



S.O.D. Fisica Sanitaria

Azienda Ospedaliero-Universitaria Careggi

Principi di radioprotezione

Dr. Simone Busoni

busonis@aou-careggi.toscana.it

Di cosa parleremo

- Radiazioni ionizzanti
- Grandezze dosimetriche Effetti biologici
- Principi di radioprotezione
- Dosimetria

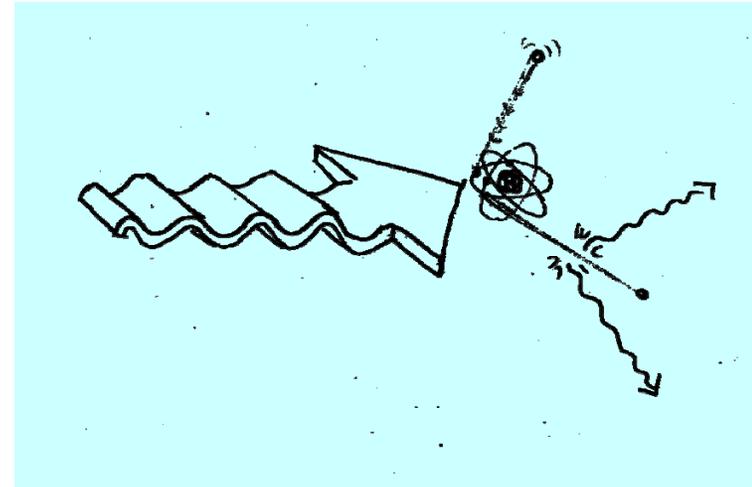
- Riferimenti normativi
- Strumenti operativi di sorveglianza fisica della radioprotezione

- Alcuni esempi
- Incidenti possibili

LE RADIAZIONI IONIZZANTI

Radiazioni ionizzanti

Particelle o fotoni con energia sufficiente a ionizzare il materiale attraversato



Da dove si originano:

- **radioisotopi** (radioattività naturale, radioisotopi artificiali)
- **macchine radiogene** (tubi RX, acceleratori)
- **raggi cosmici**

- *Radiazione direttamente ionizzante*
 - elettroni, protoni, particelle α
 - Energia sufficiente a produrre ionizzazione
 - raggi δ
 - eccitazione
- *Radiazione indirettamente ionizzante*
 - neutroni e fotoni
 - Liberazione di particelle direttamente ionizzanti quando interagiscono con la materia

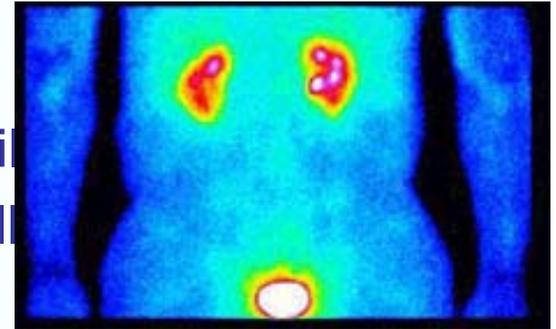
Un breve cenno storico....

- | | |
|----------|---|
| 1895 | Scoperta dei raggi X da parte Wilhelm Konrad Röntgen |
| 1896 | Scoperta della radioattività naturale dell'uranio da parte di Antoin Henri Bequerel |
| 1898 | Scoperta delle proprietà radioattive del polonio e del radio da parte dei coniugi Curie |
| 1902 | Si riconosce che un effetto ritardato della radiazione poteva essere l'insorgere di tumori |
| 1903 | Si scopre che le radiazioni possono provocare la morte degli animali da laboratorio irradiati |
| 1945 | Esplodono le bombe nucleari ad Hiroshima e Nagasaki |
| anni '50 | E. B. Lewis (California Institute of Technology) ipotizza la mancanza di un valore di soglia per l'induzione della leucemia |

Caratteristiche di sorgenti di R.I. (ovvie ma da ricordare)

Radioisotopi o radionuclidi

- emettono radiazioni sempre, non è possibile fermarli
- la sorgente “decade”, ovvero l'intensità dell'emissione diminuisce al passare del tempo



Macchine radiogene

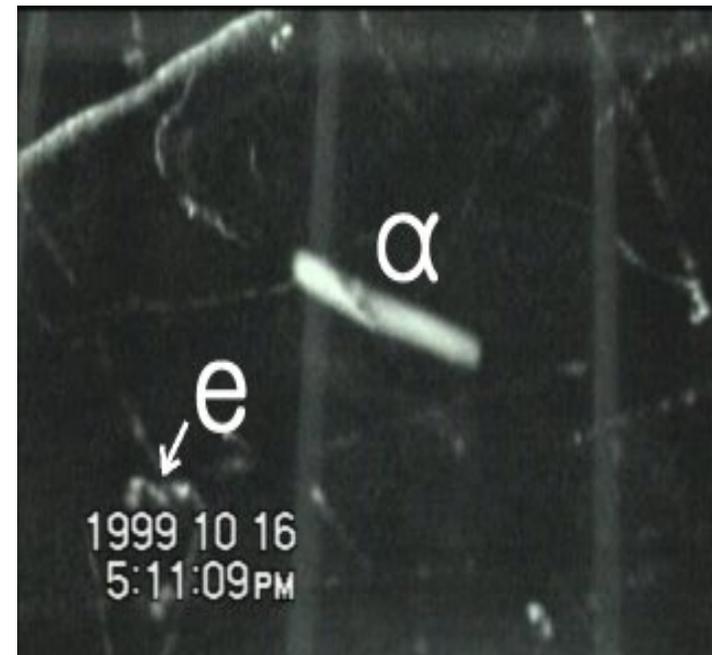
- emettono radiazioni solo quando sono comandate dall'operatore
- quando sono spente non sono sorgente di radiazioni



Caratteristiche di sorgenti di R.I. (ovvie ma da ricordare)

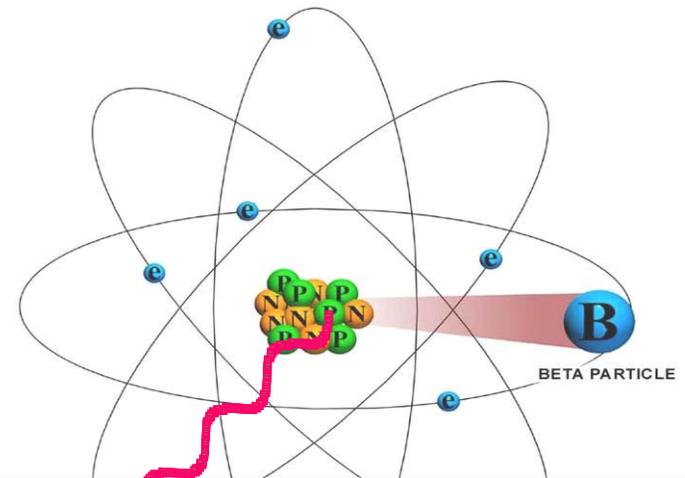
Particelle Alfa:

Alta energia, ma poca penetrazione (attraversano qualche cm in aria). Particelle di energia inferiore ai 7 MeV non attraversano lo strato morto della pelle.

