



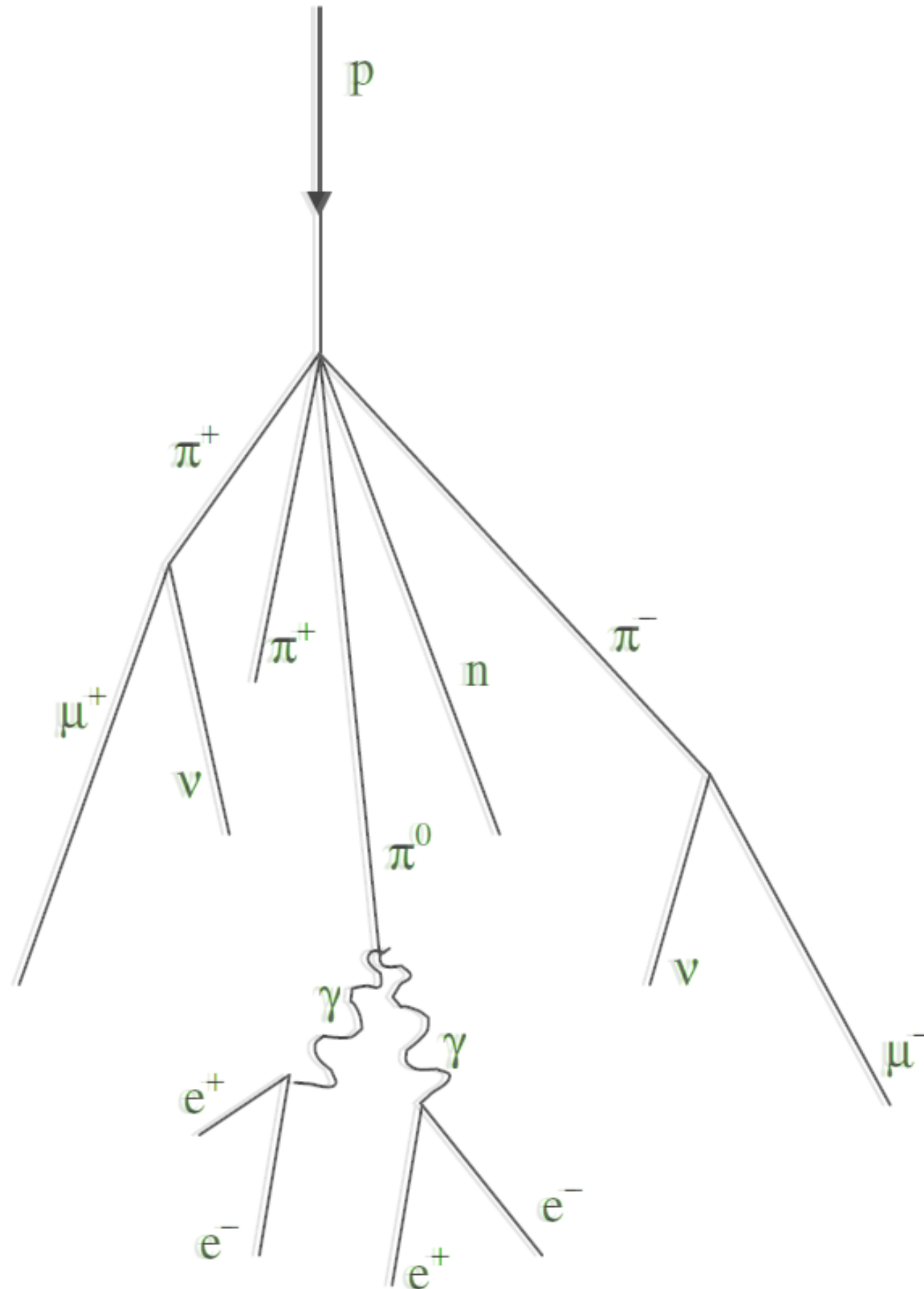
2do Encuentro de la Red Iberoamericana CyTED del
Observatorio Gigante de América Latina (LAGO)

Universidad Industrial de Santander
Bucaramanga, 03 de Diciembre

Trabajo Especial de Grado de Maestría

“Caracterización de un detector de
muones atmosférico basado en
sensores de centelleo”

Ponente: Lic. Clarizio, V.



El Universo Cósmico

EXPLORANDO LOS RAYOS CÓSMICOS Y SU IMPORTANCIA

Los **rayos cósmicos** son partículas de alta energía que viajan a través del espacio, desempeñando un papel crucial en **nuestro entendimiento** del universo y su evolución a lo largo del tiempo.

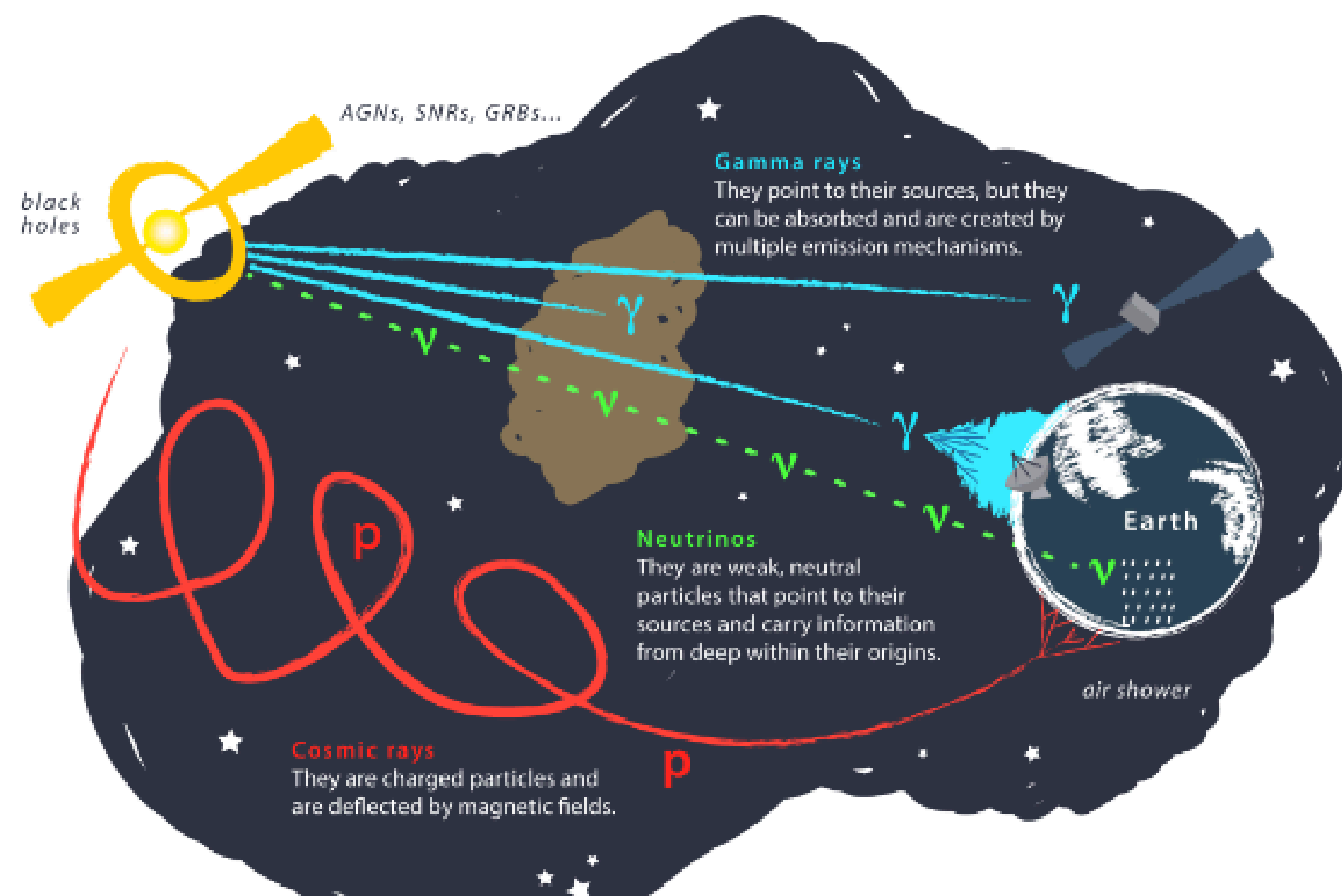
¿Por qué es importante el estudio de rayos cósmicos?



Fundamentos Científicos de Rayos Cósmicos

Origen y Composición

Los rayos cósmicos provienen de **fuentes astrofísicas**. Su composición es mayoritariamente descrita por protones (89%), núcleos de He (9%), electrones (1%) y núcleos pesados (menos del 1%).

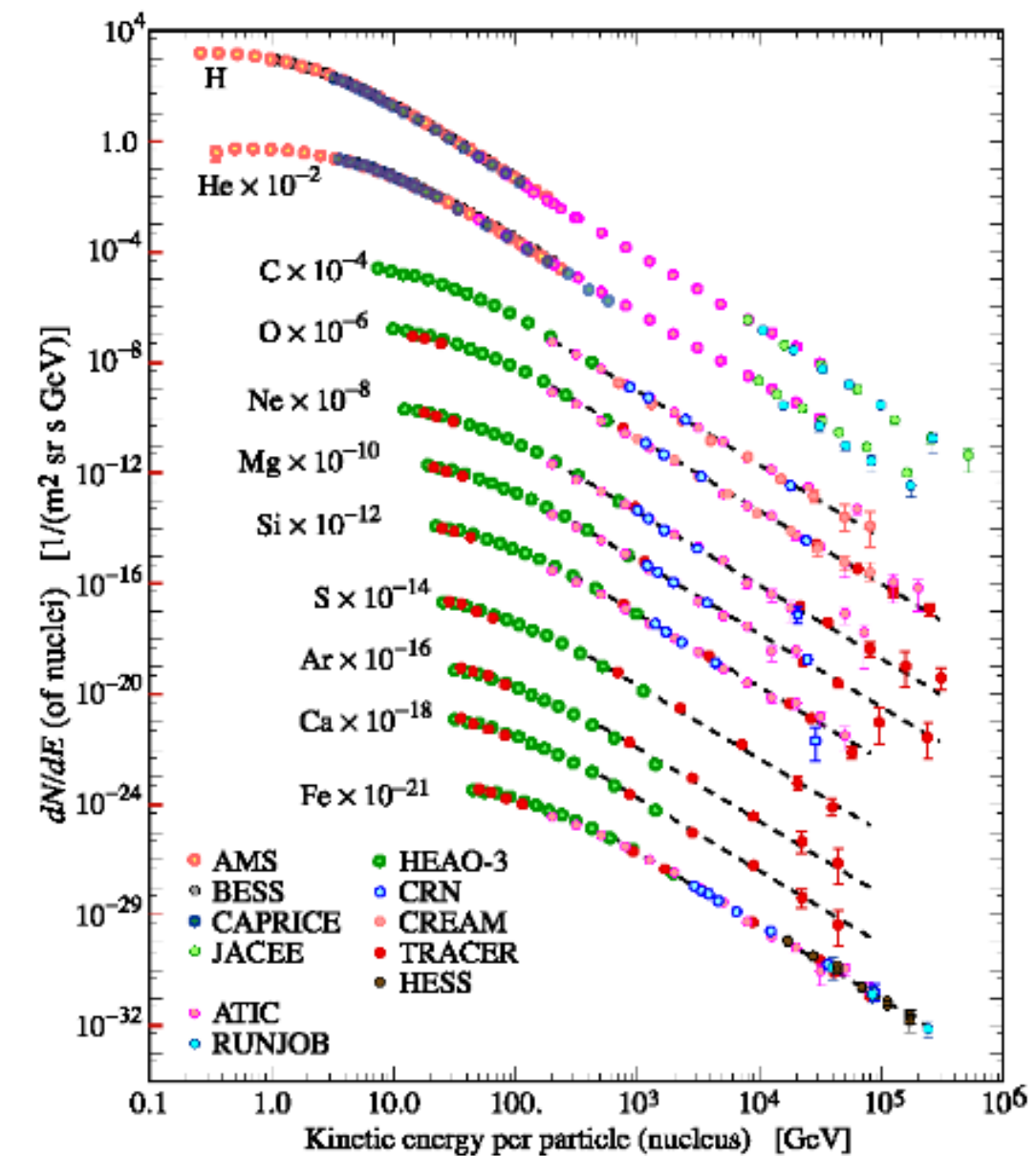


Fundamentos Científicos de Rayos Cósmicos

Espectro de Energía

Los rayos cósmicos poseen energías dentro de un rango muy amplio dependiendo de cual sea el origen de los mismos (galácticos o extragalácticos). El espectro de energía de los primarios desde los GeV hasta los cientos de TeV está descrito por:

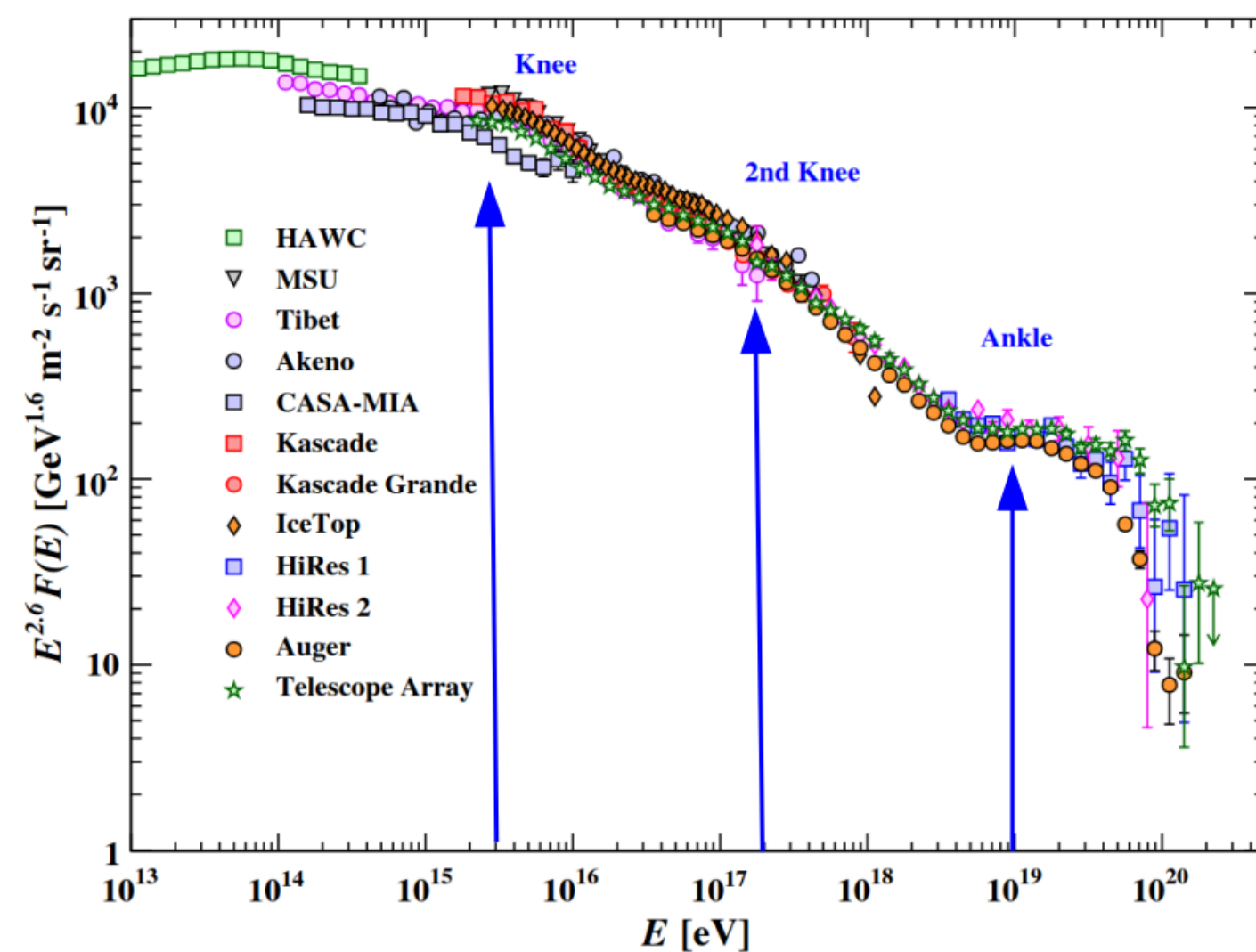
$$I(E) \approx 1.8 \times 10^4 (E/1 \text{ GeV})^{-2.7} \frac{\text{nucleons}}{\text{m}^2 \text{ s sr GeV}}$$



