

# Universidade de São Paulo Instituto de Física

FAP5844 - Técnicas de Raios-X e de feixe iônico aplicados à  
análise de materiais

Manfredo H. Tabacniks  
FI2-2008

PIXE

Particle Induced X-ray Emission

ED-XRF

Energy Dispersive X-Ray Fluorescence

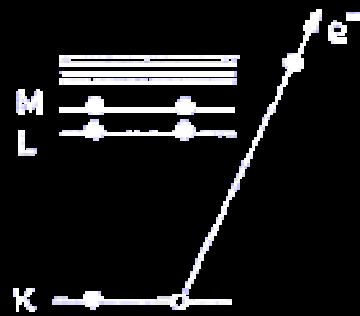
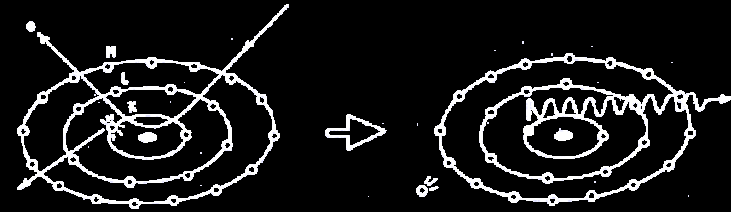


WD-XRF  
Wavelength Dispersive...

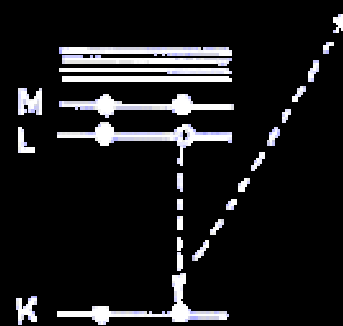
- Tabacniks, Manfredo Harri. *Análise de Filmes Finos por PIXE e RBS*. São Paulo: Instituto de Física da USP, 2000.
- Jim Heiji Aburaya, *Padronização de Análises PIXE de Amostras Sólidas em Alvos Espessos*, Dissertação de Mestrado, IFUSP 2005
- Virgílio F. Nascimento Filho, *Técnicas Analíticas Nucleares De Fluorescência de Raios X por Dispersão de Energia (ED-XRF) e por Reflexão Total (TXRF)*, Julho/99

