



Introducción a la detección gamma y a la dosimetría en tiempo real basada en imágenes en BNCT

Alejandro Valda
avalda@unsam.edu.ar



2018
JORNADAS
DEL CUIA
EN ARGENTINA

Buenos Aires, 3 al 5 de mayo de 2018

1

Plan

- ✧ Introducción: detección gamma y BNCT
- ✧ Principios de la detección gamma
- ✧ Dosimetría en tiempo real basada en imágenes
 - ✧ Planteo del problema
 - ✧ Tomografía por emisión de fotones
 - ✧ Experiencia en Argentina

2

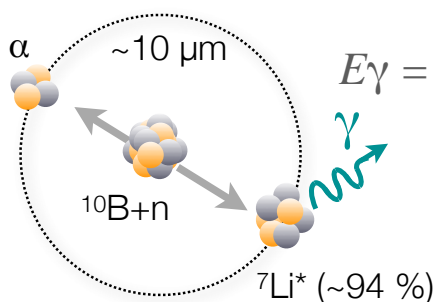
Fuentes de radiación gamma en BNCT

- Reacciones nucleares producidas en la fuente de neutrones (tema del siguiente bloque de charlas).
Ej.: fondo gamma generado en el núcleo de un reactor.
- Reacciones nucleares inducidas por neutrones en diversos nucleídos presentes en materiales del entorno.
Ej.: ¡reacción de captura en ^{10}B ! ($^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}^*$, $E_\gamma = 478$ keV); reacción de captura en ^1H ($E_\gamma = 2,2$ MeV).

Dependiendo del problema tratado, esta radiación puede ser indeseada.

3

Rayo gamma característico de la captura en ^{10}B

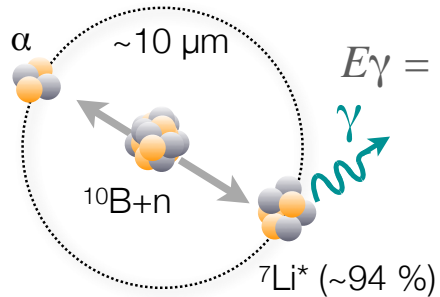


La tasa de producción depende del flujo neutrónico y del número de núcleos de ^{10}B .

La detección de este rayo gamma es la base de la técnica analítica PGNAA (*prompt gamma neutron activation analysis*) y del desarrollo de técnicas dosimétricas en tiempo real (*online*) en BNCT.

4

Rayo gamma característico de la captura en ^{10}B



La tasa de producción depende del flujo neutrónico y del número de núcleos de ^{10}B .

La detección de este rayo gamma es la base de la técnica analítica PGNAA (*prompt gamma neutron activation analysis*) y del desarrollo de técnicas dosimétricas en tiempo real (*online*) en BNCT.

Principios de detección gamma

Concepto clave

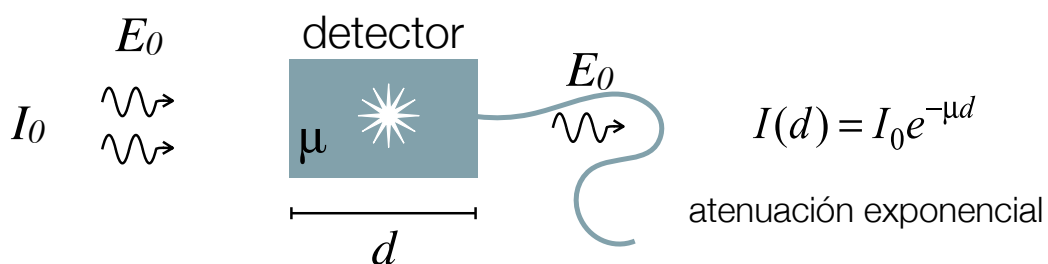
INTERACCIÓN

interacción → transferencia de energía → señal

A diferencia de las partículas cargadas, la radiación X, γ y los neutrones pueden atravesar distancias relativamente grandes sin interactuar

