

LAS INSTALACIONES DEL CENTRO NACIONAL DE TECNOLOGÍAS PARA LA FUSIÓN (TECHNOFUSIÓN):

I. ÁREA EXPERIMENTAL DE IRRADIACIÓN DE MATERIALES CON HACES DE IONES

Rafael Vila

Laboratorio Nacional de Fusión. CIEMAT (Madrid)

**y el grupo de aceleradores de TechnoFusión
CMAM, UNED, UPM**



UNION EUROPEA
FONDO SOCIAL EUROPEO



Esquema

- Introducción y objetivos generales.
- Conceptos primarios: Justificación de un triple haz.
- Condiciones a reproducir: Fusión
- Últimos avances en el AIM:
- Aceleradores y parámetros de diseño.
- Líneas de transporte de haces.
- Componentes especiales.
- Activación y Campo de dosis.



Objetivo último y premisa de partida:

“Simular” experimentalmente el daño por radiación esperado en ITER-DEMO mediante aceleradores de iones.

Aunque nunca será idéntico, puede revelar los aspectos mas esenciales de la irradiación con neutrones.

- Un efecto muy importante y conocido desde hace unos años es la sinergia en la evolución del daño entre el desplazamiento de átomos (colisiones) y la presencia de **H y He (transmutación)**



Comparación fuentes de neutrones

	Fission (Gen I)	Fission (Gen IV)	Fusion (DEMO/PROTO)	Spallation (ADS)
Structural alloy T_{\max}	<300 °C	300–1000 °C	550–1000 °C	140–600 °C
Max dose for core internal structures	~1 dpa	~30–200 dpa	<u>~150 dpa</u>	50–100 dpa
Max helium concentration	0.1 appm	~3–40 appm	<u>~1500 appm</u> (~10,000 appm for SiC)	~5000 appm/fpy
Max hydrogen concentration			~6750 appm	50,000–100,000 appm/fpy
Neutron Energy E_{\max}	<1–2 MeV	<1–3 MeV	<14 MeV	Several hundred MeV



Irradiación usando aceleradores

- Construcción y operación de una zona de irradiación de **triple haz** (*desplaz + transmutación*)
 - **Objetivo: Reproducir**
- 1- Las cantidades de H y He generados en fusión (desde 1 ppm/sem de He en Fe) mediante implantación de H y He.
- 2- Desplazamientos (dpa's) mediante iones del material a altas energías.

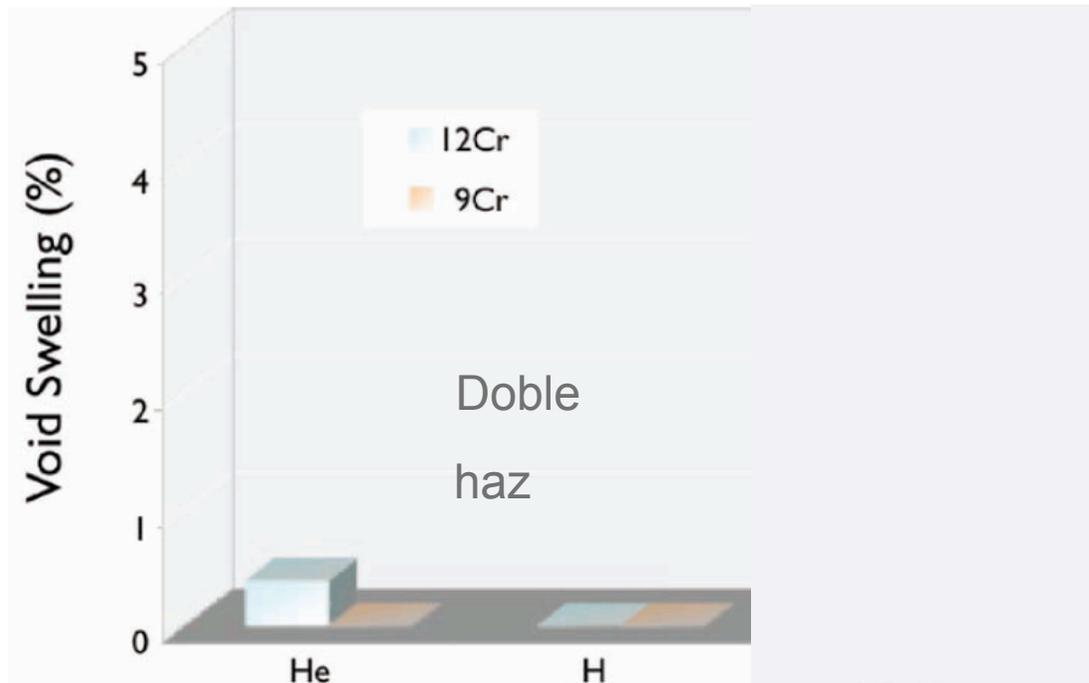
Principales Condiciones:

- Acercarnos a los valores de IFMIF en cuanto a tiempo de irradiación (del orden de 0.1 dpa/semana) o DEMO “acelerado”= 100-300 dpas/semana como valor máximo.
- Mantener el cociente He/dpa generado en Fusión (~ 9 a 11 en Fe, pero mucho mas alto en otros materiales como SiC) →



Desplazamiento + He + H

- Aunque no muy numerosos, existen suficientes ejemplos para justificar una irradiación triple:



← Irradiación con iones de Fe combinada con implantación simultánea de iones de H y/o He.

Figure 1. The synergistic effect of He and H was shown clearly in the triple ion ($\text{Fe}^{3+} + \text{He}^+ + \text{H}^+$) irradiation of an FeCr steel.[3]

Efectos encontrados en otros materiales, como SiC, acero F82H...etc

T. Tanaka, et al, Elsevier Science Bv, Kyoto, Japan, 2003.pp.294.



Que condiciones queremos reproducir?

dpa/fpy appm/fpy		DEMO HCLL (4000MW)			
		FW (front)	FW (back)	BZ (middle)	BZ (back)
Fe-56	dpa	30	29	8	2
	H	982	870	53	4
	He	270	241	16	1
SiC	dpa	20	20	8	3
	H	1053	939	62	5
	He	2596	2304	144	11
SiO2	dpa	48	49	21	8
	H	929	827	53	4
	He	1477	1319	87	7
Al2O3	dpa	19	20	9	3
	H	1114	987	60	4
	He	1290	1150	75	6
Si2N4	dpa	17	17	7	3
	H	2511	2339	398	117
	He	1287	1207	150	17
CaO	dpa	17	17	7	3
	H	2975	2698	215	18
	He	1475	1335	103	8
AlN	dpa	21	21	9	3
	H	2545	2350	363	104
	He	1076	1011	127	14

Condiciones muy variables si consideramos varias posiciones en DEMO/ITER y los varios materiales candidatos.

Incluso el cociente He/dpa puede variar notablemente:

P.Ej He/dpa :

desde ~ 0.25 para W ; ~ 10 para Fe ~ 130 para SiC (en FW)

y solo 2 para Fe a mitad de la BZ.

* Esta tabla nos permite por tanto ajustar las cantidades que necesitamos en cada caso en cada acelerador !!

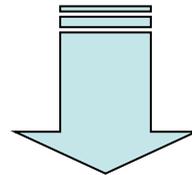
FW: Primera pared

BZ: Breeder Zone

Ref:N.Casal, F.Sordo, F.Mota...



Como llevar a la práctica todo lo
presentado?



