

I LABORATORI NAZIONALI DI LEGNARO. gli acceleratori



MILANO, 7-8 APRILE 2022

I LABORATORI NAZIONALI DI LEGNARO: gli acceleratori

LA STORIA per una ricerca all'avanguardia

- 1961 - 60 anni fa il primo acceleratore per il di Fisica Nucleare dell'Università di Padova con acceleratori di particelle
- 1968 nascono i Laboratori Nazionali di Legnaro dell'INFN
- 1971 – le attività di Fisica Interdisciplinare con AN2000
- 1981 – il TANDEM XTU per studiare le collisioni fra ioni pesanti
- Anni 90 – ALPI – il LINAC Superconduttivo
- Anni 2000 – PIAVE – un Iniettore Superconduttivo
- **Oggi: il ciclotrone B70 ed il progetto SPES**

LE TECNOLOGIE

- SVILUPPI DI ACCELERATORI E RIVELATORI
- Target di produzione e tecniche DI deposizione film sottili E SPESSI
- Trasferimento tecnologico

Electrostatic -1961
CN 7 MV



Electrostatic - 1971
AN 2 MV



Superconducting – mid 90's
ALPI 14.5 MV



Electrostatic – mid 80's
TANDEM XTU 14.5 MV

Superconducting – 2004
PIAVE 14.5 MV



SPES



Attività di ricerca e commissioni scientifiche



Le attività di **ricerca** nei **Laboratori di Legnaro** si svolgono in collaborazione con **altre sezioni** ed **Università** e si sviluppano nelle diverse Commissioni dell'Ente:

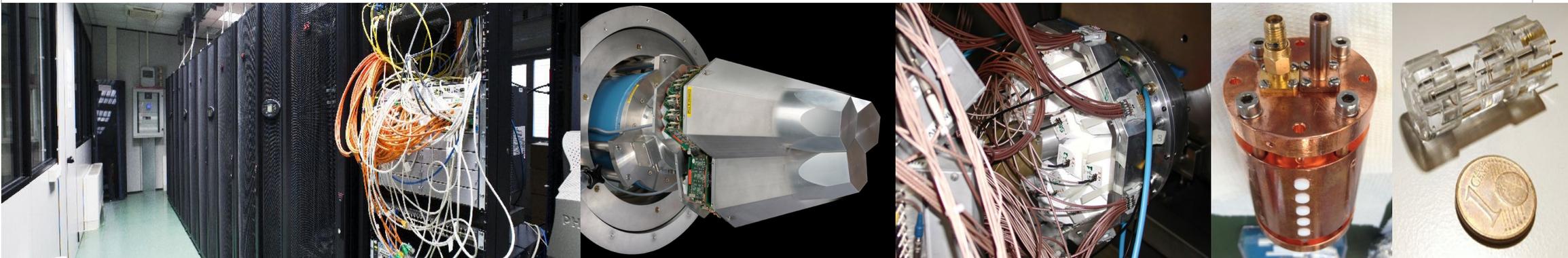
Commissione Scientifica Nazionale 1 – CMS (attività di calcolo scientifico e DAQ)

Commissione Scientifica Nazionale 2 – Axion research (**QUAX**); vacuum properties (**PVLAS**); Dark matter (**CUORE**, **CUPID**); neutrino oscillation (**T2K**)

LA RICERCA @LNL

Commissione Scientifica Nazionale 3 – ALICE (attività di calcolo scientifico e DAQ) – **GAMMA – NUCL-EX - PRISMA - nTOF – PANDORA - LUNA**

Commissione Scientifica Nazionale 5 – **Radiobiologia, Nano-dosimetria – Sensoristica e Quantum Technologies - Target di produzione - Sviluppo Acceleratori – Tecniche Nucleari – Radioisotopi - Rivelatori**



FARE UNA FISICA DI ECCELLENZA CON ACCELERATORI DI PRECISIONE

60 anni di studi di struttura e dinamica nucleare → dalle piccole macchine agli acceleratori SC.

40 anni di fisica degli ioni pesanti → dal TANDEM agli acceleratori più moderni

CN & AN2000

CN (1961)

- Voltaggio: ≤ 6 MV
- Fasci continui disponibili: $^1\text{H}^+$, $^2\text{H}^+$, $^3\text{He}^+$, $^4\text{He}^+$, $^4\text{He}^{++}$
- Fasci pulsati disponibili: $^1\text{H}^+$, $^4\text{He}^+$
- Disponibili irraggiamenti con neutroni termici e una facility di neutroni veloci BELINA

AN2000 (1971)

- Voltaggio: $0.3 < V < 2.2$ MV
- Fasci disponibili: $^1\text{H}^+$, $^3\text{He}^+$, $^4\text{He}^+$
- Disponibile un micro-fascio

Futuro:

2 possibili opzioni →

a) Sostituzione di AN2000 con **Coaxial Singletron 3.5MV positive ion Accelerator** (≈ 3 MEuro) – con recupero infrastruttura esistente

b) Sostituzione delle 2 macchine con **un'unica macchina per ioni leggeri da 0.1 MV-6 MV** (≈ 12 MEuro (Nuovo accel. + nuovo building + linee di fascio))



FISICA INTERDISCIPLINARE

- 1) Fascio per vari committenti con microbeam
- 2) Tecniche nucleari per caratterizzazione materiali
- 3) Radiobiologia e microdosimetria
- 4) Sviluppo Rivelatori
- 5) Sviluppo acceleratori
- 6) Nuovi radioisotopi

Nuove tecniche di irraggiamento e di **impiantazione di singola particella** e correlate tecniche di rivelazione con **risoluzione sub-micrometrica**:

- studio della **risposta spaziale** di rivelatori di radiazione,
- la funzionalizzazione localizzata di **materiali avanzati** e
- la creazione di **nuovi dispositivi quantistici**.



MICROFASCIO

QUANTEP (CALL)

QUANtum Technologies
Experimental Platform

implementazione di un sistema completo di circuito Integrato fotonico al silicio per il **calcolo quantistico** con circuiti di ottica quantistica lineare e singoli fotoni.

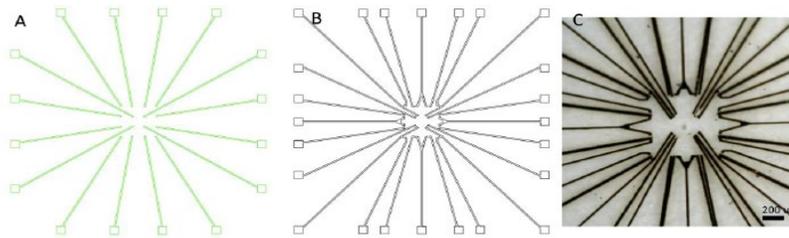
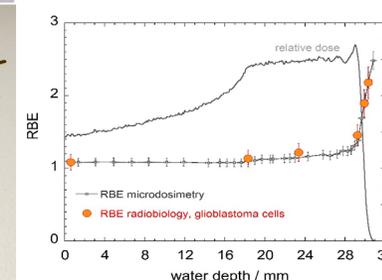
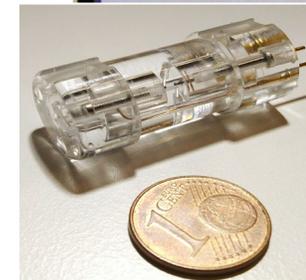


Fig. 3. DIACELL sensor. CAD schematic of biosensing (A) and dosimetric (B) electrodes. (C) Optical micrograph of central region of the diamond based electrode.



La **microdosimetria** misura la fluttuazione stocastica del deposito energetico alla scala del micron, che è strettamente correlata all'efficacia biologica della radiazione.

I rivelatori di riferimento sono i **contatori proporzionali a gas tessuto-equivalenti (TEPC)**, costruiti con materiali aventi composizione elementare analoga a quella del tessuto biologico.

TRASFERIMENTO TECNOLOGICO:

- **ingegnerizzazione di un contatore proporzionale a gas miniaturizzato** (mini-TEPC) per la caratterizzazione microdosimetrica di fasci di particelle cariche usate per la cura dei tumori (adroterapia).
- standardizzazione procedure di costruzione e assemblaggio, riproducibilità della risposta, integrazione del sensore con un sistema automatico di controllo e analisi dati, utilizzabile agevolmente in ambito clinico.

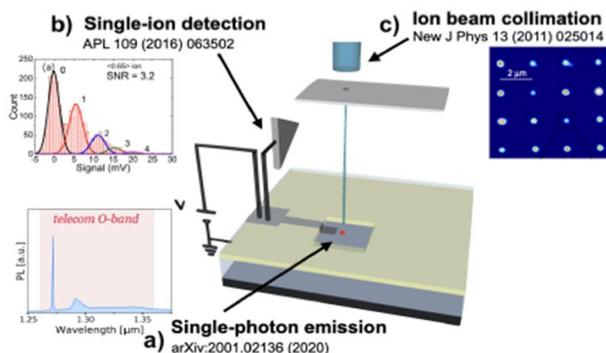


Figure 5: Fabrication of integrated SPSs in Si

ASI SUPPORTED IRRADIATION FACILITIES ASIF



Setup for **Ana**lysis with MeV accelerators of **I**sotopic **t**Argets and their preparation



Caratteristiche della nuova Facility di irraggiamento

Large area uniform irradiation of spacecraft materials & components in a wide range of energies and fluences

Fluence: $1 \times 10^9 \div 10^{16} \text{ cm}^{-2}$

Energy: 0.2÷5.5 MeV

Large area

- $\Delta X \cdot \Delta Y = 20 \times 20 \text{ cm}^2$ @ 2 MeV, $\Delta X \cdot \Delta Y = 8 \cdot 8 \text{ cm}^2$ a 5.5 MeV
- XY beam scanning

Spatial uniformity: target $\leq \pm 1\%$

Accuracy: base $\leq \pm 5\%$ - target to $\leq \pm 3\%$ (multiple Faraday cups)

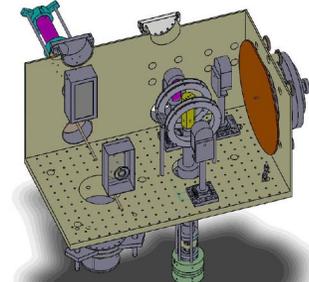
No Carbon build-up (cryogenic LN2 trap)

Time for full irradiation: from 30s to several hours

Certification of irradiation: ESA/ASI compliant

Nuclear target manufacturing: PVD chamber

Sputtering chamber



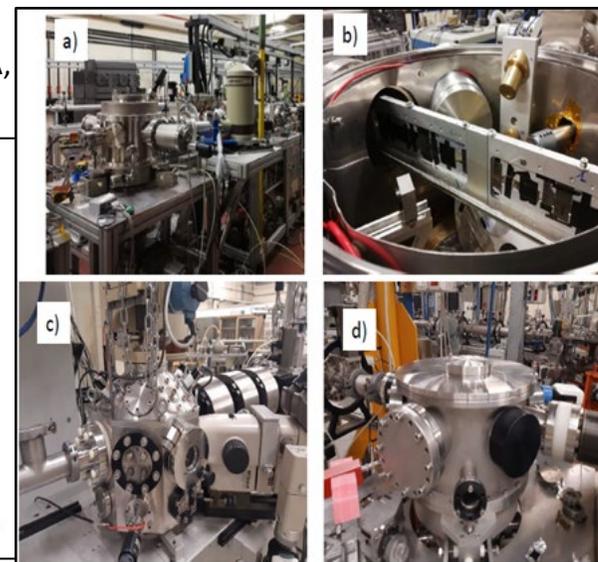
Caratteristiche del Fascio:

Monochromatic Beams: $^1\text{H}^+$, $^4\text{He}^+$ Energy: 0.2÷5.5 MeV

Standard Beam Size: 2÷8 mm (FWHM)

Beam Current: 1-400nA (typical)- (>400nA, <2μA energy dependent)

Apparati e linee di fascio dedicati alle tecniche nucleari



3 different scattering chambers available at LNL:

-15° beam line at CN facility [a, b])

