

**Universidade de São Paulo  
Instituto de Física**

**Física Aplicada  
Aula 16**

**Profa. Márcia de Almeida Rizzutto**

Edifício Oscar Sala – sala 220

[rizzutto@if.usp.br](mailto:rizzutto@if.usp.br)

<http://disciplinas.stoa.usp.br/course/view.php?id=24279>

**2º Semestre de 2016**

# Programa

- O Espectro Eletromagnético
  - Dimensões dos objetos
  - Produção de energia
- Revisão sobre ondas Mecânicas;
- Princípios de acústica - Efeito Doppler;
  - Imagens por Ultrassom
  - Levitação mecânica
- Revisão das Equações de Maxwell - Equação da onda eletromagnética
  - Ondas de rádio; TRC, LCD,
  - Estrutura atômica – Revisão de física moderna;
  - Efeito Fotoelétrico, Celulares solares, Modelo atômico
- Descrição dos princípios de geração dos Raios-X: Tubos de raios-X
  - Propriedades dos Raios-X – Difração, Absorção
  - Aplicações de raios X: e interação com a matéria
  - Imagens obtidas com Raios-X – Radiografia,
    - Fluorescência de raios X (XRF)
      - Tomografia.
      - Microscopia
  - Aceleradores de partículas e radiação Síncrotron
    - Uso de aceleradores para análise de materiais
      - Lasers e Aplicações
      - Física Aplicada e Reatores

Física Aplicada 2016

Domingo	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado
agosto						
	Aula 1		Aula 2			
	Aula 3		Aula 4			
	Aula 5		Aula 6			
	Aula 7		Aula 8			
setembro						
	SEMANA DA		PATRIA			
	AULA 9		não AULA			
	não AULA		não AULA			
	Aula 10		Aula 11/AP1			
outubro						
	Aula 12/AP2		Aula 13/AP3			
SEMANA FÍSICA	Aula 14		fériado			
	Aula 15/AP4		Aula 16/AP5			
	Aula 17/AP6		Aula 18 /AP7			
	Aula 19/AP8					
novembro			fériado			
	Aula 20		Aula 21			
	RECESSO	fériado	não AULA			
	Aula 22		Aula 23			
	Aula 24		Aula 25			
dezembro						
	PROVA					