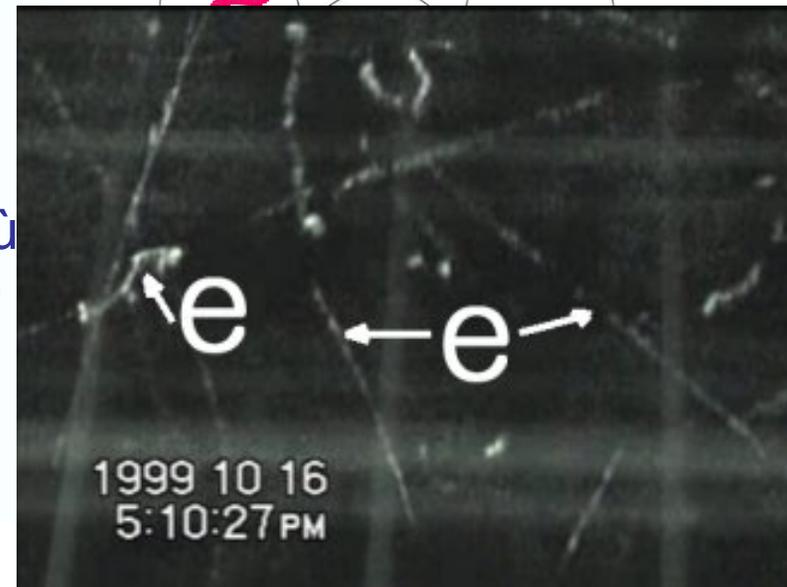


Caratteristiche di sorgenti di R.I. (ovvie ma da ricordare)

Particelle Beta: il percorso in aria è di una decina di cm per energie di circa 100 keV. Particelle più energetiche possono attraversare qualche metro in aria (3.8m per β da 1 MeV) e possono costituire un problema per la pelle e le strutture dell'occhio per sorgenti di alta attività.



Raggi X o Gamma (radiazioni elettromagnetiche): Queste sono le più penetranti (percorrono anche decine di metri in aria) e possono attraversare i materiali.



EFFETTI BIOLOGICI DA ESPOSIZIONE A RADIAZIONI IONIZZANTI

- danni somatici deterministici
(avvengono sopra una dose soglia)
- danni somatici probabilistici
- danni genetici probabilistici

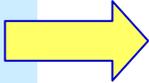
- **danno deterministico (dose dipendente)**

- legato cioè al superamento di una dose-soglia
- gli effetti si manifestano in tutti gli irradiati
- periodo di latenza breve (ore/giorni/settimane)
- la gravità delle manifestazioni aumenta con l'aumentare delle dosi

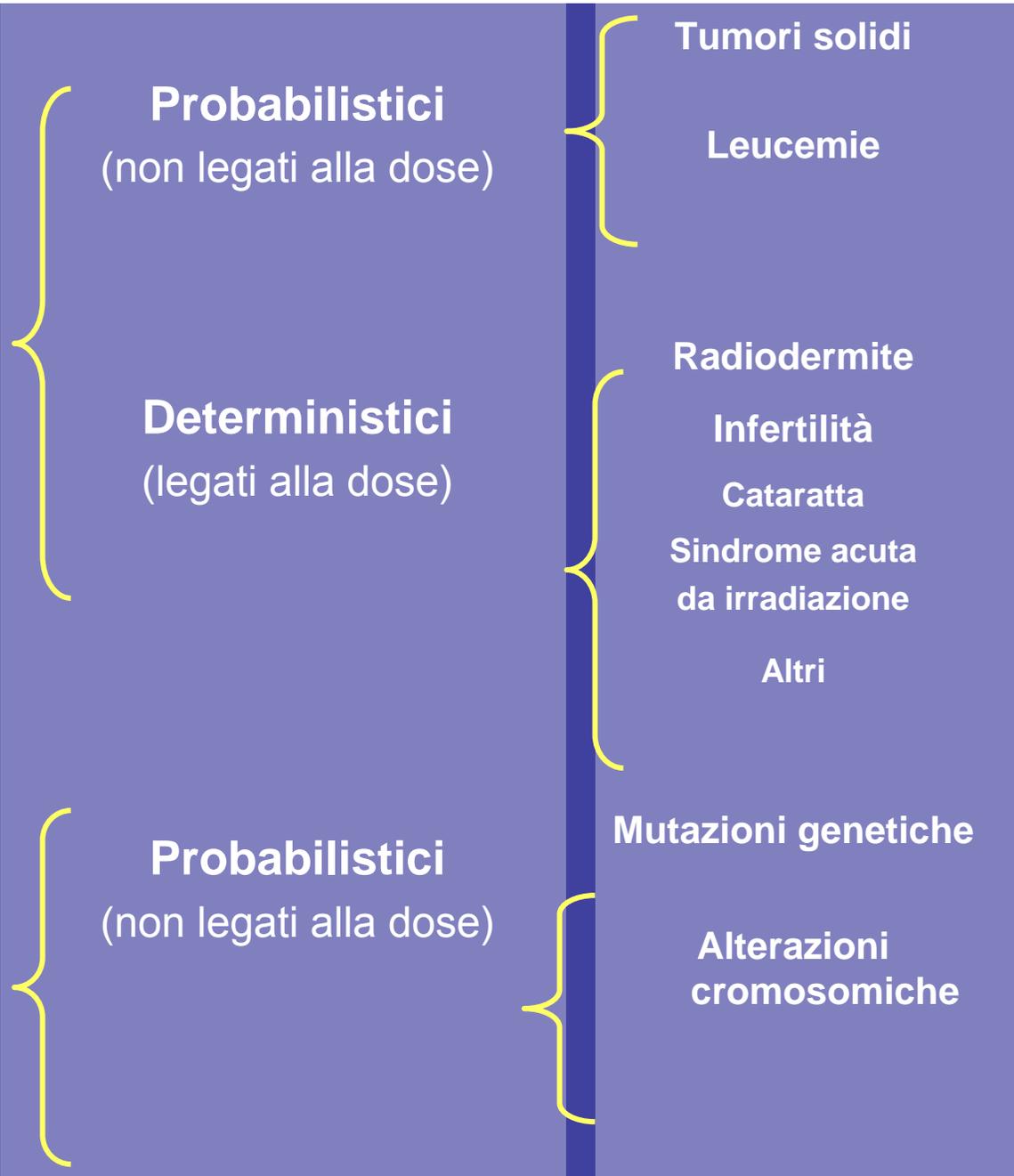
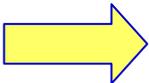
- **danno probabilistico è dose indipendente**

- non esiste una dose-soglia
- anche dosi basse possono determinare il danno da radiazioni ionizzanti
- all'aumentare della dose aumenta la probabilità del danno
- si manifesta dopo anni o decenni

