

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CATANIA
FACOLTA' DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E NATURALI
Corso di Laurea in Fisica

Diagnostica di fasci radioattivi con rivelatori di particelle per la facility EXCYT dei LNS

Tesi di laurea di

Salvatore Cappello

Relatori: Ch.mo Prof. **D. Vinciguerra**
Dr. P. Finocchiaro

ANNO ACCADEMICO 1998-99

Sommario

La facility EXCYT ai LNS

Diagnostica di fasci radioattivi

Caratteristiche dei fasci
radioattivi in EXCYT

LEBI

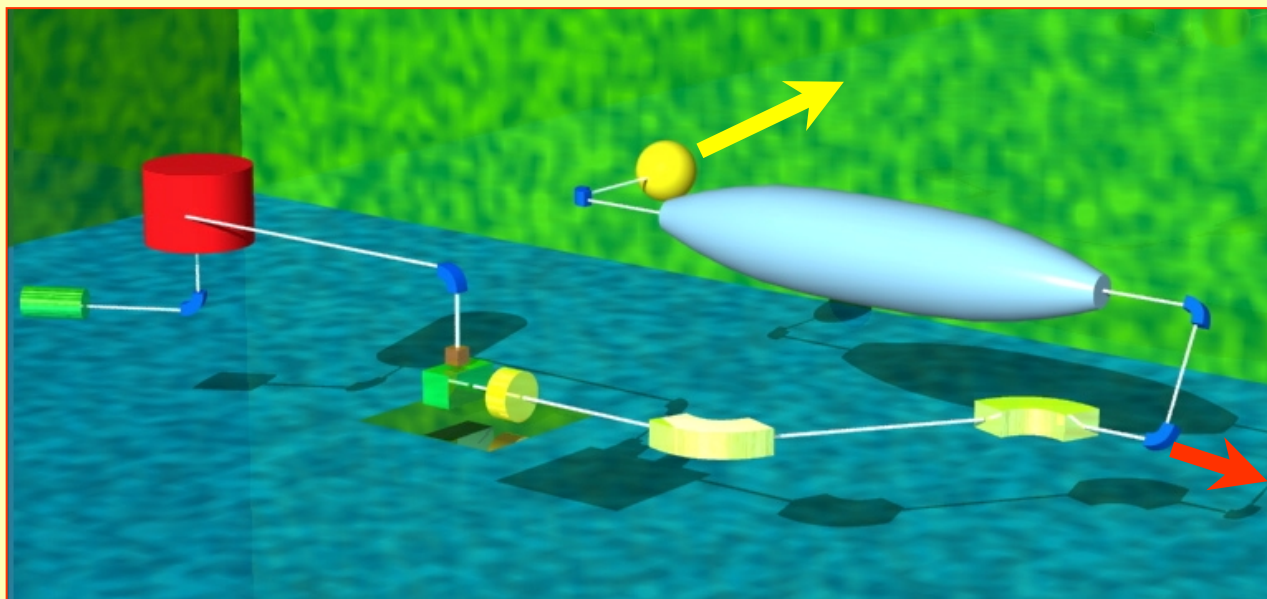
(Low Energy Beam Imager-Identifier)

HEBI

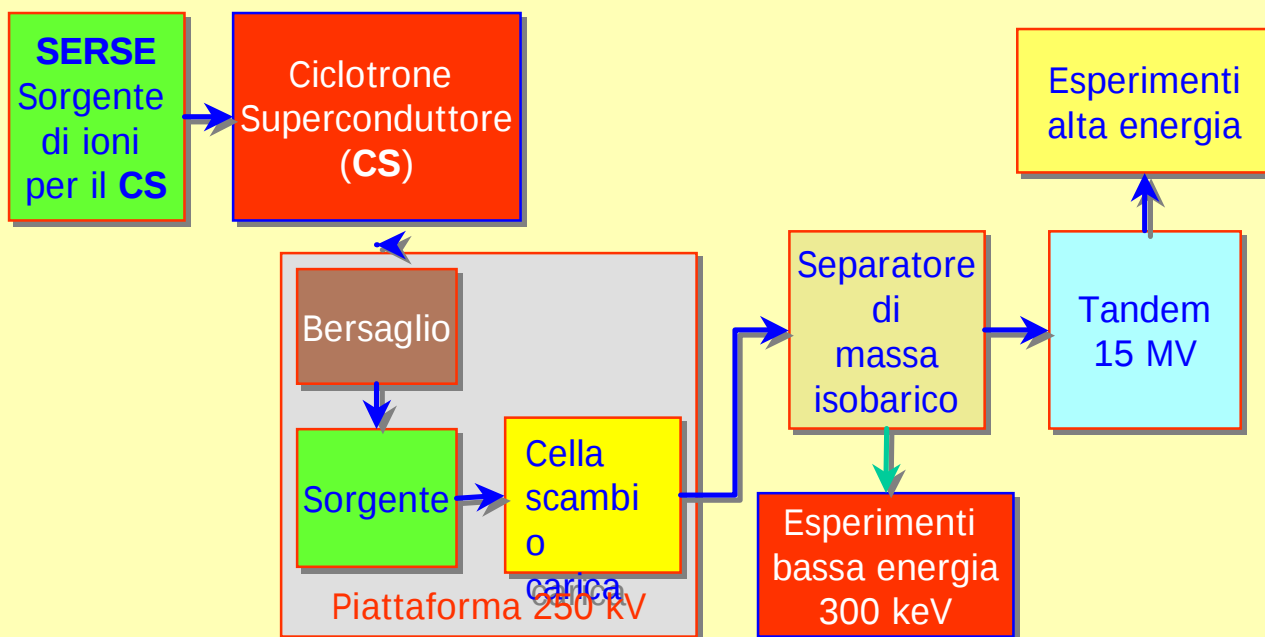
(High Energy Beam Identifier)

Conclusioni e prospettive

La facility EXCYT ai LNS



- Fascio primario 80 MeV/A (**CS**)
- Separatore isobarico a due stadi, risoluzione 1/20000
- Fascio secondario da 0.2 a 8 MeV/A (**Tandem**)
- Fascio a bassa energia da 300 keV



Diagnostica di fasci radioattivi

Motivazione fisica:

- Intensità previste dei fasci da 10^4 a 10^9 pps.
- Le normali tecniche diagnostiche raggiungono le loro intrinseche limitazioni a causa del basso rapporto segnale-rumore.
- Identificazione di fasci di ioni radioattivi prima degli esperimenti.



Possibile soluzione:

Aumentare la sensibilità incrementando il segnale.



Tecniche disponibili:

- Rivelatori al silicio
- Rivelatori al germanio
- Scintillatori
- Altro

Caratteristiche dei fasci radioattivi in EXCYT

Fasci radioattivi: ^{11}Be , ^{17}F , ^{18}F .

All'interno di ciascun fascio si considerano il radionuclide con cui si intende fare gli esperimenti e i suoi contaminanti isobari, sia instabili che stabili.



I contaminanti isobari rappresentano le specie nucleari con la maggiore probabilità di sfuggire alla selezione del separatore isobarico.



E' necessario non solo individuare la presenza nel fascio del nuclide di interesse, ma anche operare una chiara e netta discriminazione dai suoi possibili contaminanti.

	Fascio primario	Fascio Secondario	Contaminanti			
A=11	^{12}C	^{11}Be	^{11}Li	^{11}C	^{11}B	
Intensità relative	1	10^{-3}	10^{-5}	10^{-1}	10^{-1}	
Intensità assolute	10^9	10^6	10^4	10^8	10^8	
A=17	^{19}F	^{17}F	^{17}N	^{17}C	^{17}Ne	^{17}O
Intensità relative	1	10^{-2}	10^{-2}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-2}
Intensità assolute	10^9	10^7	10^7	10^5	10^5	10^7
A=18	^{19}F	^{18}F	^{18}N	^{18}Ne	^{18}O	
Intensità relative	1	10^{-1}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-1}	
Intensità assolute	10^9	10^8	10^6	10^6	10^8	

DECADIMENTI

- $^{11}\text{Be} \Rightarrow ^{11}\text{B};$
 $^{11}\text{C} \Rightarrow ^{11}\text{B};$
 $^{11}\text{Li} \Rightarrow ^{11}\text{Be} \Rightarrow ^{11}\text{B}.$
- $^{17}\text{F} \Rightarrow ^{17}\text{O};$
 $^{17}\text{C} \Rightarrow ^{17}\text{N} \Rightarrow ^{17}\text{O};$
 $^{17}\text{Ne} \Rightarrow ^{17}\text{F} \Rightarrow ^{17}\text{O};$
 $^{17}\text{N} \Rightarrow ^{17}\text{O}.$
- $^{18}\text{F} \Rightarrow ^{18}\text{O};$
 $^{18}\text{N} \Rightarrow ^{18}\text{O};$
 $^{18}\text{Ne} \Rightarrow ^{18}\text{F} \Rightarrow ^{18}\text{O}.$

