

CNAO: esposizione ai campi elettromagnetici del sincrotrone

E. Giroletti(§), C. Bosio(#)

§ - Università degli Studi di Pavia, INFN sez. Di Pavia e Fondazione CNAO, Pavia via Bassi 6, elio.giroletti@unipv.it

- ARPA Lombardia, Dipartimento di Pavia, via Bixio – Pavia, c.bosio@arpalombardia.it

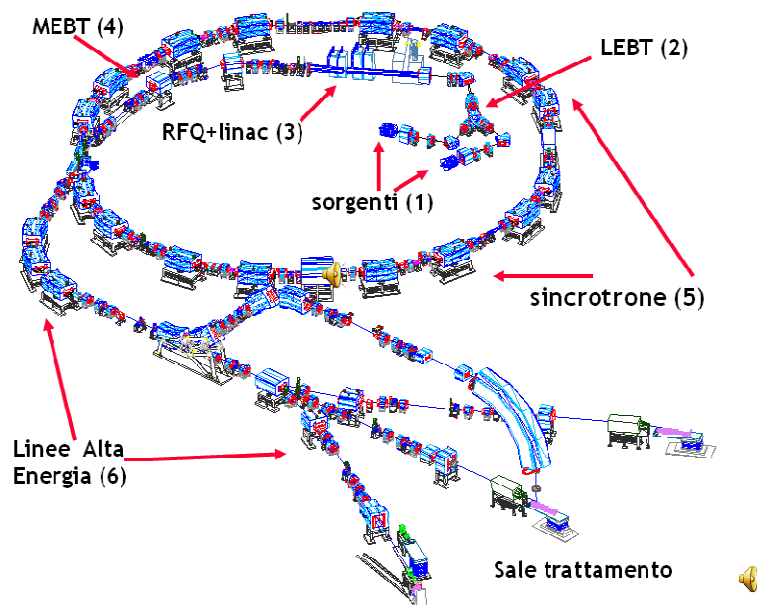
RIASSUNTO

Il sistema di accelerazione del Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica (CNAO), in fase di installazione e commissioning a Pavia, è costituito da un sincrotrone preceduto da uno stadio acceleratore composto da RFQ (quadrupolo a radiofrequenza) e linac (acceleratore lineare). I protoni e gli ioni carbonio sono prodotti da due sorgenti identiche del tipo ECR supermanogan. Come noto, le traiettorie delle particelle sono guidate da magneti (dipoli), focalizzate e defocalizzate sulla loro traiettoria da magneti correttori (quadrupoli, sestupoli e ottupoli). Tutte queste apparecchiature producono un ampio spettro di campi elettromagnetici a diverse frequenze e potenze. Infatti, sull'impianto sono presenti CEM a bassa frequenza (frequenza di rete) nelle molteplici cabine di alimentazione e quadri elettrici e cavi di adduzione, e campi a frequenze più elevate, anche dell'ordine delle decine e centinaia di MHz, fino ai 14 GHz delle sorgenti ECR. In queste ultime è presente anche un campo magnetico statico da 1 tesla. L'esposizione ai campi elettromagnetici del sistema di accelerazione, pertanto, può essere significativa. L'obiettivo del lavoro è effettuare il censimento delle sorgenti di CEM e di caratterizzarle, per la successiva valutazione della esposizione. Nel presente lavoro vengono presentate le prime misure relative alle sorgenti ECR e ai generatori del RFQ.. I risultati mostrano il rispetto dei limiti di esposizione previsti dalla normativa in vigore (e da quella sospesa).

