

Simulaciones para un experimento de neutrinos de reactor con Skipper-CCD utilizando los códigos PHITS, MCNP6 y Geant4

P.Bellino¹, B. Cervantes², E. Depaoli³, J. Molina⁴, D. Rodrigues⁵, I. Sidelnik⁶

¹Física Experimental de Reactores, Comisión Nacional de Energía Atómica (pbellino@cnea.gov.ar)

² Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México

³ Departamento de Metrología de Radioisótopos, Comisión Nacional de Energía Atómica

⁴ Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción

⁵ Depto. Física, FCEyN (UBA) - IFIBA - CONICET

⁶ Departamento de Física de Neutrones, CONICET, Centro Atómico Bariloche, CNEA

105° Reunión de la Asociación Física Argentina - Primera RAFA Webinar
24 de septiembre de 2020

- 1 Introducción
- 2 Simulaciones
- 3 Geant4
- 4 MCNP/PHITS
- 5 Análisis
- 6 Conclusiones

ν IOLETA: neutrino Interaction Observation with a Low Energy Threshold Array

- Experimento para medir neutrinos producidos en un reactor nuclear
- Propiedades determinadas a partir de interacciones neutrino-electron y neutrino-núcleo
- Es un esfuerzo colaborativo entre varias instituciones y países
- A corto plazo se instalará un experimento en la Central Nuclear Atucha II
- De particular interés resulta la Dispersión Elástica Coherente neutrino-Núcleo ($\text{CE}\nu\text{NS}$)
- Se utilizarán sensores CCD con tecnología Skipper
- Estos detectores poseen umbrales de detección de 15 eV (4 e^-) y ruido de lectura subelectrónico
- Detección de electrones individuales desde 0 a 100000 e^-

www.violetaexperiment.com

ν IOLETA: neutrino Interaction Observation with a Low Energy Threshold Array

- Experimento para medir neutrinos producidos en un reactor nuclear
- Propiedades determinadas a partir de interacciones neutrino-electron y neutrino-núcleo
- Es un esfuerzo colaborativo entre varias instituciones y países
- A corto plazo se instalará un experimento en la Central Nuclear Atucha II
- De particular interés resulta la Dispersión Elástica Coherente neutrino-Núcleo ($\text{CE}\nu\text{NS}$)
- Se utilizarán sensores CCD con tecnología Skipper
- Estos detectores poseen umbrales de detección de 15 eV (4 e^-) y ruido de lectura subelectrónico
- Detección de electrones individuales desde 0 a 100000 e^-

www.violetaexperiment.com

ν IOLETA: neutrino Interaction Observation with a Low Energy Threshold Array

- Experimento para medir neutrinos producidos en un reactor nuclear
- Propiedades determinadas a partir de interacciones neutrino-electron y neutrino-núcleo
- Es un esfuerzo colaborativo entre varias instituciones y países
- A corto plazo se instalará un experimento en la Central Nuclear Atucha II
- De particular interés resulta la Dispersión Elástica Coherente neutrino-Núcleo ($\text{CE}\nu\text{NS}$)
- Se utilizarán sensores CCD con tecnología Skipper
- Estos detectores poseen umbrales de detección de 15 eV (4 e^-) y ruido de lectura subelectrónico
- Detección de electrones individuales desde 0 a 100000 e^-

www.violetaexperiment.com

ν IOLETA: neutrino Interaction Observation with a Low Energy Threshold Array

- Experimento para medir neutrinos producidos en un reactor nuclear
- Propiedades determinadas a partir de interacciones neutrino-electron y neutrino-núcleo
- Es un esfuerzo colaborativo entre varias instituciones y países
- A corto plazo se instalará un experimento en la Central Nuclear Atucha II
- De particular interés resulta la Dispersión Elástica Coherente neutrino-Núcleo ($\text{CE}\nu\text{NS}$)
- Se utilizarán sensores CCD con tecnología Skipper
- Estos detectores poseen umbrales de detección de 15 eV (4 e^-) y ruido de lectura subelectrónico
- Detección de electrones individuales desde 0 a 100000 e^-

www.violetaexperiment.com

ν IOLETA: neutrino Interaction Observation with a Low Energy Threshold Array

- Experimento para medir neutrinos producidos en un reactor nuclear
- Propiedades determinadas a partir de interacciones neutrino-electron y neutrino-núcleo
- Es un esfuerzo colaborativo entre varias instituciones y países
- A corto plazo se instalará un experimento en la Central Nuclear Atucha II
- De particular interés resulta la Dispersión Elástica Coherente neutrino-Núcleo ($\text{CE}\nu\text{NS}$)
- Se utilizarán sensores CCD con tecnología Skipper
- Estos detectores poseen umbrales de detección de 15 eV (4 e^-) y ruido de lectura subelectrónico
- Detección de electrones individuales desde 0 a 100000 e^-

