INGEGNERIA BIOMEDICA LM

RADIAZIONI IONIZZANTI ED INTERAZIONI BIOLOGICHE

PROF. D'ERRICO

ANNO ACCADEMICO SEGUITO 2018/19

A cura di

GIANLUCA CARLONI

master COPY

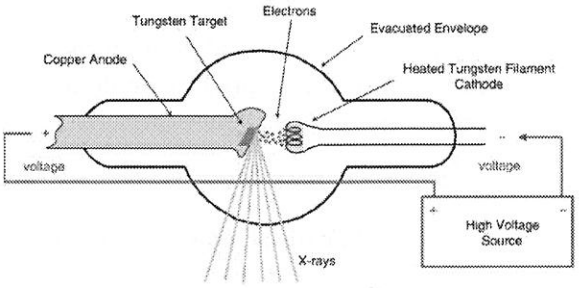



master
COPY


master
COPY

Produzione dei Raggi X

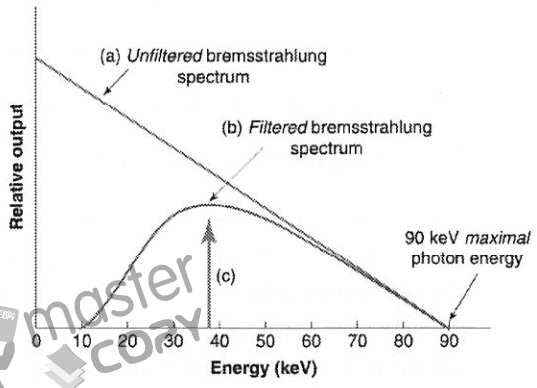
Oggi utilizziamo Rx per diagnosticare lesioni e talvolta per curarle, quindi in ambiti sia diagnostici che terapeutici. Il tubo che genera fasci di Rx è chiamato *Tubo di Coolidge*, e si presenta come un'ampolla di vetro sottovuoto spinto in cui vi sono 2 fondamentali elementi: un filamento, che funge da *catodo*, ed una targhetta, che funge da *anodo*, entrambi di Tungsteno, generalmente. Essi sono posti in alta tensione e per *effetto termoionico* si genera fra questi una elevata corrente. Infatti, elettroni molto energetici saltano via dal filamento catodo, generando una nuvola elettronica che viene incanalata verso la targhetta anodo applicando tipicamente centinaia di KV. L'energia acquisita dagli elettroni accelerati da 100kV è pari a 100eV (*elettronvolt*). Scontrandosi contro la targhetta gli elettroni producono 3 effetti: generazione di Rx di spettro continuo (radiazione di frenamento, *Bremsstrahlung*), generazione di Rx caratteristici, e dissipazione di calore. In particolare, lo smaltimento di calore può avvenire solo per conduzione ed irraggiamento, mentre la convezione è inibita, dato il vuoto spinto del tubo.



L'anodo non è statico bensì montato su di un disco rotante. Questo per evitare il surriscaldamento o fusione del punto di impatto del fascio elettronico. Infatti, sono evidenti i danni subiti dall'anodo quando esso non ruota oppure ruota con una velocità inadeguata. L'impronta del fascio, detta *macchia focale*, è idealmente un punto per massimizzare la risoluzione, ma al contempo dovrebbe avere una superficie estesa per smaltire al meglio il calore; per questo occorre un *trade-off*.

Il sistema appena descritto è immerso in un bagno d'*olio isolante*, che lo isola elettricamente dall'ambiente circostante (ci sono centinaia di KV!), e per lo smaltimento del calore è presente uno scambiatore olio-acqua corrente. I raggi x prodotti sono fatti fuoriuscire da finestrelle di *bakelite*, dello spessore di 1.02mm.

L'esistenza simultanea di involucro vetroso, olio isolante e finestre di bakelite determina una forte attenuazione dei raggi x di bassa energia (filtro intrinseco), ossia quelli che si fermerebbero sulla superficie del corpo senza attraversarlo, e quindi inutili per diagnostica, anzi, dannosi alla pelle. Ecco perché la curva di output relativa all'energia dei Rx vede un forte filtraggio alle basse frequenze, chiamato *hardening* cioè indurimento, infatti rimangono solo i raggi x con energie più elevate, detti appunto *raggi-X duri*. Ecco che il grafico si discosta dal caso "pulito" dove sarebbero moltissimi Rx a bassa energia e pochissimi quelli ad alta energia (triangolo decrescente). Tipicamente esprimiamo gli spessori fisici di questi materiali in equivalenti *spessori di Alluminio*, poiché proprio l'alluminio ha la caratteristica di attenuare raggi x di bassa energia, il che rispecchia la situazione sopra descritta. Infatti, oltre al filtro intrinseco si aggiunge tipicamente un 2-3mm di alluminio per l'hardening, però perdiamo pure dei fotoni (l'area sottesa dallo spettro si riduce). Si ha filtraggio anche a causa della attenuazione dei fotoni che attraversano il materiale dell'anodo prima di uscire.



