

# Alcune riflessioni su Chernobyl

## Spunti tratti da una conferenza dell'IAEA del 1996

di Ennio Lazzarini

*L'articolo è essenzialmente la traduzione di un opuscolo pubblicato dall'IAEA (International Atomic Energy Agency) in cui sono riassunti i risultati salienti di una Conferenza tenuta a Vienna sotto il patrocinio della stessa IAEA, del WHO (World Health Organization) e dell'EC (European Community) sulle conseguenze di Chernobyl a dieci anni di distanza (1996) dall'evento (1986). È premessa un'introduzione a cura di chi scrive riguardante l'interfaccia tra la scienza ed il pubblico e le distorsioni che questa interfaccia produce o può produrre. In appendice sono descritte le unità di misura SI usate nel settore. Si presenta, inoltre, l'ipotesi della relazione tra dose e rischio da radiazione, il calcolo del rischio e le origini dell'incidente di Chernobyl.*

Ci sono argomenti che vanno rimossi dalla coscienza collettiva a qualsiasi costo, per esemplificare, un ex ministro del centro-sinistra affermò alla televisione un paio di settimane fa con disdegno che c'è chi pensa di ridar fiato al nucleare proprio nell'Italia denuclearizzata. Francamente questa nostra *pulizia* morale dovrebbe ripugnare, se è vero che il 25% dell'energia elettrica consumata in Italia è di origine nucleare, ma proveniente d'oltralpe. La nostra integrità morale è perciò quella del ricettatore che non ruba in proprio, ma stimola il furto altrui, lucrandone. Il voltafaccia italiano degli anni Ottanta sul nucleare è da ascrivere ad un noto ministro socialista che durante un viaggio in Germania occidentale si accorse che i socialdemocratici tedeschi tentavano di vincere le elezioni alleandosi con i verdi. Dopo il voltafaccia dei socialisti italiani in campo nucleare seguì quello dei comunisti, *pour cause*, per la verità tra molti dubbi e scrupoli.

Poi accadde Chernobyl che segnò la fine del nucleare italiano, ma non di quello europeo, dando inizio alla morale italiana del ricettatore. Se Chernobyl fu dunque l'evento fatale per la nostra metanoia in campo nucleare, che cosa sa il grande pubblico italiano però sulla vicenda che siano fatti storicamente e scientificamente accertati e non leggende metropolitane diffuse da quotidiani e settimanali, in-

dipendentemente dal loro colore politico? La disinformazione nasce da due circostanze fatalmente sinergiche. La prima è riassunta dal detto americano sui calcolatori: *Garbage in, garbage out*. Vale a dire la stampa quotidiana non è tecnicamente e politicamente preparata a funzionare come corretta interfaccia con il pubblico, a mo' di Aronne con Mosè (Esodo: 4, 14-16), distinguendo il grano dal loglio e dando ai due il loro giusto peso. In secondo luogo la stampa per sua natura enfatizza la madre che getta il figlio nel cassonetto, ma non i milioni di madri che ogni giorno si alzano prima del marito per preparare la colazione a lui ed ai figli, accompagnare poi i figli a scuola e, finito il loro lavoro ufficiale, tornare a riprenderli per cominciare quello in nero a casa. Questa è insignificante normalità. Infatti notizia, come si dice, è l'uomo che morde il cane e non viceversa.

Non è da meravigliarsi quindi che il largo pubblico, sia rimasto all'oscuro delle conclusioni della Conferenza internazionale tenuta a Vienna nell'aprile del 1996 sul tema: "Una decade dopo Chernobyl: Riepilogo delle conseguenze del disastro (One decade after Chernobyl: Summing up the consequence of the accident)". Per la circostanza 800 esperti di 71 Stati si riunirono, sotto la supervisione della Commissione Europea, EC, dell'Organizzazione mondiale per la sanità, WHO, ed dell'Agenzia internazionale per l'energia atomica, IAEA per fare il punto sull'argomento. Le relazioni presentate sono state poi raccolte negli usuali Atti della Confe-

