

Progetto della nuova facility di irraggiamento al CNAO

M. Pullia¹, C. Sanelli², S. Alpegiani¹, G. Battistoni², G. Bazzano¹, L. Bellan³, A. Bertola¹, E. Bollito¹, J. Bosser¹, E. Bressi¹, G. Butella¹, L. Casalegno¹, L. Celona², G. Ciavola¹, M. Ciocca¹, P. Cirrone², A. Clozza², M. Del Franco⁴, E. Di Pasquale⁴, M. Donetti¹, A. Facoetti¹, L. Falbo¹, R. Ferrari², M. Ferrarini¹, S. Foglio¹, L. Frosini¹, A. Galatà², G. Gallo², S. Gammino², F. Generani¹, F. Gerardi¹, A. Ghigo², S. Gioia¹, S. Giordanengo², V. Lante¹, A. Lanza², L. Lanzavecchia¹, A. Mairani¹, D. Mascali², R. Monferrato¹, J. Moreno¹, M. Necchi¹, M. Nodari¹, A. Parravicini¹, L. Pellegrino², M. Pelliccioni¹, M. Pezzetta¹, C. Priano¹, E. Rojatti¹, S. Rossi¹, R. Sacchi², S. Savazzi¹, M. Scotti¹, G. Sensolini², M. Serio², S. Sironi¹, D. Sora¹, B. Tagaste¹, S. Toncelli¹, G. Venchi¹, V. Vercesi², B. Vischioni¹, S. Vitulli¹, C. Viviani¹

¹CNAO - ²INFN - ³Università di Trieste - ⁴Consorzio Nicola Cabibbo

Abstract

La Fondazione CNAO ha tra i suoi scopi anche lo svolgimento di attività di ricerca. Il centro CNAO è stato concepito sin dall'inizio con tre sale di trattamento, espandibili fino a cinque, ed una "sala sperimentale" nella quale le attività di ricerca possano venire svolte senza intralciare e senza essere intralciate dalla attività clinica.

Tale sala sperimentale deve essere progettata per essere "multi-uso", cioè tale da poter venire utilizzata per attività di ricerca nei campi più disparati e non specializzata in un tipo di attività particolare. Possibili argomenti di ricerca sono radiobiologia, sviluppo di monitor di fascio, sviluppo di dosimetri, studi di *radiation hardness* e molti altri ancora.

Lo studio di tale facility ed in particolare lo studio degli aspetti tecnici legati all'ampliamento del complesso dell'acceleratore è stato portato avanti congiuntamente da CNAO e INFN, nell'ambito dell'accordo quadro approvato nel 2009 e del nuovo accordo quadro stipulato nel 2013.

Per meglio identificare le necessità dei possibili utenti è stato svolto un sondaggio i cui risultati sono stati considerati nella definizione delle specifiche funzionali della linea e della sala sperimentale. Tale sondaggio è illustrato più avanti in questo documento.

In questo documento viene descritto il progetto della sala sperimentale e delle linee di alta e di bassa energie coinvolte. Nella prima parte del documento viene data una descrizione generale del progetto, mentre i dettagli sono generalmente riportati nelle appendici e nei documenti allegati.

INDICE

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Introduzione | 4 |
| 1.1 | Descrizione dell'impianto esistente | 4 |
| 2 | Specifiche funzionali | 7 |
| 2.1 | Specie ioniche e linee di fascio | 7 |
| 2.2 | Posizione di irraggiamento | 8 |
| 2.3 | Nozzle e intensità di fascio | 9 |
| 2.4 | Operazione parassita | 9 |
| 2.5 | Raccomandazioni | 10 |
| 3 | Ottica di fascio | 10 |
| 3.1 | Modellizzazione del fascio estratto | 10 |
| 3.2 | Ottica della linea sperimentale ad alta energia | 13 |
| 3.2.1 | Realizzazione di un chopper per la sala sperimentale | 15 |
| 3.2.2 | Correzione della traiettoria | 17 |
| 3.3 | Adattamento della LEBT per l'aggiunta della terza sorgente | 18 |
| 3.4 | Ottica della LEBT per protoni modificata | 19 |
| 3.5 | Ottica del nuovo ramo di LEBT | 20 |
| 4 | Progetto della terza sorgente | 21 |
| 5 | Magneti | 23 |
| 5.1 | Magneti per la HEBT | 23 |
| 5.2 | Magneti per la LEBT | 23 |
| 6 | Alimentatori dei magneti | 24 |
| 7 | Sistema di controllo | 26 |
| 7.1 | Architettura | 26 |
| 7.2 | Timing | 27 |
| 7.3 | Gestione automatica dei tempi morti | 28 |
| 8 | Sistema da vuoto | 28 |
| 8.1 | Tratto in sala sincrotrone | 28 |
| 8.2 | Tratto in sala sperimentale | 29 |
| 8.3 | Logica di funzionamento delle valvole di sezionamento e della valvola rapida | 30 |
| 9 | Diagnostica di fascio | 30 |
| 9.1 | Diagnostica per la HEBT XPR | 30 |
| 9.2 | Diagnostica per la terza sorgente | 31 |
| 9.3 | Diagnostica per un upgrade in corrente | 32 |
| 10 | Aspetti di radioprotezione | 33 |
| 11 | Adeguamento del SIS | 33 |
| 11.1 | Stato attuale | 33 |

| | | |
|--------|--|----|
| 11.2 | Ridondanza delle protezioni | 34 |
| 11.3 | Operatività del SIS XPR | 34 |
| 12 | Integrazione meccanica e allineamento | 35 |
| 12.1 | Supporteria e montaggio | 35 |
| 12.2 | Allineamento | 36 |
| 13 | Impianti | 37 |
| 13.1 | Impianto di raffreddamento | 37 |
| 13.1.1 | Raffreddamento magneti | 37 |
| 13.1.2 | Raffreddamento alimentatori | 38 |
| 13.2 | Impianti elettrici | 39 |
| 13.2.1 | Fase 1 – HEBT | 40 |
| 13.2.2 | Fase 2 – LEBT | 40 |
| 13.2.3 | Fase 3 – MEBT | 41 |
| 14 | Locali accessori | 42 |
| 15 | Stima dei costi | 42 |
| A. | XPR functional specification survey: collected answers | 46 |
| B. | Accordo quadro e accordi attuativi | 46 |
| C. | HEBT Optics | 46 |
| D. | LEBT Optics | 46 |
| E. | Source design | 46 |
| F. | Specifiche magneti | 46 |
| G. | Specifiche alimentatori | 46 |
| H. | Aspetti di Radioprotezione | 46 |
| I. | SIS per la sala sperimentale | 46 |
| J. | Integrazione meccanica e allineamento | 46 |
| K. | Impianti meccanici | 46 |
| L. | Impianti elettrici | 46 |

1 Introduzione

La Fondazione CNAO ha tra i suoi scopi anche lo svolgimento di attività di ricerca. Il centro CNAO è stato concepito sin dall'inizio con tre sale di trattamento, espandibili fino a cinque, ed una "sala sperimentale" nella quale le attività di ricerca possano venire svolte senza intralciare e senza essere intralciate dalla attività clinica.

Tale sala sperimentale deve essere progettata per essere "multi-uso", cioè tale da poter venire utilizzata per attività di ricerca nei campi più disparati e non specializzata in un tipo di attività particolare. Possibili argomenti di ricerca sono radiobiologia, sviluppo di monitor di fascio, sviluppo di dosimetri, studi di *radiation hardness* e molti altri ancora.

Lo studio di tale facility ed in particolare lo studio degli aspetti tecnici legati all'ampliamento del complesso dell'acceleratore è stato portato avanti congiuntamente da CNAO e INFN, nell'ambito dell'accordo quadro approvato nel 2009 e del nuovo accordo quadro stipulato nel 2013.

Per meglio identificare le necessità dei possibili utenti è stato svolto un sondaggio i cui risultati sono stati considerati nella definizione delle specifiche funzionali della linea e della sala sperimentale. Tale sondaggio è illustrato più avanti in questo documento.

In questo documento viene descritto il progetto della sala sperimentale e delle linee di alta e di bassa energie coinvolte. Nella prima parte del documento viene data una descrizione generale del progetto, mentre i dettagli sono generalmente riportati nelle appendici e nei documenti allegati.

1.1 Descrizione dell'impianto esistente

Il Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica (CNAO) di Pavia è un centro di eccellenza dedicato alla radioterapia con protoni e ioni carbonio. Il cuore del centro è un sincrotrone, di circa 25 m di diametro, in grado di accelerare ioni carbonio fino ad una energia massima di 400 MeV/u. L'acceleratore è in grado di catturare specie ioniche iniettate con una energia di 7 MeV/u e di accelerarle fino a raggiungere la rigidità magnetica massima di 6.35 T m. Nel caso dei protoni l'energia massima impiegata per i trattamenti è di 250 MeV e corrisponde ad una rigidità magnetica di 2.43 T m, ben al di sotto dei 6.35 T m di cui sopra.

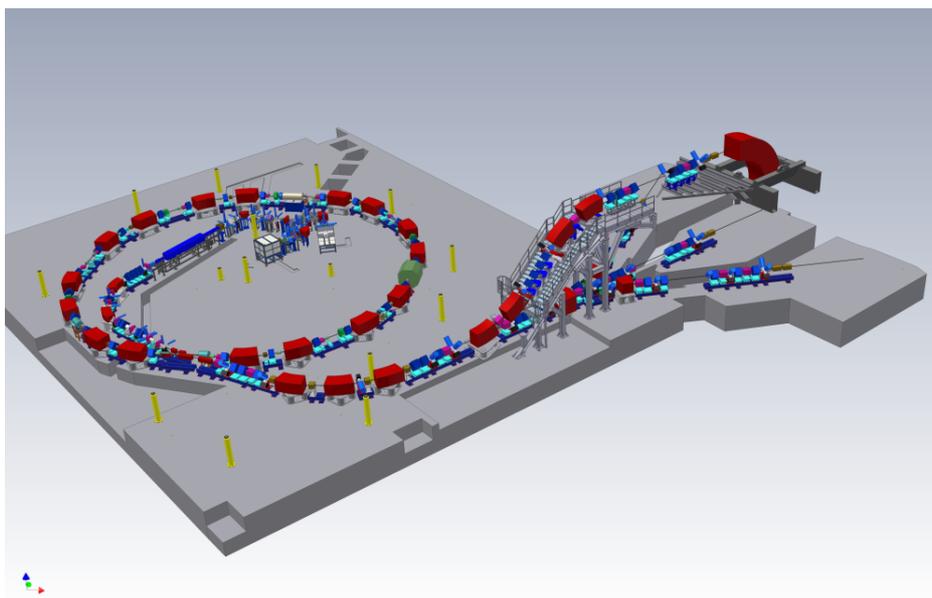


Fig. 1 L'acceleratore del CNAO è dotato di quattro linee di fascio in tre sale di trattamento.

Il sincrotrone del CNAO è una macchina flessibile ed in linea di principio è in grado di accelerare anche specie più pesanti del carbonio, sebbene il range risultante sia ridotto. Nel caso dell'ossigeno i 6.35 T m (400 MeV/u) corrispondono ad una profondità del picco di Bragg di 20 cm.

Il CNAO è dotato di tre sale di trattamento equipaggiate con una linea di fascio orizzontale. La sala centrale è dotata anche di una linea di fascio verticale. La Fig. 1 mostra il sincrotrone e le linee di trasporto.

La costruzione del Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica è iniziata nel 2005 e l'edificio è stato realizzato in maniera tale da poter essere allargato in futuro per accogliere fino a due nuove grandi sale di trattamento adatte a contenere delle testate isocentriche (gantry), ossia delle sezioni di linea in grado di ruotare intorno al paziente per permettere l'irraggiamento da tutte le direzioni. La Fig. 2 illustra l'edificio del CNAO nella fase attuale ed in una possibile futura fase di espansione del centro.

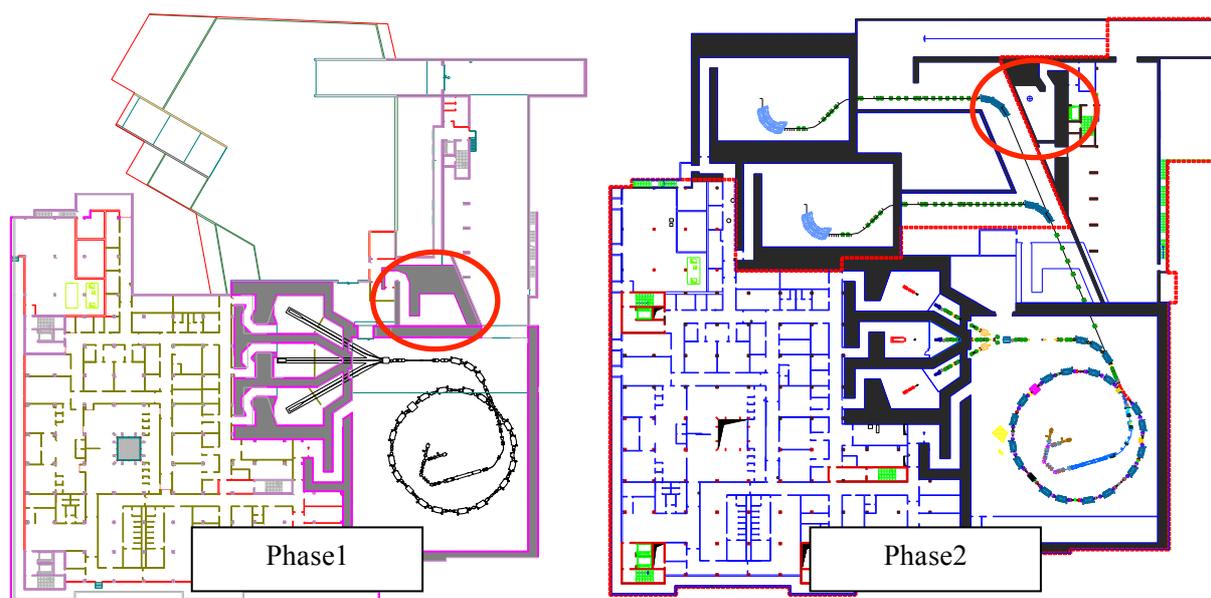


Fig. 2 Layout del CNAO nella “fase 1” e nella “fase 2”, come previsto durante la progettazione iniziale del centro. La sala sperimentale, evidenziata dai cerchi rossi, è prevista in entrambe le fasi.

La sala sperimentale è stata prevista sin dall'inizio ed è già stata costruita come illustrata nella “fase 1” di Fig. 2. La nuova linea sperimentale descritta in questo studio si diparte dalla linea esistente all'uscita del primo dipolo e passa dove passerà il primo tratto della linea di “fase 2”, come illustrato in Fig. 3.

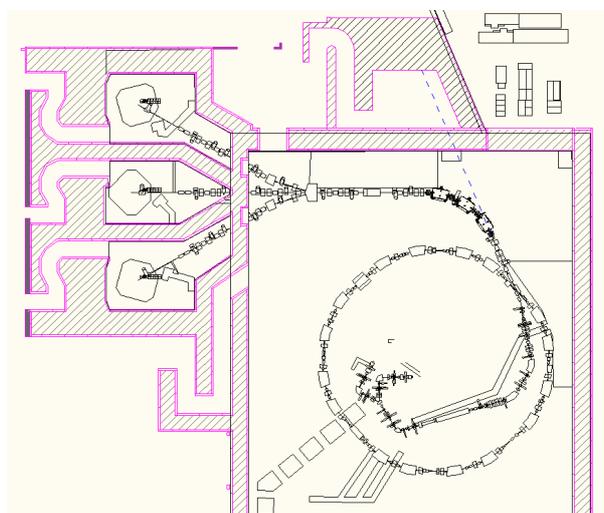


Fig. 3 La linea blu tratteggiata mostra il percorso della linea sperimentale.

Oltre ai vincoli dettati dalla geometria dell'edificio esistente, al fine di inquadrare correttamente l'impianto esistente, è utile descrivere le caratteristiche dei fasci disponibili e la modalità in cui essi vengono abitualmente utilizzati.

Il fascio del CNAO è estratto dal sincrotrone con una "estrazione lenta" di tipo risonante, che permette di distribuire le particelle accelerate su tempi dell'ordine del secondo. Tra la fine di uno *spill* e l'inizio del successivo, i magneti vengono portati fino al campo massimo, poi al campo minimo e infine riportati al valore corrispondente all'iniezione da cui inizia l'accelerazione del fascio successivo. Questo porta a una struttura temporale come quella illustrata in Fig. 4.

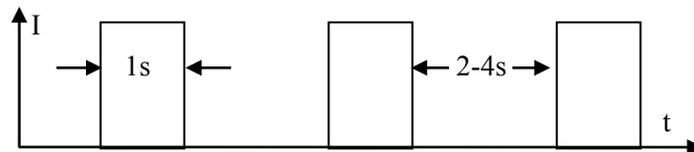


Fig. 4 Struttura temporale del fascio estratto dal sincrotrone del CNAO. Il fascio arriva in sala di trattamento per un secondo circa e tra uno spill ed il successivo vi è un intervallo di circa 3s.

Il fascio ha un diametro di qualche mm e per irraggiare tutto il bersaglio viene impiegata la tecnica della "scansione attiva". Per spiegare in cosa questa consista, si consideri il tumore all'interno di un paziente e lo si suddivida in "fette" iso-range. L'energia del fascio viene regolata in modo che il picco di Bragg si trovi in corrispondenza della prima fetta. Il fascio viene quindi deflesso da una coppia di magneti veloci (detti magneti di scansione) in modo da "pennellare" la fetta e stando in ciascun punto per il tempo necessario a depositare il numero di particelle previsto dal piano di cura, come illustrato in Fig. 5. Al termine dell'irraggiamento di una fetta, l'estrazione viene interrotta e al ciclo seguente il fascio viene accelerato alla energia corrispondente alla fetta successiva.

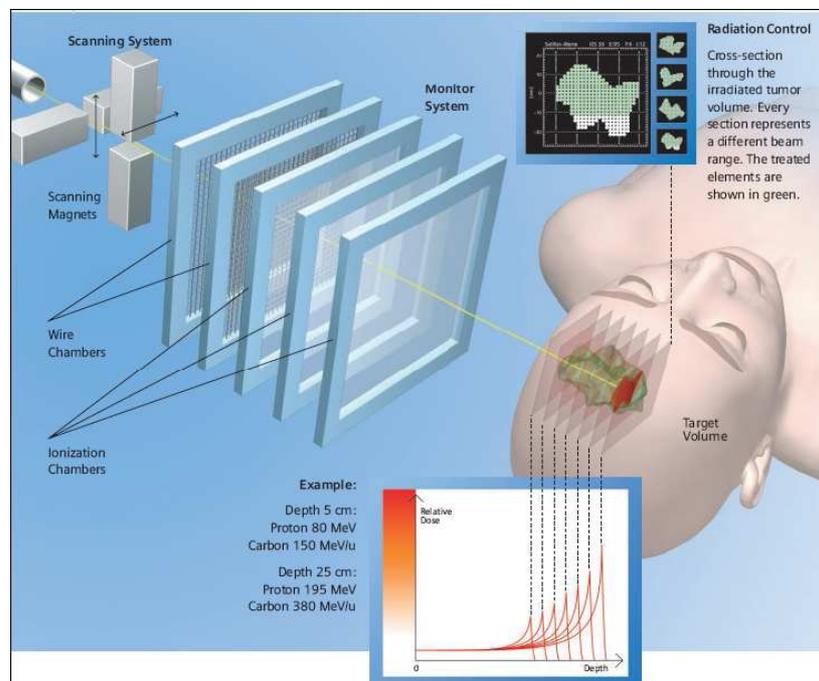


Fig. 5 Distribuzione della dose con un sistema a scansione attiva.

La dose depositata (o meglio l'integrale dell'intensità del fascio) viene misurata in tempo reale da una serie di monitor, generalmente chiamati *nozzle* in questo documento, che sono collegati e gestiscono direttamente i magneti di scansione.

