

Facilities per lo studio di effetti indotti dalle radiazioni

Gruppo CMS Pavia

A. Braghieri, A. Magnani,
P. Montagna, C. Riccardi, P. Salvini,
Ilaria Vai, P. Vitulo

Background in CMS

Neutroni:

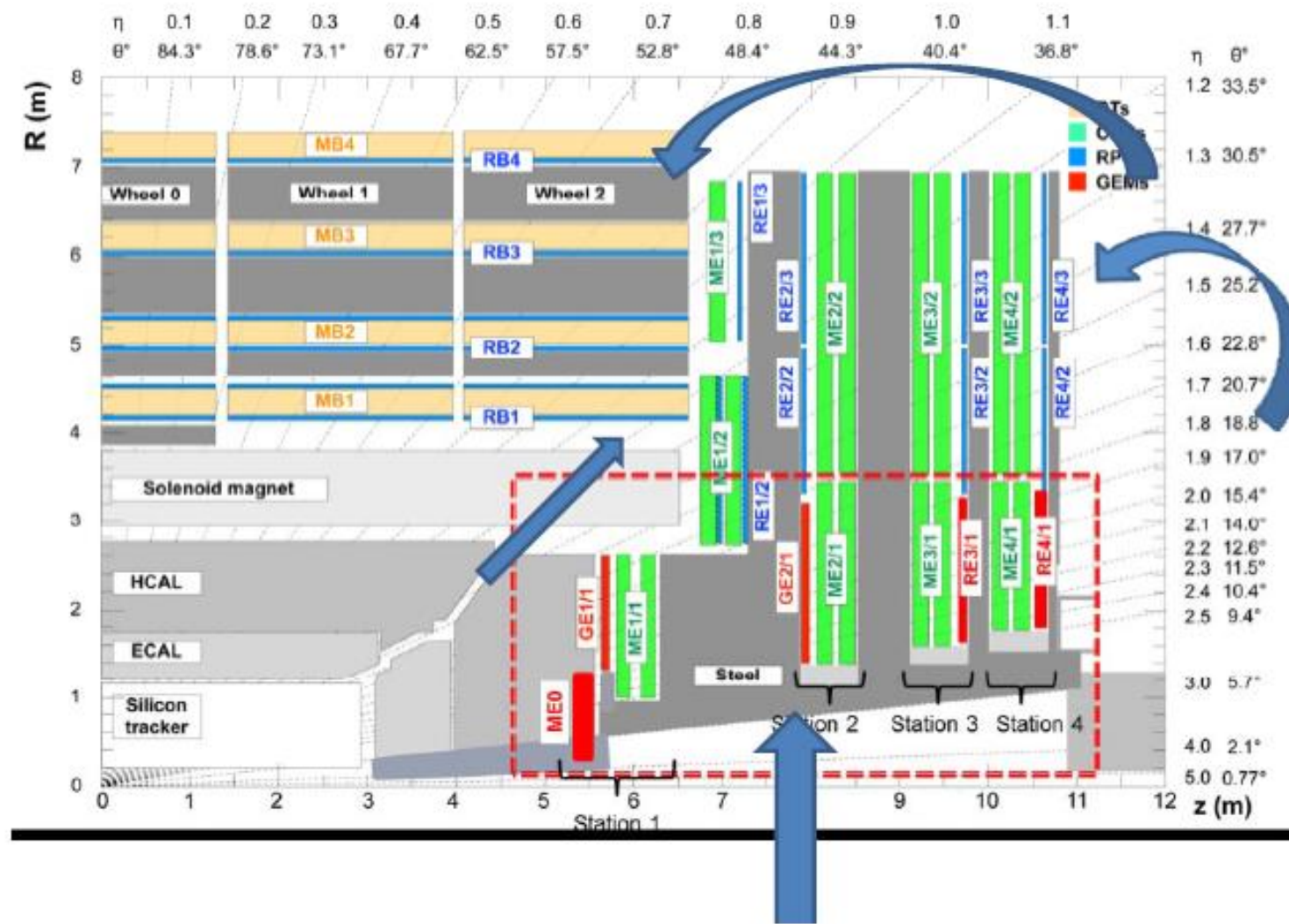
- da processo di evaporazione che segue interazione adronica: picco a **1 MeV**
- intranuclear cascade: picco a **70 MeV**

Fotoni:

- da cattura neutronica: fino a **10 MeV**

Particelle cariche:

- Contributo importante nelle regioni ad alto η



Possibile configurazione CMS post LS1 + REn/1 + GEM

Background in CMS

Neutroni:

Regione	Flusso ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) per $l=10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	Flusso ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) per $l=10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	Fluenza (cm^{-2}) per $l=10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 1 anno LHC	Fluenza (cm^{-2}) per $l=10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 1 anno LHC
GE1/1	$5,6 \times 10^3$	$5,6 \times 10^4$	$8,4 \times 10^{10}$	$8,4 \times 10^{11}$
GE2/1	$1,3 \times 10^4$	5×10^5	$1,95 \times 10^{11}$	$1,95 \times 10^{12}$
RE3/1	$1,9 \times 10^4$	$1,9 \times 10^5$	$2,85 \times 10^{11}$	$2,85 \times 10^{12}$
RE4/1	$1,1 \times 10^4$	$1,1 \times 10^5$	$1,65 \times 10^{11}$	$1,65 \times 10^{12}$

Fotoni:

