

Produção e qualidade dos raios X - Parte 1

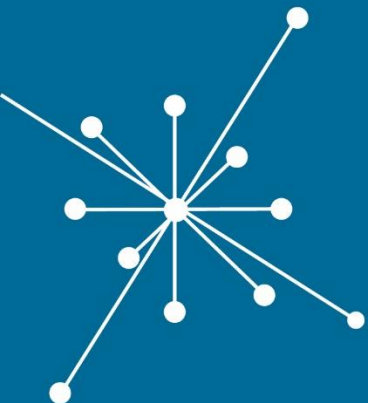
FÍSICA DAS RADIAÇÕES I

Paulo R. Costa

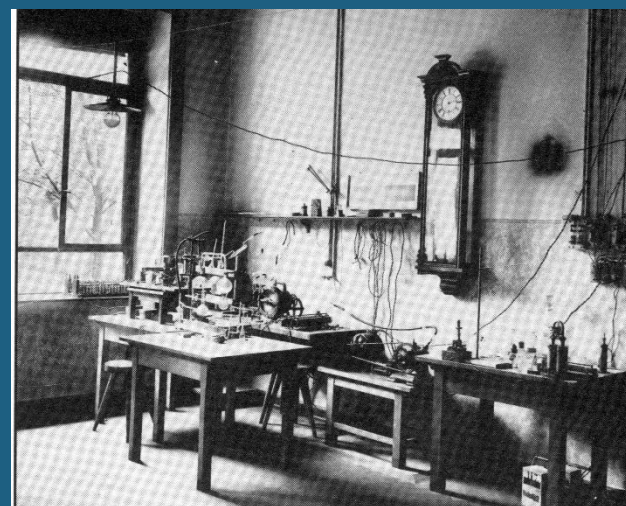
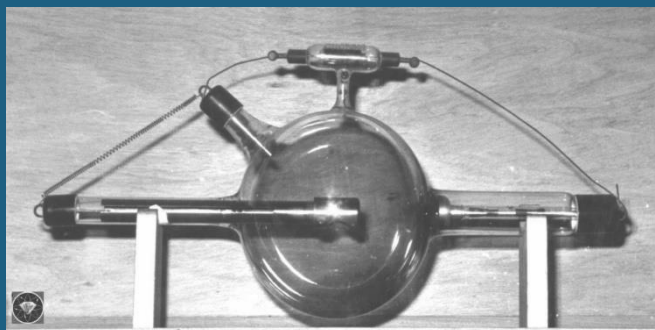
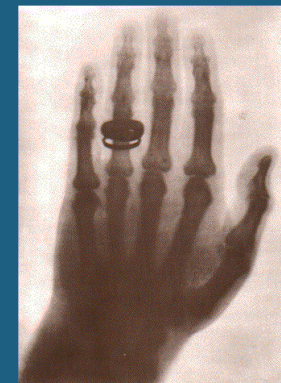
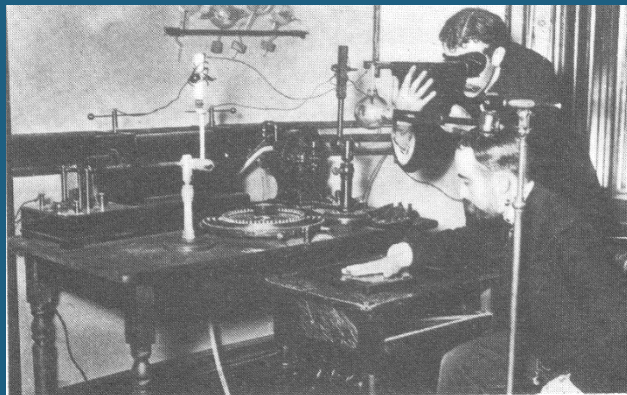


GRUPO DE
**DOSIMETRIA
DAS RADIAÇÕES**
e FÍSICA MÉDICA

IFUSP - Instituto de Física da USP



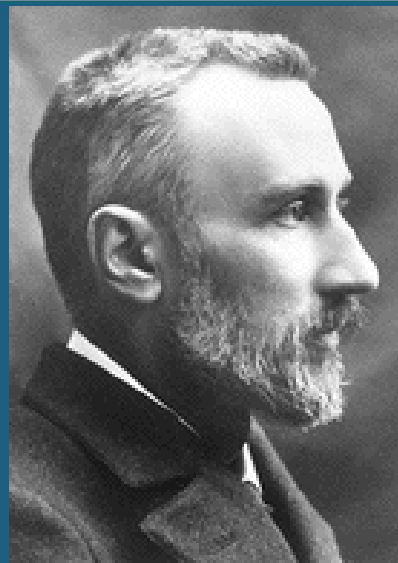
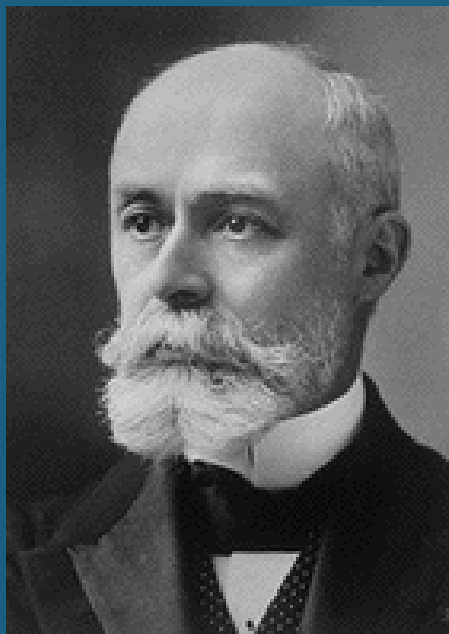
FÍSICA MÉDICA NA HISTÓRIA



FÍSICA MÉDICA NA HISTÓRIA



IFUSP - Instituto de Física da USP



So  **Mit Pedoskop richtig angepaßt - genügend Spielraum**

ging der Kunde von uns

Pasender Schuh

Gerade Zehenlage

Keine Ballen- und Hühneraugenbildung

Gesunder Fuß

Ohne Pedoskop falsch angepaßt - viel zu kurz  **So**

kam der Kunde zu uns

Zu kurzer Schuh

Verkrümmte Zehenlage

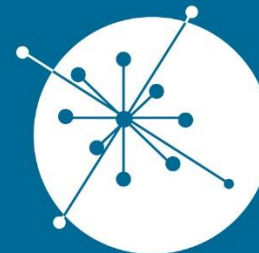
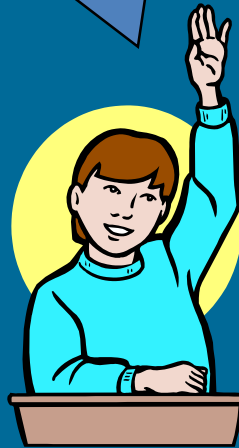
Starke Ballen- und Hühneraugenbildung

Kranker Fuß

Lassen Sie sich Ihren Fuß hier kostenlos durchleuchten




E como os raios X podem ser gerados?



GRUPO DE
**DOSIMETRIA
DAS RADIAÇÕES**
e FÍSICA MÉDICA

IFUSP - Instituto de Física da USP

Radiação diretamente ionizante



IFUSP - Instituto de Física da USP

PARTÍCULAS CARREGADAS RÁPIDAS LEVES

QUEM SÃO ?

- Elétrons e pósitrons
- Com energia cinética maior que a energia de ligação dos elétrons aos átomos do meio
- Independe da origem

EXEMPLOS

- Desintegração beta
- Feixes produzidos em aceleradores
- Produção de pares

MECANISMOS DE INTERAÇÃO

- Semelhante aos das partículas pesadas: coulombiana
- Colisões entre partículas de mesma massa: grandes perdas de energia e mudanças bruscas na trajetória
- Interações com os núcleos atômicos: bremsstrahlung
- Pósitrons: processo de aniquilação (2 fótons de 511 keV)

Excitação, ionização e perda radiativa



Caminho > alcance

$$\Delta E \cong \Delta x \frac{dE}{dx} = \Delta x \rho \frac{dE}{\rho dx}$$
$$\Delta x \ll \text{alcance}$$



Caminho = alcance

Poder de freamento

- *Poder de freamento*
 - *Stopping power* ou poder de freamento
 - Valor esperado da taxa média de perda de energia de uma partícula por unidade de distância atravessada como função da energia da partícula [MeV.cm⁻¹ ou J.m⁻¹]
 - *Mass stopping power* ou poder de freamento mássico [MeV.cm².g⁻¹ ou J.m².kg⁻¹]

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}$$

$$\frac{dE}{dx}$$

Poder de freamento

$$-\frac{dE}{dx} = \left(-\frac{dE}{dx} \right)_{col} + \left(-\frac{dE}{dx} \right)_{rad}$$

