

NESCOFI@BTF

NEutron Spectrometry in COmplex Fields

Proposta di esperimento TRIENNALE (2011-2013) 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 (50%), G. Mazzitelli (40%), L. Quintieri (20%)

M. Chiti (30%), A. Gentile (30%)

LNF

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

INFN-Milano e Dip. di Energia Politecnico di Milano

J.M. Gomez-Ros (50%)

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.

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 un sistema per il monitoraggio spettrometrico in linea delle diverse tipologie di campi neutronici prodotti nelle facilities citate.

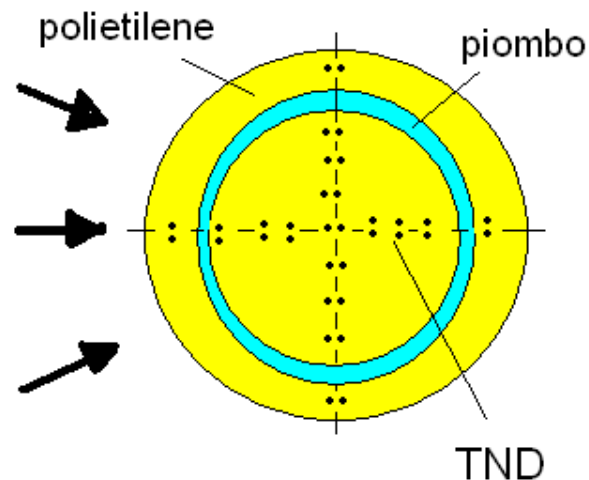
(SP)² **SP**herical **SP**ectrometer - in grado, grazie alla simmetria sferica, di misurare esattamente la grandezza “fluenza” di neutroni indipendentemente dalla distribuzione direzionale del campo.

CYSP **CY**lindrical **SP**ectrometer: fasci collimati

(SP)²

Basato 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).



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

- **Diametro esterno 25 cm**
- **Strato di piombo da 1 cm inserito fra R=4.5 cm e R=5.5 cm**
- **31 posizioni per rivelatori di neutroni termici (PASSIVI nella prima fase 2011, ATTIVI nella versione definitiva del dispositivo, 2012-2013)**

(SP)²

CALCOLO delle matrici risposta dello spettrometro (segnale dei TND nelle diverse posizioni per unità di fluensa neutronica al variare dell'energia incidente): da fare con codici Monte Carlo dal campo termico fino al GeV.

VERIFICA sperimentale della risposta: da effettuare mediante tests

- (1) **DI CALIBRAZIONE**, in fasci monoenergetici di riferimento (fluensa e spettro mono-energetico molto ben conosciuti, come PIAF@PTB Braunschweig ($E < 20$ MeV) o QMN@TSL Uppsala ($20 \text{ MeV} < E < 200$ MeV)).
- (2) **DI PERFORMANCE**, in fasci contenenti TUTTE le componenti energetiche, dal termico alle centinaia di MeV, ed aventi elevate intensità e strutture temporali complesse, come n@BTF, ANITA@TSL, VESUVIO@ISIS, LINAC medicali.

RICOSTRUZIONE dello spettro a partire dalle letture dei TND (unfolding): codice di unfolding FRUIT(*) (interamente sviluppato ai LNF, >50 licenze distribuite all'esterno dal 2008)

- (*) R. Bedogni, C. Domingo, A. Esposito, F. Fernandez. NIM A 580, 1301–1309 (2007).
R. Bedogni, M. Pelliccioni, A. Esposito. NIM A 615, 78-82 (2010).

PRIMO ANNO 2011

Attività previste
&
attività svolte fino ad ora

Principali attività previste per il PRIMO ANNO (2011)

- P1. Qualificazione del fascio n@BTF: installazione sistema di monitoraggio della distribuzione direzionale e dell'intensità del fascio di neutroni, allineamenti laser. (*< 01-06-2011*)
- P2. Acquisizione ATND di diversi tipi (*< 31-12-2011*)
- P3. Studio ed ottimizzazione della geometria mediante codici Monte Carlo (*< 01-04-2011*)
- P4. Realizzazione di un **prototipo passivo** per la verifica sperimentale del modello geometrico numerico. Si prevede di usare, come TND, lamine ad attivazione al Disprosio (sezione d'urto e geometria molto ben conosciute, per minimizzare le incertezze) (*< 01-07-2011*)
- P5. Acquisizione di un set di lamine ad attivazione al Dy e di un contatore beta portatile per la misura dell'attivazione neutronica (*< 01-06-2011*)
- P6. Tests di calibrazione del **prototipo passivo** (*< 31-12-2011*)
- una campagna con fasci monocromatici $E < 20$ MeV (PTB)
 - una campagna con fasci monocromatici $20 \text{ MeV} < E < 200 \text{ MeV}$ (TSL)

