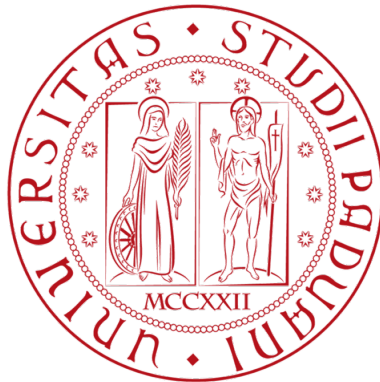


Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di laurea in Fisica

Un nuovo apparato per misure di sezione d’urto di Fusione Nucleare



Relatore: Prof.ssa Giovanna Montagnoli

Correlatore: Prof. Alberto Stefanini

Laureanda: Irene Zanon

Anno Accademico 2014/2015

Indice

Introduzione	1
1 Misure di fusione	5
1.1 Misure di sezioni d'urto di fusione	5
1.2 L'apparato EXOTIC	6
1.3 L'apparato PISOLO	8
1.4 Altri apparati	10
2 L'apparato sperimentale	13
2.1 L'acceleratore Tandem XTU	13
2.2 Apparato di rivelazione	14
2.3 Catena elettronica	15
3 Misure effettuate e risultati ottenuti	19
3.1 Scelta dei sistemi e analisi dati	19
3.1.1 Esempi di spettri e matrici nelle varie condizioni	21
3.1.2 Il sistema $^{32}\text{S}+^{48}\text{Ca}$	25
3.1.3 Il sistema $^{32}\text{S}+^{64}\text{Ni}$	26
3.2 Dati ottenuti con l'apparato PISOLO	27
4 Confronto con PISOLO e conclusioni	29
4.1 Fattore di reiezione	29
4.2 Efficienza	29
4.3 Conclusioni	30

Introduzione

Tra gli anni Sessanta e Settanta nuove tecniche di accelerazione permisero la produzione di fasci di ioni pesanti, rendendo possibile lo studio delle reazioni nucleari indotte da tali fasci. In particolare si sviluppò l'interesse per la fusione tra ioni pesanti per la ricerca di nuovi elementi della tavola periodica e nel tentativo di raggiungere i limiti di stabilità della materia nucleare [1].

I primi risultati sperimentali misero in evidenza un fenomeno inatteso: ad energie prossime o inferiori alla barriera Coulombiana, la probabilità di fusione per combinazioni proiettile - bersaglio abbastanza pesanti è di gran lunga maggiore rispetto alle previsioni teoriche di penetrazione quantistica di una barriera di potenziale.

Questo fenomeno, noto come "enhancement", è stato attribuito all'influenza della struttura nucleare sulla dinamica del processo di fusione. Per tenerne conto è stato introdotto il modello a canali accoppiati ottenendo buoni risultati per molti sistemi, come nel caso delle varie combinazioni di isotopi del Nichel, e dell'Ossigeno con nuclei bersaglio di Samario come riportato in Fig. 1 [2, 3].

Tuttavia è spesso difficile attribuire questo enhancement a specifiche eccitazioni inelastiche o canali di reazione quali il trasferimento di nucleoni. Pertanto la ricerca in questo campo è tuttora in corso.

Inoltre più di recente, è stato osservato sperimentalmente che ad energie molto inferiori alla barriera Coulombiana, la funzione di eccitazione della fusione ha un andamento non previsto dalla teoria a canali accoppiati. Infatti le sezioni d'urto risultano molto inferiori ai valori calcolati usando dei potenziali ione-ione standard, vedi Fig. 2. Questo effetto è chiamato "hindrance" ed è stato riscontrato in molti sistemi di massa media [4]. Ad oggi non esiste una teoria in grado di spiegare questo comportamento ed è quindi importante poter ottenere ulteriori dati di fusione a bassa energia per avere a disposizione una vasta sistematica. Questo implica essere in grado di misurare sezioni d'urto nell'intervallo dei μb o più piccole.

Lo scopo di questa tesi è il test con il fascio dell'acceleratore Tandem

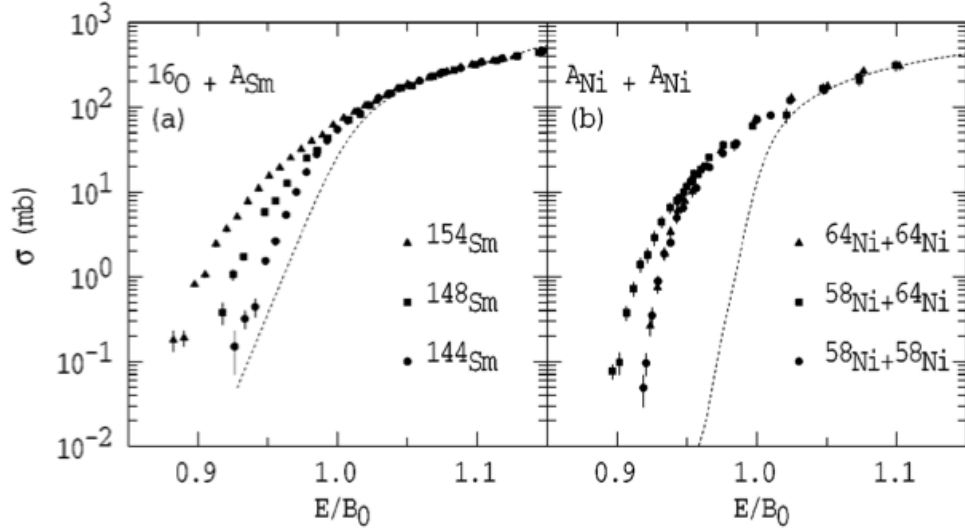


FIGURA 1: (a) La funzione di eccitazione di ^{16}O su isotopi di Samario mostra un marcato aumento della sezione d'urto con il numero di massa e la deformazione degli isotopi. (b) Differente andamento della sezione d'urto dei sistemi $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ e $^{64}\text{Ni} + ^{64}\text{Ni}$ rispetto a $^{58}\text{Ni} + ^{64}\text{Ni}$ dovuto all'influenza, in quest'ultimo caso, dei canali di trasferimento di nucleoni sul processo di fusione. Le curve tratteggiate corrispondono alla funzione di eccitazione per il modello che tiene conto del solo moto relativo dei due nuclei (figura tratta dalla Ref. [2]).

XTU dei Laboratori Nazionali di Legnaro (LNL) INFN, di un apparato che permetta la misura di queste sezioni d'urto di fusione ad energie molto inferiori alla barriera Coulombiana. Il modo più diretto per la misura di tali sezioni d'urto è la rivelazione dei prodotti di fusione - evaporazione che vengono emessi ad angoli molto piccoli rispetto alla direzione del fascio trasmesso dal bersaglio. Gli eventi di fusione sono molti ordini di grandezza più rari rispetto all'intensità del fascio (circa 10^{10} particelle al secondo) per cui occorre un sistema che impedisca alle particelle del fascio di raggiungere i rivelatori dei residui di evaporazione.

Per far questo si è scelto di utilizzare l'apparato EXOTIC, installato presso i LNL, che fu originariamente progettato per la produzione e l'utilizzo di fasci radioattivi leggeri (e.g. ^{17}F e ^8B etc.). Tuttavia in questo caso lo scopo era di verificare le sue prestazioni per lo studio di reazioni di fusione con fasci stabili confrontandole con quelle dell'apparato PISOLO correntemente usato per questo tipo di esperimenti presso i LNL.

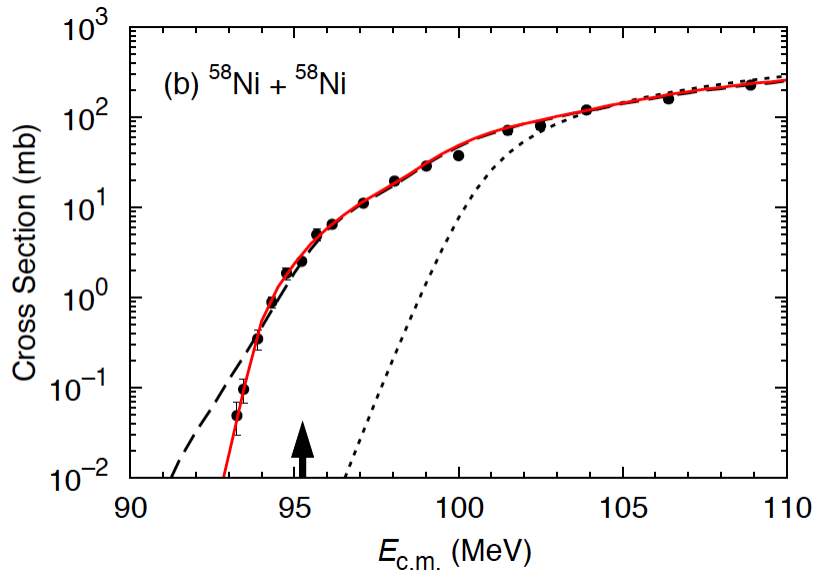


FIGURA 2: *Funzione di eccitazione per la sezione d'urto di fusione del sistema $^{58}\text{Ni}+^{58}\text{Ni}$. Linea a tratto breve: modello unidimensionale; linea tratteggiata modello a canali accoppiati; linea rossa fit fenomenologico.*

I dati sono stati ottenuti in un recente esperimento svoltosi nel luglio 2015. Sono state usate le reazioni di fusione $^{32}\text{S}+^{48}\text{Ca}$, ^{64}Ni utilizzando un fascio di ^{32}S su bersagli di ^{48}Ca e ^{64}Ni . Queste reazioni sono state infatti studiate in passato con l'apparato PISOLO e quindi un confronto risulta immediato e significativo.