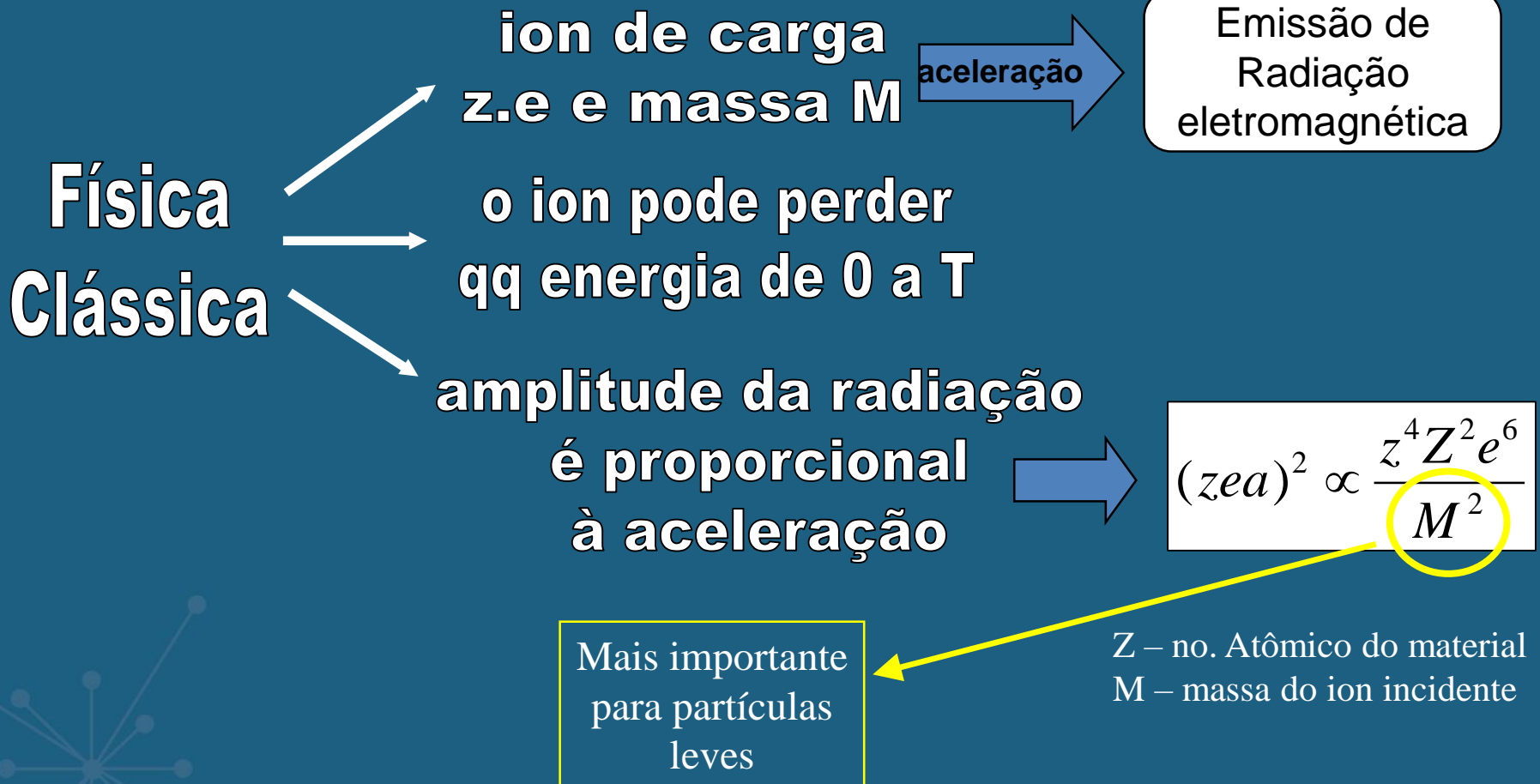
- Colisões leves
- Colisões diretas

- interação com o campo nuclear

deposição de energia próxima do caminho da partícula

deposição de energia distante do caminho da partícula

Bremsstrahlung e radiação característica

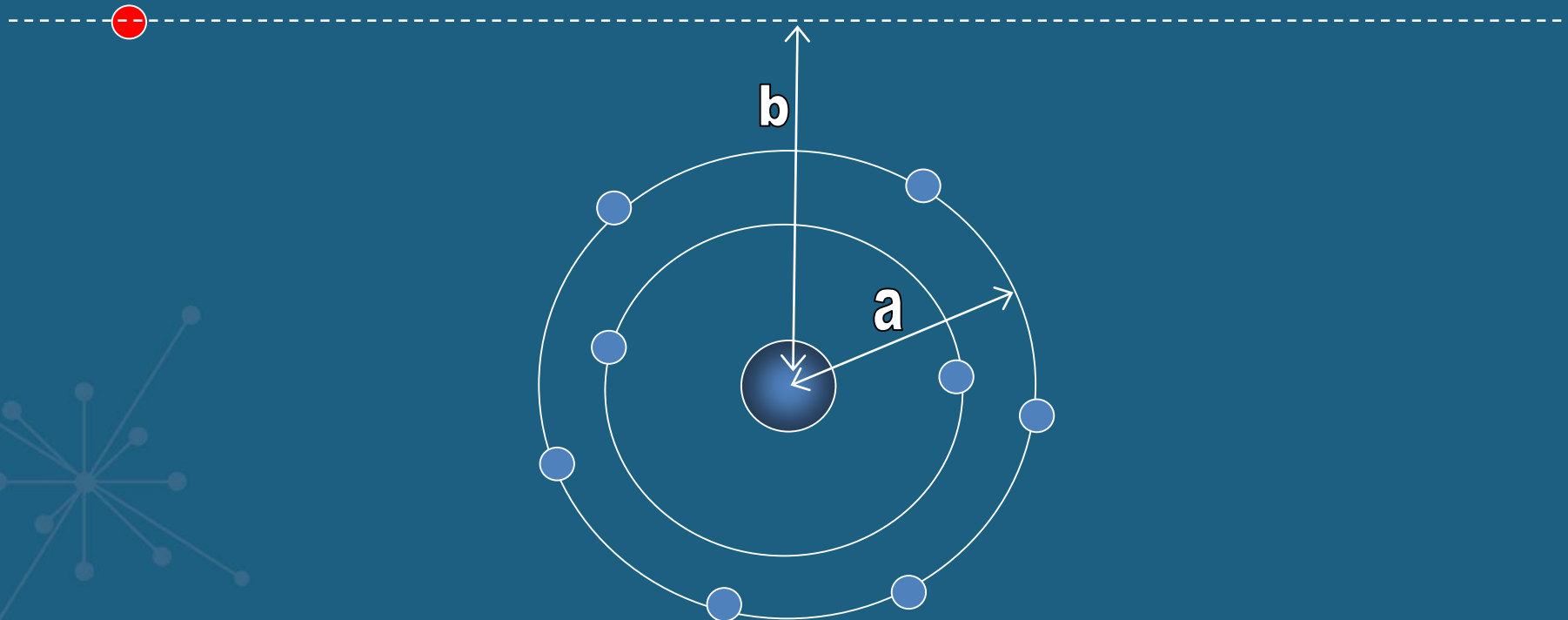


Tipos de interações coulombianas

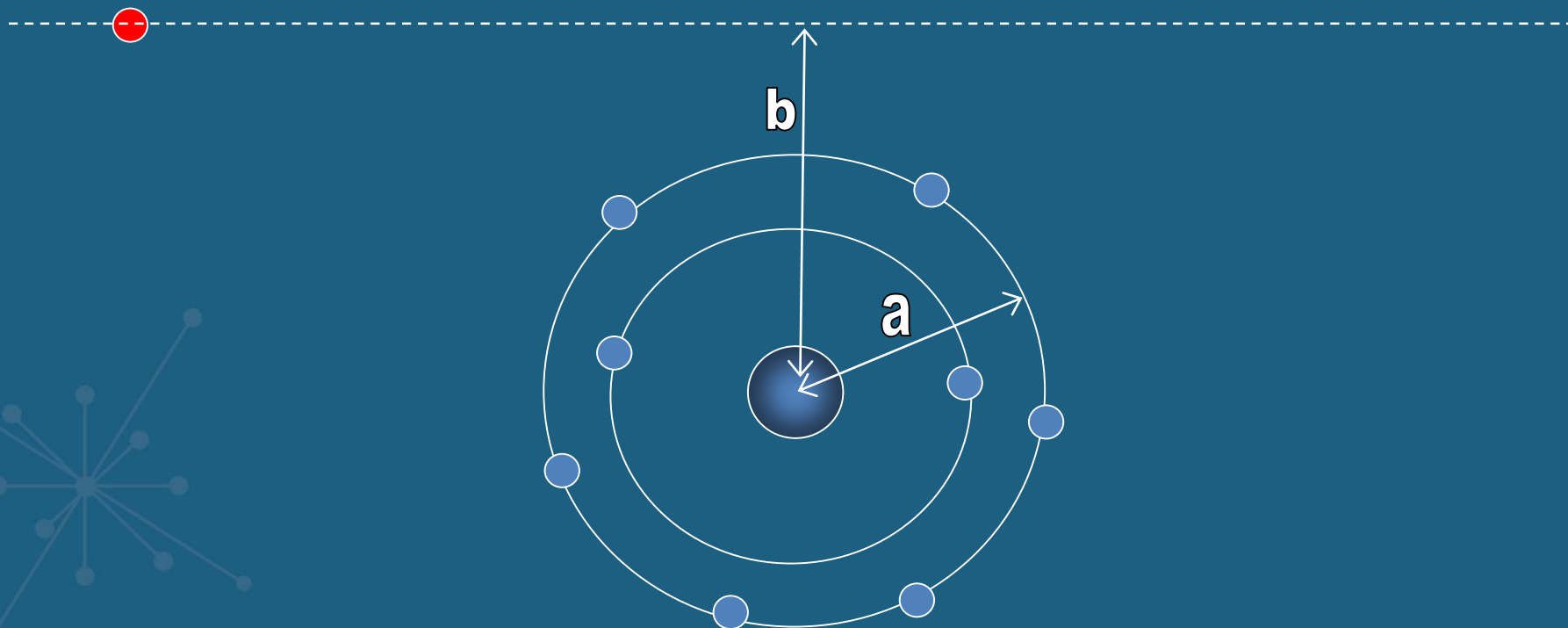
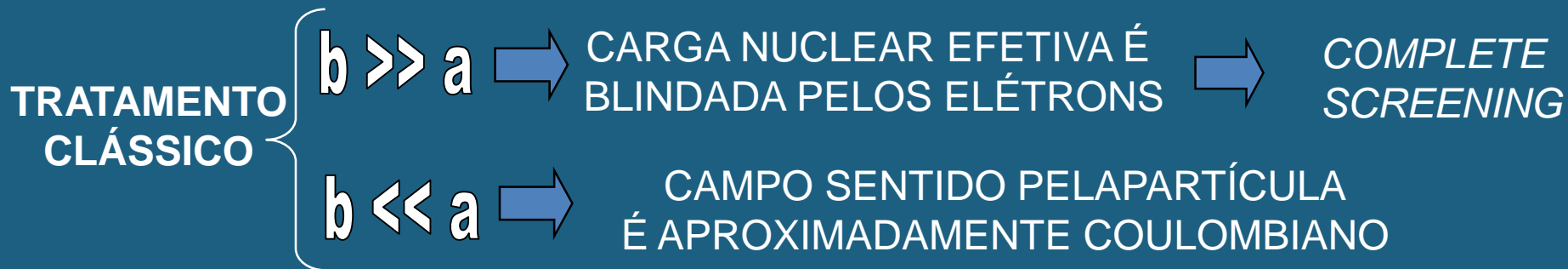
$b \gg a$ - colisões leves ("soft")

$b \sim a$ - colisões diretas ("hard" ou "knock-on")

$b \ll a$ - interações coulombianas com campo nuclear externo



Bremsstrahlung e radiação característica



Interações de elétrons e pósitrons



IFUSP - Instituto de Física da USP

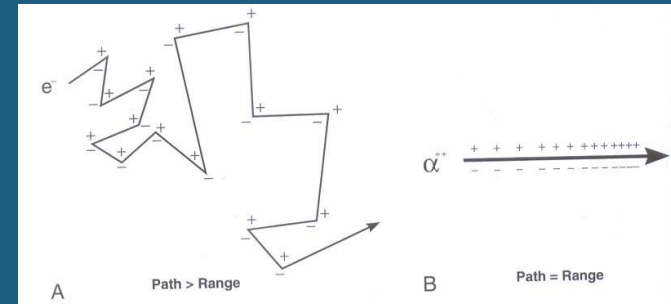
- Passagem de elétrons e pósitrons pela matéria
 - Perdas
 - Colisão
 - Radiativas (*Bremsstrahlung*)
 - Considerações
 - Interações com elétrons atômicos quase-livres
 - Desconsidera-se as interações com elétrons de camadas internas (*shell correction*)



Interações de elétrons e pósitrons

- Interações de elétrons e pósitrons

$$-\frac{dE}{dx} = \underbrace{\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col}}_{\text{como de íons pesados}} + \underbrace{\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{rad}}_{\text{perda radiativa}}$$



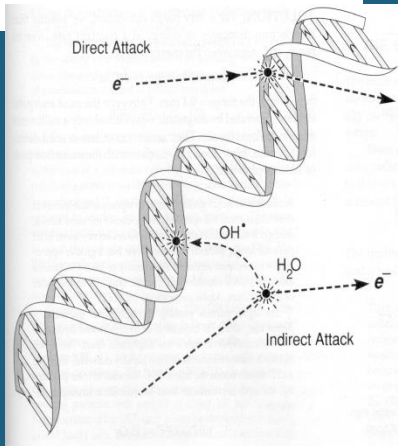
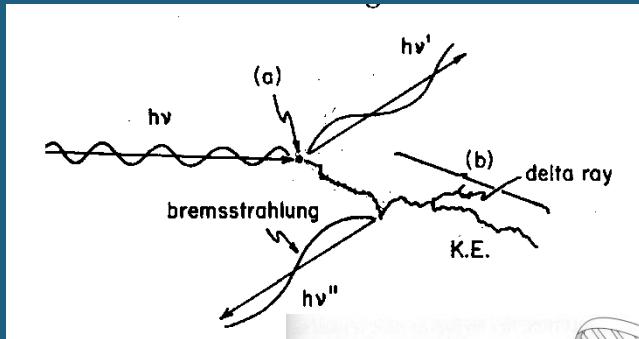
- Diferentemente dos íons pesados

- Espalhamento elástico

- Não há perda de energia \rightarrow não contribui em $(-dE/dx)$
- Variações na direção da partícula

Interações de elétrons e pósitrons

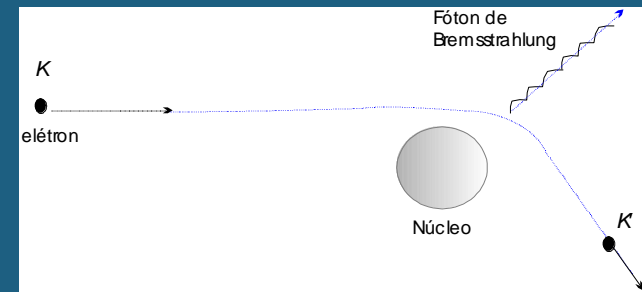
na dosimetria...



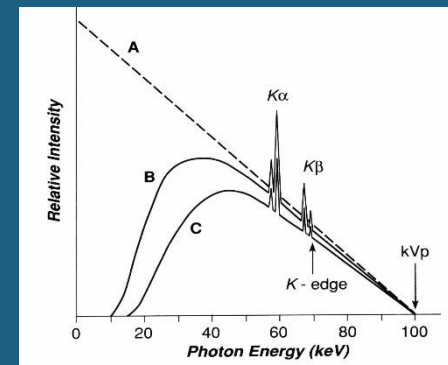
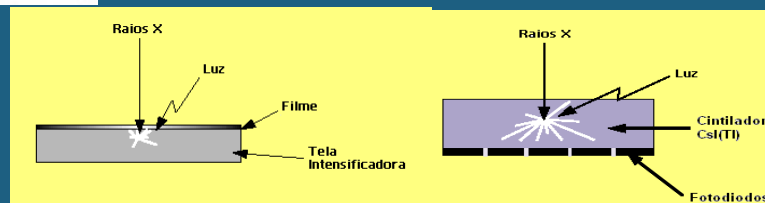
E pra que a gente precisa saber isso?



...na produção de raios X...

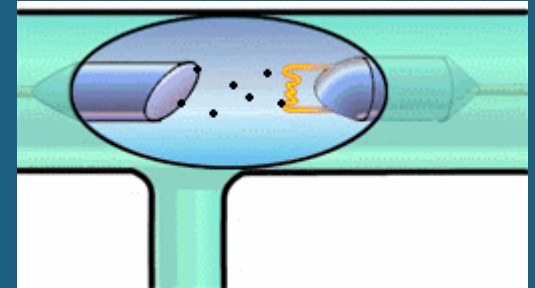


... e na deposição de energia em detectores

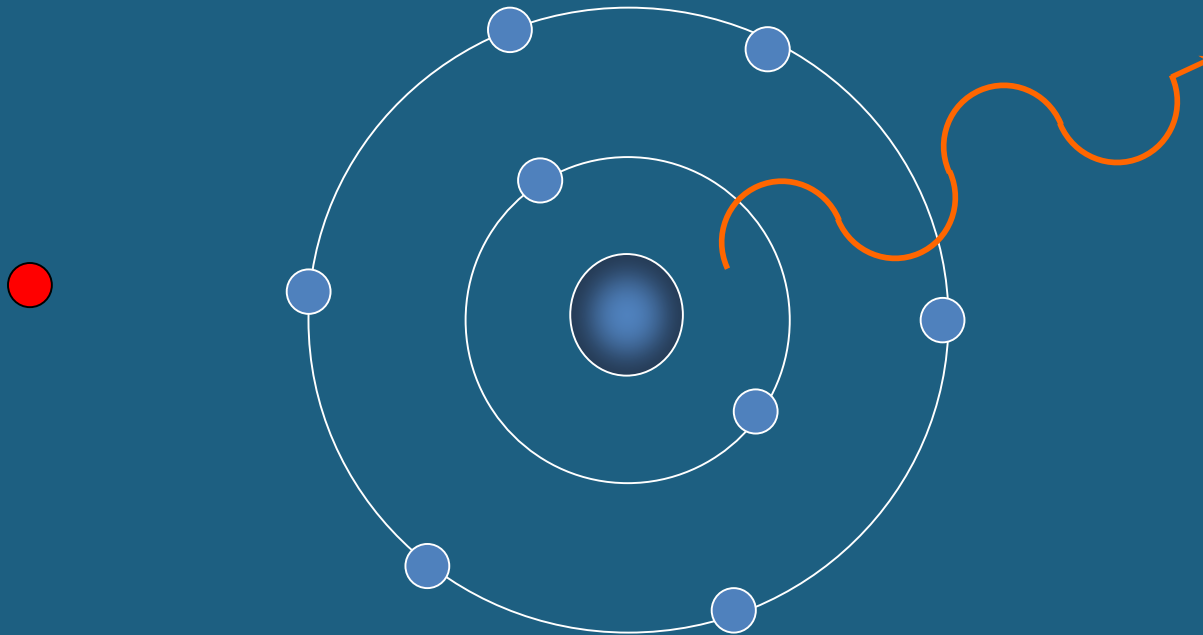


Tubos de raios X

- Acelerador de elétrons
 - Produção do feixe de fótons
 - Tubo de raios X ideal
 - Fonte pontual – detalhes na imagem
 - Exposição rápida – movimentos do paciente
- Conversor de energia
 - converte energia elétrica em raios X e calor
 - 1% apenas é convertido em raios X
 - 10% aproveitados - feixe útil ou primário
 - Calor é um produto não desejável
 - Dissipação rápida do calor



