



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



Dalla radioprotezione all'utilizzo in strumenti diagnostici e terapeutici: collaborazioni virtuose

Carmela Marino

Divisione Tecnologie e Metodologie per la Salvaguardia della Salute, ENEA
C.R. Casaccia, Roma

Convegno INFN - ENEA - 1 Luglio 2021
Laboratori INFN Frascati - Aula B. Touschek



Radioprotezione

ENEA e INFN come Enti di ricerca esercitano grandi e complesse infrastrutture sperimentali con impiego/produzione di radiazioni ionizzanti.

Spesso l'esercizio di tali infrastrutture e impianti richiedono valutazioni tecnico-scientifiche di radioprotezione specifiche e non usuali in altre realtà.

La collaborazione fra ENEA e INFN è rivolta in particolare alla condivisione delle valutazioni messe in atto per le attività di ricerca con impiego di radiazioni in grandi facility sperimentali (inclusi in particolare grandi acceleratori, impianti nucleari di ricerca).

Non è secondaria l'attenzione tecnica ed operativa per l'adempimento della normativa nazionale e la relativa specifica interpretazione ai casi sperimentali complessi dei due Enti.

Il D.Lgs.101/2020 entrato in vigore dal 27/8 u.s. inoltre introduce nuovi aspetti sia tecnici che normativi che vanno applicati senza soluzione di continuità alle attività di ricerca.

Radioprotezione

ENEA e INFN , attraverso le rispettive strutture deputate agli aspetti di radioprotezione e che coordinano le attività e le valutazioni di radioprotezione (*Istituto di Radioprotezione in ENEA e Servizio Salute e Ambiente in INFN*, seppure con funzioni differenti e in strutture organizzative anche molto differenti, sin dal 2020 si sono confrontate su tematiche rilevanti attualmente in tema di radioprotezione, legate anche ai recepimento nella normativa nazionale delle direttive Europee.

Proprio per le novità recepite nella regime legislativo nazionale grande importanza riveste **l'aggiornamento e la formazione** degli addetti ai lavori e degli esercenti delle attività con radiazioni ionizzanti.

- Ulteriori temi di primo interesse comune, anche in ragione di scadenze temporali delle norme transitorie del decreto, ma non esclusivo possono essere:
 - valutazioni di dose per esposizione esterna e contaminazione interna in condizioni di routine ed in situazioni incidentali, a priori ed a posteriori, applicando le recenti raccomandazioni ICRP sul tema;
 - qualificazione e verifica della prestazione dei mezzi di misura individuale e degli strumenti atti al monitoraggio degli ambienti di lavoro e dell'ambiente;
 - Gestione dei materiali attivati e radioattivi nelle pratiche esercite ai fini anche delle modalità di allontanamento e rilascio
-
- Ai temi di interesse scientifico si aggiunge anche l'interesse al confronto e collaborazione nella predisposizione di procedure gestionali per l'implementazione della normativa nei rispettivi Enti, anche ai fini della realizzazione di un sistema di gestione dedicato ai rischi delle radiazioni ionizzanti.

Radioprotezione – formazione

Proprio per le novità recepite nella regime legislativo nazionale grande importanza riveste l'aggiornamento e la formazione degli addetti ai lavori e degli esercenti delle attività con radiazioni ionizzanti.

- Nel 2021 è stato definito e condiviso un programma di aggiornamento e formazione per gli esperti di radioprotezione, e addetti ai lavori dei due Enti, sulle seguenti tematiche di particolare attualità con relazioni tenute da massimi esperti nazionali:
 - *Novità del Decreto Legislativo 101/2020*
 - *Vincolo di Dose e principio di ottimizzazione*
Radon: Normativa e valutazione del rischio
 - *Radon: misure e risanamento*
 - *Rifiuti radioattivi: caratterizzazione e gestione*
 - *Materiali radioattivi: caratterizzazione e gestione*
Livelli di esenzione ed allontanamento
 - *Dosimetria dei neutroni e misure di caratterizzazione dei campi neutronici*
- Il corso si è tenuto nel mese di giugno u.s.. è stato erogato dall'Istituto INFORMA con la collaborazione dell'Università di Roma Tre. Il corso, complessivamente di 32 ore in modalità remota sincrona, prevede il rilascio dell'attestato di frequenza e costituisce credito formativo dell'Esperto di Radioprotezione e assolvimento degli adempimenti di formazione secondo quanto recentemente stabilito dal decreto legislativo 101/2020.

Collaborazioni ed attività congiunte

- TOP-IMPLART (Terapia Oncologica con Protoni - Intensity Modulated Proton Linear Accelerator for RadioTherapy)
- Nuovo strumento portatile per misure in situ di attività di radionuclidi usati in medicina nucleare
- NEST - NEA Nuclear Education, Skills and Technology - proposta MANTRAS per applicazioni medicali (parte del contributo italiano a NEA/NEST con patrocinio del MAECI)
- Cluster ALISEI
- Piattaforma EURATOM MELODI

Il Progetto TOP-IMPLART

Scopo del progetto è la realizzazione di un **prototipo di acceleratore lineare di protoni innovativo con un'energia massima di 150 MeV**, base per la realizzazione di un impianto per l'utilizzo di fasci di protoni per trattamenti oncologici.

Il prototipo è stato finanziato dalla Regione Lazio con 11 M€. E' in corso di realizzazione e test presso il CR ENEA a Frascati e verrà eventualmente trasferito in un ospedale laziale

- ❑ Nov. 2012: Inizio
- ❑ Finanziamento ottenuto sinora (6.5 ML)

Il Progetto TOP-IMPLART

Team di istituzioni

- ❑ **Regione Lazio** e **Lazio Innova** (finanziamento)
- ❑ **ENEA** (acceleratore, radiobiologia cellulare e animale, radioprotezione)
- ❑ **ISS** (Istituto Superiore di Sanità) (dosimetria, monitoraggio del fascio, radiobiologia)
- ❑ **IFO-IRE** (requisiti clinici, test pre-clinici, treatment planning, radioprotezione)

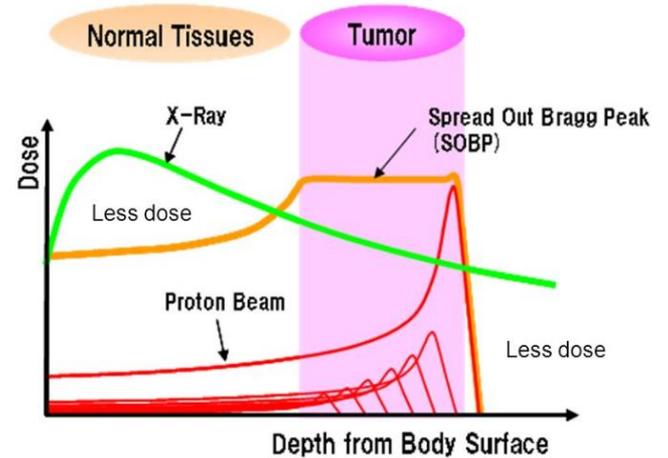
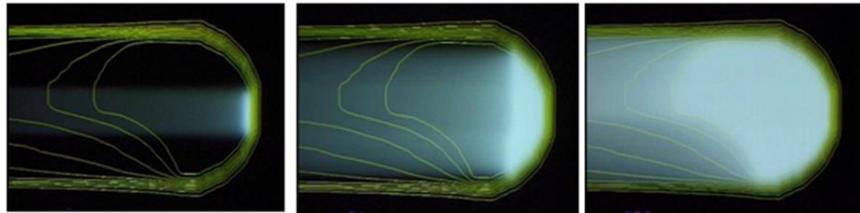
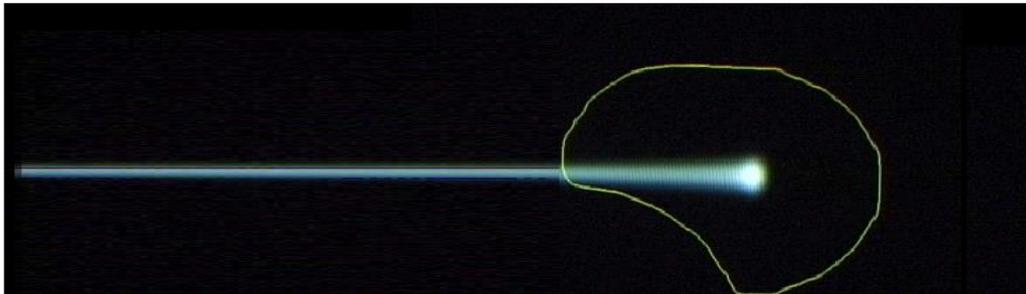
TOP-IMPLART: attività correlate

- 1. Sviluppo di nuovi rivelatori a lettura ottica per dosimetria e radiobiologia;** ENEA: R. M. Montereali, E. Nichelatti, V. Nigro, M. Piccinini, M. A. Vincenti *ISS-INFN E. Cisbani*
- 2. Dose delivery monitor per fasci ad alta intensità istantanea;** ENEA: L. Picardi, C. Ronsivalle, G. Bazzano, P. Nenzi; ISS: E. Cisbani, F. Ghio, F. Santavenere INFN-Roma3: M. Iodice, R. di Nardo); UniRoma3: F. Petrucci.
- 3. Dosimetria di fasci di protoni ad alta dose, e rateo di dose, per impulso** ENEA: M. Vadrucci; INFN: Francesco Romano
- 4. Nanodiamanti come radiosensibilizzanti in trattamenti radioterapici, in connessione col progetto INFN RESOLVE (CNS5),** ENEA: S. Pazzaglia; INFN: F. Picollo

Perché la protonterapia?

