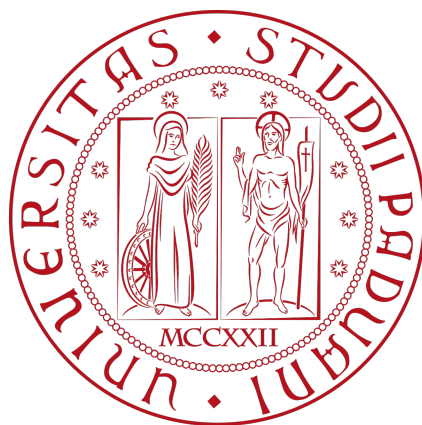




UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Fisica

Tesi di Laurea

Studio della trasmissione della facility per fasci
radioattivi EXOTIC per esperimenti con lo
spettrometro gamma AGATA

Relatore

Prof. Marco Mazzocco

Laureando

Elia Pilotto

Anno accademico 2019/2020

Indice

Abstract	v
1 Introduzione	1
2 Descrizione della facility EXOTIC	3
2.1 Bersaglio gassoso per la produzione del fascio secondario	4
2.2 Elementi ottici della linea di fascio EXOTIC	4
2.3 Fasci radioattivi prodotti da EXOTIC	5
3 Simulazioni	7
3.1 Interazione del fascio primario con il bersaglio gassoso tramite la simulazione Monte Carlo RIB EXOTIC	7
3.2 Interazione del fascio secondario con il bersaglio tramite SRIM	8
3.3 Calcolo delle matrici di trasferimento dei componenti ottici tramite GICOSY . .	8
3.4 Calcolo della trasmissione tramite MOCADI	9
4 Discussione dei risultati	13
5 Conclusioni	19

Abstract

Nel campo della ricerca in fisica nucleare e subnucleare l'utilizzo di acceleratori di particelle ionizzate è una realtà che è divenuta rilevante già nella prima metà dello scorso secolo. Allo scopo di esplorare nuove possibili condizioni sperimentali negli ultimi decenni è cresciuto l'interesse verso l'impiego di isotopi instabili per la produzione di fasci ionizzati. La facility EXOTIC [7], installata nel 2004 ai Laboratori Nazionali di Legnaro (LNL) dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), sfrutta la collisione di ioni pesanti stabili contro un bersaglio gassoso formato da elementi leggeri per la produzione in-flight di fasci di ioni radioattivi (Radioactive Ion Beams, RIBs).

Gli isotopi radioattivi vengono separati dal fascio primario tramite l'impiego di un magnete dipolare e di un selettore di velocità o filtro di Wien. Il fascio viene inoltre focalizzato tramite l'utilizzo di due tripletti di quadrupoli collocati lungo la linea in modo da convergere sul bersaglio posizionato al termine della linea di fascio, dove vengono posizionati i rivelatori per la sperimentazione. La lunghezza totale della facility è attualmente di 8.342 m, tuttavia nel prossimo futuro dovrà essere aumentata a 11.022 m a seguito dell'installazione di AGATA (Advanced Gamma Tracking Array) [9], un rivelatore a tracciamento gamma all'avanguardia, prodotto di una collaborazione europea di 13 nazioni e 45 istituti di ricerca. Come conseguenza per ciascuno degli isotopi prodotti sino ad ora le intensità dei campi magnetici degli elementi ottici precedentemente menzionati dovranno essere ricalcolate al fine di ottenere una focalizzazione ottimale del fascio sulla nuova posizione del bersaglio e la trasmissione della linea, definita come la frazione di isotopi radioattivi prodotti che raggiunge il bersaglio, dovrà essere rivalutata.

Lo scopo di questo lavoro di tesi è dunque quello di sfruttare alcune simulazioni informatiche al fine di ricavare delle stime preliminari di trasmissione della linea nella sua nuova configurazione, dovuta alla presenza del rivelatore AGATA, e confrontarle con quelle della configurazione attuale della facility EXOTIC.

Il *Capitolo 1* è dedicato ad una premessa teorica con la presentazione del formalismo matematico per la descrizione dei principali elementi ottici e di alcune nozioni di base.

Il *Capitolo 2* è dedicato alla descrizione della facility EXOTIC, del suo funzionamento e dei fasci prodotti.

Nel *Capitolo 3* è illustrato il lavoro di simulazione svolto. Il capitolo è a sua volta suddiviso nelle sezioni relative ai singoli programmi:

- La descrizione della cinematica della reazione di produzione del fascio secondario è gestita tramite una simulazione Monte Carlo [8];
- L'interazione del fascio secondario con il bersaglio gassoso è gestita dal software SRIM [1];
- Il calcolo dell'ottica degli elementi magnetici della linea avviene tramite il software GICOSY [2];
- Il calcolo finale della trasmissione avviene attraverso il software MOCADI [4].

Il *Capitolo 4* è dedicato alla discussione dei risultati delle simulazioni, confrontando la nuova configurazione, da qui in avanti denominata "configurazione AGATA", con la precedente configurazione, da qui in avanti denominata "configurazione EXOTIC".

Nel *Capitolo 5* si traggono infine le conclusioni sul lavoro.

Capitolo 1

Introduzione

Prima di addentrarsi nell'argomento sarà presentato brevemente il formalismo matematico utilizzato per la descrizione degli elementi ottici della linea di fascio EXOTIC nonché alcune nozioni di base, il tutto seguendo la trattazione presente in [3].

Si consideri quindi un sistema di assi cartesiani con asse z coincidente con l'asse ottico e assi x e y che rappresentano rispettivamente le direzioni orizzontale e verticale, con l'origine del sistema arbitraria lungo l'asse ottico. Sia dunque la quantità di moto di uno ione del fascio $\vec{p} = (p_x, p_y, p_z)$, si definisce $\tan \alpha := p_z/p_x$ e $\tan \beta := p_z/p_y$, di modo che le incognite (x, y, z, α, β) definiscono completamente la posizione e direzione di moto della particella. In particolare, una volta fissata la traiettoria percorsa dalla particella, è possibile scrivere (x, y, α, β) in funzione di z . L'azione dei vari elementi ottici può quindi essere espressa al primo ordine come un operatore lineare in forma matriciale, che prende il nome di matrice di trasferimento. Seguendo questi principi è possibile modellizzare con successo il comportamento di vari elementi ottici fondamentali.

Una lunghezza di deriva o lunghezza di drift indica semplicemente una zona in cui non sono presenti elementi ottici e le particelle proseguono indisturbate in linea retta. Un quadrupolo magnetico agisce come una lente convergente, focalizzante, lungo una delle direzioni x o y e come una lente divergente, defocalizzante, lungo l'altra. Modulando quindi le intensità dei campi magnetici di tre quadrupoli magnetici consecutivi, di cui il secondo ruotato di 90° , è possibile ottenere un complessivo effetto di focalizzazione del fascio su un qualsiasi punto dell'asse ottico e il piano ortogonale all'asse z su cui giace tale punto è definito piano focale. Si osserva tuttavia che la condizione di focalizzazione è una condizione di minimo su x e y a valore di z fissato e dunque fornisce due vincoli sulle intensità dei campi magnetici dei tre diversi quadrupoli. Per risolvere l'indeterminazione residua, l'approccio utilizzato ad EXOTIC è quello di uguagliare le intensità dei campi del primo e del terzo quadrupolo di ciascun tripletto. Infine, l'effetto di un dipolo magnetico è di curvare la traiettoria delle particelle secondo un arco di circonferenza. Per tutti gli elementi ottici magnetici, tuttavia, l'interazione fra le particelle ed il campo magnetico dipende dalla rigidità magnetica $B\rho$ secondo la nota relazione

$$B\rho = \frac{p}{q} \quad (1.1)$$

dove B indica l'intensità del campo magnetico del dipolo, ρ il raggio di curvatura della traiettoria percorsa dalla particella, p il modulo della quantità di moto e q la carica. Di conseguenza per fasci di particelle identiche ma con energie (e quindi velocità) diverse, la matrice di trasferimento di un elemento magnetico scala con la rigidità magnetica. Pertanto, al fine di mantenere la stessa traiettoria, l'intensità del campo magnetico dovrà essere variata. Per tale motivo, questa semplice trattazione non può includere elementi ottici che vadano a cambiare il modulo della

quantità di moto delle particelle, come sorgenti di campo elettrostatico o spessori di materia, ma funziona al meglio nel vuoto in presenza di soli campi magnetici. Va inoltre precisato che è possibile estendere le considerazioni presentate a ordini superiori al primo, includendo possibili aberrazioni e ottenendo risultati più accurati e affidabili.