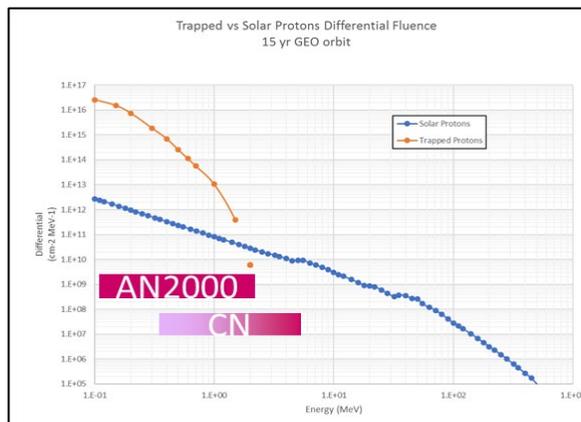
- EBS analysis
- PIXE analysis
- PIGE analysis

0° beam line (μ-beam) at AN2000 facility [c])

- EBS analysis
- PIXE analysis

60° beam line at AN2000 facility [d])

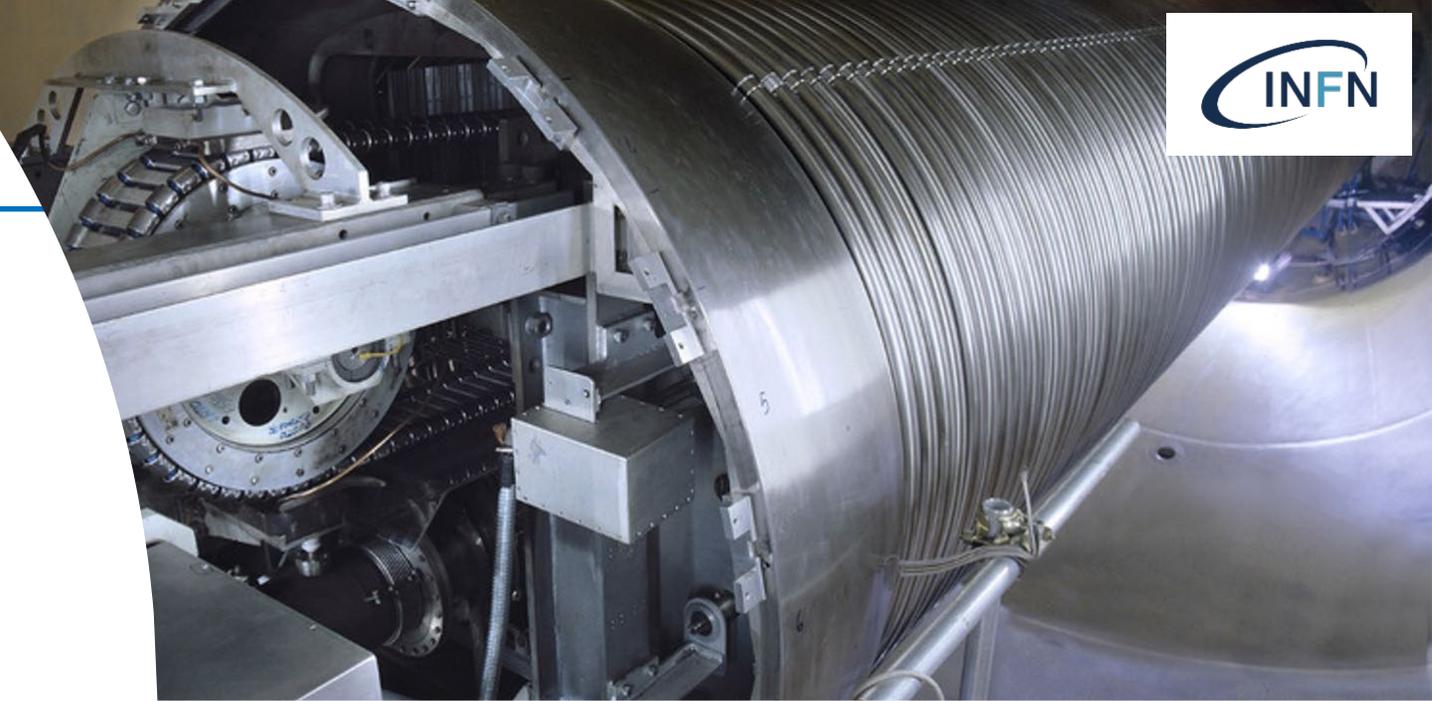
- EBS analysis



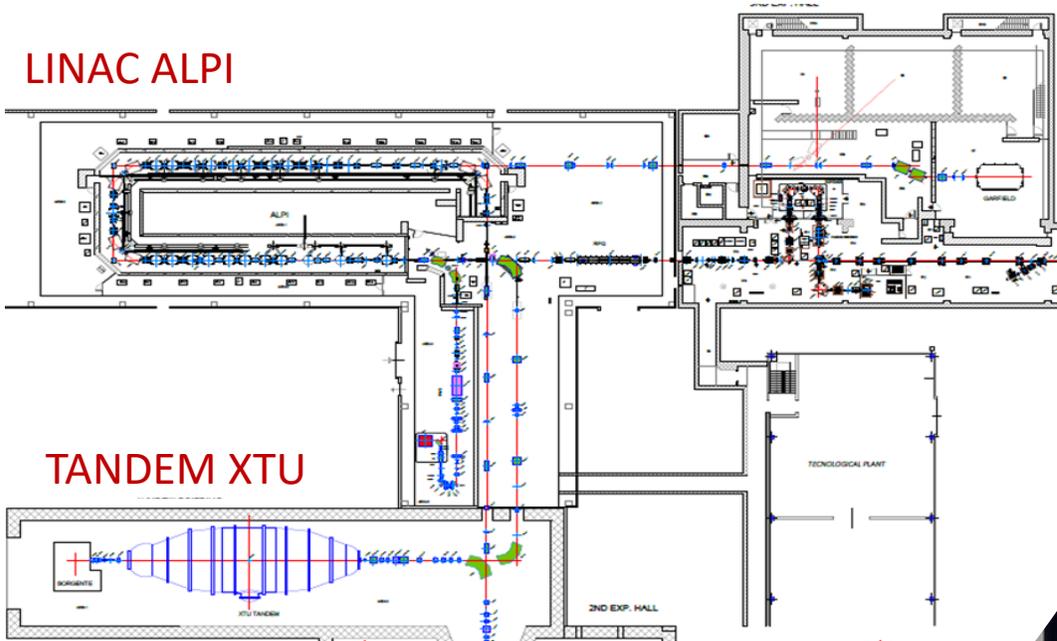
TANDEM (1980)

- Van de Graaff da 15 MV di tensione massima
- Energia: da 30 MeV/amu per ^1H a 1.5 MeV/amu per ^{197}Au
- Fascio continuo o pulsato
- Iniezione in ALPI per energie superiori

Ammodernamento **iniettore TANDEM**. Rinnovo di hardware del sistema di **controllo dell' iniettore**
Incremento affidabilità **acceleratore TANDEM**



LINAC ALPI



TANDEM XTU



ALPI-PIAVE

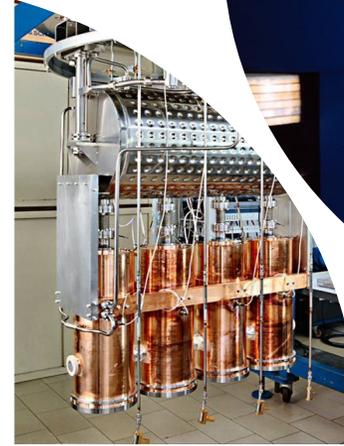
ALPI (anni 90)

- $V_{eq} \sim 50$ MV (nominale) $V_{eq} \sim 39$ MV (attuale)
- Cavità di tipo QWR (80 MHz e 160MHz) \rightarrow 4 cavità per criostato
- Fasci possibili: da ^{12}C a ^{238}U
- Iniezione: da Tandem o da PIAVE
- In futuro iniezione da SPES tramite ADIGE

Miglioramento sulla **Beam Dynamics** di ALPI in previsione dei fasci SPES

Sistema di **controllo RF** migliorato

Miglioramento situazione cavità (allineamento, performances)



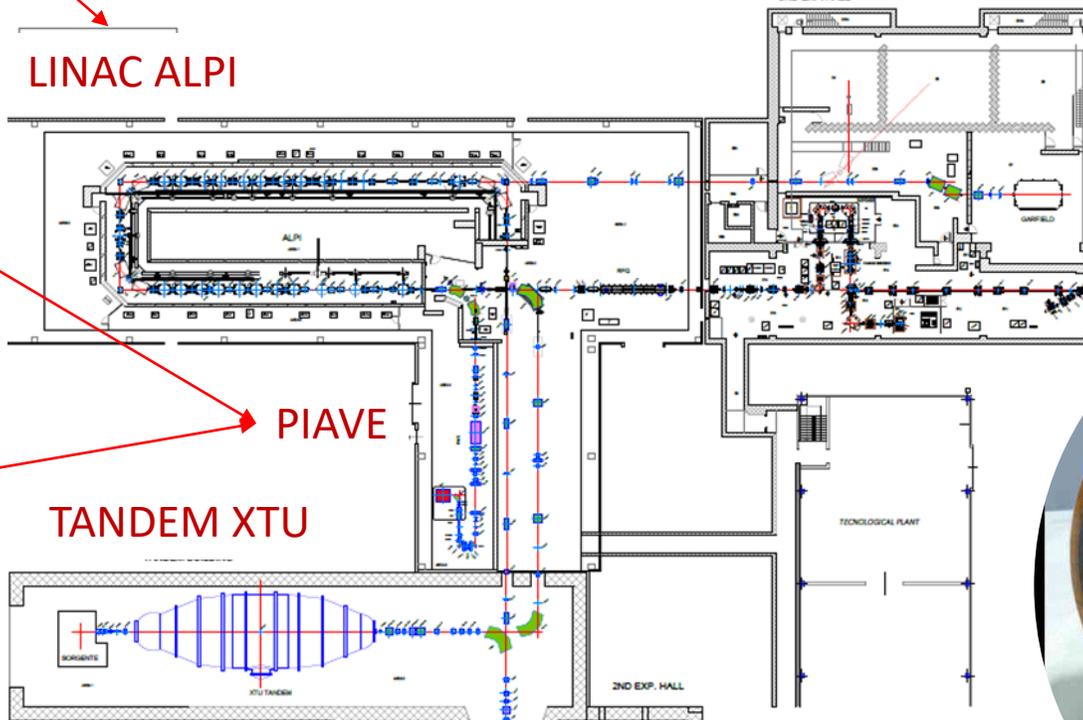
PIAVE (anni 2000)

$V_{eq} \sim 9.5$ MV (nominale) $V_{eq} \sim 7.4$ MV (attuale)

Fasci possibili: da ^{12}C a ^{238}U

Intensità massima 5 μA

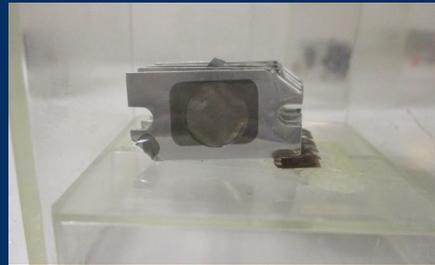
Profonda manutenzione (cicli di pulitura) del **sistema SFRQ** di PIAVE – sostituzione **tuners**



ULTERIORE ARRICCHIMENTO: nuovi fasci e nuovi bersagli



Carbon stripper foils



^{184}W on carbon



natAu on ^{58}Ni



^{148}Sm on Ta



^{54}Fe on Au



^{106}Cd

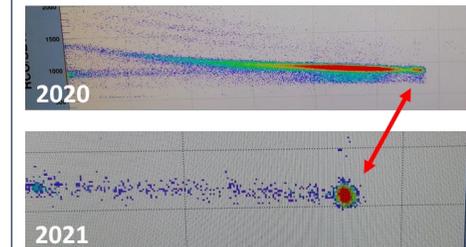
Richiesta utilizzo fasci di ^{238}U e target di ^{238}U , ^{232}Th , $^9,^{10}\text{Be}$

Inviare ad ISIN per sperimentazione campagna AGATA

Esperimenti con Tandem

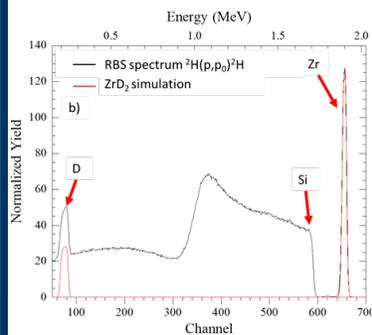
- L'accelerazione con solo TANDEM garantisce una qualità del fascio in termini di dimensione del fascio (1-2 mm) e di risoluzione in energia (0.1%) che ne rendono uniche le qualità

Beam quality: $^{18}\text{O}+^{197}\text{Au}$ - elastic

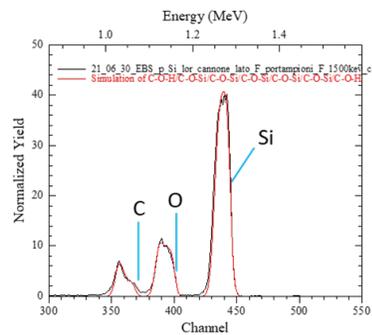


- La configurazione TANDEM-ALPI permette l'accelerazione di fasci più leggeri del ^{12}C a differenza di PIAVE-ALPI che ha un limite inferiore.

