

MUNES – Acceleratore ad alta potenza come sorgente neutronica multidisciplinare

Enrico Fagotti

INFN – Laboratori Nazionali di Legnaro

per la collaborazione MUNES

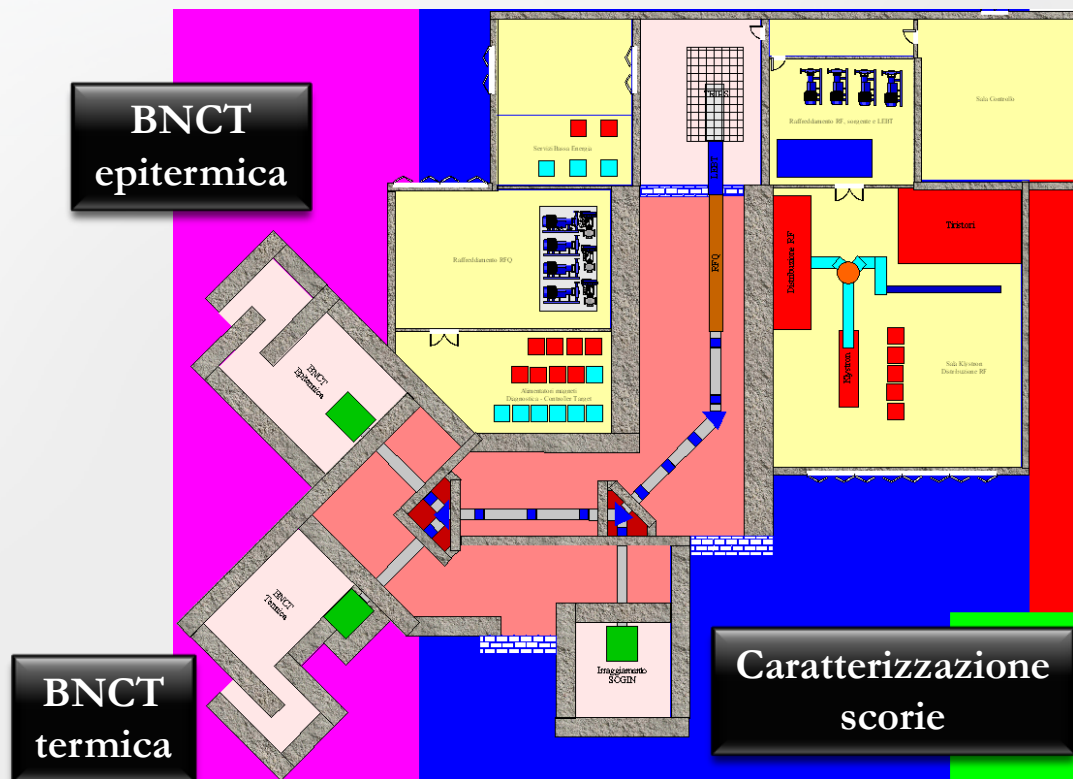


- ◆ **Descrizione del progetto**
- ◆ **Stato dell'acceleratore ad alta intensità**
 - Iniettore
 - Linea di Trasporto a Bassa Energia (LEBT)
 - RFQ
- ◆ **Bersaglio di Berillio e Moderatore di Neutroni**
- ◆ **Applicazioni**
 - BNCT
 - Caratterizzazione Scorie di 3° Livello

Descrizione del progetto

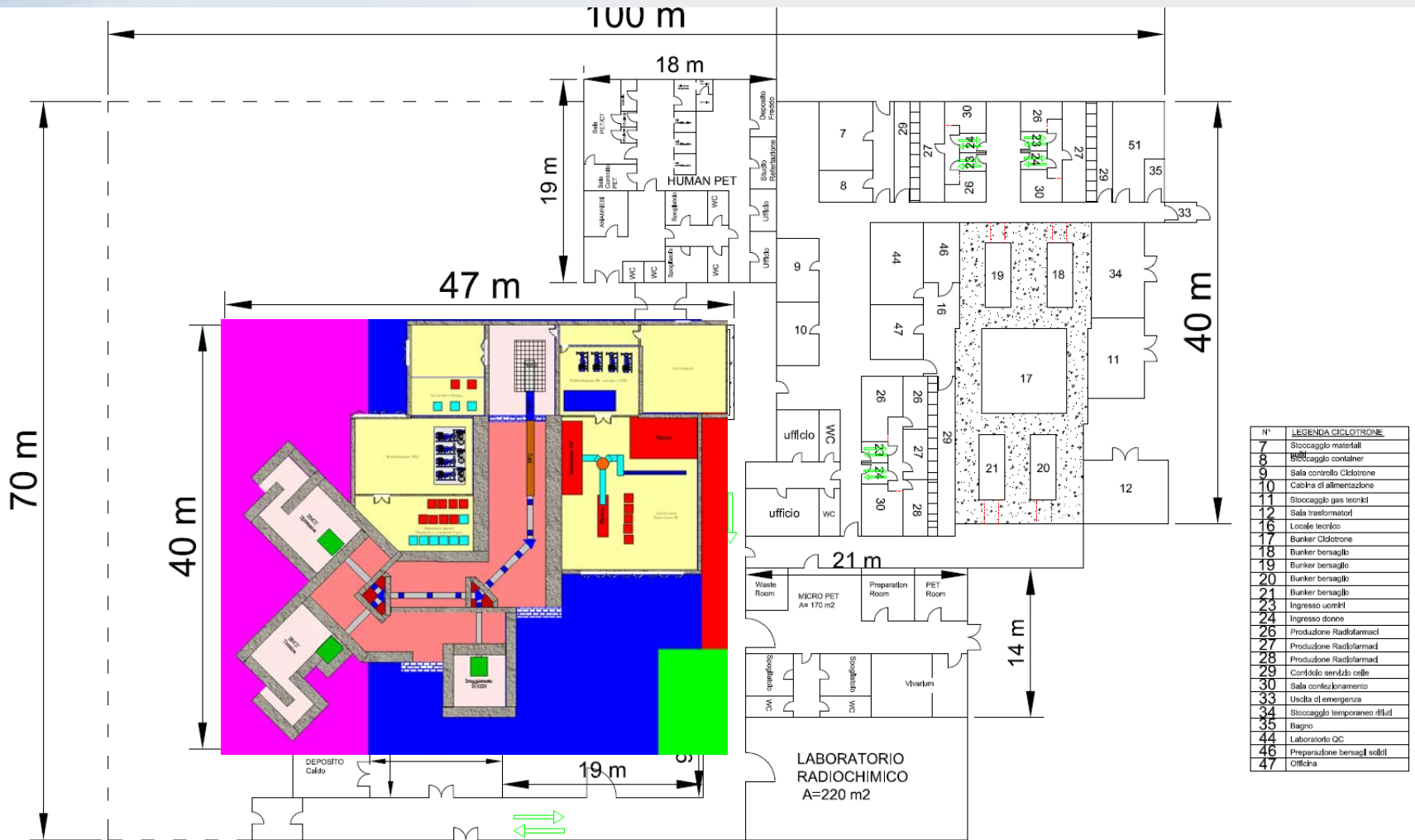
Obiettivi

Realizzazione di una sorgente di neutroni termici-epitermici per Boron Neutron Capture Therapy e per caratterizzazione di rifiuti radioattivi basata sull'utilizzo di un acceleratore lineare di alta intensità.



Con un accordo di programma tra INFN, SOGIN e Università di Pavia è prevista la realizzazione di un centro per applicazioni di tecnologie nucleari avanzate, finalizzato ad aspetti della salute e della sicurezza.