7

Interacción de fotones con la materia



$$\mu = f(\rho, Z, E_0)$$

μ : coeficiente de atenuación lineal

ρ : densidad del medio

Z : número atómico del material del medio

E_0 : energía de los fotones incidentes

RESULTADO: GENERACIÓN DE ELECTRONES RÁPIDOS

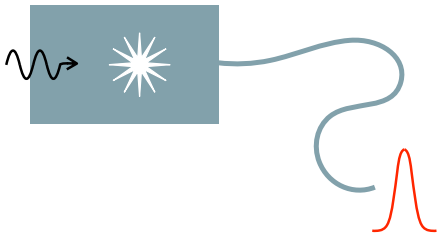
8

Señal

interacción de
electrones rápidos



- excitación
- ionización



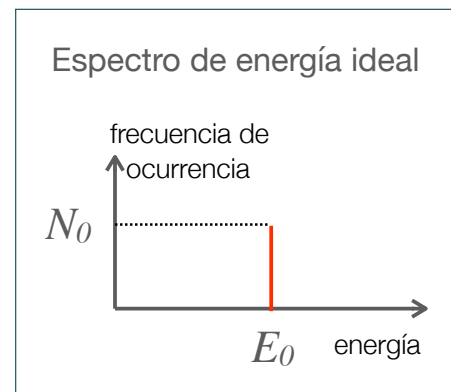
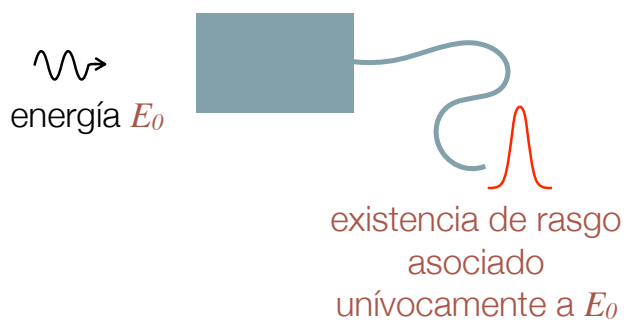
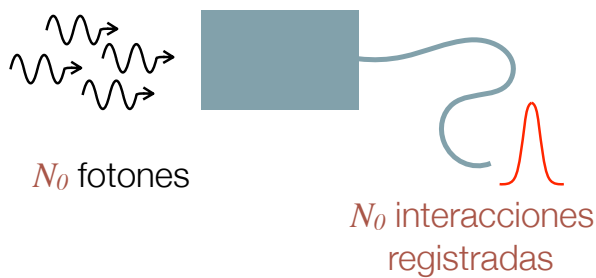
- eléctrica (ej. pulsos de corriente, corriente continua)
- química (ej. emulsión fotográfica)

Ventajas de la señal eléctrica:

transmisión, tratamiento, almacenamiento,
reprocesamiento, etc.

9

¿Qué esperamos de un detector?



10

¿Qué esperamos de un detector?

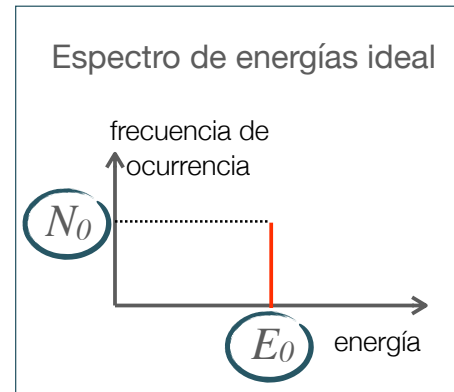


N_0 interacciones registradas



existencia de rasgo asociado

unívocamente a E_0 (por ej. amplitud del pulso)



11

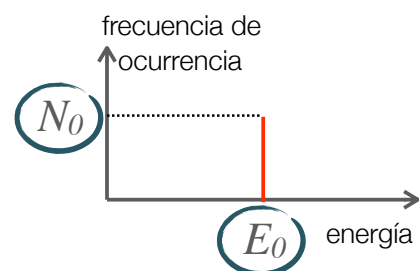
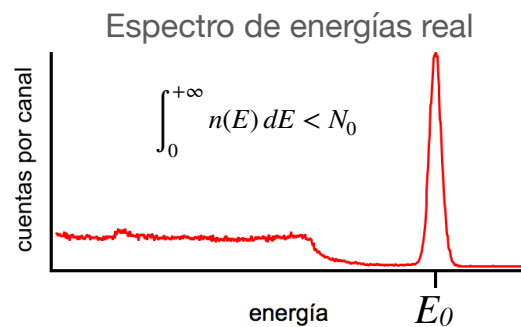
¿Qué esperamos de un detector?



N_0 interacciones registradas



existencia de rasgo asociado unívocamente a E_0



12

Eficiencia de detección



La eficiencia depende del:

- Material con el que está construido el detector
- Tipo y energía de la radiación
- Tamaño del detector

13

Familias de detectores

Los detectores de **radiación ionizante** suelen categorizarse según tres grandes grupos, dependiendo del resultado de la interacción de la radiación:

- Detectores gaseosos: generación de cargas eléctricas (ej. pares electrón-ion) en un medio gaseoso.
- Detectores de centelleo: generación de luz causada por la interacción de la radiación en determinados materiales.
- Detectores semiconductores: generación de pares electrón-hueco en la estructura electrónica del medio.

Esta clasificación no es exhaustiva, no incluye a las emulsiones fotográficas, detectores autoenergizados, detectores de trazas, ...

14

Familias de detectores

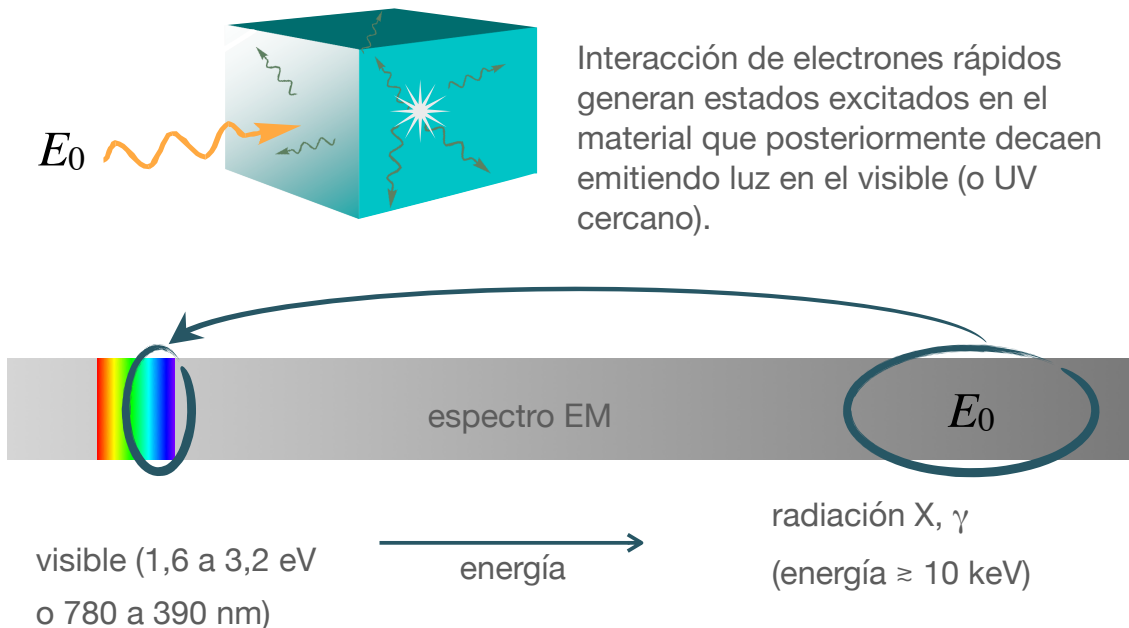
Los detectores de **radiación ionizante** suelen categorizarse según tres grandes grupos, dependiendo del resultado de la interacción de la radiación:

- Detectores gaseosos: generación de cargas eléctricas (ej. pares electrón-ion) en un medio gaseoso.
- Detectores de centelleo: generación de luz causada por la interacción de la radiación en determinados materiales.
- Detectores semiconductores: generación de pares electrón-hueco en la estructura electrónica del medio.

Esta clasificación no es exhaustiva, no incluye a las emulsiones fotográficas, detectores autoenergizados, detectores de trazas, ...

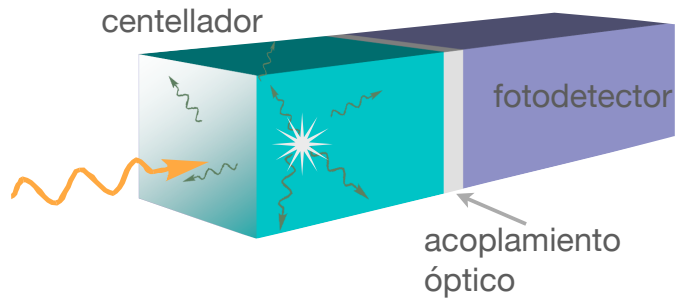
15

Material centellador



16

Detector de centelleo: fotodetector



Fotodetector:

- ojo humano (ej. experimento de Rutherford)
- emulsión fotográfica
- tubo fotomultiplicador
- fotodiodo

energía depositada



carga eléctrica

17

Detector pixelado para PET

PET: positron emission tomography

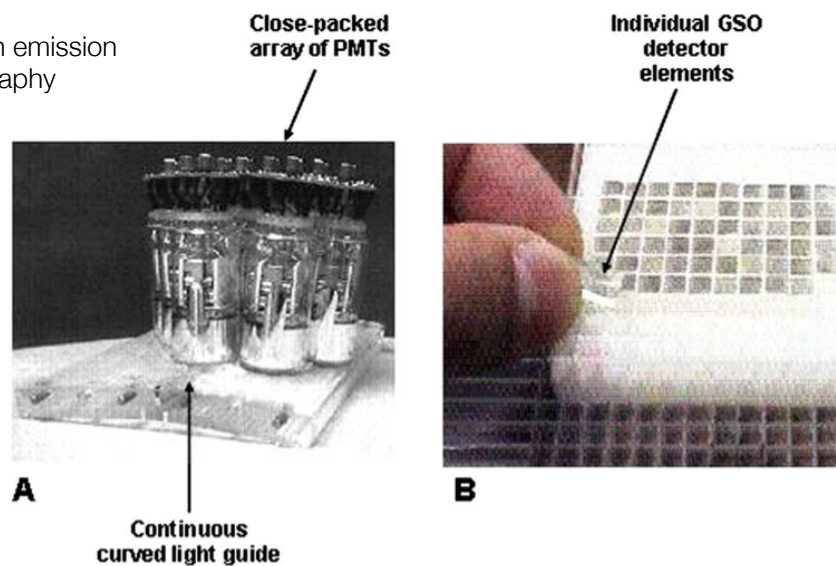


Fig 6. The Pixelar™ (Philips-ADAC) pixelated GSO detector, comprised of individual small-area detectors elements (A) fixed onto a continuous light guide backed by a close-packed array of PMTs (B). (Color version of figure is available online.)

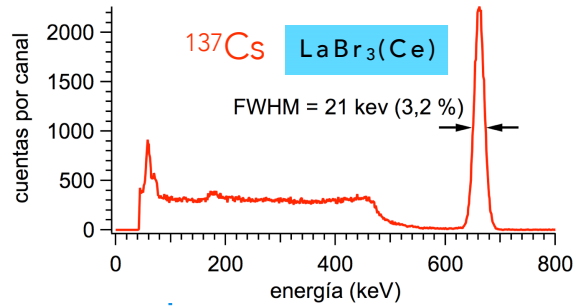
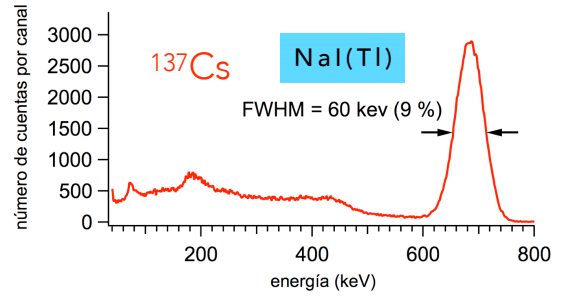
P Zanzonico, Positron "Emission Tomography: A Review of Basic Principles, Scanner Design and Performance, and Current Systems", *Seminars in Nuclear Medicine*, XXXIV, No 2, 87-111; 2004

