



UNIVERSITÀ
DEL SALENTO



MODALITÀ DI RILEVAZIONE DI SORGENTI ORFANE DI RADIONUCLIDI TRAMITE PORTALI E MONITOR PORTATILI

A cura di:

Dr. Manuel Fernández

Esperto Qualificato di Radioprotezione di 2° grado
Capo Area Laboratori, Musei e Servizi Tecnici del
Dipartimento di Matematica e Fisica "Ennio De Giorgi"

Indice

- Elementi di base delle radiazioni ionizzanti: Irraggiamento e contaminazione
- Effetti delle radiazioni sull'uomo e principi di protezione
- Tipologie e caratteristiche delle sorgenti di radiazioni
- Sorgenti orfane
- Unità di misura della radioprotezione
- Modalità di rilevazione delle sorgenti tramite portali e monitor portatili
- Norme di sicurezza e comportamentali
- Rivelatori di radiazioni

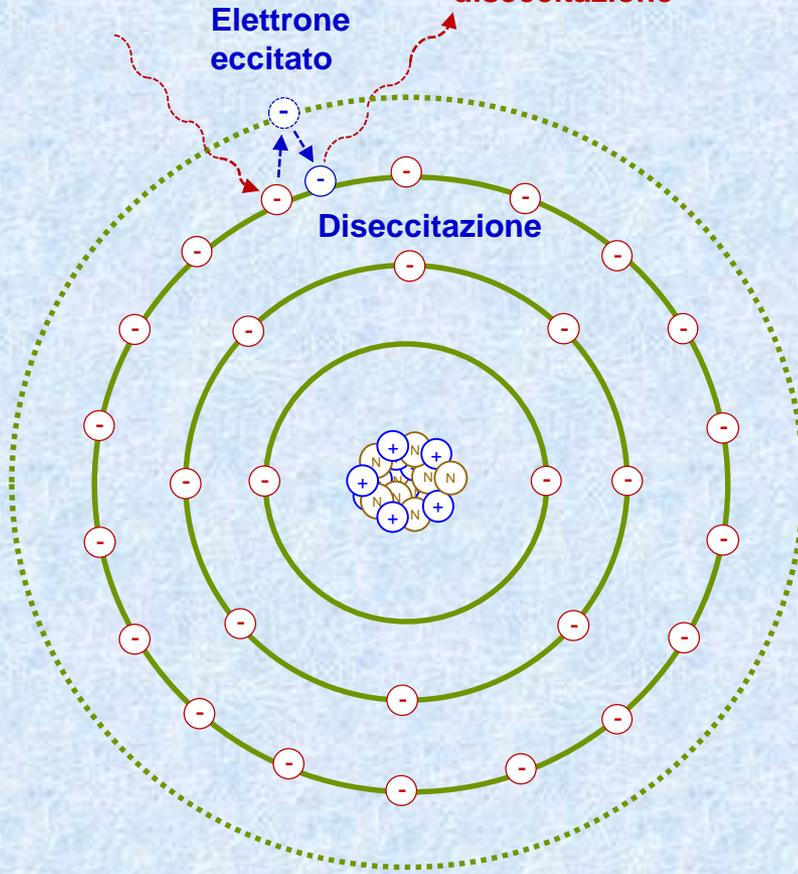
Interazione delle radiazioni con la materia: Radiazioni ionizzanti e non ionizzanti

Fotone incidente
'poco energetico'

Radiazione di
diseccitazione

Elettrone
eccitato

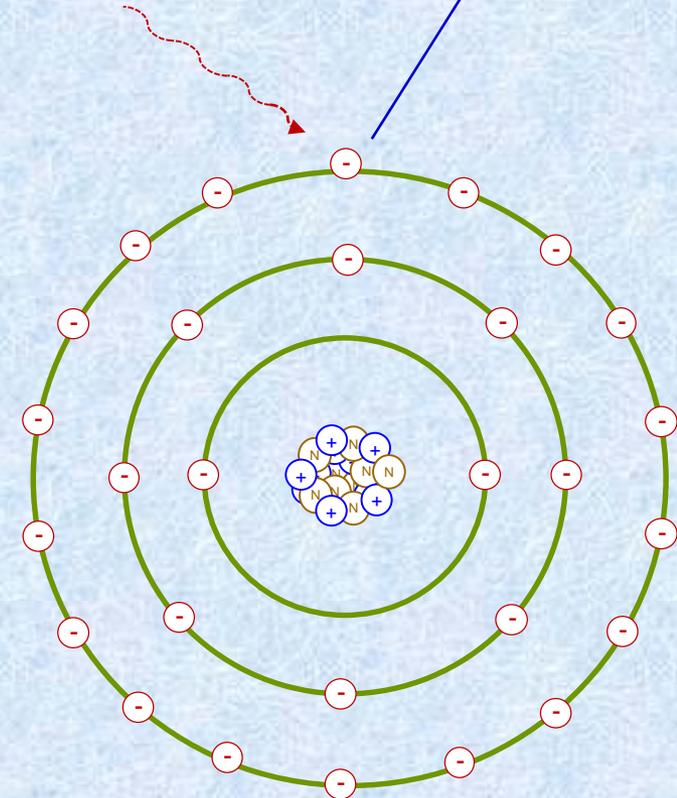
Diseccitazione



Eccitazione dell'elettrone (senza ionizzazione) seguita da **diseccitazione**

Fotone incidente
'molto energetico'

Fotoelettrone



Ionizzazione dell'atomo con **assorbimento** di radiazione **X** oppure **ultravioletta (UV)**

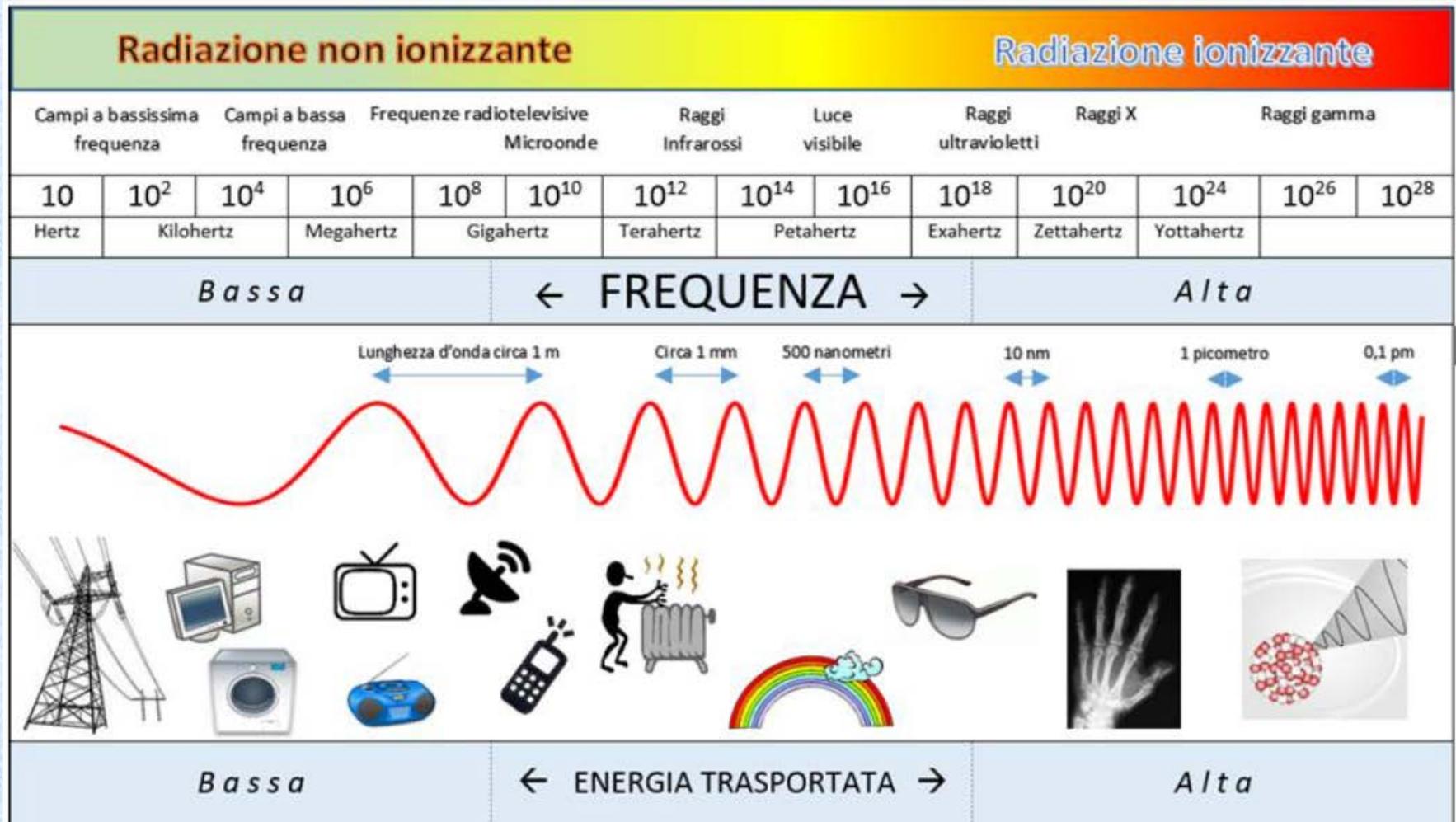
Spettro elettromagnetico

Campi statici

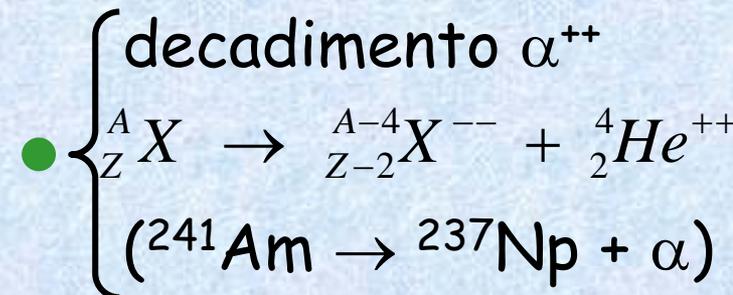
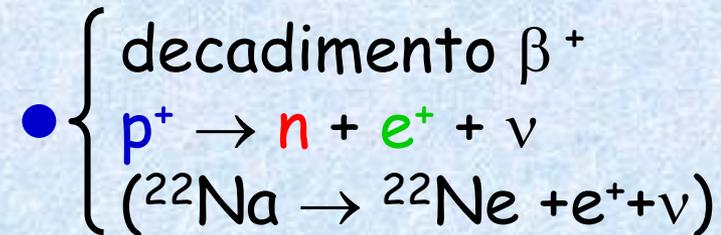
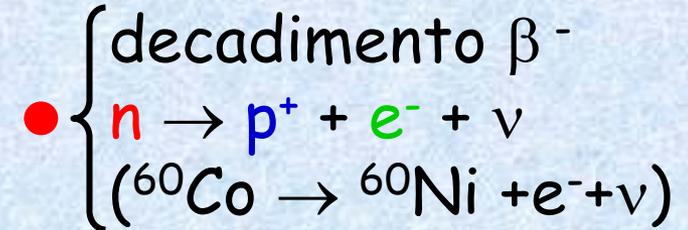
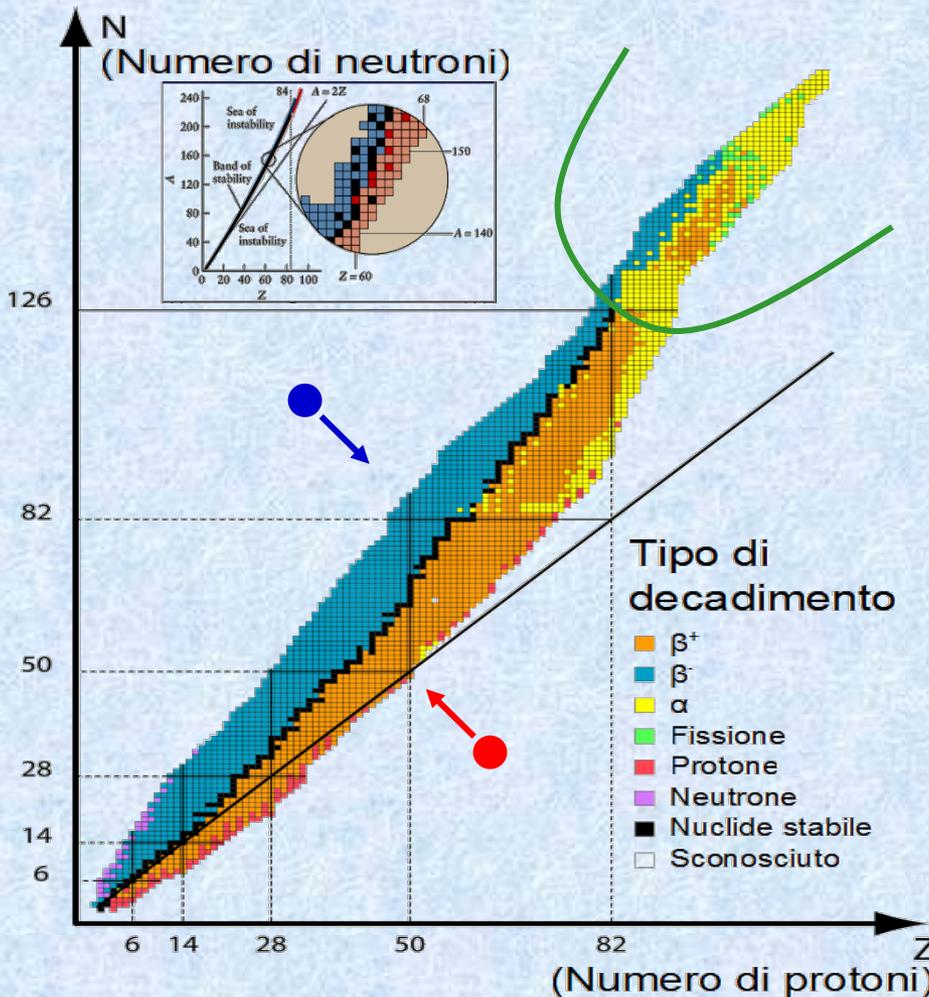
Campi elettromagnetici

Radiazioni ottiche

$$E = h\nu = hc / \lambda$$



Curva di stabilità dei nuclei



Tipologie di radiazioni ionizzanti: riassunto e classificazione

Riassunto:

- Raggi X : Fotoni dovuti a transizioni elettroniche
- Raggi γ : Fotoni dovuti a transizioni nucleari
- Neutroni (N)
- Protoni (p^+)
- Particelle α^{++} : Nuclei di elio (He^{++})
- Particelle β e β^+ : Elettroni o positroni (elettroni con carica positiva).

