

NESCOFI@BTF NEutron Spectrometry in COmplex FIELDS

R. Bedogni (70%), D. Bortot (50%), B. Buonomo (20%), A. Esposito (30%), G. Mazzitelli (20%), L. Quintieri (20%), A. Gentile (40%), M. Chiti (20%).
INFN - LNF

M.V. Introini, A. Pola
INFN-Milano / Politecnico di Milano

J.M. Gomez-Ros (40%)
CIEMAT, Madrid ed associato LNF

PROPOSTA PER IL TERZO ANNO (2013)

| | | |
|------|---|--------|
| 1. | ATTIVITA' SVOLTE FINO A GIUGNO 2012 | pag.2 |
| 1.1. | Strategia generale | pag.2 |
| 1.2. | Attività del 2012 | pag.3 |
| 1.3 | Spettrometro CYSP: studio Monte Carlo e disegno finale | pag.3 |
| 1.4 | Stato dei rivelatori attivi | pag.8 |
| 1.5 | Scelta del ATND finale | pag.11 |
| 1.6 | Elettronica analogica: preamplificatori e amplificatori di segnale | pag.11 |
| 1.7 | Elettronica digitale: analizzatore multicanale | pag.13 |
| 1.8 | Rivelatore a diodo: verifica della linearità | pag.13 |
| 1.9 | Sensibilizzazione dei rivelatori a diodo ai neutroni termici | pag.14 |
| 1.10 | Convertitore C1. Sensibilità ai neutroni termici e spessore ottimale | pag.15 |
| 1.11 | Convertitore C1. Linearità della risposta in flusso termico | pag.17 |
| 1.12 | Convertitore C1. Acquisizione di rivelatori multipli nel MINI-CYSP | pag.18 |
| 1.13 | Convertitore C1. Tests in n@BTF | pag.22 |
| 1.14 | Tests di radiation damage | pag.22 |
| 1.15 | Convertitore C2. Sensibilità ai neutroni termici e spessore ottimale | pag.22 |
| 1.16 | Convertitore C2. Linearità in flusso termico e radiation damage | pag.24 |
| 1.17 | Convertitori C1 e C2. Risposta "in-moderator" e capacità spettrometrica | pag.24 |
| 1.18 | Attività previste da Luglio a Dicembre 2012 | pag.25 |
| 1.19 | Collaborazioni e supporto esterno nel 2012 | pag.26 |
| 1.20 | Supporto dei LNF nel 2012 | pag.26 |
| 1.21 | Sito web | pag.26 |
| 1.22 | Meeting di progetto nel 2012 | pag.27 |
| 1.23 | International Review panel | pag.27 |
| 1.24 | Pubblicazioni nel 2012 | pag.29 |
| 2. | ATTIVITA' PREVISTE PER IL 2013 | pag.30 |
| 2.1 | Strategia generale | pag.30 |
| 2.2 | Richieste economiche per il terzo anno (2013) | pag.31 |
| 2.3 | Richieste di servizi ai LNF | pag.31 |
| 2.4 | Offerte | pag.32 |

1. ATTIVITA' DEL SECONDO ANNO SVOLTE FINO A GIUGNO 2012

Nota generale: *i dettagli costruttivi sugli spettrometri, sull'elettronica di acquisizione appositamente realizzata e sulla fabbricazione dei rivelatori di neutroni termici sono per il momento riservati in vista della formulazione di uno o più brevetti.*

1.1 Strategia generale

Il progetto NESCOFI prevede lo sviluppo di spettrometri per neutroni di concezione innovativa e intervallo di riposta esteso dai n termici alle centinaia di MeV. La tecnica di misura si ispira alle sfere di Bonner, ovvero alla misura di neutroni termalizzati in moderatori di cui si conosce la matrice risposta. Tuttavia, invece di usare un unico rivelatore centrale e molteplici moderatori, il che implica irraggiamenti in sequenza, si impiega un unico moderatore con all'interno diversi rivelatori di n termici. Questa modifica permette di utilizzare il dispositivo come monitor spettrometrico di tipo real-time, il che è di notevole interesse per le facilities di fast-neutron irradiation, la radioterapia convenzionale ed adronica, l'industria nucleare e la ricerca.

Il progetto prevedeva sin dall'inizio di sviluppare due diverse geometrie, adatte per diversi scenari di irraggiamento:

- spettrometro CYSP (CYlindrical SPectrometer), a geometria cilindrica, utilizzabile come strumento direzionale. Adatto per fasci di neutroni collimati o per determinare lo spettro proveniente da una data direzione eliminando (mediante assorbimento) i neutroni da direzioni diverse.
- spettrometro sferico SP² (SPherical SPectrometer) idoneo per determinare lo spettro di fluensa indipendentemente dalla distribuzione direzionale del campo. Adatto per misure di dosimetria neutronica o in campo totale.

Il planning temporale del progetto ha subito alcune variazioni dovute alla notevole differenza fra le richieste e le assegnazioni, sia per il 2011 (-50%), sia per il 2012 (-70%). Le principali conseguenze sono state le seguenti:

- Nel primo anno sono stati realizzati il disegno definitivo ed il prototipo con rivelatori passivi ad attivazione solo per lo spettrometro SP². I test con neutroni monocromatici al PTB Braunschweig (da 144 keV a 14.8 MeV) e al TSL Uppsala (da 50 a 180 MeV) eseguiti nel 2011 hanno permesso di validare la risposta simulata del SP² entro pochi %.
- il disegno Monte Carlo del CSYP è stato rinviato al secondo anno. Visto che il codice di calcolo, i materiali impiegati e le librerie di sezioni d'urto sono comuni al SP², non si ritiene necessario eseguire il prototipo con rivelatori passivi, ma si costruirà direttamente la versione attiva nel corso del 2013.
- Il secondo anno (2012) è dedicato alla scelta dei rivelatori attivi da introdurre nelle strutture moderatrici di SP² e CYSP e alla scelta della relativa elettronica di acquisizione multicanale.
- La costruzione di un SP² ed un CYSP attivi è stata portata al terzo anno.
- Il secondo anno prevedeva anche l'acquisizione di tutti i rivelatori attivi e della elettronica di acquisizione per gli spettrometri finali. Ciò è stato fatto solo parzialmente, tenuto conto dei citati tagli economici. Vedere Par. 1.18.

1.2 Attività del 2012

Come da documentazione già presentata in luglio 2011, si riportano le attività previste per il 2012. Nei paragrafi seguenti ogni attività è dettagliata e commentata.

- X1. Calcolo della matrice risposta del CYSP.
Data prevista: 01-07-2012.
Completato al 100%, vedere Par. 1.3
- X2. Prova degli ATND in campo termico.
Data prevista: 31-10-2012.
Completato al 100%, vedere Parr. dal 1.4 al 1.17
- X3. Prova degli ATND all'interno del Mini-CYSP in campi realistici.
Data prevista: 31-10-2012.
Completato al 100%, vedere Parr. dal 1.4 al 1.17
- X4. Scelta del ATND ottimale per la realizzazione di CYSP e (SP)² attivi finali.
Acquisizione dei rivelatori.
Data prevista: 31-12-2012.
Rivelatori acquisiti solo parzialmente. vedere Par. 1.18
- X5. Acquisizione e caratterizzazione dell'elettronica per la lettura simultanea di tutti gli ATND attivi dei CYSP e (SP)² attivi finali.
Data prevista: 31-12-2012.
Elettronica acquisita solo parzialmente. vedere Par. 1.18

1.3 Spettrometro cilindrico CYSP: studio monte Carlo e disegno finale

Lo spettrometro cilindrico deve avere le seguenti caratteristiche:

- diametro e lunghezza adeguati per l'intervallo di energie da misurare
- un canale di entrata per i neutroni provenienti dalla direzione voluta
- un collimatore di materiali e dimensioni adeguate per eliminare i contributi dalle altre direzioni;
- una adeguata disposizione dei rivelatori in termini di profondità e distanze reciproche;
- uno strato di materiale ad alto Z che funzioni come Energy-shifter per neutroni di alta energia.

E' stata condotta un'imponente campagna di calcoli Monte Carlo in cui la matrice risposta del dispositivo è stata studiata al variare di tutti i parametri sopra-indicati. Inoltre, al fine di verificare la capacità del dispositivo di "rigettare" i neutroni provenienti da direzioni non desiderate, ogni configurazione è stata simulata all'interno di una sala di misura realistica, in cui sono presenti un campo diretto (proveniente da una sorgente) ed

uno diffuso (ad opera delle pareti della sala).

Figura 1 mostra una tipica configurazione geometrica, composta da un blocco cilindrico in polietilene munito di collimatore, filtri di Cd per eliminare la componente termalizzata proveniente da direzioni indesiderate, intercapedini di aria per alimentare i rivelatori posti in profondità, ed infine un disco di piombo per rendere possibile la rivelazione dei neutroni alta energia. Le posizioni di misura sono collocate lungo l'asse cilindrico a profondità determinate. Nelle posizioni di misura sono stati inseriti dei rivelatori di termici con risposta $1/v$ (per analogia con lo studio sull'SP2, è stato scelto il Disprosio naturale).

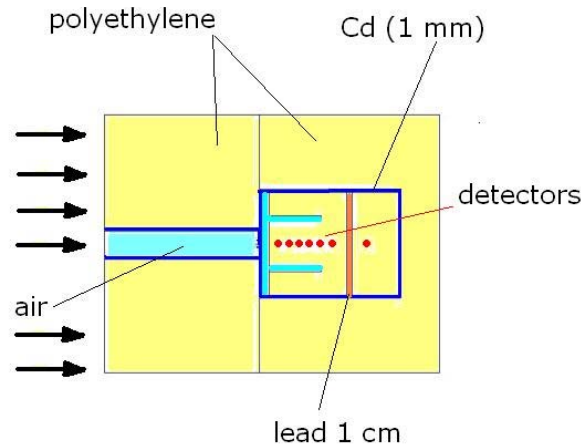


Figura 1. Una delle geometrie ipotizzate per il CYSP.

In Figura 2 si riporta la matrice risposta di una delle configurazioni studiate. Il grafico riporta, per ogni posizione di misura, il segnale del rivelatore, per unità di fluena incidente, al variare dell'energia. Il calcolo è stato fatto nel vuoto, utilizzando un fascio piano parallelo di neutroni.

Le posizioni dei rivelatori sono indicate con i numeri da 0 a 8, dove 0 rappresenta un rivelatore posto esternamente sulla "bocca" del collimatore (è evidente per il fatto che risponde praticamente solo ai neutroni termici). I numeri da 1 a 8 indicano rivelatori di neutroni termici posti a profondità crescenti. I rivelatori 6, 7 ed 8 si trovano sotto al filtro di piombo. La loro risposta è infatti caratterizzata da una "soglia" attorno al MeV. È importante notare che anche i rivelatori dal 2 al 5, posti cioè sopra al piombo, hanno una risposta significativa ai neutroni di alta energia. Ciò è dovuto al fatto che i neutroni secondari dalle reazioni (n, xn) ad alta energia sono anche emessi a grandi angoli.

Il dispositivo ha capacità spettrometrica in quanto, passando da un rivelatore al successivo, vi è un notevole cambiamento nella risposta.

È interessante far notare che, al variare dei parametri geometrici elencati al principio del paragrafo, la matrice risposta NON varia in modo drammatico. Quello che può variare anche fortemente è la capacità del sistema di rigettare i neutroni provenienti da direzioni indesiderate. Anche questo aspetto (risposta direzionale) è stato oggetto di ottimizzazione mediante monte Carlo.

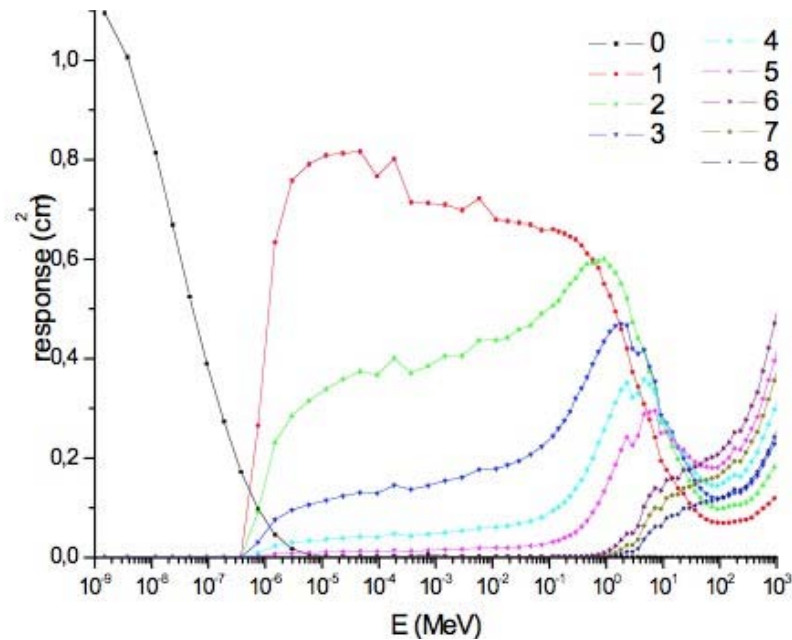


Figura 2. Tipica matrice risposta di una delle geometrie ipotizzate per il CYSP.

