

L'impianto Top-Implart

TOP-IMPLART è un acceleratore lineare di protoni sviluppato da ENEA nell'ambito di un progetto finanziato dalla Regione Lazio per la realizzazione a livello prototipale di un sistema innovativo per la terapia di neoplasie tramite protoni. Tramite un'azione di trasferimento tecnologico verso l'industria ENEA ha promosso la realizzazione di versioni ingegnerizzate adeguate all'operazione in sede ospedaliera. La macchina, oltre che in ambito bio-medicale, è impiegata anche per applicazioni nel settore dell'aerospazio per lo studio degli effetti causati dalla esposizione alle radiazioni di sistemi biologici e componenti elettronici.

DOI 10.12910/EAI2023-066

di **Concetta Ronsivalle, Alessandro Ampollini, Maria Denise Astorino, Giulia Bazzano, Fabio Fortini, Paolo Nenzi, Vincenzo Surrenti, Emiliano Trinca**, Laboratorio Acceleratori di Particelle ed Applicazioni Medicali - ENEA

L'impianto TOP-IMPLART (Terapia Oncologica con Protoni – Intensity Modulated Proton Linear Accelerator for RadioTherapy) è basato su un acceleratore lineare di protoni a RadioFrequenza (RF) sviluppato da ENEA in collaborazione con l'Istituto Superiore di Sanità (ISS) e l'Ospedale Oncologico IFO (Istituti Fisioterapici Ospedalieri) Regina Elena di Roma nell'ambito di un progetto, finanziato dalla Regione Lazio, finalizzato alla realizzazione di un prototipo di acceleratore completamente lineare per protonterapia (radioterapia con protoni).

La protonterapia, una branca della più generale adroterapia (terapia con adroni, ossia con particelle pesanti, in particolare protoni e ioni carbonio) è una tecnica particolarmente efficace basata sul bombardamento da parte di protoni accelerati del tessuto neoplastico, che offre un radiotrattamento più preciso rispetto alla terapia mediante raggi gamma, essendo in grado di conferire una dose pressoché nulla agli organi sani circostanti la regione trattata.

Questo in virtù della particolare modalità di rilascio della dose da parte dei protoni, che cedono tutta la loro energia alla fine del percorso nel tessuto (picco di Bragg).

Una macchina innovativa

L'innovatività dell'acceleratore TOP-IMPLART rispetto ad altre macchine impiegate in adroterapia quali acceleratori circolari costituiti da ciclotroni o sincrotroni, risiede nella scelta di una sequenza di acceleratori lineari, con componenti basate su un precedente brevetto ENEA. Tale soluzione offre il vantaggio di essere estremamente versatile nel piano di terapia, soprattutto in termini di controllo impulso per impulso dell'energia rilasciata e dell'intensità. **Il sistema basato su acceleratori lineari è inoltre meno costoso e meno demanding dal punto di vista della radioprotezione rispetto alle macchine basate su acceleratori circolari.**

La macchina installata in un bunker di 27 metri di lunghezza all'interno del Laboratorio APAM (Acceleratori di Particelle e Applicazioni Medicali) nel Centro Ricerche ENEA di

Frascati, è composta da un iniettore commerciale da 7 MeV operante a una radio frequenza (RF) di 425 MHz seguito da una successione di otto moduli di accelerazione di tipo SCDTL (Side Coupled Drift Tube Linac) operanti a una RF di 3 GHz, che innalzano l'energia del fascio di protoni a 71 MeV.

Gli otto moduli, interamente progettati all'interno del Laboratorio APAM, sono raggruppati in due sezioni, ciascuna di quattro moduli e ogni sezione è alimentata da un klystron da 10 MW di potenza di picco. Il fascio accelerato è emesso in impulsi di lunghezza temporale di 2.5 microsecondi che si succedono ad una frequenza tipica di ripetizione di 25 Hz. La carica tipica per impulso può essere variata fino a $5 \cdot 10^8$ protoni. I protoni si propagano in vuoto all'interno dell'acceleratore e vengono poi estratti in aria attraverso una sottile finestra di Titanio. La dimensione del fascio estratto è inferiore a 3 mm.