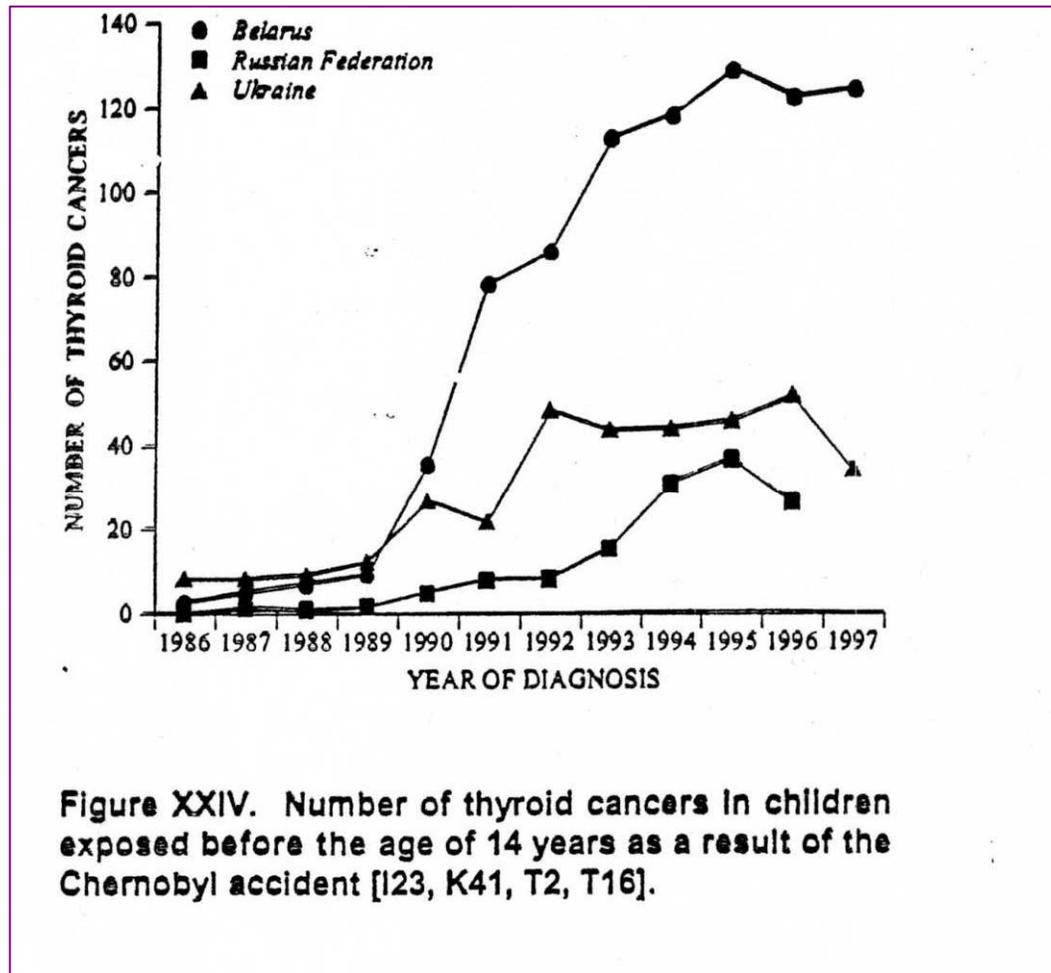
Somatici
(individuo irradiato)



Genetici
(progenie)



Cancro alla tiroide in bambini esposti prima dei 14 anni di età in seguito all'incidente di Chernobyl



Riparazione del danno

- I danni al DNA sono i più importanti e possono condurre alla disfunzione o alla morte delle cellule .
- La radiazione di fondo causa solo una piccola frazione di queste rotture (~ 5 DNA rotti per cellula ogni anno).
- Il nostro organismo ha meccanismi altamente efficienti di riparazione del DNA.



Radiosensibilità cellulare

- Più rapidamente le cellule si riproducono e più sono suscettibili di essere danneggiate dalla radiazione.
- Esempi di cellule molto radiosensibili sono:
 - Cellule che formano il sangue
 - Cellule del rivestimento intestinale
 - Cellule follicolari dei capelli
 - Cellule fetali



Irradiazione Esterna

localizzata

globale

Contaminazione

esterna

interna

Attività a rischio di incidente con possibile esposizione alle radiazioni ionizzanti

Tipo di attività	Conseguenze
Stabilimenti nucleari (impianti di potenza; laboratori e reattori di ricerca)	Pochi operatori (<u>contaminazione esterna</u>) / <u>incidente catastrofico</u> / coinvolgimento della popolazione in territori anche molto distanti
Industria convenzionale (R.I. per radiografia industriale, gammagrafia; misuratori di livello, ecc.)	Conseguenze sanitarie per gli operatori coinvolti / esposizioni localizzate (<u>irradiazione parziale esterna</u>)
Settore sanitario (radiodiagnostica; radioterapia; medicina nucleare; ricerca biomedica)	Conseguenze sanitarie per l'operatore o per il paziente coinvolto / esposizioni localizzate (<u>irradiazione parziale esterna</u>); <u>attenzione ad incidenti con contaminazione radioattiva</u> in reparti di medicina nucleare
Trasporto di materiale radioattivo	Conseguenze sanitarie per gli operatori addetti al trasporto con potenziale coinvolgimento della popolazione (<u>contaminazione radioattiva</u>)
Rifiuti, Sorgenti fuori controllo	Coinvolgimento della popolazione

Irradiazione acuta localizzata (superamento della dose soglia)

Esposizione accidentale a sorgenti ad elevata radioattività

Possibili cause:

- errata manipolazione delle sorgenti
- esposizione a fasci collimati di R.I. prodotti da apparecchi generatori fuori controllo
- ritrovamento di sorgenti abbandonate nell'ambiente

Irradiazione acuta localizzata (superamento della dose soglia)

Quadro clinico iniziale (il tempo di insorgenza è dose/dipendente)

sintomi generali: malessere generale, astenia, anemizzazione

lesioni cutanee: eritema, bruciore, prurito

dolore urente

guarigione totale

periodo di latenza
(benessere)

eritema secondario, desqu
vescicole, lesioni necrotich

remissione totale definitiva

ricadute
(dopo mesi o anni)



PHOTO 19. Self-healed hand lesion without functional impairment on Day 85.

Sindrome acuta da panirradiazione

Forma ematologica

- 0,25 Gy Sopravvivenza virtualmente certa
- 1 Gy Soglia della sindrome ematologia (osped
- 2 Gy Sopravvivenza probabile
- 5 Gy Sopravvivenza possibile (DL 50/60)
- 6 Gy Sopravvivenza virtualmente impossibile

Forma gastrointestinale (DL 100) 7 Gy

Forma neurologica 10 Gy



FIG. 12. Edematous face and thorax of the victim 50 h after exposure.

