

NESCOFI@BTF

NEutron Spectrometry in COmplex Fields

Proposta di esperimento TRIENNALE per lo sviluppo di tecniche sperimentali per la caratterizzazione di fasci neutronici pulsati ed ad alta intensità.

Roberto Bedogni (resp. LNF e nazionale) 80%

B. Buonomo (30%), A. Esposito (70%), G. Mazzitelli (40%), L. Quintieri (20%)

M. Chiti, M. De Giorgi, A. Gentile

LNF

M.V. Introini (50%), A. Pola (30%)

INFN-Milano e Dip. di Energia Politecnico di Milano

J.M. Gomez-Ros (500%)

CIEMAT, Madrid



Motivazione scientifica & obiettivi

Una caratteristica comune alle *facilities* che impiegano acceleratori di particelle nei campi della ricerca, industriale e medico è la produzione, intenzionale o non, di **campi neutronici** la cui **misura** è molto complessa a causa delle seguenti caratteristiche

- (1) Alte intensità
- (2) Intenso campo fotonico associato
- (3) Struttura temporale pulsata
- (4) Spettro energetico complesso dai termici ($1\text{E}-8$ MeV) alle decine o centinaia di MeV

In molte delle *facilities* citate si sta imponendo la necessità di caratterizzare tali campi mediante **sistemi attivi in linea** in grado di fornire indicazioni sullo spettro di fluenza ($d\varphi/dE$), sulle associate grandezze integrate (di campo o dosimetriche) e sulla loro variazione al variare delle modalità operative dell'acceleratore e delle procedure di irraggiamento.

Motivazione scientifica & obiettivi

(1) Fast neutron irradiation.

Presso alcuni dei maggiori centri con acceleratori come TRIUMF, LANSCE, TSL (linea ANITA), ISIS sono state allestite linee di fascio neutronico per studi sui materiali, *chip irradiation* (industria elettronica, avionica, aerospaziale) e *radiation damage*.

Gli spettri vengono solo simulati. Vengono effettuate misure che spesso sono rappresentano un intervallo energetico molto limitato. Vi è un notevole interesse per misure di spettro in linea, anche per stimare le perturbazioni causate dagli oggetti irraggiati e per valutare l'importanza della radiazione dispersa dai materiali presenti nella hall.

Espressioni di interesse / esperimenti già finanziati

ISIS (nell'ambito del progetto PANAREA). Due esperimenti per misure di spettro con sfere di Bonner (BSS) e studio di fattibilità per un sistema a singolo moderatore. Possibilità di provare i detectors di NESCOFI.

TSL (linea ANITA) Un esperimento per misura di spettro con BSS



Motivazione scientifica & obiettivi

(2) Campo medico

La radioterapia è uno degli strumenti principali per la cura dei tumori: si stima che venga prescritta nel 65% dei casi di tumore. Nuove tecniche (tra cui l'adroterapia) stanno migliorando l'efficacia della cura e la qualità di vita dei pazienti trattati. In parallelo sta crescendo l'interesse per i casi di tumori secondari indotti dall'irraggiamento radioterapico. Si ritiene che gran parte di questo rischio possa essere associato al campo neutronico secondario per l'elevato fattore di peso w_R dei neutroni soprattutto nel campo del MeV.

Sono state fatte campagne di caratterizzazione dei campi neutronici nella radioterapia (usando anche sfere di Bonner e rivelatori a Bolle) ma non esiste uno strumento in linea in grado di fornire indicazioni sul campo neutronico presente in sala al variare della modalità di trattamento, energia, paziente.

Potenziali utenti finali in ambito INFN: SPES, LNS, CNAO

Espressioni di interesse:

Il progetto **NEUTOR** (consorzio di università spagnole e di acceleratori per radioterapia elettro-fotonica e adronica con lo scopo di misurare le dosi neutroniche *in-patient*) offre le facilities e il co-finanziamento dei viaggi per esperimenti nell'interesse di entrambi i progetti.



UNIVERSIDAD DE SEVILLA
Facultad de Medicina
Depto. Fisiología Médica y Biofísica
FÍSICA MÉDICA
Avda. Sánchez Pizjuán, 4
E-41009 SEVILLA - ESPAÑA
Telf.: +34.95.455.1768/ 1770/ 6102 (directo)
Fax: +34.95.455.1769
E-mail: paco@us.es



Prof. Dr. F. Sánchez-Doblado
Catedrático Fisiología

Prof. Mario Calveti,
Direttore dei Laboratori Nazionali di Frascati
INFN - LNF
Via E. Fermi 40
00044 Frascati (ROMA)
Italia

Seville, 23-September-2010

NEUTOR project aims to develop a new device and procedure to estimate the extra neutron dose in patient under radiotherapy treatment. The first step was to cover the conventional clinical irradiation based on electron linear accelerators. A new challenge will be carried out in hadrontherapy. For these purpose accurate knowledge of neutron spectra and doses inside an anthropomorphic phantom is needed.