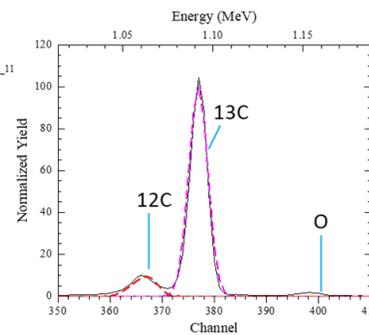
IBA Characterization of nuclear targets: examples



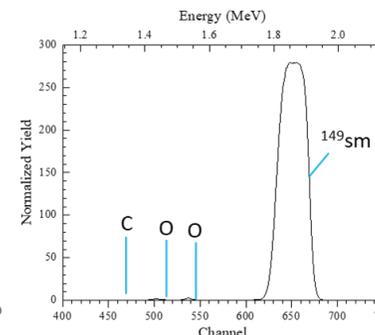
Oxygen-free deuterated targets thin films of ZrD_2



Self sustained natSi target EBS analysis



Self sustained ^{13}C target EBS analysis

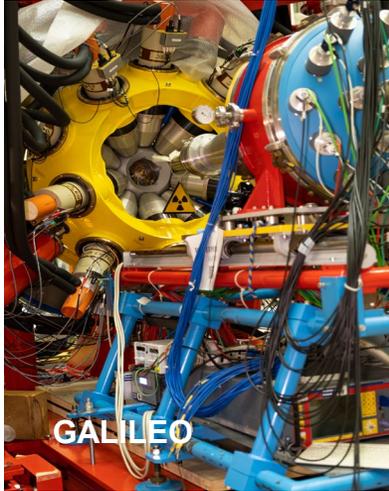


Self sustained ^{149}Sm target EBS analysis

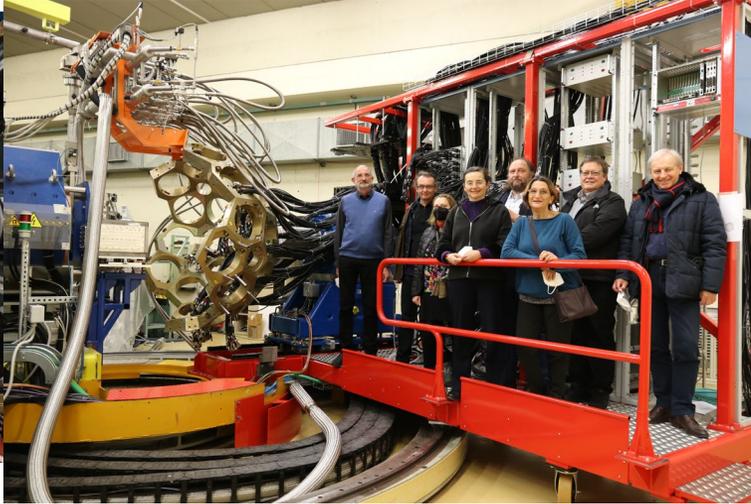
La strumentazione ai Laboratori di Legnaro

APPARATI COMPLESSI: spettrometri di varia natura accoppiati a diversi rivelatori ancillari.

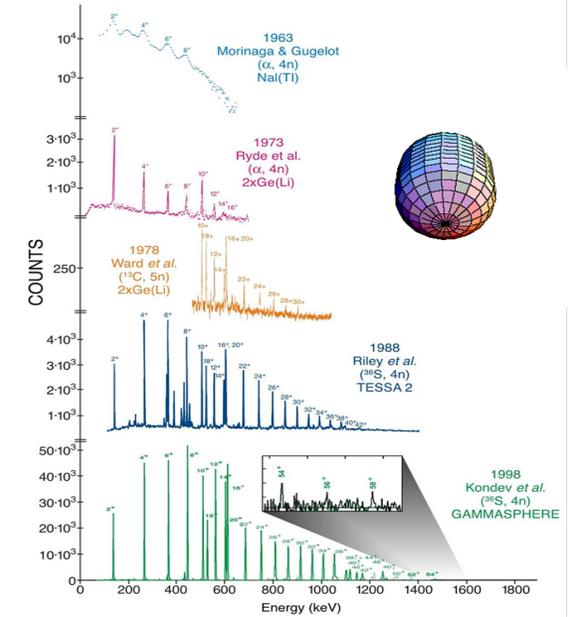
Spettrometri Gamma



AGATA: Inizio installazione settembre 2021 - Inizio campagna Aprile 2022

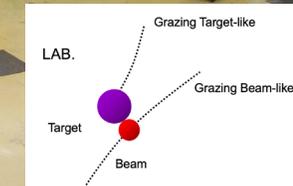
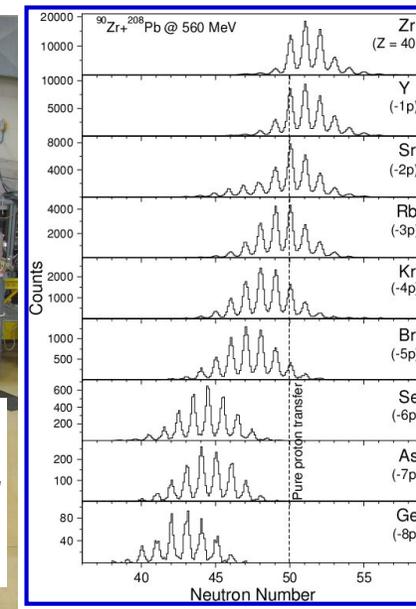
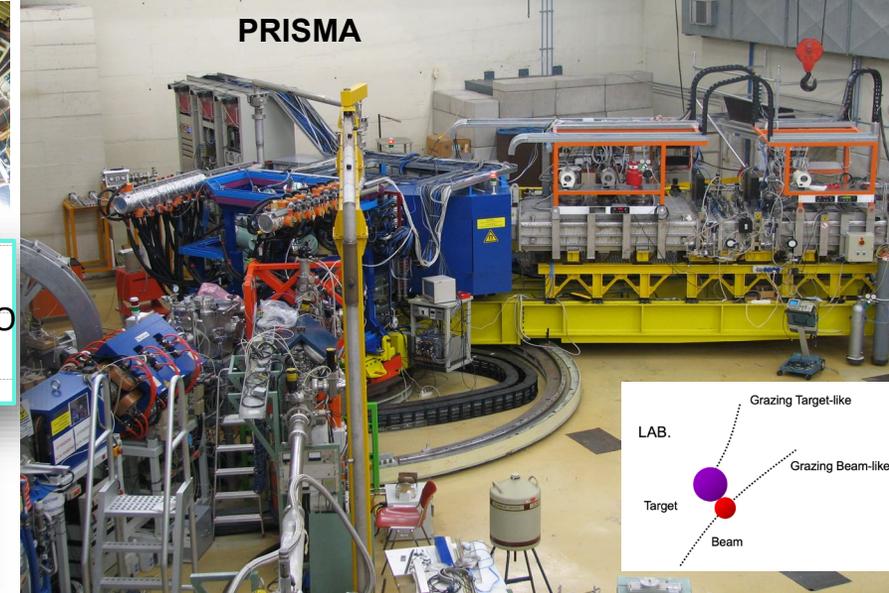
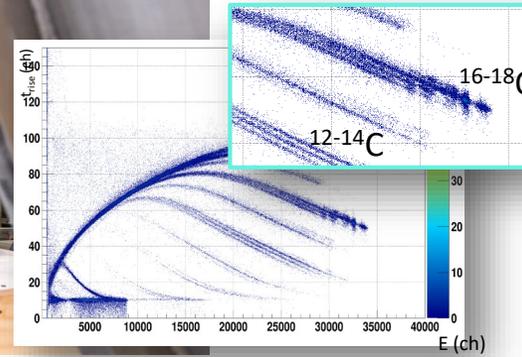
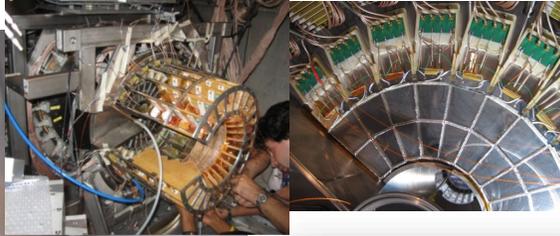
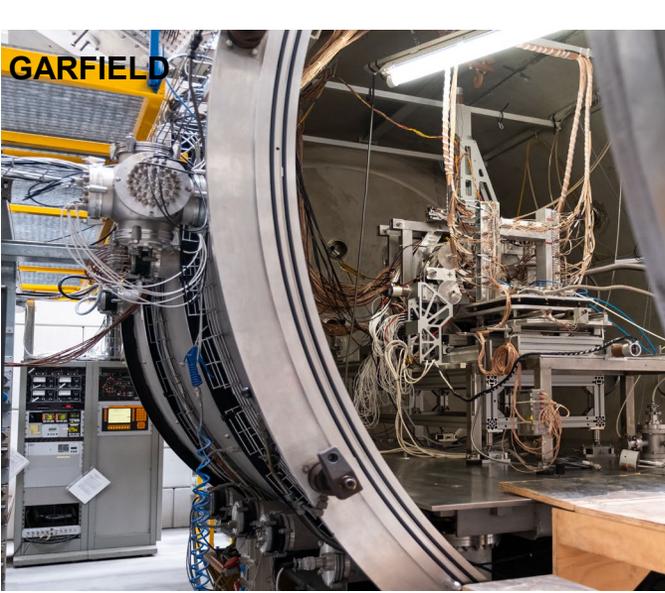


