



**UNSAM**  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE  
SAN MARTÍN

ESCUELA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

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

**M. Baldo<sup>1</sup>, M.E. Capoulat<sup>1-3</sup>, D. E. Cartelli<sup>1-3</sup>, J.C. Suárez Sandín<sup>1</sup>,  
M. Igarzabal<sup>1</sup>, M.F. del Grosso<sup>1,3</sup>, A.A. Valda<sup>1,2</sup>, M. C. Gun<sup>1</sup>, D.M.  
Minsky<sup>1-3</sup>, G. Conti<sup>1</sup>, J. Erhardt<sup>1</sup>, H.R. Somacal<sup>1,3</sup>, A. Bertolo<sup>1</sup>, P.  
Gaviola<sup>1</sup>, S. Incicco<sup>1</sup>, F. Sala<sup>1</sup>, A.J. Kreiner<sup>1-4</sup>.**

**<sup>1</sup>Subgerencia de Tecnología y Aplicaciones de Aceleradores, GIyA, GAIyANN, CNEA. <sup>2</sup>Escuela de Ciencia y Tecnología, UNSAM. <sup>3</sup>CONICET. <sup>4</sup>Secretario 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  $\gamma$ '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

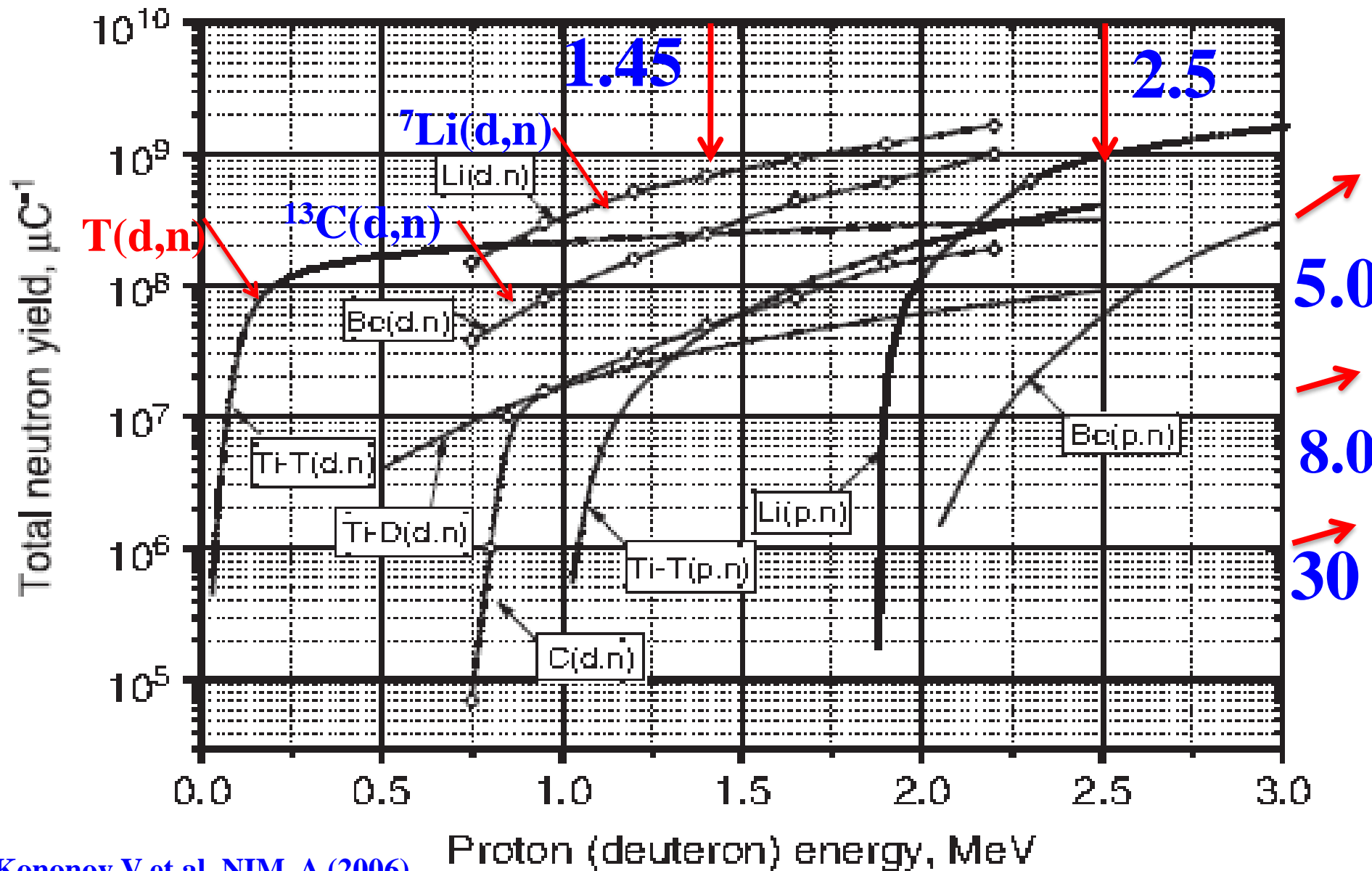
1. Reactores Nucleares (**fisión nuclear inducida por neutrones**).
2. Aceleradores (**reacciones nucleares inducidas por partículas cargadas, en particular productoras de neutrones**).

