



SEL 705 - FUNDAMENTOS FÍSICOS DOS PROCESSOS DE FORMAÇÃO DE IMAGENS

(1. Raios-X)

Prof. Homero Schiabel
(Sub-área de Imagens Médicas)

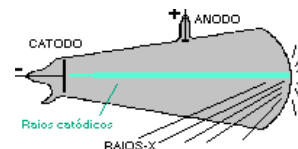


III. RAIOS-X



1. HISTÓRICO

- Meados do séc. XIX - **Maxwell**:
 - previu a existência e natureza das ondas eletromagnéticas;
- 1874 - **William Crookes**:
 - desenvolvimento dos primeiros tubos de raios catódicos (“am-pola de Crookes”);
 - sugerido como equipamento indicado para produzir “ondas eletromagnéticas artificiais penetrantes”
- 1887 - **Heinrich Hertz**:
 - ondas de rádio





- 1890-1898
 - investigações extensivas em toda a Europa das propriedades dos raios catódicos (1897 - J.J. Thomson - partículas carregadas negativamente);
- 1895 - WILHELM CONRAD RÖENTGEN:
 - experiências com tubos de raios catódicos;
 - busca da detecção das ondas eletromagnéticas (tubo com excelente vácuo e boa fonte de alta tensão - milhares de V);
 - próxima do tubo: placa fluorescente de cianeto de platina e bário;
 - (08/11/1895) para facilitar a observação da fraca luminosidade da placa fluorescente, Röntgen fechou as cortinas do laboratório e cobriu o tubo com uma caixa de papelão;



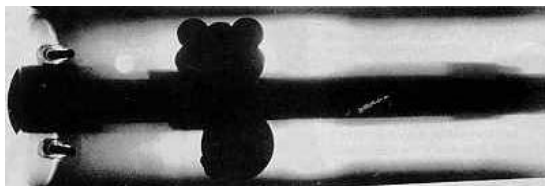
- ao ligar o tubo à eletricidade notou um brilho quase imperceptível no fundo da sala - que desaparecia quando o tubo era desligado;
- brilho vinha de uma outra placa fluorescente localizada num canto do lab.;
- placa mais próxima → brilho mais intenso;
- NÃO era efeito dos raios catódicos (só se propagam no vácuo);
- placas de madeira e metal não inibiam o brilho → radiação muito penetrante; só o chumbo conseguia bloquear os **RAIOS-X**;
- disco de chumbo diante da placa → sombra do disco e de sua própria mão!

- próximo passo: substituir a peça fluorescente por uma placa fotográfica → “fotografia” da mão de sua esposa, Bertha → primeira *RADIOGRAFIA* (publicada) da História



Conclusões:

- fluorescência em certas substâncias;
- escurecimento de filmes fotográficos;
- radiação eletromagnética (não sofre desvios em campos elétricos ou magnéticos);
- mais penetrantes após passar por absorvedores;
- diversas aplicações, principalmente, na Medicina.



Rifle de caça de Röntgen
(negativo da radiografia)





- Março 1896 - **Antoine Henri Becquerel (FRA)**
 - verificou sombras de objetos metálicos em placas fotográficas - radiação de sais de URÂNIO
 - radiação espontânea
 - proporcional à concentração dos sais;
 - sem variação com temperatura, campo eletromagnético, pressão ou estado químico

- Casal **Curie** (Pierre e Marie Sklodowska):
 - RADIOATIVIDADE
 - Pechblenda (U + Bi + Ba + Pb) → emitia muito mais radiação do que o U puro
 - JUN 1898 → Polônio;
 - DEZ 1898 → Rádium



- 1897 - **Ernest Rutherford:**
 - verificou que as radiações emitidas eram de três tipos distintos: **α** , **β** , **γ**
 - **α** - núcleos de He (E ~ 5 MeV);
 - **β** - resultado da conversão de um nêutron em um próton (E ~ 0,5 -> 1,0 MeV);
 - **γ** - (fótons) resultado do excesso de E que permanece em "núcleos-filhos" após a desintegração e emissão de radiação - natureza eletromagnética e não corpuscular (E ~ 1,0 MeV)

- RADIOATIVIDADE:
 - transformação espontânea do núcleo atômico de um nuclídeo para outro com emissão de um ou mais tipos de radiação (característica das transformações):
 - **desintegração.**