Evoluzione degli spettrometri γ



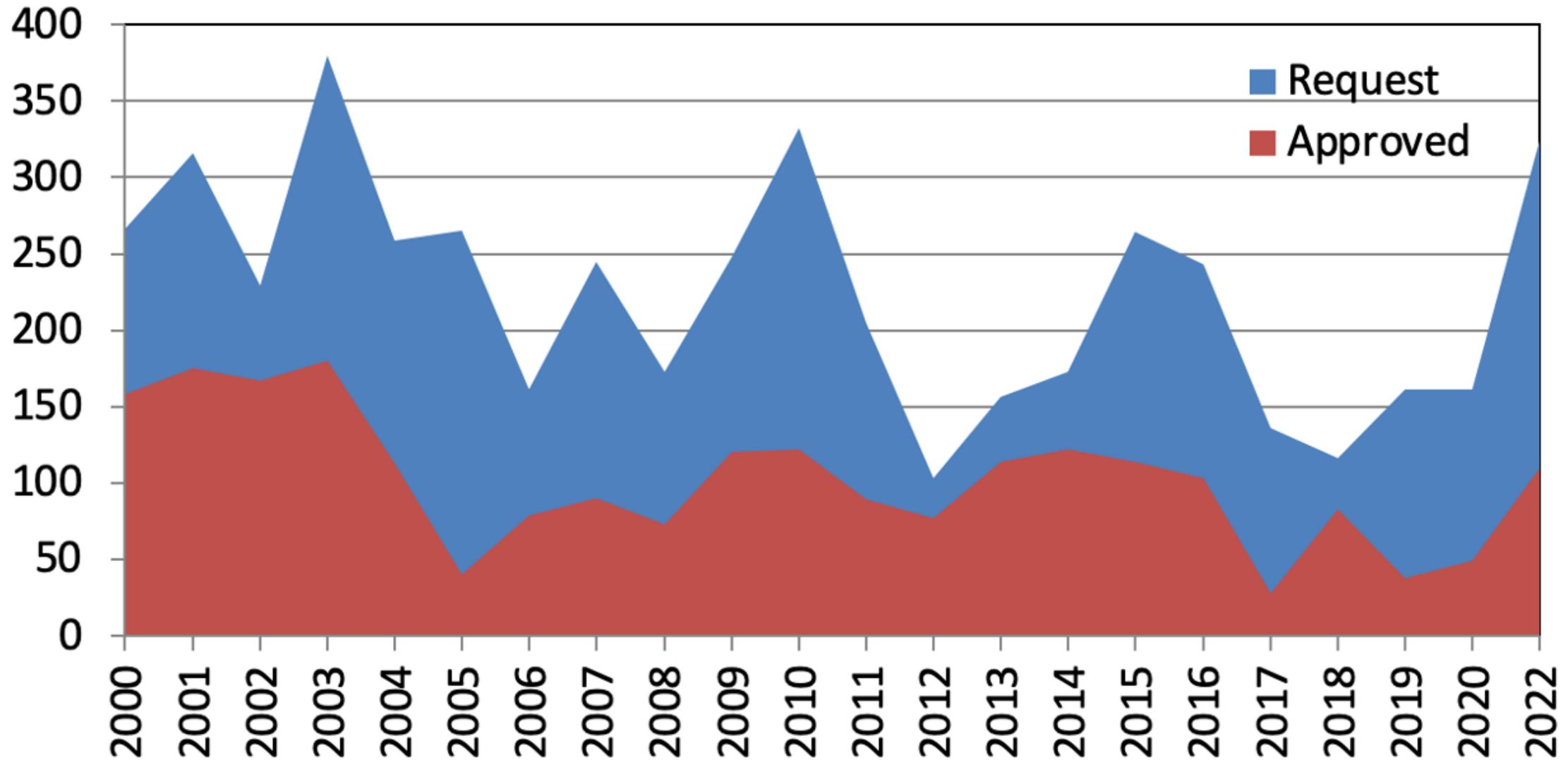
Spettrometri magnetici

Spettrometri di particelle e frammenti



E' ANCORA ATTRATTIVO LNL PER LA FISICA NUCLEARE?

RICHIESTE DI GIORNI DI FASCIO AL PAC PER ESPERIMENTI DI NP NEI VARI ANNI

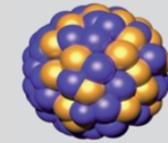


Il nostro mondo delle meraviglie: la CARTA dei NUCLIDI

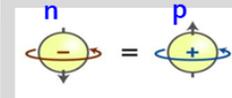
La SFIDA

Una descrizione UNICA di TUTTI i nuclei nell'Universo

LA SCIENZA DI BASE

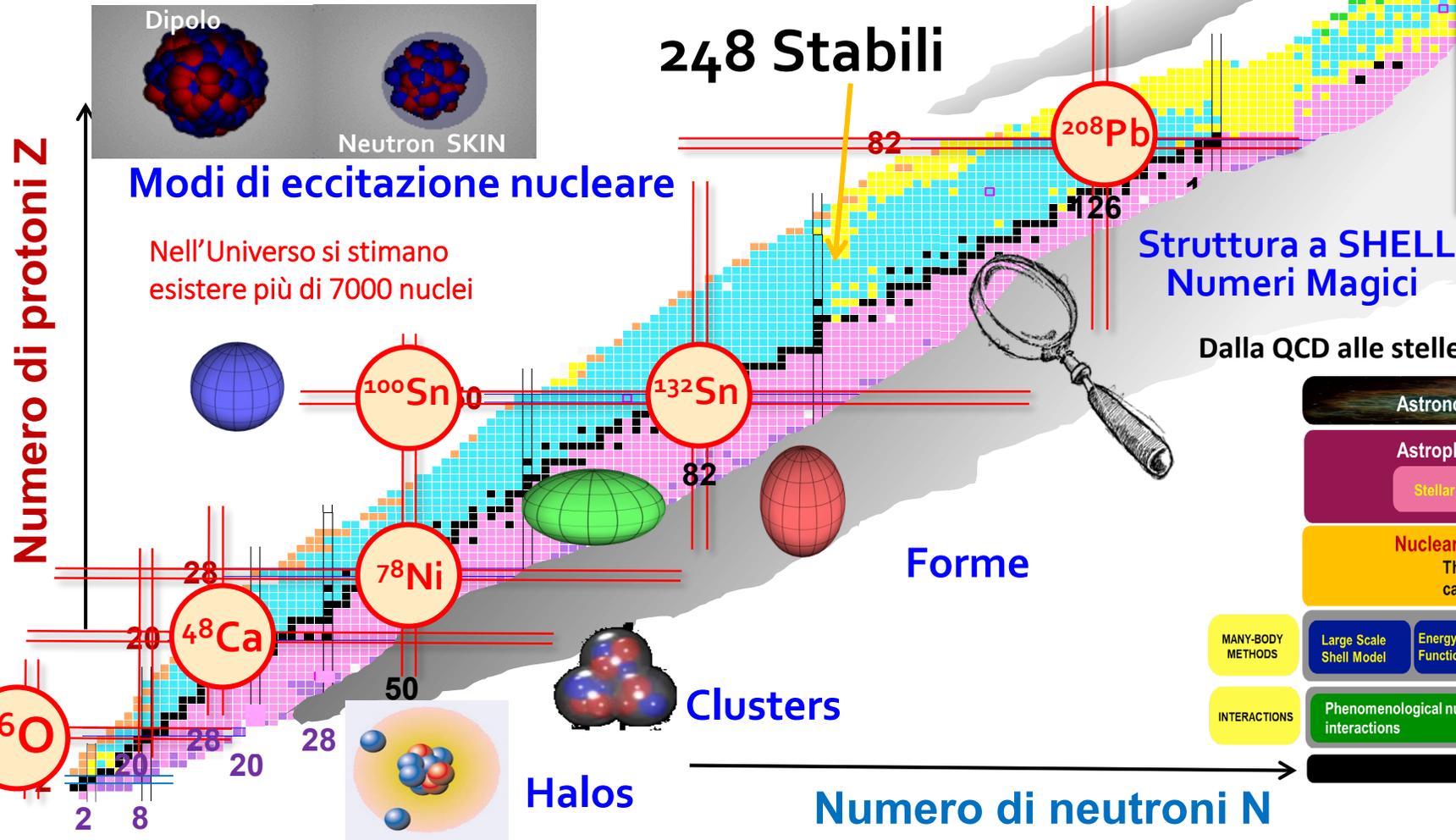


Sistema Quantistico a Molti Corpi



Principio di simmetria

Forza Nucleare Efficace



Dalla QCD alle stelle per mezzo della Fisica Nucleare

Astronomical observations

Astrophysical simulations

Stellar nucleosynthesis

Stellar explosions

Nuclear structure and reactions observables

Theoretical calculations

Experiments

MANY-BODY METHODS

Large Scale Shell Model

Energy Density Functionals

No Core Shell Model

Coupled cluster method

Fermionic Molecular Dynamics

...

INTERACTIONS

Phenomenological nuclear interactions

Unitary Transformations (SRG, UCOM, ...)

Chiral Effective Field Theory

Low energy QCD

- Studio della struttura nucleare e delle reazioni:

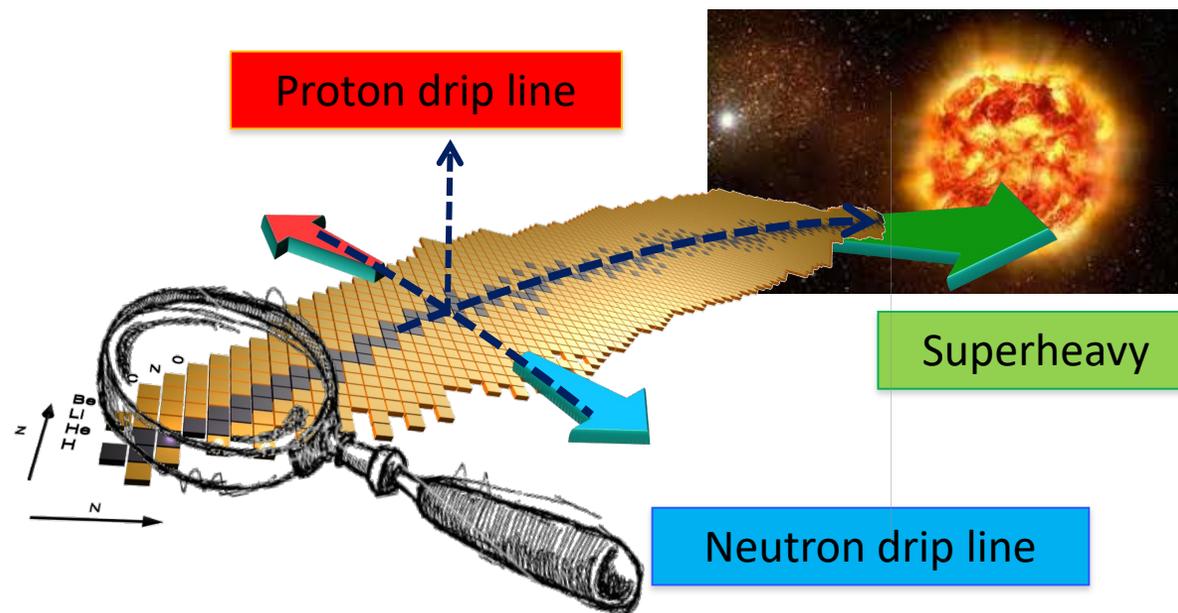
Oltre la conoscenza...



Il nucleo... un piccolo sistema complesso... quantistico!

Prime campagne con i fasci stabili.

In seguito, i nuovi fasci di **SPES** assieme ai sistemi di rivelazione all'avanguardia aiuteranno a migliorare la conoscenza della **forza nucleare**, della **dinamica delle reazioni** e della **astrofisica nucleare...**



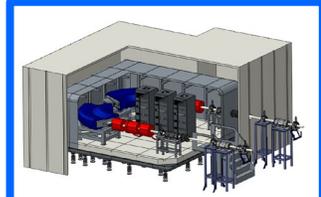
<http://web.infn.it/nucphys-plan-italy>

Studiare il sistema nucleare, per conoscere le interazioni fondamentali e definire le leggi di simmetria della natura

Il complesso SPES



ALPI

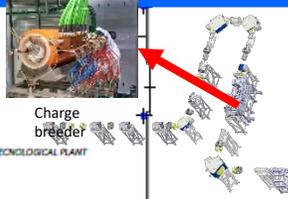
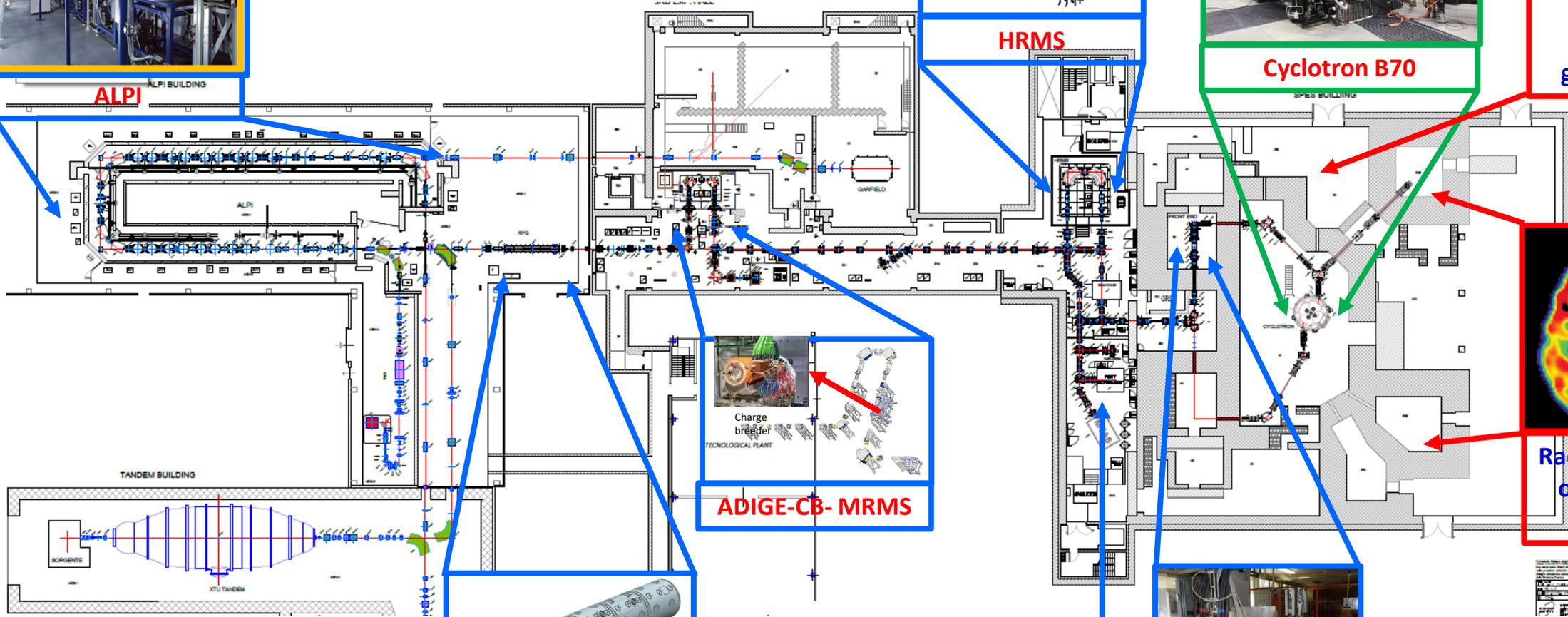


