

# LFN @ LATR: NRA

Detecção de B em materiais tecnológicos por reacções nucleares

N. Catarino, Rui M.C. Silva

DECN-IST, 10 Nov 2023

## Detecção de B em materiais tecnológicos por reacções nucleares

A fim de compreender e perspetivar de forma integradora e interligada a Física Nuclear e as suas potenciais aplicações tecnológicas, nas vertentes das reacções nucleares e detecção de elementos leves de grande importância tecnológica, como é o caso do boro, este projecto envolve...

### Trabalho e objetivos:

- compreensão da física das dispersões elásticas e inelásticas (reacções nucleares): fundamentação, realização prática e resultados espectáveis – espectros
- separação das contribuições elástica, EBS, e inelástica, NRA
- aplicação à caracterização de materiais a nível microscópico: informação pertinente – composição elementar, quantificação, estrutura e espessura – e extracção da informação pertinente: análise dos espectros
- familiarização com a cadeia electrónica de detecção: fundamentação e realização prática – detectores de radiação, processadores de sinal e analisadores multicanal
- familiarização com o equipamento de produção e transporte de feixes de partículas: acelerador, campos deflectores e linhas de transporte
- montagem das amostras a utilizar com operação (limitada) dos sistemas de vácuo; estabelecimento de condições de operação, irradiação das amostras e recolha de dados

### Análise de dados e resultados a atingir:

- análise (sumária) de espectros com calibração (conversão canal-energia) e identificação da composição elementar: identificação de elementos de  $Z \geq 11$  por EBS, identificação de elementos de  $^{11}\text{B}$ ,  $Z < 11$  (e.g.  $^6,^7\text{Li}$  e  $^{10,^{11}}\text{B}$ ) – por NRA
- quantificação integral de B detectado a partir de cálculo simples
- apresentação de resultados

## Detecção de B em materiais tecnológicos por reacções nucleares

### Justificação do B:

o boro –  $\sim 20\%$   $^{10}\text{B}$  e  $80\%$   $^{11}\text{B}$  - é um elemento com aplicações relevantes em áreas de grande importância e impacto tecnológico, nomeadamente

- electrónica: semicondutores (o B introduzido no Si em posições substitucionais é um aceitador de electrões, contribui p/ a condução c/ portadores positivos (buracos), devido à sua valência 3 (falta um electrão p/ saturar as 4 ligações c/ Si vizinhos da sua posição na rede);
- OLEDs azuis ou de cdo ajustável (o B incorporado em moléculas específicas torna-as activas na emissão de luz, p/ alterações na estrutura electrónica molecular);
- energética: electrólitos sólidos para baterias;
- armazenamento de hidrogénio;
- química: catálise (sequestração de óxidos de N, S, etc.);
- medicina: terapias BNCT/BPCT (o  $^{10}\text{B}/^{11}\text{B}$  incorporados em moléculas específicas é útil na eliminação de gliomas pela radiação emitida como resultado de reacções nucleares provocadas por neutrões/protões).

...

### Justificação das reacções nucleares:

pela sua especificidade – ditada p/ estrutura nuclear dos isótopos envolvidos – são praticamente o único meio de detectar, de forma não destrutiva (preservando qto possível a amostra) isótopos leves ( $Z < 12$ ) a energias baixas (e.g.  $< 3\text{-}5$  MeV, disponíveis em "pequenos" aceleradores): em geral, a razão sinal-ruído é favorável (p/ ausência de fundo significativo), e as interferências de outras reacções (devidas a outros isótopos), qdo existem são pouco significativas.

## LATR VG – the place

The machine...!  
2.5MV VG  
accelerator

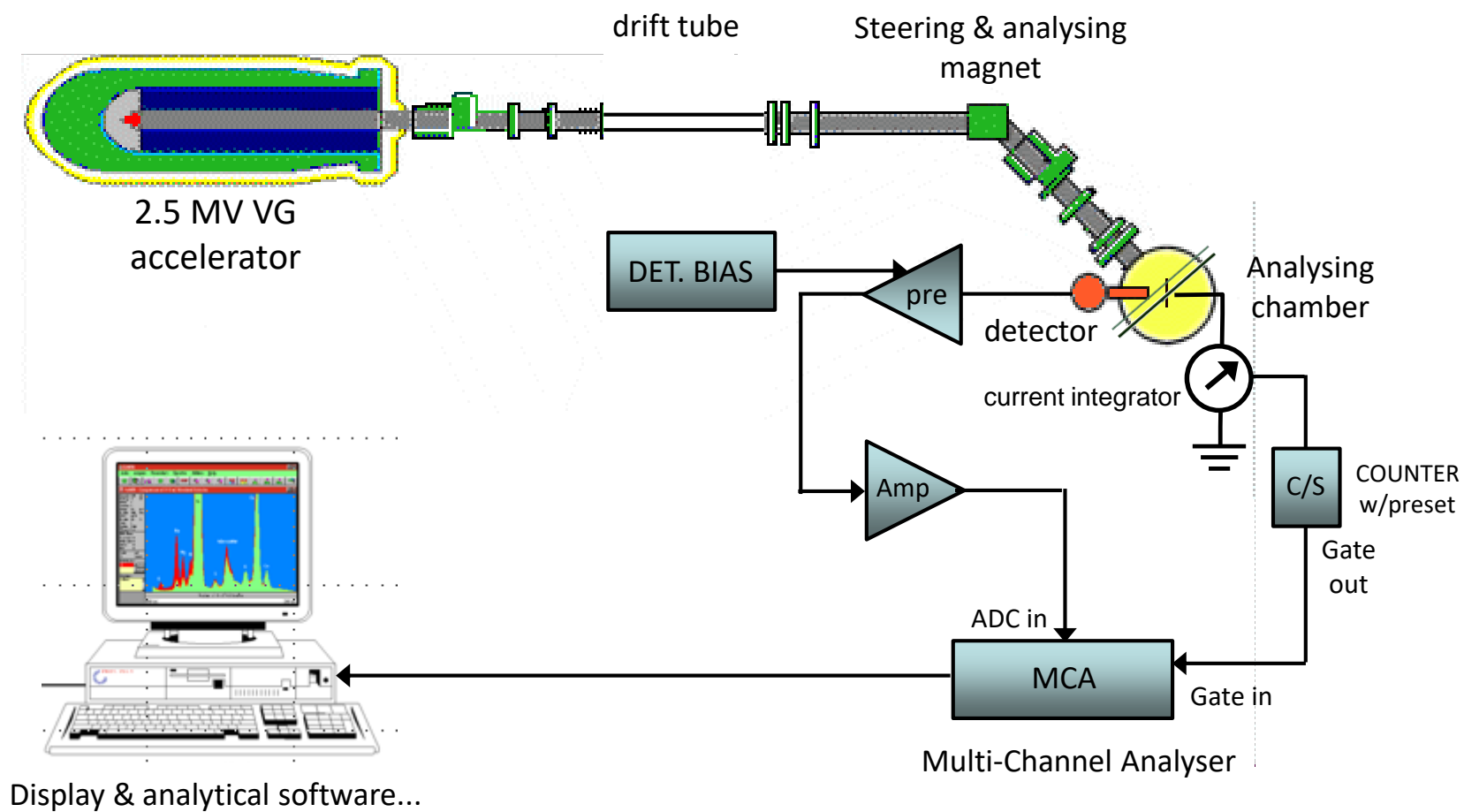


control & data acq.

