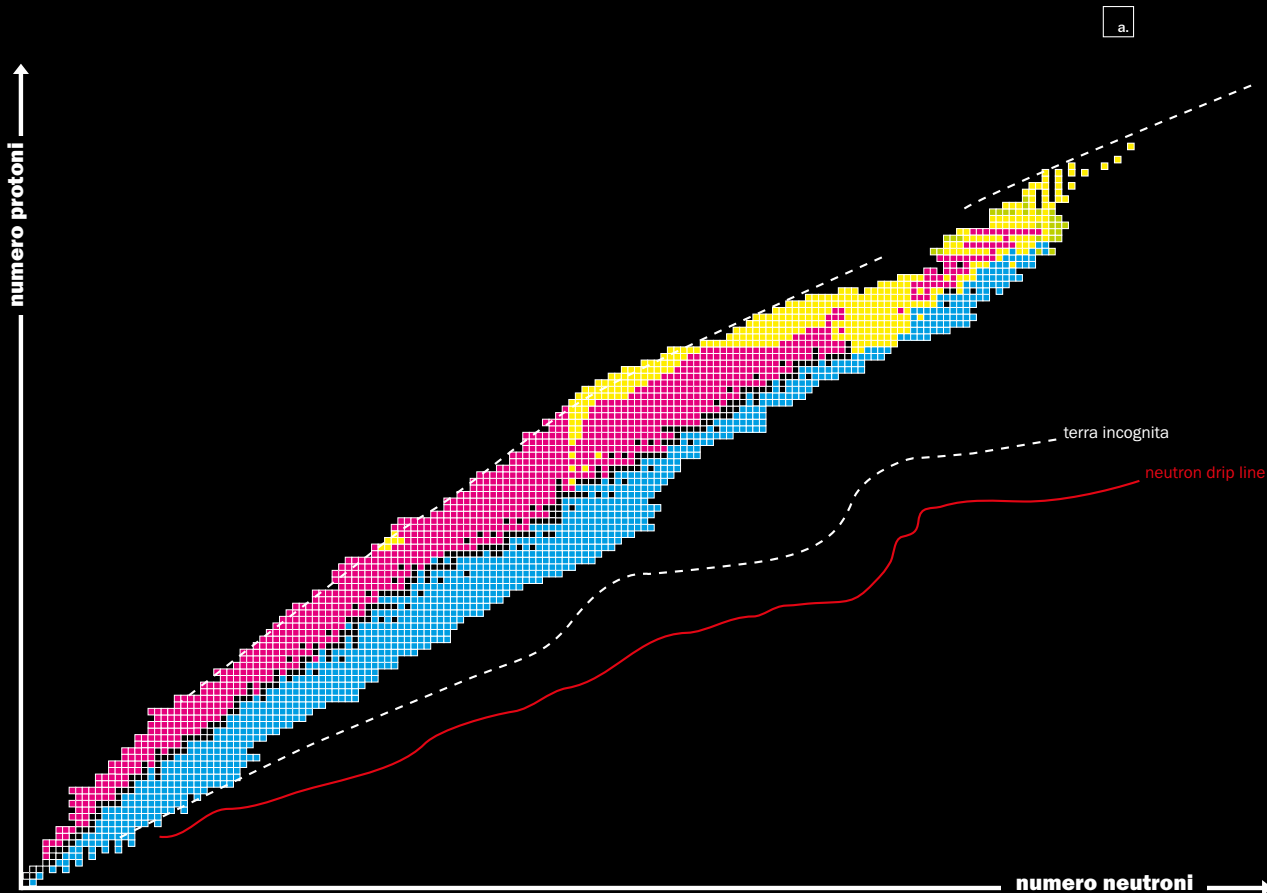


Terre incognite

Spes, una fabbrica di nuclei esotici.

