UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia "Galileo Galilei"

Corso di Laurea in Fisica

Studio dell'ottica della facility EXOTIC

Relatore: Prof. Marco Mazzocco

Laureando: Davide Bondì
Matricola: 2079194

Anno Accademico 2024/2025

Indice

1 EXOTIC **7**
1.1 AGATA 9
1.2 Il rivelatore MCP 10
1.3 Surface Barrier Silicon Detector: M_4 12

2 Elementi ottici **15**
2.1 Equazioni del moto 15
2.2 Dipolo magnetico 16
2.3 Filtro di Wien 17
2.4 Quadrupoli magnetici 17

3 Analisi dei dati **21**
3.1 Calibrazione MCP 21
3.2 Purificazione del fascio con M_4 23
3.3 Ottimizzazione fine con DANTE 25
3.4 Analisi dei dati 26
3.4.1 Ottimizzazione di α 27
3.4.2 Ottimizzazione di ξ 27
3.4.3 Ottimizzazione di β 28
3.4.4 Time of flight (TOF) 30
3.4.5 Fascio ottimizzato 31

4 Conclusioni **33**

Introduzione

Negli ultimi anni è stata registrata una forte crescita di interesse nello studio della fisica dei fasci nucleari radioattivi. Numerosi esperimenti sono stati condotti per investigare e caratterizzare l'interazione nucleare su nuclei stabili o prossimi alla linea di stabilità. Tuttavia, per ottenere una visione complessiva delle proprietà dei nuclei e della loro evoluzione lungo la carta dei nuclidi, è necessario ricorrere a fasci radioattivi, che consentono di produrre sistemi con un'elevata asimmetria tra il numero di protoni e neutroni. Per questo motivo sono state progettate diverse linee per la produzione e il trasporto di tali fasci.

La linea di fascio EXOTIC [2, 3] presente ai Laboratori Nazionali di Legnaro (LNL), uno dei quattro laboratori nazionali dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), rende possibile la produzione di fasci radioattivi leggeri, con l'obiettivo di studiarne le proprietà. Nel corso dell'ultimo anno la linea EXOTIC è stata sottoposta ad un upgrade, con modifiche necessarie a permetterne l'accoppiamento con AGATA [7], un *array* di rivelatori al Germanio iperpuro (HPGe) utilizzato per la spettroscopia γ. In particolare, si è reso necessario l'allungamento della facility di oltre 3 metri. Inoltre, a valle di tutti gli elementi ottici sono state posizionate due camere di scattering contenenti rivelatori Micro-Channel Plate (MCP). Il loro utilizzo consiste nell'identificare la direzione di ogni particella appartenente al fascio e la loro velocità ed il loro tempo di volo grazie ad un segnale di tempo. Tramite la collisione di ioni stabili del fascio primario con un gas target posto all'inizio della linea, è possibile produrre il fascio secondario desiderato. La focalizzazione del fascio purificato in AGATA è resa possibile da una sequenza di elementi ottici: un tripletto di quadrupoli magnetici, un dipolo magnetico, il filtro di Wien e un secondo tripletto di quadrupoli. Tali elementi permettono anche una purificazione del fascio secondario, composto in partenza da vari contaminanti ottenuti dalla reazione del fascio primario con il gas target e dalla componente scatterata del fascio primario stesso. Simulazioni Monte Carlo vengono utilizzate per calcolare i valori dei campi magnetici nei vari elementi ottici necessari a ottimizzare la trasmissione, i quali successivamente

vengono raffinati attraverso misure sperimentali.

Questo elaborato si concentra quindi sullo studio di alcune proprietà del fascio secondario, quali intensità, purezza e focalizzazione al variare dei valori caratteristici dei due tripletti di quadrupoli (unbalance, ξ e average). L'obiettivo è quello di ottenere un fascio secondario purificato con intensità sufficiente ($\approx 10^5$) per effettuare con esso reazioni su un target secondario. La trattazione è organizzata in quattro capitoli principali:

- Nel Capitolo 1 viene presentata la linea di fascio EXOTIC e gli elementi che la compongono.
- Nel Capitolo 2 vengono spiegati più nel dettaglio i diversi elementi ottici della linea e il loro ruolo, con spiegazioni dei fenomeni fisici coinvolti.
- Il Capitolo 3 contiene il processo di calibrazione di MCP_1 e MCP_2 per ottenere una corretta risoluzione spaziale della linea di fascio e l'analisi dei dati con l'ausilio di altri rivelatori ancillari. Vengono illustrati i risultati ottenuti e viene motivata la scelta della configurazione finale.
- Il Capitolo 4 contiene le conclusioni finali del lavoro.

Capitolo 1

EXOTIC

La facility EXOTIC [2, 3] è volta alla produzione di fasci radioattivi leggeri (Z<= 10) tramite reazioni nucleari dirette. Fino ad oggi, la facility ha permesso la produzione di fasci quali ^{17}F, ^{7}Be, ^{15}O, ^{8}Li, ^{10}C, ^{11}C, ^{18}Ne con una purezza $\approx$ 99 % e intensità fino a 10^5 pps, come mostrato in Tabella 1.1. Un fascio primario di ioni stabili, accelerato tramite l'acceleratore XTU-TANDEM [9], collide con un gas target composto da ioni leggeri (^{1}H, ^{2}H, ^{3}He, ^{4}He). Il gas è contenuto in una cella cilindrica di 50 mm di lunghezza, con pareti costituite da sottili fogli metallici di Havar, di spessore di circa 2.5 μm e diametro interno di 25 mm. Il bersaglio può operare sia a temperatura ambiente sia a 80 K (temperatura dell'azoto liquido). La produzione del fascio aumenta circa di un fattore tre se il gas è raffreddato, poiché a pressione costante (1 bar) la densità del gas cresce.

Particella	Purezza	Intensità (pps)
^{17}F	93-96 %	10^5
^{8}B	30-40 %	10^3
^{7}Be	99 %	10^6
^{15}O	97-98 %	$4*10^4$
^{8}Li	99 %	10^5
^{10}C	99 %	$5*10^3$
^{11}C	99 %	10^5
^{18}Ne	95 %	$6*10^3$

Tabella 1.1: I diversi fasci prodotti con la facility EXOTIC e la purezza e intensità raggiunte per ognuno.

La linea di fascio (in Fig.1.1) è progettata per garantire l'accettazione di un fascio secondario distribuito su un grande angolo solido. Il primo tripletto di quadrupoli è posizionato vicino al gas target e il fascio è trasportato tramite un tubo di diametro pari a 160 mm. Per eliminare la componente di ioni indesiderati (costituita da ioni primari scatterati e da reazione secondarie) si utilizza un magnete dipolare di curvatura pari a 30° per una selezione in rigidità magnetica e un filtro di Wien per una selezione in velocità, combinati da un opportuno sistema di slitte. Questo permette un'accettanza orizzontale $\Delta\theta = \pm 50$ mrad e un'accettanza verticale $\Delta\phi = \pm 65$ mrad per un angolo solido $\Delta\Omega = 10$ msr. Il secondo tripletto di quadrupoli, infine, consente la focalizzazione del fascio in un punto a valle della linea, dove sono posizionati i rivelatori per l'analisi delle particelle generate dalle reazioni nucleari indotte dal fascio radioattivo su un bersaglio secondario.

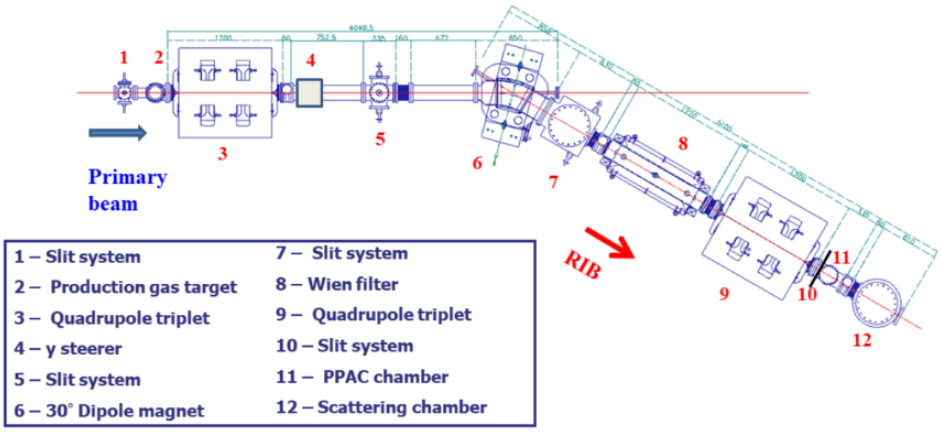


Figura 1.1: Linea di fascio EXOTIC e gli elementi che la compongono. Lo schema mostra la configurazione originale della linea, per cui non è presente l'allungamento della linea fino ad AGATA e la seconda camera di scattering per MCP_2. Tratto da [2].