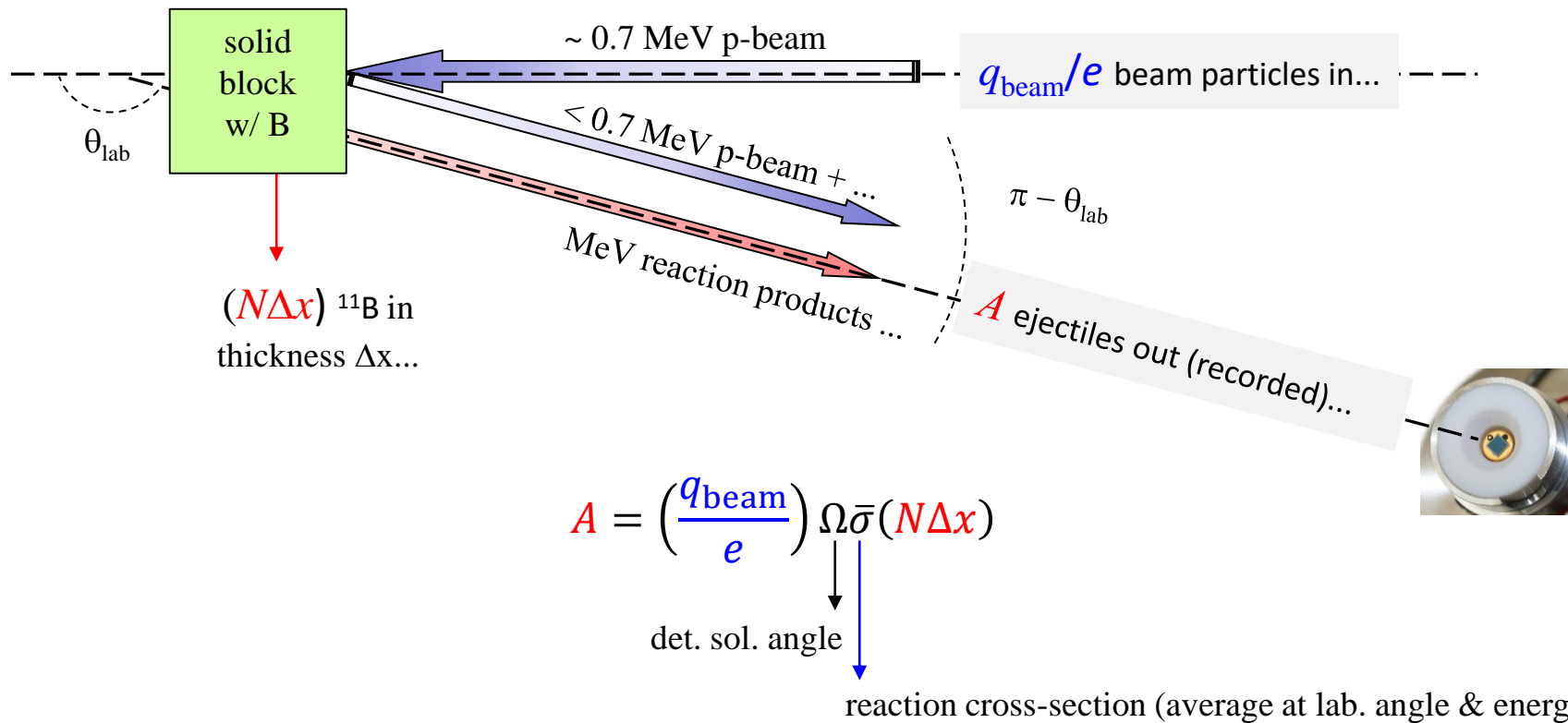


beam lines experiment hall

## The 'production' chain...

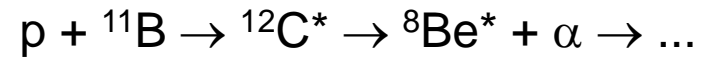
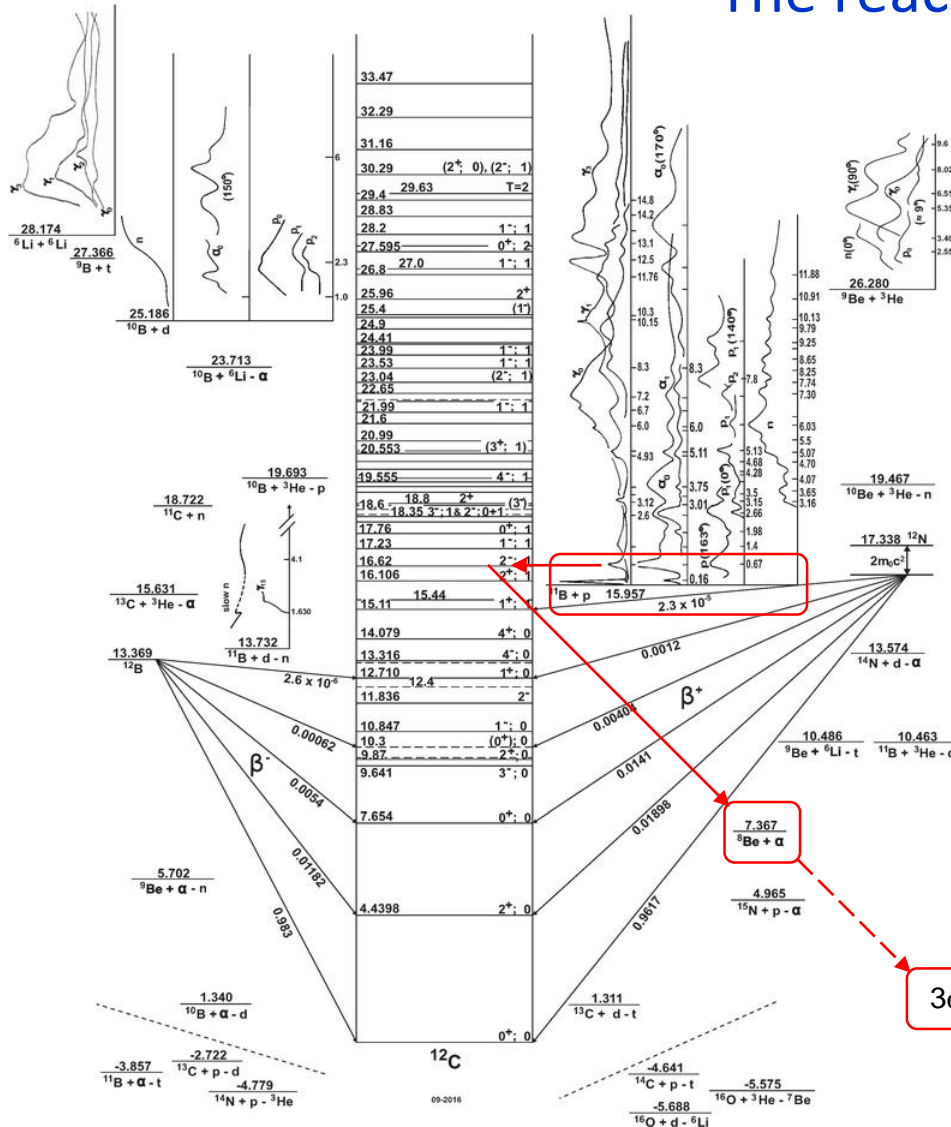


