Uranio impoverito

Nicola Pacilio e Carlo Pona[1]

ENEA–Casaccia, Roma

1 Introduzione

Il recente conflitto in Jugoslavia ha riacceso le preoccupazioni, oltre che per gli aspetti puramente geopoliti e strategici e sul significato dell'aggressione perpetrata dalla North Atlantic Treaty Organization (NATO), anche per i disastri ambientali che ha provocato direttamente e indirettamente. Degli effetti e della estensione dei danni dovuti all'inquinamento da sostanze chimiche e tossiche si è parlato nel capitolo precedente. In questo capitolo analizzeremo alcune implicazioni dell'uso di uranio impoverito per migliorare il potere penetrante dei proiettili e dei missili.

L'uranio impoverito (DU, ossia *depleted uranium*) è un prodotto di scarto del processo di arricchimento dell'uranio impiegato nelle centrali nucleari e nella fabbricazione di bombe atomiche. È altamente tossico e radioattivo. Viene chiamato "impoverito" perché il suo contenuto in uranio 235, fissile, è ridotto dallo 0,7 allo 0,2%. All'inizio degli anni Settanta il governo americano ha cominciato a cercare delle soluzioni per smaltire il DU senza doverlo immagazzinare in depositi per scorie nucleari a bassa radioattività.

Il 3 maggio 1999 il Maggiore Generale Charles Wald, vice direttore della sezione "Piani Strategici e Politica" del Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti, ha ammesso durante un briefing che in Kosovo gli aerei A–10 Warthog hanno sparato contro le forze dell'esercito jugoslavo proiettili da 30 mm contenenti uranio impoverito, ed ha aggiunto: *"Sono stato intorno agli A–10 per molto tempo. Ho visto gli addetti alle munizioni mettere questi proiettili negli aerei per vent'anni, cosicché sono stati fatti numerosi studi scientifici su queste cose, e non sembra che ci sia alcun problema con questo, e non è stato un problema per nessuno di noi"*.[2]

In un rapporto del 1979, lo US Army Mobility Equipment Research & Development Command sosteneva che l'uso dei proiettili contenenti uranio impoverito mette in pericolo *"non solo le persone nelle immediate vicinanze, ma anche quelli che si trovano a*

[1] pona@casaccia.enea.it

[2] *"I've been around the A–10s for a long time. I know that I see the munition handlers put these bullets in the aircraft, holding on to them for 20 years, so they've done a lot of scientific studies on these things, and there doesn't seem to be a problem. So I don't think there's a problem at all with that, and it hasn't been a problem for any of us"*. Dept. of Defense Briefing, Monday May 3, 1999.
http://www.defenselink.mil/news/May1999/t05031999_t0503asd.htm

distanza sottovento: [...] *le particelle* [...] *si depositano rapidamente nei tessuti polmonari esponendo l'ospite ad una dose tossica crescente di radiazioni alfa, capace di provocare il cancro e altre malattie mortali"*.

Nel 1990 un altro studio, commissionato dall'esercito americano alla Science Applications International Corp., affermava: *"L'uranio impoverito provoca il cancro quando penetra nell'organismo e la sua tossicità chimica causa danni ai reni"*. Nonostante ciò i proiettili contenenti uranio impoverito furono usati nella guerra del Golfo.

Dalla dichiarazione della dottoressa Rosalie Bertell,[3] epidemiologa dell'International Institute of Concern for Public Health di Toronto: *"L'uranio impoverito rientra in una delle maggiori categorie di scorie nucleari prodotte per le industrie di armi atomiche e di reattori nucleari. È molto tossico per gli esseri umani, sia chimicamente in quanto metallo pesante, sia come emettitore di particelle alfa, che sono molto pericolose quando la sorgente è interna. Recentemente è stato impiegato dagli Stati Uniti e dal Regno Unito come sostituto del piombo nei proiettili e nei missili, e in occasione della Guerra del Golfo è stato usato estensivamente per la prima volta. È molto probabilmente una delle maggiori cause della Sindrome del Golfo, della quale hanno fatto l'esperienza sia i veterani che la gente dell'Iraq"*.[4] La dottoressa Bertell riferisce anche di uno studio della World Health Organization del 1998, nel quale sono riportate osservazioni di incrementi della diffusione di leucemie fra i giovani del sud dell'Iraq e si parla di una sindrome sconosciuta, della quale sono affette migliaia di veterani della Guerra del Golfo. La stessa dottoressa riferisce di aver documentato la presenza di DU nelle urine di queste persone, anche 7–8 anni dopo la fine della guerra.

Questo quadro viene reso ancora più inquietante dall'esistenza di rapporti come quello dei Los Alamos National Laboratories, che afferma: *"I poligoni di prova delle bombe all'uranio impoverito di Aberdeen e Yuma (nei deserti USA) non possono essere oggetto di insediamento umano senza preventiva decontaminazione"*.[5] La National Lead Industries di New York, fabbrica di armamenti ad uranio impoverito, è stata chiusa nel 1980 dalle autorità statunitensi a causa dei rilasci eccedenti il limite imposto, che causavano un'eccessiva contaminazione dell'aria (150 μCi, pari a 5.5 MBq al mese, corrispondenti a 375 g di DU). La quantità rilasciata dalla fabbrica in questione, tradotta in termini di radioattività da "campo di battaglia", corrisponde a 2 proiettili per cannoncini da 30 mm al mese.

