

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

Scuola di Scienze  
Corso di Laurea in Fisica

# Studio di un Rivelatore per Neutroni di Alta Energia

Relatore:

Dott. Cristian Massimi

Correlatori:

Prof. Gianni Vannini,

Dott.sa Federica Mingrone

Presentata da:

Chiara De Lucia

II Sessione  
Anno Accademico 2014/2015



*“...E il naufragar m'è dolce in questo mare”*

**A Francesca Galli.**



# Abstract

Guidata dall'interesse per lo studio della fissione nucleare, per molto tempo la ricerca nel campo dei neutroni si è concentrata su energie medio-basse ( $E < 20$  MeV) mentre per la regione a più alte energie le informazioni risultavano scarse o mancanti. Recentemente, invece, si è sviluppato un nuovo interesse per i Neutroni di Alta Energia, utilizzabili nelle terapie mediche per la cura di tumori, e di grande importanza per la radioprotezione e la trasmutazione delle scorie radioattive derivanti da produzione di energia nucleare. Queste applicazioni richiedono precisi fasci di neutroni quasi-monoenergetici, con energie dai 20 a qualche centinaia di MeV, servono perciò misurazioni intese a determinare le caratteristiche del fascio e atte a ottenere valori precisi della sezione d'urto relativa ai processi innescati da neutroni veloci.

La sezione d'urto di un certo processo nucleare si deduce dalla misura del numero di eventi acquisiti per unità di tempo da un rivelatore, conoscendo l'efficienza di questo, l'intensità del fascio che incide nel bersaglio e le caratteristiche del target. Diventa, quindi, determinante la conoscenza dell'intensità del fascio dei neutroni, anche nel caso di un intervallo energetico ampio, come quello prodotto al CERN dalla *facility* n-TOF, che possiede energie che vanno dal meV al GeV.

Sulla base di queste motivazioni, in questo lavoro di tesi, si vuole proporre un prototipo semplice di rivelatore per Neutroni di Alta Energia e si presenta

## ABSTRACT

---

uno studio preliminare del primo test sotto fascio, focalizzando l'attenzione sulla massima energia misurabile.

# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>1 Reazioni nucleari</b>	<b>3</b>
1.1 Sezione d'urto di reazioni indotte da neutroni . . . . .	3
1.2 La <i>facility</i> n_TOF . . . . .	7
<b>2 La Rivelazione dei Neutroni</b>	<b>11</b>
2.1 Rivelatori per neutroni . . . . .	11
2.2 Scintillatori e fotomoltiplicatori . . . . .	13
2.3 La tecnica del Tempo di Volo . . . . .	14
2.4 Lo scintillatore NE213 . . . . .	15
2.5 Telescopio per protoni di rinculo . . . . .	17
2.6 Il problema del $\gamma$ -flash . . . . .	17
<b>3 Primo Prototipo</b>	<b>21</b>
3.1 Apparato sperimentale . . . . .	21
3.2 Calcolo del <i>range</i> delle particelle cariche . . . . .	24
3.3 Test sotto fascio . . . . .	27
3.3.1 Tempo di recupero . . . . .	27
3.3.2 Pacchetti dedicati e parassiti . . . . .	30
3.3.3 Tensione applicata a fotomoltiplicatori . . . . .	32

## INDICE

---

3.4	Analisi dei segnali . . . . .	33
	<b>Conclusioni</b>	<b>35</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>36</b>
	<b>Ringraziamenti</b>	<b>38</b>

# Introduzione

Lo studio dei processi indotti da Neutroni di Alta Energia ( $E_n > 20$  MeV) richiede tecniche di produzione di fasci con un vasto spettro energetico e tecniche di rivelazione adatte ad essi. Le motivazioni che spingono la ricerca in questo settore sono molteplici: dall'astrofisica alle tecnologie nucleari, dalla medicina alla radioprotezione. In tutte le indagini il punto determinante è costituito dalla conoscenza dell'intensità del fascio di neutroni. La procedura per tale determinazione si basa sulla conoscenza di una sezione d'urto di un processo indotto da neutroni. Quindi in questo lavoro di tesi, strutturato in tre capitoli, si vuole presentare un prototipo semplice di rivelatore per neutroni veloci: nel Primo Capitolo saranno trattate le basi teoriche e sperimentali dello studio della sezione d'urto di reazioni indotte da neutroni, le principali reazioni nucleari ad essa connesse e, infine, verrà brevemente descritta la *facility* n\_TOF (Neutron Time Of Flight) del CERN di Ginevra. Quest'ultima si presta perfettamente allo studio di neutroni veloci, in quanto grazie all'utilizzo del processo di spallazione di protoni su piombo, fornisce un fascio di neutroni con energie che vanno dalla zona termica fino a qualche GeV. Inoltre, con la tecnica del tempo di volo si può determinare con grande precisione e accuratezza la velocità (e quindi l'energia) di un neutrone conoscendo il tempo che impiega a percorrere una certa distanza. La tecnica del *Time of Flight* verrà illustrata nel Secondo Capitolo, assieme

## INTRODUZIONE

---

ad altre tecniche di rivelazione per neutroni veloci e ai principali problemi ad esse legati. Nel caso della *facility* n\_TOF del CERN un problema rilevante è la produzione di una grande quantità di fotoni che arrivano sui rivelatori ( $\gamma$ -flash). Infine, nel Terzo Capitolo si descriverà il prototipo di un rivelatore e si analizzeranno i dati del primo test sotto fascio.

# Capitolo 1

## Reazioni nucleari

### 1.1 Sezione d'urto di reazioni indotte da neutroni

Tipicamente, una reazione nucleare è scritta come:  $a + X \rightarrow b + Y$  dove  $a$  è la particella proiettile,  $X$  il bersaglio e  $b$  e  $Y$  i prodotti della reazione. Nelle reazioni più comuni  $Y$  è un elemento pesante che spesso si ferma nel bersaglio e  $b$  una particella leggera che può essere, invece, rivelata e misurata. La stessa reazione può essere indicata con la forma compressa  $X(a, b)Y$ . Se  $a$  e  $b$  sono la stessa particella (e quindi  $X$  e  $Y$  lo stesso nucleo) si tratta del processo di diffusione elastica se  $Y$  e  $b$  sono nello stato fondamentale o anelastica se sono in uno stato eccitato. Nelle reazioni nucleari si conserva l'energia totale e l'impulso, che possono quindi essere usati per calcolare le energie dei prodotti partendo da quella del proiettile.

Le reazioni avvengono secondo una certa probabilità legata alla sezione d'urto  $\sigma$ , o meglio la sezione d'urto può essere definita come una quantità che, avendo le dimensioni di un'area, è proporzionale alla probabilità di reazione.

## 1. Reazioni nucleari

---

La sezione d'urto si misura in barn (b), dove  $1 b = 10^{-24} \text{ cm}^2$ , unità di misura che viene introdotta per non avere a che fare con numeri troppo piccoli.

I rivelatori per le particelle uscenti dal bersaglio coprono solo un certo angolo solido  $d\Omega$ , non osservano, quindi, tutti i prodotti della reazione e solo una frazione  $d\sigma$  della sezione d'urto può essere dedotta. Il rapporto  $\frac{d\sigma}{d\Omega}$  è detto sezione d'urto differenziale e fornisce importanti informazioni sulla distribuzione angolare delle particelle uscenti. Integrando su tutto l'angolo solido, dalla sezione d'urto differenziale si ottiene la sezione d'urto  $\sigma$  della reazione. In molte applicazioni di fisica nucleare è importante conoscere anche la probabilità di trovare la particella uscente ad un certa energia. Si può quindi definire la sezione d'urto doppiamente differenziale  $\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE_b}$ , in modo da legare  $\sigma$  anche alla probabilità di osservare  $b$  in un certo intervallo energetico  $dE_b$  [KK].

Sperimentalmente, le reazioni indotte da neutroni vengono studiate tramite fasci di neutroni diretti su un bersaglio di materiale spesso isotopicamente arricchito. Nell'attraversare il bersaglio i neutroni possono o meno interagire con esso, e l'interazione risultante può causare la modifica della loro energia e/o direzione, arrivando fino a fermare il neutrone all'interno del bersaglio stesso. Ognuna delle interazioni subite dai neutroni è governata dalla sezione d'urto del processo che ha avuto luogo, la quale dipende dalle caratteristiche dei nuclei bersaglio e dall'energia dei neutroni incidenti.

I neutroni possono, principalmente, interagire in due modi: per *scattering* o per assorbimento. Nel primo caso la velocità e l'energia cinetica dei neutroni incidenti cambiano, e si può distinguere tra *scattering* elastico, se il nucleo mantiene lo stesso numero di protoni e neutroni acquistando una certa velocità di rinculo, e *scattering* anelastico se il nucleo bersaglio dopo l'interazione si trova in uno stato eccitato [PR].

Nel caso di un bersaglio di Idrogeno può avvenire solo *scattering* elastico, perché il fatto che il nucleo di  $H$  non abbia stati eccitati proibisce la diffusione anelastica. Questo fornisce la base per alcuni rivelatori per neutroni veloci (energia superiore al MeV) in quanto in questa regione anche la cattura radiativa è fortemente soppressa e l'unica reazione che può aver luogo è la diffusione elastica. Un tipico esempio di apparato per la misura della sezione d'urto, molto frequente in letteratura, è il telescopio per i protoni di rinculo.