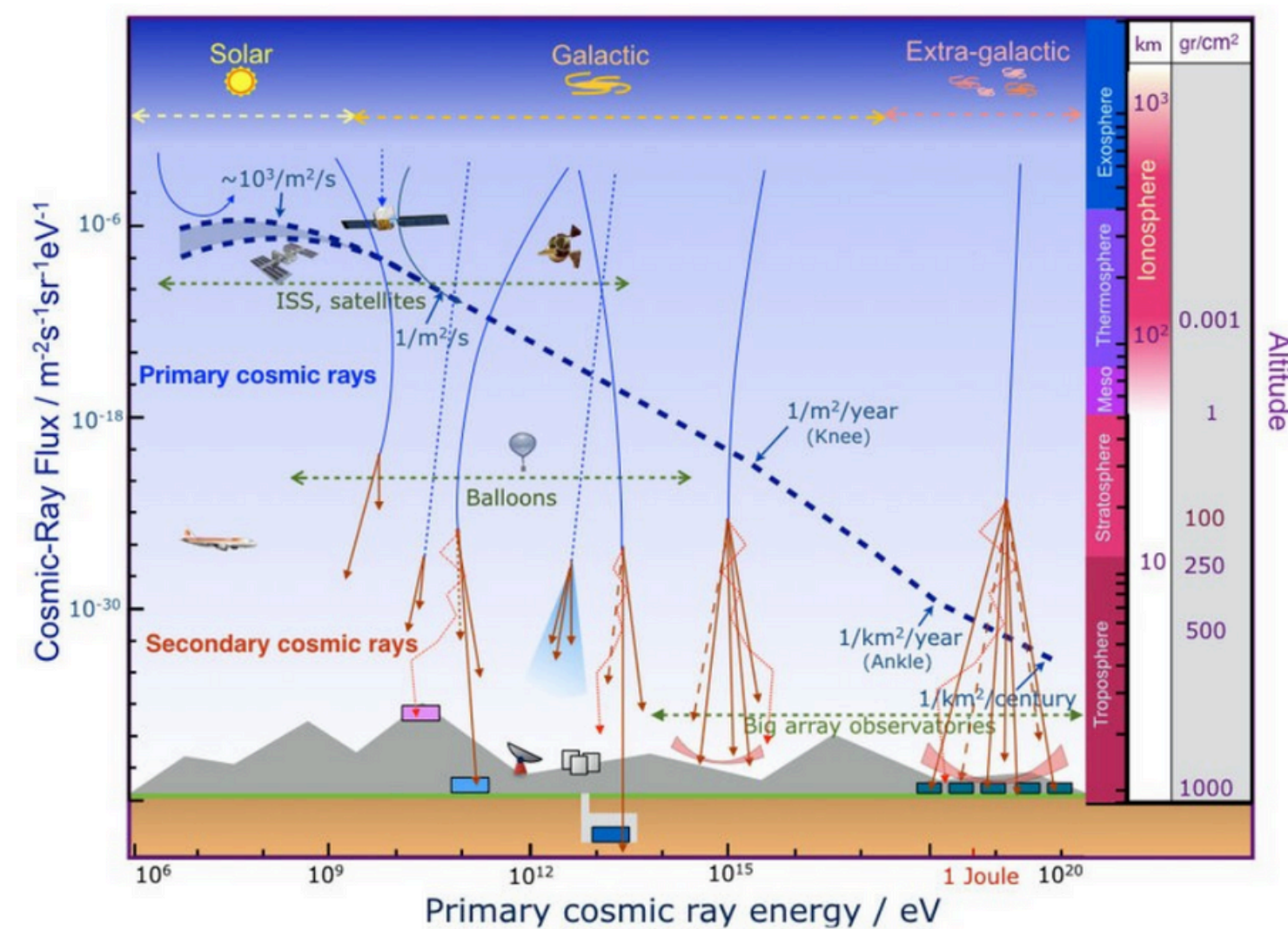
F0. Flujo de rayos cósmicos primarios en función de su energía de arribo

Fundamentos Científicos de Rayos Cósmicos

Espectro de Energía



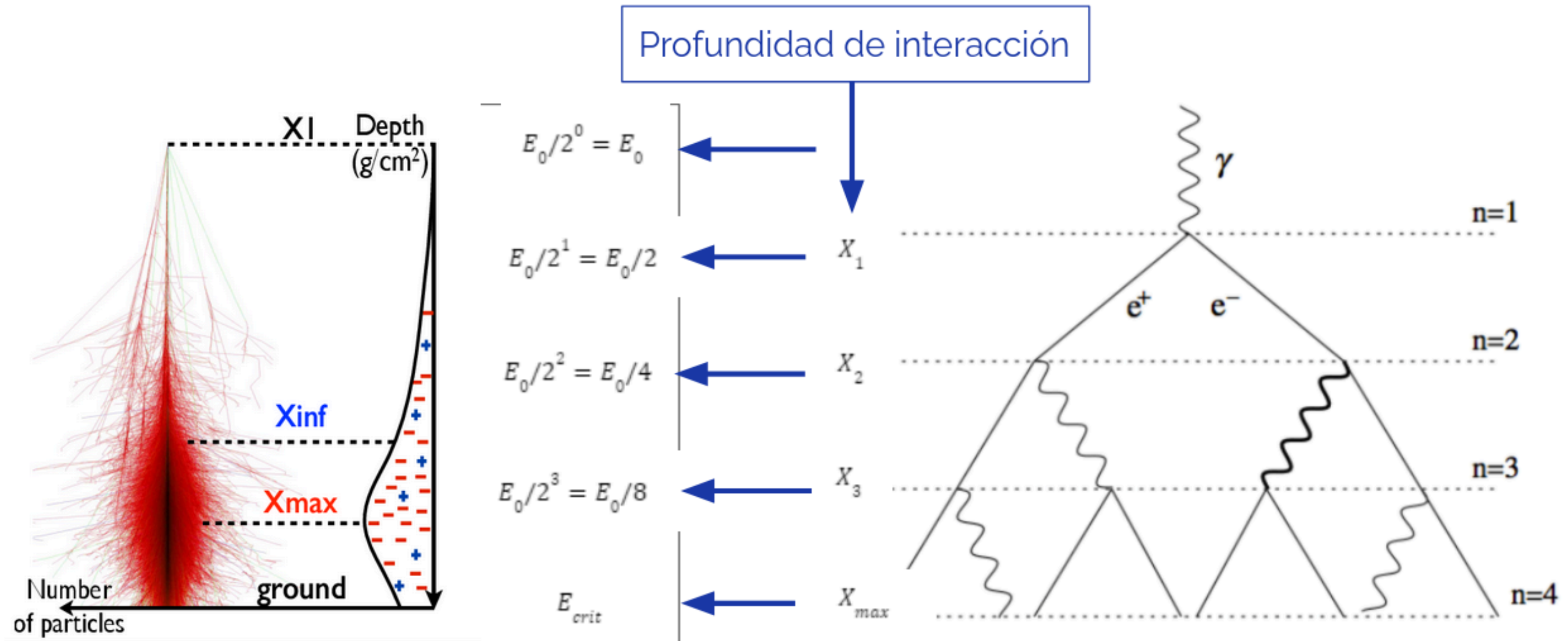
F1. Etapas en el espectro de energía



F2. Esquema de RC en la atmósfera terrestre

Fundamentos Científicos de Rayos Cósmicos

Distribución espacial de RC: Modelo de Heitler



Fundamentos Científicos de Rayos Cósmicos



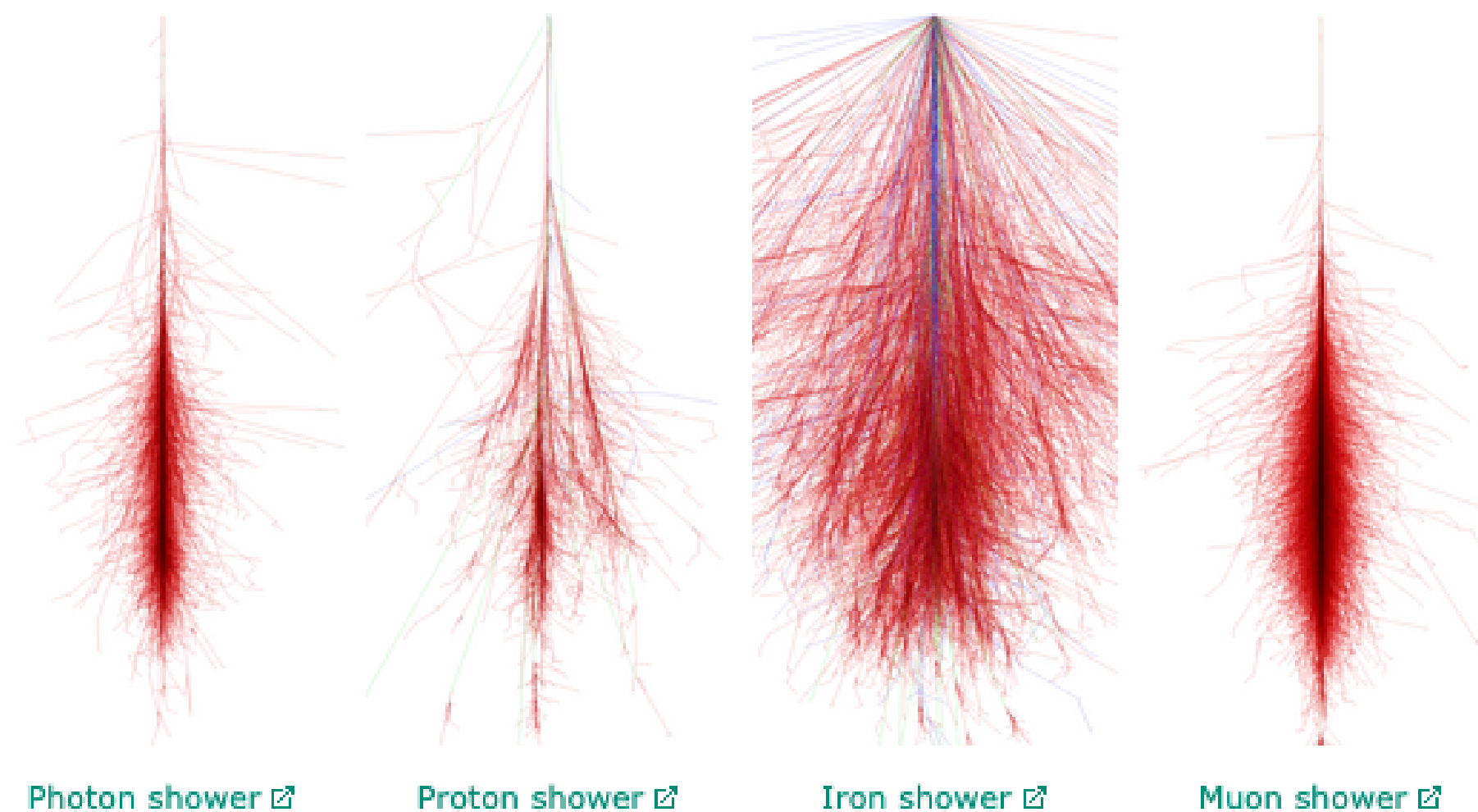
Producción de RC secundarios

Se producen **Extensive Air Showers (EAS)** para energías alrededor de los cientos de PeV de los rayos cósmicos primarios.

La mayoría de estas partículas producidas decaen durante su viaje en la atmósfera.

Se generan **3 cascadas**:

- Hadrónica
- Electromagnética
- Muónica



F3. Simulaciones en CORSIKA de las EAS producidas por diferentes RC primarios

Muones cósmicos

Descripción general

- **Carga y masa:** $-e$, $\sim 207 m_e$
- **Vida media:** $2.2 \mu s$
- Emiten menos *Bremsstrahlung* que los electrones, por lo que tienen mayor capacidad de penetración

$$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu [63.43 \%]$$

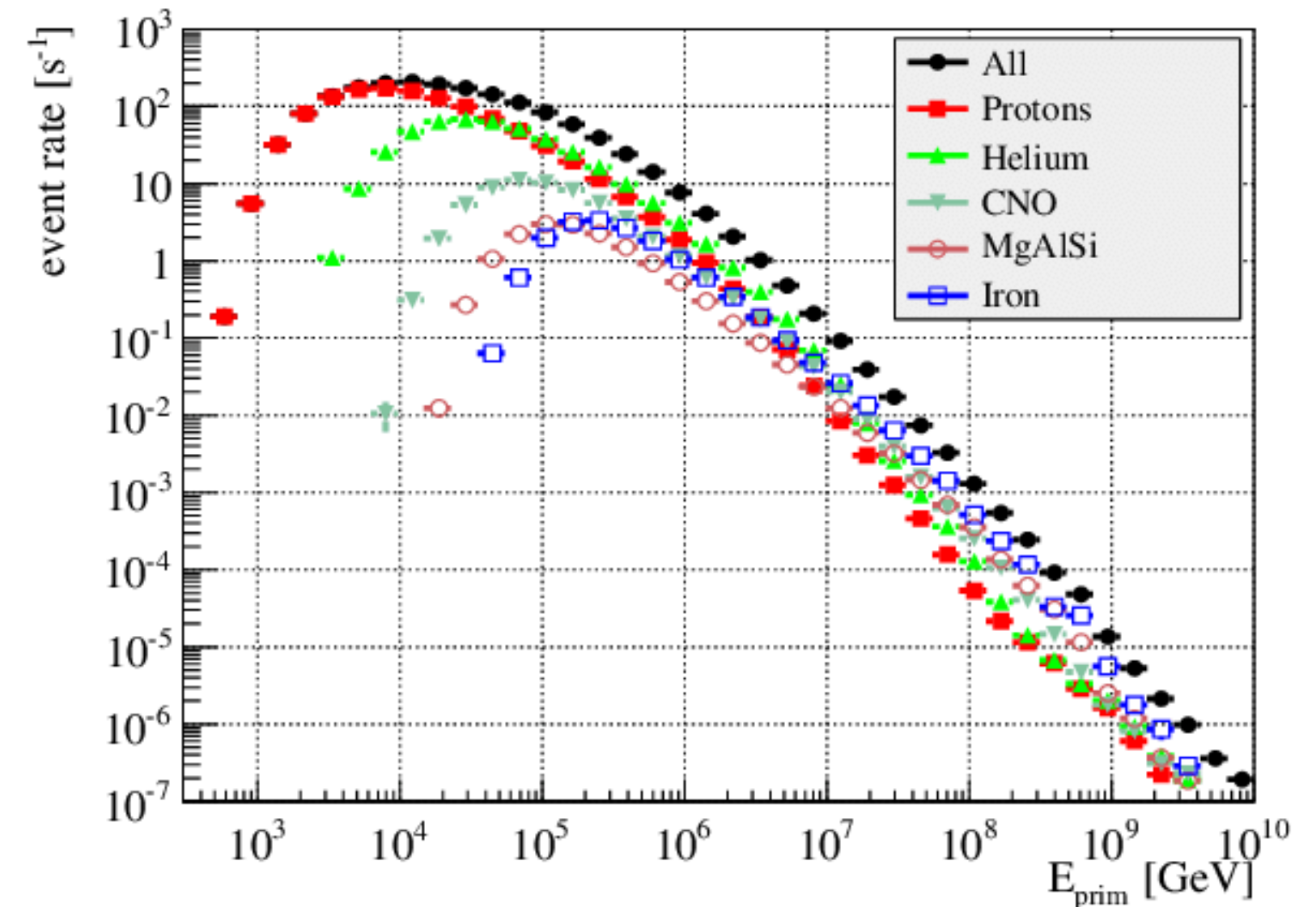
$$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 [21.13 \%]$$

$$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^- [5.6 \%]$$

$$K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e [5.6 \%]$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu [99.99 \%]$$

$$\pi^+ \rightarrow \gamma e^+ \nu_e [0.01 \%]$$



F4. Simulación del flujo de muones cósmicos en función del RC primario [1]

