

# Universidade de São Paulo Instituto de Física

PGF5207 - Técnicas de Raios-X e de feixe iônico aplicados à  
análise de materiais

Manfredo H. Tabacniks  
FI2- 2010

## PIXE

Particle Induced X-ray Emission

## ED-XRF

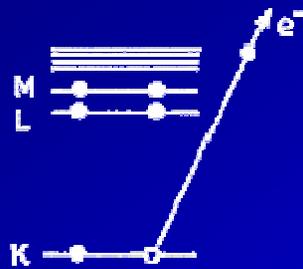
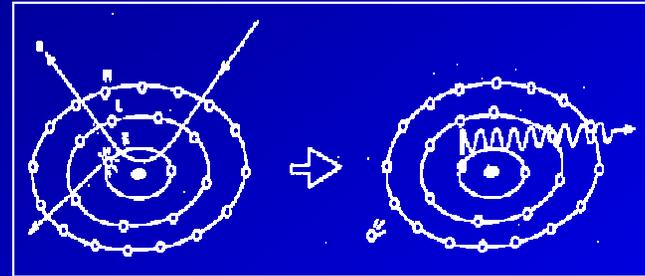
Energy Dispersive X-Ray Fluorescence

## WD-XRF

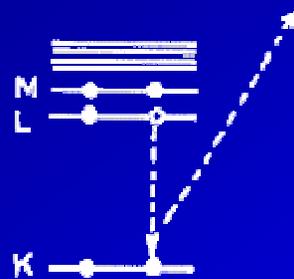
Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence

- 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*

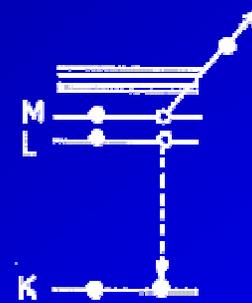
# Ionização e de-excitação Princípios Básicos



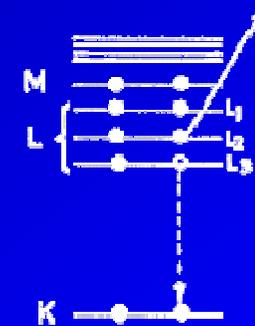
ionização



emissão de Rx



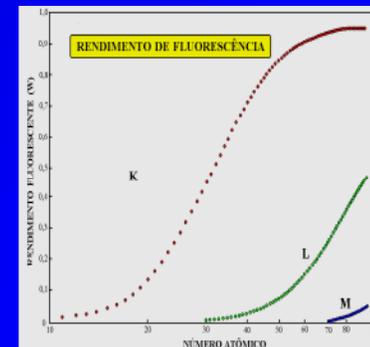
emissão de e-Auger



transição Koster-Krönig

rendimento fluorescente

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



Adaptado de Govil, I. M., Current Science, Vol. 80, No. 12, 25 June 2001

M.H. Tabacniks, IFUSP PGF5207 2010

# Espectros de raios-X EDX

Intensidades relativas



transições de dipolo

$$\Delta s \neq 0$$

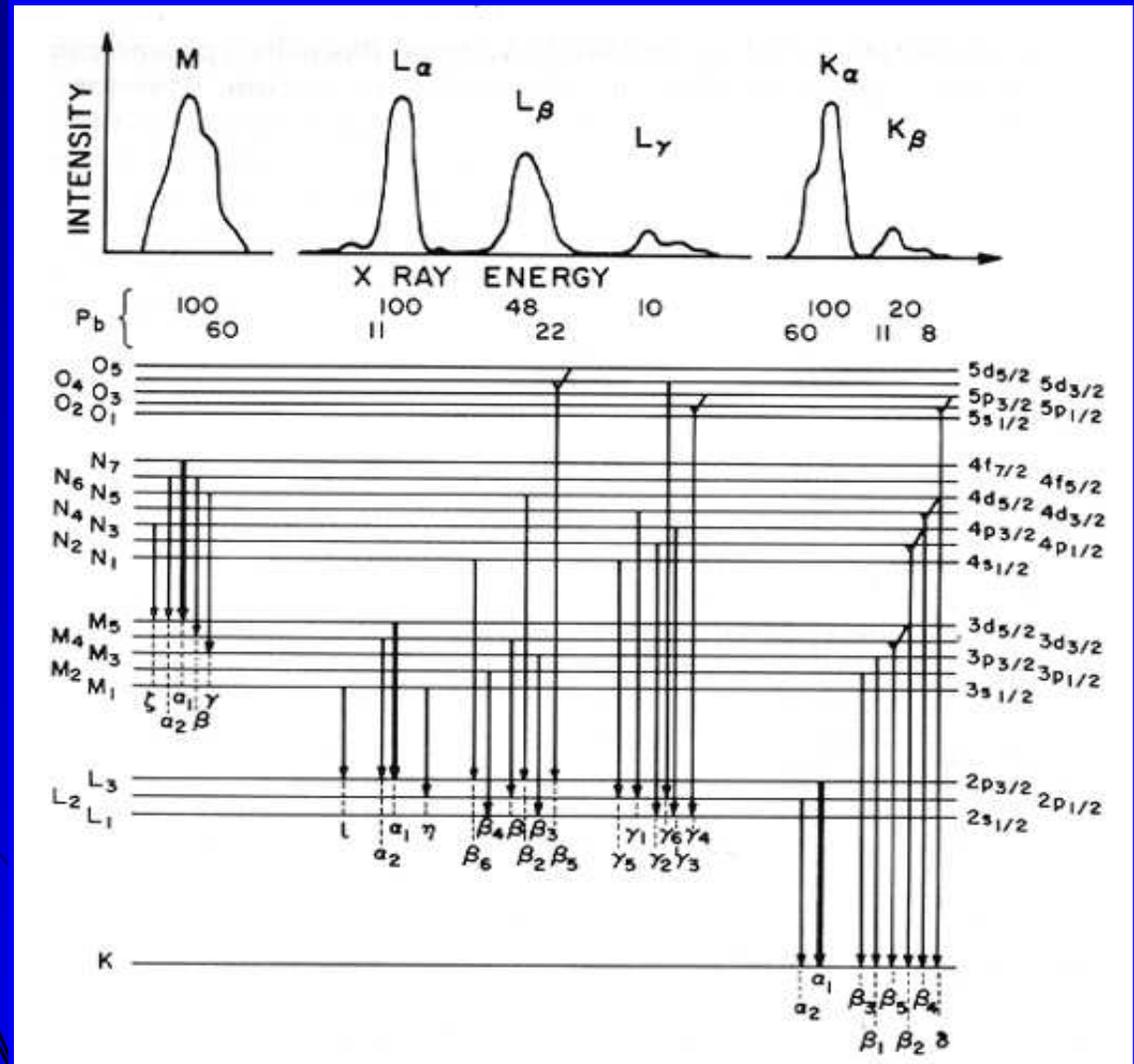
$$\Delta j = 0, \pm 1$$

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

Espectro M

Espectro L

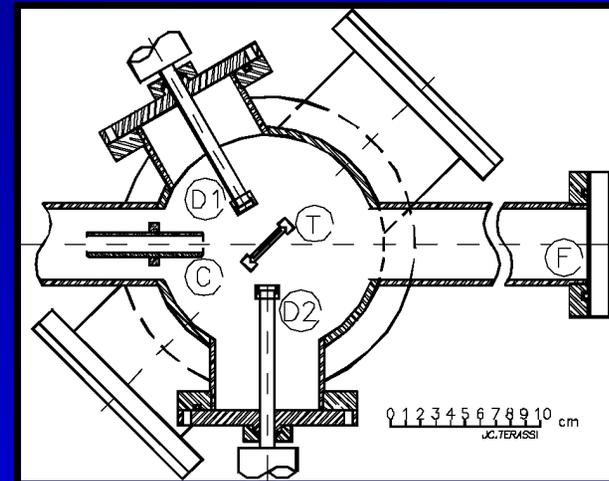
Espectro K



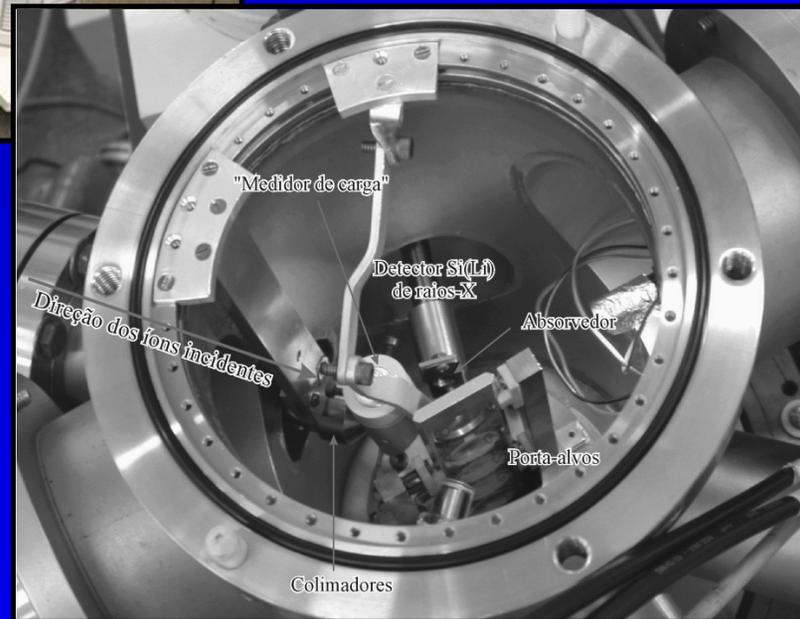
# Equações do PIXE

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

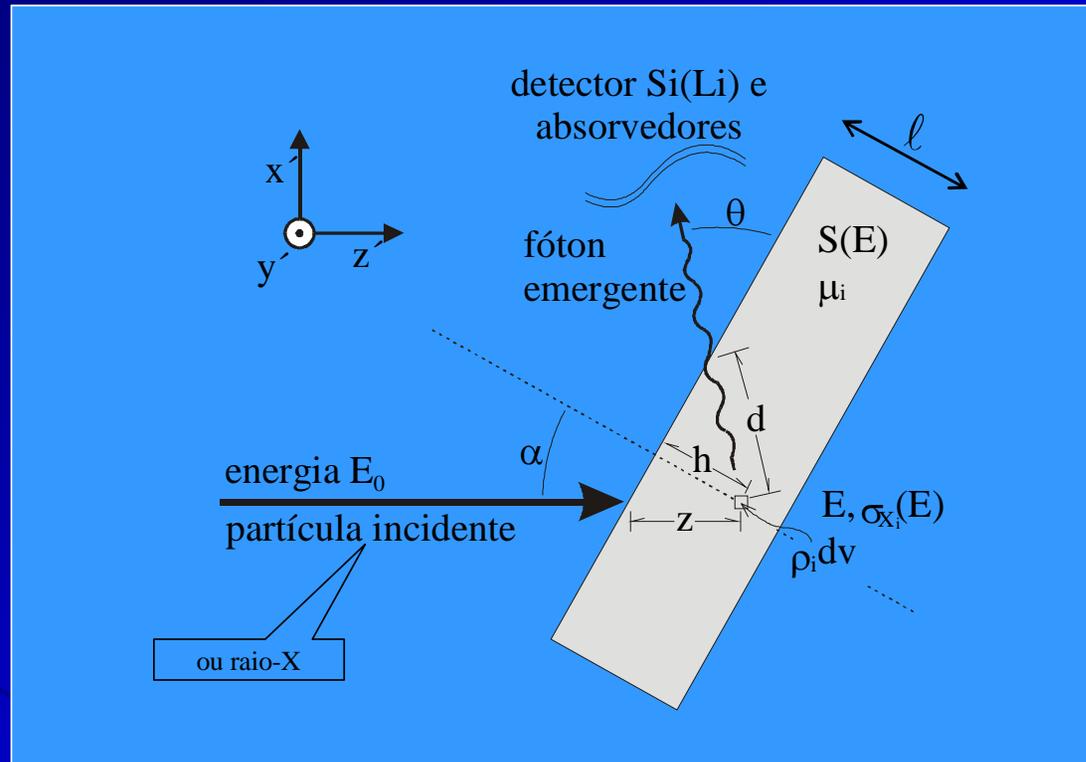
# PIXE: arranjo experimental



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



# Geometria experimental: PIXE ou ED-XRF



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

# 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

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

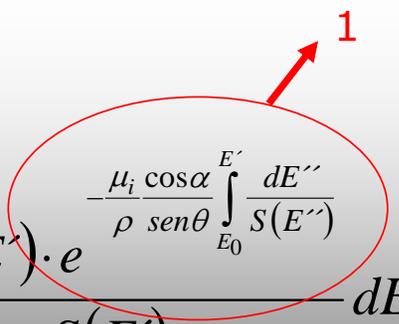
Energia inicial das partículas incidentes

