



# DESARROLLO DE UN NUEVO PATRÓN NEUTRÓNICO EN EL LABORATORIO DE METROLOGÍA DE RADIACIONES IONIZANTES DEL CIEMAT

R. Méndez Villafañe, X. Campo Blanco, F. González Sánchez

Laboratorio de Patrones Neutrónicos (LPN), Laboratorio de Metrología de Radiaciones Ionizantes,  
LMRI, CIEMAT



# DESARROLLO DE UN NUEVO PATRÓN NEUTRÓNICO EN EL LMRI DEL CIEMAT

## INDICE

- Introducción: Recomendaciones de la norma ISO 8529-1
- El Laboratorio de Patrones Neutrónicos (LPN) del CIEMAT:
  - Características del LPN
  - Fuentes neutrónicas
  - Trazabilidad
- Desarrollo del patrón Cf + D<sub>2</sub>O:
  - Características del nuevo patrón
  - Modelización MC
  - Variación de parámetros constructivos
  - Validación del nuevo patrón
- Conclusiones

# Introducción: recomendaciones de la norma ISO 8529-1

La norma [ISO 8529](#) en sus tres partes es la que establece los campos de referencia recomendados para las calibraciones, su producción, caracterización y uso:

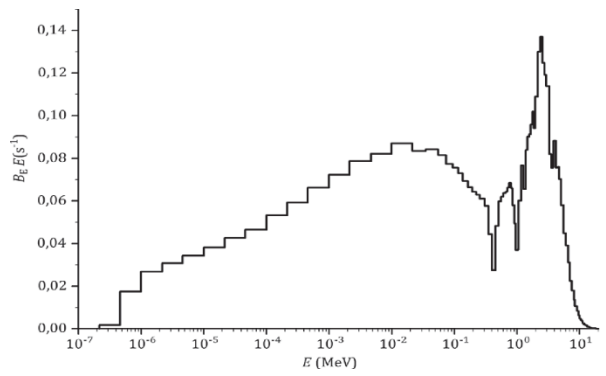
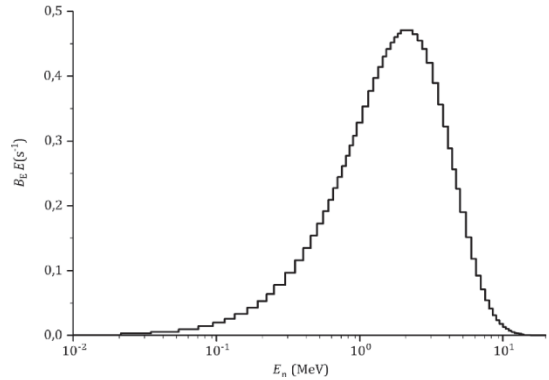
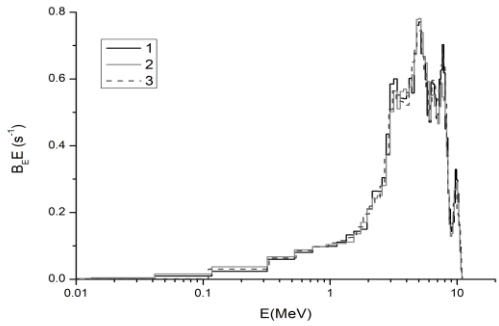
Source	Half-life a <sup>d</sup>	Fluence-averaged energy <sup>a</sup> MeV	Specific source emission rate <sup>b</sup> s <sup>-1</sup> ·kg <sup>-1</sup>	Ratio of photon to neutron ambient-dose-equivalent rates <sup>c</sup>
<sup>252</sup> Cf (D <sub>2</sub> O moderated)	2,647	0,57	2,1 × 10 <sup>15</sup>	< 0,18 <sup>e</sup>
<sup>252</sup> Cf	2,647	2,13	2,4 × 10 <sup>15</sup>	0,05 <sup>f</sup>
			s <sup>-1</sup> ·Bq <sup>-1</sup>	
<sup>241</sup> Am-Be(α,n) small source <sup>g</sup>	432,6	4,17	6 × 10 <sup>-5</sup>	< 0,035 <sup>h</sup>
large source		4,05		

Cambios en ISO 8529-1 (2019):

- <sup>241</sup>Am-Be: fuentes **grandes** (185 – 555 GBq) y **pequeñas** (40 GBq) de Am-Be
- Nuevo espectro de <sup>252</sup>Cf actualizado según ENDF-VIII.0 y con más grupos de E.
- Nuevo espectro de <sup>252</sup>Cf - D<sub>2</sub>O

