

MI-PD

SiD

DOSIMETRIA DI SINGOLO EVENTO IN RIVELATORI A SEMICONDUTTORE

1. Partecipanti

MI-INFN

- S. Agosteo (prof. Universitario, 50%), Dipartimento di Ingegneria Nucleare, Politecnico di Milano e INFN, Sezione di Milano;
- A. Foglio Para (prof. Universitario, 30%), Dipartimento di Ingegneria Nucleare, Politecnico di Milano e INFN, Sezione di Milano;
- G. D'Angelo (collaboratore tecnico 30%), Dipartimento di Ingegneria Nucleare, Politecnico di Milano e INFN, Sezione di Milano;
- C. Birattari, (prof. Universitario, 20%), Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Milano e INFN, Sezione di Milano.

PD-INFN

- L. De Nardo (assegnista universitaria,20%), Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Padova e INFN, Sezione di Padova;
- I. Lippi (ricercatore INFN, 20%) , INFN, Sezione di Padova;
- R.Martinelli (ricercatore INFN,20%), INFN, Sezione di Padova;
- G.Tornielli (prof. universitario, 20%); Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Padova e INFN, Sezione di Padova;
- P.Zotto (prof. universitario,30%); Dipartimento di Fisica, Politecnico di Milano e INFN, Sezione di Padova;

2. Scopo dell'esperimento

Lo scopo dell'esperimento è la realizzazione di un rivelatore a semiconduttore per la spettrometria degli effetti di singolo evento (SEE) indotti dalla radiazione. Tale dispositivo può essere impiegato direttamente per il monitoraggio dei SEE nei componenti elettronici sottoposti a intensi campi di radiazione, tipici dei sistemi di acquisizione utilizzati presso acceleratori di alta energia (ad esempio LHC), o alla radiazione cosmica. Lo stesso rivelatore può essere convertito in un microdosimetro allo stato solido, ricoprendolo con uno spessore di plastica tessuto-equivalente. Come descritto in seguito, dispositivi a semiconduttore, di differenti caratteristiche, ricoperti con una plastica idrogenata possono essere utilizzati come spettrometri di neutroni a idrogeno di rinculo. Anche questo tipo di rivelatori saranno studiati nell'ambito del presente esperimento.

Il più comune singolo evento è il Single-Event-Upset (SEU) che si manifesta come una alterazione dello stato memorizzato. Sono sensibili tutti i dispositivi di memoria: memorie statiche, dinamiche, FLASH e registri in genere, microprocessori, DSP e macchine a stati, logiche programmabili, ecc. ed è causato dalla raccolta, in un nodo sensibile, della carica depositata nel dispositivo elettronico dalla particella ionizzante. La sezione d'urto è tipicamente funzione del Linear Energy Transfer (LET) o dell'energia della particella. Secondo un modello comunemente accettato l'effetto ha una soglia che corrisponde ad un valore critico della carica raccolta in un volume sensibile, soglia che ci si aspetta essere tecnologia

dependente in quanto legata alle dimensioni fisiche dei transistors integrati. Al di sopra della soglia critica la sezione d'urto è costante e non dipende più dal LET della particella ionizzante. Talvolta l'energia depositata può raggiungere livelli tali da causare latch-up e quindi un danno permanente al dispositivo che non sia adeguatamente protetto. Risultati recenti mostrano una saturazione nella sezione d'urto relativa alla produzione di SEU verso l'energia dei neutroni intorno a 100 MeV.

E' stato evidenziato inoltre che la sezione d'urto per SEU è fortemente dipendente dalla componente termica dello spettro. Il meccanismo suggerito dagli autori per spiegare il fenomeno è la reazione di cattura $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ dove sia la particella alfa che il nucleo di litio hanno energia sufficiente a causare singoli eventi nei moderni dispositivi elettronici. Il ^{10}B rappresenta circa il 20% del Boro naturale che è utilizzato come drogante nella realizzazione dei circuiti integrati e può essere presente anche negli strati di passivazione oltre che come semplice contaminante.