Concepto de triple Haz en
TechnoFusión.



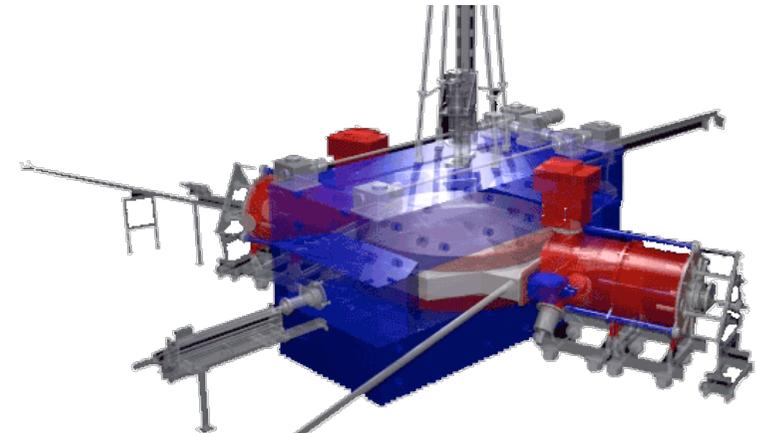
Concepto de triple Haz en TechnoFusión

Modelo inicial :

- **1 Ciclotrón** para iones pesados (Fe, C, Si...): iones de unos cientos de MeV → Utilizado para producir desplazamientos (dps).

- **2 aceleradores lineales** de ligeros (H y He): unos pocos MeV → Implantar las cantidades necesarias para simular la transmutación de H y He

→ Igualar la penetración en el material blanco de los 3 haces iónicos.





Elementos principales del AIM

- Aceleradores
- Líneas de transporte de haces
- Degradadores de haz
- Cámara experimental de triple haz.



Aceleradores- Aspectos técnicos

- Diseño conceptual en marcha.
- **Aceleradores lineales** : Existen comerciales, pero se necesita definir ciertos parámetros en el corto plazo
 - Fuentes de Iones (tipo, rangos de corriente...)
- **Ciclotrón** es el componente mas complejo.
 - Diseño ciclotrón isócrono –multi-ión (complejo). Colaboraciones externas con grandes instalaciones y empresas nac/internac.
 - Parece que se elimina la opción superconductora.
- También es importante avanzar en los componentes de las líneas de transporte, neutralizador, degradador de energías..etc
- Previstos algunos prototipos previos.



Ciclotrón: Existen ejemplos similares pero NO multi-ion y con los rangos de energía requeridos !

→ Requiere Diseño específico y construcción. Colaboraciones / contratos en marcha establecidos con MIT, SigmaPhi, ACS, GANIL...

IBA C70
(Arronax, Nantes)+



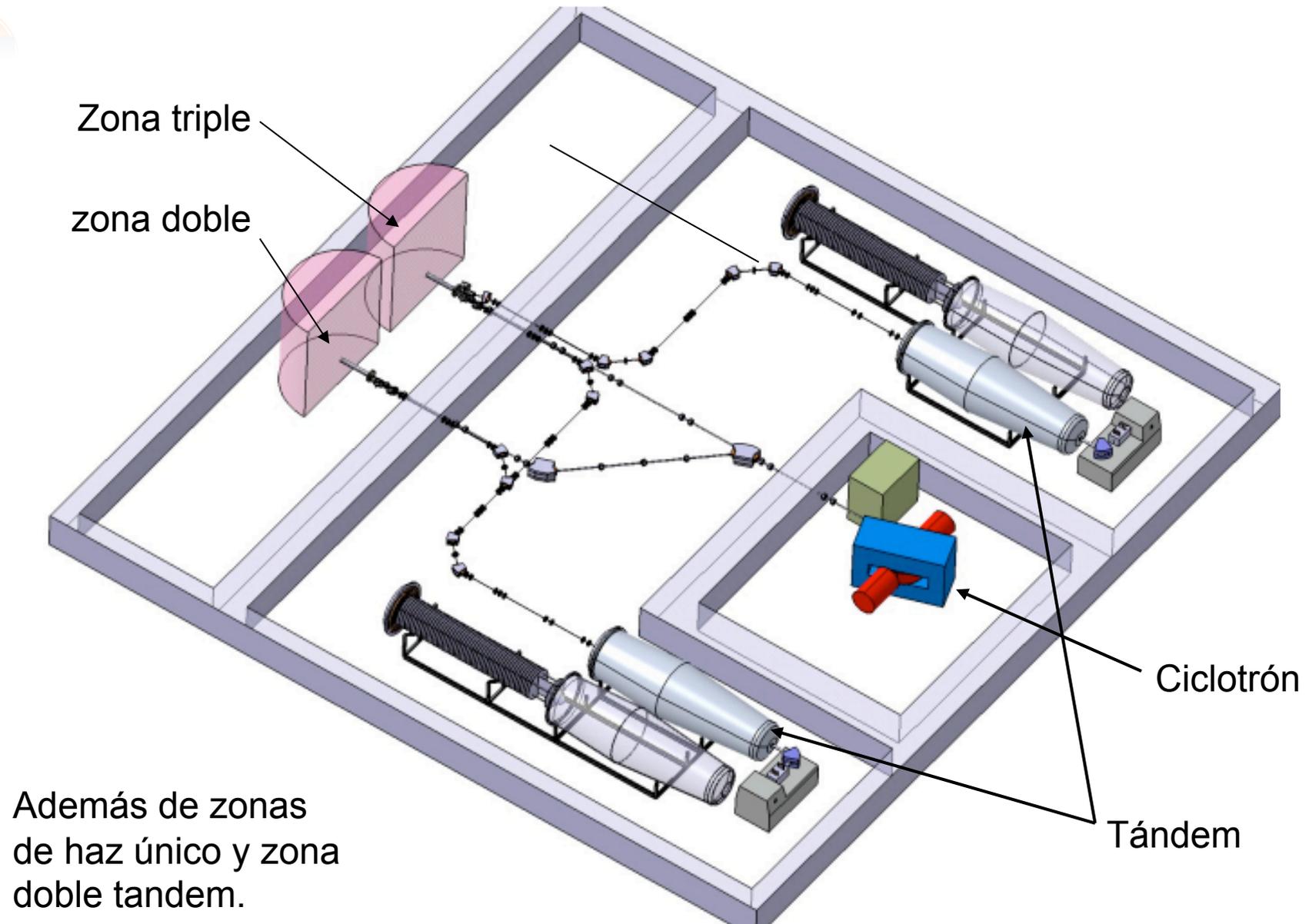


Diseño de líneas de transporte de los aceleradores

- Contrato con Elytt Energy para un diseño doble
 - a) Básico y b) Utilizando Ed Ciemat.
 - 1 pto triple haz
 - 1 pto de protones alta E (separado por blindaje)
 - Varias estaciones simples aprovechando los 2 tándem.
 - Pendiente de definir mejor algunos parámetros.

