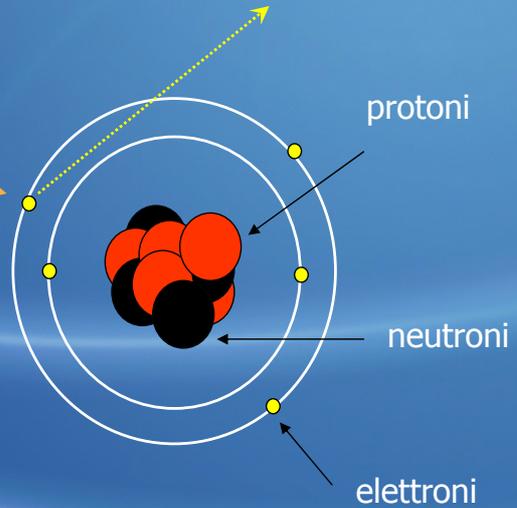


Radioattività ambientale



Si dice che una radiazione è ionizzante quando è in grado di produrre, direttamente o indirettamente, la ionizzazione degli atomi e delle molecole del mezzo attraversato.

radiazione ionizzante



Ionizzare costa energia ...

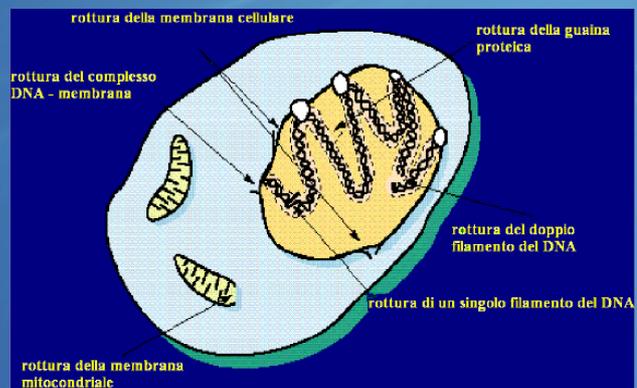
... quanta energia devo spendere per staccare un elettrone da un atomo ?

circa 10 eV

Unità di misura dell'energia: J su scale atomiche: eV 1 eV = 1.602 10⁻¹⁹ J

Usiamo la definizione di caloria per valutare quanta energia corrisponda a 10 eV

Dopo la ionizzazione, l'elettrone e lo ione possono interagire con le molecole d'acqua presenti nei tessuti e dare luogo alla formazione di RADICALI LIBERI



Il cariotipo di un soggetto esposto a radiazioni ionizzanti presenta più aberrazioni cromosomiche di quelle normalmente osservate in un soggetto non esposto.



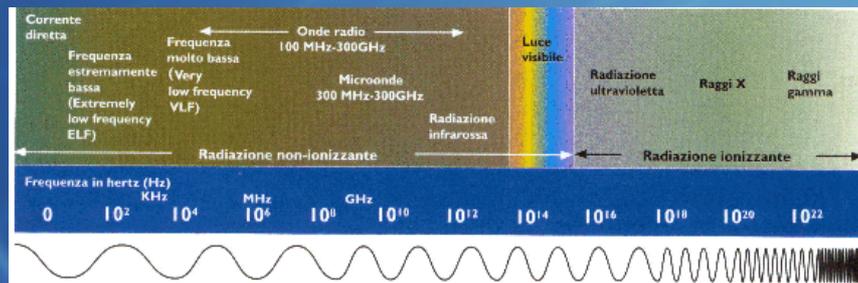
Danni genetici



Danni cellulari

Prima della irradiazione	Dopo la irradiazione	Dopo la riparazione	
		morfoloia	aberrazione
			Normale
			Anello più frammento
			Inversione
			Normale
			Dicentrico più frammenti
			Traslocazione

radiazioni elettromagnetiche



raggi/fotoni X e γ (gamma)

- si propagano nel vuoto con la velocità della luce, $c = 300.000.000 \text{ m/sec}$
- non hanno carica elettrica
- $\lambda \nu = c$ ($\lambda =$ lunghezza d'onda, $\nu =$ frequenza)
- Energia trasportata da ciascun fotone: $E = h \nu$ ($h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$)

radiazioni corpuscolari

particelle *leggere* elettricamente cariche:
elettroni, positroni
raggi cosmici

particelle *pesanti* elettricamente cariche:
protoni
particelle α (nuclei di atomi di He)



particelle *pesanti* elettricamente neutre:
neutroni

Energie (cinetiche) tipiche delle particelle (α o β) $\sim \text{keV} \div \text{MeV}$

massa neutrone (N) = massa protone (P) = $1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

massa elettrone = $9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

Sorgenti di radiazione

Tipo di emissione

Sorgenti naturali

Raggi cosmici
Radiazione terrestre di fondo (^{238}U , ^{222}Rn , ...)
Materiali da costruzione

Continua

Sorgenti derivanti da esperimenti nucleari/bombe atomiche
Scorie di produzione di energia in centrali nucleari

Sorgenti artificiali

Sorgenti (X, γ) per impiego medico
Apparecchiature radiogene

Quando in funzione

Sorgenti Radioattive

Tipologia di emissione

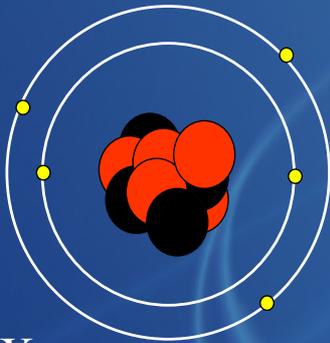
Attività della sorgente

Interazione con la materia (\rightarrow pericolosità)

Dose assorbita

Tipologia dei danni da radiazione

Rivelatori di radiazione (\rightarrow monitoraggio)