Regione	Flusso ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) per $l=10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	Flusso ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) per $l=10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	Fluenza (cm^{-2}) per $l=10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 1 anno LHC	Fluenza (cm^{-2}) per $l=10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 1 anno LHC
GE1/1	$2,5 \times 10^3$	$2,5 \times 10^4$	$3,75 \times 10^{10}$	$3,75 \times 10^{11}$
GE2/1	$3,9 \times 10^3$	$3,9 \times 10^4$	$5,85 \times 10^{10}$	$5,85 \times 10^{11}$
RE3/1	$3,8 \times 10^3$	$3,8 \times 10^4$	$5,7 \times 10^{10}$	$5,7 \times 10^{11}$
RE4/1	$9,3 \times 10^3$	$9,4 \times 10^4$	$1,4 \times 10^{11}$	$1,4 \times 10^{12}$

Background in CMS

Carichi:

Regione	Flusso ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) per $I=10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	Flusso ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) per $I=10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	Fluenza (cm^{-2}) per $I=10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 1 anno LHC	Fluenza (cm^{-2}) per $I=10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 1 anno LHC
GE1/1	$1,2 \times 10^2$	$1,2 \times 10^3$	$1,8 \times 10^9$	$1,8 \times 10^{10}$
GE2/1	5×10^1	5×10^2	$7,5 \times 10^8$	$7,5 \times 10^9$
RE3/1	$2,6 \times 10^1$	$2,6 \times 10^2$	$3,9 \times 10^8$	$3,9 \times 10^9$
RE4/1	$1,6 \times 10^2$	$1,6 \times 10^3$	$2,4 \times 10^9$	$2,4 \times 10^{10}$
ME0/0	$8,2 \times 10^6$	$8,2 \times 10^7$	$1,23 \times 10^{14}$	$1,23 \times 10^{15}$

Possibile sovrastima dovuta a:

- Calorimetro forward non implementato
- Shielding post LS1 non implementato

Regione	R (cm)	Z (cm)
GE1/1	180	560
GE2/1	180	800
RE3/1	200	980
RE4/1	200	1060
ME0/0	20	540

Test su elettronica

Misura di **Single Event Effects (SEE)** – **Misura attiva:**

- **Obiettivo:** misurare sezione d'urto di SEE
- **Modalità:** scheda alimentata esposta al fascio di particelle → in output si conta il numero di eventi indotti dall'interazione delle particelle con i chip
- **Durata del test:** tempi di acquisizione dati dal flusso delle particelle incidenti e dalle sezioni d'urto di interazione con il Si → ottenere numero statisticamente significativo di eventi (es. Test LENA: 30 min per ~ 50-60 ev.) → NON serve accumulare tanta fluenza
- **Particelle:** Neutroni veloci ($E > \text{MeV}$) e termici (interazione con il boro); Ioni

Misura di **Effetti cumulativi** – **Misura passiva:**

- **Obiettivo:** misurare fluenza massima tollerata dall'elettronica
- **Modalità:** scheda non alimentata esposta al fascio di particelle → confronto tra parametri della scheda prima e dopo l'irraggiamento
- **Durata del test:** è fondamentale accumulare FLUENZA (1 anno LHC, 10 anni LHC, ecc...)
- **Particelle:** Neutroni; Gamma

Test di sensitività a neutroni e gamma sui rivelatori

Misura di sensitività a neutroni/gamma



$$\varepsilon = \frac{\Phi_{meas}}{\Phi_{beam}}$$

Sezione d'urto macroscopica interazione neutroni/gamma - rivelatori



$$\varepsilon\Sigma = \frac{R_{meas}}{\Phi_{beam} V}$$

- ε = sensitività
- Φ_{meas} = flusso misurato
- Φ_{beam} = flusso del fascio incidente
- Σ = sezione d'urto macroscopica di interazione neutroni/gamma - rivelatore
- R_{meas} = rate di interazioni misurato
- V = volume rivelatore

Altri test sui rivelatori

Studio di possibili danni dovuti all'esposizione prolungata dei rivelatori a neutroni/gamma



Accumulare fluenza pari a 1-10 anni LHC



Studio di variazioni nella risposta del rivelatore: corrente, resistività, ecc...

Dove?

Facilities considerate per gli irraggiamenti

Facility	Fascio	
LENA Pavia	Neutroni	} Termici
ENEA Casaccia	Neutroni	
PSI Villigen (Svizzera)	Neutroni	
Louvain la Neuve (Belgio)	Neutroni	} Veloci
ENEA Frascati	Neutroni	
TSL Uppsala	Neutroni	
LNL Legnaro	Neutroni – Ioni	
CNAO Pavia	Ioni Carbonio	
GIF (++)	Gamma	

..ed altre in Italia ed Europa.

