



Ávila, del 27 al 29 de septiembre de 2022

Ponencia nº S7-2-R28-OP

Nuevo patrón primario de medida del LMRI-CIEMAT para la magnitud kerma en aire en haces de ^{137}Cs

Néstor Cornejo Díaz , Eugenio Guantes Diez

*Laboratorio de Metrología de Radiaciones Ionizantes
Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas*

Avenida Complutense 40, 28040, Madrid.

Tel.: (+34) 913466288, e-mail: nestorarmando.cornejo@ciemat.es



Laboratorio de patrones de radiación gamma en niveles de protección

Laboratorio de Metrología de Radiaciones Ionizantes (LMRI) del CIEMAT



RD 533/1996 de 15 de marzo

Laboratorio Asociado al Centro Español de Metrología

Orden ICT/149/2020 de 7 de febrero

Orden ITC/2581/2006 de 28 de julio

Depositario y responsable ante el Estado de la custodia y mantenimiento de los Patrones Nacionales de kerma en aire, cuya unidad es el gray ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J kg}^{-1}$) y sus magnitudes de Protección Radiológica derivadas



Patrones de medida de referencia del laboratorio



PTW 32005 (30 cm³)
N/S: 00047



IBA DOSE 1
N/S: 13097



PTW 32002 (10³ cm³)
N/S: 00345



IBA DOSE 1
N/S: 13097



PTW 32003 (10⁴ cm³)
N/S: 00134



PTW UNIDOS
N/S: 20641



Haces de referencia del laboratorio



NI-645

^{137}Cs (100 TBq)

Colimador: 5,72°

NI-646

^{137}Cs (1,48 TBq)

^{137}Cs (14,8 GBq)

^{60}Co (740 GBq)

^{60}Co (7,40 GBq)

Colimadores: 7° y 13°

Atenuador: Pb (20 mm)

28-10-1983



Proyecto del LMRI: “Desarrollo de un patrón primario basado en cámaras de ionización de grafito del tipo GCS-10-1”. Procedimiento negociado del CIEMAT no. **266268**, con la Comisión de Energía Atómica y Energías Alternativas (CEA) de Francia (2016 - 2017)

OBJETIVOS

Determinación absoluta de la tasa de kerma en aire en haces de ^{137}Cs y ^{60}Co .

Reducción de la incertidumbre de medida.

Desarrollo de una cadena de trazabilidad propia y directa de las instituciones españolas al Sistema Internacional de Unidades (SI).

Independencia metrológica.

Mayor agilidad en la acreditación de las Capacidades de Medición y Calibración.

Propiciar la participación en la comparación clave del BIPM para la magnitud kerma en aire.

Participación más activa en el CCRI del CIPM.




Patrones primarios de kerma en aire basados en cámaras de ionización de paredes de **grafito**.

- **Número atómico** similar al número atómico efectivo del aire
- Disponible con **alta pureza** y **composición conocida**
- Dimensionalmente **estable** ($\alpha_L = 3,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1} - 5,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)
- El **maquinado** puede hacerse con una alta precisión
- Es un excelente **conductor eléctrico**

Aislantes: **Poliestireno reticulado** (*Cross linked polystyrene*).

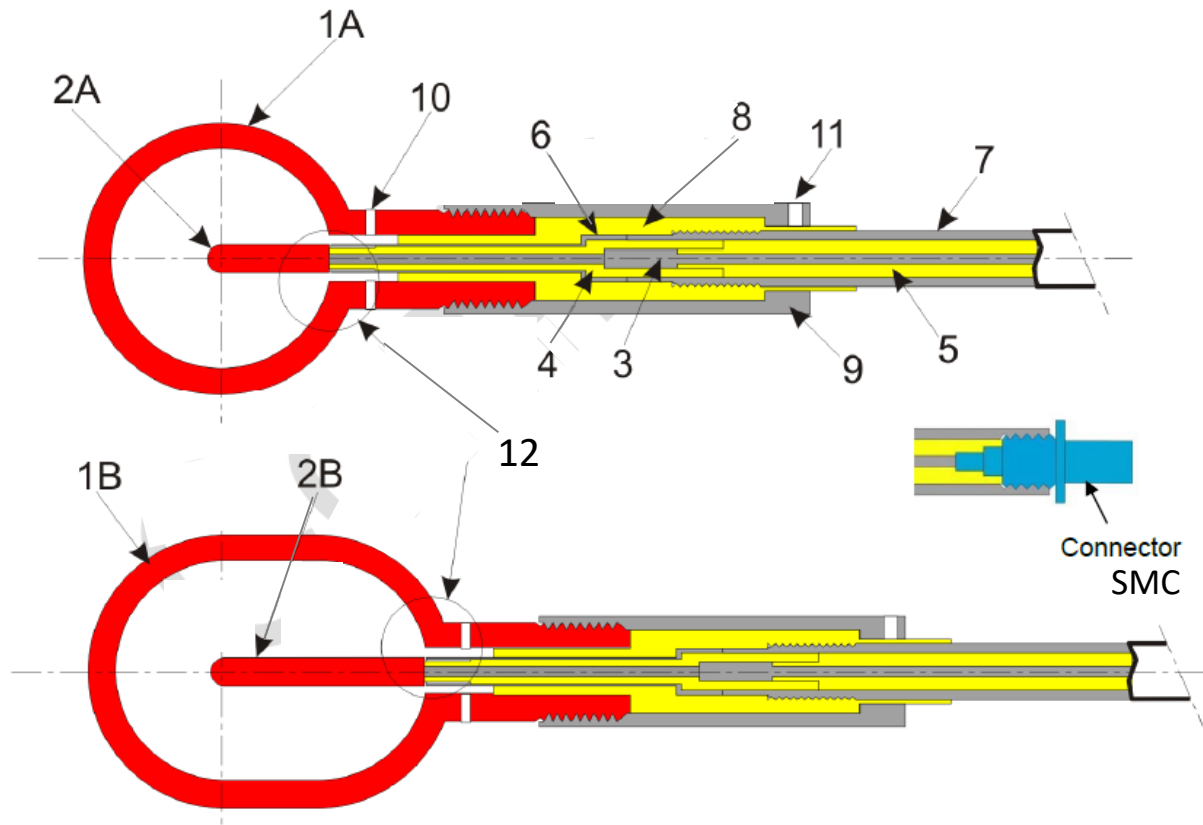
- Es un buen **aislante** (Conductividad $10^{-16} \text{ S m}^{-1}$)
- **Resistente** a la acción de la radiación ionizante
- Fácil **mecanización** y **pulido**
- Buena **estabilidad dimensional** ($\alpha_L = 80 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1} \pm 10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)

$\dot{K}_{\text{air}} \cong 0,15 \text{ mGy s}^{-1}$  Volumen \approx unidades de cm^3

Para ^{137}Cs y ^{60}Co , espesor de pared = 3 mm  Condición de Bragg-Gray



Esquemas de las nuevas cámaras de ionización



- 1A, 1B: Pared exterior de grafito
- 2A, 2B: Electrodo central de grafito
- 3: Conductor eléctrico central (Al-Mg: 2017A)
- 4, 5: Aislante interno (Poliestireno reticulado)
- 6: Electrodo de guarda (Al-Mg: 2017A)
- 7: Tallo (Al-Mg – Anodizado)
- 8: Aislante externo (Poliestireno reticulado)
- 9: Soporte electrodo exterior (Al-Mg: 2017A - Anodizado)
- 10: Abertura de ventilación
- 11: Conexión de HV
- 12: Remate redondeado