Seção de choque de produção de raios X

Freamento das partículas incidentes

## Equação geral do PIXE: alvo fino

Auto absorção de raios X desprezível

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


## Equação geral do PIXE: alvo fino

Freamento 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

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



## 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

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

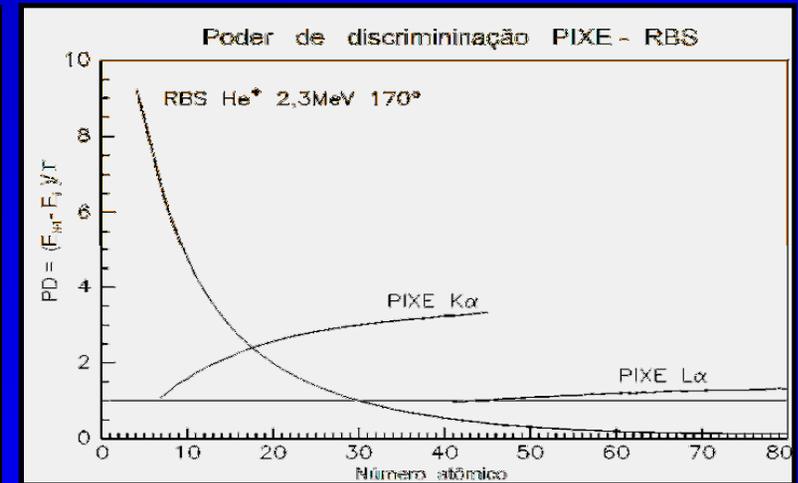
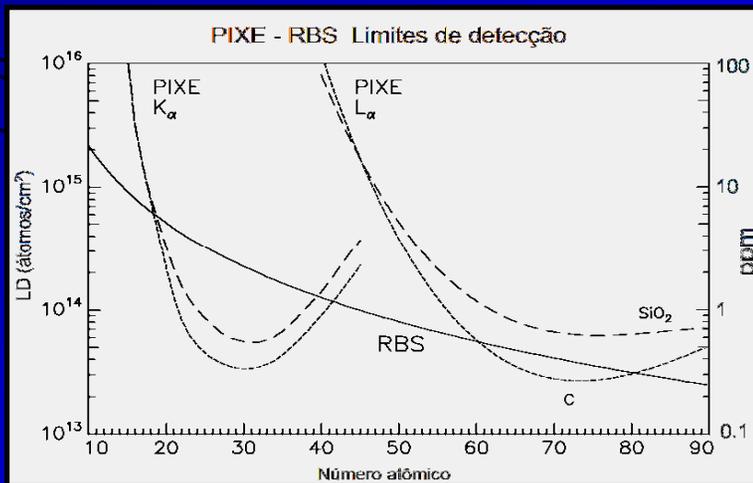
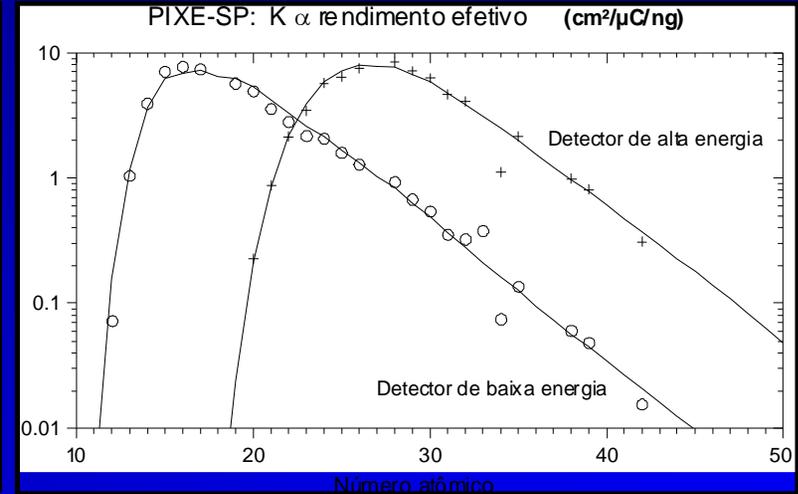
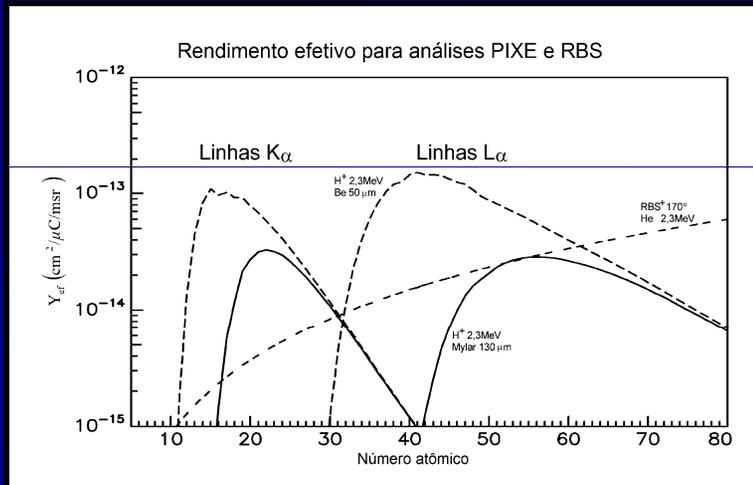
Fator de resposta

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

Medidas Experimentais

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

# Resumo Gráfico: Calibração e Limites de Detecção



# PIXE de amostras espessas

Em analogia ao fator de resposta de alvo fino...

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

..o fator de resposta de alvo grosso calculado por:

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

Arranjo Experimental

reduziria o cálculo de amostras espessas para:

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

Com a diferença que a espessura (at/cm<sup>2</sup>) passa a ser uma razão de densidades e o resultado expresso em µg/g (ppm)

# 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 ( a solução depende da matriz da amostra):

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

$\frac{\mu_i \cos \alpha}{\rho \sin \theta} \int_{E_0}^{E'} S(E'') dE''$

# PIXE de amostras espessas (o fator de correção $F_i$ )

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

alvo espesso

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

alvo fino

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

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

# Clara: Configuração e Parâmetros Iniciais

**Cálculo da eficiência de produção de raios X**

Geometria do arranjo experimental

Alpha - (deg): 75    Fator geom.: 0.732  
 Theta - (deg): 75

Ponto de interação

Proton incidente  $\alpha$     Fóton emergente  $\theta$

Modo de cálculo

Energia inicial - keV: 2000  
 Avo fino  
 Energia final - keV: 25  
 Energia final efetiva

Modelo de "Stopping Power"

Ziegler (1985)

Modelo de "Ionization cross-section"

Johanson and Johanson  
 Campbell

Modelo de "Fluorescence yield"

Fanhynek  
 W.L. médio

Atenuação para energia final efetiva

	$I/I_0$ - (%)	$h$ - (cm)
	1	2.257E-01
Fóton:	2.379E-11	2.379E-01
Próton:	5.249E-01	3.249E-01

Composição da matriz

Z	% em massa
1	3.8849
2	13.8501
0	82.2650

qtde. de elementos: 3  
 Densidade: 1.0000 g/cm3

Identificação da linha de interesse

Z	Símb	Nome	Linha
26	Fe	Iron	K $\alpha$

Energia do fóton - (eV): 6403.0  
 $m/\rho$  - (cm2/g): 1.000E+01

Passo da integração

Automático    Ptos: 100

Resultados para alvos finos

* Proton *	Ômega (Z)	b (Z)	Sigma K	=	Sigma X
<eV	Barbynek	K $\alpha$	cm2	=	cm2

Resultados

Energia final	h	t fóton	t próton	$\rho \cdot t$	$I/I_0$	Integral	...	Integral X
<eV	(cm)	(cm)	(cm)	(g/cm2)	%	(g)	...	(g)

Calcular

Fator de correção para alvos finos

Integral X / Sigma X	
	(g/cm2)

Visualiza resultado

# Clara: Configuração da Matriz

Composição das matrizes

Matriz principal

Ác. Lúico

	Z	Símb	Nome	Massa	E	% massa
1	1	H	Hydrogen	1.0079	3	3.8849
2	5	B	Boron	10.811	1	13.890
3	8	O	Oxygen	15.9994	4	82.2250
4						0.0000
5						0.0000
6						0.0000
7						0.0000
8						0.0000
9						0.0000
10						0.0000

Densidade - (g/cm<sup>3</sup>):

Matriz secundária

	Z	Símb	Nome	Massa	E	% massa
1						0.0000
2						0.0000
3						0.0000
4						0.0000
5						0.0000
6						0.0000
7						0.0000
8						0.0000

Composição das matrizes

Matriz principal

Ác. Lúico

	Z	Símb	Nome	Massa	E	% massa
1	1	H	Hydrogen	1.0079	3	3.8849
2	5	B	Boron	10.811	1	13.8901
3	8	O	Oxygen	15.9994	4	82.2250
4						0.0000
5						0.0000
6						0.0000
7						0.0000
8						0.0000
9						0.0000
10						0.0000

Concentração da matriz principal - (%): 90.0000

Densidade - (g/cm<sup>3</sup>): 1.2666 1 1.2666

Matriz secundária

HAP

	Z	Símb	Nome	Massa	E	% massa
1	20	Ca	Calcium	40.078	10	39.8936
2	15	P	Phosphorus	30.97376	6	18.4937
3	8	O	Oxygen	15.9994	26	41.4070
4	1	H	Hydrogen	1.0079	2	0.2017
5						0.0000
6						0.0000
7						0.0000
8						0.0000
9						0.0000
10						0.0000

Concentração da matriz secundária - (%): 10

Densidade - (g/cm<sup>3</sup>): 1.5500 1 1.5500

# Clara: Cálculo do Fator de Correção

Clara XVI

File View Window

X-ray yield calc

Geometry

Alpha - (deg): 45 geom. factor  
 Theta - (deg): 75 0.7321

interaction point

proton photon

Calc mode

Initial energy - keV: 2500

Final energy - keV: 25

Effective final energy

Stopping Power model

Ziegler (1985)

Ionization cross-section model

Johanson and Johanson

Campbell

Effective final energy attenuation

1/fo - (%): 1

h - (cm): 4.357E-01

rho \* t t

(g/cm2) (cm)

Photon: 5.788E-01 4.510E-01

Proton: 7.900E-01 6.161E-01

Integral step

Automatic Ptos: 100

Thin target results

* Proton *	Omega (Z)	b (Z)	Sigma K	=	Sigma X
keV	Bambynek	Ka	(cm2)	=	(cm2)
2,500.00	4.8571E-01	8.7640E-01	1.0648E-22	=	4.5325E-23

Results

final energy	h	photon t	proton t	rho*t	1/fo	Integral	...	Integral X
keV	(cm)	(cm)	(cm)	(g/cm2)	%	(g)	...	(g)
25.00	6.8064E-03	7.1293E-03	9.7388E-03	1.2487E-02	92.9795	5.4640E-25	...	2.3259E-25