Layout del centro



Collaborazioni

INFN

Laboratori Nazionali di Legnaro
Sezione di Pavia

Università Italiane

Pavia
Padova
Pisa
Milano

Aziende

SOGIN

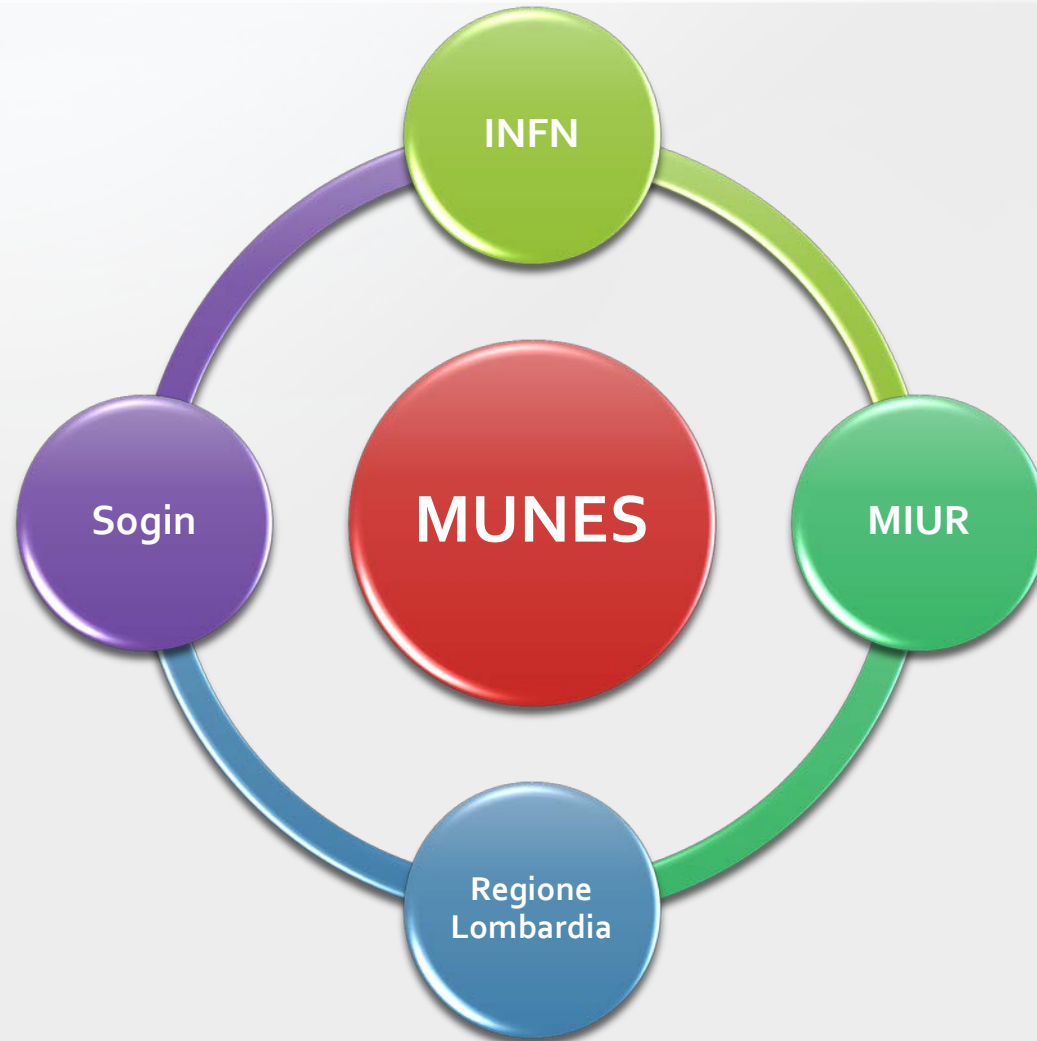
Università straniere

Louisiana State University (USA)
Universidad del País Vasco (Spagna)

I.R.C.C.S.

Istituto Oncologico Veneto (Padova)

Finanziamenti



Stato dell'acceleratore ad alta intensità

Parametri principali

Tipo di acceleratore: LINAC

Corrente di protoni: fino a 50 mA

Energia di protoni: 5 MeV

Struttura temporale: fino a CW

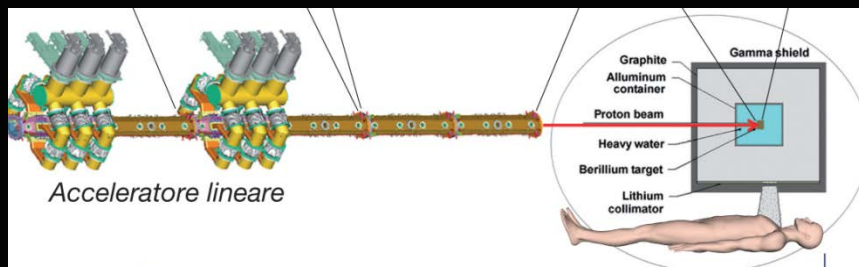
Potenza di fascio: fino a 250 kW

Convertitore neutronico: Berillio solido

Densità di potenza in operazione su bersaglio di Be: 700 W/cm²

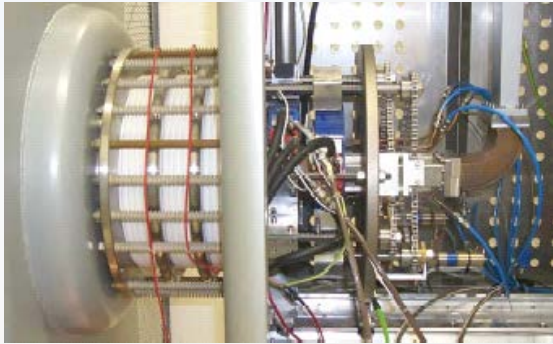
Intensità di sorgente neutronica: 10¹⁴ s⁻¹

Applicazioni principali: BNCT e caratterizzazione scorie



	$\Phi_{th} (E \leq 0.5 \text{ eV})$ (cm ⁻² s ⁻¹)	Φ_{th} / Φ_{total}	$K_n (E > 0.5 \text{ eV}) / \Phi_{th}$ (Gy·cm ²)	K_γ / Φ_{th} (Gy·cm ²)
LNL neutron source	4.3E+09	0.96	0.33E-13	0.92E-13
IAEA recommendations for BNCT	> 1.0E+09	> 0.90	≤ 2.0E-13	≤ 2.0E-13

Sorgente di protoni



Sviluppata a LNS (2000)



Ottimizzata a LNL (2007)

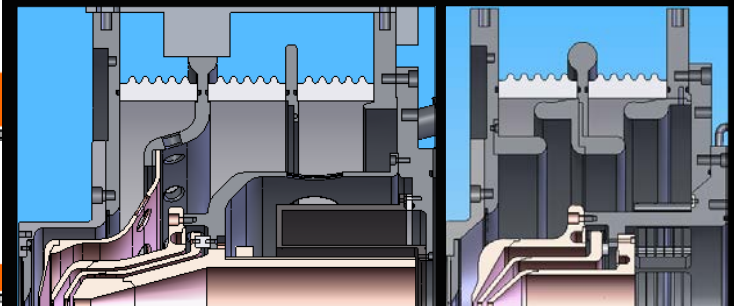
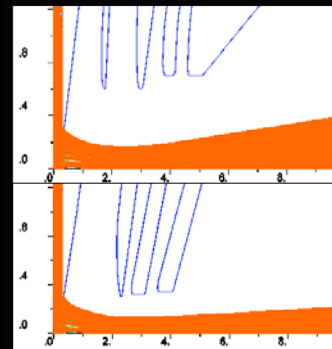
Status

$I_p \approx 45 \text{ mA}$
 $E = 80 \text{ KeV}$
 $\varepsilon_{n,rms} < 0.1 \text{ mm-mrad}$
 $\varphi_b(z = 200 \text{ mm}) = 34 \text{ mm}$
Struttura temporale: CW