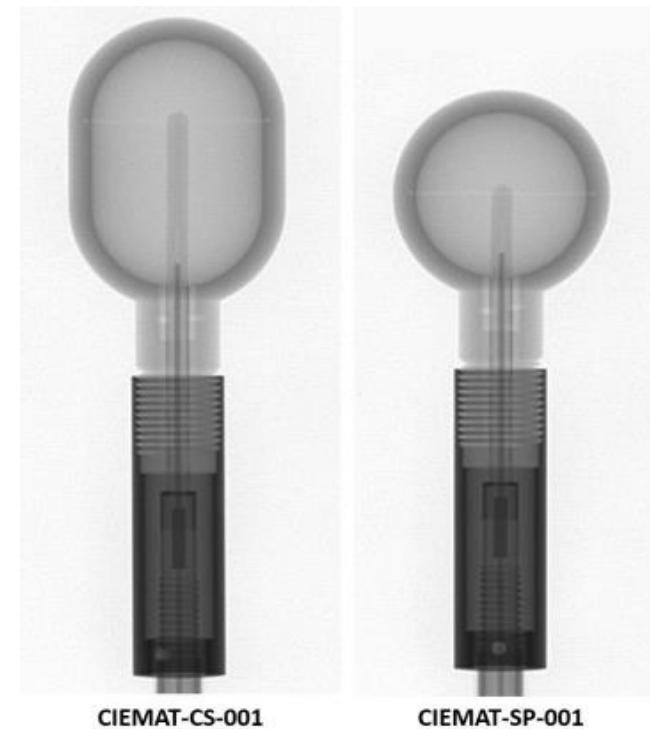


Datos de las nuevas cámaras de ionización

Parámetros	Cámaras	
	CS-001	SP-001
Altura externa / mm	39	-
Diámetro externo / mm	28	28
Altura interna / mm	33	-
Diámetro interno / mm	22	22
Espesor de pared / mm	3	3
Diámetro del electrodo / mm	3	3
Longitud del electrodo / mm	23	12
Volumen nominal / cm ³	9,6	5,5

Grafito grado 5890 PT
 Carbone Lorraine
 Pureza ultra alta (99,998 %) y grano super fino (10 μm)