SEL 705 - FUNDAMENTOS FÍSICOS DOS PROCESSOS DE FORMAÇÃO DE IMAGENS

(1. Raios-X)

Prof. Homero Schiabel
(Sub-área de Imagens Médicas)



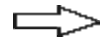
RADIAÇÃO

- Corpuscular
 - partículas subatômicas de alta velocidade (alta frequência): e^- , p^+ , nêutrons, α , β , γ , ...
 - $E = 1/2 (m v^2)$
- Eletromagnética
 - oscilações elétrica e magnética (ondas)
 - não têm massa;
 - $v = c$ (diferença apenas no λ)

Max Planck (1901): teoria dos quanta \rightarrow E depende da frequência de radiação (ou de λ):

$$E = h \nu$$

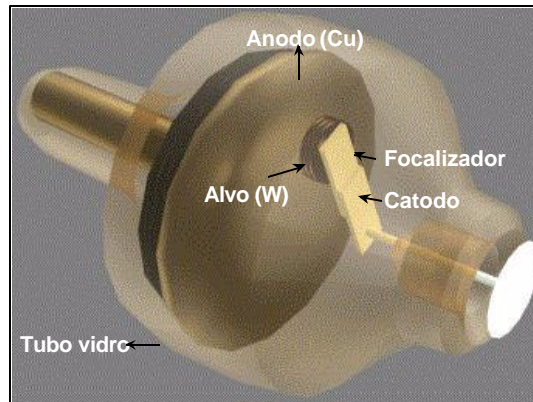
$$\nu = c / \lambda$$



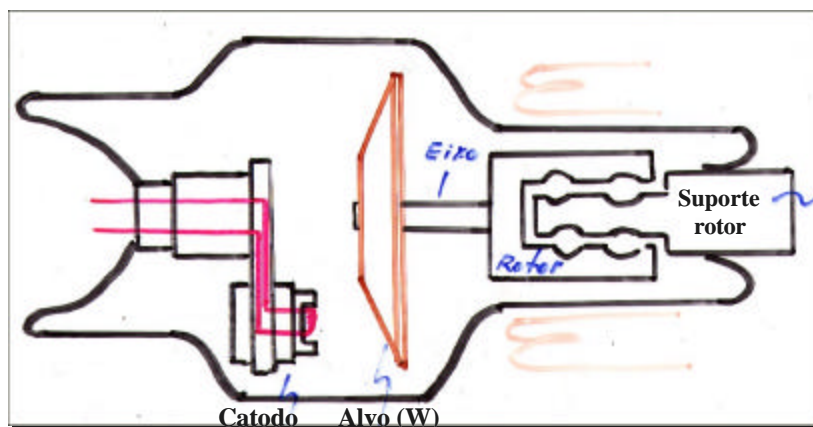
$$E = h c / \lambda$$

2. PRODUÇÃO DE RAIOS-X

Tubo de Raios-X (Anodo estacionário)



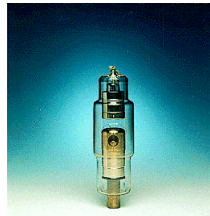
Tubo de Raios-X (Anodo rotativo)



- Eletrodos submetidos a uma alta ddp (milhares de V);
- elétrons do filamento emitidos em direção ao alvo e subitamente desacelerados → **E** → calor e R-X

$$E = e \cdot V$$

E = energia do e^-
e = carga do e^-
V = tensão entre os eletrodos [kV]



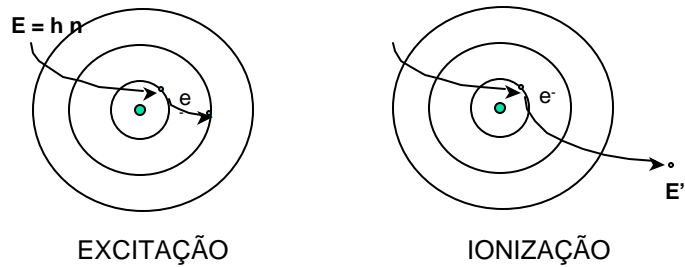
Tubo de 1897

2.1. Excitação e Ionização

- Se denotarmos E_1 como a energia original de um e^- orbital e E_2 como sua energia final, a energia de um *quantum* será:

$$E = h \nu = E_2 - E_1 \quad (1)$$

- Quando um *quantum* tem energia tal que possibilite levar o e^- a uma órbita mais alta → **EXCITAÇÃO**
- Quando um e^- orbital recebe energia suficiente para escapar do átomo → **IONIZAÇÃO**