La magnitud  $H^*(10)$  se determina a partir de la tasa de emisión de las fuentes,  $B(t)$  y el coeficiente de conversión de fluencia a equivalente de dosis ambiental,  $\bar{h}_\Phi$  (o personal)

$$B(t) \longrightarrow \dot{\Phi} = \frac{B(t)F_1(\theta)}{4\pi l^2} F_A(l) \longrightarrow \dot{H}^*(10) = \dot{\Phi} \bar{h}_\Phi(10)$$



# El Laboratorio de Patrones Neutrónicos del CIEMAT

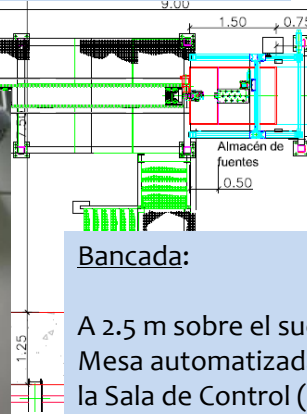
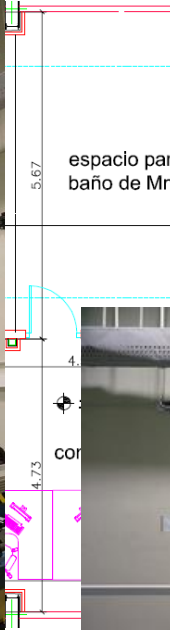
## Características del LPN

Sala de Irradiación (bunker):

dimensiones ISO : 9 m x 7.5 m x 8 m  
paredes de hormigón de 1.25 m  
Dimensionado para 1 mg <sup>252</sup>Cf como máximo.

Puerta del búnker:

6.5 Tn Automatizada  
Ladrillos de Contek® especialmente diseñado para el LPN con presencia de <sup>10</sup>B (colemanita)



**Bancada:**

A 2.5 m sobre el suelo y con 3 m de longitud  
Mesa automatizada controlada remotamente desde la Sala de Control (Programa de Control)

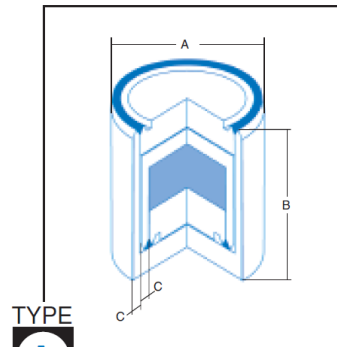
**Manipulador Cartesiano:** permite seleccionar la fuente neutrónica desde la posición de almacenamiento hasta la de lanzamiento  
**Lanzadera:** dispara la fuente hasta la posición de irradiación (4 m sobre el suelo) en menos de 1 s.

# El Laboratorio de Patrones Neutrónicos del CIEMAT

## Fuentes neutrónicas

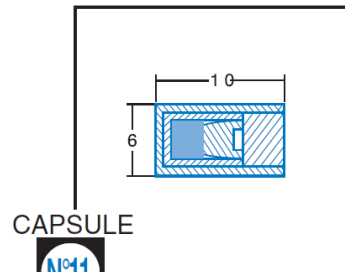
- $^{252}\text{Cf}$  : 0,236 mg de (5 GBq) y  $B(t) = 5,471 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}$  ( $\pm 2.26\% \text{ K}=2$ ) Calibrada en NIST
- $^{241}\text{Am-Be}$ : 185 GBq y  $B(t) = 1,1 \cdot 10^7 \text{ s}^{-1}$  ( $\pm 1.4\% \text{ K}=2$ ) Calibrada en CMI (Rep. Checa)