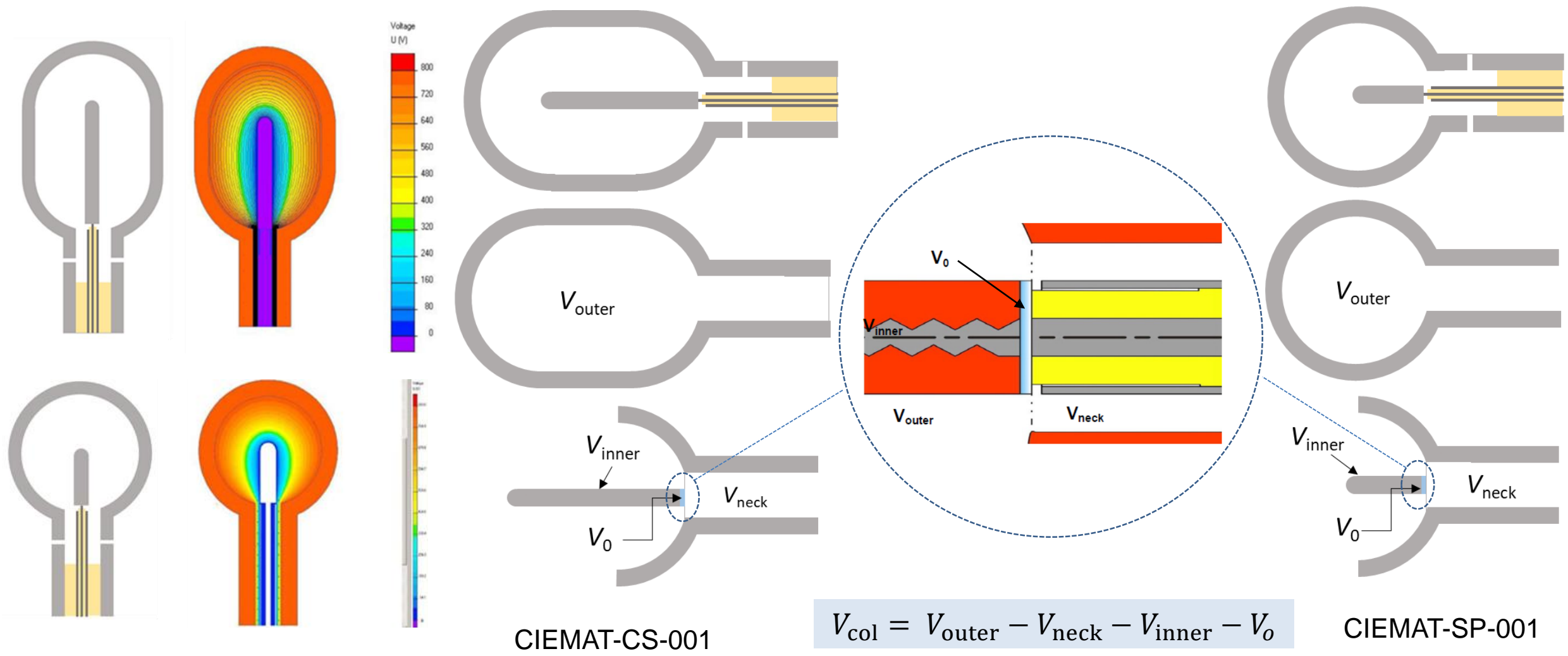
Densidad
 (1.8281 ± 0.0010) g.cm⁻³



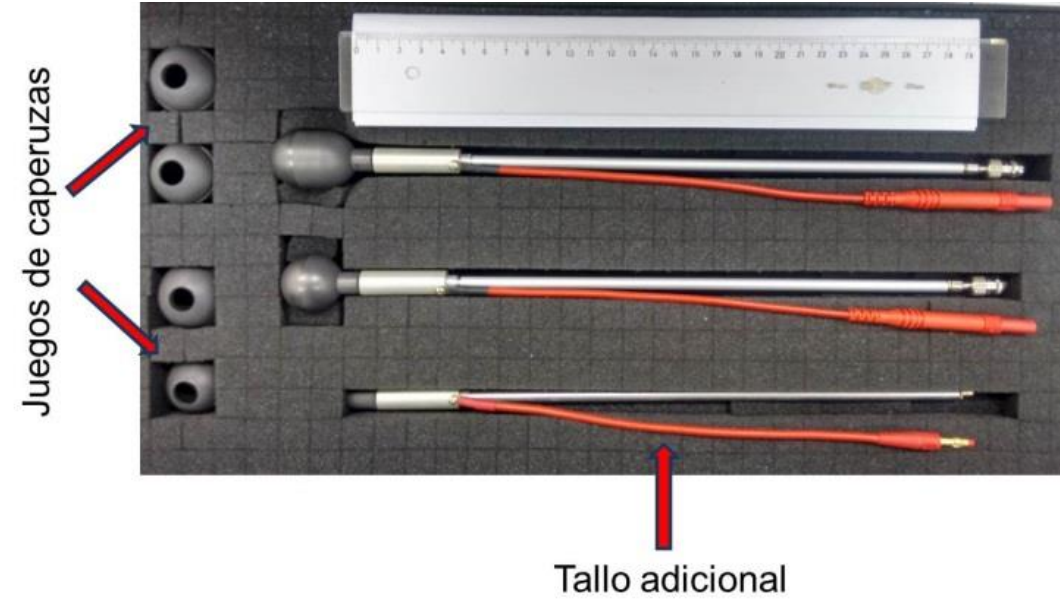
Radiografías tras el ensamblaje



Volumen efectivo de colección de carga eléctrica



Componentes del patrón de referencia basado en las cámaras de grafito



Determinación absoluta del kerma en aire

Principio dosimétrico de Bragg-Gray – cámara de ionización ideal

$$K_{\text{air}} = \frac{Q}{\rho_0 \cdot V_{\text{col}}} \cdot \left(\frac{\bar{W}}{e}\right)_{\text{air}} \cdot \left(\frac{\bar{S}_{\text{el}}}{\rho}\right)_{\text{C,air}} \cdot \left(\frac{\bar{\mu}_{\text{en}}}{\rho}\right)_{\text{air,C}} \cdot \frac{1}{(1 - \bar{g}_{\text{air}})}$$

- Q : Carga eléctrica por la ionización de la radiación gamma en el aire de la cavidad de la cámara,
- ρ_0 : Densidad del aire seco para las condiciones ambientales de referencia ($\rho_0 = 1,293 \text{ kg m}^{-3} \pm 0,01 \%$),
- V_{col} : Volumen de colección de carga eléctrica de la cámara de ionización,
- $(\bar{W}/e)_{\text{air}}$: Energía promedio necesaria por unidad de carga eléctrica liberada en aire ($(\bar{W}/e)_{\text{air}} = (33,97 \pm 0,12) \text{ J C}^{-1}$),
- $(\bar{S}_{\text{el}}/\rho)_{\text{C,air}}$: Cociente de los valores medios de los poderes de frenado electrónicos másicos del grafito y el aire,
- $(\bar{\mu}_{\text{en}}/\rho)_{\text{air,C}}$: Cociente de los valores medios de los coeficientes másicos de absorción de energía del aire y el grafito,
- \bar{g}_{air} : Fracción promedio de la energía cinética de los electrones secundarios que se pierde en procesos radiativos.

P. J. Allisy-Roberts, D. T. BURNS, C. KESSLER, *Measuring conditions and uncertainties for the comparison and calibration of national dosimetric standards at the BIPM*, Rapport BIPM-2011/04, 21 pp (2011)

International Commission on Radiation Units and Measurements, *Key data for ionizing – radiation dosimetry: Measurement standards and applications*. ICRU Report No. 90. ICRU Vol. 14 No.1 (2016)

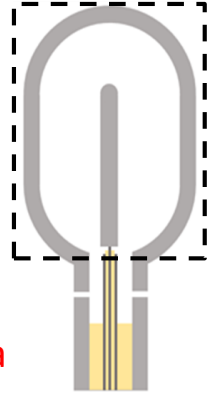
Determinación absoluta del kerma en aire

Principio dosimétrico de Bragg-Gray – cámara de ionización real

Cámara de ionización real en un campo real de radiación

- Abierta al aire atmosférico
- Irradiaciones en aire
- Existencia de electrodos, aislantes y cables
- Colección de carga mediante campo eléctrico
- Existencia de un tallo para los conductores
- Perturbación de las paredes
- Campo real no paralelo, con perfil no uniforme
- Dimensiones finitas de la cavidad

- ⇒ Variación de la masa de aire en la cavidad, efecto de la humedad relativa
- ⇒ Variaciones en la atenuación de los fotones entre la fuente y la cámara
- ⇒ Fugas, Efecto de polaridad
- ⇒ Pérdida de carga por difusión y recombinación de iones
- ⇒ Dispersión de la radiación en el tallo
- ⇒ Atenuación y dispersión de la radiación en las paredes
- ⇒ No uniformidad axial y radial del haz, posicionado de la cámara
- ⇒ Interacción de fotones en la cavidad, perturbación de la fluencia de electrones

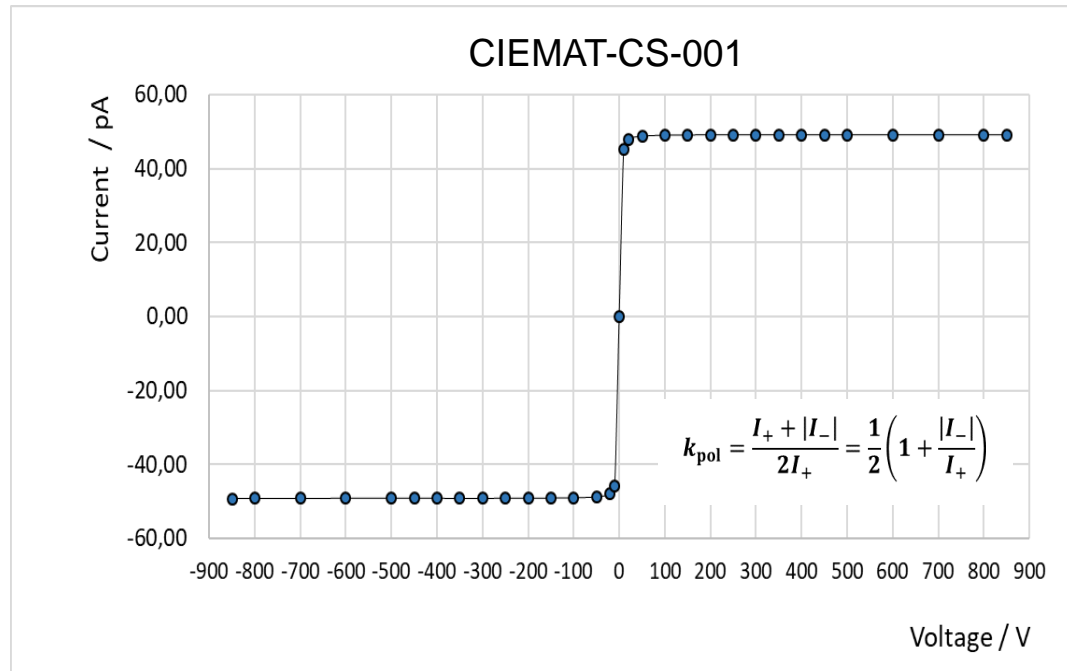


$$K_{\text{air}} = \frac{Q - Q_F}{\rho_0 \cdot V_{\text{col}}} \cdot \left(\frac{\bar{W}}{e}\right)_{\text{air}} \cdot \left(\frac{\bar{S}_{\text{el}}}{\rho}\right)_{\text{C,air}} \cdot \left(\frac{\bar{\mu}_{\text{en}}}{\rho}\right)_{\text{air,C}} \cdot \frac{1}{(1 - \bar{g}_{\text{air}})} \cdot k_{PT} \cdot k_h \cdot k_{\text{att}} \cdot k_{\text{pol}} \cdot k_s \cdot k_{\text{st}} \cdot k_{\text{wall}} \cdot k_{\text{an}} \cdot k_{\text{rn}} \cdot k_{\text{pos}} \cdot k_{\text{SA}}$$

