PRODUZIONE DI RAGGI X

di

dott.ssa Rossella Vidimari

Servizio di Fisica Sanitaria

INDICE

Paragrafo 1 Origine dei raggi X

1.1 Catodo e Filamento catodico

1.2 Accelerazione degli elettroni

1.3 Anodo

Paragrafo 2 Spettro dei raggi X

Paragrafo 3 Fattori che influenzano lo spettro dei raggi X

3.1 Tensione del tubo radiologico

3.2 Corrente del tubo radiologico

3.3 Materiale del target

3.4 Filtrazione

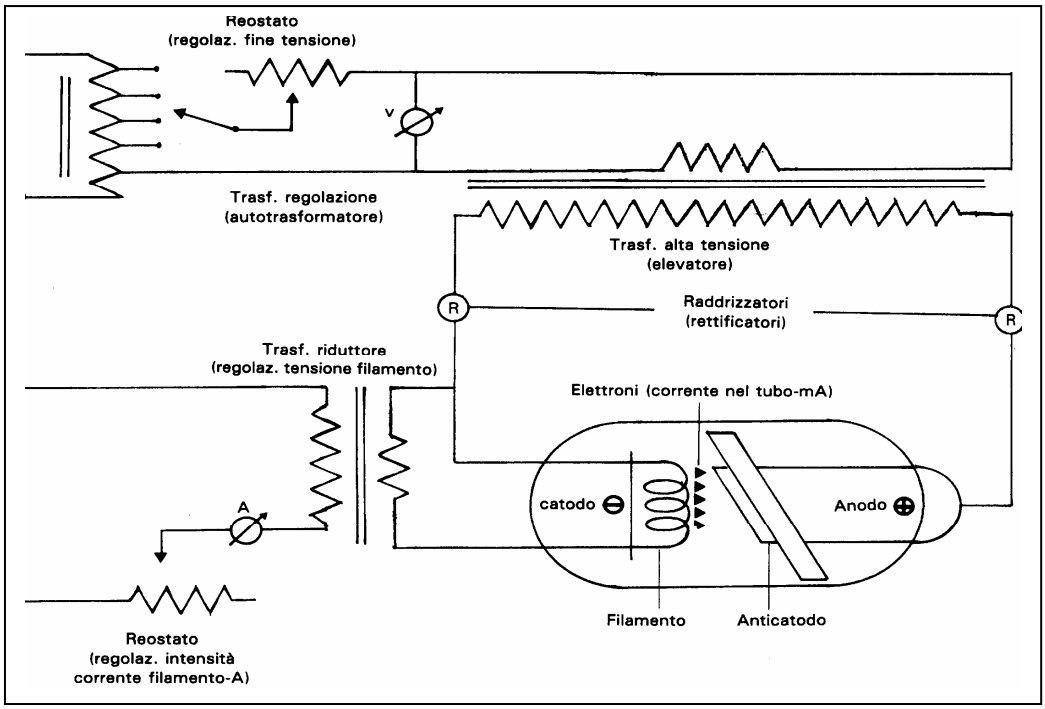
Paragrafo 1

ORIGINE DEI RAGGI X

I raggi X sono una radiazione elettromagnetica di elevata energia (>1 keV) ottenuta bombardando, in condizione di vuoto spinto, un bersaglio (target) metallico con elettroni veloci emessi per emissione termoionica da un catodo riscaldato ed accelerati verso un anodo positivo (target). In seguito ai processi di interazione tra gli elettroni veloci e gli atomi del materiale costituente il target, una parte dell'energia elettronica (<1%) si trasforma in radiazione X, il resto (≈99%) è persa sotto forma di calore.

Una sorgente di raggi X (o **tubo di Coolidge**) può essere considerata costituita essenzialmente da tre parti fondamentali:

- La sorgente di elettroni, rappresentata da un filamento, collegato al catodo e dotato di circuito autonomo di alimentazione;
- Il sistema di accelerazione degli elettroni che rappresenta il circuito principale di alimentazione del tubo (alta tensione), collegato con gli elettrodi del tubo stesso attraverso particolari sistemi di raddrizzamento della corrente;
- Il bersaglio contro il quale gli elettroni vengono accelerati e convogliati (anodo).



