



DESARROLLO de TECNOLOGÍA de ACELERADORES en CNEA para APLICACIONES MÉDICAS y NUCLEARES

**M. Baldo¹, M.E. Capoulat¹⁻³, D. E. Cartelli¹⁻³, J.C. Suárez Sandín¹,
M. Igarzabal¹, M.F. del Grosso^{1,3}, A.A. Valda^{1,2}, M. C. Gun¹, D.M.
Minsky¹⁻³, G. Conti¹, J. Erhardt¹, H.R. Somacal^{1,3}, A. Bertolo¹, P.
Gaviola¹, S. Incicco¹, F. Sala¹, A.J. Kreiner¹⁻⁴.**

¹Subgerencia de Tecnología y Aplicaciones de Aceleradores, GIyA, GAIyANN, CNEA. ²Escuela de Ciencia y Tecnología, UNSAM. ³CONICET. ⁴Secretario General de APCNEAN.

AATN, CCK, 1/12/2023

Aceleradores: Contexto y significación

- Hay más de **30000** aceleradores instalados en los últimos 60 años.
- Se producen **1000** aceleradores de **uso industrial** (**todo salvo medicina e investigación**), por **2000 MU\$S/año**.
- Una estimación conservadora: el valor de los productos que contienen partes y materiales tratados con aceleradores excede **los 500 mil millones de U\$S/año** (del orden del PBI nuestro).

Aplicaciones de Aceleradores

1. **Medicina**: Protonterapia, Hadronterapia, BNCT, Producción de Radioisótopos: Imágenes, Terapia.
2. **Materiales**: Caracterización y Modificación de Propiedades: Implantación iónica, Daño por Radiación, Microanálisis, Micromaquinado.
3. **Medio Ambiente, Arqueometría, Bienes culturales**: Técnicas de análisis de alta sensibilidad: PIXE, PIGE, RBS, AMS.
4. **Detección de materiales nucleares (U, Pu), drogas, explosivos y prospección petrolífera**: Interrogación activa con neutrones y γ 's.
5. **Incineración/transmutación de residuos radiactivos (futuro)**.
6. **Producción de energía (futuro)**.
7. **Estudios sobre estructura de la materia**: Subnuclear, nuclear, atómica, molecular, de sólidos,....

Los grandes vertientes de la Física y Tecnología Nucleares

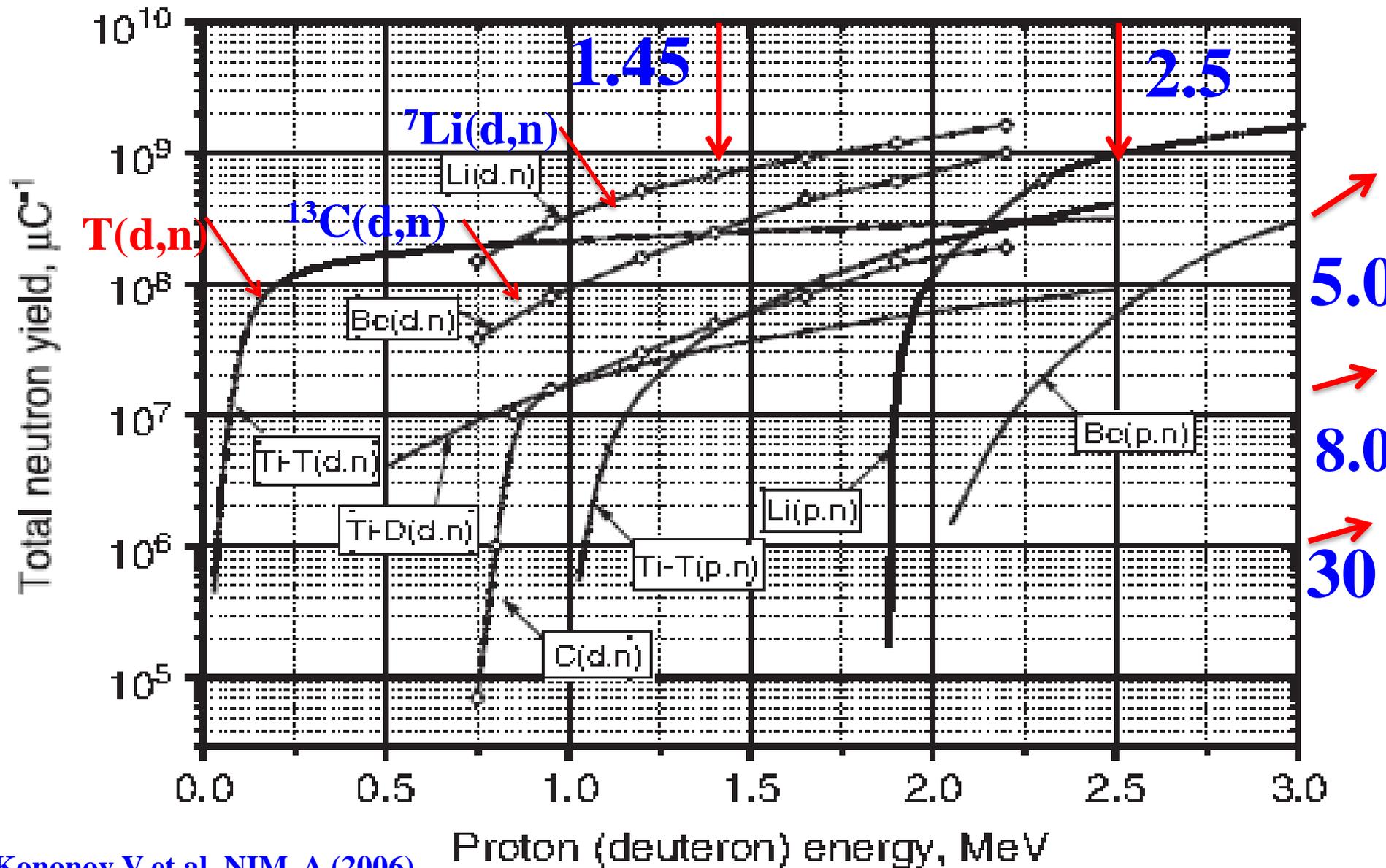
1. Reactores Nucleares (**fisión nuclear inducida por neutrones**).
2. Aceleradores (**reacciones nucleares inducidas por partículas cargadas, en particular productoras de neutrones**).

Estas **dos tecnologías** están empezando a converger en los llamados **sistemas híbridos o ADS (Accelerator Driven Systems)**.