# Ionização e de-excitação

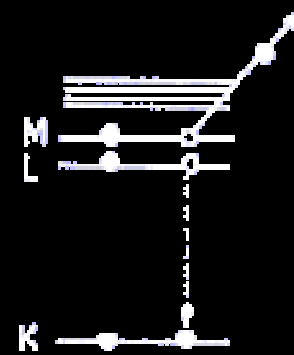
## Princípios Básicos



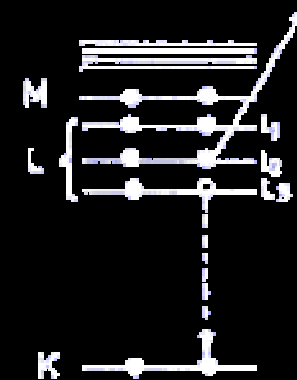
ionização



emissão  
de Rx



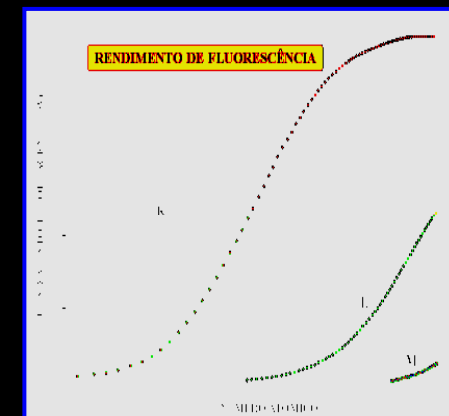
emissão  
de e-Auger



transição  
Koster-Krönig

rendimento fluorescente

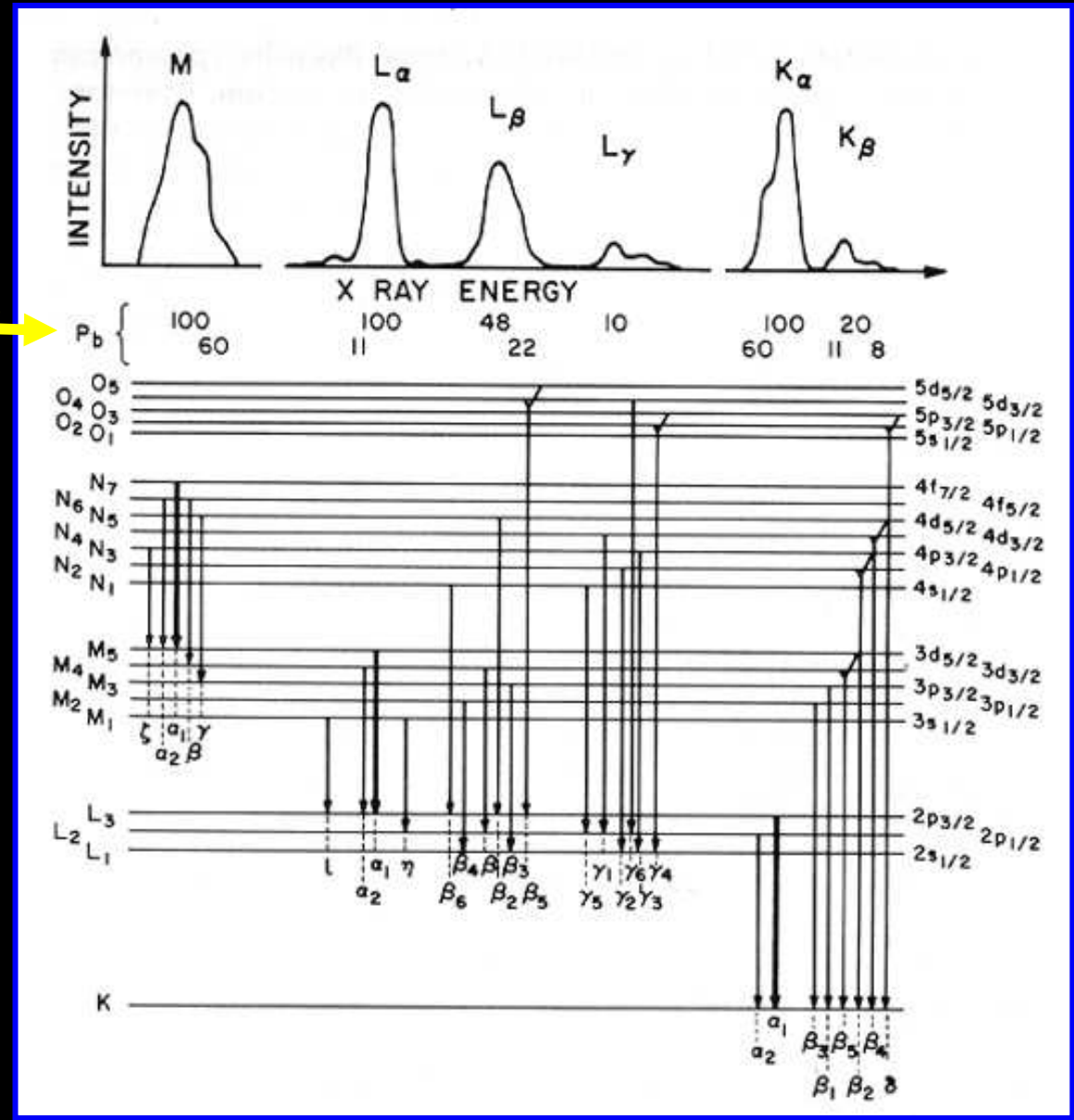
$$\omega = \frac{N_x}{N_x + N_e}$$



# Espectros de raios-X EDX

## Espectro M      Espectro L      Espectro K

Intensidades relativas



transições de dipolo

$$\Delta s \neq 0$$

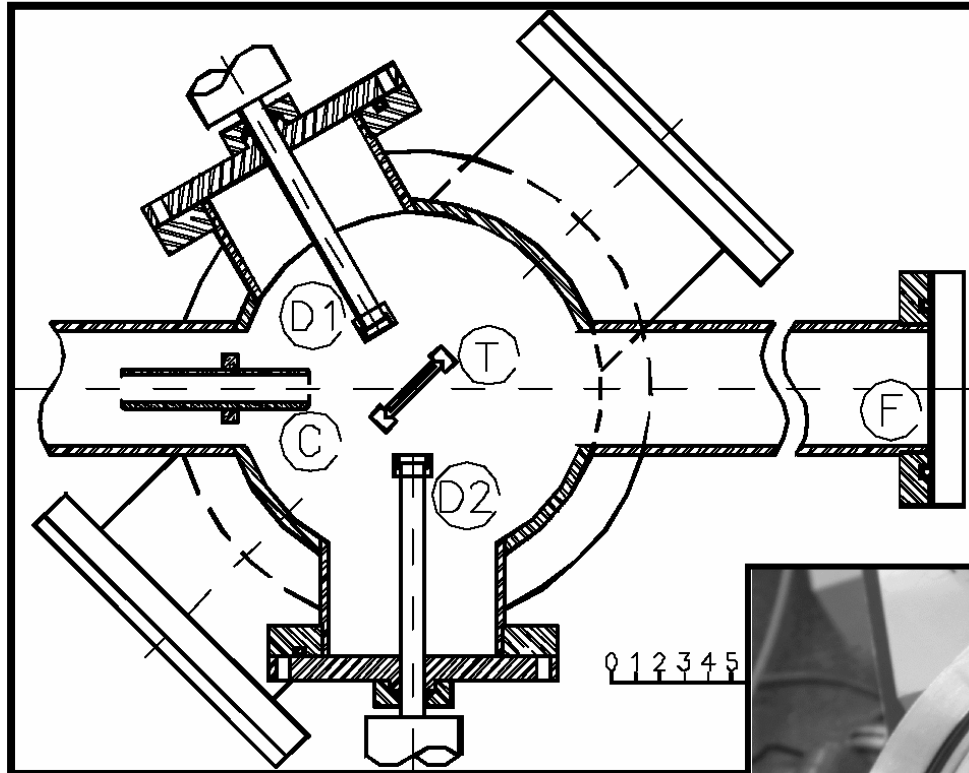
$$\Delta j = 0, \pm 1$$

$$j = \ell \pm |s|$$

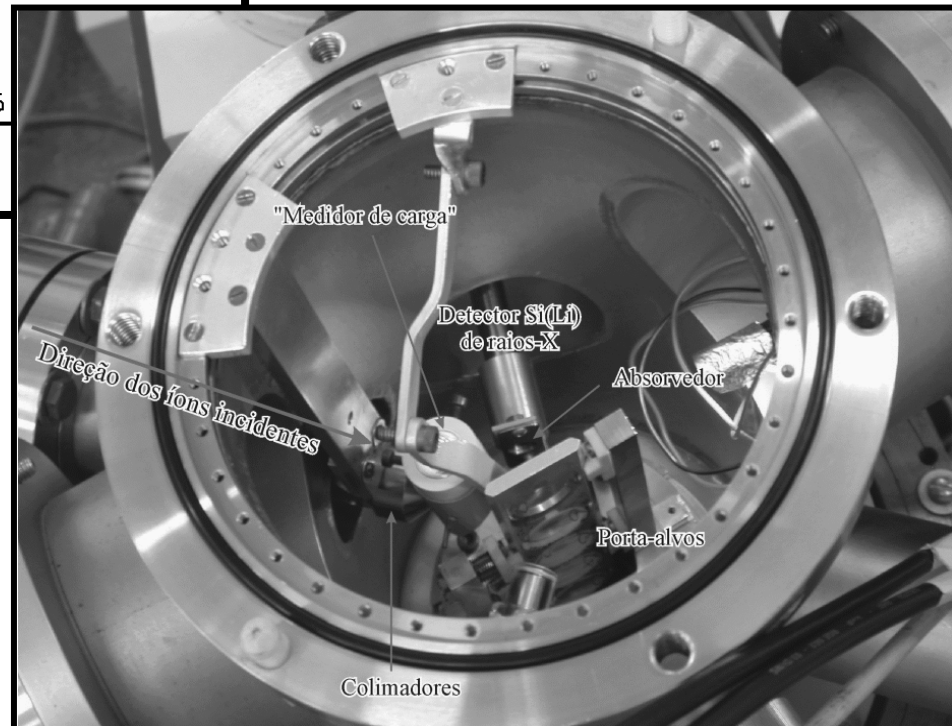
# Equações do PIXE

- Equação Geral do PIXE
- PIXE de Alvos Finos
- PIXE de Alvos Espessos

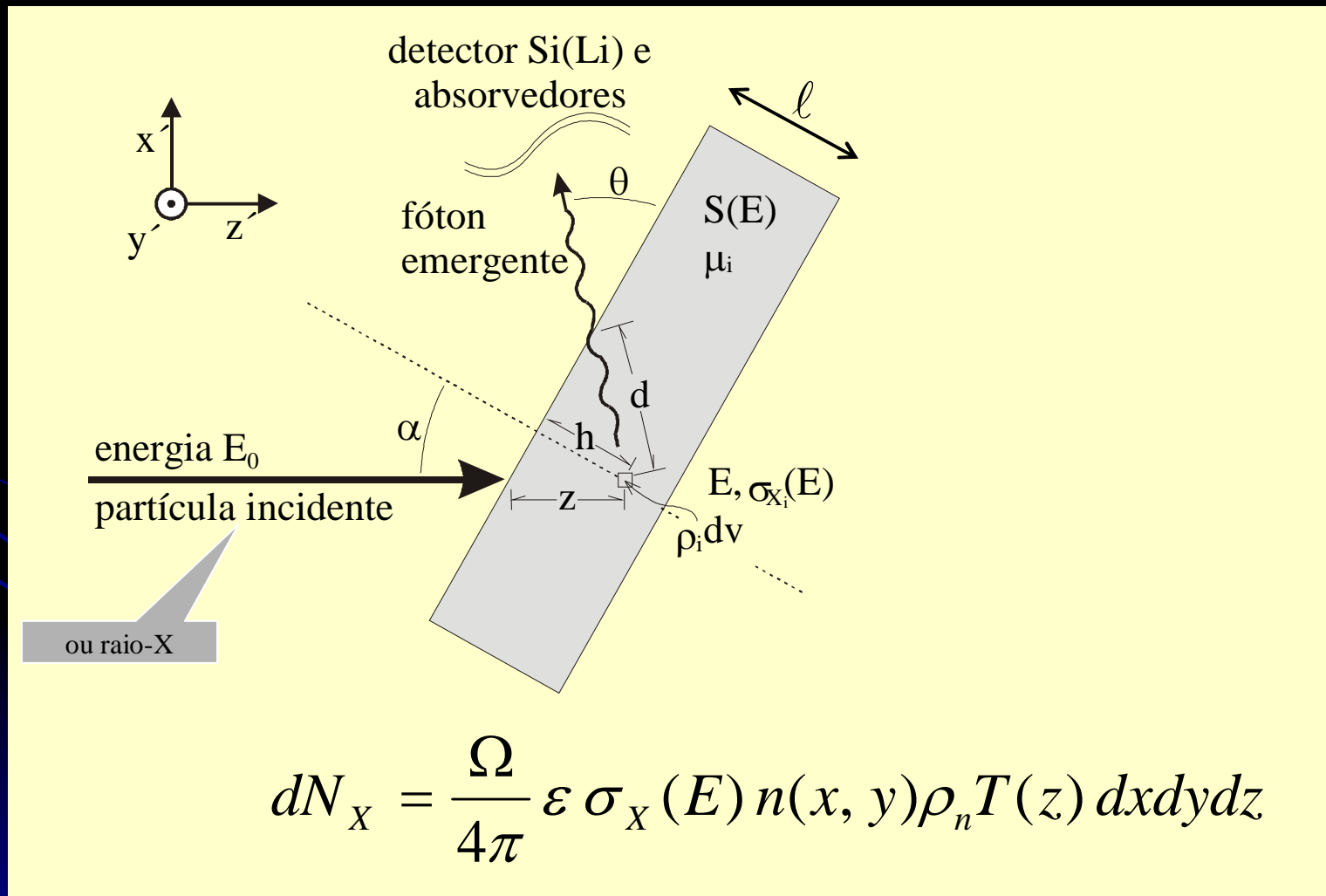
# PIXE arranjo experimental



D1, D2: detectores  
T: amostra  
C: colimador de feixe  
F: copo de faraday.



# Geometria experimental: PIXE ou ED-XRF



# Equação geral do PIXE

$$dN_i = \frac{\Omega}{4\pi} \varepsilon \sigma_x(E) n(x, y) dx dy T(z) \rho_n dz$$

Quantidade de raios X detectados

Quantidade de partículas incidentes

Ângulo sólido de detecção

Concentração elementar

Eficiência de detecção

Auto absorção de raios X

$$N_i = \frac{\Omega}{4\pi} \varepsilon_i \frac{Q}{q \cdot e \cdot \cos \alpha} \frac{\rho_n}{\rho} \frac{N_0}{A_n} \int_{E_0}^E \frac{\sigma_{X_i}(E') \cdot e}{S(E')} \left[ \frac{\mu_i \cos \alpha}{\rho \sin \theta} \int_{E_0}^{E'} \frac{dE''}{S(E'')} \right] dE'$$

Energia inicial das partículas incidentes

Seção de choque de produção de raios X

Freamento das partículas incidentes



# Equação geral do PIXE

Quantidade de raios X detectados

Quantidade de partículas incidentes

Ângulo sólido de detecção

Eficiência de detecção

Concentração elementar

Auto absorção de raios X

$$N_i = \frac{\Omega}{4\pi} \varepsilon_i \frac{Q}{q \cdot e \cdot \cos \alpha} \frac{\rho_n}{\rho} \frac{N_0}{A_n} \int_{E_0}^E \frac{\sigma_{X_i}(E') \cdot e}{S(E')} \frac{\mu_i \cos \alpha}{\rho \sin \theta} \int_{E_0}^{E'} \frac{dE''}{S(E'')} dE'$$

Energia inicial das partículas incidentes

Seção de choque de produção de raios X

Freamento das partículas incidentes

# Equação geral do PIXE

Quantidade de raios X detectados

Quantidade de partículas incidentes

Ângulo sólido de detecção

Eficiência de detecção

Concentração elementar

Auto absorção de raios X

$$N_i = \frac{\Omega}{4\pi} \varepsilon_i \frac{Q}{q \cdot e \cdot \cos \alpha} \frac{\rho_n}{\rho} \frac{N_0}{A_n} \int_{E_0}^E \frac{\sigma_{X_i}(E') \cdot e}{S(E')} \frac{\mu_i \cos \alpha}{\rho \sin \theta} \int_{E_0}^{E'} \frac{dE''}{S(E'')} dE'$$

Energia inicial das partículas incidentes

Seção de choque de produção de raios X

Freamento das partículas incidentes

# Equação geral do PIXE

Quantidade de raios X detectados

Quantidade de partículas incidentes

Ângulo sólido de detecção

Eficiência de detecção

Concentração elementar

Auto absorção de raios X

$$N_i = \frac{\Omega}{4\pi} \varepsilon_i \frac{Q}{q \cdot e \cdot \cos \alpha} \frac{\rho_n}{\rho} \frac{N_0}{A_n} \int_{E_0}^E \frac{\sigma_{X_i}(E') \cdot e}{S(E')} \frac{\mu_i \cos \alpha}{\rho \sin \theta} \int_{E_0}^{E'} \frac{dE''}{S(E'')} dE'$$

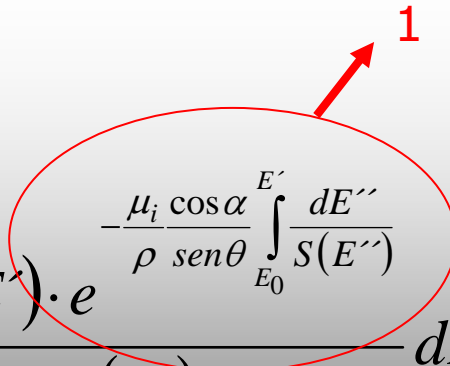
Energia inicial das partículas incidentes

Seção de choque de produção de raios X

Freamento das partículas incidentes

# Equação geral do PIXE: alvo fino

Auto absorção de raios X desprezível

$$N_i = \frac{\Omega}{4\pi} \varepsilon_i \frac{Q}{q \cdot e \cdot \cos \alpha} \frac{\rho_n}{\rho} \frac{N_0}{A_n} \int_{E_0}^E \frac{\sigma_{X_i}(E') \cdot e}{S(E')} \cdot \frac{\mu_i \cos \alpha}{\rho \sin \theta} \int_{E_0}^{E'} \frac{dE''}{S(E'')} dE'$$


# Equação geral do PIXE: alvo fino

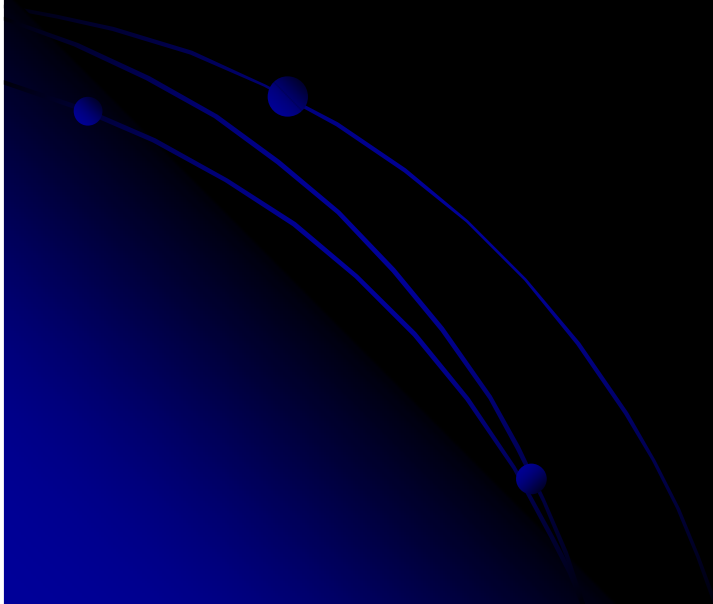
Freemento do feixe incidentes desprezível:  $E(z) \rightarrow E_0$

$$N_i = \frac{\Omega}{4\pi} \varepsilon_i \frac{Q}{q \cdot e \cdot \cos \alpha} \frac{\rho_n}{\rho} \frac{N_0}{A_n} \int_{E_0}^E \frac{\sigma_{X_i}(E') \cdot 1}{S(E')} dE'$$

$$\int_{E_0}^E \frac{\sigma_{X_i}(E') \cdot 1}{S(E')} dE' \xrightarrow{dz = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{S(E)}} \sigma_{X_i}(E_0) \cdot \rho \cdot \ell$$