Elevata capacità conformazionale “intrinseca” :

- ❑ Distribuzione di dose longitudinale (picco di Bragg)
- ❑ Modesta diffusione laterale

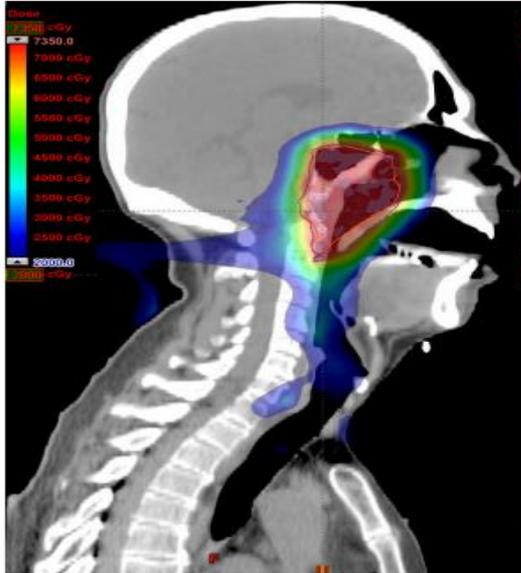


Irraggiamento di un volume tumorale di forma qualsiasi con scanning attivo:

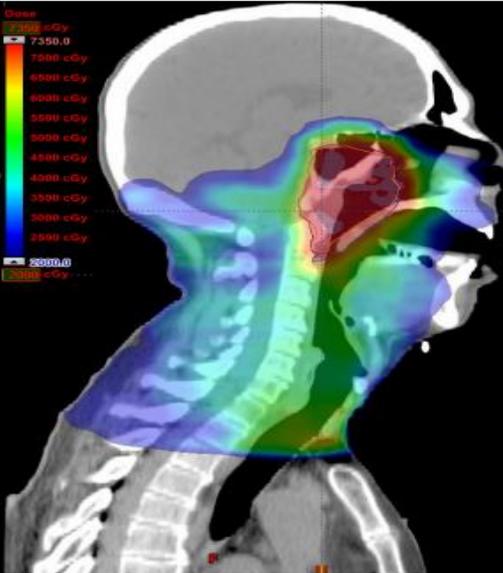
- ❑ Modulazione di energia
- ❑ Modulazione di intensità
- ❑ Variazione della posizione trasversa

Eliminazione della radiazione non necessaria

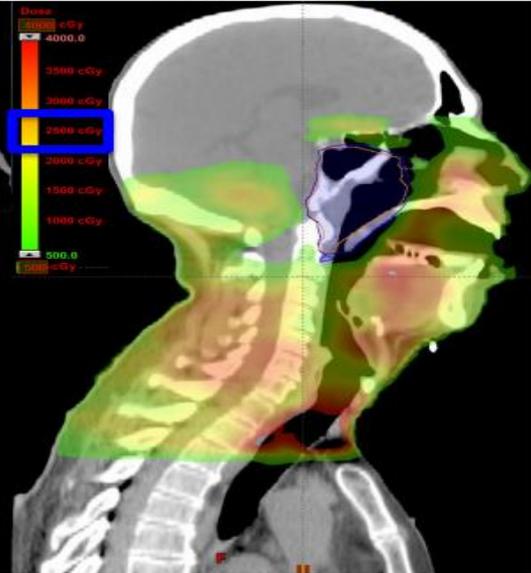
Proton Therapy (IMPT)



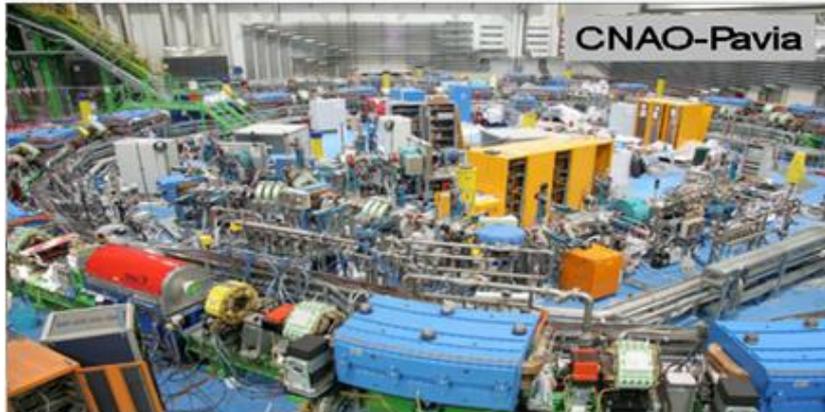
X-Ray Therapy (IMRT)



Added Radiation w/
IMRT (X-Rays)



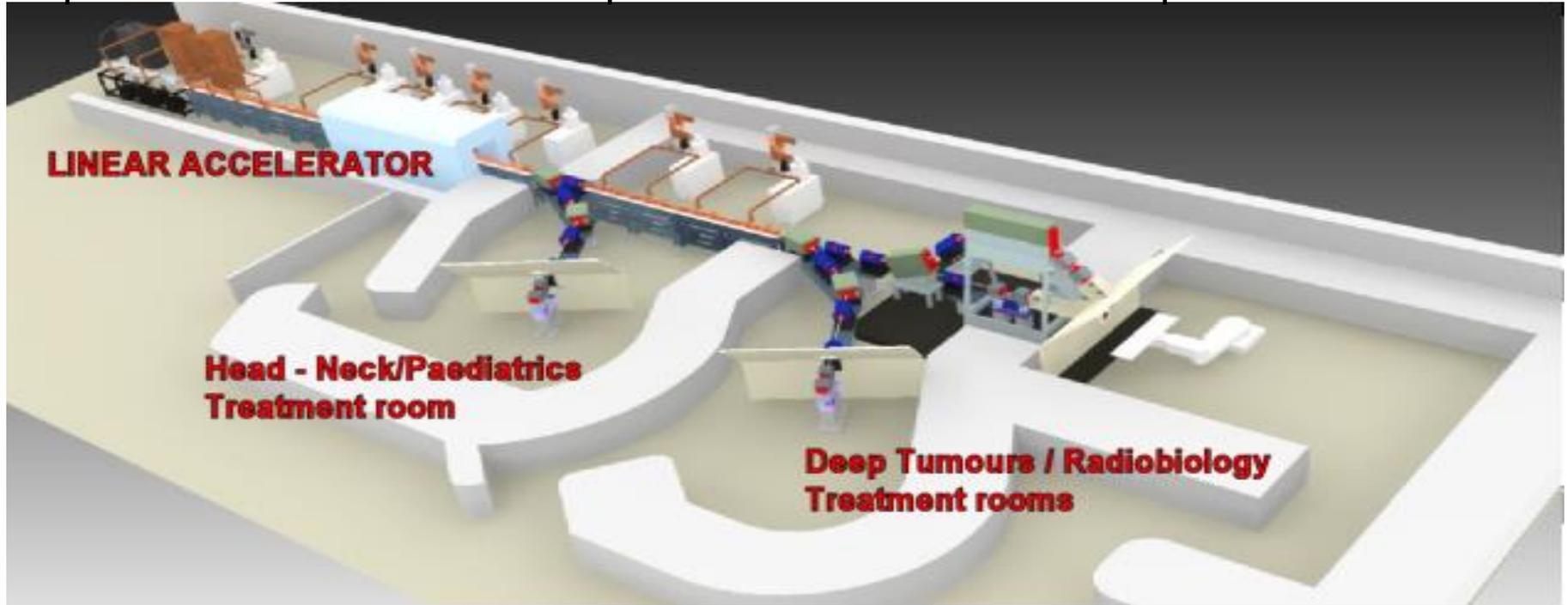
Acceleratori a confronto



I più diffusi acceleratori per protonterapia sono **ciclotroni** e **sincrotroni** (questi ultimi impiegati anche per accelerare ioni leggeri).

L'acceleratore TOP-IMPLART

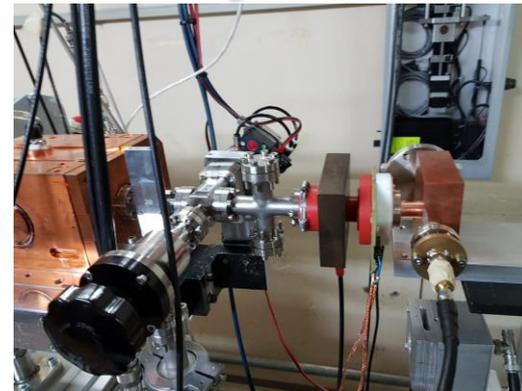
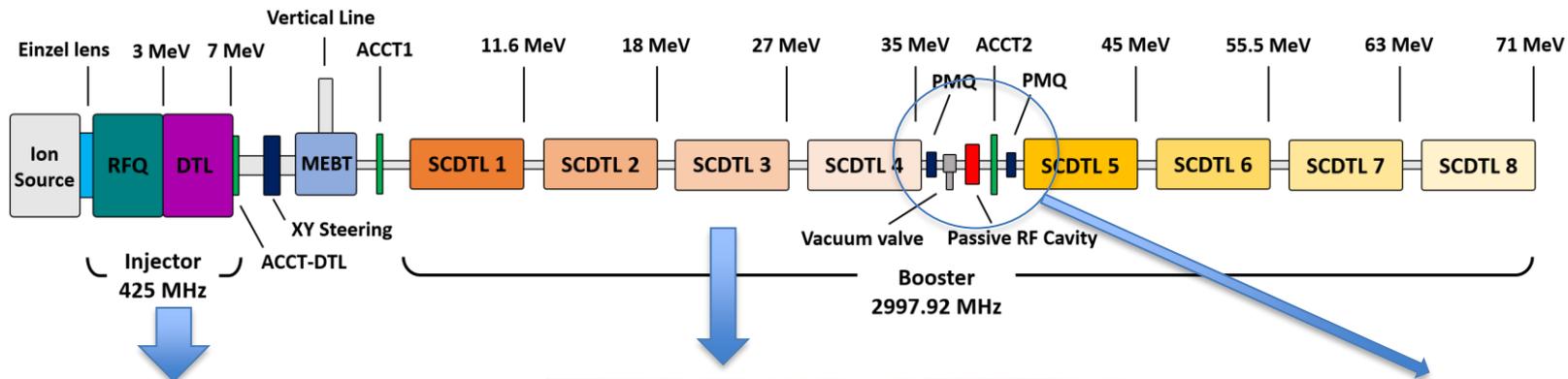
Prototipo di impianto per protonterapia basato su un acceleratore completamente lineare ad alte performances e a basso impatto e costo



