

9a. Edición de las Jornadas del CUIA en Argentina
Terapia por Captura Neutrónica en Boro
Neutrones para la Salud



UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN



UNIVERSIDAD
FAVALORO



FUSIÓN NUCLEAR PARA BNCT
FUSIÓN NUCLEAR PARA LA SALUD

Manuel Sztejnberg

COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
UNIVERSIDAD FAVALORO

20 de Abril de 2017 – Buenos Aires, Argentina

9a. Edición de las Jornadas del CUIA en Argentina
***Terapia por Captura Neutrónica en Boro
Neutrones para la Salud***

***FUSIÓN NUCLEAR PARA BNCT
FUSIÓN NUCLEAR PARA LA SALUD***

Manuel Sztejnberg
manuelsingc@cae.cnea.gov.ar

***INGENIERÍA EN FÍSICA MÉDICA
INGENIERÍA NUCLEAR***

*División Instrumentación y Dosimetría, SubGlyC, GAEN, Comisión Nacional de Energía Atómica
Departamento de Física y Química, FICEN, Universidad Favaloro
Departamento de Física Aplicada, FICEN, Universidad Favaloro*

20 de Abril de 2017 – Buenos Aires, Argentina

Disponibilidad de Instalaciones de Irradiación

Neutrones en cada centro de atención médica

- *¡ tratamientos disponibles en una gran cantidad de lugares !*
- *una herramienta en la mano de los médicos !*

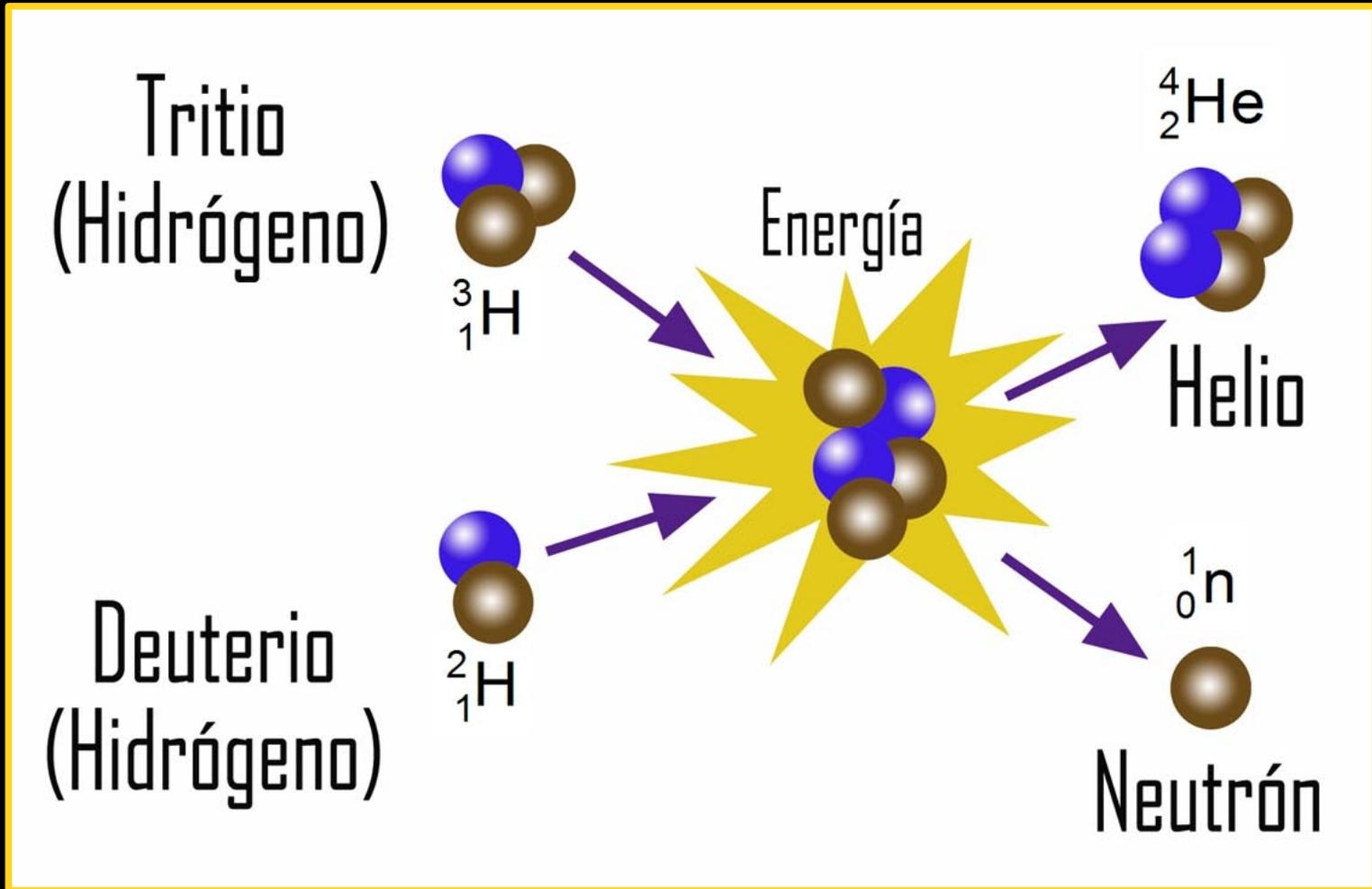
Neutrones en los centros de I+D

- *Favorece las actividades al disminuir los requerimientos logísticos*
- *Instalaciones de irradiación más accesibles atraerían grupos por fuera de BNCT*

¿Dónde estamos?

