

**Avances en las técnicas de rechazo de
sucesos por la forma de los pulsos (PSD)
para la búsqueda de la desintegración
doble-beta sin neutrinos.
El experimento IGEX en Canfranc.**

D. González, S. Cebrián, E. García, I.G. Irastorza, A. Morales, J. Morales,
A. Ortiz, A. Peruzzi, J. Puimedón, M.L. Sarsa, S. Scopel, J.A. Villar

Laboratorio de Física Nuclear y Altas Energías
Universidad de Zaragoza

V Jornadas de Física de Altas Energías

**XXVII Reunión Bienal de la RSEF
Valencia, 20-24 septiembre 1999**

Desintegración doble beta del ^{76}Ge

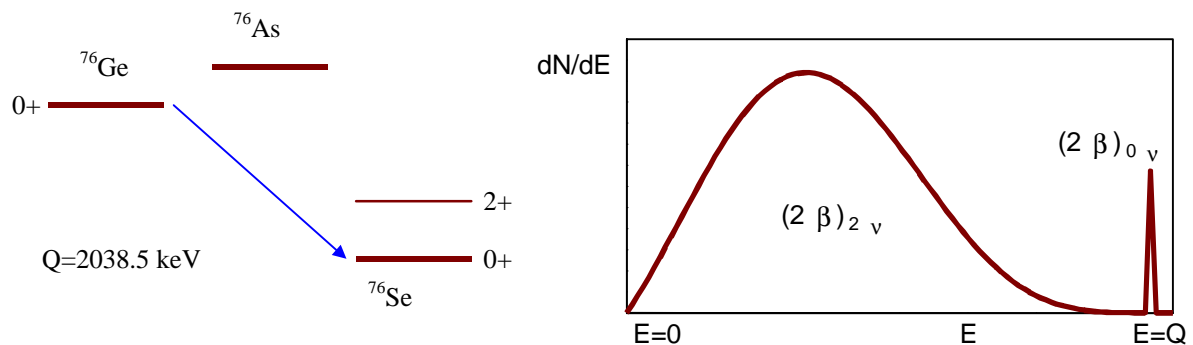
■ Modos de desintegración

- $(2\beta)_{2\nu}$ $(A, Z) \rightarrow (A, Z+2) + 2e^- + 2\nu$
proceso de 2º orden
- $(2\beta)_{0\nu}$ $(A, Z) \rightarrow (A, Z+2) + 2e^-$
no conserva el número leptónico

■ $(2\beta)_{0\nu}$ implica:

- neutrino autoconjugado (=Majorana)
- masa no nula y/o componentes dextrógiras en la corriente leptónica

■ $(2\beta)_{0\nu}$ con detectores de Ge: se busca un pico en $E=Q$ superpuesto al espectro $(2\beta)_{2\nu}$ y al fondo



■ Sensibilidad (expectativas) en ausencia de señal

$$T_{1/2} \geq \ln 2 N_A \frac{a}{A} 10^3 e \sqrt{\frac{Mt}{B\Gamma}}$$

a : enriquecimiento

Γ : resolución (keV)

ϵ : eficiencia de detección

B : fondo observado (cuentas/keV·kg·yr)

M : masa de detector (kg)

A : masa atómica

N_A : Número de Avogadro

t : tiempo de medida (años)

El experimento

- International Germanium Experiment : disponer de un experimento de la mayor sensibilidad posible para obtener el mejor límite a la vida media del proceso $2\beta_{(0\nu)}$ usando grandes cantidades de ^{76}Ge .
 - Γ : resolución integrada en el tiempo debe ser $\sim 3\text{keV}$ para $E=Q$.
 - B: ultrabajo fondo radiactivo
 - detectores y blindaje interno con materiales seleccionados de muy baja actividad
 - blindaje pasivo e inyección de N_2 contra el radon
 - blindaje activo: veto antimuones con plásticos centelleadores
 - selección de sucesos: Pulse Shape Discrimination (PSD)
 - M: detectores de germanio enriquecidos en ^{76}Ge al 86%
 - t: mantener la estabilidad en ganancia, resolución, ruido, fondo, pureza de la señal PSD, etc.

■ The IGEX Collaboration

C.E. Aalseth ^a, F.T. Avignone III ^a, R.L. Brodzinski ^b, S. Cebrián ^c, E. García ^c,
D. González ^c, W.K. Hensley ^b, I.G. Irastorza ^c, I.V. Kirpichnikov ^d,
A.A. Klimenko ^e, H.S. Miley ^b, A. Morales ^c, J. Morales ^c, A. Ortiz de Solórzano ^c,
S.B. Osetrov ^e, V.S. Pogosov ^f, J. Puimedón ^c, J.H. Reeves ^b,
M.L. Sarsa ^c, S. Scopel ^c, A.A. Smolnikov ^e, A.S. Starostin ^d, A.G. Tamanyan ^f,
A.A. Vasenko ^d, S.I. Vasiliev ^e, J.A. Villar ^c

^aUniversity of South Carolina, Columbia, South Carolina 29208 USA

^bPacific Northwest National Laboratory, Richland, WA 99352 USA

^cUniversity of Zaragoza, 50009 Zaragoza, Spain

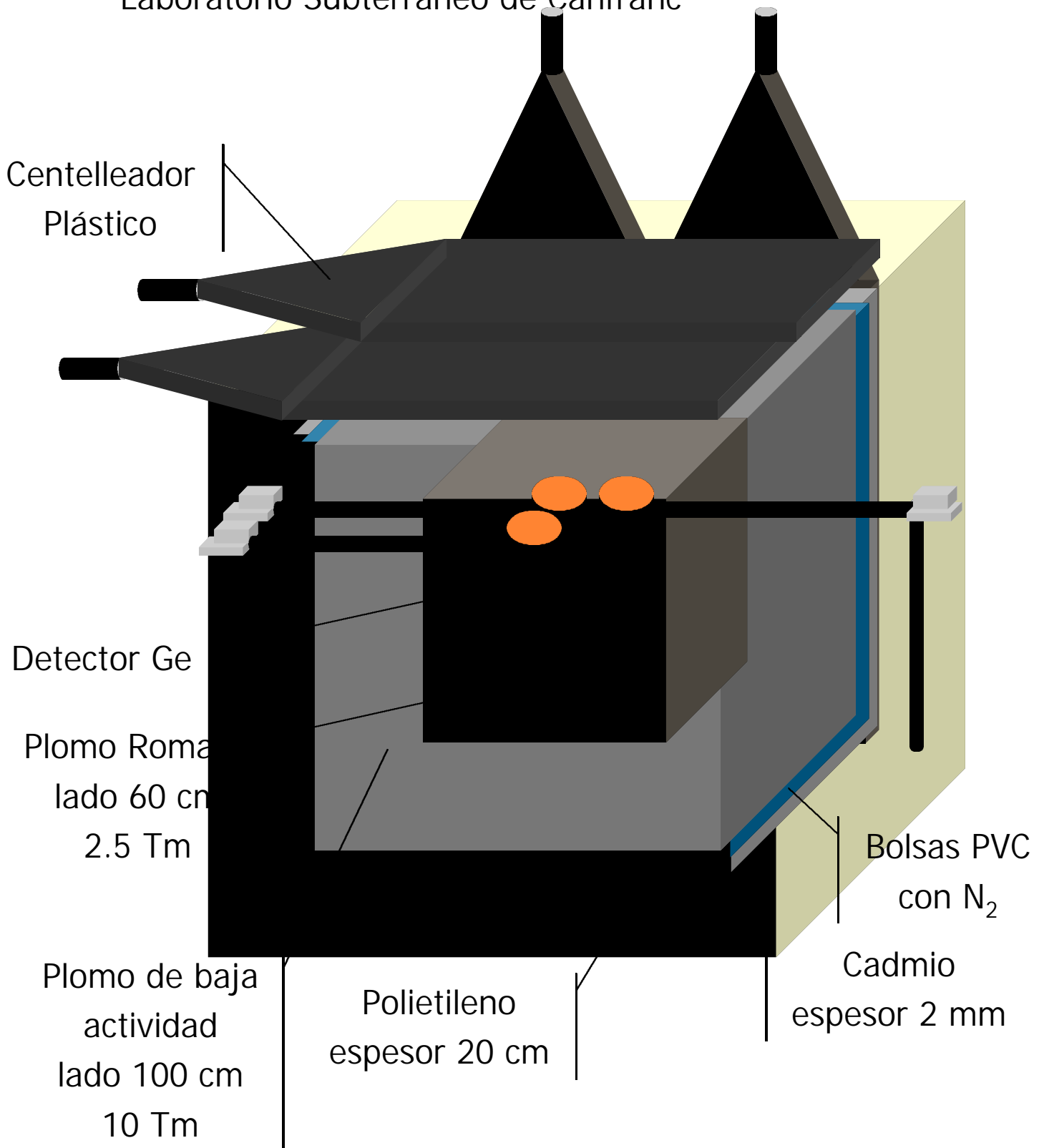
^dInstitute for Theoretical and Experimental Physics, 117 259 Moscow, Russia

^eInstitute for Nuclear Research, Baksan Neutrino Observatory, 361 609 Neutrino, Russia

^fYerevan Physical Institute, 375 036 Yerevan, Armenia

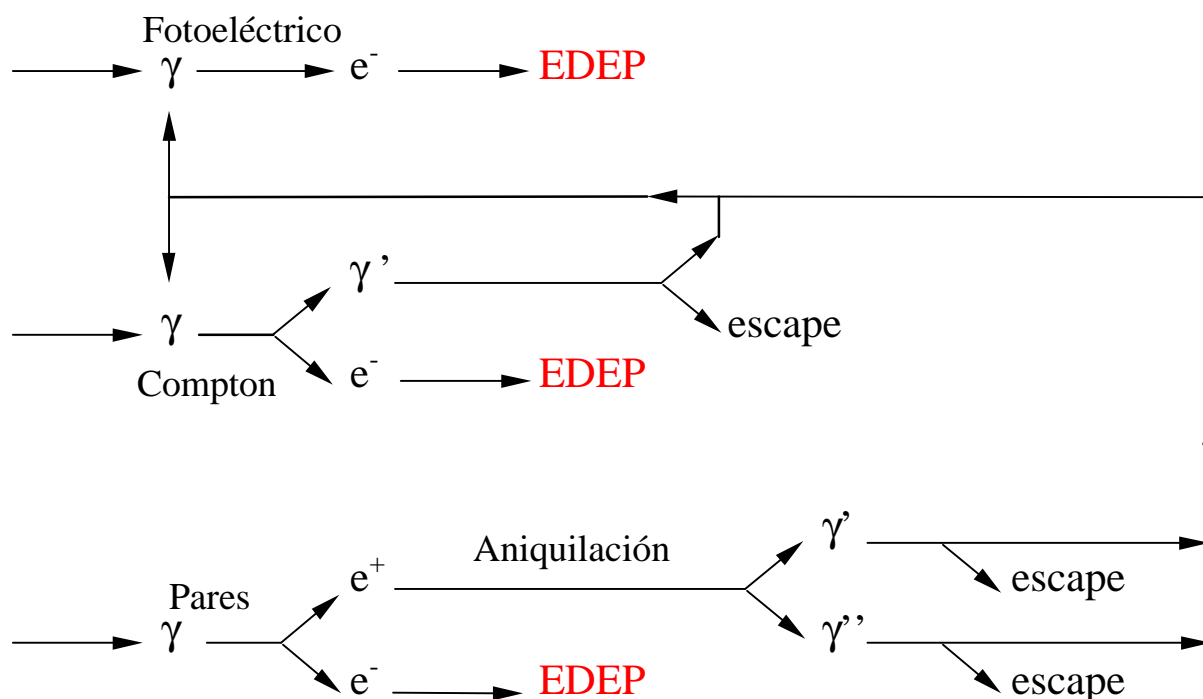
El experimento

- El blindaje para los detectores RICO-GRANDE en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc



Fundamentos de PSD

PSD como técnica de reducción del fondo radiactivo



Sucesos mono-localizados en el cristal:

SSE (Single-Site Events)

- | 1-Compton
- | Creación de pares e^+e^- con escape doble
- | desintegración doble-beta

Sucesos multi-localizados en el cristal:

MSE (Multi-Site Events)

- | Multi-compton
- | 1-Compton+fotoeléctrico
- | Desintegración β^+ + 1 ó más fotones de aniquilación

- | Los sucesos **doble-beta** son **SSE** mientras que el fondo radiactivo produce sobre todo MSE.

