



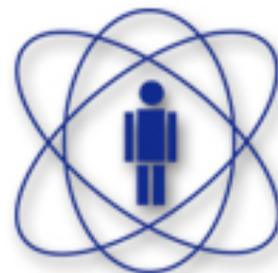
CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS

<http://www.cbpf.br>

MICROSCOPIA ELETRÔNICA



ANDRÉ LUIZ PINTO



CBPF

Roteiro



- **Introdução**
- **Fundamentos**
 - Fontes de elétrons
 - Lentes de elétrons
 - Interação elétron-matéria
- **Microscópio Eletrônico de Varredura**
- **Microscópio Eletrônico de Transmissão**
- **Aplicações à Nanotecnologia**
- **Comentários Finais**
 - LabNano

O que desejamos observar?

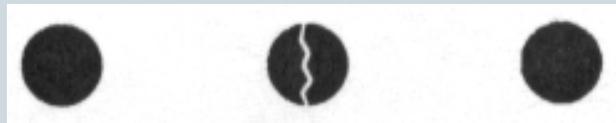


- **Morfologia da matéria**
- **Materiais amorfos**
 - **Morfologia**
 - **Composição química**
 - ✦ Composição atômica
 - ✦ Estado de ionização
 - ✦ Estrutura molecular
 - **Presença de ordenamento de curto alcance**
- **Materiais cristalinos**
 - **Morfologia**
 - **Composição química**
 - ✦ Composição atômica
 - ✦ Estado de ionização
 - ✦ Estrutura molecular
 - **Estrutura cristalina**
 - **Defeitos**
 - ✦ Classificação
 - ✦ Quantificação
 - **Natureza das interfaces entre os domínios cristalinos**
 - **Textura cristalográfica**

Nosso Arsenal



- Aumento x Resolução (lateral)



- Olho humano – 0,1 mm
- Microscopia Ótica – 0,5 μm
- Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) – 1-4 ηm
- Microscópio Eletrônico de Transmissão (MET) – 1-0,8 Å
- Microscópio de Ponta de Prova (SPM) – 0,3 Å

O que desejamos em um canhão?



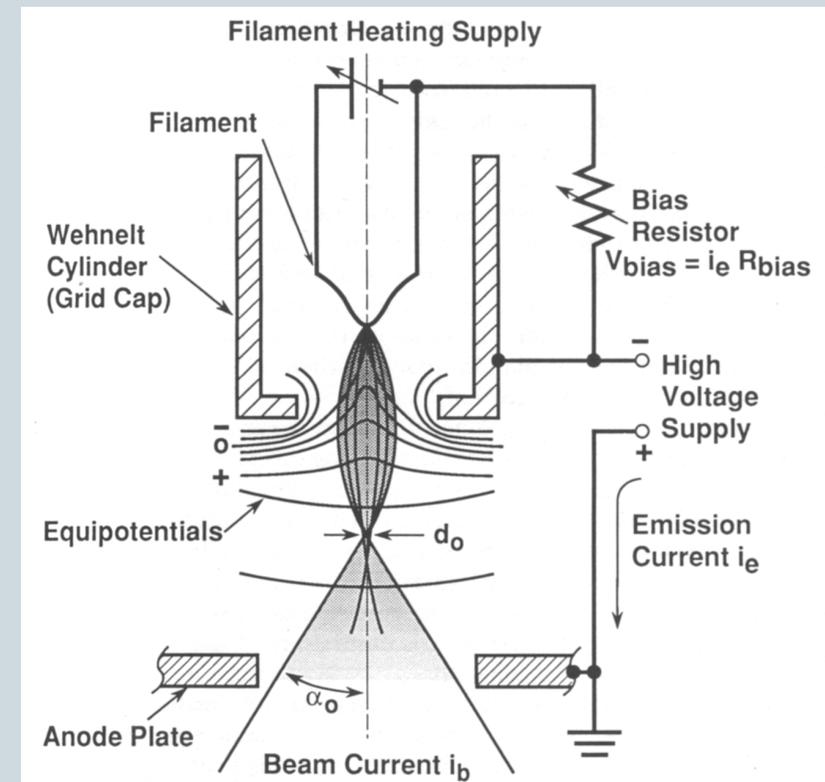
- Alto brilho
- Fonte de dimensões reduzidas
- Estabilidade
- Energia Controlável
- Coerência

Brilho



- Definimos o brilho como a densidade de corrente (corrente, i_e , por unidade de área) emitido em um ângulo sólido α_o . Unidade: A/m^2sr

$$\beta = \frac{i_e}{\pi \left(\frac{d_o}{2} \right)^2 \pi (\alpha_o)^2}$$



Energia dos Elétron



- Através do Princípio da Dualidade Onda-Partícula de de Broglie podemos associar o momento da partícula ao seu comprimento de onda

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

- Energia cinética do elétron a partir do seu potencial de aceleração

$$eV = \frac{m_0 v^2}{2} \Rightarrow p = m_0 v = \sqrt{2m_0 eV}$$

Energia dos Elétrons



- Comprimento de onda

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_0 eV}}$$

- Correção relativística

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_0 eV \left(1 + \frac{eV}{2m_0 c^2} \right)}}$$

Energia dos Elétrons



TABLE 1.2 Electron Properties as a Function of Accelerating Voltage

Accelerating voltage (kV)	Non-relativistic wavelength (nm)	Relativistic wavelength (nm)	Mass ($\times m_0$)	Velocity ($\times 10^8$ m/s)
100	0.00386	0.00370	1.196	1.644
120	0.00352	0.00335	1.235	1.759
200	0.00273	0.00251	1.391	2.086
300	0.00223	0.00197	1.587	2.330
400	0.00193	0.00164	1.783	2.484
1000	0.00122	0.00087	2.957	2.823

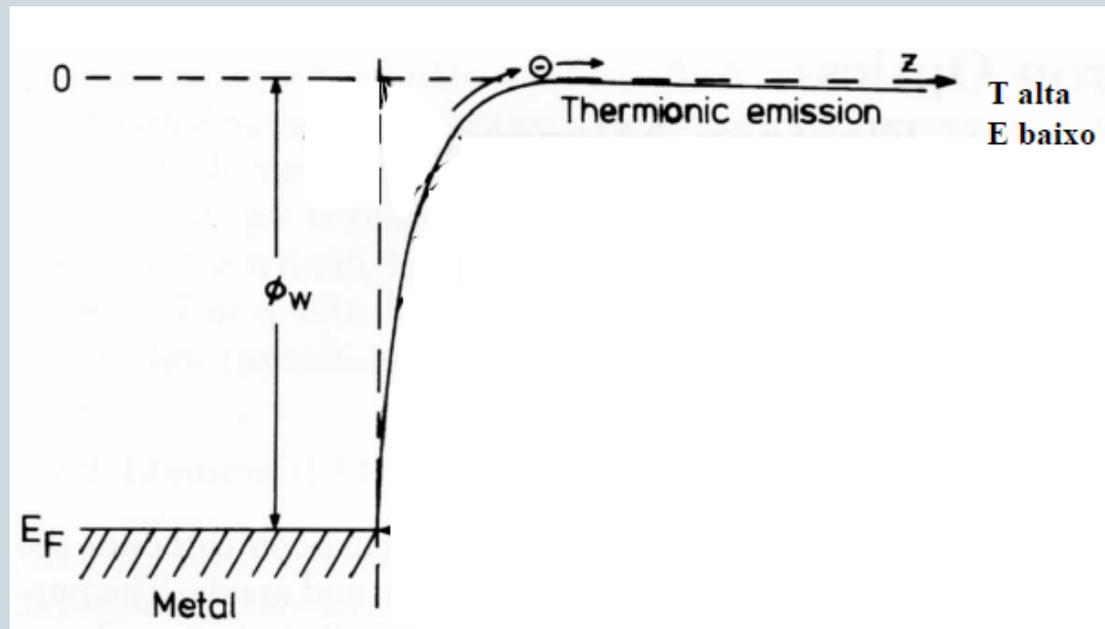
Fontes Termiônicas



- Lei de Richardson para a densidade de corrente

$$J = AT^2 e^{-\frac{\Phi}{kT}}$$

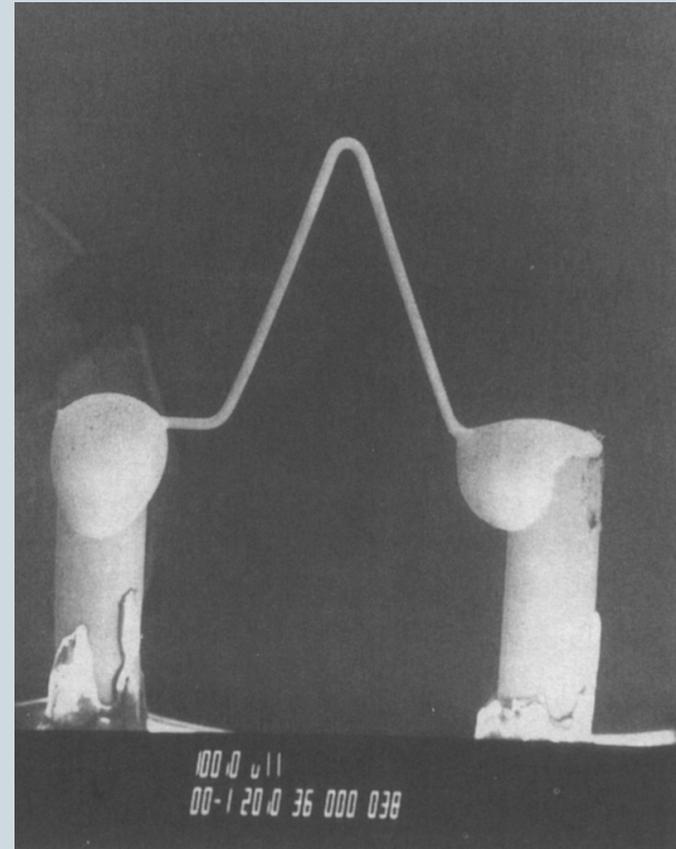
A- Cte de Richardson
 Φ - Função Trabalho
K – Cte de Boltzmann



Filamento de W



- Baixo custo (~ US\$ 90)
- Baixa vida (~ 100 h)
- Baixo brilho

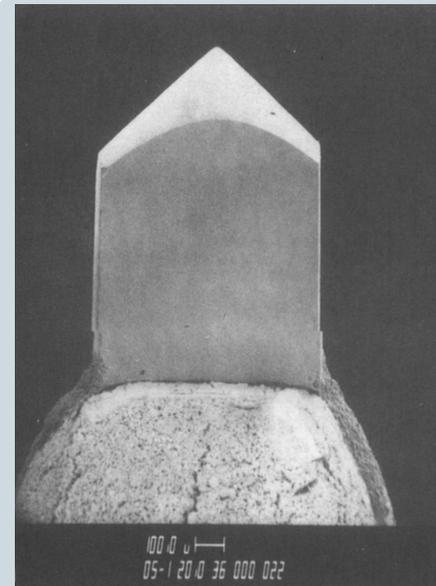


Williams e Carter

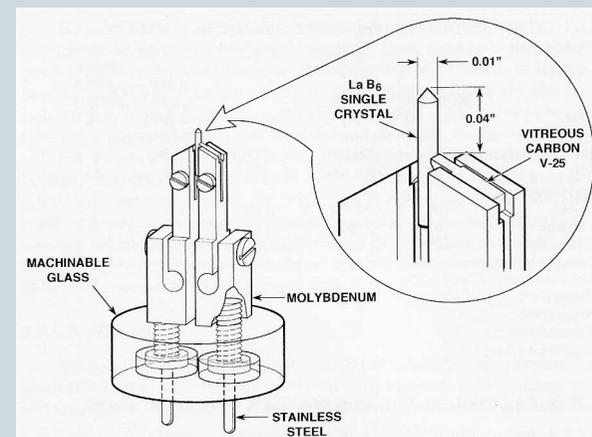
Filamento de LaB_6



- Maior custo (~US\$ 1-3k)
- Maior vida (~500 h)
- Maior brilho
- Monocristal $\langle 100 \rangle$
- Suporte resistivo de grafite ou rênio
- Sujeito a choque térmico
- Altamente reativo
- Podem ter efeito Schottky (ponta com $r \sim 1-10 \mu\text{m}$ dobra o brilho)

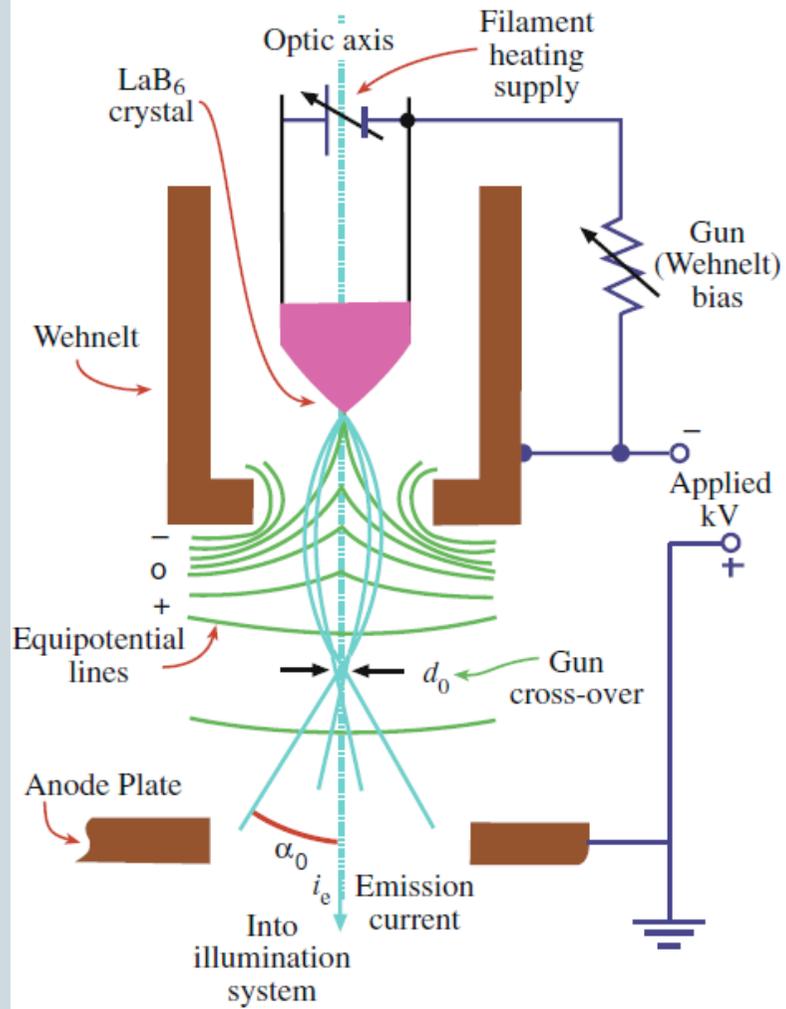


Williams e Carter



Goldstein

Canhão de Elétrons - Wehnelt



Williams e Carter

Problemas das Fontes Termiônicas



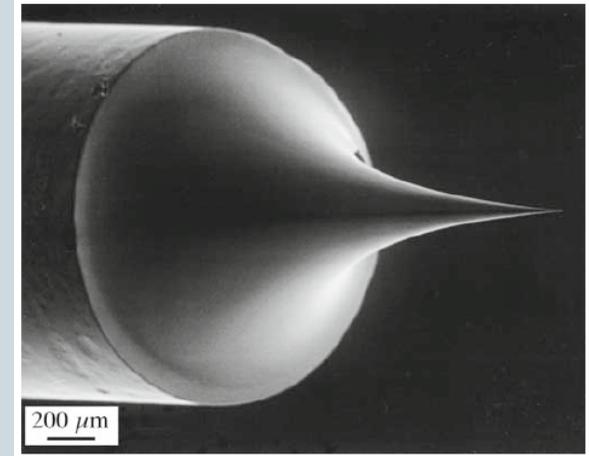
- Evaporação do catodo
- “Thermal drift”
- Baixo brilho
 - Brilho máximo

$$\beta_{Max} = \frac{J_c e V_o}{\pi k T}$$

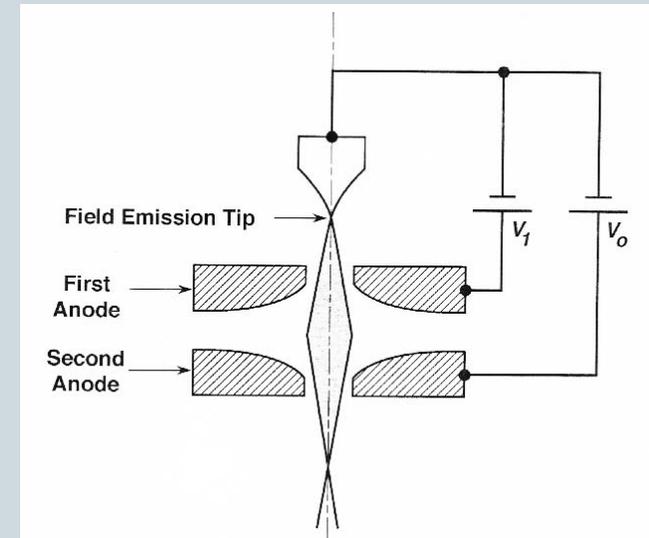
Canhão de Emissão por Campo (FEG)



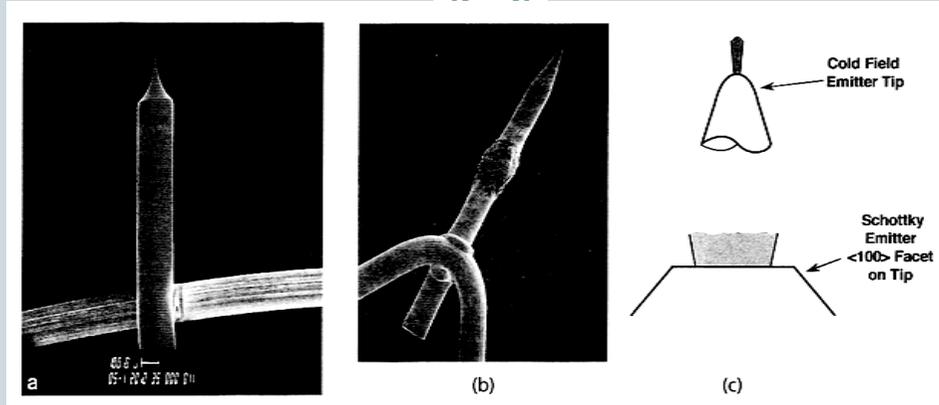
- Monocristal <310> com ponta afiada ($r < 100 \text{ nm}$)
- Menor raio concentra o campo elétrico e diminui a necessidade de T
- V_1 – voltagem de extração (3-5 kV)
- V_2 – voltagem de aceleração
- Brilho máximo
$$\beta_{Max} = \frac{J_c e V_o}{\pi \Delta E}$$



Williams e Carter



Canhão de Emissão por Campo (FEG)



Goldstein et al

- 3 tipos básicos
 - Frio
 - Térmico
 - Schottky
- Crossover
 - Frio - $< 5 \text{ } \eta\text{m}$
 - Térmico - $< 5 \text{ } \eta\text{m}$
 - Schottky - $< 15\text{-}30 \text{ } \eta\text{m}$
- Variação da Energia (ΔE)
 - Frio – 0,3 eV
 - Térmico – 1 eV
 - Schottky – 0,3 - 1 eV
- Estabilidade de Corrente
 - Frio – 5%/h
 - Térmico – 5%/h
 - Schottky – 2%/h

