

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI  
FISICA E ASTRONOMIA

Corso di laurea in fisica

**Studio di schermature  
per una facility a neutroni veloci  
presso il ciclotrone di SPES-LNL**

**Relatore:** Riccardo Rando

**Laureanda:** Marta Mensi

Anno Accademico 2015 / 2016

## Sommario

Introduzione .....	3
1. DANNI DA RADIAZIONE .....	4
1.1. <i>SEE</i> .....	5
1.2. <i>Neutroni atmosferici</i> .....	7
1.3. <i>Produzione di neutroni da acceleratore</i> .....	9
2. LA FACILITY NEPIR .....	11
2.1. <i>Il ciclotrone del progetto SPES</i> .....	11
2.2. <i>Sorgenti disponibili a NEPIR</i> .....	12
2.2.1. <i>Sorgente QMN</i> .....	13
2.2.1. <i>ANEM la sorgente a spettro continuo</i> .....	16
2.1. <i>Layout della facility</i> .....	17
3. STRUMENTI PER I CALCOLI MONTE CARLO.....	21
3.1. <i>FLUKA e IGI</i> .....	22
3.1. <i>Calcoli preliminari</i> .....	23
4. SCHERMATURE PER SORGENTE QMN.....	24
4.1. <i>Parametrizzazione della sorgente QMN</i> .....	24
4.1. <i>Attivazione dell'aria per la sorgente QMN</i> .....	26
4.1. <i>Dose equivalente depositata dalla sorgente QMN</i> .....	29
5. SCHERMATURA PER ANEM .....	31
5.1. <i>Modellizzazione della sorgente ANEM</i> .....	31
5.1. <i>Risultati delle simulazioni relative al target ANEM</i> .....	33
CONCLUSIONI .....	35
BIBLIOGRAFIA .....	37

## Introduzione

L'introduzione di tecnologie sempre più scalate nella fabbricazione di dispositivi elettronici ha come effetto negativo una accentuata sensibilità dei sistemi elettronici agli effetti delle radiazioni. Lo studio dei danni da radiazione, un tempo limitato a componenti usate in condizioni limite, nucleare civile e militare, spazio e più recentemente fisica ai grandi acceleratori, si è esteso anche all'elettronica di tutti i giorni. Infatti, se sulla superficie terrestre i livelli di radiazione sono bassi, enorme è il numero di sistemi elettronici, molti dei quali operano in applicazioni sensibili (sicurezze, medicali, etc.).

I raggi cosmici primari provenienti dallo spazio interagiscono con l'atmosfera generando in un processo a cascata numerose particelle, tra cui anche neutroni energetici. Questo fenomeno costituisce la causa principale della radiazione sulla superficie terrestre, insieme alla presenza di isotopi radioattivi dei materiali che la compongono.

Il passaggio di particelle ionizzanti in un dispositivo a semiconduttore può creare accumulo di carica negli ossidi, ed effetti cumulativi di disordine del reticolo cristallino del silicio, con progressiva variazione dei parametri di funzionamento del dispositivo.

Inoltre una singola particella può rilasciare una quantità di carica sufficiente da indurre un malfunzionamento, temporaneo o permanente, del dispositivo: si tratta dei cosiddetti "Single Event Effects" (SEE).

I neutroni non liberano direttamente carica elettrica nel semiconduttore ma possono indurre break-up di un nucleo, con conseguente emissione di frammenti ionizzanti, oppure neutroni energetici possono cedere sufficiente energia ad un atomo del cristallo tale da scalarlo dalla sua posizione, rendendolo una particella ionizzante. Quindi anche un singolo neutrone può provocare un SEE.

Per molto tempo la tolleranza dell'elettronica agli effetti dei neutroni venne studiata solo per applicazioni avioniche e più recentemente anche per la fisica delle alte energie e in ambito spaziale.

Tuttavia oggi le tensioni di soglia di un dispositivo elettronico sono in continua diminuzione a causa della loro miniaturizzazione dei dispositivi elettronici e questo li rende sempre più sensibili a SEE. Anche se il flusso neutronico sulla superficie terrestre risulta limitato, il numero di sistemi elettronici sensibili a tali effetti è enorme, rendendo fondamentali test di tolleranza ai SEE indotti da neutroni atmosferici.

Per studiare la sensibilità a SEE dovuti a neutroni di dispositivi elettronici sono state realizzate facility che operano o effettuando misure dirette su numerosi dispositivi ad alta

quota (dove il flusso di neutroni è più intenso rispetto al livello del mare) oppure irraggiando qualche dispositivo con flussi intensi di neutroni prodotti artificialmente, aumentando quindi di molti ordini di grandezza il flusso naturale di neutroni.

Facility di questo secondo tipo cercano di ottenere uno spettro in energia il più possibile simile a quello dei neutroni atmosferici, oppure si utilizzano fasci di neutroni monocromatici a varie energie integrando l'effetto con tecniche di calcolo.

La realizzazione del ciclotrone da 70 MeV del progetto SPES, ai Laboratori Nazionali dell'INFN di Legnaro, apre la possibilità di costruire una facility (NEPIR) per effettuare test di sensibilità ai SEE indotti da neutroni su dispositivi e sistemi elettronici.

NEPIR sfrutterà i protoni da 70 MeV estratti dal ciclotrone per produrre fasci intensi di neutroni con spettro atmosferico (ANEM) e quasi-monoenergetico (QMN).

L'utilizzo di sorgenti neutroniche impone un accurato studio dei problemi inerenti alle tematiche di radioprotezione. Per garantire il rispetto dei limiti imposti dalle leggi vigenti si rende necessaria una valutazione della dose e dell'attivazione dell'aria nella sala sperimentale.

Questa tesi si occupa di studiare, attraverso simulazioni Monte Carlo FLUKA, il sistema di schermatura dell'area bersaglio di NEPIR, per proporre un layout ottimizzato della facility.

## **1. DANNI DA RADIAZIONE**

La radiazione incidente su un dispositivo elettronico può causare malfunzionamenti che dipendono dalla natura della radiazione, dal punto d'interazione, dal dispositivo e da come viene depositata l'energia. Una particella carica attraversando il materiale che costituisce il circuito elettronico può rilasciare energia fondamentalmente in due modi: ionizzando il mezzo o interagendo con i nuclei atomici delle particelle che costituiscono il reticolo.

Le particelle cariche, attraversando un mezzo (nei circuiti microelettronici si tratta essenzialmente di silicio ed ossido di silicio), perdono energia per ionizzazione, generando coppie elettrone-lacuna; gli elettroni liberati nell'ossido di silicio, avendo mobilità più elevata delle lacune, riescono a diffondere, mentre le lacune tendono a rimanere intrappolate generando un campo elettrico netto che può alterare la soglia di funzionamento di un transistor.

Il fenomeno per cui le prestazioni di un circuito elettronico sono deteriorate a causa del caricamento degli isolanti prende il nome di *total ionization damage*.

Quando la radiazione incidente interagisce direttamente coi nuclei degli atomi del semiconduttore, questi possono ricevere energia sufficiente ad essere scalzati dalla propria sede, deformando la struttura del reticolo cristallino. Il danno subito dal cristallo è detto *total displacement damage*, ed è principalmente causato da particelle massive (protoni, neutroni, alfa ma anche gamma energetici). Gli effetti risultanti, come la creazione di stati-trappola intermedi nella band-gap del cristallo, sono importanti nei rivelatori a semiconduttore ma possono avere un'influenza negativa anche sui microcircuiti elettronici deteriorandone le prestazioni, ad esempio causando un aumento della corrente di leakage in un transistor.

### **1.1. SEE**

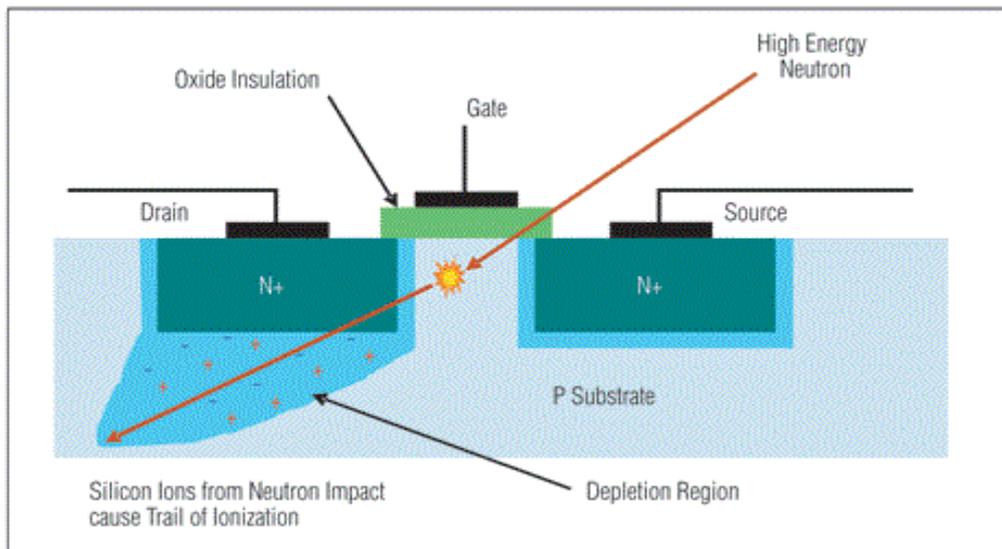
Esistono altri tipi di effetti indotti dalla radiazione che, a differenza del *displacement damage* e dello *ionization damage*, che sono danni cumulativi proporzionali alla dose depositata nel materiale, possono essere causati istantaneamente da una singola particella che interagisce con un nodo sensibile del circuito. Questo tipo di effetti sono detti *Single Event Effects* (SEE). Se una particella genera un'alta densità di carica in vicinanza di un nodo di un transistor essa può indurre una risposta indesiderata del circuito come, ad esempio, l'accensione di transistor parassiti o l'alterazione dello stato logico in una cella di memoria.

Non essendo carichi, i neutroni sono in grado di indurre SEE solo per via indiretta, tramite l'interazione nucleare con un atomo (Figura 1.1). Il nucleo può essere spezzato in frammenti ionizzanti oppure scalzato dalla sua posizione, generando in entrambi i casi una forte densità di ionizzazione del mezzo.

Da notare che un atomo di Si, scalzato da un neutrone abbastanza energetico, può a sua volta spostare altri atomi di Si liberando perciò una consistente quantità di carica in una regione ristretta.

La carica sufficiente per generare un SEE decresce col diminuire delle sue dimensioni: sono sufficienti una decina di fC per dispositivi costruiti in tecnologie micrometriche e ben di meno in moderne tecnologie sub-micrometriche.

La probabilità che si verifichi un SEE è funzione della sensibilità a tale tipo di SEE del dispositivo che si analizza.



**Figura 1.1 - Rappresentazione schematica della generazione di un SEE per l'interazione nucleare di un neutrone con un atomo di Si di un transistor. Il nucleo di Si viene scalzato dalla sua posizione nel reticolo cristallino e prende a viaggiare nel cristallo lasciando una densa scia di ionizzazione. La carica liberata viene raccolta dal campo elettrico che circonda il nodo di drain.**

Tale probabilità viene misurata in funzione del LET, Linear Energy Transfer, della particella incidente. Nel caso di protoni o neutroni la probabilità viene data in funzione della loro energia.

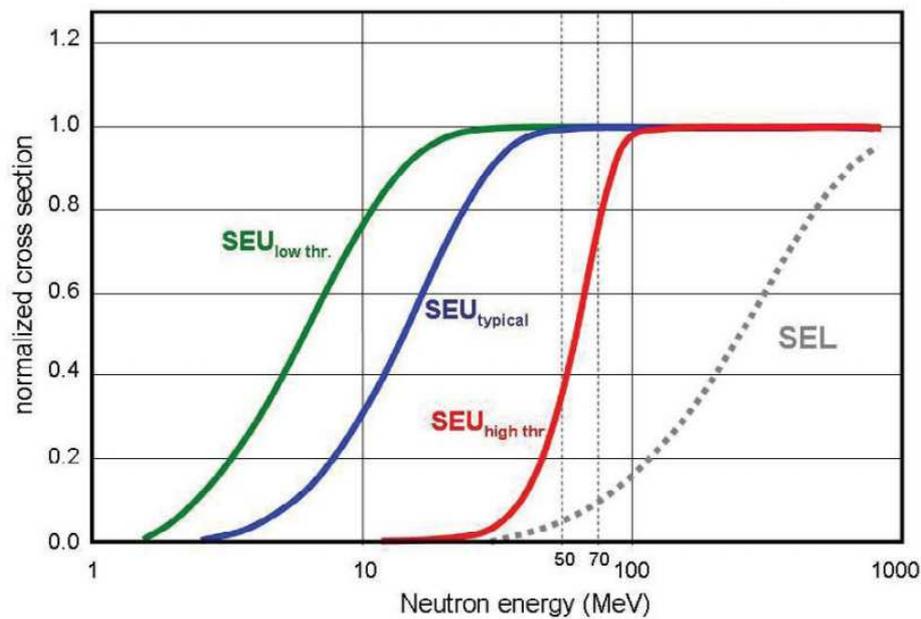
I SEE si possono dividere in due categorie: *soft-errors*, errori momentanei che, se rilevati, possono essere corretti e *hard-errors*, che possono essere fatali per il circuito se non esistono sistemi di protezione.

Comuni esempi di *hard-errors* sono:

- single event latchup (SEL); il latchup è una forma di corto circuito che può instaurarsi in un circuito integrato: un effetto da evento singolo può essere l'attivazione di un percorso parassita, in condizioni normali non attivo, a bassa impedenza tra adiacenti sezioni drogate *p* e *n* che compongono il circuito;
- single event burnout (SEB), un meccanismo distruttivo simile al latchup;
- single event gate rupture (SEGR); in un transistor MOSFET, uno ione che rilascia sufficiente carica nel substrato sotto al contatto di gate può rompere il dielettrico isolante che separa i due nodi, inducendo una forte corrente di leakage dal gate; questo comporta la perdita del controllo sul funzionamento del transistor.