Il S. Francisco Examiner del 17 agosto 1997 riporta il testo di un manuale di addestramento militare statunitense che raccomanda di usare sempre guanti speciali quando si toccano i proiettili, e di indossare una maschera speciale quando questi vengono sparati. Il

[3] http://news.flora.org/flora.mai-not/10957

[4] *"Depleted uranium is one of the largest categories of radioactive waste produced for the nuclear weapons and nuclear reactor industry. It is highly toxic to humans, both chemically as a heavy metal and radiologically as an alpha particle emitter which is very dangerous when taken internally. Recently it has been employed as a substitute for lead in bullets and missiles by the US and UK, and was first used extensively by the West in the Gulf War. It is most likely a major contributor to the Gulf War Syndrome experienced both by the veterans and the people of Iraq."* http://www.defenselink.mil/news/May1999/t05031999_t0503asd.html

[5] M.H. Ebinger, E.H.Essington, E.S.Gladney, B.D.Newman and C.L.Reynolds, *"Long Term Fate of Depleted Uranium at Aberdeen and Yuma Proving Grounds Final Report, Phase I: Geochemical Transport and Modeling"*, LA–117 90, DE90 012660, Los Alamos National Laboratory, New Mexico 87545, USA.

manuale conclude: *"Ricordate di stare sempre lontano, se possibile, dagli equipaggiamenti e dal terreno contaminati"*.[6]

Secondo un articolo della BBC News,[7] pubblicato il 30 luglio 1999, lo scienziato britannico Roger Coghill avrebbe dichiarato che il numero di morti attesi per cancro, a causa dell'uso del DU in Kosovo da parte dell'aviazione americana, supererà i 10.000. Coghill ha affermato ciò durante una conferenza convocata a Londra per discutere l'uso di DU da parte degli eserciti statunitense e britannico durante la Guerra del Golfo del 1991. Egli ha anche detto che durante la guerra nei Balcani sono stati osservati alti livelli di radiazione: a Kozani, nel Nord della Grecia, alcuni scienziati hanno rilevato, che nel corso del mese di giugno, il livello di radioattività superava la normale del 25% nei giorni in cui il vento soffiava dal Kosovo. I ricercatori bulgari hanno riferito di livelli 8 volte superiori in Bulgaria, e 30 volte in Jugoslavia.

Anche se ci troviamo in completa assenza di dati quantitativi certi sull'uso effettivo di ordigni all'uranio impoverito, possiamo sicuramente dire che questo è un problema ecologico non trascurabile, sul quale è necessario fare chiarezza. Un altro elemento di preoccupazione è il rientro della popolazione civile nelle zone dove si è fatto un grande uso di questo tipo di armamenti, cioè laddove si è probabilmente in presenza di alti livelli di inquinamento da contaminazione radioattiva.

2 La storia

Nella storia recente gli USA hanno combattuto quattro guerre atomiche: contro il Giappone nel 1945, in Kuwait e Iraq nel 1991, in Bosnia nel 1995 e, l'ultima, per ora, in Jugoslavia. Questi quattro conflitti sono caratterizzati dall'uso bellico di innovazioni e tecnologie acquisite nell'ambito della fisica nucleare. In Giappone sono state usate due bombe basate, rispettivamente, sulla fissione del plutonio e dell'uranio arricchito. Per i tre interventi più recenti, invece, sono state usate bombe contenenti uranio impoverito, senza il ricorso al fenomeno della fissione nucleare. Già da molti anni gli Stati Uniti hanno utilizzato il DU per la manifattura di capsule, proiettili e armamento protettivo dei carri armati pesanti. Questo materiale a basso costo possiede la proprietà di essere molto denso, e quindi in grado di penetrare corazze e schermi antiproiettile di spessore notevole. Questa capacità penetrante è stata ampiamente dimostrata nel corso della Guerra del Golfo: la parola massacro definisce gli effetti di queste armi assai meglio della parola guerra. Tuttavia il DU possiede un'altra proprietà che secondo il punto di vista dei militari potrebbe essere considerata altrettanto "desiderabile": infatti esso brucia spontaneamente al momento dell'impatto. Così, vengono formate minute particelle di aerosol, del diametro di meno di 5 micron, così leggere da poter essere inalate. Le particelle vengono inoltre trasportate dai venti per decine di chilometri. Fra le 300 e le 800 tonnellate di DU sono state rilasciate sul suolo e nelle acque di Kuwait, Arabia Saudita e Iraq, colpendo centinaia di migliaia di soldati e civili. Alle vittime straniere si sono aggiunte quella delle stesse forze armate alleate: dei 697.000 soldati americani stanziati nel Golfo, 90.000 hanno riportato sintomi che riguardano disfunzioni respiratorie, affezioni gravi al fegato e alla milza, perdita della

[6]US Department of Defense: *"Environmental Exposure Report. Depleted Uranium in the Gulf"*. http://www.gulflink.osd.mil/du/index.html

[7]BBC News, Venerdì 30 luglio 1999. http://news.bbc.co.uk/hi/english/sci/tech/newsid_408000/408122.stm

memoria, emicranie, febbri e abbassamenti della pressione sanguigna. Alla nascita dei figli si riscontrano inoltre effetti generati dai disturbi citati. L'insieme di questi disturbi e malesseri è stato classificato sotto il nome di "Sindrome del Golfo", e anche se ancora non è chiara la genesi dei disturbi, appare probabile che la causa debba essere ricercata nel micidiale cocktail velenoso derivante dalla esposizione a vaccini, gas tossici e uranio impoverito. Gli effetti sulle popolazioni dell'Iraq sono di gran lunga più rilevanti.