Goldstein et al

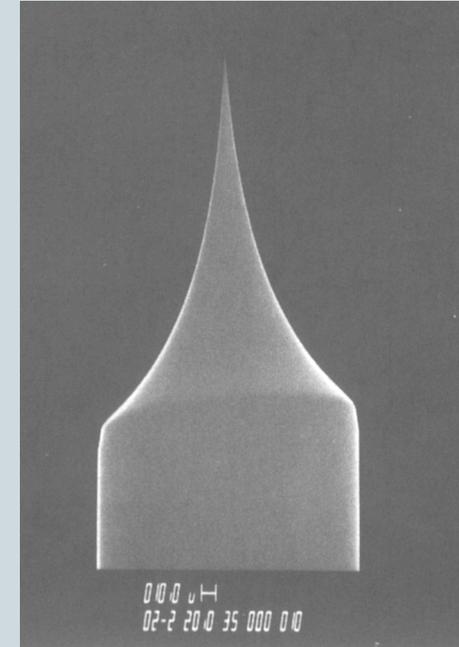
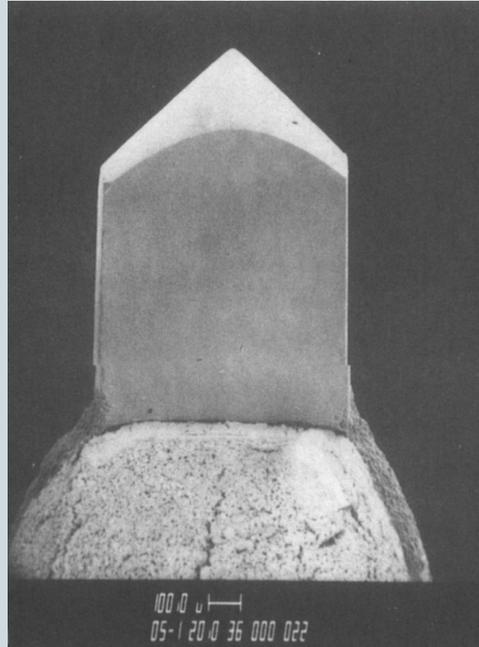
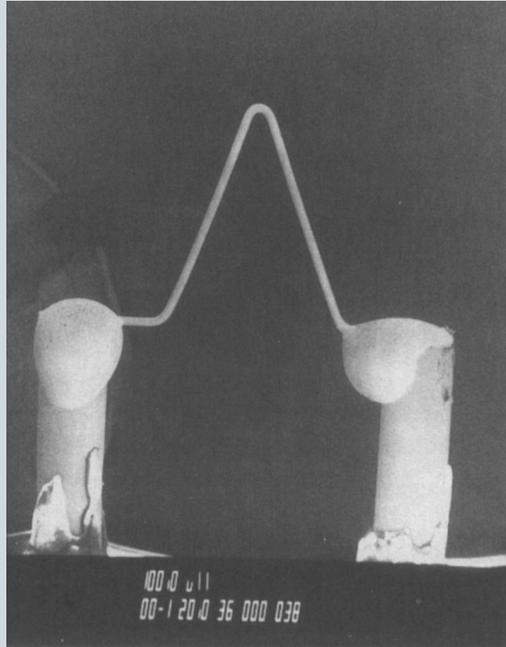
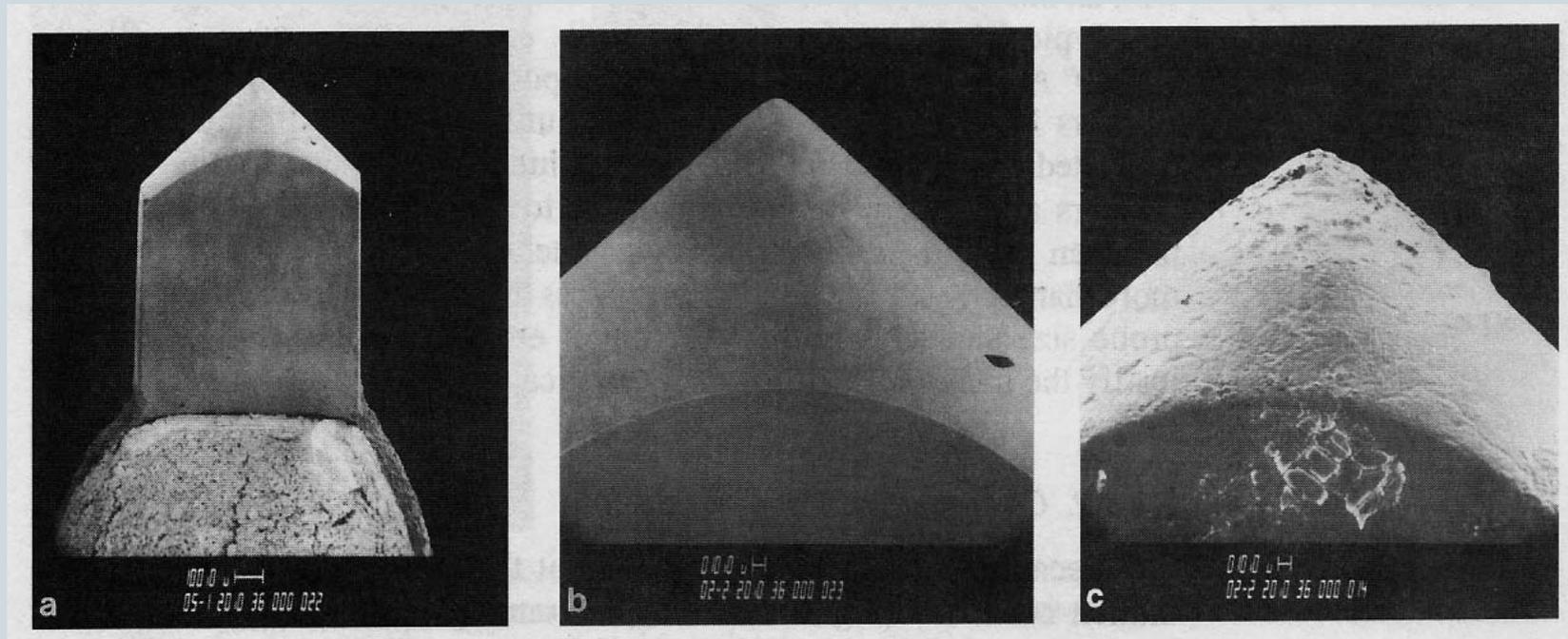


TABLE 5.1 Characteristics of the Principal Electron Sources

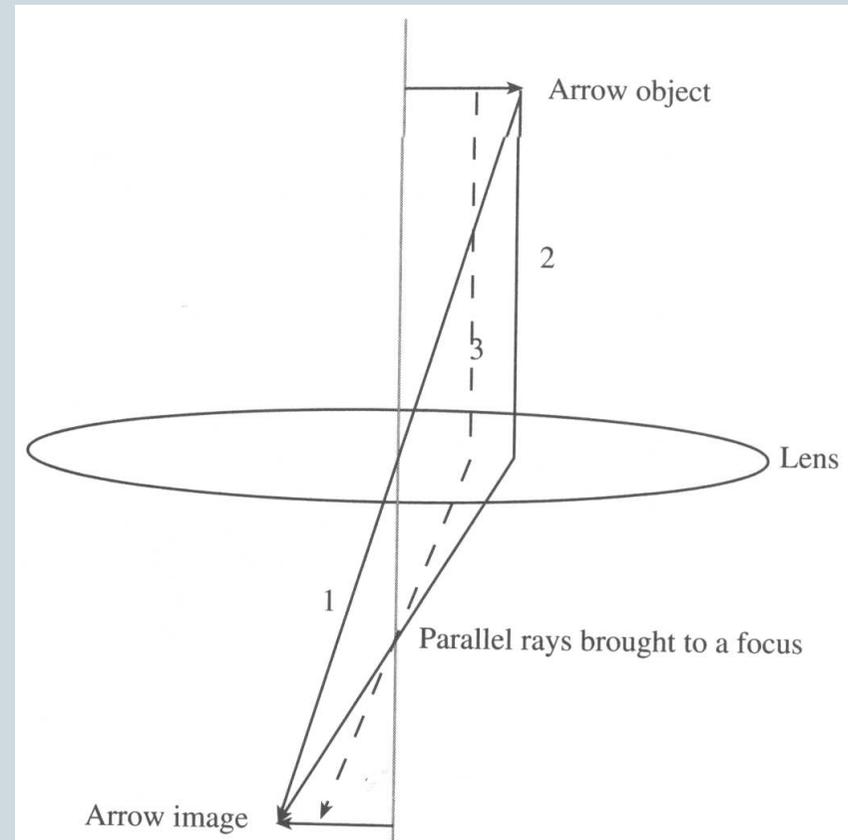
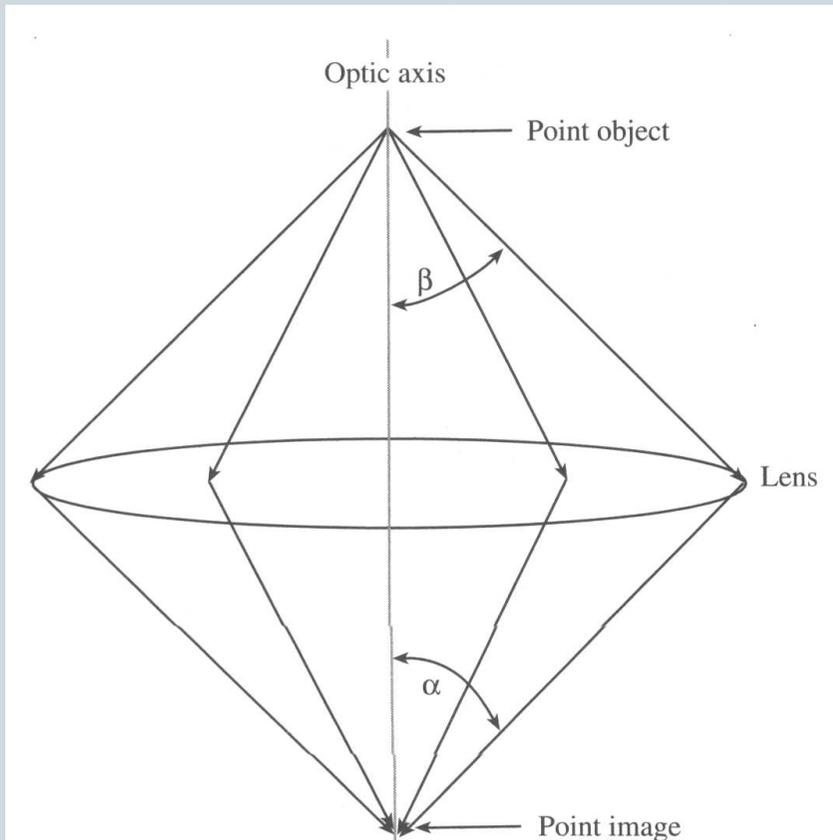
	Units	Tungsten	LaB ₆	Schottky FEG	Cold FEG
Work function, Φ	eV	4.5	2.4	3.0	4.5
Richardson's constant	A/m ² K ²	6×10^9	4×10^9		
Operating temperature	K	2700	1700	1700	300
Current density (at 100 kV)	A/m ²	5	10^2	10^5	10^6
Crossover size	nm	$> 10^5$	10^4	15	3
Brightness (at 100 kV)	A/m ² sr	10^{10}	5×10^{11}	5×10^{12}	10^{13}
Energy spread (at 100 kV)	eV	3	1.5	0.7	0.3
Emission current stability	%/hr	<1	<1	<1	5
Vacuum	Pa	10^{-2}	10^{-4}	10^{-6}	10^{-9}
Lifetime	hr	100	1000	>5000	>5000

Degradação da Fonte



Goldstein et al

Diagramas de Raios



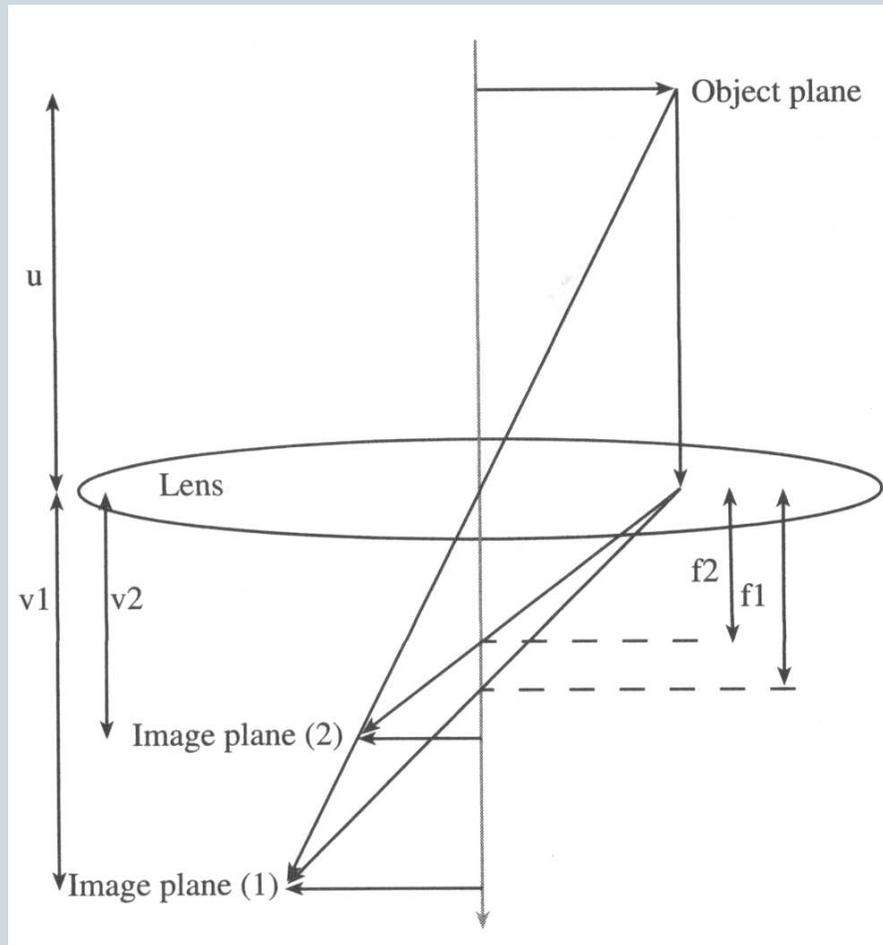
Ângulos reais são pequenos $\sim 0,57^\circ$

Williams e Carter

Lentes Variáveis



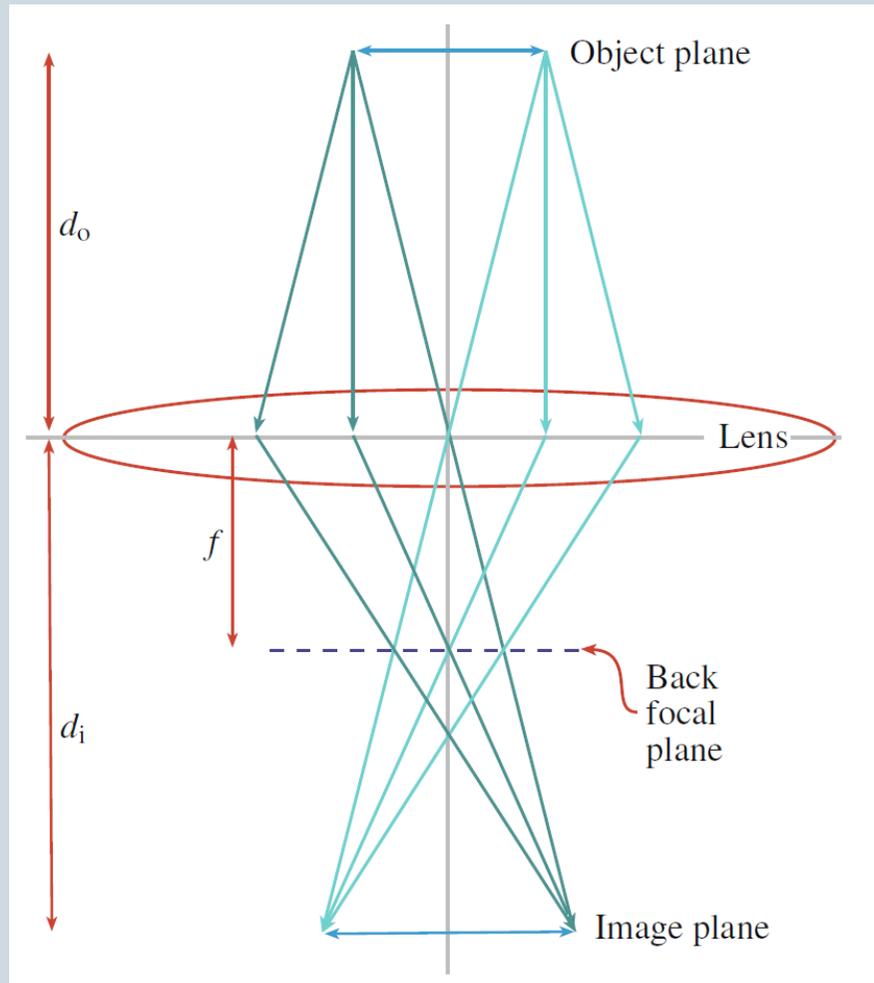
Williams e Carter



$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$$

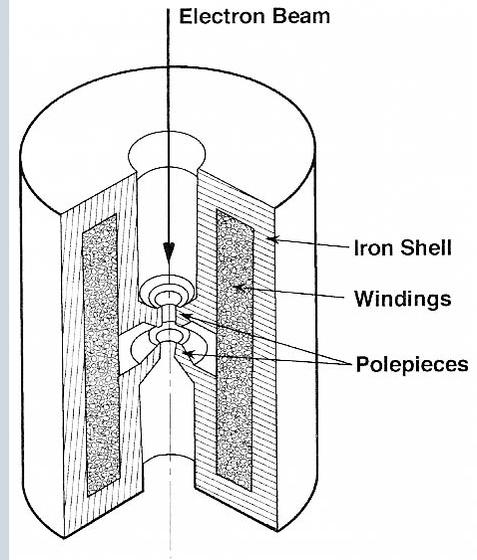
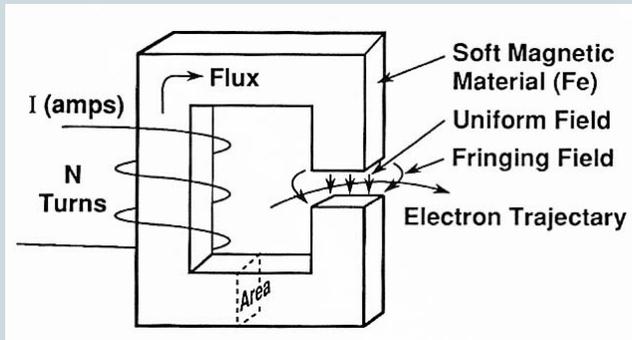
$$M = \frac{u}{v}$$

Plano Focal e Plano Imagem

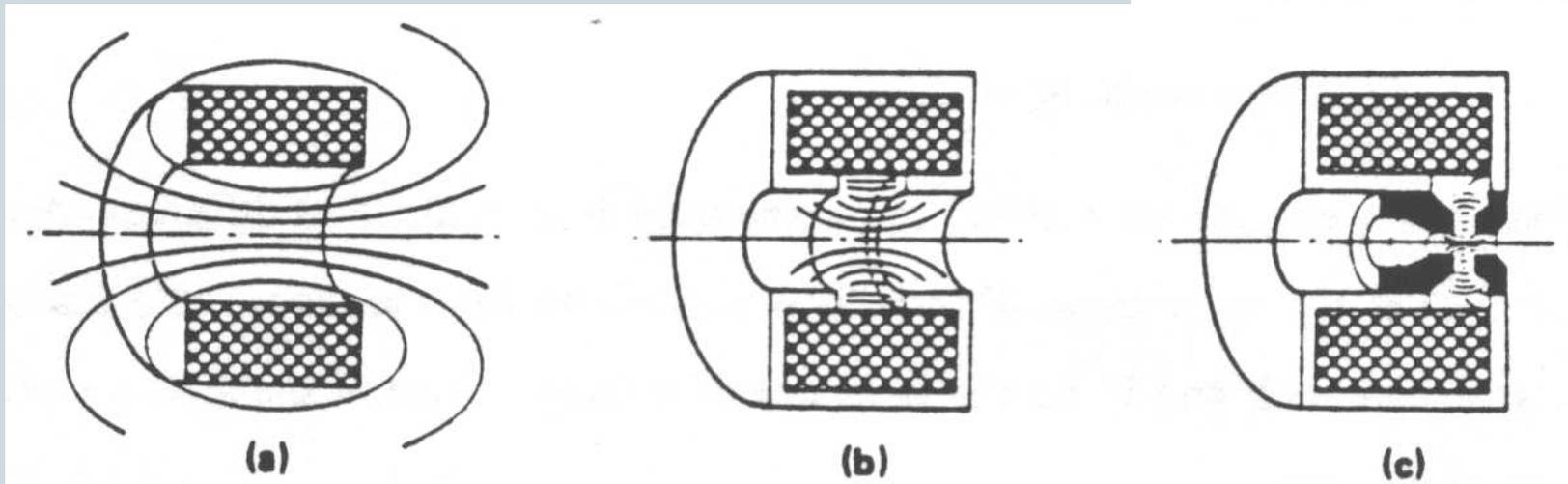


Williams e Carter

Como funcionam?