La risposta direzionale del CYSP è stata studiata nel seguente modo:

- la configurazione sotto studio è stata inserita in una sala di irraggiamento rappresentativa di una tipica irradiation hall di una facility da fast neutron irradiation: dimensioni dell'ordine della decina di metri e pareti in cemento (Figura 3).
- Si è ipotizzata una sorgente isotropica di neutroni di varie energie e si è collocato lo strumento ad una distanza di alcuni metri.
- Si è simulata la risposta dei diversi rivelatori in presenza ed in assenza di sala. La risposta in presenza di sala include il contributo diffuso dalle pareti e dall'aria, mentre la risposta "senza sala" è quella "ideale" perché risente solo della radiazione proveniente dalla direzione "voluta" sorgente-strumento.

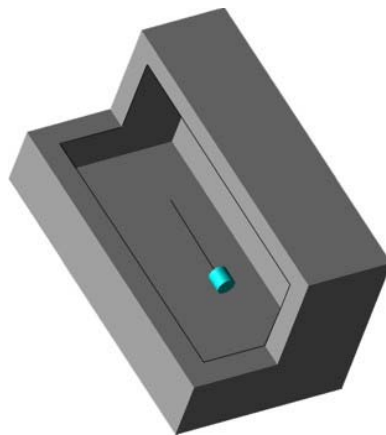


Figura 3. Modello di sala usato per lo studio della risposta direzionale del CYSP.

Evidentemente, lo strumento “ideale” dovrebbe avere, per tutti i rivelatori, un rapporto UNITARIO fra risposta “senza sala” e “risposta con sala”. In realtà questo rapporto è tanto più inferiore a 1 quanto più il rivelatore in oggetto “vede” la radiazione diffusa dalla sala.

A scopo esemplificativo vedere la Figura 4, ovvero il citato rapporto (no wall / wall) è riportato, in funzione della posizione del rivelatore, per la configurazione denominata CYSP-1 (mostrata in Figura 5).

Siccome la configurazione non presenta collimatore, le posizioni poco profonde risentono moltissimo della radiazione diffusa, mentre il rapporto aumenta all’aumentare della profondità lungo l’asse del cilindro.

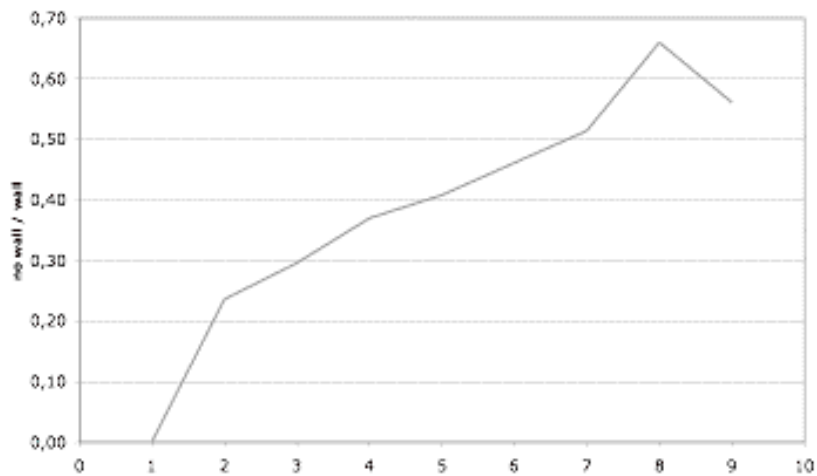


Figura 4. Rapporto (no wall / wall) per la configurazione di Fig. 5 all’energia di 1 MeV.

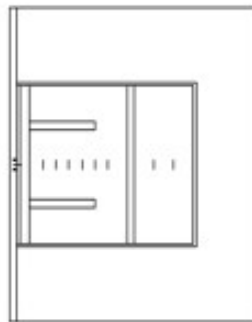


Figura 5. Configurazione denominata CYSP-1, priva di collimatore e con due posizioni sotto piombo.

A partire dal risultato Monte Carlo ottenuto per la configurazione CYSP-1, la geometria è stata migliorata cercando di appiattire verso l’unità il profilo di Fig. 4, mantenendo allo

stesso tempo un'elevata modulazione della risposta all'interno del cilindro, ossia una buona capacità spettrometrica. In particolare, come si può notare dall'evoluzione mostrata in Figura 6, è stato aggiunto un collimatore, ne sono state variate le dimensioni e sono state cambiate le posizioni dei rivelatori.

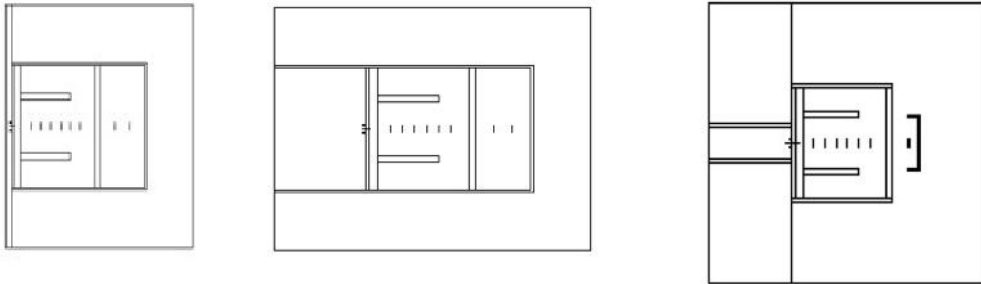


Figura 6. Diverse fasi evolutive del disegno del CYSP.

Il percorso evolutivo ha permesso di identificare una configurazione finale, chiamata CYL-7, che presenta un profilo (no wall / wall) molto prossimo all'unità su tutte le energie e per tutti i rivelatori. Lo spettrometro finale attivo verrà costruito sulla base di questo disegno Monte Carlo. La sua prestazione, a confronto con le fasi immediatamente precedenti CYL-5 e CYL-6, è mostrata in Figg. 7 e 8.

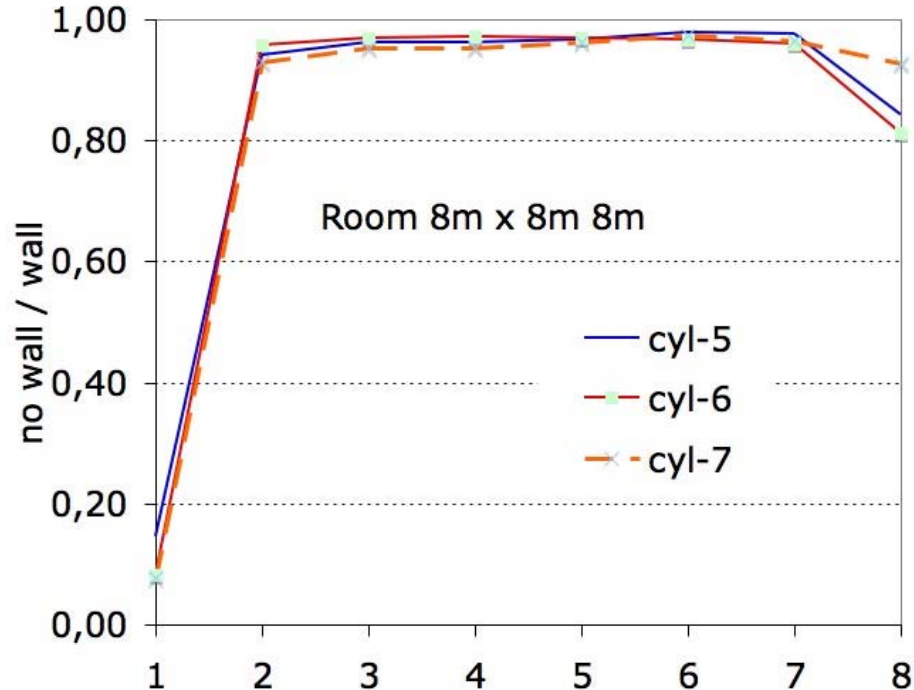


Figura 7. Profilo del rapporto (no wall / wall) ad 1 MeV per le configurazioni CYL-5, CYL-6 e CYL-7 (definitiva).

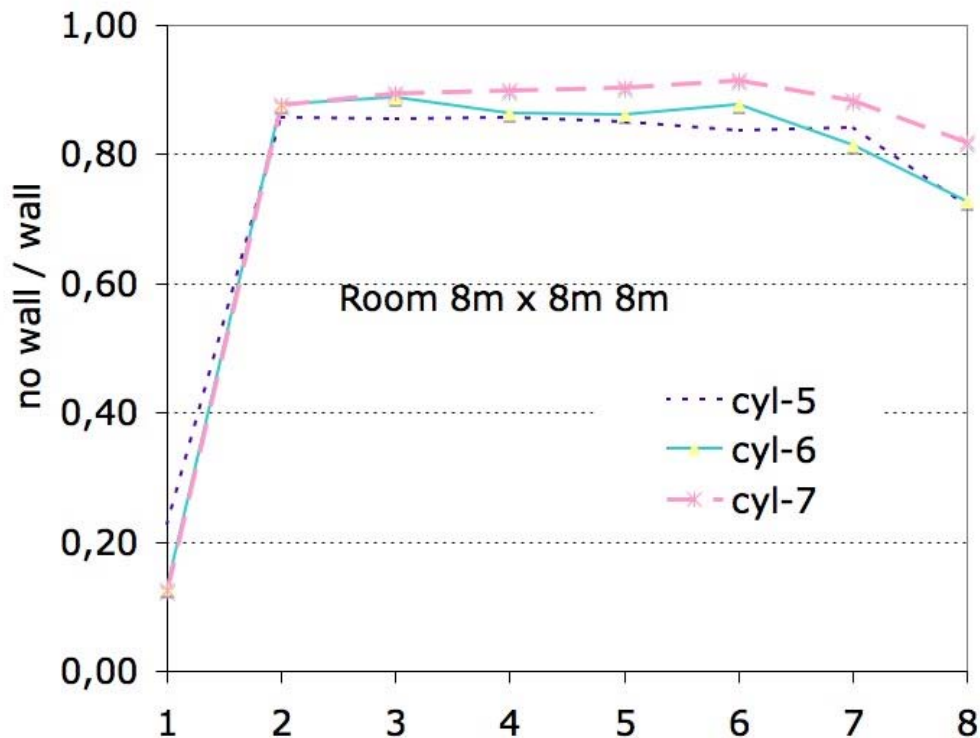


Figura 8. Profilo del rapporto (no wall / wall) a 10 MeV per le configurazioni CYL-5, CYL-6 e CYL-7 (definitiva).

1.4 Stato dei rivelatori attivi

Come dichiarato al Par. 6.3 del documento presentato per il finanziamento 2012, sono stati valutati i seguenti rivelatori attivi come possibili candidati per il CYSP e l'SP² finali, da costruire nel 2013:

Diamanti CVD. Da tests effettuati [1] su un diamante di circa 0.5 cm x 0.5 cm opportunamente ricoperto da uno strato micrometrico di ⁶LiF, appare chiaro che questo tipo di rivelatore è sicuramente adatto dal punto di vista dell'ottima separazione fra segnale neutronico e fotonico (Vedere Fig. 9). Ciò si deve all'elevata energia dei prodotti della reazione di cattura ⁶Li(n,α)³H: il tritone ha energia 2.73 MeV mentre la particella alfa ha energia 2.05 MeV. Tuttavia il rivelatore, allo stato attuale, soffre di due problemi che hanno indotto il gruppo a scartarlo in vista della produzione degli spettrometri finali:

Bassa sensibilità. Anche quando lo spessore di convertitore ⁶LiF raggiungesse i 30 μm, ovvero lo spessore che massimizza il numero di alfa e tritoni che entrano nel volume sensibile del diamante (seppur degradando la separazione fra i due picchi), la risposta ai neutroni termici (intesa come numero di impulsi per unità di fluensa termica incidente)

non sarebbe superiore a circa 0.01 cm^2 . Tenuto conto che:

- negli spettrometri finali gli ATND si troveranno all'interno di un moderatore
- Il valore "ottimale" del rapporto di moderazione, inteso come flusso termico nelle posizioni di misura / flusso veloce incidente, è dell'ordine di 20,
- per tipici spettri veloci, il valore del rapporto di segnale fra la posizione di massimo e quella di minimo è dell'ordine di 10;

per avere statistiche di conteggio accettabili sulle posizioni meno sensibili, ovvero circa 10 – 20 cps, servirebbero flussi veloci dell'ordine di $4 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Se nei fasci di spallazione ad alta potenza questo valore può essere raggiunto, nelle applicazioni mediche o di dosimetria (anche in zone controllate di centrali nucleari o impianti di fabbricazione di combustibile) si hanno flussi sicuramente più bassi, anche di 2 o 3 ordini di grandezza. E' pertanto necessario aumentare l'efficienza del rivelatore, ad esempio aumentandone l'area.