L'acceleratore TOP-IMPLART

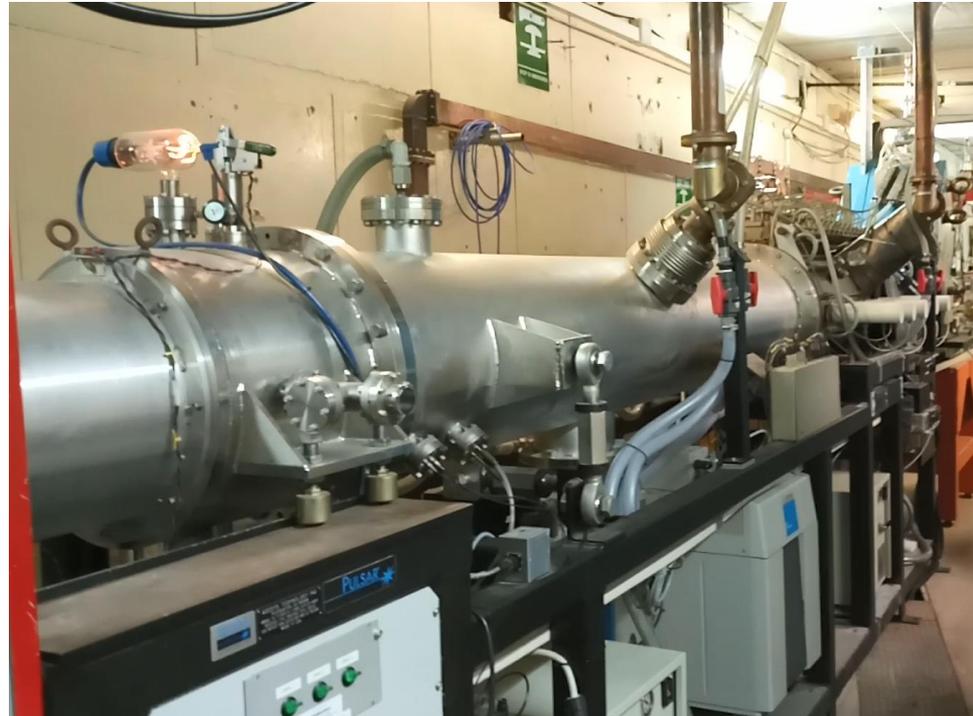
- 👍 Compatto e leggero
- 👍 Perdite di fascio contenute e limitate < 7 MeV
- 👍 Impianto modulare: la massima energia disponibile può variare da installazione a installazione
- 👍 Performances: tutte le caratteristiche fisiche (energia, intensità, direzione, ...) del fascio possono essere variate rapidamente e attivamente offrendo **precisione e flessibilità** nel delivery di dose al paziente (e.g. controllo ottimale dei movimenti intra-frazione)
- 👍 Minori costi di funzionamento
- 👎 Può accelerare un solo tipo di ione
- 👎 Non è mai stato impiegato nella pratica clinica

Layout schematico



Iniettore (7 MeV)

- ❑ Acceleratore PL7 di AccSys-Hitachi
- ❑ Lunghezza: 4.6 m
- ❑ Composto da:
 - ❑ Sorgente Duoplasmatron (30 keV)
 - ❑ RFQ, 425 MHz (3 MeV)
 - ❑ DTL, 425 MHz (7 MeV)
- ❑ Corrente iniettata: fino a qualche mA
- ❑ Lunghezza impulso: 20 -100 us
- ❑ Frequenza ripetizione: max 200 Hz



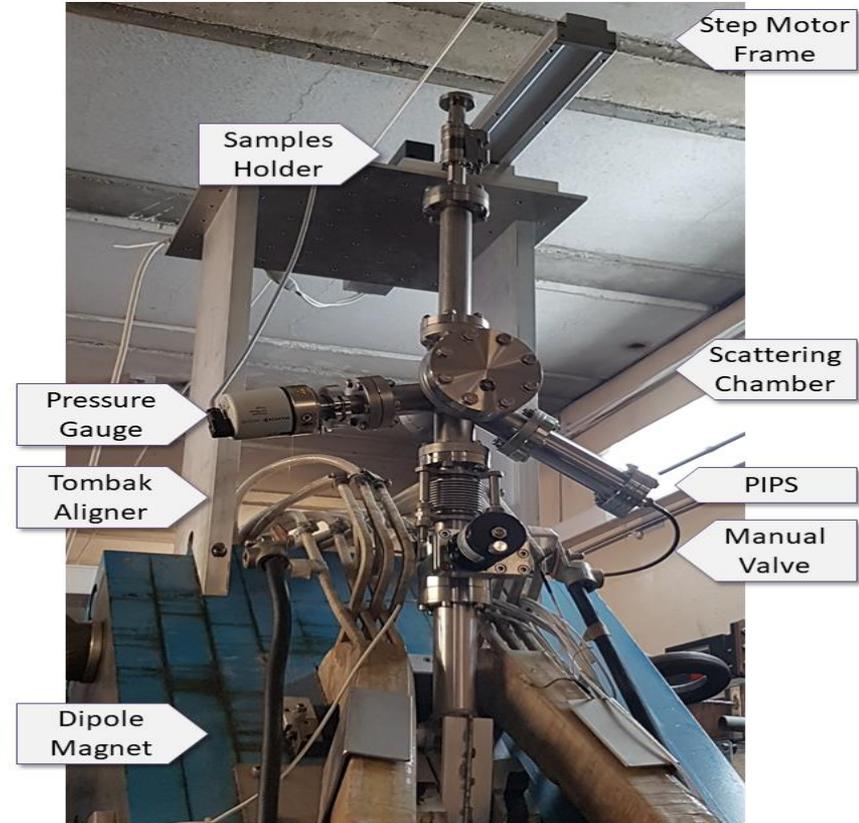
Linea verticale (3 – 7 MeV)

- ❑ Linea principalmente dedicata alla radiobiologia ; corrente fino a ~ pA
- ❑ Focus sullo studio di protocolli ottimizzati di delivery per il fascio di protoni pulsato
- ❑ Utilizzata anche per progetti pilota in altri ambiti (e.g. PIXE)

M. Vadrucchi et al., atticon12363

Attività correnti:

- ❑ Caratterizzazione del monitor di fluensa basato su detector al Si (PIPS nell'immagine) e scattering elastico nucleare e CR39 detector
- ❑ Misure di test e calibrazione
- ❑ Analisi dati e identificazione del setup ottimale di lavoro



Sezione SCDTL – I (7 – 35 MeV)



- ❑ Modulatore Scandinova K1
- ❑ Klystron Thales 10 MW (TH 2157A)
- ❑ 4 strutture acceleranti tipo SCDTL

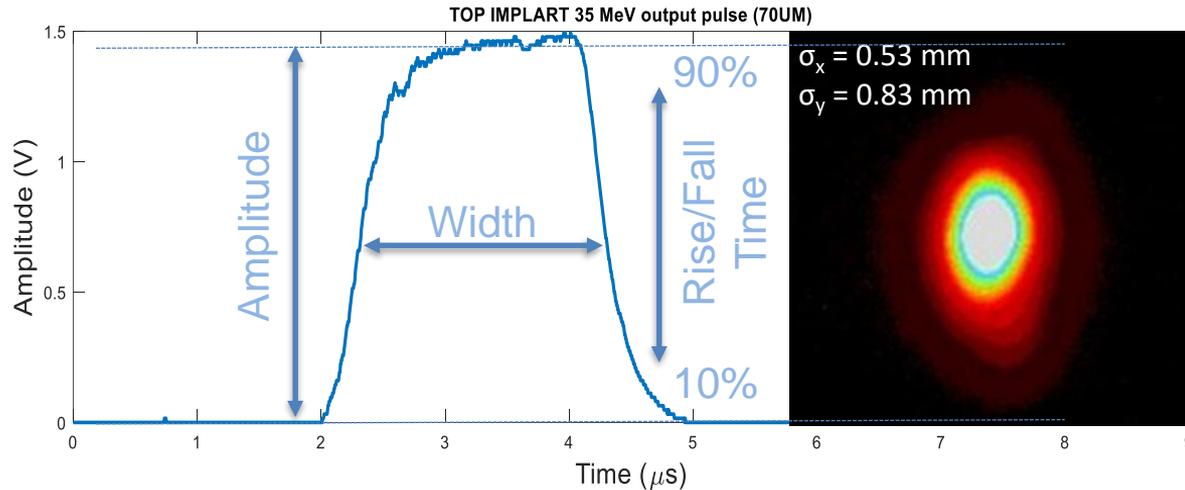


Sezione SCDTL – II (35 – 71 MeV)