La selezione del fascio è ulteriormente perfezionata da quattro fenditure posizionate lungo la linea di fascio:

- La prima, S0 (elemento 1 in Fig.1.1), è situata 15 cm a monte del gas target ed è utilizzata per regolare le dimensioni del fascio primario. L'apertura utilizzata è generalmente un quadrato di area 3.61 mm^2.

- La fenditura S1 (elemento 5 in Fig.1.1) è situata a 1 m a monte del dipolo magnetico ed impedisce alle componenti marginali del fascio primario di urtare sulle pareti della camera a vuoto del dipolo magnetico

stesso. L'apertura della fenditura è solitamente pari a ±5 cm (x) × ± 2 cm (y).

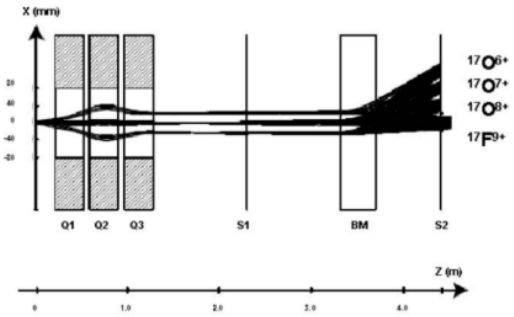


Figura 1.2: Il primo tratto della linea di fascio tra il primo tripletto di quadrupoli e il dipolo magnetico nel piano orizzontale. Tratto da [2].

- La fenditura S2 (elemento 7 in Fig.1.1) è posizionata a 65 cm a valle del dipolo magnetico, sul piano focale intermedio, ed elimina la maggior parte del fascio primario con maggiore dispersione (Fig. 1.2); l'apertura delle slitte è pari a ±10 cm (x) × ± 1.25 cm (y). Si nota che ottimizzando l'apertura di S2 si può impedire il passaggio del fascio primario scatterato e ridurre notevolmente la trasmissione di contaminanti con diversa rigidità magnetica.

- La fenditura S3 (elemento 10 in Fig.1.1) invece lavora insieme al filtro di Wien con lo scopo di di eliminare le impurità "sopravvissute" alla selezione di S2. La fenditura S3 presenta un'apertura romboidale di diagonali pari a 60-70 mm.

1.1 AGATA

Nell'ultimo anno, la facility è stata estesa di oltre tre metri per essere connessa all'Advanced GAmma Tracking Array (AGATA) [7] (AGATA). L'array AGATA è stato installato nel 2021 presso LNL per una campagna sperimentale della durata di 6 anni. Nell'attuale configurazione, AGATA è costituito da 13 rivelatori a triple cluster (AGATA Triple Cluster, ATC) disposti su una struttura a flange, come mostrato in Fig.1.3. L'array ha una copertura angolare di 1 sr. Il numero di ATC sarà progressivamente aumentato fino a raggiungere una copertura angolare pari a 2 sr.

I rivelatori AGATA utilizzano cristalli di germanio ad alta purezza (HP-Ge) di tipo n, incapsulati e segmentati elettricamente; essi presentano una

forma esagonale asimmetrica rastremata, scelta appositamente per adattarsi alla geometria del rivelatore nella sua configurazione finale. Ogni rivelatore ATC contiene tre cristalli di HPGe segmentati 36 volte lungo la direzione longitudinale e trasversale. L'energia totale depositata in ciascun cristallo viene raccolta nel contatto centrale generando 37 segnali per cristallo. Questo tipo di segmentazione consente l'identificazione precisa dei singoli punti di interazione dei raggi γ all'interno del volume cristallino, consentendo anche misurazioni ad alta risoluzione dell'energia depositata nel rivelatore.

Quando i raggi γ raggiungono i rivelatori, possono depositare tutta la loro energia mediante effetto fotoelettrico o solo una parte di essa per effetto Compton in un dato segmento del cristallo, con conseguente creazione di coppie elettrone-lacuna e raccolta di una carica netta sugli elettrodi. Si implementa quindi l'analisi della forma dell'impulso (PSA) per analizzare il segnale prodotto in tutti i 36 segmenti del cristallo. Questo processo consente di ricostruire con un'eccellente risoluzione (4-5 mm alla FWHM, larghezza a metà altezza) la posizione di interazione all'interno del cristallo.

L'obiettivo principale di AGATA è lo studio della natura e della fenomenologia dell'interazione nucleone-nucleone e dei suoi fenomeni emergenti. La spettroscopia a raggi γ svolge un ruolo fondamentale in questo campo, consentendo la misurazione di osservabili fisici legati al decadimento dei livelli nucleari eccitati. Da questa misurazione precisa del raggi γ emessi dai livelli nucleari eccitati si ottiene non solo l'energia di eccitazione ma anche le probabilità di transizione ridotte e i loro numeri quantici associati, misurando: (i) la durata di vita degli stati eccitati, da cui si possono dedurre gli elementi della matrice di transizione ridotta, (ii) la distribuzione angolare dei raggi, legate alla multipolarità della transizione e (iii) alla sua polarizzazione, che possono fornire informazioni sul carattere elettrico o magnetico della transizione.

1.2 Il rivelatore MCP

Il trasporto del fascio può essere ottimizzato tramite rivelatori MicroChannelPlate (MCP) [4], i quali, grazie alla loro struttura, forniscono informazioni sulla posizione e sul tempo di volo (TOF) delle particelle. La loro struttura e composizione si basa su piastre a grande area circolare ($r = 52$ mm), montate in configurazione a *chevron* (Fig. 1.4). Il rivelatore fornisce un segnale temporale rapido e, grazie all'anodo sensibile alla posizione, consente di ottenere le coordinate x e y dell'evento. Il funzionamento del rivelatore (in Fig. 1.5) sfrutta un campo elettrostatico per accelerare elettroni secondari, emessi

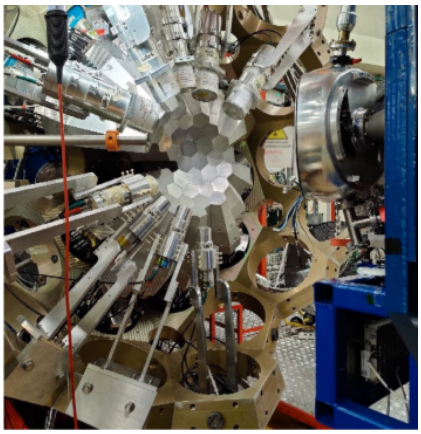


Figura 1.3: AGATA nella sua configurazione a 13 ATC utilizzata nell'esperimento EXOTIC.

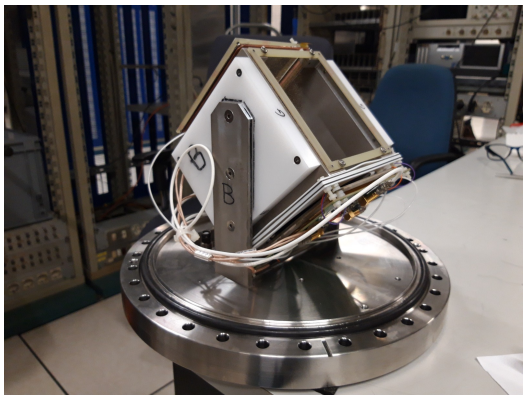


Figura 1.4: Vista del rivelatore di ingresso MCP.

da un sottile foglio di Mylar alluminato (≈20 mg/cm^2), verso l'insieme delle piastre MCP. Gli elettroni sono guidati da un campo magnetico parallelo.

Il rivelatore offre una risoluzione temporale di circa 480 ps e spaziale di circa 1.5 mm su entrambi gli assi, con un'efficienza prossima all' 80% negli esperimenti standard con fasci di ioni (Z>=3).

