

Esposizione a basse dosi di radiazioni ionizzanti: il modello lineare senza soglia è valido?

Luca Giannoni, Marino Mazzini

*Dipartimento di Ingegneria Meccanica Civile ed Industriale
Università di Pisa, Largo Lazzarino n.1 – 56126 Pisa*

1. Introduzione

Da oltre mezzo secolo, l'interesse e l'attenzione per gli effetti dannosi delle radiazioni ionizzanti sulla salute umana e sull'ambiente sono andati crescendo ininterrottamente e sono stati i punti cardine in materia di sicurezza nucleare e radioprotezione. Uno dei principali oggetti di studio e di dibattito, ancora oggi molto attivo, riguarda la valutazione del rischio per l'uomo di effetti sanitari stocastici a lungo termine associati alle esposizioni a basse o bassissime dosi di radiazioni ionizzanti. La stima di tale rischio non interessa solo situazioni straordinarie o incidentali (come il recente caso della centrale nucleare di Fukushima-Daiichi), ma soprattutto molteplici ambiti ordinari e comuni, quali ad esempio l'ambito lavorativo e le applicazioni nucleari in campo medico, coinvolgendo dunque gran parte della popolazione mondiale.

Tuttavia, poiché gli effetti sanitari di tipo stocastico e tardivo (principalmente tumori solidi e leucemie), associati ad esposizioni dell'uomo a basse dosi di radiazioni ionizzanti, appaiono clinicamente del tutto simili ai casi spontaneamente osservabili tra la popolazione, la loro incidenza non è desumibile attraverso dati sperimentali diretti, ma può essere ricavata unicamente mediante studi epidemiologici condotti su ampie coorti di individui esposti. Mediante tali indagini è possibile ricavare modelli di stima del rischio che esprimono la relazione che intercorre tra dose media ricevuta pro capite e frequenza di effetti dannosi nella popolazione esposta.

Già a partire dal secondo dopoguerra, attraverso le indagini e le valutazioni proposte nel corso degli anni da autorità scientifiche in ambito genetico, radiologico e tossicologico e da vari enti e commissioni di studio e regolamentazione del fenomeno (quali ICRP (*International Commission on Radiological Protection*), UNSCEAR (*United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*), IAEA (*International Atomic Energy Agency*), BEIR (*committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations*,

USA), NCRP (*National Council on Radiation Protection and Measurements, USA*), NRPB (*National Radiological Protection Board, UK*) ed altri), le normative nazionali ed internazionali di radioprotezione hanno adottato concordemente un modello conservativo di valutazione di tale rischio, noto come modello lineare senza soglia (LNT: *Linear No-Threshold model*). Tale modello non ammette alcuna soglia minima di tolleranza della dose e, pertanto, nessun livello di dose di radiazioni ionizzanti, anche se bassissimo, è associabile ad un rischio totalmente nullo di insorgenza di effetti sanitari dannosi per l'uomo. L'applicazione del suddetto modello propone e supporta, sul piano dell'informazione rivolta al pubblico, un'interpretazione pessimistica e cautelativa del rischio correlato alle pratiche inerenti radiazioni ionizzanti, restringendone l'accettabilità e la tollerabilità agli occhi dell'opinione pubblica, soprattutto nell'ambito della produzione dell'energia elettrica da fonte nucleare.

Nel corso degli anni, numerose critiche ed obiezioni alla validità scientifica e sperimentale del suddetto modello sono state mosse a partire dai risultati di studi epidemiologici e statistici condotti su specie animali, su individui e su specifici gruppi di popolazione, esposti cronicamente a basse dosi di radiazioni ionizzanti, nonché dalle indagini statistiche relative a popolazioni esposte a diversi fondi di radioattività naturale. Questi studi mostrano invece l'effettiva esistenza di una soglia di dose (al di sotto della quale il rischio di cancerogenesi tardiva negli individui esposti risulta inesistente o troppo basso da osservare) ed addirittura avvalorano in alcuni casi la teoria di una possibile risposta adattativa dell'organismo per esposizioni a dosi sufficientemente basse di radiazioni ionizzanti, con conseguenti benefici a lungo termine per gli individui esposti, secondo un modello alternativo noto come ormesi.

La stessa veridicità storica e politica dell'ipotesi di linearità senza soglia è stata messa in discussione da una recente inchiesta del Prof. Edward J. Calabrese, docente di tossicologia dell'Università del Massachusetts Amherst (USA) [1], che si è basato sulla corrispondenza epistolare, a cavallo tra gli anni '30 e '50, del premio Nobel per la medicina Hermann J. Muller (1890-1967), principale fautore dell'ipotesi LNT.

È opportuno proseguire in campo radioprotezionistico con un approccio che esclude la presenza di una soglia minima per esposizioni a basse dosi di radiazioni? Il modello di semplice proporzionalità diretta può continuare a sussistere anche in presenza di chiare evidenze scientifiche che ne confutano la validità?