Se invece di subire un urto il neutrone viene catturato dal nucleo bersaglio, questo può dare origine a varie reazioni. Per neutroni di energia  $E < 10$  MeV il principale meccanismo di reazione è legato alla formazione di un nucleo composto: il neutrone incidente è assorbito dal nucleo  ${}^AZ$  con formazione del composto  ${}^{A+1}Z$  che, successivamente, decade in modi diversi:

- mediante l'emissione di un neutrone per ritornare al nucleo iniziale nello stato: fondamentale (n,n) o eccitato (n,n'), rispettivamente diffusione elastica e anelastica.
- mediante l'emissione di un protone, particella alfa o frammenti di fissione: (n,p), (n, $\alpha$ ), (n,f). In questi processi l'energia d'eccitazione del nucleo composto viene statisticamente distribuita tra i vari nucleoni, ma si può verificare un accumulo di energia su un protone (o su un aggregato di nucleoni) sufficiente a farlo sfuggire dal nucleo.
- mediante l'emissione di radiazione gamma: (n, $\gamma$ ), detta cattura radiativa. Il processo avviene quando il nucleo composto raggiunge lo stato fondamentale a seguito dell'emissione di una cascata di raggi  $\gamma$  e non può più emettere nucleoni, ma può risultare instabile per decadimento  $\beta$ .

## 1. Reazioni nucleari

---

Poiché il neutrone è elettricamente neutro, la sua rivelazione avviene comunemente tramite le particelle cariche prodotte da reazioni nucleari indotte dal neutrone stesso, infatti, molti rivelatori si basano su reazioni di assorbimento, dove il neutrone viene assorbito dal nucleo che emette una particella carica. Gli elementi più usati sono  $^3\text{He}$ ,  $^6\text{Li}$  e  $^{10}\text{B}$  perché hanno un'elevata sezione d'urto, come si può vedere in Fig.1.1, per i neutroni a basse energie e  $^{235}\text{U}$  per energie fino a 20 MeV.

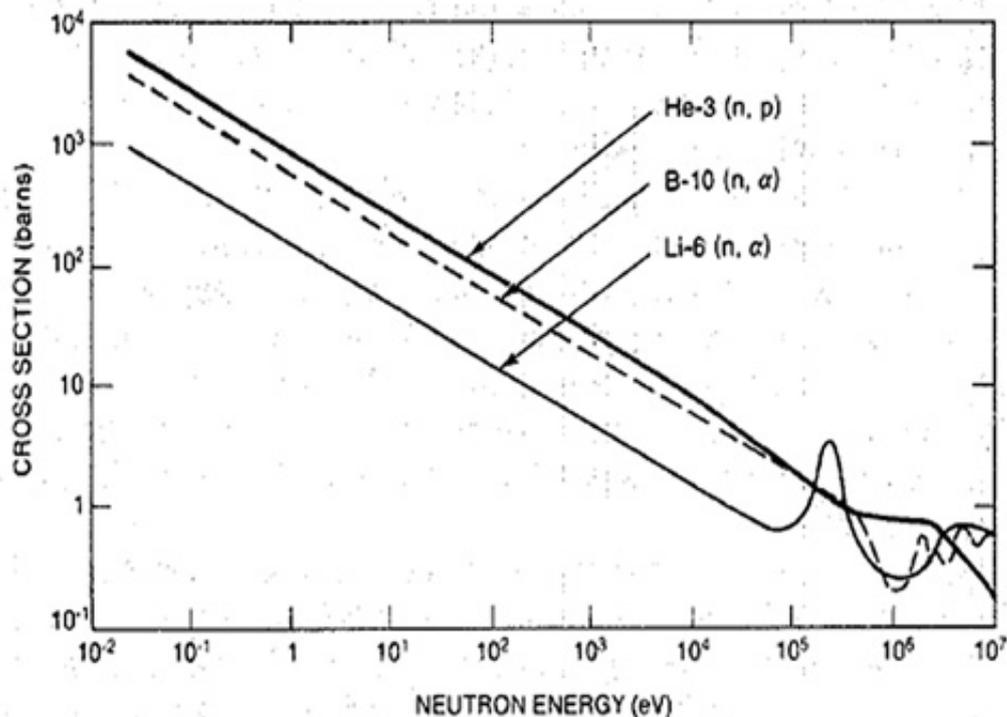


Figura 1.1: La figura mostra la relazione della sezione d'urto in funzione dell'energia dei neutroni per  $^3\text{He}$ ,  $^6\text{Li}$  e  $^{10}\text{B}$ , al crescere dell'energia  $\sigma$  diminuisce, con  $E_n > 100$  KeV sono presenti alcuni picchi (soprattutto nel  $^6\text{Li}$ ) detti "risonanze" e rappresentano le zone energetiche in cui le reazioni con i nuclei sono intensificate.

Per neutroni con energie superiori ai 20 MeV manca una sezione d'urto di riferimento, ovvero conosciuta con grande accuratezza e precisione. L'unica

reazione ben nota è lo *scattering* n-p: a basse energie la sezione d'urto delle reazioni (n, particella carica) decresce, presentando un andamento  $1/v$  tipico delle reazioni che procedono con la formazione del nucleo composto, fino ad un valore di circa qualche centinaio di KeV dove presenta delle risonanze, che indicano una maggiore intensità delle reazioni nucleari.

### 1.2 La *facility* n\_TOF

La *facility* n\_TOF (Neutron Time Of Flight), operativa al CERN dal 2001, è costruita per studiare le interazioni neutrone-nucleo e per determinarne le sezioni d'urto.

I neutroni vengono prodotti per spallazione da un fascio pulsato di protoni (con frequenza massima  $\nu = 0.4$  Hz) diretti su un bersaglio di piombo (Pb) a forma cilindrica (di altezza 40 cm e diametro 30 cm, raffreddato ad acqua), all'uscita del quale vengono moderati da uno spessore di 5 cm di acqua borata, prima di entrare nel tubo a vuoto che li guida fino alla sala sperimentale. Grazie alla tecnica di spallazione e ai processi di moderazione, si ottiene un fascio di neutroni con uno spettro energetico che va dalla regione termica ( $\sim 0.025$  eV) a qualche GeV. La tecnica del tempo di volo permette di ricostruire l'energia dei neutroni con una grande precisione, e questo insieme al grande intervallo energetico coperto permette lo studio accurato di diverse reazioni neutrone-nucleo.

Il fascio di protoni, accelerato dal *Proton Synchrotron* (PS) del CERN, incide sul target di piombo con un impulso di 20 GeV/c. La scelta del piombo è legata alla sua grande produzione di neutroni nel meccanismo di spallazione, che aumenta con l'aumentare dell'energia dei protoni incidenti. In questo modo, i protoni accelerati dal PS producono circa 300 neutroni

## 1. Reazioni nucleari

---

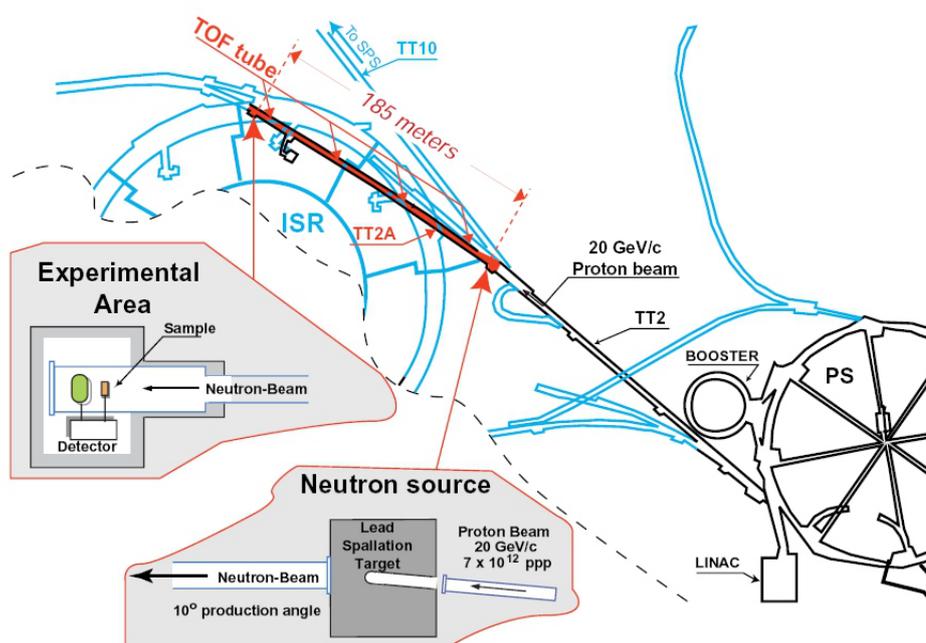


Figura 1.2: Schema della *Facility n\_TOF*

ciascuno, i quali vengono inviati alla sala sperimentale attraverso un tubo a vuoto. Il fascio viene indirizzato nel tubo con un angolo di  $10^\circ$  rispetto alla direzione dei protoni incidenti per escludere le particelle cariche che sono principalmente prodotte lungo la direzione del fascio di protoni. Il fascio di protoni prodotto dal proto-sincrotrone viene inviato sul bersaglio di piombo in due modalità, entrambe con una distribuzione gaussiana in tempo di 7 ns:

- Dedicata, in cui il fascio è composto da un pacchetto di  $7 \cdot 10^{12}$  protoni dedicati interamente all'esperimento n\_TOF.
- Parassita, in cui il fascio è composto da un pacchetto di  $3.5 \cdot 10^{12}$  protoni dedicati ad altri esperimenti, che vengono invece inviati ad n\_TOF.

