

## 2. Radiazioni ionizzanti: gli effetti, il rischio, l'informazione e le norme

### Riassunto

Da sempre l'umanità è soggetta all'azione delle radiazioni ionizzanti che sono presenti nell'ambiente naturale, alle quali si dà il nome di "fondo naturale di radiazioni". Per la loro presenza l'uomo riceve mediamente una dose di 2.4 mSv/a con oscillazioni notevoli da punto a punto del globo terrestre, fino a valori anche venti volte circa più alti di quello medio. Grande variabilità del fondo è anche presente nel nostro Paese. Il valor medio valutato per la popolazione italiana è di 3.4 mSv. Questo valore indubbiamente deve costituire un indice di riferimento cui guardare per eventuali raffronti nelle valutazioni di rischio.

Al di là degli effetti positivi che dall'impiego delle radiazioni l'uomo ha saputo trarne, in questa sede si intende mettere a fuoco gli aspetti negativi sul piano sanitario, in quanto oggetto della disciplina di prevenzione e della normativa che su di essi sono state impostate. Nella classificazione che ne fa la radiopatologia, questi effetti vengono distinti in *effetti deterministici* ed *effetti stocastici*.

I primi si manifestano a seguito di esposizioni elevate al di sopra di una dose soglia diversa per i vari effetti: in buona approssimazione, sul piano clinico, questi cominciano a manifestarsi a dosi comprese tra 500 e 1000 mSv, mentre alterazioni a livello ematologico vengono rilevate con particolari tecniche di laboratorio a dosi di circa 250 mSv. Alle dosi indicate gli effetti sono comunque modesti e regrediscono nel volgere di qualche giorno. All'aumentare della dose aumenta anche la loro gravità che, oltre i 4000 mSv, cominciano a compromettere la vita dell'esposto in assenza di appropriati interventi terapeutici. Il loro manifestarsi sul piano clinico avviene in breve tempo dopo l'esposizione: entro ore, giorni o settimane in relazione inversa all'entità delle dosi. L'induzione di cataratta è l'unica conseguenza di tipo *deterministico* che può manifestarsi dopo un periodo di 1-2 anni. A questa categoria di effetti appartengono anche alcune manifestazioni conseguenti ad esposizioni protratte nel tempo, quali quelle alle quali nel passato erano soggetti i radiologi e che pertanto venivano riferite come "cute del radiologo" e "sangue del radiologo". Gli effetti di tipo deterministico oggi si possono osservare solo a seguito di eventi incidentali, nei quali gli esposti possono ricevere dosi molto elevate, come si è verificato negli operatori dell'impianto di Chernobyl.

Con la denominazione di *effetti stocastici* (statistici o casuali) si raggruppano sia i tumori che possono colpire gli esposti, che le malattie genetiche che potrebbero colpire i figli degli esposti. La riduzione della probabilità del manifestarsi degli effetti stocastici costituisce oggi il principale obiettivo della radioprotezione. Si tratta comunque di eventi casuali di bassa probabilità che possono manifestarsi a seguito di esposizione alle radiazioni ionizzanti. Il periodo di latenza intercorrente tra l'esposizione e la manifestazione clinica è lungo (dell'ordine di anni o di

decine di anni) e si fa l'ipotesi, per i fini della radioprotezione, che siano effetti privi di soglia e che si possano quindi verificare anche a dosi molto basse e prossime allo zero. E' questo il principale, anche se non unico, *principio di cautela* applicato nella protezione dalle radiazioni. A questo punto va detto che mentre tumori solidi e leucemia in particolare sono riscontri che numerosi studi epidemiologici dimostrano essere correlati, per dosi medio-alte, con l'esposizione a radiazioni, lo stesso riscontro non è manifesto per quanto riguarda gli effetti genetici sui figli degli esposti: questi infatti sono stati riscontrati solamente nelle specie animali e di qui, per il principio di cautela, estrapolati anche all'uomo. Per quanto riguarda l'effetto oncogeno merita citare il documento UNSCEAR 2000 secondo cui *"il numero dei tumori solidi associati con l'esposizione con le radiazioni non è sufficiente per permettere, per molti siti o tipi specifici di tumori, una analisi dettagliata della risposta in dose. Per tutti i tumori solidi raggruppati la relazione dose-risposta è lineare fino a circa 3 Sv, mentre la curva dose-risposta per la leucemia viene meglio descritta da una funzione lineare-quadratica. Rischi statisticamente significativi per il cancro nel "Life Span study" (che segue gli esposti alle esplosioni delle bombe atomiche giapponesi) vengono rilevati per dosi all'organo superiori a circa 100 mSv."*

Per i fini della radioprotezione si assume comunque che vi sia una correlazione dose-probabilità di induzione oncogena di tipo lineare fino a dose nulla e quindi senza soglia. Sulla base allora di **questa ipotesi** fondamentale, prendendo i dati forniti dai vari studi per esposizioni a dosi medio-alte, introducendo modelli, *presunti*, strumenti di mediazione tra popolazioni e di proiezione per l'età e il sesso, l'organismo di vertice della radioprotezione, l'ICRP, ha ricavato dei coefficienti di rischio e su di essi ha costruito il *"sistema di protezione radiologica"*. E' una costruzione certamente valida, coerente, elegante ed utile ai fini della prevenzione e della valutazione dei rischi connessi con l'esposizione a radiazioni ionizzanti, con l'unico difetto che non se ne precisano in modo sufficientemente chiaro il campo ed i limiti di applicazione. Allora il sistema dalla radioprotezione passa con disinvoltura alla radiopatologia e viene impropriamente impiegato per fare previsioni.

Il sistema ha certamente bisogno di essere sottoposto a revisione, e questo è quanto sta facendo la stessa ICRP, anche perché queste improprie applicazioni possono essere strumento di amplificazione di effetti che, la storia insegna, sono intimamente connessi con le radiazioni e con il termine *nucleare*: gli effetti psicologici. Questi effetti vanno ad interessare non solo il singolo individuo, al solo sospetto di essere stato esposto in una situazione incidentale, ma tutta una collettività, come si è verificato dopo gli incidenti di Three-Mile Island (TMI) e soprattutto di Chernobyl. In queste circostanze si è avuto il chiaro riscontro che gli effetti psicologici sullo stato di salute è ben evidente e preminente rispetto ai reali danni che

la contaminazione radioattiva può aver procurato alle popolazioni interessate, tanto da far introdurre una nuova entità nosologica denominata *"disordine da stress ambientale cronico"* o *"polluzione psicologica da raggi"*.

Non vi è dubbio che in tutto ciò gioca pesantemente l'informazione che, spesso in modo strumentale, viene diffusa attraverso i mezzi di comunicazione. L'informazione preventiva, con la finalità di "educare" e "formare", rappresenta un obiettivo da perseguire come strumento di prevenzione primaria per questo tipo di effetti; l'informazione attuale, nel momento dell'emergenza, deve peraltro guardarsi sia per il modo con cui viene posta, che per la fonte che la diffonde, dall'ingenerare situazioni o sentimenti dalle caratteristiche amplificanti sia nell'induzione che nell'estensione degli effetti psicologici.

La normativa specifica non aiuta certamente a superare questa remora psicologica nei confronti delle radiazioni, vista la trattazione a parte che il legislatore fa di questa sorgente di rischio negli ambienti di vita e di lavoro (rischio che viene pertanto inteso come più serio di tutti gli altri) e considerata la complessità che caratterizza detta normativa in termini di difficoltà nella lettura, nell'interpretazione e nell'applicazione.

Dall'esposizione fatta emergono alcune indicazioni che meriterebbero un intervento delle autorità responsabili:

- a livello sopranazionale (ICRP) per:
  - specificare più chiaramente il campo di applicazione dell'ipotesi lineare, dei modelli e dei valori numerici indicati per le valutazioni di rischio;
  - limitare l'impiego della dose collettiva a un valore minimo di dose e ad una limitata estensione temporale;
  - sostituire i "limiti di dose" con i "livelli di riferimento";
- a livello europeo per eliminare la classificazione dei lavoratori in due raggruppamenti;
- a livello nazionale per:
  - ridurre la burocratizzazione della normativa e la pleora delle competenze;
  - inserire la normativa di radioprotezione in un testo unico sulle tutele lavorative ed ambientali;
  - rendere più snelle le procedure operative, chiamando in causa anche le associazioni scientifiche.

## Il fondo naturale di radiazioni

Fin dalla sua prima comparsa nella scena della vita terrestre l'uomo è stato oggetto di esposizione alla radiazione ionizzante che è presente sul nostro Pianeta fin dalla sua nascita. Le sorgenti naturali di esposizione vengono suddivise, in ragione della loro provenienza e natura, in: radiazione cosmica (galattica e solare), radiazione cosmogenica e radiazione primordiale. La radiazione proveniente dalla nostra galassia e dagli spazi intergalattici è quella più energetica con valori compresi tra  $10^8$  e  $10^{20}$  eV, la cui costituzione è indicata nella tabella 1.

Tab. 1: Composizione della radiazione galattica (%)

Protoni	Particelle $\alpha$	Elettroni	Nuclei pesanti
86.2	10.8	2	1

La radiazione solare, che è ciclica nella sua intensità con periodi undecennali, è essenzialmente costituita da protoni di energia per lo più inferiore a 100 MeV. Il campo magnetico terrestre funge da parziale schermo di questa radiazione che comunque, raggiungendo l'atmosfera, dà luogo a cascate di altre radiazioni, tra cui muoni, elettroni, gamma e neutroni, alle quali è principalmente dovuta la dose ricevuta al suolo.

La dose della radiazione cosmica, oltre che con l'altezza sul livello del mare, varia anche con la latitudine, e, mediamente, alla latitudine di  $50^\circ$  essa è di circa 270 microSv/a e di 80 microSv/a rispettivamente per la radiazione direttamente ionizzante e per la radiazione neutronica.

La radiazione cosmica è anche responsabile della radiazione cosmogenica, in quanto i neutroni secondariamente prodotti dalla radiazione cosmica attivano i nuclidi stabili rendendoli radioattivi. Tra questi quelli più importanti per la dose sono il trizio, il carbonio-14 e il sodio-22 che hanno anche un ruolo metabolico nell'organismo umano. Si stima che la dose annua sia ripartita come in Tab. 2. I radionuclidi primordiali sono quelli che hanno un periodo di dimezzamento del-

Tab. 2: Dose annua dai principali radionuclidi cosmogenici (microSv/a)

$^{14}\text{C}$	$^{22}\text{Na}$	$^3\text{H}$	$^7\text{Be}$	Totale
12	0,15	0,01	0,03	~12,2 (15)

l'ordine dell'età del sistema solare (e i loro figli), e pertanto si trovano sulla Terra fin dalla sua formazione. I principali sono riportati in tab. 3. La distribuzione estremamente variabile nelle varie regioni terrestri di questi radionuclidi comporta agli

abitanti dosi notevolmente diverse; così ad esempio, per alcune regioni ad alto fondo, la dose assorbita in aria è di 790 o 35 o 5 mSv/a rispettivamente in alcune regioni del Brasile (Guarapari), in alcune regioni dell'India (Kerala) e ad Orvieto in Italia.

**Tabella 3: Alcuni radionuclidi primordiali**

	$T_{1/2}$ (a)	Dose assorbita in aria (nGy/h)
Torio-232 (e figli serie 4n)	1,405.1010	18
Uranio-238 (e figli serie 4n+1)	4,47.109	16
Uranio-235 (e figli serie 4n+2)	7,038.108	-
Potassio-40	1,28.109	17
Rubidio-87	4,75.1010	-

Si osservi inoltre che il contributo dell'uranio e del K-40 a causa della loro presenza naturale nel suolo è di 10-50 Bq/kg (uranio) e 100-700 Bq/kg (K-40). Analoga disparità di esposizione si può rilevare per quanto riguarda il radon, la cui concentrazione indoor dipende oltre che dalla regione, dal materiale e dalle tecniche di costruzione delle abitazioni e anche dalle caratteristiche climatiche delle zone. Nella tabella 4 sono riportate alcuni valori delle concentrazioni di radon indoor rilevati in alcune abitazioni.

**Tabella 4: Concentrazione di radon nelle abitazioni di alcuni paesi (Bq/m³)**

	Valore medio	valore massimo
Canada	34	1720
Kazakistan	10	6000
Iran	82	3070
Estonia	120	1390
Finlandia	120	20000
Norvegia	73	50000
Svezia	108	85000
Belgio	48	12000
Francia	62	4690
Svizzera	70	10000
Regno Unito	20	10000
Repubblica Ceca	140	20000
Slovacchia	87	3750
Italia	75	1040
Spagna	86	15400
Portogallo	62	2700

Se si assume il valore di conversione esposizione-dose efficace proposto dall'UNSCEAR:

$$1 \text{ Bq h}^{-1}\text{m}^{-3} = 9 \text{ nSv},$$

nel caso del valore massimo di esposizione sopra indicato (in Svezia) e per una permanenza indoor di 10 ore al giorno si avrebbe una dose efficace giornaliera di 7.6 mSv e quindi una dose equivalente al polmone di 63 mSv al giorno.