- Los aceleradores son actualmente los principales candidatos a alcanzar los centros médicos ...
 - *no sería un hecho masivo debido a la complejidad, costo y baja versatilidad de las instalaciones.*
- Los reactores de fisión están hoy en día asociados a las actividades de muchos grupos de BNCT y han sido pieza fundamental de irradiaciones clínicas y preclínicas ...
 - *debido a consideraciones de seguridad sumadas a costos y complejidad no hay perspectivas que esta sea una herramienta que se vaya a desplegar en más laboratorios u hospitales áreas densamente pobladas.*

Pensando en otra modalidad ...
Fusión Nuclear



Reacciones nucleares de fusión

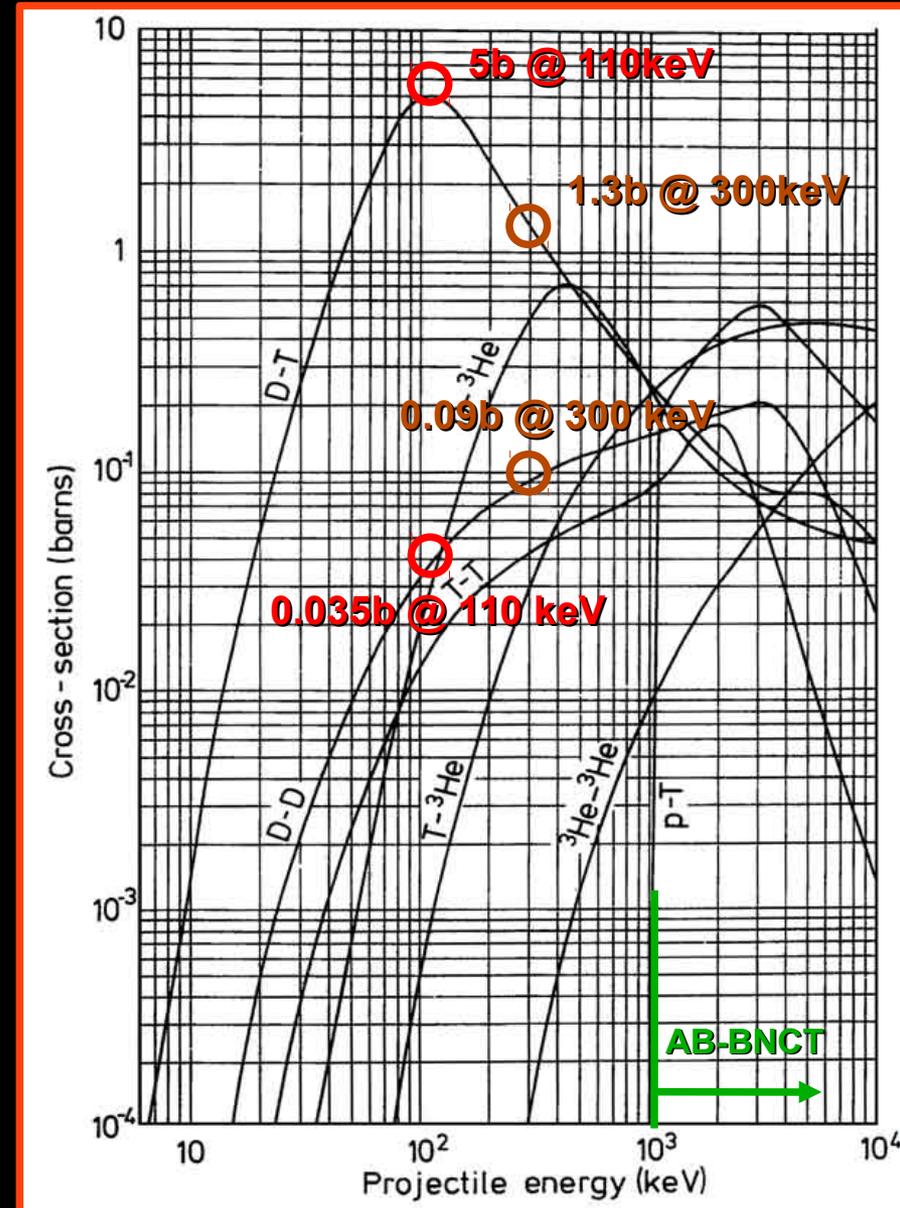
Reacción	Productos (K en MeV)	K_{tot} MeV	K_{tot}/A MeV	K_{tot}/B_C
d + t	${}^4\text{He}$ (3,52) + n (14,06)	17,58	3,52	39,6
d + d	t (1,01) + p (3,03)	4,04	1,01	8,49
d + d	${}^3\text{He}$ (0,82) + n (2,45)	3,27	0,82	6,87
d + ${}^3\text{He}$	${}^4\text{He}$ (3,67) + p (14,67)	18,34	3,67	20,7
t + t	${}^4\text{He}$ + 2 n	11,32	1,89	27,2
t + ${}^3\text{He}$	${}^4\text{He}$ + p + n	12,1	2,02	14,6
t + ${}^3\text{He}$	${}^4\text{He}$ (4.8) + d (9.5)	14,3	2,38	17,2
t + ${}^3\text{He}$	${}^5\text{He}$ (2.4) + p (11.9)	14,3	2,38	17,2
p + ${}^6\text{Li}$	${}^4\text{He}$ (1.7) + ${}^3\text{He}$ (2.3)	4,0	0,57	3,13
p + ${}^7\text{Li}$	2 ${}^4\text{He}$	22,4	2,8	18,1
d + ${}^6\text{Li}$	2 ${}^4\text{He}$	22,4	2,8	19,2
p + ${}^{11}\text{B}$	3 ${}^4\text{He}$	8,68	0,72	4,67
n + ${}^6\text{Li}$	${}^4\text{He}$ (2,1) + t (2,7)	4,8	0,69	—
*n + ${}^7\text{Li}$	${}^4\text{He}$ + t + n	-2,47	-0,31	—

BNCT basada en Fusión

→ Se pueden obtener neutrones provenientes de reacciones de fusión deuterón-deuterón, D-D, o deuterón-tritón, D-T, acelerando partículas a energías mucho menores que las necesarias para aceleradores típicos para BNCT.