2 Specifiche funzionali

Come anticipato, allo scopo di sfruttare al meglio la sala sperimentale è stato preparato e diffuso un questionario. Tale questionario spazia dall'argomento di ricerca all'ingombro del rivelatore, dall'intensità di fascio necessaria al tipo di particella desiderata e via di seguito. Al questionario è stata allegata una breve descrizione dei fasci disponibili al CNAO, per aiutare gli utenti nella compilazione. Questionario, descrizione dei fasci ed una sintesi delle risposte ricevute si trovano in appendice a questo documento [Appendice A].

Considerando sia le richieste interne che i risultati del sondaggio, sono quindi state definite le specifiche funzionali, ossia gli obiettivi che ci si prefigge di raggiungere nella progettazione e nella realizzazione della sala e delle linee di fascio. La progettazione e la futura realizzazione della sala e delle linee vengono portate avanti congiuntamente da CNAO e INFN, come concordato negli "accordi attuativi" [Appendice B], e per tale ragione la definizione delle specifiche funzionali è stata concordata tra i due enti. Riunioni della collaborazione sono state tenute regolarmente per discutere delle specifiche funzionali e seguire l'avanzamento dei lavori di progettazione.

Si è inoltre ritenuto opportuno suddividere il progetto in fasi realizzabili in maniera sequenziale e considerare passi successivi per la realizzazione della linea sperimentale in modo da potersi calibrare con le disponibilità di risorse.

Le richieste principali sono state quindi identificate a prescindere dalla immediata realizzabilità e compatibilità con le risorse previste e sono quindi state suddivise in classi di priorità.

2.1 Specie ioniche e linee di fascio

Il CNAO è ad oggi autorizzato a produrre fasci di protoni e di ioni carbonio e queste sono le specie ioniche più usate in adroterapia al momento della scrittura di questo documento. Ciononostante in letteratura è stata suggerita in varie occasioni la possibilità di utilizzare altre specie ioniche e a seconda del tipo di tessuti coinvolti di considerare anche la specie ionica come parametro nell'ottimizzazione del trattamento, e.g. [1, 2]. Per quanto riguarda le applicazioni cliniche, solitamente vengono considerati solo gli ioni leggeri. Altre specie, anche più pesanti, possono anche essere interessanti per le valutazioni relative alle dosi assorbite dagli astronauti.

Un altro aspetto di grande impatto da considerare nella progettazione della facility sperimentale è quello delle linee di fascio da realizzare. Considerazioni sulla disponibilità del fascio hanno spinto a indagare l'interesse degli utenti per una linea di "media" energia (MEBT), ossia una linea per fasci da 7 MeV/u.

Il risultato del sondaggio è che circa un terzo delle risposte manifesta interesse per tale facility, mentre naturalmente tutti coloro che hanno risposto sono interessati alla linea ad alta energia (HEBT).

L'interesse dimostrato per specie ioniche addizionali oltre a protoni e carbonio, richiede la realizzazione di una terza sorgente per la produzione di tali ioni e la realizzazione di un breve tratto di linea a bassa energia (LEBT) per collegare tale sorgente alle linee esistenti.

La linea più urgente da realizzare è stata ritenuta, naturalmente, la HEBT. In seconda battuta, quando sarà disponibile il budget necessario, si è stabilito di realizzare la terza sorgente con la sua LEBT mentre la MEBT è stata ritenuta non urgente e verrà eventualmente (ri)considerata in una fase successiva. Considerato il non trascurabile interesse della comunità per tale linea, si è comunque stabilito di lasciare libero lo spazio necessario ad una sua futura implementazione.

Bisogna poi tenere conto che tutte le valutazioni di radioprotezione in base a cui sono state richieste le attuali autorizzazioni sono basate sulle energie e sulle intensità nominali di protoni e ioni carbonio. Per le specie ioniche aggiuntive vanno quindi definiti i parametri su cui basare le nuove valutazioni.

In tale ottica, sono stati definiti due stadi; nel primo sono previsti gli ioni con le caratteristiche riportate in Tabella 1 mentre nel secondo stadio le caratteristiche sono quelle riportate in Tabella 2.

Tabella 1 Specie ioniche, massima intensità e massima energia previste in sala sperimentale nel primo stadio

| | H | He | Li | C | O |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Z | 1 | 2 | 3 | 6 | 8 |
| I (p/s) | 1.00E+10 | 2.50E+09 | 1.11E+09 | 2.78E+08 | 1.56E+08 |
| K (MeV/u) | 250 | 261.4 | 253 | 400 | 400 |

Tabella 2 Specie ioniche, massima intensità e massima energia previste in sala sperimentale nel secondo stadio

| | H | He | Li | Be | B | C | N | O |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Z | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| I (p/s) | 1.00E+10 | 2.50E+09 | 1.11E+09 | 6.25E+08 | 4.00E+08 | 2.78E+08 | 2.04E+08 | 1.56E+08 |
| K (MeV/u) | 330 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 |

Riassumendo, per quanto riguarda la priorità di realizzazione, comprendendo in questa anche le necessarie pratiche autorizzative, l'ordine da seguire è:

1. Linea HEBT, con i fasci di p e C già autorizzati (fase 1);
2. Terza sorgente con relativa LEBT e linea HEBT con i fasci di Tabella 1 (fase 2);
3. Terza sorgente con relativa LEBT e linea HEBT con i fasci di Tabella 2 (fase 2);
4. Linea MEBT (fase 3);

2.2 Posizione di irraggiamento

Uno degli aspetti considerati è quello del punto in cui effettuare l'irraggiamento del bersaglio; tale punto verrà (impropriamente) chiamato isocentro in questo documento. I vincoli imposti dalla geometria della sala esistente, suggeriscono un compromesso tra le dimensioni del campo irraggiato da un lato, dimensioni che sono tanto maggiori quanto maggiore è la distanza tra l'isocentro e i magneti di scansione, e lo spazio dietro al bersaglio dall'altro. In quanto segue i termini "avanzato" o "arretrato" vanno intesi come "a valle" e "a monte" ("upstream" e "downstream"), nella direzione del fascio.

In base al sondaggio solo il 7% dei possibili utenti necessita di un campo di scansione di 200 mm × 200 mm, mentre per il 93% un campo di 135 mm × 135 mm è sufficiente e la posizione corrispondente si trova a circa due metri dal muro, lasciando quindi agio per l'installazione di bersaglio e strumentazione. Fig. 6 mostra la posizione in cui si viene a trovare l'isocentro nei due casi in questione. La posizione più arretrata delle due, è stata scelta come "isocentro nominale".

Considerato che si intende realizzare la sala sperimentale in modo da essere adattabile alle esigenze degli utilizzatori e che tra i possibili utenti vi è anche chi, pur non necessitando di un fascio "attivo" ha invece bisogno di massimizzare lo spazio disponibile a valle del bersaglio per installare strumentazione lontano da esso, nelle specifiche funzionali si è previsto di costruire il terminale della linea composto da sezioni di camera a vuoto facilmente smontabili e componibili in modo da poter spostare il punto di irraggiamento in varie posizioni lungo la direzione del fascio.

In Fig. 6 è rappresentata anche la terza opzione utilizzabile qualora sia richiesto un fascio fisso e serva una grande distanza dietro al bersaglio.

Come si vedrà in seguito, durante la fase di progettazione è stato aggiunto anche un quarto punto, a monte dei magneti di scansione per i casi più estremi.

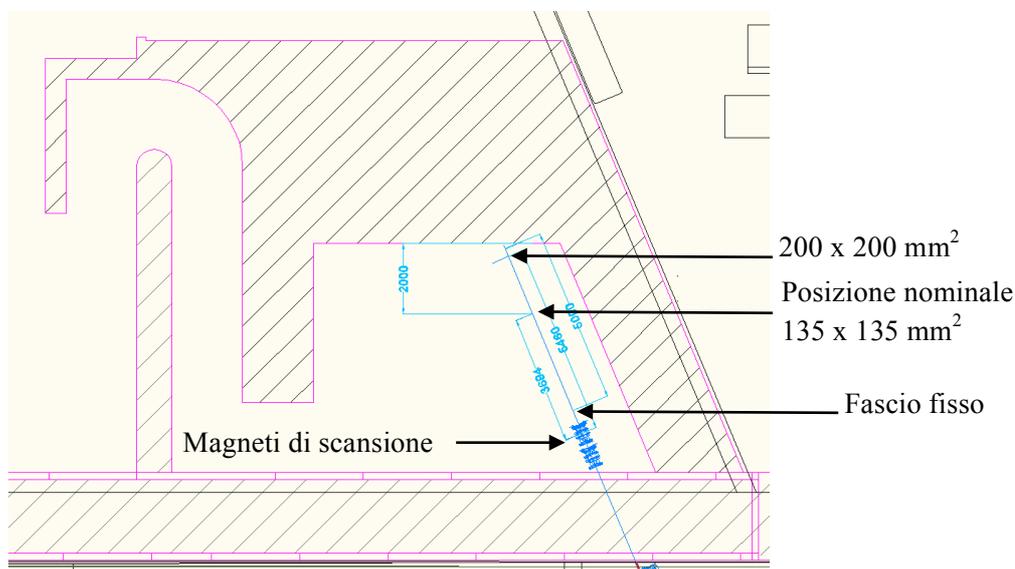


Fig. 6 Posizione dell'isocentro per i campi 200x200 mm² e 135x135 mm² e posizione dell'isocentro per fascio fisso.

Come anticipato nel paragrafo 2.1, lo spazio sulla sinistra della linea (la zona centrale della sala) verrà lasciato libero da installazioni fisse per accogliere eventualmente in futuro la linea a 7 MeV/u.

2.3 Nozzle e intensità di fascio

Il sistema di distribuzione della dose in uso al CNAO è in grado di controllare fasci nell'intervallo di intensità per cui è stato concepito (p 10^8 - 10^{10} /spill e C 10^6 - 10^8 /spill). Molti utenti hanno richiesto fasci meno intensi, in certi casi anche di diversi ordini di grandezza. Un nozzle per basse intensità è quindi desiderabile.

Analogamente al comportamento adottato nel caso delle linee di fascio e delle specie ioniche addizionali, anche nel caso del nozzle si è deciso di procedere "per priorità". Considerato che comunque la maggior parte degli utenti è soddisfatta da fasci clinici, si è deciso di installare dapprima un nozzle convenzionale, uguale a quelli in uso nelle sale di trattamento, in modo da avere dei tempi e dei costi certi.

Per gli esperimenti che richiedono un fascio fisso a basse intensità si prevede di procedere al setup della linea con intensità all'interno del range di funzionamento convenzionale e quindi di ridurre l'intensità assumendo che le impostazioni rimangano valide. In molti casi l'esperimento stesso potrebbe essere in grado di confermare tale assunzione.

Si raccomanda comunque di prevedere uno sviluppo nella direzione di un nozzle a bassa intensità, in una fase successiva, quando le risorse lo permetteranno.

2.4 Operazione parassita

Il sincrotrone è generalmente impiegato per il trattamento dei pazienti e le attività ad esso connesse, ad esempio la misura di verifica preliminare dei piani di trattamento o le attività quotidiane di assicurazione di qualità. Il fascio è quindi disponibile in via esclusiva per le attività sperimentali solo in turni dedicati.

Può tuttavia accadere che, per varie ragioni, l'acceleratore sia fermo in attesa che il paziente sia pronto al trattamento. Durante questi intervalli il fascio potrebbe essere passato alla sala sperimentale. Non appena il fascio viene richiesto in una sala di trattamento, esso deve essere immediatamente arrestato e rimesso a disposizione delle sale di trattamento anche se l'irraggiamento in sala sperimentale non è terminato.

Alla prima occasione in cui la macchina è nuovamente libera, il fascio verrà rimandato in sala sperimentale e l'irraggiamento riprenderà dove si era interrotto.

Il sistema di controllo ed il sistema di sicurezza radiologica (SIS; Safety Interlock System) dovranno poter gestire questa modalità parassita/automatica di operazione in sala sperimentale.

2.5 Raccomandazioni

Oltre alle richieste illustrate nei paragrafi precedenti, tramite il questionario sono emerse una serie di necessità degli utilizzatori. Non tutti i desideri potranno essere soddisfatti, ma come illustrato in precedenza le richieste principali vengono qui riportate per essere soddisfatte quando vi saranno le risorse necessarie.

- Un laboratorio di biologia, autorizzato a trattare campioni irraggiati, dotato di cappe a flusso laminare, incubatore a CO₂, microscopio, centrifuga, frigorifero
- Una sala vicino alla sala sperimentale in cui effettuare (pre)montaggio e smontaggio delle apparecchiature sperimentali
- Una sala accanto alla sala sperimentale da utilizzare come deposito temporaneo del materiale degli utenti esterni
- Un deposito in cui conservare i materiali irraggiati in attesa che essi possano uscire dal CNAO
- Accesso a un'officina e a un laboratorio di elettronica

3 Ottica di fascio

3.1 Modellizzazione del fascio estratto

Come menzionato nel paragrafo 1.1, l'estrazione del fascio dal sincrotrone del CNAO è del tipo "risonante a terzo di intero". In questo tipo di estrazione il fascio circolante viene portato vicino (in *tune*, Q_x) a una risonanza e quindi spinto verso di essa lentamente, in modo da rendere instabile e quindi estrarre una piccola frazione delle particelle circolanti ad ogni giro.

Il meccanismo di avvicinamento alla risonanza può essere vario, dalla variazione della forza di uno o più quadrupoli alla diffusione stocastica del fascio nello spazio delle fasi longitudinale o trasversale. Nel sincrotrone del CNAO questa operazione avviene accelerando lentamente per induzione il fascio tramite un "betatron core".

Nel caso del CNAO la risonanza è eccitata da un sestupolo dedicato posizionato in una sezione a dispersione nulla per non influenzare contemporaneamente la cromaticità della macchina. La presenza del sestupolo suddivide lo spazio delle fasi orizzontale (x, x') in una regione stabile di forma triangolare ed una regione instabile intorno ad essa, come mostrato in Fig. 7.

Le particelle che si trovano nella regione instabile si muovono lungo tre separatrici aumentando l'ampiezza di oscillazione giro dopo giro sino a raggiungere il setto elettrostatico che le deflette inviandole verso la linea di estrazione.

Nello spazio delle fasi orizzontale, il fascio è quindi costituito dal tratto di separatrice tagliato dal setto elettrostatico, distribuzione detta "barra di carica", ed ha emittanza molto piccola.

Nello spazio delle fasi verticale (y, y') il fascio ha invece circa la medesima distribuzione del fascio circolante, con una distribuzione a campana.

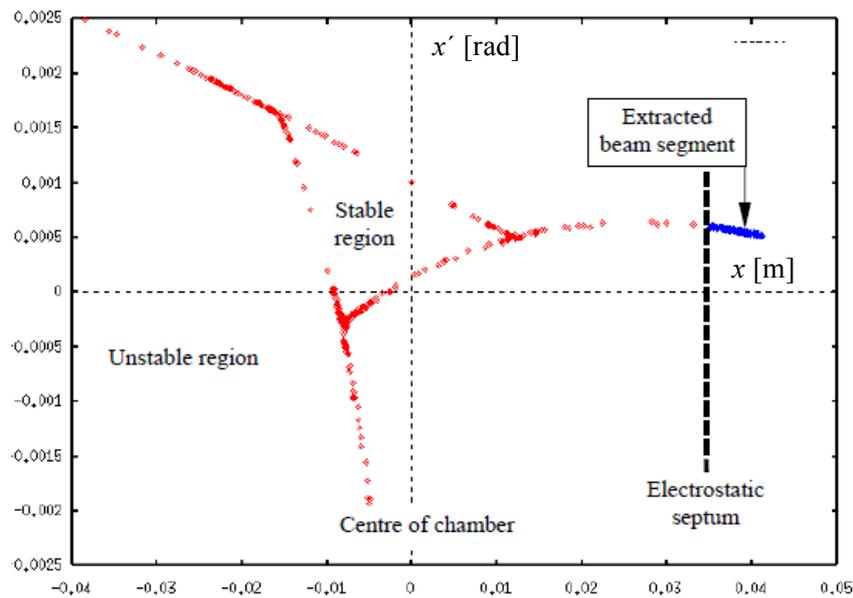


Fig. 7 Lo spazio delle fasi (x, x') è suddiviso in una regione stabile di forma triangolare ed una regione instabile intorno ad essa. In figura sono visibili in rosso le separatrici, la posizione del setto elettrostatico di estrazione e la porzione di fascio estratto.

La dimensione della regione stabile dipende dalla differenza tra il tune della particella e la risonanza. Considerando la relazione tra Q_x , $\Delta p/p$ e dimensioni della regione stabile, si può verificare come diverse ampiezze e diversi valori di $\Delta p/p$ partecipino contemporaneamente alla distribuzione del fascio estratto.

La distribuzione del fascio nello spazio delle fasi orizzontale è quindi data in realtà dalla sovrapposizione delle varie separatrici.

Nel sincrotrone del CNAO è stata realizzata la “condizione di Hardt” che sovrappone le separatrici al setto elettrostatico per minimizzare le perdite.

L’ottica delle linee di estrazione del CNAO è stata progettata usando una variante dell’approccio utilizzato nel PIMMS [3]. In tale approccio, le funzioni ottiche descrivono una ellisse praticamente vuota in cui la barra di carica giace su un diametro, come illustrato in Fig. 8. La dimensione orizzontale del fascio non può quindi essere più descritta semplicemente dalle dimensioni dell’ellisse, ma è necessario tenere conto dell’orientamento della barra di carica e quindi dell’avanzamento in fase. Le dimensioni dell’ellisse rimangono una quantità interessante in quanto rappresentano comunque la dimensione massima che il fascio può avere.

Mentre l’approccio proposto nel PIMMS prevede di realizzare le linee con moduli telescopici e con funzioni separate, al CNAO si è scelto di privilegiare una soluzione compatta in cui le dimensioni del fascio vengono controllate da un unico modulo.

Analizzando la distribuzione del fascio estratto più in dettaglio, si nota come le barre di carica relative a valori diversi di $\Delta p/p$ siano diverse: in Fig. 8 la barra rossa, corrispondente a $\Delta p/p = -0.001$, è più corta della barra blu che rappresenta le particelle con $\Delta p/p = 0.0$. Dalla distanza tra i centri delle distribuzioni relative a valori diversi di $\Delta p/p$ si possono definire il valore della funzione ottica “dispersione” e della sua derivata (D_x, D_x').

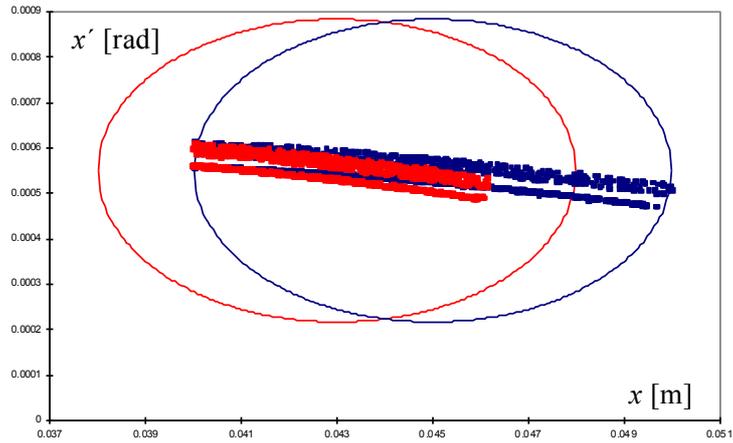


Fig. 8 Nell'approccio a "ellisse vuota" la barra di carica giace su un diametro e la dimensione del fascio dipende anche dall'orientamento della distribuzione all'interno dell'ellisse e quindi dall'avanzamento in fase.

Nel PIMMS e nelle linee di estrazione del CNAO il valore iniziale della dispersione così calcolata è stato considerato per ottenere un valore nullo di (D_x, D_x') all'isocentro. Questo significa che all'isocentro le barre di carica relative a valori diversi di $\Delta p/p$ sono centrate l'una sull'altra.