La base di volo percorsa dai neutroni è lunga 185 metri e questo permette alle particelle più instabili di decadere prima di arrivare nella sala sperimentale, mentre le particelle cariche (soprattutto elettroni, pioni e protoni, ma

## 1. Reazioni nucleari

---

anche muoni e kaoni) rimaste vengono deviate da un elettromagnete lungo 2 m posto a circa 145 metri dal target di spallazione.



# Capitolo 2

## La Rivelazione dei Neutroni

### 2.1 Rivelatori per neutroni

I neutroni, non possedendo carica elettrica, interagiscono fortemente con i nuclei, ma non elettromagneticamente con protoni ed elettroni. L'interazione forte, a causa del suo corto raggio d'azione, agisce solo se il neutrone si trova almeno ad una distanza di circa  $10^{-13}$  cm dal nucleo. Nonostante le interazioni siano più rare, quando i neutroni interagiscono con la materia, a seconda della loro energia, danno vita a processi diversi. I neutroni di bassa energia sono principalmente soggetti a cattura e inducono processi di fissione, mentre lo scattering elastico e inelastico avviene principalmente per quelli con energia cinetica dell'ordine dei MeV, ad alte energie, invece, producono una cascata adronica [WL]. Per questo motivo è utile classificare i neutroni in base all'energia:

- Neutroni con  $E_n \simeq 0.025$  eV sono detti *Termici* ;
- Neutroni con  $\sim 0.1$  eV  $< E_n < 100$  KeV sono detti *Epitermici*;
- Neutroni con  $100$  KeV  $< E_n < 10$  MeV sono detti *Veloci*;

## 2. La Rivelazione dei Neutroni

---

- Neutroni con  $E_n > 100$  MeV sono ad *Alta Energia*.

La rivelazione dei neutroni termici e epitermici avviene tramite rivelatori che contengono elementi (per esempio:  ${}^6\text{Li}$  o  ${}^{10}\text{Be}$ ) con un'elevata sezione d'urto per le reazioni nucleari del tipo  $(n, \alpha)$ .

Per la rivelazione dei neutroni veloci, invece, si può seguire un metodo indiretto, diminuendone prima la velocità per poi rivelarli come neutroni lenti: questo approccio non permette di misurarne l'energia, ma solo di conteggiarli. Per questo motivo è preferibile usare un metodo diretto, sfruttando lo *scattering* elastico di neutroni su nuclei, dove l'energia di rinculo del nucleo bersaglio è data da:

$$E_r = \frac{4A}{(A+1)^2} (\cos^2 \theta) E_n,$$

dove  $A$  è il numero di massa del nucleo bersaglio e  $\theta$  l'angolo di scattering nel sistema di riferimento del laboratorio. Il bersaglio più comunemente usato è l'idrogeno, in quanto nello scattering  $(n, p)$  su H si ha una buona conoscenza del valore della sezione d'urto e quindi, fissato l'angolo a cui si rivelano i protoni di rinculo, si ottiene una relazione lineare tra l'energia dei protoni di rinculo e l'energia dei neutroni incidenti:

$$E_p = (\cos^2 \theta) E_n.$$

Questo approccio è particolarmente adatto a fasci di neutroni quasi mono-energetici. I protoni possono essere rivelati da scintillatori, di cui il più comune è NE213 che possiede ottime capacità di discriminare le diverse particelle cariche dai fotoni [HS].

Per la misura del flusso di un fascio di neutroni sono largamente usati i telescopi per protoni di rinculo, perché permettono la discriminazione del tipo di particelle, riducendo drasticamente il fondo dovuto alle particelle

cariche che si possono creare nell'interazione dei neutroni di alta energia con i materiali inerti presenti nel rivelatore o nei suoi pressi.

### 2.2 Scintillatori e fotomoltiplicatori

Per capire i concetti alla base della rivelazione dei neutroni, è importante conoscere il funzionamento delle strumentazioni di base atte allo scopo. Per prima cosa è utile sapere cos'è e come funziona uno scintillatore e il suo stretto legame con il fotomoltiplicatore (o PM, dall'inglese *photomultiplier*). Il primo scintillatore fu inventato dal fisico W. Crookes nel 1903, che notò come uno spessore di solfuro di zinco (ZnS) produceva una debole scintillazione quando attraversato da particelle  $\alpha$ . Questa scintillazione veniva osservata tramite un microscopio ad occhio nudo in una stanza completamente buia [WL]. Il passo successivo, compiuto nel 1944 dai fisici S. Curran e W. Baker, fu quello di sostituire l'uso dell'occhio nudo con uno strumento detto fotomoltiplicatore.

Gli scintillatori sono composti da materiali che attraversati da particelle cariche emettono luce, questo perché le particelle cariche eccitano atomi e molecole, che diseccitandosi emettono fotoni. Questi fotoni sono raccolti dal fotocatodo del fotomoltiplicatore e convertiti in una debole corrente elettrica, che viene amplificata dai dinodi posti lungo il corpo del PM fino ad arrivare all'anodo, dove avviene l'acquisizione del segnale.

Il segnale di uno scintillatore fornisce numerose informazioni sulla particella che lo ha causato, ad esempio sotto un certo valore minimo di energia, la luce in uscita dallo scintillatore è direttamente proporzionale all'energia di eccitazione. Essendo il fotomoltiplicatore uno strumento lineare, l'ampiezza del segnale elettrico finale è proporzionale a questa energia, il che rende possibile usare lo scintillatore per studiare lo spettro energetico.

## 2. La Rivelazione dei Neutroni

---

I materiali degli scintillatori hanno la proprietà di luminescenza, ovvero assorbono energia e la riemettono sotto forma di luce visibile. Questa riemissione può avvenire quasi istantaneamente ( $\sim 10^{-8}$  s), e viene detta fluorescenza, oppure più lentamente (da *ms* a ore a seconda del materiale) e viene detta fosforescenza. Il numero di fotoni emessi ( $N$ ) al tempo  $t$  dipende quindi dalla costante di decadimento  $\tau_d$  secondo la relazione esponenziale:

$$N = \frac{N_0}{\tau_d} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_d}},$$

dove  $N_0$  è il numero totale di fotoni emessi. Risulta evidente come un buono scintillatore dovrebbe avere una bassa costante di decadimento e un'alta efficienza di conversione tra l'energia di eccitazione e la luce riemessa. In più deve essere trasparente alla sua stessa radiazione, che deve essere emessa in un intervallo spettrale compatibile con il fotomoltiplicatore.

Quando un fotone incide sul fotocatodo viene emesso un elettrone per effetto fotoelettrico, che, a causa del voltaggio applicato, è accelerato verso il primo dinodo, dove trasferisce parte della sua energia agli elettroni del dinodo. Questo causa l'emissione di elettroni secondari, che vengono accelerati verso il dinodo successivo producendo un effetto a cascata e la carica finale viene raccolta dall'anodo.

### 2.3 La tecnica del Tempo di Volo

La tecnica del tempo di volo è la più adatta a misurare l'andamento della sezione d'urto in funzione dell'energia dei neutroni incidenti, infatti può essere usata per determinare la velocità  $v$  (e quindi l'energia  $E_n$ ) di un neutrone conoscendo il tempo  $t$  che impiega a percorrere una certa distanza  $L$ . Il tempo di volo dei neutroni viene misurato in riferimento al tempo di arrivo dei fotoni ( $T_\gamma$ ) prodotti nel bersaglio di spallazione, come differenza

tra un tempo di *stop* ( $T_{stop}$ ), che rappresenta l'istante in cui le particelle prodotte dalla reazione sono rivelate, e  $T_\gamma$  stesso [PS].

Sperimentalmente il tempo di volo viene misurato con la formula:

$$TOF = (T_{stop} - T_\gamma) + t_0,$$

dove  $t_0$  è un tempo di offset che può essere calcolato dalla misura del tempo di volo dei fotoni prodotti sul bersaglio di spallazione. Da tenere in considerazione è il tempo che passa tra l'istante in cui il neutrone viene creato e quello in cui lascia il bersaglio ( $t_{mod}$ ) che comporta un'indeterminazione sull'istante di creazione. Il tempo di volo legato alla velocità del neutrone è quindi dato dalla formula:

$$v = \frac{L}{TOF + t_{mod}},$$

dove L è la distanza tra il target di produzione dei neutroni e la superficie frontale del rivelatore. Dalla velocità si calcola relativisticamente l'energia cinetica del neutrone:

$$E = mc^2(\gamma - 1) = mc^2\left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1\right).$$

### 2.4 Lo scintillatore NE213

Questo tipo di scintillatore organico, composto da Idrogeno (in maggiore percentuale) e Carbonio, si è dimostrato funzionale nel misurare l'energia dei neutroni in un intervallo energetico dai 2 ai 30 MeV [AB], mentre sorgono più difficoltà per i neutroni ad alta energia. In questo secondo caso sorgono due problemi principali: per prima cosa le interazioni con i nuclei di Carbonio diventano più significative ed, inoltre, aumenta l'energia dei protoni di rinculo rendendone più difficile la rivelazione. L'aumento delle interazioni

## 2. La Rivelazione dei Neutroni

---

n-C è un problema perché servono dati dettagliati sulla sezione d'urto per poterne calcolare il contributo, questo può essere risolto se la componente dello *scattering* n-p può essere isolata e analizzata separatamente nello scintillatore. Mentre per risolvere il problema della rivelazione dei protoni è utile usare un sistema di più rivelatori in fila.

