

Fondati nel 1968, i Laboratori Nazionali di Legnaro sono un centro internazionale per la fisica del nucleo e per le applicazioni di tecnologie nucleari.

I Laboratori

www.lnl.infn.it



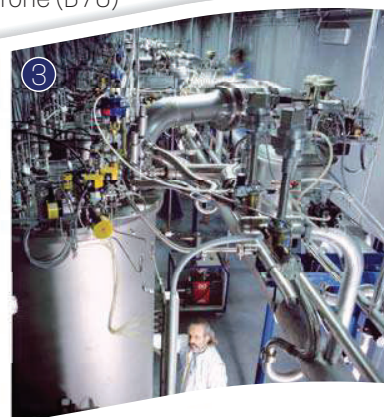
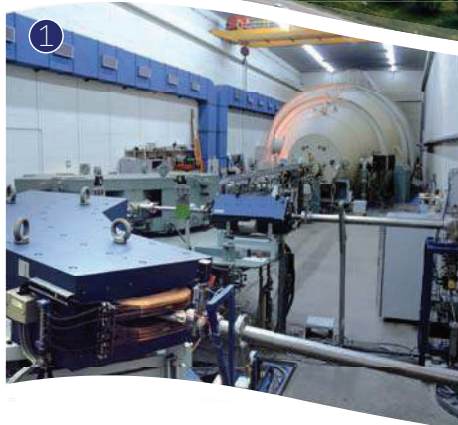
I punti di forza dei Laboratori sono la progettazione e l'utilizzo di acceleratori di particelle nucleari assieme allo sviluppo di rivelatori per particelle cariche e per radiazioni gamma.

Ogni giorno ai LNL lavorano 250 tra ricercatori, tecnologi, tecnici ed amministrativi.

Gli acceleratori di particelle

Ai LNL sono presenti 3 grandi acceleratori di particelle nucleari:

- ① Tandem (XTU) ② Ciclotrone (B70)
- ③ Linac (PIAVE-ALPI)



Inoltre sono in funzione piccoli acceleratori (CN, AN2000) per studi delle proprietà di materiali, radiobiologia, fisica dell'ambiente e della salute.

Rivelatori per studiare la struttura nucleare e la dinamica delle reazioni



● **GALILEO:**
un insieme di rivelatori di raggi gamma ad alta risoluzione per studiare la struttura nucleare.

● **PRISMA:**
uno spettrometro magnetico a grande accettazione per studiare i meccanismi delle reazioni nucleari.



● **GARFIELD:**
un rivelatore di particelle cariche per lo studio della dinamica delle reazioni.

Ricerca tecnologica e applicazioni della fisica nucleare

● Radiobiologia e microdosimetria per studiare l'interazione delle radiazioni ionizzanti con la materia e per quantificare il danneggiamento dovuto all'esposizione a radiazioni in cellule biologiche o apparecchiature elettroniche.



● Sviluppo di nuovi acceleratori e di nuovi rivelatori per applicazioni nel campo della medicina nucleare, del monitoraggio della radioattività ambientale e dello studio del patrimonio artistico.

LHC

I ricercatori dei LNL contribuiscono ai grandi esperimenti di LHC come CMS e ALICE.

Supercomputing

I LNL ospitano un "TIER-2": un nodo di secondo livello della GRID, la rete di supercomputer costruita per raccogliere, analizzare e archiviare i dati prodotti dagli esperimenti di LHC al CERN.

Fusione Nucleare

I LNL sono coinvolti nei più grandi progetti internazionali per lo sviluppo di reattori per la fusione nucleare.

Una risorsa scientifica ed economica di prestigio internazionale.

Chi sono i fisici?

I fisici sono una grande comunità di scienziati che cerca di scoprire i meccanismi più nascosti dell'Universo, indagando i principi primi della Natura.

Per raggiungere i loro scopi, i fisici realizzano grandi esperimenti, sviluppano tecnologie innovative ed effettuano le misure più precise che

l'umanità è in grado di compiere.

I fisici misurano le quantità più piccole e più grandi che esistano.

Tra le tante invenzioni dei fisici, sono diventati famosi il World Wide Web, la Risonanza Magnetica Nucleare e la realizzazione della più grande macchina del mondo:

l'acceleratore LHC di 27 chilometri di lunghezza a Ginevra.

L'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare promuove, coordina ed effettua la ricerca scientifica nel campo della fisica subnucleare, nucleare e astroparticellare, nonché lo sviluppo tecnologico pertinente alle attività in questi settori.

L'INFN è:

- 5000 ricercatori (2000 interni e 3000 universitari associati).

- 1300 giovani scienziati tra laureandi, borsisti e dottorandi.

- 270 milioni di euro (circa) il budget annuale.

- 2500 pubblicazioni ogni anno.

- Presenza qualificante nelle principali imprese scientifiche mondiali: gli scienziati dell'INFN dirigono o co-dirigono gli esperimenti e i programmi internazionali più importanti.

- Per ogni 10 € investiti ne ritornano quasi 11 in commesse internazionali per le aziende italiane. Sono 150 le aziende italiane che hanno ricevuto una commessa dal CERN durante la costruzione dell'acceleratore LHC.

- La valutazione dell'Istituto viene svolta dal Comitato di Valutazione Internazionale (CVI) composto da esperti di fama internazionale con competenze scientifiche ed economiche.

L'INFN è presente in 16 regioni italiane con:

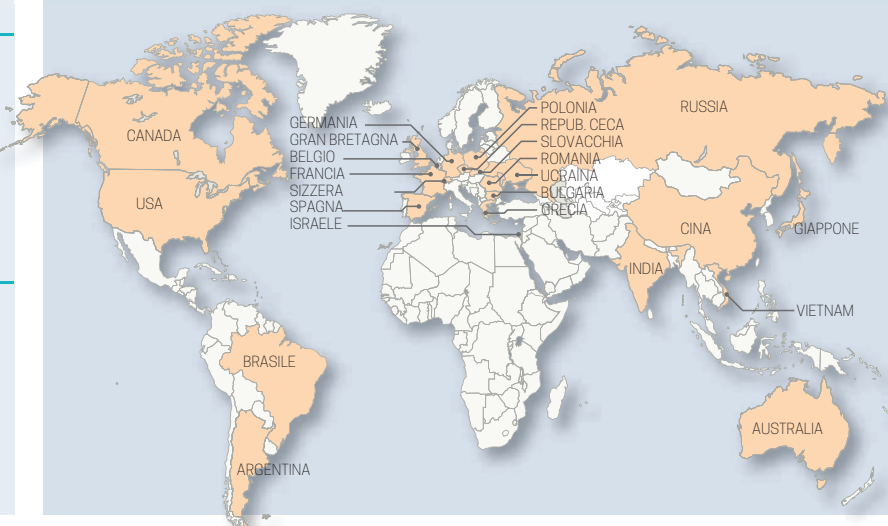
- 4 grandi Laboratori Nazionali
- 20 sezioni
- 10 gruppi collegati
- 1 consorzio internazionale
- 3 centri nazionali e scuole

- Da diversi anni l'INFN sperimenta la terapia del cancro usando fasci di protoni presso i LNS.
- L'INFN è co-responsabile del CNAO di Pavia, primo centro di adroterapia antitumorale in Italia.
- L'INFN è all'avanguardia per le applicazioni della fisica ai beni culturali e per le tecnologie informatiche.



www.infn.it

▪ Programmi di collaborazione diretta con 24 Paesi



Acceleratori per nuovi materiali e (micro) dispositivi

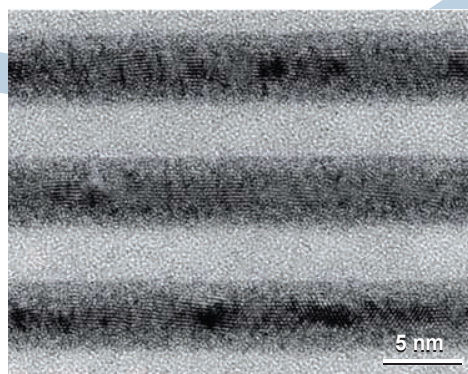


Ai Laboratori di Legnaro le tecnologie degli acceleratori di particelle, sviluppate per la ricerca di base, trovano applicazione nell'analisi della composizione dei materiali e nella produzione di dispositivi innovativi su scala micrometrica e nanometrica.

Materiali nano-strutturati

Bombardando i materiali con ioni pesanti si interviene sull'organizzazione superficiale degli atomi, così da raggiungere bassissime rugosità e ottenere superfici lisce su scala atomica.

Con questo metodo vengono sintetizzati rivestimenti a film sottile con proprietà ottiche e meccaniche innovative.



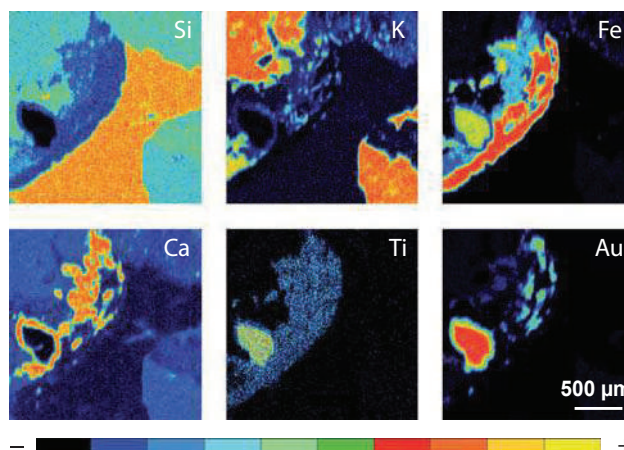
Strati dello spessore di qualche decina di atomi vengono prodotti in laboratorio e controllati a livello atomico con le più sofisticate tecniche analitiche.

Nella foto si distinguono particolari di dimensione inferiore a 5 nm grazie alla microscopia elettronica in trasmissione.

