

Dosimetria in campo misto presso la facility CLEAR del CERN

Matteo Bolzonella¹, Marco Caresana¹, Andrea Cirillo¹, Antonella Mele², Fabio Pozzi³ e Marco Tisi³

¹Politecnico di Milano, Dipartimento di Energia, Via Lambruschini, 4a - 20156 Milano

²ONET Technologies ND, DG JRC – Dir. J – Nuclear Decommissioning and Waste Management, sito di Ispra

³CERN, Geneva, Switzerland

andrea.cirillo@polimi.it

Riassunto

Questo lavoro presenta la campagna di misure del campo di radiazioni secondario in prossimità della facility CLEAR del CERN. Il fascio principale è composto da treni di elettroni a 200 MeV, fermati da un bersaglio in piombo e cemento. Le misure sono state effettuate in cinque posizioni per tre valori di carica accelerata per treno di impulsi, utilizzando rivelatori a termoluminescenza (TLD) e luminescenza otticamente stimolata (OSL) per il campo fotonico, e rivelatori a tracce (CR39) per il campo neutronico. La caratterizzazione del campo fotonico ha evidenziato un buon accordo tra TLD e OSL, con differenze tra le letture imputabili alla dose da elettroni dovuta alle perdite di fascio e alla radiazione diffusa. Entrambi gli strumenti, tuttavia hanno evidenziato una sovrastima della dose rispetto all'andamento lineare atteso per alte intensità del fascio primario. I CR39 impiegati per la caratterizzazione del campo neutronico hanno evidenziato una risposta pressoché lineare, con una sovrastima dell'andamento lineare solo in una posizione, e comunque molto meno evidente rispetto al caso dei dosimetri fotonici. Per spiegare l'origine di questo comportamento inatteso si ipotizza la presenza di una corrente di buio di energia inferiore al fascio, tale da generare un segnale fotonico non accompagnato da una significativa produzione di fotoneutroni.

INTRODUZIONE

Campi di radiazioni ad elevata intensità trovano ad oggi numerose applicazioni nel test di materiali per acceleratori o applicazioni spaziali, nonché in ambito di ricerca nel settore medicale, come nelle promettenti radioterapie FLASH (Favaudon, 2014) e a elettroni a elevatissima energia (VHEE), o per la sterilizzazione di dispositivi di protezione individuali. Le misure dosimetriche in questi campi sono generalmente ostacolate dalle condizioni operative proibitive in cui gli strumenti devono operare, caratterizzate da campi misti a ratei di dose molto elevati. Queste considerazioni giustificano, nella maggior parte dei casi, l'impiego di strumentazione passiva, che presenta minori problematiche legate a effetti di saturazione. In questo lavoro, il campo secondario neutronico e fotonico generato in prossimità di un acceleratore di elettroni ad elevata energia è stato misurato in diverse condizioni di intensità del campo e con diversa strumentazione. L'obiettivo dello studio è quello di studiare l'andamento della lettura degli strumenti in funzione dell'intensità del fascio primario, e analizzare la variabilità della risposta tra i diversi tipi di dosimetro.

MATERIALI E METODI

CLEAR

La facility CLEAR (CERN Linear Electron Accelerator for Research) del CERN è un acceleratore in grado di fornire un fascio di elettroni versatile in termini di energia, durata e rateo di ripetizione dell'impulso (Korysko, 2023). I suoi principali usi riguardano i test per materiali da impiegare in acceleratori esistenti e futuri, studi in ambito medicali (per esempio per radioterapia FLASH) e verifiche della resistenza a radiazioni per applicazioni spaziali. La facility si basa su un LINAC in grado di produrre fasci di elettroni con le caratteristiche riportate in (tab. 1) e mette a disposizione degli utilizzatori diverse aree di test per la strumentazione, sia in aria, sia nel vuoto.

Per l'esperimento in questione, il fascio è costituito da elettroni a circa 195 MeV, con una frequenza di 10 Hz e tre diverse intensità (3, 25 e 50 nC per treno di impulsi). Le misure sono state effettuate in aria in 5 posizioni (fig. 1) in prossimità del beam dump, costituito da un bersaglio spesso 80 cm in piombo e cemento. La durata di ciascuna misura è stata scelta al fine di raggiungere valori simili di dose integrata per le tre intensità. I valori di carica complessivamente accelerati sono 113 μC (a 3 nC/treno), 245 μC (a 25 nC/treno) e 270 μC (a 50 nC/treno). Sono stati impiegati dosimetri a termoluminescenza e a luminescenza stimolata otticamente per la misura del campo fotonico, mentre dosimetri a tracce per il campo neutronico. Essi sono stati posizionati su un fantoccio in PMMA di 30x30x15 cm^3 e irraggiati nelle posizioni da 1 a 4 alle diverse intensità del fascio. In posizione 5 è stato invece tenuto fisso un rem counter basato su un sistema di rivelazione passivo. I dettagli sulla strumentazione utilizzata sono dati nelle sezioni seguenti.