Tutte le misure effettuate sinora mostrano che la probabilità di SEU, oltre a dipendere dalla topologia circuitale e dai parametri di utilizzo, anche ambientali, è legata alla tecnologia ed al processo di fabbricazione utilizzati nella realizzazione dei dispositivi stessi, con una variazione della sezione d'urto entro due ordini di grandezza.

I problemi legati agli Effetti di Singolo Evento sono sempre stati trascurabili nella fisica delle alte energie, dato il basso livello di radiazione. Quindi si presenta per la prima volta con la realizzazione di LHC per l'elettronica posizionata all'interno della caverna in cui avvengono le collisioni p-p. È quindi interessante realizzare un microdosimetro a semiconduttore che può essere integrato nelle schede di lettura del rivelatore e, una volta calibrato, può fornire un monitor in tempo reale della dose di radiazione assorbita e della relativa probabilità di Singolo Evento.

Come già accennato, il rivelatore di evento singolo al silicio può essere facilmente convertito in un microdosimetro allo stato solido applicando uno spessore di una plastica tessuto-equivalente (TE). La possibilità che esso, soprattutto se esposto in particolari campi di radiazione, possa costituire per semplicità e costi una alternativa conveniente rispetto alla tecnica TEPC (Tissue Equivalent Proportional Counter) è già stata discussa teoricamente [ZAI] e in parte affrontata sperimentalmente [SCH-ROS1-ROS2] con lo studio della risposta in alcuni prototipi nella ricerca spaziale e nel monitoraggio microdosimetrico di fasci per la BNCT, settori caratterizzati da elevata complessità del campo di radiazione.

Il maggior limite allo sviluppo dell'applicazione nel campo della microdosimetria sembra essere la inadeguatezza di tali dispositivi a rispondere correttamente nella zona degli eventi di rilascio energetico più basso a causa del rumore intrinseco che fissa una soglia nel sistema di acquisizione troppo elevata per consentire una estrapolazione dello spettro e a comprendere la totalità della componente di basso LET e alla esplorazione di volumi con diametro simulato dell'ordine del micrometro. Un altro problema oggetto di studio è la corretta stima del volume sensibile, la sua indipendenza dal LET delle particelle incidenti e il limite inferiore che la tecnologia consente.

La presenza inoltre dell'effetto 'funneling' e la sua significatività nella distorsione degli spettri microdosimetrici, rende necessario il confronto con gli spettri ottenuti con TEPC per identici volumi sensibili simulati e lo studio di adeguati algoritmi di correzione. Al fine di dimostrare la fattibilità di un microdosimetro a semiconduttore è stata effettuata una misura preliminare con un fotodiodo p-i-n. commerciale ricoperto di una plastica TE A-150 con fasci di neutroni monoenergetici presso i Laboratori Nazionali di Legnaro. Il fotodiodo non è stato polarizzato, ottenendo uno spessore della zona depleta di circa 20 μm . Si noti che tale spessore corrisponde a circa 45 μm nel tessuto muscolare, di molto superiore alle dimensioni di interesse in microdosimetria ($< 10 \mu\text{m}$). Lo spettro di singolo evento è mostrato nella Fig. 1.