## The experiment layout...



*$N\Delta x$  "wanted" !*

## The reaction...



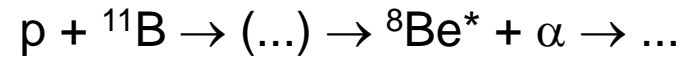
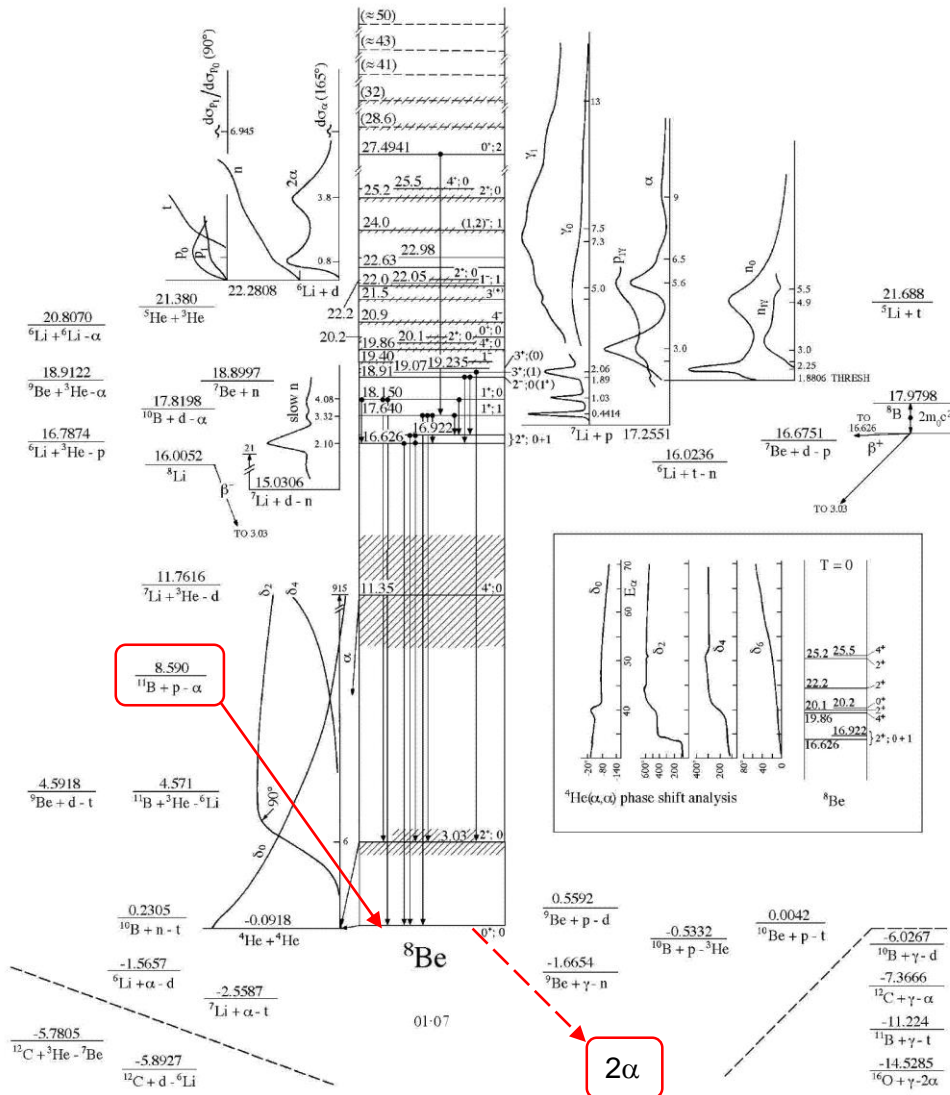
$$E^* = 16.62 \text{ MeV}$$

