El Laboratorio Láser de Aceleración y Aplicaciones:

Proyecto LaserPET

I Jornada RSEF/IFIMED de Física Médica
Valencia 10-11 Marzo de 2016

José Benlliure
Universidad of Santiago de Compostela

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD
UNIÓN EUROPEA
FONDO EUROPEO DE DESARROLLO REGIONAL
"Una manera de hacer Europa"

El uso de radioisótopos en biomedicina

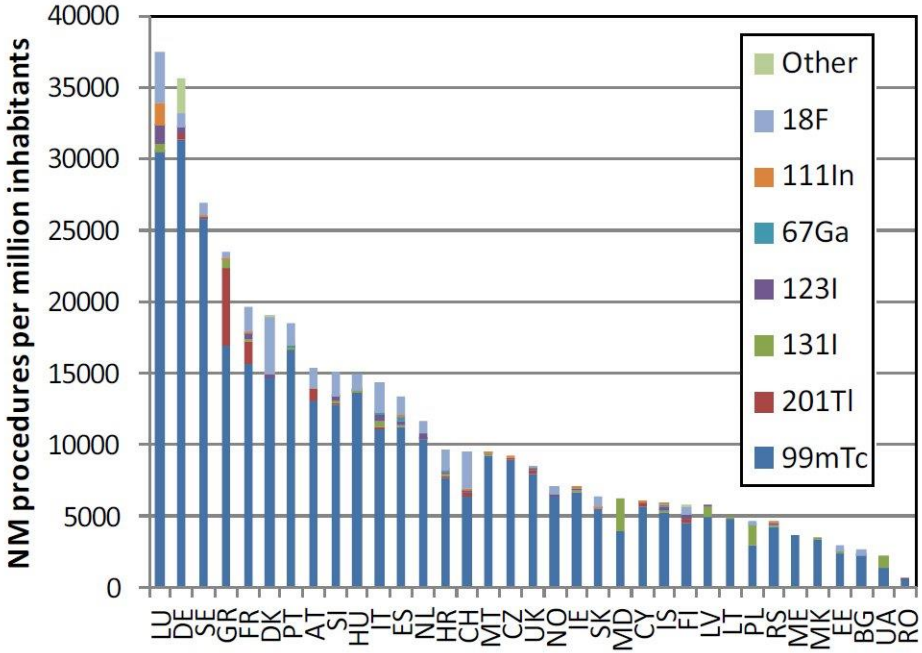
El uso de radioisótopos en ciencias biomédicas puede clasificarse en tres categorías:

-Radiotrazadores

-Imagen: SPECT(^{99m}Tc,^{201}Tl,^{123}I), PET(^{11}C,^{13}N,^{15}O,^{18}F)

-Terapia: brachyterapia(^{103}Pd), terapia selectiva(^{211}At,^{213}Bi)

La demanda muldial de radioisótopos se incrementa anualmente de forma exponencial



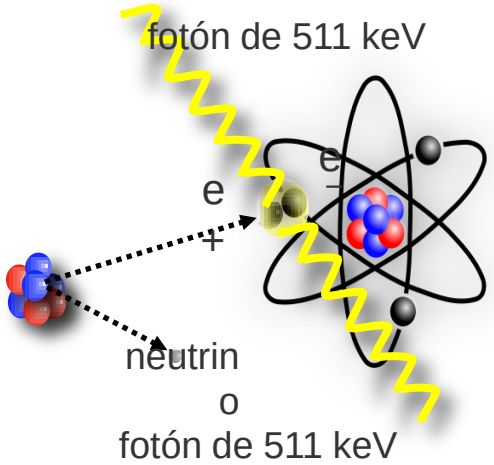
Los radioisótopos se producen en reacciones nucleares producidas con:

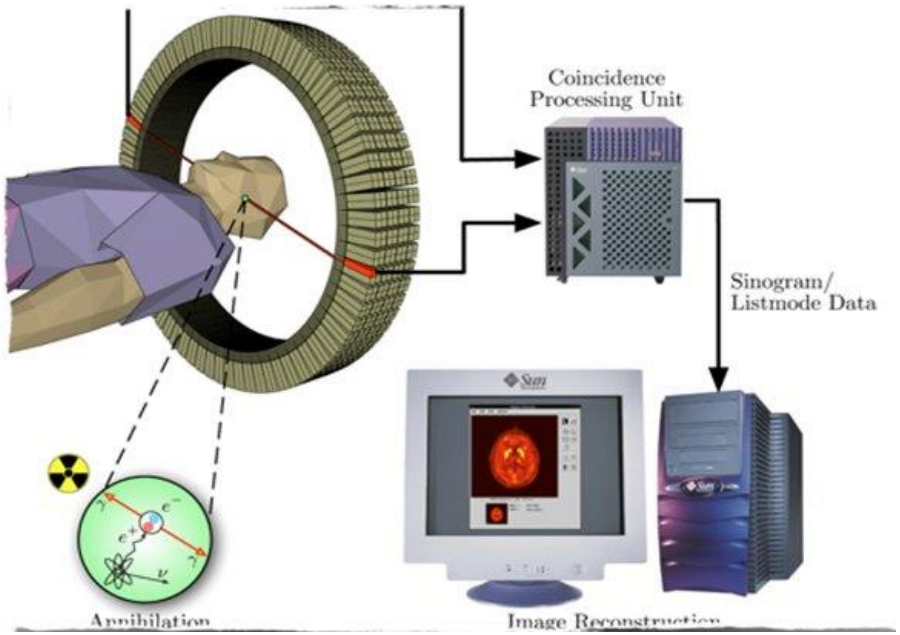
- Reactores nucleares
- Aceleradores de partículas
- En un futuro con láseres compactos

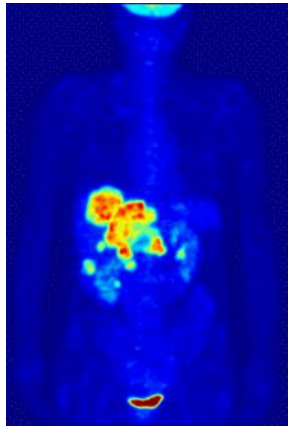
Radioisótopos para imagen médica PET

La tomografía por emisión de positrones es considerada la técnica más precisa de imagen 3D para el diagnóstico médico:

- Los positrones emitidos por un radioisótopo β^+ se aniquilan produciendo dos fotones
- La detección de los dos fotones emitidos a 180º permite determinar el volumen de la zona de emisión utilizando técnicas de reconstrucción de imágenes





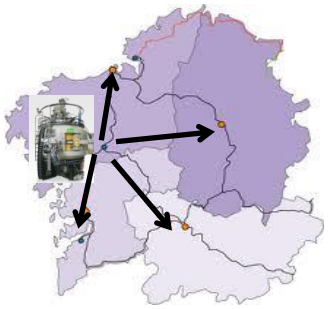


Radioisótopos para imagen médica PET

La producción de radioisótopos β^+ es una tecnología bien establecida pero requiere un acelerador con una infraestructura compleja y una inversión importante:

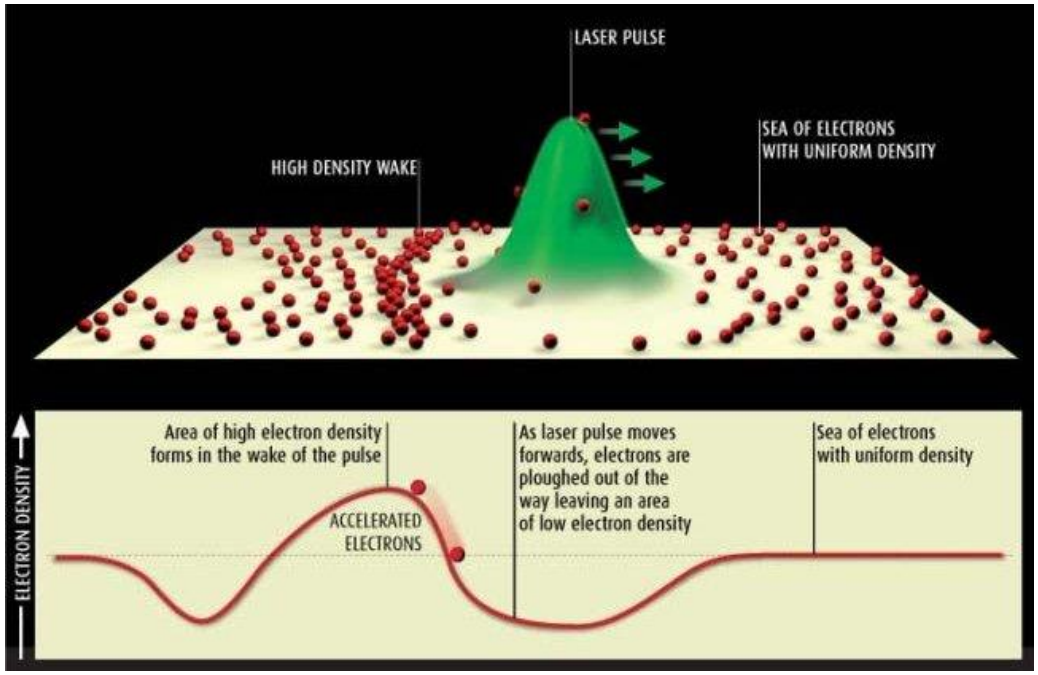
- La inversión se amortiza con una producción elevada de dosis por día.
- La estrategia de producción se basa en la distribución desde un centro de producción regional.
- La producción se limita generalmente al ^{18}F.