Alto costo: il singolo diamante ha un costo superiore ai 2000 €. Se se ne volesse inoltre aumentare l'area sensibile per aumentare la risposta, tale costo esploderebbe.

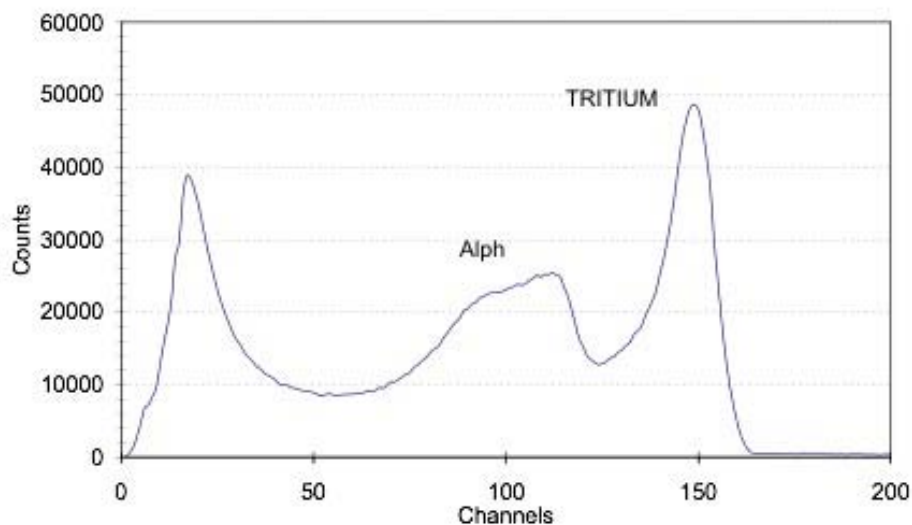


Figura 9. Spettro ottenuto irraggiando con neutroni termici un diamante ricoperto da uno strato micrometrico di ^6LiF .

Contatori a gas BF_3 di piccola dimensione. La reazione di cattura $^{10}\text{B}(n,\alpha)$ si sviluppa in due canali, aventi Q-valore 2.8 MeV e 2.3 MeV e probabilità 6% e 94% (Vedere in Fig. 10 lo spettro tipicamente ottenuto irraggiando con neutroni termici un rivelatore a gas di BF_3).

Il costo di questi rivelatori, benché inferiore al CVD (circa 1000 €/cad. per un rivelatore con lunghezza sensibile 5 cm, diametro 13 mm e pressione 20 cmHg), è sempre molto alto pensando al numero di rivelatori necessari. L'efficienza è adeguata e la discriminazione n/gamma buona, ma non è possibile miniaturizzarli fino ad 1 cm, che è il goal per gli spettrometri finali.

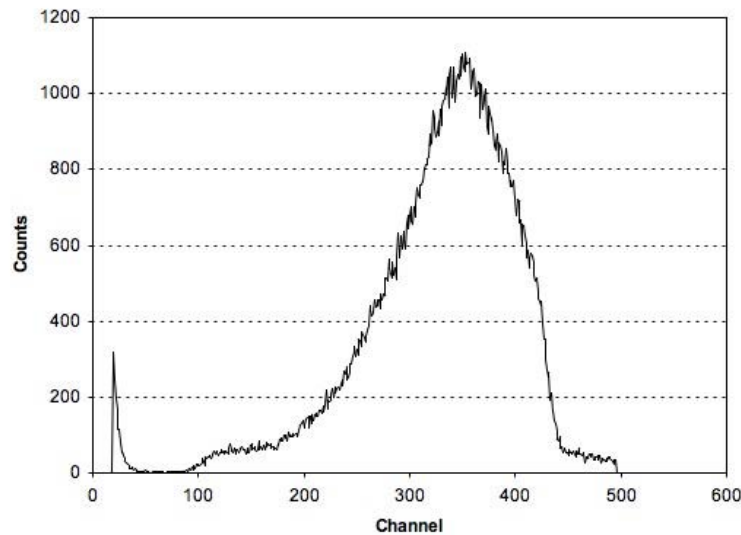


Figura 10. Spettro ottenuto irraggiando con neutroni termici un rivelatore a gas di BF_3 .

Rivelatori al Silicio ricoperti da convertitori di neutroni termici.

Come dimostrato nei paragrafi seguenti, questa è la scelta finale che tiene conto di una serie di vantaggi sottoelencati:

- adeguata sensibilità: se di area sufficientemente grande (1 cm^2 nel nostro caso) e ricoperto con l'adeguato convertitore (Par 1.9), il silicio presenta buone statistiche di conteggio in tempi dell'ordine di minuti o decine di minuti anche con bassi flussi veloci (dell'ordine di 10^2 o $10^3 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$). Inoltre, attraverso un'opportuna miscelazione di materiale convertitore è possibile modulare la sensibilità del rivelatore di circa un fattore 15. Questo permetterà di fornire, a seconda del campo di radiazione su cui lo spettrometro sarà installato, il detector con la sensibilità ottimale.
- basso costo. I rivelatori attualmente in uso costano circa 120 € /cad e il convertitore viene depositato ai LNF, a costi ridottissimi (il convertitore costa < 1 € per rivelatore).
- Buona miniaturizzazione. I rivelatori scelti hanno dimensione $12 \times 14 \times 2 \text{ mm}^3$, sufficientemente piccole per non perturbare il campo moderato quando 30 rivelatori sono inseriti lungo gli assi di una sfera da 25 cm di diametro.
- Buona separazione neutroni/gamma, che permette di ottenere il solo contributo neutronico da una semplice elaborazione del segnale.

Considerazione sul tipo di semiconduttore ed il "radiation damage". È noto che il silicio è soggetto a "radiation damage" dovuto ai neutroni veloci, quando la fluensa totale raggiunge 10^{12} cm^{-2} (a 1 MeV). Rivelatori al SiC o al diamante sono sicuramente più resistenti, ma avrebbero costi proibitivi se si volessero realizzare in aree dell'ordine del cm^2 , necessarie per ottenere le sensibilità richieste da questo progetto.

1.5 Scelta del ATND (active thermal neutron detector) finale

Considerando pertanto che:

- il numero di rivelatori necessari per CYSP e SP² è dell'ordine di varie decine;
- il costo per rivelatore non può superare il centinaio di €;
- il fatto che gran parte dei campi ove CYSP e SP² potranno convenientemente essere impiegati ha flussi veloci sicuramente inferiori a 1E+5 cm⁻² s⁻¹,
- una volta costruiti e testati un CYSP ed un SP² per “basso flusso”, la matrice risposta, l'elettronica di elaborazione e i programmi di unfolding possono essere immediatamente estesi per impiegare rivelatori per “alto flusso”,

- (1) **si è deciso di concentrare gli sforzi sulla fabbricazione di spettrometri adatti a flussi fino a 1E+5 cm⁻² s⁻¹, usando diodi al silicio a basso costo con deposizione di strato sensibile “in-house”.**
- (2) **Eventuali facilities che richiedessero prestazioni più spinte in termini di flusso neutronico, saranno coinvolte come finanziatori per rimpiazzare i diodi al silicio con rivelatori più resistenti (e molto più costosi).**

1.6 Elettronica analogica: preamplificatori e amplificatori di segnale

I rivelatori ATND (active thermal neutron detectors) sviluppati in NESCOFI@BTF sono utilizzati in modalità spettrometrica, ossia l'informazione sui neutroni termici incidenti viene ottenuta dall'elaborazione della distribuzione di energia rilasciata dai neutroni nel rivelatore. Ci si è posti pertanto due problemi:

- come realizzare la singola catena di acquisizione (preamplificatore, amplificatore e digitalizzazione del segnale);
- come parallelizzare decine di catene di acquisizione (una per ogni posizione del CYSP e dell' SP²

Per la singola catena di acquisizione è senz'altro possibile acquistare moduli commerciali di preamplificatori e amplificatori, ma il costo per attrezzare un intero spettrometro veloce con 10 (CYSP) o 31 (SP²) posizioni di misura sarebbe proibitivo. **Si è pertanto optato per realizzare in casa l'elettronica analogica necessaria**, a partire da preamplificatori ed amplificatori integrati a basso costo (meno di 100 € per chip).

Dopo un'analisi di mercato volta a recuperare i componenti più performanti al minor prezzo, si è scelto il fornitore e si sono confrontate le prestazioni elettroniche del chip “low-cost” con quelle dei suddetti moduli commerciali ad alto costo (ORTEC, SILENA).

Un primo test ha riguardato la misura del noise-FWHM in funzione del tempo di formazione dell'impulso nell'amplificatore (τ) (variato da 0.1 a 10 μ s) ed in funzione della tensione di alimentazione V_{bias} al rivelatore (variata su 3.5 V, 12.2 V e 23.7 V). In Fig. 11 si mostra il confronto fra la catena “a basso costo” e quella tradizionale (SILENA e ORTEC) alla tensione di 12.2 V (il massimo valore di bias usato per i rivelatori di NESCOFI). I rimanenti parametri elettrici del circuito sono: impulso di test: 2.5 mV,

capacità di iniezione nel pre: 4.91 pF.

Le curve sono del tutto sovrapponibili, così come per le altre tensioni non mostrate.

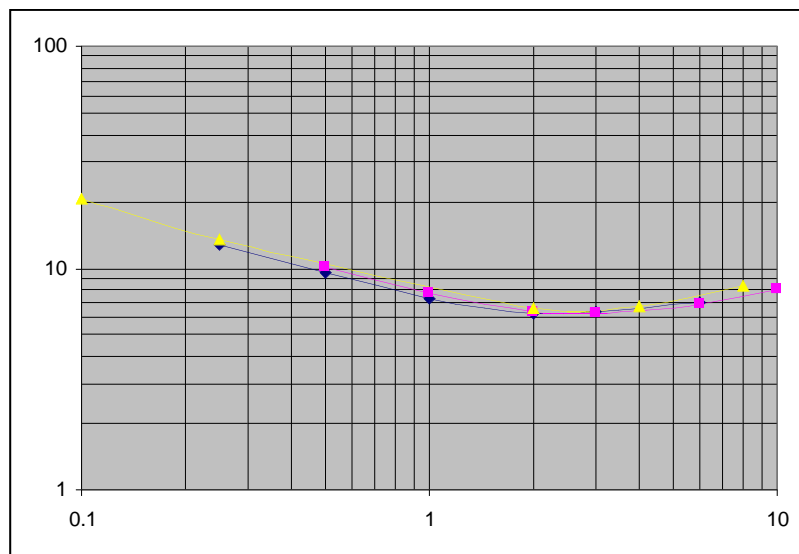


Fig. 11. Noise-FWHM in keV in funzione del tempo di formazione dell'impulso (us). Blu = SILENA; ROSA = ORTEC, GIALLO = "low-cost".

Si veda inoltre Tab. 1 dove il Noise-FWHM teorico viene comparato con quello misurato. La ottima concordanza fra le due serie di dati indica che i componenti NON presentano sorgenti di rumore diverse dal rumore elettronico prevedibile e calcolabile secondo i parametri elettrici del circuito.

Tabella 1. Noise-FWHM in funzione del tempo di formazione dell'impulso

| Tau (us) | FWHM (keV) TEORICO | FWHM (keV) "low-cost" |
|----------|-----------------------|--------------------------|
| 0.1 | 20.43 | 20.52 |
| 0.25 | 13.06 | 13.49 |
| 2 | 6.07 | 6.64 |
| 4 | 6.02 | 6.69 |
| 8 | 7.68 | 8.25 |

Sulla base dei preamplificatori ed amplificatori integrati qui selezionati, sono state fabbricate DUE schede elettroniche per l'acquisizione SIMULTANEA di DUE oppure OTTO rivelatori. Ogni canale monta la linea di alimentazione per il detector, un pre ed un ampli. I test descritti nei paragrafi successivi sono stati eseguiti con queste schede.

La scheda a 2 canali è stata pensata per le prove sul singolo o doppio rivelatore, mentre quella ad 8 canali servirà per gli spettrometri finali. In particolare 4 schede da 8 canali verranno usate per l' SP² e due per il CYSP.

1.7 Elettronica digitale: analizzatore multicanale

Il segnale in uscita dagli stadi analogici delle schede descritte in 1.6 viene digitalizzato mediante oscilloscopi digitali; la filtrazione digitale e l'elaborazione di spettro sono realizzate da un software Labview appositamente sviluppato.

Gli oscilloscopi digitali sono:

- PICO 4227 a due canali, per la scheda a due canali
- NI USB 6366 (8 ingressi simultanei campionati fino a 2 MS/s) per la scheda a 8 canali.

1.8 Rivelatore a diodo: verifica della linearità

La linearità di ampiezza dell'impulso rispetto all'energia depositata nel rivelatore è una caratteristica determinante quando si fa spettrometria. Tale caratteristica è stata misurata ai LNF mediante le seguenti sorgenti gamma di bassa energia:

| | |
|--------|----------------------|
| Am-241 | 26.3 keV; 59.5 keV |
| Ba-133 | 31.6 keV |
| Co-57 | 217.6 keV; 136.5 keV |

Si riportano in Fig. 12 gli spettri gamma ottenuti dal rivelatore a diodo "tal quale" oppure "nudo", cioè prima di avere depositato il convertitore di neutroni. In Fig. 13 è riportata la retta di calibrazione energetica, che mostra una eccellente linearità.