Schema di un circuito e di un tubo per raggi X

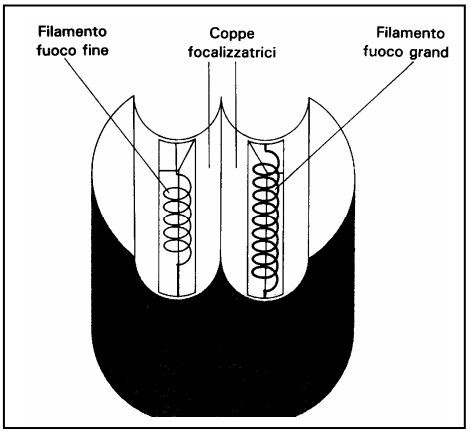
1.1 Catodo e Filamento catodico

Il filamento catodico usualmente impiegato ha la forma di una spiralina. I tubi di Coolidge sono provvisti di due spiraline di diversa lunghezza e dimensioni, allocate in opportune nicchie di focalizzazione. In questo modo si ottengono due fuochi: il **fuoco fine** e **fuoco grande** .

Il catodo e le spiraline sono caricate negativamente in modo tale che gli elettroni emessi per effetto termoelettronico vengono respinti dalle pareti della nicchia focalizzatrice e focalizzati verso l'anodo.

L'Intensità di emissione dipende da:

- *temperatura raggiunta dal filamento* (per temperature maggiori a 2000°C si ottengono tipiche correnti di 8÷10A);
- *natura del materiale costituente il filamento* (la probabilità del fenomeno termoelettronico cresce con il numero atomico Z: materiale tipico per le sue proprietà è il tungsteno con Z pari a 74);
- *dimensioni del filamento*: lunghezza e spessore (maggiore sono le dimensioni del filamento maggiore è il numero di atomi e quindi di elettroni).



1.2 Accelerazione degli elettroni

L'accelerazione degli elettroni catodici avviene nel vuoto spinto per evitare l'interferenza sulla loro traiettoria di altre particelle costituenti l'eventuale gas interposto. Essa è determinata da una alta differenza di potenziale (d.d.p.) tra catodo ed anodo. Il sistema di accelerazione risulta complesso in quanto la tensione deve essere rettificata e mantenuta costante per valori alta (alta tensione).

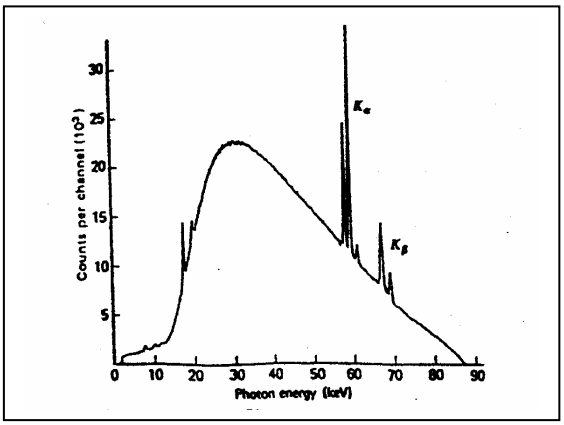
1.3 Anodo

L'anodo è costituito nella sua struttura tradizionale da un blocco metallico abitualmente di rame collegato al capo positivo del trasformatore; sulla sua superficie contrapposta al catodo è applicato un disco (piatto anodico) rappresentato di solito da una pastiglia di tungsteno (anticatodo).

Gli elettroni provenienti dal catodo ed accelerati dall'elevata d.d.p. interagiscono con gli atomi che costituiscono l'anticatodo mediante due differenti processi:

- **frenamento** (interazione tra gli elettroni ed il campo nucleare degli atomi) con produzione di raggi X a spettro continuo);

- **collisioni** tra elettroni veloci e gli elettroni orbitali interni degli atomi con produzione di radiazione X a spettro discreto oppure di calore.