# Calendário

<http://disciplinas.stoa.usp.br/course/view.php?id=24279>



# Laboratório para Análise de Materiais com Feixes Iônicos - LAMFI



Console

Acelerador

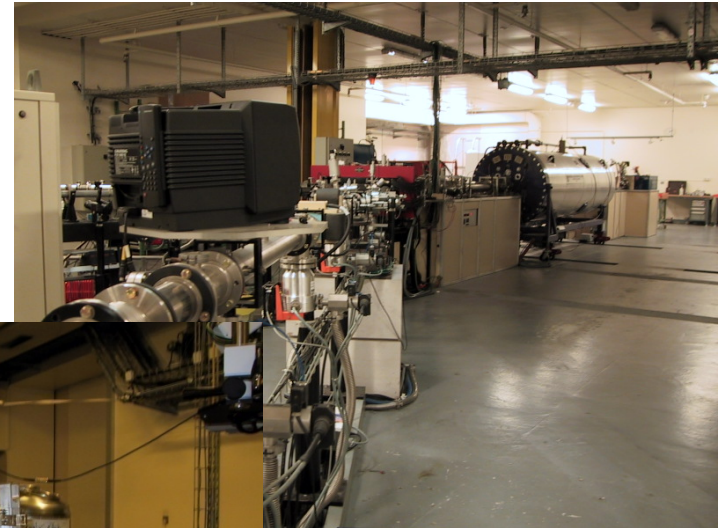
Fontes de íons



# LAMFI – Laboratório de Análise de Materiais por feixe iônicos para análise de objetos do patrimônio histórico

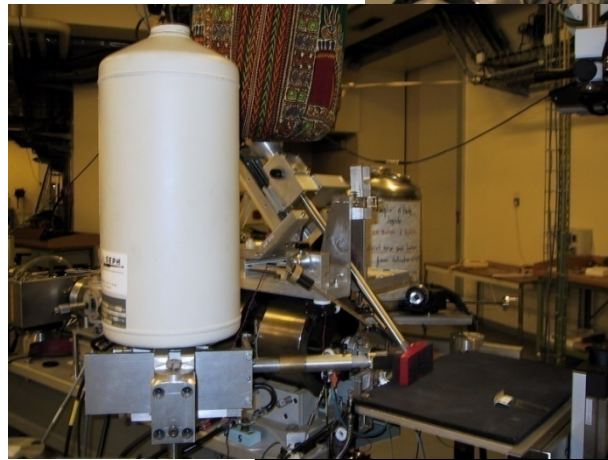


**Semelhante ao acelerador do Louvre - Paris**



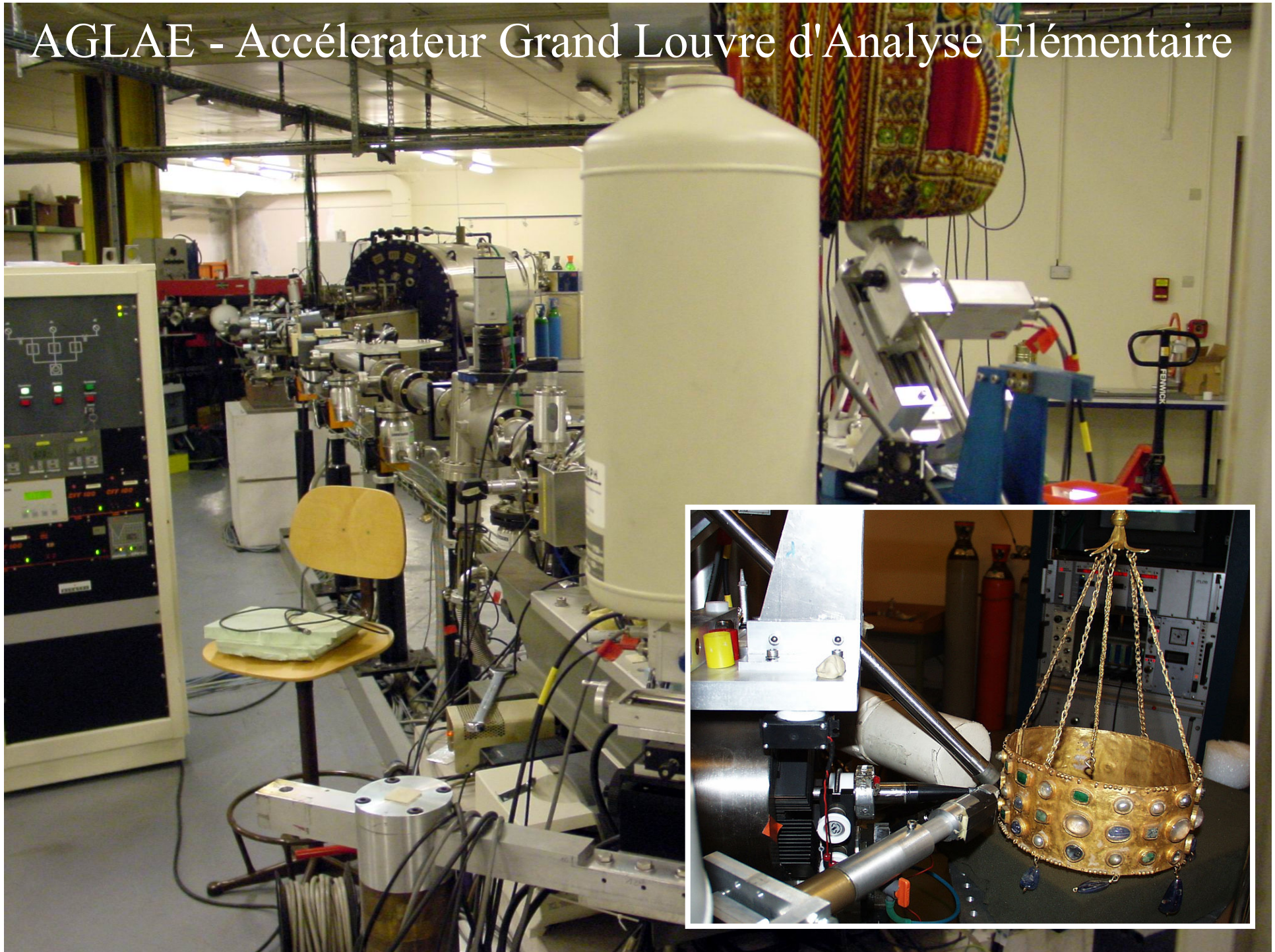
**LOUVRE-FRANÇA**

- **Acelerador Pelletron,**
- **Linha de feixe externo**





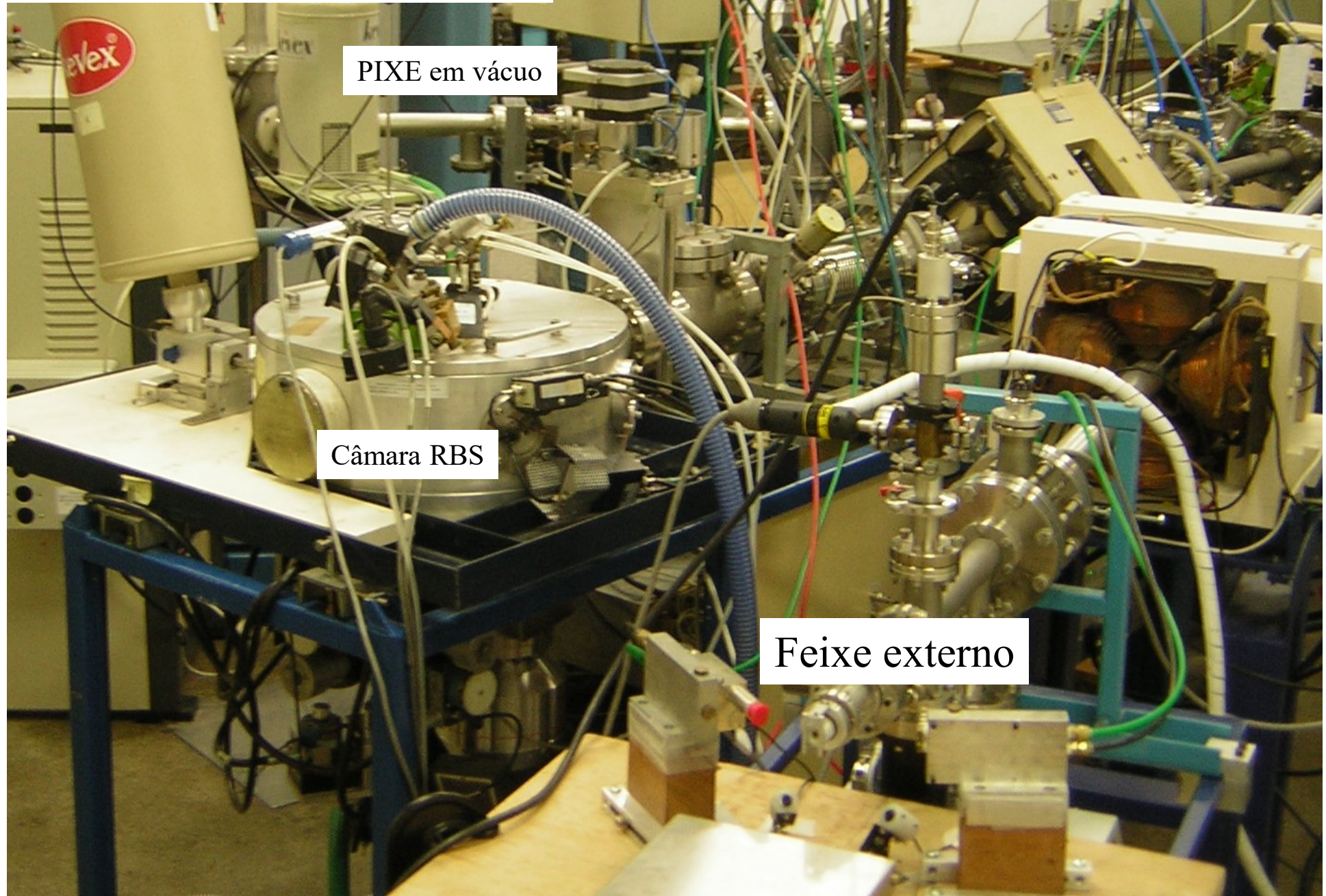
# AGLAE - Accélérateur Grand Louvre d'Analyse Élémentaire





LAMFI - USP *Laboratório para Análise de Materiais por Feixes Iônicos*

Acelerador Pelletron 1.7 MV  
Fonte de íons RF Alphatross e SNICS



PIXE em vácuo

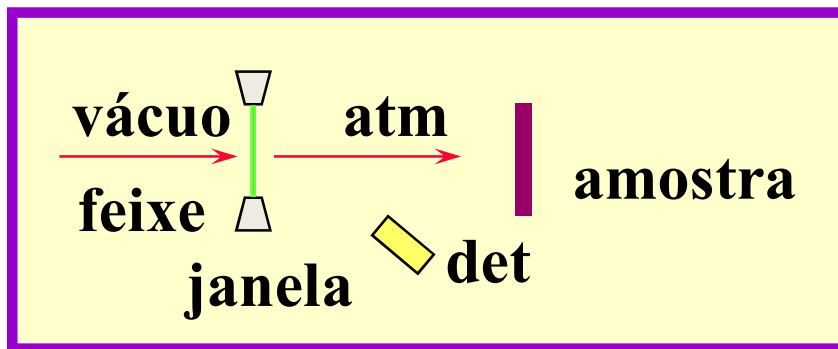
Câmara RBS

Feixe externo



# Feixe Externo - LAMFI

Arranjo experimental do sistema de feixe externo (LAMFI).



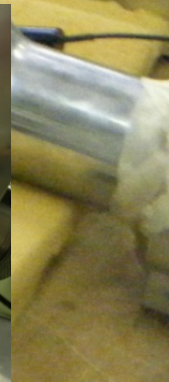
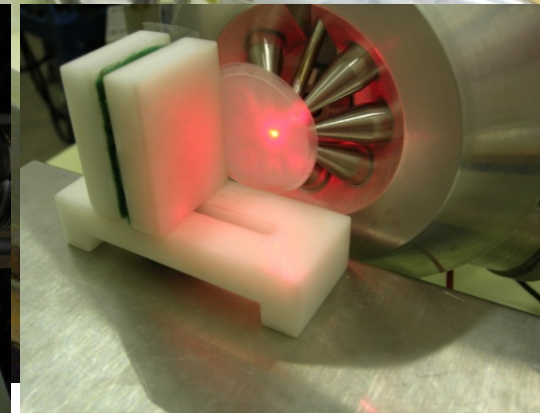
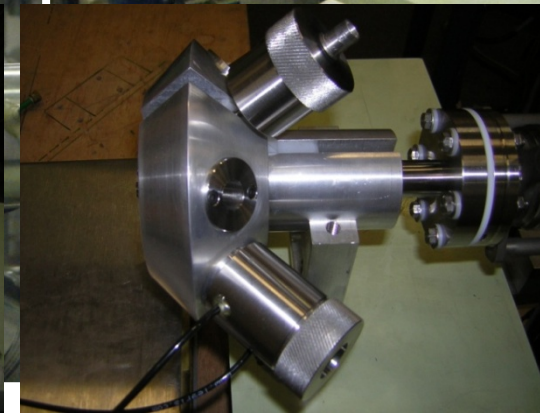
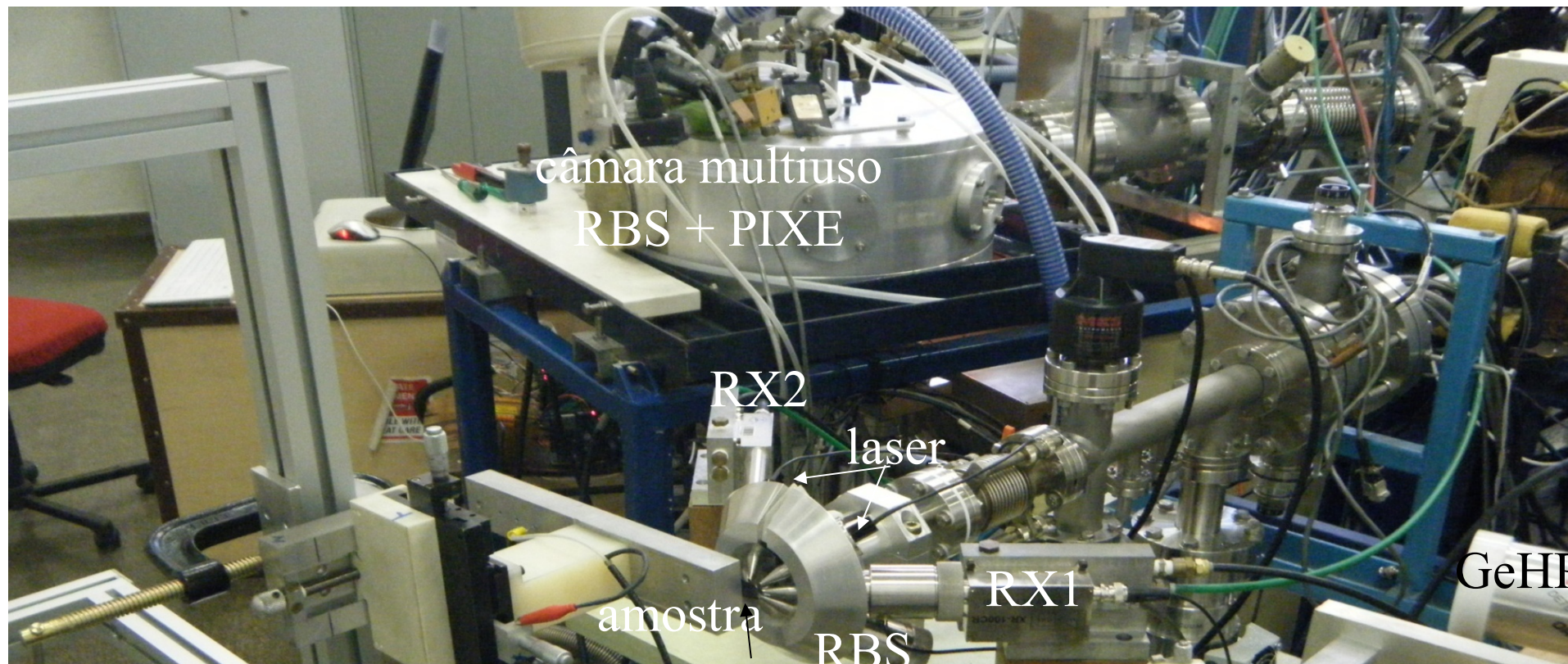
25/50  $\mu\text{m}$  Kapton foil  
2.4 MeV  $^1\text{H}$  0.9/1.5 MeV





## Vantagens de uso do arranjo experimental de feixe externo:

- Medidas imediatas ---> sem preparação
- Objetos de diferentes tamanhos e forma complexas
- Fácil de manusear e mover os objetos
- Sem problemas de carga em isolantes -> não necessita de resfriamento
- Redução dos efeitos térmicos ---> sem danos (ar)
- Sem problemas de ressecamento da amostra
- Possibilidade de medidas de pequenos pontos = 1 mm