## Equação geral do PIXE

$$N_i = \frac{\Omega}{4\pi} \varepsilon_i \frac{Q}{q \cdot e \cdot \cos \alpha} \frac{\rho_n}{\rho} \frac{N_0}{A_n} \int_{E_0}^E \frac{\sigma_{X_i}(E') \cdot e}{S(E')} \cdot \frac{\mu_i \cos \alpha}{\rho \sin \theta} \int_{E_0}^{E'} \frac{dE''}{S(E'')} dE'$$



## Equação geral do PIXE

$$N_i = \frac{\Omega}{4\pi} \varepsilon_i \frac{Q}{q \cdot e \cdot \cos \alpha} \frac{\rho_n}{\rho} \frac{N_0}{A_n} \int_{E_0}^E \frac{\sigma_{X_i}(E') \cdot e^{-\frac{\mu_i \cos \alpha}{\rho \sin \theta} \int_{E_0}^{E'} \frac{dE''}{S(E'')}}}{S(E')} dE'$$



## Equação do PIXE de Alvos Finos

$$n_i = \frac{\Omega}{4\pi} \varepsilon_i \frac{Q}{q \cdot e \cdot \cos \alpha} \frac{N_0}{A_n} \sigma_{X_i}(E_0) \cdot \rho_n \cdot \ell$$

## Equação do PIXE de Alvos Finos

$$n_i = \frac{\Omega}{4\pi} \varepsilon_i \frac{Q}{q \cdot e \cdot \cos \alpha} \frac{N_0}{A_n} \sigma_{X_i}(E_0) \cdot \rho_n \cdot \ell$$

Arranjo Experimental

Equação reduzida

$$n_i = r_i \cdot Q \cdot (\rho_n \cdot \ell)$$

Fator de resposta

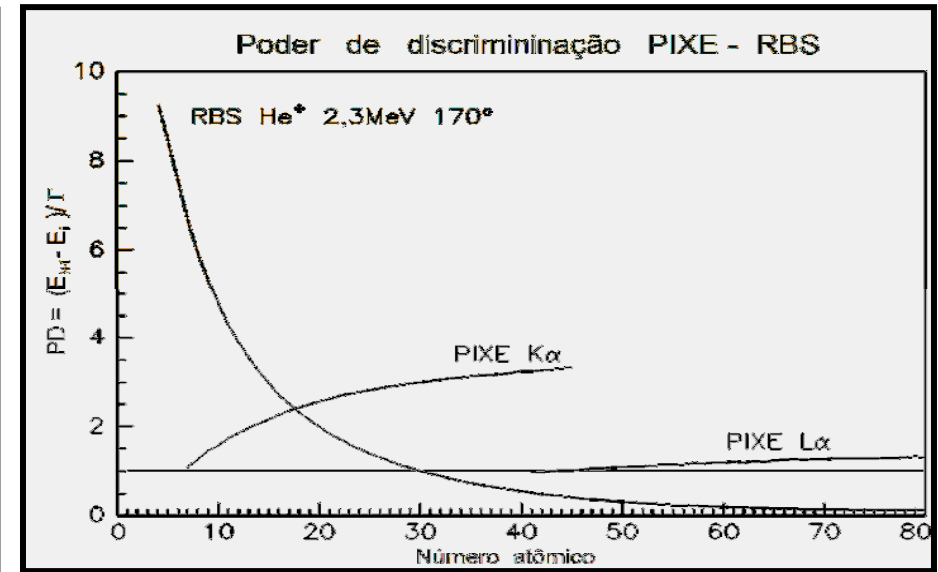
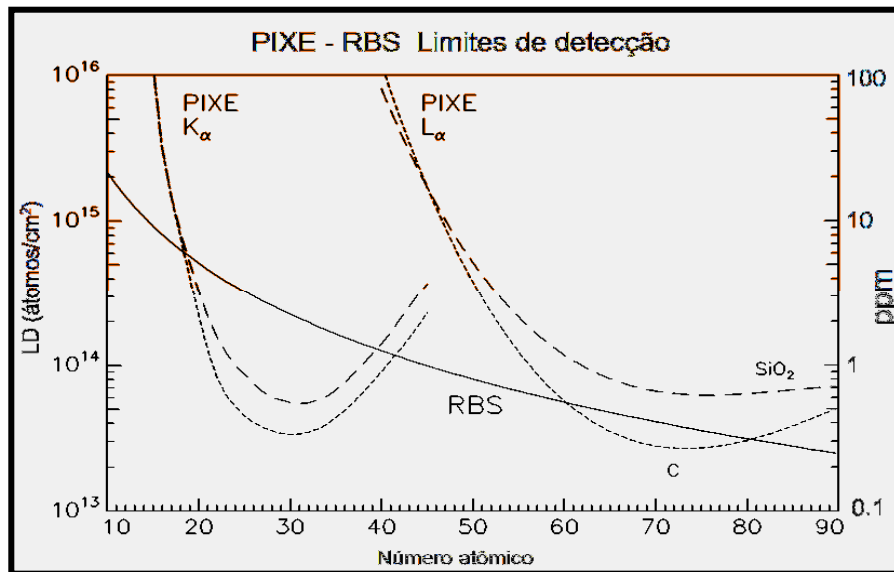
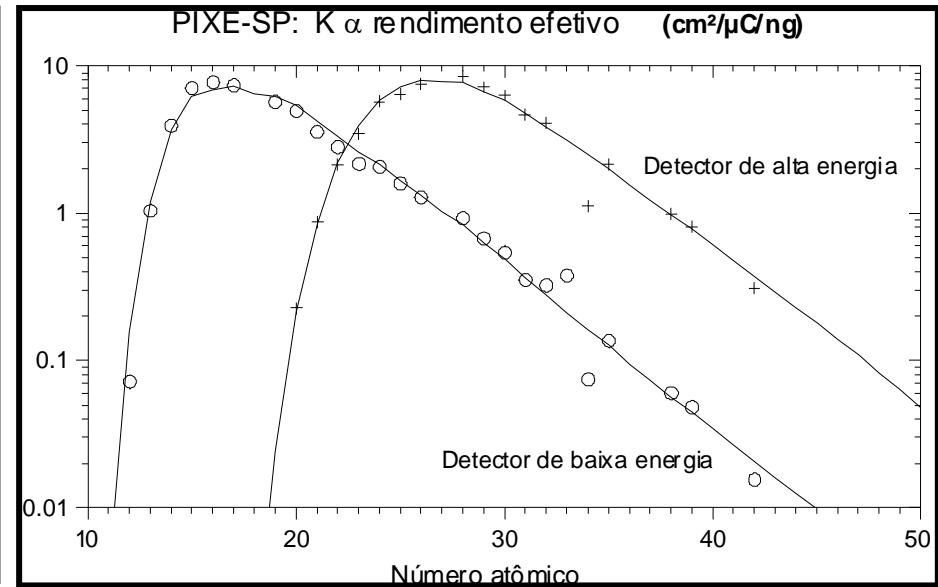
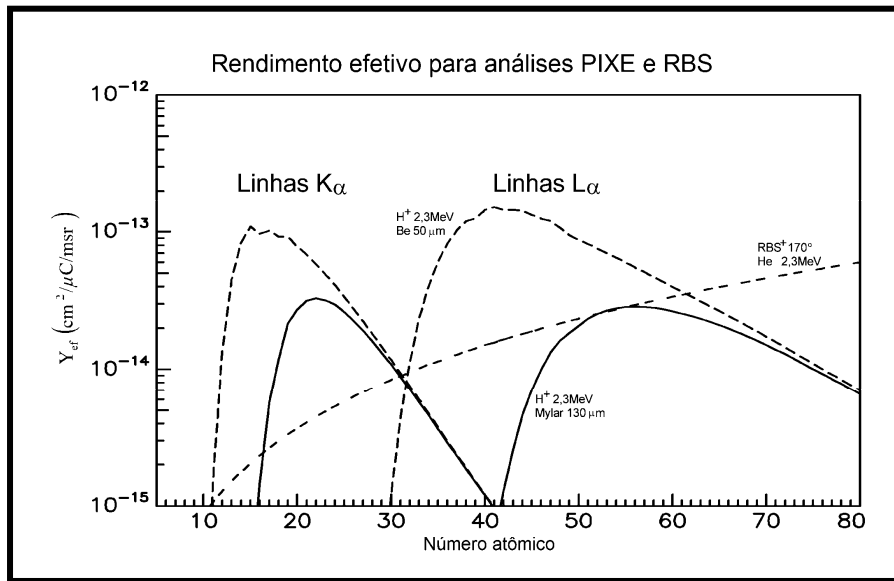
$$r_i = \frac{\Omega}{4\pi} \varepsilon_i \frac{N_0}{A_n} \frac{1}{q \cdot e \cdot \cos \alpha} \sigma_{X_i}(E_0)$$

Medidas Experimentais

$[\mu\text{g}/\text{cm}^2]$



# Resumo Gráfico: Calibração e Limites de Detecção



# O problema dos elementos "invisíveis"

Análise PIXE não detecta os elementos com  $Z < 11$

$$\left[ \sum_m \frac{\rho_j}{\rho} \right]_{\text{detectados}} + \left[ \sum_k \frac{\rho_i}{\rho} \right]_{\text{invisíveis}} = 1$$

Uma fração dos elementos não detectados pode ser estimada...

$$\left[ \sum_k \frac{\rho_i}{\rho} \right]_{\text{invisíveis}} = \left[ \sum_r \frac{\rho_i}{\rho} \right]_{\text{conhecidos}} + \left[ \sum_s \frac{\rho_i}{\rho} \right]_{\text{desconhecidos}}$$

...mas isso não basta para uma solução única da integral:

$$N_i = \frac{\Omega}{4\pi} \varepsilon_i \frac{Q}{q \cdot e \cdot \cos \alpha} \frac{\rho_n N_0}{A_n} \int_{E_0}^E \frac{\sigma_{X_i}(E') \cdot e^{-\frac{\mu_i \cos \alpha}{\rho \sin \theta} \int_{E_0}^{E'} \frac{dE''}{S(E'')}}}{\rho \cdot S(E')} dE'$$

# PIXE de Alvos Espessos

$$N_i = R_i \cdot Q \cdot \frac{\rho_n}{\rho}$$

↓ ↓ ↘  
**Medidas Experimentais** [μg/g]

$$R_i = \frac{\Omega}{4\pi} \varepsilon_i \frac{N_0}{A_n} \frac{1}{q \cdot e \cdot \cos \alpha} \int_{E_0}^E \frac{\sigma_{X_i}(E') \cdot e}{S(E')} \left( \frac{\mu_i \cos \alpha}{\rho \sin \theta} \int_{E_0}^{E'} \frac{dE''}{S(E'')} \right) dE'$$