Esempi di *soft-errors* sono:

- *single event upset* (SEU), consiste nel cambiamento di stato in un circuito logico. A seguito dell'impatto di uno ione può cambiare stato un solo bit oppure possono essere modificate più celle di memoria adiacenti (*multiple bit upset*);
- *single event functioning interrupt* (SEFI), un soft error nel quale si verifica l'interruzione temporanea di un circuito logico;
- *single event transient*, uno o più impulsi di tensione che si propagano attraverso un circuito senza alterarne lo stato logico, ma che possono essere interpretati dall'elettronica collegata a questo circuito come un vero segnale.



**Figura 1.2 – Tipiche sezioni d’urto normalizzate per SEU e SEL in funzione dell’energia dei neutroni.**

La probabilità che si verifichi un SEE in un circuito esposto ad un campo di radiazione è espressa come una sezione d’urto. Figura 1.2 riporta alcuni esempi di sezione d’urto di SEE prodotti da neutroni: il SEE appare come un fenomeno a soglia, per cui serve che la particella incidente abbia un’energia minima per produrre un effetto. Per i neutroni, valori di soglia tipica sono di decine di MeV, tuttavia questo valore è in diminuzione per i circuiti realizzati con le tecnologie più moderne, ed esistono misure su dispositivi recenti che hanno evidenziato sensibilità anche a neutroni tra 1 MeV e 10MeV. All’aumentare dell’energia della particella aumenta anche la probabilità di realizzare un SEE, fino a raggiungere un valore di plateau.

## 1.2. Neutroni atmosferici

Neutroni di energia sufficiente a causare SEE sono naturalmente presenti al livello del mare per azione dei raggi cosmici energetici che interagiscono con gli strati alti dell'atmosfera: la loro distribuzione energetica va dai neutroni termici fino alle decine di GeV. Il flusso di questi neutroni è funzione dell'altezza sul livello del mare (profondità atmosferica), della latitudine (zona geomagnetica) e della fase di attività solare [1], tuttavia la forma dello spettro sopra i 10 MeV è sostanzialmente indipendente da altezza e latitudine. Figura 1.3 mostra il flusso neutronico differenziale di riferimento, misurato nella città di New York, al livello del mare, al valore medio della modulazione riconducibile all'attività solare.

Integrando sull'energia a partire da 1 MeV, si ottiene un flusso totale di  $21 \text{ n cm}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ ; si osservi che quasi il 40% dei neutroni atmosferici, con  $E > 1 \text{ MeV}$ , ha energia compresa nell'intervallo tra 1 e 10 MeV, mentre più del 60 % ha energia compresa tra 10 e 60 MeV.

La risposta di un dispositivo al flusso neutronico atmosferico si può misurare monitorando il funzionamento di un gran numero di questi dispositivi in una località dove questo flusso sia naturalmente abbondante: in alta montagna, sopra i 3000 m, dove il flusso è un ordine di grandezza più grande rispetto al livello del mare. Tuttavia questo approccio è poco pratico e soprattutto richiede tempi di acquisizione dati lunghi settimane o mesi. Un'alternativa è esporre un solo dispositivo campione ad un flusso neutronico molto più alto di quello naturale, presso una sorgente neutronica artificiale.

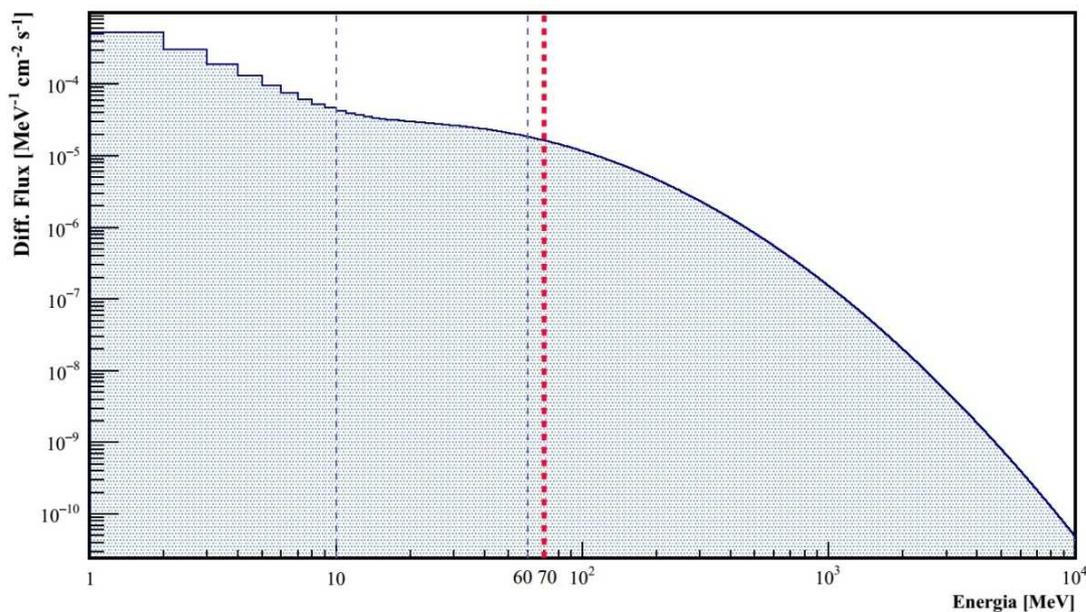


Figura 1.3 – Flusso differenziale di neutroni atmosferici con energie superiori ad 1 MeV ricavato da un fit di dati sperimentali misurati all'esterno, al livello del mare, nella città di New York ad un livello medio di attività solare.

### 1.3.

Esistono sostanzialmente due tipi di sorgenti neutroniche artificiali: quelle realizzate con un reattore e quelle basate su acceleratore. Lo spettro energetico dei neutroni da reattore è inadeguato per riprodurre lo spettro atmosferico perché, seppure caratterizzato da flussi molto abbondanti fino all'energia attorno ad 1 MeV, ad energie più elevate cala troppo rapidamente e non supera generalmente i 10 MeV (Figura 1.4).

Per lo studio degli effetti dei neutroni atmosferici, è dunque conveniente usare una sorgente di neutroni da acceleratore, il cui spettro dipende fortemente dal tipo di convertitore usato per generare neutroni a partire da un fascio primario di particelle cariche, generalmente protoni o deutoni, e dall'energia del fascio primario.

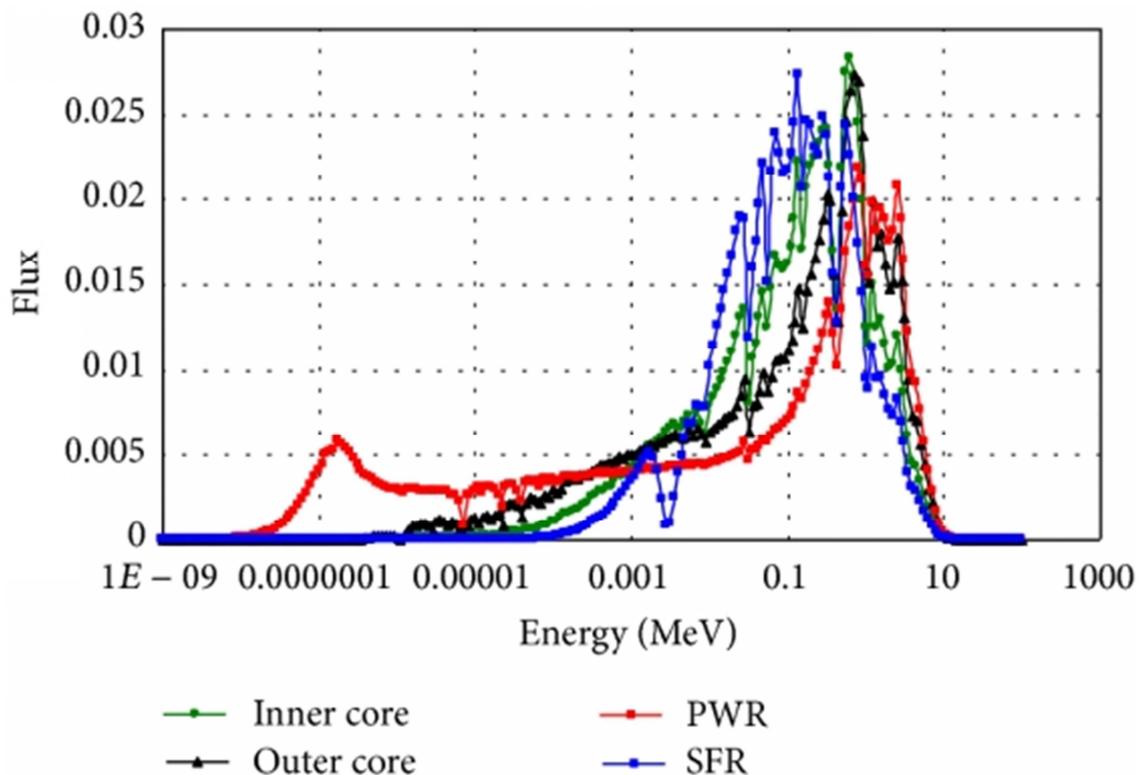
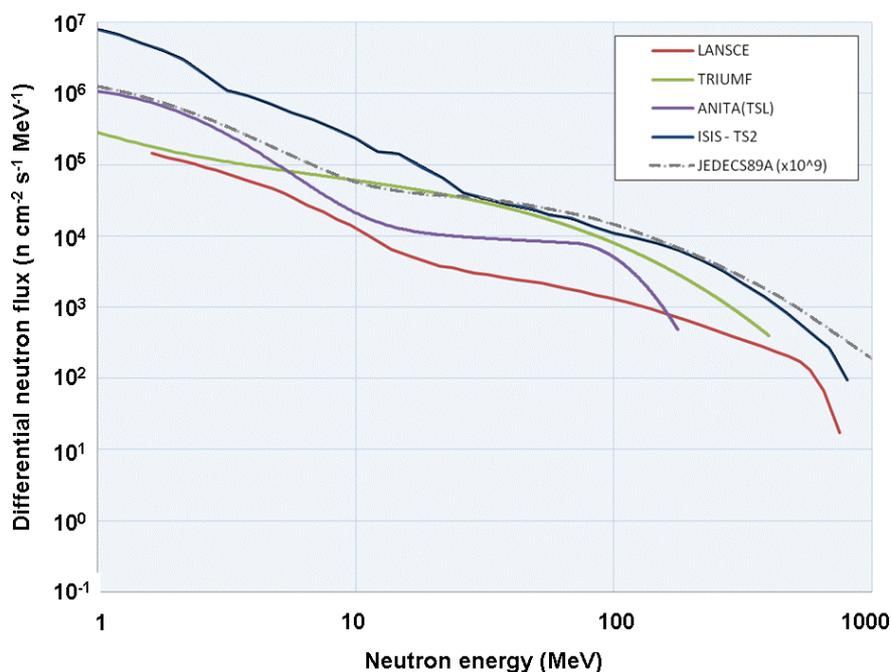


Figura 1.4 – Confronto fra spettri di diversi tipi di reattori nucleari (Super-Critical water-cooled Fast Reactor, all'interno e all'esterno del nucleo; Pressurized Water Reactor; Sodium-cooled Fast Reactor) [2]. Notare il *cutoff* energetico preso i 10 MeV comune a tutti.

In Figura 1.5 sono confrontati gli spettri di emissione prodotti da diverse facility impiegate per effettuare irraggiamenti con neutroni simil-atmosferici. La linea tratteggiata (JEDEC) è la curva di riferimento (illustrata in Figura 1.3) moltiplicata per un fattore di accelerazione  $F = 10^9$ . Per fattore di accelerazione si intende il rapporto fra il flusso di neutroni disponibile presso una facility e il flusso dei neutroni naturalmente presenti in atmosfera.

In una sorgente basata su acceleratore, protoni o deutoni vengono proiettati contro un bersaglio di spessore e materiale scelti opportunamente per ottenere uno spettro neutronico con determinate caratteristiche.



**Figura 1.5 – Spettri energetici differenziali di diverse sorgenti di neutroni da acceleratore usate per studiare gli effetti dei neutroni atmosferici. La curva tratteggiata (JEDEC) è la curva di riferimento (illustrata in Figura 1.3) moltiplicata per un fattore  $F = 10^9$ . La facility di irraggiamento ChipIR, che si trova presso il laboratorio ISIS (nel Regno Unito) è quella più performante, con un fattore di accelerazione  $F = 3 \times 10^9$ .**

Per energie del fascio primario inferiori ai 30 MeV, le reazioni più efficienti risultano date da nuclei leggeri su bersagli a basso Z (Li, Be...). Ad energie più alte si possono produrre neutroni sfruttando il processo di spallazione e diventa vantaggioso l'uso di materiali ad alto Z. Proiettili di energia superiore ai 30 MeV hanno lunghezza d'onda ridotta associata più piccola della dimensione del nucleo, abbastanza da consentire un urto elastico con singoli nucleoni i quali urteranno a cascata altri nucleoni nello stesso nucleo (intra-nuclear cascade). Le particelle che ottengono energia sufficiente a sfuggire dal nucleo vengono emesse principalmente lungo la direzione della particella incidente. L'energia residua è distribuita fra i nucleoni rimasti, lasciando il nucleo in uno stato fortemente eccitato che può portare all'espulsione di altri nucleoni. Attraverso il meccanismo di spallazione si possono ottenere quindi neutroni "in avanti" con energia confrontabile con quella del proiettile e neutroni emessi isotropicamente attraverso la diseccitazione dei nuclei per evaporazione.

Le facility attuali lavorano principalmente con protoni ad alta energia (1GeV) e bersagli di Uranio, Tungsteno o Tantalio, ottenendo un flusso elevato di neutroni con spettro di energia continuo fra 0 MeV e l'energia del fascio primario.

## 2.

Presso i Laboratori Nazionali dell'INFN di Legnaro, nell'ambito del progetto SPES, è in fase di collaudo un ciclotrone per protoni di energia selezionabile fra 35 e 70 MeV ad altissima corrente, fino a 750  $\mu$ A. Un tale fascio primario può essere sfruttato per generare intensi fasci di neutroni con diverse caratteristiche, con distribuzione energetica che arriva fino all'energia del fascio primario.