di Gianfranco Prete

a.
Carta dei nuclidi. Rappresentazione della distribuzione dei nuclei, dove sulle ascisse è riportato il numero di neutroni e sulle ordinate il numero di protoni (numero atomico) degli isotopi. I quadratini neri rappresentano i nuclei stabili (valle di stabilità), mentre i quadratini colorati (in giallo, rosa, verde e azzurro) indicano i nuclei instabili conosciuti. I diversi colori dipendono dalle caratteristiche dei nuclei, le quali ne determinano i modi di decadimento. I nuclei nell'area compresa fino alla linea tratteggiata non sono conosciuti e costituiscono la terra incognita. La linea rossa rappresenta la *neutron drip line*, cioè il confine oltre il quale supponiamo non esistano sistemi legati di neutroni e protoni. Le nostre conoscenze attuali però non ci permettono di stabilire esattamente dove questa linea si collochi. Per comprendere il ruolo delle reazioni nucleari nelle stelle è importante conoscere il comportamento dei nuclei che partecipano al processo-r (linea tratteggiata nella terra incognita).



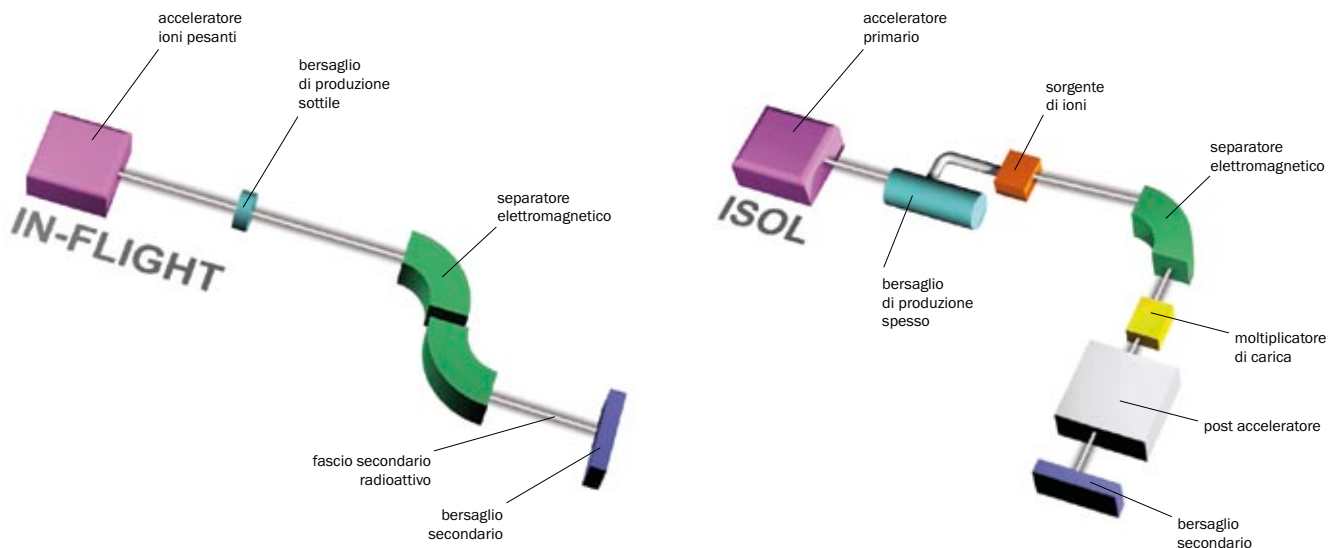
A partire dal 2014, in Italia sarà possibile studiare i nuclei atomici e le reazioni nucleari in regioni della carta dei nuclidi attualmente inaccessibili. Potremo indagare i processi che portano alla formazione dei nuclei pesanti nelle stelle, ma saremo anche in grado di produrre nuovi radiofarmaci e creare materiali innovativi. Questo grazie a Spes (*Selective Production of Exotic Species*), un progetto multidisciplinare e multiutente che sarà realizzato ai Laboratori Nazionali di Legnaro dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. Spes produrrà fasci di ioni ricchi di neutroni per le attività di ricerca di fisica nucleare, ma anche fasci di protoni e neutroni per applicazioni in campo medico, astrofisico, per lo studio dei materiali e dei reattori nucleari di IV generazione (quei reattori cioè che produrranno scorie con vita media molto più breve, concepiti per minimizzare i rifiuti e ottimizzare l'utilizzo del combustibile nucleare).

