



# RADIAZIONI

## EFFETTI e SORGENTI

Cosa sono le radiazioni?  
Che effetti hanno le radiazioni su di noi?  
Da dove provengono le radiazioni?

>1 000 mSv

Dosi utilizzate in radioterapia

100 mSv

Dosi agli astronauti  
(in 4 mesi)

10 mSv

Esame TC all'addome

1 mSv

Dose ai lavoratori dell'industria  
nucleare (in 1 anno)

0,1 mSv

Radiografia al torace  
o volo aereo (di 20 ore)

0,01 mSv

Radiografia ai denti

0,001 mSv

Noci brasiliane (30 g)





# **RADIAZIONI**

## **EFFETTI e SORGENTI**

Cosa sono le radiazioni?  
Che effetti hanno le radiazioni su di noi?  
Da dove provengono le radiazioni?

Programma per l'Ambiente delle Nazioni Unite

## DISCLAIMER

Questa pubblicazione si basa in gran parte sui lavori del Comitato Scientifico delle Nazioni Unite sugli Effetti delle Radiazioni Atomiche (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation - UNSCEAR), un organismo sussidiario dell'Assemblea Generale delle Nazioni Unite e per il quale il Programma per l'Ambiente delle Nazioni Unite (United Nations Environment Programme - UNEP) fornisce il segretariato. Questa pubblicazione non rappresenta necessariamente il punto di vista del Comitato Scientifico o del Programma per l'Ambiente delle Nazioni Unite.

I nomi utilizzati e la presentazione del materiale in questa pubblicazione non implicano in alcun modo espressione di una qualche opinione da parte del Programma per l'Ambiente delle Nazioni Unite relativamente allo stato legale di alcun Paese, territorio, città o area o delle sue autorità, o relativamente alla delimitazione delle sue frontiere o confini.

Questa pubblicazione può essere riprodotta in parte e in ogni sua forma per scopi didattici o no-profit senza autorizzazione speciale da parte del detentore del copyright, purché sia citata la fonte. Il Programma per l'Ambiente delle Nazioni Unite apprezzerrebbe ricevere una copia di ogni materiale stampato che fa uso di questa pubblicazione come fonte.

Questa pubblicazione non può essere rivenduta o usata per qualsivoglia altro scopo commerciale senza autorizzazione preventiva in forma scritta da parte del Programma per l'Ambiente delle Nazioni Unite.

Il Programma per l'Ambiente delle Nazioni Unite promuove pratiche rispettose per l'ambiente sia globalmente che nell'ambito delle proprie attività. Questa pubblicazione è stata stampata su carta riciclata, al 100% senza uso di cloro. La politica di distribuzione dell'UNEP è finalizzata a ridurre il suo contributo alle emissioni di gas ad effetto serra.

Catalogazione: Radiazioni: effetti e sorgenti, Programma per l'Ambiente delle Nazioni Unite, 2016

ISBN: 978-92-807-3829-2

Job No.: DEW/2327/NA

Copyright © Programma per l'Ambiente delle Nazioni Unite, 2016

Versione elettronica



# **RADIAZIONI**

## **EFFETTI e SORGENTI**

Cosa sono le radiazioni?  
Che effetti hanno le radiazioni su di noi?  
Da dove provengono le radiazioni?

Programma per l'Ambiente delle Nazioni Unite

## RICONOSCIMENTI

Questo opuscolo si basa in gran parte sui lavori del Comitato Scientifico delle Nazioni Unite sugli Effetti delle Radiazioni Atomiche (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation - UNSCEAR) e sulla pubblicazione Radiazioni: dosi, effetti, rischi, edita inizialmente da Geoffrey Lean nel 1985 e nel 1991 nell'ambito del Programma per l'Ambiente delle Nazioni Unite (United Nations Environment Programme - UNEP).

Questo opuscolo è stato pubblicato originariamente in Inglese. La traduzione è stata curata dal Centro Nazionale per la Protezione dalle Radiazioni e Fisica Computazionale dell'Istituto Superiore di Sanità (Italia). In caso di discrepanze, prevale la versione inglese.

Revisione tecnica: Malcolm Crick e Ferid Shannoun

Revisione testi: Susan Cohen-Unger e Ayhan Evrensel

Grafica e impaginazione: Alexandra Diesner-Kuepfer

Inoltre, le seguenti persone hanno fornito contributi e commenti utili a questo opuscolo:

Laura Anderson, John Cooper, Susan Cueto-Habersack, Emilie van Deventer, Gillian Hirth, David Kinley, Vladislav Klener, Kristine Leysen, Kateřina Navrátilová-Rovenská, Jaya Mohan, Wolfgang-Ulrich Müller, Maria Pérez, Shin Saigusa, Bertrand Thériault, Hiroshi Yasuda e Anthony Wrixon.

## PREMESSA

Hiroshima, Nagasaki, Three Mile Island, Chernobyl e Fukushima-Daiichi: questi nomi sono ormai associati alla paura della popolazione verso le radiazioni, derivanti dall'uso di ordigni nucleari o da incidenti in centrali nucleari. In realtà, le persone sono di gran lunga più esposte quotidianamente a radiazioni provenienti da molte altre sorgenti, incluse sia l'atmosfera e il suolo terrestre, che le applicazioni mediche e industriali.



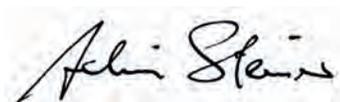
Nel 1955, i test di ordigni nucleari aumentarono le preoccupazioni della popolazione relative agli effetti delle radiazioni atomiche su aria, acqua e cibo. Di conseguenza, l'Assemblea Generale delle Nazioni Unite istituì il Comitato Scientifico delle Nazioni Unite sugli Effetti delle Radiazioni Atomiche (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation - UNSCEAR) avente il compito di raccogliere e valutare le informazioni sui livelli di esposizione alle radiazioni e sui loro effetti. Il primo rapporto del Comitato ha rappresentato la base scientifica per il negoziato sul Trattato di Bando Parziale dei Test Nucleari col quale, nel 1963, sono stati proibiti i test di ordigni nucleari in atmosfera. Da allora, il Comitato ha continuato a produrre rapporti di alto profilo scientifico sull'esposizione alle radiazioni, inclusi quelli relativi agli incidenti alle centrali nucleari di Chernobyl e di Fukushima-Daiichi. Il lavoro del Comitato è stato sempre di grande valore sia per la comunità scientifica che per i decisori politici.

La comunità scientifica ha pubblicato informazioni su sorgenti ed effetti delle radiazioni che tendono ad essere molto tecniche e forse di difficile comprensione per il pubblico – cosa che ha spesso confuso, più che informato, il pubblico stesso, per cui i timori generalizzati e la confusione generatisi decenni fa ancora prevalgono. Questa pubblicazione affronta la questione riportando le informazioni scientifiche più aggiornate fornite dall'UNSCEAR – sui diversi tipi di radiazioni, sulle loro sorgenti e sui loro effetti sugli esseri umani e sull'ambiente – e rendendole comprensibili al lettore non esperto.

Oggi, il segretariato dell'UNSCEAR opera sotto l'egida del Programma per l'Ambiente delle Nazioni Unite (United Nations Environment Programme - UNEP), che aiuta i Paesi ad implementare politiche e pratiche sostenibili dal punto di vista ambientale. Aiutare il pubblico a comprendere le radiazioni

e come esse influiscano sulla vita su questo pianeta fa parte del mandato centrale dell'UNEP.

Mi congratulo con molto piacere con tutti coloro che hanno contribuito a questa pubblicazione, nonché con i componenti del Comitato e con le loro delegazioni, che hanno lavorato con notevole impegno nei sei decenni passati su questi argomenti cruciali.

A handwritten signature in black ink, reading "Achim Steiner". The signature is written in a cursive, flowing style.

Achim Steiner  
Direttore esecutivo dell'UNEP e  
Sottosegretario Generale delle Nazioni Unite

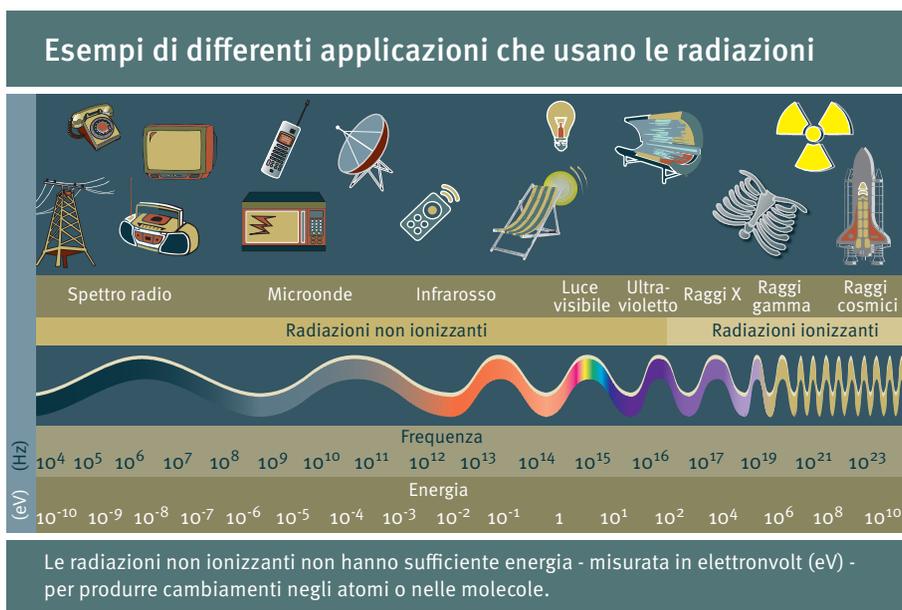
# INDICE

<b>INTRODUZIONE</b>	<b>1</b>
<b>1. COSA SONO LE RADIAZIONI?</b>	<b>3</b>
1.1. Un po' di storia	3
1.2. Alcune nozioni di base	4
Decadimento radioattivo ed emivita	6
Unità di misura delle radiazioni	7
1.3. Potere di penetrazione delle radiazioni	9
<b>2. CHE EFFETTI HANNO LE RADIAZIONI SU DI NOI?</b>	<b>11</b>
2.1. Effetti sugli esseri umani	13
Effetti a breve termine sulla salute	14
Effetti ritardati sulla salute	15
Effetti sulla progenie	18
2.2. Effetti su animali e piante	22
2.3. Relazione tra dosi di radiazioni ed effetti	24
<b>3. DA DOVE PROVENGONO LE RADIAZIONI?</b>	<b>27</b>
3.1. Sorgenti naturali	28
Sorgenti cosmiche	28
Sorgenti terrestri	29
Sorgenti nei cibi e bevande	32
3.2. Sorgenti artificiali	32
Applicazioni mediche	33
Ordigni nucleari	37
Reattori nucleari	39
Applicazioni industriali ed altre applicazioni	48
3.3. Esposizione media a radiazioni per popolazione e lavoratori	54



# INTRODUZIONE

Prima di iniziare, dobbiamo distinguere tra radiazioni ionizzanti e non ionizzanti. Le **radiazioni ionizzanti** hanno abbastanza energia da liberare elettroni da un atomo, lasciandolo quindi carico elettricamente, mentre le **radiazioni non ionizzanti**, come le onde radio, la luce visibile o la radiazione ultravioletta, non hanno sufficiente energia per farlo. Questa pubblicazione tratta gli effetti dell'esposizione alle radiazioni provenienti sia da sorgenti naturali che artificiali. Tuttavia d'ora in poi, la parola **radiazioni** si riferirà solamente alle radiazioni ionizzanti.



Ad oggi, sappiamo più riguardo le sorgenti di radiazioni e gli effetti dell'esposizione alle radiazioni, che riguardo quasi tutti gli altri agenti pericolosi, e la comunità scientifica continua costantemente ad aggiornare e analizzare le conoscenze. La maggior parte delle persone è consapevole dell'uso delle radiazioni nella produzione di energia elettrica in centrali nucleari o nelle applicazioni mediche. Tuttavia, molti altri usi delle tecnologie nucleari nell'industria, nell'agricoltura, nelle costruzioni, nella ricerca e in altre aree sono quasi sconosciuti. A chi legge per la prima volta su questo argomento, potrebbe risultare sorprendente che le sorgenti di radiazioni che causano le maggiori esposizioni della popolazione non sono necessariamente quelle che attraggono la maggiore attenzione. Infatti, le maggiori esposizioni sono causate dalle sorgenti naturali sempre presenti nell'ambiente e il contributo più

grande all'esposizione da sorgenti artificiali proviene dall'uso delle radiazioni in medicina in tutto il mondo. Inoltre, cose di tutti i giorni, come i viaggi aerei o abitare in case termicamente ben isolate in certe parti del mondo, possono aumentare sostanzialmente l'esposizione alle radiazioni.

Questa pubblicazione è un tentativo, da parte del Programma per l'Ambiente delle Nazioni Unite (United Nations Environment Programme - UNEP) e del segretariato del Comitato Scientifico delle Nazioni Unite sugli Effetti delle Radiazioni Atomiche (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation - UNSCEAR), di aiutare ad aumentare la consapevolezza e approfondire la conoscenza delle sorgenti, dei livelli e degli effetti dell'esposizione alle radiazioni ionizzanti. Riunendo i maggiori scienziati da 27 Stati Membri delle Nazioni Unite, l'UNSCEAR fu istituito dall'Assemblea Generale delle Nazioni Unite nel 1955, per valutare l'esposizione alle radiazioni, i suoi effetti e i suoi rischi su scala mondiale. Tuttavia, non stabilisce, e nemmeno raccomanda, standard di sicurezza; piuttosto, fornisce informazioni scientifiche che consentono alle autorità nazionali e ad altri organismi di farlo. Le valutazioni scientifiche dell'UNSCEAR effettuate negli ultimi sessanta anni sono la principale fonte di informazione per questa pubblicazione.

# 1. COSA SONO LE RADIAZIONI?

Per essere in grado di parlare dei livelli, degli effetti e dei rischi connessi all'esposizione alle radiazioni, dobbiamo prima acquisire alcune nozioni di base di scienza delle radiazioni. La radioattività e le radiazioni da essa prodotte esistevano sulla Terra da molto prima che emergesse la vita. Infatti, sono presenti nello spazio sin dall'origine dell'Universo e materiali radioattivi facevano parte della Terra già durante la sua formazione. Tuttavia l'umanità scoprì per la prima volta questo fenomeno elementare e fondamentale solo negli ultimi anni del XIX secolo e stiamo ancora apprendendo nuovi modi per impiegarlo.

## 1.1. Un po' di storia

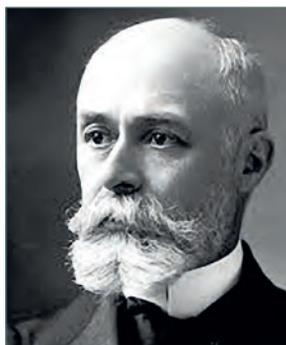
Nel 1895, **Wilhelm Conrad Roentgen**, un fisico tedesco, scoprì le radiazioni – che chiamò raggi X – che potevano essere usate per osservare l'interno del corpo umano. Questa scoperta preannunciò l'uso medico delle radiazioni, il quale ha continuato ad espandersi da allora. Roentgen fu insignito del primo Premio Nobel per la Fisica nel 1901, in riconoscimento dello straordinario servizio reso all'umanità. Un anno dopo la scoperta di Roentgen, **Henri Becquerel**, fisico Francese, ripose alcune lastre fotografiche in un cassetto, insieme a frammenti di un minerale contenente uranio. Quando sviluppò le lastre, scoprì con sorpresa che erano state colpite dalle radiazioni. Questo fenomeno è chiamato **radioattività** e avviene quando l'energia è rilasciata spontaneamente da un atomo. Oggi la radioattività viene misurata in unità chiamate becquerel (Bq), dal nome di Henri Becquerel. Poco dopo, una giovane chimica, **Marie Skłodowska-Curie**, sviluppò ulteriormente le ricerche e fu la prima a coniare la parola radioattività. Nel 1898, lei e suo marito **Pierre Curie** scoprirono che, mentre l'uranio rilasciava energia, allo stesso tempo si trasmutava, misteriosamente, in altri elementi, uno dei quali chiamarono polonio, dal nome del Paese natale di lei, mentre un altro lo chiamarono radio, l'elemento "brillante". Marie Curie condivise il



Wilhelm C. Roentgen (1845–1923)



Marie Curie (1867–1934)



Henri Becquerel (1852–1908)

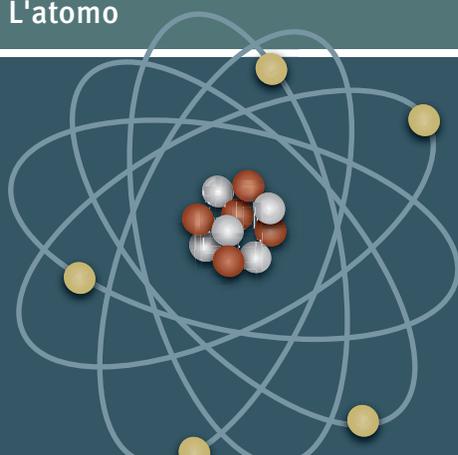
Premio Nobel per la Fisica del 1903 con Pierre Curie e Henri Becquerel. Nel 1911 divenne la primadonna a vincere un secondo Premio Nobel per le sue scoperte sulla chimica delle radiazioni.

## 1.2. Alcune nozioni di base

Le indagini degli scienziati furono mirate a comprendere l'*atomo* e, in particolare, la sua struttura. Oggi sappiamo che gli atomi sono costituiti da un piccolo nucleo carico positivamente, circondato da una nuvola di *elettroni* carichi negativamente. Il nucleo è solo circa un centomillesimo delle dimensioni dell'intero atomo, ma è così denso che contiene quasi l'intera massa dell'atomo.

Il nucleo è costituito da un ammasso di particelle, *protoni* e *neutroni*, strettamente legate fra loro. I protoni hanno una carica elettrica positiva, mentre i neutroni non hanno carica. Gli elementi chimici sono determinati dal numero di protoni nei loro atomi (per esempio, il boro ha un atomo con 5 protoni e l'uranio ha un atomo con 92 protoni). Gli elementi con lo stesso numero di protoni ma un differente numero di neutroni sono chiamati *isotopi* (per esempio, l'uranio-235 e l'uranio-238 differiscono per tre neutroni nei loro nuclei). Normalmente un atomo nel suo insieme non è carico né positivamente né negativamente, poiché ha lo stesso numero di elettroni carichi negativamente e di protoni carichi positivamente.

**L'atomo**



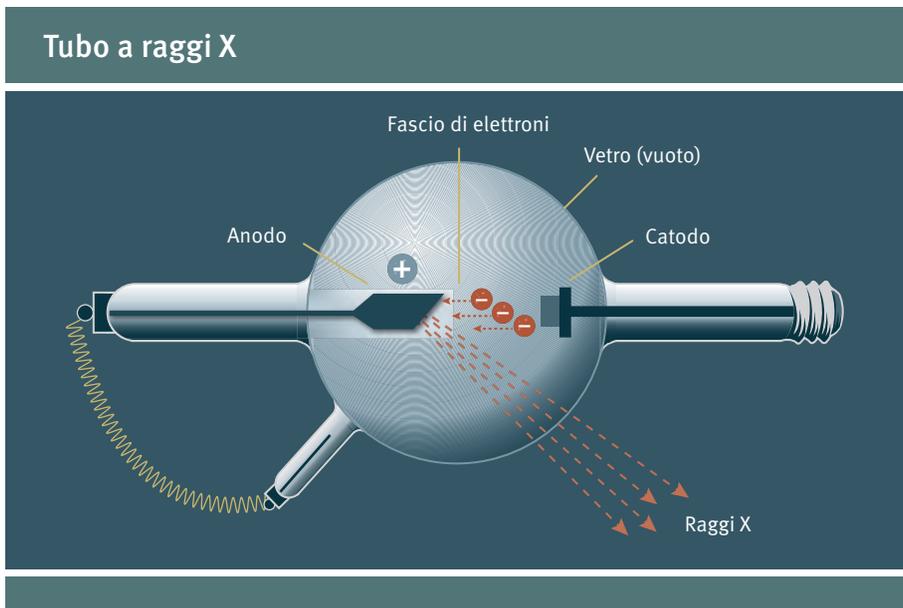
Numero atomico 5 - numero di elettroni  
Simbolo **B** - numero di protoni  
Nome BORO

● elettrone ● protone ● neutrone

Un atomo è composto di un nucleo con neutroni neutri e protoni carichi positivamente, circondato da una nuvola di elettroni carichi negativamente. In atomi neutri, il numero di elettroni e di protoni è lo stesso, rappresentando il numero atomico dell'elemento.