Fundamentos de PSD

■ Teoremas de reciprocidad

- m : electrodo infinitesimal móvil (portadores e^- o h^+)
- 1 : electrodo sensor
- q_m aparece en m cuando V_1 se aplica en 1
- Q_1 aparece en 1 cuando V_m se aplica en m
- Entonces: $q_m \cdot V_m = Q_1 \cdot V_1$

■ Expresión de la corriente o pulso

- Q_1 es la carga inducida que se va a medir

$$i = \frac{dQ_1}{dt} = q_m \frac{d}{dt} \left(\frac{V_m}{V_1} \right) = q_m \nabla \left(\frac{V_m}{V_1} \right) \vec{v}$$

- Weighting field (cm^{-1}): calculado aplicando potencial 1 al electrodo sensor, sin considerar densidad de carga en el cristal

$$\nabla \left(\frac{V_m}{V_1} \right) = -\vec{E}_w$$

- Forma final de la corriente inducida

$$i = -q_m \vec{E}_w \vec{v}, \vec{v} = \vec{v}(\vec{E})$$

■ Ingredientes para el cálculo numérico

- geometría (espacio r - z)
- potencial aplicado al cristal
- densidad de carga del cristal $|N_A - N_D|$
- velocidad de los portadores en función del campo eléctrico

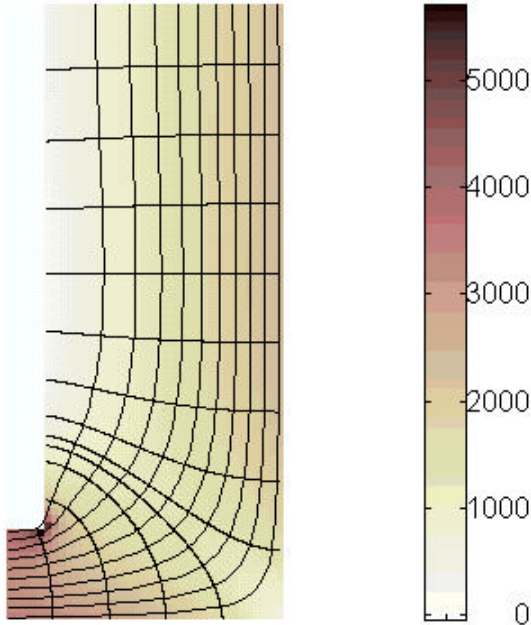
$$\nabla^2 \phi(\vec{r}) = -\frac{\rho(\vec{r})}{\epsilon} \text{ en la zona depletada del cristal} \quad \phi(\vec{r}_{\text{int}}) - \phi(\vec{r}_{\text{ext}}) = V_0$$

$$\nabla^2 \phi(\vec{r}) = 0 \text{ en la zona no depletada del cristal} \quad \vec{E}(\vec{r}) = -\nabla \phi(\vec{r})$$

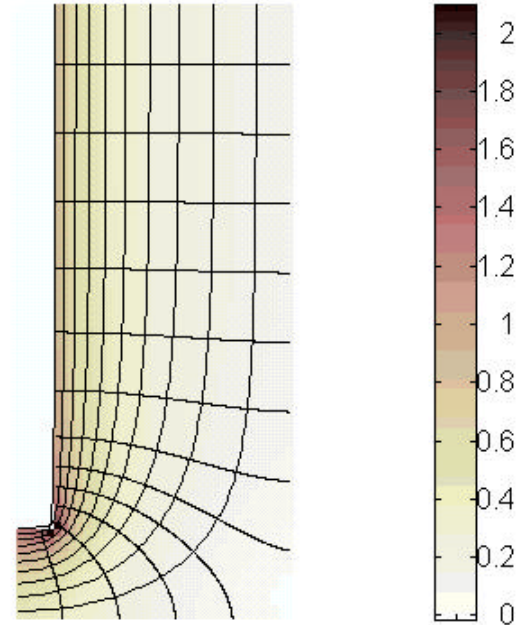
Fundamentos de PSD

- Campo eléctrico, el caso del detector depletado $V_0 > V_D$

RG1 V0=4800 volt True Field - Raw Solution

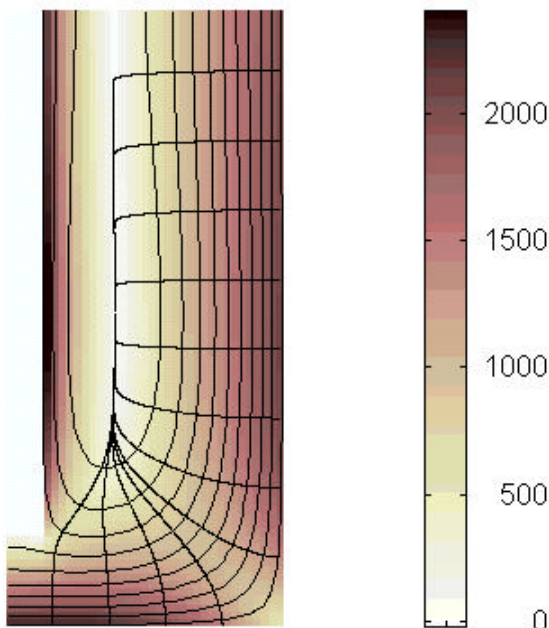


RG1 V0=4800 volt Weighting Field - Raw Solution

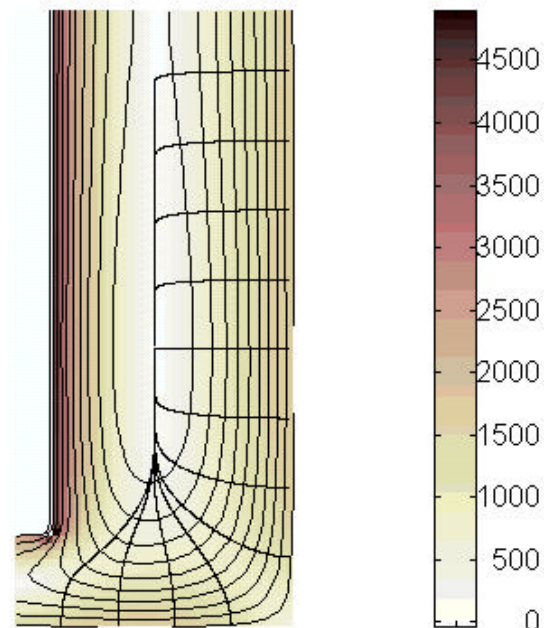


- El caso del detector no depletado $V_0 > V_D$ (solucion no válida)

RG1 V0=2000 volt True Field - Raw Solution



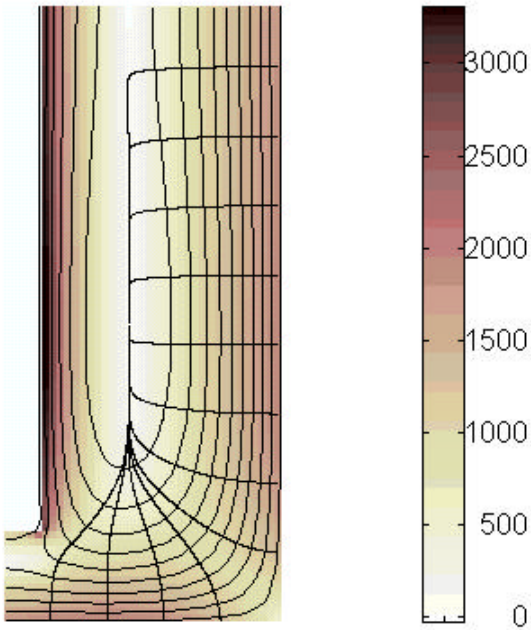
RG1 V0=0 volt True Field - Raw Solution



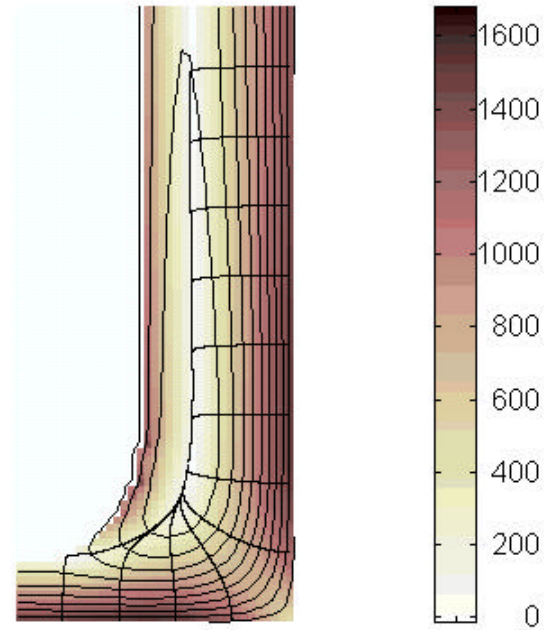
Fundamentos de PSD

- Campo eléctrico, el caso del detector no depletado $V_0 < V_D$ solución iterativa

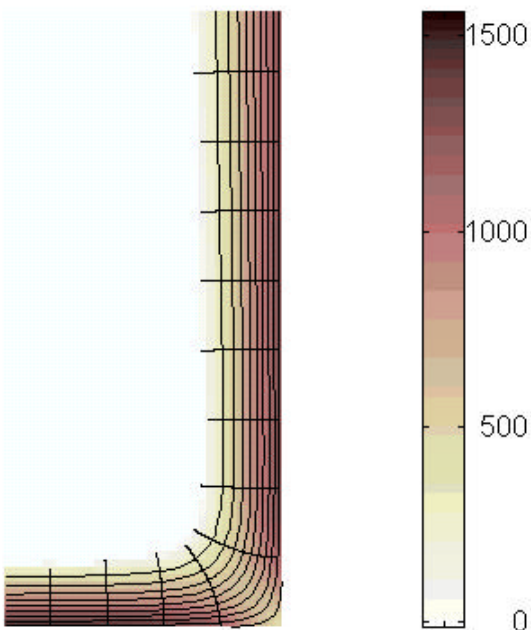
RG1 V0=1000 volt True Field - Iteration-1