Spettro caratteristico del tungsteno

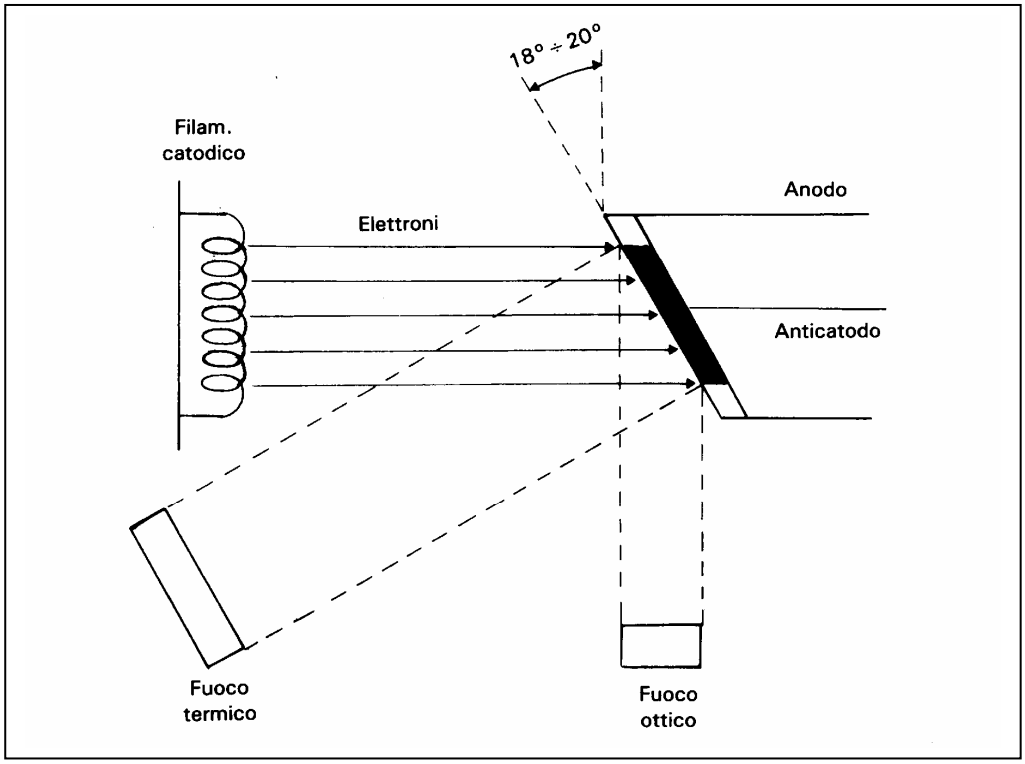
Il materiale costituente l'anticatodo deve essere caratterizzato da un alto punto di fusione, da una buona conducibilità termica e un elevato numero atomico.

IL tungsteno presenta un punto di fusione di circa 3300°C ed una elevata conducibilità termica. Altri dischi anodici possono essere costituiti da altro materiale come ad esempio il molibdeno caratterizzato da un valore basso di Z (pari a 42), ma da uno spettro di emissione quasi monocromatico.

La zona dell'anticatodo ove avviene l'urto del fascio di elettroni e quindi ove avviene la produzione di fotoni X è detta **macchia focale (fuoco, bersaglio o target)**.

La macchia focale è soggetta a due opposte esigenze: una superficie di impatto ampia per aumentare la dispersione termica (fuoco termico), viceversa una macchia focale piccola per ridurre i fenomeni di sfumatura o penombra dell'immagine radiografica (fuoco ottico).

Una soluzione tecnica è quella di dare una opportuna inclinazione all'anodo (18 ÷ 20 °).

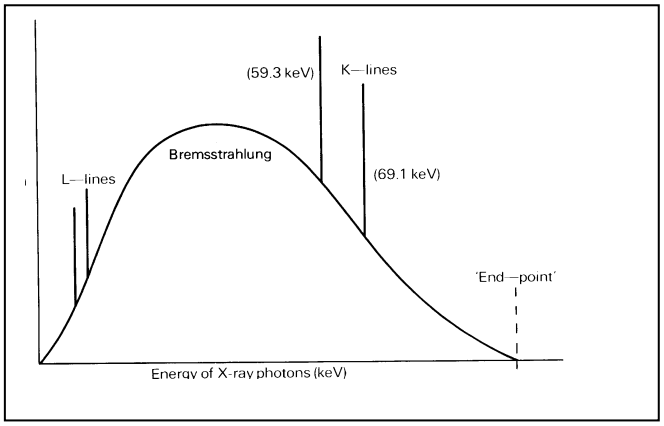


Anodo a fuoco fisso: fuoco termico e fuoco ottico.