Ejemplos de Aplicaciones

- **Producción de radioisótopos**
- **Incineración nuclear de residuos radiactivos (futuro)**
- **Producción de energía (futuro)**
- **BNCT**

Reacciones productoras de neutrones

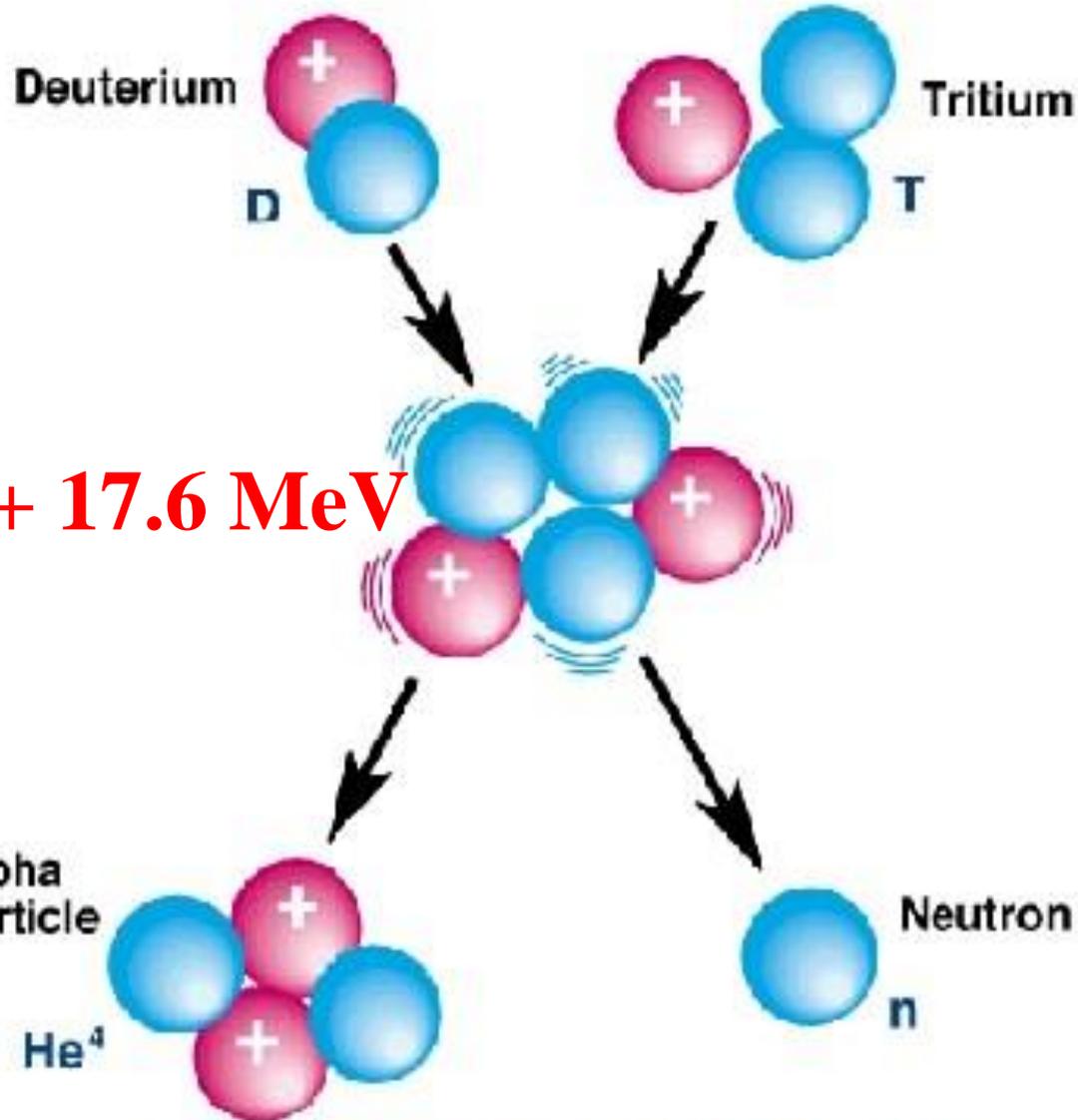


Reacciones y rendimientos

- **Ti-T(d,n)⁴He @ 250 keV (30 mA) → 6x10¹² n/s**
E_n = 14 MeV (T_{fusión,Ti}=1700 °C)
- **⁷Li(d,n)⁸Be @ 1.5 MeV (30 mA) → 3x10¹³ n/s**
E_n = 13-16 MeV (T_{fusión}= 180 °C)
- **⁹Be(d,n)¹⁰B @ 1.5 MeV (30 mA) → 9x10¹² n/s**
E_n = 15 keV-5.8 MeV (70% ≤ 1 MeV) (T_{fus}= 1300 °C)

Reacción de fusión

Deuterium-Tritium Fusion Reaction



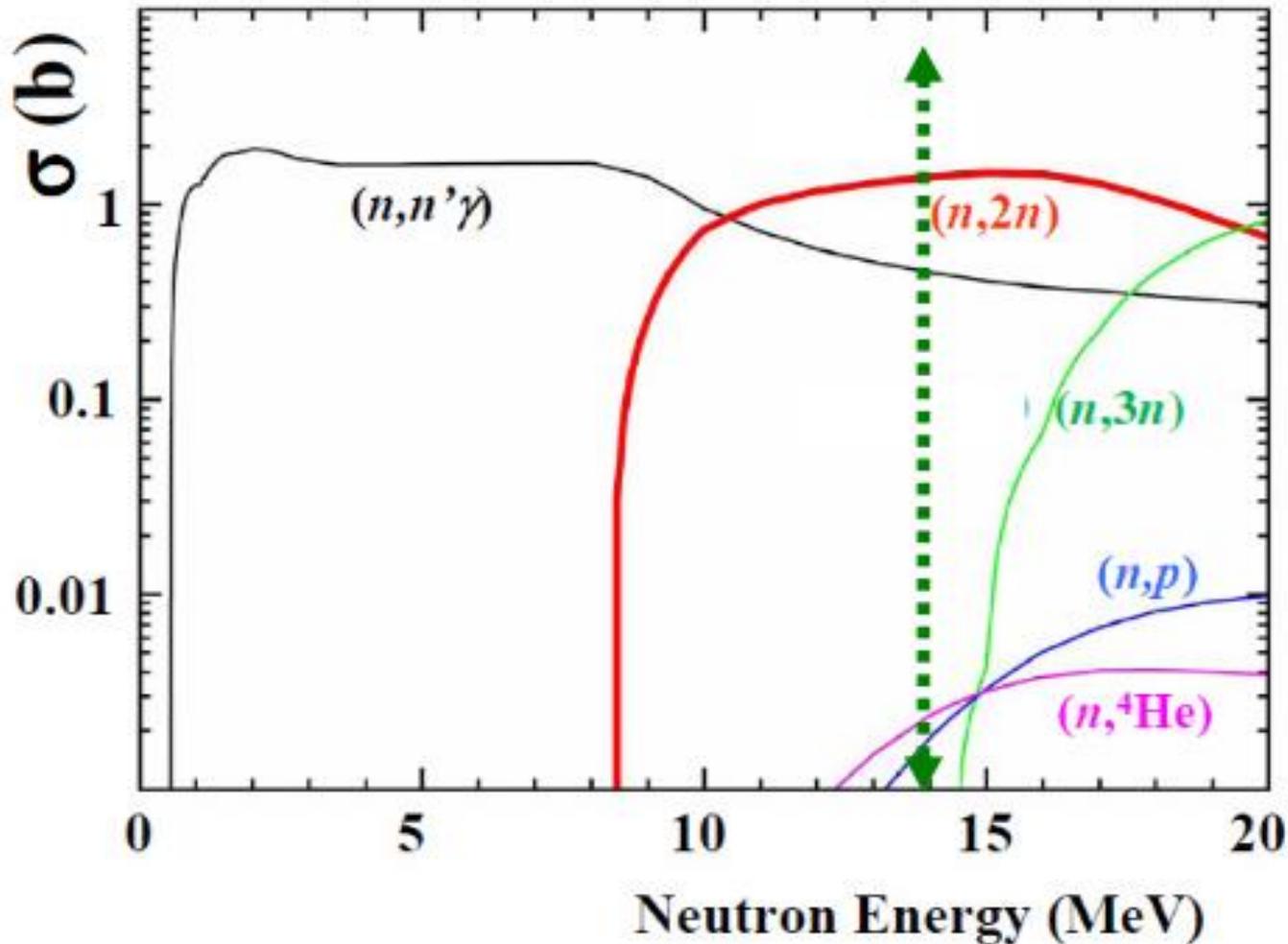
Producción de radioisótopos: caso de ^{99m}Tc