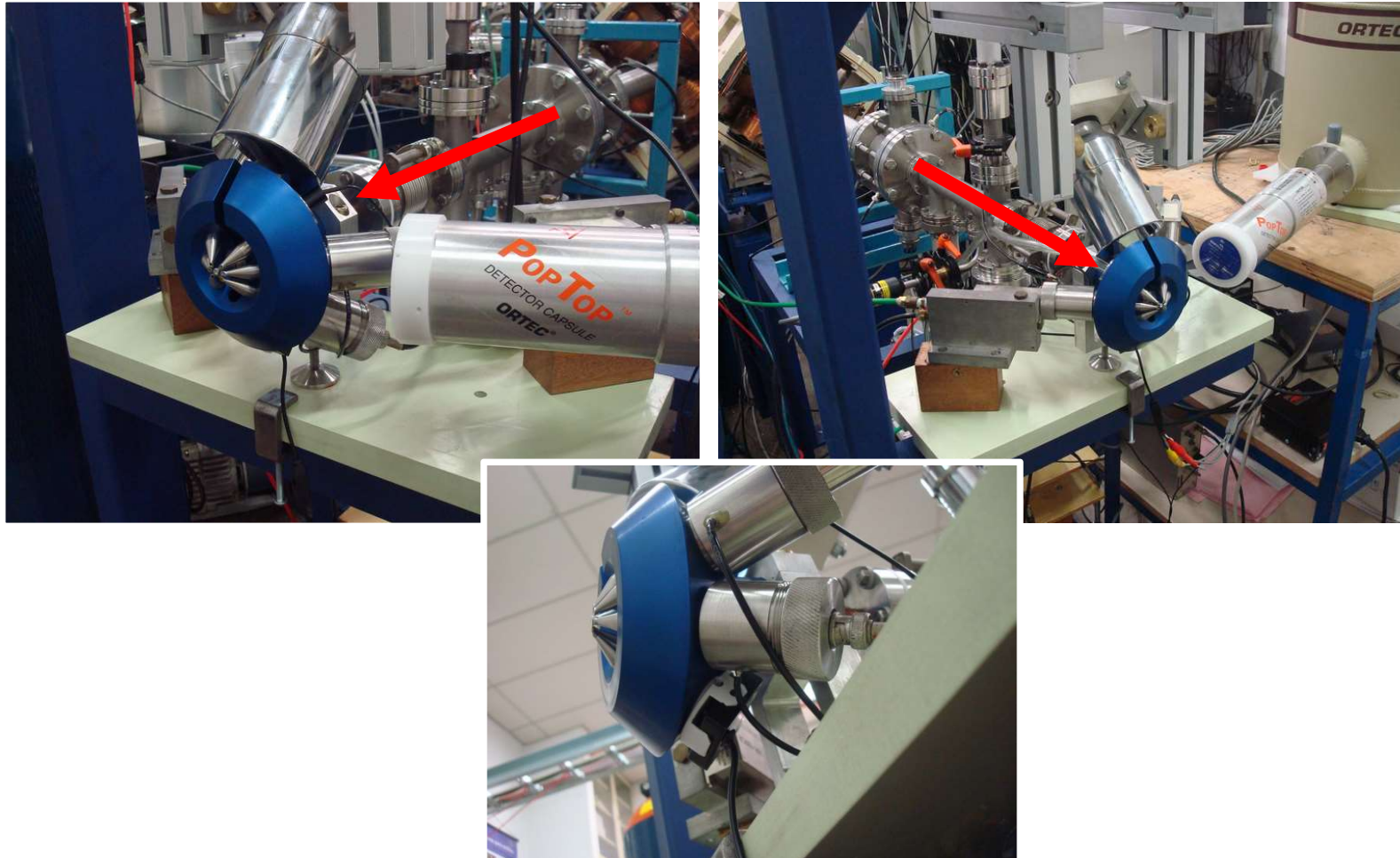




# Arranjo experimental



Medidas com o feixe externo no LAMFI





# LAMFI Laboratório para Análise de Materiais por Feixes Iônicos

1.7 MV NEC (5SDH) Pelletron tandem; fontes RF/Rb para feixe de  $\text{He}^-$  e SNICS II para  $\text{H}^-$ ,  $\text{Li}^-$ ,  $\text{O}^-$ ,  $\text{Si}^-$ .

Arranjo de feixe externo

arranjo para análises RBS em vácuo

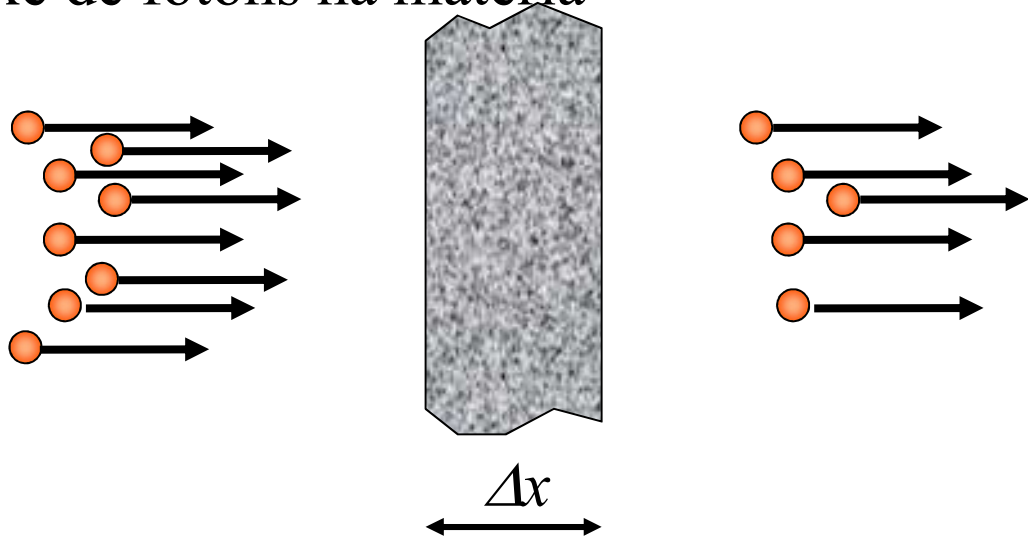
Arranjo PIXE com 2 Si(Li) e porta amostras com 18 pos.