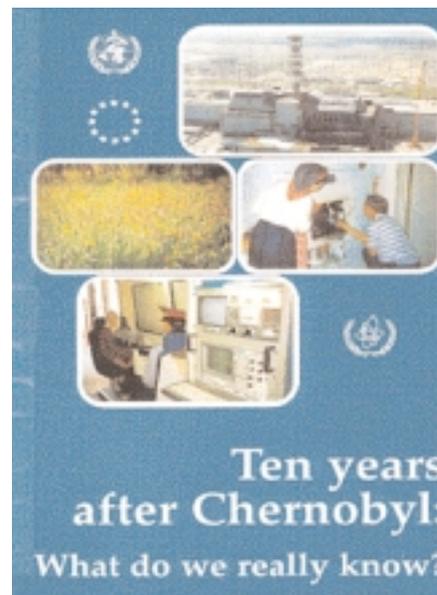


Figura 1 - Frontespizio dell'opuscolo dell'IAEA

renza (Proceedings of the IAEA-WHO-EC International Conference, Vienna, April, 1996) [1]. In seguito ne fu stilato un riassunto (Figura 1) di estrema chiarezza anche per i mediatori della stampa, e forse per loro. Esso non destò alcuna eco, neanche negli ambienti universitari, avendo io distribuito personalmente il libretto in fotocopia a Colleghi increduli. Tornatomi alla mente l'opuscoletto in occasione di un resoconto informativo sulla questione dell'uranio impoverito per questa rivista [2], ho cercato di convincere la Direzione della medesima a pubblicarne la traduzione italiana. Quanto di mio ho ritenuto di aggiungere alla traduzione, a titolo esplicativo, è scritto in corsivo tra parentesi quadra. È stata redatto anche un capitolo, sotto la mia sola responsabilità, riguardante: A) le unità di misura SI usate nel settore; B) il calcolo del rischio radiologico con alcune sue applicazioni. In esso è espresso anche il mio personale convincimento sull'origine storico-politica dei fatti di Chernobyl dopo i quali nell'Urss vi fu la *glasnost* e la nascita della CRI (Comunità delle Repubbliche Indipendenti). Si accenna anche alla questione energia e globalizzazione, di cui Chernobyl è stata la prima manifestazione.

E. Lazzarini - Dipartimento Ingegneria Nucleare - Politecnico di Milano. 2cesne2@axp7000.cdc.polimi.it

## Dieci anni dopo Chernobyl: che cosa realmente sappiamo?

Per la traduzione in italiano dell'opuscolo dell'IAEA, citato nell'introduzione, consultare il sito [www.ilb2b.it](http://www.ilb2b.it)

### Appendice: rischio nucleare

Questa appendice, che non fa parte dell'opuscolo dell'IAEA, raccoglie le unità SI usate nel settore della radiazione, la stima del danno da irraggiamento; illustra l'ipotesi della linearità tra rischio e dose di irraggiamento e la sua natura iper-cautelativa, dandone alcune esemplificazioni.

### Sorgenti di radiazione

Su questo pianeta tutti gli esseri viventi sono sempre stati sempre soggetti ad irraggiamento con particelle e quanti di al-

sando trasformazioni chimiche delle sue molecole M; 2) introdurre le pertinenti unità di misura del sistema SI [3].

### Il meccanismo dell'interazione radiazione-biologia

Il numero di specie eccitate e ionizzate,  $M^*$  ed  $M^+$  prodotte dalla radiazione ionizzante dipende solo dall'energia della particella, ma la loro concentrazione locale, cioè lungo la *traccia* della particella, dipende invece dal tipo di particella perché queste hanno diverso LET (*Linear Energy Transfer*), cioè trasferiscono al mezzo attraversato un diverso ammontare della loro energia per unità di percorso. In particolare il LET cresce con la carica, la massa della particella e cala con la sua energia [4].

Il mezzo da considerare nel nostro caso è l'acqua, essendo questa la parte preponderante degli organismi viventi, che in primissima approssimazione possono

perossile). Le concentrazioni dei prodotti radiolitici primari crescono nel mezzo con l'irraggiamento finendo quindi per reagire essi stessi con le specie radiolitiche primarie. Si formano così i prodotti radiolitici secondari, ad esempio  $H_2O_2$  da  $HO_2^*$  ed  $H^*$ .

In conclusione il danno locale provocato dalla radiazione cresce con il LET, ma l'entità delle reazioni diffusive, cioè delle reazioni con i soluti, cresce invece al diminuire del LET per la minore probabilità di ricombinazione entro-traccia delle specie radiolitiche primarie. Accennato al meccanismo chimico alla base dell'assorbimento in un mezzo delle particelle di alta energia, vediamo le *unità di misura* SI usate nel settore. Esse sono:

- 1) l'energia assorbita per unità di massa, detta gray, Gy, corrispondente a 1 J/kg;
- 2) la dose equivalente, ossia i Gy pesati per la differente pericolosità della radiazione legata al LET. Essa è espressa per mezzo del fattore di ponderazione per la radiazione,  $w_R$ . Il

Tabella 1 - Valori di  $w_R$  per alcune particelle e quanti di data energia

Particelle	$w_R$	Particelle	$w_T$
Elettroni 1 MeV quanti 1 MeV	1	Neutroni (2-20 MeV)	10
Neutroni ( $E < 10$ MeV)	5	Neutroni $< 20$ MeV	5
Neutroni (10-100 keV)	10	Protoni $> 2$ MeV	5
Neutroni (0,1-2 MeV)	20	$\alpha$ , ioni pesanti, PF (prodotti di fissione)	20

