

GIACOMO TORZO, CLAUDIO VENIER

Dipartimento di Fisica

Università di Padova

Un semplice contatore Geiger tascabile per α , β e γ

(Pervenuto il 21.10.99, approvato il 14.1.00)

ABSTRACT

A simple pocket-size, battery operated Geiger counter is here described. It may be used in classroom to test low emission radioactive sources, or to detect background radiation.

Introduzione

Con il nome generico di radiazione ionizzante si indica una vasta categoria di particelle capaci di provocare la ionizzazione degli atomi con cui esse interagiscono. Dato che l'energia di legame degli elettroni più esterni nei singoli atomi è dell'ordine di qualche decina di eV, l'energia minima di tali particelle dev'essere dello stesso ordine di grandezza: si può trattare di quanti di radiazione elettromagnetica (fotoni) ad alta frequenza (UV, raggi X, raggi γ), o di particelle dotate di massa (elettroni, protoni, neutroni, ioni pesanti).

Per le particelle cariche l'interazione con la materia è essenzialmente di tipo Coulombiano e la probabilità di collisione ionizzante è proporzionale al tempo che la particella passa in prossimità dell'atomo interessato, e quindi inversamente proporzionale alla velocità della particella.

Dato che nella collisione (che può produrre, oltre che ionizzazione, anche eccitazione elettronica dell'atomo) la particella perde parte della propria energia, essa progressivamente rallenta nell'attraversare uno spessore di materia e con ciò aumenta la sua sezione d'urto per collisioni ionizzanti.

A parità di energia le particelle più pesanti sono molto più lente delle particelle leggere e quindi hanno maggiore sezione d'urto.

Le particelle α (nuclei di elio = 2 protoni + 2 neutroni), la cui massa è circa 10^4 volte quella delle particelle β (elettroni), vengono fermate da strati molto più sottili di materiale (a parità di energia).

La lunghezza di penetrazione di una particella carica in un dato materiale è quindi determinata essenzialmente dalla loro energia e dalla loro massa.

Diversa è la situazione per i fotoni che viaggiano a velocità costante (quella appunto della luce) e normalmente perdono energia in una unica collisione (per effetto fotoelettrico, o in più collisioni per effetto Compton). Per questo tipo di radiazione quindi si deve applicare un criterio statistico: si può solo prevedere che la probabilità di trovare un

fotone dopo un certo spessore di materiale decresce esponenzialmente con lo spessore attraversato.

1. Camera a ionizzazione, contatore proporzionale e tubo di Geiger

Le camere a ionizzazione, i contatori proporzionali e i contatori Geiger-Müller sono sensori sostanzialmente dello stesso tipo, ma che vengono utilizzati in modo diverso e per diversi tipi di misure¹.

Si tratta in tutti e tre i casi di un condensatore il cui dielettrico è costituito da una opportuna miscela di gas.

Nel *tubo di Geiger-Müller* il condensatore è di solito a forma cilindrica con immersi due elettrodi tra i quali è mantenuta una alta tensione (tipicamente 500 volt). Quando il sensore è attraversato da una particella ionizzante, gli ioni accelerati dal campo elettrico innescano una scarica tra gli elettrodi. Poiché il numero di eventi è proporzionale al numero di particelle che attraversano il tubo, la frequenza delle scariche fornisce una misura proporzionale alla attività della sorgente che emette le particelle.

Il tubo di Geiger opera, come spiegato più avanti, nella regione di saturazione (alta tensione di polarizzazione del condensatore). Se si opera a tensione più bassa il condensatore si comporta come una camera a ionizzazione.

Nella *camera a ionizzazione* non avviene moltiplicazione, e la corrente è solo quella molto piccola prodotta dagli ioni della traccia. Ogni impulso di corrente trasporta tanta carica quanta ne è stata prodotta nella traccia della particella ionizzante. Dato che la carica prodotta è proporzionale all'energia della particella, questo tipo di sensore può essere tarato in energia se dotato di un adeguato integratore che misuri l'area dei singoli impulsi di corrente. Le camere proporzionali vengono usate principalmente per misurare spettri di particelle α (o anche β nel caso si usi gas ad alta pressione con elevato potere d'arresto).