2. Il modello LNT

La teoria lineare senza soglia costituisce un modello di estrapolazione, nella zona delle basse dosi di esposizione alle radiazioni ionizzanti, dei dati sul rischio di comparsa di effetti stocastici tardivi ricavati sperimentalmente per esposizioni a dosi acute ed elevate, rispetto alla dose media normalmente ricevuta pro capite dalla popolazione irradiata. Ciò permette di ricavare una curva grafica che caratterizza la relazione intercorrente tra dose irradiata ed incidenza di effetti a lungo termine nel soggetto esposto (vedi Fig.1).

Il principale degli studi statistici condotti per esposizione umana a dosi elevate ed acute di radiazioni ionizzanti è rappresentato dal *Life Span Study* condotto sui sopravvissuti giapponesi alle bombe atomiche

di Hiroshima e Nagasaki [2].

Comunque, dati analoghi si hanno anche dagli studi sugli abitanti dell'atollo delle Bihini, irraggiati accidentalmente per l'esplosione della prima bomba-H, sull'incidenza di tumori solidi e leucemie fra i bambini inglesi (in particolare nel caso di parti gemellari) che negli anni '50 erano stati irraggiati in utero eseguendo una o più radiografie del

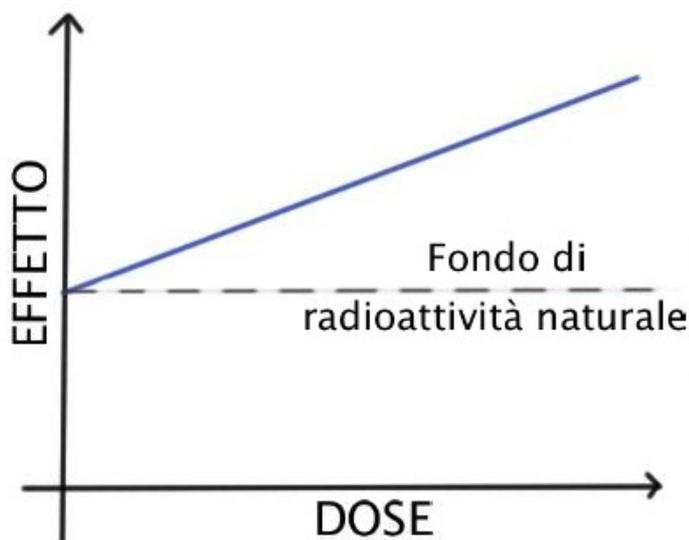


Fig.1 Andamento tipico della curva dose-effetto per il modello lineare senza soglia; la linea tratteggiata indica il livello di riferimento relativo al fondo di radioattività naturale.

ventre della madre per vedere come si presentava il parto, ecc.

Il modello lineare senza soglia prevede peraltro l'uso di un fattore di riduzione del rischio specifico, noto come DDREF (*Dose and Dose-Rate Effectiveness Factor*), che indica il rapporto tra la pendenza dell'interpolazione lineare senza soglia dei dati ricavati per alte dosi e ad alti ratei di dose e la pendenza della retta di interpolazione lineare dei dati a basse dosi e bassi ratei di dose. La maggior parte degli enti di regolamentazione in materia radioprotezionistica concordano nello stabilire tale fattore circa pari a 2 [3]. L'applicabilità del modello lineare senza soglia è stata dimostrata, oltre che per dosi alte ed acute, anche in studi statistici su pazienti bambini sottoposti a radiodiagnosi, quali tomografia assiale computerizzata (TAC), come riportato in un articolo del 2012 di M.S.

Pearce e altri [5], in cui è stata stimata una triplicazione del rischio di leucemie e tumori al cervello nei soggetti analizzati per dosi cumulate superiori a 50 mGy (vedi Fig.2). Si tratta comunque di dosi di due o più ordini di grandezza superiori a quelle a cui annualmente è esposta la popolazione che vive in prossimità di una centrale nucleare, paragonabili a quelle ricevute nell'intera vita da tali persone.

L'ipotesi lineare senza soglia, come già accennato, fu teorizzata e proposta per la prima volta alla comunità scientifica dal medico e genetista Hermann J. Muller, durante la lettura del suo discorso alla cerimonia di consegna dei premi Nobel, in cui egli dichiarò: “[*There is*] no escape from the conclusion that there is no threshold”, cioè l'impossibilità di accettare una soglia minima di sicurezza per la dose da radiazioni ionizzanti [1]. In seguito, tra gli anni '50 e '60, in un clima di preoccupazione nei confronti delle conseguenze per l'uomo dei primi test atomici in atmosfera, grazie ai suoi studi sugli effetti mutageni dei raggi X su campioni di Moscerino della Frutta (*Drosophila melanogaster*) ed al prestigio internazionale ottenuto dall'attribuzione del summenzionato premio, Muller portò le agenzie governative statunitensi di regolamentazione del fenomeno verso l'adozione del modello LNT, da egli postulato e di cui fu sempre fervente sostenitore. Negli anni a seguire,