La struttura interna è contenuta in una gabbia metallica inclinata di 45° rispetto all'asse ottico. Due delle sei facce sono griglie (di ingresso e interna) trasparenti al passaggio degli ioni, mentre le restanti quattro sono costituite dalla superficie delle MCP e da tre pareti in acciaio inox. L'intera scatola è polarizzata allo stesso potenziale del primo MCP (circa –2000 V). Gli ioni provenienti dal bersaglio attraversano una prima griglia composta da fili di tungsteno placcati in oro (diametro 20 μm, spaziatura 1 mm), poi da un sottile foglio seguito da una seconda griglia interna, e infine da

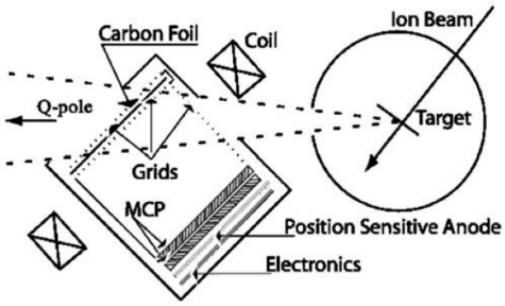


Figura 1.5: Vista schematica dall'alto del rivelatore MCP. Il centro della lamina di carbonio si trova a 25 cm dal bersaglio. Tratto da [4].

una griglia esterna connessa elettricamente alla griglia interna. Le griglie interna ed esterna sono disposte simmetricamente ai lati del foglio di Mylar alluminato, a una distanza di 4 mm. La griglia interna accelera, verso le MCP, gli elettroni secondari prodotti nel foglio ed emessi all'indietro, conferendo loro un'energia di circa 300 eV. La griglia esterna serve a bilanciare le forze esercitate sul foglio. Gli elettroni accelerati raggiungono la superficie delle MCP e vengono moltiplicati; la carica risultante viene raccolta dall'anodo sensibile alla posizione. Per conservare le informazioni di posizione, viene applicato un campo magnetico parallelo al campo elettrico di accelerazione. Questo campo è generato in MCP_1 da due bobine poste esternamente alle facce del MCP (una davanti al foglio e l'altra dietro all'anodo di posizione), mentre in MCP_2 da due magneti permanenti posti nella stessa posizione che in MCP_1. Il campo magnetico al centro della bobina è di circa 100 Gauss. Gli elettroni seguono una traiettoria elicoidale lungo le linee del campo magnetico, coprendo circa 10 cm fino a raggiungere le MCP. I test preliminari hanno mostrato che la risoluzione in posizione del rivelatore è influenzata dall'intensità e dall'uniformità del campo magnetico.

Nella fase finale dell'esperimento, a seguito di un aumento della corrente del fascio a ≈ 120 enA, è stato implementato DANTE [8], un rivelatore MCP di superficie rettangolare (40×60 mm^2). A differenza degli MCP di EXOTIC, gli MCP di DANTE sono posizionati perpendicolarmente alla direzione del fascio e stoppano gli ioni incidenti. La risoluzione spaziale di DANTE risulta essere ≈ 1 mm mentre la sua risoluzione spaziale è circa di 130 ps.

1.3 Surface Barrier Silicon Detector: M_4

L'energia delle particelle del fascio viene rivelata tramite un rivelatore a barriera superficiale [1], M_4, posizionato al centro della camera di scattering di

AGATA. M_4 è un wafer a diodo al silicio di tipo *pn*, caratterizzato da uno strato di svuotamento sottile. È realizzato in silicio di tipo *p*; una superficie è stata incisa e successivamente rivestita con un sottile strato di oro, mentre l'altra è ricoperta da un sottile strato di alluminio che funge da contatto elettrico. Il suo impiego consente di identificare rapidamente gli ioni trasmessi, grazie alla misura della loro energia. La risoluzione energetica di M_4, misurata con sorgenti α, è di 1.3 % a 5 MeV (FWHM 70 keV).

Capitolo 2

Elementi ottici

2.1 Equazioni del moto

La linea di fascio EXOTIC è dotata di diversi elementi ottici, progettati per trasportare le particelle in modo controllato. Alcuni di questi elementi, come anticipato nell'introduzione, sfruttano le proprietà elettromagnetiche con lo scopo di modificare la traiettoria del fascio secondo le necessità sperimentali. Per determinare il moto di una particella di massa m e carica ze immersa in un campo elettromagnetico EM è necessario conoscere la distribuzione spaziale del campo stesso. Considerando una particella in un campo elettrico E e magnetico B noti, essa sarà soggetta a:

- una forza Coulombiana dovuta all'interazione con E:

$$\vec{F_E} = (z)e\vec{E} \tag{2.1}$$

- una forza di Lorentz dovuta all'interazione con B:

$$\vec{F_L} = (z)e\vec{v} \times \vec{B} \tag{2.2}$$

.

Applicando la seconda legge di Newton $\vec{F} = m\vec{a}$ si ottiene:

$$\vec{F} = m\vec{a} = (ze)[\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}] \tag{2.3}$$

Si nota che, in assenza di campo elettrico ($E = 0$), la forza agente sulla particella è perpendicolare al vettore velocità. Di conseguenza, la direzione della velocità può cambiare, mentre il modulo rimane costante. E' possibile

definire l'angolo compreso tra le velocità $\vec{v}$ e $\vec{v} + d\vec{v}$ in due istanti di tempo successivi (Fig.2.1) e introdurre il raggio di curvatura istantaneo r della particella mediante le relazioni

$$d\phi = \frac{d\vec{v}}{\vec{v}} \tag{2.4}$$

$$\vec{v} = r\frac{d\phi}{dt} \tag{2.5}$$

Sostituendo la 2.5 nella 2.4, si ottiene $\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{v^2}{r}$ e dall'equazione 2.1:

$$m\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{mv^2}{r} = (ze)\vec{v}\vec{B} \tag{2.6}$$

Dividendo entrambi i membri per v e definendo la rigidità magnetica $\chi = Br$, si ricava

$$\chi = \frac{m\vec{v}}{ze} = \frac{\vec{p}}{ze} \tag{2.7}$$

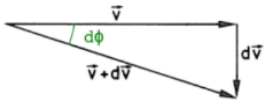


Figura 2.1: La variazione del vettore velocità in due istanti di tempo successivi.

2.2 Dipolo magnetico

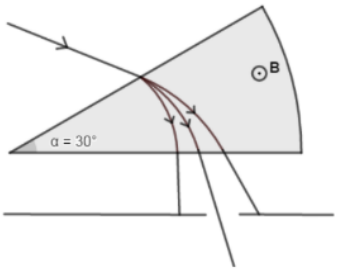


Figura 2.2: Struttura schematica del dipolo magnetico a 30°.

Il dipolo magnetico (Fig.2.2) è un elemento ottico presente lungo la linea di fascio EXOTIC che consente la selezione di particelle in rigidità magnetica. Il fascio incidente entra nel dipolo, viene deviato di un angolo di 30°, percorre una traiettoria ad arco di circonferenza e termina nel sistema di slitte di

selezione, le quali sono utilizzate per stoppare il fascio primario scatterato e i contaminanti con diversa rigidità magnetica. E' quindi possibile scegliere un valore di campo e un'apertura delle slitte S2 tale da far passare esclusivamente le particelle con la rigidità magnetica χ desiderata.

2.3 Filtro di Wien

Il filtro di Wien, o filtro di velocità, è un elemento ottico che permette la selezione di particelle cariche in base alla loro velocità mediante un campo elettrico $\vec{E}$ ed un campo magnetico $\vec{B}$ ortogonali tra loro (Fig.2.3). Come già visto, è possibile quantificare i due contributi

$$\vec{F_E} = (ze)\vec{E}$$

$$\vec{F_L} = (ze)\vec{v} \times \vec{B}$$

Nel filtro di velocità, con $\vec{B} \perp \vec{E}$, le due forze hanno la stessa direzione e verso opposto. Il momento della particella resterà invariato solo se $|F_E| = |F_L|$, ovvero se $|v| = E/B$. Una combinazione opportuna delle intensità dei campi E e B e una fenditura di uscita consentono il passaggio esclusivo delle particelle con la velocità v desiderata, deviando quelle con velocità superiori o inferiori.

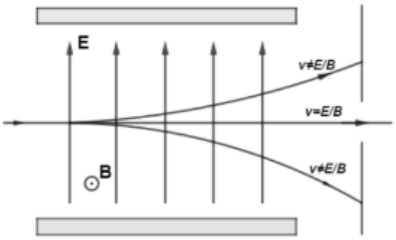


Figura 2.3: Il funzionamento del filtro di Wien come selezionatore in velocità.

2.4 Quadrupoli magnetici

La linea di fascio EXOTIC è dotata di due tripletti di quadrupoli per la focalizzazione del fascio. Questi elementi fungono da lenti [9], nelle quali la particella che li attraversa viene deviata o avvicinata rispetto all'asse ottico. Sono costituiti da quattro facce polari iperboliche (Fig. 2.4) e permettono la focalizzazione del fascio di particelle in uno dei due piani paralleli alla

direzione del moto al prezzo di una defocalizzazione nel piano a questo ortogonale. Una opportuna combinazione di più quadrupoli in serie, focalizzanti lungo assi ortogonali, *i.e.* x e y, permette di ottenere una focalizzazione complessiva in entrambe le direzioni.