Tabella 1 - Parametri del fascio prodotti dall'acceleratore CLEAR.

Parametro	Valore
Energia del Fascio	60 MeV – 200 MeV
Carica per impulso	10 pC – 2 nC
Durata dell'impulso	1 ps – 4 ps
Frequenza dell'impulso	1,5 GHz
Numero di impulsi	1 – 200
Rateo di ripetizione del fascio	0,83 Hz – 10 Hz

DOSIMETRI A TERMOLUMINESCENZA (TLD)

I dosimetri a termoluminescenza (TLD) sono stati impiegati per la caratterizzazione della componente fotonica del campo. Essi sono dosimetri TLD-100, TLD-600 e TLD-700 prodotti da Thermo Scientific™. In tutte e tre le versioni, il cristallo termoluminescente è in LiF:Mg,Ti, la cui risposta è lineare per oltre 5 ordini di grandezza di dose integrata (10 μGy -1 Gy) e il cui numero atomico efficace è paragonabile a quello del tessuto biologico (Gibson, 1985). La differenza tra le tre tipologie impiegate riguarda l'arricchimento del cristallo nell'isotopo ^6Li : i TLD-100 impiegano litio naturale (con un'abbondanza di ^6Li di circa il 7,5%), i TLD-600 sono arricchiti in ^6Li al 95,6%, mentre i TLD-700 contengono ^6Li in quantità minori dello 0.01% (Paiva, 2015). Questa differenza determina la sensibilità del dosimetro al campo neutronico termico: il ^6Li , infatti, presenta una sezione d'urto di 945 b per la reazione $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$ per neutroni termici, mentre la principale reazione del ^7Li con neutroni termici è $^7\text{Li}(n,\gamma)^8\text{Li}$ con una sezione d'urto associata di 0,033 b. Ne consegue che i TLD-100 e TLD-600 saranno sensibili almeno in parte al campo neutronico, mentre i TLD-700 saranno essenzialmente trasparenti a questa radiazione. L'impiego simultaneo di TLD a diversa concentrazione di ^6Li permette, quindi, di stimare separatamente la dose da neutroni e fotoni anche in campo misto.

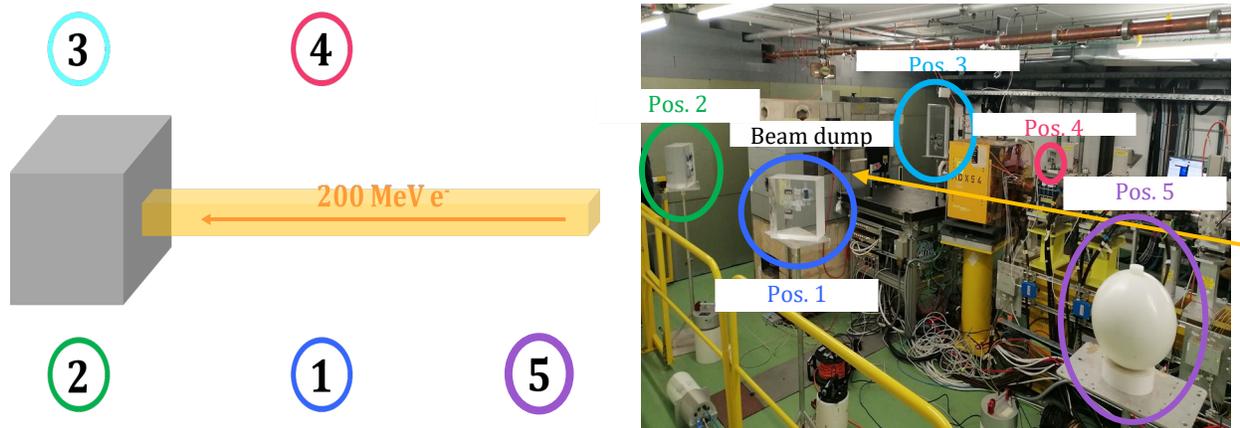
I dosimetri sono stati tarati in $H_p(10)$ e letti mediante il lettore Harshaw 5500, analizzando due regioni di interesse della glow curve identificate di default dal sistema.