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

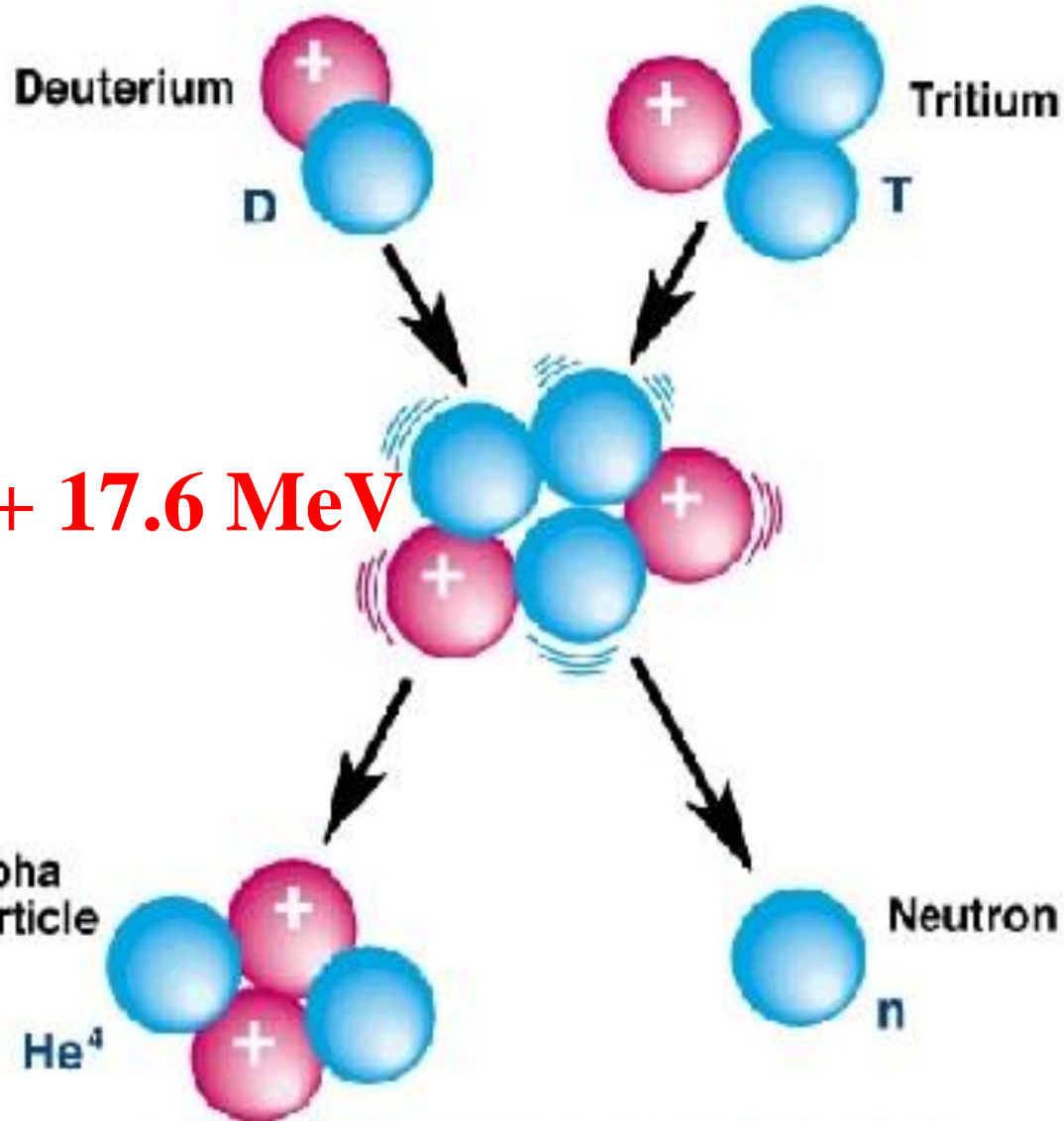


# Reacciones y rendimientos

- **Ti-T(d,n)<sup>4</sup>He @ 250 keV (30 mA) → 6x10<sup>12</sup> n/s**  
**E<sub>n</sub> = 14 MeV (T<sub>fusión,Ti</sub>=1700 °C)**
- **<sup>7</sup>Li(d,n)<sup>8</sup>Be @ 1.5 MeV (30 mA) → 3x10<sup>13</sup> n/s**  
**E<sub>n</sub> = 13-16 MeV (T<sub>fusión</sub>= 180 °C)**
- **<sup>9</sup>Be(d,n)<sup>10</sup>B @ 1.5 MeV (30 mA) → 9x10<sup>12</sup> n/s**  
**E<sub>n</sub> = 15 keV-5.8 MeV (70% ≤ 1 MeV) (T<sub>fus</sub>= 1300 °C)**

# Reacción de fusión

## Deuterium-Tritium Fusion Reaction





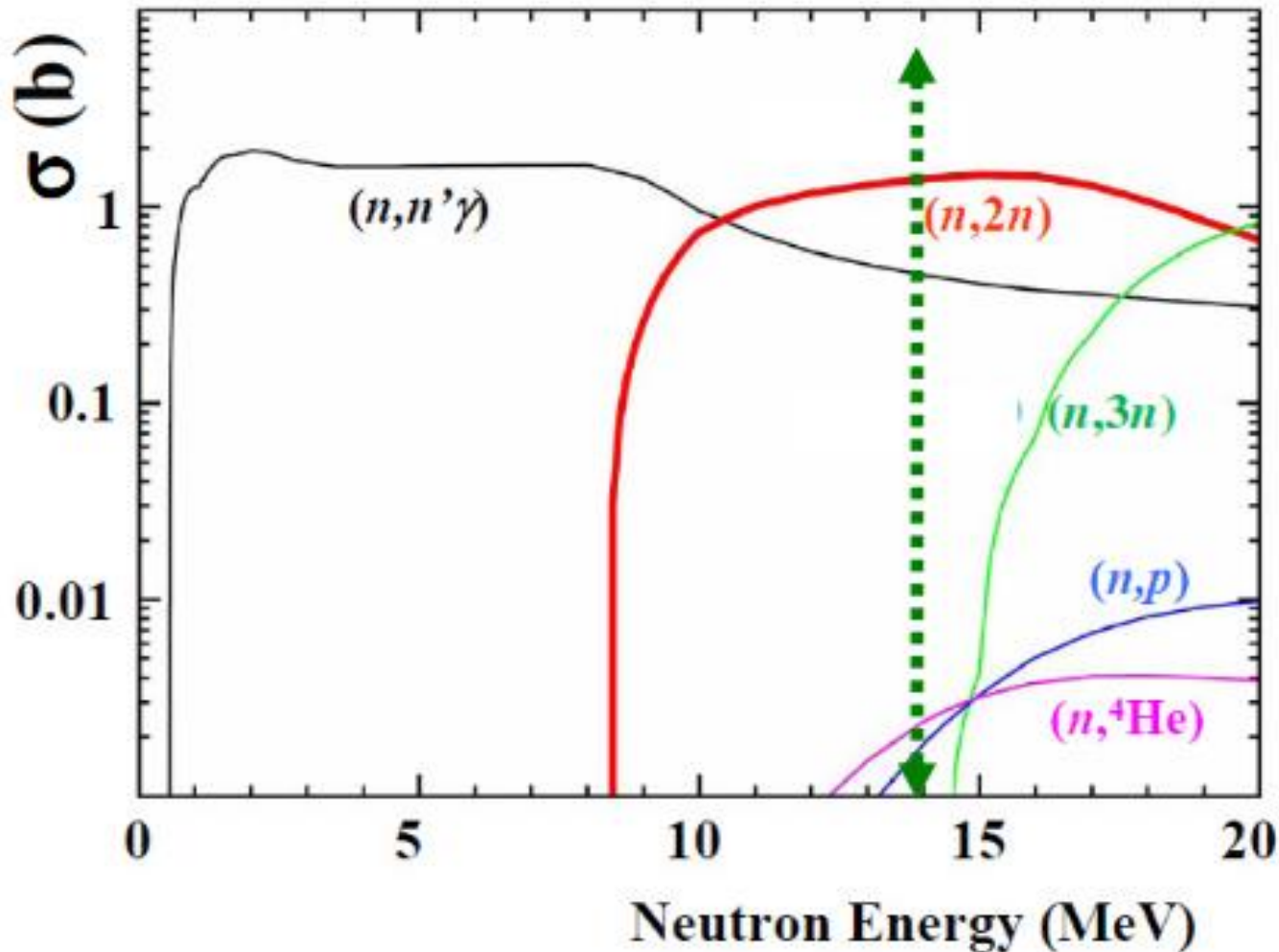
# Producción de radioisótopos: caso de $^{99m}\text{Tc}$