Correction factor

Integral X / Sigma X: 5.1316E-03

(g/cm2)

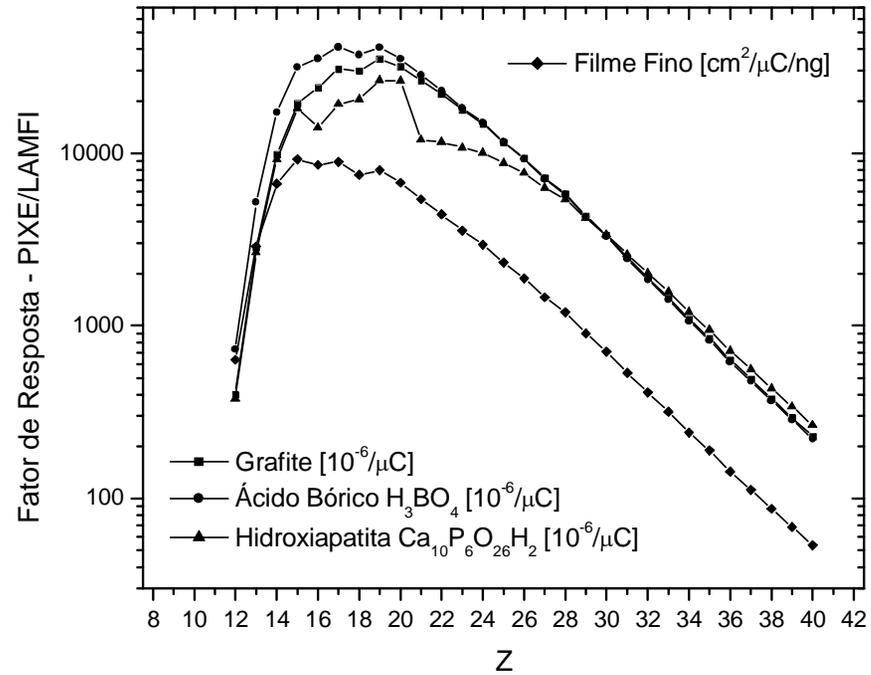
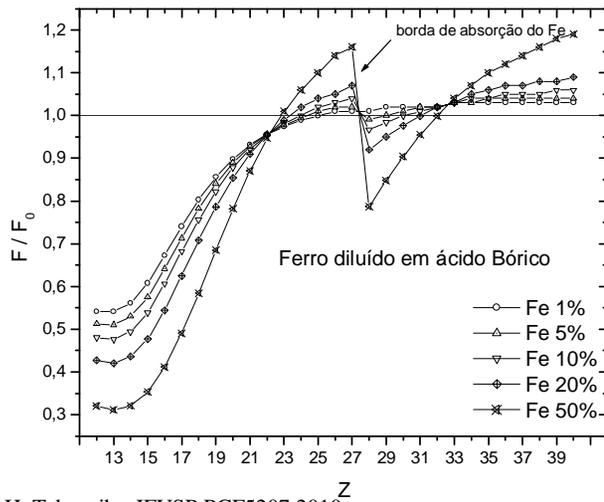
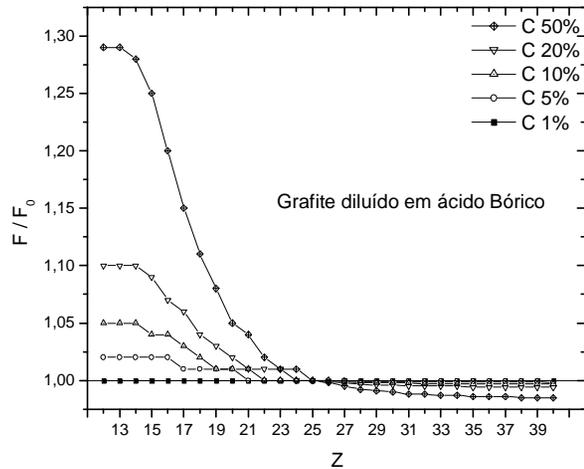
Log results

Laboratório de Análises de Materiais por Feixes Iônicos - Instituto de Física - Universidade de São Paulo - Brasil  
 Ion Beam Material Analysis Lab. - Physics Institute - University of São Paulo - Brazil  
<http://www.if.usp.br/lami/clara>  
 ABURAYA, J. H. <caburaya@if.usp.br>

Results - double click: 1...

Element	Line	Correction
14	Kal	1.4915E-03
15	Kal	2.1192E-03
16	Kal	2.8324E-03
17	Kal	3.5273E-03
18	Kal	4.1223E-03
19	Kal	4.5841E-03
20	Kal	4.9137E-03
21	Kal	5.1817E-03
22	Kal	5.2629E-03
23	Kal	5.3313E-03
24	Kal	5.3654E-03
25	Kal	5.3600E-03
26	Kal	5.3242E-03
27	Kal	5.2952E-03
28	Kal	5.2385E-03
29	Kal	5.1868E-03
30	Kal	5.1816E-03

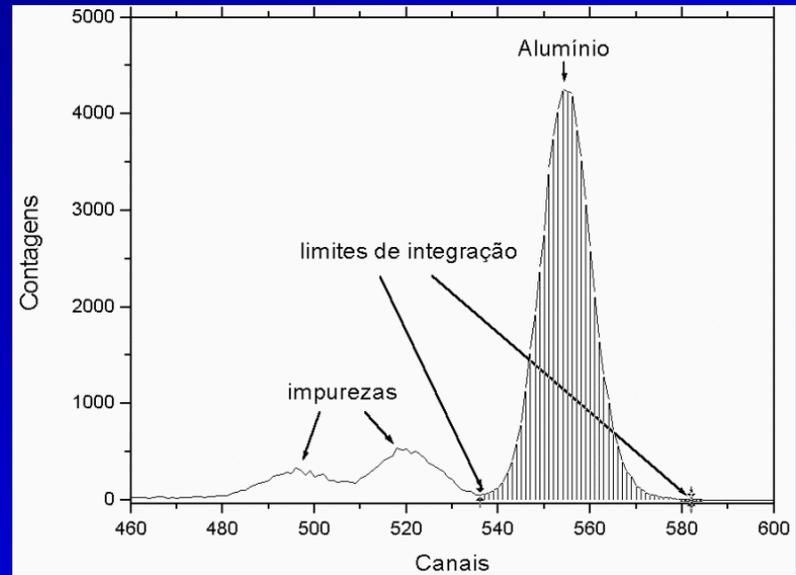
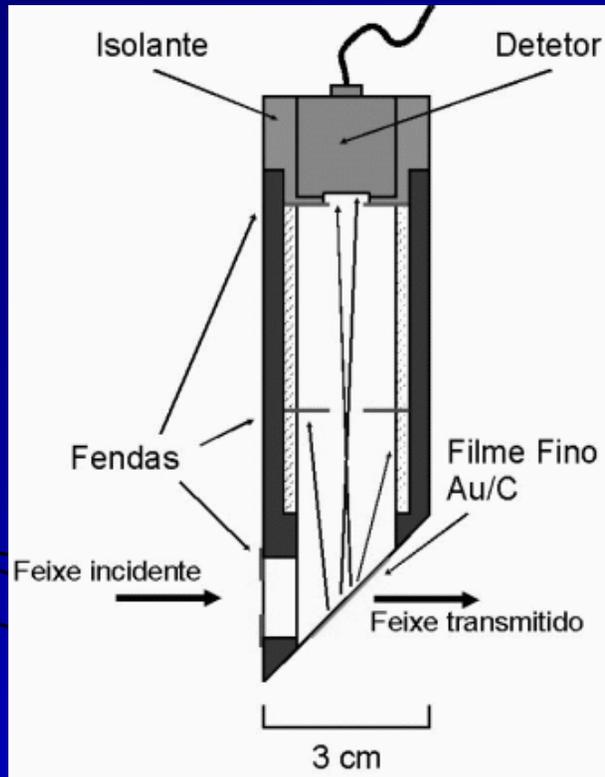
# Clara



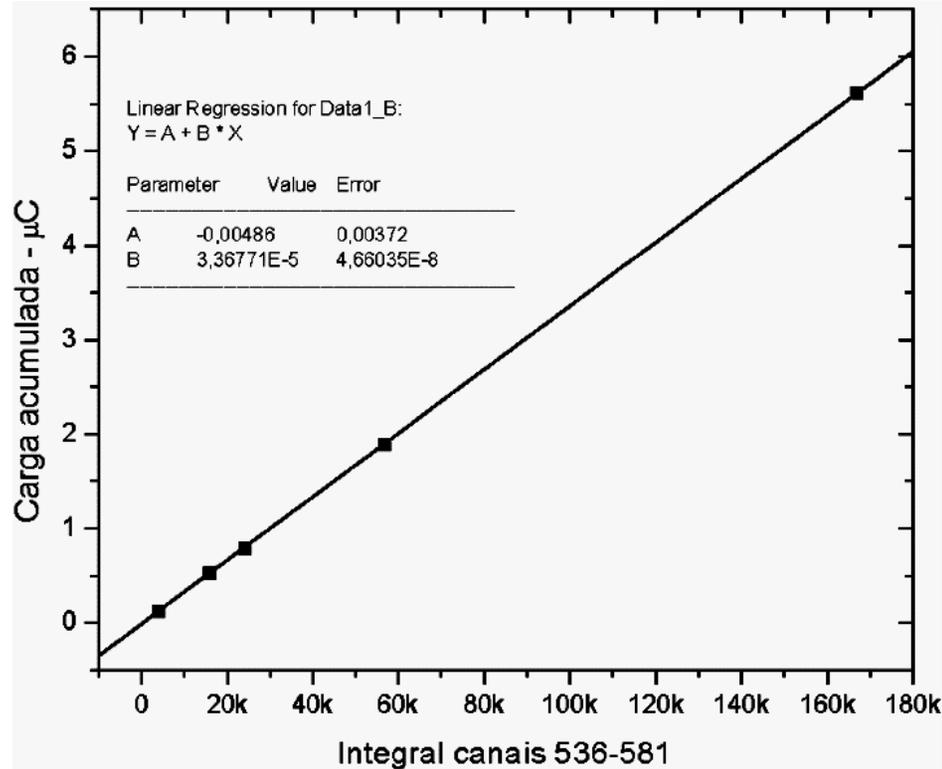
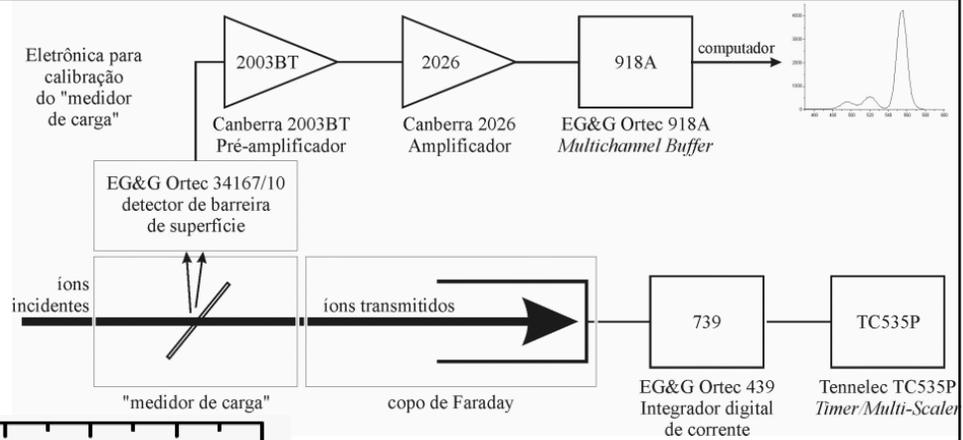
$$F_i = \frac{1}{\sigma_i(E_0)} \int_E^E \frac{\sigma_i(E') \cdot e^{-\mu_{\text{mat}}(E)Z}}{S(E)} dE$$

Matriz conhecida

# Medidor de carga integrada



# Calibração do Mq



incerteza na medida de carga

$$\Delta q/q = 0,1\%$$

# Bancos de dados

## Razão de Intensidades Kb/Ka

- 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.