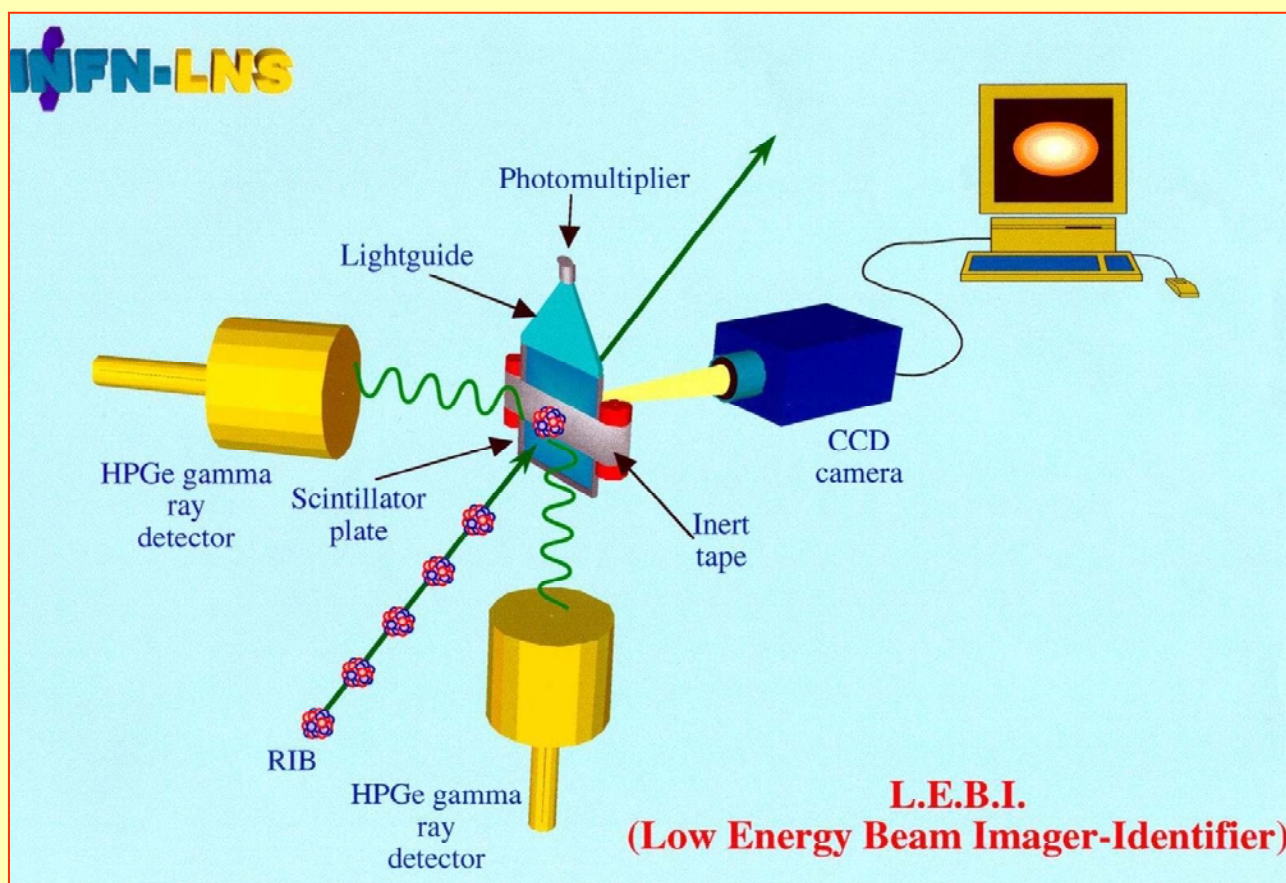
ATTIVITA'

Nucleo	$T_{1/2}$ (sec)	BETA	Energia Massima (keV)	Energia media pesata(keV)
^{11}Be	13.81	β^-	11506	9736
^{11}Li	8.50×10^{-03}	β^-	20610	18246
^{11}C	1223.4	EC β^+	1982.1	960
^{11}B	stabile	--	--	--
^{17}F	64.49	EC β^+	2760.7	1739
^{17}N	4.173	β^-	8680	3781
^{17}C	1.93×10^{-1}	β^-	13166	7662
^{17}Ne	1.09×10^{-1}	EC β^+	14530	8609
^{17}O	stabile	--	--	--
^{18}F	6586.2	EC β^+	1655.5	633
^{18}N	6.24×10^{-1}	β^-	13899	10066
^{18}Ne	1.67	EC β^+	4446	4853
^{18}O	stabile	--	--	--

Nuclide	$T_{1/2}$ (sec)	λ	t (sec)	N(0)	N(t) totale	Disintegr.
^{11}Be	13.81	0.050192	1	10^6	9.6×10^5	3.9×10^4
^{11}Li	0.0085	81.54673	1	10^4	3.8×10^{-32}	$\sim 10^4$
^{11}C	1223.4	0.000567	1	10^8	9.9×10^7	5.7×10^4
^{11}B	Stabile	--		10^8	$\sim 10^8$	0
^{17}F	64.49	0.010748	1	10^7	9.9×10^6	8×10^3
^{17}N	4.173	0.166103	1	10^7	8.6×10^6	1.4×10^6
^{17}C	0.193	3.591436	1	10^5	2.8×10^3	9.7×10^4
^{17}Ne	0.1092	6.347502	1	10^5	1.7×10^2	10^4
^{17}O	Stabile			10^7	1.2×10^7	0
^{18}F	6586.2	0.000105	1	10^8	$\sim 10^8$	~ 0
^{18}N	0.624	1.110813	1	10^6	3.3×10^5	6.7×10^5
^{18}Ne	1.672	0.414562	1	10^6	6.6×10^5	3.4×10^5
^{18}O	Stabile	--		10^8	$\sim 10^8$	0

LEBI (Low Energy Beam Imager-Identifier)

- Dispositivo di diagnostica per fasci radioattivi prima che vengano accelerati dal Tandem (fascio a bassa energia: 300 keV).
- Si pone dopo il primo ed il secondo stadio del separatore isobarico.
- Ausilio operazioni iniziali di tuning del fascio.



- (1) Visualizzazione del profilo trasversale del fascio
- (2) Identificazione degli ioni radioattivi

Rivelazione della radioattività dei nuclei instabili presenti nel fascio

LEBI: visualizzazione del fascio

OBIETTIVI

- Visualizzare la posizione.
- Misurare il FWHM del profilo trasversale.
- Discriminare spazialmente i radionuclidi, dove possibile.

SOLUZIONE

Impiantare il fascio radioattivo su di un nastro avvolgibile di Mylar alluminizzato, posto direttamente davanti ad una sottile lastra scintillante (CsI).

PRINCIPIO FISICO

- Le particelle β^- e β^+ rilasciano parte della loro energia all'interno del CsI.
- L'energia viene convertita in luce formando un'immagine luminosa sulla superficie del cristallo scintillante, che rappresenta il fascio impiantato sul nastro.

IL CODICE BIS++ (Beta in Scintillators)

- Simula con il metodo Monte Carlo la produzione di luce nel CsI quando viene attraversato da elettroni e positroni.
- La richiesta fatta alla simulazione è di poter mostrare, in prima approssimazione, la forma e le dimensioni dello *spot*

di luce prodotto dalle particelle beta nel cristallo scintillante.

LEBI: simulazione dello *spot* del fascio

Il dispositivo LEBI e' così schematizzato:

- una superficie piana di spessore trascurabile su cui si impianta il fascio radioattivo;
- una lastra scintillante di CsI(Tl) posta parallelamente a tale superficie ad una distanza di 0.5 mm, avente dimensioni 50x50x2 mm³;
- una telecamera CCD posizionata assialmente al cristallo.

Cosa si calcola:

- perdita di energia specifica e range di elettroni e positroni nella materia;
- numero di fotoni prodotti nel CsI;
- direzione di uscita dei fotoni.

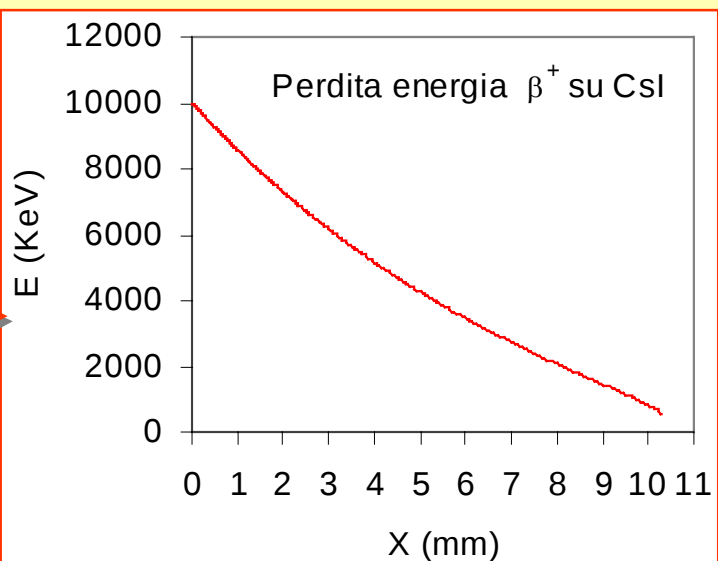
Perdita d'energia delle particelle beta nella materia

- per collisione;
- per radiazione: effetto bremsstrahlung;

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{tot} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{rad} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{coll}$$

Range beta:

- foglio di calcolo;
- formule semiempiriche.



