



Atti del Workshop:
Tecniche Speciali e Avanzate di
Dosimetria e
Radioprotezione

24 | 06 | **DUEMILASEDICI**

Dipartimento di Fisica e Chimica

Viale delle Scienze, Edificio 18 - PALERMO

Presidente del Workshop

Prof.ssa Maria Brai

A cura di

Francesca Alberghina

Giorgio Collura

Cristina D'Oca

Salvatore Gallo

Maurizio Marrale

Stefania Nici

Salvatore Panzeca

Michele Quartararo

Luigi Tranchina

**Atti del Workshop:
Tecniche Speciali e Avanzate di Dosimetria e Radioprotezione**

CODICE ISBN: 9788894124514



SESSIONE DI TECNICHE DOSIMETRICHE AVANZATE IN RADIOPROTEZIONE

RELAZIONE GENERALE

Contaminazione neutronica e rischi associati in radioterapia Pag.76
F. d'Errico

COMUNICAZIONI ORALI

Un sistema digitale innovativo per la caratterizzazione energia-flusso di fasci X diagnostici Pag.78
L. Abbene, G. Gerardi, G. Raso, F. Principato

DOSIMETRIA NIR IN MRI Pag.82
Pietro Luigi Indovina, Anna Botta, Girolamo Garreffa

Commissioning del fascio di un sistema CyberKnife per l'implementazione dell'algoritmo Monte Carlo per il calcolo della dose e valutazioni fisico dosimetriche nelle applicazioni cliniche Pag.83
A. Micali, C. Siragusa, A. Brogna, I. Bonaparte, M.C. Angiocchi, G. Feti, I. Ielo

Dosimetria in-vivo mediante immagini EPID: risultati di uno studio multicentrico Pag.86
A. Piermattei, S. Cilla, F. Deodato, S. Menna, F. Greco, M. Grusio, R. Caivano, V. Fusco, L. Orlandini, G. Benecchi, R. Nigro, D. Falco, A. Fidanzio

Valutazione della dose al cristallino: difficoltà e nuovi limiti ICRP Pag.89
P. Pisciotta, G. Russo, M.G. Sabini, L.M. Valastro, E. Nicolai, C. Petrucci

Analisi retrospettiva degli errori di posizione dei pazienti e l'impatto della dose nella colonscopia virtuale mediante TCMS: esperienza di un singolo centro Pag.92
S. Salerno, L. Scopelliti, M. Marrale, C. Tudisca, A. Lo Casto, R. Lagalla



COMUNICAZIONI POSTER

- Revisione delle raccomandazioni per la dimissione di pazienti affetti da carcinoma tiroideo differenziato (CTD) e trattati con 131I: studio di coorte di pazienti con TSH esogeno e endogeno** **Pag. 95**
L. Barone Tonghi, G.R. Asero, G.V. Di Martino, A.M. Gueli, G. Pellegriti
- Progettazione di un irradiatore autocontenuto per la calibrazione di dosimetri personali a termoluminescenza** **Pag. 97**
S. Chillura Martino, G. Di Chiara, D. Fiore, N. Marchese, C. Pace, A. Parlato, E. Tomarchio
- Procedura di calibrazione di un set di Dosimetri TLD secondo la ISO/ASTM51956:2005(E) e la ASTM standard E-668** **Pag. 100**
G. Di Chiara, A. Parlato, E. Tomarchio
- Procedura di calibrazione di sistemi dosimetrici a film radio-cromici GAFCHROMIC® mod. HD-V2** **Pag. 103**
F. Martorana, G. Di Chiara, G. Perrone, G. Giangrande, C. Ganci, A. Parlato, E. Tomarchio
- Una procedura per la gestione informatizzata della radioprotezione** **Pag. 105**
Paolo Randaccio
- Determinazione della componente gamma nella colonna termica del reattore TRIGA di Pavia tramite Dosimetri ESR di alanina** **Pag. 107**
S. Gallo, M. Marrale, M. Ferrari, A. Longo, S. Panzeca, G. Collura, S. Nici, S. Bortolussi, G. Iacoviello, I. Postuma, N. Protti, S. Altieri
- High energy radiation processing for the synthesis of insulin nanocarriers for the development of a new strategy for the treatment of Alzheimer's Disease** **Pag. 110**
C. Dispenza, M.A. Sabatino, L.A. Ditta, G. Spadaro, V. Militello, P. San Biagio, D. Giacomazza, P. Picone, L. Cristaldi, D. Nuzzo, M. Di Carlo
- Misure preliminari su scanner MRI 7T di stabilità nel tempo di Dosimetri gel di tipo Fricke** **Pag. 112**
G. Collura, S. Gallo, S. Nici, L. Tranchina, B.F. Abbate, M. Brai, V. Caputo, S. Caracappa, G. Cassata, F. d'Errico, S. Mutolo, M. Spanò, M. Marrale
- Uso della spettroscopia ESR per la caratterizzazione di composti fenolici irradiati con fasci clinici di fotoni ed elettroni** **Pag. 115**
S. Gallo, G. Iacoviello, S. Panzeca, G. Collura, A. Longo, S. Nici, M. Brai, M. Marrale