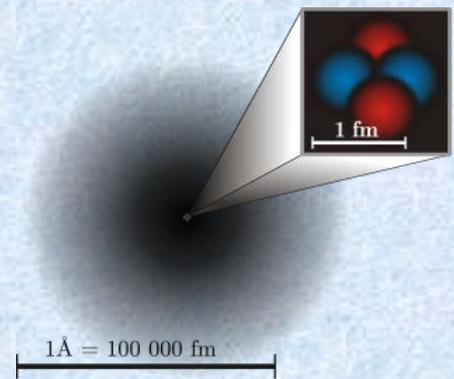
**Criterio di classificazione ai fini radiologici per la salute:
massa, densità, tipologia, ...???**

**Sulla base
della carica**

- p^+ , α^{++} e β^+ hanno carica positiva
- β^- hanno carica negativa
- X , γ e N sono privi di carica

Perché ?

Radiazioni direttamente ed indirettamente ionizzanti



Dimensioni dell'atomo \gg Dimensioni del nucleo
L'atomo è sostanzialmente vuoto!

Forze nucleari: { Molto intense a dimensioni nucleari
Trascurabili a dimensioni atomiche

Forze elettromagnetiche: { Meno intense a dimensioni nucleari
Le più intense a dimensioni atomiche

Particelle cariche (p^+ , α^{++} , β^+ , β^-):

- Interagiscono appena vengono generate
 - Cedono energia in più processi graduali
- } \Rightarrow direttamente ionizzanti

Neutroni:

- Interagiscono a distanza (solo forze nucleari)
 - Cedono energia in unico processo
- } \Rightarrow indirettamente ionizzanti

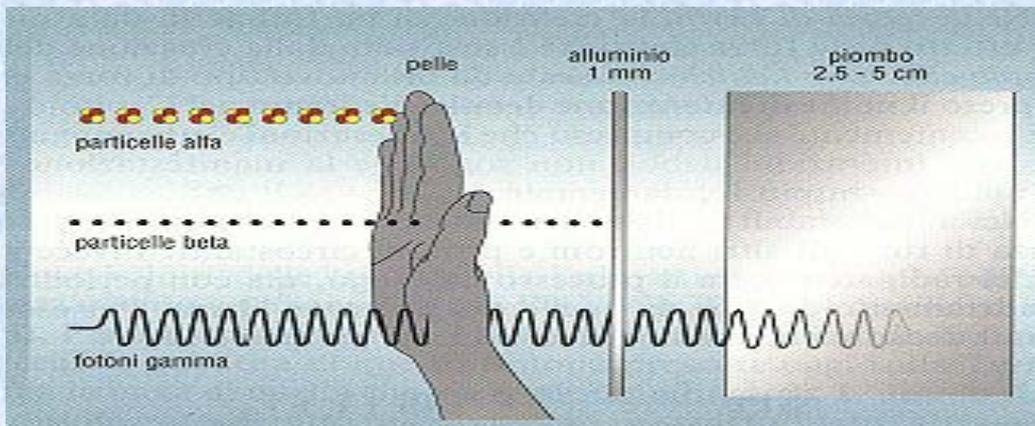
Fotoni (X , γ):

- Interagiscono sostanzialmente a distanza
 - Cedono energia in unico processo
- } \Rightarrow indirettamente ionizzanti

Ionizzazione diretta ed indiretta

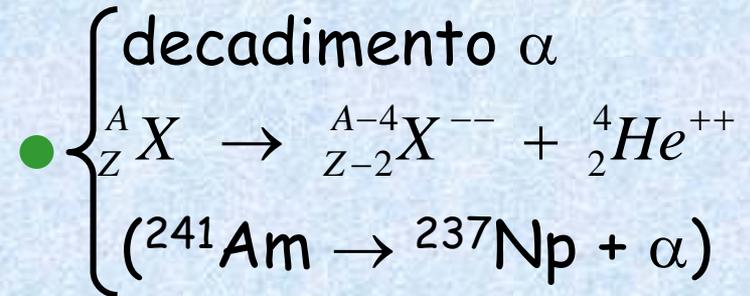
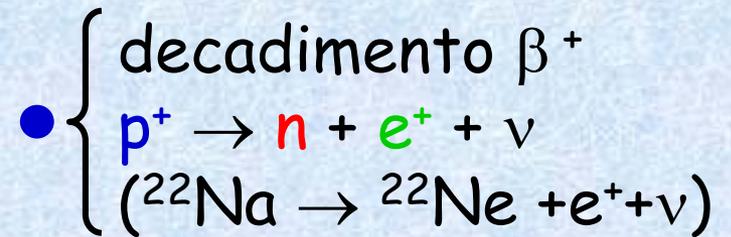
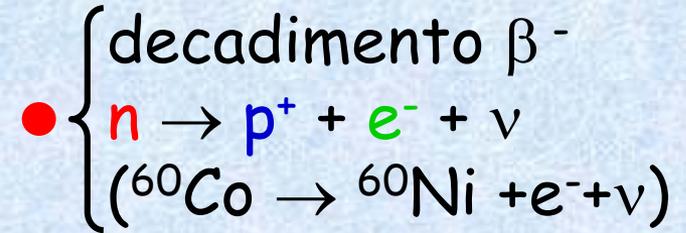
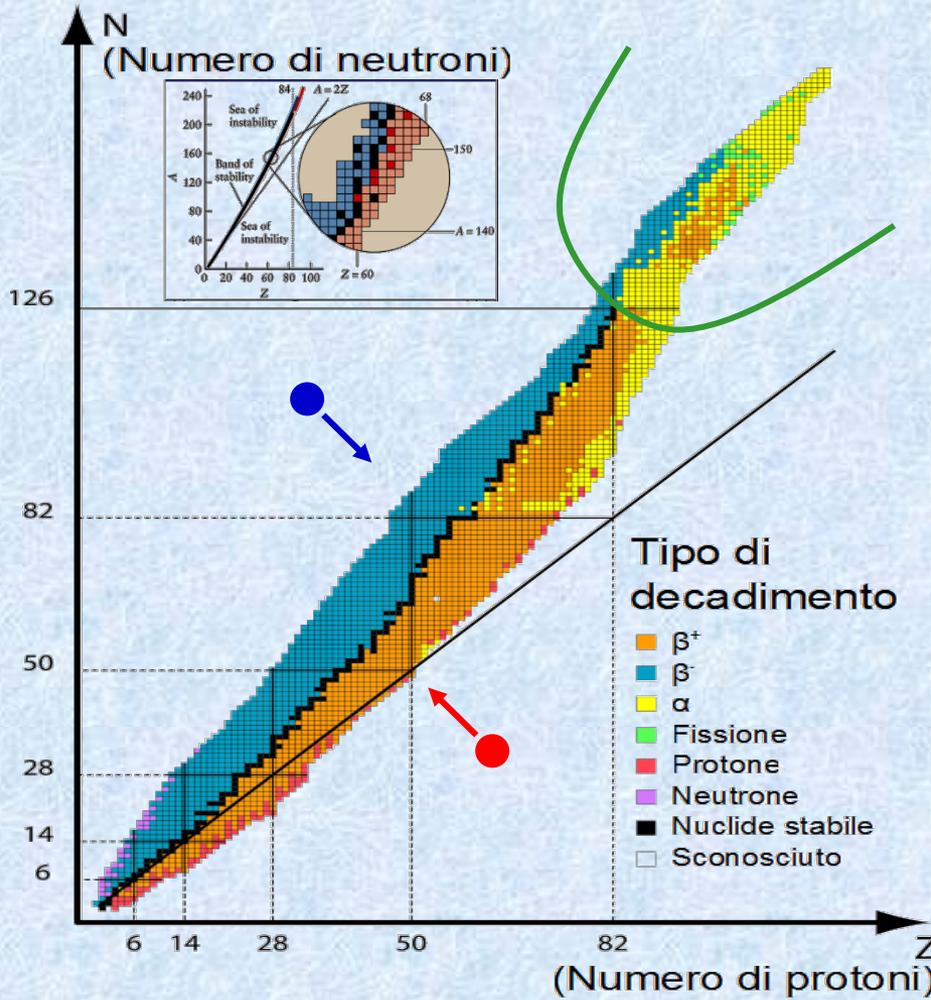
Potere di penetrazione

Ionizzazione	Interazione con il mezzo	Potere di penetrazione	Percorso massimo in aria
Diretta (α^{++}, β^{\pm})	Continua	Basso	$\alpha^{++} \sim 4 \text{ cm}$
			$\beta^{\pm} \sim 4 \text{ m}$
Indiretta (N, γ, X)	Solo attraverso particelle cariche secondarie	Alto	Qualunque




**Elevato
rischio di
irraggiamento**

Nuclei instabili



Elevato rischio di contaminazione

Simboli radiazioni ionizzanti



Simbolo
generico



Irraggiamento



Contaminazione



Simbolo nelle
centrali nucleari

Effetti delle radiazioni sull'uomo

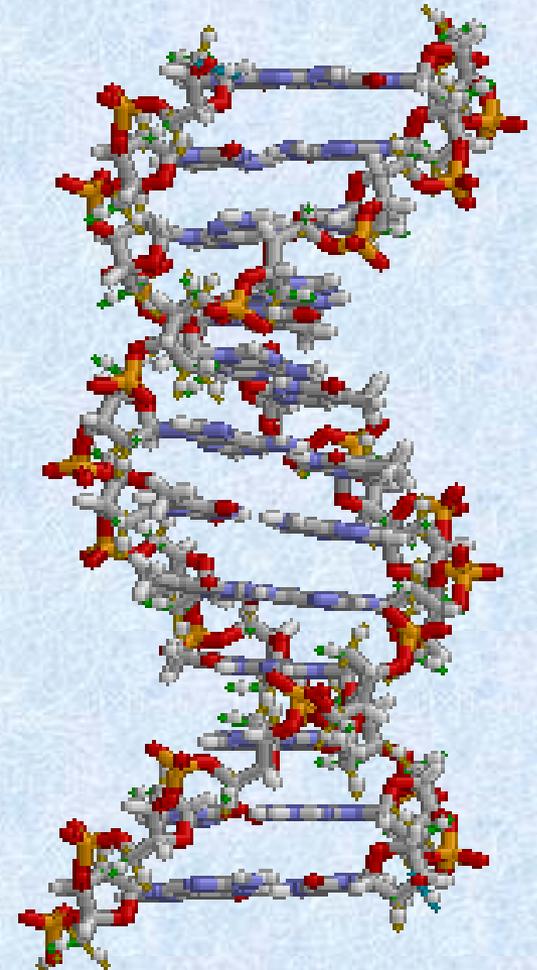
Attraverso la ionizzazione ed eccitazione delle molecole del tessuto si ha **danno cellulare**, che può essere:

➤ danno **diretto al DNA** per rottura dei legami molecolari;

➤ danno **indiretto** con la ionizzazione delle molecole di H_2O (65 % del peso corporeo) e **produzione di radicali liberi** (H^+ e OH^-) molto reattivi, che attaccano chimicamente la cellula.

La conseguenza è la generazione di mutazione genetiche e quindi **l'induzione di tumori**.

Attenzione: L'effetto è **privo di soglia** (bastano due raggi γ per provocare danno).