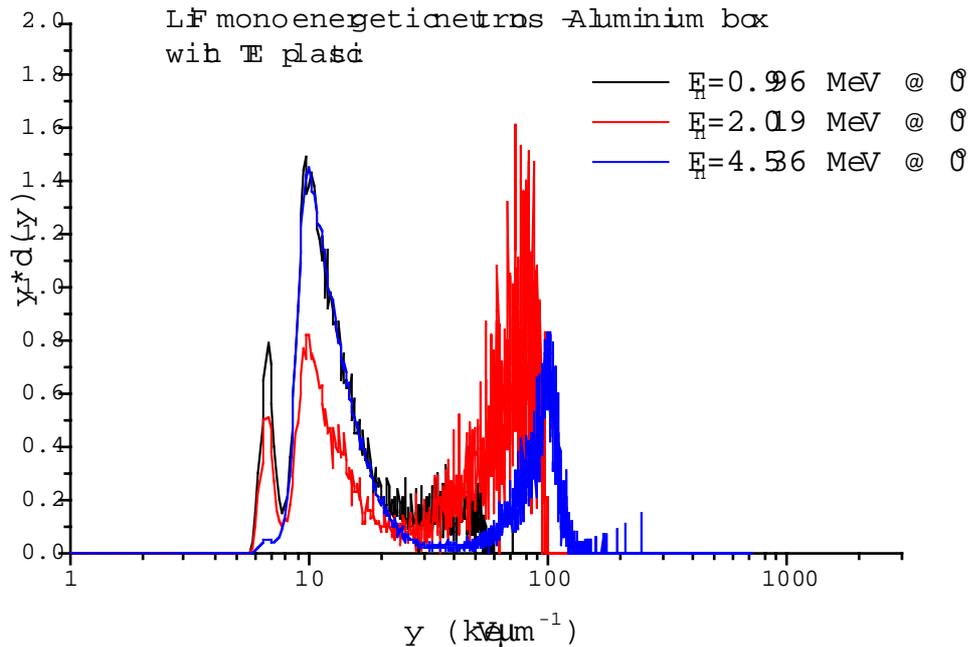


Fig. 1 - Spettri di singolo evento ottenuti irraggiando con neutroni monoenergetici un fotodiodo p-i-n commerciale ricoperto di una plastica TE.

Si osserva che la distribuzione relativa ai protoni di rinculo prodotti nelle interazioni elastiche con i neutroni si sposta al variare dell'energia del fascio incidente. Ciò avviene anche per protoni di rinculo con range nel Si superiore allo spessore della zona depleta (pari a 16, 50 e 185 μm a 1, 2 e 4.5 MeV rispettivamente). La spiegazione di tale fenomeno è dovuta all'effetto di funneling [HSI], per cui particelle di alto LET generano una distorsione locale del campo elettrico estendendo la raccolta della carica nel substrato del fotodiodo. Il funneling è quindi responsabile della dipendenza dal LET dello spessore della zona depleta utile, rendendo impossibile l'utilizzo di questo fotodiodo come microdosimetro. Tuttavia un dispositivo commerciale analogo (più sottile di quello attualmente disponibile) può essere impiegato per misure preliminari in diversi campi neutronici per fornire indicazioni circa il progetto e la realizzazione di un rivelatore ad hoc. Tale utilizzo è reso possibile soprattutto grazie ai bassi costi dei fotodiodi p-i-n commerciali.

E' quindi necessario progettare e realizzare un circuito integrato che sia caratterizzato da uno spessore della zona depleta di qualche μm che sia indipendente dal LET delle particelle incidenti.

Utilizzando tecnologie epitassiali con spessori della zona attiva da 1 a 10 μm si minimizzano i problemi legati al funnelling ed alla diffusione della carica, ottenendo un volume sensibile del dispositivo stabile. La realizzazione del dispositivo come un array di piccoli rivelatori ottimizza l'uniformità spaziale di risposta e minimizza problemi di pile-up e diffusione laterale. Per massimizzare il rapporto segnale/rumore e raggiungere quindi in sensibilità il limite minimo di energia lineale, si pensa di integrare il preamplificatore di carica con il rivelatore sullo stesso substrato.

Tra le tecnologie che il mercato offre il BiCMOS è la più versatile per questo tipo di applicazioni consentendo di integrare giunzioni pn e MOSFET con BJT su strati epitassiali molto sottili (<2 μm). Nel primo dispositivo che si intende realizzare troveranno posto diverse tipologie di rivelatore che si potranno sostituire al diodo PIN commerciale per un test comparato. Successivamente, individuate le caratteristiche

ottimali del dispositivo, si intende realizzare un rivelatore con front-end a basso rumore integrato per un test completo.