Capitolo 2

Descrizione della facility EXOTIC

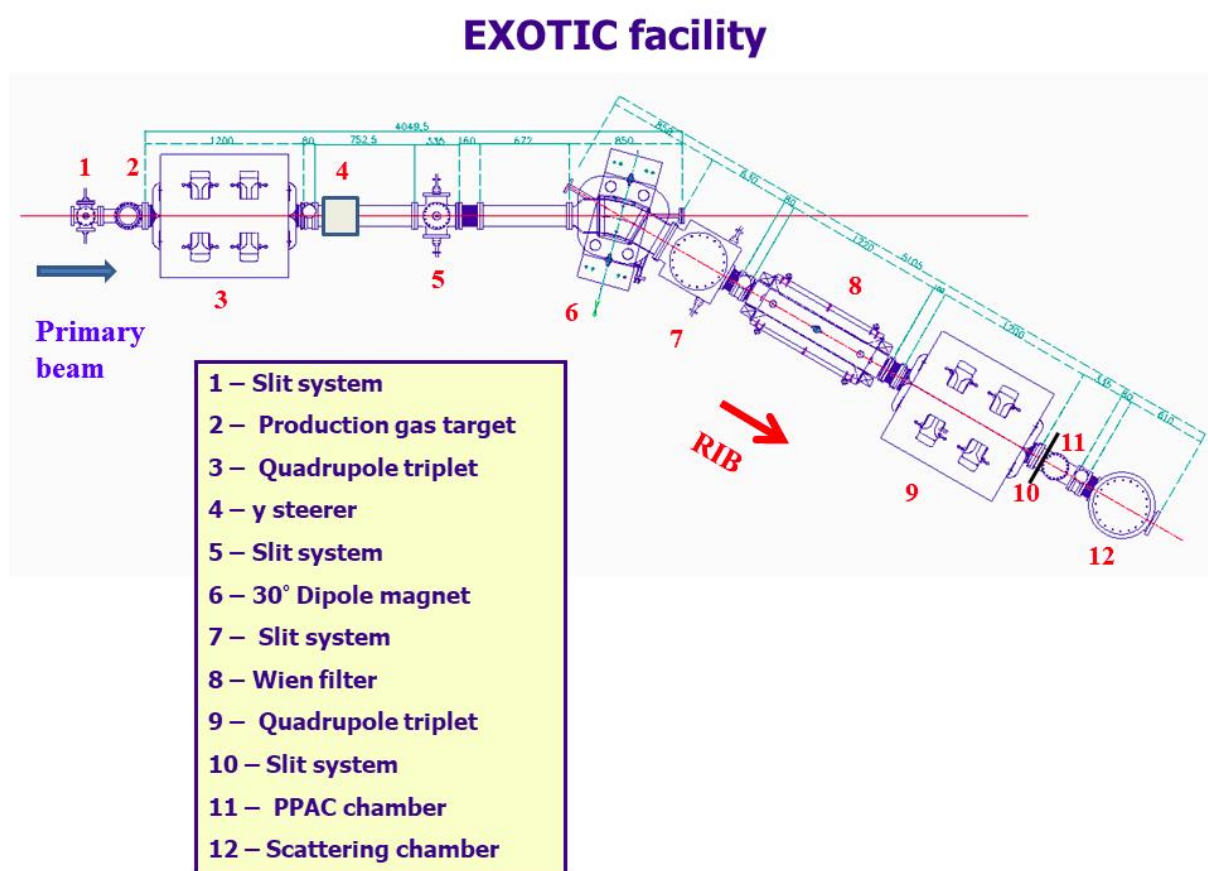


Figura 2.1: Schema della facility EXOTIC. 1) sistema di fenditure in ingresso S0; 2) bersaglio gassoso per la produzione del fascio secondario; 3) primo tripletto di quadrupoli per la focalizzazione del fascio; 4) y steerer; 5) sistema di fenditure S1; 6) magnete dipolare con angolo di deviazione di 30°; 7) sistema di fenditure S2 e piano focale intermedio; 8) filtro di Wien; 9) secondo tripletto di quadrupoli per la focalizzazione del fascio; 10) sistema di fenditure S3 e piano focale finale; 11) PPAC chamber; 12) camera di scattering.

A monte della facility EXOTIC si trova il complesso di acceleratori di particelle TANDEM-ALPI-PIAVE dei LNL, in grado di produrre fasci di particelle ad elevata intensità con energie nell'intervallo tra 2 e 12 MeV/u. Esso produce il fascio primario che viene accelerato e quindi focalizzato sul bersaglio di produzione del fascio secondario, posto all'ingresso della linea di fascio EXOTIC, preceduto da un sistema di fenditure mobili di forma rettangolare denominato

S0 (punto 1 di figura 2.1), il quale a sua volta è utilizzato per sopprimere le componenti marginali del fascio primario al fine di ridurre il background del processo di produzione.

2.1 Bersaglio gassoso per la produzione del fascio secondario

Il bersaglio gassoso (punto 2 di figura 2.1), costituito da elementi leggeri quali $^1\text{H}_2$, $^2\text{H}_2$, ^3He , ^4He , è racchiuso in una cella cilindrica della lunghezza di 50 mm e diametro interno di 25 mm, le cui finestre di entrata e di uscita sono formate da fogli di Havar dello spessore di 2.2 μm . La collisione di ioni pesanti ($A \in [7; 18]$) su particelle leggere, che prende il nome di reazione nucleare in cinematica inversa, produce, per effetto della conservazione del momento lineare, un fascio secondario all'interno di uno stretto cono coassiale all'asse ottico. La cella può inoltre essere portata a temperatura criogenica per aumentare, a parità di pressione, la densità del gas, aumentando quindi la probabilità di interazione e dunque l'intensità del fascio secondario.

2.2 Elementi ottici della linea di fascio EXOTIC

Dopo l'interazione con il bersaglio di produzione, il fascio secondario passa all'interno di un primo tripletto di quadrupoli magnetici, denominati Q1, Q2 e Q3, posti a circa 20 cm a valle del bersaglio (punto 3 di figura 2.1). L'utilizzo di tre quadrupoli in successione con assi di focalizzazione alternati permette, come precedentemente illustrato al capitolo 1, di focalizzare il fascio in entrambe le direzioni a distanza idealmente arbitraria dal tripletto stesso. A valle del primo tripletto si trova il y-steerer, elemento di correzione attualmente non in utilizzo e pertanto non presente nelle nostre simulazioni, seguito da un sistema intermedio di fenditure di forma rettangolare denominato S1 (punto 5 di figura 2.1), il cui scopo è quello di eliminare le componenti marginali del fascio secondario, evitando che possano colpire o strisciare lungo le pareti della camera del dipolo magnetico producendo delle traiettorie impossibili da prevedere e, di conseguenza, del fondo indesiderato.

Successivamente (punto 6 di figura 2.1), un magnete dipolare devia il percorso del fascio di 30° secondo un arco di circonferenza con raggio di curvatura $\rho = 0.7$ m, operando una separazione dei componenti del fascio primario e secondario in base alla loro rigidità magnetica $B\rho$, secondo la relazione (1.1). Alle spalle del magnete è presente un terzo sistema di fenditure rettangolari, denominato S2 (punto 7 di figura 2.1), con apertura regolabile, che serve a definire l'accettanza in rigidità magnetica (vale a dire in momento) della linea di fascio. Le particelle, sia del fascio secondario in produzione sia del fascio primario sia di altri possibili fasci contaminanti, la cui rigidità magnetica è al di fuori dell'intervallo individuato dalla fenditura S2, vengono arrestate a questo punto della linea di fascio. Affinché questa operazione avvenga al meglio, i quadrupoli Q1, Q2, Q3 del primo tripletto sono regolati in modo tale da focalizzare il fascio sul piano focale intermedio F1, corrispondente al sistema di fenditure S2.