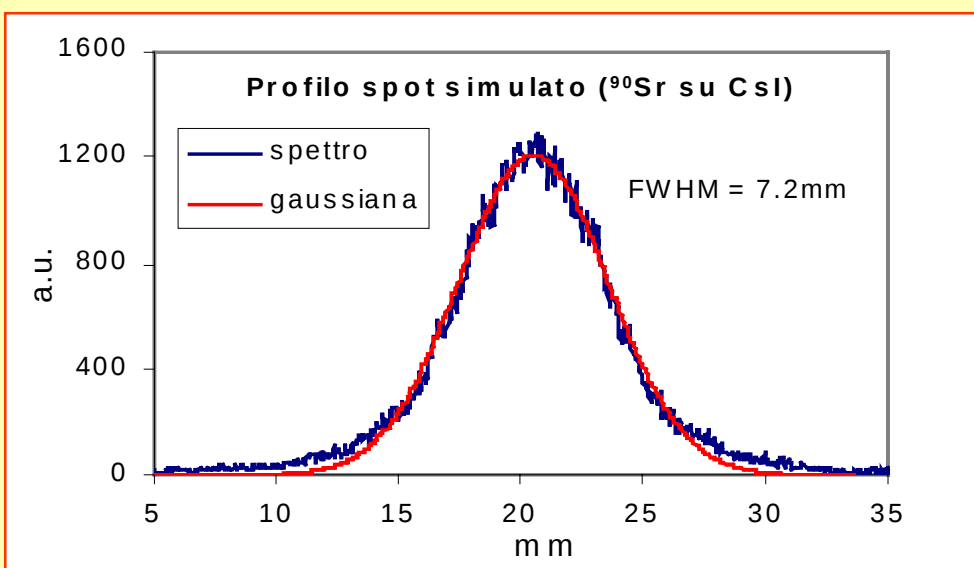
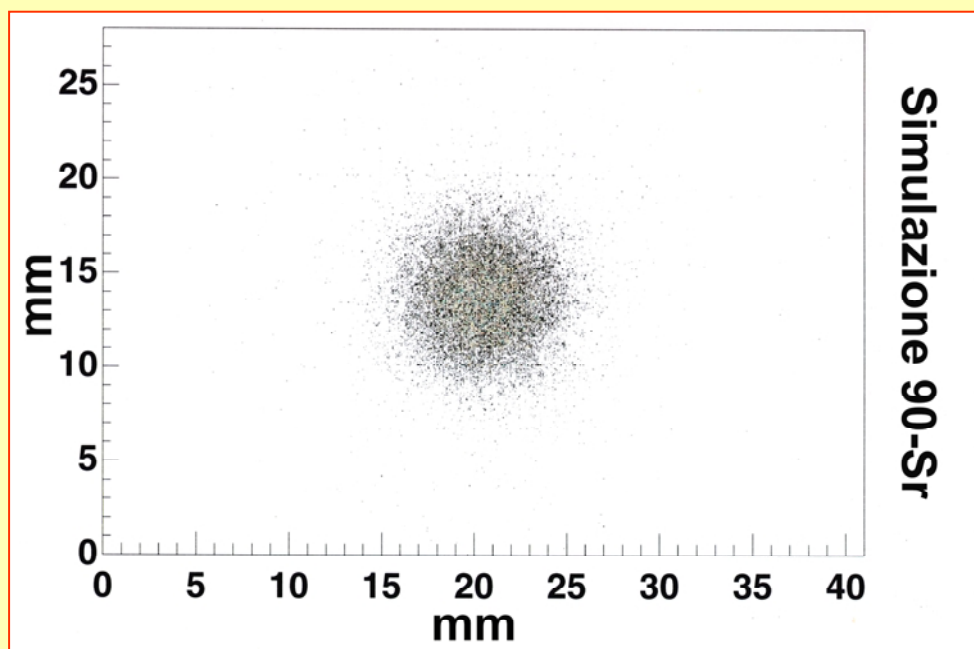
LEBI: simulazione con sorgente ^{90}Sr

Sorgente disponibile: ^{90}Sr

- attività: 31 MBq
- $T_{1/2} = 28.78$ anni
- $E_{\text{max}}(\beta^-) = 546.2$ keV
- Decade in ^{90}Y :
 - $T_{1/2} = 64.10$ ore
 - $E_{\text{max}}(\beta^-) = 2280$ keV

Dati di input:

- distanza CCD-CsI = 11 cm;
- diametro sorgente = 6 mm;
- spessore CsI = 2 mm;
- numero di nuclei = 40000;
- apertura lente = 11.4 mm.



LEBI: test sperimentale con sorgente ^{90}Sr

^{90}Sr

CsI

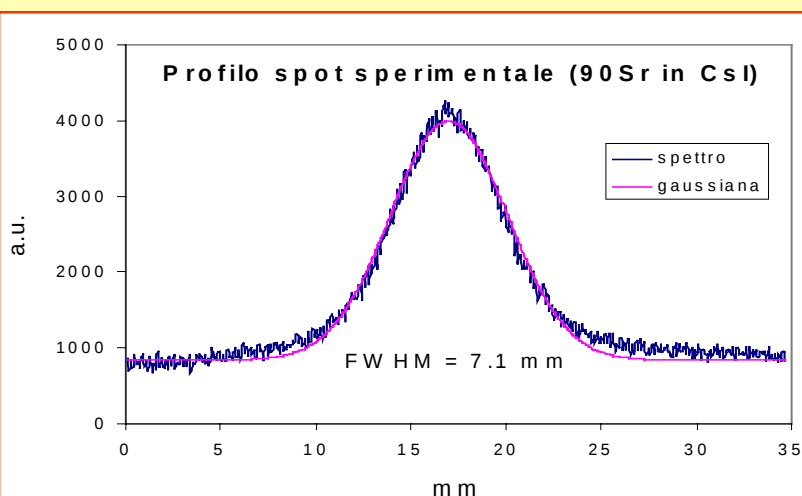
CCD



Apparato sperimentale:

- telecamera CCD;
- scintillatore CsI (2x100x100 mm³);
- PC + *frame grabber*;
- software “Global Lab Image”.

Spot ^{90}Sr su CsI



- FWHM sperimentale = **7.1 mm**
- FWHM simulazione = **7.2 mm**

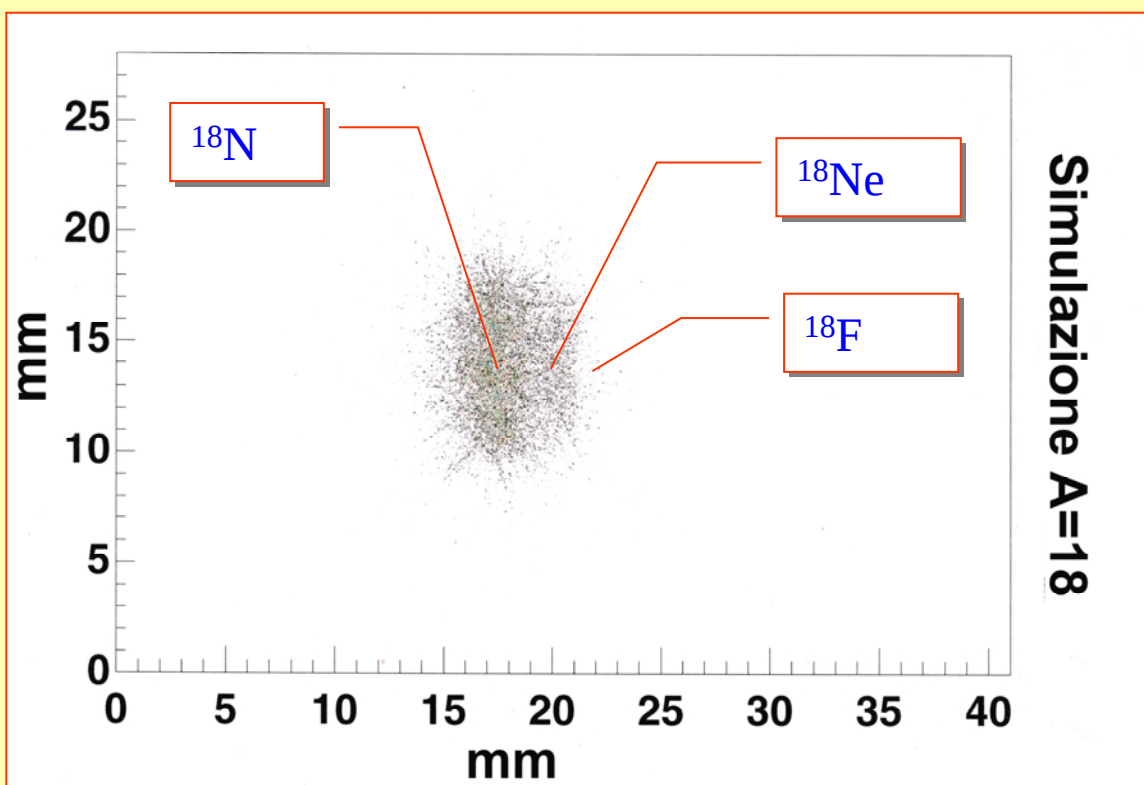
LEBI: simulazioni per il fascio secondario ^{18}F

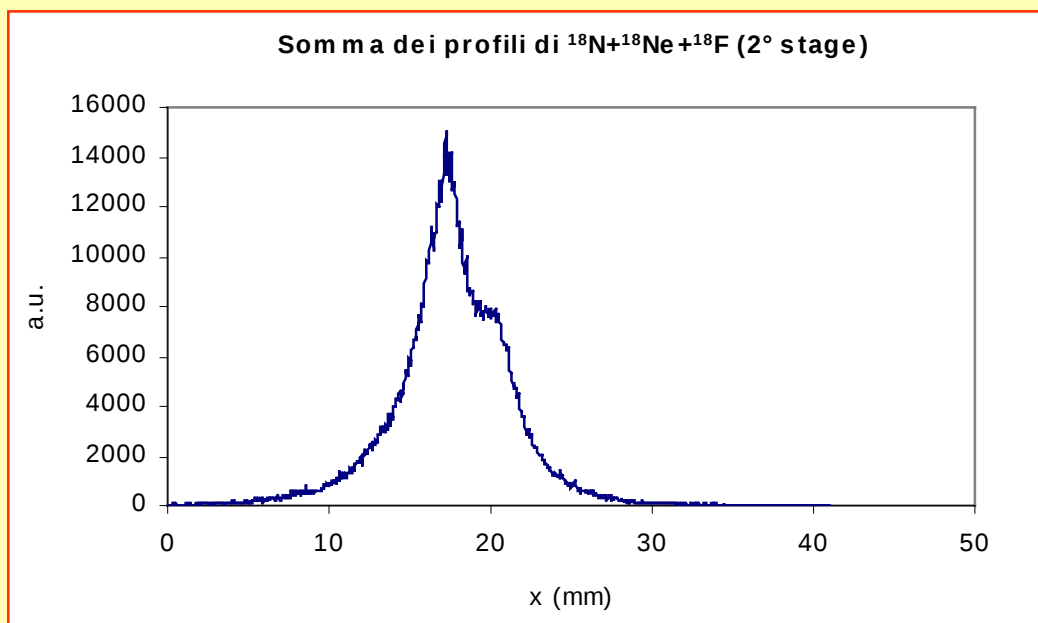
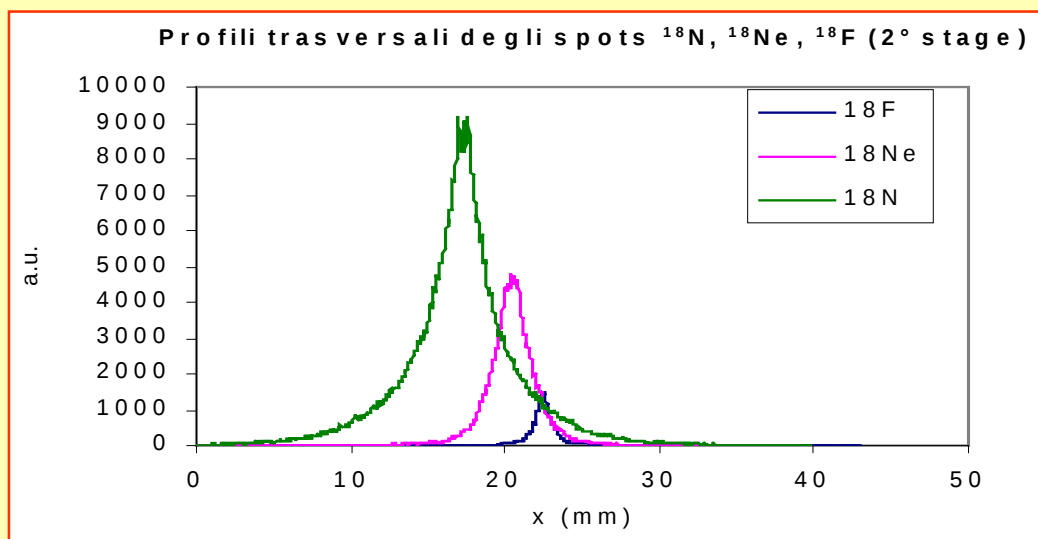
- Contaminanti radioattivi ^{18}N , ^{18}Ne .
- LEBI non è sensibile ai nuclei stabili.
- Distanze relative previste tra le specie nucleari che si impiantano sul nastro :
 - Azoto-Neon = 3.2 mm
 - Neon-Fluoro = 2 mm
- Larghezza fascio = 0.5 mm
- Altezza fascio = 8 mm