Caracterización necesaria en el punto de referencia del haz de radiación del laboratorio



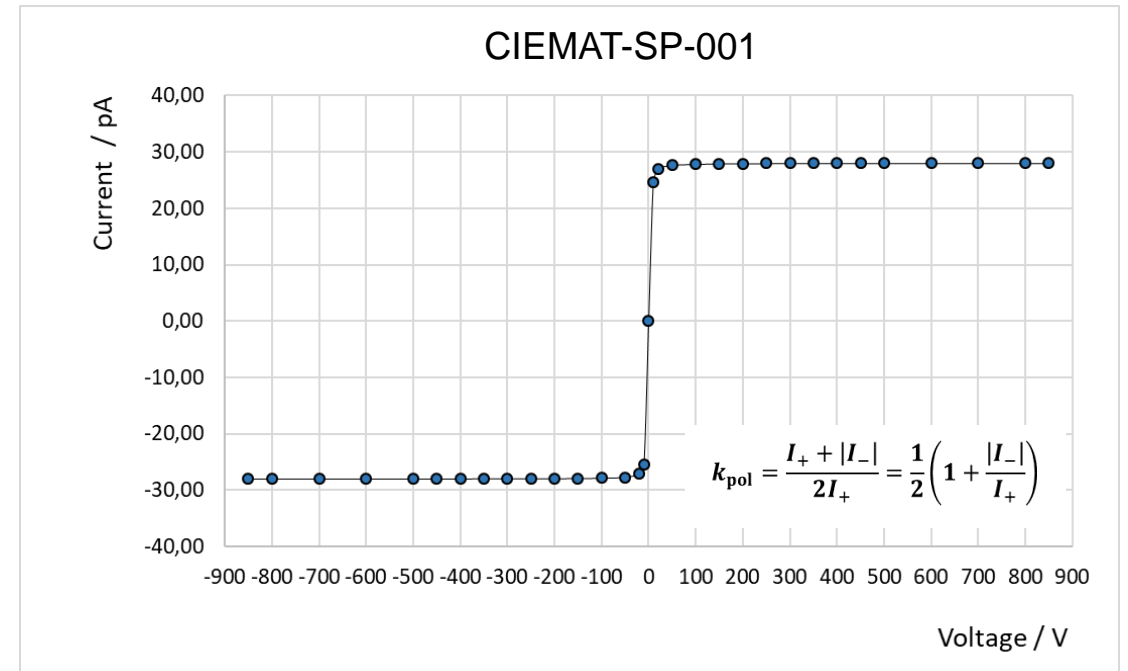
Pruebas eléctricas (Efecto polaridad y Saturación)



$$k_{pol} (400 \text{ V}) = 1,0001 \pm 0,0002$$

$$I_{fugas} < 10^{-15} \text{ A}$$

$$k_S (400 \text{ V}) = 1,0009 \pm 0,0002$$

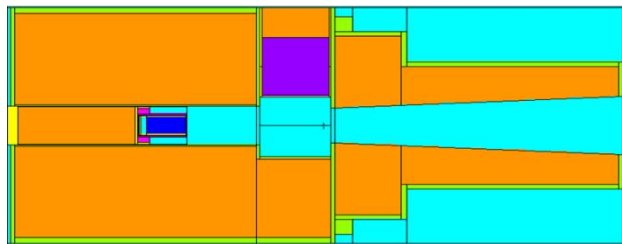
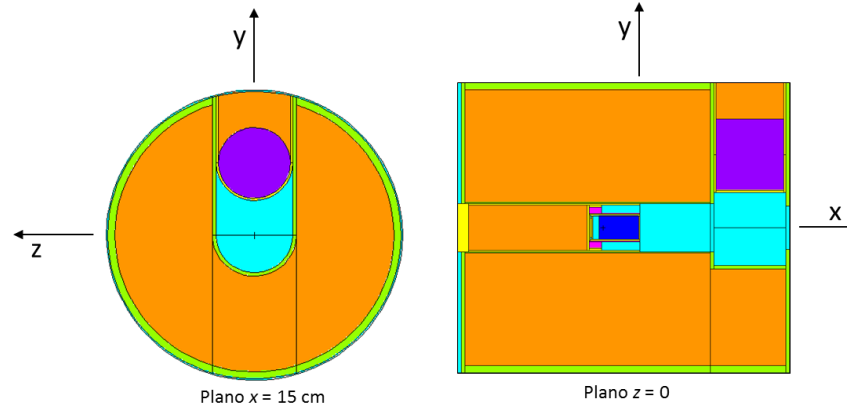
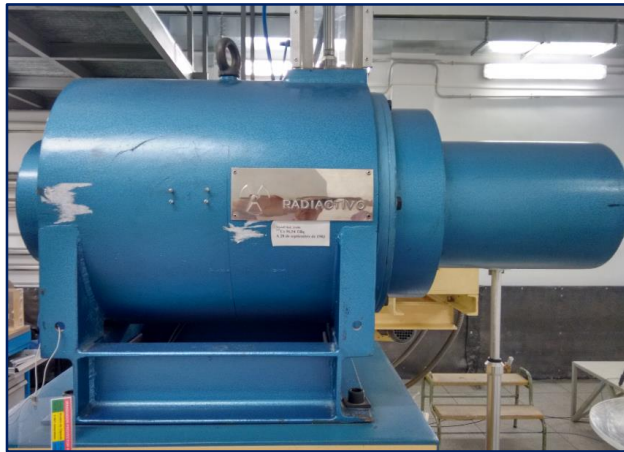