2011. Le assegnazioni sono state pari al 48.7% delle richieste

.....e le missioni sono state tagliate del 70%

Nonostante le assegnazioni 2011 a questo progetto siano state in assoluto “ben collocate” rispetto agli altri progetti di CSN V, la strategia per l’anno 2011 non ha potuto prescindere dal taglio di circa il 50% fra richieste ed assegnazioni. Tali riduzioni sono state particolarmente severe sul fronte missioni (tagli superiori al 70%), imponendo delle pesanti limitazioni sulle campagne sperimentali per il test dei prototipi con neutroni monocromatici presso il PTB Braunschweig ($E < 20$ MeV) ed il TSL Uppsala ($E > 20$ MeV).

Sulla base delle due considerazioni che seguono, si è optato per un cambio di strategia:

- (1) Nella proposta iniziale i prototipi passivi avevano, come obiettivo principale, la verifica della geometria mediante irraggiamenti a fasci monocromatici di riferimento.**
- (2) Per le suddette ragioni economiche, non sarebbe stato possibile effettuare il testing completo di ENTRAMBI i prototipi passivi SP² (sferico) e CYSP (cilindrico), in quanto ciò avrebbe richiesto una quantità di giorni di missione e di tempo macchina molto superiore alle risorse a disposizione.**

Vale la pena anticipare che le due campagne con neutroni monocromatici (PTB e TSL) effettuate nel corso del 2011 per il testing del SP² sono state rese possibili grazie a due co-finanziamenti ad hoc ottenuti nell’ambito del progetto ERINDA (FP7), vedere Par. 6.5.2.

2011. Le assegnazioni sono state pari al 48.7% delle richieste

.....e le missioni sono state tagliate del 70%

Si è pertanto optato per focalizzare lo studio sulla configurazione SP² (geometria sferica, valida per distribuzioni direzionali non note a priori) in quanto potenzialmente in grado di lavorare nella maggior parte degli scenari operativi. Pertanto lo studio numerico, la generazione della matrice risposta, la costruzione del prototipo passivo ed i tests sperimentali a fasci monocromatici di riferimento sono stati eseguiti fin ora solamente sul SP².

...e il CYSP ?

La configurazione cilindrica (CYSP) per fasci collimati NON è stata abbandonata: sono stati fatti calcoli ed un esperimento su un disegno di “piccole” dimensioni (lunghezza 25 cm, diametro 3-4 cm, così come suggerito al 4.1 della proposta del primo anno) rendendosi conto che: le dimensioni vanno aumentate (fino a circa 50-60 cm di diametro ed altezza), ed è necessario introdurre una schermatura laterale ulteriore rispetto al foglio di Cd già previsto. Dati più dettagliati sono riportati in 6.4.2.

Il nuovo disegno è in fase di simulazione. La costruzione sarà più onerosa di quanto previsto inizialmente, dovuto alle grandi dimensioni e all'impiego di diversi materiali in quantità maggiori del previsto (fra cui piombo, polietilene borato, cadmio). **Pertanto si è pensato di segmentare il piano di sviluppo del CYSP come segue:**

2011 (2° metà): Costruzione di un moderatore “a basso costo”, di dimensioni inferiori al CYSP finale senza degradatori in piombo, idoneo per poter effettuare una importante serie di prove di irraggiamento previste per il 2012 sui rivelatori attivi (prove contrassegnate con S1 nell'elenco attività formulato a luglio 2010). Questo prototipo presenterà, in corrispondenza delle posizioni di misura (circa 10), delle cavità abbastanza grandi per alloggiare i rivelatori attivi fin ora acquisiti o in corso di acquisizione, e sarà predisposto per il cablaggio dei rivelatori.