Nel *contatore proporzionale*, che opera a tensioni intermedie, il fattore di moltiplicazione è all'incirca costante (non si ha qui la produzione di ioni da fotoni secondari che avviene nel tubo di Geiger), cosicché il segnale è circa proporzionale alla quantità di elettroni e ioni contenuta nella traccia, ma molto maggiore che nella camera a ionizzazione. Dato che qui il fattore di moltiplicazione è molto minore che nel caso del Geiger, i tempi morti possono essere molto contenuti (sotto 1 μ s), e tale sensore si presta bene ad essere usato con contatori (scale) che discriminano gli impulsi in energia.

2. Sulle unità di misura per le radiazioni ionizzanti

L'attività di una sorgente radioattiva si esprime, nel Sistema Internazionale, in becquerel (Bq): questa unità di misura è definita come numero di decadimenti per secondo (è quindi omogenea alla frequenza, che si esprime in Hz). Una unità di misura che è stata molto usata in passato è il curie (Ci), e il fattore di conversione tra le due unità è $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$. Ma tale unità è stata dichiarata fuori norma a partire dal 31.12.1985, in base alla normativa stabilita dalla Comunità Europea su indicazione del Bureau Internazionale di Pesi e Misure (IBPM).

Dalla definizione di attività, risulta chiaro che un contatore Geiger può essere tarato in becquerel se esso è in grado, oltre che di misurare il tempo di conteggio T e il numero contato di eventi ionizzanti C , anche di fornire in uscita il valore medio $f = C/T$ (se T è misurato in secondi, il valore di f è una misura dell'attività rivelata).

Bisogna infatti distinguere tra la frazione di attività rivelata dal sensore e l'attività totale emessa dalla sorgente: ad esempio, per una sorgente di piccole dimensioni (puntiforme), il sensore intercetta solo una piccola frazione delle particelle emesse, pari al rapporto $\Omega/4\pi$, ove Ω è l'angolo solido sotteso alla sorgente dal sensore (tale rapporto è anche detto fattore geometrico di efficienza E_G , o accettazione). In altri termini si può dire che il contatore Geiger misura l'intensità del flusso di radiazione prodotto dalla sorgente.

Si deve tenere presente inoltre che non tutte le particelle emesse entro l'angolo Ω producono ionizzazione: alcune non raggiungono il sensore perché fermate dall'aria o dalle pareti del tubo di Geiger, altre attraversano il sensore senza interagire con il gas. Più precisamente si deve dire allora che la misura fornita da un particolare sensore è proporzionale all'intensità del flusso di radiazione, e la costante di proporzionalità è detta efficienza intrinseca E_I di quel sensore.

La sensibilità di un contatore Geiger-Müller è quindi determinata dal prodotto $E_G \times E_I$: il primo

fattore è proporzionale al volume del sensore, mentre il secondo dipende essenzialmente dalla trasparenza delle pareti del sensore (tubi a pareti spesse non "sentono" le particelle alfa o le beta di bassa energia).

È importante notare che un contatore Geiger non può misurare l'energia delle particelle né la quantità di carica da esse prodotta: per questo motivo la sua scala non dovrebbe essere graduata in gray/ora (Gy/h), che è una unità di intensità di dose assorbita², né tantomeno in röntgen/ora³ (R/h), che è una unità di intensità di dose di esposizione, o in sievert/ora (Sv/h), che è una unità di intensità di dose di esposizione equivalente assorbita⁴.

Gli strumenti commerciali tuttavia riportano molto spesso scale graduate in mR/h o mGy/h, facendo un improprio riferimento ad una convenzionale equivalenza tra il flusso di eventi ionizzanti prodotti da particelle di qualsiasi energia e natura e l'energia depositata in aria da un pari flusso di un particolare tipo di particelle di data energia. Ad esempio il vecchio modello Philips PW 4012/01 usa il fattore di conversione $1 \text{ mR/h} = 33 \text{ Bq}$ per la propria scala con riferimento alla radiazione γ emessa da Radio, mentre il modello Surveyor-50 della Bicon usa il fattore di conversione $1 \text{ mR/h} = 20 \text{ Bq}$ con riferimento alla emissione da Cobalto. Gli strumenti adatti a misurare correttamente dosi di esposizione o assorbimento sono altri, in generale più costosi, più delicati e più difficili da usare: ad esempio la camera a ionizzazione, il contatore proporzionale a gas, i vari tipi di scintillatori a gas o a stato solido.