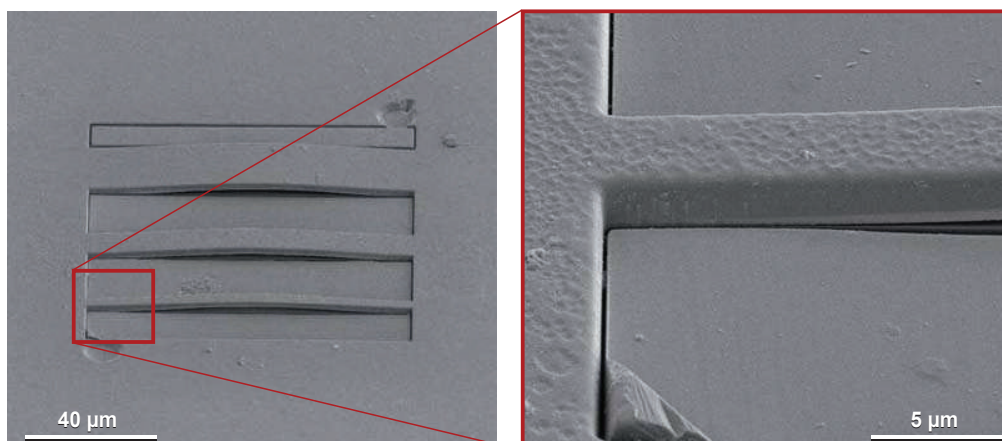
Analisi dei materiali

I prodotti delle interazioni tra gli ioni e la materia solida vengono analizzati per conoscere in modo approfondito la composizione superficiale dei materiali.

Fasci di protoni e particelle alfa delle dimensioni di $\sim 1 \times 1 \mu\text{m}$ e con un'energia dell'ordine del MeV consentono di studiare le proprietà dei materiali di interesse per la fisica nucleare, la fisica dei semiconduttori, la scienza dei materiali, la fisica ambientale, la geologia, la fisica dello stato solido e l'optoelettronica.



Microdispositivi



Fasci focalizzati di ioni sono impiegati nella preparazione di microdispositivi elettromeccanici su diamante e altri materiali.

L'immagine mostra prototipi di microsensori in diamante ottenuti mediante scrittura con microfascio ionico.

Una sfera di cristallo per nuclei esotici.

La collaborazione

La collaborazione AGATA si estende a livello europeo e comprende 43 istituzioni in 11 diversi paesi che condividono gli sforzi per costruire questo capolavoro di scienza e tecnologia.

Il rivelatore viene utilizzato in campagne sperimentali con fasci stabili e radioattivi presso i principali laboratori europei (LNL, GSI, GANIL).

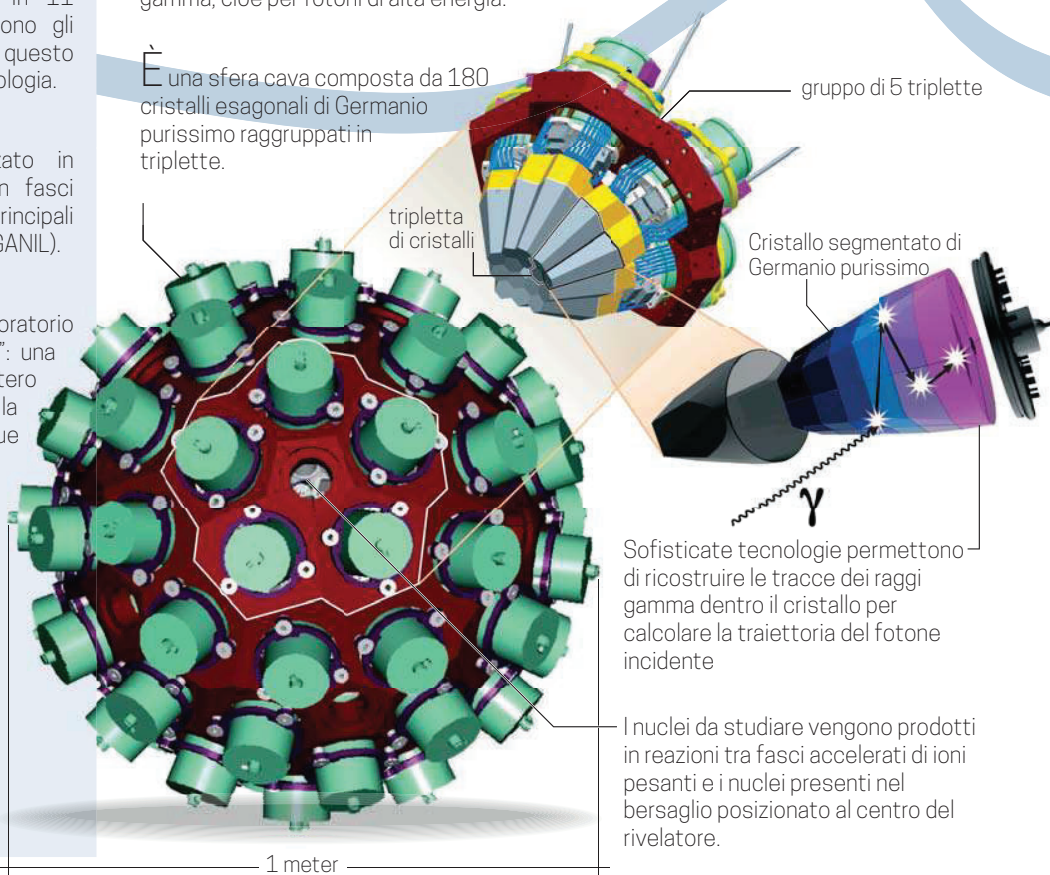
LNL sono stati il primo laboratorio ad ospitare il "dimostratore": una versione ridotta dell'intero apparato usata per verificare la fattibilità del progetto e le sue innovative potenzialità.



Il rivelatore

AGATA (Advanced Gamma Tracking Array) è un rivelatore di nuova generazione per radiazione gamma, cioè per fotoni di alta energia.

È una sfera cava composta da 180 cristalli esagonali di Germanio purissimo raggruppati in triplette.



Sofisticate tecnologie permettono di ricostruire le tracce dei raggi gamma dentro il cristallo per calcolare la traiettoria del fotone incidente

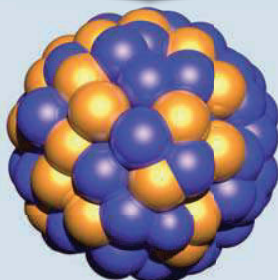
I nuclei da studiare vengono prodotti in reazioni tra fasci accelerati di ioni pesanti e i nuclei presenti nel bersaglio posizionato al centro del rivelatore.

A che cosa serve



Fisica nucleare:

per studiare le proprietà dei nuclei e dell'interazione nucleare lontano dalla valle di stabilità



Astrofisica:

per indagare che cosa accade nella cucina delle stelle, studiando in laboratorio i nuclei prodotti all'interno delle stelle

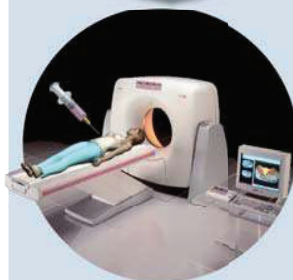


Applicazioni future



Imaging medico:

permetterà di eseguire scansioni diagnostiche, come la PET, in maniera più accurata e veloce, riducendo la dose di farmaco radioattivo necessaria



Sicurezza nazionale:

potrà rendere più efficaci i controlli per la ricerca di materiali radioattivi, ad esempio nel traffico delle merci



PRISMA

lo spettrometro per ioni pesanti



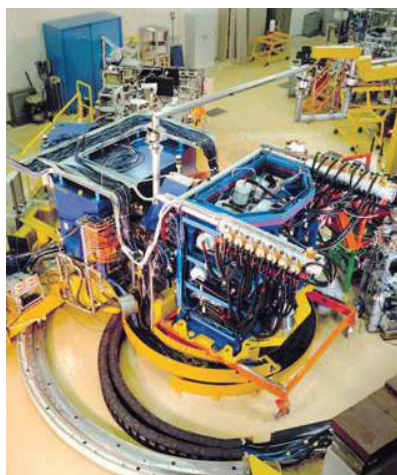
PRISMA è



uno dei più grandi spettrometri magnetici per ioni pesanti esistenti al mondo.

Grazie al suo intenso campo magnetico è in grado di disperdere gli ioni prodotti in razioni tra ioni pesanti sui 100 cm del suo piano focale.

È dotato di un sistema di rivelazione di particelle che permette la ricostruzione delle traiettorie degli ioni nonché la determinazione della loro carica, massa ed energia.



Fisica Nucleare con PRISMA

PRISMA studia i nuclei prodotti in reazioni nucleari tra ioni pesanti. Durante queste collisioni un certo numero di neutroni e protoni vengono scambiati e si creano così altri nuclei, sia stabili che "esotici".

Per studiare e comprendere la natura dei processi fisici coinvolti, i nuclei prodotti vengono identificati dai rivelatori di PRISMA che

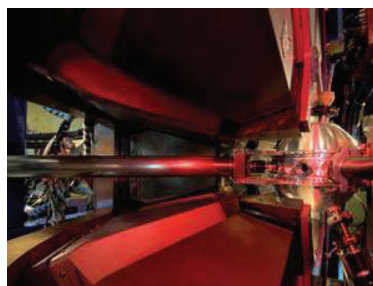
misurano carica, massa ed energia cinetica.

PRISMA è utilizzato anche in accoppiamento con rivelatori gamma ad alta efficienza. Una volta identificato il nucleo prodotto si può studiarne la struttura attraverso la misura dei raggi gamma emessi nel suo decadimento.

