

Prefazione:
indagine sul metodo

Scrivere una Tesi di Laurea non è solo l'ultimo degli impegni scolastici di uno studente universitario, ma rappresenta il momento in cui, finalmente, gli viene consentito di sperimentare - e cioè di mettere in atto quel metodo di ragionamento che dovrebbe aver progressivamente acquisito, per trattare sistematicamente un determinato argomento.

Da quest'angolo visuale - puramente personale - questa Tesi di Laurea, intitolata "*Il danno da radiazioni ionizzanti: profili giuridici della radioprotezione*" non rappresenta solo l'atto conclusivo della (mia) carriera universitaria bensì un percorso euristico di apprendimento ed elaborazione, rappresentabile, in modo evidentemente eufemistico, come la storia del modo in cui una sessantina di articoli variegati estratti da molteplici riviste giuridiche, plurimi testi di legge, note giurisprudenziali e monografie consultate, sono confluite in una trattazione unitaria e metodologicamente coerente (si spera), sulla base di valutazioni profondamente legate all'intuizione.

Oggetto di questa Tesi di Laurea è lo studio giuridico delle modalità in cui l'ordinamento gestisce le situazioni di rischio, e reagisce alle vicende di danno connesse agli utilizzi tecnologici delle radiazioni ionizzanti.

Giova precisare, in via preliminare, che "*danno*" non deve leggersi in senso tradizionale - e cioè quale evento empiricamente percepibile come causato e verificatosi *hic et nunc* - ma nella sua più ampia dimensione meta-giuridica di fenomeno progressivo ed unitario.

Il danno da radiazioni ionizzanti vuole perciò essere essa stessa formula euristica volta *a pensare insieme ciò che è separato* - e cioè chiave di volta delle dinamiche della *società del rischio nucleare*, che guarda al presente come conseguenza del passato, ma anche come causa del futuro.

In tale formula - a rimorchio dell'intuizione *Beckiana* che ha orientato la conoscenza sulla comprensione di una realtà in transito verso una nuova modernità - i concetti di rischio e danno finiscono per costituire una sorta di endiadi che dischiude l'obsolescenza della tradizionale concezione

fenomenica del danno-evento, e per essa quella dei tradizionali rimedi di diritto.

Questa Tesi è, quindi, anzitutto un percorso elaborativo articolato che muove i primi passi dalla ricognizione delle fonti in materia di impieghi delle radiazioni ionizzanti, ed attraversando la farraginoso strada della contestualizzazione del fenomeno entro i dogmi della *sedes materia*, perviene a sgretolare il tradizionale paradigma del danno incardinato nelle presupposizioni di ingiustizia e causalità dell'evento.

Ma si tratta di un sgretolamento spontaneo fomentato dall'intuizione che il danno, nell'*eone della radiazione*, è globale, oltre che globalizzato – e ciò nel senso che si sta già manifestando progressivamente come conseguenza a lunga latenza di impieghi della tecnologia nucleare condotti nel totale disprezzo dell'ambiente e della vita umana.

Tale efferatezza e violenza del metodo tecnologico è, in vero, un *topos* della retorica militare in cui la tecnologia nucleare è stata concepita, salvo poi estendersi sulla scorta dell'imperativo di sicurezza (?) a numerosi impieghi civili.

L'energia nucleare, costituisce, a ben vedere, il prototipo dell'attività umana pericolosa, e cioè dell'attività dotata di caratteri ontologici di pericolosità che si manifestano, come correttamente osservato da notoria letteratura, nella produzione di rischi.

Il rischio è, invece, un concetto intrinsecamente aleatorio, che implica la possibilità concreta della produzione di conseguenze dannose nell'arco di un periodo ben determinato.

Ciò pertanto a tale concetto fa da *pendant* quello di probabilità di verifica del danno, che costituisce una metodologia scientificamente non univoca di calcolo del valore numerico dell'incidenza di un evento possibile su una base numerica finita e predeterminata.

Ambedue le nozioni sono, per altro, indiscutibilmente legate al più generale concetto di ipotesi che costituisce il *primum movens* nella selezione delle possibili catene causali meritevoli di indagine connesse all'impiego di una data tecnologia.

Ma anche il preventivo vaglio delle ipotesi è questione di plausibilità, e cioè risente del calcolo delle probabilità che l'ipotesi sia corretta.

Ogni ipotesi di rischio è prima qualificata, con metodo scientifico *ex ante*, e poi quantificata sulla scorta del metodo statistico, e cioè sulla scorta di considerazioni empiriche inerenti la relazione che incorre tra i casi in cui si è concretizzato e quelli in cui no.

Così, che la preoccupazione manifestata da Edward Teller, e presa molto seriamente da Oppenheimer (!) ai tempi del *Trinity Test*, circa l'ipotesi che la reazione di fissione innescata dalla detonazione della bomba atomica avrebbe potuto innescare l'esplosione dell'azoto presente nell'aria e nei mari, e conseguenzialmente determinare l'incenerimento dell'intero pianeta, fosse ritenuta altamente improbabile, si fondava esclusivamente sulla critica alle assunzioni ingiustificate nei calcoli di Teller, e cioè su obiezioni di carattere puramente teorico, che hanno comunque veicolato l'accettazione della possibilità di respingere come falsa una teoria che poteva rilevarsi vera.

Solo l'elemento fattuale della detonazione dell'ordigno nucleare, e delle successive duemilaquarantatre detonazioni sperimentali, hanno consentito di espungere fuor dubbio la teoria del collasso atomico dell'azoto dai rischi connessi all'impiego dell'energia nucleare.

Così è per l'intera categoria dei rischi globalizzati prodotti dalla nuova modernità in cui la manifestazione del danno per causa diluita ha origine nel fatto stesso dell'esistenza e dell'impiego di una determinata tecnologia, benché filtrata attraverso la lente del calcolo statistico-probabilistico.

Fuor di critica epistemologica, inoltre, il rischio è indubbiamente prodromo del danno.

Più precisamente il rischio è il danno possibile non ancora verificatosi, mentre il danno è la concretizzazione della probabilità che il rischio si realizzi.

Quale specifico fattore di rischio, le radiazioni ionizzanti si caratterizzano per la capacità plurioffensiva e per le modalità di aggressione proteiforme.

Dal primo punto di vista vengono in rilievo gli ambiti oggettivi del danno, quale lesione all'integrità fisica dell'uomo o all'equilibrio bio-chimico dell'ecosistema.

Il carattere proteiforme delle modalità di aggressione al bene giuridico ha, per converso, rilevanza sul piano del rafforzamento dell'aleatorietà della

nozione di rischio globalizzato, *a fortiori ratione* in presenza di ipotesi di danno che morfologicamente non agevolano l'impiego del modello della spiegazione per nessi di causa.

Il danno da radiazioni ionizzanti è stato ed è danno ambientale poiché l'impiego della tecnologia nucleare ha già determinato la contaminazione su scala mondiale dell'ambiente con picchi di stima riferenti il raddoppio del valore del cd. fondo naturale; ma è anche prodromo di possibili catastrofi tali da determinare l'annientamento della specie umana, o più condivisibilmente (?) l'irreparabile compromissione di determinate porzioni territoriali del pianeta interessate, al fronte di possibili incidenti in centrali nucleari, o possibili impieghi di armi nucleari.

Il danno da radiazioni ionizzanti è stato ed è, sia in modo diretto che tramite la contaminazione dell'ambiente, danno all'integrità fisica dell'uomo, essendo notori gli effetti delle due anime dell'esposizione acuta e cronica; ma è anche un danno futuro in quanto possibilmente e potenzialmente capace di alterare il genoma che la specie umana trasmette all'atto della filiazione.

Posti nell'insieme dei rischi da radiazioni ionizzanti la contaminazione ambientale quale prodromo dell'alterazione degli equilibri dell'ecosistema, e dell'avvelenamento fisico-chimico di tutte le specie viventi, ivi compresa la specie umana, nonché l'interessamento diretto della salute umana a riscontro delle notorie e plurime applicazioni socialmente accettate dell'atomo civile, il grado di plausibilità di ciascuna ipotesi accede indefettibilmente quale parametro della valutazione e della predisposizione delle misure di prevenzione dei rischi.

Così se nell'ambito della valutazione dei rischi si ritiene maggiormente pregnante l'ipotesi dei danni di prima generazione rispetto ai danni alle generazioni successive – e cioè si ritiene che l'irraggiamento interessi principalmente il tessuto organico direttamente irraggiato, oltre che, in misura residua e possibile, la trasmissibilità del genoma alterato – è evidente che il sistema di prevenzione si porrà come obiettivo la riduzione del rischio di effetti, che denomineremo deterministici o stocastici, senza considerare l'incidenza nella gradazione della tollerabilità dell'esposizione,

di possibili ulteriori rischi, ancorché meno probabili, *a fortiori* se non corroborati, o sparsamente corroborati, da riscontri empirici.

Quanto premesso non vale, si precisa, come critica epistemologica verso il metodo scientifico, ma piuttosto è teso ad evidenziarne i caratteri di aleatorietà e parzialità in quanto caratterizzanti, in modo indefettibile, dell'approccio giuridico al problema della gestione del rischio e della riparazione del danno conseguente all'esposizione a radiazioni ionizzanti.

Da quest'angolo visuale, come si anticipava, lo scopo principale della Tesi era quello di effettuare una ricognizione ed elaborazione sistematica dei profili giuridici della radioprotezione, nei due momenti della gestione del rischio e della riparazione del danno.

La base bibliografica, in punto di partenza costituita da una pluralità di articoli estratti da riviste giuridiche, aventi ad oggetto tematiche variegata a vario titolo connesse con l'impiego delle radiazioni ionizzanti – tutti succintamente catalogati nella bibliografia a pedice della trattazione - ha avuto l'estremo pregio di consentire l'elaborazione della struttura generale della Tesi che è stata mantenuta, in effetti, pressoché inalterata.

Un disegno strutturale talmente ampio ha, tuttavia, imposto una metodologica e costante caccia alle fonti, nel tentativo di ricostruire, in modo maggiormente esaustivo, un quadro generale dei profili giuridici connessi all'impiego dell'energia nucleare.

Come si anticipava quest'elaborato rappresenta una creazione di conoscenza personale condotta con metodo euristico.

L'intuizione di partenza, rilevatasi corretta a riscontro della struttura argomentativa delle fonti in epigrafe, era quella dell'impossibilità di fornire una chiave di lettura giuridica di un fenomeno che non appartiene al mondo del diritto, senza acquisire anzitutto una conoscenza, ancorché elementare, sui profili extra-giuridici della fattispecie.

Per far ciò sono state consultate le fonti maggiormente autorevoli in materia, e cioè gli elaborati che costituiscono le raccomandazioni della Commissione Internazionale di Protezione Radiologica, le quali – come ampiamente riscontrato nella bibliografia – sono corroborate da autorevoli indagini scientifiche, come quelle portate avanti nell'ambito delle Nazioni Unite dal Comitato per lo studio degli effetti delle radiazioni ionizzanti.

L'indagine, a questo punto, ha imboccato una direzione univoca che a consuntivo ha presentato il conto.

Indubbiamente anche in questo caso l'intuizione di partenza si era rilevata esatta, e cioè il diritto del nucleare – e più specificatamente quella branca del diritto che si occupa di regolamentare i fenomeni connessi all'impiego delle radiazioni ionizzanti – era sistematicamente ricostruibile solo attraverso la lettura e comprensione delle dinamiche endogene al sistema delle fonti di produzione.

In questo modo è stato difatti possibile dimostrare, in via esemplificativa, come delle fonti non vincolanti, quali le raccomandazioni di un organismo scientifico, sono interessate da un fenomeno di *giuridicizzazione* - orchestrato, fondamentale, dalle manovre del legislatore comunitario - e così permeate sino all'ordinamento interno, nella disciplina positiva della protezione sanitaria della popolazione, dei pazienti e dei lavoratori.

Tuttavia, come si anticipava, il metodo adottato – e cioè quello della curiosità della conoscenza affidata all'intuito - “ha presentato il conto” imponendo di scegliere – a consuntivo della cd. *parte generale* - tra la pluralità dei profili giuridici riscontrati e affrontati, quelli da trattare in modo particolareggiato – ha, cioè, imposto la creazione di una *parte speciale*.

In questa è confluita l'analisi dei profili penalistici, civilistici e previdenziali, connessi all'impiego di radiazioni ionizzanti.

La trattazione, benché voluminosa ed articolata, riesce a consuntivo a cogliere elementi di importanza fondamentale e trasversale che confermano inequivocabilmente la terza intuizione – e cioè quella dell'ineluttabilità della spiegazione causale, la quale presagiva come il giudizio controfattuale, condotto attraverso il filtro della regola scientifica di copertura, potesse rasentare il passaggio all'irrazionalità, finendo per l'attestare il moralmente insostenibile.