Muones cósmicos

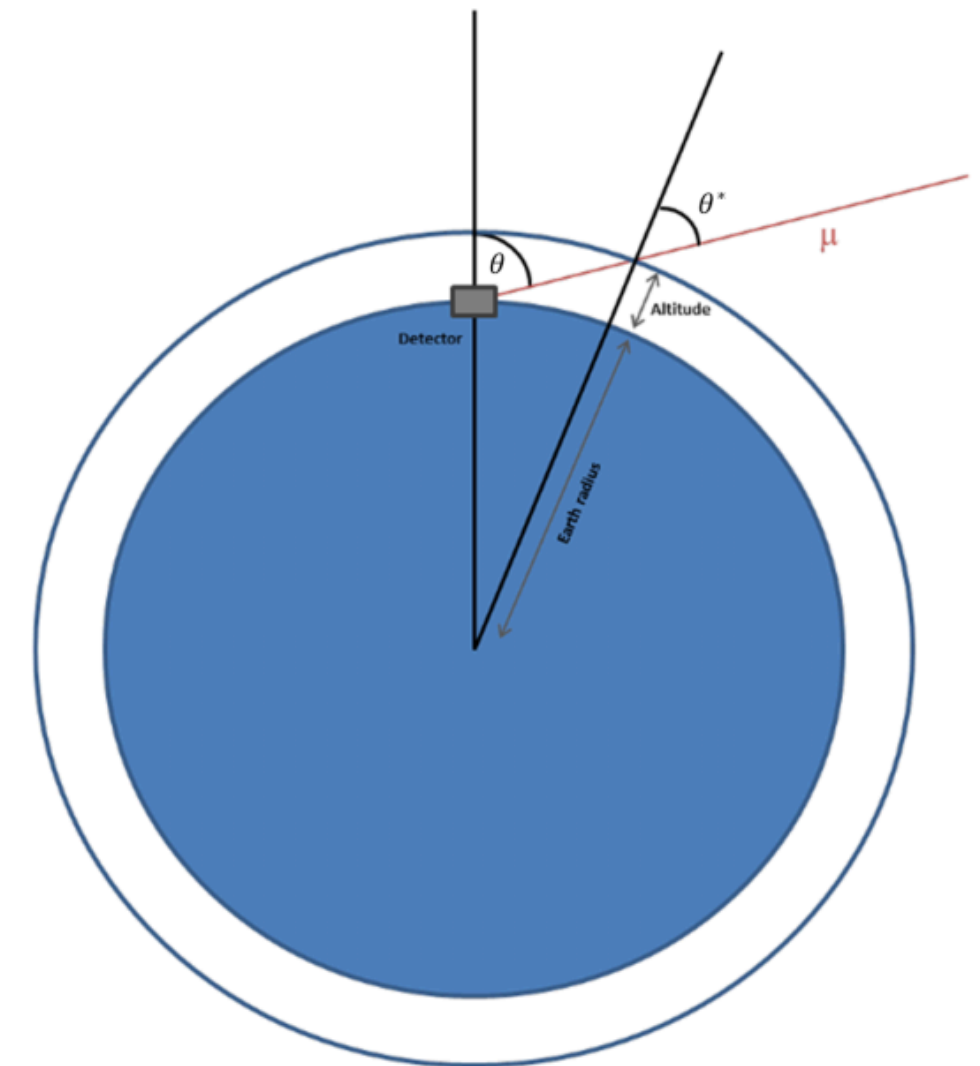
Espectro de energía

Para modelar la distribución de la energía de muones cósmicos, recurrimos a la **fórmula de Gaisser**:

$$\frac{dN_{\mu}}{dE_{\mu}} = \frac{0,14E_{\mu}^{-2,7}}{cm^2s sr GeV} \left[\frac{1}{1 + \frac{1,11E_{\mu} \cos(\theta)}{115GeV}} + \frac{0,054}{1 + \frac{1,11E_{\mu} \cos(\theta)}{850GeV}} \right]$$

$$\cos(\theta^*) = \sqrt{\frac{x^2 + p_1^2 + p_2x^{p_3} + p_4x^{p_5}}{1 + p_1^2 + p_2 + p_4}} \quad \begin{matrix} x = \cos(\theta) ; p_1 = 0,102573; p_2 = -0,068287 \\ p_3 = 0,958633; p_4 = 0,0407253; p_5 = 0,817285 \end{matrix}$$

$$\frac{dN_{\mu}}{dE_{\mu}} = A_T \frac{0,14E_{\mu}^{-2,7}}{cm^2s sr GeV} \left[\frac{1}{1 + \frac{1,11E_{\mu} \cos(\theta^*)}{115GeV}} + \frac{0,054}{1 + \frac{1,11E_{\mu} \cos(\theta^*)}{850GeV}} + r_c \right]$$



F5. Representación del modelo de la tierra curva donde el ángulo cenital θ es mayor a θ^* del muón incidente bajo esta condición. [2]

Muones cósmicos

Espectro de energía

La distribución angular de los muones cósmicos a una altitud de pocos cientos de metros relativa al nivel del mar es proporcional al **coseno cuadrado** del ángulo cenital de incidencia.

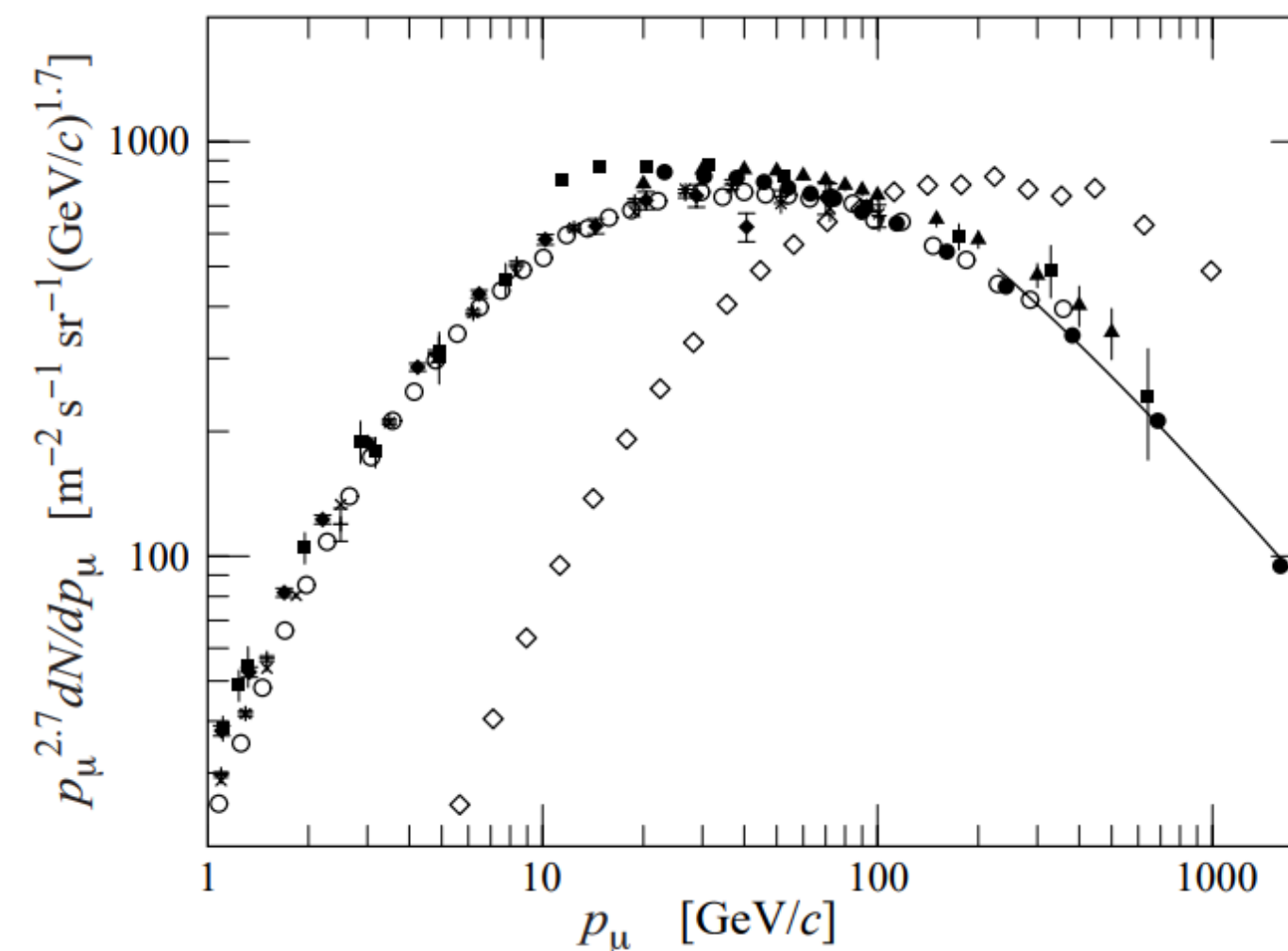
- Ángulos cercanos a 0° (cuadros negros)
- Ángulos cercanos a 75° (cuadros blancos)

Flujo de muones verticales a la profundidad atmosférica máxima:

$$X_{max} = 300 \text{ g/cm}^2 \rightarrow dN/dE_\mu \approx 200 \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

Flujo de muones al nivel del mar:

$$\text{Mean Sea Level} \rightarrow dN/dE_\mu \approx 90 \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1}$$



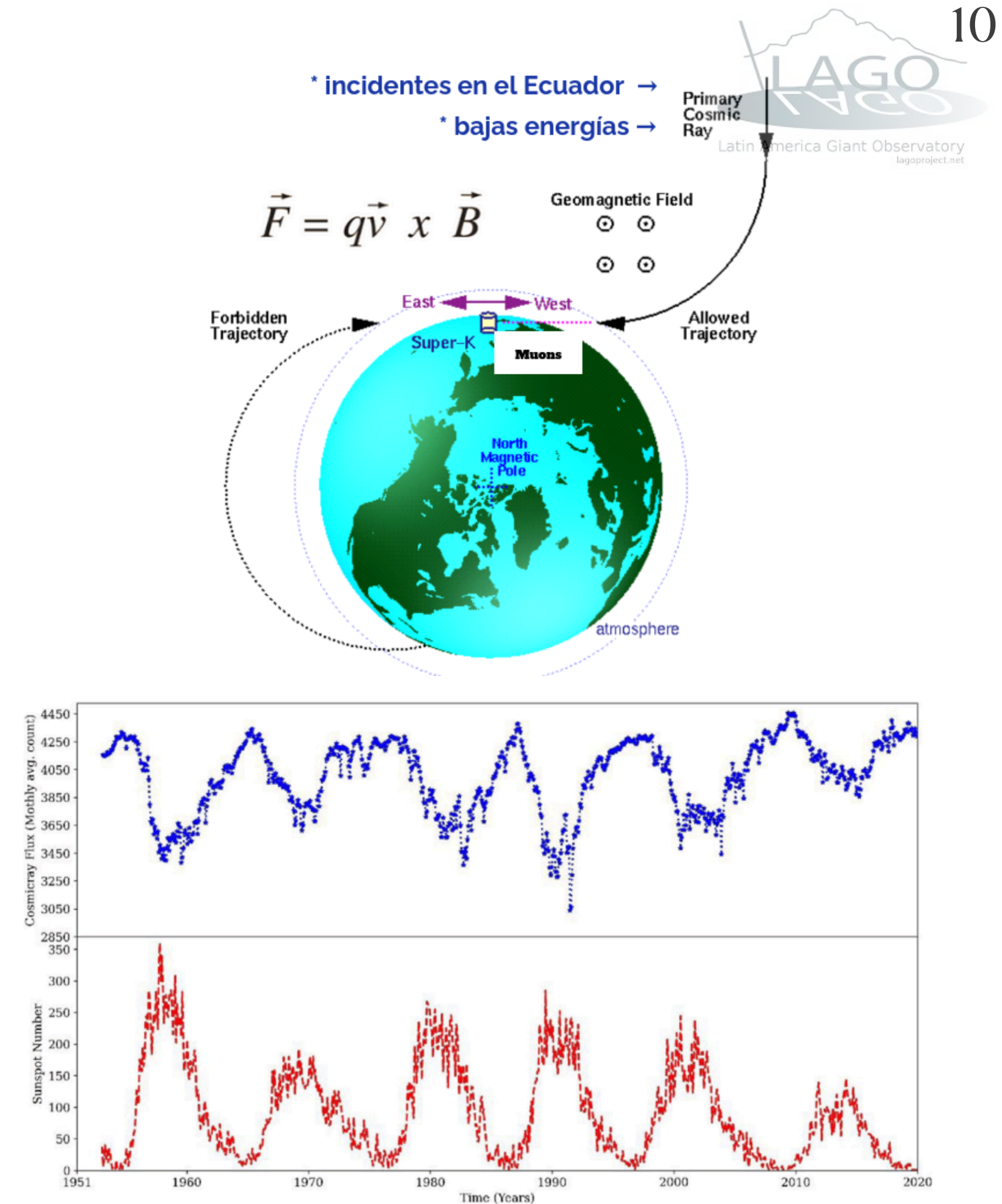
F6. Espectro de energía de muones cósmicos en relación al ángulo de incidencia. [1]

Muones cósmicos

Factores atmosféricos

Existen fenómenos atmosféricos capaces de influenciar el flujo de muones detectados en la superficie terrestre.

- **Efecto del campo geomagnético:** Afecta la incidencia de partículas cósmicas cargadas, en particular, a los protones primarios.
- **Efecto de la temporada atmosférica:** Las variaciones en temperatura producen cambios barométricos que afectan a su vez negativamente el conteo de muones.
- **Interacción con la materia atmosférica:** Los muones pierden aproximadamente 2 MeV por g/cm² en interacciones con las partículas de la atmósfera. Considerando que la profundidad atmosférica es de aprox. 1000cm², los muones pierden 2 GeV antes de llegar a la superficie terrestre.



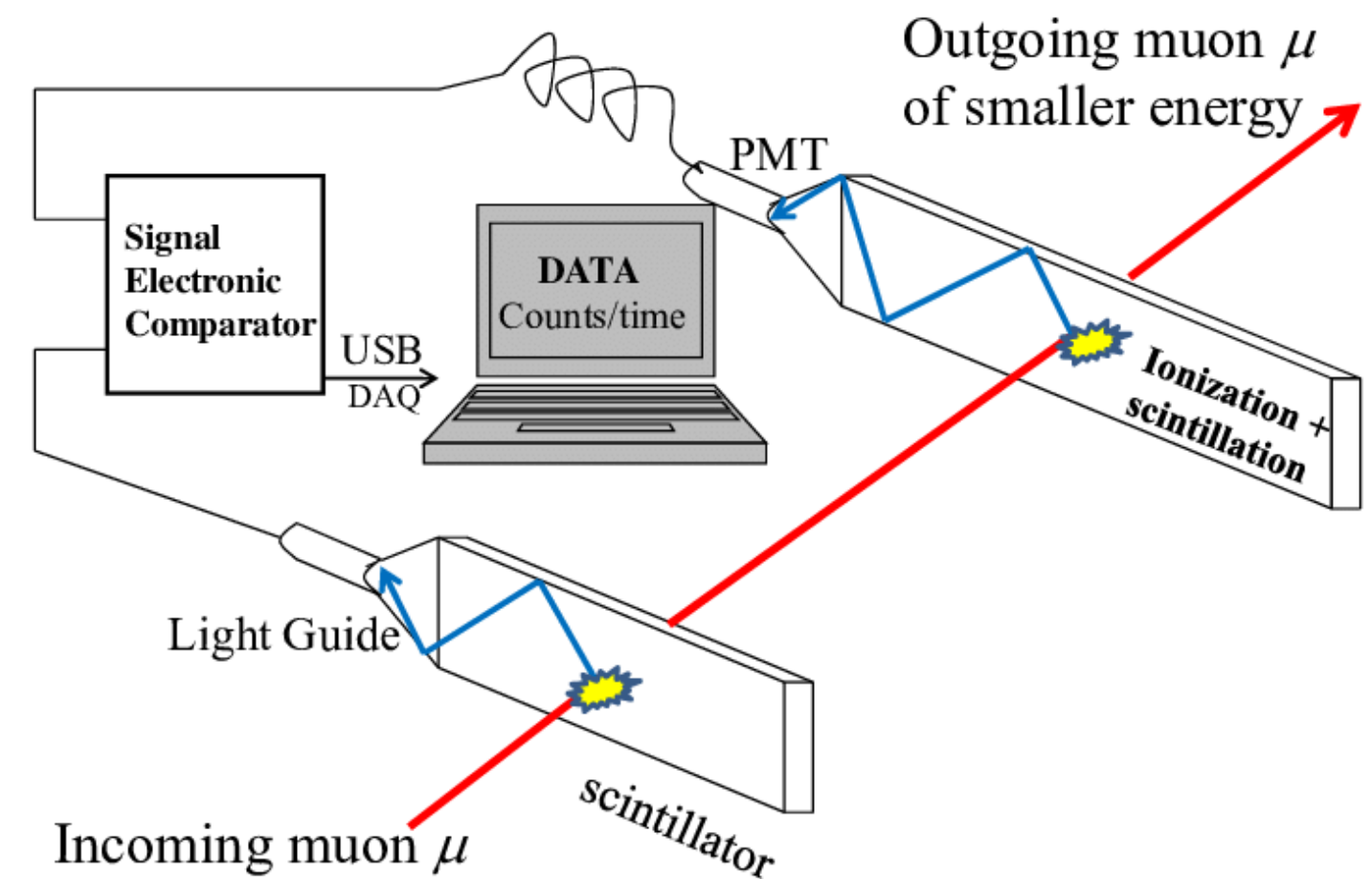
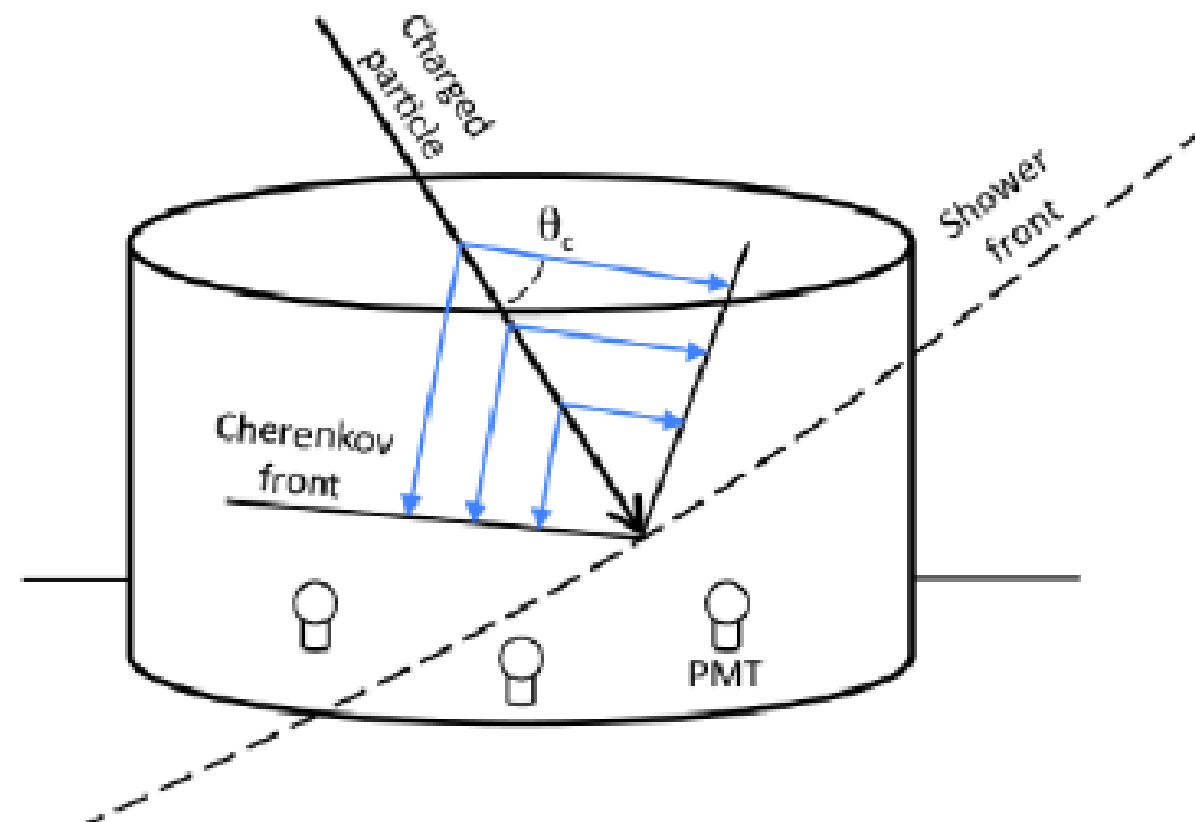
F7. Modulación del flujo de RC por los ciclos solares [4]