L'intensità di luce dipende da:

- diverse intensità del fascio;
- tasso di decadimento;
- energie dei beta.

Azoto predomina sia sul Neon sia sul Fluoro.





Il test sperimentale ed i calcoli forniscono risultati incoraggianti, che ci fanno ben sperare sull'efficacia di LEBI per una soddisfacente visualizzazione del fascio, di cui è possibile stimarne la forma, le dimensioni e la posizione.

LEBI: identificazione dei radionuclidi

SPETTROSCOPIA GAMMA

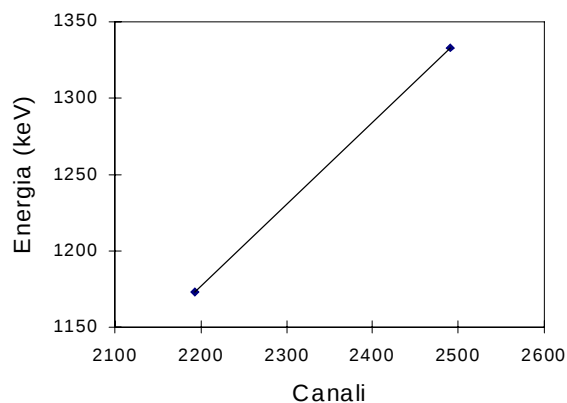
- Permette di identificare i nuclei emettitori gamma risalendo ai livelli caratteristici del nuclei.
- Coppia di rivelatori al germanio in coincidenza.



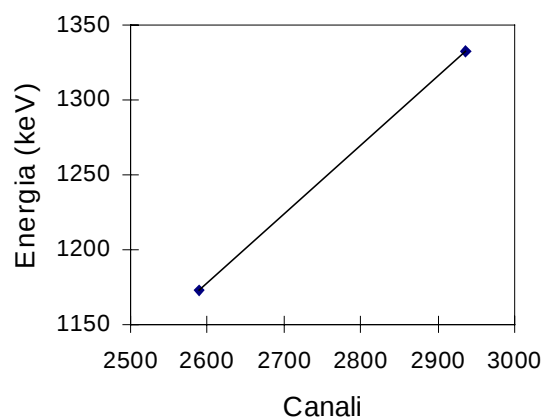
Sorgente gamma: ^{60}Co

- 1^a riga $\gamma = 1173.24 \text{ keV}$
- 2^a riga $\gamma = 1332.50 \text{ keV}$