PISOLO è un deflettore elettrostatico di fascio seguito da uno spettrometro a tempo di volo per ioni pesanti che permette misure di sezioni d'urto di fusione fino a circa $1\mu\text{b}$. In molti casi questo non è sufficiente a mettere in evidenza il fenomeno della hindrance da cui la necessità di verificare le prestazioni di EXOTIC per la misura di sezioni d'urto nel range dei nb.

Questa tesi si propone dunque di

- descrivere il set up EXOTIC nelle sue componenti, confrontandolo con il set up PISOLO;
- descrivere l'apparato di identificazione usato e le misure effettuate;
- analizzare i risultati ottenuti;
- confrontare le prestazioni di EXOTIC e PISOLO.

Capitolo 1

Misure di fusione

1.1 Misure di sezioni d'urto di fusione

La misura della sezione d'urto di fusione si può ottenere da quella di fusione - evaporazione di particelle leggere (neutroni, protoni e alfa) dal nucleo composto qualora la sua diseccitazione per fissione sia trascurabile. Questo è il caso delle reazioni studiate in questa tesi.

La misura della sezione d'urto di fusione - evaporazione si può realizzare con due metodi di base: la rivelazione diretta dei residui di evaporazione o la misura delle radiazioni emesse dalla loro diseccitazione o decadimento radioattivo. Il metodo scelto è il primo, che risulta essere il più preciso. Tuttavia occorre superare alcuni problemi sperimentali.

Per misurare il numero di residui di evaporazione è necessario porsi ad angoli piccoli rispetto al fascio incidente, in quanto il massimo della sezione d'urto differenziale si trova a 0° . E' quindi necessario avere un apparato che permetta di rigettare in modo selettivo le particelle del fascio. Infatti se tutte le particelle del fascio, dell'ordine di 10^{10} sec^{-1} incidessero su un qualsiasi rivelatore il ritmo di conteggio sarebbe insostenibile e il rivelatore verrebbe irrimediabilmente danneggiato nella maggior parte dei casi.

Si definisce come fattore di reiezione il rapporto tra il numero di particelle del fascio incidente e il numero di particelle (fondo) che vengono comunque trasmesse dall'apparato:

$$RF = \frac{N_{beam}}{N_{fondo}} \quad (1.1)$$

Un secondo parametro determinante è l'efficienza assoluta dell' apparato. Questo è dato dal rapporto A tra il numero di eventi di fusione misurato (ER)

in un dato tempo e il numero di eventi di fusione prodotti nel bersaglio:

$$A = \frac{ER}{N_{fus}} \quad (1.2)$$

dove N_{fus} è dato dalla formula:

$$N_{fus} = \frac{\sigma_{fus} N_A N_{beam} S}{A_m} \quad (1.3)$$

Qui σ_{fus} è la sezione d'urto di fusione in cm^2 per il sistema all'energia considerata, N_A è il numero di Avogadro $6.022 \cdot 10^{23}$ particelle/mole, N_{beam} è il numero di particelle del fascio giunte sul bersaglio nel tempo di misura, S è lo spessore (g/cm^2) del bersaglio e A_m è il suo numero di massa espresso in g/mole .

Le misure compiute hanno permesso di determinare il fattore di reiezione e l'efficienza per i due apparati considerati EXOTIC e PISOLO, e di effettuare quindi un confronto delle loro prestazioni.

1.2 L'apparato EXOTIC

L'apparato EXOTIC è un sistema complesso che comprende diversi elementi:

- due tripletti di quadrupoli
- un dipolo magnetico
- un filtro di Wien
- un sistema di collimatori

Questi elementi sono posizionati come illustrato in Fig. 1.1. Il primo tripletto di quadrupoli è situato a circa 200 mm dal target, mentre il secondo si trova immediatamente prima del telescopio di rivelatori $E - ToF$. I quadrupoli funzionano come lenti magnetiche e servono per focalizzare le particelle. In particolare, il primo tripletto aumenta l'accettanza di angolo solido e quindi il numero di residui che verranno rivelati. Il secondo invece serve per focalizzare i residui sull'asse del telescopio. L'angolo solido geometrico dell'apparato è $\Delta\Omega = 10 \text{ msr}$ ($\Delta\theta = \pm 50 \text{ mrad}$ in orizzontale, $\Delta\phi = \pm 65 \text{ mrad}$ in verticale) [5].

Gli altri elementi separano gli ioni di interesse e determinano complessivamente il fattore di reiezione. EXOTIC effettua una selezione in base alla rigidità magnetica e alle velocità diverse per il fascio e per i residui di evaporazione, utilizzando il dipolo magnetico e il filtro di Wien.

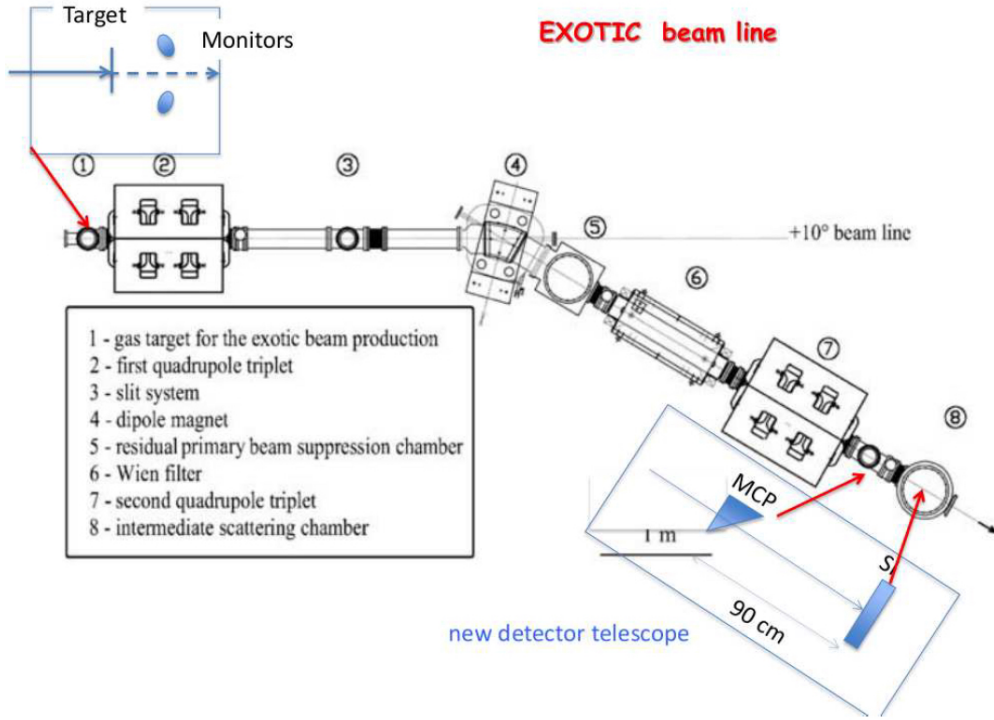


FIGURA 1.1: L'apparato EXOTIC comprende due tripletti di quadrupoli, un dipolo magnetico, un filtro di Wien, un sistema di collimatori e una camera per il telescopio $E - ToF$.

Il dipolo magnetico ha la funzione di selezionare le particelle cariche in base al loro stato di carica e alla loro quantità di moto (momento). Si definisce come rigidità magnetica il rapporto tra il momento e lo stato di carica

$$B\rho = \frac{p}{q} \quad (1.4)$$

dove p è il momento e q lo stato di carica dello ione. L'angolo di curvatura del dipolo è di 30° e il suo campo massimo è di 1.4 T.

Il filtro di Wien è uno strumento che genera campi elettrici e magnetici ortogonali tra loro e all'asse ottico. Quando una particella carica passa per il filtro viene deviata verso il basso o verso l'alto a seconda che prevalga la forza del campo elettrico o la forza del campo magnetico come illustrato in Fig. 1.2.

$$\vec{F}_{el} = q\vec{E} \quad \vec{F}_{mag} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (1.5)$$

Quando le due forze si compensano, la particella non viene deviata. I campi applicati sono tali per cui solo le particelle con velocità

$$v = \frac{E}{B} \quad (1.6)$$

non vengano deviate.

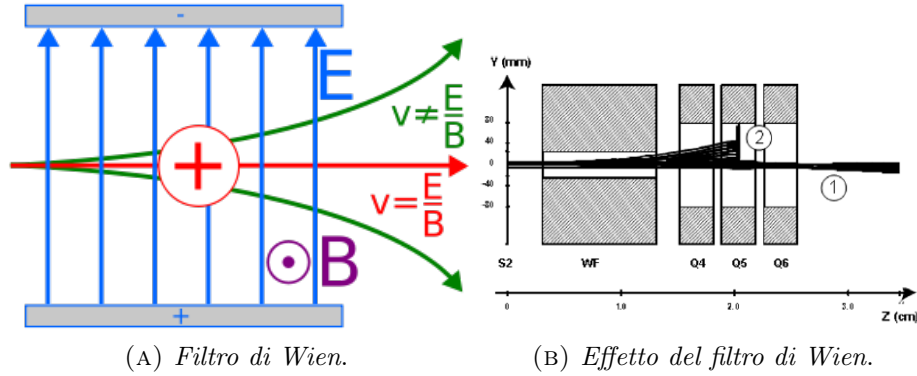


FIGURA 1.2: (A) La particella carica entrante viene curvata dal campo elettrico e magnetico in base al suo stato di carica e alla sua velocità. (B) Il collimatore posto all'interno del tripletto di quadrupoli intercetta le particelle che hanno velocità diversa da quella selezionata.