Muones cósmicos

Detección de muones

Debido a que los muones pueden penetrar varios metros de material sin perder tanta energía, es necesario recurrir a dispositivos capaces de registrar los fenómenos resultantes de la interacción de dichas partículas con los materiales de los detectores.

- Detectores de emulsión nuclear
- Detectores gaseosos
- Detectores de centelleo
- Detectores Chérenkov



Esquema general de un **hodoscopio de muones**

Muones cósmicos

Muografía

Es una técnica de generación de imagen **no invasiva** que recurre a la detección y posterior análisis de muones cósmicos luego de su interacción con los objetivos de estudio.

Muografía por Absorción

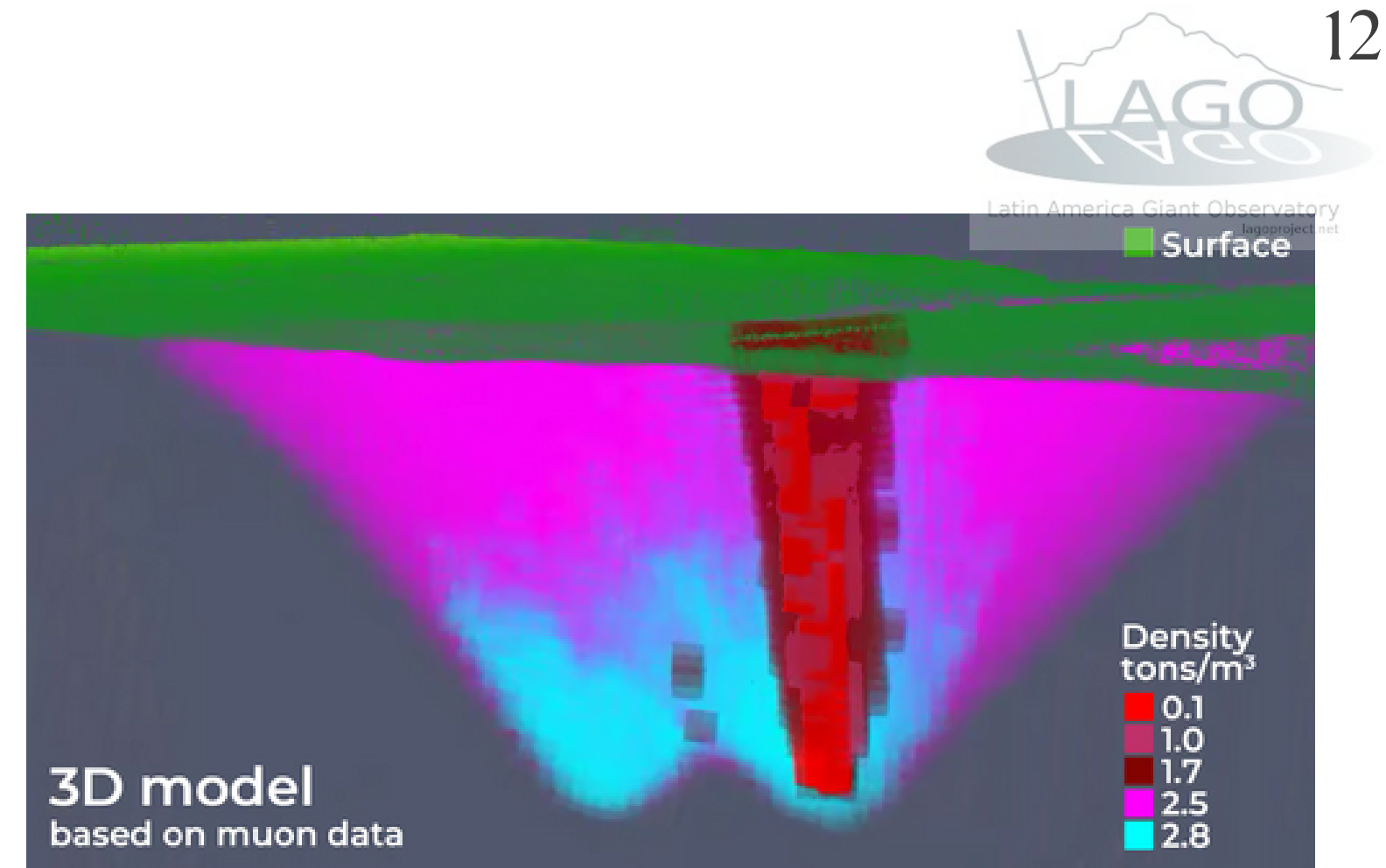


- Grandes volúmenes y cavidades
- Atenuación del flujo de muones
- Requiere mín. 2 hodoscopios

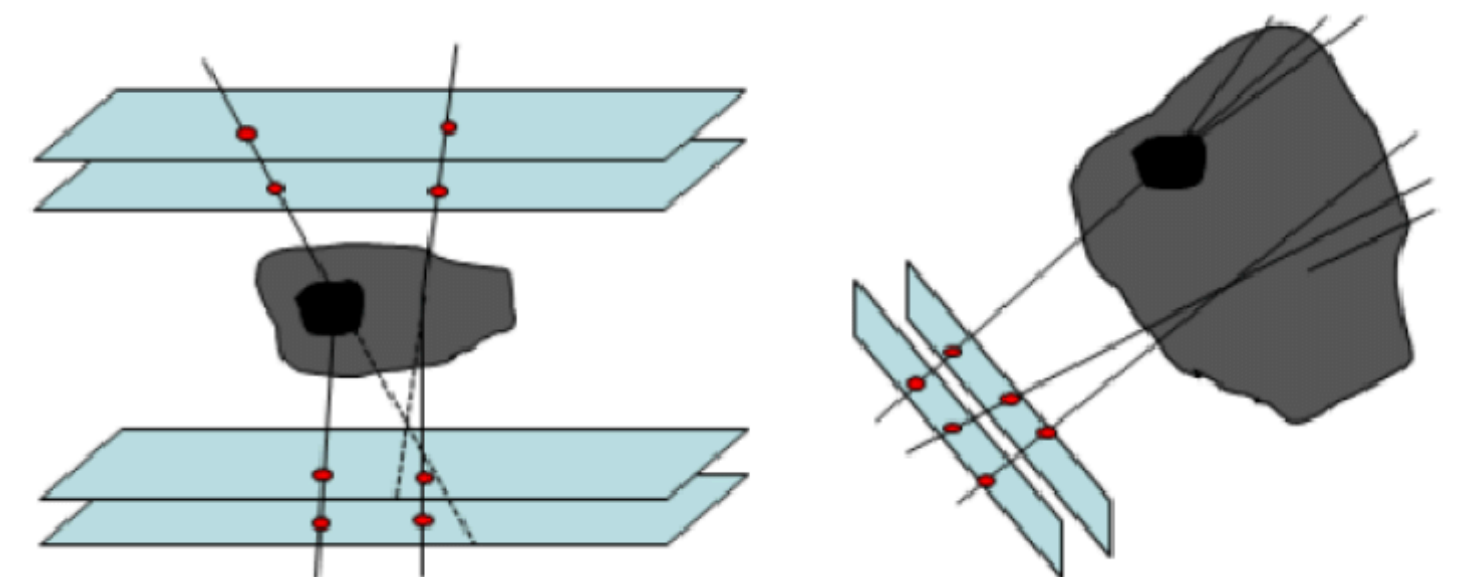
Muografía por Desviación



- Objetos pequeños (cm-m)
- Dispersión de Coulomb
- Imágenes tridimensionales
- Gran resolución respecto al número atómico Z



F8. Imagen muográfica de la mina San Cristoph en Alemania, como parte del proyecto OBIWAM



F9. Diferencia esquemática entre muografía por desviación (izquierda) y por absorción (derecha)

Proyecto de Tesis de Maestría

“CARACTERIZACIÓN DE UN DETECTOR DE MUONES ATMOSFÉRICOS BASADO EN SENSORES DE CENTELLEO”

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS - ESCUELA DE FÍSICA
ASTROFÍSICA/COSMOLOGÍA

Este proyecto de tesis se centra en el estudio de los **muones cósmicos**, realizado en la Universidad Central de Venezuela, buscando contribuir al avance en la **cosmología moderna, muografía y física de partículas**.





Motivación Científica

El estudio de **muones cósmicos** resulta de especial interés ya que estos son una fuente natural de radiación presente en la atmósfera terrestre día tras día. Mi motivación particular es el análisis de interacciones de muones con un material de estudio para su posterior caracterización densimétrica. Sin embargo, la muografía puede ser aplicada a otros campos como lo son la geofísica, arqueología, minería, ingeniería civil y física nuclear.

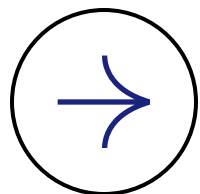
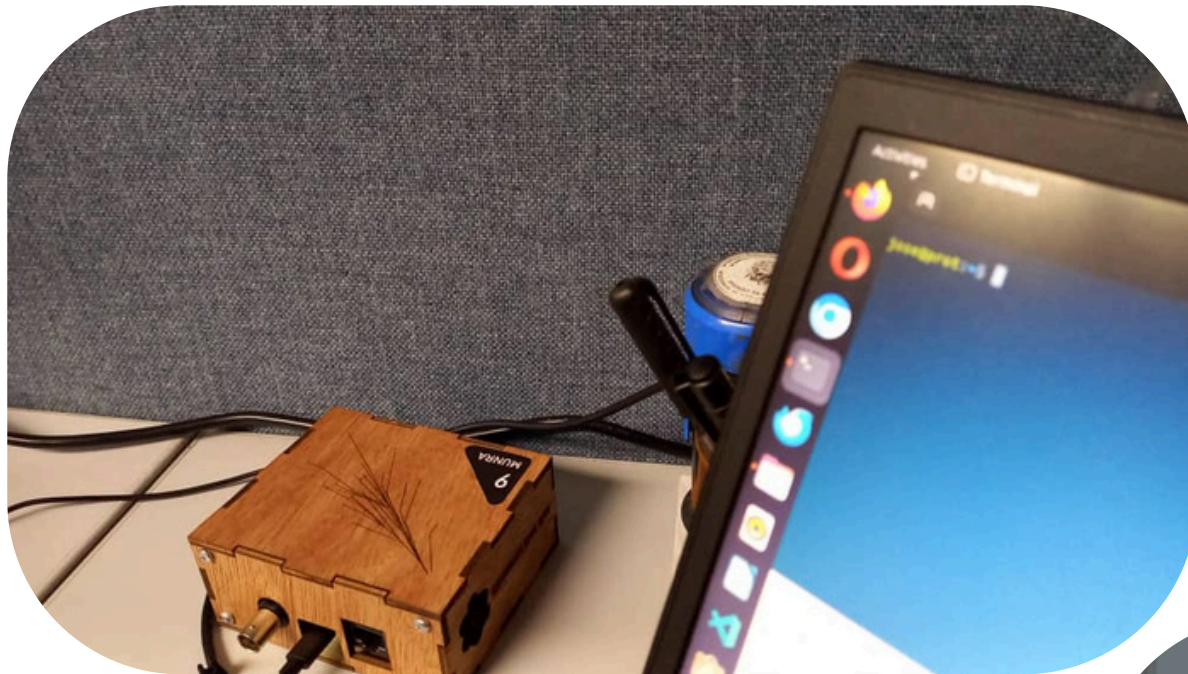
Objetivos de la Investigación

General

Lograr la caracterización *in sílico* de un hodoscopio de muones dedicado al estudio de variaciones de densidad.

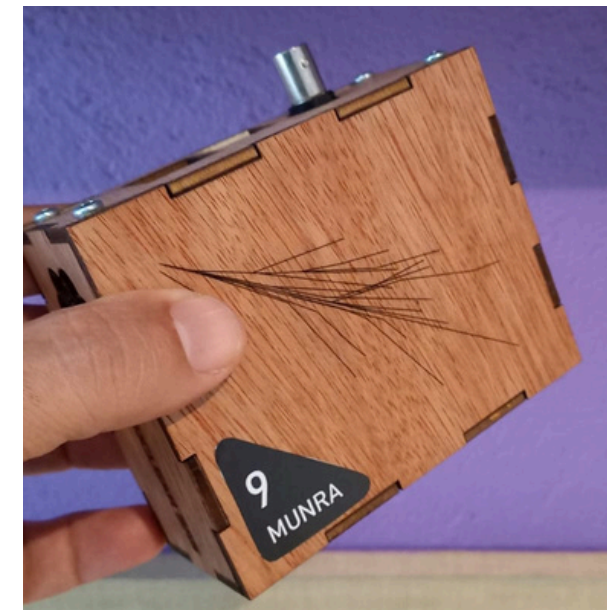
Específicos

- Simular un hodoscopio de muones con dimensiones adecuadas para ser portátil y caracterizar su resolución angular, espacial y densimétrica (sin descartar la posibilidad de ensamblarlos físicamente).
- Simular un arreglo de dos hodoscopios en modo coincidencia con distintos blancos de densidades no uniformes en medio.
- Determinar las condiciones óptimas de funcionamiento de los hodoscopios simulados (posicionamiento y tiempo de exposición) y resolución de altura de una columna de agua.
- Desarrollar un aporte académico en la forma de práctica de laboratorio de física avanzada con la creación de un algoritmo compacto capaz de reproducir imágenes muográficas.