DOSIMETRI A LUMINESCENZA STIMOLATA OTTICAMENTE (OSL)

I dosimetri a luminescenza stimolata otticamente impiegati sono InLight® prodotti da Landauer® (Perks, 2007). Ciascun dosimetro è costituito da un contenitore in plastica che permette l'alloggiamento di 4 elementi luminescenti, formati da uno strato di $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ inserito tra due strati di poliestere con uno spessore totale di 0.3 mm. La radiazione incidente su ogni cristallo è opportunamente filtrata: un alloggiamento presenta una finestra, e gli altri tre filtri sono

rispettivamente di plastica, alluminio e rame. La lettura del dosimetro prevede una l'analisi dei 4 elementi, dalla quale, mediante le diverse filtrazioni, è possibile ricavare informazioni

Figura 1 - Posizioni di riferimento per le misure



A sinistra – rappresentazione schematica delle posizioni di misura. A destra – fotografia scattata prima di una misura sulle grandezze dosimetriche operazionali per fasci sia beta che fotonici. La risposta dello strumento è lineare da 10 μSv a 10 Sv e per energie fotoniche tra 50 keV e 20 MeV.

DOSIMETRI A TRACCE (CR39)

I dosimetri in poli-allil-diglicol-carbonato (PADC), anche noto come CR39, sono tra gli strumenti più impiegati per la dosimetria da neutroni. L'interazione di queste particelle con il dosimetro causa danni alla catena polimerica, che sono resi osservabili sotto forme di tracce a seguito di un apposito trattamento chimico (Bolzonella, 2022). Un aspetto particolarmente vantaggioso di questo sistema per la dosimetria in campo misto è che esso è insensibile alla radiazione fotonica incidente, che non deposita abbastanza energia per unità di percorso da causare danni rilevabili alla catena polimerica. Per questo esperimento, su ciascun fantoccio sono stati installati 3 set di dosimetri. Davanti a ciascun CR39 è stato posto un blocco di PMMA spesso 1 cm, per amplificare il segnale (le tracce) e per mimare uno spessore di tessuto di 1 cm (quello che compare nella definizione della grandezza operativa $H_p(10)$). A valle dell'irraggiamento, i dosimetri sono stati sottoposti ad un trattamento chimico utilizzando idrossido di sodio (NaOH) 6,25 mol/L a $98 \pm 0,1$ °C per 70 minuti. Dopodiché, essi sono stati analizzati utilizzando il sistema Politrack®, costituito da un microscopio ottico per la scansione degli CR39 e relativo software per l'analisi morfologica delle tracce. L'equivalente di dose calcolato in un volume di spessore di circa 15 μm in prossimità della superficie dei rivelatori (ottenuto attraverso la spettrometria in LET delle tracce (Bolzonella, 2022)) è correlato all'equivalente di dose personale mediante un fattore di taratura, determinato mediante irraggiamenti nella facility di taratura del sito CERN-Prévessin (Building 772) con una sorgente di attività nota di AmBe. Si noti che questi dosimetri sono sensibili solo a neutroni veloci con energia ≥ 100 keV.

I dosimetri a tracce sono stati utilizzati anche per misure di equivalente di dose ambientale $H^*(10)$ mediante un rem counter passivo. Il rem counter è realizzato grazie all'inserimento di un dosimetro per neutroni termici all'interno di un moderatore sferico in polietilene, con opportuni inserti in cadmio e piombo, tale da rendere la lettura del dosimetro centrale direttamente proporzionale all' $H^*(10)$ (Birattari, 1990; Agosteo, 2009). Per questa applicazione, il dosimetro

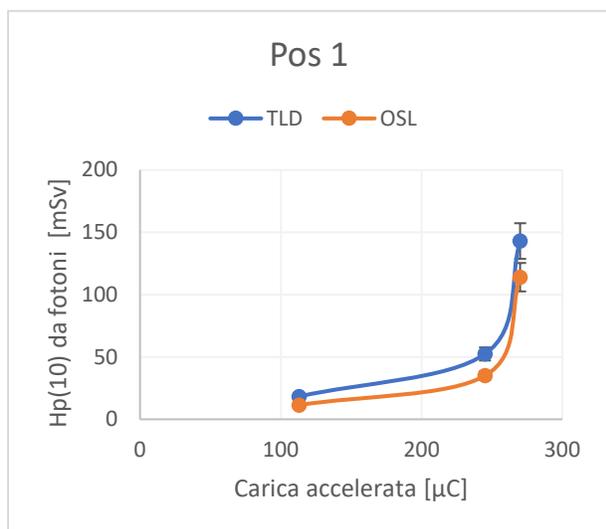
per neutroni termici impiegato era composto da due CR39 abbinati ad un convertitore di carburo di boro e basato, quindi, sulla reazione $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$. In questo caso, i dosimetri sono stati sottoposti ad un trattamento chimico con NaOH 6,25 mol/L a $98 \pm 0,1$ °C per 40 minuti. Il segnale del rem counter consiste nelle tracce (per cm^2) determinate dai prodotti di questa reazione nel CR39 e, come anticipato, risulta proporzionale all' $H^*(10)$. Anche in questo caso, il fattore di taratura che lega queste due grandezze è stato determinato mediante la sorgente di AmBe del Building 772 del CERN.