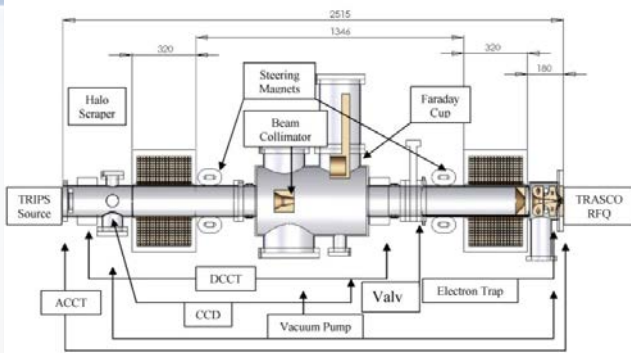
Futuri Upgrade

$\varphi_b(z = 200 \text{ mm}) = 10 \text{ mm}$
[Nuova colonna di estrazione] [LNL]

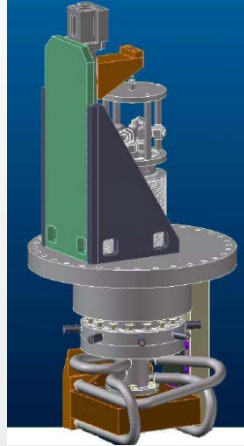


Struttura temporale: CW & pulsata
[Impulsamento Magnetron] [LNL & DEE/UPV]

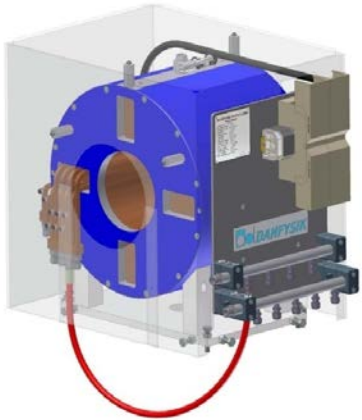
LEBT



LEBT sviluppata a LNL



Fast Emittance Scanner (FES): misure emittanza ad alta risoluzione in meno di 2 secondi (Nio2Beam – Gruppo 5)



Solenoidi sviluppati a LNL

STATUS

LEBT pronta per l'assemblaggio.

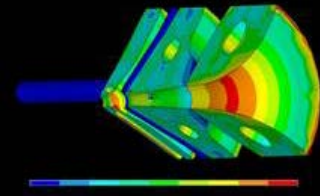
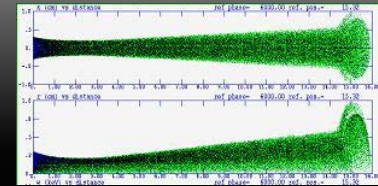
Prossimo futuro

Ottimizzazione del trasporto neutralizzato

Sviluppo FGA

Upgrade sistema di controllo

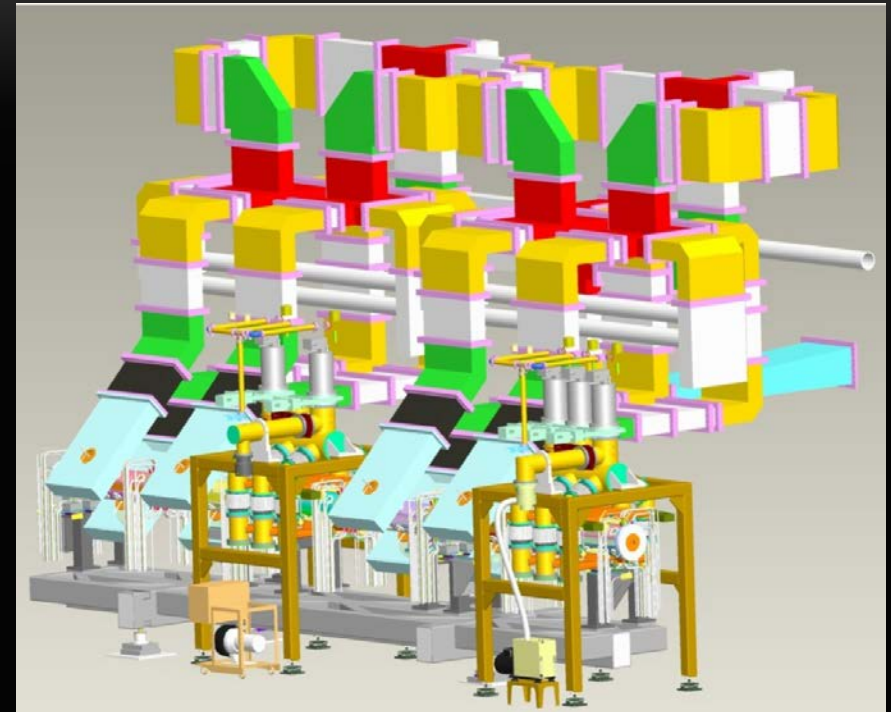
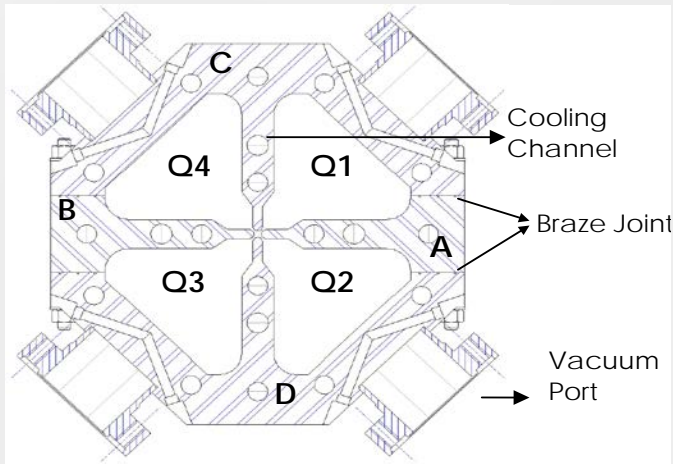
Costruzione trappola elettronica



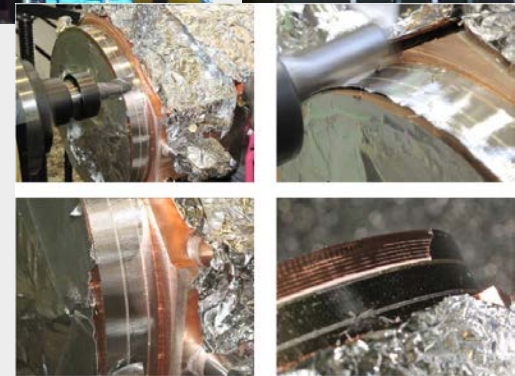
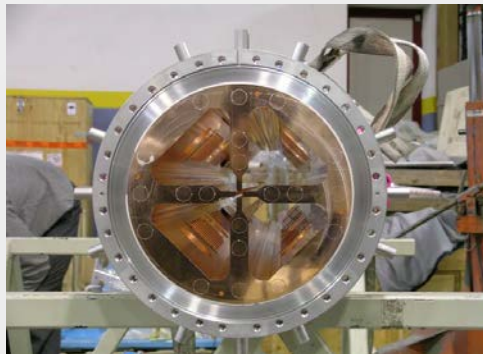
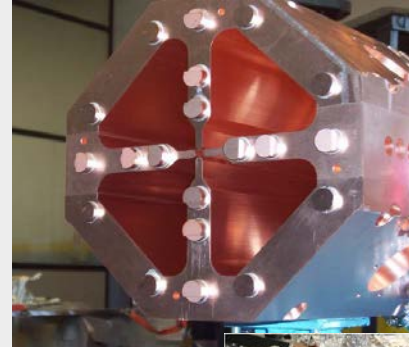
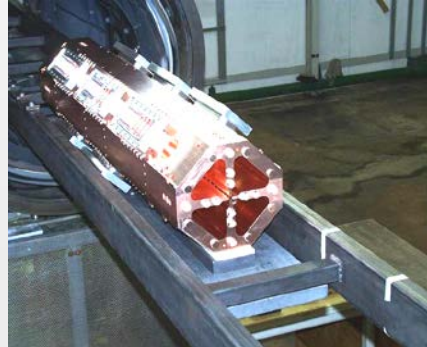
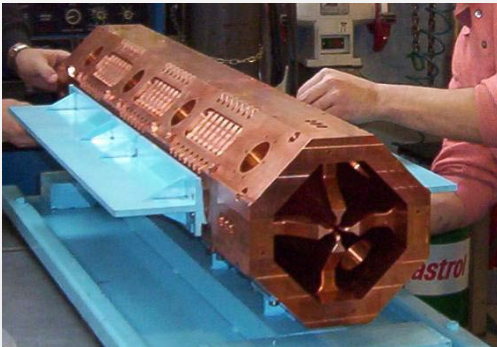
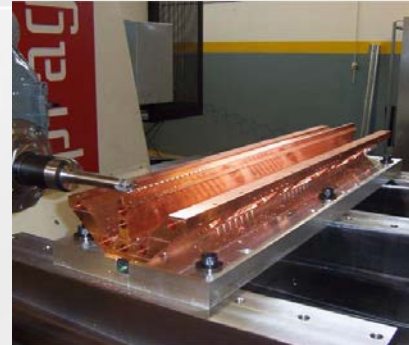
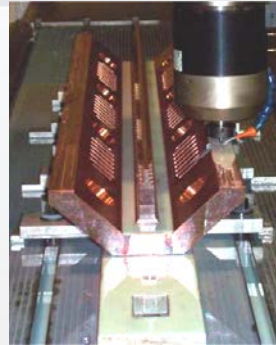
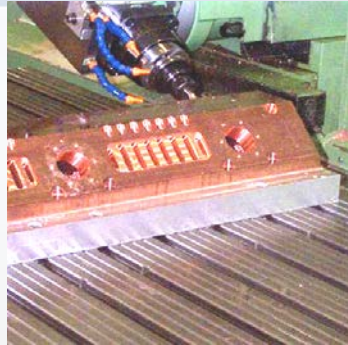
RFQ: parametri