08.09.2014 10:1



# Métodos Analíticos

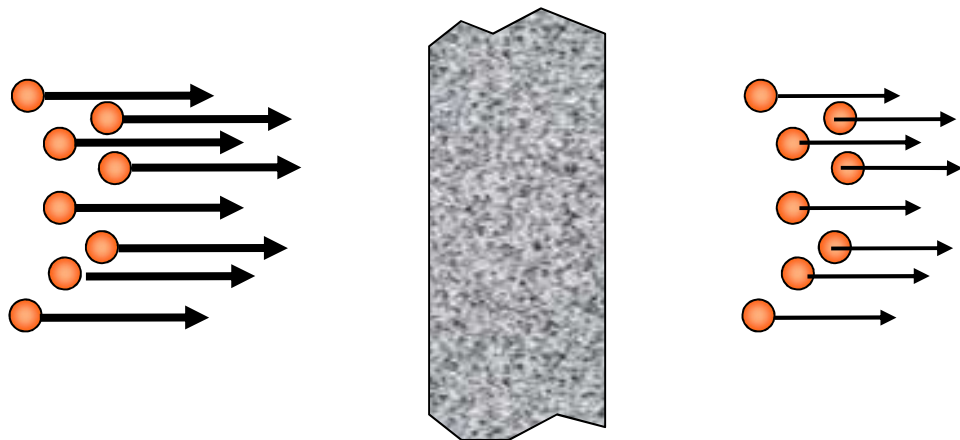
Feixe de fótons na matéria



$$\frac{N}{N_0} = e^{-\mu \cdot \Delta x}$$

$$E_v = cte$$

Feixe de íons na matéria



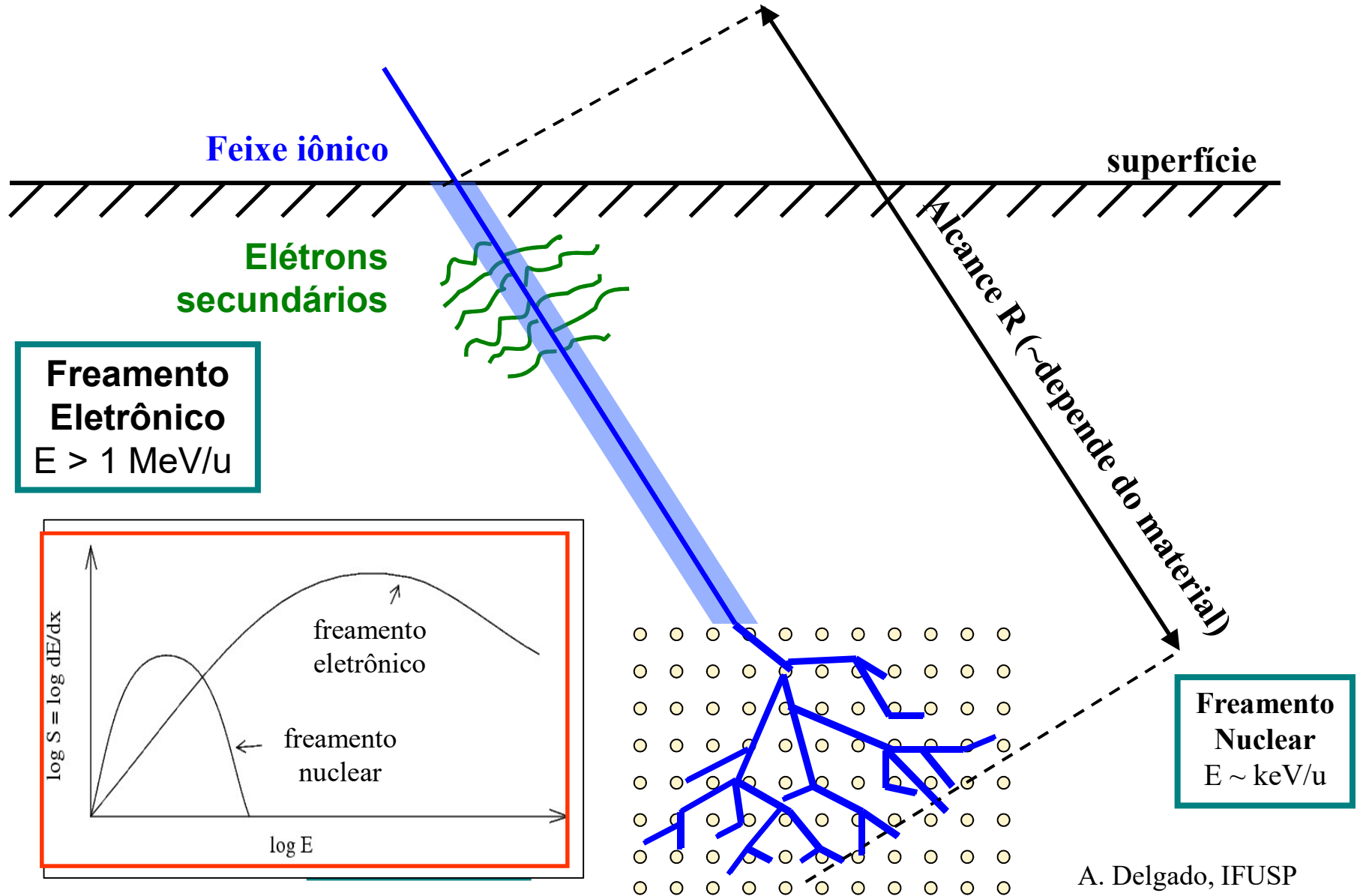
$$N_0 = cte$$

$$E' = E_0 - \left( \frac{dE}{dx} \right) \Delta x$$

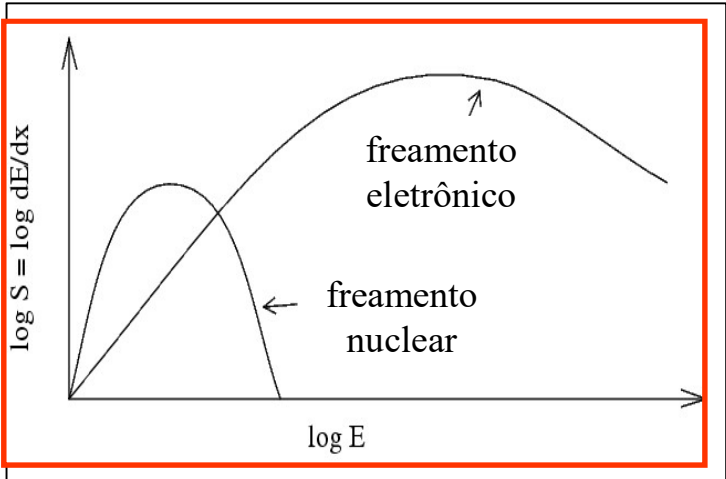


# Princípios Básicos

## Feixe de íons (MeV) na matéria



**Freamento Eletrônico**  
 $E > 1 \text{ MeV/u}$



**Freamento Nuclear**  
 $E \sim \text{keV/u}$





# Princípios Básicos

## Feixe de íons (MeV) na matéria

Intensidade do freamento de íons na matéria (na prática)

[www.srim.org](http://www.srim.org)