RISULTATI

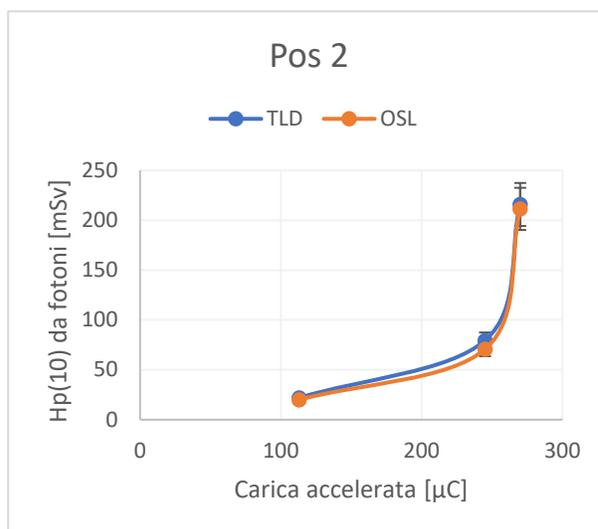
CARATTERIZZAZIONE DEL CAMPO FOTONICO

Il campo fotonico è stato misurato con dosimetri TLD-700 e OSL, e i risultati in termini di $H_p(10)$ sono riportati in (fig. 2). L'impiego dei TLD-700 è preferito rispetto a quello dei TLD-600 e TLD-100 per evitare un effetto della radiazione neutronica presente nel campo sulle letture dei dosimetri fotonici.

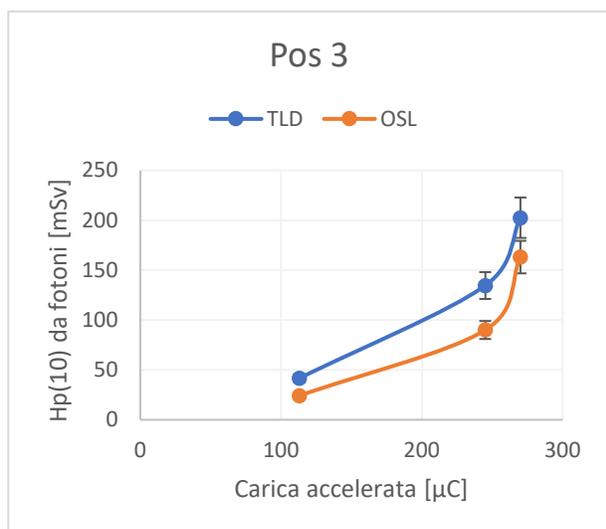
Figura 2 - Misure del campo fotonico nelle posizioni 1-4. Le barre d'errore corrispondono a 1 deviazione standard.