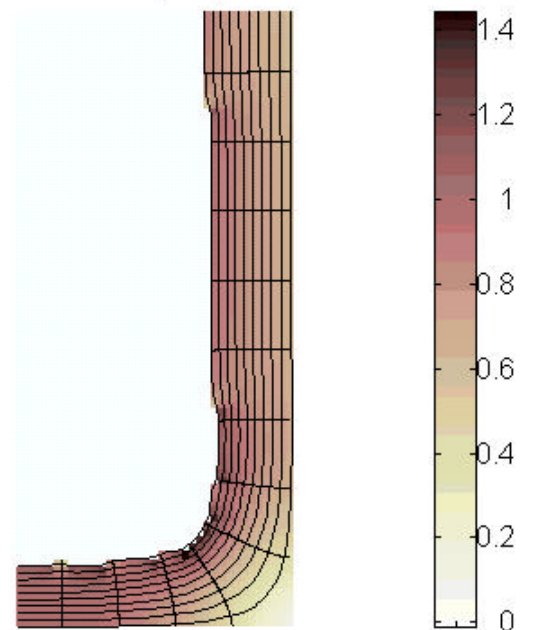
RG1 V0=1000 volt True Field - Iteration-2



RG1 V0=1000 volt True Field - Iteration-6



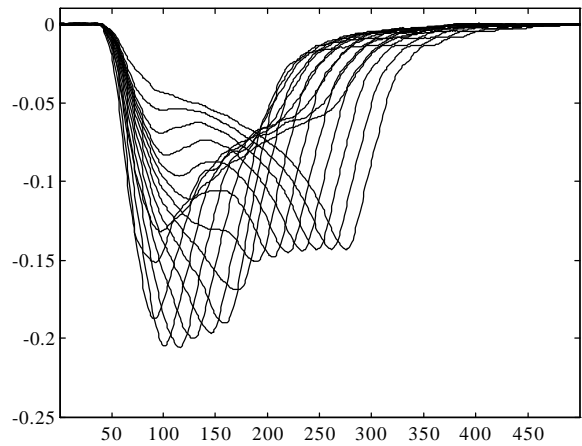
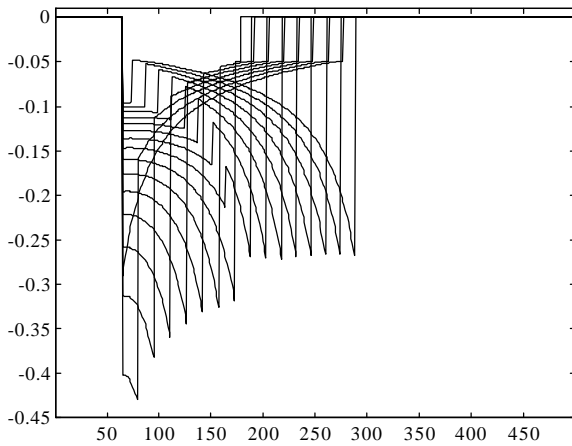
RG1 V0=1000 volt Weighting Field - Iteration-6



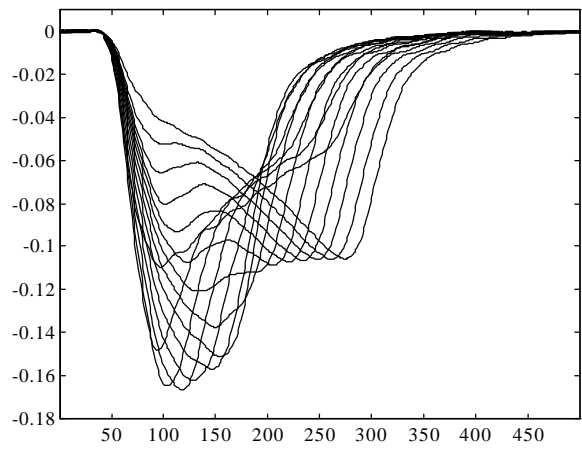
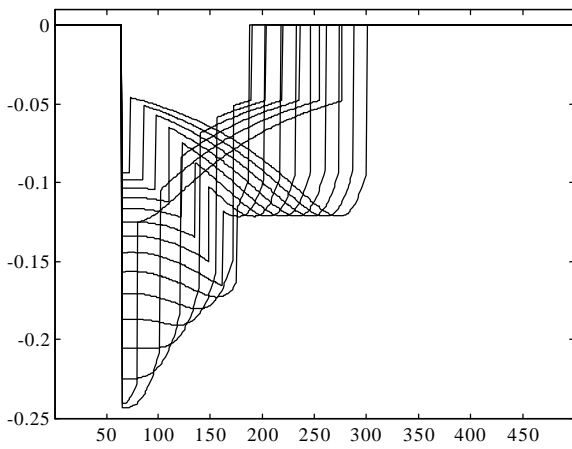
Fundamentos de PSD

■ Pulsos calculados en condiciones idealizadas: RG2

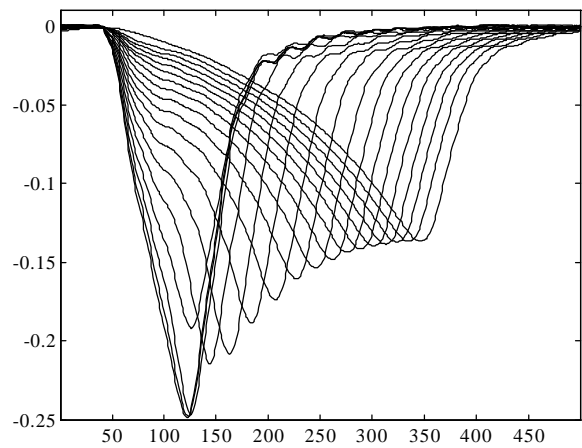
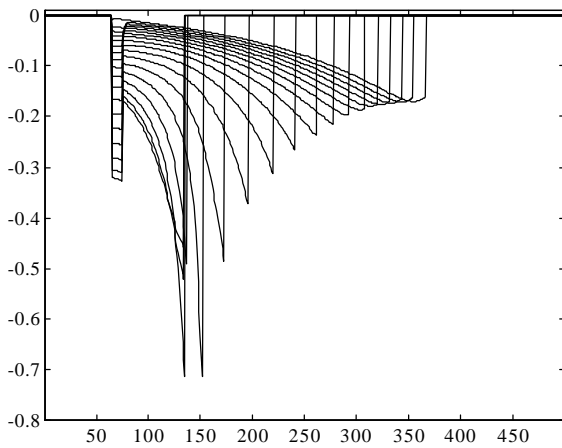
■ Parte superior del cristal



■ Parte central del cristal



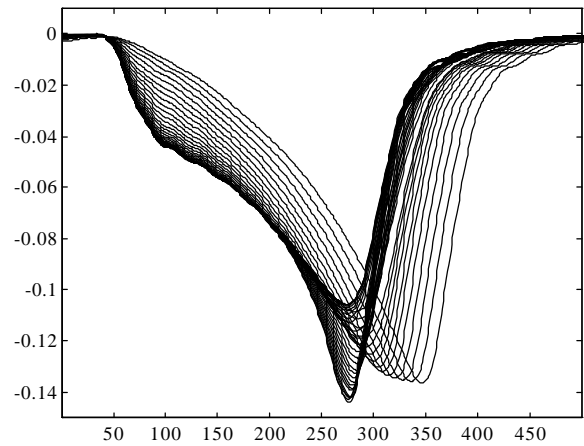
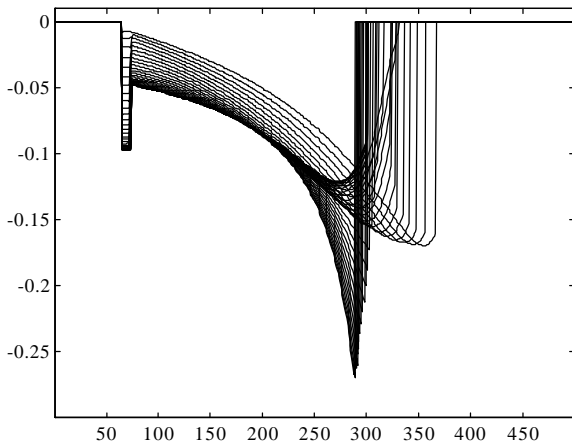
■ Parte inferior del cristal



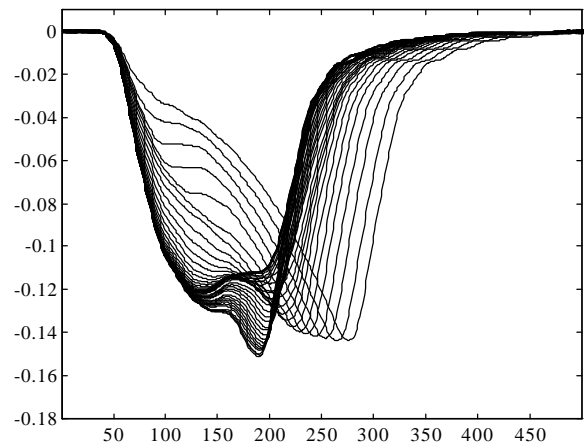
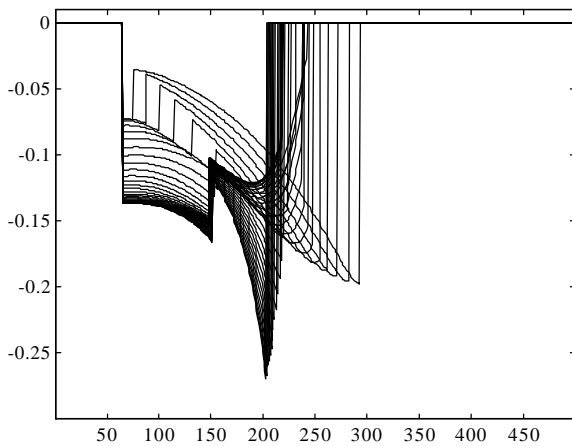
Fundamentos de PSD

■ Pulsos calculados en condiciones idealizadas: RG2

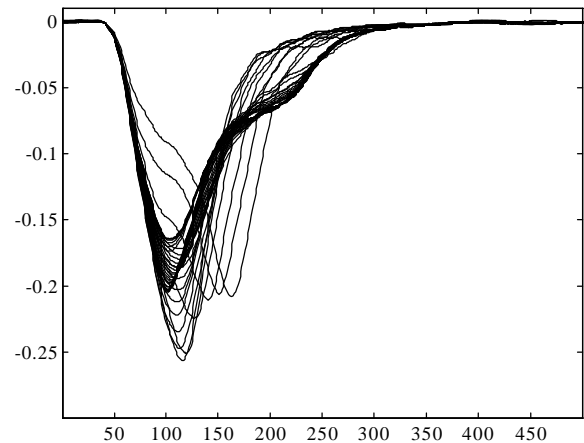
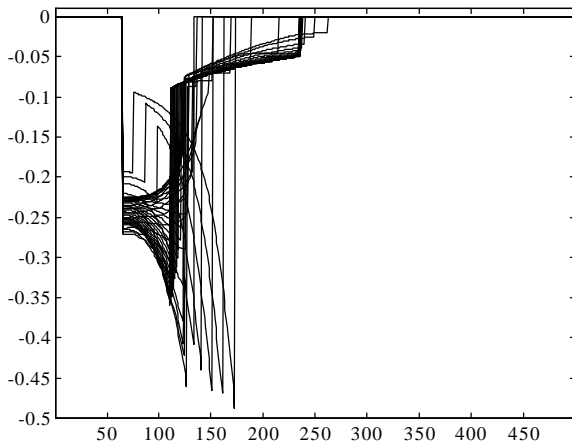
■ Posición radial 4 cm