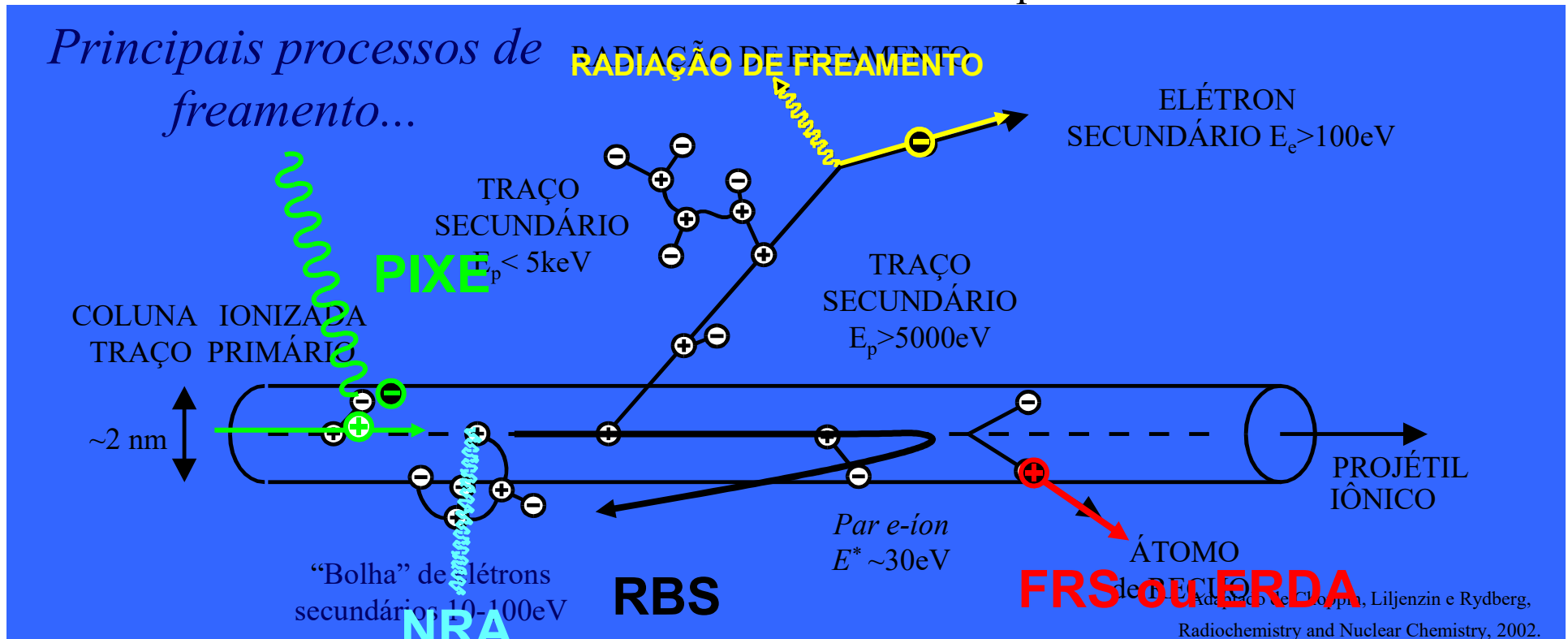
SRIM

TRIM

Programa de simulação Monte Carlo para amostra complexas e multicamada

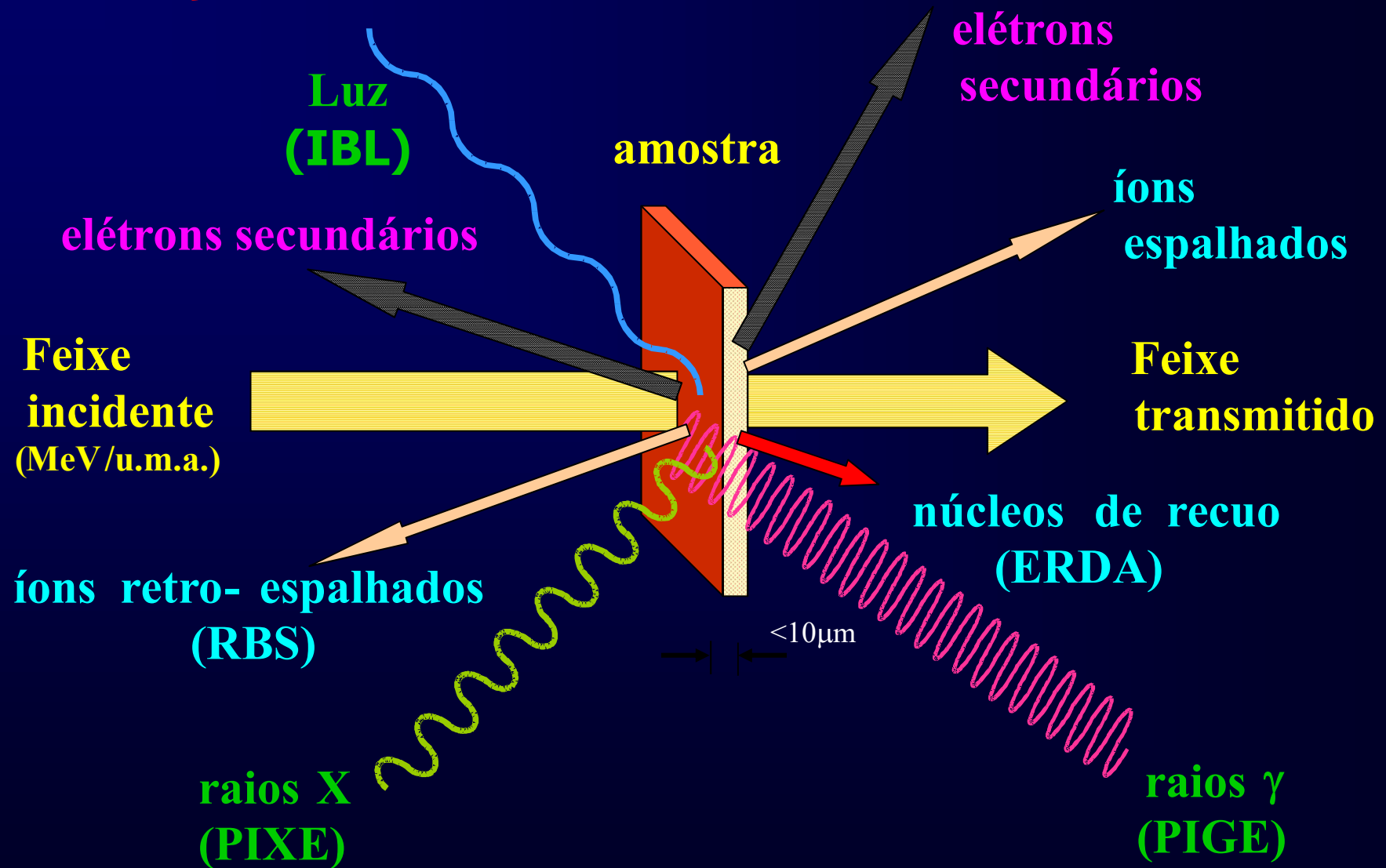
SR

Programa 'rápido' para cálculo de S e R usando polinômios ZBL



# TÉCNICAS ANALÍTICAS

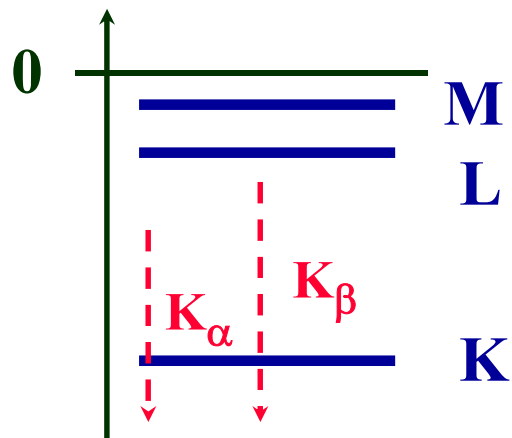
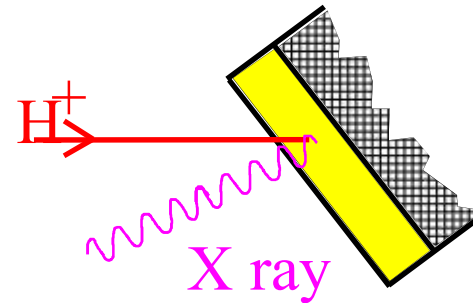
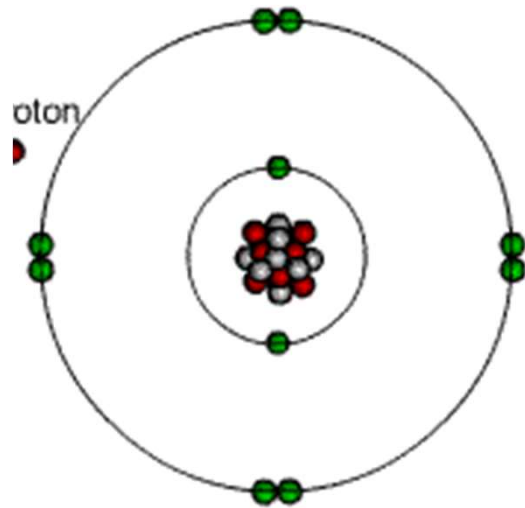
## Interação de feixe de íons com a matéria - MeV





# Método PIXE

(Particle Induced X-ray Emission)



- Não Destrutivo
- Superficial:
  - 25,5  $\mu\text{m}$  em Bronze (prótons c/ 2,4MeV)
  - 100  $\mu\text{m}$  em Celulose (prótons c/ 2MeV)
- Alta Sensibilidade: ppm
- Rápido: 10-20 min
- Identificar e quantificar elementos com  $Z > 10$
- Alta resolução para elementos vizinhos
- Preciso: erro  $\sim 5\%$

# TÉCNICA ANALÍTICA - PIXE

Espectros de raios-X

Intensidades relativas



transições de dipolo

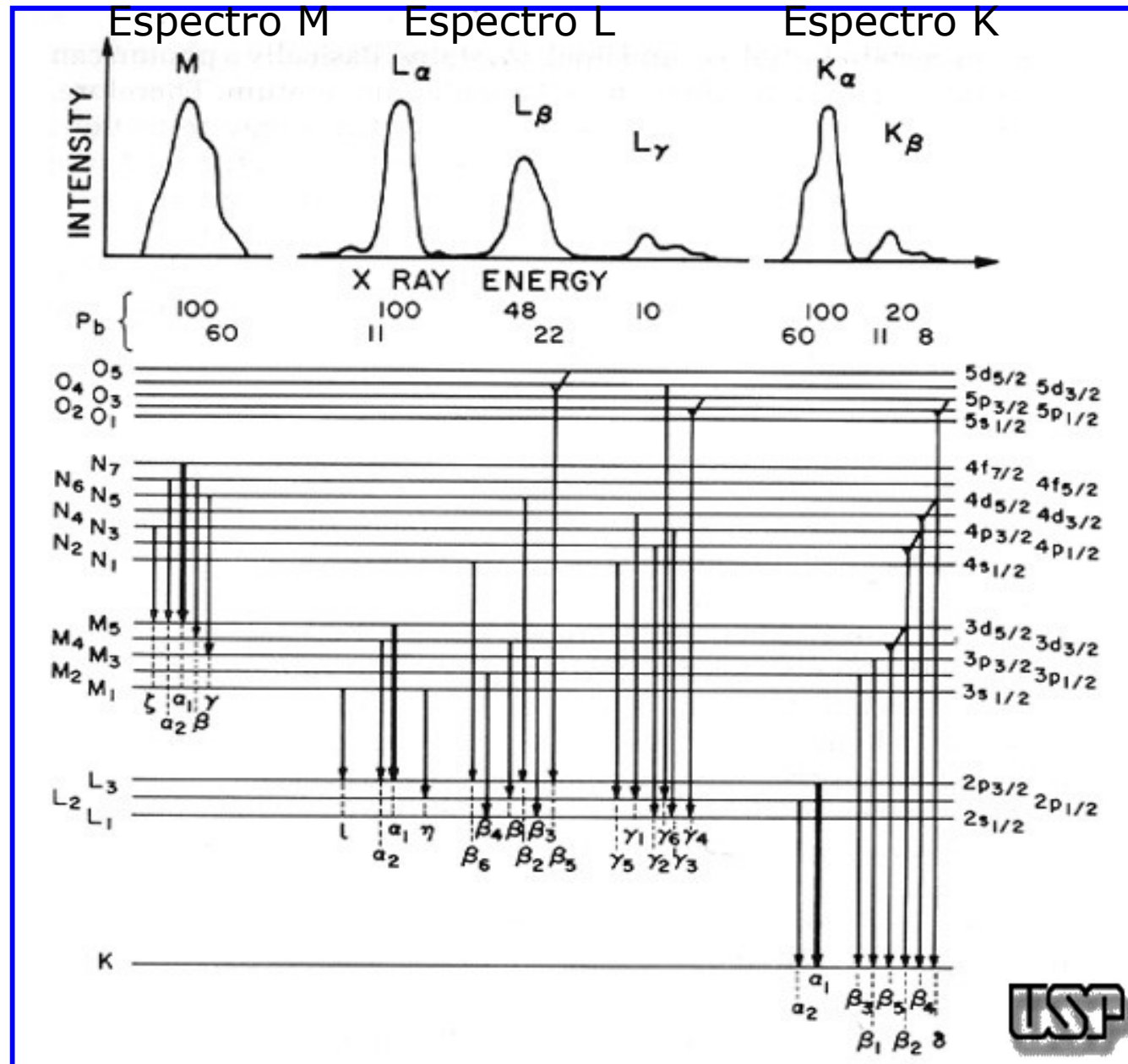
Razões das intensidades

$K\alpha/K\beta$

$L\alpha/L\beta$

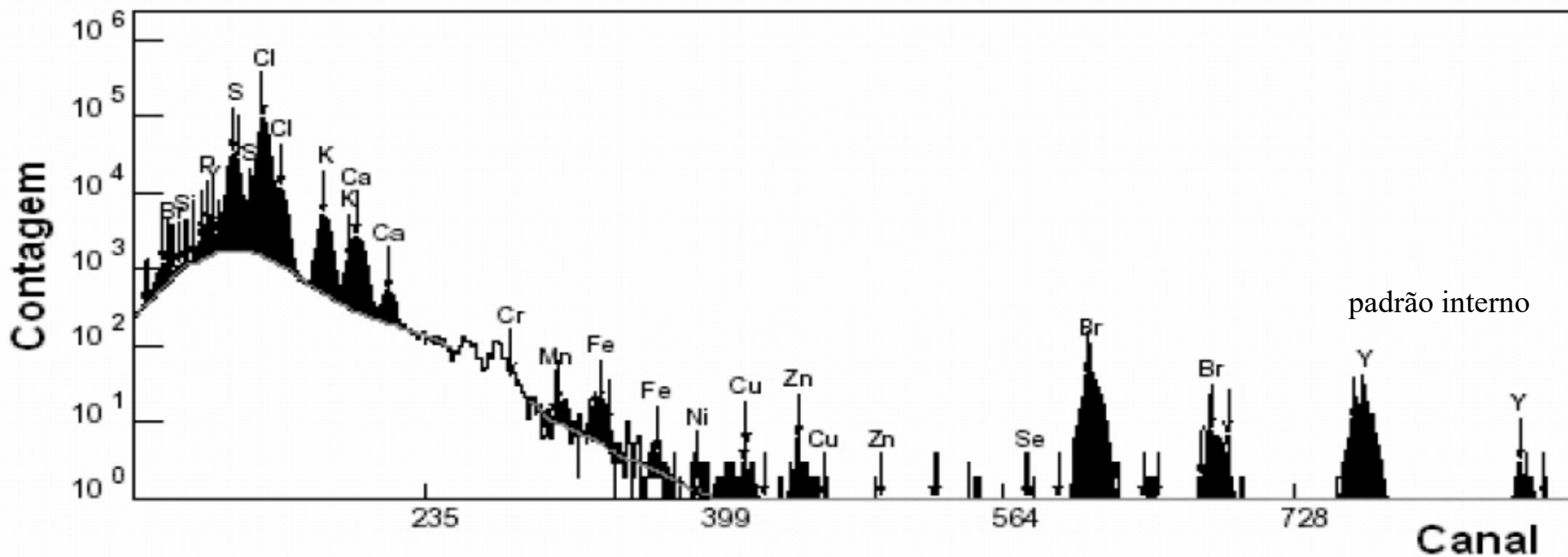
$L/M$

Permitem estudos de espessuras





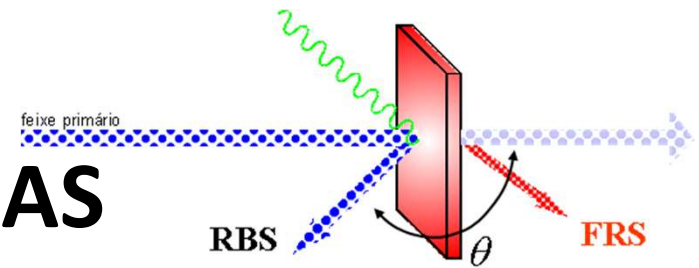
# PIXE - Análise elementar de uma amostra de soro sanguíneo



# TÉCNICAS ANALÍTICAS

Retroespalhamento Rutherford – RBS

Espectrometria de Recuo Frontal - FRS (ERDA)