Datos del fabricante: cápsulas de las fuentes



TYPE  
**A**

A: Outside diameter  
B: Overall length  
C: Thickness

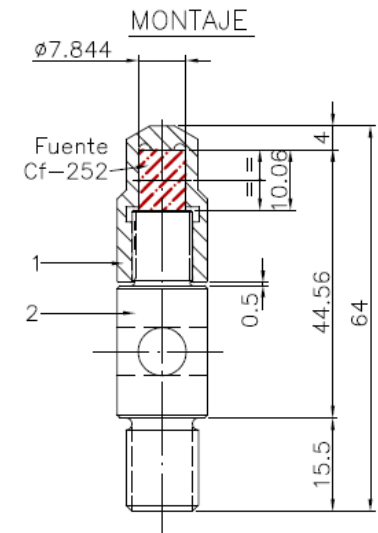
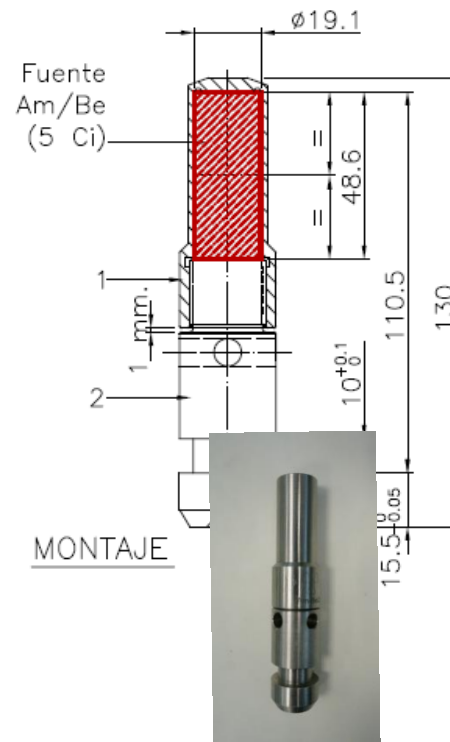


CAPSULE

Nº11

Active element incorporated in a ceramic matrix.  
Active volume can change depend on te activity requested  
(Length from: 0,762 mm to 2,29 mm.  
Active diameter: 3,18 mm

Datos porta-cápsulas de las fuentes



Basic reference	Maximum activity		Dimensions (mm)			Encapsulation	Classification ISO 2919
	GBq	Ci	A	B	C		
SNA02	1,5	0,04	8	10	0,8	double	C66545
SNA03	11,1	0,3	17	19	0,8	double	C66544
SNA04	1,5	0,04	8	15	0,8	double	C66544
SNA05	370	10	27	130	2,5	double	C66545
SNA20	185	5	19,1	48,6	1,4	double	C66546

# El Laboratorio de Patrones Neutrónicos del CIEMAT

## Trazabilidad del LPN

Patrón Primario: **Baño de Mn**  
(calibración de fuentes neutrónicas)



$$B(t)$$

Patrones Secundarios:  
**Fuentes neutrónicas**  
 $^{252}\text{Cf}$ ,  $^{241}\text{Am-Be}$ ,  $^{252}\text{Cf-D}_2\text{O}$



$$\Phi = \frac{B(t)F_1(\theta)}{4\pi l^2} F_A(l)$$

Calibración de **monitores de área**  
y **dosímetros personales**



$$\dot{H}^*(10) = \Phi \bar{h}_{\Phi}(10)$$

# Desarrollo del nuevo patrón de $^{252}\text{Cf} + \text{D}_2\text{O}$

## Características del nuevo patrón

INTERNATIONAL  
STANDARD

ISO  
8529-1

Second edition  
2021-11

### Neutron reference radiations fields — Part 1: Characteristics and methods of production

*Champs de rayonnement neutronique de référence —  
Partie 1: Caractéristiques et méthodes de production*

The  $\text{D}_2\text{O}$ -moderated  $^{252}\text{Cf}$  source is ideally composed of a point  $^{252}\text{Cf}$  source located in the centre of a 300 mm diameter heavy-water sphere, surrounded by

- a 0,8 mm thick iron shell, and
- a 1 mm thick cadmium shell.

In practice, a number of designs have been developed in reference laboratories, being slightly different in terms of construction details, such as the guide used to locate the source in the sphere centre, the material used to contain the heavy water, and the structure used to suspend or hold the moderating sphere. In addition, every moderating assembly has specific  $\text{D}_2\text{O}$  purity and  $^{252}\text{Cf}$  source capsule. The experience of reference laboratories suggests that variability in the construction of  $\text{D}_2\text{O}$ -moderated  $^{252}\text{Cf}$  sources results in non-negligible differences in the energy distribution of the neutron fluence<sup>[3]</sup>. Laboratories should characterize their  $\text{D}_2\text{O}$ -moderated  $^{252}\text{Cf}$  sources by simulations and spectral measurements. The energy distribution of the neutron emission rate and spectrum-averaged quantities of these fields should be checked through comparisons. A representative spectrum of the  $\text{D}_2\text{O}$ -moderated  $^{252}\text{Cf}$  source was derived, for the purposes of this document, by Monte Carlo simulations. In this model, 11,4 % of the source neutrons are absorbed in the moderating assembly. See [Annex C](#) for details.