■ Posición radial 2.7 cm

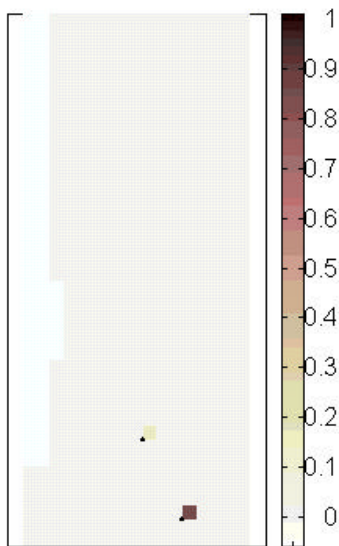


■ Posición radial 1.3 cm

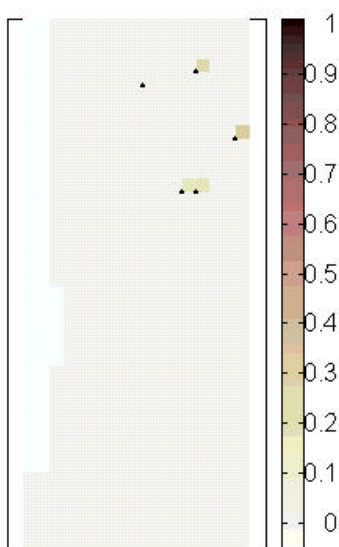
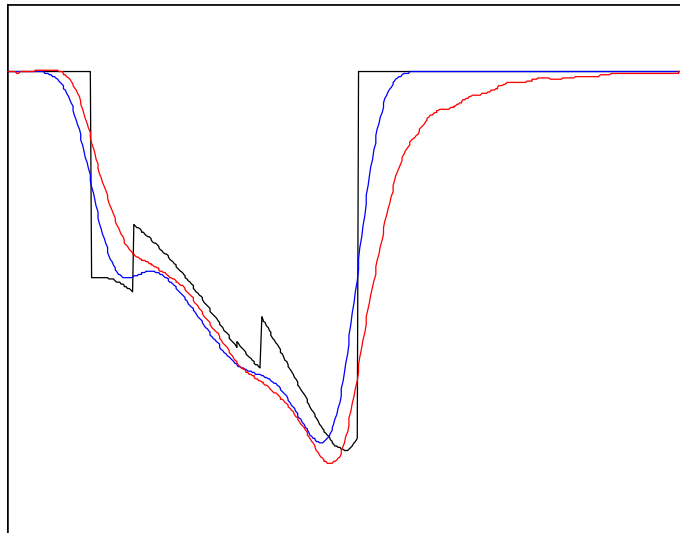


Fundamentos de PSD

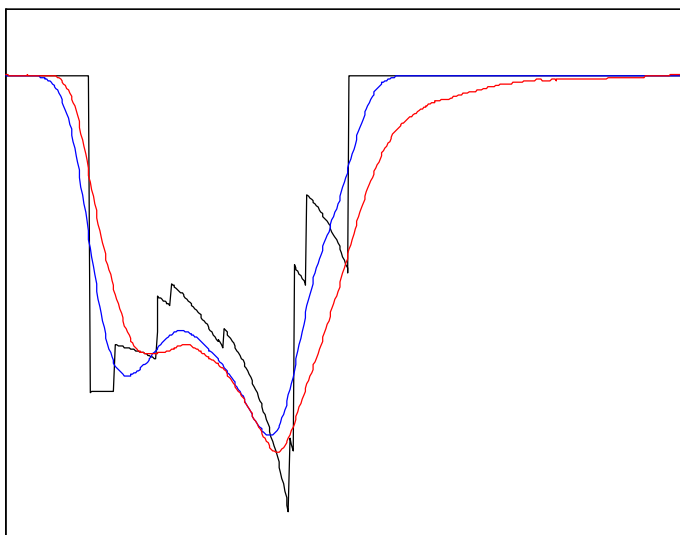
- Obtención por Monte-Carlo (GEANT) de puntos de interacción para sucesos de una fuente de calibración
 - Fotones $E=1274$ keV desde el interior del blindaje
 - Estudio centrado en el fotopico
 - Localizaciones discretizadas en intervalos de 2 mm en r y z
 - Combinación de los pulsos SSE básicos de acuerdo con la fracción de energía depositada en cada localización



$nz = 2$

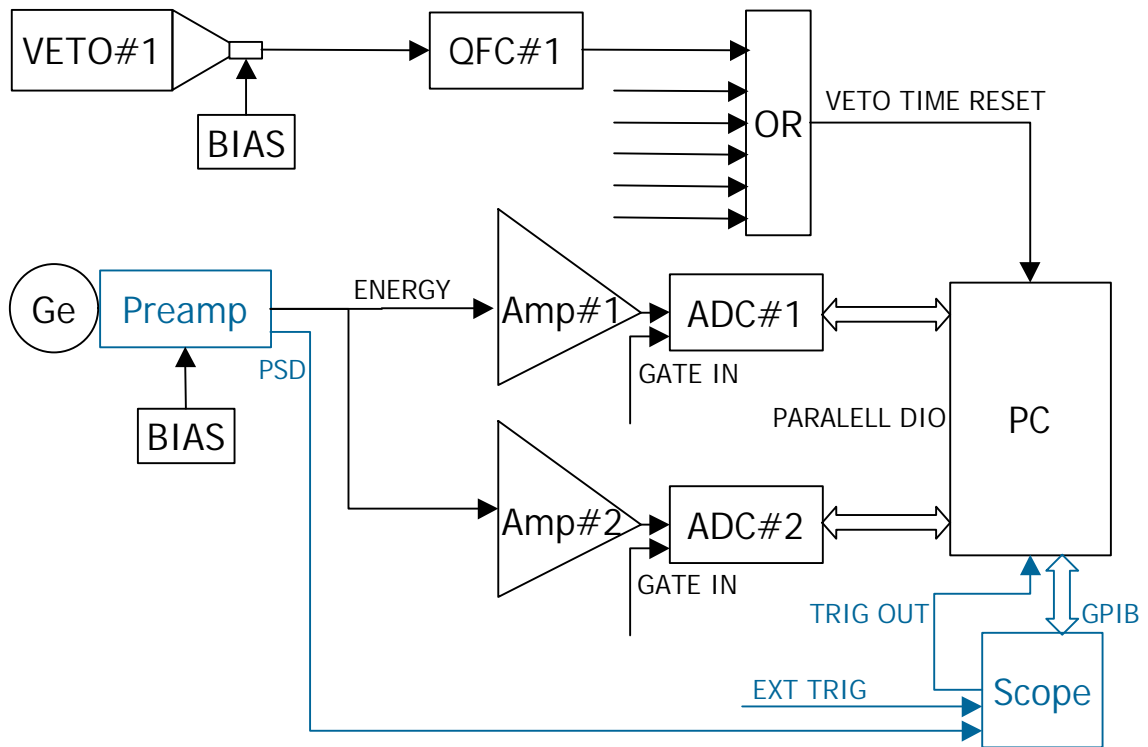


$nz = 5$



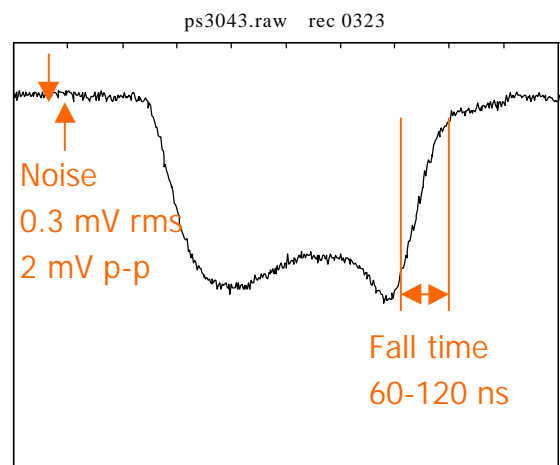
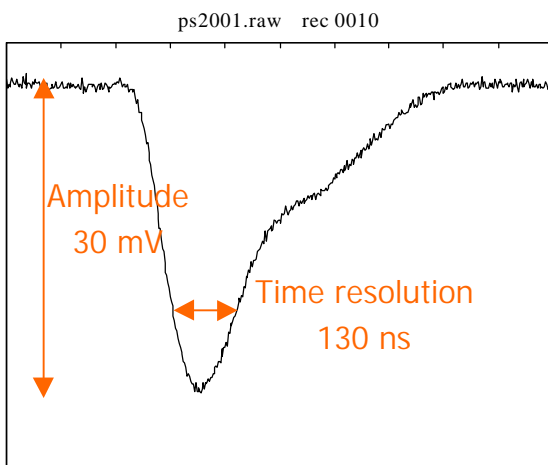
Obtención experimental de pulsos

El Sistema de Adquisición



Características de los pulsos obtenidos

- duración total: $1 \mu s$ (500 puntos, 2 ns/punto)
- Anchura de banda: 800 MHz
- Impedancia $1 G\Omega$