NEPIR (NEutron and Proton IRradiation facility) è il nome di una facility, attualmente in fase di progetto, che sfrutta il fascio del ciclotrone dei Laboratori di Legnaro per produrre intensi fasci di neutroni con diverse caratteristiche.

### 2.1.

SPES (Selective Production of Exotic Species) [3] è il progetto in fase di realizzazione presso i Laboratori Nazionali dell'INFN di Legnaro, con lo scopo di produrre fasci di ioni esotici per la ricerca nucleare di base. A questo scopo è stato progettato e costruito un bersaglio di potenza in carburo di uranio dal quale verranno estratte le specie esotiche da studiare.

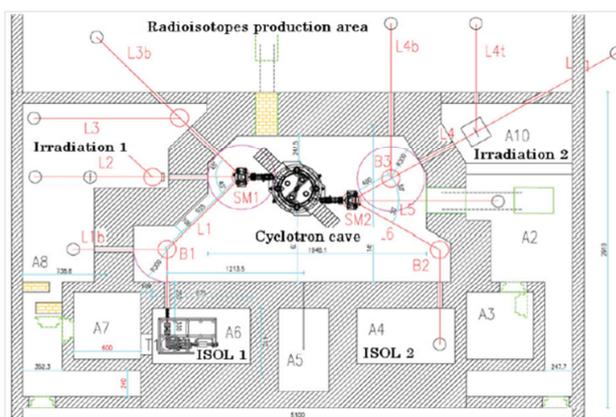


Figura 2.1 –A sinistra una planimetria di parte del piano interrato del laboratorio SPES: al centro è visibile il ciclotrone da cui dipartono due linee di trasporto di fascio. A destra una fotografia del ciclotrone scattata in occasione della visita organizzata per l'edizione 2016 della conferenza UCANS: Union of Compact Accelerator Drive Neutron Sources (Legnaro).

L'iniettore del progetto SPES è un ciclotrone (Figura 2.1), con due uscite in grado di operare contemporaneamente, per accelerare protoni in fasci di alta corrente (750  $\mu$ A in totale) ad energie variabili tra i 35 e 70 MeV. Attualmente il ciclotrone è in fase di collaudo: il fascio erogato è iniettato in un beam dump progettato e realizzato presso i Laboratori.

Lo stesso laboratorio sta per essere attrezzato per perseguire anche linee di ricerca applicata, fra cui la produzione di radionuclidi di interesse medico e la produzione di fasci di neutroni per lo studio degli effetti indotti dai neutroni su dispositivi elettronici e su materiali.

## **2.2. Sorgenti disponibili a NEPIR**

La facility per irraggiamento NEPIR è costituita di tre sottosistemi: una sorgente per produrre neutroni con fascio simil-atmosferico, una seconda sorgente per produrre fasci Quasi Monoenergetici di Neutroni (QMN) ed una linea protonica utilizzabile anche per test.

La sorgente per neutroni atmosferici porta il nome di ANEM: Atmospheric Neutron EMulator. Si tratta di un target bimetallico per produrre fasci di protoni con distribuzione energetica molto simile a quella atmosferica nell'intervallo di energia fra 1 e 65 MeV. Pur non potendo riprodurre l'intero spettro atmosferico (che si estende fino alle decine di GeV) copre l'intervallo energetico in cui si trova più del 60% dei neutroni veloci (di energia  $E > 1$  MeV) presenti in atmosfera collocandosi quindi come uno strumento di studio degli effetti dei neutroni atmosferici su dispositivi elettronici più che di validazione di sistemi. Non è inoltre adatta allo studio di effetti come SEL e SEB, che hanno energie di soglia oltre i 200 MeV.

Una sorgente QMN (Quasi Mono-energetic Neutron ) consente di studiare i meccanismi d'interazione con la materia in funzione dell'energia del neutrone [4][5][6]. Molti ambiti di ricerca traggono vantaggio nell'utilizzo di sorgenti neutroniche quasi mono-energetiche: fisica nucleare, studi riguardanti effetti dei neutroni sull'elettronica, esperimenti di benchmark per le schermature, effetti della radiazione sui tessuti viventi.

Attualmente esistono solo cinque facilities QMN nel mondo: TIARA, CYRIC, RCNP in Giappone, iThemba in Sud Africa e TSL in Svezia (unica europea in grado di operare ad energie superiori ai 40 MeV) il cui termine attività è previsto entro pochi anni.

### 2.2.1. Sorgente QMN

Fasci energetici QMN vengono prodotti utilizzando bersagli sottili di Li o Be attraverso la reazione  ${}^7\text{Li}(p,xn)$  e  ${}^9\text{Be}(p,xn)$ . I protoni che attraversano il target senza causare reazioni nucleari vengono deflessi magneticamente verso il beam dump. Lo spettro neutronico risultante nella direzione del fascio incidente presenta un picco marcato con energia simile a quella del protone, ma anche una coda a bassa energia dovuta a reazioni di break-up nucleare (Figura 2.2). Ciascuna componente contribuisce in modo circa uguale alla resa neutronica, tuttavia la frazione di neutroni ad alta energia presente nel picco decresce rapidamente con l'angolo (rispetto al fascio d'incidenza) mentre la coda a bassa energia resta sostanzialmente inalterata fino a  $45^\circ$ . Questa dipendenza angolare viene sfruttata per correggere i dati a  $0^\circ$  andando ad utilizzare quelli ottenuti ad ampi angoli ( $15^\circ$  o  $30^\circ$ ) tramite il metodo di sottrazione della coda [7].

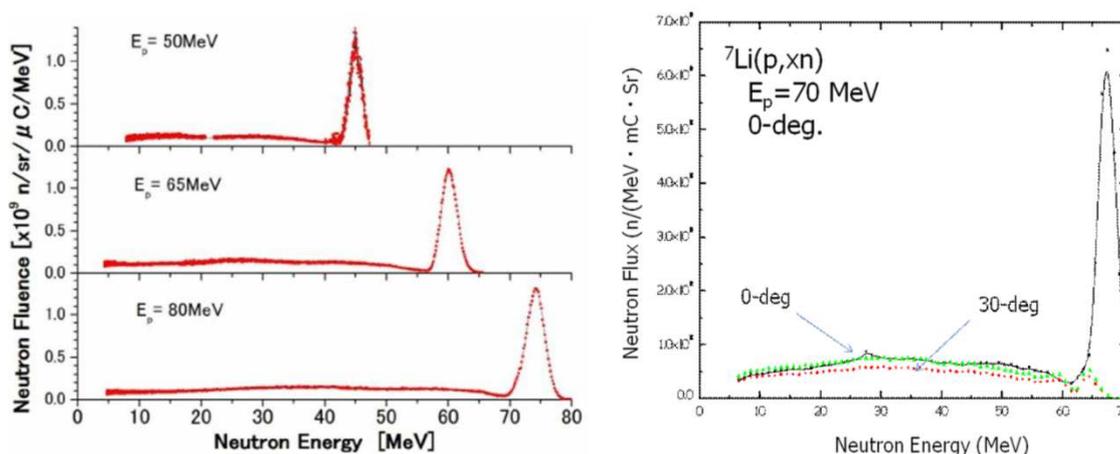


Figura 2.2 –A sinistra spettri energetici QMN dalla reazione  $\text{Li}(p,xn)$  nella direzione in avanti ( $0^\circ$ ) per varie energie del fascio primario, misurate presso la facility TIARA. A destra una rappresentazione concettuale del processo di correzione dello spettro generato da protoni da 70 MeV su Li, realizzata sfruttando l'emissione a  $30^\circ$ .

A determinare la larghezza del picco monoenergetico sono: la perdita di energia dei protoni primari nel bersaglio e il fatto che le reazioni  ${}^7\text{Li}(p,xn)$  e  ${}^9\text{Be}(p,xn)$  possono raggiungere sia lo stato fondamentale che il primo eccitato. Nella pratica si predilige il Li dato che fornisce un picco più stretto del Be a parità di spessore.

Per effettuare la correzione sui dati a  $0^\circ$  è necessario avere a disposizione misure ad ampi angoli. Le configurazioni realizzabili sono due: utilizzare un collimatore che permette di selezionare diversi angoli in modo discreto (iThemba, Figura 2.3) oppure sfruttare la

soluzione sviluppata a RCNP nella quale il bersaglio si può muovere lungo una circonferenza e il target viene ruotato in modo che i protoni vi incidano ortogonalmente. Questa configurazione offre il vantaggio di poter scegliere l'angolo in modo continuo (Figura 2.4).

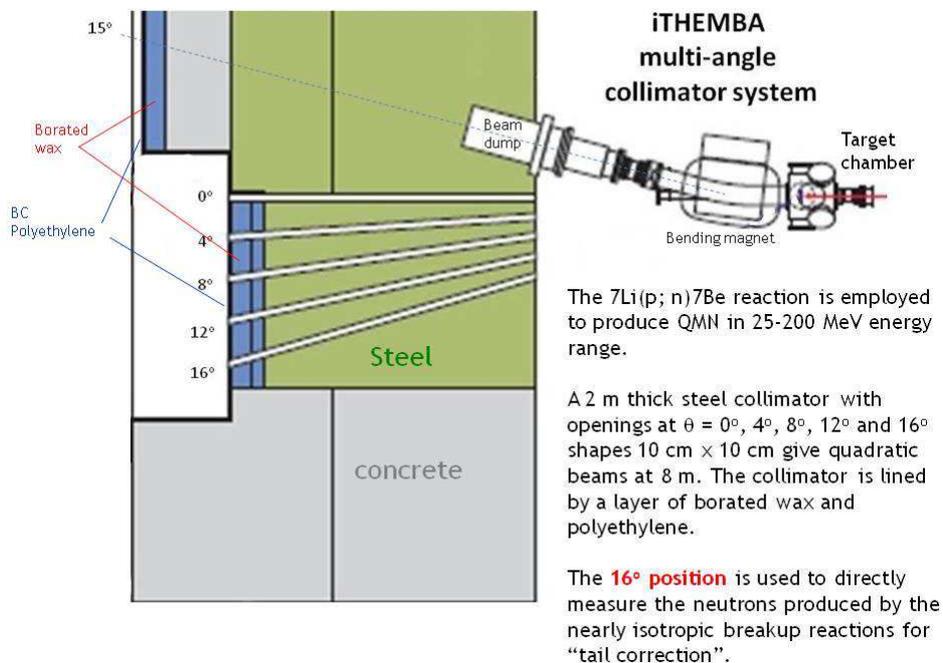


Figura 2.3 – Rappresentazione schematica del sistema di collimatori multi-angolare impiegato nel laboratorio i-Themba (Sud Africa) per la correzione della coda energetica a bassa energia del fascio QMN.

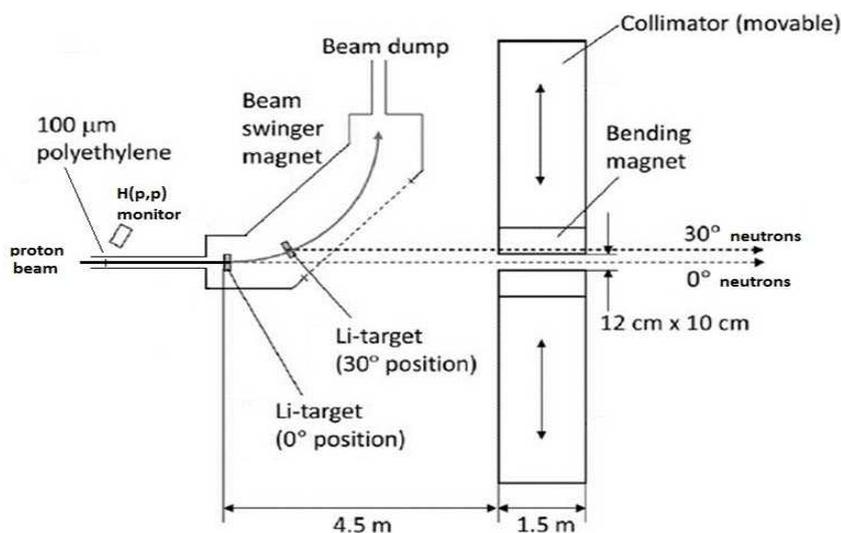


Figura 2.4 – L'approccio sviluppato presso la facility RCNP (Università di Osaka, in Giappone) per la correzione del fascio QMN sfruttando spettri ad ampio angolo. Un solo collimatore mobile è impiegato assieme ad un bersaglio con posizione variabile dentro il magnete di deflessione del fascio primario.

Il ciclotrone di SPES permetterà la produzione di fasci intensi di neutroni quasi mono energetici con la possibilità di definire l'energia del picco nel range disponibile (30-70 MeV). Per raggiungere energie del picco inferiori ai 30 MeV sarà necessario installare un degradatore (in C) che intercetta il fascio protonico prima di arrivare sul bersaglio di Li.

Il design più recente prevede che il fascio di protoni estratto dal ciclotrone giunga nella sala di NEPIR a piano terra e che la corrente sul bersaglio non superi 10  $\mu\text{A}$  in modo da limitare il flusso di neutroni verso la sala del ciclotrone. In futuro, per ottenere alti flussi sarà necessario portare la linea di fascio di NEPIR al piano superiore (livello del terreno) con l'utilizzo di una chicane magnetica.

In Tabella 2.1 sono confrontati i flussi QMN (riferiti ai neutroni monoenergetici nel picco) a NEPIR e nella altre facility QMN con  $E > 20\text{MeV}$ .

**Tabella 2.1 – Flussi neutronici di fasci con spettro QMN ( $E_n > 20 \text{ MeV}$ ) disponibili presso diverse facilities nel mondo, confrontati con la facility NEPIR alimentata da una corrente di protoni da 10  $\mu\text{A}$ .**

LAB	Proton beam energy (MeV)	Distance (m) <i>Li</i> target – test point	Mono-energetic neutron (peak) flux at the test point
TIARA	40-90	12.9	$\sim 3.5\text{-}5 \times 10^3 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ for max 1-3 $\mu\text{A}$
CRYIC	14-80	1.2	$10^6 \text{ n cm}^{-2}$ for 3 $\mu\text{A}$
RCNP	100-400	10	$10^4 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ for 1 $\mu\text{A}$
iTHEMBA	25-200	8	$1\text{-}1.5 \times 10^4 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ for typical 3 $\mu\text{A}$
TSL	25-200	3.73	$\sim 3\text{-}5 \times 10^5 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ for max 5-10 $\mu\text{A}$
NEPIR 1.0	30-70	3	$\sim 5 \times 10^5 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ for max 10 $\mu\text{A}$

### 2.2.1. ANEM la sorgente a spettro continuo

ANEM si basa su un approccio complementare rispetto alla sorgente QMN. Invece che effettuare misure a varie energie ed integrare il risultato per il dato dispositivo qui il campo neutronico è modellato a partire dal fatto che la specifica applicazione permette un singola misura integrata.