Parameter	Value	Unit
Energy In/Out	0.08/5.02	MeV
Frequency	352.2	MHz
Proton Current (CW)	50	mA
Emit. t. rms.n. in/out	0.20/0.21	mm-mrad
Emit. l. rms.	0.19	MeV-deg
RFQ length	7.13	m (8.4 λ)
Intervane Voltage	68	KV (1.8 Kilp.)
Transmission (Waterbag)	97.7	%
Q_0 (SuperFish)	10000	
Q_0 (measured)	8100	
Beam Loading	0.148	MW
RF Power dissipation	0.847	MW

- 3 segmenti elettromagnetici di 2.4 m
- 2 celle di accoppiamento e stabilizzatori di dipolo
- Ogni segmento è composto da due moduli da 1.2 m

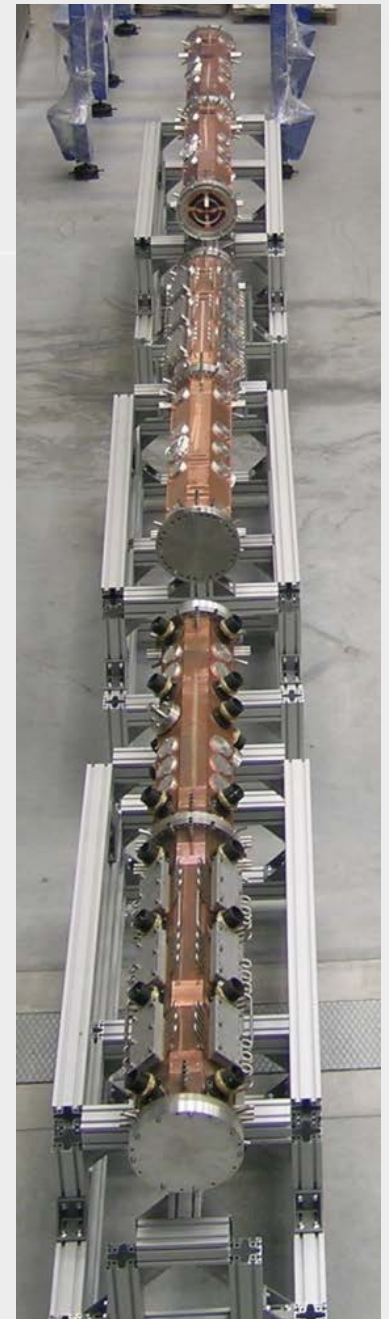
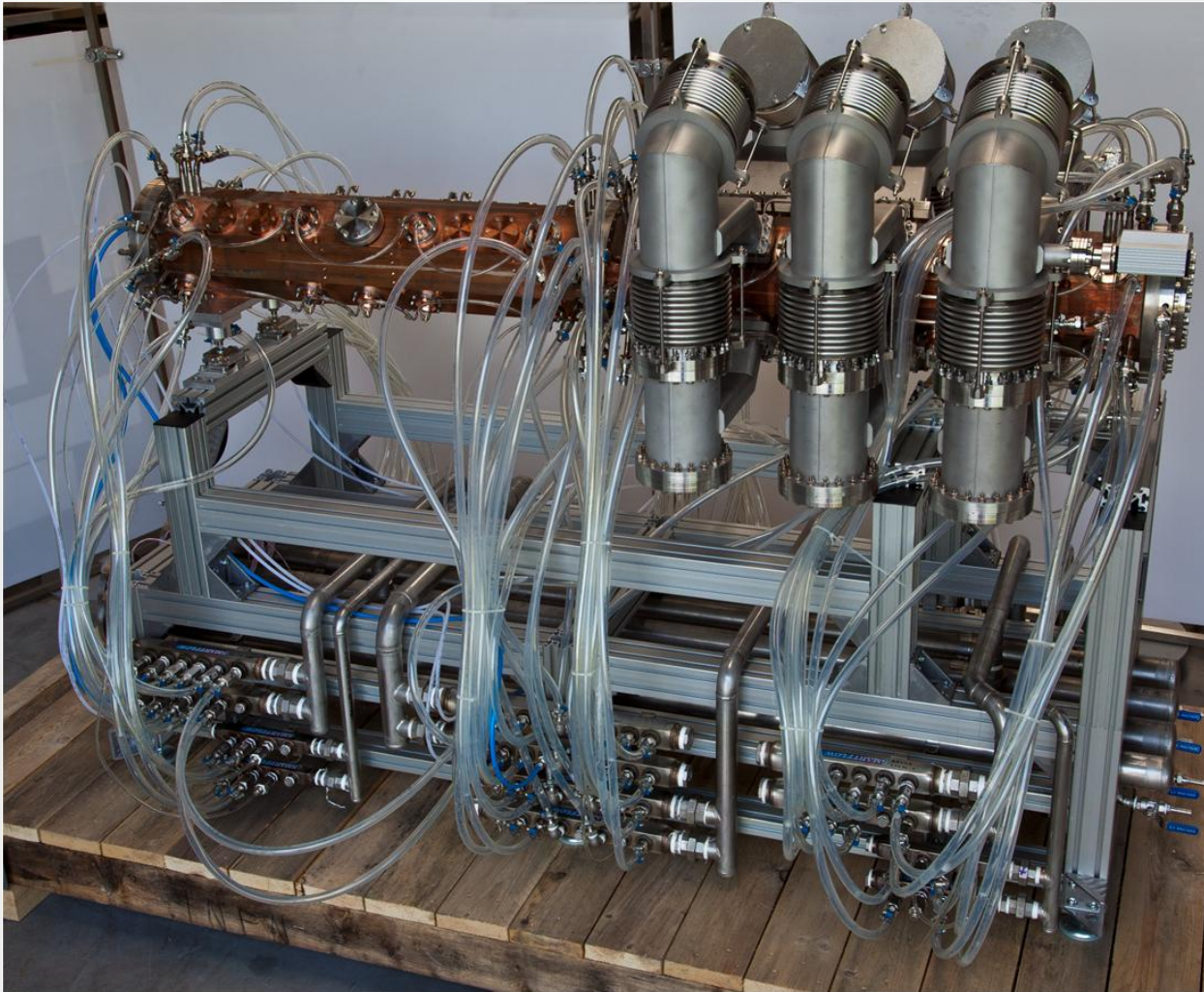


RFQ: storia di fabbricazione...