Tabella 2 - Valori di  $w_T$  per alcuni organi e tessuti\*

Tessuto	$w_T$	Tessuto	$w_T$
Midollo	0,12	Polmoni	0,12
Superfici ossee	0,03	Ovaie e gonadi	0,25
Tiroide	0,03	Altri organi	0,30
Seno	0,15	$\Sigma w_T$ per l'intero corpo	1

\*La somma dei  $w_T$  per l'intero corpo è 1, cosicché se un organo è stato irraggiato con 1 Sv è come se l'organo od il tessuto fosse stato irraggiato con  $w_T \times Sv$

ta energia. Fino al XIX secolo l'irraggiamento era dovuto a due diverse sorgenti: 1) la radioattività naturale (uranio e suoi figli, torio e suoi figli,  $^{40}K$ ,  $^{14}C$  ecc.);

2) la radiazione cosmica.

Con l'inizio del XIX secolo e la scoperta dei tubi a raggi X e delle loro applicazioni mediche sia diagnostiche, sia terapeutiche si è aggiunta una terza sorgente di irraggiamento, più intensa delle due già citate. Con l'era nucleare (anni '40) se ne è infine aggiunta una quarta, che investe innanzitutto coloro che lavorano nel campo dei reattori nucleari e dei radioisotopi, ma poi anche l'intero *habitat* (uomini, animali, piante) a causa di possibili dispersioni di radionuclidi artificiali nell'ambiente. Qualsiasi tipo di radiazione (elettroni, protoni, particelle  $\alpha$ , neutroni, raggi X, raggi  $\gamma$  ecc.) provoca direttamente o indirettamente ionizzazione ed eccitazione delle molecole. Per illustrare l'impatto biologico delle radiazioni occorre: 1) accennare al modo con cui le particelle cedono la loro energia ad un mezzo, cau-

essere assimilati a soluzioni colloidali. Le specie eccitate,  $H_2O^*$ , e ionizzate dell'acqua,  $H_2O^+$  e gli  $e^-$ , in tempi brevi ( $\sim 10^{-12}$  s) si diseccitano e/o si dissociano dando ioni e radicali.

Ioni e radicali formati, lungo ed entro la traccia della particella, sono detti specie radiolitiche primarie. Poiché il tempo di rilassamento dell' $H_2O$  è dell'ordine di  $10^{-10}$  s, le specie radiolitiche primarie si formano prima che la traccia si sfaldi e siano rimosse dalla traccia per diffusione nel mezzo. La loro ricombinazione entro-traccia è un evento tanto più probabile quanto maggiore è il LET. Se le specie primarie, ad esempio:  $H^*$ ,  $OH^*$ ,  $e^-_{aq}$ , (quest'ultimo è l'elettrone idrato) non si ricombinano entro-traccia, diffondono nel mezzo (in  $10^{-9}$ - $10^{-8}$ s) reagendo con i soluti presenti, ma anche fra loro, sebbene con minore probabilità a seguito della diluizione. Si formano così i prodotti radiolitici primari, ad esempio dalla reazione di  $H^*$  con  $O_2$ , disciolto nell' $H_2O$  si forma il radicale  $HO_2^*$  (idro-

valore di  $w_R$  per elettroni e gamma di 1 MeV è posto unitario. La dose equivalente, detta sievert, Sv, è data dal prodotto  $Gy \times w_R = Sv$ ; la Tabella 1 riporta alcuni valori di  $w_R$  per alcune particelle e quanti di diversa energia;

- 3) la dose equivalente efficace considera i Sv in relazione alla diversa sensibilità del tessuto irraggiato alla radiazione; essa è data in Sv  $\times w_T$  dove  $w_T$ , detto fattore di ponderazione tissutale, esprime la radiosensibilità del tessuto alla radiazione; la Tabella 2 riporta i valori di  $w_T$ . Il senso della dose equivalente efficace è questo: come base per i fattori  $w_T$  si ipotizza un uomo di 60 chili. Se la sua tiroide è stata irraggiata con 1 Sv è come se l'intero corpo fosse stato irraggiato con  $1 \times w_T$  Sv. Poiché, il peso della tiroide è di circa 2 etti, cioè  $0,2/60 = 0,0033$  del peso corporeo totale ed il rapporto tra  $w_T$ (tiroide)/ $w_T$ (totale) è 0,03, la tiroide è ritenuta dieci volte più radiosensibile del suo contributo al peso corporeo;

4) la dose collettiva: è la somma delle dosi equivalenti assorbite da ciascuno degli  $n$  individui di una popolazione. L'unità, che è sievert x uomo, è usata per valutazioni epidemiologiche, come è detto nel seguente paragrafo;

5) la dose impegnata, data in Sv, rappresenta la dose equivalente corrispondente all'attività dei radionuclidi ingeriti, il suo significato pratico è descritto più oltre.