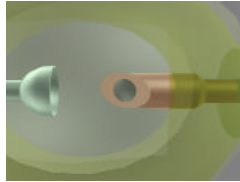


$$E' = h\nu - B$$

E' = Energia cinética do elétron livre;

B = Energia de ligação do elétron ao átomo

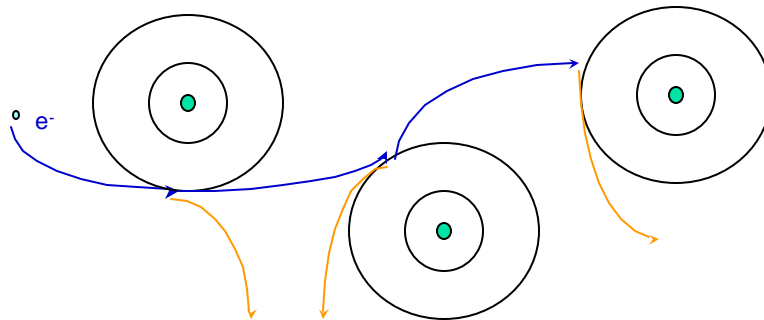
- Ionização causada pela absorção de radiação eletromagnética → ABSORÇÃO FOTOELÉTRICA → fóton incidente desaparece após a ejeção do elétron.
- Emissão de elétrons da superfície de uma substância como resultado da irradiação por ondas eletromagnéticas → EFEITO FOTOELÉTRICO



2.2. Possíveis interações entre os elétrons do feixe e os átomos do alvo no tubo de raios-X

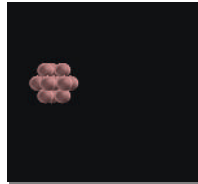
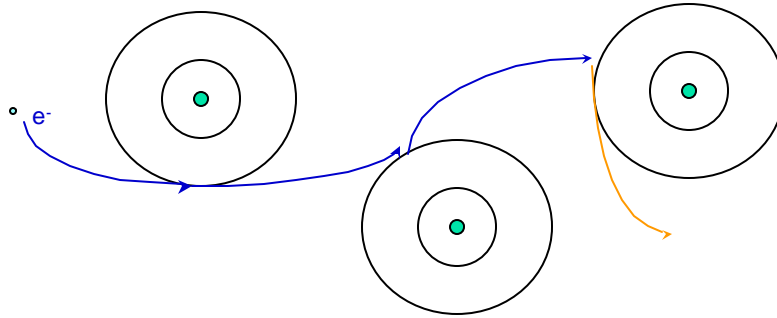
- elétron sofre 3 deflexões e produz 3 fótons de raios-X

1

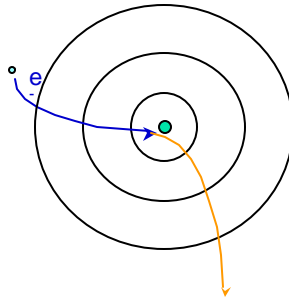


- elétron sofre 3 deflexões e produz ionização, calor e um fóton de raios-X

2



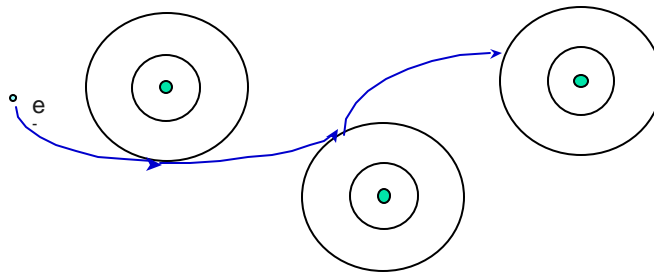
3



- elétron perde toda sua energia numa única colisão:
 - ☐ fóton X de máxima energia;

$$\text{☐ } E = hc / \lambda = eV \quad \Rightarrow \quad \lambda_{\text{mín}} = 12,4 / kV \text{ [A]}$$

4



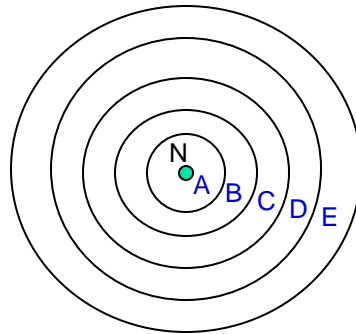
- elétron sofre 3 deflexões, produzindo ionizações e calor
- (*) **OBS.:** rendimento $\rightarrow \eta = Z V 10^{-9}$