Alcuni atomi sono naturalmente stabili, mentre altri sono instabili. Gli atomi con i nuclei instabili – che si trasformano spontaneamente, rilasciando energia sotto forma di radiazioni – sono chiamati **radionuclidi**. Questa energia può interagire con altri atomi e ionizzarli. La **ionizzazione** è il processo attraverso cui un atomo diventa carico positivamente o negativamente, perdendo o acquistando elettroni. Le radiazioni ionizzanti trasportano abbastanza energia da espellere elettroni dalla loro orbita, causando la creazione di atomi carichi chiamati **ioni**. L'emissione di due protoni e di due neutroni è chiamata **decadimento alfa**, mentre l'emissione di elettroni è chiamata **decadimento beta**. In molti casi, anche dopo l'emissione di particelle, il nuclide non raggiunge uno stato stabile. Allora emette una notevole quantità di energia sotto forma di onde elettromagnetiche chiamate **raggi gamma**, che si comportano anche come particelle, dette fotoni.

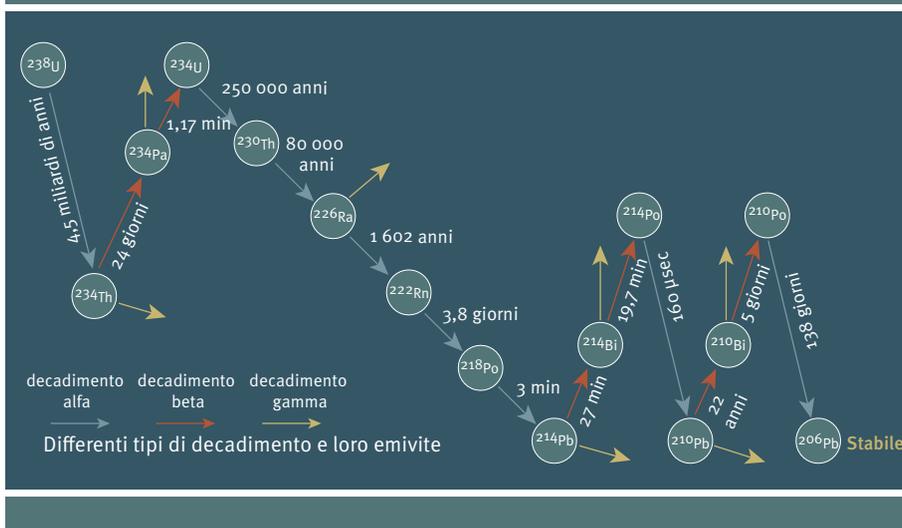
Anche i **raggi X** sono, come i raggi gamma, radiazioni elettromagnetiche, ma costituite da fotoni a minore energia. Uno spettro di raggi X con differenti energie è prodotto in un tubo a vuoto di vetro quando un fascio di elettroni, emessi da un **catodo**, viene indirizzato su un bersaglio chiamato **anodo**. Lo spettro dei raggi X dipende dal materiale dell'anodo e dall'energia a cui il fascio di elettroni è accelerato. Perciò, i raggi X possono essere generati artificialmente esattamente quando se ne ha bisogno, il che è molto vantaggioso nelle applicazioni industriali e mediche.



## Decadimento radioattivo ed emivita

Mentre tutti i radionuclidi sono instabili, alcuni sono più instabili di altri. Per esempio, le particelle nel nucleo di un atomo di uranio-238 (con 92 protoni e 146 neutroni) sono solo in grado di raggrupparsi insieme. Prima o poi, un gruppo costituito da due protoni e due neutroni lascia l'atomo sotto forma di una particella alfa, trasformando l'uranio-238 in torio-234 (con 90 protoni e 144 neutroni). Ma anche il torio-234 è instabile e si trasforma tramite un processo diverso. Emettendo un elettrone ad alta energia sotto forma di particella beta e convertendo un neutrone in un protone, diventa protoattinio-234, con 91 protoni e 143 neutroni. Questo, a sua volta, è estremamente instabile, e molto presto si trasforma in uranio-234, e così l'atomo continua ad emettere particelle e a trasformarsi, fino a diventare piombo-206, con 82 protoni e 124 neutroni, che è stabile. Esistono molte simili sequenze di trasformazione, o *decadimento radioattivo*, come è chiamato.

### Catena di decadimenti radioattivi dell'uranio-238



Il tempo necessario affinché si abbia il decadimento della metà di una qualsiasi attività di un elemento è noto come il suo tempo o *periodo di dimezzamento*. Dopo un periodo, di un milione di atomi, in media 500 000 saranno decaduti in qualcos'altro. Durante il periodo successivo, altri 250 000 atomi decadono, e così via, finché tutti saranno decaduti.. Dopo 10 periodi, ne rimarranno solamente circa mille del milione originale (cioè circa lo 0,1%). Nell'esempio dato sopra, sarà necessario poco più di un minuto perché la metà degli atomi di protoattinio-234 decada in uranio-234. Invece, per l'uranio-238 ci

vorranno quattro miliardi e mezzo di anni (4 500 000 000) affinché la metà degli atomi decada in torio-234. Ciò detto, solo relativamente pochi radionuclidi si trovano naturalmente nell'ambiente.

## Unità di misura delle radiazioni

Oggi sappiamo che l'energia delle radiazioni può danneggiare i tessuti viventi e l'ammontare di energia depositata nei tessuti viventi è espressa attraverso una quantità chiamata *dose*. La dose di radiazioni può provenire da un qualsiasi radionuclide o da diversi radionuclidi, sia che essi rimangano all'esterno del corpo sia che lo irradiano dall'interno, per esempio dopo essere stati inalati o ingeriti. Le quantità relative alla dose si esprimono in modi diversi a seconda di quante e quali parti del corpo sono irradiate, se una o più persone sono esposte e della durata del periodo di esposizione (ad es. esposizione acuta).



Harold Gray (1905–1965)  
Rolf Sievert (1896–1966)

L'ammontare di energia delle radiazioni assorbita per chilogrammo di tessuto si chiama *dose assorbita* e si esprime in unità chiamate gray (Gy), dal nome del fisico inglese e pioniere della radiobiologia, **Harold Gray**. Ma questo non dà il quadro completo, poiché la stessa dose da particelle alfa può arrecare molto più danno che da particelle beta o da raggi gamma. Per confrontare le dosi assorbite da differenti tipi di radiazione, esse devono essere pesate per la loro capacità di causare certi tipi di danno biologico. Questa dose pesata è chiamata *dose equivalente*, che è misurata in unità chiamate sievert (Sv), dal nome dello scienziato svedese **Rolf Sievert**. Un sievert equivale a 1 000 millisievert, allo stesso modo in cui un litro equivale a 1 000 millilitri o un metro equivale a 1 000 millimetri.

Un'altra considerazione da fare è che alcune parti del corpo sono più vulnerabili di altre. Per esempio, una data dose equivalente di radiazioni ha più probabilità di causare cancro nei polmoni che nel fegato, e gli organi riproduttivi costituiscono una preoccupazione particolare, a causa del rischio di effetti ereditabili. Così, allo scopo di confrontare dosi quando differenti

tessuti e organi sono irradiati, le dosi equivalenti delle differenti parti del corpo sono anch'esse pesate, ed il risultato è chiamato *dose efficace*, anche questa espressa in sievert (Sv). Tuttavia, la dose efficace è un indicatore della probabilità di cancro ed effetti genetici a seguito di dosi non elevate, e non è intesa come una misura della gravità degli effetti a dosi elevate.

Questo complesso sistema di quantità per le radiazioni è necessario per inquadrarle in una struttura coerente, permettendo agli esperti di radioprotezione di registrare le dosi individuali in maniera consistente e confrontabile, il che è di fondamentale importanza per le persone che lavorano con le radiazioni e che sono *occupazionalmente esposte*.

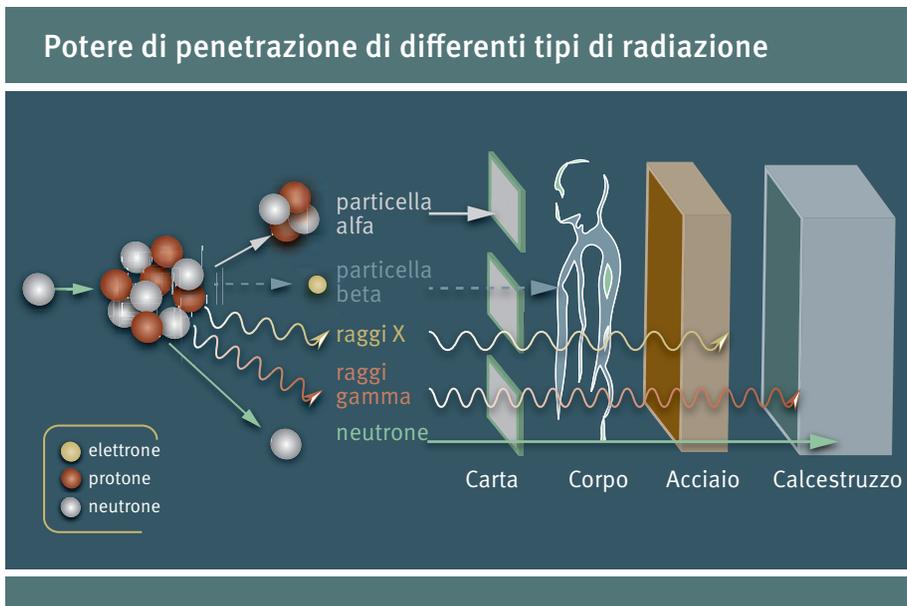
Questo, tuttavia, descrive solo le dosi agli individui. Se sommiamo tutte le dosi efficaci ricevute dagli individui di una popolazione, il risultato è chiamato

Quantità nel campo delle radiazioni	
Quantità fisiche	
Attività	Il numero di trasformazioni nucleari per unità di tempo. Si misura in decadimenti al secondo ed è espressa in becquerel (Bq).
Dose assorbita	La quantità di energia depositata dalle radiazioni nell'unità di massa di materia, come un tessuto o un organo. Si esprime in gray (Gy), che corrisponde a joule per chilogrammo.
Quantità calcolate	
Dose equivalente	La dose assorbita moltiplicata per un fattore radiazione (wR) che tiene conto del modo in cui differenti tipi di radiazioni causano danni biologici in un tessuto o in un organo. Si esprime in sievert (Sv), che corrisponde a joule per chilogrammo.
Dose efficace	La dose equivalente moltiplicata per dei fattori organo (wT) che tengono conto della suscettibilità al danno di diversi tessuti o organi. Si esprime in sievert (Sv), che corrisponde a joule per chilogrammo.
Dose efficace collettiva	Somma di tutte le dosi efficaci di una popolazione o di un gruppo di persone esposte alle radiazioni. Si esprime in sievert-persona (Sv-persona).

*dose efficace collettiva* o semplicemente *dose collettiva*, espressa in sievert-persona (Sv-persona). Per esempio, la dose collettiva annua per la popolazione mondiale è più di 19 milioni di sievert-persona, che corrisponde ad una dose annuale media per persona di 3 mSv.

### 1.3. Potere di penetrazione delle radiazioni

In breve, le radiazioni possono avere la forma di particelle (incluse le particelle alfa, le particelle beta e i neutroni) o di onde elettromagnetiche (raggi gamma e raggi X), e ciascuna può trasportare diverse quantità di energia. Le differenti energie e i differenti tipi di particelle hanno diversi poteri di penetrazione - e quindi hanno diversi effetti sulla materia vivente. Poiché le particelle alfa sono composte da due protoni carichi positivamente e da due neutroni, esse trasportano la carica maggiore di tutti i tipi di radiazione. Questa maggiore carica fa sì che esse interagiscano in maniera più intensa con gli atomi circostanti. Questa interazione riduce rapidamente l'energia della particella e perciò riduce il potere di penetrazione. Le particelle alfa possono essere fermate, per esempio, da un foglio di carta. Le particelle beta, costituite da elettroni carichi negativamente, trasportano meno carica e sono perciò più penetranti delle particelle alfa. Le particelle beta possono attraversare un centimetro o due di tessuto vivente. I raggi gamma e i raggi X sono estremamente penetranti, e attraversano qualsiasi cosa meno densa di una spessa lastra di acciaio. Neutroni prodotti artificialmente sono emessi da nuclei instabili come risultato di fissione



o fusione nucleare. Neutroni si trovano anche naturalmente come componenti della radiazione cosmica. Poiché i neutroni sono particelle elettricamente neutre, essi hanno un alto potere di penetrazione quando interagiscono con la materia o con i tessuti biologici.

## 2. CHE EFFETTI HANNO LE RADIAZIONI SU DI NOI?

Prima di presentare in dettaglio gli effetti dell'esposizione alle radiazioni, dobbiamo richiamare i pionieri nella scienza delle radiazioni precedentemente citati. Poco dopo la sua scoperta, lo stesso **Henry Becquerel** sperimentò su di sé le conseguenze più problematiche delle radiazioni – gli effetti che possono avere sui tessuti biologici. Una fiala di radio che aveva messo in tasca danneggiò la sua pelle.

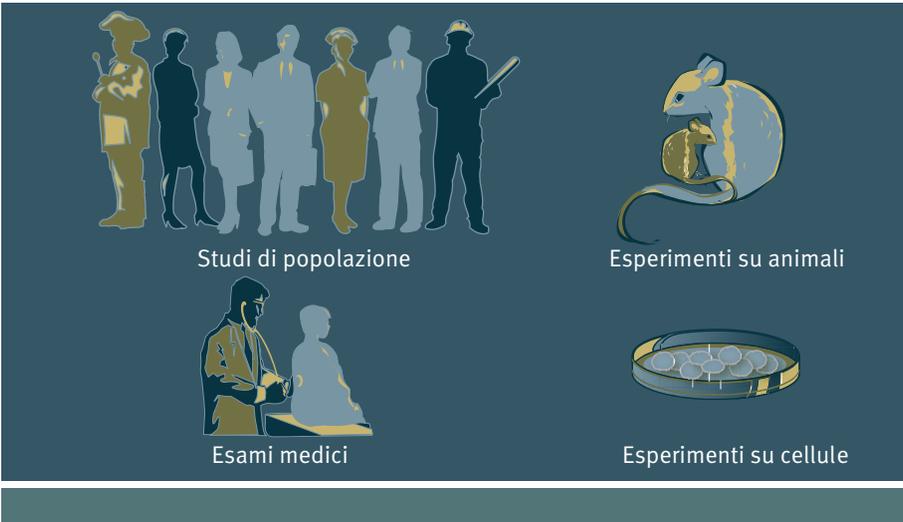
**Wilhelm Conrad Roentgen**, che scoprì i raggi X nel 1895, morì di cancro all'intestino nel 1923. **Marie Curie**, pure lei esposta alle radiazioni durante tutta la sua attività lavorativa, morì di una malattia del sangue nel 1934.

Si stima che, prima della fine degli anni '50, almeno 359 tra i primi lavoratori con radiazioni (principalmente dottori e altri scienziati), morirono a causa della loro esposizione a radiazioni, inconsapevoli della necessità di proteggersi.

Non sorprende che coloro erano coinvolti nelle applicazioni delle radiazioni sui pazienti furono i primi ad elaborare raccomandazioni per la protezione dei lavoratori dalle radiazioni. Nel 1928, durante il secondo Congresso Internazionale di Radiologia a Stoccolma, fu istituito il Comitato Internazionale per la Protezione dal Radio e dai Raggi X e **Rolf Sievert** ne fu eletto primo presidente. Dopo la Seconda Guerra Mondiale – per tener conto dei nuovi usi delle radiazioni in ambiti diversi dalla medicina – tale comitato fu riorganizzato e ridenominato Commissione Internazionale sulla Protezione Radiologica. In seguito, tra il 1958 e il 1960, Rolf Sievert fu il quarto presidente dell'UNSCEAR, periodo nel quale vi era particolare preoccupazione per gli effetti genetici sugli umani derivanti da test di ordigni atomici.

Con il crescere della consapevolezza dei rischi associati all'esposizione a radiazioni, il ventesimo secolo ha visto lo sviluppo di un'intensa attività di ricerca sugli effetti delle radiazioni sugli esseri umani e sull'ambiente. La più importante valutazione di tali effetti su gruppi di popolazione esposti a radiazioni è lo studio su circa 86 500 sopravvissuti ai bombardamenti atomici su Hiroshima e Nagasaki alla fine della Seconda Guerra Mondiale nel 1945 (di seguito indicati come *sopravvissuti ai bombardamenti atomici*). Inoltre, dati attendibili sull'argomento provengono dall'esperienza con pazienti irradiati e con lavoratori esposti a seguito di incidenti (ad es. l'incidente alla centrale nucleare di Chernobyl) e da esperimenti di laboratorio su animali e cellule.

## Fonti di informazione sugli effetti delle radiazioni



L'UNSCEAR valuta le informazioni scientifiche sugli effetti delle esposizioni a radiazioni sugli esseri umani e sull'ambiente e cerca di capire, nel modo più attendibile possibile, quali effetti possono essere associati a diversi livelli di esposizione alle radiazioni. Come sopra accennato, l'esposizione alle radiazioni dipende dal tipo di radiazione, dalla durata dell'esposizione e dalla quantità di energia depositata nel materiale. Per le sue valutazioni, l'UNSCEAR utilizza attualmente il termine *dosi basse* tper intendere livelli inferiori a 100 mGy ma maggiori di 10 mGy e il termine *dosi molto basse* per livelli inferiori a 10 mGy.

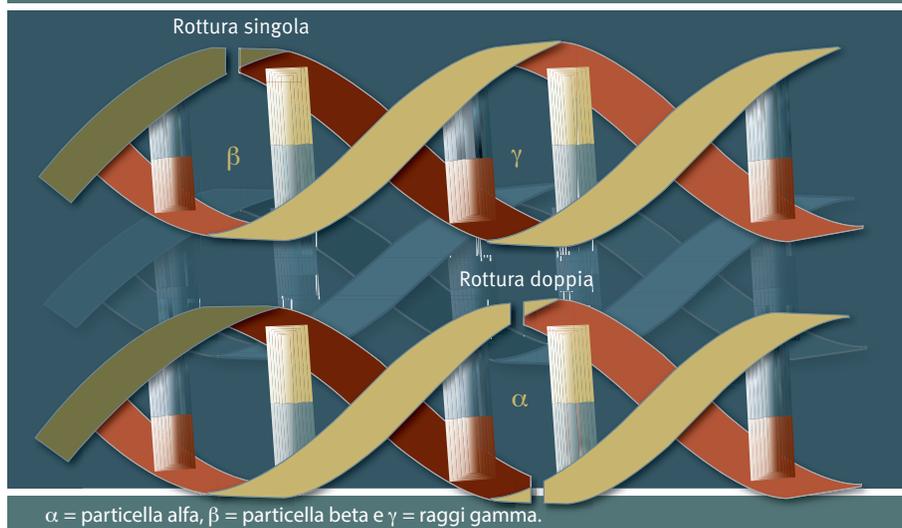
## Intervalli di dose usati dall'UNSCEAR

<b>Dosi elevate</b>	Maggiori di ~1 Gy	Incidenti gravi con radiazioni (ad es. vigili del fuoco nell'incidente di Chernobyl)
<b>Dosi moderate</b>	Da ~100 mGy a ~1 Gy	Lavoratori per operazioni di recupero dopo l'incidente di Chernobyl
<b>Dosi basse</b>	Da ~10 mGy a ~100 mGy	Tomografie computerizzate (TC) multiple
<b>Dosi molto basse</b>	Inferiori a ~10 mGy	Radiografie convenzionali (cioè senza TC)

## 2.1. Effetti sugli esseri umani

Dalla scoperta delle radiazioni, più di un secolo di ricerca nel settore delle radiazioni ha prodotto dettagliate informazioni sui meccanismi biologici attraverso cui le radiazioni influiscono sulla salute. È noto che le radiazioni possono produrre effetti a livello delle cellule, provocandone la morte o modificandole, in genere a causa di un danno diretto ai filamenti di acido desossiribonucleico (DNA) in un cromosoma. Se il numero di cellule danneggiate o uccise è abbastanza grande, questo può comportare una disfunzione in un organo o addirittura la morte. Inoltre, può capitare che il danno al DNA non comporti la morte cellulare. Tale danno viene generalmente riparato completamente, ma se ciò non avviene, la modifica che ne risulta – nota come *mutazione cellulare* – si rifletterà in successive divisioni cellulari e potrebbe infine condurre al cancro. Se le cellule mutate sono quelle che trasmettono i caratteri ereditari ai discendenti, potrebbero generarsi anomalie genetiche. Informazioni sui meccanismi biologici e sugli effetti genetici ereditari sono spesso ottenute tramite esperimenti di laboratorio.