Fator Cinematico

$$K_1 \equiv \frac{E_1}{E_0} = \left[ \frac{\left(1 - (M_1/M_2)^2 \cdot \text{sen}^2\theta\right)^{1/2} + (M_1/M_2) \cdot \text{cos}\theta}{1 + (M_1/M_2)} \right]^2$$

Sessão de choque de Rutherford (CM)

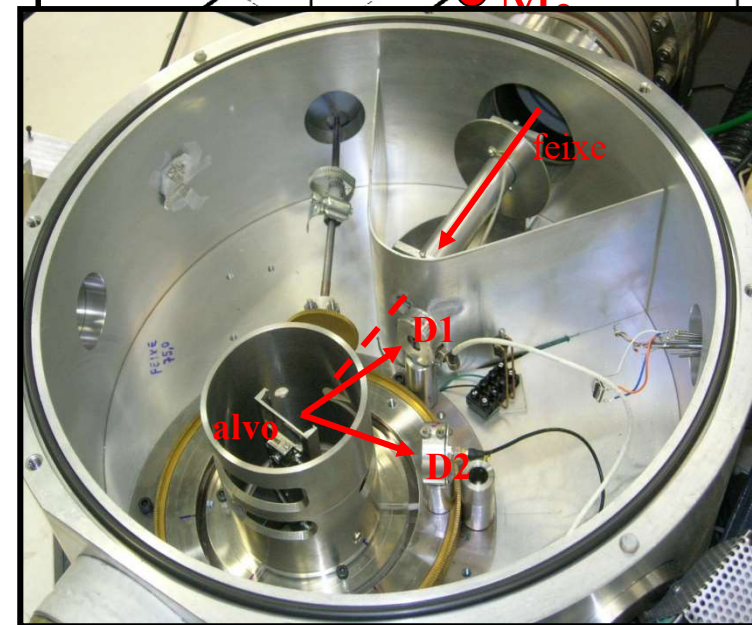
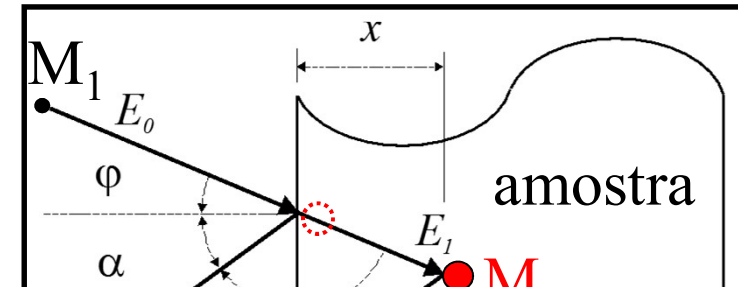
$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(E_c, \theta_c) = \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \left( \frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2}{4 \cdot E_c} \right)^2 \frac{4}{\text{sen}^4(\theta_c/2)} \left( \frac{(a + \text{cos}\theta)^2}{a} \right)$$

$$N_i = \text{cte} \frac{\Omega}{4\pi} Q \frac{Z_1^2 Z_2^2}{E^2} \frac{\rho_i \ell}{\text{cos}\varphi}$$

Medidas

$$N_p = \frac{Q}{e}$$

Densidade atomica:  
[at/cm<sup>2</sup>]