Bremsstrahlung e radiação característica



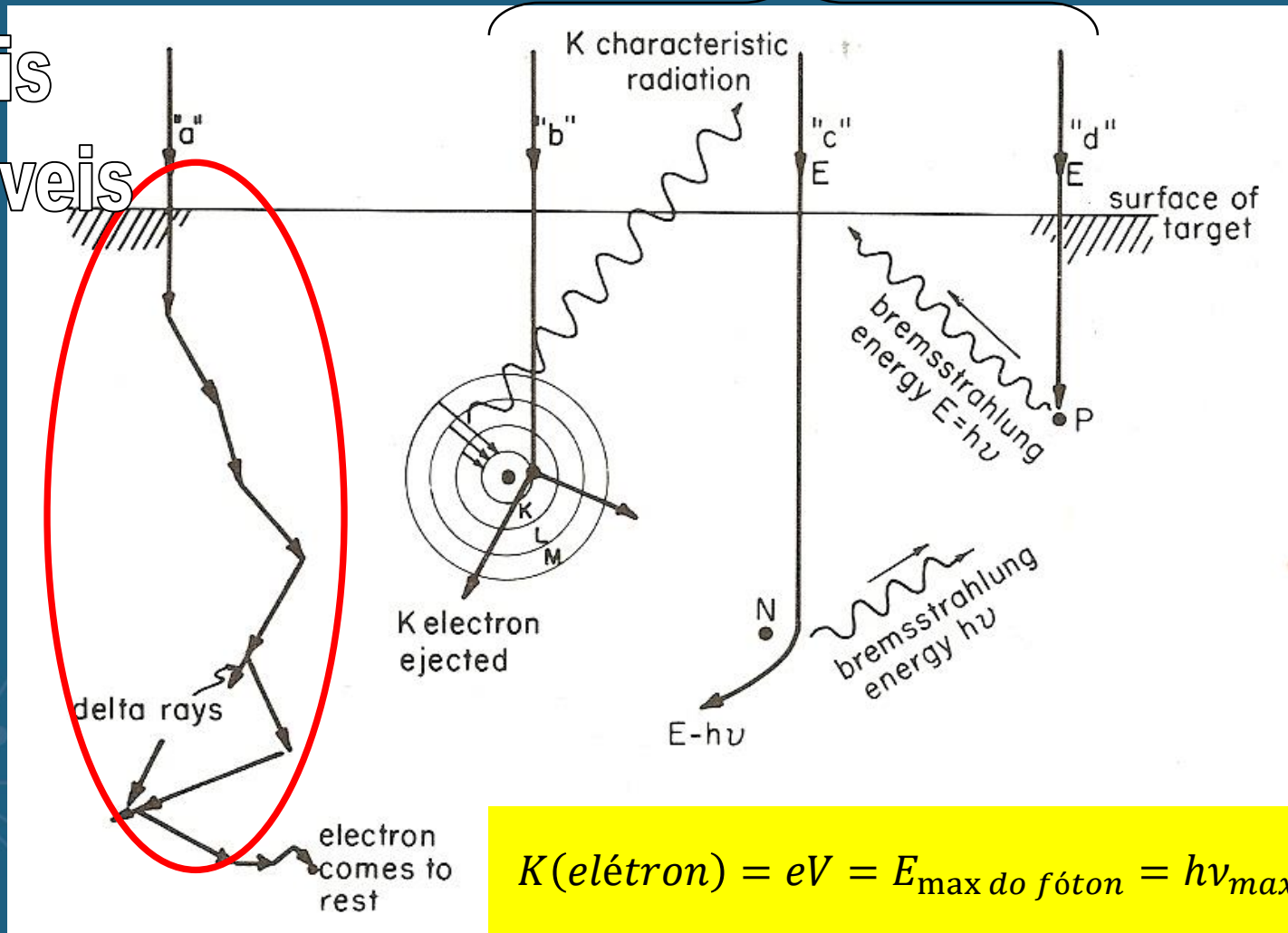
Bremsstrahlung e radiação característica

colisionais

radiativas

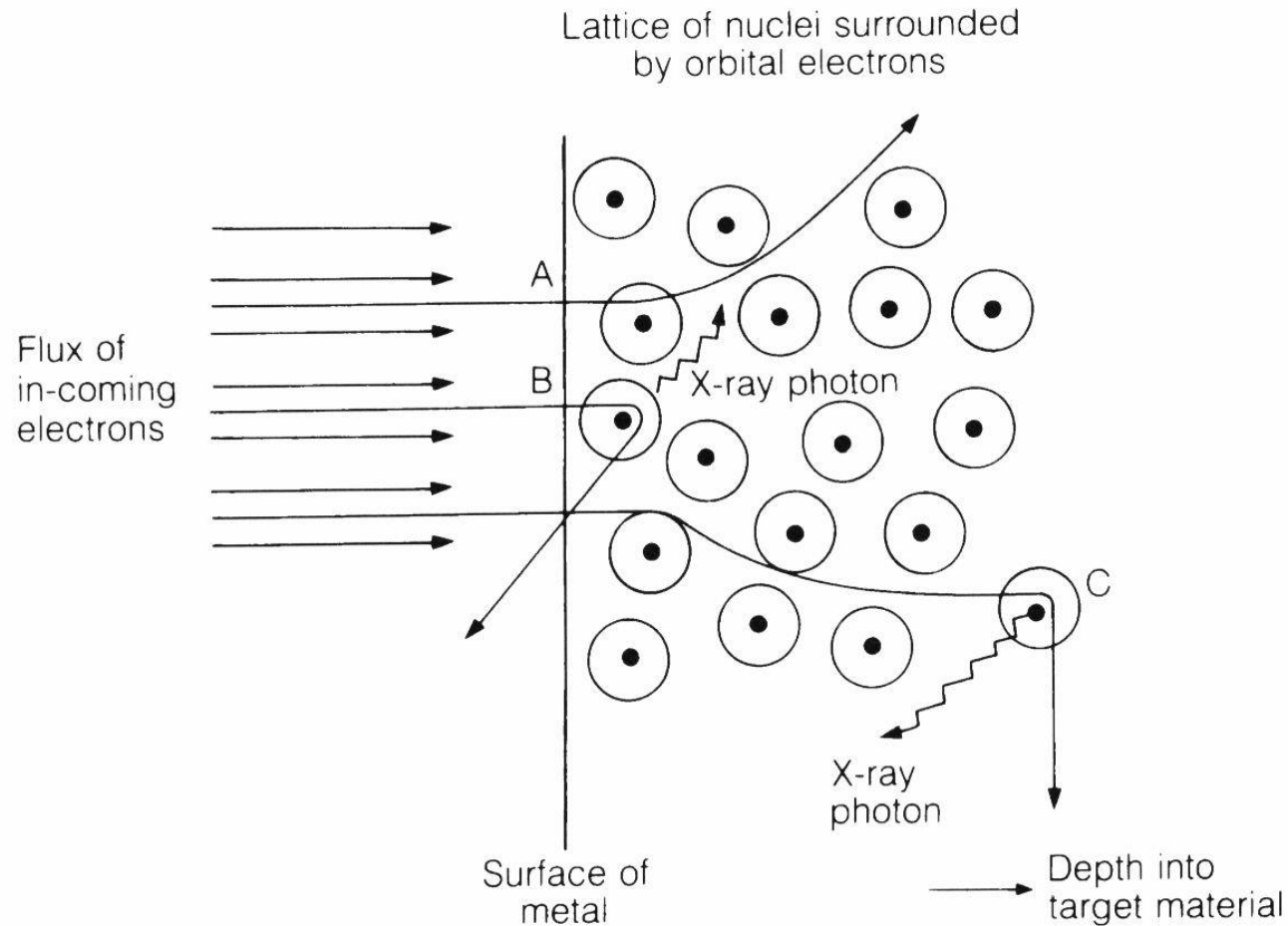
mais

prováveis

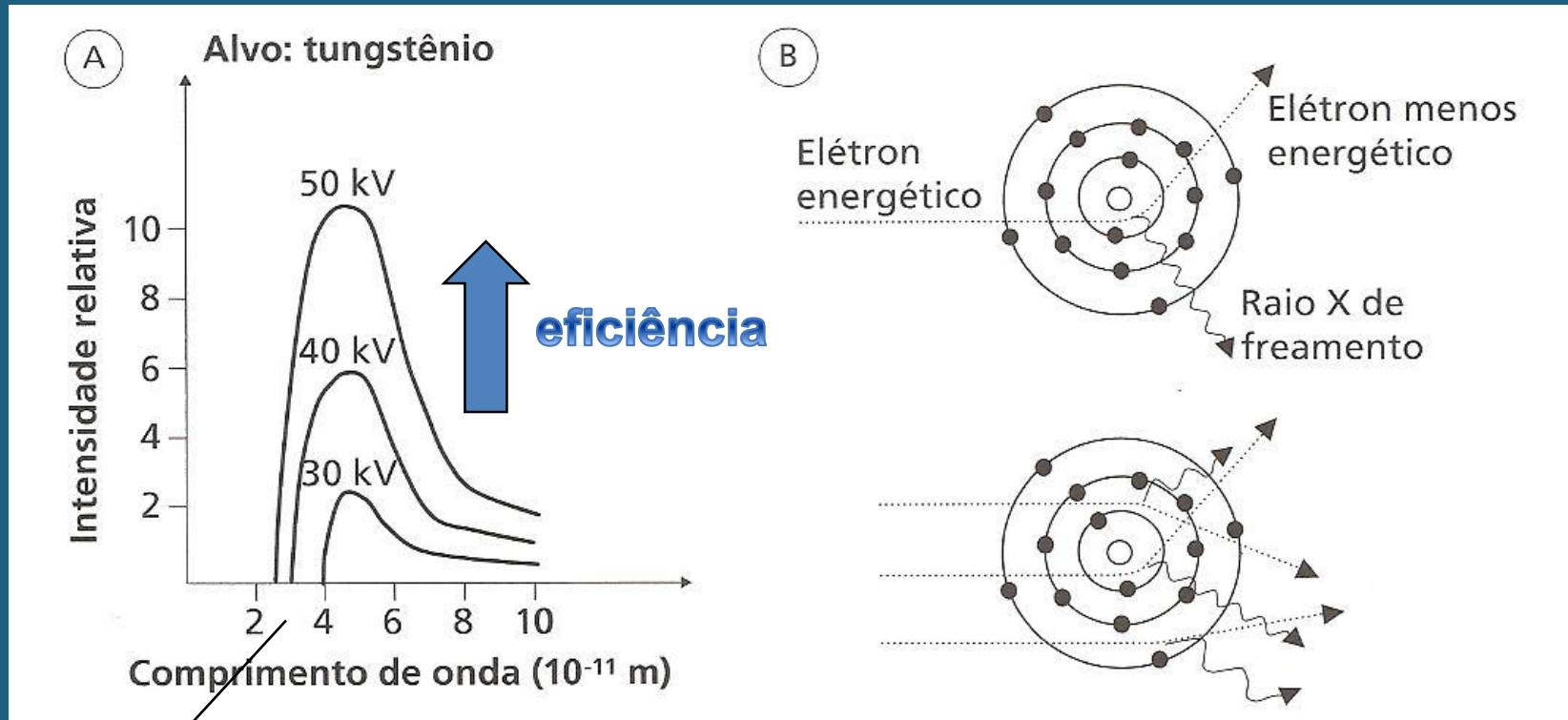


$$K(\text{elétron}) = eV = E_{\text{max do fóton}} = h\nu_{\text{max}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{min}}}$$

Bremsstrahlung e radiação característica



Bremsstrahlung e radiação característica



$$\lambda_{min} \propto \frac{1}{V}$$

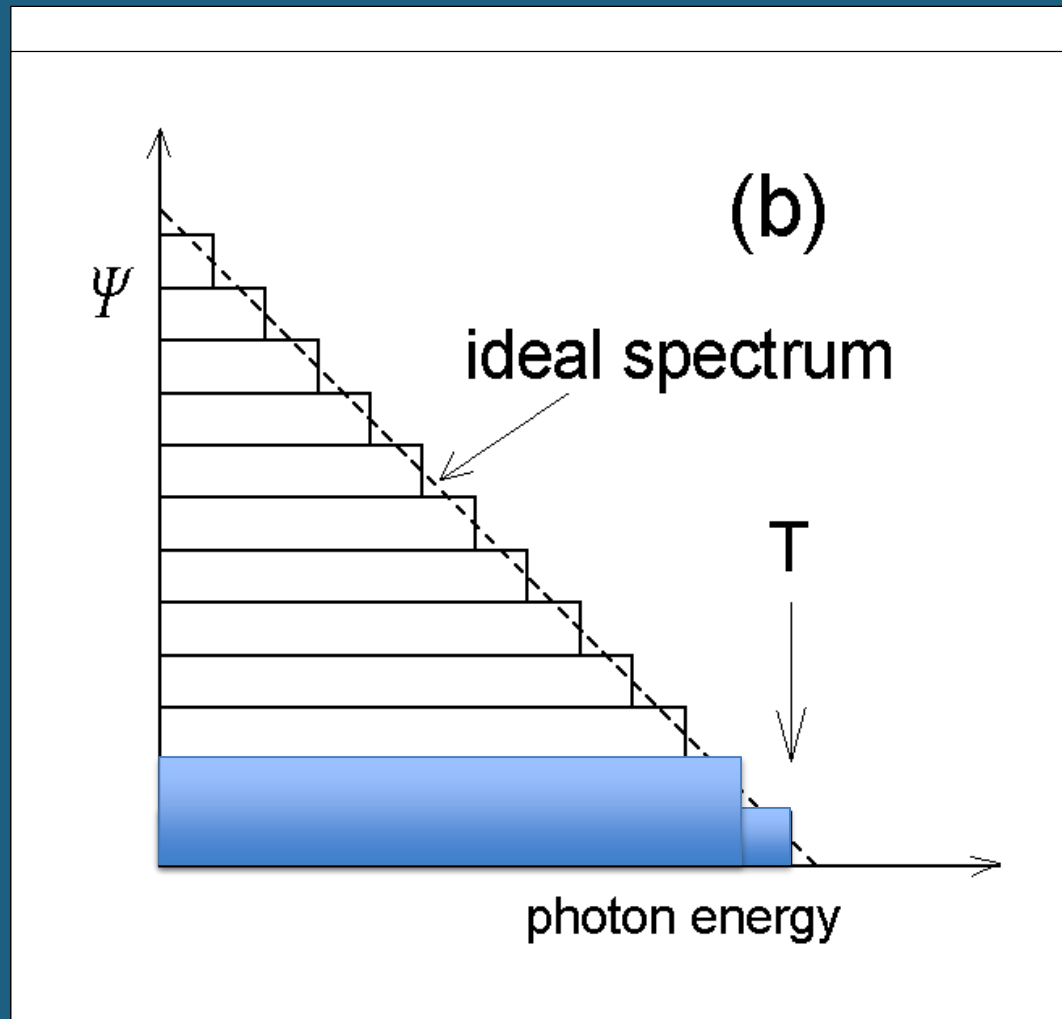
$$K(\text{elétron}) = eV = E_{\text{max do fóton}} = h\nu_{\text{max}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{min}}}$$