Il filtro di Wien ha un campo magnetico massimo di 0.08 T e un campo elettrico massimo di 20 kV/cm. Infine, sulla traiettoria centrale di EXOTIC, sono posti quattro sistemi di collimatori, il cui scopo è fermare quanto più possibile le particelle simili al fascio incidente che sfuggono alla selezione magnetica o del filtro di Wien. Questi collimatori misurano la corrente portata dalle particelle che urtano contro di esse. Il primo di questi (S0) è posto 150 mm prima del bersaglio ed è usato per limitare la larghezza del fascio incidente. La sua apertura durante l'esperimento era di $3 \times 3 \text{ mm}^2$. Il secondo (S1) è posto a circa un metro a monte del dipolo con una apertura durante l'esperimento di $6 \times 6 \text{ mm}^2$. Il terzo (S2) è posto a 650 mm dopo il dipolo magnetico e ferma la maggior parte del fascio trasmesso. Infine l'ultimo (S3) è collocato nel quinto quadrupolo (Q5) e la sua azione, assieme al filtro di Wien, seleziona ulteriormente i residui di evaporazione.

1.3 L'apparato PISOLO

PISOLO è costituito da un deflettore elettrostatico a due stadi che sfrutta campi elettrici trasversali per separare il fascio dai residui di evaporazione [6].

Per questo sfrutta la differente rigidità elettrica η tra i residui e il fascio:

$$\eta = \frac{E}{q} \quad (1.7)$$

dove E è l'energia e q lo stato di carica della particella. Lo schema dell'apparato è presentato in Fig. 1.3. Il deflettore è contenuto in una camera cilindrica di diametro 30 cm e lunga 85 cm. Al suo interno sono presenti due coppie di placchette contrapposte che producono due regioni di campo elettrostatico trasversale, i cui valori possono essere variati indipendentemente per adattarsi alle condizioni dell'esperimento.

Le tensioni applicate sono tali per cui i residui di evaporazione lasciano la regione del campo elettrico lungo l'asse del telescopio di rivelatori (vedi linea tratteggiata nera in figura), mentre le particelle del fascio sono intercettate da un collimatore di uscita (coll.out).

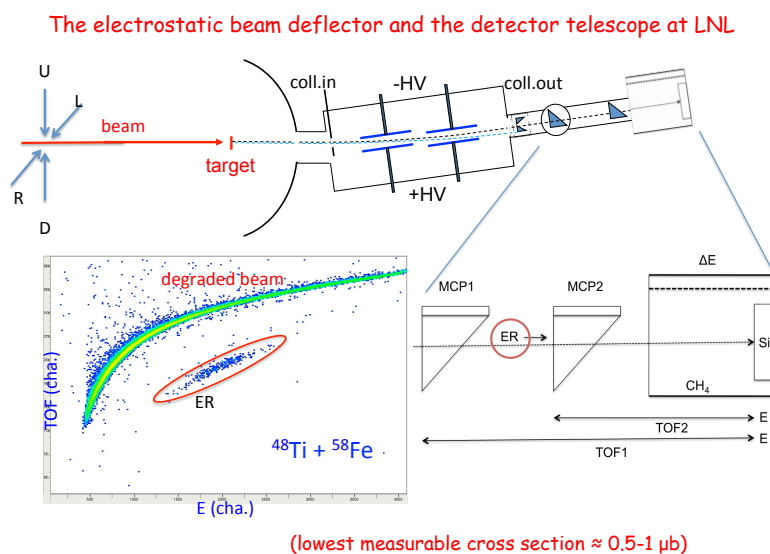


FIGURA 1.3: *Schema dell'apparato PISOLO con dettaglio del sistema di rivelazione e un esempio di matrice Energia-Tempo di volo ottenuta di recente.*

Un collimatore a quattro settori aiuta la focalizzazione del fascio sul bersaglio. A valle del bersaglio vi è inoltre un collimatore di ingresso (coll. in) al deflettore elettrostatico. L'intera struttura può ruotare sul piano orizzontale in un range di $\pm 12^\circ$, il che permette di misurare la distribuzione

angolare dei residui di evaporazione. Quando si effettuano misure ad un angolo diverso da 0° , il fascio è fermato dal collimatore di ingresso e i campi elettrici sono utilizzati per separare i residui dalle particelle simili al fascio risultanti dalla diffusione Rutherford sul bersaglio e da scattering successivi con diverse superfici metalliche.

Il telescopio è formato da due rivelatori a microchannel plates (MCP), da una camera ad ionizzazione (CI) e da un rivelatore al silicio che fornisce l'energia residua delle particelle. Due misure del loro tempo di volo vengono fornite dal silicio e dai due MCP mentre la CI misura la perdita di energia differenziale ΔE che, in combinazione con l'energia residua, permette di selezionare il numero atomico Z degli ioni. La loro massa è identificata dalla combinazione E - ToF come si vede dalla matrice in Fig. 1.3. L'angolo solido di PISOLO non è grande ($\simeq 0.05$ msr) ma il suo grande vantaggio rispetto ad altri apparati è certamente la semplicità di uso.

1.4 Altri apparati

Attualmente sono in uso in vari laboratori altri apparati degni di nota per la misura di sezioni d'urto di fusione sotto barriera.

Uno è senz'altro il Fragment Mass Analyzer (FMA) presso l'acceleratore ATLAS al Laboratorio Nazionale di Argonne (USA). Esso consiste in uno spettrometro di massa usato per separare i prodotti della fusione - evaporazione dal fascio primario di ioni pesanti incidente sul bersaglio, fermando quest'ultimo. Uno schema dell'apparato è riportato in Fig. 1.4. Esso focalizza sulla

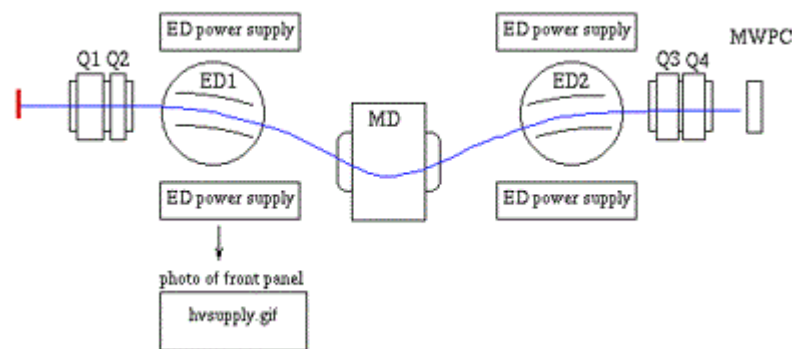


FIGURA 1.4: Lo spettrometro di massa FMA installato presso il Laboratorio Nazionale di Argonne (USA).

stessa posizione del piano focale ioni con lo stesso rapporto M/q dove M è la

massa dello ione e q la sua carica ionica. FMA sfrutta i campi elettrostatici e magnetici per rigettare le particelle del fascio e focalizzare i residui di evaporazione sul telescopio di rivelatori montato sul piano focale. Non può misurare ad angoli diversi da 0° , tuttavia copre una buona parte della distribuzione angolare avendo un angolo solido di circa 20 msr. Lo spettrometro è stato usato in misure di fusione per sistemi di massa media come $^{64}\text{Ni}+^{100}\text{Mo}$ fino a sezioni d'urto molto piccole (10-20 nb) [7].

Presso l' Australian National University a Canberra (Australia) esiste un filtro di velocità (filtro di Wien), che sfrutta l'azione di campi elettrici e magnetici incrociati per le misure della sezione d'urto di fusione, utilizzando proiettili relativamente leggeri come ^{16}O , ^{28}Si , ^{32}S o simili. Il filtro permette di separare spazialmente i residui di evaporazione dal fascio primario così da poter bloccare quest'ultimo, e rendendo possibili misure ad angoli prossimi a 0° . Lo schema dell'apparato è riportato in Fig. 1.5 [8].

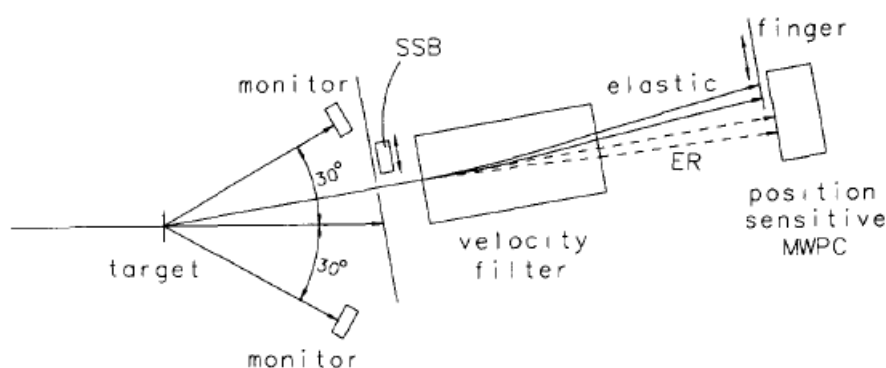


FIGURA 1.5: *Schema del filtro di velocità presso i laboratori dell'ANU, Canberra.*

Il filtro di velocità SHIP invece (vedi Fig. 1.6), situato presso il GSI a Darmstadt (Germania), è stato progettato per la rivelazione di nuclei super-pesanti. Due delle sue caratteristiche sono l'alta efficienza per i residui e l'elevato fattore di reiezione, che permettono di studiare i prodotti di fusione nella direzione del fascio fino a sezioni d'urto dell'ordine dei pb [9].

Infine un apparato molto simile ad EXOTIC è MARS [10] al Cyclotron Institute (Texas), che consiste in un separatore ad alta risoluzione progettato per la misura di piccole sezioni d'urto (vedi Fig 1.7) nella produzione di elementi pesanti.