### Danno da radiazioni al filamento di DNA



Sulla base dell'osservazione della loro comparsa, gli effetti sulla salute conseguenti all'esposizione a radiazioni sono qui definiti come effetti sulla salute a breve termine o ritardati. Generalmente, gli effetti sulla salute a breve termine si evidenziano attraverso la diagnosi di sindromi cliniche negli individui, mentre gli effetti ritardati – come il cancro – si notano con *studi epidemiologici* attraverso l'osservazione dell'aumento di incidenza di una patologia nella popolazione. Inoltre, verrà qui posta una particolare attenzione agli effetti sui bambini e su embrioni/feti, nonché agli effetti ereditari.

## Effetti a breve termine sulla salute

Gli effetti a breve termine sulla salute sono causati da un esteso danno o morte cellulare. Ne sono esempi le ustioni, la perdita di capelli e la compromissione della fertilità. Questi effetti sanitari sono caratterizzati da una soglia relativamente alta che deve essere superata in un breve periodo prima che gli effetti si verifichino. La gravità dell'effetto cresce con l'aumentare della dose dopo che la soglia è stata superata.

Generalmente, le dosi acute più alte di 50 Gy danneggiano il sistema nervoso centrale così gravemente che la morte sopraggiunge in pochi giorni. Anche a dosi minori di 8 Gy le persone mostrano sintomi di malattie da radiazioni, note anche come *sindrome acuta da radiazioni*, che può includere nausea, vomito, diarrea, crampi intestinali, salivazione, disidratazione, fatica, apatia, spossatezza, sudorazione, febbre, emicrania e pressione bassa. Il termine acuto si riferisce a problemi medici che si manifestano direttamente dopo l'esposizione, piuttosto che a quelli che si sviluppano dopo un periodo prolungato. Tuttavia, le vittime possono sopravvivere all'inizio per poi morire per danni gastrointestinali una o due settimane dopo. Dosi più basse possono non danneggiare l'apparato gastrointestinale, ma possono comunque causare la morte dopo qualche mese, soprattutto per danni al midollo osseo rosso. Dosi ancora più basse ritardano la comparsa della malattia e producono sintomi meno severi. Circa la metà di coloro che ricevono dosi di 2 Gy soffrono di vomito dopo circa tre ore, ma questo effetto è raro per dosi al di sotto di 1 Gy.

## Esposizioni accidentali in medicina

La radioterapia implica la somministrazione di dosi elevate ai pazienti. Quindi la prevenzione degli effetti acuti è una priorità.



Fortunatamente, il midollo osseo rosso e il resto del sistema emopoietico mostrano una notevole capacità di rigenerazione e possono recuperare completamente se ricevono meno di 1 Gy - sebbene ci sia un rischio più alto di sviluppare leucemia negli anni successivi. Se viene irradiata solo una parte del corpo, sufficiente midollo osseo sano sopravvive per sostituire quello che è stato danneggiato. Esperimenti su animali suggeriscono che, anche se solo un decimo del midollo osseo non viene danneggiato dalle radiazioni, le probabilità di sopravvivenza sono vicine al 100%.

Il fatto che le radiazioni possono danneggiare direttamente il DNA delle cellule è utilizzato deliberatamente per uccidere con le radiazioni le cellule maligne nei trattamenti oncologici noti come *radioterapia*. La quantità di radiazioni utilizzate in radioterapia varia a seconda del tipo e dello stadio in cui è il cancro da trattare. Le dosi tipiche per i trattamenti di tumori solidi vanno da 20 a 80 Gy al tumore, che produrrebbero danni al paziente se somministrate in una singola dose. Quindi, per controllare il trattamento, le dosi di radiazione vengono generalmente somministrate in frazioni ripetute di non più di 2 Gy. Questo frazionamento permette alle cellule del tessuto sano di recuperare, mentre le cellule tumorali vengono uccise perché sono in genere meno efficienti nel riparare i danni dovuti alle radiazioni.

## Effetti ritardati sulla salute

Gli effetti ritardati sulla salute avvengono molto tempo dopo l'esposizione. In generale, la maggior parte degli effetti ritardati sulla salute sono anche effetti stocastici, cioè quelli per i quali la probabilità che si verifichino dipende dalla dose di radiazioni ricevuta. Questi effetti sulla salute si crede siano causati da modificazioni del materiale genetico di una cellula a seguito dell'esposizione a radiazioni. I tumori solidi e la leucemia che si verificano nelle persone esposte, e i disordini genetici che si verificano nella discendenza di persone che sono state esposte a radiazioni sono esempi di effetti ritardati. La frequenza dell'incidenza – ma non la gravità – di questi effetti in una popolazione sembra crescere con dosi maggiori.

Gli studi epidemiologici sono di grande importanza per capire gli effetti ritardati dopo una esposizione a radiazioni. Tali studi usano metodi statistici per confrontare l'incidenza di effetti sulla salute (ad es. il cancro) in una popolazione esposta con quella in una non esposta. Se viene trovato un aumento considerevole nella popolazione esposta, è probabile che ciò sia associato con l'esposizione alle radiazioni della popolazione nel suo insieme.

La più importante valutazione a lungo termine di una popolazione esposta

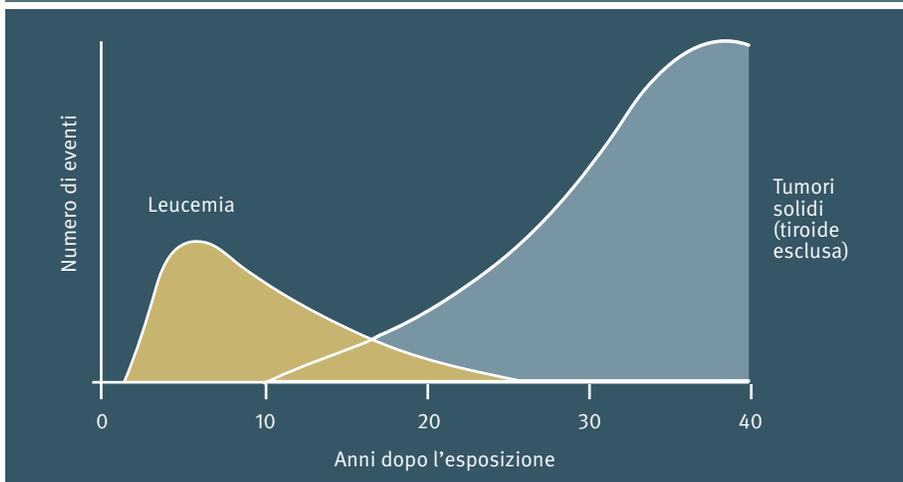
alle radiazioni è lo studio epidemiologico sui sopravvissuti ai bombardamenti atomici. Questo è lo studio più completo che sia mai stato condotto a causa del gran numero di persone, sostanzialmente rappresentativo della popolazione generale, che ha ricevuto una grande varietà di dosi ripartite abbastanza uniformemente sul corpo. Sono anche relativamente ben note le stime delle dosi ricevute da questo gruppo. Finora, lo studio ha stimato alcune centinaia di casi di tumori in più di quelli attesi in questo gruppo se non fosse stato esposto a radiazioni. Poiché molti dei sopravvissuti ai bombardamenti atomici sono ancora in vita, gli studi stanno continuando per completare la valutazione.

### *Cancro*

Il cancro è responsabile per circa il 20% di tutte le morti ed è la causa più comune di morte nei paesi industrializzati dopo le patologie cardiovascolari. Ci si aspetta che circa quattro persone su dieci nella popolazione generale possano sviluppare il cancro durante tutta la loro vita, anche in assenza di esposizione a radiazione. Negli ultimi anni, i tumori più diffusi tra gli uomini sono stati al polmone, alla prostata, al colon-retto, allo stomaco e al fegato, mentre tra le donne sono stati i tumori al seno, al colon-retto, al polmone, al collo dell'utero e allo stomaco.

Lo sviluppo di un tumore è un processo complesso, che consiste in un certo numero di stadi. Un fenomeno di avvio, verosimilmente legato ad una singola cellula, parrebbe far partire il processo, ma sembra essere necessario che si

### Comparsa di tumori dopo l'esposizione a radiazioni



verifichino una serie di altri eventi prima che la cellula diventi maligna e che il tumore si sviluppi. Il cancro diventa evidente solo molto dopo che il primo danno è avvenuto, a cui segue un periodo di latenza. La probabilità che si sviluppino tumori a seguito di esposizione a radiazioni causa grande preoccupazione e potrebbe essere calcolata per un gruppo di persone se fossero esposte ad un livello di radiazioni sufficientemente alto da produrre un aumento osservabile dell'incidenza di cancro, tale da superare le fluttuazioni statistiche ed altre incertezze. Tuttavia, il reale contributo delle radiazioni come causa di cancro resta sconosciuto.

La leucemia, il tumore alla tiroide e il tumore alle ossa si manifestano per primi, entro pochi anni dall'esposizione alle radiazioni, mentre la maggior parte degli altri tumori non si esprime fino ad almeno 10 anni, spesso alcuni decenni, dopo l'esposizione. Tuttavia, nessun singolo tipo di tumore è unicamente causato dall'esposizione a radiazioni, sicché è impossibile distinguere i tumori radio-indotti da quelli causati da altri fattori. Comunque, è importante stimare la probabilità di sviluppare un tumore dopo determinate dosi di radiazioni per fornire una solida base scientifica per fissare dei limiti di esposizione.

Studi basati su persone che hanno ricevuto trattamenti medici con radiazioni, su persone occupazionalmente esposte e – soprattutto – sui sopravvissuti ai bombardamenti atomici costituiscono il fondamento della conoscenza sulla relazione tra cancro ed esposizione a radiazioni. Questi studi coprono ampi campioni di popolazione che hanno ricevuto esposizioni su molte parti del corpo e che sono stati seguiti per periodi ragionevolmente lunghi. Tuttavia, alcuni studi presentano dei grossi inconvenienti, principalmente legati alla diversa distribuzione di età da quella della normale popolazione e all'evidenza che molti di questi pazienti fossero già malati quando irraggiati e che avessero già ricevuto dei trattamenti oncologici.

Ancora più fondamentale, quasi tutti i dati sono basati su studi di persone i cui tessuti hanno ricevuto dosi abbastanza alte, un gray o più, sia come singola dose che per un periodo di tempo relativamente breve. C'è poca informazione sugli effetti di basse dosi ricevute su tempi prolungati - solo pochi studi sugli effetti dell'intervallo di dosi che sono normalmente ricevute dalle persone che lavorano con radiazioni e non c'è praticamente nessuna informazione diretta sulle conseguenze dell'esposizione a cui la popolazione è quotidianamente soggetta. Gli studi avrebbero bisogno di seguire un gran numero di persone per un lungo periodo e alla fine potrebbero ancora essere insufficiente per osservare aumenti rispetto ai valori di riferimento del tasso di incidenza di tumori.

L'UNSCEAR ha effettuato rassegne esaustive sull'incidenza di tumori nelle popolazioni esposte a radiazioni e ha stimato che il rischio addizionale dei

decessi per tumore dovuto alle radiazioni per esposizioni sopra i 100 mSv va da 3 a 5 su cento per sievert.

### *Altri effetti sulla salute*

Dosi elevate di radiazioni al cuore aumentano la probabilità di malattie cardiovascolari (ad es. attacchi cardiaci). Tali esposizioni possono avvenire durante la radioterapia, sebbene con le tecniche di trattamento odierne si è avuta una riduzione delle dosi al cuore. Attualmente non vi sono evidenze scientifiche per concludere che l'esposizione a basse dosi di radiazioni possano causare malattie cardiovascolari.

L'UNSCEAR ha riconosciuto che c'è stato un aumento dell'incidenza di cataratte tra i lavoratori addetti all'emergenza di Chernobyl, probabilmente dovuto a dosi elevate di radiazioni. Inoltre, l'UNSCEAR ha anche studiato gli effetti delle radiazioni sul sistema immunitario nei sopravvissuti ai bombardamenti atomici, nei lavoratori addetti all'emergenza della centrale nucleare di Chernobyl e in pazienti sottoposti a trattamenti radioterapici. Gli effetti delle radiazioni sul sistema immunitario sono stabiliti stimando cambiamenti nel numero di cellule o usando varie analisi funzionali. Dosi elevate di radiazioni sopprimono il sistema immunitario a causa principalmente dei danni ai linfociti. La loro riduzione è attualmente utilizzata come un indicatore precoce per determinare la dose di radiazioni dopo un'esposizione acuta.

### **Effetti sulla progenie**

Il danno da radiazioni può portare a effetti ereditari nei discendenti, se avviene in cellule riproduttive, lo sperma o l'ovulo. Inoltre, le radiazioni possono danneggiare direttamente l'embrione o il feto che si sta sviluppando nell'utero. È importante distinguere tra le esposizioni a radiazioni di adulti, bambini ed embrioni/feti. L'UNSCEAR ha condotto rassegne esaustive degli effetti sulla salute in questi gruppi, inclusi gli effetti ereditari.

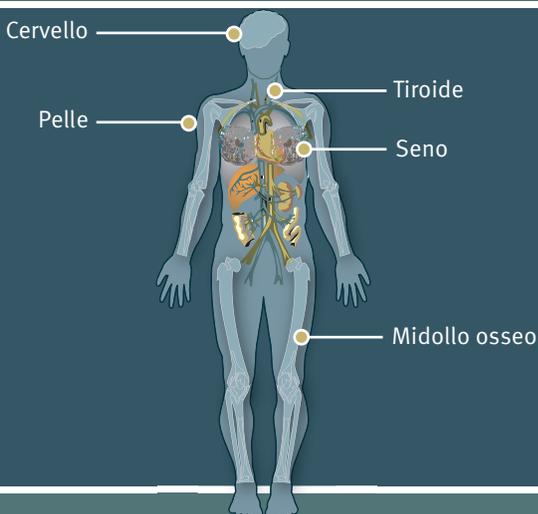
### *Effetti sui bambini*

Gli effetti sulla salute umana dipendono da diversi fattori fisici. A causa delle loro differenze anatomiche e fisiologiche, gli impatti dell'esposizione a radiazioni sui bambini e sugli adulti sono diversi. Inoltre, dato che i bambini hanno un corpo più piccolo e sono meno protetti dai tessuti che ricoprono gli organi interni, la dose a tali organi risulta più elevata rispetto a quella degli adulti per una stessa esposizione esterna. Inoltre, i bambini sono più bassi degli adulti e quindi possono ricevere dosi più elevate dai radionuclidi depositati sul suolo.

Relativamente alle esposizioni interne, a causa della dimensione minore del corpo dei bambini e, dato che i loro organi sono quindi più vicini tra loro, i radionuclidi concentrati in un organo irradiano altri organi più di quanto avverrebbe in un adulto. Ci sono anche molti altri fattori età-dipendenti connessi al metabolismo e alla fisiologia che producono differenze rilevanti nelle dosi a diverse età. Molti radionuclidi rappresentano una particolare preoccupazione per quanto riguarda l'esposizione interna nei bambini. Incidenti che determinano rilasci di iodio-131 radioattivo possono causare rilevanti esposizioni alla tiroide. Per una data quantità introdotta, la dose alla tiroide per bambini e infanti è circa nove volte più elevata che per gli adulti. Studi sull'incidente alla centrale nucleare di Chernobyl hanno confermato il legame tra il cancro alla tiroide e lo iodio-131, che si concentra soprattutto in questo organo.

Studi epidemiologici hanno mostrato che giovani sotto i 20 anni di età sembrano avere il doppio di probabilità rispetto agli adulti di sviluppare una leucemia a seguito della stessa esposizione a radiazioni. Inoltre, i bambini sotto i 10 anni sono particolarmente suscettibili; alcuni studi suggeriscono che essi hanno una probabilità di morire di leucemia tre-quattro volte maggiore degli adulti. Altri studi hanno anche mostrato che ragazze esposte ad età inferiori a 20 anni hanno circa il doppio di probabilità rispetto alle donne adulte di sviluppare un tumore al seno. I bambini hanno una probabilità maggiore degli adulti di sviluppare un tumore a seguito di esposizione a radiazioni, ma questo potrebbe non manifestarsi fino a quando non raggiungano un'età alla quale i tumori diventano solitamente evidenti.

## Organi particolarmente radiosensibili nei bambini



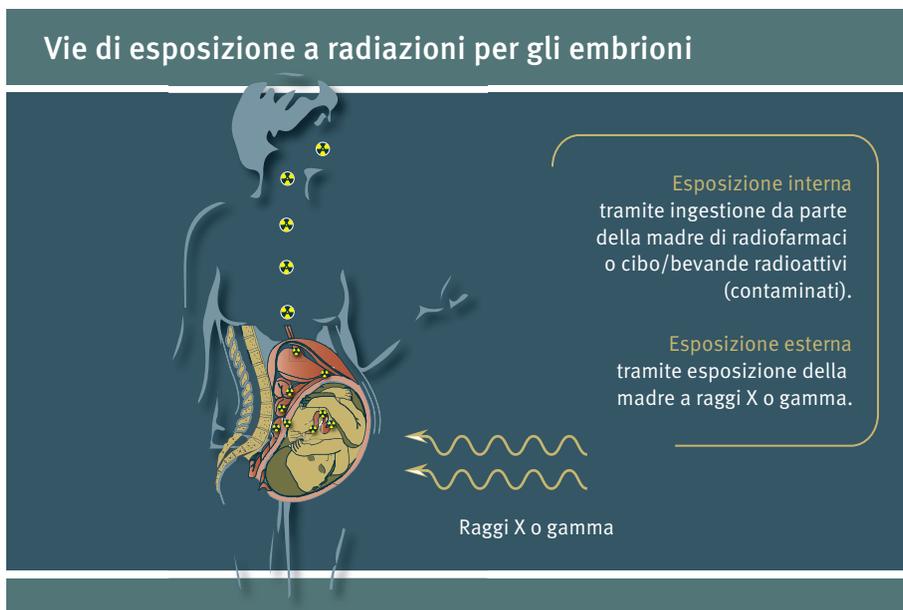
I bambini esposti a radiazioni ad età sotto i 20 anni hanno circa il doppio delle probabilità di sviluppare un **tumore al cervello** rispetto agli adulti esposti alla stessa dose. Una relazione simile è stata osservata per il **tumore al seno** per ragazze esposte ad età sotto i 20 anni.

L'UNSCEAR ha esaminato il materiale scientifico che indica che l'insorgenza di tumori è più variabile nei bambini rispetto agli adulti e che dipende dal tipo di tumore, nonché dall'età e dal sesso del bambino. Il termine *radiosensibilità* rispetto all'induzione di tumori si riferisce al tasso di tumori causato dall'irradiazione. Studi sulle differenze di radiosensibilità tra adulti e bambini hanno evidenziato che i bambini sono più sensibili allo sviluppo di tumori alla tiroide, al cervello, alla pelle e al seno, e per la leucemia.

Le differenze negli effetti sulla salute a breve termine sui bambini a seguito di dosi elevate (come quelle ricevute in radioterapia) sono complesse e possono essere spiegate con l'interazione di tessuti e meccanismi biologici differenti. Alcuni effetti sono più evidenti per esposizioni durante l'infanzia che in età adulta (ad es. difetti cerebrali, cataratta e noduli tiroidei), ma ci sono anche alcuni effetti per i quali i tessuti dei bambini sono più resistenti (ad es. polmoni e ovaie).

