

Práctica de Laboratorio **Imagen gamma: PET y Compton**

Tutores: Jorge Lerendegui y Ion Ladarescu

El objetivo de esta práctica es introducir al alumno a las técnicas de imagen gamma como son la técnica PET y el método de imagen Compton. Para ello se utilizará un sistema que permite realizar simultáneamente imagen PET y Compton consistente en cuatro cámaras Compton enfrentadas dos a dos, cada una de las cuales consta dos planos de detectores gamma sensibles a la posición operados en coincidencia temporal.

Entre los sistemas de detección de radiación gamma, algunos no solo permiten hacer espectrometría, es decir, determinar la energía de los gammas incidentes, sino que también permiten hacer reconstruir su punto de emisión, lo que se conoce como imagen gamma.

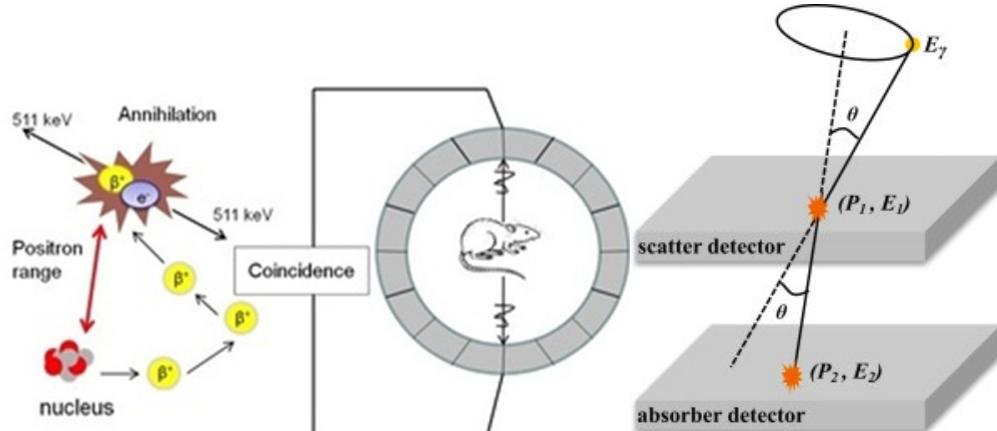


Figura 1.- Esquemas de los principios básicos de funcionamiento de las técnicas PET (izquierda) y Compton (derecha)

La primer técnica gamma que introduciremos en la práctica será la imagen Compton, que explota la dispersión Compton del gamma incidente en el *scatterer detector* y su posterior fotoabsorción en el *absorber detector* para determinar el punto de emisión del gamma incidente (ver Figura 1). Conocidas la energía depositada (E_1 y E_2) y el punto de interacción (P_1 , P_2) en ambos planos de detección, el ángulo de incidencia del gamma se determina a partir de la fórmula de la dispersión Compton:

$$\cos \theta = 1 + \frac{511}{E_g} - \frac{511}{E_2}$$

donde E_g , que se asume igual a $E_1 + E_2$, es la energía inicial del gamma. La incertidumbre en la determinación del ángulo Compton se puede derivar analíticamente

$$\delta\theta = \frac{1}{\sin\theta} \left(\left(\frac{m_e c^2}{E'^2} \right)^2 \left(\frac{\delta E'}{E'} \right)^2 + 2 \sin^2 \theta \left(\frac{\delta r}{r} \right)^2 \right)^{1/2},$$

donde $\delta r/r$ representa la incertidumbre en la determinación de la posición de interacción en ambos planos de detección y $\delta E'/E'$ la resolución en energía de nuestros detectores.

La segunda técnica de imagen que estudiaremos en esta práctica será el método PET (acrónimo en inglés de tomografía por emisión de positrones). El método *PET* consiste en medir en coincidencia los dos fotones de 511 keV que se emiten en direcciones opuestas (180°) tras la aniquilación de un positrón. Esta técnica es conocida por su uso en el campo de la imagen médica, donde un isótopo emisor β^+ se inyecta como trazador en el paciente y cada par de fotones emitidos se detectan en cristales situados en un paciente que rodea al paciente (ver Figura 1).