$I_\pi = 2^-, \Gamma = 0.28 \text{ MeV}$

cf. <https://www.tunl.duke.edu/nucldata>

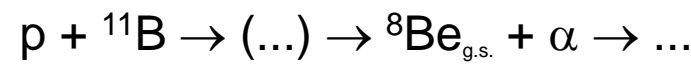


## The reaction...



$$E^* = 3.03 \text{ MeV}$$

$$I\pi = 2^+, \Gamma = 1.513 \text{ MeV}$$

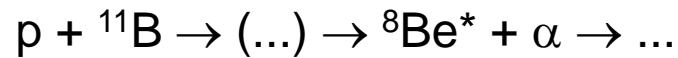
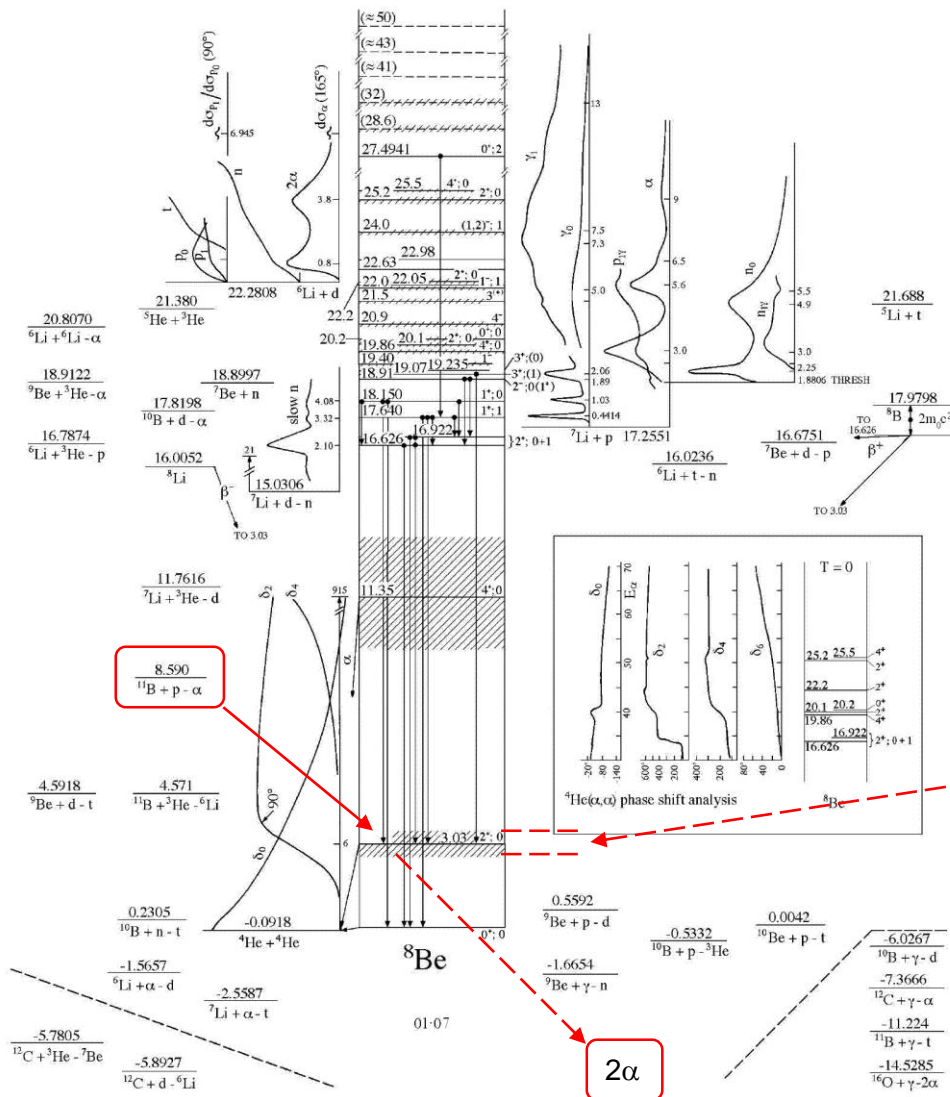


$$I\pi = 0^+, \Gamma = 5.57 \text{ eV}$$

cf. <https://www.tunl.duke.edu/nucldata>

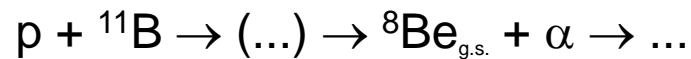


## The reaction...



$$E^* = 3.03 \text{ MeV}$$

$$I\pi = 2^+, \Gamma = 1.513 \text{ MeV}$$



$$I_{\pi} = 0^+, \Gamma = 5.57 \text{ eV}$$

cf. <https://www.tunl.duke.edu/nucldata>

## The reaction...

### NRA CALCulator

(C) R.C. da Silva (DECN/IST, 2019)

Type reaction as  ${}^AX(a,b){}^{A'}Y$ :

EXAMPLES: type  ${}^9\text{Be}(p,\alpha){}^6\text{Li}$  as  ${}^9\text{Be}(p,a){}^6\text{Li}$  or  ${}^9\text{Be}(p,4\text{He}){}^6\text{Li}$

(Target  ${}^AX$  taken as stationary in laboratory frame)

type  ${}^{241}\text{Am}(g,a)$  for  $\alpha$  decay of  ${}^{241}\text{Am}$

type  ${}^{241}\text{Am}(g,p/n)$  for p/n separation energy

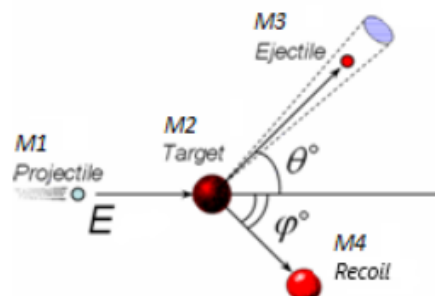
type  ${}^{70}\text{Ga}(+e,g)$  for E.C. decay of  ${}^{70}\text{Ga}$

type  ${}^{70}\text{Ga}(g,e-/e+)$  for  $\beta^-/+$  decay of  ${}^{70}\text{Ga}$

PRIMARY ION energy E/MeV =

Recoil/Daughter EXCITED STATE energy/MeV =

SCATTERING ANGLE/ejectile angle  $\theta$ /degrees =



CALC

LAB OUTPUTS: \_\_\_\_\_ ZMF OUTPUTS: \_\_\_\_\_

## The reaction...

### NRA CALCulator

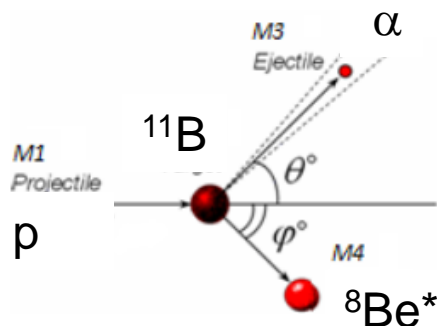
(C) R.C. da Silva (DECN/IST, 2019)

Type reaction as  ${}^AX(a,b){}^AY$ :

(Target  ${}^AX$  taken as stationary in laboratory frame)



PRIMARY ION energy E/MeV =



EXAMPLES: type  ${}^9\text{Be}(p,\alpha){}^6\text{Li}$  as  ${}^9\text{Be}(p,\alpha){}^6\text{Li}$  or  ${}^9\text{Be}(p,4\text{He}){}^6\text{Li}$

type  ${}^{241}\text{Am}(g,\alpha)$  for  $\alpha$  decay of  ${}^{241}\text{Am}$

type  ${}^{241}\text{Am}(g,p/n)$  for p/n separation energy

type  ${}^{70}\text{Ga}(+e,g)$  for E.C. decay of  ${}^{70}\text{Ga}$

type  ${}^{70}\text{Ga}(g,e-/e+)$  for  $\beta^-/\beta^+$  decay of  ${}^{70}\text{Ga}$