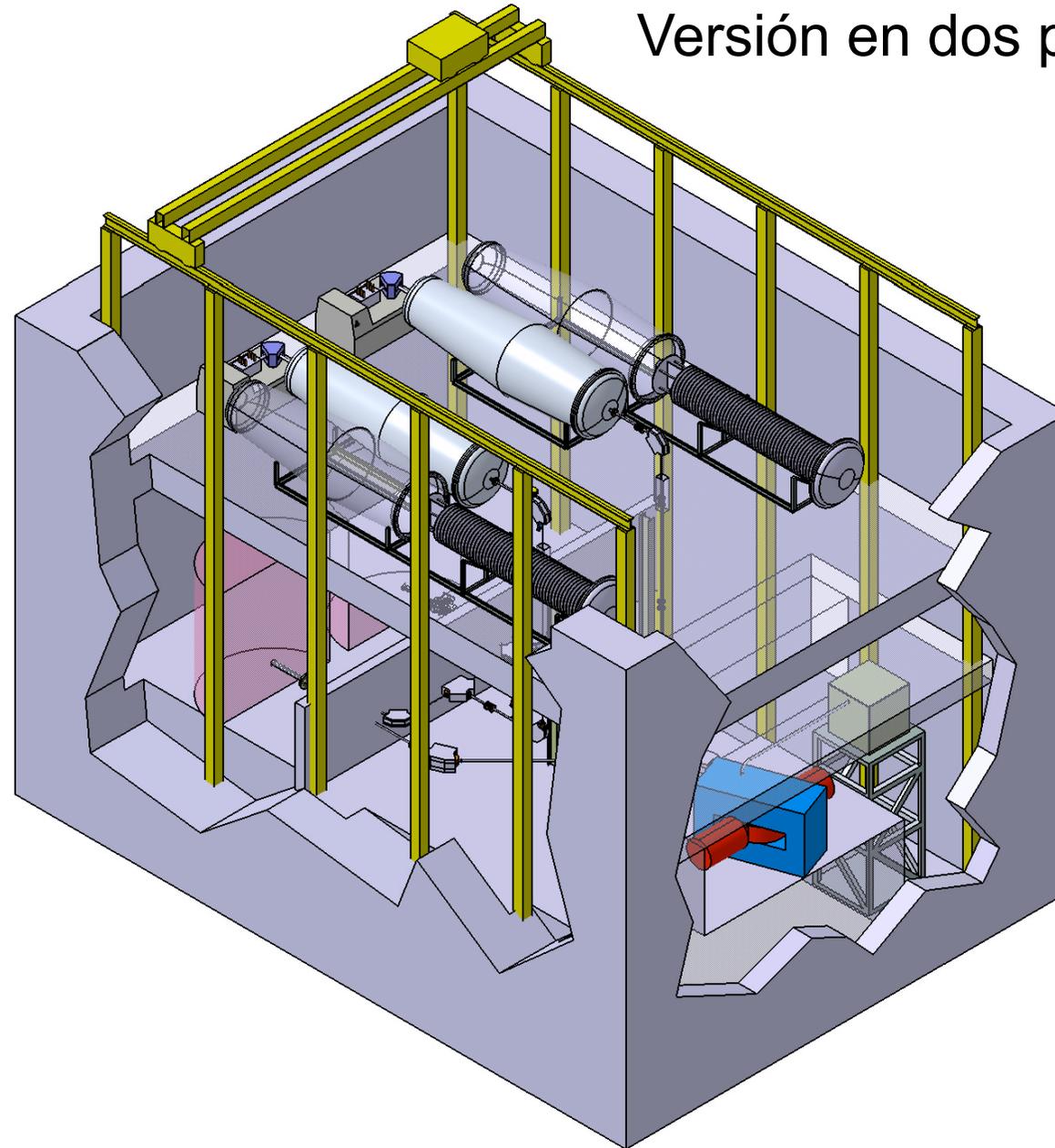


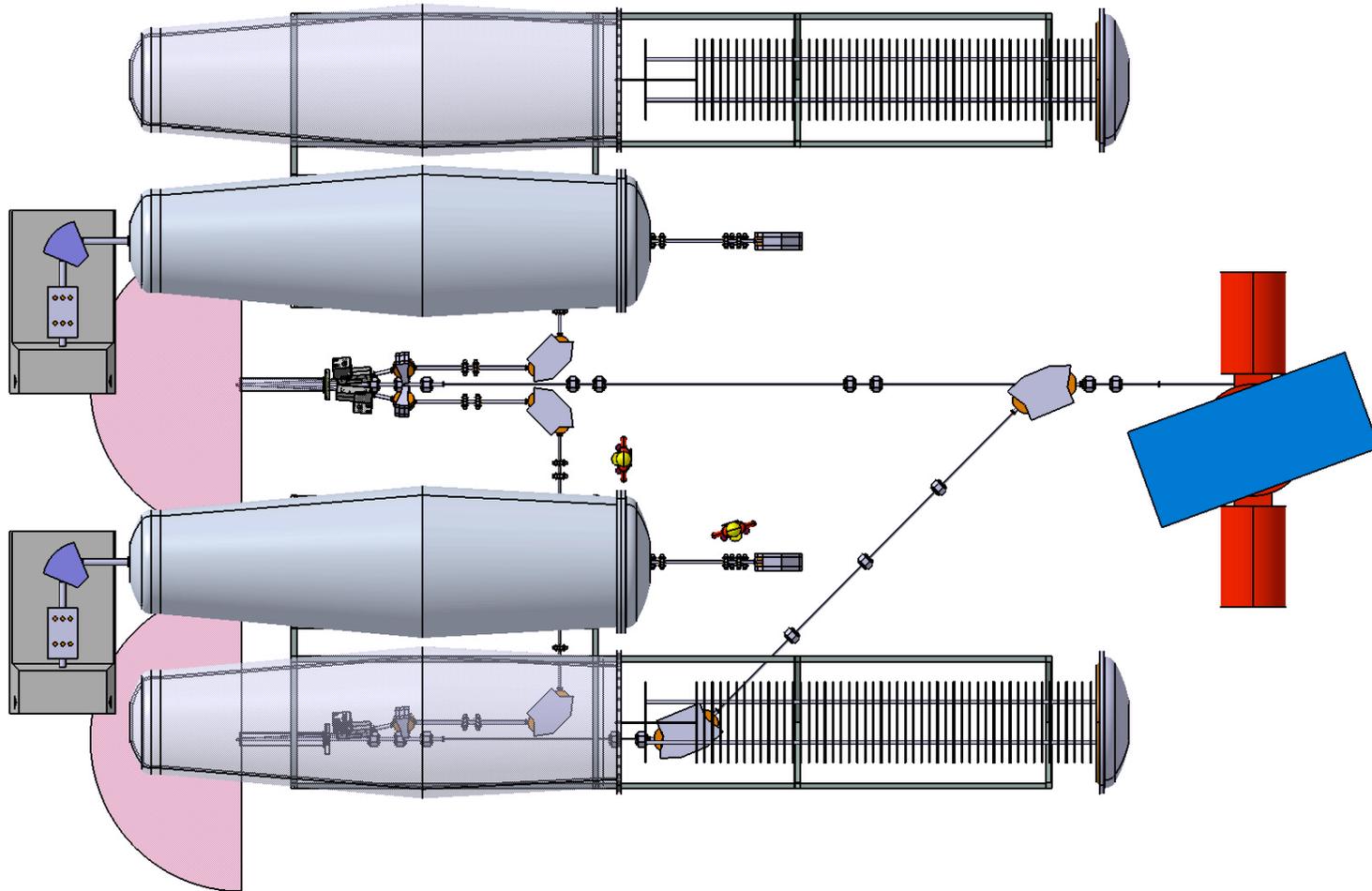
Versión básica en 1 planta

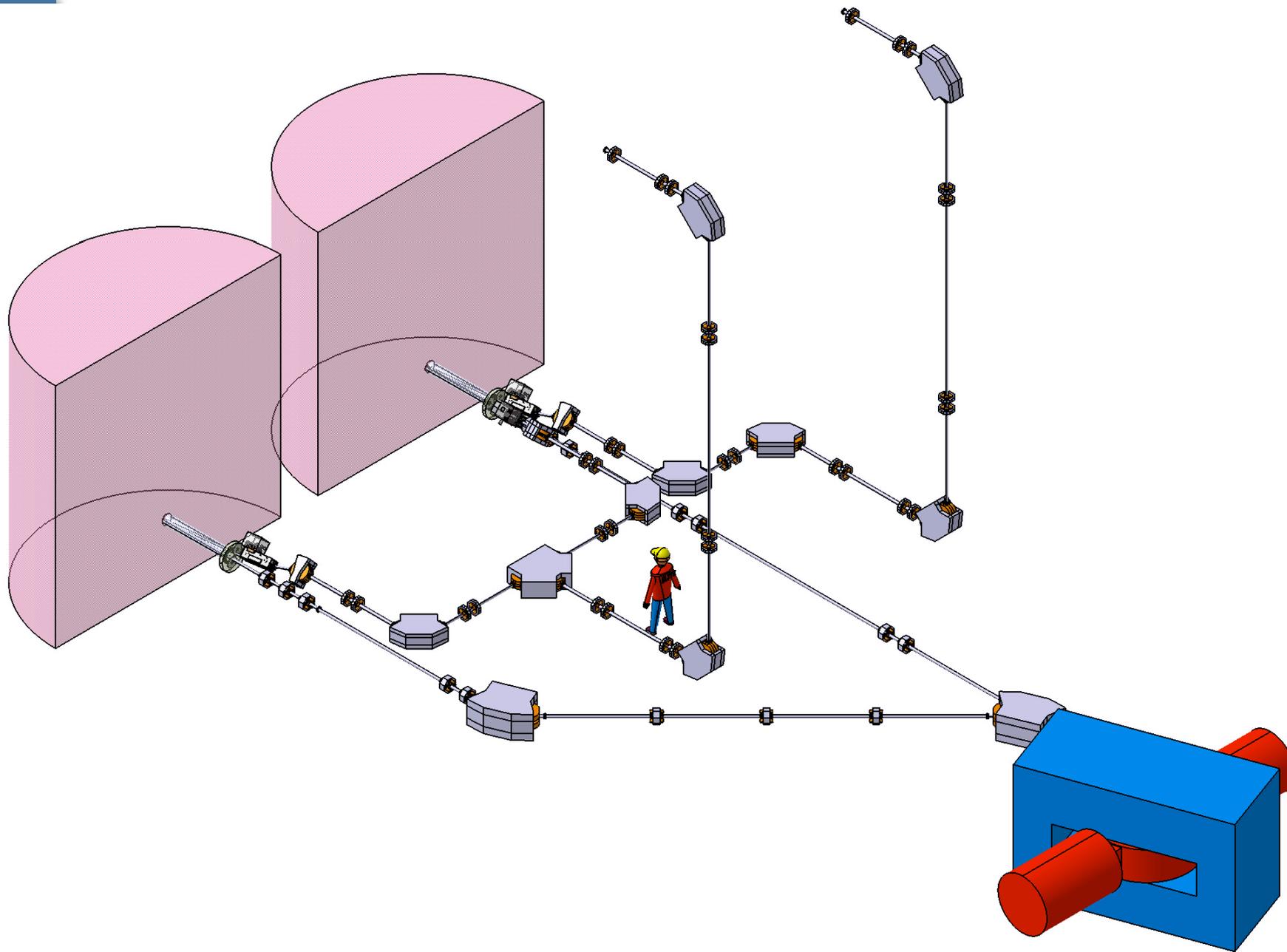