X

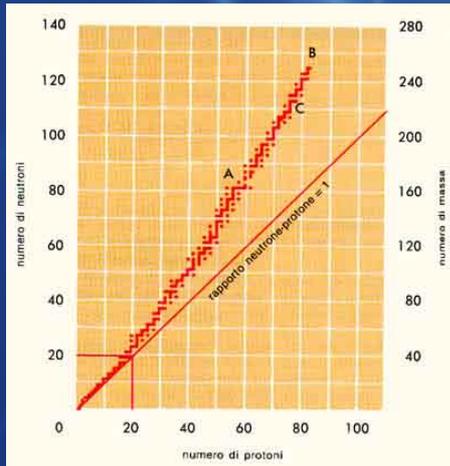
A numero di massa: numero di nucleoni (N & P)

Z numero atomico: numero di protoni (P)
→ numero di elettroni



Z : identifica la specie chimica

A : identifica il tipo di nucleo (A = Z + N)

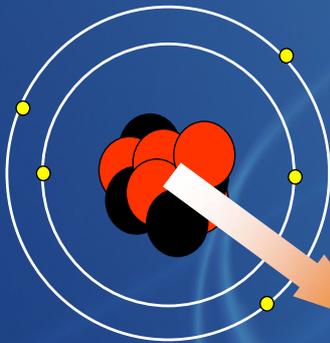


Isotopi: atomi aventi il medesimo Z ma diverso A



Alcuni isotopi naturali non sono energeticamente stabili; per raggiungere la stabilità essi tendono spontaneamente ad emettere radiazione (α , β o γ)

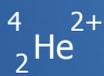
Tali isotopi si indicano con il termine di nuclei radioattivi o radionuclidi



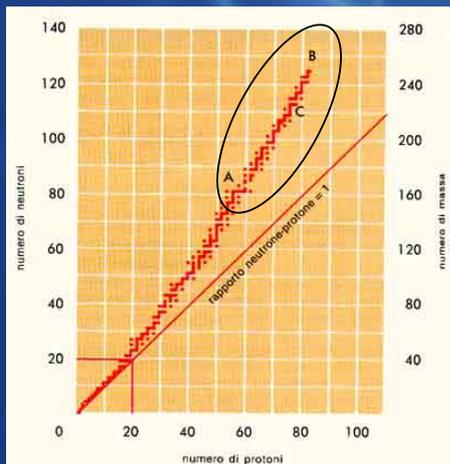
Decadimento α

$$A \rightarrow A - 4$$

$$Z \rightarrow Z - 2$$



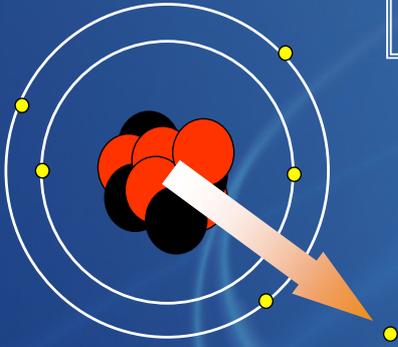
Particella pesante con 2 cariche positive



Cambiano le proprietà chimiche dell'atomo



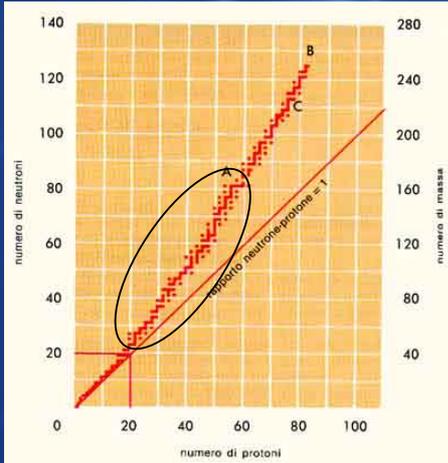
Decadimento β



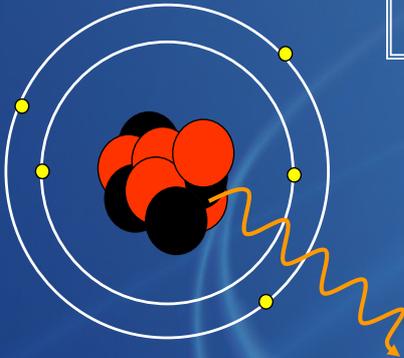
Particella leggera con 1 carica negativa



Cambiano le proprietà chimiche dell'atomo



Decadimento γ

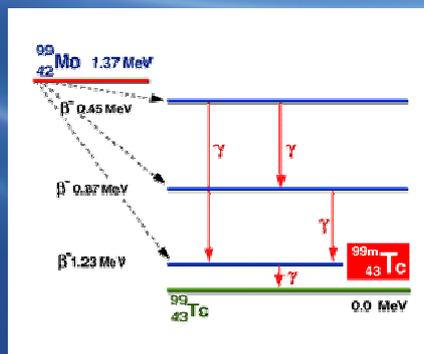
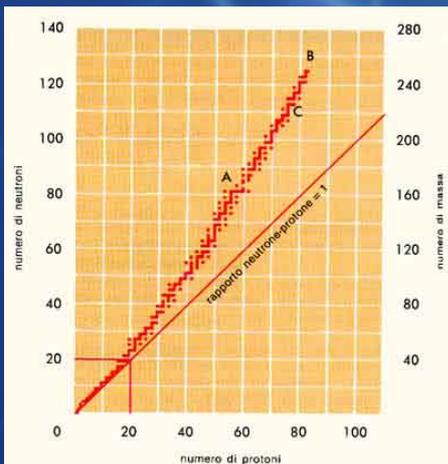


Un nucleo che si trova in uno stato eccitato può emettere uno o più fotoni di energia ben definita



NON cambiano le proprietà chimiche dell'atomo

Questo tipo di decadimento spesso segue un decadimento di tipo α o uno di tipo β



Sorgenti Radioattive

Tipologia di emissione

Attività della sorgente

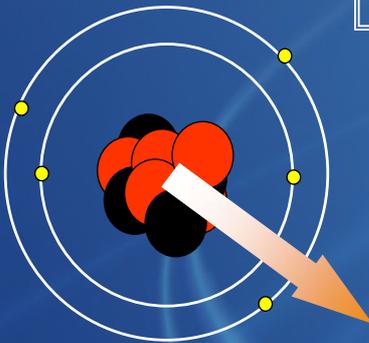
Interazione con la materia (→ pericolosità)

Dose assorbita

Tipologia dei danni da radiazione

Rivelatori di radiazione (→ monitoraggio)

Attività di una sorgente



A numero di atomi radioattivi che emettono radiazione in un secondo

Bq l'attività si misura in Bequerel; 1 Bq corrisponde ad una disintegrazione al secondo (S.I.)