www.violetaexperiment.com

ν IOLETA: neutrino Interaction Observation with a Low Energy Threshold Array

- Experimento para medir neutrinos producidos en un reactor nuclear
- Propiedades determinadas a partir de interacciones neutrino-electron y neutrino-núcleo
- Es un esfuerzo colaborativo entre varias instituciones y países
- A corto plazo se instalará un experimento en la Central Nuclear Atucha II
- De particular interés resulta la Dispersión Elástica Coherente neutrino-Núcleo ($\text{CE}\nu\text{NS}$)
- Se utilizarán sensores CCD con tecnología Skipper
- Estos detectores poseen umbrales de detección de 15 eV (4 e^-) y ruido de lectura subelectrónico
- Detección de electrones individuales desde 0 a 100000 e^-

www.violetaexperiment.com

ν IOLETA: neutrino Interaction Observation with a Low Energy Threshold Array

- Experimento para medir neutrinos producidos en un reactor nuclear
- Propiedades determinadas a partir de interacciones neutrino-electron y neutrino-núcleo
- Es un esfuerzo colaborativo entre varias instituciones y países
- A corto plazo se instalará un experimento en la Central Nuclear Atucha II
- De particular interés resulta la Dispersión Elástica Coherente neutrino-Núcleo ($\text{CE}\nu\text{NS}$)
- Se utilizarán sensores CCD con tecnología Skipper
- Estos detectores poseen umbrales de detección de 15 eV (4 e^-) y ruido de lectura subelectrónico
- Detección de electrones individuales desde 0 a 100000 e^-

www.violetaexperiment.com

ν IOLETA: neutrino Interaction Observation with a Low Energy Threshold Array

- Experimento para medir neutrinos producidos en un reactor nuclear
- Propiedades determinadas a partir de interacciones neutrino-electron y neutrino-núcleo
- Es un esfuerzo colaborativo entre varias instituciones y países
- A corto plazo se instalará un experimento en la Central Nuclear Atucha II
- De particular interés resulta la Dispersión Elástica Coherente neutrino-Núcleo ($\text{CE}\nu\text{NS}$)
- Se utilizarán sensores CCD con tecnología Skipper
- Estos detectores poseen umbrales de detección de 15 eV (4 e^-) y ruido de lectura subelectrónico
- Detección de electrones individuales desde 0 a 100000 e^-

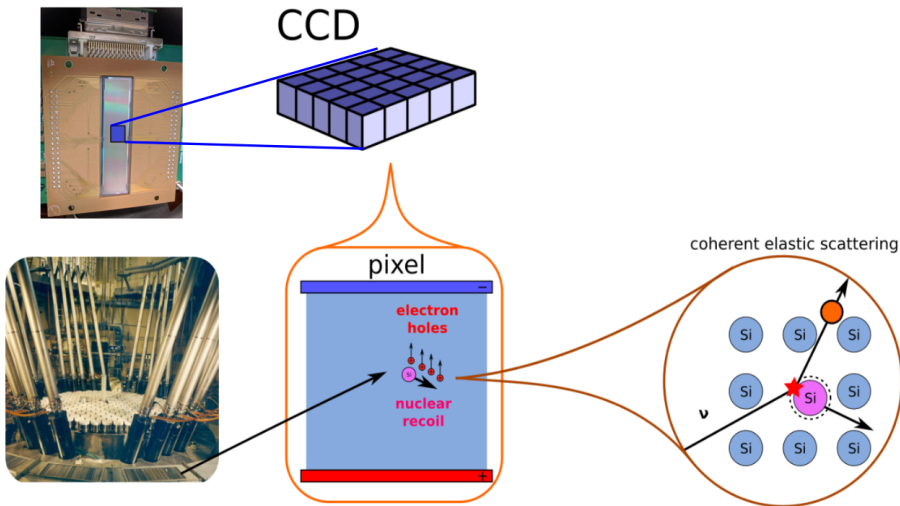
www.violetaexperiment.com

ν IOLETA: neutrino Interaction Observation with a Low Energy Threshold Array

- Experimento para medir neutrinos producidos en un reactor nuclear
- Propiedades determinadas a partir de interacciones neutrino-electron y neutrino-núcleo
- Es un esfuerzo colaborativo entre varias instituciones y países
- A corto plazo se instalará un experimento en la Central Nuclear Atucha II
- De particular interés resulta la Dispersión Elástica Coherente neutrino-Núcleo ($\text{CE}\nu\text{NS}$)
- Se utilizarán sensores CCD con tecnología Skipper
- Estos detectores poseen umbrales de detección de 15 eV (4 e^-) y ruido de lectura subelectrónico
- Detección de electrones individuales desde 0 a 100000 e^-