- **Ti-T(d,n)  $^4\text{He}$  [d+T $\rightarrow$ n+  $^4\text{He}$ ]**  
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  $^{99m}\text{Tc}$  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

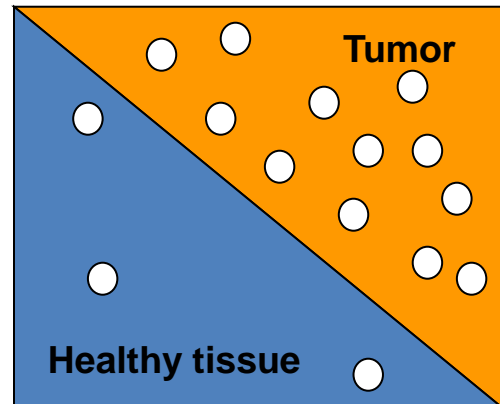
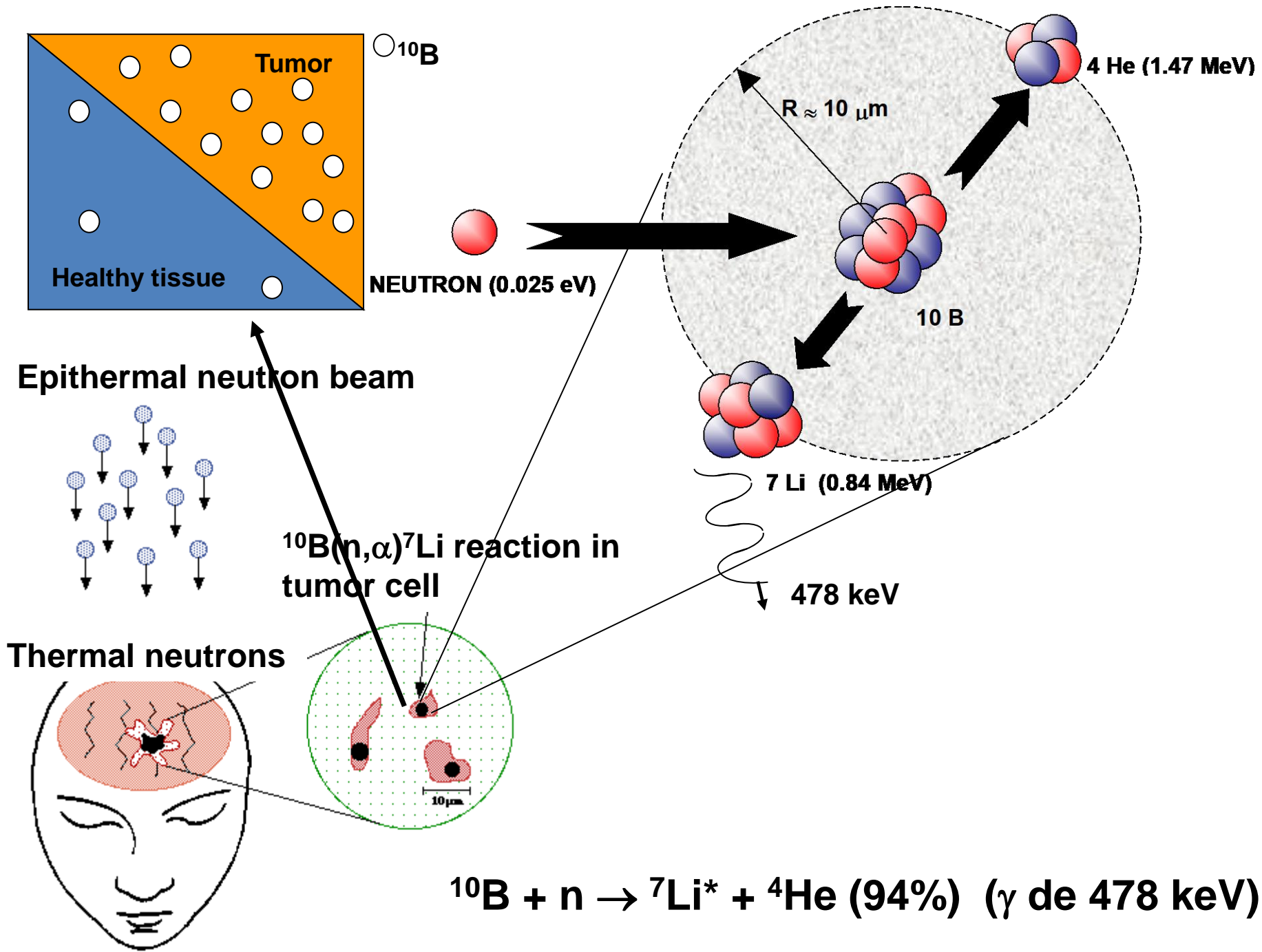


# Terapia por Captura Neutrónica en Boro (BNCT)

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.