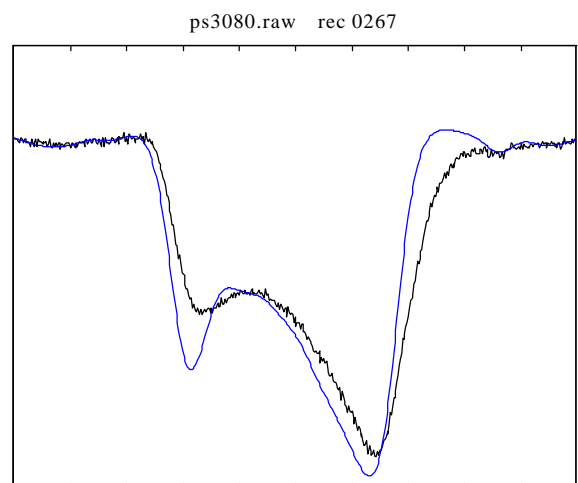
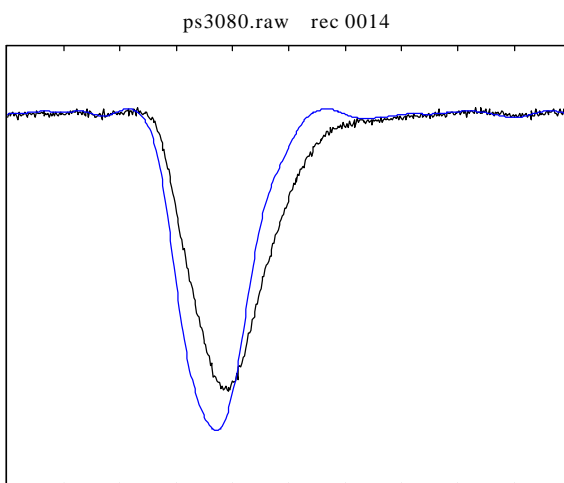
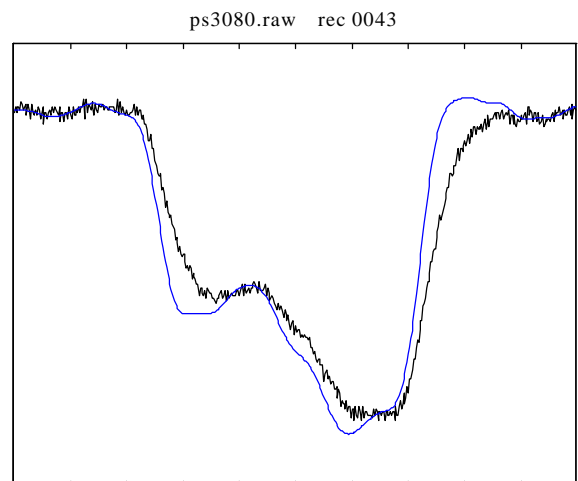
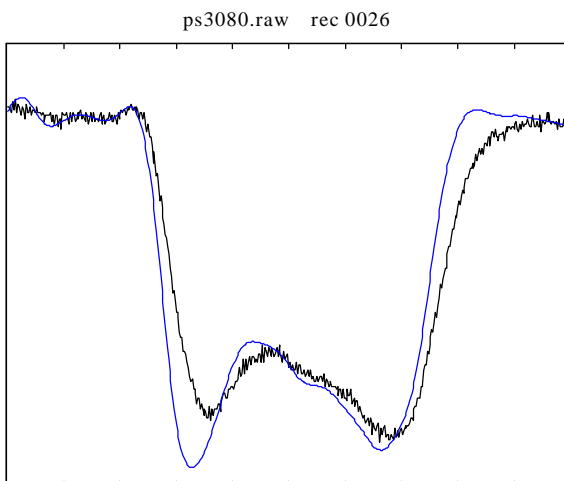
Obtención experimental de pulsos

La distorsión instrumental



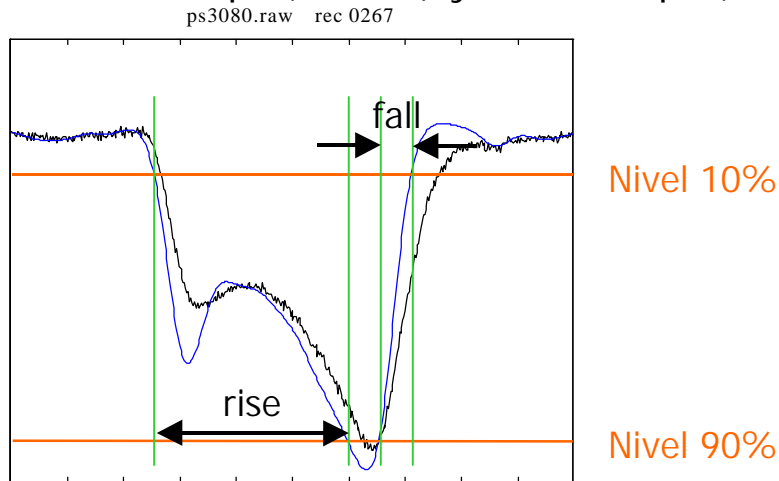
Uso de la función respuesta instrumental

- convolución con pulsos calculados: ver ejemplos anteriores de pulsos SSE y MSE calculados
- deconvolución (reconstrucción parcial) de pulsos experimentales



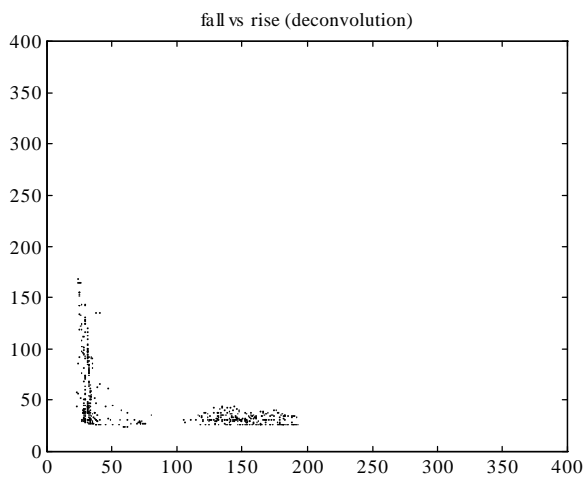
Algoritmos de rechazo

- PSD por cuts en las distribuciones rise/fall time
 - rechazar si rise > 50 pt (100 ns) y fall > 50 pt (100 ns)

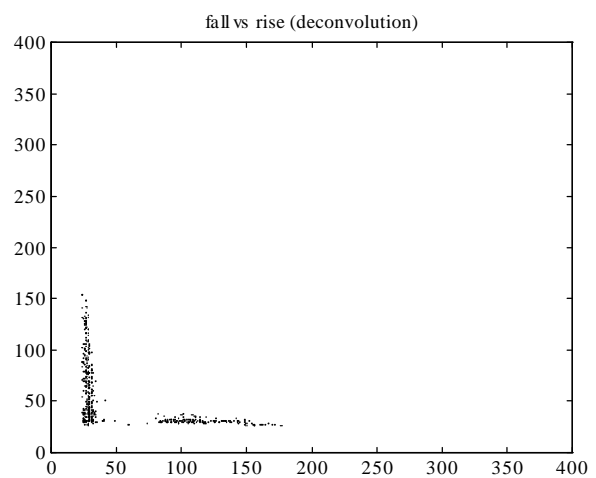


SSE calculados para RG2

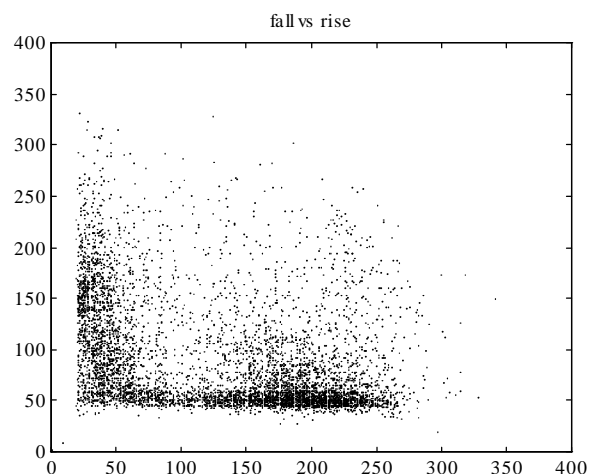
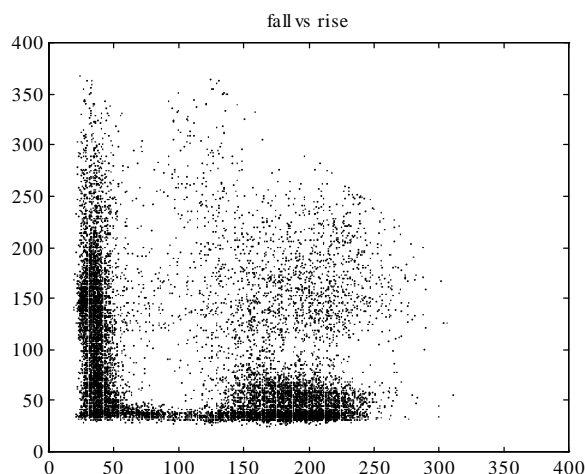
SSE calculados para RG3



sucesos del fondo RG2

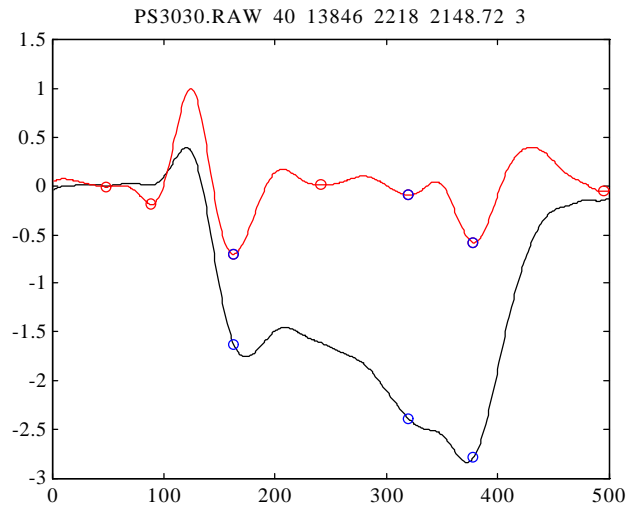
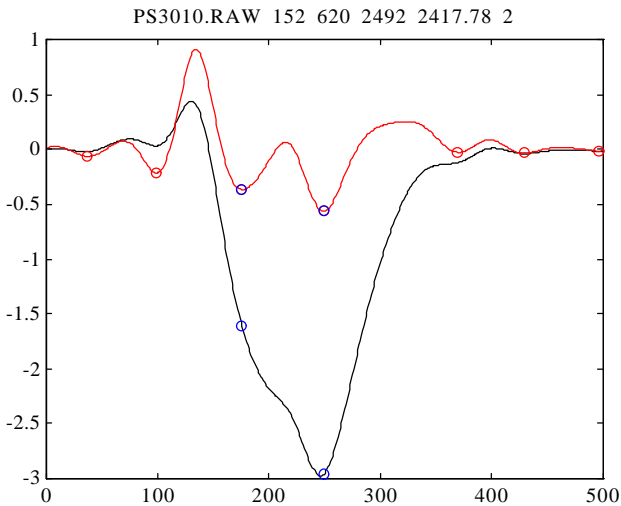
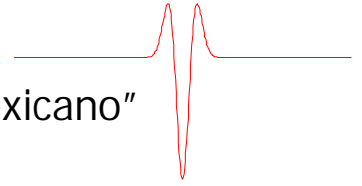