The very well known experience and prestige of the U.F. Fisica Sanitaria of the INFN-LNF in the field of neutron dosimetry and spectrometry, now under the umbrella of the project NESCOFI@BTF (NEutron Spectrometry in COmplex Fields @ Beam Test Facility) INFN - Commissione Scientifica Nazionale 5, ensure that a common collaboration would provide valuable experimental tools for the determination of the in-phantom neutron related quantities. Therefore we have the pleasure to offer, free of cost, the use of our hospital linac facilities, as we already discussed by telephone. Eventually, our project could cover the costs for their participation to the experimental campaigns, including travel and subsistence.

We hope a great success fruit of our collaboration.

Best regards,



**DPTO. DE FISIOLÓGIA MÉDICA
Y BIOFÍSICA**
FACULTAD DE MEDICINA

Prof. Dr. F. Sánchez Doblado (leader NEUTOR Project)
Head of Medical Physiology and Biophysics Department
Faculty of Medicine, University of Seville
Spain

Motivazione scientifica & obiettivi

Non esistono sistemi in grado di effettuare un monitoraggio spettrometrico del campo neutronico nelle condizioni di: (1) *alta intensità*, (2) *elevato campo gamma*, (3) *struttura pulsata*, (4) *su 10 decenni di energia neutronica*, (5) *in tempo reale*.

Esempi:

Le sfere di Bonner soddisfano (1-4) ma non 5 (le varie sfere devono essere esposte sequenzialmente);

Gli scintillatori per neutroni soddisfano in generale solo (5).

Si propone di:

Progettare, simulare e costruire DUE spettrometri idonei per il monitoraggio spettrometrico in linea delle diverse tipologie di campi neutronici prodotti nelle facilities citate:

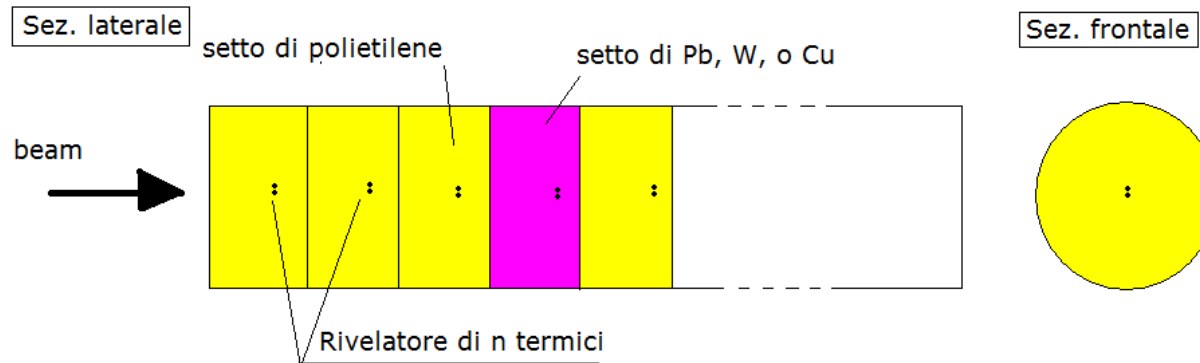
CYSP CYlindrical Spectrometer, per fasci di n collimati

(SP)² SPherical Spectrometer, per campi con distribuzioni direzionali complesse

CYSP & (SP)²

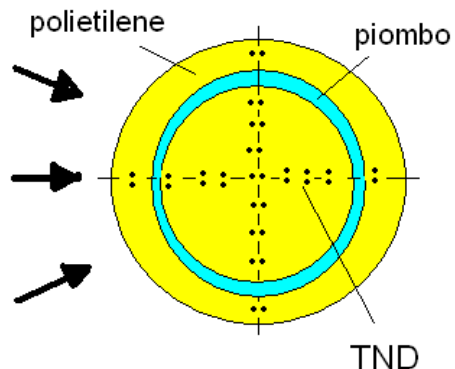
Basati sul principio di funzionamento delle sfere di Bonner: moderazione delle diverse componenti energetiche con diversi spessori di polietilene (+ metalli ad alto Z per degradare la componente > 20 MeV) e rivelazione dei neutroni termalizzati.

Ma: invece di avere un unico rivelatore e diverse sfere moderatrici, si avrà un unico moderatore contenente diversi *active thermal neutron detectors* (ATND).



CYSP

Parametri tipici: diametro 3-4 cm, lunghezza 25 cm, numero setti: 10



Sezione dello spettrometro sferico con convertitore in piombo per alta energia e possibile locazione dei TND.