- ❑ Modulatore Scandinova K1
- ❑ Klystron Toshiba 10 MW
- ❑ 4 strutture acceleranti tipo SCDTL



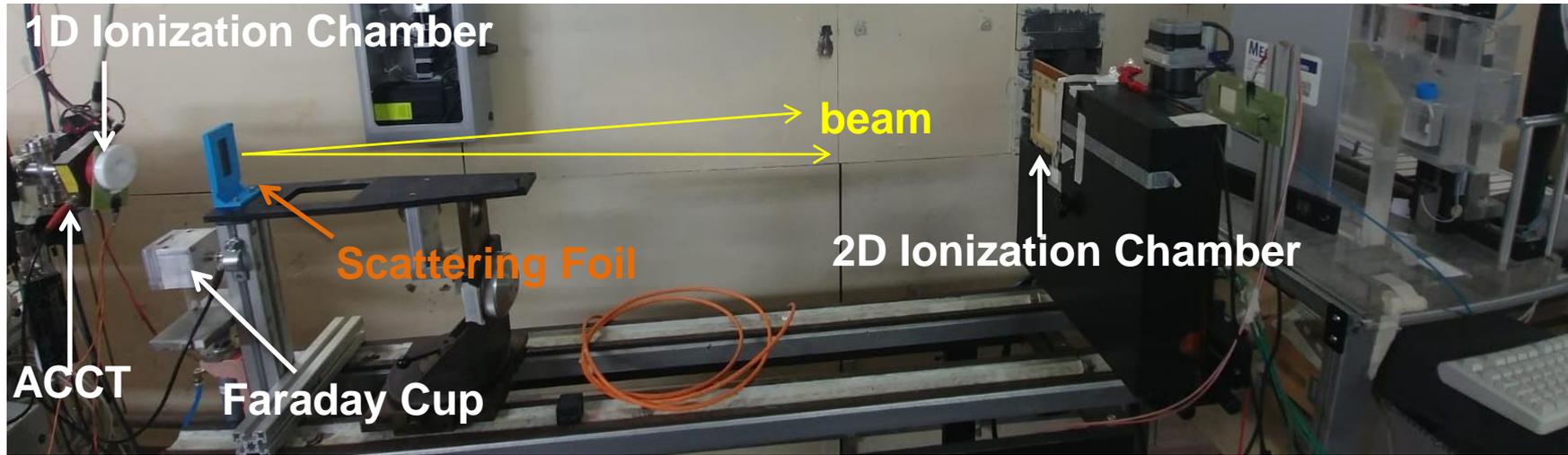
Caratterizzazione del fascio estratto (35 MeV)



Parameter	Value
Width	1 – 4 μs 2.7 μs typ.
PRF	100 Hz (max) 25 Hz typ.
Current	$\leq 50 \mu\text{A}$
Charge	135 pC (max)
h^+/pulse	$8.4 \cdot 10^8$ (max)
Beam size	<1 mm (x)
	<2.5 mm (y)
Stability	~ 3%

Corrente estratta fino a 50 μA largamente superiore rispetto a quanto richiesto per la protonterapia con scanning attivo (1-2 μA) .

Strumentazione e set-up per irraggiamenti in aria

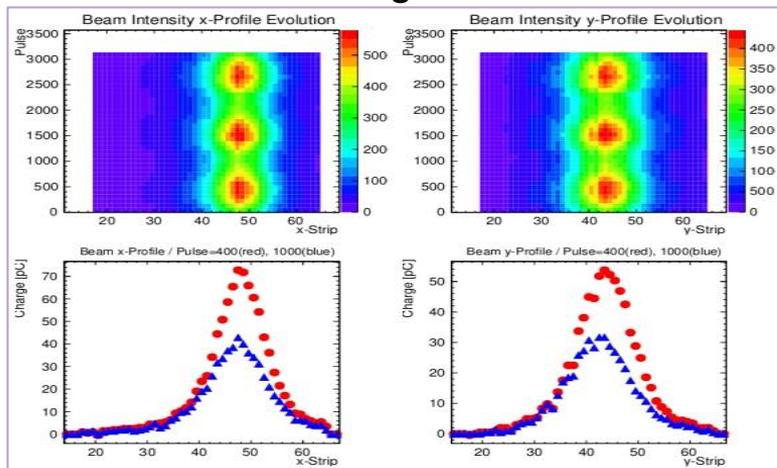


Il fascio di protoni a 35 MeV esce attraverso una finestra da vuoto in titanio

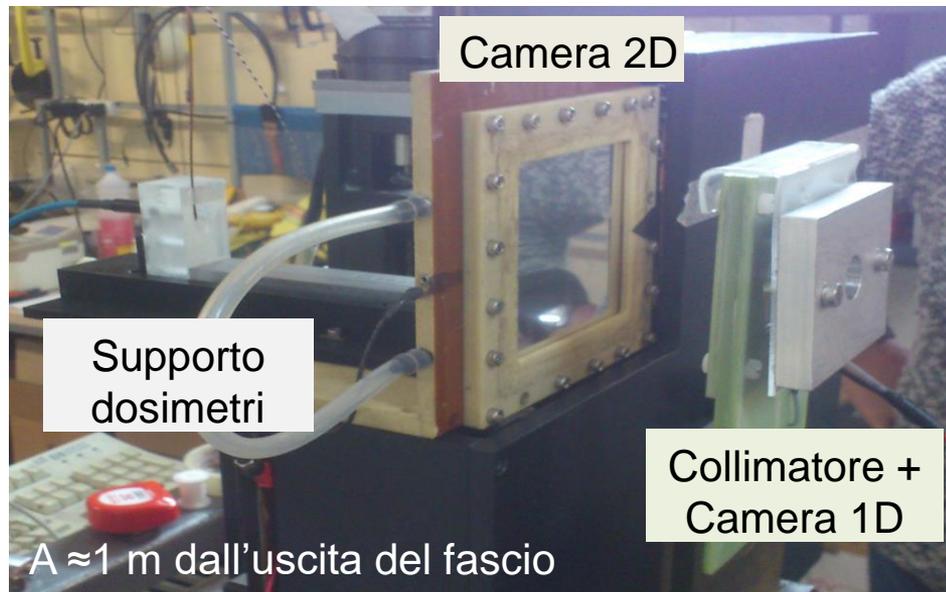
Il fascio è poi diffuso da un fogliolino in piombo da $210\ \mu\text{m}$ e 1.5 m d'aria ottenendo infine un fascio sufficientemente largo e omogeneo per campagne sperimentali

Dosimetria e monitoraggio del fascio

Effettuate con ISS ed IFO varie campagne di confronto di diversi dosimetri (camere a ionizzazione, dosimetri al diamante, al silicio, MOSFET, LiF) per caratterizzazione del fascio e intercalibrazione degli stessi.



Andamento dei profili x/y di fascio (sopra);
Profili per due impulsi (sotto)



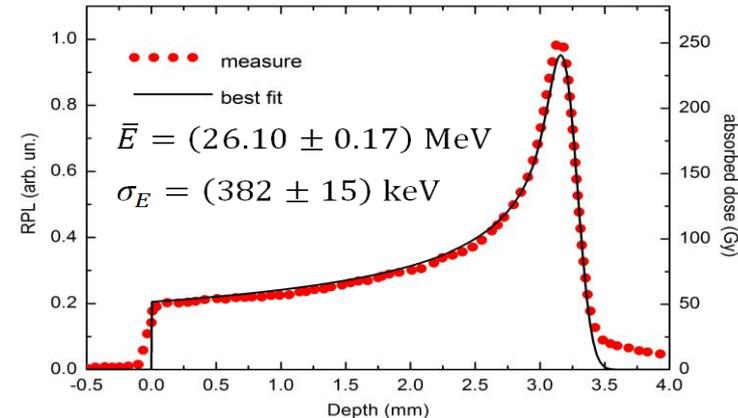
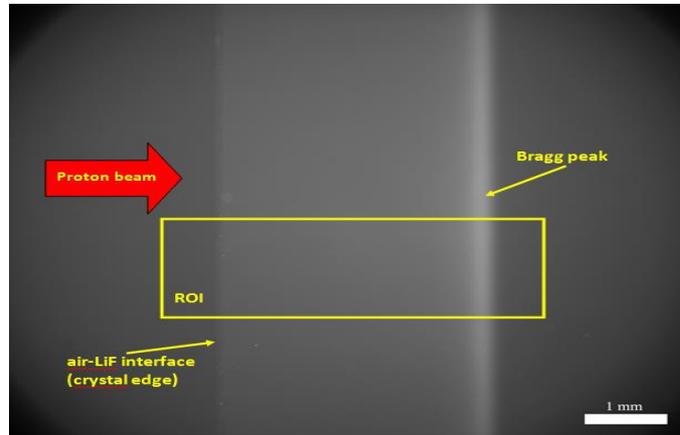
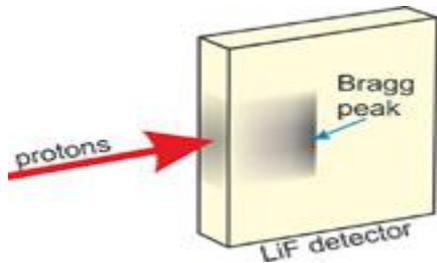
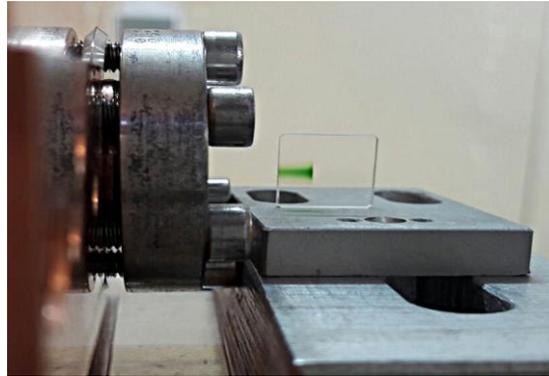
La finalità di tali campagne è la definizione di protocolli dosimetrici e di delivery ottimizzati per il fascio di protoni pulsato (ad elevato dose rate istantaneo)