- **Ti-T(d,n) ^4He [d+T \rightarrow n+ ^4He]**
blanco de titanio tritiado impactado por un deuterón, genera un neutrón de alta energía (**ya hemos producido blancos de titanio deuterado y estamos desarrollando blancos de Ti-T, P. Gaviola**)
- **Un haz de deuterones a 250 keV y 30 mA produce $\approx 6 \times 10^{12}$ neutrones/s de 14 MeV**
- **Producción de ^{99m}Tc a través de $^{100}\text{Mo}(n,2n)^{99}\text{Mo}$
 $\approx 30\text{-}300$ Ci/sem en una sola instalación (menos 1 MU\$)**

Producción de radioisótopos:



$^{100}\text{Mo}(n,x)$ reaction X-section

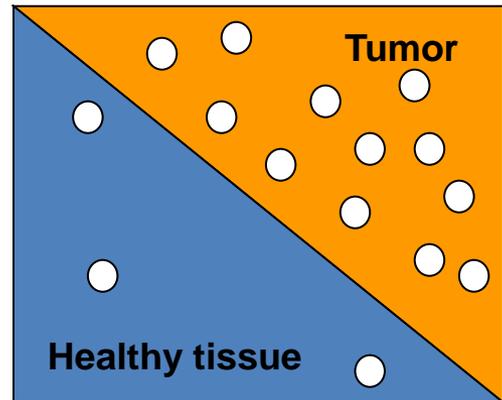
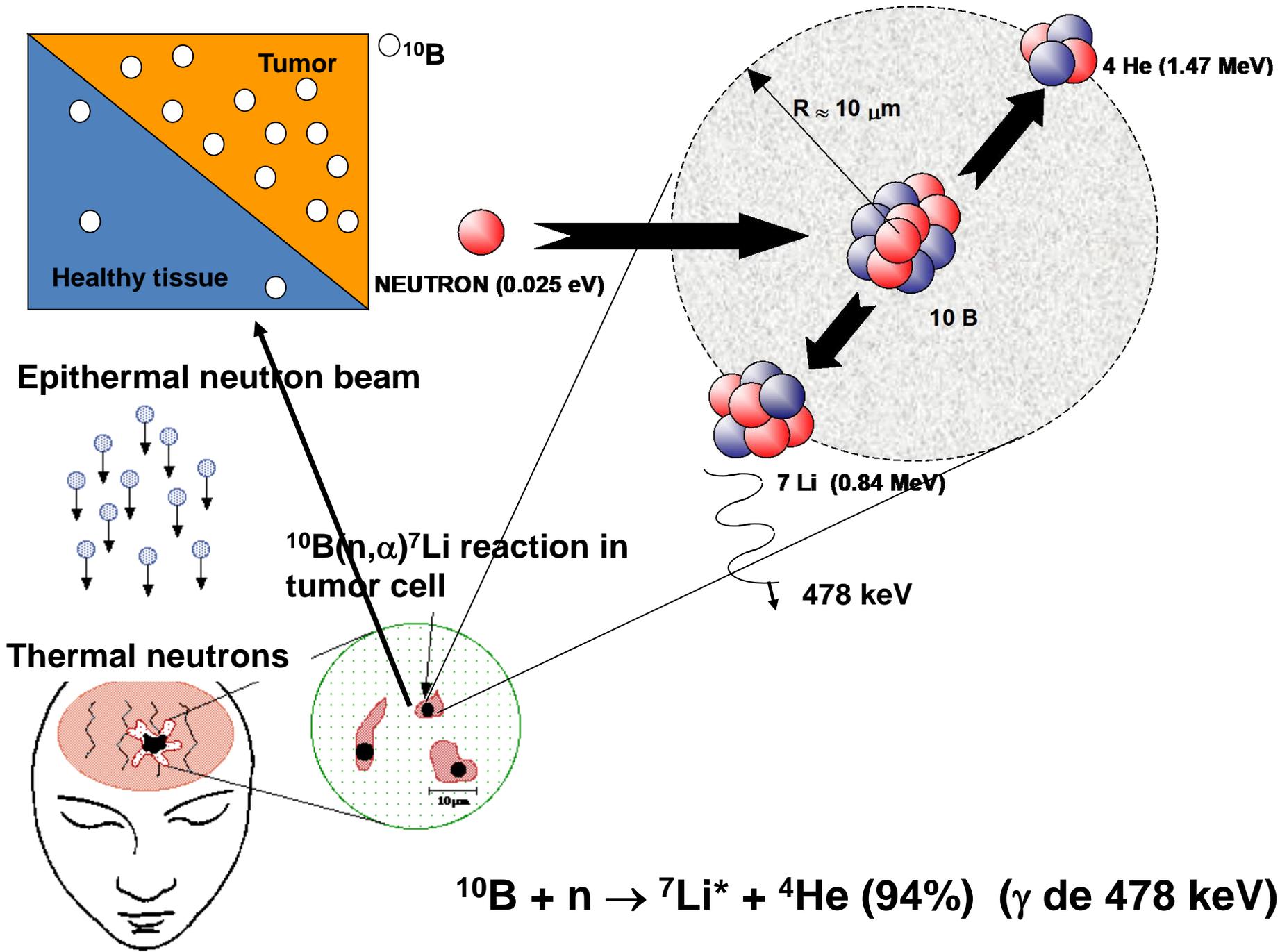


Terapia por Captura Neutrónica en Boro (BNCT)

Cuando el tumor no está **espacialmente bien definido**, i.e. , tiene **límites difusos** y regiones con **infiltración parcial**, se necesita una estrategia mucho más sofisticada.