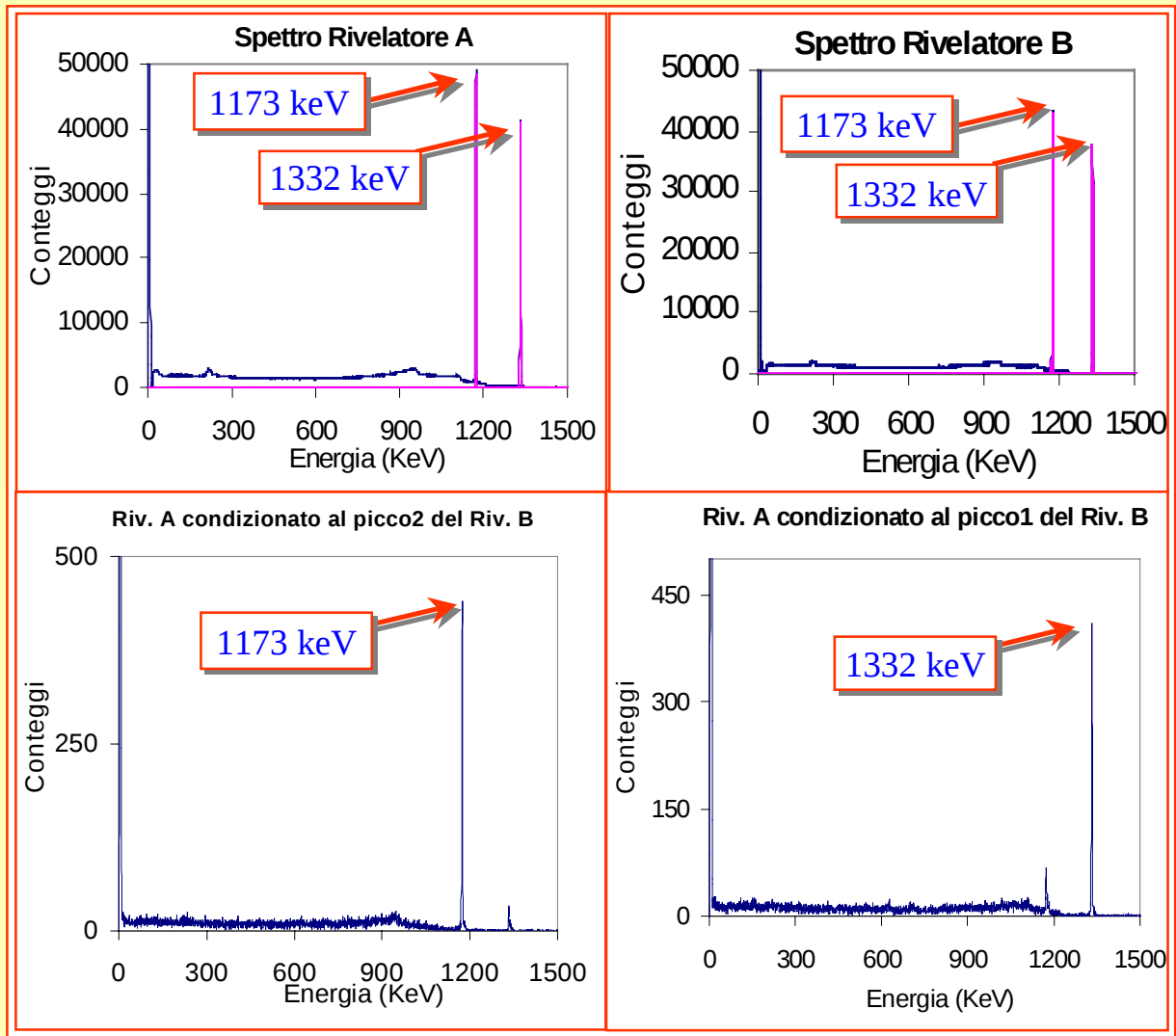
Calibrazione in energia Rivelatore A



Calibrazione in energia Rivelatore B

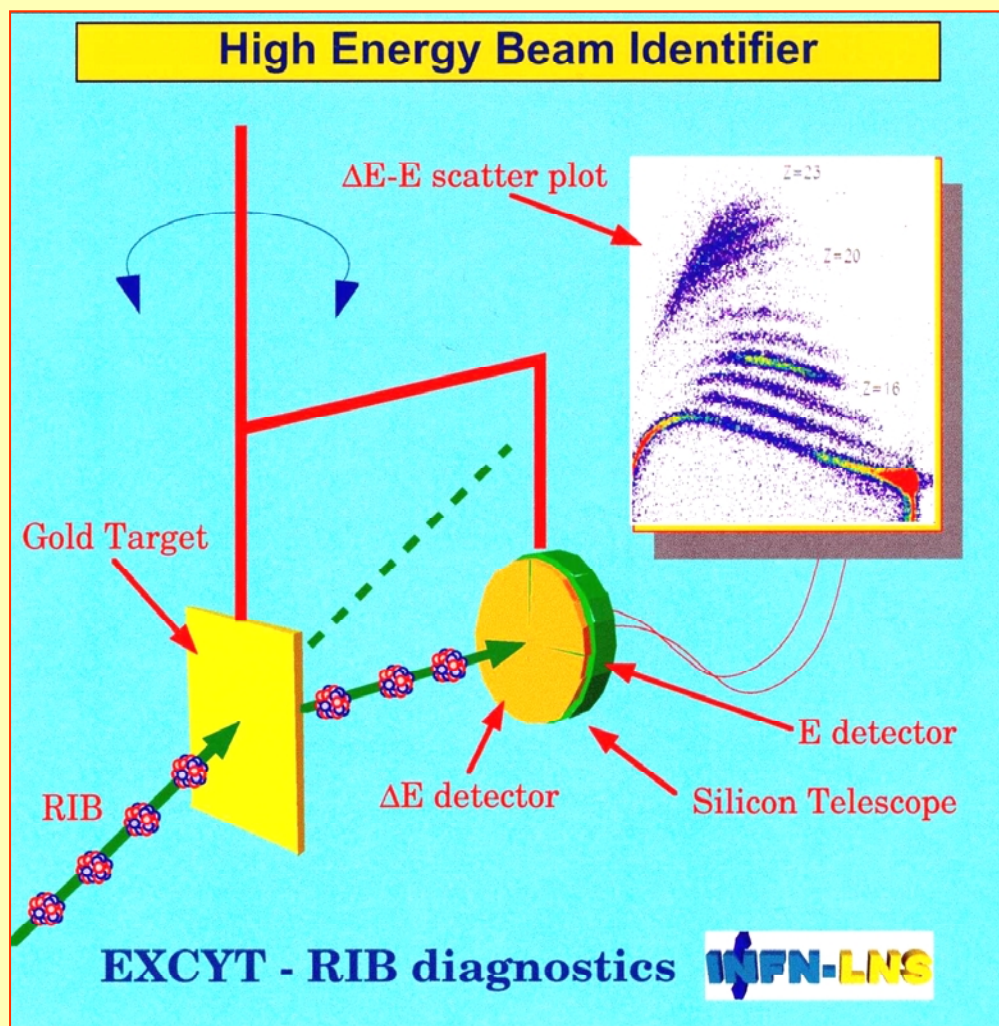


LEBI: misura con sorgente gamma



HEBI (High Energy Beam Identifier)

- Dispositivo per la diagnostica di fasci radioattivi a bassa intensità e ad alta energia (dopo l'accelerazione col **Tandem**).
- Metodo di identificazione basato su un sistema di rivelazione tipo telescopio.

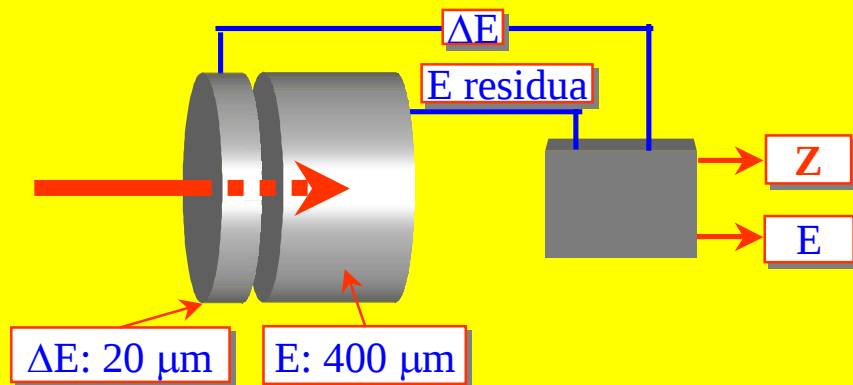


Per capire fino a che punto questa tecnica sia in grado di identificare e distinguere fasci di ioni radioattivi dai rispettivi contaminanti stabili e radioattivi:

- calcoli
- test sperimentali (fascio di ^{16}O , sorgente alfa)

HEBI: previsioni sull'identificazione di fasci radioattivi

TECNICA DI RIVELAZIONE CON TELESCOPI (Identificazione della carica Z delle particelle)



Ipotesi di lavoro:

Bisogna prevedere come si dispongono le varie specie nucleari in una matrice ΔE - E .

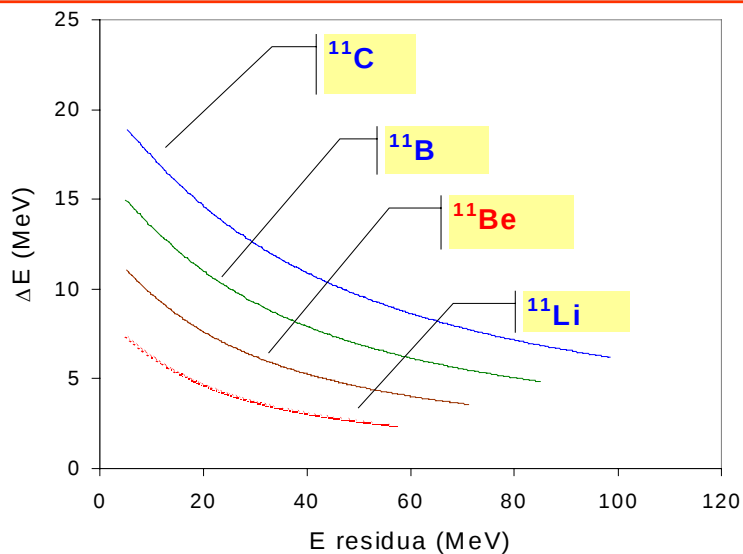
- Tre distinti fasci radioattivi ($A=11$, $A=17$, $A=18$).
- Atomi con stato di carica massimo
- Tensione del Tandem $\leq 15 \text{ MV}$.

$$E=(q+1)V$$

- E = energia cinetica
- q = stato di carica
- V = tensione di accelerazione

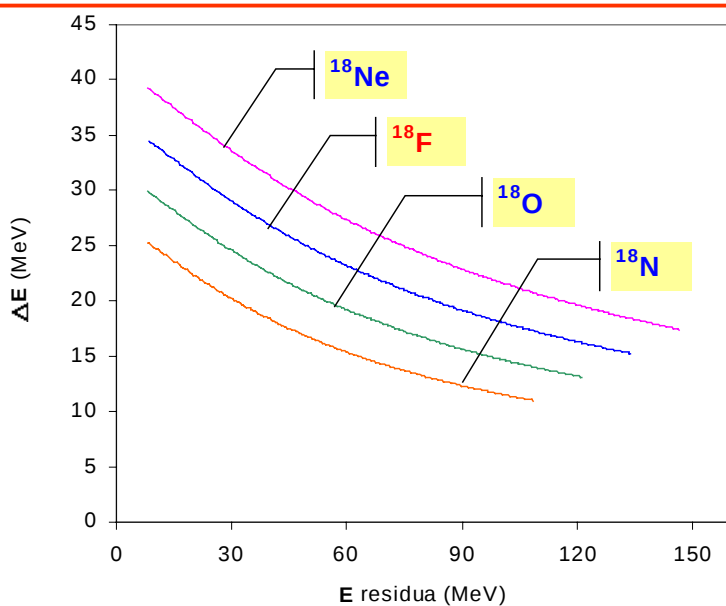
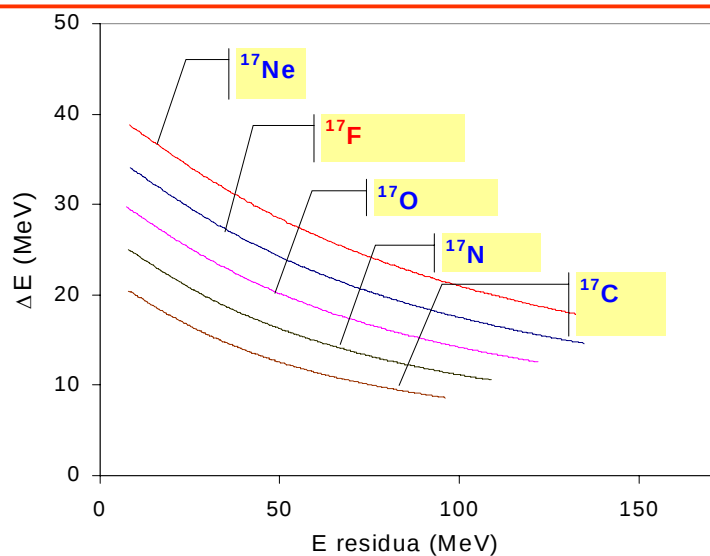
Calcoli della perdita d'energia basati sulla formula di **Bethe-Bloch** per particelle cariche pesanti.

HEBI: matrici previste per fasci radioattivi



Matrice prevista per $A=11$. Il nuclide di interesse è il ^{11}Be . Gli altri isotopi sono contaminanti, radioattivi e stabili.

Matrice prevista per $A=17$. Il nuclide di interesse è il ^{17}F . Gli altri isotopi sono contaminanti, radioattivi e stabili.



Matrice prevista per $A=18$. Il nuclide di interesse è il ^{18}F . Gli altri sono isotopi contaminanti, radioattivi e stabili.

HEBI: calcoli per il test col fascio di ^{16}O

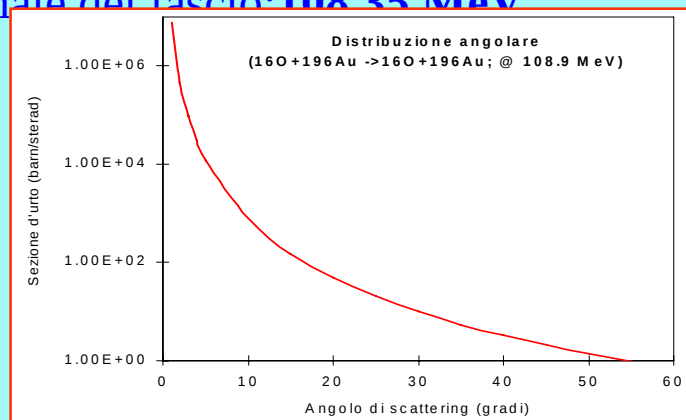
Fascio stabile accelerato dal Tandem: ^{16}O

Diffusione elastica dei proiettili su di un bersaglio pesante
Caratteristiche del fascio ^{16}O e del bersaglio di ^{196}Au :

- stato di carica: 7^+
- energia totale: **108.9 MeV**
- intensità iniziale del fascio: $\sim 10^9$ pps
- distanza bersaglio-rivelatore: **25 cm**
- angolo di scattering: **10°**
- raggio del collimatore: **1 mm**
- angolo di *grazing* per la diffusione ^{16}O su ^{196}Au : **68°**
- spessore del bersaglio: **$186 \mu\text{g}/\text{cm}^2$** .