Ci l'unità di misura precedentemente adottata per quantificare l'attività di una sorgente radioattiva è il Curie (Ci);

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

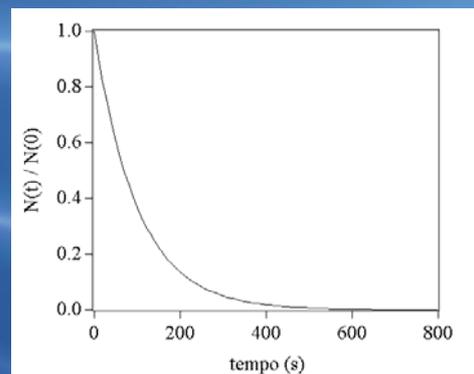
Il decadimento segue un andamento di tipo esponenziale con una costante di tempo che è specificata di una data specie atomica

$$N(t) = N_0 \exp(-t / \tau)$$

$$-\frac{\Delta N}{\Delta t} = A = -\frac{dN}{dt} = \frac{N_0}{\tau} \exp(-t / \tau) = \frac{N(t)}{\tau}$$

τ : tempo di decadimento

$\tau_{1/2}$: tempo di dimezzamento $\tau_{1/2} = 0.693 \tau$

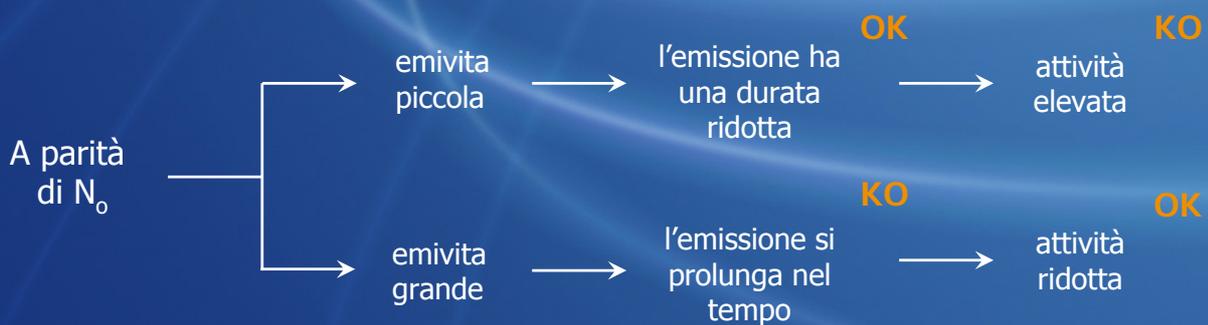


Attività di una sorgente

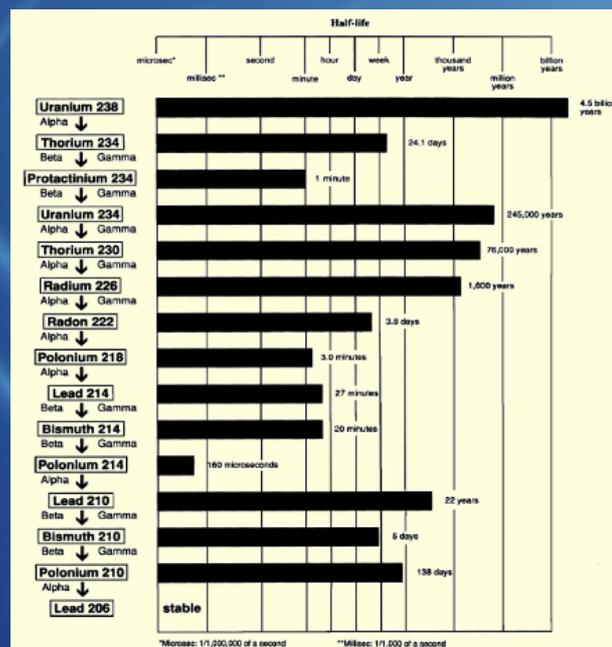
Isotopo	Emivita
^{99}Tc	0.25 g
^{131}I	8 g
^{125}I	60 g
^{60}Co	1923 g
^{137}Cs	30 a
^{226}Ra	$1.6 \cdot 10^3$ a
^{238}U	$4.5 \cdot 10^9$ a



OK / KO ?



La famiglia radioattiva avente come capostipite U^{238}



... un richiamo agli indicatori

Causa primaria →

SCHEDA INDICATORE	PARTE 1 – DEFINIZIONE
TITOLO	Quantità di combustibile nucleare impiegato.
N.	AGF-24014
TEMA	T24
DPSIR	Driving force
DESCRIZIONE DELL'INDICATORE	Quantità di combustibile nucleare utilizzato da una centrale nucleare per produzione di energia nel tempo di riferimento di un anno.
METODI DI MISURA	Dati forniti dall'ente proprietario o dal gestore dell'impianto.
SCOPO DELL'INDICATORE	Valutazione del "carico di lavoro" di una centrale nucleare.
INDICATORI COLLEGATI	Energia prodotta.
UNITÀ DI MISURA	t / anno.
LIVELLO GEOGRAFICO DI DETTAGLIO	Nazionale
POSSIBILE RAPPRESENTAZIONE	Grafica (istogramma), raffigurante la quantità di combustibile utilizzata nel corso degli anni.
DOCUMENTO DI RIFERIMENTO	ENEA – Rapporto annuale 1982 sulla radioattività ambientale in Italia – vol. II.
RIFERIMENTO NORMATIVO	
LIMITE DELL'INDICATORE	È legato alla tipologia del combustibile (arricchimento), a sua volta dipendente dalla tipologia dell'impianto.
ESPRESSIONE ALTERNATIVA DELL'INDICATORE	
PAROLE CHIAVE	Combustibile nucleare.

