Pruebas en Laboratorio y Haz de un Telescopio Compton para Monitorización de Terapia Hadrónica

Enrique Muñoz[1], John Barrio[1], Ane Etxebeste[1], Carlos Lacasta[1], Josep F. Oliver[1], Pablo G. Ortega[1,2], Carles Solaz[1], Gabriela Llosá[1]

[1]IFIC-Valencia, Spain
[2]CERN, Switzerland

IRIS group: **I**mage **R**econstruction, **I**nstrumentation and **S**imulations in medical applications.

http://ific.uv.es/iris

IFIMED- Instalación de física médica

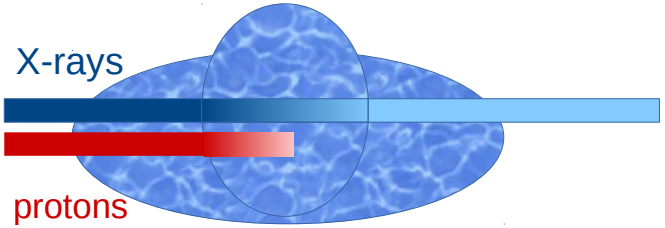
Índice

- Los principios de la Terapia Hadrónica
- Funcionamiento de un Telescopio Compton
- Reconstrucción de la imagen
- Nuestro prototipo
- Caracterización del detector
- Medidas en laboratorio
- Medidas en haz
- Resumen y conclusiones

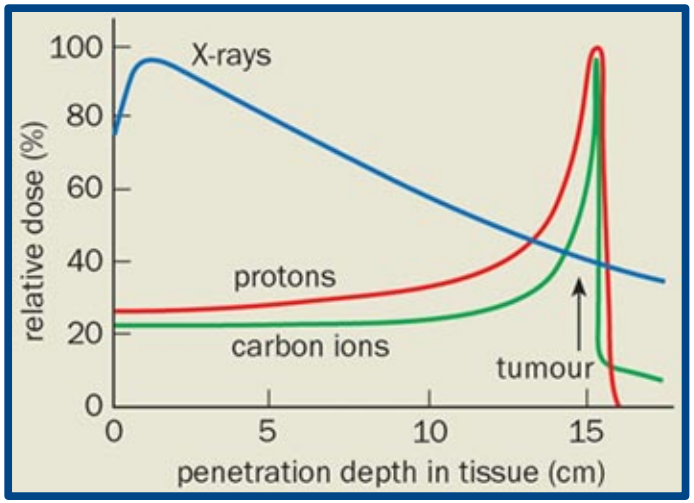
Terapia Hadrónica

La **Terapia Hadrónica** emplea radiación ionizante para tratar ciertos tipos de cáncer.

Se basa en las propiedades de interacción de partículas cargadas pesadas, principalmente protones o iones ligeros.



- Los rayos X depositan energía progresivamente a medida que avanzan.
- Los protones penetran el tejido con menor deposición de energía
- Depositan el máximo de energía justo antes de detenerse, definiendo un pico conocido como **Pico de Bragg**
- Deposición de energía prácticamente nula más allá del Pico de Bragg

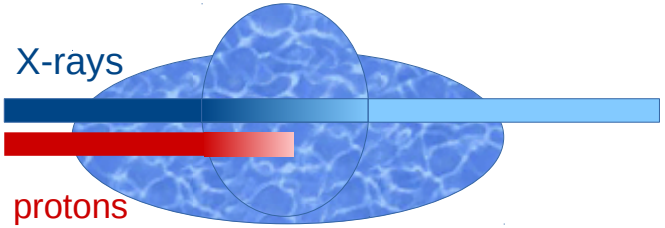


- HT permite preservar mejor el tejido sano circundante
- La monitorización de la dosis administrada es más difícil, ya que el haz es totalmente absorbido

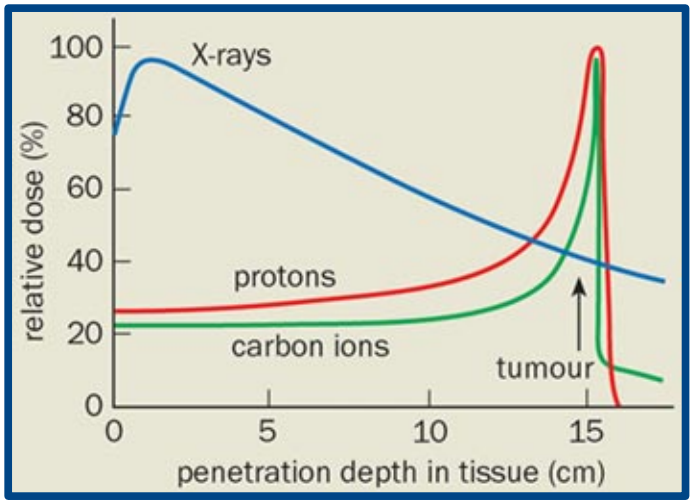
Terapia Hadrónica

La **Terapia Hadrónica** emplea radiación ionizante para tratar ciertos tipos de cáncer.

Se basa en las propiedades de interacción de partículas cargadas pesadas, principalmente protones o iones ligeros.



- Los rayos X depositan energía progresivamente a medida que avanzan.
- Los protones penetran el tejido con menor deposición de energía
- Depositan el máximo de energía justo antes de detenerse, definiendo un pico conocido como **Pico de Bragg**
- Deposición de energía prácticamente nula más allá del Pico de Bragg



- HT permite preservar mejor el tejido sano circundante

- **La monitorización de la dosis administrada es más difícil, ya que el haz es totalmente absorbido**

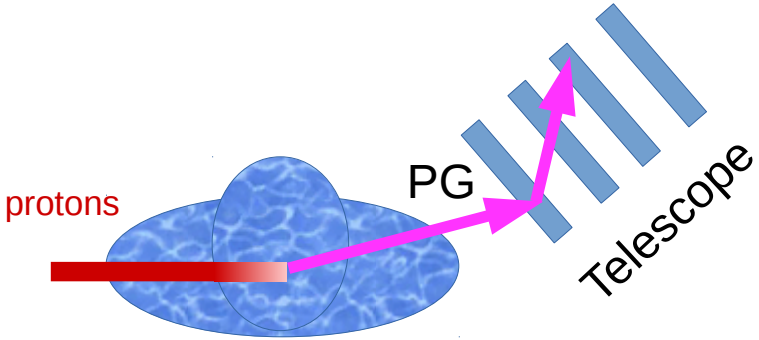
Terapia Hadrónica

- Protones absorbidos: técnicas de imagen basadas en atenuación no son posibles
- Las técnicas de monitorización de la dosis administrada se basan en la detección de partículas secundarias emitidas por núcleos excitados durante el tratamiento
  - Algunos núcleos emiten positrones → dos gammas de 511 keV
  - Algunos núcleos emiten (prompt) gammas, PG