A consuntivo del cap. V, rubricato *Considerazioni d'insieme*, il percorso elaborativo subiva lo *shock* conseguente alla consapevolezza dell'essere inceppato in un vicolo cieco.

Se il carattere dei danni conseguenti ai rischi *della nuova modernità* – di cui quelli determinati dalle radiazioni ionizzanti costituiscono prototipo - ha

l'effetto di infrangere il monopolio di razionalità della scienza, se ne deduce che un diritto modellato su base scientifica porta intrinsecamente la conseguenza dello sgretolamento delle istanze di giustizia, e la necessità di mutuare le determinazioni utili al superamento dell'*impasse* da altra branca della conoscenza.

Matura, in questo modo, la consapevolezza - sulla scorta di un velato ed autorevolissimo suggerimento - della necessità di eludere le fitte maglie della dogmatica del diritto per ricercare *aliunde* alcune possibili soluzioni al delicato problema del danno da radiazioni ionizzanti.

L'elaborato imbocca, così, la via che conduce al più ampio insieme delle determinazioni meta-giuridiche della vicenda, onde ricercare l'*input* capace di infrangere il circolo vizioso dell'eterno ritorno dell'intangibilità della causa individuale.

Il rivolgimento alle determinazioni meta-giuridiche *dei danni realizzati dalle malattie della nuova modernità*, compendiato nella postfazione a questa produzione, rappresenta il punto di rottura tramite il quale il percorso euristico, aggirando l'*impasse* dell'intangibilità della causa individuale, accede al risolutivo momento dell'indicazione di *alcune possibili soluzioni* – schiudendo il bozzolo della comprensione e divenendo, per suo tramite, un *atto logico reale* che, come ogni concetto e verità in genere, si realizza attraverso i (tre) momenti della logicità *hegeliana*, dell'astratto – o intellettuale; del dialettico – o negativo razionale, e dello speculativo – o positivo razionale.

Introduzione

L'elaborazione di questa Tesi di Laurea, intitolata “*Il danno da radiazioni ionizzanti. Profili giuridici della radioprotezione*” si sviluppa precipuamente nei tre momenti della logica *hegeliana*.

Il *momento intellettuale* è dedicato alla trattazione dei profili giuridici connessi alla prevenzione del rischio da radiazioni ionizzanti, ed al danno eventualmente cagionato in violazione, o nonostante l'osservanza, delle norme prevenzionali.

Complessivamente il *primo momento* di questa Tesi - composta da una parte generale, in due capitoli, ed una parte speciale nei tre residui capitoli - si articola in tredici paragrafi elencati nell'indice generale, composti da una pluralità di sotto-paragrafi – oltre le nove appendici endogene.

Al *Capitolo I*, rubricato “*Gli elementi extra-giuridici della fattispecie*”, è demandato l'onere di rassegnare quegli elementi del discorso che pur non attenendo al mondo del diritto, risultano indispensabili ai fini della comprensione delle delicate note modali dell'interazione tra l'energia nucleare liberata tramite l'impiego della tecnologia e tutto ciò che può venirvi a contatto.

Per far ciò, oltre alle brevi note introduttive circa la fisica delle radiazioni ionizzanti e i principi generali della radiobiologia, il cap. I si articola in due paragrafi concernenti, rispettivamente, la ricostruzione della cronologia essenziale della storia della radioattività, a riscontro delle due anime della tecnologia nucleare tra cui sussiste un vincolo di filiazione diretto, e della rassegna degli studi di epidemiologia sugli effetti negativi dell'interazione tra le radiazioni ionizzanti e l'uomo.

Conclude il cap. I, l'appendice rubricata “*Esposizione ed epidemiologia dell'UD*”, finalizzata a ricostruire il quadro globale dell'esposizione alle polveri di uranio depleto utilizzato a scopi bellici, nonché a fornire alcune indicazioni inerenti le risultanze di varie indagini epidemiologiche svolte sull'argomento, con particolare attenzione a quella svolta dalla Commissione Mandelli sull'epidemiologia di quella che venne denominata Sindrome dei Balcani.

Acquisito un bagaglio di elementi prodromici e necessari, si avvia la delicata fase dell'inquadramento del *thema* all'interno della retorica giuridica, sulla scorta di un impianto sistematico precostituito.

Il *Capitolo II*, rubricato giustappunto “*Le radiazioni ionizzanti nel sistema delle fonti di produzione*”, è composto da quattro paragrafi, rassegnati nell'indice generale, articolati in sedici sotto-paragrafi indicati minuziosamente nell'indice particolare del capitolo, oltre che tre appendici aventi ad argomento la questione della sicurezza nucleare.

Il primo paragrafo, in rassegna delle *fonti di diritto internazionale*, si occupa pressoché parallelamente di impieghi militari e civili dell'energia nucleare.

Quanto ai primi, previa introduzione sul regime di non proliferazione condotta tramite la lente del TNP, la Tesi si sofferma sulla questione della liceità dell'arma nucleare, approcciando in modo critico al *non liquet* della Corte di Giustizia delle Nazioni Unite nello storico parere reso all'Assemblea Generale nel 1996, pur senza sottovalutare la portata rivoluzionaria dell'inquadramento degli obblighi di non proliferazione entro la più generale cornice del Diritto Internazionale Umanitario.

A pedice l'appendice rubricata *Il dossier iraniano e la questione coreana*, dedicata ad una, seppur celere, disamina dei profili politico-militari delle recenti “crisi nucleari”.

Quanto agli impieghi civili, al sotto-paragrafo II va riconosciuto anzitutto il merito di aver inserito le raccomandazioni della Commissione Internazionale di Protezione Radiologica nel contesto del *soft law*, aprendo la strada alla comprensione del peculiare fenomeno di giuridicizzazione delle medesime tramite l'azione del diritto comunitario.

In secondo luogo, le risultanze dell'analisi della pubblicazione n. 103 hanno suggerito la trattazione autonoma delle questioni inerenti la radio-protezione dell'ambiente, la quale si è rivelata, a consuntivo, una scelta redazionale farraginoso, ancorché mossa da fondate ragioni di ordine sistematico.

Nell'secondo paragrafo, dedicato alle *Fonti di diritto comunitario*, previa analisi del Trattato CEEA (oggi protocollo n. 2 al Trattato di Lisbona) e analisi diacronica della disciplina radio-protezionistica condotta nelle more

del diritto derivato, con particolare attenzione alle recenti dir. 2013/59/EA e 2014/87/EA, rispettivamente in materia di protezione sanitaria e di sicurezza del nucleare, vengono affrontate tre rilevanti questioni di giurisprudenza comunitaria, inerenti rispettivamente all'ambito di applicazione del suindicato Protocollo n. 2, alla discrezionalità del legislatore nell'attuazione delle direttive ed alla repressione delle immissioni transfrontaliere intollerabili di radiazioni ionizzanti.

Come si anticipava, questo paragrafo permette di confermare la giuridicizzazione del sistema di radio-protezione elaborato in seno alla Commissione Internazionale, in attuazione delle norme contenute nel capo 3, tramite gli atti di diritto derivato nonché di consentire l'individuazione di un gravissimo *deficit* del sistema di protezione sanitaria *ex* Capo 3 – e conseguenzialmente di tutte le norme interne costituenti di questo derivazione - che, secondo la costante giurisprudenza della Corte di Giustizia dell'Unione Europea, non si applica, e più precisamente non protegge la popolazione dagli impieghi dell'*atomo militare*.

Il terzo paragrafo è dedicato alla ricostruzione del quadro legislativo nazionale.

In questo è confluita l'analisi delle fonti in materia di impieghi dell'atomo civile, con particolare riferimento alle norme in materia di protezione sanitaria.

A tal riguardo, l'analisi fornisce riscontro a varie affermazioni contenute trasversalmente all'interno della parte generale, ed inerenti sommariamente il fenomeno di giuridicizzazione delle fonti di diritto internazionale cd. debole, alla discrezionalità a senso unico nell'attuazione delle direttive comunitarie, all'individuazione dei punti ove porre un'etichetta di revisione, oltre che suggerire le vie da intraprendere nella trattazione dei *speciali* profili giuridici connessi all'impiego dell'atomo civile.

Coerentemente con la scelta redazionale di dotare di autonomia concettuale la branca della radio-protezione dell'ambiente, la tematica della gestione del ciclo dei rifiuti radioattivi è stata artificiosamente scorporata dall'analisi del quadro legislativo – modellato *funditus* sull'approccio antropocentrico che ha contrassegnato il primo secolo di attività della Commissione Internazionale di Protezione Radiologica – confluendo

nell'appendice rubricata *Criticità e Prospettive della gestione del ciclo dei rifiuti nell'ordinamento italiano*, concepita anche quale porta d'accesso alla più articolata questione del traffico illecito di rifiuti radioattivi, che sarebbe stata affrontata, successivamente, nell'appendice al Commento del Capo XI del d. Lgs 230/1995, rubricata *L'intrigo radioattivo*, a *pendant* dell'assioma dell'inidoneità del rispettivo sistema sanzionatorio.

Il capitolo di apertura della *parte speciale*, il terzo della trattazione, rubricato *Aspetti Penalistici*, è composto da due paragrafi, articolati in sei sotto-paragrafi, finalizzati all'analisi delle responsabilità penali connesse alla violazione delle norme costituente la branca della radio-protezione – come trasfusa nel nostro ordinamento tramite l'attuazione degli obblighi di cui al Capo 3 del Protocollo n.2 al Trattato di Lisbona; e delle responsabilità cd. tradizionali – e cioè che trovano la propria fonte nel codice penale, connesse all'impiego delle radiazioni ionizzanti.

Nella sua articolazione interna, il par. 3.1 accoglie un originale esegesi ed commento al capo XI del d. Lgs. 230, realizzato esclusivamente sulla base del testo di legge e delle pronunce giurisprudenziali in epigrafe.

Pregio dell'elaborazione, non è solo quello di individuare le carenze del sistema sanzionatorio a base ingiunzionale, caratterizzato da pene blande, e per il privilegio a misure transattive di composizione dell'azione penale, enucleate nella violazione pressoché trasversale del principio di legalità, bensì quello di suggerire il problema della spiegazione causale, ancorché nella sintomatologica fase della capitolazione della teoria dell'aumento probabilistico del rischio.

Ciò getta, del resto, luce sull'inidoneità della tecnica di normazione ingiunzionale a presidiare beni giuridici fondamentali - quale è la salute dell'uomo - non consentendo un modello di accertamento del reato basato sulla mera prova della violazione del precetto, nemmeno la mera individuazione di elementi prodromici alla verifica di un danno alla salute.

A conclusione del commento, quale elemento empirico teso a corroborare la necessità di revisionare un apparato sanzionatorio ritenuto inadeguato, è stata posta un'appendice endogena, che, lo si anticipava, ha ad oggetto la ricostruzione vicenda di cronaca giudiziaria, tristemente nota con

l'appellativo "*toxic ship*", poi rinominata da Legambiente, dalla cui denuncia, per altro, si è diramata a macchia d'olio l'inchiesta giudiziaria, «L'intrigo radioattivo», a sottolineare l'intreccio di interessi transnazionali imprenditoriali e criminali convergenti nello "snodo" italiano, quale crocevia delle rotte, concomitanti e reciproche, di armi e rifiuti.

Nella seconda parte del cap. III vengono rassegnati i profili di responsabilità del datore, la cui attività di impresa è soggetta all'ambito applicativo del d. Lgs 230/1995, e del medico specialista che impiega radiazioni ionizzanti a scopi terapeutici.

Tale fase della trattazione ci consente di entrare nel merito della più delicata questione della spiegazione causale, condotta secondo gli indirizzi della nota giurisprudenza Franzese, in presenza di patologie stocastiche connesse all'utilizzo di fonti di radiazioni, e di individuare nel perentorio giudizio di messa al bando dei giudizi di probabilità logica o di credibilità razionale della causa individuale, il primo sintomo dell'ineluttabilità della spiegazione del nesso di condizionamento.

A pedice, l'appendice endogena, rubricata *Dei reati contro l'ambiente*, a riscontro delle notevoli perplessità interpretative legate alla tutela penale ambientale, e sollevate nelle more del Commento del capo XI in concomitanza al confronto con le note di indirizzo di politica criminale comunitaria di cui alla dir. 2008/99/CE, avente ad oggetto un breve commento al Titolo VI-*bis* del cod. pen. condotto con metodo esegetico-sperimentale.