INTRODUZIONE

Il sistema di accelerazione del Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica (CNAO), in fase di installazione e commissioning a Pavia, è costituito da un sincrotrone preceduto da uno stadio acceleratore composto da RFQ (quadrupolo a radiofrequenza) e linac (acceleratore lineare). I protoni e gli ioni carbonio sono prodotti da due sorgenti identiche del tipo ECR supermanogan, da cui emergono con una energia di 7 keV/u. Nel RFQ le particelle ricevono una prima accelerazione fino a 400 keV/u e dal linac emergono con 8 MeV/u. Nella cavità RF del sincrotrone, i protoni e gli ioni carbonio vengono accelerati fino all'energia di 250 e di 450 MeV/u, rispettivamente, così da poter raggiungere un tumore alla profondità massima di 30 cm nel paziente.

Figura 1 – schema generale del sistema di accelerazione



Visione schematica del sistema di accelerazione del centro CNAO di Pavia. Si osservano le due sorgenti ECR (1), la linea di bassa energia (LEBT) (2), il primo stadio di accelerazione (RFQ e linac) (3), la linea di media energia del fascio

(MEBT) (4), il sincrotrone (5) e le linee di trasferimento del fascio (HEBT) (6) alle tre sale di trattamento. La sala di trattamento centrale, oltre al fascio orizzontale, ha anche una linea verticale.

In figura 1 si vede il layout del sistema di accelerazione, con la rappresentazione dei vari magneti posti sul sincrotrone, ai quali vanno aggiunti anche tutti quelli che sono ubicati sulle linee di trasferimento del fascio alle sale di trattamento.

Come noto, le traiettorie delle particelle sono guidate da magneti (dipoli), focalizzate e defocalizzate sulla loro traiettoria da magneti correttori (quadrupoli, sestupoli e ottupoli), alimentati da correnti variabili, anche molto elevate; per esempio, quelle dei dipoli sono dell'ordine dei 2.000 A.

Tutte queste apparecchiature producono un ampio spettro di campi elettromagnetici a diverse frequenze e intensità. Infatti, sull'impianto sono presenti CEM a bassa frequenza (frequenza di rete) nelle molteplici cabine di alimentazione e quadri elettrici e cavi di adduzione, e campi a frequenze più elevate, anche dell'ordine delle decine e centinaia di MHz, fino ai 14 GHz delle sorgenti ECR. In queste ultime è presente anche un campo magnetico statico da 1 tesla.

L'esposizione ai campi elettromagnetici del sistema di accelerazione, pertanto, può essere significativa. In osservanza al d.lgs 81/08, essa deve essere valutata per la protezione dei lavoratori che possono trovarsi ad operare nelle vicinanze dei magneti o delle differenti sorgenti di RF, e, in osservanza alla legge 36/01, deve essere valutata anche l'esposizione del personale che si considera non esposto e quella della popolazione che vive o lavora nelle vicinanze del Centro (con riferimento alla sottostazione elettrica).

L'obiettivo del lavoro è effettuare il censimento delle sorgenti di CEM (soprattutto di tipo non convenzionale) e di caratterizzarle, per la successiva valutazione della esposizione. Ad essa segue una campagna di misurazioni, non essendo possibile, in tali situazioni, effettuare valutazioni teoriche rappresentative del reale del livello di esposizione. Nel lavoro sono riportati i risultati delle misurazioni preliminari.

LE SORGENTI DI CEM PRESSO IL CNAO

Le apparecchiature dell'acceleratore oggetto delle misure preliminari e, pertanto, del presente lavoro sono:

- Le sorgenti ECR, che producono le particelle che verranno successivamente accelerate (protoni e ioni carbonio);
- Il generatore della radiofrequenza del RFQ (radiofrequency quadrupole) e linea di trasferimento della radiofrequenza;
- Il generatore della radiofrequenza del linac e della linea di trasferimento della radiofrequenza.

A queste prime misure preliminari faranno seguito quelle presenti direttamente sul sincrotrone ed in particolare (con i relativi alimentatori):

- dipoli: che sono i magneti deflettori del sincrotrone;
- magneti correttori principali, tra cui: quadrupoli, sestupoli e ottupoli, il cui compito è quello di focalizzare, defocalizzare o parzialmente deflettere le particelle sulla loro traiettoria;
- apparecchiature speciali quali: magneti speciali (ad esempio il dipolo del chopper), il magnete a 90° (che indirizzerà il fascio verticale sul paziente), la cavità accelerante del sincrotrone ed il setto elettrostatico di estrazione, il quale provvederà alla estrazione del fascio dall'acceleratore, per indirizzarlo nelle sale di trattamento.