Determinazione della componente gamma nella colone termica del reattore TRIGA di Pavia tramite Dosimetri ESR di alanina

S.Gallo^{1,2}, M.Marrale^{1,2}, M.Ferrari^{3,4}, A.Longo^{1,2}, S.Panzeca^{1,2}, G. Collura¹, S. Nici¹,
S.Bortolussi^{3,4}, G.Iacoviello⁵, I.Postuma^{3,4}, N.Protti^{3,4}, S.Altieri^{3,4}

¹ Dipartimento di Fisica e Chimica, Università degli Studi di Palermo, viale delle Scienze, Ed.18, Palermo.

² Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) – Sezione di Catania, via Santa Sofia 64, 95123 Catania.

³ Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) – Sezione di Pavia, via Bassi 6, 27100 Pavia.

⁴ Dipartimento di Fisica, Università di Pavia, via Bassi 6, 27100 Pavia.

⁵ U.O.C. Fisica Sanitaria – A.R.N.A.S. Ospedale Civico Palermo.

e-mail: maurizio.marrale@unipa.it

INTRODUZIONE

La Terapia per Cattura Neutronica con Boro (BNCT) è un tipo di radioterapia non convenzionale basata sulla reazione nucleare di cattura neutronica indotta dai neutroni termici ($E < 0.5$ eV) sui nuclei di B10, un isotopo stabile dell'elemento boro. Come illustrato dall'equazione seguente, la reazione di cattura emette particelle cariche secondarie caratterizzate da un alto Linear Energy Transfer (LET).

Grazie alla deposizione locale di energia delle particelle ad alto LET, la BNCT sfrutta la distribuzione intracellulare del B10 per danneggiare selettivamente le cellule tumorali (Locher, 1936). La sezione d'urto microscopica di questa reazione è pari a 3837 barns per neutroni da 25 meV mentre il valore Q è positivo e pari a 2.79 MeV.

Il range in tessuto della particella α e del nucleo di rinculo Li7 valgono rispettivamente 9 e 5 μm . Questi valori sono confrontabili con il diametro medio di una cellula umana, quantificabile intorno ai 10 μm . Da questo si ricava che l'energia liberata dalla cattura neutronica sul B10 viene assorbita principalmente dalla cellula che ha inglobato il nucleo di boro coinvolgendo blandamente le cellule circostanti. Per questa sua caratteristica la BNCT è una radioterapia con "selettività cellulare".

La coppia (α ,Li7) può provocare rotture irreparabili alla molecola di DNA. Con fluenze di neutroni termici dell'ordine di 10^{12} cm^{-2} la quantità di B10 richiesta per provocare la morte cellulare con alta efficienza è dell'ordine di 10^9 atomi/cellula, equivalente a circa 20-30 ppm. Il contributo di dose ai tessuti sani, deriva principalmente dalle reazioni di cattura indotte da neutroni termici su H e N; le sezioni d'urto sono rispettivamente 0.322 e 1.8 barn; in seguito alla cattura vengono emessi rispettivamente un raggio γ da 2.2 MeV e un protone di alto LET da circa 600 keV (range in tessuto di circa 12 μm); l'eventuale contaminazione da neutroni veloci nel fascio contribuisce alla dose mediante i protoni di rinculo dello scattering elastico sull'idrogeno.

Le sorgenti finora utilizzate in BNCT sono i reattori nucleari di ricerca che stanno per essere sostituiti da acceleratori di protoni.

Lo spettro dei neutroni dipende fortemente dalla natura e dallo spessore dei materiali utilizzati per conformare l'energia del fascio al target tumorale (tumori superficiali VS tumori profondi) ma è in ogni caso contaminato da una certa frazione di neutroni veloci; inoltre normalmente è presente anche una contaminazione da fotoni derivanti dalla fissione e dai processi di cattura radiativa indotta nei materiali strutturali del canale di irraggiamento (filtri, moderatori, ecc...). L'intensità dei gamma derivanti dalla fissione può essere ridotta fino a renderla trascurabile mediante l'impiego di opportuni filtri, quali ad esempio bismuto o piombo; quello derivante dalle catture radiative può essere ridotto con una oculata scelta dei materiali strutturali del canale di irraggiamento.