Dosimetria con rivelatori basati sulla radiofotoluminescenza di centri di colore nel LiF

Sezione V – Biofisica e Fisica Medica

Piccinini M₂ et al. **“Risposta in radiofotoluminescenza e ricostruzione della curva di Bragg a dosi cliniche in cristalli di fluoruro di litio irraggiati con protoni a 35 MeV”** Comunicazione atticon12413

E. Nichelatti, et al. **“Ottimizzazione della distribuzione teorica di dose nella regione dello Spread Out Bragg Peak' (SOBP) in protonterapia tramite tecniche semianalitiche”** Comunicazione atticon12241



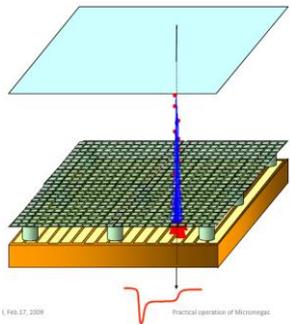
Dose delivery monitor for a unique proton-therapy beam

- TOP-IMPLART is one of the first proton LINAC dedicated to cancer therapy
 - a very low emittance pulsed beam, high instantaneous current and a large range of operation
→ **challenging for the dose delivery monitor.**
- The high current, combined to larger pulses and higher frequency, allows to investigate the emerging, promising, FLASH radiotherapy, whose principle is to deliver a high dose of radiation almost instantaneously.
- The existing beam monitor system, already deployed for the initial R&D phase of TOP-IMPLART, consists of small planar gas chambers operating in ionization regime in transmission mode. Their main limitations have been identified in:
 - i) Non-linearity effects;
 - ii) Limited dynamic range.

To overcome these limitations, **we intend to design and build a beam dose delivery monitor system based on Pad-MM, which will exploit the exceptional capability of the Micromegas to effectively operate at very different gains, by tuning the single stage amplification voltage.**

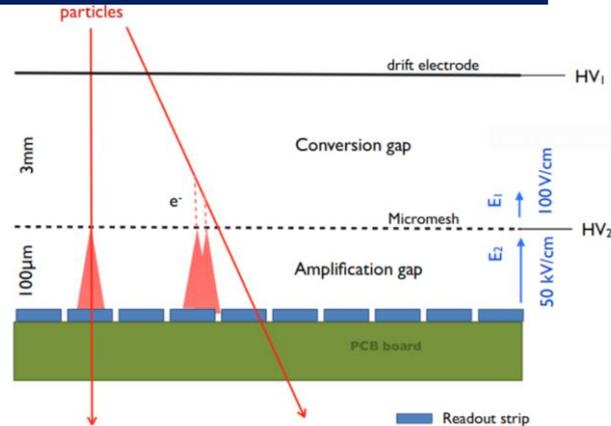
New dose delivery monitor based on Pixelated Micromegas

MICROMEGAS: Basic Principle



MM are parallel-plate chambers where the amplification takes place in a **thin gap ($\sim 100 \mu\text{m}$)**, separated from the conversion region by a fine metallic micro-mesh.

Charge is collected on the anode readout board, generally realized with **suitable segmented standard PCB**.



R&D on finely segmented readout RESISTIVE Micromegas

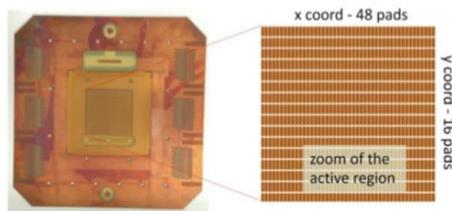
Aiming at efficient and linear measurements with:

High Dynamic range, High-rate capability, high beam intensities

Layout

Current anode layout for the Small-pads detectors:

- plane segmented in a 48x16 matrix
- Small-pads dimensions $0.8 \times 2.8 \text{ mm}^2$ ($1 \times 3 \text{ mm}^2$ pitch)
- Total active area of $4.8 \times 4.8 \text{ cm}^2$



Amplification gap Electric field can be varied to obtain charge multiplication gains in the range $1 - 10^5$

Suitable for dose delivery measurements with a dynamic range of 5 order of magnitudes

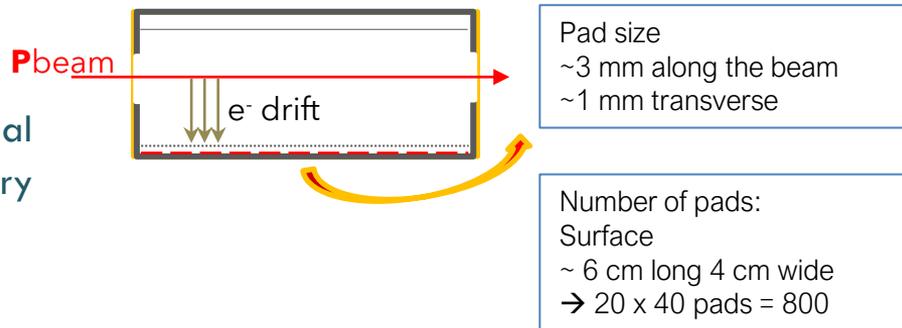
How to use Resistive Pixelated MM as Dose Delivery

The project:

design and build a beam dose delivery monitor system based on Resistive Pixelated-MM exploiting the exceptional capability of the Micromegas to effectively operate at very different gains, by 'simply' tuning the single stage amplification voltage, OR with progressive increasing gains

The key parameters and requirements to consider for a TOP-IMPLART beam monitor device :

- Number of protons per bunch in the range $\sim 10^4 - 10^8$
- Protons energy: 50 – 230 MeV
- Pulse length 2 - 5 us $\rightarrow \sim 5$ us
- Beam width (at beam pipe exit) ~ 1 mm
- Repetition rate up to 100 Hz (from 20 to 100 Hz)
- Spatial resolution ~ 0.5 mm

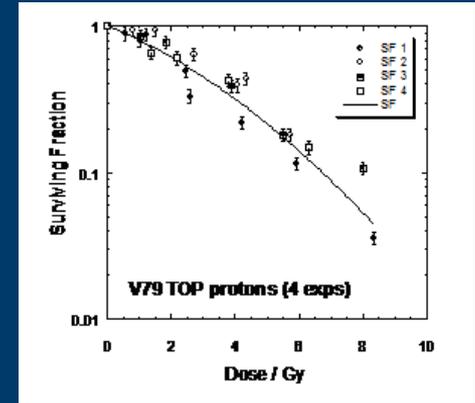
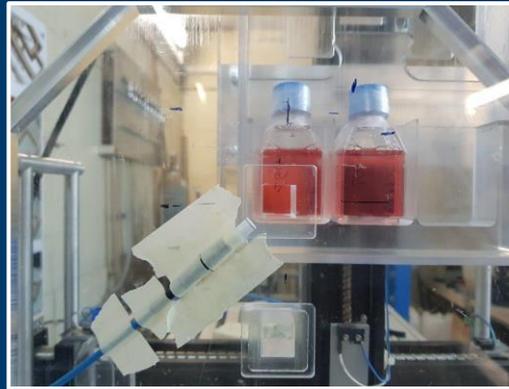


The basic idea is to use the MM, operated **at low gas pressure**, in projection mode, with the **beam traversing longitudinally** the gas ionisation gap and the electron-ion pairs drifting in perpendicular direction with respect to the beam direction, the electrons towards the MM anode plane

Radiobiologia cellulare

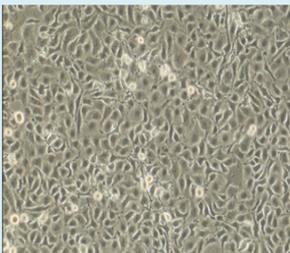
Numerose campagne di misura (ISS-ENEA) con le linee cellulari standard, V79 e CHO, volte a confrontare le curve di sopravvivenza clonogenica ottenute con il fascio di TOP-IMPLART con i dati in letteratura, sia sulla linea verticale (3-7 MeV) sia alle diverse energie (sub-cliniche) finora disponibili (27-35 MeV).

Verifica dei setup e delle procedure definite nel corso delle campagne di dosimetria.