### *Effetti sui bambini non nati*

Un embrione o un feto possono essere esposti tramite materiale radioattivo trasferito dalla madre attraverso cibo e bevande (esposizione interna) o direttamente attraverso un'esposizione esterna. Poiché un feto è protetto nell'utero, la sua dose di radiazione tende ad essere più bassa della dose che ha ricevuto la madre per la maggior parte degli eventi di esposizione a radiazioni. Tuttavia, l'embrione e il feto sono particolarmente sensibili alle radiazioni e le conseguenze sulla salute delle esposizioni possono essere gravi,



anche a dosi di radiazioni più basse di quelle che sono nocive per la madre. Tali conseguenze possono includere ritardi della crescita, malformazioni, attività cerebrale danneggiata e tumore.

Lo sviluppo dei mammiferi nell'utero si divide approssimativamente in tre stadi. È noto che le radiazioni potrebbero uccidere un embrione nell'utero nel primo stadio, che inizia con il concepimento e arriva fino al momento in cui l'embrione si impianta sulla parete dell'utero. Negli esseri umani questo periodo copre le prime due settimane di gravidanza. È molto difficile studiare cosa avviene a questo stadio; tuttavia, le informazioni provenienti principalmente da esperimenti su animali confermano che gli effetti fatali sull'embrione in questa prima fase avvengono al di sopra di determinate soglie di dose.

Durante lo stadio seguente, che negli esseri umani va dalla seconda all'ottava settimana, il pericolo principale è che le radiazioni conducono allo sviluppo di organi malformati e, forse, causano la morte al momento della nascita. Esperimenti su animali hanno mostrato che gli organi (ad es. occhi, cervello, scheletro) sono particolarmente suscettibili alle malformazioni se irradiati proprio nel momento in cui si stanno sviluppando.

Il danno maggiore sembra verificarsi nel sistema nervoso centrale dopo l'ottava settimana, quando inizia la terza ed ultima fase della gravidanza. Sono stati fatti grandi progressi nella comprensione degli effetti dell'esposizione a radiazioni del cervello dei bambini non nati. Ad esempio, 30 tra i figli dei sopravvissuti ai bombardamenti atomici dei circa 1 600 esposti a radiazioni prima della nascita a una dose di 1 Gy ebbero una disabilità mentale grave.

È controversa l'ipotesi che l'esposizione a radiazioni degli embrioni possa determinare l'insorgenza di tumore successivamente durante la vita. Gli esperimenti sugli animali non hanno mostrato nessun tipo di relazione. L'UNSCEAR ha cercato di stimare il rischio complessivo, per i bambini non ancora nati, di un certo numero di effetti dell'irraggiamento – morte, malformazione, disabilità intellettiva e cancro. In tutto, si ritiene che non più di due ogni 1 000 bambini nati vivi, che sono stati esposti a una dose di un centesimo di gray nell'utero, possano essere interessati da problemi connessi all'esposizione – confrontati con il 6% che sviluppa gli stessi effetti naturalmente.

### *Effetti ereditari*

Le radiazioni potrebbero modificare le cellule che trasmettono i caratteri ereditari ai discendenti, il che può causare disturbi genetici. Lo studio di tali disturbi è complesso perché c'è molta poca informazione su quale danno

genetico gli esseri umani subiscono a seguito dell'esposizione alle radiazioni, in parte perché il pieno computo di tutti gli effetti ereditari impiega molte generazioni per mostrarsi completamente e in parte perché – come per i tumori – questi effetti potrebbero essere abbastanza indistinguibili da quelli che si verificano per altre cause.

Molti degli embrioni e feti gravemente danneggiati non sopravvivono. È stato stimato che circa metà di tutti gli aborti spontanei hanno una costituzione genetica anomala. Anche se sopravvivono alla nascita, i neonati con disturbi genetici hanno una probabilità cinque volte maggiore di morire prima del loro quinto compleanno rispetto ai bambini normali.

Gli effetti ereditari si dividono in due principali categorie: aberrazioni cromosomiche che coinvolgono cambiamenti nel numero o nella struttura dei cromosomi, e mutazioni dei geni stessi. Essi possono manifestarsi in generazioni successive, ma non è necessariamente così.

Gli studi sui bambini i cui genitori erano sopravvissuti ai bombardamenti atomici non hanno trovato effetti ereditari osservabili. Questo non significa che non ci sia stato alcun danno, solo che una moderata esposizione di un'ampia parte di popolazione non ha un impatto osservabile. Tuttavia, studi sperimentali su piante ed animali esposti ad alte dosi hanno chiaramente dimostrato che le radiazioni possono indurre effetti ereditabili. È improbabile che gli esseri umani facciano eccezione.

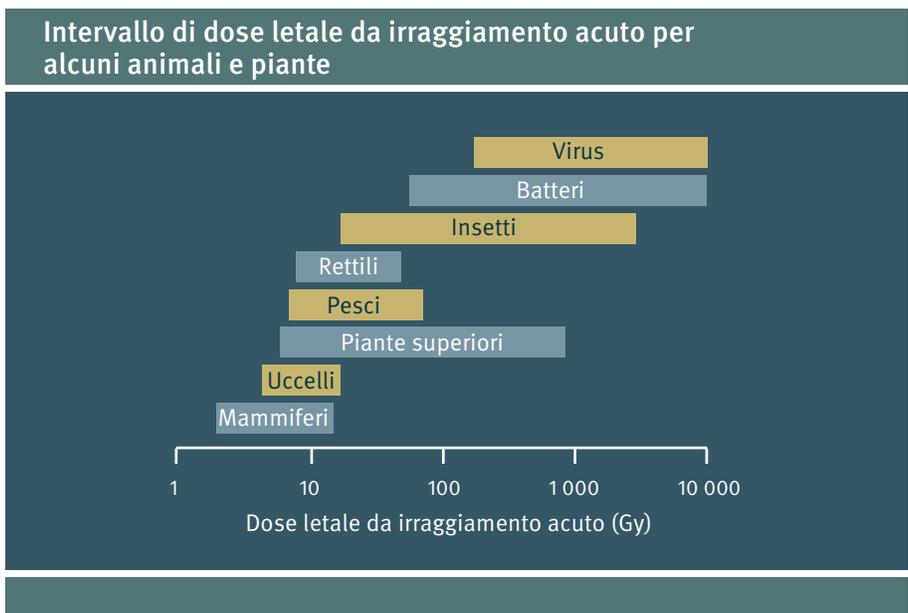
L'UNSCEAR si è concentrata solo sugli effetti ereditari gravi ed ha stimato che il rischio totale è circa 0,3–0,5% per gray— che è meno di un decimo della possibilità dell'incidenza di un tumore mortale - alla prima generazione che segue l'esposizione a radiazione.

## 2.2. Effetti su animali e piante

Gli effetti dell'esposizione a radiazioni di animali e piante stanno ricevendo più attenzione di quanta ne abbiano avuta in passato. Negli scorsi decenni, il punto di vista prevalente era che, se la vita umana era adeguatamente protetta, anche le piante e gli animali sarebbero stati ugualmente tutelati. L'UNSCEAR ha valutato gli effetti dell'esposizione a radiazioni su piante e animali, ed ha trovato che in teoria un intervallo di dosi di 1–10 Gy era improbabile che producesse effetti su popolazioni di animali e piante, e che le risposte individuali all'esposizione alle radiazioni variavano (i mammiferi sono i più sensibili alle radiazioni tra tutti gli animali). Questi effetti che sono probabilmente significativi a livello di popolazione riguardano la fertilità, la mortalità e l'induzione di mutazioni.

**Anomalie riproduttive**, come nel numero di discendenti, sono un indicatore più sensibile degli effetti delle radiazioni rispetto alla mortalità.

Le **dosi letali** sono dosi a cui il 50% dei soggetti esposti dovrebbe morire. Per le piante esposte in un periodo relativamente breve (**esposizione acuta**), queste dosi sono state osservate in un range che va da meno di 10 a circa 1000 Gy. In generale, piante più grandi sono più radiosensibili di quelle più piccole. L'intervallo di dosi letali va da 6 a 10 Gy per piccoli mammiferi ed è di circa 2,5 Gy per quelli più grandi. Alcuni insetti, batteri e virus possono tollerare dosi di oltre 1000 Gy.



Una delle principali fonti d'informazione è stata l'osservazione degli effetti dell'esposizione alle radiazioni di animali e piante nelle aree attorno alla centrale nucleare di Chernobyl. L'UNSCEAR ha valutato le vie attraverso cui l'ambiente è stato esposto e ha sviluppato nuovi approcci per valutare i potenziali effetti di tale esposizione.

Recentemente l'UNSCEAR ha stimato le dosi e i relativi effetti da esposizione a radiazioni per alcuni animali e piante dopo l'incidente nella centrale nucleare di Fukushima-Daiichi ed ha concluso che l'esposizione è stata, in generale, troppo bassa perché si osservassero degli effetti acuti. Tuttavia, non si possono escludere cambiamenti nei **biomarcatori**, che sono indicatori di un particolare stato patologico o fisiologico di un organismo - in particolare per i mammiferi - ma la loro significatività per l'integrità della popolazione di quegli organismi non è chiara.

È importante notare che le azioni di protezione e di risanamento condotte per ridurre l'esposizione a radiazioni degli esseri umani possono avere un impatto significativamente più ampio. Per esempio, possono influire su beni e servizi ambientali, sulle risorse agricole, forestali, della pesca e del turismo, e sui servizi usati in attività spirituali, culturali e ricreative.

### 2.3. Relazione tra dosi di radiazioni ed effetti

Nel sintetizzare la relazione tra dosi di radiazione ed effetti sulla salute, l'UNSCEAR ha sottolineato l'importanza di distinguere tra le osservazioni degli effetti sanitari esistenti nelle popolazioni esposte e le proiezioni teoriche dei possibili effetti futuri. Per entrambe le situazioni è importante considerare ogni incertezza ed inaccuratezza – nelle misurazioni delle radiazioni, nelle considerazioni statistiche o in altri fattori.

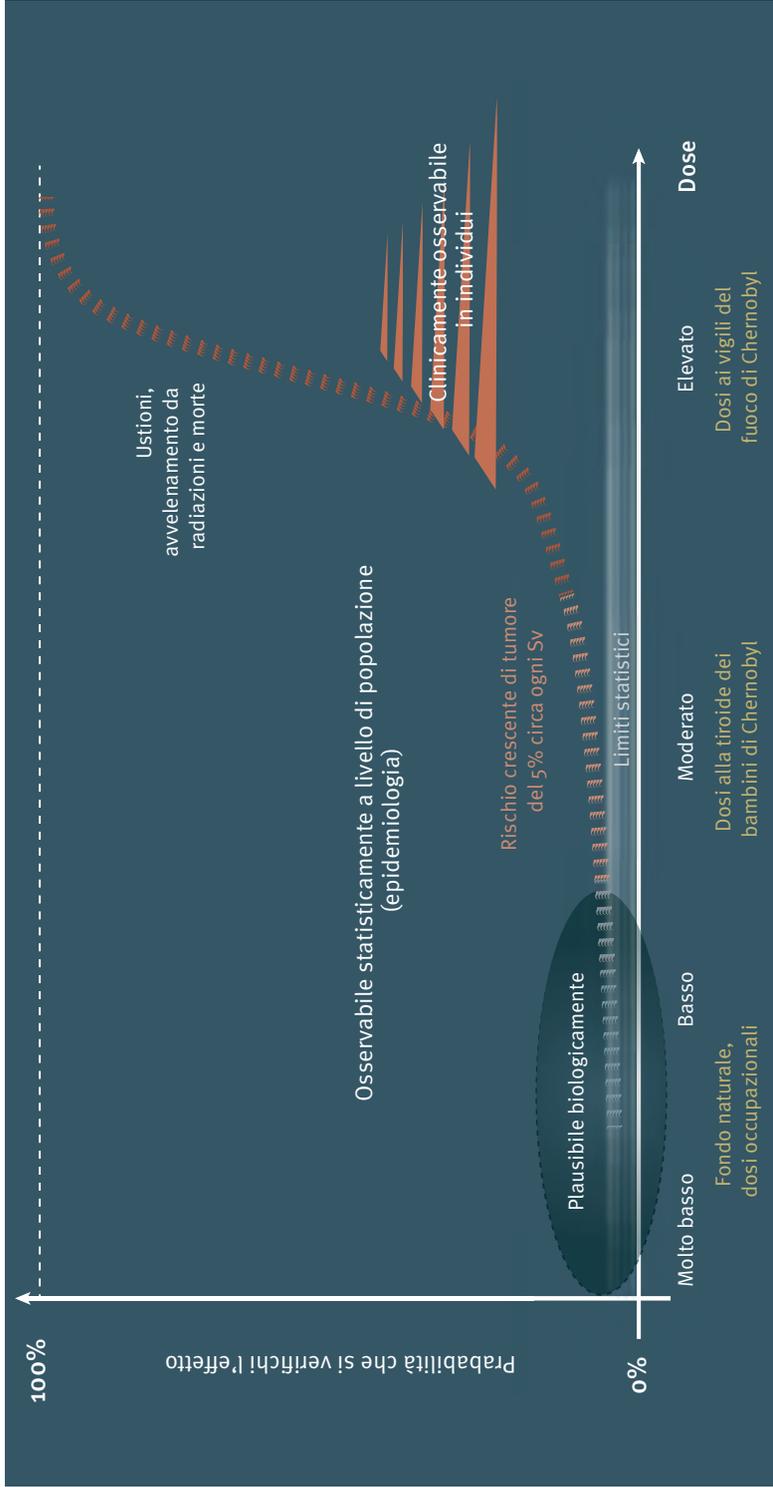
Dato lo stato attuale delle conoscenze, gli effetti osservati sulla salute possono essere attribuiti con certezza all'esposizione alle radiazioni se si verificano effetti a breve termine (ad es. ustioni della pelle) in individui che ricevono dosi superiori ad 1 Gy. Tali dosi possono derivare da incidenti nucleari, come le dosi ricevute dai lavoratori addetti all'emergenza durante l'incidente della centrale nucleare di Chernobyl o da pazienti durante un incidente in radioterapia.

È possibile, usando metodi epidemiologici, attribuire una maggiore incidenza di effetti sanitari ritardati (ad es. tumori) in una popolazione esposta a dosi di radiazione moderate se l'aumento osservato è abbastanza alto da superare ogni incertezza. Tuttavia, non ci sono biomarcatori attualmente disponibili per distinguere se un tumore è stato causato o no da esposizione a radiazioni.

Per livelli di esposizione a radiazioni bassi o molto bassi – più tipico di esposizioni a radiazioni ambientali e occupazionali – i cambiamenti nell'incidenza degli effetti sanitari ritardati non sono stati confermati, considerate le incertezze statistiche e altre incertezze. Comunque, tali effetti non possono essere esclusi.

Relativamente a possibili effetti sulla salute futuri, si hanno conoscenze sufficienti per stimare la probabilità dell'incidenza di questi effetti per dosi moderate ed elevate. Tuttavia, a dosi basse e molto basse è necessario fare delle ipotesi e usare modelli matematici per stimare la probabilità di eventuali effetti sulla salute, che hanno valori molto incerti. Pertanto, per dosi di radiazioni basse e molto basse, l'UNSCEAR ha scelto di non utilizzare tali modelli per le proprie valutazioni – a seguito, per esempio, degli incidenti di

## Relazione tra dosi di radiazioni ed effetti sulla salute



CHE EFFETTI HANNO LE RADIAZIONI SU DI NOI?

Chernobyl e di Fukushima-Daiichi – per stimare il numero di effetti sulla salute o decessi a causa delle inaccettabili incertezze nelle previsioni. Ciononostante, per confronti di sanità pubblica o per scopi di radioprotezione, può essere utile eseguire tali calcoli, purché siano prese in considerazione le incertezze e che siano spiegate chiaramente le limitazioni.

### 3. DA DOVE PROVENGONO LE RADIAZIONI?

Siamo continuamente esposti a radiazioni provenienti da molte sorgenti. Tutte le specie sulla Terra sono esistite e si sono evolute in ambienti dove sono state esposte alle radiazioni dal fondo naturale. Più recentemente, gli esseri umani e gli altri organismi sono stati esposti anche a sorgenti artificiali sviluppate approssimativamente durante l'ultimo secolo. Più dell'80% della nostra esposizione proviene da sorgenti naturali, e solo il 20% da sorgenti artificiali prodotte dall'uomo – principalmente dalle applicazioni delle radiazioni in medicina. In questa pubblicazione, l'esposizione alle radiazioni è classificata a seconda delle sue sorgenti, con particolare attenzione su quelle a cui è sottoposta la popolazione. Per fini normativi (ad es. di radioprotezione) l'esposizione alle radiazioni viene trattata separatamente per differenti gruppi di persone. Perciò, informazioni aggiuntive vengono qui fornite sui pazienti – che sono esposti per l'uso medico delle radiazioni – e sulle persone esposte nei luoghi di lavoro.

Un altro modo di classificare l'esposizione a radiazioni è a seconda di come veniamo irradiati. Le sostanze radioattive e le radiazioni nell'ambiente possono irradiare il nostro corpo da fuori – *esternamente*. Oppure possiamo inalare le sostanze che si trovano sospese nell'aria, ingoiare quelle che si trovano nel cibo e nell'acqua, o assorbirle attraverso la pelle e le ferite, e quindi esse ci irradiano da dentro – *internamente*. Considerate globalmente, le dosi da esposizioni interne ed esterne sono circa le stesse.

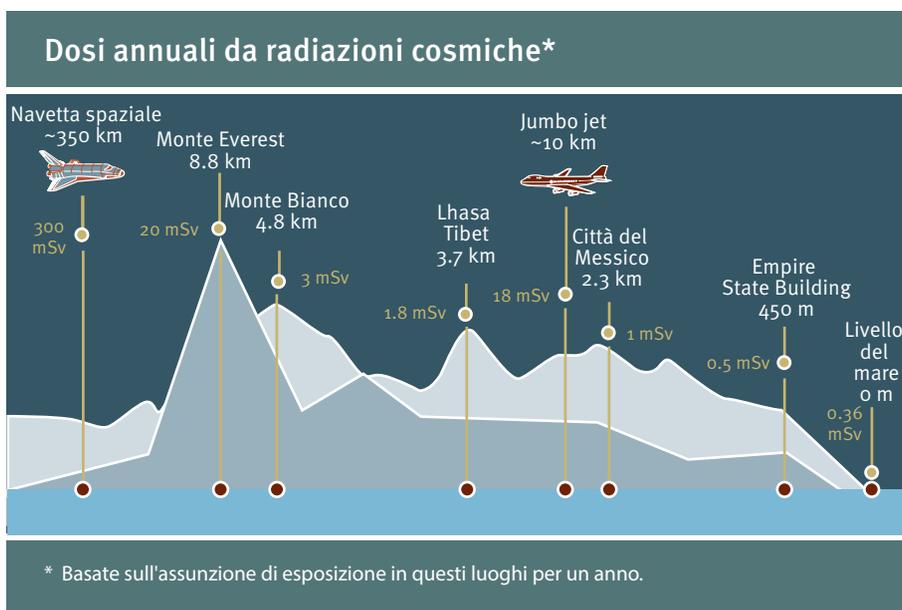


### 3.1. Sorgenti naturali

Sin dalla formazione della Terra, l'ambiente è stato esposto alle radiazioni sia dallo spazio esterno che dal materiale radioattivo nella crosta e nel nucleo. Non c'è modo di evitare di essere esposti a queste sorgenti naturali, che, di fatto, causano la maggior parte dell'esposizione alle radiazioni della popolazione mondiale. La media globale della dose efficace annuale per persona è circa 2,4 mSv, e varia da circa 1 a più di 10 mSv, a seconda di dove vivono le persone. Gli edifici possono intrappolare un particolare gas radioattivo, chiamato radon, o il materiale di costruzione stesso può contenere radionuclidi che incrementano l'esposizione a radiazioni. Sebbene le sorgenti siano naturali, la nostra esposizione può essere modificata dalle scelte che facciamo, ad esempio in che modo e dove viviamo, o cosa mangiamo e beviamo.

#### Sorgenti cosmiche

I raggi cosmici sono una delle principali sorgenti di esposizione esterna alle radiazioni. La maggior parte di questi raggi si origina nel profondo spazio interstellare; alcuni sono emessi dal Sole durante i brillamenti solari. Essi irradiano direttamente la Terra e interagiscono con l'atmosfera, producendo differenti tipi di radiazione e materiale radioattivo. Sono la sorgente dominante di radiazioni nello spazio esterno. Mentre l'atmosfera e il campo magnetico della Terra riducono considerevolmente la radiazione cosmica, alcune parti del globo sono più esposte di altre. Poiché la radiazione cosmica è deflessa dal



campo magnetico verso il Polo Nord e il Polo Sud, queste zone ricevono più radiazioni delle regioni equatoriali.