El setup que utilizaremos para la práctica permite realizar imagen PET y Compton de forma simultánea y ha sido utilizado recientemente en un experimento en el [Heidelberger Ionenstrahl-Therapiezentrum \(HIT\)](#) en el que se estudiaba la aplicabilidad de estas dos técnicas de imagen para realizar verificación del rango de los protones o iones durante tratamientos de hadronterapia. La Figura 2 muestra una imagen del setup con un fantoma de PMMA delante del gantry en HIT.

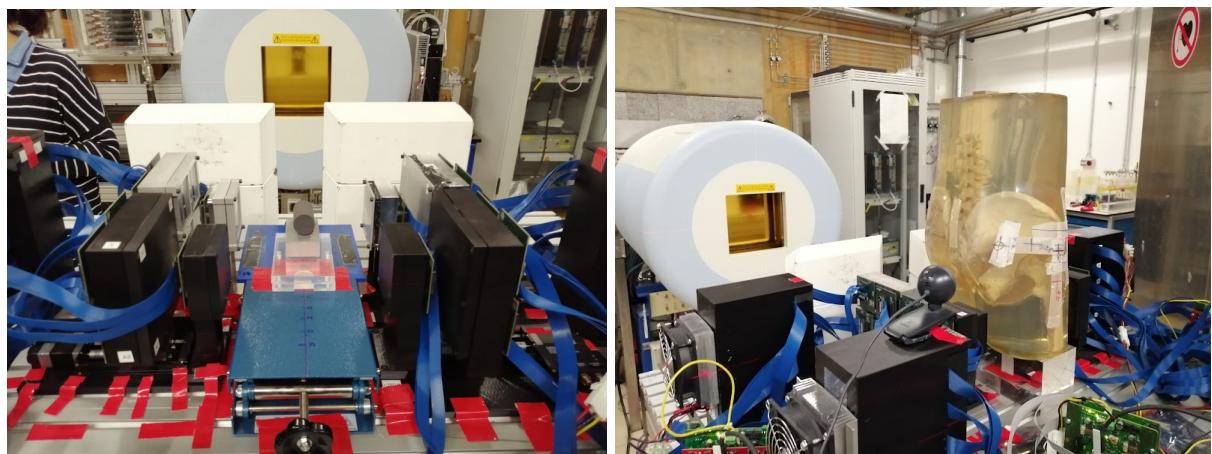


Figura 2.- Imágenes del setup experimental de imagen simultánea PET y Compton montado en el centro de hadronterapia HIT consistente en las 4 cámaras Compton enfrentadas dos a dos. Este mismo setup se ha montado en el laboratorio para la realización de la práctica.

Bibliografía

Detectores de gammas sensibles a la posición y técnicas de reconstrucción

- V. Babiano et al., γ -Ray position reconstruction in large monolithic $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ crystals with SiPM readout, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, Volume **931**, 1-22. (2019) arXiv: <https://arxiv.org/abs/1811.05469>

- J. Balibrea, J. Lerendegui-Marco, et al., *Machine Learning aided 3D-position reconstruction in large LaCl₃ crystals, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, Volume 931, 1-22. (2021)* arXiv: [arxiv link](#)

Imagen PET:

- J.J. Vaquero & P. Kinahan, *Positron Emission Tomography: Current Challenges and Opportunities for Technological Advances in Clinical and Preclinical Imaging Systems*, Annu Rev Biomed Eng. **17**, 385–414 (2015)
doi: [10.1146/annurev-bioeng-071114-040723](https://doi.org/10.1146/annurev-bioeng-071114-040723)
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5299095/>

Imagen Compton:

- D. B. Everett, J. S. Fleming, R.W.Todd, J. M. Nightingale, Proc. IEEE **124**, 995 (1977)
- L. Mihailescu, K.M. Vetter, M.T. Burks, E.L. Hull, and W.W. Craig. *Speir: A ge compton camera*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Volume **570** (1), 89 - 100 (2007)