sucesos del fondo RG3

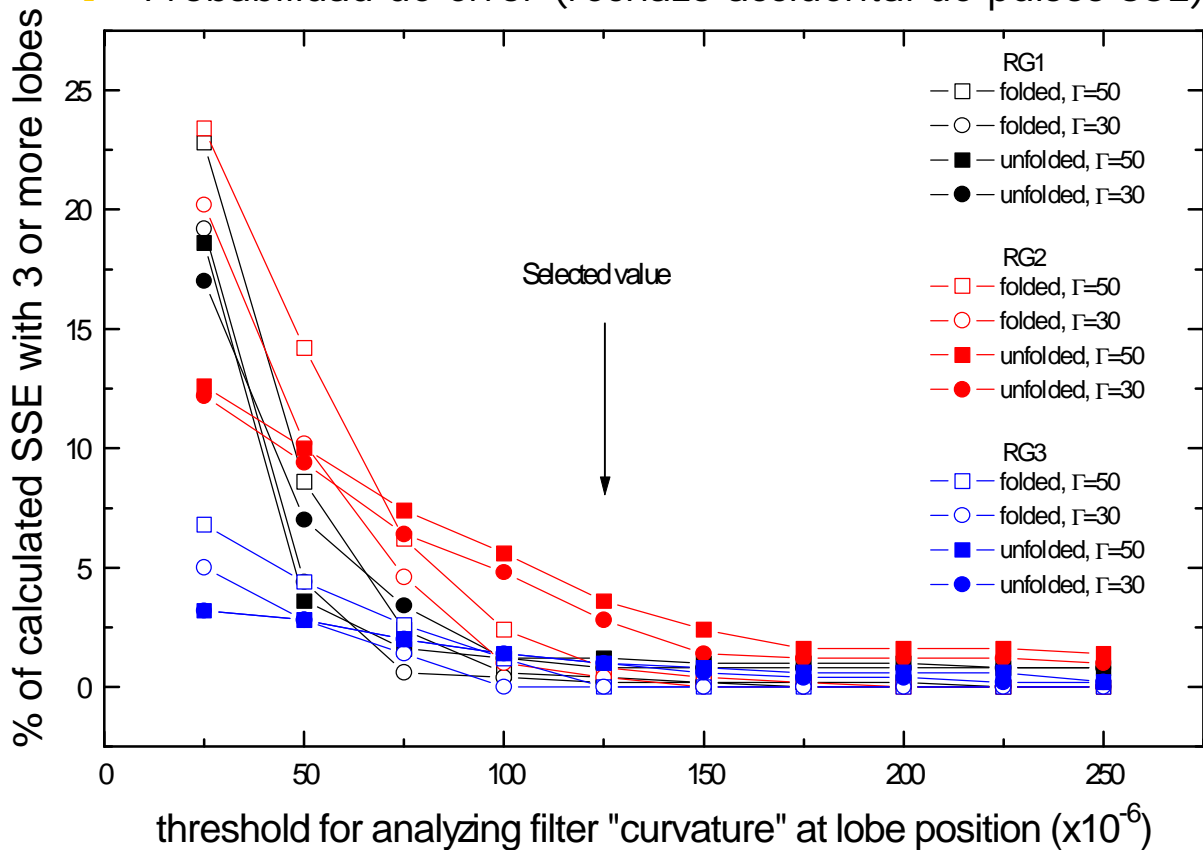


Algoritmos de rechazo

- PSD por el número de **lóbulos** en el pulso
- encontrar lóbulos con el filtro "sombrero mexicano"
- rechazar si > 2 lóbulos



- Probabilidad de error (rechazo accidental de pulsos SSE)



Algoritmos de rechazo

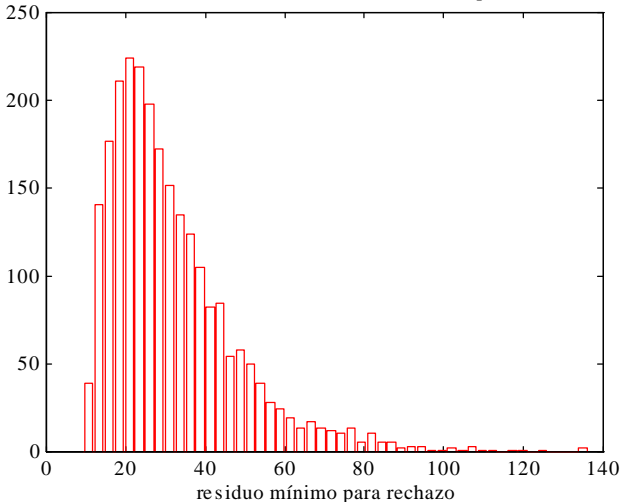
- Comparación con SSE calculados: **cuts** sobre **residuos mínimos**

- Medidas de comparación

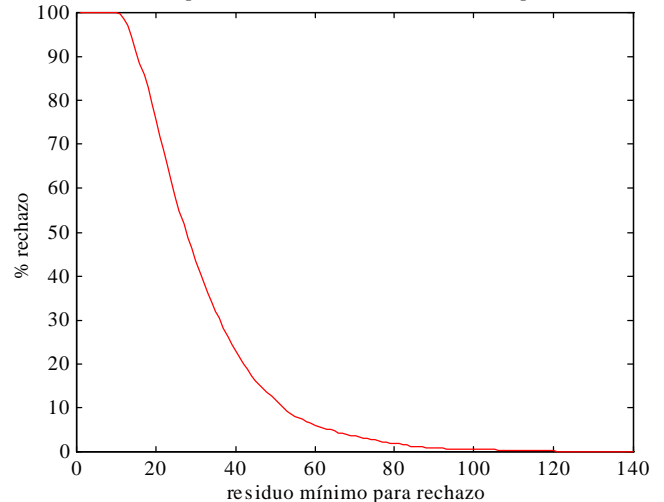
- $\max\{\langle \text{SSE} \mid \text{pulso} \rangle\}$, $\text{norm}(\text{SSE}) = \text{norm}(\text{pulso}) = 1$
- $\min\{\text{norm}(\text{SSE}-\text{pulso})\}$, $|\text{área}(\text{SSE})| = |\text{área}(\text{pulso})| = 1$
- $\min\{\text{sum}|\text{SSE}-\text{pulso}|\}$, $\max|\text{SSE}| = \max|\text{pulso}| = 1$

- Distribuciones de los residuos mínimos y rechazo en función del cut

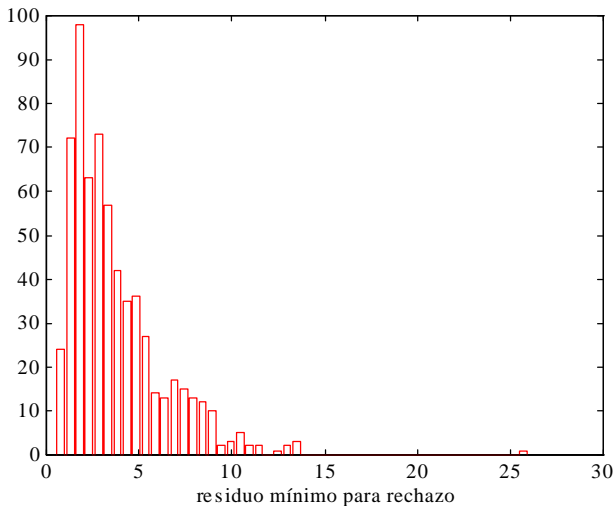
RG2: Distribución del residuo. Pulsos reconstruidos por deconvolución



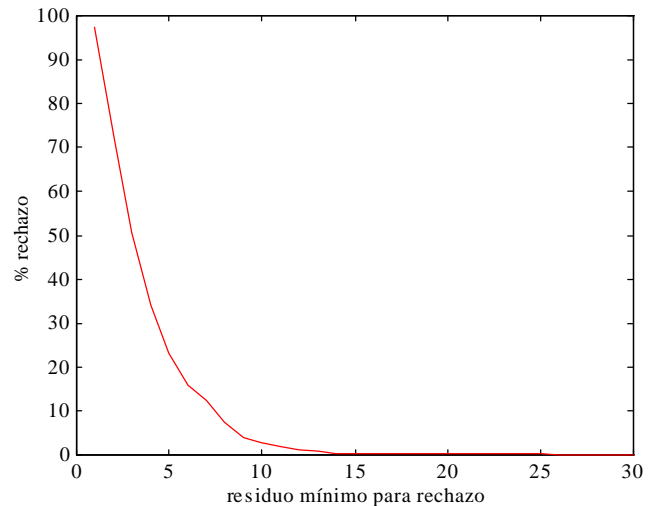
RG2: Rechazo en pico 1274 keV. Pulsos reconstruidos por deconvolución



RG2: Distribución del residuo entre SSE calculados



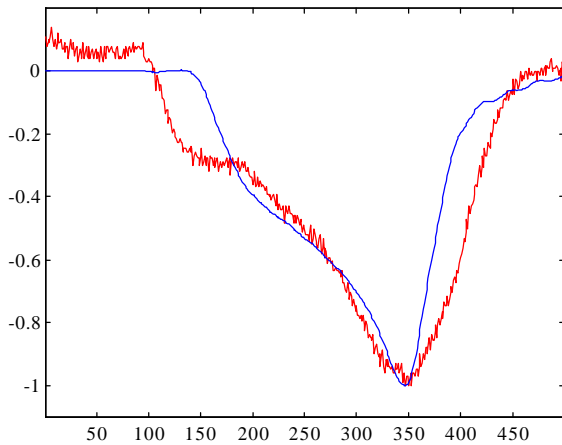
RG2: Rechazo entre SSE calculados



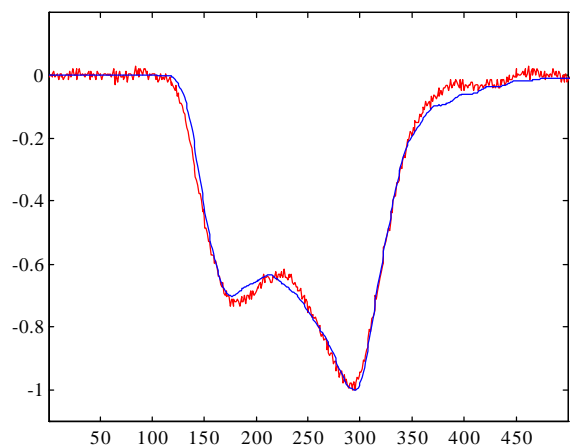
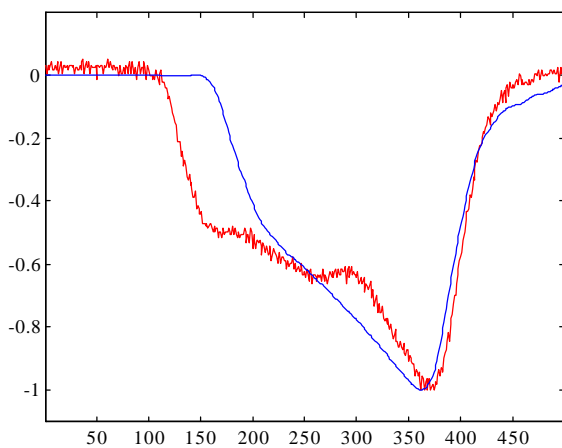
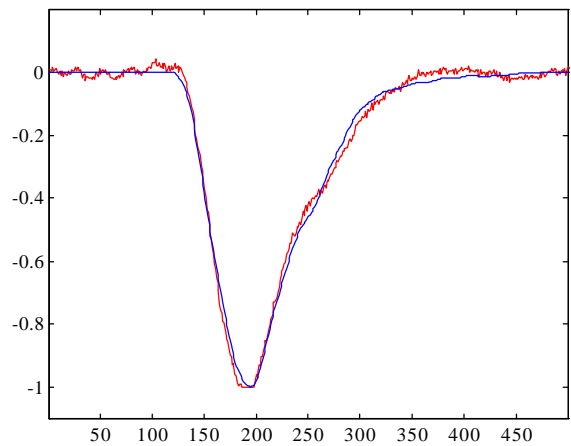
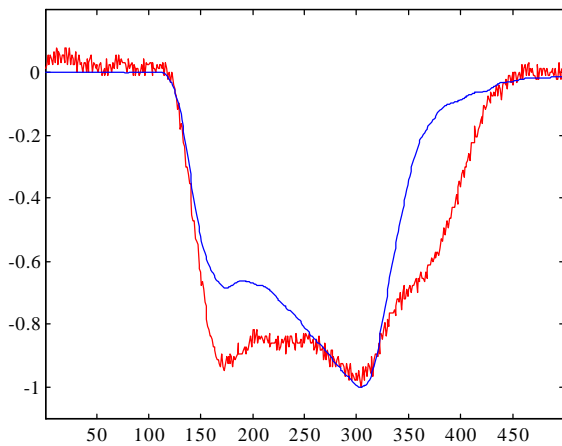
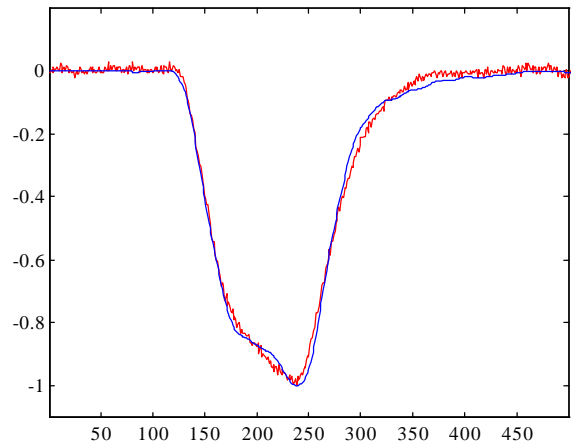
Algoritmos de rechazo