Nel caso della linea sperimentale, si è fatta una scelta diversa. Poiché in tale linea non vi sono dipoli, l'invariante di dispersione

$$\gamma_x \cdot D_x^2 + 2\alpha_x \cdot D_x D_x' + \beta_x \cdot D_x'^2 \quad 3-1$$

ha un valore diverso da zero e non è possibile azzerarlo. È possibile teoricamente ottenere $D_x = 0$ o $D_x' = 0$ ma non entrambi contemporaneamente. Poiché lo spread in quantità di moto del fascio estratto è dell'ordine di 0.1% e la corrispondente variazione di range è dell'ordine di 0.05 g/cm², la correlazione tra posizione e range può essere considerata trascurabile rispetto alla larghezza del picco di Bragg che viene eventualmente aumentata artificialmente con opportuni ripple filter.

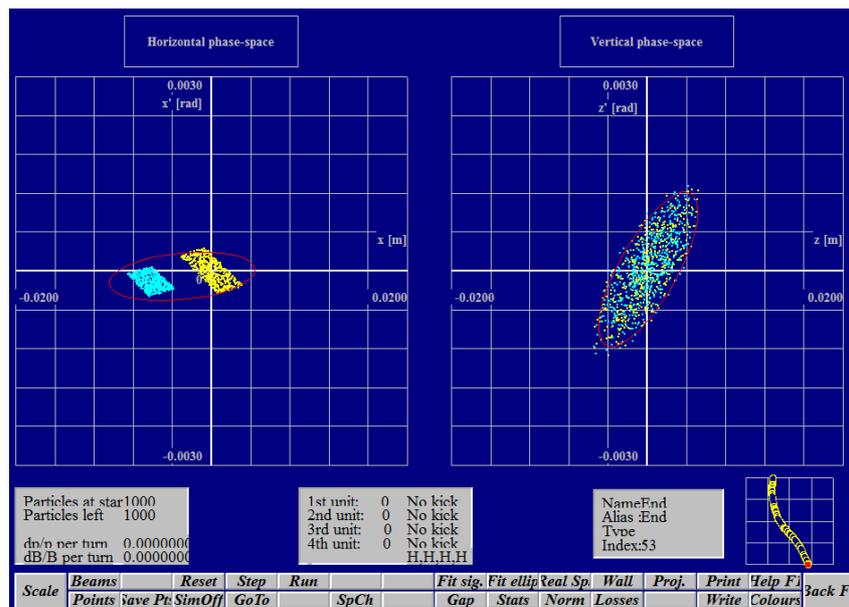


Fig. 9 Le barre di carica relative a $\Delta p/p = -0.001$ e a $\Delta p/p = 0.0$ sono separate di (D_x, D_x') $\Delta p/p$. L'area occupata dalle particelle nello spazio delle fasi può essere considerata alla stregua di emittanza se nella linea non vi sono dipoli che cambino l'invariante di dispersione.

Trascurando tale correlazione e ricordando l'assenza di dipoli nella linea, si può considerare l'allargamento del fascio dovuto alla dispersione come se fosse dovuto ad una emittanza maggiore.

In Fig. 9 sono riportate le barre di carica per $\Delta p/p = -0.001$ e $\Delta p/p = 0.0$ all'ingresso del primo quadrupolo della HEBT. L'area nello spazio delle fasi è in questo caso dello stesso ordine di grandezza dell'emittanza nel piano verticale ed una descrizione del fascio con una ellisse che racchiuda tutte le particelle indipendentemente da $\Delta p/p$ appare ragionevole.

Sulla base di questo approccio, la linea HEBT per la sala sperimentale è stata progettata usando come condizioni iniziali le misure del fascio del CNAO eseguite all'ingresso del primo quadrupolo della HEBT. In quanto segue la linea inizia subito dopo i setti magnetici, poco più di un metro a monte del quadrupolo di cui sopra. Questo arretramento del punto iniziale permette di usare nella correzione della traiettoria anche il primo correttore (H2-007A-CEB) ed il primo monitor di profilo che si trovano a monte del quadrupolo.

3.2 Ottica della linea sperimentale ad alta energia

La linea sperimentale ad alta energia (HEBT XPR) si separa dalla linea che conduce alle sale di trattamento in corrispondenza del dipolo di scambio H3-003A-SW2. Quest'ultimo è dotato di una camera a vuoto che si biforca in modo da gestire sia il fascio mandato nelle sale di trattamento, a dipolo acceso, che quello inviato in sala sperimentale, a magnete spento.

Il tratto di linea compreso tra il correttore H2-007A-CEB e H3-003A-SW2 è in comune con la linea che porta il fascio alle sale di trattamento e non sarà modificato.

Fig. 10 mostra una immagine in pianta della HEBT XPR; una descrizione degli elementi della linea è riportata in Tabella 3.

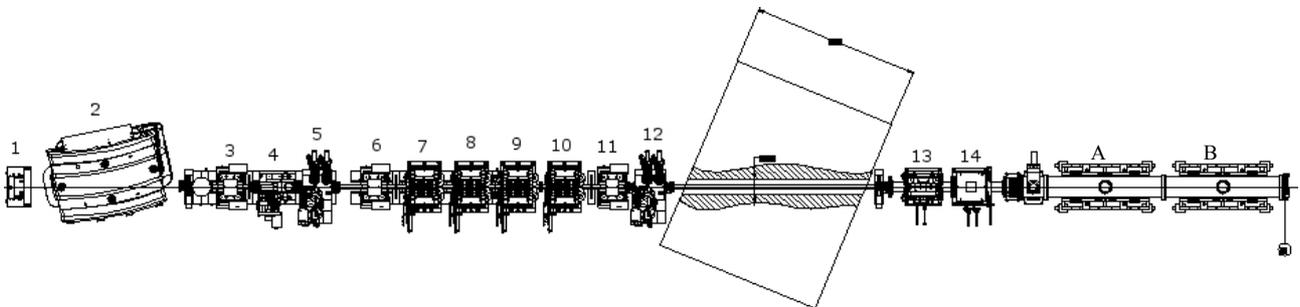


Fig. 10 Vista dall'alto della linea sperimentale.

Tabella 3 Corrispondenza tra numerazione degli elementi in Fig. 10, nomenclatura convenzionale adottata a CNAO e descrizione dell'elemento.

| | | | | | | | | |
|---|-------------|----------------------|----|-------------|------------|-----|---------------------------|-----------------|
| 1 | H3-001A-CHD | chopper | 6 | HE-015A-CEB | correttore | 11 | HE-027A-CEB | correttore |
| 2 | H3-003A-SW2 | drift | 7 | HE-018A-QUE | quadrupole | 12 | HE-030B-SFH | monitor |
| 3 | HE-007A-CEB | correttore | 8 | HE-020A-QUE | quadrupole | 13 | HE-036A-SCA | scanning magnet |
| 4 | HE-010B-QPM | QPM/QIM ¹ | 9 | HE-023A-QUE | quadrupole | 14 | HE-038A-SCA | scanning magnet |
| 5 | HE-012B-SFH | monitor | 10 | HE-025A-QUE | quadrupole | A-B | Camere a vuoto rimovibili | |

¹ QPM e QIM sono gli acronimi di Qualification Profile Monitor e Qualification Intensity Monitor-

I monitor di profilo sono qui indicati come SFH (*Scintillating Fiber Harps*), il tipo di monitor attualmente in uso nella HEBT del CNAO.

Lo studio del trasporto del fascio alla sala sperimentale è stato condotto cercando di riprodurre una situazione realistica e mantenendo discreti margini di sicurezza allo stesso tempo. Per questo motivo, le simulazioni dell'ottica di fascio sono state fatte considerando, come parametri di Twiss iniziali (α , β , γ), quelli ottenuti in campagne di misura sulla linea HEBT del CNAO, mentre, per le emittanze, sono stati presi dei valori conservativi ($\epsilon_x = 5 \pi \text{ mm mrad}$ e $\epsilon_y = 3.34 \pi \text{ mm mrad}$ per fasci di alta energia; $\epsilon_x = 7 \pi \text{ mm mrad}$ e $\epsilon_y = 7 \pi \text{ mm mrad}$ per fasci di bassa energia).

Come illustrato al paragrafo 2.2 sono quattro le posizioni di irraggiamento, o isocentri, previste in sala sperimentale. Una di queste vuole soddisfare l'esigenza, emersa dal questionario, di avere cinque metri di spazio dopo l'isocentro (soluzione 1 in Fig. 11). Pertanto, i magneti di scansione, così come il sistema di distribuzione di dose (nozzle), verranno montati su speciali supporti su rotaia per essere facilmente removibili, garantendo in questo modo la massima distanza possibile tra bersaglio e strumentazione di misura.

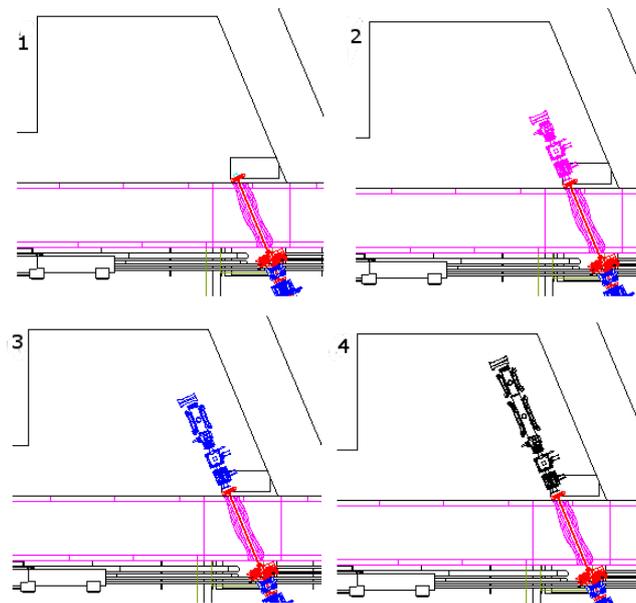


Fig. 11 Configurazioni della HEBT per le quattro posizioni di irraggiamento (isocentri) previste in sala sperimentale.

La configurazione 2 prevede la presenza del nozzle e garantisce un discreto spazio alle spalle del punto di irraggiamento. La soluzione 3 è quella “nominale”: il campione da irraggiare è collocato a circa 2 m dal muro posteriore della sala ed il campo massimo irraggiabile ha una superficie di $135 \times 135 \text{ mm}^2$. La soluzione 4 rende possibile un campo massimo di $200 \times 200 \text{ mm}^2$ la dimensione disponibile nelle sale di trattamento, ma in questo caso lo spazio disponibile intorno al bersaglio da irraggiare è limitato, con solo 370 mm di distanza dal muro.

La dimensione del fascio all'isocentro può essere scelta tra “piccola” e “grande” che corrispondono ai valori di *Full Width at Half Maximum*, FWHM, di 4 mm e 10 mm rispettivamente.

La Fig. 12 illustra i valori delle funzioni β lungo la linea sperimentale per le quattro configurazioni considerate e per dimensione di fascio grande all'isocentro con emittanza minima e dimensione di fascio piccola con emittanza massima. La prima parte di linea riportata in figura appartiene alla sezione comune della HEBT ed il primo elemento del tratto di nuova realizzazione, il correttore HE-007A-CEB, si trova a circa otto metri dall'inizio della linea.

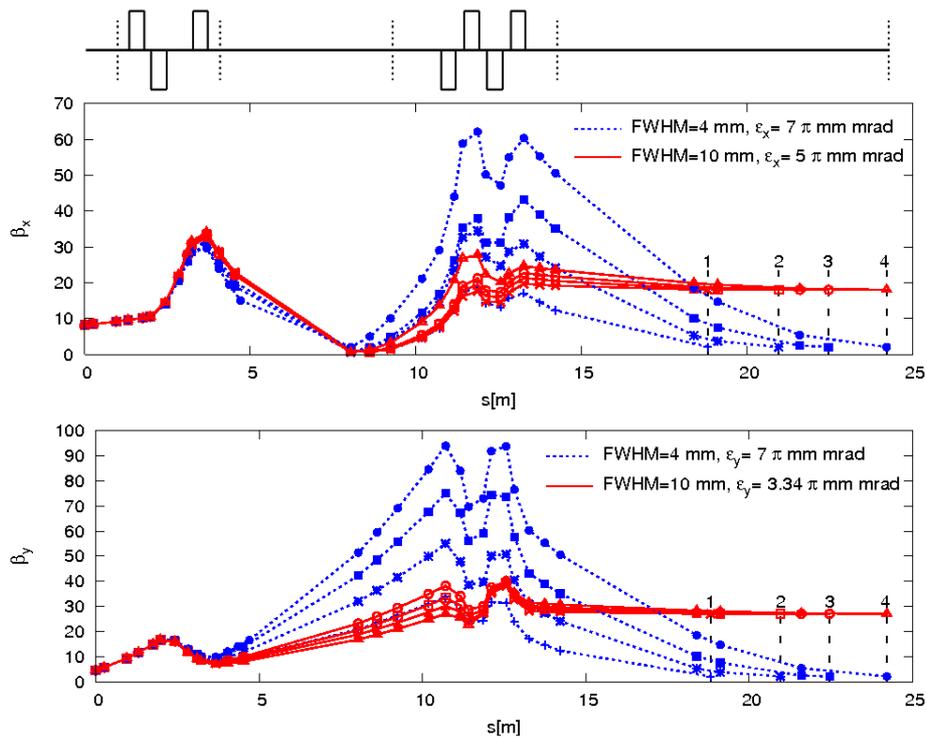


Fig. 12 Valori delle funzioni β per le quattro posizioni di irraggiamento e per le due dimensioni di fascio all'isocentro.

Dalla Fig. 12 si nota come i valori delle funzioni β in corrispondenza dei quadrupoli della linea sperimentale dipendano dalla dimensione del fascio all'isocentro e dalla posizione dell'isocentro in sala. Per questa ragione in questa sezione sono riportate le simulazioni relative all'isocentro più lontano, che è il caso più difficile. I risultati per gli altri casi e tutti i dettagli sono riportati nell'appendice C.

3.2.1 Realizzazione di un chopper per la sala sperimentale

Quando due spot (due posizioni del fascio) consecutivi non sono adiacenti, può essere necessario interrompere l'erogazione del fascio durante lo spostamento da una posizione all'altra per evitare di depositare dose lungo il percorso; inoltre alla fine della "fetta" il fascio deve venire arrestato rapidamente per evitare sovradosaggi. Questa funzionalità di interruzione e ripresa rapida del fascio è svolta dal "chopper" HEBT, un insieme di quattro magneti alimentati in serie secondo uno schema "+1, -1, -1, +1" che quando sono accesi permettono al fascio di evitare un ostacolo e quando sono spenti inviano il fascio sull'assorbitore (dump), come illustrato in Fig. 13. Il chopper è un sistema rapido, in grado di accendere e spegnere il fascio in meno di 200 μ s.

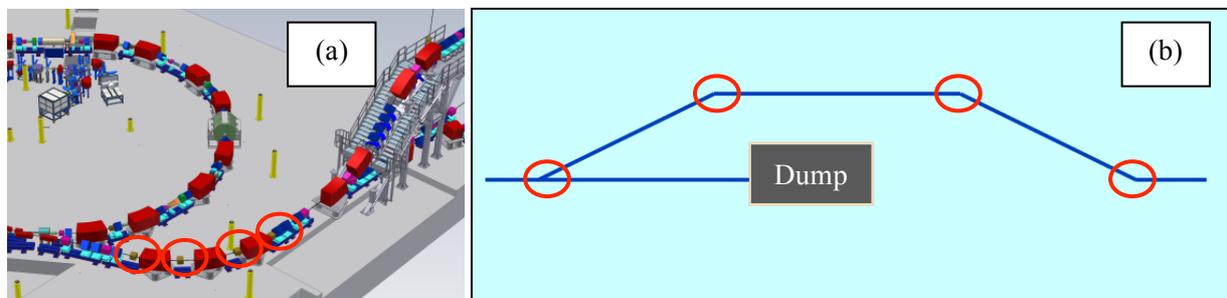


Fig. 13 Il chopper della HEBT è costituito da quattro magneti alimentati secondo lo schema "+1, -1, -1, +1" e permette di accendere e spegnere il fascio in meno di 200 μ s. I magneti del chopper, evidenziati dai cerchietti rossi, sono rappresentati come cubetti gialli nel pannello (a) della figura.

Il sistema illustrato in Fig. 13, ha inoltre il vantaggio di mantenere il fascio sul bersaglio anche durante la fase di spegnimento e accensione.

Per una distribuzione accurata della dose, un sistema analogo è necessario anche lungo la linea sperimentale.

In considerazione della limitata disponibilità di spazio e di risorse si è deciso di non prevedere un nuovo chopper dedicato e si è preferito sfruttare l'unico magnete del chopper già esistente attraversato dal fascio diretto in sala sperimentale, H3-001A-CHD.

La soluzione individuata consiste nel creare un "bump", ossia una distorsione locale, nella traiettoria che comprenda il magnete H3-001A-CHD. La distorsione dell'orbita viene lanciata dal correttore H2-019A-CEB, l'orbita viene quindi reindirizzata verso il centro della camera a vuoto da H3-001A-CHD e infine il bump è chiuso dal correttore HE-007A-CEB. In questo caso il dump non si trova in mezzo al bump, come in Fig. 13 bensì a valle di HE-007A-CEB. Con riferimento a Fig. 10, il dump si trova nel medesimo tank che contiene QIM e QPM, subito dopo essi. Il funzionamento è illustrato schematicamente in Fig. 14.

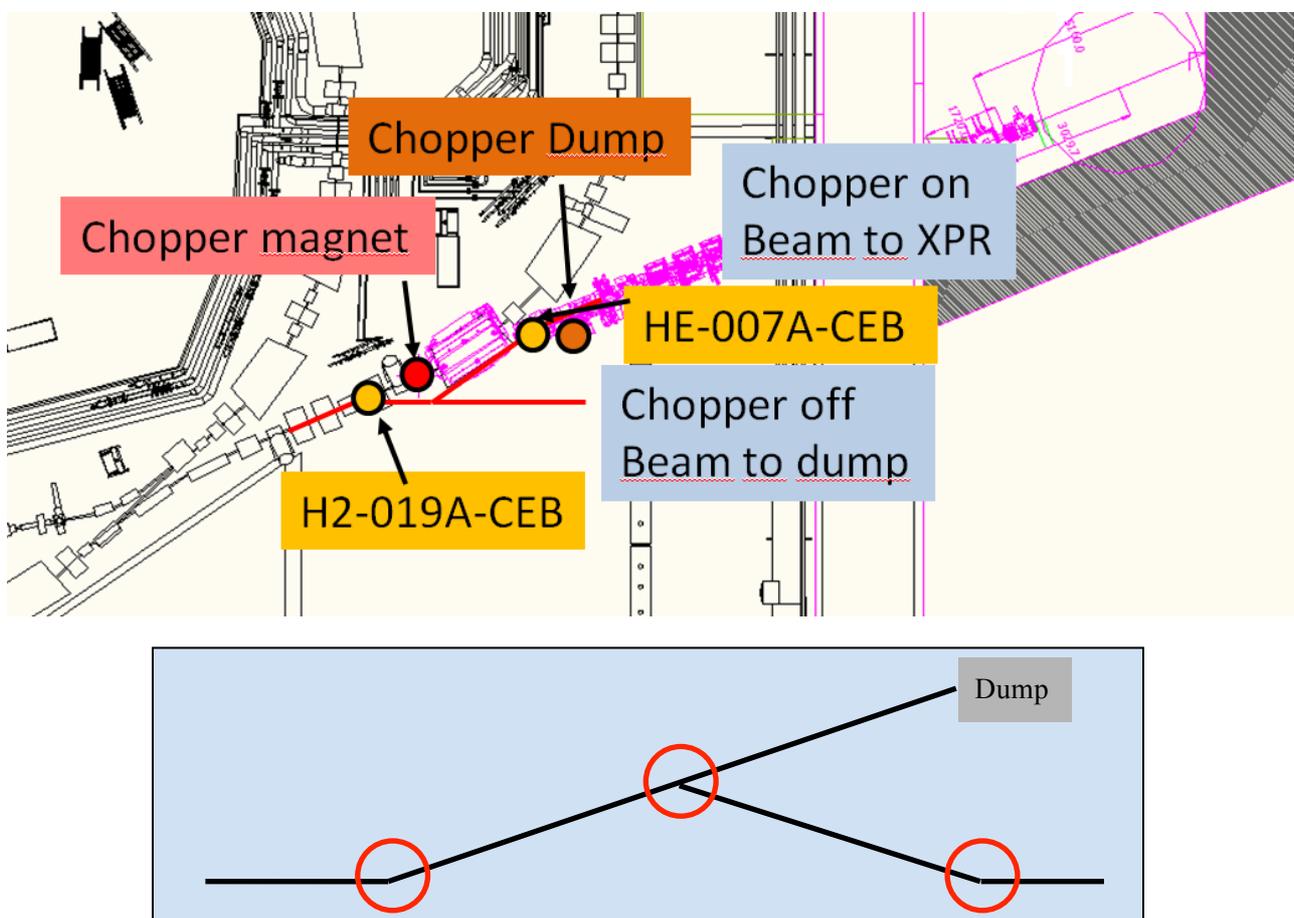


Fig. 14 Il chopper della XPR è costituito da due correttori e dal solo magnete del chopper HEBT attraversato. Il dump del chopper è rappresentato fuori dall'asse della camera a vuoto per indicare che il centro della camera a vuoto è riservato al passaggio del fascio diretto in XPR. Il pannello inferiore, è analogo al pannello b) di Fig. 13

Quando il chopper è acceso, il bump è chiuso e il fascio arriva in sala sperimentale, quando il chopper viene spento il fascio deflesso da H2-019A-CEB si allontana sempre più dal centro della camera a vuoto sino a raggiungere la posizione del dump. Al passaggio attraverso HE-007A-CEB, il fascio riceve una ulteriore deflessione che, per quanto la breve distanza la renda poco efficace, contribuisce ad allontanare il fascio dal centro della camera inviandolo sul dump.