↘ ↘  
**Arranjo Experimental**

# Fator de Correção

$$F_i = \frac{R_i}{r_i}$$

alvo espesso

$$R_i = \frac{\Omega}{4\pi} \varepsilon_i \frac{N_0}{A_n} \frac{1}{q \cdot e \cdot \cos \alpha} \int_{E_0}^E \frac{\sigma_{X_i}(E') \cdot e^{-\frac{\mu_i \cos \alpha}{\rho \sin \theta} \int_{E_0}^{E'} \frac{dE''}{S(E'')}}}{S(E')} dE'$$

alvo fino

$$r_i = \frac{\Omega}{4\pi} \varepsilon_i \frac{N_0}{A_n} \frac{1}{q \cdot e \cdot \cos \alpha} \sigma_{X_i}(E_0)$$

$$F_i = \frac{\frac{\Omega}{4\pi} \varepsilon_i \frac{N_0}{A_n} \frac{1}{q \cdot e \cdot \cos \alpha} \int_{E_0}^E \frac{\sigma_{X_i}(E') \cdot e^{-\frac{\mu_i \cos \alpha}{\rho \sin \theta} \int_{E_0}^{E'} \frac{dE''}{S(E'')}}}{S(E')} dE'}{\frac{\Omega}{4\pi} \varepsilon_i \frac{N_0}{A_n} \frac{1}{q \cdot e \cdot \cos \alpha} \sigma_{X_i}(E_0)}$$

# Fator de Correção

$$F_i = \frac{R_i}{r_i}$$

alvo espesso  $\rightarrow R_i = \frac{\Omega}{4\pi} \varepsilon_i \frac{N_0}{A_n} \frac{1}{q \cdot e \cdot \cos \alpha} \int_{E_0}^E \frac{\sigma_{X_i}(E') \cdot e^{-\frac{\mu_i \cos \alpha}{\rho} \int_{E_0}^{E'} \frac{dE''}{S(E'')}}}{S(E')} dE'$

alvo fino  $\rightarrow r_i = \frac{\Omega}{4\pi} \varepsilon_i \frac{N_0}{A_n} \frac{1}{q \cdot e \cdot \cos \alpha} \sigma_{X_i}(E_0)$

$$F_i = \frac{\frac{\Omega}{4\pi} \varepsilon_i \frac{N_0}{A_n} \frac{1}{q \cdot e \cdot \cos \alpha} \int_{E_0}^E \frac{\sigma_{X_i}(E') \cdot e^{-\frac{\mu_i \cos \alpha}{\rho} \int_{E_0}^{E'} \frac{dE''}{S(E'')}}}{S(E')} dE'}{\frac{\Omega}{4\pi} \varepsilon_i \frac{N_0}{A_n} \frac{1}{q \cdot e \cdot \cos \alpha} \sigma_{X_i}(E_0)}$$

## Fator de Correção

$$F_i = \frac{R_i}{r_i}$$

alvo espesso

$$R_i = \frac{\Omega}{4\pi} \varepsilon_i \frac{N_0}{A_n} \frac{1}{q \cdot e \cdot \cos \alpha} \int_{E_0}^E \frac{\sigma_{X_i}(E') \cdot e^{-\frac{\mu_i \cos \alpha}{\rho} \int_{E_0}^{E'} \frac{dE''}{S(E'')}}}{S(E')} dE'$$

alvo fino

$$r_i = \frac{\Omega}{4\pi} \varepsilon_i \frac{N_0}{A_n} \frac{1}{q \cdot e \cdot \cos \alpha} \sigma_{X_i}(E_0)$$

$$F_i = \frac{1}{\sigma_{X_i}(E_0)} \int_{E_0}^E \frac{\sigma_{X_i}(E') \cdot e^{-\frac{\mu_i \cos \alpha}{\rho} \int_{E_0}^{E'} \frac{dE''}{S(E'')}}}{S(E')} dE'$$

## Fator de Correção

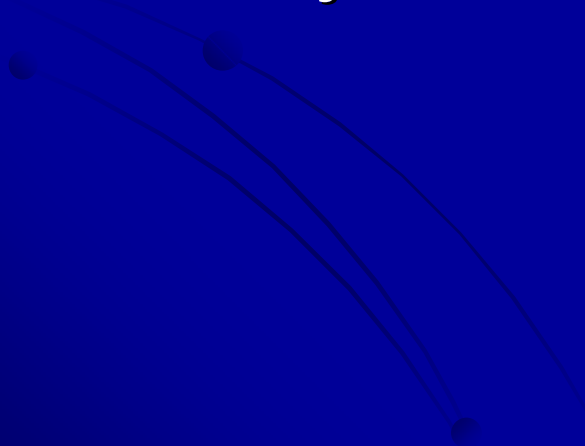
$$F_i = \frac{1}{\sigma_{X_i}(E_0)} \int_{E_0}^E \frac{\sigma_{X_i}(E') \cdot e^{-\frac{\mu_i \cos \alpha}{\rho \sin \theta} \int_{E_0}^{E'} \frac{dE''}{S(E'')}}}{S(E')} dE'$$



Matriz da amostra

## Bases de Dados

- Seção de choque de produção de raios-X
  - Razão de intensidades  $K\beta/K\alpha$
  - Rendimento de Fluorescência
  - Seção de Choque de Ionização
- Poder de Freamento
- Absorção de Raios X





# Seção de Choque de Produção de Raios X

Correspondente à emissão de  $K\alpha$

Razão de intensidades  $K\beta/K\alpha$

Rendimento de Fluorescência

$$\sigma_{X_i}(E) = b_i^\alpha \cdot \omega_i^K \cdot \sigma_i^K(E)$$

JOHANSSON, S. A. E.; CAMPBELL, J. L.  
(1988).

Seção de Choque de Ionização

## Razão de Intensidades $K\beta/K\alpha$

- SCOFIELD, J. H. Exchange corrections of K x-ray emission rates, **Phys. Ver. A**, 9, 1041, 1974.
- PERUJO, J. A. et al. Deviation of  $K\beta/K\alpha$  intensity ratio from theory observed in proton-induced x-ray spectra in the  $22 \leq Z \leq 32$  region, **J. Phys. B**, 20, 4973, 1987.

Rendimento fluorescente  $\left( \frac{\omega_K}{1 - \omega_K} \right)^{1/4} = \sum_{n=0}^3 b_n Z^n$

- BAMBYNECK, W. in Johanssen & Campbell, PIXE a novel Technique for Elemental Analysis, John Wiley and Sons, 1988.

## Seção de choque de ionização

- BRANDT, W.; LAPICKI G. **Phys. Rev. A**, 20, 465, 1979.
- BRANDT, W.; LAPICKI G. **Phys. Rev. A**, 23, 1717, 1981.
- JOHANSSON, S. A. E.; JOHANSSON, T. B. **Nucl. Instr. And Meth.**, 137,476, 1976.

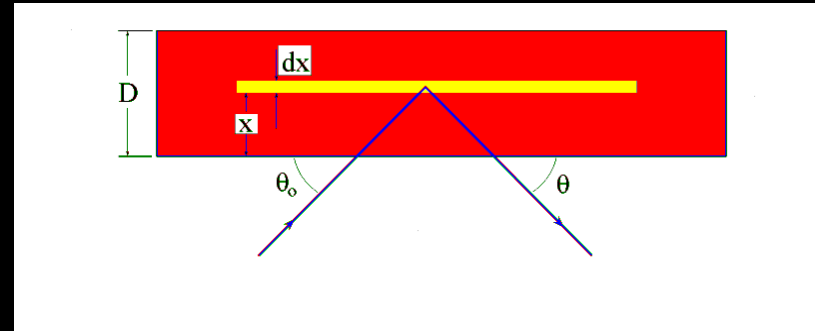
## Absorção de raios-X

BERGER, M. J.; HUBBELL, J. H. XCOM Photon Cross Sections on a Personal Computer, Gaithersburg: Center for Radiation Research NBS (National Bureau of Standards), 1988.

<http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/XCOM.html>

# XRF - Formulação básica

## Excitação monocromática



A probabilidade  $P_1$  da radiação de excitação atingir a camada  $dx$  a uma profundidade  $x$  e ângulo de incidência  $\theta_0$ :

$$P_1 = e^{-\mu_0 \cdot \rho \cdot x / \sin \theta_0}$$

matriz  
(meio)

A probabilidade  $P_2$  da radiação de excitação produzir uma vacância nos átomos de um elemento de interesse contidos na camada  $dx$ , com consequente produção de raios X característicos:

$$P_2 = \tau \cdot \omega \cdot \left(1 - \frac{1}{j}\right) \cdot b_i^\alpha \cdot \rho_n \cdot dx$$

elemento  
medido

seção de  
choque  
para efeito  
fotoelétrico

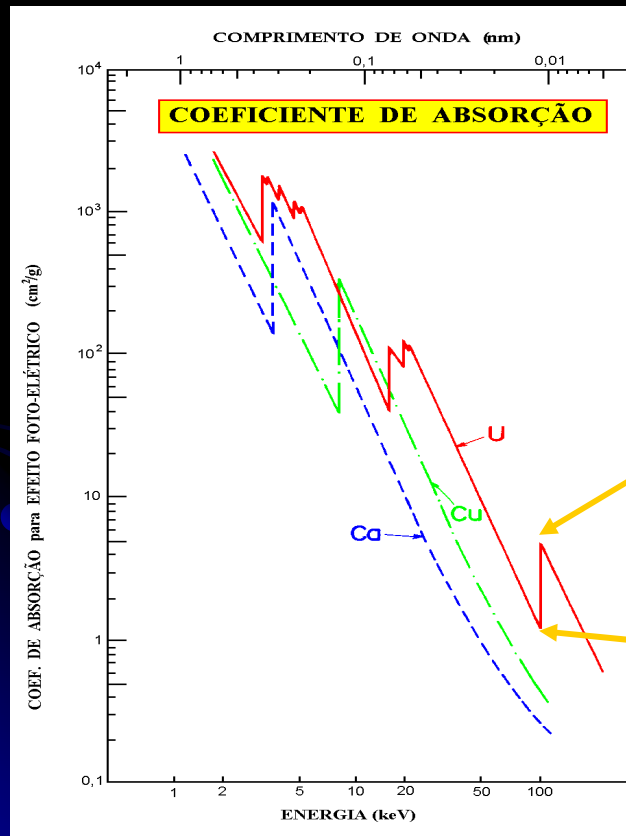
jump ratio

razão de  
emissão da  
linha  $i$

# Jump Ratio (Razão de salto)

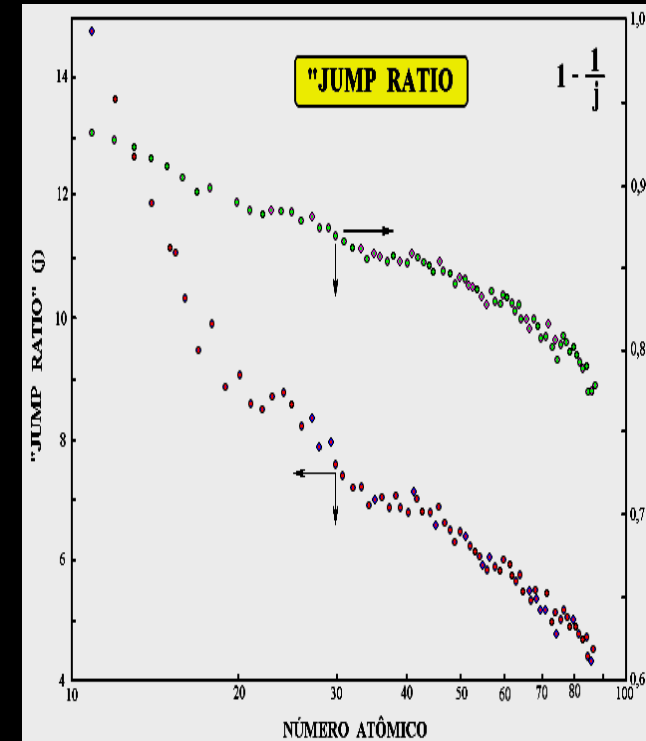
$$j_K = \frac{\tau_{K,L,M\dots}}{\tau_{L,M\dots}}$$