Diametro tipico 25 cm, spessore del convertitore in Pb 1 cm

(SP)²

CYSP & (SP)²

Nonostante i parametri geometrici siano ancora da ottimizzare mediante calcolo Monte Carlo, si prevede:

CYSP lunghezza 25 cm, diametro 3-4 cm, 10 rivelatori (ATND). Il cilindro sarà ricoperto lateralmente da un foglio di Cadmio per eliminare i neutroni diffusi di bassa energia che, provenienti da direzioni diverse da quelle del fascio incidente, potrebbero perturbare la misura.

(SP)² diametro 25 cm, \approx 20 ATND montati sui tre assi in posizioni da determinare col calcolo

La matrice risposta dei due spettrometri (segnale degli ATND nelle diverse posizioni per unità di fluensa neutronica al variare dell'energia incidente) verrà calcolata con codici Monte Carlo (MCNPX, FLUKA) dal campo termico fino al GeV.

Si utilizzerà il codice di unfolding FRUIT(*) (*interamente sviluppato ai LNF, >50 licenze distribuite all'esterno dal 2008*) per derivare lo spettro neutronico conoscendo la matrice risposta e il segnale degli ATND.

(*) R. Bedogni, C. Domingo, A. Esposito, F. Fernandez. NIM A 580, 1301–1309 (2007).
R. Bedogni, M. Pelliccioni, A. Esposito. NIM A, DOI 10.1016/j.nima.2010.01.031 (2010).

CYSP & (SP)²

VERIFICA DEL DISEGNO

Al fine di verificare la geometria degli spettrometri e la accuratezza dei calcoli Monte Carlo si realizzerà, per ogni spettrometro, un prototipo **passivo** (basso costo, facilità di lavorazione) munito di lamine ad attivazione al Dysprosio (ampiamente usate e con riposta perfettamente nota).

SCelta DEL ATND finale

Il rivelatore termico attivo verrà scelto tra le seguenti possibilità:

- Rivelatori al diamante (mono- o poli-cristallini) ricoperti da ⁶Li o ¹⁰B. *Ottime proprietà di radiation hardness e risposta ad alte fluenze, immuni ai fotoni. Alto costo.*
- *contatori proporzionali BF₃ o ³He piccolo volume*
- Coppie di scintillatori (di cui uno sensibilizzato ai n termici)
- Coppie di semiconduttori (di cui uno sensibilizzato ai n termici), con particolare interesse a semiconduttori radio-resistenti (ad es. il SiC)

Verrà acquisito e testato un TND per ogni tipo. Del tipo prescelto si acquisiranno circa 30 esemplari per gli spettrometri finali, circa 10 per CYSP e circa 20 per (SP)².

CYSP & (SP)²

TESTS DI IRRAGGIAMENTO E FACILITIES DI PROVA

Il progetto prevede due tipi di tests: di PERFORMANCE e di CALIBRAZIONE

TEST DI PERFORMANCE

Da effettuare con campi poli-energetici di tipo “realistico” come quello recentemente realizzato ai LNF nell’ambito del progetto n@BTF. Queste prove permetteranno di valutare la performance dei dispositivi in campi simili a quelli presenti presso gli utenti finali, quindi caratterizzati da elevate intensità, elevato fondo gamma, struttura pulsata e variabilità energetica su più dieci decadi (da 10^{-8} a 10^2 MeV). In questi campi verranno tipicamente effettuate le prove di **linearità, saturazione della risposta, immunità alla componente fotonica, dipendenza della risposta dalla frequenza e durata degli impulsi.**

Si pensa di utilizzare i seguenti fasci:

- n@BTF presso i LNF: foto-produzione ad alta energia;
- LINAC medicali (fino a 18-21 MV di elettroni) / radioterapia / collab. NEUTOR
- LNS / CNAO (fasci di protoni e di ioni carbonio) / adroterapia,
- ISIS (RAL, UK) o ANITA (TSL, Uppsala) / spallazione / rappresentative dell’impiego industriale per fast neutron irradiation

NOTA: queste facilities NON sono adatte alla validazione sperimentale delle funzioni risposta e alla calibrazione dei dispositivi perché POLIENERGETICHE e di spettro COMPLESSO.

CYSP & (SP)²

TESTS DI IRRAGGIAMENTO E FACILITIES DI PROVA

TEST DI CALIBRAZIONE:

Da effettuare con campi di riferimento di fluensa nota e con spettro monocromatico.