LENA Pavia

Neutroni di energia tra 0 e 18 MeV

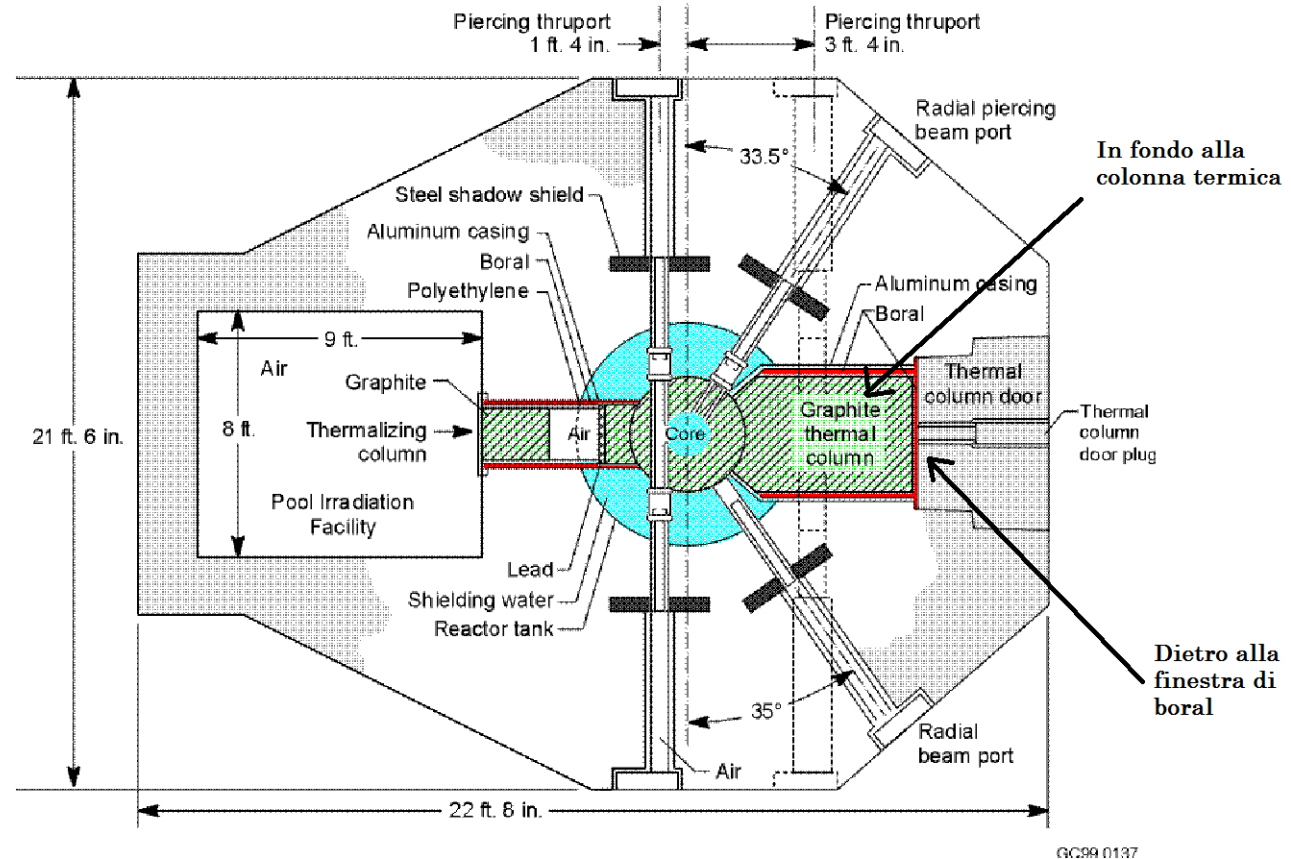
Flussi:

- Termici: $9,7 \times 10^4$ n/cm²s
- Veloci (3,5-18 MeV): $\sim 10^5$ n/cm²s

Flussi max:

- Termici: $1,17 \times 10^{10}$ n/cm²s
- Veloci (3,5-18 MeV): $4,39 \times 10^7$ n/cm²s

Costi: 2000 € per 40 h
(fluenza $\sim 1,5 \times 10^{10}$ n/cm²)



NON utilizzabile per
irraggiamento camere → no gas

Test preliminare LENA

Test pilota per misura sezione d'urto Single Event Effects indotto da neutroni svolto al LENA con schede di Front-End RPC:

- **Misura attiva:** scheda alimentata esposta a neutroni con input aperti (non collegata al rivelatore) → eventi rivelati sono dovuti all'interazione dei neutroni con il silicio dei chip

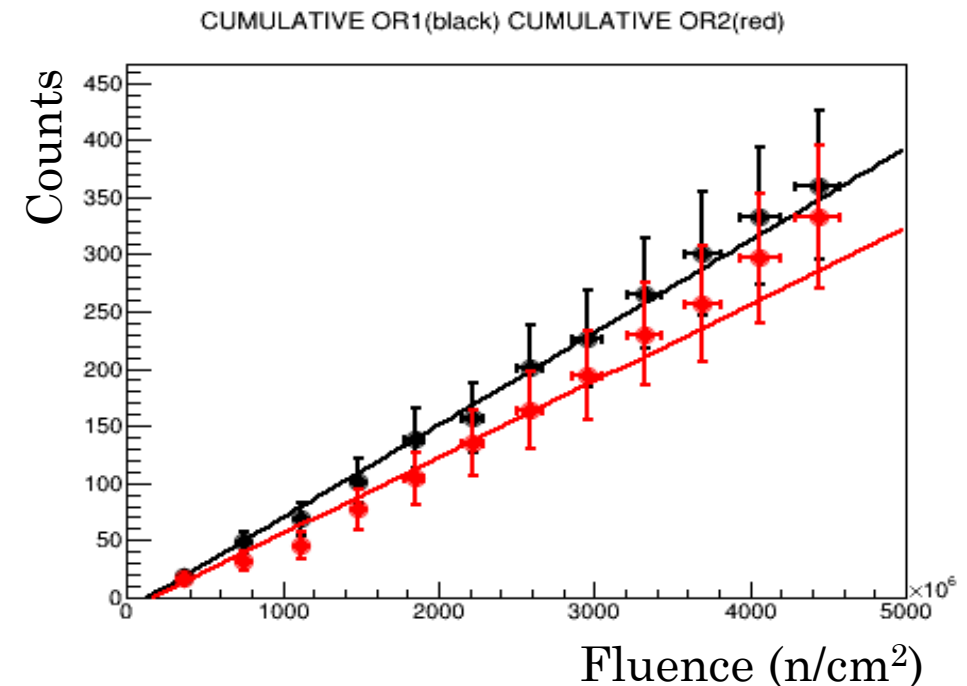
Sezione d'urto SEE in funzione della soglia di discriminazione del segnale ricavata come:

$$\sigma = \frac{R_{meas}(s^{-1})}{\Phi(cm^{-2}s^{-1})}$$

R_{meas} = rate interazioni misurata
 Φ = flusso neutroni

$$\sigma_{Slope} = \frac{\text{Number of events}}{\Phi(cm^{-2})}$$

Dal fit numero interazioni vs fluenza

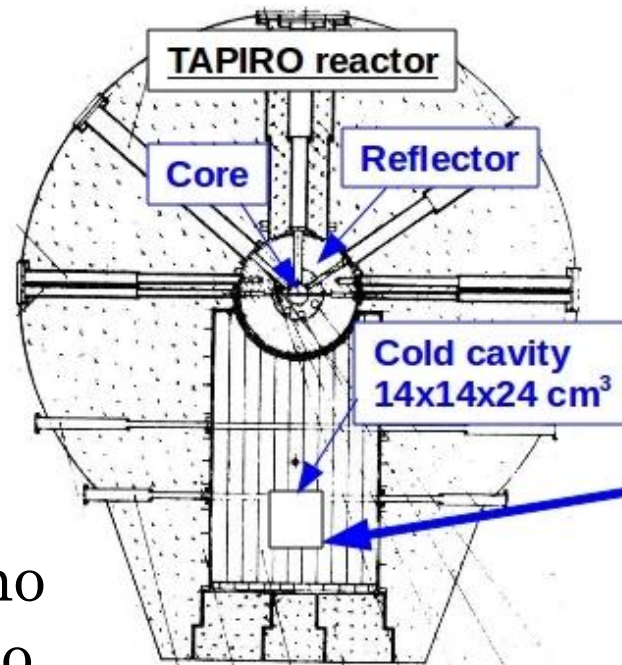


ENEA Casaccia -TAPIRO

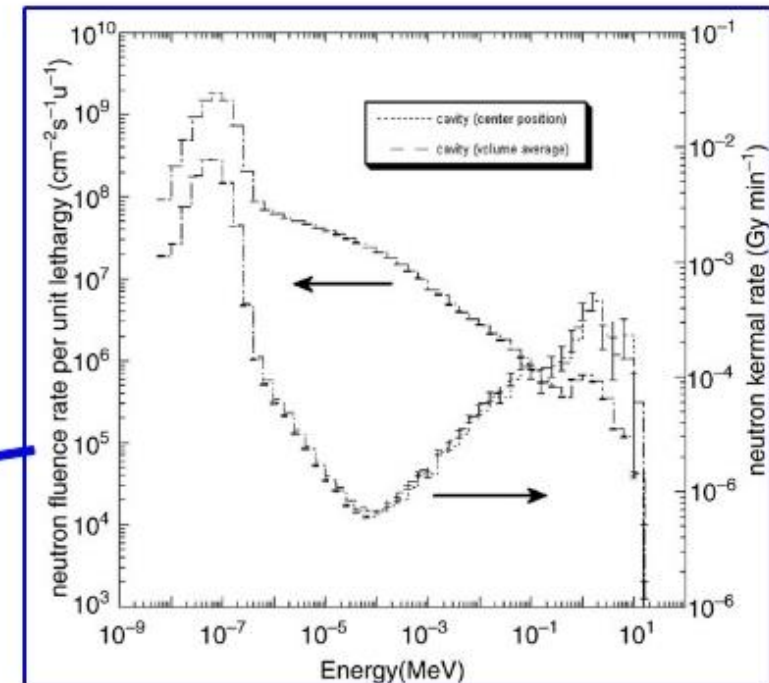
Unica cavità adatta a irraggiamento schede:
cavità HYTOR nella colonna termica

Dimensioni cavità:
 $14 \times 14 \times 24 \text{ cm}^3 \rightarrow$
scheda non può
essere esposta
perpendicolarmente
al flusso

Costi: circa 2000 € giorno
(5,5 ore di irraggiamento
nette)



- **Flussi:**
- Termico: $3,48 \times 10^9 \text{ n/cm}^2\text{s}$
- Totale: $3,75 \times 10^9 \text{ n/cm}^2\text{s}$



PSI Villigen

SINQ: sorgente continua neutroni da spallazione

- Flusso: 2×10^8 n/cm²s (Beamline BOA)
- Neutroni rallentati con deuterio liquido → spettro spostato verso le basse energie: da 2 meV a 100 meV



Solo termici!