A tutte queste apparecchiature specifiche di un impianto di accelerazione, occorre aggiungere anche quelle convenzionali, presenti in vari impianti in cui siano presenti pompe e motori di vario tipo, si pensi per esempio a quelle del sistema di raffreddamento ad acqua degli apparati dell'acceleratore, oppure anche alle pompe a vuoto ubicate tutte intorno alla linea dell'acceleratore e di trasferimento del fascio nelle sale di trattamento. Da non trascurare la centrale elettrica dell'impianto, progettata per una potenza complessiva di 10 MW elettrici forniti al CNAO.

LE MISURE DI CAMPI ELETTROMAGNETICI

Come già accennato, in questo lavoro verranno presentate le misure effettuate sui primi stadi dell'acceleratore, ed in particolare:

- le sorgenti ECR, che producono le particelle che verranno successivamente accelerate (protoni e ioni carbonio);
- il generatore della radiofrequenza del RFQ (radiofrequency quadrupole) e del linac e della linea di trasferimento della radiofrequenza dai rispettivi generatori ai due apparati.

STRUMENTAZIONE IMPIEGATA

La strumentazione impiegata per la misurazione dei campi elettromagnetici statici e dinamici è la seguente. Misura del campo magnetico statico: sonda di Hall: Namicon MPU - ST. Prima e dopo le misure si è effettuata la verifica di corretto funzionamento dello strumento, mediante due magneti (da 0 e 10 mT).

Per la misura dei CEM: analizzatore PMM 8053, dotato delle sonde:

- EP 330 per misurare campi elettrici con frequenza compresa tra 100 kHz e 3 GHz,
- EP 408 per misurare campi elettrici con frequenza compresa tra 1MHz e 40 GHz.

Le sonde hanno una soglia di rilevabilità di 0,3 V/m e sono state tarate il 19.03.2008 presso il centro SIT 08 della ditta PMM. Tali sonde sono isotrope per cui, il calcolo dell'intensità del campo elettrico complessivo E nel punto di misura, viene effettuato direttamente dallo strumento.

VALORI DI RIFERIMENTO DELL'ESPOSIZIONE

Il d.lgs 81/08 e s.m.i., TU sulla sicurezza dei luoghi di lavoro, ha abrogato il d.lgs 257/07 che introduceva i limiti di esposizione per i lavoratori: limiti che sono stati "sospesi" fino al 2012 dal d.lgs 81 stesso. Detti limiti sono comunque usati come riferimento per la valutazione dell'esposizione del personale.