Realizzando il chopper XPR in questo modo si ha anche il vantaggio che non solo si riutilizza l'hardware già esistente, ma anche la logica di funzionamento non viene modificata. I sistemi di distribuzione della dose ed i sistemi di interlock che del chopper fanno uso, continuano ad interagire con esso sempre nello stesso modo, senza necessità di distinguere quale sia la sala in uso.

Poiché il magnete e l'alimentatore sono gli stessi già in uso, anche le performance sono ovviamente le stesse ed il tempo di intervento resta di 200 μ s.

3.2.2 Correzione della traiettoria

La procedura di correzione della traiettoria, è articolata in passi successivi:

- Nel piano orizzontale:
 - La traiettoria nel piano orizzontale viene corretta utilizzando i correttori H2-019A-CEB e HE-007A-CEB ed i monitor H2-025B-SFH e HE-012B-SFH. Si noti che il correttore HE-007A-CEB si trova tra i due SFH e che tra i due strumenti di misura non vi sono altri elementi ottici (il dipolo è spento). Questo permette (e richiede) di effettuare la correzione “cum grano salis” e non usando un minimizzatore che imporrebbe il passaggio per lo zero ai due monitor anziché imporre $(x, x') = (0, 0)$ al secondo monitor.
 - Il bump del chopper viene sommato (tenendo conto dell'orbita residua dal passo precedente) alla correzione ottenuta.
 - La distorsione della traiettoria generata a valle di HE-007A-CEB, viene corretta utilizzando i magneti HE-015A-CEB e HE-027A-CEB ed il monitor HE-030B-SFH più un monitor mobile messo alla bisogna all'isocentro (HE-046A-MOB).
- Nel piano verticale:
 - una prima correzione della traiettoria in H2 con H2-007A-CEB e H2-019A-CEB ed i monitor H2-025B-SFH e HE-012B-SFH; in questo caso i monitor si trovano entrambi dopo i due correttori.
 - La correzione della traiettoria a valle di HE-007A-CEB viene eseguita, come nel piano orizzontale, utilizzando i magneti HE-015A-CEB e HE-027A-CEB ed il monitor HE-030B-SFH più il monitor mobile messo all'isocentro (HE-046A-MOB).

Seguendo tale schema, la distorsione dell'orbita dopo la correzione risulta dell'ordine di 5 mm.

In Fig. 15 è riportato l'involuppo del fascio nella parte iniziale della linea per un set rappresentativo di condizioni iniziali del fascio estratto dal sincrotrone. La figura mostra che il fascio all'altezza del dump è sufficientemente più piccolo della deflessione inferta quando il chopper è spento da ottenere una chiara separazione tra fascio trasmesso e fascio distrutto sull'assorbitore.

Lo schema di correzione proposto riduce fortemente il margine necessario in tale posizione mentre nella zona a monte di essa lo spazio disponibile nella camera a vuoto è ampiamente sufficiente ad accogliere il fascio con il margine addizionale richiesto dal fascio di traiettorie rappresentato.

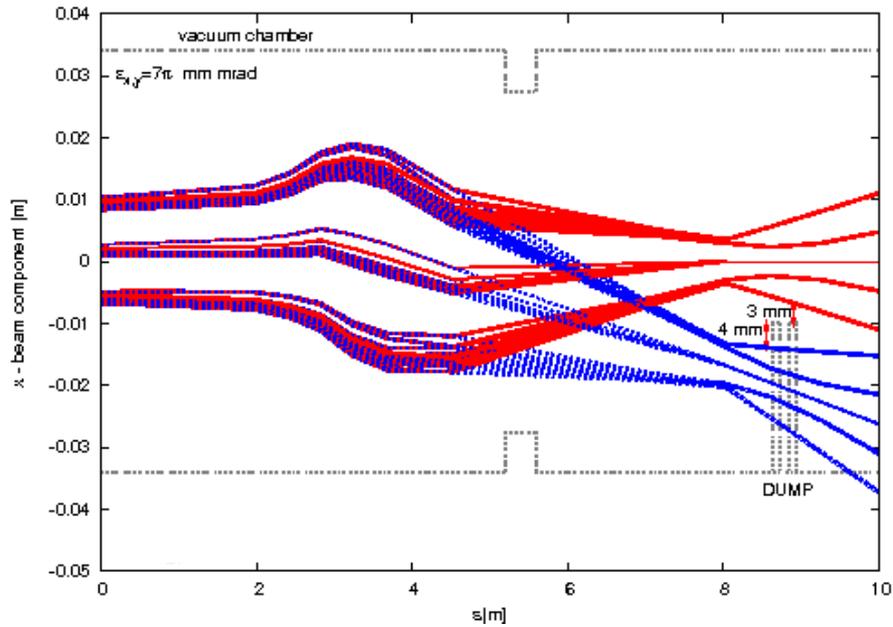


Fig. 15 Involuppo del fascio nella regione del chopper XPR per un set di distorsioni della traiettoria (dopo la correzione). Il fascio blu ed il fascio rosso sono ben separati all'altezza del dump interno.

In Fig. 16 è riportata la posizione del fascio per un set di errori di allineamento casuali (1000 casi). I punti rossi rappresentano la posizione risultante prima della correzione ed i punti neri la posizione dopo la correzione. L'esempio riguarda la correzione della parte terminale della linea.

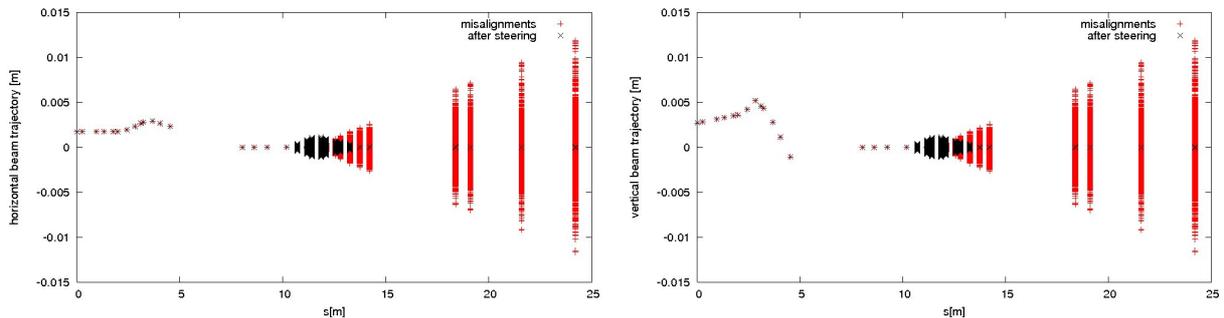


Fig. 16 Distribuzione dell'errore in posizione del fascio prima (punti rossi) e dopo (punti neri) la correzione dell'orbita.

3.3 Adattamento della LEBT per l'aggiunta della terza sorgente

Per soddisfare la richiesta di altre specie ioniche oltre a protoni e carbonio già disponibili, è necessario prevedere la realizzazione di una terza sorgente con la relativa linea di trasporto a bassa energia (LEBT). Tale terza sorgente (SO3), oltre a rendere disponibili specie ioniche non producibili con le due ECRIS già in uso al CNAO, permetterà di usare le due sorgenti esistenti solamente per scopi terapeutici.

La nuova sorgente, che sarà una copia della sorgente AISHa attualmente in fase di studio/realizzazione da parte dei Laboratori Nazionali del Sud dell'INFN (LNS), sarà dedicata alla linea sperimentale, e sarà in grado di produrre fasci con alte intensità di corrente (per il C^{4+} l'intensità attesa è più che doppia rispetto a quella attuale).

Per poter inserire la terza sorgente e la relativa LEBT sono necessarie alcune modifiche al layout attuale: la sorgente SO1 dedicata abitualmente ai fasci di protoni verrà avvicinata al dipolo di analisi, rimuovendo parte della linea magnetica esistente (che verrà riutilizzata per la terza LEBT), mentre lo spettrometro della linea O2 abitualmente usata per ioni carbonio verrà sostituito con uno dotato di una nuova porta per il fascio e

opererà come dipolo di commutazione per la seconda e terza sorgente. Sarà poi aggiunto un ramo di linea per collegare la nuova sorgente alla LEBT esistente.

La modifica del layout è illustrata schematicamente qui di seguito in Fig. 17

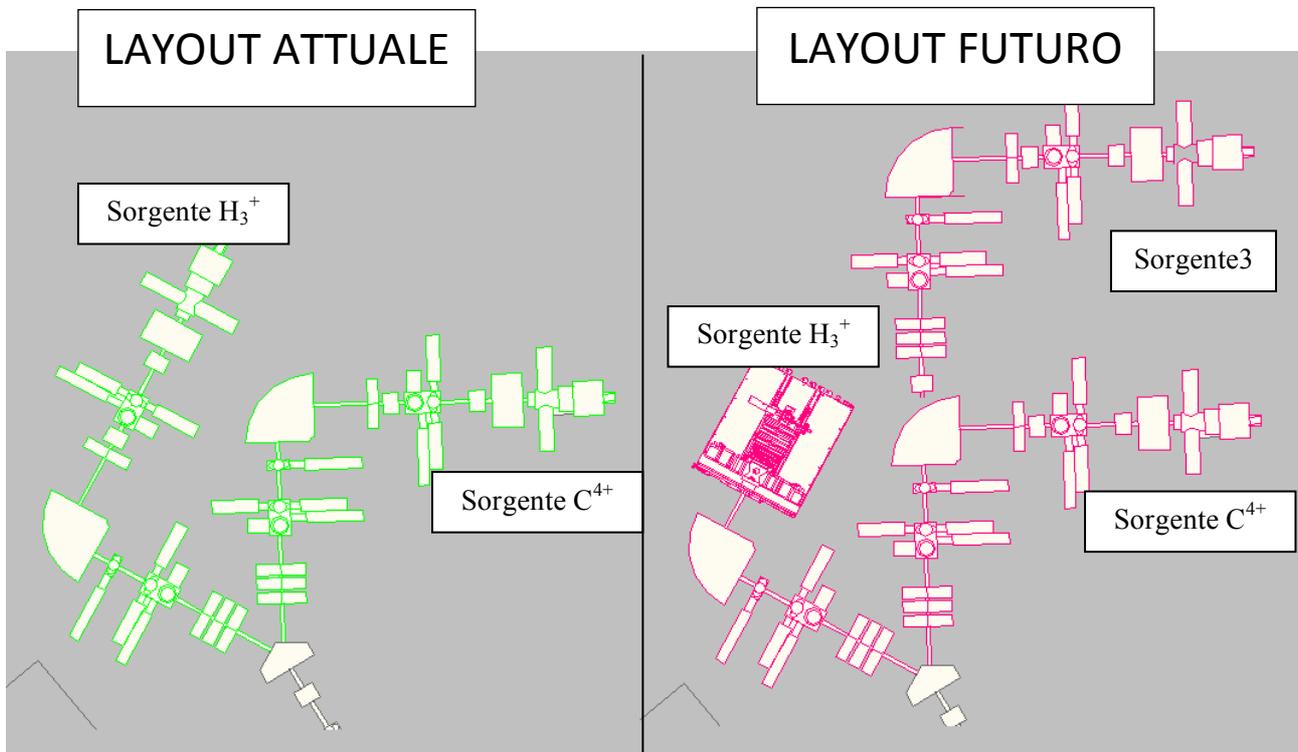


Fig. 17 Modifica del layout della LEBT per l'installazione della terza sorgente.

Per lo studio dell'ottica sono stati utilizzati i codici MADX e TRACE3D, mentre per lo studio dei parametri di fascio all'estrazione dalle sorgenti è stato utilizzato il programma KOBRA3D. In Appendice D sono riportati i dettagli dell'ottica della LEBT per la configurazione futura.

3.4 Ottica della LEBT per protoni modificata

L'avvicinamento della sorgente di protoni allo spettrometro richiede di eliminare il solenoide ed il quadrupolo presenti nel lattice attuale. Per valutare l'effetto di tale operazione e stimare le perdite di fascio che tale operazione implicherà, è stato simulato il fascio estratto dalla sorgente e sulla base di tali simulazioni è stata ottimizzata la distanza tra sorgente e magnete di analisi.

I parametri di Twiss del fascio all'uscita del sistema di estrazione della sorgente sono riportati in Tabella 4.

Tabella 4 Parametri di Twiss del fascio estratto dalla sorgente.

| Parametri di Twiss | x | y |
|--------------------|-------|-------|
| ϵ_{RMS} | 34.10 | 34.10 |
| β | 1.61 | 1.61 |
| α | -4.98 | -4.98 |

Partendo dai risultati della simulazione è stata dapprima scelta la distanza tra sorgente e dipolo, cercando da un lato di minimizzare le perdite nel dipolo e dall'altro di ottenere la massima risoluzione possibile, dove il termine risoluzione indica la capacità della linea di separare due specie ioniche con rigidità magnetica vicina.

Oltre a trasmissione e risoluzione, è necessario tenere conto anche dei limiti fisici (meccanici) degli oggetti in campo ed infine è risultato che la posizione scelta richiederà anche delle (piccole) modifiche meccaniche.

Dopo aver ottimizzato il tratto iniziale della linea, si è proceduto al “matching”, ossia al calcolo delle forze dei magneti in modo che il fascio abbia il corretto valore dei parametri di Twiss all’ingresso del RFQ.

In Fig. 18 è riportato l’andamento delle funzioni ottiche nella LEBT così ri-arrangiata. La risoluzione risultante è di 167 per una emittanza di $300 \pi \text{ mm mrad}$, avendo $\beta_x = 0.068 \text{ m}$ e $D_x = 1.51 \text{ m}$ alle fenditure di selezione. La trasmissione attesa è dell’80%.

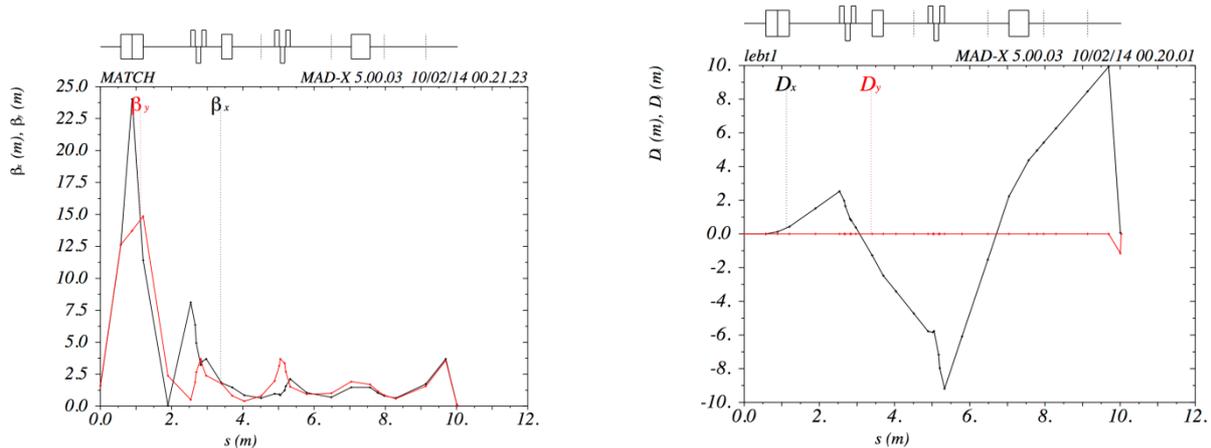


Fig. 18 Funzioni ottiche β e D nella LEBT per H_3^+ , dopo la modifica del layout.

Una trasmissione dell’80% è sufficiente dato che la corrente prodotta dalla sorgente del CNAO è generosa rispetto alla corrente richiesta per i trattamenti.

Le prestazioni ottenute sono largamente sufficienti per la produzione di fasci di protoni e la risoluzione è più che sufficiente anche se si volesse utilizzare la sorgente per produrre carbonio, ad esempio in caso di indisponibilità dell’altra ECRIS.

3.5 Ottica del nuovo ramo di LEBT

L’ottica della parte iniziale della linea della terza sorgente ricalca l’ottica attuale della LEBT, con un solenoide all’uscita della sorgente ed un quadrupolo per contenere le dimensioni del fascio in verticale nel dipolo e minimizzare le perdite. Per questa linea, che deve poter maneggiare fasci di svariate specie ioniche, si è ritenuto opportuno mantenere il design più flessibile.

Una parte dell’hardware necessario per la realizzazione del terzo braccio della LEBT, può essere riciclato da quello tolto dalla sorgente per protoni. È comunque necessario acquistare un po’ di diagnostica e qualche magnete. La nuova LEBT comprende quindi:

- 4 quadrupoli
- 3 correttori
- 2 tank di diagnostica
- 1 dipolo spettrometro
- 1 solenoide

Di cui

- 1 quadrupolo

- 2 correttori
- 1 tank di diagnostica
- 1 solenoide
- 1 spettrometro (proveniente da O2 dove andrà installato il dipolo con la porta addizionale)

provenienti dalla attuale linea O1.

Poiché la sorgente che si installerà è ancora in fase di progettazione, non vi sono simulazioni del fascio estratto e la linea è stata progettata assumendo come valori iniziali quelli impiegati nella fase di design per le due sorgenti attuali, ($\beta_{x,y} = 0.1$, $\alpha_{x,y} = 0$).

La Fig. 19 riporta l'andamento delle funzioni ottiche nella linea.

La risoluzione risultante è di 129 per una emittanza di 300π mm mrad, avendo $\beta_x = 0.115$ m e $D_x = 1.51$ m alle fenditure di selezione.

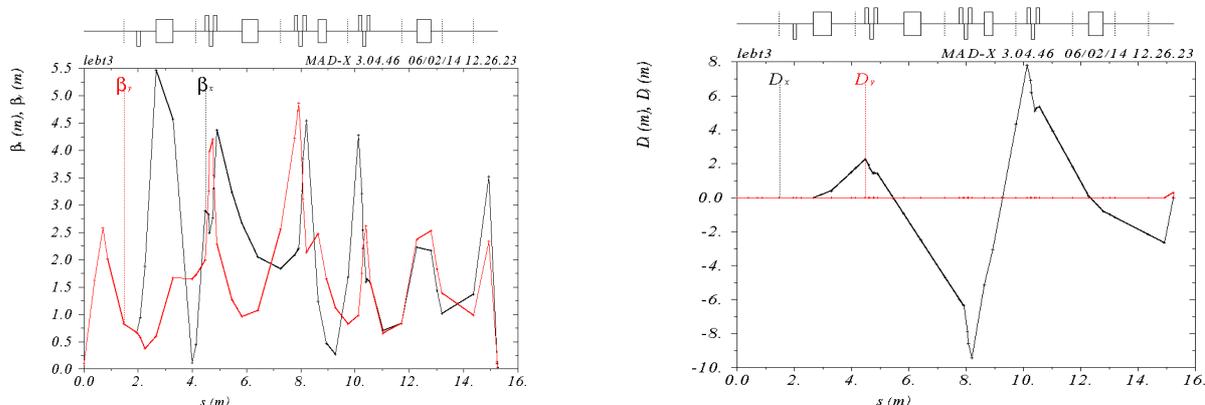


Fig. 19 Funzioni ottiche β e D nella LEBT3.