In una lettera del primo aprile 1999, l' International Action Center,[8] un'organizzazione che si batte contro i crimini della guerra e contro l'uso dell'uranio impoverito,[9] ha detto che *"la decisione del Pentagono di usare nel Kosovo proiettili al DU a partire dai jet A–10 Warthog conferisce una nuova dimensione al crimine contro l'umanità commesso dalla NATO in Jugoslavia. L'uso di queste armi è contrario a tutti i principi e le convenzioni internazionali firmate da tutti i paesi nel corso del XX secolo."*

3 La chimica

'Uranio' è una sorta di vocabolo sacro e venerabile del lessico del fondamentalismo tecnologico e dell'era atomica che si estende dal 1934 fino ai nostri giorni. L'uranio occupa la posizione numero 92 nella tavola degli elementi e il suo peso atomico è 238.03. Esso ha la stessa età della terra, ma è stato scoperto nel 1789, ai tempi della Rivoluzione Francese e pochi anni dopo l'osservazione del pianeta Urano (1781). È stato subito riconosciuto come altamente tossico. La quantità complessiva di uranio è più che doppia di quella dell'argento e più che tripla di quella del mercurio: il primo è un metallo di antica tradizione domestica e sacra; il secondo invece è intimamente collegato con il progresso strumentale e tecnologico.

L'uranio è un metallo di colore bianco argenteo, duttile e malleabile; ha un punto di fusione di 1.132°C, una temperatura di ebollizione di 3.818°C e un peso specifico pari a 18,7. La densità è di 19,04 g/cm^3 a temperatura ambiente, ossia 1,6 volte più del piombo. L'uranio metallico si ossida facilmente, per cui non è stabile come i suoi ossidi e fluoruri. In natura l'uranio si trova essenzialmente sotto la forma dei minerali di unaninite o pechblenda (U_3O_8), e carnotite o ortovanadato di uranile e potassio ($KUO_2VO_4{\cdot}2H_2O$). I principali giacimenti di pechblenda si trovano in Congo, in Russia e in Canada; la carnotite si trova principalmente in Russia, in Australia, nel Colorado e nello Utah.

L'uranio naturale è costituito quasi totalmente da due isotopi (vedi tabella I): l'uranio 238 (99,3% in peso) e l'uranio 235 (0,7%). Vi si trovano anche tracce di un terzo isotopo, l'uranio 234. I primi due sono i capostipiti di due delle 4 famiglie radioattive. La polvere di uranio prende fuoco spontaneamente a contatto con l'aria, anche a temperatura ambiente. Sotto forma di lingotto, esso reagisce con l'aria e il vapor d'acqua formando una superficie piroforica. Allo stato compatto, brucia riscaldandosi fino a una temperatura di 170°C. A contatto con l'acqua reagisce, a temperatura ambiente, scomponendola e formando UO_2, UH_3 e idrogeno gassoso. Si scioglie bene in acido cloridrico e nitrico, ed è inattaccabile dagli alcali. Per questi motivi l'uranio costituisce un grande pericolo per gli incendi quando viene esposto a fonti di calore o a fiamme. Inoltre, l'uranio me-

[8]International Action Center, http://www.iacenter.org/duyug.htm

[9]IAC, *"Metal of Dishonor, Depleted Uranium: How the Pentagon Radiates Soldiers & Civilians with DU Weapons"*. New York City, 1997. http://www.iacenter.org/depleted/appeal.htm

Composto	Massa atomica	Energia particelle α (MeV)	Composizione isotopica (%)	Vita media (anni)	Attività specifica[a] (kBq/g)
U naturale	238	4,147 4,196	99,2745	$4,468 \cdot 10^9$	12,4
	234	4,724 4,776	0,0055	$2,45 \cdot 10^5$	12,4
	235	4,364 4,395	0,72	$7,037 \cdot 10^8$	0,6
				Totale	25,4
U impoverito	238	4,147 4,196	99,8	$4,468 \cdot 10^9$	12,4
	234	4,724 4,776	0,001	$2,45 \cdot 10^5$	2,26
	235	4,364 4,395	0,2	$7,037 \cdot 10^8$	0,16
				Totale	14,8

[a]Per una definizione delle unità di misura si veda l'appendice.

Tabella I. Principali caratteristiche isotopiche dell'uranio naturale e di quello impoverito.

tallico reagisce violentemente con il cloro, con il fluoro, l'acido nitrico, il selenio, lo zolfo, l'ammoniaca, il tricloroetilene, e altri composti.