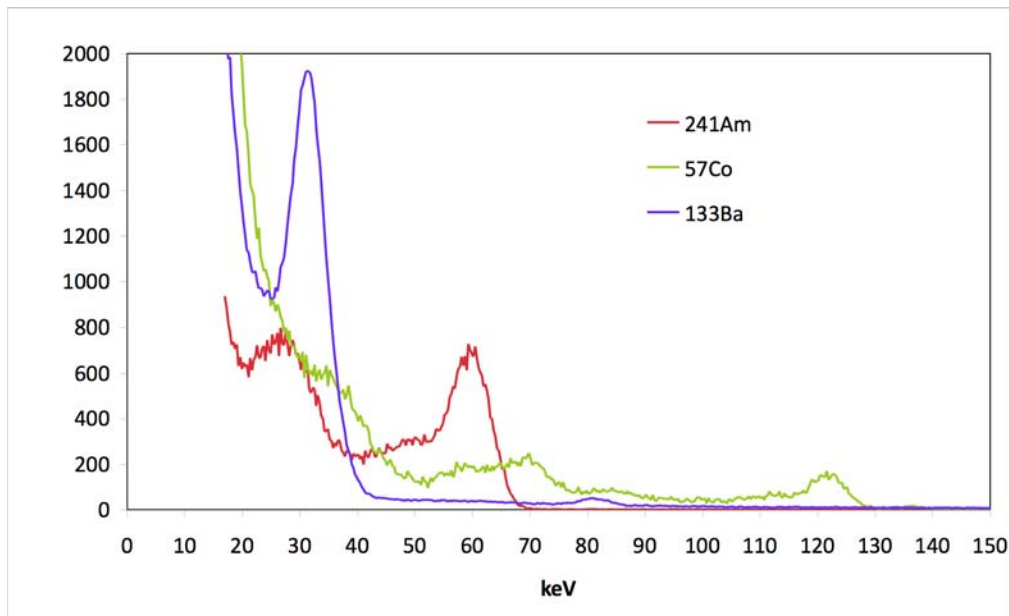


Fig. 12. Spettri gamma ottenuti dal rivelatore a diodo "tal quale" oppure "nudo", cioè prima di avere depositato il convertitore di neutroni.

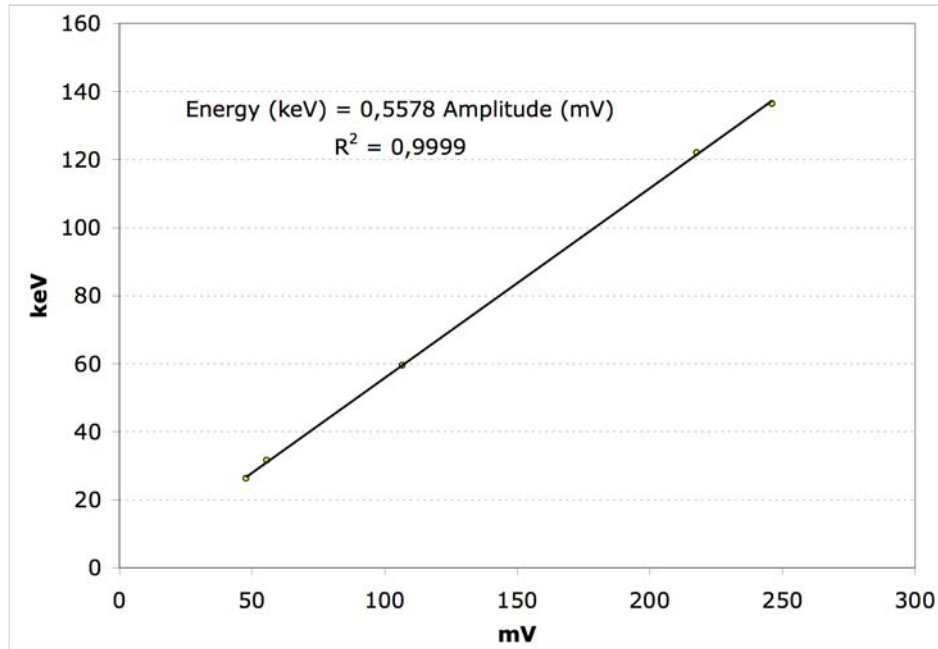


Fig. 13. Retta di calibrazione in energia depositata (per foto-elettroni) del rivelatore a diodo.

1.9 Sensibilizzazione dei rivelatori a diodo ai neutroni termici

I rivelatori a diodo scelti per questo progetto sono resi sensibili ai neutroni termici mediante deposizione di un opportuno convertitore. Naturalmente i convertitori sono composti ricchi in isotopi con elevata sezione d'urto di cattura per neutroni termici.

Dopo un primo studio preliminare volto ad identificare il materiale con più alta resa di conversione (particelle cariche secondarie / neutroni termici incidenti), sono stati scelti **DUE tipi di convertitori**. Al termine dell'anno gli ATND formati da diodo+convertitore1 e diodo+convertitore2 saranno completamente caratterizzati e potranno essere impiegati all'interno del CYSP e dell' SP².

Sono state implementate presso i laboratori del Servizio FISMEL le seguenti fasi:

- preparazione della miscela di convertitore. Nota: è molto importante avere questa fase "in casa", in quanto la sensibilità finale ai n termici del rivelatore può essere "modulata" sulla base di:
 - 1) composizione del convertitore
 - 2) spessore del convertitore.
- deposizione sui diodi, con relative procedure di controllo dello spessore depositato. Attualmente le procedure consentono un buon livello di uniformità e riproducibilità di deposizione. Rivelatori nominalmente depositati con lo stesso spessore, presentano una dispersione tipica della sensibilità finale dell'ordine di pochi %.
- procedure di QA/QC sull'intero processo.

I test descritti in seguito sono suddivisi per tipo di convertitore (C1 e C2).

1.10 Convertitore C1 - sensibilità ai neutroni termici e spessore ottimale

Sono stati eseguiti test di irraggiamento in campo termico prodotto ai LNF moderando una sorgente veloce di $^{241}\text{Am-Be}$ con un cilindro di polietilene di diametro 15 cm.

Si veda Fig. 14 per lo schema dell'esperimento. La sorgente è schermata verso il cilindro con 6 mm Pb per eliminare i fotoni da 60 keV dell'Americio. La struttura è stata simulata con MCNP ottenendo, nel punto di misura, lo spettro indicato in Fig. 15.

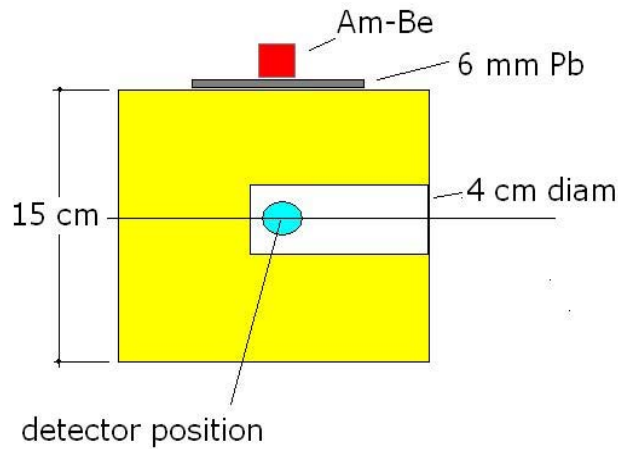


Fig. 14. Struttura moderatrice per la prova degli ATND in camp termico presso i LNF.

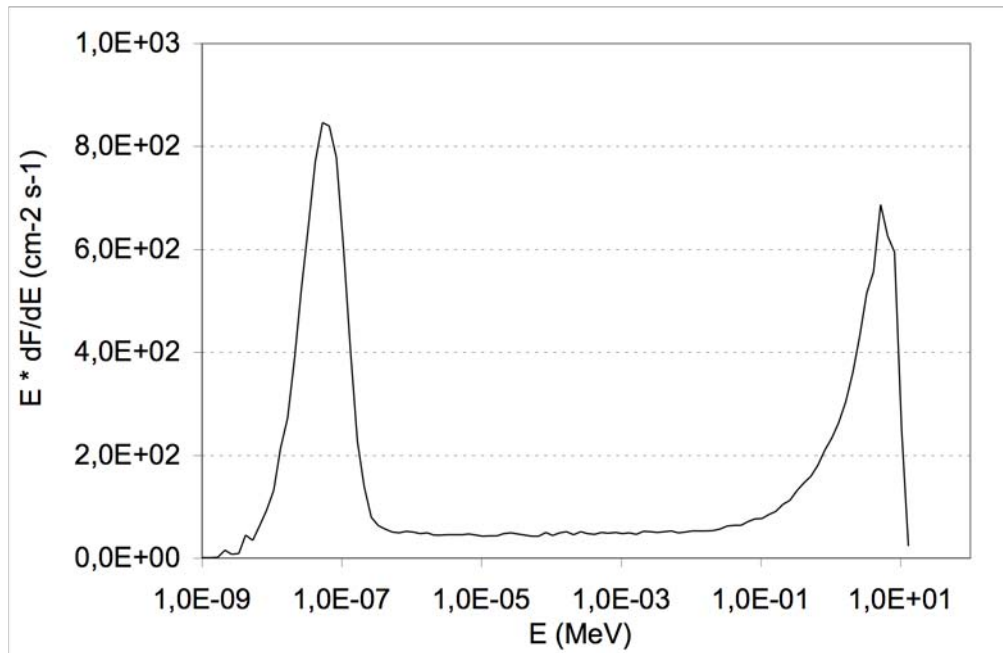


Fig. 15 Spettro neutronico nel punto di test al centro del cilindro.

I valori di flusso termico ($E < 0.4$ eV) e totale nel punto di test al centro del cilindro sono:

1.49E+3 cm⁻² s⁻¹ termico

3.30E+3 cm⁻² s⁻¹ totale

Sono stati preparati rivelatori ricoperti da diversi spessori del convertitore C1. La sigla RT (reference thickness) indica quello che poi sarà scelto come spessore ottimale sulla base dell'efficienza e della forma dello spettro. Gli spettri ottenuti esponendo 60 minuti nel cilindro di Fig. 14 sono riportati in Fig. 16, assieme allo spettro ottenuto con un rivelatore "nudo".

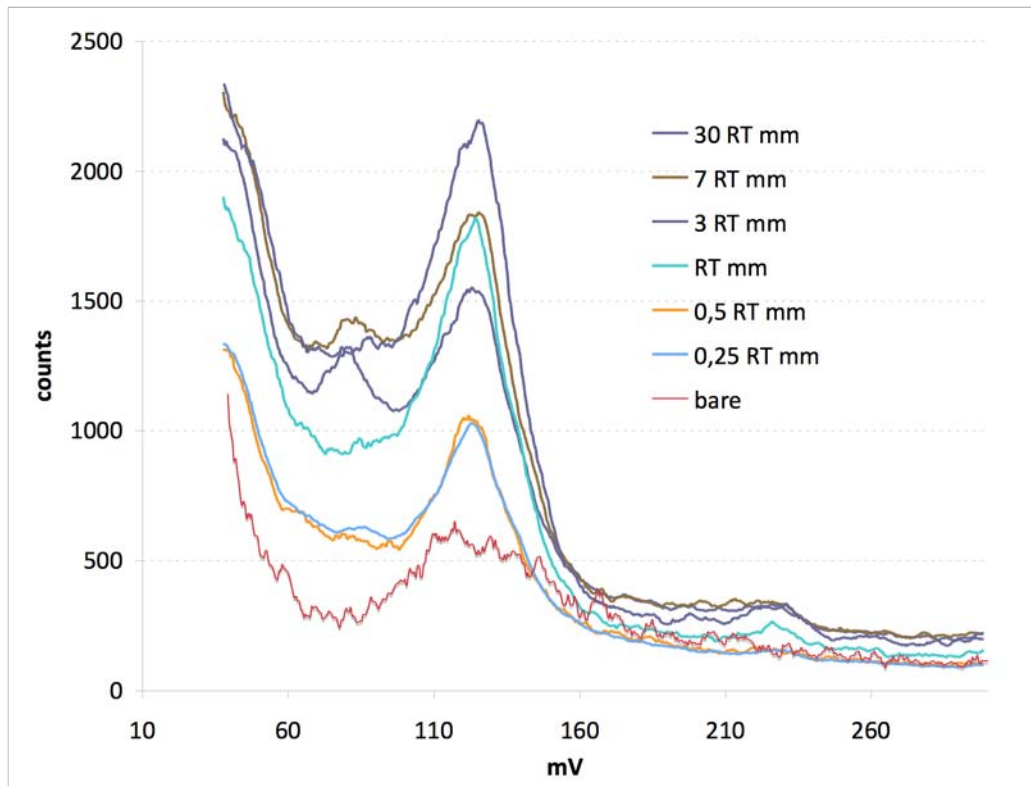


Fig. 16. Spettri ottenuti esponendo i diodi ricoperti con vari spessori di C1 per 60 minuti nel cilindro di prova.