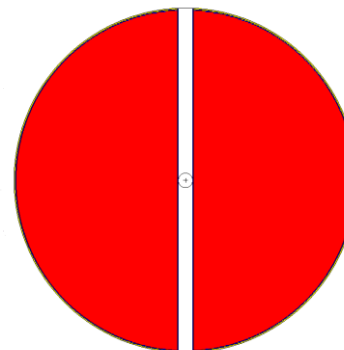
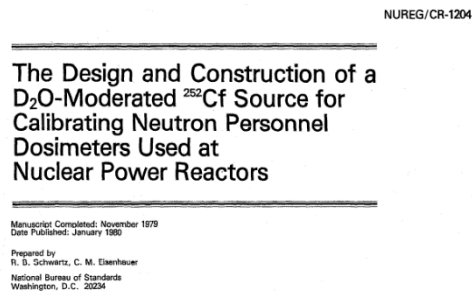
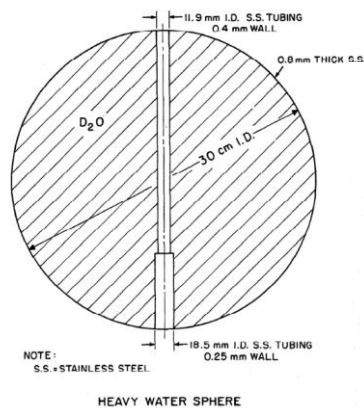


## MCNP model based on ISO-8529-1

### Modelización MC

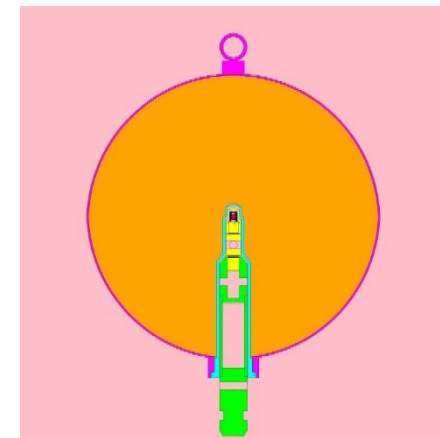
#### MODELO ISO 8529-1 (2021)

- $^{252}\text{Cf}$  en esfera  $\text{D}_2\text{O}$  con 15 cm radio interno
- Nuevo espectro de  $^{252}\text{Cf}$  basado en 89 grupos de E de ENDF-B/VIII.0
- Fuente volúmica distribuida dentro de esfera vacía de 0,64 cm de radio
- Esfera de Fe con 0.8 mm de espesor de pared
- Tubo interno de Fe de 6.4 mm de radio interno y 0.8 mm de espesor de pared
- Corteza externa de Cd de 1 mm de espesor
- Espectro simulado a 100 cm del centro de la fuente
- En vacío (comparamos con aire)



#### MODELO REALISTA (LPN)

- $^{252}\text{Cf}$  en esfera  $\text{D}_2\text{O}$  con 15 cm radio interno
- Nuevo espectro de  $^{252}\text{Cf}$  basado en 89 grupos de E de ENDF-B/VIII.0
- Fuente detallada incluyendo **cápsula** y **porta-cápsula**
- Esfera de acero inoxidable de 2 mm de espesor
- Funda de acero inoxidable que cubre la fuente y con 7,5 mm de radio interno y 2 mm de espesor.
- Modelo original **sin cubierta de Cd**
- Espectro simulado a 100 cm ( y 115 cm)
- En aire