Un fotodiode commerciale può essere impiegato come spettrometro di neutroni a protoni di rinculo ricoprendolo con una plastica idrogenata (polietilene). In tale applicazione il fenomeno del funneling è di aiuto, perché rende disponibile quasi tutto il substrato per la raccolta della carica rilasciata nel silicio dai protoni di rinculo. Ciò permette di non polarizzare il dispositivo semplificando l'elettronica associata o di alimentarlo con basse tensioni inverse, dell'ordine di quelle fornite da un modulo NIM. Gli spettri dell'energia ceduta al semiconduttore ricoperto di polietilene, relativi a irraggiamenti con fasci di neutroni monoenergetici ai LNL sono mostrati nella Fig. 2.

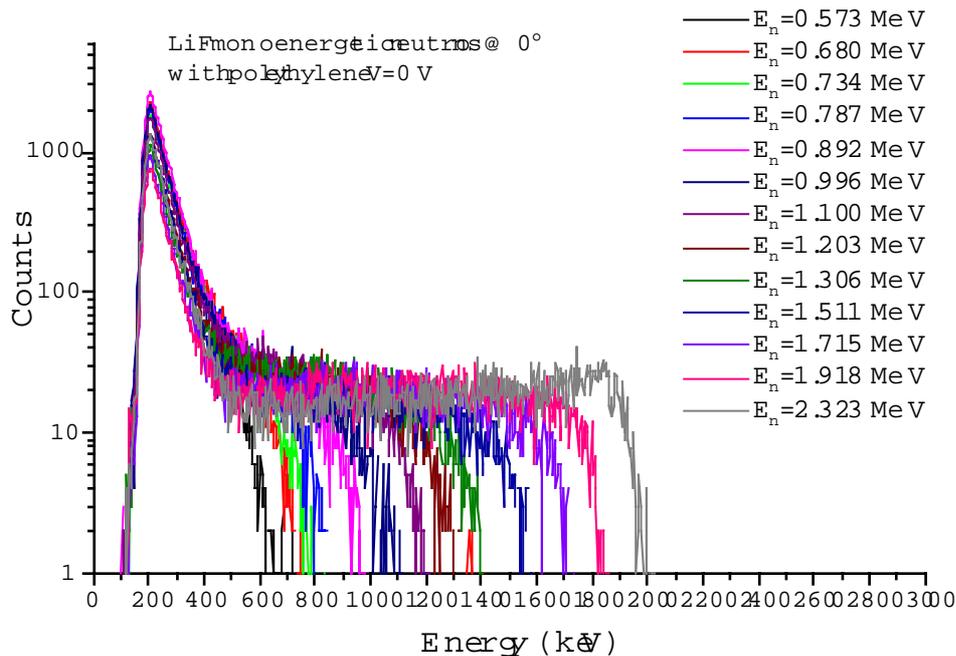


Fig. 2 – Funzioni di risposta di uno spettrometro a idrogeno di rinculo basato su un fotodiode p-i-n, ottenute con neutroni monoenergetici (rivelatore non polarizzato).

Determinando sperimentalmente e con simulazioni Monte Carlo (codice FLUKA) le funzioni di risposta del rivelatore è possibile ricostruire lo spettro di un qualsiasi campo di neutroni incidenti mediante tecniche di deconvoluzione. Anche in questo caso si potrebbe disporre di uno strumento estremamente compatto e semplice con efficienza superiore o dell'ordine di quella di un contatore a rinculo a gas idrogeno. Contrariamente a quanto richiesto nelle applicazioni microdosimetriche, in questo caso è necessario disporre di un fotodiode di spessore abbastanza elevato ($\cong 0.5$ mm) per poter estendere la sua risposta fino a 10 MeV.