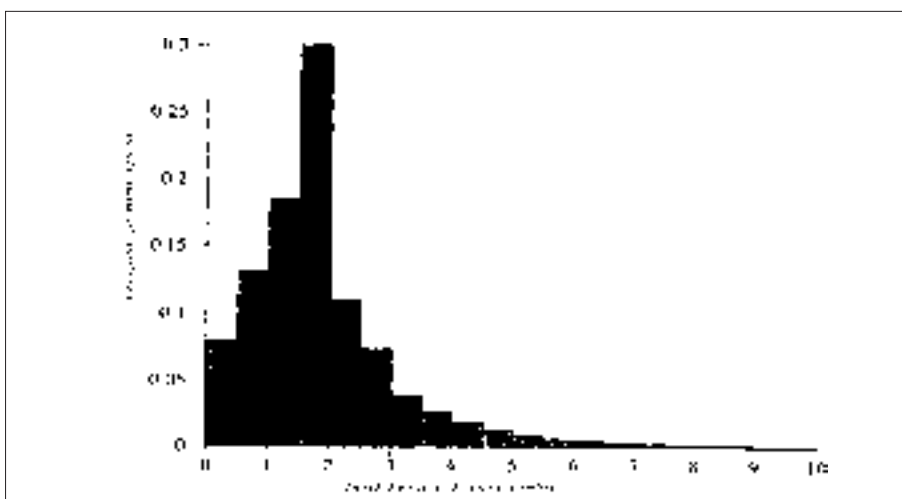


Figura 1: Distribuzione della dose efficace annua da fondo naturale.

Secondo un recente lavoro di F. Bochicchio e S. Risica (ISS), la media nazionale italiana è probabilmente compresa tra 70 e 75 Bq/m<sup>3</sup>. Considerando che il valor medio mondiale stimato dall'UNSCEAR è di 40 Bq/m<sup>3</sup>, mentre le medie nazionali di altri Paesi vanno da circa 10 Bq/m<sup>3</sup>, (Australia, Cipro, Egitto) a oltre 100 Bq/m<sup>3</sup>, (Finlandia, Svezia, Rep. Ceca, Ungheria, Estonia), la media italiana può considerarsi medio alta. La dose efficace media per la popolazione italiana dovuta all'esposizione al radon nell'aria interna alle abitazioni viene stimata in 1.9 mSv/a, di cui 1.8 mSv/a per l'irraggiamento polmonare e 0,1 mSv/a per l'irraggiamento ad altri organi.

A parte le grandi differenze che si possono riscontrare da regione a regione della terra (Figura 1), per quanto riguarda le varie componenti che concorrono a determinare la dose totale, il valore medio dalle varie fonti naturali alla popolazione è sostanzialmente identico a quello che l'UNSCEAR aveva già valutato nel 1988, e che viene riportato nella tabella seguente (tab. 5)

Tabella 5: Dose media efficace annua da fondo naturale (microSv/a)

	Irrad. Esterna	Irrad. Interna	Totale
Raggi cosmici			
Direttamente ionizzanti	300		300
Neutroni	55		55
Radionuclidi cosmogenici		15	15
Radionuclidi primordiali			
K-40, Rb-87	150	186	336
Serie U-238	100	1200	1300
Serie Th-232	160	180	340
Totale	800	1600	2400

Può risultare interessante rilevare che circa 0.2 mSv/a sono dovuti alla costante presenza di 6000 Bq di K-40 e di 4000 Bq di C-14 (più altra attività, meno importante, dovuta a vari altri radionuclidi naturali). Un uomo adulto ha nel suo corpo circa 4200 Bq di K-40 e ingerisce ogni anno oltre 20mila Bq di C-14. Per quanto riguarda in particolare l'irraggiamento esterno, nel nostro Paese è stata condotta una indagine nazionale dal CNEN negli anni passati che ha portato a rilevare i valori di esposizione gamma annui medi riportati nella tabella 6.

Tabella 6: Dose ssorbita media annua da fondo gamma in varie province italiane (mGy)

Ancona	0,85
Aosta	0,49
Bari	0,83
Bologna	0,80
Campobasso	0,69
Firenze	0,77
Genova	0,75
L'Aquila	0,82
Milano	0,82
Napoli	2,13
Palermo	0,90
Perugia	0,86
Potenza	1,31
Reggio Calabria	1,28
Roma	1,58
Torino	0,86
Trento	0,84
Trieste	0,76
Venezia	0,77

È possibile rilevare che la popolazione napoletana riceve per questa via una dose che è circa 5 volte più alta di quella annualmente ricevuta dalla popolazione aostana. Una indagine nazionale più recente condotta dall'ISS e dall'ANPA ha portato a stimare una dose efficace media gamma per la popolazione italiana compresa tra 0.5 e 0.6 mSv/a. La stessa indagine riferita alla misurazione del radon ha portato a valutare tra 70 e 75 Bq/m<sup>3</sup> la concentrazione mediata nel corso dell'anno nelle abitazioni, con differenze notevoli in relazione sia al materiale di costruzione, sia alla localizzazione geografica sul territorio; i dati si distribuiscono seguendo un andamento lognormale con il valore minimo rappresentato da alcuni becquerel per metro cubo fino al valore massimo di 1040 Bq/m<sup>3</sup>. Concludendo, la dose media totale della popolazione italiana dovuta e esposizione a radiazioni ionizzanti di origine naturale è stimabile, sulla base dei dati attualmente a disposizione, in circa 3.4 mSv/a, di cui 1.8 mSv/a e 0.5 mSv/a dovuti rispettivamente al radon in aria ed alla radiazione gamma nelle abitazioni. I corrispondenti valori medi mondiali sono di 2.4 mSv/a, 1.1 mSv/a e 0.4 mSv/a.

Alla dose media totale cui la popolazione italiana è esposta a causa delle radiazioni ionizzanti di origine naturale, si aggiunge il contributo delle sorgenti antropiche rappresentate essenzialmente dall'impiego delle radiazioni ionizzanti nelle pratiche medico-diagnostiche, ma anche dal fall-out degli esperimenti nucleari in atmosfera, alla produzione di energia con combustibili fossili, etc. Il contributo medio annuo da queste fonti è stato stimato in 1.1 mSv/a.

### **Gli effetti delle radiazioni**

I raggi X e la radioattività, scoperti rispettivamente nel 1895 e 1896, si rivelarono subito come potenti e innovativi strumenti di diagnostica medica lasciando intravedere anche alcune possibilità di impiego in campo terapeutico (risale infatti al 1899 la prima guarigione a mezzo dei raggi X di un cancro della cute). Tuttavia si evidenziarono rapidamente anche alcuni aspetti collaterali negativi come, ad esempio, l'insorgere di eritemi legati a lunghe esposizioni alle radiazioni. Successivamente, 6-7 anni dopo la loro scoperta, si ebbe evidenza dell'induzione di un tumore maligno della pelle insorto su un'ulcera radiogena cronica. Si può dire quindi che la radiopatologia è la conseguenza dei benefici della radiologia, ed è proprio per questi evidenti vantaggi che in breve tempo, agli inizi del secolo, vi è stata una enorme diffusione degli apparecchi a raggi X ed una intensa attività di ricerca sul radio, che hanno esposto un numero di operatori sempre più vasto alle radiazioni ionizzanti. Con la diffusione dell'uso, si è avuto anche un aumento ed una differenziazione della patologia, e, accanto ad una prima patologia di tipo



acuto è comparsa anche quella di tipo cronico: "la cute del radiologo". Nel 1912 viene poi descritta la prima "anemia da raggi", anche essa in forma cronica, lentamente evolutiva, che è stata nosologicamente con più frequenza riferita come "sangue dei radiologi".

In sul finire degli anni venti furono evidenziati gli effetti genetici in esperimenti di radiobiologia: il moscerino della frutta, per la prolificità e la velocità riproduttiva, ha fornito il mezzo di indagine d'elezione ed ha mostrato la capacità mutagenica delle radiazioni, con possibili effetti trasmissibili alla discendenza (peraltro mai riscontrati nella specie umana). I risultati di tali studi vennero più tardi estrapolati alla specie umana, senza però che nella specie umana mai fino ad oggi siano stati osservati, neanche nelle popolazioni più esposte.

Le ricerche e le applicazioni per fini bellici e, successivamente, per fini industriali ed energetici, negli anni '40 e '50 hanno portato ad evidenziare altre patologie di tipo acuto con coinvolgimento parziale o totale dell'organismo: le sindromi acute localizzate e quelle da panirradiazione, che sono conseguite alle forti esposizioni determinate da esplosioni nucleari, o da incidenti verificatisi negli impieghi pacifici dell'energia nucleare dopo gli anni '50.

A cominciare dagli anni '50 sono iniziati i primi studi epidemiologici su categorie, soprattutto radiologi e gruppi di pazienti esposti per motivi terapeutici e diagnostici, per chiarire il sospetto, già presente negli anni '30, circa le capacità oncoiduttrici delle radiazioni. Gli studi epidemiologici degli anni successivi più significativi dal punto di vista statistico soprattutto quelli degli esposti alle esplosioni delle bombe atomiche, hanno confermato tale sospetto, orientando la IARC ad attribuire alle radiazioni la collocazione in classe 1 come: "agenti cancerogeni per l'uomo".

Oggi si può quindi dire che il capitolo delle malattie da radiazioni ionizzanti ha raggiunto un assetto definitivo nel vasto libro della patologia umana, talché tale capitolo viene unanimemente suddiviso nei seguenti paragrafi (vedi tabella 7):

- effetti somatici deterministici (per il passato denominati effetti somatici non stocastici o anche, da noi in Italia, effetti graduati) che l'individuo subisce entro "breve tempo" a seguito di esposizione di entità rilevante, la cui incidenza è caratterizzata da una relazione dose-effetto con soglia;
- effetti somatici stocastici che conseguono all'individuo a seguito di esposizioni, anche di bassa entità, la cui incidenza è caratterizzata da una relazione dose-probabilità;
- effetti genetici che conseguono ai discendenti della popolazione esposta, la cui incidenza si suppone avvenga anche nella specie umana, in conformità ad una relazione dose-probabilità.

Tabella 7: Classificazione dei danni da radiazioni ionizzanti

<b>SOMATICI</b> (individuo esposto)	<b>Deterministici</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Radiodermite</li> <li>Infertilità</li> <li>Cataratta</li> <li>Sindrome acuta da irradiazione</li> <li>Altri</li> </ul>
	<b>Stocastici</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tumori solidi</li> <li>Leucemie</li> </ul>
<b>GENETICI</b> (progenie)	<b>Stocastici</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mutazioni geniche</li> <li>Aberrazioni cromosomiche</li> </ul>

A questi effetti canonici, anche a seguito delle reazioni riscontrate in situazioni incidentali, bisogna aggiungere gli "effetti psicologici", che conseguono anche in assenza di un assorbimento di dose e che mostrano la loro presenza essenzialmente con manifestazioni cliniche sul piano psichico e psicosomatico.

### 1. *Effetti somatici deterministici (non stocastici o graduati)*

Sono, questi, effetti conseguenti a esposizioni a dosi elevate. Indicativamente la soglia di sensibilità dell'organismo "in toto" è, per un irraggiamento acuto, del-

Tabella 8: Caratteristiche dei danni deterministici

• Dose (elevata) determina	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gravità</li> <li>Frequenza</li> </ul>
• Relazione dose effetto non lineare (sigmoide)	
• Dose soglia dipende da:	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tipo e qualità della radiazione</li> <li>Fattore di protrazione della dose</li> <li>Tessuto o organo irradiato</li> <li>Variabilità individuale</li> <li>Sensibilità del metodo diagnostico</li> </ul>
• Danno policitico (volume tessuto irradiato)	
• Reversibilità (entro certi limiti)	
• Insorgenza per lo più precoce	
• Danno (relativamente) specifico	

l'ordine di 0.25 Gy (25 rad), valore intorno al quale cominciano a manifestarsi le prime alterazioni ematologiche, rappresentate da un modesto, precoce e transitorio calo linfocitario, mentre la comparsa di qualche aberrazione cromosomica si verifica già per l'assorbimento di una dose di un fattore 2-3 più bassa.

Questi effetti non sono solamente caratterizzati dalla presenza di una soglia, ma anche da una gravità, sul piano sintomatologico, clinico e prognostico, crescente con la dose ricevuta. Per queste ragioni da noi, in Italia, tali effetti venivano denominati anche "effetti graduati" (da gradus=gradino) per indicare non solo la presenza di una soglia, ma anche questa "gradualità" delle manifestazioni cliniche connessa con l'entità della dose assorbita. Nella tabella 8 sono riassunte le principali caratteristiche di questo tipo di effetti.

Come la maggior parte delle grandezze di interesse biologico, anche la risposta alle alte dosi di radiazioni ionizzanti, in riferimento alla variabilità biologica individuale, ha un andamento di tipo gaussiano, talché, per ogni "effetto graduato" possibile, si può costruire una curva similgaussiana con una soglia, un proprio valore medio ed una propria deviazione standard. L'integrale di tale curva ha un andamento sigmoidale e fornisce la curva di distribuzione cumulativa, la quale consente, per esempio, di ricavare la "dose efficace 50%" per l'effetto considerato. Con tale dizione si intende quella dose che determina la comparsa dell'effetto in questione nel 50% degli esposti alla dose stessa.

Il meccanismo d'azione che, a livello biologico, è responsabile della induzione di questi effetti è la necrosi delle cellule funzionali dei tessuti irradiati, talché la sintomatologia discende dalla perdita parziale o totale della funzionalità del tessuto stesso. Da un punto di vista pratico va tenuta in considerazione anche la diversa natura e quindi "sensibilità" del tessuto irradiato. In particolare, le cellule staminali o quelle meno differenziate sono quelle che subiscono i maggiori danni, infatti la "radiosensibilità" è tanto maggiore quanto più la cellula è vicina al compar-

Tabella 9: Dose soglia indicativa per alcuni effetti deterministici

Dose assorbita (Gy)	manifestazioni cliniche
0.10	danni embrionali
0.25	manifestazioni ematologiche
0.30	sterilità transitoria
0.75	malattia da raggi
1.00	sindrome emopoietica (panirradiazione)
2.00	cataratta
3.00	eritema semplice
4.00	dose letale media al 50%
5.00	sindrome gastroenterica (panirradiazione)
20.0	sindrome cerebrale

timento staminale, cioè quanto più basso è il suo grado di differenziazione. E' questa una osservazione che risale agli inizi del secolo e che va sotto il nome di legge di Bergonie e Tribondes: le cellule immature e le cellule in stato attivo di suddivisione sono più sensibili alle radiazioni di quanto non lo siano le cellule che hanno acquistato le loro caratteristiche morfologiche e fisiologiche adulte. Si riscontra allora che il midollo osseo rosso, i tessuti linfoidei, la mucosa gastroenterica, gli oogoni e gli spermatogoni, sono i tessuti più radiosensibili.