L'acceleratore è seguito da una linea di delivery della radiazione che include una coppia di magneti di scansione che consente di irraggiare

bersagli estesi fino ad un'area di 10 x 10 cm montati in una apposita postazione di irraggiamento. La linea è dotata delle diagnostiche di fascio quali Faraday cup, camere a ionizzazione integrali e 2D, scintillatori e monitor non distruttivi di intensità di corrente, tutte necessarie a valutare l'intensità e la posizione del fascio di particelle durante l'irraggiamento. La postazione di irraggiamento è adatta per irraggiamenti di tipo shot-through, in cui il picco di Bragg cade dietro al campione irraggiato e SOBP (Spread Out Bragg Peak), in cui il profilo di dose rilasciato nel volume di interesse viene reso uniforme sovrapponendo con intensità diverse vari picchi di Bragg ottenuti variando l'energia dei protoni.

L'attività sperimentale e i rapporti con le aziende

L'impianto TOP-IMPLART dispone anche di una seconda linea spe-

rimentale a bassa energia (3-7 MeV) in direzione verticale che impiega un magnete a 90° installato all'uscita dell'iniettore. Questa linea viene impiegata per esperimenti di radiobiologia cellulare e caratterizzazione di dosimetri a tracce fluorescenti biocompatibili sviluppati anch'essi in ENEA. Inoltre, grazie alla elevata intensità del fascio, la linea verticale verrà impiegata per studiare effetti di tipo FLASH, cioè di irraggiamenti di breve durata (dell'ordine di 100 millisecondi) ad alto rateo di dose (valori superiori a 40 Gy/sec), e per lo sviluppo di diagnostiche adeguate a questo particolare regime radioterapico, che da studi recenti a livello internazionale appare molto promettente, ma i cui meccanismi vanno ancora compresi.

La collaborazione TOP-IMPLART ha prodotto una attività di ricerca riguardante il commissioning dell'acceleratore stesso e l'impiego

della radiazione da esso prodotta in molteplici campi di ricerca.

La principale attività sperimentale ha riguardato la caratterizzazione dosimetrica dei fasci pulsati di protoni, tramite, da un lato, la valutazione delle potenzialità di sistemi commerciali già in uso nella pratica clinica, e dall'altro lo sviluppo ad hoc di dosimetri innovativi e nuovi monitor di fascio. Questa attività è stata propedeutica alla definizione di procedure che hanno permesso la realizzazione di campagne sperimentali di radiobiologia, in vitro e in vivo. **Ad oggi, l'acceleratore TOP-IMPLART è l'unico di tipo lineare per protonterapia presso cui sia stata svolta, e pubblicata, attività di ricerca in radiobiologia.**

Inoltre, lo sviluppo dell'impianto TOP-IMPLART ha dato luogo a due filoni di rapporto con le aziende. Il primo connesso alla realizzazione meccanica delle strutture