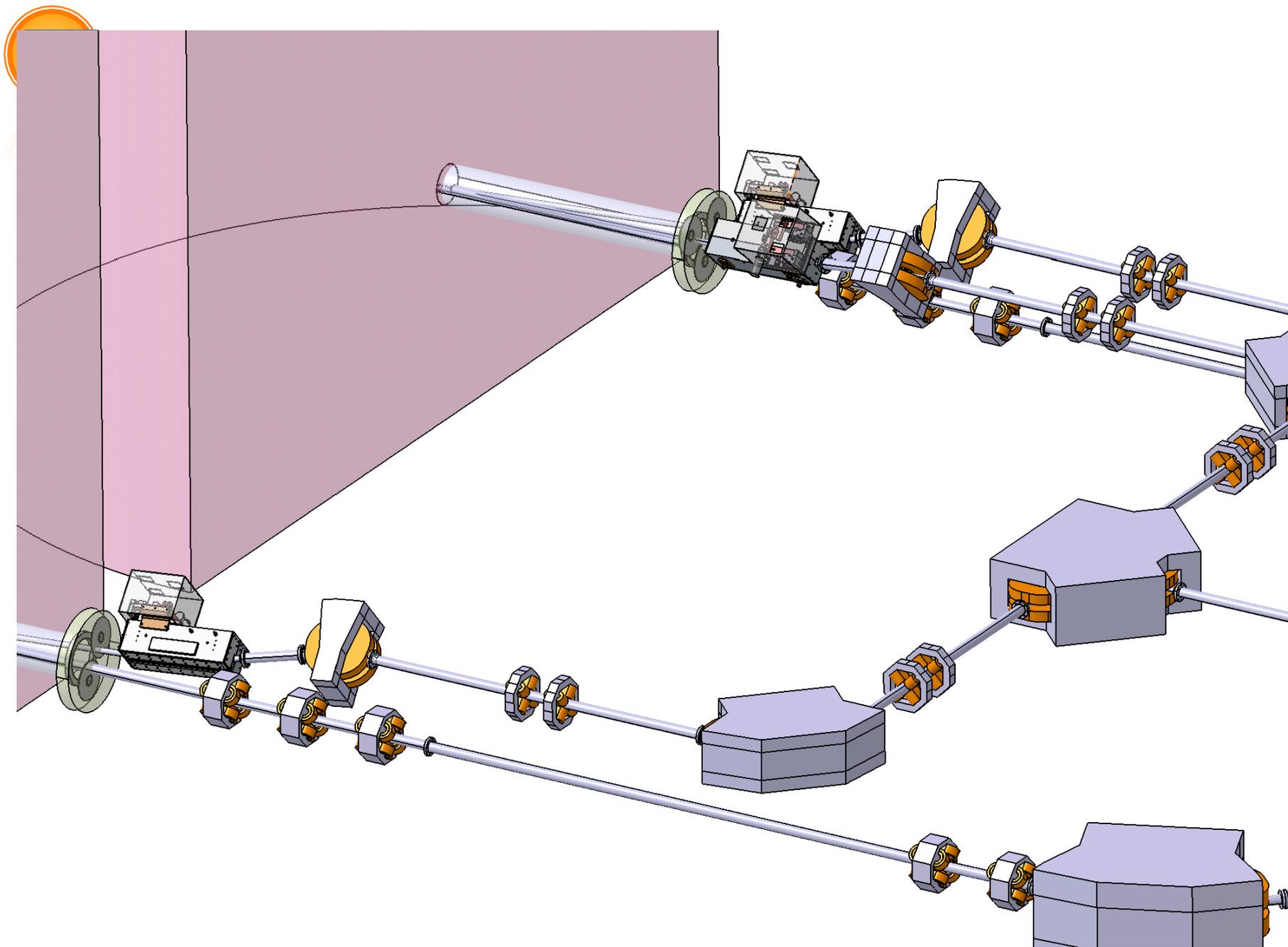


Versión en dos plantas



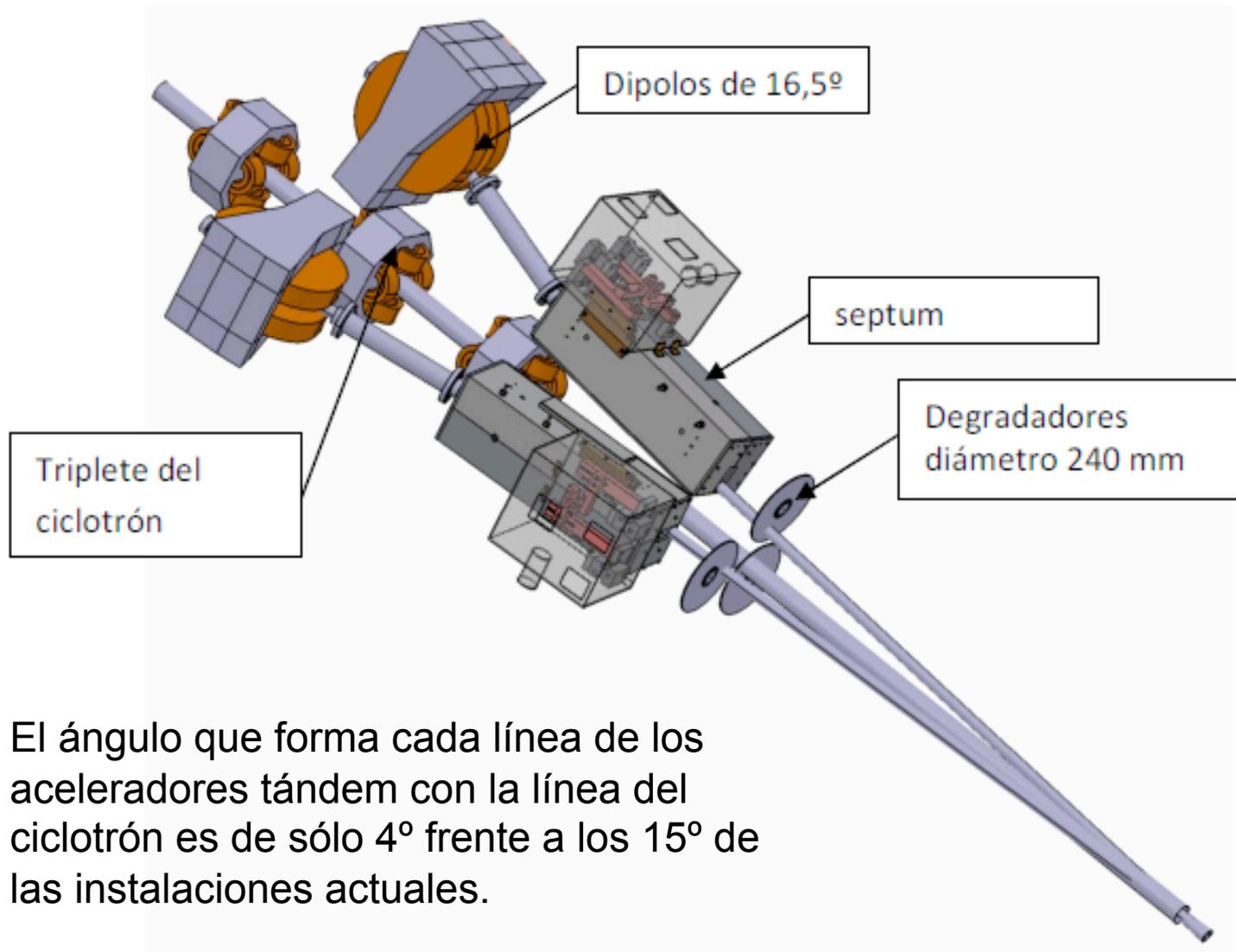






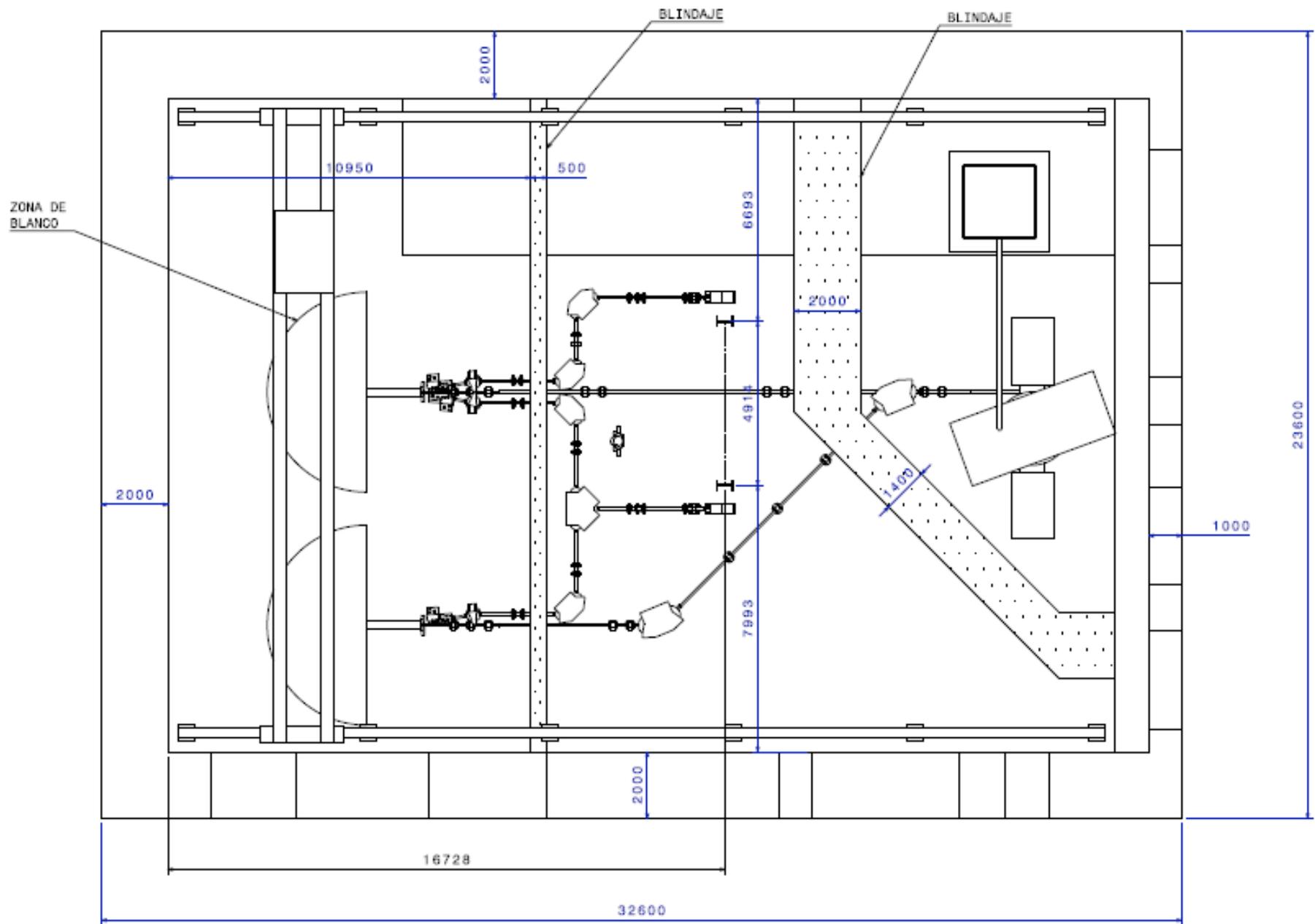


Soluciones innovadoras



El ángulo que forma cada línea de los aceleradores tándem con la línea del ciclotrón es de sólo 4° frente a los 15° de las instalaciones actuales.

