

# Práctica Imagen Gamma: PET y Compton

Técnicas Experimentales Avanzadas en Física Nuclear  
Máster Interuniversitario de Física Nuclear

Jorge Leredegui Marco, Víctor Babiano Suárez, Pablo Torres Sánchez

[jorge.leredegui@ific.uv.es](mailto:jorge.leredegui@ific.uv.es), [victor.babiano@ific.uv.es](mailto:victor.babiano@ific.uv.es), [pablo.torres@ific.uv.es](mailto:pablo.torres@ific.uv.es)

Instituto de Física Corpuscular, Paterna (Valencia)

2-6 febrero 2026



# Introducción

# Imagen Gamma: Introducción

- Compton Imaging:

$$\theta = \arccos \left( 1 - m_e c^2 \left( \frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1 + E_2} \right) \right)$$

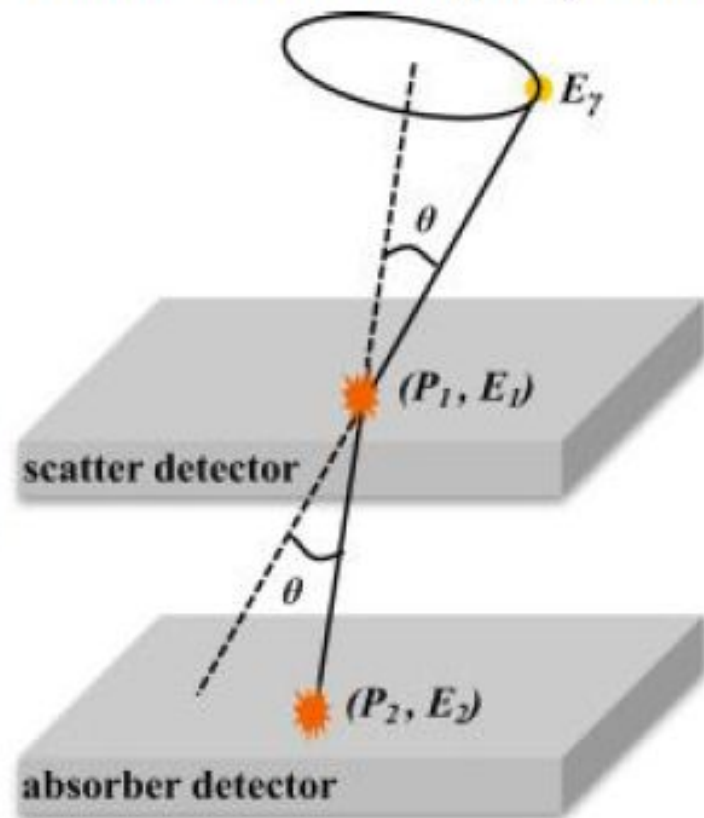
$$\Delta \theta = \frac{E_1 + E_2}{\sin \theta} \left( \frac{1}{E_1^2} \left( \frac{\Delta E_1}{E_1} \right)^2 + 2 \sin^2 \theta \left( \frac{\Delta r}{r} \right)^2 \right)^{1/2}$$

$$E_\gamma = E_1 + E_2$$

“Any” gamma ray energy

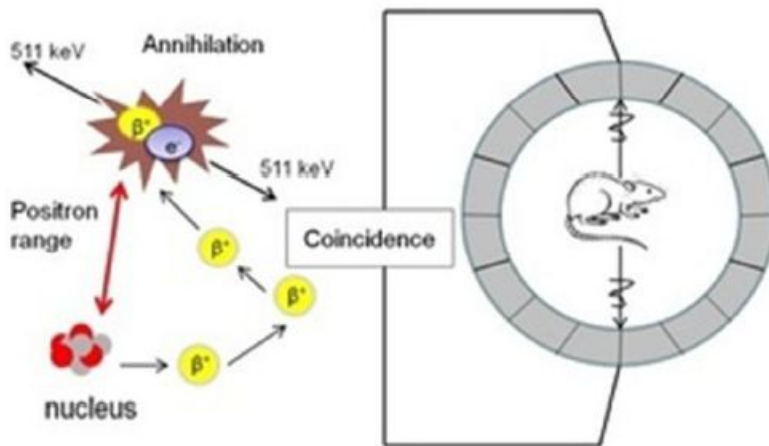
## What do we need for Compton imaging:

- 2 gamma ray detector planes in time coincidence
- Position sensitive! HOW? → Segmented read-out
- Good resolution in time, energy & position



# Imagen Gamma: Introducción

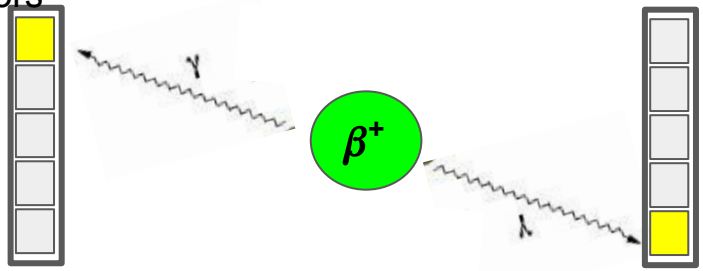
- PET Imaging:



Only for beta+ source

## What do we need to carry out PET image:

- Gamma ray detectors in time coincidence: Scintillation detectors
- Position sensitive:
  - Clinical use: Many detectors surrounding patient
  - Our system: parallel planes of detectors with segmented readout

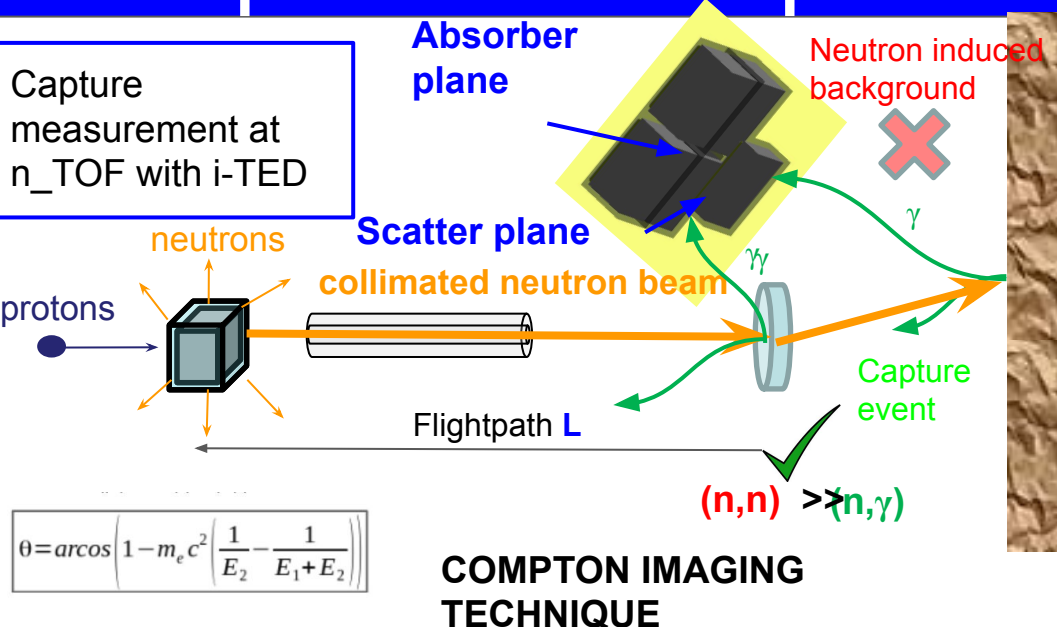


# Dispositivo experimental

De experimentos reales al laboratorio de prácticas

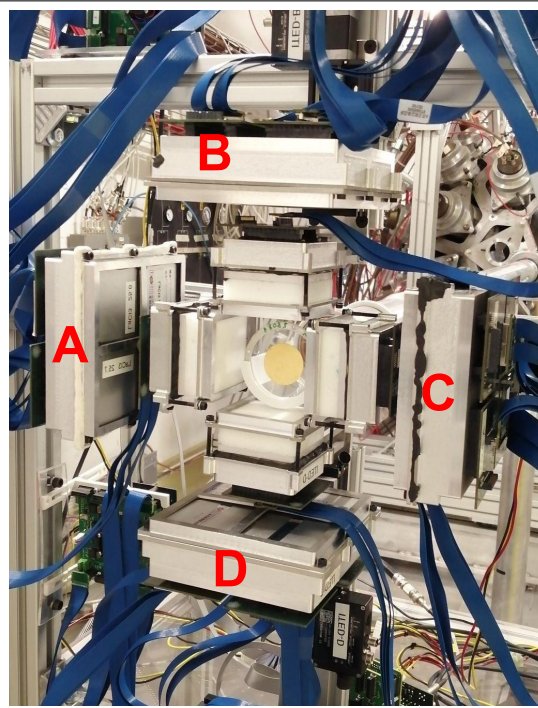
# Dispositivo: Experimentos neutrones

Capture measurement at n\_TOF with i-TED



$$\theta = \arccos \left( 1 - m_e c^2 \left( \frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1 + E_2} \right) \right)$$

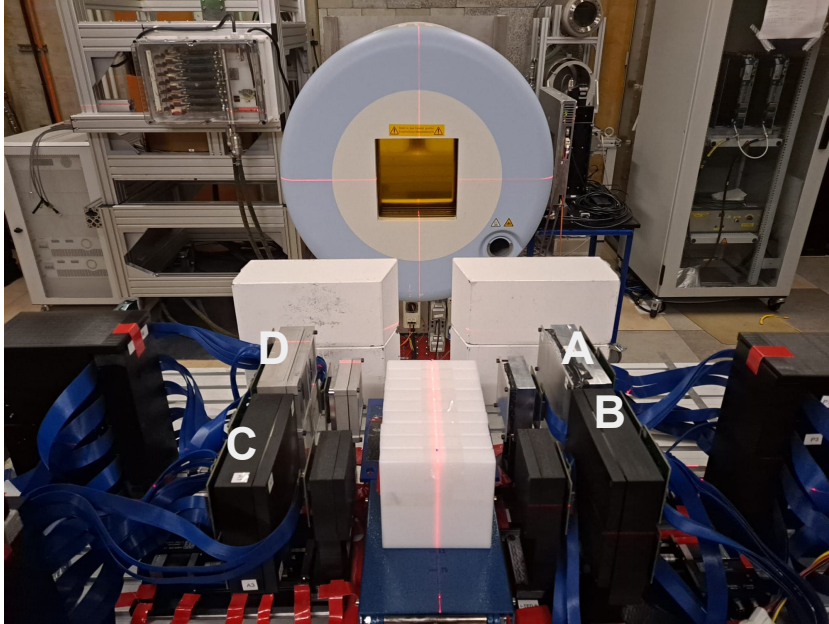
COMPTON IMAGING TECHNIQUE



4 cámaras Compton → Imagen Compton de la reacción (n,g)