Vie di penetrazione nel corpo umano

Irraggiamento:

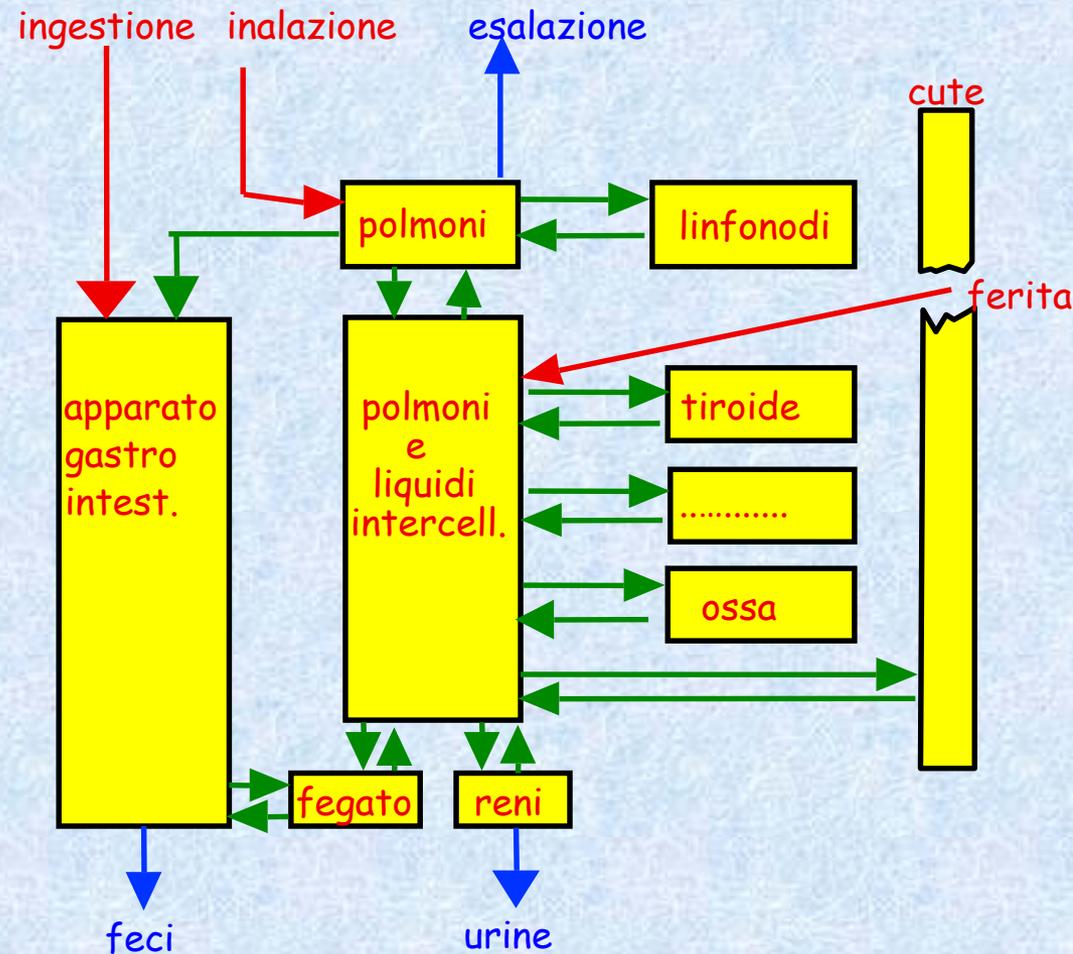
- La sorgente è esterna all'organismo;
- Le radiazioni incidono sul soggetto.

Contaminazione interna:

- La sorgente entra nell'organismo a seguito di:
 - ✓ Inalazione;
 - ✓ Ingestione;
 - ✓ Ferite della cute.

Si osservi che:

- **Neutroni, Raggi X e γ sono principalmente pericolosi per irraggiamento;**
- **Particelle α^{++} e particelle β^{\pm} sono pericolose soprattutto per contaminazione interna.**



Principi fondamentali di radioprotezione

La circostanza che qualunque esposizione alle radiazioni ionizzanti, per quanto modesta, possa produrre detrimento (assenza di soglia), ha spinto la International Commission on Radiation Protection (I.C.R.P.) a raccomandare un sistema di protezione radiologica basato su tre principi fondamentali:

- giustificazione della pratica;
- ottimizzazione della protezione (principio noto anche con l'acronimo ALARA - As Low As Reasonably Achievable);
- limitazione delle dosi individuali.

Detti principi sono stati pienamente recepiti nella normativa italiana in vigore, attraverso l'art. 2 del D. Lgs. 230/95.

Sorgenti di radiazioni

Tipologia	Carattere	Esempi di applicazioni	Rischio di esposizione
Macchine radiogene	Artificiale (emettono solo raggi X)	Diagnostica su materiali	Irraggiamento esterno
Sostanze radioattive	Naturale	Sorgenti di radioisotopi per attività di ricerca	Irraggiamento e/o contaminazione
Acceleratori	Artificiale (emettono X, γ , α^{++} , β^{\pm} , p^{+} , n)	Radiodiagnostica e radioterapia	Principalmente irraggiamento esterno

Sorgenti di radioisotopi

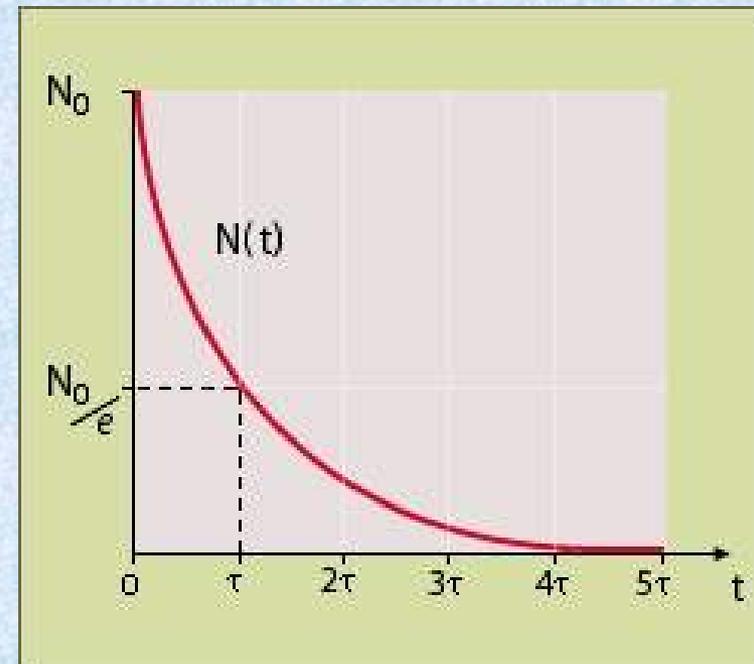
Le sorgenti radioattive sono costituite da atomi (isotopi) che si trasformano **spontaneamente** emettendo radiazioni ionizzanti. Il processo è definito dalla **probabilità** per unità di tempo che avvenga tale **transizione**. Questa grandezza rimane costante nel tempo. Ne segue che la popolazione iniziale di N_0 atomi radioattivi identici si riduce nel tempo secondo una legge di decadimento esponenziale:

$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$$

dove τ è la **vita media**.

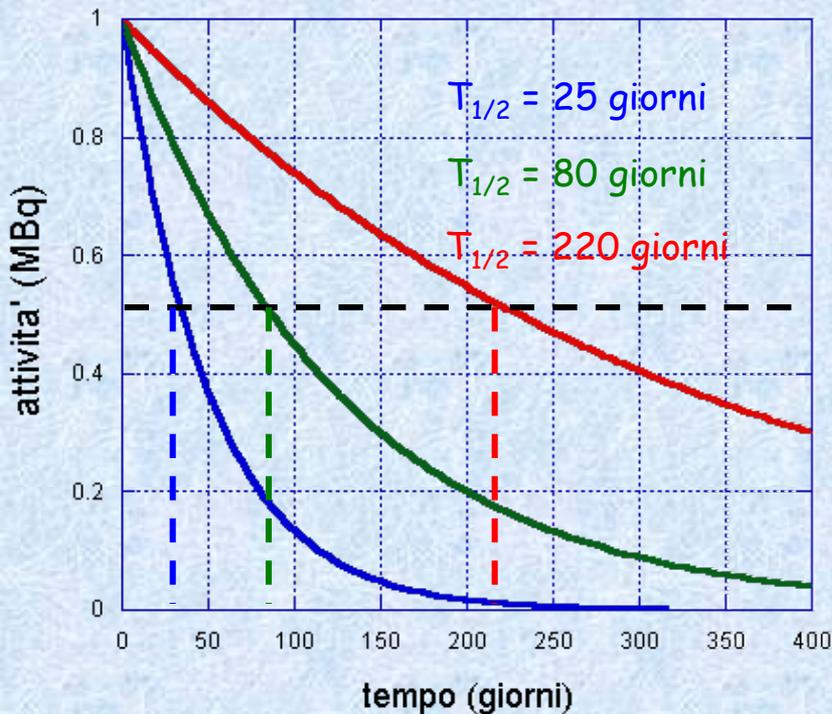
Il valore di τ può variare da miliardesimi di secondo a miliardi di anni!

Attività = Numero di decadimenti subiti nell'unità di tempo. Essa si misura in Becquerel (1 Bq = 1 decadimento/secondo) e diminuisce nel tempo.



Tempo di dimezzamento

La vita media indica il tempo che una sorgente impiega a ridurre di ca. 2,7 volte la propria attività. Più intuitivo è il concetto di **tempo di dimezzamento** $\tau_{1/2}$, che rappresenta il tempo per cui la popolazione di atomi radioattivi si dimezza. Si ha che: $\tau_{1/2} = \tau \ln 2 = 0,6931 \tau$



Maggiore è il valore di $\tau_{1/2}$ più a lungo dura dunque la sorgente.

I tempi di dimezzamento dipendono dalla transizione e **hanno valori molto variabili**:

Sorgente	Tempo di dimezzamento - $\tau_{1/2}$
Argon 41	1,8 ore
Cobalto 60	5,27 anni
Cesio 137	30,2 anni
Potassio 40	1.300.000.000 anni

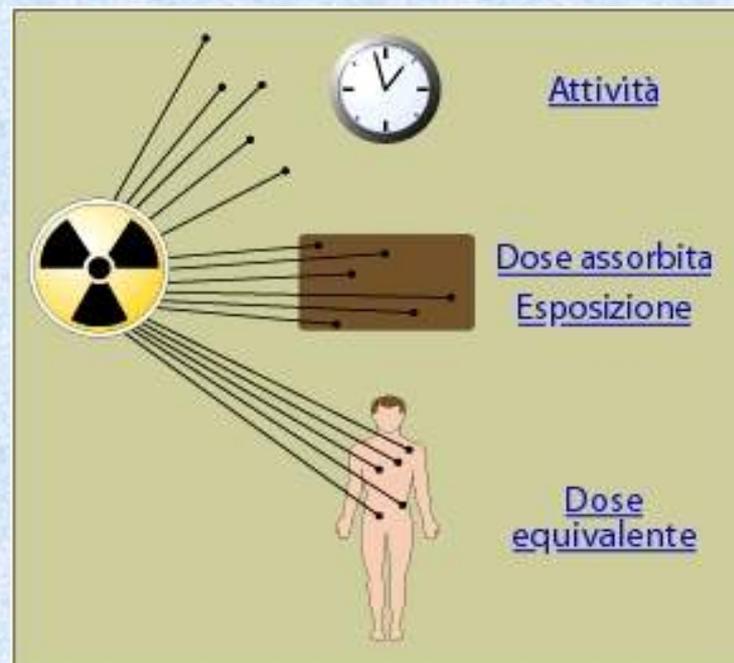
Se $\tau_{1/2}$ è di pochi giorni la sostanza si trasforma integralmente in tempi brevi, durante i quali però emette molte radiazioni;

Se $\tau_{1/2}$ è di molti anni la sostanza rimane attiva per molto tempo, ma emette meno radiazioni (a parità di attività iniziale).

Unità di misura della radioprotezione

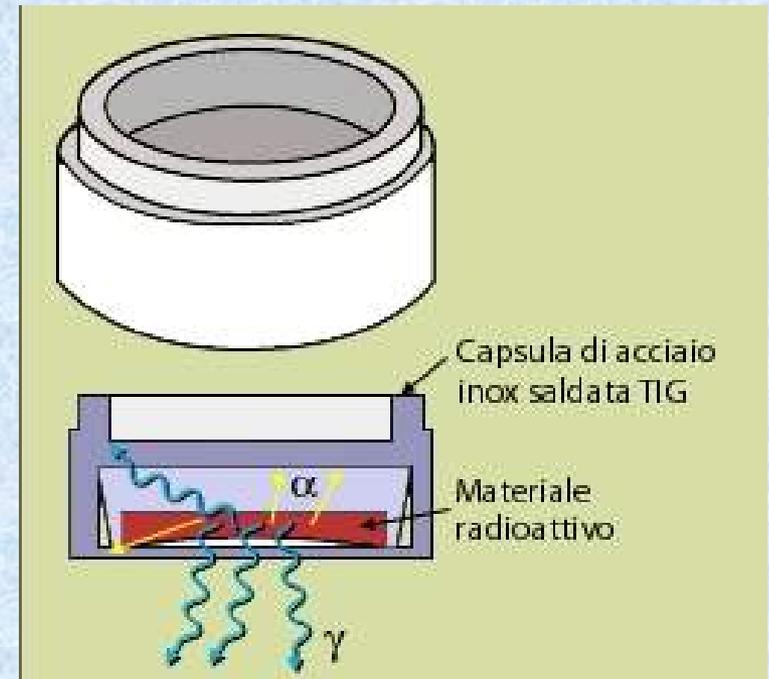
Le grandezze di interesse in radioprotezione sono:

- Le **grandezze di sorgente**, che servono per descrivere le caratteristiche di una sorgente irradiante (ad es. **attività**);
- Le **grandezze dosimetriche**, che misurano l'energia (per unità di massa) ceduta alla materia irradiata:
 - La **dose assorbita** misura l'energia per unità di massa fornita al mezzo indipendentemente dalla natura di questo
u.m.: Gray = J/kg;
 - La **dose equivalente** tiene conto degli effetti sul corpo umano in base al tipo di radiazione incidente su un dato tessuto interessato;
 - La **dose efficace** è la somma delle dosi equivalenti nei diversi organi o tessuti, ponderata con opportuni coefficienti.
u.m.: Sievert (dimensionalmente = J/kg)



Sorgenti sigillate e non sigillate

Una **sorgente sigillata** è una sorgente formata da materie radioattive solidamente incorporate in materie solide e di fatto inattive, o sigillate in un involucro inattivo che presenti una resistenza sufficiente per evitare, in condizioni normali di impiego, dispersione di materie radioattive superiori ai valori stabiliti dalle norme di buona tecnica applicabili.