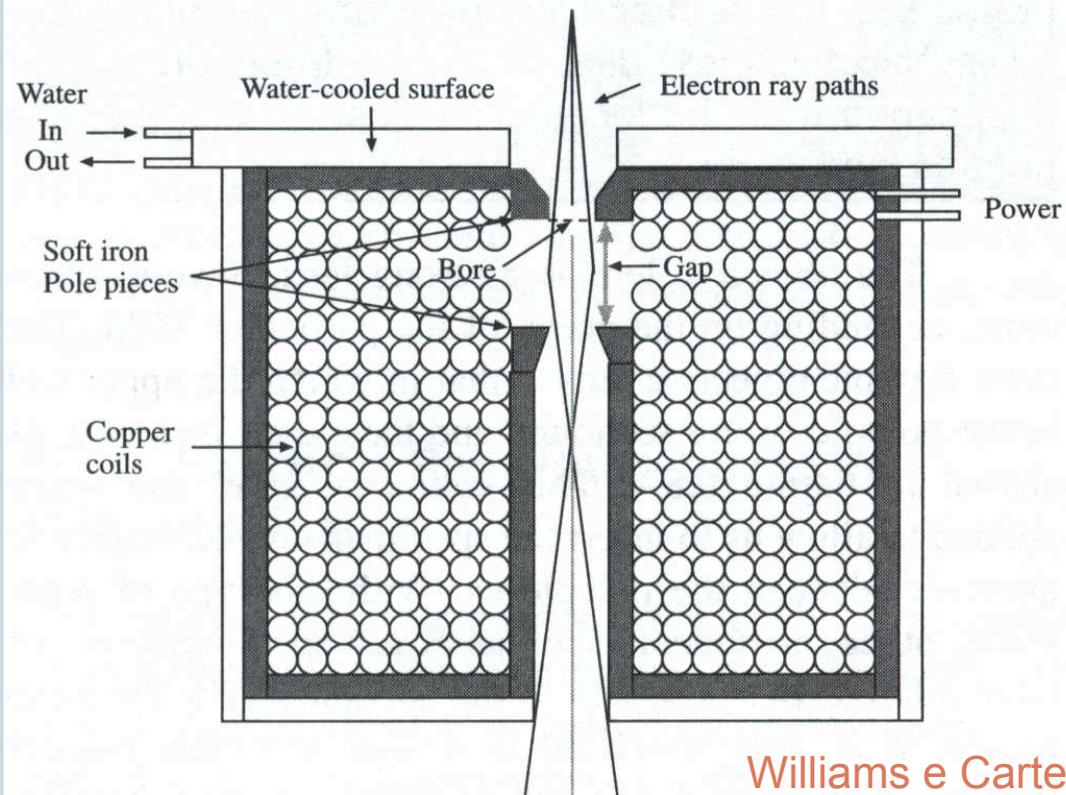
Jeol



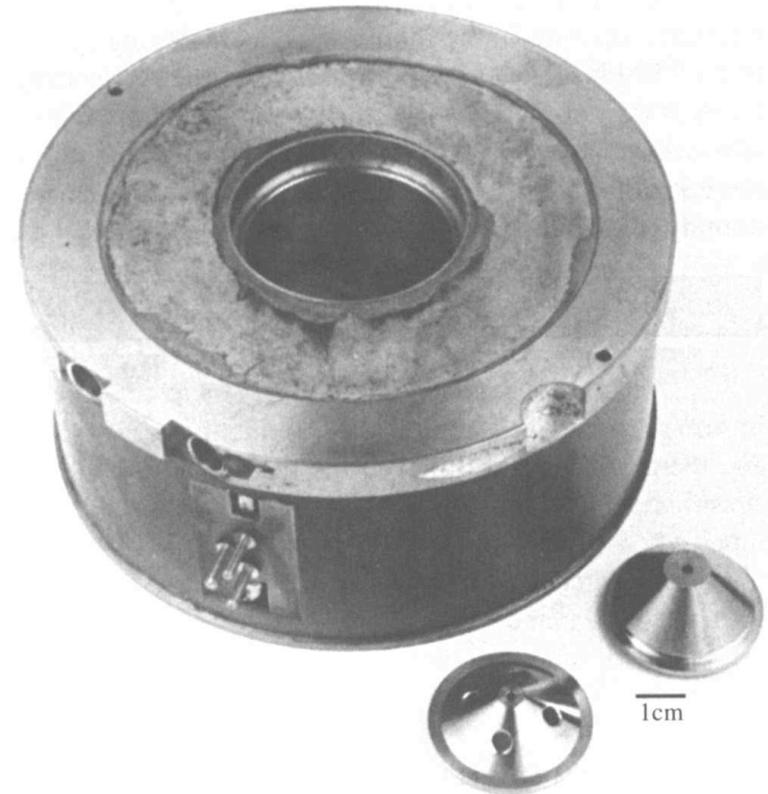
Lentes Magnéticas



Aspecto interno e externo de uma lente magnética



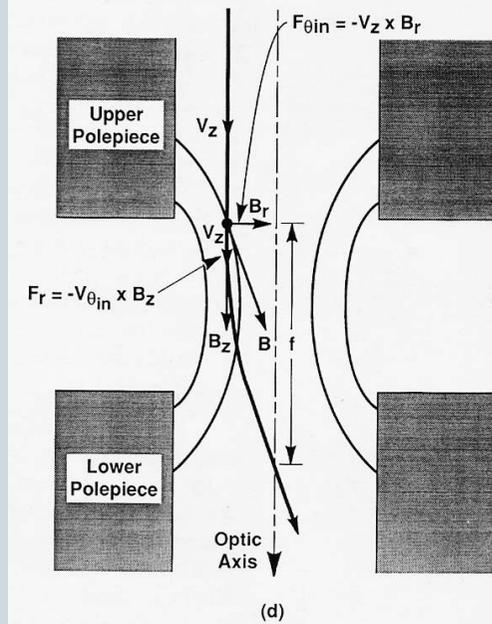
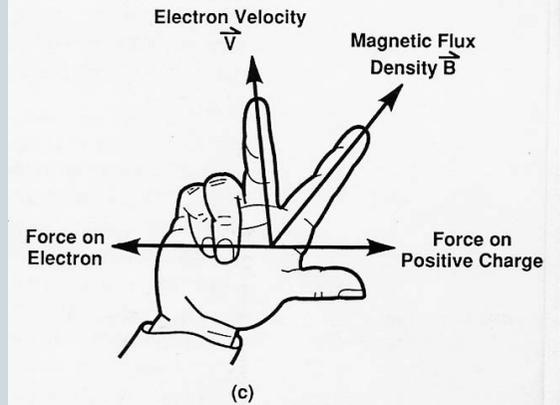
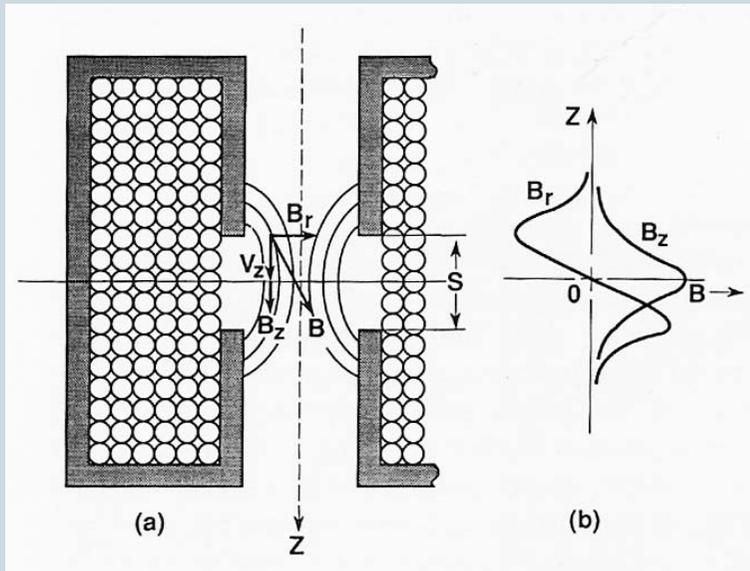
Williams e Carter



Força de Lorentz



$$\vec{F} = -e(E + \vec{v} \times \vec{B})$$

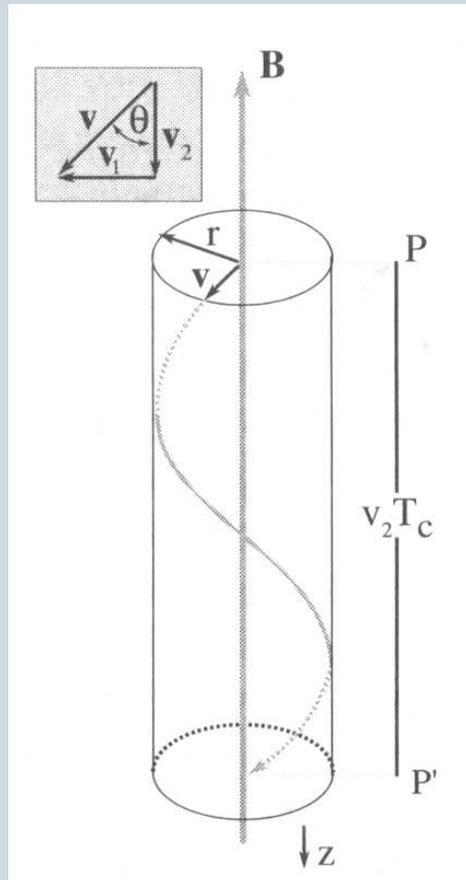


Goldstein et all

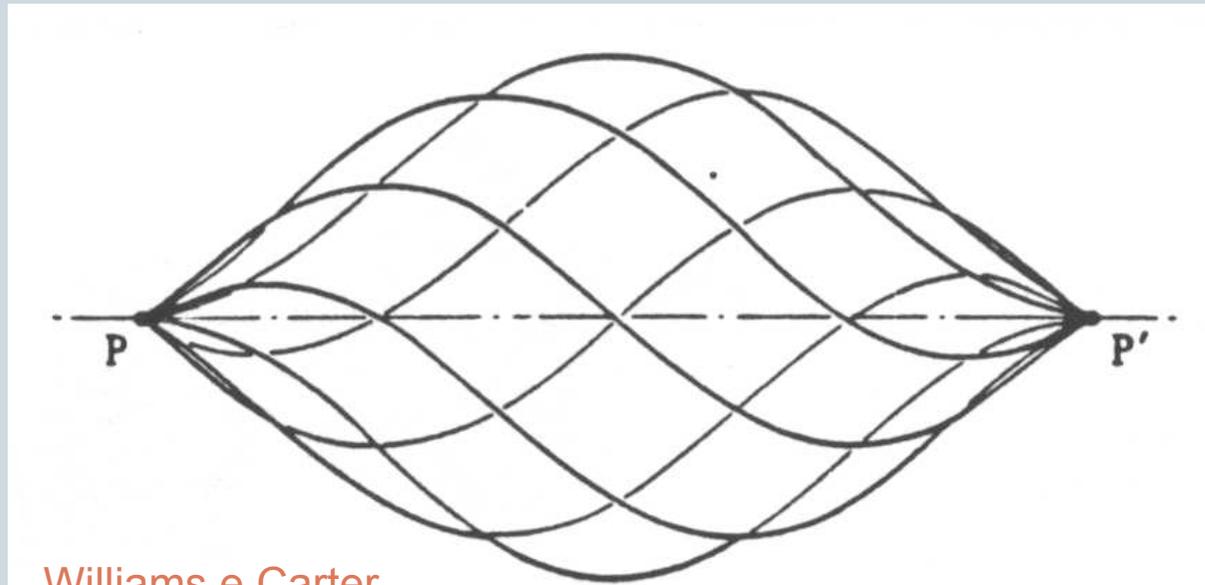
Equações Paraxiais



$$\frac{d^2 r}{dz^2} + \frac{\eta^2 B^2 r}{2V^{1/2}} = 0 \quad \frac{d\theta}{dz} = \frac{\eta B}{2V^{1/2}} \quad \eta = \left(\frac{e}{2m_0 c^2} \right)^{1/2}$$

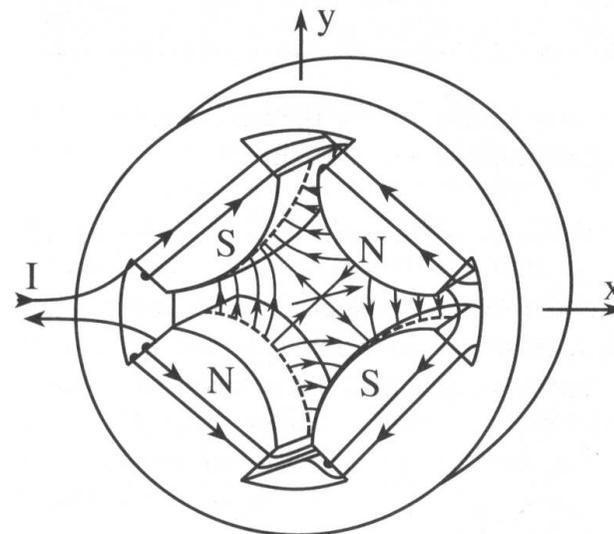
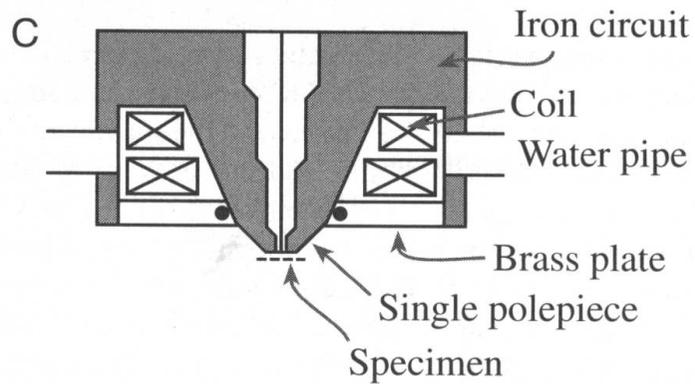
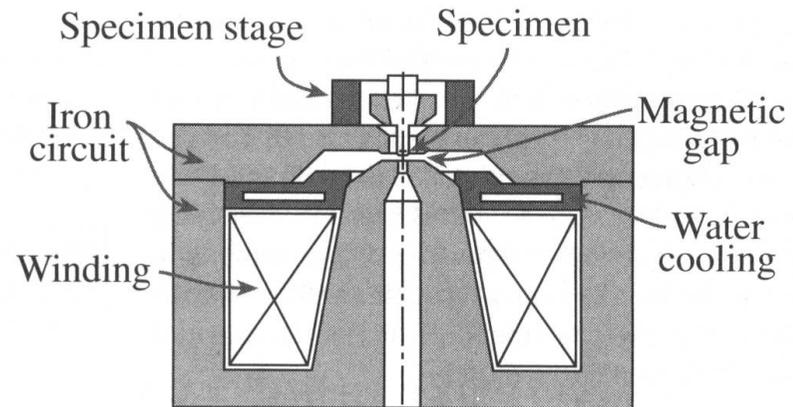
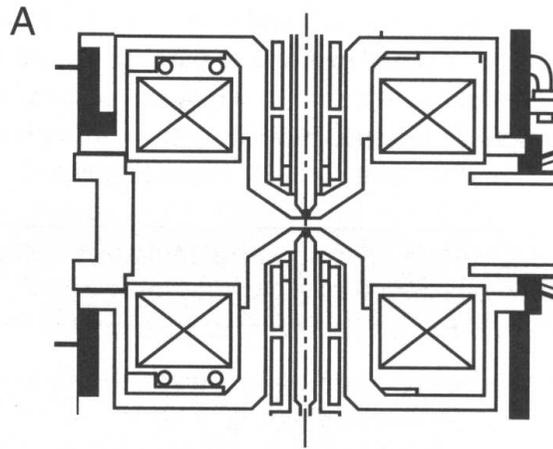