Scopo della campagna di misure qui presentate è stato quello di quantificare la dose γ che caratterizza il campo misto della facility a neutroni termici del reattore **TRIGA Mark II** dell'Università di Pavia, dove da



diversi anni si sta portando avanti una intensa attività di ricerca volta a dimostrare l'efficacia della BNCT nel trattamento di tumori diffusi al fegato e al polmone e all'osteosarcoma dell'arto. La potenza nominale in regime stazionario del reattore nucleare di ricerca del tipo TRIGA Mark II è di 250 kW ed il reattore è di tipo termico a piscina aperta, con acqua leggera per moderare i neutroni e refrigerare il combustibile nucleare. Il campo di radiazione della facility è dominato dai neutroni termici che, lungo la direzione maggiore del vano, hanno un flusso che varia da $10^{10} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ a $10^9 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Per questa quantificazione della dose γ sono stati utilizzati dosimetri a risonanza di spin elettronico (ESR) di alanina. I campioni a base di alanina trovano largo uso nella dosimetria ESR per le loro caratteristiche dosimetriche quali la tessuto-equivalenza, la linearità di risposta alla dose in un ampio range, l'alta stabilità nel tempo segnale radio-indotto, la non distruttività del segnale durante le procedure di lettura, l'indipendenza dal rateo di dose, l'assenza di trattamento del campione prima della misura ESR e il basso costo. Queste caratteristiche, se associate alla possibilità di riconoscere le varie componenti di un campo misto di radiazione, rendono l'alanina un ottimo candidato per le applicazioni dosimetriche in ambito clinico.

MATERIALI E METODI

Il presente lavoro descrive gli ultimi studi effettuati su tale componente, in particolare la misura della dose da fotoni mediante rivelatori ESR di alanina in 3 posizioni all'interno della cavità, due delle quali abitualmente utilizzate per condurre esperimenti in vitro e in vivo (POS 1) di BNCT oltre che per misurare la concentrazione di B10 in campioni biologici (POS 3).

Il lavoro è stato condotto tramite la seguente procedura:

1. simulazione Monte Carlo del reattore, in particolare della facility a neutroni termici e calcolo dello spettro γ in tre posizioni di irraggiamento;
2. progettazione mediante simulazioni Monte Carlo dei supporti impiegati nelle misure per assicurare le condizioni di CPE (Charged Particles Equilibrium) e per separare le componenti fotonica e neutronica del campo;
3. ottimizzazione del set-up di irraggiamento per la calibrazione dei rivelatori;
4. irraggiamento dei rivelatori "nudi" e schermati per separare i contributi alla dose dovuti alla componente neutronica termica e a quella fotonica.

I dosimetri ESR a base di alanina sono prodotti dalla Gamma Service (Germania). Le misure ESR sono state effettuate mediante lo spettrometro Bruker ECS 106.

Per garantire le condizioni di CPE durante l'irraggiamento dei rivelatori e nelle procedure di calibrazione si è fatto uso di opportuni contenitori di grafite progettati mediante simulazioni Monte Carlo, come riportato nella successiva sezione.

Infine, per permettere la separazione del contributo neutronico e fotonico alla dose totale letta dai rivelatori, si è fatto uso di un contenitore cavo in Teflon riempito con polvere di carbonato di litio, arricchito al 95% in ^6Li . Grazie alla reazione di cattura neutronica sul ^6Li , $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$ (sezione d'urto = 960 barns a 25 meV), è possibile rimuovere efficacemente i neutroni termici senza aggiungere dose γ nella posizione di irraggiamento. La calibrazione a fotoni è stata effettuata irradiando (fino a 20 Gy) diversi set di dosimetri di alanina tramite fotoni da 6MV utilizzando l'acceleratore lineare PrimusLow (Siemens®) situato presso l'Unità Operativa Complessa di Fisica Sanitaria dell'Ospedale A.R.N.A.S. Civico di Palermo. I campioni di alanina sono stati irradiati all'interno di contenitori di grafite (materiale che si discosta dai tessuti molli in termini di densità e di coefficiente assorbimento energetico massico). La stima della dose assoluta è stata fatta tramite una camera a ionizzazione (C.I.) anch'essa posta all'interno di un fantoccio di grafite. L'attività sperimentale vera e propria è stata affiancata da un ampio studio computazionale del campo di neutroni e fotoni nelle tre posizioni della cavità di irraggiamento.

