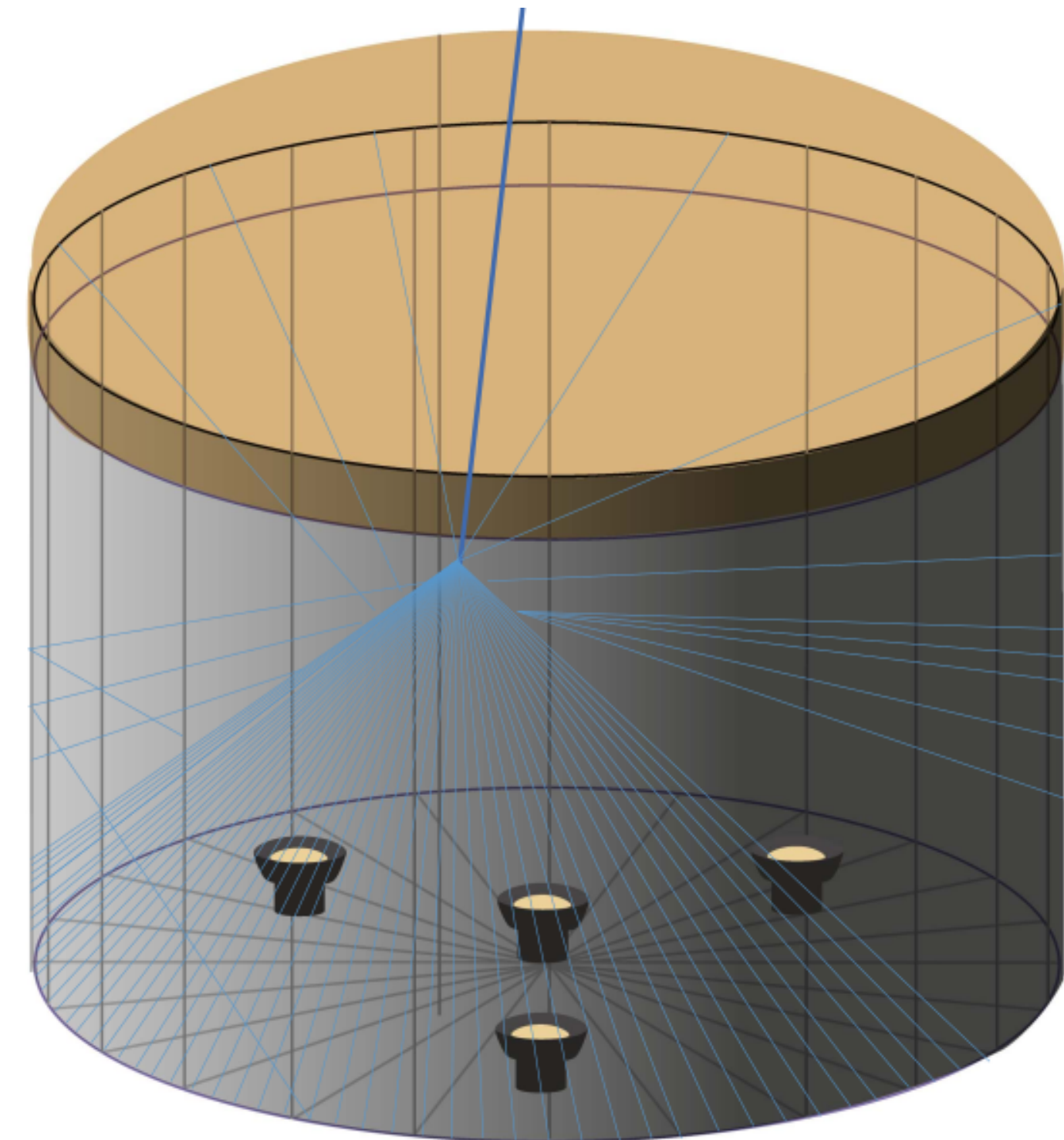


# Monitoreo de la calibración de un prototipo de detector Cherenkov analizando el decaimiento del Muón

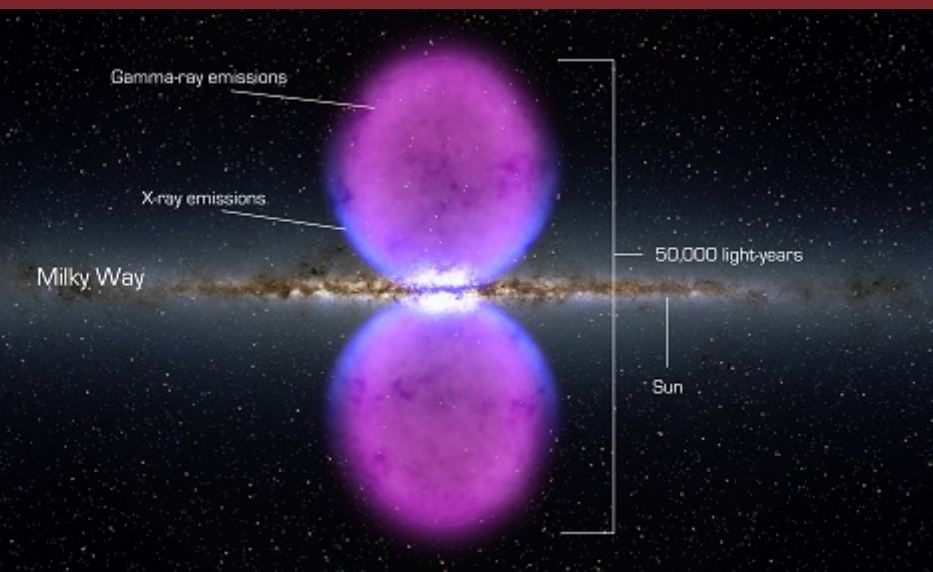
David Saúl Quispe Calloapaza  
Sonia Diana Quispe Mamani

## ASESORES

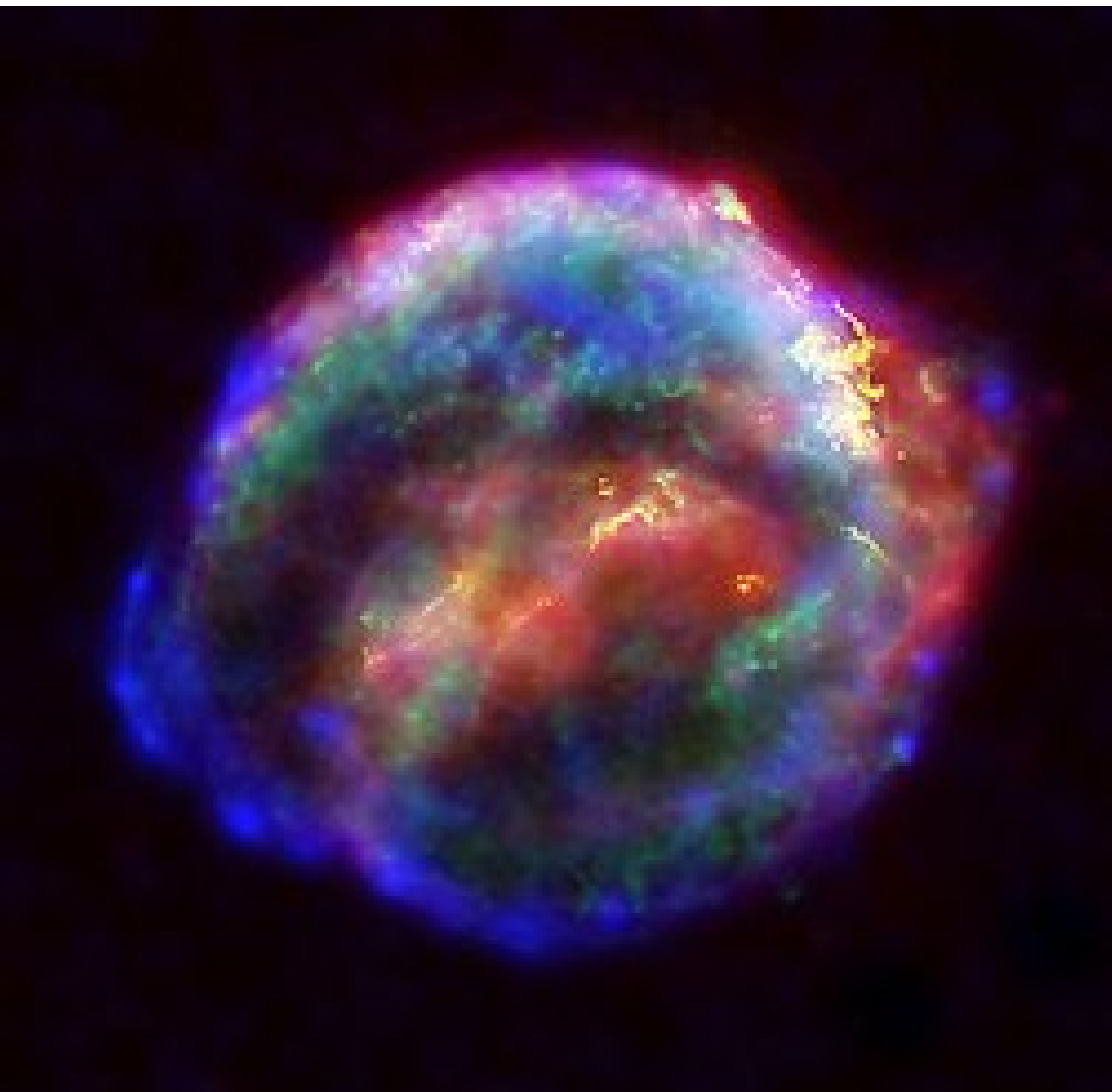
Dr. José Bellido Cáceres  
Msc. Luis Otiniano Ormachea  
Mg. Rolando Perca Gonzales



# RESUMEN



La detección de rayos cósmicos (RCs) es de gran importancia en astrofísica ya que, al detectarlos, nos permite conocer lo que sucede en el universo. Los RCs de media y alta energía ( $>100\text{TeV}$ ) son detectados empleando la tecnología de tanques Cherenkov de agua (WCD). El presente trabajo tiene el objetivo de monitorear la calibración de éstos tanques en el tiempo, analizando el decaimiento del muón que ocurre dentro del tanque y el Espectro de Michel.