- As imagens giram em microscopia eletrônica
- Para maior V é necessário maior B



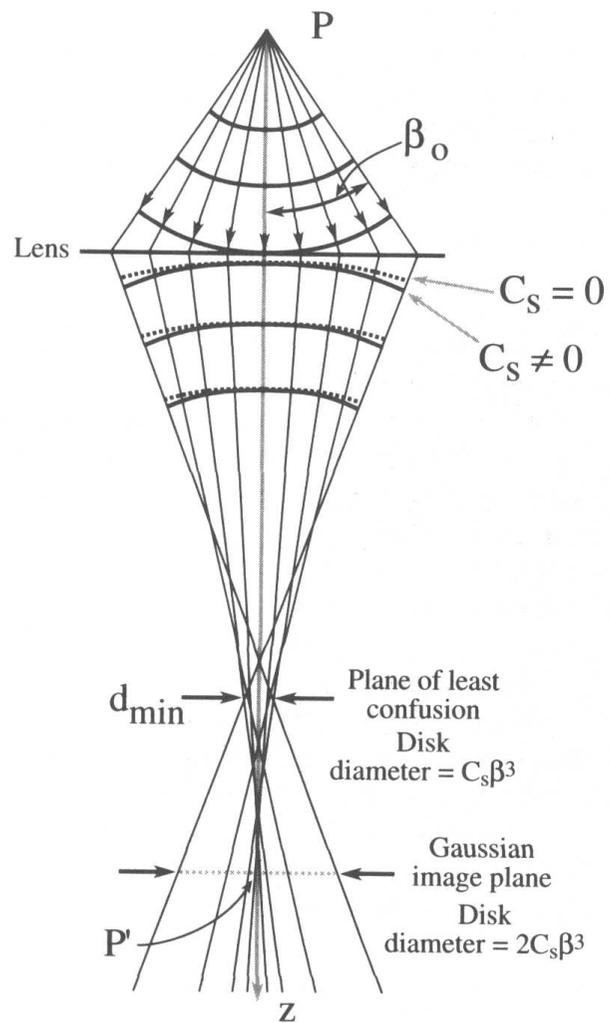
Williams e Carter

Tipos de Lentes Magnéticas



Williams e Carter

Aberrações - Esférica



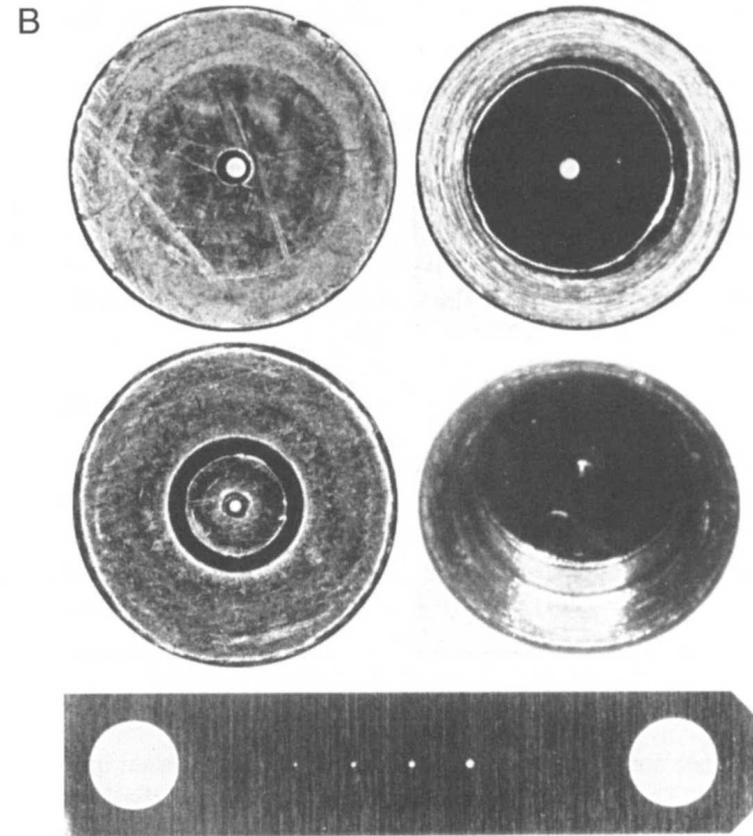
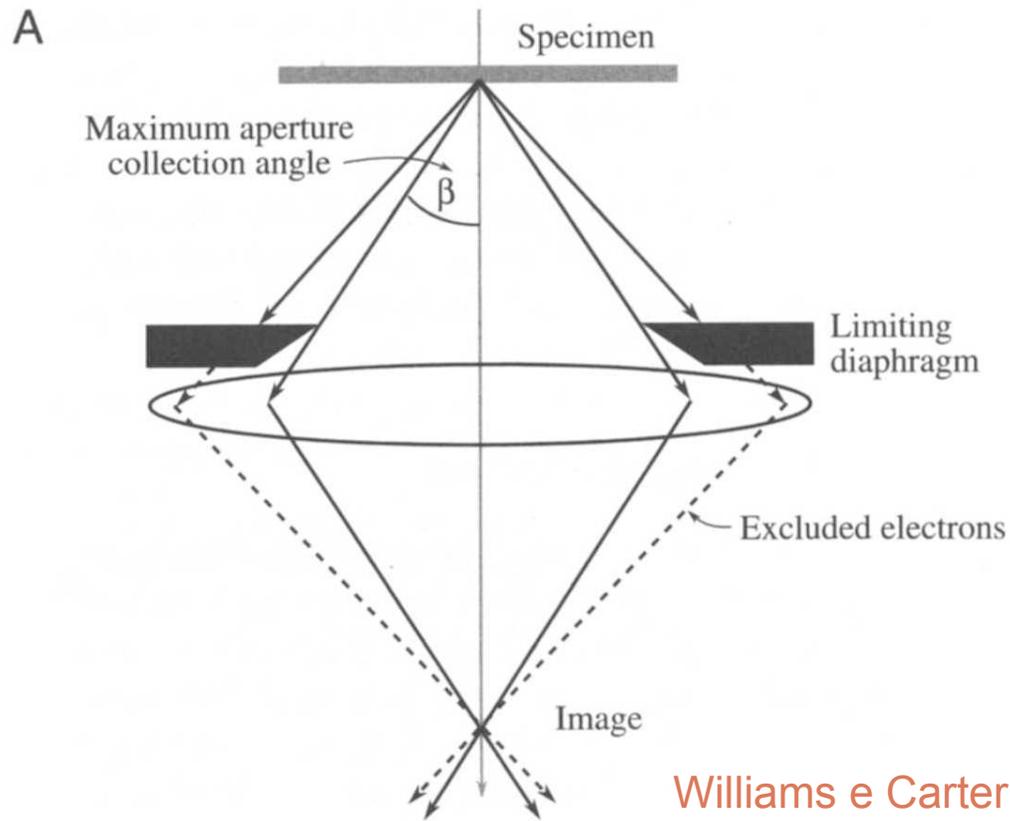
$$r_{sph} = C_s \beta^3$$

Williams e Carter

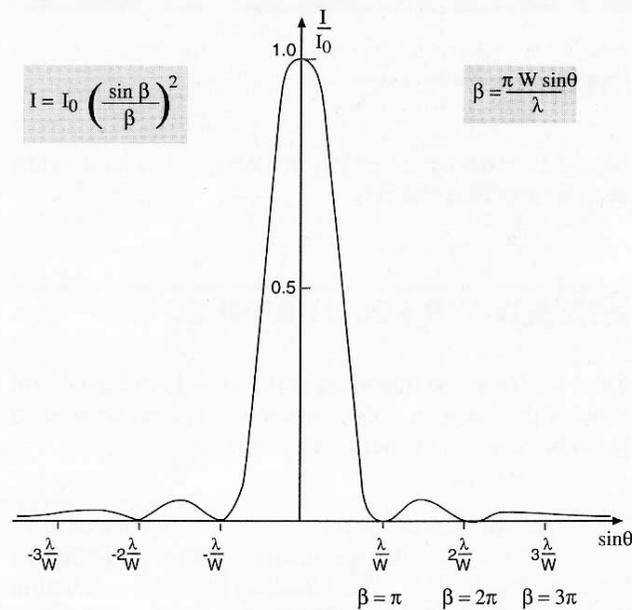
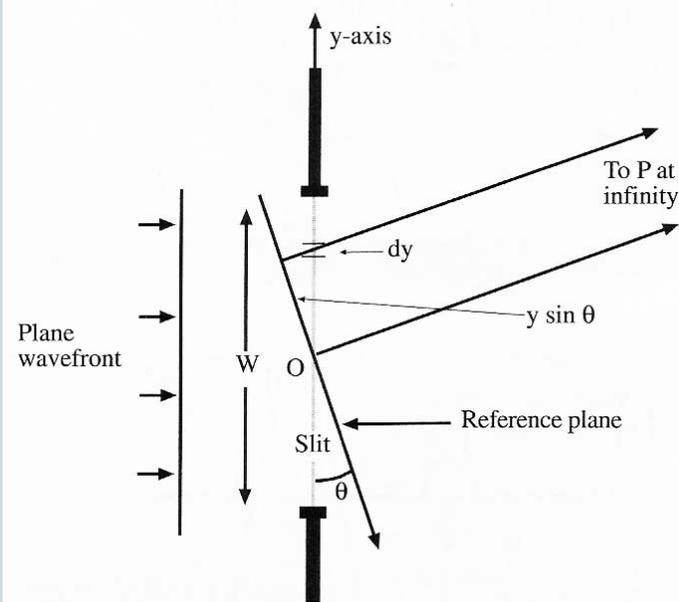
Aberturas



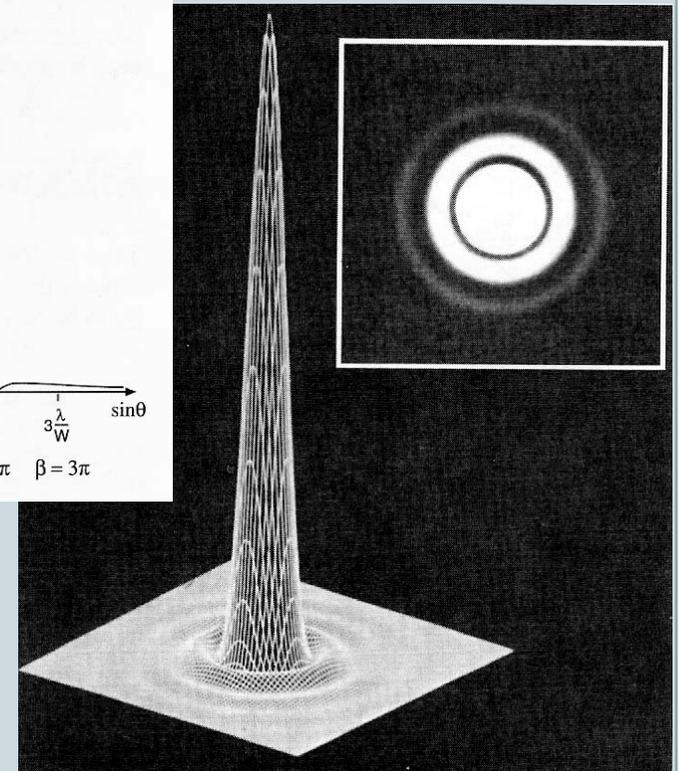
Material: Pt ou Mo



Espalhamento por fenda



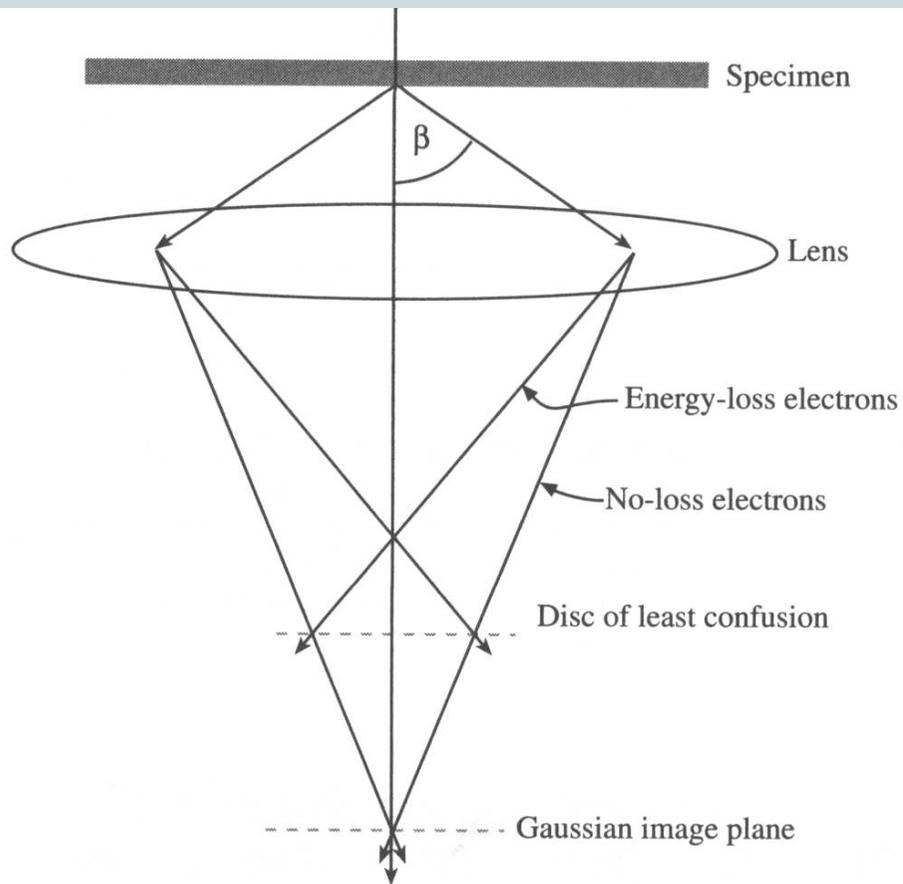
Se a abertura for muito pequena este efeito pode ser significativo



Aberrações - Cromática



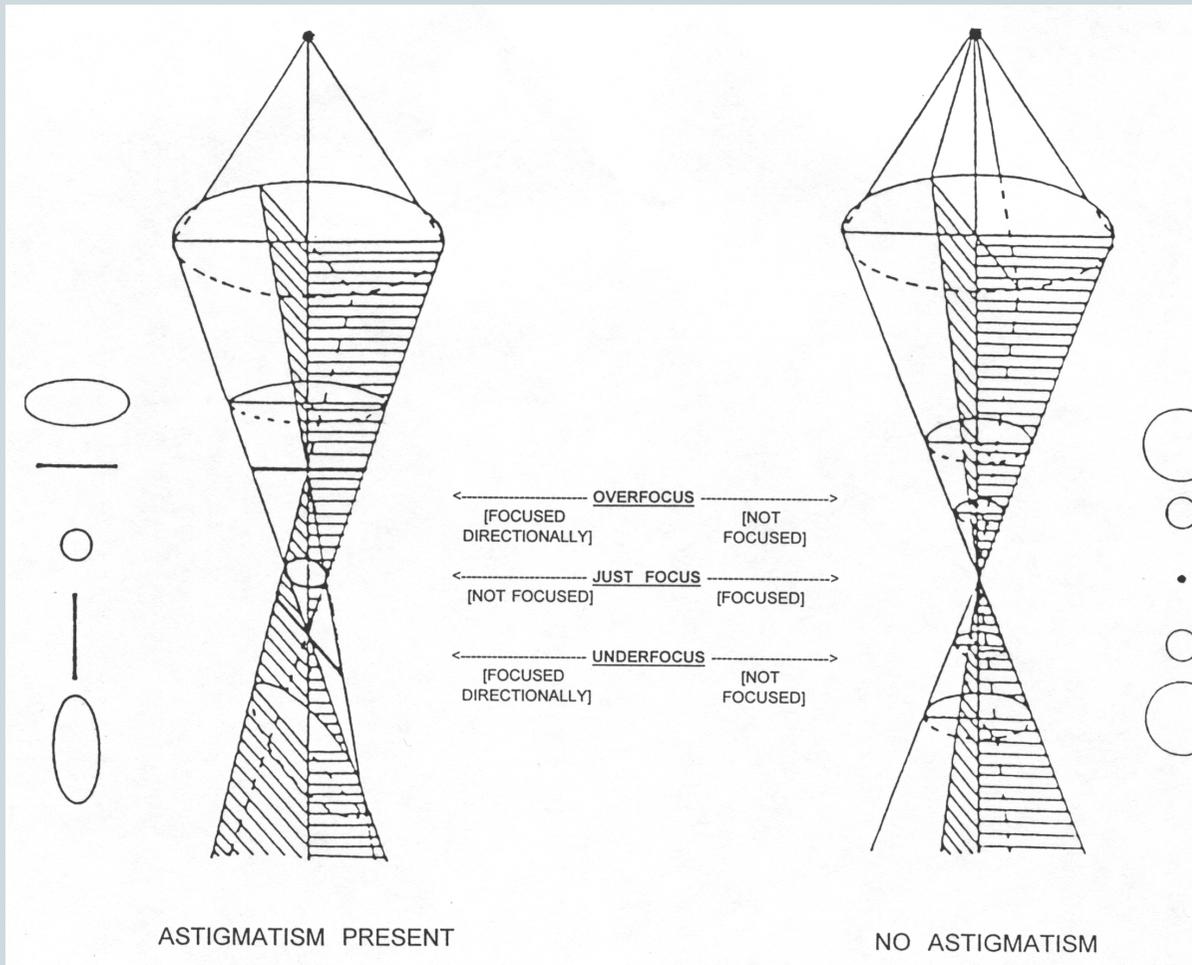
Williams e Carter



$$r_{chr} = C_C \frac{\Delta E}{E_o} \beta$$

ΔE é a perda de energia na amostra ~ 15-25 eV para amostra de espessura 50-100 ηm

Aberrações - Astigmatismo



Jeol

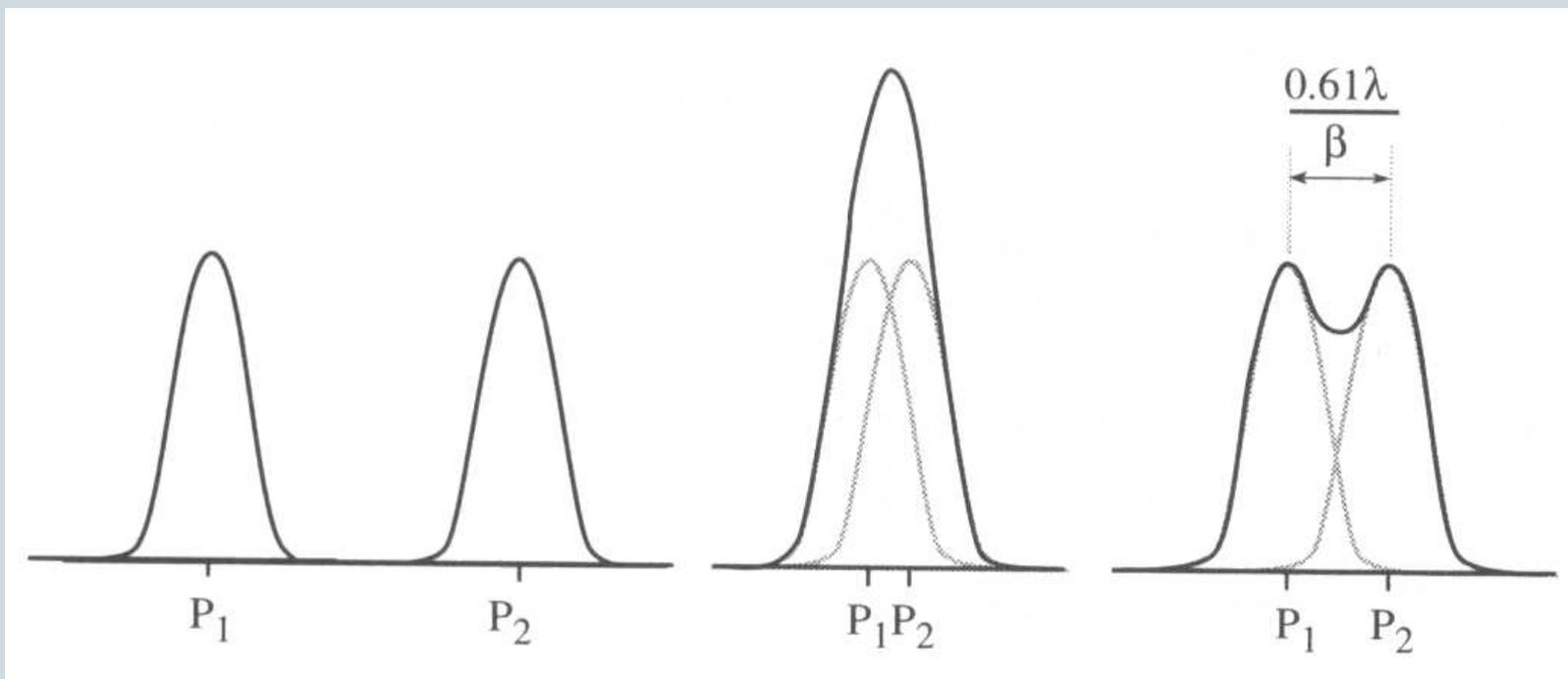
$$r_{ast} = \beta \Delta f$$

Resolução Teórica



Critério de Rayleigh $r_{th} = 0,61 \frac{\lambda}{\beta}$

Williams e Carter



Resolução Prática



$$r = \sqrt{r_{th}^2 + r_{sph}^2} = \sqrt{\left(0,61 \frac{\lambda}{\beta}\right)^2 + \left(C_S \beta^3\right)^2}$$