4 Le caratteristiche fisiche

Come già detto, e riassunto dalla tabella I, l'uranio naturale è costituito da 3 isotopi, con una netta prevalenza dell'isotopo 238, e contenuto in uranio 235 pari allo 0,7% in peso. Tutti gli isotopi dell'uranio sono radioattivi, e decadono emettendo particelle α, (nuclei costituiti da due neutroni e due protoni, e massa pari a 4 unità di massa atomica) e β (elettroni). In tal modo esso si trasforma in altri isotopi, anch'essi radioattivi: la catena del decadimento dell'uranio 238 contiene elementi radioattivi pericolosi, tra cui il radio 226 e il radon 222. Essa si ferma con l'isotopo stabile 206 del piombo. L'uranio 238 ha una lunghissima vita media ($4.5 \cdot 10^9$ anni) e un'attività molto bassa. Gli elementi suoi discendenti sono riscontrabili solo nelle rocce: questo fatto rende abbastanza difficoltosa una rapida valutazione della presenza di uranio nei residuati dei bombardamenti. Il rapporto tra le concentrazioni di uranio e piombo nelle rocce viene utilizzato per datare le rocce stesse.

Per utilizzare uranio nei reattori e nelle armi nucleari, è necessario produrre materiale “arricchito”, in cui cioè la concentrazione di uranio 235 e 234 è di gran lunga superiore a quella riscontrabile nel minerale naturale. Nell'uranio arricchito, la concentrazione di uranio 235 varia fra il 2% ed il 90%. Il materiale di scarto del processo di arricchimento è l'uranio impoverito, chiamato così perché contiene meno dello 0,7% di uranio 235. Per le applicazioni militari, questa percentuale è dello 0.2% (tabella I). Il DU è meno radioattivo dell'uranio naturale di circa il 40%, e di circa un ordine di grandezza meno dell'uranio arricchito.

Con un'attività di 14,8 kBq/g, il DU è classificato nella fascia più bassa di rischio fra gli isotopi radioattivi. L'uranio e i suoi composti sono tossici sia dal punto di vista chimico sia da quello dell'irraggiamento, quando la concentrazione supera 7,4 kBq/cm^3 nell'acqua o 1,11 Bq/cm^3 nell'aria. Negli Stati Uniti, prima della conversione in proiettile o in corazza militare, l'uranio impoverito viene considerato "scoria nucleare". Una volta trasformato, gli oggetti ottenuti vengono ridefiniti come "armi convenzionali". Questo "trucchetto" del linguaggio è finalizzato a mascherare quella che di fatto è una vera e propria arma chimica.

A causa delle sue proprietà fisiche, l'uranio viene utilizzato comunemente in medicina, per formare schermi protettivi contro le radiazioni, nell'aviazione per contrappesi e zavorre, e in mineralogia per le apparecchiature da scavo dei pozzi petroliferi. Il DU è inoltre particolarmente efficace nelle corazze e nelle blindature; nei proiettili usati contro i mezzi blindati, esso garantisce una maggiore penetrazione, del bersaglio. L'ambiguità della classificazione, così come le molteplici applicazioni del DU (dalla medicina alle guerre) rende difficile capire se e quale convenzione internazionale sia stata violata utilizzando questi proiettili: quella sulle armi convenzionali, quella sulle armi chimiche o quella sulla proliferazione delle armi nucleari ?

L'uranio impoverito è utilizzato dalle forze armate di: Stati Uniti, Gran Bretagna, Russia, Turchia, Arabia Saudita, Pakistan, Tailandia, Israele e Francia. Dalle tabelle A1 e A2, in appendice, risulta anche che l'Italia ha acquistato oltre una tonnellata di DU nel 1998, e di 233 kg nei primi tre mesi del 1999. Non è mai stato chiarito l'uso che il nostro paese intende fare di questo metallo.

5 L'origine

Il DU è un sottoprodotto del processo di arricchimento dell'uranio naturale che serve per la produzione di barre uranio con una percentuale molto alta dell'isotopo 235, altamente fissile, da destinare al combustibile per i reattori nucleari. Dal processo di arricchimento l'uranio impoverito viene prodotto per lo più sotto forma di esafluoruro (UF_6). La quantità di UF_6 disponibile negli USA è stimata in 650.000 tonnellate.[10]

6 La tossicologia

Nel Dizionario della Scienza e della Tecnica (Fratelli Fabbri Editori, 1975), leggiamo alla voce tossicologia a proposito dell'uranio: *"l'uranio e i suoi sali possiedono una tossicità chimica intrinseca e una tossicità legata alla loro natura di corpi radioattivi naturali. Relativamente alla prima, la patologia non è conosciuta. L'uranio penetra nell'organismo attraverso le vie respiratorie, giunge rapidamente nel sangue (in parte si deposita nelle ossa) ed è eliminato in gran parte con le urine. Provoca gravi degenerazioni dei reni, lesioni necrotiche acute delle arterie e dermatiti."*

[10] US Dept. of Energy, 30 set 1998.

