato quello condotto per ben nove anni da un'apposita Commissione (21) per studiare gli effetti genetici dell'esposizione all'irraggiamento subito dalle persone che si trovavano in Nagasaki e a Hiroshima allo scoppio delle bombe atomiche. Una rigorosa analisi statistica è stata eseguita

(21) Cfr. NEEL J. V. and SCHULL W. J., *Studies on the Potential Genetic Effects of the Atomic Bombs*, in *Acta genetica*, 6, 183-196, 1956; NEEL J. V., SCHULL W. J. and others, *The Effect of Exposure to the Atomic Bombs on Pregnancy Termination in Hiroshima and Nagasaki*, Washington, 1956.

sui dati raccolti su 76.626 gravidanze a termine dal 1948 al 1953 e riguardanti alcuni « indicatori di danno genetico »: sesso, malformazioni, vitalità alla nascita, mortalità neonatale (entro i primi 6 giorni dal parto) e peso alla nascita.

Si stabilirono 5 categorie dei genitori irradiati secondo la distanza dal punto « zero », dove fu sganciata la bomba, fino a 3000 metri, e due categorie per i confronti: una dei genitori che si trovavano al di là del raggio di 3000 metri, l'altra di quelli che non si trovavano in città. La dose delle radiazioni accumulata è difficilmente determinabile; ma sembra possa aver raggiunto per le persone più esposte anche 200 roentgen.

I risultati dell'analisi relativa a ciascuno degli indicatori di danno genetico sono sempre stati negativi: non si sono cioè dimostrate differenze tra i figli dei genitori irradiati e quelli non irradiati, nè rispetto al rapporto fra i sessi, nè rispetto alla frequenza delle malformazioni o della neonatimortalità o della mortalità neonatale, nè rispetto al peso alla nascita, e neppure considerando tutti gli indicatori globalmente.

Il confronto di quanto è stato osservato con quello che si sarebbe dovuto attendere, in base alle conoscenze di radiogenetica sopra esposte, conduceva la Commissione a questa conclusione: « Sulla base di quanto si conosce circa la genetica delle radiazioni nei mammiferi appariva improbabile che potessero essere dimostrati effetti notevoli della radiazione residua dallo scoppio delle bombe atomiche; e tali effetti non si sono infatti dimostrati. Ciò non significa che non ci furono mutazioni indotte nei sopravvissuti al bombardamento; d'altra parte però da questa serie di osservazioni non è neppure permessa l'opinione inversa che cioè siano state prodotte mutazioni, sebbene - sulla base delle conoscenze acquisite di radiogenetica - non c'è ragione di dubitare che in Nagasaki e Hiroshima avvennero delle mutazioni ».

2. Non più conclusivi sono i risultati di un secondo tentativo condotto da Turpin e Lejeune in Francia (22). Essi esaminarono **la discendenza di soggetti che avevano subito irradiazione pelvica in età giovane, senza protezione delle gonadi, con dose media di 1295-1461 roentgen.** Da queste ricerche è emersa soltanto una certa probabilità che sia avvenuto un aumento di mutazioni letali nel cromosoma X.

L'esperimento umano dunque non è, a questo momento, conclusivo per quanto concerne il peso che l'aumento di radiazioni ionizzanti nell'ambiente può avere nel produrre dei danni genetici germinali, i quali divengano sensibili e perciò valutabili in periodi di tempo relativamente brevi.

(22) Cfr. TURPIN P., LEJEUNE J. et BETHORE R. O., *Étude de la descendance de sujets traités par radiothérapie pelvienne*, in *Acta genetica*, 6, 204-216, 1956; TURPIN R. et LEJEUNE J., *Les affects génétiques des radiations ionisantes chez l'homme*, in *Analecta genetica*, 6, 90-97, 1958.

3. Più chiari invece appaiono i risultati dell'esperimento umano quando sono presi in considerazione i più gravi danni somatici, probabilmente connessi a mutazioni cromosomiche o anche geniche, rappresentati dai cancri da irradiazione, tra i quali hanno il primo posto le leucemie. Tali risultati (23) possono essere così riassunti:

a) **Le radiazioni residue dell'esplosione delle bombe atomiche su Nagasaki e Hiroshima hanno provocato tra i soggetti, che si trovavano in un raggio di 3000 m dal punto di caduta, un aumento di leucemici** - nel periodo 1947-1955 - da 4 a 8 volte maggiore della frequenza ordinariamente riscontrata nella popolazione giapponese della stessa età e dello stesso sesso: la media di 1-2 leucemici su 10.000 abitanti per anno è salita per quel gruppo a 4-8.