**FIG 1: Remanente de supernova SN  
1006 (Asorey, 2012)**

# RAYOS CÓSMICOS Y RAYOS GAMMA

Los rayos cósmicos está conformado por partículas elementales que provienen del espacio e interaccionan con la atmósfera a una tasa de 1000 por metro cuadrado; aproximadamente el 90% son protones y el resto son partículas alfa, electrones entre otros.

# CASCADAS ATMOSFÉRICAS (EAS)

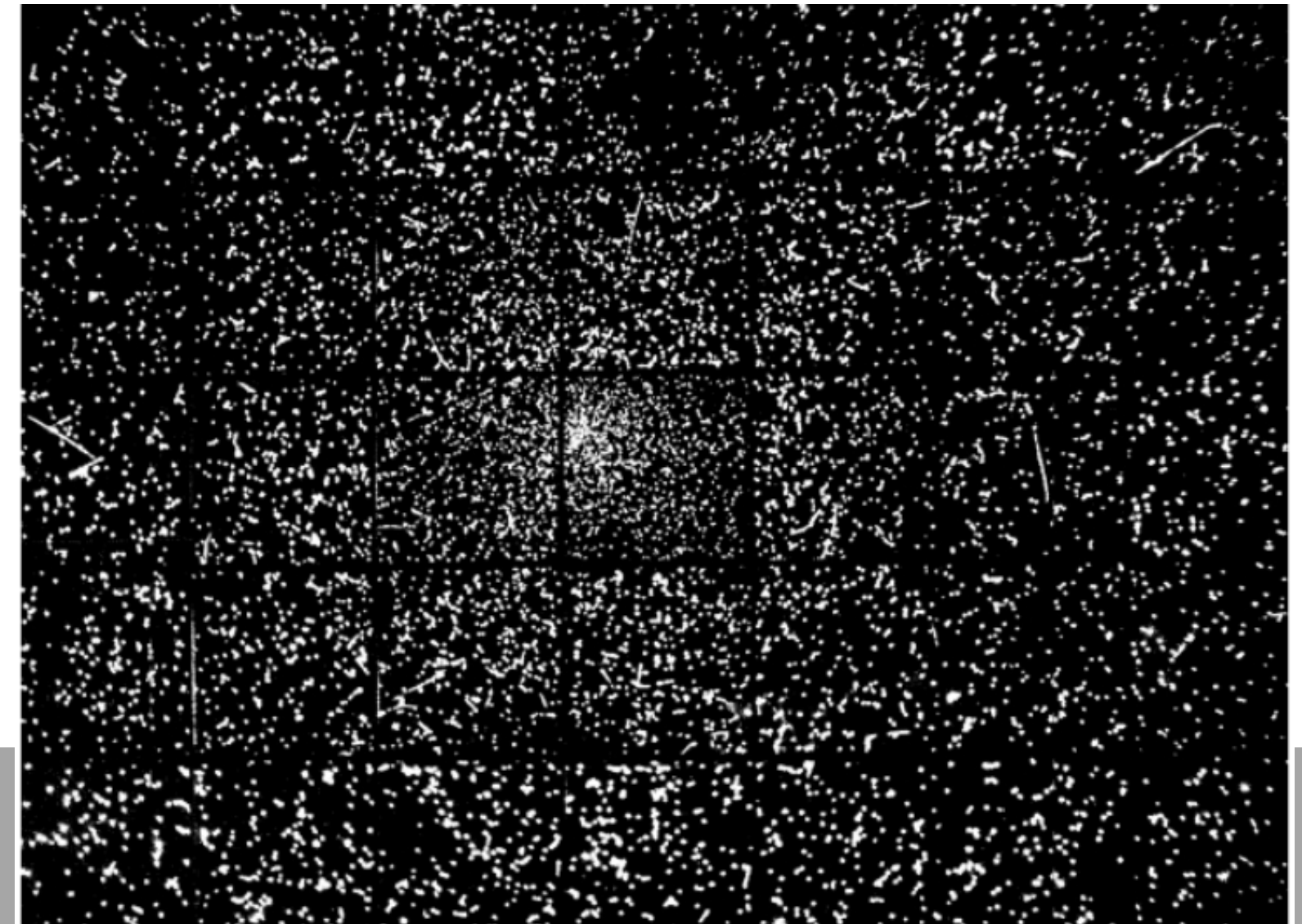
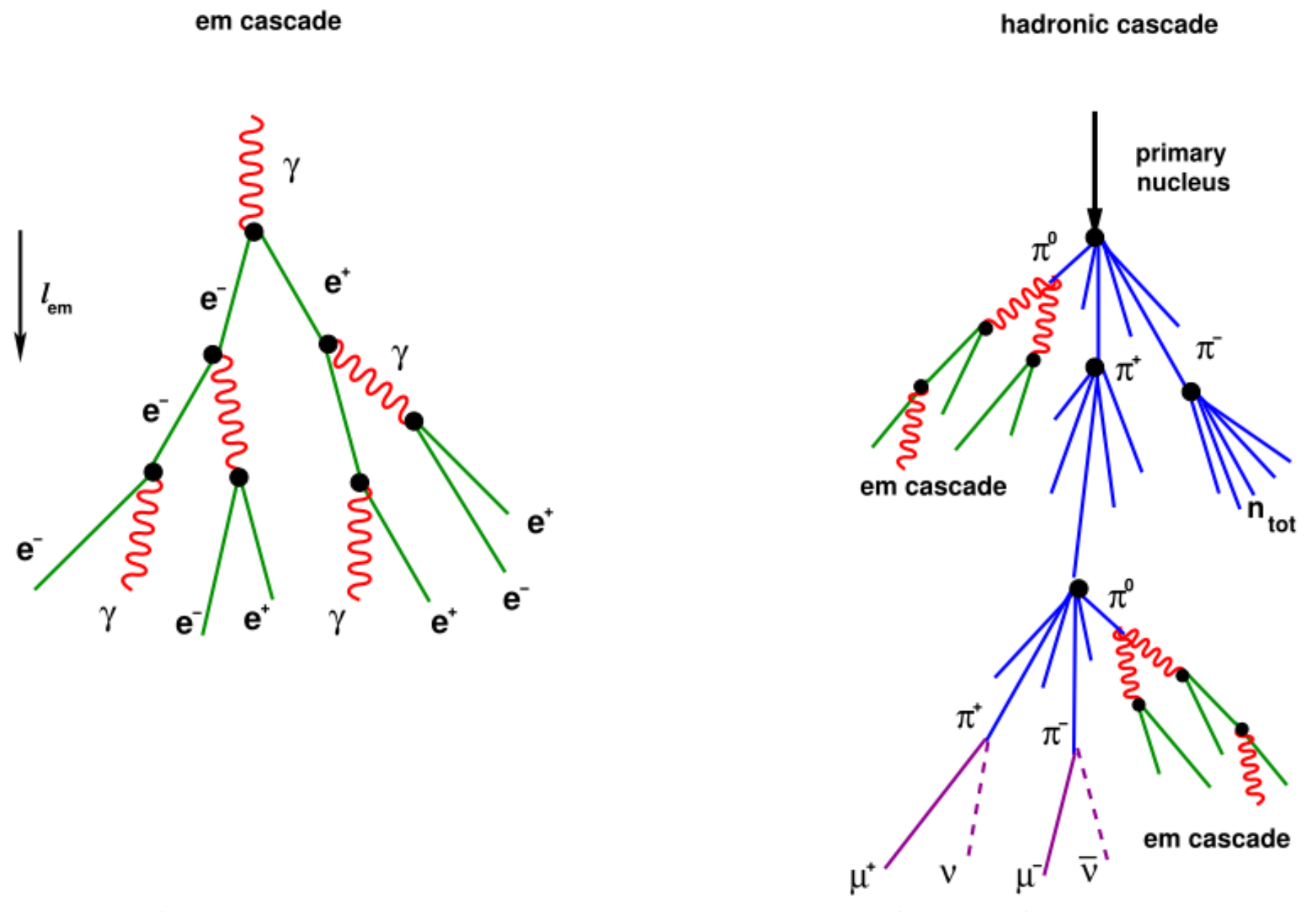


Figura 2: Desarrollo longitudinal de las cascadas (Mollerach y Roulet, 2018).

Figura 3: Densidad de partículas de una cascada casi vertical a cierto nivel de superficie (Asorey, 2012).