Bremsstrahlung e radiação característica

- *Bremsstrahlung*
 - Para se prever o comportamento no alvo
 - Caminho do elétron
 - Variações de direção em cada interação
 - Probabilidades de perdas de energia por
 - Ionização (colisão)
 - Irradiação
 - Direção de emissão do *bremsstrahlung*
 - Atenuação e espalhamento dentro do alvo

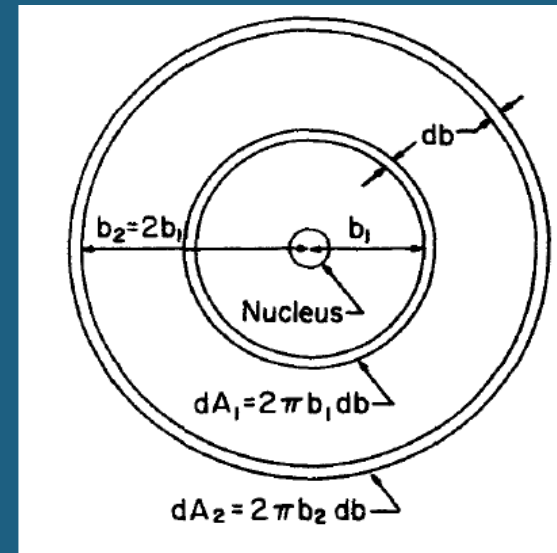


Bremsstrahlung e radiação característica



Bremsstrahlung e radiação característica

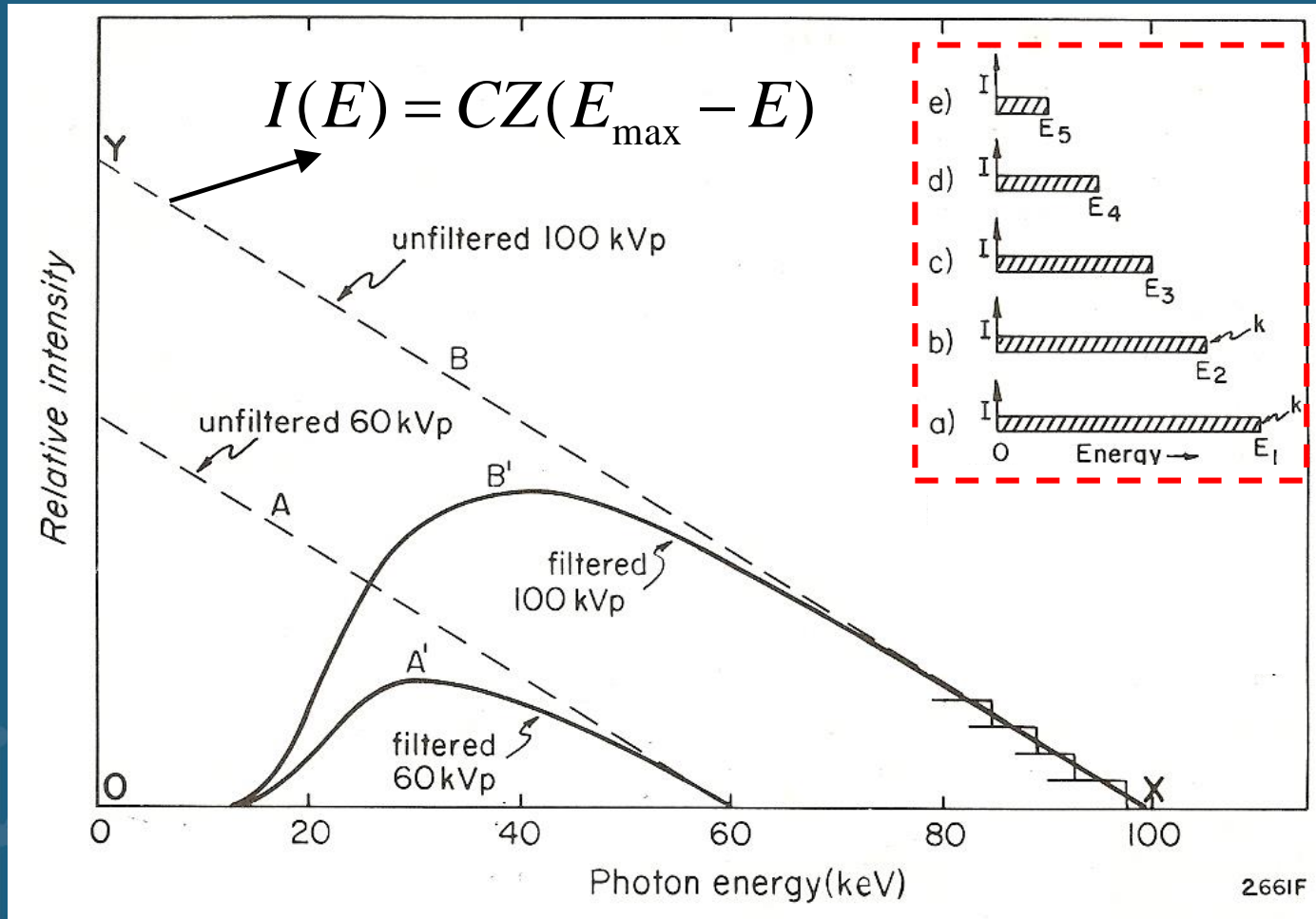
- Argumento clássico
 - Elétron perpendicular ao desenho
 - Probabilidade de interação é proporcional à área dos anéis
 - Energia emitida é inversamente proporcional à b



$$\left. \begin{aligned} dA_1 &= 2\pi b_1 \\ dA_2 &= 2\pi b_2 = 2 \times 2\pi b_1 = 2dA_1 \end{aligned} \right\} N_2 = 2N_1$$
$$h\nu \propto \frac{1}{b} \Rightarrow h\nu_1 = 2h\nu_2$$

$$N_1 h\nu_1 = N_2 h\nu_2$$

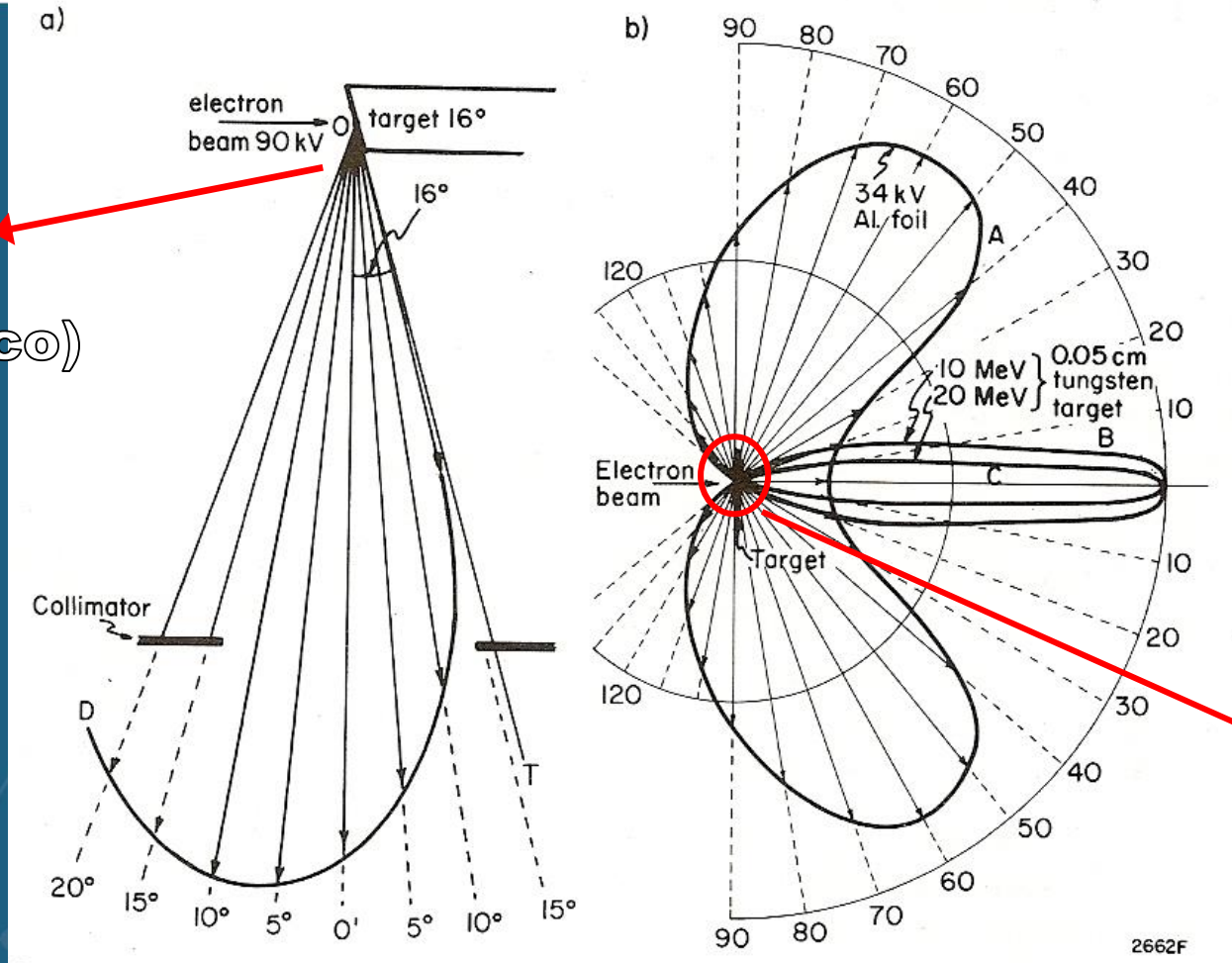
Bremsstrahlung e radiação característica



alvos
finos

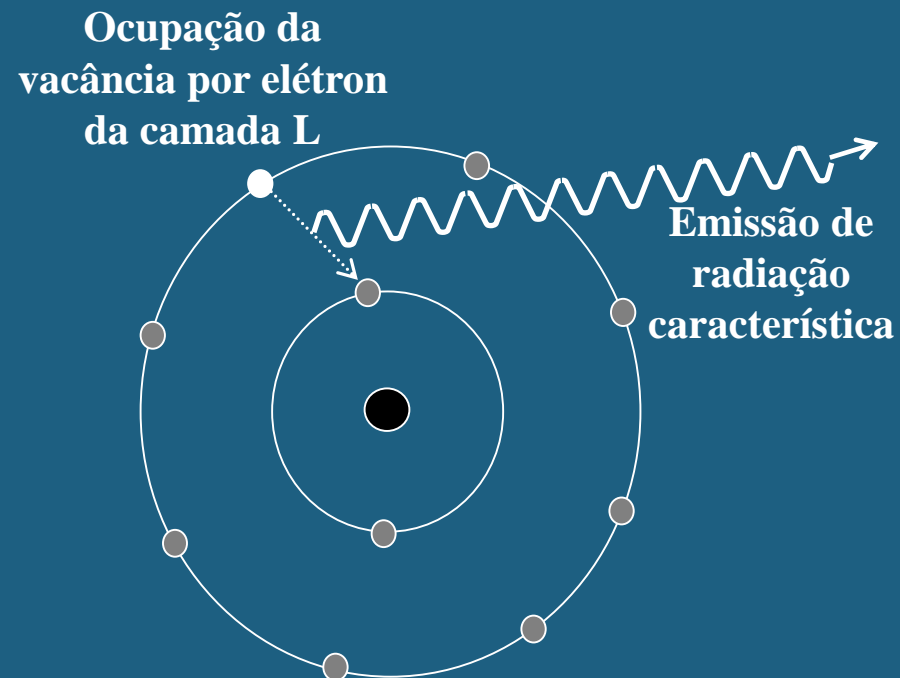
Bremsstrahlung e radiação característica

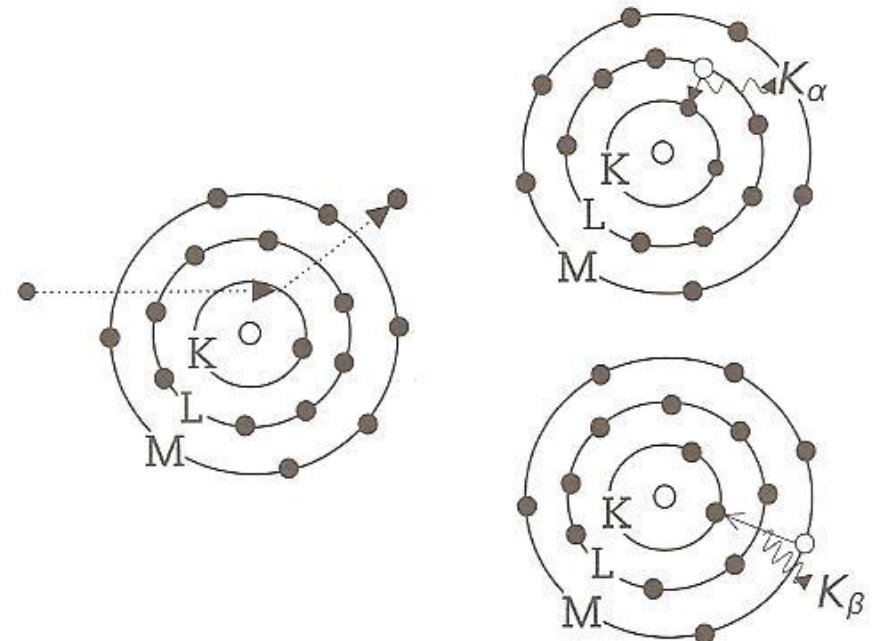
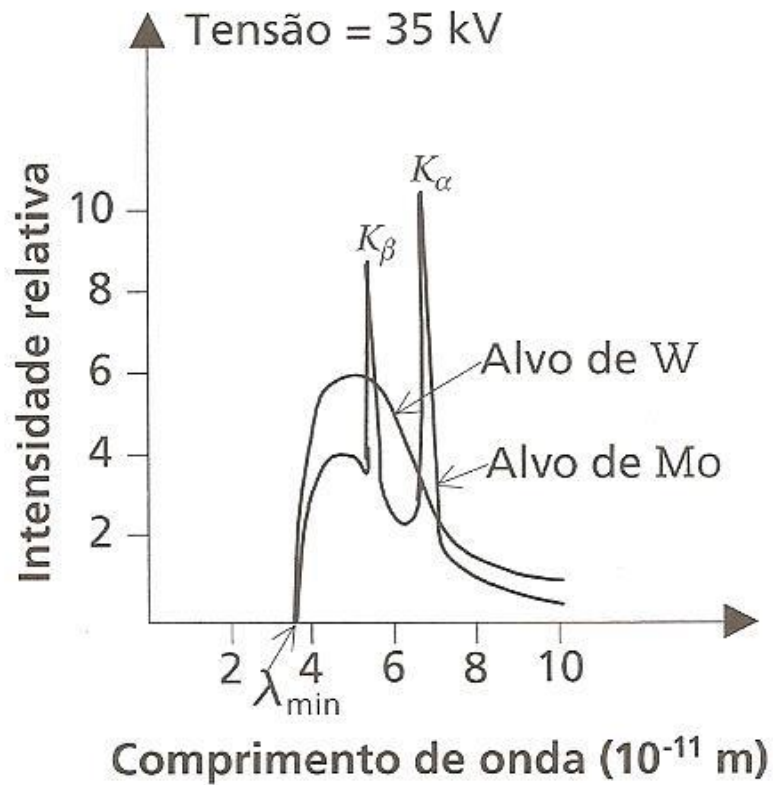
alvo
real
(isotrópico)