HRMS

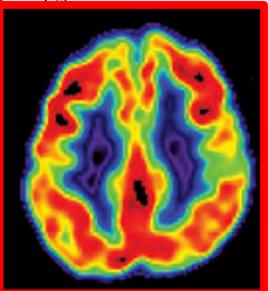


Cyclotron B70

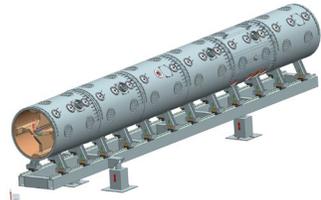
Hall for neutron generation



ADIGE-CB- MRMS



Radionuclides of medical interest



Radio Frequency Quadrupole



Target Ion Source Complex

Experimental hall Low Energy R.I.B.

Obiettivo di prima fase (2022-2023):

- Fasci non riaccelerati (40 KeV):**
- Nuova sala Sperimentale
 - ✓ **Esperimenti di bassa energia**

Obiettivo di seconda fase (2024-2025):

Fasci riaccelerati (≈ 10 MeV/u for $A \approx 130$):

- Charge Breeding
- ALPI (tecnicamente migliorato)
- 3 sale sperimentali di alta energia
- ✓ **Esperimenti di alta energia**



UN CICLOTRONE AD ALTA POTENZA

TANTI PROGETTI CONNESSI

- FISICA FONDAMENTALE
- FISICA APPLICATA



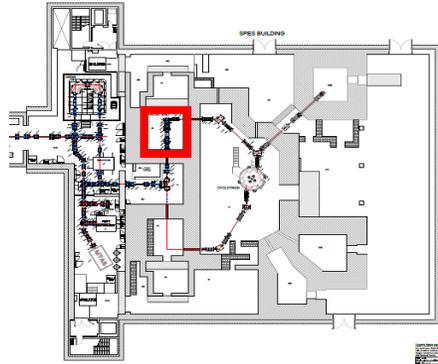
Up to **500 μA** current and **70 MeV** energy proton beam (**35 kW**) delivered to the high power Beam Dump
 Less than 1% beam loss
 Very good Cyclotron vacuum performance (8×10^{-8} mbar with beam ON)

Main Parameters

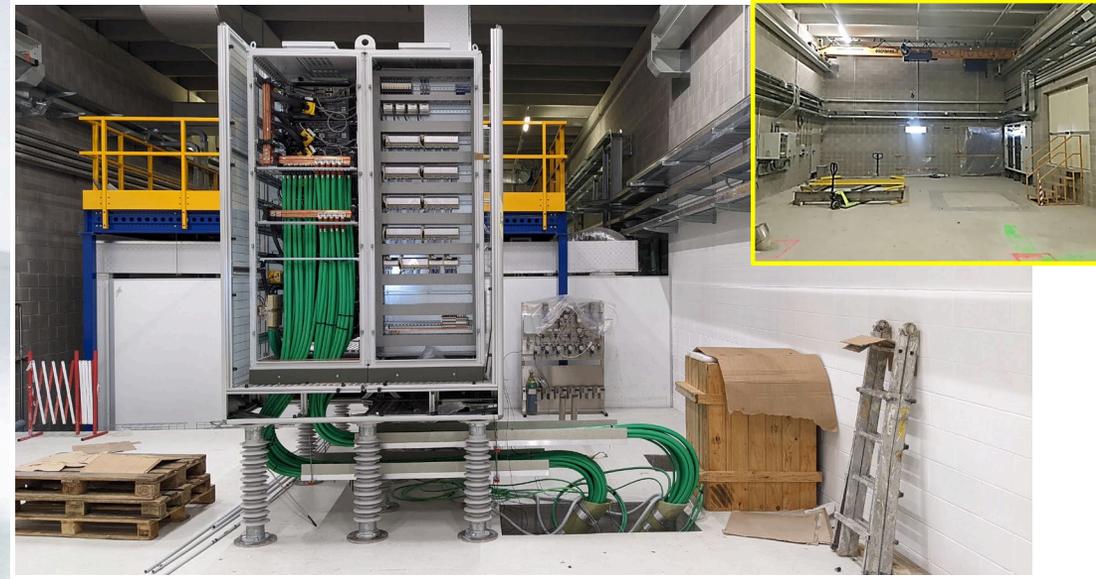
Accelerator type	Cyclotron AVF with 4 sectors, Resistive Magnet
Particle	Protons (H^+ accelerated)
Energy range	35-70 MeV
Max Current Intensity	700 μA (variable within the range 1 μA -700 μA)
Extraction	Dual stripping extraction
Max Magnetic Field	1.6 T ($B_0 = 1$ T)
RF System	nr. 2 delta cavities; harmonic mode=4; $f_{\text{RF}} = 56$ MHz; 70 kV peak voltage; 50 kW RF power (2 RF amplifiers)
Ion Source	Multi-cusp volume H^+ source; $I_{\text{ext}} = 8\text{mA}$; $V_{\text{ext}} = 40$ kV; axial injection
Dimensions	$\Phi = 4.5$ m, $h = 2$ m, $W = 190$ tons

SPES: Installazione del complesso TIS nel bunker ISOL (2021) e piattaforma HV (2022)

Crono e Safety TEST delle procedure di manutenzione



Installazione del carro ponte – finiture delle superficie e **installazione della piattaforma** ad alta tensione (sopra il bunker ISOL) – febbraio-marzo 2022

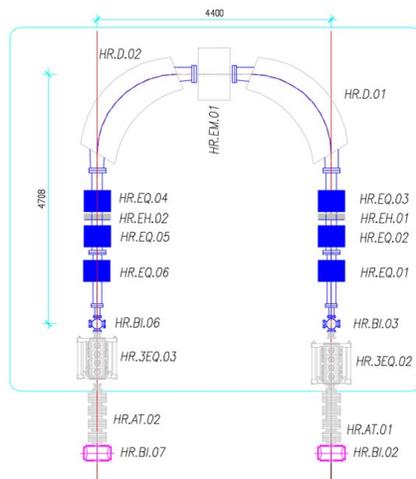
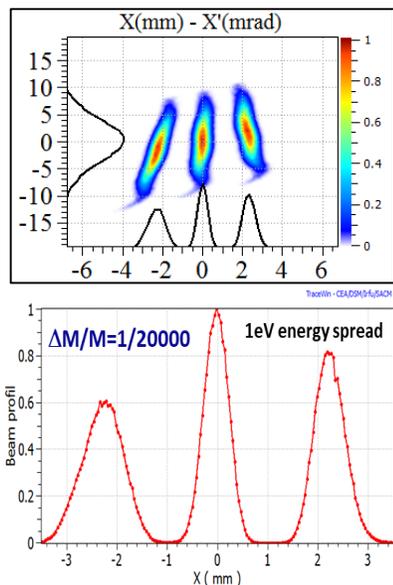
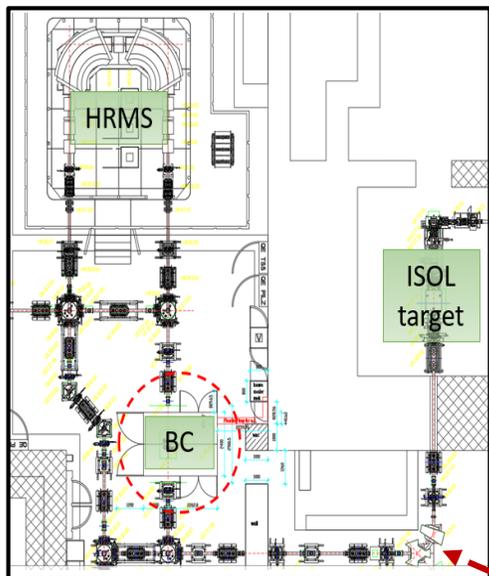


3 fasi di installazione:
marzo 2021 : **Wien filter & Electrostatic triplet**
luglio 2021 : **Front-end**
ottobre 2021: **proton beam line**

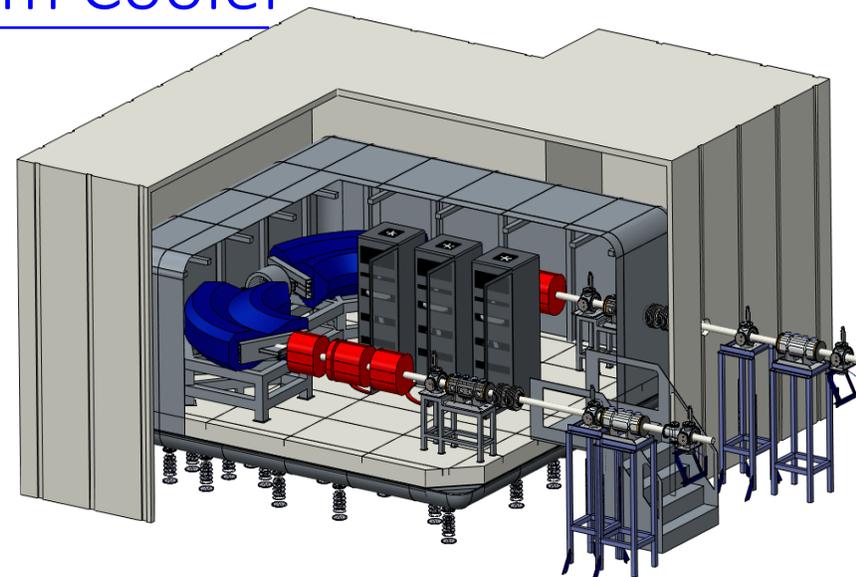
Linea di trasporto 1⁺, HRMS e Beam Cooler

Comitato di
review HRMS

R. Pardo (ANL-USA, chair)
T. Giles (CERN)
F. Varenne (GANIL)
H. Weick (GSI)



HRMS



Design ed integrazione per la costruzione della **piattaforma di HV** in corso: completamento previsto per fine 2022

Beam Cooler Status



- Test standard completed at LPC on Dec 2021
- **First Beam Cooling Test done at LPC on Feb 2022 !!**
- In programma l'installazione @LNL installation (fine 2022/inizio 2023)

HRMS - Gara per: dipoli, alimentatori, camere da vuoto e supporti; Multipolo, Quadrupoli elettrici e tripletti elettrici → **Dicembre 2021**

Invito Ditte – **primavera 2022**

Definizione vincitore: **autunno 2022**

Firma contratto: **Inizio 2023**

Consegna Dipoli: **entro metà 2024**

Completamento installazione HRMS: **fine 2025**

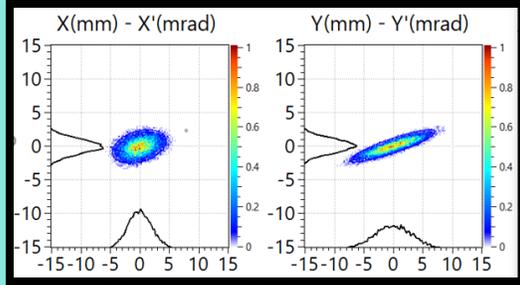
Installazione **linea di trasporto 1⁺ area A5**
– prima parte della low energy beam line