SCHEDA INDICATORE	PARTE 1 – DEFINIZIONE
TITOLO	Attività di radioisotopi artificiali rilasciati in acqua.
N.	AGF-24024
TEMA	T24
DPSIR	Pressure
DESCRIZIONE DELL'INDICATORE	Quantità di rifiuti radioattivi liquidi rilasciati da attività produttive nel tempo di riferimento di un anno.
METODI DI MISURA	Norme UNI 10374, 10136; EML Procedures Manual – HASL 300
SCOPO DELL'INDICATORE	Monitoraggio dell'emissione inquinante sia essa deliberata, sia essa accidentale.
INDICATORI COLLEGATI	
UNITÀ DI MISURA	Bq / anno
LIVELLO GEOGRAFICO DI DETTAGLIO	Locale
POSSIBILE RAPPRESENTAZIONE	Grafica (istogramma), raffigurante l'attività di radioisotopi rilasciati in acqua nel corso degli anni.
DOCUMENTO DI RIFERIMENTO	ENEA – Rapporti annuali sulla radioattività ambientale in Italia.
RIFERIMENTO NORMATIVO	D.L. 17 marzo 1995, n. 230
LIMITE DELL'INDICATORE	
ESPRESSIONE ALTERNATIVA DELL'INDICATORE	
PAROLE CHIAVE	Rifiuto radioattivo liquido

← Pressione ambientale

Sorgenti Radioattive

Tipologia di emissione

Attività della sorgente

Interazione con la materia (→ pericolosità)

Dose assorbita

Tipologia dei danni da radiazione

Rivelatori di radiazione (→ monitoraggio)

Radiazione α

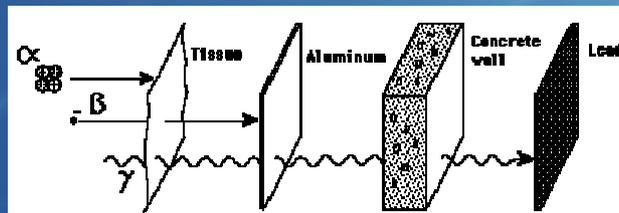
- radiazione composta da particelle pesanti con 2 cariche positive
 → interagiscono fortemente con la materia e perdono rapidamente la loro energia
 → elevata capacità di ionizzazione / ridotta penetrazione

Radiazione β

- radiazione composta da particelle leggere con 1 carica negativa/positiva
 → interagiscono moderatamente con la materia e perdono più lentamente la loro energia
 → moderata capacità di ionizzazione / modesta penetrazione

Radiazione γ

- radiazione composta da onde elettromagnetiche (priva di carica elettrica)
 → interazione ridotta con la materia / la perdita di energia si distribuisce su lunghe distanze
 → ridotta capacità di ionizzazione / elevato grado di penetrazione



absorber	density	alpha range	comments
air (STP)	1.2 mg/cm ³	3.7 cm	
paper (20lb)	0.89 g/cm ³	53 μ m	one sheet = 89 μ m
water (soft tissue)	1.0 g/cm ³	45 μ m	will not penetrate skin

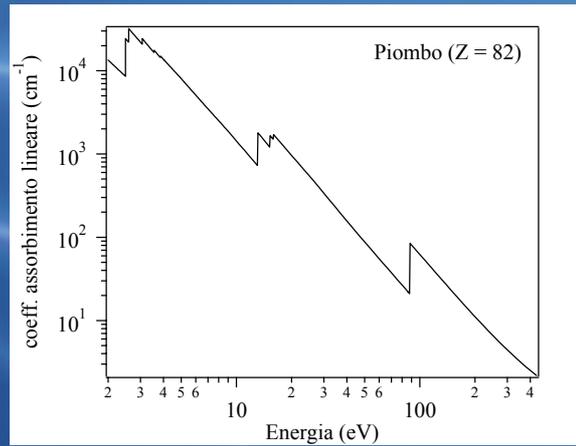
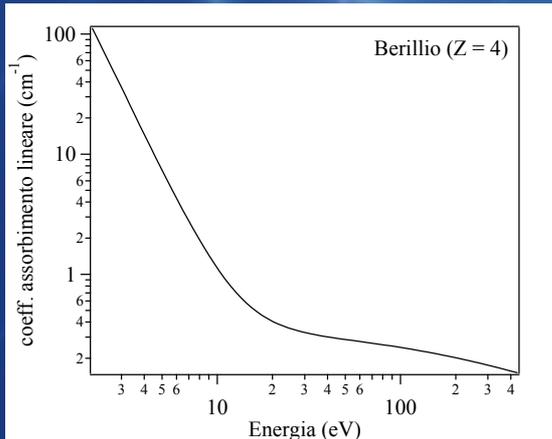
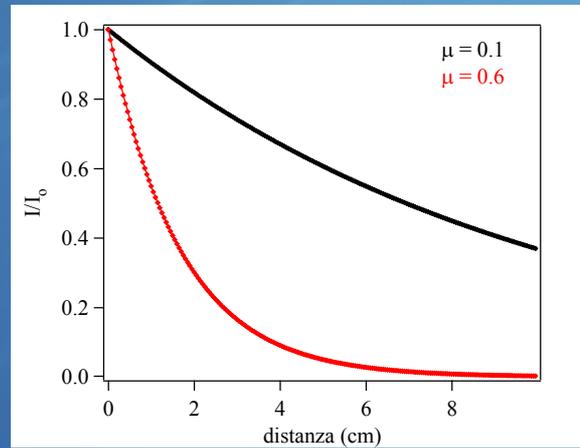
Traiettoria rettilinea / emissione monocromatica

absorber material	density	maximum beta range ⁵	
		(2.3 MeV)	(1.1 MeV)
air	1.2 mg/cm ³	8.8 m	3.8 m
water (soft tissue)	1.0 g/cm ³	11 mm	4.6 mm
plastic (acrylic)	1.2	9.6	4.0
glass (Pyrex)	2.2	5.6	2.2
aluminum	2.7	4.2	2.0
copper	8.9	1.2	0.5
lead	11.3	1.0	0.4