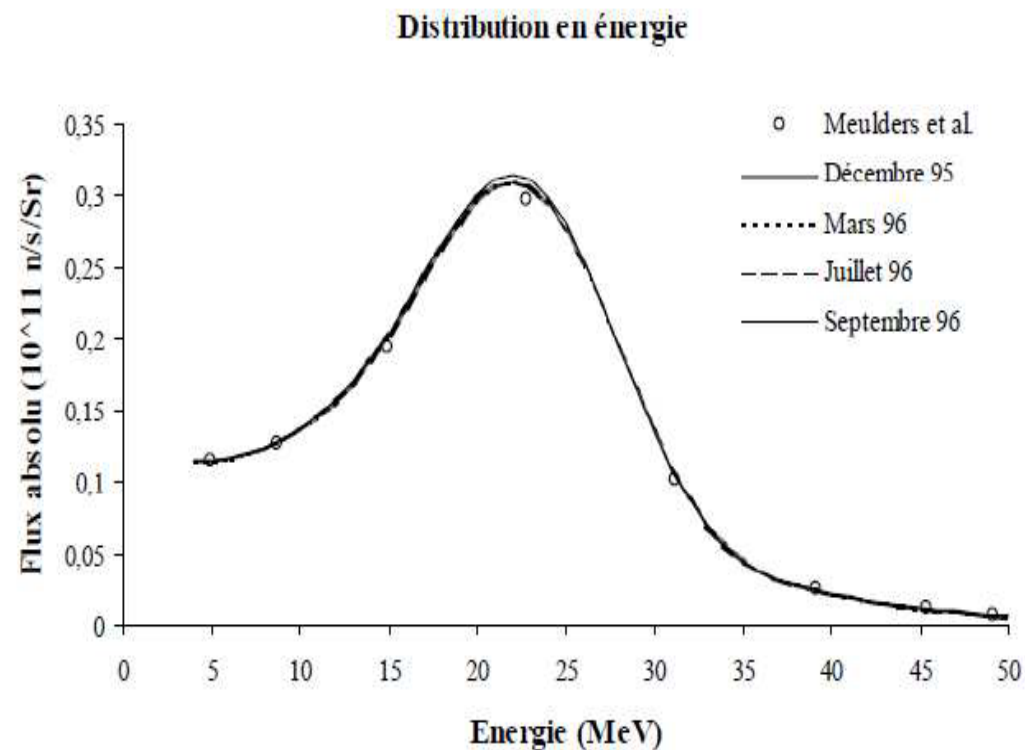
Costi: 2000 € /day (24h)

Louvain la Neuve

Neutroni da ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$

- Spettro continuo fino a 50 MeV, max intorno ai 25 MeV
- Filtro per rimuovere gamma e neutroni a bassa energia

L'energia dei neutroni si può ottenere dalla misura del tempo di volo



Dati da: E.Cortina , *WP7.2: Irradiation Facilities at UCLouvain*, AIDA kick-off meeting, UCLouvain, February 2011

<https://indico.cern.ch/getFile.py/access?resId=0&materialId=slides&contribId=2&sessionId=0&subContId=1&confId=125360>

In attesa di informazioni più dettagliate su energie, flussi e costi irraggiamento

ENEA Frascati

- Generatore di neutroni:
 - T(d,n) α : neutroni da 14,6 MeV
 - D(d,n) ^3He : neutroni da 2,8 MeV
- Flussi max: a pochi mm dalla sorgente
 - 14,6 MeV: 10^{10} n/cm²s
 - 2,8 MeV: 10^8 n/cm²s
- Flussi realistici posizione irraggiamento
 - 14,6 MeV: 10^{7-8} n/cm²s
 - 2,8 MeV: 10^{5-6} n/cm²s

Costi: 700 €/h

Dimensioni bunker:
11.5 x 12 m² e 9 m di
altezza → NON ci sono
problemi dimensioni
schede, cavi, ecc...