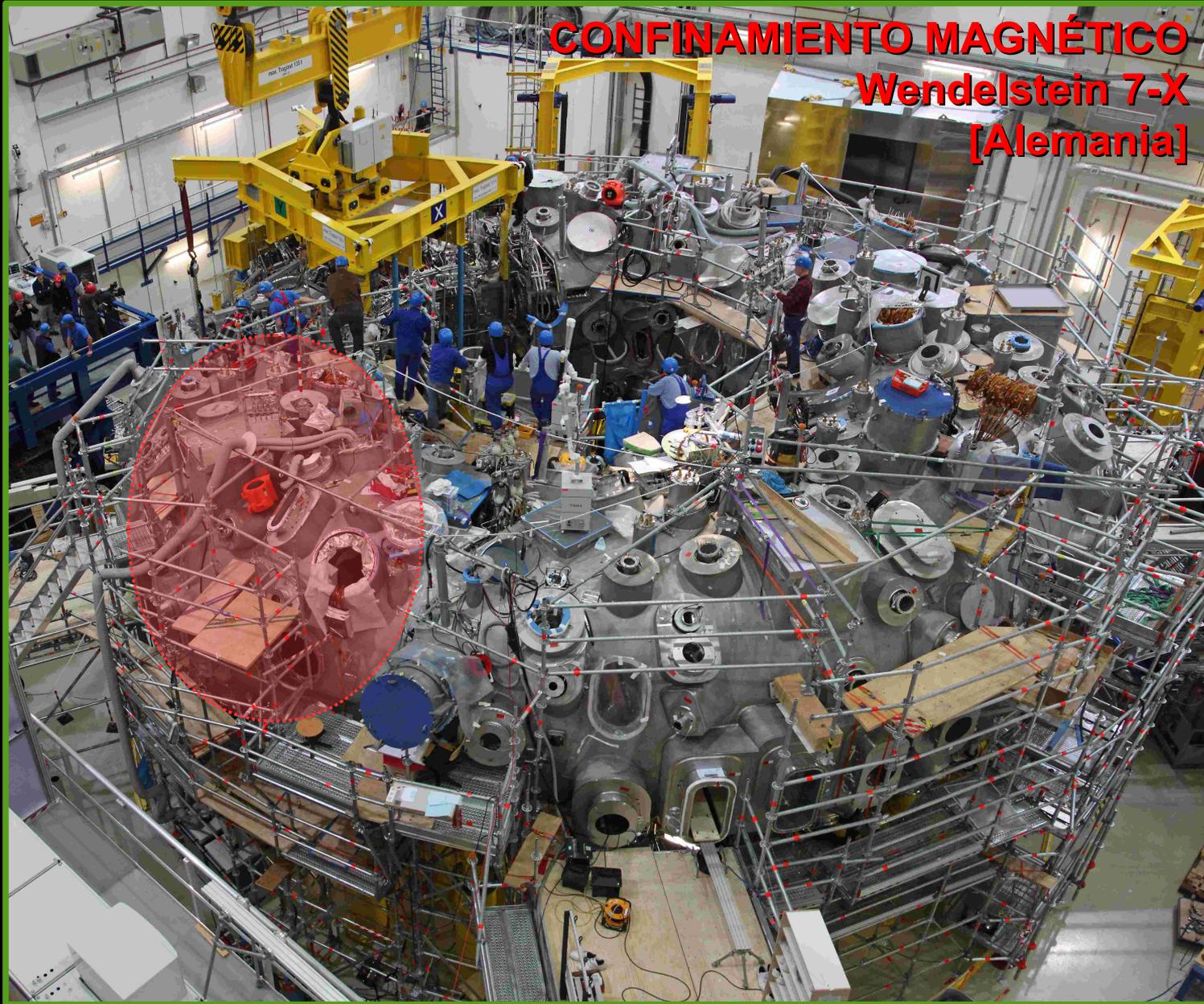
>>>> ¡¡¡ Se podrían construir generadores de neutrones más simples, compactos, versátiles y con mucho menor costo !!!

→ La reacción D-T es la que tiene mayor probabilidad de ocurrencia a bajas energías y produce neutrones muy energéticos que podrían ser problemáticos desde el punto de vista terapéutico.



Pero ... ¿ Qué tipo de Fusión ?

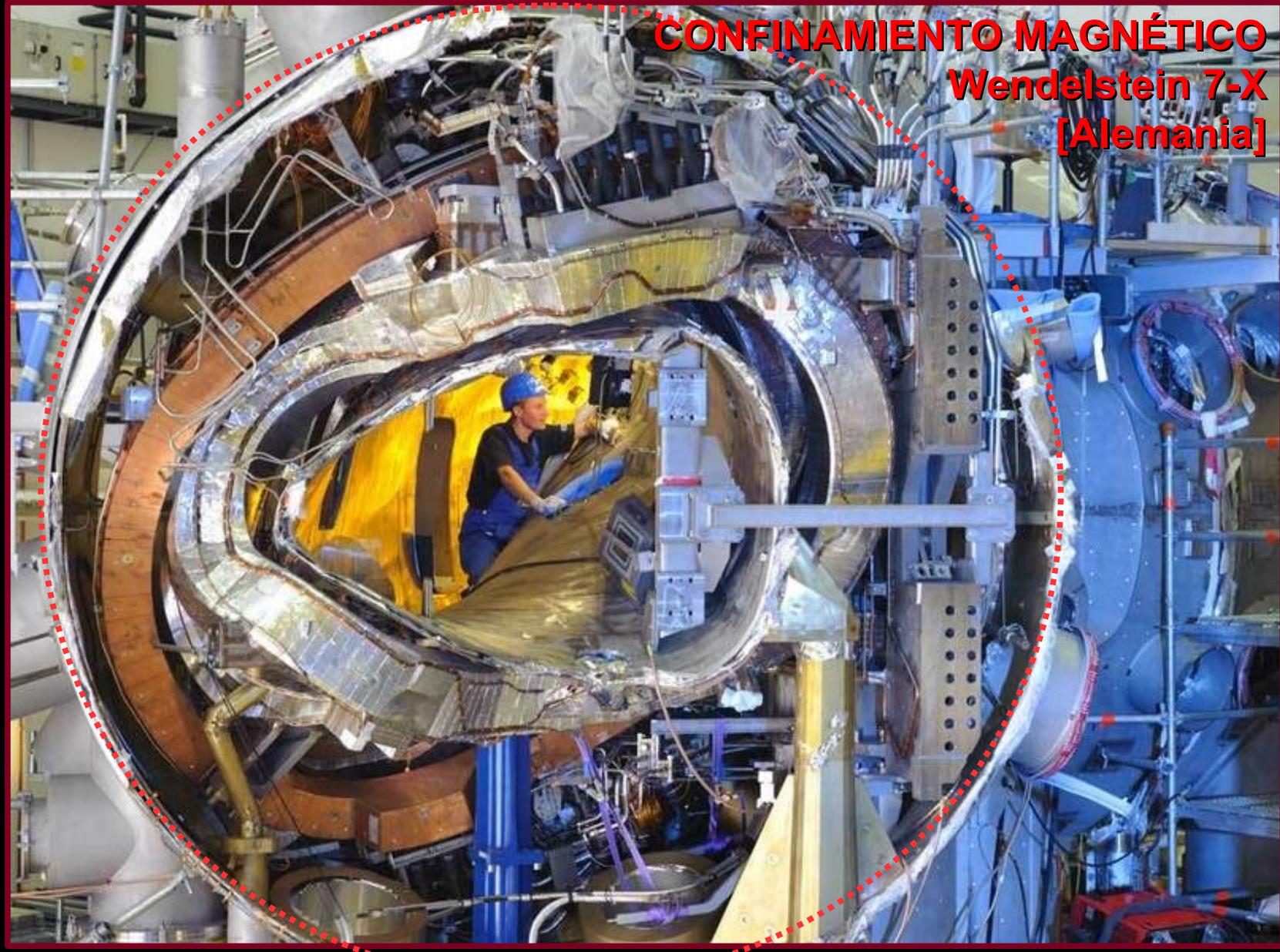
CONFINAMIENTO MAGNÉTICO
Wendelstein 7-X
[Alemania]