Nome convenzionale di questo moderatore: Mini-CYSP

2012 Anche se la configurazione geometrica del mini-CYSP non è quella definitiva, permetterà comunque di realizzare i seguenti tests nel corso del 2012 (2° anno):

- (1) Cablaggio e acquisizione simultanea di più rivelatori attivi nella stessa struttura moderante;
- (2) Risposta dei diversi tipi di rivelatore al campo realistico prodotto all'interno di un moderatore
- (3) Riposta ai diversi ratei di fluenza: problemi di saturazione, tempo morto, pile-up, sensibilità ai fotoni ed a altri tipi di particelle.
- (4) Degradazione delle proprietà elettriche in funzione della fluenza di particelle accumulata (radiation ageing o radiation damage).

N Entro metà 2012 si raggiungerà un disegno definitivo per poter realizzare, oltre che il SP² attivo, anche il CYSP attivo

Qualificazione n@BTF

Contatori lunghi	ok
Elettronica	ok
Spettro	ok
Moderatori	in fabbricazione

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 659 (2011) 373–377



ELSEVIER

Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A

journal homepage: www.elsevier.com/locate/nima



Experimental and numerical characterization of the neutron field produced in the n@BTF Frascati photo-neutron source

R. Bedogni^{a,*}, L. Quintieri^a, B. Buonomo^a, A. Esposito^a, G. Mazzitelli^a, L. Foggetta^a, J.M. Gómez-Ros^{a,b}

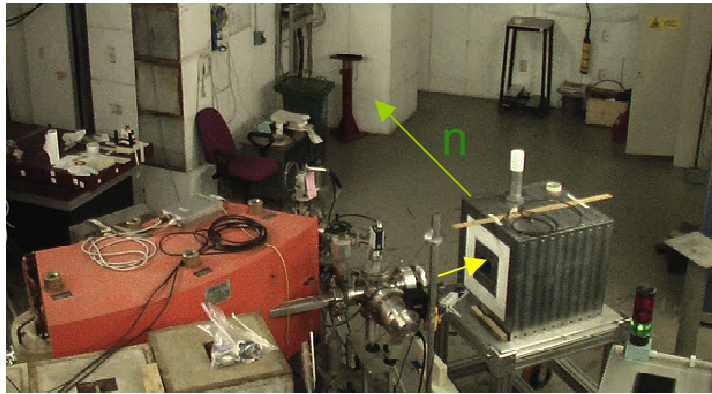
^a INFN—LNF (Laboratori Nazionali di Frascati), Via E. Fermi n. 40, 00044 Frascati (RM), Italy

^b CIEMAT, Av. Complutense 22, E-28040 Madrid, Spain

Attività svolte fino ad ora 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 e NESCOFI@BTF)



Allineamenti laser



2 tubi al BF_3 con moderatore cilindrico per monitoraggio stabilità del fascio di neutroni



Elettronica associata



Materiale in situ. Ordine in corso per i moderatori.

L'arresto del LINAC di DAΦNE ritarda i tests alla fine 2011 (run 24-28 ottobre)

Attività svolte fino ad ora primo anno - *stato dell'arte*

(P2.)

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

Rivelatori, radiatori ed elettronica

Diamanti CVD	✓	1 monoX bare 1 poliX 1.5 μm ^6LiF	4.7 x 4.7 x 0.5 5 x 5 x 0.5
Semiconduttori	✓	Photodiodes resin/flat glass coating (diverse marche e aree sensibili) <i>Si IR, Si Green</i> <i>SiC (radiation hard) 1 mm², 0.054 mm²</i> <i>InGaAs</i> <i>GaAsP visible light</i> PiN diodes windowless (Hamamatsu, diverse aree)	
Radiatori	✓	^{10}B da 50 μm , BN da 0.5 mm, B painting Mammo screen	
Elettronica	✓	Digital oscilloscope, ADC, PRE e AMP di diverse τ	
Mini BF_3	x	offerta in arrivo	

(P3.)