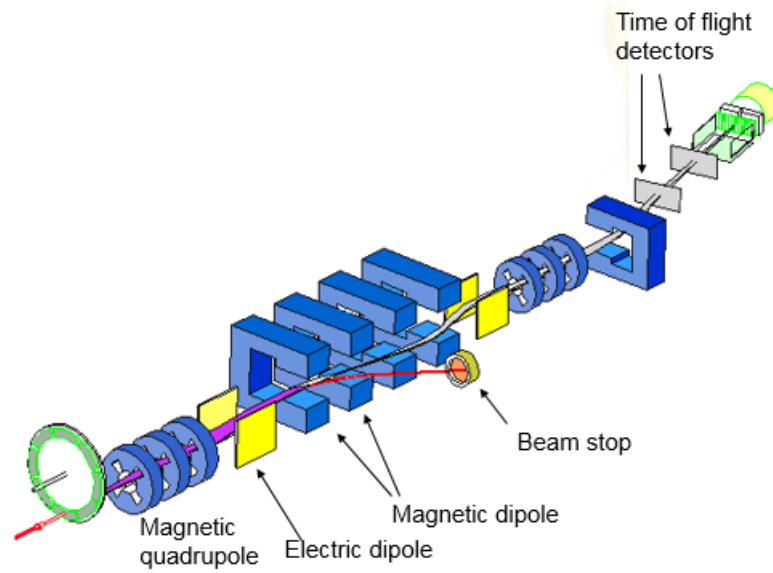


FIGURA 1.6: Schema del filtro di velocità SHIP presso il GSI a Darmstadt (Germania).

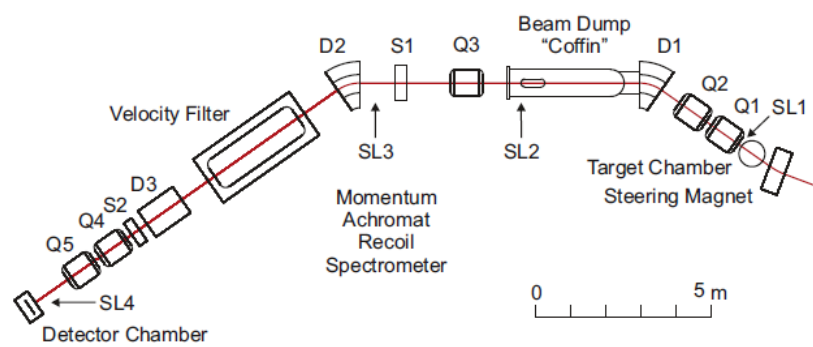


FIGURA 1.7: Schema dell'apparato MARS al Cyclotron Institute, in Texas. Il fascio arriva da destra nella figura.

Capitolo 2

L'apparato sperimentale

2.1 L'acceleratore Tandem XTU

Il fascio di ioni è stato prodotto con l'acceleratore TANDEM-XTU di tipo elettrostatico Van de Graaff da 16 MV, attivo presso i Laboratori di Legnaro dal 1982. Un acceleratore di questo tipo fornisce una notevole varietà di ioni con energia molto precisa e ottima qualità di focalizzazione. Inoltre l'energia del fascio può essere variata con facilità e rapidamente.

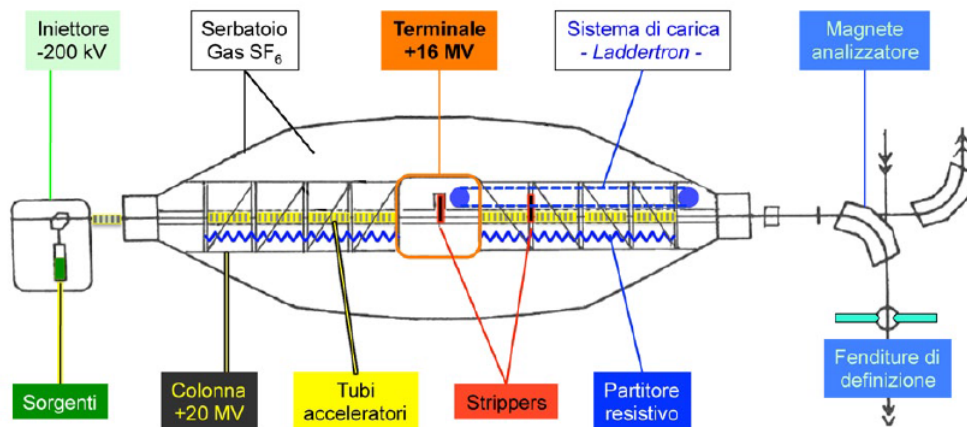


FIGURA 2.1: *Schema dell'acceleratore TANDEM-XTU*

Per gli esperimenti descritti in questa tesi, la sorgente forniva ioni zolfo con una carica negativa, ottenuta aggiungendo un elettrone all'atomo neutro. Questi ioni venivano accelerati verso un terminale positivo mantenuto ad una tensione che può arrivare fino a +16 MV [11]. In corrispondenza del terminale si trovano i cosiddetti "stripper" che sono sottili fogli di carbonio. Quando

il fascio attraversa gli stripper, perde alcuni elettroni, diventando uno ione positivo con una distribuzione di stati di carica attorno ad un valore più probabile. A questo punto lo ione positivo è accelerato verso l'estremità opposta che è a massa. Ioni con diversi stati di carica acquistano quindi diverse energie.

All'interno del Tandem è presente un partitore che fa variare la tensione in modo regolare, per limitare le possibili scariche. Per evitare invece le scariche sul contenitore esterno, questo viene riempito con un gas isolante, esafluoruro di zolfo, alla pressione massima di 7 bar.

Il fascio accelerato passa quindi attraverso un magnete analizzatore che permette, scegliendo lo stato di carica, di selezionare gli ioni con l'energia E voluta. Il campo magnetico viene infatti impostato ad un'intensità tale da permettere la curvatura a 90° solo delle particelle che abbiano rigidità magnetica

$$B\rho = \frac{(2mE)^{1/2}}{q} \quad (2.1)$$

2.2 Apparato di rivelazione

I fasci utilizzati sono stati focalizzati su uno dei bersagli installati al centro di una piccola camera di reazione. In prossimità del bersaglio sono stati usati due rivelatori al silicio posti ad angoli piccoli rispetto alla direzione del fascio incidente. Questi rivelatori erano in posizione simmetrica rispetto al fascio ad un angolo $\simeq 22^\circ$. Venivano polarizzati con una tensione di 60 V e attraverso una catena di amplificazione fornivano un segnale di energia all'ADC e un segnale logico di tempo usato come parte del trigger per il sistema di acquisizione (DAQ). Essi misuravano la diffusione elastica Rutherford sul bersaglio e negli esperimenti riportati in questa tesi erano essenzialmente usati solo per controllo della qualità del fascio sul bersaglio stesso.

A valle del filtro di Wien era posto un rivelatore a MCP (vedi Fig. 1.1) e di seguito a circa 90 cm di distanza un rivelatore al silicio a grande area (600 mm²).

L'MCP (Fig. 2.2) rivela gli elettroni prodotti dall'attraversamento di un foglio di Carbonio di spessore $20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ da parte degli ioni. Gli elettroni vengono accelerati e poi deflessi di 90° tramite una doppia griglia obliqua polarizzata (specchio elettrostatico) e inviati sulla parte sensibile del rivelatore (una coppia di micro channel plates) dove vengono moltiplicati di un fattore circa 10^6 . La loro carica viene quindi raccolta su un anodo e il segnale prodotto ha un'ampiezza di circa 100 mV e un tempo di salita $\Delta t \simeq 1 \text{ ns}$.

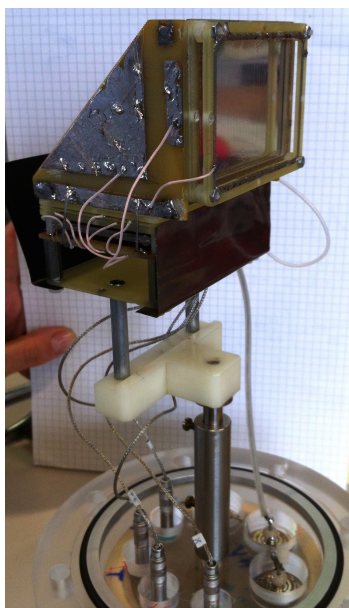


FIGURA 2.2: Foto del rivelatore a Microchannel Plates prima dell'installazione.

Il rivelatore al silicio permette di misurare l'energia degli ioni e fornisce un segnale veloce per la determinazione del loro tempo di volo. Infatti il ToF veniva misurato tra il MCP e questo rivelatore al silicio. Lo start del ToF veniva dato dal silicio poiché questo rivelatore ha una frequenza di conteggio più bassa rispetto all'MCP.

2.3 Catena elettronica

Lo schema della catena elettronica è riportato in Fig. 2.3. Dal preamplificatore del rivelatore al Silicio (Si) escono due tipi di segnali. Uno di questi è un segnale lineare positivo proporzionale all'energia con la forma caratteristica di una salita veloce seguito da una lunga coda in discesa. Il segnale passa per lo Shaping Amplifier (SA) che dà al segnale una forma gaussiana. L'ampiezza di questo segnale fornisce l'informazione sull'energia. Il segnale passa poi per un Linear Gate Stretcher (LGS) che trasforma il segnale gaussiano in un segnale positivo squadrato mantenendo l'informazione sulla sua ampiezza, ma consente di aggiustarne la larghezza e regolarne il ritardo. Ciò è importante in quanto è necessario far entrare il segnale nell'intervallo temporale determinato dal "Trigger" dell'acquisizione dati (DAQ). Il Trigger, infatti, abilita il DAQ ad acquisire i segnali entro un "gate" di $6\mu s$ dal suo arrivo; in questo caso

esso era prodotto come OR logico del segnale del Si e dei due monitors (vedi di seguito).

Il secondo segnale del preamplificatore è un segnale di tempo, negativo e veloce. Dopo essere stato amplificato in un Fast Amplifier (FA) è inviato ad un Constant Fraction Discriminator (CFD) che produce un segnale logico negativo con una temporizzazione indipendente dall'ampiezza e dal tempo di salita del segnale in ingresso. Il segnale va poi al Time to Amplitude Converter (TAC) in corrispondenza dello START. Il TAC genera un segnale che aumenta in modo regolare nel tempo finché non giunge un segnale di STOP. Il segnale ottenuto di ampiezza proporzionale alla differenza temporale tra START e STOP viene mandato al LGS e quindi al DAQ. Questo segnale fornisce il tempo di volo (ToF) della particella.