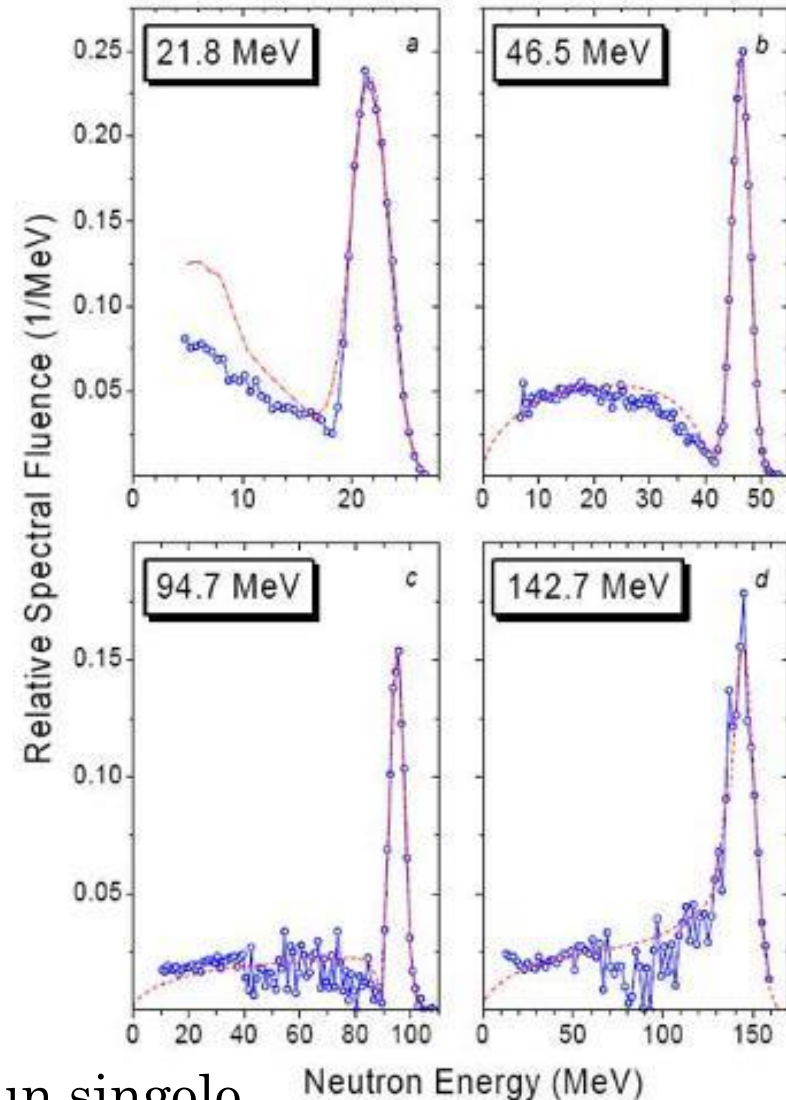


The Svedberg Laboratory - Uppsala

- Neutroni da ${}^7\text{Li}(p,n)$
- Energie standard: 22, 47, 59, 65, 75, 88, 95, 110, 143, 160, and 175 MeV
- Flusso massimo: $3 \times 10^4 - 10^5 \text{ n/cm}^2\text{s}$
- Dimensioni spot fascio: variabile, 1 - 80 cm (forma circolare o quadrata)
- Area irraggiamento disponibile: 15 m lung, 3 m larg.

Costi:

Facility	Hourly Rate (EUR/h)	Basic Startup Fee (EUR)	Reduced Startup Fee (EUR) ¹
ANITA	520	2080	1040
QMN	580	3480	1740
PAULA	550	2200	N/A



Minimo:

- 16 h per run singolo
- 10 h per run multipli

Laboratori Nazionali Legnaro

Acceleratore CN (Van de Graaff 7 MV)

Beam	Target	Energy (MeV)	Max Current (nA)
$^1\text{H}^+$	Li	≤ 7	500
$^2\text{H}^+$	Be	< 5	300
$^2\text{H}^+$	Be	5-7	100

p da 4 MeV su Be

Range spettro neutronico 2,5 MeV (da 0,5 a 3 MeV circa)

Flusso al bersaglio: $1,88 \times 10^5 \text{ n/cm}^2\text{s}$



Circa 22 h per raggiungere $1,5 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2$

Costi: irraggiamenti gratuiti per INFN

Facility SIRAD:

- NON utilizzabile per irraggiamento con ioni: energia ioni troppo bassa → non superano package chip
- NON utilizzabile per irraggiamento camere → vuoto

CNAO

Ioni Carbonio: $E = 1,4 - 4,8 \text{ GeV}$ (120-400 MeV/u)

Step energia: 0,02 MeV

Numero di particelle per spill:

da 4×10^6 a 4×10^8 ioni/spill

60 spill ogni 2-3 min

—————→ $1-2 \times 10^6 - 10^8$ ioni/s



Costi: 2500 €/h

GIF

^{137}Cs : 740 GBq (Marzo 1997), 662 keV

Misura del flusso in corso (vedi slide successiva)

GIF ++

^{137}Cs : 7-10 TBq, 662 keV

Fino a 2 Gy/h a 50 cm (fattore 10 in più rispetto a GIF)

Flussi fino a 10^9 $\gamma/\text{cm}^2\text{s}$ ^a

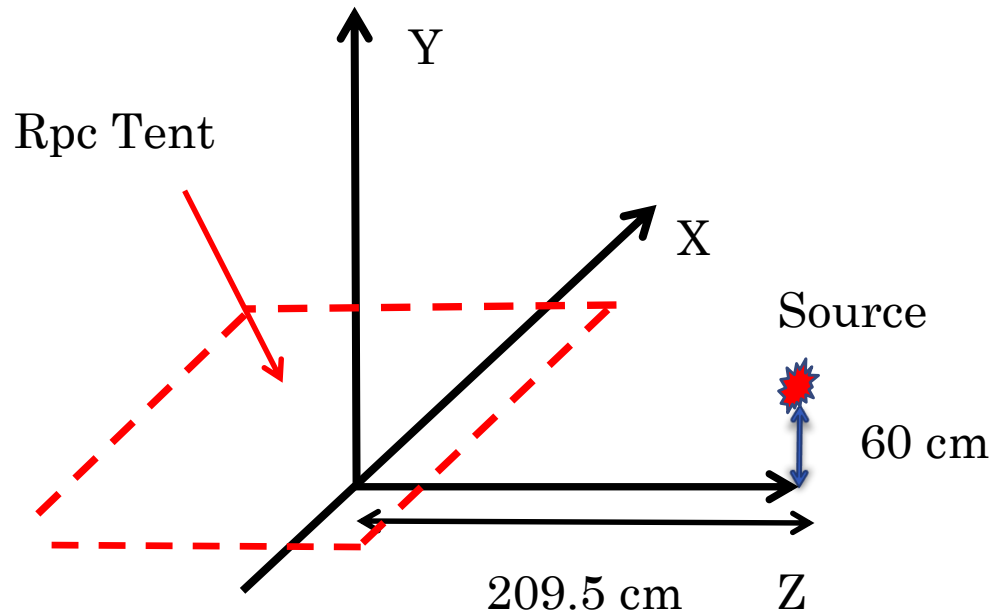
Dimensioni massime rivelatori da irraggiare: 3 x 1,4 x 0,5 m³ a distanza variabile dalla sorgente^b

^a D. Pfeiffer , *Photon fluxes for experimental setups* , GIF++ Project Meeting, 09.12.2013

^b M. Capeans et al., *Technical specifications for the new Gamma Irradiation Facility at CERN (GIF ++)*, 25.04.2009

Test alla GIF

Camera a ionizzazione utilizzata per misurare la dose gamma nella zona di irraggiamento dei rivelatori



$$\Phi = (\dot{D}/2.1) \times 10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

[\dot{D} = dose rate in $\mu\text{Gy}/\text{min}$]