A valle di S2 è quindi posto un filtro di Wien, che opera una selezione in velocità delle particelle trasmesse sino a questo punto e permette, in congiunzione con il precedente dipolo, di operare un'efficiente purificazione del fascio secondario. Il filtro di Wien, tuttavia, non è presente nelle nostre simulazioni, in quanto i programmi GICOSY e MOCADI non ne permettono la trattazione, ed è stato dunque sostituito con una lunghezza di drift pari ad 1 metro. Proseguendo, quindi, a seguire il filtro di Wien, un secondo tripletto di quadrupoli (punto 9 di figura 2.1), denominati Q4, Q5 e Q6, opera una seconda e ultima focalizzazione del fascio sul piano focale finale F2 dove viene collocato il bersaglio dell'esperimento, attualmente posto a 8.342 m a valle del centro del bersaglio di produzione, all'interno della camera di scattering (punto 12 di figura 2.1). L'apparato sperimentale AGATA verrà installato attorno al punto focale dello spettrometro PRISMA [6], 2.68 m a valle della posizione attuale. Sono state condotte delle simulazioni preliminari per individuare il migliore collocamento del secondo tripletto di quadrupoli, a seguito

della variazione del piano focale finale. Ad ogni modo, a causa degli ingombri delle installazioni e dei servizi di AGATA, è risultato successivamente chiaro che il secondo tripletto di quadrupoli dovrà restare nella posizione attuale e pertanto le nostre simulazioni sono state effettuate ricalcolando i valori dei campi magnetici dei quadrupoli Q4, Q5 e Q6 per permettere la focalizzazione del fascio nel nuovo punto di misura. Fra tripletto e bersaglio sono infine posti un quarto sistema di fenditure, denominato S3 (punto 10 di figura 2.1), seguito da alcuni dispositivi di diagnostica e tracciatura, che possono in parte variare a seconda del fascio e dell'esperimento e non sono stati inclusi nelle simulazioni nella configurazione AGATA, dal momento che dovranno essere disegnati ed installati ex-novo in posizioni ancora da concordare e definire.

2.3 Fasci radioattivi prodotti da EXOTIC

In questa sezione riportiamo in forma di tabella l'elenco dei fasci radioattivi sin ora prodotti dalla facility EXOTIC che vengono presi in considerazione nelle successive simulazioni.

RIB	Reazione	Q_{value} (MeV)	E_{primary} (MeV)	$B\rho$ (Tm)
$^{10}\text{C}^{6+}$	$^{10}\text{B} + \text{p}$	-4.43	70.0	0.485
$^{11}\text{C}^{6+}$	$^{11}\text{B} + \text{p}$	-2.76	70.0	0.587
$^{15}\text{O}^{8+}$	$^{15}\text{N} + \text{p}$	-3.54	98.0	0.587
$^{17}\text{F}^{9+}$	$^{17}\text{O} + \text{p}$	-3.54	112.0	0.587
$^8\text{B}^{5+}$	$^6\text{Li} + ^3\text{He}$	-1.97	56.0	0.551
$^{18}\text{Ne}^{10+}$	$^{16}\text{O} + ^3\text{He}$	-3.19	112.0	0.541
$^8\text{Li}^{3+}$	$^7\text{Li} + \text{d}$	-0.19	27.8	0.635
$^7\text{Be}^{4+}$	$^7\text{Li} + \text{p}$	-1.64	35.0	-
$^7\text{Be}^{4+}$	$^7\text{Li} + \text{p}$	-1.64	40.0	-
$^7\text{Be}^{4+}$	$^7\text{Li} + \text{p}$	-1.64	45.0	-
$^7\text{Be}^{4+}$	$^7\text{Li} + \text{p}$	-1.64	50.0	-

Tabella 2.1: elenco dei fasci radioattivi (RIB) simulati, accompagnati dalla rispettiva reazione di produzione, relativo Q_{value} , energia iniziale del fascio primario (E_{primary}) e, dove possibile, rigidità magnetica ($B\rho$) a cui viene impostato il magnete dipolare.

I valori di rigidità magnetica riportati provengono dall'articolo [10], dove è stata svolta una simulazione analoga a quelle di cui tratta questa tesi. I fasci selezionati sono quelli di maggiore utilizzo e più rappresentativi dei futuri esperimenti che coinvolgeranno l'apparato e permettono di analizzarne il comportamento in diverse condizioni di lavoro. In particolare il fascio di ^7Be è quello più intenso che la facility sia al momento in grado di produrre, per cui si è deciso di valutarne la trasmissione per diversi valori di E_{primary} , andando per ciascuno a ricavare a energia iniziale fissata la rigidità magnetica ottimale di lavoro della linea, allo scopo di ottenere la trasmissione massima.

Capitolo 3

Simulazioni

3.1 Interazione del fascio primario con il bersaglio gassoso tramite la simulazione Monte Carlo RIB EXOTIC

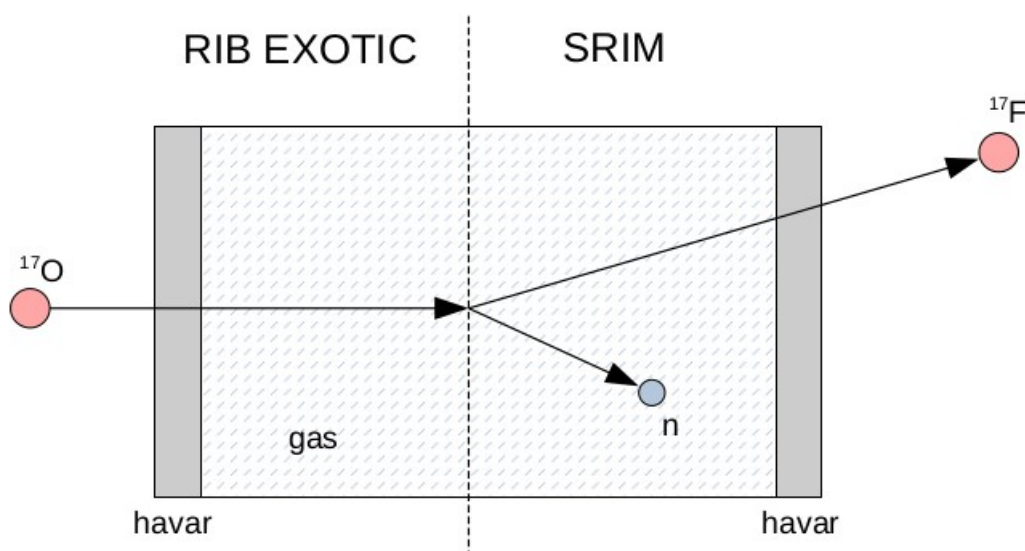


Figura 3.1: Schema dell'interazione del fascio con il bersaglio gassoso. Il software RIB EXOTIC simula la perdita di energia del fascio primario all'interno della finestra d'ingresso di havar e all'interno della regione dove è presente il gas fino al punto dove avviene la reazione nucleare di produzione e calcola la cinematica della reazione a due corpi. Il software SRIM computa la perdita di energia del fascio secondario all'interno della rimanente porzione della regione di gas e della finestra di uscita di havar.

Al fine di simulare l'interazione del fascio primario con il bersaglio gassoso di produzione e la cinematica di reazione si è utilizzato un software denominato RIB EXOTIC, codificato nel linguaggio di programmazione C e sviluppato ai Laboratori di Legnaro. Il programma richiede in input l'energia del fascio primario, il numero di eventi da generare (99999 in tutte le nostre simulazioni) e la temperatura del gas all'interno del bersaglio (criogenica o ambientale). La simulazione, di tipo Monte Carlo, assume che inizialmente sul piano xy l'intensità del fascio

segua una distribuzione gaussiana bidimensionale con deviazione standard pari a 1 mm. Le particelle, prima di interagire con il bersaglio, hanno inoltre tutte la stessa energia, impostata in input, e traiettoria rettilinea parallela all'asse ottico. All'interno della finestra d'ingresso di havar, così come nella regione in cui è presente il gas, si assume che la traiettoria prosegua in maniera rettilinea, come rappresentato in figura 3.1, e che la perdita di energia del fascio primario segua la parametrizzazione dello stopping power fornita da SRIM.