Sindrome acuta da panirradiazione

Settimane dopo l'esposizione	Dose (Sv)		
	1-3 (subletale)	4 (letale)	> 6 (sopraletale)
1	fase latente	nausea e vomito (1 giorno)	nausea e vomito, malessere, diarrea, febbre
2		depilazione, malessere generale	bocca e gola infiammate, ulcerazioni, deperimento, morte
3	perdita appetito, depilazione, infiammazione gola, emorragie	perdita appetito, emorragia, diarrea, febbre, deperimento, morte eventuale	
4	diarrea, guarigione		
Sopravvivenza	certa salvo complicazioni (2.5 Sv sono mortali nel 5% dei casi)	possibile nel 50% dei casi	impossibile

Sindrome acuta da panirradiazione

Forma ematologica

Vomito (dopo 20 min/3 ore) > 5/6 ore dubbio
Arrossamenti degli occhi, **Eritema cutaneo**, Febbre,
Infezioni, Emorragie

Forma gastrointestinale

Vomito, diarrea, **febbre**, ulcerazioni ed emorragie digestive, **perdita di sali minerali**,
perdita massiva di liquidi e proteine → **MORTE**

Forma neurologica

Ai sintomi detti in precedenza si aggiunge:
grave compromissione del Sistema Nervoso Centrale
(**convulsioni tipo epilessia**, perdita di coscienza, **coma**)
→ **MORTE**

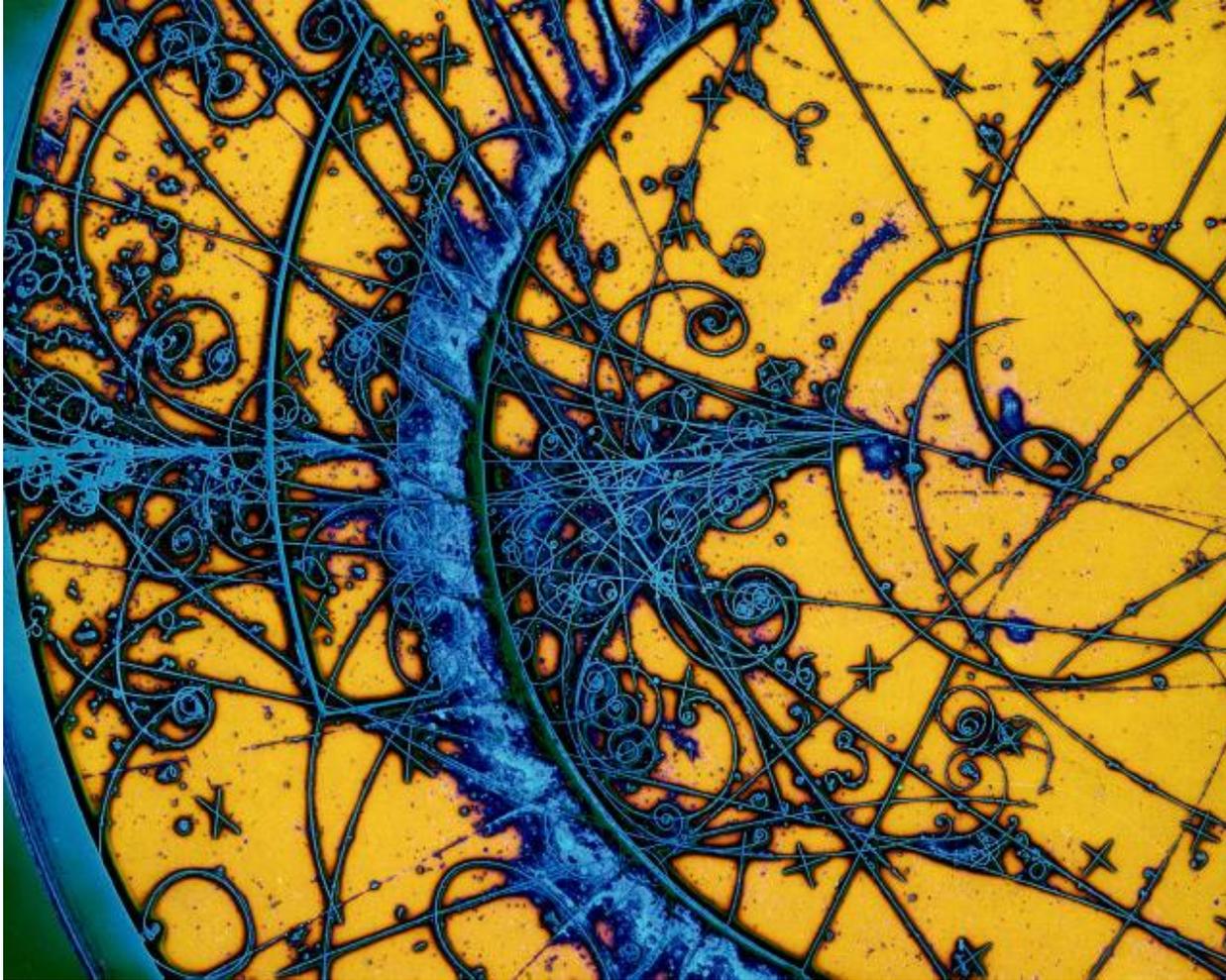
Contaminazione esterna

- **Personale (anche non sanitario)** dovrebbe poter trattare una contaminazione ed intervenire in caso di inalazione di sostanze radioattive
- **Tempestiva** applicazione di “semplici” procedure → **efficace profilassi** (minimizzando il rischio di una successiva incorporazione dei radionuclidi sulla superficie cutanea)
- **Protegersi** utilizzando adeguati DPI
- **Controllo fisico** (monitoraggio) tramite opportuni rilevatori che misurano la contaminazione radioattiva superficiale
- (è utile anche per stabilire una soglia ed identificare i soggetti con priorità di trattamento. Serve anche per controllare l'efficacia dei trattamenti di decontaminazione eseguiti).

Criteri di primo soccorso

- **Tagliare** gli abiti con le forbici, per evitare di contaminare altre parti del corpo
- Lavaggio, ripetuto, con acqua tiepida e sapone neutro esente da additivi e da abrasivi
- Per contaminazione degli occhi e del volto o di lievi ferite o ustioni termiche lavare solo con acqua fredda o tiepida o, meglio, con soluzione fisiologica.
- Per la decontaminazione di volto e/o capelli proteggere: condotti uditivi esterni, occhi, narici e bocca per evitare che il liquido di lavaggio contaminato penetri
- Protezione delle ferite non contaminate
- **Il trattamento è tanto più efficace quanto più è tempestivo**
- Inviare la vittima in ambiente sanitario specializzato.
- **D.P.I. e indumenti della vittima vanno raccolti in sacchi di plastica e smaltiti**

Un attimo di pausa



GRANDEZZE DOSIMETRICHE

Grandezze dosimetriche

- Attività
- Esposizione
- Dose
- Dose equivalente
- Dose Efficace

Il numero dei “ decadimenti ” per unità di tempo in questi materiali ci dice quanto radioattivo è quell'elemento (attività).