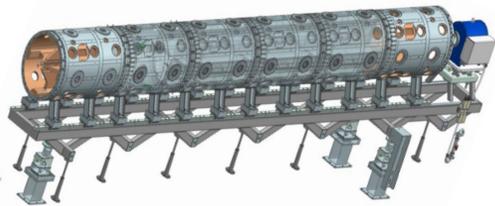
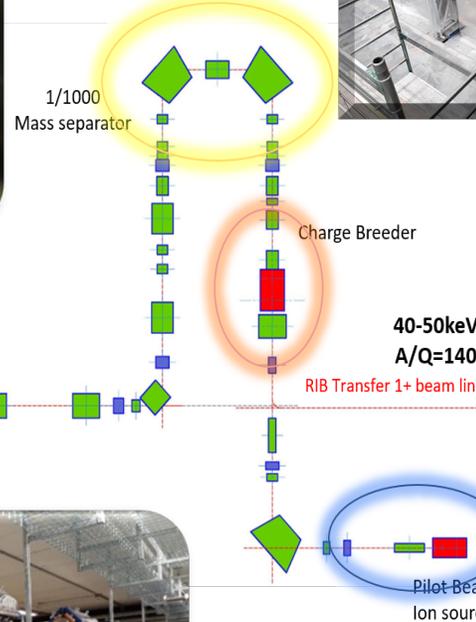
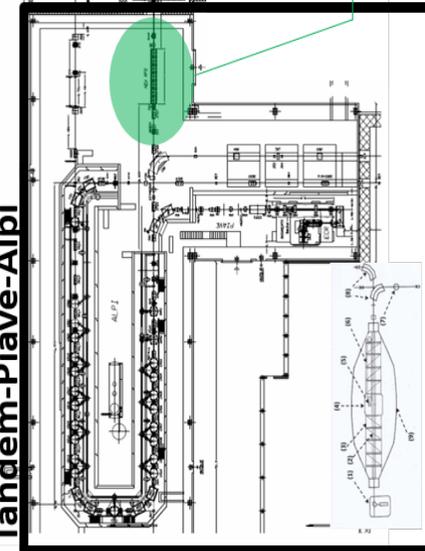
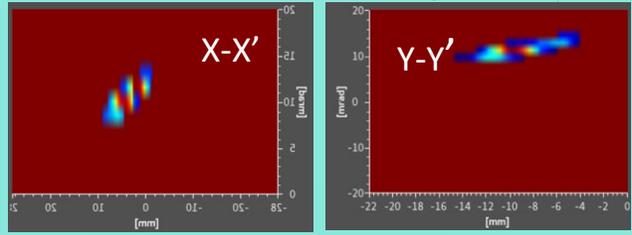
Linee di trasporto & ADIGE

- Iniettore: SIS per i test - PIS in operazione
- Arricchimento in carica: LPSC charge breeder
- MRMS: separatore in massa risoluzione 1/1000 su piattaforma 150 kV

Simulated Phase Space



Measured Phase Space



Lavori 2021 effettuati : primo modulo RFQ assemblato

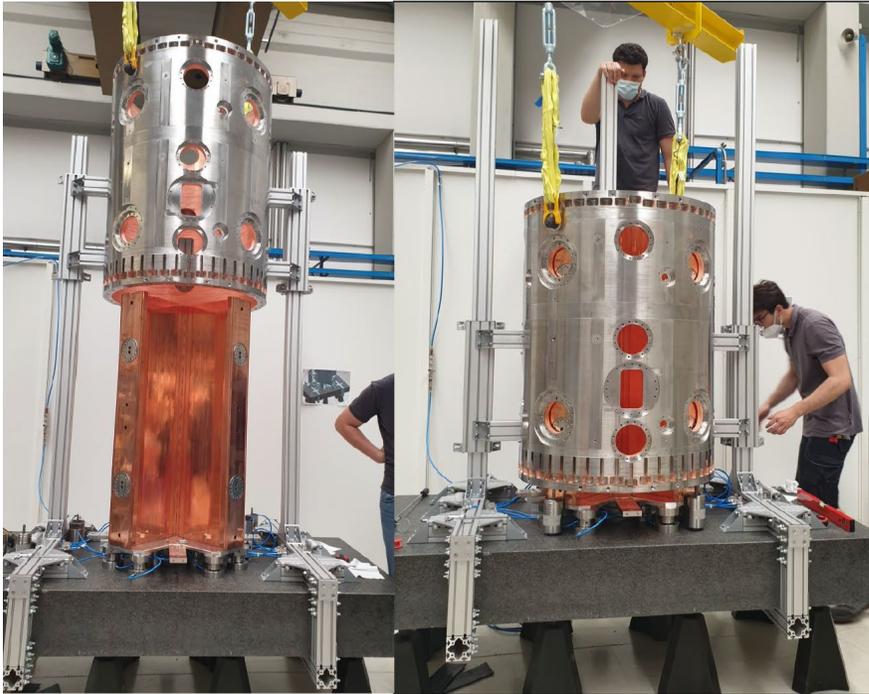
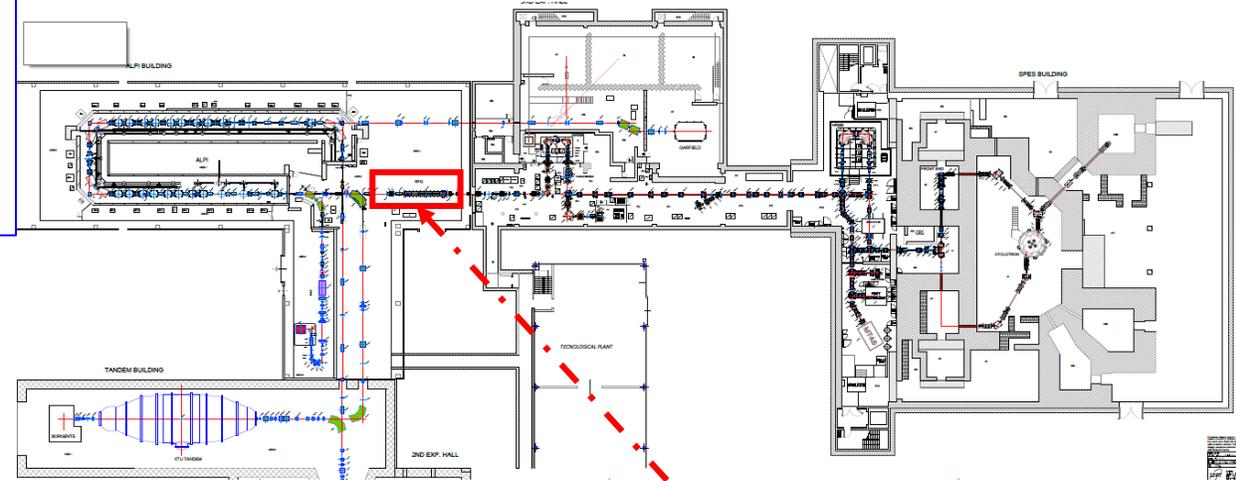
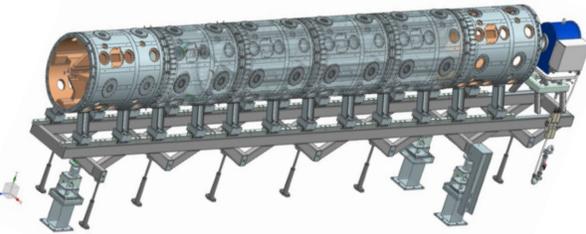
1 modulo RFQ completato

5 moduli in lavorazione (ramatura CERN)

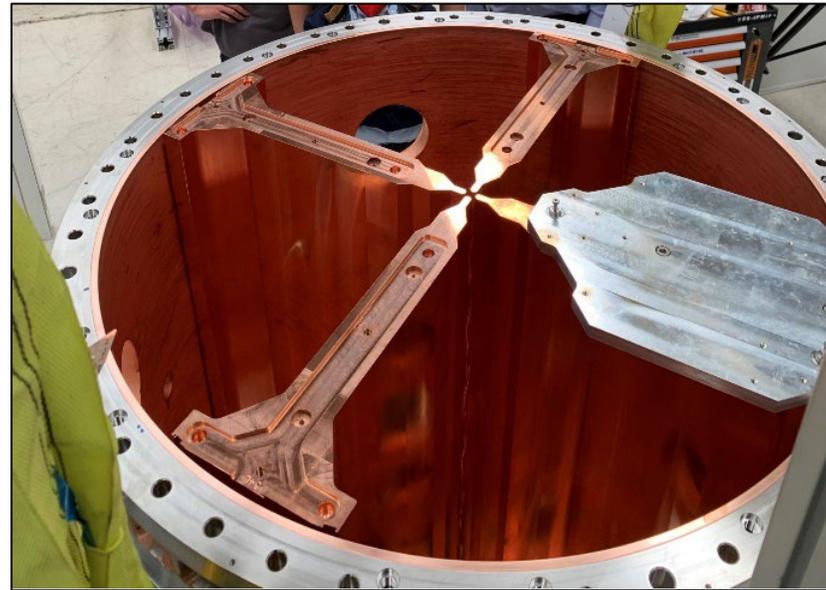
Installazione 3+3 moduli RFQ fra Settembre 2022 e Gennaio 2023

Misure RF Primavera 2023

Installazione e test sistema RF Autunno 2023



Electrodes and tank assembly



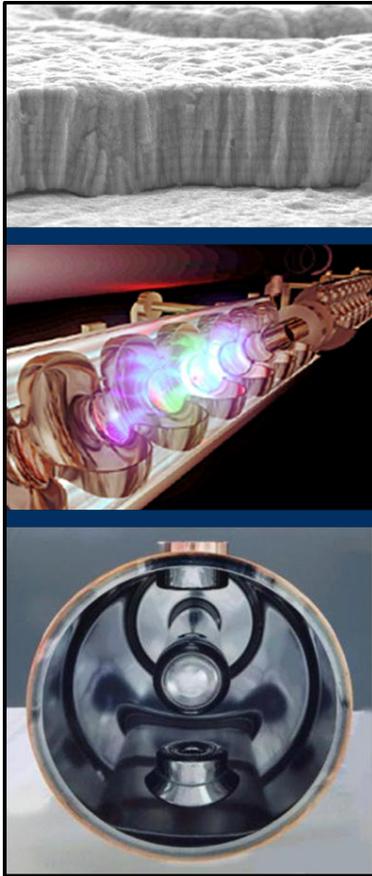
Supporto cavità pronto posizionato in area 2



- Energia 5.7 → 727.3 keV/A [$\beta=0.0395$] ($A/q=7$)
- Trasmissione del Fascio >93% for $A/q=3 \div 7$
- Potenza RF power 100 kW ($f=80$ MHz) fino a 1 mA di fascio
- Disegno meccanico e realizzazione basato sull'esperienza fatta con IFMIF,

ALTA TECNOLOGIA: SCIENZA ED INGEGNERIA DEI MATERIALI E TRASFERIMENTO TECNOLOGICO

Sputtering cavità HB(DR)

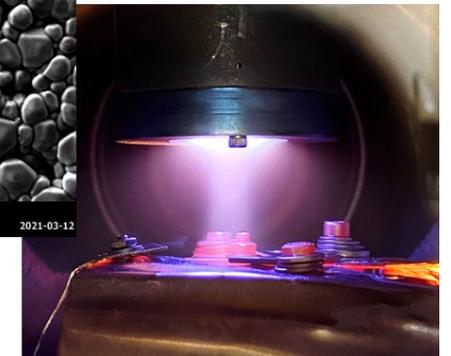
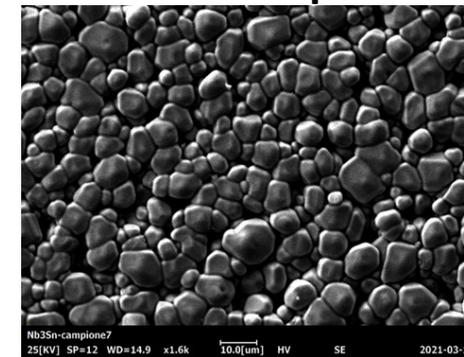
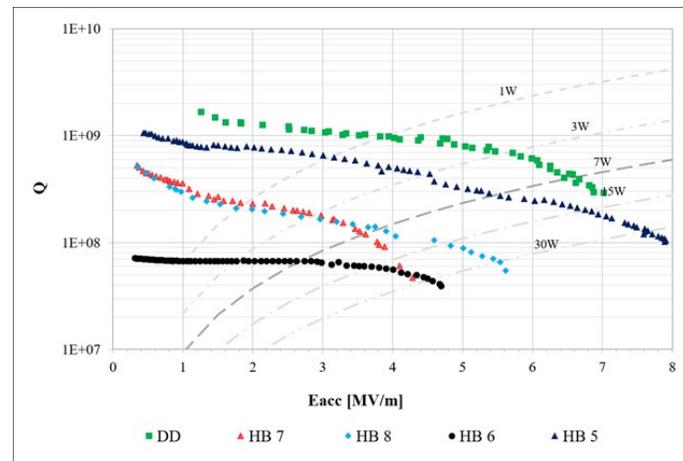