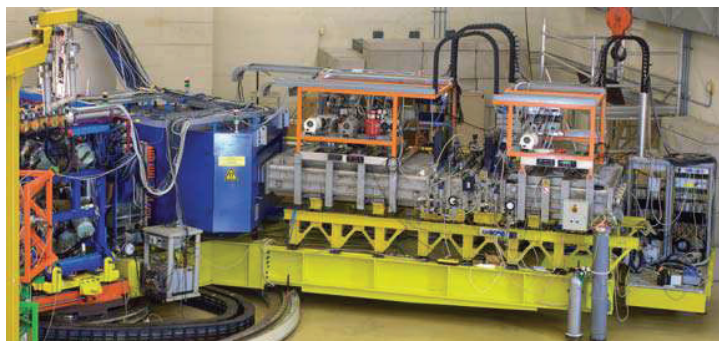
Caratteristiche

- grande accettanza in momento ($\pm 10\%$)
- larga copertura angolare (80 msr)
- ottima risoluzione in massa (1/300)
- ottima risoluzione energetica (up to 1/1000)
- possibilità di ricostruire le tracce degli ioni.
- possibilità di accoppiamento con altri rivelatori di raggi gamma, particelle cariche o neutroni.
- lo spettrometro può ruotare attorno all'asse del fascio. Questo permette di selezionare l'angolo di lavoro in base alla cinematica della reazione.

per informazioni: www.inl.infn.it/~prisma



PRISMA utilizza i fasci di ioni stabili accelerati dal complesso Tandem-Alpi-Piave e i fasci radioattivi prodotti da SPES.

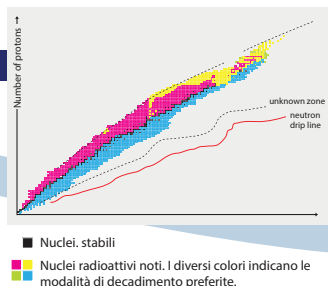


È il progetto di una infrastruttura per la produzione di fasci di ioni radioattivi ai LNL.



Fisica di base

Ricerche sui nuclei esotici, cioè quei nuclei che non esistono sulla Terra ma che vengono prodotti nelle fasi avanzate dell'evoluzione stellare.



Applicazioni



Medicina nucleare, per la produzione di radionuclidi di nuova generazione da utilizzare sia per la diagnosi che per la terapia.



Scienza dei materiali, per studiare nuovi materiali ed il danneggiamento da neutroni su dispositivi elettronici, con particolari applicazioni nei settori dei trasporti aerei e dell'informazione.



Energia, per lo sviluppo di reattori di quarta generazione.

SPES

Il cuore del progetto è il ciclotrone di alta intensità con energia fino a 70 MeV.

SPES

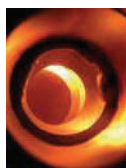
Produrrà fasci riaccelerati di ioni radioattivi per esperimenti di fisica nucleare.

SPES

Produrrà radioisotopi sperimentali per la medicina nucleare.

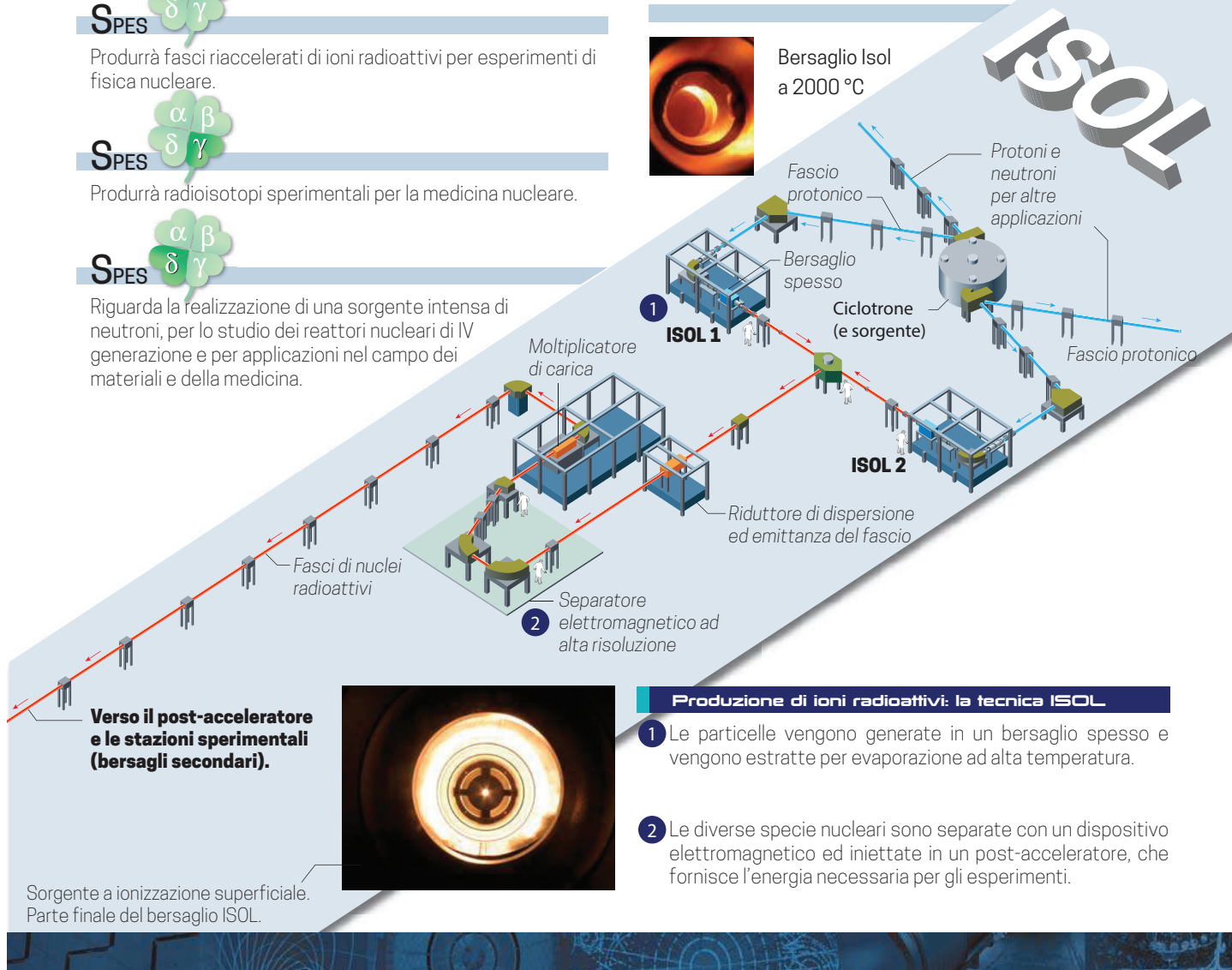
SPES

Riguarda la realizzazione di una sorgente intensa di neutroni, per lo studio dei reattori nucleari di IV generazione e per applicazioni nel campo dei materiali e della medicina.



Bersaglio Isol
a 2000 °C

ISOL



GRID la rete globale



Cos'è GRID?

una rete mondiale che unisce e utilizza contemporaneamente

la potenza di calcolo e la memoria di decine di migliaia di differenti computer sparsi nel mondo.

Nodi di primo livello:

- CNAF - Bologna, ITA
- In2p3 - Lione, FRA
- SARA - Amsterdam, OLA
- Ral - Oxford, GBR
- GridKa, Karlsruhe - Stoccarda, GER
- Fermilab - Chicago, USA
- Triumf - Vancouver, CAN
- Brookhaven - Long Island, USA
- Nordic - SVE-FIN-NOR
- Pic - Barcellona, SPA
- Assc - Taiwan, CIN



CERN
Geneva

Fibra ottica dedicata ai nodi di primo livello

L'utente può collegarsi alla GRID dal proprio pc ed usare le risorse di calcolo di cui ha bisogno.



140 centri di calcolo in 33 paesi



La GRID conta più di 10.000 utenti.



La potenza di calcolo prodotta è pari a quella di 100.000 computer

A cosa serve GRID?

GRID permette agli scienziati di affrontare problemi molto complessi tra i quali lo studio dell'evoluzione dell'universo dopo il Big Bang, lo studio del riscaldamento globale e la ricerca in campo medico per la cura di malattie come malaria e cancro.

Il ruolo italiano

L'INFN è uno dei componenti principali del progetto GRID. A Bologna il CNAF ospita uno degli 11 nodi di primo livello della GRID. Questi nodi ricevono direttamente i dati prodotti al CERN dagli esperimenti di LHC. Questi dati vengono successivamente trasferiti ad altri siti in tutto il mondo.

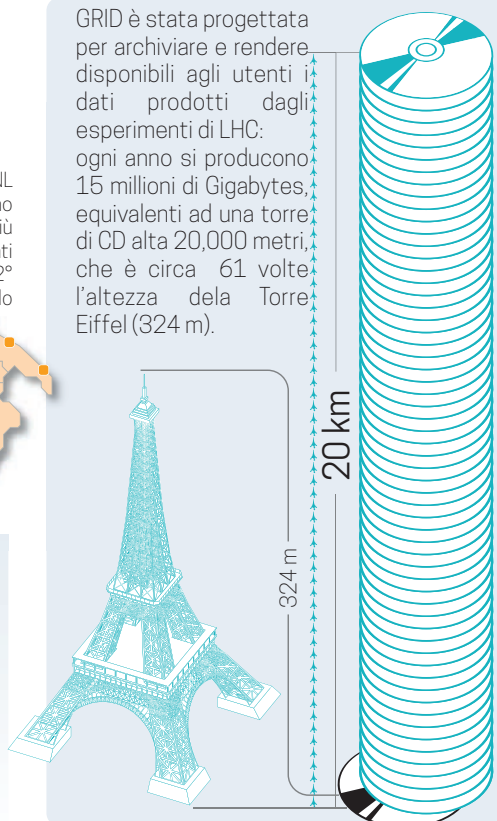


I LNL ospitano uno dei più efficienti nodi di 2° livello



Un archivio da record

GRID è stata progettata per archiviare e rendere disponibili agli utenti i dati prodotti dagli esperimenti di LHC: ogni anno si producono 15 milioni di Gigabytes, equivalenti ad una torre di CD alta 20,000 metri, che è circa 61 volte l'altezza della Torre Eiffel (324 m).



I materiali impiegati per la costruzione dei reattori per la fusione nucleare saranno esposti ad ingenti flussi di neutroni di alta energia, questo provocherà un danneggiamento maggiore rispetto a quanto accade oggi nei reattori a fissione.

Lo scopo del progetto

Per prevedere il comportamento dei materiali da costruzione all'interno dei reattori, occorre misurarne in laboratorio la resistenza. Allo scopo è nato il progetto internazionale IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility).