Recoil/Daughter EXCITED STATE energy/MeV =

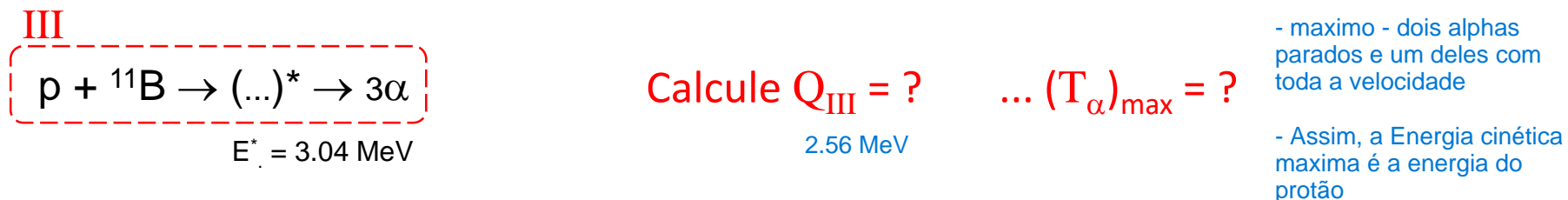
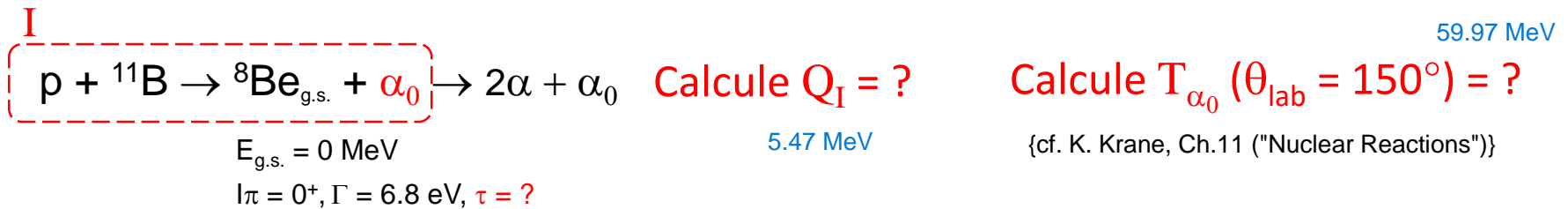
SCATTERING ANGLE/ejectile angle  $\theta$ /degrees =

CALC

LAB OUTPUTS: ? ZMF OUTPUTS:

## The reaction(s)...

Canais possíveis:

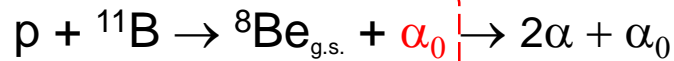


Qual o intervalo de energias esperado p/ o espectro ?  $> 0 \text{ MeV}$  até  $E = \dots \text{ MeV} ?$

maximo tem de ser superior a 3alphas, e corresponderá a soma das energias antes da reacão

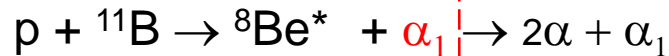
## The reaction...

As secções eficazes: cf. <https://www-nds.iaea.org/exfor/ibandl.htm>



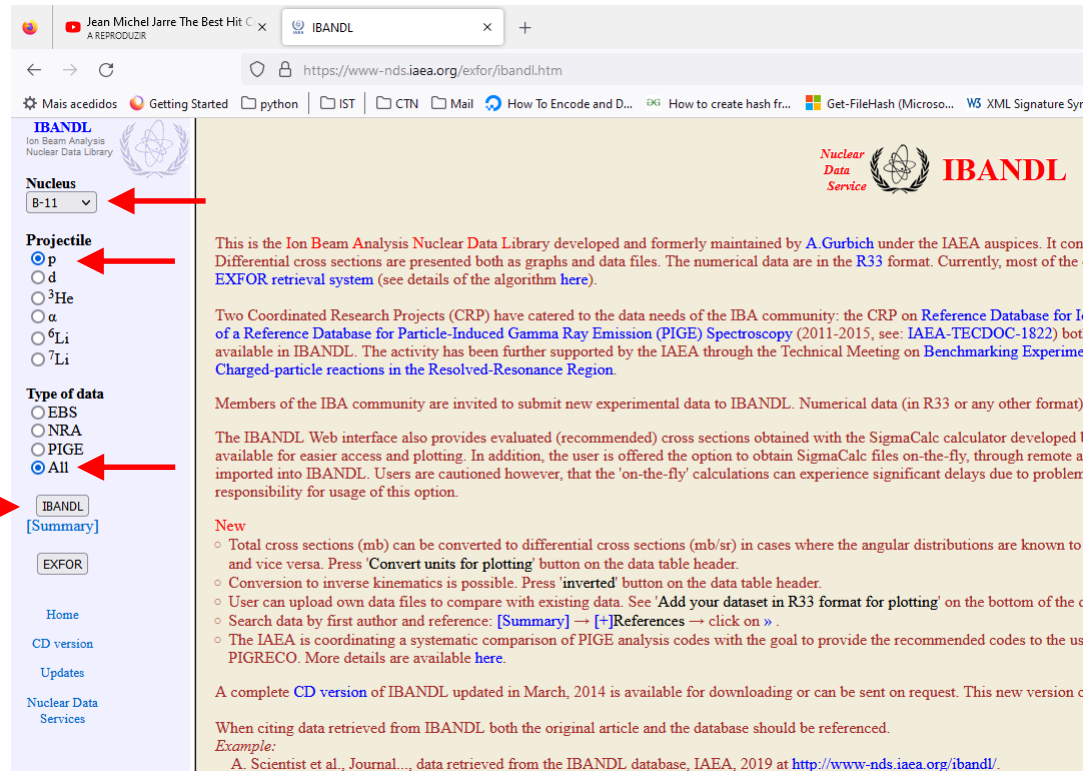
$$E_{\text{g.s.}} = 0 \text{ MeV}$$

$$I\pi = 0^+, \Gamma = 6.8 \text{ eV}$$



$$E^* = 3.04 \text{ MeV}$$

$$I\pi = 0^+, \Gamma = 1.53 \text{ MeV}$$



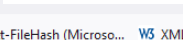


The screenshot shows the IBANDL web interface. The sidebar on the left contains the following filters:

- Nucleus:** B-11 (selected)
- Projectile:** p (selected), d,  ${}^3\text{He}$ ,  $\alpha$ ,  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^7\text{Li}$
- Type of data:** EBS, NRA, PIGE, All (selected)

The main content area displays the reaction details and cross-section data. The reaction is  $p + {}^{11}\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be}_{\text{g.s.}} + \alpha_0 \rightarrow 2\alpha + \alpha_0$ . The energy is  $E_{\text{g.s.}} = 0 \text{ MeV}$  and the spin-parity is  $I\pi = 0^+, \Gamma = 6.8 \text{ eV}$ . The interface also includes a search bar, a list of data files, and a summary of the reaction.