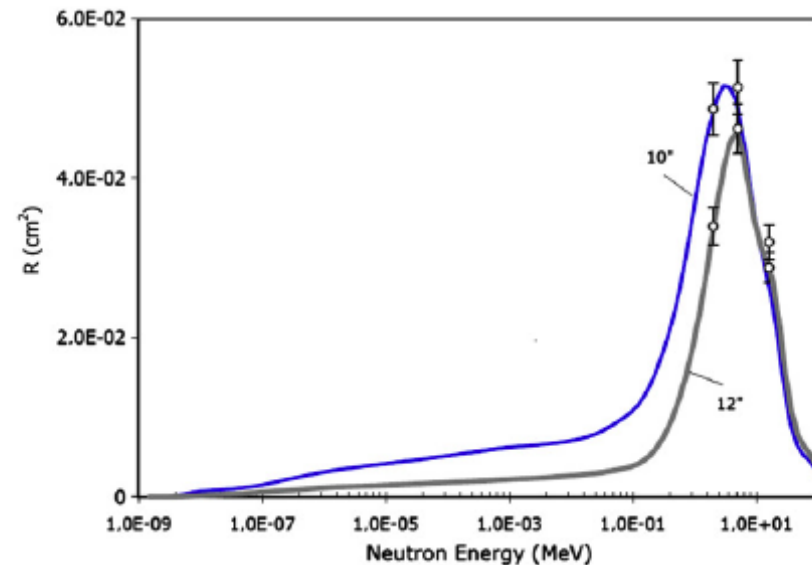
Questi tests sono necessari per la calibrazione di CYSP e (SP)² e per la verifica della loro matrice riposta (dettagliatamente simulata con metodi Monte Carlo). **L'accuratezza della risposta di questi dispositivi è strettamente legata all'esito di queste prove sperimentali.**

n TERMICI - 20 MeV: PTB o NPL

20 MeV - 200 MeV:

TSL (linea QMN) Uppsala o iThemba (Sud Africa).

Il tempo macchina di queste facilities è a pagamento; è intenzione del gruppo proponente stabilire accordi con i gestori di queste facilities al fine di ottenere beam time a prezzo ridotto.



Esempio: validazione BSS
(10" e 12" in 2, 5 e 16 MeV)

Competenze e potenzialità del gruppo proponente

Competenza specifica per la misura di campi neutronici basata sullo spettrometro a sfere di Bonner. Esperienza in misure di spettro in campi ad alta intensità (n@BTF, neutron leakage da DAΦNE, LINACs medicali, fascio VESUVIO@ISIS e TSL). Codice di *unfolding* FRUIT per la ricostruzione degli spettri dalle letture dei TND in strutture moderanti. Esperienza in rivelatori per neutroni e relativi sistemi di acquisizione

n@BTF: una facility di prova realistica in termini di intervallo energetico, intensità, struttura pulsata, campo fotonico associato.

Solido quadro di contatti collaborazioni internazionali, nell'ambito dei quali sarebbe possibile avere accesso, a costo ridotto, ad importanti facilities di prova e di calibrazione. In particolare

- presso ISIS (RAL, UK) nell'ambito della collaborazione PANAREA,
- presso TSL, attraverso il programma europeo EFNUDAT, sono state effettuate misure con BSS su fasci monocromatici fino a 200 MeV e sulla linea di *chip irradiation* ANITA
- Coordinamento del progetto europeo EURAMET n. 1104 con gli istituti di metrologia primaria NPL Teddington (UK) e PTB Braunschweig, sulla dosimetria neutronica
- Partecipazione al progetto NEUTOR (Spagna), per la misura degli spettri neutronici in fantocci antropomorfi sottoposti a radioterapia standard e con adroni.

Il progetto si è impegnato a mettere a disposizione una rete di facilities mediche ospedaliere e presso centri di ricerca dove sussiste il forte interesse ad installare dispositivi di monitoraggio spettrometrico attivo dei campi neutronici.

Audizioni

27-28 sett. 2010, Pisa

Relatore A. Esposito

Referees P. Milazzo, C. Andreani, M. Cavenago

“L’esperimento si propone di sviluppare rivelatori neutronici sensibili anche all’energia e di interessante concezione.

Incidono purtroppo sui costi dell’esperimento il costo di utilizzo di fasci presso altri laboratori, per cui in attesa di soluzioni più generali, temporaneamente si finanzia un set di misure delle due richieste nel 2011”.