I nuclei presenti in natura sulla Terra sono in gran parte stabili. Questi nuclei si dispongono, nella carta dei nuclidi, lungo una zona chiamata *valle di stabilità*. La maggior parte delle conoscenze attuali della struttura nucleare si basa su esperimenti nei quali si inducono reazioni nucleari con fasci di ioni stabili su bersagli di nuclei anch'essi stabili. Questo ha limitato lo studio alle specie nucleari che sono vicine alla valle di stabilità, per le quali il rapporto tra neutroni e protoni non è molto differente da quello dei nuclei stabili. Al di fuori di questa regione abbiamo poche informazioni sul comportamento dei nuclei, soprattutto per quelli ricchi di neutroni. La zona della carta dei nuclidi occupata da questi nuclei è stata così battezzata *terra incognita*. Questa area è delimitata dalla *neutron drip line*, oltre la quale si prevede che non esistano sistemi legati di neutroni e protoni. Non conosciamo sperimentalmente questa linea e anche le teorie non sono concordi nel definirne la posizione.

Nella regione della terra incognita sono compresi i nuclei che partecipano al cosiddetto *processo-r*, il processo di cattura rapida di neutroni responsabile della formazione degli elementi pesanti nelle stelle e dei fenomeni che portano alle violente esplosioni delle supernovae.

Lo studio sperimentale della struttura dei nuclei e della dinamica delle reazioni nucleari nella regione della terra incognita rappresenta la frontiera della fisica nucleare per i prossimi 20 anni. Questi nuclei sono chiamati *esotici* perché possono presentare proprietà del tutto nuove rispetto ai nuclei finora studiati, come ad esempio la loro dimensione. La scoperta di nuclei con un "alone" di neutroni rappresenta una delle evidenze sperimentali più significative di queste strane proprietà. Proprietà che sono previste anche per i nuclei esotici più pesanti in cui l'alone si dovrebbe trasformare in una vera e propria "pelle" di neutroni che ricopre il nucleo. Queste proprietà, dovute al debole legame tra i neutroni più esterni e il nucleo stesso, possono avere effetti rilevanti sulla struttura e sulle forme di eccitazione dei nuclei esotici.

b. Esistono due metodi per produrre fasci di nuclei radioattivi: il metodo *In-Flight* e il metodo *Isol*, che sarà utilizzato nel progetto Spes. La prima tecnica consiste nell'interazione di un fascio primario di alta energia su un bersaglio sottile. Le reazioni tra proiettile e bersaglio sono di fissione o di frammentazione: in entrambi i casi i nuclei prodotti mantengono una elevata velocità e quindi non c'è bisogno di riaccelerarli. È necessario invece separare i nuclei interessanti da tutti gli altri nuclei prodotti durante l'interazione. L'insieme di nuclei ottenuti viene perciò analizzato "in volo", mentre è trasportato nelle sale sperimentali. Nella tecnica *Isol*, invece, i nuclei radioattivi sono prodotti e termalizzati in un bersaglio molto spesso e devono quindi essere estratti. Poi, le diverse specie nucleari prodotte vengono separate mediante un dispositivo elettromagnetico e iniettate in un post-acceleratore, che fornisce loro l'energia necessaria per gli esperimenti.



b.

Il progetto Spes sarà dedicato allo studio dei nuclei esotici ricchi di neutroni. Avrà come obiettivo principale quello di produrre fasci riaccelerati di nuclei non stabili che permettano di indagare sperimentalmente il comportamento dei nuclei nella zona della terra incognita, per rispondere a domande sulla struttura di questi nuclei e sulle loro proprietà a elevate energie di eccitazione, ma anche per indagare sui meccanismi che governano l'evoluzione delle stelle.