As secções eficazes: cf. <https://www-nds.iaea.org/exfor/iband1.htm>

<https://www-nds.iaea.org/exfor/ibandl.htm>

Mais acedidos Getting Started python IST CTN Mail How To Encode and D... How to create hash fr... Get-FileHash (Microso... XML Signature Syntax ... The Risk Assessment I... Convert Coordinates

**IBANDL**  
 Ion Beam Analysis  
 Nuclear Data Library

**Nucleus**  
 B-11

**Projectile**  
☒ p  
☐ d  
☐ <sup>3</sup>He  
☐ α  
☐ <sup>6</sup>Li  
☐ <sup>7</sup>Li

**Type of data**  
☐ EBS  
☐ NRA  
☐ PIGE  
☒ All

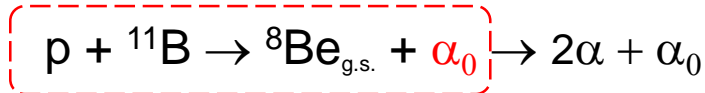
IBANDL  
 [Summary]

Home  
 CD version  
 Updates  
 Nuclear Data Services

#	Reaction	Angle	Energy	Y	Date	Ref.	View	Save	mb
47	<sup>11</sup> B(p,α) <sup>8</sup> Be	122.5°	900-3500	24	2021-04-28	M.Munch+(2020), European Physical Journal A: Hadrons and Nuclei, Vol.56, p.17 »	View	Save	<input type="checkbox"/>
48	<sup>11</sup> B(p,α) <sup>8</sup> Be	120°	1790-2940	68	2011-09-01	X4+ Ju.G.Mashkarov+(1975), Jour. Izv. Rossiiskoi Akademii Nauk, Ser.Fiz., Vol.39, p.1736 »	View	Save	<input type="checkbox"/>
49	<sup>11</sup> B(p,α) <sup>8</sup> Be	117.5°	900-3500	24	2021-04-28	X4+ M.Munch+(2020), European Physical Journal A: Hadrons and Nuclei, Vol.56, p.17 »	View	Save	<input type="checkbox"/>
50	<sup>11</sup> B(p,α) <sup>8</sup> Be	112.5°	900-3500	24	2021-04-28	X4+ M.Munch+(2020), European Physical Journal A: Hadrons and Nuclei, Vol.56, p.17 »	View	Save	<input type="checkbox"/>
51	<sup>11</sup> B(p,α) <sup>8</sup> Be	107.5°	900-3500	24	2021-04-28	X4+ M.Munch+(2020), European Physical Journal A: Hadrons and Nuclei, Vol.56, p.17 »	View	Save	<input type="checkbox"/>
52	<sup>11</sup> B(p,α) <sup>8</sup> Be	102.5°	900-3500	24	2021-04-28	X4+ M.Munch+(2020), European Physical Journal A: Hadrons and Nuclei, Vol.56, p.17 »	View	Save	<input type="checkbox"/>
53	<sup>11</sup> B(p,α) <sup>8</sup> Be	97.5°	900-3500	24	2021-04-28	X4+ M.Munch+(2020), European Physical Journal A: Hadrons and Nuclei, Vol.56, p.17 »	View	Save	<input type="checkbox"/>
54	<sup>11</sup> B(p,α) <sup>8</sup> Be	87.5°	900-3500	24	2021-04-28	X4+ M.Munch+(2020), European Physical Journal A: Hadrons and Nuclei, Vol.56, p.17 »	View	Save	<input type="checkbox"/>
55	<sup>11</sup> B(p,α) <sup>8</sup> Be	82.5°	900-3500	24	2021-04-28	X4+ M.Munch+(2020), European Physical Journal A: Hadrons and Nuclei, Vol.56, p.17 »	View	Save	<input type="checkbox"/>
56	<sup>11</sup> B(p,α) <sup>8</sup> Be	77.5°	900-3500	24	2021-04-28	X4+ M.Munch+(2020), European Physical Journal A: Hadrons and Nuclei, Vol.56, p.17 »	View	Save	<input type="checkbox"/>
57	<sup>11</sup> B(p,α) <sup>8</sup> Be	72.5°	900-3500	24	2021-04-28	X4+ M.Munch+(2020), European Physical Journal A: Hadrons and Nuclei, Vol.56, p.17 »	View	Save	<input type="checkbox"/>
58	<sup>11</sup> B(p,α) <sup>8</sup> Be	67.5°	900-3500	25	2021-04-28	X4+ M.Munch+(2020), European Physical Journal A: Hadrons and Nuclei, Vol.56, p.17 »	View	Save	<input type="checkbox"/>
59	<sup>11</sup> B(p,α) <sup>8</sup> Be	150°	460-1530	33	2018-09-10	X4+ J.Liu+(2002), Jour. Nucl. Instrum. Methods in Physics Res., Sect.B, Vol.190, p.107 »	View	Save	<input checked="" type="checkbox"/>
60	<sup>11</sup> B(p,γ) <sup>12</sup> C E <sub>γ</sub> =16103-17231keV	360°	160-1390	3	2020-04-16	X4- T.Huus and R. Day, Phys. Rev. 91, 599 (1953). »	View	Save	<input type="checkbox"/>
61	<sup>11</sup> B(p,γ) <sup>12</sup> C E <sub>γ</sub> =16433-19559keV	360°	520-3930	59	2018-12-17	X4+ R.E.Segel+(1965), Jour. Physical Review, Vol.139, p.B818 »	View	Save	<input type="checkbox"/>
62	<sup>11</sup> B(p,γ) <sup>12</sup> C E <sub>γ</sub> =17249-18560keV	90°	1410-2840	18	2018-12-17	X4+ L.N.Generalov+(2005), Jour. Izv. Rossiiskoi Akademii Nauk, Ser.Fiz., Vol.69, p.85 »	View	Save	<input type="checkbox"/>
63	<sup>11</sup> B(p,γ) <sup>12</sup> C E <sub>γ</sub> =18615-20192keV	90°	2900-4620	19	2018-12-17	X4+ M.C.Wright+(1982), Jour. Physical Review, Part C, Nuclear Physics, Vol.25, p.2823 »	View	Save	<input type="checkbox"/>

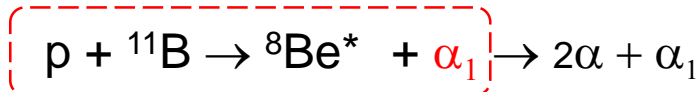
## The reaction...