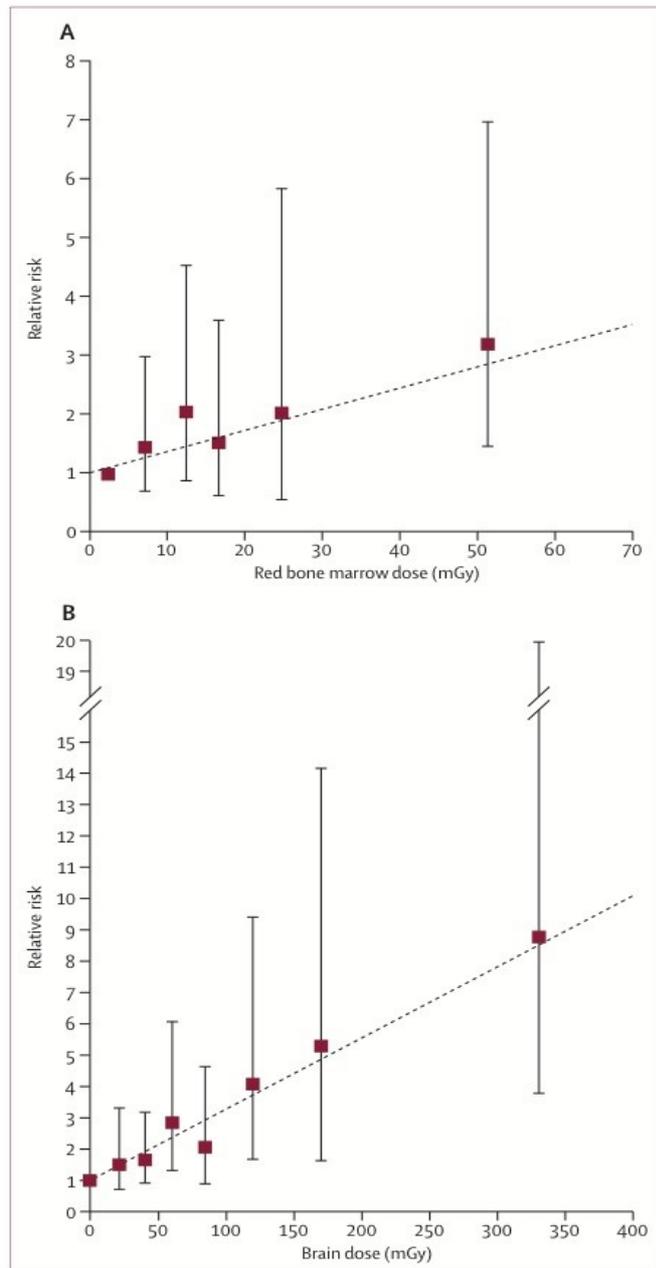


Fig.2 Rischio relativo di leucemie (A) e tumori al cervello (B) in relazione alla dose di raggi X irradiata al midollo rosso e al cervello in pazienti bambini sottoposti a TAC [7].

anche gli Enti regolatori internazionali e comunitari decisero unanimemente, in linea con le scelte statunitensi, di adottare il modello LNT per esposizioni a basse dosi di radiazioni ionizzanti. Questo, dunque, assunse un ruolo dominante nella disciplina di valutazione del rischio e nella associata normativa di radioprotezione fino ad oggi [4].

La giustificazione biologica e biofisica per l'applicazione del modello LNT si basa su due assunti ben chiari: il primo stabilisce un legame di linearità diretta tra la dose di radiazioni ionizzanti e l'energia ad essa associata, mentre il secondo afferma che anche una singola particella ionizzante è in grado di provocare, nel suo transito attraverso l'organismo umano irraggiato, un danno stocastico al DNA di una cellula, che può portare alla cancerogenesi della stessa. In tal caso, anche a basse o bassissime dosi non sussisterebbero ragioni a favore dell'esistenza di una dose di sicurezza. Supposti veri tali postulati, il modello LNT stabilisce che al variare della dose ricevuta, e quindi dell'energia assorbita per unità di massa dall'organismo, varia solo il numero di eventi dannosi corrispondenti ad essa. Aumenterebbe pertanto linearmente la probabilità di avere interazioni con le cellule in grado di portare al danneggiamento del DNA, e quindi si avrebbe una proporzionalità diretta tra la dose ricevuta ed il rischio individuale di insorgenza di forme tumorali nell'organismo irradiato.