Detector i-TED (setup de la práctica):

- V. Babiano et al., *i-TED: a Compton imager with Dynamic Electronic Collimation*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Volume **953**, 163228 (2020) Author shareable link: <https://authors.elsevier.com/a/1aCljcPqbaEW>

Imagen Compton para aplicaciones médicas:

- J. Lerendegui-Marco et al. (in press), *Towards Machine Learning aided real-time range imaging in proton therapy*, *Scientific Reports* (2022) [\[link\]](#)

General de instrumentación nuclear

- Glenn F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, 4th Edition, Willey & Sons, 2010
- William R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: A How-To Approach*, Springer, 1994

Materiales

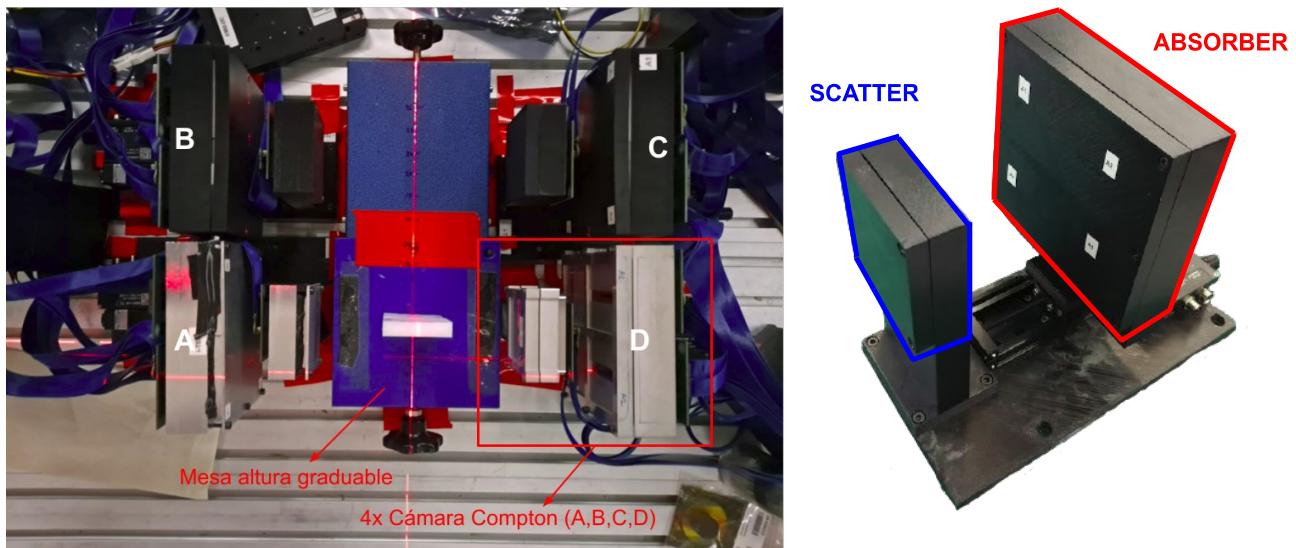


Figura 3.- Dispositivo experimental. En el panel de la izquierda se muestra el setup completo que se usará en la práctica. A la derecha se muestra una de las Cámaras Compton donde se indican los dos planos de detección .