$$\tau_K = 1 - \frac{1}{j}$$

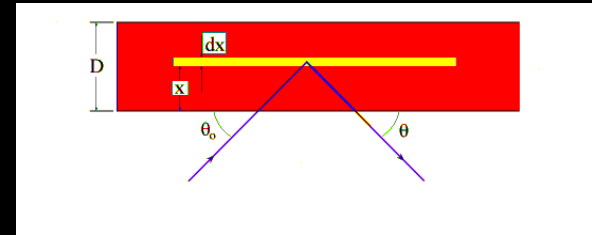


Probabilidade de ionizar elétron das camadas **K, L, M, N...**

Probabilidade de ionizar elétron das camadas **L, M, N...**



# XRF - Formulação básica



A probabilidade  $P_3$  do raio X  $K\alpha$  característico produzido na camada  $dx$  atingir o detector e ser detectado:

$$P_3 = e^{-\mu \cdot \rho \cdot x / \text{sen} \theta} \cdot \epsilon$$

A intensidade fluorescente  $dI$  é dada por :

$$dI = G \cdot e^{-\mu_0 \cdot \rho \cdot x / \text{sen} \theta_0} \cdot \tau \cdot w \cdot \left(1 - \frac{1}{j}\right) \cdot f \cdot \rho_n \cdot dx \cdot e^{-\mu \cdot \rho \cdot x / \text{sen} \theta} \cdot \epsilon$$

fator geométrico
**K**

definindo :  $\chi = \frac{\mu_0}{\text{sen} \theta_0} + \frac{\mu_n}{\text{sen} \theta}$

rx incidente  
rx característico

$$dI = G \cdot \epsilon \cdot K \cdot e^{-\chi \cdot \rho \cdot x} \cdot \rho_n \cdot dx$$

$$I = G \cdot \epsilon \cdot K \cdot \rho_n \cdot \frac{1 - e^{-\chi \cdot \rho \cdot D}}{\chi \cdot \rho}$$

Concentração elementar relativa

# XRF - Formulação básica

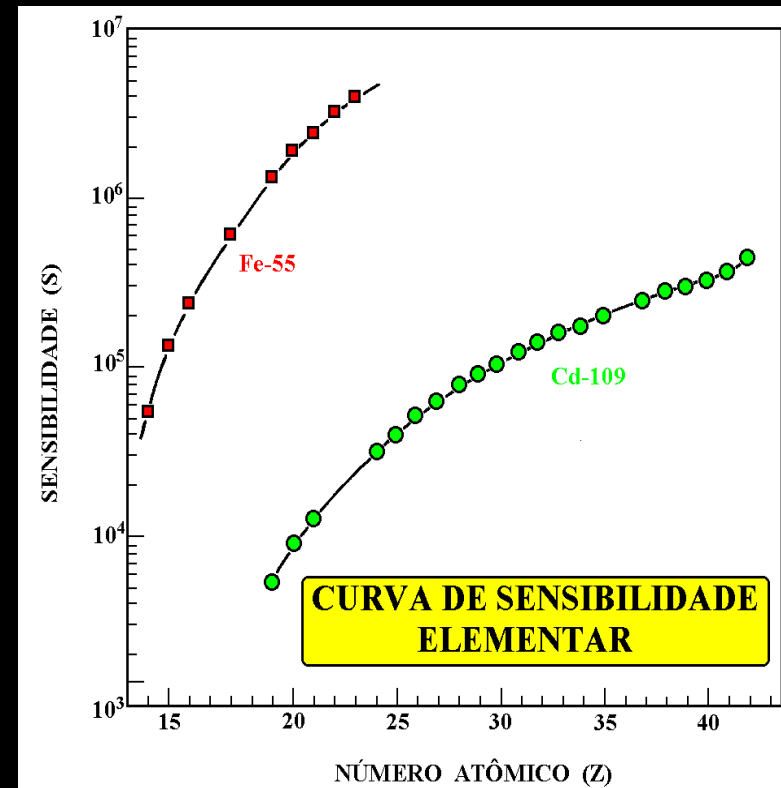
**S**ensibilidade

$$I = G \cdot \epsilon \cdot K \cdot \rho_n \cdot \frac{1 - e^{-\chi \cdot \rho \cdot D}}{\chi \cdot \rho}$$

**C**oncentração elementar relativa

$$I = S \cdot \rho_n \cdot D \left( \frac{1 - e^{-\chi \cdot \rho \cdot D}}{\chi \cdot \rho \cdot D} \right)$$

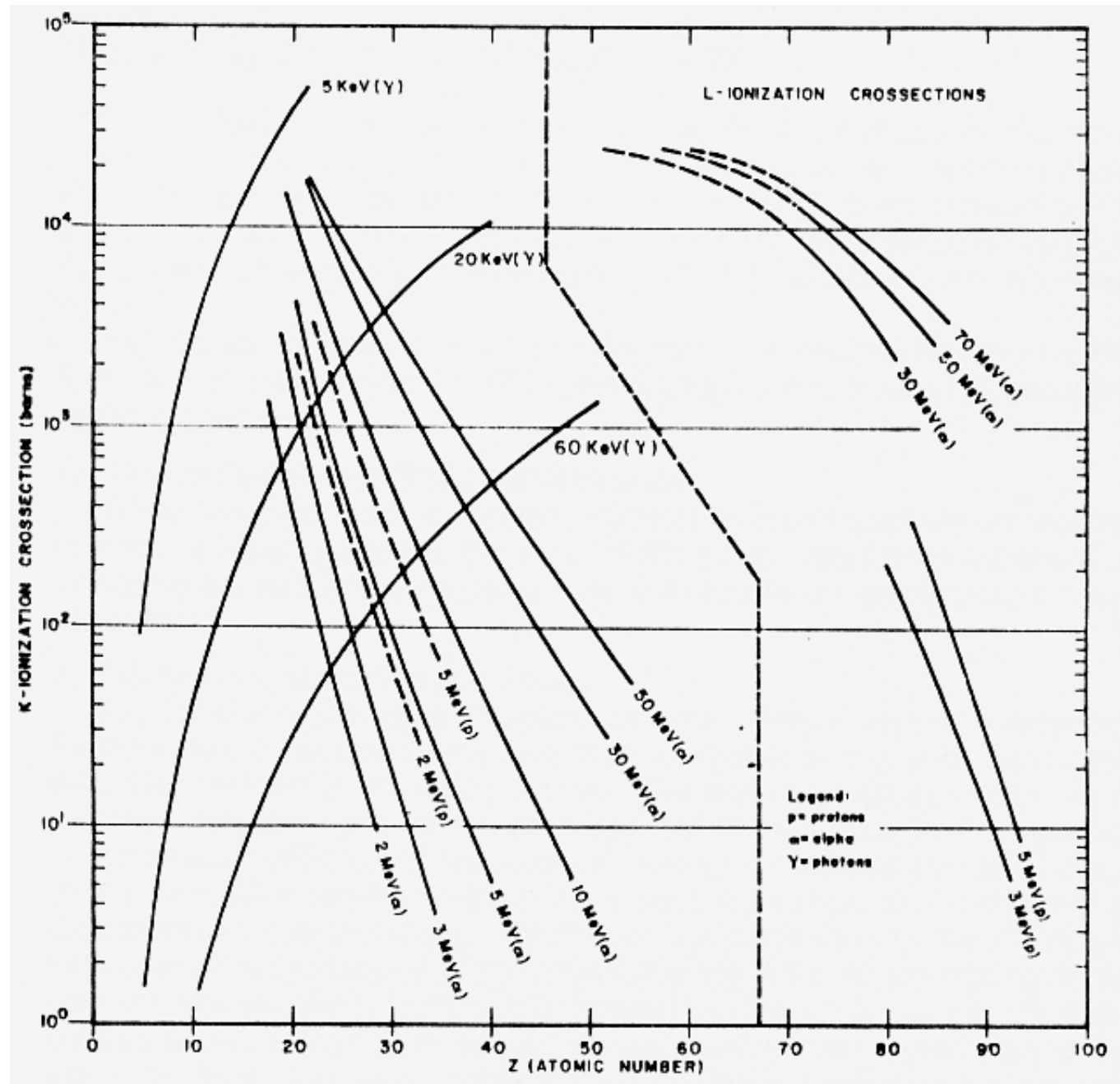
Densidade superficial



Amostra fina  $\frac{1 - e^{-\chi \cdot \rho \cdot D}}{\chi \cdot \rho \cdot D} \rightarrow 1$

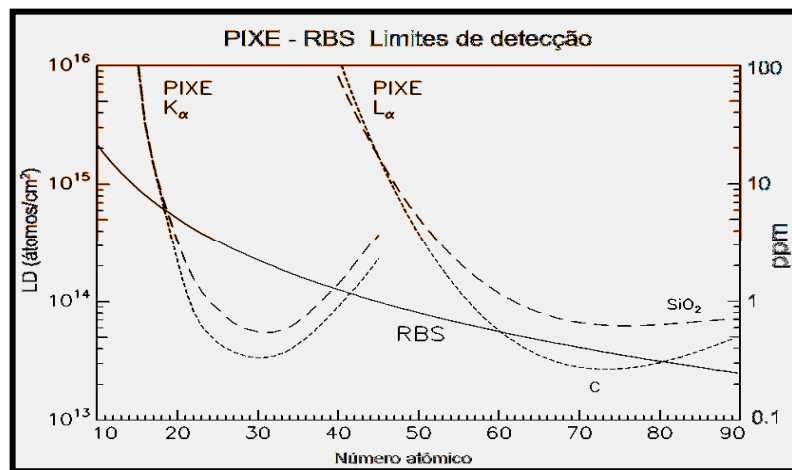
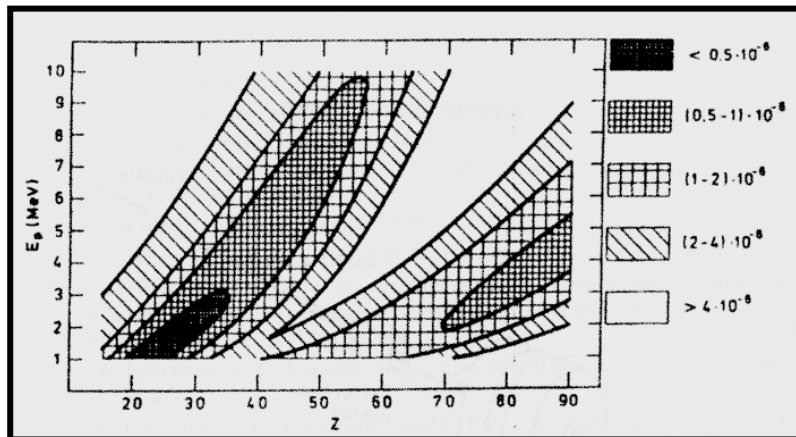
Amostra espessa  $\frac{1 - e^{-\chi \cdot \rho \cdot D}}{\chi \cdot \rho \cdot D} \rightarrow \frac{1}{\chi \cdot \rho \cdot D}$

