

SETA: Single Event Effects Tolerant Architecture studies for the electronics of the CMS Muon Drift Tube Chambers

S. Agosteo⁽¹⁾, L. Castellani⁽²⁾, M. De Giorgi⁽²⁾, I. Lippi⁽²⁾, R. Martinelli⁽²⁾, M. Pegoraro⁽²⁾, P. Zotto⁽²⁾

⁽¹⁾ Dipartimento di Ingegneria Nucleare, Politecnico di Milano

⁽²⁾ I.N.F.N. Sezione di Padova

1- Introduzione

Il rivelatore di muoni di CMS (Fig. 1.1) consiste in 240 camere a deriva (Fig. 1.2) per un totale di circa 200.000 canali. Per l'elaborazione dei segnali del rivelatore le camere sono equipaggiate con amplificatori, discriminatori, TDC, un sistema di trigger e unità di controllo. Tutta l'elettronica è alloggiata sulla camera stessa, allo scopo di minimizzare le interconnessioni con la sala di controllo dell'esperimento e quindi ridurre i costi dell'apparato. La zona del barrel di CMS ha i livelli di radiazione più bassi di tutto l'esperimento; solo il flusso di neutroni può essere un potenziale problema considerando la generazione di Single-Event-Effects (SEE) nell'elettronica dell'apparato. Fino ad ora nessun lavoro significativo è stato fatto per valutare il rischio associato ai SEE prodotti dai neutroni nella regione del barrel di CMS.

2- Fenomenologia dei SEE

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 dipendente 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. In aperta contraddizione con questo modello vi sono tuttavia dispositivi che non mostrano alcun effetto di soglia (Fig. 2.1). La spiegazione che si trova nella letteratura è che la carica critica è caratteristica di ogni singolo nodo sensibile in una specifica configurazione; i fattori che possono influenzare questo valore sono: la forma dell'impulso di carica, la posizione del nodo all'interno del chip, l'alimentazione e la relativa impedenza di linea, la temperatura, oltre ai parametri di processo. La efficacia della carica depositata da una particella ionizzante in una SRAM nel generare un SEU dipende dal rapporto tra tempo di raccolta della carica e tempo di rilassamento del nodo, considerando che il circuito ha una retroazione. Si è anche rilevato come, per le più recenti tecnologie, i SEE non sono un problema riservato

alla strumentazione aerea o spaziale ma riguardano anche le installazioni terrestri. Tutte le misure di irraggiamento eseguite su vari dispositivi, volte a definire la sezione d'urto per la produzione di singoli eventi, hanno evidenziato come i parametri tecnologici che la determinano non siano tenuti sufficientemente sotto controllo nelle fasi di produzione. La variazione dei valori misurati su dispositivi realizzati con diverse tecnologie (Fig. 2.2a, 2.2b, 2.2c), a parità di tecnologia da diverse fonderie, ed anche per diversi campioni dello stesso dispositivo, non è significativamente diversa ed è distribuita su quasi due ordini di grandezza. Un lavoro di simulazione con il codice SEMM (Rif. 1) ha dimostrato che se i normali processi produttivi producono una tolleranza di un fattore 2 nella carica critica di un dispositivo, questo si riflette in una variazione di un fattore 60 nella sezione d'urto per SEU.

Un recente lavoro (Rif. 2) ha evidenziato che, irraggiando memorie commerciali con neutroni, la sezione d'urto per SEU è fortemente dipendente dalla componente termica dello spettro. Sono stati utilizzati neutroni da un reattore con diverse configurazioni di schermatura, volte ad aumentare o diminuire la naturale componente termica dello spettro energetico sul dispositivo. In Fig. 2.3 sono riportati gli spettri sia del reattore libero (free-2) sia mediante interposizione di uno schermo in polipropilene (poly-2) o di polietilene borato (nb-poly-2). In Fig. 2.4, i risultati sperimentali, riportati come sezione d'urto per la produzione di SEU, evidenziano che irraggiando con una forte componente termica nello spettro (spettro indicato come poly-2 in Fig. 2.3), si ottengono sezioni d'urto da 2 a 100 volte maggiori a quelli ottenuti utilizzando neutroni con una ridotta componente termica (spettro nb-poly-2).

Il meccanismo suggerito dagli autori per spiegare il fenomeno è che la reazione di cattura $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ sia dominante rispetto alla reazione di scattering con il ^{28}Si . 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.

La Fig. 2.5 mostra l'energia dei prodotti di rinculo delle interazioni dei neutroni con il ^{10}B ed il ^{28}Si . Come risulta, l'interazione con il ^{28}Si produce energie significative solo per neutroni di energia superiore ai 100keV. La Fig. 2.6 riporta i valori medi del LET dei prodotti di reazione per ^{10}B e ^{28}Si ; in Tab. 2.1 sono riportati i valori del LET e del range dei prodotti tipici della reazione nucleare nel Silicio. Si nota che i LET dei prodotti di decadimento del ^{10}B sono significativi: $1.47\text{MeV}/(\text{mg}/\text{cm}^2)$ per la particella alfa e $0.84\text{MeV}/(\text{mg}/\text{cm}^2)$ per il ^7Li ; le soglie tipiche in memorie commerciali sono nell'intervallo $1\text{-}3\text{ MeV}/(\text{mg}/\text{cm}^2)$.

Particle type	Energy	LET (MeV/(mg/cm ²))	Range (mm)
^{28}Si	50keV	2.35	0.43
	500keV	2.81	1.92
	1MeV	4.53	3.78
	2MeV	7.67	7.02
^4He	1.5MeV	1.18	5.07
	4MeV	0.71	17.23
	7MeV	0.50	39.22
^1H	100keV	0.57	0.88
	5MeV	0.06	213
^{10}B	100keV	1.23	0.34
^7Li	0.8MeV	2.22	2.42

Tab. 2.1: LET e range di alcuni tipici prodotti di reazioni nucleari con il Silicio.

3- Descrizione e scopo

Il flusso di particelle nelle camere a deriva del rivelatore di muoni di CMS è stato simulato utilizzando i codici FLUKA, MARS e GCALOR. Il risultato delle simulazioni è riportato in Fig. 3.1a e 3.1b. La Fig. 3.2 mostra lo spettro in energia per le camere delle stazioni MB1 (la più interna) ed MB4, che sono quelle con il flusso maggiore. I valori massimi, integrati su 10 anni di attività (corrispondente a 5×10^7 s), sono di 5×10^{10} n/cm² di cui circa il 10% termici (energia inferiore ad 1eV). La dose assorbita sul rivelatore è molto bassa, inferiore ad 1Gy per 10 anni di attività.

Visto che il flusso di radiazione nel rivelatore è dominato dai neutroni ci limiteremo a studiare i SEE prodotti da questi ultimi.

Lo scopo di questo esperimento è di ottenere una valutazione attendibile della sezione d'urto per la generazione di SEE nelle condizioni di lavoro delle camere. Considerando il fatto che il dispositivo più sensibile al flusso di neutroni è l'unità di controllo, e che ragioni di bilancio non ci consentono di utilizzare dispositivi resistenti alle radiazioni, ci proponiamo inoltre di studiare una architettura del sistema che sia "intrinsecamente" resistente alla generazione di SEE.