Primo anno

- P1. Qualificazione del fascio n@BTF: installazione sistema di monitoraggio della distribuzione direzionale e dell'intensità del fascio di neutroni, allineamenti laser.
- P2. Acquisizione di **un esemplare per ogni tipo di ATND** e della relativa elettronica di acquisizione per la sperimentazione finalizzata alla scelta dell'ATND finale.
- P3. Studio ed ottimizzazione della geometria del CYSP e del (SP)² mediante codici di calcolo (MCNPX, FLUKA), presso i LNF ed il CIEMAT.
- P4. Realizzazione di un CYSP e di un (SP)² passivi per la verifica sperimentale del modello numerico mediante lamine ad attivazione al Dy (vedere Sez. 4).
- P5. Acquisizione di un set di lamine ad attivazione al Dy e di un contatore beta portatile per la misura dell'attivazione neutronica.
- P6. Tests di calibrazione del CYSP e dell' (SP)² passivi
- una campagna con fasci monocromatici $E < 20$ MeV (PTB o NPL)
 - una campagna con fasci monocromatici $20 \text{ MeV} < E < 200 \text{ MeV}$ (TSL iThemba Labs)

Richieste & assegnazioni 2011

Missioni interne	7 k€	2 k€
Missioni esterne	10.5 k€	3.5 k€ (*)
Consumo	64.5 k€	27.0 k€
Trasporto strumenti	1.5 k€	1.0 k€
Inventario	21 k€	18 k€
Costruzione apparati	6 k€	6 k€
Sp. Servizi (beam time)	28 k€	10 k€
TOTALE	138.5 k€	67.5 k€

Secondo anno

- S1. Verifica sperimentale della prestazione dei vari ATND (quattro campagne di misura) in campi rappresentativi in termini di energia, intensità e fondo gamma, delle facilities in uso presso gli utenti finali:
- una campagna di misura presso n@BTF (energia degli elettroni 510 MeV)
 - una campagna di misura in un LINAC medicale già caratterizzato (progetto NEUTOR), energia degli elettroni 15-21 MeV;
 - una campagna di misura in una facility medicale con adroni (LNS o CNAO)
 - una facility da spallazione per chip irradiation (ANITA o ISIS)
- S2. Scelta del ATND ottimale per la realizzazione di CYSP e (SP)² attivi finali.
Acquisizione di 38 ATND per gli strumenti finali
- S3. Costruzione del CYSP e (SP)² attivi finali
- S4. Acquisizione e caratterizzazione della catena elettronica per la lettura simultanea di tutti gli ATND attivi dei CYSP e (SP)² attivi finali.

Richiesta TOTALE 161.5 kE

Terzo anno

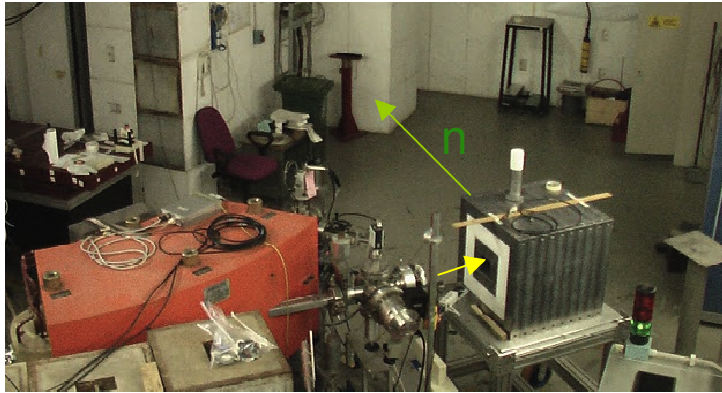
- T1. Calcolo della matrice risposta CYSP e (SP)² attivi finali
- T2. Tests di calibrazione del CYSP e dell' (SP)² finali attivi
- una campagna con fasci monocromatici $E < 20$ MeV (PTB o NPL)
 - una campagna con fasci monocromatici $20 \text{ MeV} < E < 200 \text{ MeV}$ (TSL o iThemba Labs)
- T3. Test di performance del CYSP e dell' (SP)² finali attivi in campi rappresentativi in termini di energia, intensità e fondo gamma, delle facilities in uso presso gli utenti finali (quattro campagne di misura):
- una campagna di misura presso n@BTF (energia degli elettroni 510 MeV)
 - una campagna di misura in un LINAC medicale già caratterizzato (progetto NEUTOR), energia degli elettroni 15-21 MeV;
 - una campagna di misura in una facility medicale con adroni (LNS o CNAO)
 - una facility di spallazione per chip irradiation (ANITA o ISIS)

Richiesta TOTALE 55.6 kE

Attività previste per il primo anno - *stato dell'arte*

(P1.)

Qualificazione del fascio n@BTF: installazione sistema di monitoraggio della distribuzione direzionale e dell'intensità del fascio di neutroni, allineamenti laser.



Attività “ponte” tra n@BTF (sviluppo del target di foto-produzione e del complesso schermante, vedi relazione successiva) **concluso con il 2010.**

Allineamenti laser



2 tubi al BF_3



Elettronica associata



Arrivo materiale

< Marzo 2011

Montaggio e test

< Maggio 2011

Attività previste per il primo anno - *stato dell'arte*

(P2.)

Acquisizione di un esemplare per ogni tipo di ATND e della relativa elettronica di acquisizione per la sperimentazione finalizzata alla scelta dell'ATND finale.