Max $\sim 2 \times 10^5$
 $\gamma/\text{cm}^2\text{s}$



Stima del tempo di utilizzo

- Misure di SEE: durata del test al LENA usata come riferimento
- Misure cumulative: considerati i valori di fluensa di 1 anno LHC a 10^{34} e 10^{35} $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Facility	Misure attive	Misure passive	
	$1,5 \times 10^{10}$ n/cm ²	1 anno LHC (10^{34} cm ⁻² s ⁻¹) 10^{11} n/cm ²	1 anno LHC (10^{35} cm ⁻² s ⁻¹) 10^{12} n/cm ²
LENA	40 h	10^6 s = 278 h	10^7 s = 2778 h
LNL	22 h	147 h	1758 h
ENEA Frascati (14 MeV)	30 min	2,8 h	28 h
Uppsala	14 h	93 h	926 h
GIF		10^6 s = 278 h	10^7 s = 2778 h
GIF ++		100 s	16 min

Problemi riscontrati:

- **Misura energie neutroni**

- Reattore: si può ricostruire spettro con metodo attivazione neutronica: ^{197}Au (termici ed epitermici), ^{58}Ni ($E > 3,45$ MeV), ^{27}Al ($E > 5,3$ MeV), ...
- Si ricava una sezione d'urto pesata sul flusso:

$$\sigma = \frac{\int \sigma(E)\phi(E)dE}{\int \phi(E)dE}$$

- **Misura con gli ioni**

- Chip con packaging plastico \rightarrow ioni con energie dell'ordine di qualche 100 MeV non lo superano
- Decapsulamento presso ditte specializzate costa 500/1000 € al pezzo

Backup

Energie ioni SIRAD e UCL

SIRAD

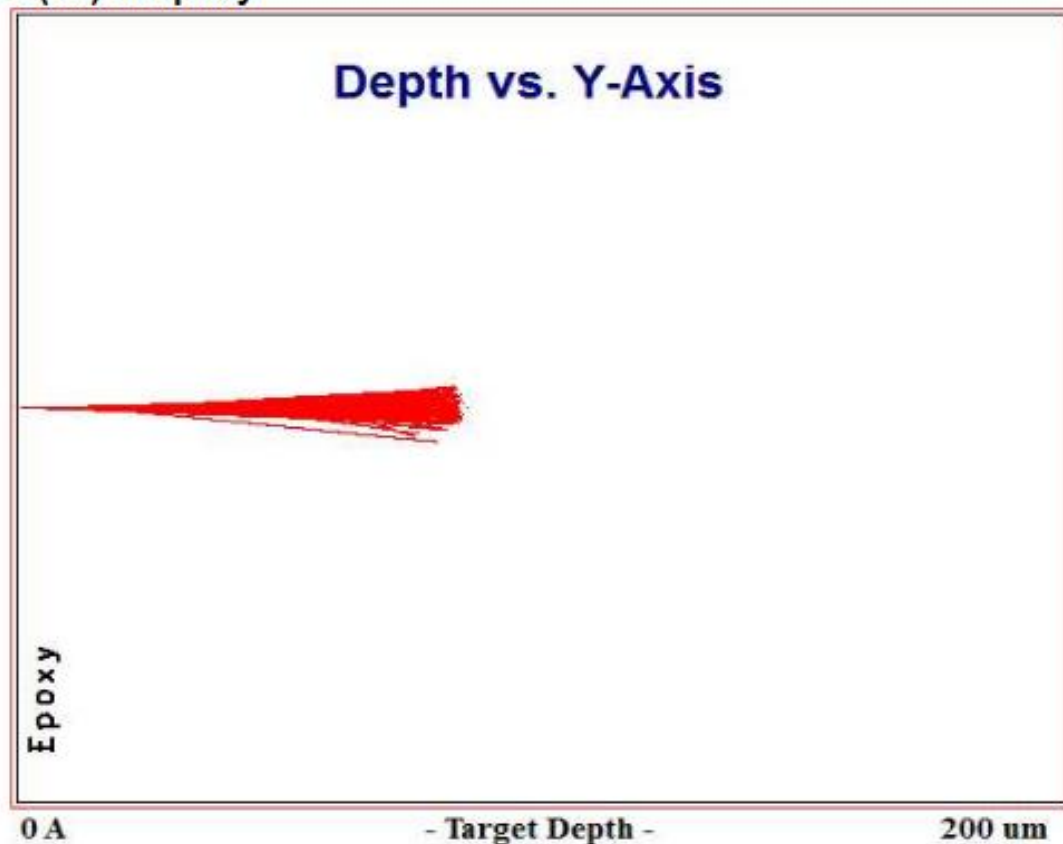
Ione	Energia (MeV)
^{16}O	98,15
^{28}Si	126,15
^{58}Ni	168,15
^{107}Ag	182,15
^{19}F	98,15
^{35}Cl	140,15
^{81}Br	168,15
^{127}I	18,15

UCL

Ione	Energia (MeV)
^{40}Ar	151
^{20}Ne	78
^{15}N	60
^{13}C	131
^{22}Ne	235
^{40}Ar	372
^{58}Ni	576
^{83}Kr	756

Range nel rivestimento (1-1,3 mm spessore) ~ 100 μm

O(16) in epoxy



9999 Ions Calculated

Ion Type = O
 Ion Energy = 98,1 MeV
 Ion Angle = 0

SRIM-2008.04
 gennaio 16, 2014
 www.SRIM.org

Calculation Parameters:

Backscattered Ions 0
 Transmitted Ions 0
 Vacancies/ion 1632,9

ION STATS

	Range	Straggle
Longitudinal	84.5 um	3770 A
Lateral Proj.	4580 A	6404 A
Radial	7149 A	5427 A