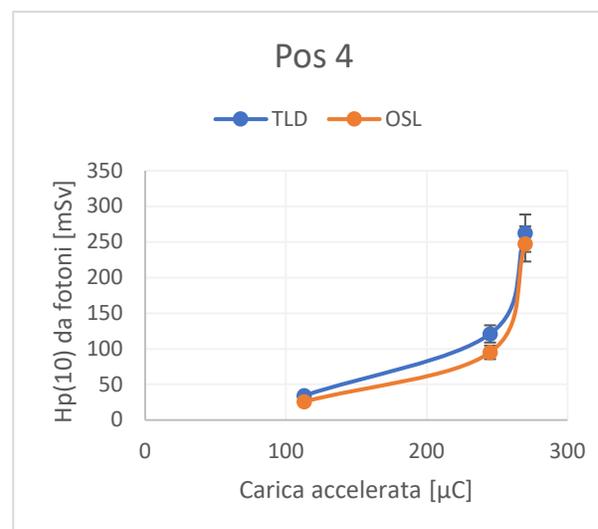
2. a – Posizione 1



2. b – Posizione 2



2. a – Posizione 3



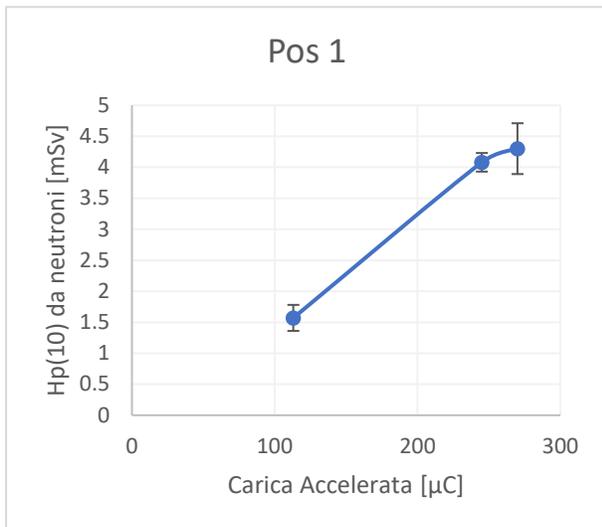
2. d – Posizione 4

CARATTERIZZAZIONE DEL CAMPO NEUTRONICO

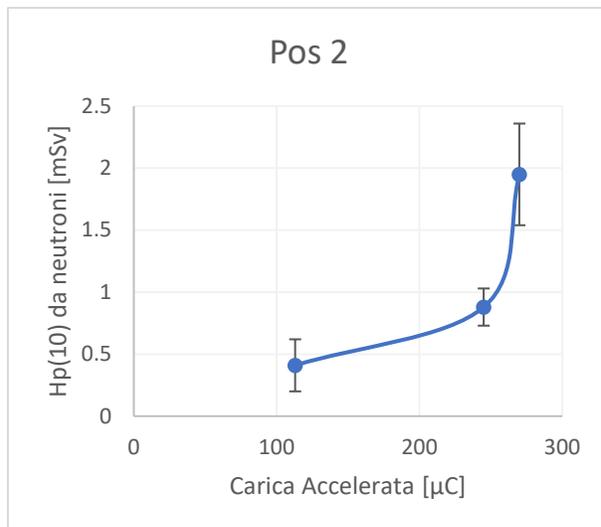
Le misure di dose della componente neutronica del campo sono state effettuate mediante dosimetri a tracce (CR39). Il confronto delle misure dei TLD-100 e TLD-600 con quelle dei TLD-700 permetterebbe, almeno in teoria, una stima dell'intensità del campo neutronico anche con questi strumenti. In questo caso, tuttavia, l'intensità del campo fotonico è risultata talmente superiore rispetto a quello neutronico, da rendere pressoché impossibile risolvere la differenza tra le letture degli strumenti considerando l'incertezza sperimentale associata alle misure. Infine, l'equivalente di dose ambientale è stato misurato in posizione 5 mediante il rem counter passivo. I risultati per l'equivalente di dose personale nelle posizioni 1-4 sono riportati in (fig. 3), quelli per l'equivalente di dose ambientale in posizione 5 in (fig. 4). Per quanto concerne le misure ad alta intensità in questa posizione, il lettore ottico dei dosimetri ha evidenziato una notevole

sovrapposizione di tracce, che ha richiesto l'uso di un algoritmo di correzione per la stima della dose.

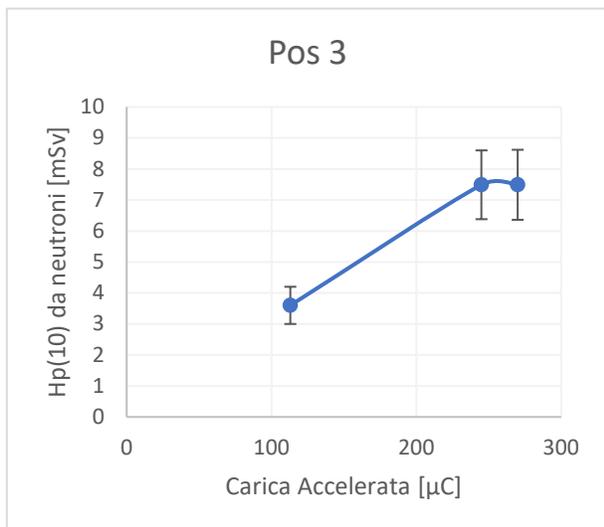
Figura 3: Misure del campo neutronico nelle posizioni 1-4. Le barre d'errore corrispondono a 1 deviazione standard.