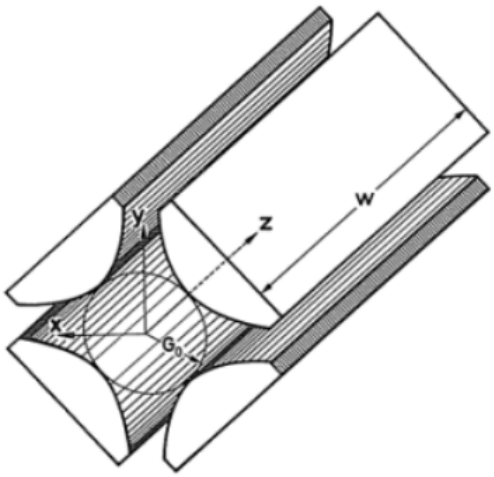


Figura 2.4: Schema assonometrico di un quadrupolo magnetico. Tratto da [9].

In un quadrupolo magnetico di apertura G_0 è presente un potenziale scalare che in un generico punto (x_i, y_i) interno assume la forma:

$$V_B = 2xy\frac{V_T}{G_0^2} \;=\; g_B xy \tag{2.8}$$

Dove V_T è il potenziale magnetico degli elettrodi e $g_B = \frac{2V_T}{G_0^2}$. Applicando $B = -\nabla V_B$ si ottengono le tre componenti del campo magnetico B:

$$B_x(x,y) = -\frac{\partial V_B}{\partial x} \;= -g_B y \tag{2.9}$$

$$B_y(x,y) = \frac{\partial V_B}{\partial y} = -g_B x \tag{2.10}$$

$$B_z(x,y) = 0 \tag{2.11}$$

Sostituendo nell'equazione di Lorentz:

$$m\ddot{x} = (ze)v_x g_B y \tag{2.12}$$

$$m\ddot{y} = (ze)v_y g_B x \tag{2.13}$$

Le soluzioni di tale sistema di equazioni sono periodiche sul piano xz e divergono sul piano yz. Da tali soluzioni è possibile poi scrivere in forma matriciale l'equazione che delinea il passaggio di un fascio di particelle all'interno dei quadrupoli mediante l'utilizzo della matrice di trasferimento ad essi associata:

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x|x & x|a \\ a|x & a|a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ a_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} cos(kz) & k^{-1}sen(kz) \\ -ksen(kz) & cos(kz) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ a_1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} y_2 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y|y & y|b \\ b|y & b|b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ a_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} cosh(kz) & k^{-1}senh(kz) \\ -ksenh(kz) & cosh(kz) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ b_1 \end{pmatrix}$$

Dove si sono definiti i parametri $a = \frac{sen\alpha}{\sqrt{1+tan^2\beta cos\alpha^2}}$ $b = \frac{sen\beta}{\sqrt{1+tan^2\alpha cos\beta^2}}$ e $k^2 = \frac{B_T(ze)}{G_0 m v_z} \approx \frac{B_T}{G_0 \chi}$.

Nel caso specifico della facility EXOTIC, il primo tripletto è utilizzato per ottenere un fuoco al centro delle slitte in S2. La configurazione del tripletto è fatta da una prima lente che focalizza in x, seguita da una seconda lente che focalizza in y e una terza focalizzante nuovamente in x. Il secondo tripletto, invece, nella nuova configurazione di EXOTIC, è utilizzato per ottenere una focalizzazione del fascio in prossimità del rivelatore AGATA. La sua configurazione è la medesima del primo tripletto.

Capitolo 3

Analisi dei dati

3.1 Calibrazione MCP

Nell'ambito delle misure svolte presso la linea di fascio EXOTIC, un ruolo cruciale è svolto dai rivelatori MCP, utilizzati per determinare con precisione la traiettoia degli ioni incidenti. Per garantire una corretta interpretazione spaziale dei segnali raccolti, è necessario eseguire una calibrazione accurata dei due MCP coinvolti. Lo scopo della calibrazione è quello di stabilire una corrispondenza univoca tra le coordinate spaziali reali del piano d'ingresso e le coordinate in canali fornite dal sistema di acquisizione. Per tale ragione, è stata montata una maschera di calibrazione a forma di croce direttamente sul foglio degli MCP. Su tale maschera sono stati realizzati punti di riferimento visibili e facilmente riconoscibili, disposti in modo da essere visibili durante la misura, ma da non coprire eccessivamente l'area attiva del rivelatore. L'apertura dei fori nella maschera è di 5 mm lungo x per la strip orizzontale della croce. I punti sono circa equidistanti di 6 mm. Le aperture lungo la strip verticale hanno le medesime caratteristiche. Un esempio è dato dalla Fig. 3.1 per MCP_1 e 3.2 per MCP_2. L'analisi dei segnali associati a questi punti noti ha permesso di determinare le trasformazioni geometriche necessarie (traslazioni, rotazioni e scale) per convertire correttamente le coordinate in canali nei corrispondenti valori fisici in millimetri lungo gli assi x e y. Questa fase è fondamentale per l'accurata ricostruzione degli eventi e per garantire la coerenza spaziale tra i due rivelatori.

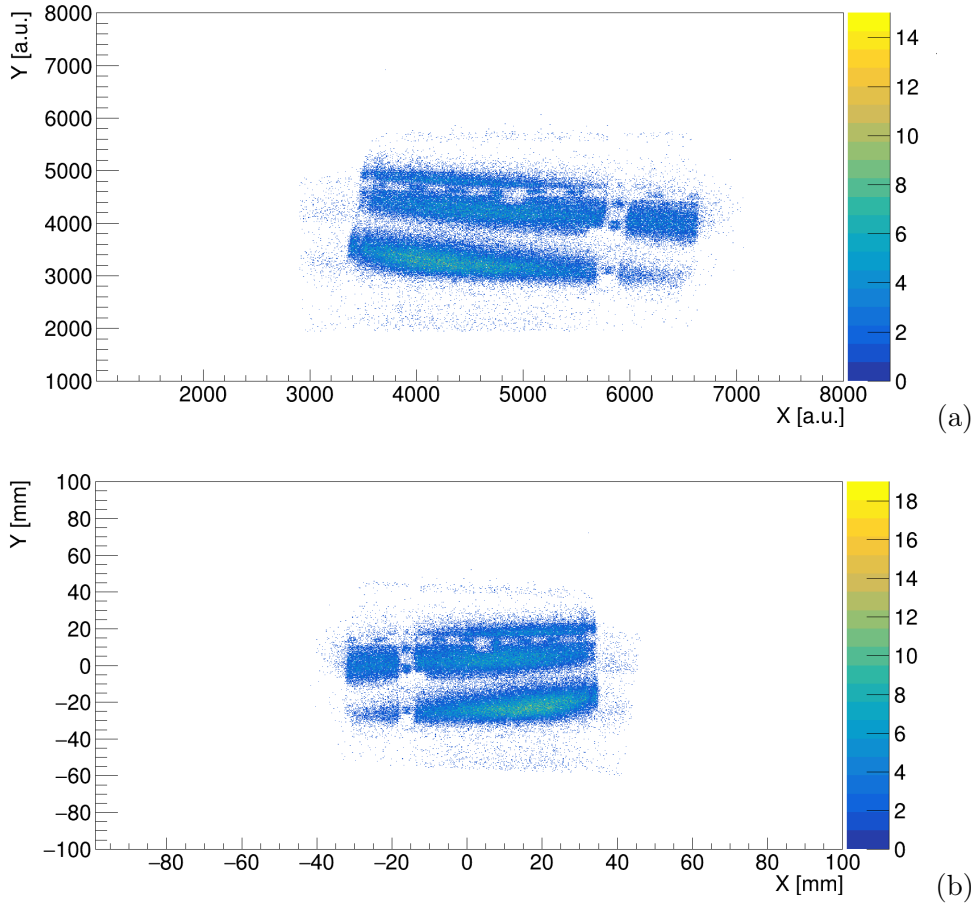


Figura 3.1: (Lo spettro di posizioni x e y misurate da MCP_1 non calibrato (a) e dopo la calibrazione (b). La maschera posizionata di fronte al foglio di Mylar, genera una regione d'ombra sullo spettro. I rettangoli rappresentano i fori millimetrici della maschera usati per la calibrazione.