- **SSE calculados convolucionados vs. Pulsos experimentales**, mínimos residuos

■ Pulsos a rechazar



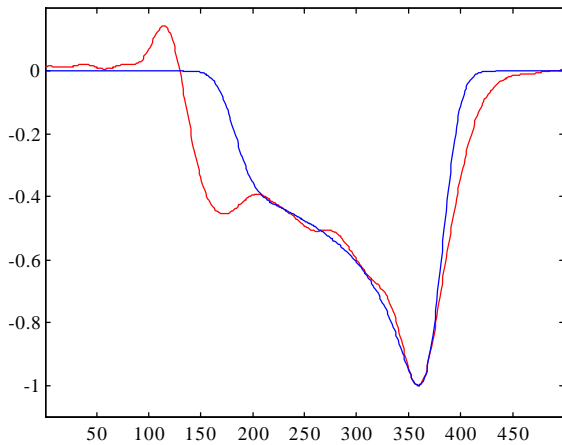
■ Pulsos a aceptar



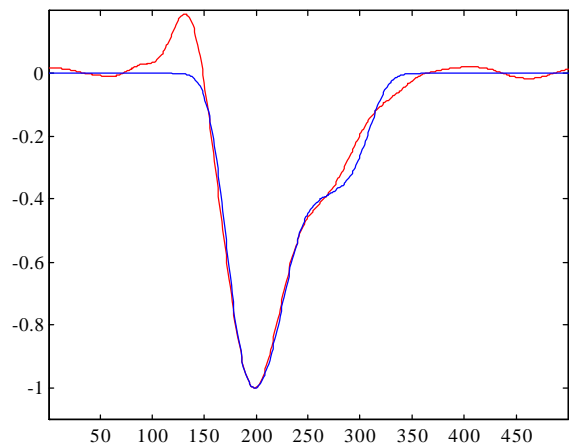
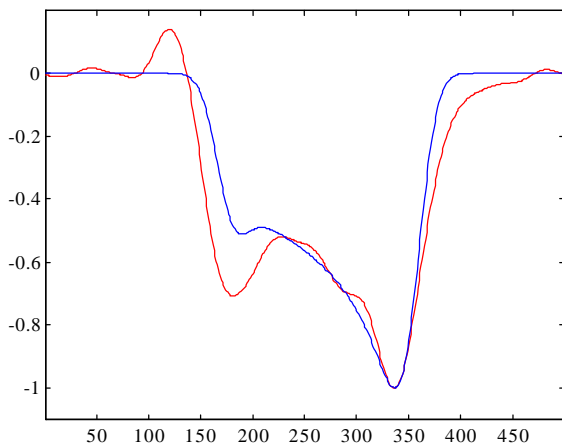
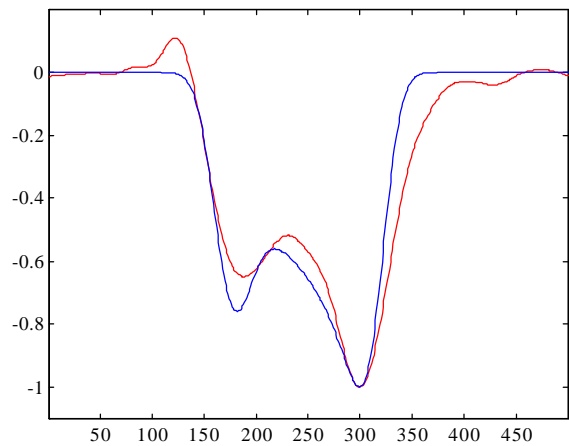
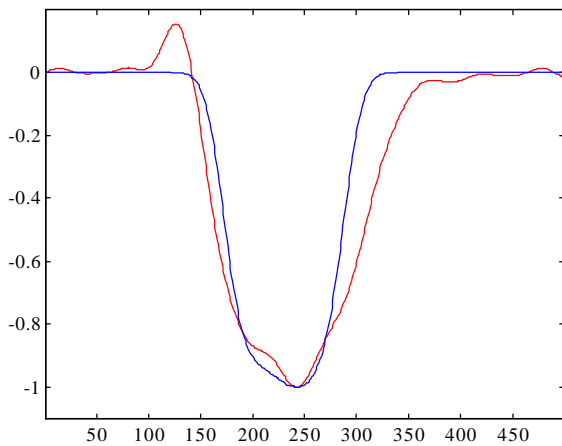
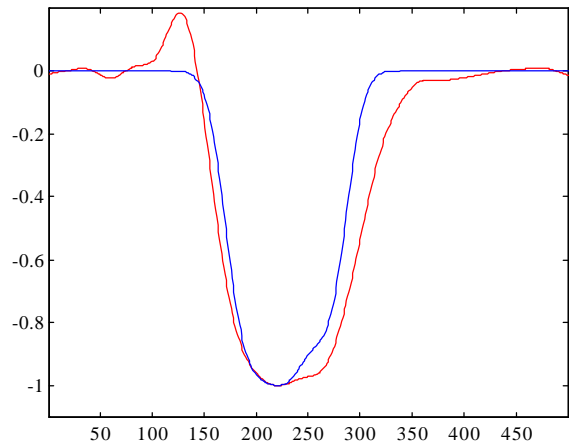
Algoritmos de rechazo

- SSE calculados vs. Pulsos experimentales deconvolucionados, mínimos residuos

■ Pulsos a rechazar



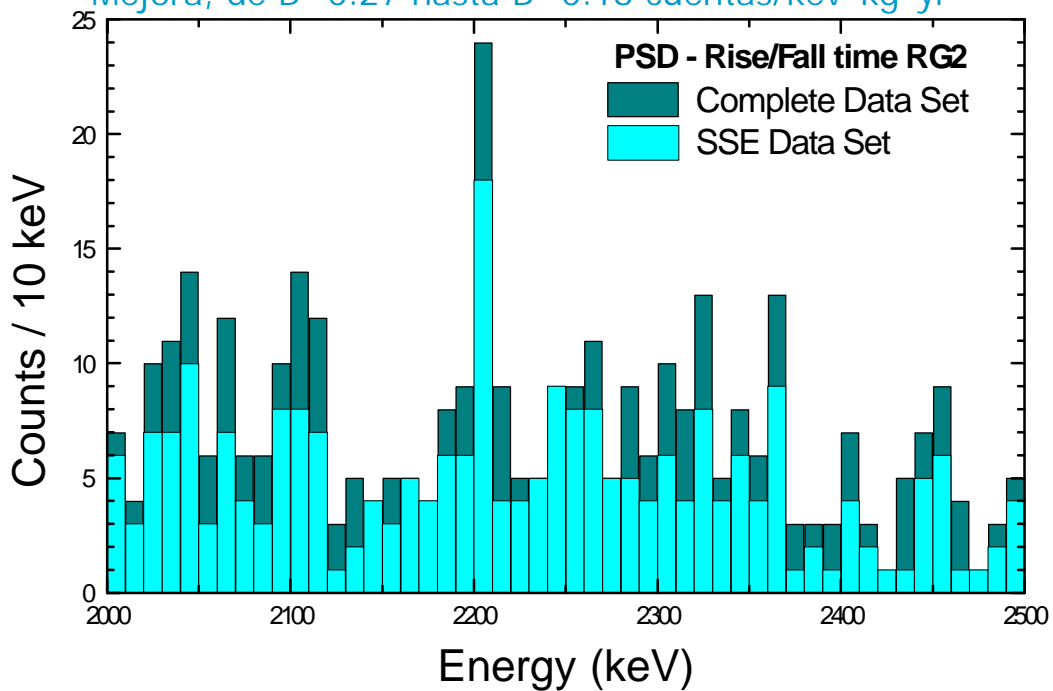
■ Pulsos a aceptar



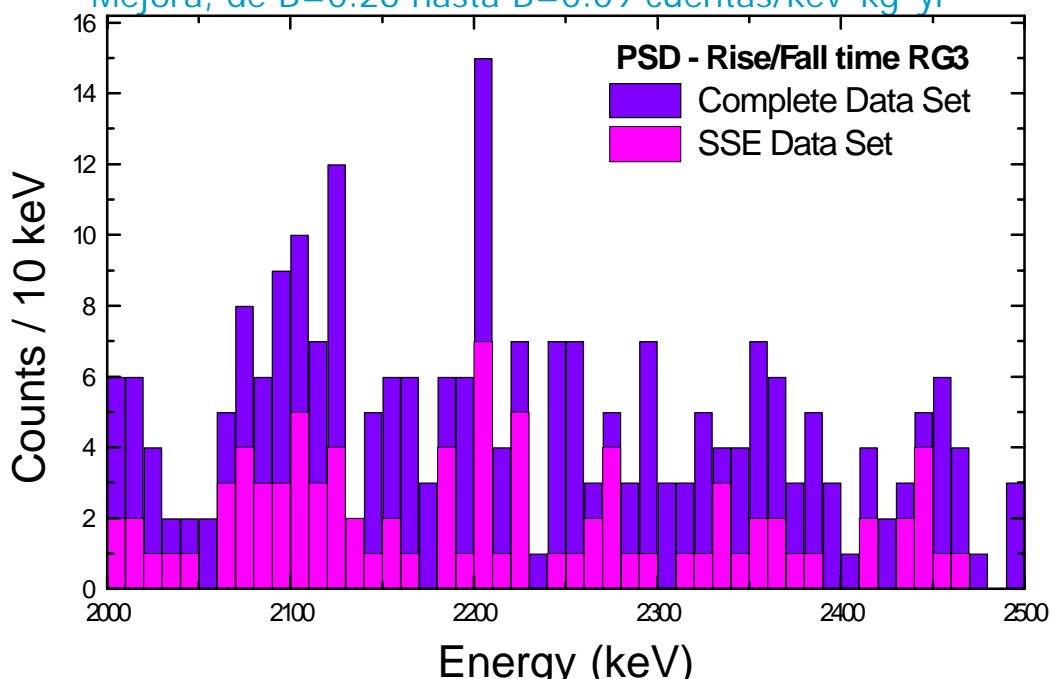
Resultados

- PSD-rise/fall 2.0-2.5 MeV, 4.64 kg· yr. Rechazo: 44.98%
Mejora, de $B=0.26$ hasta $B=0.14$ cuentas/kev· kg· yr