Inoltre, il livello di esposizione aumenta con l'altezza, poiché c'è meno aria al di sopra che funge da schermo. Così, le persone che vivono al livello del mare ricevono, in media, una dose efficace annua di circa 0,3 mSv da sorgenti cosmiche di radiazioni, o circa il 10–15% della loro dose totale da sorgenti naturali. Quelli che vivono sopra i 2 000 metri ricevono una dose molte volte maggiore. I passeggeri degli aeroplani possono essere esposti a dosi ancora maggiori, poiché l'esposizione alle radiazioni da sorgenti cosmiche dipende non solo dall'altitudine, ma anche dalla durata dei voli. Per esempio, ad altezze di crociera, la dose efficace media è 0,03–0,08 mSv per un volo di 10 ore. In altre parole, un volo andata e ritorno New York-Parigi esporrebbe una persona a circa 0,05 mSv. Questa è approssimativamente la dose efficace che un paziente riceverebbe da una radiografia a raggi X di routine al torace. Sebbene le dosi efficaci stimate per i singoli passeggeri durante un volo siano basse, le dosi collettive possono essere abbastanza alte a causa del gran numero di passeggeri e di voli in tutto il mondo.

## ESPOSIZIONE NEI LUOGHI DI LAVORO

---

Le dosi da sorgenti cosmiche sono particolarmente importanti per le persone che volano spesso, come i piloti e gli assistenti di volo, che ricevono in media 2–3 mSv annualmente. Sono state misurate le dosi anche per alcune missioni spaziali. Le dosi riportate per brevi missioni spaziali erano nell'intervallo di 2–27 mSv, a seconda dell'attività solare. Tuttavia, un astronauta in missione per quattro mesi nella Stazione Spaziale Internazionale, che orbita attorno alla Terra ad un'altezza di 350 km, riceve una dose efficace di circa 100 mSv.

## Sorgenti terrestri

### *Suolo*

Qualunque cosa dentro e sulla Terra contiene *radionuclidi primordiali*. Questi radionuclidi di vita media estremamente lunga che si trovano nel terreno – come il potassio-40, l'uranio-238 e il torio-232 – insieme ai radionuclidi in cui essi decadono – come il radio-226 e il radon-222 – continuano ad emettere radiazioni sin da prima che la Terra prendesse la sua forma attuale. L'UNSCEAR calcola che ogni persona nel mondo riceve, in media, una dose efficace annuale di circa 0,48 mSv da esposizione esterna a sorgenti terrestri.

L'esposizione esterna varia considerevolmente da un luogo all'altro. Studi in Francia, Germania, Italia, Giappone e Stati Uniti, per esempio, suggeriscono che circa il 95% delle loro popolazioni vive in aree dove la dose annuale media all'aperto varia da 0,3 a 0,6 mSv. Tuttavia, in alcuni luoghi di questi Paesi le persone possono ricevere dosi maggiori di 1 mSv in un anno. Ci sono altri posti nel mondo dove l'esposizione alle radiazioni da sorgenti terrestri è ancora più alta. Per esempio, sulla costa sudoccidentale del Kerala, India, una striscia di terra densamente popolata lunga 55 chilometri contiene sabbie ricche di torio, dove le persone ricevono annualmente, in media, 3,8 mSv. Altre regioni con alti livelli di sorgenti naturali terrestri sono note in Brasile, Cina, Repubblica Islamica di Iran, Madagascar e Nigeria.

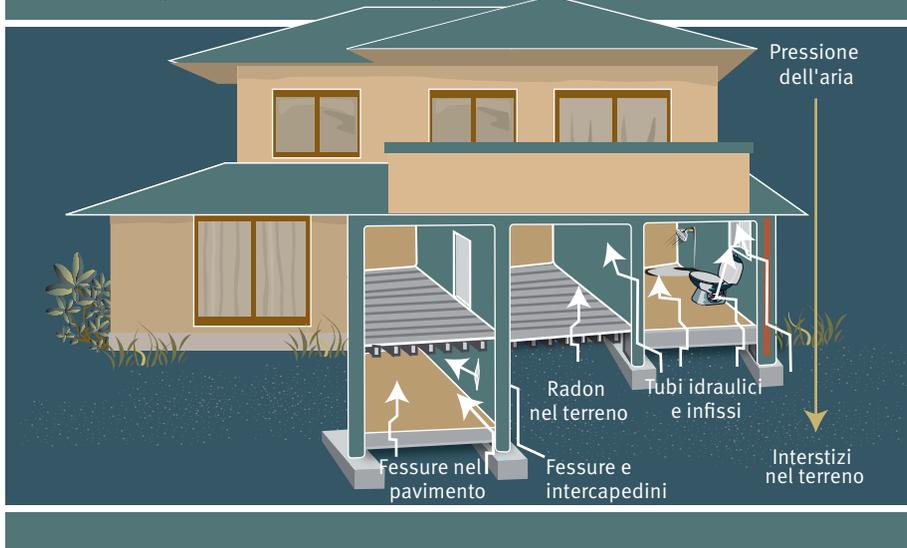
### *Gas radon*

Il radon-222 è un radionuclide in forma gassosa che viene emanato continuamente dal terreno.. È prodotto nella serie di decadimenti dell'uranio-238 contenuto nelle rocce e nei terreni della Terra. Quando inalato, alcuni dei prodotti a breve vita media di decadimento del radon – principalmente polonio-218 e -214 – vengono ritenuti nei polmoni ed irradiano le cellule del tratto respiratorio con particelle alfa. Il radon è perciò una causa primaria di cancro ai polmoni sia nei fumatori che nei non fumatori; tuttavia, i fumatori sono molto più vulnerabili a causa della forte interazione tra il fumo e l'esposizione al radon.

Il radon è presente ovunque nell'atmosfera e può filtrare direttamente negli edifici attraverso le cantine e i pavimenti, dove la sua *concentrazione* – cioè la quantità dell'attività in termini di decadimenti per unità di tempo in un volume di aria – può continuare ad aumentare. Soprattutto quando le case sono riscaldate, l'aria calda sale ed esce nella parte superiore della casa attraverso le finestre o attraverso perdite, cosa che crea un abbassamento di pressione nel piano terra e nel piano interrato. A sua volta, questo causa l'aspirazione attiva del radon dal sottosuolo, attraverso fessure e dispersioni (ad es. attraverso l'ingresso dei tubi di servizio) nella parte inferiore della casa.

La concentrazione media mondiale di radon al coperto è di circa 50 Bq/m<sup>3</sup>. Tuttavia, questa media non evidenzia la grande variabilità da luogo a luogo. In generale, le concentrazioni medie nazionali variano molto, andando da meno di 10 Bq/m<sup>3</sup> a Cipro, Egitto e Cuba, a più di 100 Bq/m<sup>3</sup> nella Repubblica Ceca, in Finlandia e Lussemburgo. In alcuni Paesi, come il Canada, la Svezia e la Svizzera, ci sono case con concentrazioni di radon tra 1 000 e 10 000 Bq/m<sup>3</sup>. Ciononostante, la frazione di case con concentrazioni così elevate è molto piccola. Alcuni dei fattori che causano queste variazioni sono la struttura geologica locale, la permeabilità del terreno, i materiali da costruzione e la ventilazione degli edifici.

## Vie di ingresso del radon negli edifici



In particolare, la ventilazione, che dipende dal clima, è un fattore chiave. Se gli edifici sono ben ventilati, come nei climi tropicali, è improbabile che l'accumulo di radon sia sostanziale. Tuttavia, nei climi temperati o freddi, dove gli interni tendono ad essere meno ventilati, la concentrazione di radon può aumentare considerevolmente. Quindi, è importante considerare l'effetto di una ventilazione limitata nel progettare edifici a risparmio energetico. Estesi programmi di misurazione sono stati condotti in molti Paesi e hanno costituito la base per l'attuazione di misure per ridurre le concentrazioni di radon al coperto.

Il livello di radon nell'acqua è generalmente molto basso, ma alcune fonti – ad es. pozzi profondi a Helsinki, Finlandia, e a Hot Springs, Arkansas, Stati Uniti – hanno concentrazioni molto elevate. Il radon nell'acqua può contribuire ad un aumento della concentrazione di radon nell'aria, specialmente in bagno durante l'uso della doccia. Tuttavia, l'UNSCEAR ha valutato che il contributo di dose dovuto al radon ingerito con l'acqua è piccolo in confronto a quello dovuto alla sua inalazione. L'UNSCEAR stima che la dose efficace annuale da radon è di 1,3 mSv, rappresentando circa la metà di quella che le persone ricevono da tutte le sorgenti naturali di radiazioni.

## ESPOSIZIONE NEI LUOGHI DI LAVORO

---

In alcuni luoghi di lavoro l'inalazione di radon è la causa principale dell'esposizione alle radiazioni dei lavoratori. Il radon è la principale sorgente di esposizione alle radiazioni nelle miniere sotterranee di tutti i tipi. La dose efficace annuale media per un minatore di carbone è circa 2,4 mSv, e per altri minatori è circa 3 mSv. Nell'industria nucleare la dose efficace annuale media per un lavoratore è circa 1 mSv, principalmente da esposizione al radon nell'estrazione dell'uranio.

### Sorgenti in cibi e bevande

Cibi e bevande possono contenere radionuclidi primordiali ed alcuni altri radionuclidi, principalmente da sorgenti naturali. I radionuclidi possono essere trasferiti alle piante e poi agli animali dalle rocce e dai minerali presenti nel terreno e nell'acqua. Quindi, le dosi variano in funzione delle concentrazioni di radionuclidi nel cibo e nell'acqua e delle abitudini alimentari del luogo.

Per esempio, il pesce e i crostacei hanno livelli relativamente alti di piombo-210 e polonio-210, perciò le persone che mangiano grandi quantità di cibo che proviene dal mare potrebbero ricevere dosi leggermente maggiori della popolazione generale. Dosi relativamente più alte sono ricevute anche dalle popolazioni delle regioni artiche, che consumano grandi quantità di carne di renna. Le renne dell'artico contengono concentrazioni relativamente alte di polonio-210, che si accumula nei licheni che pascolano. L'UNSCEAR stima che la dose efficace annuale media da sorgenti naturali nel cibo e nelle bevande è 0,3 mSv, dovuta principalmente al potassio-40 e ai radionuclidi della serie dell'uranio-238 e del torio-232.

I radionuclidi da sorgenti artificiali possono essere presenti nei prodotti alimentari in aggiunta ai radionuclidi da sorgenti naturali. Tuttavia, il contributo alla dose dagli scarichi autorizzati nell'ambiente di questi radionuclidi è in genere molto basso.

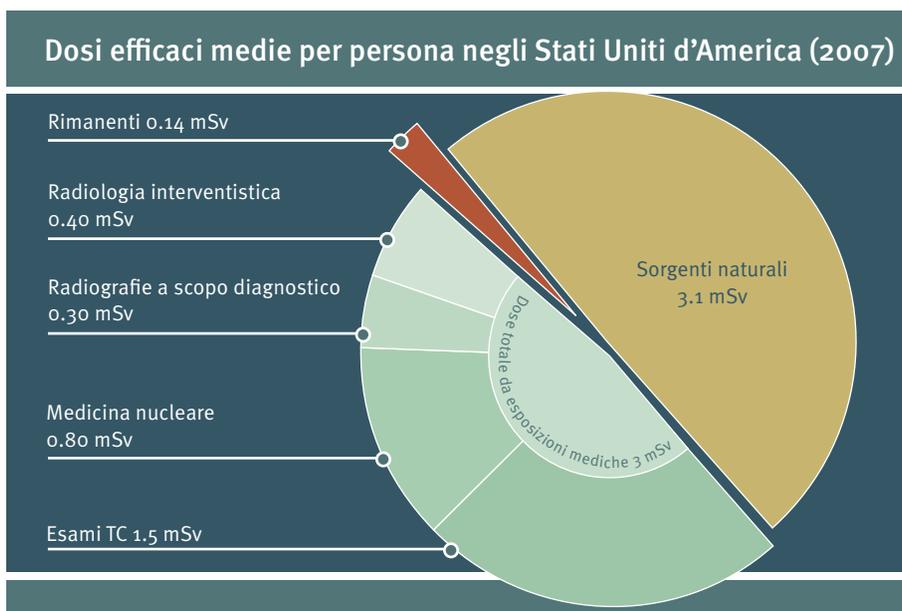
### 3.2. Sorgenti artificiali

L'impiego delle radiazioni è notevolmente cresciuto negli scorsi decenni poiché gli scienziati hanno imparato ad utilizzare l'energia degli atomi per molti scopi, dall'ambito militare a quello medico (ad es. per i trattamenti oncologici), e dalla produzione di elettricità alle applicazioni domestiche (ad es. i rilevatori di fumo). Le dosi da queste e altre sorgenti artificiali di radiazioni si sommano, sia per gli individui che per la totalità della popolazione, alle dosi di radiazioni da sorgenti naturali.

Le dosi individuali che si ricevono da sorgenti di radiazione artificiali hanno una grande variabilità. Molte persone ricevono dosi relativamente piccole da queste sorgenti, ma alcuni individui possono ricevere dosi molto più alte della dose media. Le sorgenti artificiali di radiazioni sono in genere ben controllate da azioni di radioprotezione.

## Applicazioni mediche

L'uso delle radiazioni in medicina per diagnosticare e curare alcune malattie ha un ruolo di tale importanza che può considerarsi di gran lunga la principale sorgente artificiale di esposizione alle radiazioni nel mondo. In media, l'esposizione a radiazioni in ambito medico rappresenta il 98% dell'esposizione a sorgenti di radiazioni artificiali e, dopo le sorgenti naturali di radiazioni, dà il secondo maggior contributo all'esposizione a radiazioni per la popolazione mondiale, rappresentando approssimativamente il 20% dell'esposizione totale. La maggior parte di queste esposizioni si verificano nei paesi industrializzati, dove sono disponibili più risorse per le cure mediche e, quindi, la strumentazione radiologica è usata in modo più estensivo. In alcuni paesi ciò comporta annualmente una dose efficace media derivante da usi medici simile a quella dovuta alle sorgenti di radiazioni naturali.



Ci sono differenze sostanziali tra l'esposizione a radiazioni per scopi medici e gli altri tipi di esposizioni. L'esposizione a radiazioni per scopi medici coinvolge in genere solo una parte del corpo, mentre gli altri tipi di esposizioni

spesso coinvolgono tutto il corpo. Inoltre, la distribuzione in età dei pazienti normalmente copre un intervallo di età più alta rispetto all'intera popolazione. Infine, le dosi dovute alle esposizioni mediche dovrebbero essere confrontate con quelle derivanti da altre sorgenti con particolare attenzione, considerando che i pazienti ricevono un beneficio diretto dalla loro esposizione.

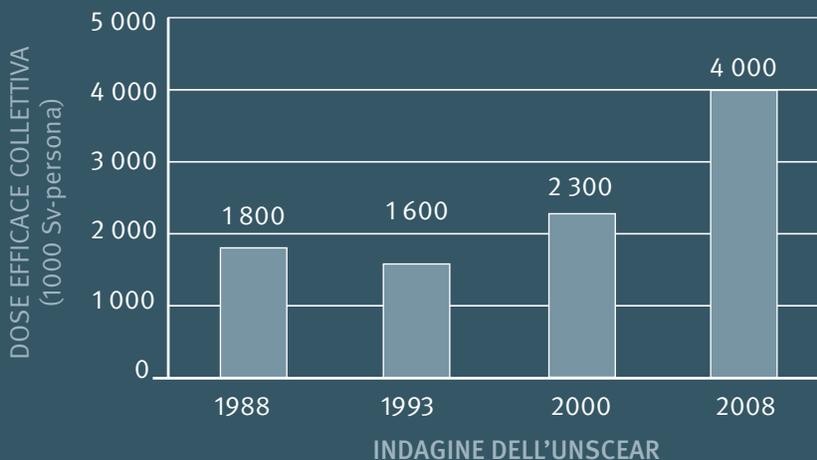
La crescente urbanizzazione, insieme ad un graduale miglioramento degli standard di vita, hanno inevitabilmente comportato un più ampio accesso della popolazione alle cure mediche. Di conseguenza, la dose alla popolazione dovuta alle esposizioni mediche continua a crescere nel mondo. L'UNSCEAR sta raccogliendo regolarmente informazioni sulle procedure di diagnosi e cura. Secondo la sua indagine per il periodo 1997–2007, nel mondo sono state effettuate annualmente circa 3,6 miliardi di procedure mediche che fanno uso di radiazioni, che, confrontate con i 2,5 miliardi di procedure risultanti dalla precedente indagine del 1991–1996, comporta un aumento di quasi il 50%.

Le principali tipologie di pratiche mediche che utilizzano le radiazioni sono la radiologia (incluse le procedure interventistiche), la medicina nucleare e la radioterapia. Altri usi che non sono inclusi dalle valutazioni periodiche fatte dall'UNSCEAR sono i programmi di screening e la partecipazione volontaria in programmi di ricerca medica, biomedica, diagnostica o terapeutica.

La **radiologia diagnostica** è l'analisi delle immagini ottenute usando raggi X, come le radiografie (ad es. lastre al torace o radiografie dentali), fluoroscopie (ad es. con pasto baritato o con clisma opaco) e tomografie computerizzate (TC). Le modalità di imaging che usano radiazioni non ionizzanti, come ad esempio l'ecografia o la risonanza magnetica, non sono prese in considerazione dall'UNSCEAR. La **radiologia interventistica** utilizza delle procedure poco invasive guidate dall'imaging per diagnosticare e trattare patologie (ad es. per guidare un catetere in un vaso sanguigno).

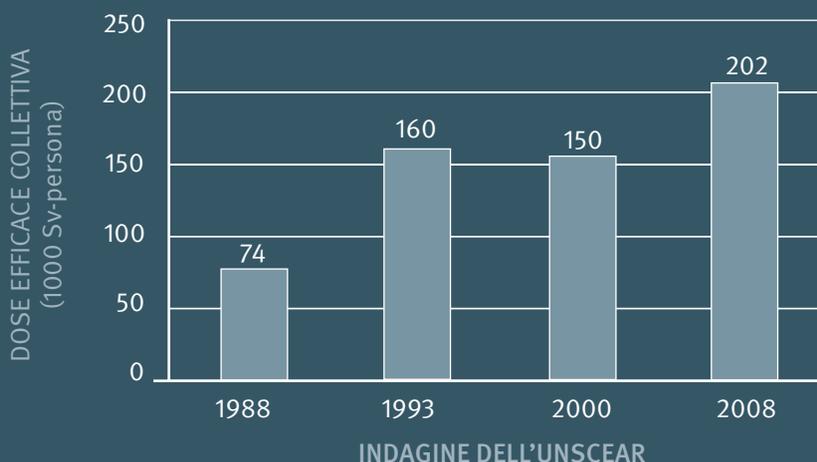
A causa del più ampio uso di esami TC e della significativa dose per esame, la dose efficace media mondiale per le procedure radiologiche è quasi raddoppiata passando da 0,35 mSv nel 1988 a 0,62 mSv nel 2007. In base all'ultima indagine dell'UNSCEAR, gli esami TC contribuiscono ora al 43% della dose totale collettiva dovuta alla radiologia. Questi numeri variano da regione a regione. Circa due terzi di tutte le procedure radiologiche sono ricevute dal 25% della popolazione mondiale che risiede nei paesi industrializzati. Per il rimanente 75% della popolazione mondiale, la frequenza annuale delle procedure è rimasta abbastanza costante, anche per una semplice radiografia dentale.

## Esposizione globale da esami radiologici (1988–2008)



La **medicina nucleare** consiste nell'introduzione nel corpo di sostanze radioattive *non sigillate* (cioè solubili e non incapsulate), principalmente per ottenere immagini che diano informazioni sia sulla struttura che sul funzionamento di un organo, e meno frequentemente per trattare certe patologie come l'ipertiroidismo e il tumore della tiroide. Normalmente un radionuclide viene modificato per formare un radiofarmaco, che viene solitamente somministrato per via orale o per via endovenosa. Il radiofarmaco si distribuisce nel corpo secondo

## Esposizione globale da medicina nucleare (1988–2008)



le caratteristiche fisiche o chimiche, rendendo possibile uno scan. Infine, le radiazioni emesse dai radionuclidi dall'interno del corpo vengono analizzate per produrre un'immagine a scopo diagnostico o per curare una patologia.