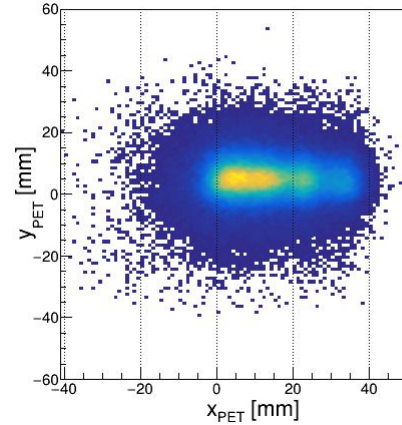
IDEA: Usar la imagen para eliminar eventos de fondo inducido por neutrones dispersados

# Dispositivo: Aplicaciones médicas

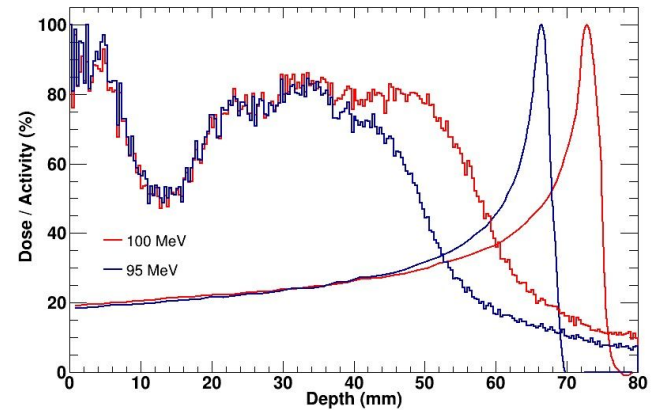
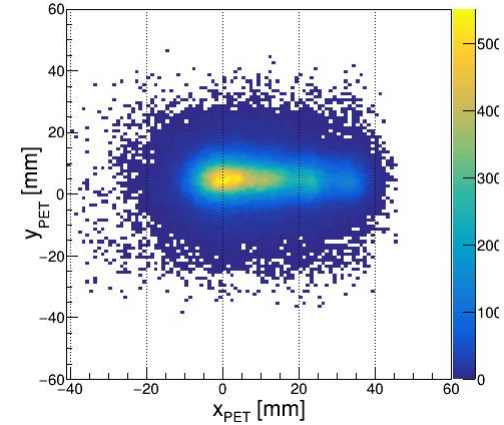


4 cámaras Compton → Imagen Compton  
2 Planos de detectores enfrentados → PET

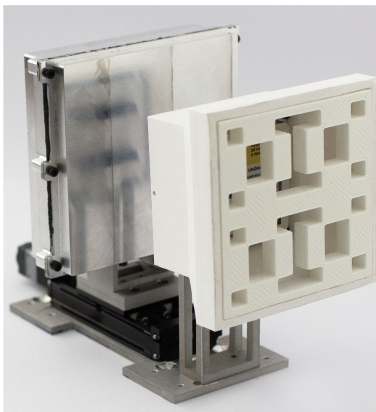
N-12 PET, 95 MeV



N-12 PET, 100 MeV



# Dispositivo: Aplicaciones nucleares

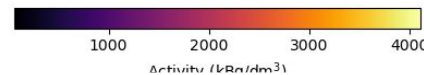
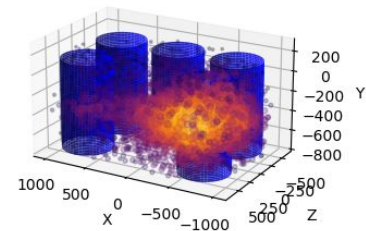
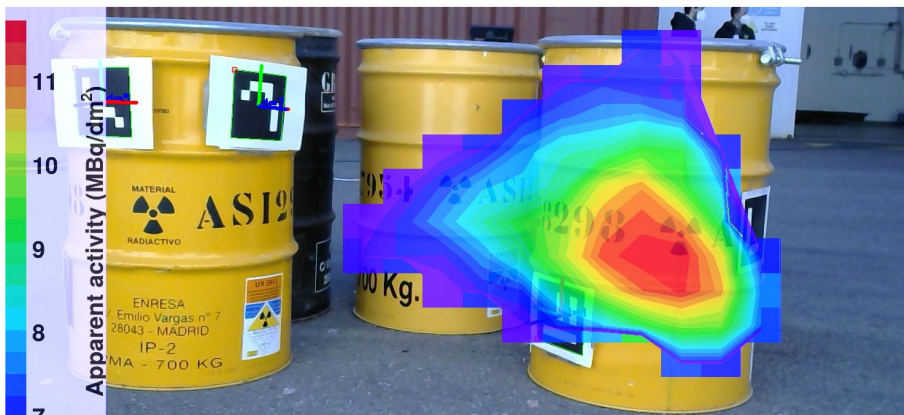


A computer-vision aided Compton-imaging system for radioactive waste characterization and decommissioning of nuclear power plants

Víctor Babiano-Suárez <sup>a</sup><sup>b</sup>, Javier Balibrea-Correa <sup>b</sup>, Ion Ladarescu <sup>b</sup>,  
Jorge Lerendegui-Marco <sup>b</sup>, César Domingo-Pardo <sup>b</sup>

<sup>a</sup> University of Valencia, Spain

<sup>b</sup> Instituto de Física Corpuscular, CSIC-University of Valencia, Spain



# Dispositivo experimental: concepto

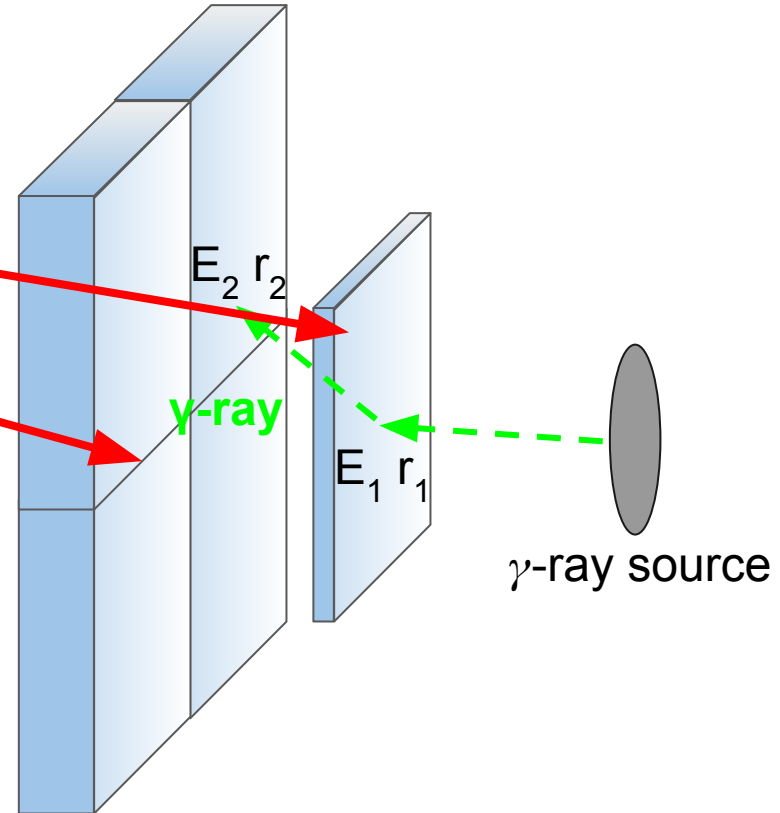
i-TED 5: Compton camera

## 2 Detector Planes

- 1 Scatterer: 50 x 50 mm x **10** mm  
LaCl<sub>3</sub> **monolithic** crystal
- 4 Absorbers: 50 x 50 mm x 25 mm  
LaCl<sub>3</sub> **monolithic** crystals

In order to determine with **high accuracy the energy and position:**

1. **High energy resolution:** LaCl<sub>3</sub>
2. **High position sensitivity:** Pixelated photomultiplier

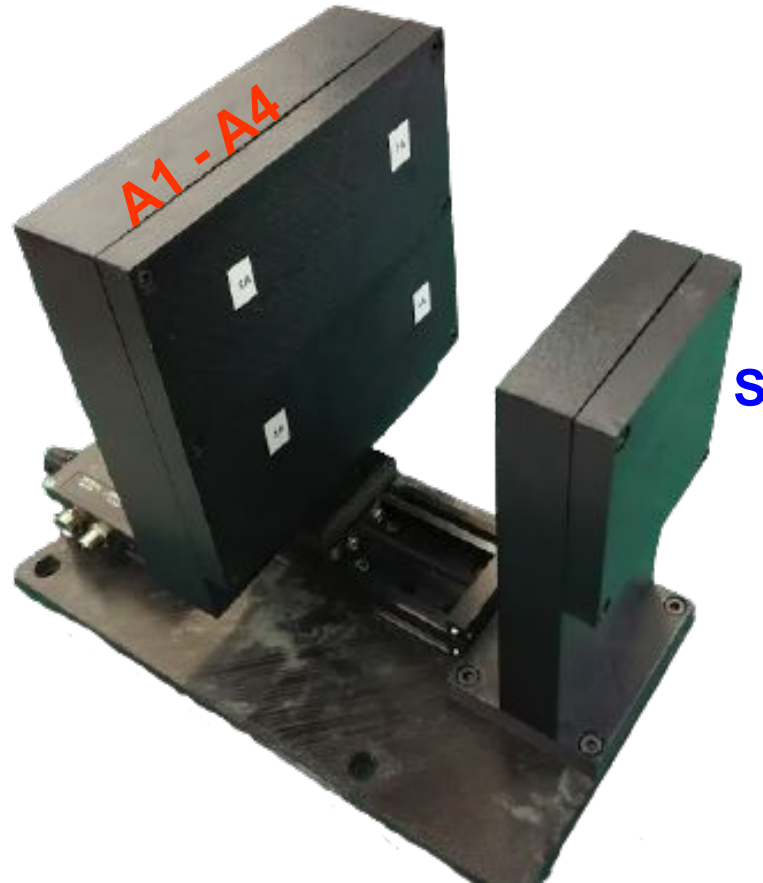


# Dispositivo experimental

i-TED 5: Compton camera

## 2 Detector Planes

- **1 Scatterer:** 50 x 50 mm x **10** mm  
LaCl<sub>3</sub> **monolithic** crystal
- **4 Absorbers:** 50 x 50 mm x 25 mm  
LaCl<sub>3</sub> **monolithic** crystals