Ilustración 41. Vista de la focalización final desde la zona del blanco.





Costes

Tabla 10-1. Costes recurrentes y no recurrentes de los imanes para la instalación de nueva planta.

		Numero max. Simultaneo	Numero total	Coste unitario (€)	Coste total(€)	Coste no recurrente
Linea ciclotron						
	Cuadrupolos	16	25	11322,11	283052,69	29546,42
	Dipolos	2	2	70838,97	141677,93	69649,77
Lineas tandem						
	Cuadrupolos	57	65	9361,80	608517,00	27512,20
	Dipolos 45	8	10	16382,10	163820,95	35242,26
	Dipolos 16.5	3	2	16382,10	32764,19	35242,26
	Septums	2	3	45000,00	135000,00	0,00
Total					1364832,76	197192,91

El coste total es del orden de 1,6 M€.



ESTIMACION DE COSTE DE LOS COMPONENTES DE VACIO

Total : 366 a 330 k€

ESTIMACION DE COSTE DE LAS FUENTES DE ALIMENTACION

cuadрупolos van alimentados independientemente y todos los dipolos van alimentados en serie

Total : 436 a 291 k€

ESTIMACION DE COSTE DE LOS DIAGNOSTICOS

Total : 245 k€

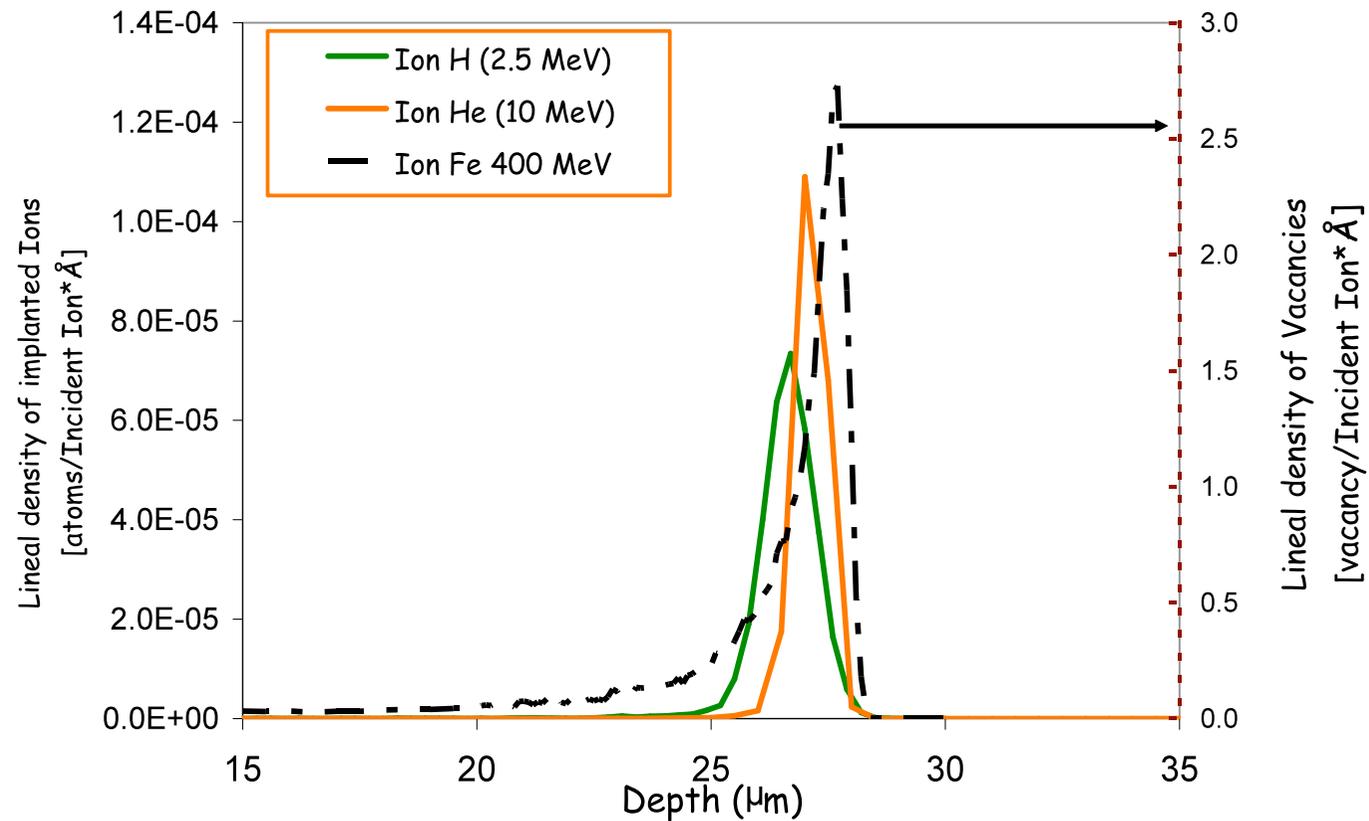
Tabla 10-8. Coste total de las líneas de la instalación de nueva planta.

Imanes	1562
Fuentes de alimentación	436
Soportes	309
Vacío	366
Instrumentación	245
Total	2918



Necesidad de un degradador de haz

A energía fija las zonas dañadas e implantadas son muy estrechas:

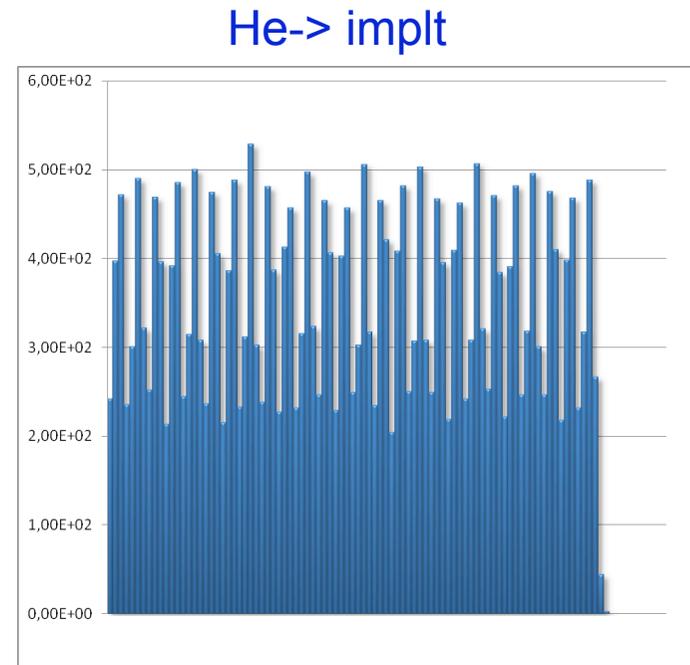
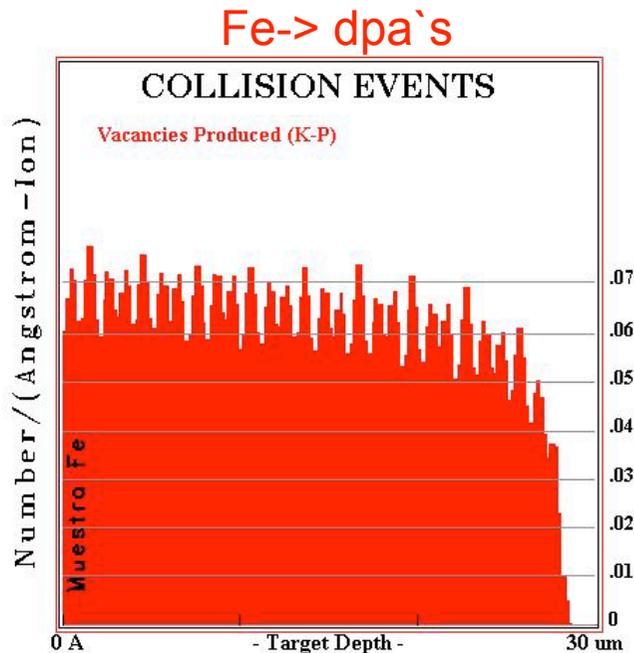
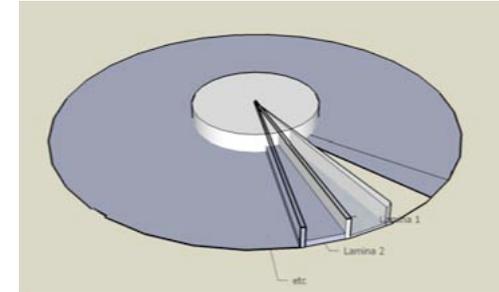


→ Es necesario degradar la energía para **ensanchar la zona irradiada**



En progreso : Degradador de haz

- Realizado: Estudio de modelos similares
- Cálculo de un perfil realista (J de Vicente con SRIM) de haz doble Fe 385MeV y He atravesando 27 láminas de Fe distintas y finalmente incidiendo sobre el blanco de Fe. (varios GB de datos)



- » Contactos sobre el tema en Jannus (Yves Serruys) y Jülich (P.Jung).
- » Proyecto de Iberinco: diseño más detallado y *Efectos Térmicos*



Objetivo: Irradiar la muestra reproduciendo los altos campos magnéticos esperados en ITER /DEMO.

→ Muestra en el interior de un imán.

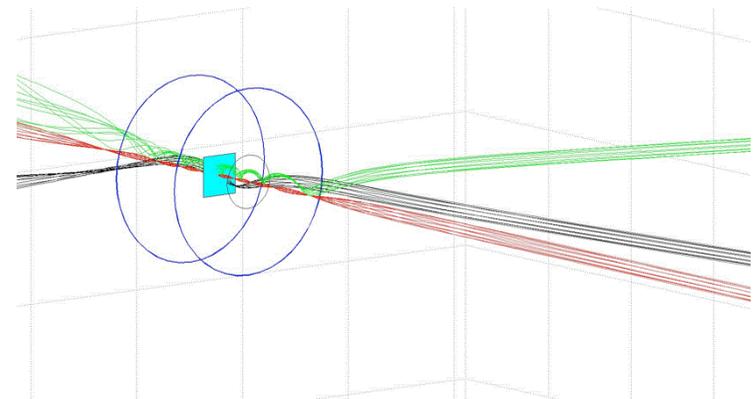
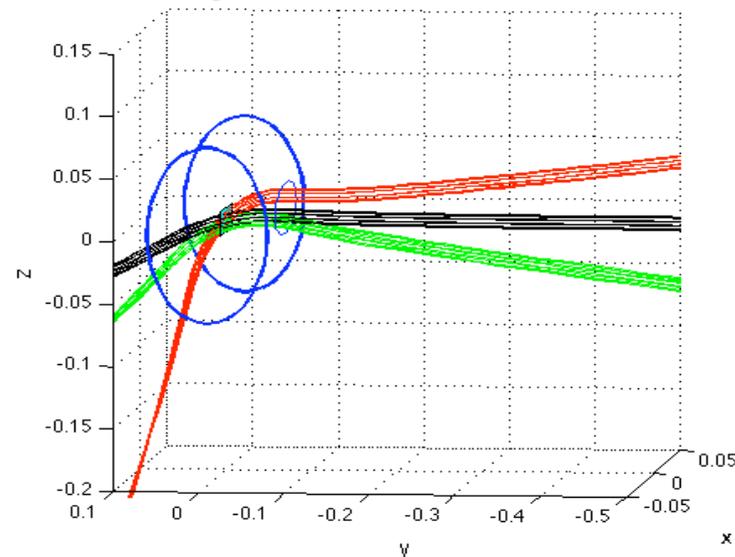


2 opciones:

1- Neutralizar el haz para que no se vea afectado. Descartado: Neutralizador muy poco eficiente y voluminoso para estas energías.

2.- Ajustar las trayectorias de los haces para incidir en la misma zona de la muestra. Actualmente en desarrollo. 2 ejes posibles.

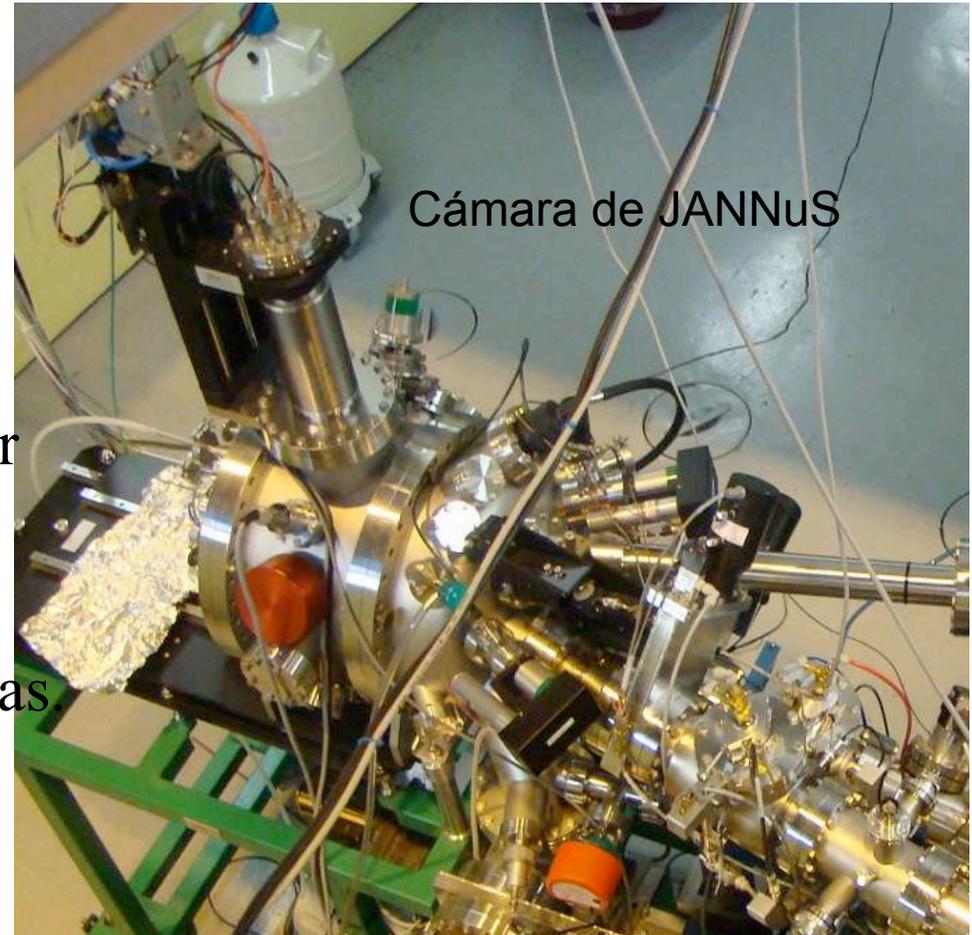
red H⁺ E=8MeV / green He⁺⁺ E=10MeV / black Fe¹⁴⁺ E=385MeV