Il numero di procedure diagnostiche in medicina nucleare è cresciuto a livello mondiale da circa 24 milioni nel 1988 a circa 33 milioni nel 2007. Questo ha prodotto un significativo aumento della dose efficace collettiva annua da 74 000 a 202 000 Sv-persona. Anche le applicazioni terapeutiche nella medicina nucleare moderna stanno crescendo, raggiungendo un numero di circa 0,9 milioni di pazienti all'anno nel mondo. Nuovamente, l'uso della medicina nucleare è abbastanza disomogeneo, con il 90% degli esami distribuiti nei paesi industrializzati.

La **terapia con radiazioni** (anche detta **radioterapia**) fa uso di radiazioni per trattare varie patologie, generalmente cancro, ma anche tumori benigni. La radioterapia con fasci esterni si riferisce al trattamento del paziente tramite l'uso di una sorgente di radiazioni posta esternamente al corpo del paziente ed è chiamata **teleradioterapia**. Questa terapia usa delle macchine che contengono sorgenti altamente radioattive (di solito il cobalto-60) o macchine ad alto voltaggio che producono radiazioni (cioè gli acceleratori lineari). Il trattamento può anche essere effettuato ponendo sorgenti radioattive metalliche o sigillate, sia temporaneamente che permanentemente, all'interno del corpo del paziente, e questa terapia è detta **brachiterapia**.

Nel mondo si stima che 5,1 milioni di pazienti siano stati trattati annualmente con radioterapia nel periodo 1997–2007, partendo da una stima di 4,3 milioni di pazienti trattati nel 1988. Circa 4,7 milioni di pazienti sono stati trattati con teleradioterapia e 0,4 milioni sono stati trattati con brachiterapia. Il 25% della popolazione che vive nei paesi industrializzati ha ricevuto il 70% dei trattamenti radioterapeutici effettuati nel mondo e il 40% di tutte le procedure di brachiterapia.

## ESPOSIZIONE NEI LUOGHI DI LAVORO

---

Poiché il numero complessivo delle procedure mediche che usano radiazioni è cresciuto in modo significativo negli ultimi decenni, anche il numero di addetti del settore è cresciuto, superando i 7 milioni con una dose efficace annua media di circa 0,5 mSv per lavoratore. In radiologia interventistica e in medicina nucleare, lo staff medico potrebbe ricevere dosi più alte rispetto alla media.

## *Incidenti nelle applicazioni mediche*

Alcune applicazioni mediche delle radiazioni (ad es. radioterapia, radiologia interventistica e medicina nucleare) comportano il rilascio di alte dosi ai pazienti. Se utilizzate in modo scorretto, possono causare un danno serio o anche la morte. Le persone a rischio non includono solo i pazienti, ma anche i medici e il resto del personale che si trova nelle vicinanze. L'errore umano è stato la causa più comune di questi incidenti. Esempi includono la somministrazione della dose sbagliata a causa di un errore di pianificazione del trattamento, lo scorretto utilizzo della strumentazione, l'irraggiamento dell'organo sbagliato o, sia pure occasionalmente, anche del paziente sbagliato.

Nonostante gli incidenti gravi in radioterapia siano rari, ne sono stati catalogati oltre 100. L'UNSCEAR ha riportato 29 incidenti segnalati dal 1967, che hanno causato 45 morti e 613 lesioni. Tuttavia, è probabile che alcune morti e molte lesioni non siano state riportate.

Non solo la sovraesposizione, ma anche la sottoesposizione potrebbe avere serie conseguenze, quando i pazienti ricevono una dose di radiazione insufficiente per trattare una patologia potenzialmente letale. I programmi di garanzia di qualità sono funzionali al mantenimento della buona pratica e uno standard elevato per minimizzare i rischi di tali incidenti.

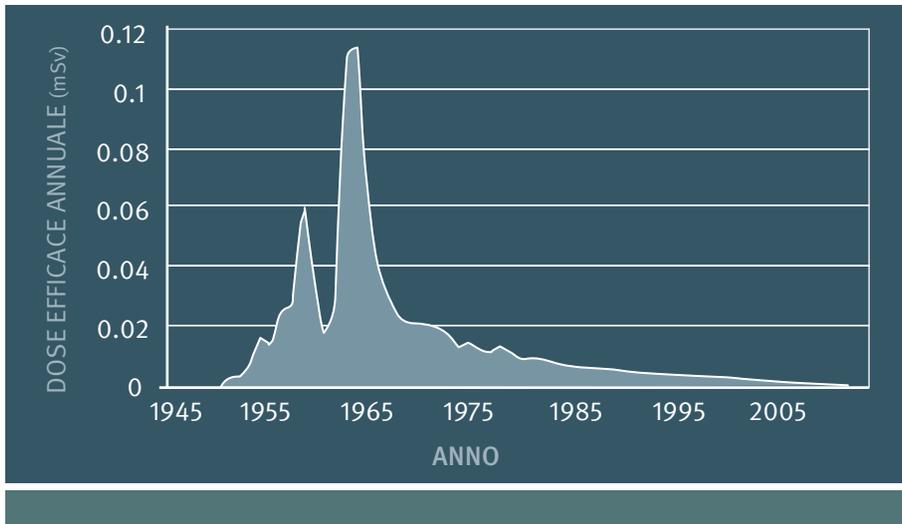
## **Ordigni nucleari**

Nel 1945, durante la fase finale della Seconda Guerra Mondiale, furono sganciate due bombe atomiche su due città giapponesi – su Hiroshima il 6 agosto e su Nagasaki il 9 agosto. L'esplosione delle due bombe uccise circa 130 000 persone. Questi eventi restano l'unico uso bellico di armi nucleari nella storia. Tuttavia, dopo il 1945 furono testate nell'atmosfera molte armi nucleari, principalmente nell'emisfero settentrionale. Il periodo di maggiore attività di questi esperimenti fu tra il 1952 e il 1962. In totale, furono condotti oltre 500 esperimenti, corrispondenti complessivamente a 439 megatoni di tritolo (TNT), l'ultimo dei quali nel 1980. Persone in tutto il mondo furono esposte alle radiazioni dovute alle ricadute radioattive (fallout) di questi esperimenti. In risposta alle preoccupazioni per l'esposizione alle radiazioni degli esseri umani e dell'ambiente, nel 1955 fu fondata l'UNSCEAR.

La stima annuale media di dose efficace dovuta al fallout globale a causa degli esperimenti atmosferici di armi nucleari fu massima nel 1963, con circa 0,11 mSv, e in seguito scese al livello odierno di circa 0,005 mSv. Questa esposizione scenderà solo molto lentamente nel futuro perché è quasi

interamente dovuta al radionuclide a lunga vita carbonio-14.

### Dose media mondiale per persona da fallout di test nucleari



Fino al 50% del fallout totale prodotto dagli esperimenti di superficie si depositò localmente entro 100 km dal sito del test. Le persone che vivevano vicino a questi siti furono quindi esposte soprattutto al fallout locale. Comunque, poiché gli esperimenti furono condotti in aree relativamente remote, le popolazioni locali esposte furono numericamente piccole e non contribuirono in modo significativo alla dose collettiva globale. Tuttavia, le popolazioni che vivevano “sottovento” rispetto ai siti dove avvenivano gli esperimenti ricevettero dosi ben più alte dei valori medi.

Il primo rapporto dell'UNSCEAR nel 1958 rappresenta la base scientifica su cui fu negoziato il *Trattato sulla Messa al Bando Parziale degli Esperimenti Nucleari nell'Atmosfera, nello Spazio Cosmico e negli Spazi Subacquei*. Dopo la firma di questo Trattato sulla Messa al Bando Parziale degli Esperimenti Nucleari (Partial Test Ban Treaty - PTBT) nel 1963, furono condotti annualmente circa 50 esperimenti sotterranei fino agli anni '90; alcuni esperimenti sono stati effettuati anche dopo questa data. Molti di questi esperimenti hanno avuto un impatto molto più basso degli esperimenti in atmosfera e ogni residuo radioattivo è rimasto solitamente confinato a meno di fuoriuscite di gas verso l'atmosfera. Anche se gli esperimenti hanno prodotto grandi quantità di residui radioattivi, non è attesa un'esposizione a radiazioni della popolazione, perché i residui si trovano in profondità e sono sostanzialmente fusi con le rocce in cui sono avvenuti gli esperimenti stessi.

C'è comunque preoccupazione rispetto al riutilizzo delle aree usate per gli esperimenti nucleari (ad es. per i pascoli e per le coltivazioni), perché alcune zone sono state occupate nuovamente. Le dosi dovute ai residui radioattivi in alcuni siti, ad esempio in aree localizzate nella zona degli esperimenti nucleari di Semipalatinsk nell'odierno Kazakistan, possono essere considerevoli, mentre in altre, come negli atolli di Mururoa e di Fangataufa nella Polinesia francese, le dosi non dovrebbero contribuire per più di una frazione della normale esposizione al fondo naturale che avrebbe comunque la popolazione che vive in quelle zone. Per ulteriori siti, come le isole Marshall e Maralinga, dove gli Stati Uniti e il Regno Unito, rispettivamente, condussero alcuni dei loro esperimenti, l'esposizione della popolazione residente dipenderebbe dalla dieta e dallo stile di vita.

## Reattori nucleari

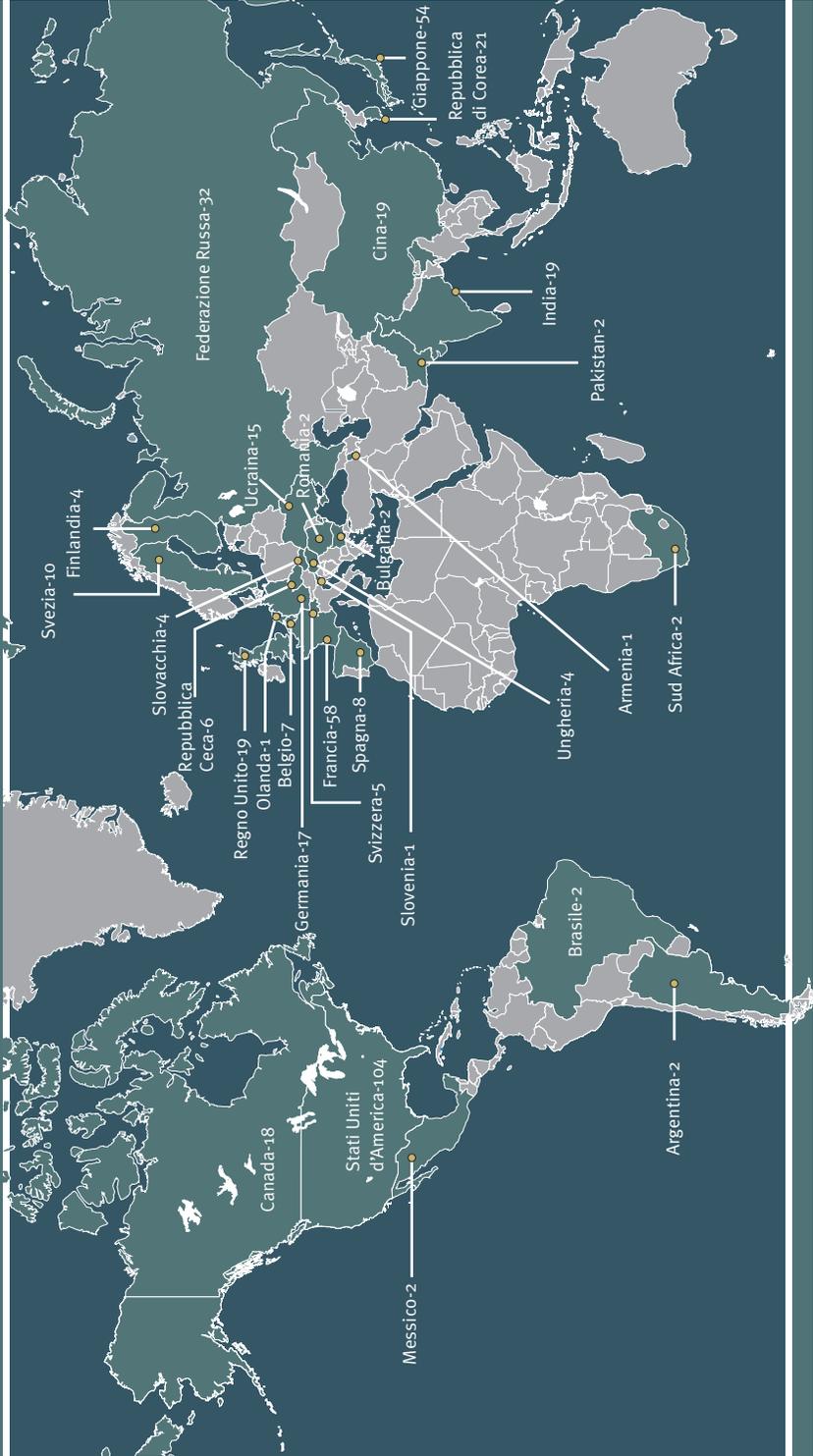
Quando specifici isotopi di uranio o plutonio sono colpiti da neutroni, il nucleo si divide in due nuclei più piccoli per un processo noto come fissione nucleare, rilasciando energia e due o più neutroni. I neutroni rilasciati possono a loro volta colpire altri nuclei di uranio o plutonio facendoli dividere, rilasciando più neutroni, che a loro volta possono dividere altri nuclei.. Questa concatenazione di eventi è chiamata reazione a catena. Questi isotopi sono normalmente impiegati come combustibile nei reattori nucleari, dove la reazione a catena è controllata per poter essere fermata quando diventa troppo veloce.

L'energia rilasciata dalla fissione nei reattori nucleari può essere impiegata per produrre elettricità nelle centrali nucleari. Tuttavia, ci sono anche reattori usati per la ricerca, per testare combustibili nucleari e diversi tipi di materiali, per ricerche di fisica nucleare e biologia, e per la produzione di radionuclidi da utilizzare in medicina e nell'industria. Sebbene ci siano differenze tra i due tipi di reattori, entrambi richiedono processi industriali come l'estrazione di uranio e lo smaltimento dei rifiuti nucleari prodotti, che può comportare l'esposizione dei lavoratori e della popolazione.

## Centrali nucleari

La prima centrale nucleare commerciale su scala industriale, Calder Hall, fu costruita nel 1956 nel Regno Unito, e da allora c'è stata una considerevole crescita della quantità di elettricità prodotta da centrali nucleari. Nonostante l'aumento della dismissione dei vecchi reattori, la produzione di energia elettrica di origine nucleare continua a crescere. Alla fine del 2010, circa 440 reattori nucleari erano operativi in 29 paesi, fornendo circa il 10% della produzione globale di energia elettrica, e 240 reattori per la ricerca erano distribuiti in 56 paesi nel mondo.

## Centrali nucleari nel mondo (2010)



Sebbene la produzione di elettricità attraverso l'uso dell'energia nucleare sia spesso controversa, in condizioni di normale operatività dà un contributo molto piccolo all'esposizione totale a radiazioni. Inoltre, i livelli di esposizione a radiazioni variano ampiamente a seconda del tipo di centrale e di dove sono dislocate, e variano nel corso del tempo.

I livelli di esposizione complessiva dovuti ai normali scarichi dei reattori sono diminuiti nonostante la produzione di energia da parte delle centrali sia aumentata. Ciò è in parte dovuto ai progressi tecnologici e in parte alle più stringenti misure di radioprotezione. In generale, gli scarichi dagli impianti nucleari producono dosi di radiazione molto basse. La dose collettiva annuale alle popolazioni intorno alle centrali nucleari è stimata essere 75 Sv-persona. In tal modo, chi vive nei pressi di una centrale nucleare è esposto in media ad una dose efficace annuale di circa 0,0001 mSv.

La componente dominante dell'esposizione a radiazione derivante da operazioni legate all'energia nucleare è l'estrazione mineraria. L'estrazione e la lavorazione dell'uranio producono notevoli quantità di residui solidi di scarto dopo la lavorazione, che contengono livelli elevati di radionuclidi naturali. Dal 2003, la produzione mondiale totale di uranio ha raggiunto circa 2 milioni di tonnellate, mentre i residui risultanti dalla lavorazione hanno raggiunto un totale di oltre 2 miliardi di tonnellate. Attualmente, i cumuli di residui sono mantenuti in modo protetto, ma esistono molti vecchi siti minerari abbandonati e solo alcuni hanno avviato azioni di rimedio. L'UNSCEAR stima in 50–60 Sv-persona l'attuale dose collettiva annuale alle popolazioni che risiedono attorno alle miniere e ai siti estrattivi e di lavorazione.

Il combustibile esaurito prodotto dai reattori può essere riprocessato per recuperare uranio e plutonio per un successivo utilizzo. Gran parte del combustibile esaurito è conservata in depositi temporanei, ma circa un terzo di tutto ciò che è stato prodotto finora è stato riprocessato. Si stima che la dose collettiva annuale dovuta al riprocessamento sia nel range dei 20–30 Sv-persona.

## ESPOSIZIONE NEI LUOGHI DI LAVORO

---

Nell'industria nucleare, i rilasci di radon nelle miniere sotterranee di uranio forniscono un sostanziale contributo alle esposizioni occupazionali. L'estrazione e il processamento dei minerali radioattivi che possono contenere alte concentrazioni di radionuclidi rappresentano un'attività diffusa. La dose efficace media annuale per lavoratore nell'industria nucleare è diminuita gradualmente dagli anni '70, da 4,4 mSv all'attuale valore di 1 mSv. Ciò è principalmente dovuto alla significativa riduzione dell'attività mineraria connessa all'uranio, associata all'introduzione di tecniche di estrazione mineraria e di ventilazione più avanzate.

## Principali processi nell'industria nucleare

Conversione, arricchimento e raffinazione preparano l'uranio per essere usato come combustibile.

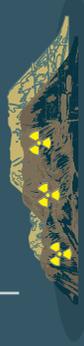


La fabbricazione di combustibile produce barre di combustibile, generalmente da uranio in pellet ceramici, incapsulati in tubi metallici.



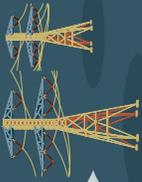
L'uranio e il plutonio ritrattati provenienti dal combustibile esaurito possono essere riciclati come combustibile dopo la conversione e l'arricchimento.

La macinazione estrae l'uranio dal minerale. I residui diventano materiale di scarto contenente radionuclidi a lunga vita in basse concentrazioni.



L'uranio naturale è estratto principalmente da miniere a cielo aperto o sotterranee.

Reattori di ricerca e di potenza, dove i nuclei degli atomi di uranio si scindono (fissione) e rilasciano energia usata per scaldare l'acqua.



I prodotti radioattivi secondari rendono il combustibile meno efficiente. Dopo 12-24 mesi il combustibile esaurito viene rimosso dal reattore.

I radioisotopi prodotti nei reattori possono essere estratti e utilizzati in medicina e nell'industria.



Le scorie a bassa e media attività sono per lo più smaltite in depositi interrati poco profondi.



Profondità ridotta e intermedia



Deposito di superficie

Le scorie altamente radioattive che includono il combustibile esaurito vengono tenute ad oggi in depositi temporanei in attesa di una collocazione definitiva in siti geologici profondi.



Deposito geologico di profondità

Rifiuti a bassa attività e alcuni rifiuti a media attività sono attualmente smaltiti in depositi poco profondi, sebbene, nel passato, i rifiuti erano a volte riversati in mare. Sia i rifiuti ad alta attività che il combustibile esaurito (se non viene riprocessato) sono stoccati, ma alla fine avranno bisogno di essere smaltiti. Uno smaltimento adeguato dei rifiuti non dovrebbe dare luogo ad esposizione della popolazione anche in un lontano futuro.

### *Incidenti in installazioni nucleari*

I livelli di esposizione durante le normali attività che si svolgono negli impianti civili dell'industria nucleare sono molto bassi. Tuttavia, ci sono stati alcuni gravi incidenti che hanno destato una grande attenzione pubblica e le cui conseguenze sono state revisionate dall'UNSCEAR. Tra questi sono inclusi l'impianto di ricerca di Vinca nell'ex-Iugoslavia nel 1958, l'impianto nucleare di Three Mile Island negli Stati Uniti nel 1979, e l'impianto di conversione del combustibile nucleare di Tokaimura in Giappone nel 1999.