L'unità di misura nel S.I. dell'attività è il Becquerel

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ disintegrazione/secondo}$$

Storicamente l'attività veniva misurata in Curie

$$1 \text{ Ci} = 3.7 * 10^{10} \text{ Bq}$$

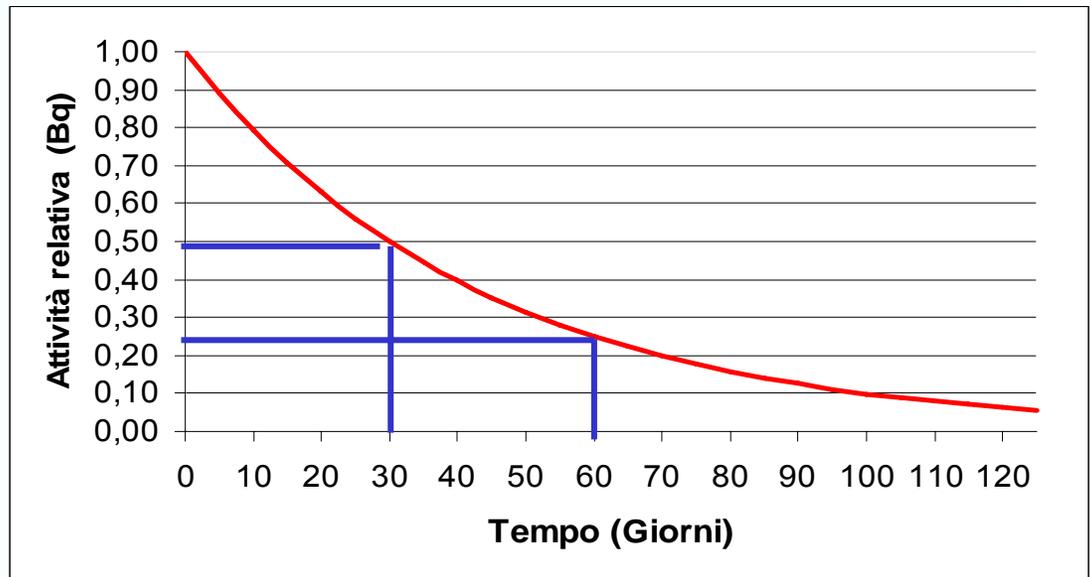
Legge di decadimento radioattivo

$$A(t) = A_0 e^{-t/\tau} = A_0 e^{-0.693 (t / t_{1/2})}$$

$t_{1/2}$ = tempo di dimezzamento

τ = vita media

A_0 = attività iniziale

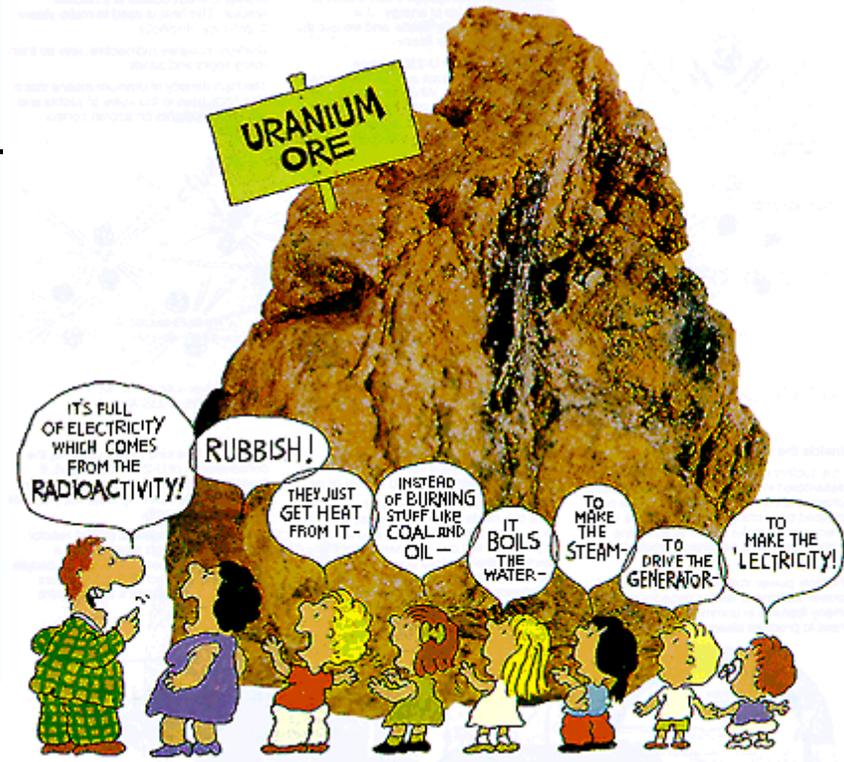


Esempi:

- Molti isotopi naturali come l'Uranio e il Torio hanno una emi-vita di miliardi di anni.
- Molti isotopi per impiego medico come il Tecnezio 99m hanno una emi-vita di appena 6 ore.

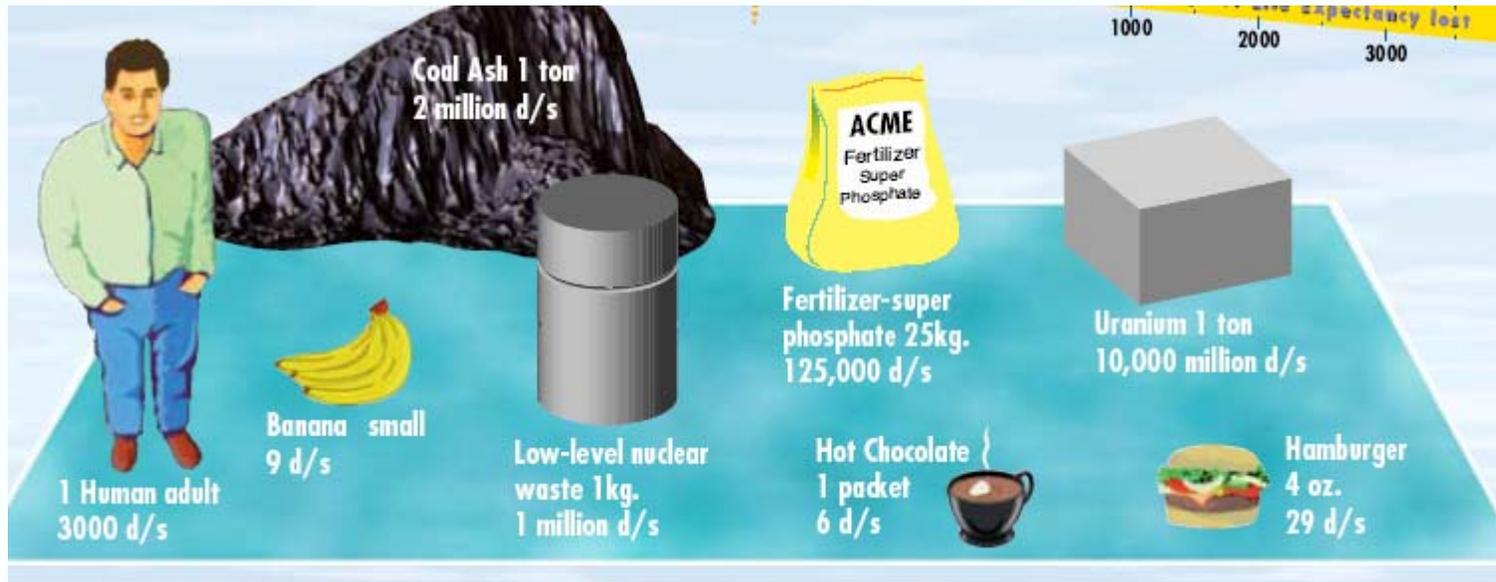
La radioattività NON è necessariamente in relazione con la quantità

- Si definisce attività specifica la quantità di radioattività che si trova in un grammo di materiale.
- Le materie radioattive con una lunga emivita hanno una bassa attività specifica.