Traiettoria non rettilinea accompagnata da emissione X
 emissione non monocromatica

$$I = I_0 \exp(-x\mu(E))$$

μ : coefficiente di assorbimento lineare
il suo valore dipende dall'energia



Sorgenti Radioattive

Tipologia di emissione

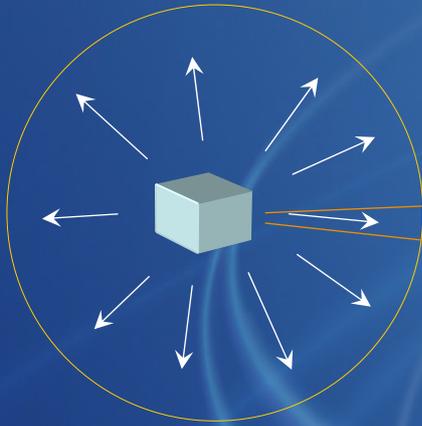
Attività della sorgente

Interazione con la materia (→ pericolosità)

Dose assorbita

Tipologia dei danni da radiazione

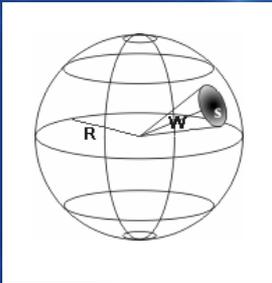
Rivelatori di radiazione (→ monitoraggio)



Il numero di particelle emesse, in tutte le direzioni, dalla sorgente rappresenta l'attività della sorgente stessa e si misura in Bq.

Il numero di particelle ionizzanti che colpiscono il materiale è dato da:

$$n = A \frac{\Omega}{4\pi} \quad (\text{si misura in Bq})$$



angolo solido $\Omega = \frac{S}{R^2}$

Ciascuna particella trasporta un'energia pari a E [eV]; quelle che vengono assorbite dal materiale gli cedono la propria energia dando luogo a processi di ionizzazione.

L'energia trasferita, per unità di massa, viene identificata con il termine DOSE.

1 Gray = 1 Gy = 1 Joule / kg (in passato : 1 rad = 0.01 Gy)

Attenzione al tempo di esposizione !!

Il concetto di DOSE fa riferimento al quantitativo di energia depositata, non al danno indotto dalla radiazioni ionizzante.

Per quantificare il danno, ed avere una grandezza il cui valore sia effettivamente proporzionale al danno biologico, si introduce il concetto di DOSE EQUIVALENTE (DE)

$$\text{DOSE EQUIVALENTE} = \text{DOSE} \times \text{fattore di qualità (Q)}$$

$$1 \text{ Sievert} = 1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy} \times Q \quad (\text{in passato } 1 \text{ rem} = 1 \text{ rad} \times Q)$$

Il Sv tiene conto del fatto che, a parità di energia depositata, il danno indotto sui tessuti dipende dal tipo di radiazione considerata.

Fotoni X e γ	$\forall E$	Q = 1
Elettroni	$\forall E$	Q = 1
Particelle α	$\forall E$	Q = 20
Neutroni	E < 10 keV	Q = 5
	10 keV < E < 100 keV	Q = 10
	100 keV < E < 2 MeV	Q = 20
	2 MeV < E < 20 MeV	Q = 10
	E > 20 MeV	Q = 5

A parità di energia assorbita e di danno riportato, **ciascun tessuto possiede, in generale, una diversa capacità di reagire al danno subito**. Per tenere conto di questa caratteristica, sono stati introdotti dei coefficienti utili a determinare, per ciascun tessuto, un parametro il cui valore sia proporzionale al danno indotto sul tessuto stesso dalla radiazione ionizzante.

$$\text{DOSE EFFICACE} \rightarrow \sum_{\text{tessuti irradiati}} DE_i N_i$$

Somma delle dosi equivalenti dei singoli tessuti irraggiati, ciascuna pesata con un coefficiente tipico del tessuto considerato

Gonadi: $N = 0.20$
 Midollo osseo, colon, polmone, stomaco: $N = 0.12$
 Vescica, cervello, seno, rene, fegato, muscoli: $N = 0.05$
 esofago, pancreas, intestino, milza, tiroide, utero: $N = 0.05$
 Osso, pelle: $N = 0.01$

Virus, batteri, protozoi: $N \approx 0.03 - 0.0003$
 Insetti: $N \approx 0.1 - 0.002$
 Molluschi: $N \approx 0.06 - 0.006$
 Piante: $N \approx 2 - 0.02$
 Pesci: $N \approx 0.75 - 0.03$
 Anfibi: $N \approx 0.4 - 0.14$
 Rettili: $N \approx 1 - 0.075$
 Uccelli: $N \approx 0.6 - 0.15$
 Umani: $N = 1$

Le cellule dotate di maggiore attività proliferativa e minor grado di differenziazione risultano più sensibili all'effetto delle radiazioni ionizzanti.