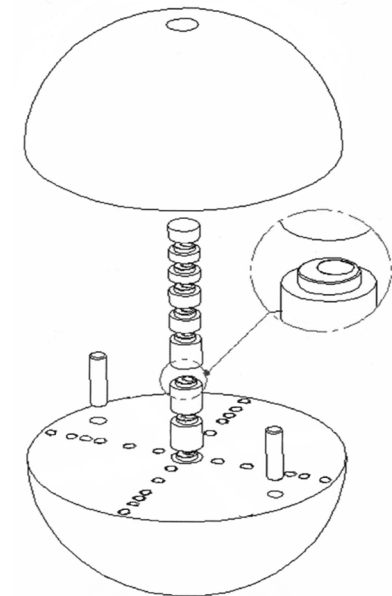
Studio ed ottimizzazione della geometria mediante codici Monte Carlo

(P4.)

Realizzazione prototipo passivo (lamine ad attivazione al Dy) per la verifica sperimentale del modello numerico.

Questa fase è stata svolta in due steps:

- (1) **Un prototipo passivo in SOLO polietilene**, di diametro 30 cm, 37 posizioni per rivelatori passivi su tre assi, risposta LIMITATA a 20 MeV e verificata sperimentalmente a 2.5 MeV e 14 MeV monocromatici.



Riferimenti bibliografici

Radiat. Meas. 2011, doi 10.1016/j.radmeas.2011.06.037

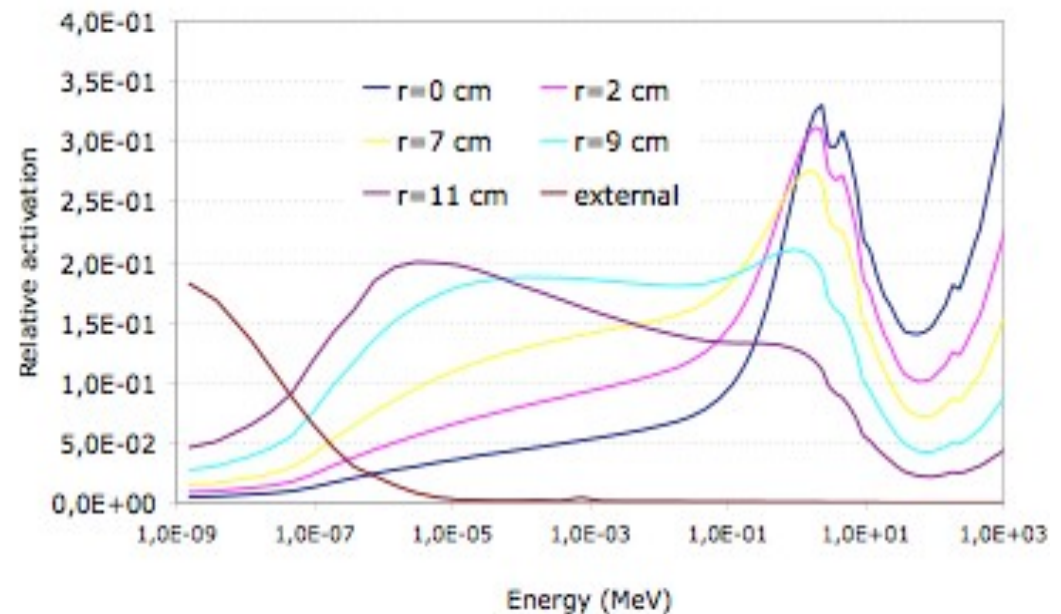
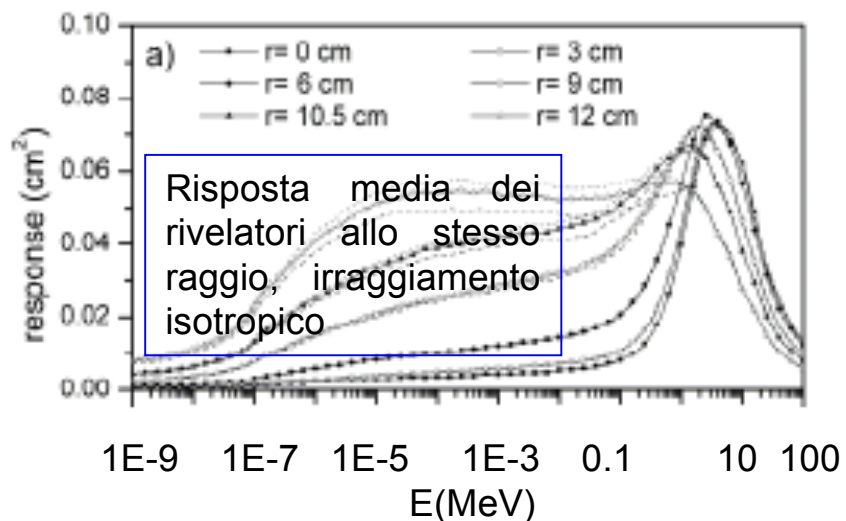
Nucl. Instrum. Meth. A 613 (2010) 127-133.