Un fascio di particelle cariche ad alta intensità (fino a 10^{17} deutoni/s) verrà utilizzato per generare un intenso flusso di neutroni. Questi neutroni verranno utilizzati per irraggiare i materiali da analizzare.

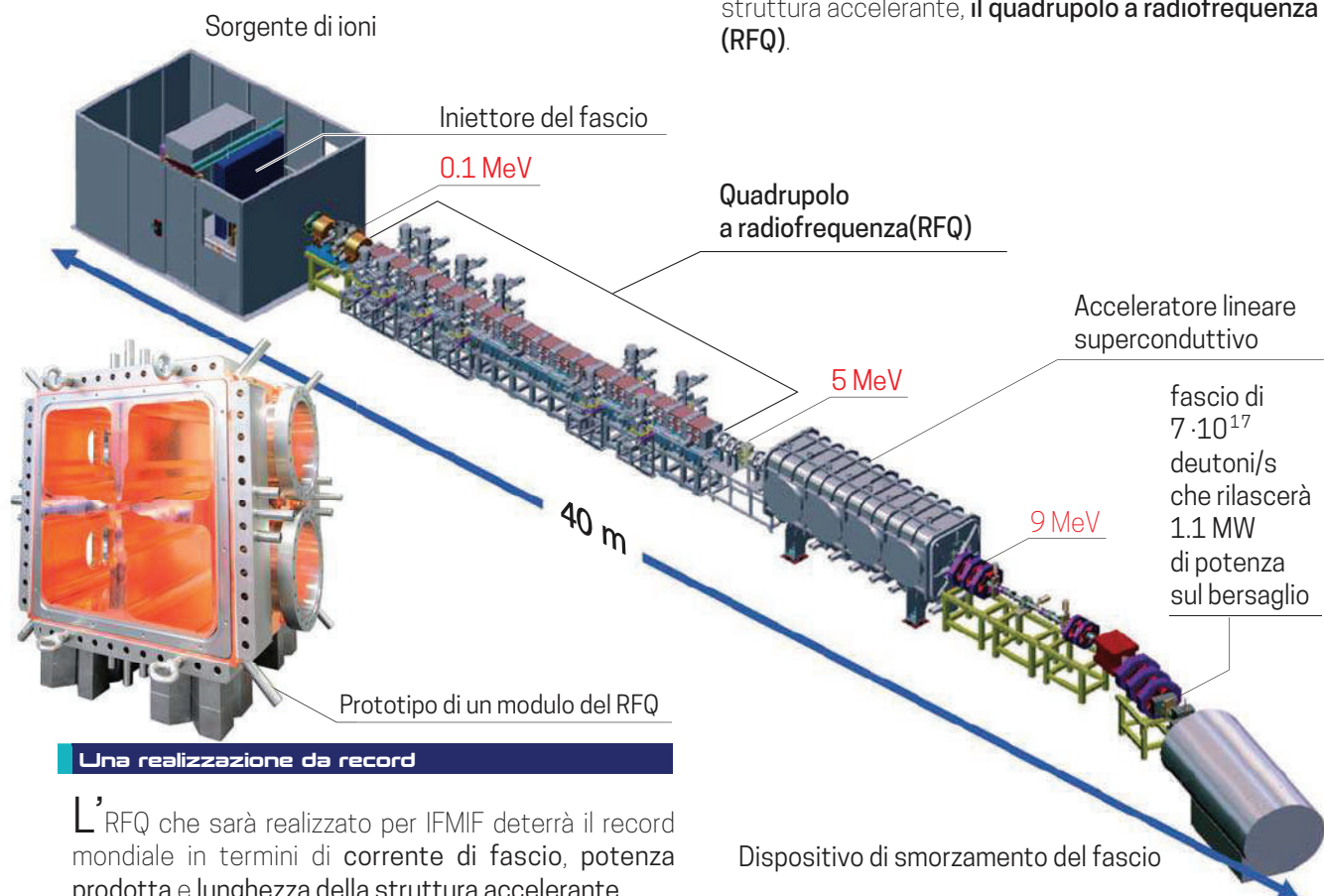
La collaborazione internazionale

La fase preliminare di IFMIF è frutto di una collaborazione tra Europa e Giappone in cui il Giappone mette a disposizione le infrastrutture a Rokkasho, mentre l'Europa costruisce l'acceleratore e le apparecchiature di alta tecnologia.



Il ruolo dell'INFN

L'INFN ha la responsabilità di realizzare la principale struttura accelerante, il **quadrupolo a radiofrequenza (RFQ)**.



Una realizzazione da record

L'RFQ che sarà realizzato per IFMIF deterrà il record mondiale in termini di **corrente di fascio, potenza prodotta e lunghezza della struttura accelerante**.

La collaborazione italiana

Coinvolge i **Laboratori Nazionali di Legnaro**, che hanno esperienza ventennale nel campo degli RFQ, assieme alle sezioni INFN di **Padova, Torino e Bologna**,

che contano su raffinate competenze e strumentazioni per la parte meccanica, in collaborazione con **importanti aziende italiane**.

La medicina progredisce anche grazie agli sviluppi della ricerca in fisica di base.

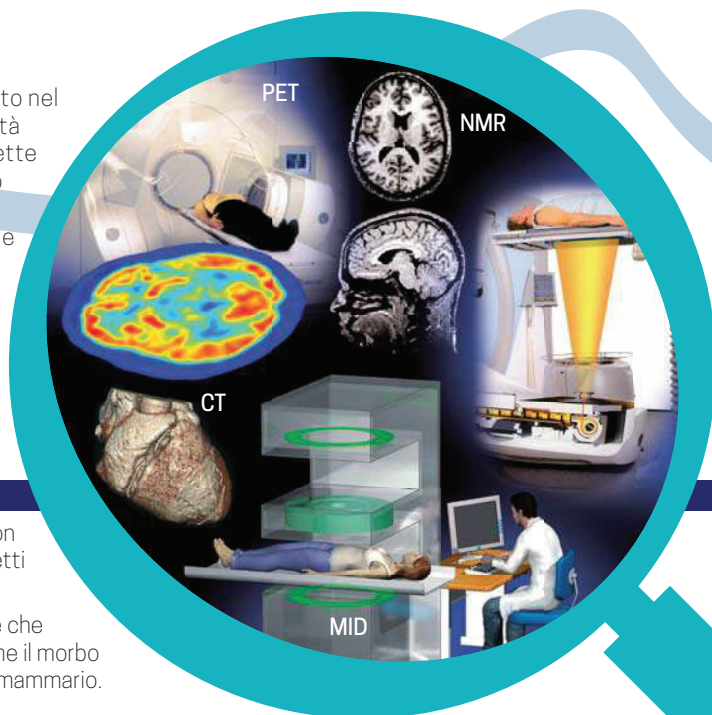
Diagnosi

Le tecniche principali di diagnostica per immagini sono:

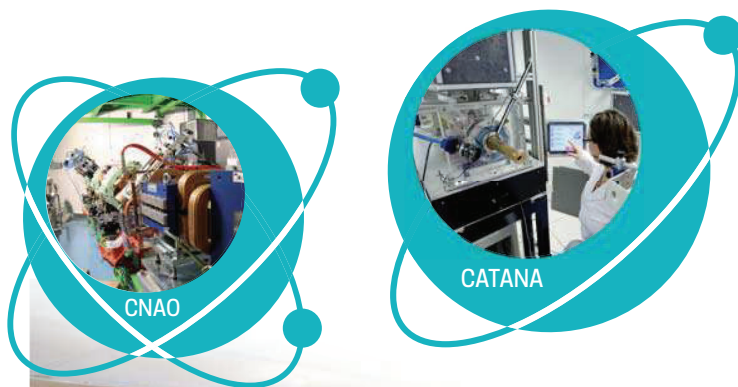
- la **Tomografia a Emissione di Positroni (PET)**
in cui un liquido leggermente radioattivo viene iniettato nel paziente e assorbito dalle cellule con maggiore attività metabolica, come quelle tumorali. Questo liquido emette positroni che si annichilano con gli elettroni del corpo umano producendo due raggi gamma. Questi ultimi vengono poi rivelati consentendo di localizzare le zone con il maggior metabolismo.
- la **Risonanza Magnetica Nucleare (RMN)**
in cui si sfrutta l'interazione di un campo magnetico con i nuclei entro gli atomi del corpo umano.
- la **Tomografia Computerizzata (CT)**
che sfrutta i raggi X per ottenere immagini tridimensionali della zona investigata.

Tra i progetti dell'INFN

- Lo strumento **MID** è un suscettometro per la misura non invasiva dell'accumulo di Ferro nel fegato in pazienti affetti da gravi forme di anemia.
- Il progetto **Magic 5** è dedicato allo sviluppo di software che supportano lo specialista nella diagnosi di patologie come il morbo di Alzheimer e di alcuni tumori come quello polmonare e mammario.
- **Ecorad** è un sistema eco-scintigrafico per ottenere immagini morfologico-funzionali di porzioni di corpo umano.



Terapia Oncologica



Gli acceleratori di particelle sviluppati per le ricerche di fisica fondamentale si sono rivelati utili strumenti per la cura dei tumori, come nel caso della radioterapia e dell'adroterapia.

CATANA

È il primo e unico centro italiano di terapia del melanoma oculare con protoni. È attivo dal 2002 a Catania all'interno dei Laboratori Nazionali del Sud dell'INFN.

Da allora sono stati trattati oltre 200 pazienti con una percentuale di remissione della malattia del 95%.

CNAO

A Pavia è in fase di sperimentazione il Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica (CNAO): il sincrotrone del CNAO, che produce ed accelera particelle utili alla cura di cellule tumorali, è stato progettato e realizzato dall'INFN.

Il CNAO è uno dei quattro centri al mondo in cui gli ioni Carbonio sono utilizzati per la terapia.

I fasci di particelle hanno energie tali da consentire il trattamento di cellule tumorali localizzate in profondità all'interno del corpo umano.

BNCT

Ai Laboratori Nazionali di Legnaro si studia la possibilità di realizzare un fascio di neutroni per studi radiobiologici e trattamenti di alcune patologie tumorali.