^{11}C	^{13}N	^{15}O	^{18}F
20 min.	10 min.	2 min.	110 min.



Cambiando el paradigma de la aceleración de partículas

Interacción láser materia



- La fuerza “ponderomotriz” que genera el pulso láser “aparta” a los electrones del frente del pulso generando una “ola” de difencia de potencial que es propaga con el pulso.

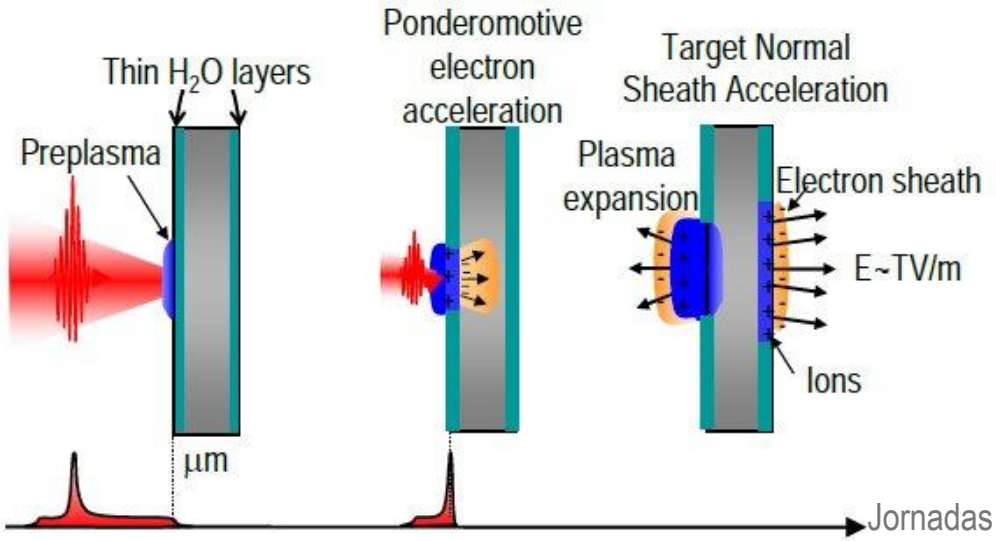
- Los electrones “arrastrados” por la “ola” de potencial pueden ser acelerados a energías relativistas si el pulso láser tiene una potencia suficiente.

- La distribución uniforme en posición y momento de los electrones del plasma hace que experimenten diferentes aceleraciones al interaccionar con el láser y que el espectro de energía sea continuo.

Aceleración de protones e iones pesados

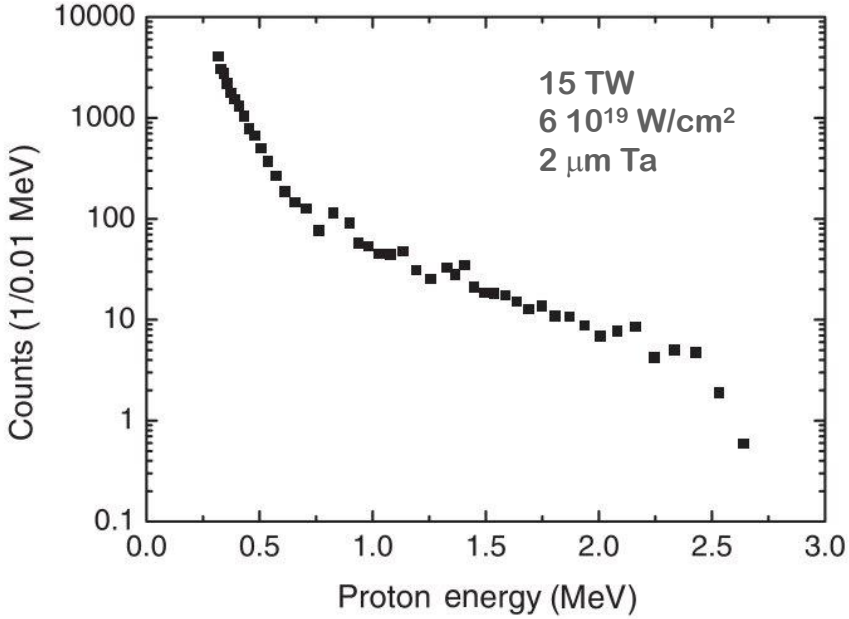
Mecanismos de aceleración

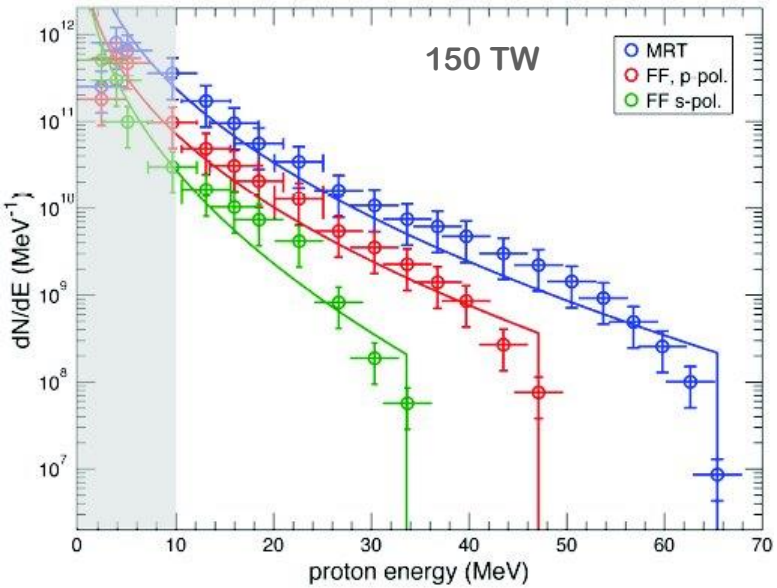
- La aceleración directa de protones no es posible ($I>10^{24}$ W/cm^2).
- El pulso láser se atenua en un médio denso y sólo induce una onda de carga en la superficie de entrada.
- La onda de carga superficial acelera electrones del plasma hacia las superfices de entrada y salida del material.
- El campo electrostático que generan en superficie los electrones expulsados produce la aceleración de los protones/iones que se encuentran en esa superficie (TNSA).



Aceleración de protones e iones pesados

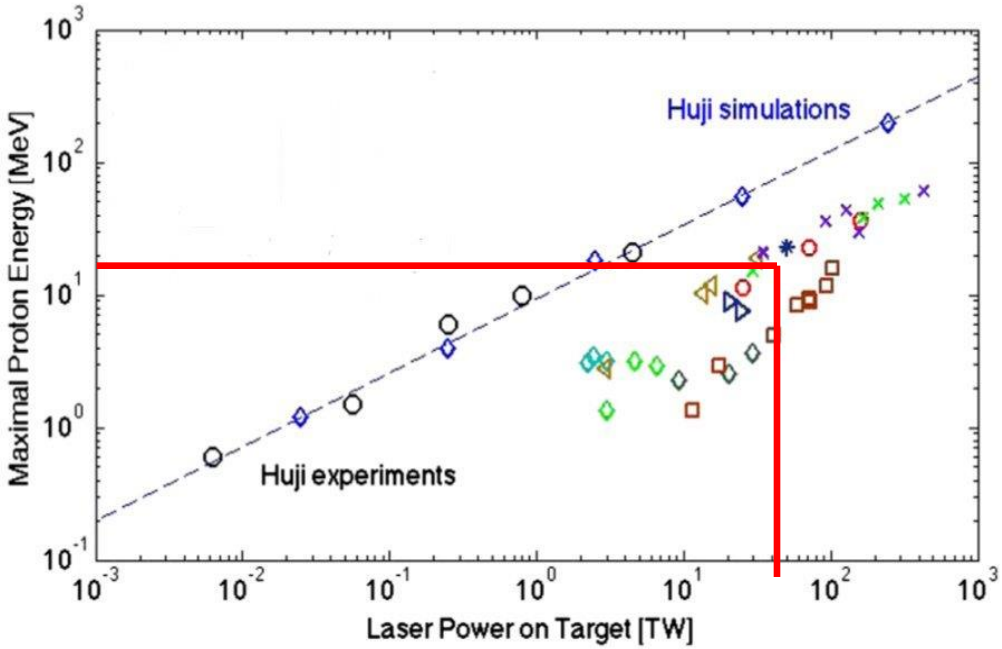
Resultados recientes





Aceleración de protones e iones pesados

Resultados recientes



A. Ziegler et al., PRL 110, 215004 (2013)

El láser que se propone instalar e la USC tiene una potencia de 45 TW por lo que podría acelerar protones a energías por encima de 10 MeV.