$$k_{pol} (400 \text{ V}) = 1,0000 \pm 0,0003$$

$$k_S (400 \text{ V}) = 1,0011 \pm 0,0002$$

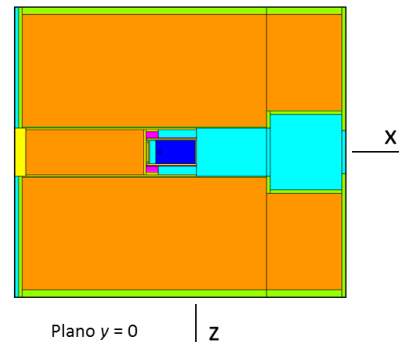


Simulación estadística del haz de ^{137}Cs de referencia en el LMRI del CIEMAT



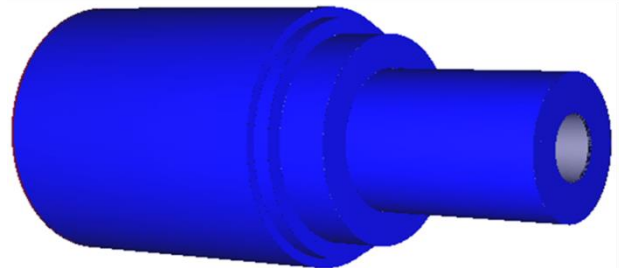
Leyenda

- CsCl
- Aire
- Al
- AISI 316
- Pb
- F111 UNE
- U



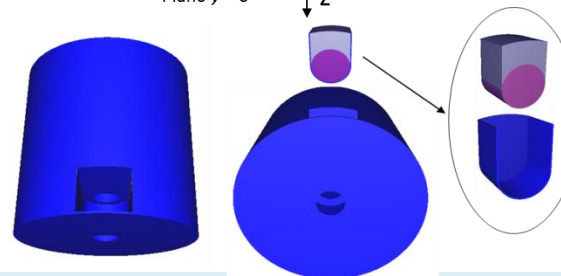
Leyenda

- CsCl
- Aire
- Al
- AISI 316
- Pb
- F111 UNE
- U



Leyenda

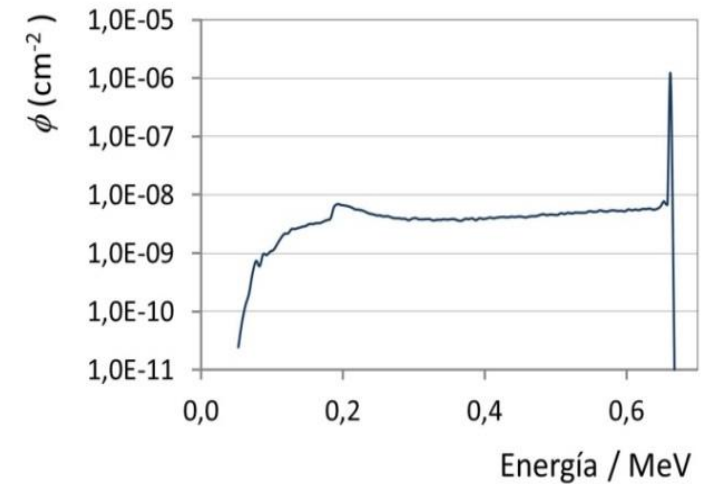
- UNE F 111
- Pb



Leyenda

- UNE F 111
- U
- Pb

Espectro de fluencia de fotones



Cociente de los valores medios de los poderes de frenado electrónico másicos del grafito y el aire

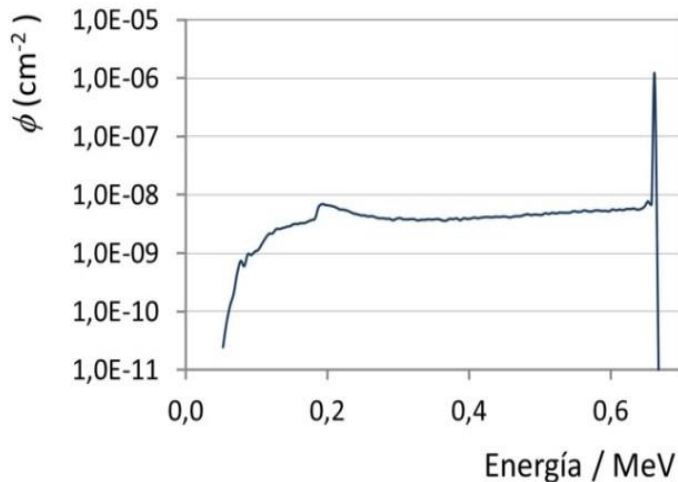
$$\left(\frac{\bar{S}_{el}}{\rho}\right)_{c,air} = \frac{\int_{\Delta}^{E_{m\acute{a}x}} \Phi_E^{air} \cdot \left(\frac{S_{\Delta}(E)}{\rho}\right)_c dE + \Phi_E^{air}(\Delta) \cdot \left(\frac{S_{el}(\Delta)}{\rho}\right)_c \cdot \Delta}{\int_{\Delta}^{E_{m\acute{a}x}} \Phi_E^{air} \cdot \left(\frac{S_{\Delta}(E)}{\rho}\right)_{air} dE + \Phi_E^{air}(\Delta) \cdot \left(\frac{S(\Delta)}{\rho}\right)_{air} \cdot \Delta}$$

*Ecuación de Nahum,
Teoría de Spencer-Attix*

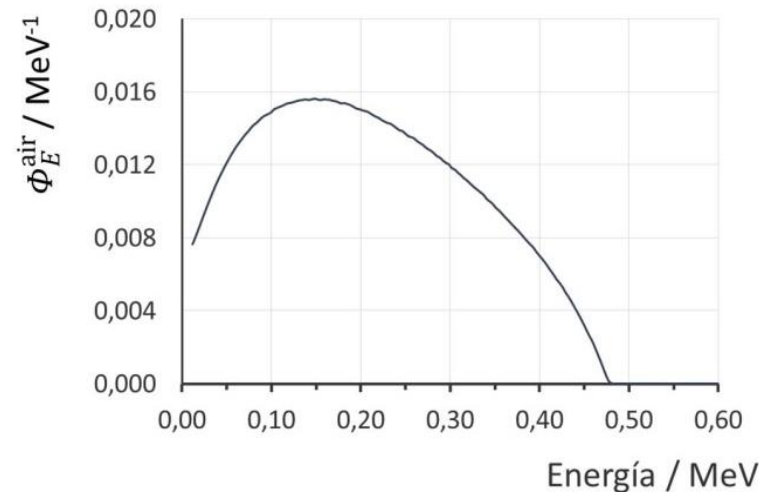
ICRU Report No. 90. ICRU Vol. 14 No.1 (2016)

$I_c = 81$ eV, Efecto densidad para $2,265 \text{ g cm}^{-3}$ y un electrón de conducción en el grafito.

Espectro de fluencia de fotones



CIEMAT-SP-01



Cámara	Δ / keV	$\left(\frac{\bar{S}_{el}}{\rho}\right)_{c,air}$	$u / \%$
CS-001	30	1,0034	0,04
SP-001	28	1,0035	0,04

$$u \left[\left(\frac{\bar{W}}{e}\right)_{air} \cdot \left(\frac{\bar{S}_{el}}{\rho}\right)_{c,air} \right] = 0,13 \%$$

Simulación estadística. MCNPX (2.6.0)

Código CAVITY (EGSnrc)

16th Meeting of the CCRI, BIPM (1999)

Metrología 55, R21 (2018)



Cociente de los valores medios de los coeficientes máxicos de absorción de energía del aire y el grafito

$$\left(\frac{\bar{\mu}_{en}}{\rho}\right)_{air,c} = \frac{\int \phi_E E (\mu_{en}/\rho)_{air} dE}{\int \phi_E E (\mu_{en}/\rho)_c dE}$$