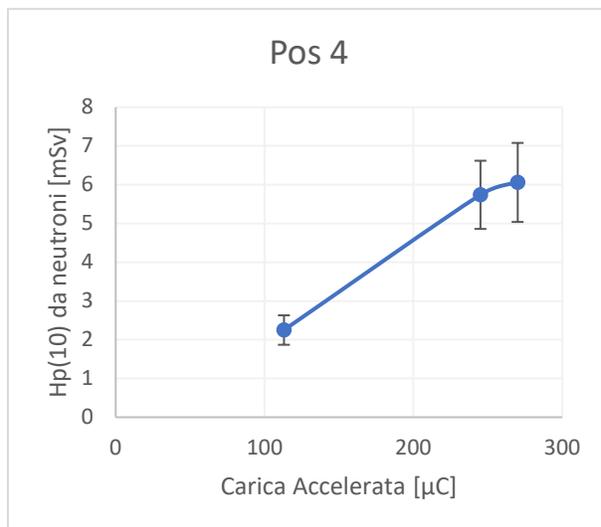
3. a - Posizione 1



3. b - Posizione 2

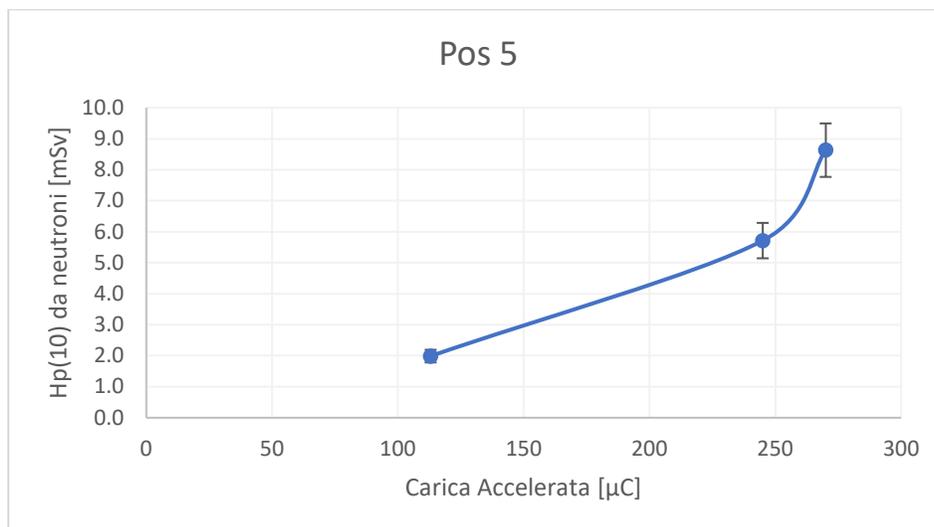


3. c - Posizione 3



3. d - Posizione 4

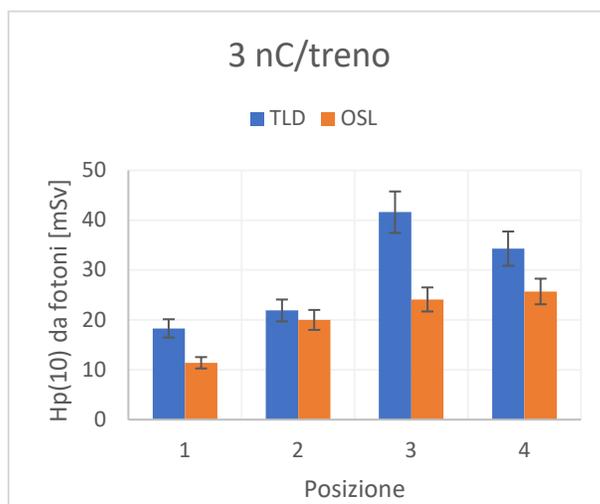
Figura 4: Misure con il rem counter passivo in posizione 5. Le barre d'errore corrispondono a 1 deviazione standard.



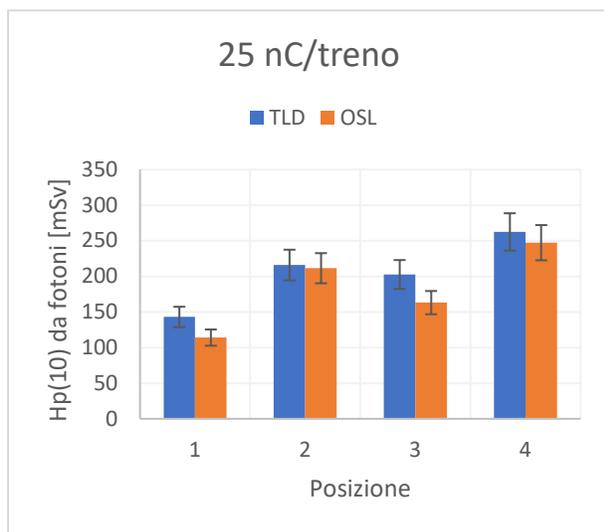
DISCUSSIONE

Il confronto tra la strumentazione passiva per misura di campo fotonico ha evidenziato un accordo tra le varie tecniche piuttosto variabile da una posizione all'altra. Infatti, sebbene la contaminazione neutronica del campo non alteri significativamente la lettura dei dosimetri a termoluminescenza, lo stesso non si può dire della componente elettronica, ragionevolmente dovuta alle perdite del fascio primario o a elettroni soggetti a scattering nella stanza. Ne consegue che nelle posizioni in cui gli OSL registrano una dose beta bassa (posizione 4) o addirittura nulla (posizione 2) l'accordo tra le due tecniche sia pienamente soddisfacente, mentre nelle restanti la lettura dei TLD risulta sempre significativamente maggiore di quella degli OSL. Inoltre, è interessante osservare come ad alta intensità gli OSL indichino dosi da beta in proporzione minori rispetto a quelle gamma, e allo stesso tempo la deviazione tra i due strumenti diminuisca sempre in queste condizioni (fig. 5).