4 Progetto della terza sorgente

La Fondazione CNAO è dotata, per il trattamento dei pazienti con adroni, di due sorgenti ECR SUPERNANOGAN, che soddisfano pienamente gli attuali protocolli di trattamento. Tali sorgenti, tuttavia, non possono soddisfare le richieste dei programmi di ricerca, sia per quanto riguarda la produzione di altri ioni, in particolare ioni metallici quali ad esempio il Li, sia per quanto riguarda eventuali aumenti di corrente volti ad esempio a sviluppi futuri tesi ad abbreviare i tempi di trattamento.

È necessario, pertanto, avere una terza sorgente (O3) che, innanzitutto, consenta di lasciare le due esistenti (O1 ed O2) sempre pronte, efficienti e con i loro parametri di produzione costanti per fornire sempre lo stesso fascio di ioni usato per la routine terapeutica.

Una sorgente che mantenga le caratteristiche di alta affidabilità, stabilità e riproducibilità delle proprietà del fascio prodotto ed accelerato e che sia adatta ad una struttura di tipo ospedaliero deve essere semplice da ottimizzare, con la manutenzione rapida e facile e che possa produrre tutti gli ioni richiesti: deve essere, cioè, una sorgente ECR appositamente progettata.

Attualmente nessuna sorgente commerciale ad esempio è in grado di produrre il Li con la intensità richiesta, che sul target è circa due volte quella dell'intensità del C utilizzato (cfr. Tabella 1).

Presso il centro HIMAC di Chiba, è stata costruita una sorgente ECR operante a 18 GHz, in grado di produrre una corrente di C^{4+} circa doppia rispetto alla SUPERNANOGAN del CNAO, ma con vincoli costruttivi poco compatibili con l'ambito ospedaliero, minore affidabilità rispetto alle sorgenti usate in precedenza e la possibilità di produrre ioni Li non è ancora stata dimostrata.

Le sorgenti di terza generazione sarebbero in grado di produrre le maggiori intensità degli ioni richiesti, Li compreso, ma sono costose ingombranti e difficili da gestire, specie in ambiente ospedaliero.

La sorgente, che soddisfa i requisiti richiesti e, quindi, si propone come terza sorgente per il CNAO, è la sorgente ECR, a 18 GHz, AISHa (Advanced Ion Source for Hadron therapy), che si sta costruendo a Catania.

AISHa incorpora i più recenti sviluppi teorici proposti dal Gruppo di R&D di Sorgenti di Ioni presso i Laboratori Nazionali del Sud dell'INFN e, pur essendo ancora un prototipo, è ragionevole ipotizzare che sarà in grado di soddisfare le esigenze del CNAO, così come quelle di altre facilities che operano in ambiti analoghi. È stata progettata rispettando alcune delle caratteristiche tipiche delle SUPERNANOGAN, quali la compattezza e la necessità di bassa potenza elettrica, evitando però la rigidità progettuale e operativa di tale tipo di sorgente ed implementando la capacità di produrre ioni metallici e maggiori intensità in generale.

In Tabella 5 sono riportate le correnti attese per AISHa, con due generatori RF a 18GHz, ed il confronto con le SUPERNANOGAN, per le stesse caratteristiche di emittanza.

Tabella 5 Correnti attese per alcune specie ioniche considerando una emittanza al 90% di 180π mm mrad.

| Ion | SUPERNANOGAN (14.5 GHz) [μ A] | AISHa (18 GHz + TFH) [μ A] |
|-------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| H^+ | 2000 | 4000 |
| H_2^+ | 1200 | 2000 |
| H_3^+ | 800 | 1000 |
| $^3He^+ - ^4He^+$ | 800 | 2000 |
| $^{12}C^{4+}$ | 200 | 800 |
| $^6Li^{2+}$ | // | 600 |
| $^{18}O^{6+}$ | 250 | 1000 |
| $^{16}O^{6+}$ | 400 | 1200 |
| $^{21}Ne^{7+} - ^{20}Ne^{7+}$ | 120 | 600 |

La LEBT, che sarà installata ai LNS utilizzerà la stessa ottica e gli stessi elementi di diagnostica che saranno utilizzati nella Fase 2 al CNAO in modo da essere direttamente confrontabili e minimizzare i tempi di messa in funzione a Pavia.

Inoltre, sempre nello spirito di collaborazione e sinergia tra CNAO e LNS, AISHa1 a Catania, libera dai vincoli dell'accessibilità della sala Sincrotrone, potrà essere il test bench a distanza della sorgente AISHa2 installata al CNAO. A Catania, per esempio, si possono provare ed ottimizzare i nuovi fasci di ioni, mentre a Pavia, grazie alla presenza degli operatori di macchina 24/24 h e 7/7 g si possono fare test di lunga durata.

Possiamo quindi riassumere i motivi per i quali una sorgente AISHa completa l'iniettore del CNAO nel migliore dei modi:

- l'indipendenza della terza sorgente rispetto alle due dedicate ai trattamenti;
- l'intensità degli ioni prodotti, che oggi può sembrare alta per gli ioni H_3^+ e C^{4+} , ma che potrebbe risultare insufficiente in futuro;
- la produzione di ioni metallici con la stessa AISHa, per l'intensità richiesta degli ioni Li;

- d) la versatilità di un sistema con più gradi di libertà rispetto alle sorgenti esistenti (4 solenoidi permettono di adeguare il confinamento magnetico alle possibili esigenze, mentre il sistema RF è estremamente sofisticato e consente variazioni in potenza, frequenza e fase);
- e) dal punto di vista dell'emittanza del fascio si potrebbero avere ulteriori miglioramenti.

Inoltre la sorgente AISHa è stata disegnata in modo da mantenere le stesse caratteristiche di affidabilità delle sorgenti esistenti, di stabilità sulle 24h e di MTBF e MTTR (*Mean Time Between Failures* e *Mean Time To Repair*, tempo medio tra due rotture e tempo medio necessario alla riparazione).

Tutti i dettagli sul progetto della sorgente possono essere trovati nell'appendice E.

5 Magneti

5.1 Magneti per la HEBT

Come illustrato al paragrafo 3.2 lungo la HEBT per la sala sperimentale andranno installati:

- Quattro quadrupoli
- Tre correttori
- Due magneti di scansione

In previsione della futura sala sperimentale alcuni magneti erano già stati acquistati durante la costruzione dei magneti per le linee di estrazione del CNAO, in particolare sono già disponibili:

- Quattro quadrupoli
- Un correttore
- Due magneti di scansione

Vanno quindi costruiti due correttori identici a quello già esistente. In fase di gara si richiederà la sola costruzione partendo dai disegni "As-Built" dei correttori attualmente in uso. Le misure magnetiche verranno effettuate presso i Laboratori Nazionali di Frascati che possiedono in casa la strumentazione necessaria per la caratterizzazione del magnete.

5.2 Magneti per la LEBT

Per quanto riguarda la linea di trasferimento a bassa energia dalla nuova sorgente alla LEBT attuale, saranno necessari:

- Un correttore
- Un tripletto di quadrupoli
- Uno spettrometro a 90°

Anche in questo caso si è deciso di procedere all'ordine di magneti identici a quelli esistenti, tranne che nel caso dello spettrometro a 90° che deve prevedere una seconda apertura per permettere il passaggio dal fascio proveniente dalla sorgente SO3 durante i trattamenti.

Dalle simulazioni effettuate mediante codici ad elementi finiti, effettuare un secondo foro nella gamba di ritorno del giogo non altera significativamente le caratteristiche magnetiche del dipolo. Dovrà quindi essere ordinato un dipolo uguale ai due spettrometri attualmente installati nella LEBT nel quale verrà realizzato il secondo foro. Fig. 20 illustra la differenza tra il dipolo con e il dipolo senza porta per il fascio.

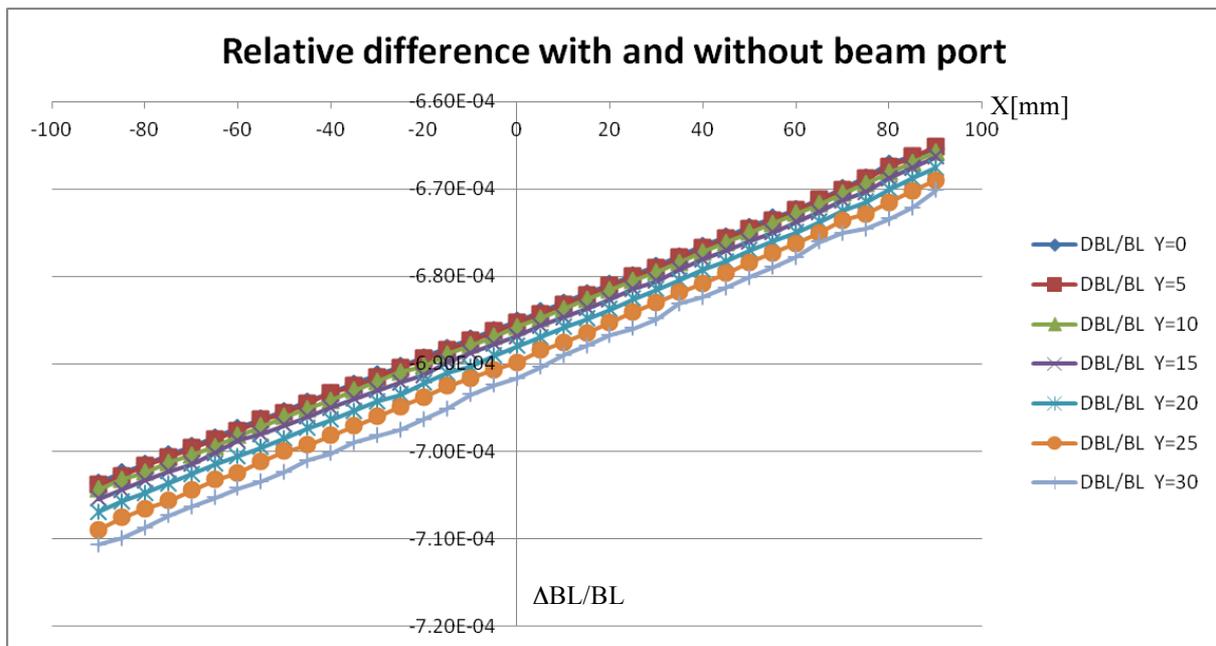
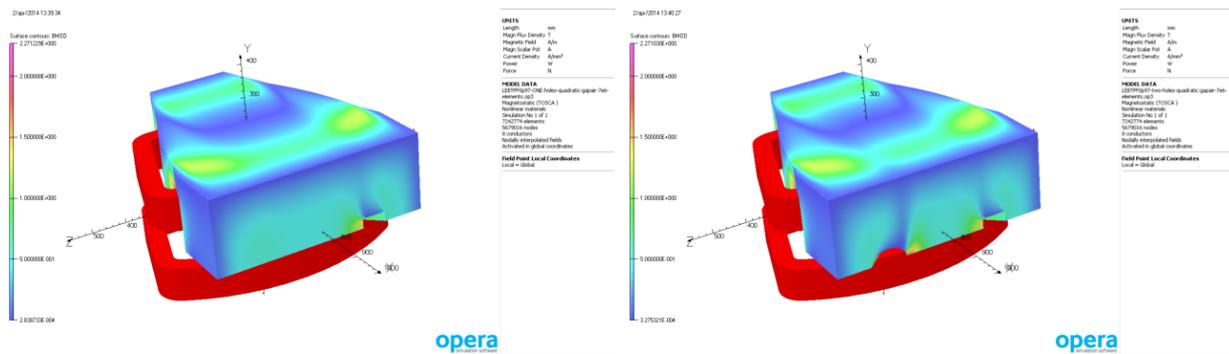


Fig. 20 Modello del dipolo a 90° della LEBT con e senza porta per la terza sorgente. La differenza di campo integrato e di variazione di campo integrato è piccola e circa costante in tutta la good field region.

6 Alimentatori dei magneti

I magneti della linea sperimentale necessitano dei rispettivi alimentatori ossia, considerato che ciascun correttore comprende una via verticale ed una orizzontale:

- quattro alimentatori per quadrupoli;
- sei alimentatori per correttori (uno per via), oppure due alimentatori multi-via;
- due alimentatori per magneti di scansione.

Durante la realizzazione del CNAO, erano stati acquistati un certo numero di alimentatori per la linea sperimentale; in particolare:

- tre alimentatori per quadrupoli;
- due armadi a quattro vie per correttori;
- due alimentatori per magneti di scansione.

Degli alimentatori originariamente acquistati per quadrupoli e correttori, diverse parti o interi armadi sono stati usati come ricambi e non ce ne sono di disponibili. Ad oggi inoltre è impossibile ordinare nuovi alimentatori uguali a quelli esistenti perché una parte consistente delle schede elettroniche necessarie non sono più in produzione (in particolare le schede di conversione analogico/digitale, la scheda a DSP utilizzata

per implementare il controllo digitale e la scheda FPGA che invia gli impulsi di comando agli IGBT). A questo si aggiunge che i requisiti funzionali richiesti dalla XPR sono leggermente diversi da quelli dell'epoca: la macchina non deve poter lavorare solo a setpoint (come le attuali) ma deve poter inseguire un riferimento variabile nel tempo e rappresentato da una sequenza di valori digitali a 18 bit inviati dal Generatore di Funzioni Digitale (GFD); è anche richiesto di ricevere dall'alimentatore una misura della corrente erogata ad alta precisione ed alta velocità in un intervallo di tempo compreso tra due eventi del ciclo macchina.

Per questi motivi si ritiene che la soluzione più efficace consista nell'acquistare quattro alimentatori ex novo secondo le specifiche allegate (vedi appendice G). Dal punto di vista delle prestazioni le nuove specifiche sono identiche a quelle originali perché i calcoli di ottica hanno portato ai medesimi requisiti; sono invece state introdotte le nuove funzionalità appena descritte nella gestione dei riferimenti e una riletture continua ad alta velocità e in tempo reale della corrente attuata che permette, in cooperazione con la GFD, di eseguire misure di corrente tra due qualsiasi eventi di timing del ciclo macchina. Sono state inoltre inserite alcune piccole modifiche (a volte in aggiunta, a volte in sottrazione) motivate dall'esperienza accumulata nelle operazioni di CNAO.

Per quanto riguarda gli alimentatori per i correttori anche in questo caso ci troviamo con un numero di macchine disponibili inferiore al numero di magneti da alimentare. Per i motivi precedentemente descritti non è possibile acquistare una replica dell'armadio a 4 vie esistente. Ancor più che nel caso precedente è consigliabile progettare ed acquistare dei nuovi alimentatori: infatti, grazie all'esperienza acquisita sugli alimentatori dei correttori, è oggi possibile fare scelte più efficaci. Le macchine attualmente in uso impiegano, per ogni via, uno stadio d'uscita lineare da ± 30 V e ± 150 A realizzato con 128 transistor bipolari, 64 per il banco positivo e 64 per quello negativo. Una simile struttura è molto ingombrante, dissipa una notevole quantità di potenza (a causa dell'intrinseca bassa efficienza degli stadi lineari).

Visti i progressi della tecnologia degli alimentatori di potenza, si ritiene invece che i tempi siano maturi per investigare la possibilità di realizzare gli alimentatori dei correttori in tecnologia switching.

Recentemente sono però apparse sul mercato delle unità di potenza commerciali realizzate a MOSFET che sfruttano tecniche di commutazione a zero tensione/corrente che dichiarano un funzionamento a quattro quadranti con valori di ripple residuo compatibili con la nostra applicazione. Per questa ragione si è deciso di esplorare questa possibilità, specificando gli alimentatori in modo che i fornitori possano proporre sia una versione lineare che una a modo commutato (le specifiche sono nell'appendice G). Ovviamente le specifiche di prestazione sono le stesse delle attuali unità lineari, come richiesto dall'ottica della linea.

Gli alimentatori per i magneti di scansione, infine, sono già disponibili in casa e non è necessario acquistarne di nuovi.

L'unico upgrade richiesto consiste nell'aggiornare il software del cestello di controllo National Instruments con l'ultima versione disponibile, quella che implementa l'attivazione dello stadio Booster non appena il timeout iniziato dalla precedente attivazione scade, senza attendere il completamento del salto di corrente in corso.

Per questi ultimi alimentatori esiste il problema della lunghezza massima delle verso il carico dovuto alla topologia dell'alimentatore ed alle sue modalità di funzionamento.

All'epoca della messa in funzione dei magneti di scansione delle sale di trattamento, si era dimostrato come fosse possibile operare l'alimentatore senza modifiche al controllo purché la lunghezza punto-punto della connessione verso il carico fosse inferiore a 15 metri, condizione che richiese di installare gli alimentatori attualmente utilizzati direttamente sui sopalchi realizzati in sala trattamento, invece che in sala alimentatori come originariamente previsto.

Sappiamo anche per certo che una distanza di 85 metri non permette all'alimentatore di funzionare correttamente, ma non è noto quale sia la distanza limite per un corretto funzionamento.

I vincoli ambientali che l'installazione dovrà soddisfare potrebbero richiedere una distanza di connessione intorno ai 20 metri.

Per verificare la sostenibilità di questa configurazione si intendono organizzare dei test alimentando un reale magnete di scansione con dei cavi tagliati alla misura attesa per l'installazione definitiva.

Infine, si consideri che quando l'alimentatore di un magnete viene spento, il campo magnetico lungo il percorso del fascio non è nullo, ma vi è un campo residuo. Per tale ragione, è opportuno considerare l'acquisto di un alimentatore a quattro quadranti per alimentare il dipolo di switching H3-003A-SW2, in modo da poter annullare il campo magnetico quando il fascio è diretto in sala sperimentale.

7 Sistema di controllo

7.1 Architettura

L'architettura del sistema di controllo evolverà verso una maggiore connettività tra i livelli e la possibilità di bypassare uno o più livelli se le necessità di intervento lo richiederanno, grazie ad una maggiore standardizzazione delle soluzioni software adottate.

Il sistema di controllo della linea sperimentale consiste in una evoluzione naturale del sistema di controllo del resto dell'impianto CNAO secondo una strategia di medio-lungo termine definita indipendentemente dalla costruzione della linea sperimentale stessa.

Quindi sulla linea sperimentale si vedranno realizzate alcune delle soluzioni già pensate per l'impianto nel suo insieme, in particolare si adottano le seguenti scelte:

- Un nuovo sistema di comunicazione tra i vari elementi del sistema di controllo basato sul protocollo OPC-UA che permette di standardizzare in maniera più profonda i vari componenti del sistema di controllo stesso.
- Una nuovo framework per la realizzazione dei livelli del sistema di controllo, generalmente vicini all'impianto, basati sull'ambiente di sviluppo Labview. Il framework è basato su una versione aggiornata sia del software di National Instrument sia delle schede elettroniche della stessa azienda. Il framework sarà utilizzato per tutte le nuove realizzazioni sia della linea sperimentale sia dell'impianto esistente ove siano richieste modifiche maggiori.
- Un sistema di middleware che consente l'utilizzo di alcuni vecchi protocolli di comunicazione insieme alla nuova soluzione, per permettere un'evoluzione controllata dell'impianto senza richiedere sostituzioni di quanto già esistente e nello stesso tempo permettere la convivenza trasparente con i nuovi sviluppi.
- Una nuova versione dei GFD (Generatori di Funzione Digitali) realizzati per servire gli alimentatori basati sugli sviluppi di cui ai due punti precedenti.
- Un framework aggiornato per la realizzazione delle applicazioni a livello operatore in .NET che include un insieme aggiornato delle librerie già utilizzate per l'impianto esistente.
- Un ambiente di test delle applicazioni che permetterà una estesa verifica del software e dell'hardware da installare sull'impianto prima della definitiva messa in esercizio allo scopo di ridurre al massimo i fermi macchina, essendo l'impianto impegnato per le attività istituzionali e non potendo contare su estesi periodi di commissioning.
- Una nuova versione dello SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) che si allinea con lo stato dell'arte e nello stesso tempo mantiene la compatibilità con quanto già esistente.