As secções eficazes: cf. <https://www-nds.iaea.org/exfor/ibandl.htm>



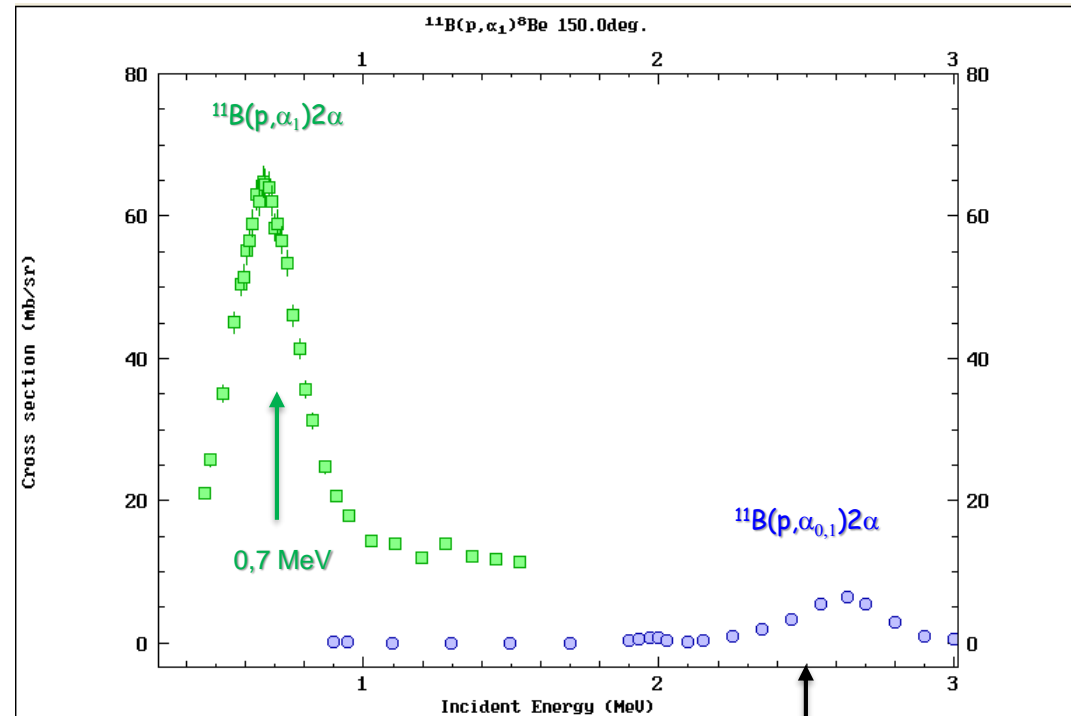
$$E_{\text{g.s.}} = 0 \text{ MeV}$$

$$I\pi = 0^+, \Gamma = 6.8 \text{ eV}$$



$$E^* = 3.04 \text{ MeV}$$

$$I\pi = 0^+, \Gamma = 1.53 \text{ MeV}$$



É a energia "correta" para que ocorra a reação (se for a mais os prótons passam quase sem interagir e se for de menos não há energia suficiente para que ocorra a reação)

Porquê a escolha da energia p/ o feixe ?



## The energy calibration...

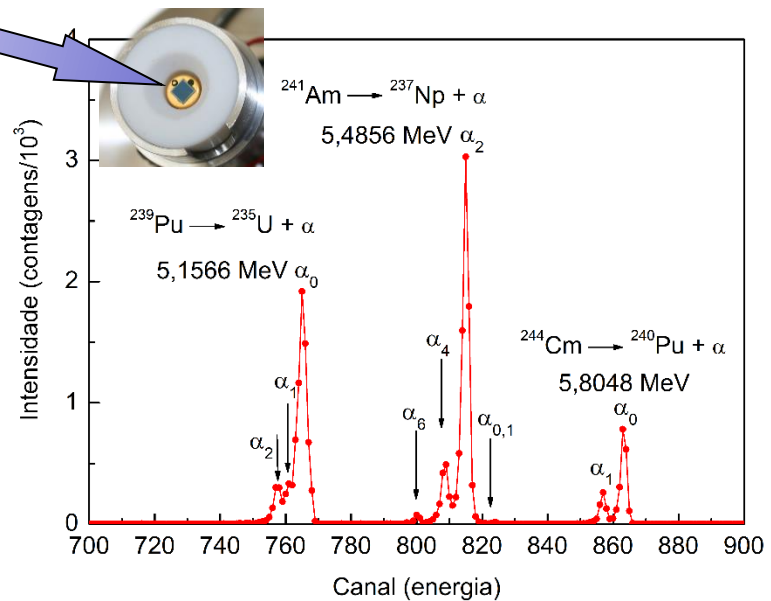
### Establishing the channel-to-energy conversions