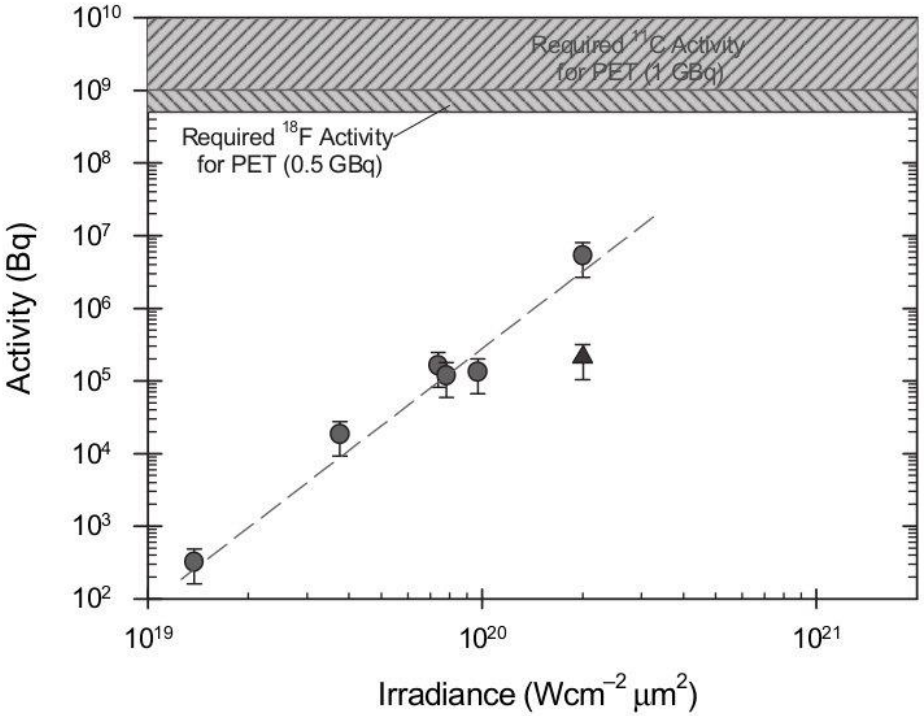
Producción de radioisótopos por aceleración láser

Producción de ^{18}F con protones acelerados con láser

- 120 J, ~1 ps (10^{20} W/cm^2), CR ~10^6
  ^{11}C activity/shot ~ 200 kBq
  I. Spencer et al., NIMB 183, 449 (2001)

- 20-30 J, 0.3 – 0.8 ps (1-6 10^{19} W/cm^2), CR <10^6
  ^{11}C activity/shot ~ 1 MBq
  J. Fuchs et al., PRL 94, 045004 (2005)

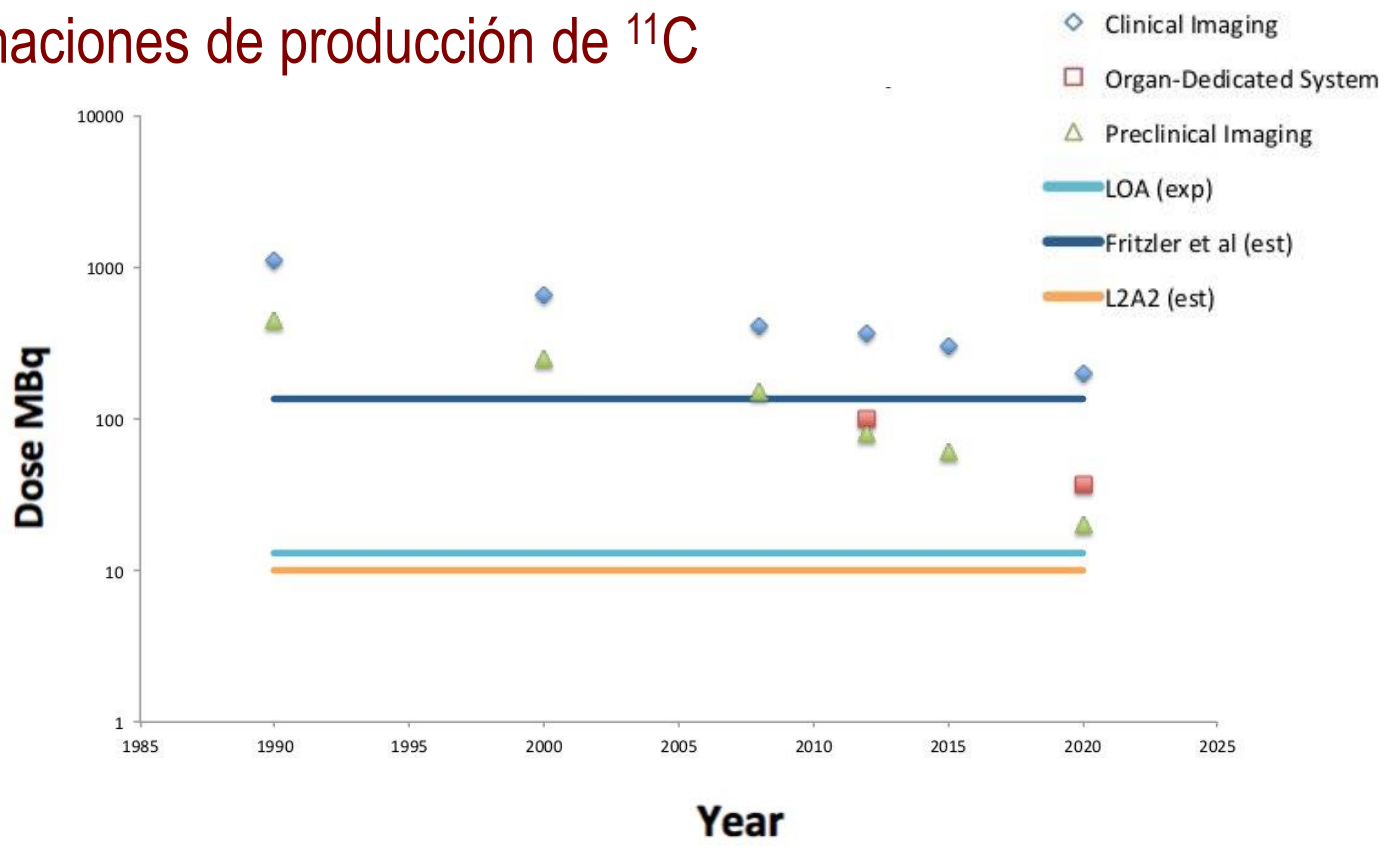
- 0.8 J, 40 fs (6 10^{19} W/cm^2), CR <10^6
  ^{11}C activity/shot ~ 1.2 kBq
  S. Fritzler et al., App. Phys. Lett. 83, 3039 (2003)



K. Ledingham et al., New. J. Phys 12, 045005 (2010)

Producción de radioisótopos por aceleración láser

Estimaciones de producción de ^{11}C

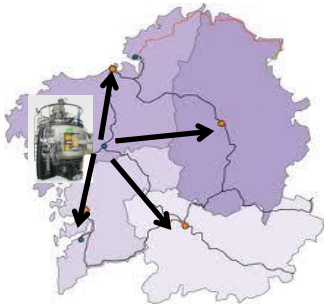


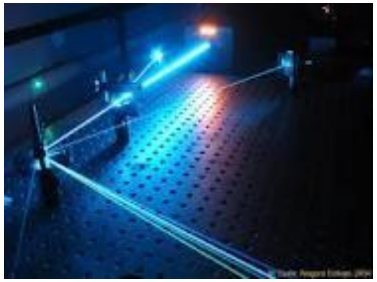
Las previsiones de mejora en la tecnología láser y la disminución de dosis requeridas podrían hacer viable el uso de láseres compactos para la producción de radioisótopos.

Producción de radioisótopos por aceleración láser

Un láser compacto también puede utilizarse para producir radioisótopos β^+:

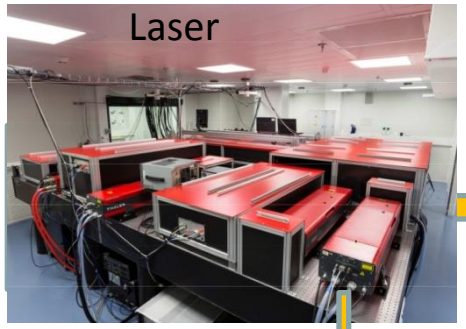
- La inversión necesaria es menor.
- Podría instalarse en cualquier hospital o centro de investigación.
- Permitiría la producción «a la carta» de monodosis de diferentes radioisótopos para uso pre-clínico o clínico.





Laboratorio Láser de Aceleración y Aplicaciones

Principales infraestructuras y proyectos de I+D



Compresor

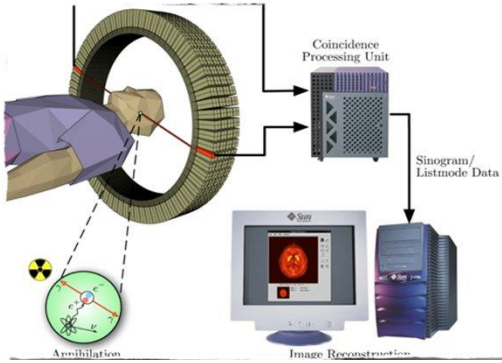
Cámara de aceleración

Focalización
Blanco
Sensores

45 TW
10 Hz

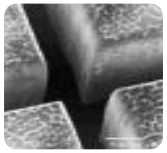
Generación de radioisótopos

Blanco
Sensores



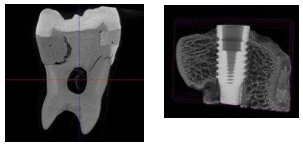
1 GW
1 kHz

Micromecanizado



- Micromecanizado
- Microelctrónica
- Tratamiento de superficies
- Micropegado
- ....