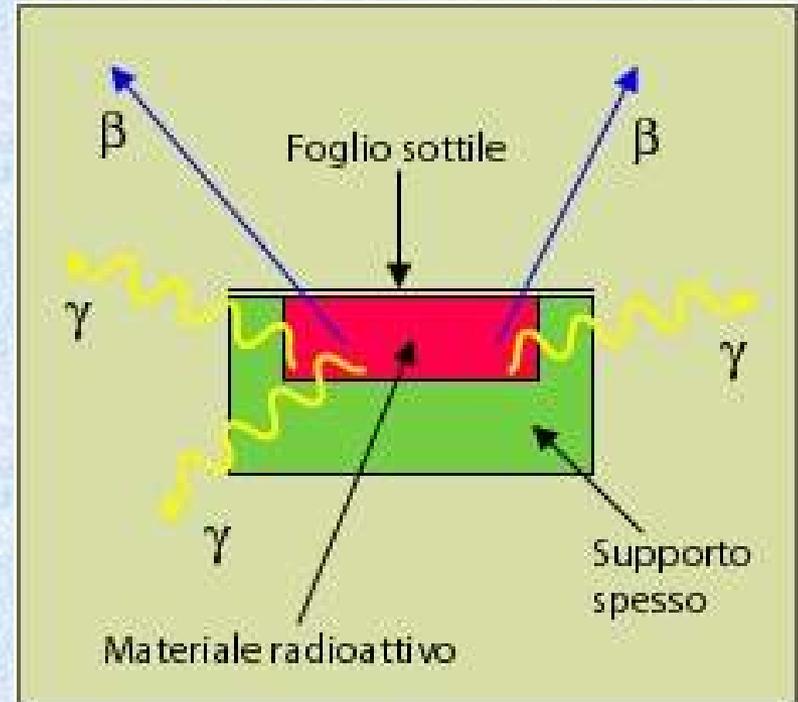


La **sigillatura** evita la dispersione di materie radioattive (contaminazione), ma non è un mezzo di protezione contro le radiazioni prodotte dalla sorgente (irraggiamento).

Sorgenti sigillate

Quando la sigillatura in forma di **strato ricoprente** assorbe integralmente le radiazioni che interessano (ad esempio sostanze α o β -emittenti) si ricorre a sorgenti in cui il materiale radioattivo è depositato su un foglio metallico sottile.

La sorgente va **maneggiata con cura per evitare graffi** che rilascino atomi radioattivi.



Sono sigillate le sorgenti $\beta + \gamma$ di bassa attività, usate per ricerca e didattica, quando interessa solo la radiazione γ .

Sorgenti non sigillate

Per sorgente non sigillata si intende qualsiasi sorgente che non ha le caratteristiche della sorgente sigillata. Tali sorgenti vengono spesso impiegate (anche in forma di soluzione o sospensione liquida) come traccianti radioattivi o per analisi radiochimiche e di laboratorio.



Gli isotopi sono a contatto diretto con l'aria dell'ambiente in cui si lavora, per cui il rischio di contatto, ingestione o inalazione è elevato e pertanto l'uso dei dispositivi di protezione è fondamentale.

Sorgenti orfane

‘Sorgenteorfana’ (D. Lgs. n° 52 del 6 febbraio 2007):

Sorgente sigillata che non è sottoposta a controlli da parte delle autorità o perché non lo è mai stata o perché è stata abbandonata, smarrita, collocata in un luogo errato, sottratta illecitamente al detentore o trasferita ad un nuovo detentore non autorizzato.

Le più probabili sorgenti orfane



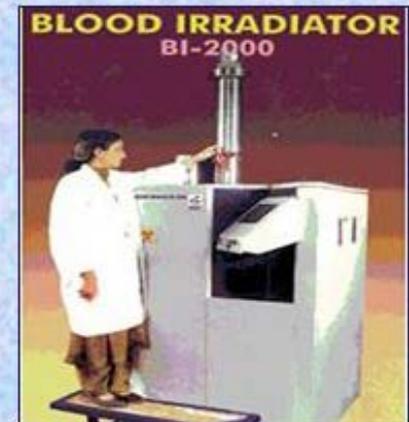
Co – 60 (emivita: 5,26 anni)

Cs-137 (emivita: 30,17 anni) →

← Ir-192 (emivita: 75,20 giorni)

Ra-226 (emivita: 1620 anni)

Sr - 90 (emivita: 28 anni)



Sorgenti orfane e trattamento dei rifiuti

Perché una sorgenteorfana può essere pericolosa nel trattamento e riciclo dei rifiuti?

- Perché può avere già in partenza un'attività tale da essere pericolosa per i soggetti che si avvicinano (irraggiamento);
- Ma soprattutto perché nell'attività di trattamento ci può essere la rottura dell'involucro o della capsula che contiene la sorgente, con conseguente dispersione in aria del materiale radioattivo, che può quindi essere inalato (contaminazione);
- Infine, perché se il materiale viene riciclato per la fabbricazione di nuovi prodotti, questi avranno già in partenza una radioattività intrinseca a cui saranno esposti gli utilizzatori dei prodotti.

Sono queste le motivazioni per cui il legislatore ha emanato il D. Lgs. n° 100 del 1° giugno 2011 in base al quale i rifiuti metallici devono essere controllati da un sistema che permetta di rilevare la presenza di radioattività residua, costituiti da portali oppure monitor portatili.

Origine delle sorgenti orfane



La provenienza delle sorgenti orfane è variegata. Esse possono provenire ad esempio da:

- **Trattamento incontrollato nell'ambito della sanità, industria, ricerca, agricoltura;**
- **Prodotti radioattivi ritenuti innocui in passato e che sono stati utilizzati per la costruzione di materiali di consumo** (orologi fosforescenti, parafulmini, ecc.);
- **Incidenti di trasporto**, con relativo abbandono delle sorgenti;
- **Residui di uso militare** (ad es. munizioni con uranio impoverito);
- **Potenziale uso come armi sporche per attività di terrorismo.**

Si tenga in conto che negli ultimi decenni, la storia degli incidenti causati da sorgenti radioattive sigillate indica una media di due persone all'anno decedute a causa di tali eventi e di un considerevole numero di individui che hanno subito danni severi in conseguenza delle radiazioni assorbite.

Tipologie di sorgenti orfane

Sorgenti di tipo sanitario



Sorgenti per radioterapia - L'elemento attivo è di pochi cm



Sorgenti per cobaltoterapia



Pacemaker al plutonio



Rifiuti sanitari

Tipologie di sorgenti orfane

Sorgenti di tipo industriale



Apparecchi portatili per controlli non distruttivi di materiali



Sonda per misurazione dell'umidità e della densità di bitume e catrame



Gascromatografo



Generatori termoelettrici



Sorgente radioattiva per misura di spessori

Tipologie di sorgenti orfane

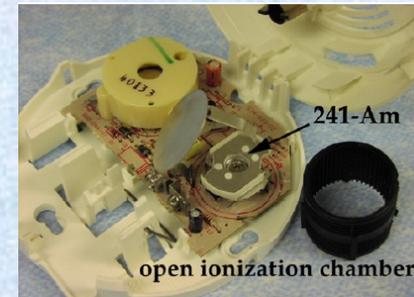
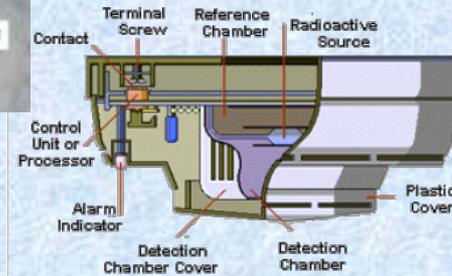
Sorgenti da materiali di consumo



Zavorre per aerei ed imbarcazioni



Testata di parafulmine



Rivelatori di fumo



Candele



Lenti ottiche

Scaricatore di sovratensione



Tipologie di sorgenti orfane

Sorgenti per uso personale



Vetreteria fluorescente



Lancette e quadranti degli orologi



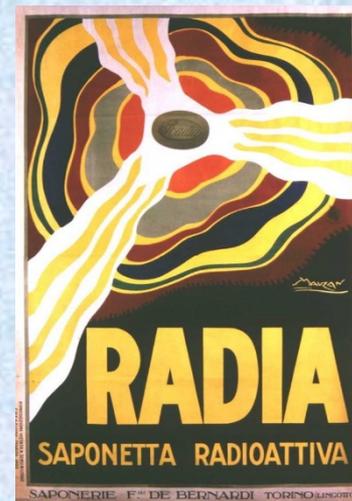
Creme di bellezza



Emanatori a radio



Protesi dentarie



Tipologie di sorgenti orfane

Sorgenti di origine militare



Strumentazione con vernici radioluminescenti



Mirino per lancio di missili



Bussola al trizio



Proiettili a base di uranio impoverito

Rilevazione delle sorgenti orfane

Il controllo delle sorgenti orfane può essere fatto tramite:

- portali;
- monitor portatili.

In entrambi i casi in genere il monitoraggio avviene attraverso un rivelatore a scintillazione di ioduro di sodio drogato con tallio NaI(Tl) .



↑
Portale



← Monitor portatile

Cosa fare in caso di rilevazione?

Quale comportamento adottare se un portale / monitor portatile rileva la presenza di radiazioni provenienti da un mezzo?

- Annotare il settore del mezzo in cui il monitor ha rilevato le radiazioni;
- Spostare il mezzo in un'area isolata e ben delimitata, coprendolo con un telo che ne impedisca la dispersione di polveri, liquidi o gas;
- Impedire ad eventuali 'curiosi' di avvicinarsi al mezzo;
- Allertare immediatamente l'Esperto Qualificato di Radioprotezione e su indicazione di questo gli organi di ispezione e la ditta per la bonifica.

Cosa non fare se il portale / monitor portatile rileva radiazioni?

- Scaricare subito la merce al fine di individuare la sorgente da cui provengono le radiazioni;
- Calpestare, schiacciare o comprimere gli involucri, in quanto si potrebbe rimuovere la sigillatura, provocando la contaminazione ambientale;
- Trasferire il carico all'esterno dell'azienda (ad es. per il riciclaggio), altrimenti vi è il rischio di dispersione di materiale contaminato oppure di integrazione della sorgente radioattiva in nuovi prodotti;
- Mai toccare a mani nude la merce, poiché rischiano di contaminarsi.

Come procede l'esperto qualificato?



Localizza la sorgente orfana

- Indossa adeguati dispositivi di protezione individuali, costituiti da grembiule, collare e guanti piombati, in quanto il radioisotopo non è noto in partenza;
- Utilizza un monitor portatile ad alta sensibilità, provvedendo a scandire i vari lati del mezzo al fine di individuare in modo approssimato la posizione della sorgente. Il monitor ha in genere anche la funzione di rivelatore di radioisotopi;
- Dopo aver chiesto di stendere un telo impermeabile al percolato, chiede all'autista di scaricare progressivamente il contenuto del mezzo fino ad individuare la sorgente.

Assicura la sua messa in sicurezza

- Identifica il/i radioisotopo/i presente/i tramite il rilevatore e determina l'attività in base a valutazioni di dosi e geometriche adeguate;
- Provvede a garantire che la sorgente venga inserita in un fusto metallico, preferibilmente di acciaio, e spostata in luogo sicuro;
- Se l'attività della sorgente è inferiore a quella prevista dalla normativa, il tempo di dimezzamento del radioisotopo è minore di 75 giorni e il rateo di dose efficace all'esterno del fusto non supera quello per cui i lavoratori possano essere considerati esposti, allora la sorgente è conservata nel fusto per un tempo congruo affinché l'attività si riduca a valori dell'ordine di quelli ambientali;
- Altrimenti occorre contattare una ditta specializzata che provvede al trattamento della sorgente come rifiuto radioattivo;
- In ogni caso occorre mettere a conoscenza gli organi di vigilanza.

Come sono fatti i rivelatori?

