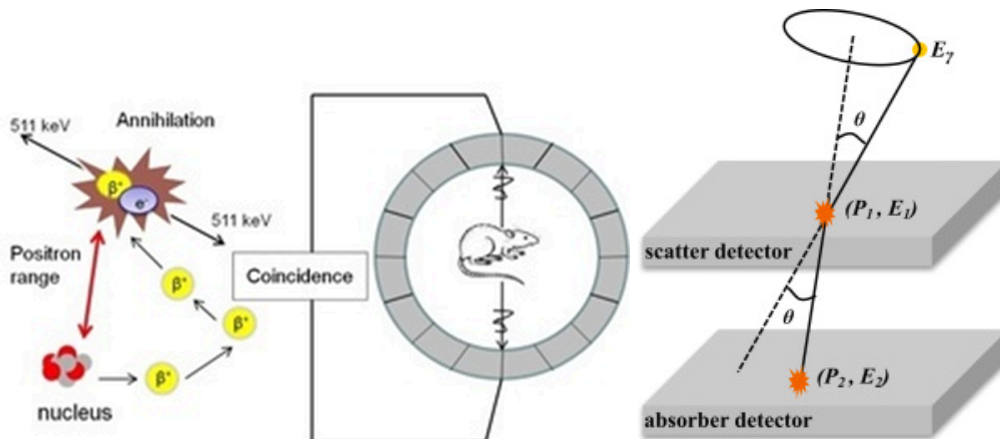


## Práctica de Laboratorio **Imagen gamma: PET y Compton**

Tutores: Víctor Babiano, Bernardo Gameiro, Jorge Lerendegui, Pablo Torres

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 cuáles 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

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

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 ( $180^\circ$ ) tras la aniquilación de un positrón. Esta técnica es conocida por su uso en el campo de la imagen médica, donde un isótopo emisor  $\beta^+$  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).