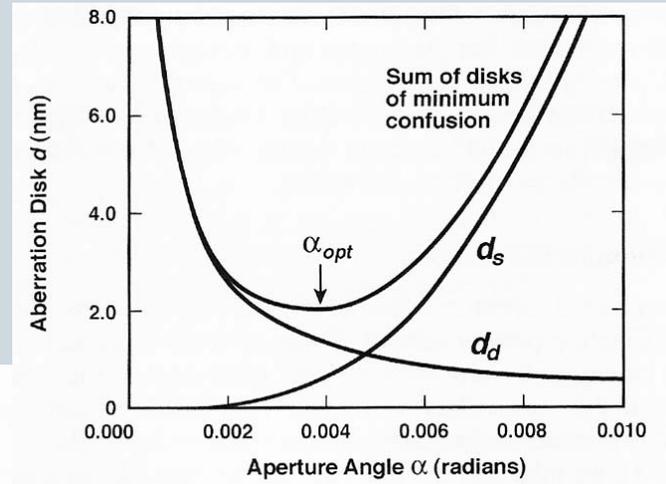
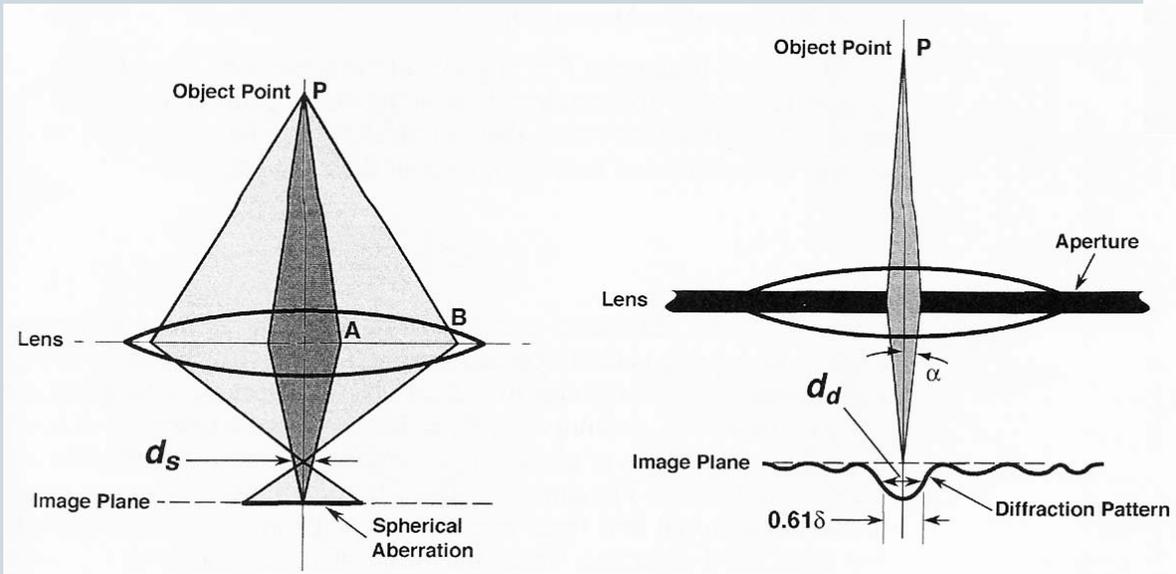
Ângulo de coleta ótimo:

$$\frac{dr(\beta)}{d\beta} = 0 \Rightarrow \beta_{opt} = 0,77 \frac{\lambda^{\frac{1}{4}}}{C_S^{\frac{1}{4}}}$$

Resolução do Microscópio

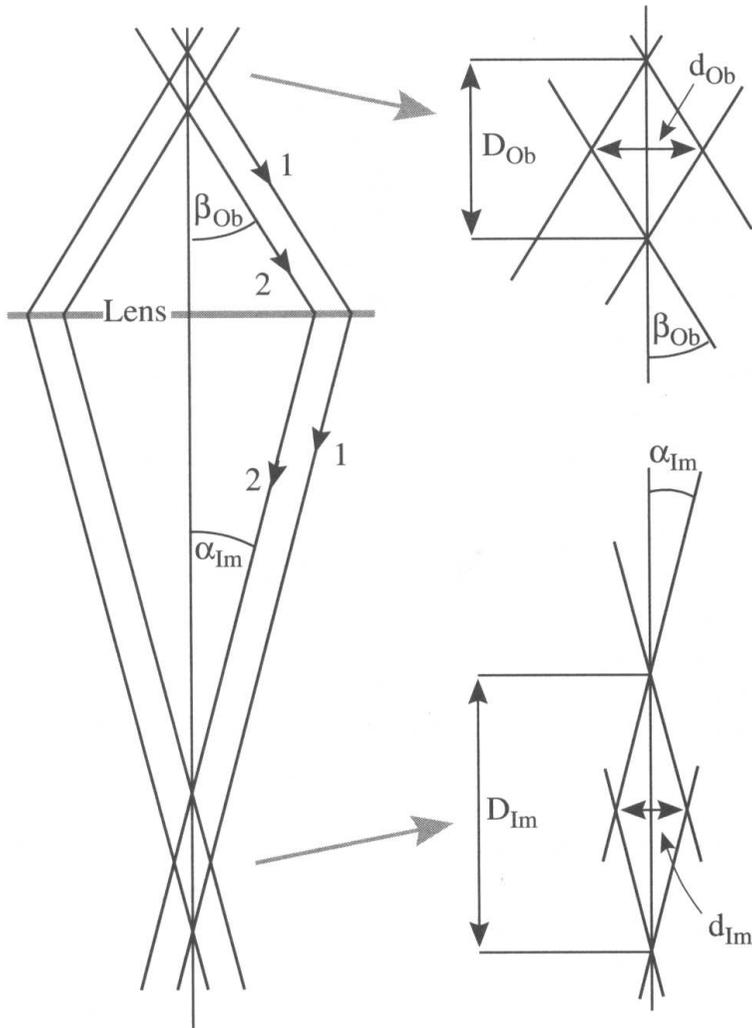
$$r_{min} \approx 0,91 \left(C_S \lambda^3\right)^{\frac{1}{4}}$$

Aberturas



Profundidade de Campo

Profundidade de Foco



Profundidade de Campo

$$D_{ob} = \frac{d_{ob}}{\beta_{ob}}$$

$$d_{ob} \sim 2 \text{ \AA}$$

$$\beta_{ob} \sim 10 \text{ mrad}$$

$$D_{ob} \sim 20 \text{ \mu m}$$

$$d_{ob} \sim 2 \text{ \mu m}$$

$$\beta_{ob} \sim 10 \text{ mrad}$$

$$D_{ob} \sim 200 \text{ \mu m}$$

Profundidade de Foco

$$D_{im} = \frac{d_{ob}}{\beta_{ob}} M_T^2$$

$$d_{ob} \sim 2 \text{ \AA}$$

$$\beta_{ob} \sim 10 \text{ mrad}$$

$$M_T \sim 500.000x$$

$$D_{im} \sim 5 \text{ km}$$

$$d_{ob} \sim 2 \text{ \mu m}$$

$$\beta_{ob} \sim 10 \text{ mrad}$$

$$M_T \sim 50.000x$$

$$D_{im} \sim 5 \text{ m}$$

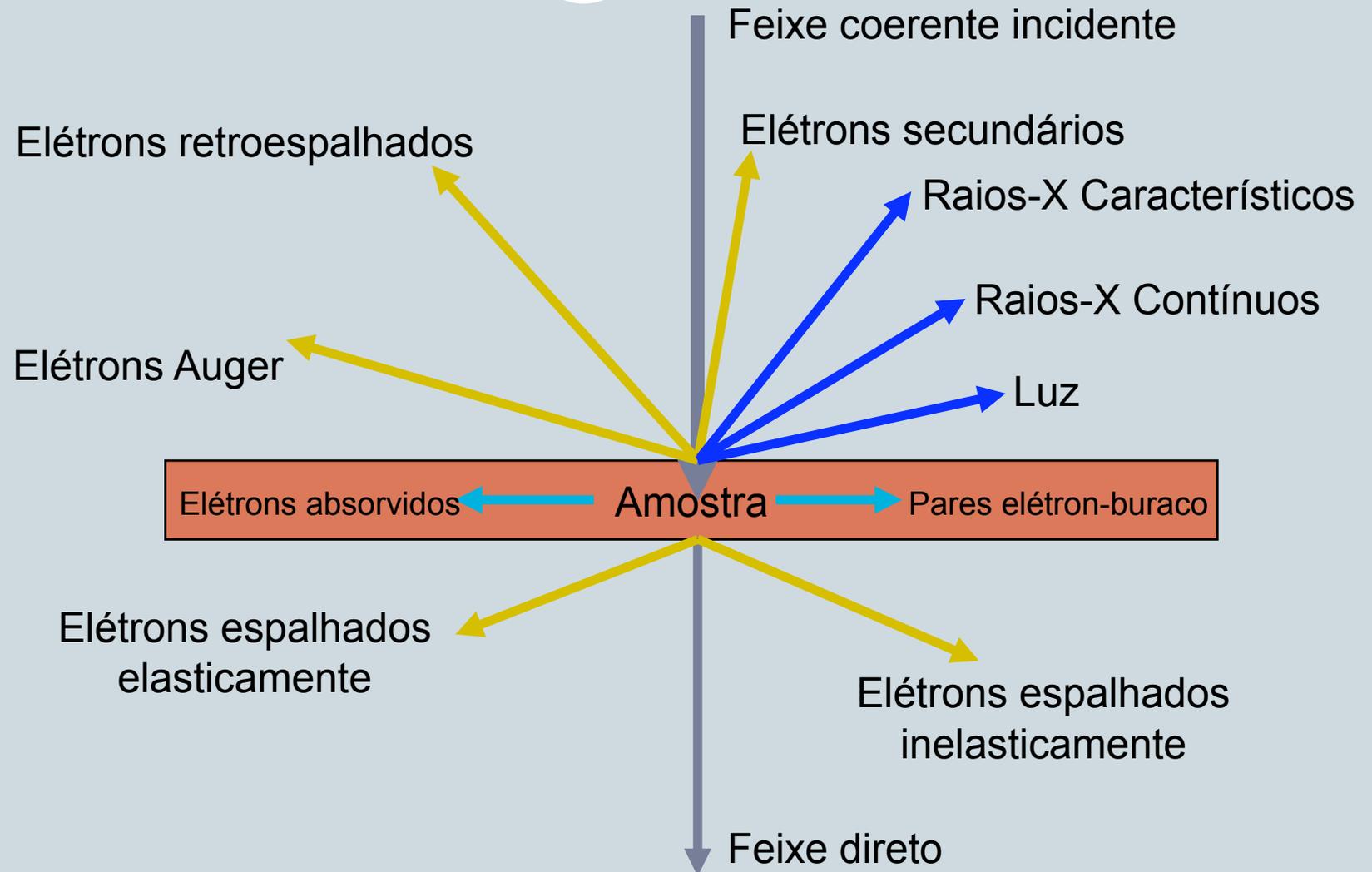
Williams e Carter

Características gerais do feixe



- Quase paralelo ($0,05-1^\circ$)
- Diâmetro ($1 \text{ nm} - 1 \text{ }\mu\text{m}$)
- Corrente ($1 \text{ pA} - 1 \text{ }\mu\text{A}$)
- Energia
 - MEV – 1- 40 keV
 - MET – 100 – 400 keV (exige correção relativística)
- Coerência – depende da fonte

Interação Elétron-Amostra



Espalhamento



- **Elástico**

- Elétrons espalhados elasticamente (“forward”)
- Elétrons Retroespalhados elasticamente

- **Inelástico**

- Elétrons espalhados inelasticamente (“forward”)
- Elétrons Retroespalhados inelasticamente
- Elétrons Secundários
- Elétrons Auger
- Raios-X
- Luz
- Fónons
- Plásmons

Seção de Choque



- Avalia a probabilidade de espalhamento por um átomo isolado:

$$\sigma_T = \sigma_{Elast} + \sigma_{Inelast}$$

- Pode-se tomar também a seção de choque com a área efetiva para a ocorrência de um determinado evento

Seção de Choque



- Probabilidade de ocorrência de um evento:

$$Q = \frac{N}{n_i n_t} = \frac{N_0 \sigma_T \rho}{A} \quad \frac{(\text{eventos} / \text{cm}^3)}{(e^- / \text{cm}^2) (\text{at.} / \text{cm}^3)} \Rightarrow (\text{cm}^2)$$

- N – número de eventos
- n_i – número de partículas incidentes
- n_t – número de alvos

Livre Caminho Médio



- Distância entre eventos de espalhamento:

$$\lambda = \frac{1}{Q} = \frac{A}{N_0 \rho \sigma_T} \quad (\text{cm})$$

- A – massa atômica
- N_0 – número de Avogrado
- ρ – densidade

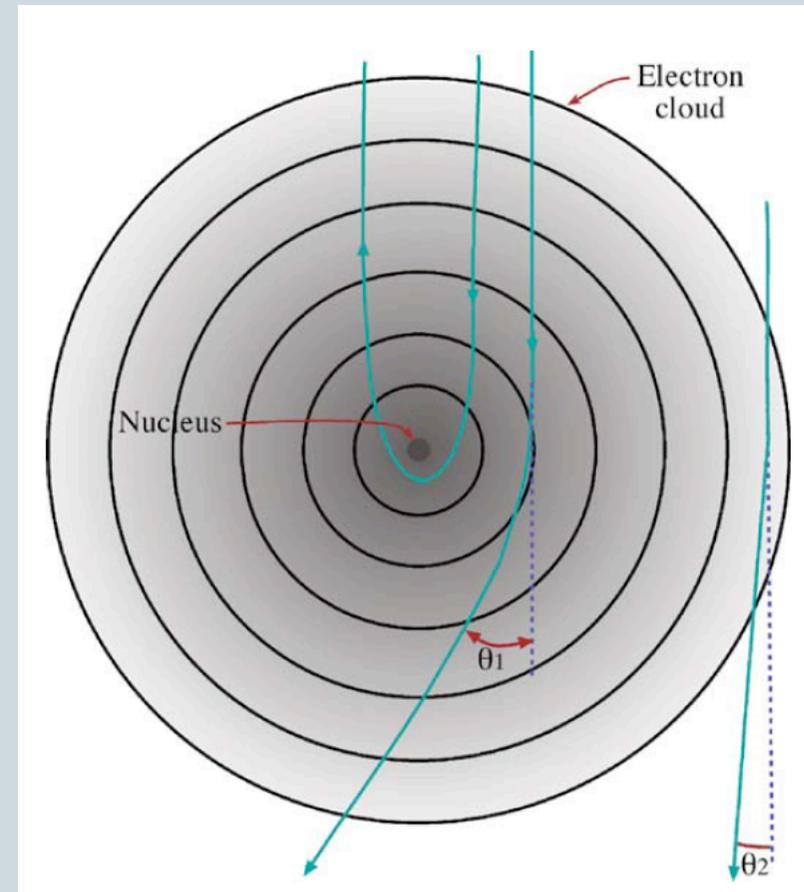
Espalhamento Elástico



- Espalhamento elástico de Rutherford para um ângulo maior do que θ :

$$\sigma(\theta) = 1,62 \times 10^{-20} \frac{Z^2}{E} \text{ctg}^2 \frac{\theta}{2}$$

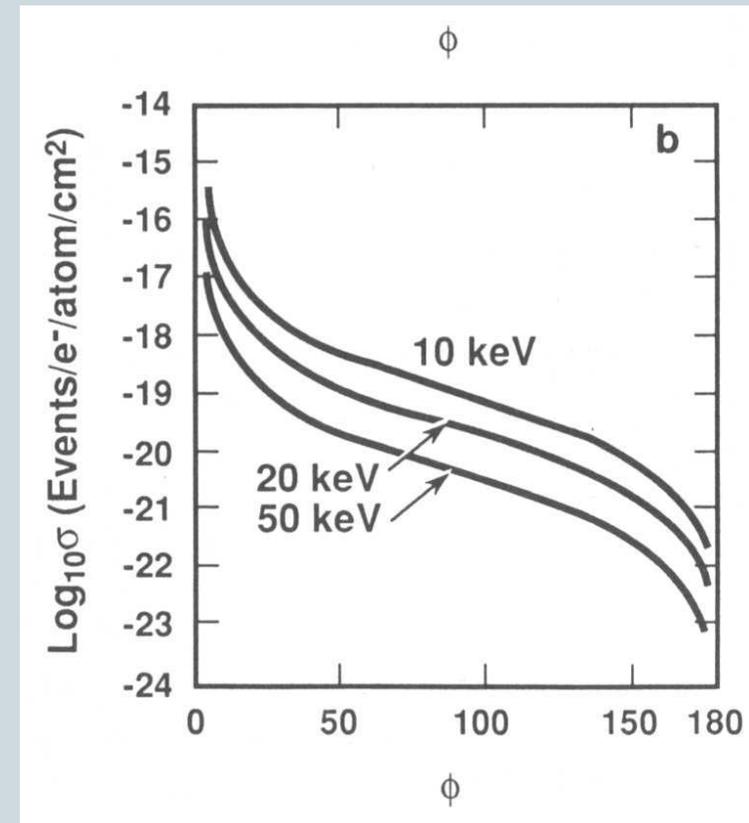
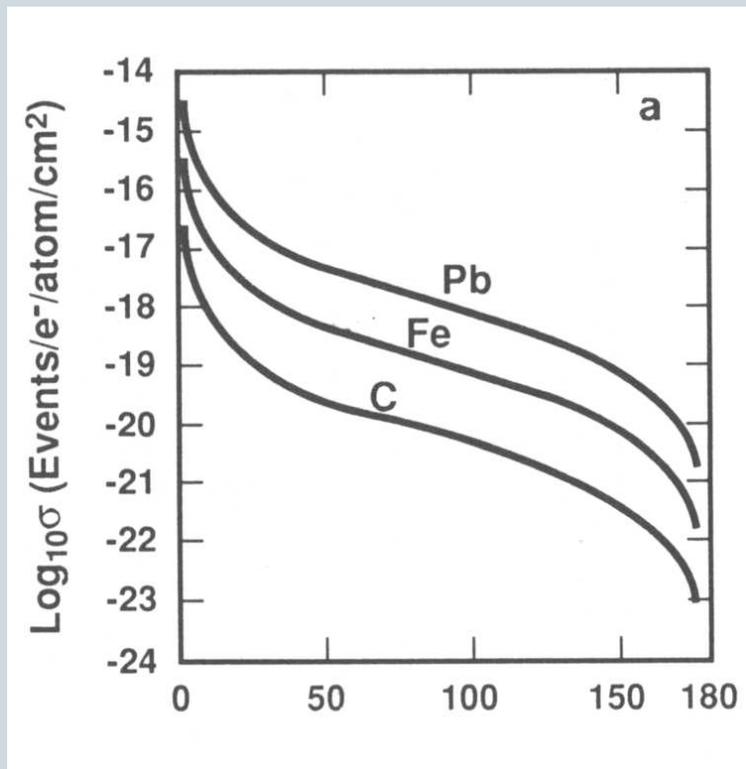
- E é a energia do feixe
- Z é o número atômico



Espalhamento Elástico



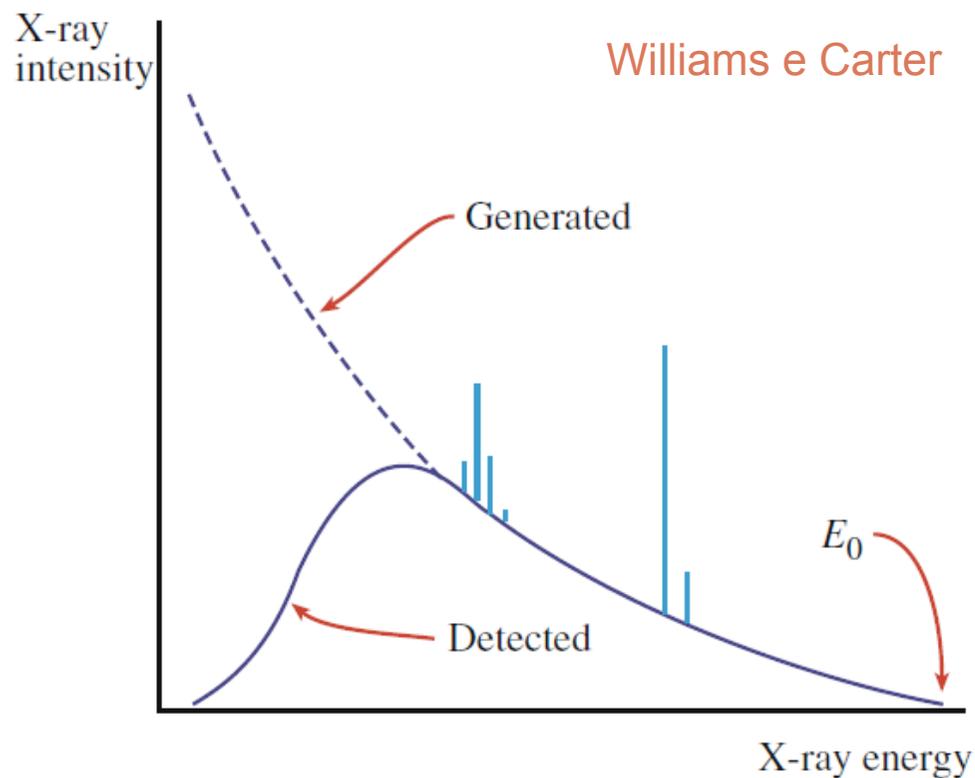
$$\sigma(\theta) = 1,62 \times 10^{-20} \frac{Z^2}{E} \text{ctg}^2 \frac{\theta}{2}$$