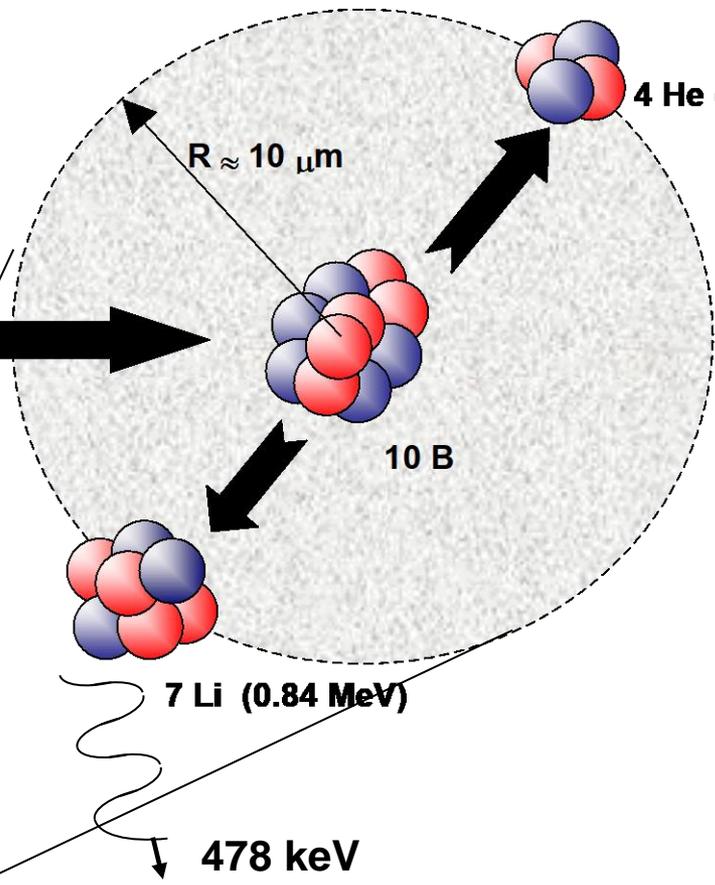
1. **Carga selectiva** del tumor con un **capturador neutrónico** (e.g., ^{10}B). Droga portadora BPA.
2. **Irradiación con neutrones.** $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ (high LET/RBE).

Con esta metodología **“binaria”** se logra una resolución a **nivel celular.** **Esto es único.**

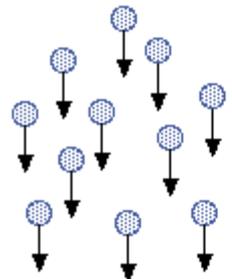


^{10}B

NEUTRON (0.025 eV)

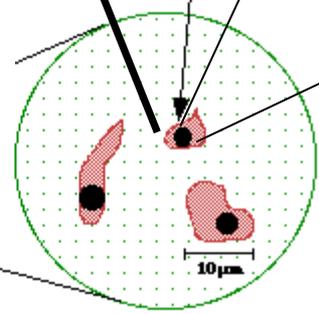
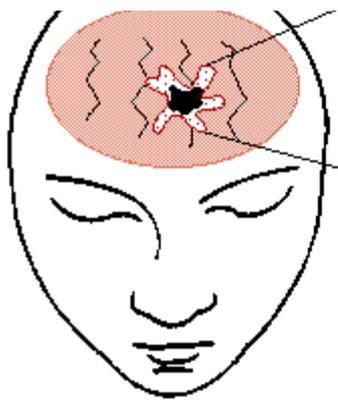