La fisica per i beni culturali e l'ambiente



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

La fisica incontra l'arte ed esplora i suoi segreti più profondi con tecniche in grado di rivelare la composizione chimica di un'opera e di datarla fino a 50 mila anni fa.

La tecnologia degli acceleratori di particelle, sviluppata per la ricerca di base, trova oggi applicazioni nello studio del patrimonio artistico e dell'ambiente.

Strutture INFN coinvolte

LABEC

Laboratorio per i beni culturali a Firenze



LANDIS

Laboratorio di analisi non distruttive ai Laboratori Nazionali del Sud, Catania.



AN2000

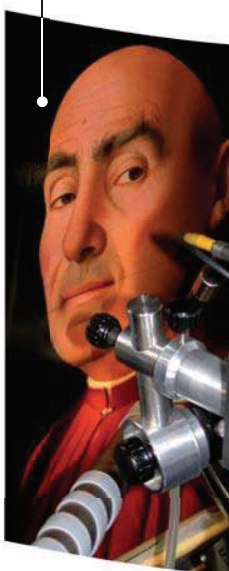
La linea di microfascio presente all'acceleratore AN2000 dei LNL è dedicata allo studio della composizione dei materiali tramite la tecnica PIXE (*Particle Induced X-ray Emission*).

Esempi di ricerche condotte dai fisici dell'INFN

Datazione della tonaca di San Francesco



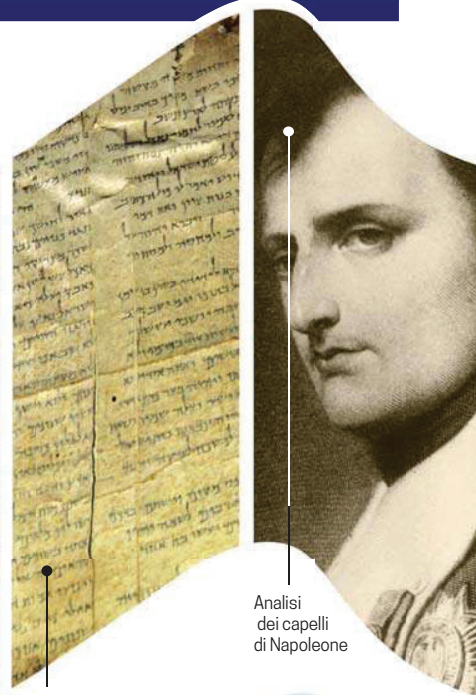
Studio della composizione del "Ritratto di ignoto" di Antonello da Messina



Analisi sul tesoro di Misurata



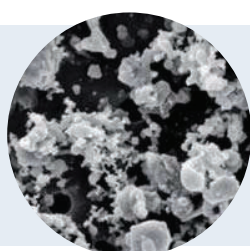
Misure sulla composizione degli inchiostri di Galileo



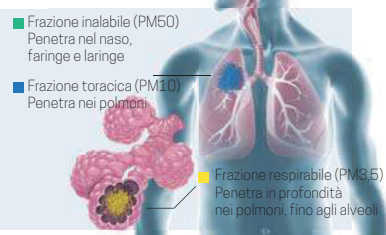
Analisi dei capelli di Napoleone

Studio della composizione dei rotoli del Mar Morto

In campo ambientale le tecnologie nucleari sono impiegate per analizzare il particolato atmosferico (polveri sottili) o la presenza di radioattività nei materiali.



Il materiale particolato (PM) viene classificato in base alle dimensioni delle polveri. Ad esempio con PM10 si indica il particolato con diametro inferiore a 10 micrometri.

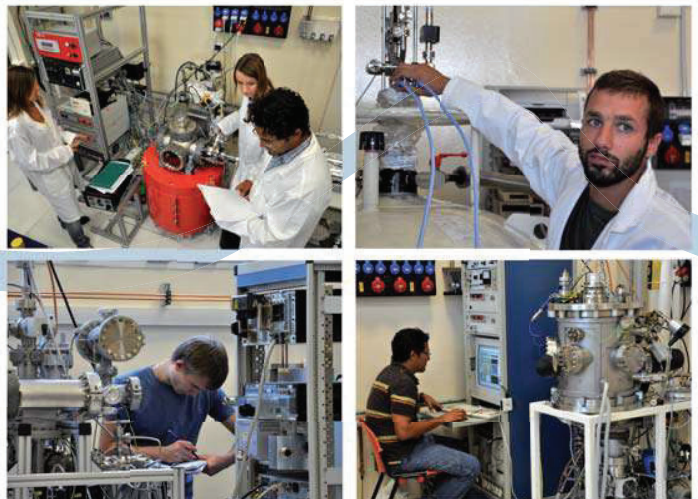


Studio, lavoro e ricerca ai Laboratori Nazionali di Legnaro

Gli obiettivi della formazione

Studiare e svolgere attività di ricerca ai Laboratori Nazionali di Legnaro significa:

- lavorare a grandi progetti in fisica nucleare, subnucleare e astroparticellare;
- sviluppare tecnologie nucleari per l'energia, la salute e l'ambiente;
- collaborare con università, centri di ricerca stranieri e internazionali;
- avere a disposizione laboratori, strumentazione e tecnologie d'avanguardia (acceleratori di particelle, rivelatori di radiazioni, strumenti di analisi dei materiali, laboratori fisici, chimici e informatici, officina meccanica ed elettronica).



Le opportunità

Le opportunità di svolgere attività di studio, ricerca e lavoro per studenti, ricercatori e tecnici sono molteplici:

- borse di studio di formazione tecnica per diplomati
- tesi di laurea triennale e specialistica (con possibilità di usufruire di borse di studio)
- tesi di dottorato di ricerca
- master di secondo livello
- borse di studio post laurea, in discipline tecnico-scientifiche e amministrativo-gestionale.

I laboratori offrono inoltre stage di orientamento rivolti a studenti delle scuole superiori e studenti universitari:

- stage per studenti delle scuole secondarie di II grado
- stage per studenti universitari delle lauree triennali e magistrali



I numeri

Ogni anno, in media, 19 studenti universitari, 18 studenti di dottorato e 10 studenti di master frequentano i LNL per svolgere il lavoro di tesi.

I ricercatori che svolgono attività presso i LNL, ogni anno, sono relatori di 30 studenti provenienti da diverse Università per il loro lavoro di tesi.

I giovani scienziati sono profondamente coinvolti nelle attività sperimentali e rappresentano la speranza dei Laboratori per il futuro.



MASTER @ LNL in

Surface Treatments for Industrial Applications



Istituto Nazionale
di Fisica Nucleare



Il Master è nato per trasferire all'industria le tecnologie acquisite nelle ricerche con gli acceleratori ai LNL.

Il Master in Surface Treatments for Industrial Applications, attivo dall'a.a. 2002/2003, è un Master dell'Università di Padova, svolto in collaborazione con i Laboratori Nazionali di

Gli argomenti

Lo scopo è quello di formare specialisti che, una volta apprese le tecnologie più avanzate di Plasma Engineering, chimica ed elettrochimica, metallurgia e diagnostica delle superfici, possano applicarle ai diversi settori merceologici.

Alto-vuoto e Ultra-alto-vuoto.

La tecnologia del vuoto è fondamentale in molti processi di deposizione di film sottili e ultra-pulizia delle superfici.

Tecniche di deposizione PVD e CVD

Le deposizioni da fase vapore fisiche (PVD) e chimiche (CVD), permettono di depositare film sottili per migliorare le proprietà del materiale di partenza, come ad esempio la resistenza all'usura e la resistenza alla corrosione.

Ricoprimenti protettivi, funzionali e decorativi

I film sottili depositati con le tecniche CVD e PVD possono avere infinite applicazioni. Ad esempio, rendono il materiale più resistente alla corrosione o all'usura, oppure ne variano la conducibilità elettrica o la capacità di legare le cellule (come nei biomateriali).



Strumenti per l'analisi di superfici

Diffrattometro a raggi X, microscopio elettronico, spettroscopia EDAX, spettrofotometro UV-visibile, sono solo alcuni degli strumenti di analisi che permettono di studiare la microstruttura dei materiali, la cui conoscenza è necessaria per il miglioramento delle proprietà dei materiali.



Automazione e disegno CAD 3D

Il master forma specialisti con competenze anche per progettare e realizzare macchinari di avanguardia.

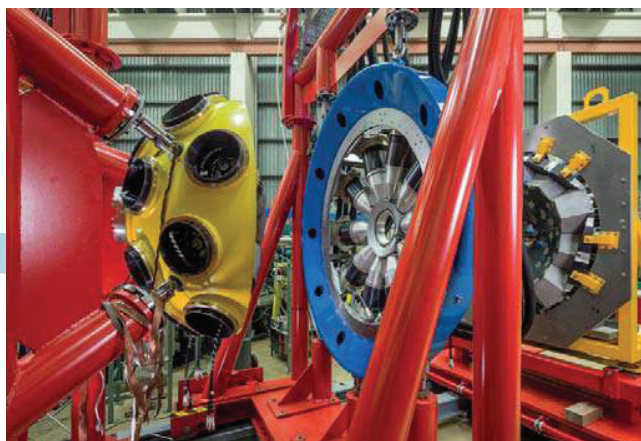
I trattamenti di superficie hanno grande applicabilità: dalla resistenza all'usura per applicazioni meccaniche, alla resistenza alla corrosione dei metalli, dalle applicazioni per l'industria del packaging, alla resistenza al "liquid metal embrittlement" per i target ad alta intensità per la produzione di radiofarmaci.

Un apparato per spettroscopia gamma con alta risoluzione e grande efficienza.

GALILEO

Galileo

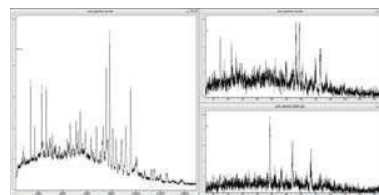
è uno spettrometro per raggi gamma ad alta risoluzione, con copertura angolare a 4π . Il decadimento dei nuclei prodotti in reazioni nucleari è caratterizzato dall'emissione di specifici raggi gamma (fotoni) la cui energia, direzione e molteplicità sono collegati alla struttura del nucleo stesso. GALILEO è uno strumento utilizzato per misurare questi raggi gamma con alta risoluzione e grande efficienza, al fine di ottenere precise informazioni spettroscopiche. Il sistema può essere completato con diversi rivelatori ancillari quali EUCLIDES per la misura di particelle cariche o Neutron Wall per neutroni veloci.