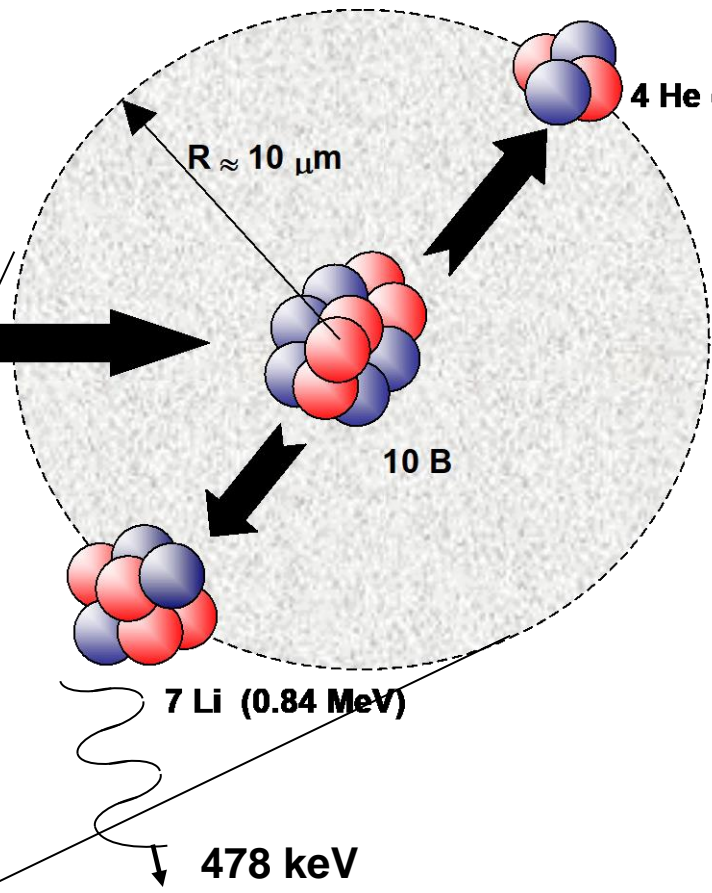
1. **Carga selectiva** del tumor con un **capturador neutrónico** (e.g.,  $^{10}\text{B}$ ). Droga portadora BPA.
2. **Irradiación con neutrones.**  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  (high LET/RBE).

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

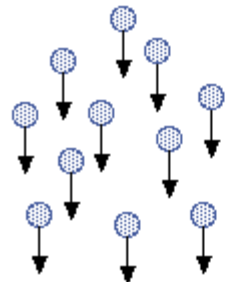


$^{10}\text{B}$

NEUTRON (0.025 eV)

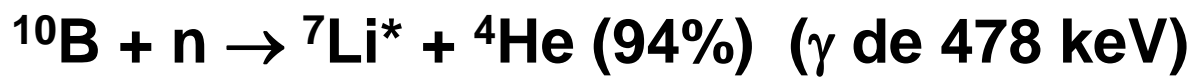
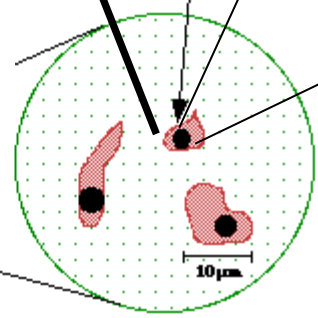
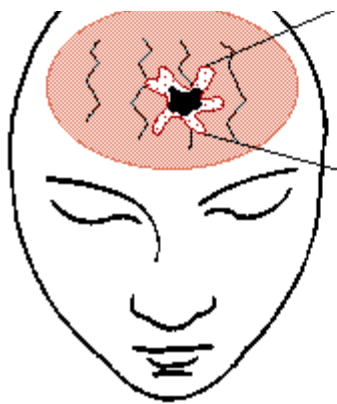