[By Max-Planck-Institut für
Plasmaphysik, Tino Schulz -
Public Relations Department,
Max-Planck-Institut, CC BY-SA
3.0, File:Wendelstein7-X
Torushall-2011.jpg - Wikimedia
Commons.]

Pero ... ¿ Qué tipo de Fusión ?

CONFINAMIENTO MAGNÉTICO
Wendelstein 7-X
[Alemania]



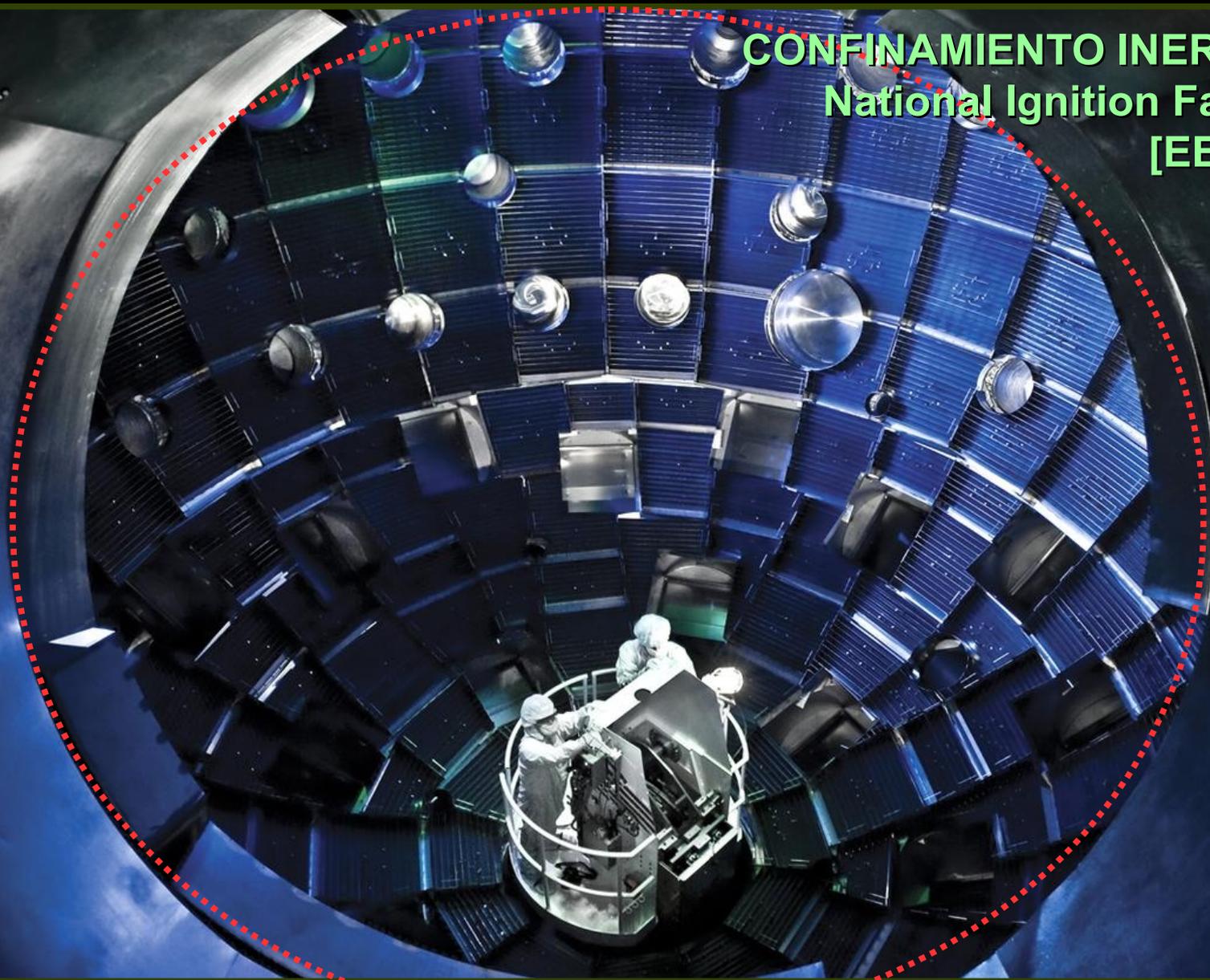
Pero ... ¿ Qué tipo de Fusión ?