Il segnale del CFD fornisce inoltre un segnale logico che va a far parte del Trigger. Si noti che la frequenza di conteggio dell'esperimento realizzato era al massimo di qualche centinaio di Hz per cui la probabilità che due segnali di eventi distinti si sovrapponevano nello stesso gate era molto piccola.

Il rivelatore MCP fornisce un segnale veloce simile a quello del Silicio. Dopo essere stato trasformato in segnale logico dal CFD esso passa per un modulo di ritardo (Delay) che fa in modo che questo segnale giunga al TAC dopo quello del rivelatore Si e che quindi funga da STOP. Il motivo per cui si preferisce usare l'MCP come STOP, benché si trovi fisicamente a monte del Silicio, è dovuto al fatto che la frequenza di conteggio del Si è inferiore a quella dell'MCP. Utilizzando quindi il Silicio come START si evita di intasare l'elettronica facendo partire il TAC con segnali non seguiti da uno STOP.

Da ciascuno dei due monitors partono due segnali, analoghi a quelli del Silicio descritto sopra, uno lineare corrispondente all'energia e uno veloce corrispondente al tempo. Il segnale lineare va all'acquisizione passando per lo SA e un LGS. Il segnale veloce va al FA e al CFD, quindi a contribuire alla formazione del Trigger.

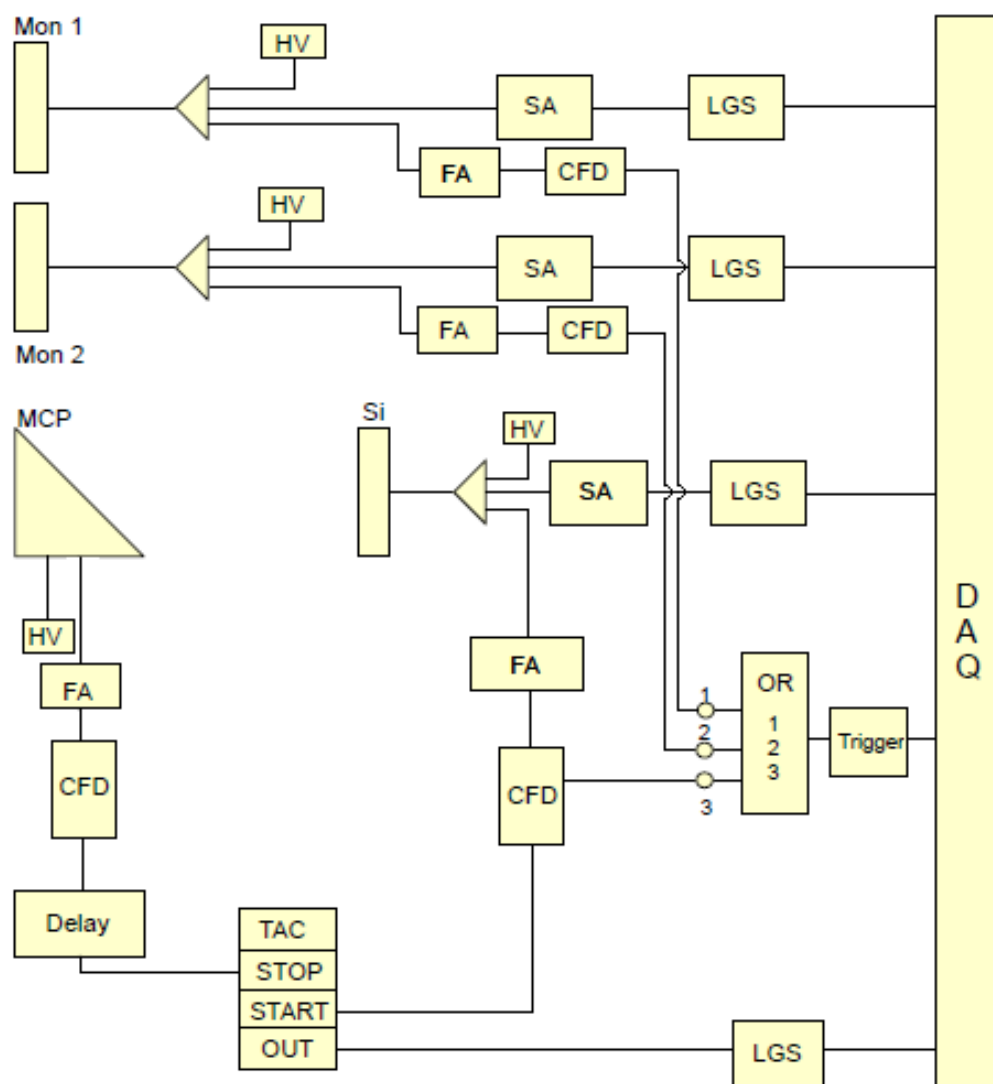


FIGURA 2.3: Schema dell'elettronica del telescopio di rivelatori usato con l'apparato EXOTIC.

Capitolo 3

Misure effettuate e risultati ottenuti

3.1 Scelta dei sistemi e analisi dati

L'esperimento svolto con EXOTIC ha riguardato due sistemi: $^{32}\text{S}+^{48}\text{Ca}$ e $^{32}\text{S}+^{64}\text{Ni}$. La scelta di questi due sistemi è dettata dal fatto che erano già stati studiati in anni recenti con l'apparato PISOLO [12, 13] e sono quindi presenti dati con cui confrontare i nuovi risultati.

Il primo bersaglio utilizzato è stato $^{48}\text{CaF}_2$ con uno spessore di $50 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ su un supporto di carbonio di spessore $15 \mu\text{g}/\text{cm}^2$. Lo spessore effettivo del Calcio, arricchito al 96,56% in massa 48, è stato calcolato tramite la formula

$$S_{eff} = \frac{50 \mu\text{g}/\text{cm}^2}{2M_F + M_{Ca}} \times M_{Ca} = 27.9 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \quad (3.1)$$

Il secondo bersaglio di ^{64}Ni metallico aveva uno spessore di $50 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ su un supporto di carbonio di spessore $20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$. Il suo arricchimento isotopico era di 96,57%. Il fascio utilizzato era ^{32}S con stato di carica 8^+ , accelerato dal Tandem ad energie che vanno da 77 a 84 MeV.

Per l'analisi dati è stato utilizzato il programma Cracow [14], che permette di selezionare e visualizzare i diversi spettri relativi ai parametri misurati e costruire matrici bidimensionali con combinazioni opportune di tali parametri (vedi Fig. 3.1). Inoltre sia negli spettri singoli che nelle matrici è possibile ricavare il numero di eventi che soddisfano a condizioni opportunamente impostate. Nel caso di una matrice, il programma permette di creare un poligono che racchiuda l'area che si intende integrare. Per esempio nella matrice costruita con i parametri energia in ascissa (E) e tempo di volo in ordinata (ToF) il poligono chiamato ER_Exotic contiene gli eventi identificati

come eventi di fusione - evaporazione. Infatti la distinzione tra questi eventi e il fondo dovuto al fascio si realizza sfruttando la combinazione $E - ToF$ in base alla diversa massa M dei due tipi di ioni. Poichè

$$E = \frac{1}{2} M \frac{\ell^2}{ToF^2} \quad (3.2)$$

dove ℓ è la base di volo, segue che

$$M = \frac{2E \times ToF^2}{\ell^2} \quad (3.3)$$

Osservando la matrice è anche possibile distinguere gli eventi di fondo,

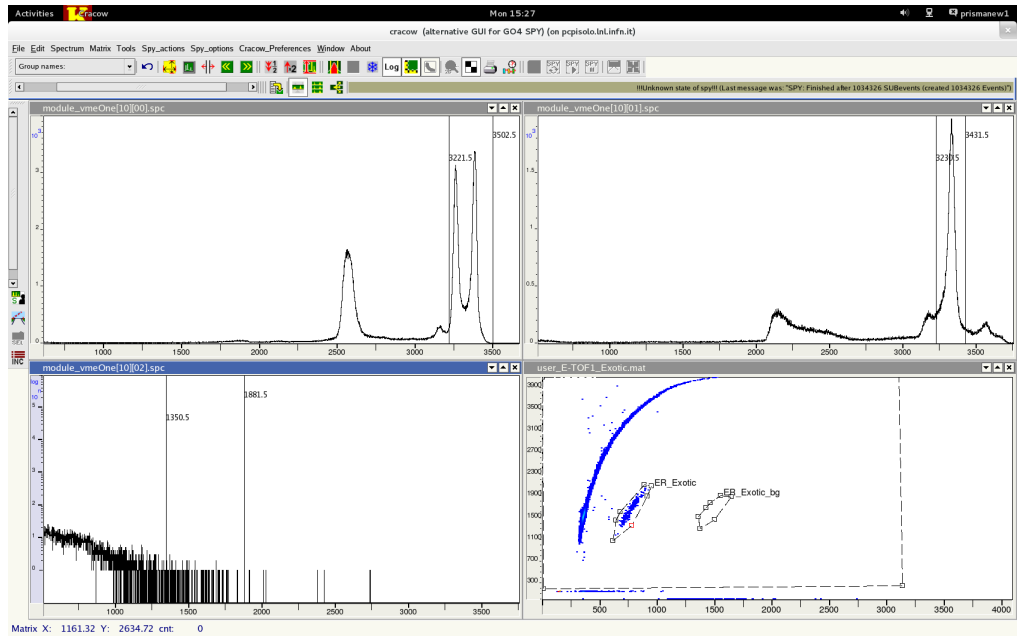


FIGURA 3.1: Schermata ottenuta dal programma Cracow. In basso a destra si trova un esempio di matrice $E - ToF$. I due spettri in alto sono gli spettri di energia dei due monitor. Lo spettro di sinistra mostra uno sdoppiamento del picco elastico dovuto al danneggiamento da radiazioni del rivelatore corrispondente. In basso a sinistra si vede lo spettro di energia del rivelatore al silicio del telescopio $E - ToF$.

ossia dovuti a particelle simili al fascio, con $M \approx 32$, che si dispongono in un lungo arco sulla sinistra della matrice. Questo si nota più specificamente in Fig. 3.2. E' quindi evidente che per poter misurare sezioni d'urto molto piccole è fondamentale avere un livello di fondo più basso possibile.