Diversi tipi di tubi Geiger possono essere classificati per tipo di particelle che sono in grado di rivelare: di solito, in funzione della crescente trasparenza della finestra del sensore si distinguono tre classi: modelli adatti solo per γ e X (fotoni di grande energia), oppure per γ e β (elettroni), infine per γ , β e α (nuclei di elio).

Un ultimo parametro, che diventa importante ad elevati flussi di radiazione, è quello che viene definito tempo morto τ . Esso è l'intervallo di tempo, successivo all'evento che produce la scarica, durante il quale il sensore non è in grado di contare altri eventi, e quindi è inattivo o morto.

3. Natura del segnale e definizione di tempo morto

Per capire l'origine del tempo morto si deve considerare l'evoluzione temporale della tensione agli elettrodi negli istanti immediatamente successivi al passaggio della particella ionizzante.

Quando la particella attraversa il gas nel rivelatore essa subisce collisioni multiple perdendo mano a mano energia e lasciando sul suo percorso una traccia costituita da coppie di ioni positivi e

negativi; il numero di coppie create dipende dalla natura della particella, dalla sua energia e dalla lunghezza della traccia. Questi ioni sono soggetti ad un campo elettrico, di solito a simmetria radiale nei tubi Geiger cilindrici ove l'elettrodo a tensione positiva (anodo) è costituito da un filo assiale e quello posto a massa (catodo) è costituito dalle pareti del tubo (figura 1).

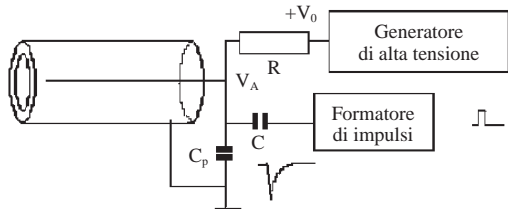


Fig. 1

Se il campo elettrico è sufficientemente elevato, gli ioni vengono separati prima che possano ricombinarsi, e vengono accelerati raggiungendo rapidamente l'energia cinetica necessaria a ionizzare per urto altri atomi del gas prima di raggiungere gli elettrodi. A valori molto alti del campo elettrico, si producono anche fotoni, emessi dagli atomi eccitati, che ionizzano a loro volta altri atomi. L'effetto è quello di una moltiplicazione a valanga con una conseguente rapida crescita della corrente elettrica ed una corrispondente caduta della impedenza $Z(t)$ tra anodo e catodo.

La tensione dell'anodo $V_A(t)$, in funzione del tempo t è data dalla tensione di alimentazione V , ripartita tra la elevata resistenza di polarizzazione ($R \approx 10 \text{ M}\Omega$) e l'impedenza $Z(t)$: $V_A(t) = V Z(t) / [R + Z(t)]$. La corrente massima, corrispondente alla Z minima è praticamente indipendente dal numero di ioni presenti nella traccia, e di conseguenza il segnale $V_A(t)$ non dipende dall'energia della particella ionizzante, nè dalla sua natura, ma solo dal numero di particelle ionizzanti.

Ciò equivale a dire che il sensore Geiger opera in condizioni di saturazione. Perchè ciò avvenga è necessario che la tensione di polarizzazione dell'anodo sia sufficientemente alta, cioè sia entro quella che viene detta zona di plateau.

La forma del fronte di discesa del segnale prodotto da un evento ionizzante è determinata dalla corrente di scarica, mentre il fronte di risalita è sostanzialmente un esponenziale determinato dalla costante di tempo $\tau = RC_p$: $V_A(t) \approx V[1 - \exp(-t/\tau)]$, ove C_p è la capacità parassita tra gli elettrodi.

Per contare il numero di eventi conviene trasformare il segnale analogico, prelevato all'anodo mediante una capacità, in un segnale digitale attraverso un discriminatore a soglia, che eviti conteggi spuri dovuti a segnali di rumore, e un formatore di impulsi, di opportuna durata ed ampiezza, che possa agevolmente pilotare un contatore elettronico.

Il discriminatore è sostanzialmente un comparatore di tensione con isteresi e con soglia prossima alla tensione di picco del segnale prodotto da un evento ionizzante.