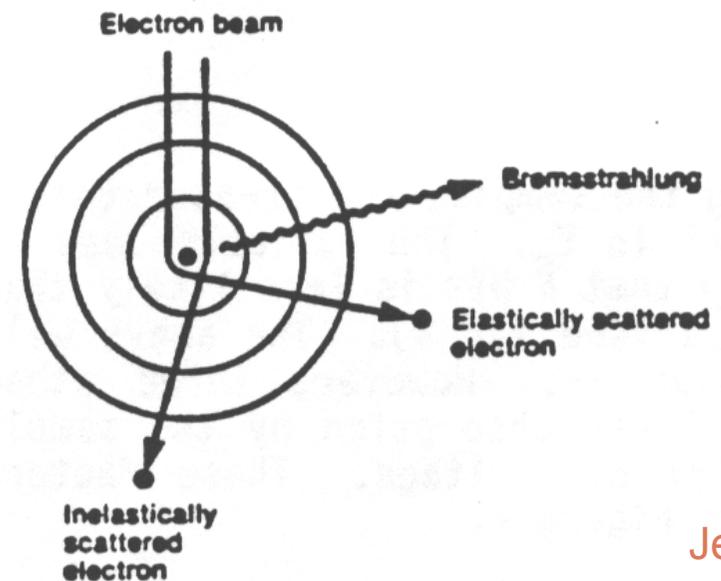
Raios-X Contínuos (Bremsstrahlung)



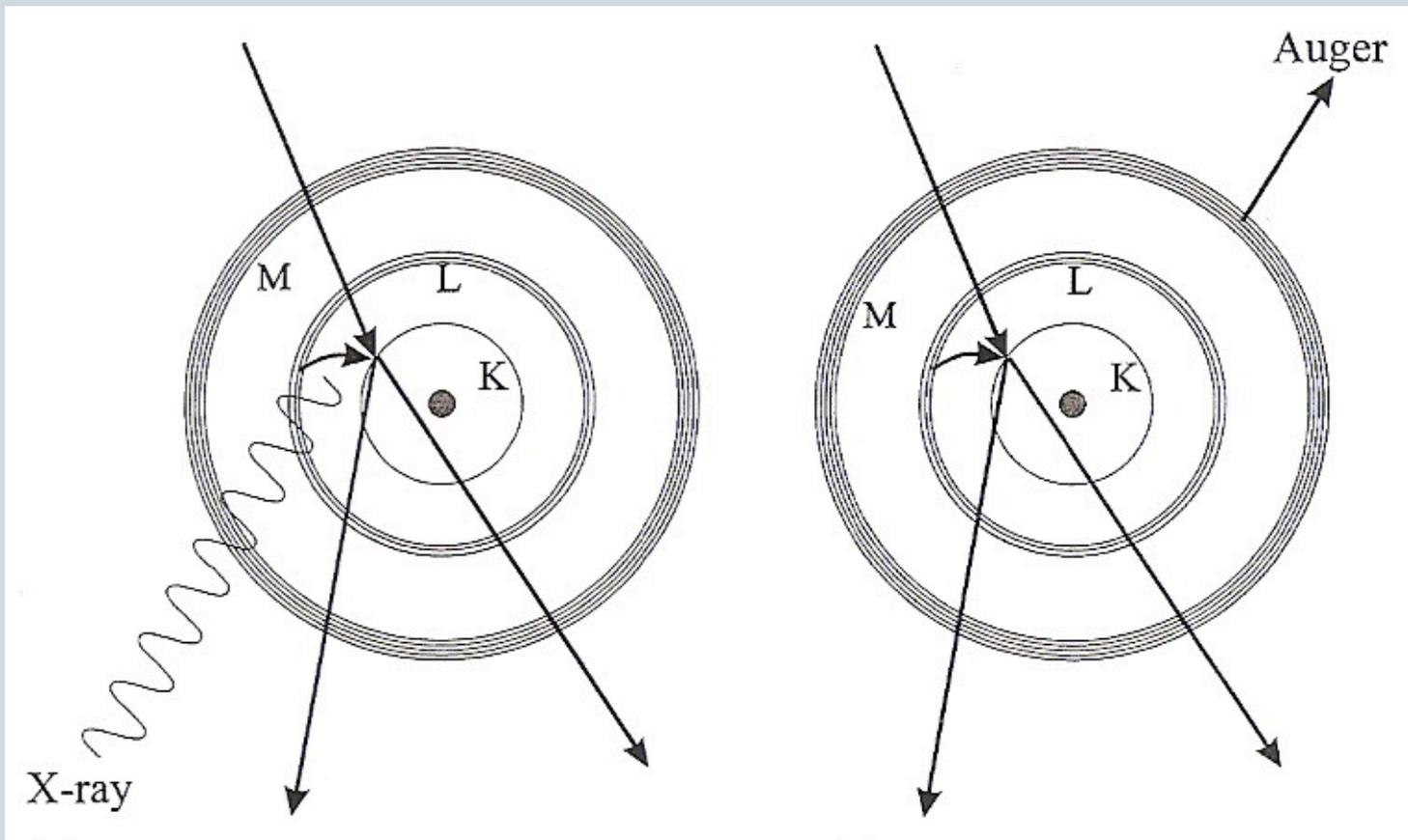
- Fruto da desaceleração dos elétrons do feixe devido à interação coulômbica com os átomos da amostra
- Qualquer quantidade de energia pode ser perdida



$$I_{CM} \approx i_P \bar{Z} \frac{E_o - E_v}{E_v}$$

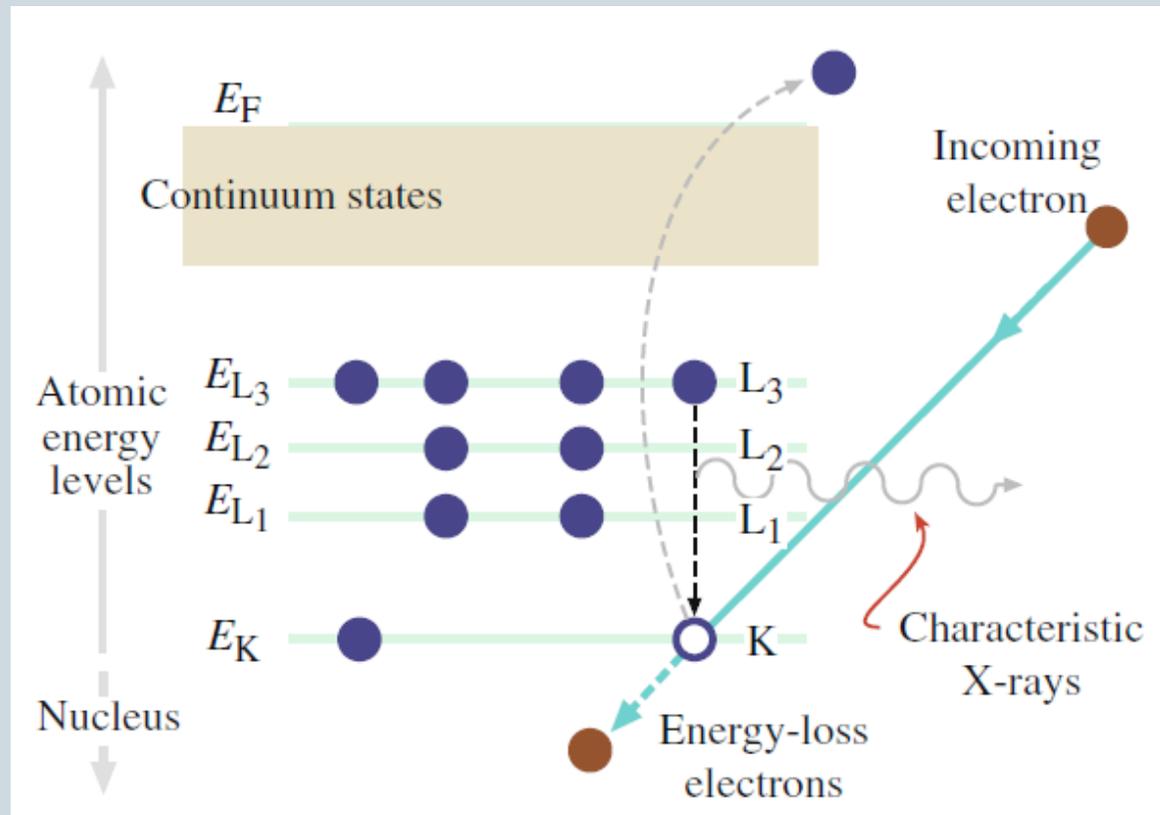


Geração de Raios-X



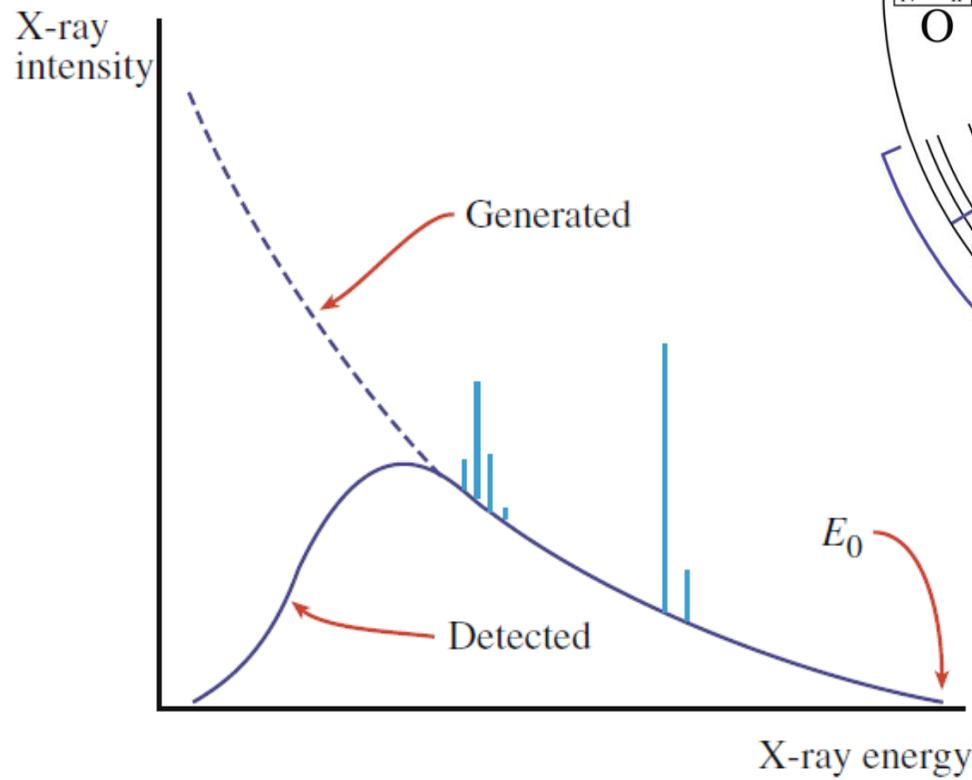
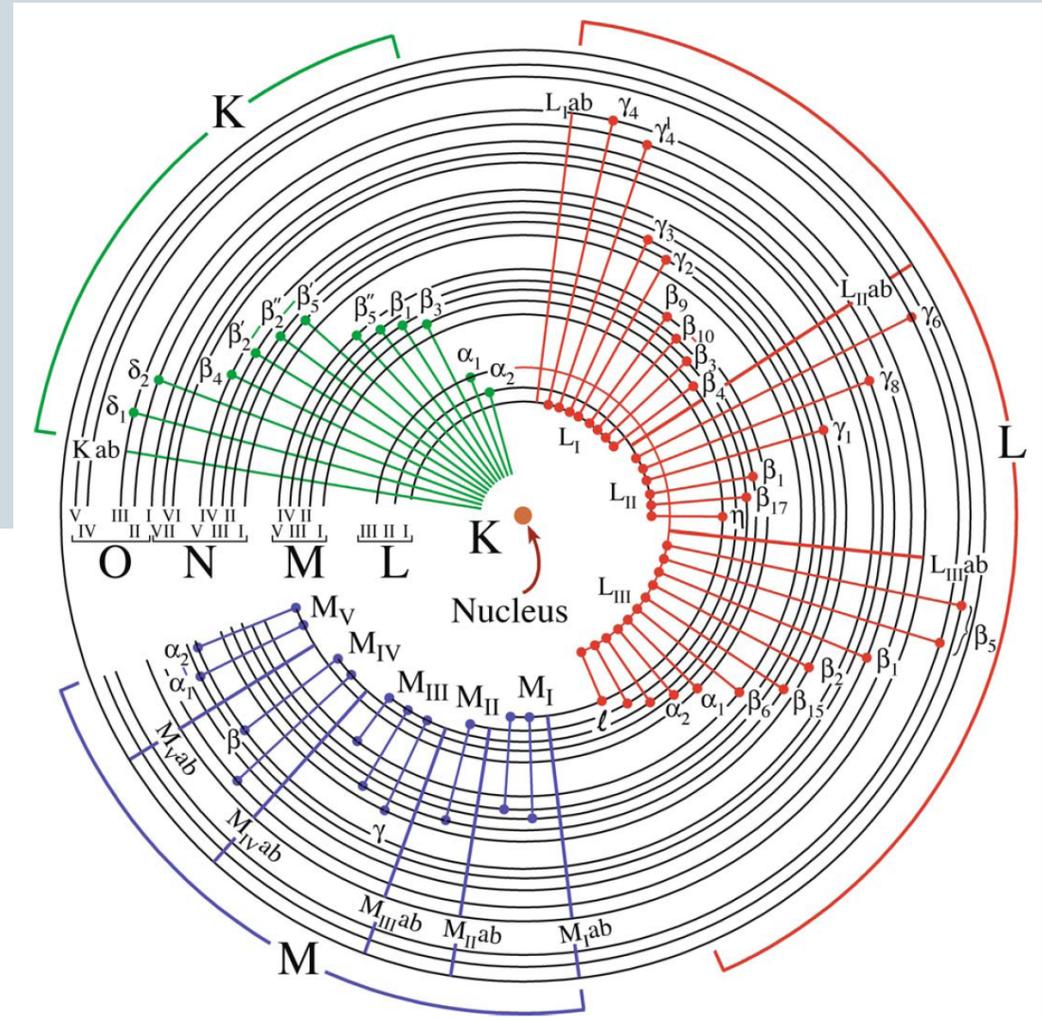
Goodhew et al

Emissão de Raios-X Característicos



Williams e Carter

Raio X



Williams e Carter

Energy Table

element	K α	K β 1	K β	L α 1	L β 1	L β 2	L γ 1	Llab	Lllab	Llllab	M α 1
1 H											
2 He											
3 Li											
4 Be											
5 B	0.183		0.192								
6 C	0.277		0.284								
7 N	0.392		0.400								
8 O	0.525		0.532								
9 F	0.677		0.687								
10 Ne	0.849		0.867								
11 Na	1.041	1.067									
12 Mg	1.254	1.296	1.303								
13 Al	1.487	1.553	1.560								
14 Si	1.740	1.829	1.840								
15 P	2.013	2.136	2.144								
16 S	2.308	2.464	2.471								
17 Cl	2.622	2.816	2.820								
18 Ar	2.957	3.191	3.203								
19 K	3.313	3.590	3.608								
20 Ca	3.691	4.013	4.038	0.341	0.345				0.353	0.349	
21 Sc	4.089	4.461	4.489	0.396	0.400						
22 Ti	4.509	4.932	4.965	0.452	0.458						
23 V	4.950	5.428	5.464	0.511	0.519						
24 Cr	5.412	5.947	5.989	0.573	0.583			0.742	0.693	0.599	
25 Mn	5.895	6.491	6.538	0.638	0.649						
26 Fe	6.400	7.058	7.111	0.705	0.718				0.721	0.708	
27 Co	6.925	7.650	7.710	0.776	0.791				0.794	0.779	
28 Ni	7.473	8.265	8.332	0.852	0.869				0.871	0.854	
29 Cu	8.042	8.906	8.981	0.930	0.950				0.953	0.933	
30 Zn	8.632	9.572	9.661	1.012	1.035			1.198	1.045	1.022	
31 Ga	9.243	10.265	10.368	1.098	1.125			1.303	1.145	1.117	
32 Ge	9.876	10.983	11.104	1.188	1.219			1.413	1.249	1.217	
33 As	10.532	11.727	11.865	1.282	1.317			1.529	1.359	1.324	
34 Se	11.209	12.496	12.655	1.379	1.419			1.653	1.475	1.434	
35 Br	11.909	13.292	13.471	1.481	1.526			1.782	1.599	1.553	
36 Kr	12.634	14.113	14.325	1.586	1.637			1.916	1.730	1.677	
37 Rb	13.376	14.961	15.204	1.694	1.752			2.064	1.866	1.807	
38 Sr	14.142	15.837	16.108	1.807	1.872			2.217	2.009	1.941	
39 Y	14.934	16.739	17.038	1.923	1.996			2.377	2.154	2.080	
40 Zr	15.748	17.669	18.000	2.042	2.125	2.219	2.303	2.541	2.305	2.222	
41 Nb	16.584	18.622	18.987	2.166	2.257	2.367	2.462	2.710	2.464	2.371	
42 Mo	17.446	19.609	20.004	2.293	2.395	2.518	2.624	2.881	2.627	2.524	
43 Tc	18.327	20.620	21.047	2.424	2.537			3.055	2.795	2.678	
44 Ru	19.237	21.657	22.120	2.559	2.683	2.836	2.965	3.233	2.966	2.838	
45 Rh	20.170	22.725	23.218	2.697	2.835	3.001	3.144	3.417	3.145	3.002	
46 Pd	21.125	23.820	24.349	2.839	2.990	3.172	3.329	3.608	3.330	3.173	
47 Ag	22.105	24.942	25.517	2.984	3.151	3.348	3.520	3.807	3.526	3.351	
48 Cd	23.110	26.097	26.715	3.134	3.317	3.528	3.717	4.019	3.728	3.538	
49 In	24.140	27.279	27.943	3.287	3.487	3.714	3.921	4.237	3.939	3.730	
50 Sn	25.195	28.489	29.194	3.444	3.663	3.905	4.131	4.465	4.157	3.929	
51 Sb	26.279	29.725	30.486	3.605	3.844	4.101	4.348	4.699	4.382	4.132	
52 Te	27.382	30.996	31.816	3.770	4.030	4.302	4.571	4.940	4.613	4.342	
53 I	28.515	32.296	33.169	3.938	4.221	4.508	4.801	5.192	4.854	4.599	
54 Xe	29.669	33.628	34.594	4.110				5.453	5.104	4.782	