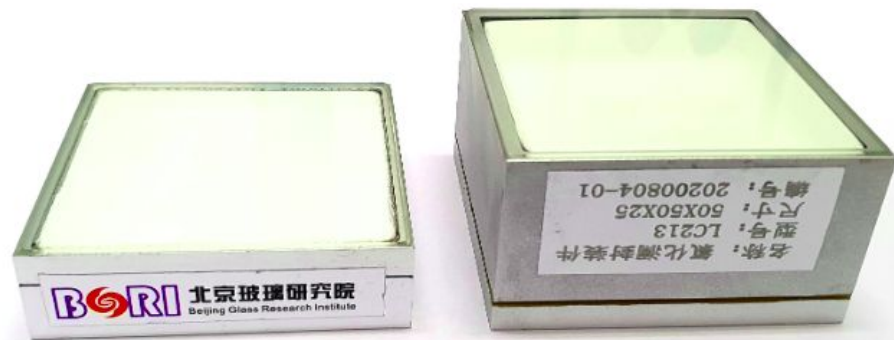


# Dispositivo experimental

i-TED 5: Individual detectors

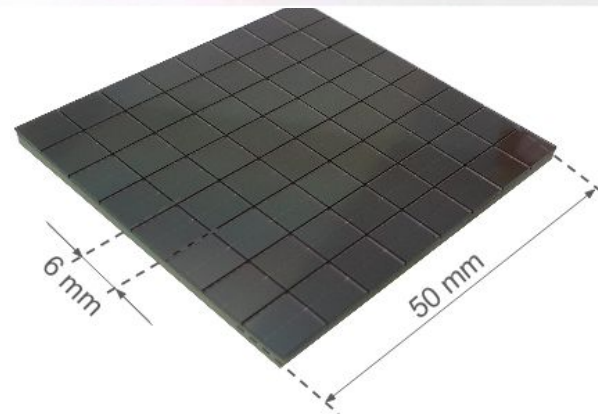
## 2 Detector Planes

- 1 Scatterer: 50 x 50 mm x 10 mm  
LaCl<sub>3</sub> **monolithic** crystal
- 4 Absorbers: 50 x 50 mm x 25 mm  
LaCl<sub>3</sub> **monolithic** crystals



## Segmented read-out:

Detectors coupled to 8x8 pixelated Sensl SiPMs covering the entire surface of the detector.



Sensl<sup>®</sup> Array J-60035-64P-PCB

# Dispositivo experimental

i-TED 5: Electronics

## 2 Detector Planes

- 1 Scatterer: 50 x 50 mm x **10** mm  
LaCl<sub>3</sub> **monolithic** crystal
- 4 Absorbers: 50 x 50 mm x 25 mm  
LaCl<sub>3</sub> **monolithic** crystals

## Segmented read-out:

Detectors coupled to 8x8 pixelated Sensel SiPMs covering the entire surface of the detector.

**Data acquisition:** PETSys electronics and acquisition system.

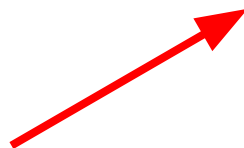
## SiPM read-out:

ASICs: [Application-specific integrated circuit](#)  
64 channels/crystal

## PETSys electronics:

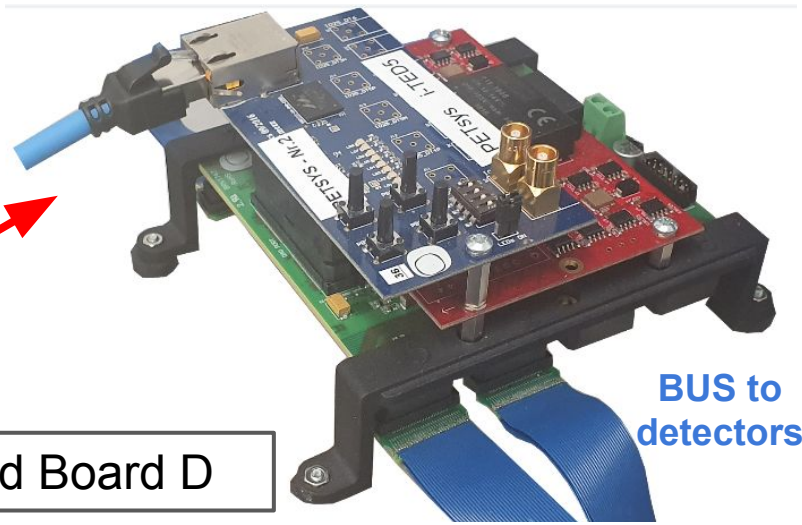
- Integrated and scalable system (medical applications)
- Data from transferred via Gigabit Ethernet
- Power supply to SiPM

SFP/  
Ethernet  
to PC



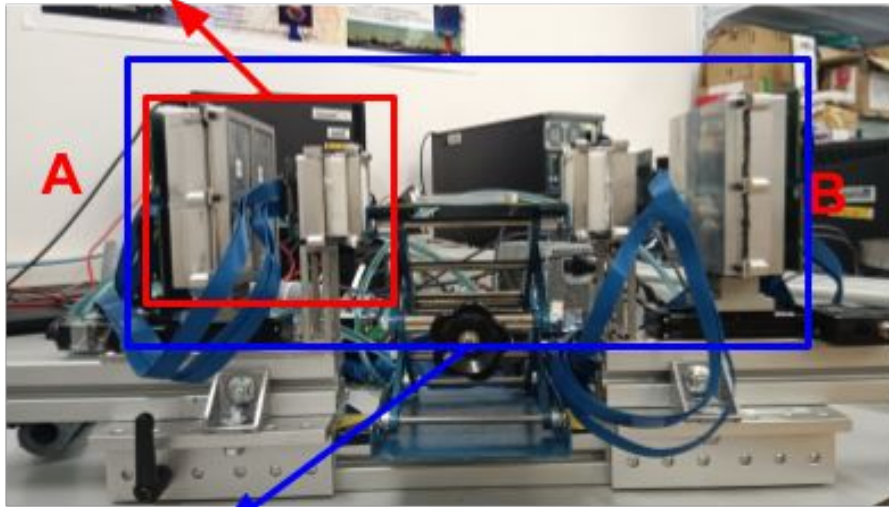
BUS to  
detectors

PETSys<sup>®</sup> TOF Front-End Board D



# Imagen Compton y PET simultánea

**IMAGEN  
COMPTON:**



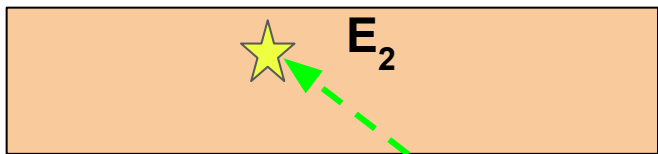
**IMAGEN PET**

**IMAGEN COMPTON:**  
Cada módulo  
(Cámara compton) por  
separado

**IMAGEN PET:**  
Detectores sensibles  
a la posición paralelos  
y enfrentados

# Imagen Compton y PET simultánea

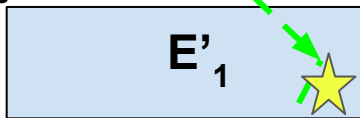
i-TED B



COMPTON

$$E_1 + E_2 = E_g$$

$$E'_1 + E'_2 = E_g$$



i-TED A

Any gamma source  
(e.g Na-22)

i-TED B



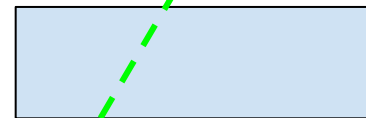
PET

$$E_B = 511 \text{ keV}$$

$$E_A = 511 \text{ keV}$$



511 keV



511 keV



i-TED A

$\beta^+$  source  
(e.g Na-22)

# Lectura de datos y reconstrucción de eventos *singles*

# Adquisición de datos *raw*

**Each individual detector of iTED:**

G-ray interaction in the monolithic  $\text{LaCl}_3$  crystal.



Scintillation photons collected 8x8 pixelated SiPM.



The 64 channels are read-out with PET-SYS.

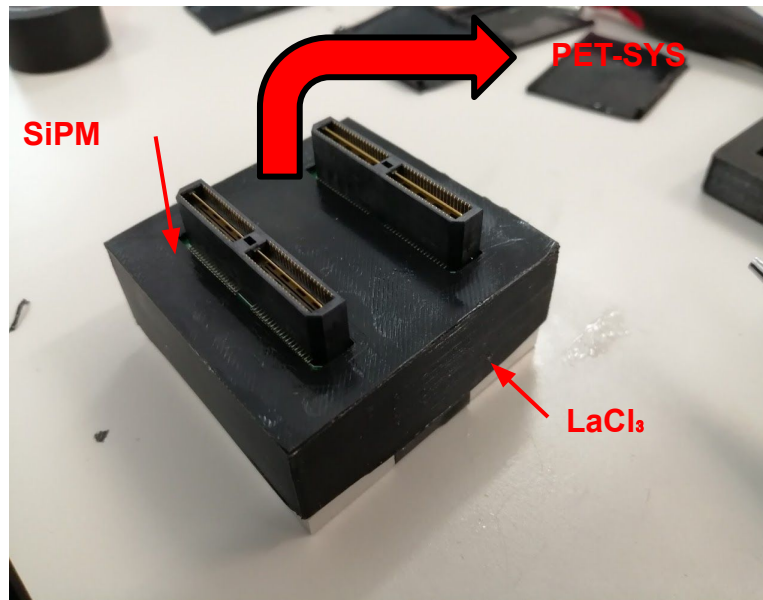
**Primary data from PETSys**

"Raw" data

|         |                |                |
|---------|----------------|----------------|
| Channel | Timestamp [ps] | Integral [ADC] |
| Channel | Timestamp [ps] | Integral [ADC] |
| Channel | Timestamp [ps] | Integral [ADC] |
| ...     | ...            | ...            |
| Channel | Timestamp [ps] | Integral [ADC] |

**DATA  
ACQUISITION**

Raw data files



Each Pixel  $\rightarrow$  channel of the ASICS (=4x5x64 = 1280 in total)  $\rightarrow$  Identified with an index