Utilizzando le sezioni d'urto riportate in letteratura possiamo ottenere una prima rozza stima della massima frequenza di SEU che possiamo aspettarci nell'elettronica del rivelatore di muoni di CMS. La memoria totale distribuita sul rivelatore ammonta a circa 1Gbit ed utilizzando un massimo di sezione d'urto pari a 2×10^{-8} SEU/Mbit/(n/cm²) per un flusso di 5×10^9 n/cm² si ottiene un massimo di 7SEU/h. Visto che il 90% della memoria è localizzata nei collettori e nell'elettronica di controllo delle camere, e considerando il caso peggiore, in cui ogni SEU nell'unità di controllo può essere riparato solo riavviando il processore, questo può significare la perdita di una camera a deriva ogni circa 10 minuti di presa dati. Naturalmente pensiamo di poter studiare una architettura del sistema di controllo che sia il più possibile tollerante ai SEE grazie ad autonome capacità diagnostiche e di ripristino trasparenti all'acquisizione.

Lo scopo delle prove di irraggiamento che intendiamo eseguire è duplice. Innanzitutto vogliamo verificare che il contributo dei neutroni veloci alla sezione d'urto per i SEE sull'elettronica delle camere sia trascurabile, sia in assoluto che confrontato con quello della componente termica. Trascurabile significa che la frequenza stimata di danni permanenti non incide in modo determinante sulla vita media dei dispositivi e che la frequenza di SEE riduce l'accettazione del rivelatore (per trigger e readout) al massimo intorno all'1% in un run di 8 ore. Vogliamo inoltre verificare che il sistema di controllo delle camere sia in grado di riparare autonomamente tutti i danni prodotti dai SEE sull'elettronica di front-end, readout e trigger delle camere e che le sue capacità di autoriparazione possano abbattere la frequenza di SEE che richiedano la reinizializzazione del sistema, per ciascuna unità di controllo, a meno di 0.01 per run di 8 ore in modo che la frequenza di SEE totale "vista" dall'acquisizione sia meno di 2.5 per run.

I risultati ottenuti dall'irraggiamento con neutroni termici/veloci potrebbe essere utili a tutti i gruppi che intendono installare elettronica nella caverna di CMS ed abbiano bisogno di qualificare i dispositivi, dagli alimentatori di alta e bassa tensione alle CPU dell'acquisizione o dei sistemi di controllo.

4- Programma di test

La procedura per l'irraggiamento dei dispositivi prevede di utilizzare sia neutroni termici che veloci presso una o più linee di fascio da 7MeV del CN Van de Graaff dei LNL. I dispositivi che sono già pronti per essere irraggiati sono:

- un prototipo della scheda di controllo delle camere (CCB)
- una scheda di test con 4 BTI, il primo di tre ASICS dedicati al trigger delle camere
- un prototipo della scheda di front-end con 4 MAD, l'ASIC con 4 canali di amplificazione e discriminazione

Se i risultati saranno significativi vorremmo ripetere le procedure di irraggiamento in almeno due periodi all'anno per seguire l'evoluzione dei prototipi e le prime fasi della produzione fino circa a tutto il 2002.

La Fig. 4.1 illustra il setup per l'esperimento. La CCB si occupa di identificare i SEE nelle schede BTI e MAD mediante un continuo monitoraggio via JTAG o I²C. Un sistema di acquisizione costituito da un PC collegato via RS232 alla CCB si occupa di raccogliere la statistica e di catalogare le tipologie di SEE in alcune classi predeterminate. Un semplice contatore NIM è utilizzato per analizzare il rumore nei front-end durante l'irraggiamento. Le unità vengono irraggiate, con un flusso uniforme sulla superficie, una per volta. La scheda BTI ha bisogno di un impulsatore per la generazione del clock e di una unità di monitoraggio dell'alimentazione per l'identificazione di possibili fenomeni di latchup (SEL); vengono irraggiati 4 prototipi dell'ASIC BTI, il front-end della catena del trigger di camera ed un chip commerciale utilizzato per la distribuzione del clock. La scheda Front-end necessita di una unità addizionale (Front-end Test Board), alimentata direttamente dalla rete, quale interfaccia I²C verso la CCB; vengono irraggiati 4 prototipi dell'ASIC MAD, il front-end analogico delle camere ed un chip commerciale per la generazione di segnali di configurazione. Irraggiando la CCB vengono testati, oltre al microprocessore, molti dispositivi commerciali: SRAM, FLASH, FPGA, ADC, DAC ed un ricevitore/trasmittitore per fibra ottica.

4.1- Irraggiamento con neutroni termici.

Per l'irraggiamento con neutroni termici pensiamo di avvalerci del moderatore in grafite, approntato per gli studi di BNCT su organi espianati, previo accordo con il responsabile dell'esperimento (Allegato 1). La Fig. 4.2 illustra la geometria dell'apparato che è installato su una linea di fascio dell'acceleratore CN. Il dispositivo, introdotto nella cavità cubica con 18cm di lato, viene irraggiato con un flusso uniforme di neutroni, prevalentemente termici, di 1.6×10^6 n/cm²/s/μA (contenitore in acciaio inox). La Tabella 2 fornisce i flussi di neutroni termici, epitermici e veloci e la dose in funzione dell'intensità del fascio di deuterio.

Per stimare l'intensità di fascio necessaria per l'irraggiamento occorre considerare che il limite massimo di SEE che necessitano di riavviare il processore della CCB è di circa 100/h per i limiti del sistema di acquisizione. Naturalmente, per non perturbare la statistica di eventi singoli con una frequenza eccessiva di inizializzazioni del sistema (che prendono circa 30s ciascuna), sarebbe meglio non doverne eseguire più di 10 per ora. Considerando quindi che la memoria di programma ammonta a 2Mbit e che la sezione d'urto massima può essere di circa 4×10^{-8} SEU/(n/cm²) si ottiene un flusso ottimale pari a 1.4×10^5 n/cm²/s che corrisponde ad una corrente del fascio di

circa 90nA. In queste condizioni il flusso di neutroni termici è pari a circa 1 anno equivalente su LHC per ora di irraggiamento (1LHCy/h).

L'irraggiamento delle schede BTI e Front-end richiede la massima intensità possibile di fascio che possiamo fissare intorno ai 270nA corrispondenti ad un flusso di neutroni termici pari a 4.2×10^5 n/cm²/s pari a circa 3 LHCy/h.

Il tempo necessario per l'irraggiamento è pari a:

- 8 ore per la CCB
 - 4 ore per la BTI Board
 - 4 ore per la Front-end Board
- per un totale di 2 giorni.

4.2- Irraggiamento con neutroni veloci

Per l'irraggiamento con neutroni veloci pensiamo di utilizzare una linea di fascio del CN attrezzata con una targhetta in Berillio: sfruttando la reazione nucleare ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$ si ottengono neutroni veloci con lo spettro riportato in Fig. 4.3. La resa della reazione è di circa 2×10^{10} n/s/ μA con un fascio di deuterio da 7MeV. Per l'irraggiamento dei dispositivi utilizzeremo un supporto in nylon con piedestallo in alluminio in grado di posizionare la scheda ad una distanza di 0.5m dalla targhetta di Berillio ad una altezza di 1.25m da terra. Il flusso di neutroni sul dispositivo, che si vuole uniforme sulla sua superficie entro il 10%, risulta essere di circa 2.7×10^7 n/cm²/s/ μA , oppure 10^{11} n/cm²/h/ μA , che equivale a 20LHCy/h/ μA . Visto che ci aspettiamo una sezione d'urto per la produzione di SEE più bassa di circa un ordine di grandezza rispetto a quella ottenuta con neutroni termici, pensiamo di regolare la corrente del fascio al valore massimo possibile, compatibilmente con eventuali vincoli di radioprotezione.

Per consentire di ricavare sufficiente statistica per eventi rari valutiamo che i dispositivi vadano irraggiati per un tempo pari ad 8 ore ciascuno per un totale di 3 giorni.