$\left(\bar{\mu}_{en}/\rho\right)_{air,c}$					
XCOM sin renormalizar		XCOM renormalizado		PENELOPE	
Valor	u (%)	Valor	u (%)	Valor	u (%)
0,99931	0,041	0,99936	0,041	0,99967	0,041

$$\left(\bar{\mu}_{en}/\rho\right)_{air,c} = 0,9994 \pm 0,0005$$

$$(1 - \bar{g}_{air}) = 0,9985 \pm 0,0001$$

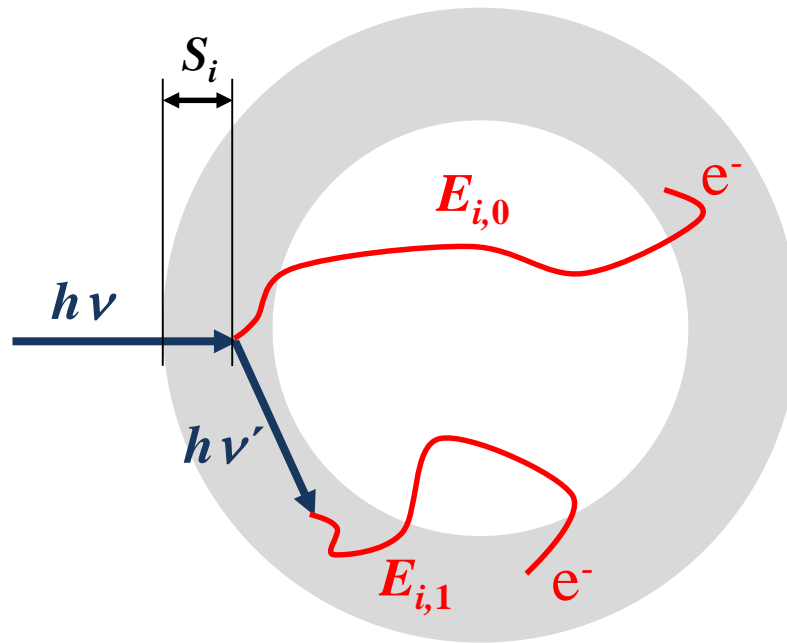
$$u \left[\frac{\left(\bar{\mu}_{en}/\rho\right)_{air,c}}{(1 - \bar{g}_{air})} \right] = 0,1 \%$$

SELTZER, S. M. Calculation of photon mass energy transfer and mass energy-absorption coefficients. Radiat. Res. 136, 147–170 (1993)

BERGER, M. J., HUBBELL, J. H., SELTZER, S. M., CHANG, J., COURSEY, J. S., SUKUMAR, R., ZUCKER, D. S., AND OLSEN, K.: XCOM, Photon Cross Section Database (version 1.5). [Online] Available: <http://physics.nist.gov/xcom> (NIST, Gaithersburg, MD) (2010).

SALVAT, F. PENELOPE-2014: A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport, Publication NEA/NSC/DOC(2015)3, Nuclear Energy Agency Data Bank (Organization for Economic Co-operation and Development, Issy-les-Moulineaux, France) (2015)

Corrección al efecto de la pared de la cámara



$$k_{\text{at}} = \frac{\sum_i E_{i,0} \times e^{\mu_i S_i}}{\sum_i E_{i,0}}$$

$$k_{\text{sc}} = \frac{\sum_i E_{i,0}}{\sum_i (E_{i,0} + E_{i,1})}$$

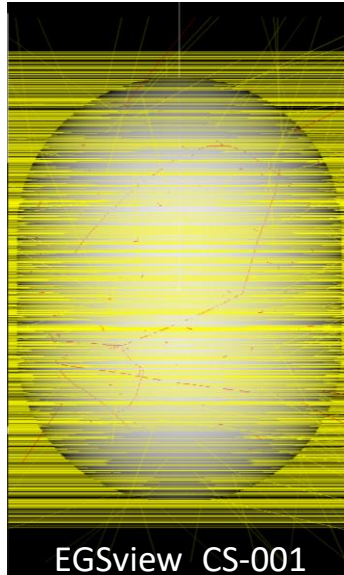
$$k_{\text{wall}} = k_{\text{at}} \cdot k_{\text{sc}}$$

ROGERS D. W. O., BIELAJEW A. F. AND NAHUM A. E.: Ion chamber response and A_{wall} correction factors in a ^{60}Co beam by Monte Carlo simulation Phys. Med. Biol. (1985)

BIELAJEW. A. F: Ionization cavity theory: a formal derivation of perturbation factors for thick-walled ion chambers in photon beams Phys. Med. Biol. 31 161–70 (1986)

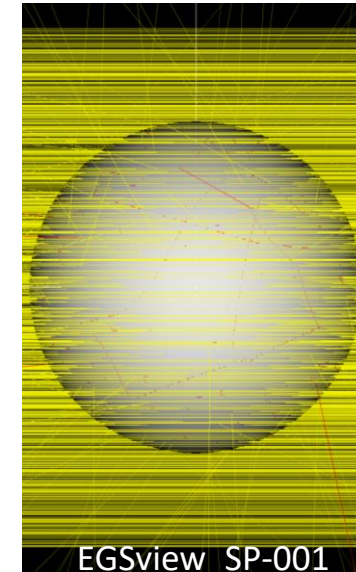


Corrección al efecto de la pared de la cámara – Simulación Monte Carlo



Código: EGSnrc/**CAVITY**

Transporte detallado:
Photon cross sections = XCOM
Bound Compton scattering = norej
Photon splitting = 100
ECUT = 5 keV
ESTEPE = 0,05
BCA = Exact
Skin depth for BCA = 3
Electron-step algorithm =EGSnrc
Spin effects = ON
Atomic relaxations =eadl



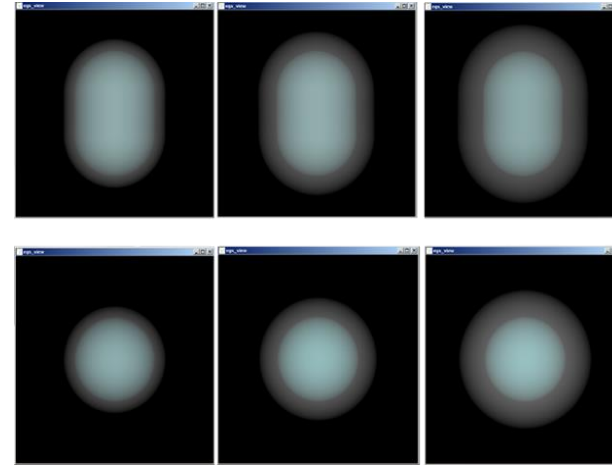
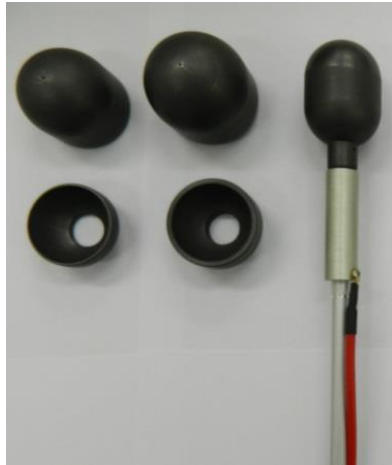
$$k_{\text{wall}} = 1,0233 \pm 0,0008 (k = 1)$$

$$k_{\text{wall}} = 1,0272 \pm 0,0009 (k = 1)$$

Incertidumbre estadística	0,01 %
Espesor de las paredes	0,02 %
Código y al algoritmo de cálculo	0,07 % (CS-001) 0,08 % (SP-001)
Tamaño real de la fuente	0,01 %
Espectro de fotones	0,02 %