Metodología y Avances

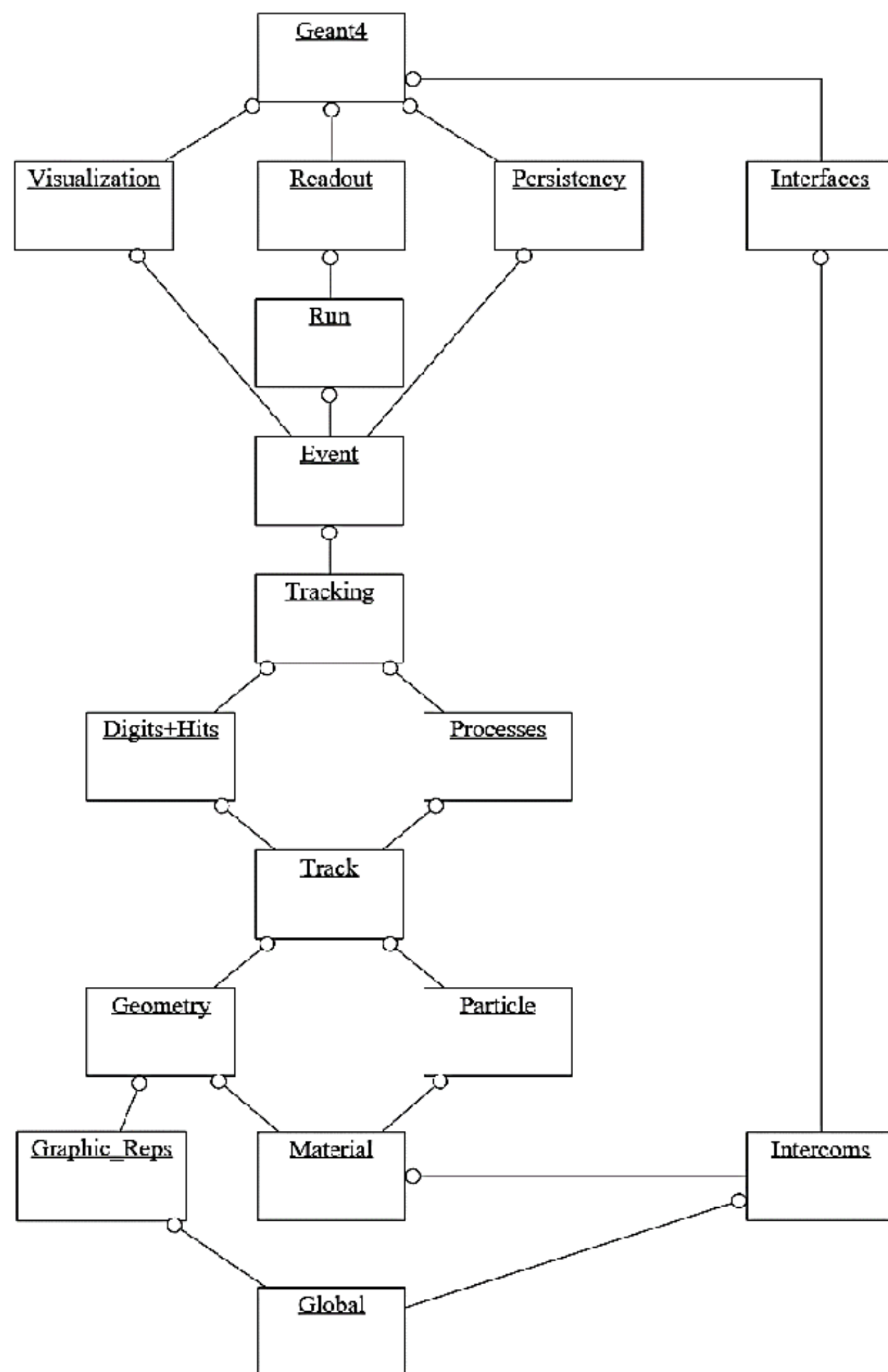
MÉTODOS Y TÉCNICAS EN LA INVESTIGACIÓN



La investigación contiene una componente **computacional y una experimental**. Se han utilizado diversas herramientas computacionales y recientemente fue incluido un hodoscopio llamado "**MUNRA**" como parte del marco metodológico.



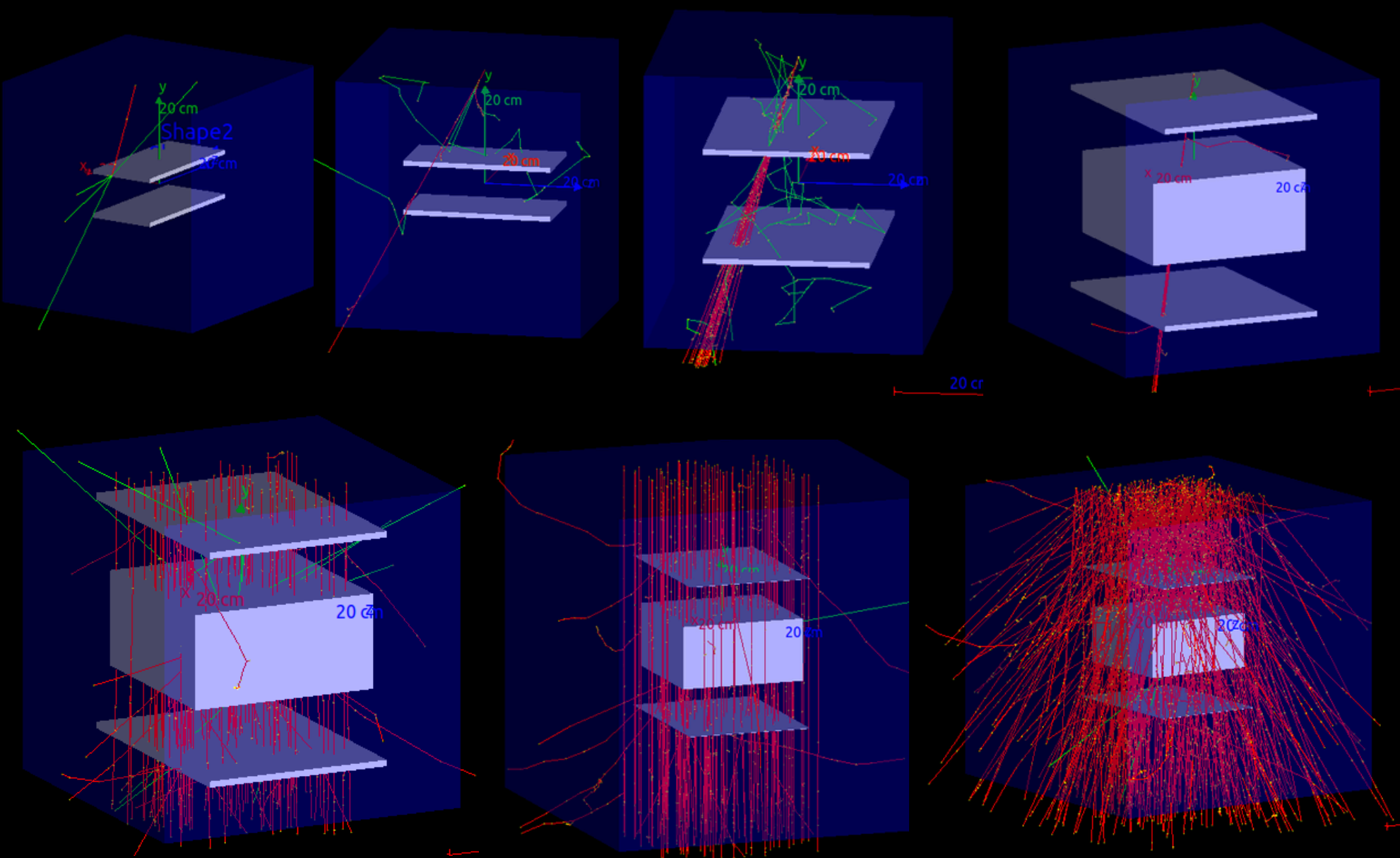
Geant4: A simulation toolkit



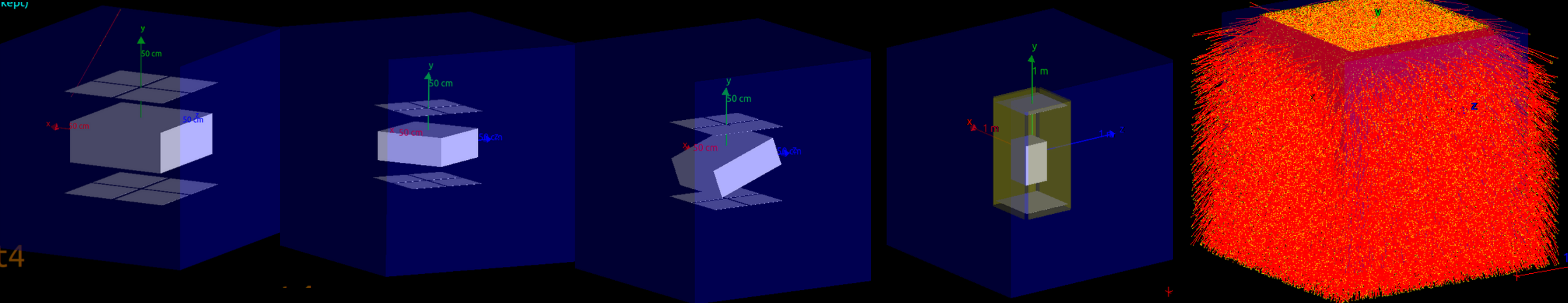
Geant4 es un paquete de herramientas computacionales con el cual somos capaces de crear simulaciones de partículas y radiación a través de la materia. Las aplicaciones creadas pueden simular cualquier montaje experimental o detector y fuentes de radiación, y almacenar salidas e interacciones específicas.

- Física de altas energías
- Ciencias del espacio y radiación
- Física médica
- Física de aceleradores de partículas

Geant4: A simulation toolkit



keru

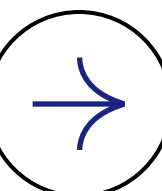
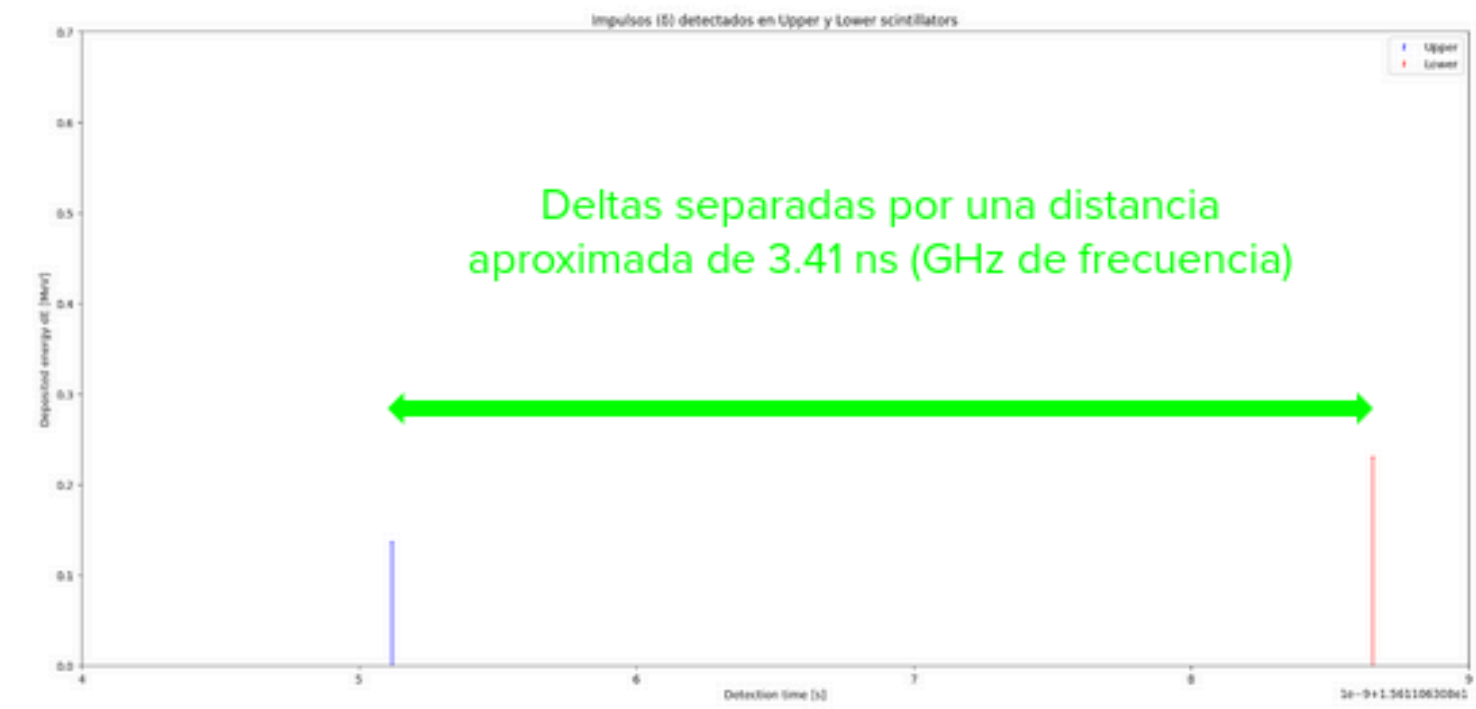
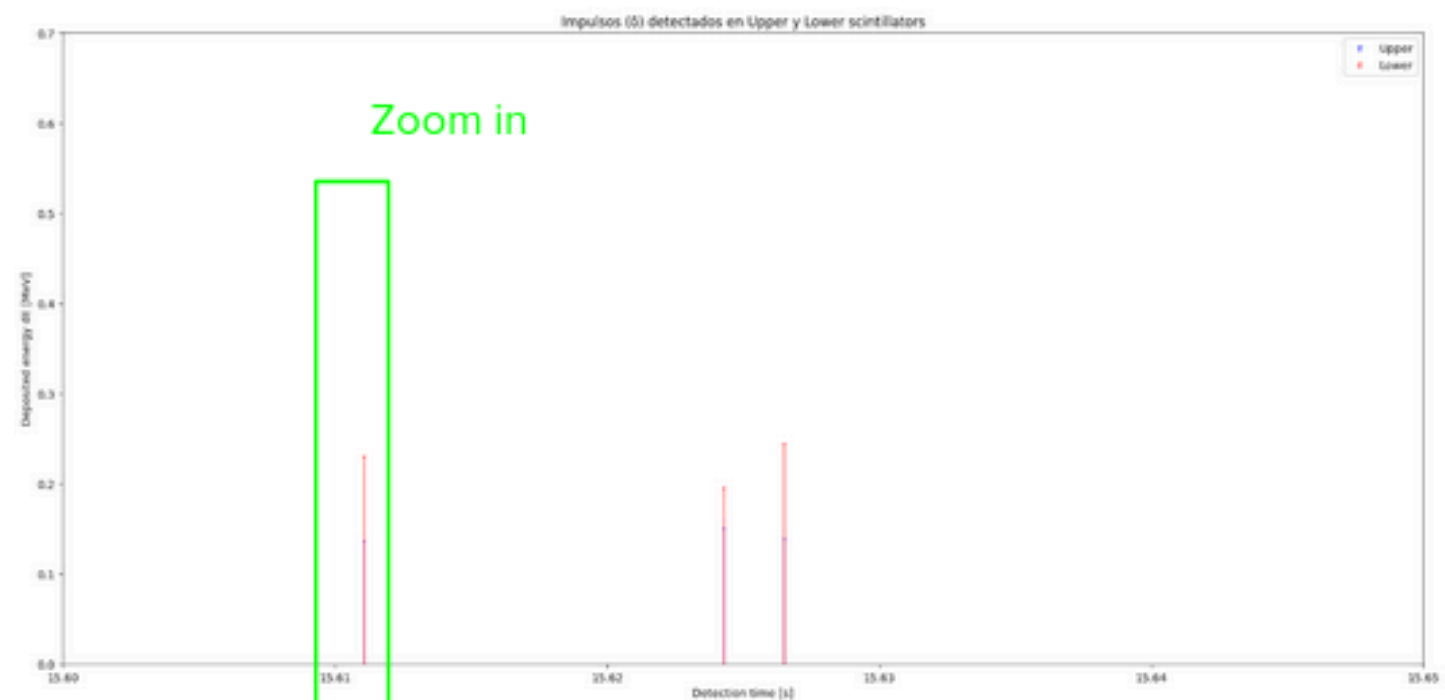
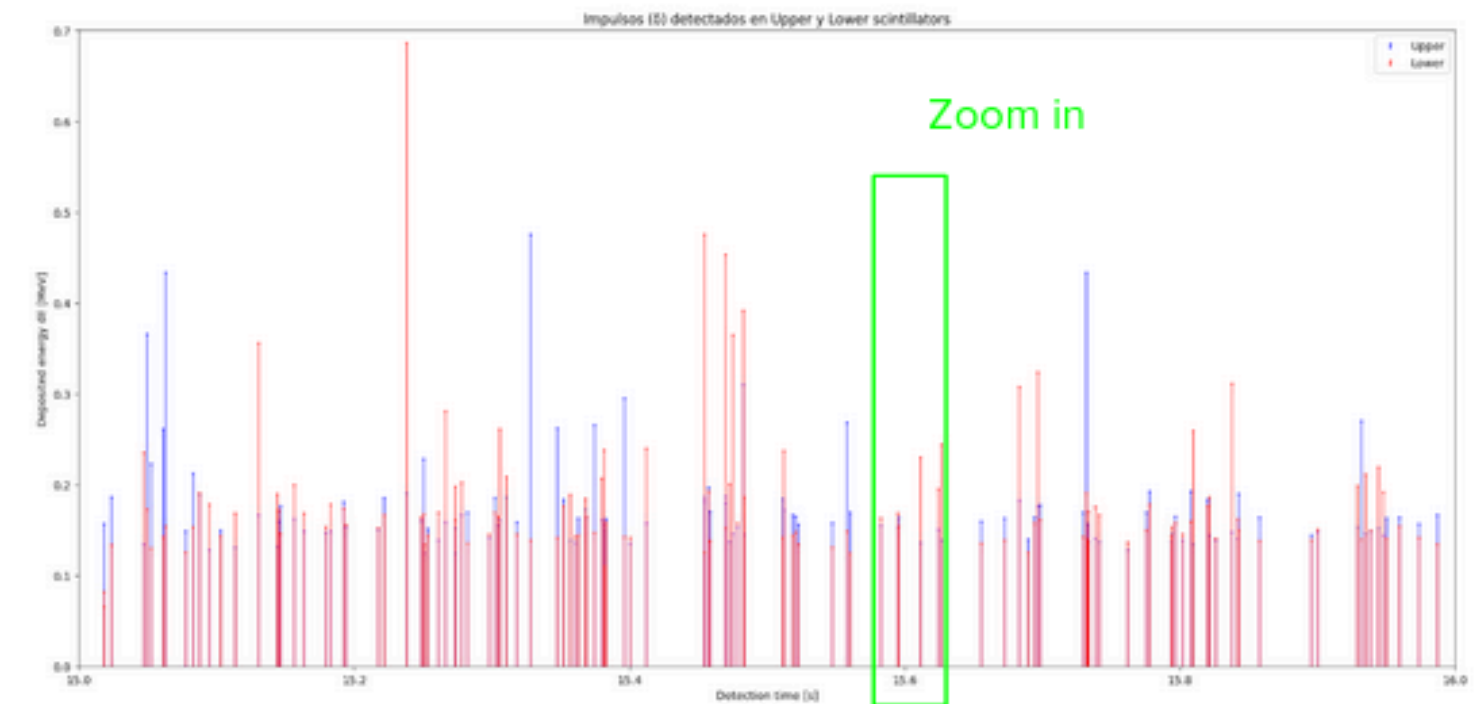
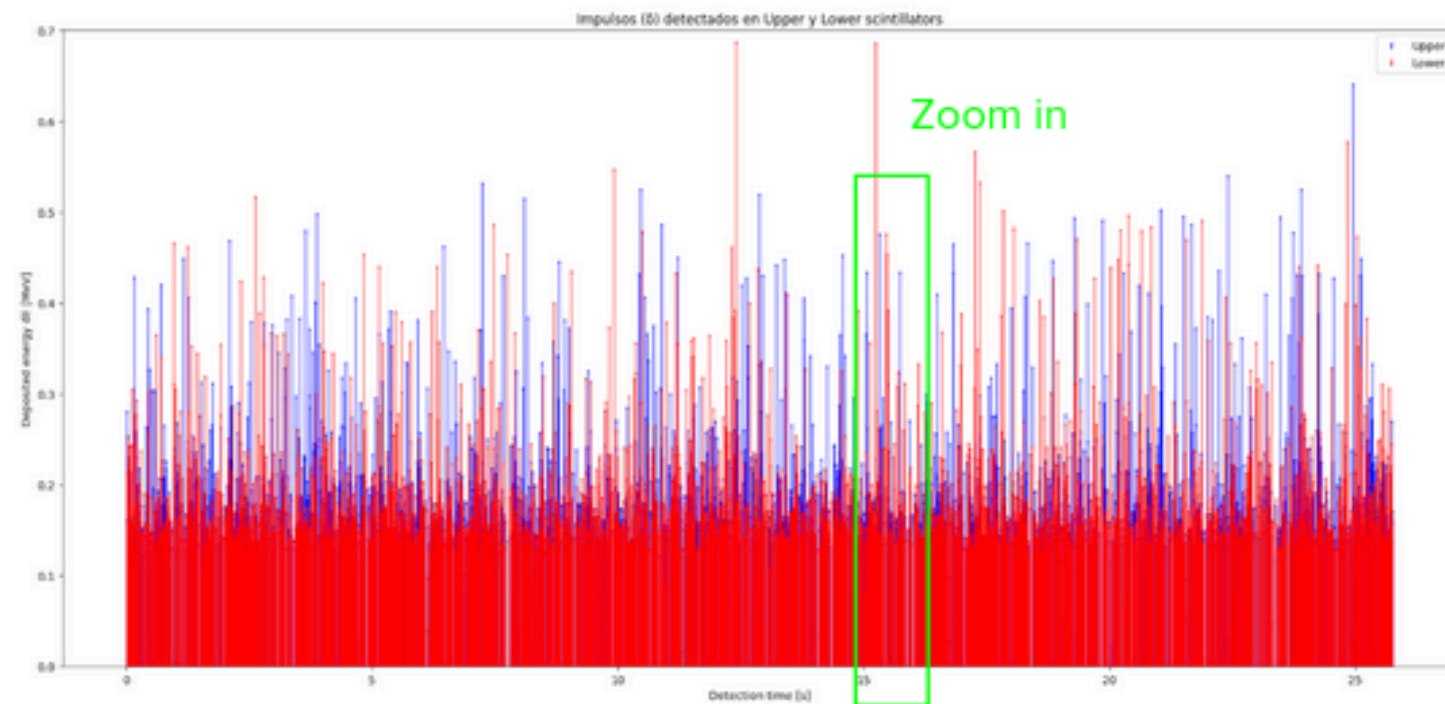