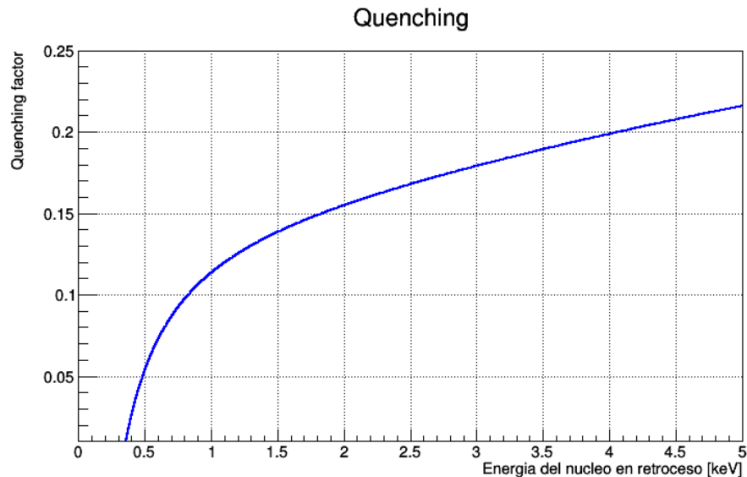
www.violetaexperiment.com

Mecanismo de detección



Factor de quenching

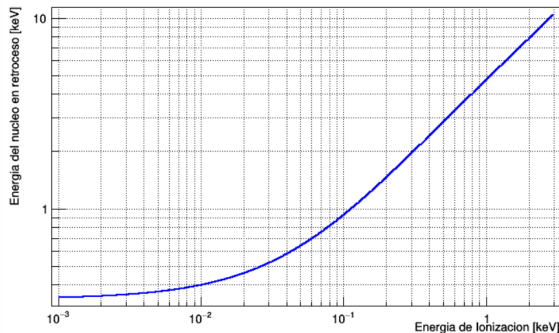
¿Qué fracción de energía del núcleo en retroceso se transfiere a electrones/huecos?



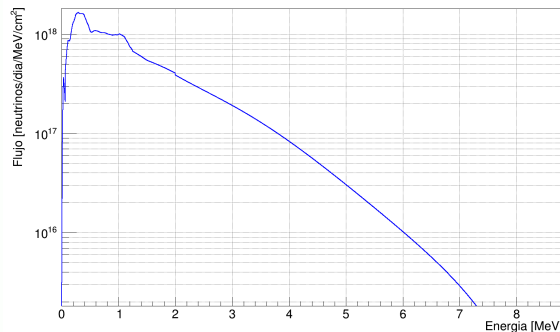
Importancia de la determinación del factor de quenching

Si el quenching a baja energía de recoil no es tan bajo como estamos asumiendo, entonces el número de cargas ionizadas será mayor al esperado y eso significa más señal y por lo tanto más sensibilidad para todas las interacciones que se quieren estudiar

Quenching

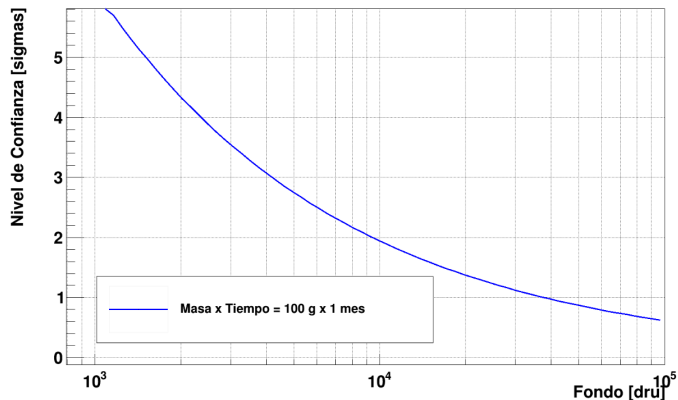


Espectro de neutrinos de CNA II



Importancia de la reducción del fondo

Nivel de confianza para la observación de $\text{CE}\nu\text{NS}$ a 12 m del núcleo de Atucha II, 2000 MW, integrando hasta 275 eV de energía de recoil



(dru = *differential rate unit* = eventos por día por keV por kg)

Objetivos de las simulaciones

I) Determinación del factor de quenching

- Modelar experimentos con Skippers-CCD con el mayor detalle posible
- Estimar el factor de quenching al comparar experimentos y simulación

II) Optimización del blindaje del experimento

- Reducir la radiación de fondo que le llegue al detector
- Limitación de tamaño y materiales debido a estar en una central nuclear
- Optimización de materiales para blindaje de campos mixtos

Herramientas de simulación

- Será necesario simular partículas con un amplio rango de energías (eV - GeV)
- Una opción es trabajar con distintos programas para distintos rangos
- Para validar los modelos y programas se pueden comparar entre ellos (en los rangos donde solapan el rango de trabajo) y también comparar con datos experimentales
- En esta charla se mostrarán los avances realizados para validar el modelado de un experimento con Skippers-CCD con los programas Geant4, MCNP y PHITS
- Se comienza trabajando en el rango de energías más cómodo (keV - MeV) donde estos programas suelen funcionar muy bien