In-beam PET

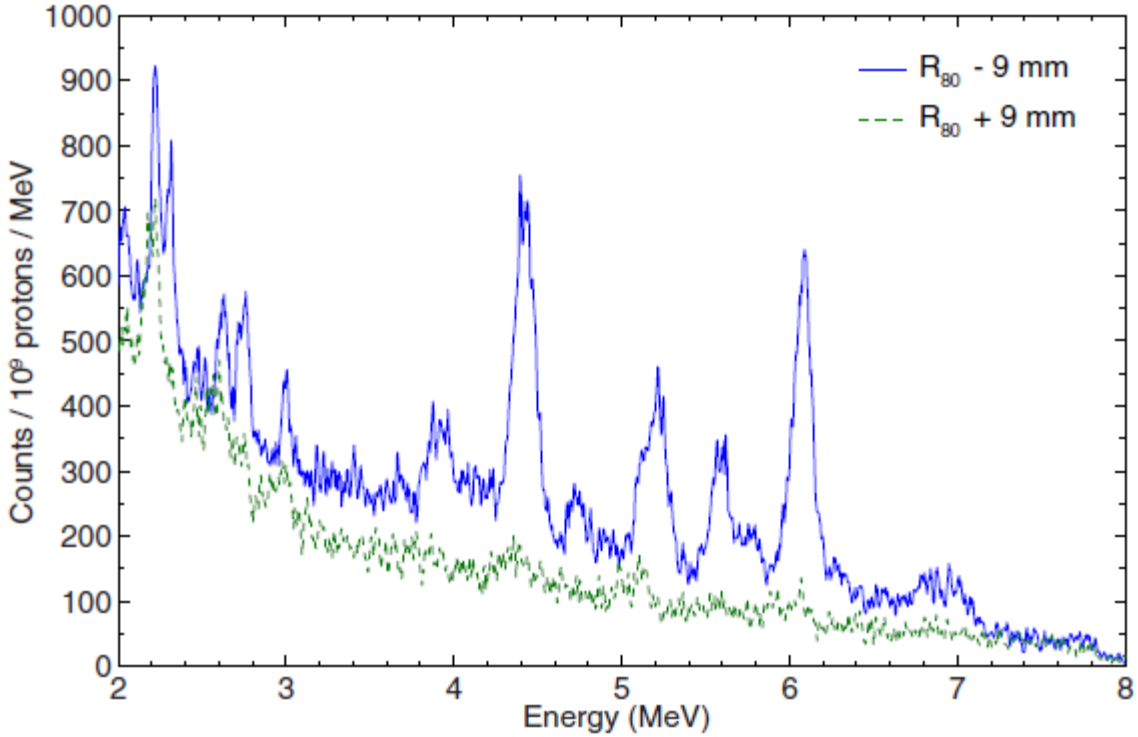
- Basado en la tecnología PET
- El haz activa al paciente
- Algunos núcleos emiten positrones
- Imagen del mapa de aniquilación de positrones

Prompt Gammas



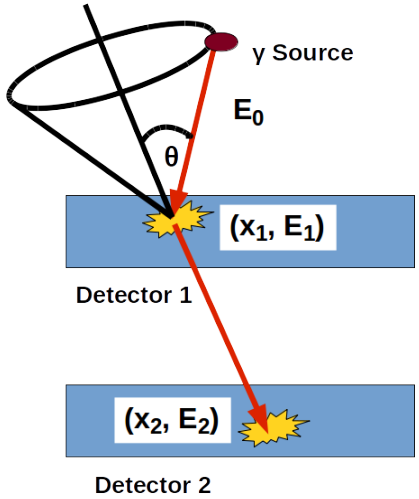
- Basado en la tecnología de Cámaras Compton
- El haz activa al paciente
- **Prompt Gammas de alta energía emitidos en un espectro continuo**
- Imagen del mapa de producción de PG

Prompt Gamma



Verburg et al., *Energy- and time-resolved detection of prompt gamma-rays for proton range verification*, Phys. Med. Biol. 58(2013) L37-L49

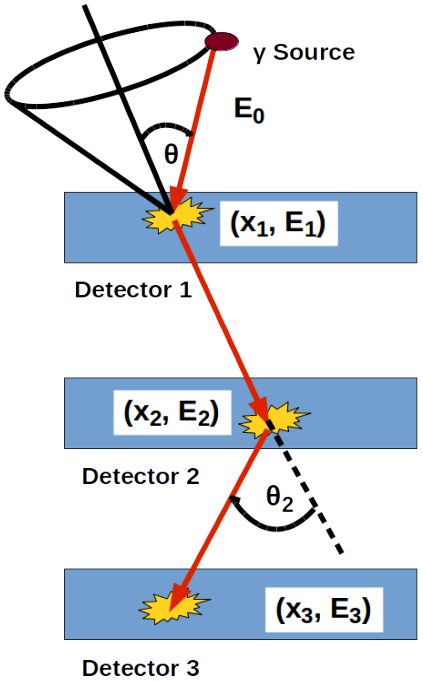
Configuración del Telescopio Compton



Scatterer + absorber: 2 interacciones

- Origen del gamma confinado a la superficie de un cono
- Es necesario conocer E_0

$$\cos(\theta) = 1 - \frac{E_1 m_e c^2}{E_0 (E_0 - E_1)}$$

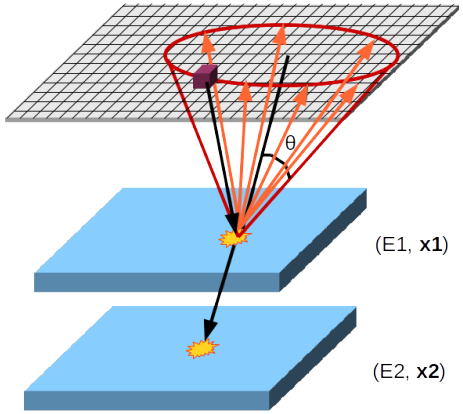


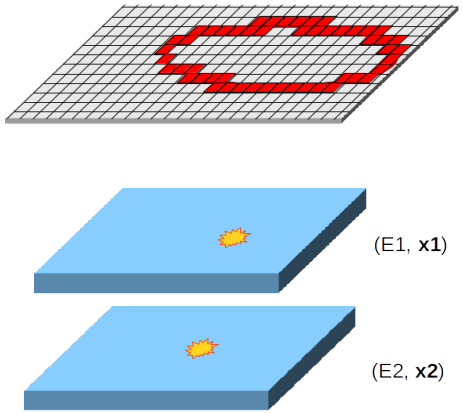
Multilayer: 3 interacciones

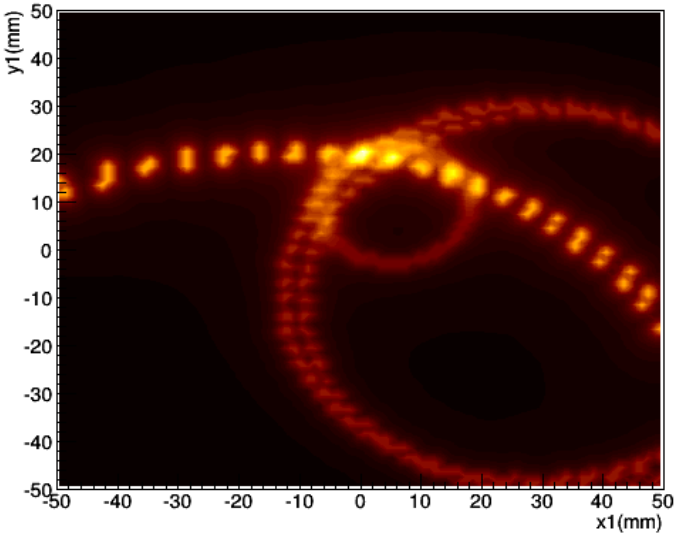
- El segundo ángulo θ_2 permite determinar E_0
- Eficiencia reducida un factor ~ 10^2