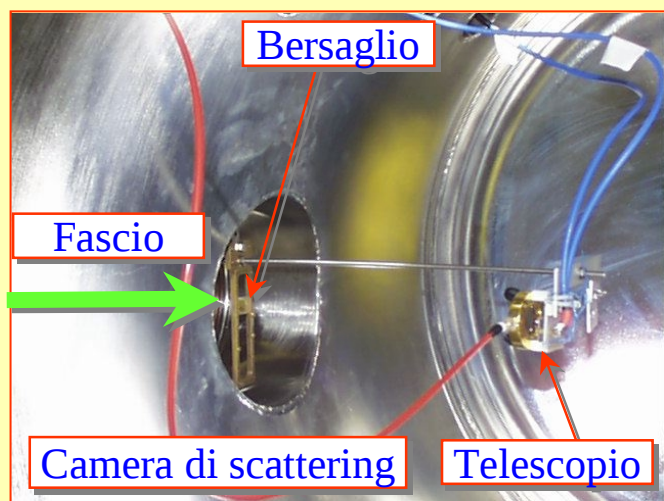
Calcolo dell'intensità del fascio:

- perdita di energia nello spessore di oro = **250 keV**
- perdita di energia causata dalla diffusione elastica = **300 keV**
- energia finale del fascio: **108.35 MeV**

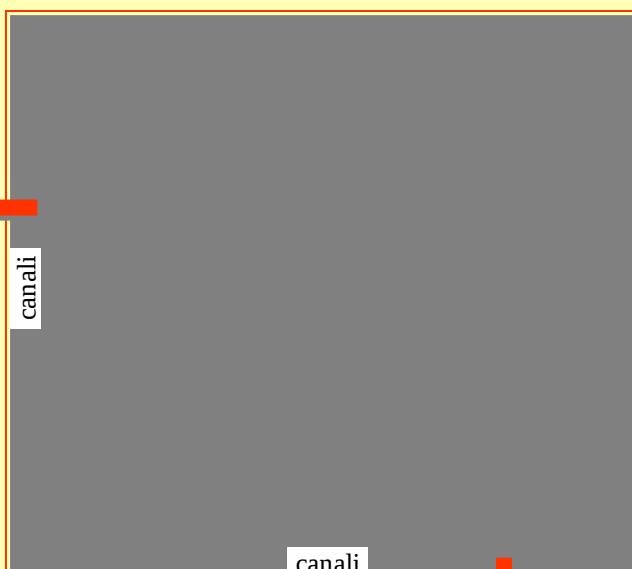
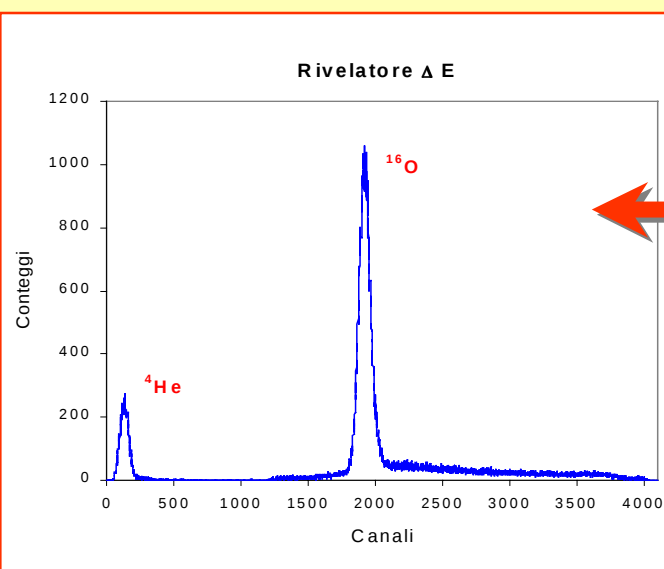


- sezione d'urto $d\sigma/d\Omega$ a 10° : **7.64×10^2 barn/sterad**
- intensità del fascio sul rivelatore $\sim 10^1$ pps

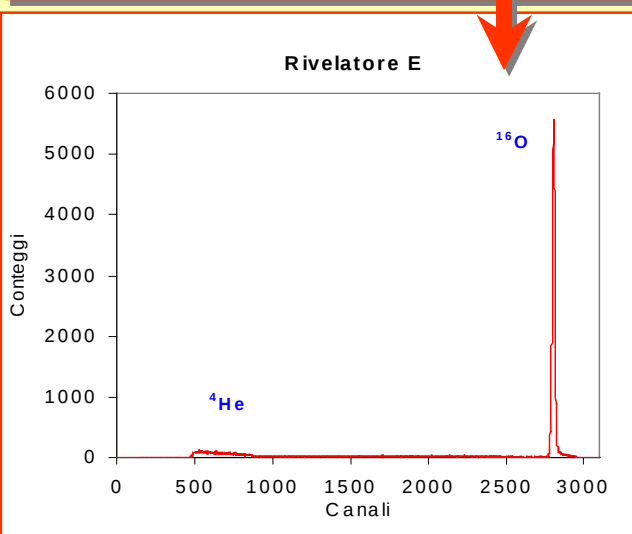
HEBI: test sperimentale con fascio di ^{16}O



Apparato sperimentale



- Matrice sperimentale ΔE -E
- Spettri dei rivelatori ΔE ed E.



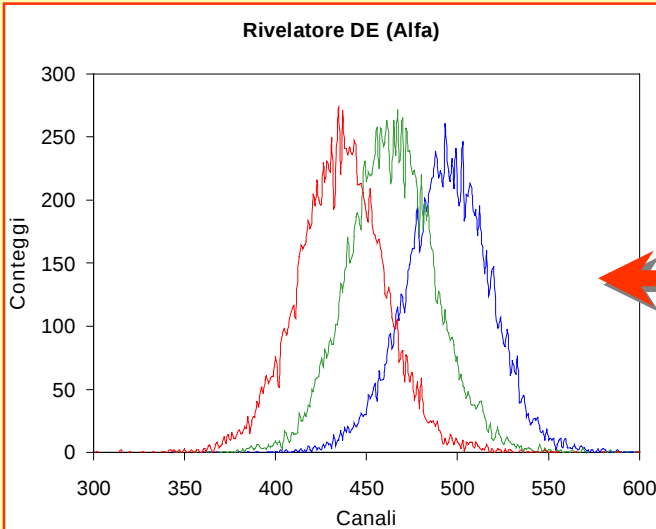
HEBI: calibrazione in energia (1)

Sorgente alfa a tre picchi:

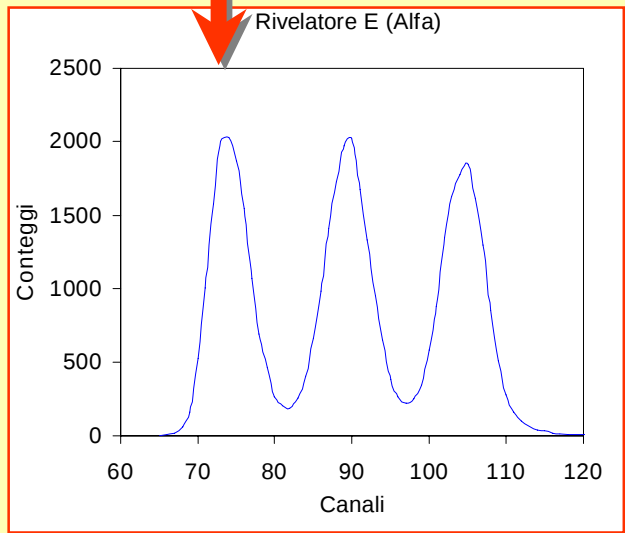
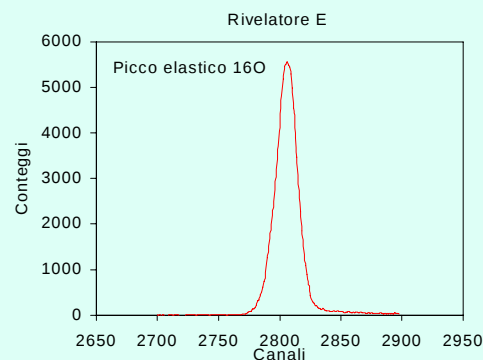
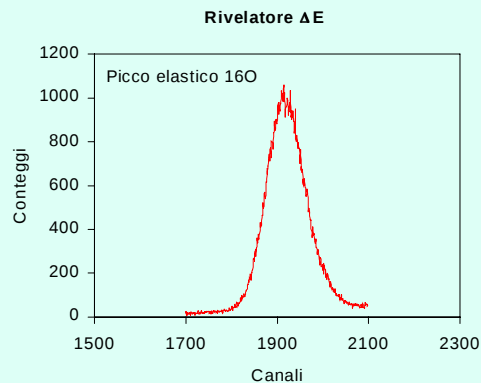
- ^{239}Pu , $E=5155$ keV
- ^{241}Am , $E=5484$ keV
- ^{244}Cm , $E=5806$ keV

Best fit lineare su quattro punti:

- picco elastico prodotto da ^{16}O
- tre picchi alfa provenienti dalla sorgente



Sorgente alfa: ΔE -
E

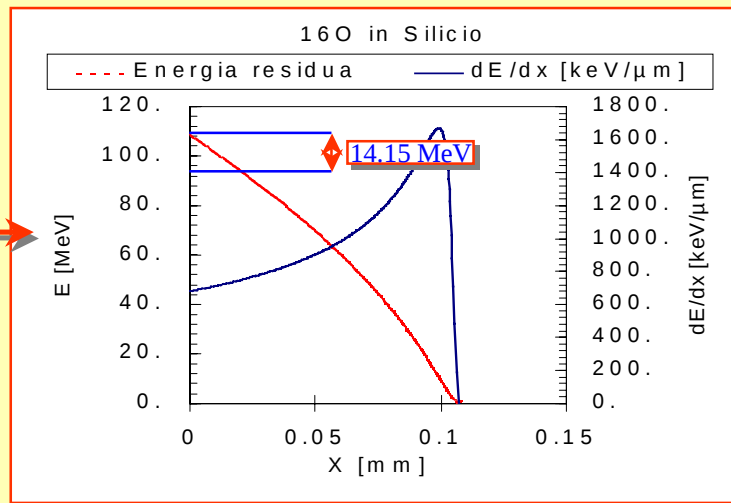


Fascio ^{16}O : picco elastico

HEBI: calibrazione in energia (2)