Sostanzialmente quindi, a seconda dell'effetto, vi è una soglia che va correlata alla radiosensibilità del tessuto interessato. Nella tabella 9 vengono riportate le soglie approssimative di dose per alcuni effetti conseguenti ad una irradiazione acuta. Gli effetti di una irradiazione acuta vengono anche detti "effetti precoci", giacché compaiono, dalla azione della causa, dopo un intervallo di tempo (periodo di latenza) relativamente breve (ore, giorni o settimane). Fa eccezione la cataratta che può avere periodi di latenza dell'ordine di 1-2 anni; ma anche in tal caso le prime opacità del cristallino compaiono abbastanza precocemente. Il breve periodo di latenza è pertanto un altro elemento caratteristico di tali effetti (gli effetti stocastici infatti hanno periodi di latenza ben più lunghi, dell'ordine di anni).

Per illustrare l'altra caratteristica, quella della gradualità, nella tabella 10 sono riportate le manifestazioni cliniche che compaiono a seguito di una panirradiazione acuta di entità crescente.

**Tabella 10: Intervalli di comparsa di sindromi conseguenti a panirradiazione**

Dose assorbita (Gy)	manifestazioni cliniche
0.10	danni embrionali
0.25	manifestazioni ematologiche
0.30	sterilità transitoria
0.75	malattia da raggi
1.00	sindrome emopoietica (panirradiazione)
2.00	cataratta
3.00	eritema semplice
4.00	dose letale media al 50%
5.00	sindrome gastroenterica (panirradiazione)
20.0	sindrome cerebrale

Nel caso di una irradiazione localizzata alla cute, la "gradualità", e quindi la gravità, delle lesioni è riportata nella tabella 11.

Tabella 11: Correlazione tra gravità e dose nel caso di esposizione della cute

Dose soglia (Gy)	Manifestazioni cutanee
0 – 3	nessuna manifestazione
~ 3	eritema semplice
~ 6	eritema bolloso
~ 12	dermatite ulcerosa
~ 32	dermatite necrotica

In questa tabella la dose soglia è riferita a raggi X di 100 KeV. Le soglie aumentano per radiazioni più penetranti, ma allora vengono interessati anche i tessuti profondi. In ogni caso anche per radiazioni elettromagnetiche più penetranti, le manifestazioni precedenti si verificano in corrispondenza di una dose assorbita dalla strato basale della cute pari a quello sopra indicato. Ciò non è più vero se si cambia "tipo" di radiazione. In particolare, una irradiazione dello strato basale con particelle alfa, con neutroni o con protoni determina gli stessi effetti a livelli più bassi di dose assorbita. Questa constatazione ha consentito di introdurre il concetto di "efficacia biologica relativa" della radiazione, il cui significato è numericamente correlato al rapporto tra la dose efficace al 50% della radiazione in esame, rispetto alla stessa dose di radiazione elettromagnetica. Oggi tale concetto, che è pur sempre valido in radioterapia, è stato adattato alle esigenze della radioprotezione con riferimento soprattutto agli effetti stocastici, di cui si dirà più oltre, e si preferisce parlare di "fattore di peso" piuttosto che di "fattore di qualità" della radiazione (come nel passato recente) o di "efficacia biologica relativa" (come nel passato più lontano).

Tra gli effetti graduati vengono di solito riportati anche quegli effetti somatici che compaiono sempre a seguito di dosi cumulate elevate per esposizioni protratte nel tempo, sia che l'erogazione delle dosi avvenga costantemente, ma con intensità relativamente bassa, sia che avvenga ad intermittenza ad intensità più alta, ma sempre al di sotto dei valori di soglia. Tale modalità di irradiazione consente all'organismo di riparare le "microlesioni", almeno in parte, e quindi di dilazionare nel tempo la comparsa delle manifestazioni cliniche. In queste condizioni espositive si hanno soglie più elevate il cui valore può essere ottenuto dalla seguente espressione:

$$D_c = D_a t^n,$$

dove  $D_c$  è la soglia per esposizione cronica,  $D_a$  è quella per esposizione acuta,  $t$  è il tempo durante il quale la dose viene frazionata ed  $n$  è un numero valutato sulla base della pendenza della curva su scala bilogaritmica ed è espressione della capacità di recupero del tessuto.

La "distribuzione temporale" della dose, pertanto, determina un innalzamento delle soglie di comparsa dei vari effetti graduati di un fattore variabile, in relazione al periodo di frazionamento della dose. Tale principio viene sfruttato in radioterapia. Ma parlando di radiopatologia la esposizione cronica interessa in quanto responsabile di due sindromi, che, per esser diffuse nel passato tra i radiologi, sono note come "sangue del radiologo" e "cute del radiologo". La prima (anemia cronica) è il risultato di una ipoplasia midollare indotta da dosi dell'ordine di qualche centiGray per settimana al midollo osseo, con un quadro ematologico periferico di tipo anemico e leucopenico che migliora a seguito di allontanamento dalla sorgente di rischio. La seconda (radiodermite cronica) si manifesta dopo alcuni anni di esposizione al rischio con secchezza, assottigliamento e fragilità del rivestimento cutaneo, con comparsa di verruche, ipercheratosi e teleangectasie e, a lunga distanza, comparsa di piaghe torbide di difficile guarigione e possibile comparsa di carcinoma di tipo spino- o basocellulare.

I tessuti non hanno tutti la stessa suscettibilità nei confronti delle radiazioni ionizzanti. Ve ne sono alcuni più radioresistenti, altri meno e questo è vero sia per quanto riguarda gli effetti graduati che per quanto riguarda gli effetti stocastici. In particolare, si può tracciare la seguente scala qualitativa di radiosensibilità dei vari tipi cellulari o tessuti:

linfociti  
cellule germinali  
cellule basali dell'epidermide e mucose  
connettivo  
fegato  
muscolo  
sistema nervoso

In generale, la scala di radiosensibilità dei tessuti ubbidisce alle regole di Bergonie e Tribondeau (1906) già ricordate sopra, anche se oggi si è riscontrata qualche eccezione. In genere, la radiosensibilità è maggiore per quelle cellule per le quali:

- la frequenza mitotica è più alta,
- il processo cariocinetico è più lungo,
- le caratteristiche fisiologiche e morfologiche sono meno definite.

Come ulteriore informazione si può aggiungere che le cellule e i tessuti sono più radiosensibili quanto meglio sono ossigenati (effetto ossigeno): se meglio ossigenate, le cellule non solo si riproducono più rapidamente, ma più facilmente pos-

sono formare composti nocivi o complessi molecolari che possono legarsi ad altre molecole importanti per la sopravvivenza cellulare o per il contenuto informativo che devono trasmettere alla loro discendenza. L'ossigeno peraltro può comportare il blocco dei sistemi enzimatici di riparazione, con la formazione di perossidi irreversibili ed inattivi.

Per spiegare meglio gli effetti elementari di interesse cellulare e la diversa radio-resistenza dei tessuti, conviene ricordare che le cellule si suddividono in perenni (tessuto nervoso, muscolare....), stabili (epatociti, fibrociti....) e labili (sistema emopoietico, mucose, pelle...).

Le cellule perenni, una volta raggiunta la maturità funzionale, non vanno più incontro (almeno teoricamente) a processi riproduttivi (o si riproducono con estrema lentezza) in tutto il corso della vita dell'individuo. Le cellule stabili vanno incontro a mitosi solo nel caso di particolari stimoli, conseguenti, ad esempio, alla riduzione della massa del loro tessuto o a particolari richieste fisiopatologiche dell'organismo. Le cellule labili, infine, sono cellule che hanno un loro ciclo vitale limitato, al termine del quale pertanto devono essere sostituite.

Mentre le manifestazioni graduate conseguenti ad irradiazioni acute sono a tutt'oggi ancora riscontrabili a seguito di situazioni incidentali o di irradiazioni terapeutiche, le manifestazioni ora descritte non sono più oggetto di osservazione clinica a causa degli alti livelli di protezione ed al rispetto degli stringenti standard di radioprotezione che da alcuni decenni vengono messi in atto. Per cui, quando oggi si parla di radioprotezione, si intende sostanzialmente quella disciplina volta alla riduzione del rischio stocastico, giacché si dà per scontato che nella attività lavorativa le dosi, salvo situazioni incidentali, sono contenute a livelli ben più bassi rispetto alla soglia di comparsa degli effetti graduati. Accanto a questi effetti negativi sul piano sanitario, non possono certamente essere dimenticati i numerosi impieghi che sullo stesso piano sanitario vedono le radiazioni ionizzanti protagoniste sia nella diagnostica, sia, soprattutto, nella terapia dei tumori.

## 2. *Effetti somatici stocastici*

Sotto il termine di effetti stocastici si raggruppano sia effetti somatici (che interessano il "soma" dell'individuo esposto), sia effetti genetici (che interessano i figli degli esposti) e per i quali si veda il paragrafo successivo. Questi effetti compaiono con incidenza casuale e per essi, convenzionalmente e per i fini della radioprotezione, si assume una probabilità non nulla di comparsa anche per dosi molto piccole e prossime allo zero (ipotesi dell'extrapolazione a zero), e cioè si assume l'assenza di una soglia. In particolare, l'induzione di effetti somatici stocastici consiste nella induzione di tumori (oncogenesi) su tessuti o organi dell'individuo esposto. Le principali caratteristiche di tale tipo di effetti sono riportati nella tabella 12.

Tale capitolo della patologia da radiazioni è indubbiamente più importante per la radioprotezione, proprio in relazione a questo manifestarsi “a caso” degli effetti stocastici e al fatto che si prescinde da una soglia; pertanto per i fini della radioprotezione si assume che neanche al di sotto dei valori limite di dose vi sarebbe una garanzia assoluta nei riguardi di una possibile patologia indotta.

Va esplicitamente ed enfaticamente rilevato però che l'estrapolazione a zero è un'ipotesi. Essa è stata formulata come principio di prudenza per i fini esclusivi della protezione dalle radiazioni, cioè della disciplina di radioprotezione a suo tempo fondata per la prevenzione e per la protezione degli effetti sanitari dell'esposizione a radiazioni ionizzanti, disciplina ben distinta dalla radiopatologia che è invece la disciplina che si occupa della clinica, terapia e riabilitazione dei pazienti affetti da patologie già in atto causati dall'esposizione alle radiazioni, disciplina nella quale evidentemente non ha senso il principio di estrapolazione a zero.

**Tabella 12: Caratteristiche dei danni stocastici**

• Dose (anche molto bassa)	<div> <div>Non determina la gravità (legge del “tutto o nulla”)</div> <div>Determina la probabilità di comparsa</div> </div>
• Relazione dose-effetto lineare passante per l'origine.	
• Dose soglia supposta assente per i fini della radioprotezione.	
• Danno monocitico.	
• Latenza lunga o molto lunga.	
• Assenza di reversibilità.	
• Danno aspecifico.	
• Attribuzione eziologica su base probabilistica.	

Poiché oggi il tema degli effetti stocastici è il tema dominante nell'interesse collettivo, merita precisare alcuni elementi di basilare interesse per la comprensione di questi effetti, a cominciare dalla definizione.

Il tumore è una espansione incontrollata di una popolazione cellulare, una situazione, cioè, nella quale il fenomeno della riproduzione cellulare è sottratta alle regole di insieme che governano la condizione di omeostasi riproduttiva delle cellule. I tumori, a secondo della loro evoluzione ed a seconda delle caratteristiche anatomo-patologiche (invasività, anaplasia, perdita delle caratteristiche morfo-



giche, metastatizzazione, velocità di crescita) possono a loro volta distinguersi in benigni o maligni. Inoltre, a seconda del tessuto colpito, assumono denominazioni diverse, come, ad esempio:

- tumori del tessuto epiteliale: carcinomi (maligni), polipi, adenomi, papillomi (benigni)
- tumori del tessuto connettivo: sarcomi (maligni), fibromi, lipomi, osteomi, condromi, leiomiomi, angiomi (benigni)
- tumori del tessuto nervoso: neuroblastomi, glioblastomi (maligni), neurinomi, glomi (benigni)
- tumori del tessuto emopoietico e linfatico: leucemie, plasmocitoma, linfoma e adenoma, ecc.

In radioprotezione, quando si parla di rischio stocastico somatico si intende far riferimento essenzialmente a tumori maligni, anche se, dal punto di vista eziologico, sono egualmente attribuibili alle radiazioni ionizzanti i tumori benigni. In ogni caso i tumori radioindotti sono aspecifici, nel senso che presentano caratteristiche del tutto eguali a quelli indotti da altri agenti cancerogeni o da quelli "naturali".