Esistono diversi strumenti basati su un **sistema catodo (-) / anodo (+)** per rivelare le radiazioni ionizzanti:

Rivelatori a stato solido - Si basano sul processo di luminescenza:

Scintillatori, basati su analizzatori multicanale + convertitori analogico-digitali e che **discriminano tra i diversi radioisotopi**

Rivelatori a gas - Si distinguono in base alla differenza di potenziale applicata:

ΔV bassa: 100 - 400 V \longrightarrow **Camere a ionizzazione**

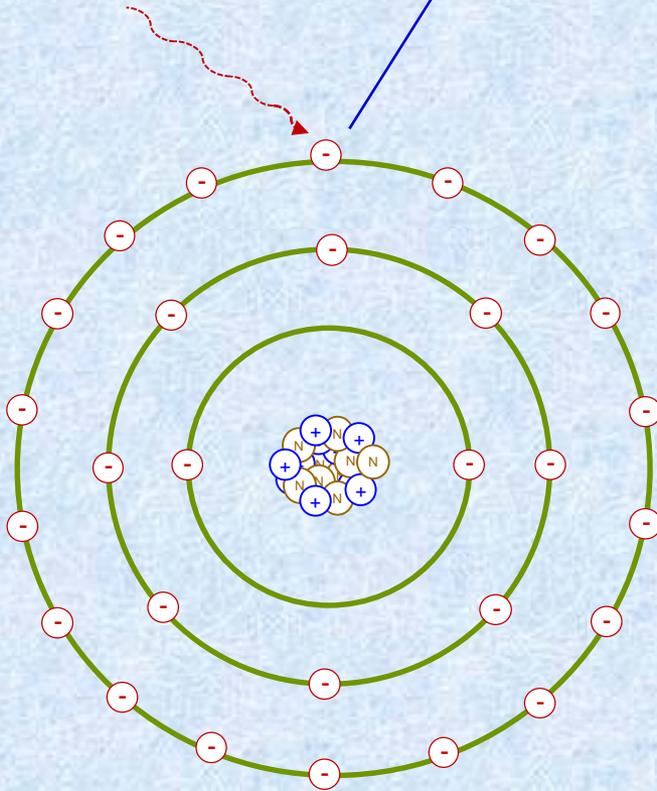
ΔV media: 400 - 700 V \longrightarrow **Contatori proporzionali**

ΔV alta: 800 - 1200 V \longrightarrow **Contatori Geiger**

Processo di luminescenza

Radiazione incidente
(Raggio X, UV)

Fotoelettrone



Ionizzazione dell'atomo con **emissione di un fotoelettrone dal guscio esterno**

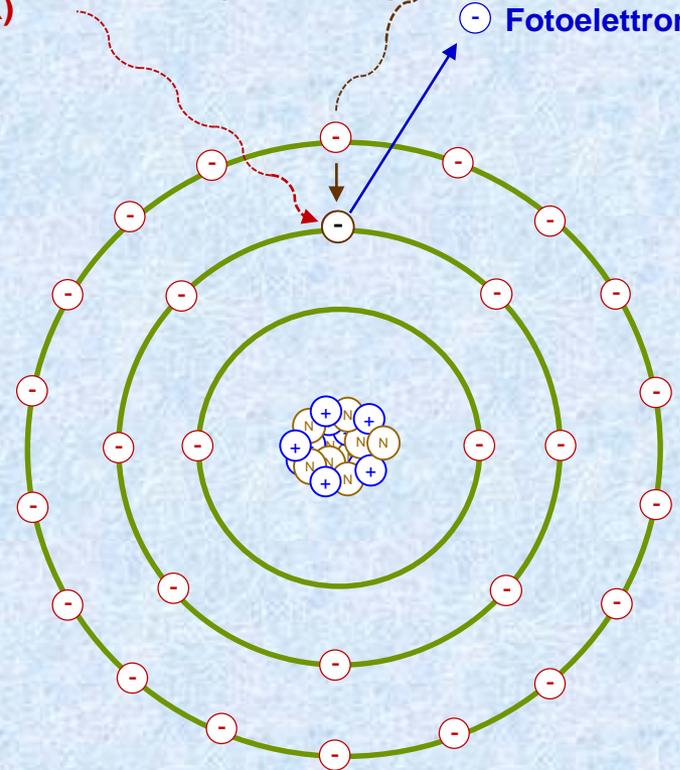
Scintillazione

$$E_{\text{Fotoelettrone}} = E_{\text{Raggio X}} - E_{\text{diseccitazione}}$$

Radiazione incidente
(Raggio X)

Radiazione di diseccitazione
(IR, Vis, UV)

Fotoelettrone



Ionizzazione dell'atomo con **emissione di un fotoelettrone da un guscio interno e di un fotone di diseccitazione**

Rivelatori a stato solido

Si basano sul processo di luminescenza che avviene in alcuni cristalli drogati con impurezze.

Il numero di elettroni eccitati dalla banda di valenza alla banda di conduzione è proporzionale all'energia dei fotoelettroni generati dalla radiazione incidente (Raggio X o γ) e, dopo un tempo caratteristico τ_c , riemettono la radiazione attraverso i livelli energetici dell'impurezza.

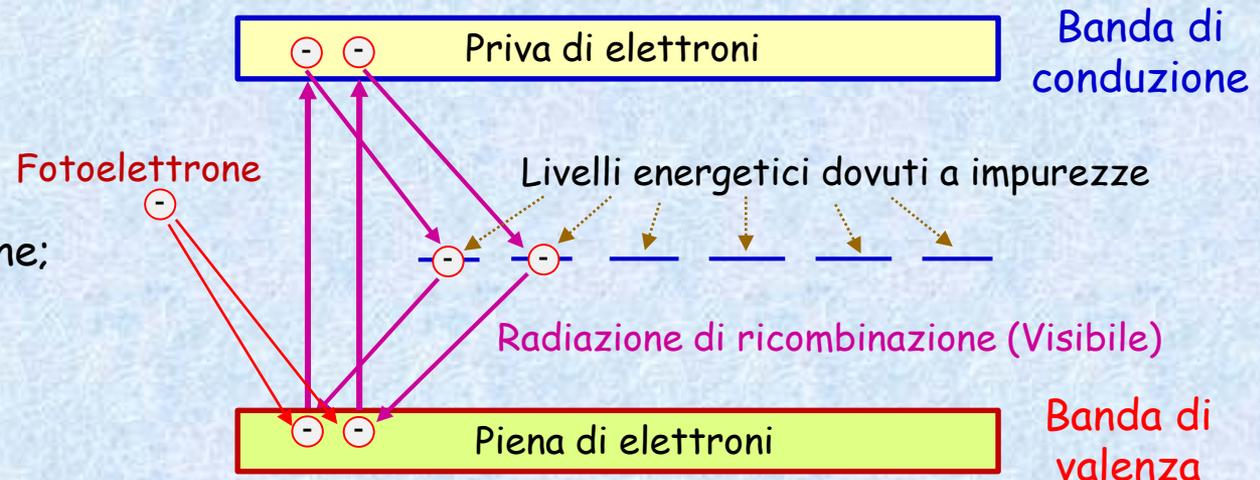
In base al valore di τ_c si distingue se:

- il processo termina appena cessa la causa di eccitazione (Raggio X o γ). In questo caso si parla di **fluorescenza**;
- il livello energetico dovuto all'impurezza è metastabile, ovvero l'elettrone permane su di esso per un tempo consistente; la luminescenza persiste alla cessazione dell'eccitazione e il processo è denominato **fosforescenza**. Questo è un effetto parassita.

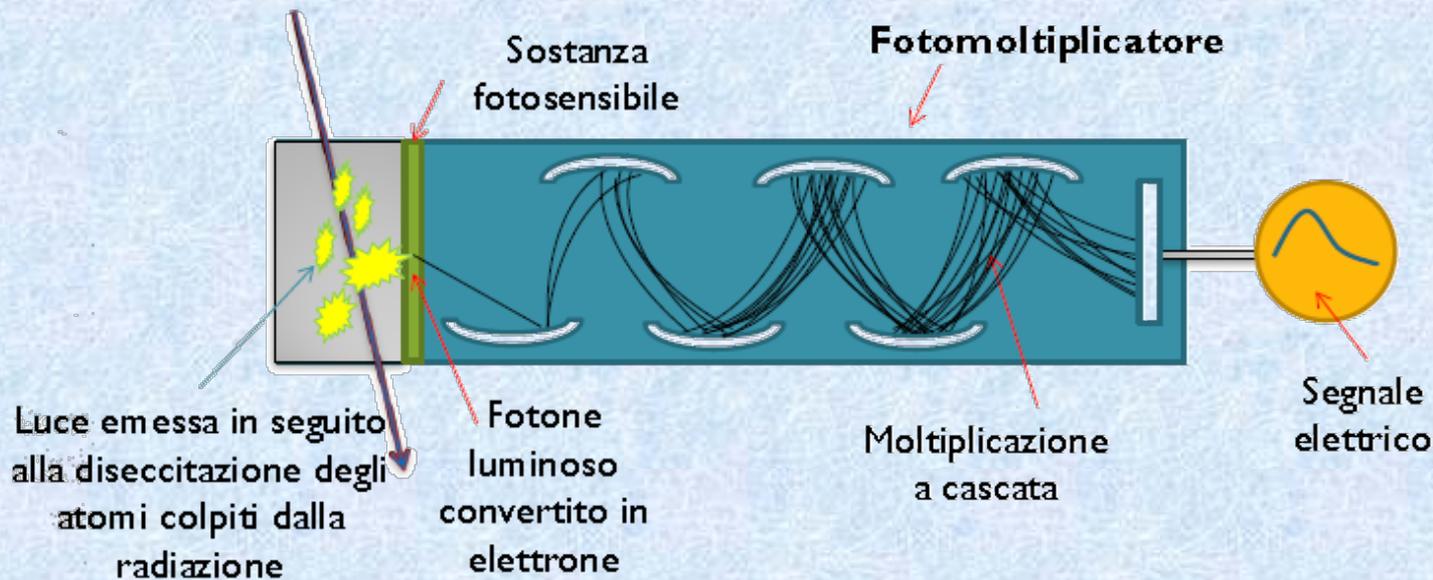
La migliore efficienza di questo processo si ha con i **cristalli di NaI(Tl)**, ovvero ioduro di sodio drogato con una percentuale di impurezze di tallio compresa tra 1% e 3%.

Caratteristiche:

- buon coefficiente di assorbimento di raggi X, γ ;
- alta efficienza di conversione;
- trasparenza alla propria fluorescenza;
- tempi di eccitazione brevi ($< 10^{-8}$ s).



Scintillatori



$$N^{\circ} \text{ fotoni riemessi} = N^{\circ} \text{ elettroni ricombinati} \propto E_{\text{Fotoelettrone}} \propto E_{\text{Raggio X,}\gamma}$$



In pratica nei scintillatori è fatto un **conteggio del numero di fotoni che pervengono sulla sostanza fotosensibile**; essi sono proporzionali all'energia dei raggi X o γ incidenti.



La sostanza fotosensibile **converte i fotoni di scintillazione in un impulso elettrico**, che tuttavia è molto debole.

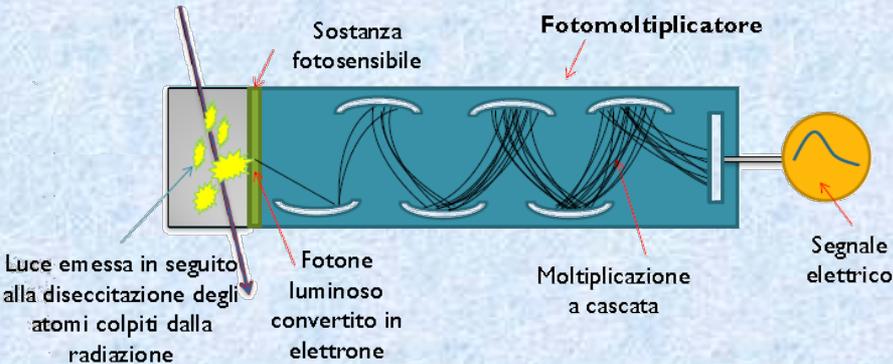
La conseguenza è che **sull'anodo arriva un segnale misurabile e commisurato all'energia della radiazione incidente.**



Tramite il fotomoltiplicatore l'impulso elettrico debole si converte in un segnale elettrico significativo.

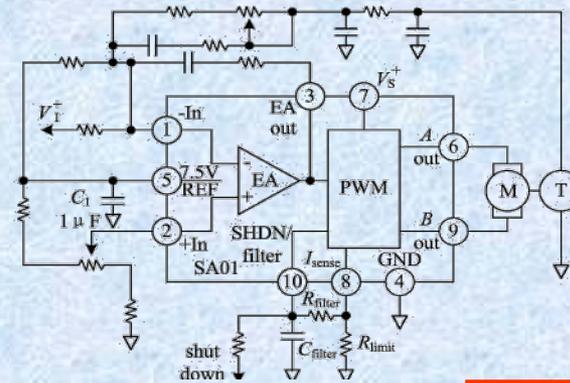


Rivelatori di radioisotopi

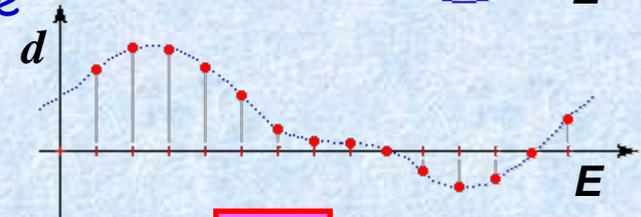
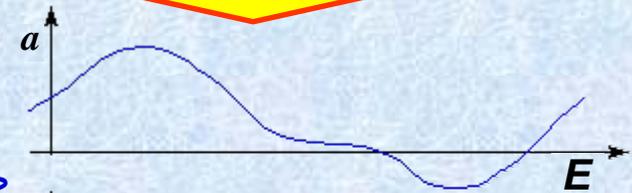


Sull'anodo arriva un segnale misurabile e commisurato all'energia della radiazione incidente.