Experimental Design

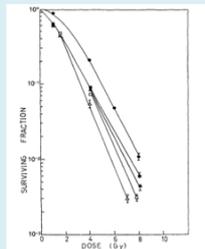
HT + X-rays / protons



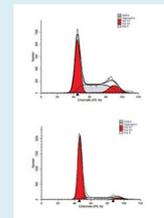
In vitro model:
Human glioblastoma cell line:
U251MG

Biological endpoints

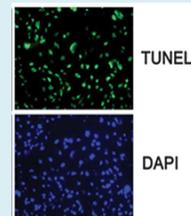
Cell viability:
clonogenic assay, MTT



Cell cycle effects



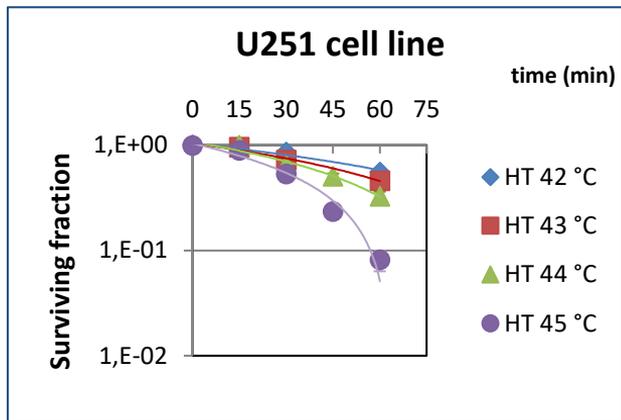
Cell death mechanisms:
apoptosis, necrosis, senescence



Molecular mechanisms:
gene expression

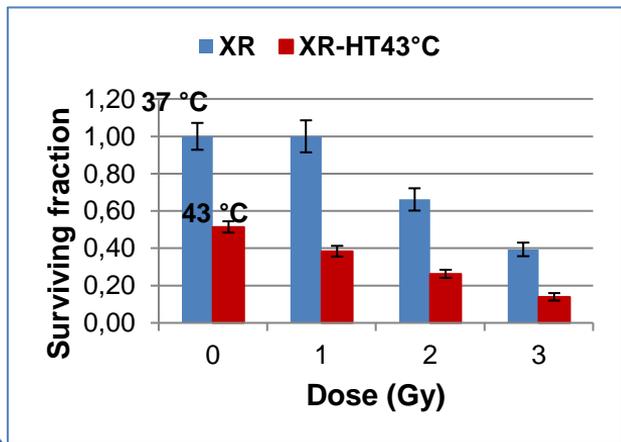


Results



Survival of U251 cell line after heating in water bath (range 42-45 °C, 15-60 minutes)

SF values show a significant response of U251 cells to HT exposure compared to the 37 °C control



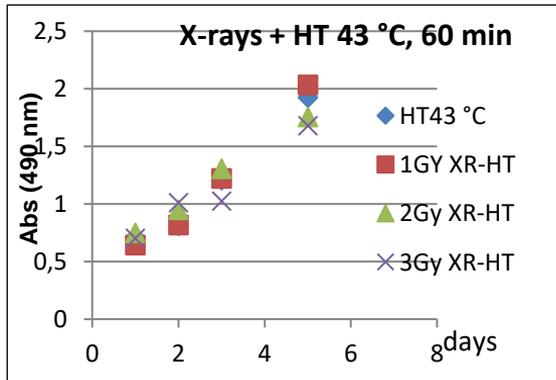
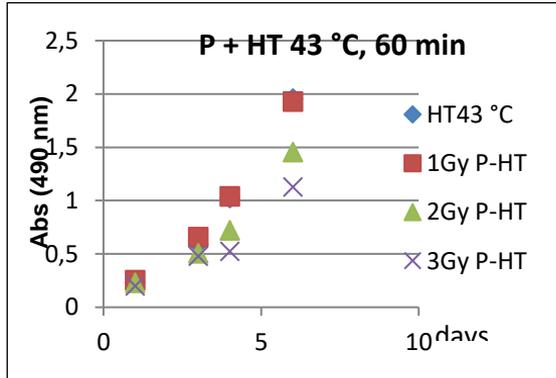
Combined treatment HT-X-rays (T = 43 °C, 60 minutes)

SF values show a large thermal radiosensitization (range 1-3 Gy) not dependent on the treatment sequence.

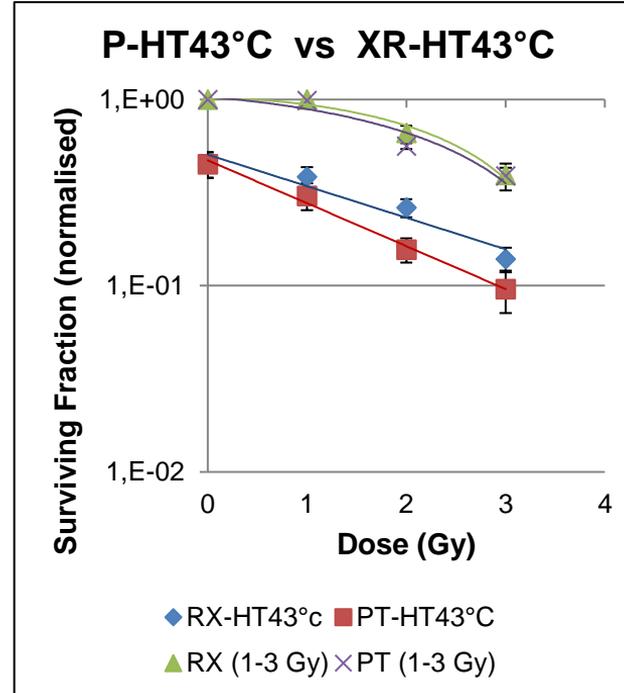
Results: HT + protons vs HT + X-rays

Larger radiosensitizing effect of hyperthermia combined with proton irradiation compared to hyperthermia combined with X-ray irradiation

MTT cell proliferation assay



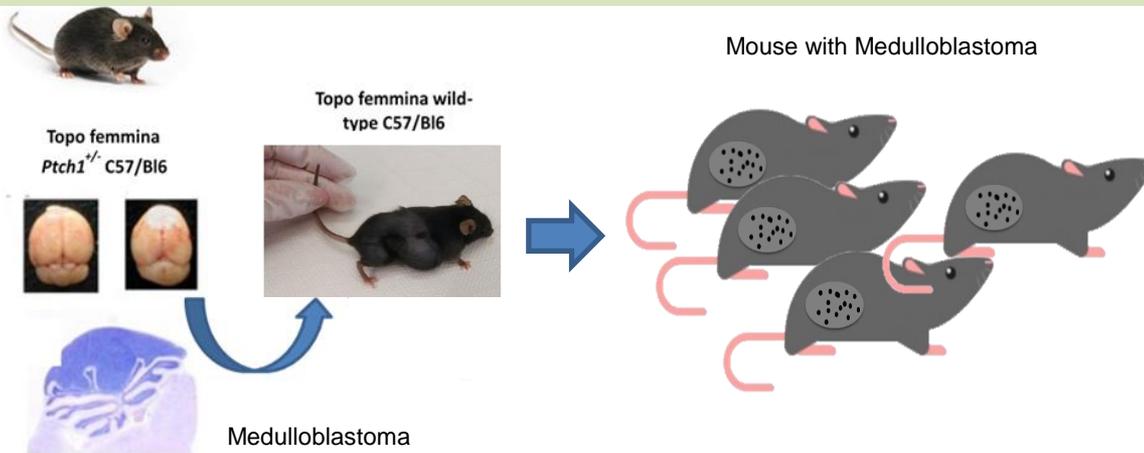
Clonogenic assay



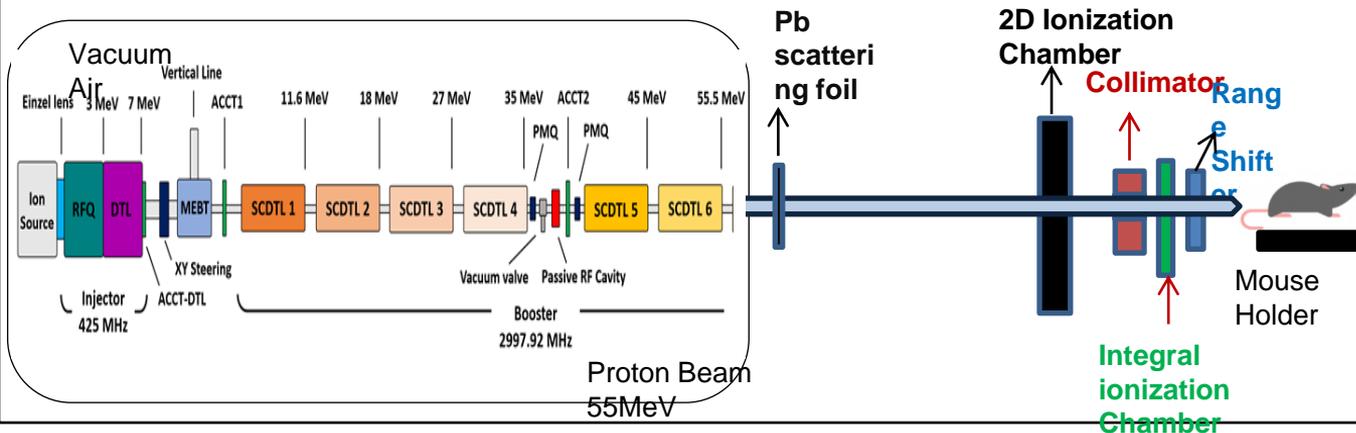
Conclusions

- Our results are encouraging and show that HT could represent a promising approach to improve the response of GBM to radiation treatment, especially with proton irradiation.
- In the experiments combining HT treatment and radiation, either cell proliferation or clonogenic survival assay show a marked thermal radiosensitization, more evident for protons than X-rays.
- Experiments with protons are in progress and our preliminary results need to be confirmed out of statistical accuracy.
- Ultimate goal is to define the optimal treatment protocol for HT-P combination to be used with the *in vivo* U-251 MG mouse model.