Nel *Capitolo IV*, composto da due paragrafi articolati in ben tredici sottoparagrafi, tra cui due ulteriori appendici endogene, è confluita la trattazione congiunta degli aspetti previdenziali – affrontati tramite l'analisi delle due anime della tutela assicurativa speciale per gli operatori sanitari, ed ordinaria per i lavoratori esposti al rischio di radiazioni ionizzanti; e civilistici, con attenzione al settore della responsabilità datoriale, e della colpa professionale del medico specialista.

Per altro, le due appendici endogene seguono la medesima biforcazione, avendo ad oggetto, rispettivamente, le misure previdenziali adottate per fronteggiare l'emergenza giudiziaria determinata dal proliferare delle istanze

di risarcimento dei danni da esposizione alle polveri di uranio impoverito, e gli aspetti strutturali del recente contenzioso civile.

A tal riguardo giova precisare che la scelta di trattare unitariamente tali aspetti rispondeva all'esigenza di cogliere in modo preciso il *discrimen* tra la tutela previdenziale e civile del lavoro, ha avuto il pregio di paventare, *ex post* - e cioè in seguito all'accorpamento delle citate appendici – l'intuizione che la regola della spiegazione causale fosse solo uno strumento per veicolare il sistema verso determinate traiettorie di ingiustizia sostanziale, tracciate aprioristicamente da precise scelte etiche.

Quanto alla responsabilità civile del datore di lavoro, previa introduzione sulla questione dogmatica della natura della responsabilità *ex art. 2087 c.c.*, condotta sotto la lente di quella dottrina che ha traghettato l'obbligo di prevenzione all'interno della cooperazione creditoria per mezzo della ricomposizione delle condizioni generali del contratto, in forza della clausola *ex art. 1374 c.c.*, la trattazione si sofferma sulle problematiche interpretative connesse alla nozione di imprenditore accolta nella norma di riferimento, e sull'individuazione del datore di lavoro nel pubblico impiego.

Nel sub-par. *B)*, rubricato *Sul contenuto e sulla violazione del precetto*, l'art. 2087 c.c. viene prima contestualizzato nel più ampio rapporto che incorre tra la particolare disciplina della radio-protezione e quella generale antinfortunistica, e poi ricostruito quale generale obbligo di prevenzione, avente ad oggetto l'adozione di tutte le misure prevenzionali tecnicamente possibili ancorché non previste specificatamente dalla legge.

Per tale via, risulta, semplificato l'arduo compito di cogliere le sfumature processuali caratterizzate dal rispettivo riparto dell'onere probatorio, in presenza di danni conseguenti alla violazione del generico precetto vincolistico piuttosto che ad alcuna delle disposizioni speciali.

Di notevole interesse è l'analisi svolta in materia di concorso del fatto colposo del creditore che perviene, sulla scorta delle indicazioni della disciplina antinfortunistica, ad attestare l'esistenza di un generico obbligo di auto-prevenzione, che incide inevitabilmente sulle determinazioni inerenti la violazione dell'art. 2087 c.c.

A pedice del capitolo sono analizzati i profili giuridici inerenti la responsabilità civile del medico (libero professionista o dipendente),

cominciando dall'annosa diatriba sulla natura della responsabilità, tramite l'analisi della trentennale elaborazione giurisprudenziale, scardinata dal recente intervento legislativo, che aveva condotto alla riconduzione della colpa del medico nell'alveolo della responsabilità *ex contractu*, sino alla ricostruzione del contenuto della prestazione, svolta in concomitanza con la ricostruzione dei rispettivi oneri probatori.

In modo dettagliato viene affrontata la problematica della gradazione della colpa ai fini dell'applicazione dell'art. 2236 c.c., colta quale occasione per esaminare i profili della violazione dell'obbligo di diligenza – e più precisamente di come l'esonero per colpa lieve riguardi i soli casi di imperizia.

Oltre alla ricostruzione dell'obbligo di diligenza quale componente della prestazione medica, ma anche come parametro di imputazione della colpa, e dell'obbligo di regolare tenuta della cartella clinica, a *pendant* del suggerimento della Commissione Internazionale di Protezione Radiologica di disciplinare le determinazioni inerenti la registrazione dei valori dosimetrici in radioterapia e medicina nucleare, la trattazione si sofferma sulla natura e contenuto dell'obbligo di informazione nonché sulle conseguenze della sua violazione in termini del risarcimento del danno cagionato attinente, beninteso, non già alla determinazione di un pregiudizio fisico, ma alla violazione del diritto all'autodeterminazione.

L'epilogo della trattazione affronta l'annosa questione della dicotomia tra obbligazioni di mezzi e di risultato, al cui perentorio giudizio di non fondatezza fa da riscontro l'alto grado di specializzazione raggiunto dalla medicina radiologica.

Il *Capitolo V*, titolato *Considerazioni d'insieme*, costituisce il culmine del momento intellettuale, ivi confluendo l'analisi trasversale necessaria a cogliere le sfumature giudiziali della ricostruzione eziologica dominata dal principio dell'univocità causale, nonché la rassegna dei profili giuridici del danno da radiazioni ionizzanti, nei residuanti attinenti alla dimensione oggettiva, e nella ricostruzione delle posizioni di titolarità soggettiva.

Oggetto del par. 5.1 è l'*indagine comparativa* vertente, anzitutto sugli schemi ricostruttivi della causalità nel rito penale e civile.

Nel sotto-paragrafo *I.* rubricato (...) *nel rito penale*, ancorché l'indagine verteva principalmente sugli aspetti dogmatici del concetto di causalità e sulla corretta lettura delle note di indirizzo della giurisprudenza Francese, si è avuto la possibilità di affrontare il problema definitorio della causa commissiva ed omissiva, dimostrando come il tradizionale criterio di riparto finisce per perdere la sua capacità selettiva in presenza di situazioni collocabili nell'ambito di applicazione della radioprotezione.

Il successivo sotto-paragrafo, nel rassegnare la dogmatica della causalità civile, e principalmente nell'intento di ricercare la misura in cui è possibile rivendicare un'autonomia concettuale rispetto a quella penale al cospetto della conclamata univocità della spiegazione causale, riesce a spostare il baricentro, sulla scorta delle indicazioni di autorevole giurisprudenza, da un'analisi in punto di principio, ad un'analisi in punto di giudizio.

In questo modo il principio dell'univocità causale viene filtrato attraverso la dicotomia della regola di giudizio, intesa quale espressione delle finalità proprie di ciascun ordinamento processuale.

Nel sub-par. *C)*, rubricato *Criteriologia processuale e tutela previdenziale*, viene rassegnata, a grandi linee, la criteriologia medico legale in sede di accertamento delle patologie stocastiche, con riferimenti anche al sistema della *Probability of Causation*, frequentemente usata nel settore previdenziale.

Successivamente l'indagine si sofferma sulla discrasia degli assetti processuali in materia di riconoscimento delle malattie tabellate o non, pervenendo ad individuare gli elementi caratterizzanti la presunzione di causalità, e gli effetti della sua operatività sul riparto degli oneri probatori.

Tale sezione della trattazione si conferma, a posteriori, quale elemento indefettibile per la comprensione dell'*impasse onnicomprensivo*, e cioè per l'individuazione di quell'elemento unico capace, nelle diverse sfumature, di bloccare il funzionamento della giustizia, e che, beninteso, non vuole riferirsi al concetto di spiegazione causale, ma più specificatamente al momento della sussunzione sotto la legge scientifica di copertura, per altro nella specifica materia del danno connesso all'esposizione a radiazioni ionizzanti.

Quanto al par. 5.2, rubricato *Profili giuridici del danno*, assorbe l'analisi dei profili impliciti e di quelli residuali legati alla triplice morfologia del

danno conseguente all'esposizione a radiazioni ionizzanti, e cioè di danno - patrimoniale e non - all'integrità psico-fisica dell'esposto ed eventualmente, in conseguenza, dei prossimi congiunti di questo; di danno ambientale conseguente alla contaminazione radioattiva quale fonte dell'obbligazione restitutoria verso lo stato, o risarcitoria verso i privati; nonché di danno all'integrità fisica dell'uomo conseguente alla contaminazione ambientale.

Quanto a quest'ultimo sotto-paragrafo, giova precisare, deve riconoscersi il pregio dell'approccio sperimentale adottato muovendo i passi da un'ipotesi di accertata contaminazione ambientale rilevante *ex art. 452-ter c.p.* che ha consentito, a consuntivo, di paventare l'idea di un'azione risarcitoria volta a cogliere il danno da radiazioni ionizzanti nella sua dimensione progressiva.

Gli spunti e le intuizioni suggerite nel corso della trattazione prendono forma nella *postfazione*, intitolata *La dimensione meta-giuridica del danno*, composta da quattro rubriche.

La postfazione incarna, effettivamente, il momento dialettico di questa tesi poiché finalizzata ad una revisione critica degli aspetti salienti ed originali dell'elaborato, mutuando da altri settori di studio – segnatamente dalla filosofia e dalla sociologia – gli elementi *per sopprimere determinazioni intellettuali nel passaggio alle loro opposte*.

Rappresenta cioè, il passaggio obbligato per il superamento delle difficoltà trasversalmente osservate nell'esplicazione del momento intellettuale, a cui fa da *pendant* il momento speculativo della trattazione, che nel disegno originario avrebbe dovuto incarnare le cd. conclusioni, ma che, per converso, è stato confinato all'elaborazione di un'Appendice esogena – e cioè un'appendice all'intera trattazione, perciò rassegnata nell'indice generale – che contiene *alcune possibili soluzioni* ai problemi determinati dall'applicazione delle tradizionali categorie del diritto moderno.

Come si avrà modo di osservare a consuntivo, se l'*impasse onnicomprensivo* è stato individuato nella regola della spiegazione causale tramite la sussunzione sotto leggi scientifiche di copertura, le direttrici del malfunzionamento dei rimedi di diritto sono sottese *funditus* alla medesima inidoneità della tradizionale concezione di danno-evento, quale fonte produttivo sia dell'azione risarcitoria, che dell'esercizio dell'azione penale, a

cogliere le dinamiche del danno progressivo realizzato, più generalmente, dalle dinamiche insite alla *società del rischio nucleare*.

Tali direttrici, che costituiscono oggetto ed ispirazione delle prime tre rubriche della *postfazione*, rispondono a precisi quesiti logici sollevati nei meandri della trattazione.

In primo luogo occorre chiedersi perché un sistema vocato alla giustizia potesse condurre a soluzioni palesemente ingiuste, con la conseguenza che si rendeva necessario, preventivamente, comprendere l'essenziale differenza tra i concetti di giustizia ed etica.

In ciò, il pregio della rubrica *Scelte etiche e giustizia procedurale*, risiede nell'aver formulato *tranchant* una opinione sul come determinate scelte etiche di politica del diritto, talvolta diametralmente opposte, compiute dal legislatore finiscono per soffocare le istanze di giustizia dei danneggiati.

Allo specifico problema dell'inadeguatezza del concetto di danno-evento è dedicata la rubrica *Il rischio nucleare globalizzato* volta a sganciare, sulla scorta dell'intuizione *Beckiana*, la nozione di danno dalla manifestazione fenomenica di evento verificatosi *hic et nunc*, cogliendolo nella sua dimensione progressiva ed unitaria, a cui fanno da *pendant*, in modo oltremodo curioso, le caratteristiche peculiari *delle malattie della nuova modernità* -e cioè la natura aspecifica ed il lungo periodo di latenza.

La terza rubrica, intitolata *Le vittime dell'atomo militare*, è finalizzata a dare consistenza al rilievo del *deficit* abnorme nella protezione sanitaria della popolazione dai rischi connessi all'impiego di radiazioni ionizzanti, e cioè al problema dell'inapplicabilità della disciplina radio-protezionistica agli impieghi dell'atomo militari, ancorché allo stato attuale, continuano a rappresentare il più rilevante fattore di contaminazione ambientale, oltre che, anche per suo tramite, o per cause lavorative, un rilevante fattore di contaminazione dell'uomo.

A *pendant* delle cifre da capogiro, come esplicate nell'omonima rassegna del prof. Zucchetti, la rubrica conclusiva della *postfazione*, intitolata *Considerazioni sull'inverno nucleare* rappresenta, infine, uno strumento volto a demonizzare, sul versante sociologico, la rilevanza della fomentata preoccupazione della guerra atomica.

A tali problematiche, seppur in modo laconico, si dà risposta nell'Appendice conclusiva della trattazione, attraverso l'enucleazione di un *autentico paradigma del danno-progressivo, quale danno interinale e parziale*, utile a paventare alcune possibili soluzioni trasversali sul problema dell'inefficienza dei rimedi di diritto tradizionali a tutelare i beni giuridici da forme di aggressione tipiche di una seconda modernità.