# DETECTORES CHERENKOV

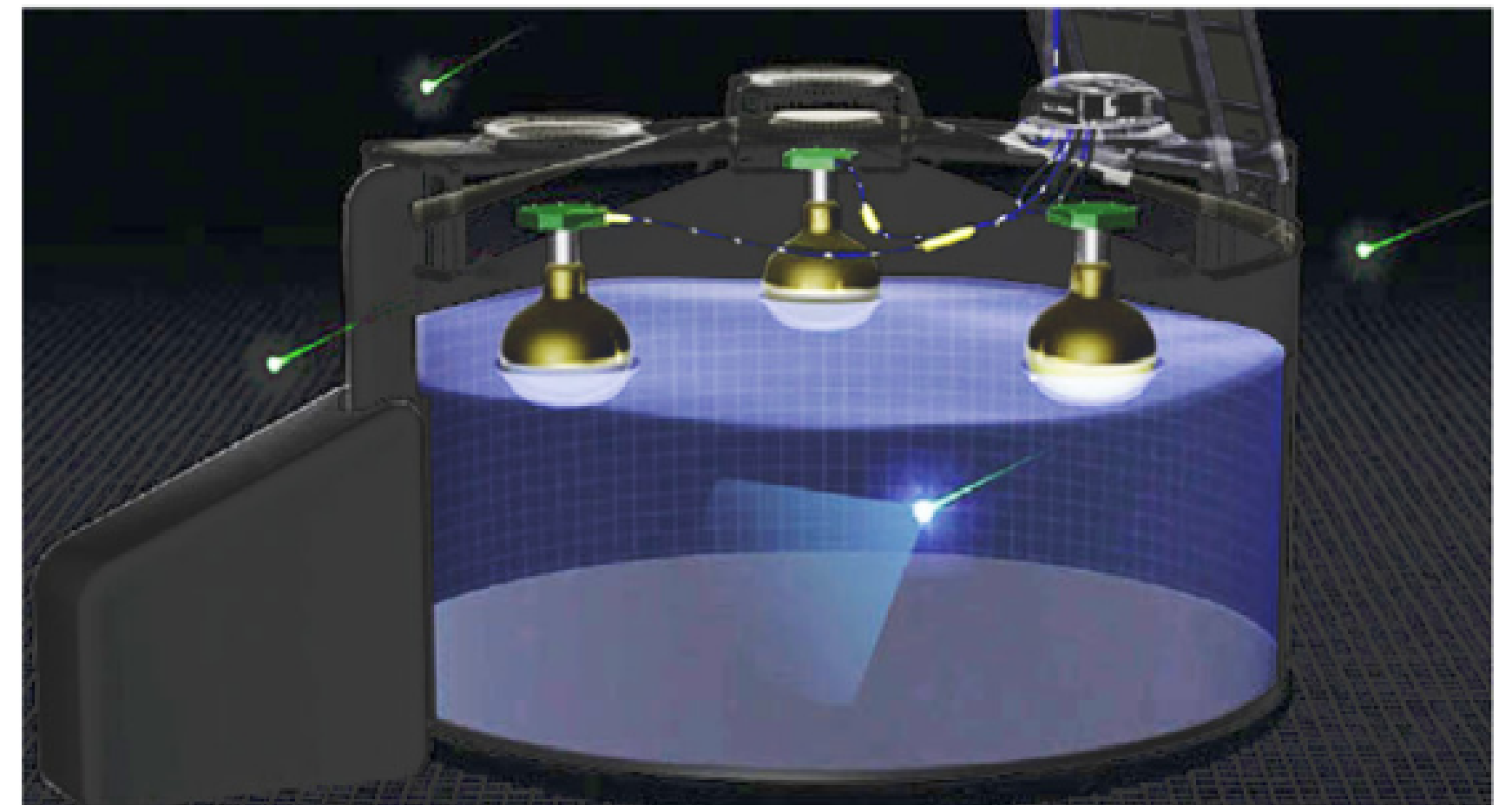
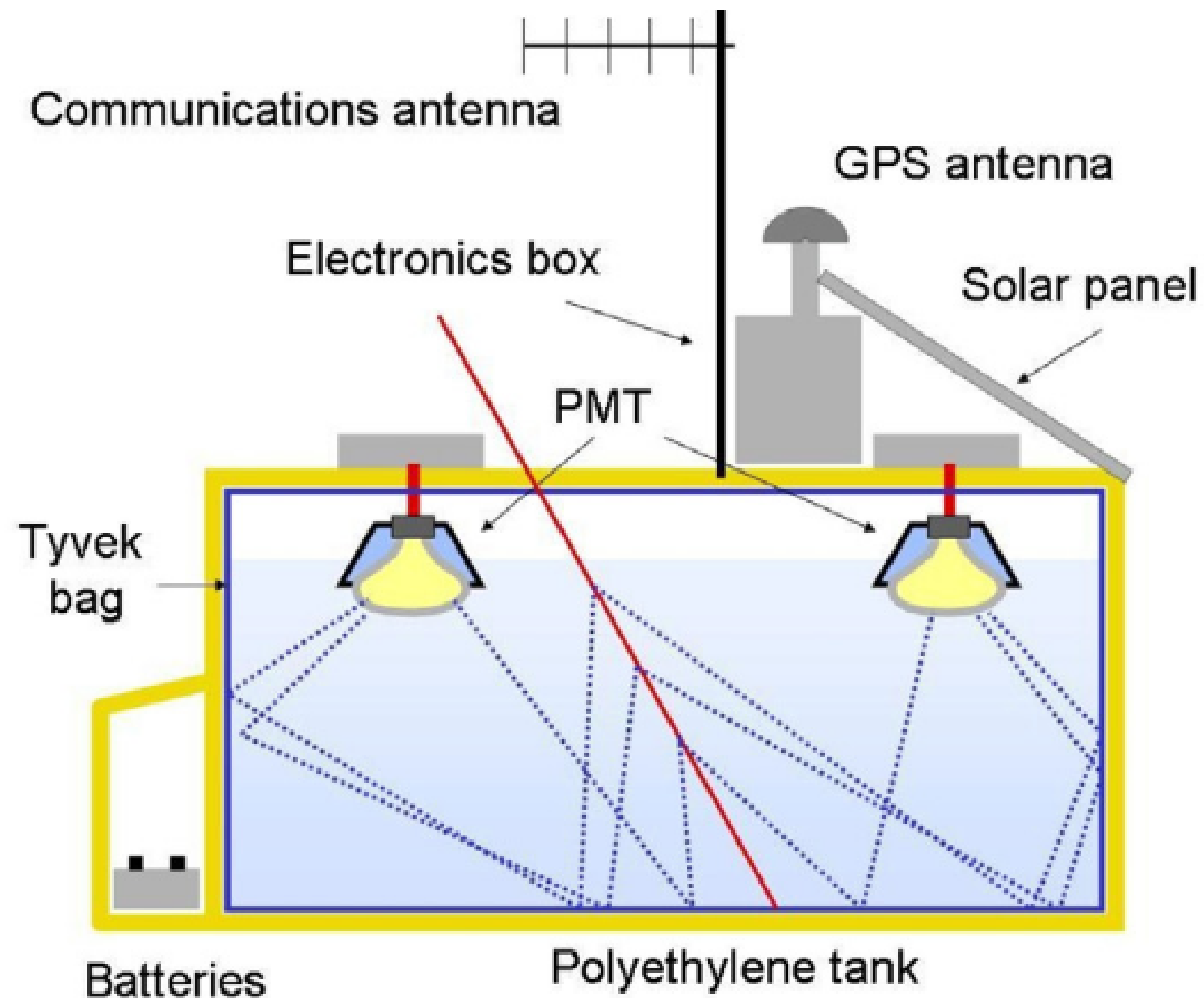
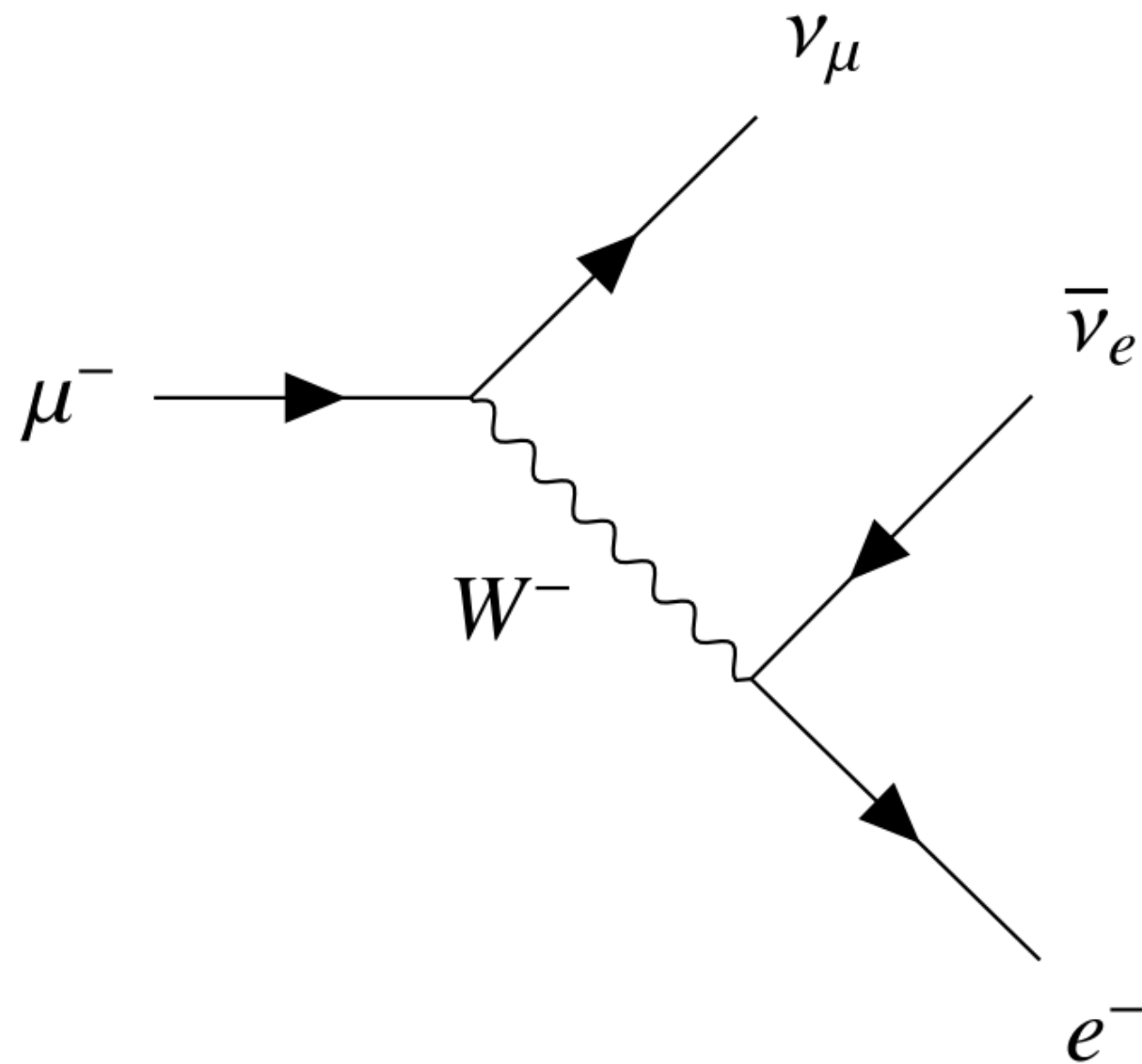


Figura 4: Esquema de un WCD. Los fotones emitidos por las partículas cargadas al interacciones con el medio son detectados por los PMT [Lu and Yuan, 2020]