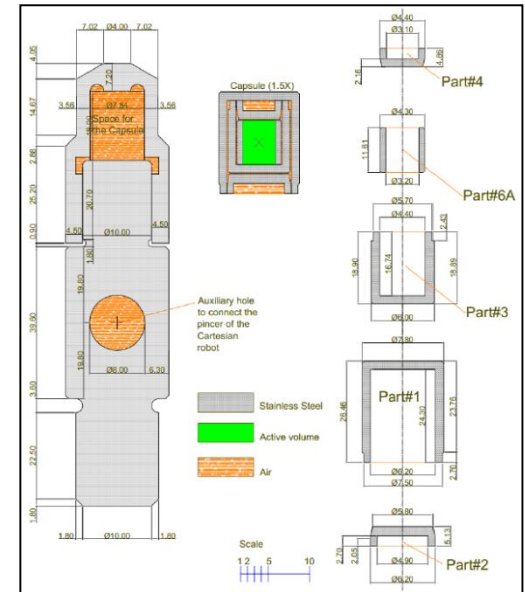
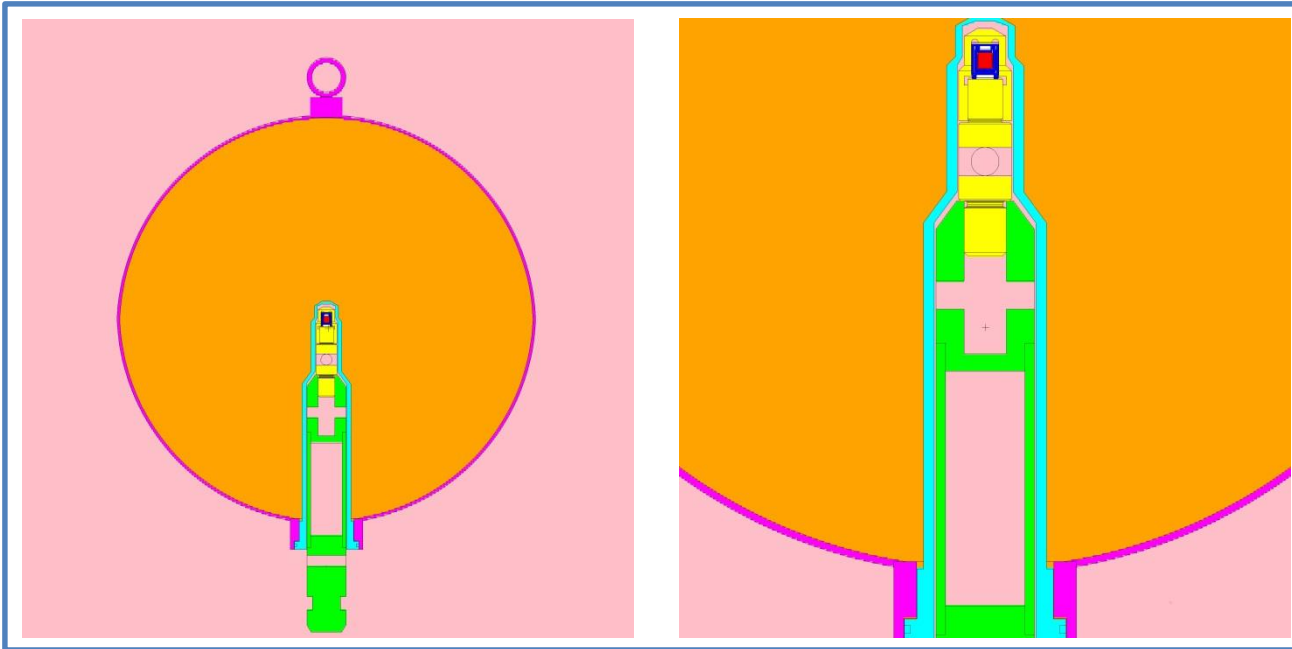


# Desarrollo del nuevo patrón de $^{252}\text{Cf} + \text{D}_2\text{O}$

## Modelización MC

Simulación realizada con MCNPX 2.6 con ENDF/B-VIII. Fuente de  $^{252}\text{Cf}$  detallada, con distribución Maxwelliana con  $T = 1.42 \text{ MeV}$ .

Se emplean tallies F2 (fluencia promedio en  $4\pi$ ) y F5 a distancia de 115 cm. Incertidumbres estadísticas en MC  $< 0,5 \%$ . ENDF/B-VII.



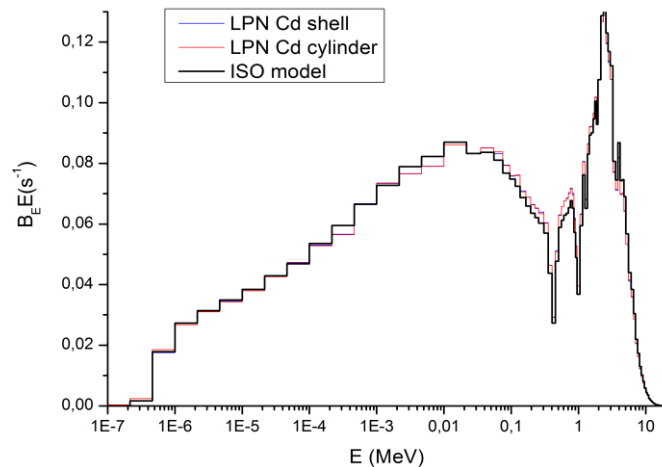
Modelo desarrollado en MCNPX de la esfera de agua pesada con la fuente incluyendo todos sus elementos: porta cápsula, antorcha, funda y los materiales de la esfera.

Partes del porta cápsula de la fuentes de  $^{252}\text{Cf}$ .