*«Il pensiero, come intelletto, se ne sta alla
determinazione rigida e alla differenza di
questa verso altre: siffatta limitata
astrazione vale per l'intelletto come cosa
che è e sussiste per sé»*

PARTE GENERALE

1. CAPITOLO I: Gli elementi extra-giuridici della fattispecie

Parte Generale – Capitolo I: Gli elementi extra-giuridici della fattispecie; 1.1 Storia della radioattività: le applicazioni militari e civili; 1.2 Studi di epidemiologia: l'effetto delle radiazioni ionizzanti sull'uomo; I. Appendice: Esposizione ed epidemiologia dell'UD.

In fisica è definita radiazione l'emissione di energia sotto forma di onde o corpuscoli.

Se ne distinguono usualmente due tipologie: quelle la cui energia è insufficiente a sottrarre elettroni all'atomo colpito, radiazione cd. eccitante, e quelle la cui energia è tale da determinare la ionizzazione della materia, quindi la sottrazione di elettroni dal nucleo e conseguente formazioni di anioni (o ioni con carica elettrica negativa), o la scissione dell'atomo colpito, da cui consegue la formazione di cationi (o ioni con carica elettrica positiva).

Le radiazioni ionizzanti vengono raggruppate in due categorie: si parla di radiazioni direttamente ionizzanti (o densamente ionizzanti) con riferimento alle particelle elettricamente cariche (α , β^- , β^+), le quali determinano la ionizzazione dell'intera struttura tessutale irradiata; le particelle elettricamente neutre (neutroni, raggi γ e raggi X) o prive di massa (fotoni), dette indirettamente ionizzanti (o sparsamente ionizzanti), in genere onde elettromagnetiche ad alta frequenza e lunghezza relativamente corta, che sono in grado di penetrare a fondo la materia determinandone la ionizzazione nel tragitto di percorrenza mediante meccanismi indiretti.¹

Gli studi di radiobiologia² sono concordi sul fatto che gli effetti dell'interazione siano determinati dal trasferimento di tutta o parte dell'energia al tessuto irraggiato.

Ne consegue la rottura dei legami molecolari e formazione di ioni immediatamente capaci di interagire e reagire determinando l'alterazione chimica di altre molecole e, quindi, la diffusione delle conseguenze dell'interazione a porzioni tessutali adiacenti a quella direttamente ionizzata.³

¹ Cfr. Cavanna, Del Forno 2005 . p. 74.

² Cfr. ICRP N. 103; Bucci, Poggi, 1999.

³ Cfr. Garrozzo, Marziano, 1985, p. 292.

Trattandosi di materiale biologico l'effetto più probabile è la radiolisi delle molecole dell'acqua, da cui consegue la produzione di radicali liberi, altamente reattivi, che mediano il trasferimento dell'energia ad altre molecole adiacenti.

D'altro canto la ionizzazione può riguardare direttamente il DNA inducendo una pluralità di variazioni possibili nella codificazione genetica a cui può conseguire una differente risposta cellulare: l'inattivazione, il riarrangiamento dei cromosomi o la mutazione.

La gravità del danno cellulare non dipende solamente dalla dose assorbita o dal rateo di dose ma anche dalla qualità della radiazione, descritta in termini di trasferimento lineare di energia;⁴ in ogni caso l'efficacia biologica della radiazione aumenta proporzionalmente al LET con la conseguenza che le radiazioni densamente ionizzanti sono maggiormente efficaci per unità di dose assorbita nonostante le reazioni interessino un numero inferiore di molecole.⁵

L'irraggiamento del DNA può produrre la rottura di uno, *single strand break*, o entrambi i filamenti, *duble strand break*, la rottura di legami di una molecola proteica ovvero il danno ad una base.

Gli studi di radiobiologia *in vitro* dimostrano che la rottura di un singolo filamento in genere è facilmente riparabile; è invece più difficile riparare correttamente il danno «in caso di rotture in una regione limitata del DNA, quando gli enzimi possono interferire fra loro o addirittura può essere stata compromessa la sequenza di basi su entrambi i filamenti».⁶

⁴ «Il LET è utilizzato quale unità di misura dell'energia media per unità di lunghezza depositata lungo la traccia di una particella, e dipende dal tipo di particella e dalla sua energia. Le radiazioni sparsamente ionizzanti (gli elettroni, i raggi X e 'Y) producendo poche interazioni per micron, sono chiamate a basso LET, mentre le particelle cariche, o radiazioni densamente ionizzanti, come le particelle α e i protoni, sono chiamate ad alto LET; questo non è in realtà sufficiente a descrivere la qualità della radiazione dal punto di vista della sua efficacia radiobiologica in quanto questa varia a seconda della velocità della particella, essendo legata al dettaglio della struttura della traccia», **Bucci, Poggi**, 1999, p.11

⁵ «Le reazioni di tessuti ed organi dovute all'esposizione a radiazione ad alto LET sono simili a quelle dell'esposizione a basso LET, ma la loro frequenza e la loro gravità sono maggiori per unità di dose assorbita di radiazione ad alto LET. Queste differenze per l'effetto in questione sono espresse in termini di efficacia biologica relativa (RBE). L'efficacia biologica relativa di radiazioni ad alto LET, per confronto con radiazioni a basso LET, è definita come il rapporto tra la dose da radiazione a basso LET di riferimento e la dose di radiazione ad alto LET che produce un effetto biologico di eguale grado», **ICRP N. 103**, p. 143.

⁶ Cfr. **Bucci, Poggi**, 1999, p.12.

Le conseguenze sono essenzialmente ed alternativamente due: la morte della cellula, anche conseguente alla perdita della capacità riproduttiva ovvero la mutazione, generalmente considerata prodromo di patologie neoplastiche.⁷

La Commissione Internazionale di Protezione Radiologica definisce “sorgente” qualsiasi entità fisica o procedura tale da produrre dosi quantificabili in termini di esposizione di uno o più individui.

Occorre distinguere anzitutto tra “sorgenti artificiali”, o installazioni nell’ambiente, esemplificativamente si pensi ad una centrale elettronucleare o ad una macchina radiogena per diagnostica, ovvero procedure implicanti l’utilizzo di materiali radioattivi, si pensi alla bronchiterapia che consiste nell’introduzione nel corpo del paziente di sorgenti sigillate o non,⁸ oppure alla fluoroscopia; e “sorgenti naturali”, costituite dai materiali radioattivi dispersi nell’ambiente⁹ e nell’aria; e dalle radiazioni cd. cosmiche¹⁰.

⁷ «E’ noto (...) che una singola particella α può formare 200 SSB e circa 20 DSB nell’attraversare il nucleo di una cellula, perciò ha una elevata probabilità di produrre un effetto biologico permanente, incluse le mutazioni o aberrazioni cromosomiche nelle cellule che sopravvivono. Nel caso delle radiazioni a basso LET, invece, la traccia di un singolo elettrone forma in media 1 SSB e 0.04 DSB, ma occasionalmente può produrre anche 20 SSB e pochi DSB, di cui alcuni complessi (...)», **Bucci, Poggi**, 1999, pp.12-13.

⁸ Si definisce sorgente non sigillata «qualsiasi sorgente che non corrisponde alle caratteristiche o ai requisiti della sorgente sigillata», mentre si definisce sorgente sigillata qualsiasi «sorgente formata da materie radioattive solidamente incorporate in materie solide e di fatto inattive, o sigillate in un involucro inattivo che presenti una resistenza sufficiente per evitare, in condizioni normali di impiego, dispersione di materie radioattive superiore ai valori stabiliti dalle norme di buona tecnica applicabili», art.4, comma 3 lett s) e t) D. Lgs. 230/1995.

⁹ «(...) La radioattività è un fenomeno che si produce normalmente in natura in quasi tutti gli elementi, che hanno un numero atomico maggiore di quello del piombo (Pb 82), ed anche in alcuni elementi di numero atomico inferiore, i quali subiscono una disintegrazione spontanea, dando luogo ad un’emissione continua di radiazioni (...), trasformandosi in elementi più stabili. In natura esistono quarantuno elementi radioattivi, dei quali i più comuni sono potassio 40, selenio 79, radon 86, rubidio 87, radio 88, torio 90, uranio 92, indio 113, stagno 124, tellurio 130, neodimio 150, samario 152, lutezio 176, renio 187, piombo 202 e bismuto 209», **Troisi Fortunato**, 1974, p. 609.

¹⁰ «La radiazione primaria che raggiunge dallo spazio lo strato esterno dell’atmosfera terrestre è composta dall’87% da protoni, per l’11% da particelle α , per l’1% da nuclei con numero atomico compreso tra 4 e 26 e per l’1% da elettroni di energia molto elevata. La radiazione cosmica è principalmente di origine esterna al sistema solare ma una componente importante è dovuta al Sole con variazioni periodiche dovute all’attività solare. L’interazione con l’atmosfera determina la produzione di elettroni, di raggi γ , neutroni e mesoni. La dose efficace dovuta alla radiazione cosmica dipende essenzialmente dall’altitudine dal livello del mare. A quota 0 è mediamente di 0,3 mSv/anno e tende a raddoppiare ogni 2000 m fino ad alcuni chilometri di quota. (...)», **Sandri**, 2003, p. 5.

1.1. Storia della radioattività: le applicazioni militari e civili.

Era il dicembre del 1885 quando il fisico W. Conrad Roentgen comunicò alla comunità scientifica internazionale di aver osservato che i raggi emanati da un ampolla vuota d'aria, attraversata da una corrente ad alta tensione, avevano la capacità di attraversare i corpi opachi¹¹; l'anno successivo il fisico francese Antoine Henri Becquerel scopre la radioattività naturale dell'uranio nel tentativo di verificare la relazione tra i raggi X e la fluorescenza.¹²

La coniazione del termine radioattività si deve a Marie Curie che nel 1888, osservando l'eccessiva radioattività di un minerale, il pechblenda, rispetto alle quantità di uranio presenti, ipotizzò l'esistenza di altri elementi naturalmente radioattivi.

In particolare venne isolato un metallo, molto simile al bismuto, a cui fu dato il nome di polonio, in onore della patria della scienziata. Successivamente, in base alle medesime osservazione, nel 1902, i coniugi Curie ipotizzano l'esistenza di un altro elemento, il quale venne isolato e denominato radio.

Nel 1934 viene realizzata, per la prima volta artificialmente, la scissione dell'atomo dell'uranio mediante il bombardamento nucleare¹³; si osservò che la scissione dell'atomo determinava il rilascio di altri neutroni in grado di provocare potenzialmente reazioni a catena e se ne concluse che le reazioni di fissione erano in grado di autoalimentarsi.

Orbene il procedimento di fissione nucleare può essere moderato mediante un refrigerante, principio che sta alla base dei reattori delle centrali termonucleari, ovvero essere incontrollato, determinando il rilascio di un

¹¹ Cfr. **Spiridigliozzi, Ballarin**, 2001, p.9.

¹² Le radiazioni prodotte dell'uranio furono inizialmente denominate radiazioni Becquerel, solo successivamente il fisico Ernest Rutherford osservò che i raggi emessi dall'uranio erano costituiti da una pluralità di particelle. Lo stesso Rutherford individuò i raggi α e β , a cui successivamente furono aggiunti i raggi γ . Cfr. **Bagatti, Corradi, Desco, Ropa**, 2012, p. 2.

¹³ Il merito della scoperta della modalità artificiale di fissione si deve ad un gruppo di fisici, i cd ragazzi di via Panisperna, supervisionati da Enrico Fermi. Tuttavia è noto che la prima fissione artificiale fu casuale ed incompresa essendo, i fisici italiani, convinti di aver creato dei nuovi elementi transuranici. La comprensione del processo di fissione deve riconoscersi a due chimici tedeschi, Otto Hahn e Fritz Strassman, che dimostrarono sperimentalmente che un atomo di uranio (U235) può scindersi in due o più frammenti qualora assorba un neutrone.

ingente quantità di energia, principio che sta alla base delle cd. bombe atomiche (o nucleari).¹⁴

Dall'induzione del primo processo di fissione al *Trinity test*, il primo test nucleare, nell'ambito del cd. Progetto *Manhattan*, il 15 Luglio 1945, nel deserto di *Jornada del Muerto* nel *New Mexico*, a 54 Km dalla città di *Socorro*, passarono solo undici anni.

Il 6 Agosto 1945, nella mattinata, l'aviazione statunitense sgancia sulla città giapponese di Hiroshima l'ordigno al plutonio codificato "*Little boy*"; solo tre giorni più tardi il *Boeing B-29 Superfortress* decollato alla volta di Kokura viene dirottato su Nagasaki; erano circa le 11 del mattino quando il terzo ordigno a fissione nucleare del plutonio, codificato "*Fat man*", detona su Nagasaki.