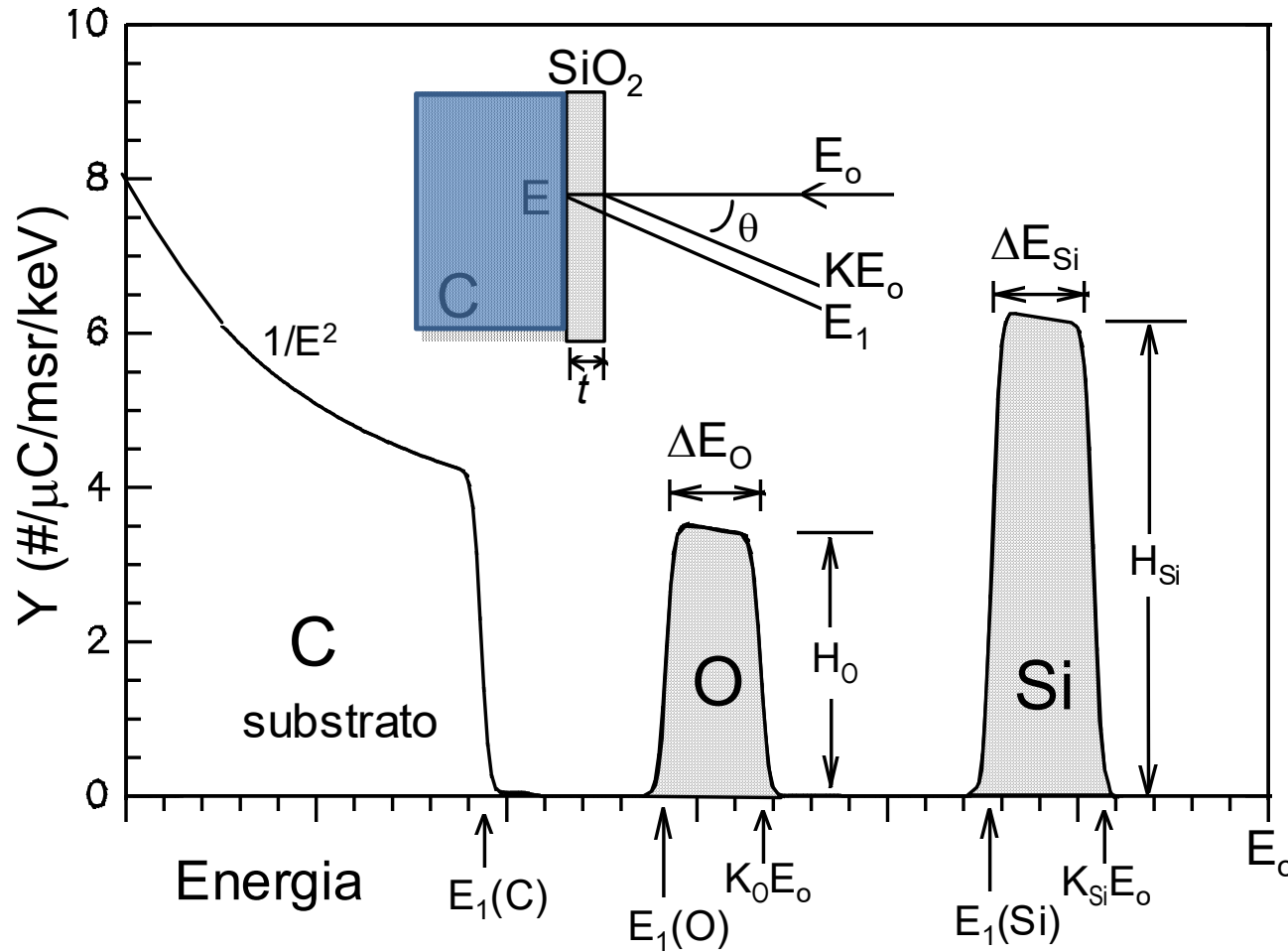


50 cm





# Um espectro RBS didático (feixe $\alpha$ com 2,4MeV)



$$\Delta E_O = [S]_O^{meio} . t$$

$$\Delta E_{Si} = [S]_{Si}^{meio} . t$$

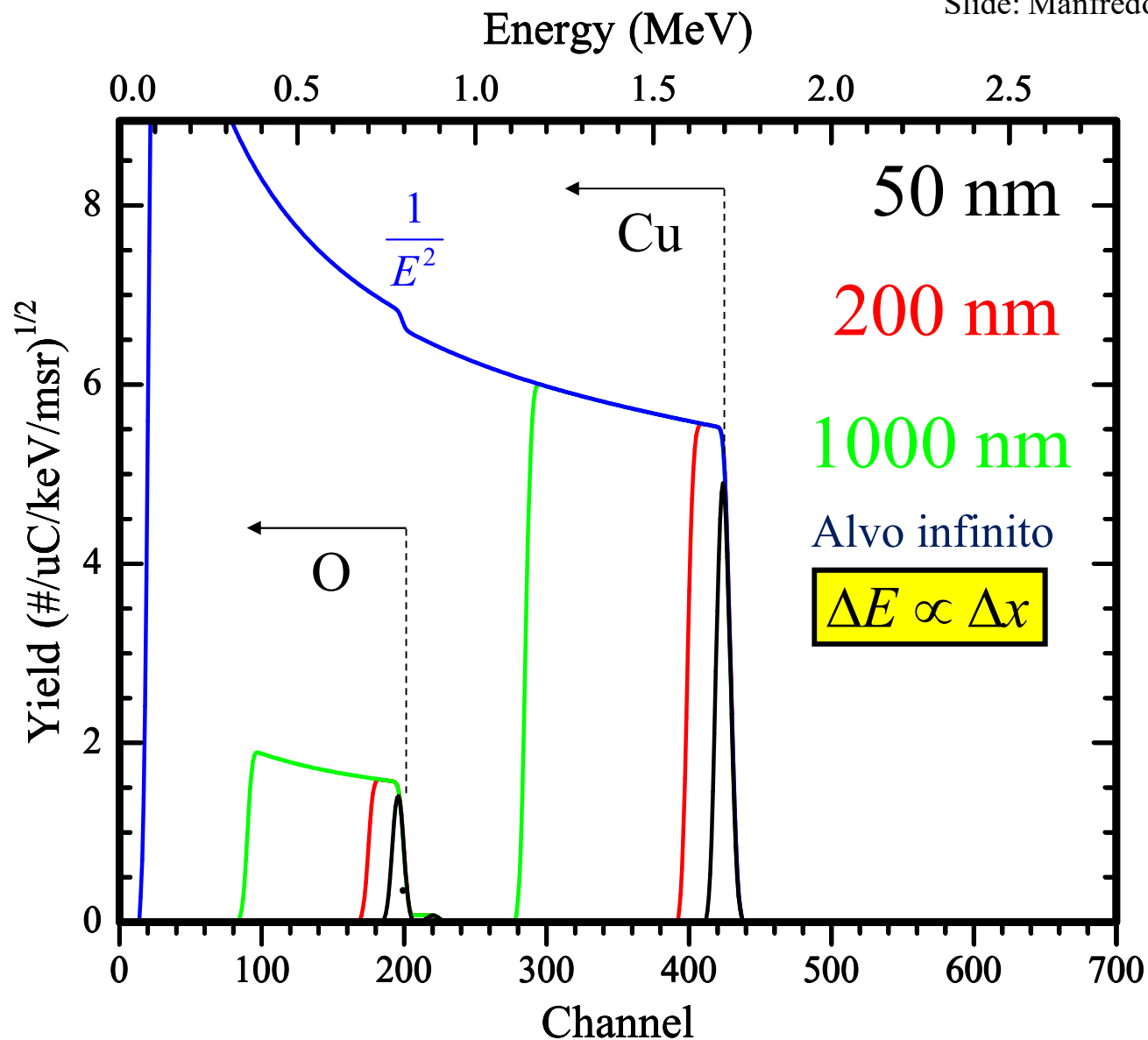
$$E_1(\text{C}) = K_C E_0 - [S] . t$$

$$E_1(\text{O}) = K_O E_0 - [S] . t$$

$$E_1(\text{Si}) = K_{Si} E_0 - [S] . t$$

# TÉCNICAS ANALÍTICAS -RBS

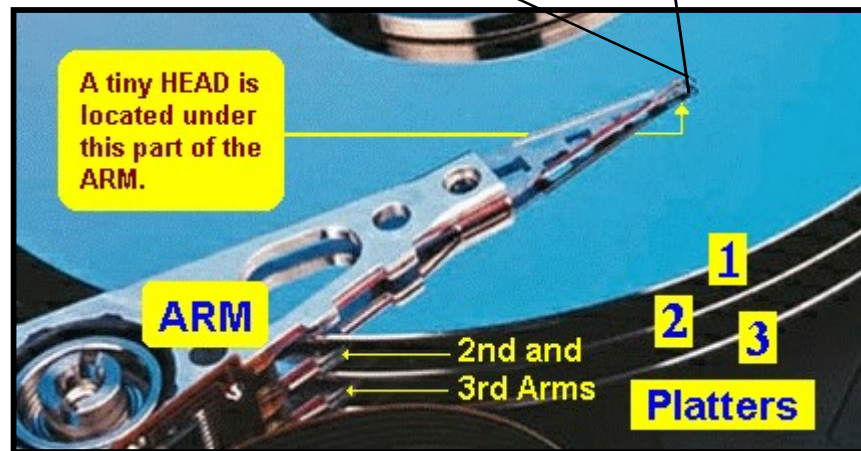
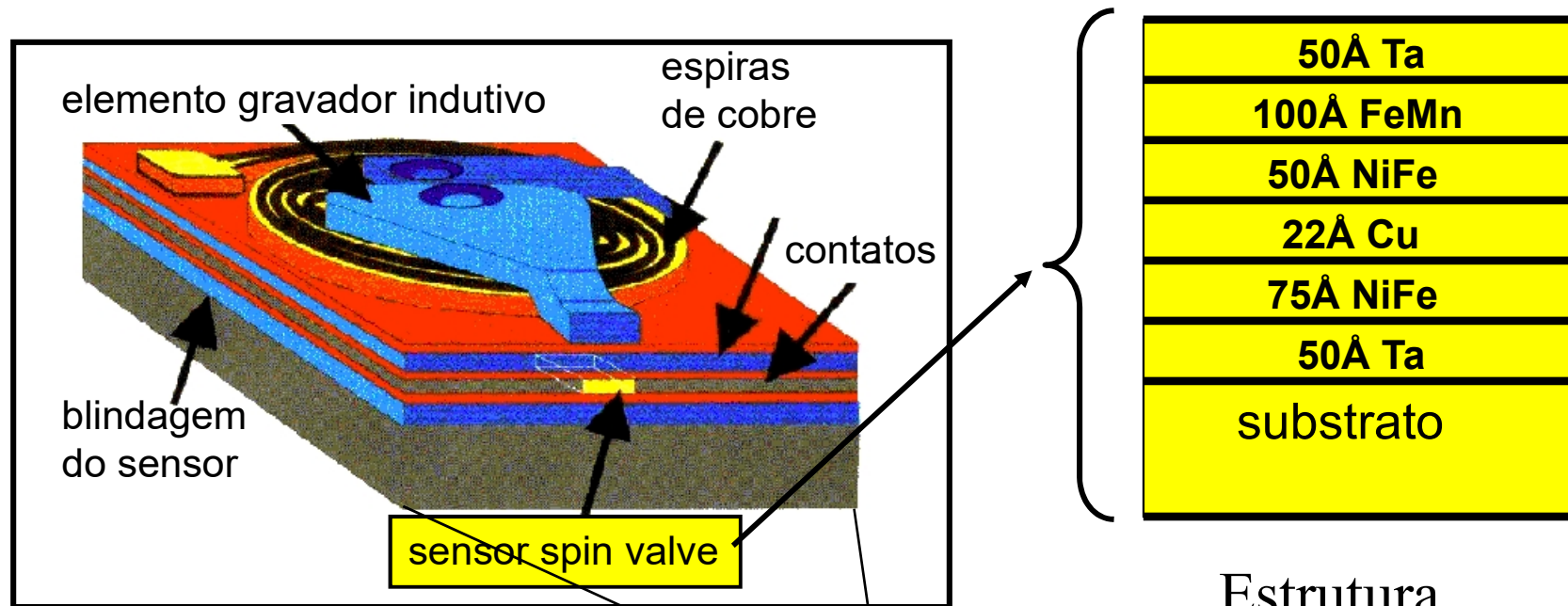
Slide: Manfredo H. Tabacniks



RBS – Dependência da espessura (CuO alvo)



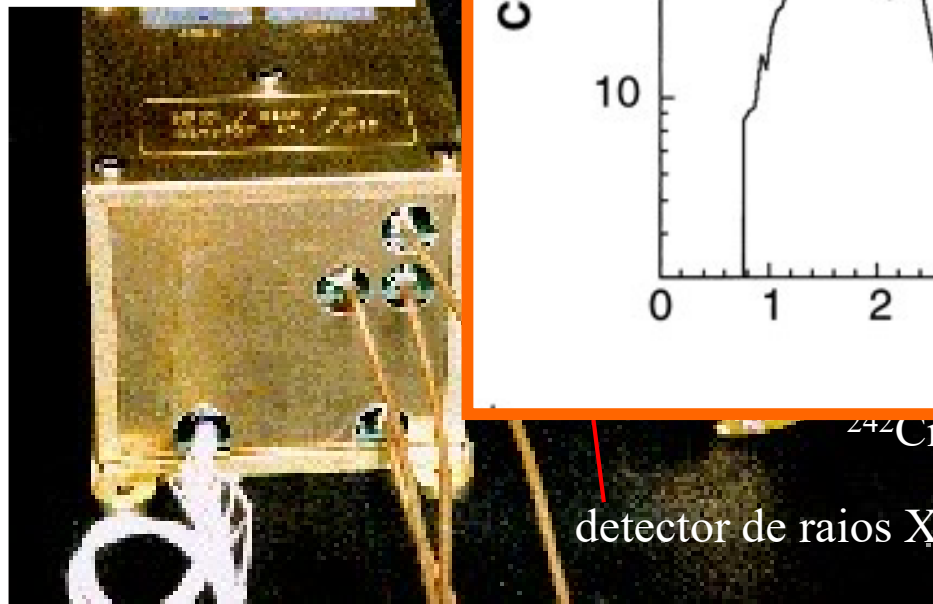
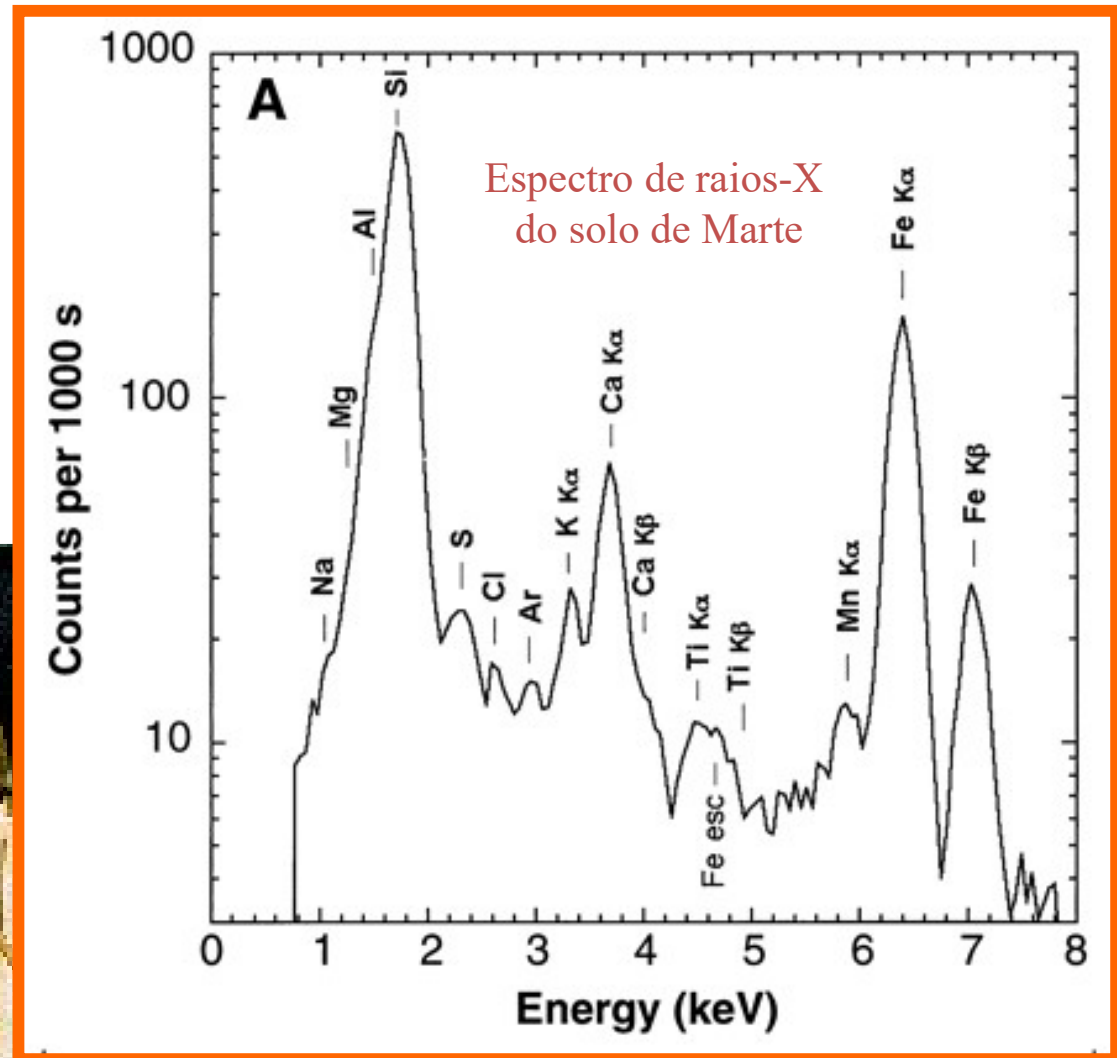
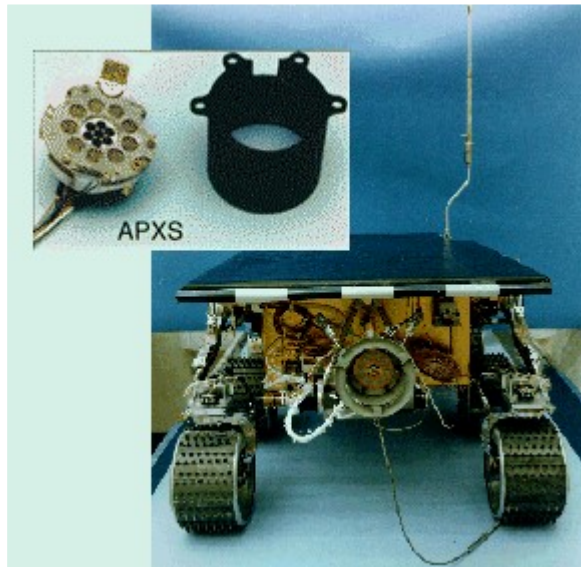
# Cabeça magnética gravador/sensor (tipo spin-valve)