# Reconstrucción de eventos *singles*

## Single crystal event building (*build singles*)



1 EVENT = SUM PIXELS THAT  
FIRE WITHIN 100 ns FROM  
THE 1st PIXEL HIT

**Energy** = sum of the charge of all  
the fired pixels

**Time** = timestamp of first pixel hit

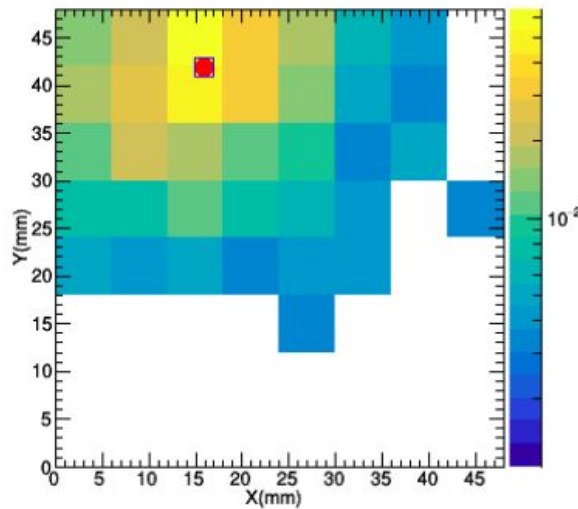
Raw data



Single events

1 charge and  
timestamp value  
per **pixel** fired

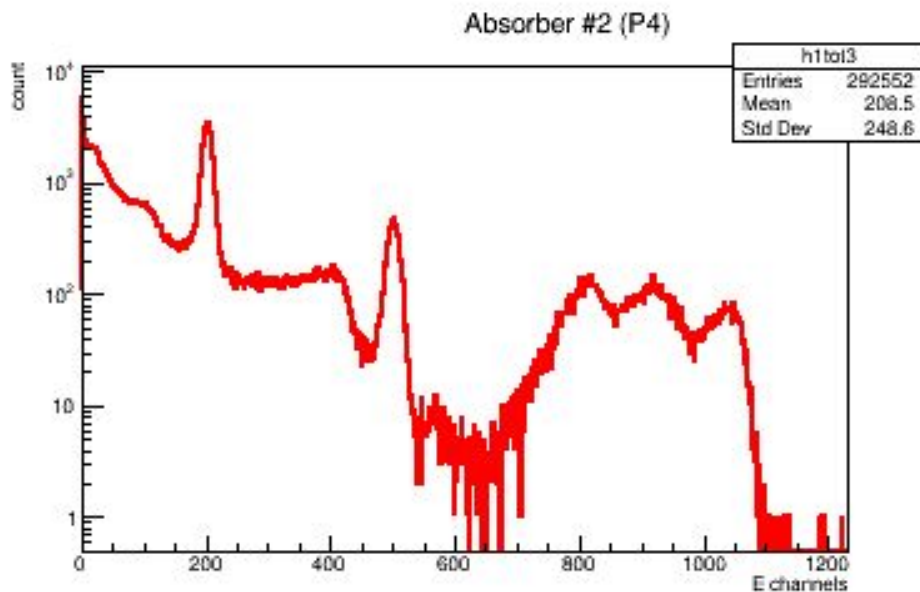
1 charge (or light)  
map, sum charge,  
and timestamp  
per **crystal** fired



Pixel charge  
map scatterer  
 $E_1 = 511 \text{ keV}$

# Reconstrucción de eventos *singles*

## Single crystal event building: Energy spectra



Na-22 spectrum (single absorber crystal)

### Deposited energy:

Proportional to sum of the charge of all the fired pixels

### SINGLE EVENTS IN THE OUTPUT FILES:

1 ROOT TTree per crystal → 20 TTree's for the whole setup

→ Recommended Task: Open an example file in the list of documents we have provided and plot the amplitude for different crystals.

# Realización de la práctica

# Práctica Imagen Gamma: PET y Compton

- Visualizar y explicación del setup
- Visualizar y explicación de la GUI del sistema de adquisición de datos
  
- Calibración en energía de los detectores
- Medida de imagen PET y Compton en 4 posiciones
- Reconstrucción PET/Compton
- Visualización de los resultados finales
  
- Discusión de las diferencias entre PET y Compton Limitaciones espaciales (PET), resolución (PET vs Compton) , impacto de la energía del gamma (Compton)

# Calibración en energía

## Gammas from $^{152}\text{Eu}$ (13.537 y 6)

| $E_g$ (keV) | $I_g$ (%) | Decay mode |
|-------------|-----------|------------|
|-------------|-----------|------------|

|            |         |                  |
|------------|---------|------------------|
| 121.7817 3 | 28.58 6 | e+b <sup>+</sup> |
|------------|---------|------------------|

|               |        |                |
|---------------|--------|----------------|
| → 344.2785 12 | 26.5 4 | b <sup>-</sup> |
|---------------|--------|----------------|

|              |           |                  |
|--------------|-----------|------------------|
| → 1408.006 3 | 21.005 24 | e+b <sup>+</sup> |
|--------------|-----------|------------------|

|              |           |                  |
|--------------|-----------|------------------|
| → 964.079 18 | 14.605 21 | e+b <sup>+</sup> |
|--------------|-----------|------------------|

|              |           |                  |
|--------------|-----------|------------------|
| → 1112.074 4 | 13.644 21 | e+b <sup>+</sup> |
|--------------|-----------|------------------|

|               |           |                |
|---------------|-----------|----------------|
| → 778.9040 18 | 12.942 19 | b <sup>-</sup> |
|---------------|-----------|----------------|

|             |           |                  |
|-------------|-----------|------------------|
| 1085.869 24 | 10.207 21 | e+b <sup>+</sup> |
|-------------|-----------|------------------|

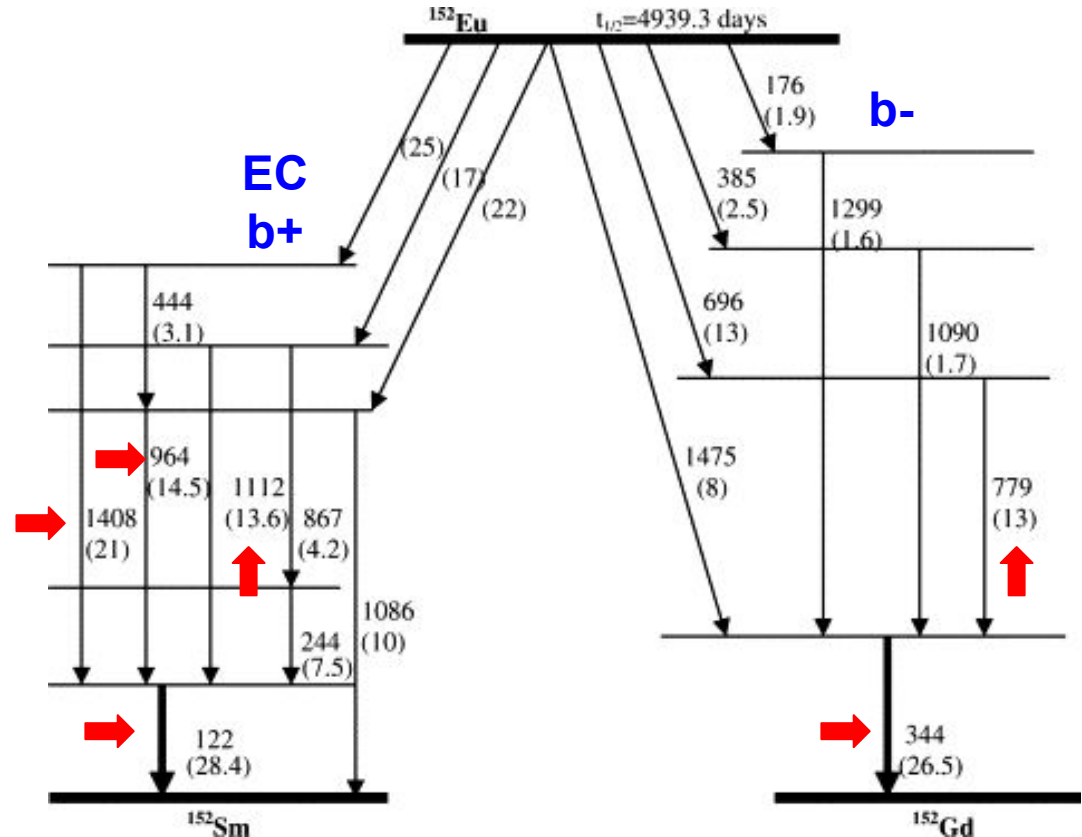
|              |          |                  |
|--------------|----------|------------------|
| → 244.6975 8 | 7.583 19 | e+b <sup>+</sup> |
|--------------|----------|------------------|

First step before imaging measurements

Output

**PRÁCTICA:**

Tomar datos, discutir el espectro y mostrar fit de los picos



# Calibración en energía

## Gammas from $^{152}\text{Eu}$ (13.537 y 6)

| $E_g$ (keV) | $I_g$ (%) | Decay mode |
|-------------|-----------|------------|
|-------------|-----------|------------|

|            |         |                  |
|------------|---------|------------------|
| 121.7817 3 | 28.58 6 | e+b <sup>+</sup> |
|------------|---------|------------------|

|               |        |                |
|---------------|--------|----------------|
| → 344.2785 12 | 26.5 4 | b <sup>-</sup> |
|---------------|--------|----------------|

|              |           |                  |
|--------------|-----------|------------------|
| → 1408.006 3 | 21.005 24 | e+b <sup>+</sup> |
|--------------|-----------|------------------|

|              |           |                  |
|--------------|-----------|------------------|
| → 964.079 18 | 14.605 21 | e+b <sup>+</sup> |
|--------------|-----------|------------------|

|              |           |                  |
|--------------|-----------|------------------|
| → 1112.074 4 | 13.644 21 | e+b <sup>+</sup> |
|--------------|-----------|------------------|

|               |           |                |
|---------------|-----------|----------------|
| → 778.9040 18 | 12.942 19 | b <sup>-</sup> |
|---------------|-----------|----------------|

|             |           |                  |
|-------------|-----------|------------------|
| 1085.869 24 | 10.207 21 | e+b <sup>+</sup> |
|-------------|-----------|------------------|

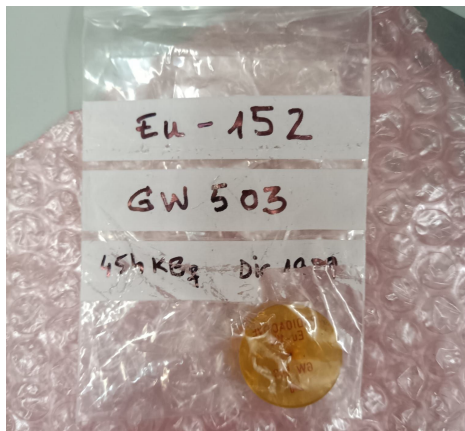
|              |          |                  |
|--------------|----------|------------------|
| → 244.6975 8 | 7.583 19 | e+b <sup>+</sup> |
|--------------|----------|------------------|