5- Scala dei tempi

Periodo	Attività prevista
5-7/1999	Classificazione e misura delle sezioni d'urto di SEE nei prototipi di CCB, FEB e BTIB.
8-12/1999	Migliorie all'architettura della CCB volte ad aumentare la tolleranza ai SEE. Irraggiamento del primo prototipo di Trigger Board (TRB) e di Readout Board (ROB). Qualifica del primo lotto di produzione di FEB.
2000/2001	Qualifica della produzione di elettronica per il trigger ed il readout delle camere a deriva per la rivelazione dei muoni di CMS.

6- Conclusioni

Si chiede di iniziare un programma di irraggiamento con neutroni termici e veloci presso il CN Van de Graaff dei L.N.L..

Si richiede che i L.N.L. forniscano la targhetta di Berillio per il fascio di neutroni veloci.

Nel caso la sezione d'urto per la produzione di SEE con i neutroni veloci non risultasse trascurabile si renderebbe necessario caratterizzare lo spettro di irraggiamento e quindi di eseguire delle misure dosimetriche e/o di utilizzare un collimatore.

7- Riferimenti

1* G.R.Srinivasan et al."Accurate, Predictive Modeling of Soft Error Rate Due to Cosmic Rays and Chip Alpha Radiation", 32nd IEEE International Reliability Physics Proceedings, pp.12-16, 1994.

2* P.J.Griffin et al."The Role of Thermal and Fission Neutrons in Reactor Neutron-Induced Upsets in Commercial SRAMs", IEEE Trans. On Nucl. Science, vol.44, No.6, Dec 1997.

CMS

A Compact Solenoidal Detector for LHC

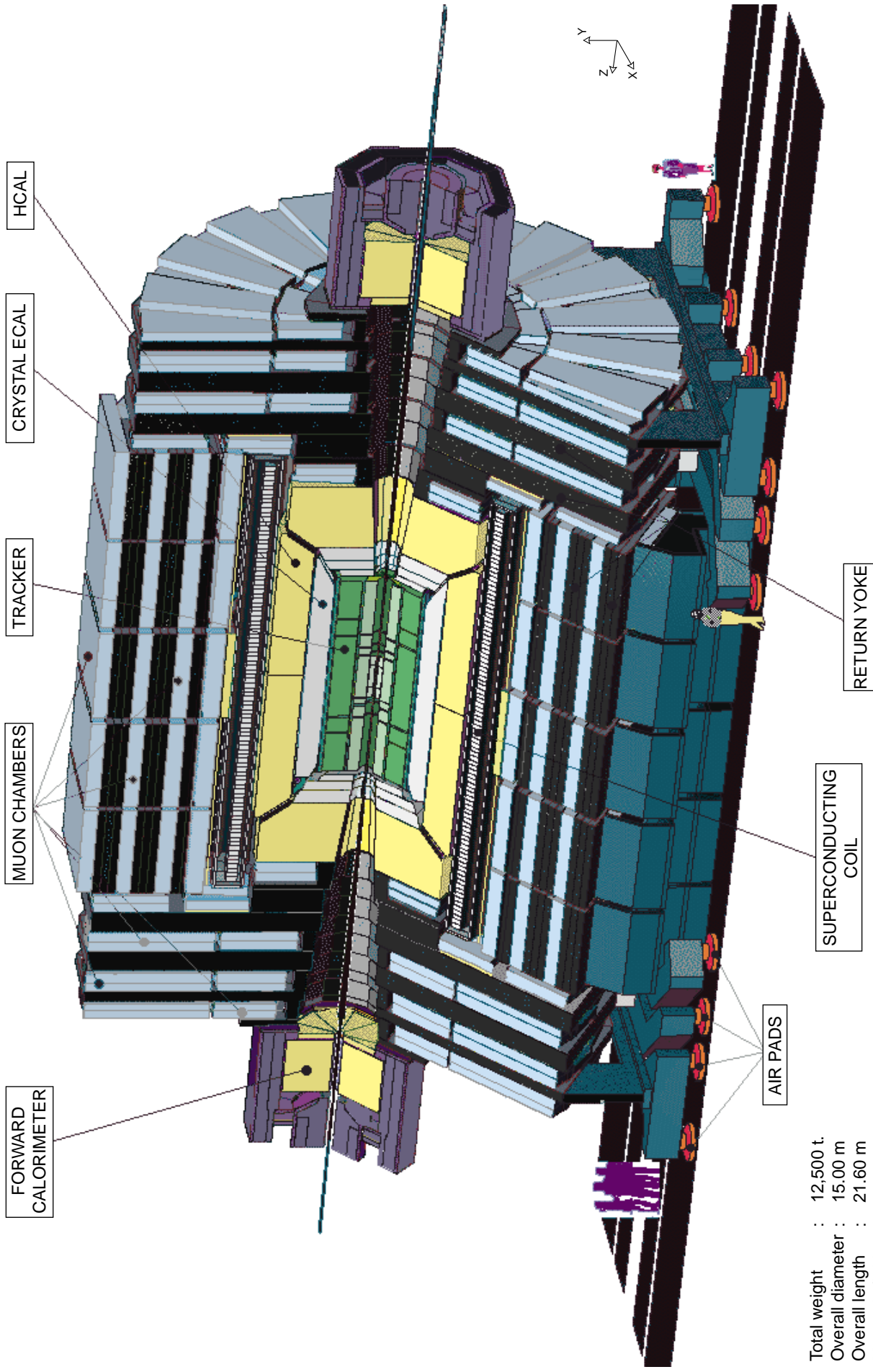


Fig. 1.1.1(color): View of the CMS detector.

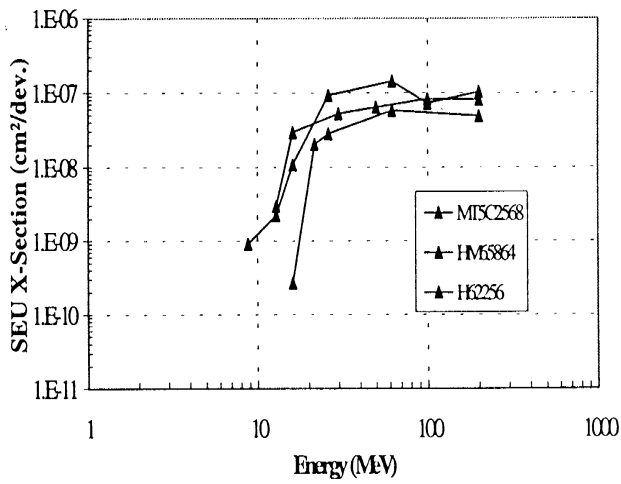


Fig. 2.1a: Sezioni d'urto per SEU su memorie da 256kbit.

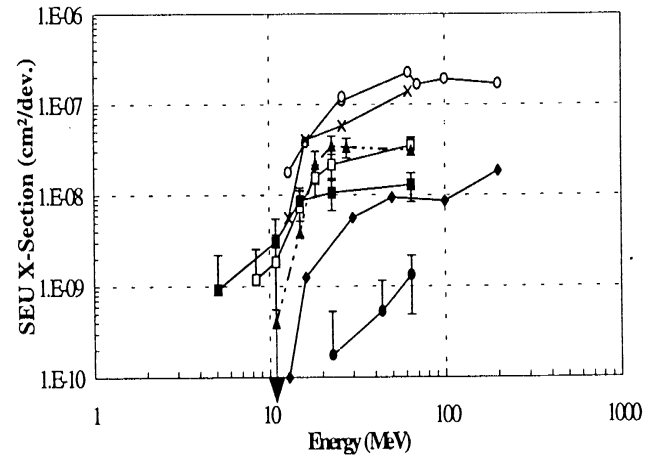


Fig. 2.1b: Sezioni d'urto per SEU su memorie da 1Mbit.