Bibliografia

- [ZAI] M. Zaider, M.J. Bardash, and J. Ladik, Solid state Microdosimetry, Radiat. Prot. Dosim. 85 (1999) 443-446
- [SCH] O. Schröder, T. Schmitz, The application of commercial semiconductor chips for personal neutron dosimetry, Radiat. Prot. Dosim., 61 (1995) 9-12.
- [RES1] A. Resenfeld et al., Application of p-i-n and MOSFETS for dosimetry in gamma and neutron fields, Radiat. Prot. Dosim. 84 (1999) 349-352.

- [RES2] A. Resenfeld and P.D. Bradley, Semiconductor microdosimetry in mixed radiation and photon fields: present and future, Radiat. Prot. Dosim. 85 (1999) 385-388.
- [HSI] C.M. Hsieh et al., A field funneling effect on collection of alpha-particle-generated carriers in silicon devices, IEEE Electron Device Letters, EDL-2 (1981) 103-105.

3. Preventivo di attività per il biennio 2001-2002

Le misure saranno effettuate con le sorgenti neutroniche disponibili presso i seguenti laboratori:

- Van De Graaff CN dei LNL:
 - misure con fasci di neutroni monoenergetici generati con le seguenti reazioni:
 - ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ su targhette sottili di LiF, che permettono di ottenere energie fino a circa 5 MeV (l'energia massima di accelerazione di protoni al CN è di 7 MeV). Il sistema di supporto del bersaglio e di misura della corrente di protoni incidenti è già disponibile presso i LNL;
 - ${}^2\text{H}(d,n){}^3\text{He}$: si possono ottenere neutroni fino a circa 10 MeV. Anche in questo caso il bersaglio è già disponibile presso i LNL;
 - ${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$: si possono ottenere al CN neutroni fino a circa 20 MeV. Il sistema per la produzione di neutroni monoenergetici è in fase di realizzazione presso i LNL e necessiterà di un pozzetto di Faraday per la misura della corrente di particelle incidenti e l'acquisto di un bersaglio di trizio, di cui si propone il finanziamento.
 - misure con neutroni termici presso la sorgente moderata basata sulla reazione ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$ (già utilizzata nell'ambito dell'esperimento ATER.MOND). Il flusso massimo di neutroni ottenibile è dell'ordine di $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \mu\text{A}^{-1}$. La sorgente è disponibile presso i LNL;
 - misure con neutroni veloci prodotti da un bersaglio spesso con la reazione ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$. Anche in questo caso l'apparato sperimentale è già disponibile presso i LNL.
- CERN – Facility CERF nell'area Sperimentale Nord dell'SPS:

La struttura sperimentale di riferimento CERF è basata su un fascio di adroni (sostanzialmente protoni + π^+) di 120 GeV/c che incidono su un bersaglio di rame. Il bersaglio è inserito in una struttura schermante in cima alla quale sono disponibili una zona schermata con calcestruzzo e una con ferro, che forniscono spettri di neutroni secondari differenti che si estendono alle alte energie. Tali distribuzioni energetiche sono mostrate nella Fig. 3 e sono simili a quelle dei campi di neutroni secondari che si prevede siano generati nella struttura del CMS (Fig. 4). In particolare, lo spettro relativo allo schermo in calcestruzzo della CERF è simile alla distribuzione di neutroni prevista per le strutture più interne di CMS (MB1) poiché è caratterizzata da un picco di alta energia più intenso. Al contrario, lo spettro dello schermo in ferro della CERF simula meglio quanto previsto per le strutture più esterne di CMS (MB4).