CONFINAMIENTO INERCIAL **National Ignition Facility** **[EE.UU.]**



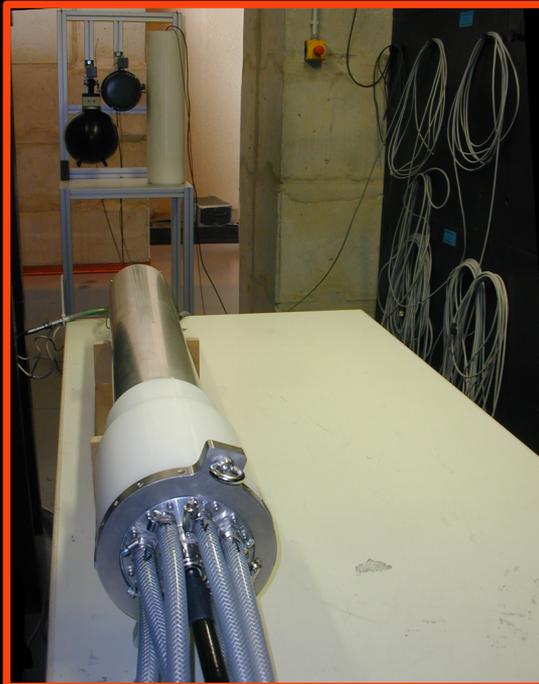
Pero ... ¿ Qué tipo de Fusión ?

CONFINAMIENTO INERCIAL
National Ignition Facility
[EE.UU.]



Pensemos en Fusión por Confinamiento Inercial Electrostático

- **Energías de los proyectiles de ~ 100 keV (plasma caliente)**
- **Tasas de producción de $\sim 10^8$ n/s para D-D y $\sim 10^{10}$ n/s para D-T**
- **Blanco gas-plasma (vs blancos sólidos)**
- **Tamaños característicos: ~ 1 m**



NSD-Gradel Neutron Generator
[NSD-Gradel-Fusion, Luxembourg, 2014.]



Generador de IECF, desarmado, diámetro ~ 60 cm
[NPRE, UIUC, USA, 2009.]

Pensemos en Fusión por Confinamiento Inercial Electrostático

12
WS-BNCT-NPS

20 / 04 / 2017



Generador de
IECF, desarmado,
diámetro ~60 cm
[NPRE, UIUC,
USA, 2009.]

Pensemos en Fusión por Confinamiento Inercial Electrostático

13
WS-BNCT-NPS

20 / 04 / 2017



NSD-Gradel Neutron
Generator
[NSD-Gradel-Fusion,
Luxembourg, 2014.]

Pensemos en Fusión por Confinamiento Inercial Electrostático

14
WS-BNCT-NPS

20 / 04 / 2017

**MEDICIÓN DE TRAZAS EN
DETECTORES PLÁSTICOS
DE PARTÍCULAS EMITIDAS
POR EL GENERADOR**



**En colaboración con
J. Sved – NSD-Gradel-Fusion
A. Portu, G. Saint Martin – CNEA
S. Bortolussi, I. Postuma, S. Altieri – UniPV**

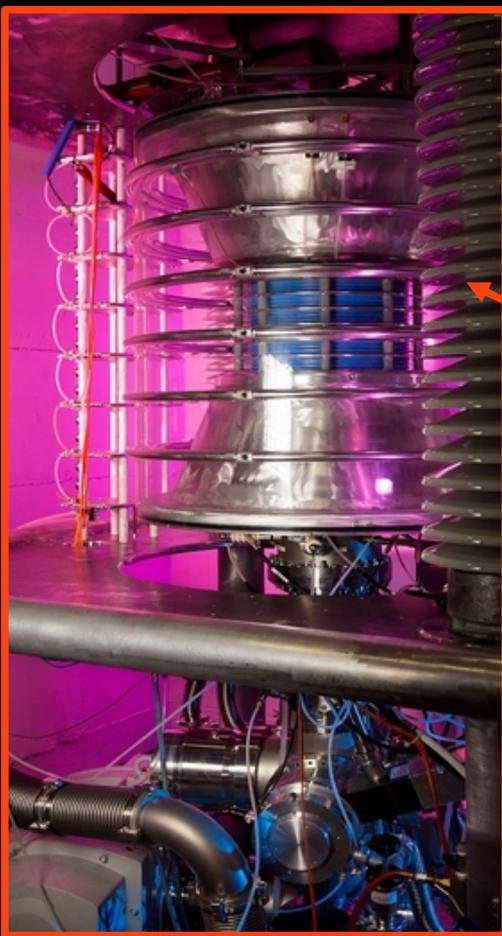
NSD-Gradel Neutron
Generator
[NSD-Gradel-Fusion,
Luxembourg, 2014.]

También se puede pensar en... pequeños aceleradores para fusión

- **Proyectiles de energías ~ 300 keV**
- **Tasas de producción de $\sim 5 \cdot 10^{11}$ n/s para D-D y $\sim 5 \cdot 10^{13}$ n/s para D-T**
- **Blanco gaseoso (más complejo que para IEC)**
- **Tamaños característicos: ~ 4 m**

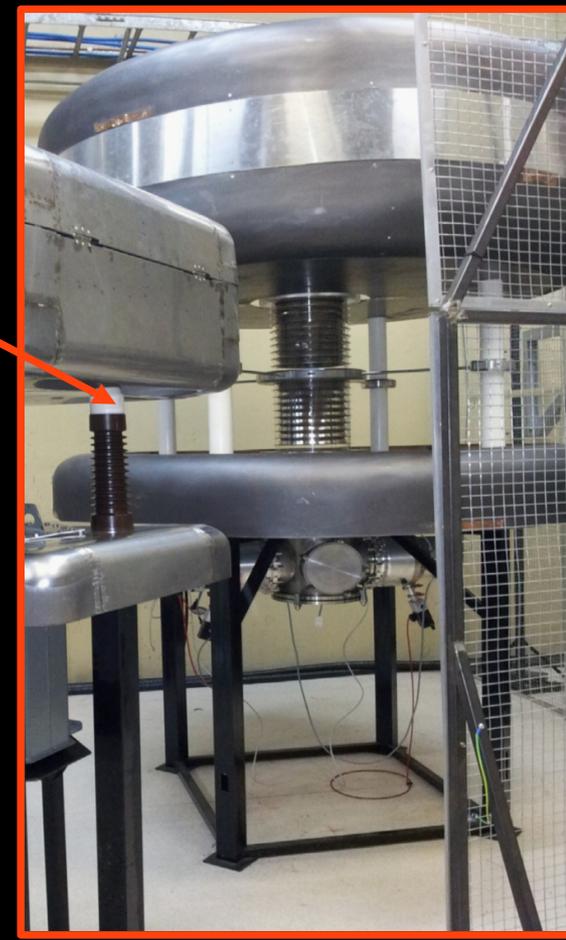
En fase de desarrollo

Actualmente operacional



IZQUIERDA
High shield neutron generator, Phoenix Nuclear
Labs [Product Data Sheet, PNL, 2015]

DERECHA
200 kV Electrostatic Accelerator, CNEA [Kreiner & al,
Appl.Radiat.Isot., 2014]



¿Qué se puede hacer con ellos?