... più un organismo è complicato, più si danneggia facilmente

Proviamo a fare un po' di conti ...



attività sorgente	$1 \cdot 10^{10}$ Bq
d	2 m
tempo di esposizione	20 min
energia dei fotoni	1 MeV
zone colpite	mano (10%) polmoni (30%)

(mSv)

0.001-0.01	Hourly cosmic dose on high-altitude flight, depends on position and solar sunspot phase.
0.01	Annual USA dose from nuclear fuel and nuclear power plants
0.01	Daily natural background radiation, including radon
0.1	Average annual USA dose from consumer products
0.15	USA EPA cleanup standard
0.25	USA NRC cleanup standard for individual sites/sources
0.27	Annual USA dose from natural cosmic radiation (0.16 coastal plain, 0.63 eastern Rocky Mountains)
0.28	Annual USA dose from natural terrestrial sources
0.39	Global level of human internal radiation due to radioactive potassium
0.46	Estimated largest off-site dose possible from March 28, 1979 Three Mile Island accident
0.66	Average annual USA dose from human-made sources
2	USA average medical and natural background
2.2	Average dose from upper gastrointestinal diagnostic X-ray series
3	USA average dose from all natural sources
3.66	USA average from all sources, including medical diagnostic radiation doses
5	USA NRC occupational limit for minors (10% of adult limit)
100	USA EPA acute dose level estimated to increase cancer risk 0.8%
120	30-year exposure, Ural mountains, lower cancer mortality rate
150	USA NRC annual occupational eye lens exposure limit
175	Guarapari, Brazil annual natural radiation sources
250	USA EPA voluntary maximum dose for emergency non-life-saving work
260	Ramsar, Iran, annual natural background peak dose
500	30-year exposure, Ural mountains
750	USA EPA voluntary maximum dose for emergency life-saving work
500-1000	Low-level radiation sickness due to short-term exposure World War II nuclear bomb victims

Sorgenti Radioattive

Tipologia di emissione

Attività della sorgente

Interazione con la materia (→ pericolosità)

Dose assorbita

Tipologia dei danni da radiazione

Rivelatori di radiazione (→ monitoraggio)

Effetti delle radiazioni ionizzanti

Effetti deterministici

Sono caratterizzati dalla presenza di una **dose-soglia**. Superata la dose-soglia, **la gravità del danno** aumenta all'aumentare della dose di radiazione. Il tempo di latenza è generalmente breve.

L'esposizione alla radiazione è di tipo acuto

Effetti stocastici

Non esiste una dose-soglia. La **probabilità** di contrarre patologie causate dall'esposizione alla radiazione aumenta in modo proporzionale alla dose assorbita. Il tempo di latenza può essere lungo.

L'esposizione alla radiazione è di tipo cronico

Le differenze tra i due tipi di effetti sono legate a:

- * **attività** delle sorgenti coinvolte
- * **TEMPI DI ESPOSIZIONE**

Effetti delle radiazioni ionizzanti / Danni di tipo **deterministico**

Biological Effects of Short Term Radiation on Humans	
Dose (Rad)	Effect
0-20	No detectable effects
20-100	Measurable transient blood changes. Temporary decrease in white blood cell count.
100-200	Acute radiation sickness - nausea, vomiting, longer-term decrease in white blood cells.
200-300	Vomiting, diarrhea, loss of appetite, listlessness, death in some cases.
300-600	Vomiting, diarrhea, hemorrhaging, deaths occurring in 50% of cases at 350 rad or above without medical treatment.
Above 600	Eventual death in almost all cases

Le diverse strutture dell'organismo hanno una diversa sensibilità all'esposizione. Nel determinarsi della lesione definitiva, contano molto i processi riparativi.

Le cellule dotate di maggiore attività proliferativa e minor grado di differenziazione risultano più sensibili all'effetto delle radiazioni ionizzanti.

Dagli studi epidemiologici non si è ottenuta prova del fatto che esposizioni acute inducano mutazioni genetiche sui figli

Sindrome del Sistema Nervoso Centrale: conseguente all'aumento di permeabilità capillare a carico dell'encefalo e conseguente edema cerebrale; si verifica per dosi molto alte; si hanno entro breve tempo convulsioni e coma e morte; anche se l'individuo irradiato è sottoposto a cure e resta in vita durante questa fase, muore poi per altre sindromi

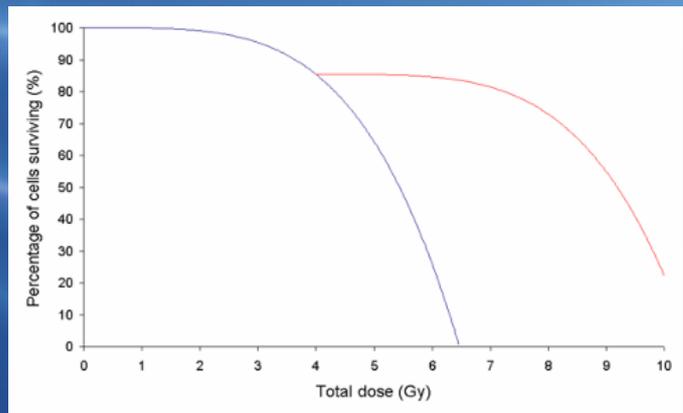
Sindrome dell'Apparato Gastroenterico: conseguente alla distruzione della mucosa intestinale; si ha perdita (con vomito e diarrea) di acqua, sali minerali, proteine e di sangue; viene persa la funzione di barriera della mucosa ed il passaggio di batteri in circolo; l'individuo di solito muore entro una o due settimane per disidratazione, blocco renale, ipoproteinemia, anemia e sepsi.