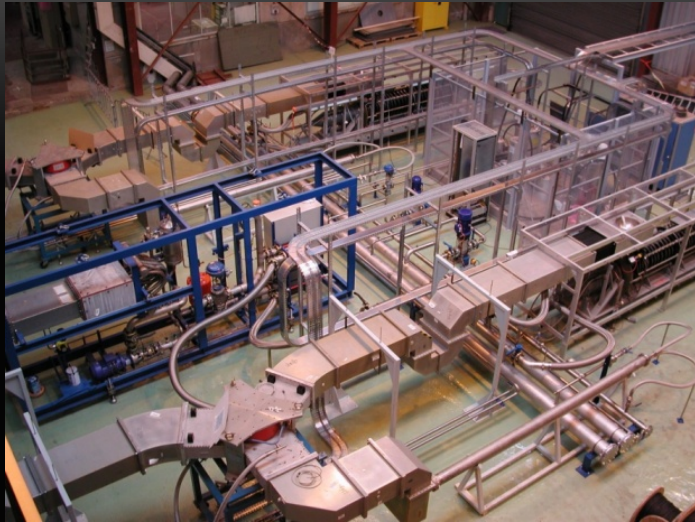
... e qualche intoppo

RFQ: costruzione completa



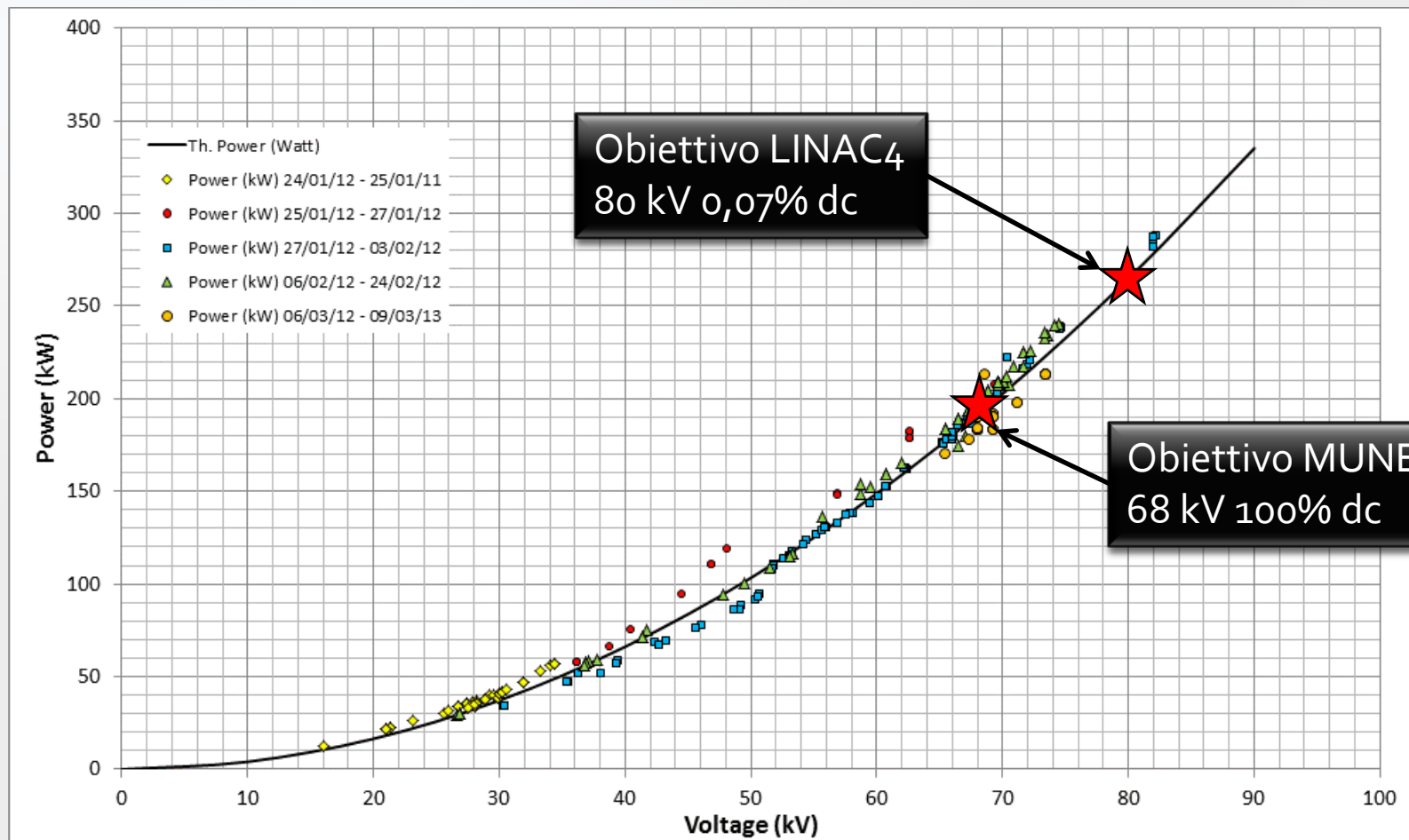
RFQ: test in potenza al CEA (Saclay)

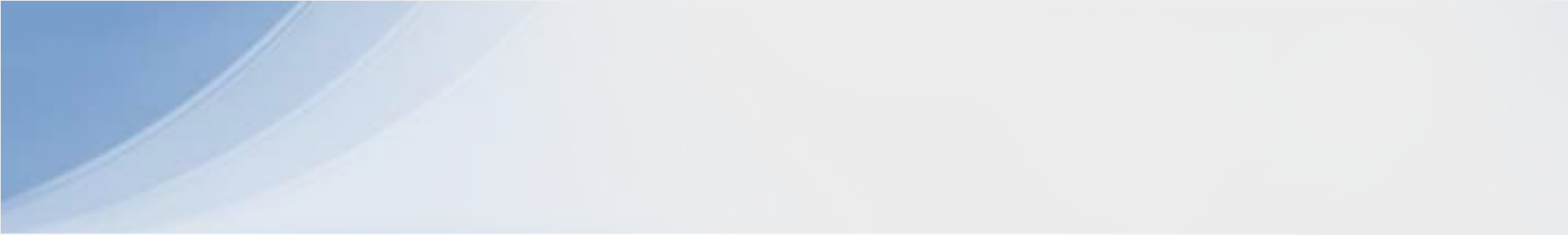
- La parte di alta tecnologia (cavità, distribuzione RF, sistema di accordatura in frequenza, sistema di controllo locale) sono già stati sviluppati



- L'impiantistica convenzionale (alimentatore e amplificatore di potenza, sistema di raffreddamento secondario) deve essere acquistata.
- Un accordo tra INFN e CEA ha permesso di testare con successo a Saclay gli accoppiatori di potenza e la cavità.