Per quanto riguarda la patogenesi conseguente ad irradiazione, la radiobiologia, che studia gli effetti delle radiazioni sugli animali, può fornire delle utili informazioni da estrapolare all'uomo. Si può pertanto puntualizzare che è a livello di alcune macromolecole chiave per la vita cellulare, quali DNA ed enzimi, che una alterazione biofisica e biochimica può dare origine a lesioni biologiche irreversibili. La lesione può verificarsi per una interazione diretta della radiazione con le forze di legame che supportano la struttura molecolare o per una azione mediata dall'intervento dei radicali liberi generati dalla radiazione stessa, in particolare dai radicali prodotti dall'interazione della radiazione con le molecole di acqua di cui è ricca tutta la materia vivente. Si ritiene che il 65% delle lesioni al DNA sia dovuto all'azione indiretta dei radicali liberi ed il restante 35% all'azione diretta della radiazione sul DNA. In relazione a queste due modalità, sul DNA possono intervenire delle alterazioni elementari, quali ad esempio:

- reazioni chimiche di alchilazione, ossidazione, etc, delle basi,
- perdita di una o più basi puriniche o pirimidiniche,
- formazione di un addotto chimico,
- rottura di un filamento principale o di entrambi i filamenti in corrispondenza dei legami glicosidici o fosforici,
- formazione di legami crociati nel singolo filamento,
- formazione di legami crociati tra filamenti diversi.

Gli effetti morfologici e funzionali più generali conseguenti alle lesioni del DNA sono principalmente rappresentati, a livello cellulare, dai seguenti danni:

- danno cromosomico, che si manifesta visivamente con:
  - aberrazioni numeriche (eteroploidia),
  - aberrazioni sequenziali (delezione, interscambi, inversioni pericentriche,...),
  - aberrazioni strutturali (frammenti, anelli, dicentrici,...).
- danno genico, rappresentato da mutazioni nei singoli geni (quindi a un livello strutturale più basso del cromosoma), mutazioni che quasi sempre sono negative per il clone cellulare (o per le cellule germinali),
- ritardo mitotico, che consiste in una permanenza maggiore delle cellule labili nella fase G2 e ciò comporta una diminuzione dell'indice mitotico, almeno per un certo periodo di tempo dopo l'esposizione,
- danno letale che consiste nella scomparsa della capacità riproduttiva della cellula (la capacità di riprodursi da parte della cellula diminuisce all'aumentare della dose assorbita).

L'elemento cardine del danno cellulare, che si estrinseca sia a livello somatico che genetico, è quindi rappresentato dalle alterazioni indotte sugli acidi nucleici e si estrinseca o nella morte della cellula o nella sua trasformazione. Nel caso di irradiazioni elevate sarà più eclatante il primo effetto, che sfocerà in una sintomatologia sul piano clinico da correlare all'organo o al sistema maggiormente colpito o più radiosensibile. Il secondo effetto, che ha un periodo di latenza molto più lungo e non è correlabile ad una soglia, è in qualche modo responsabile della cancerogenesi.

La trasformazione neoplastica per unanime consenso del mondo scientifico è un fenomeno complesso, lungo nel tempo, che comincia ormai ad essere più chiaro e che, anche se non compreso a fondo, indica che si tratta di un processo a molti stadi nel quale la lesione a livello del DNA rappresenta la prima e più importante tappa del procedimento. Nella letteratura corrente si parla con certezza di almeno tre stadi:

- *iniziazione*: che è la fase nella quale si ha la produzione di una mutazione genetica "stabile" (cioè trasmissibile alle cellule figlie), che nel caso delle radiazioni ionizzanti può avvenire attraverso i meccanismi dell' "urto o effetto diretto" o dell' "effetto indiretto" attraverso, ad esempio, i radicali liberi, come già indicato;

- *promozione*: che è un processo che si protrae nel tempo e che richiede esposizione prolungata e/o ripetuta ad un agente promotore, come sono appunto anche le radiazioni ionizzanti; questa azione consiste nell'indurre la proliferazione cellulare attraverso una delle varie vie che interferiscono con i normali sistemi di controllo del ciclo di riproduzione cellulare. Questa, generalmente, avviene a seguito di uno stimolo (per esempio ormonale) sulla membrana superficiale della cellula e con la conseguente attivazione di sistemi enzimatici di trasduzione endocellulare, come le esochinasi. Ciò in ultima analisi si traduce, all'interno del nucleo, in una inibizione di geni soppressori e/o in un'attivazione di geni promotori. In questa fase si viene anche a determinare una modificazione dello stato di differenziazione della cellula, con una inibizione o addirittura una regressione (dedifferenziazione) della sua specializzazione, fatto questo che può far riassumere alla cellula le caratteristiche totipotenti tipiche della fase ontogenetica, cioè del periodo di formazione degli organi;
- *progressione*: questo terzo passaggio può essere distinto a sua volta in fase di conversione e, più propriamente, in fase di progressione. La conversione è la fase nella quale una o più cellule, che ormai si riproducono rapidamente, trasformano il loro fenotipo da precanceroso a maligno. Qui sembrano giocare un ruolo importante i processi di amplificazione di alcuni proto-oncogeni (come il c-ras) o l'inattivazione di alcuni geni soppressori (come il gene p53). Nella fase di progressione il processo di malignità va avanti ulteriormente con l'acquisizione delle caratteristiche di invasività e di metastatizzazione, dovute principalmente all'acquisizione dell'insensibilità, alla inibizione da contatto, alla secrezione di enzimi litici della matrice intercellulare, alla secrezione del fattore autocrino di mobilità (AMF), etc.

Questi processi complessi ed ancora poco chiari, e sui quali la ricerca è estremamente attiva, sono contrastati, in ogni caso, con almeno tre livelli di protezione, che fanno capo ai principi dell'omeostasi:

- il *livello dei sistemi antiossidativi* che tendono a bloccare l'azione dei radicali liberi principali artefici della formazione di addotti e più probabili responsabili, assieme alle rotture doppie del DNA, delle mutazioni geniche e quindi dell'azione iniziatrice del processo oncogeno. Ad esempio alcune molecole biologiche conte-

nenti in genere il gruppo tiolico-SH sono in grado di cedere facilmente  $1^{\circ}\text{H}$  neutralizzando radicali liberi o sottraendo ossigeno alla cellula. Un composto sulfidrilico presente nella cellula in concentrazione relativamente alta è il glutathione GSH (o anche molecole proteiche contenenti il gruppo cistenico- $\text{CH}_2\text{-SH}$ ) che viene considerato un "modulatore" della radiosensibilità cellulare;

- il *livello dei sistemi enzimatici riparativi* che fanno della cellula un vero e proprio microlaboratorio chimico; in questo laboratorio i numerosi enzimi, operando in modo armonico e sinergico, provvedono al ripristino dell'integrità dell'informazione genetica ed alla riparazione dei danni al DNA; a questo livello fa capo anche l'attività di "morte programmata della cellula" o apoptosi, processo che porta appunto alla morte della cellula che non può essere riparata. Si tratta di sistemi più o meno complessi mono- o poli-enzimatici che svolgono azioni di riparazione a livelli più organizzati, che operano sul DNA interventi di "escissione" (eliminazione di un tratto) e successiva ricostruzione, di "riparazione per postreplicazione", etc.
- il *livello della vigilanza sull'integrità del "self"*, rappresentato dal sistema immunitario, che provvede ad eliminare le cellule "deviate".

### 3. *Effetti genetici*

Per effetti genetici si intendono (visto che le mutazioni eccezionalmente sono positive per la specie) le manifestazioni patologiche che conseguono ai figli a seguito del danno indotto dalle radiazioni ionizzanti sulle cellule della linea germinale dei genitori e che possono estrinsecarsi sia in aborti spontanei che in malattie ereditarie.

Per quanto riguarda il rischio abortivo si deve parlare più di un'ipotesi anziché di fatti scientificamente provati nella specie umana, giacché non vi sono indicazioni concrete che possano condurre ad una correlazione causa-effetto, e ciò potrebbe dipendere dal fatto che la quantificazione del rischio abortivo non risulta agevole, data la precocità con cui si può manifestare nel corso della gestazione, simulando pertanto un mestruo posticipato.

Anche nel caso degli effetti genetici va evidenziato che quelli radioindotti non hanno una specificità che consenta di distinguerli da quelli che si manifestano in modo apparentemente spontaneo e dovuto ad altre svariate ragioni.

alla base degli effetti stocastici somatici, con la differenza che qui le aberrazioni cromosomiche o le mutazioni genetiche riguardano le cellule della linea germinale anziché somatica. Mentre al momento le tecniche citologiche visive non permettono di evidenziare mutazioni di singoli geni (forse il ricorso alle tecniche, peraltro ormai abbastanza diffuse, di biologia molecolare potrebbero dare in futuro indicazioni "firmate" dall'agente eziologico), l'evidenziazione delle alterazioni del patrimonio genetico è invece visivamente possibile nel caso che l'alterazione sia grossolana e consista in una modificazione numerica o morfologica dei cromosomi. Tra le malattie con alterato numero dei cromosomi (aneuploidia) possiamo ricordare quelle riportate nella tabella 13.

Tabella 13: Alcune sindromi genetiche da alterato numero cromosomico

Sindrome	n. crom.	Corredo	Caratteristiche cliniche	Frequenza
Klinefelter	47	XXY	Microdidimia, azoospermia, ginecomastia, eunocoidismo, faccia glabra, osteoporosi, deficit mentale.	$2.10^{-3}$ maschi
Turner	45	X	Infantilismo sessuale, nanismo, Pterigio, amenorrea	$1.10^{-3}$ femmine
Down	47	trisomia	Ritardo mentale, pliche epicantiche, orecchie malformate, occipite piatto	1/700
Trisomia D	47	1 dei 3 cromos. del gruppo D	Microftalmia, opacità corneali, orecchie malformate, palatoschisi, criptorchidismo, angiomi facciali, malformazioni cardiache e renali.	$1-2.10^{-4}$
Trisomia E	47	crom. 17 o 18	Orecchie ad impianto basso, micrognatismo, occipite prominente, sterno breve, pelvi strette, malformazioni cardiache e renali	$1-2.10^{-4}$

Una malattia dovuta a delazione è quella che va sotto il nome di "cri du chat" caratterizzata da grave ritardo mentale, microcefalia, ipertelorismo con grido caratteristico somigliante al miagolio del gatto. Vi è una mancanza di circa 2/3 del braccio corto di un cromosoma del gruppo B (4 o 5). E' stato rilevato altresì che nel mongolismo si ha una più elevata incidenza leucemica ed è stato constatato che in soggetti normali affetti da leucemia mieloide si osserva una alterazione cromosomica nella coppia 21-22 consistente in una abnorme piccolezza (per delezione o traslocazione) di parti di tali cromosomi, che vengono indicati, così modificati, come cromosomi Ph (Filadelpia). E' evidente che grandi alterazioni morfologiche (ad es., dicentrici, anelli, etc.) rappresentano motivo di infertilità per i gameti portatori e pertanto o non daranno luogo a formazione di zigote o

saranno motivo di abortività alla prima suddivisione dello zigote. Va esplicitamente rilevato che le malattie genetiche dovute ad alterazioni grossolane del corredo cromosomico ed indicate nella tabella 13 non sono mai state osservate nella specie umana come associabili ad esposizione dei genitori alle radiazioni.

Accanto alle malattie cromosomiche esiste una vasta congerie di malattie, il cui numero va crescendo con l'affinarsi delle conoscenze, determinate da mutazione geniche disvitali (caratteri patologici compatibili con la vita). Fra le oltre 5000 ad oggi note, nella tabella 14 se ne riportano alcune tra quelle determinate da disordini genetici dominanti, tratte dal BEIR V, con la loro frequenza "naturale" di comparsa. Anche per quanto riguarda queste malattie non esistono evidenze epidemiologiche nella specie umana che ne ricollegli la causa all'esposizione a radiazioni ionizzanti.

**Tabella 14: Alcune malattie genetiche dominanti**

Malattia	Frequenza (10 <sup>-6</sup> )
Osteogenesi imperfetta	40
Acondroplasia	30
Anidria	15
Poliposi colica	71
Retinoblastoma	24
Rene policistico	860
Distrofia miotonica	220
Sferocitosi	220
Morbo di Huntington	300
Sindrome di Marfan	30
Sclerosi tuberosa	25
Neurofibromatosi	350

Si tratta di malattie monogeniche, determinate cioè dalla mutazione di un solo gene. Accanto vanno considerate anche le malattie ereditarie di origine poligenica più difficili da individuare e quantificare (ad es., fra tali malattie sembra che debba essere considerato il diabete).

E' evidente che la gravità sanitaria delle malattie ereditarie non è univocamente quantificabile, in quanto essa può andare dalla morte infantile, ad un accorciamento della vita, a menomazioni più o meno gravi, ad alterazioni che potrebbero anche non evidenziarsi sul piano clinico, in quanto la mutazione indotta resta a livello genotipico recessivo senza capacità espressiva.

Sulla base di osservazioni ed ipotesi si stima che la incidenza di malattie genetiche in una popolazione umana non soggetta a irradiazioni artificiali sia dell'ordine di 10<sup>5</sup> per 10<sup>6</sup> nati vivi (cioè il 10% circa dei nati vivi è portatore di malattia genetica).

Merita ricordare che nella specie umana non è stato ancora mai dimostrato che le radiazioni ionizzanti possono indurre effetti genetici; i risultati di una tale associazione sono negativi non solo nei discendenti delle popolazioni esposte all'incidente di Chernobyl, ma anche nel caso dei discendenti degli esposti alle esplosioni di Hiroshima e Nagasaki.