Vedi relazione successiva

Rivelatori (assegnazione 8 k€)

Diamanti CVD	✓ acquistati	1 mono- bare	4.7 x 4.7 x 0.5
		1 poli- 1.5 μm ^6LiF	5 x 5 x 0.5
Semiconduttori	✓ prove preliminari su foto-sensori		
Fibre scintillanti			
BF_3 , ^3He			

Elettronica varia (assegnazione 5 k€ consumo + 12 k€ inventariabile)

Attività previste per il primo anno - *stato dell'arte*

(P3.)

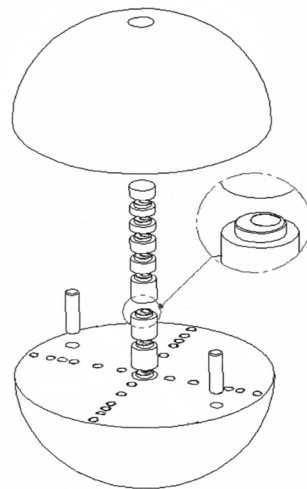
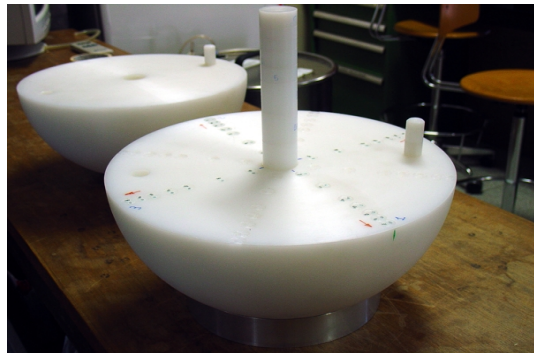
Studio ed ottimizzazione della geometria del CYSP e del (SP)² mediante codici di calcolo (MCNPX, FLUKA), presso i LNF ed il CIEMAT.

(P4.) 6.0 k€ costruzione apparati

Realizzazione di un CYSP e di un (SP)² passivi per la verifica sperimentale del modello numerico mediante lamine ad attivazione al Dy

(SP)² *Esiste un prototipo (convenzione INFN-MICINN FISMEI-CIEMAT)*

(Diametro 30 cm, 37 posizioni per rivelatori passivi su tre assi, risposta LIMITATA a 20 MeV e verificata sperimentalmente a 14 MeV monocromatici, ²⁵²Cf)



Provato con TLDs e con Dy-foils

Radiat. Meas. 2010, submitted

Nucl. Instrum. Meth. A 613 (2010) 127-133.

Radiat. Meas. 10.1016/j.radmeas.2010.05.016

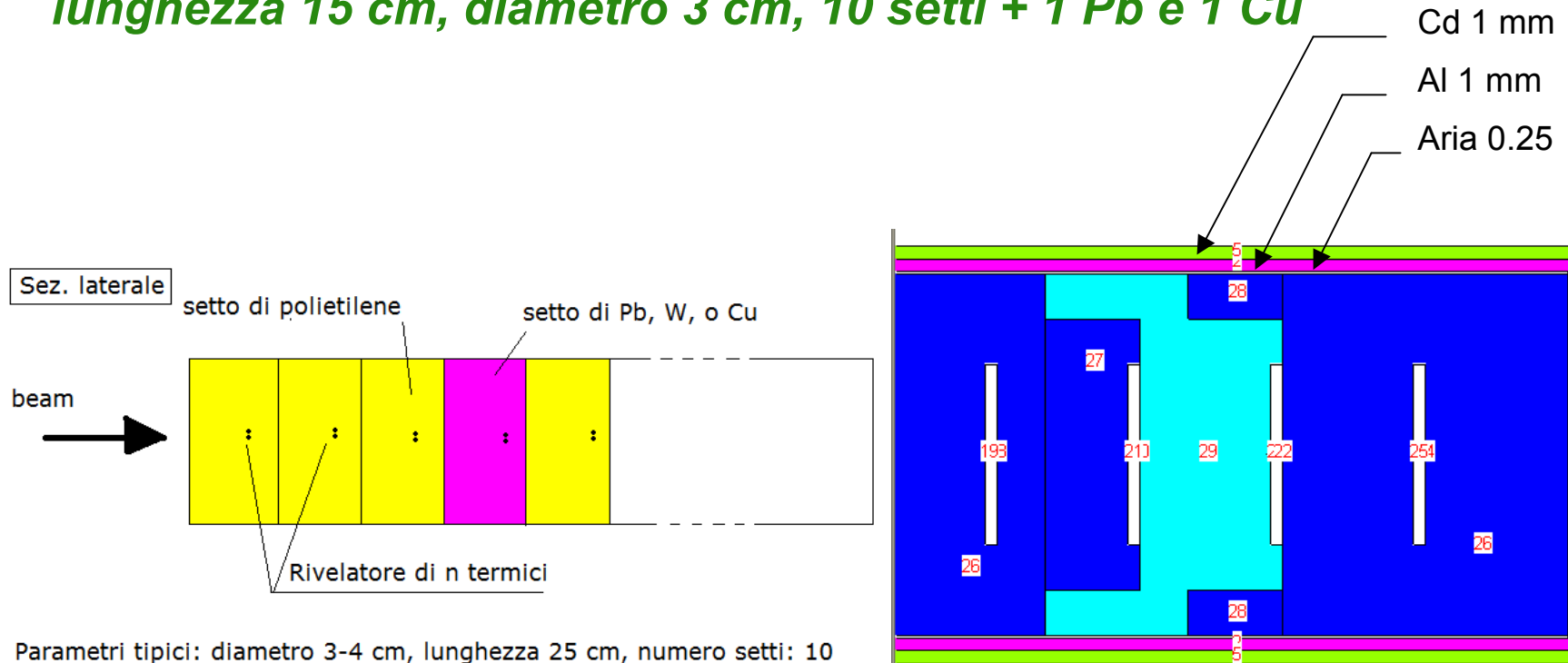
Estensione ad alta Energia
(relazione J.M. Gomez)