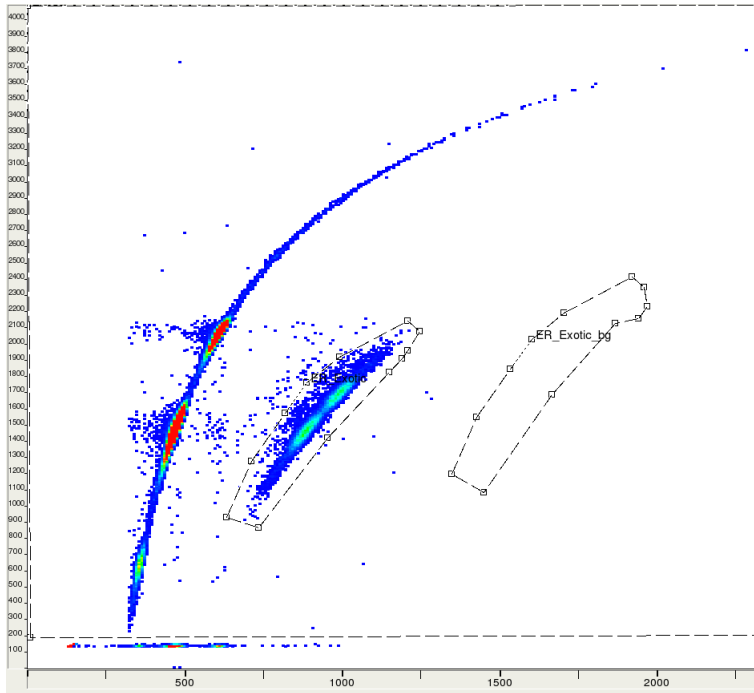


FIGURA 3.2: Esempio di matrice $E - ToF$ per la reazione $^{32}\text{S} + ^{48}\text{Ca}$ ad $E_{lab} = 84\text{MeV}$. Gli eventi di fondo si dispongono in un ampio arco (sinistra) mentre gli eventi relativi ai residui di evaporazione ER sono individuabili nel gruppo compatto sotto di esso. Sia per gli ER che per gli eventi tipo fascio si possono distinguere diverse strutture corrispondenti a stati di carica ionica contigui selezionati da EXOTIC.

3.1.1 Esempi di spettri e matrici nelle varie condizioni

Al fine di ottimizzare le prestazioni dell'apparato sono stati presi in esame gli elementi di EXOTIC, in particolare i quadrupoli, i collimatori e il filtro di Wien.

Sono state effettuate diverse misure per il sistema $^{32}\text{S} + ^{48}\text{Ca}$ all'energia di 84 MeV, cambiando un solo parametro alla volta al fine di determinare il valore ottimale di campo elettrico o magnetico per l'elemento corrispondente. Per gli altri sistemi e/o energie i valori ottimali ottenuti sono stati scalati in base alla rigidità elettrica/magnetica nei vari casi. Quest'operazione è di fondamentale importanza per migliorare il fattore di reiezione e l'efficienza dell'apparato. L'ottimizzazione del filtro di Wien, ad esempio, permette di aumentare non poco il fattore di reiezione, molto importante per le misure a bassa energia in cui i pochi eventi di fusione rischiano di confondersi con gli

eventi di fondo. L'effetto sulle matrici è visibile in Fig. 3.3.

La prima matrice corrisponde ad una misura con il filtro di Wien spento. E' possibile vedere come gli eventi di fondo siano più diffusi e numerosi rispetto alle altre. Risulta problematico distinguere gli eventi di evaporazione. Nella seconda matrice, con il filtro di Wien ad una tensione di 4 kV il numero di eventi di fondo è ridotto notevolmente, tuttavia sono ancora presenti eventi estranei tra l'arco degli eventi di fondo e il gruppo della fusione-evaporazione, situazione questa che rende incerto l'esatto conteggio di questi ultimi.

Con una tensione di 8 kV la matrice risulta pulita e gli eventi di fusione nettamente distinguibili. Con una tensione di 12 e 16 kV, sebbene gli eventi di fondo siano stati ridotti ulteriormente, si perdono eventi di fusione, cioè l'efficienza di Exotic tende a ridursi. Si è dunque scelto di usare il filtro con una tensione elettrostatica di 8 kV.

Per meglio comprendere l'importanza della pulizia dal fondo, in Fig. 3.4 è possibile osservare come gli eventi siano più difficili da rivelare al diminuire dell'energia. Osserviamo le quattro matrici del sistema $^{32}\text{S}+^{64}\text{Ni}$ alle energie di 84, 81, 78 e 77 MeV. Mentre alle due energie più elevate gli eventi di fusione sono ancora facilmente distinguibili dal fondo, questo non è più vero ad energie inferiori. Per individuarli si posizionano i gate poligonali nelle medesime coordinate E-ToF che avevano nelle matrici relative alle energie più alte. Naturalmente i tempi di misura aumentano considerevolmente a basse energie.

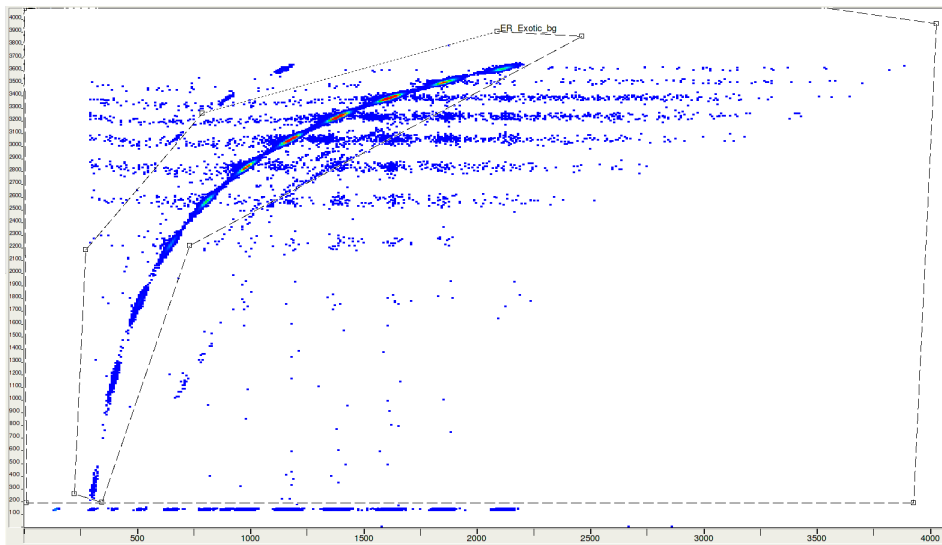
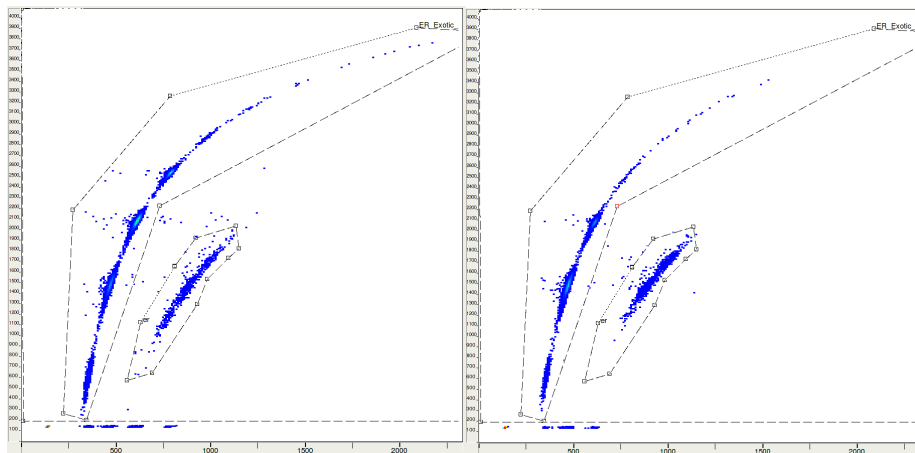
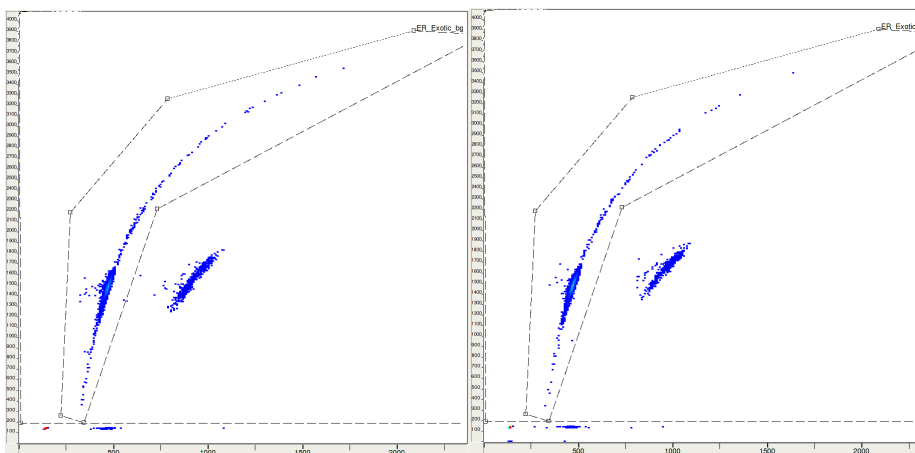
(A) *Filtro di Wien spento.*(B) $V = 4 \text{ kV}$.(C) $V = 8 \text{ kV}$.(D) $V = 12 \text{ kV}$.(E) $V = 16 \text{ kV}$.