2.3. Espectro de raios-X

■ Espectro Contínuo

- Raios-X podem assumir qualquer valor de intensidade, desde 0 até a máxima energia (numericamente = kVp)

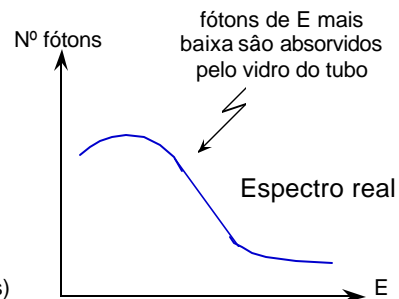
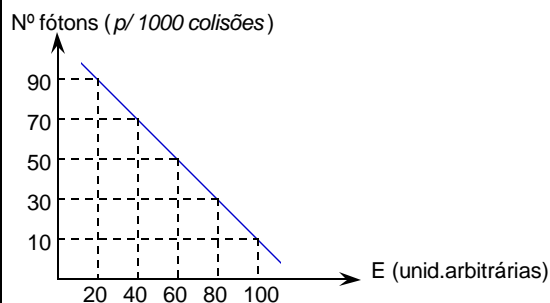
A - 100
B - 80
C - 60
D - 40
E - 20



- Probabilidade de interação de um elétron do feixe com elétrons orbitais de cada camada para a produção de fótons de raios-X:

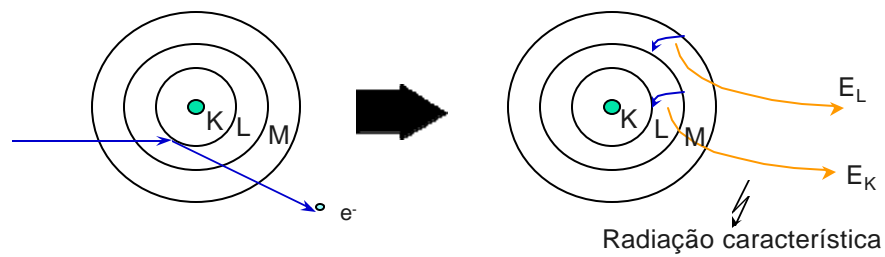
E - 9/100 D - 7/100 C - 5/100 B - 3/100 A - 1/100

Supondo 1000 colisões:



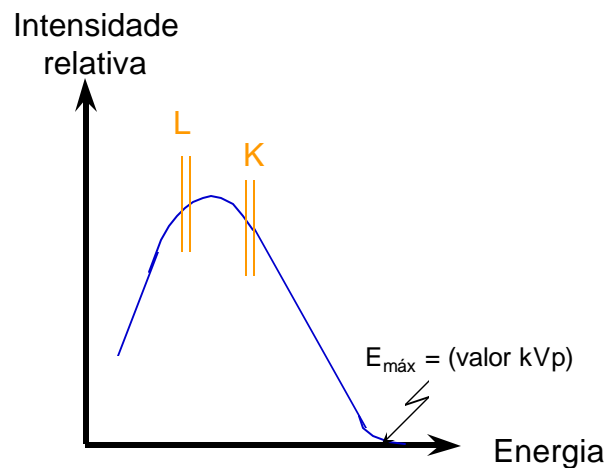
■ Espectro de Linhas

- Interação dos e⁻ do feixe com e⁻ orbitais dos átomos do alvo
→ e⁻ ou fótons produzidos no alvo removem e⁻ das camadas mais internas dos átomos → ionização → e⁻ das camadas superiores (+ externas) decaem, ocupando o espaço vazio das camadas inferiores → emissão de fótons de energia característica (radiação característica).