3. Confutazione del modello LNT

La critica fondamentale che viene mossa nei confronti del modello lineare senza soglia riguarda sostanzialmente la sua impostazione conservativa, basata più su di una filosofia cautelativa e protezionistica, in materia di salute pubblica e di accettabilità del rischio, che su di una solida base scientifica convalidata da un numero sufficiente di dati sperimentali statistici certi.

Dal punto di vista fisico e biologico, il modello LNT assume che gli effetti probabilistici tardivi correlati alle radiazioni ionizzanti siano il risultato di risposte biologiche autonome da parte di singole cellule, totalmente indipendenti l'una dall'altra. Viene trascurata quindi ogni interazione tra cellule dello stesso tipo o della medesima progenie cellulare e viene escluso a priori qualsiasi possibile effetto di sinergia ed antagonismo. Inoltre il modello lineare senza soglia applica univocamente il principio di sovrapposizione degli effetti, senza fare distinzioni tra esposizioni distribuite in un lasso di tempo più o meno lungo (dosi croniche) ed esposizioni singole non ripetute (dosi

acute), ignorando quindi totalmente la possibilità di attivazione dei meccanismi naturali di difesa biologica dell'organismo e dei processi di riparazione cellulare e del DNA danneggiato, i quale svolgono invece un ruolo cruciale nella determinazione della radioresistenza di un individuo esposto. Tra tali meccanismi biologici vengono indicati, a titolo d'esempio:

- la produzione, da parte di geni specifici delle cellule attivati solo da basse dosi di radiazioni ionizzanti, di particolari ed efficienti enzimi riparatori dei filamenti di DNA danneggiato;
- il processo noto come apoptosi, o morte cellulare programmata (PCD), per il quale le cellule danneggiate praticamente “si suicidano”, per evitare che il danno si trasmetta durante la riproduzione cellulare fino a generare una forma cancerosa;
- un processo di risposta allo stress ossidativo mediante specifici enzimi antiossidanti, i SOD (*Super-Oxide Dismutases*), i quali si oppongono alla produzione dei ROS (*Reactive Oxygen Species*), agenti chimici reagenti con l'ossigeno delle cellule, che stanno alla base del fenomeno di mutazione cancerosa delle stesse [6].

Oltre a quanto appena esposto, in un articolo del 2011 dal titolo *Muller's Nobel lecture on dose-response for ionizing radiation: ideology or science?*, il già citato Professor Edward J. Calabrese, docente di tossicologia e da oltre vent'anni studioso dei modelli di interpretazione della curva dose-danno per numerose sostanze tossiche e agenti cancerogeni, ha esposto evidenti prove di natura storiografica che confutavano la validità scientifica e storica delle nette dichiarazioni di Muller, riguardo l'inesistenza di una soglia di dose minima di sicurezza per il rischio di effetti dannosi a lungo termine per l'uomo legati a basse esposizioni alle radiazioni ionizzanti. L'analisi critica e storiografica compiuta dal Prof. Calabrese sulle corrispondenze epistolari tenute da Muller negli anni '40 dimostra che questi fosse venuto a conoscenza dei determinanti risultati di un importante studio epidemiologico su larga scala condotto presso l'Università di Rochester, tra il 1944 e il 1946, dai genetisti Curt Stern ed Ernst Caspari, per conto del governo statunitense. Tale studio riguardava l'influenza di basse dosi e bassi ratei di dose di raggi gamma sul tasso di mutazione genica dei campioni di Moscerino della Frutta, e per esso Muller svolse il ruolo di consulente formale. I dati conclusivi del suddetto studio, inve-

ro, fallivano apertamente nel supportare l'ipotesi di linearità senza soglia, sostenuta senza dubbio alcuno da Muller stesso nel proprio discorso di accettazione del premio Nobel tenutosi il 12 dicembre 1946, appena tre mesi dopo il termine di tale ricerca. Questo fatto pone Muller in una posizione di contraddizione e di inattendibilità al momento di tali dichiarazioni così conclusive, che al contrario non lasciavano dubbio alcuno sulla validità del modello LNT. Le rivelazioni emerse dall'articolo del Prof. Calabrese implicano che la scelta di Muller, di sostenere con convinzione la tesi di linearità senza soglia, fu fatta più per ideologia che per validità scientifica comprovata. Una scelta che, di fatto, favorì enormemente l'approvazione del modello LNT, quale unico strumento di valutazione del rischio radiologico e nucleare per esposizioni a basse dosi di radiazioni ionizzanti, a partire dalla seconda metà del ventesimo secolo fino ad oggi [1]. Essa risulta oggi essere ingannevole e fuorviante nei confronti dell'opinione pubblica, di quel periodo e dei nostri giorni.