1 grammo di Cobalto-60
ha la stessa attività di
1800 tonnellate di Uranio
naturale

Alcuni esempi di attività



Dose assorbita

- L'energia di una radiazione si deposita in un volume di tessuto del nostro corpo diviso per la massa del tessuto stesso si misura come dose di radiazione.

Più energia viene rilasciata

- La grandezza fisica definita per unità di massa è la D

$$D =$$

L'unità di misura della D

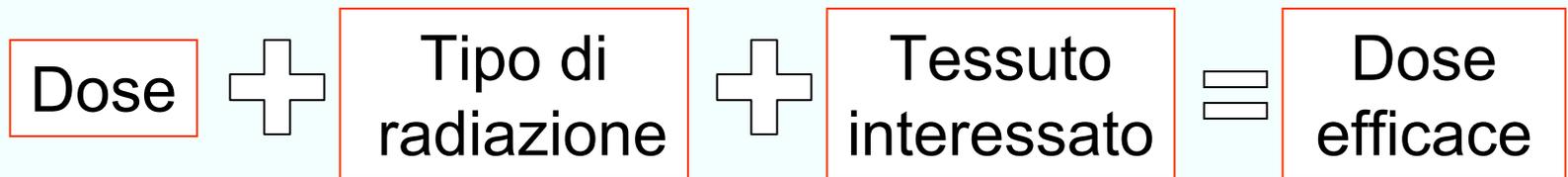
Dose assorbita (D): quoziente di dE diviso per dm , in cui dE è l'energia media ceduta dalle radiazioni ionizzanti alla materia in un elemento volumetrico e dm la massa di materia contenuta in tale elemento volumetrico.

L'unità di misura è il gray (Gy):

$$1\text{Gy} = 1 \text{ J/ Kg}$$

Cos'è una "Dose" da radiazioni?

- La grandezza utilizzata nella radioprotezione pratica è la dose efficace
- Per dose efficace si intende l'energia media ceduta dalle radiazioni ionizzanti nel corpo umano in riferimento al tipo, alla qualità della radiazione usata e agli effetti biologici che produce su tutto il corpo.
- ***Il Sievert è l'unità di misura della dose da radiazioni.***



La gravità degli effetti biologici (danno) è proporzionale alla dose efficace.

Dose equivalente

Dose equivalente (H): grandezza radioprotezionistica ottenuta moltiplicando la dose assorbita (D) per fattori (Tab. 3) che dipendono dal tipo e dall'energia della radiazione, al fine di qualificare il significato della dose assorbita stessa per gli scopi della radioprotezione. L'unità di misura è il sievert (Sv):

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/ kg}$$

I fattori di conversione da utilizzare quando la dose equivalente è espressa nella vecchia unità di misura, il rem, sono i seguenti:

$$1 \text{ rem} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

Tabella 3. Alcuni fattori di peso w_R per la radiazione.

Radiazioni	w_R
Radiazioni X, γ , β , elettroni, positroni e muoni di qualsiasi energia	1
Protoni con energia (E) >di 2 MeV	5
Neutroni con $E < 10$ KeV	5
Neutroni con $10 < E < 100$ keV	10
Neutroni con $100 \text{ KeV} < E < 2 \text{ MeV}$	20
Neutroni con $2 < E < 20 \text{ MeV}$	10
Neutroni con $E > 20 \text{ MeV}$	5
Particelle α di frammenti di fissione, nuclei pesanti	20

Dose efficace

Dose efficace (E): somma delle dosi equivalenti nei diversi organi o tessuti, ponderate secondo i fattori indicati in Tabella 4:

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T$$

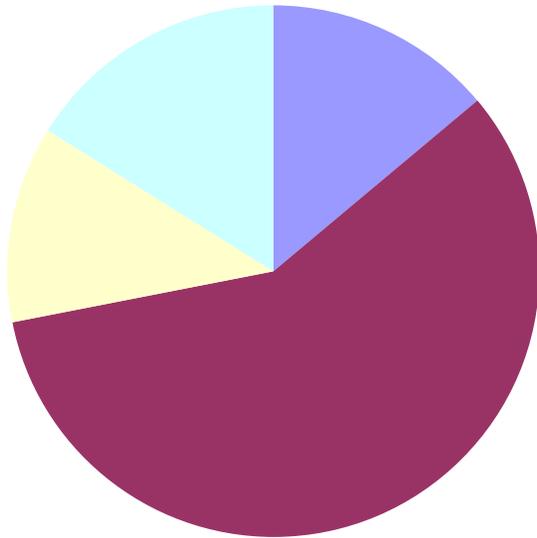
L'unità di misura è il sievert (Sv).

Tabella 4. Fattori di peso, w_T , per tessuti ed organi.

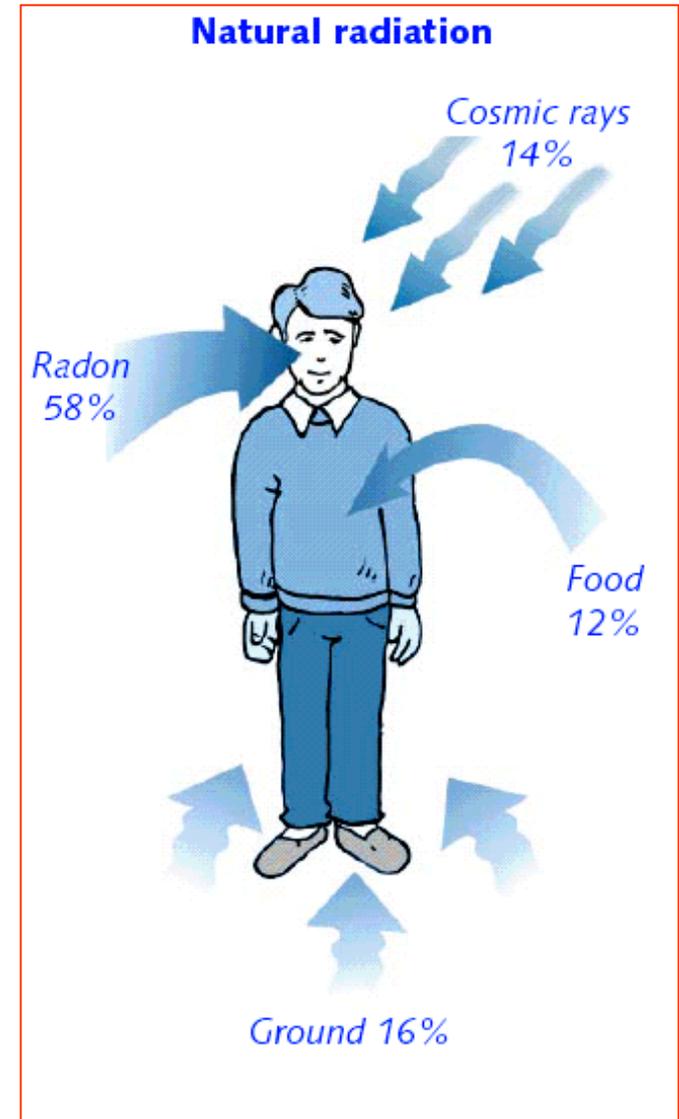
Tessuto o organo	w_T
Gonadi	0,20
Colon	0,12
Midollo osseo (rosso)	0,12
Polmone	0,12
Stomaco	0,12
Mammelle	0,05
Esofago	0,05
Fegato	0,05
Tiroide	0,05
Vescica	0,05
Ossa (superfici ossee)	0,01
Pelle	0,01
Rimanenti organi e tessuti	0,05