First step before imaging measurements

Output

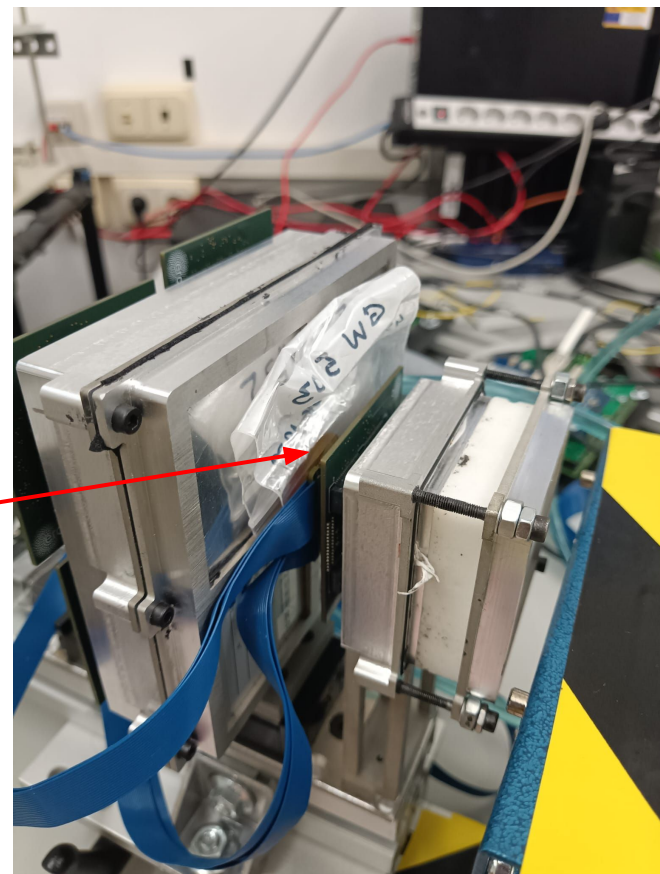
**PRÁCTICA:**

Tomar datos, discutir el espectro y mostrar fit de los picos



**Eu-152 source  
in-between planes**

**Individual  
calibration of the  
10 detectors of  
i-TED A & B**



# Calibración en energía

## Gammas from $^{152}\text{Eu}$ (13.537 y 6)

| $E_g$ (keV) | $I_g$ (%) | Decay mode |
|-------------|-----------|------------|
|-------------|-----------|------------|

|            |         |                  |
|------------|---------|------------------|
| 121.7817 3 | 28.58 6 | e+b <sup>+</sup> |
|------------|---------|------------------|

→ 344.2785 12 26.5 4

→ 1408.006 3 21.005 24

→ 964.079 18 14.605 21

→ 1112.074 4 13.644 21

→ 778.9040 18 12.942 19

|             |           |                  |
|-------------|-----------|------------------|
| 1085.869 24 | 10.207 21 | e+b <sup>+</sup> |
|-------------|-----------|------------------|

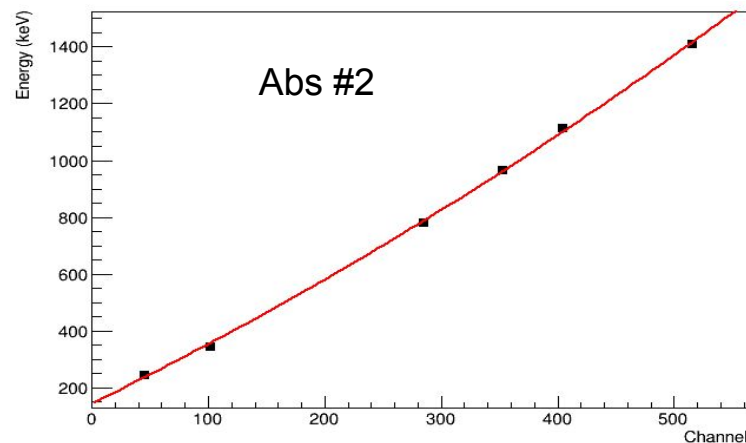
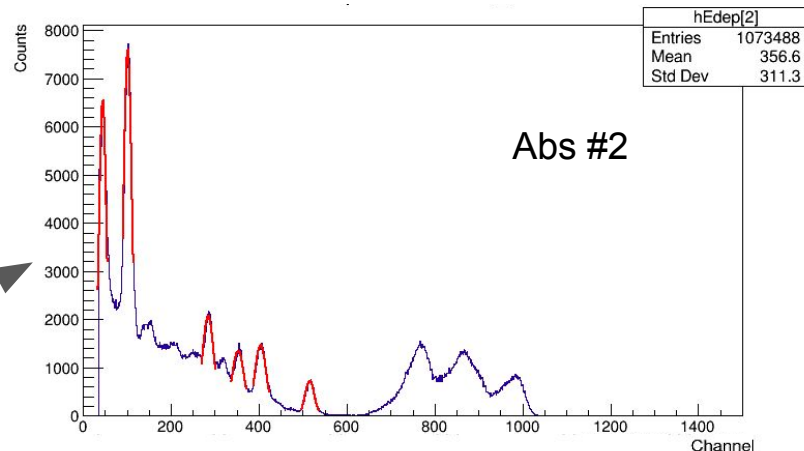
→ 244.6975 8 7.583 19

First step before imaging measurements

Output

**PRÁCTICA:**

Tomar datos, discutir el espectro y mostrar fit de los picos



# Resolución en energía

## Gammas from $^{152}\text{Eu}$ (13.537 y 6)

| $E_g$ (keV) | $I_g$ (%) | Decay mode |
|-------------|-----------|------------|
|-------------|-----------|------------|

|            |         |                  |
|------------|---------|------------------|
| 121.7817 3 | 28.58 6 | e+b <sup>+</sup> |
|------------|---------|------------------|

|               |        |                |
|---------------|--------|----------------|
| → 344.2785 12 | 26.5 4 | b <sup>-</sup> |
|---------------|--------|----------------|

|              |           |                  |
|--------------|-----------|------------------|
| → 1408.006 3 | 21.005 24 | e+b <sup>+</sup> |
|--------------|-----------|------------------|

|              |           |                  |
|--------------|-----------|------------------|
| → 964.079 18 | 14.605 21 | e+b <sup>+</sup> |
|--------------|-----------|------------------|

|              |           |                  |
|--------------|-----------|------------------|
| → 1112.074 4 | 13.644 21 | e+b <sup>+</sup> |
|--------------|-----------|------------------|

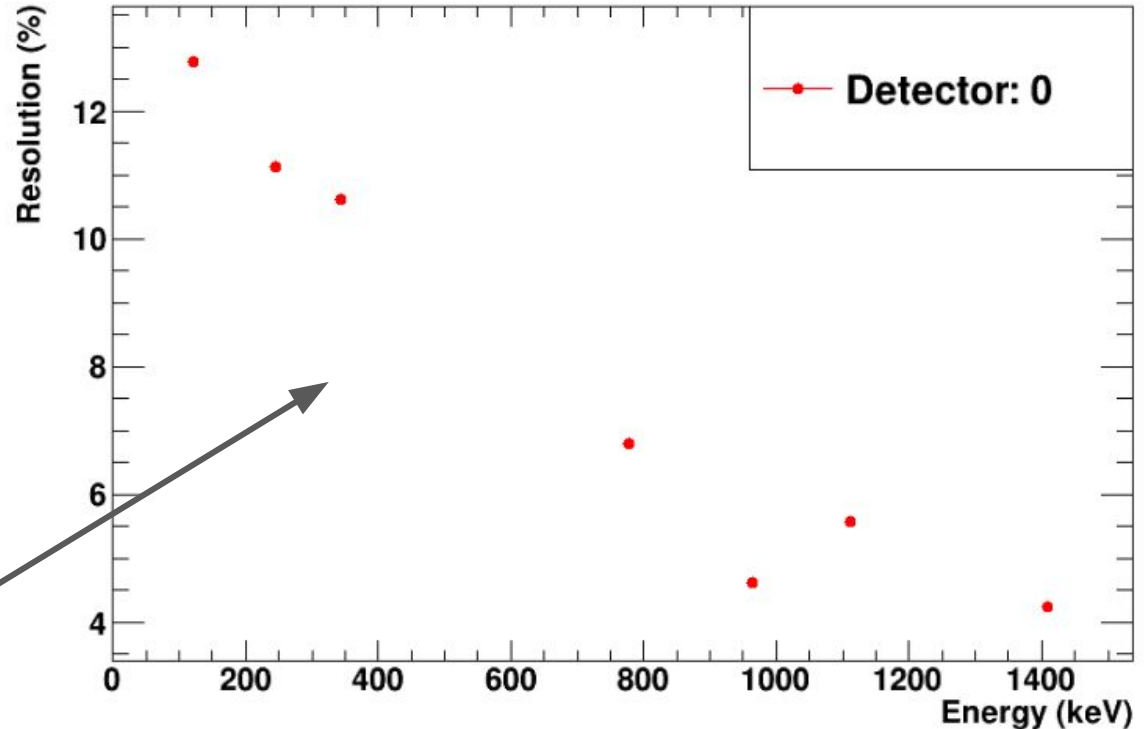
|               |           |                |
|---------------|-----------|----------------|
| → 778.9040 18 | 12.942 19 | b <sup>-</sup> |
|---------------|-----------|----------------|

|             |           |                  |
|-------------|-----------|------------------|
| 1085.869 24 | 10.207 21 | e+b <sup>+</sup> |
|-------------|-----------|------------------|

|              |          |                  |
|--------------|----------|------------------|
| → 244.6975 8 | 7.583 19 | e+b <sup>+</sup> |
|--------------|----------|------------------|

First step before imaging measurements

Output

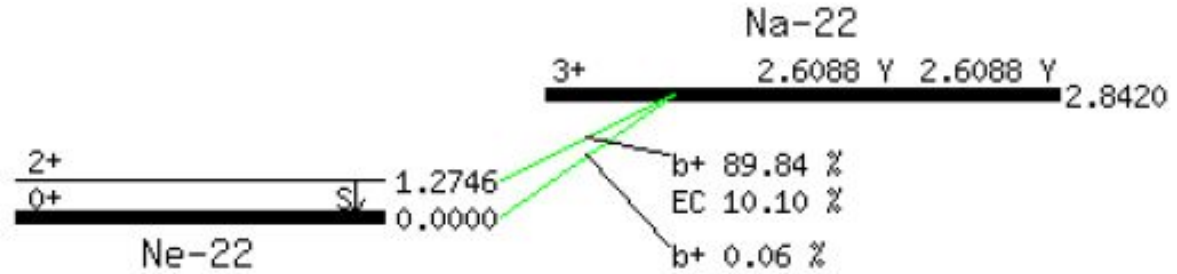


**PRÁCTICA:**

Tomar datos, discutir el espectro y mostrar fit de los picos

# Medidas imagen PET & Compton

- Fuente Na-22 (emisor beta+)