Dal studio degli spettri "bare" e "ricoperti" emerge che:

(1) il segnale dovuto ai neutroni termici appare circa sui 120 mV, cioè nella stessa regione dove si manifesta, nel rivelatore nudo, il "continuo" dovuto agli elettroni secondari estratti dai gamma. **E' pertanto necessario, se si usa C1 come convertitore di termici, accoppiare un rivelatore "nudo" ad ogni rivelatore "ricoperto" e determinare per differenza il segnale dovuto ai n termici.**

(2) la risposta ai termici aumenta all'aumentare dello spessore di convertitore, ma allo stesso tempo aumenta anche la risposta ai fotoni. Lo spessore ottimale è da ricercare non

solo in funzione della massima sensibilità, ma anche in base alla forma dello spettro.
Si è pertanto scelto RT come spessore ottimale.

E' stato poi fabbricato un set di diversi rivelatori ricoperti con C1-RT e la loro sensibilità ai termici è stata determinata e confrontata. Su questa base si può affermare che:

- la risposta media ai termici è di 0.02 cm^2 (conteggi per unità di fluenza)
- la riproducibilità del processo di fabbricazione, intesa come variabilità della risposta ai termici per un set di rivelatori aventi nominalmente lo stesso spessore RT di convertitore, è di circa il 5%.

1.11 Convertitore C1. Linearità della risposta in flusso termico

Come dichiarato al 7.3.1. del documento presentato in Luglio 2011 per il finanziamento 2012, gli ATND con convertitore C1 sono stati provati ad un flusso termico variabile fino a $1\text{E}+6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ presso la thermal-pile del NPL (Teddington, UK) (Fig. 17).



Figura 17. “Thermal pile” del NPL. Bocca di uscita della colonna termica.

Il flusso termico è stato variato da $1\text{E}+3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ fino $1\text{E}+7 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

In Figura 18 si riporta come esempio lo spettro ottenuto a $2\text{E}+4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, usando un rivelatore ricoperto C1-RT nelle due configurazioni:

- esposto al campo termico
- esposto al campo termico con un filtro di gomma borata per eliminare il termico.

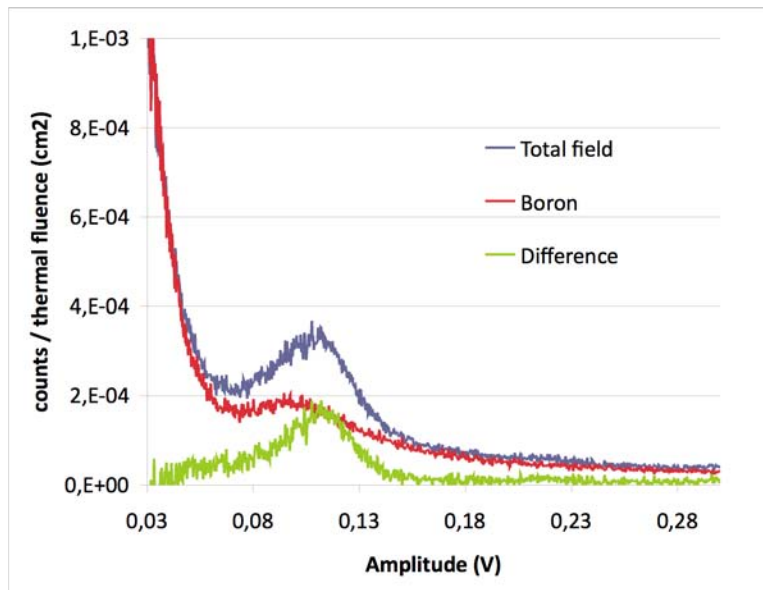


Figura 18. Spettro ottenuto con diodo ricoperto C1-RT a flusso $2E+4 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, con e senza assorbitore di boro.

I dati sono ancora in fase di elaborazione, ma si può affermare che i valori di risposta determinati in Par 1.10 sono ottimamente conservati su tutta la scala di flusso fino ad almeno $1E+6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, dove il sistema di acquisizione regge ancora bene ed il tempo morto è del tutto controllato. Si conferma che per valutare correttamente il segnale dovuto ai neutroni termici è necessario usare una coppia di rivelatori (uno nudo e uno ricoperto)

1.12 Convertitore C1. Acquisizione di rivelatori multipli nel MINI-CYSP

Come dichiarato al 7.3.2. del documento presentato in Luglio 2011 per il finanziamento 2012, gli ATND con convertitore C1 sono stati provati in parallelo all'interno di un moderatore cilindrico semplificato (Fig. 19), realizzato in polietilene e avente dimensioni 40 cm (diametro) x 50 cm (lunghezza). Come evidenziato in Fig. 20, al suo interno sono state realizzate delle cavità per alloggiare gli ATND.



Fig. 19. Procedura di calibrazione del Mini-CYSP con fasci monocromatici al NPL. Da

notare l'uso del cono d'ombra per stimare la radiazione diffusa.

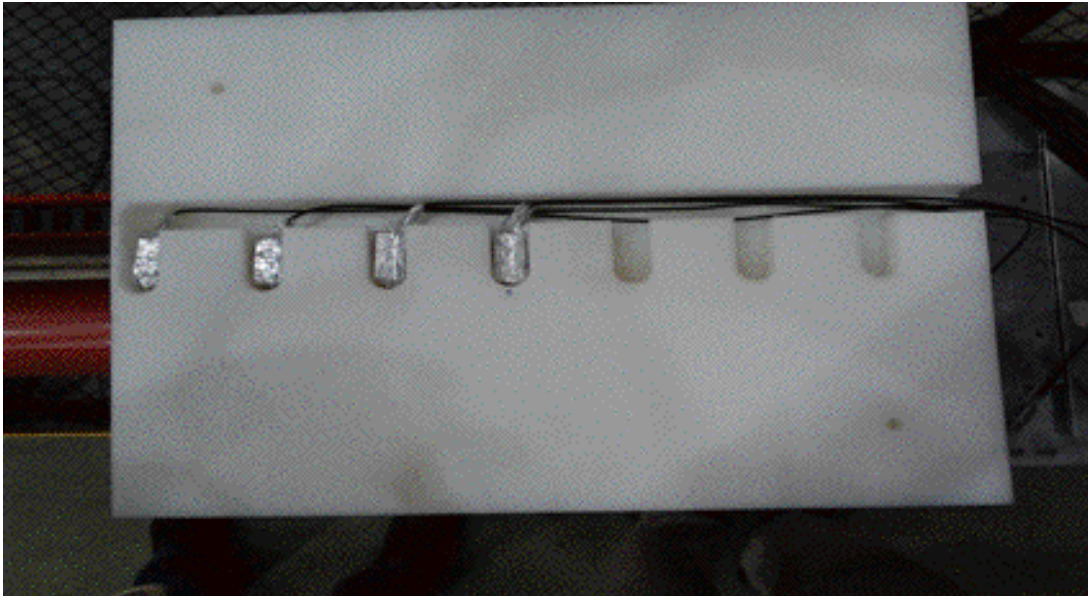


Fig. 20. Sezione del Mini-CYSP con quattro ATND montati.

Sono stati impiegati i fasci da 565 keV e 5 MeV con la tecnica di calibrazione del cono d'ombra.

L'acquisizione simultanea dei ATND (diodi ricoperti con RT-C1) all'energia di 565 keV ha prodotto gli spettri da Fig. 21 a Fig 27. Al fine di apprezzare la modulazione della risposta lungo l'asse del cilindro, sono riportati in ordine gli spettri dal rivelatore più superficiale a quello più profondo. Simili spettri, ma con diversi rapporti a causa della diversa energia incidente, sono stati ottenuti a 5 MeV.

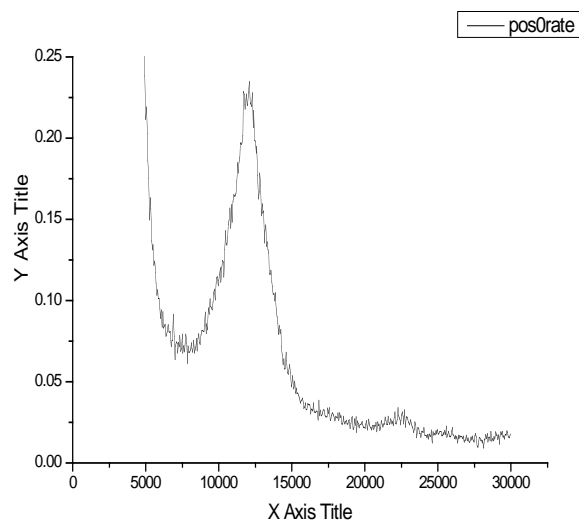


Fig. 21. Spettro della posizione 1 (la più superficiale).