Haces externos

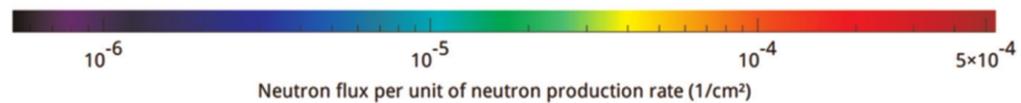
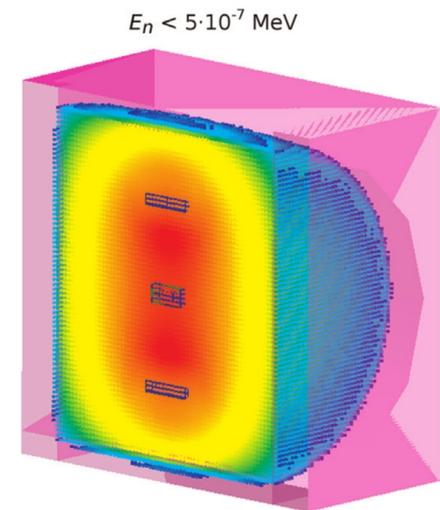
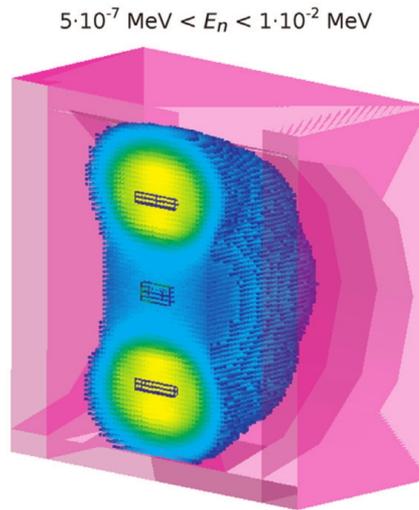
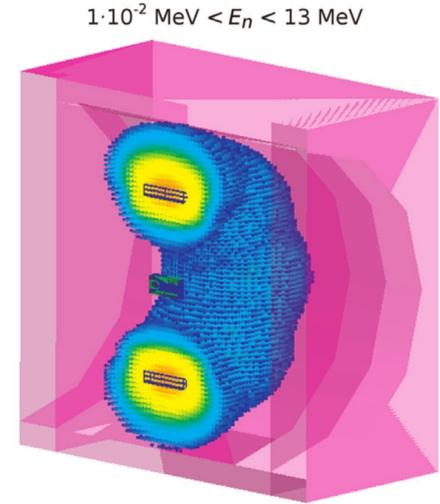
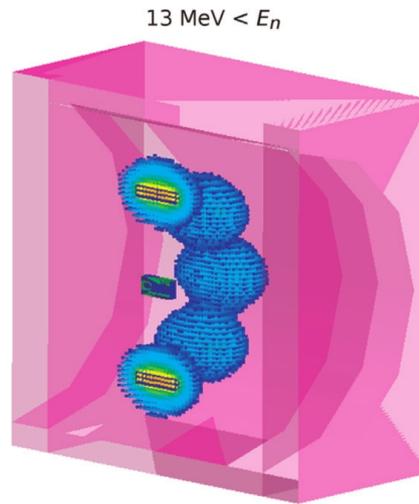
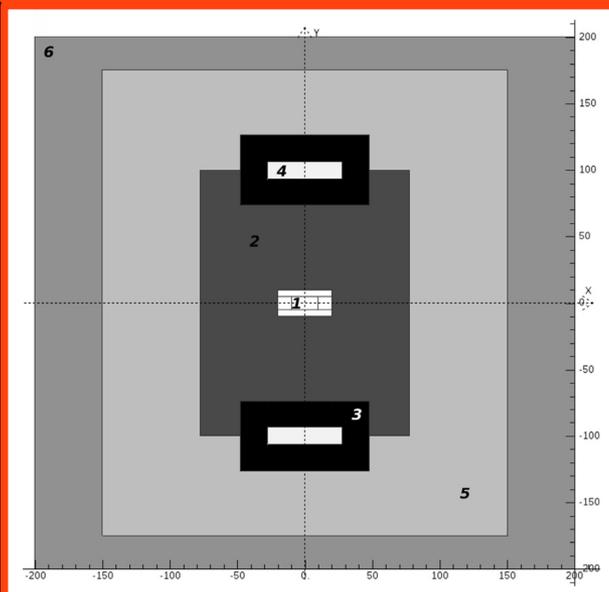
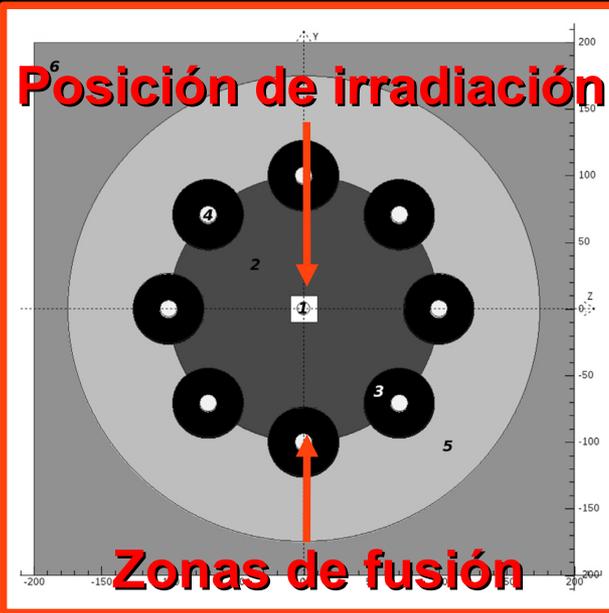
- **Diferentes estudios muestran que se podrían obtener distribuciones de dosis apropiadas para ciertos casos [p.ej.: Sztejnberg & Kreiner, 8YBNCT, 2015].**
- * **Para tener tiempos de irradiación prácticos ($\lesssim 1\text{hr}$) se debe contar con producciones por encima de $\sim 5 \cdot 10^{13}$ n/s .**