alvo
fino

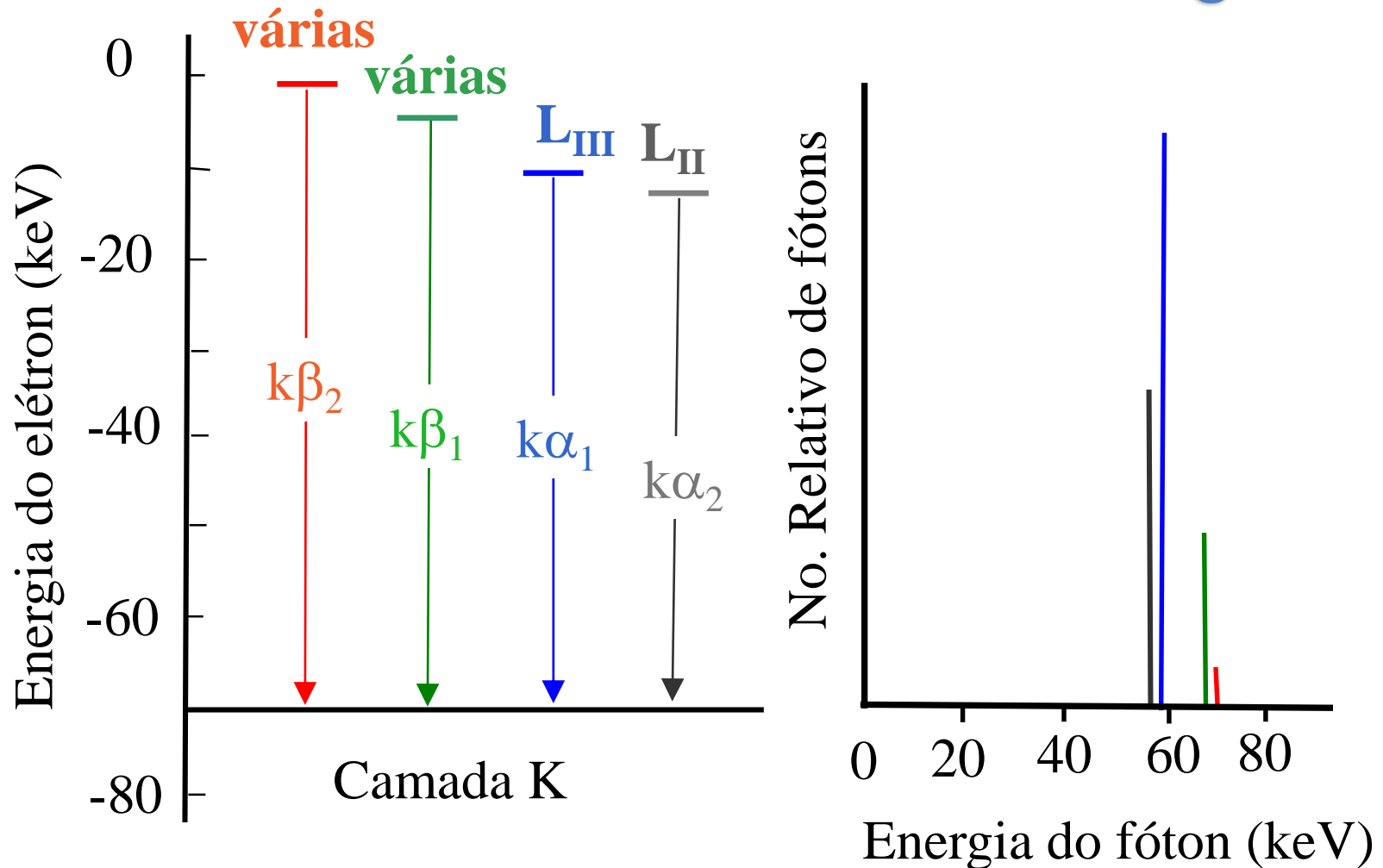
Bremsstrahlung e radiação característica





Bremsstrahlung e radiação característica

Para o Tungstênio



Bremsstrahlung e radiação característica

Transition	Designation	Energy (keV)	Relative No. of Photons
$K-L_{III}$	α_1	59.321	100
$K-L_{II}$	α_2	57.984	57.6
$K-M_{II}$	β_3	66.950	10.8
$K-M_{III}$	β_1	67.244	20.8
$K-M_{IV}$	$\beta_{5/1}$	67.654	0.233
$K-M_V$	$\beta_{5/2}$	67.716	0.293
$K-N_{II}$	$\beta_{2/1}$	69.033	2.45
$K-N_{III}$	$\beta_{2/2}$	69.101	4.77
$K-N_{IV}$	$\beta_{4/1}$	69.269	0.127
$K-N_V$	$\beta_{4/2}$	69.283	0.127
$K-O_{II}$	$\beta_{2/3}$	69.478	1.07
$K-O_{III}$	$\beta_{2/4}$	69.489	1.07

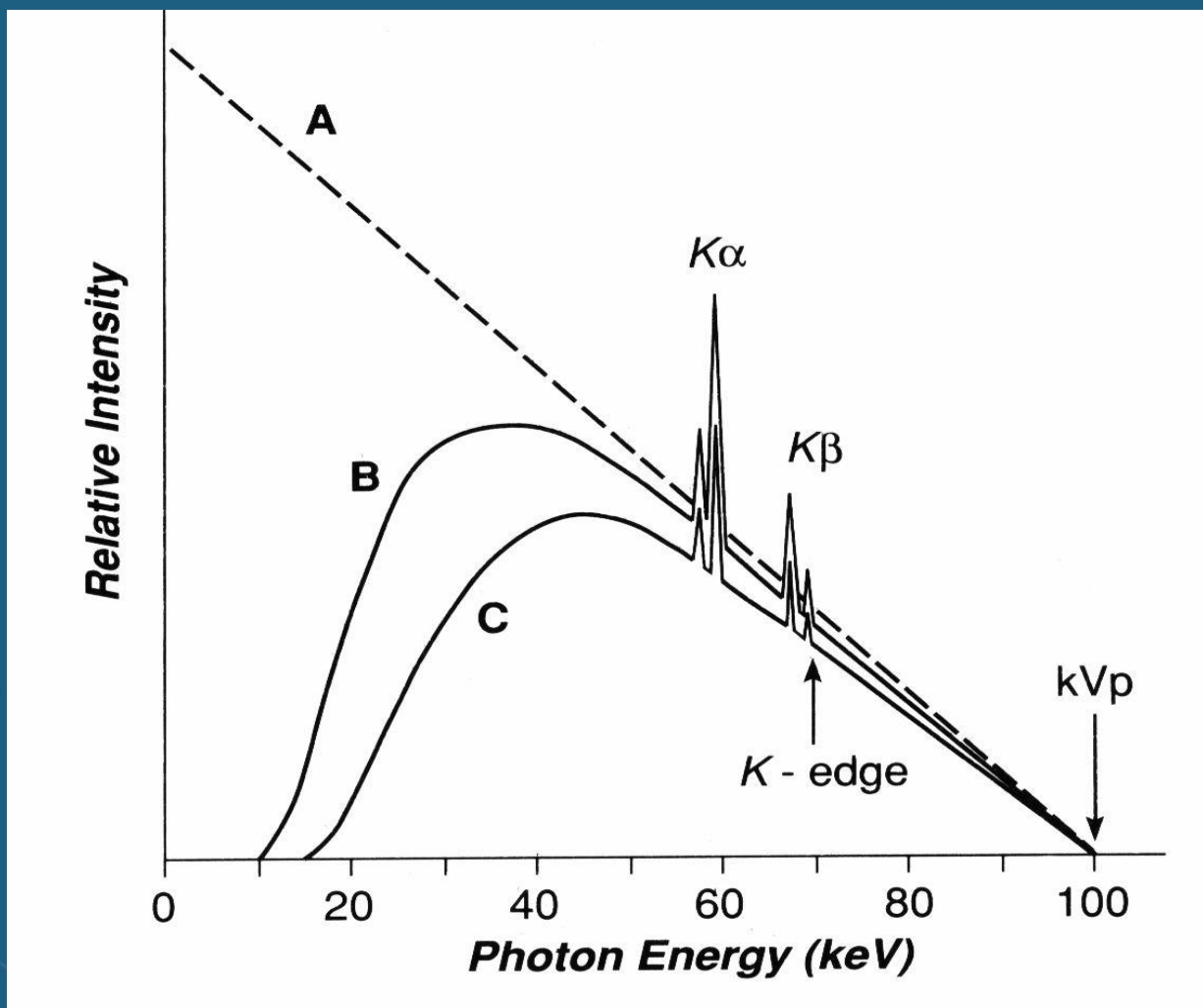
Energy values are grouped as follows:
 - $\beta_3, \beta_1, \beta_{5/1}, \beta_{5/2}$ are grouped with $\cong 67.2$.
 - $\beta_{2/1}, \beta_{2/2}, \beta_{4/1}, \beta_{4/2}$ are grouped with $\cong 69.1$.
 - $\beta_{2/3}, \beta_{2/4}$ are grouped with $\cong 69.484$.
 Relative photon counts are grouped as follows:
 - $\beta_3, \beta_1, \beta_{5/1}, \beta_{5/2}$ are grouped with $\cong 32.1$.
 - $\beta_{2/1}, \beta_{2/2}, \beta_{4/1}, \beta_{4/2}$ are grouped with $\cong 8.4$.
 - $\beta_{2/3}, \beta_{2/4}$ are grouped with $\cong 1.07$.

^aAfter Storm and Israel (1970). Reproduced with permission from Academic Press.

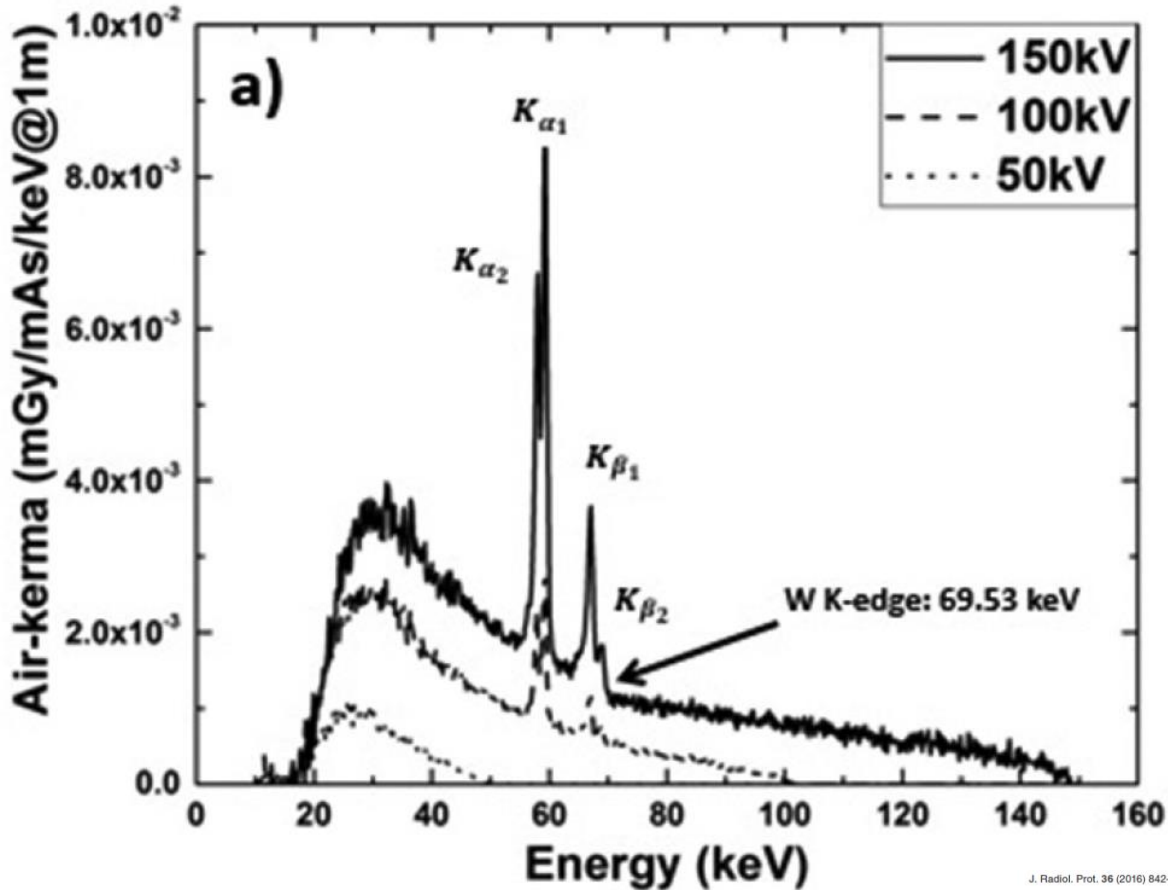
Shell	Oxygen Z = 8	Calcium Z = 20	Copper Z = 29	Molybdenum Z = 42	Tin Z = 50	Tungsten Z = 74	Lead Z = 82
K	.533	4.037	8.981	20.000	29.200	69.525	88.004
L _I	.024	1.438	1.096	2.867	4.465	12.098	15.861
L _{II}	.009	.350	.953	2.625	4.156	11.541	15.200
L _{III}	.009	.346	.933	2.521	3.929	10.204	13.035
M _I	—	.044	.122	.505	.884	2.820	3.851
M _{II}	not	.025	.074	.410	.756	2.575	3.554
M _{III}	filled	.025	.074	.392	.714	2.281	3.066
M _{IV}	—	—	.007	.230	.493	1.871	2.586
M _V	—	—	.007	.228	.485	1.809	2.484