Se una seconda particella attraversa il sensore prima che sia finito l'impulso generato da quella precedente, il suo effetto è solo quello di allungare e deformare l'impulso, e i due eventi vengono contati dal discriminatore come uno solo. Ciò equivale a dire che se τ è la durata efficace di un impulso, cioè il tempo necessario affinché $V_A(t) \approx V$, il sensore resta cieco per un tempo τ ogni volta che conta un evento.

Supponiamo di contare eventi, distribuiti nel tempo in modo casuale con una frequenza media $f = C_0/T$, per un intervallo $T \gg \tau$, ove C_0 è il numero totale di eventi contati nel tempo T . Per effetto del tempo morto il numero di eventi contati sarà $C_1 < C_0$. La frequenza media misurata è $f_1 = C_1/T$, e il tempo morto totale è $T_1 = C_1 \tau$. Il numero di eventi persi è in media $C_0 - C_1 = f T_1$.

Quindi si può scrivere $f = C_0/T = [(C_0 - C_1) + C_1]/T = f(T_1/T) + f_1 = f(C_1\tau/T) + f_1 = f f_1 \tau + f_1$, e in definitiva $f = f_1/(1 - f_1\tau) \approx f_1(1 + f_1\tau)$, formula che permette di ricavare la frequenza degli impulsi effettiva f dalla frequenza di impulsi misurata f_1 , una volta che sia noto il tempo morto τ . L'errore relativo $\Delta f/f$ dovuto al tempo morto è quindi dell'ordine di $f_1\tau$. Ad esempio se $\tau = 10^{-4} \text{ s}$, una frequenza misurata $f_1 = 600$ corrisponde ad una frequenza effettiva $f = 636$, con un errore percentuale su f del 6%.

4. Descrizione di un Geiger tascabile

Descriviamo qui un contatore Geiger-Müller portatile, con visore digitale e consumo ridotto.

La sua sensibilità (0.01 Becquerel) consente misure attendibili della radiazione di fondo naturale ($\approx 0.4 \text{ Bq}$), ed il sensore usato, dotato di finestra sottile, permette di rilevare anche particelle α .

Il fondo scala (200 Becquerel) supera di molto l'intensità di rischio per esposizione a sorgenti radioattive intense. La soglia di attenzione è infatti di 2 Bq: con una esposizione ad una tale attività prolungata per un anno si raggiunge la dose massima consentita per la popolazione civile, pari ad una dose equivalente di 600 millirem/anno, circa.

Il tempo di acquisizione di una misura è variabile tra 1 e 10 secondi.