Epithermal neutron beam

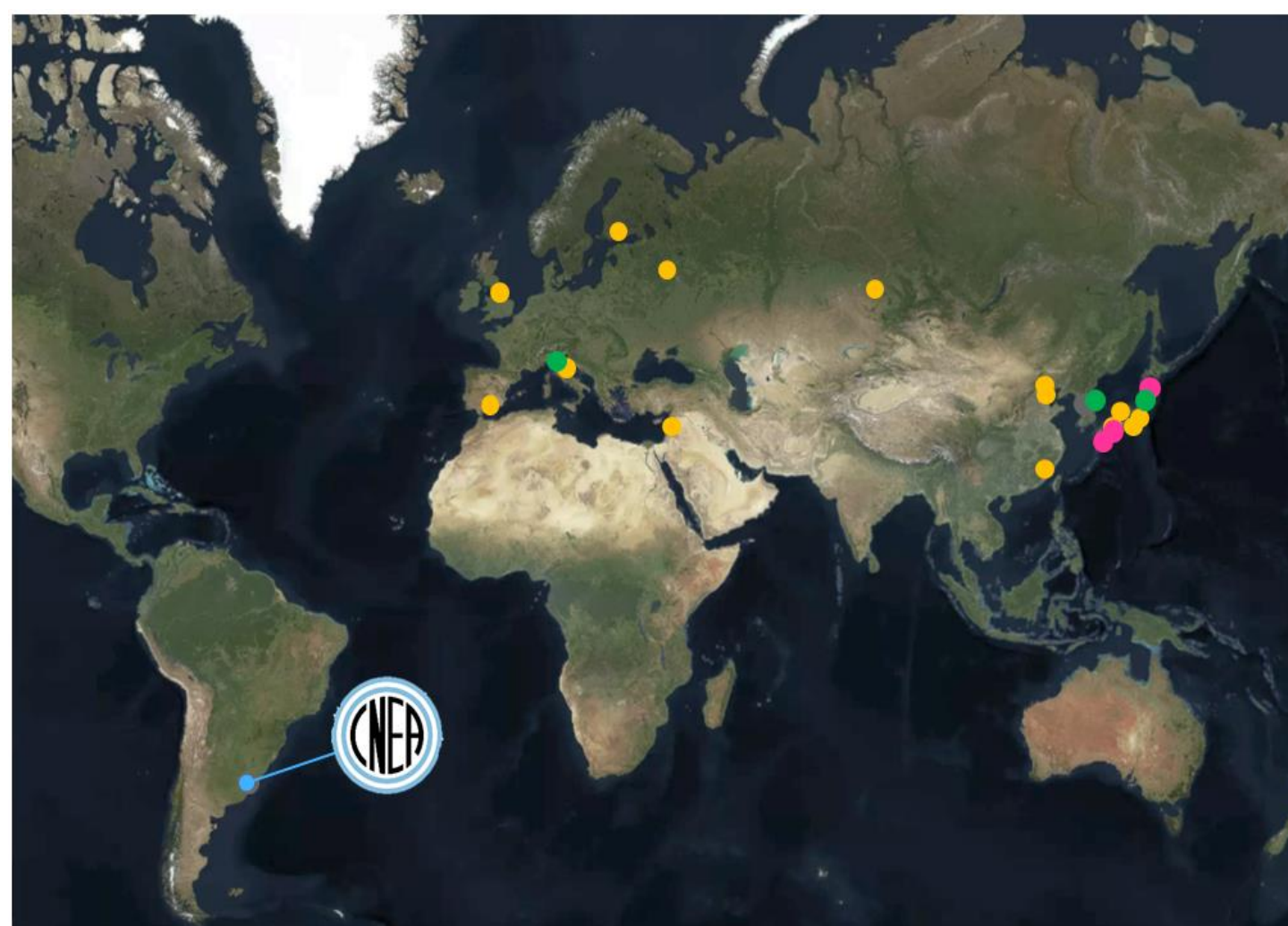


$^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  reaction in tumor cell

Thermal neutrons

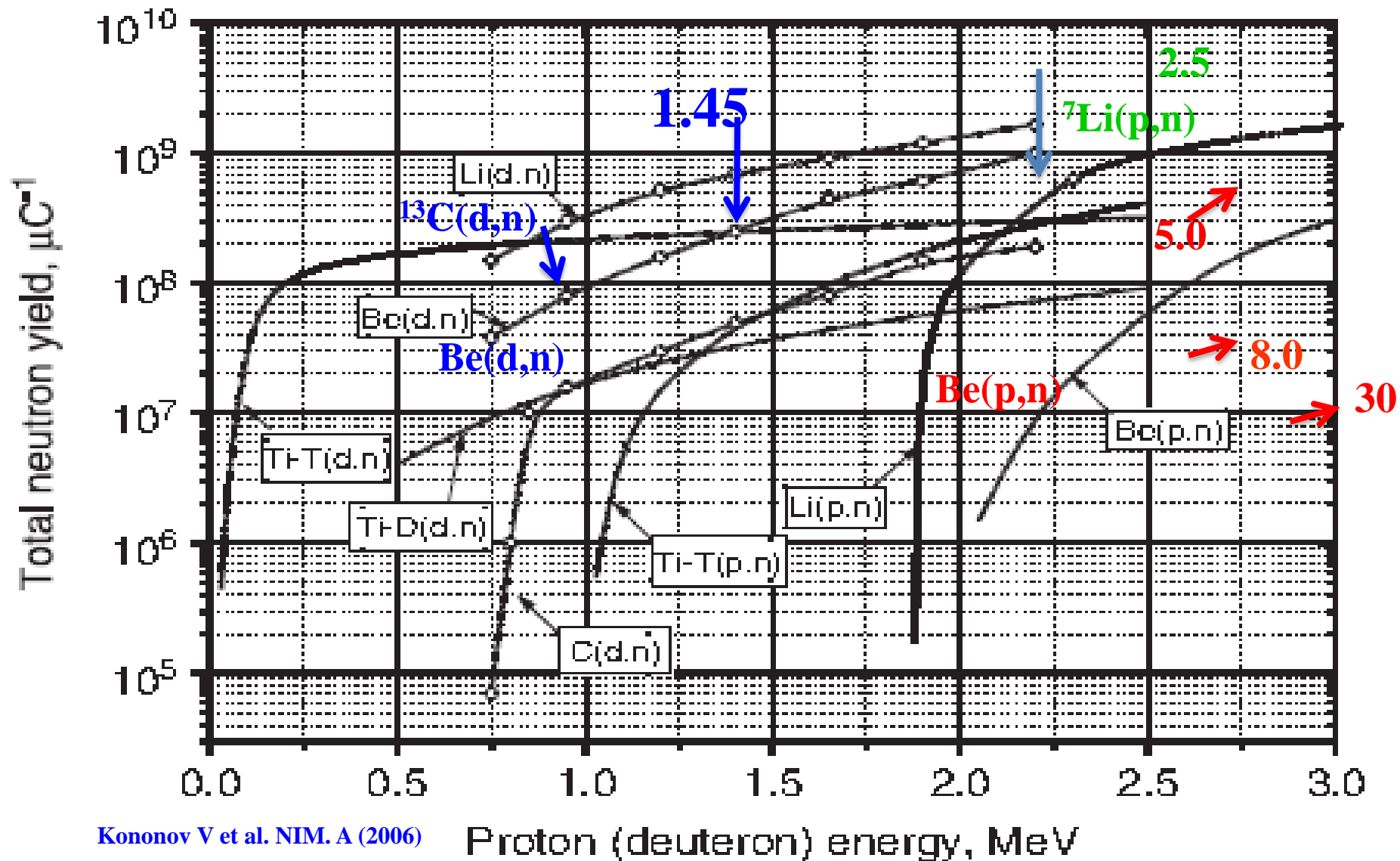


# Proyectos AB-BNCT en el mundo <https://isnct.net/>: 26 proyectos, 15 clínicos, 11 de investigación.



- 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)