Infatti, il vetro (silice) e l'alluminio sono simili per *numero atomico Z* (Si 14, Al 13) e per *densità* (vetro 2.2g/cm3, Al 2.7g/cm3); invece l'olio è dominato dagli elementi carbonio, ossigeno e azoto, e ha una densità di 0.9, inferiore a quella dell'acqua.

Raggi X a spettro continuo (Bremsstrahlung)

L'elettrone, carico negativamente, è attratto dal nucleo dell'atomo, carico positivamente, e può venire deflesso nella sua traiettoria, producendo raggi-x. Quando l'elettrone impatta *direttamente* contro il nucleo

atomico si ha il rilascio di un Rx con la massima energia, quando l'elettrone passa *molto vicino* al nucleo venendo molto deflesso si ha il rilascio di Rx di media energia, mentre quando esso transita *lontano* dal nucleo venendo poco deflesso si ha il rilascio di Rx di bassa energia. Dato che in percentuale la dimensione del nucleo è molto piccola rispetto al totale dei gusci orbitali è più probabile che vi sia interazione medio-lontana perciò, in condizioni non filtrate, vengono prodotti molto più Rx di media-bassa energia rispetto a quelli di alta energia.

La massima energia dei fotoni x formatisi non può superare l'energia di accelerazione imposta dal voltaggio d'alimentazione. La produzione di radiazioni di frenamento è più probabile con alte energie elettroniche e per bersagli di alto numero atomico Z.

L'efficienza di produzione dei Rx in funzione dell'energia degli elettroni è:

60 keV (radiologia convenzionale)	99.5% calore	0.5% Rx
200 keV	99% calore	1% Rx
4 MeV (decadimenti nucleari)	60% calore	40% Rc

master COPY

Raggi X caratteristici – spettro a righe

In questo caso l'elettrone incidente incontra l'elettrone dell'atomo e lo scalza dal proprio guscio o orbitale (K, L, M), pertanto la *lacuna* o vacanza viene riempita da un elettrone del guscio successivo, e nel farlo libera una radiazione X caratteristica ad una energia pari alla differenza di energia di legame fra i due orbitali. Con una targhetta di tungsteno si avrà la radiazione X caratteristica del tungsteno (righe a 60 e 70 keV). Altri tipici elementi usati sono Molibdeno (17.5 e 19.6 keV) e Rodio (20 e 22.1 keV). Le righe costituiscono circa l'1% dello spettro, in termini di area sottesa.

In Mammografia si usano proprio queste righe, e non lo spettro continuo, per massimizzare la capacità di distinguere due materiali distinti, ovvero il *contrasto*.

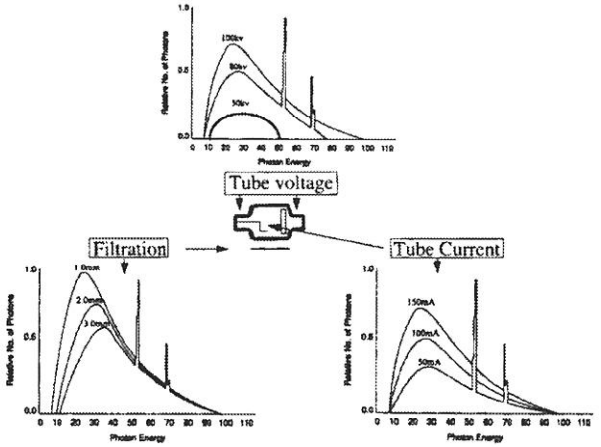
Risoluzione (spaziale): distanza minima fra due OGGETTI diversi che è possibile distinguere.