Spes sarà realizzato, con il contributo di tutta la comunità di fisica nucleare dell'Infn, ai Laboratori Nazionali di Legnaro. Nei laboratori è già presente un acceleratore lineare a cavità superconduttive, Piave-Alpi, in grado di fornire fasci accelerati a energie dai 5 ai 15 MeV per nucleone (MeV/amu), che sarà utilizzato per l'accelerazione dei fasci instabili. La tecnica di produzione si basa sul metodo Isol (*Isotope Separation On Line*) che utilizza la fissione dell'uranio indotta da un fascio di protoni per produrre i nuclei esotici da riaccelerare. Nel progetto Spes un bersaglio di carburo di uranio naturale, costituito da 7 dischi di 4 cm di diametro e 1 mm di spessore (28 gr di materiale), viene bombardato da un fascio primario di protoni con energia di 40 MeV, producendo diecimila miliardi di fissioni al secondo. Il bersaglio viene scaldato fino a 2.000 °C e i prodotti di fissione, estratti per agitazione termica e ionizzati per ionizzazione superficiale, sono selezionati e trasportati verso l'acceleratore Piave-Alpi per formare fasci secondari di ioni ricchi di neutroni da utilizzare per la sperimentazione. Un sistema analogo a più bassa potenza, Excyt, in grado di fornire fasci esotici leggeri è stato realizzato a Catania ai Laboratori Nazionali del Sud dell'Infn e rappresenta un'installazione di riferimento per lo sviluppo del progetto Spes.

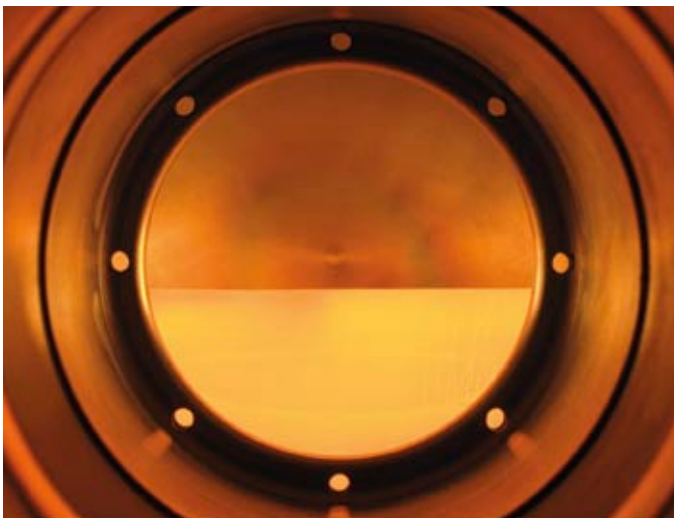
L'elemento più critico del progetto è il sistema bersaglio-sorgente poiché deve sostenere la potenza del fascio primario, lavorare ad alta temperatura e in un ambiente ad alta radioattività.

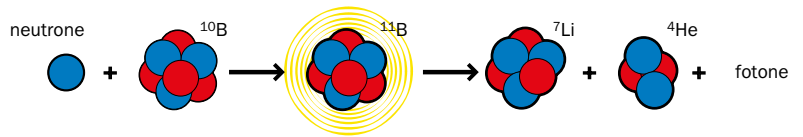
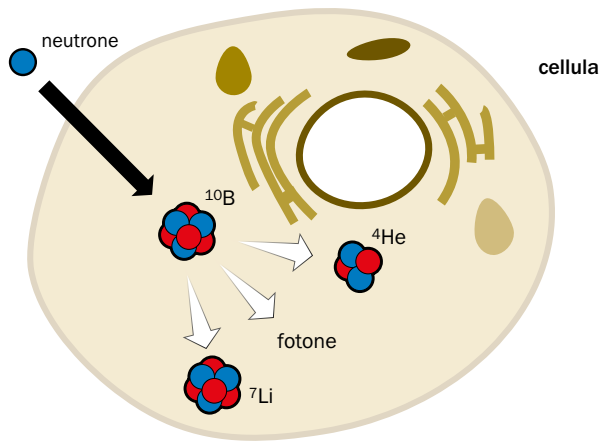
La progettazione termica di questo sistema, la produzione e caratterizzazione degli elementi di carburo di uranio naturale, i sistemi di sicurezza e radioprotezione dell'impianto rappresentano alcuni dei punti del progetto Spes che richiederanno lo sviluppo di tecnologie d'avanguardia. Dal punto di vista della sperimentazione i punti di forza sono: l'intensità dei fasci, 10-100 volte superiore a quanto attualmente disponibile; l'alta selezione in massa dei fasci, cioè la capacità di selezionare l'isotopo di interesse con cui formare il fascio tra tutti i nuclei estratti dalla sorgente; la loro energia, 2-3 volte più alta di quella fornita dai migliori sistemi Isol oggi operativi nel mondo.