# DECAIMIENTO DEL MUÓN



**Fig 5: Digrama de Feynman del decaimiento del muón (Renga, 2019).**

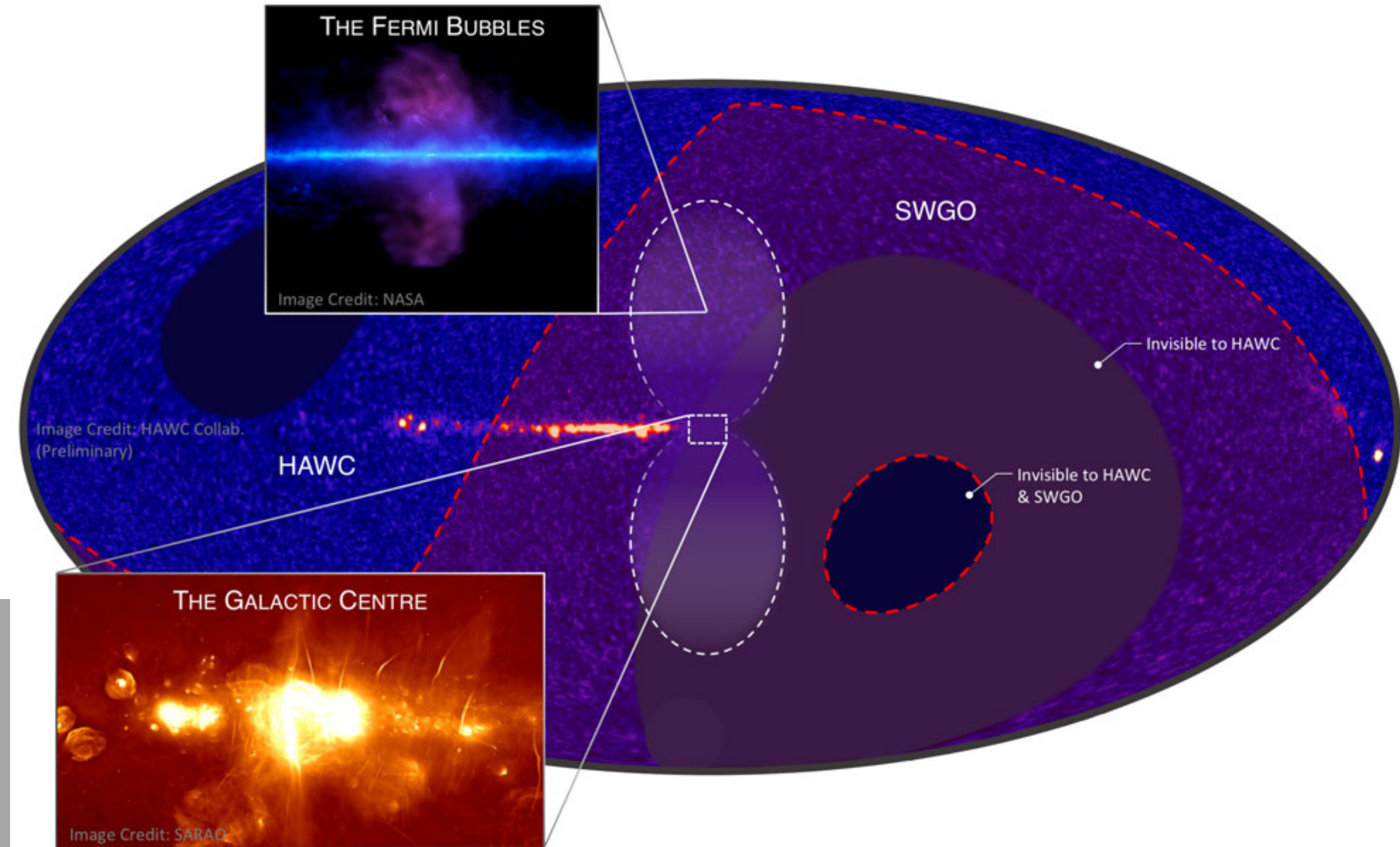
El muón, al igual que el electrón, se encuentra dentro del grupo de los leptones en el modelo estándar, ambos presentan características similares, tienen el mismo espín (1/2), pero la principal diferencia se encuentra en la masa, la masa del muón es aproximadamente 200 veces la masa del electrón y además es inestable (Olive, K. A. et al. (2014)..

**Para muones positivos:**

$$\mu^+ \rightarrow e^+ \bar{\nu}_\mu \nu_e$$



El objetivo de la colaboración es desarrollar, durante los próximos tres años, una propuesta detallada para la implementación de dicho observatorio, incluida la selección de sitios y opciones tecnológicas.



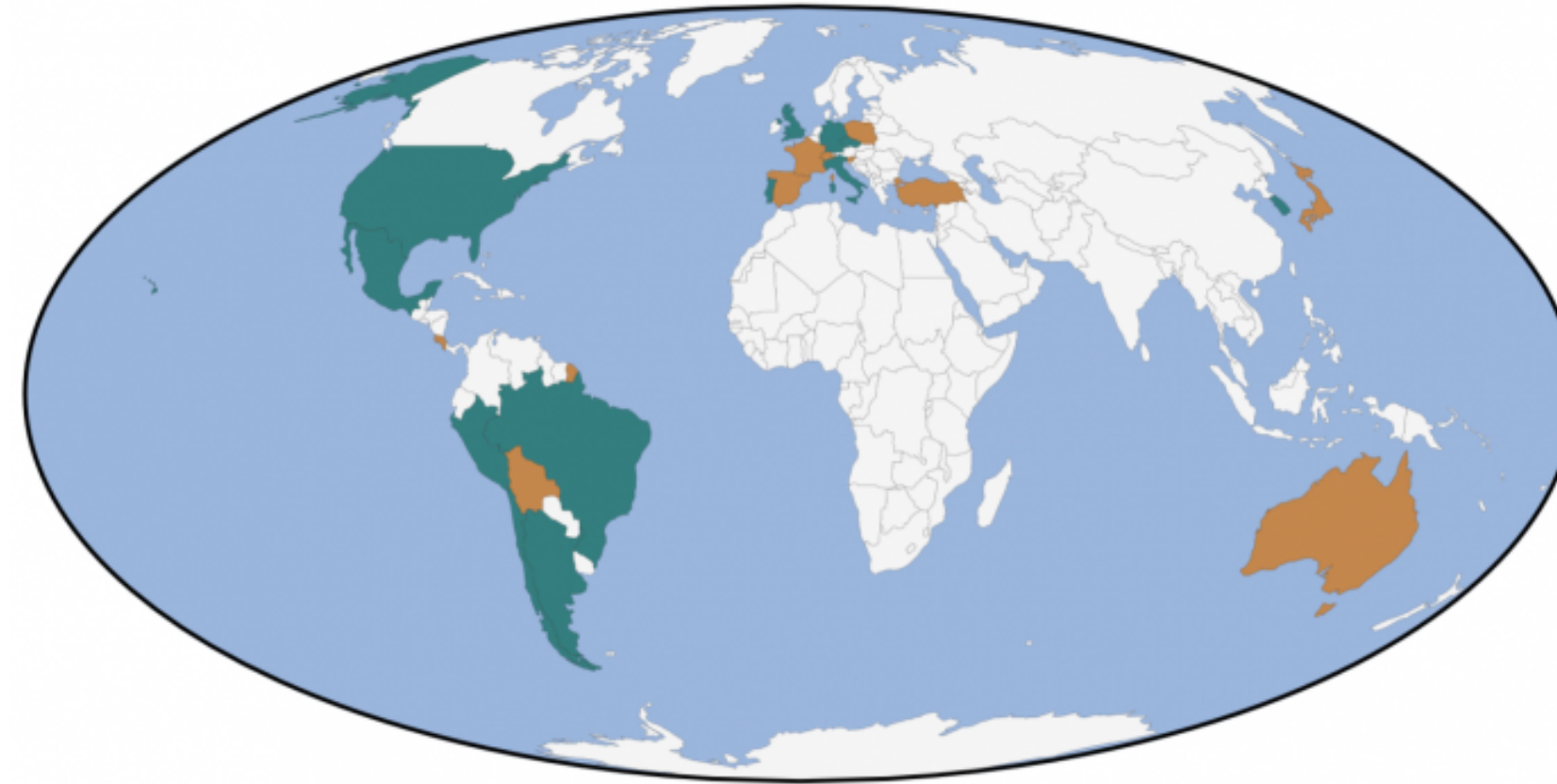


## REPRESENTANTES

- Adrian Rovero (Argentina)
- Ronald Shellard (Brazil)
- Claudio Dib (Chile)
- Jakub Vicha (Czech Republic)
- Christopher Van Eldik (Germany)
- Alessandro de Angelis (Italy, INFN)
- Marco Tavani (Italy, INAF)
- Andres Sandoval (Mexico)

• Jose Bellido Caceres (Peru)

- Mário Pimenta (Portugal)
- Jason Lee (South Korea)
- Jon Lapington (UK)
- Pat Harding (USA)



## PERÚ

• Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

- Pontificia Universidad Católica del Perú
- Universidad Nacional de Ingeniería
- Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco
- Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial del Perú (CONIDA)
- Universidad Nacional Mayor de San Marcos

# TRES DETECTORES PROTOTIPO SE INSTALARÁN EN IMATA (FINANCIADOS POR AUSTRALIA Y ALEMANIA)

**Quotation No#** 2381

4/03/2021

**Customer Details**

Astronomy Australia Limited  
P.O. Box 2100  
Hawthorn VIC 3122

**Delivery**

SWGO  
The Southern Wide-field  
Gamma-ray Observatory



16 Drury Terrace  
Tonsley SA 5042  
ABN 76 084 835 905



Description	Qty	Each	Total
Aquamate SWGO Water Tank 3.9m Diameter x 3.6m High Complete with Enclosed Bag Liner with opening flap NSF/ANSI 61 certified for Potable Water Delivered CIP to Port of Callao Peru Includes Freight & Origin Charges Excludes Destination & Duty Charges	3	8,500.00	25,500.00
Aquamate SWGO Water Tank 3.9m Diameter x 4.3m High Complete with Enclosed Bag Liner with opening flap NSF/ANSI 61 certified for Potable Water Delivered CIP to Mexico City Railhead Mexico Includes Freight & Origin Charges Excludes Destination & Duty Charges	1	10,200.00	10,200.00