Type of Damage Calculation

Quick: Kinchin-Pease

Stopping Power Version

SRIM-2008

% ENERGY	LOSS Ions	Recoils
Ionization	99,81	0,09
Vacancies	0,00	0,00
Phonons	0,01	0,08

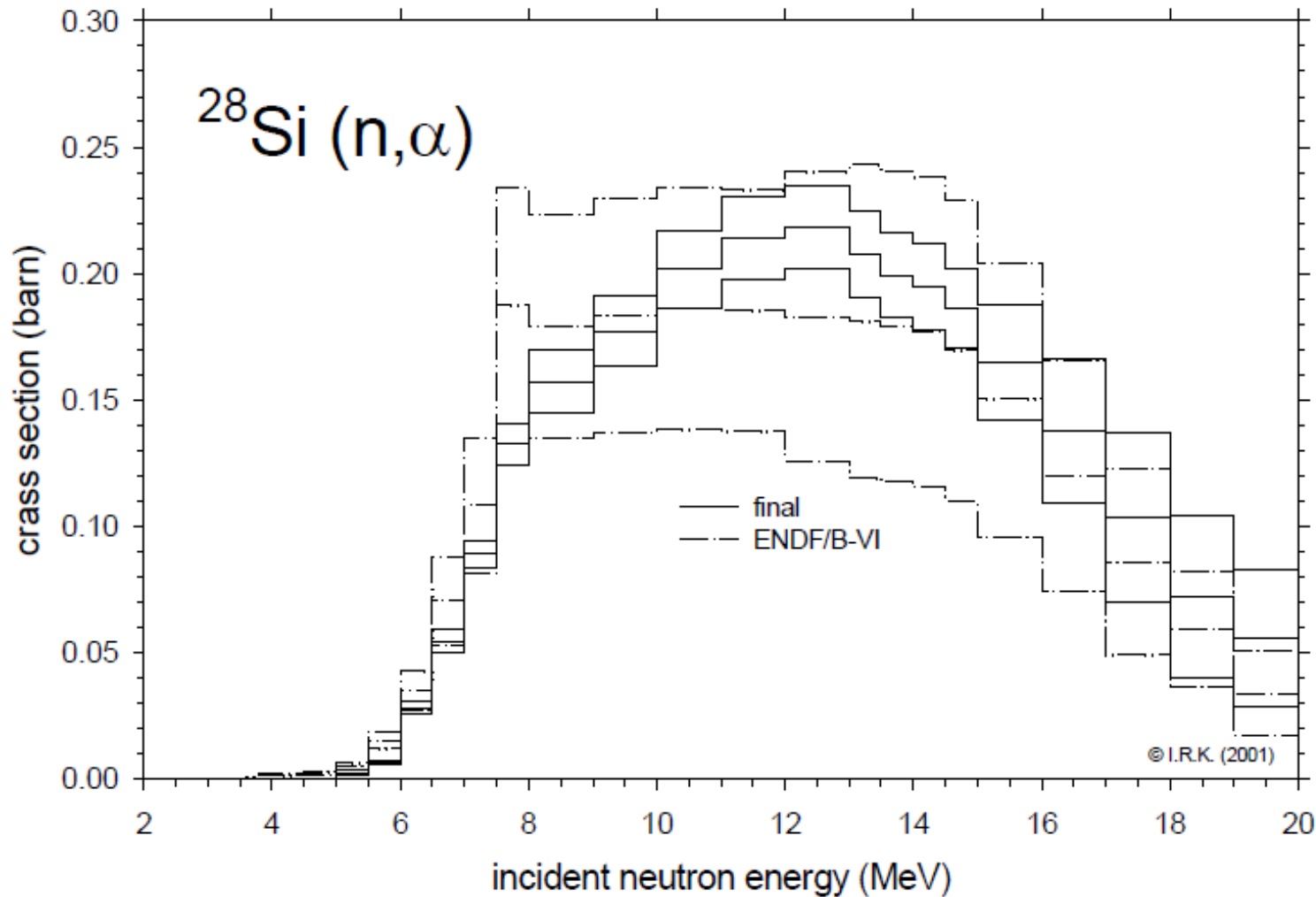
SPUTTERING YIELD

	Atoms/ion	eV/Atom
TOTAL		
H	0,000000	0,00
C	0,000000	0,00
O	0,000000	0,00

Target layers:

Layer Name	Width (A)	Density	H (1,008)	C (12,011)	O (15,999)	Solid/Gas	Stop Corr.
1 Epoxy	199,5231628	1,850	0,47500	0,45000	0,07500	Solid	0,9639168
Lattice Binding Energy			3	3	3		
Surface Binding Energy			2	7,41	2		
Displacement Energy			10	28	28		

Sezione d'urto $^{28}\text{Si}(n,\alpha)$ vs E_n



Diversa da 0 per
 $E_n > 4$ MeV

Test su elettronica

Tipo di test	Obiettivo	Tipo di misura	Caratteristiche	Quali particelle
Single Event Effects	Misura sezione d'urto	Attiva: scheda alimentata, lettura output	Non serve accumulare tanta fluena	Neutroni: <ul style="list-style-type: none"> • Fast: $E > 3-4$ MeV • Termici: interazione con boro Ioni(?)
Effetti cumulativi: <ul style="list-style-type: none"> • Accumulo dose • Displacement 	Misura limiti tolleranza scheda	Passiva: confronto parametri scheda prima e dopo irraggiamento	Fondamentale fluena accumulata	Gamma Neutroni