t4

Avances

Registros sintéticos de coincidencia

Se realizó una representación gráfica en forma de deltas de los pulsos registrados en los detectores superiores e inferiores del hodoscopio.

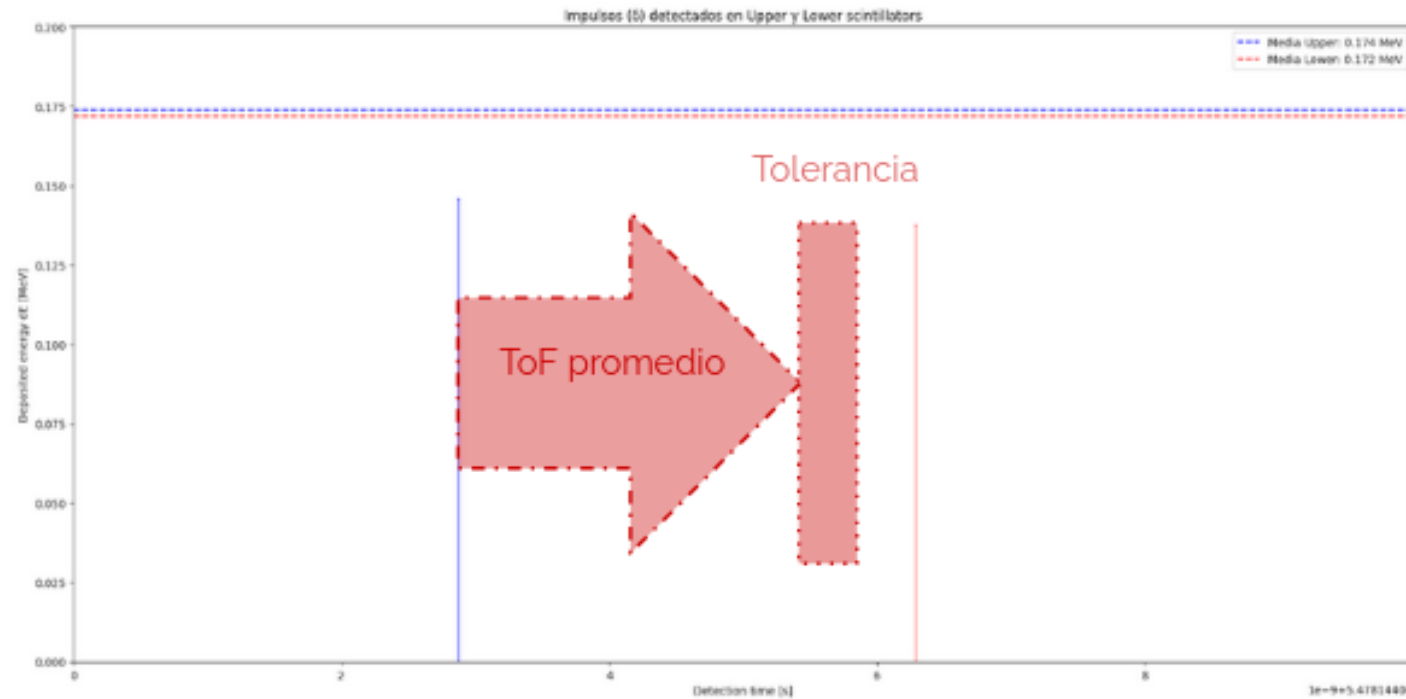


Avances

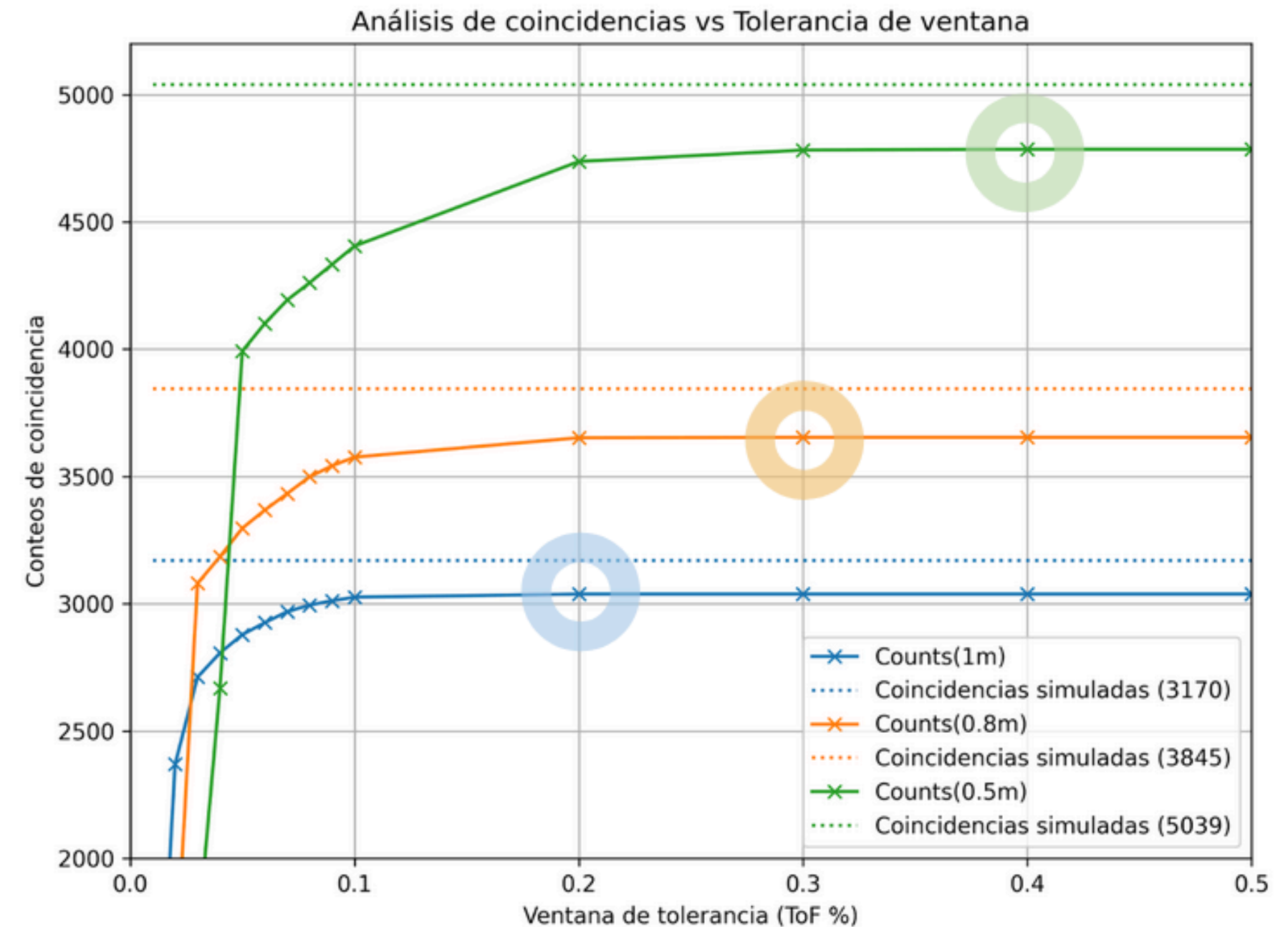
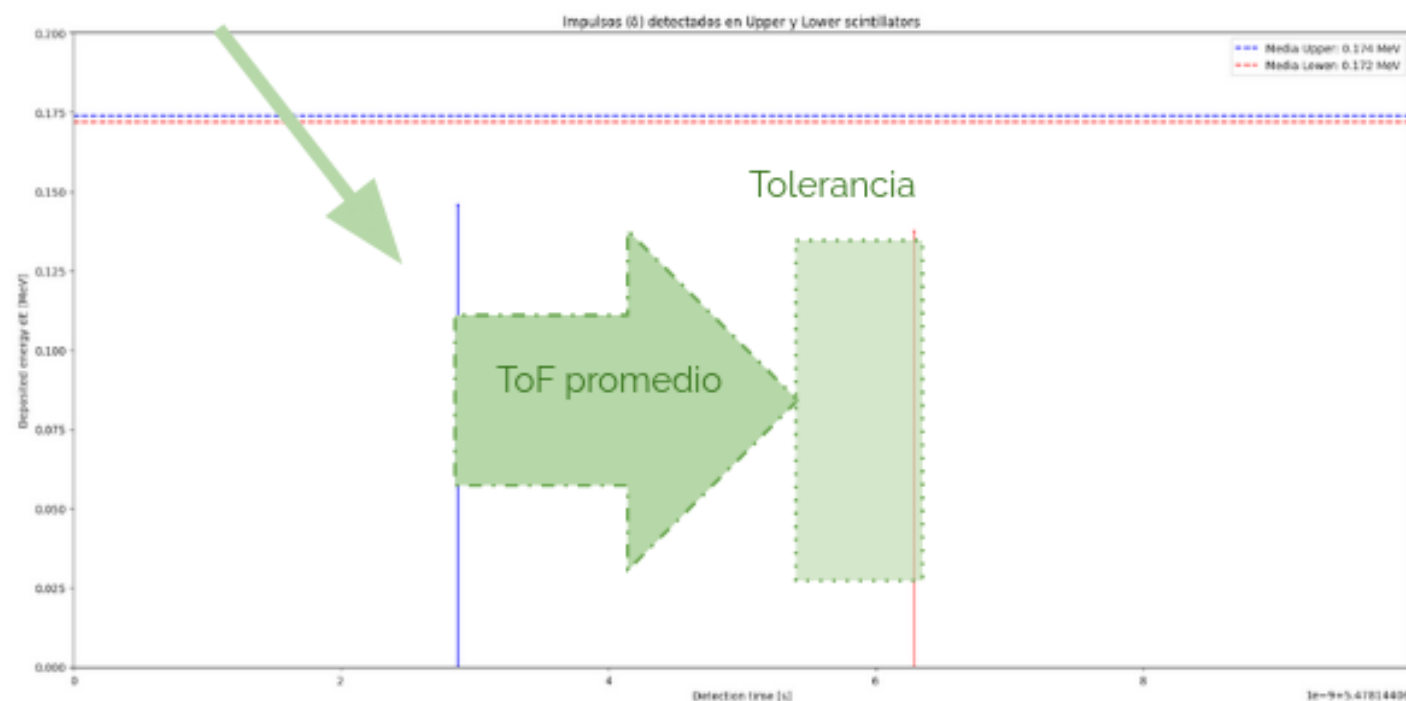
Análisis del algoritmo de coincidencia

Se estudiaron los criterios de selección y la tolerancia del algoritmo para detectar y optimizar los registros sintéticos de coincidencia.