Herramientas de simulación

- Será necesario simular partículas con un amplio rango de energías (eV - GeV)
- Una opción es trabajar con distintos programas para distintos rangos
- Para validar los modelos y programas se pueden comparar entre ellos (en los rangos donde solapan el rango de trabajo) y también comparar con datos experimentales
- En esta charla se mostrarán los avances realizados para validar el modelado de un experimento con Skippers-CCD con los programas Geant4, MCNP y PHITS
- Se comienza trabajando en el rango de energías más cómodo (keV - MeV) donde estos programas suelen funcionar muy bien

Herramientas de simulación

- Será necesario simular partículas con un amplio rango de energías (eV - GeV)
- Una opción es trabajar con distintos programas para distintos rangos
- Para validar los modelos y programas se pueden comparar entre ellos (en los rangos donde solapan el rango de trabajo) y también comparar con datos experimentales
- En esta charla se mostrarán los avances realizados para validar el modelado de un experimento con Skippers-CCD con los programas Geant4, MCNP y PHITS
- Se comienza trabajando en el rango de energías más cómodo (keV - MeV) donde estos programas suelen funcionar muy bien

Herramientas de simulación

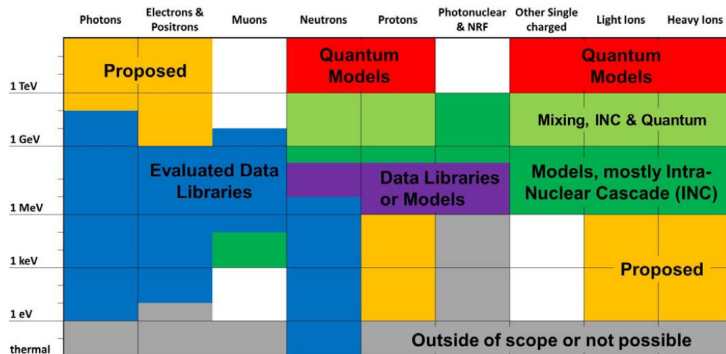
- Será necesario simular partículas con un amplio rango de energías (eV - GeV)
- Una opción es trabajar con distintos programas para distintos rangos
- Para validar los modelos y programas se pueden comparar entre ellos (en los rangos donde solapan el rango de trabajo) y también comparar con datos experimentales
- En esta charla se mostrarán los avances realizados para validar el modelado de un experimento con Skippers-CCD con los programas Geant4, MCNP y PHITS
- Se comienza trabajando en el rango de energías más cómodo (keV - MeV) donde estos programas suelen funcionar muy bien

Herramientas de simulación

- Será necesario simular partículas con un amplio rango de energías (eV - GeV)
- Una opción es trabajar con distintos programas para distintos rangos
- Para validar los modelos y programas se pueden comparar entre ellos (en los rangos donde solapan el rango de trabajo) y también comparar con datos experimentales
- En esta charla se mostrarán los avances realizados para validar el modelado de un experimento con Skippers-CCD con los programas Geant4, MCNP y PHITS
- Se comienza trabajando en el rango de energías más cómodo (keV - MeV) donde estos programas suelen funcionar muy bien

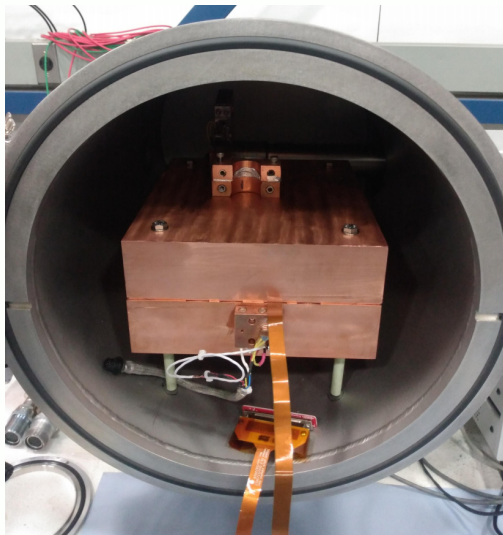
Rangos de trabajo de los programas

Energías y partículas simulados por MCNP6



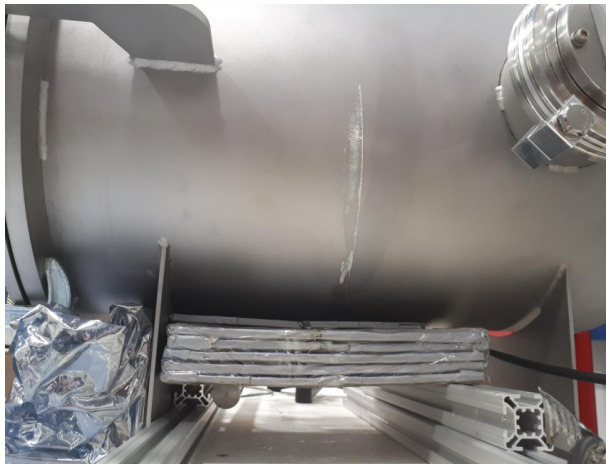
- Tanto PHITS como MCNP6 simulan fotones y electrones hasta 1keV (simulación actual).
- Con MCNP6 se puede bajar hasta 1eV (fotones) y 10eV (electrones).
- Geant4 puede utilizar al código PENELOPE para simular bajas energías.