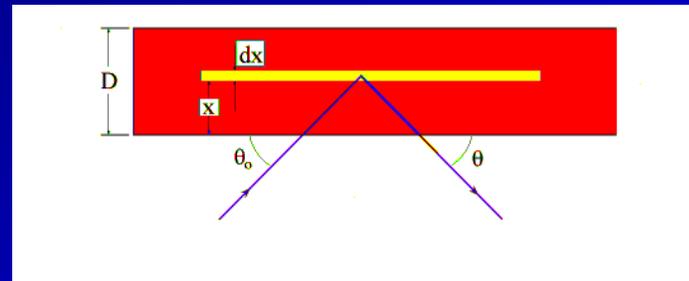
## Absorção de raios-X

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

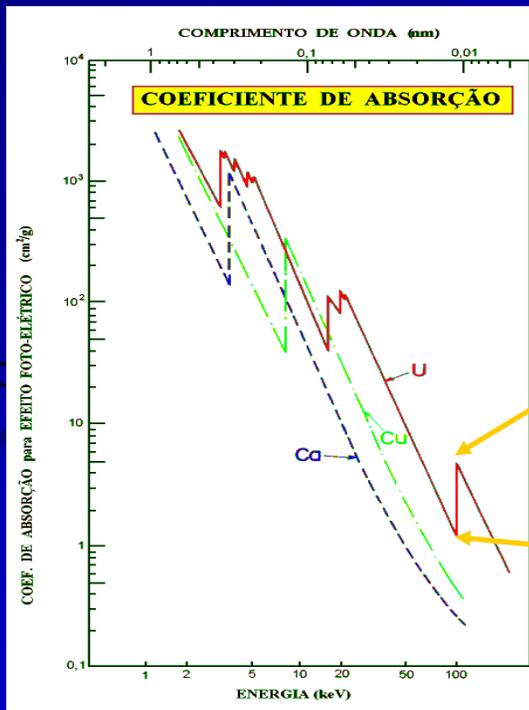
jump ratio

razão de  
emissão da  
linha  $i$

# Jump Ratio (Razão de salto)

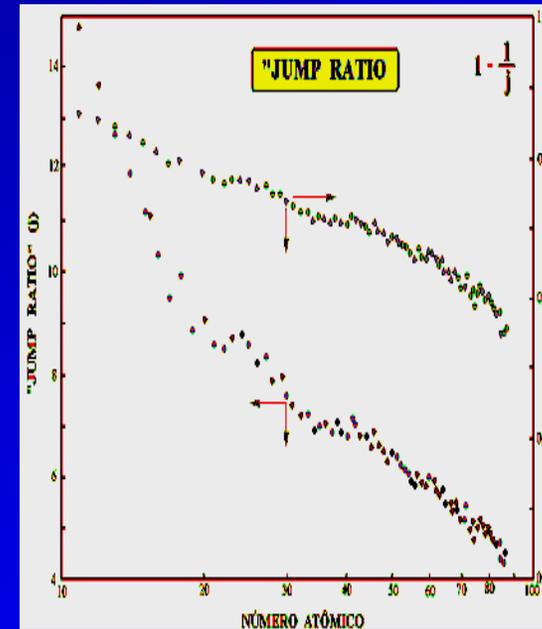
$$j_K = \frac{\tau_{K,L,M\dots}}{\tau_{L,M\dots}}$$

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

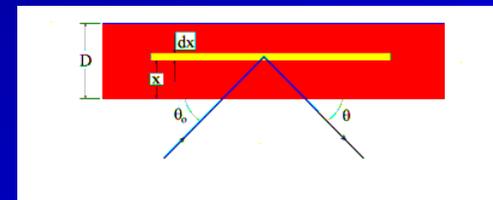


Probabilidade de ionizar elétron das camadas K, L,M,N...

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:

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

A intensidade fluorescente  $dI$  é dada por :

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

$\left(1 - \frac{1}{j}\right) \cdot f$ 
  
**K**

fator geométrico

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

rx incidente  
rx característico

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

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

Concentração elementar relativa

# XRF - Formulação básica

Sensibilidade

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

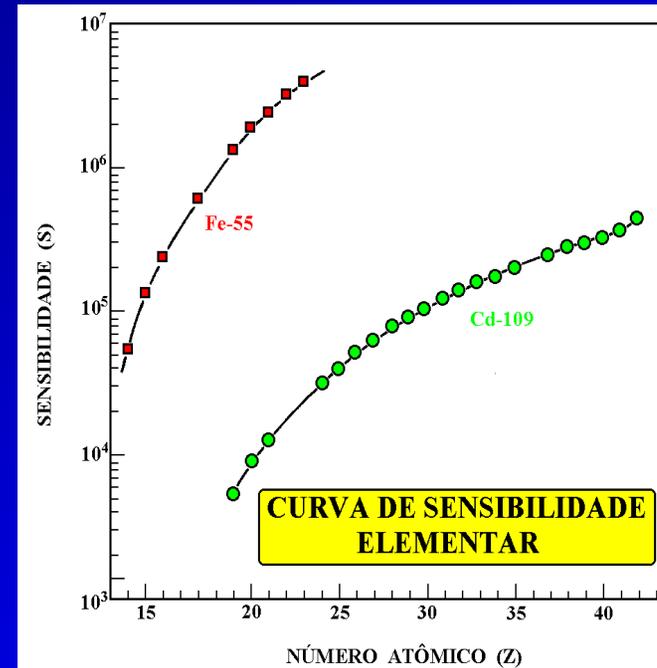
Concentração elementar relativa

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

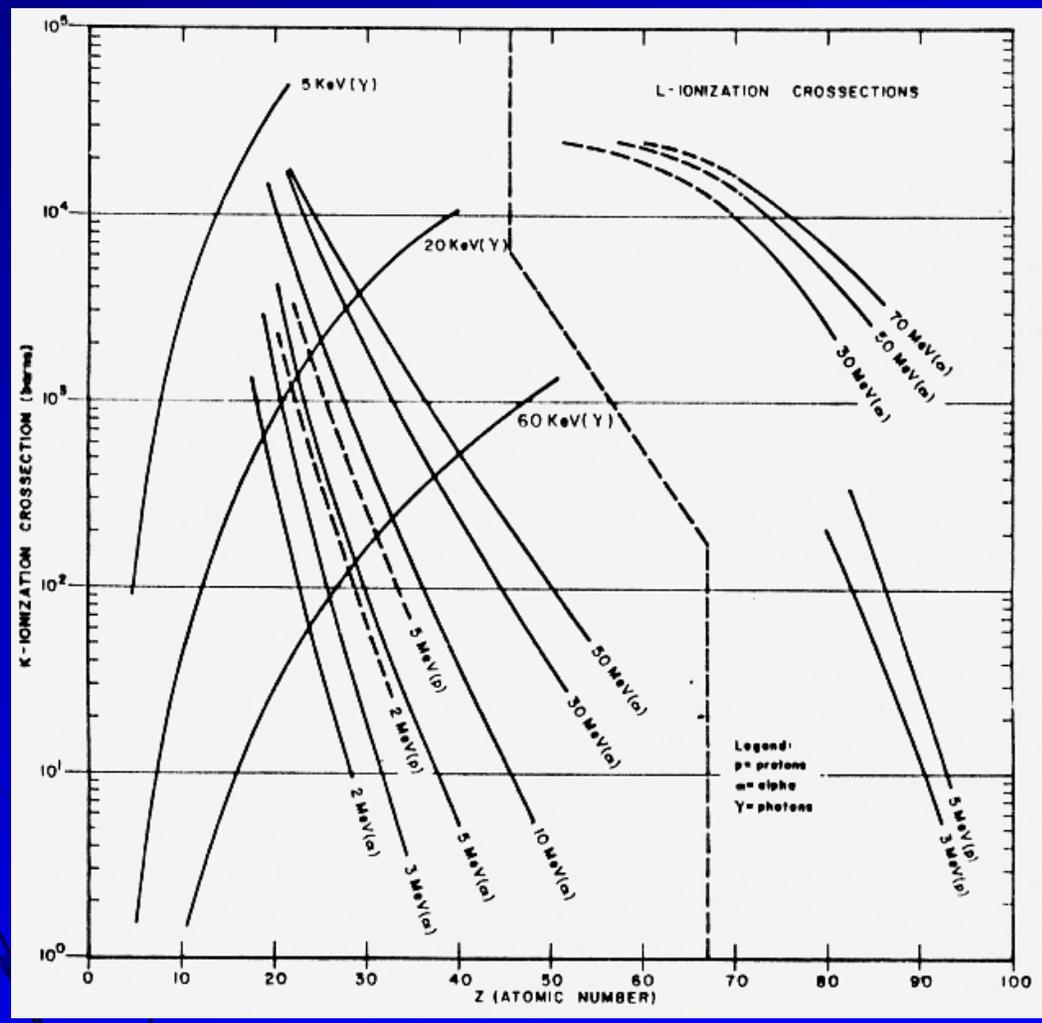
Densidade superficial

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

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

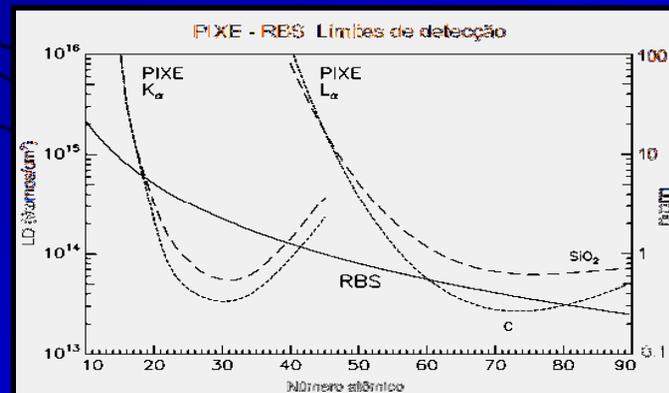
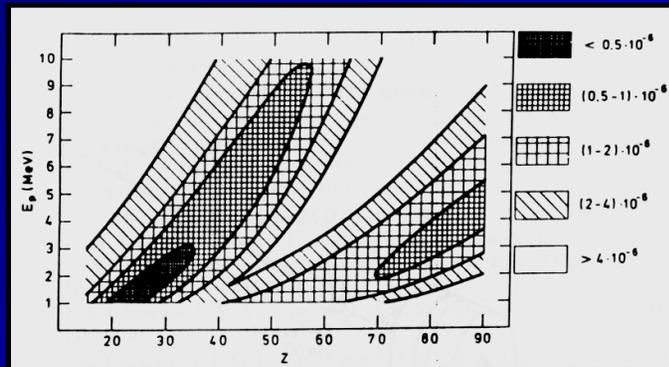