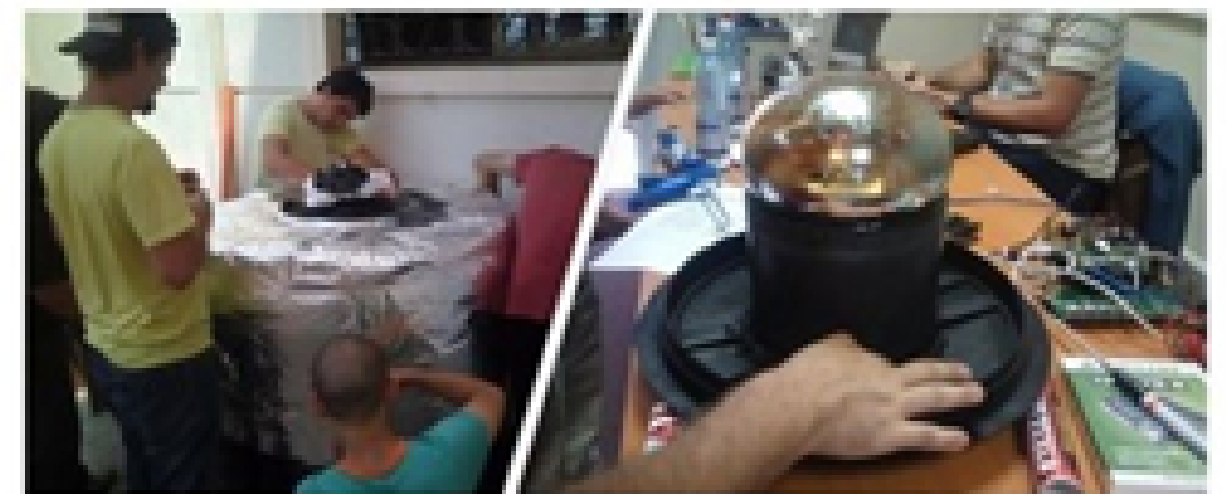
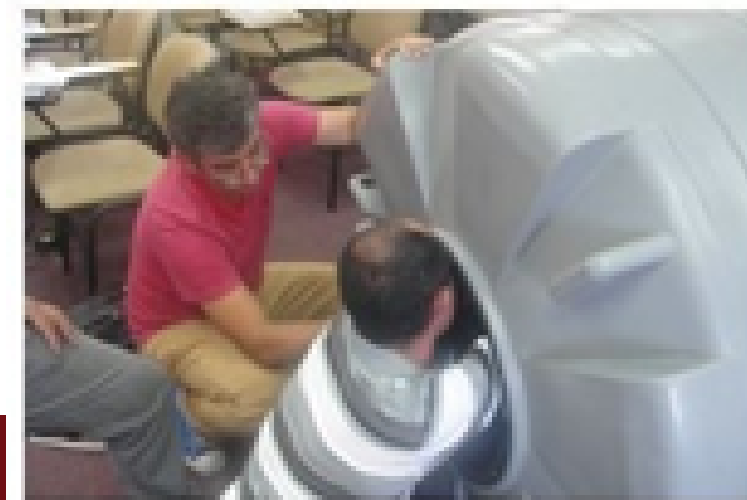
# LAGO: LATINO AMERICAN GIANT OBSERVATORY



Observatorio de Rayos  
Cósmicos Secundarios  
Descentralizado don  
presencia en 10 países de  
Latino America, España y la  
Antartida

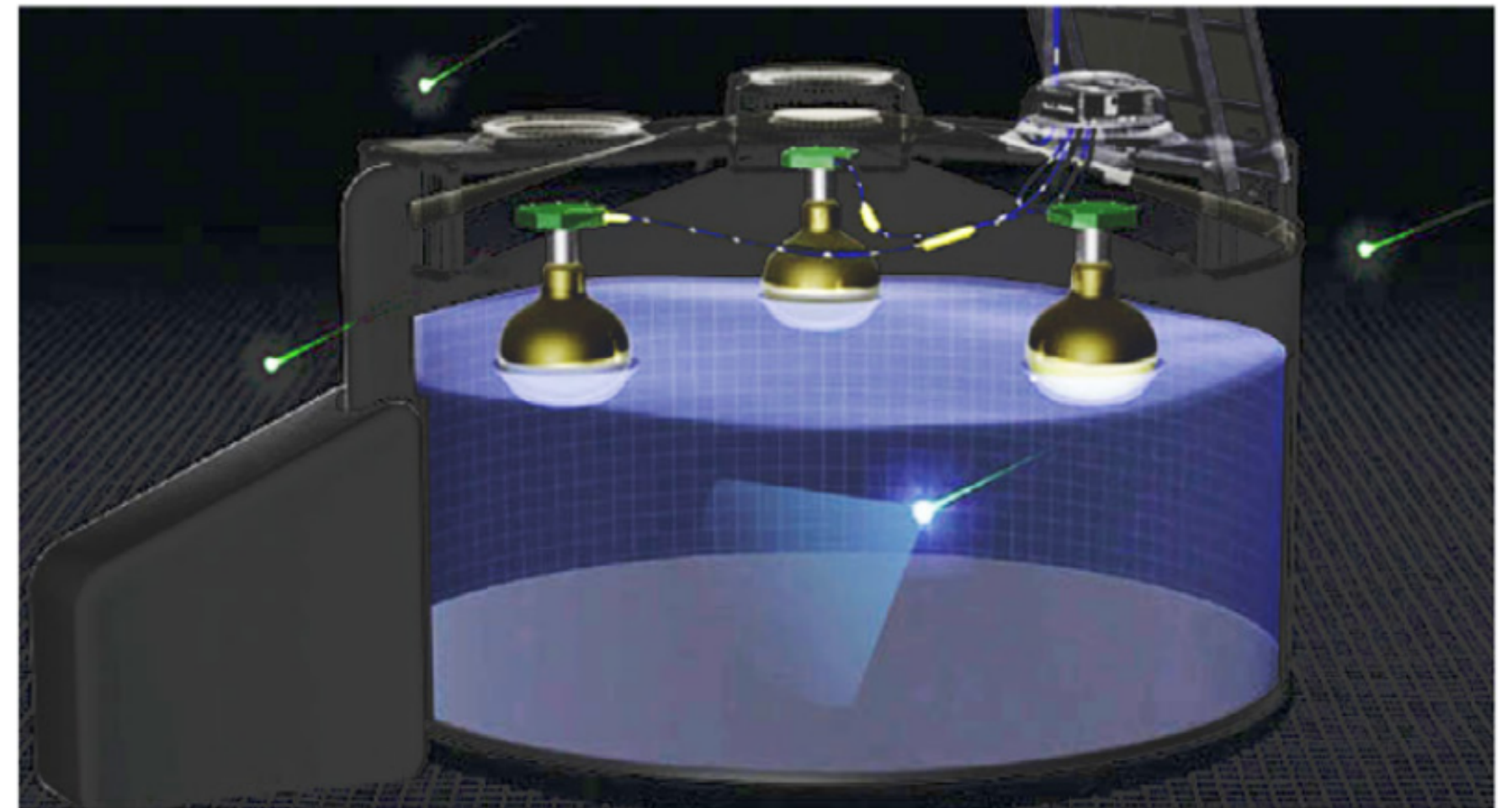
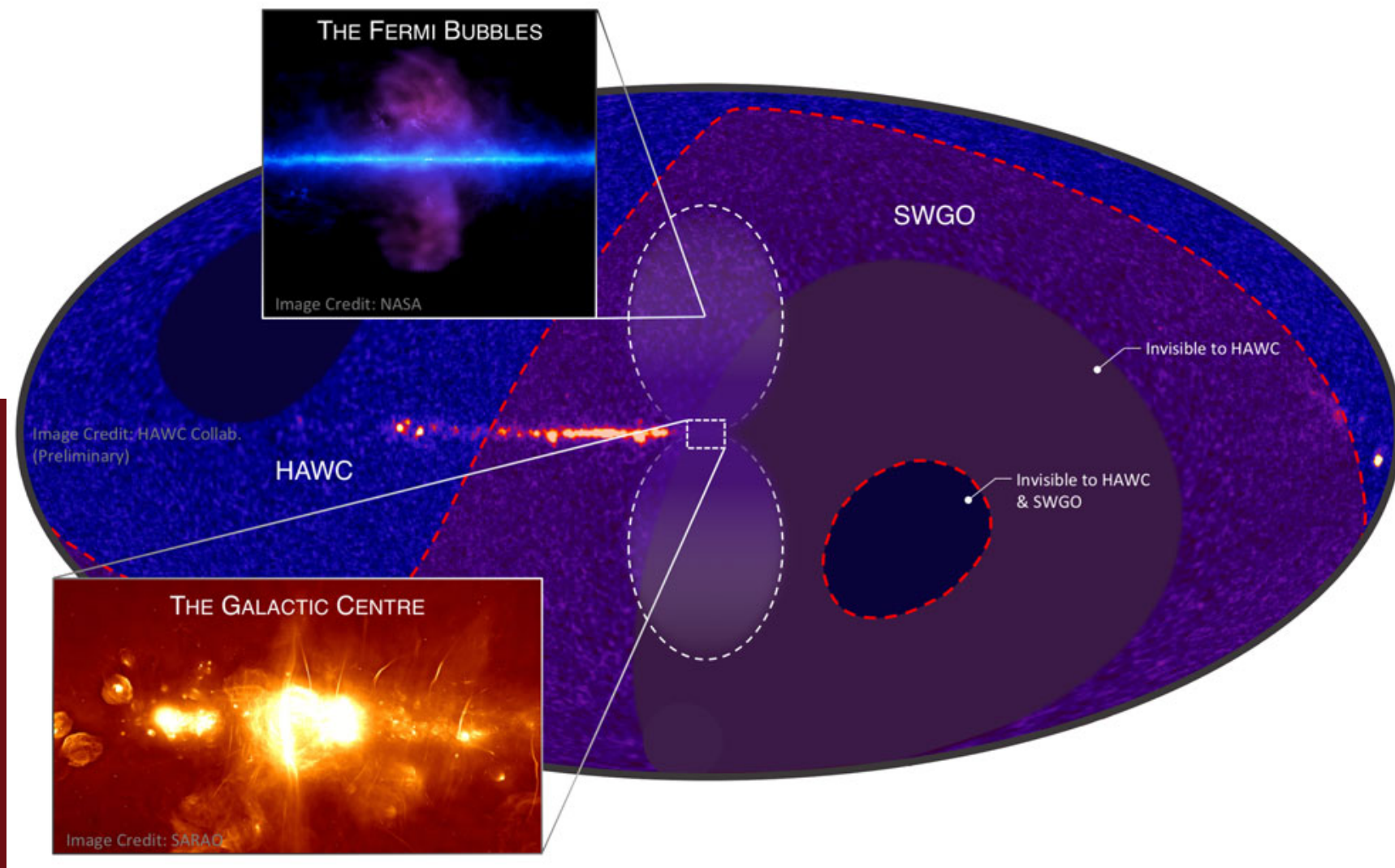
## Objetivos

- Estudiar el Universo Extremo.
- Estudiar el Clima Espacial.
- Estudiar la radiación de fondo.
- Formar una comunidad científica en física de altas energías.