Sindrome del Midollo Osseo Emopoietico: conseguente alla distruzione delle cellule staminali del midollo emopoietico (progenitori delle linee delle cellule bianche, delle piastrine, delle cellule rosse); se la dose non è stata elevata e vengono praticate cure adeguate (emoderivati, fattori di crescita, allotrapianto di midollo), l'individuo può sopravvivere. Rimane comunque a rischio elevatissimo per eventi stocastici

Lethal radiation doses (Gy)

Organism	Lethal dose	LD ₅₀	LD ₁₀₀	Class/kingdom
Dog		3.5 (LD _{50/30 days})		Mammals
Human	4-10	4.5	10 ⁴¹	Mammals
Mouse	4.5-12	8.6-9		Mammals
Rabbit		8 (LD _{50/30 days})		Mammals
Tortoise		15 (LD _{50/30 days})		Reptile
Goldfish		20 (LD _{50/30 days})		Fish
Escherichia coli	60		60	Bacteria
Fruit fly	640			Insects
Amoeba		1000 (LD _{50/30 days})		-
Parasitoid wasp	1800			Insects
Deinococcus radiodurans	15000			Bacteria

Esempio di **radioresistenza**: percentuale di cellule che sopravvivono alla dose indicata in Gy. La curva rossa indica il risultato ottenuto interrompendo l'esposizione a 4 Gy e riprendendola poi dopo un tempo d'attesa.



<http://en.wikipedia.org/>

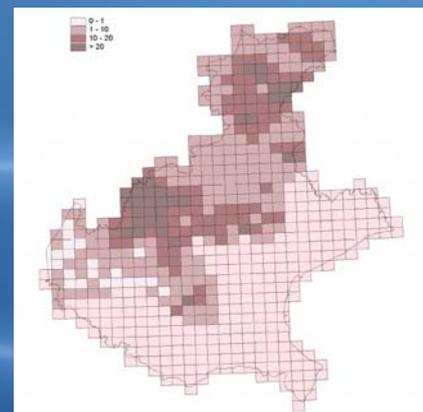
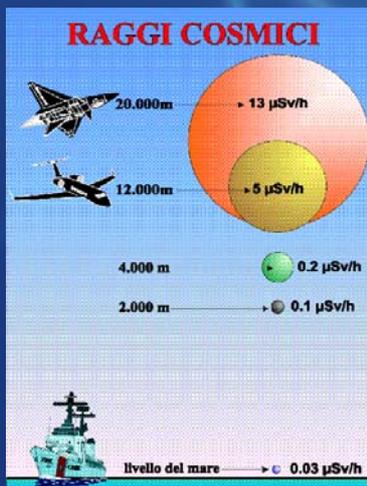
Effetti delle radiazioni ionizzanti / Danni di tipo **stocastico**

L'esposizione aumenta il rischio, ma le patologie sono sempre le stesse (leucemie, linfomi, tumori solidi)

Latenza per le leucemie : da 1 a 25 anni (picco dopo 5 anni dalla irradiazione), con notevole riduzione del rischio dopo tale periodo. Per gli altri tumori solidi il rischio comincia dopo 5 anni e gradualmente aumenta dopo 10 anni, mantenendosi elevato per tutta la durata della vita.

Le radiazioni ionizzanti hanno azione sia sulla iniziazione che sulla promozione delle neoplasie (attivazione di proto-oncogeni, inibizione di geni soppressori, induzione di specifiche mutazioni)

Il limite (seguendo un criterio di tipo cautelativo) di dose efficace è stabilito in **1 mSv per anno solare**. Limiti maggiori di dose equivalente sono stabiliti per esposizione parziale, relativa a particolari organi e tessuti.



Il 50 % dell'esposizione da fonti naturali deriva da radon e toron (gas)

Causa	Riduzione media della vita (giorni)
Abuso di alcool	4000
Essere celibe, vedovo o divorziato	3500
Fumo (1 pacchetto al 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 (5 mSv/anno)	40
Cadute	28
Esposizione alle radiazioni di individui della popolazione (1 mSv/anno)	18
Esami RX-diagnostici	6
Caffè	6

Sorgenti Radioattive

Tipologia di emissione

Attività della sorgente

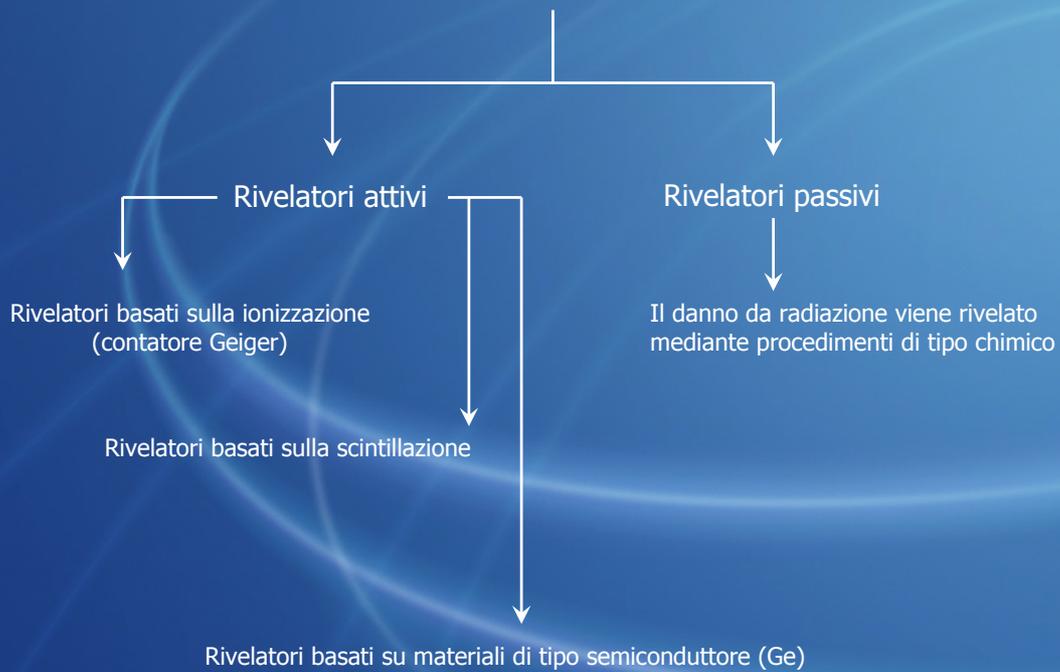
Interazione con la materia (→ pericolosità)