Prima delle unità SI era usato il *rad* per la dose assorbita ed il *rem* per la dose efficace: il rad corrisponde a 100 erg assorbiti per grammo e il rem, che è l'equivalente del Sv, è  $\text{rad} \times w_R$ . Si può verificare che  $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$ . Le altre unità vanno di conserva.

Un'unità ancora più vecchia del rad è il *roentgen*, R, che è un numero di ionizzazione pari a  $2,1 \times 10^9$  corrispondente ad un'unità elettrostatica di carica di entrambi i segni prodotta da una sorgente X o  $\gamma$  per ml di aria secca in condizioni standard di temperatura, T, e pressione,

### Rischio da irraggiamento e dose collettiva

Sorge ora la domanda di come si possa valutare il rischio di irraggiamento per una certa dose equivalente assorbita dall'organismo. Anche se non vi è accordo generale, a scopo cautelativo si assume che non vi sia alcuna soglia per il rischio, cioè che questo cresca linearmente con la dose assorbita.

Per la verità, la gran parte dei fenomeni naturali, rappresentati in un piano in cui gli effetti sono posti in grafico in funzione dell'entità delle cause che li determinano, ha un andamento a sigmoide (Figura 2 curva A) [5]. Si pensi ad esempio alle guarigioni in funzione della quantità di farmaco somministrato: dapprima si è sotto-soglia ed il farmaco non ha effetto alcuno, poi al crescere della dose il numero delle guarigioni aumenta esponenzialmente raggiungendo infine un massimo su cui si mantengono. Una volta raggiunto il massimo ogni ulteriore aumento

ci. Il grafico che dà il numero di persone ebre in funzione del numero di bicchieri di vino bevuti ha un andamento simile: fino a due-tre bicchieri di vino gli effetti sono minimi, ma arrivati a due litri in tutti i bevitori appaiono i segni dell'ebbrezza (scoordinamenti dei movimenti ecc.). Proseguendo ancora nell'ingestione, arrivati sui cinque litri comincia a spuntare la curva, anch'essa a sigmoide, dei morti per etilismo acuto.

Assumere l'ipotesi della linearità dose/rischio trova un'equivalente nell'ipotesi che le morti per etilismo acute crescano linearmente con il vino bevuto secondo la retta che passa per l'origine e per il punto a 5-10 litri, corrispondente alla probabilità del 100% di morte per etilismo acuto. Implicita nell'assunzione della linearità dose/effetto è l'ipotesi che statisticamente si abbia un morto ogni dieci litri di vino x uomo bevuti da una popolazione. Per esemplificare, tra i 50 addetti di una agenzia bancaria, che bevono alla mensa un quintino di vino cia-

Tabella 3 - Valore di  $LD_{50/30}$  (lethal dose) in Sv\*

Specie	$LD_{50/30}$ (Sv)	Specie	$LD_{50/30}$ (Sv)
Ameba	1.000	Scimmia	6
Tartaruga	15	Cane	3,5
Coniglio	8	Uomo	2,5-3,5

\*I dati per l'uomo derivano da Hiroshima e Nagasaki. Per  $LD_{50/30}$  vedere testo

Tabella 4 - Dosi assorbite e conseguenze per l'uomo\*

Dose (Sv)	Conseguenze	Tempo di sopravvivenza
100	Morte per lesioni al sistema nervoso centrale	2-3 giorni
10-50	Morte per lesioni intestinali	1-2 settimane
3-5	Morte del 50% degli esposti per lesioni midollari	ca. 6 settimane

P, NTP. Il roentgen serviva per misurare in un punto l'intensità di radiazione dovuta a sorgenti X o  $\gamma$ . Per correlare le dosi in R con quelle in rad e Gy si ricorda che una ionizzazione in aria richiede 34 eV e che 1 ml di aria in condizioni NTP pesa 1,394 mg. Quindi 1 R equivale a 0,87 rad, infatti è:

$$(2,1 \times 10^9 \times 34 \times 1,6 \times 10^{-12}) / 1,294 \times 10^{-3} = 87 \text{ erg g}^{-1} = 0,87 \text{ rad} = 0,0087 \text{ Gy}$$

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-12} \text{ erg}$$

La Tabella 3 riporta per alcune specie animali il valore di  $LD_{50/30}$  (Lethal Dose) che è la dose equivalente che causa statisticamente la morte del 50% degli individui di una specie entro 30 giorni dall'irraggiamento supposto istantaneo.

Si osserva che  $LD_{50/30}$  cala con la complessità biologica della specie [5]. La Tabella 4 si riferisce all'uomo ed è ricavata dagli eventi di Hiroshima e Nagasaki dell'agosto 1945.