Experimentos Triple Haz “in-situ”

- Aspecto crítico para asegurar el éxito de la instalación.
- La complejidad de la cámara triple hace que deban escogerse y diseñarse cuidadosamente los experimentos a realizar.
- La cámara debe ser lo bastante versátil como para poder acomodar diferentes técnicas en función del tiempo.
- Trabajo en progreso para definirlas



Activación

- Tema muy importante para licenciamiento de la instalación.

Cálculos algo diferentes si se incluyen los **protones** o no, ya que son el caso peor.

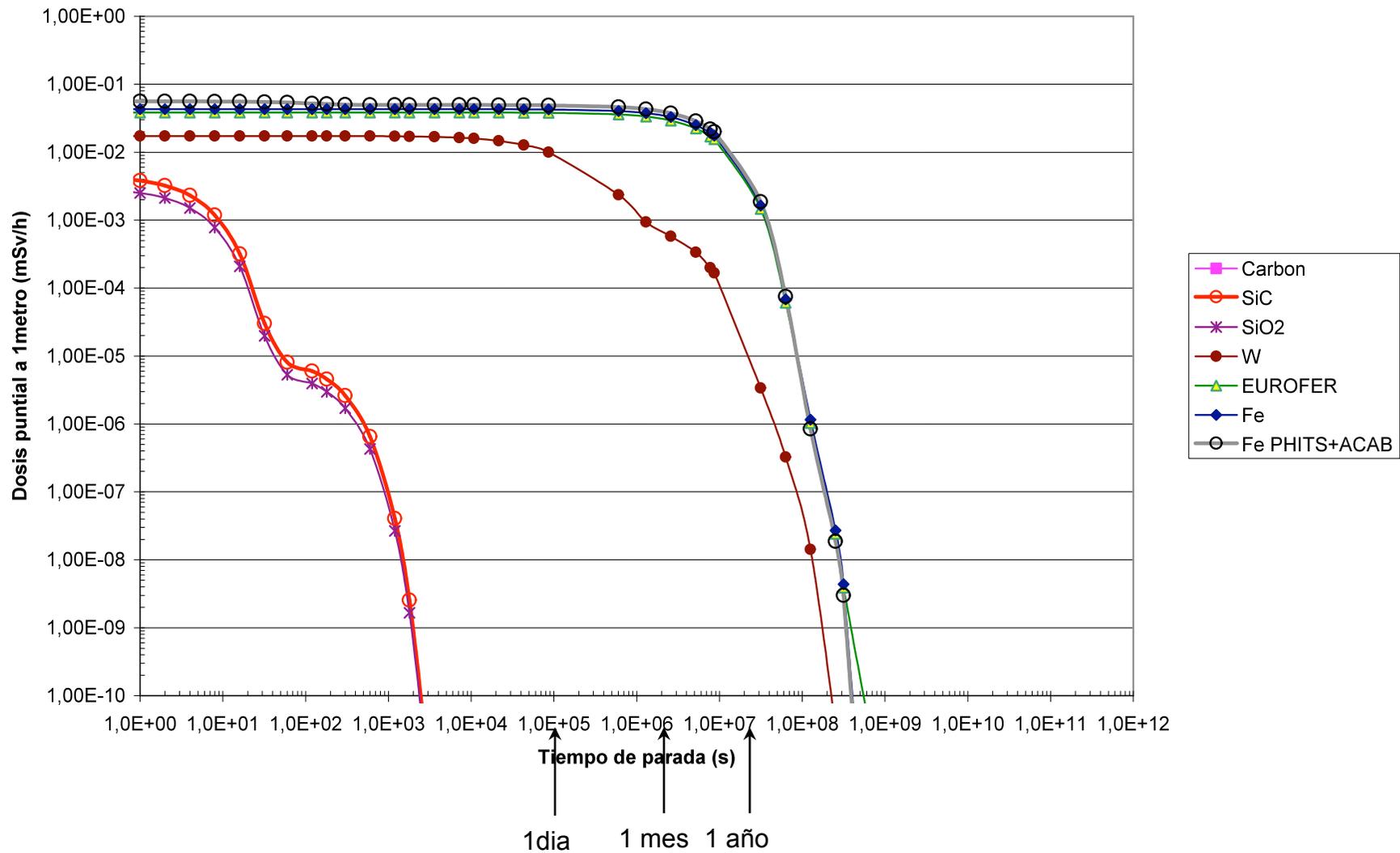
- También se caracterizan todos los elementos formados durante la irradiación.

iones pesados: No se han encontrado librerías de cálculo fiables pero según la bibliografía los niveles de activación/transmutación van a ser muy reducidos al estar por debajo de los 10 MeV / nucleón en el caso de C, Si, Fe y W. -> El caso mas critico sería el C con 9.4 Me/nucleón (en el caso de un ciclotrón de k=85).



Caso extremo: H⁺ de 10 MeV

Dosis sólo por protones tras 1 semana de operación, 1 microA, 10 MeV





Niveles de radiación.

La evaluación del campo de dosis en funcionamiento generado en el entorno de la muestra irradiada es una tarea fundamental. Determina las posibles **restricciones de acceso** a la zona de irradiación, la **dosis** a la que están expuestos los diferentes **equipos** presentes en la sala y los **blindajes** necesarios a utilizar.

- Extenso estudio de dosis de **neutrones** y **gammas** calculados en blancos de **Fe** y **C** durante operación con las condiciones:
 - **Protones** de 10 MeV y
 - **He** de 15MeV (sistemas de implantación).
 - Haz circular de 1 cm² y corrientes de **50 pA/cm²** y **1 μA/cm²** (condiciones típicas y máx. de trabajo).
 - Tamaño de muestra: 2 X 2 cm con un espesor de 1 mm (perpendicular a esta última dimensión incide el haz).
 - Tiempo de irradiación: 1 semana (full time)
 - Cálculo : MCNPX



Futuro / Activación

- Ampliar estudio paramétrico efectos de activación de la muestra que tenga en cuenta todas las condiciones de TECNOFUSION. Estudio en función de las características del haz y de las características de la muestra.
- Evaluar la producción de transmutantes sólidos y gaseosos de manera pormenorizada. Y comparar con resultados experimentales.
- Completar los estudios de transmutación con partículas alfa e iones ligeros/pesados (usar modelos nucleares).
- **Incertidumbres** en los cálculos de activación.
- Estudio de viabilidad, desde el punto de vista de activación, de un **degradador** de haz
- Estudio de viabilidad, desde el punto de vista de activación, del **beam dump (caso protones)**.



Gracias por su atención