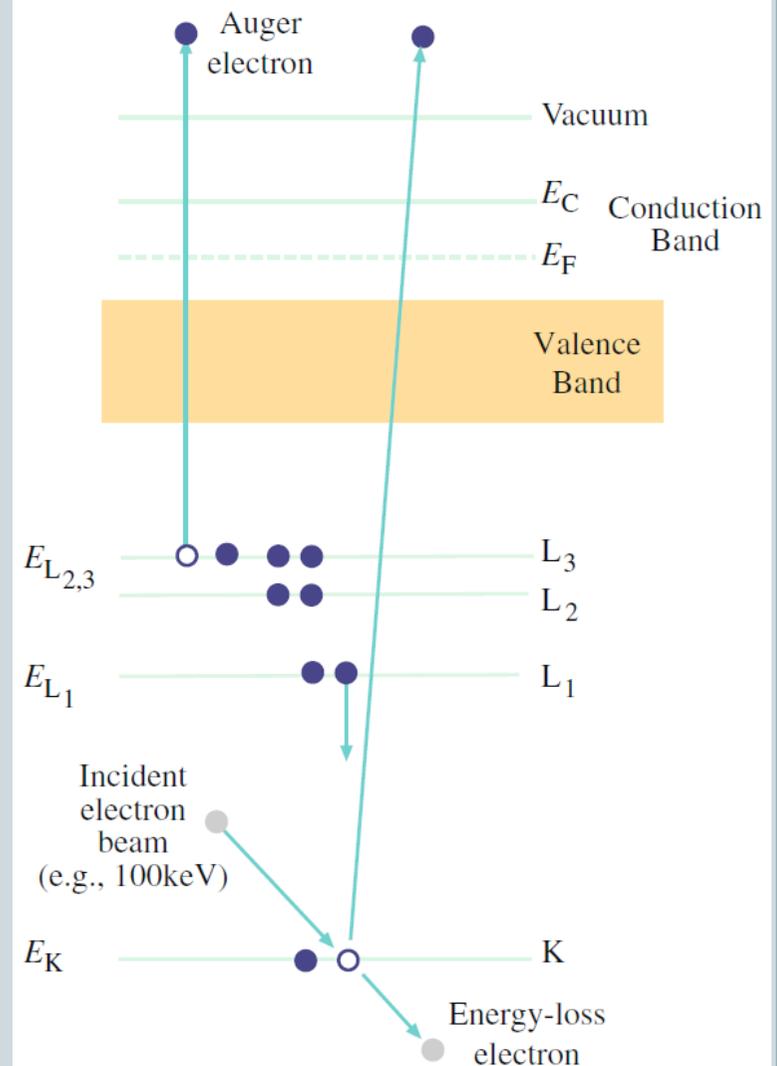
element	K α	K β 1	K β	L α 1	L β 1	L β 2	L γ 1	Llab	Lllab	Llllab	M α 1
55 Cs	30.857	34.985	35.990	4.287	4.620	4.936	5.281	5.721	5.358	5.012	
56 Ba	32.071	36.381	37.458	4.466	4.828	5.157	5.531	5.996	5.623	5.247	
57 La	33.302	37.800	38.940	4.651	5.042	5.384	5.789	6.268	5.889	5.484	0.833
58 Ce	34.575	39.261	40.452	4.840	5.262	5.613	6.052	6.548	6.161	5.724	0.883
59 Pr	35.865	40.744	42.000	5.034	5.489	5.850	6.322	6.835	6.439	5.963	0.929
60 Nd	37.188	42.272	43.580	5.231	5.722	6.090	6.602	7.130	6.724	6.210	0.978
61 Pm	38.541	43.826	45.201	5.433	5.962	6.339	6.892	7.436	7.014	6.461	
62 Sm	39.918	45.416	46.858	5.636	6.205	6.587	7.178	7.748	7.314	6.718	1.081
63 Eu	41.328	47.035	48.526	5.846	6.457	6.843	7.481	8.061	7.620	6.981	1.131
64 Gd	42.768	48.698	50.237	6.058	6.714	7.103	7.786	8.386	7.932	7.243	1.185
65 Tb	44.233	50.380	52.007	6.273	6.978	7.367	8.102	8.717	8.253	7.516	1.240
66 Dy	45.734	52.116	53.790	6.495	7.248	7.636	8.419	9.055	8.583	7.790	1.293
67 Ho	47.268	53.883	55.624	6.720	7.526	7.912	8.747	9.400	8.917	8.068	1.348
68 Er	48.813	55.674	57.480	6.949	7.811	8.189	9.089	9.758	9.262	8.358	1.406
69 Tm	50.421	57.507	59.380	7.180	8.102	8.469	9.426	10.121	9.617	8.650	1.462
70 Yb	52.051	59.380	61.318	7.416	8.402	8.759	9.780	10.491	9.976	8.944	1.522
71 Lu	53.696	61.288	63.290	7.656	8.709	9.049	10.144	10.874	10.345	9.249	1.581
72 Hf	55.400	63.225	65.324	7.899	9.023	9.348	10.516	11.274	10.737	9.558	1.645
73 Ta	57.110	65.221	67.420	8.146	9.343	9.652	10.896	11.682	11.133	9.877	1.710
74 W	58.872	67.237	69.498	8.398	9.673	9.962	11.286	12.100	11.539	10.200	1.776
75 Re	60.658	69.304	71.668	8.653	10.010	10.276	11.686	12.531	11.955	10.531	1.843
76 Os	62.492	71.420	73.845	8.912	10.355	10.599	12.096	12.972	12.381	10.868	1.914
77 Ir	64.341	73.582	76.111	9.175	10.709	10.921	12.512	13.424	12.820	11.212	1.980
78 Pt	66.267	75.739	78.372	9.443	11.071	11.251	12.942	13.883	13.273	11.563	2.050
79 Au	68.199	77.978	80.719	9.714	11.443	11.585	13.382	14.353	13.736	11.922	2.123
80 Hg	70.167	80.249	83.100	9.989	11.823	11.924	13.830	14.843	14.215	12.287	2.195
81 Tl	72.168	82.602	85.507	10.269	12.214	12.272	14.292	15.343	14.701	12.661	2.271
82 Pb	74.243	84.921	87.995	10.552	12.614	12.623	14.765	15.855	15.205	13.041	2.346
83 Bi	76.345	87.313	90.566	10.839	13.024	12.980	15.248	16.376	15.720	13.427	2.423
84 Po	78.472	89.779		11.131	13.447	13.340	15.744				
85 At	80.614	92.319		11.427	13.876		16.252				
86 Rn	82.878	94.862		11.728	14.315		16.771				
87 Fr	85.096	97.473		12.032	14.771	14.450	17.304				
88 Ra	87.437	100.149		12.341	15.235	14.841	17.850				
89 Ac	89.779	102.807		12.653	15.714		18.409				
90 Th	92.182	105.609	109.624	12.969	16.203	15.625	18.984	20.463	19.683	16.299	2.996
91 Pa	94.645	108.473		13.292	16.703	16.025	19.568	21.172	20.362	16.768	3.083
92 U	97.167	111.297	115.658	13.616	17.220	16.428	20.167	21.771	20.947	17.165	3.171
93 Np	99.427	113.748		13.945	17.750	16.841	20.785				
94 Pu											
95 Am											
96 Cm											
97 Bk											
98 Cf											
99 Es											
100 Fm											
101 Md											
102 No											
103 Lr											

Emissão de Elétron

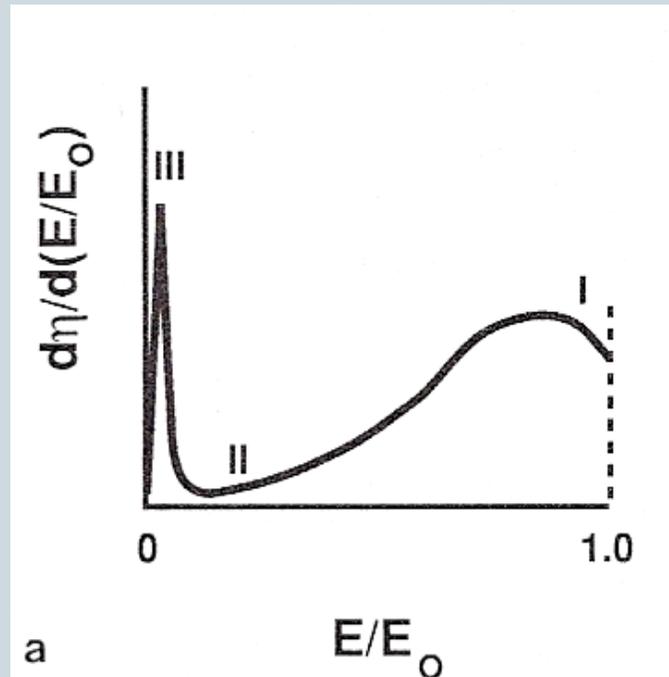


- **Elétrons emitidos**
 - Auger (300eV-3keV)
 - ✦ Possuem energia característica das transições de decaimento
 - Secundários
 - ✦ Lentos ($E \leq 50\text{eV}$)
 - provenientes das bandas de condução e valência
 - ✦ Rápidos ($E < E_0/2$)
 - provenientes de camadas mais internas

Williams e Carter

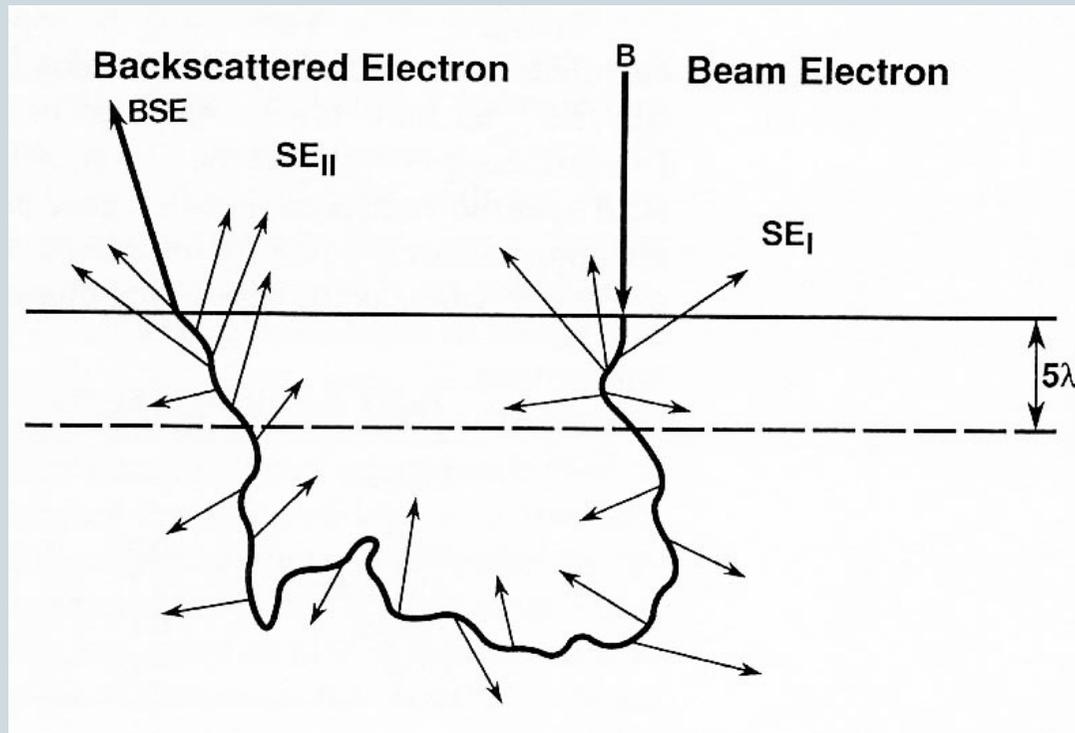


Energia dos Elétron Emitidos

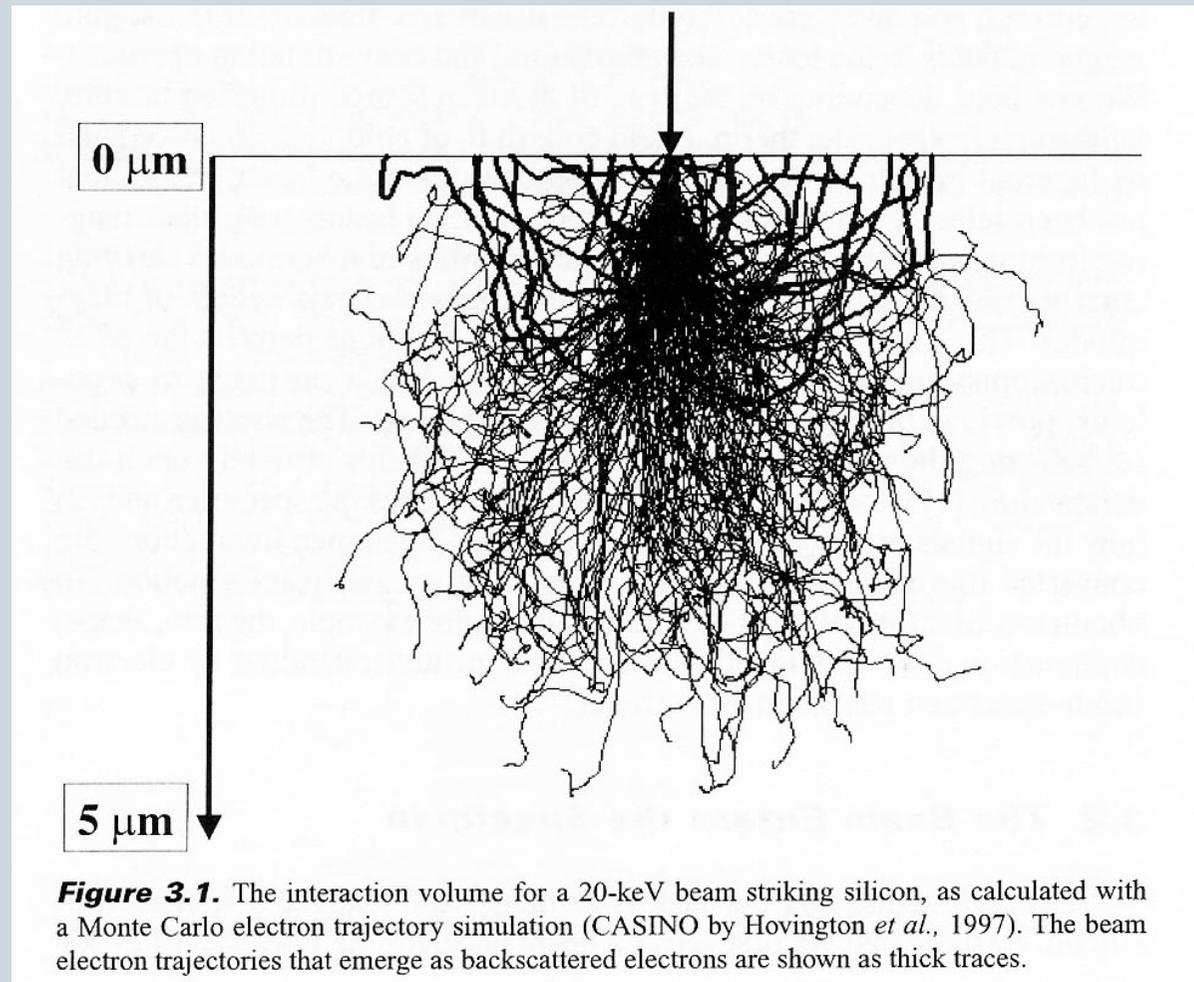


- I – BSE
- II – FSE
- III - SE

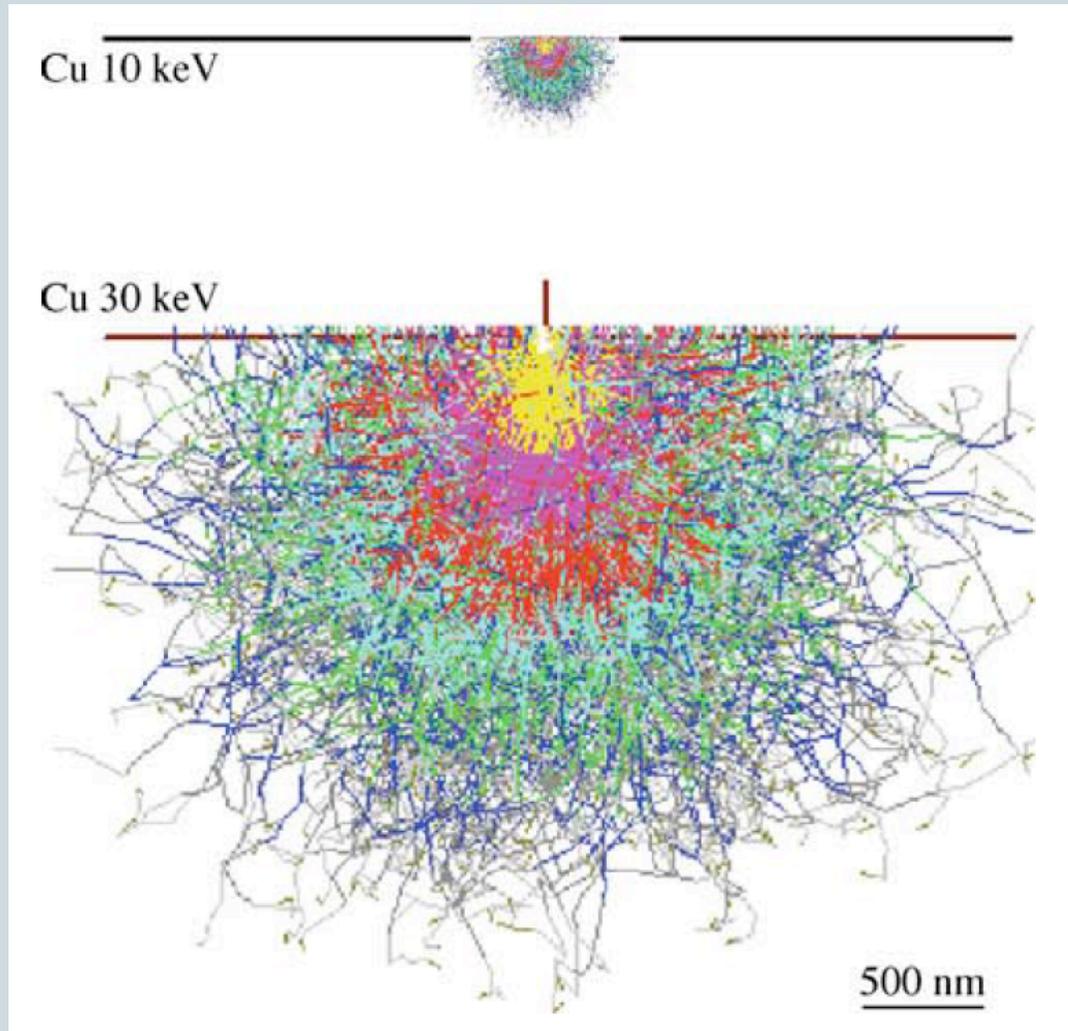
Volume de Interação em Amostras Massivas