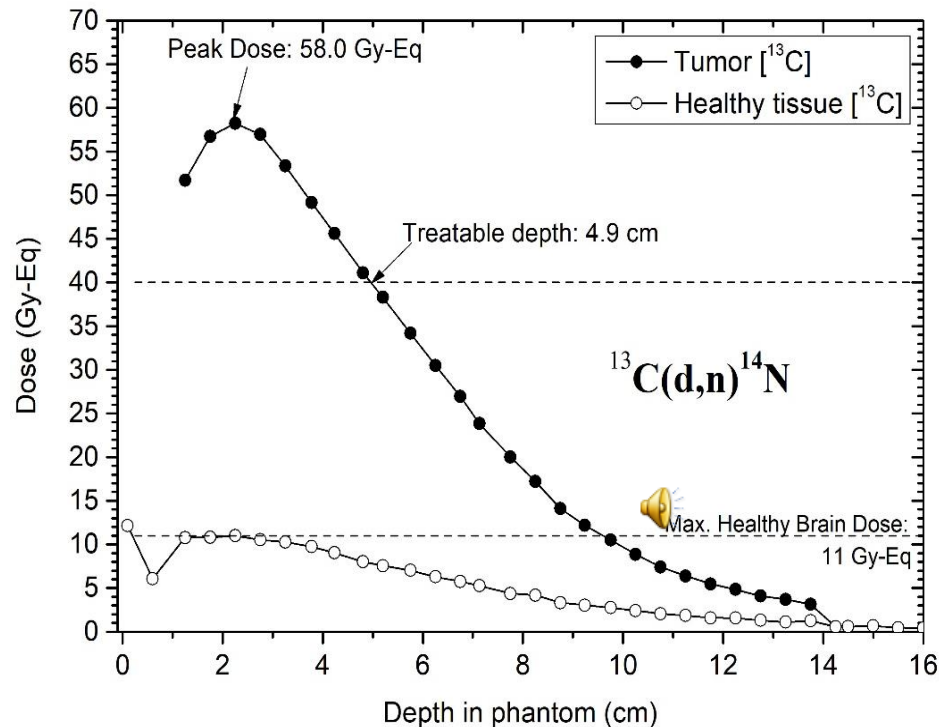
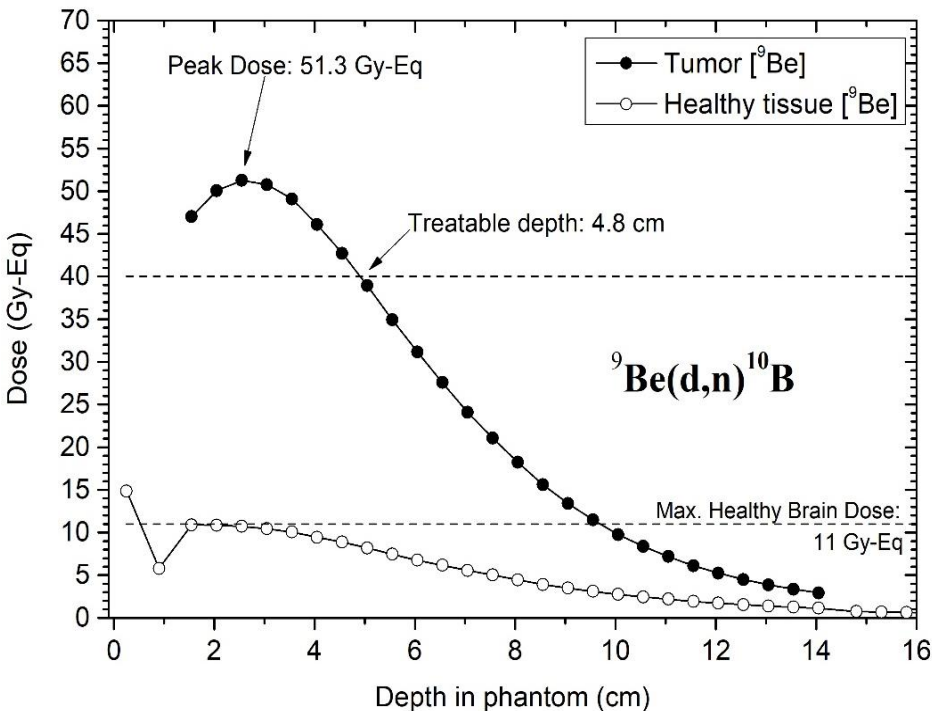


# Configuraciones óptimas: $^{13}\text{C}(\text{d},\text{n})^{14}\text{N}$ & $^9\text{Be}(\text{d},\text{n})^{10}\text{B}$ (ver Phys. Med. 30(2014)133 & 33(2017)106 para detalles)

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

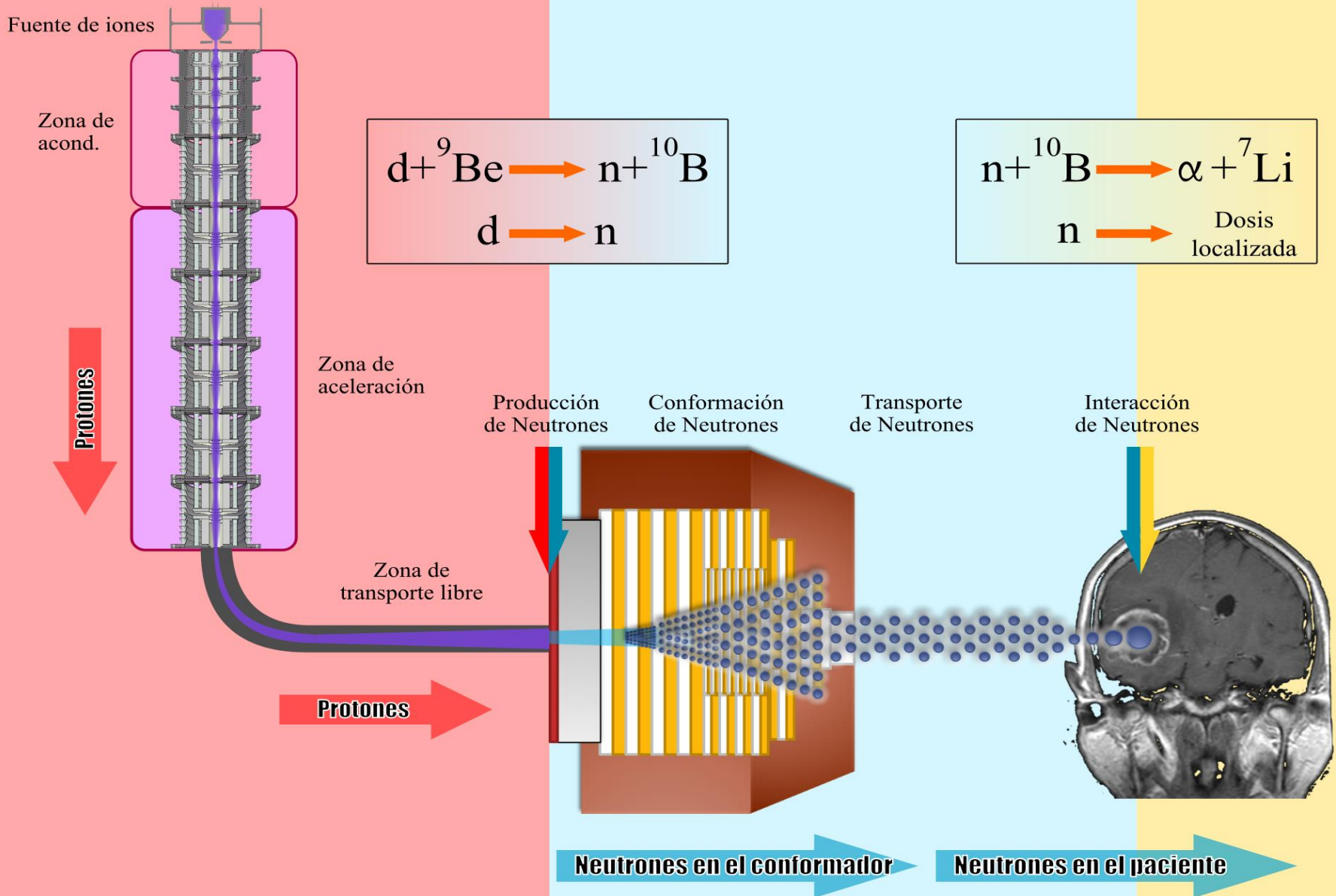
\* Deuteron beam current: 30mA. BSA made of  $\text{AlF}_3$ . 52 ppm of  $^{10}\text{B}$ . T/N=3.5. No activation.