Lo scopo principale è studiare gli effetti dei neutroni atmosferici sui dispositivi elettronici ad altitudini elevate (per applicazioni avioniche) ma soprattutto sul livello del mare.

Per facility di questo tipo un parametro importante è il fattore di accelerazione  $F$  (tipicamente intorno a  $10^8 - 10^9$ ).

Questo impone un'accurata progettazione del bersaglio in modo tale che lo spettro coincida con quello richiesto e contestualmente sia in grado di sostenere alta potenza.

Per la produzione di uno spettro simil-atmosferico l'idea è usare una convoluzione pesata degli spettri neutronici prodotti da diversi materiali. Si ottiene un risultato soddisfacente utilizzando un target rotante composto da una corona circolare di W (spessore 5 mm) e un settore circolare in Be (spessore 24 mm); il fascio protonico (linea rossa in Figura 2.5 Figura 2.6) intercetta periodicamente il settore di Be permettendo di modellare la forma dello spettro in uscita.

Inoltre la rotazione del bersaglio ha il vantaggio di distribuire il calore prodotto nelle interazioni su un volume più ampio, garantendo un buon raffreddamento.

All'interno della camera a vuoto, visibile in in Figura 2.5, le due componenti di materiali differenti sono montate su un tamburo in Al puro che ne costituisce il sostegno. Una corona di Cu schiacciata tra i settori da cui è composto il bersaglio e brasata sull'Al garantisce la propagazione del calore dal target al tamburo. Sull'asse centrale è collocato l'albero motore e i condotti per il sistema di raffreddamento elicoidale ad acqua.

Il W è ottimo nell'approssimare lo spettro a basse energie ma risulta poco popolato nella regione sopra i 30-40 MeV, mentre il Be ha uno spettro praticamente piatto fino a circa 65 MeV e viene utilizzato per aggiustare la resa neutronica in vicinanza della regione di cut-off, intorno ai 70 MeV (Figura 2.6). Lo spessore del Be è limitato a 24 mm in modo da evitare fenomeni di blistering causati dall'accumulo di H.

Simulazioni mostrano che utilizzando un target con il 19% di Be e la restante parte in W si ottiene la performance migliore per lo spettro neutronico atmosferico nella regione dei neutroni veloci. La massima corrente tollerabile dal bersaglio ANEM è stata stimata attraverso simulazioni termomeccaniche di 50  $\mu\text{A}$  (valore conservativo).

Alla distanza di 6 m, con una corrente di  $10 \mu\text{A}$  di protoni da 70 MeV, il fattore di accelerazione della facility NEPIR sarebbe  $F=10^9$ , valore molto competitivo.

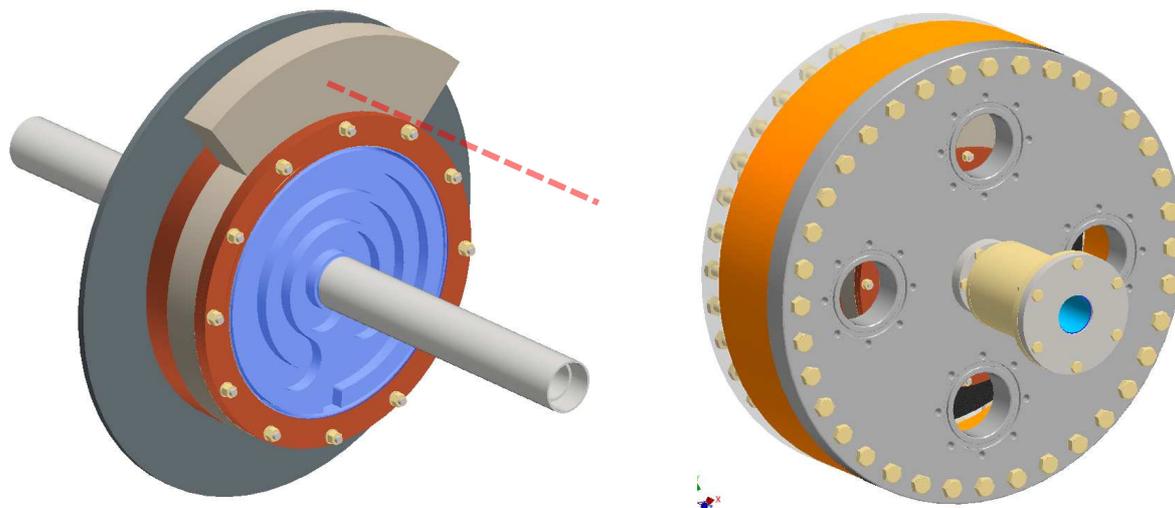


Figura 2.5 – A sinistra una rappresentazione tridimensionale del rotore del sistema ANEM: i settori di Be e W (raggio 16 cm) di ANEM intercettano periodicamente il fascio di protoni che corre parallelo all’asse di rotazione, alla distanza di 13 cm. In blu è visibile il circuito di raffreddamento (ad acqua) elicoidale dentro il tamburo rotante che sostiene i settori irraggiati. In rosso le flange di rame sfruttate per asportare il calore dai settori verso l’acqua. A destra è rappresentata la camera a vuoto che contiene il rotore.

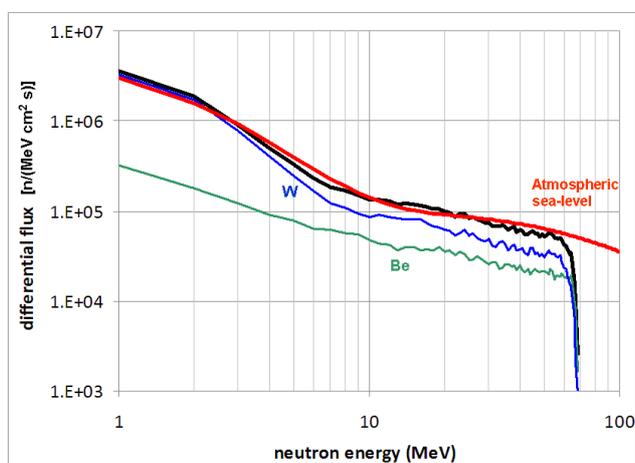


Figura 2.6 – Lo spettro generato da ANEM è la somma pesata degli spettri generati da ciascun settore: Be 18% (in verde), W 82% (in blu). In nero è rappresentato il flusso neutronico generato da ANEM (a 6 m di distanza) con  $30 \mu\text{A}$  di corrente di protoni da 70 MeV, confrontato con la curva di riferimento per i neutroni atmosferici moltiplicata per un fattore  $F = 3 \times 10^9$ .

## 2.1.

In Figura 2.7 è mostrata una proiezione orizzontale della facility su cui è basata la geometria implementata nelle simulazioni Monte Carlo FLUKA. I protoni estratti dal ciclotrone

vengono portati attraverso due quadrupoli fino al magnete di switching che permette di selezionare la linea di utilizzo L2. Dal magnete al muro restano 2,75 m nei quali è posizionata l'ottica, per il trasporto e la messa a fuoco del fascio, e il degradatore di energia per i protoni. A un metro dal muro di comunicazione con la sala del ciclotrone è posizionato ANEM seguito, alla distanza di 50 cm, dalla sorgente QMN; i due bersagli condividono la stessa linea protonica e sono dunque posizionati uno di seguito all'altro perciò, per permettere l'utilizzo della sorgente quasi monoenergetica, la corona di W deve essere dotata di un foro adeguato al passaggio del fascio.

A seguire è posizionato il magnete di deflessione per deviare verso un beam dump il fascio di protoni che emerge dal bersaglio sottile di QMN. I neutroni generati dall'una o l'altra sorgente continuano invece nella direzione del fascio primario verso un collimatore di Fe e si propagano fino al termine della sala dove è stato posizionato un assorbitore di neutroni mobile, per ora un semplice blocco di cemento.

Nel progetto di SPES è già presente la porta di comunicazione con l'esterno; questa verrà parzialmente murata, una volta ultimati i lavori, in modo da ridurre la larghezza a un metro e aggiunto un labirinto esterno in grado di arginare efficacemente la fuoriuscita della dose.

È previsto, per sviluppi futuri, l'ampliamento dell'esperimento con il suo trasferimento al piano superiore (ground level). Per tale scopo è già realizzata l'apertura per il passaggio del fascio di protoni con angolo di  $20^\circ$  rispetto all'orizzontale, in modo da avere la linea in uscita dal muro del ciclotrone a un'altezza di 340 cm circa dal pavimento (vedi Figura 2.10).

Il progetto attuale prevede invece di avere una corrente massima di  $10 \mu\text{A}$  in modo da semplificare il design della facility, ridurre i costi e limitare il più possibile i problemi di radioprotezione. I bersagli e l'impianto di pompaggio possono essere collocati in un bunker di dimensioni ridotte efficacemente schermato, come in Figura 2.8.

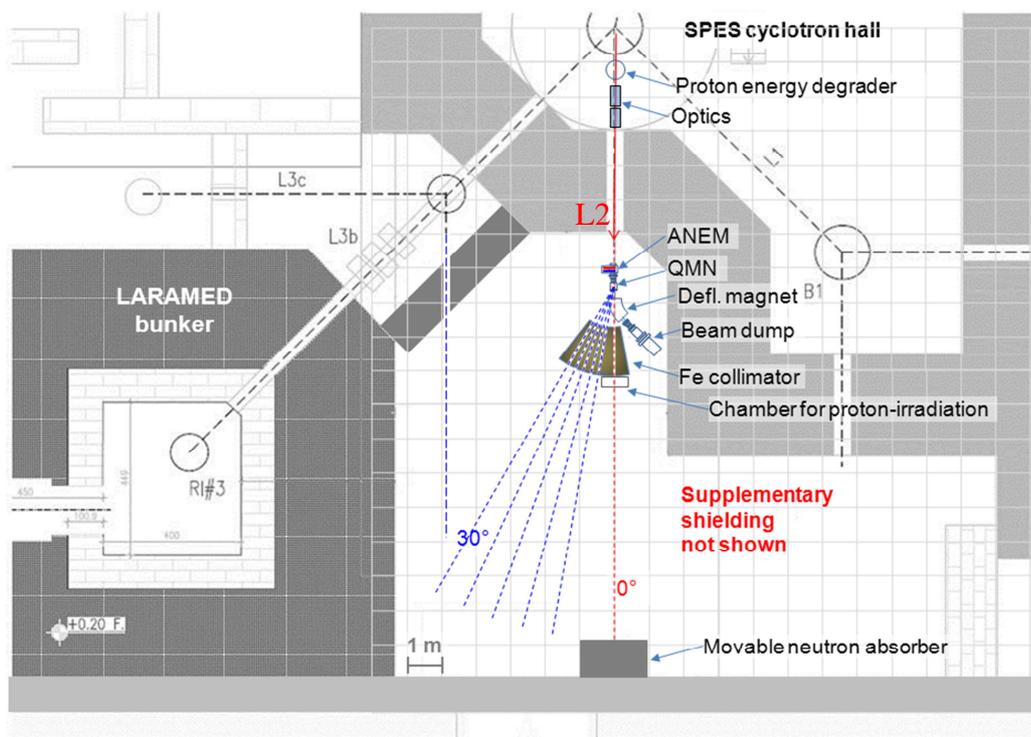


Figura 2.7 – Disegno concettuale (proiezione in pianta) della facility di irraggiamento NEPIR che mostra la disposizione dei diversi elementi che la costituiscono. La griglia è di quadrati da 1 m di lato.

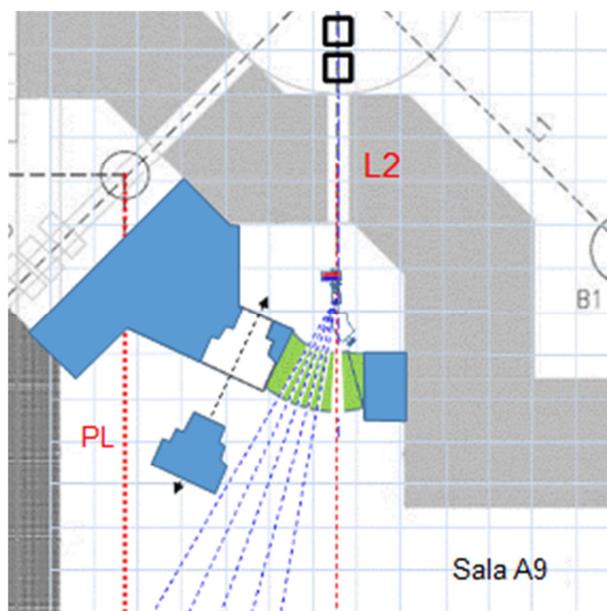
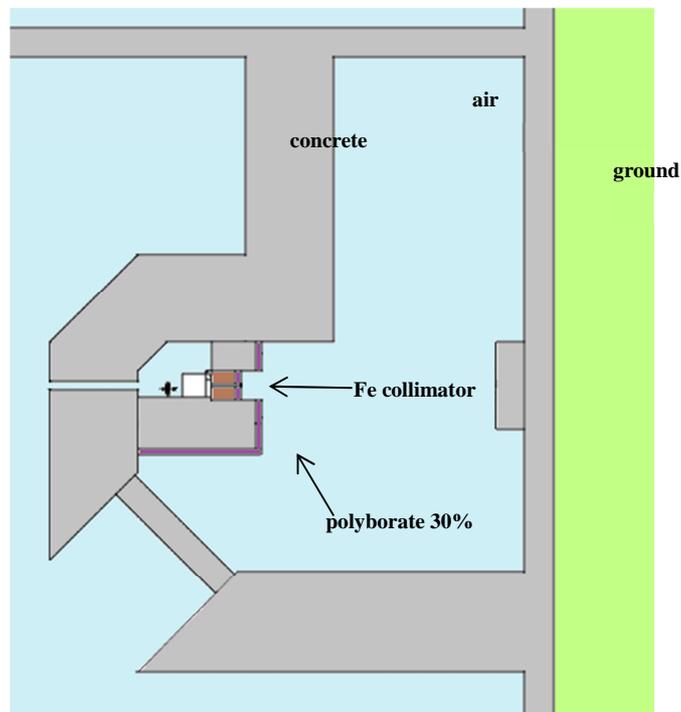