- Alcune estensioni al Repository di progetto e al Repository Management System per includere informazioni necessarie per la configurazione delle nuove soluzioni.

Si dovrà prevedere l'installazione di una estensione della rete di comunicazione basata su cavi Ethernet di livello 6 che permetterà di collegare le stazioni di lavoro dedicate alla linea sperimentale con il resto delle installazioni dedicate al sistema di controllo.

Il server della base di dati sarà lo stesso dell'impianto esistente opportunamente esteso in termini di capacità e potenza per sopportare il carico risultante dalla messa in esercizio della linea sperimentale.

Il server dello SCADA sarà invece indipendente e sarà comunque possibile mettere in comunicazione la nuova installazione con quella attuale che avrà un cammino evolutivo parallelo, ma non contemporaneo.

I server di file saranno gli stessi utilizzati per l'impianto esistente poiché basati su una SAN (Storage Area Network) che può essere estesa secondo i requisiti dell'intero impianto indipendentemente dalla realizzazione specifica della linea sperimentale.

7.2 Timing

Per quanto riguarda il timing la realizzazione per la linea sperimentale segue le indicazioni ricevute nell'ottica di mantenere i costi contenuti. Verranno quindi seguite due strade:

- Un utilizzo di alcune schede disponibili per le attività di manutenzione;
- Un piccolo sviluppo brevemente descritto di seguito.

Verrà realizzata una sorta di sostituto delle schede FTTR (o DIO6) ovvero dei ricevitori ottici del fast timing. L'attività si struttura su due livelli:

- realizzazione di un adapter ottico/digitale/ottico con cui decodificare il frame di timing distribuito su fibra ottica e tradurlo in un dato seriale digitale, realizzando anche il converter complementare;
- scrittura di una libreria per FPGA in ambiente Labview per utilizzare il timing decodificato a velocità e jitter compatibili con la risoluzione del fast timing.

La prima parte si scompone a sua volta in due attività distinte:

- decodifica ottica e generazione dell'impulso digitale corrispondente;
- decodifica del protocollo di comunicazione

In entrambi i casi si tratta di attività di competenza di un progettista elettronico: partendo dal tipo di testine ottiche utilizzate si trovano schemi applicativi già fatti e consigliati dal produttore per la ricostruzione che è del tipo ottico/analogico/digitale e viceversa; il protocollo è noto e sono a loro volta disponibili schemi e dispositivi commerciali per la trasformazione.

La libreria in FPGA ha lo scopo di ricevere il treno di timing, che è seriale, e trasformarlo internamente in eventi e dati come avviene nei FTTR.

È anche possibile realizzare in FPGA la decodifica del protocollo. In una fase iniziale non è tuttavia consigliabile perché rende più complicato il reverse engineering che potrebbe essere necessario fare in impianto per raffinare il dispositivo.

Il vantaggio funzionale della soluzione proposta è duplice:

- avere un ricevitore di timing direttamente integrato in FPGA (presenti in tutti gli chassis dell'impianto) senza dover aggiungere dispositivi di terze parti da configurare;

- avere degli strumenti da utilizzare in ambiente di test per stimolare con il timing i dispositivi sotto test senza dover utilizzare risorse del timing di produzione.

7.3 Gestione automatica dei tempi morti

Il software del timing verrà esteso per permettere di assegnare automaticamente alla linea sperimentale il fascio quando questo non sia utilizzato nelle sale di trattamento.

La QA Console verrà estesa per permettere di gestire l'avvio nella sala sperimentale di lavori che prevedano l'utilizzo del fascio solo nei tempi in cui esso non viene utilizzato nelle sale di trattamento mediante la creazione e l'utilizzo di "Trattamenti parziali" generati nel momento in cui il lavoro nella sala sperimentale viene interrotto a seguito della richiesta fascio in una sala di trattamento.

8 Sistema da vuoto

Il canale sperimentale è stato progettato, per quanto concerne il suo sistema da vuoto, tenendo in considerazione alcuni criteri fondamentali:

- Il suo impatto sul vuoto del resto dell'acceleratore, HEBT e Sincrotrone, deve essere il minore possibile.
- Il canale deve essere il più possibile versatile al fine di permettere l'installazione di apparati sperimentali di diversa natura e dimensione, compatibilmente con gli spazi a disposizione.
- La configurazione richiesta da ogni apparato sperimentale deve essere il più possibile di facile e rapida installazione
- L'affidabilità deve essere massima e l'uso della linea sperimentale deve essere tale da garantire sempre l'operatività del sincrotrone, anche in caso di guasto o di rientro accidentale di vuoto.

Il canale sperimentale, che congiunge un tratto della HEBT con la sala sperimentale, può essere distinto in due parti la prima situata in sala sincrotrone e la seconda situata in sala sperimentale.

Le due sezioni hanno caratteristiche diverse al fine di ottimizzarne la funzionalità.

8.1 Tratto in sala sincrotrone

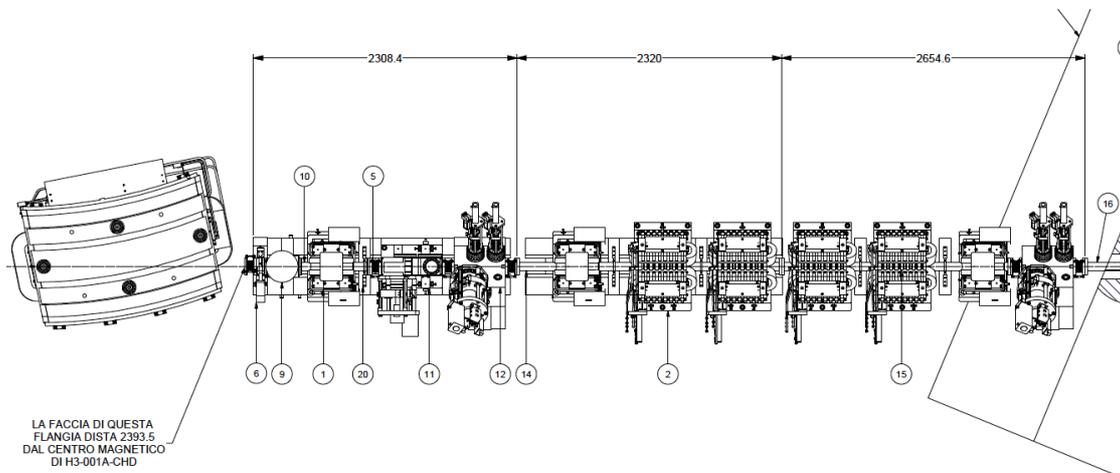


Fig. 21 Vista in pianta del tratto della HEBT in sala sincrotrone.

La sezione situata in sala sincrotrone è essenzialmente un canale di trasporto del fascio dalla HEBT attuale alla sala sperimentale. Questa sezione funge anche da zona di separazione del vuoto tra linee verso le sale di trattamento e sala sperimentale. I dispositivi da vuoto che la compongono sono di seguito descritti.

- Immediatamente all'uscita del dipolo della HEBT si trova un soffiutto di collegamento, la cui funzione è di compensare eventuali piccoli disallineamenti e dilatazioni termiche dei canali da vuoto.
- Dopo il soffiutto troviamo una valvola gate di sezionamento a comando elettro-pneumatico, il cui scopo è di sezionare il vuoto del canale sperimentale dal resto della macchina in caso di manutenzione o di intervento del sistema di sicurezza impianti.
- Immediatamente dopo la valvola di sezionamento ci sarà una valvola rapida, il cui scopo è quello di proteggere la HEBT e il sincrotrone in caso di guasto o rottura catastrofica del vuoto nel canale sperimentale. Questa valvola, infatti, ha tempi di chiusura dell'ordine dei millisecondi ed è comandata da un proprio sensore di vuoto.
- A seguire ci sono due camere di diagnostica di fascio, un tratto dritto di canale da vuoto, lungo circa 4 metri ed una terza camera in cui sono installati un sensore di vuoto una pompa ionica ed altra diagnostica.

Un tratto di canale da vuoto attraversa quindi il muro e collega la sezione in sala sincrotrone con quella in sala sperimentale.

8.2 Tratto in sala sperimentale

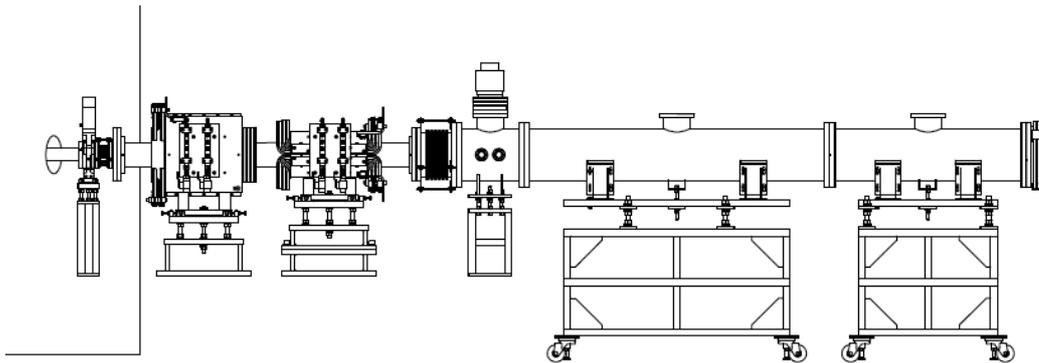


Fig. 22 Vista laterale del tratto della HEBT in sala sperimentale.

Il tratto in sala sperimentale è modulare, nel senso che può essere modificato nella sua lunghezza per meglio adattarsi alle diverse richieste degli utenti.

A ridosso del muro è prevista una valvola gate elettropneumatica di sezionamento che permette di modificare il canale in sala sperimentale senza influire sul vuoto del canale che lo precede.

Alla valvola è collegato un soffiutto che permette di recuperare piccoli disallineamenti facilitando le operazioni di montaggio del resto del canale.

Dopo il soffiutto è presente la camera dei magneti di scansione, essa è realizzata in materiale isolante al fine di eliminare completamente ogni tipo di corrente parassita che potrebbe essere indotta dal funzionamento dei suddetti magneti.

Un ultimo soffiutto di grande diametro collega la camera dei magneti di scansione con una camera su cui è previsto il montaggio di una pompa turbomolecolare, con relativa pompa primaria, una valvola

elettropneumatica per il rientro di azoto, un sensore di vuoto e il sensore che comanda la chiusura della valvola rapida.

Dopo questa camera si possono inserire due camere di estensione mobili, montate su appositi supporti dotati di ruote, che ne facilitano il movimento.

Infine, al termine del canale si trova una finestra sottile di uscita, in fibra di carbonio, identica alle finestre di uscita dei canali di trattamento dei pazienti.

8.3 Logica di funzionamento delle valvole di sezionamento e della valvola rapida.

Il canale sperimentale è stato concepito per operare in sicurezza nei confronti del sincrotrone, onde evitare al massimo ogni tipo di interruzione dei trattamenti clinici dei pazienti.

Tale sicurezza è principalmente garantita dalla presenza della valvola rapida, che interviene non appena il suo sensore rileva il superamento di una soglia preimpostata del vuoto all'interno del canale sperimentale. Inoltre, la chiusura della valvola rapida comporta la chiusura contemporanea della valvola di sezionamento a lei vicina, preservando, in tal modo, il vuoto della HEBT e del sincrotrone

Ulteriore sicurezza è prevista nell'operazione del canale in sala sperimentale. In caso di intervento per la modifica della lunghezza del canale o per eventuale intervento di manutenzione, l'apertura della valvola di rientro dell'azoto può essere effettuata solo se la valvola di sezionamento è, a sua volta, chiusa. Mentre l'apertura della valvola di sezionamento, al termine delle operazioni di modifica o manutenzione, può essere effettuata solo se il sensore di vuoto rileva una pressione inferiore ad un valore predeterminato, tale da garantire il minore impatto possibile sulla parte del canale sperimentale che si trova verso il sincrotrone.

9 Diagnostica di fascio

Nell'ambito del progetto per le linee sperimentali (LEBT con terza sorgente e HEBT) si prevede la costruzione dei rivelatori di fascio necessari per avere misure di spettro ed emittanza (della sorgente), di intensità, di forma dei profili trasversi e di posizione del fascio.

A partire dall'esperienza delle linee terapeutiche del CNAO, si è deciso di replicare sostanzialmente i rivelatori già esistenti, prestando attenzione a rinnovare gli stessi, sostituendo eventuali componenti obsoleti e introducendo elementi innovativi per migliorare le prestazioni.

I rivelatori di fascio installati al CNAO sono stati interamente prodotti nei laboratori CNAO, non vi sono rivelatori acquistati "chiavi in mano". In alcuni casi è stata assegnata a ditte esterne la costruzione di parti dei rivelatori, poi assemblati e finalizzati in casa.

9.1 Diagnostica per la HEBT XPR

Nella nuova linea ad alta energia (HEBT XPR) che porta il fascio nella sala sperimentale si prevede l'installazione di due monitor di profilo e di un monitor per la qualificazione di profilo e intensità (QPM/QIM). Un monitor di profilo aggiuntivo potrebbe essere richiesto per l'isocentro: tale monitor dovrebbe lavorare in aria (e non in vuoto) e non avrebbe bisogno di movimentazione.

Per quanto riguarda il monitor di qualificazione, si intende duplicare esattamente quello in uso sulla HEBT terapeutica. Tale rivelatore è il risultato di una collaborazione CNAO- LLR (Ecole Polytechnique, Parigi).

Un decisivo aggiornamento viene proposto per i monitor di profilo da installare sulla HEBT XPR, rispetto alla HEBT terapeutica. Il principio di produzione del segnale rimane lo stesso dei rivelatori attualmente installati: una coppia di arpe di fibre scintillanti metallizzate (una con fibre orizzontali e una con fibre verticali) è montata su un attuatore pneumatico per poter essere mossa dentro o fuori la linea di fascio. Quando il fascio incide sulle fibre, produce fotoni che la metallizzazione confina all'interno di ciascuna fibra fino alla sua unica estremità non metallizzata. Nel rivelatore attuale (SFH, Scintillating Fiber Harps) il segnale delle fibre viene riletto da una telecamera, nel rivelatore proposto per la HEBT XPR (SFP, Scintillating Fibers with Photodiodes - Fig. 23) il segnale viene riletto da una barra di fotodiodi. Ne risulta un rivelatore di più semplice manifattura, più compatto, meno costoso e con più semplice elaborazione dati.

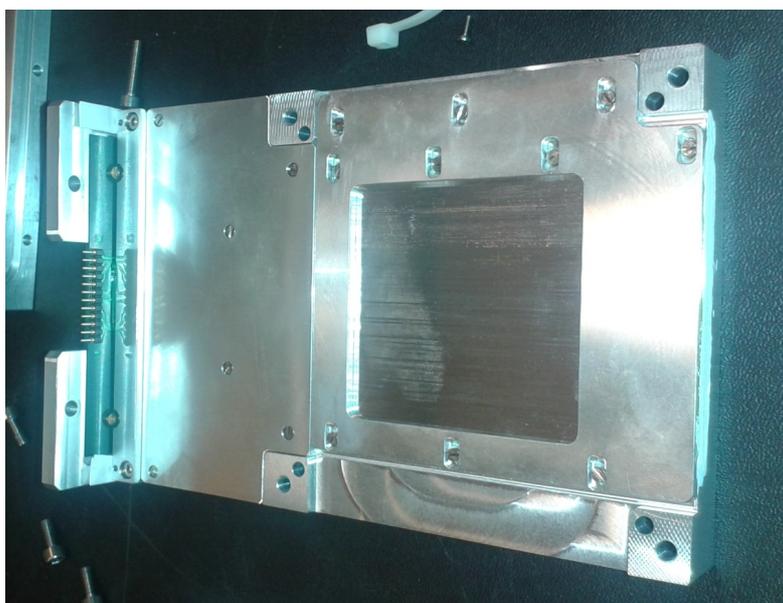


Fig. 23 Fotografia del rivelatore SFP (Scintillating Fibers with Photodiodes). Un'arpa di fibre scintillanti orizzontali e una di fibre verticali sono sovrapposte. Il segnale viene generato dal fascio che attraversa le fibre è riletto dai fotodiodi posti all'estremità delle fibre (visibili sulla sinistra dell'immagine).

Anche il rivelatore SFP è frutto della collaborazione CNAO- LLR (Ecole Polytechnique, Parigi). Attualmente CNAO possiede un prototipo di SFP, su cui sono stati effettuati i test con fascio necessari per validare le prestazioni dell'innovativo sistema di riletture. CNAO, in collaborazione con gli esperti di LLR, si occuperà in prima persona della realizzazione dei rivelatori per la linea HEBT XPR.

Tutti i rivelatori per la HEBT XPR richiedono la presenza di un circuito di aria compressa per azionare l'attuatore IN/OUT pneumatico.

9.2 Diagnostica per la terza sorgente

Lungo la LEBT CNAO i rivelatori di fascio sono installati su diversi tipi di tank. Focalizziamo la nostra attenzione sui tank "tipo 390 mm" (Fig. 24), ossia lunghi 390 mm da flangia a flangia e ospitanti tutti i rivelatori disponibili sulla LEBT: andando nella direzione del fascio, quattro piatti motorizzati per formare una fenditura orizzontale e una verticale, un wire scanner orizzontale e uno verticale e, infine, una Faraday cup.

L'introduzione della terza sorgente e la modifica della attuale LEBT rende necessario spostare un tank "tipo 390 mm" attualmente installato sulla linea O1 alla linea O3: questo non richiede la costruzione di nuovi rivelatori, ma la maggior parte dei cavi (segnale, controllo, alimentazione) di tale tank dovrà essere stesa nuovamente, a causa dell'arretramento dello stesso.

Per caratterizzare il fascio uscente dalla sorgente O3, si richiede inoltre l'installazione di un tank "tipo 390 mm" all'uscita della sorgente stessa e quindi la costruzione di: quattro piatti motorizzati (due piatti senza fenditura e due piatti con fenditura intagliata da 1mm; tutti predisposti per la connessione all'alta tensione e il raffreddamento ad acqua), per creare le fenditure con cui eseguire le misure di emittanza, fare lo spettro della sorgente e tagliare gli aloni non desiderati di fascio; due wire scanner (motorizzati) per misurare i profili di fascio sul piano orizzontale e verticale; una Faraday cup con raffreddamento ad acqua da usare per misurare l'intensità di corrente e come beam stopper.

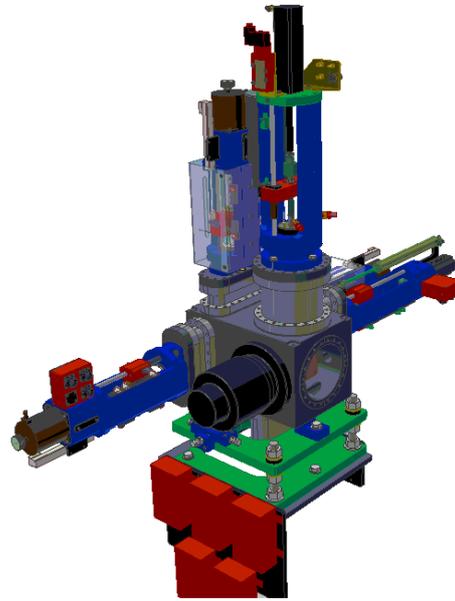


Fig. 24 Modello del tank di diagnostica lungo 390mm su cui sono installati (andando nella direzione del fascio; da sinistra a destra nel disegno) quattro piatti per formare le fenditure orizzontali e verticali, due wire scanner e infine una Faraday cup.