## ✓ Dose profiles:





# Esquema de la instalación

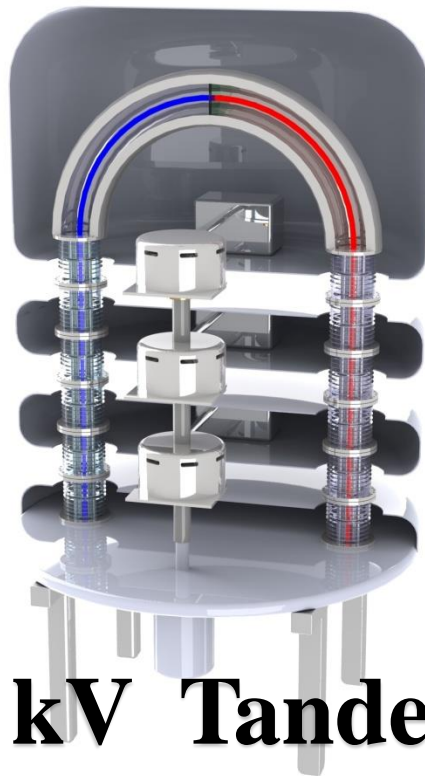




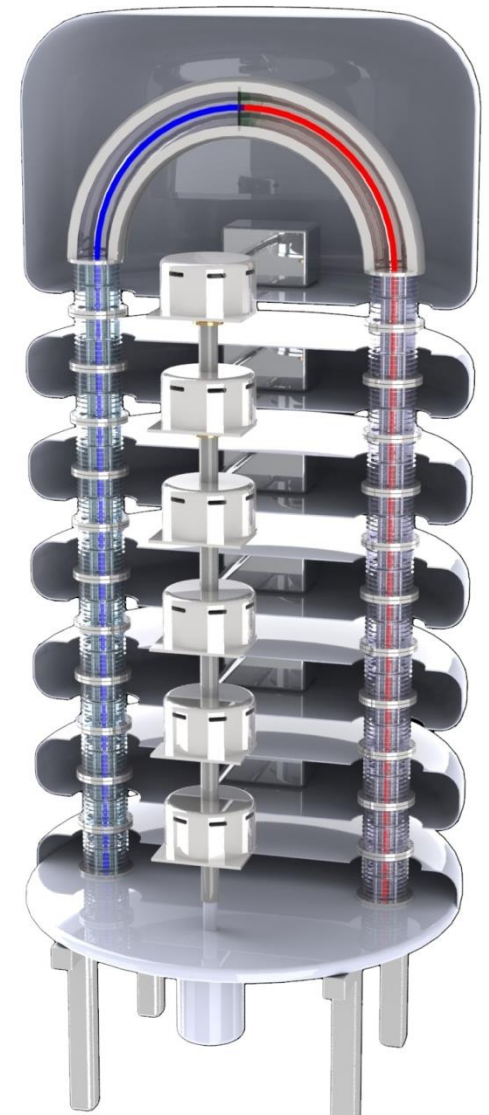
# Diferentes aceleradores en desarrollo



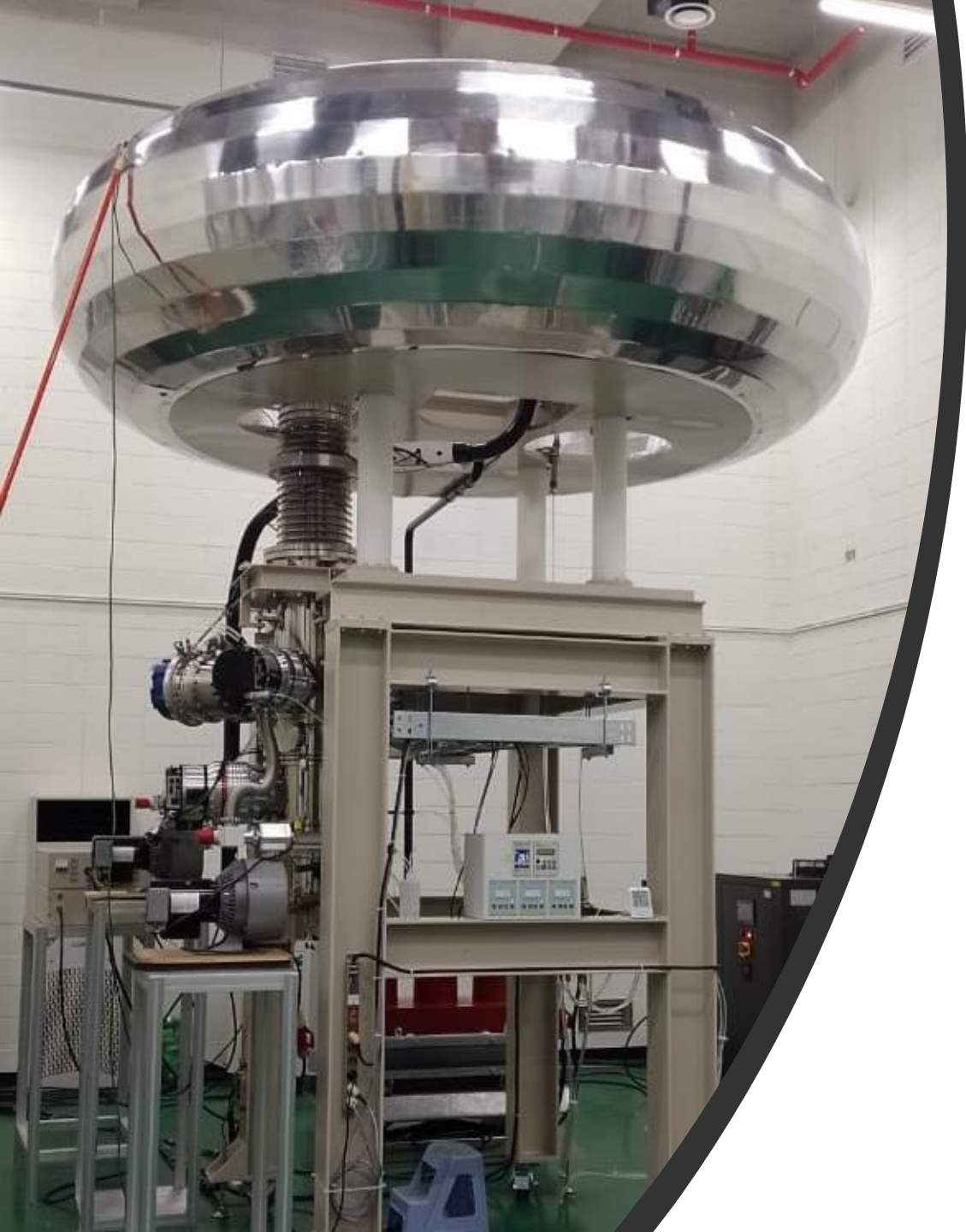
**240 kV  
Accelerator**