Epithermal neutron beam

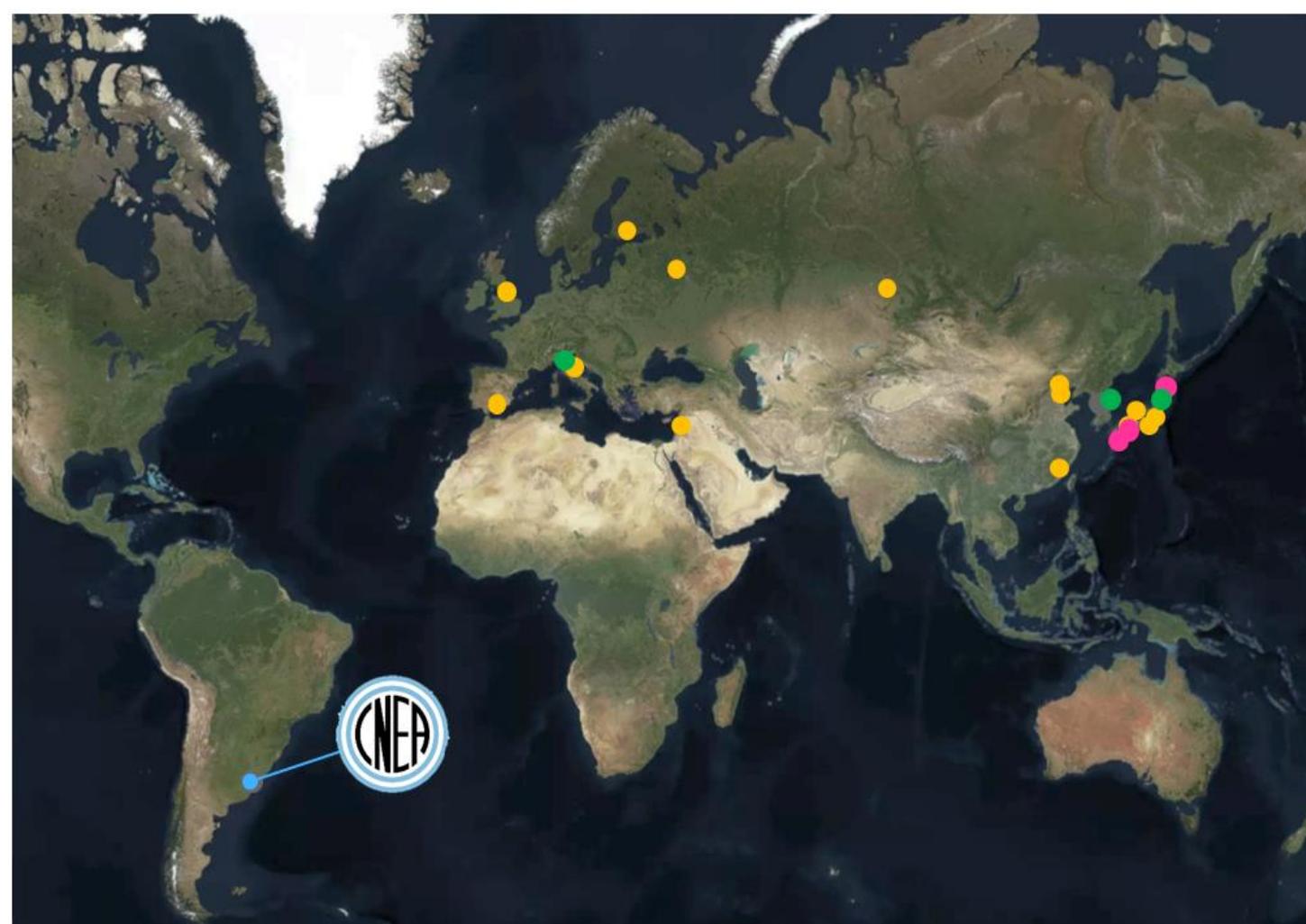


$^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ reaction in tumor cell

Thermal neutrons

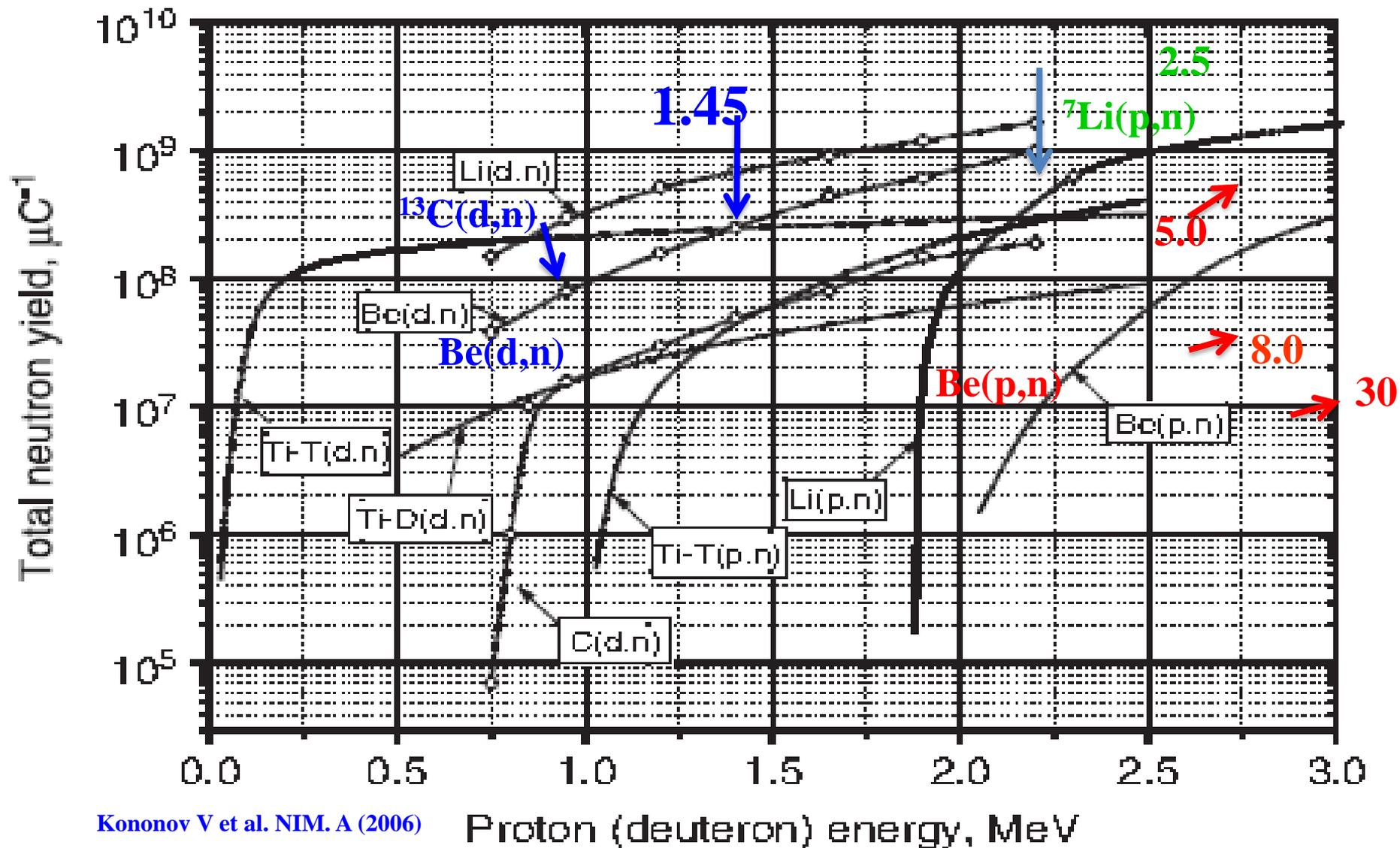


Proyectos AB-BNCT en el mundo <https://isnct.net/>: 26 proyectos, 15 clínicos, 11 de investigación.



- Asia: 18
 - Japan x 8
 - China x 5
 - Korea x 2
 - Taiwan
 - Israel
 - Russia
- Europa: 7
 - Italy x 3 **CNAO**
 - Finland
 - Russia
 - UK
 - Spain
- Americas: 1
 - Argentina

Reacciones productoras de neutrones: exotérmicas (d,n) & endotérmicas (p,n)