Attività previste per il primo anno - *stato dell'arte*

CYSP

Esiste un prototipo e sono in fase di ultimazione dei calcoli preliminari con:

lunghezza 15 cm, diametro 3 cm, 10 setti + 1 Pb e 1 Cu



Parametri tipici: diametro 3-4 cm, lunghezza 25 cm, numero setti: 10

Problemi potenziali

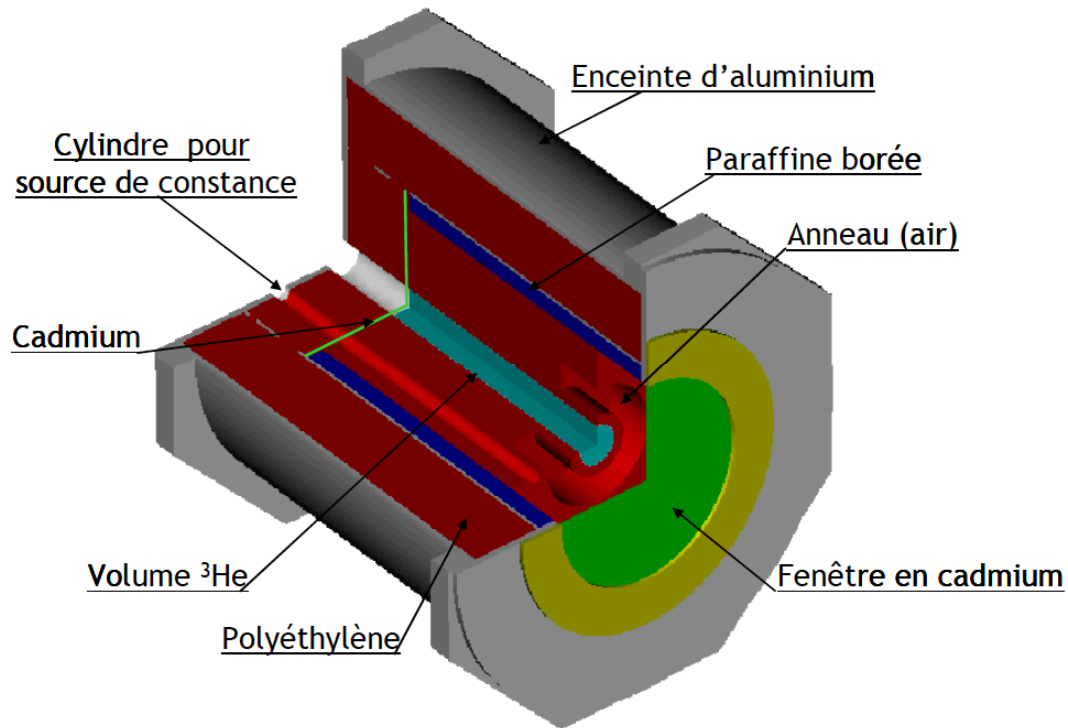
- *streaming in Al e aria*
- *penetrazione laterale epitermica*

R. Bedogni, riunione preliminare NESCOFI@BTF. Frascati, 3-12-2010

Attività previste per il primo anno - *stato dell'arte*

CYSP: idee per migliorare il disegno

Seguire la filosofia “long counter” - *conservando un piccolo diametro*



Diametro 40 cm

Altezza 45 cm

Cilindro interno PE

(moderazione e penetrazione dei n nella direzione voluta; include anello di aria e tappo PE)

PE borato + cilindro esterno

(soppressione dei n in direzioni non volute)

Da: HDR V. Gressier, IRSN Cadarache.