Nel novembre dello stesso anno, a Washington, il presidente Truman e i primi ministri inglese e canadese Attlee e Mackenzie King firmarono una dichiarazione trilaterale sull'energia atomica impegnandosi a procedere con la diffusione di documentazione scientifica a fini pacifici con qualsiasi paese interessato ad uno scambio reciproco.

Nel novembre del 1952, quale risultato del progetto denominato "*Operation Ivy*", viene fatta detonare al di sopra dell'atollo di Enewetak, la prima bomba all'idrogeno; l'anno successivo il medesimo obiettivo viene raggiunto dall'Unione Sovietica.

Nella contrapposizione dei blocchi della guerra fredda, l'esperimento sovietico evidenziò il fallimento strategico della politica di segretezza atomica, oltre che atterrire il mondo costituendo fonte della consapevolezza dello scenario di autodistruzione del genere umano.

Non a caso, solo pochi mesi dopo, l'8 Dicembre del 1953, il presidente Truman, in un discorso alle Nazioni Unite, propone l'istituzione di un'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica, aprendo la stagione del collaborazionismo internazionale sulla disciplina della ricerca sull'utilizzazione a scopi pacifici dell'energia nucleare.

Cronologicamente si riconduce il momento dell'inizio della collaborazione alla prima conferenza di Ginevra del 1955, convocata dall'ONU e denominata "*Atoms for peace*".

¹⁴ Cfr. Zucchetti, 2008, p. 7 ss.

Tra i risultati conseguiti devono annoverarsene almeno due, di importanza fondamentale, la creazione dell'AIEA (Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica) e la fine del regime di segretezza, sostituito, sulla scorta della dichiarazione di Washington, da un regime di condivisione e collaborazione per lo sviluppo dell'energia nucleare ai fini pacifici.

Da questo momento in poi il progresso tecnologico è stato inarrestabile: la prima centrale elettronucleare del mondo era già stata realizzata a Chicago nel 1951, si trattava della più giovane tra alcune centrali nucleari create prevalentemente per scopi militari ed abilitate a produzione di energia per scopi civili, tra cui quella di *Mayak*, nella regione di *Chelyabinsk*, alle spalle degli Urali, costruita per produrre plutonio a scopi militari, e tristemente conosciuta per il più grave, benchè meno noto all'opinione pubblica, incidente con rilascio di scorie e fumi radioattivi, nel 1957; la centrale di *Calder Hall*, la prima centrale commerciale del mondo, venne inaugurata nel 1956 nel complesso nucleare britannico di *Sellafield*, sulle coste del mar d'Irlanda, nel nord dell'Inghilterra.¹⁵

Attualmente l'energia nucleare è utilizzata da 29 paesi nel mondo, e rappresenta circa il 13,5 % della produzione mondiale di elettricità.

La questione dell'accettazione sociale dell'energia nucleare è stata correttamente qualificata come *clash of risk culture* (U. Beck, 2008), ad evidenziare la relatività culturale della disaffezione verso l'energia nucleare.

Così l'esperienza di *Chernobyl* viene valutata differently in Italia ed in Francia, conducendo a risultati differenti.

Prescindendo dalle questioni culturali, indubbiamente la circostanza che Francia il 75% dell'energia elettrica proviene dai 58 reattori nucleari in funzione gioca un ruolo determinante nell'approccio politico al problema del nucleare.

In seguito all'incidente di *Fukushima* in conseguenza del quale furono arrestati 43 reattori, allo stato attuale risultano in funzionamento 427 reattori,

¹⁵ Già nel 1974 in Europa erano in funzione 44 centrali elettronucleari, «in Gran Bretagna 14, Francia 8, Germania 6, Urss 4, Svezia 2, Olanda 1», altre 3 si trovano in Italia (Latina, Garignano e Trino Vercellese) dismesse a seguito del referendum del 1987. «Negli Stati Uniti (...) ne (erano) in funzione trenta (...). Altre centrali si trova(va)no in Canada 5, Giappone 5, India 2 e Pakistan 1», **Troisi Fortunato**, 1974, p. 609.

ai quali vanno sommati i 67 reattori di terza generazione che secondo l’A.I.E.A risultano in costruzione.¹⁶

Un caso singolare in cui va riconosciuta la derivazione di una tecnologia civile a partire da una militare è proprio quello dell’energia nucleare.

Ciò emerge nitidamente dalla parziale ricostruzione della storia della radioattività suesposta in cui si nota come a partire dal momento in cui viene indotta la prima la prima reazione a catena (Zucchetti, 2008), lo sviluppo della tecnologia nucleare viene assorbita dalla ricerca militare nel coinvolgimento nella corsa contro il tempo «per battere la Germania nazista (...) e salvare così il mondo libero».¹⁷

Orbene ancorché la ricerca della sicurezza sia stato l’imperativo categorico dello sviluppo del nucleare civile, cosa che non può di certo dirsi per il nucleare militare, è chiaro che non sia stato possibile tagliare perentoriamente il vincolo derivante dal rapporto di filiazione diretto.

Per la politica militare del nucleare, la coesistenza con il nucleare civile diventa un’opportunità da sfruttare, non solo perché la ricerca in ambito civile conduce soventemente a scoperte qualitativamente superiori da poter successivamente applicare alla tecnologia militare, ma anche in vista di un potenziale utilizzo dei prodotti utilizzati nell’industria energetica nucleare.

A tal riguardo è paradigmatica in ambedue i sensi la vicenda del riprocessamento del combustibile esaurito, quale nuova fase del ciclo di gestione del combustibile nucleare finalizzata a ridurre la produzione di scorie, ed impiegata per la produzione di plutonio a scopi militari.

Caratteristica comune della fase di riprocessamento e di quella prodromica di arricchimento dell’uranio è quella di produrre scorie.

Se la materia fissile utilizzata è l’uranio, il prodotto di scarto sarà costituito dal *depleted uranium*, o uranio impoverito, caratterizzato da un alta densità molecolare e dalla natura piroforica che lo rende congeniale a utilizzi per scopo bellico.

Vale la pena precisare che l’idea di impiegare l’uranio impoverito sia in ambito civile che militare risiede nelle vicissitudini tecniche dello

¹⁶ Cfr. **Colella**, 2017, p. 109 -110.

¹⁷ v. **Zucchetti**, 2008, p. 175.

smaltimento di un metallo pesante ed ingombrante, ma anche nel valore d'acquisto estremamente basso.

In ambito civile è stato utilizzato per ottenere il bilanciamento dei punti cardine e delle superfici di controllo degli aereomobili di grosse dimensioni, ma anche per la costruzione di mazze da golf o di accessori per canne da pesca.

Tuttavia è proprio nel settore militare che le peculiari caratteristiche di questa scoria nucleare hanno trovato il terreno di elezione.

Le ragioni che agevolano l'impiego militare dell'*UD* sono da ricercare su due differenti piani.

Anzitutto si anticipava dell'alta densità e piroforicità che rendono congeniale questo metallo per la creazione di proiettili incendiari da utilizzare contro mezzi corazzati.

Il processo di penetrazione polverizza l'uranio che esplose in frammenti incandescenti con combustione violenta che può raggiungere i 5000 °C nel momento in cui viene a contatto con l'aria attraverso la corazzatura perforata, ampliandone l'effetto distruttivo.

La densità del metallo aumenta le capacità perforanti del proiettile in quando all'impatto con la corazzatura non si appiattisce, come avviene generalmente con il piombo.

Nel rapporto della SAIC titolato «*Kinetic Energy Penetrator Environmental and Health Consideration*», è stato osservato che le caratteristiche dell'uranio impoverito sono comparabili a quelle del tungsteno ancorché sia «venticinque volte più tossico», e pertanto meno preferibile.

Senonché il primo fornitore al mondo del tungsteno è la Cina, la quale non sarebbe certamente un alleato affidabile in caso di guerra, e ciò determina la capitolazione di qualsiasi istanza di sicurezza.

I proiettili all'uranio impoverito¹⁸ vengono utilizzati in scenari di guerra a partire dal 1991, nella quale si stima vennero utilizzate almeno 335 tonnellate di uranio impoverito.

Successivamente, nonostante la notorietà degli effetti nocivi, e dei processi di esposizione, illustrati in un *Memorandum* del Comando Americano del

¹⁸ Per un'analisi dettagliata v. **Zucchetti**, 2008, pp. 72 – 92.

marzo 1991, è stato ripetutamente utilizzato nel corso delle guerre civili nei Balcani, tra il 1994 ed il 2000, e nella guerra in Iraq nel 2003.

Le potenzialità ed il rendimento delle radiazioni ionizzanti ne valsero l'utilizzo in una pluralità di applicazioni pratiche al di fuori del campo energetico, in medicina diagnostica e terapeutica (cd. medicina nucleare), in geologia, in archeologia, nell'industria e persino in agricoltura.

Giova precisare che oggi non è necessario utilizzare elementi naturalmente radioattivi in quanto, tramite il bombardamento nucleare, si può ottenere l'alterazione della composizione atomica di un elemento, quindi la formazione di isotopi radioattivi.

Poichè la radioattività, quale caratteristica fisico-chimica di un elemento, non può essere modificata alcun altro tipo di reazione, i radioisotopi sono frequentemente utilizzati quali traccianti nell'industria¹⁹, in agricoltura²⁰ e in medicina²¹.

¹⁹ Nell'industria i radioisotopi traccianti vengono utilizzati per esaminare «trasferimenti fisico-chimici di sostanze diverse, come i processi di assorbimento, di adsorbimento, umidificazione artificiale, solubilità, scambio ionico (...). Con l'impiego di isotopi traccianti è studiato il meccanismo di alcune reazioni, quali ossidazione e isomerizzazione degli idrocarburi, polimerizzazione e vulcanizzazione della gamma, deidrogenazione ed aromatizzazione del petrolio, il processo di sintesi della benzina. Radioisotopi traccianti sono impiegati nell'autoradiografia, un metodo utilizzato per studiare la composizione di leghe metalliche e valutare l'andamento del processo di fusione dei metalli (...). In processi industriali gli isotopi traccianti sono utilizzati per verificare lo stato uniforme di prodotti vari quali materiali di costruzione, prodotti alimentari per bestiame, cioccolato, nella fabbricazione dei concimi artificiali, del vetro, del cemento [ovviamente, si ricorre, in tali circostanze, a radioisotopi aventi un periodo di dimezzamento corto, dovendo essere offerti al pubblico i prodotti tracciati.]», **Fortunato Troisi**, 1974, p 612.

²⁰ E' notevole l'impiego di radioisotopi traccianti in agricoltura per la valutazione de metabolismo delle piante ai fini dell'utilizzazione di concimi chimici e sostanze nutritive. «Un concime fosfatico marcato con fosforo 32 è aggiunto al terreno, in cui la pianta è in sviluppo, ed in questa con un contatore Geiger si mette in evidenza il fosforo radioattivo, le cui radiazioni beta compaiono già dopo una giornata. Se ne segue il destino entro la pianta, anche mediante autografie, eseguite con pellicole applicate alle foglie ed a sezioni della pianta, che con la diversità di impressione dimostrano la diversa distribuzione del fosforo nella pianta». Al fine di valutare l'efficacia disinfestante di un insetticida « sono stati marcati vermi con poche microcurie di un isotopo γ ed insetti con fosforo 32 o stronzio 89 per poterne seguire i rispettivi spostamenti nel terreno e nell'aria.», **Fortunato Troisi**, 1974, p 617.

²¹ L'impiego di radioisotopi traccianti in medicina è diffuso sia per scopi diagnostici che per scopi terapeutici. Esemplicativamente si pensi alle analisi diagnostiche di alterazioni tiroidee mediante la somministrazione del cd. cocktail atomico, contenente circa cinque microcurie di iodio 131, e l'applicazione del contatore gamma al collo al fine di valutare, ad intervalli di quarantotto ore, l'entità di presenza dello iodio nella ghiandola. Sempre ai fini diagnostici, i radioisotopi iodio 131 e arsenico 74 sono utilizzati ai fini della localizzazione dei tumori cerebrali. Ai fini terapeutici si pensi alla somministrazione di forti dosi di iodio 131 per distruggere i tumori metastatici dopo la rimozione della tiroide cancerosa. **Cfr. Fortunato Troisi**, 1974.

Le applicazioni pacifiche delle radiazioni ionizzanti non si esauriscono all'utilizzo di radioisotopi in funzione di traccianti ma prevedono l'impiego di sorgenti radioattive fisse, costituite da sostanze sia sigillate che non.

Anche nell'industria, oltre che in diagnostica, è diffuso l'impiego di procedimenti radiografici e radioscopici per rilevare difetti, incrinature e disomogeneità di macchinari, di serbatoi e di costruzioni navali.