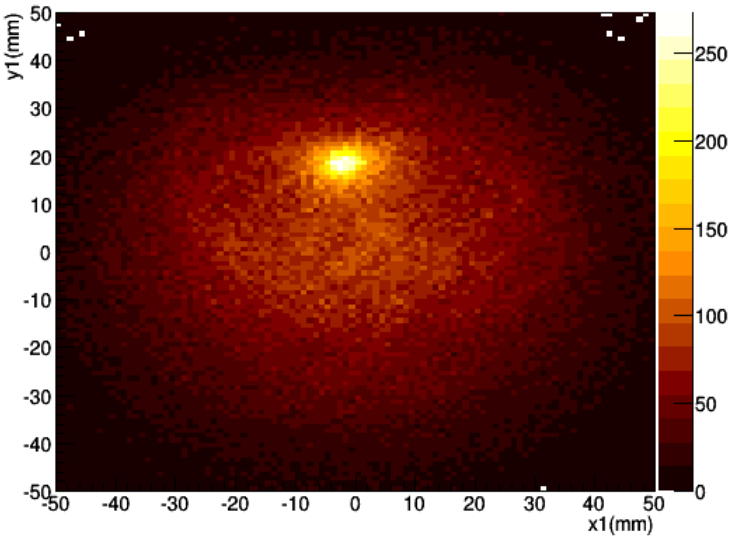
$$E_0 = E_1 + \frac{1}{2}\left(E_2 + \sqrt{E_2^2 + 4\frac{E_2 m_e c^2}{1 - \cos\theta_2}}\right)$$

Reconstrucción de la imagen

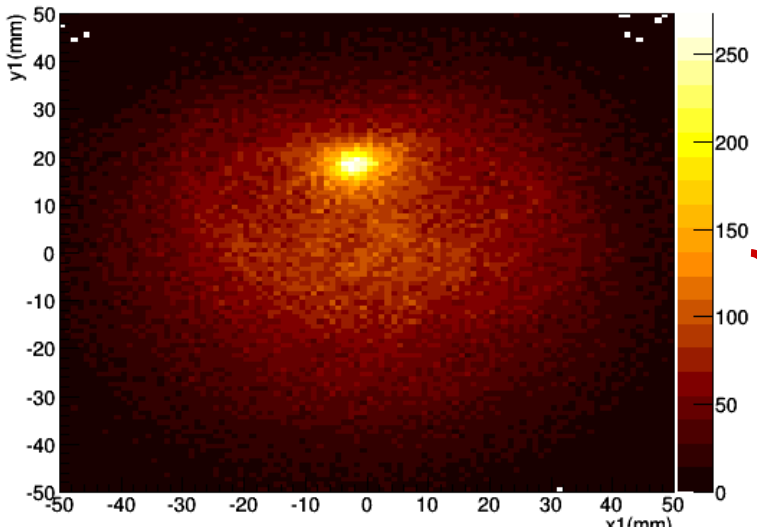


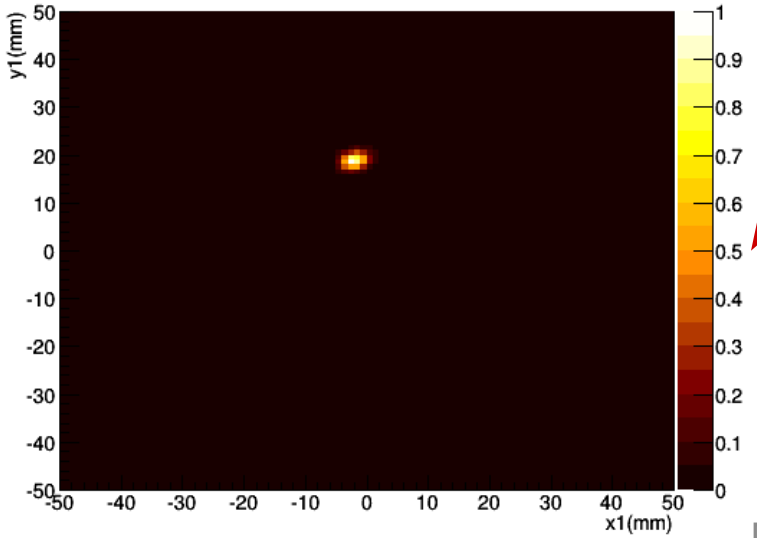






Reconstrucción de la imagen





Método iterativo para reconstrucción de la imagen. List Mode ML-EM

$$\lambda_j^{n+1} = \frac{\lambda_j^n}{s_j} \sum_{i=0}^{N} \frac{t_{ij}}{\sum_k t_{ik} \lambda_k^n}$$

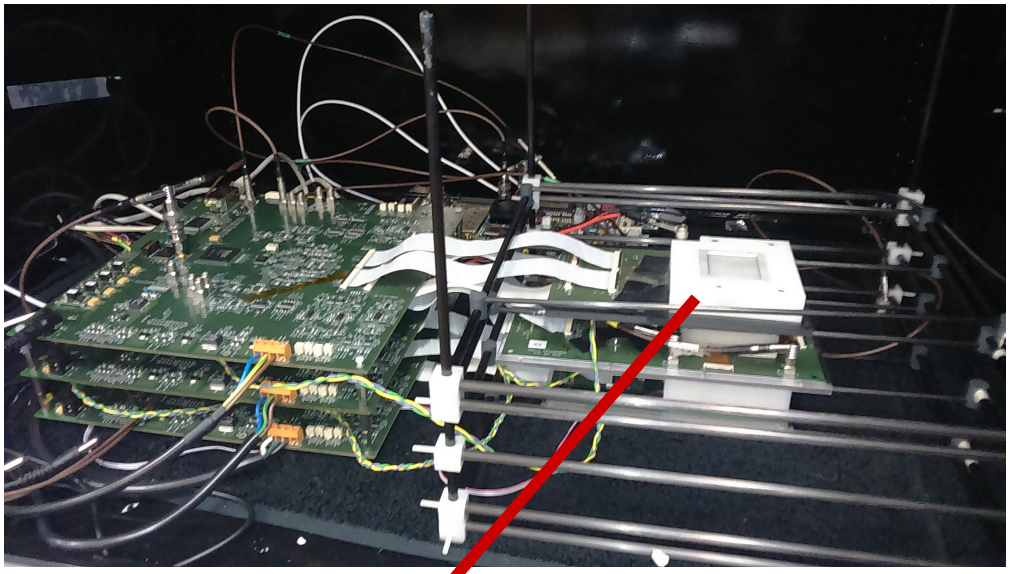
N eventos medidos

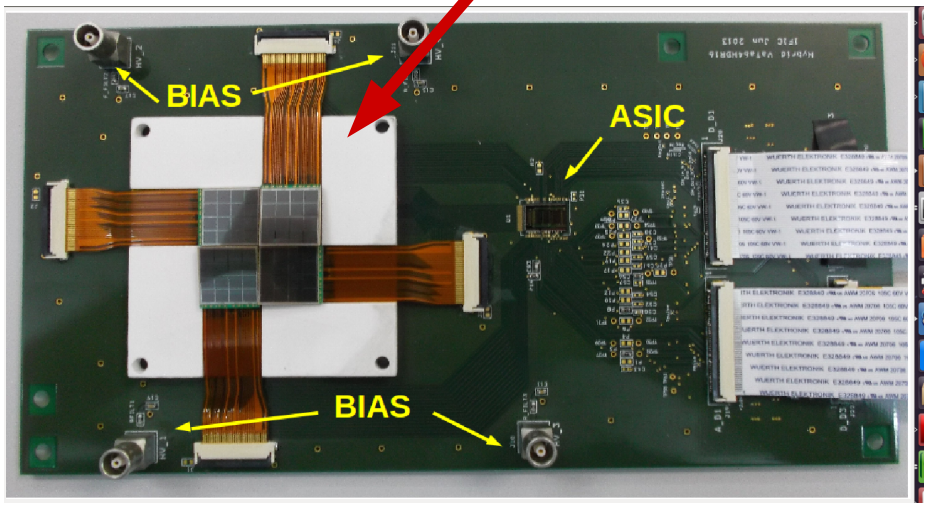
$\boldsymbol{\lambda}^n_j$ → valor del píxel j en la iteración n