Volume de Interação em Amostras Massivas



Volume de Interação em Amostras Massivas

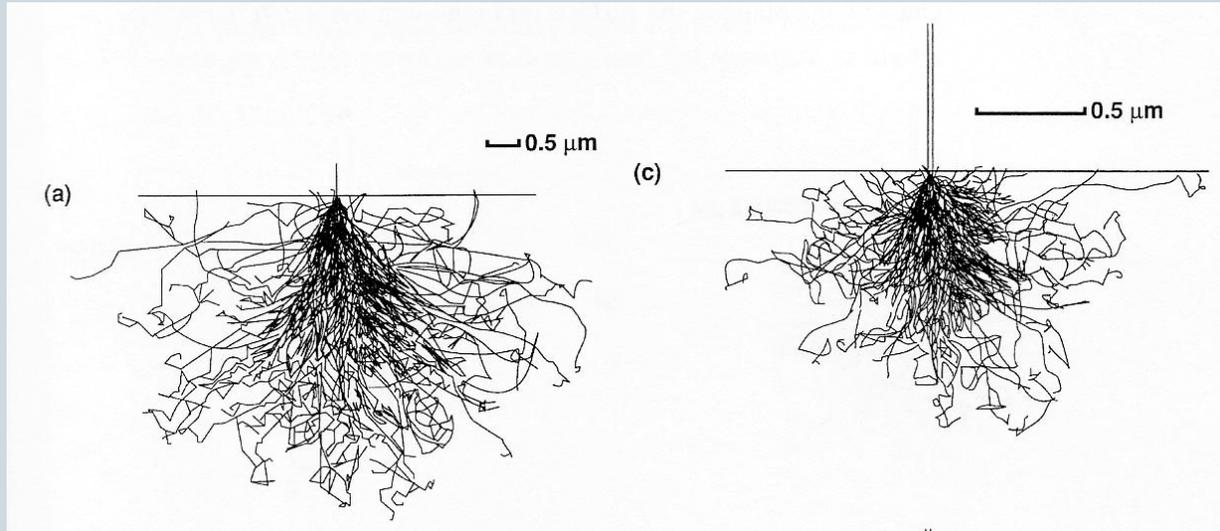


Williams e Carter

Volume de Interação em Amostras Massivas

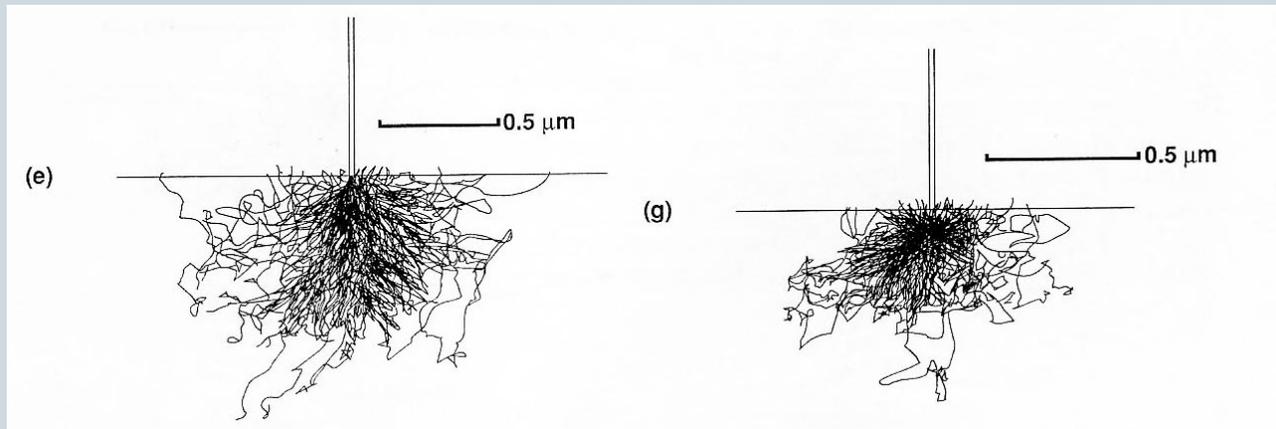


C



Fe

Ag

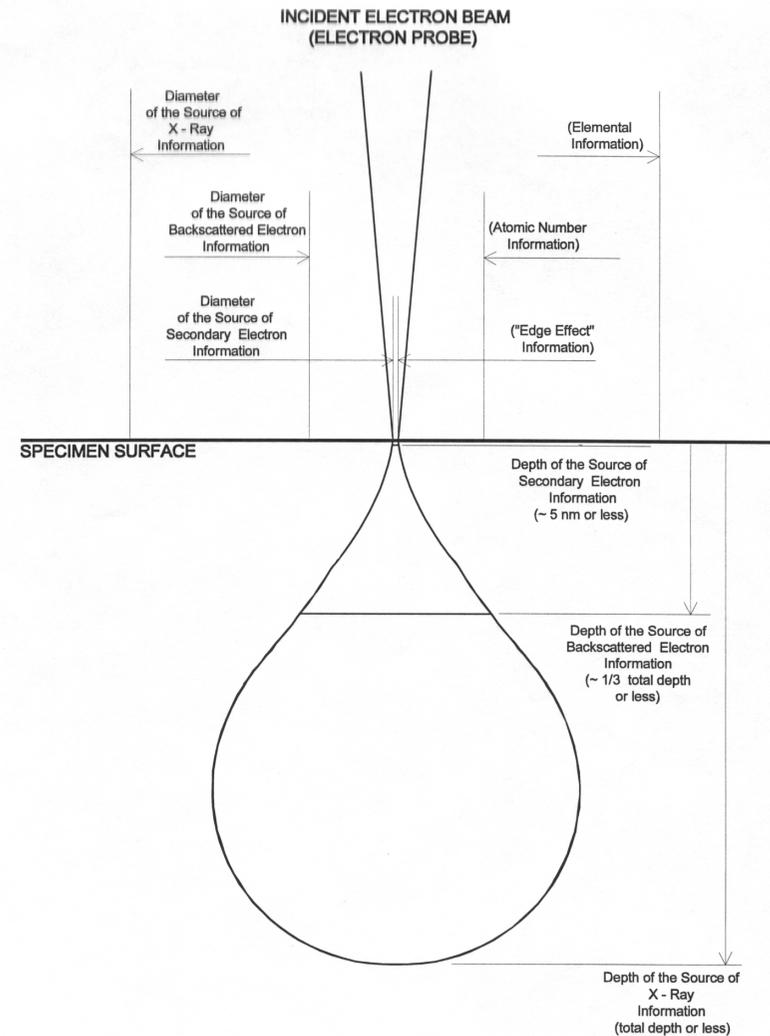


U

Resolução e Origem em Amostras Massivas



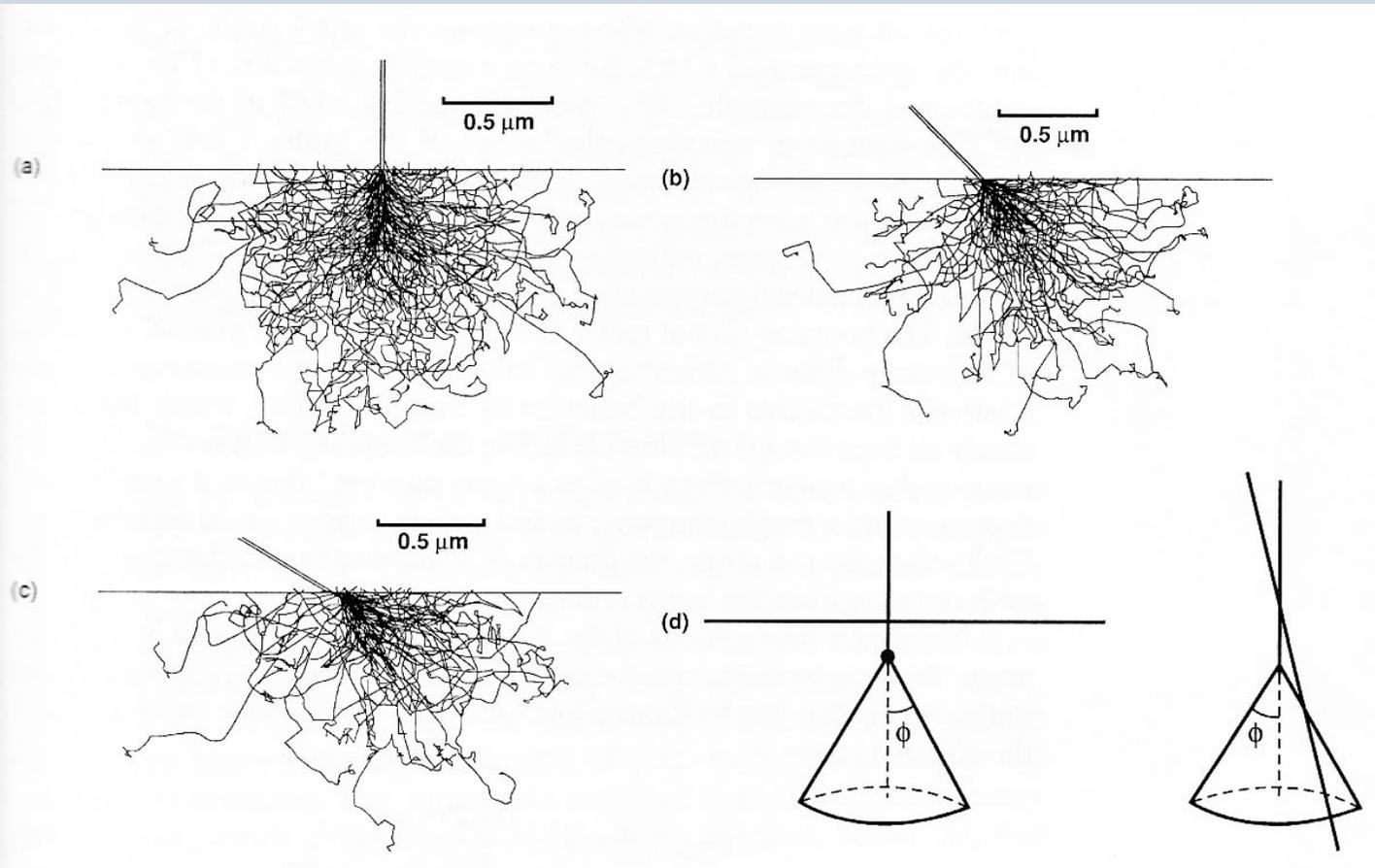
- e⁻ Secundários
~ 1-5 ηm
- e⁻ Retroespalhados
~ 0,1 μm
- Raios-X
~1-5 μm



Efeito da Inclinação em Amostras Massivas



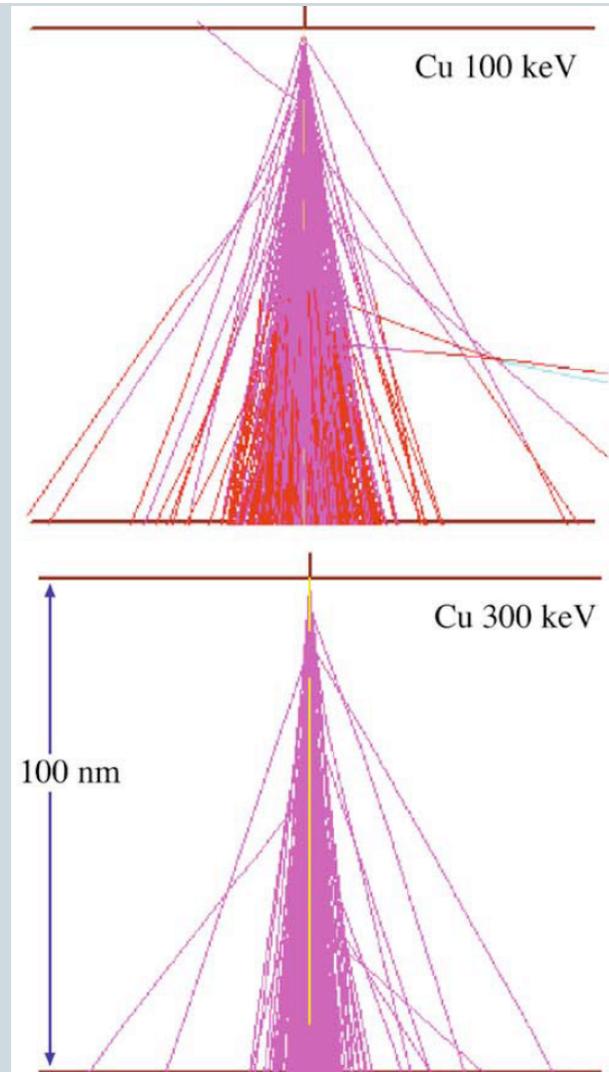
0°



45°

60°

Volume de Interação em Folha Fina

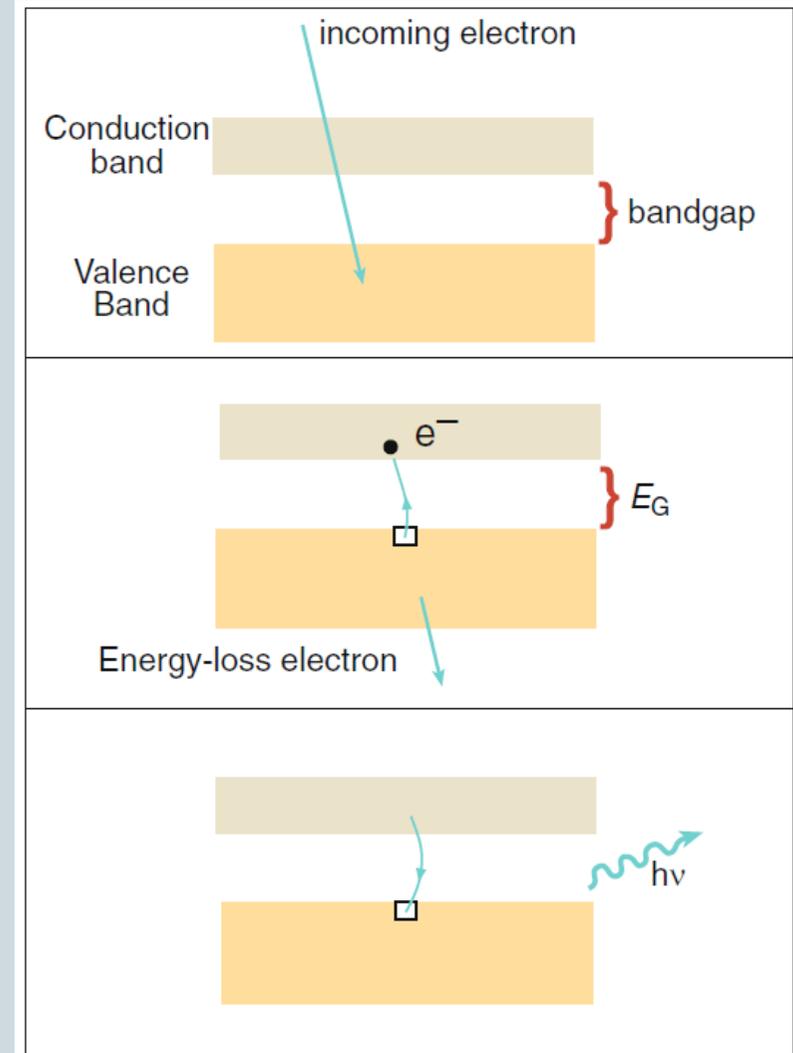


Williams e Carter

Emissão de Luz



- A luz emitida pode ser utilizada para caracterizar alterações na banda de gap como fruto de dopagens, segregações em interfaces...



Plásmons



- Podem ocorrer em qualquer material com elétrons fracamente ligados ou livres

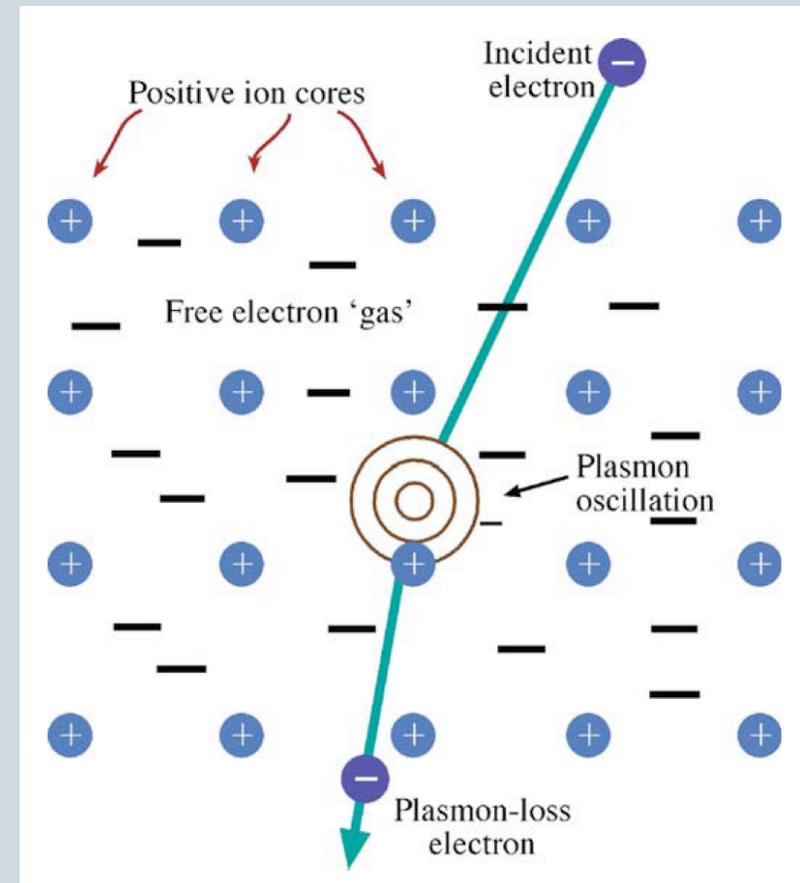
$$\frac{d\sigma_{\theta}}{d\Omega} = \frac{1}{2\pi a_0} \left(\frac{\theta_E}{\theta + \theta_E^2} \right)$$

- a_0 é o raio de Bohr

$$a_0 = \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m_0 e^2}$$

- $\theta_E = E_P/2E_0$ ($E_P \sim 15-25\text{eV}$)
- Podem ser utilizados para avaliar a espessura de amostras em MET

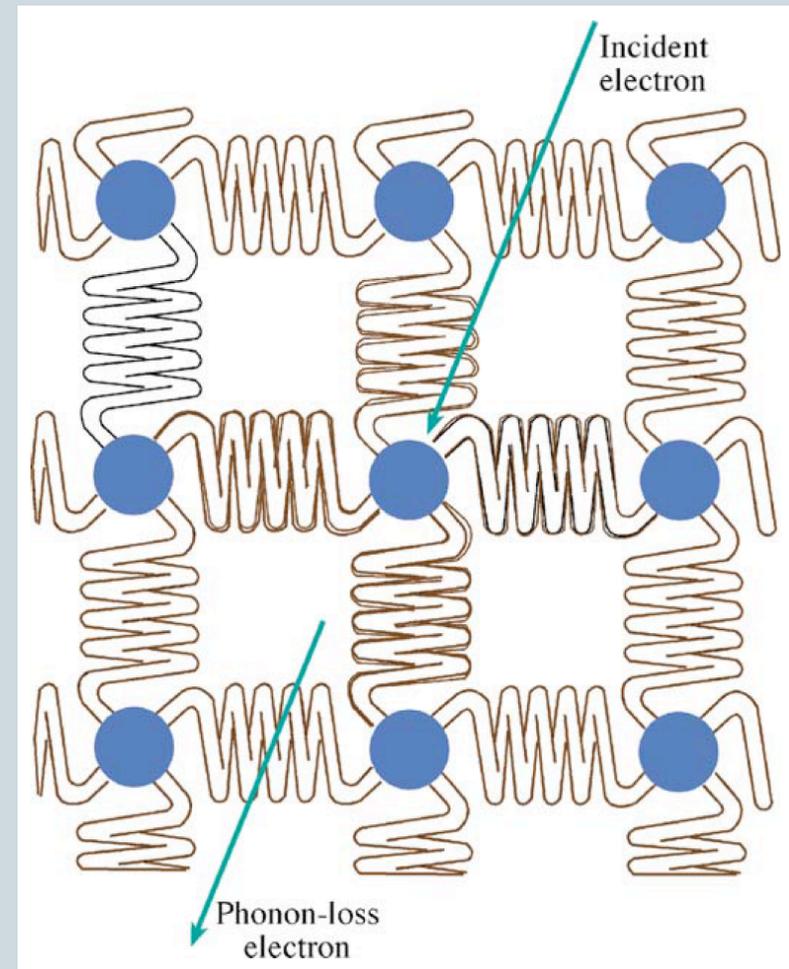
Williams e Carter



Fónons



- Vibrações na rede (mesmo em materiais amorfos)
- Ângulo de espalhamento $\sim 5-15$ mrad
- Perda de energia $\sim 0,1$ eV
- Espalhamento $\sim Z^{3/2}$
- Aumenta com a temperatura
- Gera um ruído de fundo sem informação sobre a amostra



Williams e Carter

Referências



- Goldstein, J. I. et alli., “Scanning Electron Microscopy and X-Ray Analysis”, Ed. Plenum, New York, 2003.
- Goodhew, P. J. et all, “Electron Microscopy and Analysis”, Ed. Taylor & Francis, London, 2001.
- Williams, D. B. e Carter, C. B., “Transmission Electron Microscopy” , Ed. Plenum, New York, 2009.
- Apostila da Jeol – MET

André L. Pinto

pinto@cbpf.br

- Bem vindos ao mundo da microscopia eletrônica!

INTERNATIONAL
MICROSCOPY CONGRESS