# Desarrollo del nuevo patrón de $^{252}\text{Cf} + \text{D}_2\text{O}$

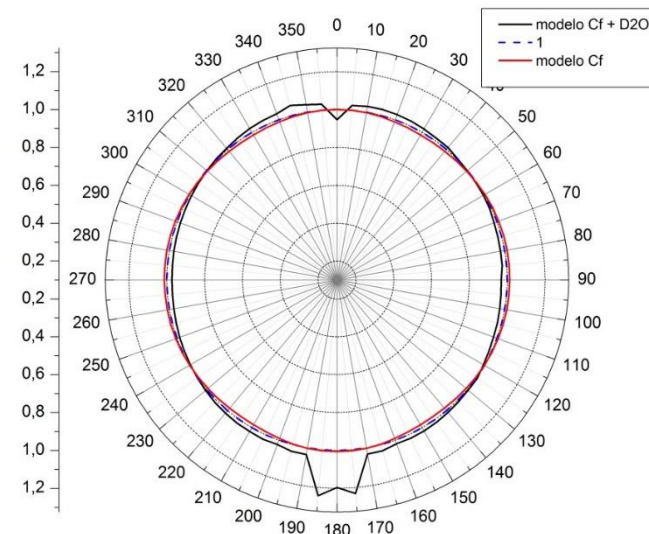
## Variación de parámetros constructivos: Cd y anisotropía

	$\phi$	Fugas	$\bar{E}_\phi$	$\bar{E}_H$	$\dot{H}^*(10)$	$h_\phi(10)$
	[ $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]	[%]	[MeV]	[MeV]	[ $\mu\text{Sv/h}$ ]	[ $\text{pSv}\cdot\text{cm}^2$ ]
Sin Cd	7,58E-06	0,95	0,50	1,89	7,91E-04	104,2
Cd esférico	6,62E-06	0,83	0,55	1,91	7,58E-04	114,4
Cd cilíndrico	7,02E-06	0,88	0,55	1,91	8,03E-04	114,3
ISO 8529-1	7,11E-06	0,89	0,56	1,97	8,06E-04	114,6



Comparación de los espectros ISO de  $^{252}\text{Cf} + \text{D}_2\text{O}$  y los modelos con Cd desarrollados.

Magnitudes obtenidas a partir de la simulación del modelo MC y comparación con las recomendaciones ISO. Tasas de fluencia y de equivalente de dosis ambiental **por neutrón emitido**. Y coeficiente de conversión de fluencia a dosis y de transmisión.

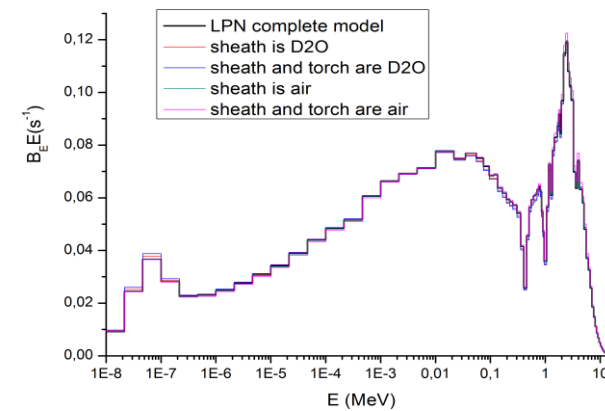
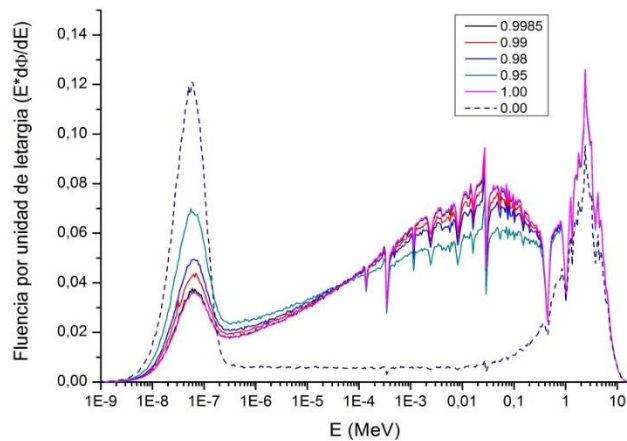
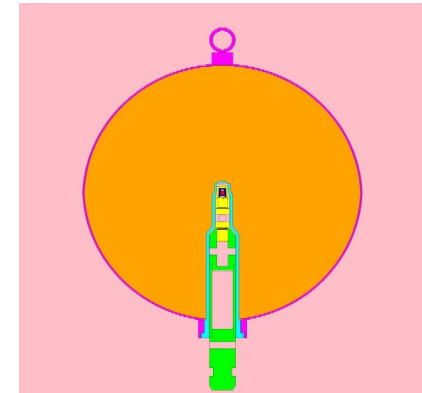