$\mathbf{s}_j$ → sensibilidad del píxel j

$\mathbf{t}_{ij}$ → matriz del sistema

Nuestro Prototipo



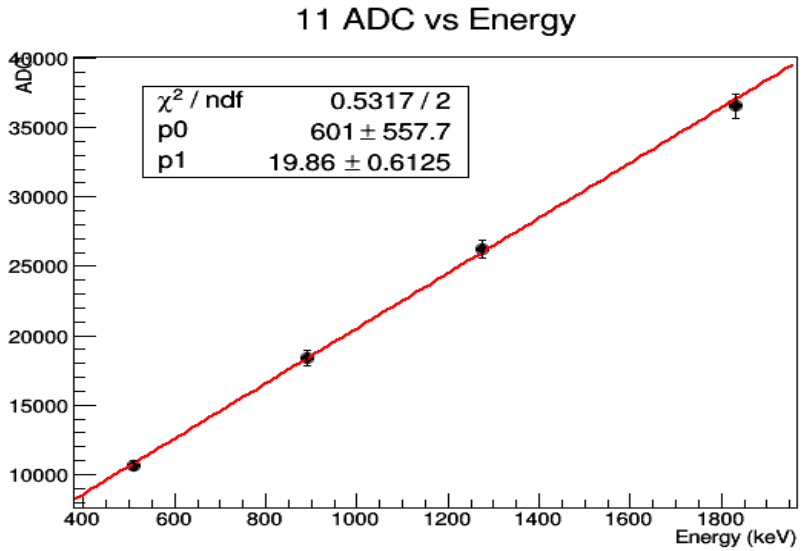


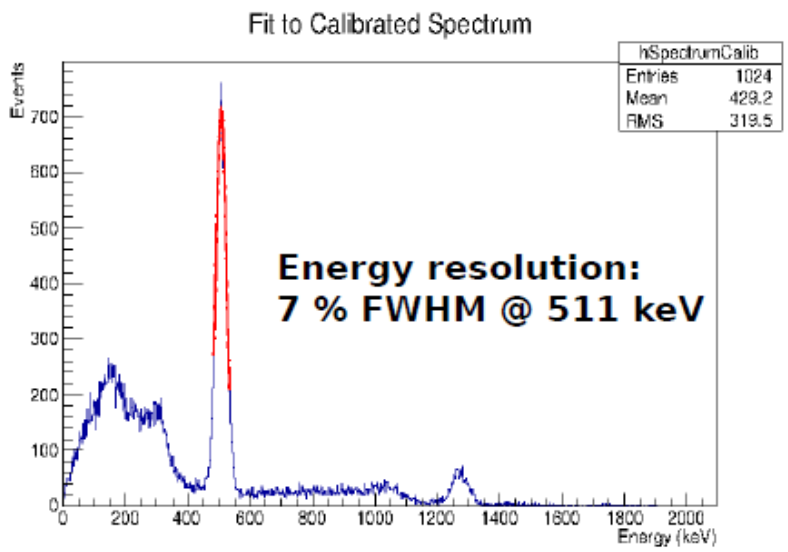
3 Planos funcionales basados en cristales continuos de $LaBr_3$ acoplados a SiPMs

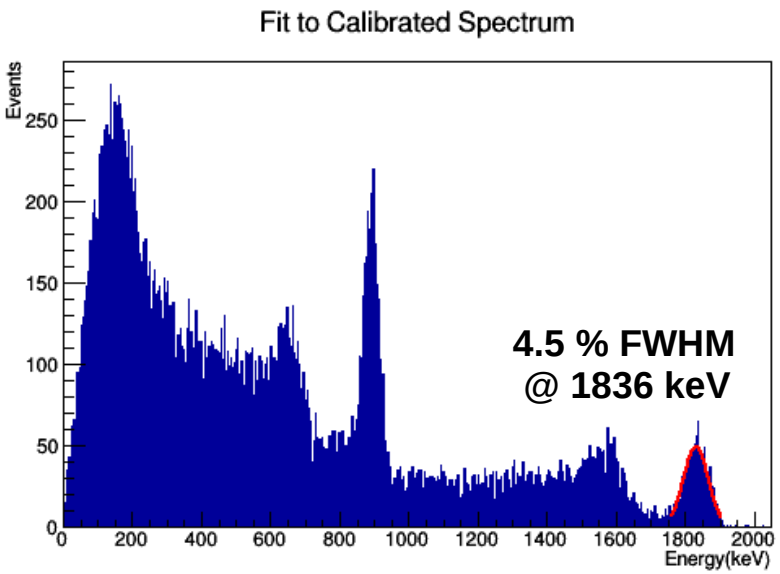
- 26.8 x 27.2 x 5 mm^3
- 32.4 x 36.0 x 5 mm^3
- 32.4 x 36.0 x 10 mm^3

El sistema de adquisición permite tomar datos de **coincidencias dobles y triples simultáneamente**.