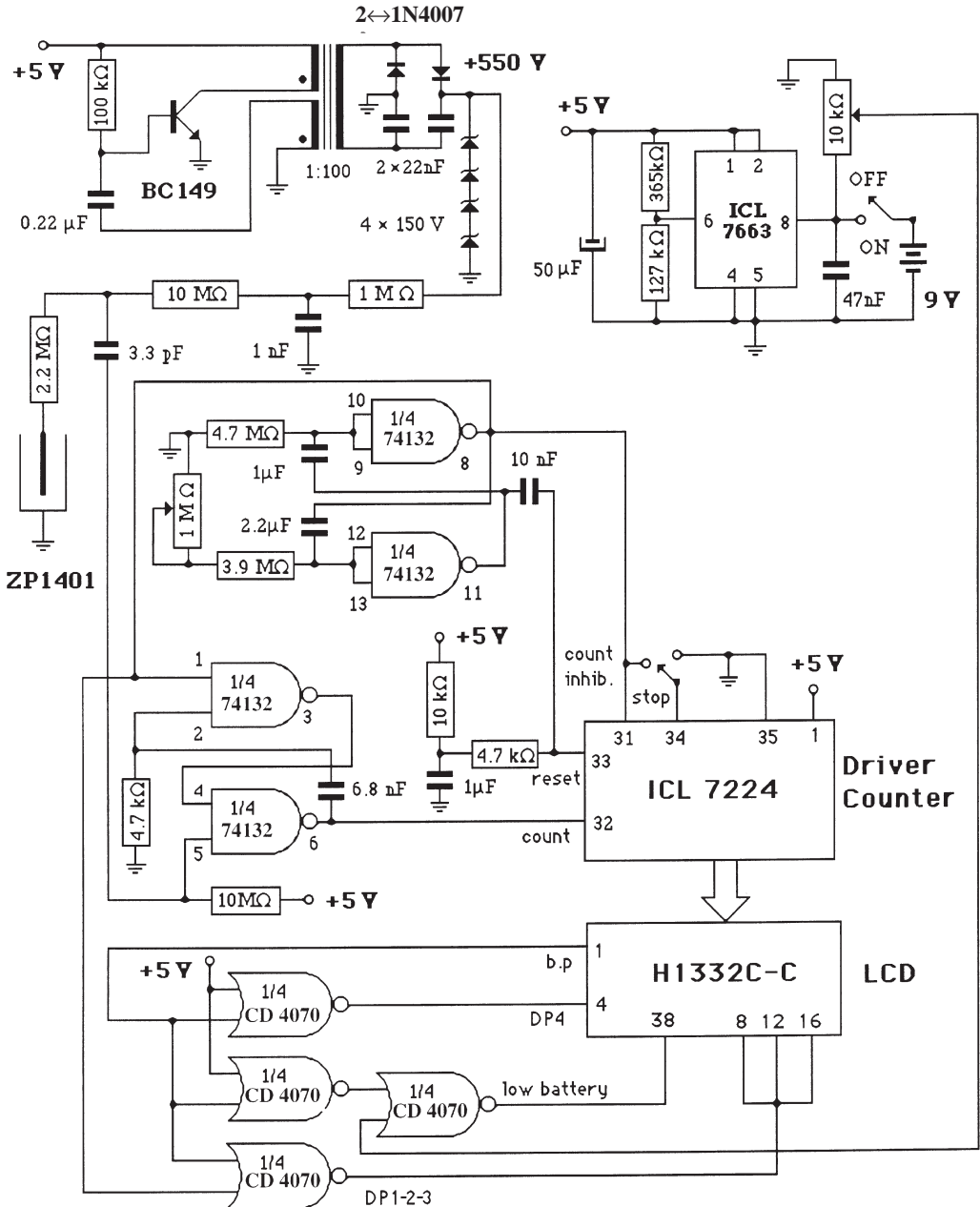
Il contatore è montato in una scatola di $15 \times 8 \times 3 \text{ cm}$ e pesa circa 250 grammi (inclusa la batteria alcalina da 9 volt).

L'alimentatore ad alta tensione è ottimizzato per basso consumo, ed utilizza un oscillatore a rilassamento formato da un solo transistor ed un doppio avvolgimento nel primario del trasformatore per alta frequenza. La durata di una batteria in condizioni di funzionamento continuo supera la settimana.

Lo strumento non contiene componenti fragili, fatta eccezione per il tubo Geiger che, per poter rivelare particelle alfa, è dotato di una finestra frontale di mica molto sottile (diametro 9mm, 2.5 mg/cm²). Le particelle beta e gamma possono invece attraversare anche le pareti del tubo (lunghezza attiva 27 mm, 250 mg/cm²). La sensibilità dello strumento è maggiore quindi per beta e gamma, e lo strumento risulta direzionale per le alfa.

Il tempo morto è $\tau = 0.1$ millisecondi (pertanto effetti di non linearità diventano apprezzabili solo per attività superiori a 100 Bq).

Le norme per un uso corretto del sensore sono molto semplici: normalmente basta lasciare in sede il cappuccio di plastica che protegge la finestra. In queste condizioni lo strumento non risente degli eventuali urti accidentali e conta correttamente beta e gamma. Solo se si vuole rivelare la



presenza di alfa è necessario sfilare il cappuccio di plastica. Esso è forato per evitare che la finestra possa venire rotta per effetto della pressione dell'aria imprigionata quando si rimette in sede il cappuccio. È opportuno quindi evitare di ostruire con le dita il foro quando si inserisce o si rimuove la protezione, perchè il tubo danneggiato non è riparabile, e può solo essere sostituito.

L'alimentazione a circa 550V è prodotta da un oscillatore a rilassamento, ottimizzato per basso consumo, costituito da un solo transistor (BC149) che guida il primario di un piccolo trasformatore 1::100 (3 spire:: 300 spire su pot-core B50 Thomson $\Phi = 15\text{mm}$) e retroazionato attraverso un secondario ausiliario a rapporto 1::1. La tensione alternata del secondario è rettificata da una coppia di diodi che caricano due condensatori in serie e stabilizzata da una serie di 4 zener da 150V e infine filtrata da un RC prima di essere fornita tramite un resistore da $1\text{M}\Omega$ all'anodo del tubo Geiger.