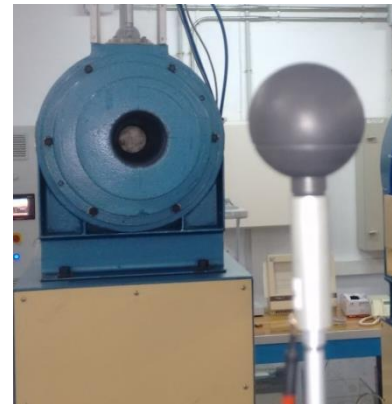
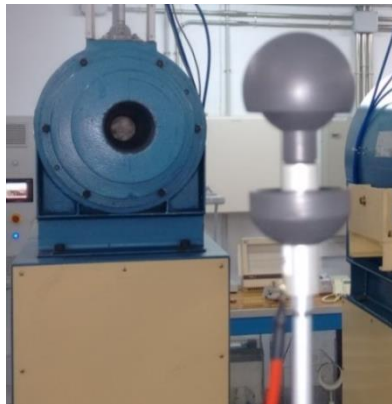


Corrección al efecto de la pared de la cámara – Validación experimental

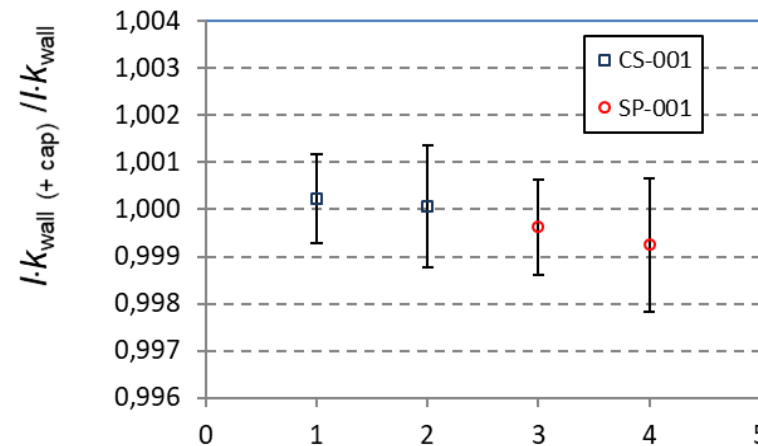


Imágenes con el sistema EGSview

Simulación Monte Carlo para obtener el factor k_{wall} con los diferentes espesores de pared: 3 mm, 5 mm y 7 mm.



Medidas experimentales de verificación utilizando las caperuzas adicionales

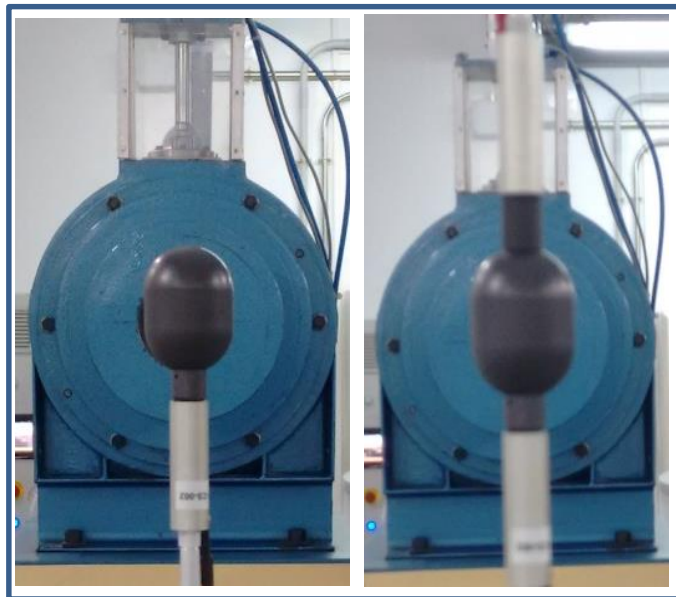


Puntos 1 y 3, espesor total de pared = 5 mm
 Puntos 2 y 4, espesor total de pared = 7 mm

Valores de $I \cdot k_{wall}$ con las caperuzas adicionales, normalizados con el valor de $I \cdot k_{wall}$ sin caperuzas adicionales, para ambas cámaras.



Corrección al efecto de la dispersión de la radiación en el tallo de las cámaras

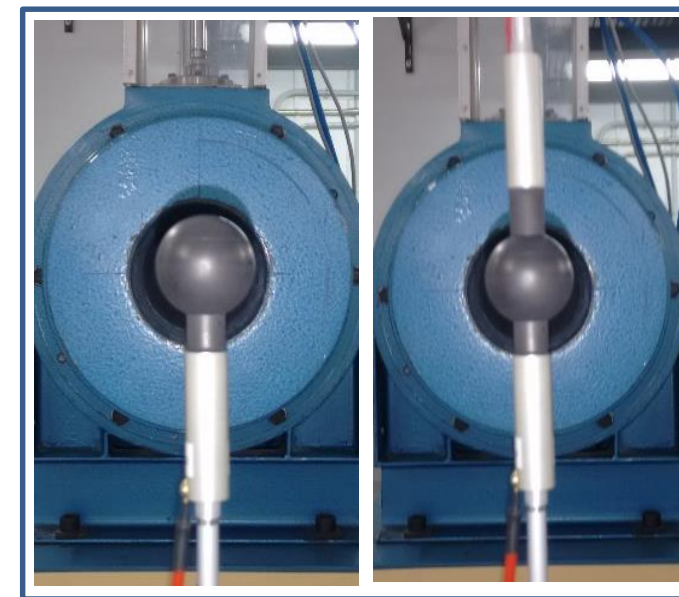


I_{NST}

I_{ST}



$$k_{ST} = \frac{2I_{NST} - I_{ST}}{I_{ST}}$$



I_{NST}

I_{ST}

Cámara	k_{ST}	$u(k_{ST})$
CS-001	0,9986	0,0003
SP-001	0,9985	0,0002



Valor de referencia para el kerma en aire – Balance de incertidumbre

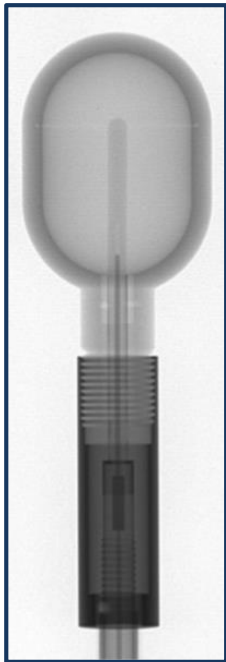
	CIEMAT-CS-001			CIEMAT-SP-001		
	Valores	Incertidumbres 100 u_A 100 u_B		Valores	Incertidumbres 100 u_A 100 u_B	
Parámetros físicos						
$\rho_0 / \text{kg m}^{-3}$	1,2930	-	0,01	1,2930	-	0,01
$(\bar{W}/e)_{\text{air}} / \text{J C}^{-1}$	33,97	-		33,97	-	
⇒ $(\bar{S}_{\text{el}}/\rho)_{\text{c,air}}$	1,0034	-	0,13	1,0035	-	0,13
⇒ $(\bar{\mu}_{\text{en}}/\rho)_{\text{air,c}}$	0,9994	-		0,9994	-	
⇒ $1 - \bar{g}_{\text{air}}$	0,9985	-	0,10	0,9985	-	0,10
Factores de corrección						
k_{PT}	-	-	0,07	-	-	0,07
k_h	0,9970	-	0,03	0,9970	-	0,03
k_{att}	1,0000	-	0,03	1,0000	-	0,03
k_{pos}	1,0000	-	0,06	1,0000	-	0,06
⇒ k_s	1,0009	0,01	0,02	1,0011	0,01	0,02
⇒ k_{st}	0,9986	0,03	-	0,9985	0,02	-
⇒ k_{wall}	1,0233	0,01	0,08	1,0272	0,01	0,09
k_{an}	1,0000	0,05	0,03	1,0000	0,05	0,03
k_{rn}	1,0007	0,06	0,08	1,0005	0,06	0,08
k_{SA}	1,0000	-	0,10	1,0000	-	0,10
⇒ Volumen / cm^3	9,6126	-	0,03	5,5104	-	0,04
Carga eléctrica medida	-	0,01	0,14	-	0,01	0,14
Incertidumbre combinada		0,09	0,29		0,08	0,29
		0,30			0,30	