Risultato test in potenza



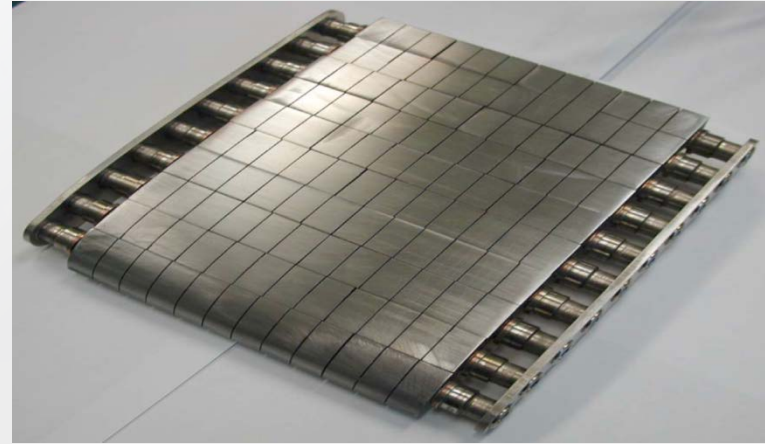


Bersaglio di Berillio e Moderatore di Neutroni

Convertitore di Berillio



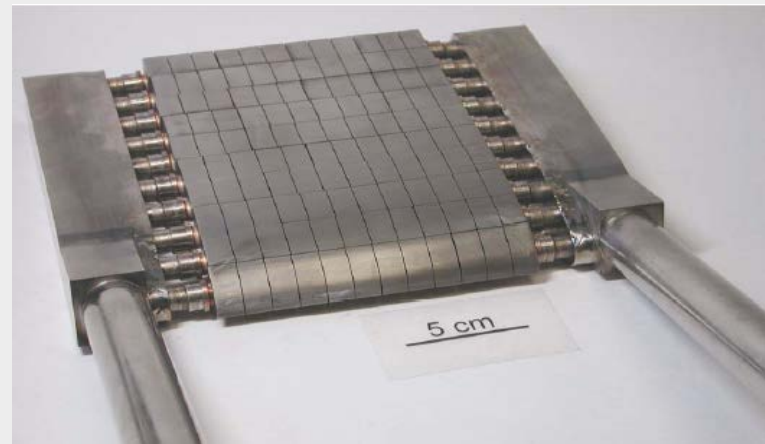
1. Be-tile brazed cooling pipes with Zr adapters



3. collector plates welding & EDM manufacturing process



2. Zr cooling system manifold & collector plates

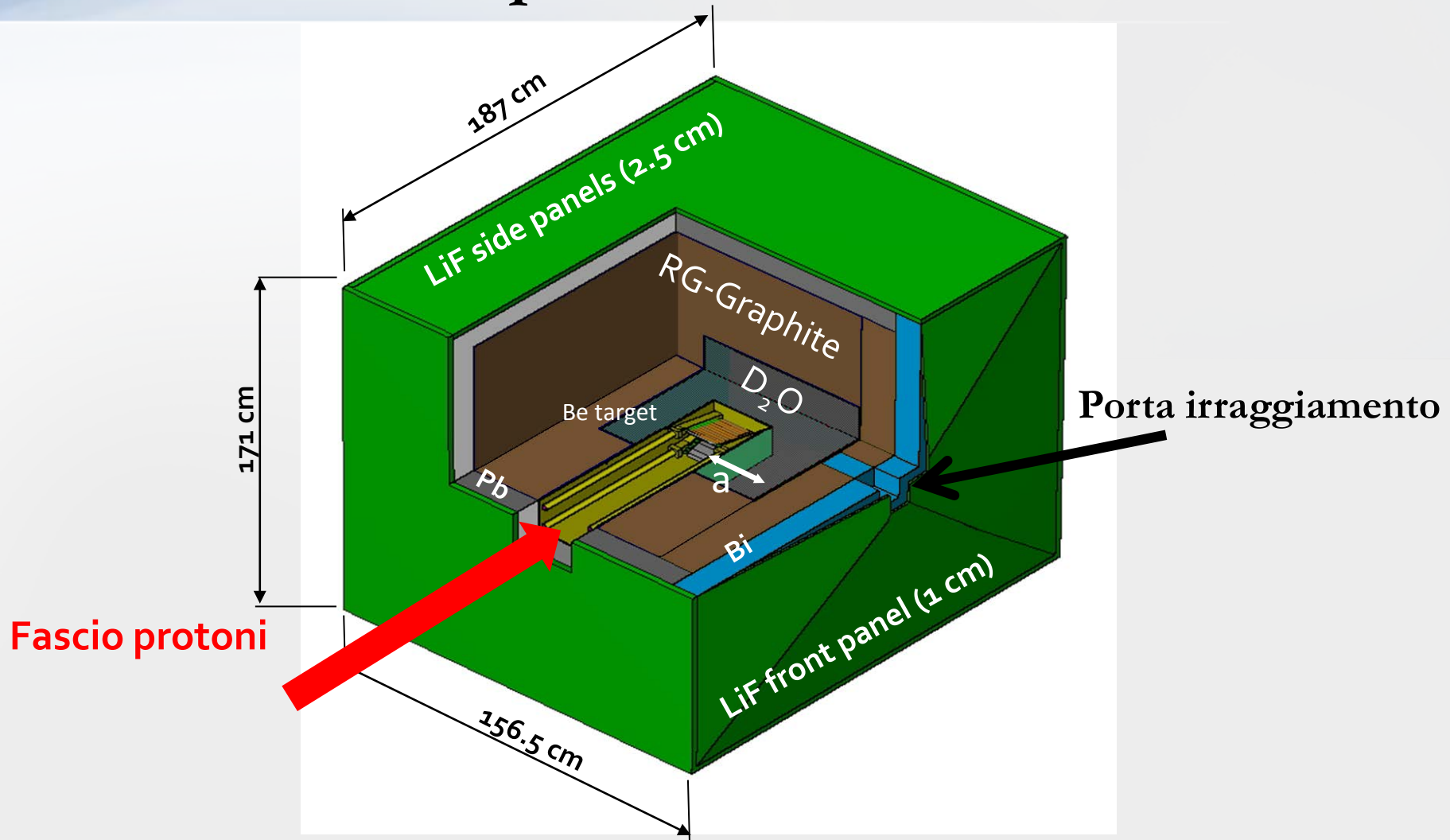


4. Half target: final assembling ready for e-beam test

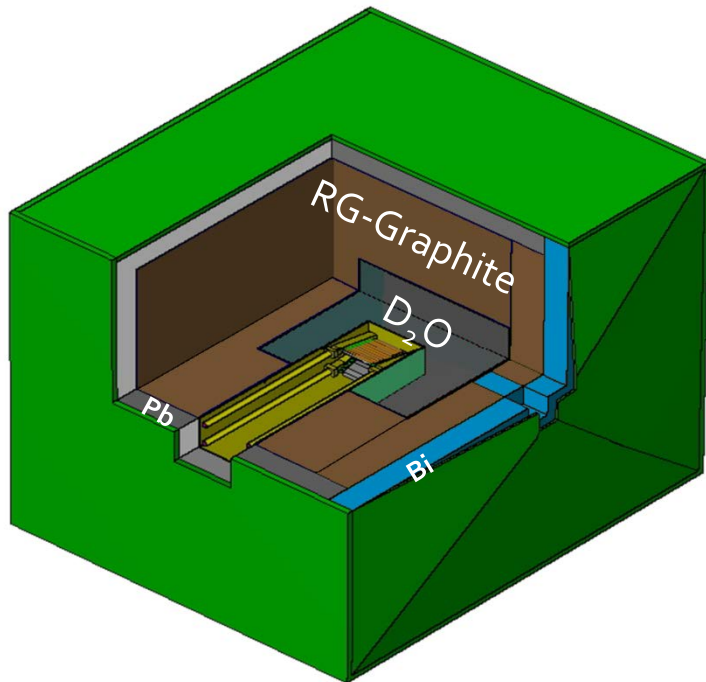
Risultati dei test

Tipo di test	Test effettuato	Risultati	Test superato
Termo-meccanico	Numero cicli: 2350 ~ 10 volte più alto del richiesto (200)	<ul style="list-style-type: none"> • Nessun segno visibile di danneggiamento • Nessuna cricca osservata all'analisi metallografica • Affidabilità migliore delle attese 	SI
Danneggiamento da radiazione: neutroni	Livelli di fluenza neutronica appropriati (10^{18} - 10^{20} cm ⁻²)	<ul style="list-style-type: none"> • Livelli d'indurimento del materiale la metà di quelli attesi • Proprietà meccaniche non compromesse anche ad alti livelli di dose (~0.1 dpa) • Generazione di bolle di He osservata solo ad alti livelli di dose (~0.08 dpa) • Stima vita media: 3100 ore (il doppio rispetto al parametro di disegno) 	SI
Danneggiamento da radiazione: protoni	Preparazione del set-up sperimentale	Sospeso	