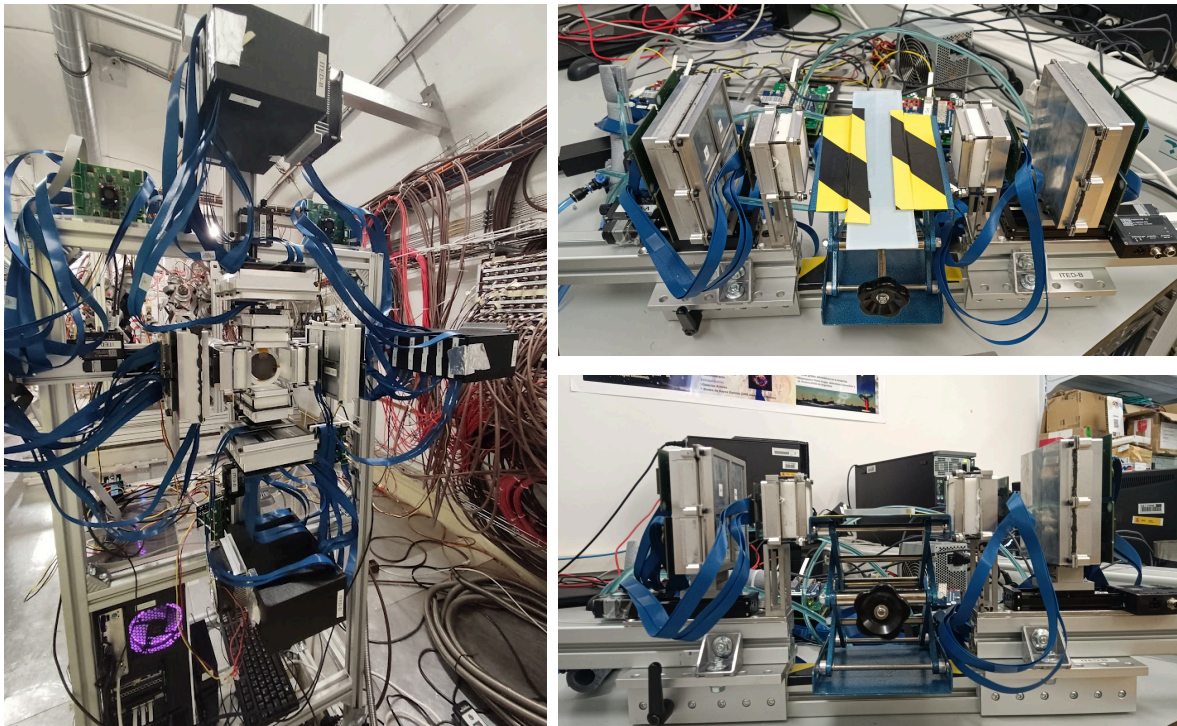


Figura 2.- *Setup experimental montado en el experimento CERN n\_TOF consistente en las 4 cámaras Compton enfrentadas dos a dos (izquierda). Setup consistente en 2 cámaras Compton enfrentadas montado en el laboratorio del IFIC para la realización de la práctica (derecha)*

El mismo setup experimental que utilizaremos en la práctica, llamado i-TED, está basado en un array de cámaras Compton y fue diseñado para experimentos de reacciones (n,g) en la instalación CERN n\_TOF, como se muestra en la Figura 2. Además, enfrentando las cámaras Compton dos a dos, este sistema permite realizar de forma simultánea imagen Compton y

PET, tal y como se ha demostrado 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.

En esta práctica utilizaremos un setup consistente en dos cámaras Compton de i-TED enfrentadas para poder reconstruir también imagen PET (ver paneles de la derecha de la Figura 2) y utilizaremos fuentes que decaen beta+ (emisión de positrones) para reconstruir la imagen por las técnicas Compton y PET.

## Bibliografía

### Detectores de gammas sensibles a la posición y técnicas de reconstrucción

- V. Babiano et al.,  *$\gamma$ -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  $\text{LaCl}_3$  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)

### 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

- V. Babiano-Suárez, *i-TED: a Compton imager with Dynamic Electronic Collimation*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Volume **953**, 163228 (2020) <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.163228>
- Babiano-Suárez, V., Lerendegui-Marco, J., Balibrea-Correa, J. et al. *Imaging neutron capture cross sections: i-TED proof-of-concept and future prospects based on Machine-Learning techniques*. Eur. Phys. J. A **57**, 197 (2021). <https://doi.org/10.1140/epja/s10050-021-00507-7>
- B. Gameiro et al. *Towards Real Time Compton Imaging in Demanding Conditions*. Lecture Notes in Computer Science LNCS, 15386, 2025. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-90203-1\\_47](https://doi.org/10.1007/978-3-031-90203-1_47)

### **i-TED para aplicaciones médicas: Imagen Compton y Compton-PET**

- Lerendegui-Marco, J., Balibrea-Correa, J., Babiano-Suárez, V. *et al.* Towards machine learning aided real-time range imaging in proton therapy. *Sci Rep* **12**, 2735 (2022) <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06126-6>
- Balibrea-Correa, J., Lerendegui-Marco, J., Ladarescu, I. *et al.* *Hybrid in-beam PET- and Compton prompt-gamma imaging aimed at enhanced proton-range verification.* *Eur. Phys. J. Plus* **137**, 1258 (2022). <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-022-03414-y>
- J. Lerendegui-Marco, J. Balibrea-Correa *et al.*, *First Pilot Tests of Compton Imaging and Boron Concentration Measurements in BNCT Using i-TED.* *Applied Radiation and Isotopes*, 225:112009, 2025.
- P. Torres-Sánchez, J. Lerendegui-Marco *et al.* *The potential of the i-TED Compton camera array for real-time boron imaging and determination during treatments in Boron Neutron Capture Therapy.* *Applied Radiation and Isotopes*, 217:111649, 2025

### **i-TED para aplicación a la caracterización de residuos nucleares:**

- Babiano-Suarez, Victor; Balibrea-Correa, Javier; Ladarescu, Ion; Lerendegui-Marco, Jorge; Leganes-Nieto, Jose Luis; Domingo-Pardo, Cesar, *A computer-vision aided compton-imaging system for radioactive waste characterization and decommissioning of nuclear power plants.* *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 1076:170449 (2025)