u_A , u_B : incertidumbres típicas relativas de tipo A y B, respectivamente



Valor de referencia para el kerma en aire

CIEMAT-CS-001

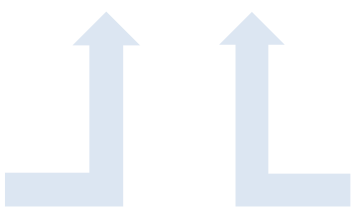


$$\begin{aligned} \bar{I}_{CS} &= 54,624(76) \text{ pA} \\ \dot{K}_{\text{air,CS}} &= 1,5302(46) \cdot 10^{-4} \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1} \\ u &= 0,30 \% (k = 1) \end{aligned}$$

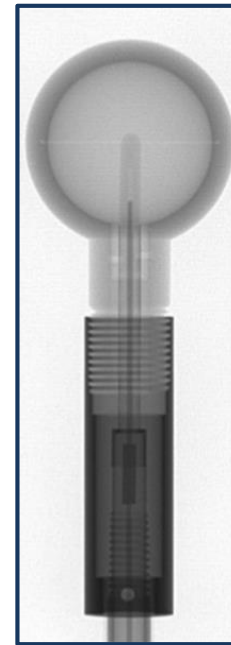
NI-645: ^{137}Cs
Medidas a 2 m

Referidas a: 01/01/2019

$$\dot{K}_{\text{air}} = 1,531(5) \cdot 10^{-4} \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1}$$



CIEMAT-SP-001



$$\begin{aligned} \bar{I}_{SP} &= 31,212(44) \text{ pA} \\ \dot{K}_{\text{air,SP}} &= 1,5311(46) \cdot 10^{-4} \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1} \\ u &= 0,30 \% (k = 1) \end{aligned}$$

Referencia actual (PTW 32005 (00047)): $\dot{K}_{\text{air}} = 1,534(12) \cdot 10^{-4} \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1}$

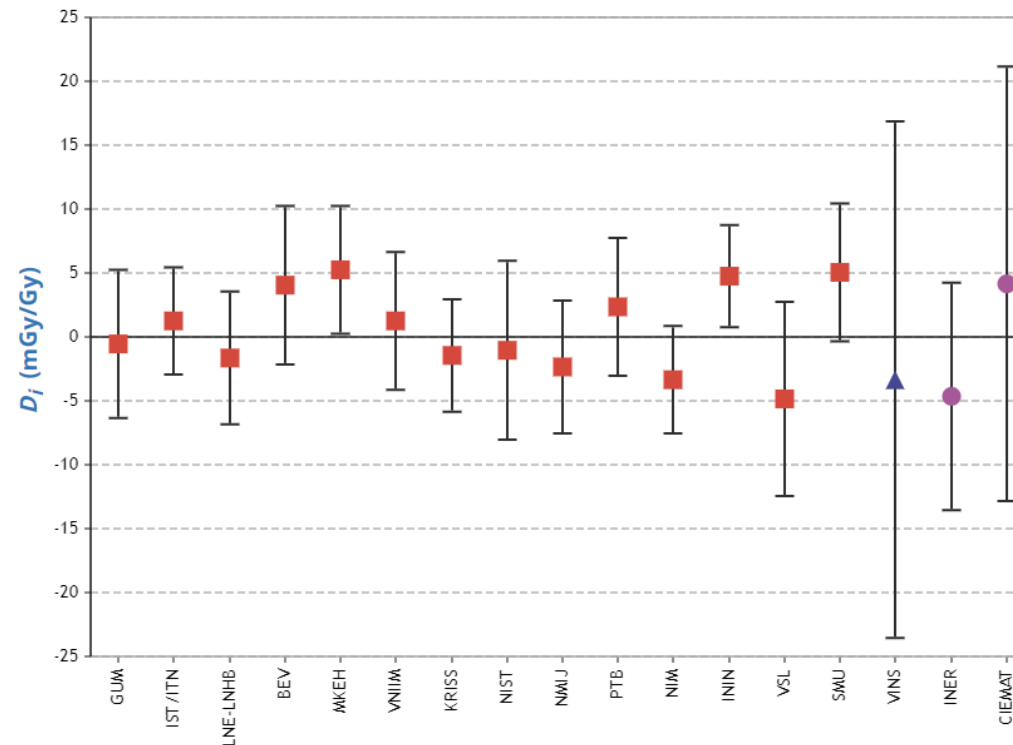


BIPM.RI(I)-K5

	LAB_i		D_i	U_i
			mGy/Gy	mGy/Gy
	GUM	Polonia	-0.5	5.8
	IST/ITN	Portugal	1.3	4.2
	LNE-LNHB	Francia	-1.6	5.2
	BEV	Austria	4.1	6.2
	MKEH	Hungría	5.3	5.0
	VNIIM	Rusia	1.3	5.4
	KRISS	Corea	-1.4	4.4
	NIST	EEUU	-1.0	7.0
	NMIJ	Japón	-2.3	5.2
	PTB	Alemania	2.4	5.4
	NIM	China	-3.3	4.2
	ININ	México	4.8	4.0
	VSL	Países Bajos	-4.8	7.6
	SMU	Eslovaquia	5.1	5.4
	VINS	Serbia	-3.3	20.2
	INER	Taiwán	-4.6	8.9
	CIEMAT	España	4.2	17.0

Degrees of equivalence, D_i and expanded uncertainty $U_i (k=2)$

Air kerma in Cs-137



Nuevo grado de equivalencia calculado con la referencia del patrón primario

$(-0,3 \pm 4,7)$ mGy/Gy

PARTICIPATING INSTITUTES

■ BIPM.RI(I)-K5

▲ EURAMET.RI(I)-K5.1

● APMP.RI(I)-K5



Conclusiones

- Detalles constructivos y caracterización del primer patrón primario de medida de España para la magnitud kerma en aire en haces de radiación gamma.
- Parámetros y factores de corrección determinados con métodos actualizados y consideraciones novedosas.
- Valor de referencia coherente proporcionado por el patrón primario.
- Reducción de la incertidumbre típica del kerma en aire de referencia, del 0,76 % al 0,30 %.
- Actualización posible del grado de equivalencia del LMRI-CIEMAT mediante la comparación clave: BIPM.RI(I)-K5

Información adicional

N. Cornejo Díaz, New LMRI-CIEMAT primary standard for ^{137}Cs air-kerma. Measurement 188, 110374. *Elsevier Ltd.* (2022)

N. Cornejo Díaz, Caracterización del patrón de referencia primario del LMRI para la magnitud kerma en aire, en haces de ^{137}Cs . LMRI-CIEMAT, DT-LMRI-2202 (2022)