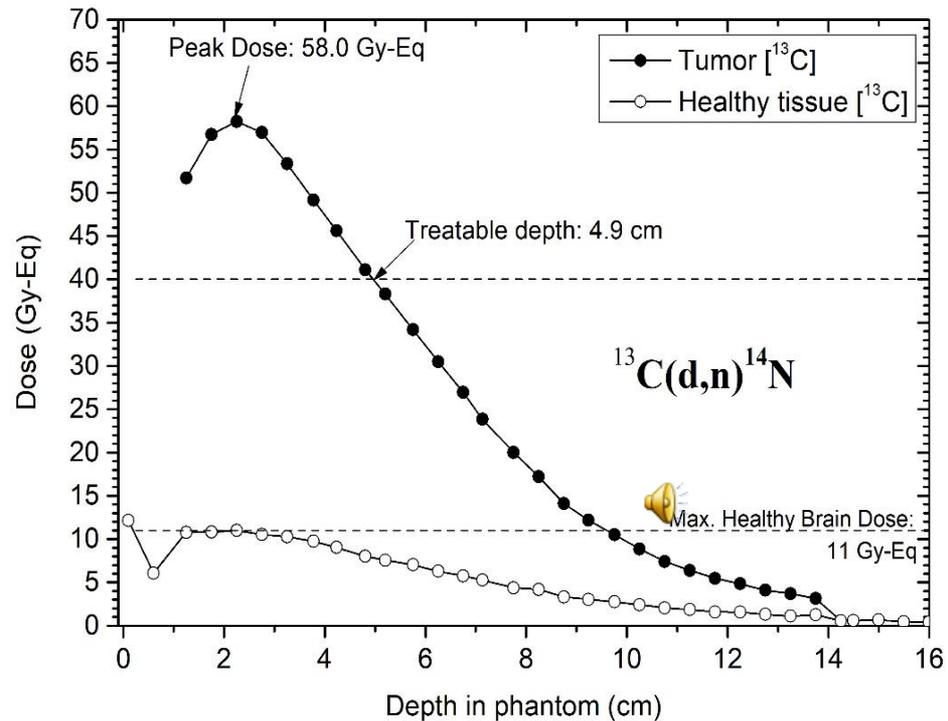
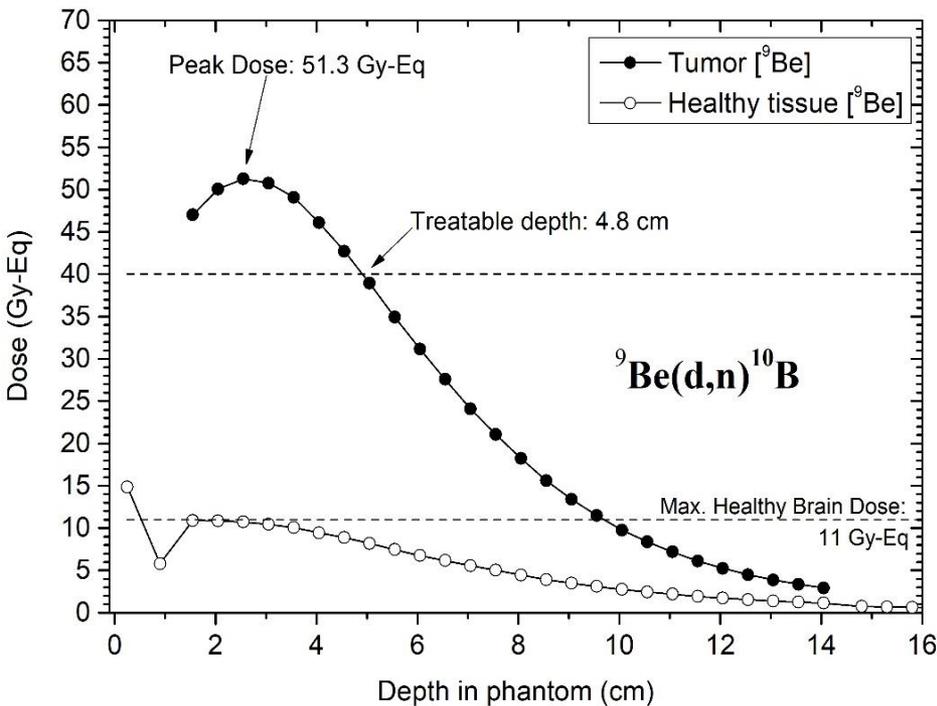


Configuraciones óptimas: $^{13}\text{C}(\text{d},\text{n})^{14}\text{N}$ & $^9\text{Be}(\text{d},\text{n})^{10}\text{B}$ (ver Phys. Med. 30(2014)133 & 33(2017)106 para detalles)

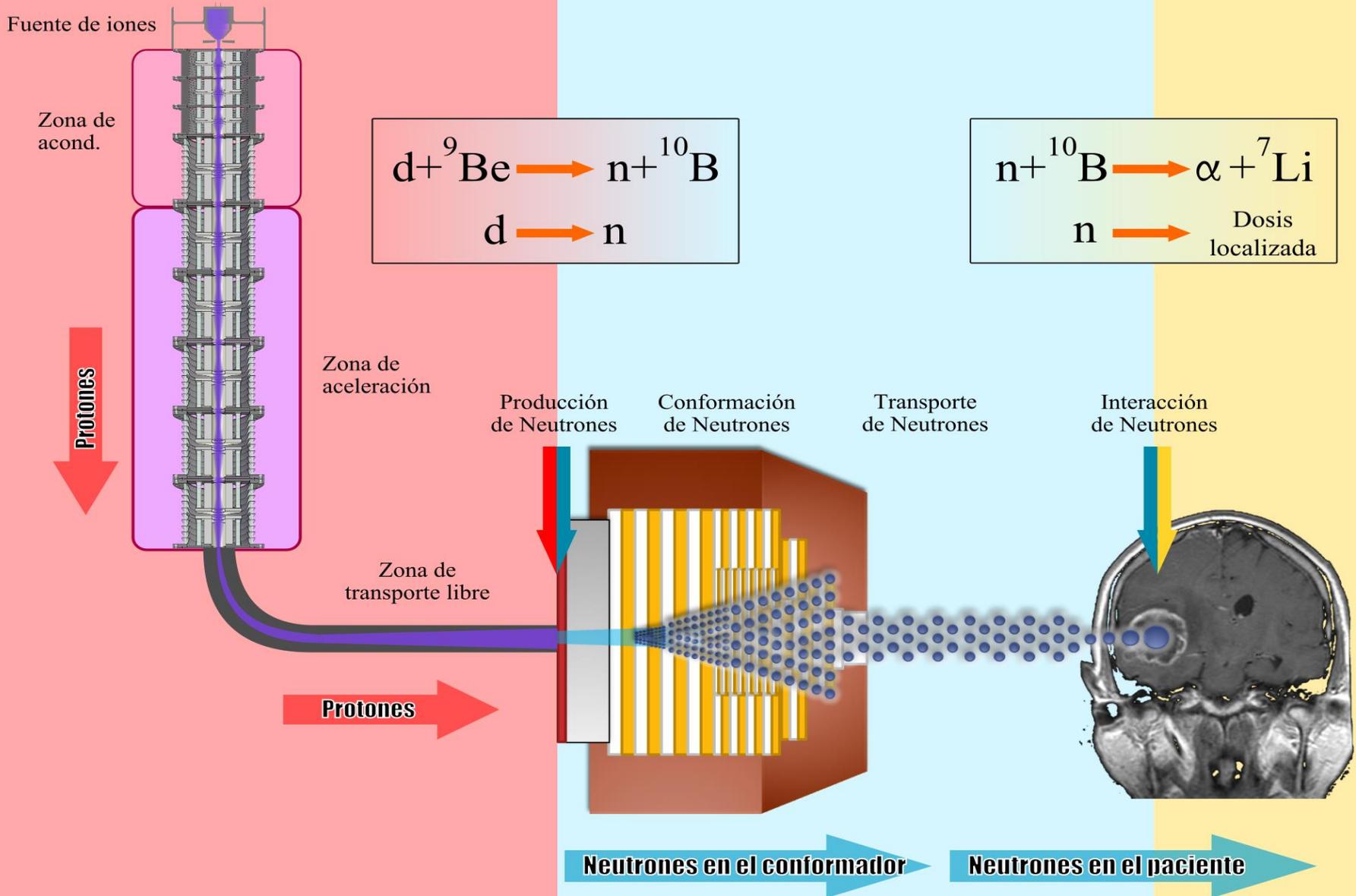
Reaction	Treatment Time	Maximum dose [Gy-Eq]			Treatable depth [cm]
		Tumor	Skin	Healthy brain	
$^{13}\text{C}(\text{d},\text{n})^{14}\text{N}$	1 h*	58.0	12.0	11.0	4.90
$^9\text{Be}(\text{d},\text{n})^{10}\text{B}$	1 h*	51.3	15.0	10.9	4.82