### **General de instrumentación nuclear**

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

## **Materiales**

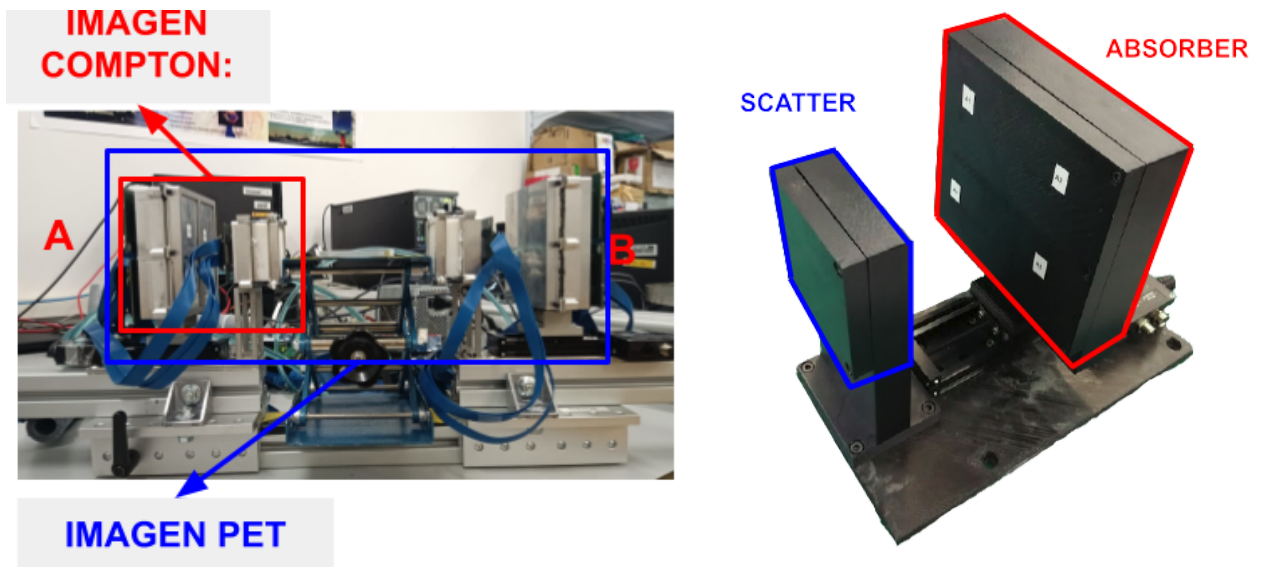


Figura 3.- Dispositivo experimental. En el panel de la izquierda se muestra el setup completo que se usará en la práctica. A la derecha se muestra una de las Cámaras Compton donde se indican los dos planos de detección.

- **Cámara Compton *i-TED* (2 en el setup completo, véase Fig. 3):**
  - Scatterer detector (Plano 1): 1 cristal centelleador inorgánico de LaCl<sub>3</sub> (50 x 50 x 10 mm).
  - Absorber detector (Plano 2): 4 x cristal centelleador inorgánico de LaCl<sub>3</sub> (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 la fuentes radiactivas utilizadas par 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, que los estudiantes utilizarán para la realización de la práctica.

### B) Calibración en energía

Se realizarán medidas con una fuente de Eu-152 que se usarán para calibrar los 10 detectores individuales (2 Cámaras Compton x 5 detectores) que se usarán en esta práctica para la obtención de las imágenes. Se realizarán algunas calibraciones en energía en la práctica 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 a lo largo del eje central de los 4 detectores.

- 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.
- Se utilizarán los detectores A y B (ver Figura 3) para reconstruir las imágenes Compton (solo A) y PET (A y B) de la fuente de Na-22 en cuatro posiciones.

Se explicará el procedimiento de selección de eventos y reconstrucción de las imágenes y se reconstruirán varias imágenes PET y Compton durante la realización de la práctica. Se distribuirán todos los resultados que permitan explicar en la memoria el procesamiento de datos y la reconstrucción de las imagen 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

Al final de la práctica, los estudiantes contarán con 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) Análisis de resultados**

- Como parte del material con el que trabajar en el laboratorio y en casa, se contará con varios macros de root que permitirán realizar análisis cuantitativo de las proyecciones de las imágenes para poder discutirlos.
- Se analizarán las diferencias (campo de visión, resolución, energía de los rayos gamma) en la imagen PET y Compton.
- Se analizará cuantitativamente la resolución obtenida con PET y Compton y el impacto de la energía gamma en la resolución de imagen Compton.

#### **E) Memoria**

La memoria consistirá en la presentación de un **documento breve que incluya únicamente la respuesta a una serie de cuestiones.** 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 explicarán en la sesión de prácticas