7 I rischi

Mentre l'uranio impoverito, grazie alle proprietà a cui abbiamo accennato, può essere facilmente fuso e lavorato con tecniche convenzionali, la sua radioattività, la sua tossicità chimica e la sua piroforicità richiedono grandi precauzioni nella sua manipolazione. Il DU è debolmente radioattivo ed è considerato nel gruppo dei radioisotopi a più bassa radiotossicità. I rischi radiologici principali derivano dalla emissione di particelle α e β da parte dell'uranio e dei suoi discendenti. Le particelle α hanno un grande potere ionizzante. Esse percorrono in aria al massimo frazioni di cm, e possono essere arrestate completamente con un foglio di carta oppure dallo strato superficiale di pelle morta; per questo motivo esse non costituiscono un pericolo in caso di irraggiamento a distanza (esterno al corpo umano). La loro pericolosità e rischiosità deriva però dalle polveri e dagli aerosol che possono essere eventualmente inalati. Per questo motivo vengono imposti limiti di concentrazione molto rigidi: in aria[11] 0.25 mg/m^3. Per le particelle β il discorso è diverso in quanto possono compiere un percorso in aria molto più lungo. Il potere ionizzante e il percorso in aria sono funzione della massa. Le particelle β, che hanno una massa ottomila volte più piccola delle particelle α, costituiscono un problema anche per l'irradiazione esterna da breve distanza, e ancor più se a contatto. Il rateo di dose[12] β alla superficie è qualche frazione di Gy/h. I danni biologici prodotti dalle radiazioni non sono linearmente legati all'attività, all'energia e al tipo di particella: una stessa sorgente può provocare danni di entità molto diversa a seconda dell'organo colpito, della durata dell'esposizione e delle modalità di irraggiamento (interno o esterno). Questo concetto viene espresso con una grandezza appositamente studiata, l'equivalente biologico relativo (relative biological equivalent). Esso vale sempre 1 per la radiazione fotonica (raggi X, γ, e β di bassa energia), e assume valore massimo per le particelle α (fino a oltre 25). Analogamente, ogni organo o tessuto ha dei suoi valori specifici per la sensibilità a una data radiazione e una data particolare modalità di irraggiamento. Come tutti i metalli pesanti, l'uranio è tossico anche se considerato dal solo punto di vista della tossicità chimica, e gli organi maggiormente interessati sono i reni. I potenziali effetti nocivi, sia tossici che radioattivi, del DU sono legati alla sua incorporazione all'interno dell'organismo, che può avvenire generalmente in 2 modi: per ingestione o per inalazione. Nel caso militare, esiste una terza via per l'incorporazione dell'uranio: i frammenti di proiettile depositati all'interno dell'organismo. Per quanto riguarda l'inalazione, è la natura piroforica dell'uranio a renderla possibile: l'impatto di un proiettile al DU su un blindato, o di un proiettile convenzionale contro una corazza al DU, produce polveri e aerosol che prendono rapidamente fuoco. Le alte temperature legate alla combustione ossidano l'uranio metallico generando biossido (UO_2), triossido (UO_3) e principalmente ottaossido (U_3O_8) di uranio. La percentuale di DU che passa allo stato aerosol–gassoso dipende da molti fattori: durezza del bersaglio, velocità e angolo di impatto, cammino all'interno del bersaglio. La durezza del bersaglio è particolarmente critica: l'impatto di un proiettile al DU con una corazza contenente DU produce ovviamente la massima percentuale di DU volatile (fino al 70%), mentre la percentuale diminuisce notevolmente nel caso di impatto con bersagli di basso peso specifico. Nel caso della Guerra del Golfo, la maggior parte dei proiettili attraversarono completamente la corazza dei blindati iracheni, e la percentuale di DU volatilizzato dal

[11] US Dept.of Energy.
[12] US Dept. of Energy, 30 set 1998.

proiettile è stata stimata fra il 10% ed il 35%. Una frazione compresa fra il 60% ed il 70% dell'aerosol è di diametro sufficientemente ridotto da poter essere inalato.[13] Secondo il più importante organo scientifico mondiale in materia di radioprotezione, l'International Commission for Radiological Protection (ICRP), la dose effettiva equivalente per inalazione, rispetto all'intero corpo umano, è data da $3.2 \cdot 10^{-4}$ Sv/Bq, dove il Sievert (Sv) è l'unità di misura della dose assorbita, dal tessuto biologico e il Becquerel (Bq) è l'unità di misura dell'attività.[14] Nella stessa pubblicazione della ICRP si ritrova il fattore di conversione raccomandato per l'uranio che è dato da 1 Sv per g di uranio per anno per kg di polmone. Questo significa che con 50 mg di uranio inalati all'anno si raggiunge la dose massima ammissibile di 50 mSv. Ancora, la stessa ICRP valuta il rischio di cancerogenicità (cioè la probabilità dell'occorrenza di un evento letale tra gli individui esposti alla radiazione) di $5 \cdot 10^{-2}$ cancri/Sv cioè di 1 caso di carcinoma maligno ogni 20 Sv di radiazione assorbita.[15] Si tenga presente che gli effetti genetici sono dello stesso ordine di grandezza, cioè per ogni carcinoma nella generazione attuale, un altro è atteso nelle due generazioni successive. Anche la radiazione β emessa costituisce un pericolo se il metallo viene posto a contatto. Si è calcolato che 1 grammo di DU, non schermato e tenuto a contatto con la pelle, somministra una dose dell'ordine del μSv al giorno: per ottenere una dose pari al fondo naturale basta una scheggia di DU di circa 25 g (una pallina di 1,4 cm di diametro) incorporata per un anno.