* Deuteron beam current: 30mA. BSA made of AlF_3 . 52 ppm of ^{10}B . T/N=3.5. No activation.

✓ Dose profiles:



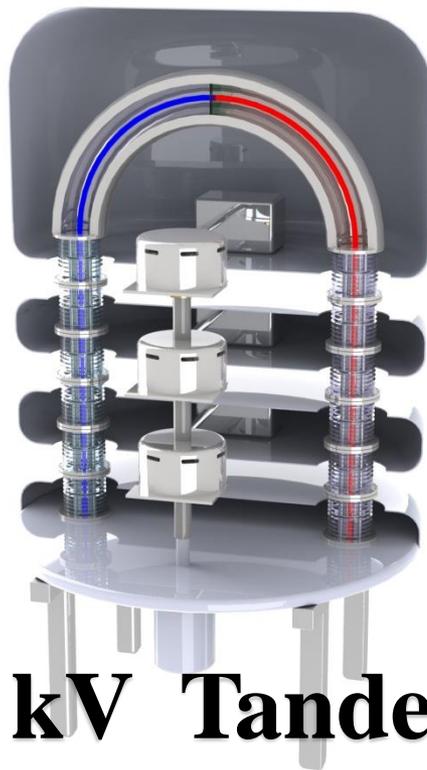
Esquema de la instalación



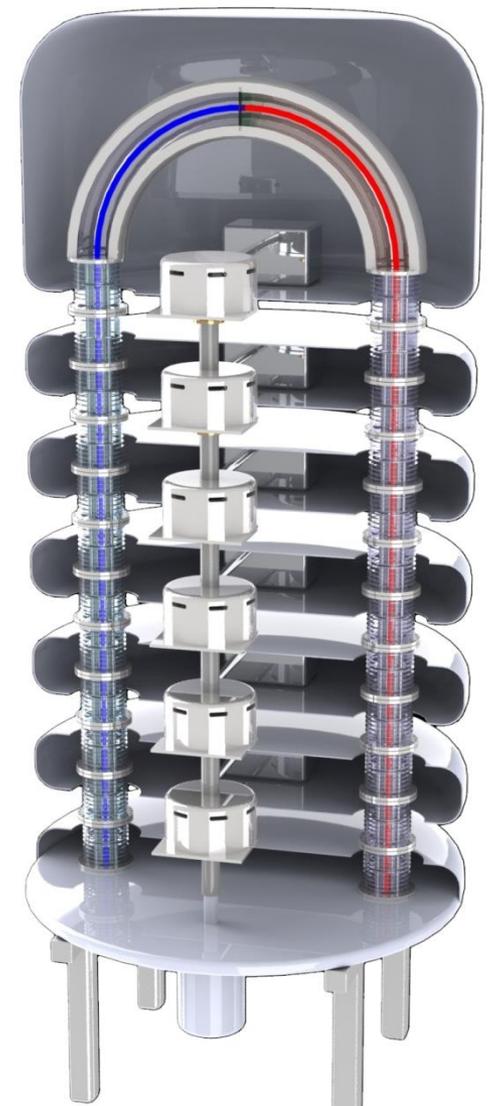
Diferentes aceleradores en desarrollo



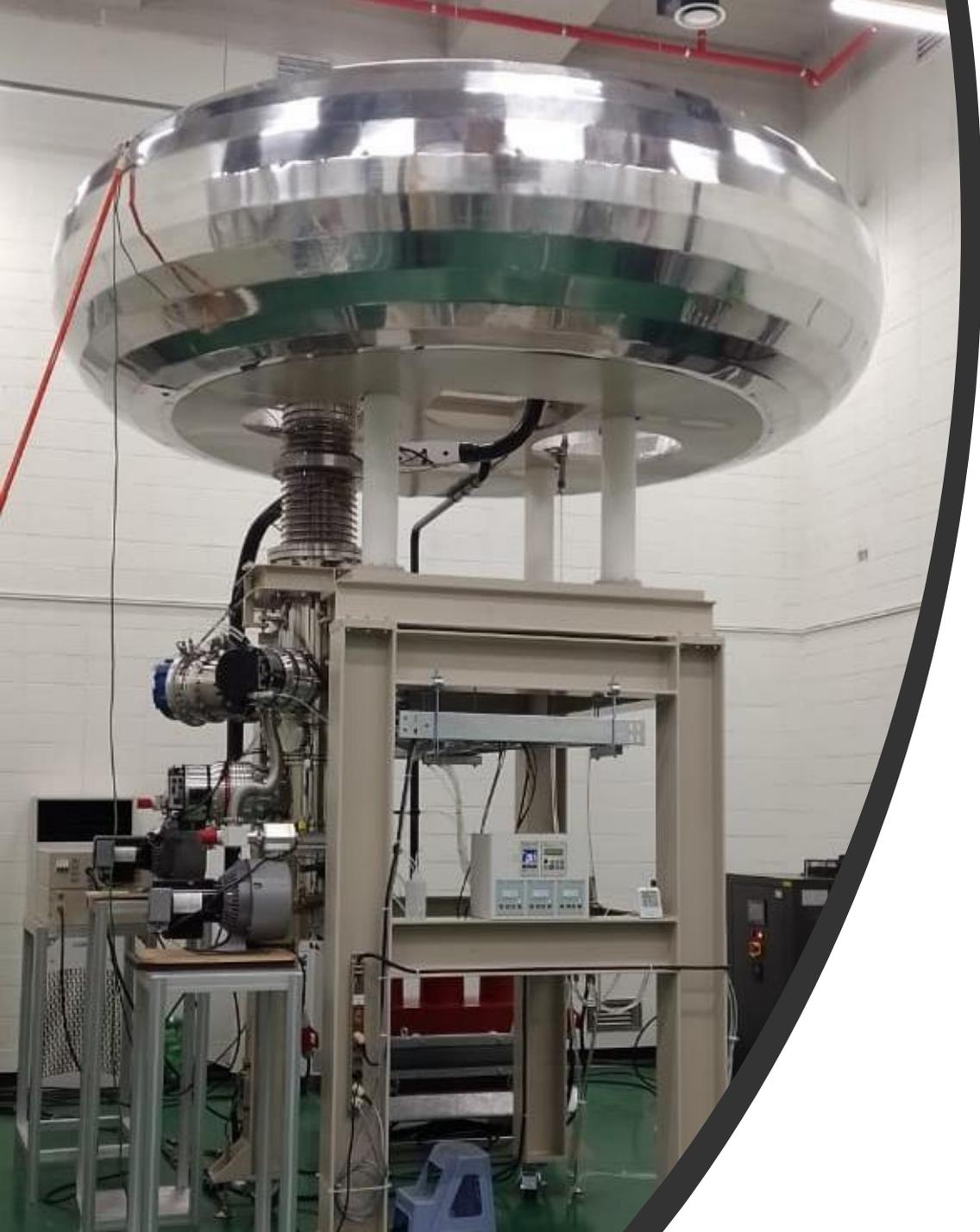
**240 kV
Accelerator**



**720 kV Tandem
o single-ended**



**1.44 MV Tandem
Accelerator**

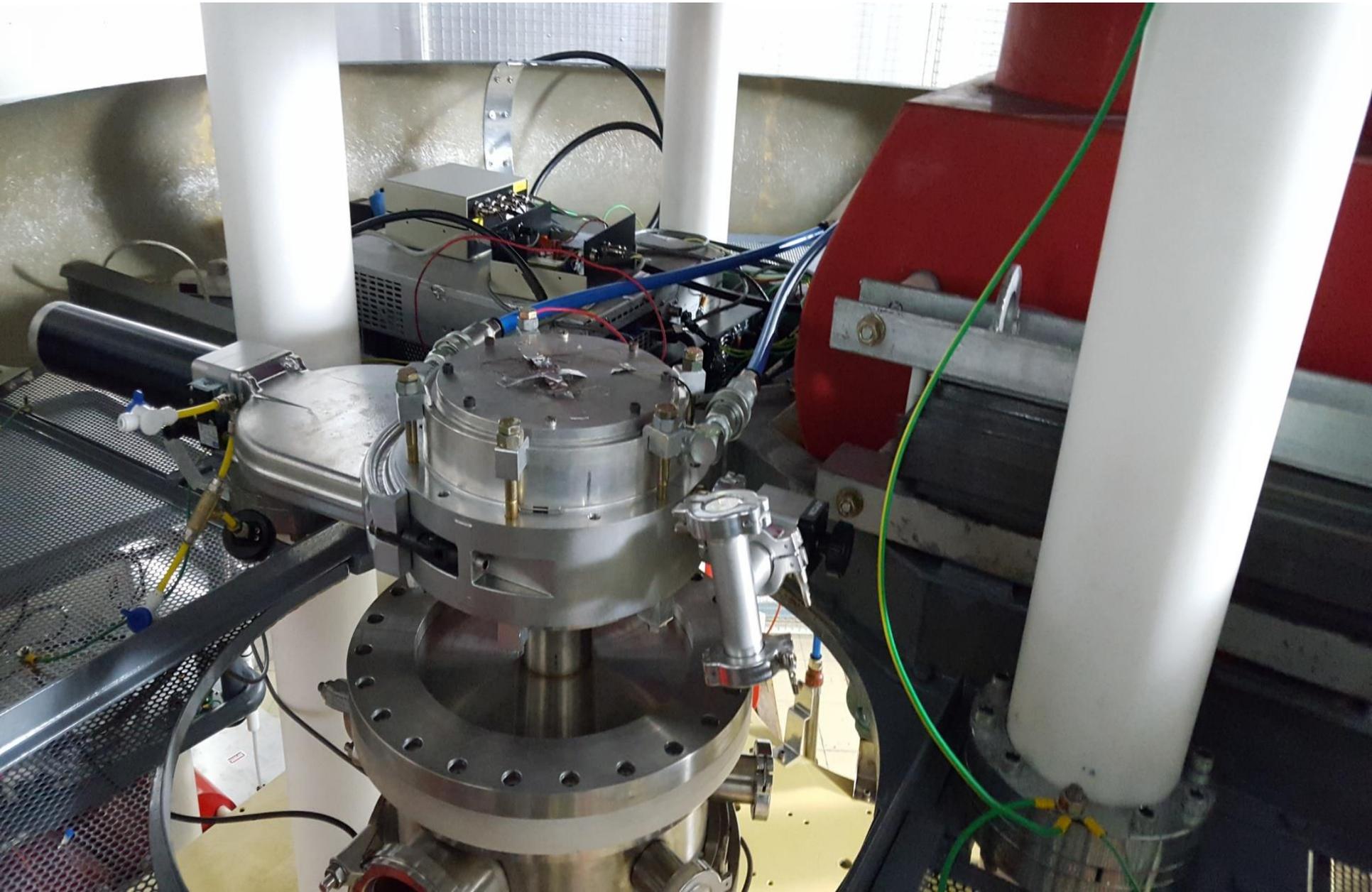


**Acelerador
vendido,
instalado y
operativo en
Corea.**

Máquina de 0.72 MV lista



Blanco de alta potencia refrigerado.



Laboratorio de desarrollo de aceleradores y futuro centro BNCT (en construcción).



Resumen/conclusiones

- Programa que apunta al **Desarrollo de Tecnología de Aceleradores** en nuestro país. Tecnología que es complementaria a la de reactores.
- **Cubrir necesidades en áreas médicas** (BNCT, radioisótopos) y **nucleares/industriales** (daño por radiación, detección de materiales nucleares, prospección petrolífera, digestión de actínidos en un futuro, etc.).
- **Sustitución de importaciones.**
- **Exportación de tecnología** (alto valor agregado) y generación de empleo de calidad.

Gracias por la atención!