Radiat. Meas. 45 (2010) 1220-1223.

(2) SP² : ESTENSIONE AD ALTA ENERGIA

- Diametro esterno 25 cm
- Strato di piombo da 1 cm inserito fra R=4.5 cm e R=5.5 cm
- 31 posizioni per rivelatori di neutroni termici (PASSIVI nella prima fase 2011, ATTIVI nella versione definitiva del dispositivo, 2012-2013):

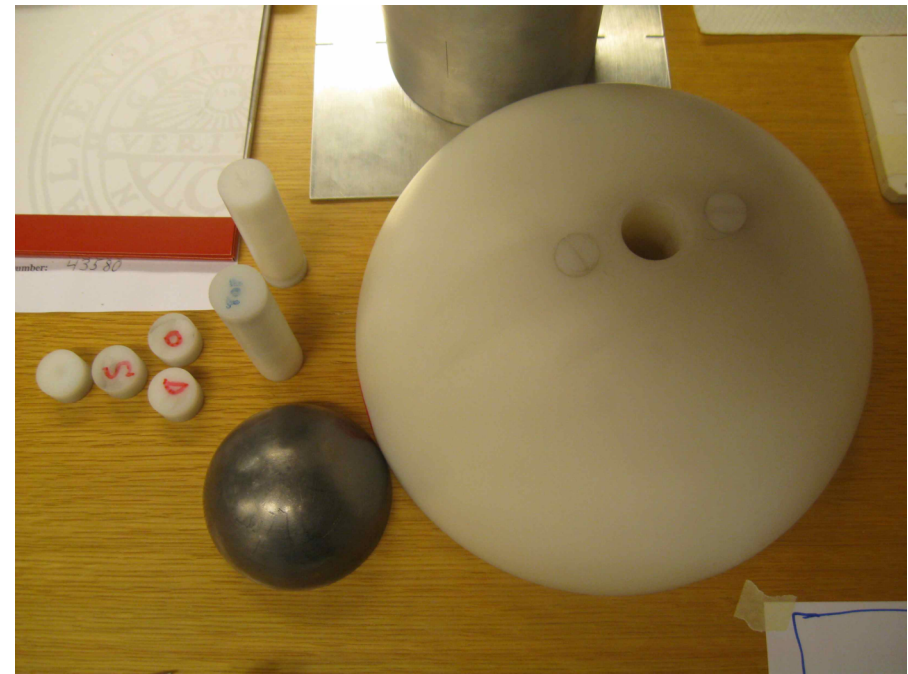
La matrice risposta del nuovo dispositivo mostra chiaramente che l'intervallo energetico è stato esteso alle centinaia di MeV



(2) SP² A RANGE ESTESO: IL PROTOTIPO



Semisfera inferiore con
calotta in Pb e lamine di Dy
inserite



Semisfera superiore

P5. Acquisizione di un set di lamine ad attivazione al Dy e di un contatore beta portatile per la misura dell'attivazione neutronica. (fatto)

P6. Tests di calibrazione del prototipo passivo
- una campagna con fasci monocromatici $E < 20$ MeV (PTB)
- una campagna con fasci monocromatici $20 \text{ MeV} < E < 200 \text{ MeV}$ (TSL)

Entrambi fatti.

Campagna di bassa E al PTB: 23-28 Maggio 2011

Campagna di alta E al TSL: 20-24 Giugno 2011

(Dati in corso di valutazione)

Per le suddette campagne di calibrazione sono stati ottenuti DUE specifici co-finanziamenti EC nell'ambito del progetto ERINDA (FP7)

Da fare: test su fascio realistico n@BTF, non appena possibile.