Per ogni particella del fascio primario inoltre viene scelto casualmente, secondo distribuzione uniforme, il valore della coordinata z all'interno del gas alla quale avviene la reazione di produzione del fascio secondario, di modo che nella nostra simulazione il fascio primario si estingue completamente all'interno del gas bersaglio. Va precisato che ciò è ben diverso da quello che accade realmente e il rapporto fra le intensità sperimentali del fascio secondario e del fascio primario è proporzionale alla probabilità che avvenga una reazione nucleare, ovvero dell'ordine di 10^{-6} . Una volta determinata la posizione lungo l'asse z dove avviene la reazione, il software procede a calcolarne la cinematica, assumendo che le particelle del gas siano in quiete rispetto al sistema di riferimento del laboratorio e che l'emissione dei prodotti di reazione abbia distribuzione angolare uniforme nel sistema di riferimento del centro di massa.

3.2 Interazione del fascio secondario con il bersaglio tramite SRIM

Al fine di calcolare la perdita di energia dovuta all'interazione del fascio secondario con il gas bersaglio e con la finestra di uscita di havar, sono stati utilizzati i software LISE++ [5], per il calcolo di alcuni dei parametri di input, e SRIM, per la simulazione. Tramite i due è stato possibile ricavare la perdita di energia in maniera statistica simulando gli urti elastici di ciascuno degli ioni prodotti con le particelle del gas e con quelle della finestra di havar. In unione ai software precedentemente menzionati è stato utilizzato anche un semplice programma (scritto in linguaggio C) per convertire il file di output di SRIM dopo l'interazione con il gas bersaglio in input per SRIM per l'interazione con la finestra di havar. Così facendo in conclusione è stato possibile ottenere lo spazio delle fasi, vale a dire posizioni e quantità di moto simulate delle particelle del fascio secondario, all'uscita dal bersaglio di produzione.

3.3 Calcolo delle matrici di trasferimento dei componenti ottici tramite GICOSY

Il software GICOSY permette di simulare, secondo il formalismo presentato nel capitolo 1, il comportamento dei principali elementi ottici della linea, quali lunghezze di drift, sistemi di fenditure e elementi magnetici quadrupolari e dipolari. Il programma è inoltre in grado di calcolare al primo ordine le intensità dei vari campi magnetici che consentono una focalizzazione ottimale del fascio sui piani focali F1 e F2 selezionati, nonché di calcolare fino al terzo ordine le matrici di trasferimento degli elementi ottici della linea. Le posizioni dei piani focali finali F2 sono tuttavia differenti fra le configurazioni EXOTIC e AGATA, dunque risulta necessario distinguere fra le due, a differenza delle simulazioni precedenti. La figura 3.2, che riporta una schema della facility vista sul piano orizzontale, evidenzia questa distinzione e inoltre mostra chiaramente, come già spiegato, che l'effetto di un singolo quadrupolo è di focalizzazione lungo una delle direzioni trasversali, come si vede per Q1, Q3, Q4 e Q6, e di defocalizzazione lungo quella ortogonale, come per Q2 e Q5.

Nei calcoli effettuati con GICOSY e MOCADI, inoltre, tutti gli elementi ottici sono stati divisi in due parti uguali e nel loro centro si è simulata la presenza di un collimatore di forma circolare con lo stesso diametro (160 mm) della linea di fascio. Questo accorgimento serve a tenere in

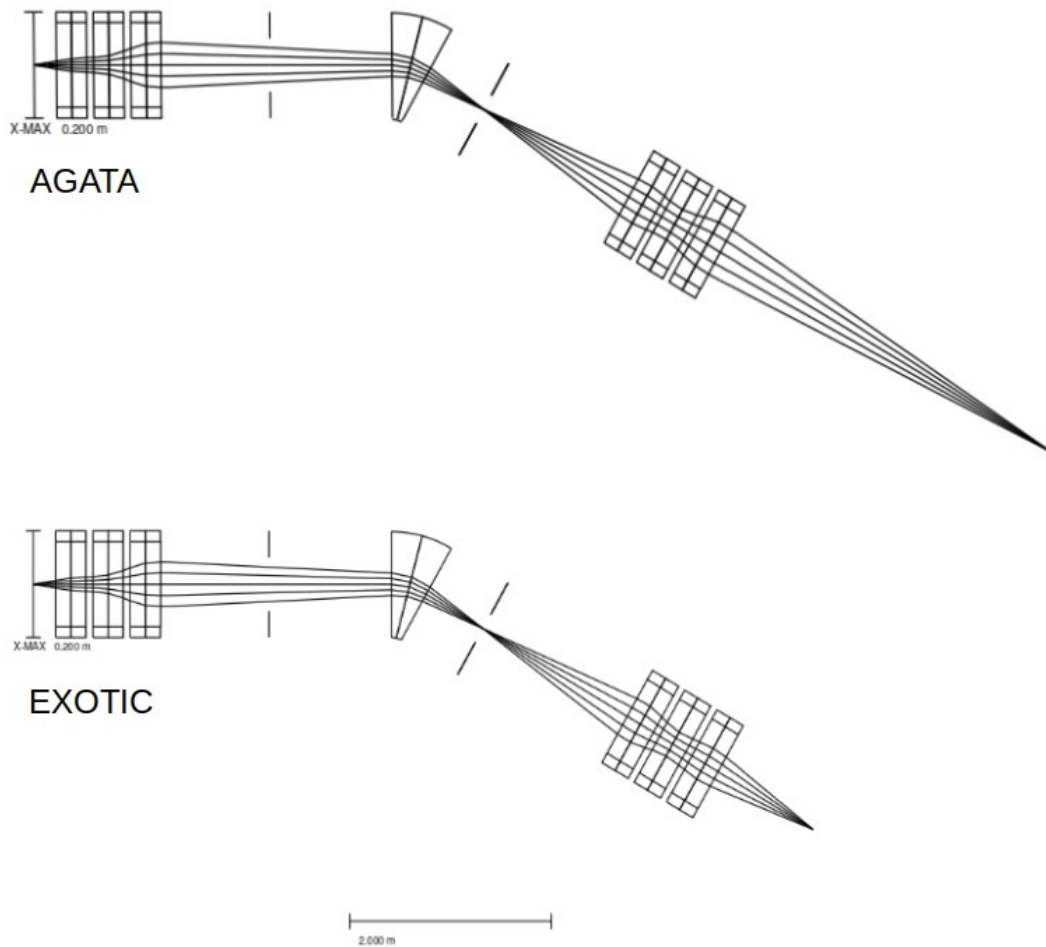


Figura 3.2: Vista sul piano orizzontale della linea di fascio per il ^{17}F nelle due configurazioni AGATA (in alto) ed EXOTIC (in basso), come risultano modellizzate nel software GICOSY.

considerazione nella simulazione i limiti geometrici imposti degli elementi che costituiscono la linea di fascio e ad eliminare quelle traiettorie curvilinee che convergendo, soprattutto all'interno dei quadrupoli magnetici, finirebbero per attraversare, nella simulazione, delle zone "non fisiche" all'esterno del tubo a vuoto della linea di fascio.

3.4 Calcolo della trasmissione tramite MOCADI

Per ottenere la simulazione completa del fascio secondario lungo la linea e quindi ricavarne la trasmissione nelle configurazioni AGATA e EXOTIC si è sfruttato il software MOCADI, che permette di combinare in un unico codice le matrici di trasferimento calcolate con GICOSY, scalandole opportunamente a seconda della rigidità magnetica, con lo spazio delle fasi del fascio secondario all'uscita del bersaglio gassoso e calcolato mediante i programmi RIB EXOTIC e SRIM. Un ulteriore programma scritto in C è inoltre stato utilizzato per convertire il formato del file di output di SRIM nel formato del file di input accettato MOCADI.

MOCADI permette di modellizzare elementi ottici generici per mezzo delle loro matrici di trasferimento, nonché lunghezze di deriva, collimatori e sistemi di fenditure di varia natura e può fornire le coordinate (x, y, α, β) di ogni particella per qualunque valore di z . Grazie a queste caratteristiche è stato possibile operare una più fine ricostruzione computerizzata della linea di

fascio nelle due configurazioni. In particolare mentre per EXOTIC si è riportato l'ingombro dato dalla strumentazione che si trova attualmente collocata fra il sistema di fenditure S3 ed il piano focale finale F2, vale a dire i due Parallel Plate Avalanche Counter (PPAC) per il tracciamento evento per evento del fascio secondario ed il sistema di collimazione finale, per AGATA tutto ciò è stato rimosso e sostituito dal solo tubo a vuoto, modellizzato tramite una serie di collimatori circolari del diametro di 160 mm. Infine, in entrambe le configurazioni, in corrispondenza di F2, si sono posizionati quattro diversi collimatori circolari con un diametro rispettivamente di 40 mm, 20 mm, 15 mm e 10 mm, dimensioni scelte poiché corrispondenti a quelle dei bersagli sperimentali utilizzati ai Laboratori di Legnaro, in quanto a seconda delle esigenze sperimentali potrebbe essere conveniente scegliere un fascio più focalizzato e meno intenso o viceversa. Il collimatore da 15 mm in particolare corrisponde alla dimensione standard del bersaglio per la facility EXOTIC.