Sorgenti radioattive vengono utilizzate anche nell'ambito della disinfestazione in quanto l'irraggiamento delle larve di parassiti può determinarne la sterilità, tuttavia tali tecniche richiedono l'impiego di sorgenti particolarmente potenti, per cui non sono di uso comune; lo sono, invece, le tecniche impiegate per la sterilizzazione di funghi, o la depurazione di acque sfruttandone la capacità di conduzione conseguente alla radiolisi.

Forti sorgenti di radiazioni sono utilizzati per modificare le caratteristiche dei materiali irradiati, come nel caso della reticolazione o della degradazione dei polimeri, utilizzata nella fabbricazione di particolari materiali polimerici altamente resistenti ai solventi, alle alte temperature ed all'invecchiamento, come i pneumatici delle automobili.

Nell'ambito della pittura, dell'archeologia, della paleontologia, sono frequentemente utilizzate tecniche radiografiche al fine di ottenere informazioni sul supporto, sull'imprimitura, sul colore ed i pennelli utilizzati, ovvero per lo studio di mummie, tessuti organici e altri oggetti.²²

È evidente che, volendo spostare l'attenzione su un altro aspetto del fenomeno, le probabilità di esposizione dell'uomo a radiazioni ionizzanti aumentano proporzionalmente all'impiego delle medesime nella vita produttiva.

Come si avrà modo di esporre a breve, le conseguenze di tale esposizione, a cui le scienze radiobiologiche ed epidemiologiche si riferiscono con la locuzione «danni»,²³ ancorchè prevedibili nel caso di esposizione a determinate dosi, ciò nel senso che «al di sopra della dose soglia, la gravità della lesione, inclusa la diminuzione della capacità di recupero del tessuto,

²² Cfr. **Argenti**, 2011.

²³ Cfr. **Bucci, Poggi**, 1999; **ICRP**, 2007; **UNSCEAR**, 1994.

aumenta con la dose»,²⁴ rimangono altamente aleatorie nel caso di esposizione a basse dosi.

Non v'è, inoltre, alcuna evidenza scientifica che dimostri l'inefficacia biologica delle radiazioni al di sotto di una determinata soglia, anzi, in modo concorde la letteratura internazionale adotta un modello lineare senza soglia, ciò nel senso che a bassi dosi e bassi ratei di dose il rischio di un danno cellulare irreparabile diminuisce senza mai annullarsi.²⁵

Dalle precedenti considerazioni possiamo trarre un'indicazione di massima: le radiazioni ionizzanti, date le proprie caratteristiche chimico-fisiche, si rilevano di estrema utilità, talvolta insostituibile, in una pluralità di settori dell'industria e sanità, tuttavia riserbano aspetti profondamente critici che inducono un'attenta riflessione sulle situazioni di esposizione.

Del resto gli studi di radiobiologia, poc'anzi richiamati per sommicapi, sono concordi nell'asserire che la conseguenza dell'assorbimento dell'energia prodotta da onde o corpuscoli cd. ionizzanti è quella della produzione di un danno cellulare ovvero un danno genetico; da ciò consegue la classificazione delle radiazioni ionizzanti quale agente fisico patogeno e genotossico.

Prevalentemente l'autorevole letteratura in materia di interazione radiazione-tessuto biologico²⁶ individua un duplice ordine di conseguenze negative possibili che dipendono fondamentalmente e principalmente dall'entità della dose assorbita, secondariamente dal rateo di dose; fattori di rischio questi che vanno, ovviamente, cumulati a quelli generalmente applicati, cd. non modificabili: l'età, il sesso e i fattori cd. genetici, ereditarietà e familiarità.

Per altro verso è frequente imbattersi in classificazioni differenti, sensibilmente orientate ad un concetto di tutela che, esorbitando i limiti di un approccio precauzionale *ad interim*, si stagni sull'orizzonte della tutela intergenerazionale.²⁷

Tra le due tipologie di classificazione quella maggiormente pratica è quella adottata dalla letteratura maggioritaria: l'esposizione alla *noxa* può

²⁴ ICRP, 2007, p 43.

²⁵ Cfr. ICRP, 2007.

²⁶ Cfr. ICRP, 1991, 2007; UNSCEAR, 1994; Trenta, 2001; Bucci, Poggi, 1999.

²⁷ Cfr. Bucci, Poggi, 1999.

indurre fondamentalmente due processi morbosi differenti, uno a breve latenza, a cui ci si riferisce con la locuzione di «effetto deterministico»,²⁸ l'altro, fondamentalmente asintomatico, di natura aspecifica e probabilistica, denominato «effetto stocastico».

D'altro canto risulta maggiormente esaustiva, anche sul piano radiobiologico, la classificazione adottata dal Polvani secondo cui «i diversi effetti delle radiazioni ionizzanti possono essere raggruppati in quattro classi: effetti precoci, effetti tardivi, effetti di prima generazione, effetti sulle generazioni successive»;²⁹ e tuttavia sia per ragioni di economia che di convenienza espositiva sarà adottato l'approccio tradizionale della letteratura internazionale maggioritaria.³⁰

²⁸ Nella pubblicazione 41 (ICRP, 1984), le reazioni tissutali avverse erano denominate «effetti non stocastici», tale denominazione fu sostituita nella *Pubblicazione 60* (ICRP, 1991b) dal termine deterministico, intendendo “un danno causalmente determinato da eventi precedenti”.

²⁹ «Gli effetti precoci sono dovuti ad assorbimento di dosi molto elevate o anche di dosi non molto elevate ma assorbite in breve intervallo di tempo; hanno carattere fondamentalmente necrobiotico e si manifestano dopo un periodo di breve latenza, da pochi minuti a qualche ora o qualche giorno. (...) Gli effetti tardivi si manifestano dopo anni e sono anch'essi dose-dipendenti. (...) Gli effetti di prima generazione sono caratterizzati dal danno alle cellule germinali, con alterazioni cromosomiche e fenomeni di mutazione, ma anche su un'azione diretta sul prodotto del concepimento. Dosi elevate (...) sono in grado di determinare la morte endouterina (...). Gli effetti sulle generazioni successive si stabiliscono attraverso due meccanismi: lesione a carico dei cromosomi e mutazioni a carico dei geni.», **Garrozzo, Marziano**, 1985, pp. 292-294)

³⁰ Sul punto, tengo a precisare, la scelta del metodo di indagine risulta maggiormente confacente alle esigenze di questa produzione. La tematica da me affronta si stagna sulla rilevanza giuridica del danno biologico e tanatologico causalmente connesso a situazioni di esposizione alla *noxa*, al riguardo della quale i profili squisitamente radiobiologici, si collocano a monte, tra le premesse doverose, senza rivestire un ruolo principale. Come si avrà modo di apprezzare nel corso della trattazione, il principio dell'alterazione atomica delle porzioni tissutali direttamente o indirettamente ionizzate non hanno alcun rilievo pratico sul piano dell'accertamento dell'eziopatogenesi di neoplasie o altre fonti di detrimento a carattere probabilistico.

Se ne deduce che ciò che preme mettere in evidenza è la correlazione causale tra situazioni di esposizione alla *noxa* e l'insorgenza di fattori di detrimento sicché sia individuata una piattaforma valutativa ai fini dell'accertamento medico-legale del nesso causale in situazioni di responsabilità penale o civile. In questa prospettiva risulta profondamente complicato l'accertamento del nesso eziologico nei casi di effetti cd. tardivi e praticamente impossibile l'accertamento della circostanza che una data esposizione si collochi quale estremo causale del fatto delle lesioni genetico-ereditarie riportate dalla progenie di un soggetto esposto. Al riguardo l'evidenza giuridica è confermata succintamente anche dalla Commissione Internazionale di Protezione Radiologica nella misura in cui afferma che «continua a non esservi alcuna evidenza diretta che l'esposizione dei genitori alle radiazioni possa condurre ad un eccesso di malattie ereditarie nella progenie.»; per altro verso l'inclusione del rischio di effetti ereditari (o di seconda generazione) nel sistema di radioprotezione risulta avvalorato dalle prove raccolte da studi radiobiologici su animali da laboratorio, quindi giustificato in via prudenziale. Cfr. **ICRP**, 2007.

1.2. Studi di epidemiologia: gli effetti delle radiazioni ionizzanti sull'uomo.

Come anticipato a partire dalla Pubblicazione 60, la Commissione classificò gli effetti che producono reazioni tissutali come «effetti deterministici».

Sotto tale categoria vengono ricondotti sia lesioni precoci che tardive la cui eziopatogenesi è evidentemente individuata in un'esposizione a dosi massicce di radiazioni ovvero a dosi relativamente basse ma con ratei di tempo elevati - da cui consegue la nomenclatura «esposizione acuta».³¹

La letteratura scientifica è concorde nell'affermare che il processo induzione di una reazione tissutale avversa, statisticamente con alta probabilità di conseguenze necrobiotiche, è connesso al superamento di una dose-soglia, in ogni caso nessuna reazione tissutale è radioinducibile al di sotto dei 100 mGy indipendentemente dalla qualità della radiazione.³²

Nei casi di irraggiamento acuto, può verificarsi l'avvelenamento dell'integrità bio-chimica dell'organismo, con «sintomatologia è severa»³³, r decorso acutissimo nei casi di prognosi infausta, con sopravvivenza di ore o qualche giorno; in altre circostanze «l'exitus»³⁴ sopravviene, a distanza di qualche mese, a causa di fattori concausali; in occasioni del tutto eccezionali può verificarsi la rimessione dei sintomi al fronte di un impegnativo percorso di cura e convalescenza.

L'altra categoria di danni, denominati stocastici, dal greco *στοχαστικός*, congetturale, è costituita da manifestazioni neoplastiche: leucemie, mielomi, linfomi, tumori solidi, prevalentemente alla tiroide, ai polmoni, alla cute, sia baso-cellulari che spino-cellulari, sia melanomi maligni,

³¹ Cfr. **Garrozzo, Marziano**, 1985.

³² «Le reazioni tissutali precoci (in una scala temporale da alcune ore ad alcune settimane) possono essere reazioni di tipo infiammatorio a seguito di variazioni della permeabilità delle cellule e di rilascio di istamina, per esempio l'eritema, e reazioni successive conseguenti alla perdita di cellule, per esempio mucositi, e desquamazione nei tessuti epiteliali. Le reazioni tissutali tardive (in una scala temporale di mesi o anni) sono chiamate 'generiche' se avvengono a seguito di una lesione indotta direttamente nel tessuto bersaglio, per esempio, occlusioni vascolari che provocano la necrosi profonda di un tessuto a seguito di un'irradiazione cronica, o sono chiamate 'conseguenziali' se avvengono come esiti di reazioni immediate, per esempio la necrosi cutanea a seguito di grave ulcerazione della cute e di infezione cronica, e occlusioni intestinali causate da ulcerazione grave della mucosa», **ICRP**, 2007, p. 137.

³³ «(...) malessere e grave prostrazione generale, vomito, emorragie cutanee e mucose, diarrea, caduta dei capelli e dei peli, alterazioni dell'equilibrio bioelettrico, convulsioni e tremori fino al coma», **Garrozzo, Marziano**, 1985, p.293.

³⁴ **Garrozzo, Marziano**, 1985, p.293.

esemplificativamente quelli da cronica esposizione ai raggi UV; ovvero processi distrofici.³⁵

Il modello di risposta cellulare alla dose è speculare a quello adottato per le reazioni tissutali essendo basato «sul presupposto che, nell'intervallo relativo alle basse dosi, le dosi di radiazioni maggiori di zero comporteranno un aumento dell'eccesso di rischio di tumore e/o malattia ereditaria, in modo proporzionale»³⁶.

Occorre qualche precisazione. Il concetto di modello di reazione cellulare alla dose costituisce il nucleo essenziale del sistema di radioprotezione dosimetrica.

La logica sottesa tiene conto dei principi fondamentali di radiobiologia ed individua nella ionizzazione dell'atomo la causa o di una disfunzione cellulare di natura fundamentalmente necrobiotica o di un'alterazione genetica; la circostanza che l'irraggiamento sia fattore condizionante delle conseguenze della prima o della seconda tipologia di disfunzione è correlato alla qualità ed all'intensità della radiazione.

Ne consegue che un modello di protezione dagli effetti deterministici dell'irraggiamento, affinché sia efficace, deve prevenire che la dose assorbita dalle porzioni tissutali esposte superi la soglia limite.

L'adozione di un modello lineare senza soglia di induzione degli affetti stocastici implica invece l'assoluta aleatorietà dell'efficacia degli strumenti di protezione in quanto il fenomeno della ionizzazione della materia si verifica a livello atomico indipendentemente dalla dose, per cui, ancorché statisticamente improbabile, nel caso di esposizioni a basse dosi e bassi ratei.