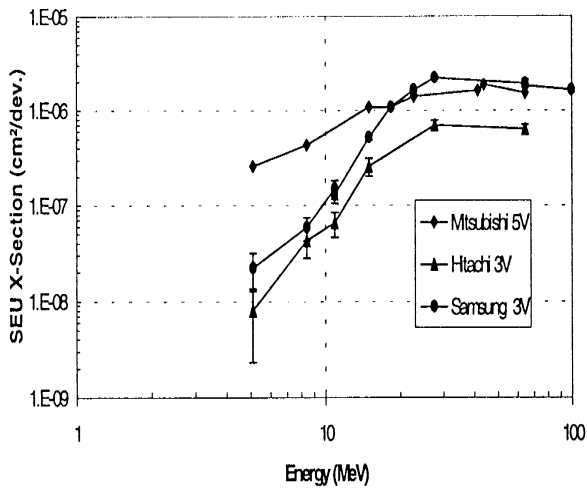


Fig. 2.1c: Sezioni d'urto per SEU in memorie da 4Mbit.

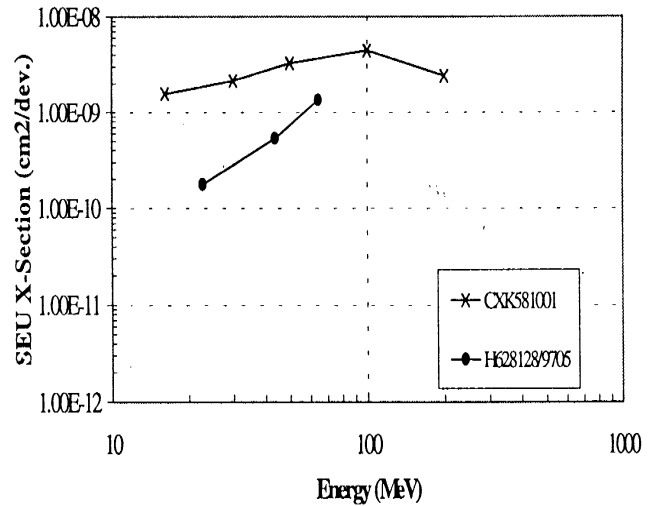


Fig. 2.2: Sezioni d'urto per SEU in memorie che non mostrano alcun effetto di soglia.

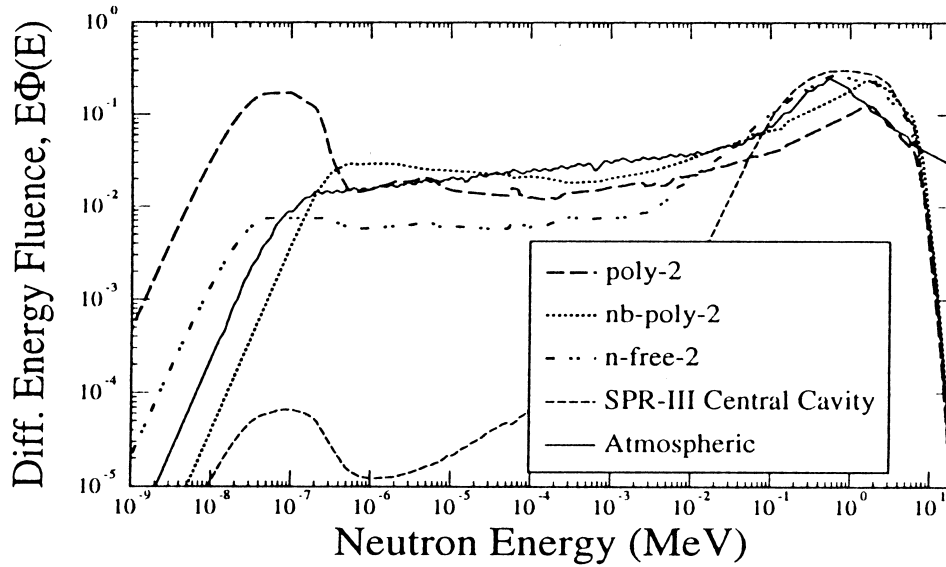


Fig. 2.3: Spettri in energia dei neutroni utilizzati per l'irraggiamento.

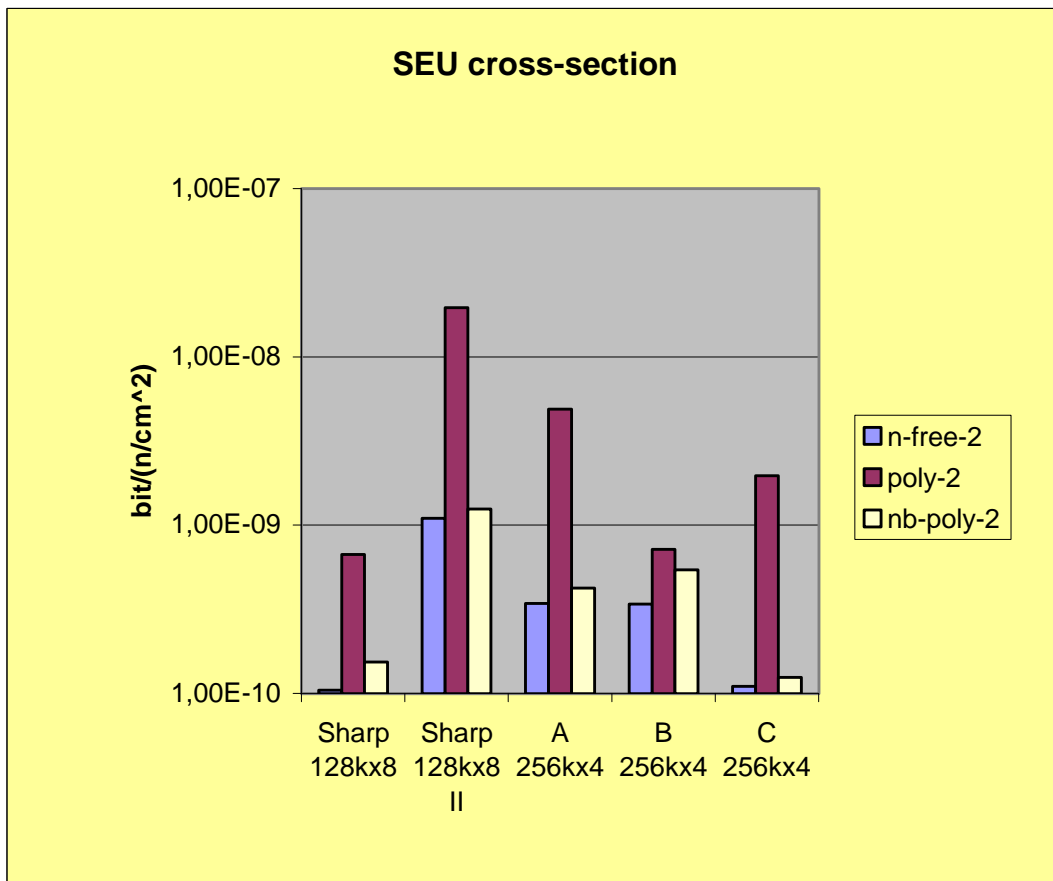


Fig. 2.4: Sezioni d'urto per la produzione di SEU per 6 SRAM con 3 diversi spettri di irraggiamento.