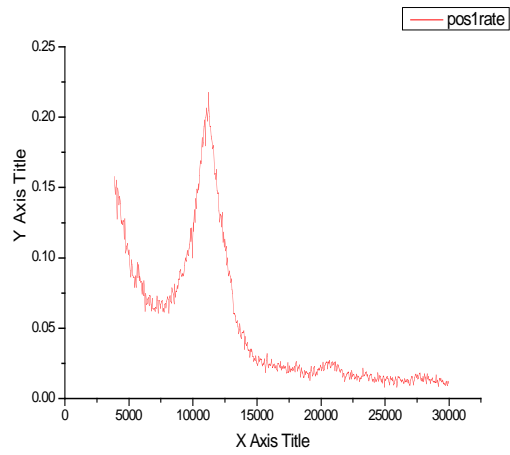


Fig. 22. Spettro della 2^a posizione verso l'interno del cilindro

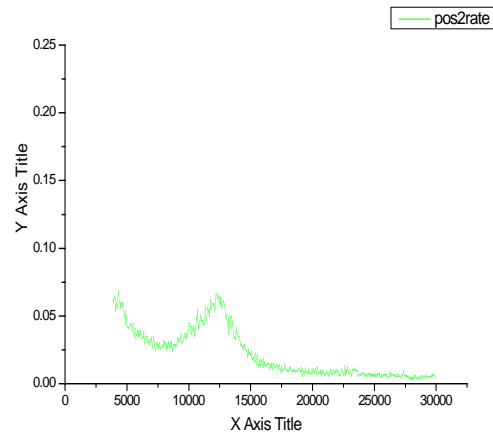


Fig. 23. Spettro della 3^a posizione verso l'interno del cilindro

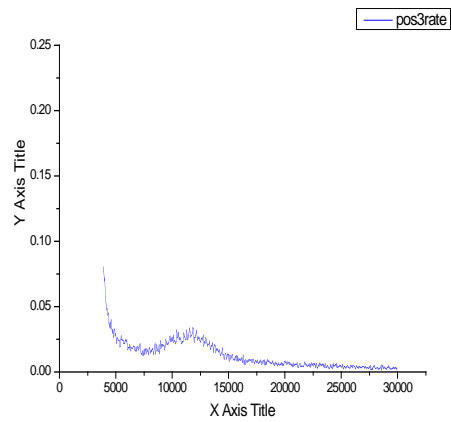


Fig. 24. Spettro della 4^a posizione verso l'interno del cilindro

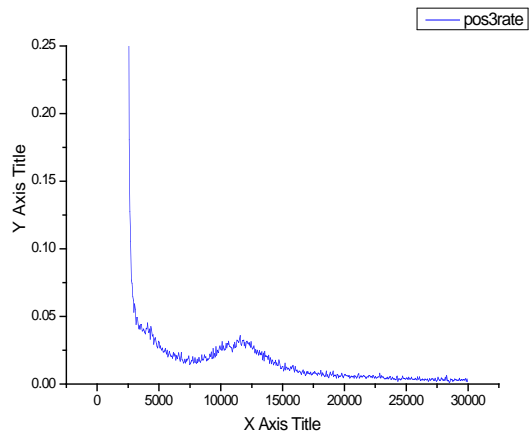


Fig. 25. Spettro della 5^a posizione verso l'interno del cilindro

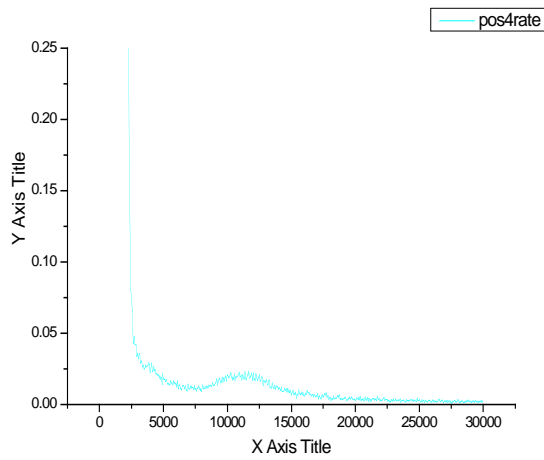


Fig. 26. Spettro della 6^a posizione verso l'interno del cilindro

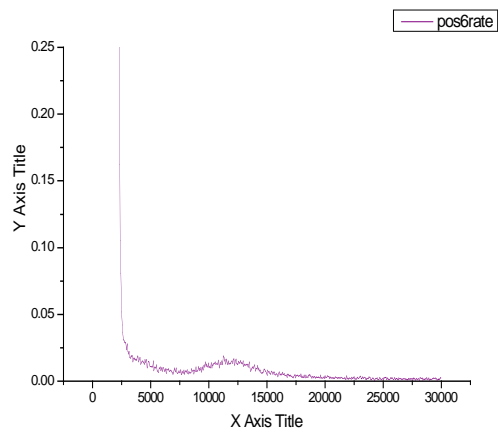


Fig. 27. Spettro della 7^a posizione verso l'interno del cilindro

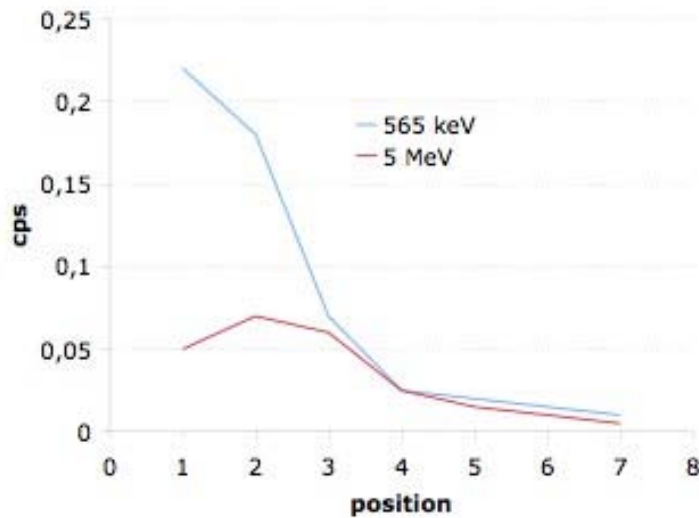


Fig. 28. Profilo di risposta a 565 keV e 5 MeV nel cilindro semplificato Mini-CYSP.

In Figura 28 è riportato il profilo della risposta al variare della posizione. Questo profilo verrà utilizzato, nello spettrometro finale CYSP, per ricostruire lo spettro neutronico.

1.13 Convertitore C1. Tests in n@BTF

Un rivelatore ricoperto con C1-RT è stato verificato, all'interno del stesso cilindro moderatore descritto in 1.10, usando il campo veloce della facility n@BTF presso i LNF. Il test conferma i risultati e le sensibilità di 1.10. In particolare questo test, condotto in un ambiente molto rumoroso dal punto di vista dei disturbi elettromagnetici, è stato utile per capire come migliorare le schermature elettromagnetiche dei circuiti analogici.

1.14 Tests di radiation damage

Nell'esperimento condotto all'NPL sono stati esposti rivelatori ricoperti C1-RT a fluenze accumulate fino a $5E+10$ cm⁻², senza produrre alcuna alterazione negli spettri acquisiti. Per arrivare a fluenze dell'ordine di $1E+12$ cm⁻² e per testare anche il convertitore C2, non ancora sviluppato in Marzo 2012 (quando si è svolta la campagna al NPL), è in programma una campagna di misura al reattore TRIGA di ENEA Casaccia.

1.15 Convertitore C2. Sensibilità ai neutroni termici e spessore ottimale

In analogia con quanto descritto in 1.10, il convertitore C2 è stato studiato, al variare dello spessore, nel campo di prova dei LNF realizzato con una sorgente di Am-Be e un cilindro di polietilene.

Lo spessore di riferimento (reference thickness), ovvero quello che ottimizza la risposta termica e la separazione fra segnale neutronico e fotonico nello spettro, è chiamato C2-RT.

Sono stati fabbricati rivelatori con i seguenti spessori di convertitore (normalizzati a RT): 0.17, 0.25, 0.32, 0.50, 0.87, 1.00

Gli spettri ottenuti con i vari convertitori sono riportati in Fig. 29, assieme allo spettro del rivelatore nudo che serve per “sottrarre” il contributo fotonico.

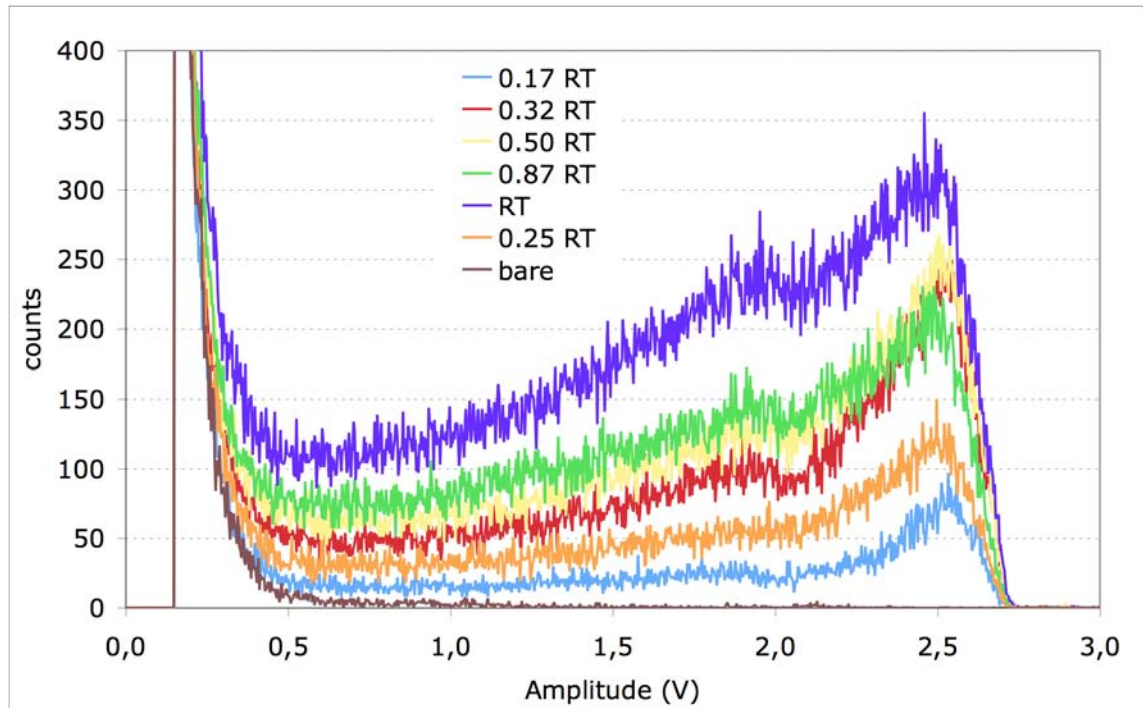


Fig. 29. Spettri ottenuti esponendo i diodi ricoperti con vari spessori di C2 per 60 minuti nel cilindro di prova.

E' molto interessante il fatto che il contributo fotonico si esaurisce nei primi canali. Di fatto, una soglia posta a 0.5 V è sufficiente per eliminare dallo spettro la quasi totalità del contributo fotonico.

Un importante risultato è che, impiegando il convertitore C2, non è necessario accoppiare un rivelatore “nudo” al rivelatore ricoperto, in quanto il contributo fotonico viene facilmente eliminato come di sopra indicato.

Tabella 2. Riposta ai termici in funzione dello spessore di C2.

| Spessore (in unità di RT) | Response (cm ²) |
|------------------------------|--------------------------------|
| 0.17 | 0.003 |
| 0.25 | 0.007 |
| 0.32 | 0.013 |
| 0.50 | 0.016 |
| 0.87 | 0.017 |
| 1.00 | 0.026 |

Dal confronto fra C1 e C2 emerge immediatamente che:

- 1) **La risposta dei due convertitori in spessore ottimale è simile.**
- 2) **Il convertitore C2 semplifica molto gli aspetti pratici di misura, in quanto un solo rivelatore è sufficiente per rivelare i neutroni termici eliminando il contributo fotonico. C1 invece richiede necessariamente l'impiego di una coppia di rivelatori nudo/ricoperto.**

1.16 Convertitore C2. Linearità col flusso termico e radiation damage

Queste prove non sono state fatte all'NPL in quanto il convertitore C2 non era ancora stato prodotto all'epoca della campagna NPL (marzo 2012). E' stata però prevista una campagna aggiuntiva dedicata al C2, presso il reattore TRIGA di ENEA Casaccia (16-17 luglio 2012). Ovviamente la qualità metrologica del fascio termico non sarà quella del NPL, ma si intende utilizzare un diodo C1-RT, calibrato al NPL, per la verifica del flusso presso la colonna termica del reattore.

1.17 Convertitori C1 e C2. Risposta "in-moderator" e capacità spettrometrica

Come previsto al 7.3.2. del documento presentato in Luglio 2011 per il finanziamento 2012, gli ATND con convertitori C1 e C2 sono stati provati all'interno di moderatori di riferimento (sfere di Bonner) per verificare che sia possibile utilizzarli per spettrometria neutronica.

Il campo neutronico, realizzato al TSL Uppsala (18-22 Giugno 2012), è quello prodotto da un fascio di protoni da 30 MeV che incide su un target di Berillio.

I dati di riferimento (log files e calibrazioni dei monitor di fascio) non sono ancora pervenuti, per cui l'elaborazione rimane al momento a livello qualitativo.

Sono state esposte una serie di sfere di Bonner (diametri in pollici: 2", 2.5", 3", 3.5", 4", 4.5", 5", 7", 8," 10", 12", più tre sfere a risposta estesa con attenuatori di piombo e rame e diametri esterni 7" e 12"). Sono stati impiegati tre diversi rivelatori centrali:

- scintillatore a ioduro di litio-6 (cilindrico, 4 mm x 4 mm), ossia il rivelatore classico che viene impiegato nelle sfere di Bonner
- il diodo C1-RT ed un diodi nudo per stimare il contributo fotonico
- il diodo C2-RT

A parità di carica incidente sul target di berillio, il rapporto dei conteggi ${}^6\text{LiI} / (\text{C1_RT} - \text{nudo})$ e ${}^6\text{LiI} / \text{C2_RT}$ NON DEVE dipendere dalla sfera utilizzata.

Nonostante i dati di riferimento non siano ancora pervenuti, un'analisi preliminare basata sul valore medio delle correnti di protoni ha confermato che i rapporti suindicati variano di poco più del 10% al variare della sfera.

Anche questo test appare completato con esito positivo.

E' utile, al fine di comparare i tre tipi di rivelatori all'interno dello stesso moderatore, esaminare gli spettri di Figg. 30, che si riferiscono alla misura fatta con la sfera di Bonner

da 5" (diametro 12.7 cm) con i tre rivelatori per un tempo di 5 minuti con corrente di protoni 50 nA su target di Be.

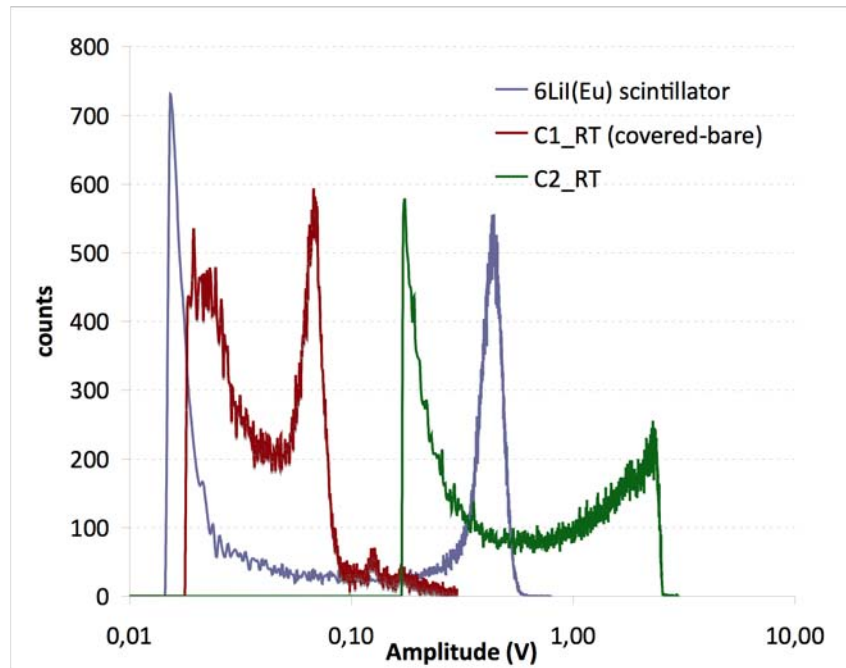


Fig. 30. Spettri nella sfera da 5" ottenuti a 50 nA x 5 minuti. Rivelatori ${}^6\text{Li}(\text{Eu})$ (riferimento per le sfere di Bonner, ma di difficile miniaturizzazione), diodo-C1 (ricoperto RT, nudo e differenza) e diodo C2-RT.