Ossigeno:

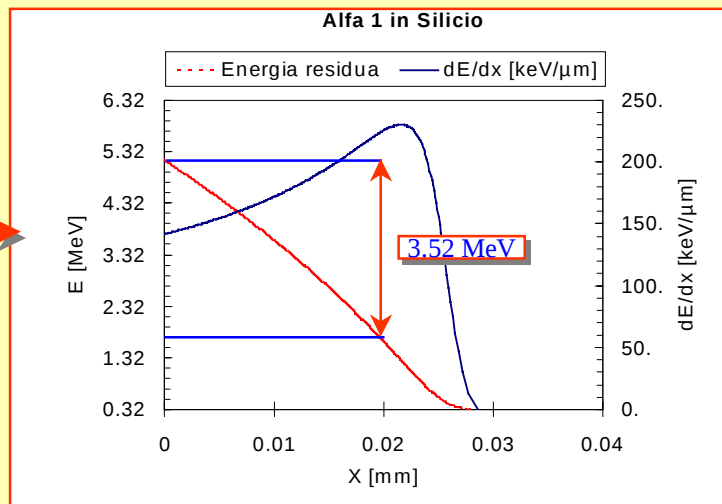
perdita media
d'energia in 20 μm di
silicio=14.15 MeV
(rivelatore ΔE)



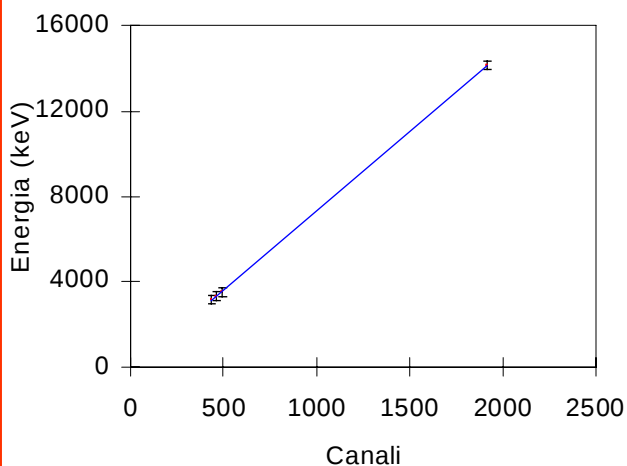
Sorgente alfa:

perdita media
d'energia in 20 μm di
silicio (rivelatore ΔE)

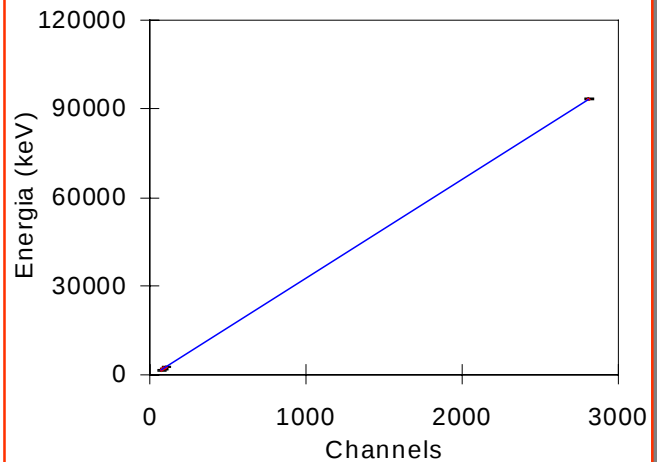
- (^{239}Pu) 3.52 MeV
- (^{241}Am) 3.34 MeV
- (^{244}Cm) 3.16 MeV



Calibrazione rivelatore ΔE



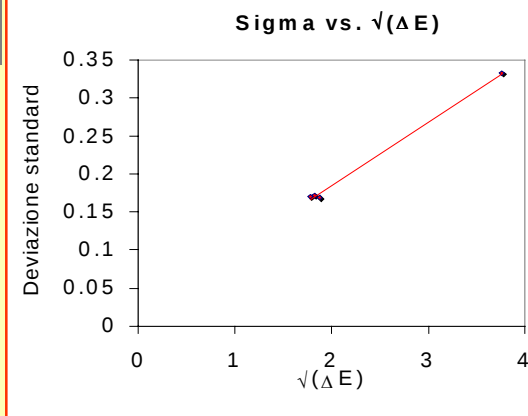
Calibrazione rivelatore E



HEBI: errori sperimentali

σ ed energia rilasciata nel rivelatore ΔE

	$\sigma(\text{keV})$	Energia ΔE (MeV)	$\sqrt{\Delta E}$ (MeV ^{1/2})
Alfa 1	22.8	3.52	1.87
Alfa 2	23.2	3.34	1.83
Alfa 3	22.8	3.16	1.78
¹⁶ O	44.7	14.15	3.76



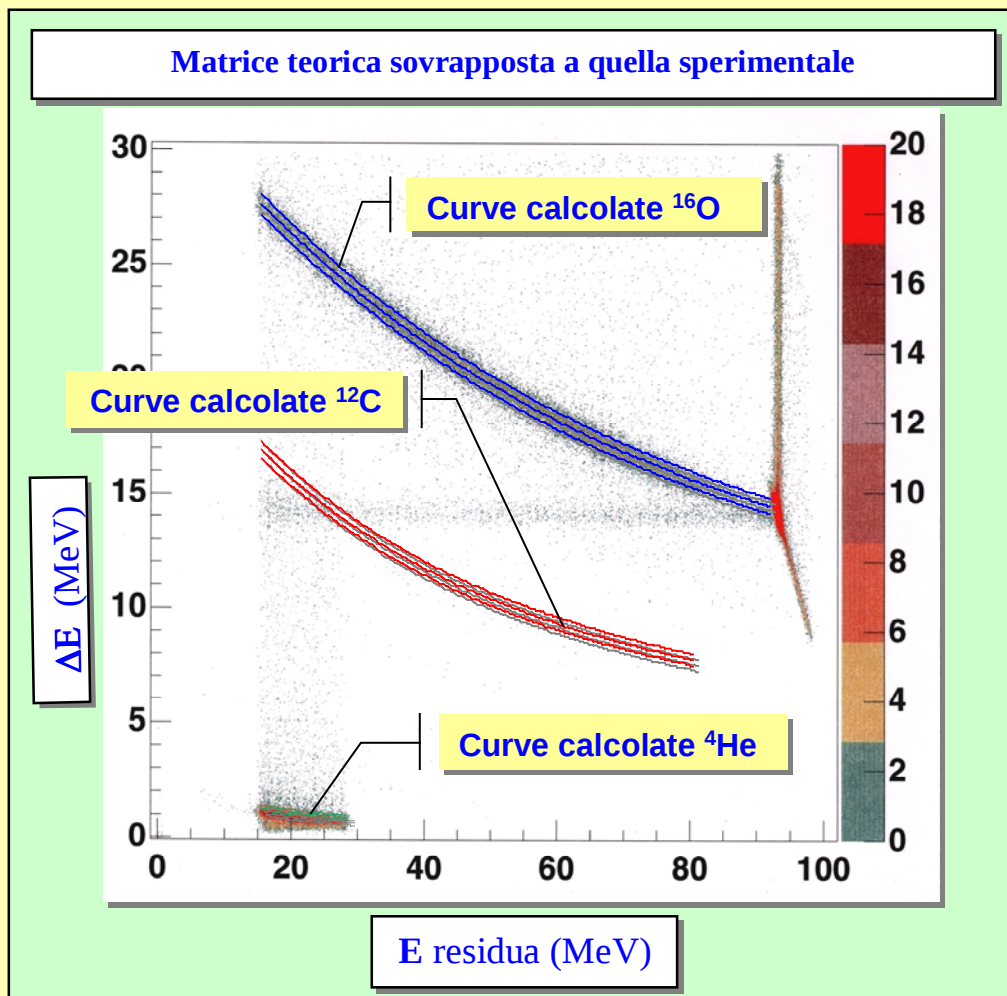
$$\sigma = 0.0835 \sqrt{\Delta E} + 0.018 \text{ (MeV)}$$

Confronto fra σ (sper.) e σ (straggling)

Nucleo	σ (sper. Interpolato) (MeV)	σ (energy straggling) (MeV)
¹⁶ O	0.47	0.02
¹² C	0.39	0.02
⁴ He	0.17	0.02
¹¹ Be	0.30	0.02
¹¹ Li	0.25	0.01
¹¹ C	0.39	0.02
¹⁷ F	0.51	0.02
¹⁷ C	0.40	0.02
¹⁷ N	0.44	0.02
¹⁷ Ne	0.54	0.02
¹⁸ F	0.51	0.02
¹⁸ N	0.44	0.02
¹⁸ Ne	0.54	0.02

I valori della deviazione standard dovuti all'*energy straggling* sono trascurabili rispetto alle deviazioni standard sperimentali.

HEBI: confronto tra matrice sperimentale e calcoli



L'accordo tra le curve sperimentali e le curve calcolate è molto buono.