Microtomografía láser



Infraestructuras:
- Sala limpia láser
- Zona radioprotegida
- Labortorio de micromecanizado
- Laboratorio de instrumentación

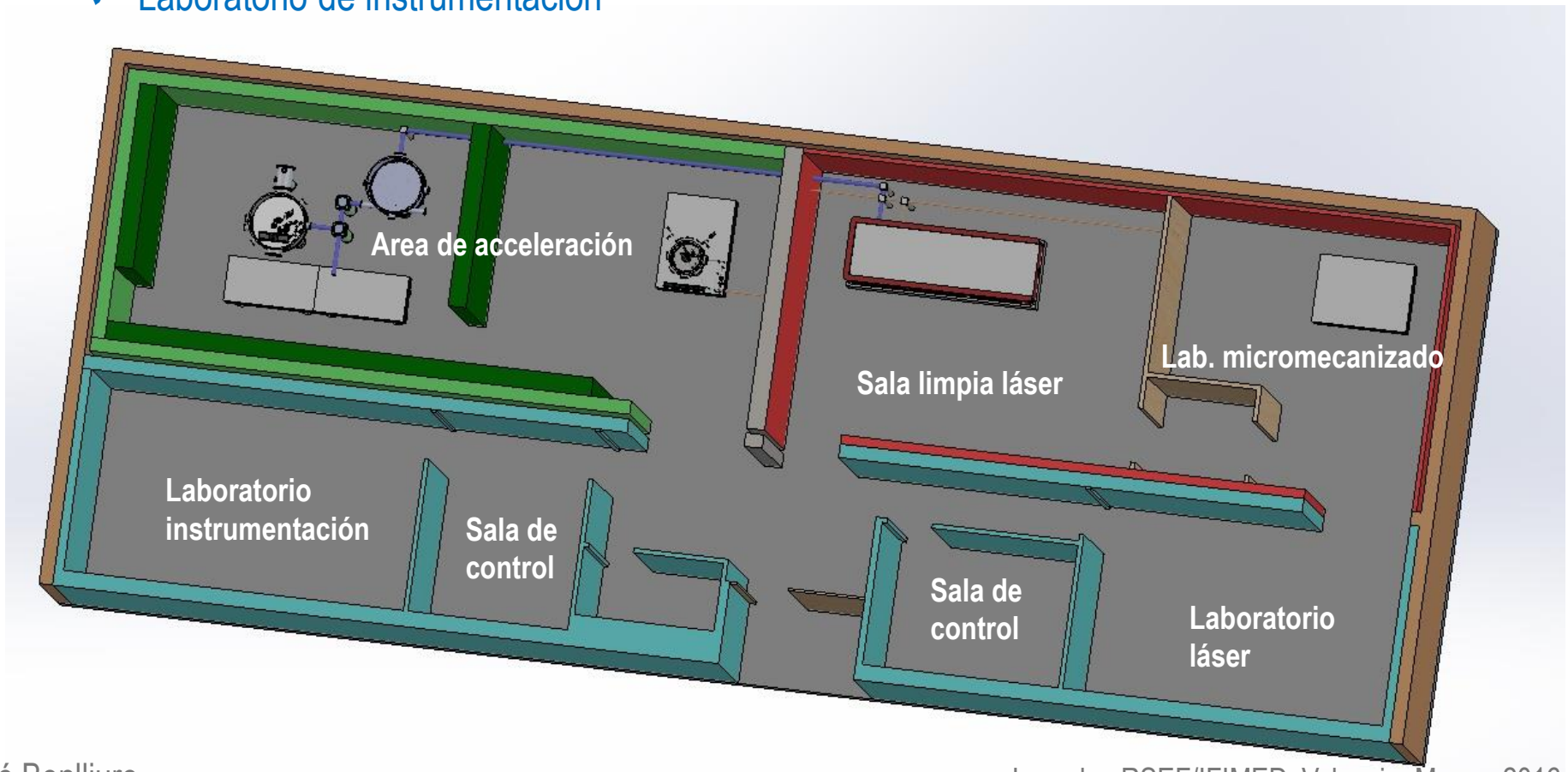
Desarrollo del proyecto

	2013				2014				2015				2016			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Diseño conceptual																
Diseño técnico																
Construcción del láser																
Construcción edificio																
Montaje experimentos																
Pruebas láser																
Primeros experimentos																

Inversión (2013 - 2015): 5,3 M€

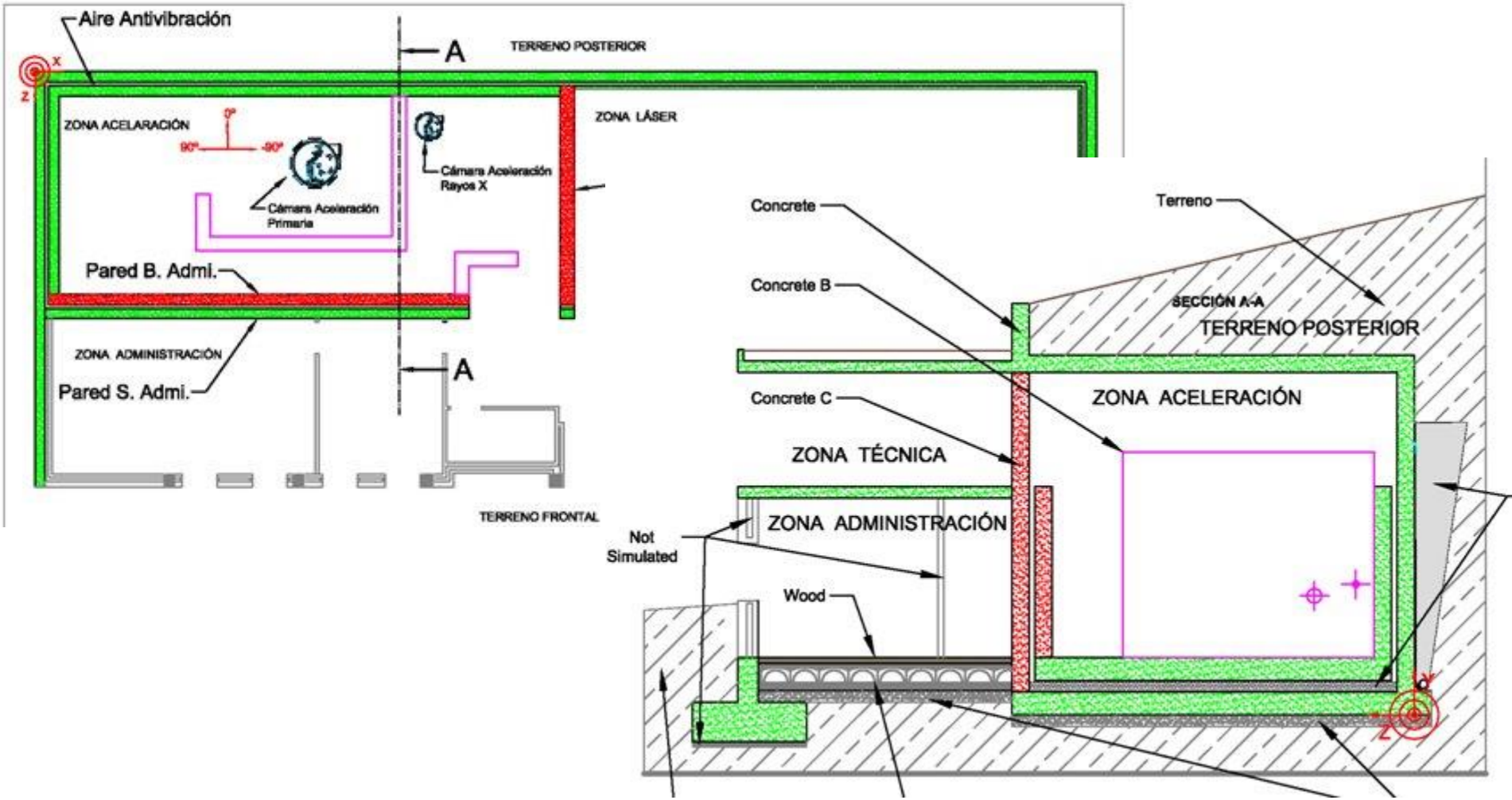
Laboratorio Láser de Aceleración y Aplicaciones

- ✓ Sala limpia para el láser
- ✓ Area de aceleración
- ✓ Laboratorios de óptica y micromecanizado
- ✓ Laboratorio de instrumentación