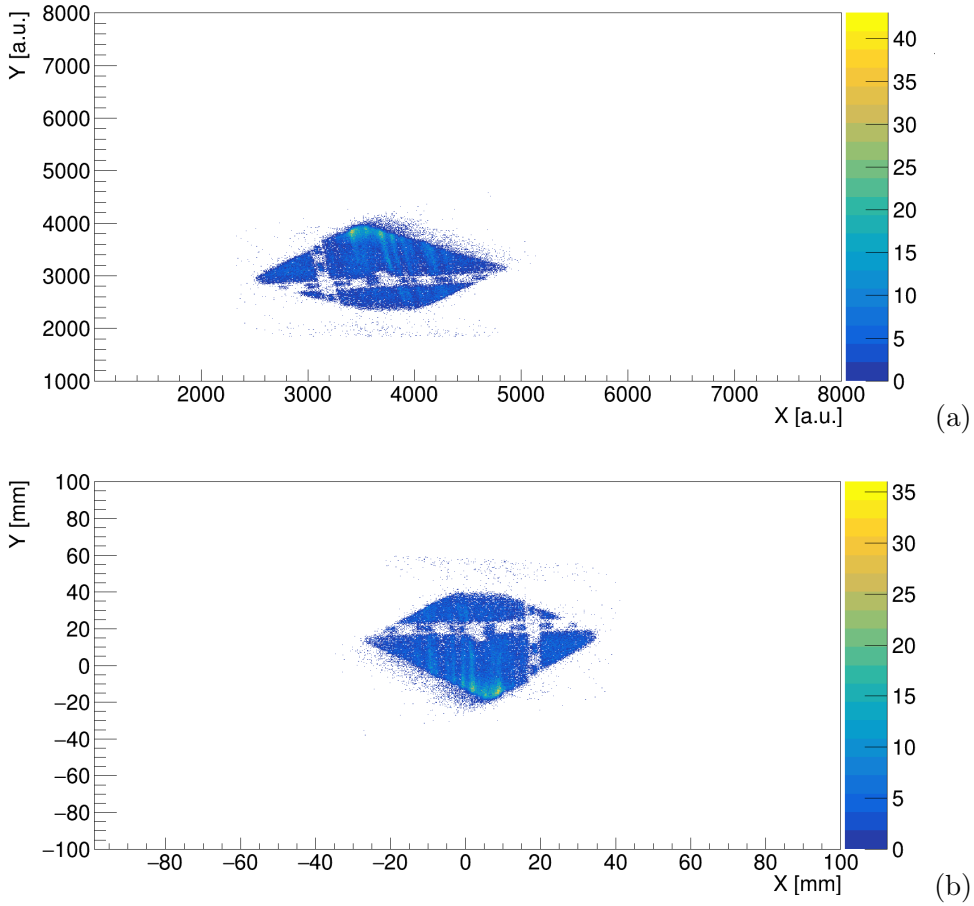


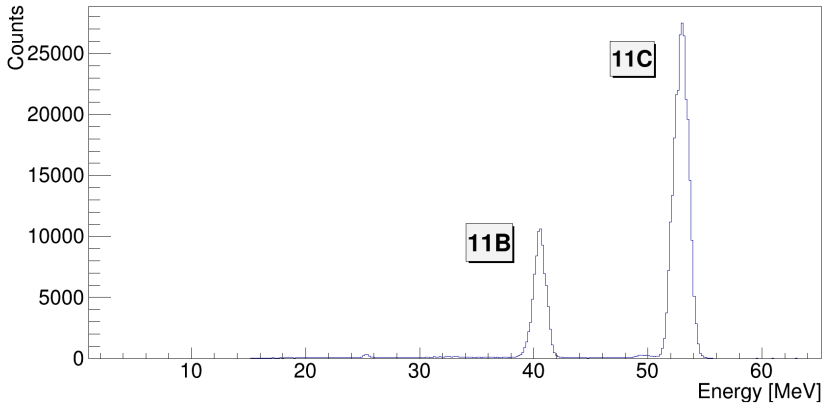
Figura 3.2: Lo spettro di posizioni x e y misurate da MCP_2 non calibrato (a) e dopo la calibrazione (b).

3.2 Purificazione del fascio con M_4

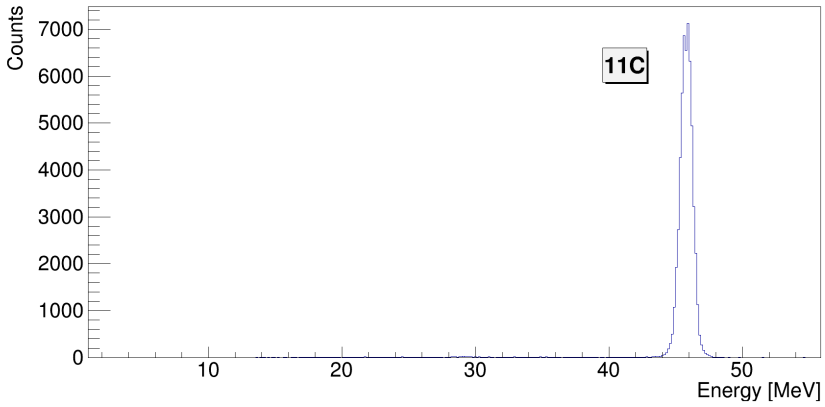
Una prima purificazione del fascio secondario è stata effettuata posizionando M_4 al centro della camera di scattering di AGATA. Il suo utilizzo permette di identificare velocemente gli ioni trasmessi, tramite la misura della loro energia. Inoltre, la correlazione della misura dell'energia della particella con la misura del suo TOF effettuate tra i due MCP, permette di associare i diversi tempi di volo misurati ai diversi isotopi trasmessi. Questo è di particolare importanza nella seconda fase della misura, quando M_4 verrà sostituito da DANTE, utilizzato per un'ottimizzazione fine del fascio secondario.

Per massimizzare la selezione del nucleo di interesse ^{11}C (Fig. 3.3), sono stati impostati i valori dei campi magnetici B nel dipolo magnetico e

nel filtro di Wien, stimati a partire dall'energia nota dei nuclei di ^{11}C (54 MeV). La parte elettrica del filtro è stata impostata invece ad un potenziale costante pari a $V = 90$ kV. Successivamente, è stata effettuata una prima variazione dei campi magnetici associati ai quadrupoli del primo tripletto (Q1, Q2 e Q3). Per il primo tripletto di quadrupoli la configurazione iniziale dei parametri è stata ottenuta in seguito ad un'ottimizzazione di acquisizioni svolte con M_4. In seguito, abbiamo proceduto a una riottimizzazione fine dei due elementi magnetici principali (dipolo e filtro di Wien), per poi riprendere la variazione sistematica dei valori dei campi magnetici di Q1, Q2 e Q3, individuando infine la combinazione ottimale. Abbiamo ottenuto i valori finali dei campi magnetici relativi al dipolo e al filtro, pari rispettivamente a $B_{dipolo} = 52.75$ (838.21 mT) e $B_{Wien} = 71.7$ (66.38 mT). Si nota che i valori riportati sono in corrente e non in campo magnetico poiché gli alimentatori degli elementi magnetici sono pilotati in corrente. Successivamente abbiamo svolto lo stesso processo sui quadrupoli associati al secondo tripletto (Q4, Q5 e Q6) e infine nuovamente su Q1, Q2 e Q3, continuando iterativamente fino alla convergenza. A supporto della selezione del nucleo corretto, lungo la linea di fascio è presente un dipolo magnetico, il quale permette una selezione del fascio in rigidità magnetica 2.7. Da tale relazione si evince che, a parità di rapporto $\frac{mv}{ze}$ nuclei con diverso numero atomico Z o stato di carica Q possono avere rigidità magnetica χ simile, risultando dunque non separabili. È questo il caso di ^{11}C e ^{11}B, che in determinate condizioni possono seguire traiettorie simili, rendendo difficle la separazione dei due nuclei tramite il solo sistema dipolo-S2. E' dunque necessaria una discriminazione aggiuntiva tramite il filtro di Wien. In assenza del filtro, tramite la misura del TOF e dell'energia, è possibile discriminare i nuclei di ^{11}C e ^{11}B. Nella Fig. 3.3 mostriamo l'azione del filtro di Wien (b) e lo spettro in energia in assenza del filtro di Wien (a), con i due picchi chiaramente distinguibili. L'analisi degli spettri energetici ottenuti durante le diverse acquisizioni ha evidenziato due picchi distinti, centrati rispettivamente a 38 MeV e 54 MeV, come si può constatare dalla Fig.3.3. Si può attribuire con buona certezza il picco a più alta energia (54 MeV) al ^{11}C, e quello a più bassa energia (38 MeV) al ^{11}B. Questa attribuzione è anche confermata da calcoli di cinematica diretta effettuati con il software LISE++ [5] per nuclei scatterati a piccoli angoli intorno allo 0°.