18

Espectros gamma

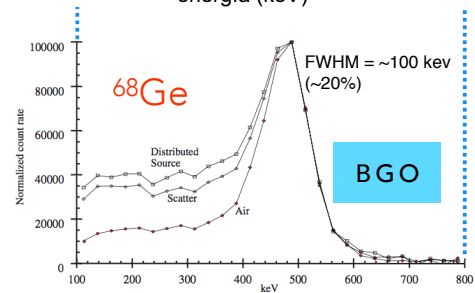
^{137}Cs : $E_0 = 662,6 \text{ keV}$

^{68}Ge : $E_0 = 511 \text{ keV}$



BGO: $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$

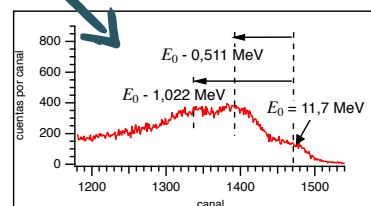
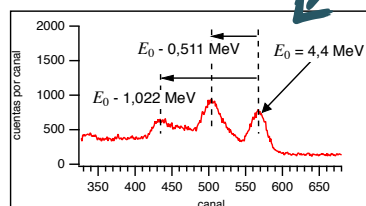
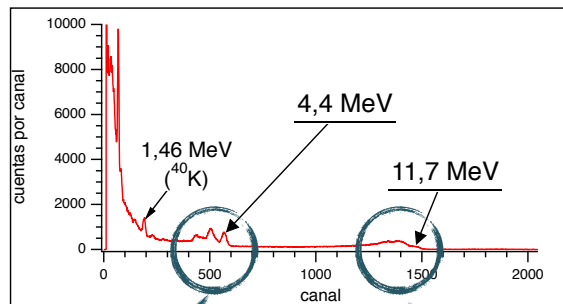
Espectros de BGO: fuente lineal en aire, fuente lineal en interior de cilindro con agua de 20 cm de diámetro y solución radiactiva acuosa en el mismo cilindro (extraído de *Positron Emission Tomography: Basic Sciences*; editores: D L Bailey, D W Townsend, P E Valk, M N Maisey; Springer, 2005).



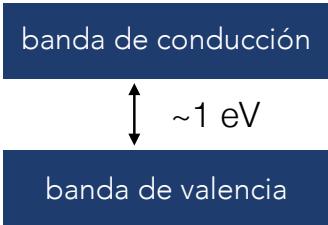
Espectro gamma de "alta" energía

Detector: NaI(Tl)

Medición de la composición del haz de un acelerador de protones mediante la reacción $^{11}\text{B}(p,\gamma)^{12}\text{C}$ (tesis de Licenciatura en Física, UBA, de J Melillo, 2017)



Detector semiconductor



Principio de detección

El frenado de los electrones rápidos producidos por las partículas ionizantes genera pares electrón-hueco. Éstos se hacen migrar mediante la acción de un campo eléctrico aplicado.

Análogo a lo que ocurre en detectores gaseosos pero con densidad varios miles de veces superior.

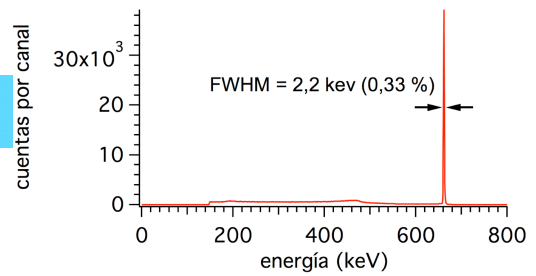
$$N_{\text{pares electrón-hueco}} \propto \text{energía depositada}$$

Existen detectores basados en semiconductores intrínsecos (ej. Ge, Si) y dopados con donores (tipo n) o aceptores (tipo p) de electrones .

Espectroscopía de fotones y de partículas cargadas. Dosimetría.

Espectros gamma

HPGe

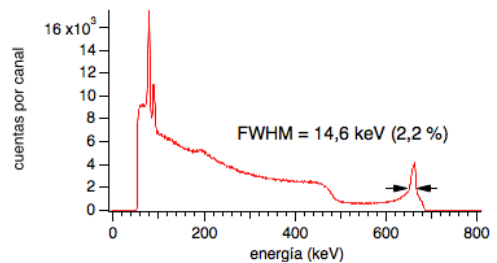


Fuente en todos los casos:

¹³⁷Cs ($E_0 = 662,6$ keV)

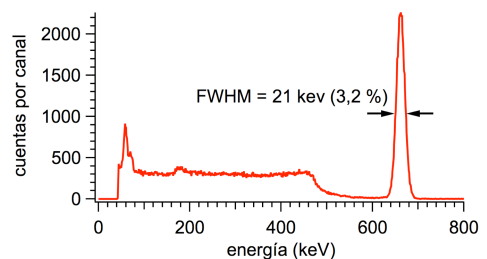
HPGe: *high purity germanium*

CdZnTe



LaBr₃(Ce)

(centellador incluido sólo a título comparativo)