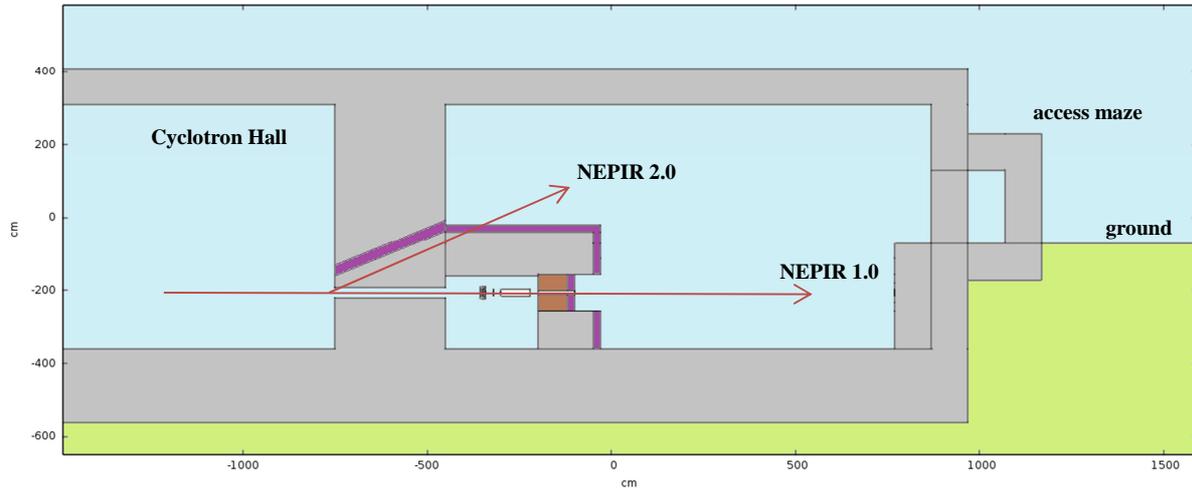
Figura 2.8– Pianta della facility NEPIR nella versione al livello 0 della sala sperimentale. In blu è rappresentata la schermatura di cemento (130 cm) e polietilene borato (20 cm). In verde un collimatore multi-angolare in Fe ispirato a quello in uso presso il laboratorio i-Themba in Sud Africa.

Un blocco di cemento ad incastro in grado di scorrere costituirà la porta di accesso al bunker nell' eventualità di dover intervenire per manutenzione; il suo orientamento è tale da non ostruire la prevista linea protonica (in Figura 2.8, PL).

Nelle Figura 2.9 e Figura 2.10 si mostra la descrizione geometrica della sala e del bunker e la collocazione delle sorgenti così come sono state implementata nelle simulazioni FLUKA. Lo spessore esatto e i materiali di cui sono costituite le pareti che separano l'interno del bunker dalla sala sperimentale sono oggetto di discussione in questa tesi; in questa figura appaiono pareti di cemento Portland foderate da 20 cm di polietilene borato al 30%. Il fascio neutronico prodotto passa attraverso un collimatore di ferro di diametro 10 cm e costituito da un blocco 1m x 1m x 80 cm incassato nel muro di cemento e seguito da 20 cm di polietilene borato al 30%.



**Figura 2.9 – Proiezione orizzontale della sala sperimentale all'altezza del fascio nella geometria di FLUKA. Sono rappresentati in colori diversi i materiali utilizzati nella simulazione.**



**Figura 2.10 – Sezione lungo un piano verticale passante per il fascio della facility di irraggiamento Nepir. Sono visibili le due componenti della schermatura: 130 cm di cemento (grigio) foderato con 20 cm di polietilene borato al 30% (in viola). L’asse del fascio di protoni è indicato dalla dicitura NEPIR 1.0, mentre NEPIR 2.0 indica l’upgrade della facility.**

### 3.

Le sorgenti di neutroni della facility NEPIR devono sottostare a rigidi vincoli dettati dalla normativa italiana in ambito di radioprotezione a causa della loro intrinseca pericolosità. Questa non si ferma al campo di radiazione che emettono quando vengono alimentate con un fascio di protoni (prompt radiation), ma si estende all’attivazione intrinseca che subiscono nel tempo e a quella indotta in tutti i mezzi materiali che le circondano: i sistemi ausiliari necessari al funzionamento delle sorgenti (camere a vuoto, linee di fascio, magneti, beam dump...), le schermature e, non ultima, l’aria che le circonda.

Questo lavoro di tesi si concentra particolarmente su due aspetti: il primo è l’attivazione indotta in aria dall’esercizio delle sorgenti neutroniche di NEPIR. Il fine è quello di capire come devono essere fatte le schermature per evitare l’attivazione dell’aria nella sala sperimentale oltre i limiti di norma, costringendo i progettisti ad includere un sistema di trattamento dell’aria attivata. L’altro aspetto importante è la valutazione del rateo di dose equivalente rilasciata nell’ambiente (dentro la sala sperimentale, ma soprattutto all’esterno del laboratorio) perché questo è l’altro dei fattori che potenzialmente limitano la corrente di fascio sfruttabile dalle sorgenti.

I limiti di dose rilasciabile in ambiente adottati dalla legislazione italiana derivano dalla pubblicazione n°103 del 2007 dell’ente internazionale ICRP (International Commission on

Radiological Protection) . Questi fissano a  $0.3 \mu\text{Sv/h}$ , confrontabile con il fondo naturale, il rateo di dose che può emergere dal laboratorio NEPIR verso l'ambiente esterno (zone di libero accesso al pubblico). Mentre  $1 \text{ Bq/g}$  è il valore di soglia della concentrazione della radioattività per l'emissione in ambiente dell'aria attivata dall'esercizio della facility.

E' dunque necessario dotare NEPIR di adeguate schermature per adempire alle normative ed ottenere dagli enti preposti l'autorizzazione a lavorare con la corrente massima desiderata di  $10 \mu\text{A}$ .

### **3.1. FLUKA e IGI**

FLUKA (FLUktuierende KAskade) [8] è un codice di calcolo basato su metodi Monte Carlo per il trasporto e l'interazione delle particelle con la materia. È sviluppato e mantenuto da una collaborazione che coinvolge il CERN e l'INFN. Trova applicazioni quali la fisica delle particelle elementari e dei raggi cosmici, la radioprotezione, la fisica medica e il progetto di acceleratori e di sorgenti di particelle. FLUKA è uno strumento versatile e potente, avvantaggiato dall'uso di un'interfaccia grafica denominata Flair, caratteristica non comune fra i codici Monte Carlo di questo tipo.

Altro strumento importante usato in questo lavoro di tesi è Flupix, una macchina virtuale che gira sotto Virtualbox, costituita sostanzialmente di una installazione di Linux Knoppix Linux, nella quale è già installato FLUKA, la sua interfaccia grafica Flair e tutte le numerose librerie con le sezioni d'urto sfruttate dal codice. Questo semplifica di molto l'installazione e l'utilizzo del software in un qualunque computer. Tuttavia una simulazione Fluka ad alta statistica può essere un compito gravoso anche per un moderno personal computer, della durata di decine di ore. Per questo motivo l'INFN mette a disposizione dei suoi gruppi di ricerca una quantità di software diversi, fra cui FLUKA, che sono supportati da IGI (Italian Grid Infrastructure). Si tratta di un'infrastruttura di calcolo distribuito di estensione nazionale, facente parte della European Grid Infrastructure. È basata su una molteplicità di centri di calcolo connessi in rete e coordinati fra loro per l'esecuzione di calcoli o analisi anche molto complessi, ben al di là delle capacità di un singolo personal computer. IGI viene utilizzato per l'elaborazione di grandi moli di dati e costituisce uno strumento fondamentale per diversi ambiti di ricerca; tra i membri associati figurano: INFN, INAF e CNR. IGI impiega normali computer in formato server connessi tra loro, sfruttando l'impiego di molte unità a basso costo, per effettuare calcoli gravosi minimizzando le latenze d'uso dei processori, un approccio più vantaggioso rispetto all'utilizzo di poche unità ad alte

prestazioni ma con costi elevati. Il punto di forza di IGI non è la rapidità con cui completa una simulazione, ma la possibilità di elaborare in parallelo simulazioni diverse.

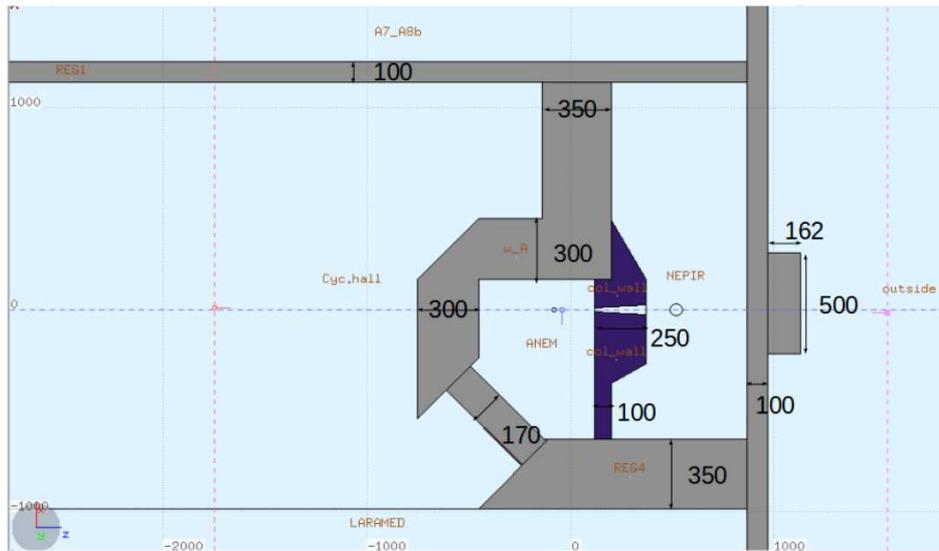
### **3.1. Calcoli preliminari**

La letteratura scientifica riguardo le tecniche per schermare sorgenti di neutroni nell'intervallo di energia di qualche decina di MeV è piuttosto scarsa: si trovano informazioni su tecniche raffinate di schermatura per neutroni di bassa energia (termici ed epitermici), dove le sezioni d'urto di diversi materiali possono essere molto diverse e gli spessori delle schermature (e quindi le quantità di materiali in gioco) sono scarsi, generalmente inferiori al metro. Esistono testi che descrivono tecniche di schermatura per la radiazione prodotta da acceleratori (quindi anche neutroni) di energia superiore ad 1 GeV. In questi casi l'approccio è generalmente quello di usare schermature molto spesse fatte di materiali molto densi. Per contenere gli ingenti costi, la scelta dei materiali è limitata: sostanzialmente si fa ampio uso di cemento, eventualmente arricchito di Ba e integrato con pannelli di ferro in quelle applicazioni in cui lo spazio è limitato.

Studiando le soluzioni adottate nelle facility con valori di correnti ed energie del fascio primario confrontabili con quelle di NEPIR si osserva che l'approccio realizzato è ibrido: si usano muri di cemento dello spessore fra 2 e 3 m per realizzare schermature dove non è importante contenere gli ingombri. Altrimenti si usano spessori ridotti di cemento, oppure di Fe per termalizzare i neutroni energetici, accoppiati con pannelli di polietilene (che può essere arricchito di Ba) spessi 10 o 20 cm per assorbire i neutroni precedentemente termalizzati. Un ulteriore rivestimento di qualche mm di Pb può essere utilizzato (ad esempio nel laboratorio di i-Themba) per attenuare la radiazione  $\gamma$  stimolata dall'interazione dei neutroni con gli schermi.

Per calcolare la schermatura presso NEPIR si è scelto di partire dai calcoli relativi alla sorgente QMN. L'efficacia della schermatura deve essere tale da contenere sotto il limite di norma sia l'attivazione dell'aria nella sala sperimentale che il rateo di dose equivalente rilasciato all'esterno dell'edificio del laboratorio SPES.

Contestualmente si è verificato che i muri di spessore 3 m che separano la sala del ciclotrone dalla sala sperimentale di NEPIR garantiscono sufficiente schermatura e che il flusso neutronico riversato nella sala ciclotrone attraverso l'apertura che consente il passaggio della linea di fascio è tollerabile.



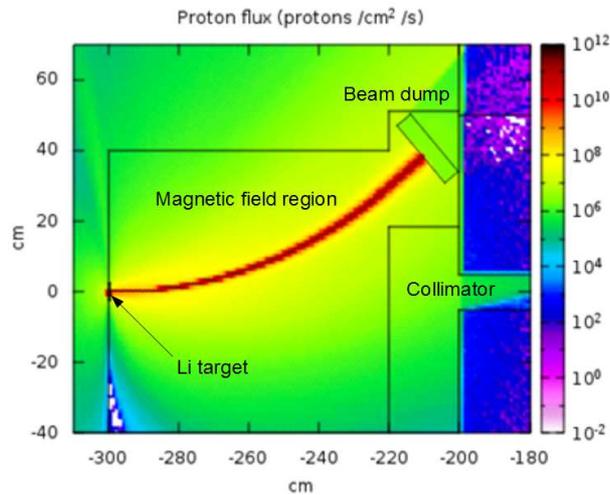
**Figura 3.1** – Pianta della facility dotata delle schermature risultanti da calcoli preliminari. Lo schermo biologico in cemento baritico (in viola) è spesso 250 cm. Il collimatore è una semplice apertura conica centrata sulla sorgente ANEM. Notare che ci sono delle differenze nella posizione delle sorgenti assunte in questo lavoro di tesi.