Esistono infatti prove di laboratorio e dati ricavati da molteplici e differenti studi statistici ed epidemiologici che mettono in dubbio la validità scientifica del modello lineare senza soglia, dimostrando come esso preveda una stima eccessiva ed esagerata del rischio di effetti sanitari correlati a basse esposizioni alle radiazioni ionizzanti. Ad esempio, osservando gli studi epidemiologici condotti negli ultimi decenni su lavoratori impiegati in pratiche che comportano l'utilizzo o la presenza di radiazioni ionizzanti ed esposti ad irraggiamento esterno, durante tutta la loro carriera professionale, è stato riscontrato un livello di mortalità per patologie radioindotte, ma anche per tumori spontanei, generalmente inferiore rispetto al resto della popolazione, dimostrando una maggiore radioresistenza di tale categoria di individui. In particolare sono da citare i più recenti e significativi risultati degli studi simultanei condotti tra il 1995 ed il 1996 negli Stati Uniti, in Canada e nel Regno Unito, su 95,000 lavoratori nucleari, ed in Giappone, su altri 115,000, dai quali emerge esplicitamente che *“nessuna prova di aumento del rischio di cancro rispetto alla popolazione generale”* è stata riscontrata [7]. Inoltre, per quanto riguarda la categoria dei lavoratori esposti a radiazioni ionizzanti generate da uranio, plutonio e altri elementi transuranici, uno studio collaborativo internazionale condotto da IARC (*International Agency for Research on Cancer*) negli anni '90 ha permesso di ricavare dati provenienti da tre nazioni diverse (Canada, Regno Unito e Stati Uniti) riguardanti circa due milioni di soggetti irradiati in ambito professionale. I risul-

tati concordano nel suggerire che il rischio di mortalità per cancro derivato dall'applicazione del modello LNT sovrastima la mortalità effettiva. L'eccesso relativo di rischio (ERR) valutato da IARC per tutti i tipi di neoplasie, esclusa la leucemia, risulta addirittura negativo e pari a circa $-7 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$, indicando pertanto la possibilità di un effetto ormetico e l'esistenza di una soglia di dose ben definita per esposizioni a basse dosi di radiazioni ionizzanti [7].

Per quanto riguarda invece il caso delle esposizioni in ambito medico dovute a trattamenti di radioterapia e radiodiagnosi, la maggior parte delle indagini epidemiologiche, condotte in larga scala su pazienti adulti, non ha riscontrato alcun significativo effetto sanitario associato alle radiazioni ionizzanti. Nel caso esemplare di pazienti sottoposti a diagnosi mediante l'utilizzo di Iodio-131, esami periodici (*follow up*) compiuti in Svezia nell'arco di venti anni su 35,000 pazienti soggetti a diagnosi con I-131 hanno riportato un rateo di insorgenza di tumori alla tiroide pari a 0.62 volte i ratei comunemente attesi con il modello LNT [1]. A questi dati sono da aggiungere quelli pubblicati in un vasto studio condotto nel 1995 su "*Thyroid cancer after diagnostic administration of I-131*", riguardanti l'esposizione a Iodio-131 a scopo terapeutico contro l'ipertiroidismo, i quali dimostrano che dopo la somministrazione di una massiccia dose di iodio radioattivo "*nessun incremento di rischio è stato rilevato tra i pazienti diagnosticati in ospedale per ragioni estranee al sospetto di tumore alla tiroide*" [8].

Ugualmente, studi ed inchieste statistiche su membri della popolazione che vivono in zone ad elevato fondo di radioattività naturale, rispetto al valore medio mondiale di dose pari 2.2 mSv/anno, hanno dimostrato, in controtendenza rispetto al modello LNT, una minore tasso di insorgenza del cancro rispetto alla popolazione di riferimento, come riscontrato dai risultati dello studio HBRA (*High Background Radiation Area*) condotto a Yangjiang, città delle Cina meridionale, in cui è stato misurato un rateo medio annuo di dose legato all'ambiente di circa 5.4 mSv/anno per abitante. Secondo l'interpretazione dei dati ottenuti, da parte di Wei L., lo studio mostra la presenza di "*una tendenza della mortalità per cancro, nella zona con fondo di radioattività naturale più alto, ad essere minore rispetto a quella nell'area di controllo*" [3]. In un'indagine statistica analoga pubblicata da N.A. Frigerio e R.S. Stowe, dal titolo *Carcinogenic and Genetic Hazards from Background Radiations*, del 1976, è stato calcolato il tasso di mortalità per tumori maligni relativo all'esposizione al fondo di radioattività naturale in tutti quanti i 50 Stati

d'America. Prima che venissero presentati i dati effettivi di tale studio, le previsioni ricavate in base all'interpretazione lineare senza soglia indicavano che il numero teorico di tumori in eccesso sarebbe dovuto oscillare tra i 3,000 ed i 10,000 casi annui, per ogni 1.7 mSv/anno di incremento del fondo naturale rispetto alla media mondiale. I risultati reali però si discostarono nettamente da tale tendenza, addirittura invertendola (vedi Fig.4): dei 14 Stati con fondo di radioattività naturale maggiore di 1.4 mSv/anno rispetto alla media, 12 si dimostravano significativamente al di sotto della media statunitense di casi di cancro annui, uno di poco ancora più basso e soltanto uno Stato leggermente al di sopra di essa; inoltre, tutti gli Stati con rateo d'insorgenza di cancro più basso tra quelli riscontrati presentavano un valore del fondo naturale in eccesso rispetto alla media statunitense di oltre 1.35 mSv/anno [3].