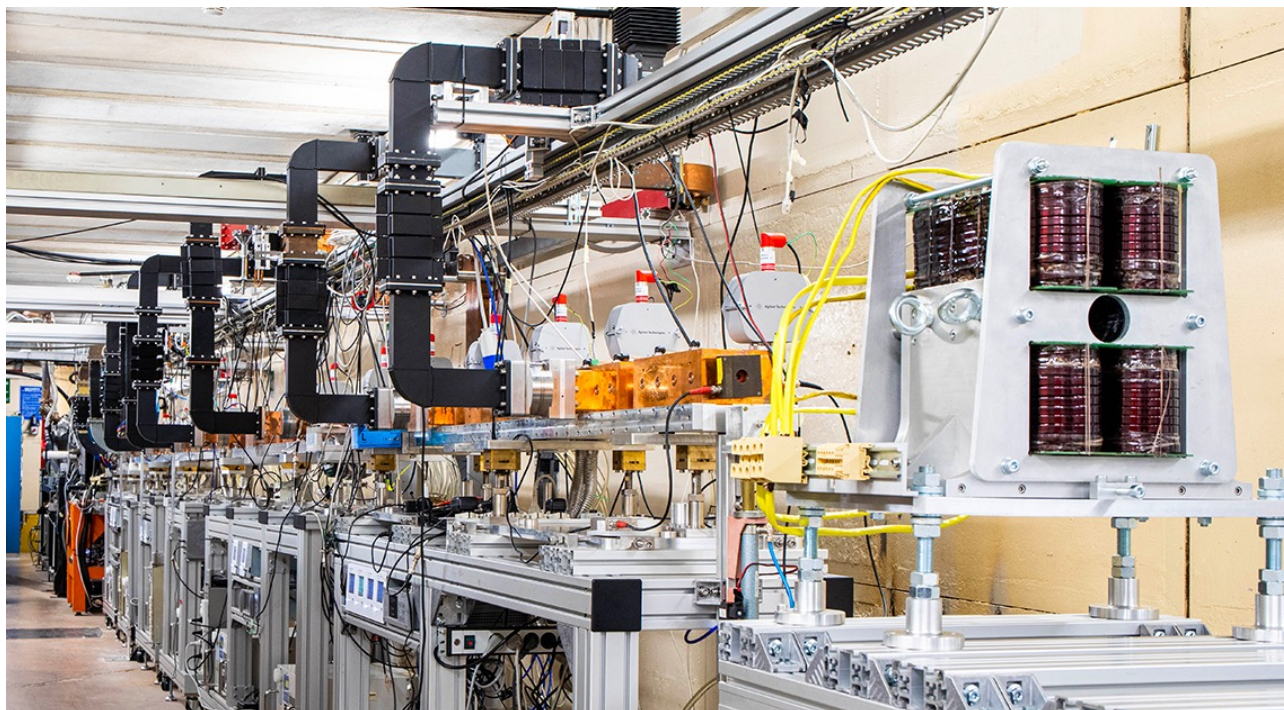
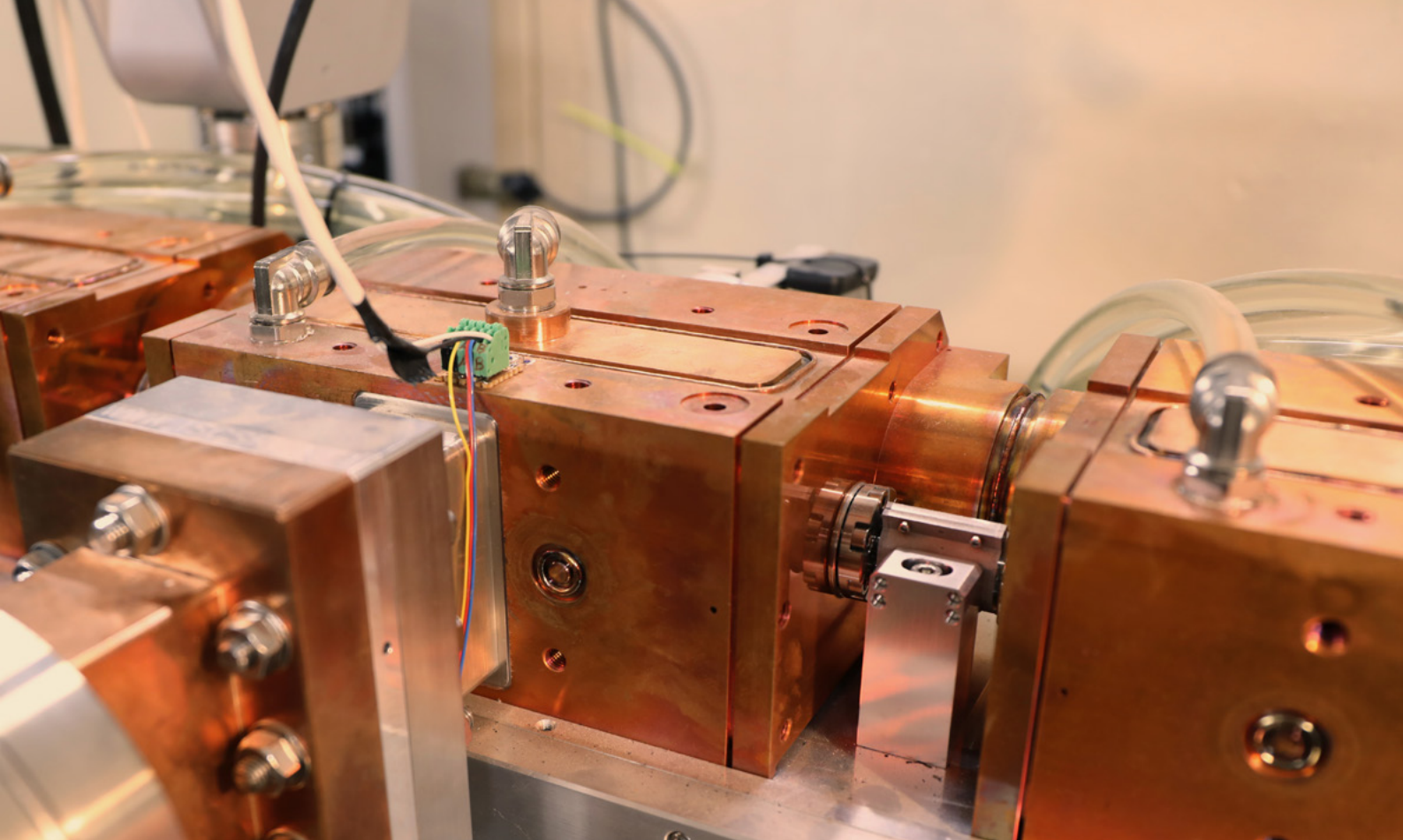