RISULTATI e DISCUSSIONE

In tab. 1 è riportato il confronto tra le dosi totali simulate e misurate con i rivelatori ESR nelle tre posizioni di irraggiamento oltre alle componenti di dose già descritte (solo simulazione Monte Carlo). Si sono considerate le diverse condizioni di irraggiamento: U = Unshielded, S = Shielded, U+G = Unshielded + Graphite, S+G = Shielded + Graphite, che verranno giustificate nel seguito.

	Dose (Gy)	Err %	Dose (Gy)	Err %	Dose (Gy)	Err %	Dose (Gy)	Err %
Irraggiamento	U		S		U+G		S+G	
POS 1								
$^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$	68.6	0.0004	0.1	0.08	68.6	0.0004	0.09	0.03
$^1\text{H}(n,n')^1\text{H}'$	2.4	0.07	1.96	0.007	2.42	0.07	2.08	0.05
γ background	5.56	0.01	5.32	0.03	5.62	0.006	5.34	0.02
$^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$	0.38	0.0002	-	-	0.38	0.004	--	--
tot (sim)	75.98	0.004	6.60	0.03	76.05	0.004	6.68	0.03
tot (mis)	36.76	0.03	6.66	0.03	37.18	0.03	6.60	0.05
POS 2								
$^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$	27.3	0.005	0.04	0.08	29.76	0.004	0.05	0.05
$^1\text{H}(n,n')^1\text{H}'$	0.59	0.13	0.43	0.1	0.49	0.12	0.45	0.1
γ background	2.90	0.007	2.76	0.03	2.90	0.006	2.76	0.02
$^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$	0.15	0.007	--	--	0.16	0.004	--	--
tot (sim)	30.70	0.004	3.06	0.03	33.11	0.004	3.08	0.03
tot (mis)	14.13	0.05	2.81	0.05	15.36	0.04	2.82	0.08
POS 3								
$^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$	11.07	0.004	0.02	0.04	16.59	0.003	0.03	0.05
$^1\text{H}(n,n')^1\text{H}'$	0.24	0.2	0.13	0.12	0.19	0.1	0.15	0.1
γ background	2.28	0.01	2.14	0.03	1.72	0.01	1.6	0.03
$^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$	0.06	0.07	--	--	0.09	0.003	--	--
tot (sim)	13.55	0.004	2.24	0.03	18.52	0.004	1.72	0.03
tot (mis)	6.29	0.06	1.18	0.14	8.36	0.04	1.70	0.06

Tabella 1 – Dose totale e componenti di dose simulate nei volumi di alanina dei dosimetri, confrontate con le misure registrate dai rivelatori.

Il confronto delle dosi totali simulate e misurate risulta molto buono entro gli errori sperimentali per il set-up di irraggiamento con schermo di carbonato di litio, come riportato in tab. 1, colonne S e S+G, e va a validare la simulazione Monte Carlo in particolare per quel che concerne il trasporto dei fotoni. Un discorso diverso va fatto nei casi dei rivelatori "nudi" (tab. 1, colonne U e U+G). I valori simulati presentano sempre un fattore 2 rispetto ai risultati delle misure. Si deve considerare che in assenza dello schermo litiato la principale componente di dose è quella dovuta ai protoni delle reazioni di cattura termica sull'azoto dell'alanina. Il fattore di peso per la risposta dei rivelatori a questa radiazione non è al momento noto con precisione e quindi non è stato possibile correggere opportunamente il contributo alla dose totale dovuto all'interazione dei neutroni termici. Avendo però a disposizione le diverse componenti di dose fisica dalle simulazioni, si può ricavare un fattore di peso pari a 0.4 per i neutroni termici, valore che avvicina ottimamente le dosi simulate a quelle calcolate, come mostrato in tab. 2.

Radiazione	Fattore di peso (RE)	Posizione di irraggiamento		Dose (Gy)
$^1\text{H}(n,n')^1\text{H}'$	0.6	POS 1	sim	34.82
γ background	1		mis	36.76
$^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$	0.4	POS 2	sim	14.27
			mis	14.13
		POS 3	sim	6.89
			mis	6.29

Tabella 2 – confronto tra le dosi totali simulate e misurate nei rivelatori irraggiati in POS 1, assumendo come fattore di peso per la componente neutronica termica un fattore RE pari a 0.4

CONCLUSIONI

Da questo lavoro si conclude che la procedura seguita che sfrutta in combinazione la simulazione Monte Carlo e la dosimetria con alanina permette la caratterizzazione delle componenti fotonica e neutronica di un campo misto.