<http://mirror.href.com/thestarman/asm/mbr/cuhds.gif>

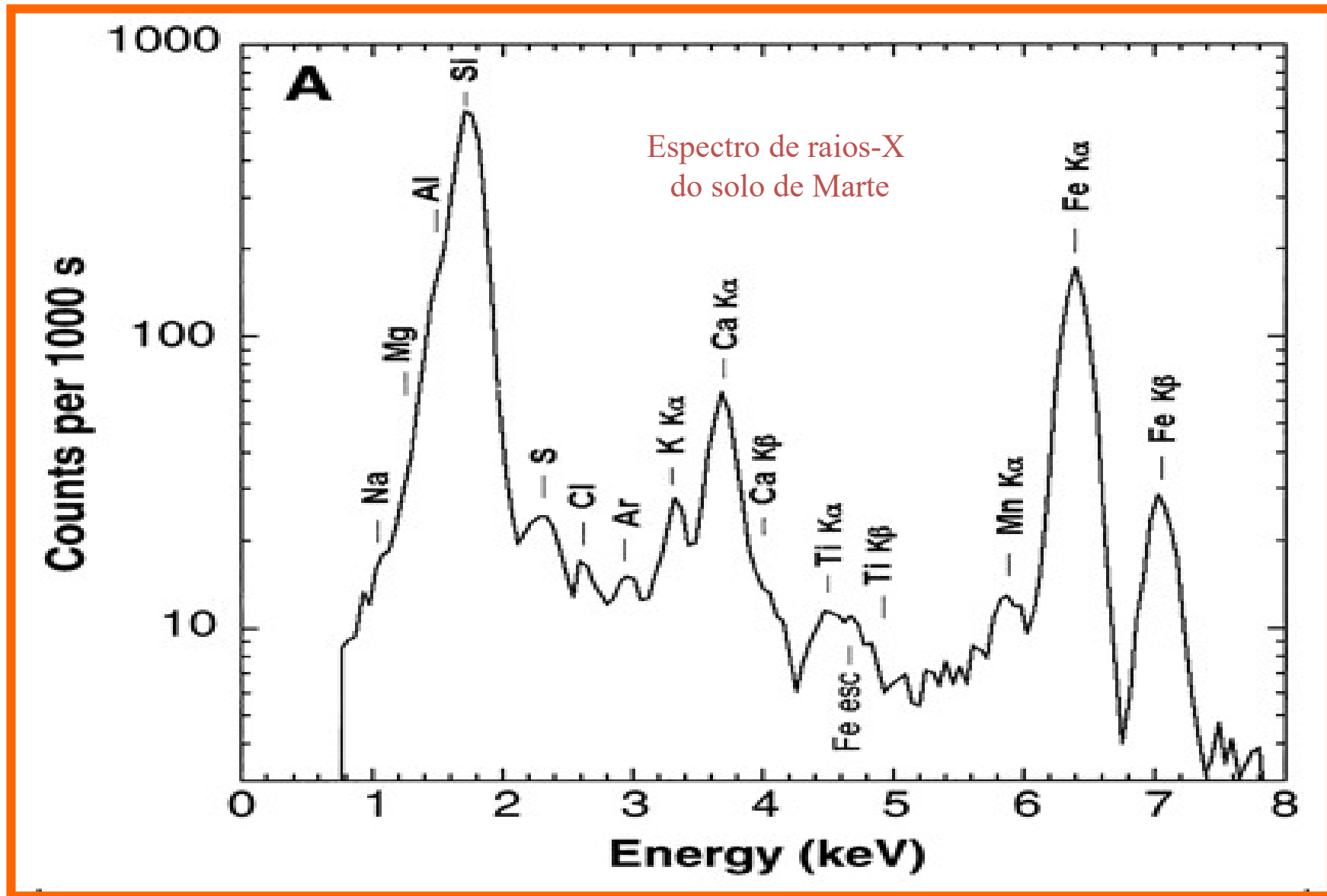
Estrutura totalmente determinada através dos métodos PIXE e RBS  
IBM-ARC 1995

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





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



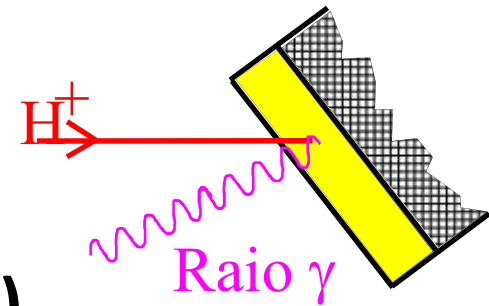
# Métodos de feixe iônico

## **RBS + ERDA + PIXE**

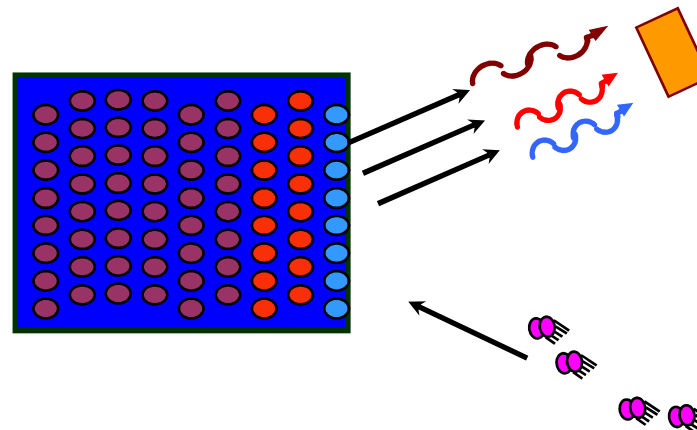
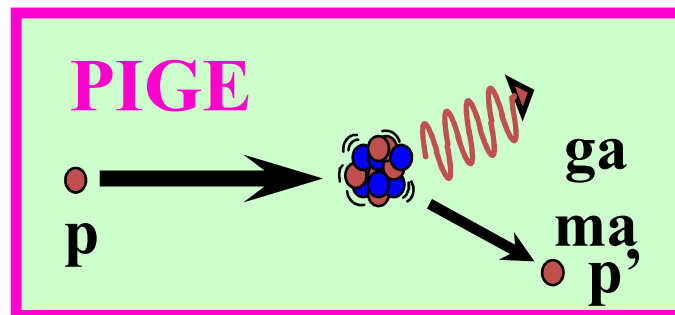
- Alta sensibilidade:  $< 10^{14}$  Au/cm<sup>2</sup>
- Toda a tabela periódica
- PIXE calibrado com padrões
- RBS é absoluto: não necessita calibração
- Perfil em profundidade (  $\Delta x \sim 100\text{\AA}$  )
- Sensível à topografia (rugosidade)
- Rápido: 10-20 min
- Feixe externo para amostras especiais

# TÉCNICA ANALÍTICA PIGE

(Particle Induced  $\gamma$ -ray Emission)



Reações do tipo  $(p,\gamma)$ ,  $(p, p' \gamma)$  e  $(p,\alpha\gamma)$



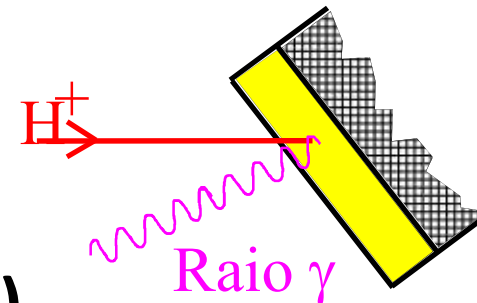
Detetor  
(HpGe, NaI)

Partícula

- Não Destrutivo
- Alta Sensibilidade: ppm
- Rápido: 10-20 min
- Identificar e quantificar elementos com  $Z < 10$
- Separação isotópica



# TÉCNICA ANALÍTICA PIGE (Particle Induced $\gamma$ -ray Emission)



*Espectro PIGE de contagens por canal para uma irradiação de uma folha fina de mica com prótons de aproximadamente 3 MeV (Medeiros, 2008).*