# PIXE x XRF

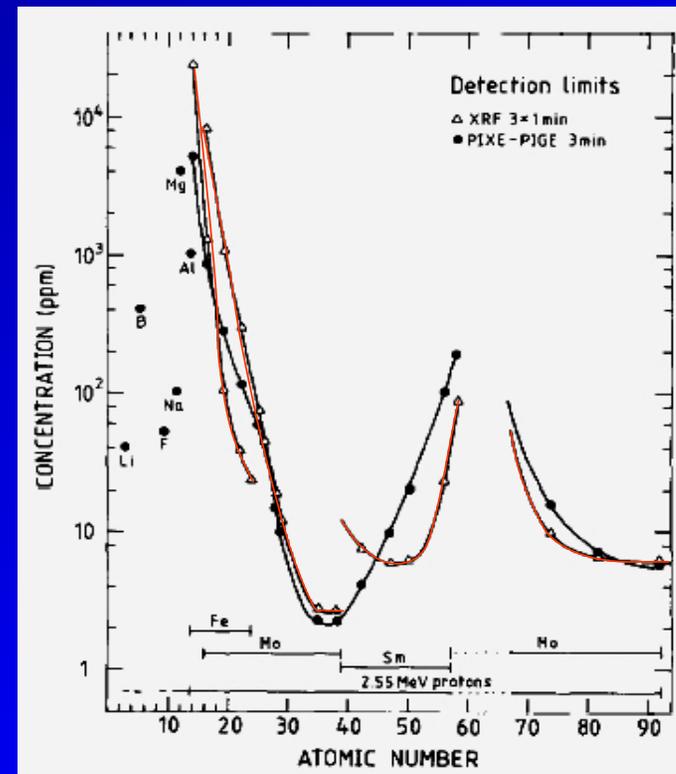


# PIXE x XRF Limites de detecção

## PIXE

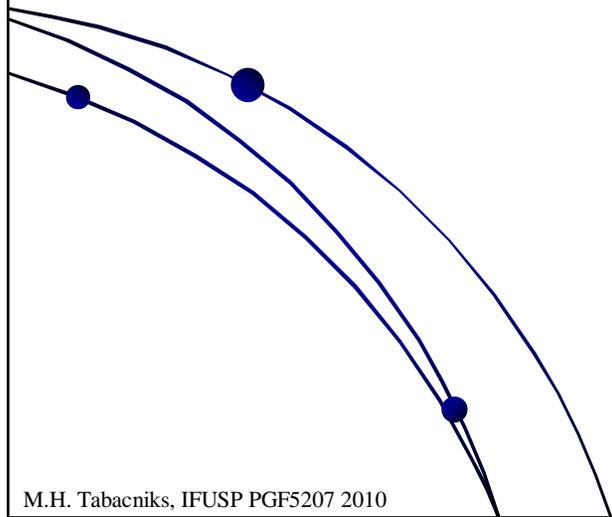


## PIXE x XRF



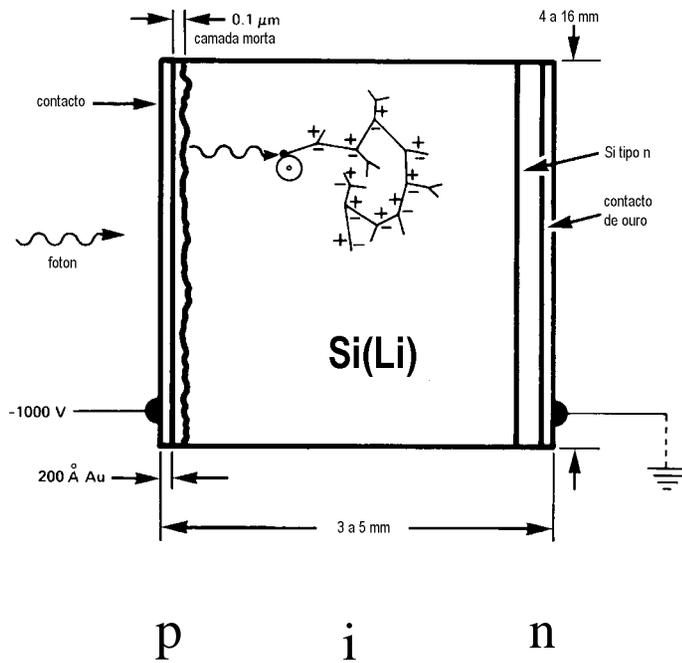
Geological samples (pellets)  
 Ext. PIXE H<sup>+</sup>, 2.5MeV, 50nA  
 XRF (Fe, Mo, Sm) 1 min, 2000 cps.  
 Malmqwvist, NIM B22 (1987) 386

# Instrumentação e parâmetros experimentais



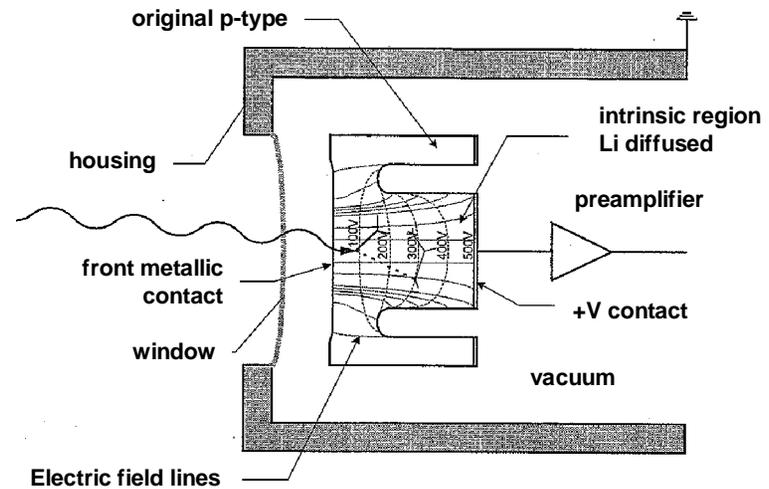
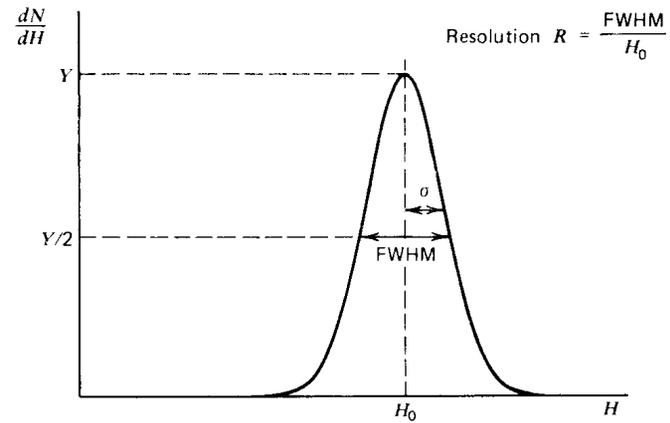
M.H. Tabacniks, IFUSP PGF5207 2010

# Detetor de Raios-X, Si(Li)



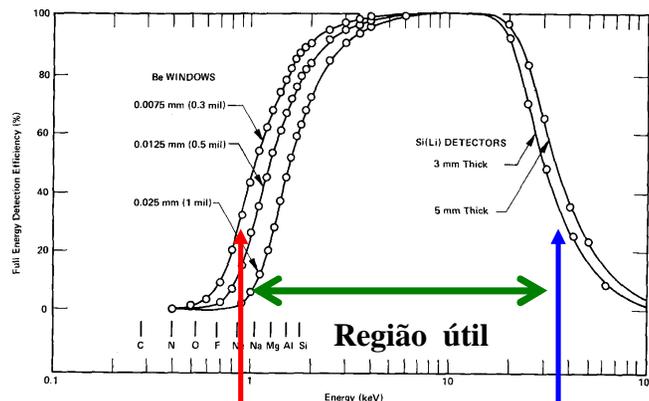
$$E = 2500 \text{ V/cm}$$

(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)

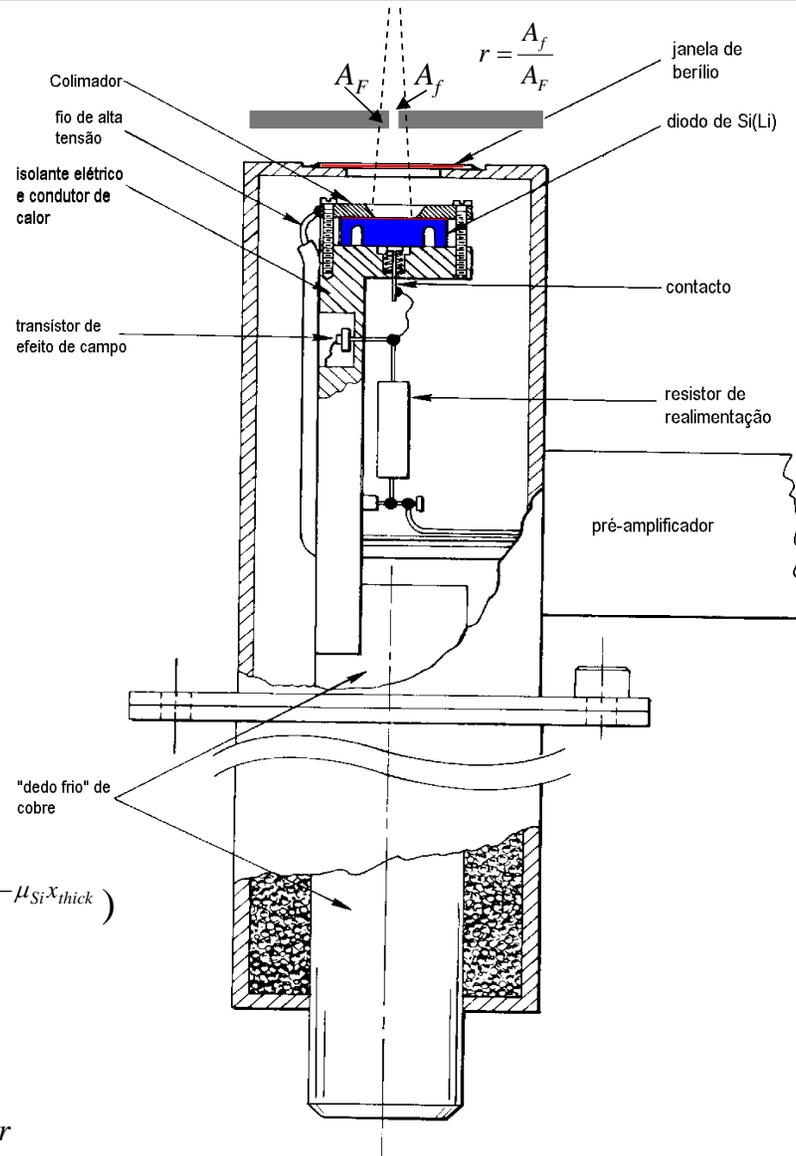
Espessura do cristal

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

$$\epsilon_{tot} = \frac{\Omega}{4\pi} \epsilon_{det} \cdot e^{-\mu_{Abs} X_{Abs}} \cdot \left[ r - (1-r)e^{-\mu_{FF} X_{FF}} \right]$$