## L'epidemiologia

Lo studio epidemiologico è lo strumento valutativo dello stato di salute di una popolazione, studio che può limitarsi alla semplice descrizione numerica, temporale e geografica (epidemiologia descrittiva) o anche alla valutazione sistematica del sospetto di correlazione dello stato di salute con la presenza di un agente responsabile (epidemiologia analitica). Quest'ultima è pertanto la disciplina medica che studia la distribuzione delle malattie non solo infettive, come un tempo, ma, oggi soprattutto, anche croniche e degenerative. Forse in nessun'altra branca della salute umana sono stati condotti tanti studi di epidemiologia analitica come nel caso degli esposti a radiazioni ionizzanti il cui risultato rappresenta l'elemento più importante per la impostazione dottrinale della radioprotezione. Seguendo allora l'indirizzo epidemiologico analitico, sono stati condotti studi tipo coorte e tipo caso-controllo per cercare di ottenere delle correlazioni non solo causali, ma anche quantitative tra esposizione a radiazioni e incidenza o mortalità oncogena. Le più importanti serie epidemiologiche studiate sono:

- sopravvissuti giapponesi alle esplosioni nucleari,
- pazienti irradiati per fluoroscopia,
- pazienti irradiati per spondilite,
- pazienti irradiati per tinea capitis,
- pazienti trattati con radio per TBC,
- minatori esposti ad alte concentrazioni di radon,
- pittori di quadranti di orologio, etc.

Tra queste, quella più significativa, rappresentativa ed attendibile dal punto di vista statistico è tuttavia quella dei sopravvissuti alle esplosioni nucleari della seconda guerra mondiale. E' a questa coorte pertanto che, in prima istanza, fanno riferimento tutti quegli organismi che eseguono valutazioni sul legame quantitativo tra rischio oncogeno ed esposizione, come l'UNSCEAR (il Comitato scientifico delle Nazioni Unite sugli effetti delle radiazioni atomiche), il NIH (l'Istituto nazionale di sanità degli Stati Uniti), il BEIR (la Commissione scientifica per le radiazioni dell'Accademia Nazionale delle Scienze degli Stati Uniti), l'ICRP (la

Commissione internazionale per le protezioni radiologiche). A corredo e a conferma scientifica del legame causale tra radiazioni e tumore vi sono anche i numerosi studi in vitro e tutta la sperimentazione radiobiologica. Dall'insieme dei vari studi è stato possibile dedurre delle valutazioni quantitative di mortalità oncogena in funzione di dosi medio-alte (maggiori di alcune decine di milliSievert).

Diversa è invece la situazione per quanto riguarda esposizioni a dosi basse in corrispondenza alle quali, non solo non è possibile inferire delle correlazioni quantitative, ma neanche correlazioni causali. Infatti, per mancanza di effetti chiaramente ed univocamente correlabili alle dosi, le indagini e gli studi effettuati non sono riusciti a fornirci indicazioni statisticamente significative di un aumento del rischio oncogeno tra gli esposti.

Al riguardo, vale la pena citare il documento UNSCEAR 2000 secondo il quale "Il numero dei tumori solidi associati con l'esposizione alle radiazioni non è sufficiente per permettere una analisi dettagliata della risposta in dose per molti siti o tipi specifici di tumori. Per tutti i tumori solidi raggruppati la relazione della curva dose-risposta è lineare fino a circa 3 Sv, mentre la curva dose-risposta per la leucemia viene meglio descritta da una funzione lineare-quadratica. Rischi statisticamente significativi per il cancro nel "Life Span Study" (l'Organismo nippo-americano oggi denominato Radiation Effects Research Foundation (RERF), che studia gli effetti delle esplosioni nucleari giapponesi) vengono rilevati per dosi all'organo superiori a circa 100 mSv". Ciò risulterebbe ancora più vero per la leucemia per la quale i risultati dello stesso Life Span Study indicano un rischio relativo inferiore a 1 al di sotto di 20 mSv. Questo risultato di assenza di evidenze di aumento del rischio oncogeno alle basse dosi viene confermato dal raffronto delle statistiche oncogene tra popolazioni soggette a fondi ben diversi di radiazioni.

Mentre nel caso degli effetti stocastici somatici si è potuto far riferimento anche alla epidemiologia analitica, nel caso degli effetti genetici si può far ricorso solo alla radiobiologia sperimentale animale. Müller lavorò per 10 anni prima di poter dimostrare nel 1927 che i raggi X producono realmente mutazioni nella *Drosophila melanogaster*. Sull'azione mutagena delle radiazioni evidenziata sul moscerino della frutta, organismo caratterizzato da solo 4 cromosomi, da intensa capacità riproduttiva e da una veloce successione generazionale, si è impostata una imponente ricerca che ancora oggi conduce ad importanti risultati scientifici. In particolare è stato rilevato che vi è un aumento delle mutazioni trasmesse ai discendenti, che questo aumento è collegato in modo lineare alla dose assorbita dai genitori (siamo sempre a dosi elevate), che l'intensità di radiazione ed il frazionamento della dose sono ininfluenti nella determinazione dell'effetto e che il danno genetico presente nei figli non può essere riparato. Gli stessi esperimenti radiobiologici condotti su altre specie animali hanno confermato l'effetto mutageno sulle cellule germinali e la conseguente trasmissione di tali mutazioni ai discendenti.



Come già detto, non è stato possibile sinora rilevare con metodi epidemiologici un eccesso di malattie ereditarie nella progenie umana di soggetti esposti alle radiazioni ionizzanti rispetto alla progenie di soggetti non esposti. Lo studio radioepidemiologico più importante è stato quello sui discendenti dei sopravvissuti di Hiroshima e Nagasaki, nel corso del quale è stato effettuato un confronto tra 30.000 bambini di cui almeno uno dei genitori era stato irradiato e 40.000 bambini i cui genitori non erano stati irradiati. Nessuna differenza statisticamente significativa è apparsa tra i due gruppi per quanto concerne lo sviluppo psicofisico, le malformazioni di origine genetica ed alcuni indicatori di natura citogenetica e biochimica. I risultati dell'indagine epidemiologica pubblicati nel 1981 sono stati confermati nel 1988. Altre indagini condotte su popolazioni umane, per quanto di minore rilevanza, non hanno analogamente evidenziato alcun aumento di effetti genetici.

Allora, ed è qui un punto molto importante perché sta alla base della impostazione filosofica della radioprotezione, ci si pone in una prospettiva di cautela e si introduce l'ipotesi che quel rapporto di linearità, che è stato riscontrato alle dosi medio-alte tra incidenza neoplastica e dose, possa esser estrapolato anche alle piccole dosi fino a dose zero, senza quindi una soglia al di sotto della quale considerare assenti gli effetti neoplastici. Una prospettiva, questa, di cautela, in quanto è ben evidente, come del resto già evidenziato più sopra, che l'organismo ha delle risorse reattive alla noxa con le quali cerca di opporsi al danno o di ripristinare le condizioni "quo ante"; risorse rappresentate da vari meccanismi di protezione, di riparazione e di eliminazione degli effetti elementari prodotti dalla radiazione.

Analogamente, a dosi elevate le radiazioni ionizzanti possono produrre danni ereditari. Infatti, come accennato, i dati sperimentali su piante ed animali, notevolmente numerosi, ottenuti in condizioni di irradiazione perfettamente definite (dose e rateo di dose), indicano che tali danni possono di fatto insorgere. Per quanto analoghi effetti non siano stati dimostrati a tutt'oggi nella specie umana, tuttavia, sempre per i fini della radioprotezione e nello spirito del principio di cautela, in analogia a quanto si registra nella sperimentazione animale, si assume che anche nell'uomo si possano avere effetti genetici e, anche in questo caso, si suppone che l'incidenza di effetti, calcolata per estrapolazione dalle sperimentazioni sugli animali, sia correlata linearmente con la dose e sia estrapolabile fino a dose zero.

## Il rischio

I termini rischio e pericolo, usati frequentemente come sinonimi, nella realtà hanno un diverso significato non solo semantico, ma anche concettuale, dal momento che nel lessico corrente hanno le seguenti definizioni:

- pericolo: *circostanza o insieme di circostanze da cui può derivare un danno*. Si tratta quindi di un termine che implica un solo riferimento aleatorio: "può derivare" ("pericolo" è, ad esempio, il termine da usare nel caso della vicinanza di un precipizio). Ciò, nel caso nostro specifico, si traduce ad esempio nell'affermare che le radiazioni ionizzanti costituiscono un pericolo di eritema o che l'esposizione alle radiazioni può rappresentare un pericolo per l'induzione di eritema.
- rischio: *eventualità di subire un danno a seguito del verificarsi di circostanze più o meno prevedibili*. Si tratta quindi di un termine più tenue e meno certo del pericolo, che implica un doppio riferimento aleatorio: "l'eventualità" e "la prevedibilità". Ha quindi il significato di probabilità che a seguito del concretizzarsi di eventi fortuiti possa verificarsi un danno. E' quindi come parlare di probabilità di probabilità che si verifichi un danno; ovvero, servendosi del termine "pericolo", il rischio è la probabilità che un pericolo produca un danno. Questo è pertanto il significato giusto da chiamare in causa quando si parla di effetti stocastici delle radiazioni.

Il termine rischio ha diverse accezioni che vanno in qualche modo chiarite. Un primo significato è quello attribuito al termine dal linguaggio comune, quando viene impiegato per indicare la minaccia che accada un evento indesiderato. Con questo significato generico il termine è riferito ai campi d'interesse più svariati, che vanno dall'economia alla salute individuale e collettiva. Chiaramente in questa sede non si fa riferimento a questo significato. Un secondo significato che viene dato a questo termine è quello in uso nelle valutazioni di sicurezza e di prevenzione. Si tratta in questo caso di uno strumento giustificativo dei criteri da porre in atto per prevenire situazioni che possono comportare dei danni anche notevoli all'individuo e alla collettività. In questo contesto si deve far ricorso a due concetti primari: quello di probabilità e quello di gravità delle conseguenze associate all'evento che si vuole evitare. Così il termine "rischio" diviene una entità matematica definita dall'espressione

$$R = p \cdot M$$

in cui  $p$  rappresenta la probabilità che si verifichi quell'evento e  $M$  la gravità espressa ad esempio in termini di effetti sanitari vari opportunamente pesati e sommati. In questo caso alla probabilità può essere assegnato un valore ottenuto dall'analisi storica di quel tipo di eventi e quindi la probabilità assume più pro-

priamente il significato di frequenza di accadimento; ovvero, le si può assegnare un valore ottenuto da una analisi di dettaglio dei mezzi, degli strumenti, dei sistemi e componenti, del personale (inteso come "fattore umano") che vengono coinvolti nell'accadimento dell'evento che si vuole evitare (tipico il caso di un impianto nucleare nei confronti di situazioni incidentali). Anche questa accezione di rischio non è quella che interessa in questa sede.

Un terzo significato del termine "rischio" è quello connesso con le esigenze di protezione. In questo caso il concetto fa capo direttamente alle tecniche statistico-epidemiologiche ed è, almeno in parte, il risultato del raffronto tra popolazioni.

Un primo modo di effettuare questo raffronto è quello che va sotto la denominazione di *studio caso-controllo* (di tipo longitudinale), che consiste nel partire dalla malattia attuale, e risalire nel tempo alle cause che possono averla determinata. In tale tipo di studio si ricerca un gruppo di individui (i "casi") affetti da una determinata patologia. Quindi viene individuato un gruppo di persone simili ai casi, ma non malati, che costituiscono i "controlli". La comparabilità tra i due gruppi è richiesta per tutte quelle variabili (sesso, età, condizioni ed abitudini di vita, etc.) che possono influire sui risultati in maniera "mascherata" e che per questo vengono definiti come "fattori di confondimento". Si passa poi ad individuare nei due gruppi il numero di individui che precedentemente sono stati esposti al fattore presunto causa di quella malattia.

Un secondo modo di effettuare il raffronto su dati epidemiologici è lo *studio trasversale* (cross-sectional) nel quale l'indagine della incidenza della malattia e la misura dell'esposizione avviene simultaneamente. E' un tipo di indagine che non ha trovato molto spazio nel campo delle radiazioni ionizzanti.

Un terzo modo è quello di rilevare la frequenza cumulata nel tempo di un fenomeno morboso (o di morte per causa) in una popolazione specifica esposta, rispetto alla stessa frequenza cumulata in un'altra popolazione non esposta opportunamente identificata e dalle caratteristiche sovrapponibili con la prima. Lo studio parte quindi dall'esposizione e ne identifica nel tempo gli effetti. E' questo un altro modo di condurre una ricerca epidemiologica definita come *indagine longitudinale di tipo "coorte"* ed è forse lo strumento tecnico che offre la più facile via alla comprensione ed alla definizione del concetto di rischio. Nel caso specifico si tratta di selezionare un gruppo di individui esposti ad un possibile agente patogeno, seguirli nel tempo, ed individuare il numero di soggetti che via via vanno incontro a malattia (incidenza) o muoiono (mortalità) per una data causa. La incidenza o la mortalità risultante va quindi confrontata con l'analogo indice epidemiologico riscontrato nello stesso tempo tra gli individui di una popolazione non esposta, e, per il resto, dalle caratteristiche del tutto confrontabili con quelle del gruppo in studio. Anche in questo caso, per la correttezza dell'impostazione e conduzione delle indagini, deve essere predisposto un protocollo ben predefini-

to, formulato con criteri finalizzati ad eliminare i possibili effetti confondenti (come l'accurata scelta delle popolazioni da raffrontare), con valutazione delle dimensioni del campione (onde avere statistiche sufficientemente robuste), con l'impiego di strumenti e modalità di raccolta dei dati che offrano le migliori garanzie di accuratezza, veridicità e scientificità, con la valutazione dei dati stessi in merito alla ripetibilità ed alla validità, ed infine con una analisi dei dati improntata ad obiettività e neutralità rispetto alle possibili tesi alternative.