GALILEO ed i rivelatori ancillari



Nella sua configurazione finale GALILEO è composto da: 30 rivelatori al Germanio (Ge) assieme ai loro schermi anti-Compton e 10 cluster tripli di tipo "High-Purity Germanium" (HPGe). GALILEO è stato costruito utilizzando rivelatori esistenti, appartenenti agli apparati GASP ed EUROBALL e sfrutta l'elettronica di ultima generazione sviluppata per il progetto AGATA.

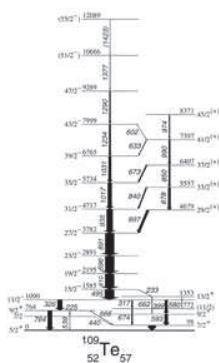


EUCLIDES è un rivelatore a 4π , composto di 40 telescopi al Silicio assemblati in una sfera compatta di 8 cm di raggio. Viene installato all'interno della camera di reazione, ad una pressione di circa 10^{-6} mb. EUCLIDES rivela ed identifica particelle leggere cariche emesse in reazioni di fusione-evaporazione e viene utilizzato per selezionare il canale di reazione.



Neutron Wall è un apparato a copertura 1π composto da 50 rivelatori assemblati in una sfera compatta di 510 cm di raggio. Questi 50 rivelatori sono scintillatori liquidi con la capacità di discriminare i segnali indotti da neutroni da quelli prodotti dai raggi gamma. Neutron Wall rivela ed identifica i neutroni emessi in reazioni di fusione-evaporazione con energie che variano tra i 100 keV ed i 10 MeV ed è utilizzato per selezionare il canale di reazione di interesse.

Spettroscopia gamma con GALILEO



Lo scopo di GALILEO è di studiare la Struttura Nucleare attraverso la spettroscopia gamma ad alta risoluzione. Gli esperimenti vengono realizzati usando i fasci stabili dei LNL ed i fasci radioattivi prodotti da SPES.

Lo sviluppo di rivelatori ad alta efficienza per raggi gamma è fondamentale per consentire lo studio dei nuclei e dei processi più "esotici", ovvero quelli a bassa sezione d'urto.

- Studio delle caratteristiche della forza nucleare
- Studio dei nuclei ai limiti di spin e isospin
- Studio dell'evoluzione delle shell magiche
- Studio del pairing neutrone-protone nel nucleo
- Misura delle caratteristiche collettive e di singola particella della materia nucleare

Riprodurre in laboratorio i processi che avvengono nelle stelle



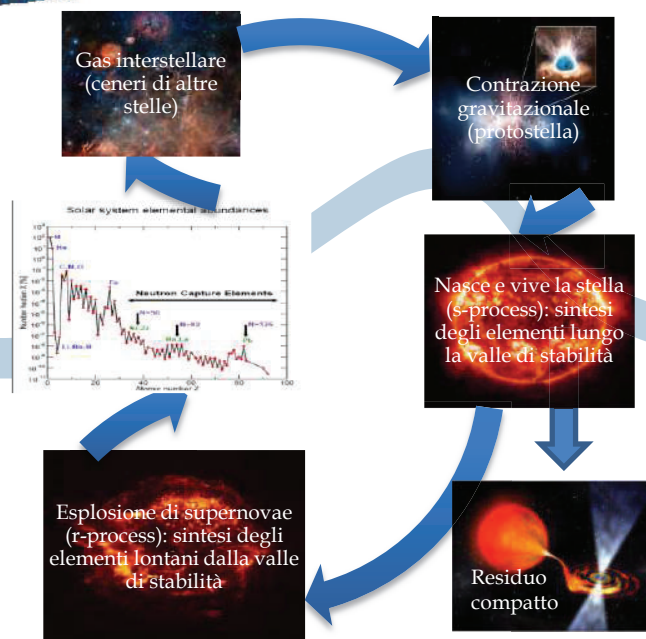
BELINA (BEam Line for Nuclear Astrophysics)

Le reazioni nelle stelle

Fra 1 e 3 minuti dopo il big bang si sono formati gli elementi primordiali: idrogeno, elio, litio e berillio. Gli altri elementi fino al ferro si sono formati nelle stelle per fusione. Gli elementi di massa superiore al ferro si sono formati per assorbimento di flussi di neutroni nelle fasi finali della vita di una stella. Tali processi sono:

- processo lento (s-process, tempo medio di cattura neutronica molto maggiore del tempo di decadimento) che avviene durante le combustioni stellari quiescenti e forma gli elementi della valle di stabilità. La densità neutronica è di circa 10^7 n/cm^3 , $T=5 \cdot 10^8 \text{ K}$ da cui $kT=20-90 \text{ keV}$;
- processo rapido (r-process, tempo medio di cattura neutronica molto minore del tempo di decadimento) che avviene nelle fasi finali esplosive della stella e produce quasi tutti gli elementi fuori dalla valle di stabilità. La densità neutronica è maggiore di 10^{21} n/cm^3 .

Il tasso di creazione/distruzione di un elemento nel processo di nucleosintesi dipende dalla densità neutronica, dalla vita media, dalla temperatura e dalla sezione d'urto di cattura neutronica.



Infrastrutture e laboratori

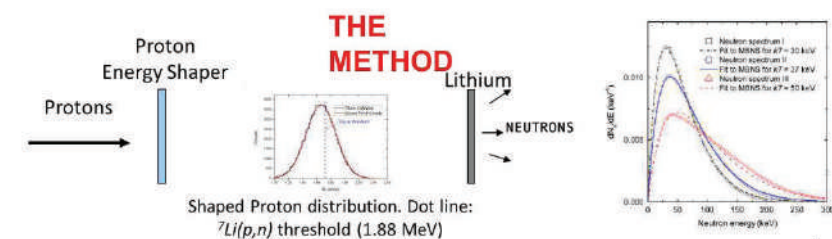
Per riprodurre l'abbondanza osservata degli elementi nell'universo è necessario conoscere la quantità *Maxwellian Averaged Cross Section* (MACS).

$$MACS \equiv \frac{\langle \sigma \cdot v \rangle}{v_T} = \frac{2}{\sqrt{\pi} (kT)^2} \int_0^\infty \sigma(E) E e^{-E/(kT)} dE$$

Durante un s-process, la densità neutronica è circa 10^7 n/cm^3 e i neutroni hanno una distribuzione di velocità di Maxwell-Boltzmann con valori $8 \text{ keV} < kT < 120 \text{ keV}$, a seconda della massa e dello stato evolutivo della stella.

La misura diretta di MACS avviene con il metodo dell'attivazione neutronica, a partire da neutroni generati con diversi valori di kT secondo la distribuzione di Maxwell-Boltzmann (M-B). MACS si calcola attraverso la misura di $\sigma(E)$ in un ampio intervallo di energia.

Le infrastrutture LENOS e BELINA utilizzano un metodo innovativo per produrre lo spettro neutronico di M-B, che consiste nel formare lo spettro energetico del fascio di protoni in modo da ottenere lo spettro desiderato di neutroni senza necessità di moderazione.



ARI 70 (2012) pg 1583-1589

P.F. Mastinu et al., NIM A 601, 333 (2009).

Presso l'acceleratore CN è stata messa a punto una linea di fascio di neutroni a tempo di volo con radio frequenza variabile. I neutroni sono prodotti tramite la reazione ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ e si è sviluppato un metodo per utilizzare litio metallico. Rivelatori sono stati sviluppati ad hoc per queste misure. La fibra di carbonio è largamente usata per ridurre il fondo.

Schema del sistema di fascio pulsato al CN con radio frequenza variabile

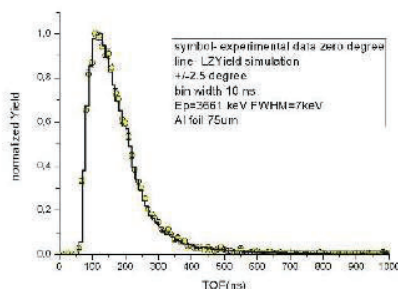


Goniometro a basso fondo per misure di distribuzione angolare

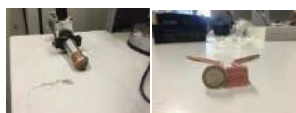


Risultati preliminari e prospettive

Il metodo per formare fasci di neutroni con distribuzione di M-B a $kT=30 \text{ keV}$ è stato dimostrato sperimentalmente



Spettro del tempo di volo (TOF) misurato e previsto dai calcoli per la distribuzione M-B a $kT=30 \text{ keV}$



Bersagli di litio metallico

- Studio della nucleosintesi stellare e del processo s
- Misura di spettri neutronici con tempo di volo
- Misura di MACS con metodo dell'attivazione neutronica
- Misura di sezione d'urto in funzione dell'energia
- Sviluppo di rivelatori e tecniche di rivelazione di neutroni

SPES

(Selective Production of Exotic Species)

Ciclotrone

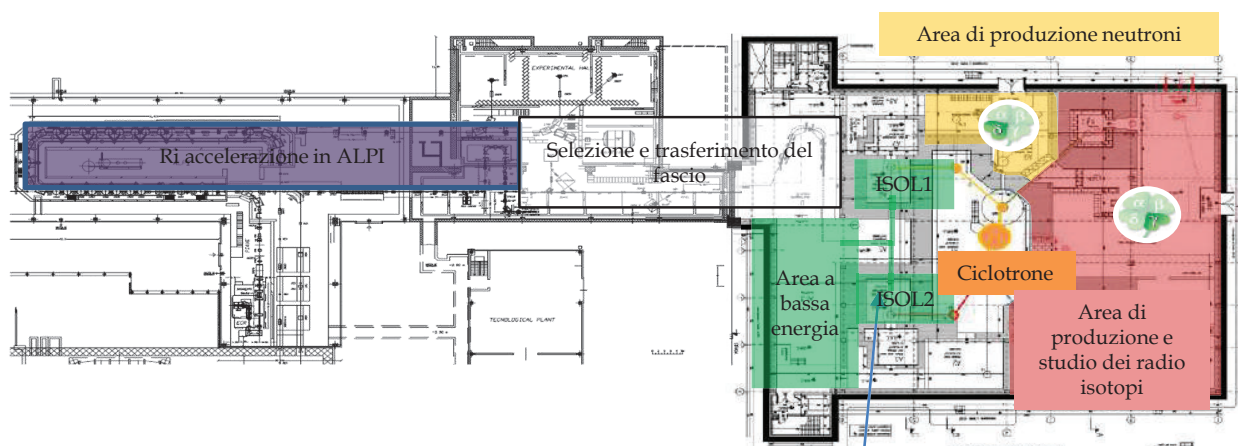
Il ciclotrone è una macchina acceleratrice circolare in cui le particelle (ad esempio, protoni) percorrono una traiettoria a spirale a partire dal centro e sono immerse in un campo magnetico perpendicolare fissato.