K Lines Tungsten				L Lines Tungsten			
Transition	Symbol	Energy (keV)	Relative Number	Transition	Symbol	Energy (keV)	Relative Number
K-N _{II} N _{III}	K β_2	69.081	7	L _I -N _{III}	L γ_5	11.674	10
K-M _{III}	K β_1	67.244	21	L _{II} -N _{IV}	L γ_1	11.285	24
K-M _{II}	K β_3	66.950	11	L _{III} -N _V	L β_2	9.962	18
K-L _{III}	K α_1	59.321	100	L _I -M _{III}	L β_3	9.817	37
K-L _{II}	K α_2	57.984	58	L _{II} -M _{IV}	L β_1	9.670	127
K lines Molybdenum				L _I -M _{II}	L β_4	9.523	29
K-M _{II} M _{III}	K β_{31}	19.602	24	L _{III} -M _V	L α_1	8.395	100
K-L _{III}	K α_1	17.479	100	L _{III} -M _{IV}	L α_2	8.333	11
K-L _{II}	K α_2	17.375	52				

Espectros de raios X



Bremsstrahlung e radiação característica



J. Radiol. Prot. 36 (2016) 842–857

doi:10.1088/0952-4746/36/4/842

Evaluation of mean conversion coefficients from air-kerma to $H^*(10)$ using secondary and transmitted x-ray spectra in the diagnostic radiology energy range

A H Lopez Gonzales¹, J C Santos¹, L Mariano¹, A Tomal² and P R Costa¹

SpeckCalc



IFUSP - Instituto de Física da USP

SpekCalc

Med Phys. 2007 Jun;34(6):2164-74.

Calculation of x-ray spectra emerging from an x-ray tube. Part I. electron penetration characteristics in x-ray targets.

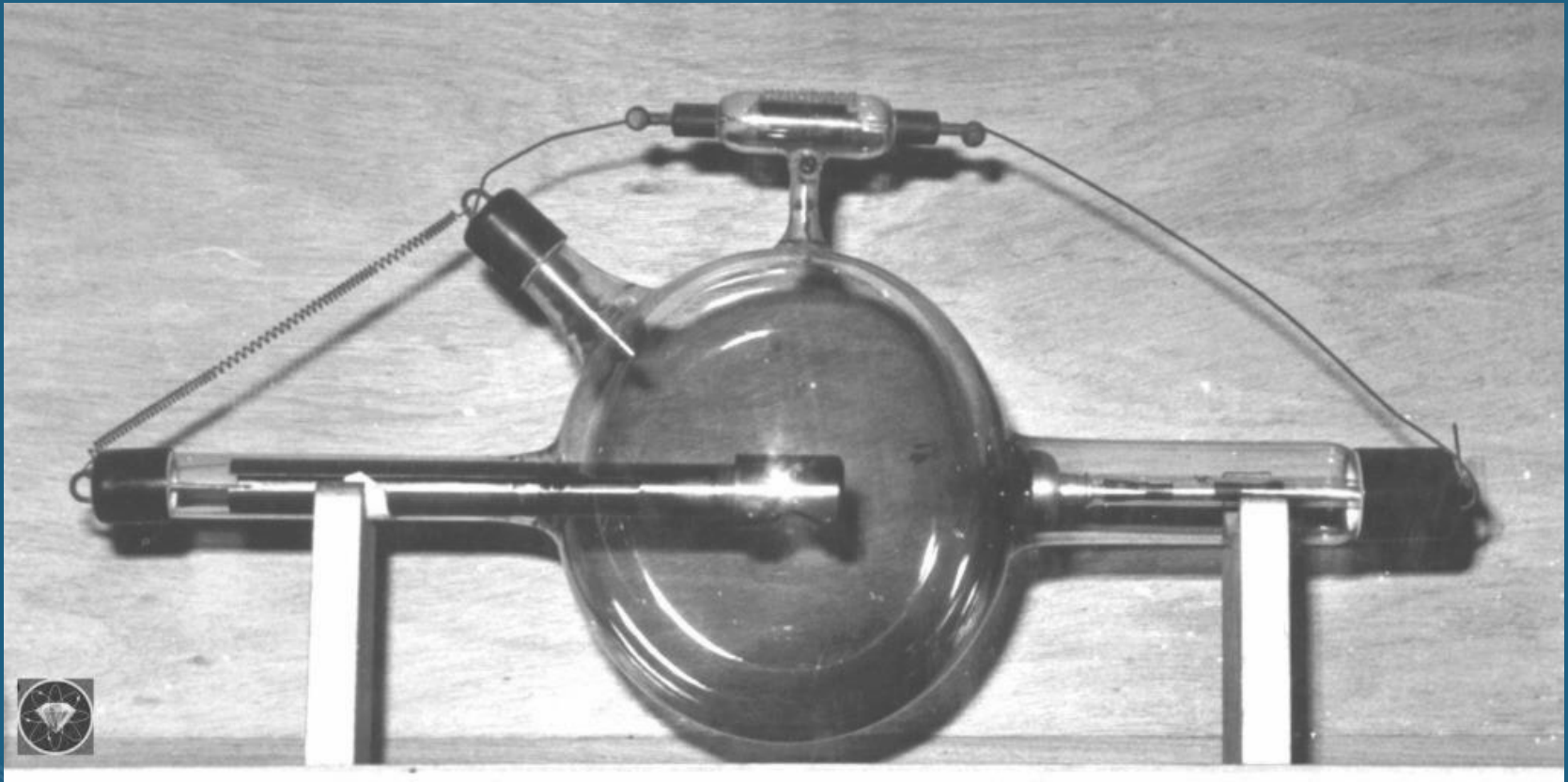
Poludniowski GG1, Evans PM.

Med Phys. 2007 Jun;34(6):2175-86.

Calculation of x-ray spectra emerging from an x-ray tube. Part II. X-ray production and filtration in x-ray targets.

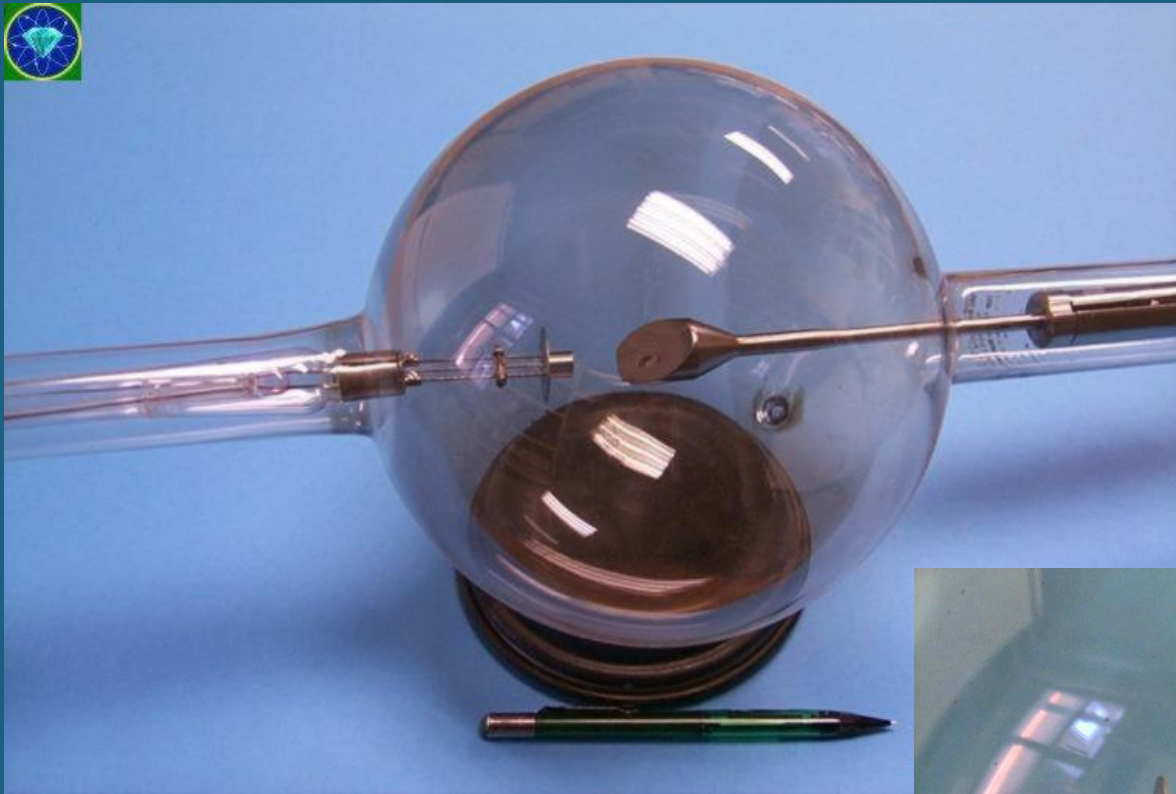
Poludniowski GG1.