Experimento realizado



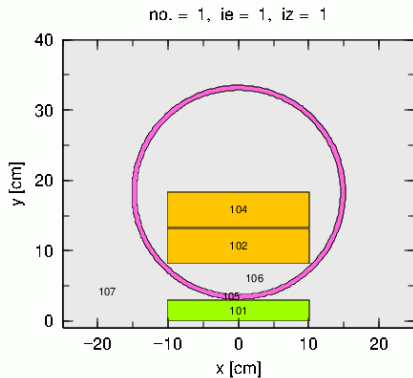
- Detector de silicio ($9\text{cm} \times 3\text{cm} \times 675\mu\text{m}$)
- Dos bloques de cobre rodeando al detector, como blindaje ($12'' \times 8'' \times 2''$)
- Dewar de acero inoxidable ($\phi=10''$, $e=0.7\text{cm}$)

Experimento realizado

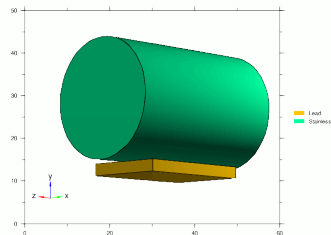
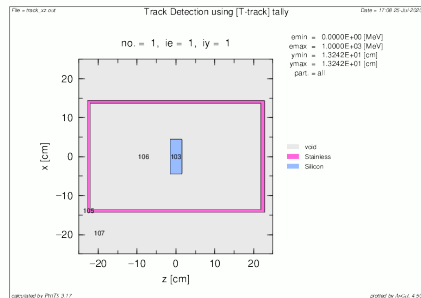


- Blindaje de plomo (3cm)
- Fuente de fisiones espontáneas de ^{252}Cf ($1.2\mu\text{Ci}$) debajo del plomo
- Plomo como blindaje para los gammas producidos por la fuente

Simulación del experimento



emin = 0.0000E+00 [MeV]
emax = 1.0000E+03 [MeV]
zmin = -2.3000E+01 [cm]
zmax = 2.3000E+01 [cm]
part. = all



Metodología

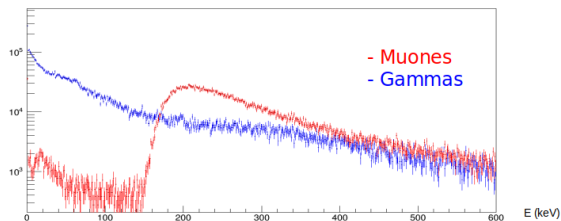
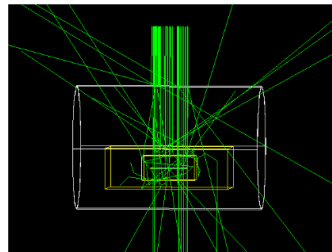
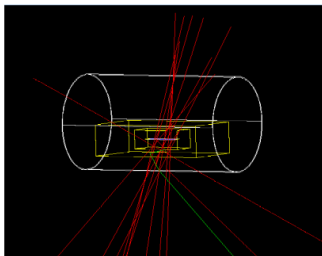
G4 simulation
in CCD (root file)

Generation of
fits files from
2 dimensional
histos

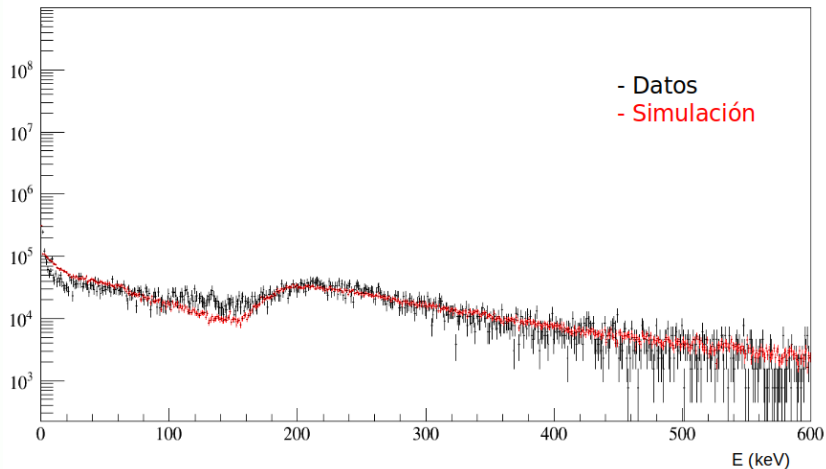
Reconstruction
or extraction as
Normal data