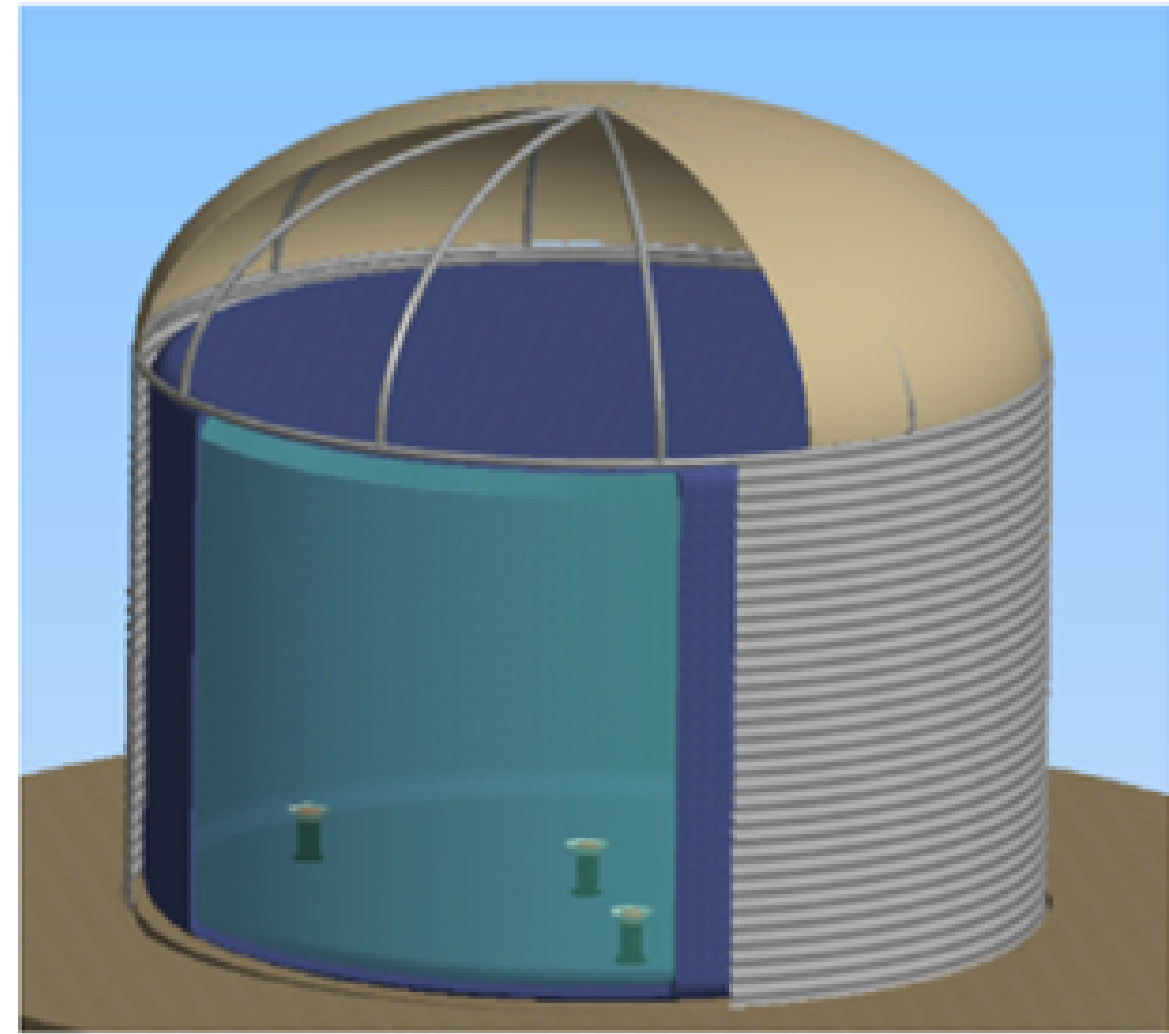


# IMPORTANCIA DEL TRABAJO

El centro de nuestra galaxia solo puede ser observado desde el Hemisferio Sur. Es por ello que colaboraciones científicas internacionales como SWGO (Southern Wide-field Gamma-ray observatory) pretenden construir observatorios para la detección de rayos cósmicos y rayos gamma. Los tanques cherenkov de agua son instrumentos que permiten la detección de estos eventos, por lo que es necesario realizar un protocolo de calibración y monitoreo de la respuesta de estos detectores.



# MÉTODO



# DETECTORES CHERENKOV DE LAGO (Nahuelito)

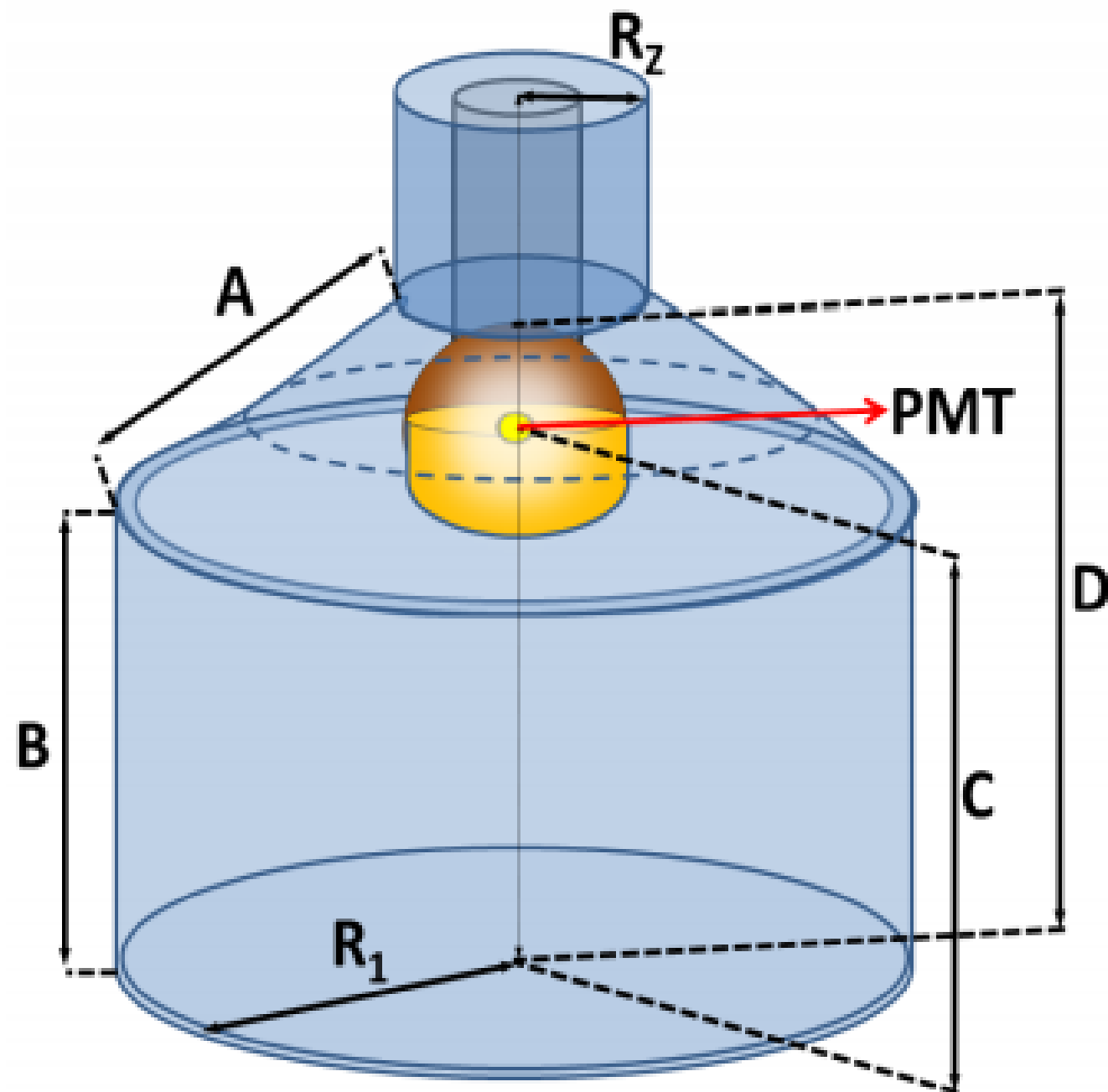
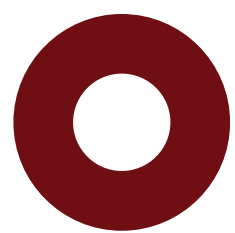


Figura 8: Esquema del tanque Nahuelito.