INDICE PER AUTORI

A

B.F. Abbate	112
L. Abbene	78
F. Alberghina	62
S. Altieri	107
E. Amato	16
M.C. Angiocchi	23,26,83
G.R. Asero	16,95

B

F. Baffigi	18
A. Baldi	43
A. Barbon	74
L. Barone Tonghi	95
A. Bartoli	43
A. Bartolotta	68
A. Bazani	13
G. Benecchi	86
E. Bonanno	29
I. Bonaparte	23,26,83
E. Bortolin	60
S. Bortolussi	107
A. Botta	82
M. Brai	31,34,38,62,68,112
A. Brogna	23,83
M. Bruzzi	43
G. Burrafato	16

C

R. Caivano	86
M.C. Cantone	21
G. Caputo	16,
V. Caputo	34,38,112
S. Caracappa	112
G. Cassata	112
R. Catalano	51
N. Cavalli	29
S.Chillura Martino	97
N. Chiodini	21
S. Cialdi	21
S. Cilla	86
G. Collura	31,62,68,107,112,115
L. Cristaldi	110
T. Cucchiara	34
F. Cuccia	34
I. Cupparo	43

D

E. D'Ippolito	21
C. De Angelis	60,71
G. De Angelis	71
C. De Mattia	21
S. Della Monaca	71
F. Deodato	86
F. d'Errico	31,76,112
M. Di Carlo	110
G. Di Chiara	97,100,103
G.V. Di Martino	95
L. Di Trocchio	71
C. Dispenza	110
L.A. Ditta	110
M.C. D'Oca	68

F

D. Falco	86
M. Fasoli	21
P. Fattibene	60,66,71
M. Ferrari	107
G. Ferrera	38
G. Feti	23,83
L. Ficcadenti	71
A. Fidanzio	86
V. Figlia	38
D. Fiore	97
L. Fulgentini	18
V. Fusco	86

G

C. Gagliardo	31
S. Gallo	31,62,68,107,112,115
C. Ganci	103
M. Gargano	21
M. Garioni	13
G. Garreffa	82
G. Gerardi	78
D. Giacomazza	110
G. Giangrande	103
C. Gianino	51
M.C. Gilardi	18
A. Girlando	29
A. Giulietti	18
L.A. Gizzi	18
F. Greco	86
M. Grusio	86
A.M. Gueli	16,29,31,41,95



I

G. Iacoviello	31,34,38,107,115
I. Ielo	23,26,83
G. Immè	51
P.L. Indovina	82

K

P. Koester	18
------------	----

L

L. Labate	18
R. Lagalla	92
D. Lamia	18
A. Lo Casto	92
G. Loi	21
A. Longo	31,62,68,107
N. Luca	34
M. Lucentini	71
N. Ludwig	21

M

M. Magnoni	47
S. Manenti	59
G. Mangano	51
G. Mannino	16
N. Marchese	97
C. Marino	29
M. Marrale	31,34,62,68,92,107,112,115
F. Martorana	103
S. Menna	86
A. Micali	23,26,83
F. Midili	26
V. Militello	110
P. Milone	41
E. Mones	21
V. Mongelli	23
D. Morelli	51
A. Mostacci	71
S. Mutolo	112

N

S. Nici	31,62,68,107,112,115
E. Nicolai	89
R. Nigro	86
D. Nuzzo	110

O

L. Orlandini	86
--------------	----

P

C. Pace	97
D. Palla	18
S. Pallotta	43

S. Panzeca	34,38,62,68,107,115
A. Parlato	97,100,103
G. Pedroli	13
G. Pellegriti	95
G. Perrone	103
G. Petrillo	41
C. Petrucci	89
P. Picone	110
A. Piermattei	86
L. Piersanti	71
S. Pisa	71
P. Pisciotta	18,89
E. Pittella	71
I. Postuma	107
F. Principato	78
N. Protti	107

Q

M.C. Quattrini	60,71
----------------	-------

R

L. Raffaele	41
P. Randaccio	105
G. Raso	78
S. Rizzo	62
G. Russo	18,89

S

M.A. Sabatino	110
M.G. Sabini	89
S. Salerno	92
P. San Biagio	110
A.S. Santamaria	54
F. Santavenere	71
G. Savoca	34,38
M. Scaringella	43
L. Scopelliti	92
C. Siragusa	26,83
G. Spadaro	110
S. Spampinato	41
M. Spanò	38,112

T

M.A. Tabocchini	60
C. Talamonti	43
E. Tomarchio	38,97,100,103
L. Tranchina	31,62,112
C. Tudisca	92

V

L.M. Valastro	89
A. Vedda	21
I. Veronese	21