I primi calcoli (descritti in [9] e in parte sono stati integrati da questo lavoro di tesi) prendevano in considerazione un muro di cemento baritico dello spessore di 2.5 m; il collimatore era costituito di un semplice foro conico, con vertice centrato sulla sorgente.

## 4. SCHERMATURE PER SORGENTE QMN

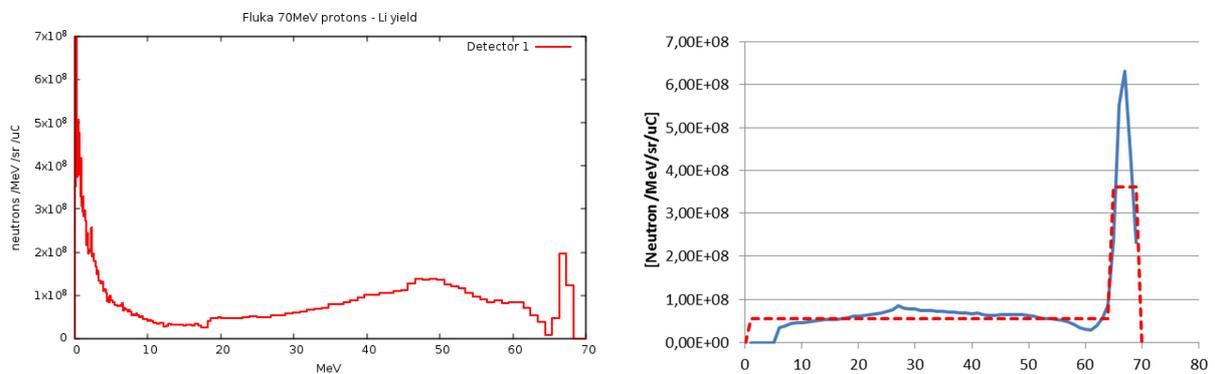
### 4.1. Parametrizzazione della sorgente QMN

In un primo approccio il target per fasci monoenergetici è stato modellizzato in FLUKA come un disco sottile (4mm) di Li investito da un fascio di protoni da 70 MeV. I protoni emergenti dal target vengono deflessi (Figura 4.1) da un campo magnetico (1T) verso un beam dump; questo elemento nelle nostre simulazioni è stato modellizzato come un cilindro di diametro 20 cm e spessore 5 cm a cui era assegnato il materiale della libreria FLUKA *black hole* che ha la proprietà di assorbire le particelle che lo colpiscono terminandone istantaneamente il trasporto. Lo scopo era risparmiare tempo di calcolo ed emulare un beam dump ideale; il comportamento e gli effetti di un beam dump reale verranno affrontati in futuro.



**Figura 4.1** – Mappa di flusso protonico in un intorno della sorgente QMN. In rosso è visibile il fascio emergente dal bersaglio di Li (4 mm) deflesso dal campo magnetico (1T) verso il beam dump.

La resa neutronica da protoni da 70 MeV su Li calcolata da FLUKA risulta del tutto insoddisfacente. Confrontata con i dati sperimentali, Figura 4.2, mostra una chiara sottostima del picco monocromatico, rendendo così il suo utilizzo inadeguato ai fini di ottenere una simulazione realistica del fenomeno.



**Figura 4.2** – Resa neutronica da protoni da 70 MeV su 4 mm di Li calcolata da FLUKA (a sinistra) confrontata con dati sperimentali (a destra in blu) [10]. È evidente come FLUKA calcoli in modo insoddisfacente questa resa. A destra in rosso un’ approssimazione realizzata con due sorgenti distinte ( $0 < E < 63$  MeV e  $63 < E < 70$  MeV) per rendere separatamente il picco e la coda a bassa energia.

Per produrre lo spettro neutronico effettivamente utilizzato nella facility è stata implementata una sorgente di neutroni ad hoc tale da riprodurre lo spettro sperimentale del Li. L’uso di tale sorgente neutronica permetteva inoltre di rendere il calcolo più efficiente, evitando di sprecare tempo a calcolare il trasporto di protoni che non producevano neutroni.

La forma naturale dello spettro QMN evidenzia la possibilità di approssimarli tramite due sorgenti flat (di facile implementazione in FLUKA, perchè standard): la prima per riprodurre

la coda a basse energie (intervallo energetico fra 0 MeV e 63 MeV) e la seconda per rendere picco monocromatico (intervallo fra 63 MeV e 70 MeV). L'altezza delle due distribuzioni flat è la media dello spettro sperimentale nell'intervallo energetico relativo.

Operativamente sono state effettuate due simulazioni distinte, dalle quali sono stati ottenuti i contributi, a dose equivalente e attivazione dell'aria, riconducibili separatamente ai neutroni presenti nella coda e a quelli nel picco. La somma dei due risultati è stata fatta pesando ciascun contributo: 39% per i dati relativi al picco (i neutroni nel picco sono il 39% del totale) e 61% per quelli dovuti alla coda a bassa energia.

Sono stati considerati solo neutroni emessi in avanti, uniformemente entro un cono di semiapertura  $20^\circ$ . Questo sovrastima di circa un fattore 2 l'effetto dei neutroni nel picco monocromatico, perchè in realtà l'emissione non è angolarmente uniforme: è molto orientata in avanti ( $0^\circ$ ) e diminuisce velocemente all'aumentare dell'angolo. L'emissione ad angolo maggiore non era simulata per risparmiare tempo di calcolo.

#### **4.1. Attivazione dell'aria per la sorgente QMN**

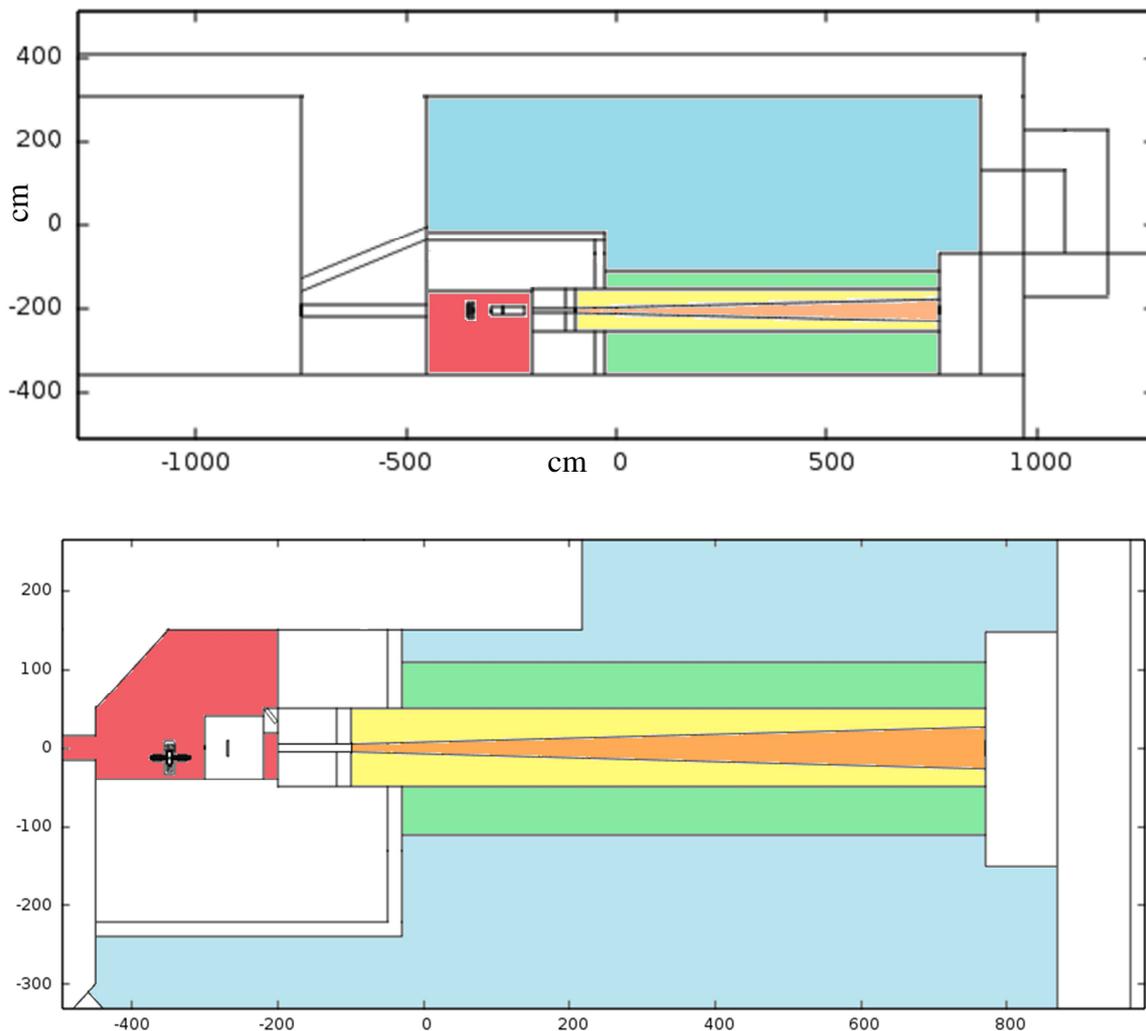
Per studiare l'attivazione dell'aria, il volume da essa occupato nella sala sperimentale è stato sezionato matematicamente in celle diverse. FLUKA è stato programmato per calcolare l'attività (in Bq) per ciascuno di questi volumi separatamente, in diversi istanti di tempo a partire da un istante  $t_0$ , corrispondente al tempo di spegnimento del fascio. Il tempo di irraggiamento considerato, corrispondente a 24 ore consecutive, è realisticamente un tempo lungo per l'attività tipica a NEPIR e si può considerare un caso di scenario peggiore. L'attivazione dell'aria scala linearmente con la corrente di protoni, e i valori presentati in questo lavoro di tesi sono relativi ad una corrente di  $1 \mu\text{A}$ .

Per calcolare attivazione e dose in diversi punti della facility NEPIR (ma anche all'esterno del laboratorio SPES) sono stati scelti dei parametri di configurazione di FLUKA che consentono la generazione e il trasporto tanto di neutroni quanto di fotoni.

Il volume d'aria di NEPIR è stato sezionato in cinque sottovolumi visibili in Figura 4.3:

- 1) air\_bunker (in rosso): l'aria all'interno del bunker in cui sono posizionati i bersagli;
- 2) air\_cone (in arancione): l'aria all'interno del tronco di cono che si estende dal foro di uscita del collimatore (diametro 10 cm) fino all'assorbitore in fondo alla sala; tale regione contiene il fascio di neutroni che attraversa la sala sperimentale dove si trova il punto-misura in cui viene collocato il dispositivo elettronico da studiare;

3) air-cylinder (in giallo): il cilindro che circonda lo air cone. E' isolato dal resto perchè è una regione di transizione fra il volume che vede direttamente la sorgente e quello che è totalmente schermato;



**Figura 4.3 – Sezione verticale lungo la linea di fascio (sotto, rispettiva sezione orizzontale all’altezza del fascio) in cui sono messi in evidenza i volumi geometrici per la valutazione dell’attivazione dell’aria. In rosso l’aria del bunker in cui il fascio protonico collide con il target; in arancione il tronco di cono che contiene il faro di neutroni in uscita del collimatore e che si propaga fino all’assorbitore; in giallo un cilindro che racchiude il tronco di cono; in verde la camera pulita e in azzurro tutta l’aria della facility esterna al bunker e camera pulita.**

4) camera\_stagna (in verde): è un volume a forma di parallelepipedo allungato, centrato sull’asse del fascio di neutroni. Corrisponde ad una ipotetica camera bianca modulare sigillata, sfruttata per contenere l’aria attivata dal fascio di neutroni mentre attraversa la sala sperimentale. Tale volume si estende per 8 m, dalla superficie esterna del bunker fino al fondo della sala (sulla superficie dell’assorbitore per i neutroni), altezza e larghezza misurano 2.50 m. FLUKA è impostato per calcolare l’attività dell’aria in questo ambiente al netto dei

volumi *air\_cylinder* e *air\_cone* (calcolati separatamente) per valutare i contributi all'attivazione dovuti ai neutroni che non vengono direttamente dalla sorgente (diffusi dal collimatore e dall'assorbitore), come si vede bene in Figura 4.4;

5) *aria\_NEPIR* (in azzurro): il resto del volume d'aria presente all'interno della facility.

La Tabella 4.1 riporta i risultati delle simulazioni per una corrente di fascio di 1uA a diversi istanti di tempo, calcolata nei diversi volumi. Il tempo 0 corrisponde all'istante in cui viene spento il fascio, dopo 24 ore di irraggiamento.

Ovviamente, l'aria dentro il cono e quella nel resto della camera stagna non sono in nessun modo separate e quindi finiscono per mescolarsi. Note le dimensioni e l'attività di questi volumi d'aria, è stato calcolato un valore per attività media all'interno della camera stagna pari a 0.17 Bq/g (a tempo 0 con 1  $\mu$ A di corrente). È dunque importante installare la camera stagna quando la sorgente QMN opererà a piena corrente (10  $\mu$ A), poiché ci aspettiamo un aumento dell'attività di un ordine di grandezza, eccedendo il limite di legge. Tuttavia, già 15 minuti dopo lo spegnimento del fascio, l'attività scenderebbe sotto 1 Bq/g, consentendo l'espulsione dell'aria attivata della camera stagna e l'accesso al personale.

**Tabella 4.1 – Valori di attività espressi in Bq/g calcolati per diverse volumi di aria e diversi tempi dopo lo spegnimento del fascio nella sala sperimentale, dopo 24h di irraggiamento con una corrente equivalente di 1  $\mu$ A di protoni da 70 MeV sul target QMN.**

<b>tempo</b>	<b>Cono (fascio)</b>	<b>Air_cilinder</b>	<b>Camera stagna</b>	<b>NEPIR</b>
0	11.28	0.3	0.02	<0.01
15m	2.58	0.1	<0.01	<0.01
1h	0.39	0.01	<0.01	<0.01

Il laboratorio di SPES è appositamente dotato di un sistema centralizzato di aspirazione dell'aria che viene espulsa attraverso un camino dotato di un sistema di monitoraggio della radioattività.