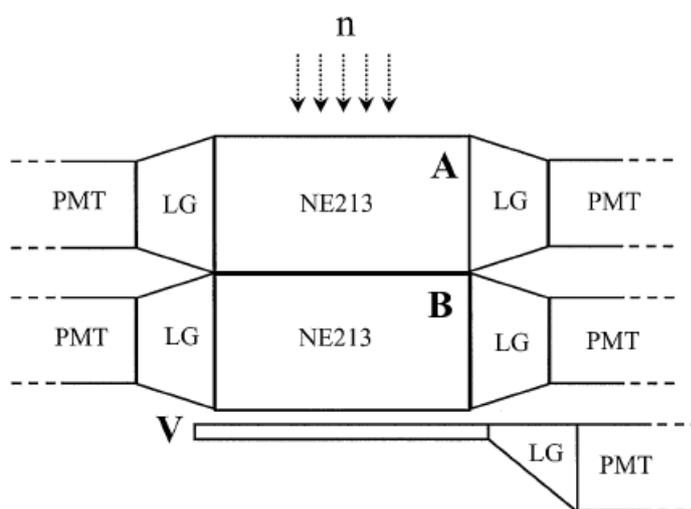


Figura 2.1: Diagramma schematico dei due, A e B, scintillatori NE213 in serie e dello scintillatore plastico V [AB].

In Fig.2.1 è rappresentato l'apparato per la rivelazione di neutroni con energia fino a 100 MeV, usando due scintillatori NE213 (A e B) in fila e uno scintillatore plastico V che rivela le particelle cariche che superano B. Per le altre sono possibili due tipi di eventi: singoli (particelle rivelate solo in A) o coincidenti (particelle rivelate in A e B). Il primo caso è identificato dall'arresto delle particelle nello scintillatore A, mentre il secondo dal passaggio in A e dall'arresto in B.

### 2.5 Telescopio per protoni di rinculo

Il telescopio per protoni di rinculo o PRT, dall'inglese *Proton Recoil Telescope*, rivela i protoni prodotti dalla reazione di *scattering* elastico n-p in una precisa geometria (da qui il suo nome), infatti generalmente solo un certo angolo solido dei protoni uscenti è coperto. Per questo motivo non serve conoscere solo la sezione d'urto dell'urto elastico, ma anche la sua, meno precisa, sezione d'urto differenziale, che è causa del maggior contributo all'incertezza associata alle misure tramite PRT. Il telescopio è costituito da due o più rivelatori che hanno la funzione di misurare la perdita di energia e l'energia totale del protone. La discriminazione delle particelle più pesanti dei protoni, prodotte dalla reazione, avviene tramite la tecnica del  $\Delta E - E$ , misurando la perdita di energia ( $\Delta E$ ) in un primo rivelatore e l'energia stessa ( $E$ ), ricavata dall'insieme di rivelatori del telescopio [VD].

Il bersaglio migliore, per produrre reazioni n-p, sarebbe composto da solo Idrogeno, questo non è possibile a causa della bassa densità, che si otterrebbe con un bersaglio gassoso. Il *target* contiene, dunque, anche altri elementi, come ad esempio il Carbonio nel caso del Polyethylene ( $H_2C_4$ ). Gli urti dei neutroni contro i nuclei più pesanti danno vita a reazioni che producono protoni, altre particelle cariche e neutroni diffusi, che costituiscono il *background*. Tali fondi sono determinabili effettuando una diversa misura con un bersaglio che contenga solo l'elemento diverso dall'idrogeno. Durante l'analisi dati questo *background* è sottratto dalle misure iniziali.

### 2.6 Il problema del $\gamma$ -flash

Uno dei problemi fondamentali nel rivelare i neutroni di alta energia con la tecnica del tempo di volo è legato alla grande presenza di fotoni emessi

## 2. La Rivelazione dei Neutroni

---

nei processi di spallazione, necessari per produrre neutroni di alte energie. Questi fotoni arrivano al rivelatore prima di qualsiasi altra particella presente nel fascio e saturano il segnale del rivelatore, coprendo l'acquisizione degli eventi successivi fino a che questo non riprende a funzionare normalmente.

Il segnale del  $\gamma$ -flash è mostrato in Fig.2.2 e corrisponde al picco del grafico, che si trova a circa 620 ns, ovvero il tempo di volo dei fotoni:

$$TOF_{\gamma} = T_{\gamma} = \frac{L}{c} \simeq 620 \text{ ns},$$

dove  $L = 185 \text{ m}$  è la lunghezza della base di volo e  $c$  la velocità della luce. La presenza del  $\gamma$ -flash induce un tempo morto che interrompe per un certo

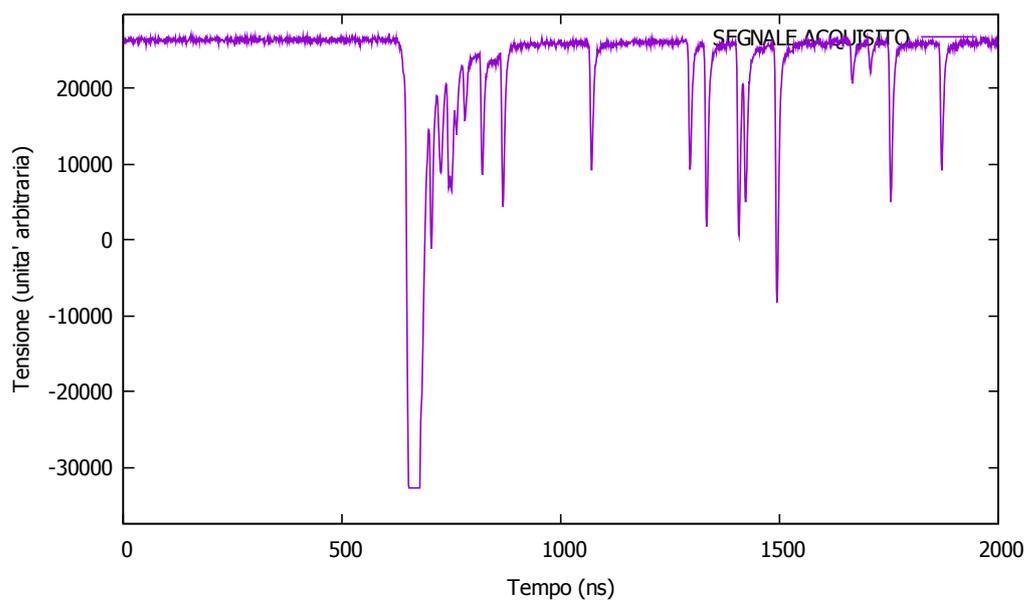


Figura 2.2: Grafico del segnale ottenuto da uno scintillatore al passaggio di particelle cariche prodotte nell'urto n-p su Polyethylene.

intervallo di tempo (che varia con il tipo di scintillatore e la sua elettronica) l'acquisizione di altri segnali prodotti dal passaggio delle particelle cariche, ma permette di avere un punto di riferimento per calibrare in tempo i vari rivelatori presenti.

## 2. La Rivelazione dei Neutroni

I segnali “nascosti” dal  $\gamma$ -flash corrispondono a particelle aventi una certa energia, per i protoni è stato realizzato un grafico (Fig.2.3) del tempo di volo, a cui è stato sottratto il tempo di volo dei fotoni  $T_\gamma$ , in funzione dell’energia. A circa 200 ns il valore dell’energia è 500 MeV, questo significa che l’energia

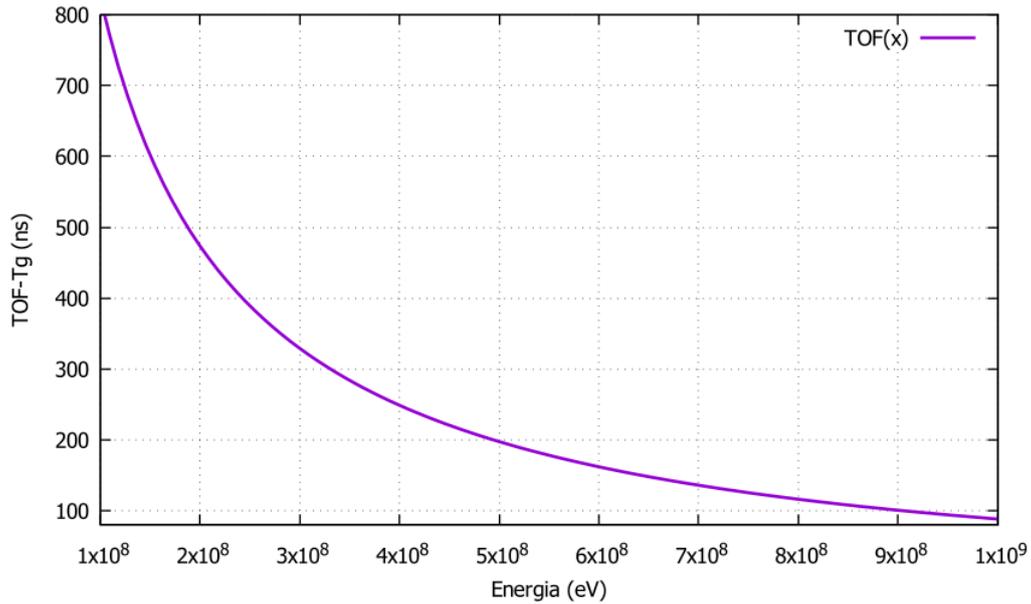


Figura 2.3: Tempo di volo dei protoni a partire dal  $\gamma$ -flash in funzione dell’energia.

dei protoni 200 ns dopo il  $\gamma$ -flash ( $\sim 820$  ns) è circa 500 MeV. Si può dedurre come una minor durata del segnale indotto dai fotoni del  $\gamma$ -flash aumenti lo spettro energetico delle particelle rivelabili.