Laboratorio Láser de Aceleración y Aplicaciones

Radiation protection issues



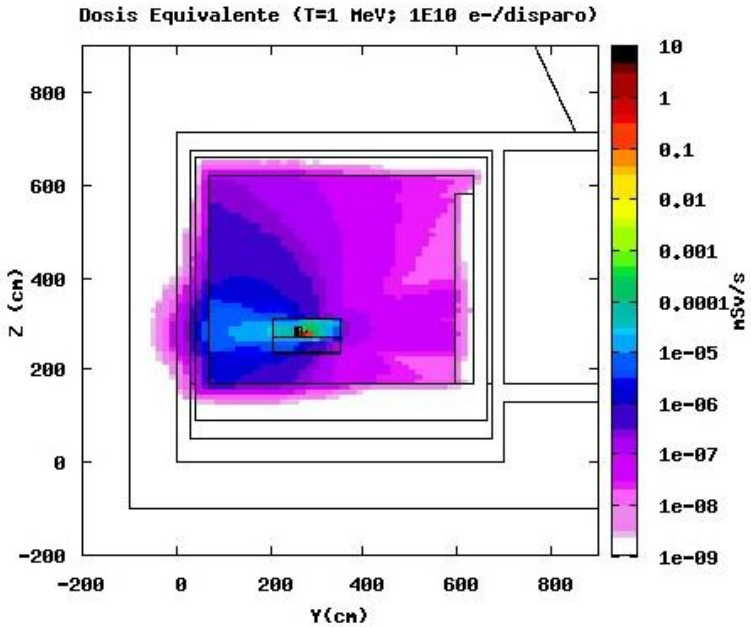
Protección radiológica: simulaciones

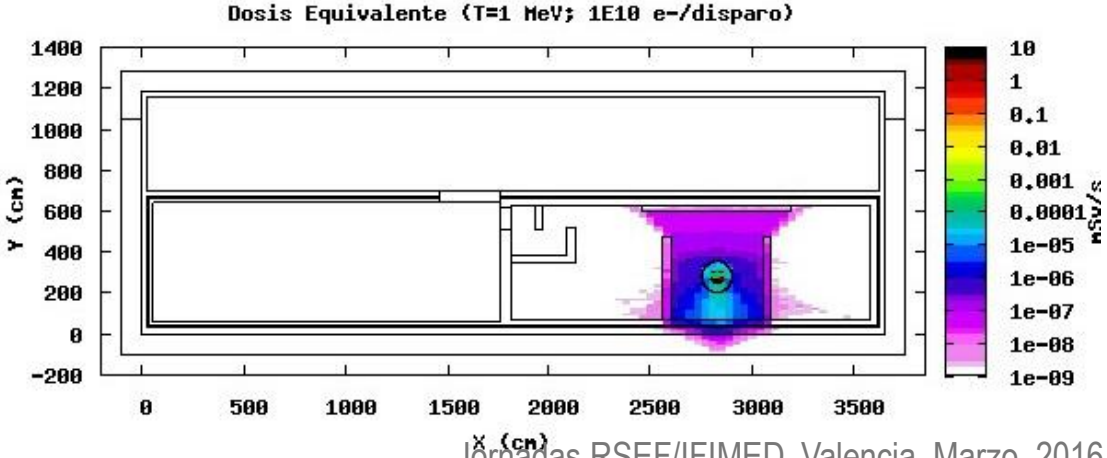
Las simulaciones se han realizado siguiendo los estándares europeos utilizados en todas las instalaciones que producen radiación ionizante y reconocidos por el CSN.

Sólo electrones y gammas salen de la cámara sin activar el aire.

Las dosis esperadas en las zonas de trabajo están muy por debajo de las dosis ambientales.

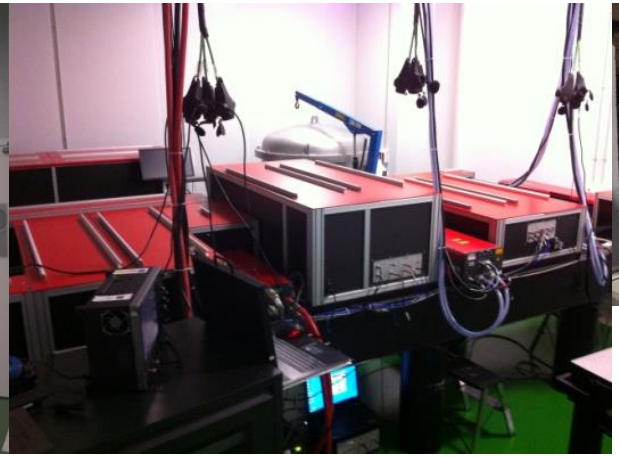
Los resultados indican que una persona situada en la zona accesible más próxima a la radiación producida recibiría en 10 minutos de exposición una dosis equivalente de 5 μSv (una radiografía dental).





L2A2: infraestructuras

L2A2: infraestructuras



Laboratorio Láser de Aceleración y Aplicaciones

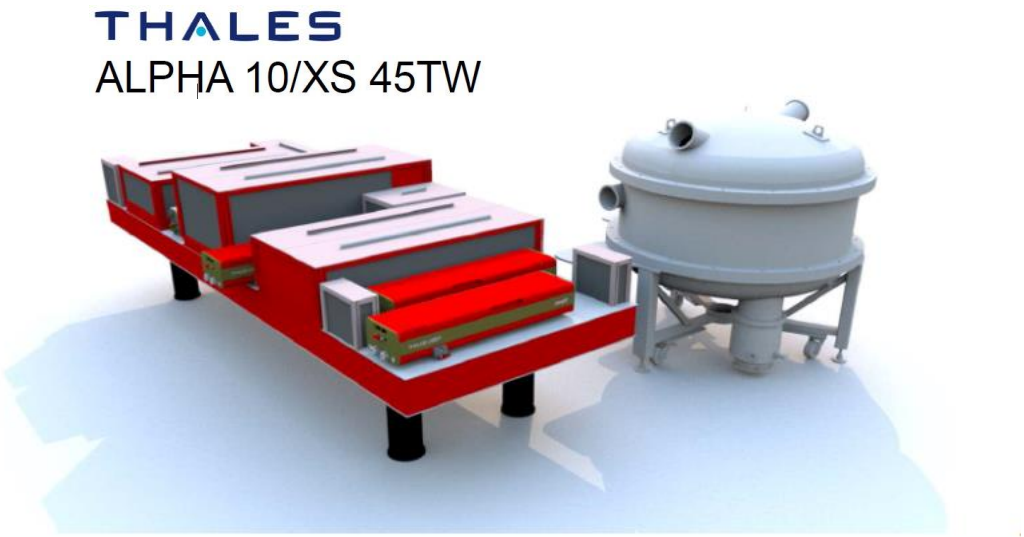
Un láser de Titanio-Zafiro con dos líneas de haz

Línea de alta potencia ~ 50 TW

- Energía del pulso: ~1.4 J
- Duración de pulso: 30 – 100 fs
- Contraste: ~ $1:10^{10}$
- Tasa de disparo: 10 Hz

Línea de potencia media ~ 100 GW

- Energía del pulso: ~2 mJ
- Duración de pulso: 30 – 100 fs
- Contraste: ~ $1:10^{6}$
- Tasa de disparo: 1000 Hz

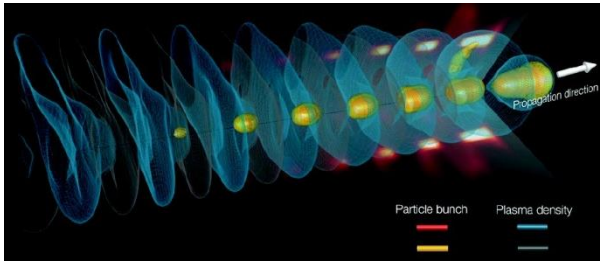


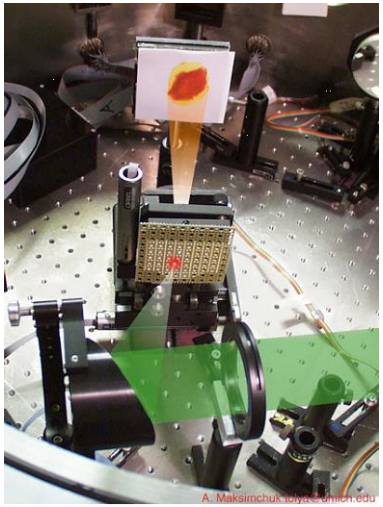
Tecnologías necesarias

Optica y láser

Sistemas de caracterización y focalización de pulsos láser

- Autocorreladores
- Optica adaptativa





Plasmas y materiales

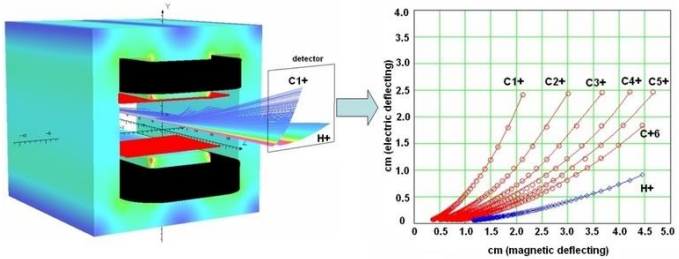
Blanco de aceleración:

- Simulaciones
- Optimización del material: blancos nanoestructurados
- Sistemas de posicionamiento

Nuclear y partículas

Caracterización del haz de protones:

- Parábola de Thomson
- Monitor de flujo en contínuo



Física médica

Blanco de activación:

- Diseños optimizados para protones acelerados por láser

TIC

Sistemas de seguridad y control:

Equipo de trabajo actual

Física del láser

- J. Arines, C. Bao, M. Flores (USC)
- F. Cambronero, D. Nieto (L2A2)

Interacción láser-materia:

- C. Ruíz, A. Aragón (L2A2)
- A. Paredes (UVi)

Física nuclear y médica:

- J. Benlliure, D. Cortina (USC)
- A. Iglesias, J. Llerena, J. Silva (L2A2)

Tecnologías TIC:

- D. Cabello, V. Sánchez, J. Vidal (USC-CiTIUS)
- B. Blanco, D. Castro (L2A2)

Conclusiones

✓ La aceleración por láser está cambiando el paradigma de la aceleración de partículas ofreciendo numerosas oportunidades científicas y tecnológicas

- sistemas compactos
- económicamente competitivos

✓ El Laboratorio Láser de Aceleración y Aplicaciones (L2A2) estará equipado con infraestructuras para contribuir al desarrollo de esta nueva tecnología

- láser con salidas de potencia media (100 GW) y alta (50 TW)
- zona de aceleración y laboratorios de óptica e instrumentación

✓ El primer proyecto de este laboratorio es la producción de radioisótopos para imagen medica PET utilizando un acelerador láser, pero también se propone el uso del láser para otras aplicaciones (microtomografía, micromecanizado) y el laboratorio está abierto a otras ideas.