Figura 1: L'impianto TOP IMPLART presso il Centro ENEA di Frascati



acceleranti e di alcuni componenti a radiofrequenza da parte di ditte italiane (in particolare laziali) e il secondo legato all'interesse suscitato come possibile sistema ad alto impatto commerciale nel mondo della protonterapia. Questo secondo filone ha portato, tramite un'azione di trasferimento tecnologico svolta dall'ENEA, alla realizzazione di una versione ingegnerizzata della macchina a più elevata energia da parte della ditta pugliese LINEARBEAM (<https://linearbeam.com/>). Il sistema industriale è in fase di completamento anche dal punto di vista delle certificazioni per il suo impiego in una struttura clinica.

Oltre a costruire una consolidata

esperienza nell'ambito delle Scienze della Vita, l'attività sperimentale di TOP-IMPLART ha permesso di evidenziare le potenzialità di questo impianto anche in campi diversi dalla protonterapia. Grazie alle competenze sviluppate nella caratterizzazione e delivery del fascio di protoni, l'impianto può infatti essere applicato con successo nel **settore dell'aerospazio** per la caratterizzazione della resistenza a radiazioni rappresentative dell'ambiente spaziale, come i protoni, appunto, di componenti elettronici e materiali. Questi test si svolgono secondo protocolli ESA e in questi anni è stata avviata una attività di studio per verificare l'aderenza delle metodologie

sviluppate a TOP-IMPLART con i requisiti di tali protocolli. Attualmente l'acceleratore TOP-IMPLART è una delle facilities inserite nel programma ASIF2 (ASI Supported Facilities) finanziate dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI). L'operatività della macchina è garantita dallo staff tecnico e scientifico del Laboratorio APAM che verifica la qualità del fascio di particelle, si occupa della manutenzione e supporta gli utenti provenienti sia dal mondo dell'industria che da quello della ricerca anche nella realizzazione di setup di irraggiamento custom, se richiesto.

per info: concetta.ronsivalle@enea.it