Soluzione finale per il moderatore termico



Risultati calcolo MCNPX



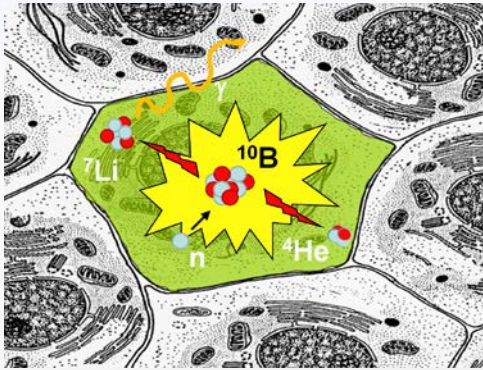
Resa neutronica misurata $\sim 3.05 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1} \cdot \text{mA}^{-1}$
 Agosteo et al., 2010. Proc. of ICNCT-14, Argentina (2010)

Sorgente di neutroni attesa con RFO + bersaglio Be
 $\rightarrow S_n \sim 1.05 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$

	$\Phi_{th} (E \leq 0.5 \text{ eV})$ ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	Φ_{th} / Φ_{total}	K_{nth} ($\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$)	$K_{n \text{ epi-fast}}$ ($\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$)	K_{γ} ($\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$)	$K_{\gamma} / K_{n \text{ tot}}$	$K_{n (E > 0.5 \text{ eV})} / \Phi_{th}$ ($\text{Gy} \cdot \text{cm}^2$)	K_{γ} / Φ_{th} ($\text{Gy} \cdot \text{cm}^2$)
IAEA TECDOC-1223 ref. parameters	> 1.0E+09	> 0.90					$\leq 2.0E-13$	$\leq 2.0E-13$
MCNPX results	4.30E+09	0.96	2.53	0.51	1.42	0.46	0.33E-13	0.92E-13

Applicazioni

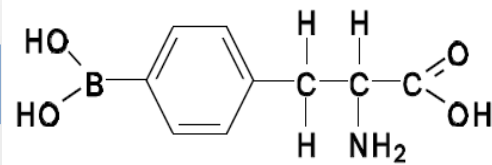
Boron Neutron Capture Therapy (BNCT)



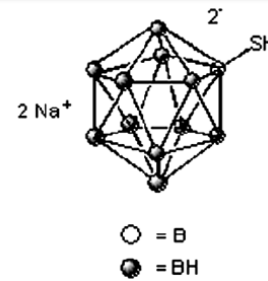
La BNCT è una radioterapia sperimentale binaria che utilizza la reazione di cattura neutronica $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ indotta da neutroni termici ($\langle E \rangle = 25 \text{ meV}$).

La particella α e il nucleo di ^7Li sono particelle ad alto LET e corto range ($<$ diametro medio cellulare $\approx 10 \mu\text{m}$) capaci di depositare la loro energie interamente all'interno della cellula caricata con ^{10}B .

BPA



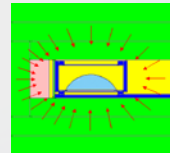
BSH



In questo modo la selezione della terapia è demandata alla distribuzione di ^{10}B e non al campo di radiazione. Questo fatto fa della BNCT una valida opzione contro i tumori diffusi. Aspetto cruciale per una buona riuscita del trattamento è quindi la disponibilità di trasportatori di ^{10}B capaci di realizzare una selezione cellule sane-cellule tumorali estremamente efficiente. Le molecole clinicamente approvate sono la BSH e la BPA. Ad oggi lo sforzo maggiore nella ricerca BNCT sta proprio nello sviluppo di trasportatori altamente selettivi.

BNCT a Pavia: il metodo TAO_rMINA

(Trattamento Avanzato d'Organi Mediante Irraggiamento Neutronico e Autotrapianto)



L'innovazione terapeutica si basa sulla possibilità di irraggiare in un campo neutronico l'organo isolato, in seguito all'infusione del composto ¹⁰BPA. I neutroni provengono da tutte le direzioni, garantendo l'irraggiamento dell'intero organo

Dopo l'infusione della BPA, il fegato viene espantato dal paziente

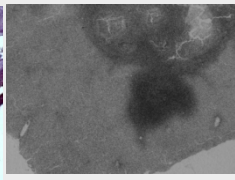
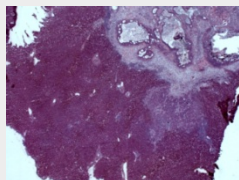
L'organo viene lavato e messo in 2 sacche di teflon

Quindi viene deposto in un contenitore di teflon...

... e irraggiato nel reattore



Due pazienti terminali affetti da metastasi epatiche da adenocarcinoma del colon sono stati trattati a Pavia con il metodo TAO_rMINA tra il 2001 e il 2003. In entrambi i casi, circa 10 giorni dopo il trattamento le scansioni CT mostravano il fegato in condizioni normali mentre le metastasi da adenocarcinoma apparivano necrotiche.



L'autoradiografia neutronica dimostra l'accumulo selettivo del boro nelle metastasi epatiche dei pazienti.

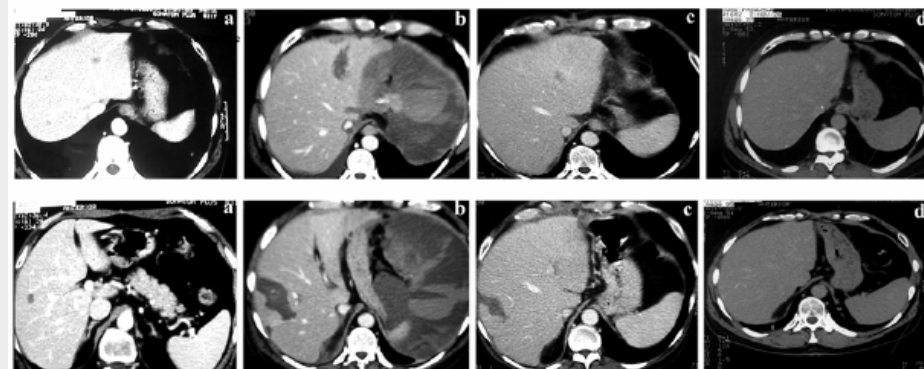
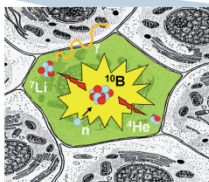


Figure 6. Sequence of CT images of the liver on a cranial (above) and a caudal (below) level in the first patient subjected to BNCT. Evolution at different times of the metastases towards necrosis with final substitution by normal hepatic tissue. (a): pre-operatively; (b): at 7 days; (c): at 6 months; (d): at 12 months after the procedure.

La **Boron Neutron Capture Therapy (BNCT)** è una **tecnica sperimentale per il trattamento del cancro** in cui le cellule cancerose vengono eliminate per mezzo di una reazione nucleare. **La reazione indotta dai neutroni si concentra sul tessuto malato grazie all'immissione in esso di un farmaco contenente atomi di Boro.** I nuclei di Boro si spaccano, rilasciando frammenti che eliminano le cellule malate con grande efficacia.

Meccanismo d'azione

BNCT si basa sull'elevata selettività di interazione del ^{10}B con neutroni termici, a bassa energia, per dare ^{11}B ; tale specie è instabile e la sua fissione produce due particelle molto veloci: ^7Li ed ^4He (o particella α). Queste provocano la morte delle cellule intorno all'atomo di ^{11}B

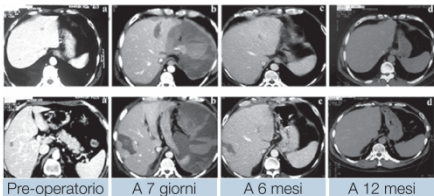


Il progetto italiano INFN

La **BNCT è stata fatta in Italia su un progetto INFN e funziona!**

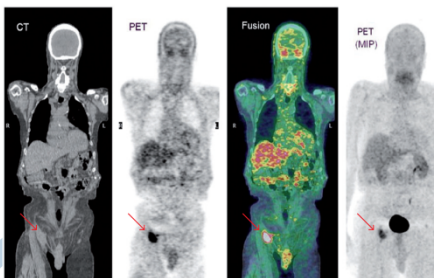
Caso clinico:

sequenze di immagini tomografiche del fegato a livello craniale (sopra) e caudale (sotto) nel primo paziente trattato a Pavia con BNCT



Come agisce a livello linfonodale

Distribuzione in vivo con PET/CT del ^{18}F -FBPA e suo accumulo a livello linfonodale.