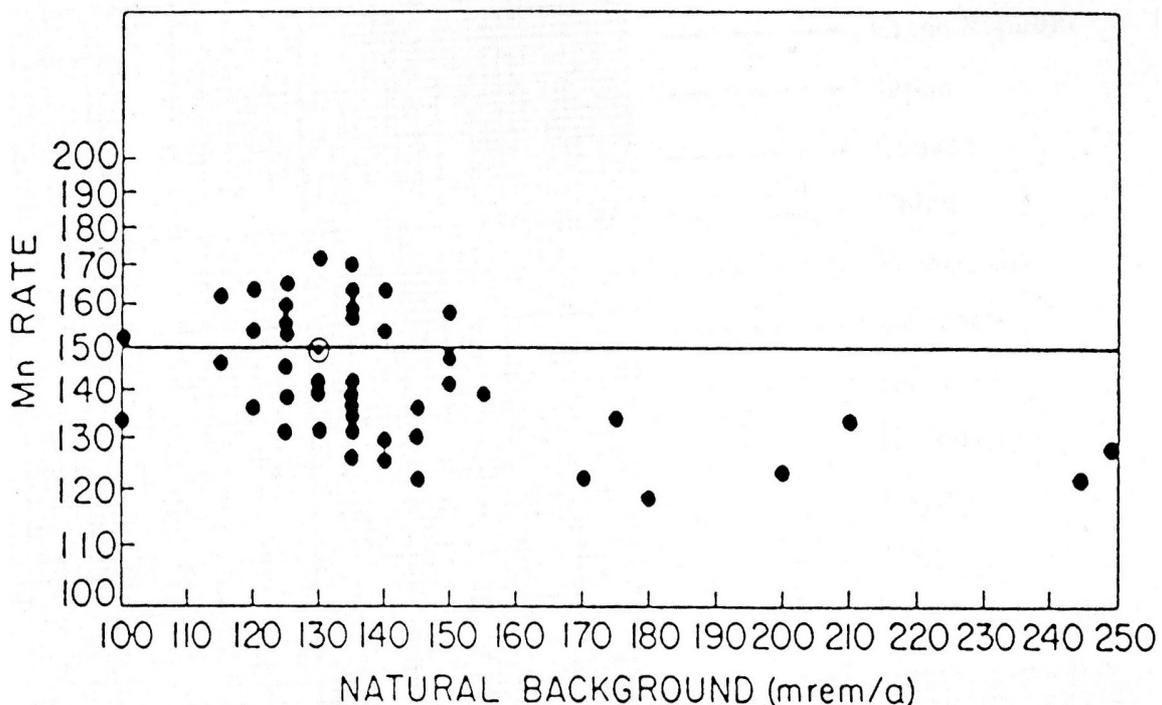


Fig.4 Tassi di mortalità per tumori maligni (aggiustati per età) tra la popolazione degli Stati Uniti d'America, per Stato e per eccesso al valore medio annuo di dose equivalente (in mrem/anno) legata al fondo di radioattività naturale; la linea orizzontale ed il valore cerchiato indicano rispettivamente il rateo di mortalità medio e il valore medio del fondo naturale per gli Stati Uniti [3].

Infine, ad analoghe conclusioni si giunge anche in base ai dati di studi e ricerche condotte in relazione ai più gravi incidenti avvenuti in impianti nucleari di potenza, tra i quali si citano:

- Lo studio UNSCEAR del 2010 sulle conseguenze dell'incidente di Chernobyl [2] indica chiaramente che nessun aumento di incidenza del cancro o della leuce-

mia è stato rilevato nella popolazione maggiormente esposta durante l'incidente (che è stata evacuata nei giorni seguenti a questo) o che vive nelle zone maggiormente contaminate; lo stesso dicasi per i casi di cancro fra il personale che eseguì le operazioni di sistemazione dell'impianto e del sito (oltre 500.000 persone che hanno ricevuto dosi comprese fra 10 mSv ed oltre 1 Sv, con una media di 130 mSv), anche se sembra esserci un incremento dei casi di leucemia, peraltro molto minore di quello atteso in base al modello LNT;

- Una ricerca condotta al MIT di Boston [9] a seguito dell'incidente di Fukushima-Daiichi, la quale dimostra l'importanza dell'intensità di dose sugli effetti delle radiazioni.