In uno studio sull'argomento, Leonard A. Dietz, in passato scienziato dell'Atomic Power Laboratory, ha stimato che una particella di ossido di uranio di 5 micron di diametro può irraggiare il tessuto polmonare circostante, a una distanza compresa in qualche decina di micron, a una dose di 13,60 Sv/anno, qualche migliaio di volte il limite annuo per la popolazione (per irradiazione all'intero corpo).[16] Quando viene inalato a seguito di un uso come proiettile, per quanto detto sopra, il DU arriva come aerosol nella forma di ossido di uranio (UO), altamente solubile (al 99% in massa) nei fluidi delle mucose polmonari. Una parte quindi si dissolve nel sangue e attraverso i reni viene eliminato in breve tempo con le urine. La gran parte dell'ossido di uranio che non viene eliminato si fissa nelle ossa e nei vari organi e lì rimane praticamente per tutta la vita; dalle ossa esso irraggia le cellule di midollo osseo proprio nella fase di formazione delle nuove cellule ematopoietiche. Basta anche un solo decadimento nucleare, con l'emissione di due particelle α, a generare nella cellula bersaglio quella mutazione sufficiente a generare un tumore. La probabilità che ciò avvenga con un singolo decadimento è bassa, ma ci basta sapere che non è pari a zero.

8 Ipotesi

È pressoché impossibile avere informazioni precise, sia sul tipo di armamenti sia sui luoghi dove essi sono stati impiegati. Dobbiamo pertanto lavorare per ipotesi, se vogliamo stimare quantitativamente la dimensione del problema. È ormai fuori di dubbio l'impiego

[13]Center for Health Promotion and Preventive Medicine.

[14]ICRP, *"Limits for Intakes of Radionuclides by Workers"*. ICRP Pub. 30, part.I, supplement. Pergamon Press, Oxford, 1979.

[15]ICRP, pubblicazione 60.

[16]Leonard A. Dietz, Appendix 11, *"Estimate of Radiation Dosage from a Depleted U ranium Oxide Particle"*, pp. 153–55 di "Uranium Battlefields" e Leonard A. Dietz, lettera *"Uranium Health Hazard"* a Chemical &E ngineering News, 4 feb 1991.

massiccio di A–10 Warthog in Kosovo. Inoltre, da informazioni recenti, ricavate durante il viaggio a Belgrado effettuato nel mese di luglio dall'associazione *Un ponte per...*, sembra che siano stati impiegati missili Tomahawks nei bombardamenti praticamente quotidiani degli aeroporti militari di Batajnica e di Rakovica, a poche decine di chilometri da Belgrado. La notizia non è confermata ufficialmente, ma il fatto è stato riferito da più parti. Secondo le dichiarazioni del Pentagono solo il 20% dei proiettili montati sugli A–10 conteneva DU, per cui si può stimare che circa 500.000 proiettili siano stati sparati in Kosovo. L'ipotesi più ragionevole che si può fare è che ad ogni "raffica" — dove per raffica intendiamo il rilascio completo del DU caricato su un missile Tomahawk, o nelle bombe a guida laser GBU–28, o nelle munizioni per i PGU-14/B API montate sugli A–10 — vengono "sparati" circa 400 kg di DU.[17] Un aereo A–10 Warthog dispone di oltre 1.100 proiettili da 300–330 g l'uno, e i missili Tomahawk, possono essere modificati per disporre di un carico tra 400 e 500 kg di DU. Complessivamente, l'attività disponibile per ogni raffica è di circa $5{\cdot}10^9$ Bq. Nell'impatto si raggiunge una temperatura di circa 5.000°C, superiore al punto di ebollizione dell'uranio (4.700°C); si produce così una grande quantità di aerosol composta da ossidi di uranio. La frazione che si trasforma in aerosol respirabile, di diametro inferiore al micron, è stimata tra il 10 e il 35%. Secondo l'Army Environmental Policy Institute tale frazione arriva fino al 70%.[18] Immaginiamo per i nostri conti che tale frazione sia del 20%: ad ogni raffica si libera una quantità di DU pari a $1{\cdot}10^9$ Bq sotto forma di aerosol respirabile e, con vento debole, a 500 m si ritrova un numero di particelle tra 200 e 10.000 per cm^3, pesanti tra 0.6 e $5{\cdot}10^{-9}$ g ciascuna. Siccome l'uomo respira mediamente circa 20 litri (20.000 cm^3) di aria al minuto (un bambino circa 14, e un neonato circa 3.5) ne consegue che in un minuto si possono inalare dai 4 ai 200 milioni di particelle (fra 2 mg e circa 1 g).

Se tale quantità venisse tutta inalata il numero di carcinomi potenzialmente sviluppabili sarebbe pari a:

$$1 \cdot 10^9 \text{ Bq/colpo} \times 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ Sv/Bq} \times 5 \cdot 10^{-2} \text{ carcinomi/Sv} = 1,6 \cdot 10^3 \text{ carcinomi/colpo}$$

Quest'ipotesi non è realistica, in quanto prevede che tutta la parte trasformata in aerosol venga effettivamente respirata dalla popolazione. Però è utile per comprendere quale potenziale distruttivo e cancerogeno sia contenuto in questo materiale.