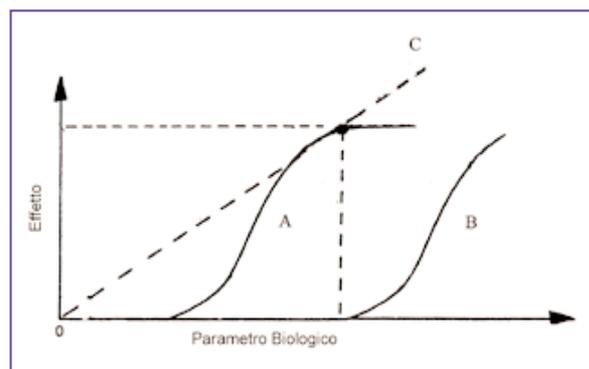


Figura 2 - Andamento a sigmoide di molti fenomeni biologici (curva A). Al crescere del parametro biologico possono apparire anche altri fenomeni (curva B). La curva C rappresenta l'ipotesi di una relazione lineare tra effetti e parametro biologico (esemplificazioni dei diversi casi nel testo)

della dose di farmaco non solo non ha alcun effetto terapeutico, ma potrebbe anzi far spuntare la curva B di Figura 2, anch'essa una sigmoide, che descrive i danni da assunzione massiccia di farma-

scuno (dose collettiva = 10 litri), vi dovrebbe essere almeno un morto per etilismo acuto al giorno, cioè in due mesi l'agenzia dovrebbe rinnovare tutto il suo organico (!), cosa che è fuori dall'esperienza quotidiana di ognuno di noi. In altre parole l'ipotesi della linearità dose/rischio appare molto cautelativa.

### Valutazione del rischio

L'altra questione, oggetto di estrema prudenzialità, è fissare il numero di Sv x uomo, cioè la dose collettiva

che assorbita provoca un morto; da questa ipotesi deriva il secondo punto per la costruzione del grafico lineare dose/rischio, essendo il primo punto dato dall'origine del riferimento (Figura 2, curva C).

Nel 1977 l'International Commission for Radiation Protection, ICRP, suggerì che il rischio di morte per radiazione fosse di  $10^{-2}$  Sv<sup>-1</sup>, cioè si ipotizzava di avere stocasticamente un decesso ogni 100 Sv x uomo assorbiti. Anche questo dato deriva dalle esplosioni di Hiroshima e Nagasaki. Successivamente (dopo Chernobyl) il limite di rischio fu abbassato e fissato a 0,05 Sv<sup>-1</sup>, sempre a scopi ipercautelativi. Dunque, con riferimento alla *dose collettiva* ed alla linearità tra dose e rischio, su una popolazione che assorba una extra dose di N Sv dovrebbero verificarsi N/20 decessi per cancro in più, mentre la morbilità per cancro dovrebbe essere doppia.

Per quanto riguarda la supposta linearità tra rischio/dose efficace è interessante considerare il grafico di Figura 3, che dà la mortalità per cancro in diversi Stati degli Usa in funzione della dose equivalente naturale assorbita dagli abitanti di ogni Stato. Essa dipende dalla natura del terreno (radioattività naturale), dalla sua altitudine sul livello del mare (la dose di radiazione cosmica cresce con l'altitudine), dalla tipologia abitativa (case di legno, mattoni, cemento armato ecc.). Come conseguenza la dose può variare da uno Stato all'altro anche di un fattore 2. La Figura 3 sembra suggerire invece

che la mortalità diminuisca con la dose assorbita lasciando supporre l'esistenza di un effetto di ormesi delle piccole dosi. Sebbene possibile, questa conclusione potrebbe essere invalidata nel presente caso da concause di altra origine, ad esempio gli Stati in cui si assorbono dosi più elevate (Utah, Colorado, Montana) furono fondati dai Mormoni per i quali è disdicevole bere alcolici e fumare. In ogni caso il grafico propone di combattere altre cause di morte prima di quella legata a dosi di radiazione dell'ordine di due volte quella naturale, che è completamente mascherata dalle altre. Vi sono altri esempi oltre questo che evidenziano l'alto grado di precauzionalità applicato nel campo dell'energia nucleare, legato, si ripete: 1) alla presunta linearità tra rischio e dose, 2) alla stima di un decesso ogni 20 Sv x uomo assorbiti. Questo ha portato alla penalizzazione psicologica del nucleare e al conseguente principio della massima precauzionalità. L'estensione di questo principio ha investito innumerevoli altri settori tecno-

logici si cita come esempio la questione dell'elettrosmog e la storia dell'interamento a titolo precauzionale delle linee di trasmissione elettrica.

Il fattore di rischio genetico, che l'ICRP aveva fissato in  $4 \times 10^{-3}$  Sv<sup>-1</sup> nel 1977, è stato ora portato a  $2 \times 10^{-3}$  Sv<sup>-1</sup>, sempre per le solite ragioni precauzionali.