$r$  = razão de furo no *Funny Filter*

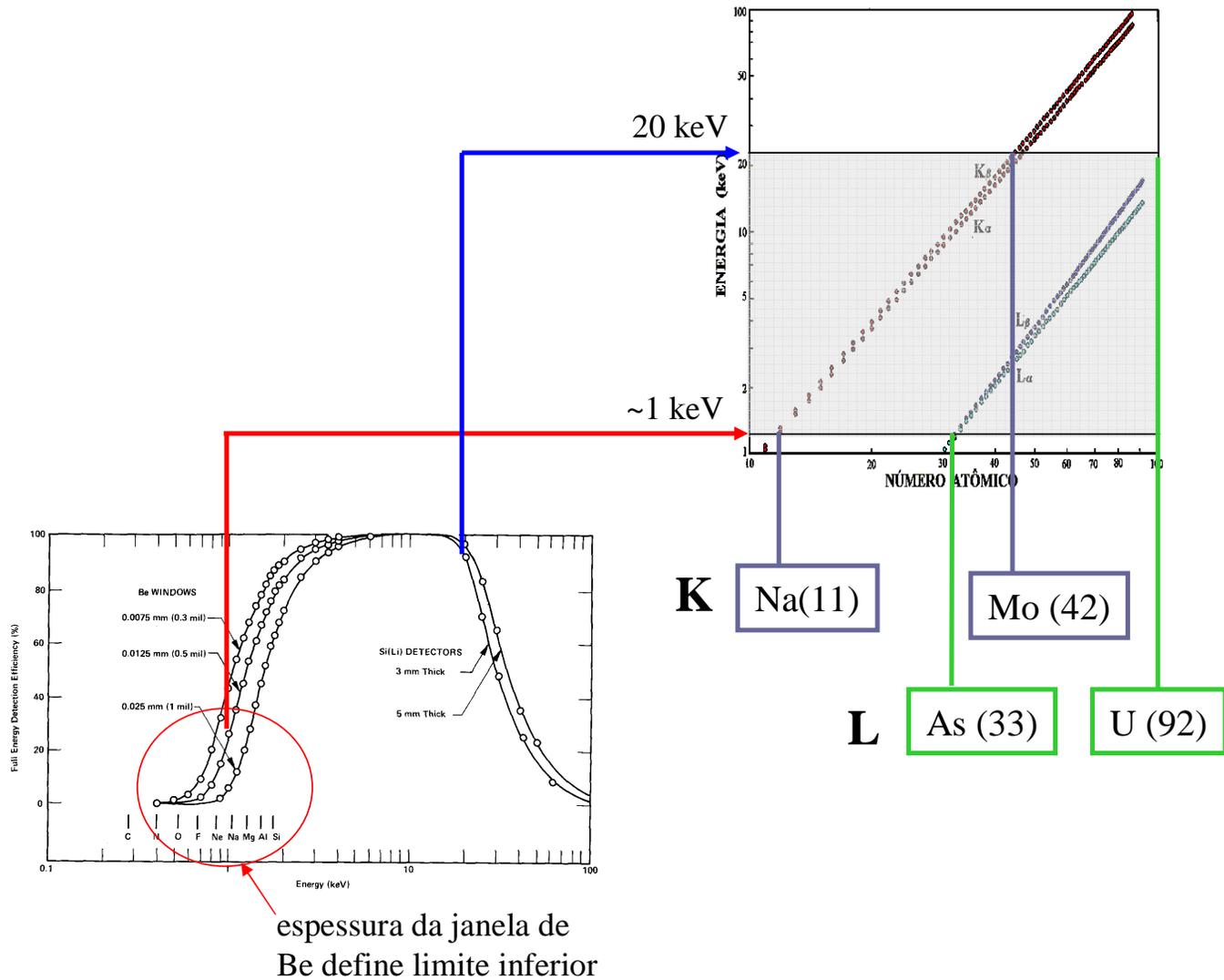
$f_E$  = fração de perdas por escape



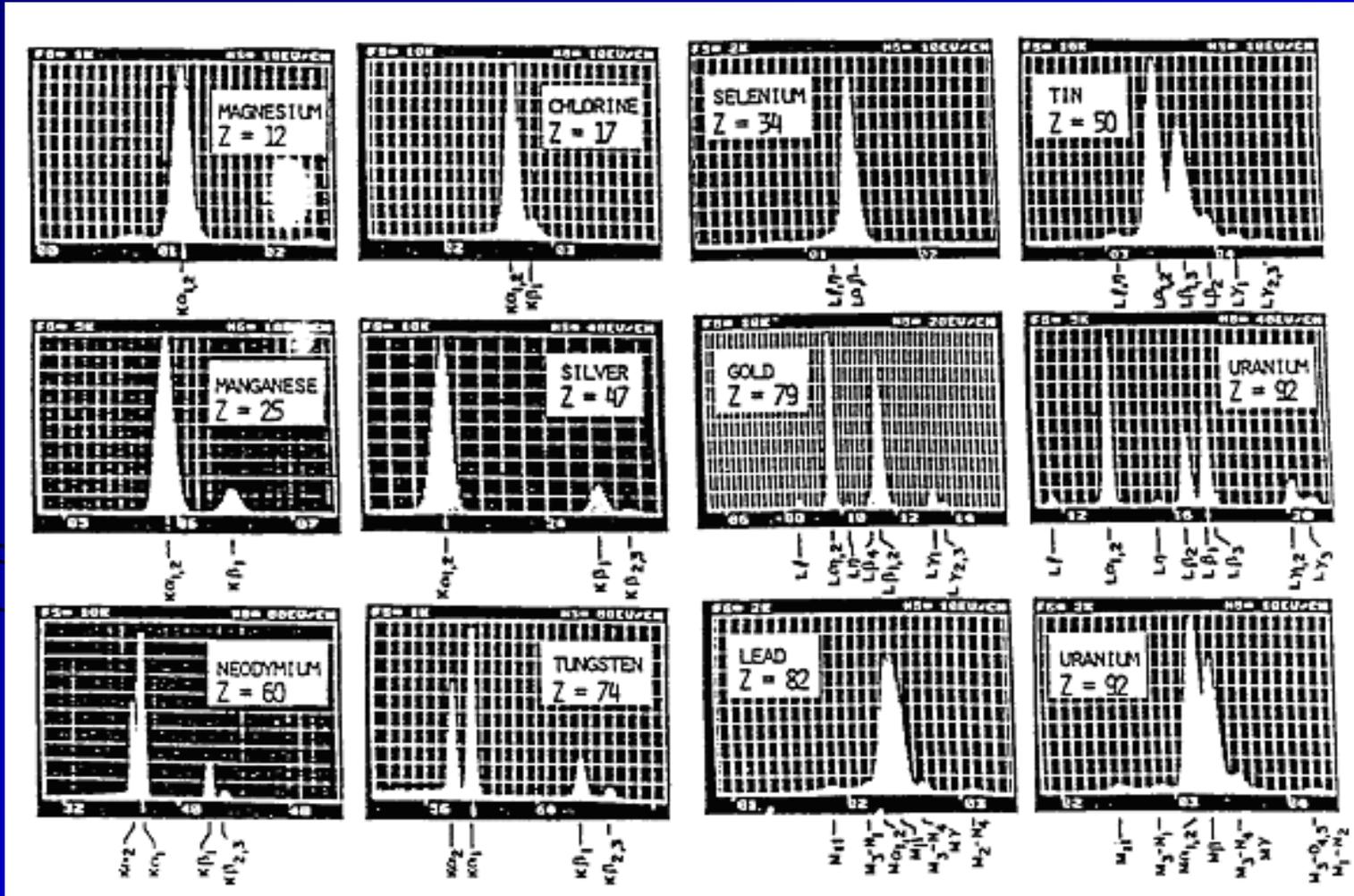
Construção de um detector de Si(Li). Adaptado de Jenkins (1981)

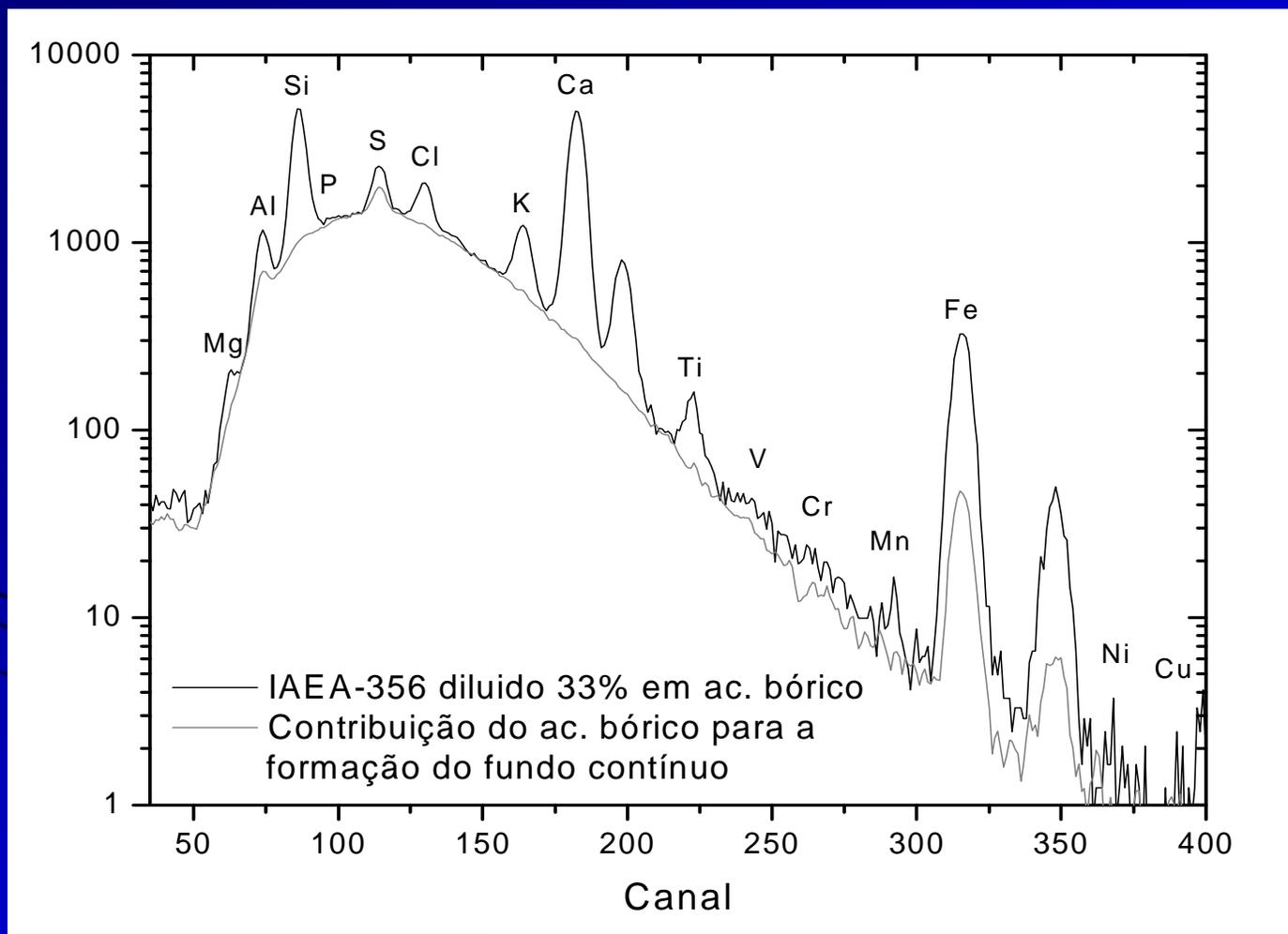
# Detector de Raios-X, Si(Li)