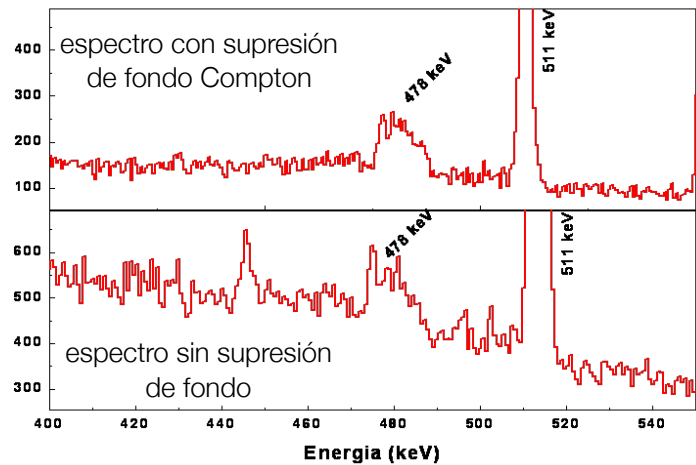
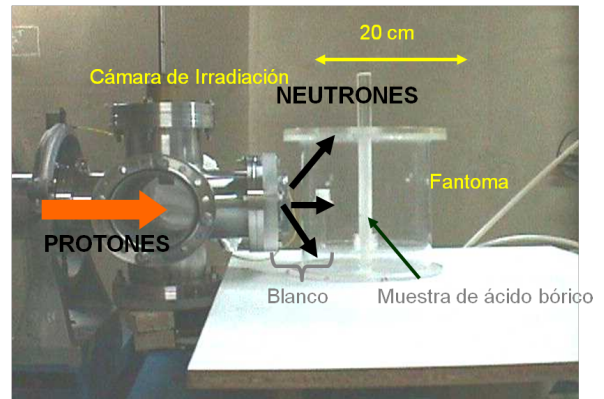
Detección del rayo gamma de 478 keV

Reacción de captura en ^{10}B :



Detector: HPGe

“Optimization of a neutron production target and a beam shaping assembly based on the $^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$ reaction for BNCT”, AA Burlon, AJ Kreiner, AA Valda et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 229 (2005) 144–156



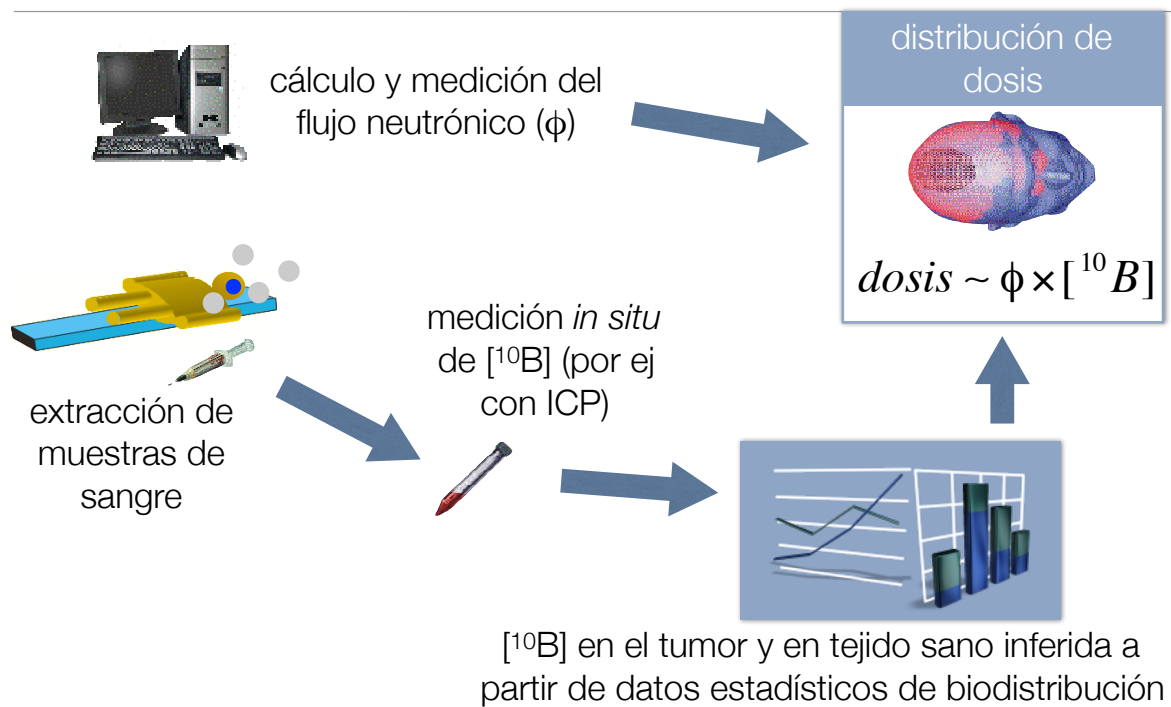
23

Dosimetría en tiempo real basada en imágenes:

Planteo del problema

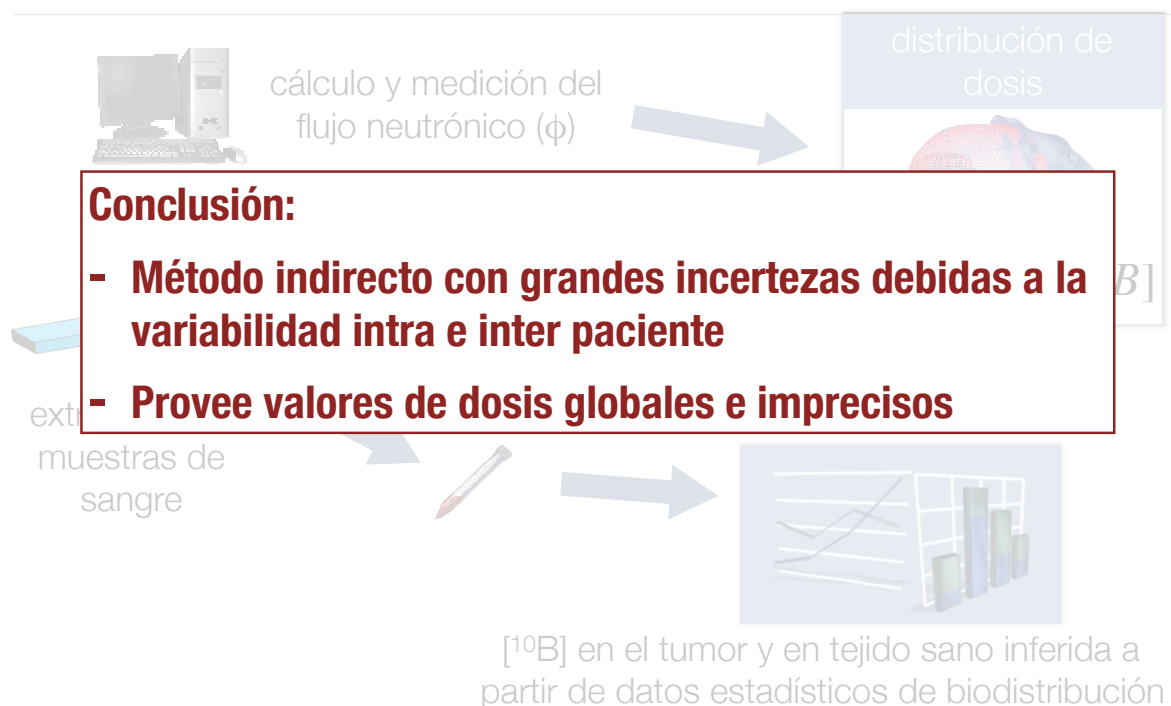
24

Dosimetría actual



25

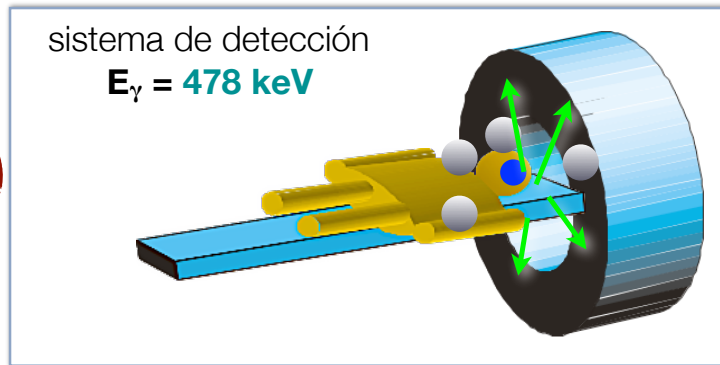
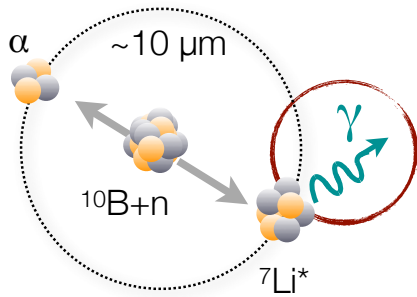
Dosimetría actual



26

Dosimetría basada en SPECT

SPECT: Single Photon Emission Tomography



Reconstrucción tomográfica:
dosimetría 3D



- en tiempo real
- específica del paciente
- no invasiva
- con información espacial

27

Sin embargo...

presencia de fondo neutrónico y de radiación gamma



desarrollo específico del sistema de detección

28

Primeros trabajos

- WFAR Verbakel et al., *Int. J Radiation Oncology Biol Phys*, 55, 743 (2003)
- T Kobayashi, T., Y Sakurai, M Ishikawa, *Med Phys*, 27, 2124 (2000)

Trabajos sobre el tema presentados al
17th International Congress on Neutron Capture Therapy
2 al 7 de octubre de 2016, Missouri, USA

- *Characterization of a CdZnTe detector prototype for Boron imaging by SPECT: simulations and measurements in a neutron field*; S Fatemi, L Bianchini, S Bortolussi, I Postuma, N Protti, A De Bari, G Benassi, N Zambelli, M Bettelli, A Zappettini, S Altieri; Italia
- *Towards ^{10}B neutron capture reaction mapping in a patient with photon-counting SPECT systems*; A Winkler, H Koivunoro, I Auterinen, S Savolainen; Finlandia
- *Development of a real-time prompt gamma-ray imaging system using GAGG:Ce or SrI₂:Eu scintillator array for BNCT*; H Tanaka, Y Sakurai, T Takata, T Watanabe, M Suzuki, K Akabori, S Kawabata, S Masunaga, N Kondo, K Ono, A Maruhashi, Japón
- *Design and Feasibility of a Gamma-Ray Detection System for Three Dimensional Patient Dose Imaging*; K Akabori, K Taki, Y Aoki, T Mitsumoto, S Yajima, H Tanaka; Japón
- *3D SPECT reconstructed image from prompt gamma ray in BNCT for a heterogeneous human phantom: A Monte Carlo simulation study*; C Gong, X Tang, C Geng, H Yu, W Shao, D Shu, D Chen; China
- *Gadolinium effect estimation of GAGG for BNCT-SPECT*; N Saraue, M Manabe, R Ohya, F Sato, I Murata; Japón

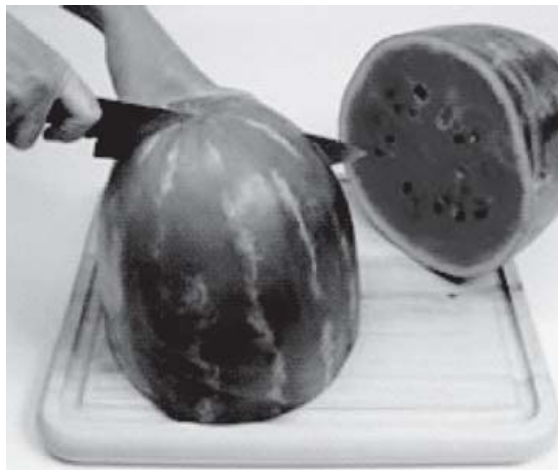
Dosimetría en tiempo real basada en imágenes:

Tomografía por emisión de fotones

31

Tomografía

Tomografía: del griego **tomos** (τόμος), que significa **corte o sección**



32

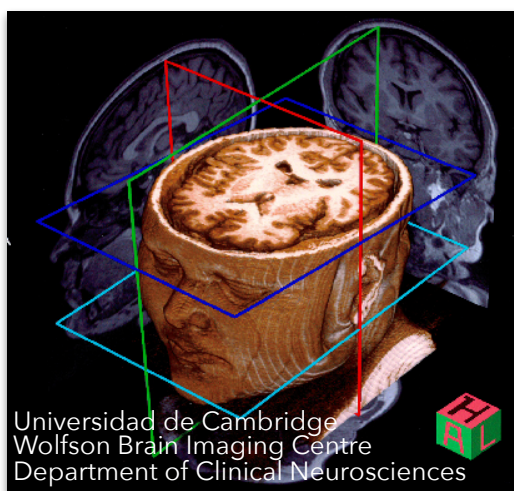
Tomografía

Tomografía: del griego **tomos** (τόμος), que significa **corte o sección**

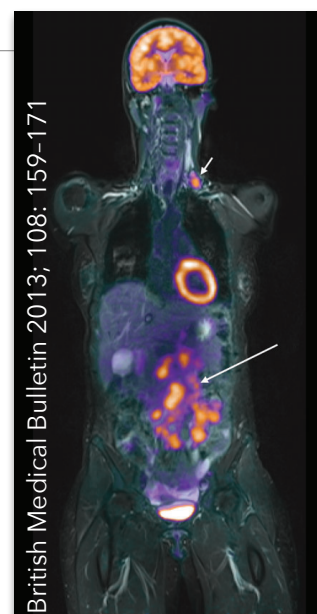


33

Algunos ejemplos en medicina



Técnica de visualización 3D de una imagen de resonancia magnética



Corte tomográfico en una imagen dual: resonancia magnética y medicina nuclear

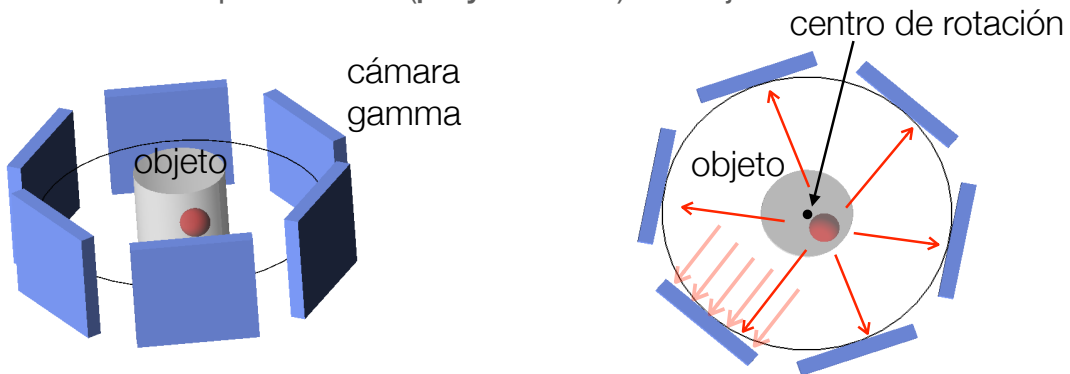
34

SPECT

SPECT (*single-photon emission computed tomography*)

Detector: cámara gamma

Adquisición de múltiples “vistas” (proyecciones) del objeto



Cada proyección contiene **información integrada** del objeto a lo largo de “caminos”, sin información de la distancia al detector (profundidad) a la que se encuentra cada fuente elemental.

35

Reconstrucción tomográfica

La adquisición de un número apropiado de:

- caminos de integración y
- ángulos de proyección

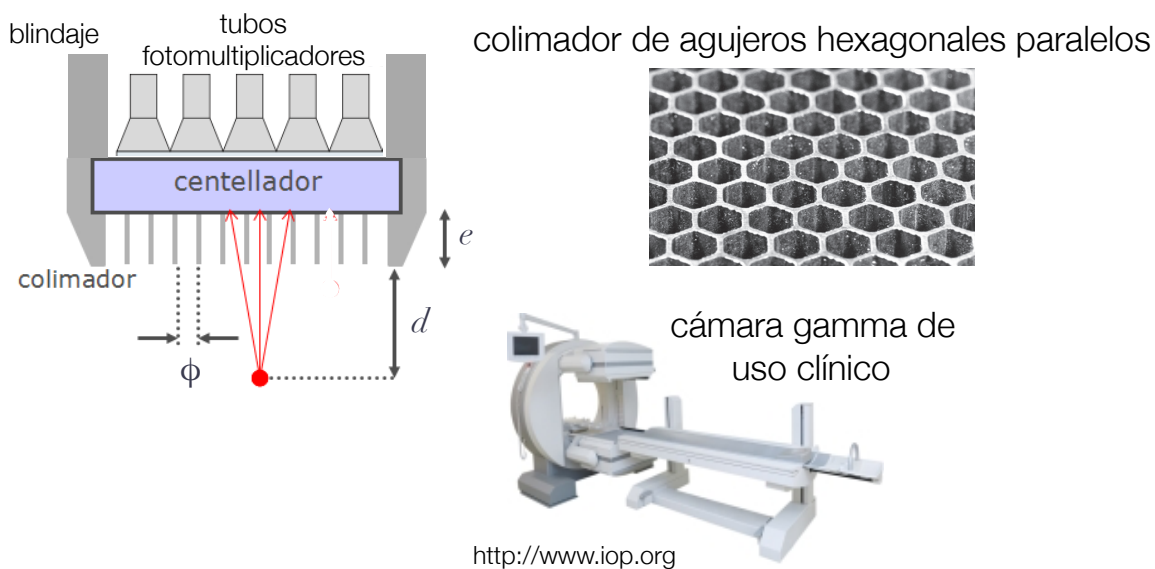
permite, mediante la aplicación de algoritmos matemáticos*, encontrar la distribución espacial de las fuentes de señal. En nuestro caso esto corresponde a la **distribución de fuentes emisoras de radiación gamma**. Este proceso se conoce como **reconstrucción tomográfica**.