Attività di fattibilità volte al 2[^] anno

L'acquisizione simultanea dei circa 30 ATND di cui si comporranno il SP² oppure CYSP potrà essere fatta in due modi:

MODALITA' IMPULSO (+tradizionale, +sensibile, +caro)

(e.g. con diodi P-i-N che sono i più economici, circa 120 €)

- Il diodo deve essere windowless e ricoperto da un idoneo radiatore
- Si svuota il diodo con pochi V (per minimizzare il depleted volume e quindi la risposta agli elettroni secondari), si preamplifica (charge preamplifier), si amplifica e si fa lo spettro.

Serve una canale spettrometrico (almeno 1.5 k€) per ogni rivelatore

MODALITA' CORRENTE (+innovativa, -sensibile, - - - caro)

(stessi rivelatori P-i-N)

Il diodo può essere

- windowless e ricoperto da un idoneo radiatore (vedere la rad. ion. secondaria),
- ricoperto da uno strato scintillante + radiatore (vedere i fotoni visibili)

La corrente (radiation-induced) viene inviata ad un AMP OP ultra-low current con una R_f da 1 Gohm (fino a 10), quindi 0.2 pA vengono trasformati in 0.2 mV e letti da un ADC non spinto.

**VANTAGGI: un ADC a 30 ingressi costa 500 €.
I costi si ridurrebbero di un fattore 50 ca.**

Attività di fattibilità volte al 2[^] anno

Tuttavia:

La modalità corrente è MOLTO meno sensibile della modalità a impulso.

Siccome le facilities interessate presentano ratei dai 10^2 ai 10^8 n cm⁻² s⁻¹, si pensa all'eventualità di proporre spettrometri per DUE gamme di sensibilità, utilizzando le due modalità di acquisizione.