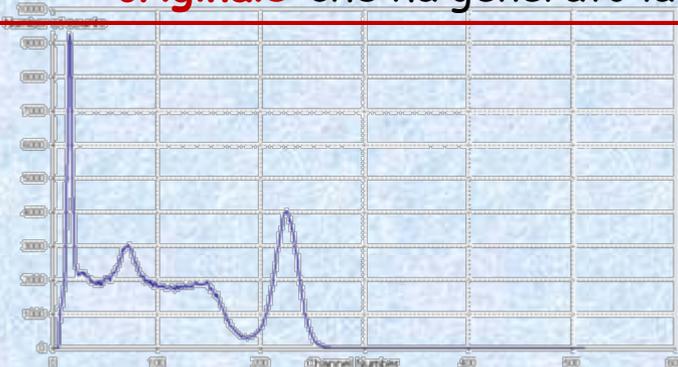
Convertitore analogico-digitale



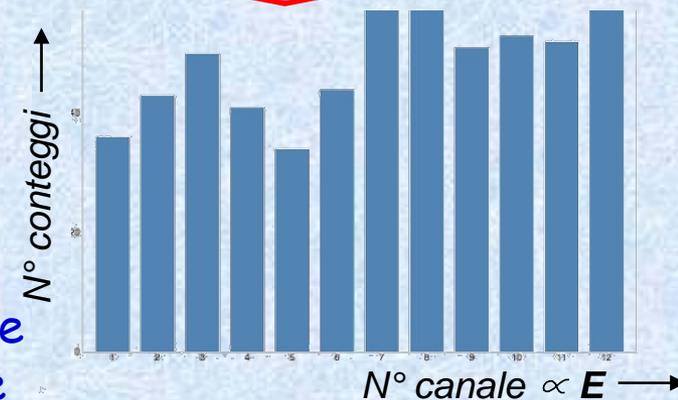
Amplificatore di impulsi



Di conseguenza il **segnale elettrico** prodotto dal contatore può essere **'incasellato'** in diversi canali in funzione dell'**energia del fotone X originale** che ha generato la scintilla



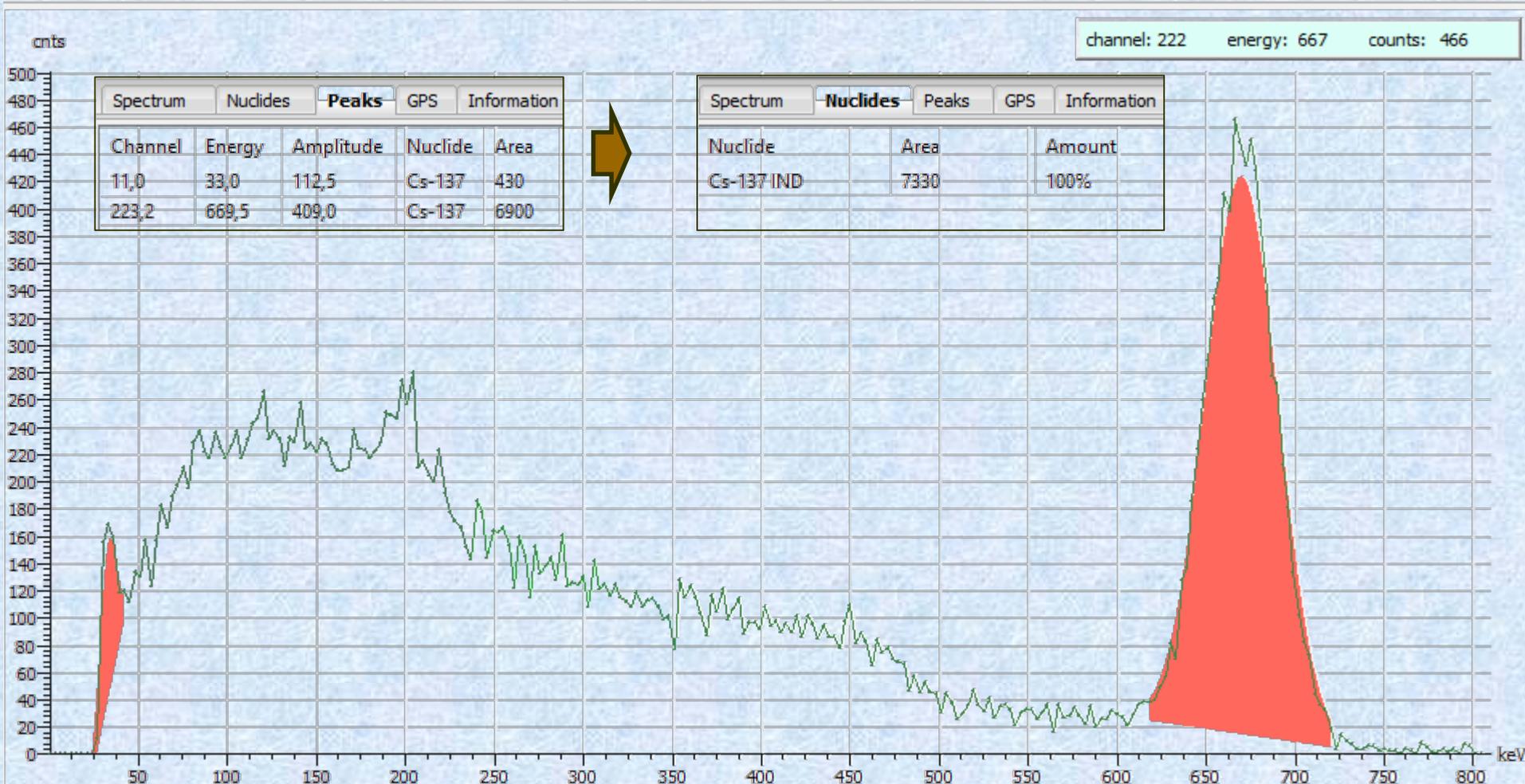
Analizzatore multicanale



Calibrazione dello strumento

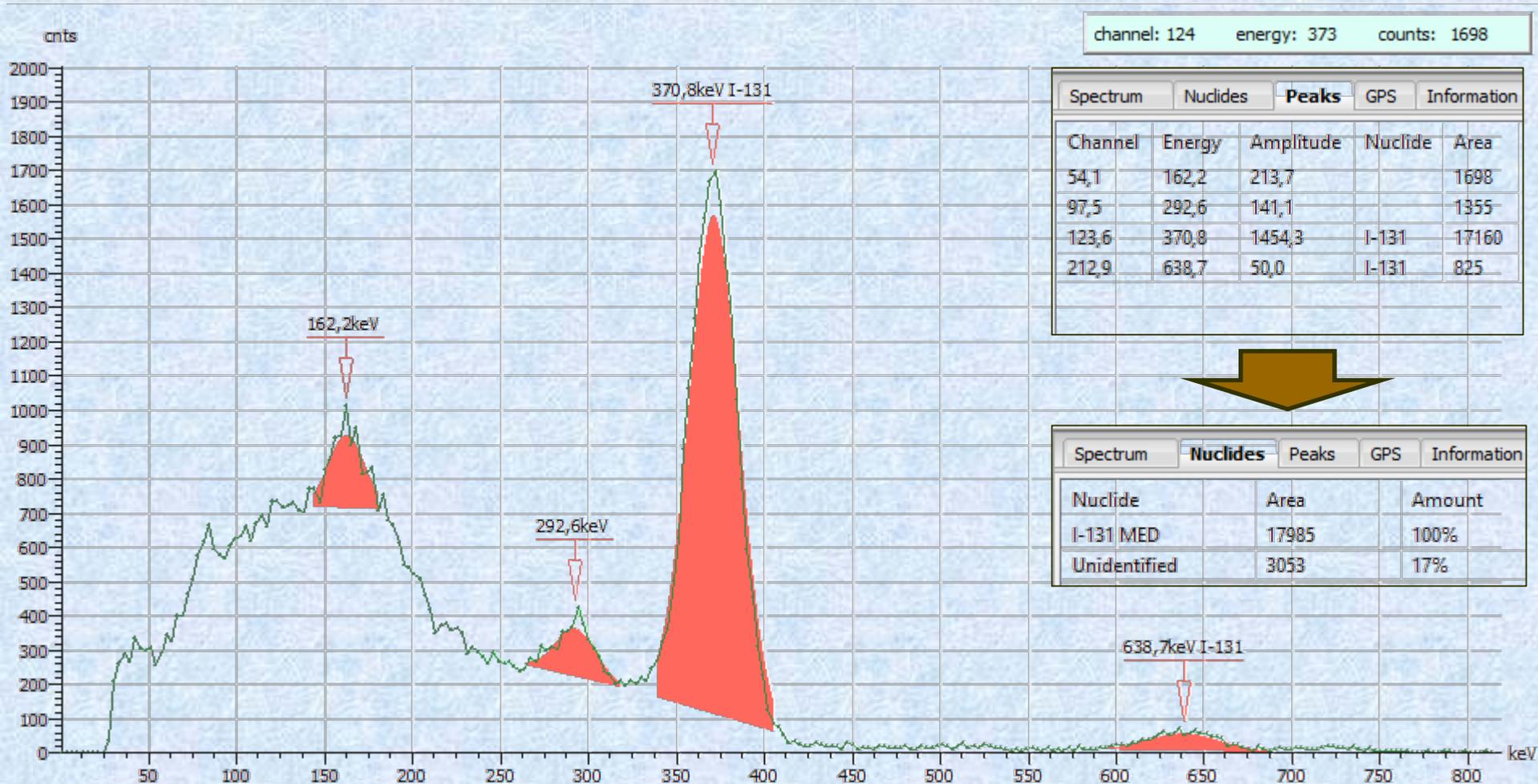
È necessaria una calibrazione iniziale che metta in relazione il numero di canale con l'energia della radiazione incidente.

In genere si prende come riferimento il ^{137}Cs (cesio) che ha picchi ben definiti.



Spettro di radioisotopi

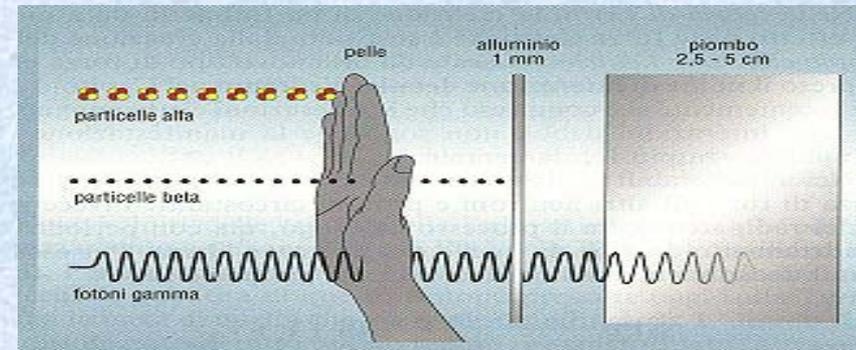
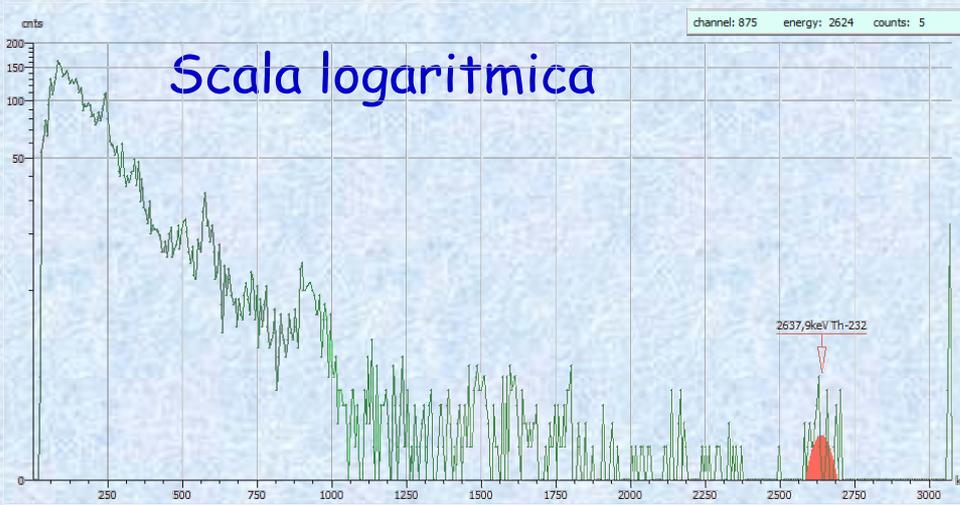
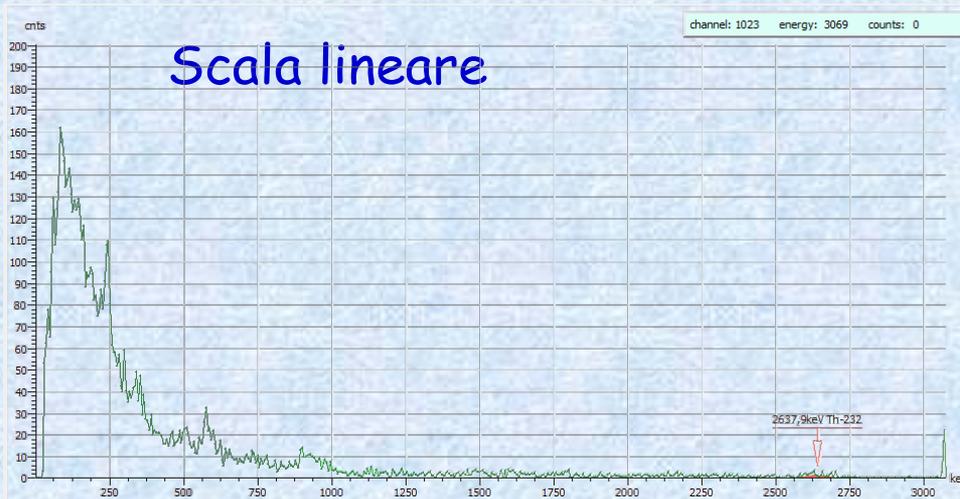
Panno intriso di ^{131}I (iodio), utilizzato da paziente sottoposto a radioterapia.
Lo ^{131}I , è tipicamente un isotopo γ -emittente.