## Lei de Moseley

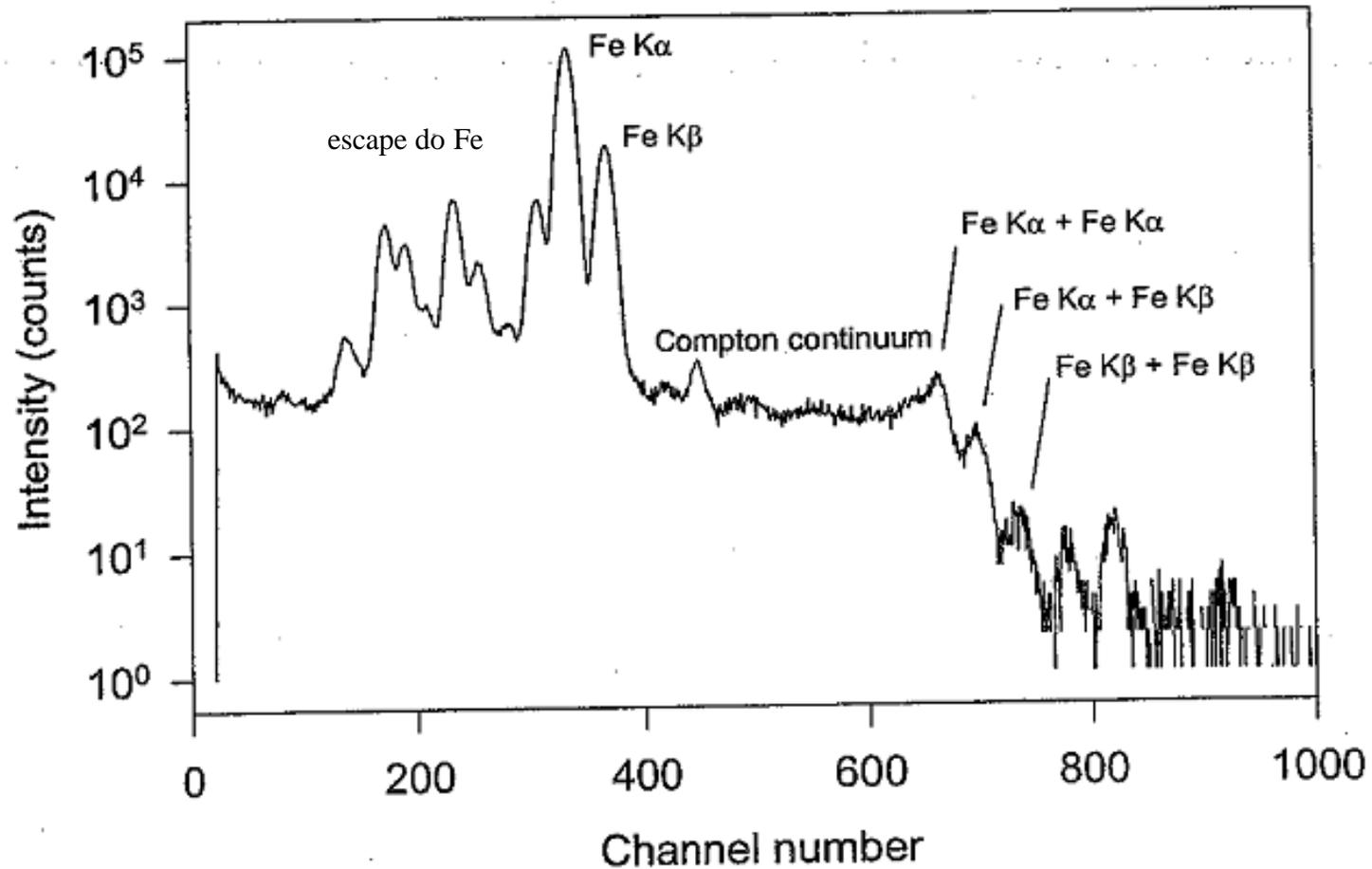


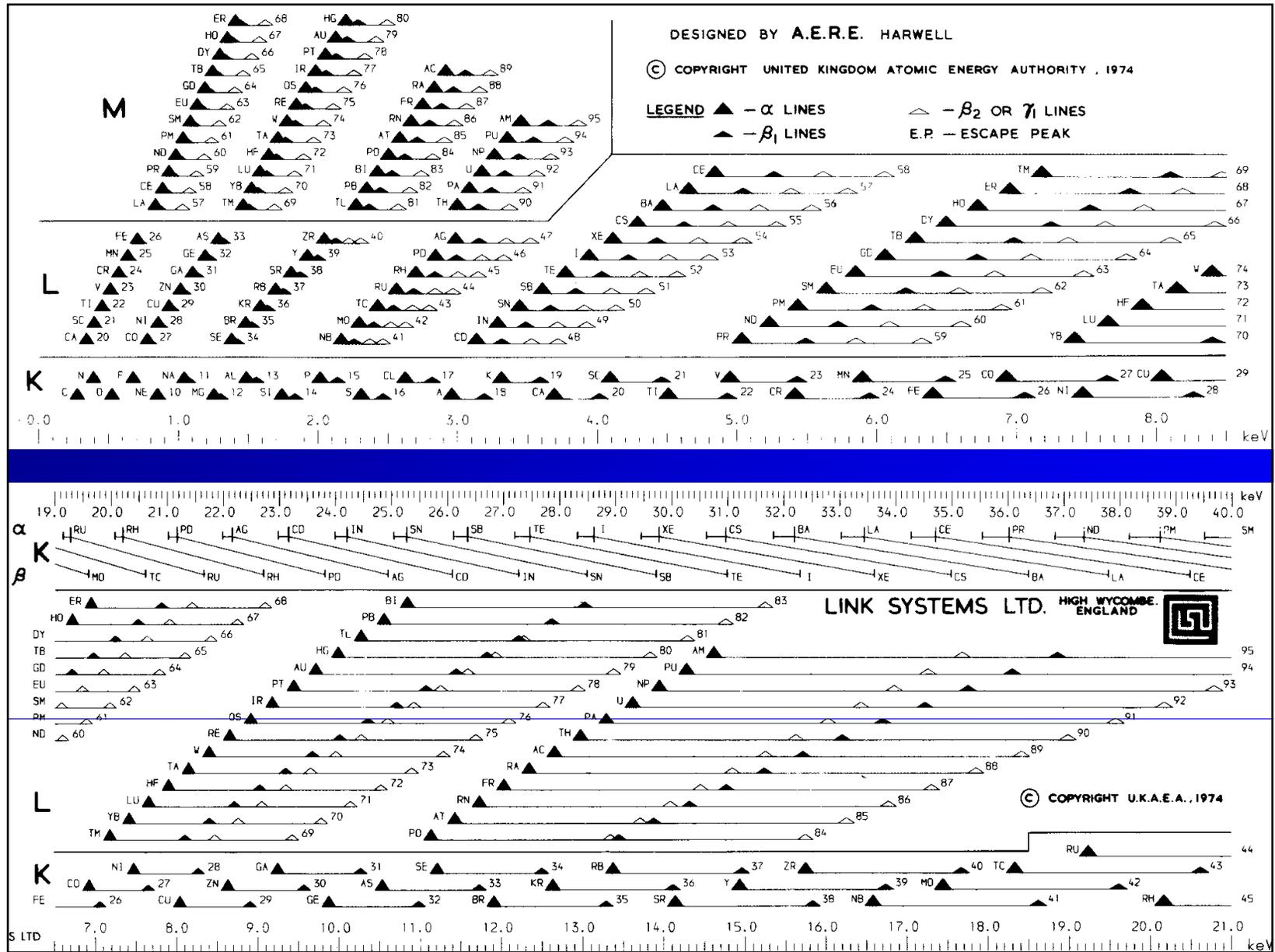
M.H. Tabacniks, IFUSP PGF5207 2010



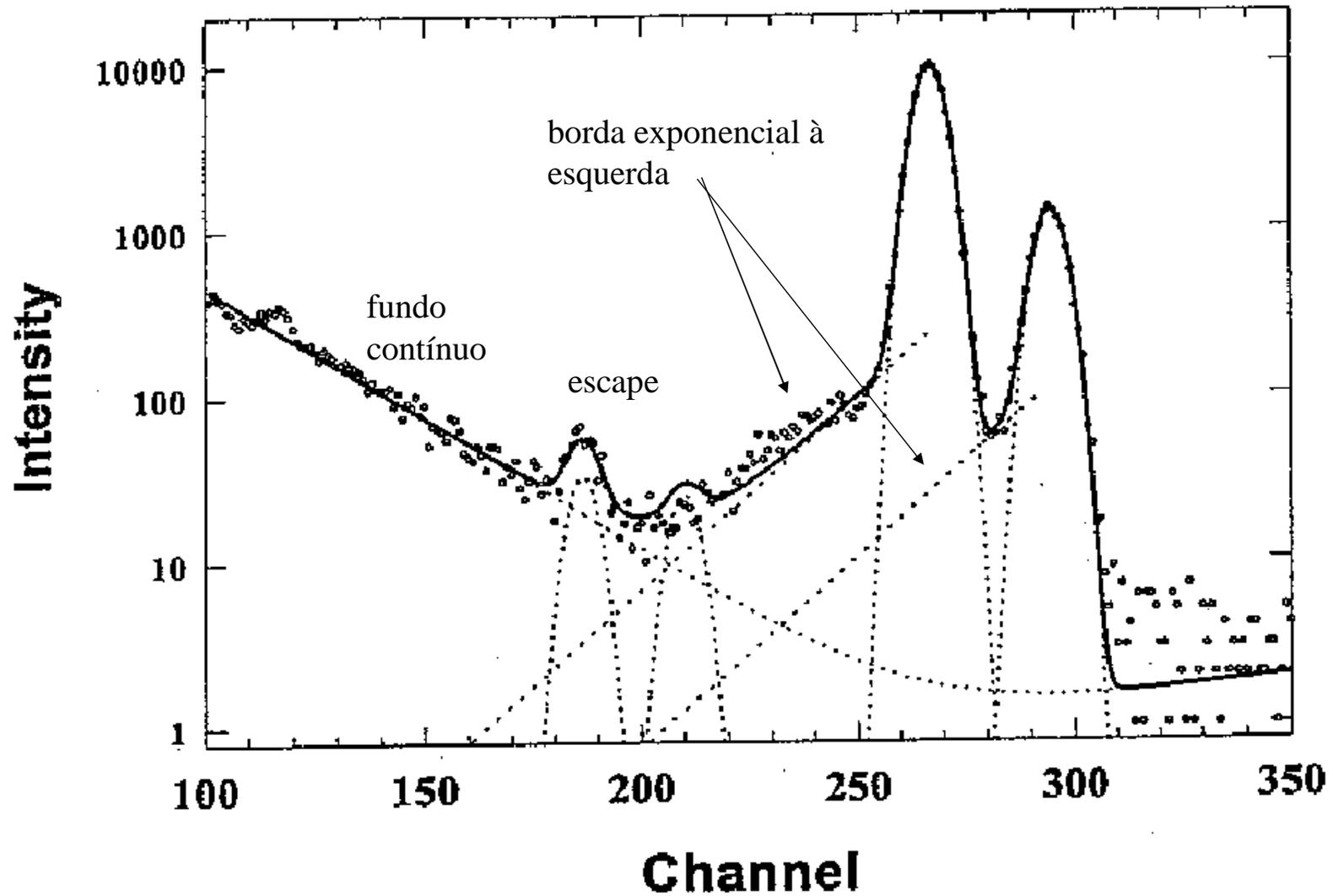


# Artefatos em espectros de raios-X





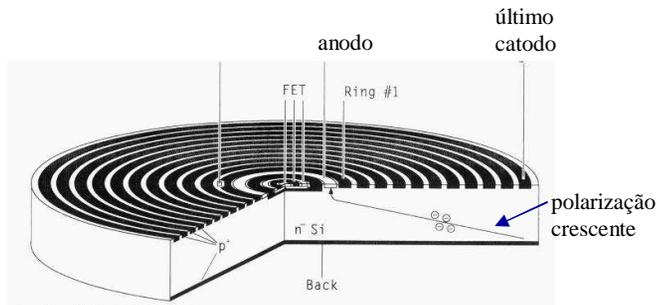
# Artefatos em espectro de raios X (Si(Li))



M.H. Tabacniks, IFUSP PGF5207 2010

# Novos detectores de RX

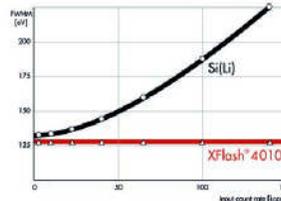
Detector de raios-X tipo Si PIN



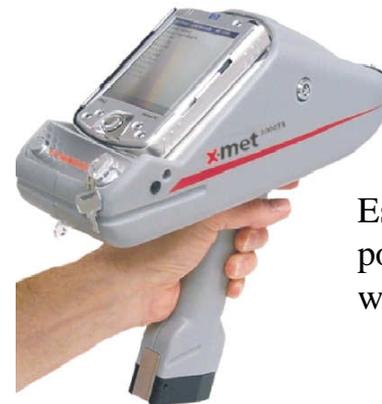
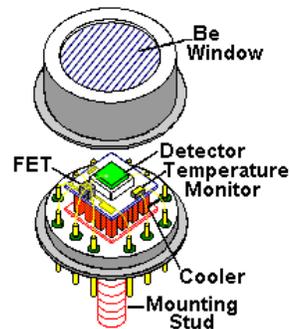
Detector de raios-X câmara CCD