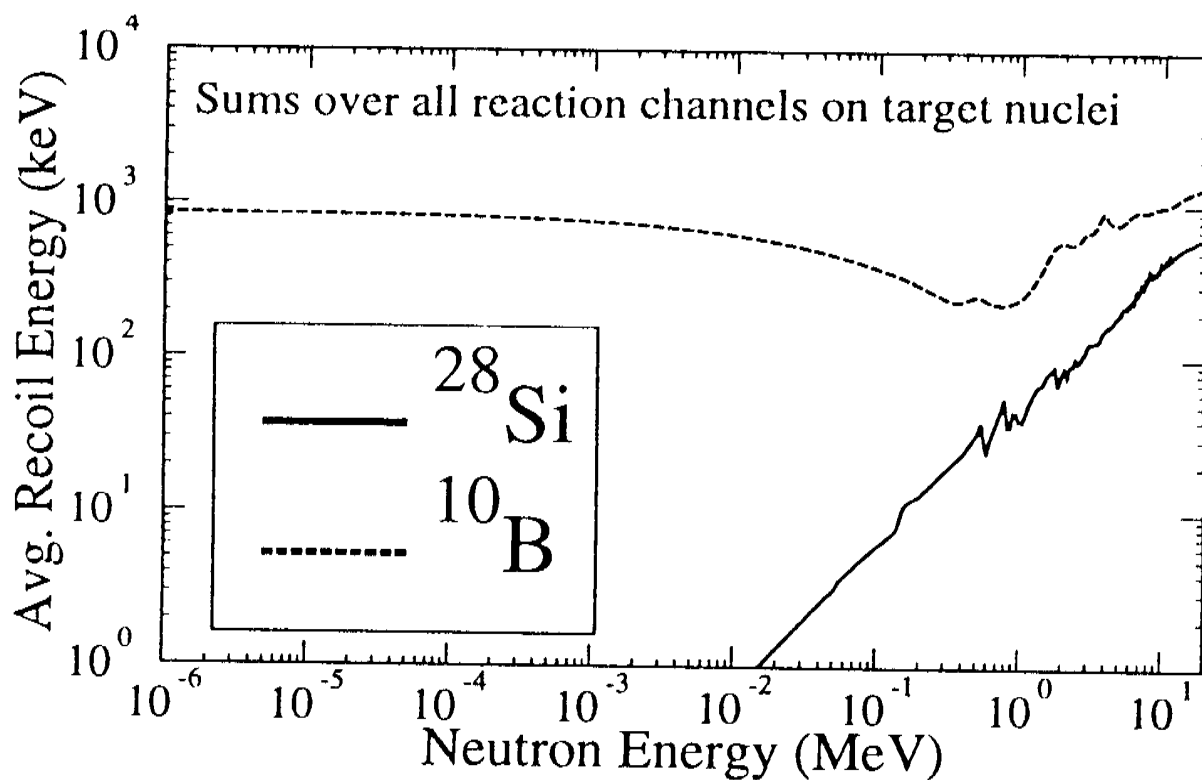


Fig. 2.5: Energia media dei prodotti di rinculo dell'interazione dei neutroni con ^{10}B e ^{28}Si in funzione dell'energia.

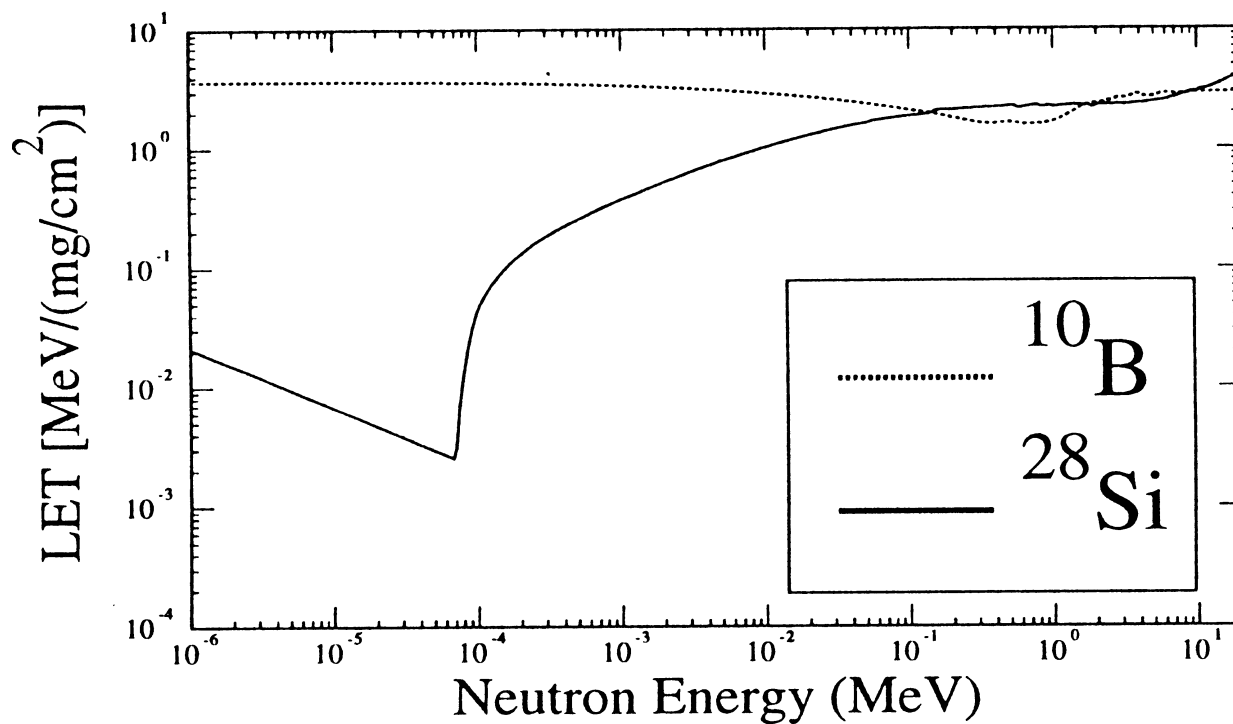


Fig. 2.6: LET medio dei prodotti di reazione dei neutroni con con ^{10}B e ^{28}Si in funzione dell'energia.