Spettro di radioisotopi

Asticella di ^{232}Th (torio), utilizzata per attività di saldatura.

Il ^{232}Th , è tipicamente un isotopo α -emittente e quindi difficilmente rilevabile. Si riporta lo spettro anche in scala logaritmica.



Spectrum	Nuclides	Peaks	GPS	Information
Channel	Energy	Amplitude	Nuclide	
879,3	2637,9	1,6	Th-232	



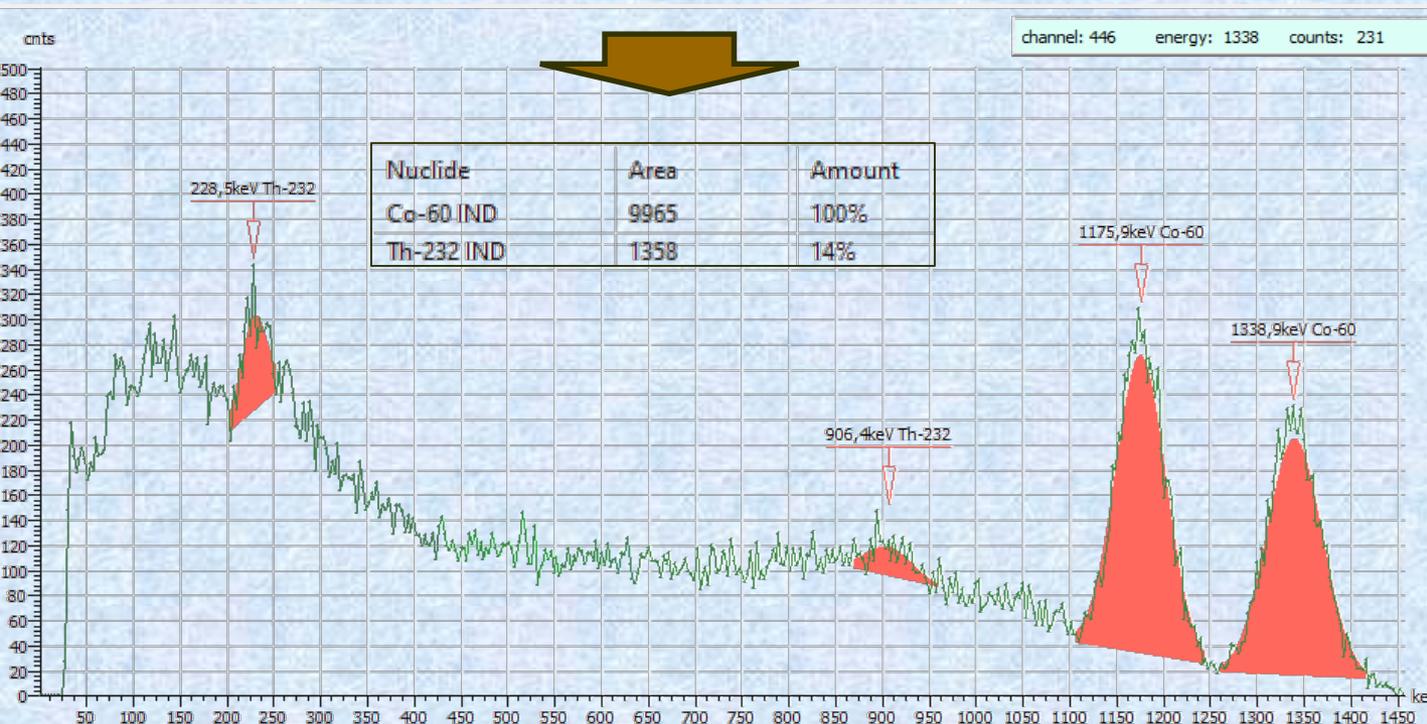
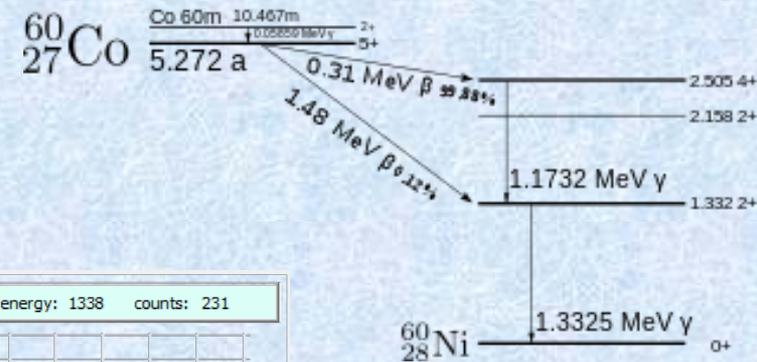
Spectrum	Nuclides	Peaks	GPS	Information
Nuclide	Area	Amount		
Th-232 IND	67	100%		

Spettro di radioisotopi

Disco di ^{60}Co (cobalto), per attività didattica. Contiene residui di torio.

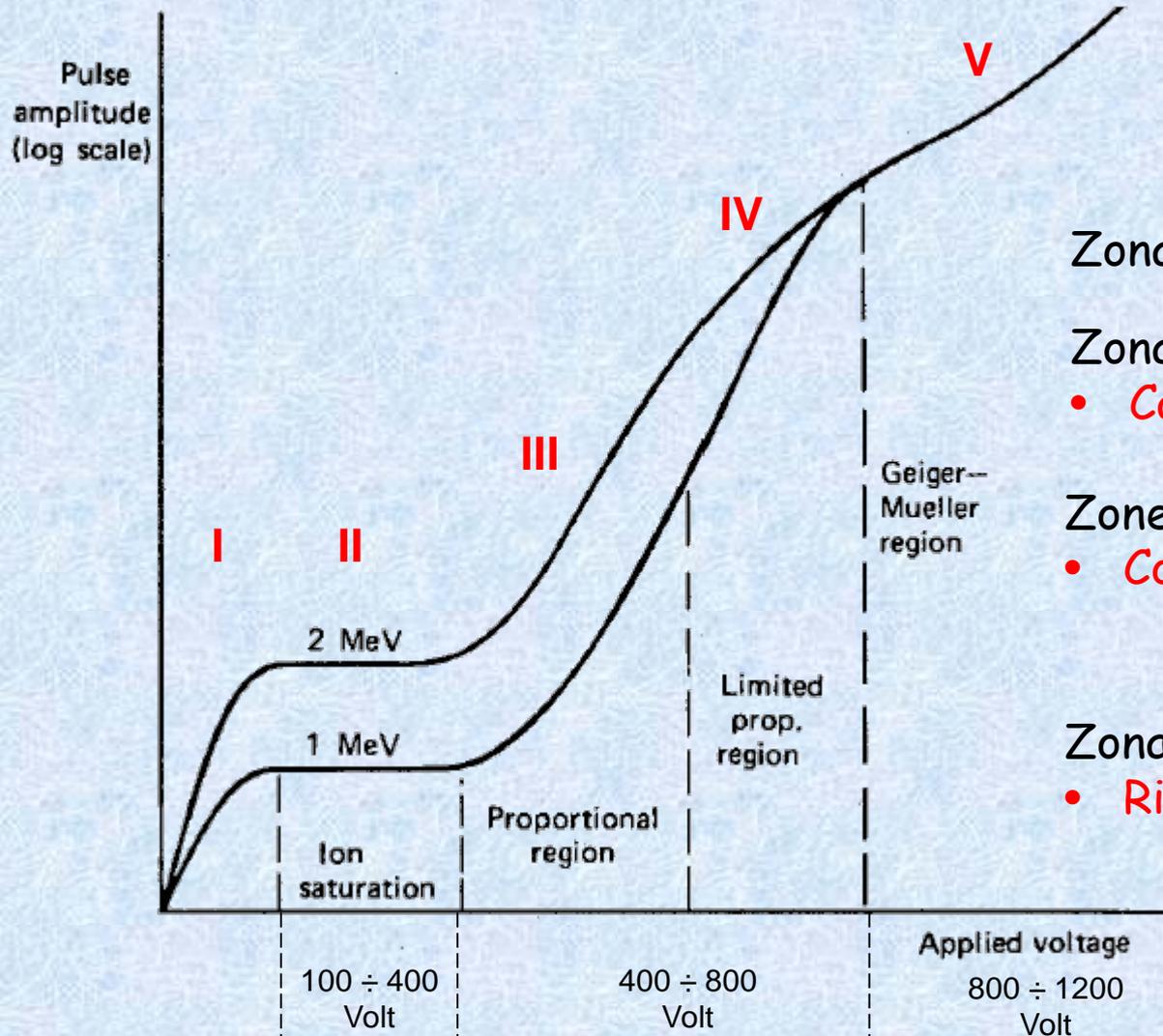
Il ^{60}Co , è tipicamente un isotopo β -emittente, che a seguito di ulteriori decadimenti emette raggi γ .

Channel	Energy	Amplitude	Nuclide
76,2	228,5	75,5	Th-232
302,1	906,4	23,3	Th-232
392,0	1175,9	237,6	Co-60
446,3	1338,9	188,9	Co-60
852,9	2558,8	2,8	Th-232



Regimi di funzionamento di un rivelatore a gas

A seconda della tensione applicata tra gli elettrodi si distinguono diversi regimi di funzionamento:



Zona I - di ricombinazione

Zona II - di saturazione:

- Camere a ionizzazione

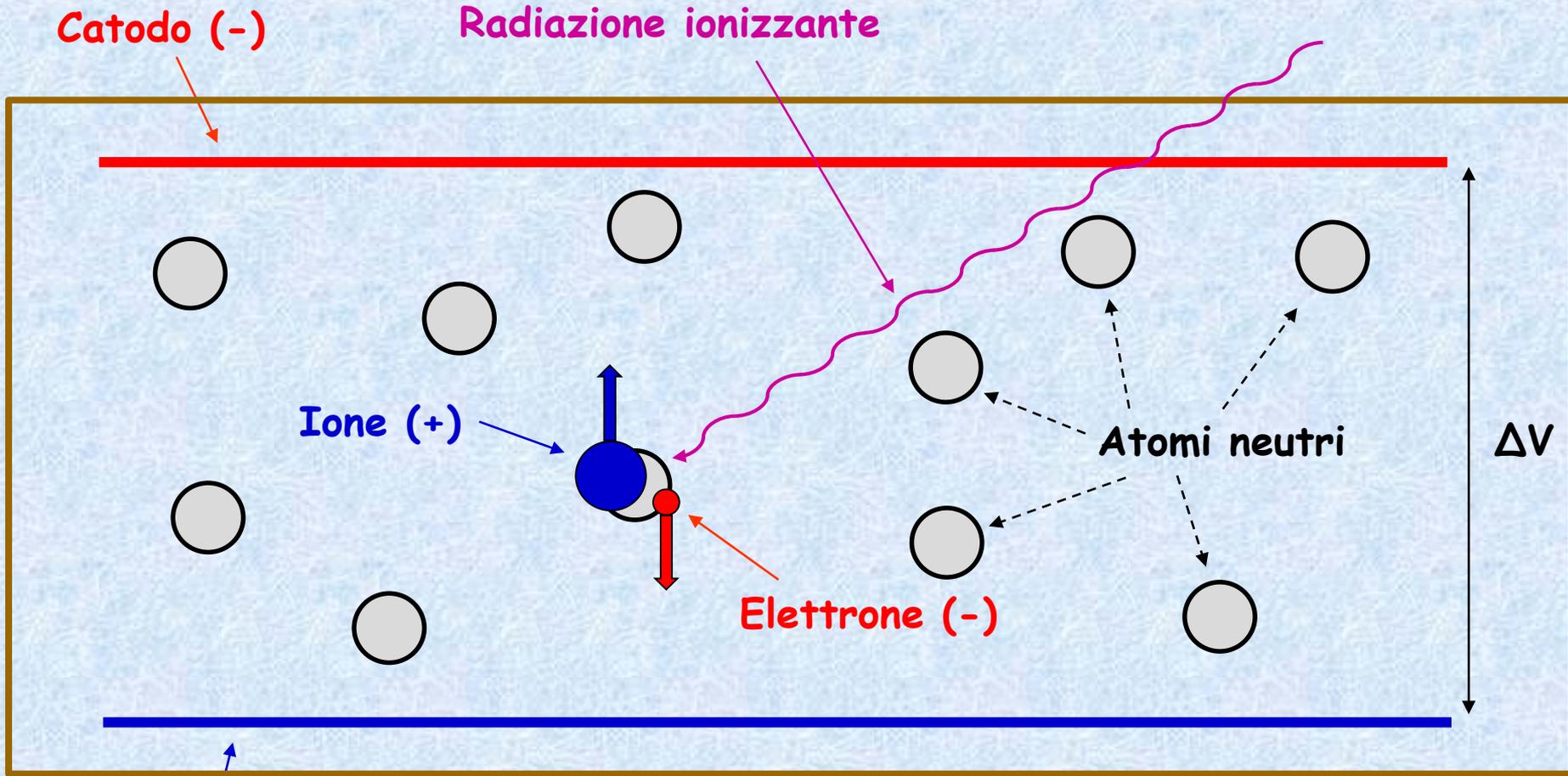
Zona III, IV - di proporzionalità:

- Contatori proporzionali

Zona V: di Geiger-Müller

- Rivelatori Geiger-Müller

Camera a ionizzazione

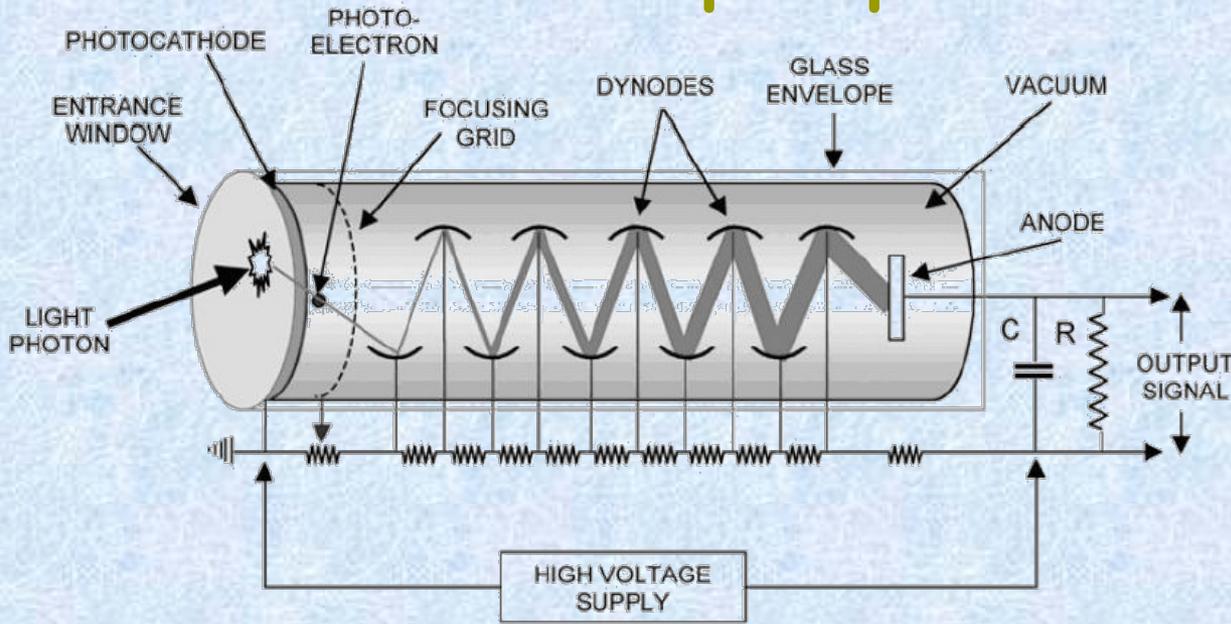


Anodo (+) ΔV bassa \longrightarrow Ogni coppia ione-elettrone viene rilevata, ma non provoca ulteriori ionizzazioni



Strumento estremamente sensibile a variazioni di intensità della radiazione, ma incapace di discriminare radioisotopi che emettono fotoni con energie diverse

Contatore proporzionale



ΔV media



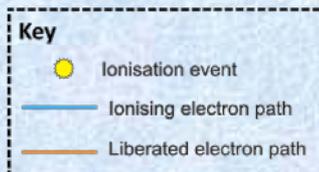
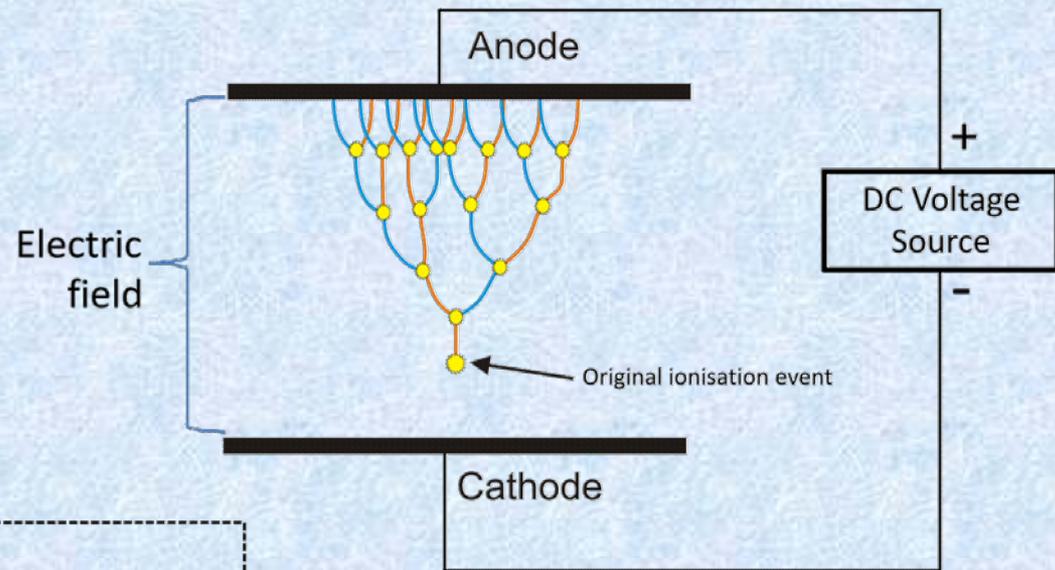
Ogni fotoelettrone ionizza ulteriori atomi (effetto valanga), proporzionalmente alla sua energia.

Il contatore è formato da una serie di lastre a potenziale via via crescente (dinodi), che amplificano il numero degli elettroni che arrivano sull'anodo.



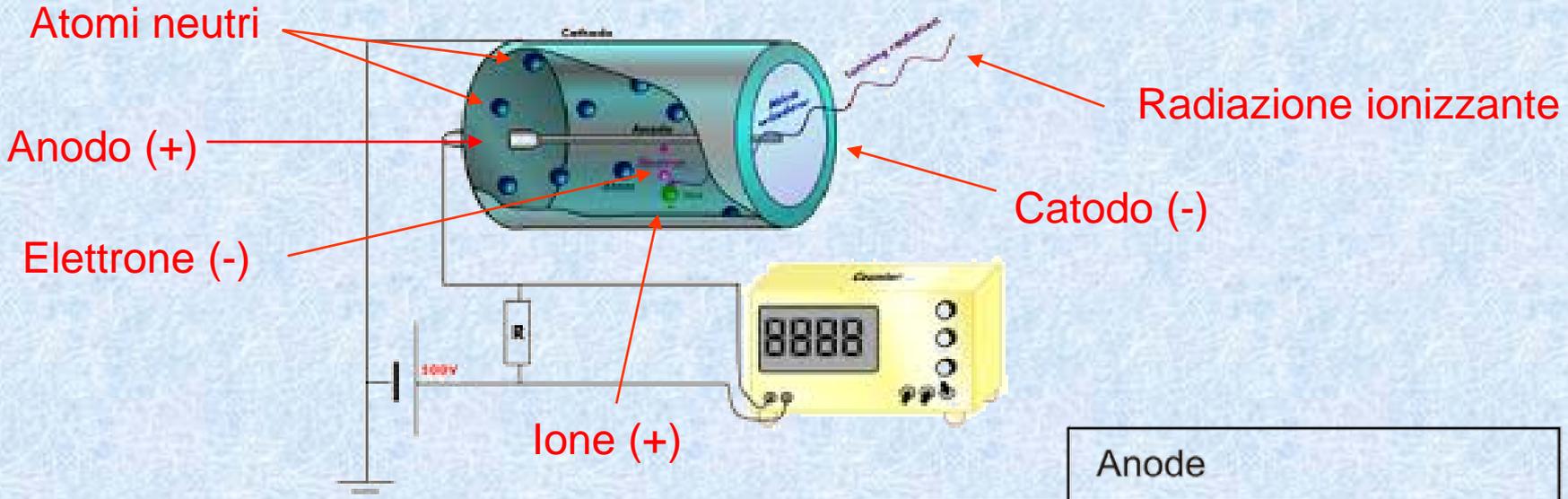
La conseguenza è che **sull'anodo arriva un segnale misurabile e commisurato all'energia della radiazione incidente.**

$$(E_{\text{Fotoelettrone}} \propto E_{\text{Raggio X}})$$

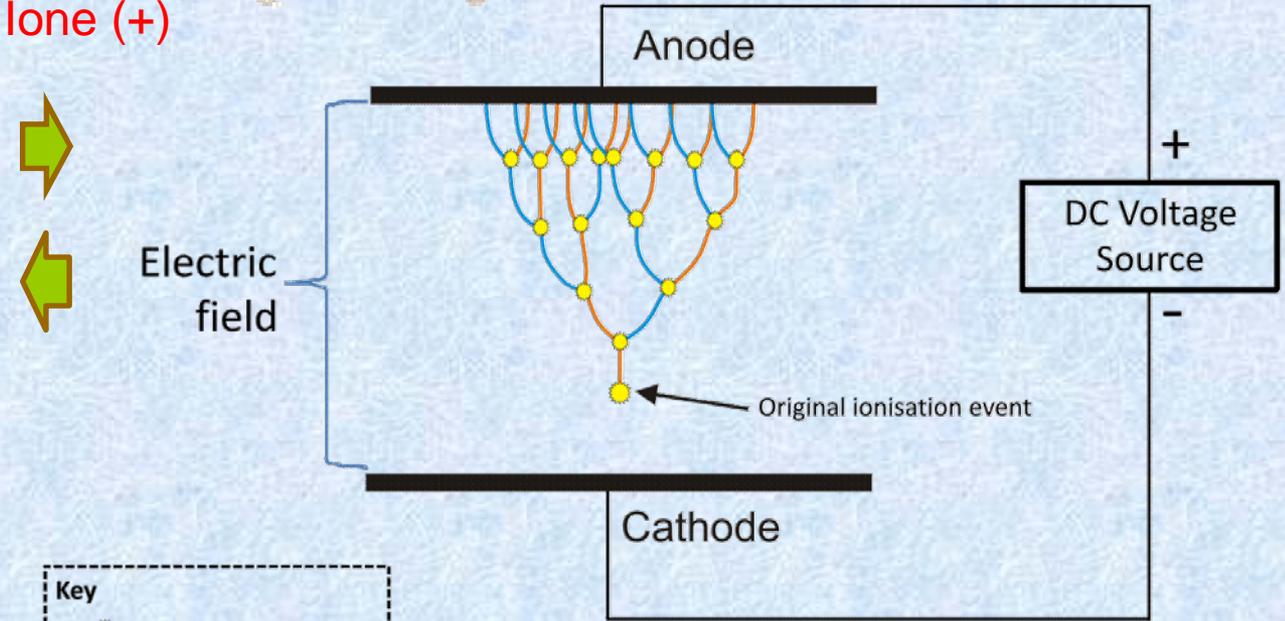


EFFETTO VALANGA DI TOWNSEND

Contatore Geiger-Müller



ΔV alta
 Qualunque fotoelettrone
 satura il contatore
 Non è possibile discriminare
 tra radioisotopi
 In compenso ha un
 alta sensibilità



Key

- Ionisation event
- Ionising electron path
- Liberated electron path

EFFETTO VALANGA DI TOWNSEND

Riferimenti

- D. Lgs. 230/1995 "Attuazione delle direttive 89/618/EURATOM, 90/641/EURATOM, 92/3/EURATOM e 96/29/EURATOM in materia di radiazioni ionizzanti" e successive modificazioni ed integrazioni;
- "Proposta di procedura per la gestione dei dispositivi di protezione individuale dalla radiazione X per uso medico-diagnostico: camici e collari per la protezione del lavoratore", INAIL - Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro ed ambientale - Coordinamento scientifico di Sergio Iavicoli, collaborazione di Francesco Campanella, Maria Antonietta D'Avanzo, Laura Moretti, Domenico Acchiappati, Paolo Giuliani, Fabriziomaria Gobba;
- "Il rischio fisico nel settore della bonifica dei siti industriali di origine non nucleare contaminati da radiazioni ionizzanti", INAIL - Dipartimento Innovazioni Tecnologiche e Sicurezza degli Impianti, Prodotti ed Insediamenti Antropici - Carmine Zicari.

N.B.: Le immagini illustrate in questa presentazione hanno il solo scopo di facilitare la comprensione di quanto riferito ed appartengono ai loro legittimi proprietari.

Grazie per l'attenzione

Manuel Fernandez