Exemplo



Triple  
 $\alpha$  source

$\sim 5.5 \text{ MeV } \alpha$

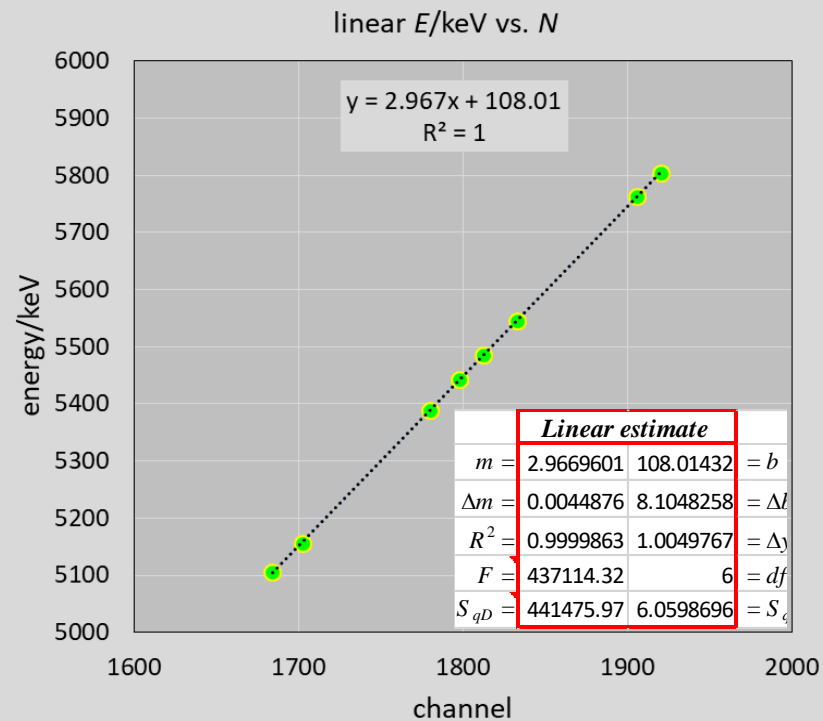


## The energy calibration...

### Establishing the channel-to-energy conversions

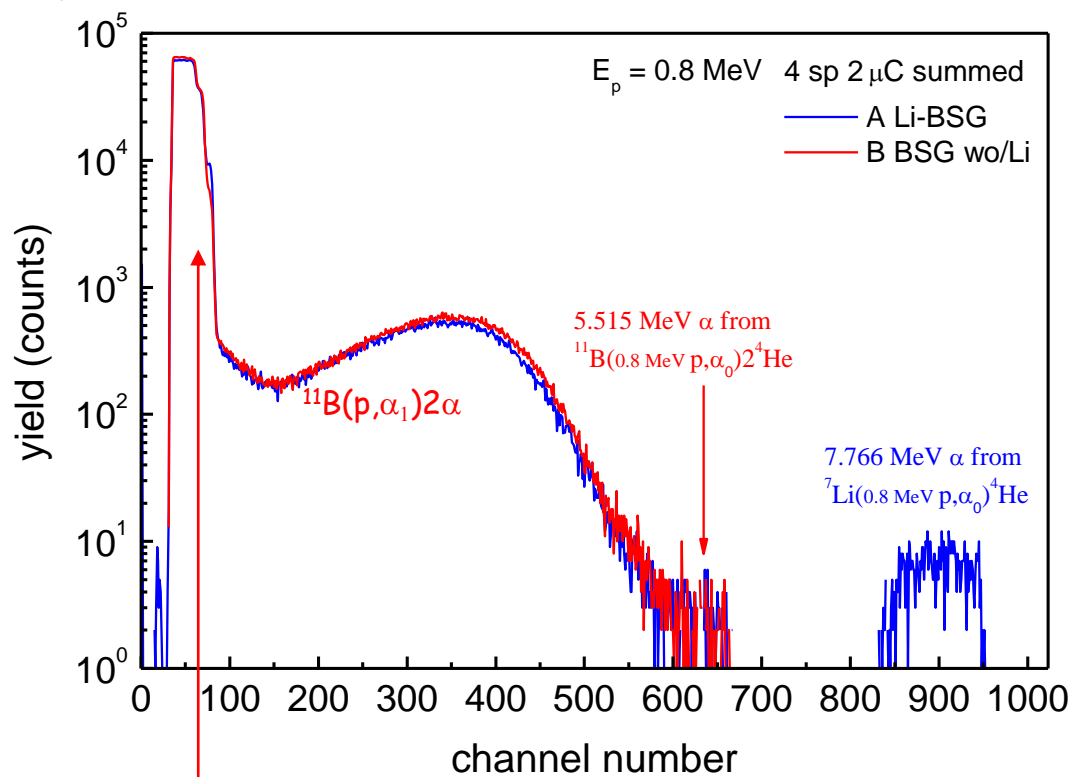
#### Exemplo

Fonte	Transição	I%	$E_n/\text{keV}$	$E/\text{keV}$
<sup>244</sup> Cm (0+)	18,1 <i>a</i>			5901.61
	$\alpha_0$	0+	76.4	0 5804.82
	$\alpha_1$	2+	23.6	42.824 5762.70
	$\alpha_2$	4+	0.022	141.690 5664
<sup>241</sup> Am (5/2-)	432,2 <i>a</i>			5637.81
	$\alpha_0$	5/2+	0.34	0 5544.5
	$\alpha_1$	7/2+	0.20	33.192 5511.47
	$\alpha_2$	5/2-	85.2	59.537 5485.56
	$\alpha_3$	9/2+	0.04	75.89 5469.45
	$\alpha_4$	7/2-	12.8	102.96 5442.80
	$\alpha_5$	11/2+	0.01	130.00 5416.27
	$\alpha_6$	9/2-	1.40	158.51 5388.23
	$\alpha_7$	13/2+	-	191.5 5355.9
	$\alpha_8$	11/2-	0.015	225.96 5321.9
<sup>239</sup> Pu (1/2+)	24110 <i>a</i>			5244.50
	$\alpha_0$	7/2-	0.03	0 5156.72
	$\alpha_1$	1/2+	73.3	0.0768 5156.59
	$\alpha_2$	3/2+	15.1	13.040 5144.3
	$\alpha_3$	9/2-	0.03	46.204 5111.2
	$\alpha_4$	5/2+	11.5	51.701 5105.5



## The (kind of) primary 'deliverable'...

Exemplo I: espectros de vidros de borossilicato (BSG) não dopado e dopado c/ Li, obtidos no LATR/IST



O que é isto ?

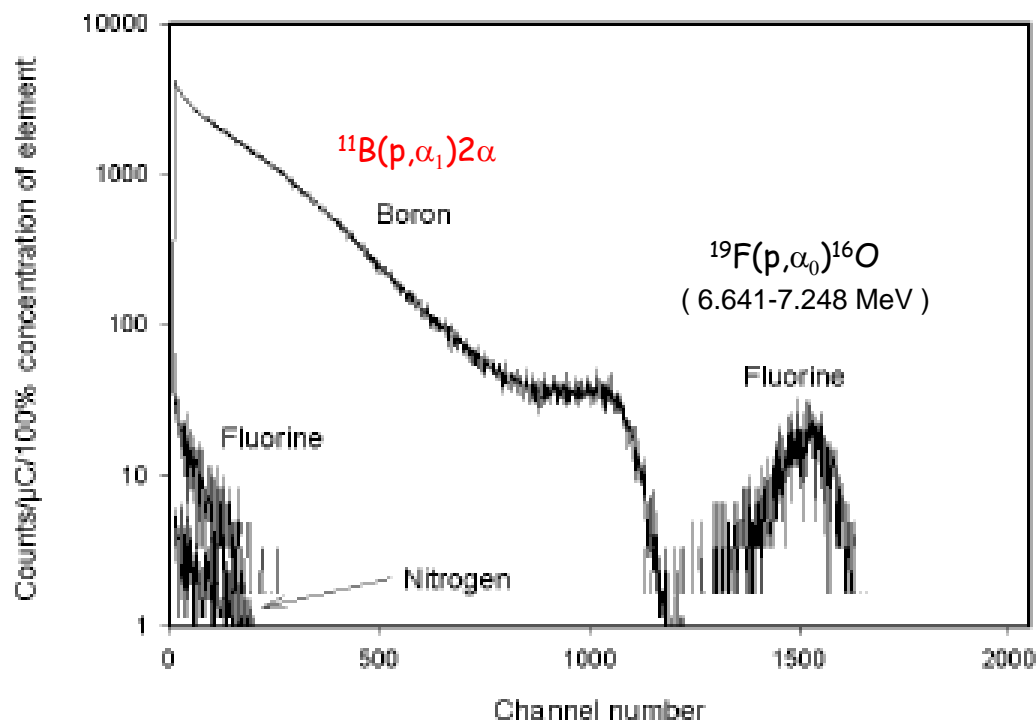
Raios x de transições atômicas e raios x emitidos devido à emissão de elétrons de auger

Qual dos vidros tem B ? ambos

Qual dos vidros tem Li ? azul

## The (kind of) primary 'deliverable'...

Exemplo: espectros de mistura  $\text{H}_2\text{BO}_3 + \text{CaF}_2$ , publicado em..



*Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry,  
Vol. 254, No. 1 (2002) 53–57*

The results...