FIGURA 3.3: Alcuni esempi di matrici con diversi valori del campo elettrico del filtro di Wien. E' possibile vedere come gli eventi di fondo siano ridotti notevolmente con l'aumentare del campo elettrico.

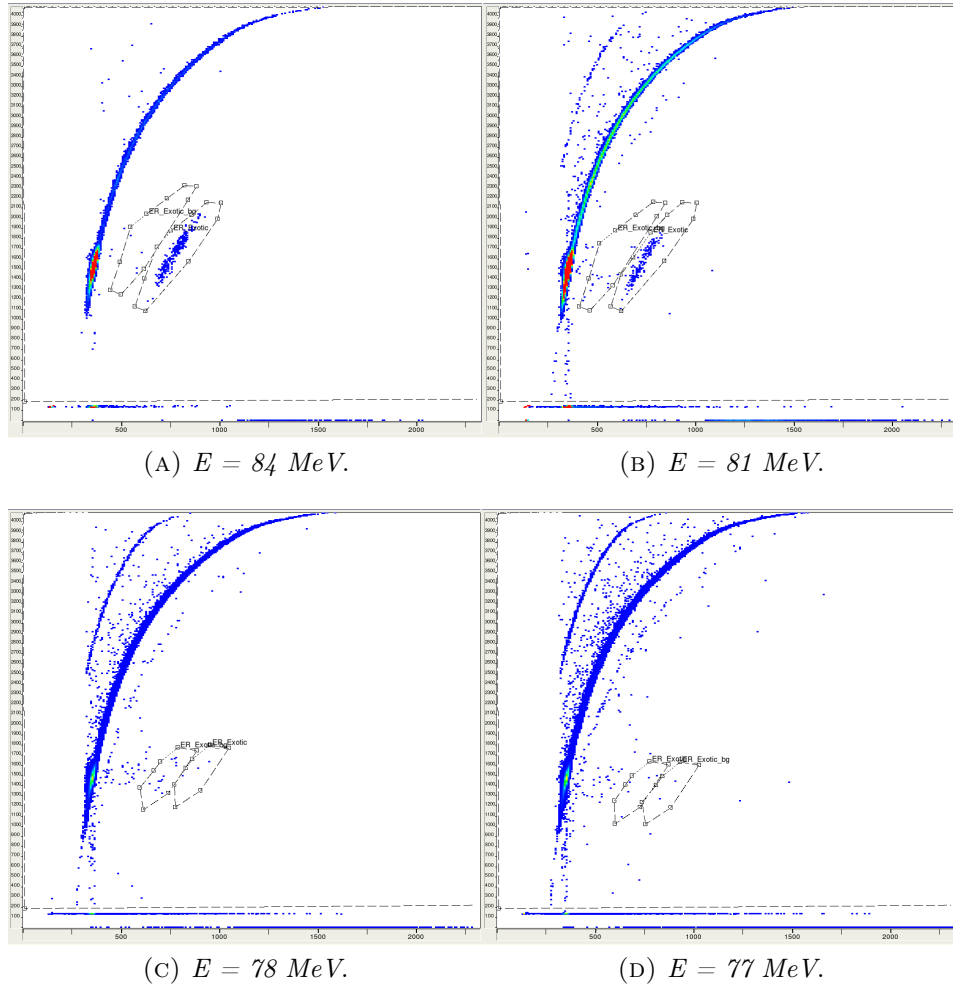


FIGURA 3.4: Alcuni esempi di matrici con diversi valori dell'energia del fascio. *E'* possibile notare come gli eventi di fusione siano sempre più difficilmente distinguibili dal fondo man mano che l'energia decresce.

3.1.2 Il sistema $^{32}\text{S}+^{48}\text{Ca}$

Per il sistema $^{32}\text{S}+^{48}\text{Ca}$ sono state misurate le energie di 84 MeV, 81 MeV, 78 MeV e 77 MeV. I risultati sono riportati in tabella 3.1, ove le sezioni d'urto riportate sono quelle misurate nel 2011.

E_b (MeV)	ER	N_{fondo}	I (nA)	t (s)	N_{beam}	σ (mb)
84	13537	256278	34.0	1622	4.30×10^{13}	344.5 ± 6.5
84	7362	157522	40.0	1625	5.07×10^{13}	344.5 ± 6.5
81	6073	139039	58.5	904	4.12×10^{13}	224.2 ± 3.2
78	3784	106594	45.0	904	3.17×10^{13}	166.1 ± 3.1
77	2589	46437	117.4	305	2.79×10^{13}	134.8 ± 1.9

TABELLA 3.1: Risultati ottenuti dall'analisi della matrice E -ToF eseguita con Cracow per il sistema $^{32}\text{S}+^{48}\text{Ca}$. ER sono gli eventi di fusione-evaporazione rivelati, N_{fondo} è l'integrale degli eventi dovuti al fascio in tutta la matrice, I è l'intensità del fascio, t è il tempo di misura, N_{beam} è il numero totale di ioni del fascio giunti sul bersaglio nel tempo t e σ la sezione d'urto misurata nell'esperimento precedente con il suo errore. Le due misure a 84 MeV sono state effettuate con la tensione del filtro di Wien a 8 kV e 16 kV, rispettivamente.

L'intensità del fascio è stata ricavata dai valori della corrente riportati nel libro di misura dell'esperimento tenendo conto della parte di fascio che viene intercettato dal collimatore $S0$ posto prima del bersaglio. Il valore riportato in tabella corrisponde all'intensità del fascio che arriva effettivamente sul bersaglio. L'incertezza sull'intensità del fascio si può valutare dell'ordine di $\pm 20\%$, in questo e negli altri casi discussi in questa tesi. Conoscendo l'intensità del fascio e lo stato di carica degli ioni è possibile calcolarne l'intensità in pA (particle nano Ampere), secondo la formula

$$I_p = \frac{I_e}{q} \quad (3.4)$$

dove I_e è la corrente del fascio misurata in nA riportata in tabella e q è lo stato di carica degli ioni che, in questo caso, è pari a 8^+ . Da questo risultato e conoscendo il tempo di misura t si può facilmente ottenere il numero di particelle che incidono sul bersaglio durante tutto il run di misura

$$N_{beam} = \frac{I_p}{e} \times t \quad (3.5)$$

dove e è la carica elementare.

E_b (MeV)	σ (mb)	RF	N_{fus}	ER	A
84	344.5 ± 6.5	1.68×10^8	5.19×10^6	1.35×10^4	2.61×10^{-3}
84	344.5 ± 6.5	3.22×10^8	6.11×10^6	7.36×10^3	1.20×10^{-3}
81	224.2 ± 3.2	2.97×10^8	3.24×10^6	6.07×10^3	1.88×10^{-3}
78	166.1 ± 3.1	2.98×10^8	1.85×10^6	3.78×10^3	2.05×10^{-3}
77	134.8 ± 1.9	6.02×10^8	1.32×10^6	2.59×10^3	1.96×10^{-3}

TABELLA 3.2: Valori dei parametri per il sistema $^{32}\text{S}+^{48}\text{Ca}$ alle diverse energie.

Dai valori in tabella è stato possibile ricavare il fattore di reiezione e l'efficienza di EXOTIC. Il fattore di reiezione si ottiene dal rapporto

$$RF = \frac{N_{beam}}{N_{fondo}} \quad (3.6)$$

dove N_{beam} sono le particelle del fascio e N_{fondo} sono le particelle di fondo rilevate.

Il secondo fattore è l'efficienza dell'apparato ed è dato dal rapporto

$$A = \frac{ER}{N_{fus}} \quad (3.7)$$

dove ER è il numero di eventi di fusione rivelati e N_{fus} è il numero totale di eventi di fusione attesi secondo la formula (1.3). I parametri così calcolati sono riportati in tabella 3.2. L'errore totale sui parametri A ed RF così ricavati, è determinato per la maggior parte dall'incertezza sull'intensità del fascio ($\pm 20\%$), mentre l'errore statistico deriva prevalentemente da quello sui conteggi di N_{fondo} e ER .

In particolare, si osservi il valore del parametro RF per l'energia di 84 MeV. La prima misura è stata presa con il filtro di Wien ad una tensione di 8 kV mentre la seconda è stata presa con una tensione di 16 kV. Il fattore di reiezione risulta quasi raddoppiato mentre l'efficienza risulta più che dimezzata.

3.1.3 Il sistema $^{32}\text{S}+^{64}\text{Ni}$

Con un procedimento analogo a quello utilizzato per $^{32}\text{S}+^{48}\text{Ca}$, sono state misurate le energie 84, 81, 78 e 77 MeV per il sistema $^{32}\text{S}+^{64}\text{Ni}$.

I risultati ottenuti e le intensità del fascio sono riassunti nella tabella 3.3 mentre i parametri ricavati per questo sistema sono mostrati nella seguente tabella 3.4.

E_b (MeV)	ER	Fondo	I_e (enA)	t (s)	N_{beam}	σ (mb)
84	337	58112	40.0	4741	1.48×10^{14}	11.6 ± 0.8
81	174	313197	71.5	21042	1.17×10^{15}	0.65 ± 0.06
78	13	497818	60.4	29160	1.37×10^{15}	0.013 ± 0.006
77	5	566662	153.4	31429	3.76×10^{15}	0.0026 ± 0.0005
77	3	644507	153.4	26404	3.16×10^{15}	0.0026 ± 0.0005

TABELLA 3.3: Risultati ottenuti dall'analisi della matrice E-ToF eseguita con Cracow per il sistema $^{32}\text{S}+^{64}\text{Ni}$. Le due misure a 77 MeV corrispondono a due run successivi, senza cambiamenti nel set-up sperimentale.