# Capitolo 3

## Primo Prototipo

Lo scopo di un test con un semplice prototipo per la rivelazione di protoni di rinculo provenienti da una reazione  $H(n,p)$  è quello di verificare, come prima cosa essenziale, che la presenza del  $\gamma$ -flash non impedisca (nella nostra *facility* a tempo di volo) la rivelazione di neutroni di alta energia. In pratica si cerca di determinare qual è la massima energia (minimo tempo di volo) dei neutroni rivelabile.

### 3.1 Apparato sperimentale

L'apparato sperimentale utilizzato (schematizzato in Fig.3.1) si compone di un bersaglio di Polyethylene ( $H_4C_2$ ) posto sul fascio, su di esso incidono i neutroni producendo uno *scattering* elastico n-p sui nuclei del bersaglio. Ad una certa distanza  $A$  dalla targhetta sono posti i rivelatori, composti da Polyvinyltoluene  $H_{10}C_9$  (densità  $\rho = 1.032 \text{ g/cm}^3$ ), inclinati di un angolo  $\phi \sim 36^\circ$  rispetto alla direzione del fascio incidente. Sono stati usati più scintillatori di spessori diversi e connessi, separatamente, a modelli differenti di fotomoltiplicatori, che lavorano quindi a tensioni diverse. Sono state esaminate tre

### 3. Primo Prototipo

---

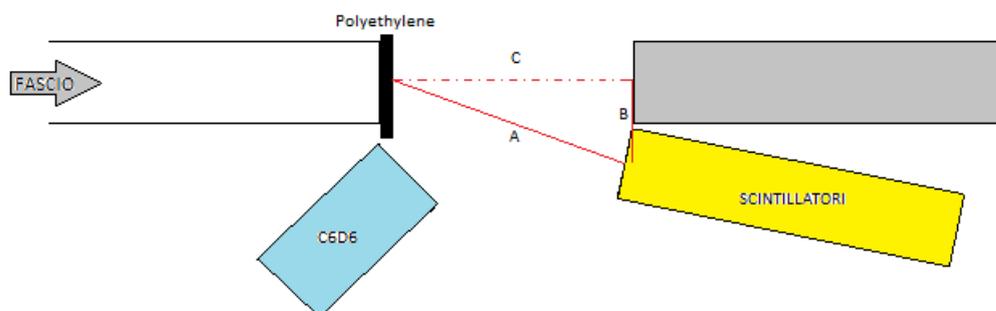


Figura 3.1: Schema della disposizione dell'apparato sperimentale utilizzato per il test del prototipo

diverse configurazioni in cui è stata variata la disposizione degli scintillatori, la distanza A dal bersaglio e la tensione applicata ai fotomoltiplicatori.

In Fig.3.1 sono raffigurati anche gli scintillatori  $C_6D_6$ , utilizzati per le misure di cattura neutronica ( $n, \gamma$ ). Verrà mostrato nel paragrafo 3.3 il confronto tra il loro tempo di recupero di acquisizione, a seguito del  $\gamma$ -flash, con quello degli scintillatori posti a rivelare i protoni rinculati dallo *scattering*.

In prima configurazione, *run* 102716 e 102717, si sono utilizzati cinque scintillatori, su due dei quali (secondo e terzo in posizione) sono stati acquisiti i segnali sia dall'anodo del fotomoltiplicatore che dall'ultimo dinodo per poter confrontare i segnali di tensione. In Tab.3.1 è rappresentato l'ordine di disposizione degli scintillatori il loro spessore in questa prima configurazione. I rivelatori non sono accostati tra loro, ma lo spessore d'aria tra essi è trascurabile in quanto la perdita di energia delle particelle è minima rispetto a quella persa negli scintillatori.

In seconda configurazione si è aggiunto un ulteriore scintillatore di spessore 3 cm, tra i primi due della prima configurazione. In più sono stati scambiati i fotomoltiplicatori associati agli scintillatori (il nome in DAQ è rimasto connesso al modello di PM). La Tab.3.2 mostra le caratteristiche della seconda configurazione, dove sono rimaste invariate le distanze A, B e C, con

### 3. Primo Prototipo

Posizione	Spessore (cm)	Nome DAQ	Tensione (V)	Modello PM
1°	0.5	SCIN1	700	Hamamatsu short
2°	1.3	SCIN2 SCIN3	700	Hamamatsu short
3°	3.0	SCIN4 SCIN5	700	Hades
4°	6.0	SCIN6	1300	Medea
5°	6.0	SCIN7	1600	Hamamatsu AMS

Tabella 3.1: Prima Configurazione (*run 102716*):  $A = 11$  cm,  $B = 6.5$  cm e  $C = 8$  cm

Posizione	Spessore (cm)	Nome DAQ	Tensione (V)	Modello PM
1°	0.5	SCIN2 SCIN3	850	Hamamatsu short
2°	3.0	SCIN8	800	Hamamatsu R762 (ATLAS)
3°	1.3	SCIN1	800	Hamamatsu short
4°	3.0	SCIN4 SCIN5	850	Hades
5°	6.0	SCIN6	1600	Medea
6°	6.0	SCIN7	1800	Hamamatsu AMS

Tabella 3.2: Seconda Configurazione (*run 102730*):  $A = 11$  cm,  $B = 6.5$  cm e  $C = 8$  cm

i valori:  $A = 11$  cm,  $B = 6.5$  cm e  $C = 8$  cm. In questa configurazione, parte dei *run* sono stati eseguiti senza il bersaglio di Polyethylene per studiare il segnale di  $\gamma$ -flash isolato, causato dai fotoni in uscita dal tubo a vuoto (gli stessi che, non interagendo con il bersaglio, arrivano ai rivelatori per primi).

La terza configurazione mantiene la stessa disposizione degli scintillatori della seconda configurazione, ma varia le distanze  $A$  e  $B$ , e conseguentemente quello dell'angolo che assume il valore di  $\phi \sim 22^\circ$ . In quest'ultima configurazione i rivelatori erano posti ad una distanza  $A = 20$  cm dal target in Polyethylene e a  $B = 7.5$  cm dall'asse del fascio incidente.

### 3. Primo Prototipo

## 3.2 Calcolo del *range* delle particelle cariche

È stata effettuata una stima del *range* delle particelle cariche attraverso il rivelatore utilizzando SRIM, un programma di simulazione Monte Carlo, che simula il passaggio di particelle nella materia calcolando la perdita di energia a causa della ionizzazione e la massima distanza, detta *range*, che una particella con una determinata energia riesce a percorrere in un certo materiale. Si è simulato, inserendo nel programma i dati relativi alla prima configurazione, il passaggio di un fascio di protoni (a diverse energie) attraverso sette strati: uno spessore di Polyethylene di 6 mm, 11 cm di aria e i cinque scintillatori in Polyvinyltoluene. Gli spazi tra i rivelatori (spessori di aria) sono stati trascurati in quanto erano dell'ordine di 1 o 2 cm. I protoni con energie superiori a qualche decina di MeV attraversano lunghe distanze in aria perdendo pochissima energia, se confrontata con quella persa nei rivelatori.

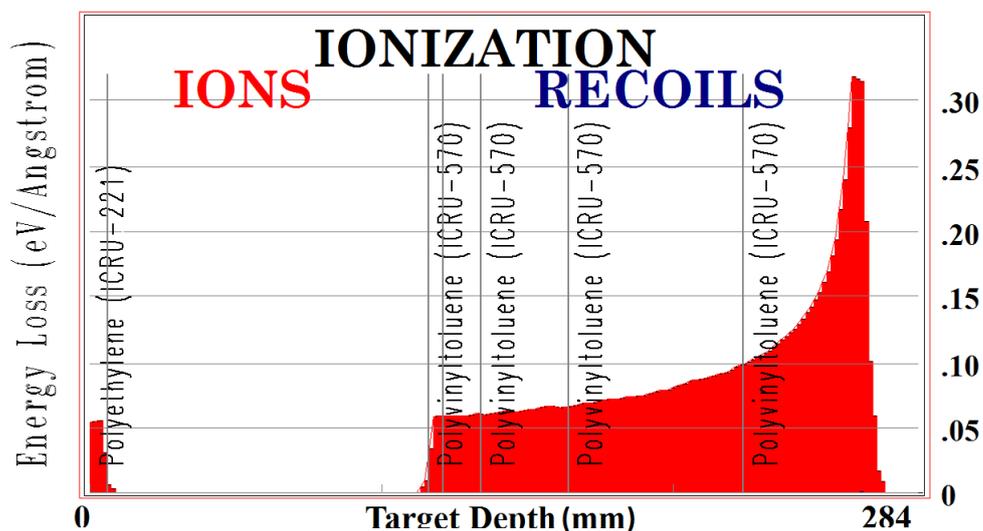


Figura 3.2: Perdita di energia di un fascio di protoni da 150 MeV nei vari materiali che compongono l'apparato sperimentale in prima configurazione.

### 3. Primo Prototipo

Questo effetto è visibile nel grafico in Fig.3.2 che rappresenta la perdita di energia in eV/Å in funzione della distanza percorsa da un protone in mm. La simulazione prevedeva un'energia iniziale dei protoni  $E_p = 150$  MeV, che si fermano nell'ultimo scintillatore, la quale corrisponde ad un'energia dei neutroni  $E_n = \frac{E_p}{\cos^2(36^\circ)} \simeq 230$  MeV. A questa energia  $E_p$  corrisponde un tempo di volo di circa 600 ns dopo il  $\gamma$ -flash (Fig.2.3).

In prima configurazione solo i protoni con un energia maggiore di 170 MeV attraversano senza fermarsi tutti i rivelatori, l'energia dei protoni che non si fermano nel materiale è riportata in Tab.3.3.