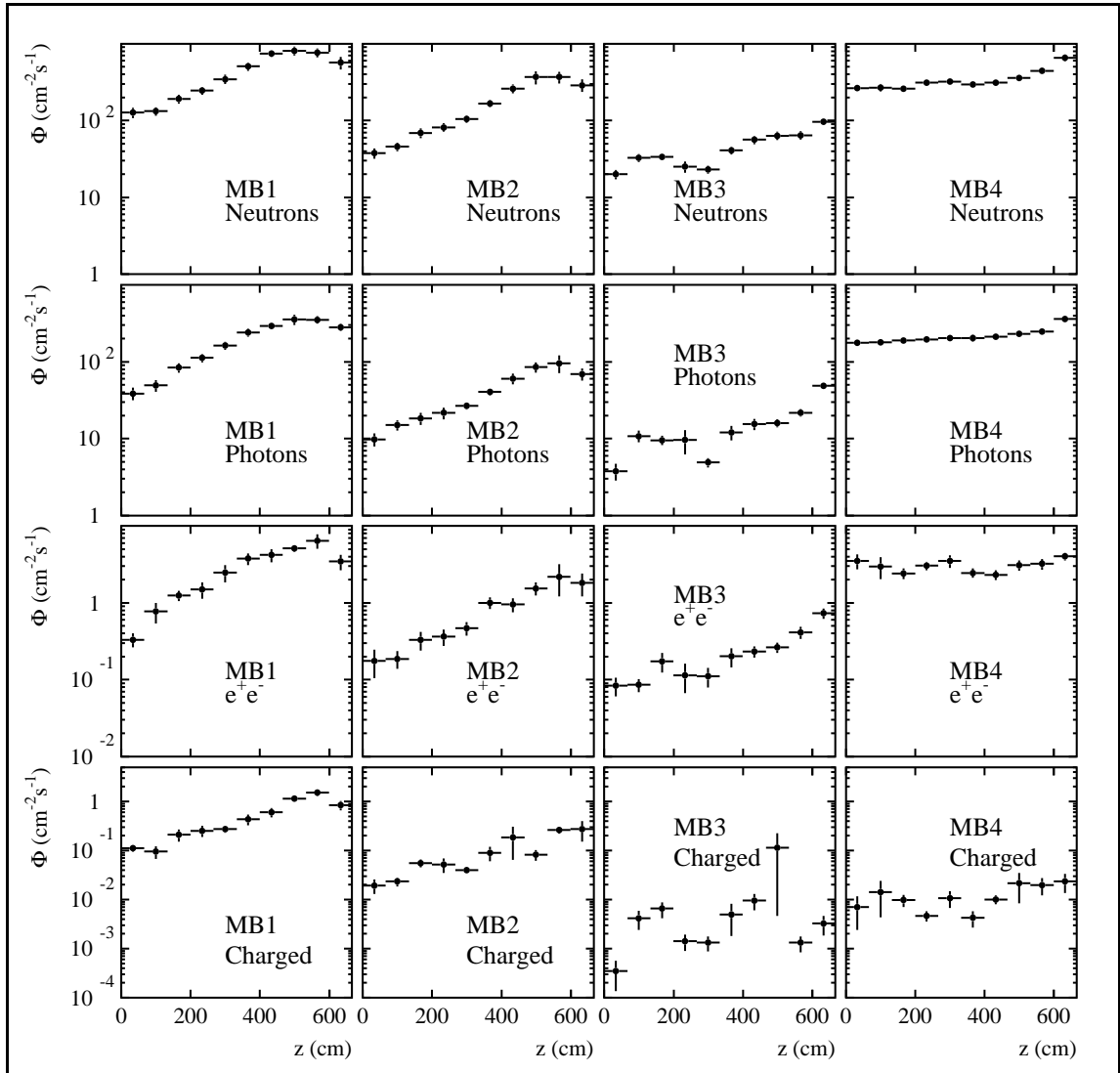


Figura 3.1a: flussi di particelle nel barrel di CMS corrispondente ad una luminosità di ($10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$).

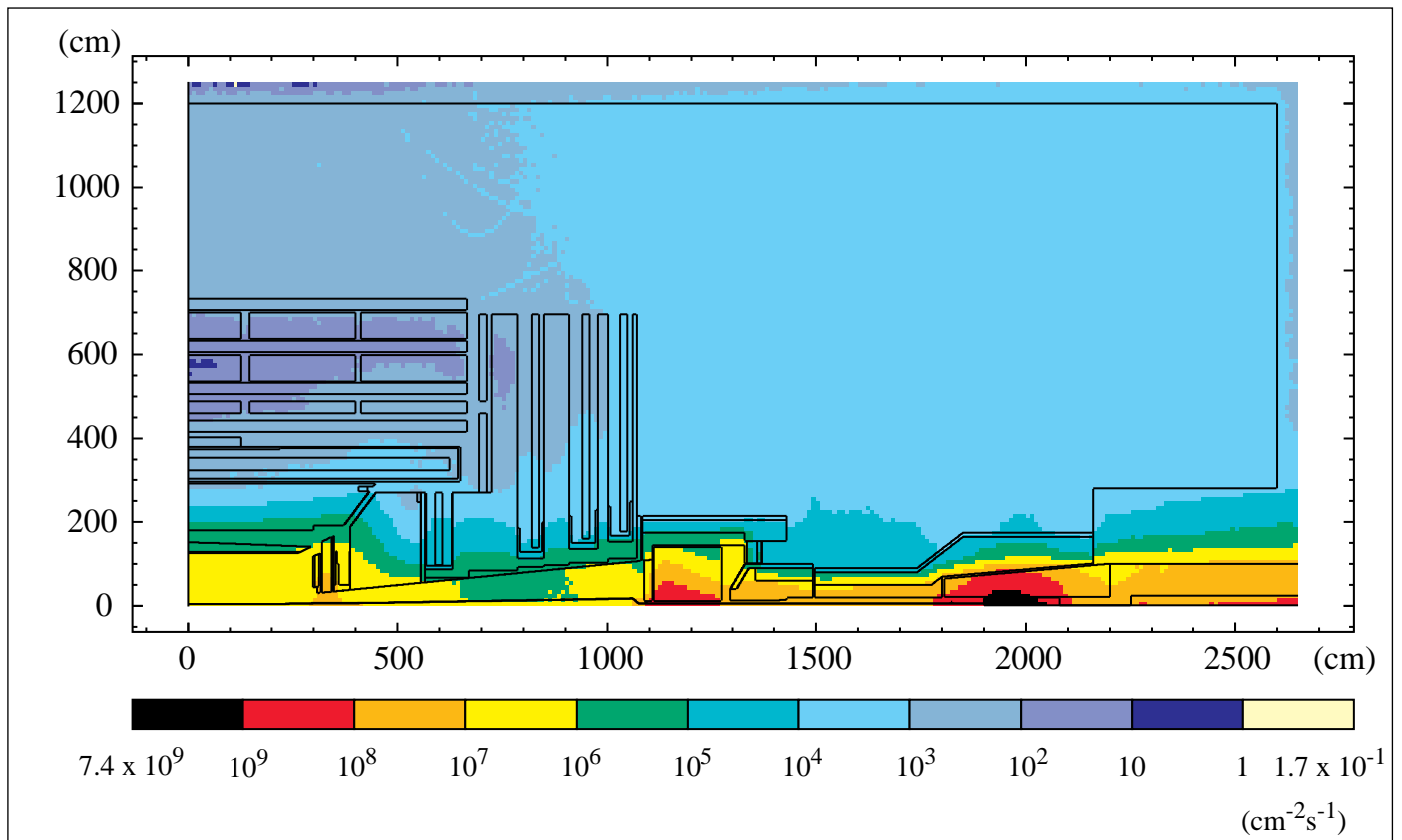


Fig. 3.1b: Flusso di neutroni nel rivelatore CMS corrispondente ad una luminosità di picco pari a ($10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$).