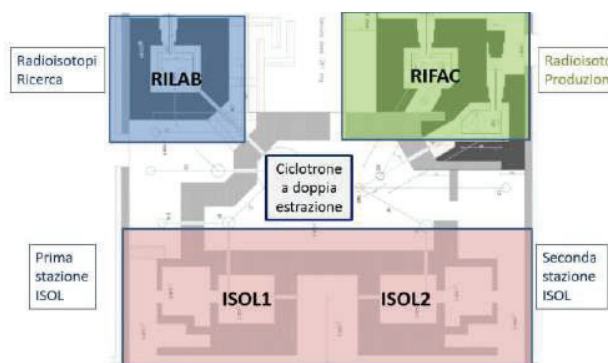
Principali parametri di macchina	
Tipo	Ciclotrone con 4 settori, magnete resistivo
Particelle	Protoni (H^+)
Energia	35-70 MeV
Intensità di corrente	700 μA (range 1 μA – 700 μA)
Estrazione	Doppia
Campo magnetico massimo	1.6 T ($B_0 = 1$ T)
Sistema di radio frequenza RF	2 cavità delta; Modo armonico = 4; $f_{RF} = 56$ MHz; Picco di voltaggio = 70 kV; Potenza RF = 50 kW (2 amplificatori RF)
Sorgente di ioni	$I_{ext} = 8$ mA; $V_{ext} = 40$ kV; iniezione assiale
Dimensioni	$\Phi = 4.5$ m, $h = 2.0$ m, massa = 190 tonnellate

Infrastrutture e laboratori

L'edificio ospita il ciclotrone, i laboratori per lo studio e la produzione dei radiofarmaci, l'area per la fisica con protoni a bassa energia e le zone per i bersagli necessari per la realizzazione dei fasci esotici (ISOL).



Obbiettivi di ricerca di SPES



- Come si sono prodotti gli elementi più pesanti del ferro?
- Studio di radio isotopi
- Produzione di radio isotopi
- Irraggiamento con neutroni
- Fisica nucleare con protoni a bassa energia

Laboratorio per radiofarmaci LARAMED



La Fisica nucleare applicata alle nuove frontiere della medicina

La missione di LARAMED (Laboratorio di Radionuclidi per la Medicina), nato nel 2013 è ricercare nuovi/innovativi radioisotopi per la medicina da produrre con il ciclotrone per protoni da 70 MeV installato ai LNL. Le applicazioni delle tecniche di fisica nucleare alla medicina sono la parte direttamente collegata alla società del progetto SPES. LARAMED ingloba le idee e i risultati di diversi progetti:

APOTEMA: Studio teorico sulla produzione alternativa, mediante ciclotroni ospedalieri di bassa energia, (e senza l'uso di materiale strategico) del radionuclide molibdeno-99 (^{99}Mo) e tecnezio-99 metastabile (^{99m}Tc) (largamente impiegato negli ospedali);

TECHN-OSP: Sviluppo di una nuova ed affidabile tecnologia per la produzione da ciclotrone e la purificazione del tecnezio metastabile ^{99m}Tc attraverso la reazione nucleare ^{100}Mo (p, 2n) ^{99m}Tc ;

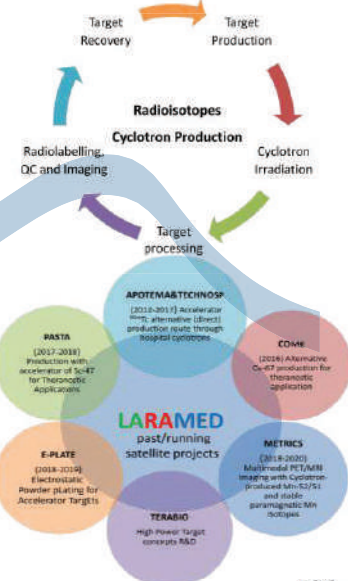
COME: Studio sperimentale della reazione nucleare ^{70}Zn (p, α) ^{67}Cu come potenziale nuova via verso la produzione del radionuclide medico rame ^{67}Cu a scopo diagnostico ed allo stesso tempo terapeutico (radioterapia cellulare) denominato (teranostico);

PASTA: Sviluppo di nuovi metodi di produzione per il radioisotopo teranostico scandio ^{47}Sc ;

METRICS: Imaging multimodale PET e MRI con radioisotopi stabili e paramagnetici di manganese $^{52,51}\text{Mn}$ prodotti da ciclotrone;

TERABIO: Sviluppo di bersagli (targets) ad alta potenza per la produzione massiva di radionuclidi terapeutici non standard mediante fasci di protoni ad alta energia e corrente elevata;

E-PLATE: Studio di un nuovo approccio per la produzione di bersagli ad alta potenza per fasci di protoni.



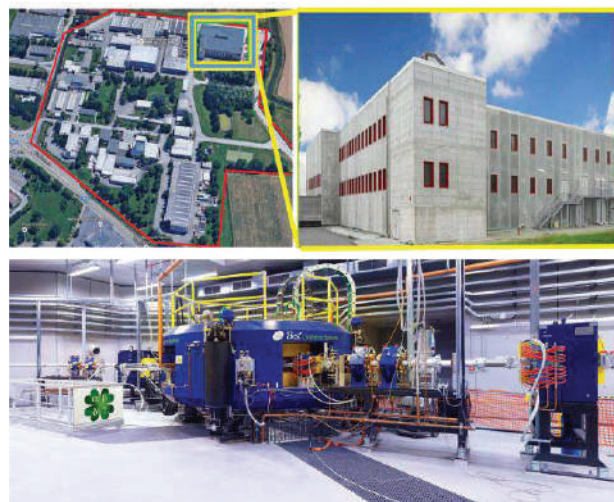
Infrastruttura e obiettivi

L'edificio SPES/LARAMED ai LNL ospita il ciclotrone, in grado di fornire due fasci di protoni contemporaneamente: uno per ricerche in fisica nucleare di base e uno per ricerche interdisciplinari in campo medico. LARAMED sarà dotato di due aree apposite.

RILAB laboratorio per:

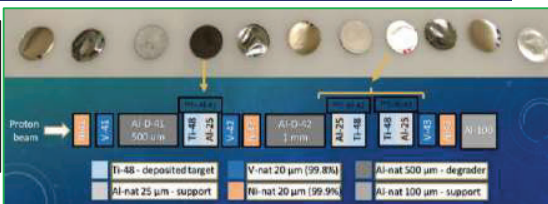
- la misura ad alta precisione delle funzioni di eccitazione nucleare;
- la produzione a bassa attività di radioisotopi e radiofarmaci per scopi di ricerca;
- testare tecnologie avanzate per nuovi bersagli ad alta potenza.

RIFAC zona dedicata alla produzione di radionuclidi stronzio ^{82}Sr , rubidio ^{82}Rb , gallio ^{68}Ga e germanio ^{68}Ge in collaborazione con partner industriale.



Risultati preliminari e prospettive

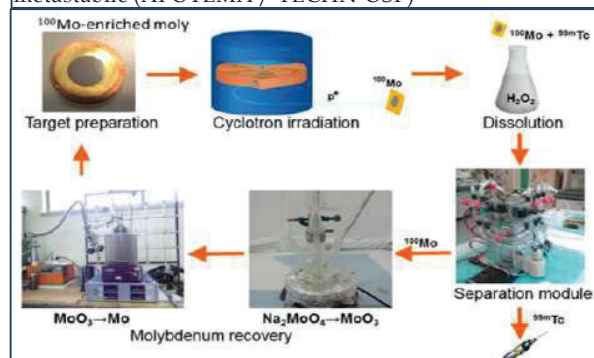
Bersagli arricchiti di titanio su supporto di alluminio pronti per irraggiamento con protoni da ciclotrone da cui ricavare radionuclide scandio (PASTA / E_PLATE)



Cella calda installata nel laboratorio di radiochimica RILAB



Metodo alternativo per la produzione di tecnezio metastabile (APOTEMA / TECHN-OSP)



- Sviluppare un centro scientifico e tecnologico per la fisica applicata alla medicina
- Stimolare il trasferimento tecnologico di risultati scientifici
- Fornire nuove fonti di finanziamento per l'ente
- Incrementare l'unione della comunità coinvolta nei radiofarmaci

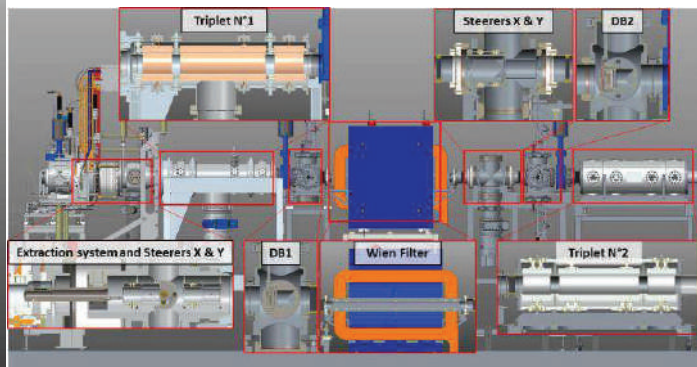
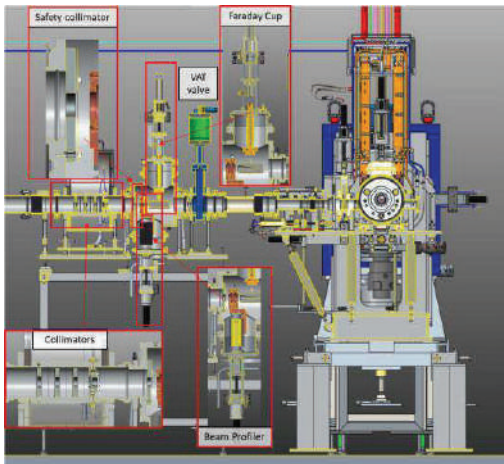
Astrofisica nucleare

L'evoluzione delle stelle e il loro destino dipendono in modo critico dal gioco fra la forza gravitazionale, che tende a farle collassare, e le reazioni nucleari nel loro nucleo che liberano energia e generano espansione. Inizialmente le stelle bruciano idrogeno trasformandolo in elio, quindi elio in carbonio, e così via a generare per fusione elementi chimici sempre più pesanti, fino al ferro. Gli elementi ancora più pesanti si formano per assorbimento di flussi di neutroni in situazioni che si realizzano nelle fasi finali della vita delle stelle, in particolare nelle supernove. Le specie nucleari formate in questi processi sono caratterizzate da un eccesso di neutroni, sistemi "esotici" non presenti sulla terra a causa della loro breve vita.