QWR preparation		
1	Mechanical preparation (tumbling)	12 hours
2	Electrochemical preparation (electro polishing)	Solution (H ₃ PO ₄ , Butanol)
3	Chemical preparation (SUBU)	Solution (Sulfamic acid, ammonium citrate, butanol, H ₂ O ₂)
4	Passivation	Solution (sulfamic acid)
Baking process		
Chamber temperature, [°C]		120 – 200
Cavity lamps temperature, [°C]		400 – 450
Time, [hours]		72 - 96
Sputtering process		
Sputtering pressure, [mbar]		0,1 – 0,2
Cathode current, [A]		3,25 – 3,5
Bias voltage, [-V]		120 – 130
Sputtering cycle time, [min]		15
Number of cycles		16 – 20
Initial cavity temperature, [°C]		300

- Coating di cavità
- Ricerca e sviluppo di film sottili e spessi per cavità risonanti superconduttive (niobio su rame)
- Ricerca e sviluppo di film spessi di Y per produzione target Zr
- Ricoprimenti per cristalli (CUPID)



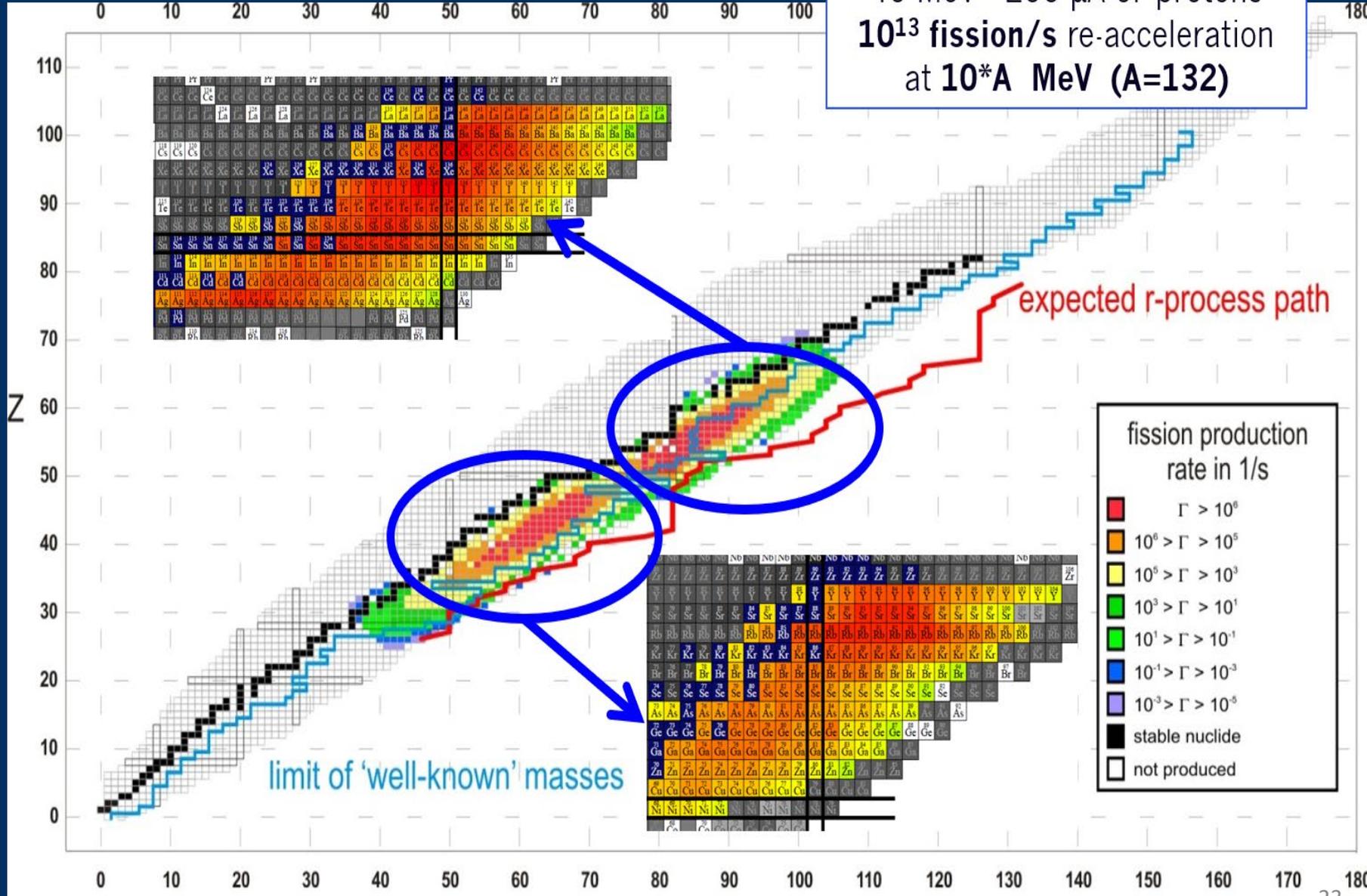
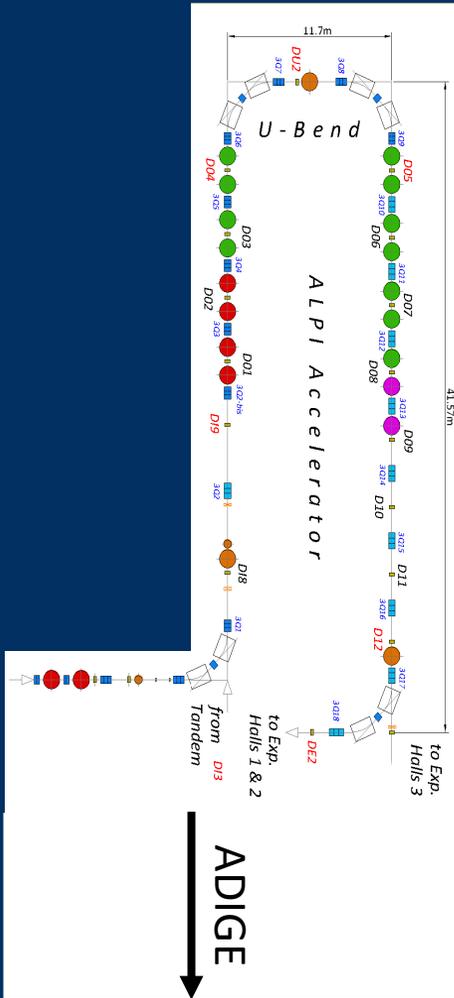
LNL è leader nella tecnologia di ricoprimento di cavità anche con materiali innovativi quali Nb₃Sn.



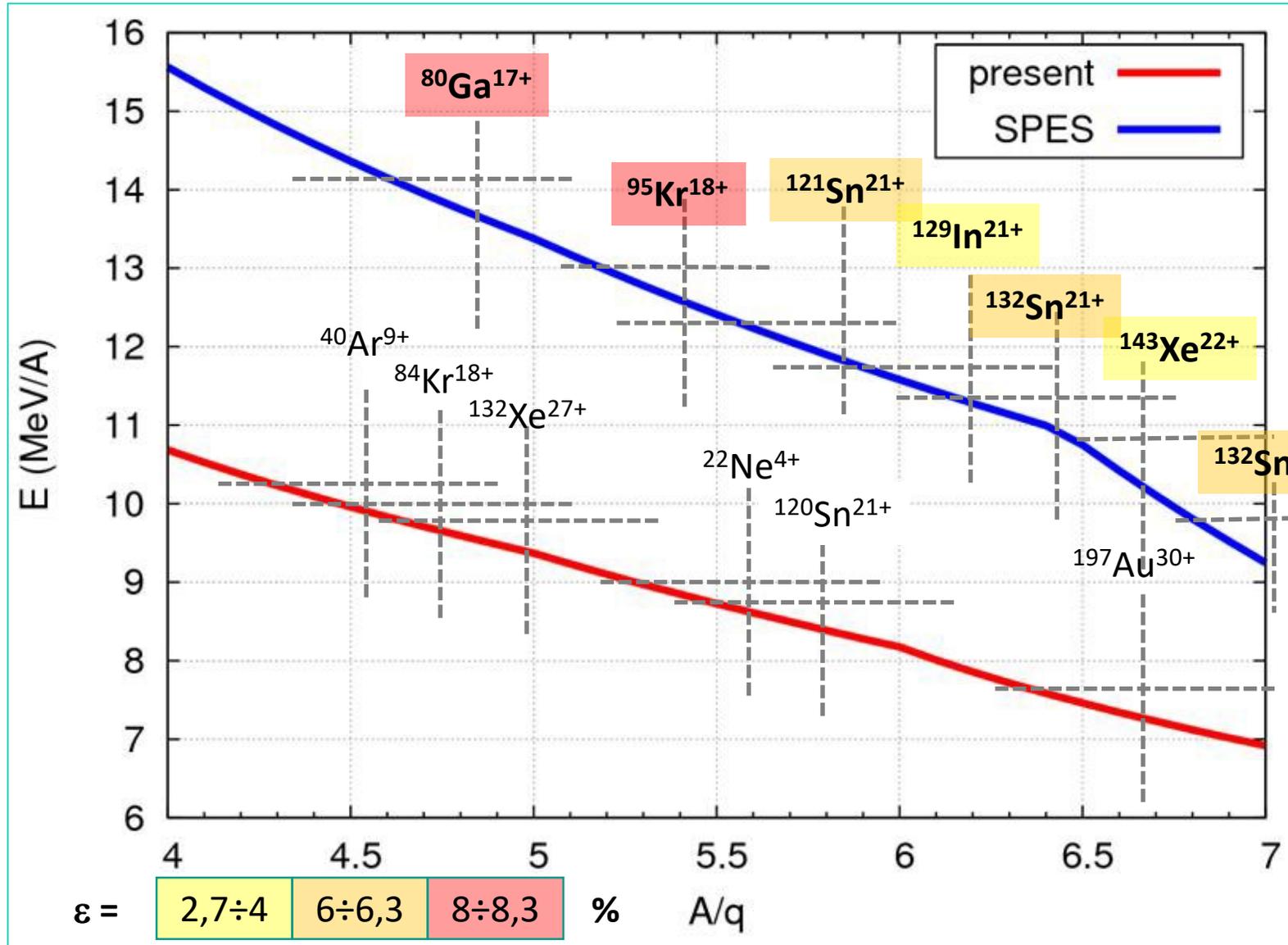
SPES: I FASCI ATTESI

<https://web.infn.it/spes/index.php/news/spes-beam-tables>

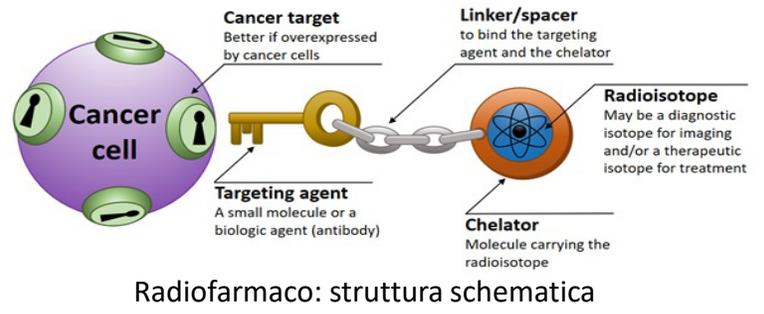
40 MeV - 200 μ A of protons
 10^{13} fission/s re-acceleration
at $10 \cdot A$ MeV ($A=132$)