HEBI: matrici calcolate per RIB

Matrice calcolata

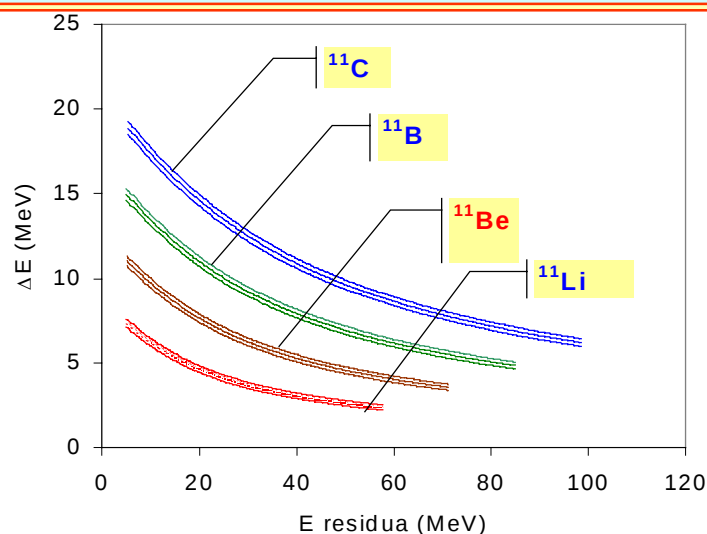
Fascio secondario:

^{11}Be .

Contaminanti:

^{11}Li , ^{11}C (radioattivi);

^{11}B (stabile).



Matrice calcolata

Fascio secondario:

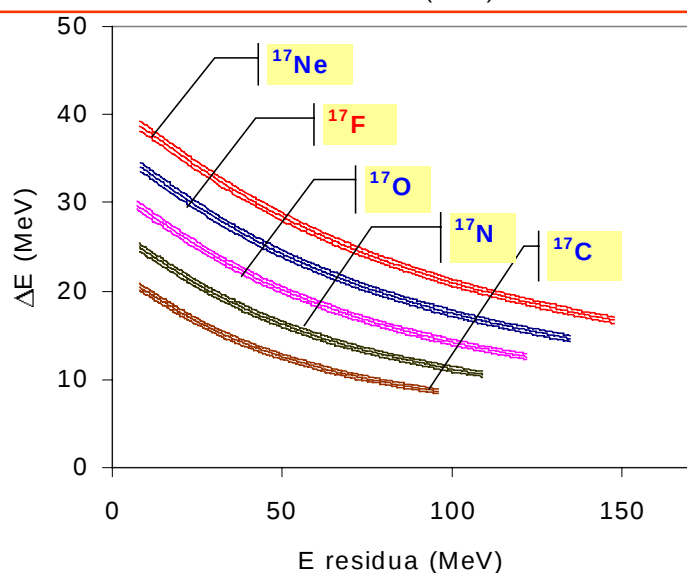
^{17}F .

Contaminanti:

^{17}Ne , ^{17}C , ^{17}N

(radioattivi);

^{17}O (stabile).



Matrice calcolata

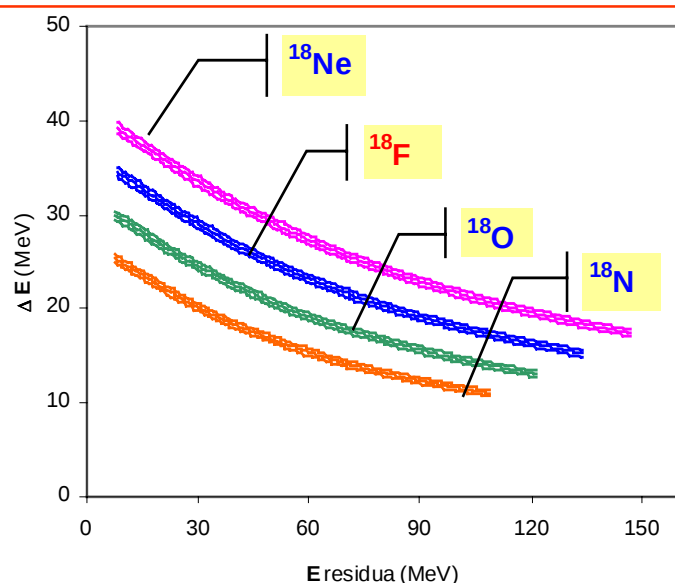
Fascio secondario:

^{18}F .

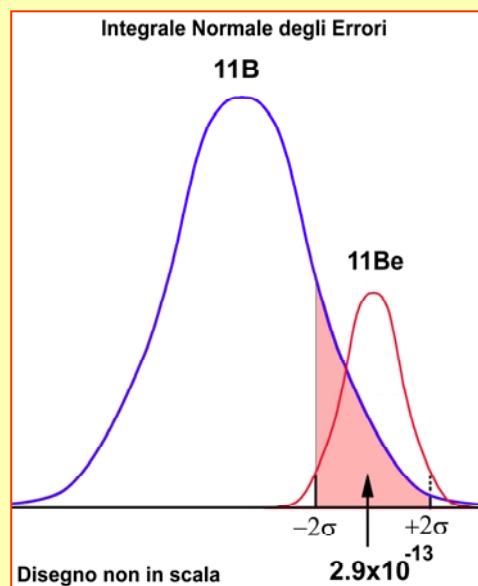
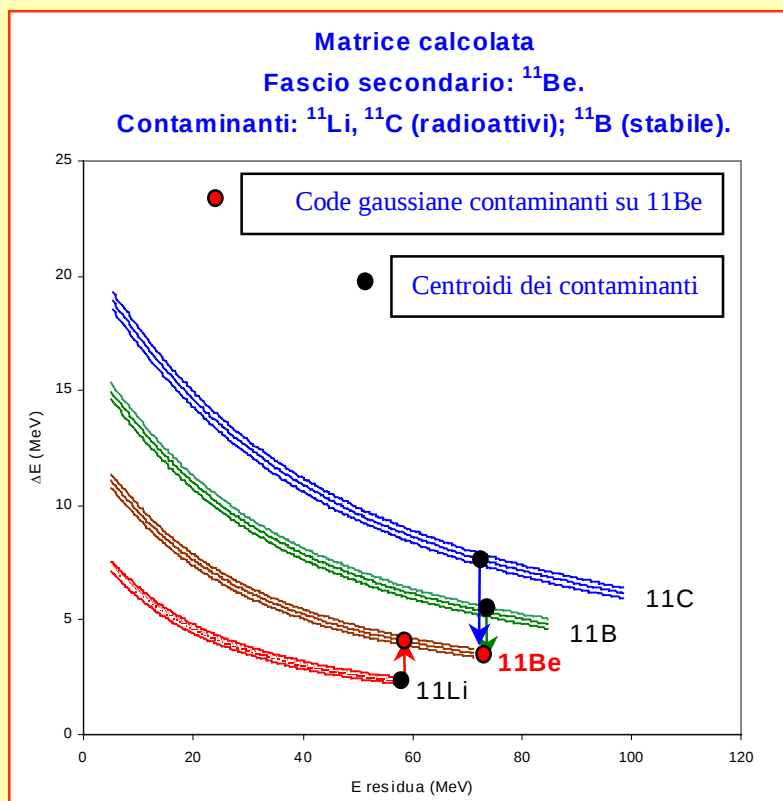
Contaminanti:

^{18}N , ^{18}Ne (radioattivi);

^{18}O (stabile).



HEBI: previsioni per l'identificazione di RIB



^{11}Be	$^{11}\text{Li}: < 2.887 \times 10^{-15}$
	$^{11}\text{C}: < 2.887 \times 10^{-15}$
	$^{11}\text{B}: 2.90 \times 10^{-13}$

^{17}F	$^{17}\text{N}: < 2.887 \times 10^{-15}$
	$^{17}\text{Ne}: 1.561 \times 10^{-10}$
	$^{17}\text{O}: 2.90 \times 10^{-13}$

^{18}F	$^{18}\text{N}: < 2.887 \times 10^{-15}$
	$^{18}\text{Ne}: 8.072 \times 10^{-11}$
	$^{18}\text{O}: 2.90 \times 10^{-13}$

Efficace discriminazione tra i nuclidi di interesse ed i contaminanti.

HEBI: contaminazione radioattiva del rivelatore

Percorso dei RIB in silicio

Nucleo	$E_{\max}$ (MeV) nuclidi	Perdita energia in 20 μm (MeV)	Energia residua (MeV)	Spessore percorso (μm)
^{11}Be	75	3.75	71.25	240
^{11}Li	60	2.5	57.5	290
^{11}C	105	6.52	98.48	190
^{17}F	150	15.38	134.62	174
^{17}N	120	11.10	108.9	133
^{17}C	105	9.05	95.95	135
^{17}Ne	165	17.58	147.42	114
^{18}F	150	16.03	133.97	108
^{18}N	120	11.57	108.43	140
^{18}Ne	165	18.3	146.7	116

Energia depositata dalle particelle beta in silicio

Nucleo	Energia beta (MeV)	Spessore attraversato (μm)	Energia rilasciata (MeV)
^{11}Be	11.506	~ 200	0.116
^{11}Li	20.610	~ 200	0.14
^{11}C	0.960	~ 200	0.096
^{17}F	1.739	~ 200	0.082
^{17}N	8.680	~ 200	0.116
^{17}C	13.166	~ 200	0.136
^{17}Ne	13.508	~ 200	0.138
^{18}F	0.633	~ 200	0.02
^{18}N	13.899	~ 200	0.139
^{18}Ne	3.424	~ 200	0.08

Conclusioni e prospettive

E' stata affrontata la problematica della diagnostica di fasci radioattivi in EXCYT.

I calcoli, le simulazioni ed i test sperimentali sui primi prototipi di LEBI e HEBI hanno mostrato l'efficacia degli strumenti e delle metodologie utilizzate.

Il dispositivo LEBI costituisce senz'altro una interessante innovazione nel campo della diagnostica per fasci radioattivi.

Il sensore HEBI rappresenta una nuova risposta al problema dell'identificazione di fasci radioattivi ad alta energia.

L'insieme dei dispositivi LEBI, HEBI, separatore di massa isobarico e Tandem costituisce uno strumento completo per tutte le esigenze di selezione, rivelazione, identificazione e discriminazione di fasci radioattivi per la *facility* EXCYT.