Ma la definizione di rischio è frutto non solo di questo approccio statistico epidemiologico, ma in parte è anche il risultato di ipotesi affidate alla logica dei fatti o ad esigenze di modellazione dei medesimi, o alla introduzione di ipotesi che, anche se non ritenute sempre e da tutti verosimili, sono in ogni caso improntate al principio di prudenza, principio che per i fini di protezione non è in ogni caso in discussione, *salvo quando la sua applicazione produce più male che bene*. L'organismo di vertice che valuta e propone formalmente il modello valutativo è l'International Commission on Radiological Protection (ICRP). Nel valutare il rischio questa Commissione parte dalla constatazione di una correlazione lineare tra esposizione a dosi medio-alte e mortalità oncogena, suppone l'assenza di una soglia, introduce un fattore di riduzione dalle alte alle basse dosi, propone un criterio di proiezione nel tempo, formula una interpretazione analitica tra esposizione acuta ed esposizione prolungata nel tempo, etc. Per cui il modello diviene uno strumento valutativo del rischio, e risulta solo in parte legato alle evidenze epidemiologiche e molto alle ipotesi, ai modelli ed ai criteri di cautela. Così, dal rischio valutato attraverso lo studio di varie serie epidemiologiche, si è passati al concetto di rischio proiettato nel tempo futuro, inteso come attesa di un evento oncogeno possibilmente conseguente ad esposizione come fatto la cui probabilità risulta dal coacervo dei risultati delle analisi, delle ipotesi, dei modelli, dei trasferimenti tra popolazioni, della proiezione nel corso della vita e del criterio di cautela. In tale modello, che l'ICRP dice esplicitamente finalizzato ai fini della radioprotezione, se si indica con  $D$  la dose ricevuta, con  $\alpha$  un coefficiente detto brevemente "fattore di rischio", ricavato adottando i criteri di cui sopra e denominato, più formalmente, "coefficiente nominale di probabilità per tumori mortali", il rischio viene valutato come

$$R = \alpha \cdot D.$$

In base a quanto sopra, i valori dei "fattori di rischio" suggeriti dalla ICRP nella Pubblicazione n. 26 del 1977, e successivamente rettificati nella successiva Pubblicazione n. 60 del 1990, sono quelli indicati nella tabella 15. L'incremento dei fattori di rischio è essenzialmente dovuto a due ragioni: la revisione della dosi-

metria degli esposti alle esplosioni e l'applicazione del "modello moltiplicativo" nella proiezione del rischio più "conservativo" per i fini della radioprotezione.

Tabella 15: Coefficienti nominali di rischio per tumori mortali nella popolazione ( $10^{-2}$  Sv<sup>-1</sup>)

Organo o Tessuto	ICRP 26 (1977)	ICRP 60 (1990)
colon	-	0.85
esofago	-	0.30
fegato	-	0.15
mammella	0.25	0.20
midollo rosso	0.20	0.50
ovaio	-	0.10
pelle	-	0.02
polmone	0.20	0.85
stomaco	-	1.10
osso compatto	0.05	0.05
tiroide	0.05	0.08
vescica	-	0.30
tessuti rimanenti	0.50	0.50
TOTALE	1.25	5.00

Considerazioni del tutto analoghe valgono per quanto riguarda il rischio connesso con gli effetti genetici nella specie umana. Si suppone inoltre, adottando anche in questo caso un principio di prudenza per i fini della radioprotezione, che il rischio genetico nell'uomo, mancando i dati epidemiologici, possa essere estrapolato dalle specie animali. Quindi, anche per questo tipo di effetti l'ICRP, per i fini della radioprotezione, assume che in tutte le generazioni future vi sia la probabilità di comparsa di un effetto genetico grave ogni 100 nati vivi per ogni Sievert di radiazione ricevuta dai genitori. Si suppone altresì che vi sia una correlazione lineare e senza soglia tra comparsa di tali effetti e dose ricevuta dai genitori.

La modellazione del rischio stocastico ora indicata riguarda valutazioni di tipo proiettivo "a priori", cioè fatte prima dell'esposizione, nel senso che, nota la dose che sarà ricevuta, consentono di stimare la probabilità di andare a morte nel corso della vita futura a causa di un tumore radioindotto. Si tratta di valutazioni che sono certamente lecite per i fini della radioprotezione ed in particolare quindi negli interventi di giustificazione e di ottimizzazione, nelle analisi previsionali di rischio in vista dell'inserimento di una nuova "pratica" come si dirà tra poco. Va invece detto in maniera esplicita ed enfatica che questo stesso strumento non può venir applicato acriticamente e semplicisticamente nelle situazioni "a posteriori" per stimare i morti per tumore in conseguenza di situazioni incidentali senza incorrere nel sospetto di far dell'allarmismo o addirittura del terrorismo psicologi-

co, magari per fini strumentali. Le situazioni post-incidentali sono infatti materia di radiopatologia e non di radioprotezione.

### La dottrina di radioprotezione

Il sistema di riferimento concettuale entro il quale si muove la radioprotezione viene tracciato dall'ICRP, che periodicamente emana delle pubblicazioni dal titolo "Raccomandazioni". Le prime Raccomandazioni del 1959, e le successive fino al 1977, erano dirette essenzialmente a eliminare la possibilità che si verificassero effetti di tipo deterministico. Per la loro naturale specificità e per l'evidenza di una soglia ben individuabile, gli effetti deterministici non costituiscono oggetto di particolari modelli ai fini della prevenzione: è sufficiente limitare i livelli di esposizione al di sotto dei valori soglia per avere la garanzia della loro impossibilità di manifestarsi. La stessa impostazione dottrinale e politica non può essere messa in atto nei confronti degli effetti stocastici, la cui correlazione con l'esposizione alle radiazioni non è in discussione, ma per i quali le evidenze sono limitate alle esposizioni medio-alte. Pertanto il sistema di riferimento conteneva un unico principio: quello della limitazione della dose al di sotto di un valore limite valutato, con criteri "tossicologici", in un decimo della soglia di comparsa di detti effetti. A mano a mano che il dato epidemiologico della induzione oncogena è divenuto evidente, quell'unico principio è stato accompagnato da un secondo: il principio ALARA (As Low As Reasonable Achievable), per ottenere anche lo scopo di ridurre la probabilità degli effetti stocastici. Ma il riferimento concettuale si è meglio precisato e definito con la Raccomandazione del 1977 che ha introdotto il "sistema di limitazione delle dosi" basato sul tripode: giustificazione, ottimizzazione e limitazione. L'ultima Raccomandazione, che risale al 1990, rileva che le azioni umane nei confronti delle radiazioni si muovono in due direzioni tra loro in antinomia: da una parte, quelle che, per soddisfare esigenze di sviluppo e di progresso, introducono nuove sorgenti di esposizione (le pratiche); e, dall'altra, quelle che l'uomo mette in atto sulle fonti di esposizione già esistenti per ridurre l'esposizione (gli interventi). Esempi di pratiche possono essere quelle della Francia quando decide di costruire nuovi reattori nucleari, mentre esempi di interventi potrebbero essere quelli messi in atto per ridurre l'esposizione dovuta all'incidente di Chernobyl (qualora fossero stati decisi in aderenza al principio di giustificazione di cui si parla più oltre).

Le precedenti Raccomandazioni contenute nella Pubblicazione 26 proponevano il "sistema di limitazione delle dosi", sistema che non contemplava entrambe le situazioni espositive ora ricordate. Il cambio di denominazione in "sistema di protezione radiologica" introdotto dalla pubblicazione del 1990 sottende due fatti: (i)

enfaticamente il concetto secondo il quale la limitazione della dose non esaurisce le attività di radioprotezione, e (ii) l'esigenza di adattabilità ai vari contesti espositivi. Ad esempio, non appare infatti ragionevole applicare i limiti di esposizione più sopra indicati alle condizioni post-incidentali o al problema del radon nelle abitazioni: si potrebbero infatti causare degli effetti sanitari certi e più gravi di quelli che si vorrebbe evitare. La necessità quindi di rendere più malleabile ed adattabile la dottrina già elaborata nel 1977 alla specifica casistica ha portato la Commissione ad individuare un doppio binario lungo il quale adattare in maniera ragionevole la prevenzione del rischio radiologico.

Si avrà quindi un sistema di protezione radiologica nelle pratiche e un sistema di protezione radiologica negli interventi, sistemi costituiti da principi che, ancorché eguali nella denominazione (giustificazione, ottimizzazione e limitazione), poggiano su argomentazioni logiche e contesti valutativi diversi: si potrebbe dire commettendo un errore di eccesso interpretativo e solo al fine di rendere più evidente la differenza tra le due logiche, che il sistema nelle pratiche è più fondato su considerazioni socio-economiche, mentre il sistema negli interventi è più basato su considerazioni socio-sanitarie. E' evidente però che in entrambi i casi il fine ultimo è sempre il raggiungimento di un bene di ordine sanitario. Così nella giustificazione della pratica si richiede un raffronto tra beneficio e detrimento, mentre nella giustificazione degli interventi si richiede che questi "producano più bene che male".

Analogamente, per quanto riguarda l'ottimizzazione della protezione, si richiede che l'entità della dose individuale, il numero di persone esposte e la probabilità di incorrere in esposizioni incidentali sia la più bassa possibile, tenendo conto di fattori economici e sociali. E' questo un principio che consente di non esasperare la corsa all'abbassamento del rischio verso il valore zero, in quanto pone come limite per ogni pratica la dose in corrispondenza alla quale si ha il beneficio più alto. Ciò sottintende la necessità di impiegare una unità di misura unica, che è poi quella economica, per le varie grandezze che entrano in gioco sia nel processo di giustificazione che in quello di ottimizzazione. Lo stesso principio applicato invece agli interventi si preoccupa che la riduzione della dose produca il beneficio più grande ragionevolmente ottenibile.

Il terzo principio riferito alle pratiche richiede l'imposizione di un limite superiore alla dose individuale o, nel caso delle esposizioni potenziali, un limite superiore al rischio. I valori scelti a tal fine dalla Commissione derivano non più da considerazioni "tossicologiche" ma da valutazioni demoscopiche basate sulla "accettabilità" sociale di un nuovo rischio introdotto a fronte del beneficio che da tale introduzione deriva.

Con gli accennati arricchimenti concettuali che consentono la diversificazione applicativa alle diverse occasioni espositive, i tre principi del sistema di protezio-



ne radiologica acquistano una dimensione nuova atta a proiettare il sistema stesso anche al di fuori della stretta pratica radioprotezionistica. L'insieme delle ipotesi, dei coefficienti di rischio, della monetizzazione della dose e del sistema di protezione radiologica costituiscono senza dubbio una costruzione filosofica elegante ed utile per i fini della radioprotezione, ma il sistema si presta a esasperazioni interpretative ed applicative che possono comprometterne l'applicabilità. Una facile esasperazione utile per terrorizzare e difficile da capire se viene travisato lo spirito del sistema è l'impiego della dose collettiva valutata come somma di infinitesime dosi estese ad un numero enorme di individui e proiettata a centinaia di anni nel futuro. Il risultato così ottenuto viene quindi ascientificamente impiegato come mezzo per predire il numero di morti cui quella dose darà luogo. E' questo certamente un uso strumentale ed improprio del sistema e dei coefficienti di rischio che non trova riscontro nelle finalità della radioprotezione che sono quelle per le quali questa costruzione è stata formulata. (Proprio l'uso strumentale della ipotesi lineare senza soglia unito al concetto di dose collettiva è stato un utile e determinante strumento ausiliare per raggiungere lo scopo dello smantellamento delle centrali nucleari in Italia).

E' da prima della Pubblicazione n° 60 del 1990 che il mondo scientifico è preoccupato per l'impostazione sempre più puntigliosa che viene data alle basi dottrinarie della radioprotezione nei confronti del rischio stocastico: ciò ha infatti portato a una sempre più esasperata, fideistica e integralista accettazione dogmatica dei suoi principi, dimenticando che alla base non vi sono verità scientifiche, ma ipotesi finalizzate alla prevenzione.

Si ricorderà come i contrasti più marcati siano sorti a suo tempo, proprio in riferimento alle posizioni della Pubblicazione 60 ed in vista di un suo recepimento nelle Direttive comunitarie, con la prestigiosa Accademia delle Scienze Istituto di Francia (ASIF). Questa Accademia non condivideva l'abbassamento dei limiti di dose in grazia della sola ipotesi della estrapolazione lineare associata all'altra ipotesi dell'assenza di una soglia per gli effetti stocastici. Il dibattito si è protratto per qualche tempo, tra vari gruppi di persone, attraverso note e commenti nelle riviste specialistiche, fino a che il Presidente dell'ICRP, il Prof. R. Clarke, diffuse un documento nel quale indica in via ipotetica una impostazione del quadro di base diversa rispetto all'attuale; scardinando il "Sistema di protezione radiologica", Clarke propose di abrogare alcune entità ritenute responsabili delle difficoltà in cui ci si veniva a trovare a seguito di una applicazione pedissequa ed acritica dei principi. Per superare tutto ciò secondo il Presidente dell'ICRP la panacea sarebbe quella di:

- Introdurre il sistema della dose "controllabile", una serie cioè di "livelli" di dose (anziché limiti) calibrati con riferimento al fondo naturale di 3 mSv, che possono essere ragionevolmente tenuti



sotto controllo con un qualsiasi strumento. Da questa definizione sfuggirebbe solo la dose da fondo naturale a livello del suolo che evidentemente è una quantità fissa non modificabile.