✓ Al tratarser de un proyecto pluridisciplinar las posibilidades de colaboración son muchas y cualquier idea de mejora o uso de la instalación es bienvenida.

Objetivos

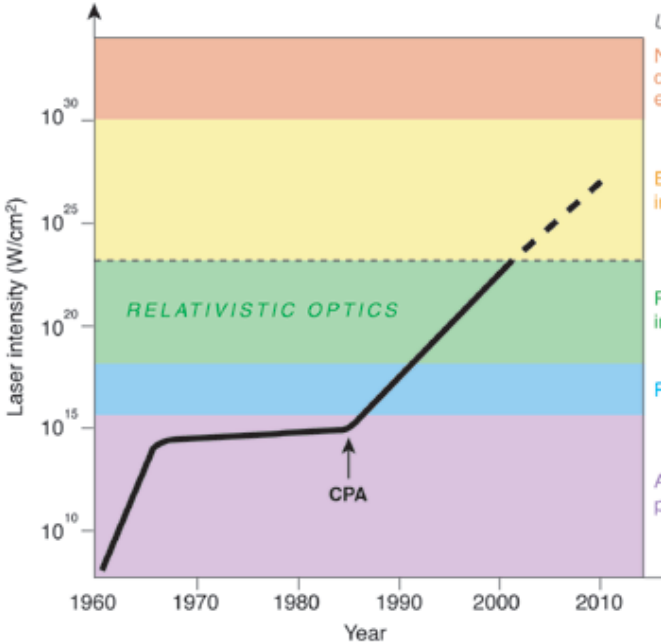
- ✓ Infraestructura científica de la USC para desarrollar proyectos de investigación básicos y aplicados en el ámbito de la aceleración láser y los láseres de pulso ultra-corto y ultra-intenso.
- ✓ Proyecto que involucra a varias disciplinas: óptica y láser, plasmas, materiales, física nuclear y de partículas, física médica, tecnologías TIC.
- ✓ Desarrollar un programa de investigación sobre la producción de radioisótopos para imagen médica PET (^{11}C y ^{18}F) utilizando un acelerador láser.
- ✓ Proponer otras aplicaciones: micromecanizado, microtomografía, …
- ✓ Proponer proyectos de investigación básica en óptica y láser, plasmas, materiales, física nuclear o física de partículas.

Láseres de gran potencia

Pulsos láser ultra intensos (I>5 10^{18} W/cm^2):

La intensidad de un pulso láser está definida por tres parámetros: **energía, duración y superficie**. Hay dos formas de producir pulsos ultra-intensos:

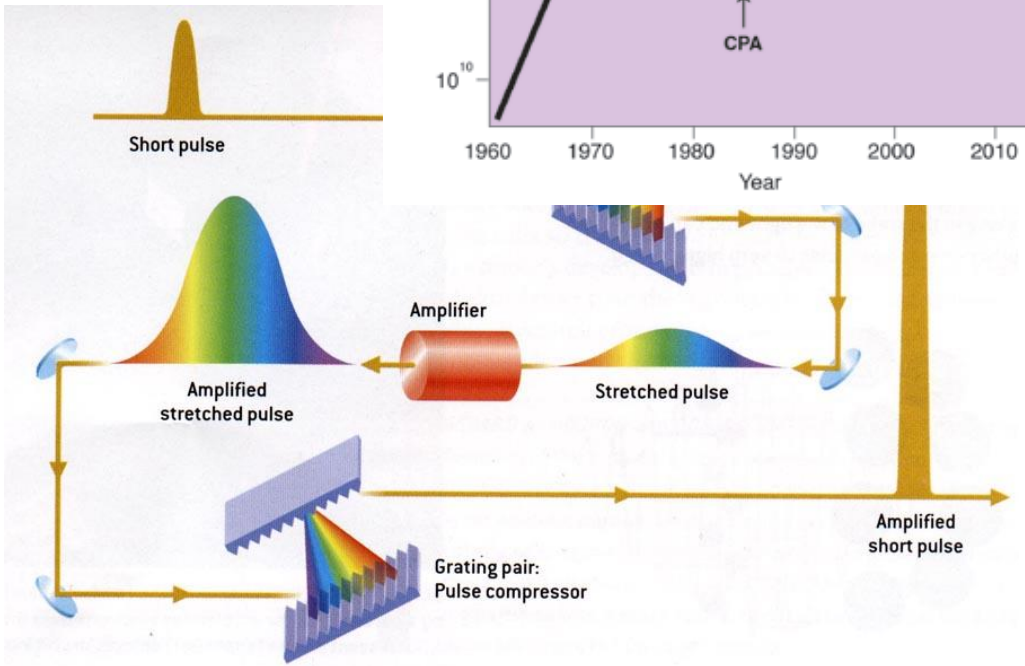
- ✓ Láseres de gran energía: E ~ 1KJ-1MJ, t ~ 1 ps, A~0.1 mm^2
- ✓ Láseres de pulso ultra-corto: E ~ 1mJ-1J, t ~ 10-100 fs, A~1 μm^2



Chirped pulse amplification (CPA):

Esta revolución tecnológica propuesta por G. Mouraeu en 1985 permite producir pulsos láser de altísima potencia (W>TW) con un láser de mesa Ti-zafiro (~800 nm).

En este régimen la interacción del láser con la materia está dominada por el campo electromagnético que genera y no por los fotones: **óptica relativista**



Interacción láser materia

Interacción de un electrón libre con una onda electromagnética plana:

La energía cinética que adquiere el elec

$$E = \gamma m_o c^2 = \left(1 + \frac{a_o^2 \sin^2(\varpi t - kz)}{2}\right.$$

Con una longitud de onda de *800 nm* y u
de los electrones sería comparable a su

Una onda electromagnética puede acele

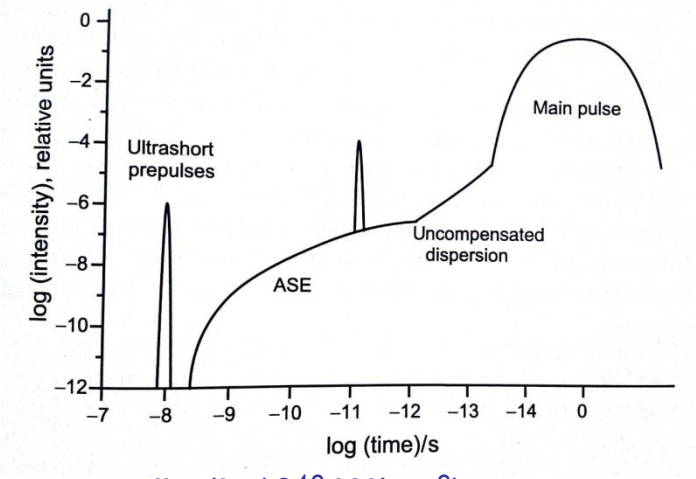
- ✓ interacciona con electrones libres: **pl**
- ✓ la densidad de potencia o intensidad del pulso electromagnético debe alcanzar ***I~4 10^{18} W/cm^2*** para λ=*800 nm* (E_o~5 10^{12} *V/m* teniendo en cuenta $I=1/2c\varepsilon_o E_o^2$)

¿Puede un láser generar un pulso de estas características?

Generación de plasmas

La estructura temporal de un pulso láser de gran intensidad presenta tres componentes:

- Pulso principal
- Pre-pulso debido a la dispersión espectral no compensada
- Pre-pulso producido por la emisión espontánea amplificada



La tercera componente tiene la intensidad necesaria para ionizar un medio ($I>10^{12}$ W/cm^2) y llega con la suficiente antelación (~ 1 ns) para que el plasma se propague (10 – 100 μm):

La densidad del plasma define el índice de refracción del mismo.

$$n_{pl} = \sqrt{1 - \frac{n_e e^2}{\gamma m_o \varepsilon_o \omega_L^2}}$$

✓ Los medios gaseosos tienen un índice de refracción real.

$$n_e < n_{cri} = \gamma m_o \varepsilon_o \omega_L / e^2$$

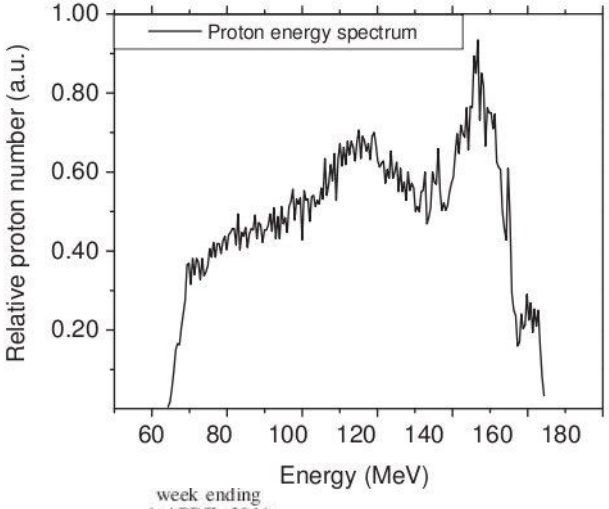
✓ Los medios sólidos tienen un índice de refracción imaginario.

$$n_e > n_{cri} = \gamma m_o \varepsilon_o \omega_L / e^2$$

Aceleración de protones e iones pesados

Resultados

- haces de protones de hasta 70 MeV y de iones hasta 10 MeV/u con ~10^{20} W/cm^2
- gran luminosidad: > 10^{12} protones por pulso
- emitancia pequeña ~ 0.005 π mm.mrad
- gran dispersión en energía



Simulaciones con blancos multi-capa indican la posibilidad de reducir la dispersión en energía para los haces de prototones.