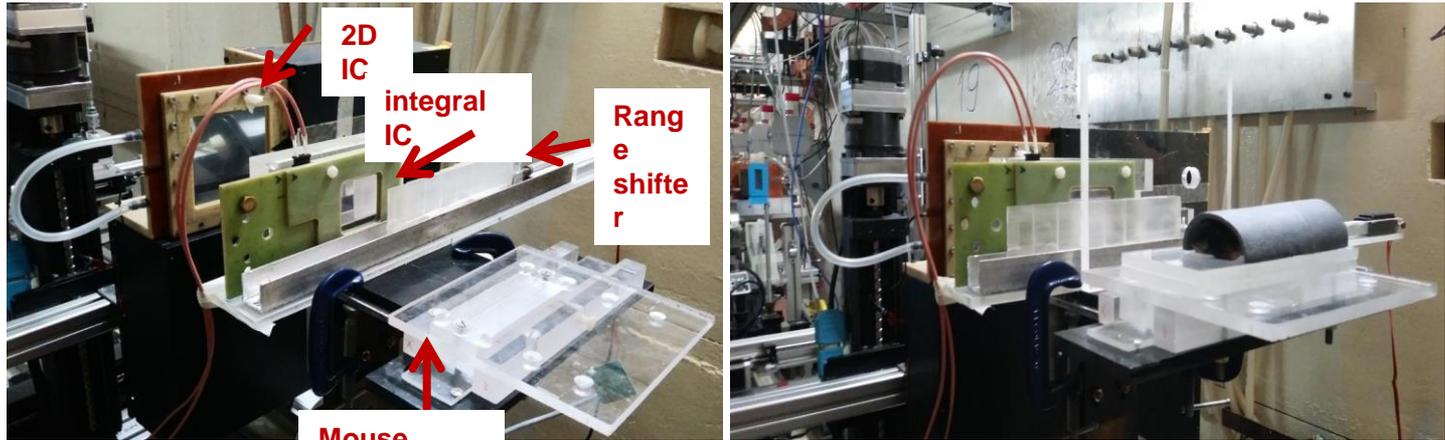
Top Implant, medulloblastoma mouse model



Top Implant, mouse proton irradiation platform

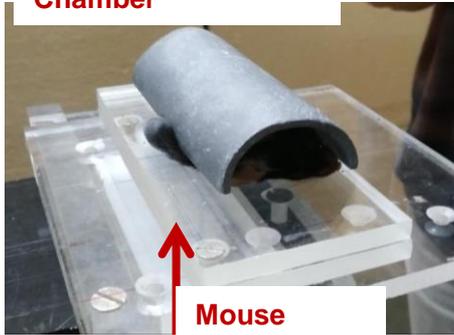


Top Implart, mouse proton irradiation platform

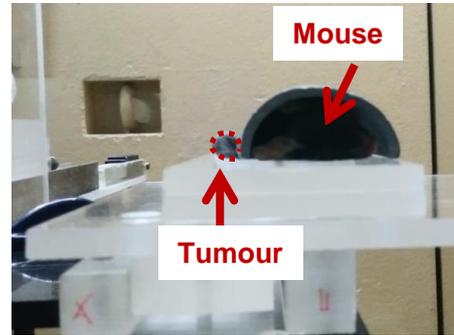


IC=Ionization Chamber

Mouse holder

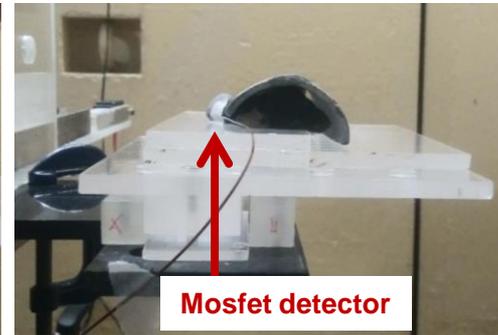


Mouse Holder



Mouse

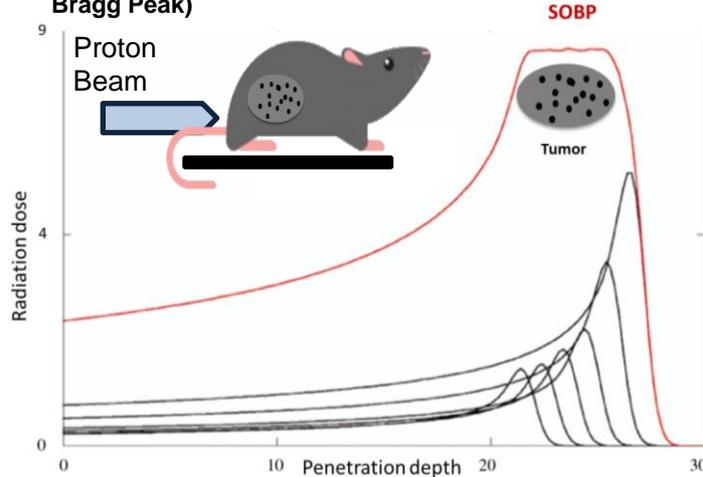
Tumour



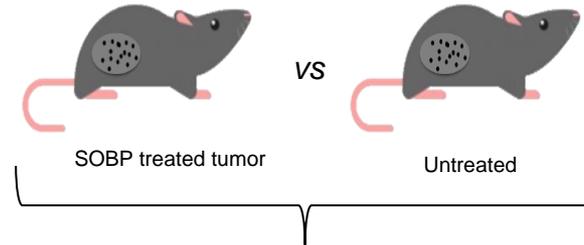
Mosfet detector

Top Implant, medulloblastoma mouse model

Tumor irradiation with 10 Gy at SOBP (Spread-out Bragg Peak)

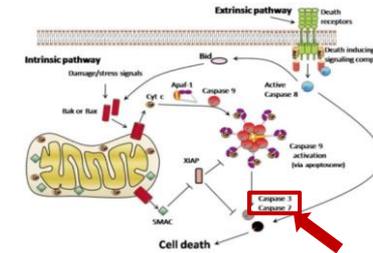
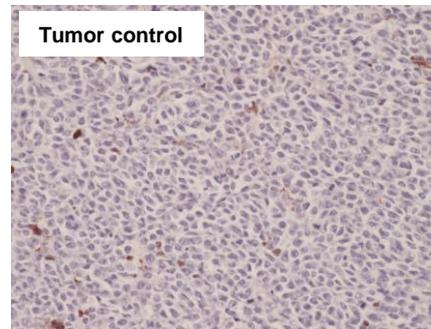
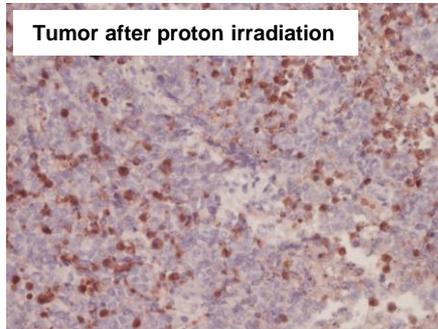


Tumor cells-death analysis



Tumor collection at 4 hours post treatment

Immunohistochemistry for cleaved-caspase-3



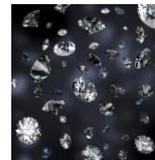
Cell death program

Nanodiamanti come radiosensibilizzanti in trattamenti radioterapici, in connessione col progetto INFN RESOLVE (CNS5)

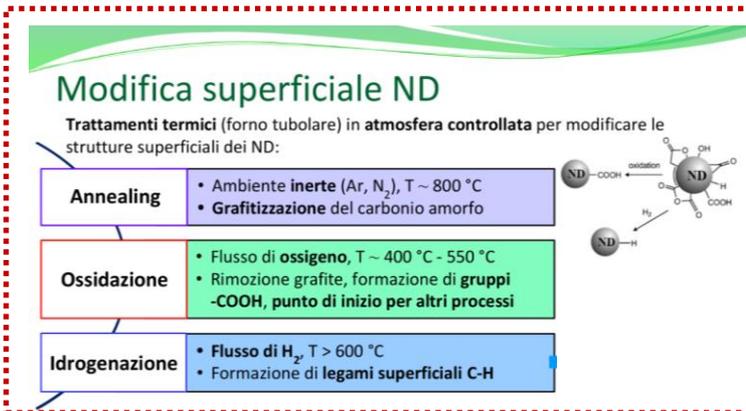
- Il Laboratorio di Tecnologie Biomediche della Divisione Tecnologie e Metodologie per la salvaguardia della salute - Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi territoriali dell'ENEA è attivamente impegnato nella messa a punto di nuove strategie terapeutiche per la cura dei tumori cerebrali infantili, tra i quali il medulloblastoma *Sonic hedgehog*-dipendente. Per tale scopo, il progetto RESOLVE mira a sviluppare terapie innovative sinergiche tra agenti fisici (raggi-X, protoni) e farmaci immunomodulanti per il trattamento del medulloblastoma in modelli murini preclinici in vitro/in vivo.
- Il gruppo di Fisica dello Stato Solido del Dipartimento di Fisica dell'Università di Torino associato alla sezione INFN di Torino svolge attività di sviluppo ed utilizzo di sensori innovativi in diamante artificiale per applicazioni in micro-radiobiologia. In particolare, questi dispositivi permettono di monitorare in real-time e simultaneamente l'attività chimica ed elettrica delle cellule in analisi (es. neuroni) e la dose della radiazione ionizzante a cui vengono esposte, permettendo di effettuare studi in vitro sugli effetti indotti da Raggi-X o protoni. In particolare, in questo studio sarà attiva la collaborazione ENEA-INFN nello sviluppo e fabbricazione di sensori in diamante artificiale per applicazioni in micro-radiobiologia che verranno utilizzati per la dosimetria pretrattamento nel modello animale. Le esposizioni a raggi X e protoni si svolgeranno nei C.R. ENEA Casaccia e Frascati. Nel C.R. Casaccia si svolgerà inoltre l'attività sperimentale cellulare e molecolare.