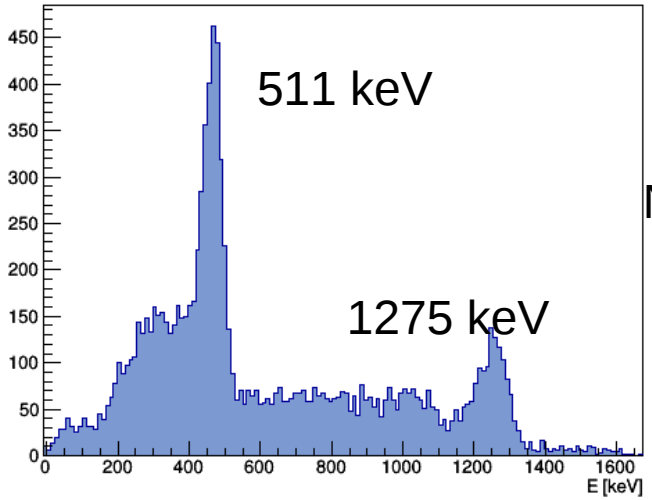
Caracterización



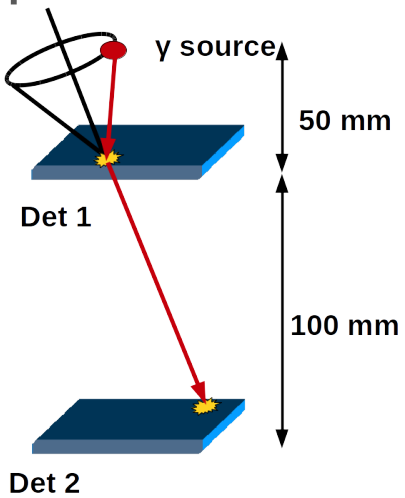


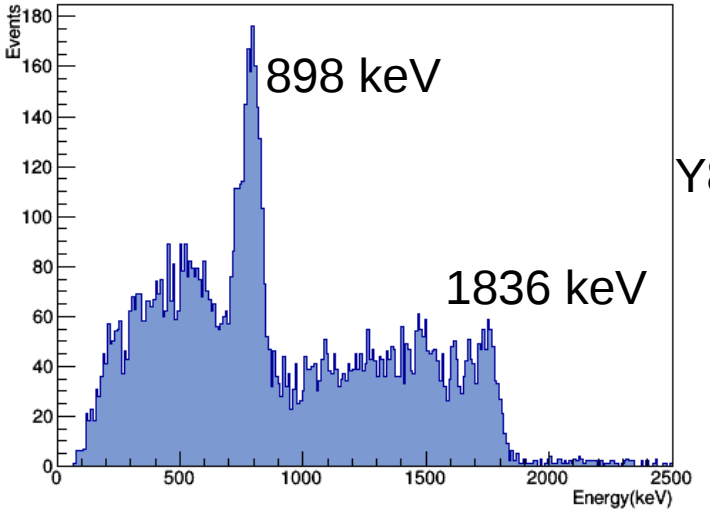


Medidas en Laboratorio: Fuentes radiactivas con dos planos



Na22





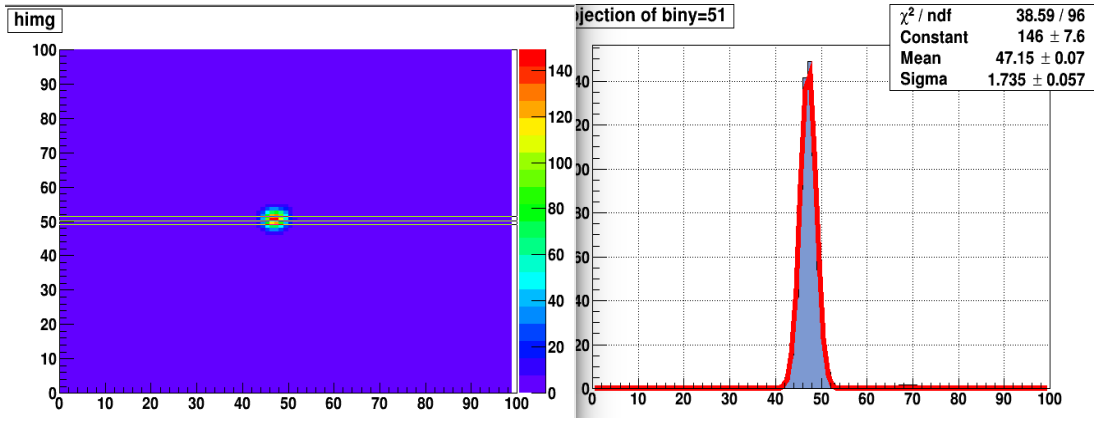
Y88

Espectro Suma en coincidencias:

- Se recuperan los fotopicos (Compton + Fotoeléctrico)
- Espectro continuo (Compton + Compton)
- Ruido debido a la ventana de coincidencias (~50 ns)

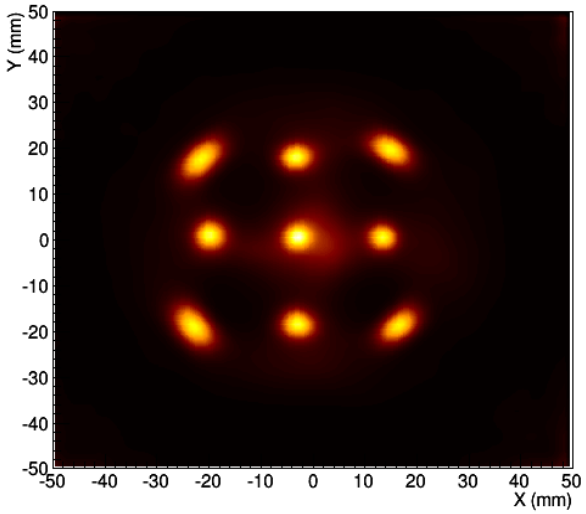
Medidas en Laboratorio: Fuente de Na-22 con dos planos

Reconstrucción seleccionando los eventos del pico de 1275 keV



Fit gaussiano en el perfil X a lo largo del máximo:

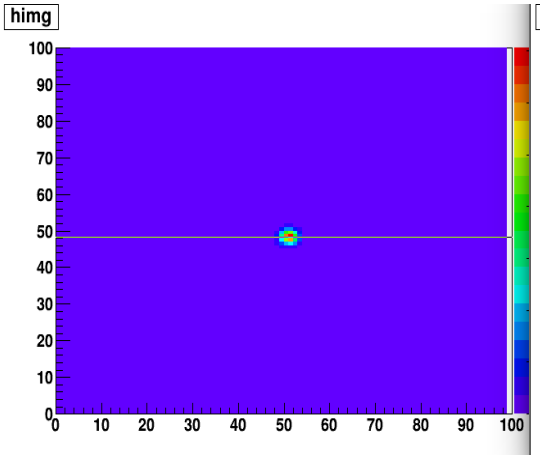
FWHM 4.0 mm

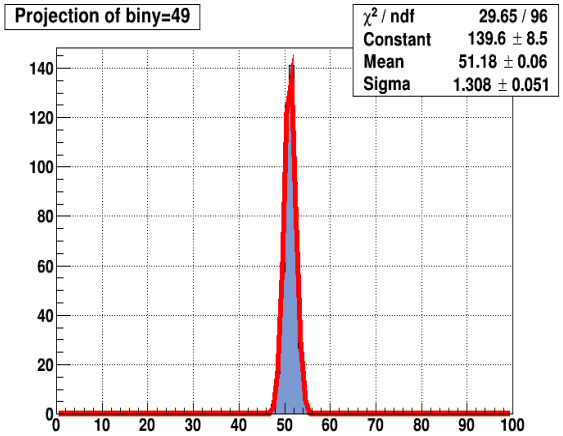


- Reconstrucción de imágenes de la fuente en distintas posiciones, separadas 20 mm
- Imágenes reconstruidas en la posición correcta
- Puntos reconstruidos por separado

Medidas en Laboratorio: Fuente de Y-88 con dos planos

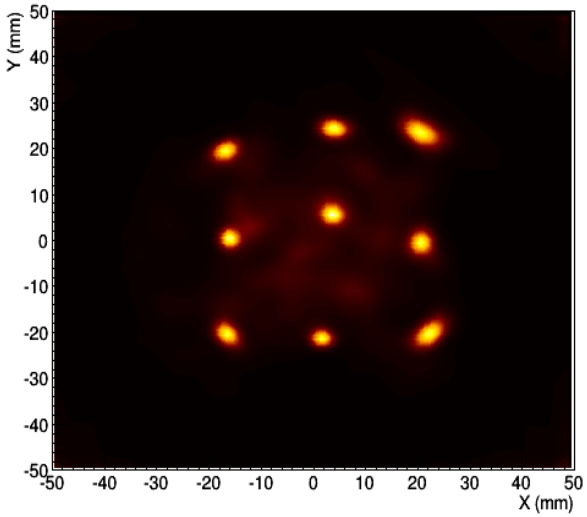
Reconstrucción seleccionando los eventos del pico de 1836 keV





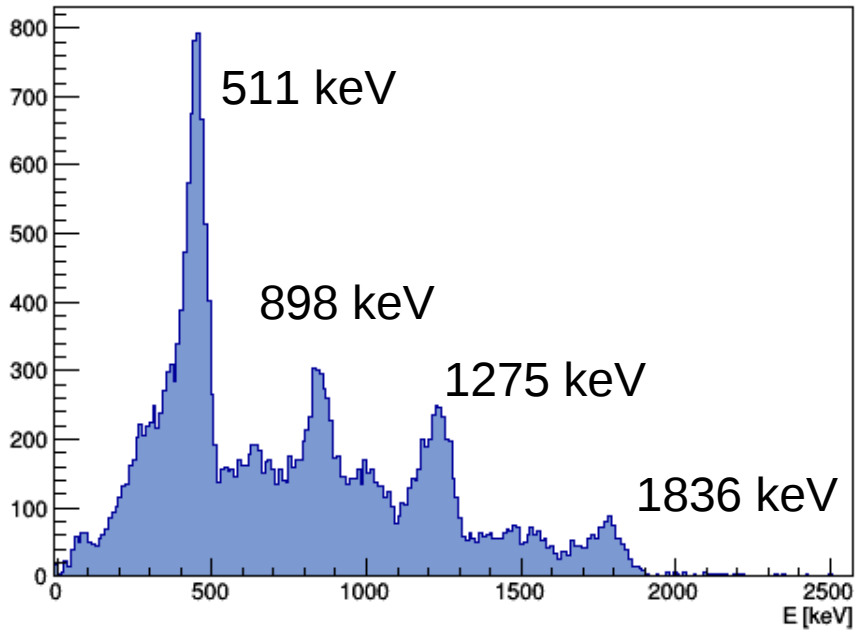
Fit gaussiano en el perfil X a lo largo del máximo:

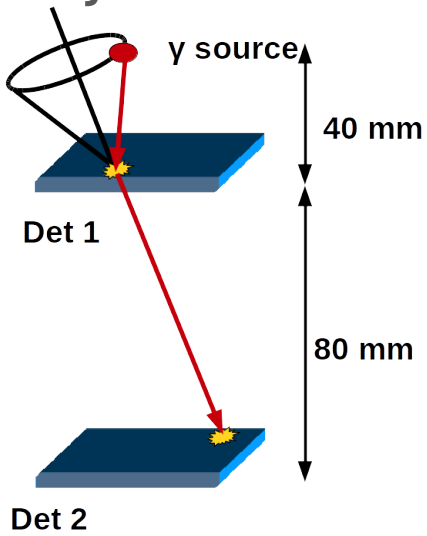
FWHM 3.1 mm



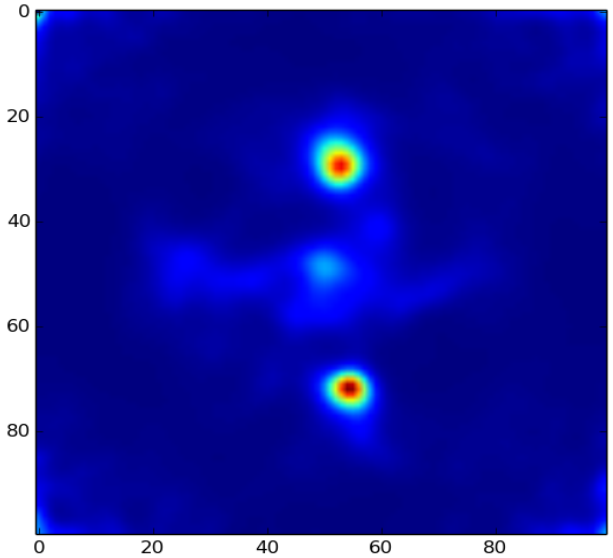
- Reconstrucción de imágenes de la fuente en distintas posiciones, separadas 20 mm
- Imágenes reconstruidas en la posición correcta
- Puntos reconstruidos por separado

Medidas en Laboratorio: Fuentes de Y-88 y Na-22 juntas

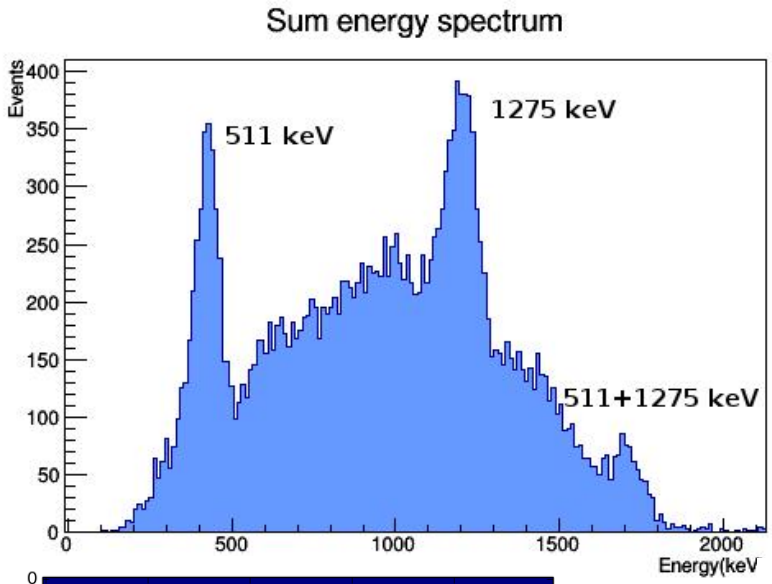


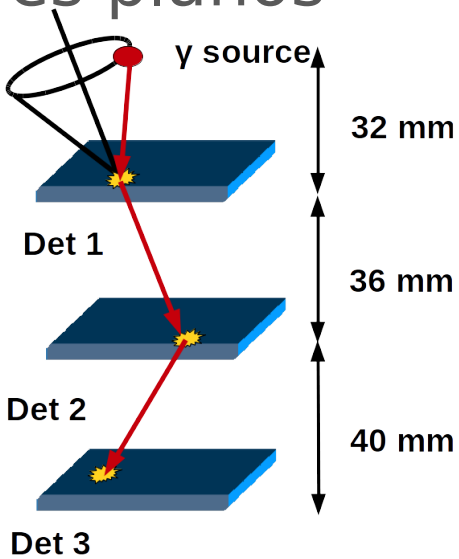


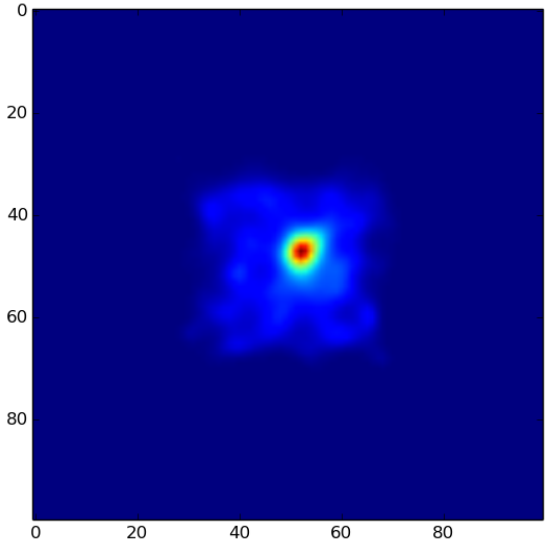
- Selección de eventos con 950kev < Esum < 1950keV
- Fuentes separadas 40 mm
- Puntos reconstruidos simultáneamente