Materiale del mezzo	Spessore (mm)	Energia protoni (MeV)	Energia $\alpha$ (MeV)	Energia $^{12}\text{C}$ (MeV)
Polyethylene	6	> 23	> 100	> 550
Aria	110	> 25	> 100	> 575
Polyvinyltoulene	5	> 35	> 140	> 800
Polyvinyltoulene	13	> 55	> 220	> 1200
Polyvinyltoulene	30	> 90	> 325	> 1800
Polyvinyltoulene	60	> 130	> 500	> 2800
Polyvinyltoulene	60	> 170	> 650	> 3700

Tabella 3.3: valori dell'energia minima che protoni, alfa e nuclei di Carbonio-12 devono possedere per poter attraversare i singoli spessori, in prima configurazione, senza fermarsi all'interno.

Questo significa che già nel secondo rivelatore non passeranno protoni con energia inferiore a 35 MeV, nel terzo con  $E_p < 55$  MeV e così via. Allo stesso modo un segnale indotto dalla stessa particella in tutti i rivelatori, se è essa un protone, implica che possieda un'energia superiore ai 170 MeV.

Lo stesso calcolo effettuato in configurazione tre fornisce, invece, i risultati riportati in Tab.3.4.

### 3. Primo Prototipo

Materiale del mezzo	Spessore (mm)	Energia protoni (MeV)	Energia $\alpha$ (MeV)	Energia $^{12}\text{C}$ (MeV)
Polyethylene	6	> 23	> 100	> 550
Aria	200	> 25	> 100	> 575
Polyvinyltoluene	5	> 35	> 140	> 800
Polyvinyltoluene	30	> 80	> 300	> 1600
Polyvinyltoluene	13	> 85	> 350	> 2000
Polyvinyltoluene	30	> 110	> 450	> 2500
Polyvinyltoluene	60	> 145	> 600	> 3500
Polyvinyltoluene	60	> 180	> 700	> 4500

Tabella 3.4: valori dell'energia minima che protoni,  $\alpha$  e Carbonio-12 devono possedere per poter attraversare i singoli spessori, in terza configurazione, senza fermarsi all'interno.

In Fig.3.3 e Fig.3.4 sono rappresentati, in terza configurazione, i due grafici di perdita di energia per ionizzazione del fascio nei materiali. Nel primo caso ( $E_p = 90$  MeV,  $E_n \simeq 104$  MeV) tutti i protoni si fermano entro il quarto rivelatore, nel secondo caso ( $E_p = 180$  MeV,  $E_n \simeq 209$  MeV) tutti i protoni attraversano l'apparato sperimentale, perdendo energia per ionizzazione, ma non a sufficienza perché vengano fermati.

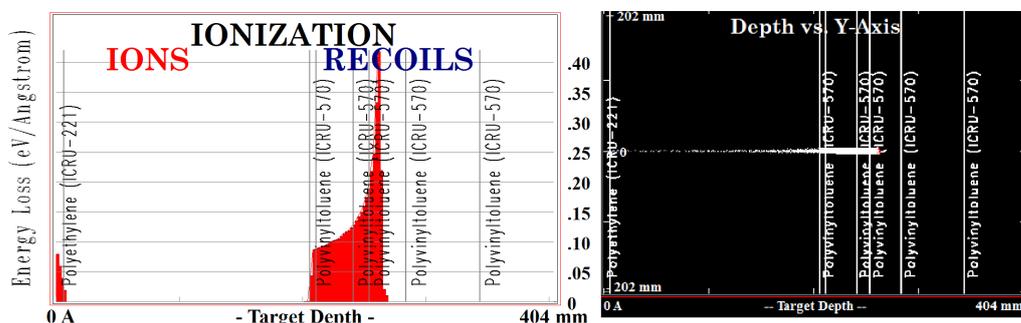


Figura 3.3: In terza configurazione: a sinistra perdita di energia per ionizzazione, a destra simulazione del passaggio del fascio a 90 MeV con stop nel quarto scintillatore.

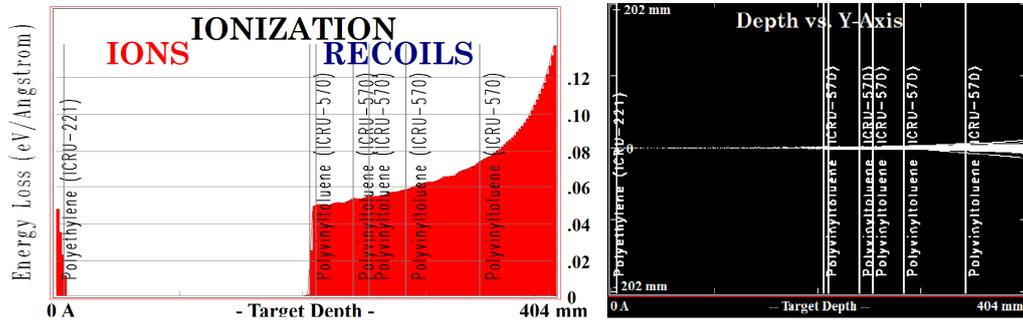


Figura 3.4: In terza configurazione: a sinistra perdita di energia per ionizzazione, a destra simulazione del passaggio del fascio a 180 MeV con *escape* da tutti gli scintillatori.

La seconda configurazione si differenzia dalla terza, solo per lo spessore d'aria tra il bersaglio e il primo rivelatore, passando da 110 a 200 mm. Confrontando la prima e la terza configurazione si nota come questa differenza di spessore non sia significativa nella perdita d'energia delle particelle, mentre lo è l'aggiunta di un ulteriore scintillatore. Attraverso questa simulazione risulta, quindi, preferibile utilizzare la seconda o la terza configurazione.

## 3.3 Test sotto fascio

Come già detto precedentemente, il test è stato effettuato in tre diverse configurazioni per confrontare i vari fattori in gioco tra loro e studiare la tecnica migliore da applicare alla rivelazione di neutroni di alta energia. Si andranno ora ad analizzare alcuni di questi fattori.

### 3.3.1 Tempo di recupero

Per studiare al meglio il problema del  $\gamma$ -flash, una parte dei *run* in seconda configurazione sono stati effettuati senza il bersaglio di Polyethylene, sia per confrontare il segnale indotto dai fotoni con lo stesso nel rivelatore  $C_6D_6$ ,

### 3. Primo Prototipo

---

sia per misurare il tempo di recupero del funzionamento dell'elettronica per ogni scintillatore (*Recovery Baseline*, tempo di ritorno alla base), utile per sapere la durata dell'intervallo di tempo in cui non c'è acquisizione di eventi indotti da protoni o da altre particelle cariche. Durante questo intervallo temporale, il  $\gamma$ -flash preclude, infatti, dalla rivelazione i protoni di più alta energia, sottolineando l'importanza dell'uso di fotomoltiplicatori con il più breve tempo di *Recovery Baseline*, che permettono la rivelazione di un più vasto spettro energetico di protoni (ovvero di neutroni).

Nome DAQ	<i>Recovery Baseline</i> (ns)	Energia protoni dopo <i>Recovery Baseline</i> (MeV)	Ritorno al 5% del picco (ns)	Energia protoni dopo ritorno al 5% (MeV)
SCIN2	236	424	90	960
SCIN3	240	419	80	1000
SCIN8	407	240	116	795
SCIN1	265	381	77	1000
SCIN4	296	346	osc	-
SCIN6	884	96	sat	-
SCIN7	247	404	57	> 1000
C6D6	1680	57	sat	-

Tabella 3.5: i valori riportati in tabella sono riferiti al run 102731, effettuato in configurazione 2, senza il *target* di polyethylene per studiare il segnale del  $\gamma$ -flash. I dati rappresentano i tempi di *recovery* e di ritorno al 5% del picco dei vari scintillatori e le energie che possederebbero i protoni dopo questi tempi.

In Tabella 3.5 è possibile vedere come la *recovery* della *baseline* degli scintillatori avvenga più velocemente ( $\sim 200$  ns) rispetto a quella del rivelatore C<sub>6</sub>D<sub>6</sub> ( $> 1 \mu$ s). Oltre al tempo di ritorno alla base è stato misurato quello per ritornare al 5% dell'altezza del picco, tranne per lo SCIN6 e il C<sub>6</sub>D<sub>6</sub> a causa della saturazione del segnale che non permette di calcolare l'altezza del picco e per lo SCIN4 che presenta delle piccole oscillazioni nel segnale.