Nanodiamanti come radiosensibilizzanti in trattamenti radioterapici

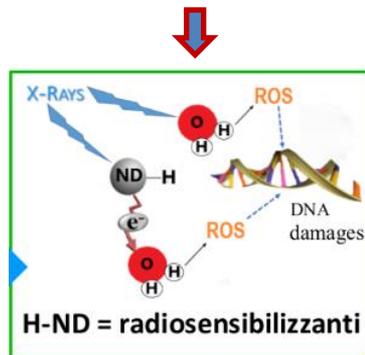
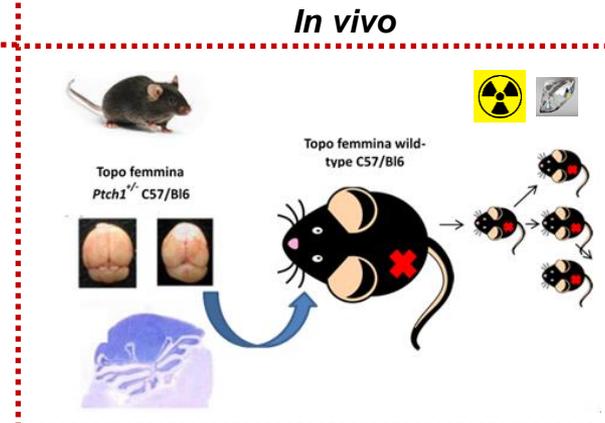
- Fisica dello Stato Solido del Dipartimento di Fisica dell'Università di Torino associato alla sezione INFN di Torino
- Laboratorio di Tecnologie Biomediche della Divisione Tecnologie e Metodologie per la salvaguardia della salute Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi territoriali dell'ENEA



Preparazione nanodiamanti idrogenati (UniTO)



Biological testing (ENEA)





FONDI
STRUTTURALI
EUROPEI
pon
2014-2020



PER LA SCUOLA - COMPETENZE E AMBIENTI PER L'APPRENDIMENTO (PSE-FESR)



UNIVERSITÀ
degli STUDI
di CATANIA



Istituto Nazionale
di Fisica Nucleare



Italian National Agency for New Technologies,
Energy and Sustainable Economic Development

Nuovo strumento portatile per misure in situ di attività di radionuclidi usati in medicina nucleare

V. Bellini¹, M. Capogni², C. Sutera³

¹ Università degli Studi di Catania

² ENEA – Istituto Nazionale di Metrologia
delle Radiazioni Ionizzanti (INMRI) – C.R.
Casaccia

³ INFN – Sezione di Catania

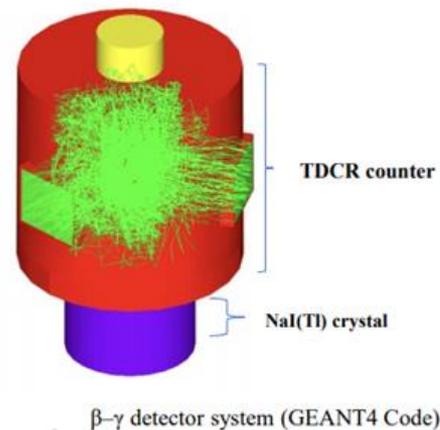
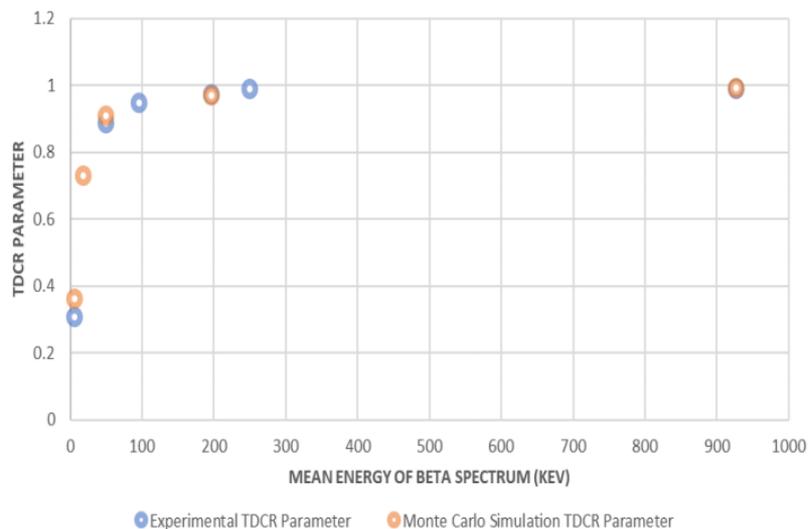


Tema di ricerca

- Messa a punto di uno strumento portatile per misure di attività di radionuclidi a schema di decadimento complesso e breve emivita (es.: F-18, Cu-64, I-131, ...) di uso in medicina nucleare per diagnosi e terapia
- Lo strumento prevede l'implementazione di un canale 'gamma', basato su rivelatore NaI(Tl) 3"x3", su un esistente rivelatore portatile dell'ENEA-INMRI facente uso della tecnica *Triple-to-Double-Coincidence Ratio* (TDCR), con liquidi scintillanti, già utilizzata per radionuclidi beta-emettitori puri. Tale tecnica viene implementata su un dispositivo (TDCR counter) costituito da 3 fotomoltiplicatori, simmetricamente collocati a 120° intorno ad una camera ottica in cui viene inserita una fiala in vetro contenente il radioattivo da misurare in soluzione con liquido scintillante

Stato di avanzamento del progetto (1)

- Sviluppo del Codice Monte Carlo in GEANT4 del nuovo strumento (completato)



Confronto tra parametro TDCR simulato e misurato per emettitori beta-puri. Criticità per basse energie (H-3)

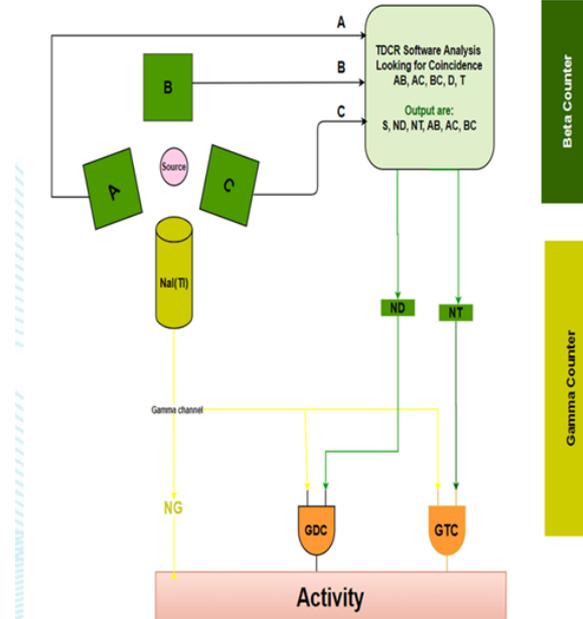
Parametro TDCR =
Coincidenze Triple /
Coincidenze Doppie

Stato di avanzamento del progetto (2)

- Sviluppo presso azienda CAEN del software di analisi dati per coincidenze beta-gamma con uso di sistemi digitali tipo CAEN Desktop Digitizer



(DT5720) Digitizer



Attività in corso

- Implementazione in hardware presso ENEA-INMRI del canale gamma basato su un rivelatore NaI(Tl) 3"x3" di forma cilindrica, connesso alla base del TDCR portatile
- Studio e applicazione delle tecniche di coincidenza beta-gamma nella misura di radionuclidi beta-gamma emettitori a breve emivita

- Borsa di studio di Dottorato di Ricerca Industriale nell'ambito del PON 2018, Università Catania
- Periodo Dottorato: 1° Aprile 2019 – 31 Marzo 2022, estendibile a fine Giugno 2022 causa pandemia covid-19
- Tutor scientifico: Dott. M. Capogni (ENEA-INMRI)
- Tutor accademico: Dott. C. Sutura (INFN-CT)

- Convenzione Quadro tra ENEA e Università di Catania

- PON Ricerca e Innovazione 2014-2020 finanziato con fondi comunità europea

- Progetto MRTDosimetry dell'European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR)

Prospettive future

- Contatti con centri di medicina nucleare dell'area romana in corso per misure in situ di radionuclidi diagnostici e teranostici con il nuovo sistema di misura
- Contatti anche con strutture ospedaliere di altre regioni italiane, inclusa la regione Sicilia, per valutare possibile uso dello strumento presso centri di medicina nucleare del Paese
- Future collaborazioni con azienda CAEN per continuare sviluppo di elettronica e software di acquisizione nel settore delle misure dirette
- Collaborazioni con altri Istituti Metrologici in ambito europeo sul tema di misure di radiofarmaci e loro uso in medicina nucleare

NEST-MANTRAS

- È un progetto fatto nell'ambito di NEST (NEA Nuclear Education Skills and Technologies)
- MANTRAS: Medical Application, Nuclear Technologies, Radioprotection and Safety è un "education and training" nel campo delle tecniche nucleari applicate alla medicina anche includendo la medicina nucleare, la radioprotezione e le soluzioni innovative di dosimetria e microdosimetria.
- **INFN contribuirà ai seguenti temi:**
 - Radioterapia e dosimetria dei protoni/fasci ionici; dosimetria di fasci convenzionali "flash" pulsed proton/ion beams con dosimetria innovativa
 - Discussione dei principi di adroterapia; valutare/studiare le caratteristiche fondamentali di ioni accelerati da usare in adroterapia
 - Valutare/studiare le basi della dosimetria applicata all'adroterapia
 - Partecipare ad almeno una sessione "hands-on" dove utilizzare un apparato sia con fantocci che con pazienti
 - Produzione di radioisotopi con acceleratori
 - Dosimetria biologica, ovvero stima della dose assorbita in scenari incidentali
 - Dosimetria fisica e biologica, radioprotezione nella BNCT
 - Applicazione di Machine Learning/AI all'analisi di dati in medicina nucleare (es. immagini PET)