- **Importante:** Medir la distancia entre la muestra e i-TED A y B → Parámetro importante en la reconstrucción de imagen.
- Tomar un medida corta y discutir el espectro.
  - **PREGUNTA: De dónde sale el 511 keV?**

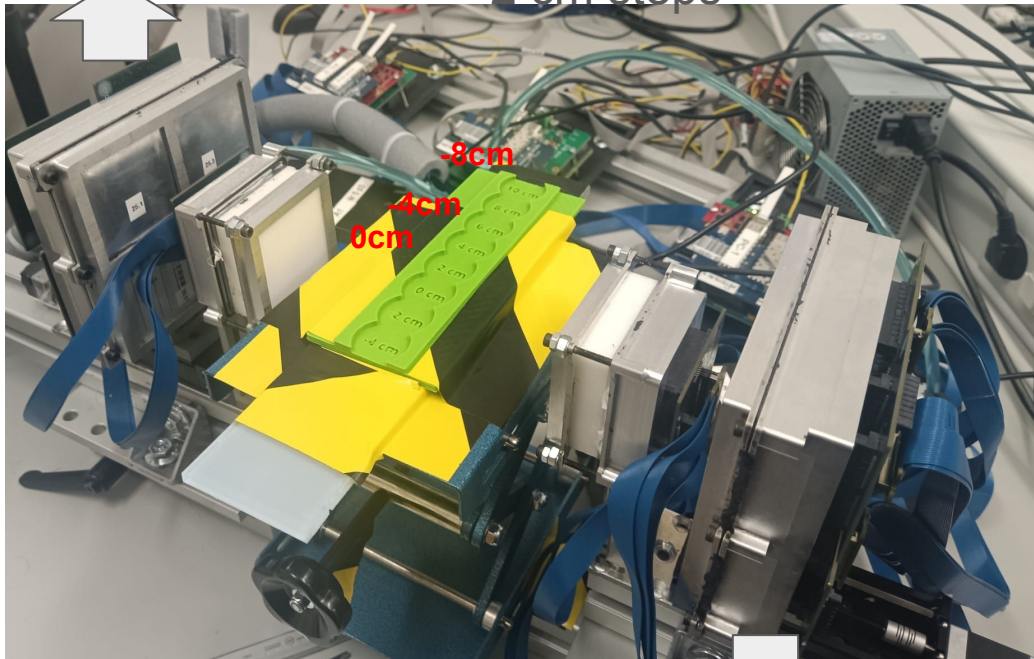
Gammas from  $^{22}\text{Na}$  (2.6019 y 4)

| Eg (keV)  | Ig (%)    | Decay mode |
|-----------|-----------|------------|
| 1274.53 2 | 99.944 14 | e+b+       |

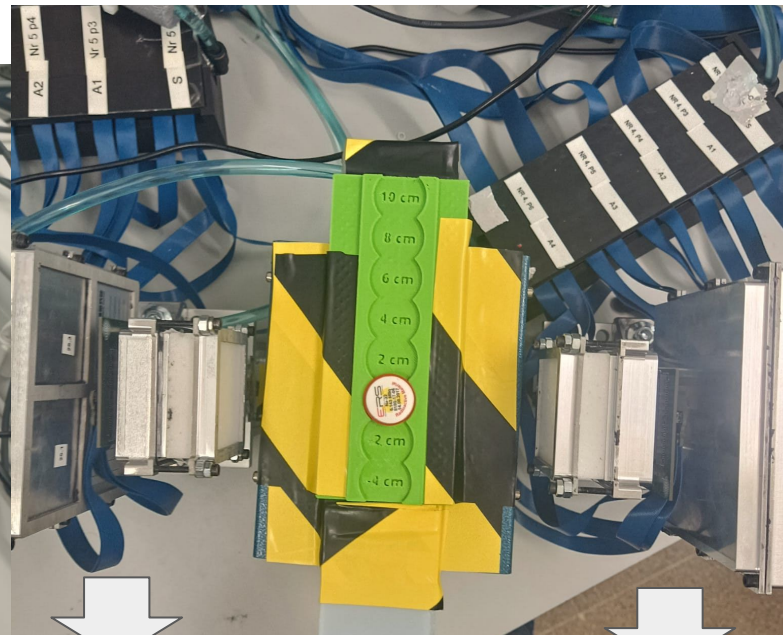
# Imagen Compton y PET simultánea

i-TED A

Positioning table:  
2 cm steps



i-TED B



i-TED A

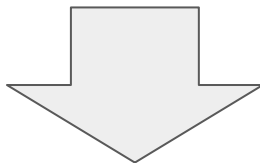
i-TED B

# Imagen Compton y PET simultánea

**i-TED A**



Imágenes se visualizan desde aquí!



**X (imagen)**



**1**

x=0cm

**2**

x=4cm

**3**

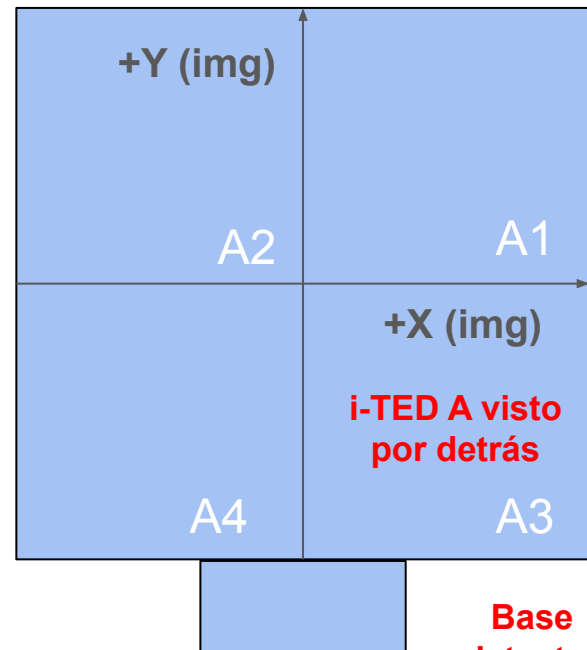
x=-8cm



**i-TED B**

**DISCUTIR RESULTADO CON  
PET Y COMPTON!**

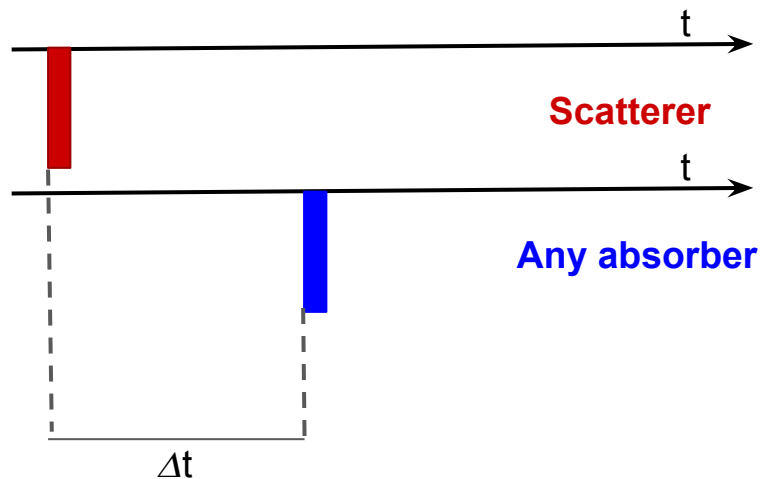
Sistema referencia imágenes:  
se visualizan desde detrás de  
i-TED A



# Reconstrucción de imagen PET y Compton

# Reconstrucción de coincidencias

## Coincidence event building (*single2tree*)



$\Delta t \leq 10 \text{ ns} \rightarrow$  Coincidence  $\rightarrow$  Select event  
 $\Delta t > 10 \text{ ns} \rightarrow$  Separated events  $\rightarrow$  reject



**Coincidences:** Save charge map  
(64 pixels) of Scat. and Abs.

1 COINCIDENCE EVENT =  
2 SINGLE EVENTS IN TWO OR MORE  
SEPARATE CRYSTALS

**Coincidence window** =  
Time interval after scatterer  
event time (10 ns)

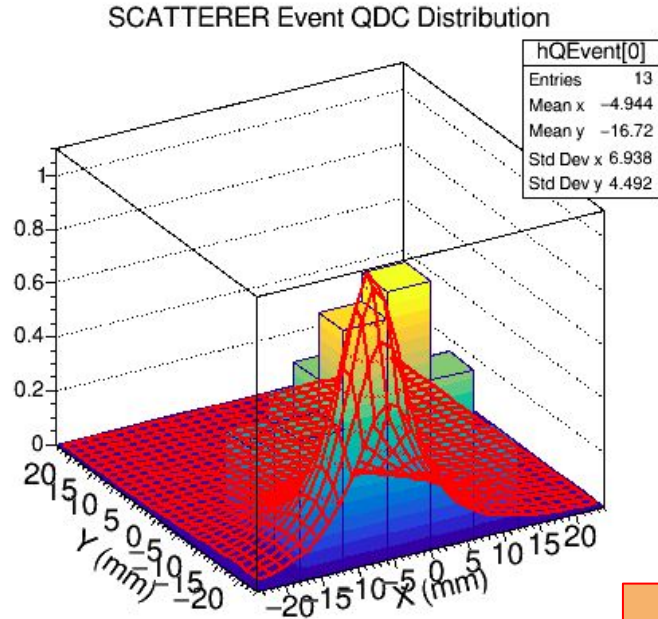
**Sum energy** = Sum of deposited  
energies in individual crystals

**COINCIDENCE EVENTS IN THE OUTPUT  
FILES:**

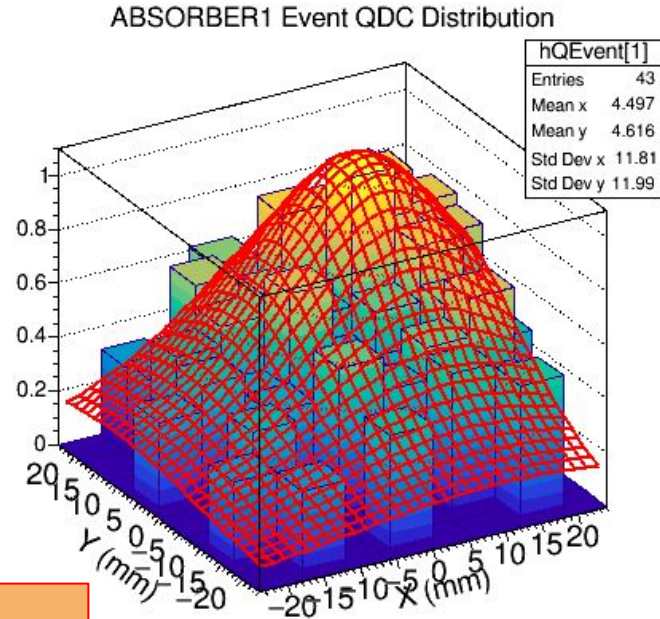
**1 ROOT TTree called "COINCIDENCES"**

# Posición de interacción

Fit of the charge distributions of Absorber and Scatter (coincidence events)



$r1 = (x1, y1, z1)$

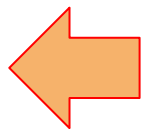


$r2 = (x2, y2, z2)$

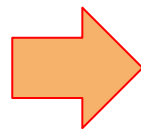
The interaction position reconstruction accuracy is critical for imaging.