Paragrafo 2

SPETTRO DEI RAGGI X

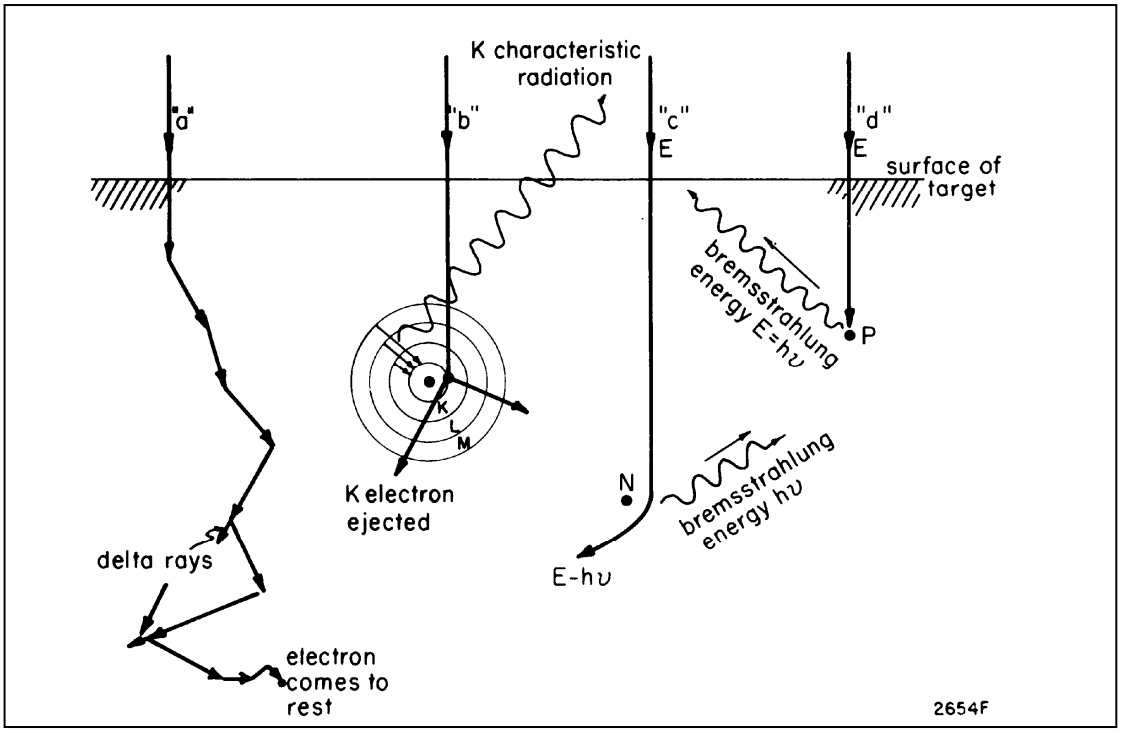
Il fascio di radiazioni emesse da un tubo a raggi X è policromatico ovvero è composto da radiazioni di differente lunghezza d'onda (o di diversa frequenza) che costituiscono nel loro insieme lo spettro X.
La distribuzione spettrale dei fotoni mostra un fondo continuo in cui si distinguono gruppi di righe corrispondenti a radiazioni X monocromatiche.



La ***componente continua*** è il risultato del processo di decelerazione degli elettroni all'interno del target e conseguente trasferimento di energia a singoli fotoni. Questi fotoni potranno avere una energia che varia con continuità da un valore minimo (0) ad un valore massimo corrispondente all'energia massima degli elettroni E_{max} pari a:

$$\mathbf{0 < h\nu < E_{max} = e\,V_p}$$

essendo $\mathbf{V_p}$ la d.d.p tra catodo e anodo ed **e** la carica dell'elettrone.



La ***componente monocromatica*** dello spettro (***spettro caratteristico***) dipende strettamente dalla natura del materiale costituente l'anodo, risultando indipendente dalla d.d.p. stabilita tra gli elettrodi. Tale spettro ha origine dall'interazione tra gli elettroni veloci e quelli orbitali più interni degli atomi anodici: gli elettroni veloci cedono parte della loro energia scalzando gli elettroni atomici dalle loro orbite eccitando o ionizzando l'atomo; per riportare l'atomo alla condizione di

stabilità energetica, il vuoto lasciato deve essere immediatamente riempito o da un elettrone delle orbite più esterne (effetto a cascata) o da un elettrone "libero" con conseguente emissione di energia sotto forma di fotoni. L'energia emessa è pari alla differenza di energia tra i livelli orbitali interessati, quindi a seconda del materiale costituente l'anodo (ovvero per un dato numero atomico Z) o meglio a seconda di come sono distribuiti i livelli energetici, i fotoni emessi saranno caratteristici di quel materiale: fotoni monocromatici .