(a)



(b)

Figura 3.3: (a) Lo spettro in energia su M_4 in cui si vedono i picchi di ^{11}B (38 MeV) e ^{11}C (54 MeV) e (b) lo spettro in energia su M_4 in cui si vede il solo picco relativo ai nuclei di ^{11}C a seguito della purificazione con il filtro di Wien.

3.3 Ottimizzazione fine con DANTE

Nella fase successiva dell'esperimento la corrente del fascio è stata incrementata fino a valori dell'ordine di 120 enA, corrispondenti ad una frequenza maggiore al limite massimo tollerato da M_4 pari a circa 1 kHz; è stato dunque implementato il rivelatore DANTE, la cui superficie è simile a quella del target effettivo (diametro 3.5 cm). L'introduzione di DANTE ha consentito di mantenere attive le funzionalità di monitoraggio del TOF e di identificazione del fascio anche a correnti elevate, senza compromettere la qualità del segnale e la risoluzione temporale.

In seguito all'implementazione del rivelatore DANTE abbiamo proceduto all'ottimizzazione fine del fascio secondario. In questa fase dell'esperimento, abbiamo considerato solo i valori dei campi magnetici di Q4, Q5 e Q6 relativi al secondo tripletto di quadrupoli e li abbiamo variati ciclicamente al fine di trovarne la migliore combinazione. Secondo i dettami dell'ottica è consigliabile impostare una configurazione simmetrica in cui il primo (Q1 o Q4) e il terzo quadrupolo (Q3 o Q6) di ciascun tripletto assumono un medesimo valore (incognito) del campo magnetico e lasciando come altro parametro libero il secondo quadrupolo (Q2 o Q5); in questo modo il numero di incognite si riduce ed è quindi possibile imporre le due condizioni di fuoco lungo le coordinate x e y nei punti della linea desiderati per giungere ad una soluzione unica. Nella misura in questione, a seguito di simulazioni effettuate con il software TraceWin [6], abbiamo osservato come una maggiore trasmissione fosse attesa per valori asimmetrici. Al fine di ottimizzare il trasporto del ^{11}C, partendo dai valori simulati, sono stati definiti tre parametri utili:

- AVERAGE, definito come $\alpha = \frac{Q_4+Q_6}{4} + \frac{Q_5}{2}$, rappresenta la media pesata dei quadrupoli tenendo conto dell'eventuale accoppiamento tra il primo e il terzo.
- UNBALANCE, definito come $\beta = \frac{\frac{Q_4+Q_6}{2} - Q_5}{\frac{Q_4+Q_6}{2} + Q_5}$, quantifica lo sbilanciamento tra il quadrupolo centrale e la media dei due esterni.
- ξ, definito come $\xi = \frac{Q_4-Q_6}{Q_4+Q_6}$, misura l'asimmetria tra i due quadrupoli esterni. Si nota che nel caso in cui si fosse rispettata l'uguaglianza $Q_4 = Q_6$ tale parametro risulterebbe sempre superfluo poiché pari a 0.

Si ricorda che ogni quadrupolo è un elemento ottico che ha la proprietà di focalizzare un fascio di particelle cariche lungo un asse a patto di una defocalizzazione lungo l'asse a questi perpendicolare. La configurazione dei due tripletti di quadrupoli lungo la linea di fascio EXOTIC è strutturata in modo tale che si abbia l'alternanza di quadrupoli focalizzanti e defocalizzanti lungo un determinato asse; i tre parametri introdotti consentono di interpretare in modo corretto l'effetto delle variazioni dei campi magnetici sull'ottica del fascio, fornendo dei criteri diretti per individuare la configurazione più efficace.

3.4 Analisi dei dati

A seguito di numerose acquisizioni di set di dati, ottenuti variando le combinazioni dei tre parametri sopra elencati, è necessaria un'accurata analisi

al fine di scegliere i valori di Q4, Q5 e Q6 che meglio massimizzano l'intensità del fascio su AGATA. L'ottimizzazione è stata condotta secondo un approccio iterativo: in ogni ciclo, è stato fatto variare un solo parametro tra average, unbalance e csi (α, β e ξ) mentre i rimanenti due sono stati ai valori ottimali individuati nel ciclo precedente. In questo modo, ad ogni iterazione si affinava progressivamente la configurazione, convergendo verso la combinazione di valori capace di garantire le migliori prestazioni complessive. Nel caso specifico, si è proceduto variando inizialmente il valore dell'average , poi di ξ e infine dell'unbalance. Per ogni ciclo di dati abbiamo scelto il valore del parametro migliore tenendo conto della focalizzazione e dell'intensità del fascio lungo gli assi x e y in prossimita del bersaglio (attualmente DANTE).

3.4.1 Ottimizzazione di α

Nella prima fase dell'analisi dei dati abbiamo variato il parametro average e abbiamo fissato i parametri ξ e unbalance rispettivamente ai valori (in corrente) $\xi = -0.229$ e $\beta = -0.3326$. Il valore in corrente per ogni quadrupolo va da 0 (spento) a 100 (massima corrente erogabile).

In particolare abbiamo variato il parametro average da un valore iniziale di 36.425 ad un valore finale di 46.425. Dalla Fig.3.4 è chiaro l'andamento: all'aumentare dell'average il fascio focalizza sempre più lontano dal target. Come conseguenza, nella Fig. 3.4 si nota che l'acquisizione (α=36.425) corrispondente al primo grafico in alto a sinistra, ha il fuoco meglio posizionato rispetto alle altre; per questo motivo abbiamo proceduto all'analisi della variabile ξ con tale valore di α come predefinito.

3.4.2 Ottimizzazione di ξ

A questo punto abbiamo provveduto all'ottimizzazione della variabile ξ da un valore iniziale di -0.32949 a un valore finale di 0.2705 tenendo fisse le variabili average ($\alpha = 36.425$) e unbalance ($\beta = -0.3326$). L'effetto di ξ consiste in una riduzione della dimensione del punto focale, come si può visualizzare dalla Fig. 3.5. Si evince dunque che le due acquisizioni con maggiore statistica sono quelle posizionate rispettivamente in alto a sinistra ($\xi = -0,32949$) e in alto al centro ($\xi = -0.22949$). Abbiamo individuato come migliore condizione nuovamente l'acquisizione del ciclo precedente in quanto il valore di ξ ($\xi = -0.22949$) aumenta sensibilmente la statistica nel punto focale.

3.4.3 Ottimizzazione di β

Si procede infine alla variazione sistematica del parametro unbalance; effettuando delle variazioni tra un valore iniziale di $\beta = -0.3326$ ad un valore finale di $\beta = -0.2526$. L'effetto della variabile unbalance è opposto a quello di ξ lungo l'asse x, in quanto disperde il fuoco e parallelizza il fascio. In questo caso selezionare il valore di β migliore, osservando i profili del fascio, risulta più complesso. Osservando la Fig. 3.6 abbiamo constatato che le due acquisizioni con maggior statistica risultano ai valori dell'unbalance pari a $\beta = -0.3326$ e $\beta = -0.3026$, rispettivamente corrispondenti ai grafici in alto a sinistra e in alto al centro. Si nota dalla proiezione XZ (Fig. 3.6) che la prima acquisizione presenta una minore intensità massima del fascio e il fuoco è leggermente spostato indietro sull'asse y. Al contrario, la seconda acquisizione è meglio focalizzata e presenta un'intensità di fascio leggermente maggiore. Si conclude comunque in prima analisi che le due acquisizioni corrispondono alle migliori combinazioni di α, β e ξ Per discriminare il migliore tra questi due valori di β si è passati all'analisi dello spettro di TOF tra DANTE e MCP_1.