# PIXE x XRF

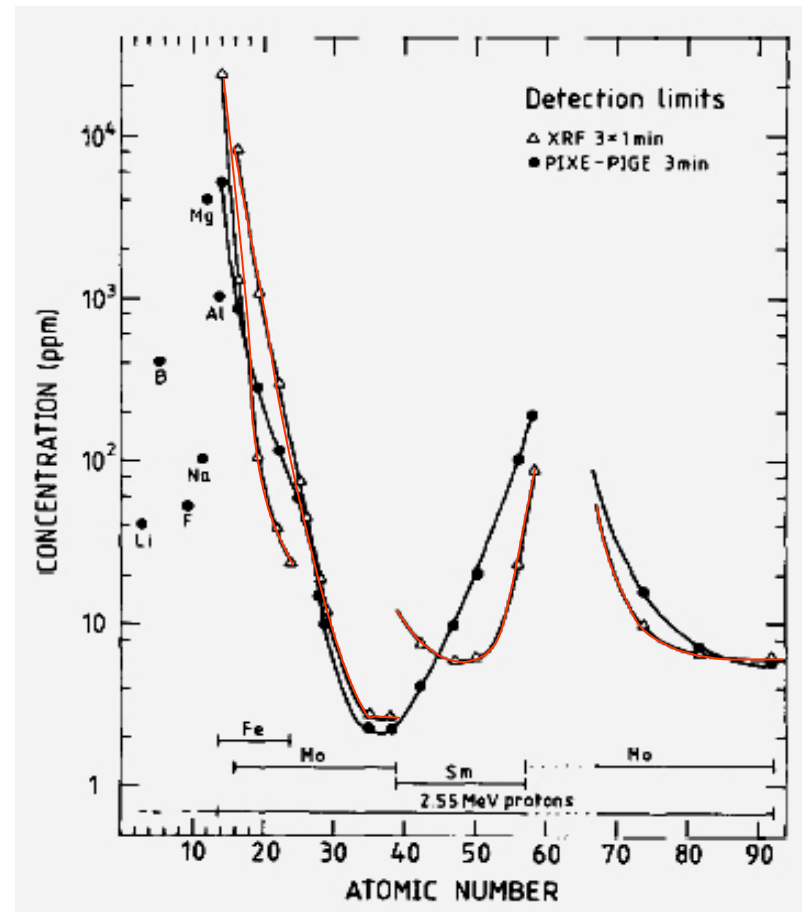


# PIXE x XRF Limites de detecção

## PIXE



## PIXE x XRF



Geological samples (pellets)  
 Ext. PIXE H<sup>+</sup>, 2.5MeV, 50nA  
 XRF (Fe, Mo, Sm) 1 min, 2000 cps.  
 Malmqwist, NIM B22 (1987) 386



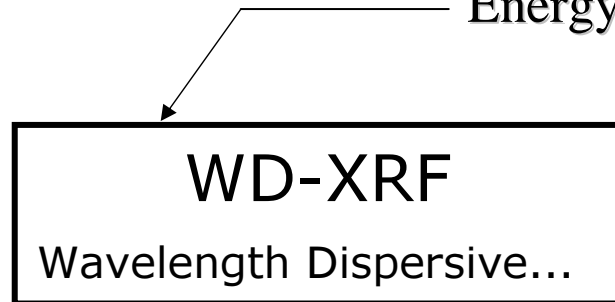
Instrumentação e parâmetros experimentais

# PIXE

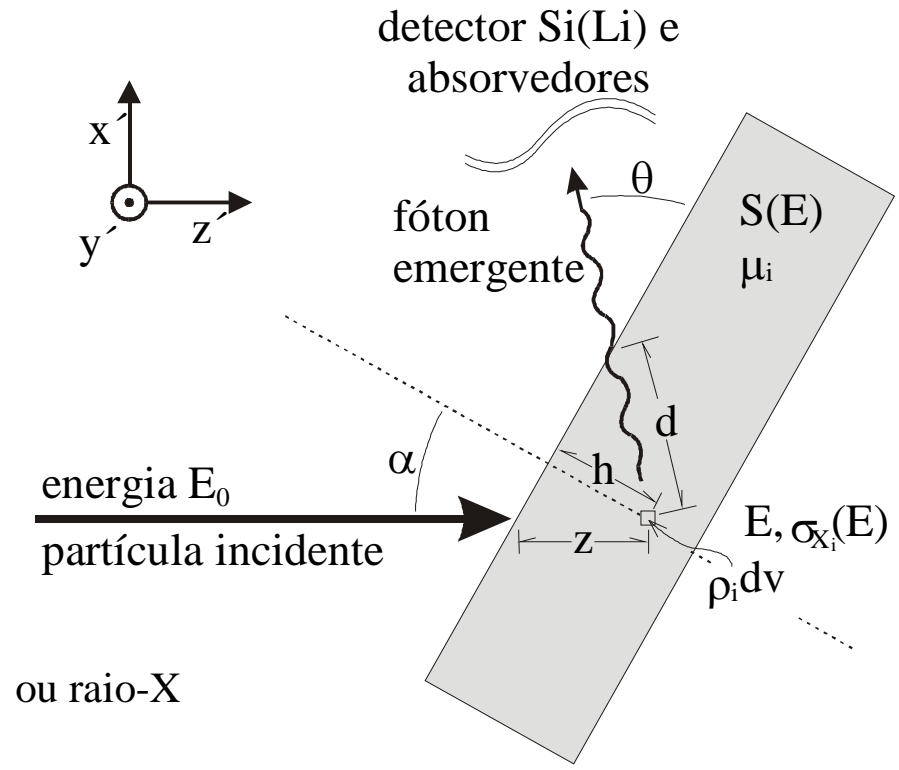
Particle Induced X-ray Emission

ED-XRF

Energy Dispersive X-Ray Fluorescence

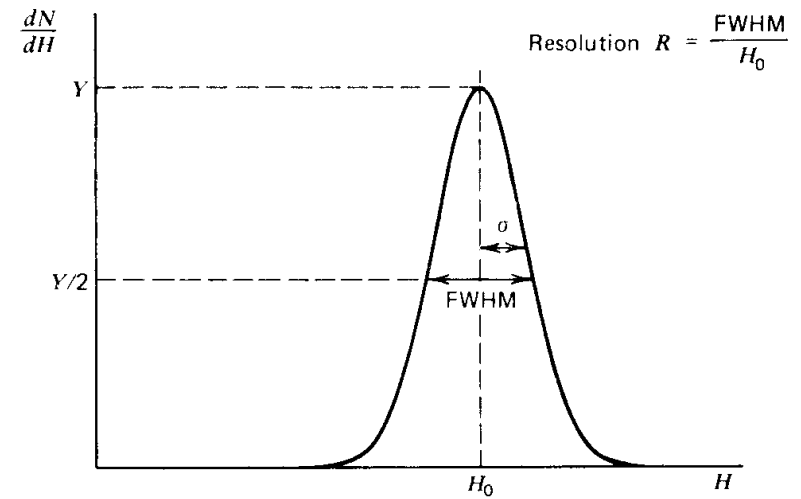
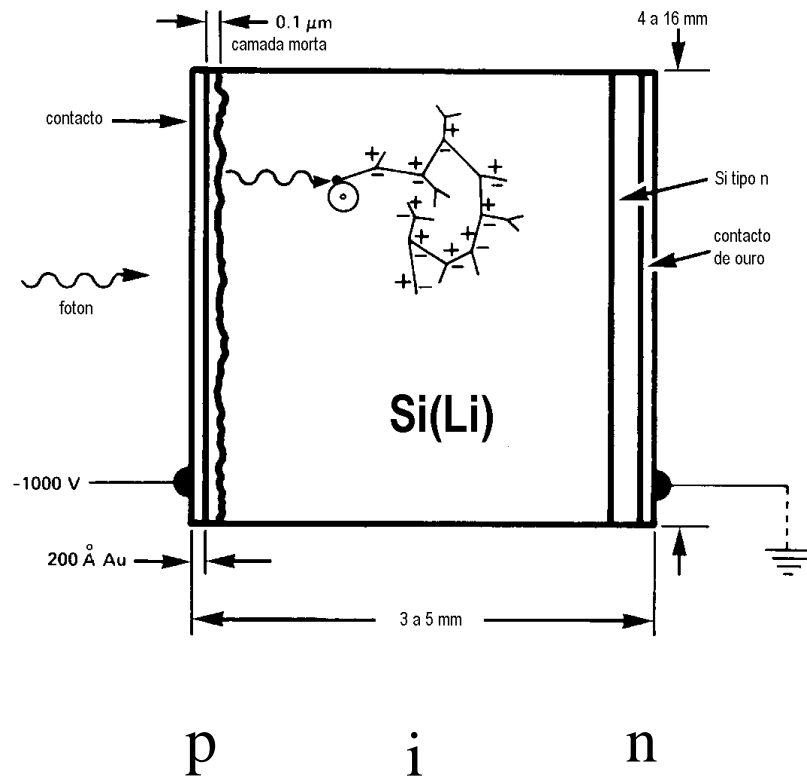


- Tabacniks, Manfredo Harri. *Análise de Filmes Finos por PIXE e RBS*. São Paulo: Instituto de Física da USP, 2000.
- Jim Heiji Aburaya, *Padronização de Análises PIXE de Amostras Sólidas em Alvos Espessos*, Dissertação de Mestrado, IFUSP 2005
- Virgílio F. Nascimento Filho, *Técnicas Analíticas Nucleares De Fluorescência de Raios X por Dispersão de Energia (ED-XRF) e por Reflexão Total (TXRF)*, Julho/99
- International Atomic Energy Agency - IAEA, *Instrumentation for PIXE and RBS*. IAEA-TECDOC-1190, Vienna, Austria, December 2000



$$dN_X = \frac{\Omega}{4\pi} \varepsilon \sigma_X(E) n(x, y) \rho_n T(z) dx dy dz$$

# Detector de Raios-X, Si(Li)

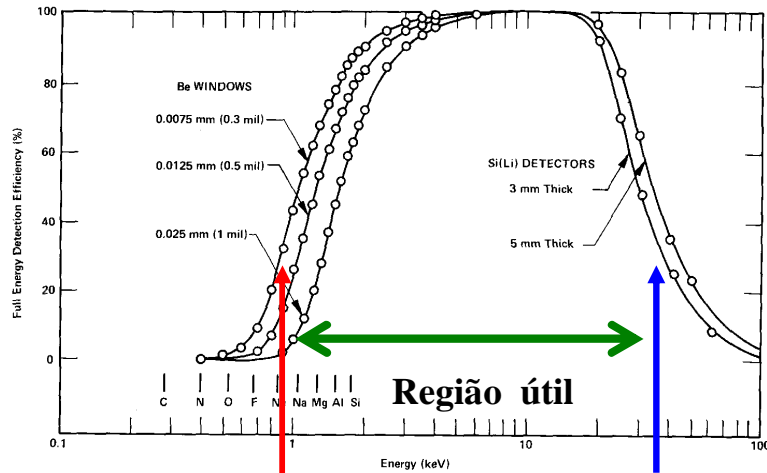


$$E = 2500 \text{ V/cm}$$

(Jenkins et al, 1981)

# Detector de Raios-X, Si(Li)

Curvas de eficiência relativa de um detector de Si(Li) com opção para 3 janelas de berílio e duas espessuras do cristal. Adaptado de Jenkins (1981)