Quanto agli studi di epidemiologia, giova premettere che:

a) vengono denominati studi ecologici quelli basati sulla distribuzione geografica delle malattie. Nonostante siano largamente in uso, per i fini che ci riguardano, quest'ultimi si rilevano scarsamente utili in quanto suscettibili di presentare margini di errore significativi a causa dell'assenza di dati relativi all'esposizione individuale ed altri fattori confondenti;³⁷

³⁵ Cfr. **Garrozzo, Marziano**, 1985; **Trenta**, 2001; **Campurra**, 2014.

³⁶ Cfr. **ICRP**, 2007, p. 24.

³⁷ Cfr. **Bucci, Poggi**, 1999, p. 15.

b) in secondo luogo i più recenti studi di epidemiologia e gli studi clinici dell'ultimo decennio hanno accresciuto il bagaglio di conoscenze sul meccanismo della cancerogenesi, specificatamente sono stati individuati una pluralità di disordini ereditari e fattori familiari che realizzano la cd. suscettibilità genetica al cancro;

c) in terzo luogo di consideri che non è possibile assumere le risultanze degli studi epidemiologici sull'eziopatogenesi da irraggiamento *tout court* al fine di accertare l'efficacia eziologica di una determinata esposizione individuale all'evento costituente fattore di detrimento fisico.

Sul primo profilo, per l'indiscutibile rilevanza scientifica, mi occuperò di esporre, chiaramente per sommicapi, le fondamentali risultanze degli studi epidemiologici sulle coorti di sopravvissuti ai bombardamenti di Hiroshima e Nagasaki, di pazienti esposti alla *noxa* ai fini diagnostici e terapeutici e di lavoratori esposti al rischio derivante dalle radiazioni ionizzanti, in particolar modo sugli studi degli effetti dell'esposizione al radon (cd. epidemiologia dei minatori).

Quanto al secondo profilo, per ciò che interessa il *thema*, occorre chiedersi se i fattori costituenti la suscettibilità genetica al cancro inducano un eccesso di rischio legato all'esposizione ad agenti fisici genotossici come le radiazioni ionizzanti.

Sul punto la Commissione ritiene che, ancorché «i geni oncogeni (...) siano troppo rari per causare una distorsione significativa delle stime di rischio di cancro da radiazioni a basse dosi»,³⁸ è comunque probabile che ci siano implicazioni per i rischi individuali soprattutto in pazienti con neoplasia recidivante precedentemente trattati con radioterapia; tanto da indurre una stima, nella Pubblicazione 60, per un fattore pari a 10.³⁹

Allo stato dell'arte «sebbene la Commissione riconosca che le varianti debolmente espresse di geni oncogeni possano, in linea di massima, essere sufficientemente comuni da influenzare le stime di rischio di cancro da radiazioni basate sulla popolazione, le informazioni disponibili non sono sufficienti per fornire una significativa valutazione quantitativa sull'argomento.»⁴⁰

³⁸ Cfr. ICRP, 2007, p. 175.

³⁹ Cfr. Bucci, Poggi, 1999.

⁴⁰ Cfr. ICRP, 2007, p. 131 e pp. 166-167.

La ricerca epidemiologica maggiormente significativa sul piano statistico è elaborata nell'ambito del "Life Span Study",⁴¹ un progetto di ricerca elaborato a partire dagli anni '50 dalla Fondazione di Ricerca sugli Effetti delle Radiazioni ionizzanti, il quale costituisce la piattaforma di valutazione adottata dai principali organismi internazionali e regionali «che eseguono valutazioni sul legame qualitativo tra rischio oncogeno ed esposizione (...)»⁴².

Seguendo l'ordine adottato dal *report* del 1994 del Comitato scientifico delle Nazioni Unite sarà fornito un quadro esemplificativo delle stime di rischio per la cancerogenesi di alcune tipologie di tumori:

a) con riferimento al carcinoma all'esofago si legge che «*The risk estimates (...) in neither case are they statistically significant*»⁴³.

Le variazioni del rischio dovute ad altri fattori, come il sesso e l'età, sono fondamentalmente coerenti con i modelli adottati per le altre neoplasie evidenziando un aumento del rischio di cancerogenesi radio-indotta nelle donne e nei casi di esposizione di individui di età inferiore ad anni venti. Ancorché gli studi continuano a presentare delle disomogeneità si può asserire che sussiste un rischio di radio-induzione del carcinoma all'esofago proporzionale al rateo di dose, con un periodo di latenza medio da cinque a dodici anni «*but when the dose is fractionated the risk is very small*»;⁴⁴

b) con riferimento al cancro allo stomaco si può affermare che «*current results suggest that there is an association between low-LET radiation exposure and stomach cancer risk, with females having greater relative risks and perhaps also greater absolute risks than males.*»;⁴⁵

⁴¹ «The cohort of the life span study includes 93,000 survivors of the atomic bombings and 27,000 persons who lived at Hiroshima and Nagasaki in 1950 but who were not in the cities at the time of the bombings. The primary findings of the life span study have been used to clarify the association between radiation exposure and cancer mortality», UNSCEAR, 1994, p. 28.

⁴² «(...) l'UNSCEAR (organismo scientifico delle Nazioni Unite chiamato a fare periodicamente il punto delle conoscenze in materia di effetti delle radiazioni atomiche; il NIH (istituto di sanità nazionale degli Stati Uniti); il BEIR (un comitato scientifico di esperti periodicamente istituito dal National Research Council degli Stati Uniti; l'ICRP (...))»Trenta, 2001, p. 133.

⁴³ UNSCEAR, 1994, p. 27.

⁴⁴ UNSCEAR, 1994, p. 28.

⁴⁵ UNSCEAR, 1994, p. 28.

c) esiste una significativa correlazione tra l'esposizione alla *noxa* e il cancro al polmone. Nello specifico si legge che «*an elevated risk of lung cancer is seen following acute exposure to low-LET radiation*»⁴⁶;

d) con riferimento al cancro alla tiroide gli studi epidemiologici concordano sul fatto che sussista un eccesso di rischio per le esposizioni di bambini ad agenti genotossici rispetto alle esposizioni di individui adulti, mentre non sussiste una significativa differenza di rischio a causa del sesso. In sintesi «*low-LET radiation exposures, possibly at doses as low as 0.1 Gy, are associated with significant excess risks of thyroid cancer in children. The excess risk for adults appears to be lower. In contrast to the pattern seen for many other solid tumours, excess relative risks are similar for males and females despite large differences in the sex-specific background rates in most populations.*»;⁴⁷

e) con riferimento alla leucemia i risultati evidenziano un aumento del rischio per i sopravvissuti esposti in giovane età, mentre non risultano differenze significative in ordine al fattore sessuale.

In sintesi un eccesso di rischio per le esposizioni a basso LET è individuabile, con riferimento alla leucemia acuta ed alla leucemia mieloide cronica, specialmente in individui esposti prematuramente, con un periodo di latenza compreso tra tre e dieci anni.

Non sussiste, invece, alcuna evidenza scientifica «*of an association between radiation exposure and chronic lymphocytic leukaemia*»;⁴⁸

f) per concludere gli studi di coorte non individuano correlazione tra l'esposizione alla *noxa* ed i linfomi maligni (non-Hodking), mentre «*the studies of the survivors of the atomic bombings in Japan and of people exposed to radiation for medical purposes provide little evidence of an elevated risk of multiple myeloma following radiation exposure*»⁴⁹.

Il vantaggio dei *follow-up* basati sulle c.d serie mediche è costituita dalla varietà di radiazioni utilizzate a scopo diagnostico o terapeutico e dalla possibilità di effettuare un controllo minuzioso sull'entità dosimetrica delle esposizioni,

⁴⁶ Cfr. UNSCEAR, 1994, p. 29.

⁴⁷ Cfr. UNSCEAR, 1994, p. 32.

⁴⁸ Cfr. UNSCEAR, 1994, p. 33.

⁴⁹ Cfr. UNSCEAR, 1994, p. 33.

Il *report* del 1994 del Comitato scientifico, esemplificativamente, dedica al riguardo un'apposita sezione inerente al frazionamento della dose nei pazienti affetti da tubercolosi ed esposti tramite fluoroscopia al torace, si rinvia all'apposita trattazione.⁵⁰

Per completezza espositiva è opportuno precisare che il merito di tale studio è quello di aver fornito una piattaforma valutata assimilabile a quello del *LSS* sui sopravvissuti ai bombardamenti del 6 e 9 agosto 1945, in fatto di numero di soggetti coinvolti.

Si evince, sommariamente, la medesima incidenza nel tasso di rischio di insorgenza di neoplasie mammarie, benché è opportuno sottolineare della maggiore incidenza di tumori mammari spontanei in Canada rispetto al Giappone.

Viceversa nel rapporto tra le stime di rischio di cancerogenesi di neoplasia polmonare si evidenzia una significativa discrepanza tale da potersi affermare, con le incertezze del caso, che nella radio-induzione del tumore al polmone assumono rilevanza sia la qualità della radiazione che il rateo di tempo, sicché è maggiormente probabile che l'insorgenza si verifichi a seguito di un'esposizione acuta a basso LET, come nei casi assunti dal *LSS*, piuttosto che in conseguenza di esposizioni a radiazioni densamente ionizzanti con ratei di dose altamente frazionati.⁵¹

Gli studi epidemiologici di coorte relativi ai lavoratori sono quelli maggiormente incisivi con riferimento all'indagine statistica delle correlazioni eziopatogenetiche tra esposizione cronica a basse dosi e detrimento fisico; i gruppi di popolazioni presi in riferimento nelle indagini più significative riguardano i lavoratori delle centrali elettronucleari e i lavoratori nelle aree minerarie esposti al gas radon.

Quanto alle prime, l'analisi globale dei dati relativi ai lavoratori delle installazioni nucleari di Canada, Stati Uniti e Regno Unito ha preso in considerazione una coorte di 95673 lavoratori esposti ad una dose media cumulativa pari a 0.05 Sv, mentre circa il 5% ha accumulato una dose superiore a 0.2 Sv⁵². Sommariamente si può affermare che:

⁵⁰ Cfr. UNSCEAR, 1994, pp. 43-45.

⁵¹ Cfr. UNSCEAR, 1994; Bucci, Poggi, 1999.

⁵² Cfr. Cardis et al., 1995.

a) con riferimento ai tumori solidi, la stima di rischio è relativamente vicina allo zero, confermando, nei tratti essenziali, le conclusioni del LSS;

b) con riferimento alle leucemie la percentuale di rischio risulta essere significativamente diversa dallo zero, tale risultato può essere assunto, con riserva, quale evidenza scientifica della correlazione tra l'insorgenza di leucemie ed esposizioni croniche.⁵³

Quanto alle seconde, le indagini epidemiologiche relative all'esposizione al radon costituiscono un interessante fonte di informazioni per un duplice ordine di ragioni: anzitutto perchè il radon è un elemento radioattivo allo stato aereiforme naturalmente presente nell'aria al riguardo del quale è stato osservata la non trascurabilità delle dosi assorbite in situazioni di esposizione «nei luoghi di lavoro»;⁵⁴ in secondo luogo sussiste non solo un rischio di esposizione a gas radon in alcune attività lavorative, principalmente attività minerarie, termali e attività di volo⁵⁵, ma anche un rischio cd. residenziale. Al riguardo il merito degli studi epidemiologici di coorti di minatori esposti a gas radon è quella di aver reso possibile l'estrapolazione della stima di rischio alle popolazioni tenendo conto delle differenze di esposizione e di altri fattori confondenti.

Complessivamente l'indagine ha monitorato 68000 minatori e circa 2700 casi di tumore; a consuntivo si può affermare, con sufficiente grado di probabilità statistica, che la correlazione tra cancerogenesi polmonare ed esposizioni cumulativa è in genere apprezzabile con linearità all'interno di una singola coorte benchè la stima dell'eccesso di rischio varino in modo sostanziale.

Orbene l'opinione della Commissione Internazionale di Protezione Radiologia sino alla Pubblicazione 103 era «che la valutazione del rischio da radon dovrebbe includere gli studi epidemiologici di minatori»⁵⁶, tuttavia alla luce dei più recenti sviluppi degli studi caso-controllo ed ecologici sull'esposizione residenziale possiamo affermare che la rilevanza della cd. epidemiologia dei minatori acquisisce un ruolo particolare limitatamente

⁵³ Cfr. **Bucci, Poggi**, 1999.

⁵⁴ Cfr. **Sandri**, 2003, p. 5.

⁵⁵ Cfr. **Sandri**, 2003.