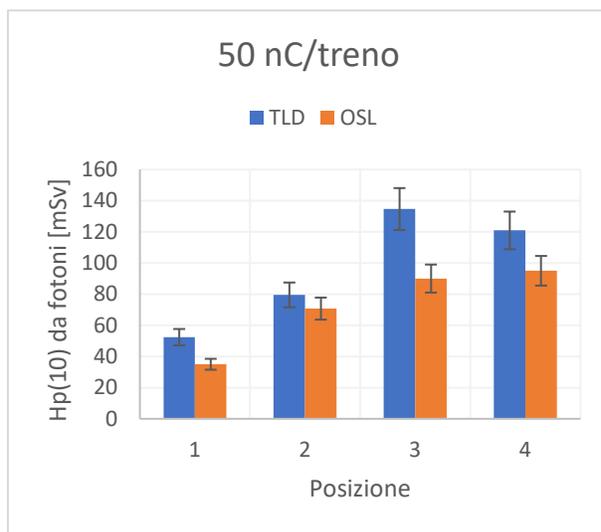
Figura 5: $H_p(10)$ misurata nelle 4 posizioni per diverse intensità del fascio. Le barre d'errore corrispondono a 1 deviazione standard.



5. a – 3 nC per treno di impulsi



5. b – 25 nC per treno di impulsi



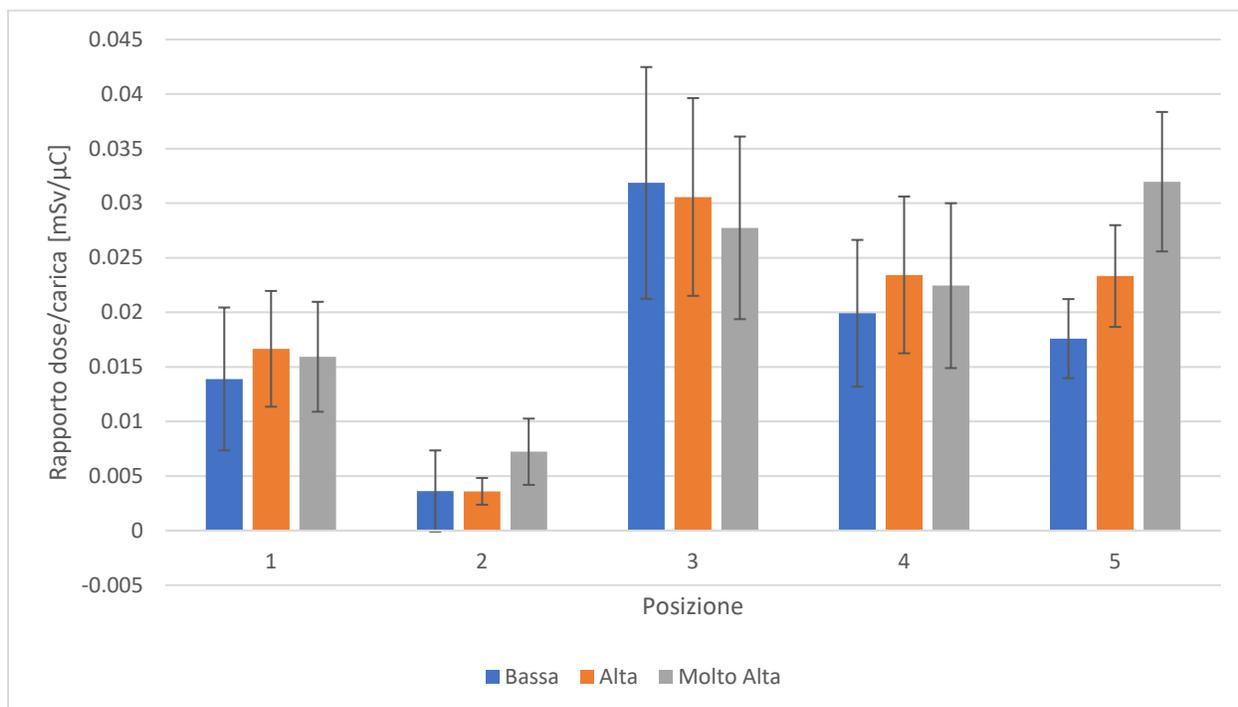
5. c – 50 nC per treno di impulsi

In ogni modo, considerando che l'energia del fascio rimane costante alle varie intensità, sarebbe legittimo aspettarsi una relazione dose-carica accelerata di tipo lineare, specialmente considerando che i range di dose misurati cadono perfettamente nell'intervallo in cui la risposta di tutti gli strumenti in questione è lineare. I grafici in (fig. 2) mostrano, invece, come le misure siano più che lineari in tutte le posizioni per il fascio a intensità molto alta.