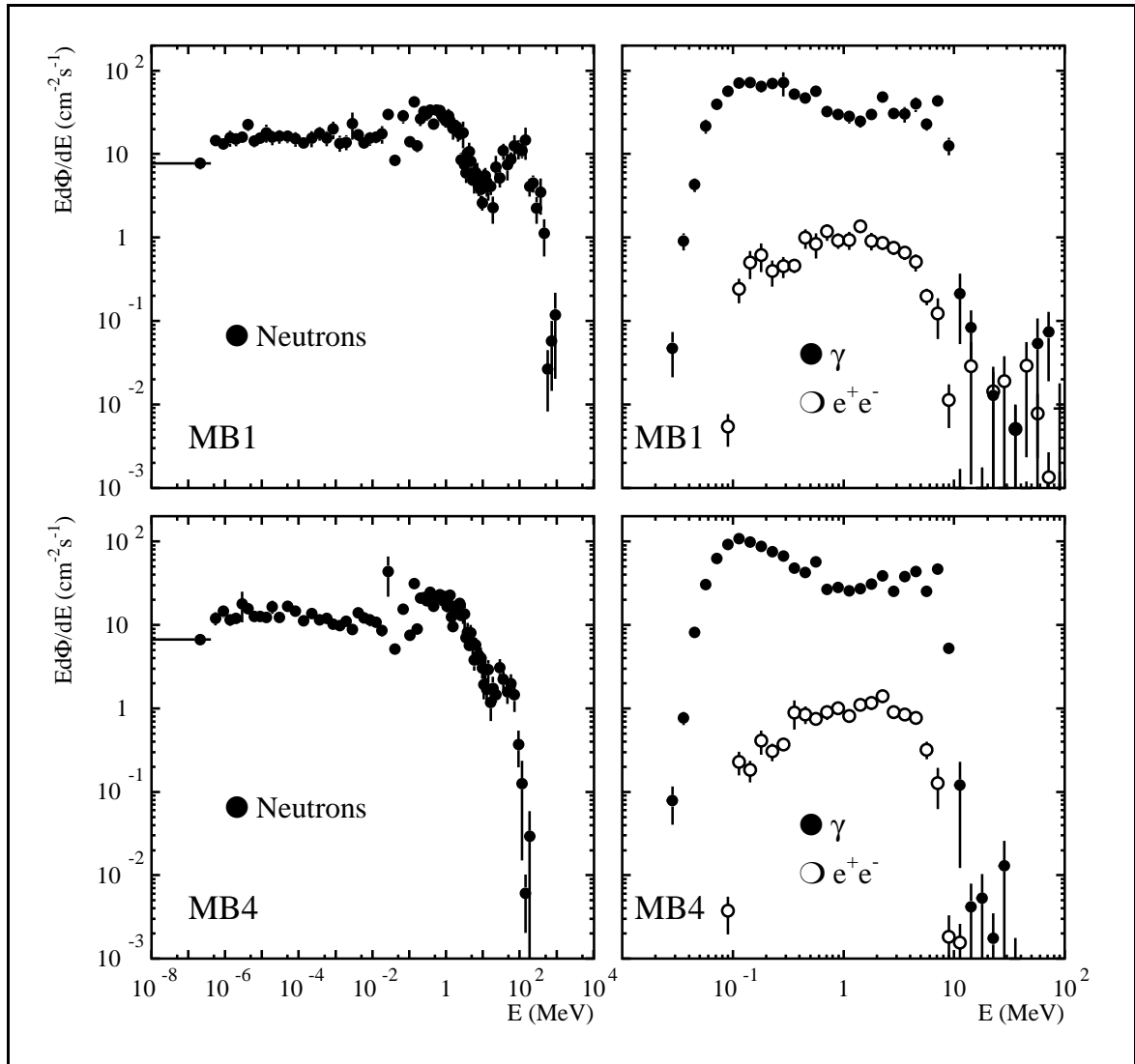


Fig. 3.2: Spettri di particelle nei tubi a deriva di MB1 e MB4. I fotoni sono tagliati a 30 keV e gli elettroni a 100 keV. Luminosità pari a $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

DTBX electronics: experimental setup for SEE characterization

Padova, 17 mar 1999

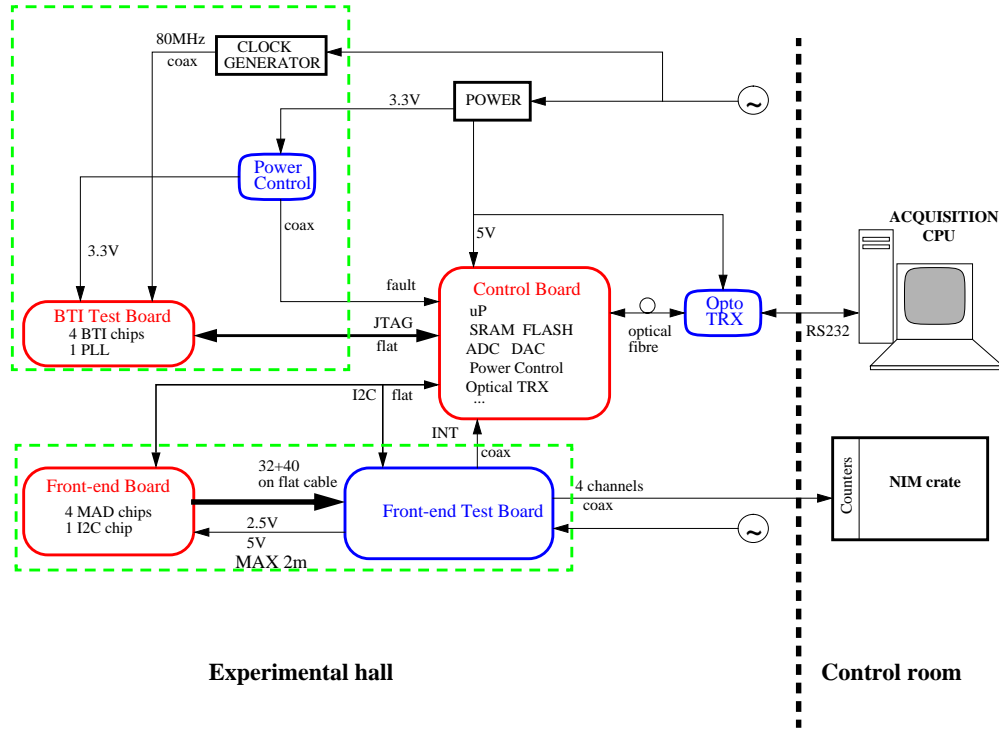


Fig 4.1: Setup sistema di acquisizione per il test di irraggiamento.

THERMAL NEUTRONS IRRADIATION

Control Board 8 h

8 hours with Ibeam = 90 nA -> $\Phi = 1.4 \times 10^5 \text{ n/cm}^2/\text{s}$
SEU ~ 1/h - 100/h

BTI Test Board and Front-end Board 8 h

4 hours with Ibeam = 270nA -> $\Phi = 4.2 \times 10^5 \text{ n/cm}^2/\text{s}$ -> 3 LHC-year / h

FAST NEUTRONS IRRADIATION

Control Board, BTI Test Board and Front-end Board 24 h

8 hours with Ibeam = 1 μ A -> $\Phi = 10^{11} \text{ n/cm}^2/\text{h} = 20\text{LHCy/h}$

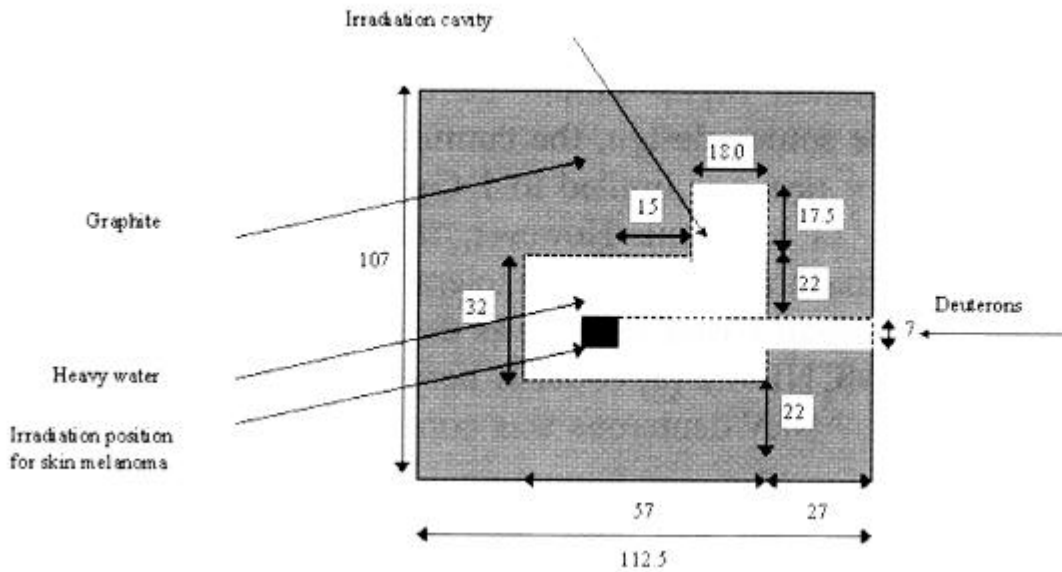


Fig. 4.2: Geometria del moderatore in grafite utilizzato per l'esperimento di BNCT su organi espantati (From: S. Agosteo et al. "Characterization of an accelerator-based neutron source for BNCT of explanted livers", Radiation Protection Dosimetry, vol. 70, Nos. 1-4, pp. 559-566, 1997).