Linee K per il tungsteno			**Linee L per il tungsteno**		
transizione	Energia (keV)	n.relativo	transizione	Energia (keV)	n.relativo
$K\text{-}N_{II}$	69.08	7	$L_{I}\text{-}N_{III}$	11.67	10
$K\text{-}M_{III}$	67.24	21	$L_{II}\text{-}N_{IV}$	11.28	24
$K\text{-}M_{II}$	66.95	11	$L_{III}\text{-}N_{V}$	9.96	18
$K\text{-}L_{III}$	59.32	100	$L_{I}\text{-}M_{III}$	9.82	37
$K\text{-}L_{II}$	57.98	58	$L_{II}\text{-}M_{IV}$	9.67	127
Linee K per il molibdeno			$L_{I}\text{-}M_{II}$	9.52	29
K-M	19.60	24	$L_{III}\text{-}M_{V}$	8.39	100
$K\text{-}L_{III}$	17.48	100	$L_{III}\text{-}M_{IV}$	8.33	11
$K\text{-}L_{II}$	17.37	52			

Paragrafo 3

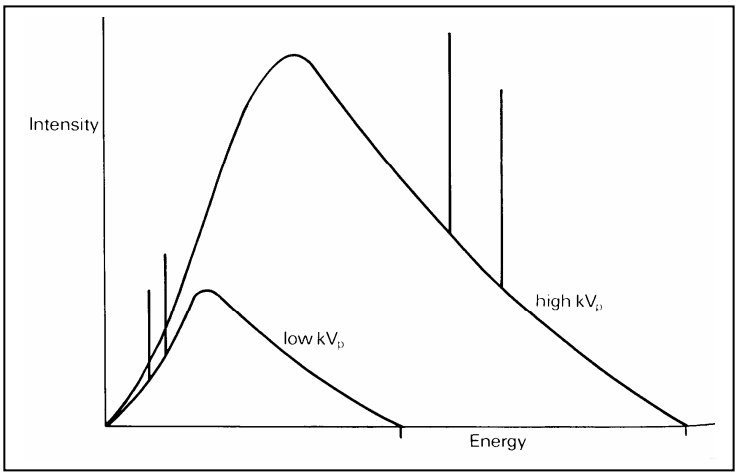
FATTORI CHE INFLUENZANO LO SPETTRO DEI RAGGI X

3.1 Tensione del tubo radiologico

La tensione applicata tra gli elettrodi del tubo determina la velocità con cui il fascio di elettroni viene accelerato dal catodo verso l'anodo, quindi l'energia cinetica degli elettroni stessi e l'energia dei fotoni X che ne derivano. La tensione caratterizza qualitativamente il fascio X ed è espressa in termini di **valore massimo** o **tensione di picco** (kVp).

Quanto maggiore è l'energia dei raggi X tanto maggiore è la loro frequenza e tanto minore è la lunghezza d'onda. Aumentando la energia aumenta la **"durezza"** e quindi il **"potere di penetrazione"**del fascio di radiazione, mentre diminuisce la loro assorbibilità da parte dei mezzi materiali attraversati.

Per tensioni via via più alte il picco dello spettro radiante si sposta verso energie più alte e l'intensità totale aumenta rapidamente in modo proporzionale al quadrato della tensione.



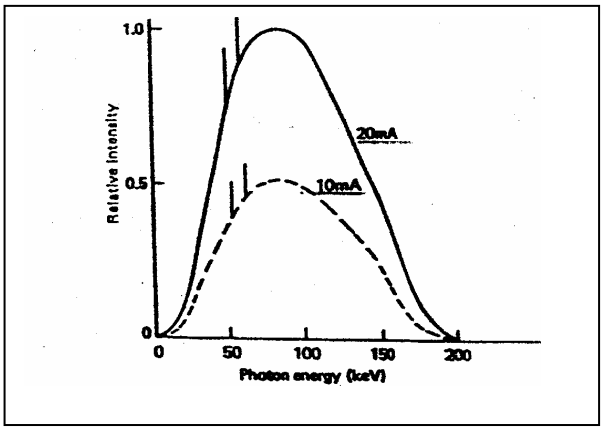
Dipendenza dello spettro X dalla tensione kVp

3.2 Corrente del tubo radiologico

L'**intensità** del fascio X è proporzionale soprattutto all'intensità della corrente applicata al filamento catodico, quindi alla temperatura raggiunta da quest'ultimo ed al conseguente flusso elettronico.