Trentacinque gravi incidenti in impianti nucleari avvenuti tra il 1945 e il 2007 costarono la vita o produssero gravi danni ai lavoratori, e sette incidenti causarono rilasci di materiale nucleare al di fuori del sito con rilevabili esposizioni della popolazione alle radiazioni. Ci sono stati anche incidenti gravi in impianti collegati all'industria nucleare bellica. Escludendo gli incidenti di Chernobyl nel 1986 e quello di Fukushima-Daiichi nel 2011 — che sono discussi sotto — sono noti 32 morti e 61 casi di lesioni causate da radiazioni che hanno richiesto cure mediche.

Il più grave incidente in una installazione civile prima dell'incidente di Chernobyl fu quello della centrale nucleare di Three Mile Island il 28 marzo 1979. Una serie di eventi condussero a una parziale fusione del nocciolo del reattore. Questo incidente fu causa del rilascio nell'edificio di contenimento di una grande quantità di prodotti di fissione e di radionuclidi da parte del nocciolo del reattore danneggiato, ma il rilascio nell'ambiente fu relativamente piccolo e l'esposizione della popolazione fu molto bassa.

### *L'incidente alla centrale nucleare di Chernobyl*

L'incidente dell'impianto nucleare di Chernobyl il 26 aprile 1986 fu non solo il più grave incidente nella storia dei programmi nucleari a scopi civili, ma anche il più grave in termini di esposizione della popolazione. La dose collettiva derivata da questo incidente fu molte volte più grande della dose collettiva combinata di tutti gli altri incidenti radiologici.

Due lavoratori morirono per trauma subito dopo l'incidente e 134 soffrirono di sindrome acuta da radiazione, che fu fatale per 28 di loro. Danni alla pelle e alla cataratta furono i maggiori problemi tra i sopravvissuti. Oltre agli addetti all'emergenza, diverse centinaia di migliaia di persone furono successivamente coinvolte durante gli interventi di recupero. Oltre all'apparente aumento nell'incidenza dei casi di leucemia e di cataratta tra coloro che ricevettero alte dosi nel 1986 e nel 1987, ad oggi non c'è nessuna evidenza consistente di altri effetti sanitari correlati alle radiazioni in questo gruppo.

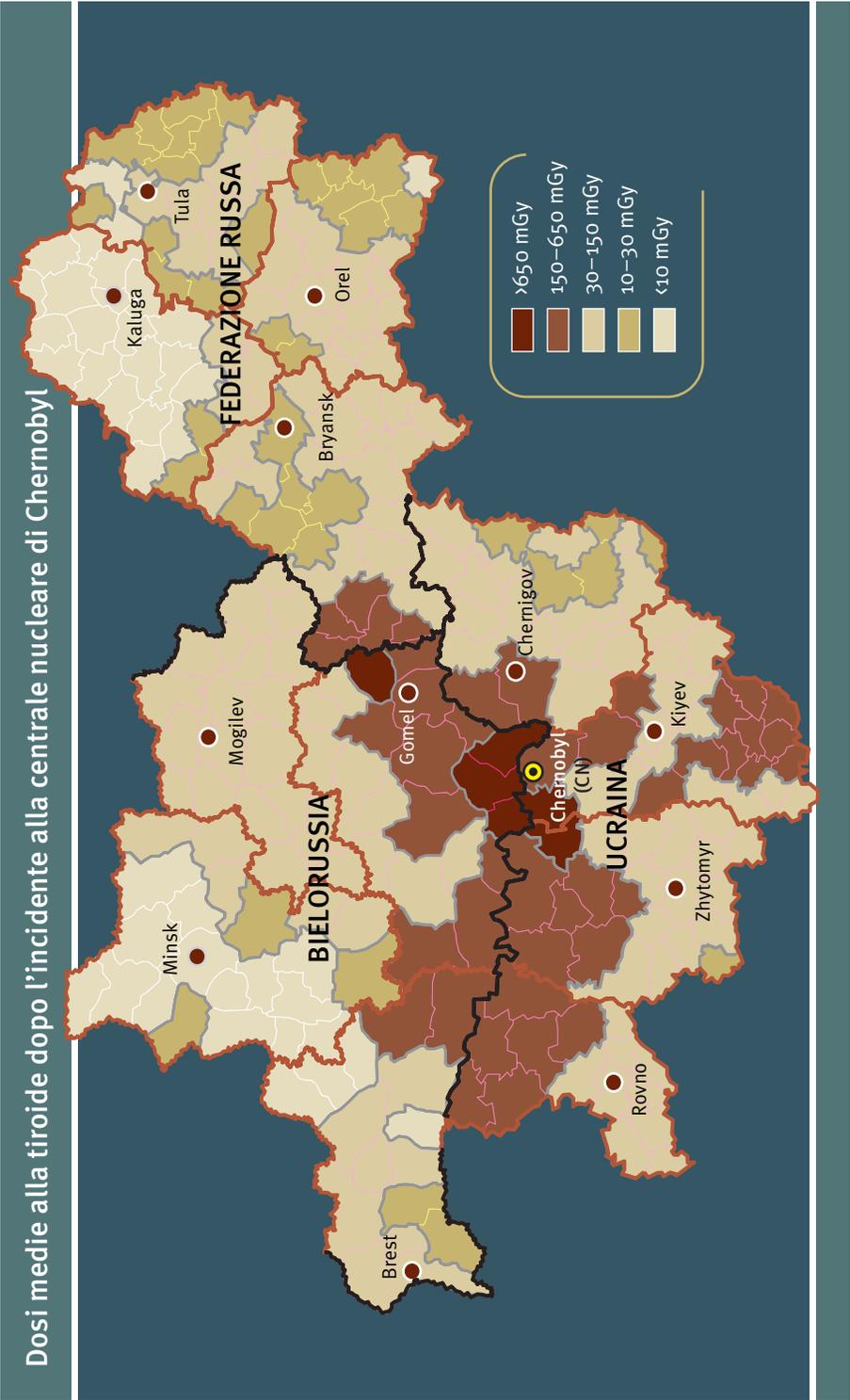
L'incidente causò il più grande ed incontrollato rilascio radioattivo nell'ambiente mai registrato in tutte le operazioni civili; grandi quantità di sostanze radioattive furono rilasciate nell'atmosfera per circa 10 giorni. La nube radioattiva che si era creata a causa dell'incidente si diffuse sopra l'intero emisfero settentrionale e depositò rilevanti quantità di materiale radioattivo su ampie aree dell'ex-Unione Sovietica e di altre parti d'Europa, contaminando terre e acque, in modo particolare nell'attuale Bielorussia, nella Federazione Russa e nell'Ucraina, causando una grave distruzione sociale ed economica per ampie fasce della popolazione.

La contaminazione del latte fresco con il radionuclide a breve vita iodio-131 (con un'emivita di otto giorni) e la mancanza di rapide contromisure condussero a dosi alla tiroide molto elevate, specialmente nei bambini in aree dell'ex-Unione Sovietica. Dai primi anni '90, l'insorgenza di tumori alla tiroide tra le persone esposte da bambini o adolescenti nel 1986 è aumentata in Bielorussia, in Ucraina e in quattro delle regioni più colpite della Federazione Russa. Nel periodo 1991–2005 sono stati riportati più di 6 000 casi di tumori tiroidei; di questi, almeno 15 casi sono stati fatali.

Nel lungo periodo, la popolazione nel suo complesso è stata anche esposta a radiazioni, sia esternamente a causa dei depositi di materiale radioattivo, che internamente tramite l'ingestione di alimenti contaminati, principalmente da cesio-137 (con un'emivita di 30 anni). Tuttavia, le dosi risultanti dall'esposizione a radiazioni a lungo termine furono relativamente basse e la dose efficace media individuale nel periodo 1986–2005 nelle aree contaminate della Bielorussia, della Federazione Russa e dell'Ucraina fu di 9 mSv. È probabile che questo valore non comporti considerevoli danni alla salute della popolazione, fermo restando che la grave distruzione causata dall'incidente ebbe un forte impatto sociale ed economico e provocò un grande disagio nelle popolazioni colpite.

L'UNSCEAR studiò in dettaglio in molti rapporti le conseguenze radiologiche dell'incidente. La comunità internazionale fece sforzi senza precedenti per valutare la magnitudine e le caratteristiche delle conseguenze dell'incidente, in generale

Dosi medie alla tiroide dopo l'incidente alla centrale nucleare di Chernobyl



e in diverse aree di interesse, allo scopo di migliorare la comprensione delle conseguenze radiologiche dell'incidente e per contribuire alla loro mitigazione.

In sintesi, gli studi dal 1986 indicano che le persone che sono state esposte da bambini allo iodio-131 e gli addetti alle operazioni di emergenza e recupero che ricevettero alte dosi di radiazione hanno un maggior rischio di presentare effetti sanitari radio-indotti. Tuttavia, la maggior parte dei residenti furono esposti a bassi livelli di radiazione, confrontabili con i livelli del fondo naturale annuale o di poco maggiori.

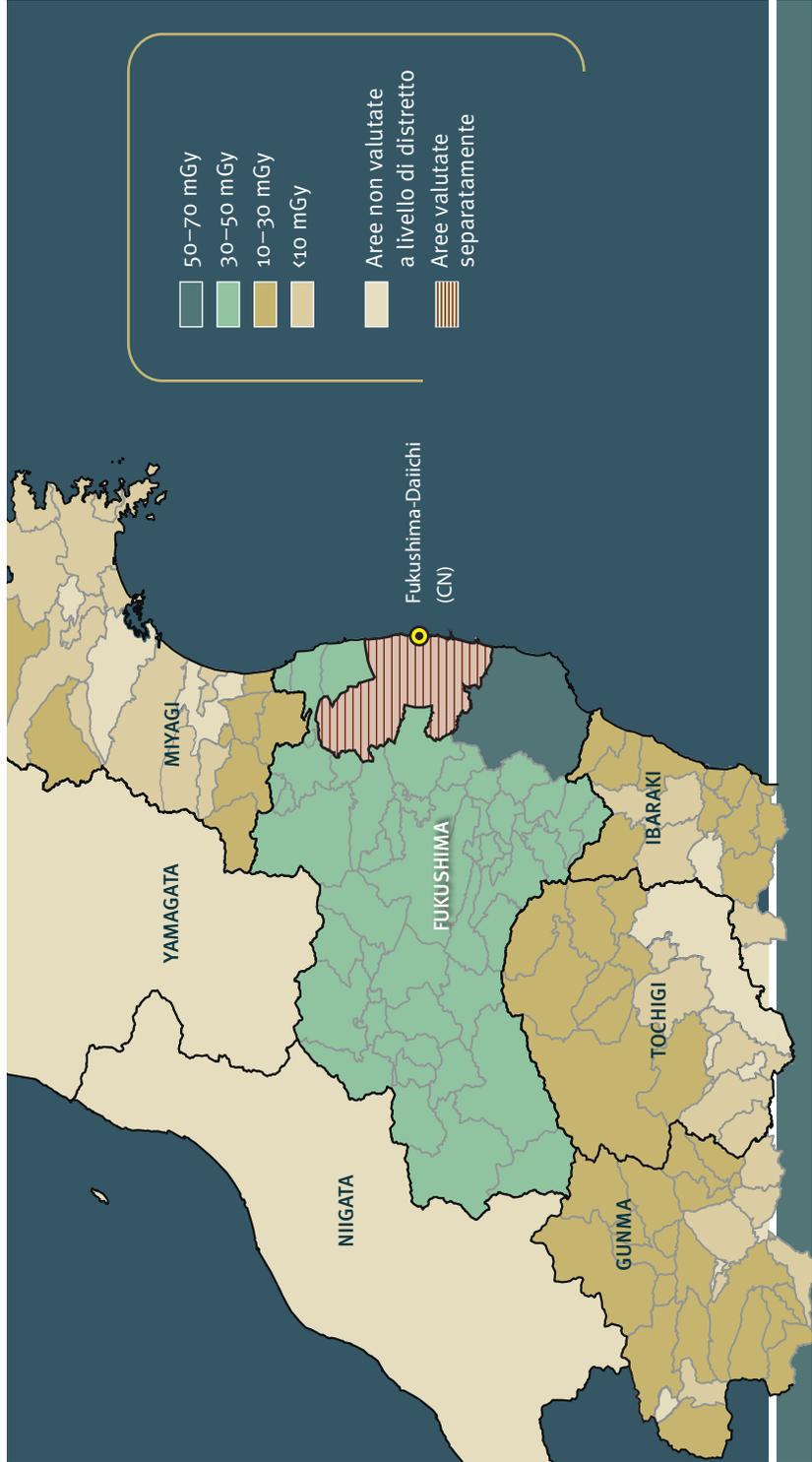
### *L'incidente alla centrale nucleare di Fukushima-Daiichi*

Dopo il forte terremoto di magnitudo 9,0 nel Giappone orientale e lo tsunami sulla costa orientale del Giappone del nord, verificatisi l'11 marzo 2011 la centrale nucleare di Fukushima-Daiichi fu seriamente danneggiata e materiale radioattivo fu rilasciato nell'ambiente. Tra l'11 e il 15 marzo quasi 85 000 residenti entro un raggio di 20 km dal sito della centrale nucleare e in alcune aree limitrofe furono evacuati per misura precauzionale, mentre ai residenti che vivevano entro 20–30 km dalla centrale fu chiesto di restare al riparo dentro le loro case. Successivamente, nell'aprile del 2011, fu raccomandata l'evacuazione di altre 10 000 persone che vivevano a nord-ovest della centrale a causa delle quantità elevate di radionuclidi presenti nel terreno. Queste evacuazioni ridussero di molto i livelli di esposizione a cui sarebbe potuta essere esposta la popolazione. Il consumo di acqua e di alcuni alimenti fu temporaneamente soggetto a restrizioni per limitare l'esposizione alle radiazioni da parte della popolazione. Nel gestire la situazione di emergenza nella centrale nucleare, fu esposto sia il personale di staff che il personale addetto all'emergenza.

L'UNSCEAR effettuò una valutazione delle dosi da radiazione e degli effetti associati alla salute e all'ambiente. Circa 25 000 lavoratori furono coinvolti nelle attività di mitigazione e nelle altre attività che si svolsero nella centrale nucleare di Fukushima-Daiichi durante il primo anno e mezzo dopo l'incidente. La dose efficace media che ricevettero questi lavoratori per quel periodo fu di circa 12 mSv. Tuttavia, 6 lavoratori ricevettero una dose totale cumulativa di oltre 250 mSv; la dose più alta ricevuta da un lavoratore fu di 680 mSv, principalmente dovuta ad una esposizione interna (circa 90%). Si stimò che 12 lavoratori avessero ricevuto dosi alla tiroide comprese tra i 2 e i 12 Gy. Tra i lavoratori esposti alle radiazioni a causa dell'incidente non fu registrato nessun caso di morte o di patologie acute connesse alle radiazioni.

La dose efficace media per gli adulti nelle aree evacuate nella prefettura di Fukushima furono comprese tra 1 e 10 mSv nel primo anno dopo l'incidente. Si

## Dosi medie alla tiroide per infanti dopo l'incidente alla centrale nucleare di Fukushima-Daiichi



stimò che le dosi efficaci per i bambini di un anno furono circa il doppio. Per le aree della prefettura di Fukushima che non furono evacuate le dosi furono più basse.

Nei casi di maggiore esposizione, le stime di dose media alla tiroide, principalmente da iodio-131, andarono dai 35 mGy per gli adulti fino agli 80 mGy per i bambini di un anno di età. La dose annuale alla tiroide, principalmente dovuta alle sorgenti di radiazioni naturali esterne, è tipicamente dell'ordine di 1 mGy. L'UNSCEAR concluse che era teoricamente possibile che il rischio di tumore alla tiroide nel gruppo dei bambini più esposti alle radiazioni sarebbe potuto crescere. Comunque, il cancro alla tiroide è una malattia rara tra i bambini, così che non sono attesi effetti statisticamente osservabili in questo gruppo.

A confronto con il disastro di Chernobyl, l'incidente nucleare di Fukushima-Daiichi fu certamente diverso per il tipo di reattore, per il modo in cui l'incidente accadde, per le caratteristiche del rilascio di radionuclidi e per la loro dispersione, e per le misure di protezione che furono prese. In entrambi i casi, una grande quantità di iodio-131 e di cesio-137 – i due radionuclidi più importanti dal punto di vista dell'esposizione dopo gli incidenti nucleari – fu rilasciata nell'ambiente. Il rilascio di iodio-131 e di cesio-137 dovuto all'incidente di Fukushima-Daiichi, confrontato con quello di Chernobyl, fu del 10% e del 20%, rispettivamente.

## Applicazioni industriali e altre applicazioni

Le sorgenti di radiazione sono usate in un ampio spettro di applicazioni industriali. Queste includono l'irraggiamento industriale usato per la sterilizzazione dei prodotti medici e farmaceutici, la conservazione di alimenti o la disinfestazione da insetti; la radiografia industriale usata per verificare la presenza di difetti nelle saldature dei giunti metallici; gli emettitori alfa e beta usati per i composti luminescenti nei mirini dei fucili e usati come sorgenti di luci a bassa intensità per indicare uscite o mappe; sorgenti radioattive o macchine a raggi X in miniatura usate nei carotaggi per misurare le caratteristiche geologiche nelle perforazioni fatte per minerali, per esplorazioni petrolifere o di gas; sorgenti radioattive usate nei dispositivi per misurare spessori, umidità, densità e livelli dei materiali; e altre sorgenti sigillate utilizzate nella ricerca.

Sebbene la produzione di radionuclidi per usi industriali e medici sia ampiamente diffusa, causa livelli di esposizione molto bassi alla popolazione. Tuttavia, in caso

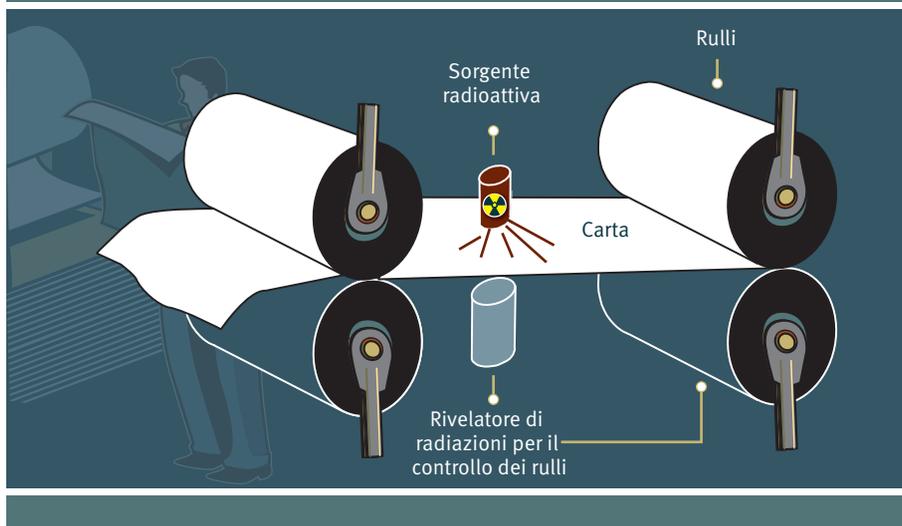
### ESPOSIZIONE NEI LUOGHI DI LAVORO

---

Il numero di lavoratori coinvolti nell'uso industriale delle radiazioni era di circa un milione nei primi anni 2000, con una dose efficace media per anno per lavoratore pari a 0,3 mSv.

di incidenti, le aree di contaminazione risultano più localizzate e possono dar luogo ad alti livelli di esposizione.