Attività previste per il primo anno - *stato dell'arte*

(P5.)

Acquisizione di un set di lamine ad attivazione al Dy e di un contatore beta

L'assegnazione (6 k€) copre solo parte del beta counter.

(P6.)

Tests di calibrazione del CYSP e dell' (SP)² passivi

- una campagna con fasci monocromatici $E < 20$ MeV (PTB o NPL)
- una campagna con fasci monocromatici $20 \text{ MeV} < E < 200 \text{ MeV}$ (TSL, iThemba Labs)

L'assegnazione (10 k€ / 28 richiesti) permette una campagna per entrambi gli strumenti (o due per uno solo...).

Una campagna: 4-5 energie / 5 giorni di beam-time / 12 k€ a prezzo "convenzionato" + 2 persone in loco

Possibilità:

- *chiedere a PTB/TSL quali sono le possibilità di accesso a prezzo ridotto*
- *organizzare una campagna condivisa con NEUTOR*
- *calls europee (EFNUDAT - ERINDA programme)*

-

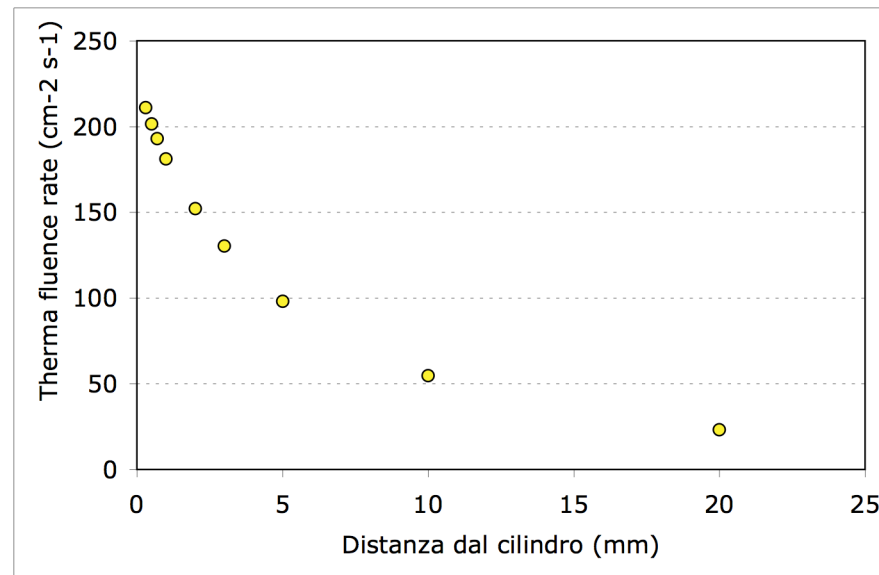
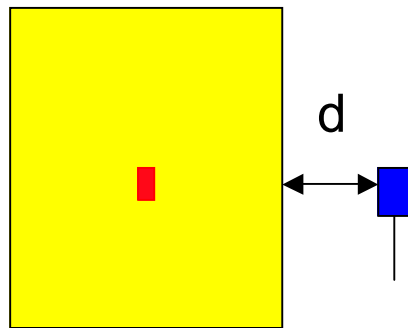
R. Bedogni, riunione preliminare NESCOFI@BTF. Frascati, 3-12-2010

Prove preliminari su fotosensori al Silicio

Usati fotosensori di tipo Sionex 71N7 con area sensibile 162.5 mm^2 (sono disponibili aree inferiori a piacere, fino a $3-4 \text{ mm}^2$) per avere la massima sensibilità possibile - sorgente di calibrazione poco intensa)

Ricoprimento con materiale sensibile ai n_{th}

Calibrazione preliminare in flusso termico: $0.7 \mu\text{V cm}^2 \text{ s}$



Prove preliminari su fotosensori al Silicio

Sensibilità ai fotoni

Misurata con sorgenti di taratura ai LNF

Calibrazione preliminare con fotoni del ^{137}Cs : $1.9\text{E-}4 \mu\text{V cm}^2 \text{s}$

Rapporto S_{th} / S_{γ} $4\text{E+}3$

Buono ma inferiore di un ordg a quello di sensori considerati “photon-insensitive”. Necessità di studiare se serve una configurazione a due sensori con diverse sensibilità n_{th} e γ

Funzione $S_{\gamma}(E_{\gamma})$: da determinare

Linearità: da provare in neutroni e fotoni (ok in 30-150 μV)

Sensibilità ai n veloci: da provare

Elettronica: da disegnare (vedi relazione Pola)

Acquisiti sensori da 10 mm² (6 €), 46 mm² (12 €) e 162 mm² (33 €)

Acquisiti AO adattatori di Z.