	Neutron flux density ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \mu\text{A}^{-1}$)			Prompt gamma ray dose ($\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \mu\text{A}^{-1}$)
	Thermal	0.4 eV–10 keV	>10 keV	
Design (without tank)	$6.8 \times 10^6 \pm 3 \times 10^4$	$4.0 \times 10^5 \pm 8 \times 10^3$	$7.3 \times 10^4 \pm 4 \times 10^3$	$5.3 \times 10^{-7} \pm 9 \times 10^{-9}$
Experimental structure with stainless steel tank	$1.6 \times 10^6 \pm 5 \times 10^3$	$3.1 \times 10^5 \pm 1 \times 10^3$	$6.3 \times 10^4 \pm 6 \times 10^2$	$4.5 \times 10^{-6} \pm 2 \times 10^{-8}$
Experimental structure with aluminium tank	$4.0 \times 10^6 \pm 8 \times 10^3$	$3.5 \times 10^5 \pm 1 \times 10^4$	$6.1 \times 10^4 \pm 3 \times 10^3$	$2.3 \times 10^{-6} \pm 1 \times 10^{-8}$

Tab. 2: Flussi di neutroni termici, epitermici e veloci nella cavità di irraggiamento.

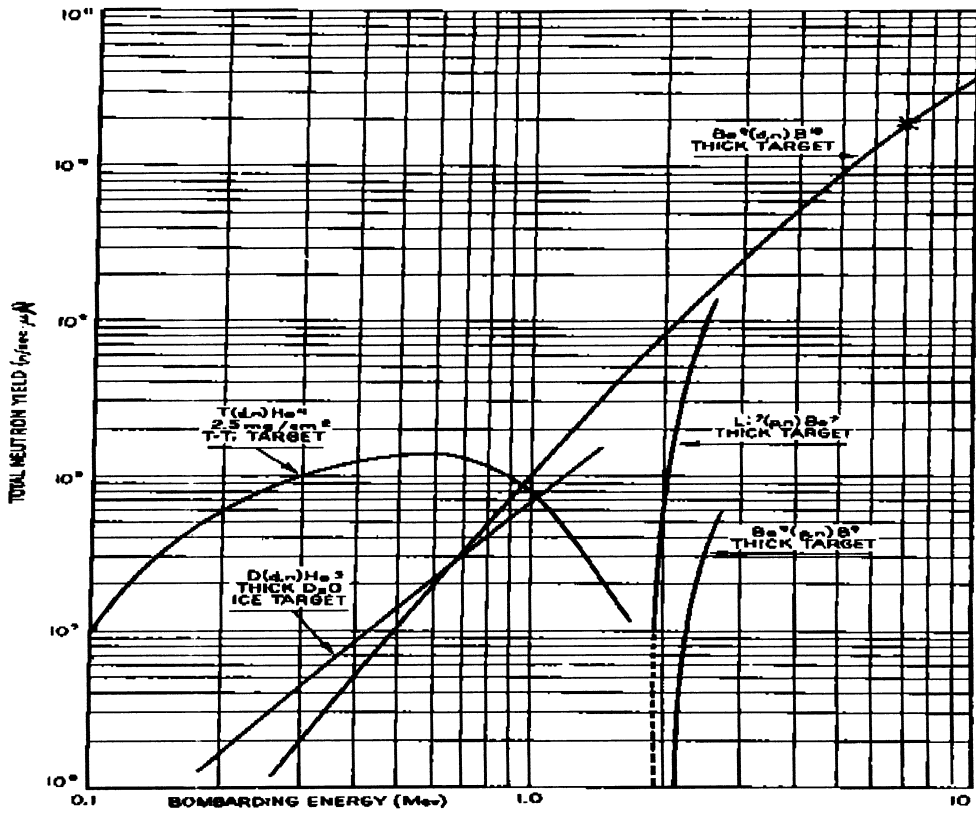


Fig. 4.3a: Rese neutroniche di alcune tipiche reazioni nucleari.

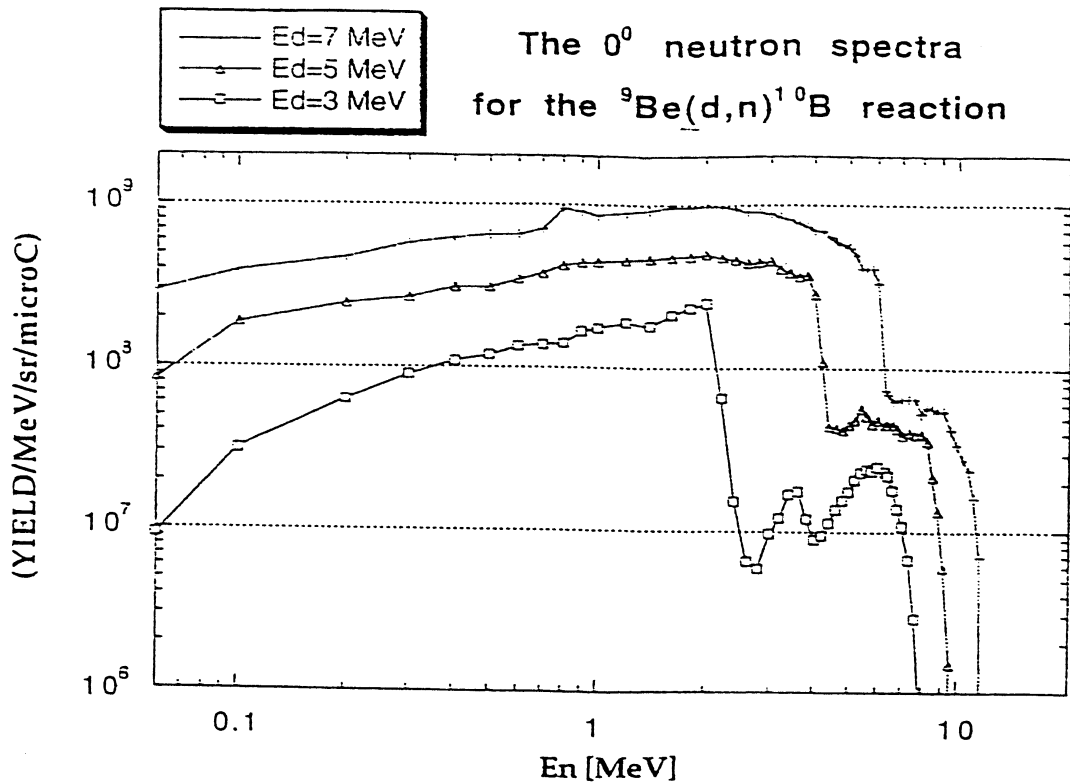


Fig. 4.3b: Spettro in energia dei neutroni emessi dal bersaglio di ${}^9\text{Be}$ bombardato con deuterio, per tre diverse energie del fascio.