Detector "Flash" Silicon Drift Peltier cooled até 100 kcps



xmet<sup>3000TX</sup>



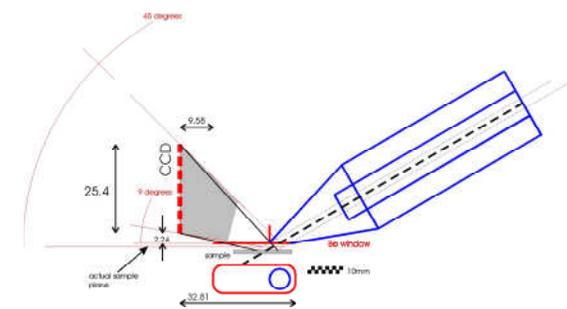
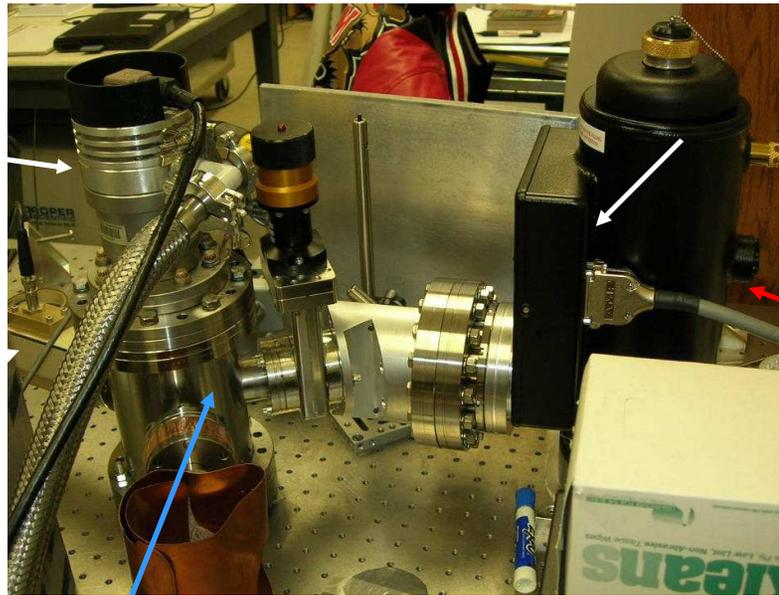
Espectrômetro XRF portátil  
www.metorex.com

# Um XRF-XRD portátil com CCD (NASA)

Bomba Turbo

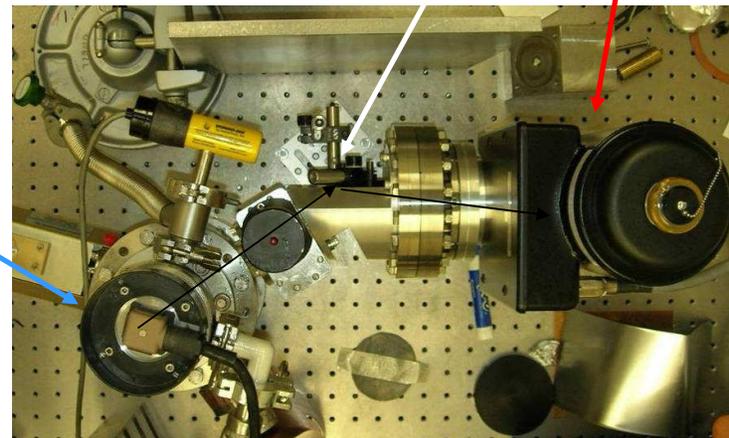
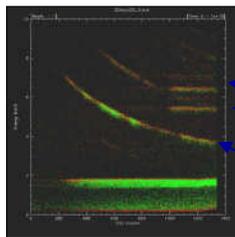
Fonte de elétrons 10 kV

Tubo de RX

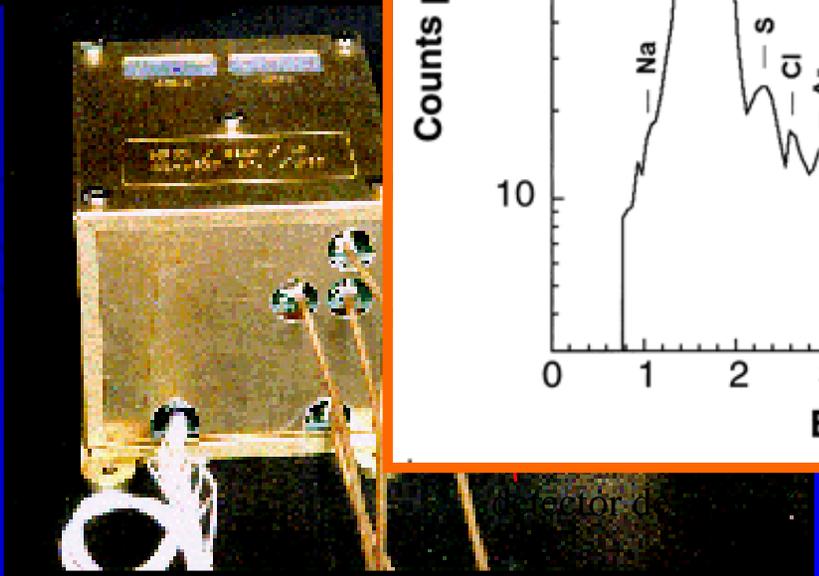
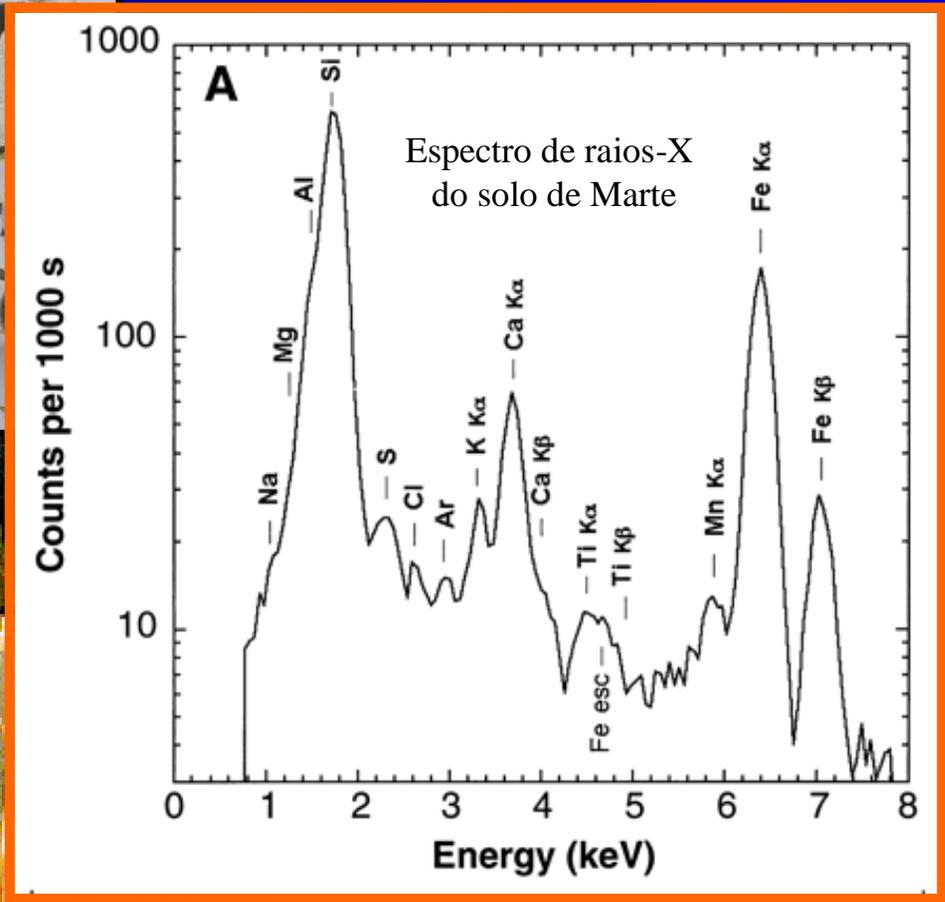


Amostra

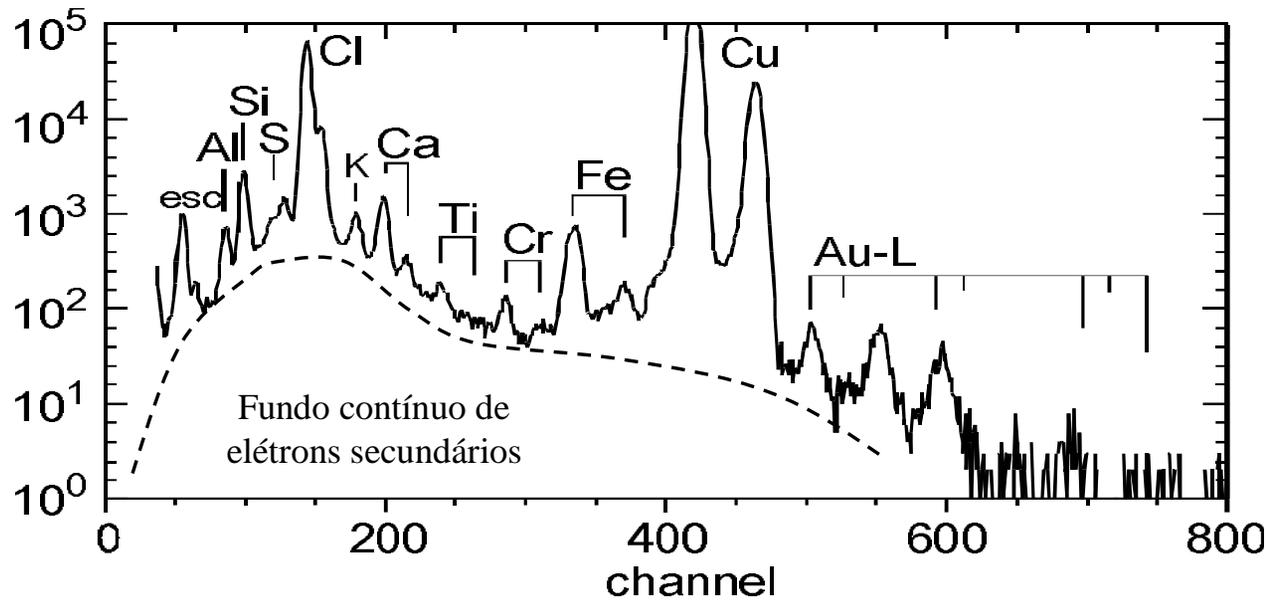
CCD-RX



# 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

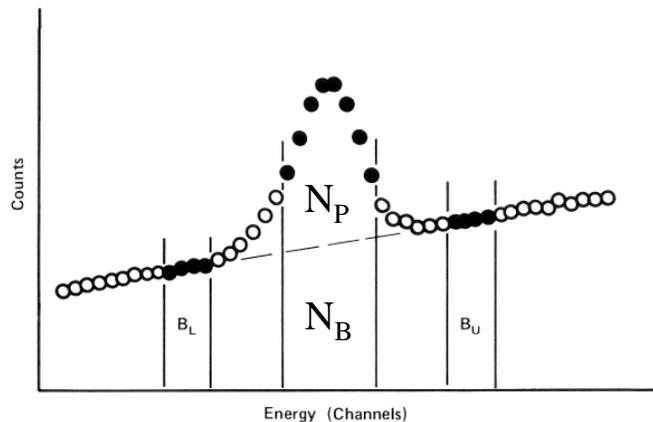
$$E = E_0 + G * canal$$

Resolução

$$FWHM^2 = A_1 + A_2 E_x$$

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

## 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 ←

GUPIX

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

### Alvo espesso (ou semi-espesso)

GUPIX

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>