- **Cámara Compton i-TED (4 en el setup completo, véase Fig. 3):**
 - Scatterer detector (1): 1 cristal centelleador inorgánico de LaCl₃ (50 x 50 x 10 mm).
 - Absorber detector (2): 4 x cristal centelleador inorgánico de LaCl₃ (50 x 50 x 25 mm).
 - 5 x fotomultiplicador de Silicio (SIPMs) pixelados (8 x 8 pixeles de 3 x 3 mm) (SensL ArrayJ-60035-64P-PCB).
 - Lectura de cada SIPM: Circuito integrado de aplicación específica (ASICs) .
 - Estabilización térmica de los ASICs: Celulas Peltier (FPH1-7106NC).
- **Electrónica, adquisición y procesamiento de datos:**
 - PETsys FEB/D-v2 electronics. (<https://www.petsyselectronics.com/web/>)
 - PC con software de adquisición PETsys.
 - ROOT (ver guión de la práctica de ROOT, <https://root.cern.ch/>)
- **Dispositivos de posicionamiento:**
 - Posicionador micrométrico (M-683 from PI-miCos) controlado remotamente que permite variar la distancia entre los dos planos de detección.
 - Mesas de altura graduable para modificar la altura de las fuentes radiactivas utilizadas para hacer imagen.
- **Fuentes radioactivas:** Eu-152 y Na-22

Realización de la práctica

A) Introducción al dispositivo experimental y sistema de adquisición de datos.

Se dedicará la primera parte de la práctica a mostrar y explicar todos los componentes y funcionamiento del dispositivo experimental. También se introducirá el sistema de adquisición de datos y se realizaran varias medidas cortas de ejemplo para ilustrar los conceptos explicados.

B) Calibración en energía

Se realizarán medidas con una fuente de Eu-152 que se usarán para calibrar los 10 detectores individuales que se usarán en esta práctica para la obtención de las imágenes. Se explicara el proceso de calibración en energía y se distribuirán los ficheros para que los estudiantes puedan trabajar sobre ellos en casa (Requisito: ROOT instalado o máquina VirtualBox distribuida).

C) Imagen PET y Compton

- Toma de datos de una fuente gamma situada en cuatro posiciones distintas en el campo de visión de la cámara Compton.
- La fuente gamma será de Na-22, que además de ser un emisor gamma, se desintegra Beta+ lo que permite utilizarla para hacer imagen PET y Compton de forma simultánea.
- En tres de las medidas, el posicionamiento de las muestras será realizado desplazando la muestra en horizontal a lo largo de la mesa de altura regulable dentro del campo del rango cubierto por los detectores A y D (véase Fig. 3). La altura estará fijada para que fuente quede en el centro de los detectores en el eje vertical.
- La cuarta medida se realizará con la fuente desplazada en uno de los dos ejes hasta sacarla fuera del campo de visión cubierto por los detectores A y D. Esta medida servirá para discutir una de las diferencias entre la imagen PET y Compton.

Se explicara en detalle y se distribuirán resultados que permitan explicar en la memoria el procesamiento de datos y la reconstrucción de las imágenes PET y Compton:

- Generación de eventos en cristales individuales (*singles*) y espectro de energías en cada detector (modo singles)
- Determinación de la posición de interacción en cada detector.
- Construcción de coincidencias temporales y espectro en coincidencia o add-back.
- Reconstrucción de la imagen PET: Condiciones geométricas y de energía.
- Reconstrucción de la imagen Compton: Condiciones geométricas y de energía. Se realizarán imágenes Compton con eventos asociados a las dos energías gamma emitidas por la fuente de Na-22: 511 y 1274 keV

Se proporcionaran los ficheros ROOT con las imágenes resultantes que contengan:

- Imágenes 2D
- Proyecciones XY.
- Espectros de energía en coincidencia de los eventos seleccionados para realizar la imagen.

D) Ejercicios

- Discutir las limitaciones de la técnica PET, comparar la resolución obtenida con PET y Compton y el impacto de la energía gamma en la resolución de imagen Compton.
- Los detalles se explicarán durante la sesión de prácticas.

E) Memoria

La memoria consistirá en la presentación y discusión de los resultados más relevantes y la contestación a las cuestiones mencionadas en el apartado. Al tratarse de una práctica online, la mayor parte de los resultados se proporcionaran por parte de los profesores y se propondrá algún ejercicio extra voluntario para profundizar más en el análisis de las imágenes (Requisito: ROOT instalado o máquina VirtualBox distribuida). Los detalles se explicaran en la sesión de prácticas.