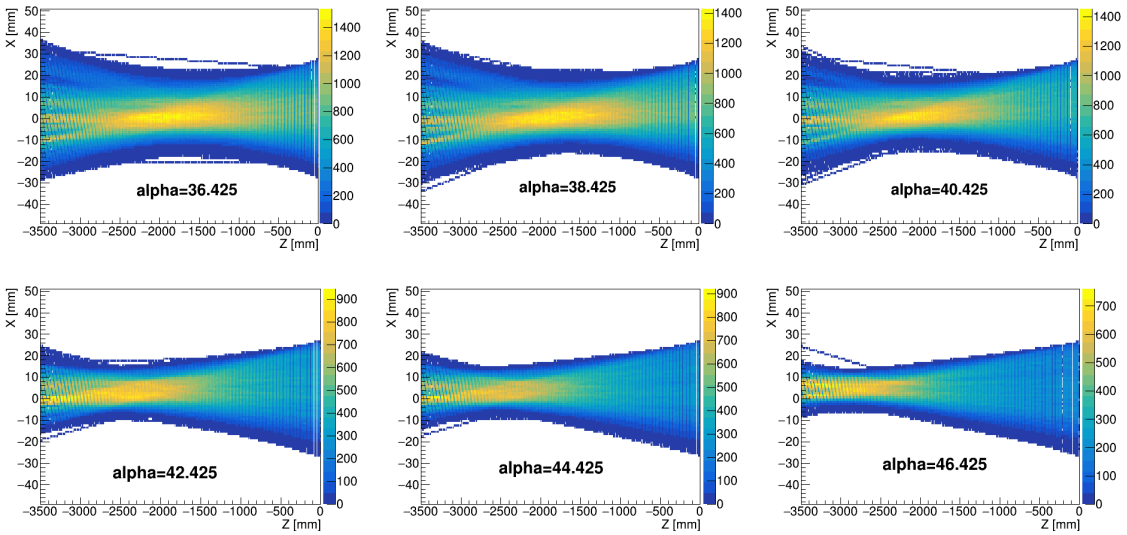


Figura 3.4: La proiezione del fascio sul piano XZ al crescere della variabile average. Lo zero dell'asse 0 corrisponde alla posizione del target. La distanza tra il centro degli MCP e il target è di circa 3380 mm.

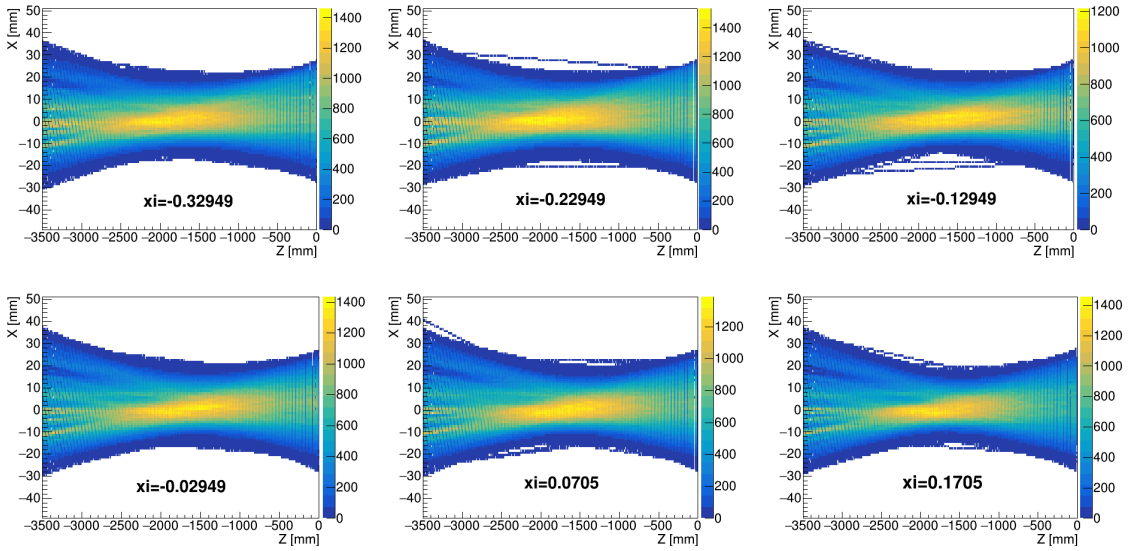


Figura 3.5: La proiezione del fascio sul piano XZ al crescere della variabile ξ.

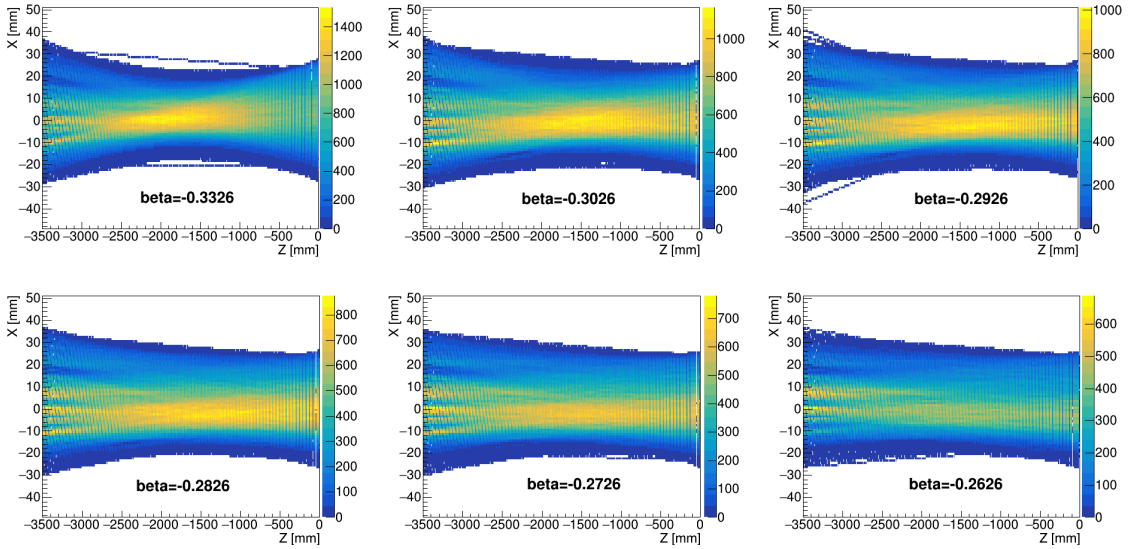
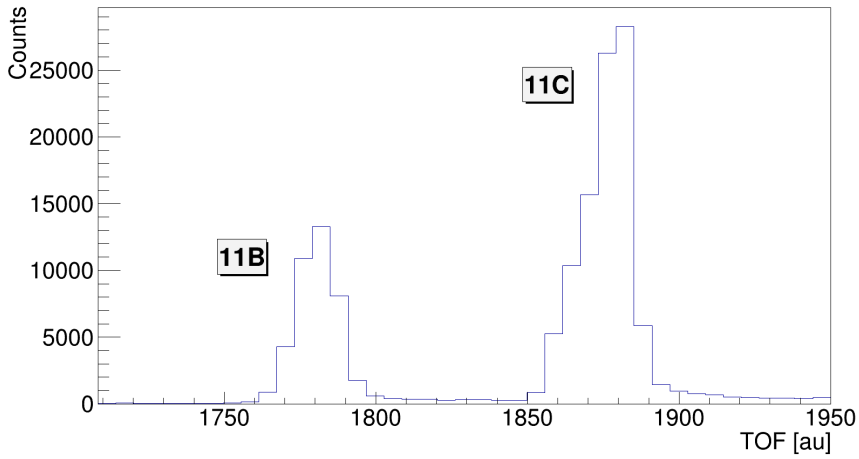


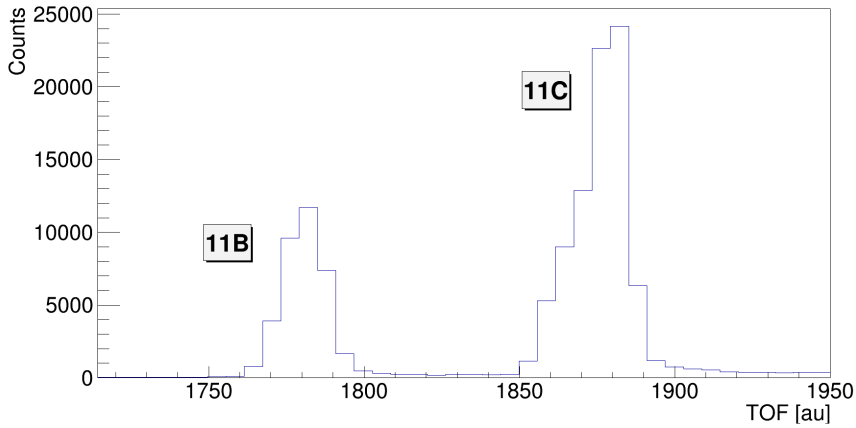
Figura 3.6: La proiezione del fascio sul piano XZ al crescere della variabile unbalance.

3.4.4 Time of flight (TOF)

Analizziamo ora lo spettro del Time of Flight (TOF) rivelato tra i due MCP, riportato in Fig. 3.7, corrispondenti alle condizioni sperimentali con migliore statistica e con migliore posizionamento del fuoco lungo entrambi gli assi. In entrambi gli spettri, il picco minore è associato al tempo di volo del ^{11}B, mentre il picco principale corrisponde al ^{11}C. Dal confronto si osserva che le due acquisizioni presentano forme molto simili; tuttavia, la prima acquisizione mostra un conteggio più elevato per il ^{11}C. Tale incremento è accompagnato anche da una maggiore contaminazione da ^{11}B rispetto alla seconda acquisizione: il numero di eventi attribuiti al ^{11}B risulta infatti superiore, sebbene la differenza sia meno marcata rispetto a quella osservata per il ^{11}C.