Estudio del fondo



Estudio del fondo



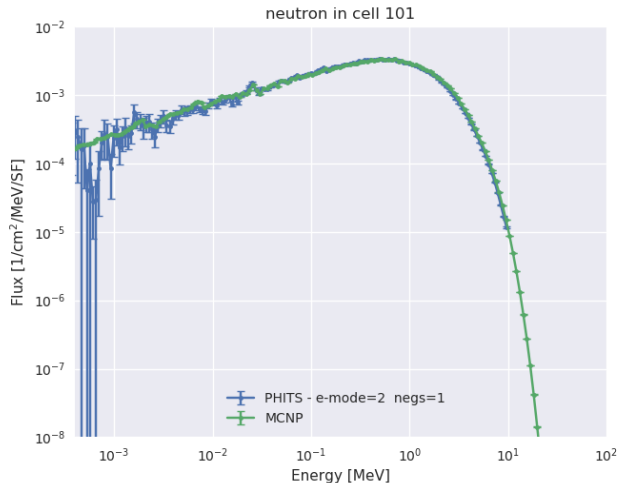
Simulación con la fuente de ^{252}Cf

Imagen simulada de los eventos producidos por gammas de la fuente sobre el detector



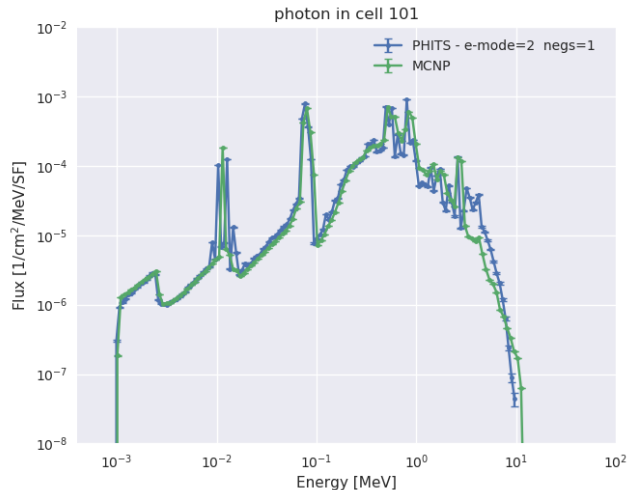
Comparación PHITS/MCNP

Flujo de neutrones en el plomo

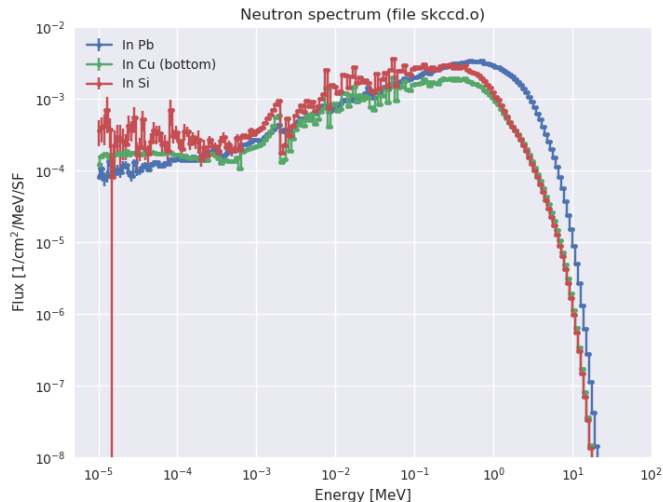


Comparación PHITS/MCNP

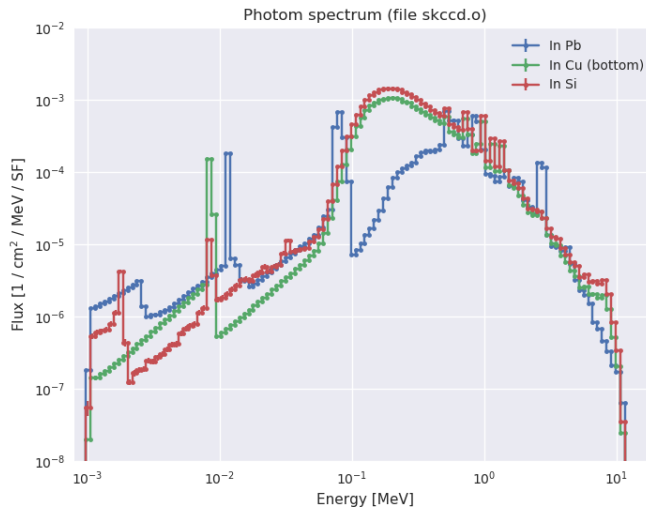
Flujo de fotones en el plomo



Flujo de neutrones

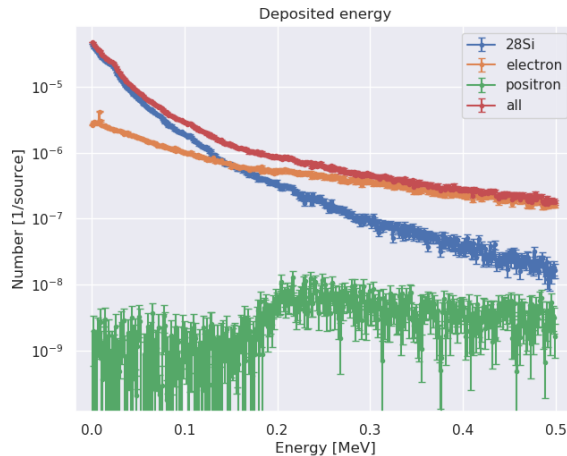


Flujo de fotones