Tubos de raios X

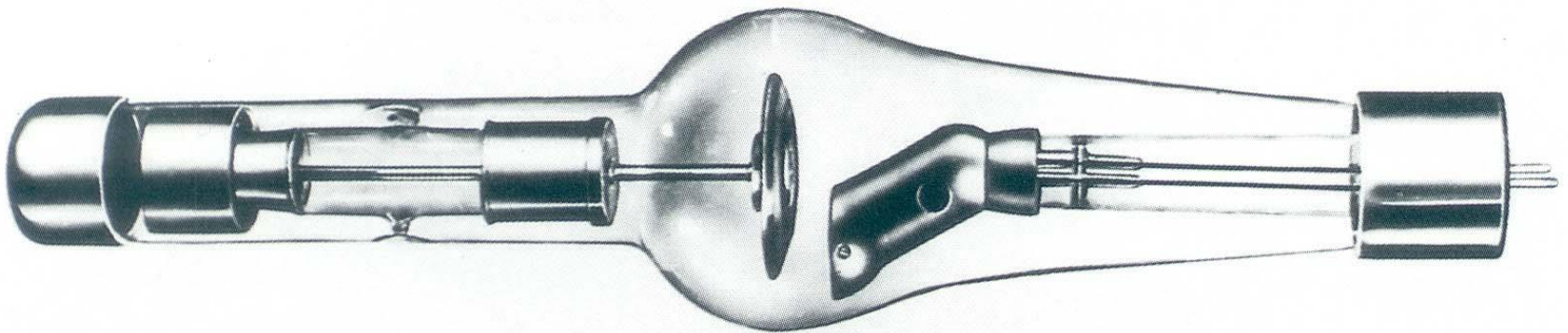


PRIMEIRO PROTÓTIPO

Tubos de raios X



Tubos de raios X



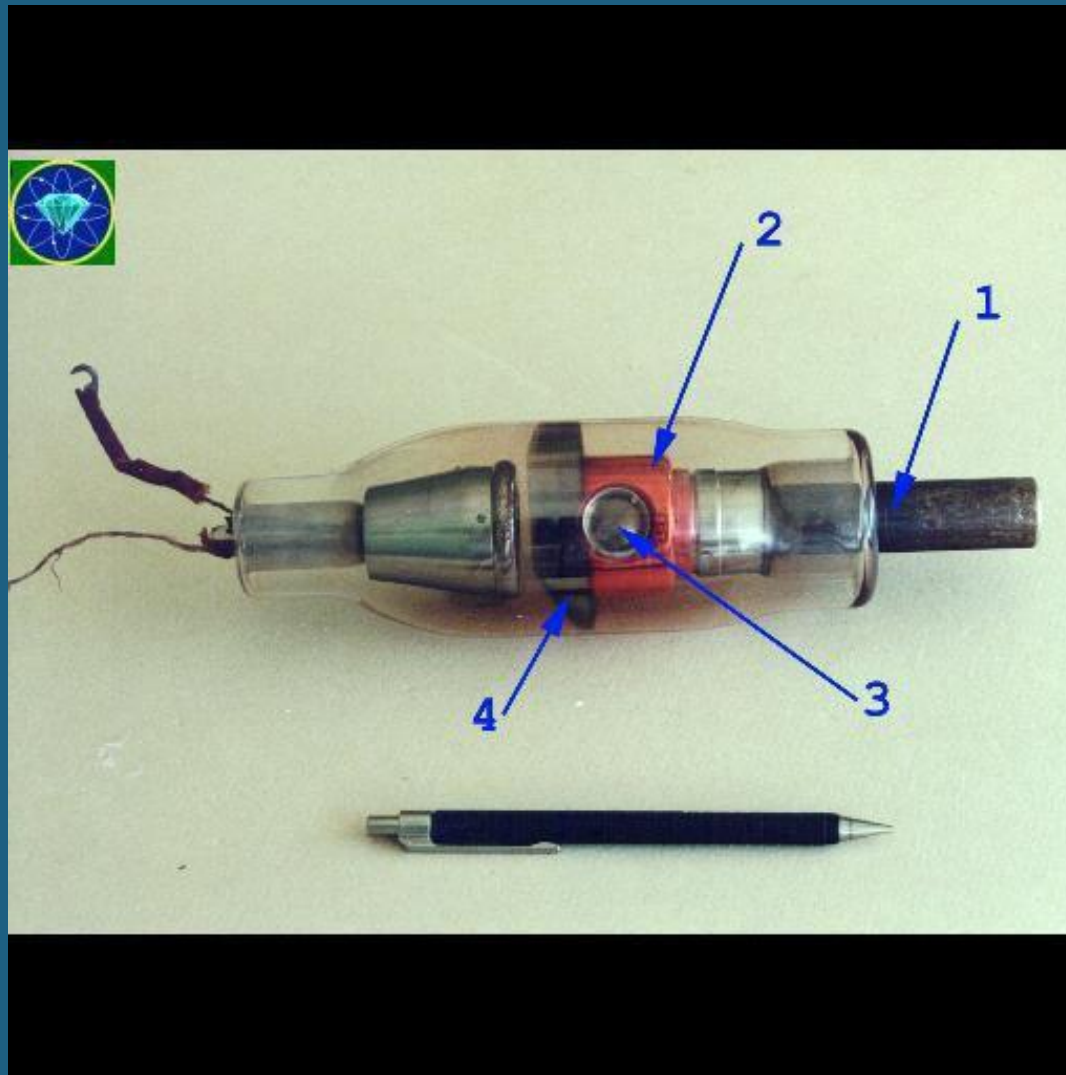
Tubo de raios X em 1937

Tubos de raios X

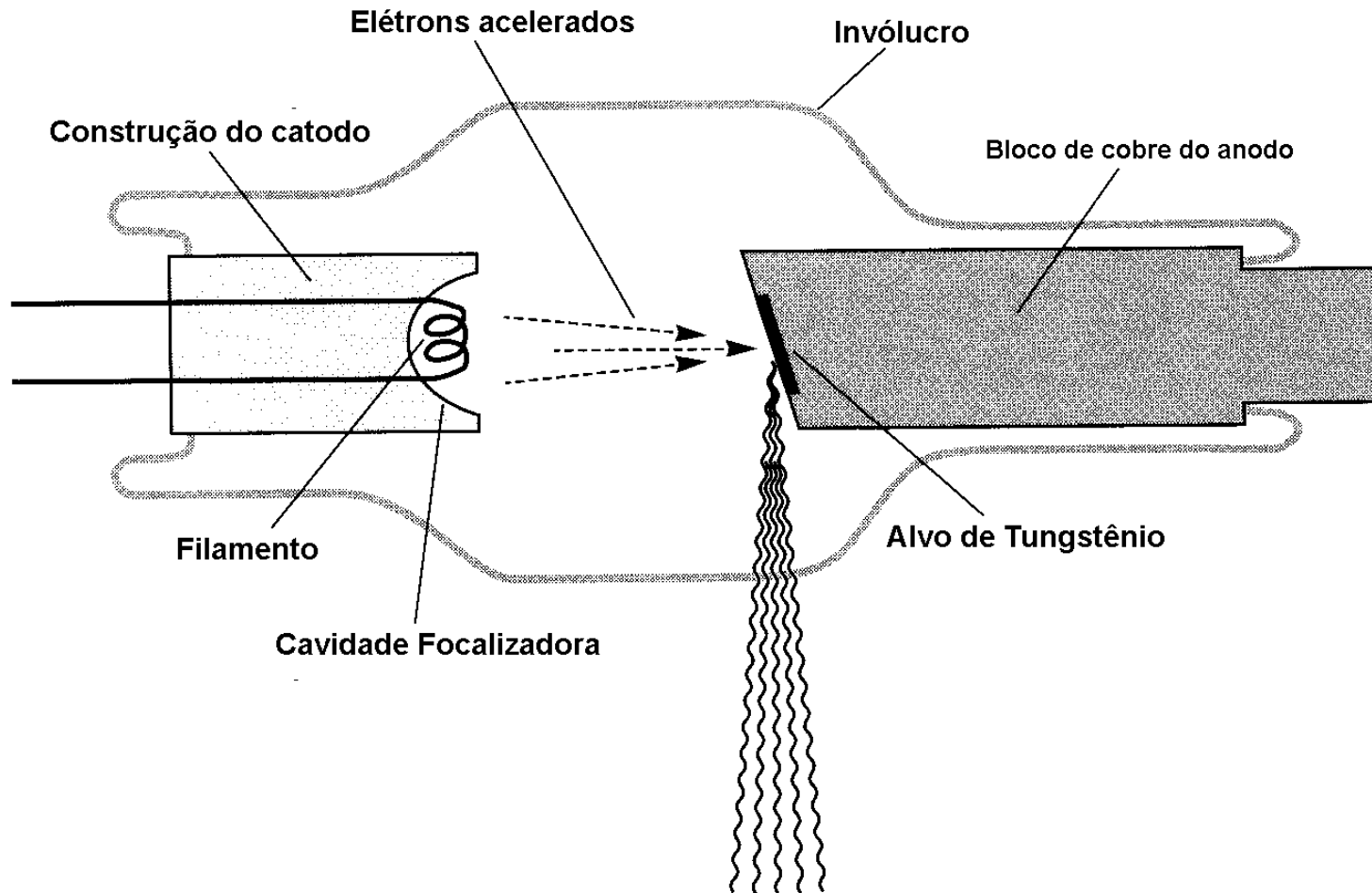
- Arquiteturas
 - Componentes
 - Vidro
 - Catodo
 - Filamento
 - Cavityde focalizadora
 - Anodo
 - Alvo
 - Bloco de cobre
 - Tipos de tubos
 - Anodo fixo
 - Anodo giratório