E' senza dubbio da osservare che anche lo scintillatore di ioduro di litio-6 presenta una buona efficienza ed una buona separazione n-gamma, ma anche nell'ipotesi di munirlo di un PMT compatto non sarebbe possibile ridurre le dimensioni a circa 1 cm, che è la dimensione "target" per le cavità porta-rivelatori degli spettrometri SP2 e CYSP finali. Tale rivelatore è stato usato in questa fase solo perché è il "classico" che viene impiegato nelle sfere di Bonner, dove non c'è il vincolo della miniaturizzazione spinta dei rivelatori.

1.18 Attività previste per il periodo da Luglio a Dicembre 2012

- Campagna di misura presso reattore TRIGA ENEA Casaccia
- Campagna di misura presso LINAC medicale Ospedale San Camillo (RM) necessaria per valutare la "robustezza" del sistema di acquisizione in un ambiente con un forte disturbo radiofrequenza e rappresentativo del campo "medico", ove si ritiene che gli spettrometri finali verranno in gran parte applicati.
- Completare l'elaborazione dati di tutte le campagne del 2012
- Disegnare i circuiti analogici di supporto per lo spettrometro SP2, che dovrà alloggiare 31 rivelatori.

Rispetto alle attività

- X4. Scelta del ATND ottimale per la realizzazione di CYSP e (SP)² attivi finali.
Acquisizione dei rivelatori.

Per realizzare un CYSP ed un SP² servono circa 60 rivelatori nell'ipotesi di poterne mettere UNO per posizione di misura. Questa ipotesi è collegata all'uso del convertitore C2 che permette di eliminare il contributo fotonico e allo stesso tempo di stimare accuratamente quello neutronico.

Nel 2012 sono stati acquisiti 60 rivelatori, che però sono stati completamente usati nelle molte prove di deposizione di diversi spessori sensibili con i due diversi tipi di convertitore. Alcuni rivelatori si sono danneggiati.

Pertanto si chiede di acquistare 60 rivelatori nel 2013 per dedicarli alla fabbricazione del CYSP e SP2 in configurazione "finale" (convertitore e spessore definiti).

- X5. Acquisizione e caratterizzazione dell'elettronica per la lettura simultanea di tutti gli ATND attivi dei CYSP e (SP)² attivi finali.

Il budget 2012 ha permesso di acquisire solo una parte dell'elettronica necessaria per gli spettrometri finali. Pertanto si chiede di completare l'acquisto nel 2013.

1.19 Collaborazioni e supporto esterno nel corso del 2012

- EU FP7 Erinda Program: 2.5 k€ (instrument shipment)
35 beam hours at TSL Uppsala
- CIEMAT Madrid 35,000 equiv-hours CPU time on EULER cluster
- CRISP (INFN-LNF): 12 k€ (neutron converters, trips exp. campaigns)
- Politecnico di Milano 4 k€ (trips at experimental campaigns)
- Ospedale San Camillo tempo macchina al LINAC da 15 MV per radioterapia

1.20 Supporto dei LNF nel corso del 2012

- una settimana di run presso n@BTF
- 2 mesi uomo presso officina meccanica
- 30 notti in foresteria
- Tutte le misure sperimentali e i processi di fabbricazione dei rivelatori si sono svolti nei laboratori dei Servizi FISMEL

1.21 Sito web

<http://www.lnf.infn.it/acceleratori/public/nescofi/>

1.22 Meetings di progetto nel corso del 2012

16 May 2012

NESCOFI@BTF 2012 Mid-Year Meeting & International Review Panel Meeting

Agenda e presentazioni scaricabili dal sito web

1.23 International Review Panel

E' stato stabilito un review panel di due esperti internazionali nel campo della dosimetria e spettrometria neutronica.

- 1) Prof. Carles Domingo, Profesor Titular of the Universitat Autònoma de Barcelona, UAB Head of the Neutron Measurement group of the UAB
carles.domingo@uab.cat
- 2) Prof. Francisco Sanchez Doblado, Profesor Catedrático of the Universidad de Sevilla, Head of the Physiology Department. paco@us.es

Il panel ha partecipato alla riunione del 16 maggio e a fine giornata ha formulato un report che si allega di seguito.

**Report of the International Review Panel
NESCOFI@BTF 2012 Mid-Year Meeting LNF 16 May 2012**

The motivation of the NEutron Spectrometry in COMplex Fields triennial project is to develop innovative neutron sensitive instruments for the spectrometric and dosimetric characterisation of neutron fields, originated in particle accelerators used in industry, research and medical applications. The neutron field in these situations may be continuous or pulsed and covers a wide energy range, from thermal (0.025 eV) to high energy (about 200 MeV). The only existing instrument usable for this purpose is the Bonner Sphere Spectrometer, which has the disadvantage of needing sequential exposure of the spheres. This makes it unusable in fields which may vary with time and not very useful for operational measurements.

The NESCOFI project proposes two instruments for overcoming these problems and to be used for operational purposes. The first one is the so called "SPherical SPectrometer (SP)²", based on a set of 31 detectors placed in the three perpendicular axis of a polyethylene sphere with a Pb inset, and a "CYlindrical SPectrometer CYSP", for directional measurements, with 8 detectors in the axis of a cylinder in the beam direction. Both these instruments have the capacity of acting as real-time neutron spectrometers or dosimeters if appropriate active detectors are used.

Dr. Bedogni, as leader of the project, presented a very clear and structured overview of its progress, the scientific publications and presentations consequence of the developments and experiments made until now. The objectives of the project for mid-2012 are already accomplished. In addition, the future plans to cover the remaining objectives were also summarised. The fact that publications have appeared in the appropriate journals of the field indicates the high quality of the work and its acceptance by the scientific community. The spectrometric capacity of both detectors and the directional independence of the (SP)² detector response has already been experimentally proved. One of the most relevant novelties of the project is the development of new active neutron detectors, based on Solid State Detectors with an adequate coating, which could replace the traditional ³He based detectors. The ability of such detectors to separate the neutron component from the photon one has been experimentally determined. It has been suggested that one immediate application of the (SP)² detector is to verify the non variability of the neutron spectrum in modern radiotherapy techniques such as IMRT, given the complex and variable multileaf collimator geometry along the treatment.

Dr. Gómez-Ros presented with much detail the results of the simulation for defining both detectors. The actual configuration of the (SP)² detector is a consequence of the feedback from several simulation steps, leading to an already optimised solution for passive detectors. Nevertheless, the discussion about the implementation of active detectors suggested that some more specific simulation should be performed to include the extra material (cables, connectors and detectors) to evaluate how the perturbation originated modifies the results. If this modification is substantial, the response matrix should be re-evaluated. Work on the CYSP detector is still in progress and will be finished shortly. A much elaborated geometry has been set-up from the iterative




simulation results, solving step by step the problems of lack of uniformity of the response.

Finally, Mr. Davide Bortot described the data acquisition system for the multiple active detectors simultaneous signal processing. The system has been well tested in several neutron reference facilities. It appeared that the cost of the complete detection system is quite low in comparison to its performance. It has also been tested for radiation damage, finding no relevant harm. The solution presented to extend from 8 to 31 channels is just to use four boards in parallel. The electronic system is set up sending a well known pulse signal from a pulse generator to all channels. Although the bias voltage should be optimised, the variability of the system response is not critical around the selected voltage of 6 V.

In summary, the established objectives have been successfully fulfilled so far, some improvements and applications have been suggested to be performed in the next months with the remaining objectives, which were subject of the final discussion in order to fix an exhaustive programme of activities to continue the project activities.


Dr. Francisco Sánchez-Doblado


Dr. Carlos Domingo

1.24 Pubblicazioni nel corso del 2012

R. Bedogni, K. Amgarou, C. Domingo, S. Russo, G.A.P. Cirrone, M. Pelliccioni, A. Esposito, A. Pola, M.V. Introini. Experimental characterization of the neutron spectra generated by a 62 AMeV carbon beam on a PMMA phantom by means of extended range Bonner sphere spectrometers. NIM A 681 (2012) 110–115.

R. Bedogni, C. Domingo, M. J. Garcia Fuste, M. de-San-Pedro, A. Esposito, A. Gentile, L. Tana, F. d'Errico, R. Ciolini, A. Di Fulvio. Calibration of neutron sensitive devices in the neutron field produced in the treatment room of a medical LINAC. Radiation Measurements (2012), doi:10.1016/j.radmeas.2012.04.009.

J. M. Gomez-Ros, R. Bedogni, M. Moraleda, A. Esposito, A. Pola, M.V. Introini, G. Mazzitelli, L. Quintieri, B. Buonomo. Designing an extended energy range single-sphere multi-detector neutron spectrometer. Nucl. Instr. Meth. A 677 (2012) 4-9.

R. Bedogni, J. M. Gomez-Ros, A. Esposito, A. Gentile, M. Chiti, L. Palacios-Perez, M. Angelone, L. Tana. Workplace testing of the new single sphere neutron spectrometer based on Dysprosium activation foils (Dy-SSS). NIM A 684 (2012) 105–108.

2. ATTIVITA' PREVISTE PER IL 2013

2.1 Strategia generale

Considerato che il disegno e la simulazione degli spettrometri sono completati e che il gruppo ha identificato idonei rivelatori di neutroni termici,

nel 2013 si intende costruire un prototipo attivo per ognuno degli spettrometri CYSP ed SP² e calibrarlo presso fasci di riferimento

- di bassa energia (E<20 MeV, PTB Braunschweig oppure NPL UK)
- di alta energia (TSL Uppsala).

Tenuto conto dei vincoli economici avuti nel 2012 e delle conseguenti variazioni nelle attività svolte (Par. 1.18), nel 2013 saranno necessarie le seguenti attività:

Y1. Acquisizione materiale per costruire gli spettrometri

- 60 rivelatori a diodo
- Completare l'acquisizione dell'elettronica di acquisizione con due ulteriori digitalizzatori ad 8 canali NI USB 6366
- Acquisire i componenti analogici (preamplificatori ed amplificatori) da montare sulle schede ad 8 canali necessarie per acquisire in parallelo tutti i rivelatori del SP2 o del CYSP. Considerando che è già in ns possesso una scheda da 8 canali montata con relativi componenti, in aggiunta serviranno
 - 3 schede a 8 canali (ne servono 4 in tutto)
 - 24 preamplificatori
 - 24 amplificatori
- Polietilene, piombo e materiali borati per fabbricazione spettrometri finali

Y2. Campagne nazionali per il testing dell'elettronica e degli spettrometri a Milano o presso i LNF.

Y3. Campagne estere

- 1 campagna CALIBRAZIONE low-E reference field (10 gg x 3 persone)
- 1 campagna CALIBRAZIONE high-E reference field (10 gg x 3 persone)
- 2 campagne Fast N irradiation in spettri diversi (TSL + ISIS) (10 gg x 3 persone)

2.2 Richieste economiche per il TERZO anno (2013)

| | |
|--|-----------------|
| Missioni interne | 12 k€ |
| Permanenze al Politecnico-Milano o LNF per messa a punto dell'elettronica di acquisizione e testing degli spettrometri (60 giorni uomo in 12 missioni) | |
| 2 campagne presso centri di radioterapia (20 giorni uomo in 4 missioni) | |
| Missioni estere | 15 k€ |
| 1 campagna CALIBRAZIONE low-E reference field (10 gg x 3 persone) | |
| 1 campagna CALIBRAZIONE high-E reference field (TSL) (10 gg x 3 persone) | |
| 2 campagne Fast N irradiation in spettri diversi (TSL + ISIS) (10 gg x 3 persone) | |
| Trasporto strumentazione (DHL via aerea assicurato) | 8 k€ |
| 4 campagne estere, 2 k€ cad. | |
| Consumo (vedere offerte O-1, O-2, O-3) | 31.5 k€ |
| 60 rivelatori a 164 €/cad (offerta O-1) | 10 k€ |
| 3 schede da 8 canali a 1000 € / scheda | 3 k€ |
| 24 preamplificatori a 61 € cad (offerta O-2) | 1.5 k€ |
| 24 amplificatori a 61 € cad (offerta O-2) | 1.5 k€ |
| polietilene, Pb e gomma borata (per DUE spettrometri) (offerta O-3) | 15.5 k€ |
| Inventario | 19.5 k€ |
| 3 digitalizzatori a 5 k€ cad (offerta O-4) | 15.0 k€ |
| 3 PC di acquisizione a 1.5 k€ cad | 4.5 k€ |
| Spese servizi (beam time per calibrazioni) (offerte O-5 e O-6) | 16 k€ |
| NPL (E<20 MeV) 2 energie monocromatiche (da Offerta O-5, costo ivato in € per due energie) | 8 k€ |
| TSL (E>20 MeV) 2 energie quasi-monocromatiche (da Offerta O-6, costo ivato in € per due energie) | 8 k€ |
| COSTO TOTALE | 102.0 k€ |

2.3 Richieste di servizi ai LNF

| | |
|-------------------------|-------------|
| Officina meccanica | 2 mesi uomo |
| Automazione e controlli | 2 mesi uomo |