- Adottare il principio che se il rischio di danno sanitario all'individuo più esposto è insignificante ("trivial") allora è insignificante anche il rischio complessivo indipendentemente da quante persone ne sono coinvolte. Ciò riporta quindi l'enfasi e l'attenzione primaria alla protezione individuale e porta ad eliminare il concetto di dose collettiva.
- Abbandonare il principio di giustificazione dal momento che la radioprotezione non ha un ruolo di rilievo nelle decisioni politiche, decisioni per facilitare le quali questo principio era appunto stato formulato (si può sottolineare questo aspetto, ricordando l'esempio italiano in merito alla produzione di energia elettrica con centrali alimentate con combustibili fossili al posto di quelle nucleari).
- Trasformare l'acronimo ALARA, che sta dietro il principio di ottimizzazione, in ALARP sostituendo il termine "Achievable" con "Practicable", fatto che solo chi conosce bene l'inglese può compiutamente apprezzare.
- Abbandonare la distinzione tra "pratiche" ed "interventi".

Tutto ciò consentirebbe tra l'altro di eliminare le distinzioni che ora vengono fatte tra dosi occupazionali, dosi mediche ed esposizione del pubblico. Con queste impostazioni il "Sistema di Protezione Radiologica" si ridurrebbe al seguente:

- controllare la dose all'individuo rappresentativo del gruppo più esposto, nel senso di far sì che non venga superato il "livello" di azione (nuova denominazione di limite di dose);
- assicurarsi che la dose risultante sia ALARP.

La proposta ha quasi due anni di vita ed ha stimolato un intenso dibattito in Paesi dove l'impiego del nucleare dà effettivamente un senso alla discussione, proprio perché il principio di giustificazione non è un principio di scelta politica ma un tema di interesse limitato agli specialisti di radioprotezione. In ogni caso, sulle posizioni raccolte, l'ICRP farà le sue considerazioni in vista dell'emanazione di un nuovo testo dal titolo "Recommendations", la cui pubblicazione si attende entro il 2005.

La veste attuale della radioprotezione è essenzialmente frutto dell'impiego delle radiazioni per la produzione di energia elettrica e quindi, avendo rinunciato al nucleare, il problema in Italia ci tocca in modo marginale, per cui in Italia abbiamo trascurato ogni approfondimento del tema della radioprotezione e, in particolare:

- il reale significato delle basi scientifiche degli effetti alle piccole dosi;
- i limiti di applicazione del modello lineare senza soglia;
- lo spostamento del riferimento di base dal rischio alla dose;
- la reimpostazione del concetto di rischio per gli effetti stocastici e la precisazione circa la conseguente liceità d'extrapolazione e d'impiego di tale concetto alle varie situazioni e alle varie problematiche connesse con l'impiego delle radiazioni ionizzanti, in particolar modo con quelle che con la Radioprotezione non hanno nulla a che vedere.

Un altro punto meritevole di discussione potrebbe essere quello di adottare il criterio di assegnare all'unità di dose, oltre un coefficiente di detrimento com'è adesso, anche un "coefficiente di beneficio" per le varie "pratiche": il raffronto sarebbe molto più facile e alla portata di tutti e, se accettato con lo stesso fideismo, non consentirebbe più l'impiego del primo a fini strumentali. D'altra parte, se analizziamo il pensiero della ICRP espresso nella Pubblicazione 73 sulla protezione del paziente, il criterio di dare per scontata la "giustificazione" dell'impiego delle radiazioni per fini medici in senso lato, sta proprio ad indicare che l'ICRP ha fatto per tutti, responsabili politici compresi, una valutazione sulla base dell'esperienza pregressa che consente di assegnare all'unità di dose un "coefficiente di beneficio" maggiore del coefficiente di detrimento. Una impostazione in tal senso consentirebbe, tra l'altro, di uniformare il valore monetario assegnato all'unità di dose ora variabile da Paese a Paese, come se il valore della vita umana fosse una variabile legata al contesto socio-economico locale.

Altro punto critico è certamente quello della limitazione, non tanto per il principio in sé quanto per il valore numerico assegnato al limite. Il significato biologico dei 20 mSv infatti non corrisponde affatto al significato che il limite ha in ambito giuridico. Se deve restare questo valore è molto meglio chiamare il principio come "principio di livellazione" ed indicare il valore come "livello di riferimento" di buona tecnica radioprotezionistica, togliendo ad esso tutto il significato deterrente che viene attribuito al "limite" dal punto di vista sia semantico, sia psicologico sia, infine, legale.

### Effetti psicologici

Si è detto sopra che nella trattazione canonica della patologia da radiazioni ionizzanti tali effetti non sono presi in esame. Tuttavia fatti più o meno recenti connessi con situazioni incidentali, dalla serietà e gravità molto diversa (ad es., gli

incidenti di TMI, di Chernobyl, nei trasporti di materiale radioattivo, le accidentali irradiazioni di singoli individui, etc.) hanno dimostrato che il solo termine "irradiazione" è capace di stimolare negli individui, ma soprattutto a livello di gruppo, una forte componente emotiva nelle valutazioni del rischio, che genera di per sé stessa una sintomatologia a volte evidenziabile anche sul piano clinico. Sembra pertanto giusto inserire tra gli effetti delle radiazioni ionizzanti anche questo tipo di effetti che, tra l'altro, condizionano in maniera determinante anche la risposta collettiva alla proposta di installazione di attività nucleari nel territorio. E' infatti ragionevole pensare che l'eziopatogenesi di questa avversione risieda in buona parte in interessi di tipo economico, sociologico e politico almeno a livello di quei gruppi economici e politici che, in omaggio a tali interessi, sono in grado di orientare l'opinione pubblica. Ma a livello dell'uomo della strada la diffidenza ed il timore con la quale questi avverte il rischio da radiazioni, hanno una giustificazione essenzialmente a livello psicologico. Tale atteggiamento ci sembra attribuibile a una o più delle seguenti motivazioni:

- Associazione mentale conscia o inconscia con la tragedia di Hiroshima e Nagasaki. Allora, all'aggettivo "nucleare" non si dà il significato denotativo che esso obiettivamente ha, ma un significato connotativo che evoca sentimenti ed esperienze sinistre.
- Incapacità, per mancanza di un organo di senso specifico, di percepire la presenza della noxa radiogena che, per questo suo comportamento "fantasma", viene assimilata a "spirito del male".
- Difficoltà obiettiva di comprensione di un linguaggio esoterico come quello fisico e tecnologico che sta dietro il "nucleare" e le radiazioni, e quindi "rifiuto per incapacità di comprensione".
- Adozione, nella impostazione della filosofia di radioprotezione, di una cautela eccessivamente discriminante rispetto ai criteri di prevenzione adottati nei confronti di altre noxae patogene, talché la radioprotezione, da "fiore all'occhiello" della prevenzione, finisce per divenire un motivo di remora nell'accettazione del rischio da radiazioni.

Insomma, il timore, sproporzionato rispetto al reale oggetto, degli effetti della radiazione genera, da solo, una reazione patologica di tipo fobico (radiofobia). Ma non interessa qui evidenziare le motivazioni degli aspetti di rifiuto aprioristico del nucleare, quanto piuttosto la motivazione del fatto che il soggetto o il gruppo che per motivi di lavoro o per situazioni geografiche si trovi coinvolto in una situazione incidentale, manifesta, anche in assenza di una causa (irradiazione nulla) o anche in presenza di una causa, ma inefficace dal punto di vista delle

induzione di un danno biologico riscontrabile e ad essa correlabile, una sintomatologia evidenziabile anche sul piano clinico. Infatti fino ad oggi ogni evento "cum" o "sine materia" (cioè con dose o meno) che abbia coinvolto elementi della popolazione, ha sempre indotto uno stato di stress psicologico, di panico, di allarmismo collettivo e conseguenti fenomeni psicosomatici.

Non si può certo affermare che vi sia un quadro clinico dalla connotazione ben chiara, sulla base del quale effettuare una descrizione nosologica univoca. La maggior parte di tali sintomi è comune anche alla sindrome prodromica della malattia acuta da raggi che precede una delle tre sindromi di panirradiazione acuta: l'emopoietica, la gastroenterica e la neurologica, sopra brevemente indicate. Tali sintomi suddivisi in psicosomatici e comportamentali sono riportati nella tabella 16.

Tabella 16: Segni e sintomi di possibile origine psicologica

Sintomi psicosomatici	Sintomi comportamentali
anoressia	ansia
nausea	insonnia
vomito	agitazione
diarrea	apatia
cefalea	irritabilità
astenia	abulia
impotenza	demoralizzazione
	sfiducia nelle autorità

In analogia, e per completare il quadro nosologico della malattia acuta da raggi, si potrebbe quindi inserire una sindrome a sé stante che, per le caratteristiche eziopatogenetiche, potrebbe essere denominata "sindrome psicologica da raggi". Nel caso di situazioni incidentali che coinvolgono poi la popolazione, questa paura, se protratta nel tempo, rappresenta uno "stressore" cronico collettivo che si amplifica nel contatto sociale con gli altri e che orienta ad accettare solo le informazioni di tipo irrazionalmente catastrofico, piuttosto che quelle ragionevolmente rassicuranti che dovrebbero essere diffuse dagli organismi istituzionali preposti. Stressore che, passando da individuo ad individuo, ritorna al soggetto iniziale con una riverberazione ciclica autoamplificantesi della paura che si ripercuote sull'atteggiamento collettivo. L'esperienza di Chernobyl, nella quale questa situazione lascia strascichi a distanza di oltre 10 anni, ha suggerito l'individuazione di un quadro nosologico nuovo cui è stata assegnata la denominazione di "disordine da stress ambientale cronico" o nel caso di TMI di "neurosi da polluzione nucleare".

Quindi alla base di queste forme patologiche individuali e collettive vi è indub-

biamente il modo particolare di percepire il rischio da radiazioni. I fattori che sostengono questo modo di percepire sono essenzialmente sociali e culturali, come le numerose ricerche a carattere psicometrico hanno dimostrato. Il rischio da radiazioni trova il primo posto nella scala di gravità per molte categorie sociali con riferimento a punti di vista precostituiti che queste categorie si sono fatte in merito alla volontarietà dell'accettazione, alla propria conoscenza del rischio, alla controllabilità da parte propria, al terrore indotto, ai benefici personali conseguenti all'accettazione, al numero di morti causati nei disastri, alla osservabilità della causa, agli effetti generazionali, alla possibilità personale di mitigazione degli effetti, etc.

In un quadro di questo genere ben si capisce allora l'importanza dell'informazione, il modo con cui viene fornita e il livello di credibilità della fonte. L'informazione nei confronti di una situazione di rischio, ed in particolare in vista e nel corso di situazioni di emergenza, va intesa nella sua triplice accezione di informazione come formazione di base nella comprensione del rischio, di informazione come educazione nel modo di affrontare il rischio ed infine di informazione attuale nella gestione dell'emergenza in atto, cioè del rischio divenuto pericolo attuale. Specialmente nei confronti della popolazione il rischio radiologico ha ricevuto soltanto quest'ultimo tipo di informazione: quella attuale che deve essere fornita nel corso della situazione di emergenza.

Il modo poi con cui l'informazione attuale viene gestita e diffusa ha importanza basilare nell'orientare l'opinione pubblica e quindi la reazione individuale e di gruppo nel modo di percepire la situazione in atto. In questo, la situazione post-Chernobyl è stata estremamente istruttiva. Un primo aspetto negativo da evitare è la pluralità delle fonti di informazione. Questa, se da una parte rappresenta un indispensabile strumento di democrazia, dall'altra costituisce strumento di distorsione, di disorientamento e di sfiducia per la popolazione, specialmente se le fonti plurime sono fonti policentriche ufficiali e contrastanti tra loro. Un secondo aspetto deleterio, e pertanto da scoraggiare, è il protagonismo in nome del quale ogni persona che vuole emergere e che ha avuto un pur minimo rapporto con la materia in interesse si sente autorizzata a dire la sua, improvvisandosi come esperto e come tale esibendosi attraverso l'intera gamma dei mass-media. Per restare nell'ambito delle radiazioni, l'incidente di Chernobyl ha fornito un eloquente esempio, come del resto la recente contesa sulle responsabilità dell'uranio impoverito. Un terzo elemento è il populismo sfruttato per fini economici o politici in opposizione al contesto di governo che si vuole scalzare, populismo in nome del quale sapienti e melliflui imbonitori fanno leva sulla paura della gente per scatenare malumori, rancori e furori contro la causa della paura e tramite essa contro chi ha malgestito quella causa e proclamando quindi la necessità di passare ad alternative più sicure e più responsabili. Un quarto elemento è il pietismo che, tramite

l'informazione, viene sollecitato nella gente attraverso immagini e descrizioni di contesti e situazioni di sofferenza (come malattie neoplastiche, malnutrizioni, etc.) che vengono presentate come frutto e conseguenza dell'evento disastroso con il quale verosimilmente nulla hanno a che vedere, ma rafforzano l'avversione verso ciò che è considerata la causa di quella sofferenza. Un quinto elemento è il pluralismo lessicale che, ad esempio, attraverso il sovrapporsi di unità di misura non contrastanti, ma comportanti dimensioni numeriche estremamente diverse, costituisce ed ha certamente costituito un mezzo di amplificazione psicologica della paura.

Le fonti di informazione, specialmente nel corso di una situazione incidentale, non godono tutte di uno stesso livello di credibilità da parte della popolazione. Gli stessi operatori professionali di informazione dimostrano di non credere agli scienziati che da sempre si occupano del tema specifico (gli scienziati nucleari non sono credibili quando parlano di rischi di Chernobyl o di uranio impoverito) anche se parlano per conto di organismi al di sopra di ogni sospetto (come è il caso della Commissione scientifica delle Nazioni Unite) per prestare più fede ai politici o agli scienziati improvvisati, tanto più quanto più quest'ultimi riescono a evocare la paura e la sensazione dell'incognito e della tragedia. La cosa diviene ancora più critica quando lo scienziato improvvisato è un camice bianco: il medico, infatti, gode di maggiore credibilità, e il medico che fa il catastrofista ha molto più credito del medico che cerca di assicurare. Un medico dovrebbe essere ben conscio di questo e dovrebbe parlare solo quando sa di sapere; i danni che un medico disinformato può provocare parlando sono ben più gravi di quelli che può causare una qualsiasi altra figura professionale e ciò proprio per il credito maggiore che gode la classe medica soprattutto, come evidente, in tematiche che riguardano la salute. I 150.000 aborti post-Chernobyl procurati per motivi "eugenetici" in Europa hanno sicuramente quest'origine.