Riportiamo il calcolo effettuato con un software chiamato HOTSPOT, prodotto da S.G. Homann presso il Lawrence Livermore National Laboratory, ben noto per l'attività di produzione delle bombe atomiche. Nell'ipotesi che l'esplosione porti alla formazione di una nuvola di aerosol, che questa viaggi con vento costante a 8 m/s, e considerando una velocità di deposizione al suolo di 1 cm/s e un tempo di permanenza nella nuvola di 10 minuti, la dose equivalente a una esposizione di 50 anni risulterebbe pari a:

Dose assorbita	permanenza 10 min.	perm. 1 ora	perm. 1 giorno
a 100 m	$1,6 \cdot 10^{-5}$ Sv	$9,60 \cdot 10^{-5}$ Sv	$2,30 \cdot 10^{-3}$ Sv
a 1 km	$0,7 \cdot 10^{-5}$ Sv	$4,20 \cdot 10^{-5}$ Sv	$1,01 \cdot 10^{-3}$ Sv
a 10 km	$0,15 \cdot 10^{-5}$ Sv	$9,00 \cdot 10^{-5}$ Sv	$2,16 \cdot 10^{-4}$ Sv
a 20 km	$0,88 \cdot 10^{-6}$ Sv	$5,28 \cdot 10^{-6}$ Sv	$1,27 \cdot 10^{-4}$ Sv

[17] Theodore Liolios: *"Assessing the risk from the depleted uranium weapons used in Operation Allied Force"*, 28 aprile 1999.

[18] AEPI: *"Health and Environmental Consequences of Depleted Uranium Use in the US Army"*, 1995.

Il fondo naturale di radiazione comporta una dose assorbita che varia da luogo a luogo, compresa nell'intervallo 0.1–2 mSv/anno. Per avere un quadro di riferimento, riportiamo il limite di dose da irraggiamento per lavoratori professionalmente esposti e per la popolazione nel suo complesso:

$5{\cdot}10^{-2}$ Sv/anno per i lavoratori professionalmente esposti (irradiazione globale);
$1{\cdot}10^{-3}$ Sv/anno per la popolazione (irradiazione globale);
$50{\cdot}10^{-2}$ Sv/anno per singolo organo per i lavoratori professionalmente esposti;
$15{\cdot}10^{-2}$ Sv/anno per il cristallino.

Nell'ipotesi di una distribuzione uniforme della popolazione (200 ab./km^2) e una permanenza nella nube di una giornata, l'irraggiamento stimato della popolazione risulta come segue:

a 1km: circa 0.03 carcinomi/sparo;
a 10 km: circa 0.6 carcinomi/sparo.

Se gli spari fossero stati "solo" 1000, ci si dovrebbero aspettare circa 630 carcinomi nella popolazione e altrettanti nella loro discendenza fino a due generazioni. Se invece fosse confermata la notizia secondo cui sarebbero stati bombardati con proiettili al DU i due aeroporti militari di Batajnica e Rakovica, entrambi a brevissima distanza da Belgrado, ovviamente il computo dei danni a lungo termine andrebbe rivisto. In questa ipotesi infatti, considerando in 2.000.000 di abitanti la popolazione di Belgrado e dintorni, ci si potrebbero aspettare conseguenze numericamente ben più significative, dell'ordine della decina di migliaia di casi fatali. Facciamo notare che abbiamo considerato solo uno degli aspetti legati all'uso delle bombe al DU, e cioè quello della contaminazione "diretta", a seguito dell'uso immediato, diremmo quasi "sul campo di battaglia" anche se in senso lato: il DU viene trasportato dal vento verso gli ignari bersagli. Non abbiamo considerato gli effetti dovuti alla presenza di questa sostanza sui campi e sui terreni destinati all'uso agricolo. Secondo fonti radioprotezionistiche americane, una concentrazione al suolo di 2 μCi/m^2 rende un campo non coltivabile. Questa concentrazione non può essere stata raggiunta come valore medio su tutto il territorio jugoslavo, ma probabilmente lo è stata a livello locale e puntuale. Non è noto, inoltre, in che modo l'uranio abbia inquinato le falde acquifere e di conseguenza quanto possa essere in grado di contaminare gli essere umani attraverso la catena alimentare.