⁵⁶ Cfr. **ICRP**, 2007, p. 95.

«alle relazioni fra dose e riposta ed agli effetti di interferenza relativi al fumo e alla esposizione ad altri agenti».⁵⁷

Sinteticamente sull'argomento è possibile enucleare una duplice indicazione di massima: il radon e i suoi elementi di decadimento costituiscono un fattore di rischio significativo circa l'eziopatogenesi del cancro al polmone, d'altro canto le evidenze epidemiologiche depongono per un fattore di rischio inerente la patogenesi di altri fattori di detrimento non neoplastici è verosimilmente basso.⁵⁸

A consuntivo, dalle stime di rischio elaborate del rapporto del Comitato scientifico delle Nazioni Unite e condivise anche dalla Commissione Internazionale di Protezione Radiologica, è possibile affermare nei casi di esposizione a dosi pari ad 1 Gy il rischio di induzione di una disfunzione neoplastica amumenta del 37%, se ne deduce che assumendo a campione uno studio di coorte, il 12% della popolazione esposta svilupperà una patologia neoplastica, presumibilmente tumori solidi nel 90% dei casi.⁵⁹

Si ricorderà che in premessa alla rassegna di epidemiologia è stato anticipata l'insufficienza degli studi epidemiologici, specialmente quelli di massa, ai fini dell'accertamento dell'efficacia eziologia dell'agente genotossico rispetto ad una manifestazione neoplastica nel caso di esposizione individuale.

A questo punto pare il caso di precisare che i modelli adottati per gli studi epidemiologici non possono tenere in considerazione fattori di rischio variabili come l'incidenza di condizioni ereditarie ovvero la sussistenza di fattori concausali.

La conseguenza è evidente: lo studio di coorte ci consegna delle percentuali statistiche elaborate su modelli teorici rarefatti, se ne deduce una potenziale sottostima del rischio in ipotesi in cui fattori concausali di qualsivoglia natura si pongano sulla medesima efficacia eziologica dell'esposizione alla *noxa*, che ancorché non abbia rilevanza significativa sul piano statistico, si assume quale plausibile sul piano individuale.⁶⁰

⁵⁷ Cfr. ICRP, 2007, p. 95.

⁵⁸ Cfr. IARC, 1988; UNSCEAR, 1994; ICRP, 2007.

⁵⁹ Cfr. UNSCEAR, 1994; BEIR V, 1990; Bucci, Poggi, 1999.

⁶⁰ Cfr. ICRP, 2007.

In ogni caso le risultanze degli studi di epidemiologia costituiscono il sostrato del sistema di radioprotezione, nel senso che le raccomandazioni precauzionali della Commissione tengono conto delle stime di rischio ivi enunciate al fine di proporre una soglia limite ammissibile di esposizione. Sotto il profilo della valutazione dell'incidenza dell'eziopatogenesi individuale, per rendere un'idea preliminare ed approssimativa delle conseguenze della riconosciuta aleatorietà degli effetti stocastici dell'irraggiamento sul piano delle incertezze che avvolgono l'accertamento processuale del nesso causale in ipotesi di evento-danno conseguente all'esposizione alla *noxa* è sufficiente considerare, dati per buoni i coefficienti di rischio elaborati dalla dottrina scientifica internazionale in sede di indagini epidemiologiche, che il fatto dall'insorgenza di una neoplasia in un soggetto cronicamente esposto a radiazioni sparsamente ionizzanti ha una probabilità statistica di essere connesso al fatto dell'esposizione poco superiore ad 1/10 per campione di popolazione esposta.

Da qui all'accertamento del nesso materiale di causalità si frappongono, oltre che i fattori concausali in funzione di abbattimento della probabilità della correlazione eziologica, le difficoltà connesse all'accertamento dell'eziopatogenesi di una manifestazione morbosa a carattere fondamentalmente aspecifico.

I. Appendice: Esposizione ed epidemiologia dell'UD

Tra i modelli teorici adottati dalla ICRP, quello dell'epidemiologia dei minatori riguarda la cd. esposizione interna.

L'impiego militare dell'uranio depleto costituisce un significativo fattore significativo di inquinamento ambientale e di esposizione dell'uomo, specialmente in ambito militare a causa del frequente utilizzo.

Recentemente anche in Italia si è registrata una crescente domanda risarcitoria proveniente da soggetti impiegati nei contingenti italiani di *peace-keeping operation* in cui è stato impiegato l'uranio impoverito, considerato causa di una serie di patologie contratte dai militari, che ha sollecitato l'istituzione di una commissione ministeriale d'inchiesta – la cd.

commissione Mandelli, che è l'unica ad aver ambito alla realizzazione di uno studio scientifico sugli effetti dell'inalazione delle polveri di uranio impoverito – oltre che di tre commissioni parlamentari finalizzate ad individuare una soluzione al possibile contenzioso di massa che la vicenda rischia di ingenerare.

I profili giuridici di tale vicenda saranno esaminati più specificatamente nell'opportuna sede, ciò che preme precisare in questa appendice sono le modalità in cui si realizza l'esposizione, e parallelamente gli esiti delle indagini epidemiologiche svolte.

Già nel *Memorandum* nel marzo 1991 del comando americano veniva sottolineato il rischio di contaminazione che correva i militari stanziati nel Golfo Persico.

Veniva reso noto, più precisamente, che «l'aerosol di ossido di uranio impoverito formatosi dall'impatto del *DU* ha un'alta percentuale di particelle respirabili» che aumenta esponenzialmente il rischio di contaminazione in assenza di adeguate misure di protezione.

Ancorché il *DU* sia considerato, giustamente, un minerale a bassa radioattività, l'inalazione delle polveri, o l'incorporazione tramite le ferite, permettono l'inserimento delle particelle nell'organismo.

Nel quadro globale dell'esposizione, ancorché una buona percentuale venga espulsa via renale o gastrointestinale, residua un accumulo di particelle che possono seguire un variegato percorso biologico, con conseguente interessamento di organi bersagliati nel transito, ed organi interessati dal deposito di radionuclidi.

In ragione del transito biologico, per altro, risultano particolarmente esposti alle radiazioni emesse dalle polveri inalare i polmoni, il fegato, i reni e l'intestino, mentre l'accumulo si registra in dosi significative nei linfonodi, nelle ossa, nel sistema uro-vescicale ed anche nel sistema nervoso.⁶¹

Si riscontra così una coincidenza tra gli organi a bersaglio interessati nel ciclo globale dell'esposizione e le patologie riscontrate nei soldati stanziati nelle aree in cui è stato sistematicamente usato l'uranio impoverito.

⁶¹ Cfr. A. Mantelero, 2013.

Tali patologie consistono principalmente nel tumore ai testicoli, all'intestino, nelle leucemie ed in alcune forme di linfoma, tra cui il morbo di *Hodking*.

La correlazione causale generale tra tali danni stocastici e l'esposizione interna all'uranio risulta scientificamente controversa, nonostante l'univocità degli studi in materia.

La controversia si regge su due ordini di ragioni inerenti sia all'incidenza del radon nell'esposizione globale dei minatori, sia sulla non coincidenza della granulometria (Zucchetti, 2007) delle polveri di uranio prodotte nelle miniere oggetto di studi epidemiologici che hanno confermato univocamente la relazione casuale con le patologie suindicate, rispetto alle particelle ossidate originatesi dall'esplosione dei proiettili a base di *UD*.

Quanto all'indagine epidemiologica svolta nel nostro paese, occorre esaminare prima di tutto il lavoro della Commissione Mandelli.

Si tratta di un'indagine epidemiologica-statistica sull'incidenza delle neoplasie maligne in una coorte di militari campionati sulla scorta di segnalazioni spontanee, che siano stati impiegati in una missione in Bosnia o Kosovo.

Le conclusioni della commissione a riguardo delle neoplasie maligne propendono per una sovrastima del rischio in quanto «emerge un numero di casi inferiore di quello atteso», mentre al riguardo del linfoma di *Hodking*, ancorché si registri un significativo eccesso del tasso di incidenza «non è stato possibile individuar(ne) le cause», *a fortiori* in assenza di riscontri circa la presenza di contaminazione da uranio impoverito.

Le prime criticità che conducono all'opinabilità delle conclusioni svolte nella relazione finale della commissione, si riscontrano già sul piano dell'errata individuazione della coorte di riferimento, in quanto l'accorpamento di situazioni di esposizione in condizioni ambientali differenti, senza riguardo delle mansioni assegnate, né del tempo di permanenza nelle aree contaminate abbiano determinato "l'annacquamento" della base statistica, alterata in eccesso.

Inoltre per quel che concerne la popolazione di confronto, estratta a campione dalla popolazione maschile coperta dai registrati dei tumori, presenta notevoli perplessità in fatto di non omogeneità del lasso temporale,

stante che la coorte esaminata è stata esposta nel periodo tra il 1995 ed il 2000, mentre i registri tumorali coprivano il periodo tra il 1993 ed il 1997, e di non coincidenza del parametro dell'età.

A corroborare i dubbi sulla metodologia dell'indagine si consideri inoltre la carenza di dati sui militari impegnati nel territorio di Sarajevo, in un territorio che in fatto di dislocazione geografica e dell'entità della contaminazione ambientale, risulta essere quello maggiormente esposto, e su cui risultano essere stati impegnati l'81,8% dei militari affetti da patologie tumorali.

Le indagini condotte dalle commissioni d'inchiesta istituite nel Senato mancano di metodo empirico, e si fondano sulle relazioni dell'audizione di soggetti coinvolti ed esperti qualificati.

La prima commissione d'inchiesta riscontrò l'esistenza «di un rischio significativo per la salute riconducibile all'uranio impoverito (...) circoscritto ai soggetti che hanno potuto inalare l'aerosol che si sviluppa in seguito all'impatto dei proiettili» concludendo per la verosimiglianza dell'ipotesi che riconduceva «una parte dei casi di gravi patologie insorte (...) sia correlabile all'esposizione di fattori chimici, tossici o radiologici presenti in loco»⁶².

La riconduzione al più generale rischio ambientale fa da *pendant* al suggerimento di un tipo intervento solidaristico assistenziale.

Interessanti sono, sul piano giuridico, le considerazioni conclusive della Commissione d'inchiesta del 2006 che fuor di prova di causalità, ritiene che l'evento sia di per sé sufficiente a «determinare il diritto delle vittime delle patologie al ricorso agli strumenti indennitari (...) in tutti quei casi in cui l'Amministrazione militare non sia in grado di escludere il nesso di causalità».

Gli studi epidemiologici sommariamente richiamate propendono per l'ignoranza sul fattore causale condizionante, o sul riconoscimento di una più generale causa ambientale.

Va osservato, in ogni caso, come nella letteratura internazionale si riscontra un'ampia documentazione in senso contrario.

⁶² v. **Commissione Inchiesta Senato**, 2004, p. 31.

La nocività dell'*UD* è stata inoltre confermata da alcuni documenti operativi della NATO in punto di esposizione esterna, finalizzate ad impartire indicazioni di radioprotezione per il maneggio di barre di uranio impoverito usate per il bilanciamento di componenti di navi o aerei; e da altre indicazioni operative impartite dall'*Headquarters Department of the Army-Office of the Surgeon General* in punto di esposizione interna, che precisavano testualmente il potenziale incremento del rischio di tumori in seguito all'inalazione.

In sostanza la conoscenza del rischio da esposizione alle polveri di uranio impoverito risulta comprovata specialmente dalle documentazioni operative, e corroborata dalle indicazioni sulle misure di protezione radiologica, consistenti nelle maschere con filtri, nelle tute ed occhiali decontaminanti.⁶³

Vale la pena precisare che tra le teorie che hanno trovato maggiore successo nella lettura più recente, quella della contaminazione ambientale delle nano-particelle di metalli pesanti e del potenziale tossico gioca un ruolo decisivo nel negare un ruolo causale esclusivo all'uranio impoverito, ed avocarlo nel più ampio rischio della contaminazione ambientale, senza tuttavia negare il ruolo decisivo dell'impiego militare dell'uranio impoverito nella realizzazione di una situazione di contaminazione ambientale, il cui carattere di piroforicità, logicamente, agevola la dispersione nell'ambiente di tale *mix* di nano-particelle composte tanto dall'*UD* che dagli altri metalli pesanti frequentemente utilizzati per la fabbricazione di mezzi corazzati.⁶⁴

⁶³ Cfr. **Mantelero**, 2013, note n. 90-91-93.

⁶⁴ Per approfondire sugli impieghi militari dell'*UD* v. **Zucchetti**, 2008, pp. 63-114; cfr. anche **Mantelero**, 2013, pp. 1-34; per approfondire la teoria delle nano-particelle v. **Mantelero**, 2013, pp. 43-50.