Nella figura 3.3 è stata riportata la sezione del fascio di ^{17}F in corrispondenza dei sistemi di fenditure S1, S2, S3 e dei collimatori che precedono F2, a loro volta riportati in grafico tramite linea rossa tratteggiata.

I sistemi di fenditure S1 e S2 hanno entrambi forma rettangolare, tuttavia mentre per S1 queste possono scorrere sia orizzontalmente che verticalmente, nel caso di S2 la dimensione lungo y è fissa e non può essere alterata. In entrambi i casi, quindi, sono state riportate le dimensioni standard di operatività della linea. Poiché inoltre la condizione di focalizzazione del fascio su F1, in corrispondenza di S2, determina completamente l'intensità dei campi magnetici del magnete dipolare e del primo tripletto di quadrupoli, il percorso che le particelle seguono nelle due configurazioni rimane lo stesso fino all'interazione con il secondo tripletto di quadrupoli e conseguentemente anche i grafici relativi a S1 e S2 sono identici.

Viceversa, a livello di S3, dopo aver oltrepassato il secondo tripletto di quadrupoli, il fascio risulta più stretto nella configurazione EXOTIC, a causa del piano focale F2 molto più vicino, rispetto alla configurazione AGATA. In questo caso, inoltre, il sistema di fenditure mobili S3, di forma romboidale, è stato modellizzato tramite un collimatore circolare, utilizzando le dimensioni standard di operatività, nel caso di EXOTIC, e quelle del solo tubo a vuoto, nel caso di AGATA.

Infine la maggiore distinzione fra le due configurazioni della linea si osserva direttamente sul bersaglio, dove il fascio prodotto in configurazione EXOTIC esibisce una migliore focalizzazione e dunque una sezione più stretta. Ciò è in parte dovuto alla presenza dei collimatori a valle di S3 che invece sono stati rimossi nella configurazione AGATA e in parte dovuto alle aberrazioni ottiche e dunque a effetti di ordini superiori al primo che sono maggiormente presenti quando la distanza fra elemento focalizzante e piano focale, vale a dire tra il secondo tripletto di quadrupoli e bersaglio, è maggiore. A causa della minore focalizzazione del fascio sul piano focale F2, ci si aspetta quindi sin da ora una minore trasmissione della linea nella configurazione AGATA e in particolare un più pronunciato calo della trasmissione al diminuire del diametro del bersaglio.

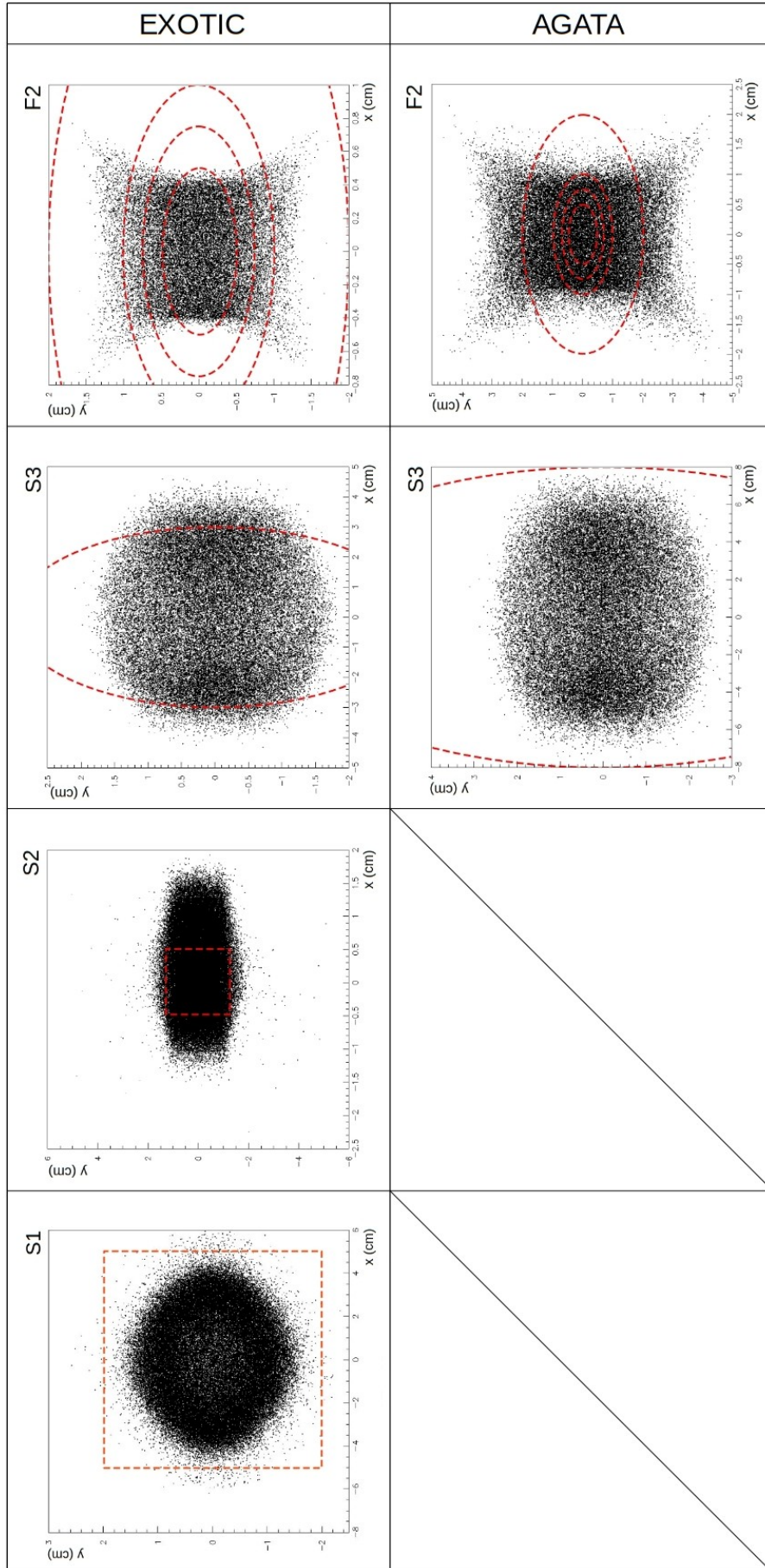


Figura 3.3: Sezione del fascio di ^{17}F in corrispondenza dei sistemi di fenditure S1, S2, S3 e dei collimatori che precedono F2, riportati in grafico tramite linea rossa tratteggiata, nelle configurazioni AGATA e EXOTIC. A causa della focalizzazione comune sul piano focale F1, i grafici relativi a S1 e S2 sono gli stessi nelle due configurazioni.

Capitolo 4

Discussione dei risultati

I risultati ottenuti dalle precedenti simulazioni, costituiti dai conteggi di particelle del fascio secondario che attraversano i 4 collimatori terminali, sono riportati in questo capitolo sia sotto forma di tabelle che di grafici. Si è deciso di indicare con ϕ il collimatore che viene considerato, riportando al pedice in millimetri il suo diametro.

^8B	EXOTIC	AGATA	rapporto
ϕ_{40}	977	1126	1.15
ϕ_{20}	833	498	0.598
ϕ_{15}	705	309	0.438
ϕ_{10}	459	157	0.342

Tabella 4.1: Risultati relativi al fascio di ^8B , dove ϕ indica il diametro del bersaglio, riportato al pedice in millimetri. Alla seconda e terza colonna sono riportati i conteggi ottenuti rispettivamente nelle configurazioni EXOTIC e AGATA, mentre l'ultima colonna riporta il rapporto fra le due.