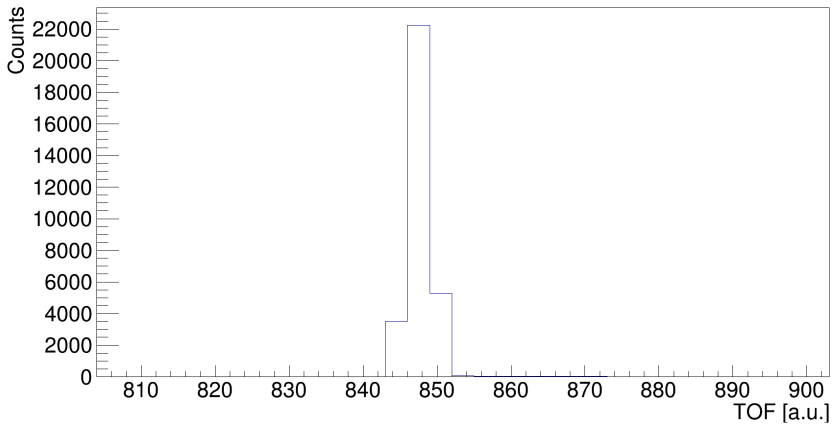
(a)



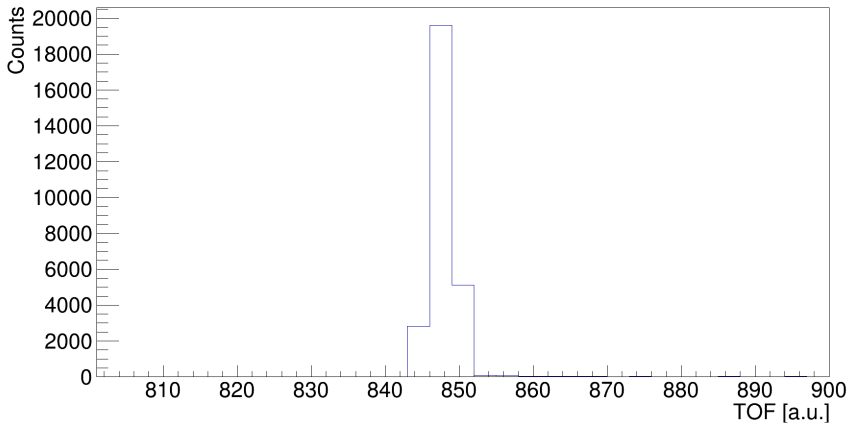
(b)

Figura 3.7: (a) Spettro del TOF rivelato da MCP per l'acquisizione a $\beta = -0.3326$ e (b) spettro del TOF per l'acquisizione a $\beta = -0.3026$.

Abbiamo quindi successivamente considerato il TOF rivelato da DANTE, in Fig. 3.8, per le stesse acquisizioni analizzate in Fig. 3.7. Si nota innanzitutto che la parte del fascio contaminata, costituita dal fascio primario scatterato, è stata efficaciemente soppressa grazie all'utilizzo degli elementi ottici, ultimo nell'ordine il filtro di Wien. Si può constatare dunque che grazie all'azione dei quadrupoli e del filtro di Wien il contaminante viene efficacemente deviato e si ferma prima di raggiungere DANTE.



(a)



(b)

Figura 3.8: (a) Spettro del TOF su DANTE per l'acquisizione a $\beta = -0.3326$ e (b) spettro del TOF per l'acquisizione a $\beta = -0.3026$.

3.4.5 Fascio ottimizzato

Abbiamo infine determinato gli yield corrispondenti al fascio di ^{11}C su AGATA. In particolare, abbiamo ottenuto un numero di conteggi pari a $I = 31450$

per la prima acquisizione ($\beta = -0.3326$) e $I = 279278$ per la seconda ($\beta = -0.3026$), corrispondenti rispettivamente a $T = 1048.3$ pps/enA e $T = 932.6$ pps/enA. Si nota che in entrambe le acquisizioni si ha la medesima durata ($t = 20$ s) e intensità del fascio primario. Per un turno di misura con un'intensità di fascio primario di ≈ 120 enA, ciò corrisponde a un'intensità di ^{11}C pari a $T \times 120$ pps, ovvero rispettivamente 1.25×10^5 pps e 1.11×10^5 pps. Dai valori ottenuti risulta evidente che la prima acquisizione sia quella con la miglior statistica. Abbiamo dunque selezionato i parametri ξ, average e unbalance rispettivamente pari a -0.22949, 36.425 e -0.3326.

Capitolo 4

Conclusioni

Il lavoro presentato in questa tesi si è concentrato sullo studio e sull'ottimizzazione del trasporto di fasci radioattivi lungo la linea EXOTIC dei Laboratori Nazionali di Legnaro, recentemente potenziata per consentirne l'accoppiamento con l'array di rivelatori γ AGATA. Dopo una descrizione delle caratteristiche principali della facility e dei suoi elementi ottici, l'attenzione è stata focalizzata sul ruolo cruciale dei rivelatori MCP, utilizzati per la misura della posizione e del tempo di volo delle particelle, e sulla calibrazione necessaria per garantirne la corretta interpretazione spaziale.

Il percorso sperimentale ha previsto una prima purificazione del fascio mediante il rivelatore M_4, seguita dall'introduzione di DANTE, che ha permesso di gestire correnti più elevate senza compromettere la qualità delle misure. Successivamente, sono stati ottimizzati i parametri dei quadrupoli magnetici del secondo tripletto (average, ξ e unbalance), al fine di massimizzare la focalizzazione e l'intensità del fascio secondario in corrispondenza del punto di interesse, in prossimità di AGATA. L'analisi iterativa dei dati ha permesso di identificare la configurazione ottimale, garantendo un equilibrio tra purezza, intensità e focalizzazione del fascio.

I risultati ottenuti hanno evidenziato una chiara separazione tra i contaminanti e il nucleo di interesse ^{11}C, grazie alla combinazione del dipolo magnetico, del filtro di Wien e dei quadrupoli magnetici. In particolare, è stata raggiunta un'intensità del fascio pari a $\approx 1.2510^5$ pps, valore in linea con le aspettative.

In conclusione, l'attività svolta ha permesso non solo di mettere a punto una procedura di calibrazione e ottimizzazione del fascio secondario, ma anche di validare sperimentalmente l'efficacia delle simulazioni e delle metodologie di analisi utilizzate.

Bibliografia

[1] Gregory Choppin et al. "Chapter 9 - Detection and Measurement Techniques". In: *Radiochemistry and Nuclear Chemistry (Fourth Edition)*. A cura di Gregory Choppin et al. Fourth Edition. Oxford: Academic Press, 2013, pp. 239–295. ISBN: 978-0-12-405897-2. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-405897-2.00009-4. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124058972000094.

[2] F Farinon et al. "Commissioning of the EXOTIC beam line". In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 266.19-20 (2008), pp. 4097–4102.

[3] MARCO Mazzocco et al. "Production and separation of light low-energy radioactive ion beams with the EXOTIC beam-line at LNL". In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 266.19-20 (2008), pp. 4665–4669.

[4] G. Montagnoli, A.M. Stefanini, M. Trotta et al. "The large-area microchannel plate entrance detector of the heavy-ion magnetic spectrometer PRISMA". In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 547.2 (2005), pp. 455–463. ISSN: 0168-9002. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.03.158. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900205009241.

[5] OB Tarasov e D Bazin. "LISE++: Radioactive beam production with in-flight separators". In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 266.19-20 (2008), pp. 4657–4664.

[6] D Uriot e N Pichoff. "TraceWin". In: *CEA Saclay, June* 596 (2014).

[7] J.J. Valiente-Dobón, R. Menegazzo, A. Goasduff et al. "Conceptual design of the AGATA 2 array at LNL". In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 1049 (2023), p. 168040. ISSN: 0168-9002. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168040.

URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016890022300030X.

[8] JJ Valiente-Dobón et al. "Studies of neutron-rich nuclei with the CLARA-PRISMA setup and description of the heavy-ion detector DANTE". In: *ACTA PHYSICA POLONICA SERIES B* 37.1 (2006), p. 225.

[9] Hermann Wollnik. *Optics of charged particles*. Academic Press, 2021.