E_b (MeV)	σ (mb)	RF	N_{fus}	ER	A
84	11.6 ± 0.8	2.55×10^9	8.09×10^5	337	4.17×10^{-4}
81	0.65 ± 0.06	3.75×10^9	3.56×10^5	174	4.88×10^{-4}
78	0.013 ± 0.006	2.76×10^9	8.34×10^3	13	1.56×10^{-3}
77	0.0026 ± 0.0005	6.64×10^9	4.60×10^3	5	1.09×10^{-3}
77	0.0026 ± 0.0005	4.90×10^9	3.86×10^3	3	7.76×10^{-4}

TABELLA 3.4: Valori dei parametri alle diverse energie per il sistema $^{32}\text{S}+^{64}\text{Ni}$.

3.2 Dati ottenuti con l'apparato PISOLO

Per il confronto con l'apparato PISOLO sono state prese in considerazione misure precedenti per gli stessi sistemi alle stesse energie ove è stato possibile. Pertanto sono riportati nella tabella 3.5 i dati corrispondenti alle due energie 84 MeV e 78 MeV per il bersaglio di calcio e 81 MeV e 78 MeV per il bersaglio di nichel. I parametri ottenuti sono mostrati invece nella tabella 3.6. Non esistono misure effettuate con l'apparato PISOLO per $^{32}\text{S}+^{64}\text{Ni}$ a 84 MeV e al di sotto di 78 MeV. Le sezioni d'urto quotate nelle tabelle 3.3 e 3.4 per 84 e 77 MeV sono i risultati di inter/estrapolazioni della funzione di eccitazione.

Per i dati relativi al calcio si è proceduto con la ri-analisi delle matrici attraverso il programma CRACOW. Invece per i dati relativi al nichel si sono ottenute le informazioni necessarie dal libro di misura dell'esperimento svoltosi nel dicembre del 2006. Tuttavia il libro di misura non riporta il numero degli eventi di fondo, motivo per cui non è stato possibile valutare il fattore di reiezione del fascio in questi due casi.

Il numero di particelle è stato calcolato in modo analogo a quello usato

<i>Target</i>	<i>E(MeV)</i>	<i>ER</i>	<i>Fondo</i>	<i>I_e(enA)</i>	<i>t(s)</i>	<i>N_{beam}</i>
⁴⁸ Ca	84	2724	8146	14.0	1680	2.10×10^{13}
⁴⁸ Ca	78	2696	12843	50.0	1560	6.95×10^{13}
⁶⁴ Ni	81	212		85.0	24900	1.89×10^{15}
⁶⁴ Ni	78	59		86.4	45900	5.67×10^{15}

TABELLA 3.5: *Risultati ottenuti con l'apparato PISOLO.*

<i>Target</i>	<i>E(MeV)</i>	<i>RF</i>	<i>N_{fus}</i>	<i>ER</i>	<i>A</i>
⁴⁸ Ca	84	2.75×10^9	2.53×10^6	2724	1.08×10^{-3}
⁴⁸ Ca	78	5.64×10^9	4.04×10^6	2696	6.67×10^{-4}
⁶⁴ Ni	81		5.73×10^5	212	3.70×10^{-4}
⁶⁴ Ni	78		3.44×10^4	59	1.72×10^{-3}

TABELLA 3.6: *Parametri ricavati per i due sistemi con PISOLO.*

per l'apparato EXOTIC, tenendo conto però che lo stato di carica del fascio per l'esperimento era 7^+ .

Capitolo 4

Confronto con PISOLO e conclusioni

Il confronto tra i due apparati si basa sui parametri fattore di reiezione ed efficienza.

4.1 Fattore di reiezione

Il confronto è stato eseguito solamente per il sistema $^{32}\text{S}+^{48}\text{Ca}$ in quanto non erano presenti i dati di PISOLO relativi al sistema $^{32}\text{S}+^{64}\text{Ni}$. Per quanto riguarda il fattore di reiezione, l'apparato PISOLO dà risultati migliori nei casi in cui il confronto è stato possibile. Tuttavia si deve tener conto che le misure con PISOLO sono state effettuate a $\theta_{lab}= 2^\circ$ mentre EXOTIC è fisso a $\theta_{lab}= 0^\circ$ e quindi in condizioni a priori più difficili.

<i>Target</i>	<i>E_{beam} (MeV)</i>	<i>RF_{EXOTIC}</i>	<i>RF_{PISOLO}</i>	<i>RF_E/RF_P</i>
^{48}Ca	84	1.68×10^8	2.75×10^9	0.06 ± 0.02
^{48}Ca	78	2.98×10^8	5.64×10^9	0.05 ± 0.01

TABELLA 4.1: Risultati del confronto del fattore di reiezione *RF*.

4.2 Efficienza

Per quanto riguarda l'efficienza, l'apparato EXOTIC è risultato migliore rispetto a PISOLO di un fattore $\simeq 2-3$ per $^{32}\text{S}+^{48}\text{Ca}$, mentre è molto simile per la reazione $^{32}\text{S}+^{64}\text{Ni}$. L'efficienza di EXOTIC potrebbe essere ulteriormen-

<i>Target</i>	$E_{beam} (MeV)$	A_{EXOTIC}	A_{PISOLO}	A_E/A_P
^{48}Ca	84	2.61×10^{-3}	1.08×10^{-3}	2.4 ± 0.7
^{48}Ca	78	2.05×10^{-3}	6.67×10^{-4}	3.1 ± 0.9
^{64}Ni	81	4.88×10^{-4}	3.70×10^{-4}	1.3 ± 0.4
^{64}Ni	78	1.56×10^{-3}	1.72×10^{-3}	0.9 ± 0.3

TABELLA 4.2: Risultati del confronto dell'efficienza A dei due apparati.

te aumentata lavorando con una tensione del filtro di Wien più bassa, ma questo andrebbe probabilmente a scapito del fattore di reiezione e quindi della pulizia delle matrici. In alternativa si può pensare di utilizzare un telescopio di rivelatori di dimensioni maggiori.

4.3 Conclusioni

Lo scopo di questa tesi è stato di confrontare l'apparato EXOTIC, usato per la prima volta per misure di fusione con fasci stabili, e l'apparato PISOLO, già utilizzato in numerosi esperimenti. I due apparati sono stati descritti in dettaglio e sono stati considerati quei parametri (fattore di reiezione del fascio RF ed efficienza A) che risultano fondamentali in questo tipo di misure.

Per il confronto sono stati considerati i due sistemi $^{32}S+^{48}Ca$ e $^{32}S+^{64}Ni$, usando i fasci di ^{32}S dell'acceleratore TANDEM XTU e rivelando con EXOTIC i residui di fusione - evaporazione ad alcune energie per le quali i risultati di misure precedenti, effettuate con PISOLO, erano già disponibili in letteratura. Per quanto riguarda EXOTIC è stato verificato in dettaglio l'effetto del filtro di Wien sulle matrici $E - ToF$ variando i campi del filtro stesso.

Sono stati quindi ottenuti RF e A analizzando i dati raccolti ed è stato realizzato il confronto tra i due apparati. Quello che risulta è un fattore di reiezione migliore per PISOLO pur tenendo conto che questo apparato lavorava a $\theta_{lab} = 2^\circ$. Invece l'efficienza di EXOTIC è risultata migliore di PISOLO di un fattore $\simeq 2-3$ per $^{32}S+^{48}Ca$, mentre è molto simile per la reazione $^{32}S+^{64}Ni$.

Vi sono comunque margini di miglioramento per ottenere prestazioni migliori da EXOTIC. Vista la forte influenza del filtro di Wien sul fattore di reiezione, una possibile strada sarebbe aumentare il campo elettrico al suo interno. La perdita in efficienza dovuta all'aumento dell'effetto del filtro potrebbe essere compensata aumentando l'area dei rivelatori per permettere la rivelazione di un numero maggiore di residui di evaporazione, sfruttando il grande angolo solido geometrico che l'apparato EXOTIC possiede.

Bibliografia

- [1] B. B. Back, H Esbensen, C. L. Jiang, K, E, Rehm, Reviews of Modern Physics **86**, 317 (2014)
- [2] M. Dasgupta, D.J.Hinde, N. Rowley and A. M. Stefanini, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. **48**, 401 (1998)
- [3] M. Beckerman, M. Salomaa, a. Sperduto, H. Enge, J. Ball, a. Dirienzo, S. Gazes, Yan Chen, J. D. Molitoris, and Mao Nai-Feng, Phys. Rev. Lett. **45**, 1472 (1980)
- [4] C.L. Jiang et al. Phys. Rev. Lett. **89**, 052701 (2002)
- [5] F. Farinon et al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B**266**, 4097 (2008)
- [6] S. Beghini, C. Signorini, S. Lunardi, M. Morando, G. Fortuna, A.M. Stefanini, W. Meczynski, and R. Pengo, Nucl. Instruments Methods Phys. Res., A **239**, 585 (1985)
- [7] C.L. Jiang et al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res., A **554**, 500 (2005)
- [8] J.X. Wei, J.R. Leigh, D.C. Weisser, J.O. Newton, S. Elfstrom, J.P. Lestone, J.X. Chen, D.G. Popescu, D.J. Hinde, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res., A **306**, 557 (1991)
- [9] S. Hofmann, G. Münzenberg, Rev. Mod. Phys. **72**, 733 (2000)
- [10] C.M. Folden III, M.C. Alfonso, D.A. Mayorov, K.R. Lawrence, A.A. Alharabi, E. Berdugo, P-J. Cammarata, A.C. Raphelt, B.T. Roeder, T.A. Werke, Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. A **678**, 1 (2012)
- [11] R.A. Ricci, C. Signorini, Nucl. Instr. and Meth. **184**, 35 (1981)
- [12] G. Montagnoli et al. Phys. Rev. C **87**, 014611 (2013)
- [13] A.M. Stefanini et al. Nucl. Phys. A **456**, 509 (1986)
- [14] J. Grebosz, Comput. Phys. Comm. **176**, 251 (2007)