Dai grafici 4.1 e 4.2 si nota chiaramente come in entrambe le configurazioni e per tutti i collimatori la trasmissione sia fortemente legata alla natura del fascio e quindi alla reazione di produzione. Ciò è dovuto in primo luogo al rapporto fra le masse dei costituenti del fascio primario e le masse dei costituenti del gas target. Nel caso infatti del ^7Be , ^{10}C , ^{11}C , ^{15}O e ^{17}F il gas target è idrogeno gassoso il cui nucleo è costituito da un singolo protone e la reazione è di tipo (p,n). Il rapporto fra le masse è quindi in prima approssimazione pari al numero di massa atomica ed essendo più alto l'interazione risulta maggiormente caratterizzata come reazione in cinematica inversa. Il cono cinematico di produzione risulta dunque più stretto e il fascio secondario più concentrato, con componenti marginali minori e una trasmissione maggiore. La reazione (d,p) del ^8Li e quelle (^3He ,n) di ^8B e ^{18}Ne , viceversa, a causa della maggiore massa dei costituenti del gas target, abbassa il rapporto fra le masse e dunque il cono cinematico risulta più ampio e la trasmissione minore, in particolare nel caso del ^8B . Questa problematica è meno presente per il ^{18}Ne data la sua massa considerevole.

Un secondo parametro cinematico da considerare è il Q_{value} , che rappresenta la differenza di massa fra reagenti e prodotti e quindi l'energia prodotta dalla reazione, negativo poiché le reazioni considerate richiedono energia per avvenire. Tale debito energetico fa sì che nel sistema di riferimento del centro di massa i prodotti abbiano una quantità di moto minore e quindi nel sistema di riferimento del laboratorio un cono cinematico più ristretto. In termini di produzione, tuttavia, un Q_{value} minore diminuisce la probabilità di reazione e quindi l'intensità del fascio secondario all'uscita dal bersaglio di produzione. Questa tuttavia dipende comunque da molti altri fattori, oltre a quelli simulati nei nostri calcoli, vale a dire intensità disponibile del fascio

^8Li	EXOTIC	AGATA	rapporto
ϕ_{40}	1657	1832	1.11
ϕ_{20}	1383	895	0.647
ϕ_{15}	1178	615	0.522
ϕ_{10}	823	334	0.406

Tabella 4.2: Risultati relativi al fascio di ^8Li .

^{10}C	EXOTIC	AGATA	rapporto
ϕ_{40}	1655	1940	1.17
ϕ_{20}	1426	864	0.606
ϕ_{15}	1213	506	0.417
ϕ_{10}	823	233	0.283

Tabella 4.5: Risultati relativi al fascio di ^{10}C .

^{11}C	EXOTIC	AGATA	rapporto
ϕ_{40}	10262	11885	1.16
ϕ_{20}	8988	5843	0.650
ϕ_{15}	7603	3920	0.516
ϕ_{10}	5304	2056	0.388

Tabella 4.3: Risultati relativi al fascio di ^{11}C .

^{15}O	EXOTIC	AGATA	rapporto
ϕ_{40}	23638	26412	1.12
ϕ_{20}	21715	12803	0.590
ϕ_{15}	18642	8138	0.437
ϕ_{10}	12977	3967	0.306

Tabella 4.6: Risultati relativi al fascio di ^{15}O .

^{17}F	EXOTIC	AGATA	rapporto
ϕ_{40}	31372	37893	1.21
ϕ_{20}	28466	17146	0.602
ϕ_{15}	24085	10043	0.417
ϕ_{10}	16391	4491	0.274

Tabella 4.4: Risultati relativi al fascio di ^{17}F .

^{18}Ne	EXOTIC	AGATA	rapporto
ϕ_{40}	4312	5025	1.17
ϕ_{20}	3720	2330	0.626
ϕ_{15}	3132	1441	0.460
ϕ_{10}	2143	673	0.314

Tabella 4.7: Risultati relativi al fascio di ^{18}Ne .

primario e stabilità della sorgente, trasmissione e tensione dell'acceleratore a monte della facility, focalizzazione del fascio primario sul bersaglio e stabilità della pressione e della temperatura all'interno del gas target.

Passando quindi al confronto fra le due configurazioni, si osserva innanzitutto che nel grafico 4.3 il rapporto fra i conteggi ottenuti per AGATA e per EXOTIC con il collimatore ϕ_{40} è consistentemente maggiore di 1 e quindi a questo livello la trasmissione della linea risulterebbe maggiore nella futura configurazione. Questa è con tutta probabilità una conseguenza della rimozione dei collimatori intermedi fra S3 e F2 che nel caso di EXOTIC causano l'arresto delle componenti marginali del fascio. Viceversa, se si considerano gli altri collimatori ϕ_{20} , ϕ_{15} e ϕ_{10} , il rapporto tra le due quantità è minore di 1 e diminuisce con il diametro fino a un valore di ~ 0.3 , indice di un più pronunciato calo della trasmissione nella configurazione AGATA, come previsto nella parte finale del capitolo 3 e come si può notare anche dal confronto dei grafici 4.1 e 4.2. In conclusione, quindi, la configurazione AGATA permette una minore focalizzazione sul bersaglio e quindi, a seconda delle dimensioni di quest'ultimo, può portare ad una minore trasmissione della linea. In base alla discussione che avverrà all'interno della collaborazione, alla luce dei risultati di questa tesi, verrà concordato anche il sistema di diagnostica del fascio, vale dire di tracciamento evento per evento, ed il sistema di collimazione.

Considerando infine il fascio di ^7Be , essendo questo il più intenso che la facility sia al momento in grado di produrre, se ne è valutata la trasmissione per valori di energia del fascio primario di 35 MeV, 40 MeV, 45 MeV e 50 MeV, riportati al pedice nell'indicazione dei rispettivi fasci. Poiché questi ultimi non sono presenti nell'articolo [10], la rigidità magnetica $B\rho$ per le simulazioni di ciascun fascio è stata ricavata andando a trovare quel valore che fornisce la trasmissione massima, operando una scansione a intervalli di 0.005 Tm, come riportato nel grafico 4.4. Dalle tabelle 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11 si può inoltre notare in primo luogo che le considerazioni proposte in precedenza

Trasmissione della facility in configurazione EXOTIC

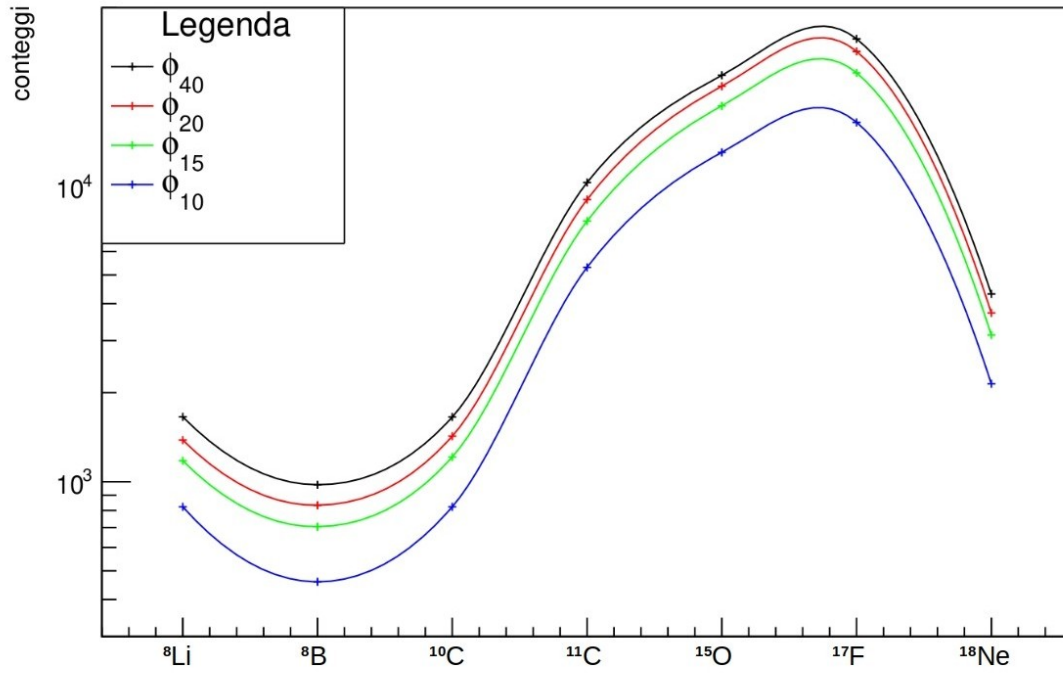


Figura 4.1: Trasmissione della facility in configurazione EXOTIC per i diversi fasci e per i collimatori circolari ϕ_{40} , ϕ_{20} , ϕ_{15} e ϕ_{10} , dove il pedice ne indica il diametro espresso in millimetri (mm).

riguardo la dipendenza della trasmissione dalla natura della reazione, che in questo caso è di tipo (p,n), e il confronto fra le configurazioni AGATA e EXOTIC trovano accordo anche in questo contesto. Si osserva quindi che la trasmissione della linea, in entrambe le configurazioni e per tutti i collimatori, così come il rapporto fra i conteggi delle due configurazioni, non sembrano avere una chiara dipendenza dall'energia del fascio primario, sebbene tali quantità non siano costanti. Ciò indica che in generale la trasmissione della linea per i diversi fasci non dipende, almeno in prima approssimazione, dall'energia del fascio primario.