È stato fatto anche un tentativo di stimare l'attivazione dell'aria dentro il bunker usando i neutroni generati da un fascio di protoni sul bersaglio di Li. Come illustrato in Figura 4.2 lo spettro neutronico è reso in modo inadeguato, tuttavia l'abbondanza di neutroni a più bassa energia, che hanno sezioni d'urto maggiori nelle reazioni di attivazione dell'aria, forniscono una sovrastima del valore dell'attivazione. Il calcolo restituisce un'attività di ~1 kBq/g, che scende in 48 h a circa 5 Bq/g, quasi tutti dovuti alla produzione di trizio.

Il valore è puramente indicativo perché queste simulazioni non includono il contributo al flusso neutronico prodotto dal beam dump che, dentro il bunker, è atteso essere tutt'altro che trascurabile.

#### **4.1. Dose equivalente depositata dalla sorgente QMN**

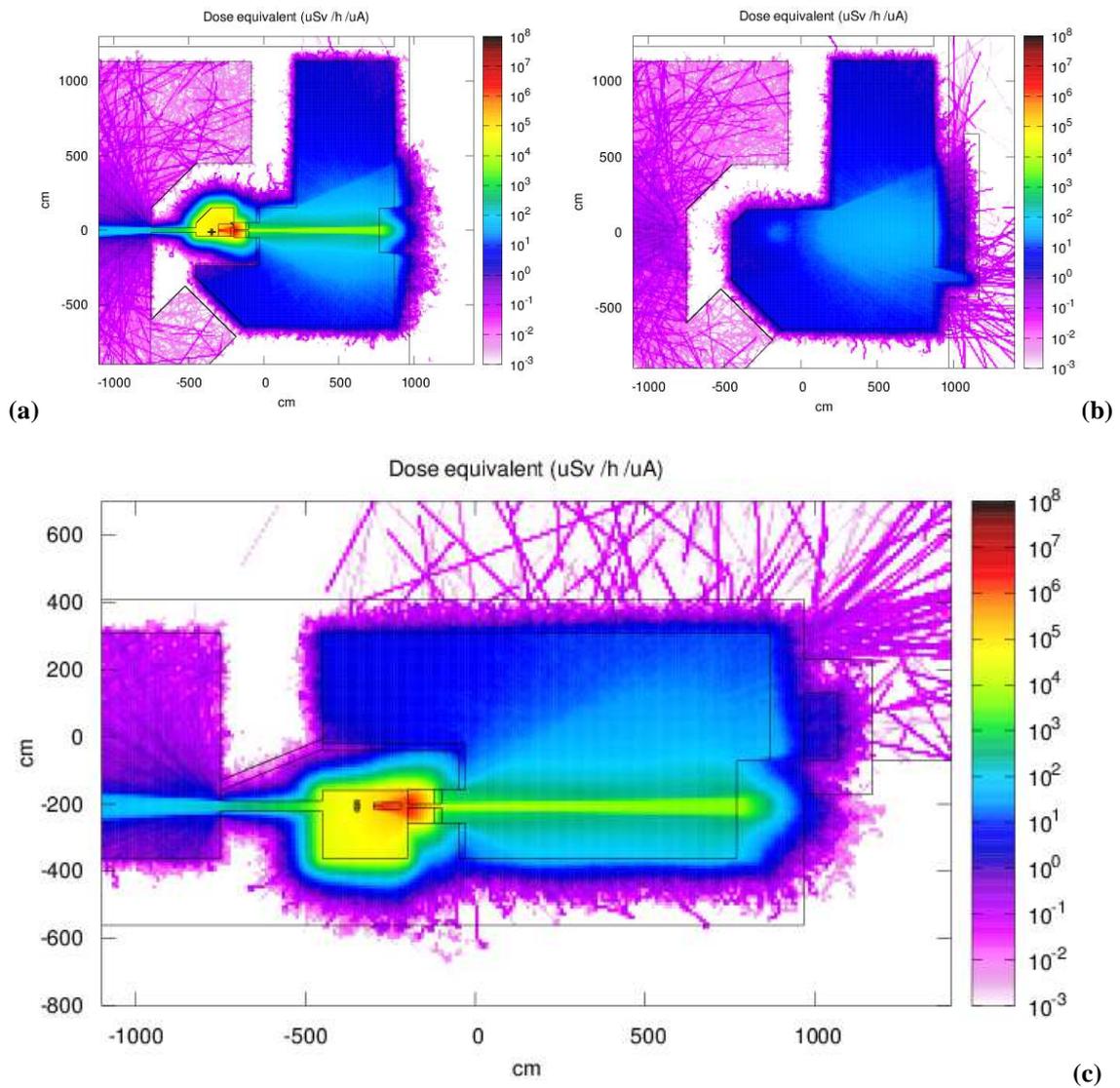
Il risultato relativo al calcolo del rateo di dose equivalente, espresso in  $\mu\text{Sv/h}$  per ogni  $\mu\text{A}$  di corrente sul target è visibile, nelle tre proiezioni in Figura 4.4. La statistica della simulazione corrisponde a 5 milioni di neutroni, con un tempo di calcolo di circa 50 ore):

I calcoli di dose (Figura 4.4) mostrano una diffusione di neutroni in alcune regioni al di fuori dell'edificio (sopra il labirinto, ma anche sotto il pavimento del labirinto) che superano di uno o due ordini di grandezza il limite del valore massimo consentito dalla normativa ( $0.1 \mu\text{Sv/h}$ ), già con corrente di fascio di  $1 \mu\text{A}$ .

Questo è indicativo del fatto che la schermatura è da irrobustire localmente in alcuni punti, certamente sono da migliorare le prestazioni dell'assorbitore di neutroni collocato in fondo alla sala, che è stato modellizzato in modo molto grezzo come un monolite di cemento. C'è tuttavia un altro fattore di cui tenere conto: il potere schermante del grosso magnete di deflessione del target QMN (Figura 4.5).

Il volume di Fe utilizzato dal magnete di deflessione non è noto allo stato attuale del progetto perché la scelta precisa di questo elemento di linea non è stata ancora effettuata. Una ragionevole assunzione è che il magnete di deflessione potrebbe corrispondere alla metà (Figura 4.5) di uno dei magneti di switching da  $30^\circ$  utilizzati nel laboratorio SPES.

È facile immaginare anche quali aggiustamenti della schermatura possono essere implementati, primo fra tutti un rinforzo del muro della facility che da sull'esterno, sopra al labirinto. L'opzione di allungare il collimatore di Fe è sfavorita dalla conseguenza di allontanare il punto misura dalla sorgente, piuttosto è preferibile diminuire le dimensioni trasversali del blocco di Fe, o traslarlo verso il basso di qualche decina di cm (conservando il foro coassiale alla linea). In questo modo diminuirebbe il flusso di neutroni direzionato verso l'alto.



**Figura 4.4 –** Diverse sezioni della distribuzione tridimensionale del rateo di dose equivalente prodotta dall'attività del target QMN. In (a) e (c) si vedono la proiezione orizzontale e verticale in un intorno (semiampiezza 1 m) centrato sulla linea del fascio. (b) mostra una proiezione orizzontale della dose equivalente all'altezza del terreno al di fuori della sala.

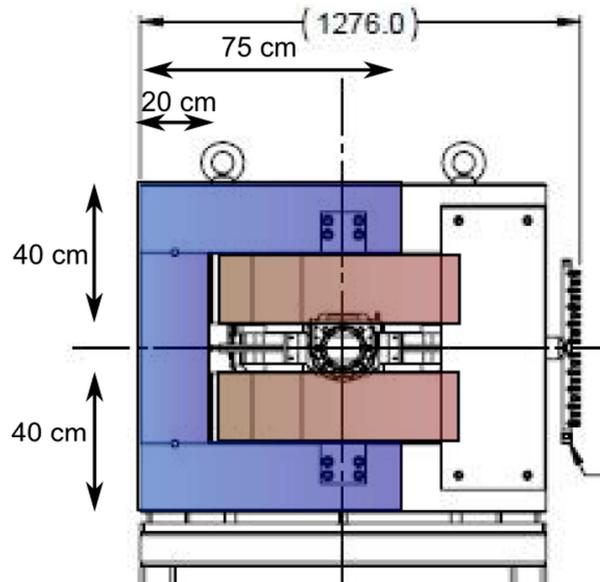


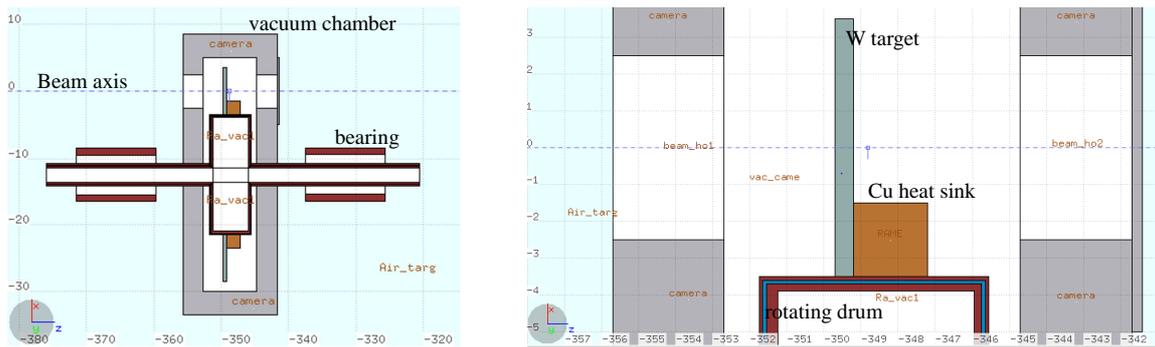
Figura 4.5 – Vista frontale (dal punto di vista del fascio) di uno dei magneti di switching da  $-30^\circ$  e  $+30^\circ$  utilizzati nel laboratorio SPES. Le linee nere corrispondono allo schema meccanico dell'apparato, le aree evidenziate in blu mostrano il circuito magnetico di ferro necessario a realizzare la deflessione del fascio in una sola direzione e sono indicative del volume di ferro che costituirebbe il magnete di deflessione del target QMN. La lunghezza da flangia di ingresso a quella di uscita è 1 m, la larghezza del traferro non è ancora determinata, ma sarebbe compresa fra 6 e 9 cm.

## 5.

La schermatura fin qui presentata è stata ottimizzata per la sorgente QMN. Tuttavia sono stati fatti dei calcoli per verificarne l'efficacia anche come schermatura del target ANEM. In particolare si è cercato di capire se una schermatura concepita in questo modo poneva delle limitazioni nella corrente massima utilizzabile per ANEM e in tal caso quali revisioni dovevano essere fatte sulla schermatura.

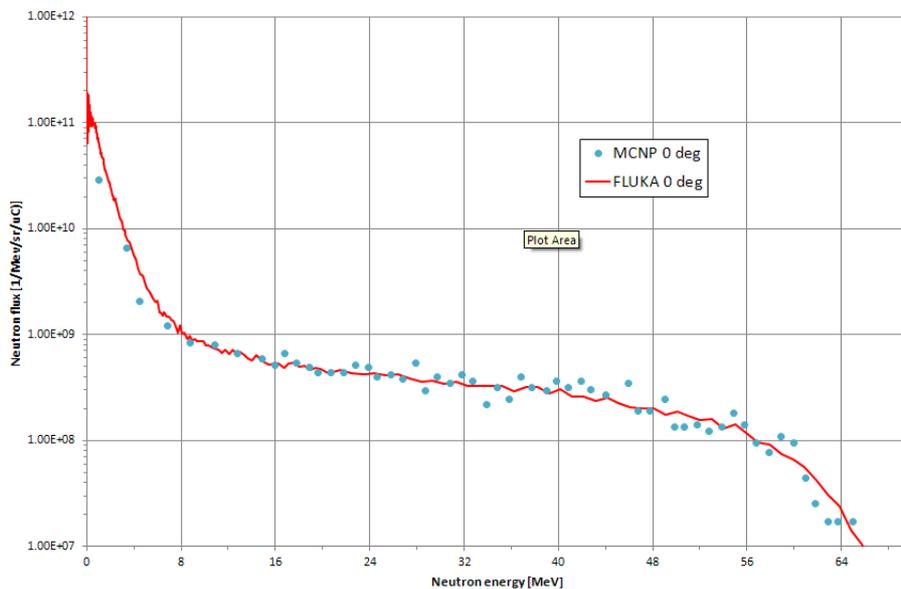
### 5.1.

Nella simulazione Monte Carlo, ANEM è stato modellizzato (nella sua versione iniziale, senza il settore di Be) in modo realistico (Figura 5.1) includendo tutti i suoi principali elementi: la corona circolare di W nelle sue reali dimensioni, il tamburo rotante che la sostiene, le flange di Cu per l'asportazione del calore e la camera a vuoto che contiene il tutto, comprensiva di cuscinetti. I valori calcolati nella simulazione sono: flusso neutronico, dose totale (dovuta a neutroni e gamma) e attivazione dell'aria nelle stesse regioni della facility individuate in precedenza per la targhetta QMN.



**Figura 5.1 – Modello FLUKA del target rotante ANEM: (a sinistra) è visibile la camera a vuoto in Al, il corpo rotante al centro sospeso sui due cuscinetti modellizzati come semplici cilindri cavi di Fe (in marrone scuro). Sull’asse rotante centrale è ancorato l’anello di Cu (in marrone chiaro) su cui poggia la corona circolare di W, attraversata dal fascio (linea tratteggiata azzurra). A destra: un dettaglio che mostra l’intercapedine con l’acqua di raffreddamento all’interno del tamburo rotante.**

La sorgente è costituita da un fascio di protoni incidente sulla corona di W; è stato contestualmente effettuato un confronto della resa neutronica da W con dati [11] ottenuti da simulazioni effettuate con codice MCNP [12] trovando un ottimo accordo dentro l’intervallo energetico di interesse (1-70 MeV).