PRL 106, 134801 (2011) PHYSICAL REVIEW LETTERS week ending 1 APRIL 2011

5.5–7.5 MeV Proton Generation by a Moderate-Intensity Ultrashort-Pulse Laser Interaction with H_2O Nanowire Targets

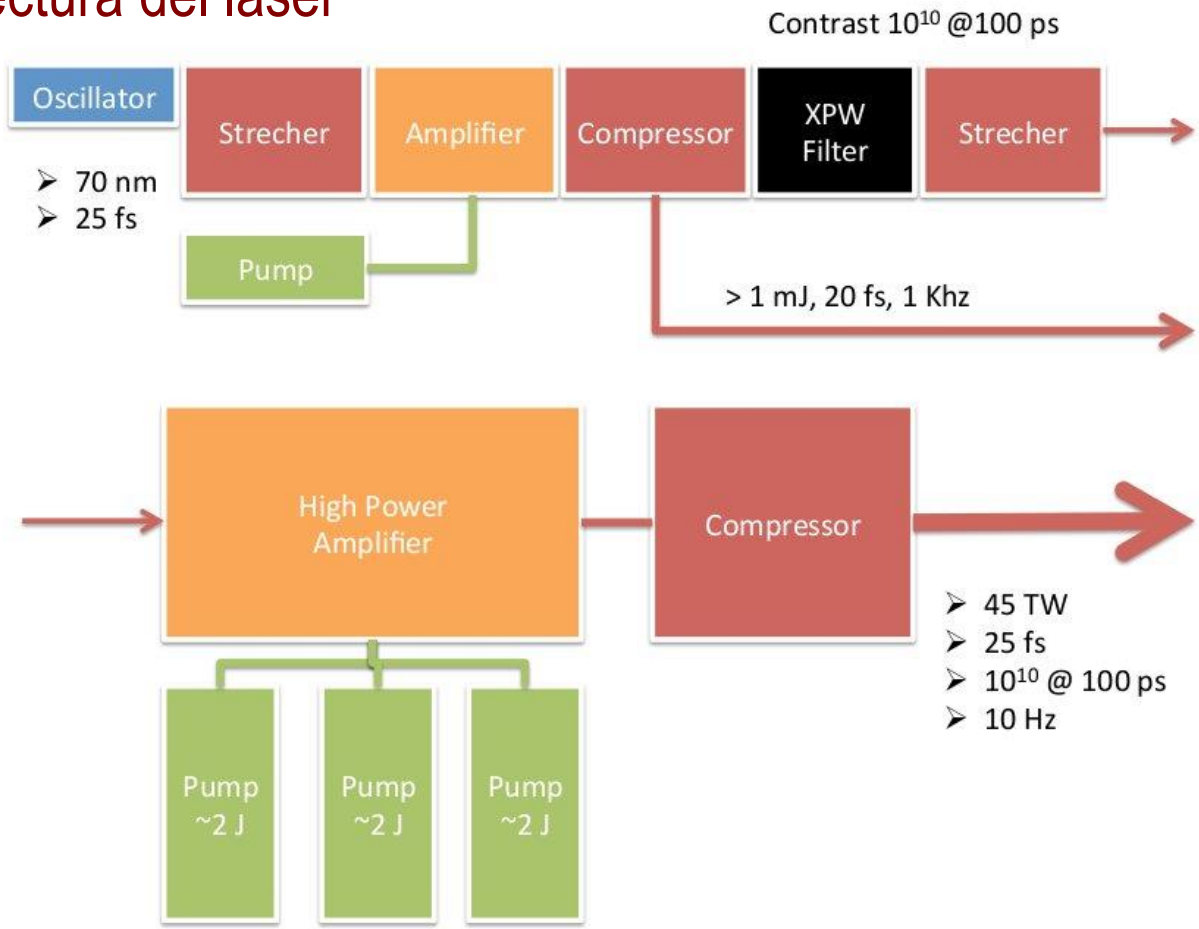
A. Zigler,[1] T. Palchan,[1] N. Bruner,[1] E. Schleifer,[1] S. Eisenmann,[1] M. Botton,[1] Z. Henis,[1] S. A. Pikuz,[2] A. Y. Faenov, Jr.,[2] D. Gordon,[3] and P. Sprangle[3]

[1]*Racah Institute of Physics, Hebrew University, Jerusalem 91904, Israel*
[2]*Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*
[3]*Plasma Physics Division, Naval Research Laboratory, Washington, D.C. 20375, USA*
(Received 26 December 2010; published 30 March 2011)

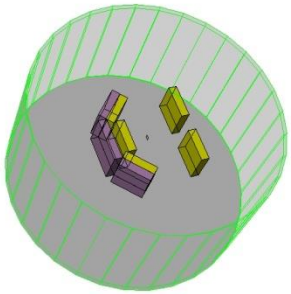
We report on the first generation of 5.5–7.5 MeV protons by a moderate-intensity short-pulse laser interacting with frozen H_2O nanometer-size structure droplets (snow phire substrate. In this setup, the laser intensity is locally enhanced by

~ 5 10^{17} W/cm2

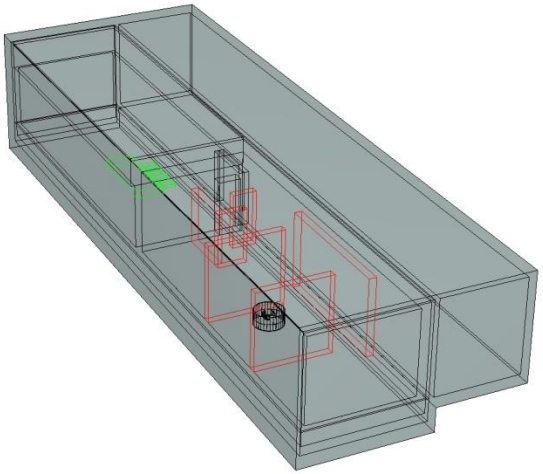
Arquitectura del láser



Protección radiológica: sistema multibarrera



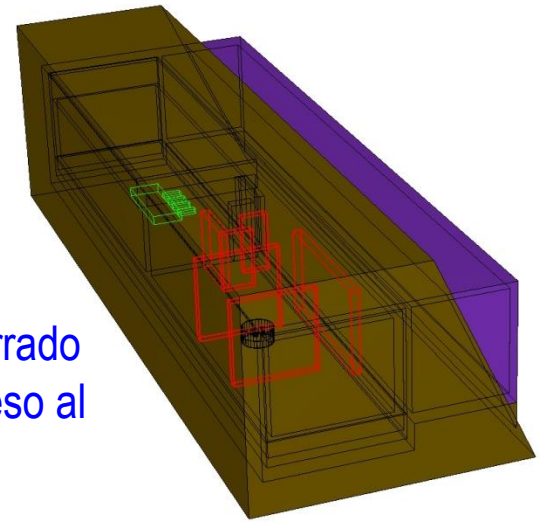
Atenuadores dentro de
la cámara de aceleración



Muros estructurales de
hormigón ~ 75 cm, 2.3 g/cm^3

Muros de bloques móbiles
~ 40 cm, 2.9 g/cm^3

Total: ~125 cm de hormigón



Laboratorio semi-enterrado
sin posibilidad de acceso al
público

Tecnologías necesarias

Sistemas de caracterización y focalización de pulsos láser

- Universidad de Porto
- CLPU

Blanco de aceleración:

- Materiales nanoestructurados: INL
- Mecánica de precisión: U. Vigo
- Simulaciones interacción láser-plasma: U. Vigo, IST Lisboa

Caracterización del pulso de protones:

- Parábola de Thomson: U. Vigo
- Películas radiocrómicas: I3M, CMAM
- Monitor de flujo en contínuo: ???