Highrate - SP²

In corrente, basso costo, alti flussi

Lowrate - SP²

In impulso, alto costo, bassi flussi

Highrate - CYSP

In corrente, basso costo, alti flussi

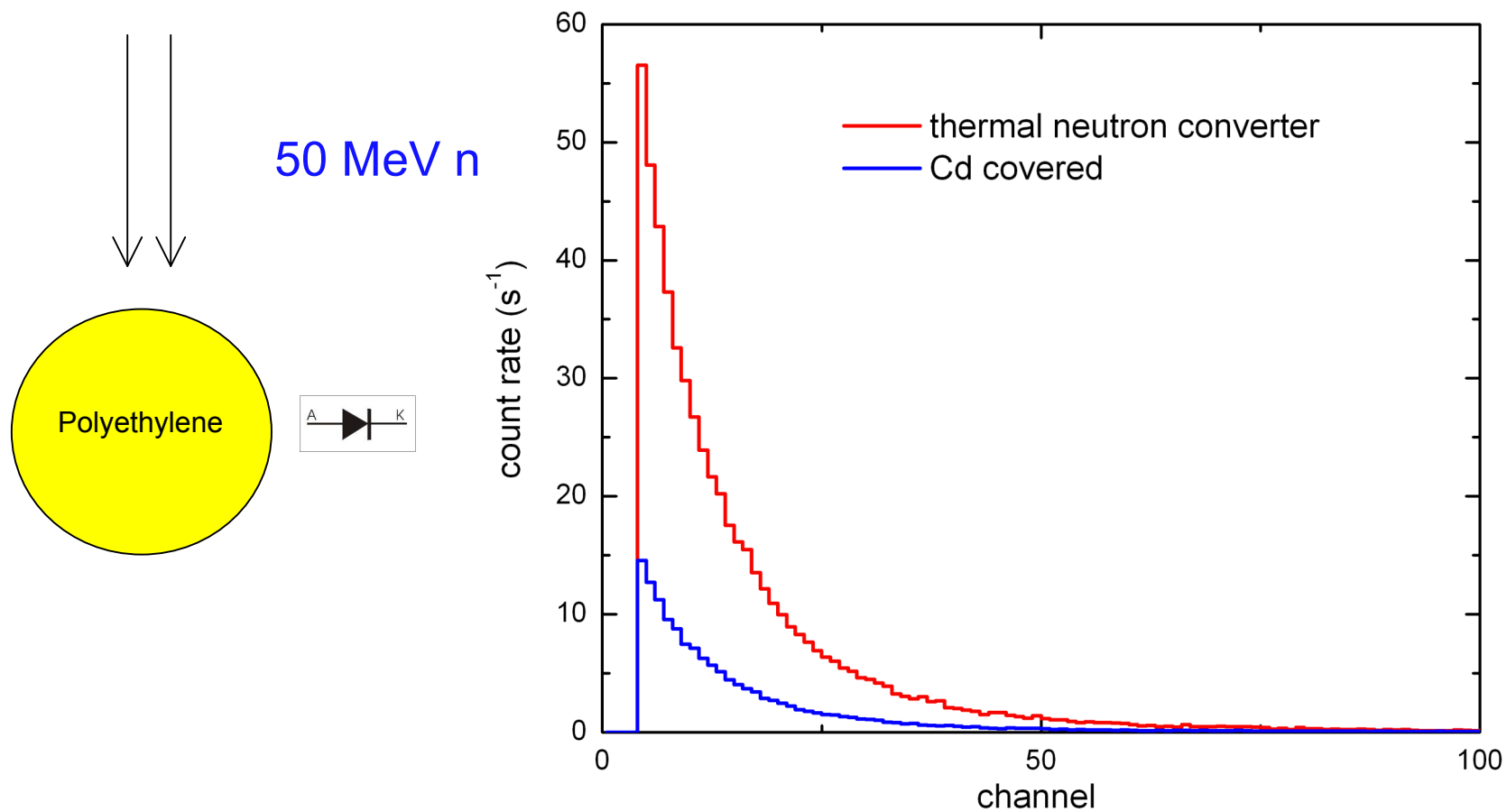
Lowrate - CYSP

In impulso, alto costo, bassi flussi

Attività di fattibilità volte al 2[^] anno

PULSE MODE

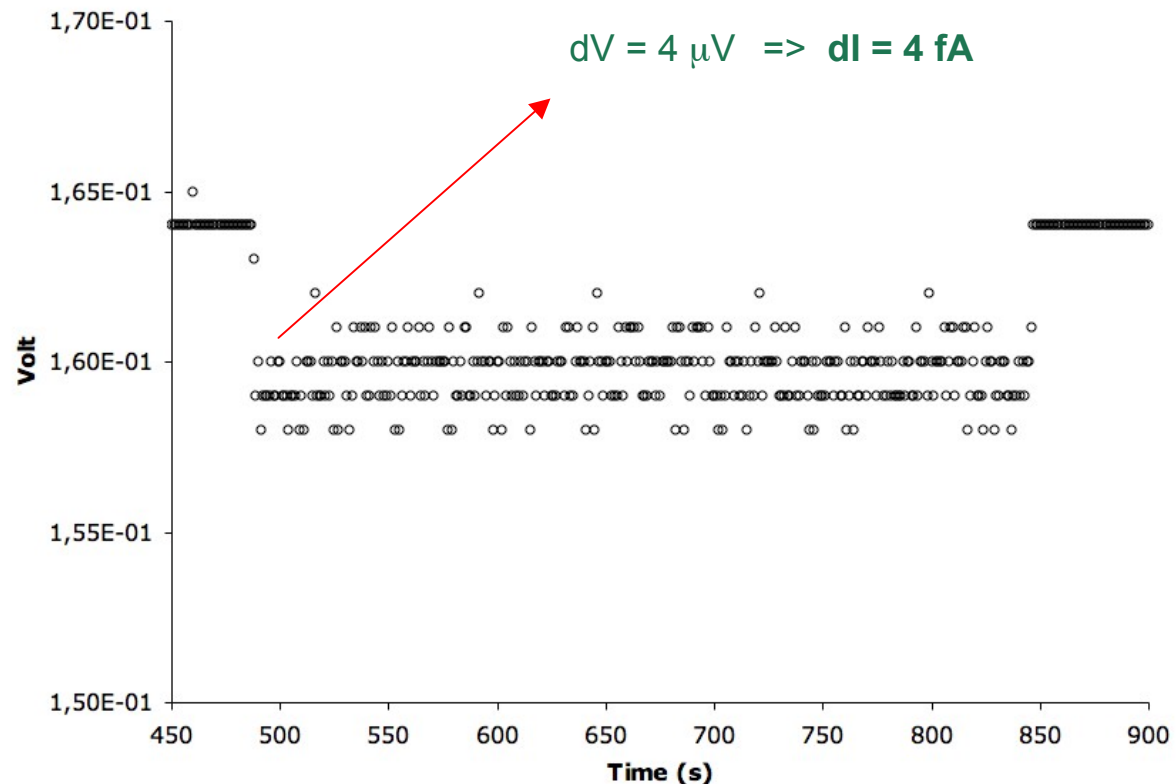
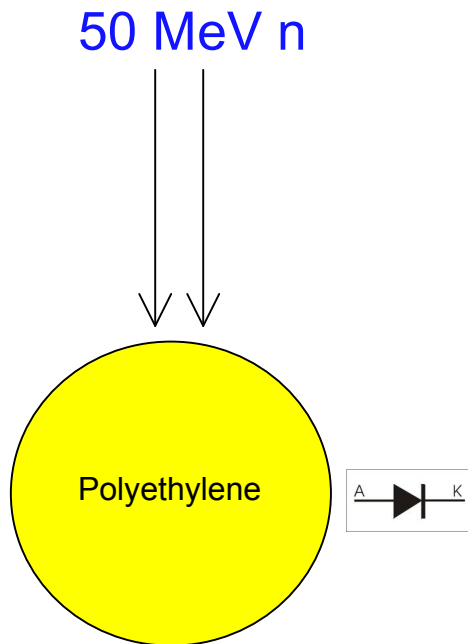
Diodo window-less S3590-09 ricoperto da un radiatore (con e senza Cd) esposto nel campo diffuso del TSL (circa $10^3 n_{th} cm^{-2} s^{-1}$)