### 3. Primo Prototipo

Il calcolo dell'energia posseduta dai protoni dopo aver attraversato il materiale scintillante per un certo intervallo di tempo, permette di vedere come SCIN1, SCIN3 e SCIN7 possiedano il miglior tempo di *Recovery Baseline*, permettendo la rivelazione anche dei protoni più energetici. La migliore pre-

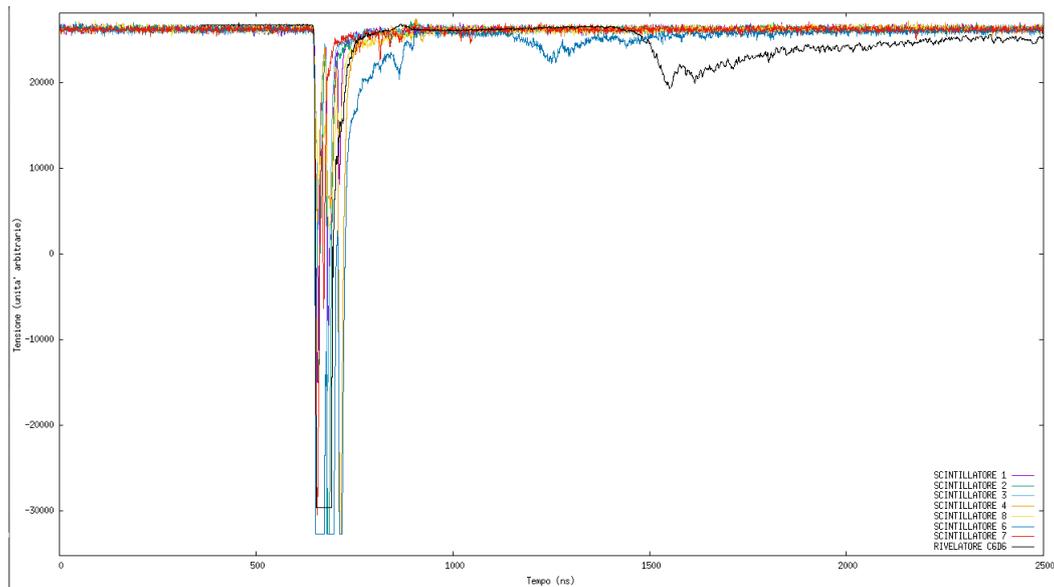


Figura 3.5: Grafico dell'impulso di tensione misurato dai vari fotomoltiplicatori in funzione del tempo in ns.

stazione nella risposta al  $\gamma$ -flash degli scintillatori organici utilizzati, rispetto al rivelatore  $C_6D_6$  è visivamente percepibile nel grafico in Fig.3.5.

Lo stesso confronto è stato effettuato nei *run* con la targhetta di Polyethylene inserita. I dati riportati in Tab.3.6 sono stati presi dal *run* 102716 in prima configurazione, in questo caso è molto più difficile individuare il punto effettivo di ritorno alla base a causa della presenza di segnali dovuti alle particelle cariche prodotte dall'interazione dei neutroni con il bersaglio di Polyethylene o da oscillazioni del segnale durante il ritorno alla base.

### 3. Primo Prototipo

---

Nome DAQ	<i>Recovery</i> <i>Baseline</i> (ns)	Energia protoni dopo <i>Recovery</i> <i>Baseline</i> (MeV)	Ritorno al 5% del picco (ns)	Energia protoni dopo ritorno al 5% (MeV)
SCIN1	300	330	116	580
SCIN2	200	490	150	631
SCIN4	220	450	155	614
SCIN6	340	291	250	393
SCIN7	260	379	90	975
C6D6	4000	8	830	100

Tabella 3.6: i valori riportati in tabella sono riferiti al *run* 102716, effettuato in configurazione 1. I dati rappresentano i tempi di recovery e di ritorno al 5% del picco dei vari scintillatori e le energie possedute dai protoni dopo questi tempi.

#### 3.3.2 Pacchetti dedicati e parassiti

Come spiegato nel paragrafo 1.2 durante la descrizione della *facility* n\_TOF, i protoni, usati per la produzione del fascio di neutroni, arrivano in pacchetti che possono essere parassiti o dedicati. Durante l'analisi dati, infatti, sono stati visti due tipi di picchi, dovuti al passaggio di fotoni, che presentavano alcune differenze nonostante appartenessero allo stesso scintillatore e allo stesso *run*.

Prendendo in analisi sempre il *run* senza il bersaglio in Polyethylene, per visualizzare meglio i segnali di  $\gamma$ -flash (Fig.3.6 e Fig.3.7), si nota come entrambi i segnali tornino alla *baseline* con lo stesso tempo, ma nel caso del "segnale parassita" (causato da fotoni prodotti dal pacchetto parassita) si ha un recupero più veloce per tornare ad un'altezza pari al 5% del picco. Questo non implica necessariamente un migliore risultato con l'utilizzo di pacchetti parassiti in quanto, sebbene il tempo morto indotto dal  $\gamma$ -flash sia più breve, i fasci parassiti contengono un minor numero di protoni che producono un minor numero di neutroni rivelabili.

### 3. Primo Prototipo

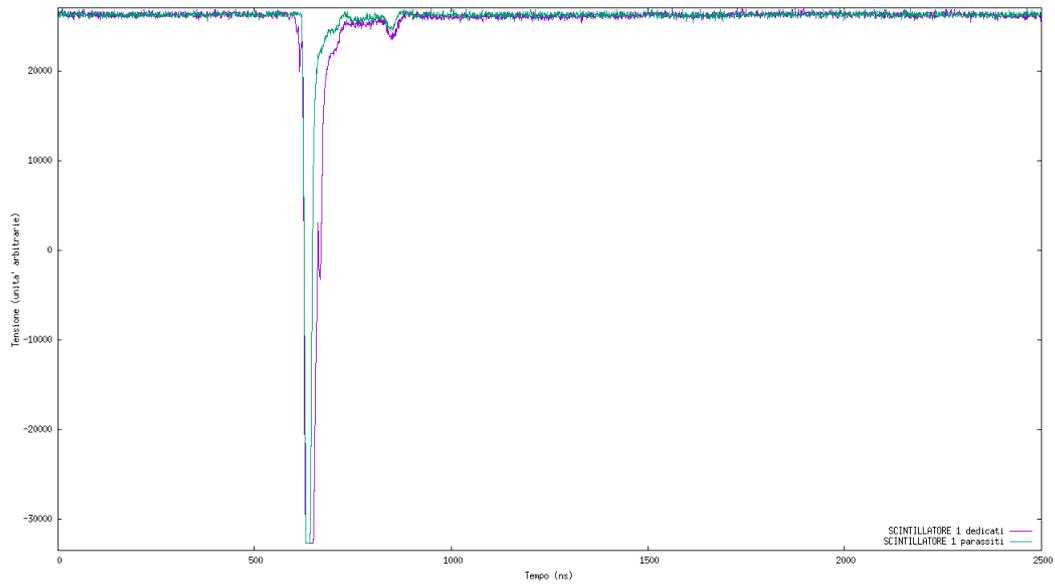


Figura 3.6: Segnali di SCIN1, al terzo posto in configurazione-2. I segnali causati dai fotoni prodotti da pacchetti parassiti (in verde) e dedicati (in viola) sono sovrapposti per evidenziarne le differenze.

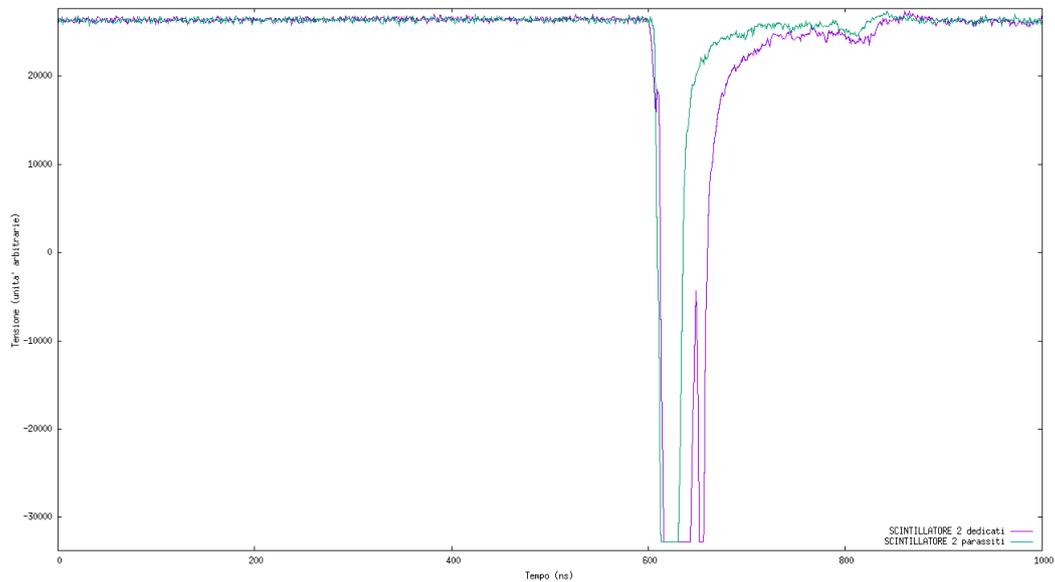


Figura 3.7: Segnali di SCIN2, al primo posto in configurazione-2. I segnali causati dai fotoni prodotti da pacchetti parassiti (in verde) e dedicati (in viola) sono sovrapposti per evidenziarne le differenze.