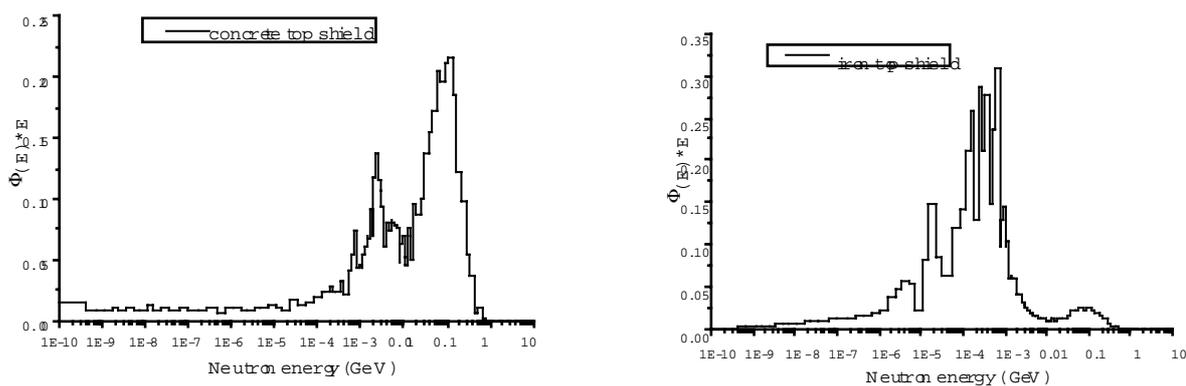


Fig. 3 – Spettri dei neutroni secondari disponibili sugli schermi di cemento e ferro presso la CERF al CERN.

Si sottolinea comunque che misure con spettri simili possono anche essere effettuate parassitamente presso il beam-dump dell'esperienza NA57, al di fuori dei turni di funzionamento della struttura

CERF. Gli spettri neutronici al di fuori di questo dump sono stati misurati e simulati [AGO] recentemente.

- Reattore TAPIRO dell'ENEA-Casaccia: sono disponibili flussi intensi di neutroni termici e epitermici ($\approx 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$), che permetteranno di valutare con maggiore accuratezza, rispetto alla sorgente di neutroni termici dei LNL, gli effetti di singolo evento generati a queste energie neutroniche. I campi di neutroni termici sono forniti da una colonna moderante di grafite nucleare, mentre quelli epitermici da un sistema di attenuatori che sarà installato entro la fine del 2000.
- Lovanio: sono disponibili fasci di neutroni monoenergetici fino a 70 MeV, che permetteranno di estendere lo studio dei singoli eventi e della risposta dei rivelatori a energie più elevate rispetto ai LNL. Il tempo di fascio è a pagamento presso questo laboratorio, per cui si prevede di acquisire dati soltanto con l'ASIC nella versione definitiva. Misure ad energia più alta sono auspicabili visto l'intervallo energetico aspettato a LHC (fino a circa 100MeV come si vede in Figura 4) e per la verifica dell'esistenza della possibile saturazione della probabilità di Singolo Evento a energie dell'ordine delle decine di MeV.