# Imágenes PET y Compton

COMPTON: Coincidences within same module



COINCIDENCES TTree  
( any coincidence)



PET: Coincidences between crystals of the opposite crystals



**i-TED-B:**  
Crystal index [5,9]  
 $E_1 + E_2 = E_g$



**COMPTON**  
 $E'_1 + E'_2 = E_g$

**PET**

$E_B = 511 \text{ keV}$

$E_A = 511 \text{ keV}$



0 + 5  
0 + 6

511 keV

...  
4+9

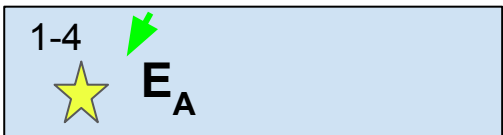
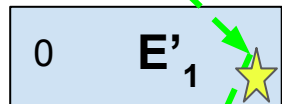
511 keV

**(25 PET  
Coincidence  
lines in total!)**

**i-TED-A:**  
Crystal index [0,4]

5 + [6-9]

0 + [1-4]



# Imagen PET

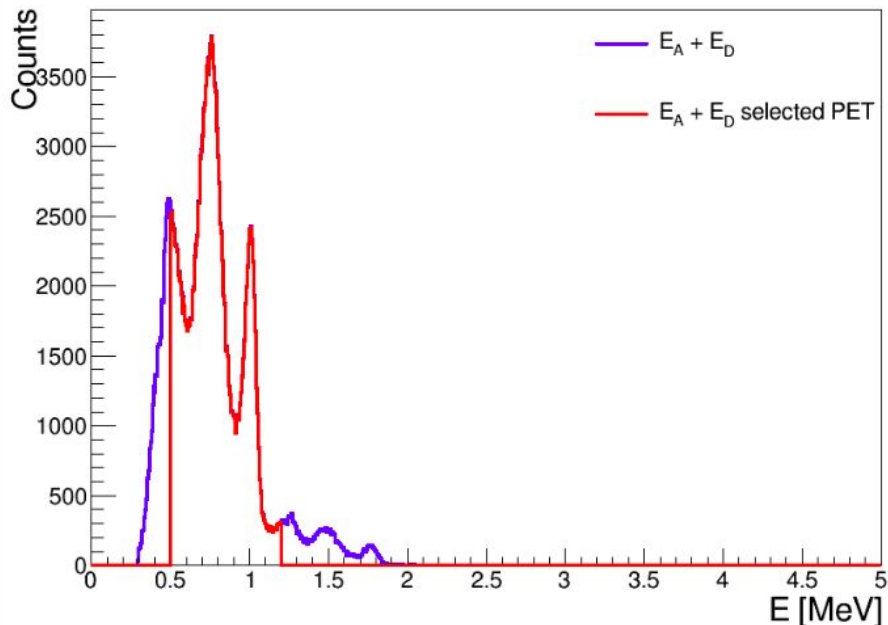
Coincidences with  $E_A = E_B = 511$  keV

Cut in  $E_\gamma = E_1 = E_2 = 511$  keV

Selección de energía inicial:  $E_a + E_b$

0.5 - 1.2 MeV

Más amplia  $\rightarrow$  más estadística



**PRÁCTICA:** Visualizar imágenes PET individuales (25 líneas de coincidencia) y sumarlas

# Imagen PET

Coincidences with  $E_A = E_B = 511 \text{ keV}$

Selección de energía inicial:  $E_a + E_b$

0.5 - 1.2 MeV

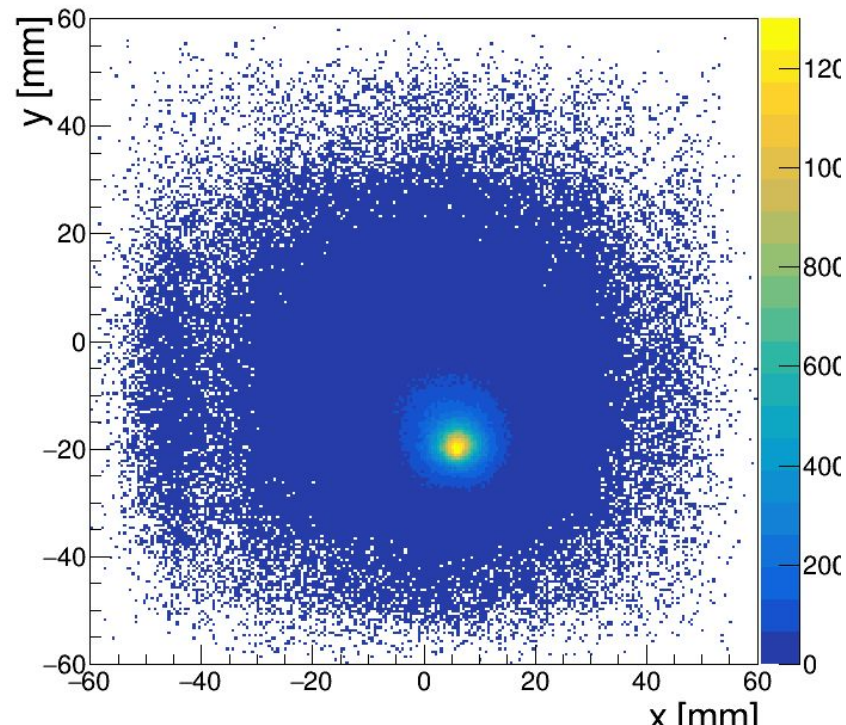
Más amplia → más estadística + imagen

Imagen correspondiente a  
Pos #2 (+2 cm)

**PRÁCTICA:** Visualizar imágenes PET individuales  
(25 líneas de coincidencia) y sumarlas

Cut in  $E_\gamma = E_1 = E_2 = 511 \text{ keV}$

Imagen visualizada desde i-TED A



# Imagen PET

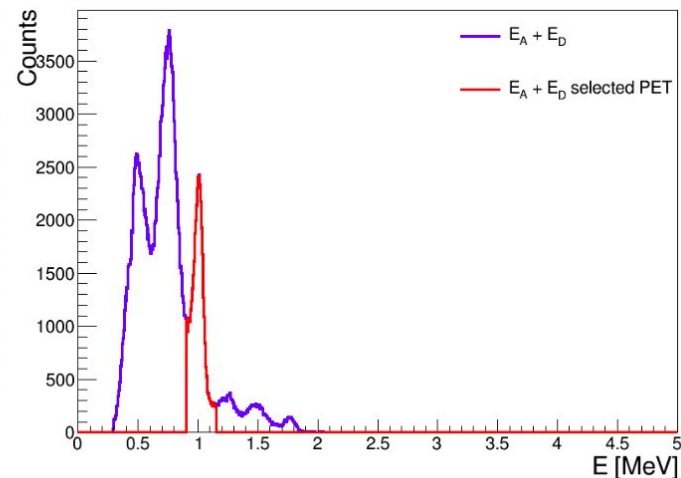
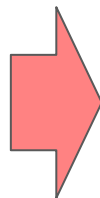
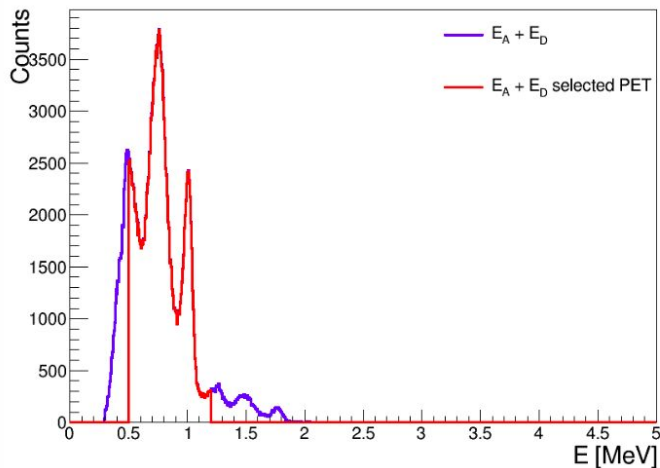
## Coincidences with $E_A = E_B = 511$ keV

Cut in  $E_\gamma = E_1 = E_2 = 511$  keV

Selección de energía optimizada:  $E_a + E_b$

0.9 - 1.15 MeV

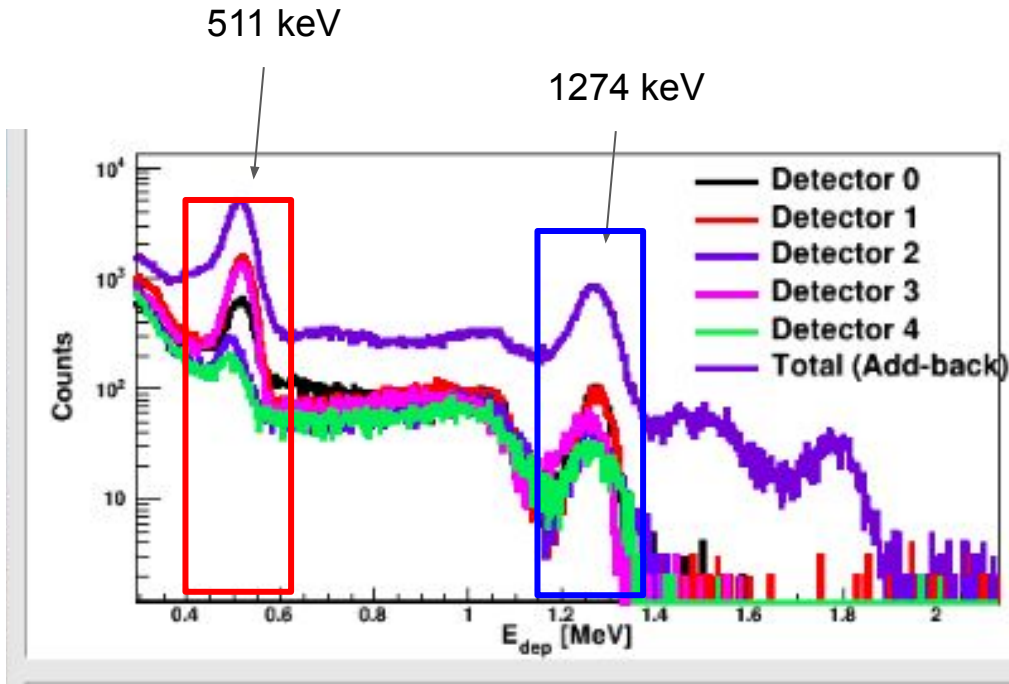
Restringida al pico suma  $E_B + E_A = 1022$  keV