Attività di fattibilità volte al 2[^] anno

CURRENT MODE

Diodo *flat-glass coated* ricoperto da un radiatore+schermo fluo (con e senza Cd) esposto nel campo diffuso del TSL (circa $10^3 n_{th} cm^{-2} s^{-1}$), letto in corrente



Richieste SECONDO ANNO (2012)

Secondo anno

- S1. Acquisiti diversi rivelatori ATTIVI di neutroni termici (Active Thermal Neutron Detectors, ATND), **in quanto possibili “candidati”** per lo spettrometro finale, questi verranno testati in campi **rappresentativi in termini di energia, intensità e fondo gamma, delle facilities in uso presso gli utenti finali:**
- un campo di riferimento **di neutroni termici** (NPL- UK, unica facility termica di riferimento in Europa);
 - n@BTF;
 - un LINAC medicale già caratterizzato (progetto NEUTOR), energia degli elettroni 15-21 MeV;
 - una facility medicale con adroni (LNS o CNAO)
 - una facility da spallazione per chip irradiation (ANITA o ISIS)
- S2. Sulla base degli esiti del punto S1, scelta del ATND ottimale per la realizzazione del dispositivo attivo finale e acquisizione di un numero adeguato di esemplari
- S3. Costruzione del dispositivo ATTIVO
- S4. Acquisizione e caratterizzazione della catena elettronica per la **lettura simultanea** di tutti gli ATND

Richieste per il Secondo anno (2012)

Missioni interne 12 k€

*Permanenze al lab di elettronica del Politecnico di Milano o ai LNF per messa a punto dell'elettronica di acquisizione e testing dei ATND (30 gg x 2 persone in 8 missioni)
2 campagne presso centri di radioterapia con elettroni e adroni (10 gg x 2 persone in 2 missioni)*

Missioni estere 10 k€

*1 campagna testing neutroni termici NPL-UK (10 gg x 3 persone)
1 campagna in una facility per fast neutron irradiation (10 gg x 3 persone)*

Trasporto strumentazione (DHL via aerea assicurato)..... 4 k€

4 campagne, 1 k€ cad.

Consumo 90 k€

Acquisizione circa 60 rivelatori n termici e relativa elettronica (preamplificatori e amplificatori)

Inventario 15 k€

Sistema digitale per filtraggio segnali e spettrometria

Apparati 20 k€

Costruzione spettrometri finali (moderatori, filtri in Cd e Boro, degradatori in Pb)

Spese servizi (beam time NPL e campo da fast neutron irradiation)..... 20 k€

Costruzione spettrometri finali (moderatori, filtri in Cd e Boro, degradatori in Pb)

TOTALE 171 k€