L'intenso fascio di protoni del ciclotrone dei Laboratori Nazionali di Legnaro attraversando bersagli dedicati in carburo di uranio produce una varietà di nuclei ricchi di neutroni; un sistema di lenti elettromagnetiche da una parte seleziona la specie di interesse e dall'altra la trasporta e la inietta in un sistema accelerante. Il fascio di particelle accelerato interagisce con bersagli adeguati, scelti in modo da produrre nuovi nuclei estremamente ricchi di neutroni, come quelli generati nelle fasi stellari avanzate. Si potrà così studiare in laboratorio cosa avviene nel cuore delle stelle, ricavando informazioni cruciali per la conoscenza del nostro universo.

Front End di SPES

L'apparato di Front End è installato nel bunker di produzione. E' formato da due parti: la linea del fascio di protoni, che accetta, controlla e verifica le proprietà del fascio e la linea del fascio radioattivo, che accelera, verifica le proprietà del fascio and effettua una separazione preliminare degli ioni radioattivi. La linea del fascio di protoni contiene collimatori, strumenti per il profilo del fascio, e gabbie di Faraday. La linea del fascio radioattivo ospita un motore pneumatico, camere di diagnosi, filtri di Wien.



Bersaglio attivo - ACTAR

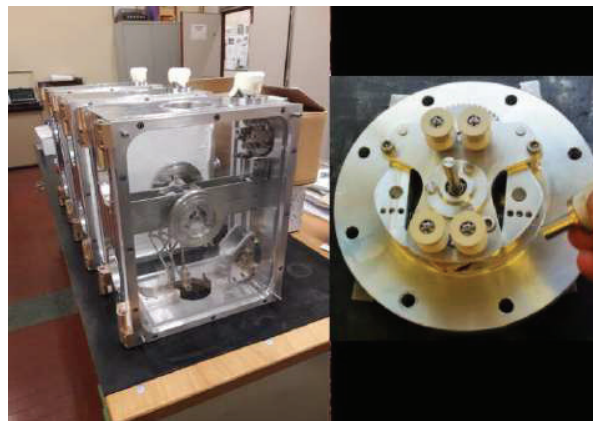
Un bersaglio attivo è un tracciatore che funziona come una Time Projection Chamber (TPC) in cui il gas usato per la rivelazione è, allo stesso tempo, il bersaglio per la reazione nucleare di interesse. Questo pone grossi vantaggi in termini di luminosità e permette di sfruttare fasci di intensità molto bassa. L'applicazione più naturale di questa tecnologia è per lo studio delle reazioni e della struttura nucleare con fasci radioattivi in cui si può aspettare che le specie più esotiche vengano prodotte con intensità di 10^3 pps.



Stazione di decadimento beta

La stazione di decadimento beta è un setup sperimentale permanente e flessibile dotata di rivelatori per fotoni e per neutroni.

Gli obiettivi di studio sono l'astrofisica nucleare (indizi su processi lenti e veloci di cattura neutronica), la struttura nucleare (evoluzione delle shell e forma dei nuclei), i decadimenti esotici (risonanze).



La Fisica nucleare per la medicina

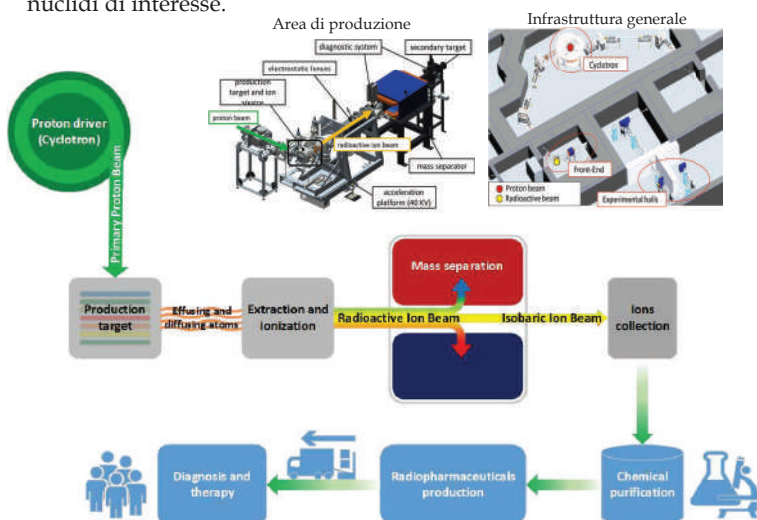
Il **progetto ISOLPHARM (ISOL technique for radioPHARMaceuticals)** nasce nel **2014** dalla volontà di innovare la produzione di radionuclidi per la medicina nucleare. L'obiettivo è sviluppare **radiofarmaci innovativi**, sfruttando i fasci di ioni radioattivi (**RIB - Radioactive Ion Beam**) *neutron-rich* che potranno essere prodotti a **SPES (Selective Production of Exotic Species)**, la futura **facility ISOL (Isotope Separation On-Line)** in fase di costruzione presso i Laboratori Nazionali di Legnaro.

Il metodo ISOLPHARM consentirà di produrre una grande varietà di radionuclidi di interesse clinico, tra cui isotopi mai studiati (^{111}Ag) o difficilmente ottenibili con le tecniche di produzione convenzionali (^{43}Sc , ^{47}Sc , ^{67}Cu , ^{149}Tb , ^{152}Tb , ^{155}Tb), con un elevatissimo grado di purezza ed attività specifica, caratteristiche fondamentali per determinare l'efficacia diagnostica o terapeutica del radiofarmaco.

Attualmente, la ricerca è focalizzata verso l' ^{111}Ag (**Progetto ISOLPHARM Ag**), un radionuclide molto promettente per la **terapia** grazie alle sue proprietà di decadimento ($t_{1/2}$ 7.45 giorni, emissione β^- , E_m 360 keV, penetrabilità 1.8 mm, I_γ 1.33 %).

Infrastruttura

Nel metodo ISOLPHARM, un **fascio protonico primario** (fino a 70 MeV) estratto dal ciclotrone SPES, collide su di un **target primario**, generando delle **reazioni nucleari**. I radioisotopi prodotti vengono rilasciati dal target grazie alle elevate temperature (2000°C), **estratti ed accelerati**. In seguito alla **separazione in massa On-Line**, solo il fascio isobarico degli ioni di interesse viene depositato su un **target secondario** di raccolta. Successivi processi di **purificazione chimica**, permettono di estrarre tra gli isobari raccolti esclusivamente i nuclidi di interesse.



Vantaggi

- Radionuclidi intrinsecamente *carrier-free*
- Piccola quantità di materiale fissile utilizzato
- Elevata versatilità e selettività di produzione
- Produzione di radionuclidi non ottenibili con tecniche tradizionali attuali
- Basso impatto ambientale

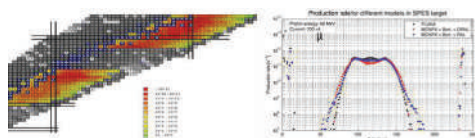
Network di ricerca



Risultati e prospettive

Calcoli Monte Carlo

Simulazione di produzione, rilascio e trasporto di ^{111}Ag ottenuti con il target SPES secondo i codici Monte Carlo.



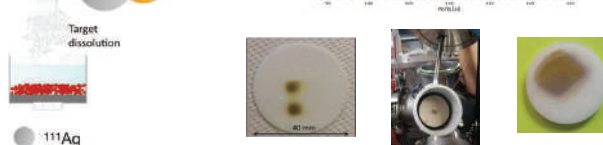
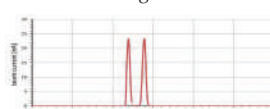
Sviluppo di radiofarmaci a base di ^{111}Ag

Una delle strategie più promettenti per la terapia antitumorale è la **targeted radionuclide therapy (TRT)**. Al fine di direzionare selettivamente il radioisotopo sulle cellule tumorali, è necessario coordinarlo ad un chelante bifunzionale (BFC) connesso, attraverso un **linker**, ad un agente per la direzionante in grado di legarsi a recettori sovraespressi sulle cellule tumorali, evitando quindi il danneggiamento delle cellule sane (**targeted radionuclide therapy**).



Produzione di fasci di Ag^+

Sfruttando la tecnica del mass marker sono stati prodotti fasci stabili di ioni argento e studiati i processi di ionizzazione ed estrazione. I fasci ottenuti sono stati depositati su di un target secondario.



- Produrre radionuclidi di interesse medico estremamente puri (*carrier-free*)
- Fornire un metodo alternativo alla produzione di radionuclidi difficilmente ottenibili con le tecniche attuali
- Realizzare una rete di collaborazione efficiente, per coprire l'intera filiera produttiva del radiofarmaco.
- Realizzare radiofarmaci selettivi (*Target Radionuclide Therapy*)