In relazione ai rischi sopraddetti i livelli di dose equivalente, a cui può essere esposto un lavoratore operante nel settore e la restante popolazione, sono stati fissati, rispettivamente, in 20 e 1 mSv anno<sup>-1</sup>. Si noti che la dose assorbita da un uomo per radioattività naturale e ra-

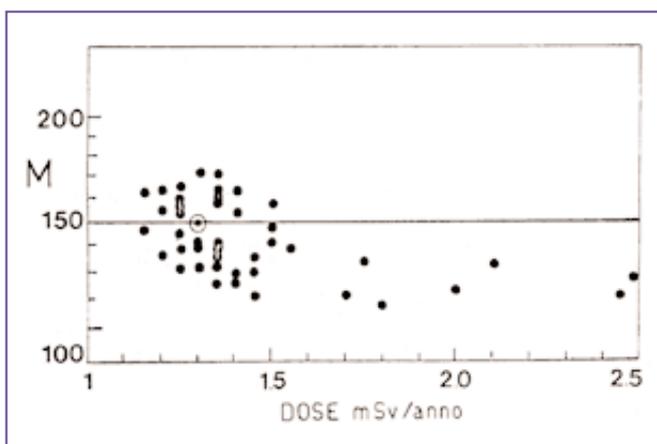


Figura 3 - Mortalità per cancro (decessi/anno per 100.000 abitanti) tra il 1950 e il 1967 negli Stati degli Usa in funzione della dose equivalente assorbita dalla popolazione degli stessi Stati. Il grafico è illustrato nel testo.  $\odot$  Valore medio, [7]

di radiazione cosmica è in media di 2 mSv anno<sup>-1</sup> con valori più elevati in zone sismiche e di acque sorgive. E veniamo all'ultima unità di misura: la dose equivalente impegnata. L'irraggiamento può avvenire: 1) da sorgenti esterne all'organismo, allontanate le quali il rischio si riduce a zero; oppure 2) da sorgenti interne costituite da radionuclidi ingeriti, esclusi naturalmente i radioattivi naturali (<sup>14</sup>C, <sup>40</sup>K, <sup>3</sup>H ecc.). La pericolosità di un radionuclide ingerito dipende:

- 1) dal  $T_{1/2}$  del radionuclide (essa cresce con  $T_{1/2}$ );
- 2) dal tempo di ricambio biologico (è più grande se il radionuclide si fissa in un tessuto, ad esempio, nelle ossa);
- 3) dalla sua forma chimica (ad esempio, se è stato ingerito da un aerosol come ione o come adsorbito);
- 4) dal tipo di particelle emesse (è più grande per le particelle  $\alpha$  che per le  $\beta$  o la radiazione  $\gamma$ );
- 5) dalla preferenzialità del nuclide per un certo tessuto (ad esempio  $I_2$  per la tiroide, Sr per le ossa).

Pesando i fattori da cui sopra, la legge stabilisce i livelli massimi permessi di concentrazione, cioè di radioattività, dei diversi radionuclidi nell'aria, nell'acqua e quindi nelle derrate solide.

Le radioattività sono date in becquerel, Bq, che corrisponde ad un decadimento al secondo. Talvolta le attività sono ancora date nell'unità, ormai abbandonata, detta curie, Ci, corrispondente a  $3,70 \times 10^{10}$  Bq. Nel caso dell'aria inoltre c'è una relazione stretta tra le concentrazioni massime e le dimensioni delle particelle (aerosol) sospese nell'aria, che trasportano i radionuclidi assorbiti (assorbiti), ad esempio se le dimensioni degli aerosol sono superiori a 10  $\mu$ m essi non arrivano ai bronchi e le particelle sono espulse più rapidamente col muco o per via intestinale (vedi [2]). Tutte queste norme sono riportate sul D. Lgs. del 26/05/2000 n° 241, pubblicato sul supplemento della Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n°203 del 31/08/2000.

#### Perché è avvenuto l'incidente di Chernobyl?

L'incidente di Chernobyl, come detto in modo molto *soft* nel libretto dell'IAEA, derivò

da deficienze di progettazione del reattore [8, 9], fra queste la mancanza di una seconda cupola di contenimento del reattore, presente invece in tutti i reattori occidentali (Figura 4).

Questa seconda cupola impedì che l'incidente al reattore Usa di Three Miles Island producesse le stesse conseguenze di quello di Chernobyl, limitando il danno a qualche decina di curie di <sup>131</sup>I disperse all'esterno del reattore, ma comunque entro il recinto dell'impianto. Per fini di paragone si fa presente che un grande ospedale italiano disperdeva giornalmente a seguito delle terapie applicate alcune decine di Ci di <sup>131</sup>I.