4. Ormesi da radiazioni

Numerosi risultati, come quelli finora esposti, fanno presupporre che, per esposizioni a basse dosi e a bassi ratei di dose di radiazioni ionizzanti, non solo sia effettivamente possibile individuare una soglia minima di dose al di sotto della quale non è riscontrabile alcun rischio di danni sanitari stocastici a lungo termine, ma anzi, in numerose occasioni, vi sia la possibilità concreta di un loro effetto benefico per l'organismo umano. Tale effetto consisterebbe in una stimolazione del sistema immunitario e dei naturali meccanismi di difesa biologica e riparazione dei danni subiti, quando l'organismo viene

esposto a dosi di radiazioni ionizzanti inferiori alla dose di tolleranza (che il sopraccitato modello LNT non accetta). Tenendo conto di tale fenomeno, noto come risposta adattativa, è possibile ipotizzare un modello alternativo di caratterizzazione della curva dose-danno per le radiazioni ionizzanti, noto come modello ormetico (vedi Fig.5), caratterizzato da una curva gra-

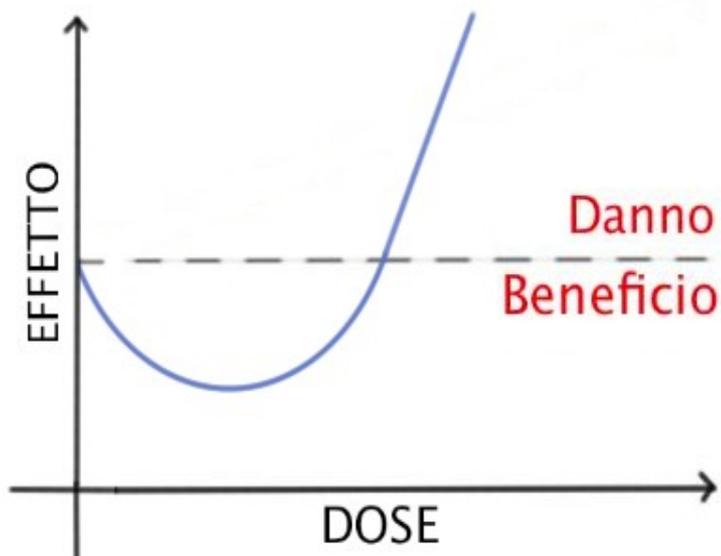


Fig.5 Andamento tipico della curva dose-effetto per il modello ormetico, indicante le zone di rischio di danno stocastico e di beneficio.

fica dose-effetto di forma parabolica (*U-shaped dose-response relationship*). Secondo tale modello, al di sotto di una dose di soglia ben definita, è possibile identificare una zona di rischio negativo, cioè di beneficio per l'organismo irradiato, rispetto al valore nominale di riferimento per esposizioni al fondo di radioattività naturale medio a cui corrisponde un eccesso di rischio nullo [10].

L'ipotesi di principio del modello ormetico si fonda essenzialmente sul processo biologico di risposta adattativa dell'organismo a modesti livelli di stress o di danno cellulare, conseguenti ad una esposizione a basse dosi e bassi ratei di dose di radiazioni ionizzanti. Da questo deriva un sostanziale incremento della radioresistenza delle cellule stesse e l'attivazione dei meccanismi specifici di riparazione del danno. Questi non potrebbero invece attivarsi nel caso di esposizione ad alte dosi, poiché per esse il danno prodotto è così grave che non viene stimolato il funzionamento di determinati geni preposti alla riparazione del danno. L'organismo invece, una volta che si sia verificata l'attivazione ottimale di tali processi di difesa biologica e di riparazione del danno, risulta maggiormente idoneo a sopportare dosi successive più elevate di radiazioni ionizzanti, riducendone le potenzialità cancerose e il detrimento che da esse deriva, mediante un processo di adattamento selettivo (*adaptive radiation triggering*) delle cellule agli effetti dannosi dell'irraggiamento. In base a tale prospettiva, tra i sostenitori del modello ormetico per le radiazioni ionizzanti sta sorgendo l'ipotesi di utilizzare l'irraggiamento a bassi dosaggi come forma di "pre-condizionamento" (*preconditioning*), ovvero un processo per il quale, irraggiando volutamente l'organismo con una bassa dose controllata, il suo sistema immunitario può sviluppare una preparazione difensiva contro possibili esposizioni susseguenti a dosi acute e dannose, in una sorta di analogia concettuale con l'immunità che si genera con gli anticorpi a seguito di una vaccinazione profilattica [11].

In aggiunta a ciò, numerosi studi hanno dimostrato anche la capacità dell'organismo di sviluppare, in seguito ad una risposta adattativa conseguente ad una irradiazione a bassi dosaggi, una naturale resistenza anche contro la cancerogenesi spontanea e la formazione di tumori maligni non direttamente provocati dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti, mediante processi di aumento della produzione degli agenti antiossidanti (SOD) che ostacolano l'attività degli agenti chimici ossidanti (ROS), i quali, come già accennato in precedenza, normalmente provocano la mutazione cancerosa del DNA [6].