Estudio de la anisotropía de las fuentes de  $^{252}\text{Cf}$  y  $^{252}\text{Cf} + \text{D}_2\text{O}$ .  $F_1(90) = 0,9676 \pm 0,0059$

# Desarrollo del nuevo patrón de $^{252}\text{Cf} + \text{D}_2\text{O}$

## Variación de parámetros constructivos: funda, antorcha y cápsula

Model	$\phi$	Fugas	$\bar{E}_\phi$	$\bar{E}_H$	$\dot{H}^*(10)$	$h_\phi(10)$
	[ $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]	[%]	[MeV]	[MeV]	[ $\mu\text{Sv/h}$ ]	[ $\text{pSv}\cdot\text{cm}^2$ ]
Modelo completo sin Cd	7,58E-06	0,95	0,50	1,89	7,91E-04	104
Funda es $\text{D}_2\text{O}$	7,25E-06	0,91	0,50	1,89	7,56E-04	104
Funda y antorcha son $\text{D}_2\text{O}$	7,55E-06	0,95	0,49	1,89	7,86E-04	104
Funda es aire	7,42E-06	0,93	0,49	1,90	7,71E-04	104
Funda, antorcha y porta cápsula son aire	7,29E-06	0,92	0,49	1,90	7,55E-04	103



Efecto de la variación en la composición de  $\text{D}_2\text{O}$

Efecto de la variación en parámetros constructivos, según se recogen en la tabla.

# Desarrollo del nuevo patrón de $^{252}\text{Cf} + \text{D}_2\text{O}$

## Validación del modelo

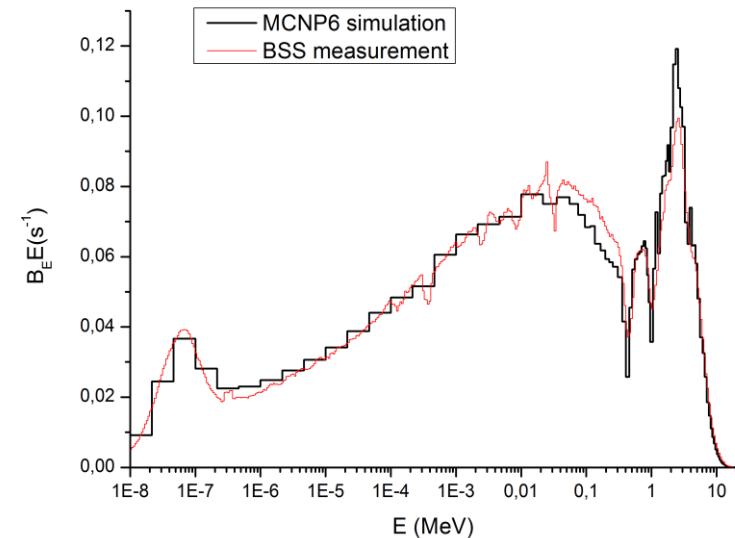
### Medidas de espectrometría

Se han realizado medidas de espectrometría neutrónica con el sistema de esfera de Bonner (BSS) empleando el cilindro de sombra.

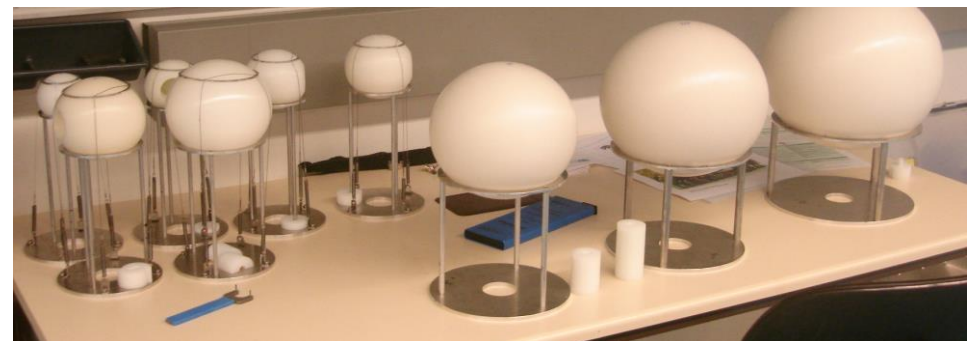
DPHI-TOT	277,09	100,00%	FPHI-TOT	743,95	100,00%
DTHERMAL	2,93	1,06%	FTHERMAL	66,71	8,97%
D-INTER-	27,31	9,86%	F-INTER-	466,31	62,68%
D-FAST-S	245,50	88,60%	F-FAST-S	210,13	28,25%
			F-FROM10	0,80	0,11%