Il segnale è prelevato tramite un filtro CR pass-alto e squadrato da un formatore di impulso (un monostabile costituito da due porte NAND (1/4 74132) e un RC da $30\mu\text{s}$) prima di essere inviato al contatore (ICL7224) che funge anche da circuito pilota per il visore a cristalli liquidi (H1332C-C).

Un astabile costituito da altre due porte NAND (1/4 74132) e due RC fornisce l'intervallo di tempo (aggiustabile a 10 secondi tramite un potenziometro da $1\text{M}\Omega$) per l'acquisizione, e il tempo di mantenimento sul visore del conteggio acquisito (≈ 5 secondi alla fine dei quali il contatore è resettato a zero).

La tensione (5V) di alimentazione dei circuiti integrati è stabilizzata da un ICL7663 e lo stato di carica della batteria da 9V è controllato da una porta NOR (1/4 CD4070) che confronta una frazione della tensione ai capi della batteria con la tensione di soglia ($\approx 2.5\text{V}$) del MOSFET e quando essa scende sotto il valore prefissato attiva il segnale "Low Battery".

Si usa uno ZP1401 (tubo Geiger prodotto dalla Philips) che richiede alimentazione da 350V a 600V. Ha finestra in mica (2.5 mg/cm^2) e parete del tubo in ferro con densità superficiale di 250 mg/cm^2 . Tempo morto massimo: $90\mu\text{s}$, capacità parassita: 1pF , gas rivelatore: miscela di neon, argon e alogeno.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano Renzo Storti per l'aiuto offerto nella costruzione del primo prototipo di questo strumento.

Note

¹ Esistono anche altri tipi di rivelatori di radiazioni ionizzanti: quelli a semiconduttore e gli scintillatori. La creazione di coppie (elettrone-lacuna) per effetto fotoelettrico interno o per interazione Coulombiana in un materiale semiconduttore è il processo che viene sfruttato nei rivelatori semiconduttore. La risoluzione in energia che è possibile ottenere in questo caso è molto maggiore, dato che l'energia necessaria a creare una coppia è di un ordine di grandezza inferiore che per gli atomi dei gas utilizzabili nei contatori a gas. Il principio di funzionamento è quello utilizzato nel fotodiode PIN polarizzato inversamente, con la massima estensione dello strato di svuotamento, per minimizzare il numero di coppie che si ricombinano prima di migrare agli elettrodi.

Il rivelatore a scintillazione utilizza una finestra, di materiale fluorescente (che può cioè convertire l'energia della particella incidente in luce) accoppiata ad un fotomoltiplicatore. La qualità dello scintillatore dipende dalla efficienza di conversione, dalla velocità dell'impulso luminoso (tempo di decadimento della fluorescenza), dal guadagno e dal rapporto segnale/rumore del fotomoltiplicatore. Molti sono i materiali usati come elemento scintillatore: inorganici (solfuro di cadmio o zinco), liquidi (cicloesano, benzolo, toluolo, xilolo,...), gassosi (argon, neon, xenon, elio, kripton, azoto,...) e vengono scelti in base al tipo e all'energia delle particelle da rivelare

² 1 gray (Gy) = 1 joule di energia assorbita da 1 kg di materiale esposto ($1\text{Gy} = 100\text{ rad}$).

³ 1 röntgen (R) = quantità di radiazione che produce una unità di carica elettrica e.s.u. di ionizzazione in 1 cm^3 di aria secca alla pressione e temperatura standard ($P = 100\text{kPa}$ e $T = 273\text{ K}$). Unità di misura di esposizione fuori norma dal 31/12/1985 e sostituita nel Sistema Internazionale dal coulomb/ chilogrammo (C/kg); il fattore di conversione vale: $1\text{ C/kg} = 3876\text{ R}$.

⁴ 1 sievert (Sv) è la dose assorbita che ha la stessa efficacia biologica di quella prodotta da una quantità di raggi X che depositano 1J in 1 kg di sostanza irradiata. ($1\text{ Sv} = 100\text{ rem}$, ove rem sta per röntgen equivalent man).