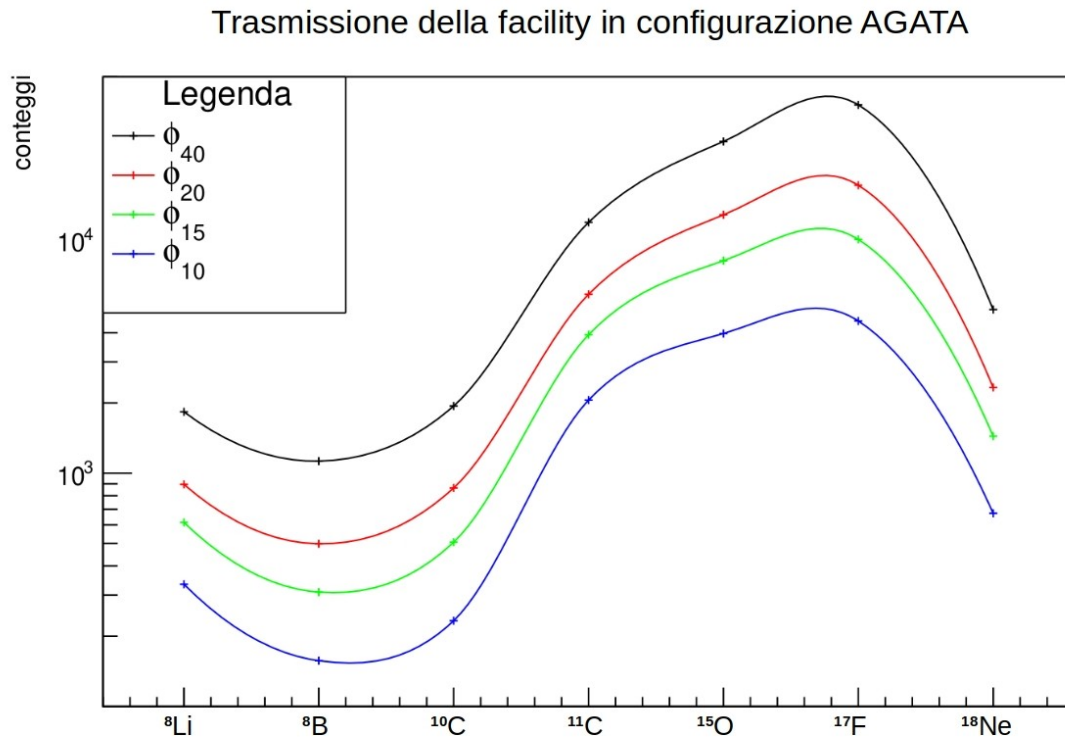


Figura 4.2: Trasmissione della facility in configurazione AGATA per i diversi fasci e per i collimatori circolari ϕ_{40} , ϕ_{20} , ϕ_{15} e ϕ_{10} , dove il pedice ne indica il diametro espresso in millimetri (mm).

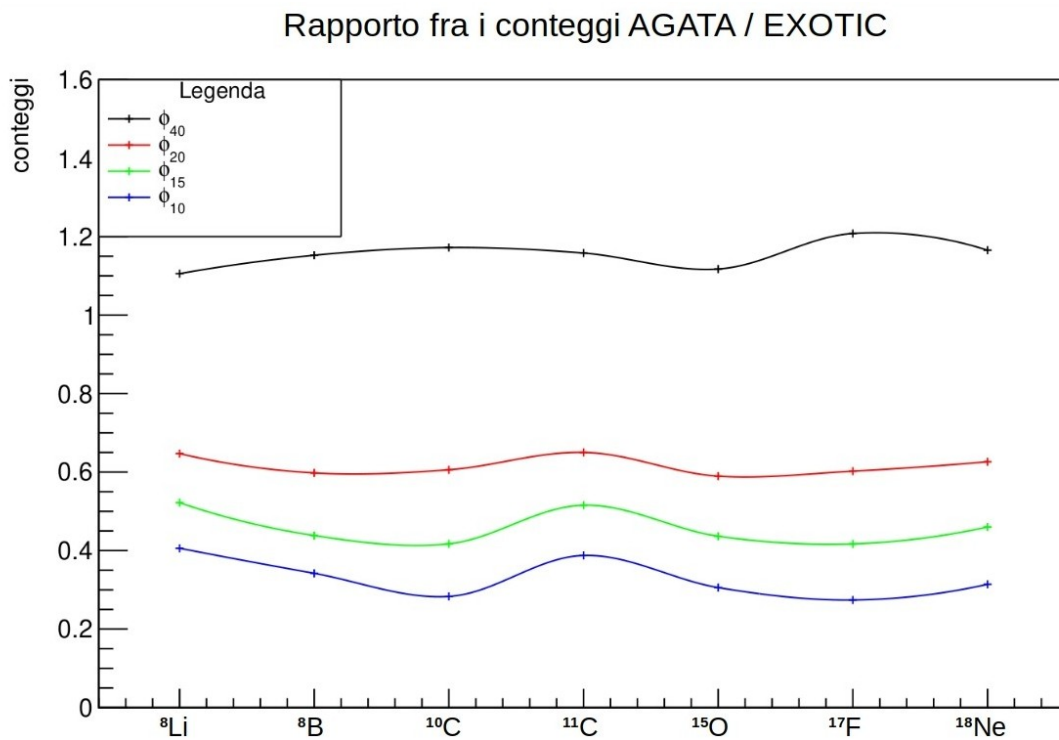


Figura 4.3: Rapprto fra i conteggi ottenuti sul bersaglio nella configurazione AGATA e nella configurazione EXOTIC, per i diversi fasci e per i collimatori circolari ϕ_{40} , ϕ_{20} , ϕ_{15} e ϕ_{10} , dove il pedice ne indica il diametro espresso in millimetri (mm).

${}^7\text{Be}_{[35]}$	EXOTIC	AGATA	rapporto
ϕ_{40}	3405	3913	1.15
ϕ_{20}	2899	1785	0.616
ϕ_{15}	2429	1085	0.447
ϕ_{10}	1653	500	0.302

Tabella 4.8: Risultati relativi al fascio di ${}^7\text{Be}_{[35]}$.

${}^7\text{Be}_{[40]}$	EXOTIC	AGATA	rapporto
ϕ_{40}	3641	3976	1.09
ϕ_{20}	3071	1917	0.624
ϕ_{15}	2564	1243	0.485
ϕ_{10}	1794	589	0.328

Tabella 4.10: Risultati relativi al fascio di ${}^7\text{Be}_{[40]}$.

${}^7\text{Be}_{[45]}$	EXOTIC	AGATA	rapporto
ϕ_{40}	3525	3863	1.10
ϕ_{20}	3012	1889	0.627
ϕ_{15}	2560	1304	0.509
ϕ_{10}	1796	722	0.402

Tabella 4.9: Risultati relativi al fascio di ${}^7\text{Be}_{[45]}$.