SPES: i fasci attesi



SPES γ e I RADIOISOTOPI



Radiofarmaco: struttura schematica



Produzione diretta di radio-isotopi di interesse medico tramite la **tecnica ISOL**: separazione di tipo fisico tramite selezione elettromagnetica usando le linee di fascio della fisica nucleare

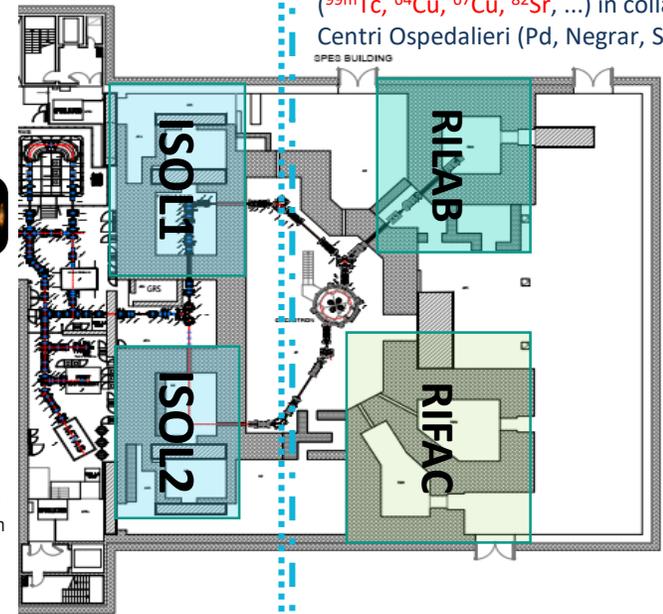
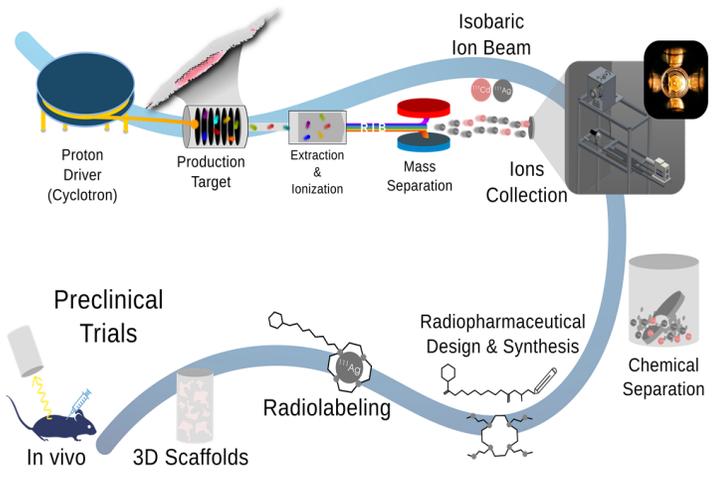


LARAMED (Laboratory of RADionuclides for MEDicine)

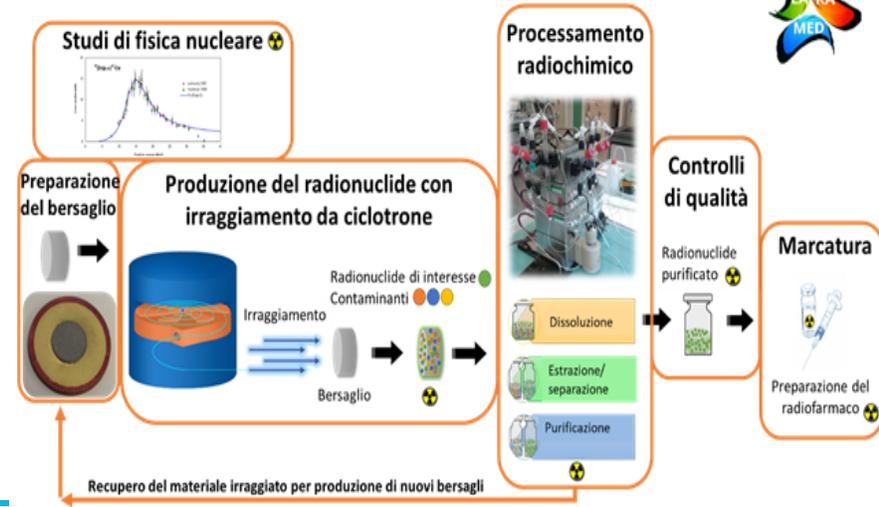
- Misure di sezioni d'urto tramite **target activation**
- Test di Bersagli di potenza

Infrastruttura di test per produzione di radioisotopi/radio-farmaci (^{99m}Tc , ^{64}Cu , ^{67}Cu , ^{82}Sr , ...) in collaborazione con Università (Pd, Fe) e Centri Ospedalieri (Pd, Negrar, S. Orsola Bo etc.)

ISOL PHARM



PRODUZIONE DI RADIOFARMACI CON CICLOTRONE NEL PROGETTO LARAMED



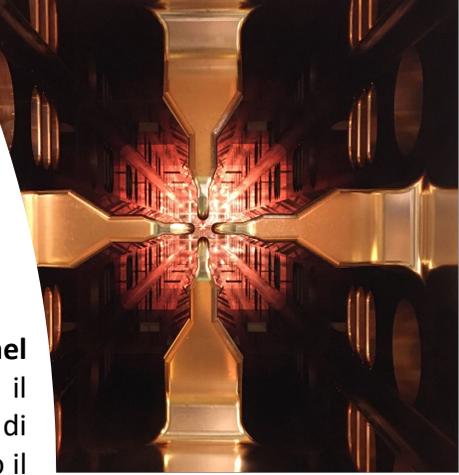
SVILUPPO DI NUOVI ACCELERATORI →

IFMIF – EVEDA

Nel luglio 2019 nel sito del Broader Approach a Rokkasho in Giappone il fascio di deutoni da 125 mA è stato accelerato nell'RFQ costruito dall'INFN a 5 MeV con il 90 % di trasmissione.



Il programma EU-JA denominato **Broader approach** è stato esteso nel **marzo 2020 per altri 4 anni**. L'INFN avrà un ruolo chiave per il completamento dei test: sono in corso a Rokkasho le attività di **commissioning del linac ad alta intensità**, dove l'RFQ INFN ha raggiunto il funzionamento RF a piena potenza (ciclo prossimo a quello continuo). Nel frattempo si è concluso il progetto dell'UE DONES-PrepF, l'attività di design per la realizzazione in Spagna di una facility Europea per il test dei materiali rilevanti per la fusione nucleare (**vedi A. Pisent**).

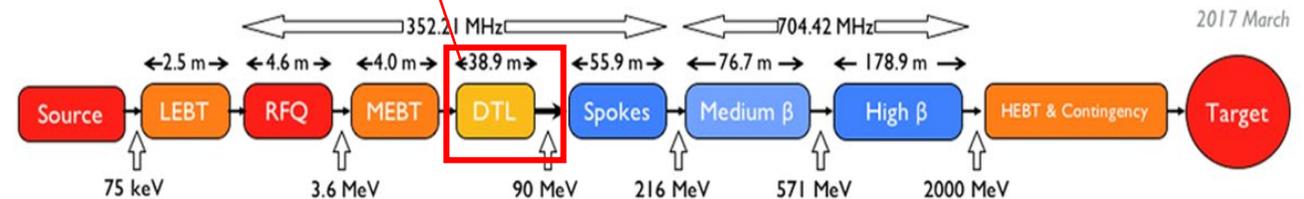


ESS



Contributo alla **European Spallation Neutron Source (SVEZIA)**: costruzione del **drift tube Linac**:

- Il primo tank del DTL è stato assemblato e allineato a Lund ed è **pronto a ricevere RF e fascio** nei prossimi mesi.
- I rimanenti **4 tank** sono a Lund in differenti fasi di assemblaggio, tuning e preparazione all'installazione.



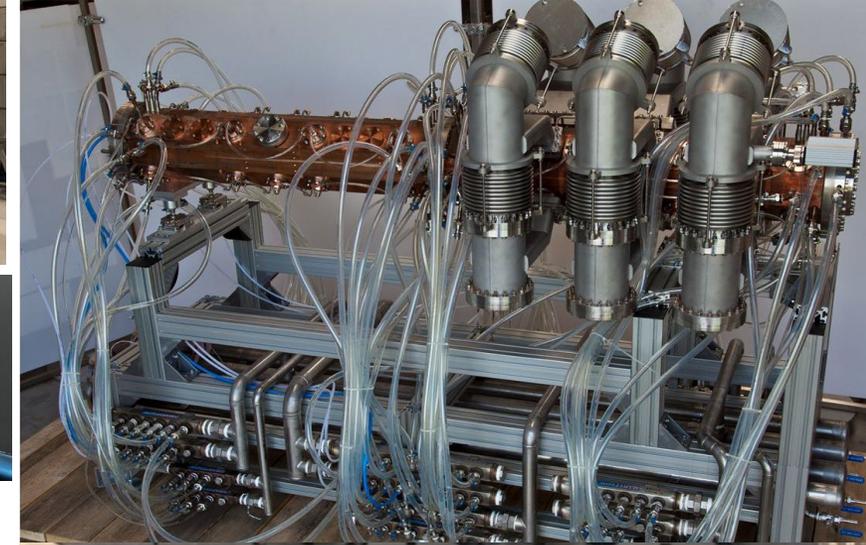
SVILUPPO DI NUOVI ACCELERATORI →

MUNES

Sviluppati 5 sistemi di amplificazione a stato solido da 125 kW l'uno a 352 MHz in CW

Realizzato moderatore neutronico termico all'acceleratore CN Testato a 500 W/cm^2 il bersaglio Be-V: nessuna evidenza blistering dopo più di 50 h d'irraggiamento
Sviluppati nuovo bersaglio Be-V-Cu

PNRR: Possibile proposta partenariato pubblico – privato – BNCT therapy center - Università della Campania Vanvitelli, INFN, Fondazione Neuromed



Tecniche avanzate di sorgenti ioniche e rilevamento di neutri per la manipolazione del fascio di particelle e l'applicazione alla fusione.

L'esperimento **Ion2neutral (2020-2024)** è un progetto integrato per sviluppare sorgenti di ioni, sistemi di raffreddamento di ioni (coolers), rivelatori a gas con moltiplicazione elettronica (per gamma/neutroni), fasci di ioni ad alta corrente e tecniche di calcolo di interesse per il **progetto ITER** e altri reattori a fusione e per il **Progetto SPES LNL**.

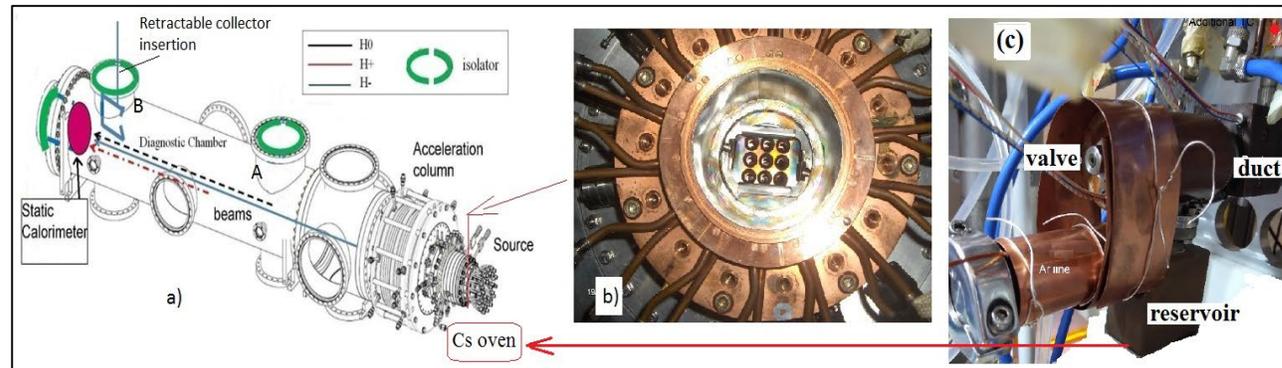


Figure 1: (a) overview 3D della sorgente NIO1 (b) sezione della sorgente che guarda verso la griglia del plasma; (c) vista di forno al Cs posto sotto la sorgente.



GRAZIE



Fabiana Gramegna
Direttore
LABORATORI NAZIONALI DI LEGNARO
Via dell'Università 2
35020 Legnaro (Pd)
049 8068 391
366 6018 969