b) **I medici radiologi, esposti a dosi giornaliere di irradiazione, muoiono per leucemia con maggior frequenza degli altri medici.** Riunendo i dati di quattro ricerche si rileva che mentre su 144.103 medici defunti 832 (0,57%) sono i deceduti per leucemia, su 504 radiologi 22 (4,36%) sono deceduti per la stessa causa. Anche qui la frequenza dei morti per leucemia nei radiologi è circa 8 volte più elevata che nei medici non esposti.

c) **I soggetti affetti da spondiloartrite anchilosante, sottoposti a irradiazione terapeutica, ammalano di leucemia più frequentemente del resto della popolazione.** Da un'inchiesta inglese su 13.352 spondiloartritici risulta che in media ne sarebbero colpiti 45 su 100.000 per anno, mentre nel resto della popolazione, corrispondente per origine, sesso ed età, ne ammalerebbero soltanto 5 su 100.000 per anno.

d) **Tra i bambini affetti da leucemia acuta, il numero di coloro che ha subito irraggiamento durante il periodo di vita endouterina è significativamente più elevato, quasi il doppio, di quanto accade nei non leucemici.** Dalle stesse ricerche anzi si ricava che è già sufficiente una dose di circa 2,5 - 5 roentgen - che è la dose che riceve il feto nel corso di un esame radiologico - per aumentare notevolmente il rischio di leucemia.

Sebbene alcuni dettagli delle precedenti citate ricerche possono essere sottoposti a critica, dall'insieme si può concludere con sufficiente sicurezza che **un certo numero di leucemie è in-**

(23) Cfr. FURTH J., *Problems of Carcinogenesis in Relation to Ionizing Irradiations*, in *Proceedings of the First Canadian Cancer Research Conference*, Honey Harbur, 1954, pp. 404-418; TUBIANA M., *Les radioleucose chez l'homme*, in *Le Sang*, 29, 721-734, 1958; LEJEUNE J. et TURPIN R., *Sur le mécanisme génétique possible des radio-leucémies chez l'homme*, *ibid.*, 730-734; BERNARD J., BOIRON M. et CORNU P., *Remarques sur l'hématologie des radio-leucoses humaines*, *ibid.*, 734-749; MEWISSEN D. J., *La corrélation dose-réponse des radioleucémies expérimentales: le probit de marquage*, *ibid.*, 764-787; BOUSSER J., BROUSSEAU C. et CHRISTOL D., *Les antécédents d'exposition aux radiations ionisantes chez les sujets atteints de leucose*, in *Le Sang*, 30, 154-158, 1959.

dotto da irradiazioni accidentali. Inoltre parecchi elementi fanno propendere ad ammettere: 1) che **il rischio di leucemia è tanto maggiore quanto più elevata è la dose** a cui un soggetto è sottoposto, pur non essendo ancor chiaro se la relazione dose-effetto sia lineare, esponenziale o di altro tipo; 2) che probabilmente anche per il manifestarsi di questi effetti somatici **non è necessario che l'irraggiamento superi una dose «soglia»**; 3) che **una dose di 30-50 roentgen è raddoppiante**. Le ultime due illazioni non essendo ancora sufficientemente dimostrate non possono essere utilizzate per formulare ipotesi sul meccanismo leucemogeno o carcinogenetico; tuttavia la prudenza obbliga a tenerli presenti quando si tratti di valutare i rischi che sono legati all'irradiazione di popolazioni.

CONCLUDENDO

Anche per l'uomo esiste il rischio di un aumento di mutazioni somatiche e gametiche in seguito a modificazioni cromosomiche o geniche, provocate da una qualsiasi, anche minima, dose di radiazioni ionizzanti che si addiziona a quella naturale. Non c'è ragione perchè abbia a differire da altre specie; anzi il fatto che anche nell'uomo compaiono mutazioni spontanee e l'osservazione che l'andamento di alcuni effetti somatici già analizzati sembra sottostare agli stessi principi che valgono per gli altri organismi viventi, depongono in favore di una stretta somiglianza con quelle.

Le mutazioni somatiche resterebbero nell'individuo, **aumentando però nella popolazione la frequenza delle malattie** ad esse connesse. **Le mutazioni gametiche crescerebbero in frequenza** e si trasmetterebbero ai discendenti, **causando nelle popolazioni un lento aumento e accumulo di caratteri dannosi alla specie**. L'entità di tali rischi non può essere ancora valutato nei suoi limiti obiettivi; **in senso relativo** può forse non essere grande, se l'aumento della dose non supera margini ampi; **in senso assoluto**, però, può forse far sorgere un problema di coscienza.

Se da un lato sarebbe antiscientifico voler drammatizzare una situazione quando mancano gli elementi sufficienti per farlo, dall'altro sarebbe antiumano voler minimizzare un rischio che, sia pur piccolo, ha il suo peso sulle future condizioni di vita dell'uomo e della società.

(continua)

A. Serra-G. Volta