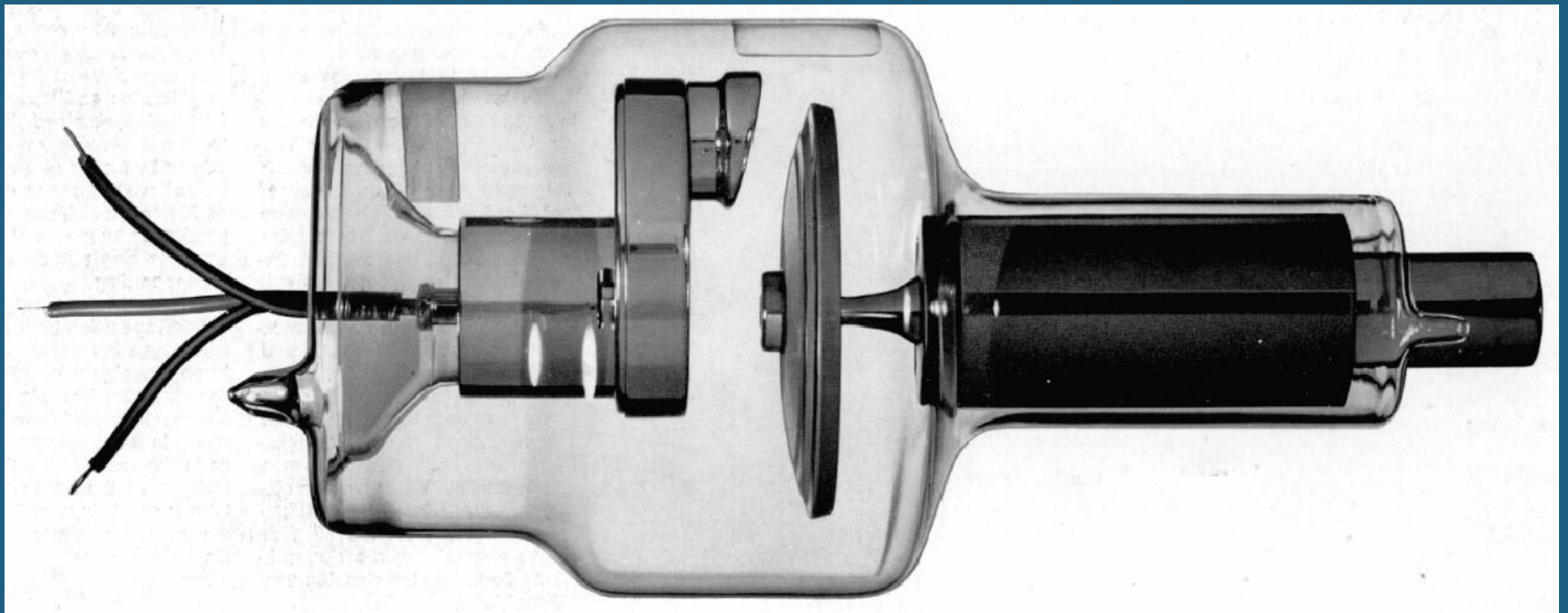
Tubos de raios X



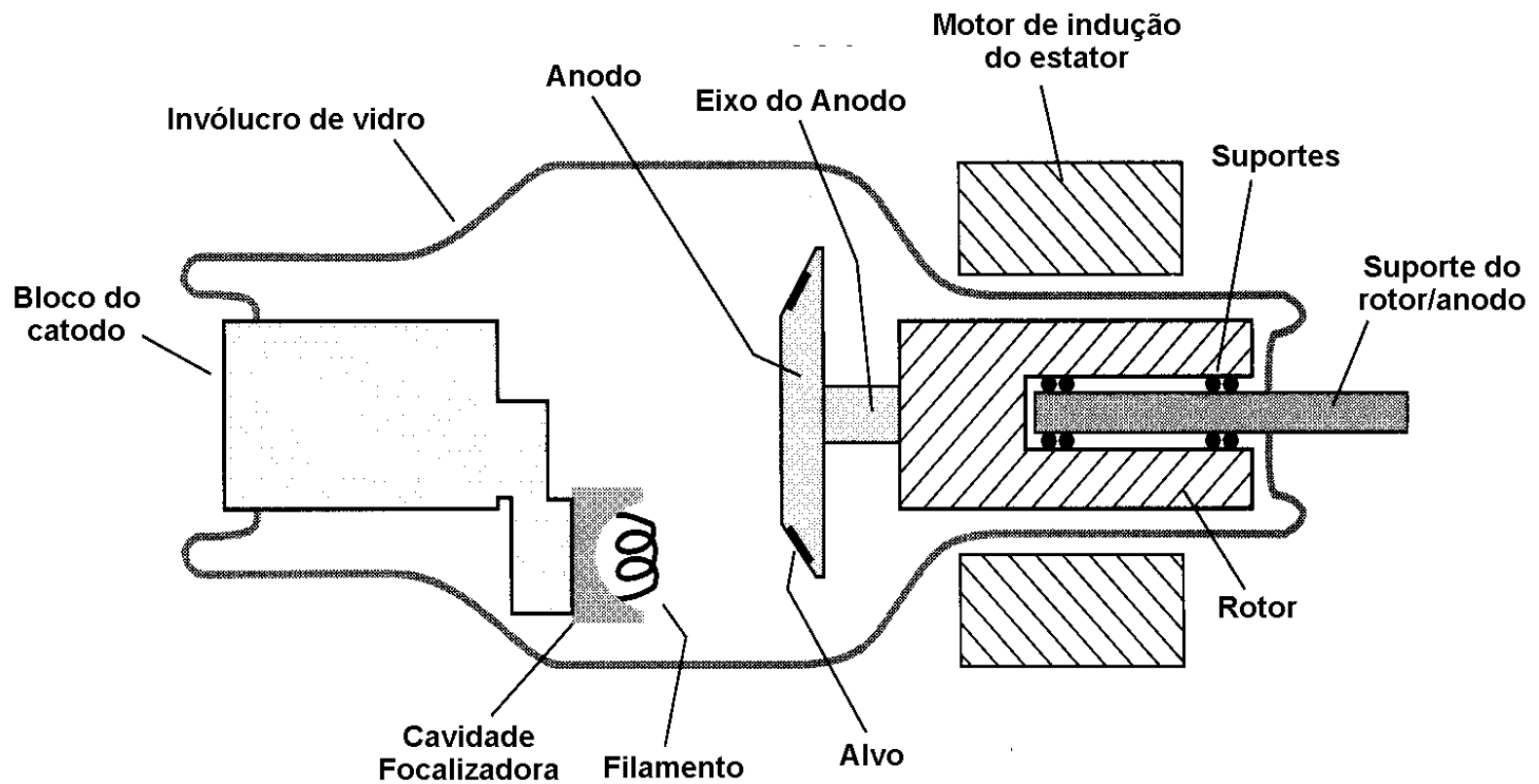
Tubos de raios X



Tubos de raios X



Tubos de raios X



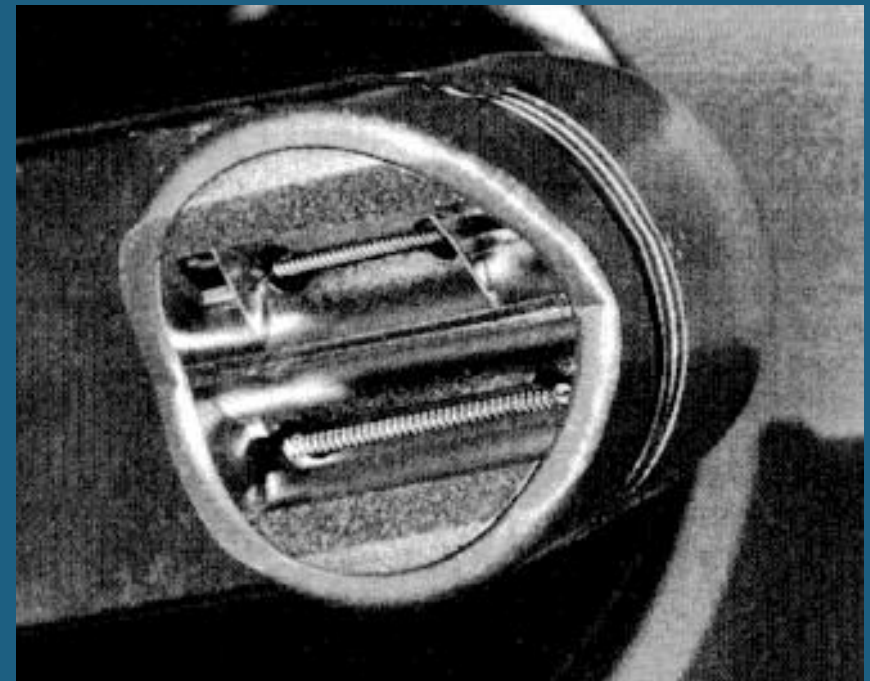
Tubos de raios X

– Invólucro

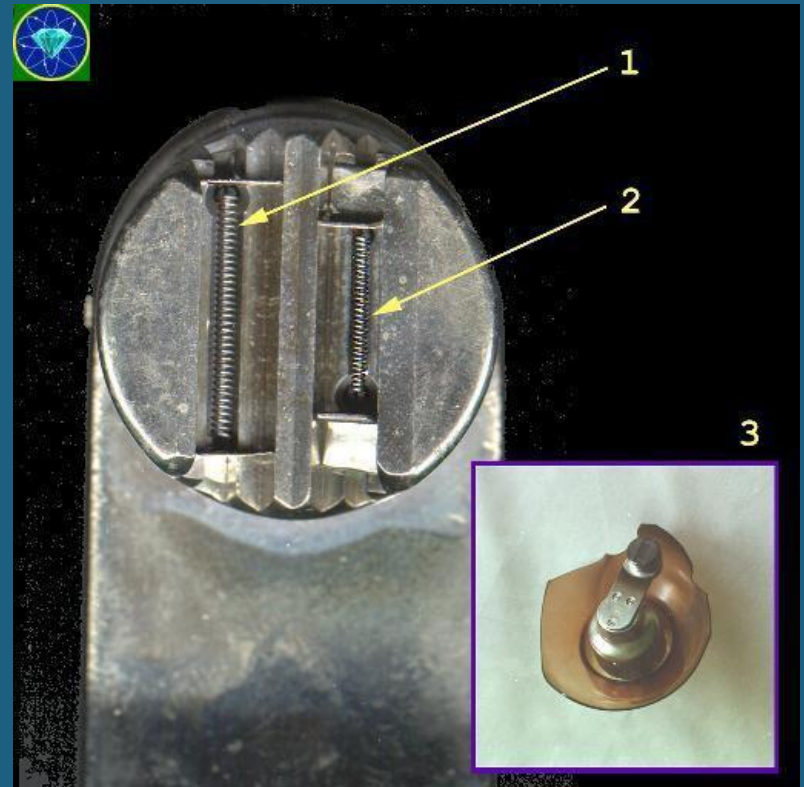
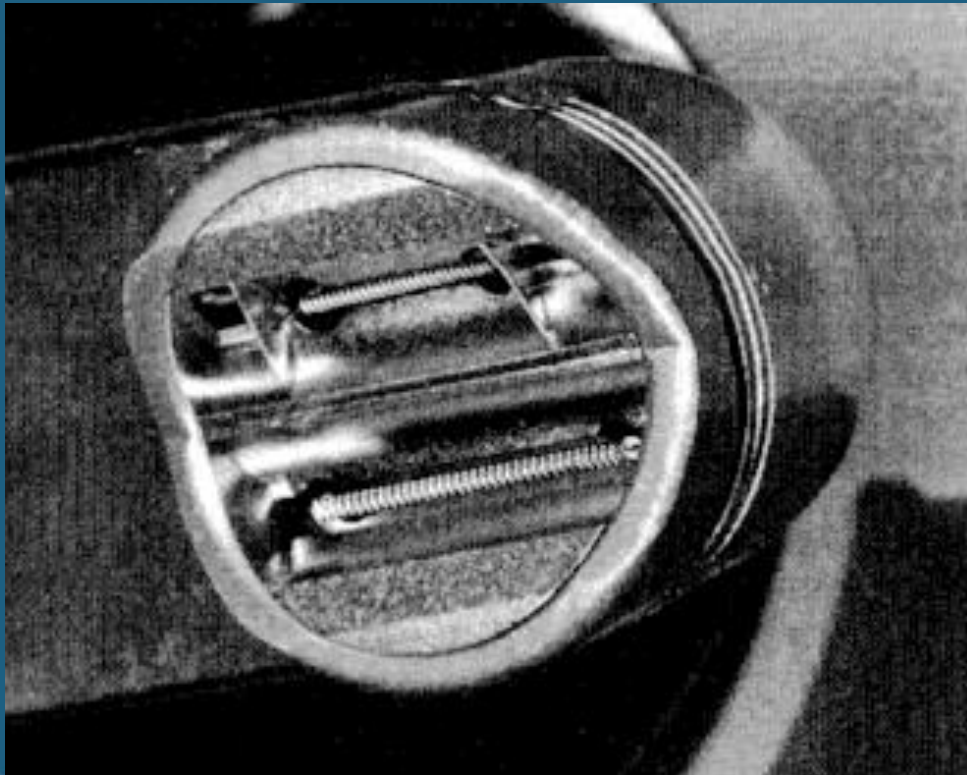
- Suporte mecânico
- Isolação elétrica para o anodo e catodo
- Vidro ou cerâmica
- Vácuo
 - Manutenção do vácuo
 - » 10^{-5} mm Hg
 - » “gaseificação” do tubo
- Alta resistência térmica (pirex)
- Janela
- Coeficiente de dilatação similar ao de metais

Tubos de raios X

- Catodo
 - Espiral de Tungstênio
 - 0,2 mm de diâmetro
 - Fino: 1-2 mm
 - Grosso: 2-5 mm
 - em linha
 - paralelos
 - Efeito termoiônico
 - $I_{\text{filamento}} = 3.5 - 5 \text{ A}$
 - Temperatura operacional (5A)
 - 2200 °C
 - Nuvem eletrônica
 - 3370 °C – evaporação
 - Corrente (*stand by*)
 - de manutenção
 - Pré-aquecimento

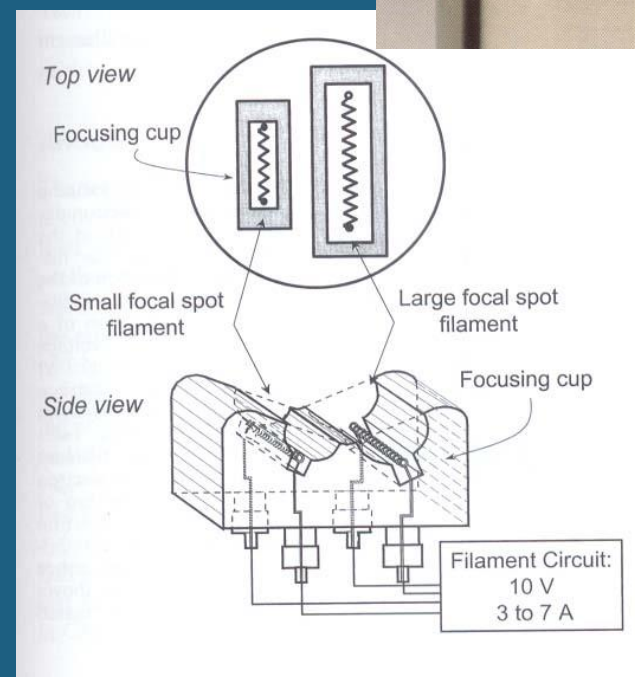
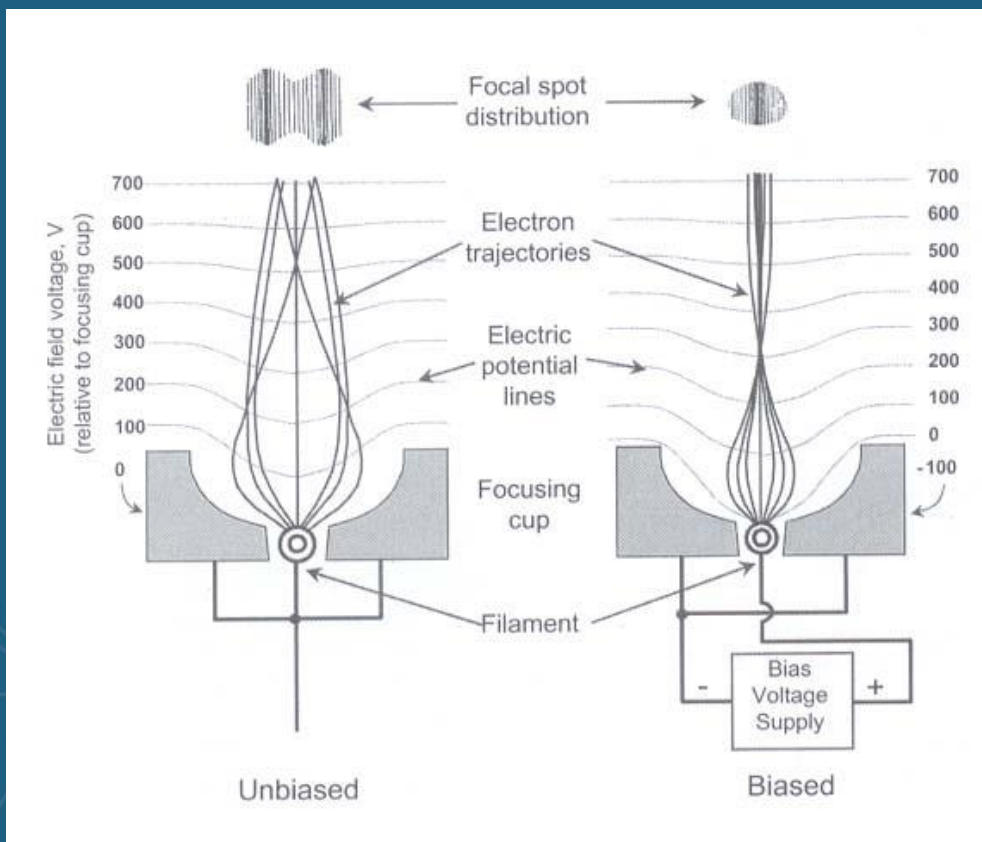


Tubos de raios X

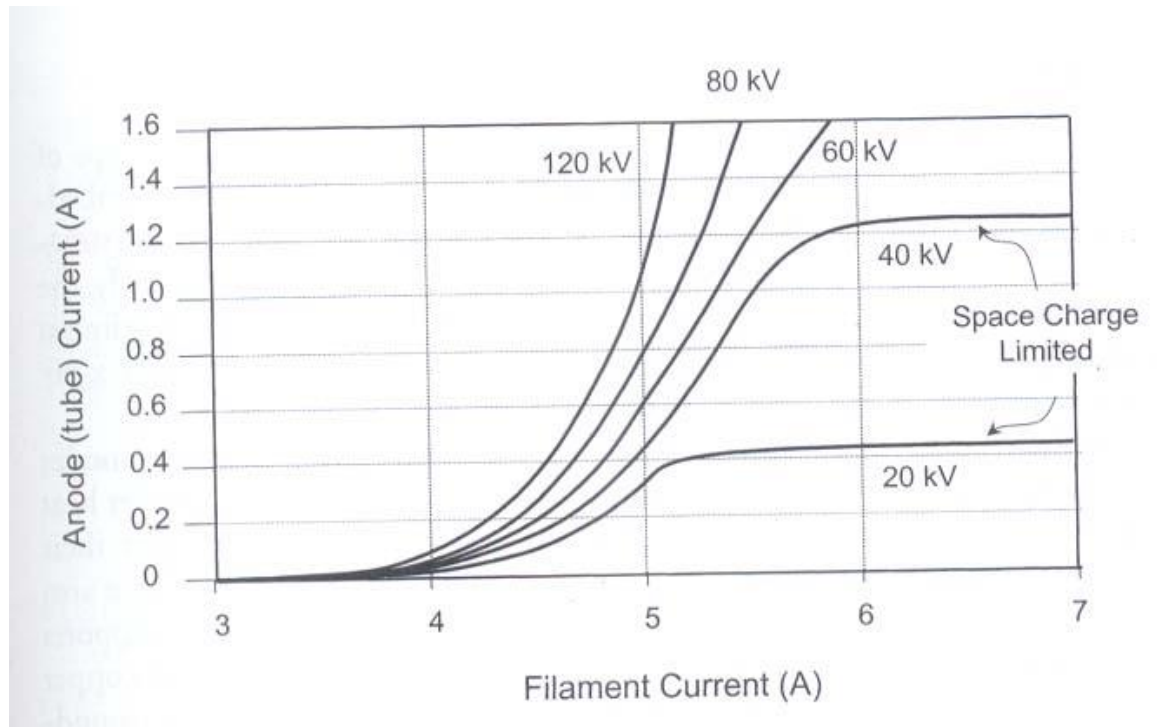
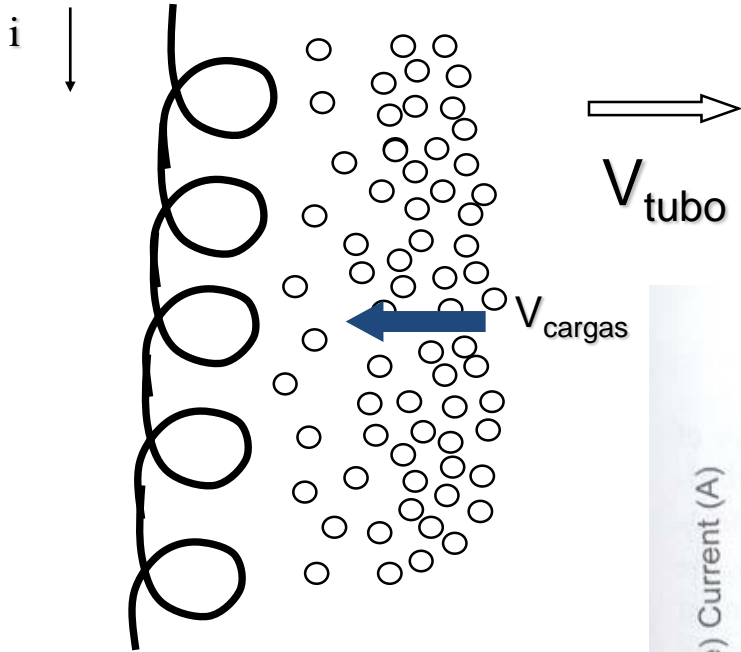


Tubos de raios X

- Dispositivo de focalização
 - cilindro de Wehnelt
 - Reduzir e uniformizar o ponto focal



Tubos de raios X



Tubos de raios X

- Anodo
 - Eficiência do processo de *bremstrahlung*

$$\varepsilon \approx V(\text{kVp}) \cdot Z \cdot 10^{-6} \quad (\%)$$

- Convencionais
 - » $Z = 74$ (W)

$$50 \leq V \leq 130 \text{ kVp} \quad \longrightarrow \quad 0,37 \leq \varepsilon \leq 0,96\%$$

- Mamografia
 - » $Z = 42$ (Mo)

$$20 \leq V \leq 35 \text{ kVp} \quad \longrightarrow \quad 0,08 \leq \varepsilon \leq 0,15\%$$





Então, que propriedades deve ter o material do anodo?



Tubos de raios X

– Anodo

• Material

- Máxima eficiência – Z alto
- Alto ponto de fusão
- Alta condutividade térmica
- Baixa pressão de vapor
- Boas propriedades mecânicas

• Solução

- Tungstênio – $Z = 74$
 - » ponto de fusão em $3.400\text{ }^{\circ}\text{C}$
- ou ligas metálicas W/Re (90/10) - $Z = 75$
 - » ponto de fusão em $3.170\text{ }^{\circ}\text{C}$



Sumário



IFUSP - Instituto de Física da USP

- Breve histórico
- Radiação diretamente ionizante
- Radiação indiretamente ionizante
- Poder de frenamento
- *Bremsstrahlung* e radiação característica
- Espectros de raios X
- Tubos de raios X