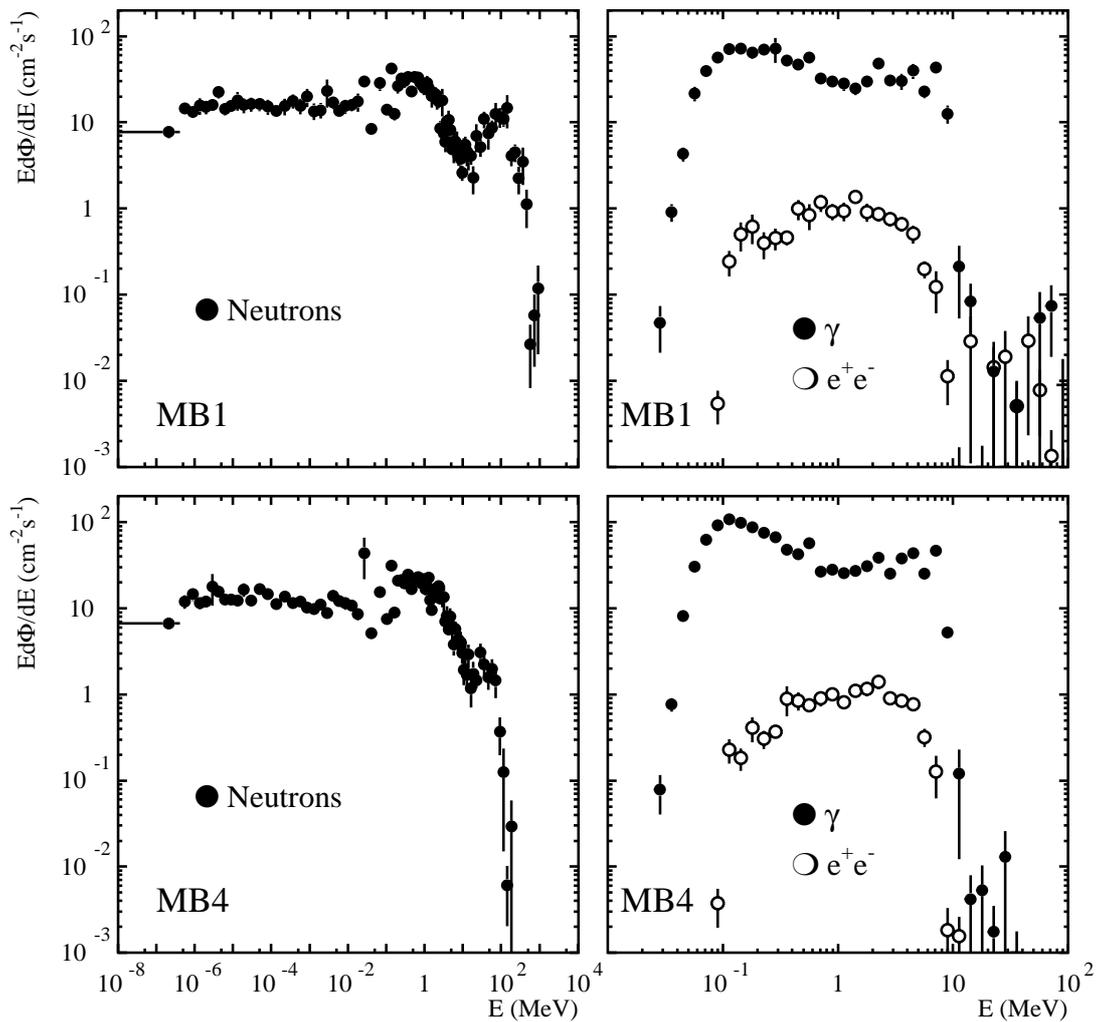


Fig. 4 – Spettri di neutroni, fotoni e $e^+ e^-$ previsti nelle strutture più interne (MB1) e più esterne di CMS (MB4).

Bibliografia

[AGO] S. Agosteo, C. Birattari, A. Foglio Para, M. Silari, L. Ulrici, FLUKA simulations and measurements for a dump for a 250 GeV/c hadron beam, Mathematics and Computers in Simulation, in press.

3.1 Anno 2001

Misure preliminari con un fotodiodo p-i-n commerciale (mesi 1-8)

Come accennato nel cap. 2, in attesa della costruzione del circuito integrato con le caratteristiche richieste per le applicazioni microdosimetriche (spessore della zona depleta dell'ordine di qualche μm e sua indipendenza dal LET) è utile poter effettuare misure preliminari con un fotodiodo commerciale dello spessore minimo disponibile. In parallelo è possibile iniziare la misura delle funzioni di risposta dello spettrometro di neutroni a semiconduttore. A tale scopo è necessario acquisire i due dispositivi con spessore opportuno assieme al preamplificatore di carica, mentre la catena di amplificazione e di acquisizione dati è già disponibile.