Infraestructura:

- Vacío: ALBA

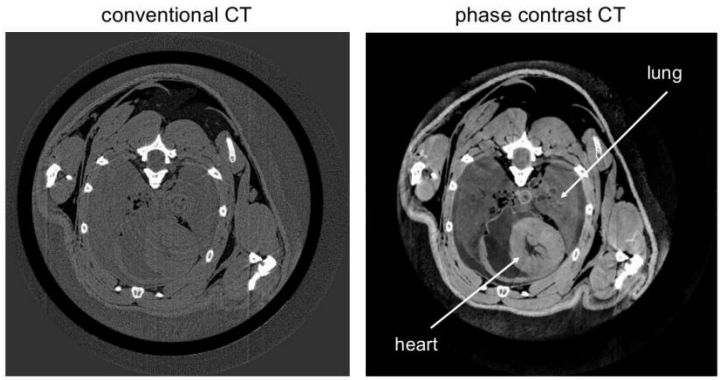
Producción de rayox X incoherentes en el régimen λ3

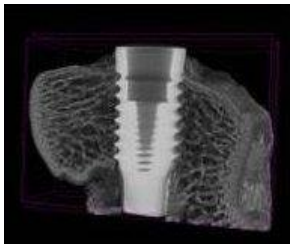
Una fuente de rayos X para imagen generada por pulsos láser de kHz en el régimen λ^3

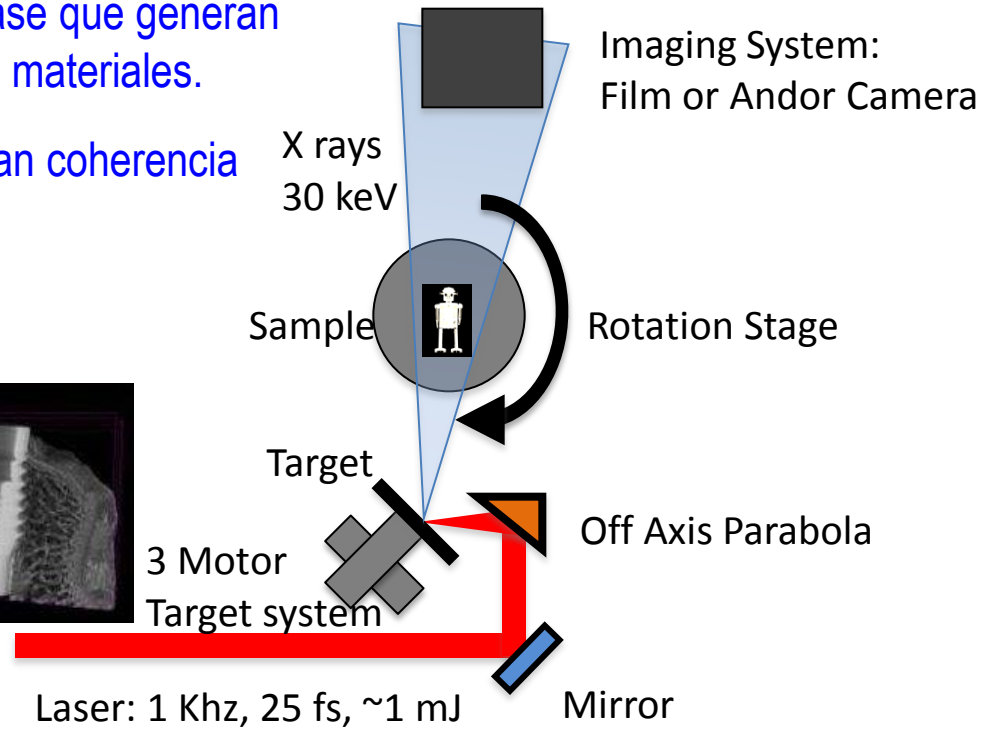
- ✓ Parámetros del láser: ~ 1 mJ, 25 fs, 1Khz.
- ✓ Fuente de rayos X-ray: 10-20 KeV T, 1 μm dispersión, divergencia pequeña.

Aplicación propuesta: imagen tomográfica de rayos X ray por contraste de fase.

- La imagen se produce por el cambio de fase que generan los diferentes índices de refracción de los materiales.
- Se requiere una fuente de rayos X con gran coherencia espacial y brillo.

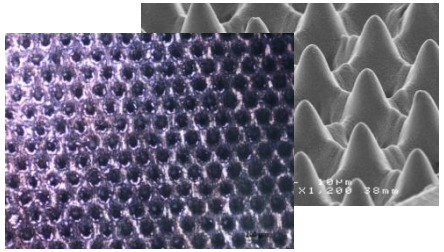




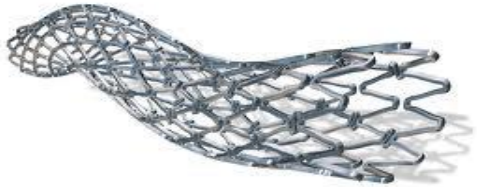


Aplicaciones con pulsos de mJ y femtosegundos

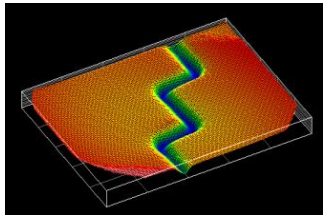
- **Tratamiento de superficies:**



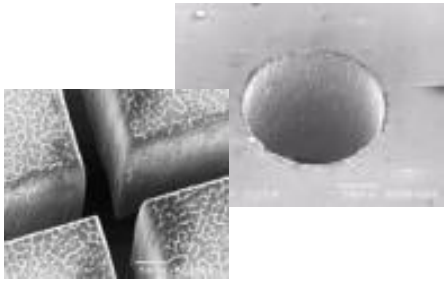
- **Aplicaciones fotovoltaicas:** procesado por láser de láminas finas.
- **Dispositivos biomédicos:**



- **Fotónicas:** procesado de guías ópticas

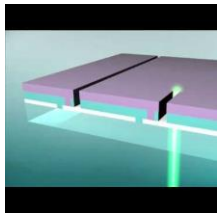


- **Microfluídica.**



- **Microcortes y microahujeros**
- **Microsoldadura**

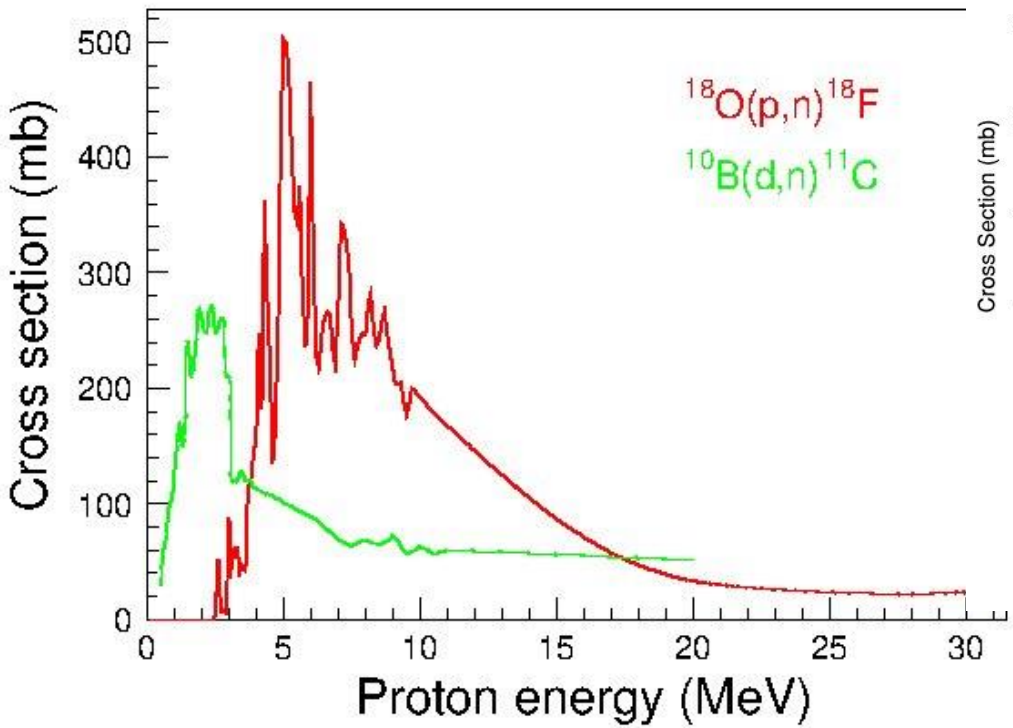
- **Producción de nanopartículas**

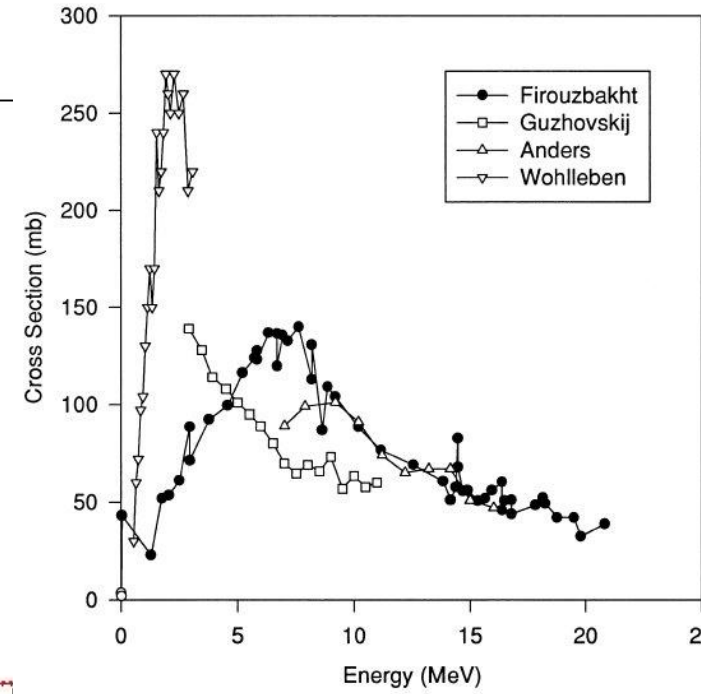


- **…….**

Radioisotope production: general considerations

Production cross sections





The energy dependence of the production cross sections defines the minimum energy for the beam particles

In some cases the cross sections are not sufficiently well known

Principales centros/proyectos de investigación

- > 100 TW
- 10 - 100 TW