**720 kV Tandem  
o single-ended**



**1.44 MV Tandem  
Accelerator**



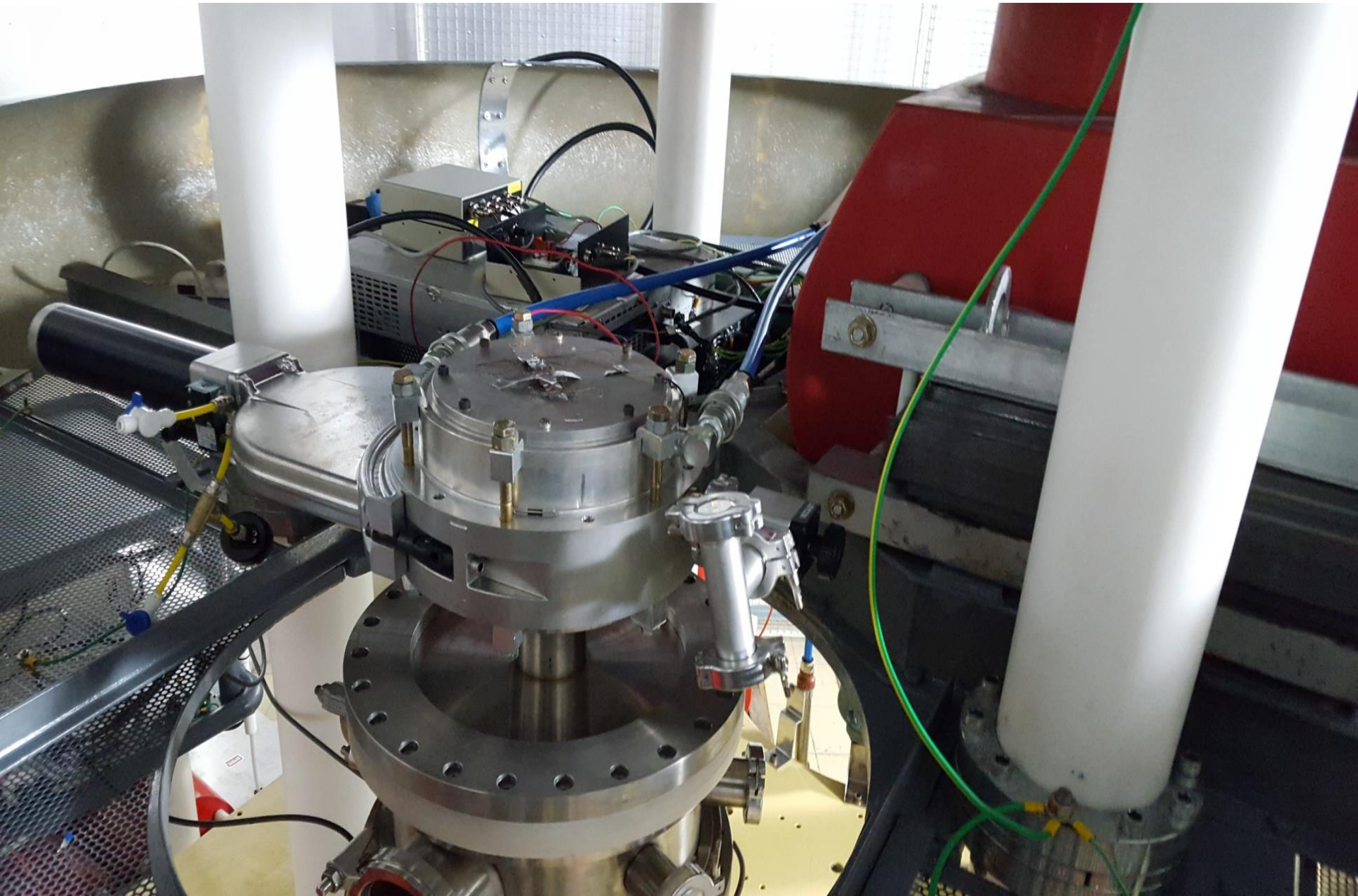
**Acelerador  
vendido,  
instalado y  
operativo en  
Corea.**

# 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!**