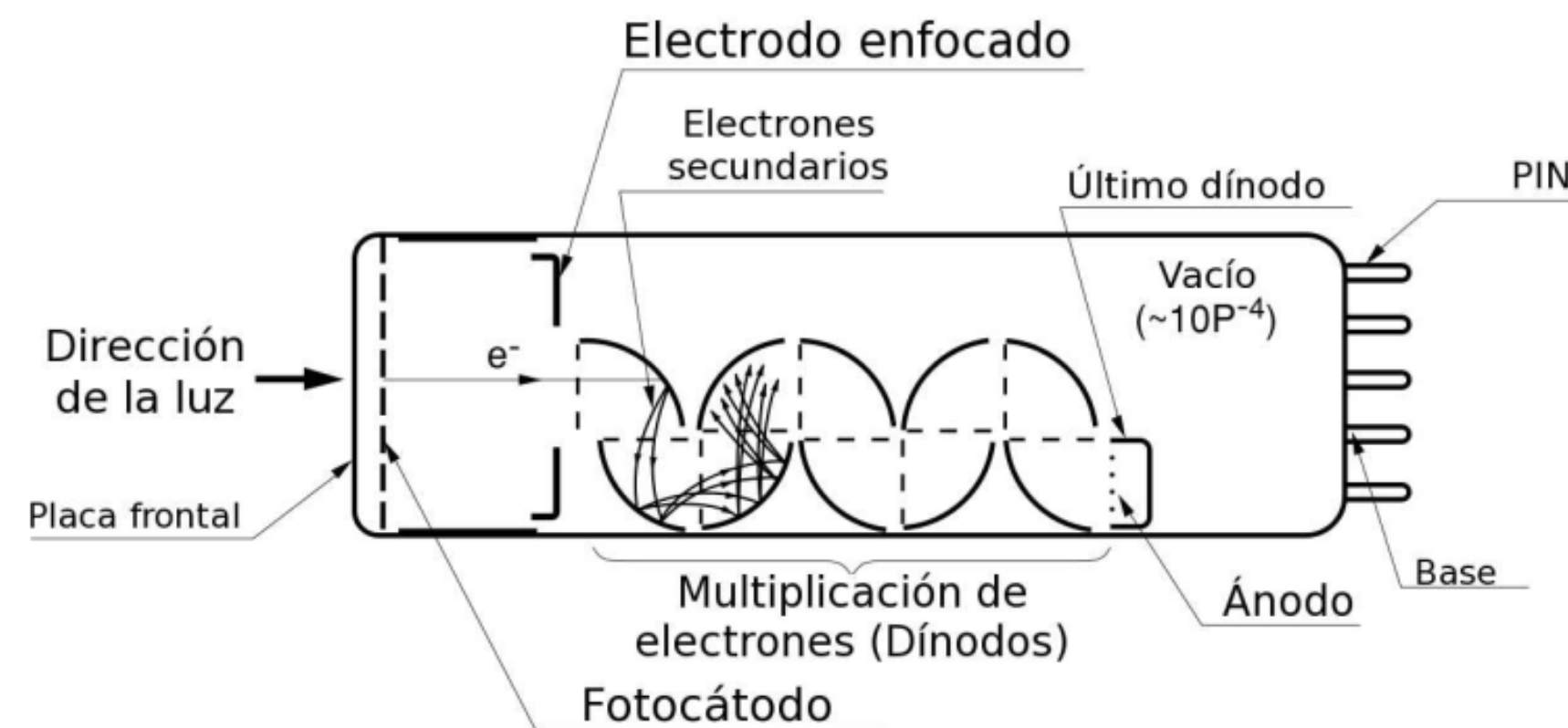
- **TANQUE:** comercial (resina de polietileno)
- **AGUA:** destilada, debe tener un coeficiente de absorción bajo para garantizar la libre propagación de los fotones dentro del tanque.
- **TYVEK:** buena reflectividad y una alta difusión de la luz (96%-99%)
- **Dimensiones:** 1.46m de nivel de agua y  $1.53\text{m}^2$  de superficie.



# TUBOS FOTOMULTIPLICADORES (PMT)

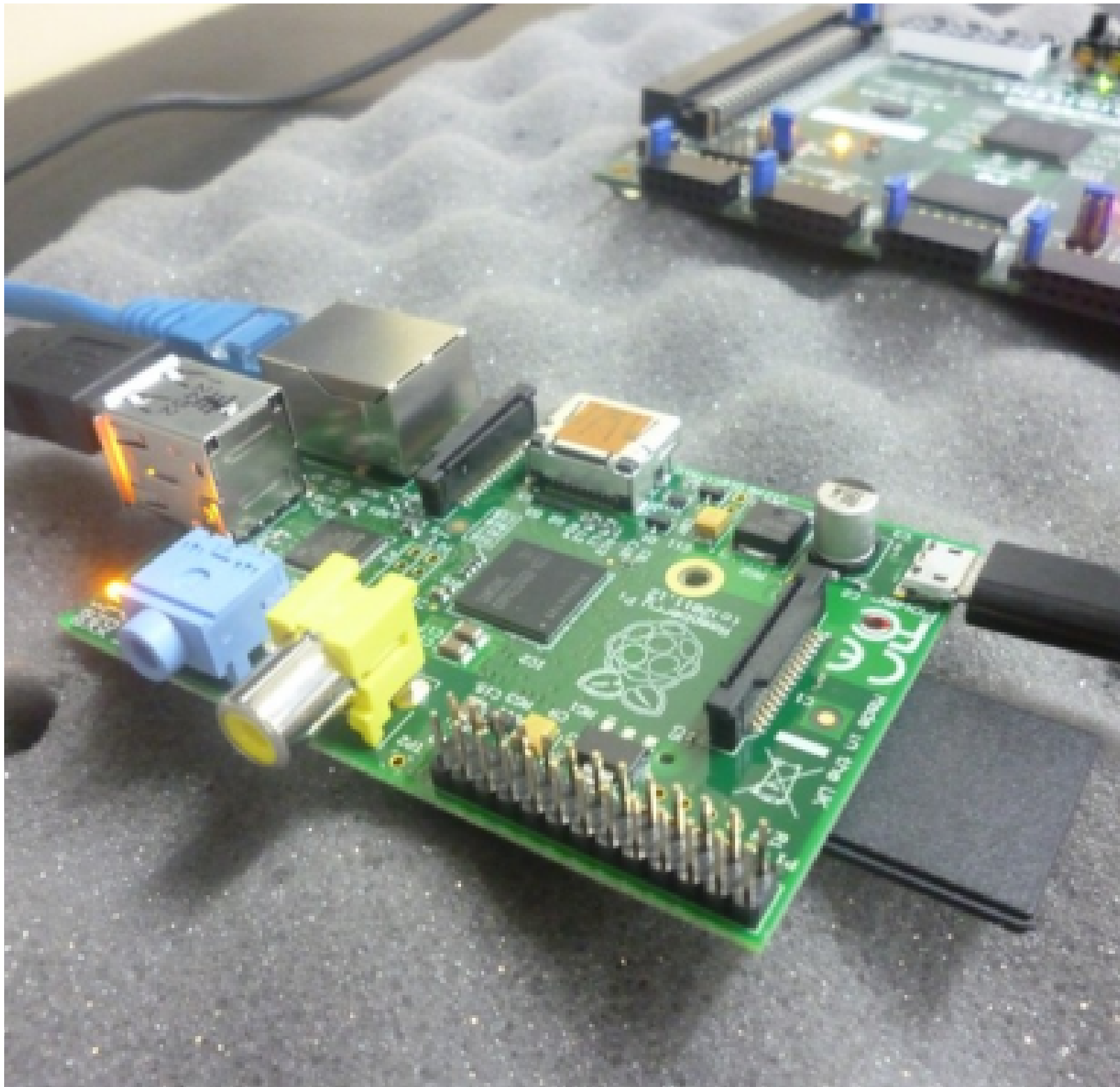
Un fotomultiplicador es un dispositivo de detección de luz que convierten la luz recibida en una señal eléctrica medible.

Un fotomultiplicador consiste en un tubo sellado al "vacío" que tiene una ventana de entrada fabricada de vidrio o cuarzo, un fotocátodo, electrodos enfocados, etapas de multiplicación de electrones llamados dínodos y un ánodo (Bonilla, 2013).



**Figura 9:** Esquema general de los elementos que conforman un PMT (**Hamamatsu Photonics ,1998**).

# SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS



- Señal analógica, en pulsos entregado por el tubo fotomultiplicador.
- Amplifica la señal (mv) y la filtra
- El sistema de adquisición de LAGO tiene hasta 3 canales independientes
- Tiene una velocidad de digitalización de 40 Mhz, por ende el tiempo entre cada evento digitalizado es de 25 ns