Una volta si attribuirono al reattore di Trino Vercellese, quando era ancora operante, le tracce di <sup>131</sup>I trovate nell'acqua del Po. Si riscontrò poi che il <sup>131</sup>I era già presente nel corso fluviale a monte del reattore a cause degli scarichi dell'ospedale delle Molinette di Torino. Questo prova la sensibilità degli strumenti di controllo in uso e dà nuovo corpo al "Cur festicisti mihi turbolentam aquam bibenti" con

quel che segue di scolastica memoria. Tornando a Chernobyl, fatale non fu solo la mancanza della seconda cupola di contenimento, su cui si dirà ancora tra poco, ma le violazioni delle regole del manuale di conduzione del reattore imposte da un funzionario venuto da Mosca, per effettuare un esperimento teso a verificare la possibilità di garantire la refrigerazione temporanea del nocciolo del reattore con un flusso d'acqua lentamente decrescente nel tempo, alimentando alcune pompe di circolazione con l'energia elettrica prodotta dall'alternatore trascinato dal moto inerziale della turbina del reattore. Per fare l'esperimento, che non aveva l'autorizzazione del responsabile della sicurezza del reattore, fu imposto agli operatori di ignorare progressivamente le norme di sicurezza previste dal manuale operativo del reattore. Ma chi allora poteva opporsi in Urss agli ordini di un funzionario venuto da Mosca? Non certo gli operatori di un reattore nucleare di provincia. Sono convinto che ciò non avrebbe mai potuto verificarsi a Caorso, chiunque, arrivato da Roma, lo avesse ordinato.

Ma perché mancava la seconda cupola con la quale anche le trasgressioni forse non avrebbero avuto l'esito fatale? Evidentemente sembrò allora più utile impiegare il ferro e il cemento occorrenti per un altro manufatto, magari più appariscente, uno stadio ad esempio. Infine, terzo punto connesso al secondo, mancava in un regime socialista per principi politici la nozione di rischio e di costo assicurativo connesso. L'argomento è considerato nel seguente paragrafo, ma prima di chiudere questo, tenuto conto delle conseguenze che la vicenda causò poi in Italia (chi si ricorda delle migliaia di miliardi, non meno di 6.000, rimborsati dagli italiani all'Enel con la bolletta elettrica per la rinuncia del nucleare?), si potrebbe commentare con mordacità popolare che i sovietici fecero l'indigestione, ma a noi toccò la purga.

### Rischi ed investimenti

Sia  $I$  il costo di un investimento richiesto per risparmiare una dose collettiva di  $C$  Sv x uomo e quindi, stocasticamente,  $C/20$  vite, applicando naturalmente i criteri

iper-cautelativi di valutazione del rischio, già illustrati. La convenienza dell'investimento  $I$  dipende dalla disuguaglianza:

$$I \leq VC/20$$

dove  $V$  è il valore di una vita umana. La formula è cinica perché chiede di esprimere la vita umana in termini monetari, però è da ricordare che è quanto accettiamo, più o meno consciamente, tutti i giorni quando compensiamo con 50.000 euro i familiari di un carabiniere per la vita del loro caro ucciso da terroristi o ban-



Figura 4 - Vista del reattore RBMK esploso a Chernobyl prima della costruzione del sarcofago

diti o quando abbassiamo al minimo legalmente consentito il risarcimento massimo per le vittime che potremo causare con la nostra automobile.

Si noti piuttosto che il parametro  $V$  non è una costante universale, ma che esso cresce, come tanti altri fattori, con il prodotto nazionale lordo, Pnl. A questo proposito è istruttivo ricordare le proteste di qualche anno fa dei fedelissimi gurka di un reggimento britannico perché i loro familiari e quelli di un britannico, entrambi uccisi al servizio di SM, erano compensati in relazione ai Pnl delle rispettive contrade di origine. Incrementare il Pnl è quindi operare per crescere il valore di  $V$  e quindi di  $I$ , cioè per crescere la convenienza dell'investimento  $I$  aumentando la sicurezza dei reattori e salvaguardando,

in generale, sempre più la vita umana. Se  $V$  è basso, come accade negli Stati emergenti rispetto a quelli evoluti, l'investimento  $I$  potrebbe non essere conveniente in una contrada emergente, ma conveniente in una sviluppata. In conclusione se è:  $I \leq VC/20$  e si omette l'investimento, prima o poi si dovrà pagare il conto (vedi Chernobyl).