9 Conclusioni

Lo scopo di questo breve lavoro è quello di illustrare in modo scientifico, anche se molto approssimato, il problema dei possibili effetti dell'uso di armi contenenti uranio impoverito durante la recente aggressione della NATO alla Jugoslavia. Dallo studio della letteratura si deduce che il DU presenta tossicità sia chimica che radiologica. L'organismo umano è in grado di eliminare una grande frazione del DU ingerito o inalato, ma quello che non viene eliminato subito è destinato a rimanere praticamente per tutta la vita, incapsulato prevalentemente nelle ossa. La pericolosità del DU è nota all'esercito statunitense da oltre 20 anni, e pur tuttavia questo materiale che viene classificato all'inizio del ciclo produttivo come "scorie nucleari", quando è trasformato in proiettile diventa ufficialmente un "armamento convenzionale". Un esame delle procedure per la gestione e lo smaltimento delle scorie radioattive adottate dal Ministero della Difesa Britannico, pubblicato dal Dipartimento per l'Ambiente nel dicembre 1997, mostra come le precauzioni adottate dagli specialisti siano molto serie. Secondo il rapporto del Comitato Consultivo per la Gestione dello Smaltimento delle Scorie, per evitare la contaminazione al poligono di tiro Eskmeals, sulla costa della Cumbria, i proiettili rivestiti con DU devono essere sparati all'interno di uno speciale tunnel munito di un sistema di filtraggio, e lavati con acqua ad alta pressione. *"I residui del lavaggio sono poi trasferiti in cisterne di raccolta e quindi definitivamente smaltiti in fusti di cemento a Drigg"*. Se il proiettile è conficcato in una corazza, è l'intera corazza ad essere inviata a Drigg per lo smaltimento. Le autorità britanniche sono talmente preoccupate dei rischi per la salute derivanti dalle testate al DU che al poligono di Eskmeals esiste un laboratorio medico di monitoraggio permanente del personale militare. In un lavoro del marzo 1998 di Dan Fahey (Veteran for Peace e Commander of Veterans of Foreign Wars) si legge: *"Molti veterani della guerra del Golfo e le loro famiglie mostrano attualmente i sintomi da avvelenamento da uranio impoverito, compresi: problemi ai reni e al fegato, disfunzioni al sistema immunitario e problemi nell'apparato riproduttivo. Gli effetti a lungo termine del DU, compresi i carcinomi, potrebbero non essersi manifestati ancora"*.[19] Non avendo ancora avuto conoscenza di casi acuti di intossicazione da DU, possiamo concludere che il vero rischio da radiazioni nasce proprio dalle microdosi di radiazione, quelle che non sono in grado di uccidere la cellula o l'organismo ma che sono in grado di innescare piano piano la comparsa di tumori. Abbiamo stimato anche il numero dei potenziali casi di carcinomi fatali riscontrabili nei prossimi 50 anni nella popolazione jugoslava esposta. Fintanto che i residui di DU resteranno sul posto e verranno utilizzati, essi potranno sempre entrare nella catena alimentare umana o ritornare in sospensione come aerosol. La presenza di numerosi pezzi di proiettile nelle zone abitate e coltivate, a causa della forte reazione che il metallo di uranio ha con l'aria, esporrà probabilmente la popolazione a una dose equivalente annua aggiuntiva di gran lunga maggiore del fondo naturale. Il metallo si ossida e si polverizza e quindi entra facilmente nella catena alimentare. Anche se l'attività in gioco è contenuta, il rischio di cancerogenesi è potenzialmente elevato per determinate fette della popolazione, ed in particolare per i bambini. Dagli elementi raccolti, sembra che l'esercito italiano non sia dotato di armamenti che utilizzano DU,[20] anche se risultano vendite di quantitativi di DU all'Italia da parte degli Stati Uniti.

Sull'argomento dell'uranio impoverito, si veda anche ad esempio l'articolo di Marco Durante, http://yugowar.na.infn.it/nostridocumenti/durante.html

[19]Swords to Plowshares, Inc.; National Gulf War Resource Center, Inc.; Military Toxics Projects, Inc.: *"Depleted Uranium (DU) Exposures"*, 2 marzo 1998, autore: Dan Fahey. http://www.rama-usa.org/duplow.htm

[20]M.Brutti, sottosegretario alla Difesa: risposta alla interpellanza parlamentare dei Verdi sulle armi all'uranio. http://www.verdi.it/kosovo

Appendice 1

Tabella A1: Esportazioni di DU dagli Stati Uniti, 1998
2844.30.2060: URANIUM COMPOUNDS DEPLETED IN U^{235}, NESOI
U.S. Domestic Exports: December 1998 and 1998 Year–to–Date (FAS Value, in Thousands of Dollars)
Units of Quantity: Kilograms

	Dec 1998		1998 YTD	
Country	Quantity	Value	Quantity	Value
WORLD TOTAL	1,218	19	41,674	1.806
Australia	—	—	114	31
Canada	100	7	3,419	87
Denmark	—	—	43	4
Italy	—	—	1,057	70
Korea, Republic of	—	—	927	14
Netherlands	559	6	8,002	86
New Zealand	—	—	5	4
Spain	—	—	69	15
Sweden	559	6	3,535	38
United Kingdom	—	—	24,503	1,457

Tabella A2: Esportazioni di DU dagli Stati Uniti, 1999, fino a Marzo
2844.30.2060: URANIUM COMPOUNDS DEPLETED IN U^{235}, NESOI
U.S. Domestic Exports: March 1999 and 1999 Year–to–Date (FAS Value, in Thousands of Dollars)
Units of Quantity: Kilograms

	Mar 1999		1999 YTD	
Country	Quantity	Value	Quantity	Value
WORLD TOTAL	1,314	22	3,340	59
Canada	12	8	315	16
Italy	—	—	233	13
Netherlands	—	—	931	10
Sweden	1,302	14	1,861	20

Appendice 2 — Unità di misura

Le unità di misura in campo radiologico hanno subito un decennio fa una trasformazione per adeguarle al Sistema Internazionale di unità di misura. Riportiamo qui le unità correnti confrontandole con quelle vecchie, peraltro tuttora ancora in uso nella prassi, anche se formalmente vietate.

Grandezza	Nuova unità		Definizione	Vecchia unità		Fattore di conversione
Attività	Becquerel	Bq	1 Bq = 1 disintegr/sec	Curie[a]	Ci	$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10}$ Bq
Dose	Grey	Gy	1 Gy = 1 Joule/kg	Rad	rad	1 Gy = 100 rad
Equivalente di dose assorbita	Sievert	Sv	1 Sv = 1 Joule/kg	Rem	rem	1 Sv = 100 rem

[a] Per motivi storici il Ci è stato definito come l'attività di un grammo di Ra^{226}.