${}^7\text{Be}_{[50]}$	EXOTIC	AGATA	rapporto
ϕ_{40}	3513	3933	1.12
ϕ_{20}	2999	1878	0.626
ϕ_{15}	2564	1318	0.514
ϕ_{10}	1790	691	0.386

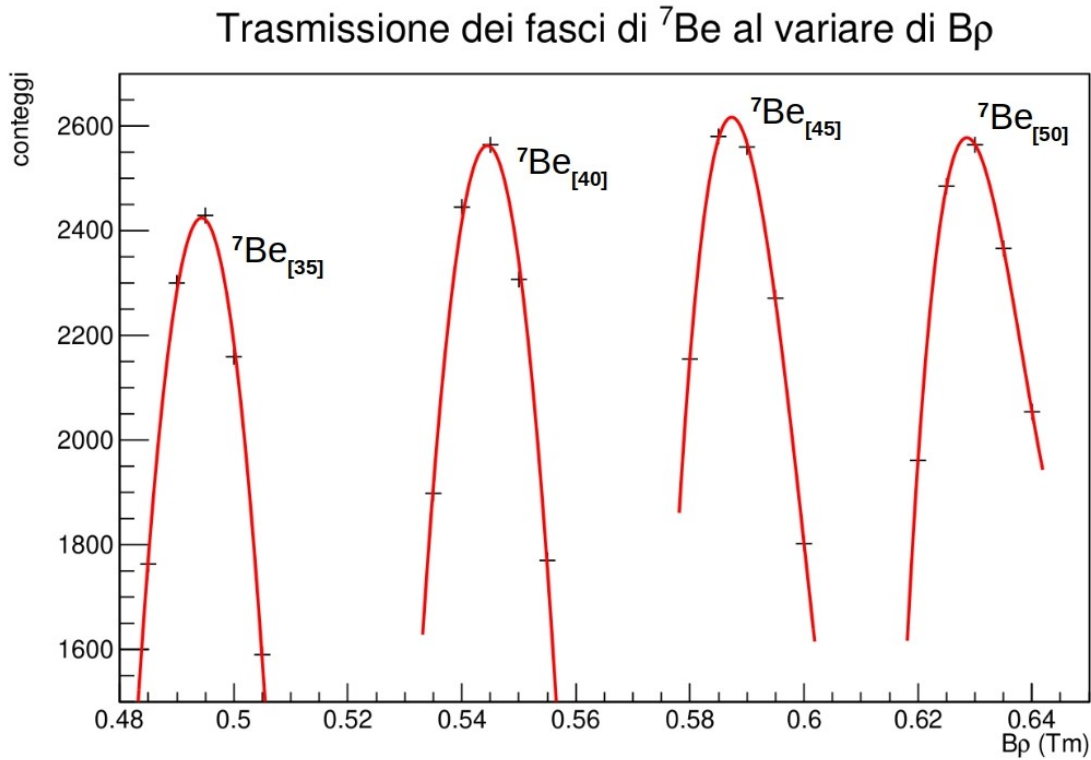
Tabella 4.11: Risultati relativi al fascio di ${}^7\text{Be}_{[50]}$.

Figura 4.4: Scansioni al variare di $B\rho$ della trasmissione dei fasci di ${}^7\text{Be}$. L'ordine, da sinistra a destra, è ${}^7\text{Be}_{[35]}$, ${}^7\text{Be}_{[40]}$, ${}^7\text{Be}_{[45]}$ e ${}^7\text{Be}_{[50]}$, in quanto ad una maggiore energia del fascio primario corrisponde una maggiore rigidità magnetica. Le linee di tendenza rappresentano fit parabolici.

Capitolo 5

Conclusioni

Utilizzando delle simulazioni computerizzate è stato possibile stimare e confrontare la trasmissione della linea di fascio della facility EXOTIC nella configurazione attuale e in quella futura, conseguente all'installazione del rivelatore gamma AGATA. Nel secondo caso la maggiore distanza fra l'ultimo tripletto di magneti quadrupolari e il bersaglio comporta su quest'ultimo una minore focalizzazione del fascio che, a seconda delle dimensioni del fascio, potrebbe portare ad un calo della trasmissione della linea fino al $\sim 30\%$ di quella originale. Sfruttando inoltre i risultati ottenuti e le misure sperimentali di intensità dei fasci radioattivi nella configurazione attuale su bersaglio di 15 mm, è stato possibile stimare l'intensità dei fasci nella nuova configurazione al variare delle dimensioni del bersaglio, come riportato in tabella 5.1.

	EXOTIC		AGATA		
	ϕ_{15} (pps)	ϕ_{40} (pps)	ϕ_{20} (pps)	ϕ_{15} (pps)	ϕ_{10} (pps)
$^7\text{Be}_{[35]}$	10^6	$1.6 \cdot 10^6$	$7.3 \cdot 10^5$	$4.5 \cdot 10^5$	$2.1 \cdot 10^5$
$^7\text{Be}_{[40]}$	10^6	$1.6 \cdot 10^6$	$7.5 \cdot 10^5$	$4.8 \cdot 10^5$	$2.3 \cdot 10^5$
$^7\text{Be}_{[45]}$	10^6	$1.5 \cdot 10^6$	$7.4 \cdot 10^5$	$5.1 \cdot 10^5$	$2.8 \cdot 10^5$
$^7\text{Be}_{[50]}$	10^6	$1.5 \cdot 10^6$	$7.3 \cdot 10^5$	$5.1 \cdot 10^5$	$2.7 \cdot 10^5$
^8B	10^3	$1.6 \cdot 10^3$	$7.1 \cdot 10^2$	$4.4 \cdot 10^2$	$2.2 \cdot 10^2$
^8Li	10^5	$1.6 \cdot 10^5$	$7.6 \cdot 10^4$	$5.2 \cdot 10^4$	$2.8 \cdot 10^4$
^{10}C	$5 \cdot 10^3$	$8.0 \cdot 10^3$	$3.6 \cdot 10^3$	$2.1 \cdot 10^3$	$9.6 \cdot 10^2$
^{11}C	$2 \cdot 10^5$	$3.1 \cdot 10^5$	$1.5 \cdot 10^5$	$1.0 \cdot 10^5$	$5.4 \cdot 10^4$
^{15}O	$4 \cdot 10^4$	$5.7 \cdot 10^4$	$2.7 \cdot 10^4$	$1.7 \cdot 10^4$	$8.5 \cdot 10^3$
^{17}F	10^5	$1.5 \cdot 10^5$	$7.1 \cdot 10^4$	$4.2 \cdot 10^4$	$1.9 \cdot 10^4$
^{18}Ne	10^3	$1.6 \cdot 10^3$	$7.4 \cdot 10^2$	$4.6 \cdot 10^2$	$2.2 \cdot 10^2$

Tabella 5.1: Vengono riportate le misure sperimentali di intensità dei fasci radioattivi nella configurazione EXOTIC per bersagli con diametro di 15 mm (seconda colonna) e le stime della stessa grandezza nella configurazione AGATA per bersagli con diametro di 40 mm, 20 mm, 15 mm e 10 mm, utilizzati ai Laboratori di Legnaro (colonne da tre a sei).

Bibliografia

- [1] J.F. Ziegler et al., *The Stopping and Range of Ions in Solids*, Vol. 1. Pergamon Press, Oxford (1984).
- [2] M. Berz et al., *COSY 5.0 - The fifth order code for corpuscular optical systems*, Nucl. Instr. and Meth. A 258 (1987) 402.
- [3] H. Wollnik, *Optics of Charged Particles*, Academic Press (1987).
- [4] N. Iwasa et al., *MOCADI, a universal Monte Carlo code for the transport of heavy ions through matter within ion-optical systems*, Nucl. Instr. and Meth. B 126 (1997) 284.
- [5] D. Tarasov et al., *The program LISE: a simulation of fragment separators*, Nucl. Instr. and Meth. A 482 (2002) 307.
- [6] A. Latina et al., *PRISMA - a magnetic spectrometer for heavy ions at LNL*, Nuclear Physics A 734 (2004) E1–E4
- [7] F. Farinon et al., *Commissioning of the EXOTIC beam line*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 266 (2008) 4097–4102.
- [8] M. Mazzocco et al., *Production and separation of light low-energy radioactive ion beams with the EXOTIC beam-line at LNL*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 266 (2008) 4665–4669.
- [9] S. Akkoyun et al., *AGATA-Advanced GAMMA Tracking Array*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 668 (2012) 26–58.
- [10] M. Mazzocco et al., *Upgrade of the facility EXOTIC for the in-flight production of light Radioactive Ion Beams* Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 317 (2013) 223–226.