Contrasto: capacità di distinguere due MATERIALI/TESSUTI diversi, quindi se vogliamo, livelli di grigio

Rumore: fluttuazione del segnale, il rumore influenza la nostra percezione di risoluzione e contrasto

Controllare la forma dello spettro

Con la *filtrazione*, ad esempio tramite spessore di alluminio, controlliamo l'energia minima, ossia variando lo spessore di alluminio possiamo diminuire o aumentare il *cutoff* delle basse energie (ma contemporaneamente varia anche l'area sottesa quindi il numero di fotoni). Settando opportunamente la *tensione di tubo* (ddp fra filamento e targhetta) controlliamo l'energia massima dei fotoni X prodotti. Infine, variando la corrente nel filamento controlliamo la cosiddetta *corrente di tubo* e perciò l'area sottesa dallo spettro (maggiore corrente implica più fotoni X); generalmente si usa l'unità di misura mAs, una corrente per un tempo quindi una carica



In una tipica indagine diagnostica ai raggi X, solamente l'1% di essi attraversa il paziente andando a creare l'immagine.

Tessuti umani molto sensibili sono i cristallini degli occhi, le mani, zona pelvica e genitali.

Una cosa da tenere a mente è che **i raggi-x non possono mai essere completamente bloccati**, ma è possibile solo ridurli moltissimo (la legge esponenziale si annullerebbe solo quando lo spessore tendesse all'infinito).

Idealmente vorremmo lavorare con tensione costante, nella pratica si ottengono a meno di fluttuazioni, dette *ripple*, molto contenute, approssimando un comportamento costante a meno di un 2-3%.

Interazione delle Radiazioni EM con la materia

Le *microonde* scaldano per effetti di torsione e rotazione; gli *infrarossi* danno solo vibrazione; sopra gli ultravioletti le interazioni non sono più ondulatorie ma divengono particellari ed entrano in gioco le interazioni con gli elettroni della nuvola che circonda gli atomi, parliamo di *Effetto fotoelettrico* e *diffusione Compton*. Invece, i fotoni *UV* sono in una situazione intermedia dando origine ad effetti sia ondulatori che particellari, e si ha ionizzazione.

Formalmente, si definiscono *radiazioni ionizzanti* quelle aventi energia superiore a 124ev. Con queste hanno fine gli effetti ondulatori e si hanno effetti particellari puri (fotoelettrico, Compton, ...); i fotoni di questa radiazione ionizzante viaggiano alla velocità della luce nel vuoto, finché non incontrano un elettrone, *se* lo incontrano.

L'energia di legame degli elettroni più esterni del Piombo (Z=82) è di circa 10eV.

Diffusione coerente

Chiamata anche *scattering elastico* o *scattering di Rayleigh*, avviene alle energie più basse, aventi un'ampia lunghezza d'onda, a tal punto da divenire comparabile con le dimensioni dell'atomo; perciò si ha un brevissimo eccitamento dell'atomo e subito si diseccita liberando quel fotone che aveva brevemente accolto, deviando la sua direzione. Questo processo NON dà ionizzazione, perciò non ci sono effetti biologici! Dal punto di vista della formazione di immagini però non va bene (deviazione del segnale). La probabilità di avere diffusione coerente scala con $\mathbf{Z^2/E}$ ed è rilevante fino ai 20-30keV (infatti a basse energie la probabilità di avere diffusione coerente cresce poiché sta al denominatore), e l'unica procedura radiologica in cui è rilevante è la Mammografia (entità di diffusione coerente 12-15% a 30keV).

L'effetto fotoelettrico

Avviene quando l'energia del fotone è relativamente **bassa** e questo incide su un elettrone dell'orbitale **interno** ad alta energia, gli trasferisce tutta l'energia necessaria a scalzarlo via e la lacuna viene rimpiazzata liberando un raggio-X di energia pari all'eccesso di Energia = $E_{incidente} - E_{ionizzazione}$. L'effetto fotoelettrico è sfruttato per *creare immagini* di radiologia convenzionale, infatti **aumenta il contrasto**, e per *schermare* i fotoni X, infatti **assorbe l'energia dei fotoni**. Noi vogliamo che il piombo dello schermo assorba i fotoni, e quindi che abbia effetto fotoelettrico, non Compton.

L'effetto fotoelettrico è l'interazione dominante su tessuto molle fino ai 30keV (la diffusione coerente è minoritaria). Se un fotone incide con energia 100keV su di un elettrone del guscio K (33keV) dell'atomo di Iodio scalzandolo, la lacuna viene rimpiazzata da un elettrone del guscio L (5keV) pertanto il primo raggio X emesso avrò energia pari a 33-5keV=28keV. A sua volta in cascata la lacuna da 5keV viene rimpiazzata da elettrone del guscio M (1keV) e quindi il secondo raggio X emesso ha energia pari a 5-1keV=4keV.

La probabilità di avere effetto fotoelettrico dipende da $\mathbf{(Z/E)^3}$, ecco perché prevale sulla diffusione coerente.

master COPY