Fondo naturale di radiazioni

L'esposizione al fondo naturale varia tipicamente da 1 a 3.5 mSv



Le figure si riferiscono agli USA
(fondo \approx 3 mSv)



Raggi cosmici

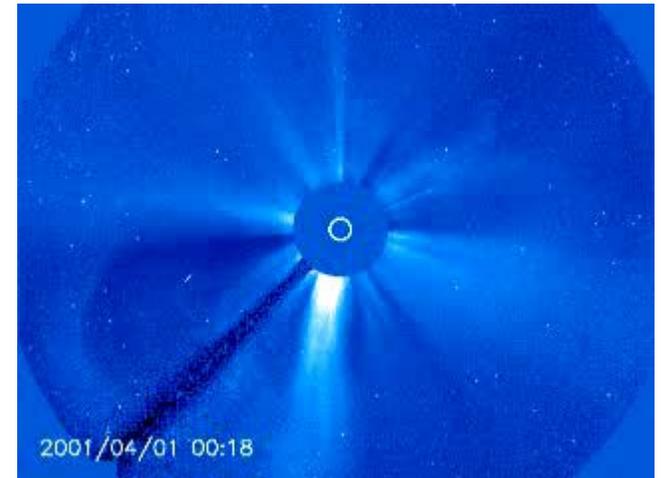
20000 metri: 13 $\mu\text{Sv/h}$

12000 metri: 5 $\mu\text{Sv/h}$

4000 metri: 0,2 $\mu\text{Sv/h}$

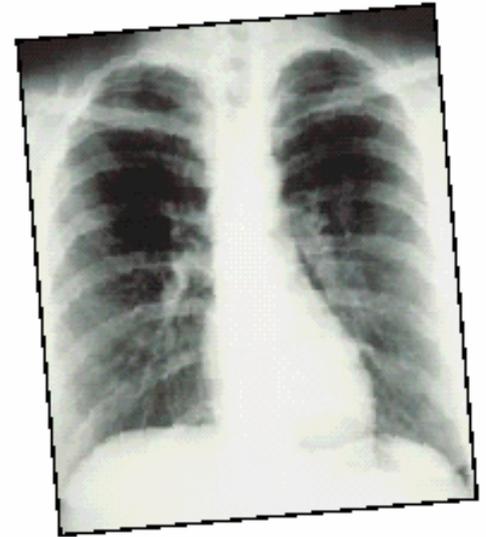
2000 metri: 0,1 $\mu\text{Sv/h}$

Livello del mare: 0,03 $\mu\text{Sv/h}$



Esposizione per indagini mediche

Tipo di esame	Dose efficace al paziente (mSv)
Cranio AP/PA	0.15
Torace PA	0.05
Addome AP	1.4
Rachide lombare	2.2
Pelvi	1.2
"pasto di bario"	3.8
Urografia	4.4



- Valori medi di dose nel Regno Unito per alcune tipologie di esami radiologici Review 1986 (NRPB-R2000)

Che dose riceviamo ogni anno?

Sorgente di radiazione	Dose annuale media su tutto il corpo (mSv)
Naturale:	
Cosmica	0.29
Terrestre	0.29
Radon	2
Interna (K-40, C-14, ecc.)	0.4
Artificiale:	
Raggi X per diagnostica	0.39
Medicina Nucleare	0.14
Prodotti di consumo	0.11
Altro (fallout, viaggi aerei, esposizioni lavorative, ecc.)	0.02
Media annua totale	3.64 mSv l'anno

≈ 82%

≈ 18%

Dati riferiti agli USA. Fonte NCRP(Report 93, 1997)

Radiosensibilità

Eventi fatali per 1 Sv di dose equivalente

Organo	Probabilità
Stomaco	1,1%
Colon	0,9%
Polmone	0,9%
Midollo osseo	0,5%
Esofago	0,3%
Vescica	0,3%
Mammella	0,2%
Fegato	0,2%
Tiroide	0,1%
Ovaie	0,1%
Rimanenti organi	0,5%
Corpo intero	5.0%

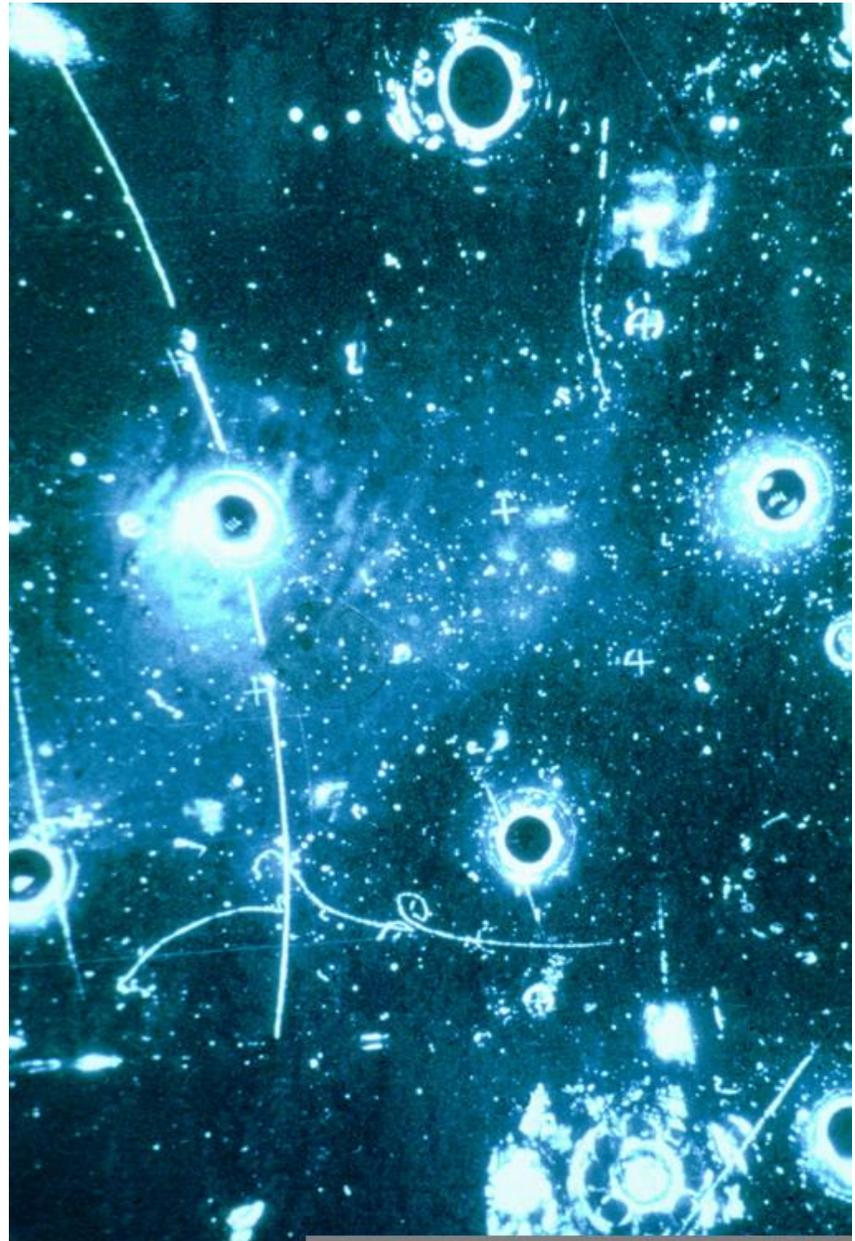
Tabella 4 Riduzione media della durata di vita associata a varie cause di tipo non lavorativo. (fonte Health Physics, 36-6, 1979 e 61-3, 1991)