5. Conclusioni

Alla luce delle prove esistenti e considerando le argomentazioni di tipo fisico e biologico sopra richiamate, si può confutare in modo chiaro e diretto le ipotesi costitutive del modello lineare senza soglia, mettendone in serio dubbio sia la validità scientifica che l'applicabilità nella stima del rischio per esposizioni a basse dosi di radiazioni ionizzanti. La scelta ancora oggi supportata del suddetto modello conservativo da parte di tutte le agenzie governative e internazionali e dei maggiori enti di regolamentazione del fenomeno, si fonda su una concezione esagerata del pericolo in ambito nucleare e radiologico, piuttosto che su una effettiva comprensione scientifica del fenomeno. Tale visione amplificata del rischio per la salute umana associato alle radiazioni, invero strettamente legata alla storia negativa che ha segnato la scoperta e l'utilizzo dell'energia nucleare (a partire dalle conseguenze dello scoppio delle due bombe atomiche fino al recente clamore degli incidenti gravi occorsi in impianti nucleari per la produzione di energia elettrica), ha portato la società moderna e la stessa opinione pubblica a prediligere una politica cautelativa nei confronti degli effetti sanitari delle radiazioni ionizzanti. In definitiva, la scelta del citato modello LNT ha generato tutt'oggi un'insensata paura nei confronti dell'energia nucleare e di ogni suo possibile utilizzo, che ne impedisce un ottimale sfruttamento a vantaggio dell'uomo.

Questa sovrastima eccessiva dell'incidenza di effetti stocastici dannosi per l'uomo porta a svantaggi non poco rilevanti, tra i quali l'onere economico causato dai costi dell'eccesso di sicurezza in ambito nucleare e radioprotezionistico, nonché, in primis, alla controversia sulla comunicazione del rischio nei confronti dell'opinione pubblica e di tutta quanta la popolazione in generale.

In conclusione, tenendo anche conto delle evidenze che dimostrano addirittura la possibilità di un effetto benefico per esposizione a basse dosi di radiazioni ionizzanti, è auspicabile che il dibattito sulla valutazione del rischio in ambito radioprotezionistico venga corredato di una solida base scientifica e non sia invece basato (come avvenuto in passato ed avviene tuttora) sull'ideologia. Occorre proseguire ed approfondire lo studio diretto e statistico della fenomenologia connessa all'esposizione a basse dosi di radiazioni ionizzanti, al fine di disporre di risultati più chiari, che possano portare ad uno sfruttamento ottimale dell'energia nucleare per il benessere dell'uomo e la salvaguardia dell'ambiente.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Calabrese, E.J., *Muller's Nobel lecture on dose-response for ionizing radiation: ideology or science?*, Springer-Verlag, USA 2011.
- [2] UNSCEAR report 2010, Vol. II, Annex D: *Summary of low-dose radiation effects on health*, USA 2011
- [3] IAEA report 1997, *Estimating and Comparing Risks from Very Low Levels of Exposure Resulting from Emissions from Energy Systems*, IAEA, Vienna 1999.
- [4] Calabrese, E.J., *The road to linearity: why linearity at low doses became the basis for carcinogen risk assessment*, Springer-Verlag, USA 2009.
- [5] Pearce, M.S. et al., *Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: a retrospective cohort study*, The Lancet, pubblicato online 2012.
- [6] Cohen, B.L., *Nessun rischio di cancro per basse dosi di radiazioni*, traduzione a cura del Dott. Giuseppe Filipponi, Fusione: scienza & tecnologia, pubblicato online 2011.
- [7] Cardis, E. et al., *Combined Analysis of Cancer Mortality among Nuclear Industry Workers in Canada, UK and the USA*, IARC Technical report 25, Lione 1995.
- [8] Hall, P., Holme, L.E., *Cancer Incidence and Mortality after Iodine-131 Therapy for Hyperthyroidism*, in: Young, J.P., et al, *Radiation and Public Perception, Benefit and Risks*, Advances in Chemistry Series 243, American Chemical Society, Washington DC 1995.
- [9] Olipitz, W. et al., *Integrated molecular analysis indicates undetectable DNA damage in mice after continuous irradiation at ~400-fold natural background radiation*, Environmental Health Perspectives 120.8/1130–1136, pubblicato online 2012.
- [10] Calabrese, E.J., Baldwin, A.L., *Hormesis: The Dose-Response Revolution*, Ann. Rev. Pharmacol. Toxicol. 43/175–97, USA 2003.
- [11] Giovannetti, A., *Le attuali conoscenze sugli effetti delle radiazioni ionizzanti a basse dosi*, presentazione online da ENEN UTBIORAD-RAB, Italia 2011.