L'ipotesi ritenuta più realistica è l'influenza di una corrente di buio dipendente dall'intensità del fascio primario: la presenza di tale corrente è stata rilevata mediante monitor attivi con una frequenza di campionamento maggiore rispetto alla frequenza degli impulsi. Per una migliore comprensione del fenomeno è opportuno coordinarsi con gli addetti alla macchina al fine di desumere ulteriori informazioni su questa corrente di buio e valutare se questo effetto possa giustificare un andamento come quello ipotizzato.

Per la caratterizzazione del campo neutronico, i CR39 hanno mostrato un comportamento sufficientemente lineare nelle posizioni 1, 3 e 4. In posizione 2 e 5, invece, le letture sovrastimano l'andamento lineare per campi a elevata intensità, analogamente a quanto osservato con i dosimetri per fotoni. In questi casi, tuttavia, la sovrastima è molto minore rispetto ai dosimetri fotonici, specialmente se si tengono in considerazione le incertezze associate alla misura. In (fig. 6) è mostrato il rapporto dose neutronica/carica accelerata per le varie posizioni, considerando intervalli di confidenza al 95%. In condizioni di linearità per ogni posizione le barre d'errore dovrebbero essere sovrapposte tra loro. In generale questa condizione è verificata, meno che in posizione 5, dove si osserva un aumento del rapporto ad alte intensità. Quest'ultimo è ragionevolmente implicabile alla differente risposta dei dosimetri neutronici: infatti, mentre quelli nelle posizioni 1-4 sono sensibili esclusivamente a neutroni veloci, il rem counter in posizione 5 fornisce la dose neutronica totale, misurando quindi anche quella dovuta a neutroni termici. Dunque, ammettendo la presenza di una corrente di buio in grado di influenzare le letture dei dosimetri, è evidente come questa abbia un notevole effetto sugli strumenti per fotoni, mentre sia meno rilevante per quelli per neutroni. Al momento, l'ipotesi che si intende investigare è che tale corrente sia associata a un'energia minore del fascio principale, inferiore o a ridosso della soglia necessaria per attivare le reazioni che producono fotoneutroni, e per questo motivo pressoché influente sul campo neutronico.

Figura 6 - Rapporti dose/carica per neutroni nelle 5 posizioni per le tre diverse intensità. Le barre d'errore corrispondono a due deviazioni standard.



CONCLUSIONI

Questo lavoro descrive le misure del campo di radiazioni secondario generato in prossimità dell'acceleratore CLEAR al CERN con strumentazione passiva per fotoni e neutroni. Le misure della componente fotonica hanno mostrato un accordo generalmente accettabile tra dosimetri a TLD e OSL, con deviazioni ragionevolmente ascrivibili alla dose da elettroni causata da perdite di fascio. L'aspetto singolare emerso dalle misure è una significativa sovrastima dell'andamento lineare (di un fattore almeno di 2) per elevati valori di carica accelerata per treni di impulsi, che suggerisce un'influenza sulla lettura complessiva di una corrente di buio con caratteristiche diverse da quella del fascio principale.

Le misure neutroniche hanno evidenziato questo andamento in maniera molto meno marcata, solo nella posizione a dose minore e nella posizione del rem counter, mostrando un comportamento lineare nelle restanti posizioni.

BIBLIOGRAFIA

- (Birattari, 1990) Birattari C. et al., *An extended range neutron rem counter*, 1990, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 29.
- (Agosteo, 2009) Agosteo S., et al., *A passive rem counter based on CR39 SSNTD coupled with a boron converter*, 2009 Radiation Measurements, 44 (9-10).
- (Bolzonella, 2022) Bolzonella M. et al., *Neutron personal dosimetry using polyallyl diglycol carbonate (PADC): Current status, best practices and proposed research*, 2022, Elsevier B.V.
- (Favaudon, 2014) Favaudon V. et al., *Ultrahigh dose-rate FLASH irradiation increases the differential response between normal and tumor tissue in mice*, 2014, Science Translational Medicine.



Convegno Nazionale Airp
Cagliari, 27 - 29 settembre 2023

(Gibson, 1985) Gibson J.A.B., *The relative tissue-kerma sensitivity of thermoluminescent materials to neutrons*, 1985, EUR 10105 EN.

(Korysko, 2023) Korysko Pierre et al., *The CLEAR user facility: a review of the experimental methods and future plans*, 2023, Journals of Accelerator Conferences Website (JACoW)

(Paiva, 2015) Paiva F. et al, *Comparing the responses of TLD 100, TLD 600, TLD 700 and TLD 400 in mixed neutron-gamma fields*, 2015, International Nuclear Atlantic Conference (INAC).

(Perks, 2007) C. A. Perks et al., *Introduction of the InLight monitoring service*, 2007, Radiation Protection Dosimetry.