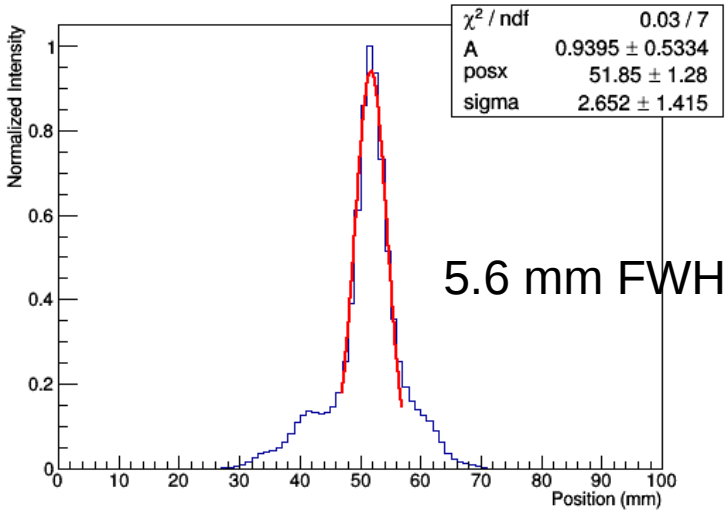


Medidas en Laboratorio: Fuente de Na-22 con tres planos



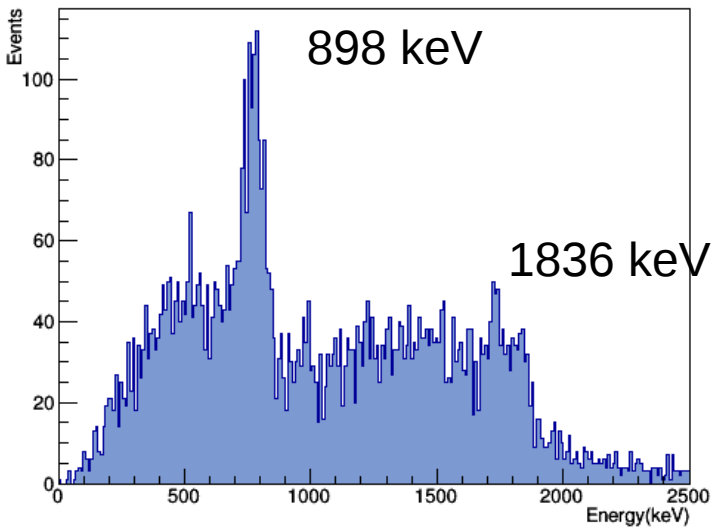


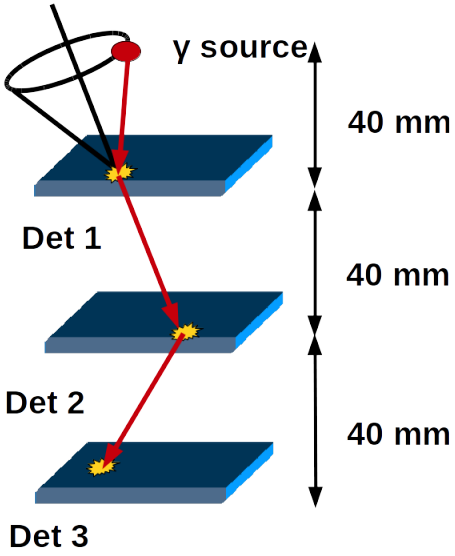


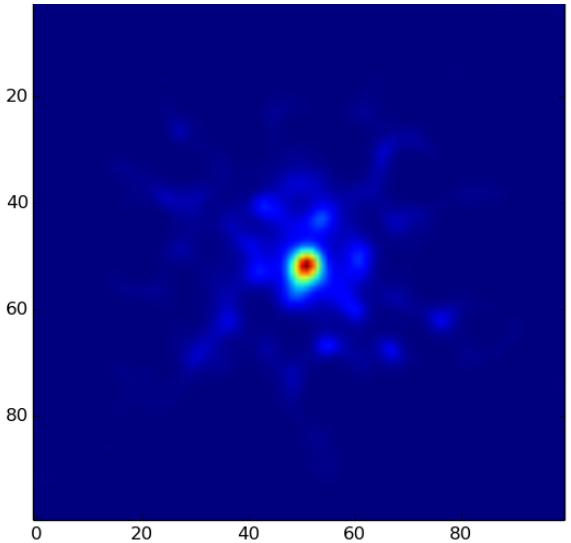


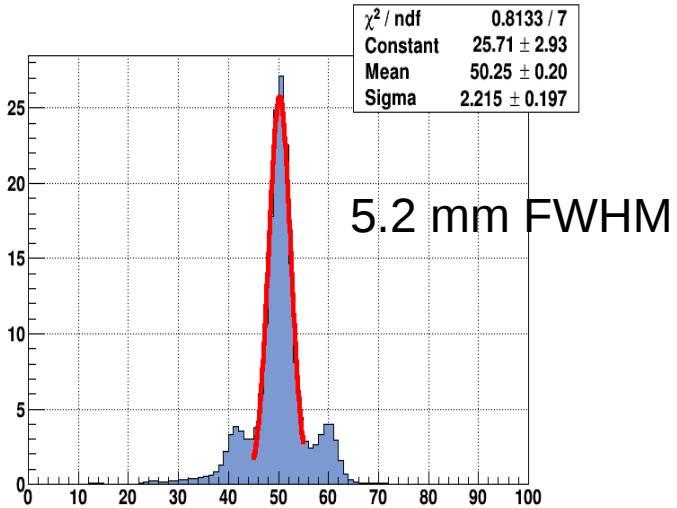
5.6 mm FWHM

Medidas en Laboratorio: Fuente de Y-88 con tres planos



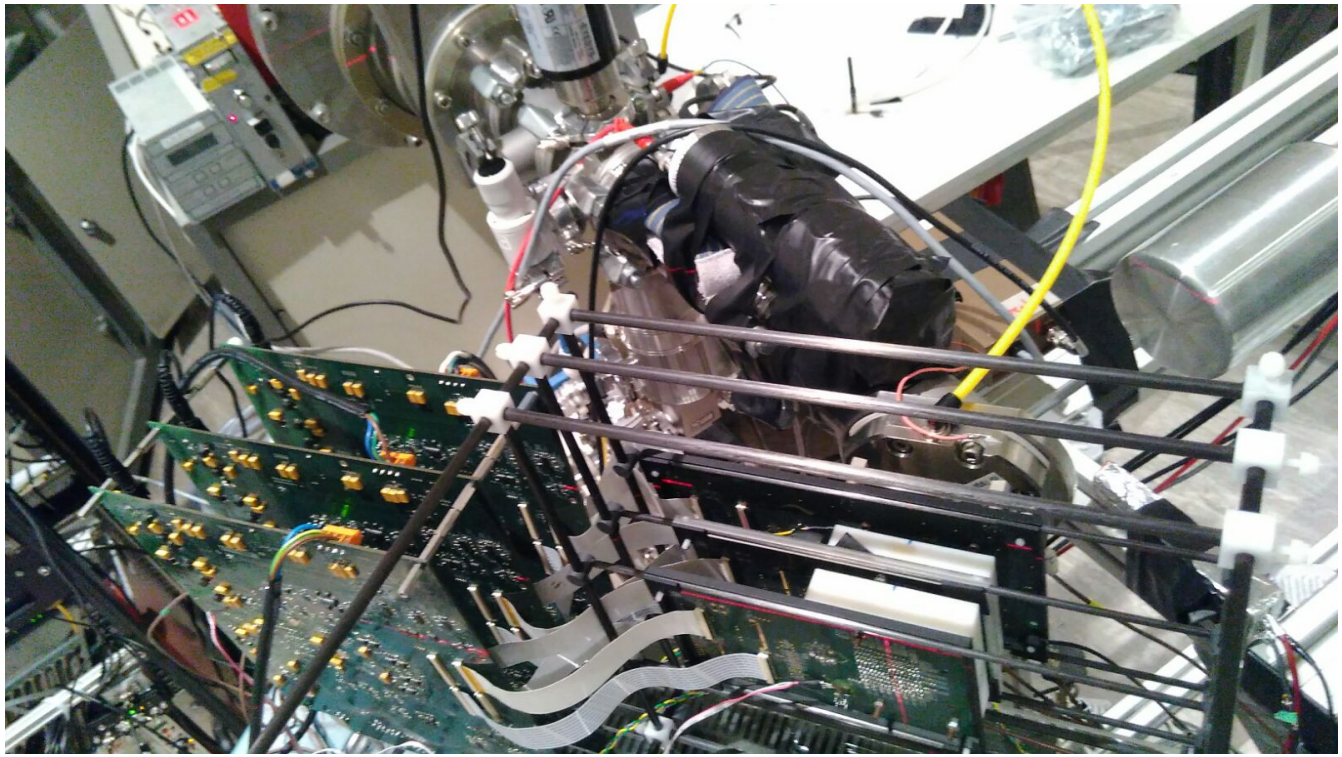






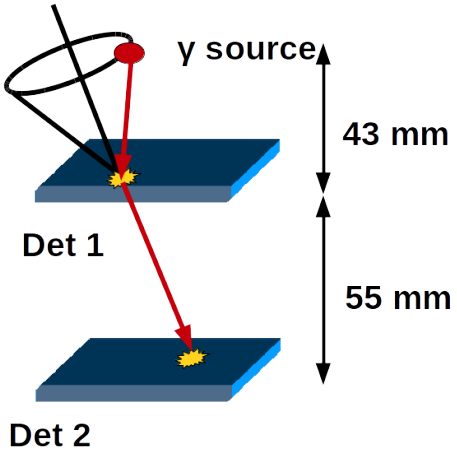
Medidas en Haz

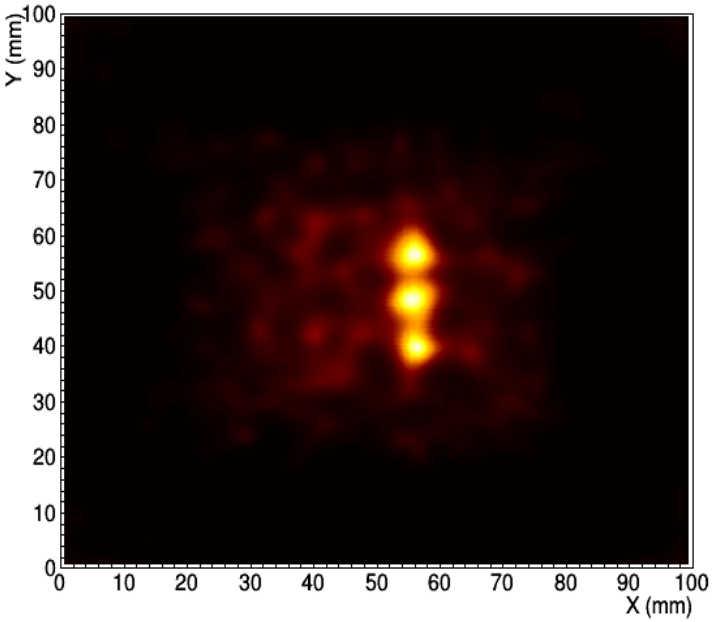
- Tests en HZDR 3MV Tandetron (Dresden)
- Gammas de 4.439 MeV. Reacción $^{15}N(p,\alpha\gamma)^{12}C$
- Rate de emisión de gammas muy bajo

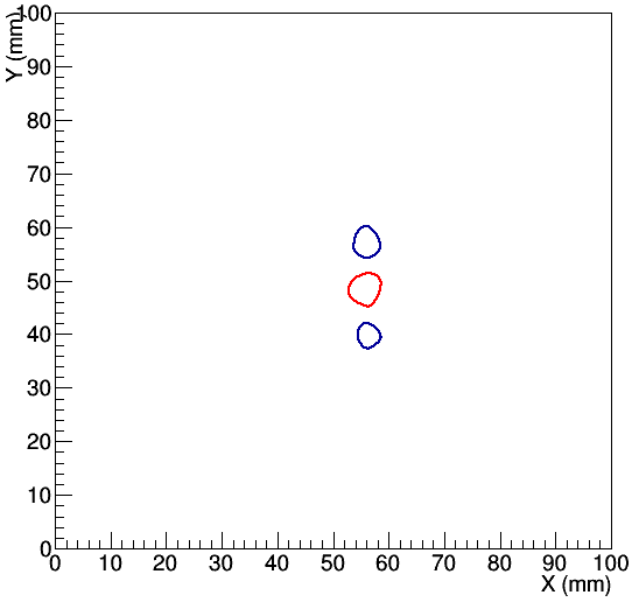


Medidas en Haz

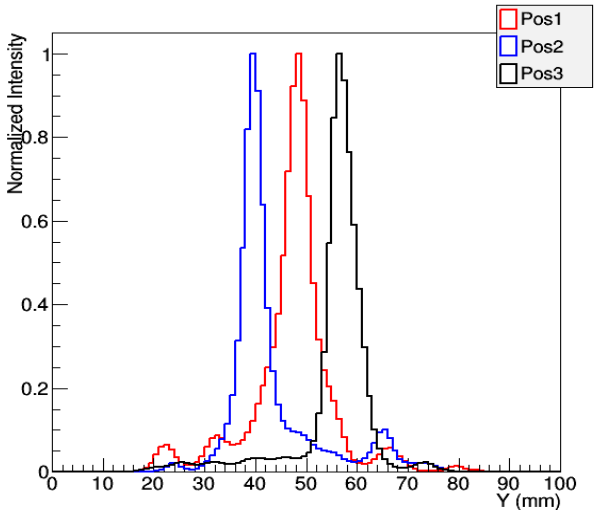
- Coincidencias con 2/3 layers. Rate muy bajo para coincidencias triples.
- Telescopio situado en 3 posiciones respecto al target (-10, 0,+10) mm
- Imágenes reconstruidas con los detectores 1-3







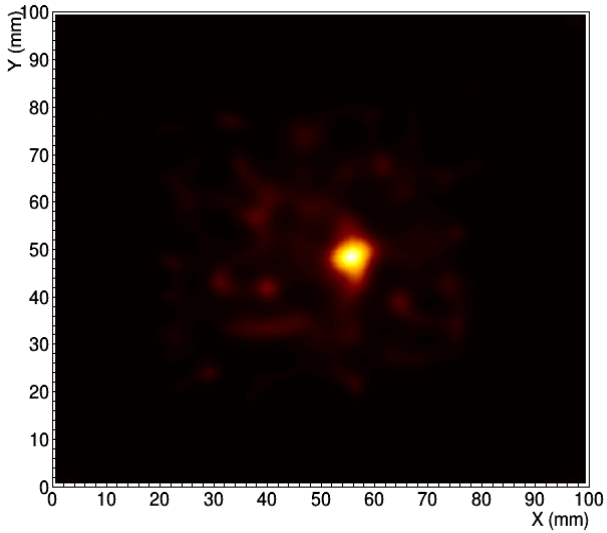
Medidas en Haz

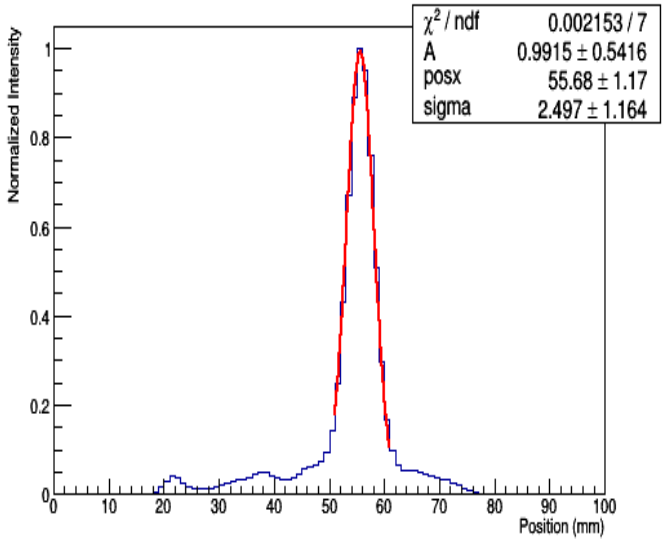


Posiciones de los puntos reconstruidos correctamente separados

Fit gaussiano en el perfil X a lo largo del máximo del punto central:

FWHM 5.9 mm





Resumen y conclusiones

- Prototipo funcional de Telescopio Compton con 3 planos basados en cristales continuos de $LaBr_3$ y SiPMs
- Fuentes puntuales de distintas energías han sido correctamente reconstruidas en distintas posiciones con dos y tres planos
- Tests con fotones de alta energía en facilidades con aceleradores llevados a cabo con resultado prometedor
- Ongoing work: optimización del detector y mejora de los algoritmos de reconstrucción con coincidencias simultáneas en 2 y 3 planos

Agradecimientos

Este trabajo está financiado en parte por el 7º Programa Marco de la Comisión Europea a través del proyecto ENVISION (G. A. num 241851), por el Ministerio de Economía y Competitividad (FPA2014-53599-R y Centro de Excelencia Severo Ochoa del IFIC SEV-2014-0398) y por la Generalitat Valenciana (GV/2013/133). Varios miembros del grupo están contratados a través de programas Ramón y Cajal y contratos predoctorales UVEG Atraccio de Talent y Generalitat Valenciana.

¡GRACIAS!