Spes è inserito in un quadro di ricerca scientifica e sviluppo tecnologico in collaborazione con importanti laboratori nel mondo: il Cern in Svizzera, Ganil in Francia, Ornl negli Stati Uniti, Triumf in Canada e Kek in Giappone. Spes è anche indirizzato verso la ricerca applicata. Uno dei suoi punti di forza è l'acceleratore primario di protoni: un ciclotrone da 70 MeV con due porte di uscita. L'elevata intensità del fascio di protoni e la possibilità di estrarre due fasci indipendenti dal ciclotrone

c.
Immagine della sorgente a ionizzazione di Spes, durante il test di verifica del comportamento termico a 2.000 °C. Utilizzando un pirometro è possibile misurare la temperatura della superficie senza contatto con l'oggetto. Le misure sperimentali sono confrontate con le simulazioni con cui è stato progettato tutto il sistema bersaglio-sorgente di Spes.

c.





d.

permettono di far funzionare, contemporaneamente agli esperimenti di fisica nucleare, una facility applicativa per lo studio di nuovi radiofarmaci e la ricerca nel campo dei reattori di IV generazione. Per la ricerca applicata è anche prevista la messa in funzione di un acceleratore di protoni di alta intensità e bassa energia con cui realizzare fasci di neutroni. Irraggiando un bersaglio di berillio o di litio si produrranno fino a centomila miliardi di neutroni al secondo, che saranno utilizzati per studi applicativi nel campo dei materiali, dell'astrofisica e della medicina. Una applicazione importante in campo medico è lo studio della Bnct (*Boron Neutron Capture Therapy*) per la cura dei tumori diffusi. Questa tecnica fa uso di neutroni "termalizzati" (cioè portati a energia molto bassa, pari all'energia di agitazione termica), che nel nostro caso avranno un flusso di un miliardo di neutroni al secondo per centimetro quadrato. Il metodo è basato sulla capacità del boro di catturare neutroni termici e decadere in un nucleo di litio e uno di elio. Nell'applicazione medica il ${}^{10}\text{B}$ viene legato a speciali molecole che, iniettate nel paziente, sono assorbite dalle cellule tumorali. L'irraggiamento del paziente con neutroni termici provoca la rottura del ${}^{10}\text{B}$ che si comporta come una "micro-bomba" distruggendo in modo selettivo solo le cellule tumorali. Questo metodo, ancora in fase sperimentale, rappresenta una strada da studiare che potrebbe aprire nuove prospettive nella cura di particolari neoplasie.

Queste attività applicative, che si sviluppano a partire dalle ricerche di fisica di base condotte dall'Infn con gli acceleratori di particelle, sono promosse e sostenute dall'istituto ma, poiché sono progetti multidisciplinari, per essere realizzati richiedono l'impegno e la collaborazione anche di partner esterni.

d.
Rappresentazione del meccanismo su cui si basa il metodo Bnct (*Boron Neutron Capture Therapy*). Un atomo di ${}^{10}\text{B}$, portato nella cellula con procedure chimiche, viene sottoposto al bombardamento con neutroni termici e si spacca in un nucleo di ${}^4\text{He}$ e in un nucleo di ${}^7\text{Li}$. L'energia rilasciata da questa reazione nucleare all'interno della cellula ne blocca la riproduzione.

Biografia

Gianfranco Prete è ricercatore dell'Infn ai Laboratori Nazionali di Legnaro.

Ha collaborato alla realizzazione di esperimenti di fisica nucleare ed è oggi responsabile del progetto Spes.

Link sul web

www.inl.infn.it/~spes

www.lns.infn.it/excyt/index.html

www.eurisol.org/site02/index.php

www.phy.ornl.gov/hrifb/