Coincidencia inválida



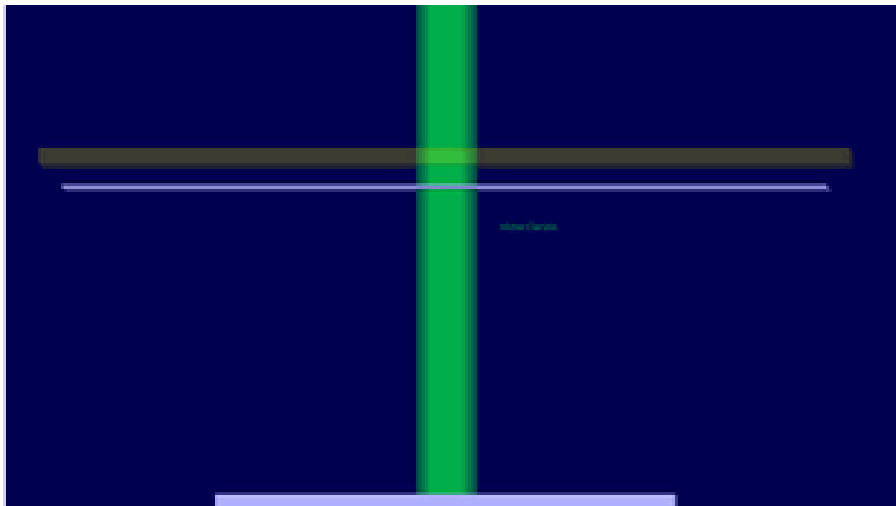
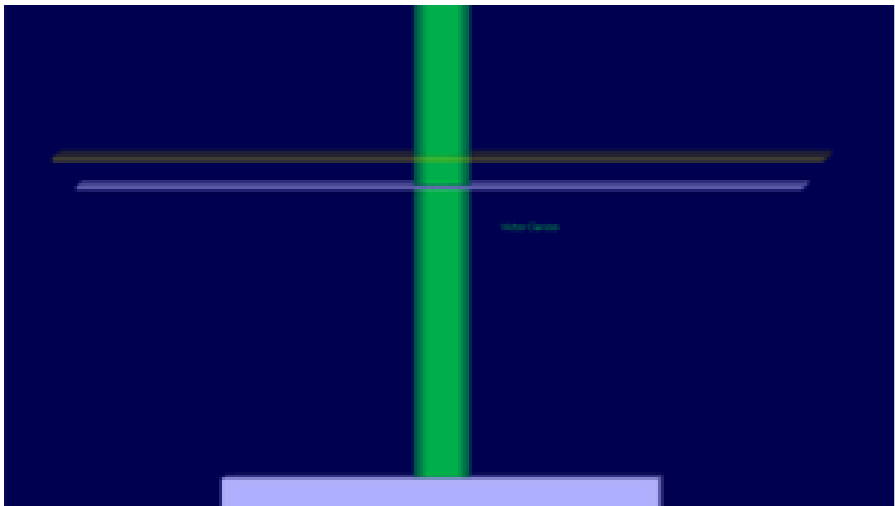
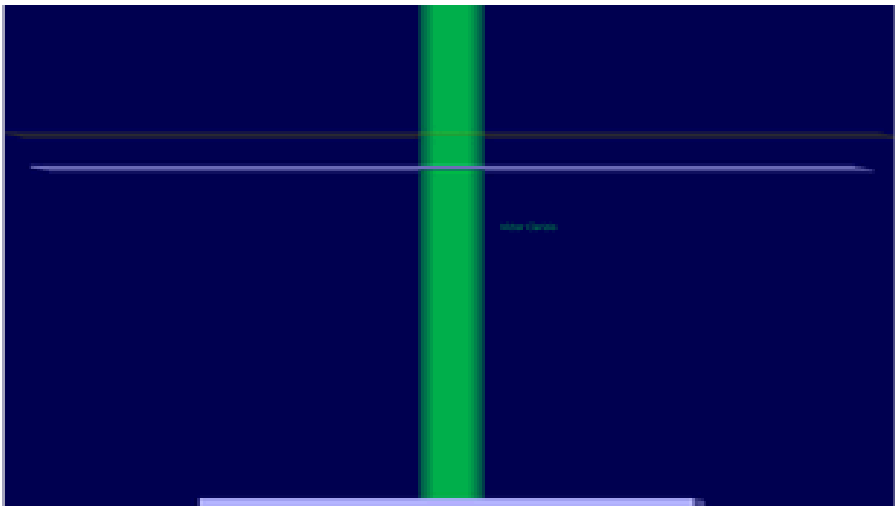
Coincidencia válida



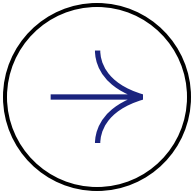
Avances

Atenuación de Gammas y electrones

Se simularon muones, gammas y electrones en una proporción de 100/30/3 respectivamente, para estudiar su atenuación con placas de plomo de espesor variable.



	Espesor láminas de plomo (mm)								
	1			3			10		
	Muones	Gammas	Electrones	Muones	Gammas	Electrones	Muones	Gammas	Electrones
Conteos Upper	7501	3255	9	7458	1770	15	7656	1244	8
Conteos Lower	6134	2625	2	6232	1236	3	6254	762	2
Coincidencias	3059	605	0	3081	530	0	3073	269	0

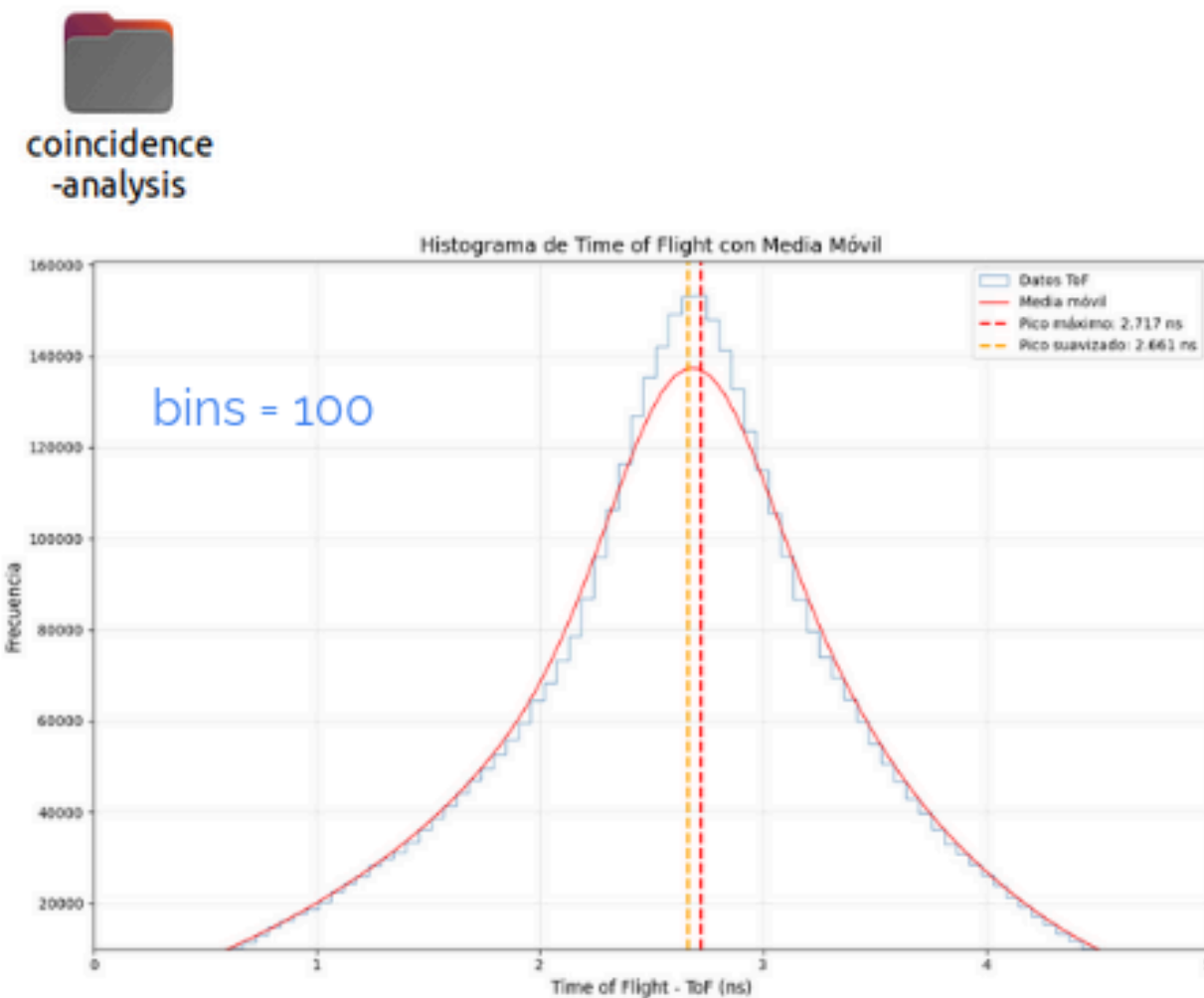


Avances

Análisis de hipótesis alternativa de coincidencia

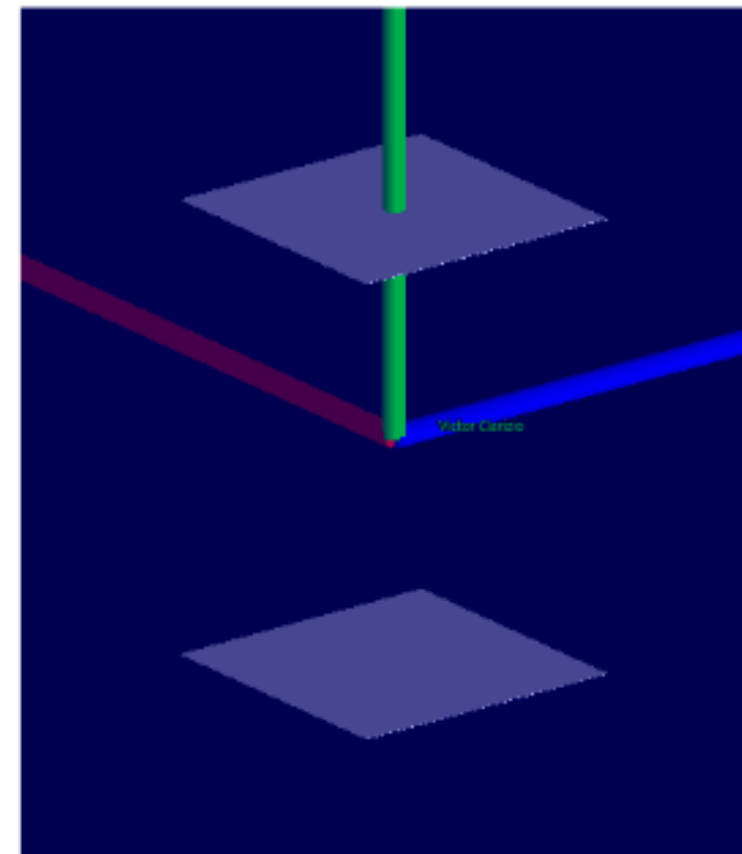
Se plantea la hipótesis alternativa para coincidencias: "Ningún evento registrado es coincidente, a menos que se demuestre lo contrario". Luego, se realiza un análisis estadístico para hallar el tiempo de vuelo de muones de coincidencia para ambas hipótesis.