La calibrazione del rivelatore sarà effettuata con sorgenti alfa e neutroniche di Am-Be e Pu-Be disponibili presso il Dipartimento di Ingegneria Nucleare del Politecnico di Milano. Le simulazioni Monte Carlo della risposta dei rivelatori ai diversi campi neutronici saranno effettuate presso lo stesso Dipartimento.

Le misure con fasci di neutroni monoenergetici sono utili per studiare la variazione della risposta del rivelatore commerciale con l'energia dei neutroni al fine di determinare lo spessore ottimale della zona depleta dell'ASIC da realizzare.

Le misure con neutroni termici permetteranno di valutare l'influenza della reazione $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$, dovuta al boro presente nel rivelatore a semiconduttore come drogante, sullo spettro microdosimetrico. Nel caso in cui questa sia non trascurabile, sarà necessario prevedere sistemi che ne eliminino il contributo nella distribuzione spettrale acquisita. Tali misure saranno effettuate sia presso i LNL sia al reattore TAPIRO, che fornisce flussi neutronici termici e epitermici più intensi e che quindi garantisce una migliore accuratezza dei dati raccolti.

Le misure al CERN sono di fondamentale importanza poter prevedere il comportamento del rivelatore di singolo evento, in questo caso non ricoperto dalla plastica TE, in presenza di neutroni di alta energia. Sarà possibile valutare l'influenza della componente neutronica di alta energia sull'induzione degli effetti di singolo evento e comprendere quale sia l'architettura dell'ASIC che garantisca meglio il loro monitoraggio.

Si prevedono i seguenti turni di misura per l'anno 2001:

Sezione INFN	LNL	Casaccia	CERN
MI	10 d/y per 2 persone	15 d/y per 2 persone	10 d/y per 2 persone
PD	10 d/y per 2 persone	15 d/y per 2 persone	10 d/y per 2 persone

Progetto e realizzazione di un ASIC prototipale

Le misure verranno ripetute con il prototipo nell'ultimo quadrimestre del 2001 e nei primi mesi del 2002, presso gli stessi laboratori citati per il fotodiodo commerciale. La prima serie di misure permetterà la verifica del comportamento del dispositivo, fornendo indicazioni per eventuali modifiche che si riterranno necessarie, nonché su quali fra i vari layout integrati sia più promettente. Si suppone pertanto che i test del 2002 saranno effettuati su un secondo prototipo migliorato. Inoltre nel secondo prototipo si integrerà l'elettronica di front-end.

Costruzione di un microdosimetro TEPC per intercalibrazione

Al fine di verificare i risultati del microdosimetro a effetto di singolo evento, è necessario costruire un microdosimetro TEPC che, essendo una tecnica affermata, permetterà la certificazione e la calibrazione del

nuovo dispositivo. Si prevede di costruire e calibrare (con una sorgente alfa ^{144}Cm) il microdosimetro TEPC costruito usando plastica TE Shonka A-150 durante il 2001.

Milestones

Luglio 2001: Completamento della fase progettuale dell'ASIC.

Novembre 2001: Realizzazione del prototipo dell'ASIC e costruzione microdosimetro TEPC.

3.2 Anno 2002

Misure con l'ASIC definitivo (mesi 3-12)

I risultati ottenuti con i due prototipi dovrebbero essere sufficienti per poter realizzare un progetto definitivo del dosimetro integrato che verrà prodotto e provato su fascio durante la seconda metà del 2002.

Misure di intercalibrazione con TEPC

Tutte le misure con il dispositivo finale saranno fatte contemporaneamente con il microdosimetro TEPC costruito e calibrato nel 2001 in modo da ottenere dati direttamente confrontabili e stabilire quindi la qualità del microdosimetro a silicio. In particolare si prevede la possibilità di modificare la dimensione della zona di svuotamento con una polarizzazione del dispositivo e metterla in relazione con la variazione di pressione del microdosimetro TEPC, in modo da simulare differenti volumi sensibili.