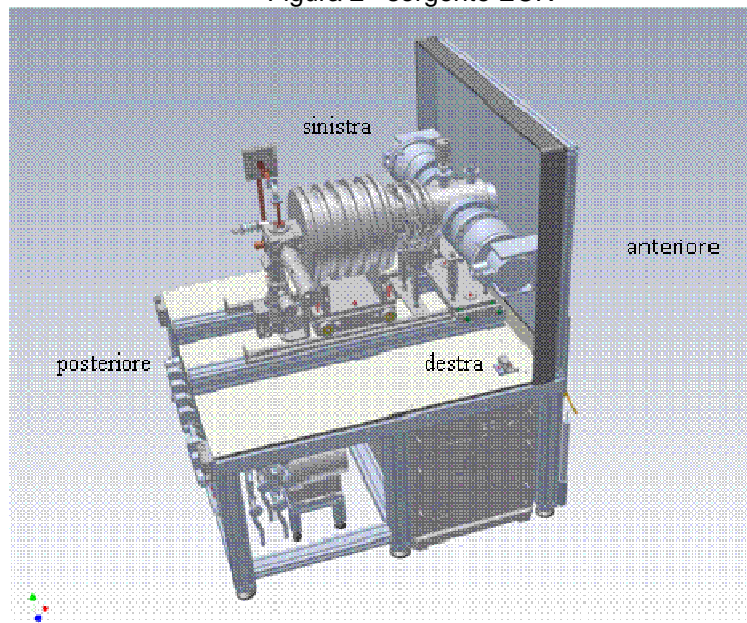
La legge 36/01, "Legge quadro sulla protezione dall'esposizione a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici", rimanda a decreti attuativi l'indicazione di nuovi limiti sui campi elettromagnetici. A livello nazionale è in vigore il D.P.C.M. 8 luglio 2003 "Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici generati a frequenze comprese tra 100 kHz e 300 GHz". Tale decreto fissa i valori limite di esposizione per la popolazione ai campi elettromagnetici connessi al funzionamento e all'esercizio dei sistemi fissi delle telecomunicazioni e radiotelevisivi operanti nell'intervallo di frequenza compresa tra 100 kHz e 300 GHz.

SORGENTI ECR SUPERNANOGAN

Le sorgenti Supernanogan ECR Ion Sources (Electron Cyclotron Resonance Ion Source) presso l'acceleratore sono due (Pantechnik -Francia-). Esse sono identiche e pertanto, intercambiabili, al fine di garantire la massima affidabilità al sistema di trattamento. Le sorgenti sono in grado di produrre ed estrarre ioni idrogeno (H+) e ioni carbonio (C4+), con energia pari a 8 keV/nucleone che verranno successivamente accelerati e privati completamente dei rimanenti elettroni prima di essere immessi nel sincrotrone.

In figura 2 si vede una foto della parte centrale delle sorgenti, la camera ove viene flussato il gas (H2 oppure CO2, ecc.), in presenza di un elevato campo magnetico, generato da magneti permanenti (due solenoidi e un sestupolo, di FeNdB) che generano un campo statico da 1 T.

Figura 2 –sorgente ECR



Vista di insieme della sorgente ECR, priva dello schermo in piombo. Il limite di 0,5 mT è di circa 1 metro intorno all'apparecchiatura. In figura si vedono i riferimenti utili per l'ubicazione delle misure di campo magnetico statico.

Nella camera viene immessa la radiofrequenza (frequenza pari a 14,5 GHz), che a sua volta eccita gli atomi, ionizza il gas presente nella camera stessa, e produce in conseguenza gli ioni che vengono estratti

attraverso una differenza di potenziale di circa 8-20 kV (dipende dal tipo di particelle da estrarre). Questo processo genera anche intensi campi di radiazioni ionizzanti (raggi X) ma che non sono oggetto di questa trattazione. In figura 2 è presente la foto del nucleo centrale della sorgente ECR.

I risultati delle misure di campo magnetico statico sono riportati in tabella 1, ove si è indicato il massimo misurato sui 3 assi. Le due sorgenti sono distinte in sorgente ioni carbonio e protoni (pur essendo identiche ed intercambiabili). Si possono rilevare alcune differenze rispetto ad una prima serie di misure, a causa dell'effetto distorcente della schermatura presente. Si evidenzia il limite di 0,5 mT, all'interno del quale possono operare solo persone adeguatamente formate ed informate e con idoneità medica.

Si è provveduto a posizionare la segnaletica indicante la presenza di campo magnetico, con le rispettive misure di tutela da adottare.

Successivamente è stata effettuata una seconda misura del campo magnetico (induzione magnetica) prodotto dai magneti permanenti delle sorgenti ECR in corso di installazione presso il centro CNAO di Pavia. Si è proceduto a questa nuova misura in seguito all'installazione degli schermi in piombo per le radiazioni ionizzanti sulle sorgenti, che modificano in campo magnetico presente. I risultati sono riportati in tabella 2.