Se  $I \geq VC/20$  e si effettua ugualmente l'investimento, si apre di sicuro una falla in altri settori da cui questi fondi sono stati sottratti (servizio sanitario, pensioni, abitazioni, scuola ed istruzione ecc.), infatti il Pnl è un dato fisso a breve termine. Un esempio: in occasione di Chernobyl in Italia l'Aima rilevò dai produttori i vegetali a foglia larga (insalate) ed altre derrate da avviare a distruzione per non meno di  $2.000 \times 10^9$  lire, risparmiando al massimo una dose collettiva di ca. 10.000 Sv x uomo dei 15.000 Sv x uomo arrivati in Italia che avremo assunto in assenza di ogni restrizione [10]. 10.000 Sv x uomo corrispondono a 500 vite risparmiate per ipotetici cancri al costo quindi di  $4 \times 10^9$  lire ciascuna. Ma perché allora solo  $0,1 \times 10^9$  lire per la vita di un carabiniere sicuramente morto al servizio dello Stato e quindi per noi? Purtroppo la nostra esistenza ha aspetti cinici ed è piena di contraddizioni comportamentali perché emozionali.

### Conclusione da trarre

Un'ultima considerazione: siamo tutti terzomondisti (ora si dice però *no global*) e preoccupati ambientalisti e si sa che lo sviluppo dei popoli, e quindi il loro Pnl, è legato alla disponibilità di energia. Questa ha diverse origini: gas, petrolio, carbone, nucleare, idroelettrica, sorgenti alternative. Quest'ultima voce reca per ora un contributo piccolo al totale della produzione e la tralasciamo per tempi futuri, più maturi. Se le società con i più alti valori del Pnl, e di  $V$ , pretendono per sé l'energia più sicura derivata da gas e petrolio, alle società emergenti rimane il carbone ed il nucleare. Quest'ultima sorgente, per le ragioni già dette, sarà usata con margini di sicurezza più bassi nelle società emergenti che in quelle economicamente più evolute del sistema mondo. Però, vedi Chernobyl, anche quest'ultime fini-

rebbero con l'essere coinvolte dai criteri di sicurezza meno spinti applicati dagli emergenti. Il terzomondismo nel campo energetico ha come unica possibile soluzione quella di lasciare le tecnologie più facili e sicure a chi ha minori possibilità economiche per affrontare i costi dei rischi delle più impervie.

L'opuscolo dell'IAEA riporta che per riparare i guasti di Chernobyl intervenne la solidarietà mondiale. Può nascere il sospetto, o l'ombra del sospetto, che l'antinuclearismo sia una forma subdola di sfruttamento indiretto dei paesi emergenti applicata da quelli più progrediti. Si deve però sottolineare che le attuali tecnologie investono l'intero pianeta e che una nuova Chernobyl in qualche altra parte del mondo in via di sviluppo coinvolgerà ancora i più prudenti tra i paesi progrediti. Per ulteriori informazioni di carattere elementare circa il rischio da radiazione è utile consultare la voce [3] della bibliografia. La traduzione in italiano di questo testo fu preparata dal Disp-Enea nel 1987, tuttavia per la concomitanza con i referendum nucleari italiani,

essa rimase, forse proprio per questo, ignorata. Nel testo sono riportati *infra alia* i risultati di una inchiesta condotta negli Usa tra diversi gruppi di cittadini (studenti, donne dei comitati elettorali, ordini professionali) tesa ad accertare la loro percezione del peso di trenta rischi paragonandola alla loro reale entità desunta dalle Tabelle attuariali Usa. Si evidenzia che rischio e percezione del rischio non sono correlati fra loro.

La ragione è che anche negli Usa i mediatori (gli Aronne) tra l'opinione pubblica e la scienza (Mosè) distorcono la realtà dei fatti, spesso in buona fede, ma talvolta solo *pour epater le bourgeois* e fare il pezzo. Sia in un caso, sia che nell'altro le collettività, però, sono indotte a pagare un prezzo eccessivo per la loro disinformazione e la mancanza di fiducia in Mosè.

#### Bibliografia

[1] Ten years after Chernobyl: What do we really know?, based on the Proc. of the

IAEA/WHO/EC International Conference, Vienna, April 1996, IAEA, Vienna, 1996.

[2] E. Lazzarini, *Chimica e Industria*, 2002, **84**(2), 51.

[3] Radiazioni: Dosi, Effetti, Rischi, traduzione di "Radiation: Doses, Effects, Risks", Ed. United Nations Environment Programme (UNEP 1985) a cura della Divisione Relazioni Esterne e Informazione della Disp-Enea, 1986.

[4] J.H. O'Donnell, D.F. Sangster, *Principles of Radiation Chemistry*, Arnold, London, 1970.

[5] G.K. Choppin, J. Rydberg, *Nuclear Chemistry: Theory and Application*, Pergamon Press, New York, 1980, Cap. 16.

[6] *ibid.*, 347.

[7] *ibid.*, 346.

[8] J.H. Gittus *et al.*, *The Chernobyl Accident and its Consequences*, United Kingdom Atomic Energy Authority, 1997.

[9] U. Spezia, *Chernobyl: Dieci anni dopo il disastro*, Milo, Roma, 1996.

[10] *ibid.*, 91.

**Ringraziamenti:** Desidero ringraziare Ferruccio Trifirò per i suggerimenti fornitimi.