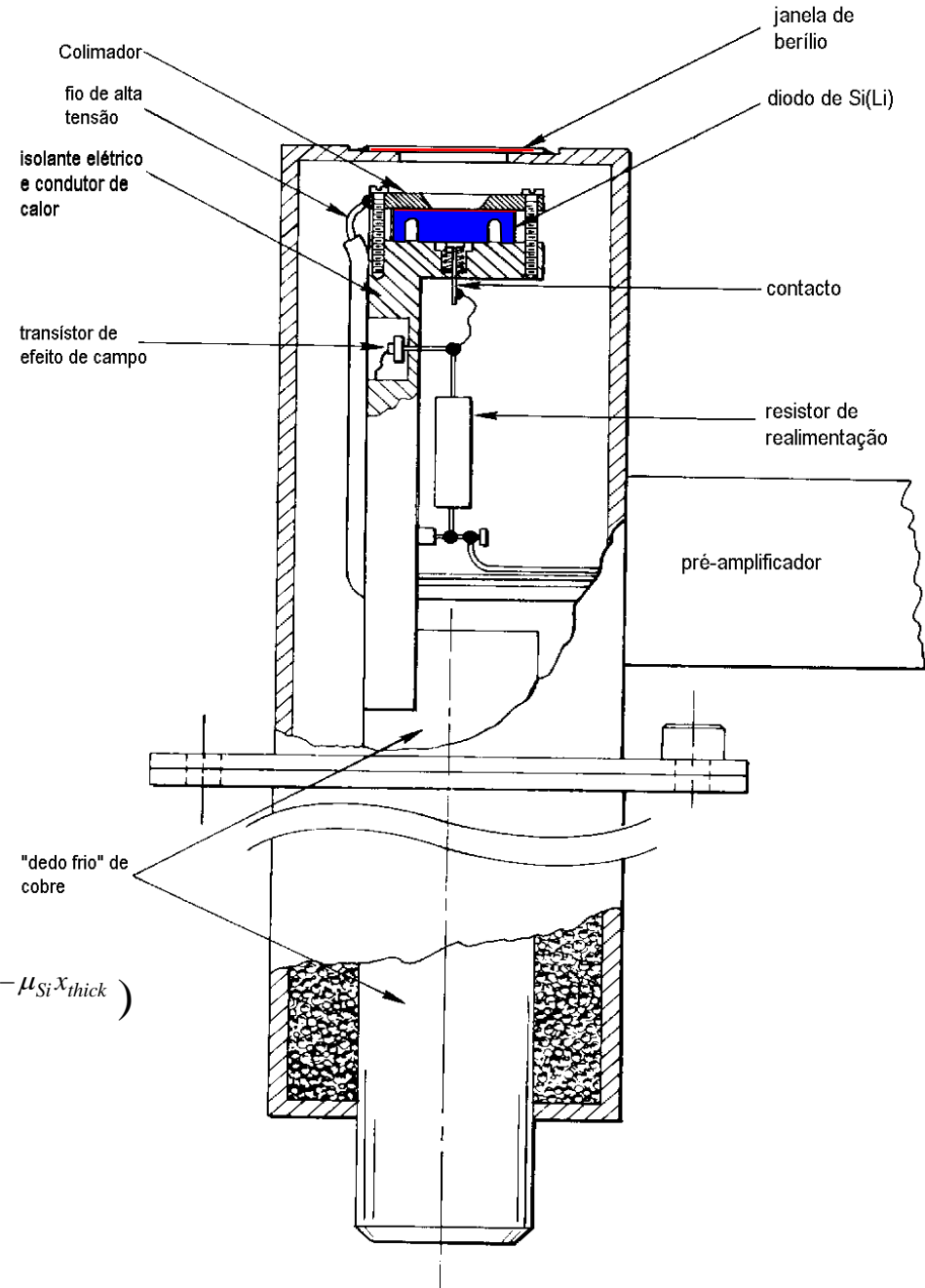
Absorvedores e Janela do Si(Li)

Espessura do cristal

$$\epsilon_{\text{det}} = \frac{I}{I_0} = e^{-\mu_{\text{Be}} x_{\text{Be}}} \cdot e^{-\mu_{\text{Au}} x_{\text{Au}}} \cdot e^{-\mu_{\text{Si}} x_{\text{dead}}} \cdot (1 - e^{-\mu_{\text{Si}} x_{\text{thick}}})$$

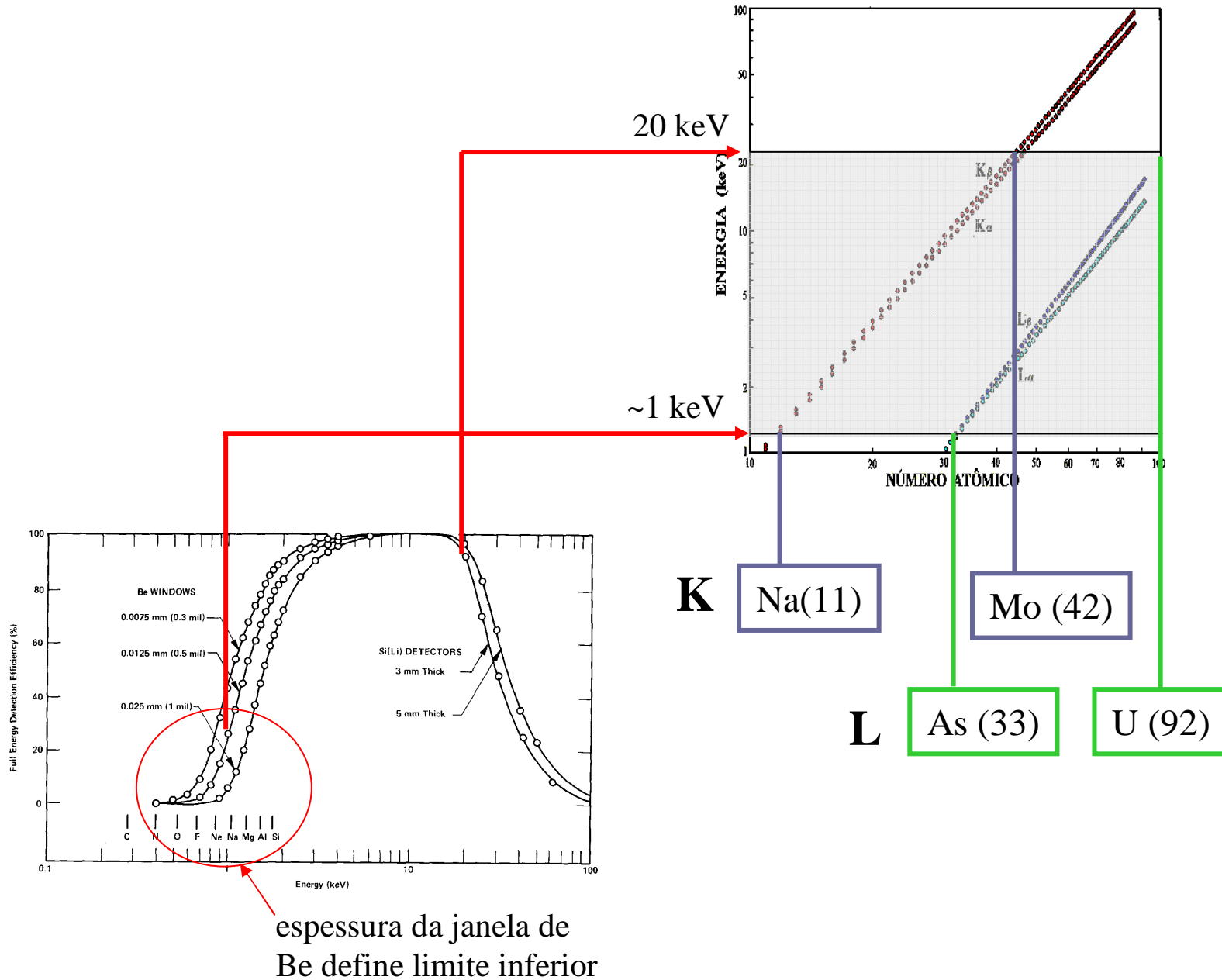
$$\epsilon_{\text{tot}} = \epsilon_{\text{det}} \cdot e^{-\mu_{\text{Abs}} x_{\text{Abs}}} \cdot \left[ r - (1 - r) e^{-\mu_{\text{FF}} x_{\text{FF}}} \right]$$

r = razão de furo no Funny Filter



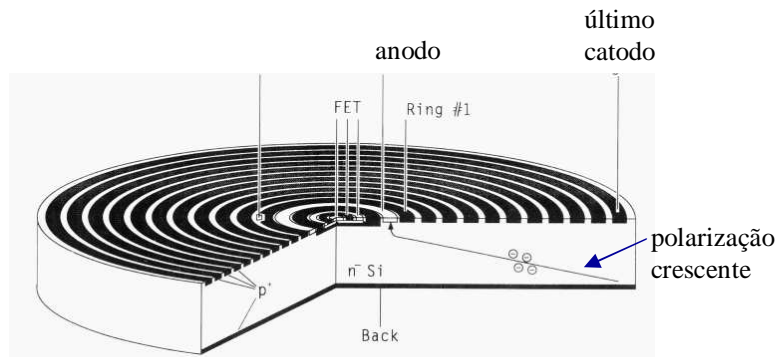
# Detector de Raios-X, Si(Li)