Tabella 1 – risultati delle misure di campo magnetico intorno alle ECR

Posizione	distanza dalla superficie (cm)	B (mT)		Osservazioni
		Carbonio	Protoni	
laterale destra	0	52	62	Contatto
	10	17,9	15	
	30	4,7	4,9	
	45	3,0	2,8	bordo apparecchiatura
	90	0,5	0,5	
	185	---	0,1	
	190	0,1	---	
Posteriore	0	85	84	Contatto
	10	26,4	30	
	30	8,7	8,3	
	40	6,8	6	bordo apparecchiatura
	110	0,5	0,5	
	215	---	0,1	
	220	0,1	---	
Sopra	0	60,3	65	Contatto
laterale sinistra	0	67	66	Contatto
	10	14,2	16,5	
	30	4	5	
	45	2,8	2,9	bordo apparecchiatura
	90	0,5	0,5	
	170	0,1	---	
	215	---	0,1	
Anteriore	0	30 ⁽¹⁾	430 ⁽²⁾	contatto, ⁽¹⁾ all'esterno della schermatura, ⁽²⁾ all'interno della schermatura
	10	---	140	Aperto
	30	---	167	Aperto
	45	3,9	---	Contatto
	70	0,5	---	
	150	0,1	---	

Tabella 2 – seconda serie di misure sulle ECR

posizione	distanza dalla schermatura (cm)	B (mT)	
		carbonio	Protoni
laterale destra	0	1,6	1,5
posteriore	0	4	4,2
	70	---	0,5
	80	0,5	---
	100	0,28	0,22
laterale sinistra	0	1,7	1,7

posizione	distanza dalla schermatura (cm)	B (mT)	
		carbonio	Protoni
	40	0,5	0,5
	100	0,13	0,1
	0	3,6	3,5
davanti	70	0,5	0,5
	10	0,33	0,35

Generatore RF e guida d'onda delle sorgenti ECR

Le misure intorno al generatore di RF della sorgente ECR02 e della guida d'onda hanno dato i valori riportati in tabella. La sorgente ECR, durante le misure, era funzionante a 260 kwatt (massima potenza), 14 GHz, producendo ioni carbonio. La sorgente, essendo funzionante, era dotata dello schermo in piombo previsto dalle norme di protezione dalle radiazioni ionizzanti.

Tabella 3 - Misure di RF effettuate intorno alla ECR

Posizione	E (V/m)	osservazioni
Uscita guida d'onda dal generatore	40 – 50	A contatto
Guida d'onda, Ingresso in camera superiore	40 – 50	A contatto
Guida d'onda – vicino alle connessioni	20 – 30	A contatto
Sotto la zona non schermata dal Pb	10 – 15	Lato SX sorgente ECR
Sotto la zona non schermata dal Pb	10 – 15	Lato DX sorgente ECR
Laterale Dx e Sx della ECR	1 -3	A contatto – ad altezza torace
Davanti sulla linea	5 – 10	Vicino al magnete
Davanti alla ECR	<10	in basso
Sopra schermo Pb della sorgente	<0,3	A contatto
Intorno alla sorgente ECR	1 – 2	a 3 mt di distanza
Alla scala di accesso all'area	<0,3	----

GENERATORE RF E GUIDA D'ONDA DEL RFQ

Le misure intorno al generatore di RF del RFQ e della sua guida d'onda fino al dummy load, per individuare eventuali perdite intorno agli apparati stessi, hanno dato valori inferiori alla sensibilità strumentale (0,3 V/m), ad eccezione dei seguenti punti: ai piedi del generatore, giusto all'uscita della guida d'onda di sono rilevati 0,4 – 0,5 V/m.

Il RFQ, durante le misure, era posto a 200 kwatt e tensione al tubo pari a 16,45 kV.