Medidas de tasa de dosis y tasa de fluencia neutrónica para  $^{252}\text{Cf} + \text{D}_2\text{O}$  (arriba) y  $^{252}\text{Cf}$  (abajo).  
En  $\mu\text{Sv/h}$  y  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  respectivamente (24/09/2018;  $B = 1,037\text{E}+08 \text{ s}^{-1}$ )

DPHI-TOT	1021,12	100,00%	FPHI-TOT	696,79	100,00%
DTHERMAL	0,04	0,00%	FTHERMAL	0,92	0,13%
D-INTER-	0,03	0,00%	F-INTER-	0,16	0,02%
D-FAST-S	1020,68	99,96%	F-FAST-S	695,49	99,81%
			F-FROM10	0,22	0,03%



Comparación entre simulación y medidas para el espectro del  $^{252}\text{Cf} + \text{D}_2\text{O}$  directo.



## Desarrollo del nuevo patrón de $^{252}\text{Cf} + \text{D}_2\text{O}$

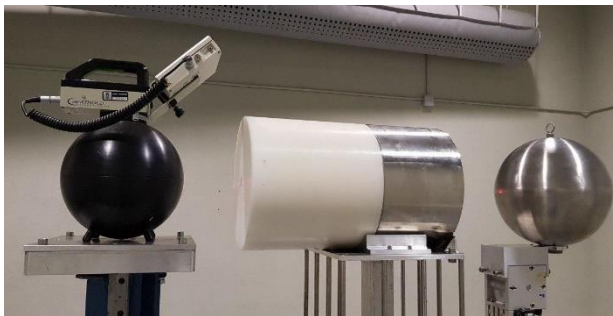
### Validación del modelo

### Calibración monitor LB6411 en campo Cf+D2O

Se han realizado las primeras medidas para incorporar este nuevo patrón al procedimiento de calibración de monitores neutrónicos en la magnitud  $H^*(10)$ .

Se ha empleado el **método de los conos de sombra** con el nuevo campo. Se realizan dos medidas con y sin cono de sombra a una distancia. La diferencia entre ambas permite determinar la componente retrodispersada y separarla de la directa.

$$M_C(l) = [M_T(l) - M_S(l)]F_A(l)$$



DETERMINACIÓN DEL FACTOR O COEFICIENTE DE CALIBRACIÓN

	Notación	Valor	Unidad	Not. Incertidumbre	Incertidumbre	unidad
Valor convencionalmente verdadero	$H^*(10)$	252,890	$\mu\text{Sv/h}$	$u_c(H)$	5,23	$\mu\text{Sv/h}$
Medida sin cono de sombra	$M_T$	345,333	$\mu\text{Sv/h}$	$u_c(M_T)$	6,931	$\mu\text{Sv/h}$
Medida con cono de sombra	$M_S$	35,000	$\mu\text{Sv/h}$	$u_c(M_S)$	1,202	$\mu\text{Sv/h}$
Medida corregida	$M_C$	314,121	$\mu\text{Sv/h}$	$u_c(M_C)$	7,121	$\mu\text{Sv/h}$
Factor o Coeficiente de calibración	$N_H$	0,805		$u_c(N_H)$	0,0247	

## Conclusiones

- a) El LPN ha desarrollado el nuevo patrón de  $^{252}\text{Cf} + \text{D}_2\text{O}$  según recomienda la norma ISO 8529-1.
- b) Se han estudiado las **diferencias en el diseño de este patrón** respecto a la propuesta de la norma ISO y se puede considerar que prácticamente no afectan a los resultados obtenidos.
- c) El **espectro** obtenido a partir de nuestro modelo es compatible con el propuesto por ISO.
- d) Se ha determinado el **factor de anisotropía** del nuevo patrón y se han analizado diversos parámetros.
- e) Queda pendiente incorporar la lámina de Cd
- f) Una vez hecho esto se incorporará al procedimiento de calibración de monitores neutrónicos de área y se ofrecerá como un servicio más del LPN



**¡¡MUCHAS GRACIAS POR SU ATENCIÓN!!**