Causa	Riduzione media della durata di vita (giorni)
Abuso di alcool	4000
Essere celibe, vedovo o divorziato	3500
Fumo (1 pacchetto di sigarette/giorno)	2250
Essere nubile, vedova o divorziata	1600
Essere sovrappeso (+ 20%)	1040
Incidenti con veicoli a motore	207
Alcool	130
Incidenti in casa	74
Fumo passivo	50
Esposizione lavorativa alle radiazioni (5 mSv/anno)	40
Cadute	28
Esposizione alle radiazioni di individui della popolazione (1 mSv/anno)	18
Esami RX-diagnostici	6
Caffè	6

Tabella 3 Riduzione media della durata di vita dovuta ad incidenti in diverse attività lavorative. (fonte Health Physics, 61-3, 1991)

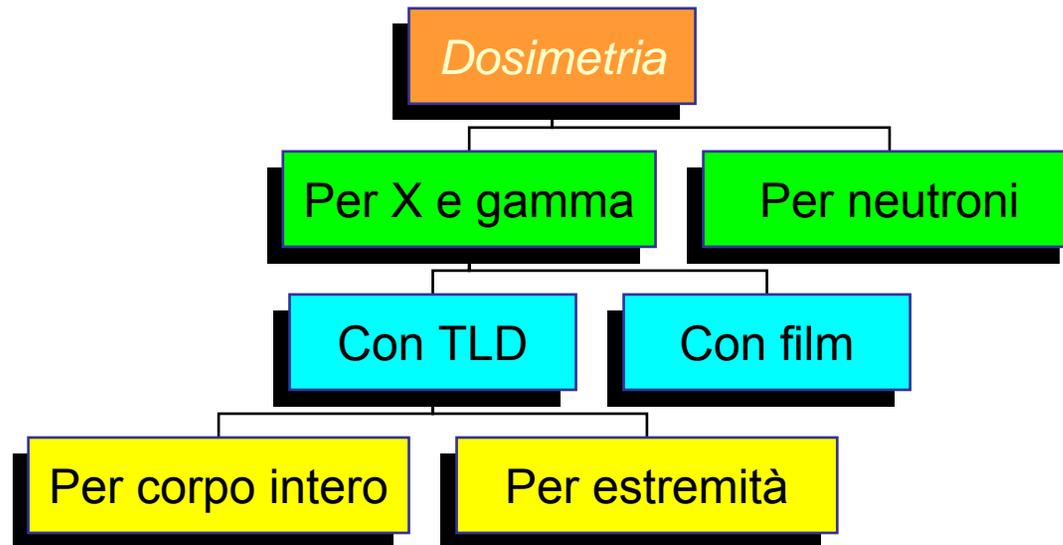
Attività lavorativa	Riduzione media della durata di vita (giorni)
Commercio	27
Industria manifatturiera	40
Servizi	27
Trasporti	160
Agricoltura	320
Costruzioni	227
Valore medio	60
Esposizione alle radiazioni (5 mSv/anno)	40

Secondo
attimo
di pausa



DOSIMETRIA DEL PERSONALE E AMBIENTALE

Dosimetria personale



È un mezzo di sorveglianza, non di protezione

Non assorbe le radiazioni, ma si limita a misurarle.



A cosa serve?

Il Servizio di Dosimetria Personale legge ogni mese tutti i dosimetri indossati dai lavoratori.

Se viene trovata una lettura inaspettata, vengono immediatamente avvertiti i responsabili della radioprotezione.

Sottrazione del fondo

- Ciascuno di noi, in ogni momento, è soggetto all'esposizione del fondo ambientale di radiazione. A Firenze sono circa 150 μSv ogni mese.
- Anche i dosimetri ricevono la radiazione di fondo, quindi un dosimetro, anche se tenuto in un cassetto a casa nostra, non darà mai una lettura nulla
- i dosimetri, però, essendo mezzi di sorveglianza, servono a misurare solo la dose ricevuta sul luogo di lavoro
- Il fondo quindi, essendo naturale, non è dovuto ad attività lavorativa, quindi il suo valore va sottratto dalla lettura di ciascun dosimetro

Per questa ragione il Servizio di Dosimetria tiene 20 dosimetri detti *testimoni*, che vengono tenuti lontano da ogni sorgente radioattiva, per misurare il fondo e sottrarlo dalla lettura di tutti gli altri dosimetri

Alcuni aspetti pratici

- La *soglia minima di rivelazione* per il nostro sistema dosimetrico è di $60 \mu\text{Gy}$
- È necessario che il dosimetro sia indossato in maniera corretta per poter valutare bene l'energia della radiazione incidente



Corretto utilizzo del dosimetro

- I dosimetri vengono letti scaldandoli: il calore infatti provoca l'emissione di luce dal TLD
- Per questa ragione non vanno mai esposti a sorgenti di calore ($>50^{\circ}\text{C}$) altrimenti perdono il segnale
- Vanno inoltre (ovviamente) lasciati lontani da sorgenti radiogene

Se un dosimetro viene intenzionalmente esposto ad una sorgente radiogena:

- Il Servizio di Dosimetria può rilevarlo, perché vi è una grossa differenza fra la lettura del dosimetro filtrato e quello non filtrato
- Il lavoratore commette reato perché si tratta di uso non corretto del dispositivo di sorveglianza, e può quindi andare incontro a sanzioni

Ma qual è la dose?

- Letture del nostro Servizio nel mese di maggio 2000