- detector RG2, 2.74 kg· yr: rechazo 32.42%
Mejora, de $B=0.27$ hasta $B=0.18$ cuentas/kev· kg· yr



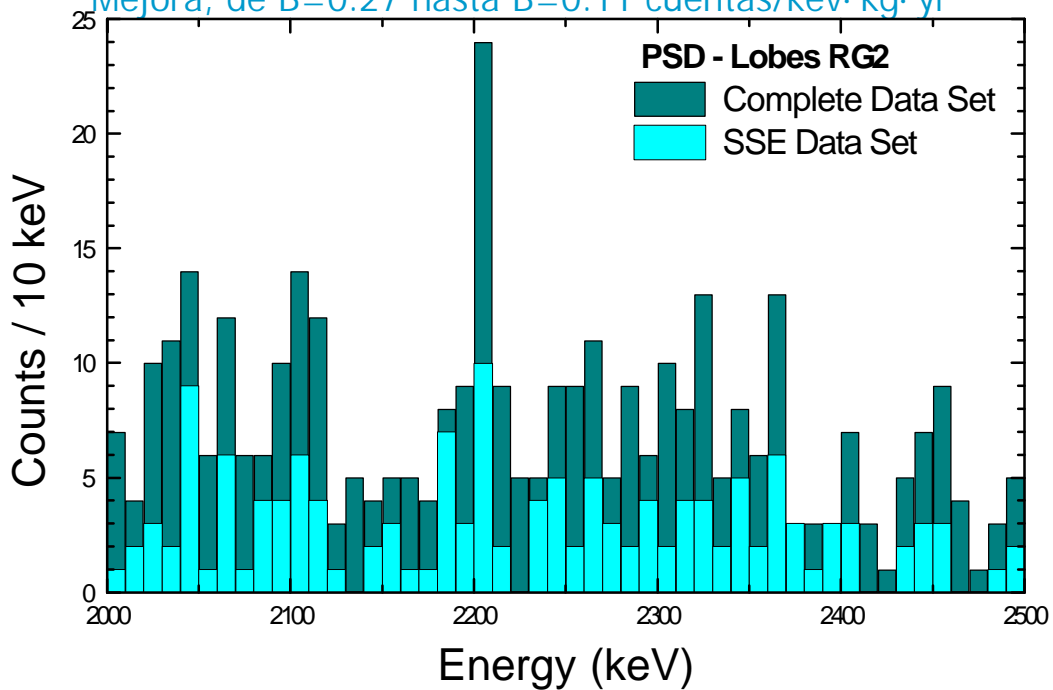
- detector RG3, 1.90 kg· yr: rechazo 63.79%
Mejora, de $B=0.26$ hasta $B=0.09$ cuentas/kev· kg· yr



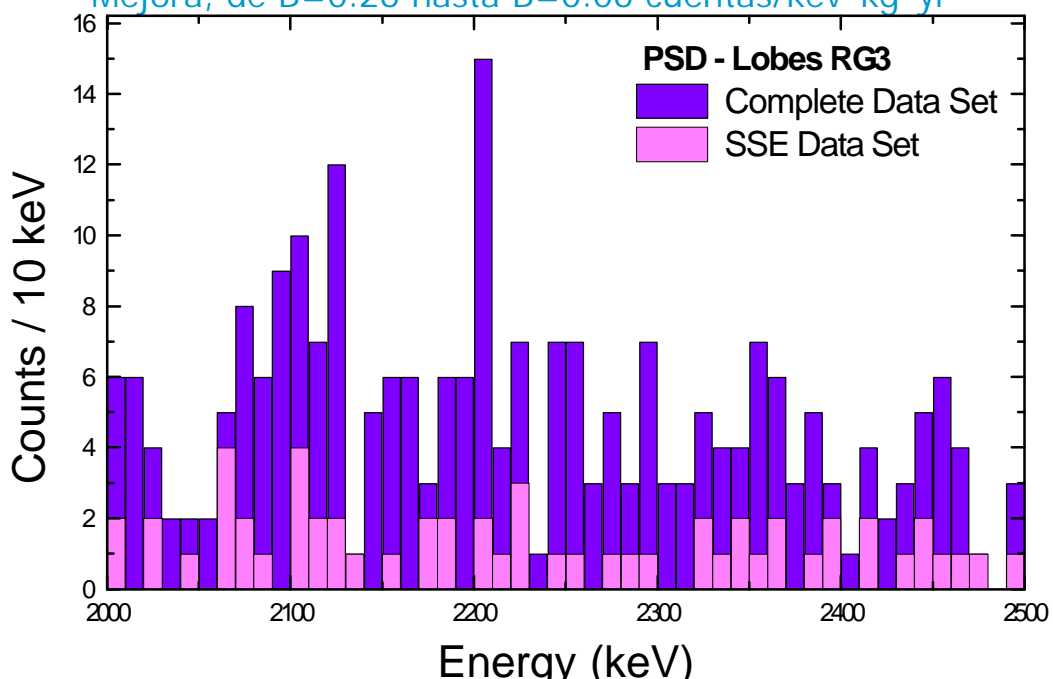
Resultados

- PSD-lóbulos 2.0-2.5 MeV, 4.64 kg· yr. Rechazo: 66.89%
Mejora, de $B=0.26$ hasta $B=0.09$ cuentas/kev· kg· yr

- detector RG2, 2.74 kg· yr: rechazo 60.44%
Mejora, de $B=0.27$ hasta $B=0.11$ cuentas/kev· kg· yr

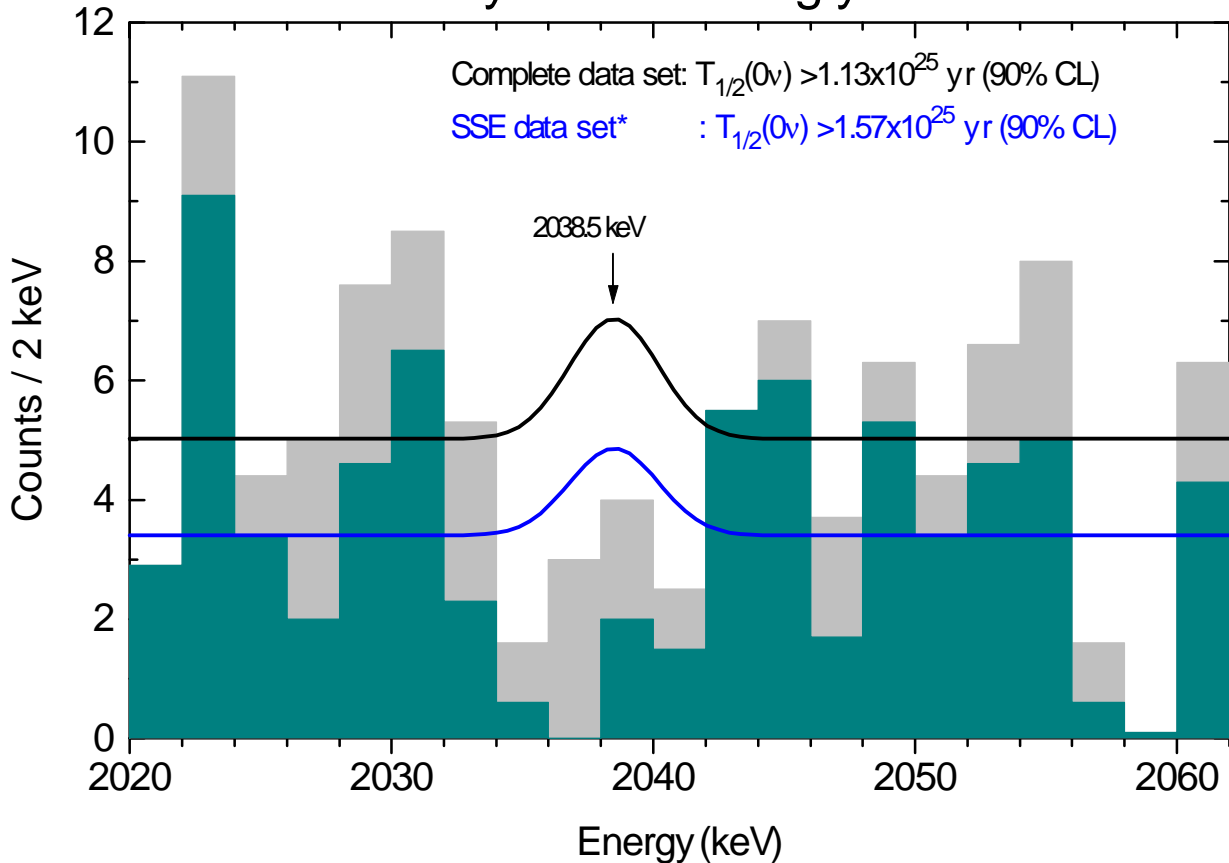


- detector RG3, 1.90 kg· yr: rechazo 76.54%
Mejora, de $B=0.26$ hasta $B=0.06$ cuentas/kev· kg· yr



Resultados

- Espectro acumulado de IGEX, 2020-2060 keV
116.75 mole year - 8.87 kg·year in ^{76}Ge



- Factores nucleares, masa efectiva de Majorana

$$\langle m_\nu \rangle_{\text{exp}} = m_e [F_N T_{1/2}(0\nu)]^{-1/2}$$

| F_N (years $^{-1}$) | Model | $\langle m_\nu \rangle$ (eV) | |
|------------------------|-------------------------------|------------------------------|---------------|
| | | Complete Data Set | SSE Data Set* |
| 1.56×10^{-13} | Weak Coupling Shell Model [1] | 0.38 | 0.33 |
| 9.67×10^{-15} | QRPA [2] | 1.55 | 1.31 |
| 1.21×10^{-13} | QRPA [3] | 0.44 | 0.37 |
| 1.12×10^{-13} | QRPA [4] | 0.45 | 0.39 |
| 1.41×10^{-14} | Shell Model [5] | 1.28 | 1.09 |

[1] W.C. Haxton, G.J. Stephenson, Jr., and D.Strottman, Phys. Rev. Lett 47 (1981) 153.

[2] P. Vogel and M.R. Zirnbauer, Phys. Rev. Lett. 57 (1986) 3148.

[3] O. Civitarese, A. Faessler, and T. Tomoda, Phys. Lett. B194 (1987) 11.

[4] K. Muto and H.V. Klapdor, Phys. Lett. B201 (1988) 420.

[5] E. Caurier, et al., Phys. Rev. Lett. 77 (1996) 1954; P.B. Radha, et al., Phys. Rev. Lett. 76 (1996) 2642.

*Includes data without Pulse Shape information

Conclusiones

- Es comúnmente aceptado que las técnicas PSD son la última posibilidad de mejora del fondo en los experimentos doble-beta actuales con detectores de Germanio.
- Se ha aplicado un algoritmo PSD simple que no se apoya directamente en cálculo numérico de pulsos SSE. El fondo en la región 2-2.5 MeV se divide por 3 (hasta 4 en el detector RG3).
- Se ha mostrado cómo un conocimiento exacto del campo eléctrico del cristal puede conducir a rechazos de más del 80% del fondo, utilizando técnicas de comparación con pulsos SSE calculados. El inconveniente es precisamente la posible enorme dependencia de los resultados en el modelo/cálculo utilizados.