I disegni esecutivi della parte meccanica dei rivelatori suddetti, in una versione generalmente migliorata rispetto ai rivelatori attualmente installati, ma senza modifiche critiche, sono disponibili e pronti per le richieste di offerta. Per quanto riguarda la costruzione della parte elettronica, esistono i disegni relativi ai moduli installati, necessari per duplicare gli oggetti esistenti. Si tratterà di assemblare nel laboratorio CNAO componenti o sottosistemi ordinati a ditte esterne. Particolare attenzione dovrà essere data all'attualizzazione dei cassette di controllo dei servo azionamenti.

Il personale CNAO sarà altresì responsabile della scrittura del codice di basso livello per il controllo dei rivelatori e della sua integrazione nell'infrastruttura del sistema di controllo CNAO.

I nuovi rivelatori da installare nella LEBT richiedono la presenza del circuito di aria compressa (per la movimentazione della Faraday cup) e dell'acqua di raffreddamento (per evitare il surriscaldamento dei piatti e della Faraday cup).

9.3 Diagnostica per un upgrade in corrente

Al fine di migliorare l'efficienza dei processi di iniezione, cattura, accelerazione e trasporto, è molto utile mettere in funzione dei monitor di perdite di fascio (beam loss monitor). I rivelatori più indicati per coprire il range di intensità e di particelle in uso al CNAO, sono dei monitor di neutroni con una elettronica di acquisizione di tipo logaritmico per massimizzare il range dinamico. Un piccolo numero di tali rivelatori, che sono installati esternamente alle linee di fascio, dotato di supporti individuali e facilmente posizionabili in sala sincrotrone permetterà di identificare i punti di perdita principali e di ottimizzare il trasporto del fascio.

10 Aspetti di radioprotezione

Sono stati esaminati i problemi di radioprotezione di maggior rilevanza posti dal funzionamento del Sincrotrone per la linea sperimentale. I risultati ottenuti devono tuttavia considerarsi ancora parziali e di carattere assolutamente preliminare. Ci si riserva di confermarli e completarli in previsione dell'inoltro dell'istanza per la necessaria modifica dell'attuale nulla osta all'esercizio.

Le valutazioni in parola, se non diversamente indicato, sono basate sui dati di corrente e energia riportati nella Tabella 4.1 della Nota Tecnica CNAO NTEMZ-SFXPR-00015, che è riportata in questo documento in Tabella 1. I risultati, frutto di misure e/o di simulazioni effettuate prevalentemente con il codice Monte Carlo FLUKA, sono riportati in Appendice H, espressi in termini di equivalente di dose ambientale, $H^*(10)$, per la componente neutronica.

Lo yield di neutroni di maggior rilevanza protezionistica risulta essere originato dal fascio di ioni ${}^4\text{He}$ da 261 MeV/u.

L'efficacia delle attuali schermature della Sala viene confermata anche con i nuovi fasci sulla base dei risultati di numerose simulazioni.

Per quanto riguarda l'ipotizzato accesso in Sala durante i trattamenti, sulla base dell'esito di misure confermate dai risultati di simulazioni, si ritiene che l'evento causato dallo spegnimento accidentale del magnete di switching debba provocare l'intervento del SIS-LV2.

Devono inoltre essere preventivamente discusse e definite le modalità di accesso e i costi dell'eventuale sorveglianza fisica individuale del personale interessato.

Per quanto riguarda la strumentazione di monitoraggio ambientale, si segnala la necessità di completare l'installazione del prescritto monitor di concentrazione di attività in aria e dotarsi prudentemente di alcune parti di ricambio.

11 Adeguamento del SIS

11.1 Stato attuale

Come le sale di trattamento, anche la sala sperimentale deve essere compresa nel sistema di sicurezza radiologica SIS, che deve assicurare la sicurezza/radioprotezione delle persone (lavoratori e pubblico) e dell'ambiente.

Una parte del SIS della sala sperimentale è già stata realizzata durante la fase di costruzione del CNAO, ma non essendo stata ancora realizzata la linea di fascio, solo una parte dell'hardware è già in campo. Inoltre l'hardware necessario e la logica di funzionamento sono stati allora definiti in assenza di un progetto della linea di trasporto, scalando semplicemente il sistema.

Il SIS prevede due livelli di intervento, SIS-LV1 e SIS-LV2:

- il SIS-LV2 impedisce che il fascio venga accelerato e che possa raggiungere le sale di trattamento;
- il SIS-LV1 spegne tutti gli apparati radiologici, oltre a provocare l'intervento del SIS-LV2.

Il SIS-LV1 disabilita gli apparati radiologici aprendo un contatto di "external interlock" di:

- sorgenti ECR
- RFQ

- LINAC
- Debuncher
- Setti elettrostatici

e inoltre causa l'intervento del SIS-LV2.

Il SIS-LV2 agisce come segue:

- inibisce lo spegnimento del “chopper LEBT” impedendo al fascio di raggiungere il LINAC
- impedisce l'apertura del “chopper HEBT”, in modo che il fascio non possa raggiungere le sale di trattamento
- causa l'intervento del “dump bumper” che distrugge il fascio circolante nel sincrotrone
- comanda l'inserimento dei “beam stopper” nella HEBT.

11.2 Ridondanza delle protezioni

Una valutazione dei possibili malfunzionamenti ha evidenziato l'esistenza di una possibile situazione nella quale la configurazione attuale del SIS fornisce un minor grado di ridondanza di protezione della sala sperimentale rispetto alle sale di trattamento.

Il SIS, infatti, monitora costantemente lo stato di alcuni magneti delle linee di estrazione e permette l'invio del fascio in una sala, solo quando lo stato di tali magneti è coerente con la sala selezionata. Ad esempio in caso di fault di un magnete che deve essere acceso, il SIS rileva la incoerenza e mette le sale in sicurezza facendo intervenire il SIS-LV2.

La differenza tra la sala sperimentale e le sale di trattamento sta nel fatto che in caso di intervento del chopper HEBT, il fascio incidente sull'assorbitore punta verso la sala nel caso della XPR mentre, grazie alla presenza dei primi dipoli della HEBT, punta altrove nel caso delle sale di trattamento.

Nel caso di malfunzionamento della “inibizione del chopper LEBT” quando interviene il SIS-LV2 per lo spegnimento del dipolo che manda il fascio verso la XPR, si avrebbe la situazione in cui il fascio incide sui beam stopper della linea sperimentale. L'intervento del chopper HEBT è insufficiente e si propone dunque di ridondare a livello del SIS-LV2 il chopper LEBT. Un metodo semplice e intuitivo di ottenere ciò è quello di aggiungere al SIS-LV2 una faraday cup della MEBT che funga da beam stopper. Nel caso di malfunzionamento della “inibizione del chopper LEBT” l'inserimento di tale beam stopper impedisce al fascio di raggiungere il sincrotrone.

11.3 Operatività del SIS XPR

Come menzionato al paragrafo 2.4, si propone di introdurre un certo grado di automazione nell'irraggiamento in sala sperimentale. A tale scopo si prevede di introdurre un nuovo stato, valido unicamente per la sala sperimentale. I possibili stati per la sala sperimentale sono quindi:

- Disabilitata;
- Abilitata (ronda possibile);
- Autorizzata (ronda eseguita e fascio richiesto);
- Selezionata (selezionata dalla sala controllo principale);
- Sospesa (selezionata dalla sala controllo principale, ma fascio richiesto in sala di trattamento).

La sala sperimentale si trova in stato “sospeso” quando è pronta a ricevere fascio ma esso è stato richiesto in sala di trattamento. Quindi quando la sala sperimentale viene selezionata mentre è già selezionata una sala di

trattamento, o quando una sala di trattamento viene selezionata mentre è già selezionata la sala sperimentale, quest'ultima entra nello stato di "sala sospesa".

Il sistema di controllo dovrà poi gestire in autonomia la sospensione e la ripresa del "trattamento in sala sperimentale". Il SIS dovrà rendere disponibile al sistema di controllo anche lo stato della sala sperimentale.

In Appendice I è riportata una descrizione dettagliata delle modifiche e delle funzionalità richieste al SIS per la sala sperimentale.

12 Integrazione meccanica e allineamento

Gli oggetti descritti in questo report devono essere installati, supportati e allineati quando vengono messi in campo. È stato dunque necessario progettare i supporti, definire una procedura di installazione ed una procedura di allineamento per minimizzare l'impatto sul funzionamento dell'acceleratore. I dettagli sono riportati in appendice J. In Fig. 25 è riportata una vista a volo di uccello della linea.

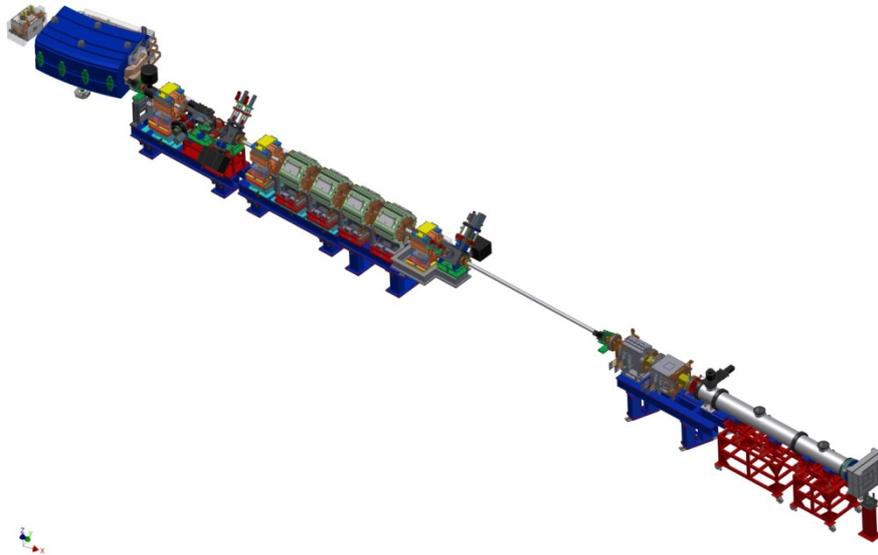


Fig. 25 Vista della linea sperimentale senza edificio. Nel lungo drift centrale si trova lo spazio per il muro tra la sala sperimentale e la sala sincrotrone.

12.1 Supporteria e montaggio

Per ridurre il fermo macchina necessario all'installazione, si prevede di montare i componenti (magneti, camere da vuoto, diagnostica) in una zona di montaggio appositamente predisposta all'esterno. I componenti verranno allineati tra loro e rispetto al girder con la precisione richiesta. I girder saranno quindi dotati di fori porta mire, per una più agevole gestione delle misure e dei successivi futuri controlli. L'errore dell'allineamento finale sarà dovuto alla somma di quelli residui dalla procedura di preallineamento e di quelli relativi al montaggio finale. Si ritiene di riuscire comunque a restare nelle tolleranze prescritte.

Per il supporto della linea di trasferimento in sala sincrotrone si sono impiegati girder e spaziatori simili a quelli usati nel resto della macchina. La lunghezza dei girder è stata scelta in modo da poter essere trasportati all'interno della sala mediante transpallet, prima di essere agganciati al carro ponte.

E' stata verificata la fattibilità di:

- carico su transpallet;

- manovrabilità all'ingresso in sala fino alla zona servita da carroponete;
- aggancio al carroponete, rispetto agli ingombri dei componenti montati sui girder.

Per poter preallineare i girder con i magneti e le camere da vuoto, è necessario dotare i girder stessi dei dispositivi per il posizionamento finale dell'intero gruppo premontato. È stata studiata una soluzione per inserire il movimento verticale tra la piastra di fissaggio a pavimento ed il piede delle gambe e per il movimento orizzontale (trasversale e longitudinale) tra la piastra sommitale delle gambe e la struttura del piano di supporto.

Le quattro posizioni previste per gli isocentri si ottengono montando tutte le sezioni di camera a vuoto o solo parte di esse, come illustrato nel paragrafo 8.2. Il risultato è illustrato in Fig. 26.

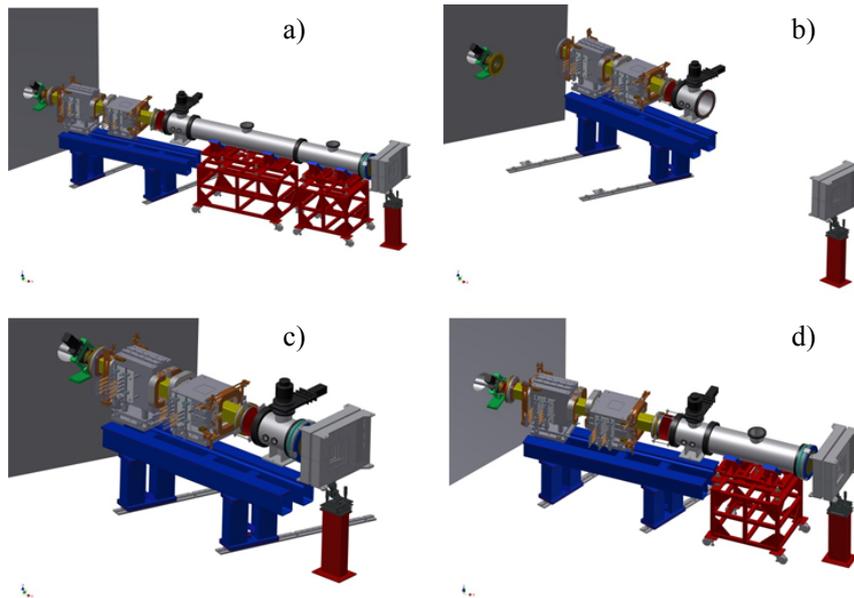


Fig. 26 Vista sala sperimentale nelle configurazioni corrispondenti alle quattro posizioni dell'isocentro.

Per poter passare facilmente da una configurazione all'altra sono state studiate delle soluzioni mobili per i componenti, in funzione delle loro caratteristiche. La linea può essere riconfigurata spostando i componenti senza doverli riallineare, grazie all'uso di spine e relativi alloggiamenti a pavimento, che garantiscono la ripetibilità del posizionamento con la precisione richiesta. È stata verificata la compatibilità della posizione dei supporti tra loro, con le guide per il girder mobile che sostiene i magneti di scansione, con gli alloggiamenti per i riscontri del supporto del nozzle e la piastra di fissaggio del pillar provvisorio per l'allineamento.

12.2 Allineamento

Le operazioni di tracciatura della rete in sala Sperimentale saranno fatte mediante Laser Tracker (LT). Le dimensioni della sala e il suo allestimento consentono di impiegare il LT come unico strumento di allineamento, con un solo punto stazione (centro sala), come illustrato in Fig. 27.

Il collegamento con la rete esistente in sala Sincrotrone verrà fatto mediante misure attraverso l'unico foro di collegamento. Si accetta il fatto che, una volta installata la linea, il foro non sarà più libero e quindi non sarà più possibile rivedere la posizione relativa tra le due reti. Dovrà essere possibile montare il LT in sala sincrotrone in asse con il foro per le prime misure.

Verranno installati tre alloggiamenti (nest) per il posizionamento dei CCR (Corner Cube Reflector, mire). I primi due (A, B) saranno posizionati, mediante misure fatte dalla sala Sincrotrone, lungo l'asse del fascio:

uno sulla parete opposta all'ingresso del fascio ed uno su un supporto (pillar) posto lungo l'asse. Il pillar sarà provvisorio e rimovibile e la sua base di fissaggio a terra sarà compatibile con la posizione e la movimentazione dei supporti mobili della linea. Le mire A e B, visibili anche dalla Sala Sincrotrone, permetteranno di relazionare le due reti.

Il terzo nest (C) sarà installato ad altezza linea sulla parete laterale, parallela all'asse del fascio e permetterà di definire una terna di assi della rete locale.

Per creare la rete in sala Sperimentale si prevede poi di posizionare un numero totale di 12 nest a parete (a coppie sovrapposti in verticale, equispaziati sulle 4 pareti), in modo da avere costante visibilità di un numero adeguato di mire per l'allineamento iniziale e i successivi controlli di posizione dei componenti. I nest a parete saranno installati mediante tasselli ad espansione.

A meno di specifiche richieste non è previsto vengano installati nests a pavimento.

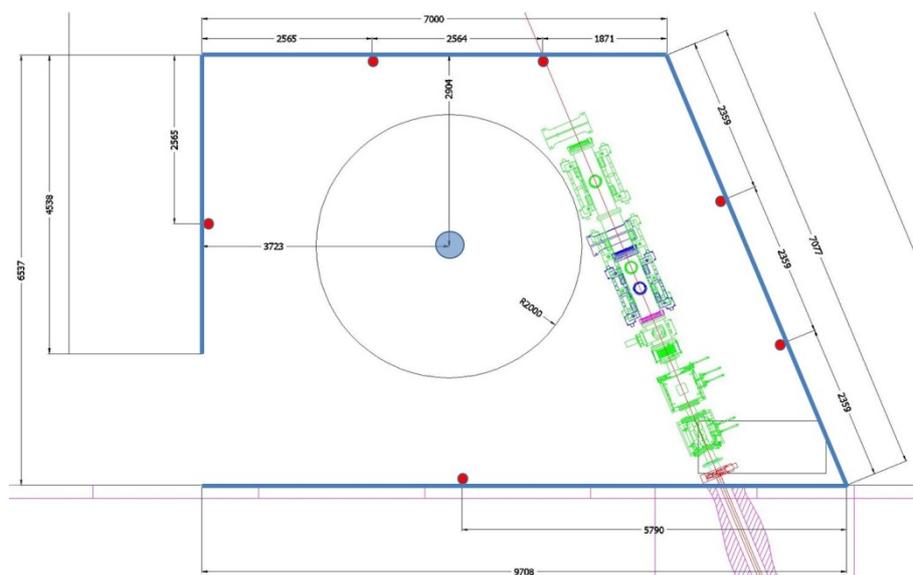


Fig. 27 Posizione del laser tracker in sala sperimentale.

13 Impianti

13.1 Impianto di raffreddamento

I circuiti di raffreddamento alta tecnologia sono due:

- I circuiti di raffreddamento magneti, che interessano i magneti della linea HEBT all'interno della sala sincrotrone e quelli di scansione al termine della linea HEBT posizionati nella sala sperimentale. I circuiti fanno capo alla stazione di pompaggio P10A-B (alta pressione) esistente.
- I circuiti di raffreddamento alimentatori, che servono i magneti della predetta linea e sono posizionati all'interno del locale predisposto al piano superiore dell'area power supply (Power Supply "Bis"), e che fanno capo alla stazione di pompaggio P09A-B.

13.1.1 Raffreddamento magneti

I magneti da raffreddare sono:

- n° 3 correttori;

- n° 4 quadrupoli;
- n° 2 magneti di scanning.

La portata nominale richiesta è di circa 50 l/min (3 m³/h).

E' possibile alimentare i magneti con l'acqua del circuito D2 (alta pressione), le cui pompe (P10A-B) sono attualmente regolate ad una frequenza pari a circa il 72% di quella nominale massima (120 m³/h). Oltre all'incremento di frequenza delle pompe non è quindi richiesto alcun altro intervento sulla stazione di pompaggio.

Nella figura Fig. 28 è riportata indicativamente la posizione di allaccio delle tubazioni di mandata e ritorno alle rispettive tubazioni del circuito D2.



Fig. 28 Passaggio tubazioni in sala sincrotrone.

In Fig. 28 la linea tratteggiata indica il presunto percorso delle tubazioni. Si osserva che:

- ad eccezione del tratto di collegamento allo stacco iniziale ed a quello dovuto all'attraversamento della parete divisoria tra sala sperimentale e sincrotrone, le tubazioni saranno ancorate al girder
- alle tubazioni si innesteranno gli stacchi dotati di attacchi Jic per l'allaccio dei magneti tramite tubazione flessibile
- ogni innesto sarà dotato di valvola di intercettazione a sfera
- il tratto in entrata alla sala sperimentale sarà dotato di valvole di intercettazione a sfera e di collegamenti flessibili per favorire la rimozione dei magneti di scanning ed il loro riposizionamento.

Sulla linea verrà installato un filtro a cartucce con grado di filtrazione di 30 µm.

13.1.2 Raffreddamento alimentatori

La realizzazione della linea sperimentale 1° fase prevede la posa in Power Supply Bis dei seguenti alimentatori:

- n° 3 alimentatori per correttori (raffreddati ad aria);
- n° 4 alimentatori per quadrupoli;
- n° 2 alimentatori per magneti di scanning.