## Lei de Moseley



# Novos detectores de RX

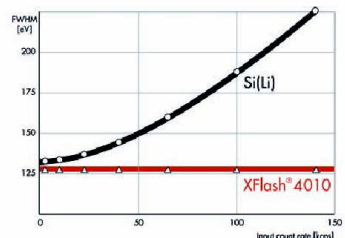
Detector de raios-X tipo Si PIN



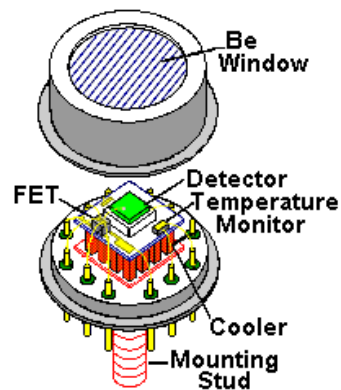
Detector de raios-X câmara CCD



Detector "Flash"  
Silicon Drift  
Peltier cooled  
até 100 kcps

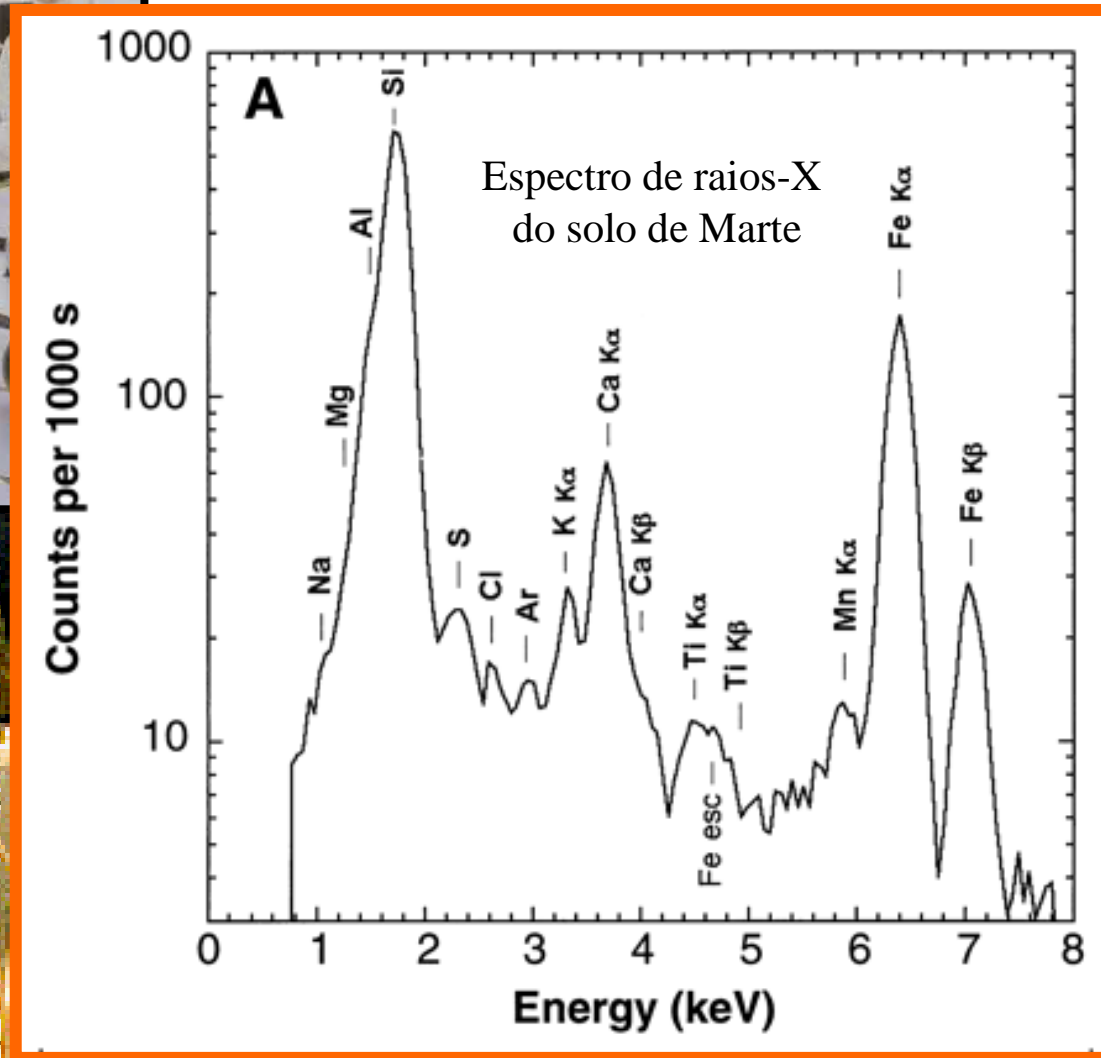
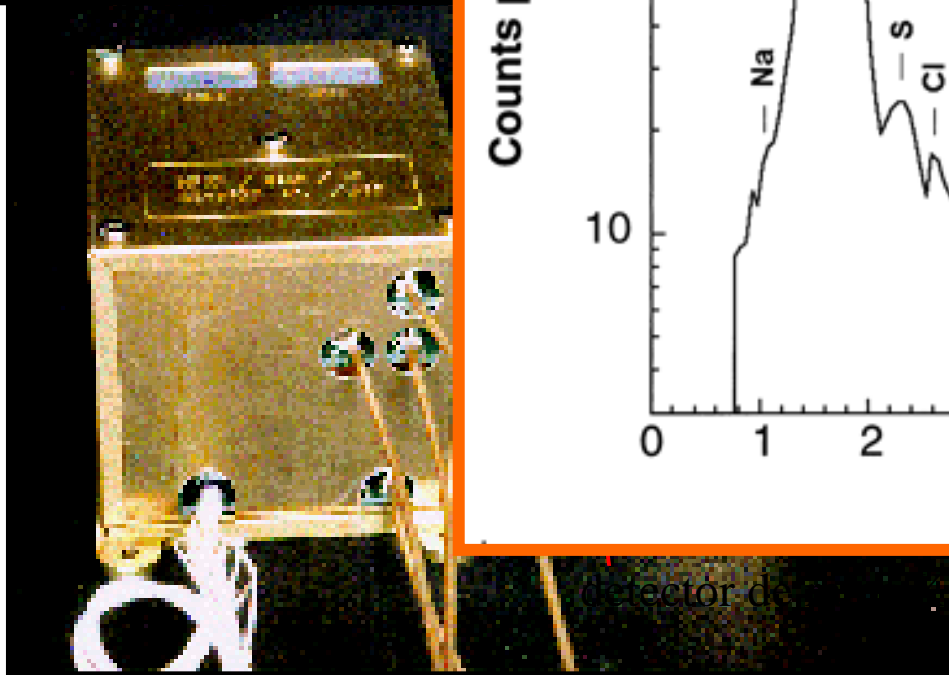


xmet 3000TX



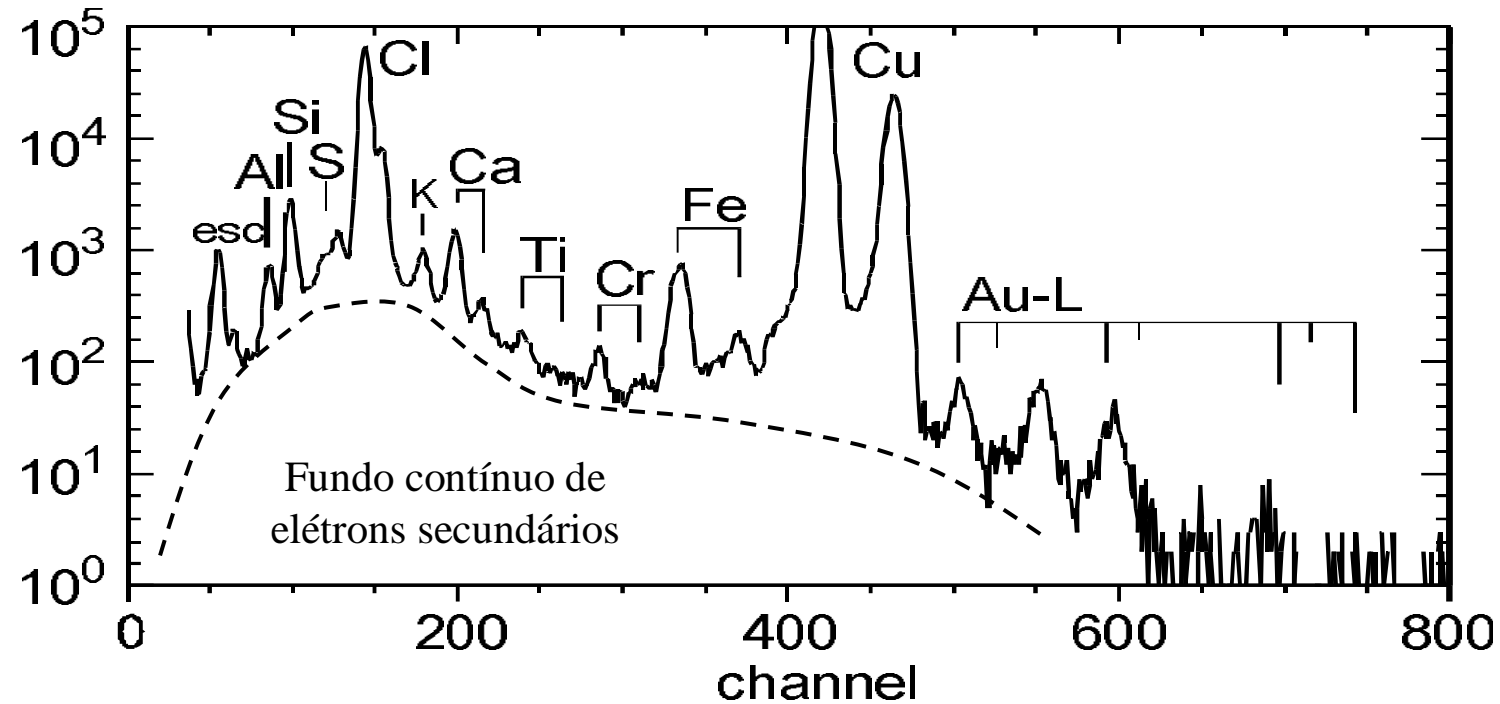
Espectrômetro XRF portátil  
[www.metorex.com](http://www.metorex.com)

# O "carro laboratório" da Mars Pathfinder (1997)





# Espectro PIXE

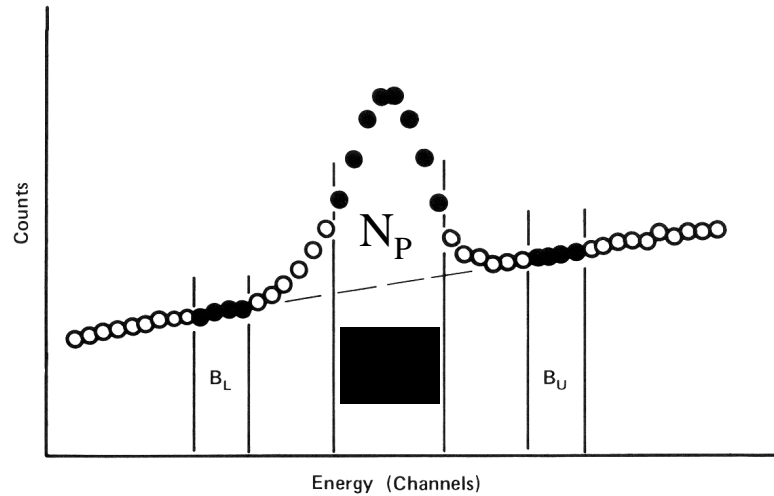


Espectro típico de uma análise PIXE com feixe de prótons com 2 MeV. Note a escala logarítmica para as contagens na vertical.

calibração em energia  $E = E_0 + G * canal$

resolução  $FWHM^2 = ruido^2 + 2.35 * Fano * E_x$

# Limite de detecção



Jenkins et al, 1981

$$N = N_P + N_B$$

$$h_B = \frac{h_L + h_U}{2} = \frac{1}{2} \left( \frac{B_L}{L} + \frac{B_U}{U} \right)$$

$$N_B = h_B * p$$

$$N_P > 3\sigma_B$$

$$N_P > 3\sqrt{N_B} \quad (p = 99.5\%)$$

# Programas para análise de espectros e cálculos auxiliares

## Ajuste de espectros

AXIL

QXAS ←

GUIPX

exige ajustes na instalação:  
Remover brancos no .spe  
WinQXAS.psl -> c:/windows

## Alvo espesso (ou semi-espesso)

GUIPX

CLARA ([www.if.usp.br/lamfi](http://www.if.usp.br/lamfi))

## Absorção de Raios-X

XCOM

## Auxiliares

Fator de Resposta do PIXE: Planilha Excel

Conversor de espectros

## Referências

- Tabacniks, Manfredo Harri. *Análise de Filmes Finos por PIXE e RBS*. São Paulo: Instituto de Física da USP, 2000.
- Jim Heiji Aburaya, *Padronização de Análises PIXE de Amostras Sólidas em Alvos Espessos*, Dissertação de Mestrado, IFUSP 2005
- Virgílio F. Nascimento Filho, *Técnicas Analíticas Nucleares De Fluorescência de Raios X por Dispersão de Energia (ED-XRF) e por Reflexão Total (TXRF)*, Julho/99
- International Atomic Energy Agency - IAEA, *Instrumentation for PIXE and RBS*. IAEA-TECDOC-1190, Vienna, Austria, December 2000
- <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/XCOM.html>