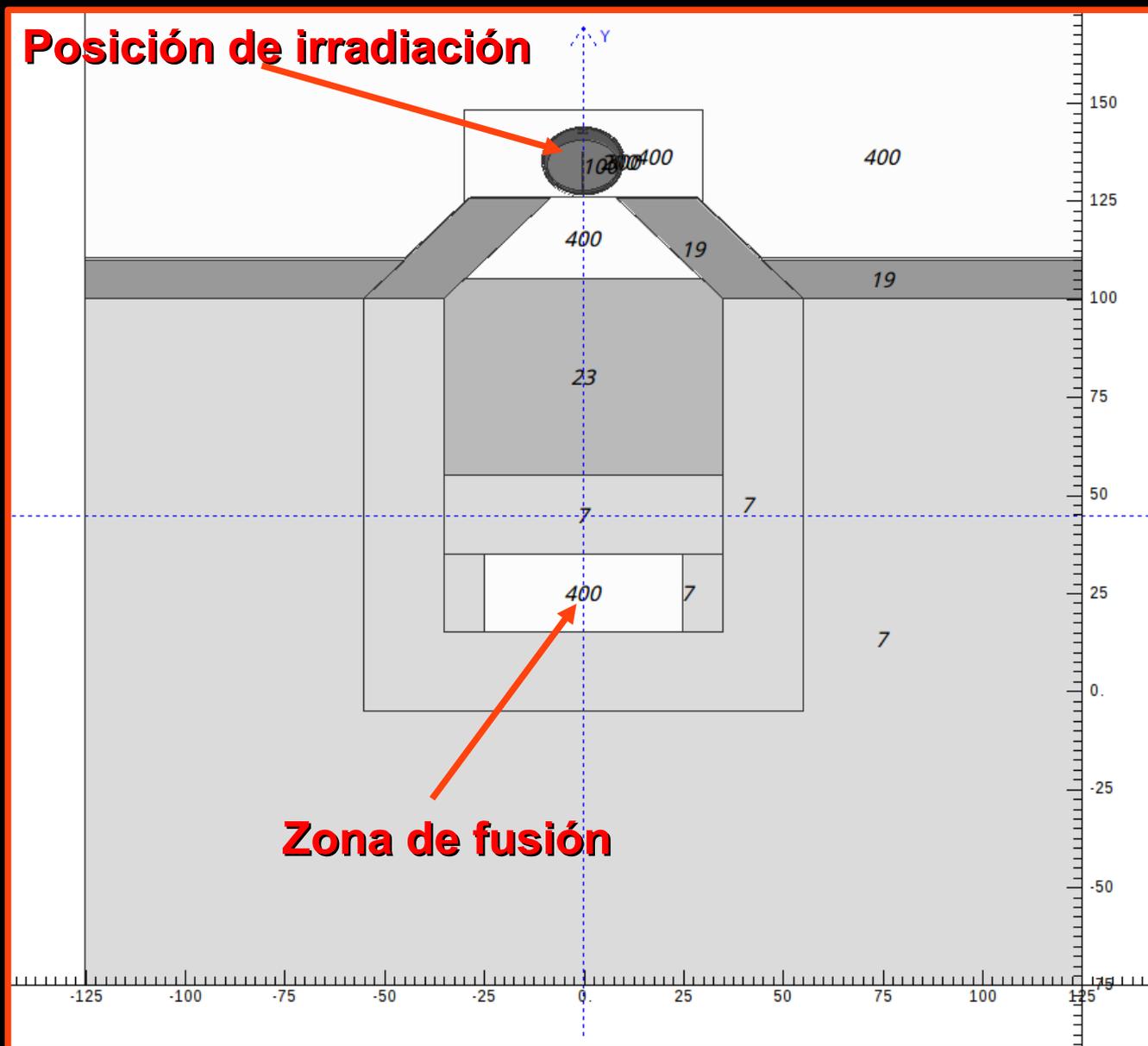
Instalación tipo cavidad en columna térmica

- **Estudios recientes muestran se pueden lograr distribuciones de dosis apropiados para irradiaciones de órganos explantados [Sztejnberg & Miller, Appl.Radiat.Isot., 2015].**
- * **Para lograr tiempos de irradiación prácticos ($\lesssim 1\text{hr}$) se debería contar con producciones por encima de $\sim 6 \cdot 10^{11}$ n/s.**