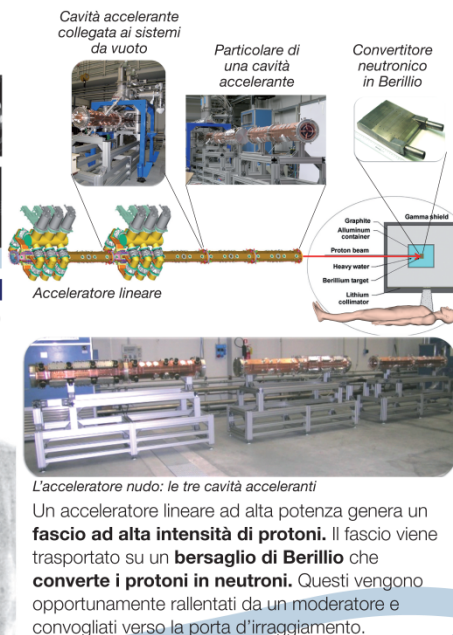
L'acceleratore di Protoni

L'INFN in collaborazione con l'Istituto Oncologico Veneto (IOV- IRCCS), l'Università di Padova e l'Università di Pavia opera da tempo nel campo della BNCT, e sta costruendo un acceleratore di protoni per produrre una sorgente neutronica per BNCT.

	Φ_n ($E \leq 0.5$ eV) ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	$\Phi_n / \Phi_{\text{total}}$	K_n ($E > 0.5$ eV) / Φ_n (Gy cm^{-2})	K_γ / Φ_n (Gy cm^{-2})
LNL neutron source	4.3E+09	0.96	0.33E-13	0.92E-13
IAEA recommendations for BNCT	> 1.0E+09	> 0.90	$\leq 2.0\text{E-13}$	$\leq 2.0\text{E-13}$

Caratteristiche della sorgente neutronica INFN

La sorgente sarà **INTENSA, SICURA, FLESSIBILE.**



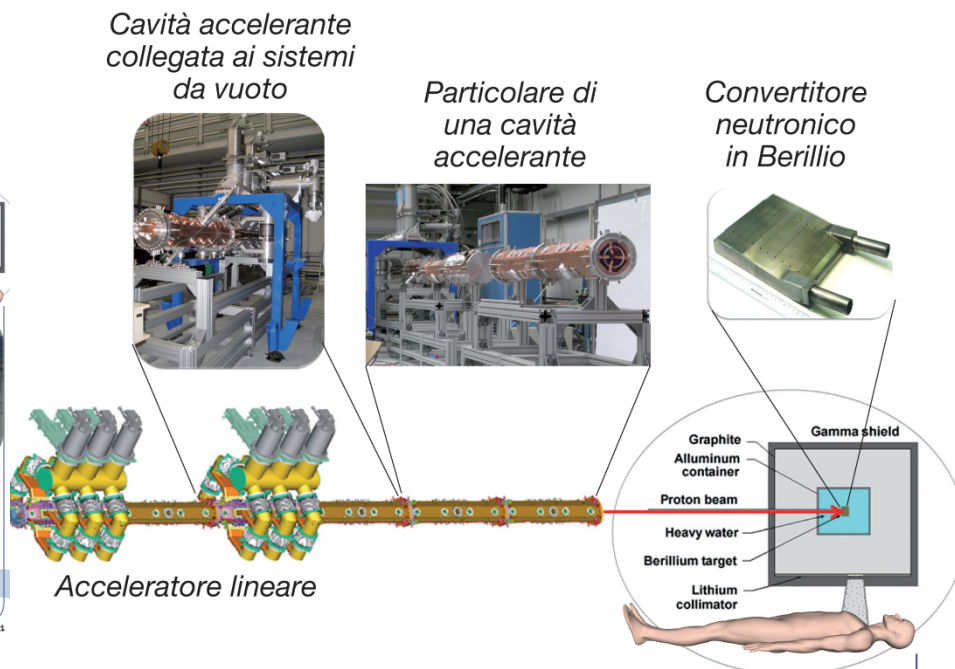
L'acceleratore nudo: le tre cavità acceleranti
Un acceleratore lineare ad alta potenza genera un fascio ad alta intensità di protoni. Il fascio viene trasportato su un bersaglio di Berillio che converte i protoni in neutroni. Questi vengono opportunamente rallentati da un moderatore e convogliati verso la porta d'irraggiamento.

L'INFN in collaborazione con l'Istituto Oncologico Veneto (IOV- IRCCS), l'Università di Padova e l'Università di Pavia opera da tempo nel campo della BNCT, e sta costruendo un acceleratore di protoni per produrre una sorgente neutronica per BNCT.

	Φ_{th} ($E \leq 0.5$ eV) ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	$\Phi_{\text{th}} / \Phi_{\text{total}}$	K_n ($E > 0.5$ eV) / Φ_{th} (Gy cm^{-2})	K_γ / Φ_{th} (Gy cm^{-2})
LNL neutron source	4.3E+09	0.96	0.33E-13	0.92E-13
IAEA recommendations for BNCT	> 1.0E+09	> 0.90	$\leq 2.0\text{E-13}$	$\leq 2.0\text{E-13}$

Caratteristiche della sorgente neutronica INFN

La sorgente sarà **INTENSA, SICURA, FLESSIBILE.**



Caratterizzazione scorie (SOGIN)

L'applicazione sarà finalizzata principalmente alle attività di ricerca riguardante la caratterizzazione radiologica dei rifiuti radioattivi, nonché ad attività riguardanti lo studio di attivazione su matrici condizionate. In particolare, saranno implementate tecniche analitiche non distruttive, di tipo NDA (non destructive analysis) e NDE (non destructive evaluation)

NDA

Interrogazione neutronica attiva: la sorgente neutronica sarà ricavata sfruttando il fascio neutronico generato dal LINAC

Conteggio neutronico passivo: si sfrutta la capacità di emissione neutronica da fissione spontanea di alcuni elementi, ad esempio Pu

Spettrometria gamma: sistemi HPGe specifici per le alte e basse energie per l'individuazione dei radionuclidi gamma emettitori presenti

NDE

Radiografia: qualificazione e distribuzione della matrice

Tali tecniche si applicano principalmente ai rifiuti prima del loro trattamento e/o condizionamento ai fini della loro classificazione, in modo da stabilirne la tipologia di gestione. In via del tutto sperimentale si utilizzeranno tali tecniche anche a matrici che simulano rifiuti già condizionati (sia in forma vetrosa che cementizia) per studiarne l'applicabilità ed eventuali sviluppi.

Conclusioni

- ❖ La parte ad alta tecnologia dell'acceleratore è stata completa con successo.
- ❖ La cavità RFQ, recentemente testata al CEA di Saclay, ha dimostrato prestazioni raggiunte solo da un progetto militare dei laboratori di Los Alamos alla fine degli anni novanta.
- ❖ Il convertitore neutronico ha brillantemente superato i test di irraggiamento con elettroni e con neutroni. Manca il test d'irraggiamento con protoni.
- ❖ Per quanto riguarda l'applicazione BNCT, presso lo IOV-IRCCS di Padova e l'università di Pavia sono in corso sperimentazioni pre-cliniche nella prospettiva di usare i fasci di neutroni generati dall'acceleratore nella terapia su pazienti.