La portata nominale complessiva è di circa 40 l/min (2,5 m³/h).

È possibile alimentare i magneti con l'acqua del circuito D1 (power supply), le cui pompe (P09A-B) sono attualmente regolate ad una frequenza pari a circa il 94% di quella nominale massima.

Le verifiche condotte ultimamente sui circuiti del power supply, sia dal punto di vista del ricalcolo delle portate di raffreddamento necessarie in funzione della riduzione della temperatura di ingresso sia dal punto di vista delle misure di portata effettuate su una serie di alimentatori non dotati di misuratore di portata visivo, ha evidenziato che è possibile effettuare un bilanciamento delle portate di ogni singola utenza, mettendo così a disposizione la portata in esubero: tale portata è di gran lunga superiore a quella richiesta per i nuovi alimentatori.

Nella figura è riportata indicativamente la posizione di allaccio delle tubazioni di mandata e ritorno alle rispettive tubazioni del circuito D1 nel Power Supply ed il percorso alle utenze al piano superiore.

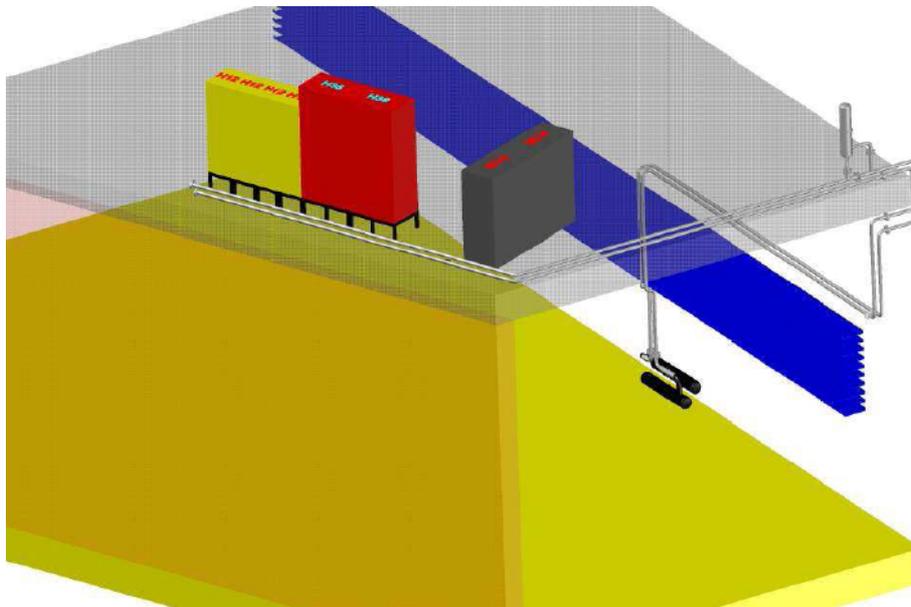


Fig. 29 Passaggio tubazioni dalla sala power supply alla sala power supply bis.

In particolare si evidenzia che:

- un tratto del percorso avviene all'esterno dell'edificio, pertanto tale tratto sarà opportunamente coibentato
- alle tubazioni si innesteranno gli stacchi dotati di attacchi Jic per l'allaccio degli alimentatori tramite tubazione flessibile
- ogni innesto sarà dotato di valvola di intercettazione a sfera

Sulla linea verrà installato un filtro a cartucce con grado di filtrazione di 30 µm.

13.2 Impianti elettrici

Come per gli altri aspetti, anche l'ampliamento dell'impianto elettrico è stato suddiviso nelle tre fasi:

- fase 1: realizzazione nuova linea HEBT e allestimento sala sperimentale con relativa sala controllo
- fase 2: realizzazione nuova linea LEBT e installazione terza sorgente
- fase 3: realizzazione nuova linea MEBT aggiuntiva

13.2.1 Fase 1 – HEBT

È necessario allestire il nuovo locale sala alimentatori Power Supply “bis”, nel locale ora adibito a magazzino, ubicato a fianco della cabina elettrica 1 e sopra la zona RF del locale power supply esistente. Gli alimentatori verranno appoggiati su supporti di rialzo dal pavimento.

Nel locale è già presente una blindo sbarra da 400A che verrà utilizzata per alimentare gli armadi alimentatori a servizio dei magneti della nuova linea HEBT. Parte di questa blindo dovrà essere ruotata di 90° per permettere la realizzazione del pavimento flottante a protezione dei cavi elettrici e degli impianti idraulici di raffreddamento.

Questa blindo ha le caratteristiche e il dimensionamento adeguato per alimentare gli armadi degli alimentatori della nuova linea HEBT e della futura LEBT.

Le alimentazioni AC verranno realizzate in cavo FG7OR di sezione adeguata in base alle caratteristiche dell'alimentatore e derivate dalla blindo sbarra tramite spine dotate di fusibili.

La distribuzione DC verrà realizzata con cavi FG7H1R di sezione adeguata in base alle caratteristiche del magnete installato in linea.

Le vie cavi DC tra nuova sala alimentatori e sala sincrotrone verranno realizzate in canali metallici aperti, in parte già presenti, fino all'ingresso dell'acceleratore; da una stima si ipotizza che il canale da 600 mm presente sia sufficiente; bisogna realizzare le calate dal soffitto al canale.

Lungo la linea i cavi saranno stesi a terra.

È necessario realizzare il prolungamento della barra equipotenziale in piatto di rame o corda da 240mmq e derivarsi dal piatto di rame installato lungo la linea con corde di rame da:

- 95mmq: per tutti i supporti, magneti e apparecchiature diagnostica;
- 25mmq: per armadi elettronica, struttura pavimenti galleggianti.

Oltre ai collegamenti elettrici dei magneti, sarà necessario adeguare l'impianto elettrico convenzionale e sarà necessario prevedere il cablaggio di sistemi accessori, come il sistema da vuoto, la diagnostica di fascio ed il SIS. I dettagli sono riportati in Appendice L.

13.2.2 Fase 2 – LEBT

In questa seconda fase si procederà con l'aggiunta di alimentatori nella nuova sala alimentatori Power Supply “bis”, che verranno alimentati dalle rimanenti prese libere della blindo sbarra anch'essi tramite spine protette da fusibile.

La stesura dei cavi DC verrà realizzata in canale metallico aperto da realizzare a soffitto del power supply fino a raccordare le forometrie già presenti tra power supply e sala sincrotrone. In sincrotrone occorre prevedere canale metallico fino alla base della linea e da qui proseguire con la stesura dei cavi a terra.

È necessario realizzare il prolungamento della barra equipotenziale in piatto di rame o corda da 240mmq e derivarsi dal piatto di rame installato lungo la linea con corde di rame da:

- 95mmq: per tutti i supporti, magneti e apparecchiature diagnostica;
- 25mmq: per armadi elettronica, struttura pavimenti galleggianti.

Da una prima stima si ipotizza la necessità in power supply di un canale da 500mm.

La nuova linea LEBT verrà dotata di una sorgente aggiuntiva che necessita delle seguenti alimentazioni:

- linea monofase da 8kW per rack di controllo → interruttore modulare da 40A
- linea trifase da 32kW per rack di potenza → interruttore modulare da 63A

Per questa fase non vi sono interruttori liberi nelle sezioni del quadro PID esistente; bisogna prevedere quindi una espansione della sezione del quadro e la ricertificazione dello stesso, in base alla normativa CEI23-51, CEI 64-8, DM37-08, DLgs 81/08.

Le nuove vie cavi verranno realizzate con idonee tubazioni e le linee verranno realizzate di sezione adeguata.

Gli impianti accessori tra i rack locali di comando e la sorgente verranno realizzati con materiale e cavi di sezione adeguata in base alle esigenze e alle indicazioni che verranno fornite dal gruppo sorgenti.

Anche per questa seconda fase sarà necessario adeguare l'impianto elettrico convenzionale e prevedere il cablaggio di sistemi accessori, come il sistema da vuoto, la diagnostica di fascio ed il SIS. In questa fase, dovendo variare la disposizione degli attuali rami di LEBT, si rende necessario lo spostamento di alcune torrette di prese elettriche e dati presenti in sincrotrone che interferiscono con il nuovo tracciato.

Questa operazione va eseguita mettendo in sicurezza gli impianti che hanno origine dal quadro QE-PID a servizio del sincrotrone. A modifiche ultimate si appronterà il nuovo layout del locale con l'indicazione delle nuove linee e di quelle eventualmente rimosse.

13.2.3 Fase 3 – MEBT

In questa terza fase si procederà con l'aggiunta di alimentatori nella nuova sala alimentatori Power Supply “bis”, che verranno alimentati da una nuova linea blindo da realizzare.

La linea verrà derivata da un interruttore di riserva presente nel quadro QEGBT1.

Gli alimentatori verranno alimentati dalle prese della blindo sbarra tramite spine fusibili. La disposizione completa degli alimentatori comprendente le tre fasi di ampliamento è raffigurata in Fig. 30

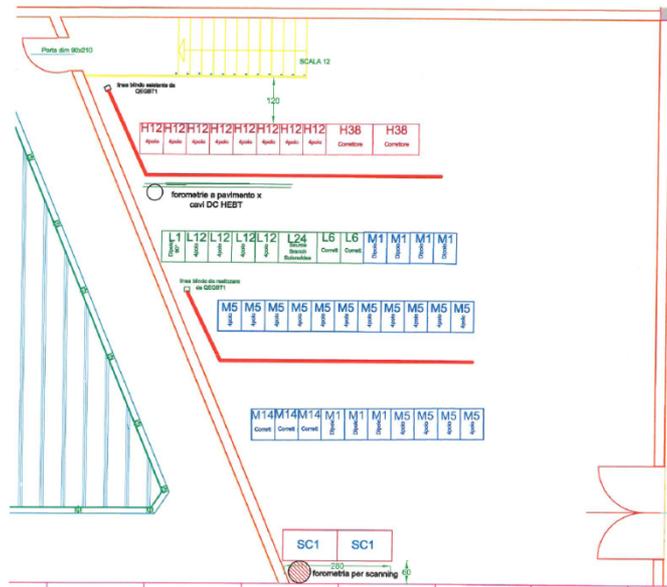


Fig. 30 Disposizione finale degli alimentatori nella sala power supply bis. I colori rosso, verde e blu corrispondono alle fasi 1, 2 e 3.

14 Locali accessori

Il sondaggio condotto tra i possibili fruitori della sala sperimentale ha evidenziato l'opportunità di dotare la struttura di locali di supporto attigui, utili all'istallazione e allo svolgimento degli esperimenti. In particolare, servono:

- un locale adibito a deposito per la conservazione dei materiali irraggiati prima che ne venga autorizzato l'allontanamento dal CNAO;
- un laboratorio di radiobiologia;
- un locale d'appoggio ove effettuare (pre)montaggio e smontaggio delle apparecchiature sperimentali;
- un deposito temporaneo del materiale degli utenti esterni.

Sebbene al CNAO sia già presente un laboratorio di biologia si ritiene opportuna la realizzazione di un piccolo laboratorio locale addizionale di radiobiologia.

Il locale di radiobiologia attiguo alla sala sperimentale servirebbe come laboratorio di appoggio per gli utenti che avranno necessità di manipolare e mantenere in coltura le cellule per gli esperimenti. Tale laboratorio non andrebbe a duplicare il laboratorio di biologia già presente al primo piano, che serve ed è attrezzato per le attività sperimentali di radiobiologia, ma avrebbe la funzione di fornire uno spazio attrezzato al minimo per i ricercatori esterni.

L'allestimento di un laboratorio vicino alla sala sperimentale eviterebbe inoltre il continuo passaggio di persone esterne a CNAO dalla sala sperimentale (piano -1) all'attuale laboratorio di biologia (piano 1 vicino agli uffici) e viceversa.

Complessivamente le dotazioni di laboratorio dovranno prevedere l'attrezzatura minima necessaria per preparare i campioni biologici (cellulari e tissutali) per l'irraggiamento e per processare gli stessi campioni dopo l'irraggiamento in modo che possano essere poi trasportati ai laboratori "di origine" dei ricercatori.

È infine auspicabile l'acquisto di un irraggiatore a raggi X in modo da avere la possibilità di avere una sorgente di radiazione di riferimento nelle stesse condizioni sperimentali utilizzate per i fasci di protoni e/o ioni carbonio.

Anche la realizzazione di un locale attiguo alla sala sperimentale ove custodire le cavie durante gli irraggiamenti è una questione da considerare, pur tenendo conto della necessità di soddisfare ai vincoli normativi e di sicurezza e che l'irraggiamento di animali richiede una lunga preparazione preliminare.

15 Stima dei costi

Con l'approssimarsi del termine dell'accordo quadro e con essa della fase di progetto, CNAO ed INFN hanno stipulato un nuovo accordo quadro ed un nuovo accordo attuativo che comprende la realizzazione della linea sperimentale. Tale accordo prevede una suddivisione della implementazione in due fasi in modo da permettere la messa in opera della facility in maniera graduale, calibrata sulla disponibilità di risorse.

Dopo un'attenta analisi delle problematiche connesse e di tutto quanto necessario per la realizzazione della XPR, è stata elaborata, dai singoli gruppi, responsabili delle loro specifiche attività, una stima dei costi attuali sulla base dell'esperienza, dei costi sostenuti per la realizzazione del CNAO e sulla base di offerte budgettarie recenti.

In Tabella 6 sono riportati i costi complessivi stimati di tutte le spese da affrontare, raggruppati in "Fase 1", "Fase 2" e "Locali di supporto". Le varie voci rappresentano il costo totale comprensivo di IVA al 22% ed arrotondate.

In aggiunta alla revisione dettagliata dei costi dei componenti sulla base delle specifiche aggiornate, si è ritenuto opportuno considerare una voce aggiuntiva, pari a circa il 10% del totale delle spese individuate per “Imprevisti, possibili aumenti dei costi, contingency”.

Il costo complessivo della terza sorgente è stimato in soli 1.440 k€ dato che si avvantaggia della costruzione precedente o in contemporanea della sorgente di Catania, che si farà carico di tutta una serie di costi per lo studio e lo sviluppo di tutti i componenti più critici e costosi. Inoltre per la sorgente dei LNS è previsto un amplificatore RF di maggior potenza e del costo di circa 250 k€, che non serve al CNAO.

Nella Fase 1 si intende avviare la costruzione dei componenti più critici della sorgente SO3, per un importo pari a 590 k€, che richiedono più tempo di realizzazione e che usufruiranno di uno sconto se acquistati in contemporaneità a quelli della sorgente AISHa realizzata a Catania con il finanziamento della Regione Siciliana.

In Tabella 7, sono riportati i costi complessivi del progetto XPR, suddiviso nelle voci principali, le fonti di finanziamento ed i relativi contributi a copertura delle due fasi di rendicontazione previste.

Grazie alla disponibilità iniziale di fondi dal Premiale IRPT dell’INFN, pari a 2.380 k€ invece di 2.155 k€, ed agli spare del CNAO si potranno coprire i costi della Fase 1, che prevedono la realizzazione della HEBT adeguata alle priorità di ricerca e l’avvio della realizzazione della sorgente SO3-AISHa.

La Fase 2 prevede il completamento della HEBT, la modifica alle LEBTs ed alle sorgenti SO1 & SO2 la realizzazione della LEBT O3, con installazione ed impianti specifici ed il completamento della sorgente SO3-AISHa.

Infine sempre nella Fase 2 è anche prevista la realizzazione dei “Locali attigui e di supporto” alla XPR che sono di responsabilità del CNAO.

La realizzazione della Fase 2 e' ovviamente legata alla possibilità di INFN e di CNAO di reperire ulteriori finanziamenti per investimenti infrastrutturali.

Tabella 6 Costi previsti per la realizzazione della XPR al termine della fase di progettazione.

| | |
|---|-----------|
| HEBT | 1 521 000 |
| Diagnostica | 256 000 |
| Vuoto | 280 000 |
| Meccanica | 86 000 |
| Magnet | 115 000 |
| Alimentatori | 370 000 |
| Sistema di controllo | 81 000 |
| Nozzle | 333 000 |
| | |
| Controlli e sicurezze, installazione, impianti | 643 000 |
| Radioprotezione | 34 000 |
| SIS | 205 000 |
| Impianti elettrici | 90 000 |
| Impianti meccanici | 173 000 |
| Sala sperimentale e sala di controllo locale | 141 000 |
| | |
| Imprevisti, possibili aumenti dei costi, contingency ~10% | 216 000 |
| | |
| HEBT spare forniti dal CNAO | 565 000 |
| | |
| Anticipo costruzione componenti SO3-AISHa | 590 000 |

| | |
|---|-----------|
| | |
| Costo totale della Fase 1 | 3 535 000 |
| | |
| HEBT completamento | 824 000 |
| Diagnostica | 196 000 |
| Magneti | 40 000 |
| Alimentatori | 283 000 |
| Nozzle | 305 000 |
| | |
| LEBT & Sorgenti SO1 & SO2 | 191 000 |
| Vuoto | 14 000 |
| Magneti | 90 000 |
| Sistema di controllo | 40 000 |
| Sorgente O1 | 36 000 |
| Sorgente O2 | 11 000 |
| | |
| LEBT O3 | 796 000 |
| Diagnostica | 213 000 |
| Vuoto | 110 000 |
| Meccanica | 26 000 |
| Magneti | 59 000 |
| Alimentatori | 301 000 |
| Sistema di controllo | 80 000 |
| Integrazione e Layout | 7 000 |
| | |
| Controlli e sicurezze, installazione, impianti LEBT | 134 000 |
| SIS | 45 000 |
| Impianti elettrici | 28 000 |
| Impianti meccanici | 61 000 |
| | |
| Imprevisti, possibili aumenti dei costi, contingency ~10% | 195 000 |
| | |
| LEBT spare forniti dal CNAO | 385 000 |
| | |
| Completamento sorgente SO3-AISHa | 850 000 |
| | |
| Costo totale della Fase 2 | 3 375 000 |
| | |
| Costo totale Fase 1 + Fase 2 | 6 910 000 |
| | |
| Locali di supporto | 600 000 |
| | |

Tabella 7 Costi previsti per la realizzazione della XPR e suddivisione degli stessi secondo gli accordi attuativi 2014

| | |
|---|-----------|
| XPR costo complessivo | 6 910 000 |
| HEBT | 2 910 000 |
| LEBT | 1 372 000 |
| Controlli e sicurezze, installazione, impianti | 777 000 |
| Sorgente | 1 440 000 |
| Imprevisti, possibili aumenti dei costi, contingency ~10% | 411 000 |
| | |
| XPR copertura costi | 6 910 000 |
| Premiale IRPT espressamente finanziato per XPR | 2 500 000 |
| A carico INFN | 2 205 000 |
| A carico CNAO in componenti spare | 950 000 |
| A carico CNAO | 1 255 000 |
| | |
| XPR Copertura costi - Fase 1 | 3 535 000 |
| A carico INFN dal Premiale IRPT | 2 380 000 |
| A carico CNAO in componenti spare per HEBT | 565 000 |
| A carico INFN dal Premiale IRPT per anticipo SO3-AISHa | 590 000 |
| | |
| XPR Copertura costi - Fase 2 | 3 375 000 |
| A carico INFN per completamento HEBT | 412 000 |
| A carico CNAO per completamento HEBT | 412 000 |
| A carico INFN per LEBTs | 473 000 |
| A carico CNAO per LEBTs | 843 000 |
| A carico CNAO in componenti spare per LEBT | 385 000 |
| A carico INFN per completamento SO3-AISHa | 850 000 |

-
- 1 A. Brahme, *Recent advances in light ion radiation therapy*, Int J Radiat Oncol Biol Phys. 2004 Feb 1;58(2):603-16.
 - 2 H Tsujii, A. Brahme, 4th Japanese – European Joint Symposium on Ion Cancer Therapy, Stockholm, 2010.
 - 3 L. Badano, M. Benedikt, P.J. Bryant, M. Crescenti, P Holy, P. Knaus, A. Meier, M. Pullia and S. Rossi, *Proton–Ion Medical Machine Study (PIMMS)*, CERN/PS 2000-007 DR.