**PRÁCTICA:** Visualizar imágenes PET individuales (25 líneas de coincidencia) y sumarlas

**EJERCICIO Extra:** Extraer las imágenes obtenidas reduciendo la ventana de energía con el script Macro\_PET.hh

# Imagen Compton



$$\theta = \arccos \left( 1 - m_e c^2 \left( \frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1 + E_2} \right) \right)$$

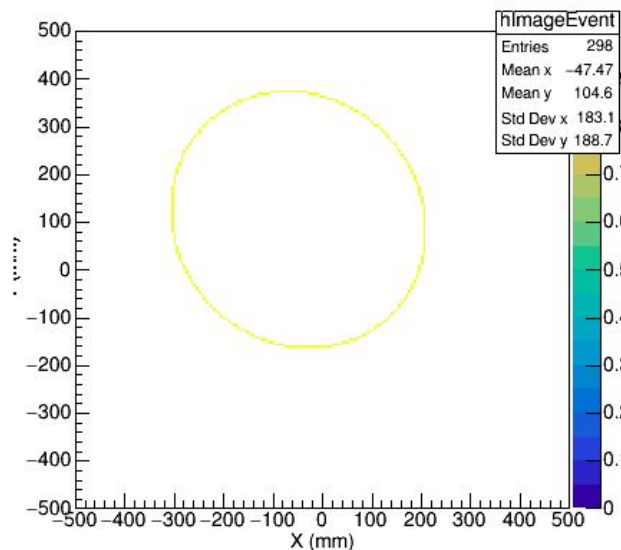
Cut in  $E_\gamma = E_1 + E_2$

Selección de energía:

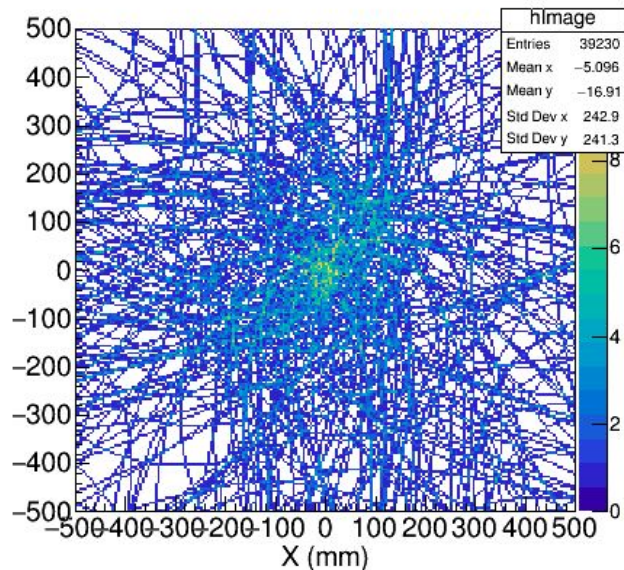
$E_1 + E_2 = 511 \text{ keV}$  o  $1274 \text{ keV}$

# Imagen Compton

## Backprojection method:



1 single event →  
Determine a cone of possible  
source positions



Many events →  
Interception of cones →  
source position

$$\theta = \arccos \left( 1 - m_e c^2 \left( \frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1 + E_2} \right) \right)$$

$$\text{Cut in } E_\gamma = E_1 + E_2$$

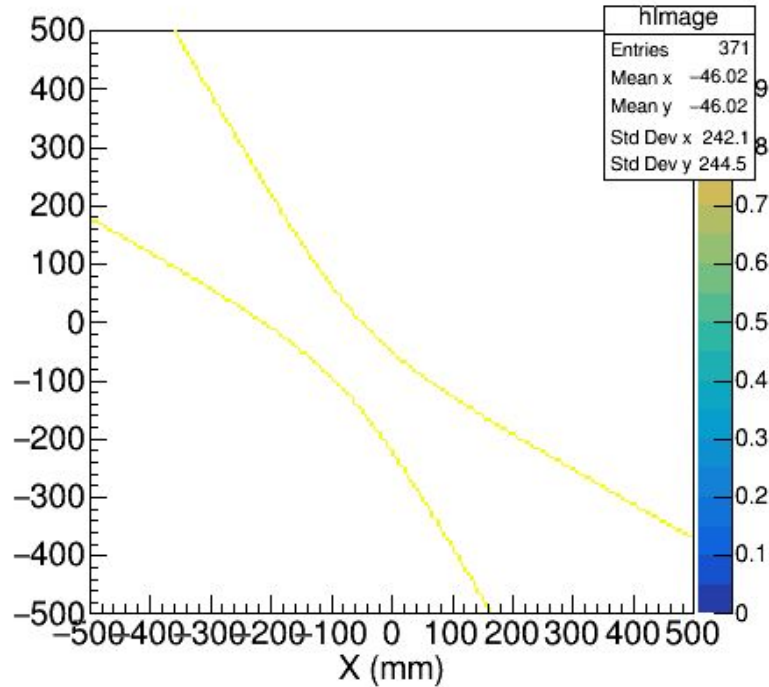
Watch it!

<http://hymnserc.ific.uv.es/ited/>

# Imagen Compton

$$\text{Cut in } E_\gamma = E_1 + E_2$$

$$\theta = \arccos \left( 1 - m_e c^2 \left( \frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1 + E_2} \right) \right)$$



Many events →

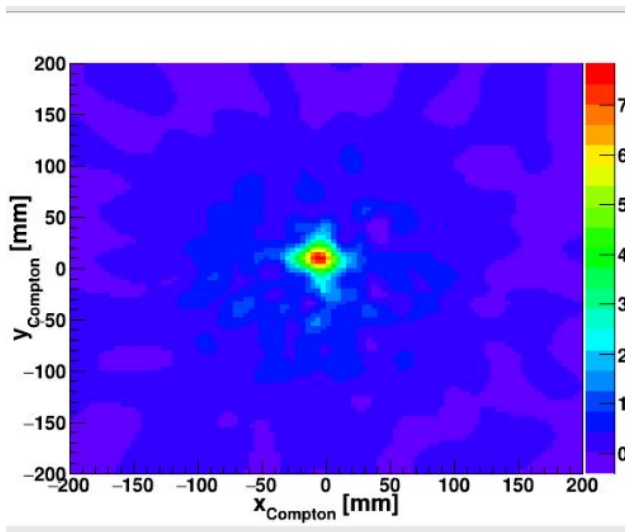
Interception of cones → source position

# Imagen Compton

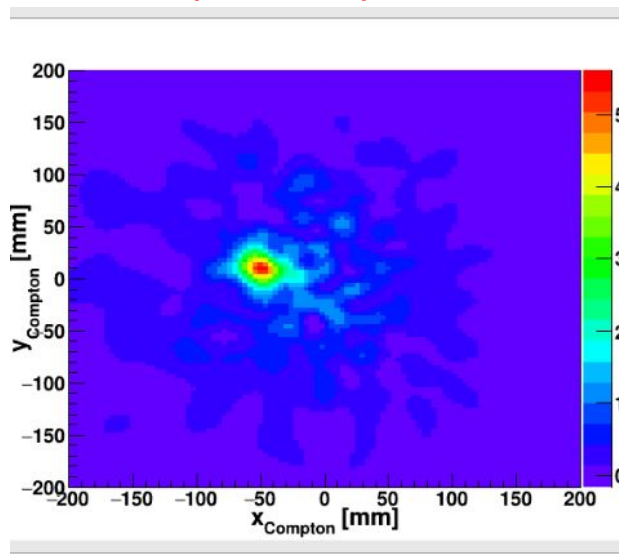
$$E_\gamma = E_1 + E_2 = 1.1 - 1.4$$

$$\theta = \arccos \left( 1 - m_e c^2 \left( \frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1 + E_2} \right) \right)$$

(x = 0 cm)



(x = -4 cm)



**PRÁCTICA:** Generar las imágenes Compton y sus proyecciones obtenidas para alguna de las posiciones para 1274 keV y 511 keV

**EJERCICIO Extra:** Sacar las figuras y las proyecciones para el resto de posiciones (Macro\_Compton.hh)

Memoria

# Memoria: Cuestiones a discutir

- Comparar la resolución espacial PET y Compton para las imágenes que se han obtenido en la práctica.
- Comparar la resolución Compton para las dos líneas gamma ( $E_g = 511 \text{ keV}$  y  $E_g = 1274 \text{ keV}$ ) para las imágenes que se han obtenido en la práctica.
- **En la memoria, contestad brevemente a las siguientes 5 cuestiones:**
  1. ¿Qué condiciones (detectores seleccionados, coincidencias temporales, cortes energéticos) se aplican para reconstruir la imagen PET y Compton con el dispositivo experimental?
  2. ¿De la comparativa PET - Compton: qué técnica proporciona mejor resolución? ¿Qué ventajas tiene la técnica Compton respecto de la PET?
  3. Para las imágenes con la fuente situada en  $X > 6 \text{ cm}$ , ¿por qué no se reconstruye imagen PET pero sí Compton?
  4. ¿Con qué energía gamma de la fuente de Na-22 se obtiene mejor resolución Compton y por qué?

# Memoria : Cuestiones extra (opcional)

## 5. Cuestiones extra (SE VALORARÁ PARA NOTA 8+):

- Extraer imagen sumada PET, las proyecciones y las resoluciones con la selección optimizada,  $E_d + E_a = [0.9 \text{ MeV}, 1.15 \text{ MeV}]$  (Ficheros *Na22\_PosXcm\_PET\_1022keVPeak.root*) y comparar con los resultados con la selección de energía inicial. ¿Afecta la ventana de energía a la resolución PET?
- A partir de los ficheros generados con las imágenes Compton, discutid si cambia la eficiencia Compton con la posición de la muestra. Para ello, cuantificad el número de eventos seleccionados para la imagen para las 4 medidas de la fuente de Na-22 en distintas posiciones. (Eficiencia Integral de los picos de 511 keV (0.4-0.6 MeV) y 1274 keV (1.2-1.4 MeV) del histograma de energía suma scatter-absorber en coincidencia temporal, llamado `hTotalEnergy`).

Para estos ejercicios, se puede usar ROOT instalado en vuestros ordenadores o la máquina virtual proporcionada en la práctica de Geant4.