Simulaciones numéricas de las instalaciones - Preliminares

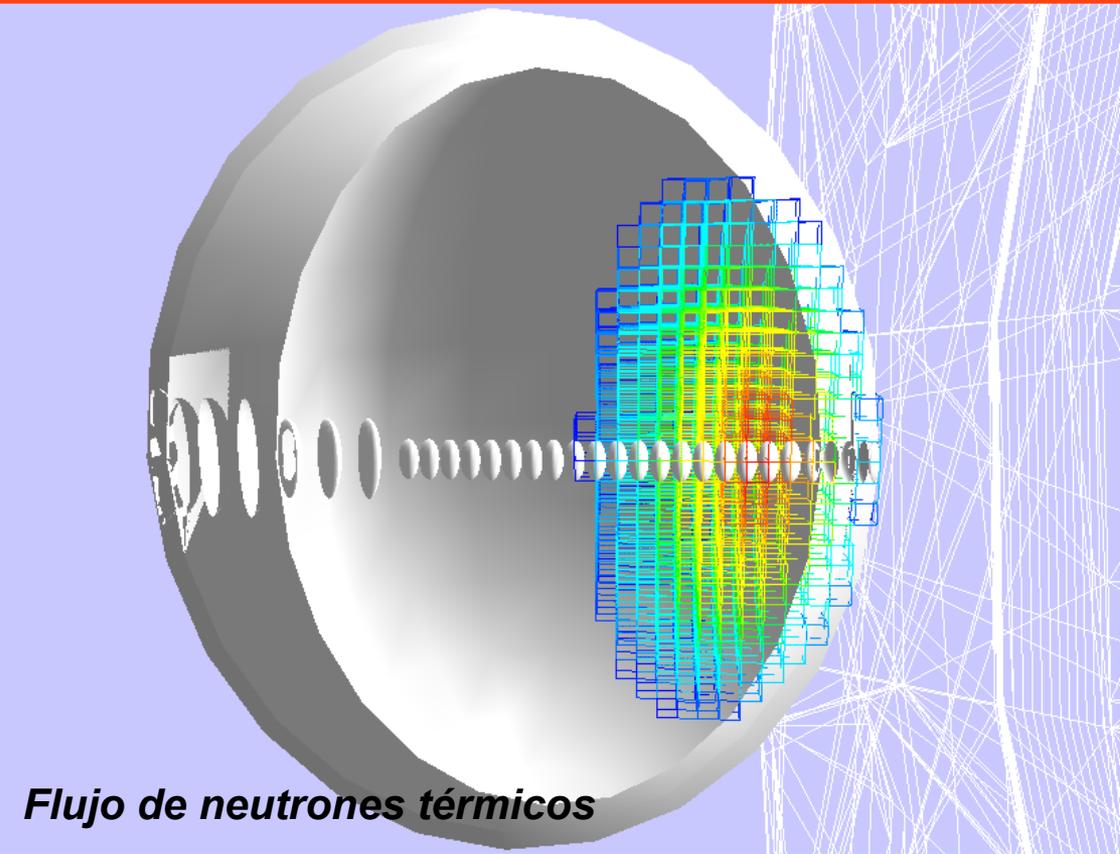
- **Se evalúan las distribuciones de dosis de radiación. Se utiliza el código de transporte de partículas MCNP. Se simula en condiciones de haz en aire, en fantoma y en tejidos de interés.**



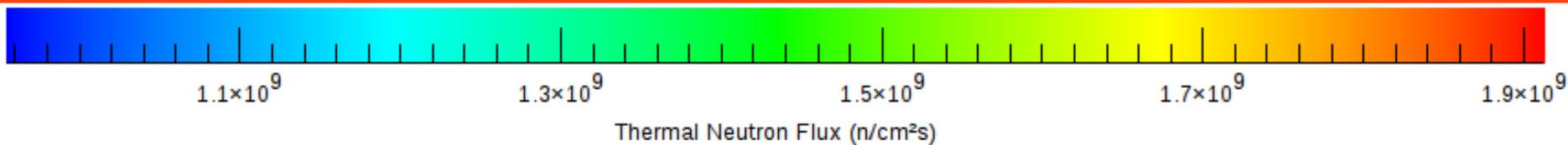


Instalación con Haz Externo – Simulación

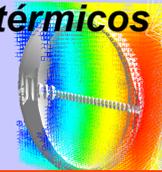
[Sztejnberg & Kreiner, 8YBNCT, 2015.]



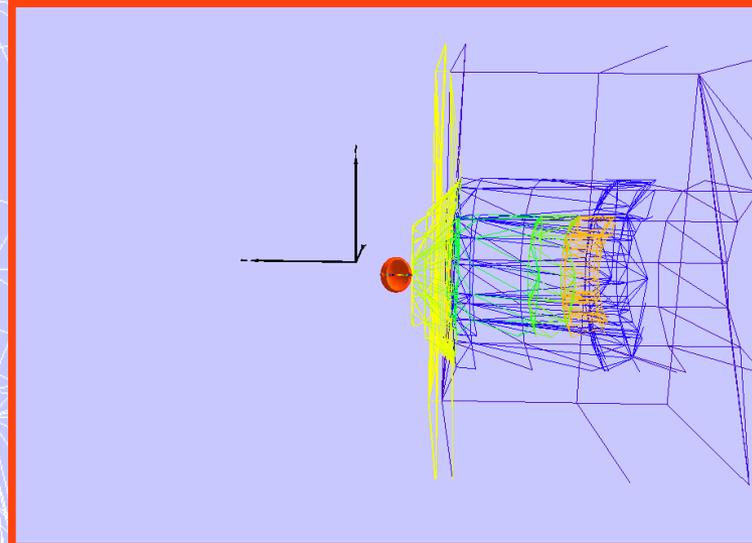
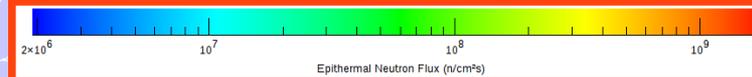
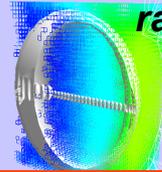
Flujo de neutrones térmicos



Flujo de neutrones epitérmicos



Flujo de neutrones rápidos



Entonces ¿por qué fusión?

Generadores de neutrones → Podrían ser utilizados para instalaciones de haz externo o en las de tipo columna térmica

Generadores IEC

Pequeños aceleradores

Costo relativo bajo: entre U\$S 300k y ~ U\$S 3M de acuerdo a tamaño y tecnología (> U\$S 10M para aceleradores grandes)

Seguridad: sistemas de baja activación, operación “prendido-apagado”, modo normal “apagado” (vs reactor de fisión)

Versatilidad: simplicidad / modularidad / multipropósito

>>> podría incrementar significativamente la disponibilidad de instalaciones de BNCT

Deben realizarse estudios y procesos de optimización más profundos que consideren:

***generadores adecuados para condiciones clínicas,
dosimetrías en condiciones más realistas de tratamientos,
diseño de blancos, activación de materiales,
adecuación de los haces,
etc ...***

Implementar los sistemas desarrollados:

***generadores de neutrones,
Instalaciones de irradiación,
etc ...***

Todavía hay una largo camino por recorrer ...



**FUSIÓN NUCLEAR PARA BNCT
FUSIÓN NUCLEAR PARA LA SALUD**

Muchas Gracias por su Atención!!!

M. Sztejnberg

manuelsgc@cae.cnea.gov.ar

WS-BNCT-NPS 2017