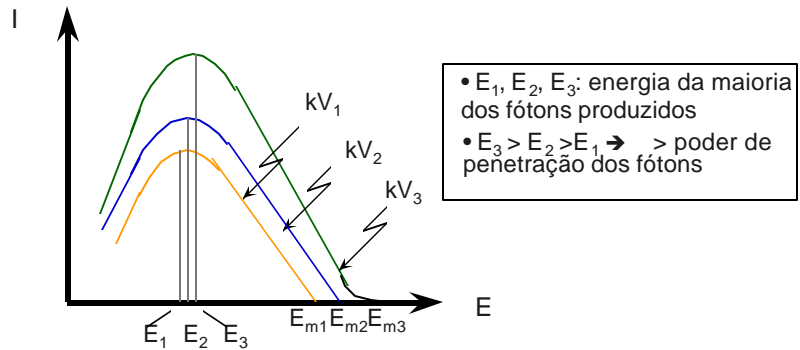
Energia maior = E_K (órbita mais próxima do núcleo)

Espectro total ("Bremsstrahlung" + característico):



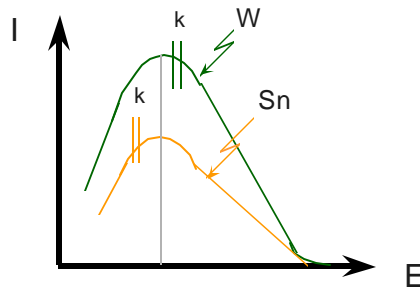
2.4. Fatores que influenciam o espectro de raios-X

- Tensão entre os eletrodos (kVp)



Quantidade de fótons produzidos aumenta com a kV:
 — qualidade do feixe proporcional à kV
 — quantidade de fótons proporcional a $(kV)^2$

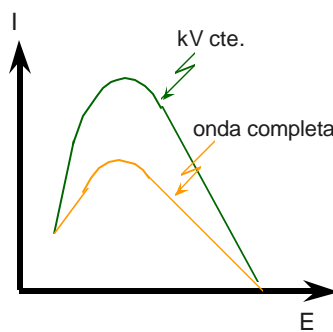
- Corrente de tubo (mA)
 - Quanto mais corrente no tubo, maior a quantidade de elétrons produzidos no feixe e, portanto, maior quantidade de fótons de raios-X.
- Material do alvo
 - Alvos com n° atômico maior produzirão mais fótons;
 - para uma dada kVp, o máximo da intensidade sempre ocorre para uma dada energia dos fótons



- Filtros

- Filtração inerente: filtração inevitável do feixe ao ser emitido a partir do alvo (vidro do tubo);
 - fótons com energia mais baixa sofrem maior absorção e, como são mais facilmente absorvidos pela matéria, não são adequados para formação da imagem, já que não contribuem para impressionar o filme
 - filtração adicional: elimina fótons de energia mais baixa

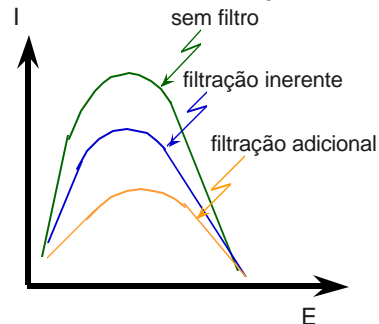
Forma de onda (retificação)



- Filtros

- Filtração inerente: filtração inevitável do feixe ao ser emitido a partir do alvo (vidro do tubo);
 - fótons com energia mais baixa sofrem maior absorção e, como são mais facilmente absorvidos pela matéria, não são adequados para formação da imagem, já que não contribuem para impressionar o filme
 - filtração adicional: elimina fótons de energia mais baixa

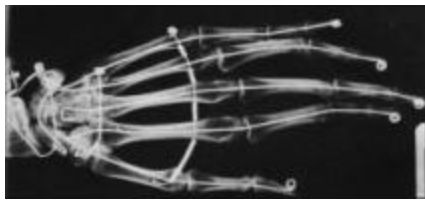
Forma de onda (retificação)



2.5. Fatores que afetam o espectro de um feixe R-X

FATOR	INTENSIDADE	QUALIDADE	COMENT.
mA	$I \propto mA$	não afetada	formato espectro não afetado
kVp	$I \propto (kVp)^2$	$Q \propto kVp$	-
Z (alvo)	$I \propto Z$	não afetada	-
retificação	> para kV cte.	idem	forma onda altera o espectro
filtração	$I \propto 1/f$	$Q \propto f$	filtros removem R-X moles
dist. focal	$I \propto 1/d^2$	não afetada	Lei Inv. Quadrado da Distância

Ex. prático da Lei do Inverso do Quadrado da Distância



$d_{FF} = 50 \text{ cm} - 6 \text{ mAs}$



$d_{FF} = 100 \text{ cm} - 24 \text{ mAs}$



$d_{FF} = 100 \text{ cm} - 6 \text{ mAs}$

(*) kVp = 50 em todos os casos