### 3. Primo Prototipo

---

#### 3.3.3 Tensione applicata a fotomoltiplicatori

È utile effettuare uno studio legato alla giusta tensione da applicare al fotomoltiplicatore, in quanto da essa dipende la qualità del segnale che viene acquisito. Se ad esempio la tensione applicata è troppo alta, il segnale satura causando una perdita di informazioni sulla durata del  $\gamma$ -flash e un maggior tempo di recupero del fotomoltiplicatore. In Fig.3.8 sono rappresentati i segnali prodotti dallo stesso scintillatore (SCIN4) a tre diverse tensioni: 1300 mV (in viola), 1500 mV (in verde) e 1600 mV (in azzurro). Risulta evidente

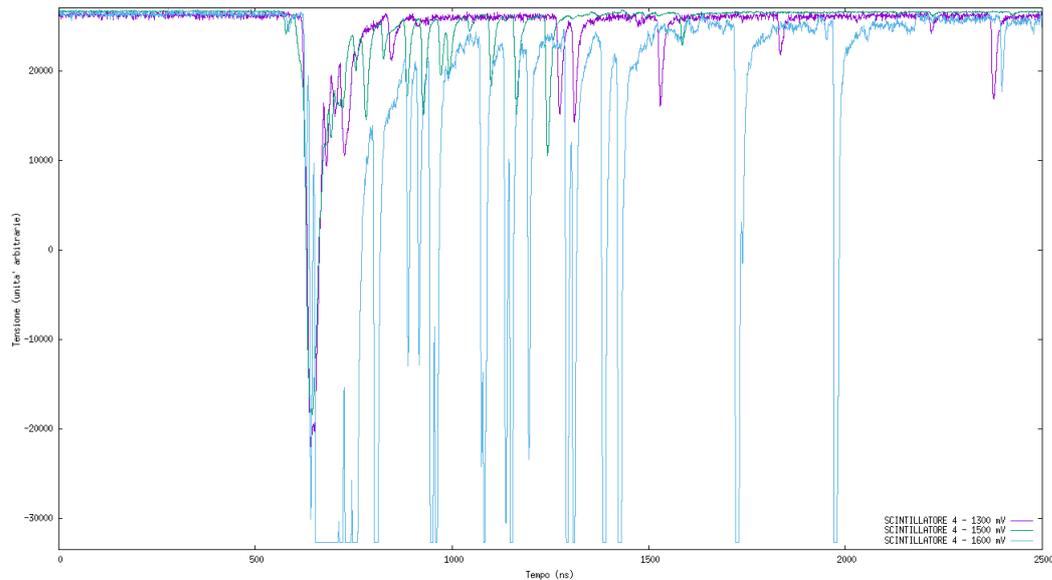


Figura 3.8: Il grafico rappresenta, sovrapposti, i segnali acquisiti dallo SCIN4 a tre diverse tensioni.

come con l'ultimo valore di tensione il segnale satura, producendo picchi "tagliati" anche per gli eventi successivi al  $\gamma$ -flash.

### 3.4 Analisi dei segnali

Per conteggiare gli eventi rivelati si devono analizzare le coincidenze dei segnali nei vari scintillatori. Per effettuare quest'analisi è meglio utilizzare i dati raccolti in seconda configurazione in quanto, tramite la simulazione illustrata al paragrafo 3.2, si è visto come si ottengano informazioni migliori con un rivelatore in più e inoltre, rispetto alla terza (a parità di scintillatori), si possiedono dati raccolti in assenza di Polyethylene, che aiutano a discriminare il segnale di  $\gamma$ -flash da quelli di particelle cariche.

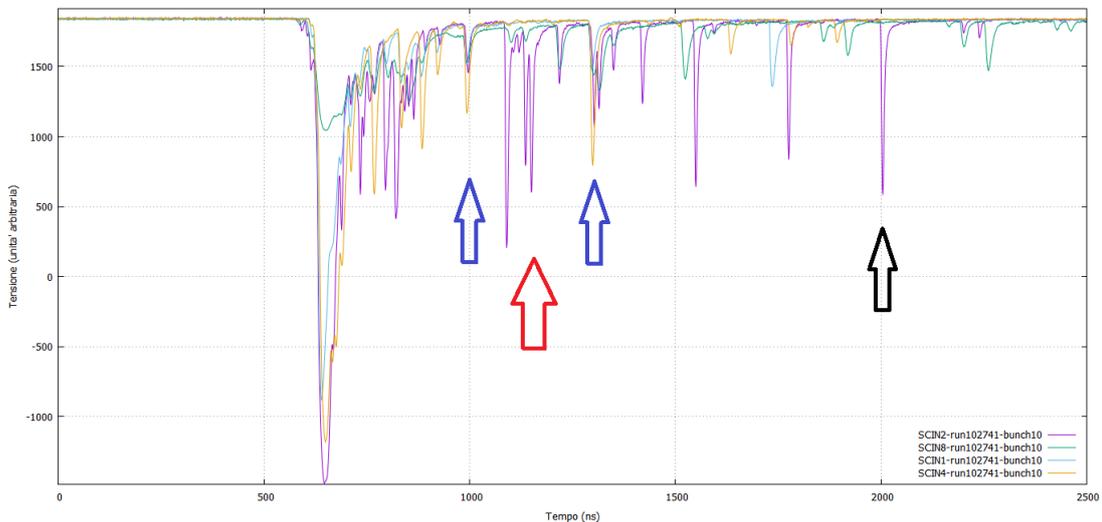


Figura 3.9: Segnali dei primi 4 scintillatori in seconda configurazione: *run* 102741, *bunch* 10.

In Fig.3.9 sono rappresentati i segnali dei primi quattro scintillatori (in ordine dal più vicino al fascio: SCIN2, SCIN8, SCIN1 e SCIN4) del *run* 102741, *bunch* 10. Le frecce indicano tre diversi tipi di coincidenza:

- la freccia nera mostra un segnale rivelato solo da SCIN2 in cui probabilmente la particella si è fermata, per cui non ci sono eventi nei successivi rivelatori.;

### 3. Primo Prototipo

---

- la freccia rossa mostra tre picchi rivelati dai primi due scintillatori;
- le frecce blu due eventi rivelati in tutti e quattro i rivelatori;

Le diverse altezze dei segnali dipendono dall'energia persa dalla particella per ionizzazione e dalla tensione applicata ai fotomoltiplicatori.

# Conclusioni

A seguito di questo primo test sotto fascio si possono trarre alcune conclusioni sulla possibilità di rivelare neutroni ad alta energia ad n\_TOF tramite la tecnica del tempo di volo. Si è innanzitutto visto come sia preferibile l'utilizzo di una serie di rivelatori in coincidenza, cioè un telescopio di scintillatori, per discriminare meglio le particelle cariche che attraversano l'apparato alle diverse energie. Avere più di uno scintillatore offre la possibilità di analizzare le coincidenze dei segnali e misurando l'ampiezza (proporzionale all'energia persa dalla particella che ha attraversato il materiale) è possibile ricostruire l'energia totale depositata dalle particelle. Infine si è visto come il  $\gamma$ -flash, utilizzato nella tecnica del tempo di volo per calibrare in tempo i rivelatori, non costituisca un problema fondamentale per la regione di alta energia (ovvero per gli eventi che temporalmente arrivano subito dopo il  $\gamma$ -flash). Esso infatti acceca i rivelatori studiati per un tempo limitato, dell'ordine dei 100 ns, permettendo di raggiungere energie fino al GeV.

I risultati del test sono, quindi, positivi e il prototipo, nella sua semplicità, risponde alle esigenze richieste anche nel campo delle alte energie.

# Bibliografia

- [AB] Buffler, Brooks, Allie, Binns, Dangendorf, Langen, Nolte, Schuhmacher: *Measurement of neutron energy spectra from 15 to 150 MeV using stacked liquid scintillators*, 2002.
- [VD] Dangendorf, Nolte, Roos, Schuhmacher, Siebert, Weyrauch: *Proton recoil telescopes for fluence measurement in neutron beams of 20 – 200 MeV energy*, 2001.
- [HS] Schuhmacher, Brede, Dangendorf, Kuhfuss, Meulders, Newhauser, Nolte: *Quasi-monoenergetic neutron beams with energies from 25 to 70 MeV*, 1999.
- [PS] Schillebeeckx, Becker, Danon, Guber, Harada, Heyse, Junghans, Kopecky, Massimi, Moxon, Otuka, Sirakov, Volev: *Determination of resonance parameters and their covariances from neutron induced reaction cross section data*, 2012.
- [RN] Nolte, Allie, Brooks, Buffler, Dangendorf, Meulders, Schuhmacher, Smit, Weierganz: *Cross section for neutrons-induced fission of  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{209}\text{Bi}$  and  $^{nat}\text{Pb}$  in the energy range from 33 to 200 MeV measured relative to n-p scattering*, 2006.

## BIBLIOGRAFIA

---

- [PD] Doll, Eberhard, Fink, Hansmeyer, Heeringa, Klages, Krupp, Wilczynski, Wolf: *Status of neutron-proton scattering in the energy range from 20 to 70 MeV*, Germany.
- [WL] William R. Leo, Springer-Verlag Berlin Heidelberg: *Techniques for nuclear and particle physics experiments*, 1994.
- [KK] Kenneth S. Krane, John Wiley & Sons Inc: *Introductory Nuclear Physics*, 1987.
- [PR] P. Rinard: *Neutron interactions with matter* cap.12

# Ringraziamenti

Inizio ringraziando il mio relatore, *Cristian Massimi*, per essere stato sempre disponibile e per avermi fornito tutte le spiegazioni e i chiarimenti di cui avevo bisogno; ringrazio, inoltre, il Prof. *Gianni Vannini* e *Federica*, per tutti i loro consigli e per avermi guidato nella stesura di questo lavoro.

Ringrazio i miei genitori, *Giuseppe* e *Daniela*, per il loro  $\infty$  supporto e per aver sempre creduto in me.

Ringrazio, poi, tutti i miei colleghi - in particolare *Maria Francesca*, *Federico* e *Marta* - per l'aiuto e la compagnia in questi tre anni, e tutti i miei amici, che hanno festeggiato con me ogni successo e condiviso ogni fallimento, supportandomi e sopportandomi nel corso di questi primi tre bellissimi anni universitari! Vorrei dire grazie anche a *Gy* e *Caio*, per tutte le risate fatte durante gli incontri del fantastico CheDepreBoloTeam.

Infine, un ringraziamento molto più che speciale va alla mia compagna di (dis)avventure, amica, coinquilina e collega, *Sonia*: spero avremo tante altre colline da svalicare assieme, anche se, dopo otto anni, non divideremo lo stesso banco. Ringraziarti di “tutto” non sarebbe sufficiente ♡.