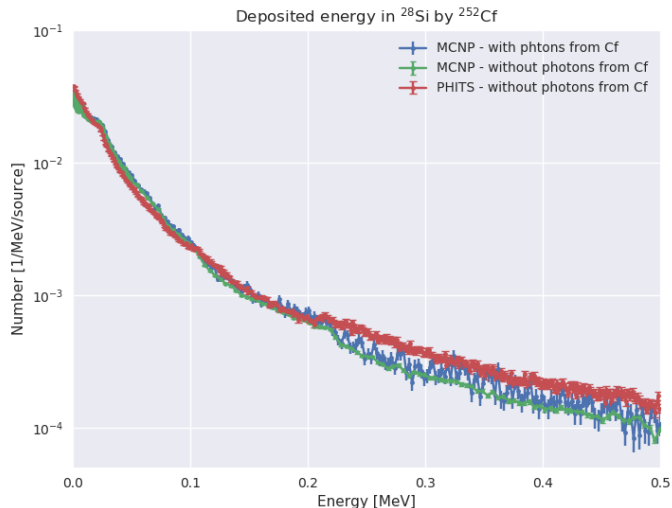


Energía depositada en Si

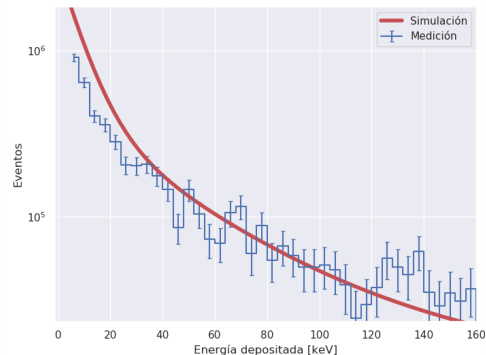
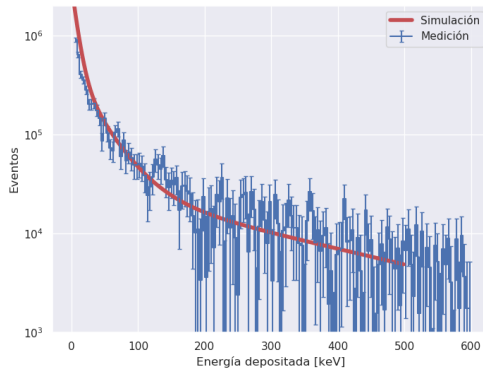
Deposición de energía debido a distintas partículas obtenidas con PHITS



Energía depositada en Si

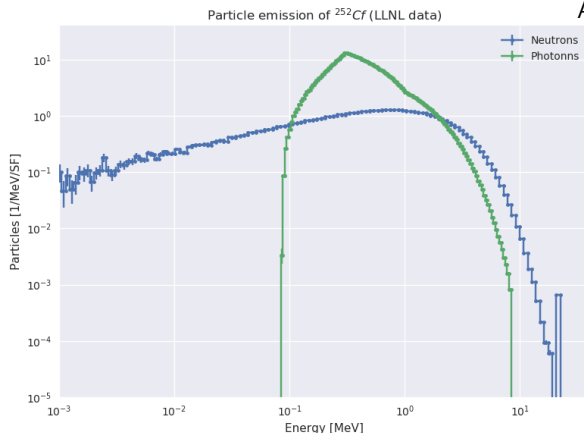


Comparación con el experimento



Fotones emitidos por la fuente de ^{252}Cf

- Por cada fisión espontánea se emiten: $\bar{\nu}_n = 3,7$ y $\bar{\nu}_p = 8,3$
- Espectro de fisión (Watt) para neutrones ($\bar{E} \approx 2\text{MeV}$)
- Se asume una fuente sin quemado