2.4 Offerte

Offerta O-1, vedere voce 8.1

Offerta

HAMAMATSU
PHOTON IS OUR BUSINESS

Offerta n.: I101256
Data Preventivo: 21/04/11
Revisione n.: 1

Cliente n°: HPI000646
Vs. rif.: ROBERTO BEDOGNI
RFQ n°: CIG 2105414298

Ns. riferimento: Aversa Massimo
Tel.: 00390650513454
Fax: 00390650513460
e-mail: aversa@hamamatsu.it

INFN LABORATORI NAZIONALI DI FRASCATI
VIA E. FERMI, 40
00044 FRASCATI (RM)
ITALY

Pagina 1/2

| Pos. | Codice prodotto | Q.ta venduta | Prezzo unitario netto | Importo netto |
|------|--|--------------|-----------------------|---------------|
| | Descrizione | (pcs) | EUR | EUR |
| 1.1 | G1115 GaAsP Photodiode RoHS conforme QMO 5 pcs | 5 | 11,00 | 55,00 |
| 2.1 | G1116 GaAsP Photodiode RoHS conforme QMO 4 pcs | 4 | 17,00 | 68,00 |
| 3.1 | G1117 GaAsP Photodiode RoHS conforme | 1 | 76,00 | 76,00 |
| 4.1 | G1118 GaAsP Photodiode RoHS conforme QMO 5 pcs | 5 | 11,00 | 55,00 |
| 5.1 | G1120 GaAsP Photodiode RoHS conforme | 1 | 76,00 | 76,00 |
| 6.1 | S3994-01 Si Photodiode RoHS conforme | 1 | 146,00 | 146,00 |
| 7.1 | S3584-09 Large-area PIN Photodiode RoHS conforme | 1 | 1.020,00 | 1.020,00 |
| 7.2 | S3584-09 Large-area PIN Photodiode RoHS conforme | 1 | 1.020,00 | 1.020,00 |
| 8.1 | S3590-09 Large-area PIN Photodiode RoHS conforme | 1 | 135,00 | 135,00 |
| 9.1 | S3204-09 Large-area PIN Photodiode RoHS conforme | 1 | 379,00 | 379,00 |

HAMAMATSU PHOTONICS ITALIA S.R.L. A SOCIO UNICO

Sede Legale:
Strada della Moia 1 int.6
20020 Arese (MI)
Tel: +39 0293581733
Fax: +39 0293581741

Dati Bancari:
Intesa San Paolo Spa
IBAN: IT85AD308932440100000000935 (Euro)
IBAN: IT48L0308932440161009347239 (Yen)

Partita IVA IT10247190159
Capitale Sociale: 728.000€
Registro Imprese di Milano: n. 312362
REA di Milano: n. 1356127
Iscrizione Registro AEE: n. IT 08030000003931



Offerta O-2, vedere voci 1 e 7

AEMME ELETTRONICA s.a.s
Via Tiburtina, 650 - 00159 - ROMA (Italy)
Tel. 039 06 4396304 - Fax 039 06 4394239
E-mail: info@aemmelettronica.it
www.aemmelettronica.it
PARTITA IVA IT 04549651000

CIG n° 3063843B37

Spett.le
IN.F.N. - L.N.F. - Fisica Sanitaria
Via Enrico Fermi, 40
00044 FRASCATI - Roma

OFFERTA n° 2504/2011 del 26/07/11

I.V.A. 20%: Vs. carico
Trasporto: A 1/2 ns. Porto franco
Consegna: 2/3 gg. Da ricevimento ordine
Pagamento: **Bonifico Banc. 60 gg. D.F.**
Validità offerta: 60 gg.

| Pos | Descrizione | Q/tà | Unit. Lordo | Sconto | Unit. Netto | TOTALE |
|-----------------------|--------------------------|------|-------------|--------|-------------|------------------|
| 1 | Cremat CR-110 | 5 | 49,0000 | | 49,0000 | 245,0000 |
| 2 | Cremat CR-110-INST | 3 | 220,0000 | | 220,0000 | 660,0000 |
| 3 | Cremat CR-110INST-HV | 2 | 300,0000 | | 300,0000 | 600,0000 |
| 4 | Cremat CR-200-100ns-INST | 5 | 230,0000 | | 230,0000 | 1150,0000 |
| 5 | Cremat CR-200-250ns | 5 | 49,0000 | | 49,0000 | 245,0000 |
| 6 | Cremat CR-200-500ns | 5 | 49,0000 | | 49,0000 | 245,0000 |
| 6 | Cremat CR-200-1us | 10 | 49,0000 | | 49,0000 | 490,0000 |
| 7 | Cremat CR-200-2us | 5 | 49,0000 | | 49,0000 | 245,0000 |
| 8 | Cremat CR-200-4us | 5 | 49,0000 | | 49,0000 | 245,0000 |
| 9 | Cremat CR-200-8us | 5 | 49,0000 | | 49,0000 | 245,0000 |
| Imponibile | | | | | | 4370,0000 |
| IVA 20% | | | | | | 874,0000 |
| Totale offerta | | | | | | 5244,0000 |

Con l'occasione porgiamo distinti saluti.

AEMME ELETTRONICA S.A.S.

Offerta O-3, (PER DUE SPETTROMETRI VA RADDOPPIATA)



Spettabile INFN-LNF

Via Fermi 40

00044 Frascati (Roma)

Alla cortese attenzione

RUP Roberto Bedogni

Con riferimento alla vostra richiesta CIG N° **Z450574EBC** vi inoltriamo la nostra migliore offerta alle condizioni previste nella vostra richiesta per la fornitura di:

- 2 fusioni in Pb come da vostro progetto 470,00 €
- 1 costruzione in gomma borata tipo SWX-238 come da vostro progetto 2.225,00€
- Polietilene HPDE 225X1000 265,00€
- Polietilene HPDE 500X1000+500X500 3.240,00€
- Spese di trasporto 150€
- Costo totale della fornitura 6.350,00€ + IVA 21%

Si allega alla presente

- Dichiarazione sostitutiva ai sensi degli art. 46 e 47 del DPR 445/2000

Protocollo ADG/2012-43

Massa 21 06 2012

RADIOMETRICS srl

L'Amministratore Delegato
Del Gratta Aldo

C/O Centro Servizi Consorzio Zona Industriale Apuana
Via degli Unni SNC - 54100 Massa
P.IVA 01227230453
www.radiometrics.it info@radiometrics.it

Offerta O-4



Pagina 1 di 2

Offerta N.: 1432558 Versione 1

Spett.le INFN DI FRASCATI
C.A.: Sig. Roberto Bedogni
LNF-Laboratori Nazionali Di Frascati
Via E. Fermi 40
00044 FRASCATI (RM)
Italy

Data: 10-05-2012
Offerta valida sino al: 15-06-2012
Tel.: (06) 94032608
Fax: (06) 94032364
Contatto n.: 1284304L

Offerta N. 1432558 Versione 1 CIG [4228014B84]

| Pos. | Q.ta | Codice | Descrizione | Prezzo unitario | Sconto | Prezzo unitario netto | Importo netto |
|----------------------------|------|---------------------------|--|---------------------|--------|-----------------------|---------------------|
| 1 | 1 | 781445-02 | NI USB-6366, X Series DAQ (8 Simultaneous AI, 24 DIO, 2 AO), 2 MS/s/ch sampling rate, 64 MS memory Paese d'origine: Hungary | 4.385,00 EUR | 10,00% | 3.946,50 EUR | 3.946,50 EUR |
| Subtotale: | | | | 4.385,00 EUR | | | 3.946,50 EUR |
| Spese di Trasporto: | | | | | | | 19,55 EUR |
| IVA 21%: | | | | | | | 832,88 EUR |
| TOTALE: | | | | | | | 4.798,93 EUR |

Moneta: Euro

Condizioni di fornitura:

- Termini di pagamento: Bonifico bancario 60gg f.m.
- Trasporto: Franco con Addebito Spese in Fattura

Paese di origine soggetto a variazioni; l'effettivo verrà indicato in fattura, documento di trasporto e sull'etichetta del prodotto.

Contatta il Customer Service per la disponibilità.

Consegna prevista entro: 25 giorni dalla data ricevimento ordine.

In caso di disponibilità immediata del materiale la spedizione verrà effettuata entro 4-5 giorni lavorativi (consegna standard) o 2 giorni lavorativi (consegna celere).

Banca d'appoggio : THE ROYAL BANK OF SCOTLAND Filiale di Milano IBAN: IT 84 W 03003 01600 303541975EUR

Se l'offerta allegata comprende corsi di formazione, la invitiamo a scaricare e prendere visione del modulo d'iscrizione al link qui allegato. Tale modulo sarà a lei richiesto compilato e firmato in fase d'iscrizione ai corsi nel caso di accettazione dell'offerta.
ftp://ftp.ni.com/pub/branches/italy/training/iscrizione_corsi.pdf

Vogliate gradire i nostri più cordiali saluti.
National Instruments Italy S.r.l.

Offerta O-5

Nota: questa offerta vale per “UNA energia monocromatica”. Si richiede il finanziamento per almeno 2 energie



QUOTATION

NPL Reference: 2011090274

The Schedule

| Job No | Product/Service Description | Planned Start | Planned Completion | Net Price GBP |
|--------------------------|--|---------------|--------------------|---------------|
| 1 | Quotation in response to the request by email from Dr Bedogni on 19/09/2011 for monoenergetic neutron irradiations in the low-scatter environment associated with the NPL 3.5 MV Van de Graaff accelerator - see Technical Annex Dates to be arranged. Report Type: UKAS+MRA | TBA | TBA | 2,500.00 |
| Delivery Address: | INFN - LNF, U.F. Fisica Sanitaria, Via E. Fermi 40, 00044 Frascati ROMA, Italy | | | |

| | |
|---------------------------------|--|
| Customer Invoice Address | E.U. Customers VAT Number (except UK): Please confirm/complete _____ |
|---------------------------------|--|

Return Arrangements

| | | | |
|---|--|--|---|
| NPL Arrange | | Customer Collection | |
| Customer Courier with Insurance - Please specify a/c no _____ - Please enter insurance value _____ | | Customer Courier without Insurance - Please specify a/c no _____ | |
| To Be Arranged | | Not Applicable | X |

Please note: NPL will not arrange artefact insurance from your courier unless you advise otherwise.

NPL Management Limited ("NPL") hereby offers to perform the programme of work specified in the Schedule above. NPL's standard terms of sale shall apply and are available upon request or may be viewed at: www.npl.co.uk/terms-conditions/npls-terms-and-conditions. In the event that the Customer purports to accept NPL's offer subject to alternative terms the Customer shall expressly notify NPL by way of letter and where such letter of notice is not received NPL's terms shall be deemed to apply.

Offerta O-6

Nota: questa offerta vale per “UNA energia”. Si richiede il finanziamento per almeno 2 energie



UPPSALA
UNIVERSITET

The Svedberg Laboratory

Björn Gällander, Director

Box 533
SE-751 21 Uppsala

Delivery address
Thunbergsvägen 5A
SE-752 38 Uppsala

Visiting address
Thunbergsvägen 3D

Phone:
+46 18 471 38 73

Fax:
+46 18 471 38 33

www.tsl.uu.se

beams@tsl.uu.se

December 21, 2011

To all users of TSL irradiation facilities

TSL beam time pricing policy (valid from January 1, 2012)

1. Basic definitions

- a. A run consists of a Startup Time and User Time at a given irradiation facility receiving the primary accelerated beam with the certain energy.
- b. A *campaign* may consist of one or several *runs* that are performed successively in the framework of one visit of the user to TSL.
- c. *Startup Time* is the period of time when TSL prepares the beam according to user's specifications. *Startup Time* includes the time for standard calibration and quality assurance measurements. The user may not have access to the irradiation facility during the *Startup Time*.
- d. *User Time* is the period of time when the specified beam is available to the user. In the beam-sharing mode, the *User Time* does not include beam time slots during which the beam is guided to a different beam line. The user is notified about the availability of the beam by signs "Billing On" in the Automatic Workplace. During the *User Time*, the user may, at any time, turn the beam on and off, as well as to access the experimental area. If an interruption in the beam delivery is planned or caused by the user, it does not interrupt the *User Time*. Interruption in the beam availability planned or caused by TSL leads to an interruption of the *User Time*.
- e. The cost of the *run* consists of the *Startup Fee* (see Sect. 1f), the *User Time Cost* (see Sect. 1g), and surcharges, if applicable (see Sect. 4 and 5).
- f. The *Startup Fee* is a fixed amount that applies separately for each and every *run* and covers the costs for setting up a standard beam.
- g. The *User Time Cost* is calculated by multiplying the hourly rate (see Sect. 2) with the user time duration, rounded up or down to the nearest half- hour.

2. The standard beam time prices

| Facility | Hourly Rate (EUR/h) | Basic Startup Fee (EUR) | Reduced Startup Fee (EUR) ¹ |
|----------|---------------------|-------------------------|--|
| ANITA | 480 | 1920 | 960 |
| QMN | 520 | 3120 | 1560 |
| PAULA | 520 | 2080 | - |

3. The lowest *User Time Cost* is the cost of 8 hours *User Time* for each and every *run* and 12 hours for a *campaign*.

¹ Valid with re-trimming between ANITA and QMN facilities without the change of the primary proton beam energy.