### La normativa

Nel quadro ora descritto anche l'impostazione della normativa di protezione, sia lavorativa che socio-ambientale, dalle radiazioni ha seguito un criterio di privilegio e di maggior rigore nei confronti di altre noxae lavorative ed ambientali: vi è infatti una normativa a parte che contribuisce a fare delle radiazioni un rischio singolare, dal quale difendersi con criteri di prevenzione "dedicati". Vi è una normativa per tutti gli agenti di rischio che vengono definiti "convenzionali", che oggi è rappresentata essenzialmente dal D.L. 626/94 ed una normativa specifica D.L. 230/95 dedicata solo alle radiazioni ionizzanti che vengono pertanto intese come agenti non convenzionali da trattare con una attenzione tutt'affatto partico-

lare, come se l'uomo non convivesse da sempre con esse. Questo è indubbiamente un altro elemento che si aggiunge a quelli più sopra indicati tra le cause che influiscono nel meccanismo psicologico con cui viene avvertita la "singolarità" del rischio da radiazioni.

Se poi ci si addentra nello studio della normativa ci si accorge che questa è di difficile lettura, di difficile interpretazione, di difficile applicazione e che in sostanza è fatta più per dissuadere dall'uso delle radiazioni anziché atta a favorirne e facilitarne un impiego avveduto, come dovrebbe essere lo spirito di una legge di regolamentazione dell'impiego di uno strumento da cui l'umanità ha tratto indubbi vantaggi, in primo luogo dal punto di vista medico.

Se già la normativa europea è particolarmente attenta alle radiazioni per via di un Trattato che a suo tempo aveva essenzialmente lo scopo di consentire uno sviluppo economico-industriale equilibrato ed armonizzato tra i paesi firmatari, il recepimento nella nostra normativa ne ha ulteriormente esasperato gli aspetti burocratico-amministrativi in maniera ingiustificata ed in ogni caso in modo tale da contribuire alla creazione di un disequilibrio nei confronti degli altri firmatari. La normativa è così rigida da rasentare posizioni ascientifiche ed anti giuridiche. Tra queste se ne possono citare alcune.

La legislazione, non solo quella nazionale, si è accorta che era discriminante l'atteggiamento assunto nei confronti delle radiazioni naturali ed ha dovuto adottare una specie di "principio di equivalenza" per motivi di non faziosità nei confronti delle radiazioni prodotte dall'uomo. Il D.L. 241/2000 ha introdotto quindi i criteri di protezione da quest'altra fonte di esposizione in una forma molto complessa, criteri che dovrebbero (ma certamente non lo saranno) entrare in vigore entro due-tre anni. Ma, a parte l'aspetto della complessità, la discriminazione è rimasta: l'esposizione dovuta a sorgenti prodotte dall'uomo è "limitata" ad 1 mSv/a, mentre quella dovuta a radon è "livellata" a 3 mSv/a, ristabilendo una disparità certamente non motivata da ragioni scientifiche, ma solo da ragioni di convenienza sociale per non "sfrattare da casa" una fetta della popolazione. La giustificazione è che nel primo caso si tratta di pratiche e nel secondo di interventi, il che certamente non rappresenta una ragione scientifica e non risponde neanche al rigido criterio di cautela al quale la normativa per altri versi si ispira.

Nonostante che la ICRP (massimo organo scientifico e normatorio nel campo delle radiazioni ionizzanti) nella Pubblicazione 60 del 1990 abbia esplicitamente dichiarato di non raccomandare più una classificazione degli esposti, tuttavia sia le Direttive Comunitarie del 1996, che il D.L. 230/95, prevedono la suddivisione in classi degli esposti: lavoratori di categoria A e lavoratori di categoria B. La prima comprende i lavoratori esposti "suscettibili di ricevere" una esposizione globale di equivalente di dose efficace annua superiore a 6 mSv fino a 20 mSv; la seconda, quella dei lavoratori di categoria B, comprende invece coloro che si



situano nella fascia di dose più bassa che va da 1 mSv a 6 mSv all'anno. Questa suddivisione viene affidata dal D.Lgs. 230/95 all'"Esperto Qualificato". Costui già trova difficile effettuare questa separazione, nonostante il suo compito sia basato su grandezze fisiche misurabili, in quanto è chiamato a confrontarsi con delle dosi "attese". Ciò evidentemente comporta una "arbitrarietà valutativa" che discende da fatti circostanziali attuali e pregressi, ma anche dalle difficoltà concrete di discriminare chi "è suscettibile di ricevere", nell'anno a venire, 5 mSv e chi invece "è suscettibile" di riceverne 7. Quindi è già insito nelle cose che questa classificazione presenta un grande rischio di aleatorietà e di discrezionalità che, date le circostanze del nostro ordinamento del lavoro, tutto può dare meno che le certezze che il diritto romano si vanta di perseguire: si può infatti verificare "ex post" che il lavoratore classificato A riceva una dose inferiore a 6 mSv e che viceversa un lavoratore B abbia ricevuto dosi maggiori di 6 mSv nel corso dell'anno.

Incongruenze, discriminazioni immotivate, oltre a maggiori difficoltà rispetto a quelle sopra segnalate, si rilevano invece in merito alla sorveglianza medica. Per quanto riguarda l'incongruenza va evidenziato che vi è un aspetto scientifico-dottorinario che è intimamente connesso con il concetto di rischio biologico. La suscettibilità individuale alle malattie è una delle più manifeste evidenze cliniche raccolte dalla medicina nel corso dei secoli. Ma certamente la caratteristica preminente degli effetti delle radiazioni ionizzanti a basse dosi, effetti ai quali è stata assegnata la denominazione di stocastici in quanto colpiscono a caso gli esposti, ha evidentemente a che vedere con la variabilità individuale. Le evidenze epidemiologiche già di per sé fanno rilevare incidenze diversificate tra maschi e femmine o differenze, a volte anche notevoli, nella incidenza di certe particolari forme neoplastiche tra popolazioni diverse. Ed è proprio per questa ragione che l'ICRP nel proporre i coefficienti "nominali" di rischio più sopra indicati ha fatto riferimento alle condizioni della mortalità oncogenica di base riscontrata in diverse popolazioni; ed è in relazione a questa variabilità che detta Commissione ha impiegato l'aggettivazione "nominali" per indicare appunto che si tratta di valori mediati tra diverse condizioni di variabilità etnica, sociale, anagrafica. L'adozione dello stesso modello moltiplicativo da parte della ICRP tiene conto di un particolare aspetto legato alla suscettibilità individuale: l'età. In base a quanto sopra, pertanto, il coefficiente nominale di rischio è, nella valutazione relativa al caso singolo, una funzione di vari parametri legati all'individuo (sesso, età), all'esposizione, alla popolazione di appartenenza. Ma accanto a questi non si possono dimenticare le correlazioni legate a particolari condizioni ereditarie, a particolari abitudini di vita, a particolari condizioni lavorative, e quelle connesse con particolari noxae sinergiche. Ciò farebbe pensare che alle basse dosi espositive ammesse, se classificazione deve esserci, questa più che su labili indi-



ci di dose "attesa", dovrebbe esser basata sulle concrete caratteristiche biologiche dell'individuo.

Da quanto ora detto una diversa tutela sanitaria differenziata per il gruppo A e B darebbe luogo a immotivate discriminazioni, in quanto da un punto di vista operativo, il rigore scientifico richiede di tutelare indistintamente sia gli A che i B da un rischio che "ex ante" è della stessa entità, dipendendo le differenze di entità non tanto dalla dose, quanto piuttosto dalla personale suscettibilità. Data questa inesistente separazione di rischio, diventa poi del tutto assurdo ammettere che per la sorveglianza medica di questi raggruppamenti di lavoratori si configurino due categorie professionali di medici con qualificazione e formazione potenzialmente diversa. Il D.L. 230/95 infatti affida la sorveglianza medica degli esposti di categoria B ad un Medico Competente, cioè a un medico che potrebbe non avere le necessarie conoscenze e che comunque non ha sostenuto l'esame specifico in materia di sorveglianza sanitaria e di rischi connessi con l'esposizione a radiazioni, esame che, invece, il Medico Autorizzato deve sostenere per esser tale. Ciò potrebbe significare una diversa e minore protezione per l'esposto di categoria B non motivata da una effettiva diversità nella entità del rischio. Un altro aspetto inconsistente per motivazioni, e immotivatamente discriminante dal punto di vista operativo, è la periodicità delle visite. Infatti mentre si richiede la sorveglianza medica con visita semestrale per i lavoratori di categoria A, si richiede la sorveglianza medica con visita annuale per i lavoratori di categoria B per un rischio che come detto è indistinguibile tra le due categorie.

Da un punto di vista giuridico appare poi quanto meno discutibile che per svolgere un'attività equivalente alcuni professionisti debbano superare un esame abilitante a carattere nazionale, mentre altri, molti dei quali non hanno conoscenze sull'argomento, vengono di fatto abilitati per decreto.

Si può inoltre rilevare un ulteriore elemento di contraddizione operativa rappresentato dal contenuto dell'art. 91 del D.L. 230/95, che richiede comunque in caso di superamento dei limiti di esposizione, la sorveglianza medica eccezionale da parte del Medico Autorizzato anche per gli esposti di categoria B. Il limite che fa scattare questo particolare tipo di sorveglianza è di 20 mSv, quando i primi indici di interessamento biologico evidenziabili con esami di laboratorio non si riscontrano nell'uomo al di sotto di 250 mSv.

Da queste brevi riflessioni si possono quindi intravedere posizioni poco congruenti con i principi giuridici e con le conoscenze scientifiche, probabilmente solo perché il tutto è finalizzato all'adozione di una cautela che va ben al di là dello spirito del principio di precauzione. Al di là quindi della diversa Commissione o Trattato di provenienza delle direttive comunitarie rivolte alla tutela sanitaria, sarebbe estremamente opportuno che queste venissero ormai recepite in un Testo Unico di normativa che non selezioni in modo immotivatamente discriminante una noxa

rispetto alle mille altre cui l'uomo si trova esposto, e che assicuri una minore vischiosità burocratica ed una più facile applicazione operativa.

### Annotazione bibliografica

Le informazioni di base, come peraltro indicato nel testo, sono riprese dalle pubblicazioni dei seguenti organismi:

UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiations)

BEIR (Biological Effects of Ionizing Radiation Committee)

ICRP (International Commission on Radiation Protection)

ISS (Istituto Superiore di Sanità)

ANPA (Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente)

### BIBLIOGRAFIA

**ICRP (International Commission on Radiological Protection).** *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.* ICRP Publication 60. Annals of the ICRP 21(1-3); 1991.

ICRP (International Commission on Radiological Protection). *Protection against radon-222 at home and at work.* ICRP Publication 65. Annals of the ICRP 23(2); 1993.

**BEIR-V (Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations - Board on Radiation Effects Research - Commission on Life Sciences - National Research Council).** *Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR V.* National Academy Press, Washington, D.C. 1990.

**BEIR-VI (Committee on Health Risks of Exposure to Radon).** *Health Effects of Exposure to Radon: BEIR VI.* National Academy Press, Washington, D.C. 1999.

**UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation).** *Sources and Effects of Ionizing Radiation. 1988 Report to the General Assembly, with Annexes.* United Nations, New York, 1988.

**UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation).** *Sources and Effects of Ionizing Radiation. 2000 Report to the General Assembly, with Annexes.* United Nations, New York, 2000.

**UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation).** *Genetic and Somatic Effects of Ionizing Radiation 1986 Report to the General Assembly, with Annexes.* United Nations, New York, 1986.

**Cardinale A, Cortellessa G, Gera F, Ilari O, Lembo G.** *Absorbed dose distribution in the Italian population due to the natural background radiation.* Proceedings of the second International Symposium on the Natural Radiation Environment, 421–440; 1972.

**Bohicchio F, Campos Venuti G, Nuccetelli C, Piermattei S, Risica S, Tommasino L, Torri G.** *Results of the representative Italian national survey on radon indoors.* Health Physics 71(5): 743–750; 1996a.

**Bohicchio F, Campos Venuti G, Monteventi F, Nuccetelli C, Piermattei S, Risica S., Tommasino L, Torri G.** *Indoor exposure to gamma radiation in Italy.* Proc. IX International Congress of the International Radiation Protection Association (IRPA 9), Vienna 14–19 April 1996, Vol. 2, 190–192; 1996c.

**Bohicchio F, Campos Venuti G, Nuccetelli C, Piermattei S, Risica S, Tommasino L, Torri G.** *Results of the National Survey on radon indoors in all the 21 Italian Regions.* Proc. workshop “Radon in the Living Environment”, Athens 19–23 April 1999: 997–1006; 1999a.

**Tarroni G., Spezia U.** *Dossier 1999 – La Radioprotezione in Italia – La salvaguardia della popolazione e dell'ambiente.* ENEA ISBN 88-8286-074-4, dicembre 1999.

**Bohicchio F, Risica S.** *Esposizione della Popolazione Italiana a Radiazioni Ionizzanti di Origine Naturale.* Proc. Convegno Nazionale di Radioprotezione: Dosimetria personale ed ambientale (AIRP 2001), La Maddalena, 26 – 28 settembre 2001.