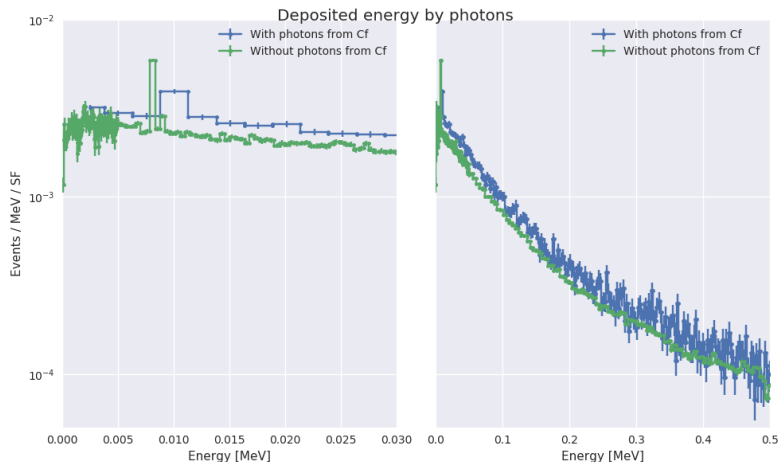


Algunas preguntas:

- ¿Cuánto influyen estos fotones en el detector?
- Por otro lado, los neutrones generan fotones al interactuar con el resto de los materiales
- ¿Qué contribución de fotones es más importante?

Algunas respuestas

- Se hicieron dos simulaciones (con MCNP), con y sin los fotones de la fuente
- Se muestra la energía depositada en Si por los fotones



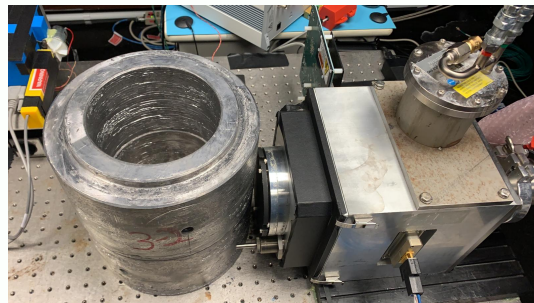
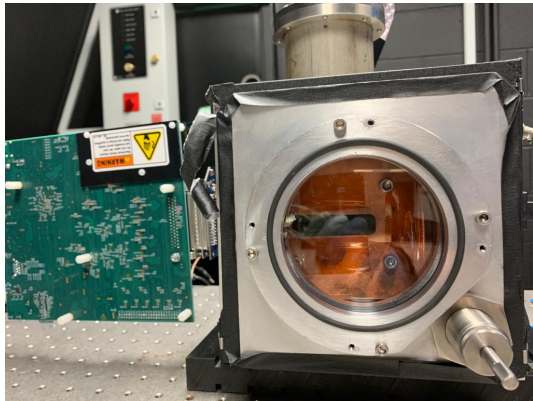
Conclusiones preliminares

- Generación de imágenes sintéticas y posterior extracción de eventos en Geant4
- Simulación del espectro de fondo (gammas y muones) en Geant4
- Coincidencia entre las simulaciones con MCNP/PHITS del experimento
- Coincidencia con los datos experimentales a altas energías
- Análisis de la contribución de fotones provenientes de la fuente de californio

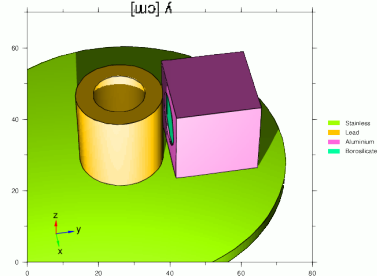
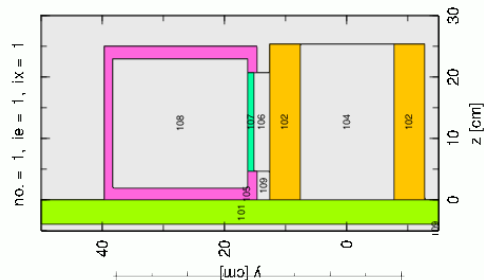
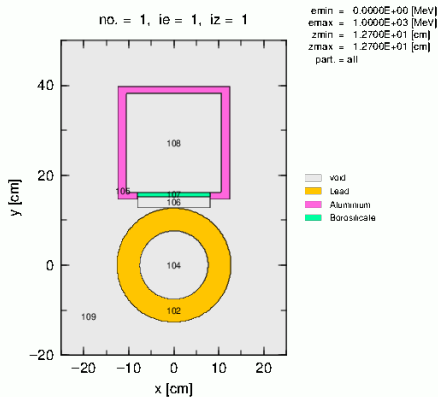
Próximos pasos

- Agregar la contribución del fondo (altas energías) en MCNP y PHITS
- Incorporar la fuente de ^{252}Cf a la simulación de Geant4 (en progreso)
- Incorporar bibliotecas para modelar interacciones a bajas energías
- Realizar una simulación más detallada en MCNP
- Agregar fuente de fotones en PHITS
- Optimizar la paralelización en MCNP
- Prueba de geometrías y materiales para optimizar el blindaje

Próximas pasos



Próximas pasos



Muchas gracias