**Figura 5.2 – In rosso resa neutronica (protoni da 70 MeV su 5 mm di W) calcolato con FLUKA, in blu la stessa curva calcolata con MCNP.**

## 5.1. Risultati delle simulazioni relative al target ANEM

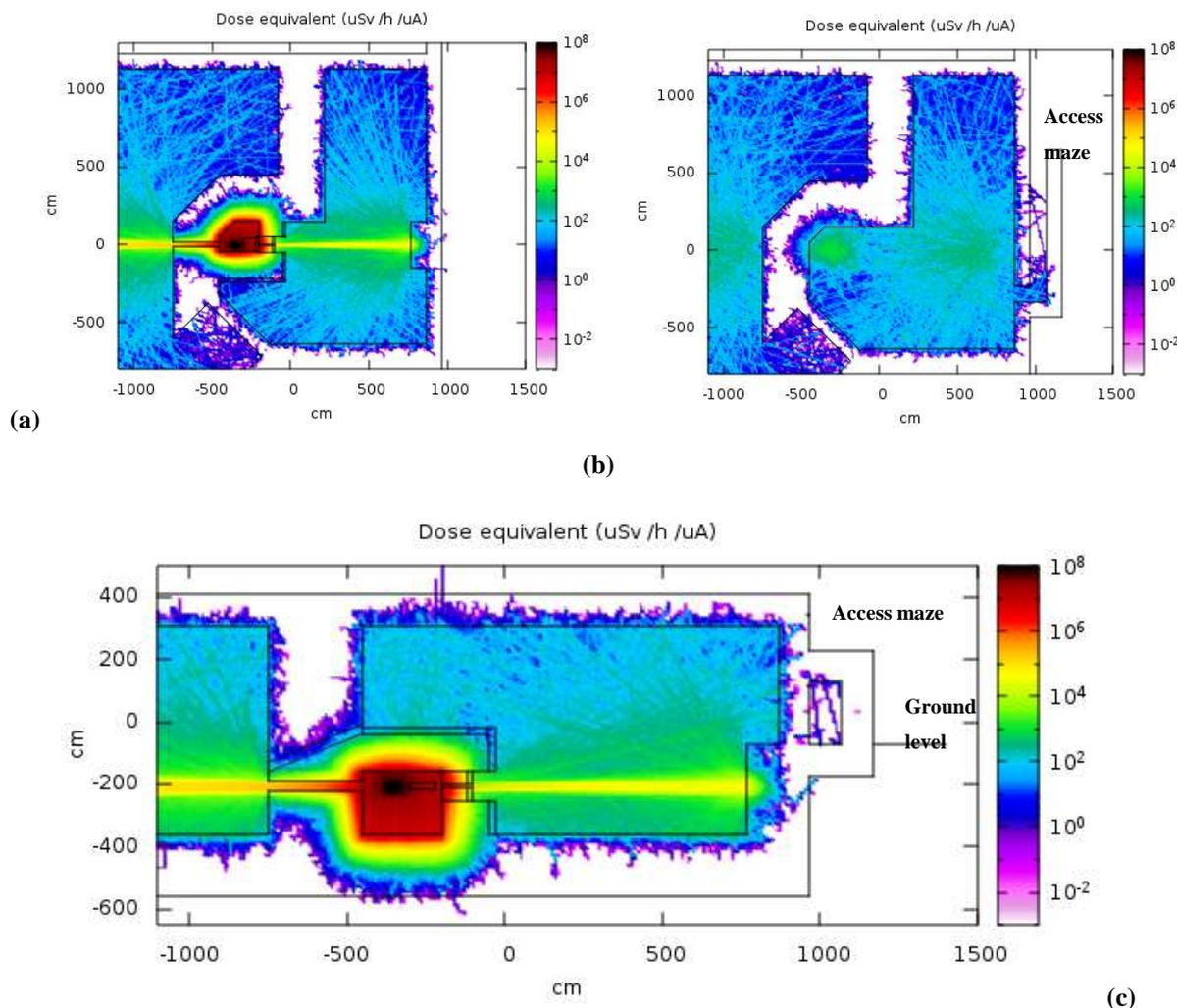
Il risultato relativo al calcolo del rateo di dose equivalente, espresso in  $\mu\text{Sv/h}$  per ogni  $\mu\text{A}$  di corrente sul target, è visibile nelle tre proiezioni di Figura 5.3 (la statistica della simulazione corrisponde a 30 milioni di protoni su W, più di due giorni di calcolo su IGI).

Figura 5.3 (a) e (b) mostrano la dose media, per un'altezza di 2 metri, misurata in (a) a partire dal pavimento della sala (parzialmente interrata) e in (b) a partire dal livello del terreno all'esterno dell'edificio. In particolare (b) sembra suggerire che la lunghezza (10 m) del labirinto esterno di accesso alla sala sia largamente sovrastimata.

I calcoli di attivazione dell'aria sono stati realizzati in due passi distinti: un primo calcolo è stato effettuato con collimatore chiuso (ovvero il collimatore di Fe non era dotato di apertura), con lo scopo di valutare l'efficacia della schermatura al netto degli effetti dovuti al fascio di neutroni che si propaga in aria nella sala sperimentale. Una seconda simulazione, identica alla precedente, includeva un collimatore forato (diametro 10 cm) che consentiva il passaggio di un fascio conico (semiapertura  $3^\circ$ ) di neutroni attraverso la sala sperimentale.

In entrambe le simulazioni, l'attività dell'aria nella sala sperimentale, al di fuori della schermatura, è calcolata per una corrente di fascio di  $1 \mu\text{A}$ , dopo 24 ore di irraggiamento.

Nel primo calcolo (collimatore chiuso) l'attività trovata è stata abbondantemente entro i limiti di legge: al peggio qualche  $\text{mBq/g}$ . A collimatore aperto la situazione generale non è peggiorata drammaticamente: l'attività è incrementata al più di un ordine di grandezza. Fa eccezione ovviamente il cono d'aria attraversato dal fascio di neutroni direttamente provenienti dalla sorgente, dove si trova un'attività di qualche decina di  $\text{Bq/g}$  all'istante di spegnimento del fascio.



**Figura 5.3 –** Diverse sezioni della distribuzione tridimensionale di dose equivalente prodotta dall'attività del target ANEM. In (a) e (c) si vedono la proiezione orizzontale verticale in un intorno (semiampiezza 1 m) centrato sulla linea del fascio. (b) mostra una proiezione orizzontale della dose equivalente all'altezza del terreno al di fuori della sala.

A dominare è il radionuclide  ${}^6\text{He}$ , che ha un tempo di decadimento molto breve (806.7 ms), infatti dopo 15 minuti l'attività di questo volume già rientra nella norma (7 mBq/g).

Nell'ipotesi di incrementare la corrente a 10  $\mu\text{A}$  tutti i valori sopra stimati aumentano proporzionalmente, tuttavia le considerazioni fatte in merito al superamento dell'attività limite e il tempo di attesa prima di poter accedere alla facility restano inalterate.

Nelle stesse simulazioni è stata calcolata anche l'attività dell'aria all'interno del bunker trovando, come atteso, un valore molto alto di attività, maggiore di 2 kBq/g alla fine dell'irraggiamento di 24 ore che si riducono a 1 Bq/g dopo 48 ore.

Questo rimarca la necessità di costruire un bunker a tenuta stagna dal quale sarà necessario aspirare l'aria nel caso si rendesse necessario l'accesso prima dello scadere del tempo di raffreddamento.

Tabella 5.1 riporta i risultati della simulazione (30 milioni di particelle primarie) della sorgente ANEM, con collimatore aperto e una corrente di fascio di 1  $\mu$ A calcolata a diversi istanti di tempo e in diversi volumi. Il tempo 0 corrisponde all'istante in cui, dopo 24 ore di irraggiamento, viene spento il fascio.

**Tabella 5.1 – Valori di attività espressi in Bq/g relativi ad un irraggiamento di 24h con una corrente di 1  $\mu$ A, calcolati per diversi volumi di aria e diversi tempi dopo lo spegnimento del fascio.**

<b>tempo</b>	<b>Bunker</b>	<b>Cono (fascio)</b>	<b>Air_cilinder</b>	<b>Camera stagna</b>	<b>NEPIR</b>
0	>2000	44.0	<0.01	<0.01	0.03
15m	--	<0.01	<0.01	<0.01	0.03
1h	>1200	<0.01	<0.01	<0.01	0.02
4h	>400	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
10h	>40	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
24h	>2	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
48h	>1	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

Dei valori riportati in tabella, sono da considerare affidabili solo i risultati relativi all'aria nel bunker, gli altri sono afflitti da errori grandi a causa della limitata statistica. Inoltre, seppure siano tutti concordi nell'indicare attivazione trascurabile in tutte le regioni della sala sperimentale, il fatto che la regione più lontana dal fascio neutronico risulti la più attiva non è coerente. Quello che è possibile concludere è che l'attività dell'aria all'interno del bunker raggiunge i 2 kBq/g in 24 ore di irraggiamento e che il tempo di raffreddamento è di 2 o 3 giorni.

## **CONCLUSIONI**

In questo lavoro di tesi è presentato lo studio delle prestazioni di una schermatura per due sorgenti di neutroni presso il Laboratorio SPES. Le due sorgenti condividono la stessa linea di fascio, lo stesso bunker e lo stesso collimatore ma sono caratterizzate da distribuzioni energetiche molto diverse. La prima è caratterizzata da uno spettro quasi monoenergetico

(QMN), l'altra da una distribuzione energetica simil-atmosferica (ANEM: Atmospheric Neutron EMulator).

La schermatura è stata dimensionata e valutata sulla sorgente di neutroni QMN, che è lo strumento più versatile e interessante fra quelli proposti dalla facility NEPIR.

Il risultato raggiunto offre ottime prestazioni sul controllo dell'attivazione dell'aria all'interno della facility NEPIR.

La dose rilasciata all'esterno dell'edificio risulta ancora sopra il limite di norma (qualche  $\mu\text{Sv/h}$ ) in un paio di regioni; i punti in cui la schermatura va rinforzata o modificata sono chiaramente identificati.

In seguito le prestazioni della stessa schermatura sono state valutate anche per la sorgente ANEM (per cui non era ottimizzata), per determinare se questa imponeva dei limiti particolarmente restrittivi sulla corrente massima di esercizio di ANEM.

I calcoli preliminari (che però richiedono maggiore statistica per essere conclusivi) indicano che, pur usando una corrente di  $10 \mu\text{A}$ , la dose rilasciata all'esterno dell'edificio risulta trascurabile e l'attivazione dell'aria sembra largamente sotto il limite di norma.

Inoltre questo lavoro indica la strada da percorrere per completare la progettazione della schermatura. In particolare bisogna implementare nella simulazione le fessure che separano i diversi elementi di cemento costituenti lo schermo, in particolare le fughe attorno alla porta che dà accesso al bunker.

Altri argomenti che si dovrà affrontare sono i seguenti:

- 1) studio dei neutroni proiettati all'indietro (backscattering) dal bunker verso la sala del ciclotrone va affrontato dopo aver modellizzato l'apertura che consente il passaggio del fascio (tubo a vuoto in alluminio circondato di polietilene ad alta densità);
- 2) avere un'idea precisa dell'attivazione dell'aria nel bunker, anche per il target QMN, è necessario disporre di un modello più realistico della resa neutronica da Li, che includa la dipendenza dall'angolo di emissione;
- 3) includere un modello del magnete di deflessione per tenere conto anche del suo potere schermante;
- 4) studio dell'attivazione dei materiali prodotto dal fascio di protoni (bersagli di Li e W; beam dump; attivazione della linea indotto dalle perdite di fascio) e anche dai neutroni (aria, magnete di deflessione, pompe e sistemi ausiliari, collimatore di Fe, schermature di cemento ed assorbitore del fascio di neutroni);

- 5) studiare la contaminazione dello spettro neutronico prodotta dall'utilizzo di un degradatore di energia per il fascio primario collocato in sala ciclotrone.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] M. S. Gordon; P. Goldhagen; K. P. Rodbell; T. H. Zabel; H. H. K. Tang; J. M. Clem; P. Bailey, Measurement of the flux and energy spectrum of cosmic-ray induced neutrons on the ground Trans. Nucl. Sci. 2004, V. 51, I. 6, pp. 3427 – 3434
- [2] [Peng Zhang, Kan Wang, Ganglin YuA, Simplified Supercritical Fast Reactor with Thorium Fuel, Sci. Techn. Nucl. Install. 2014(1):1-9 (2014)
- [3] G.Prete et al. EPJ Web of Conferences 66, 11030 (2014)
- [4] Pomp S., Barlett D.T., Mayer S., Reitz G., Röttger S., Silari M., Smit F.D., Vincke H., Yasuda H., High-energy quasi-monoenergetic neutron fields: existing facilities and future needs, EURADOS Report 2013-02
- [5] H. Harano, R. Nolte, Quasi-monoenergetic high-energy neutron standards above 20 MeV, Metrologia 48 (2011) S292-S303
- [6] R. Nolte, M.S Allie, P.J Binns, F Brooks, A Buffler, V Dangendorf, J.P Meulders, F Roos, H Schuhmacher, B Wiegel, High-energy neutron reference fields for the calibration of detectors used in neutron spectrometry, Nucl. Instr. and Meth. In Phys. Res. A, vol. 476, pp. 369-373, Jan. 2002
- [7] Enrico Mazza, Studio MC di sorgenti neutroniche con spettro continuo e discreto per applicazioni a SPES, Tesi di Laurea, 2016
- [8] <http://www.fluka.org/fluka.php>
- [9] Stefano Trevisan, Valutazione dei livelli di radiazione nella sala sperimentale del progetto ANEM a SPES, Tesi di Laurea, 2016
- [10] S. Kamada, T. Itoga, Y. Uno, W. Takahashi, T. Oishi, M. Baba, Measurement of energy-angular neutron distribution for  ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^9\text{Be}(p,xn)$  reaction at  $E_p=70$  MeV and 11 MeV, Journal of the Korean Physical Society, Vol. 59, No. 2, August 2011, pp. 1676-1680
- [11] Dario Bisello, Juan Esposito, Pierfrancesco Mastinu, Serena Mattiazzo, Gianfranco Prete, Cesar Ceballos Sanchez, Francesco Scantamburlo, Luca Silvestrin, Jeffery Wyss, A neutron-induced Single Event Effects facility at the 70 MeV Cyclotron of LNL-INFN, Physics Procedia (2014), Vol 60, pp. 66-73
- [12] <https://mcnpx.lanl.gov/>