### Strumento che usa radiazioni per la misura dello spessore



### *Materiali naturalmente radioattivi*

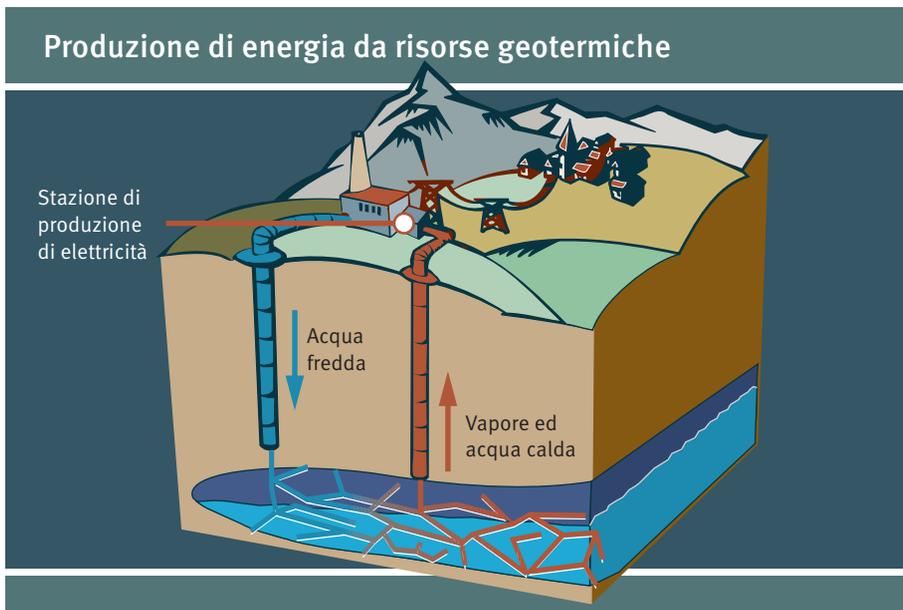
Ci sono molti tipi di impianti nel mondo che, pur non avendo nulla a che fare con l'energia nucleare, possono esporre il pubblico a radiazioni a causa di una aumentata concentrazione di *materiali naturalmente radioattivi* (NORM) nei loro prodotti industriali, sottoprodotti e rifiuti. I più importanti impianti con queste caratteristiche sono quelli che coinvolgono l'estrazione e la lavorazione dei minerali.

Le attività relative all'estrazione e alla lavorazione dei minerali possono anche condurre ad un incremento dei livelli dei NORM. Queste attività includono l'estrazione e la fusione dei metalli; la produzione di fosfati; l'estrazione di carbone e la generazione di energia dalla combustione del carbone; l'estrazione di petrolio e gas; le industrie in cui si lavorano ossido di titanio e terre rare; le industrie dove si lavorano zirconio e ceramiche; e le applicazioni che fanno uso di radionuclidi naturali (in genere isotopi del radio e del torio).

Il carbone, ad esempio, contiene tracce di radionuclidi primordiali. La combustione rilascia questi radionuclidi nell'ambiente, dove possono contaminare le persone esposte. Questo significa che, per ogni gigawatt annuo di elettricità prodotta dalle centrali alimentate a carbone, si stima che la dose

collettiva alla popolazione mondiale aumenti di circa 20 Sv-persona per anno. Inoltre, le ceneri volanti (un residuo generato durante la combustione) sono state usate in discariche e per la costruzione di strade, ma il loro uso nella costruzione di edifici comporta un'esposizione a radiazioni, sia per irradiazione diretta che per inalazione di radon. Inoltre, lo scarico delle ceneri volanti può aumentare i livelli di esposizione a radiazioni intorno alla discarica.

La generazione di energia geotermica costituisce un'altra sorgente di esposizione a radiazioni da parte della popolazione. I serbatoi sotterranei di vapore ed acqua calda sono utilizzati per generare elettricità o per riscaldare edifici. Le stime delle emissioni associate all'uso di questa tecnologia in Italia e negli Stati Uniti suggeriscono che produca circa il 10% della dose collettiva per gigawatt di elettricità prodotta annualmente tramite centrali a carbone. L'energia geotermica attualmente fornisce un contributo relativamente piccolo alla produzione mondiale di energia e quindi all'esposizione a radiazioni.



Varie altre pratiche umane possono esporre le persone ai NORM, come i fanghi provenienti dai trattamenti delle acque usati in agricoltura. Tuttavia, i livelli di esposizione del pubblico sono estremamente bassi, dell'ordine di meno di alcuni millesimi di mSv all'anno.

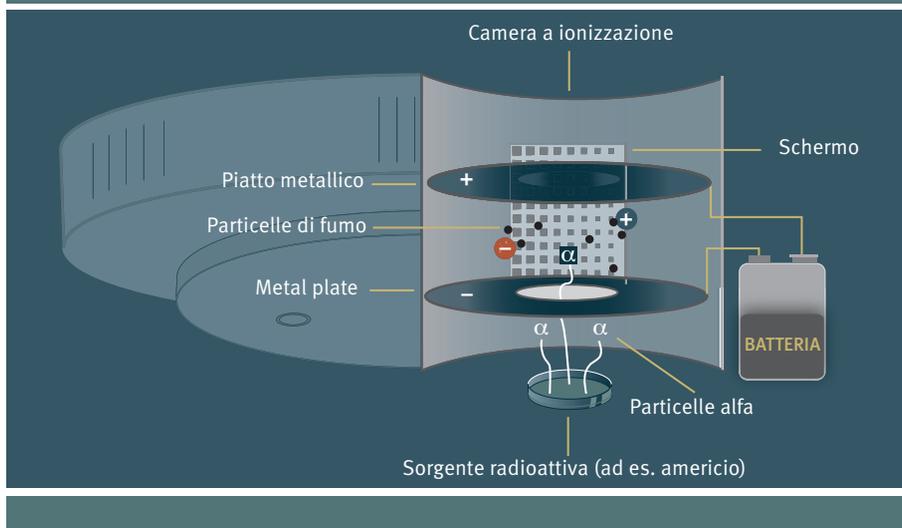
Un prodotto dell'attività di arricchimento dell'uranio è l'uranio impoverito, che è meno radioattivo dell'uranio naturale. L'uranio impoverito è stato usato per

scopi militari e civili per molti anni. Grazie alla sua elevata densità, viene usato come schermo per radiazioni o come contrappeso in aeromobili. L'uso militare dell'uranio impoverito, specialmente come munizione perforante, ha aumentato l'attenzione sulla contaminazione residua. A parte per alcuni specifici scenari, come la manipolazione per tempi lunghi, l'esposizione a radiazione dovuta all'uranio impoverito è estremamente bassa. Infatti la tossicità chimica è la sua caratteristica di maggiore pericolosità.

### *Prodotti di consumo*

Un certo numero di prodotti di consumo acquistati per uso quotidiano contengono bassi livelli di radionuclidi, deliberatamente aggiunti per utilizzare le loro proprietà chimiche o radioattive. Storicamente, il radionuclide più significativo per l'utilizzo in prodotti di consumo luminescenti fu il radio-226. Il suo utilizzo terminò alcuni decenni fa, venendo sostituito dal promezio-147 e dall'idrogeno-3 (trizio), che sono meno radiotossici. Ciononostante, per, è possibile che si siano verificate delle fuoriuscite di trizio da sveglie ed orologi contenenti composti di trizio, essendo questo radionuclide molto mobile. Tuttavia, il trizio emette solo particelle beta molto deboli che non possono penetrare la pelle, e quindi le persone sono esposte solo se il trizio entra nel corpo.

### Funzionamento dei rivelatori di fumo che fanno uso di radiazioni



Alcuni moderni rivelatori di fumo si basano su una camera a ionizzazione con piccoli fogli di americio-241, che emettono particelle alfa e producono una corrente ionica costante. L'aria può entrare liberamente nel rivelatore e, se il fumo vi entra, altera la corrente innescando un allarme.

La radioattività della sorgente di americio in un rivelatore di fumo è molto bassa. Essa decade molto lentamente con una emivita di circa 432 anni. Ciò significa che un rivelatore — alla fine di un periodo di uso di 10 anni — mantiene essenzialmente tutta la sua radioattività originale. Fintanto che la sorgente di americio resta nel rivelatore, l'esposizione sarà trascurabile. Sebbene rilevabili con strumentazione sensibile, i livelli di esposizione ricevuti da tali prodotti sono estremamente bassi. Si stima che una persona che resti a due metri dal rivelatore per otto ore al giorno riceva una dose minore di 0.0001 mSv all'anno.

### *Incidenti industriali*

Gli incidenti che coinvolgono sorgenti radioattive industriali avvengono molto più spesso di quelli nelle centrali nucleari. Eppure, solitamente non ricevono così tanta attenzione, anche se possono causare un'esposizione a radiazioni estensiva sia ai lavoratori che alla popolazione.

Tra il 1945 e il 2007, furono segnalati circa 80 incidenti ad impianti industriali che usavano sorgenti radioattive, acceleratori e strumenti a raggi X. Furono segnalate nove morti in questi incidenti e 120 lavoratori rimasero feriti. In alcuni lavoratori feriti si svilupparono sindromi acute da radiazioni. Le mani erano un comune sito di lesioni e spesso dovettero essere amputate. L'UNSCEAR ritiene probabile che alcuni incidenti in ambito industriale che hanno comportato lesioni o morti non siano stati riportati.

Le cause e gli effetti di tali incidenti sono molti e vari. Si riportano solo due di questi esempi. Nel 1978, in Louisiana, Stati Uniti, un radiologo industriale che stava lavorando su una chiatta ebbe un danno da radiazioni alla mano sinistra dovuto a una sorgente di 3,7 TBq di iridio-192, probabilmente a causa del malfunzionamento di un dosimetro. Circa tre settimane dopo, la sua mano diventò rossa e gonfia, poi comparvero delle vesciche, che cicatrizzarono entro 5–8 settimane. Sei mesi dopo, tuttavia, il dito indice dovette essere parzialmente amputato. Successivamente, nel 1990, a Shanghai, Cina, a causa di misure di sicurezza improprie, sette lavoratori furono esposti a radiazioni da una sorgente di cobalto-60 in un impianto industriale. Un lavoratore, con una dose stimata di 12 Gy, morì 25 giorni dopo l'esposizione. Un secondo lavoratore, la cui dose era stimata di 11 Gy, morì 90 giorni dopo l'esposizione. Gli altri cinque lavoratori ricevettero dosi stimate tra 2 e 5 Gy e guarirono dopo i trattamenti medici.

### *Sorgenti orfane*

Tra il 1966 e il 2007, 31 incidenti furono ritenuti causati dalla perdita, furto o abbandono di sorgenti radioattive, anche note come *sorgenti orfane*. Questi incidenti

sono noti per aver provocato la morte di 42 individui appartenenti al pubblico, tra cui bambini. Inoltre, sindromi acute da radiazione, seri danni locali, contaminazioni interne o problemi psicologici hanno comportato l'esigenza di cure mediche per centinaia di persone. Sei incidenti furono associati ad unità di radioterapia abbandonate.

Non è noto esattamente quante unità di sorgenti orfane ci siano nel mondo, ma si suppone siano dell'ordine delle migliaia. La Commissione di Regolamentazione Nucleare Americana (United States Nuclear Regulatory Commission) segnala che negli Stati Uniti d'America le compagnie abbiano perso traccia di circa 1 500 sorgenti radioattive tra il 1996 e il 2008, con più di metà mai recuperate. Uno studio condotto dall'Unione Europea ha stimato che ogni anno entro i suoi confini vengano perse dai controlli normativi fino a 70 sorgenti. Sebbene la maggior parte di queste sorgenti non rappresenterebbero un rischio radiologico significativo, gli incidenti riguardanti le sorgenti orfane rappresentano un grande motivo di preoccupazione.

Stime mondiali di gravi incidenti radiologici*			
Tipo di incidente	1945-1965	1966-1986	1987-2007
Incidenti ad impianti nucleari	19	12	4
Incidenti industriali	2	50	28
Incidenti per sorgenti orfane	3	15	16
Incidenti in ambito accademico/ ricerca	2	16	4
Incidenti in ambito medico	Non noti	18	14

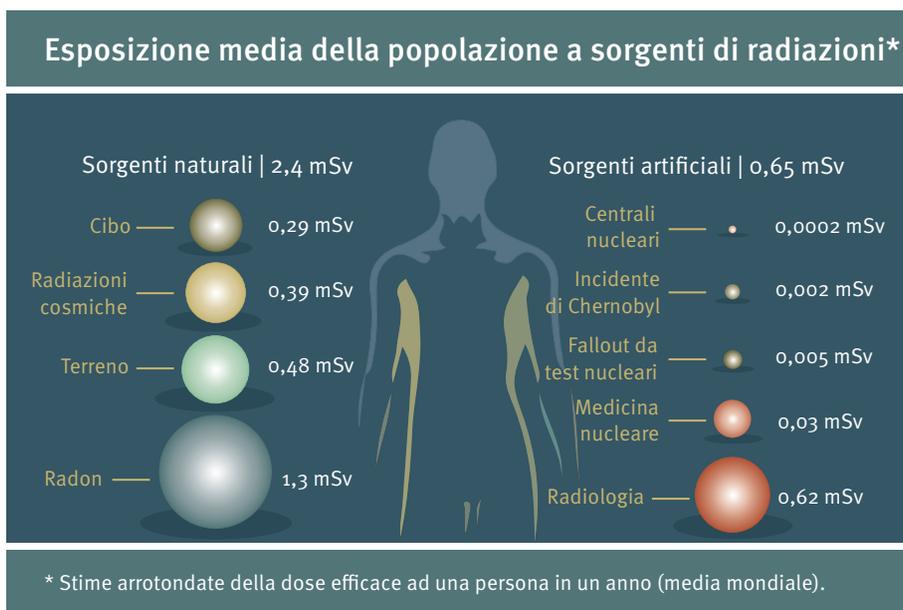
\*Basato sugli incidenti che sono stati riportati ufficialmente o pubblicati. Ci si aspetta che il numero degli incidenti non riportati, in particolar modo quelli in ambito medico, sia molto più elevato.

Le sorgenti sigillate o i loro contenitori possono essere attraenti per coloro che operano nel settore degli scarti metallici, poiché sembrano oggetti fatti di metallo prezioso e non riportano etichette di materiale radioattivo. Ci sono stati casi in cui lavoratori ignari o altri membri della popolazione hanno manomesso sorgenti e ciò ha portato a lesioni serie e anche alla morte di alcuni individui, come accadde a Goiania, Brasile, nel 1987. Una macchina per teleradioterapia abbandonata con una sorgente altamente radioattiva (50,9 TBq) di cesio-137 venne rubata e la capsula della sorgente si ruppe. Nel corso delle due settimane seguenti, la polvere solubile di cloruro di cesio venne sparsa nella discarica e nelle case circostanti. Molte persone svilupparono patologie e lesioni della cute e 110 000 persone dovettero essere monitorate per la contaminazione

radioattiva, molte delle quali erano state contaminate internamente dal cesio-137. A causa di questo incidente quattro persone morirono, incluso un bambino.

### 3.3. Esposizione media a radiazioni per popolazione e lavoratori

Generalmente, l'esposizione della popolazione alle radiazioni da sorgenti naturali domina l'esposizione totale. L'UNSCEAR stima che la dose efficace annuale media di un individuo sia di circa 3 mSv. In media, la dose annuale da sorgenti naturali è 2,4 mSv e due terzi di essa proviene da sostanze radioattive nell'aria che respiriamo, nel cibo che mangiamo e nell'acqua che beviamo. La principale sorgente artificiale di esposizione sono le radiazioni usate in medicina, con una dose efficace annua individuale media di 0,62 mSv. L'esposizione radiologica medica varia a seconda delle regioni, del Paese e del sistema sanitario. L'UNSCEAR ha stimato la dose efficace annuale media da applicazioni mediche delle radiazioni in 1,9 mSv nei Paesi industrializzati, e in 0,32 mSv in Paesi non industrializzati. Tuttavia, questi valori possono variare considerevolmente (ad es. da 3 mSv negli Stati Uniti a solo 0,05 mSv in Kenia).



Fino agli anni '90 del secolo scorso, l'attenzione circa l'esposizione dei lavoratori si è concentrata sulle sorgenti artificiali di radiazioni. Oggi, tuttavia, ci si è resi conto che un gran numero di lavoratori sono esposti a sorgenti naturali di radiazioni, principalmente nell'industria mineraria. Per alcune occupazioni nel settore minerario, l'inalazione del gas radon domina l'esposizione alle

radiazioni durante il lavoro. Mentre il rilascio di radon nelle miniere sotterranee di uranio rappresenta un contributo sostanziale all'esposizione occupazionale da parte dell'industria nucleare, la dose efficace annuale media di un lavoratore dell'industria nucleare nel suo complesso è diminuita da 4,4 mSv negli anni '70 a circa 1 mSv oggi. Tuttavia, la dose efficace annuale media di un minatore di carbone è ancora di circa 2,4 mSv e per gli altri minatori di circa 3 mSv.

La stima corrente del numero totale di lavoratori monitorati in tutto il mondo è di circa 23 milioni, dei quali circa 10 milioni sono esposti a sorgenti artificiali. Tre lavoratori su quattro esposti a sorgenti artificiali lavorano nel settore medico, con una dose efficace annua per lavoratore di 0,5 mSv. La valutazione dell'andamento della dose efficace annuale media per lavoratore mostra un aumento dell'esposizione da sorgenti naturali, principalmente a causa del settore minerario, e una diminuzione dell'esposizione da sorgenti artificiali, principalmente a causa dell'attuazione con successo di misure di radioprotezione.

### Andamenti nell'esposizione radiologica globale dei lavoratori (mSv)\*

Sorgenti	1970s	1980s	1990s	2000s
<b>Naturali</b>				
Personale aereo	—	3.0	3.0	3.0
Miniere di carbone	—	0.9	0.7	2.4
Altre miniere**	—	1.0	2.7	3.0
Miscellanea	—	6.0	4.8	4.8
<b>Totale</b>	—	1.7	1.8	2.9
<b>Artificiali</b>				
Usi medici	0.8	0.6	0.3	0.5
Industria nucleare	4.4	3.7	1.8	1.0
Altre industrie	1.6	1.4	0.5	0.3
Miscellanea	1.1	0.6	0.2	0.1
<b>Totale</b>	1.7	1.4	0.6	0.5

\* Stime della dose efficace media per lavoratore in un anno.

\*\* Le miniere di uranio sono incluse nell'industria nucleare.

## PUBBLICAZIONI DELL'UNSCEAR

Ad oggi, il Comitato Scientifico delle Nazioni Unite sugli Effetti delle Radiazioni Atomiche (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation - UNSCEAR) ha prodotto oltre 25 rapporti principali con oltre 100 allegati scientifici, che sono considerati principali fonti di autorevoli valutazioni sull'esposizione a radiazioni da esperimenti di ordigni nucleari e produzione di energia nucleare, da usi medici delle radiazioni, da attività lavorative con sorgenti di radiazioni e sorgenti naturali. Il Comitato valuta anche studi dettagliati sui tumori e sulle malattie ereditarie indotti da radiazioni, e stima le conseguenze radiologiche sulla salute e sull'ambiente a seguito di incidenti. I rapporti dell'UNSCEAR e i relativi allegati scientifici sono prodotti come pubblicazioni delle Nazioni Unite ([www.shop.un.org](http://www.shop.un.org)) e sono scaricabili liberamente e gratuitamente ([unscear.org](http://unscear.org)) al fine di diffonderne le risultanze a beneficio degli Stati Membri delle Nazioni Unite, della comunità scientifica e del pubblico.

Opinioni e commenti su questa pubblicazione sono molto apprezzati e vanno inviati a:

UNSCEAR secretariat  
Vienna International Centre  
P.O. Box 500  
1400 Vienna, Austria  
E-mail: [unscear@unscear.org](mailto:unscear@unscear.org)



Nel 1955, l'Assemblea Generale delle Nazioni Unite ha istituito il Comitato Scientifico delle Nazioni Unite sugli Effetti delle Radiazioni Atomiche (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation - UNSCEAR) con il compito di raccogliere e valutare le informazioni sui livelli di esposizione alle radiazioni ionizzanti e sui loro effetti.

Ciò avvenne in risposta alle preoccupazioni sugli effetti delle radiazioni ionizzanti sulla salute degli esseri umani e sull'ambiente, dato che a quel tempo il fallout radioattivo causato dagli esperimenti in atmosfera di ordigni nucleari raggiungeva le persone tramite l'aria, l'acqua e il cibo. Il primo rapporto dell'UNSCEAR gettò le basi scientifiche su cui, nel 1963, si negoziò il Trattato di Bando Parziale dei Esperimenti Nucleari, che proibiva gli esperimenti di ordigni nucleari in atmosfera.

Questa pubblicazione cerca di presentare in modo oggettivo le ultime conoscenze sui livelli di radiazione e i relativi effetti in un modo che risulti accessibile al lettore non esperto. Essa si basa sui rapporti scientifici dell'UNSCEAR, che sono stati utilizzati come principale fonte di informazioni.



UNEP