GENERATORE RF E GUIDA D'ONDA DEL LINAC

il generatore di radiofrequenza del linac opera a 216 MHz. Oggetto della misurazione è stata anche la guida d'onda fino al dummy-load (>30 m). Durante le misure, la potenza del generatore è stata di 1 MW (potenza massima di lavoro 1,5 MW) e le tensioni ai due tubi del generatore: 13 e 22 kV (tensioni di lavoro).

Le misure intorno al generatore di RF del linac (a porte chiuse) e alla guida d'onda hanno dato valori inferiori alla sensibilità strumentale (0,3 V/m), ad eccezione dei seguenti punti: ai piedi del generatore, all'uscita della guida d'onda, dove si sono rilevati valori comunque inferiori a 0,5 V/m.

Le misure intorno al generatore di RF del linac (a porte aperte, 1 MW di potenza) riportano valori mediamente pari a 8 V/m, valore massimo 20 V/m.

CONCLUSIONI

SORGENTI ECR SUPERNANOGAN

I valori rilevati di campo elettrico (RF) intorno alle apparecchiature durante il funzionamento delle sorgenti (RFQ e ECR) sono risultati inferiori ai limiti di legge per la popolazione (DPCM 8-VII-2003) e per i lavoratori (capo IV, titolo VIII del d.lgs 81/08 e s.m.i.). Si consideri, altresì, che le sorgenti ECR possono produrre radiofrequenze quando il personale si trova all'esterno dell'area delimitata per le radiazioni ionizzanti, rendendole così inaccessibili anche per quelle non ionizzanti.

GENERATORI RF E GUIDA D'ONDA DEL RFQ E DEL LINAC

I valori di campo elettrico rilevati intorno al generatore e alla guida d'onda sono risultati inferiori ai limiti fissati per la popolazione (DPCM 8-VII-2003) e ai livelli di azione fissati per i lavoratori (capo IV, titolo VIII del d.lgs 81/08 e s.m.i.), quando il generatore opera a porte chiuse (normale condizione di lavoro). A porte aperte vengono superati i valori di esposizione previsti per la popolazione, ma non sono superati i livelli di azione dei lavoratori.

Si consideri che il generatore di norma opera a porte chiuse, sia durante il normale funzionamento e sia durante le manutenzioni sui generatori.

INDICAZIONE DI PROTEZIONE

Ai fini della protezione dalla esposizione ai campi elettromagnetici, è necessario che:

- il personale non svolga le attività all'interno delle zone interessate dai campi elettromagnetici di alta intensità: seguire le indicazioni riportate nel manuale d'uso delle apparecchiature;
- sia apposto il simbolo di pericolo di campi elettromagnetici, con il divieto di accesso alle sorgenti a personale non idoneo (vedasi di seguito);
- si effettui la sorveglianza sanitaria del personale autorizzato a svolgere attività nelle zone interessate ai campi elettromagnetici;
- si delimitino le aree che possono essere interessate temporaneamente dalla presenza di campi elettromagnetici, con segnalazione di sicurezza.

Di seguito si riportano le situazioni di controindicazione all'esposizione a campi elettromagnetici:

- portatori di dispositivi elettromedicali o sanitari impiantati, quali ad es.: pacemaker, defibrillatori, valvole cardiache, pompe di infusione per insulina, neurostimolatori, protesi attive a controllo elettronico, sistemi per la stimolazione muscolare, protesi auricolari elettroniche, corpi intrauterini, distrattori della colonna vertebrale, derivazione spinale o ventricolare;
- presenza di oggetti ferromagnetici nel corpo: protesi metalliche; protesi dentarie fisse o mobili; clips su aneurismi (vasi sanguigni), aorta, cervello; schegge o frammenti metallici;
- affezioni patologiche particolari (anemia falciforme);
- stati fisiologici particolari (gravidanza).

Bibliografia

AA.VV, Ion Sources for CNAS Project, documento interno, CNAO, Milano, 2003

H. Vormann, B. Schlitt, et al., Status of the linac component for the Italian hadrontherapy centre CNAO, Proceeding of EPAC08, Genova, Italia, 2008