Caso 2: correlacionados

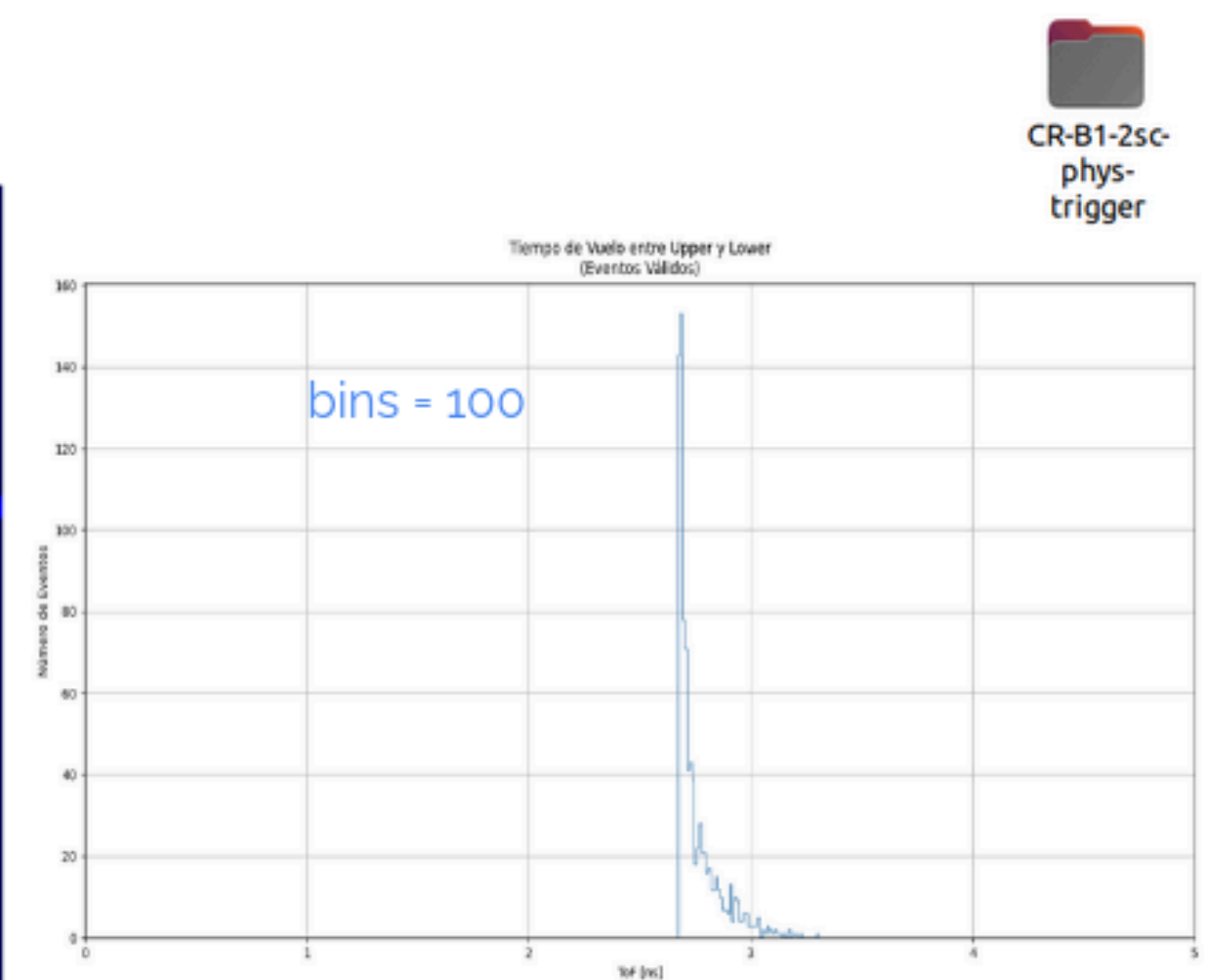


Entradas = 4222533
ToF promedio = 2.689 ns

Hipótesis nula



stepping_
outputbox_
muon.txt



Entradas = 885
ToF promedio = 2.76 ns

Hipótesis alternativa

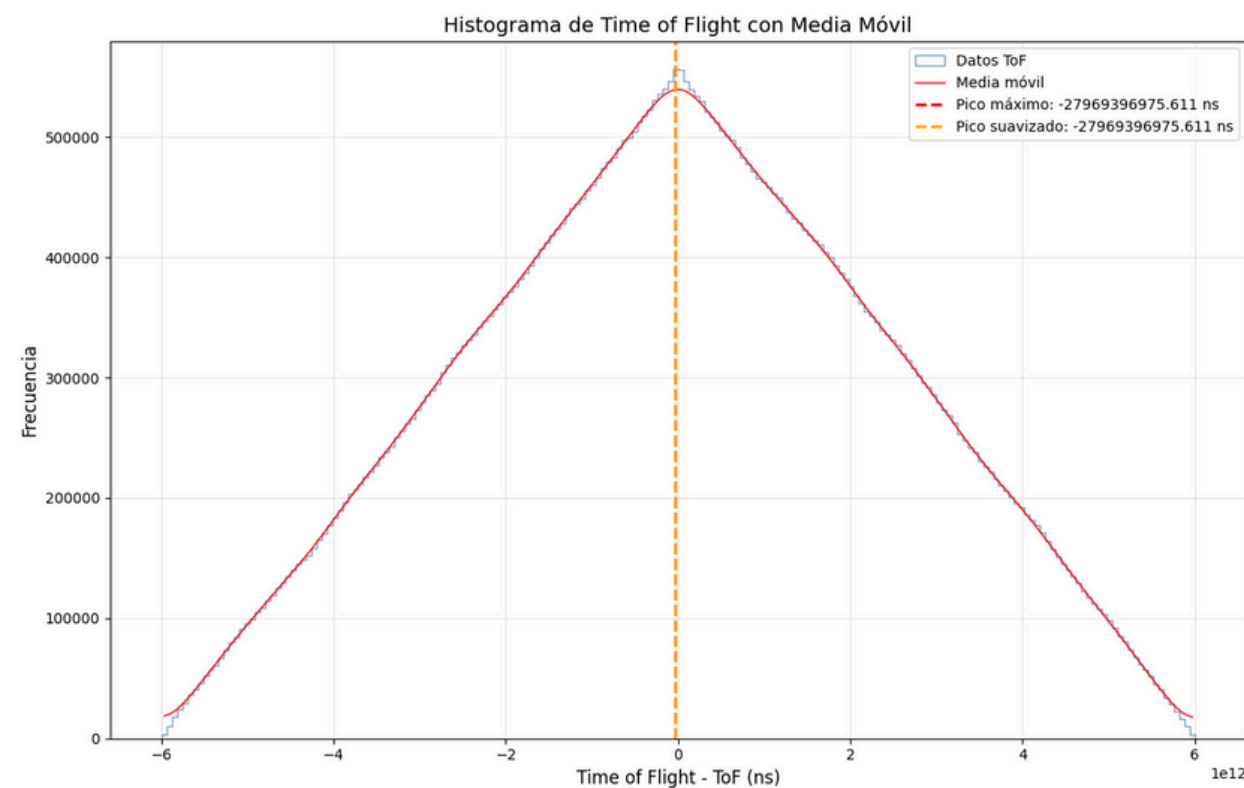


Avances

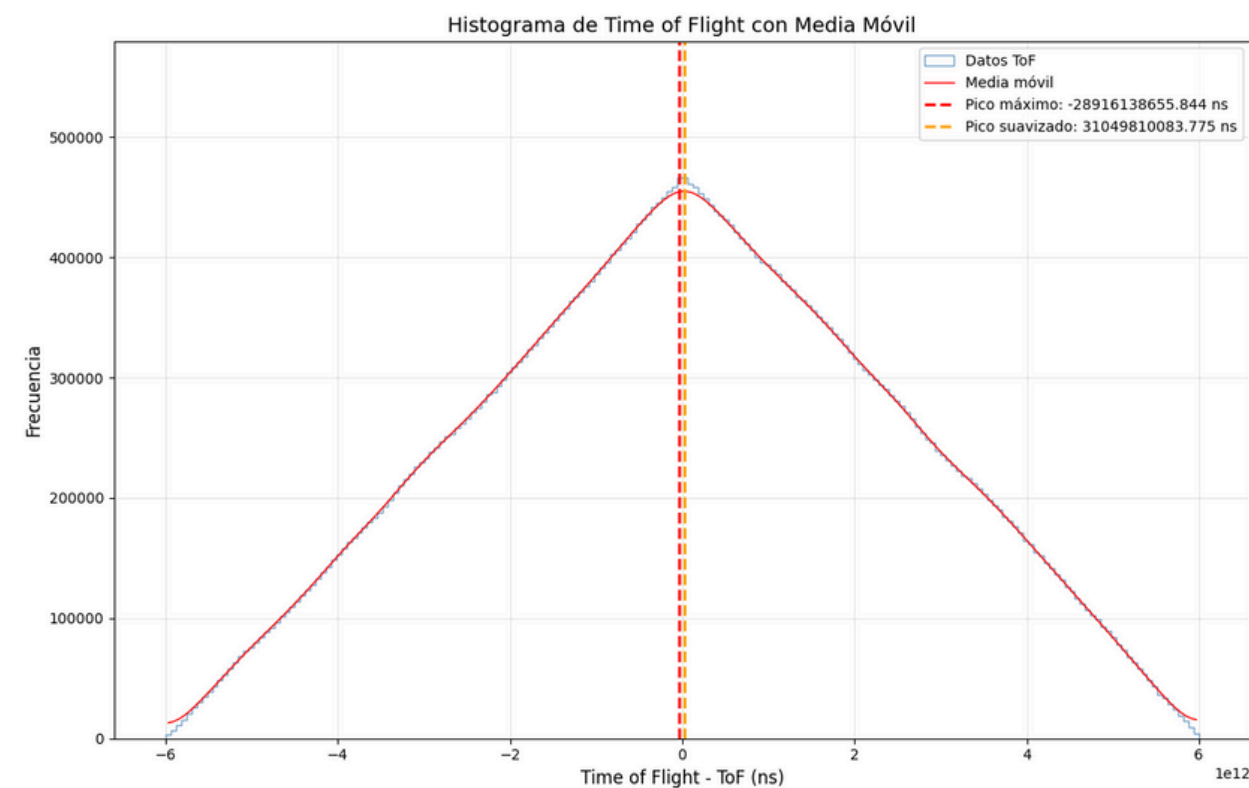
Análisis de hipótesis alternativa de coincidencia

Se analiza la relación entre el flujo de muones de coincidencia y las distintas muestras colocadas entre los detectores simulados a partir de los ToF calculados con los datos sintéticos.

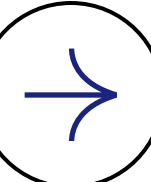
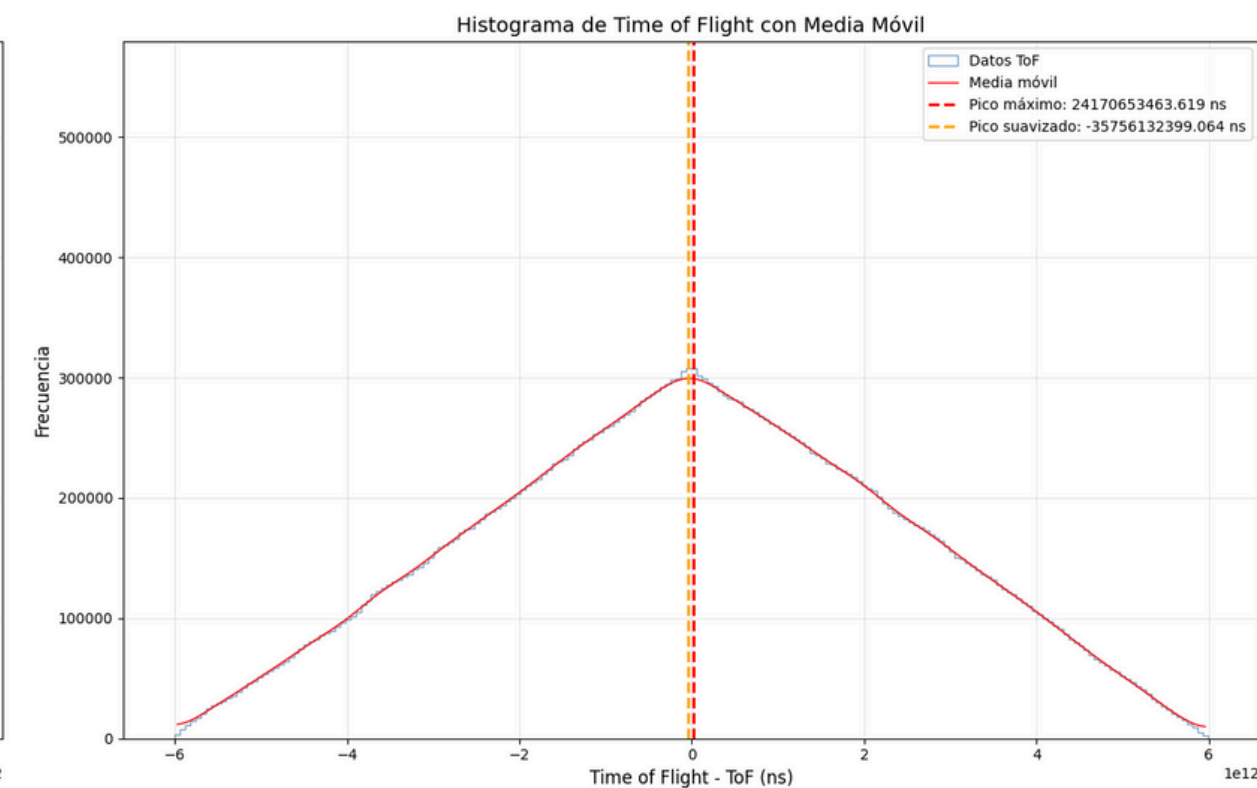
Muestra de aire



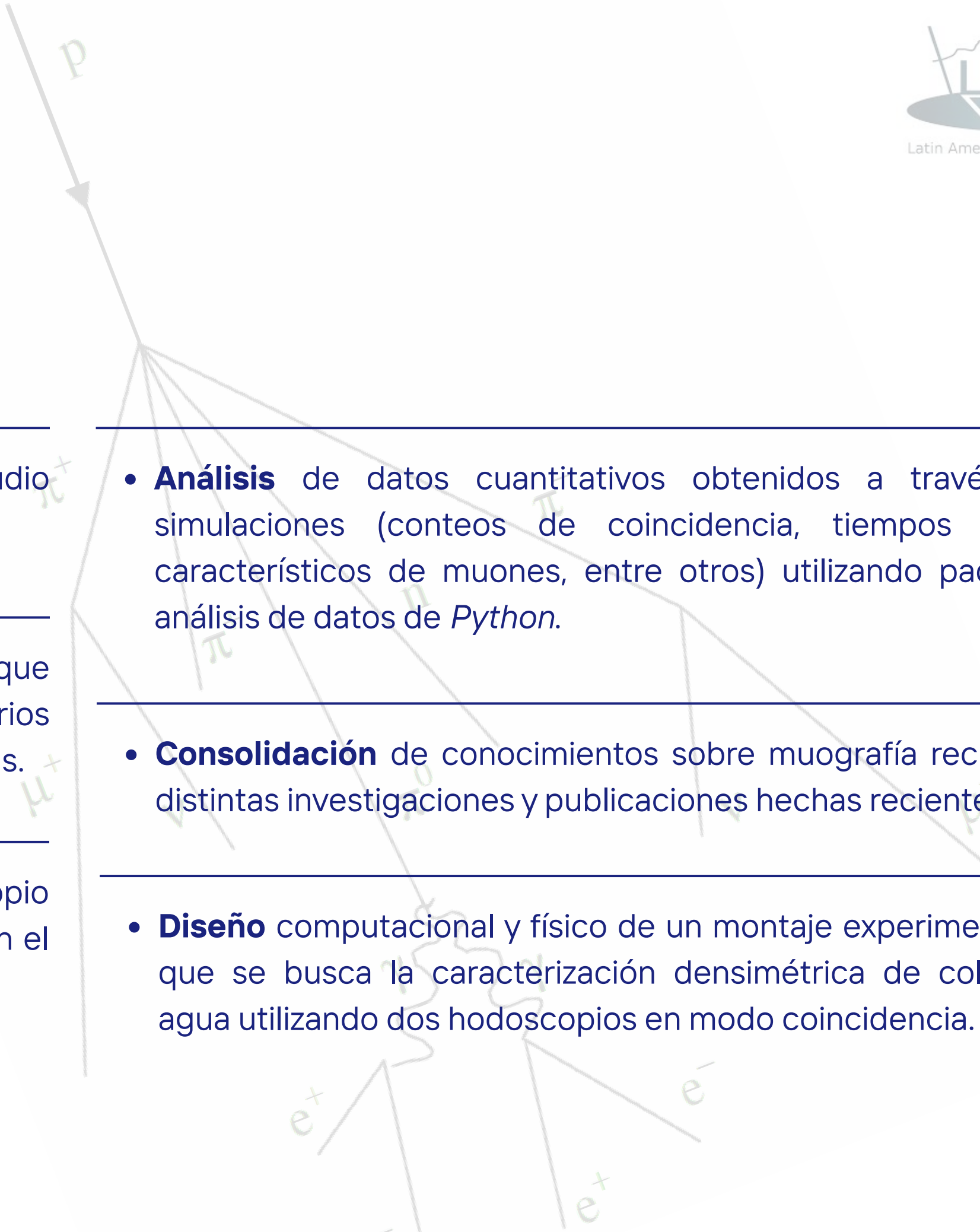
Muestra de hierro



Muestra de plomo



Avances

- 
- A faint particle interaction diagram is visible in the background. It shows an incoming particle labeled 'p' (proton) at the top left, which interacts and produces several particles: π^+ (positive pion), π^- (negative pion), μ^+ (positive muon), μ^- (negative muon), e^+ (positron), and e^- (electron).
- **Consolidación** de los fundamentos teóricos asociados al estudio de muones cósmicos y su detección
 - **Documentación** de un prototipo de hodoscopio (MUNRA) que será posiblemente integrado a futuras prácticas de laboratorios avanzados de física nuclear, cosmología y física de altas energías.
 - **Estructuración** de un proyecto de simulación de un hodoscopio de muones realizado en cpp utilizando paquetes contenidos en el *framework* de Geant4.
 - **Análisis** de datos cuantitativos obtenidos a través de las simulaciones (conteos de coincidencia, tiempos de vuelo característicos de muones, entre otros) utilizando paquetes de análisis de datos de *Python*.
 - **Consolidación** de conocimientos sobre muografía recurriendo a distintas investigaciones y publicaciones hechas recientemente.
 - **Diseño** computacional y físico de un montaje experimental con el que se busca la caracterización densimétrica de columnas de agua utilizando dos hodoscopios en modo coincidencia.



Próximos Pasos



-
- **Culminación** del trabajo de maestría: Entrega del manuscrito previamente revisado y presentación final.
-
- **Revisión y ajuste** de la metodología de análisis estadístico para eventos sintéticos (y experimentales) de coincidencia.
-
- **Análisis** estadístico de datos sintéticos correspondientes a la caracterización angular del montaje experimental simulado.
-
- **Implementación** de los análisis estadísticos y conocimientos consolidados a través de las simulaciones a un contexto experimental utilizando los hodoscopios **MunRA** con el fin de contribuir al estudio de muones cósmicos e incorporar de ser posible una práctica de laboratorio de física avanzado.

¡Gracias por su atención!



Universidad
Industrial de
Santander



CONTACTO

vclariziosaeucv@gmail.com

victorclarizio@gmail.com

+58 (424) - 127 52 71

Latin America Giant Observatory
lagoproject.net

Referencias bibliográficas

- [1] Particle Data Group. “Review of Particle Physics”. University of California. 2012.
- [2] L Cimmino, F Ambrosino, A Anastasio, M D’errico, V Masone, L Roscilli, and G Saracino. “A new cylindrical borehole detector for radiographic imaging with muons.” Scientific Reports, 11(1):17425, 2021.
- [3] Alfred Tang, Glenn Horton-Smith, Vitaly A Kudryavtsev, and Alessandra Tonazzo. “Muon simulations for super-kamiokande, kamland, and chooz.” Physical Review D, 74(5):053007, 2006.
- [4] N Dibyendu, C Petrus, O Vladimir, D Soumyaranjan. “Solar evolution and extrema: current state of understanding of long-term solar variability and its planetary impacts”. Progress in Earth and Planetary Science, 8(1), 2021.
- [5] Rodríguez Gallo Y.; Orozco, R.; Perez-Diaz, M. Metal Artifact Reduction by Morphological Image Filtering for Computed Tomography. [En línea]. World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering. 2018, [Consultado el: 28 de enero de 2020] 219-222 p. Disponible en: http://dx.doi.org/10.1007/978-981-10-9035-6_39.
- [6] Pang J; Li Z; Dong S; Li J; Mao X; and others. “Accurate in situ rock density measurement with cosmic ray muon radiography”. J. Appl. Phys. 135, 204901 (2024). <https://doi.org/10.1063/5.0207047>
- [7] Código en Python para la aplicación de Retroproyección filtrada con un modelo de prueba. Repositorio en GitHub: https://github.com/mariujose18/modelo_prueba/tree/main.
- [8] Jesús Peña-Rodríguez, Luis A. Núñez, Hernán Asorey. “Characterization of the muography background using the Muon Telescope (MuTe)”. Proceeding of Science, August 2020. <https://arxiv.org/abs/2102.11483>
- [9] Gutarra-Leon, A., Barazandeh, C., & Majewski, W. (2018). Cosmic Ray Muons in the Standard Model of Fundamental Particles. Exigence, 2 (1). <http://dx.doi.org/1082>