Dose assorbita

Tipologia dei danni da radiazione

Rivelatori di radiazione (→ monitoraggio)

Strumenti utilizzati per la rivelazione di radiazioni ionizzanti



Caratteristiche di un rivelatore

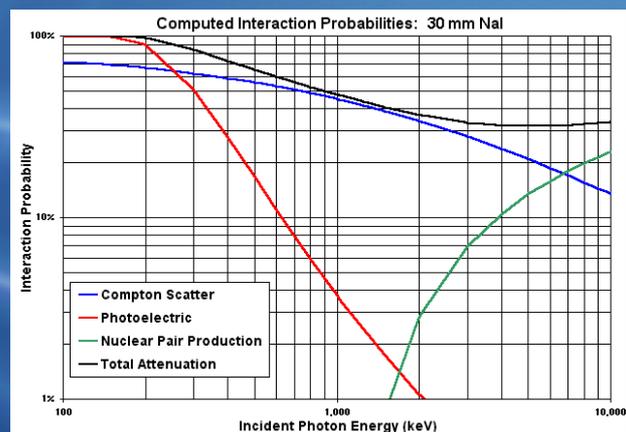
Sensibilità (al tipo di radiazione ed ad una ben determinata energia)

Risoluzione : capacità di distinguere diverse energie

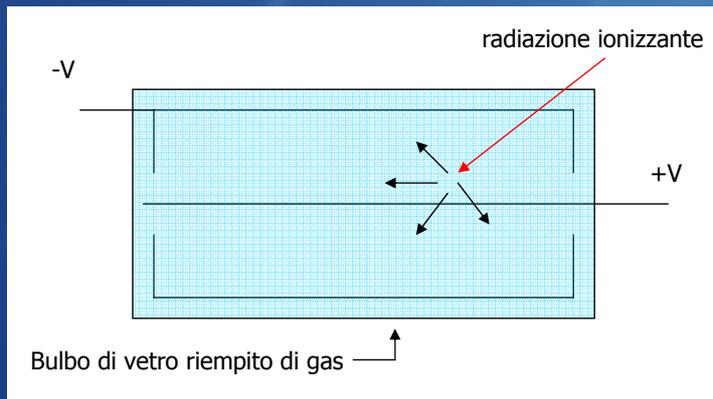
Efficienza intrinseca: rapporto tra il numero di particelle rilevate ed il numero totale di particelle incidenti

$$\varepsilon_i = \frac{N_R}{N_I}$$

Può dipendere dall'energia !



Contatore Geiger



Permette di individuare il passaggio della radiazione ionizzante all'interno della zona di misura

NON fornisce indicazioni relative all'energia trasportata dalla radiazione ionizzante

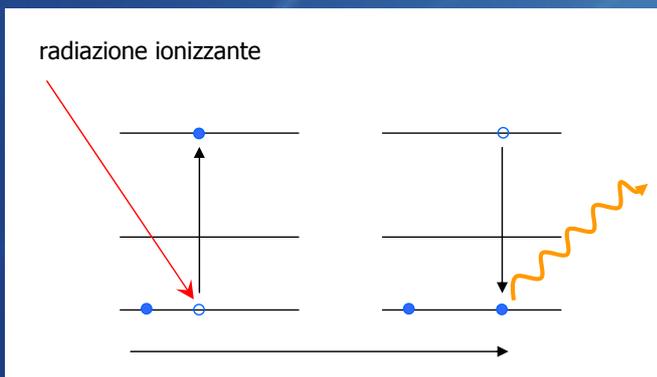
(*) radiazione α radiazione β radiazione γ



aumenta la sensibilità

(*) sotto quali condizioni può essere rivelata mediante un contatore Geiger?

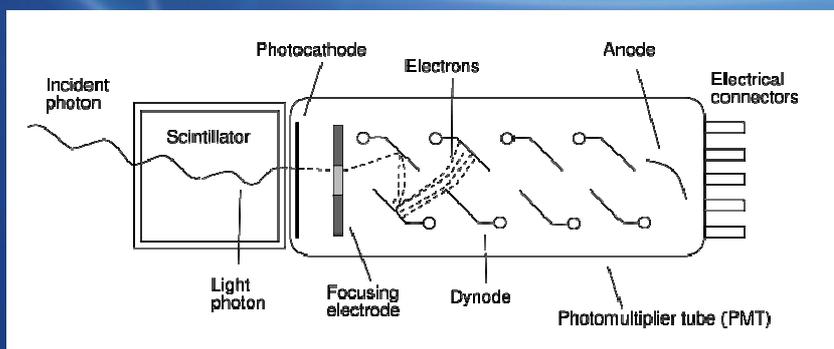
Scintillatore



Permette di individuare il passaggio della radiazione ionizzante all'interno della zona di misura e fornisce indicazioni sull'energia della radiazione stessa

Materiali solidi, possiedono tempi di risposta elevati (~ 250 ns) / hanno buona risoluzione. Possiedono un elevato *stopping power*, sono adatti alla rivelazione di radiazione X, γ e di β veloci.

Materiali plastici o liquidi; possiedono piccoli tempi di risposta (\sim ns), sono facili da lavorare e non hanno bisogno di protezioni particolari. Basso *stopping power*; sono adatti alla rivelazione di particelle α , β e γ .



Rivelatori di tipo chimico



CR-39: permette di individuare il passaggio della radiazione ionizzante all'interno della zona di misura e NON fornisce indicazioni né sull'energia della radiazione stessa né sull'istante in cui la radiazione ha attraversato il materiale.

Di norma questo tipo di rivelatori vengono utilizzati per:
monitoraggi che richiedono tempi di misura piuttosto lunghi (mesi)
rilevare particelle massicce (protoni, α) → utili per il monitoraggio di gas radon e toron (α emettitori)