L'intensità caratterizza quantitativamente un fascio di radiazioni X; essa si indica in **mA** (milli ampere) con riferimento all'intensità per unità di tempo del flusso elettronico. Infatti il flusso elettronico ovvero la quantità di elettroni determina la quantità globale di fotoni X emessi.

La forma dello spettro rimane lo stesso, la energia E_{max} rimane la stessa mentre l'intensità totale risulta proporzionale alla corrente.



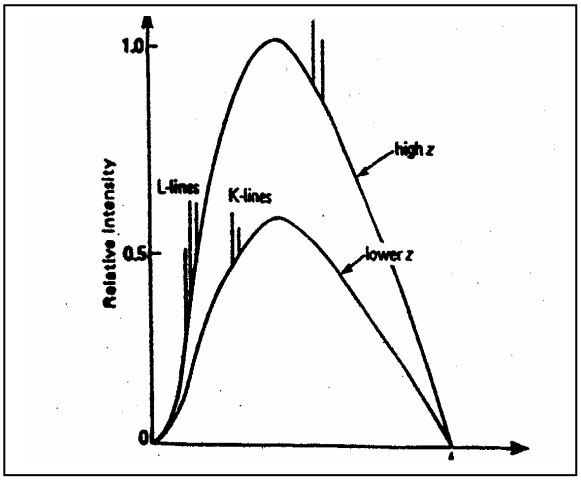
Effetto della corrente del tubo sullo spettro

3.3 Materiale del target

Un aumento del numero atomico Z del target comporta un generale aumento dell'intensità del fascio in quanto un valore più grande di massa, dimensione e carica comporta una maggiore probabilità di collisione degli elettroni. L'intensità totale del fascio radiante risulta proporzionale al numero atomico Z.

Per valori più grandi di Z comporta inoltre uno spostamento nello spettro delle linee caratteristiche verso energie più alte in quanto per valori più grandi di Z maggiore è l'energia necessaria per espellere gli elettroni di orbita K, L….

Infine il valore dell'energia massima dello spettro rimane inalterata, a parità di kVp.



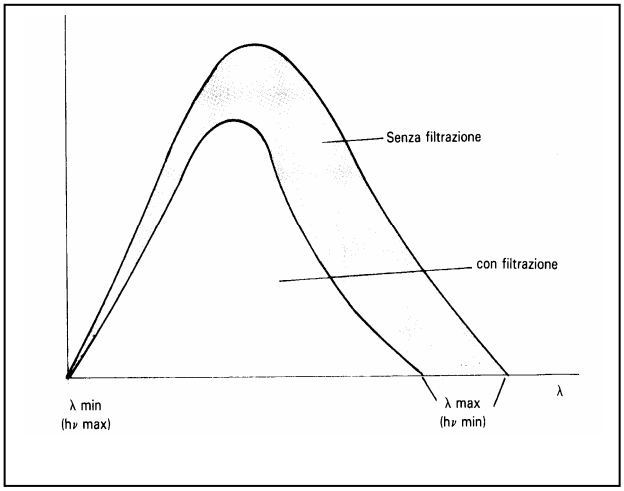
Effetto del numero atomico Z sullo spettro

3.4 Filtrazione

Il fascio di radiazioni X viene solitamente filtrato, interponendo sul suo cammino spessori opportuni di determinati materiali (**filtri**) con lo scopo di eliminare la componente meno energetica del fascio stesso ed eventuali radiazioni di fuga e diffuse (**indurimento del fascio**).

Viene detta **inerente** la filtrazione inamovibile che viene applicata in sede di fabbricazione alla finestra di un tubo.

Viene detta **addizionale** una eventuale filtrazione supplementare (berillio (Z=4) o alluminio (Z=13) o rame (Z=29)) posta sul cammino del fascio all'uscita del tubo per modificarne lo spettro o come forma o come intensità.



Effetto della filtrazione sullo spettro

L'*energia media* del fascio X dopo la filtrazione risulta aumentata in quanto la filtrazione riduce sia la componente "molle" ma anche in differente misura tutte le componenti spettrali. Più alto è il numero atomico Z del materiale usato per la filtrazione, più alta è la componente energetica filtrata. A parte l'importanza del numero atomico la filtrazione dipende dallo spessore di materiale usato.

In conclusione a parità di tensione la quantità di radiazione X assorbita dal filtro dipende dall'energia dei fotoni, dallo spessore e dal materiale del filtro.