* Por ejemplo, retroproyección filtrada o algoritmos iterativos.

36

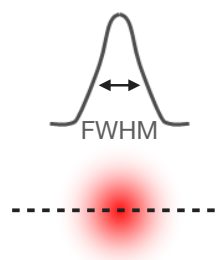
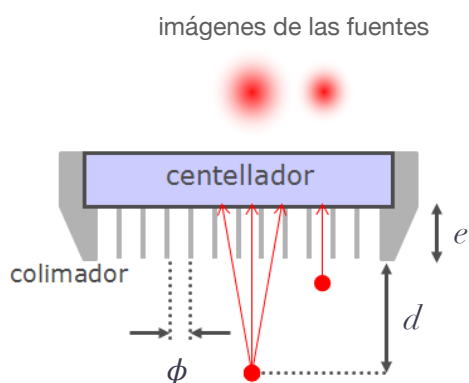
Cabezal de cámara gamma

Cámara "clásica" basada en un detector centellador de gran superficie.



37

Cámara gamma: resolución espacial



- Factores que afectan a la resolución:
- interacción en el centellador (conduce a la llamada *resolución intrínseca*)
 - colimador (entre los dos factores, éste es el dominante)

$$R \equiv FWHM \approx \frac{\phi(e+d)}{e}$$

38

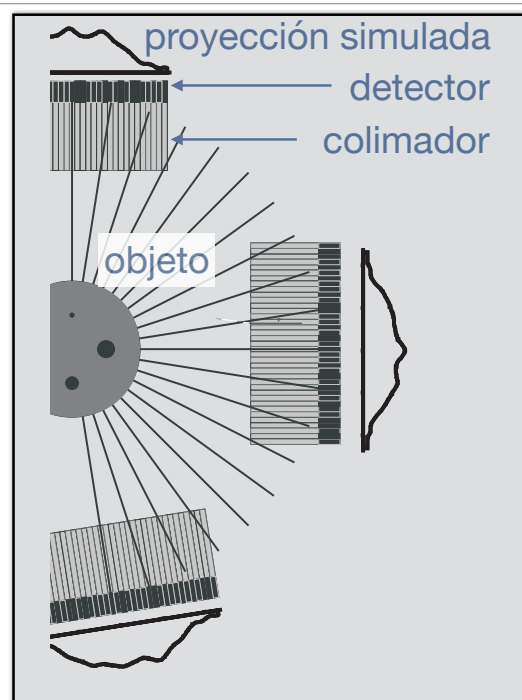
Dosimetría en tiempo real basada en imágenes:

Experiencia en Argentina

39

Diseño del sistema: características generales

- Resolución espacial del colimador: 1 cm
- Adquisición:
 - muestreo angular: 9° (20 posiciones entre 0° y 180°)
 - muestreo lineal: 37
- Imagen:
 - tamaño de la imagen: 21×21 píxeles
 - tamaño del píxel: $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$
- Cálculo: simulaciones numéricas Monte Carlo (código MCNP)



40

Trabajos experimentales

Año 2007

Prototipo ensayado en el reactor RA6 (Argentina)

Prototipo construido con detectores semiconductores discretos de CdZnTe.

Año 2008

Prototipo ensayado en el acelerador para estudios de BNCT de la Universidad de Birmingham (Reino Unido).

Colaboración CNEA - UNSAM - Univ. de Birmingham

Prototipo construido con detectores de centelleo discretos de LaBr₃(Ce).

41

Prototipo ensayado en la Univ. de Birmingham

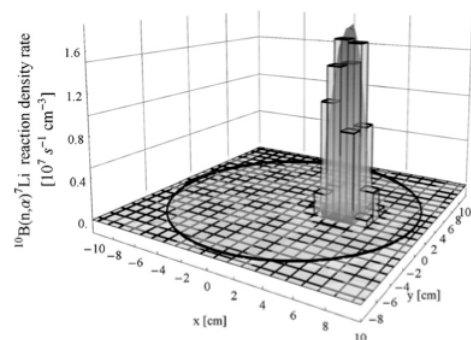


“fantom”

frente del
colimador (Pb)

4 detectores + blindaje
(⁶Li₂CO₃, Pb, parafina)

sistema de
desplazamiento lineal



Reconstrucción tomográfica de la
emisión gamma de 478 keV
representando la distribución de
capturas neutrónicas en ¹⁰B

DM Minsky et al., First tomographic image of neutron capture rate in a BNCT facility; Applied Radiation and Isotopes, 69, 1858–1861 (2011)

42

Resultados experimentales: proyección típica