# DIGITALIZACIÓN Y ESTRUCTURA DE LOS PULSOS

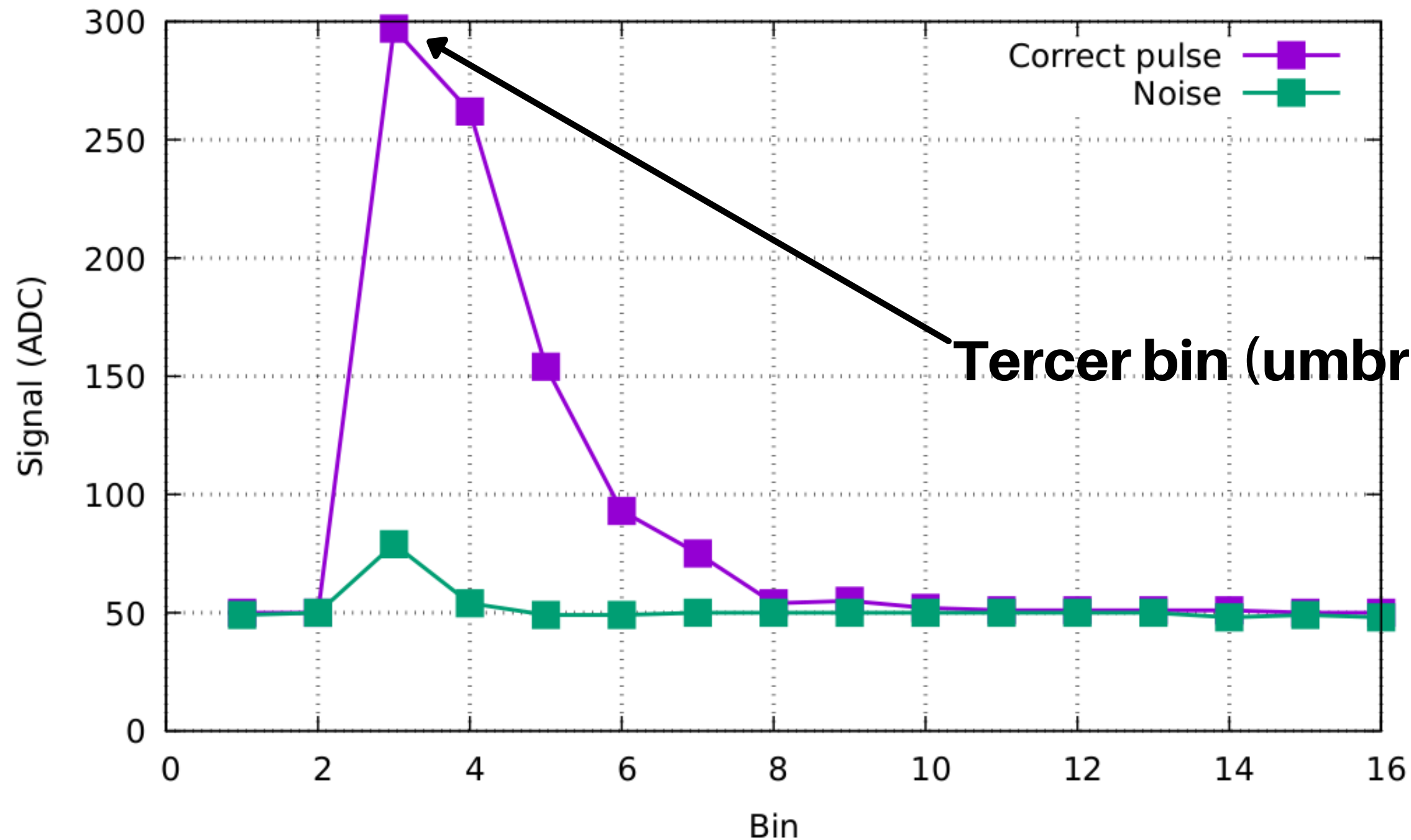


Figura 10: Digitalización de pulsos

50	51	50
52	50	50
85	50	297
78	51	262
60	50	154
61	50	93
50	50	75
51	49	54
50	50	55
50	49	52
50	50	51
50	49	51
51	50	51
50	50	51
50	50	50
51	51	50
# t	4	39907693
# c		148796394

Marcador de tiempo (ciclo temporal)



# DIGITALIZACIÓN DE PULSOS

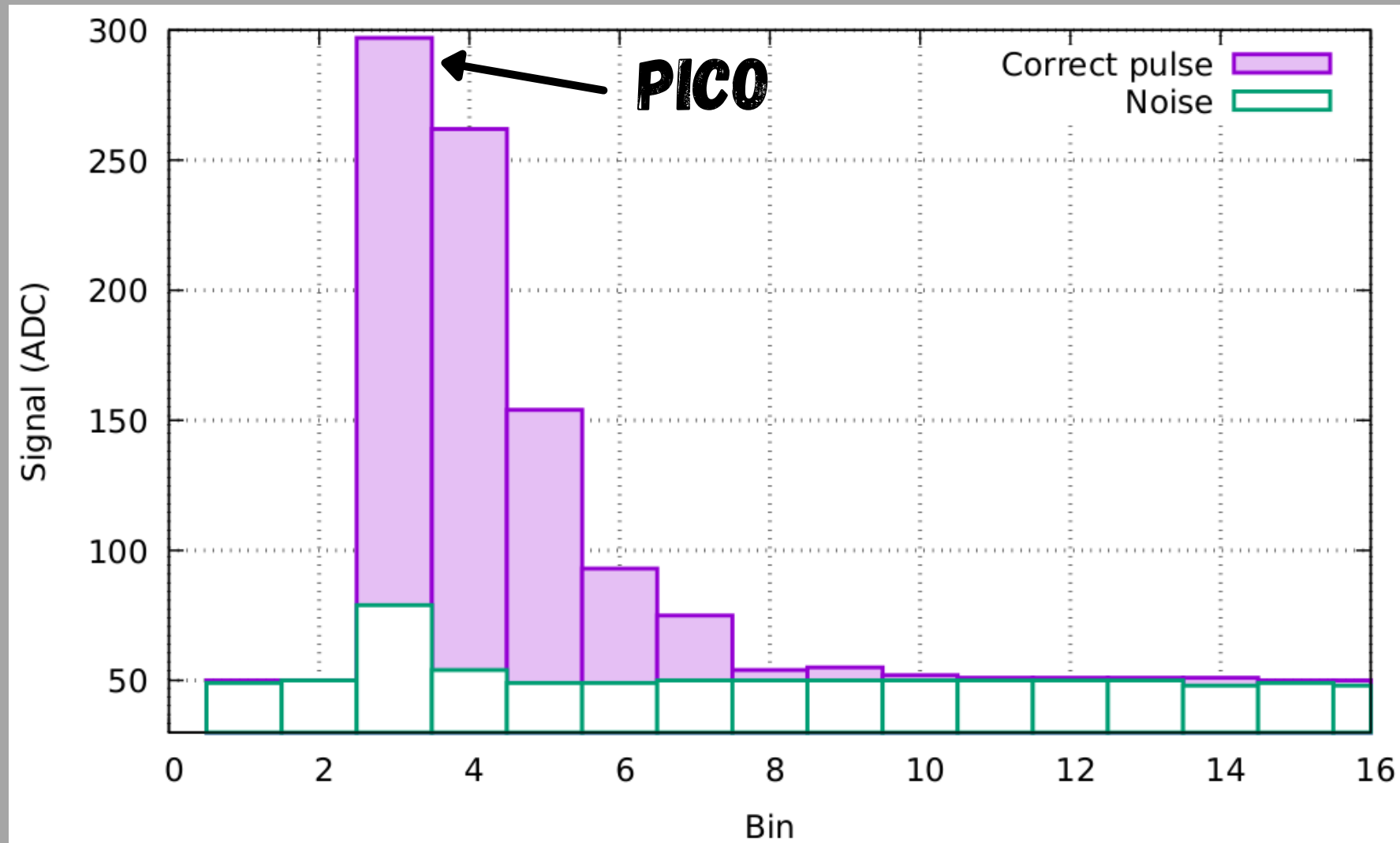


Figura 11: Gráfica de un pulso digitalizado



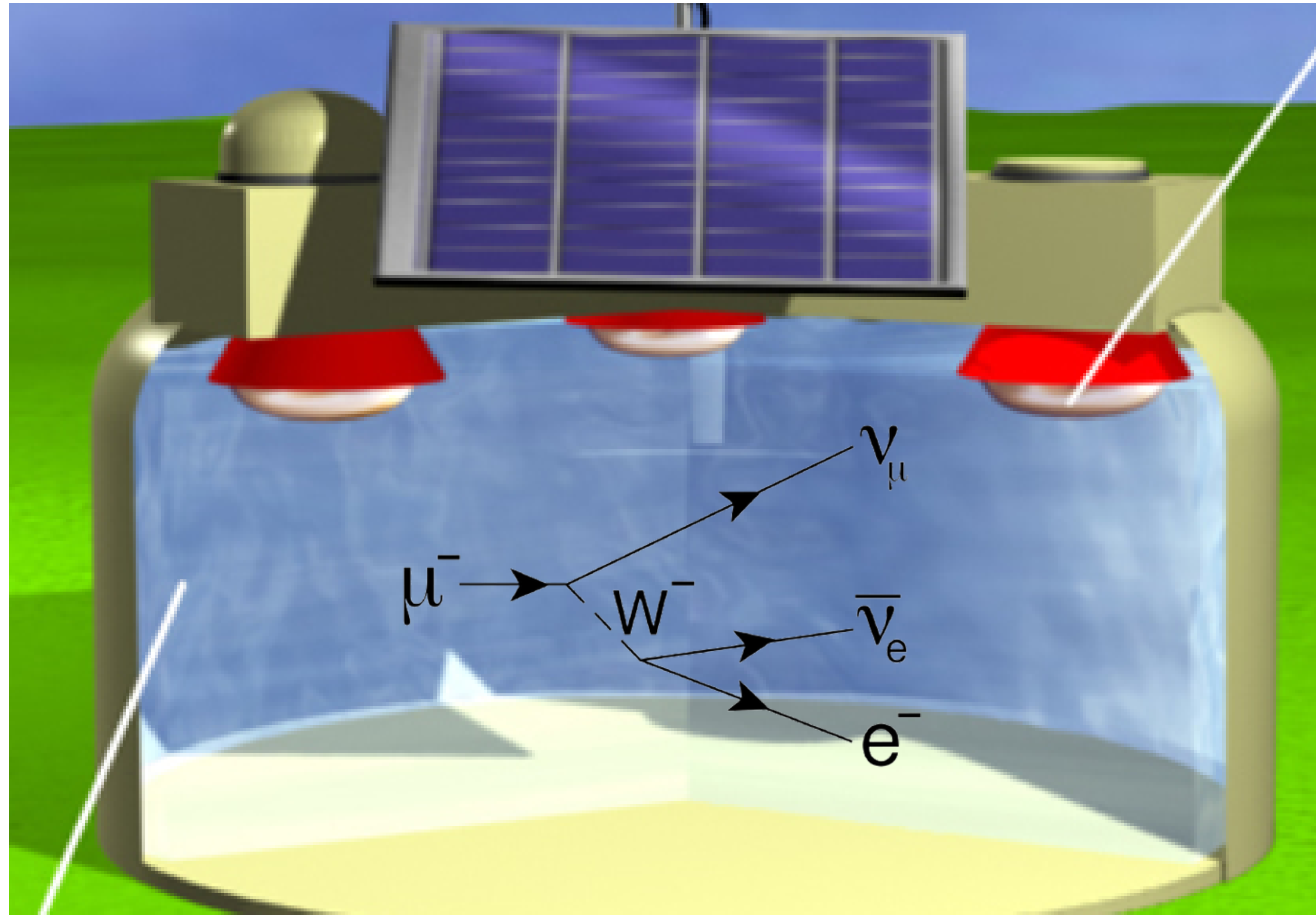
**CARGA**

$$Q \sim \sum ADC$$

**PICO**

$$ADC_{\text{máx}}$$

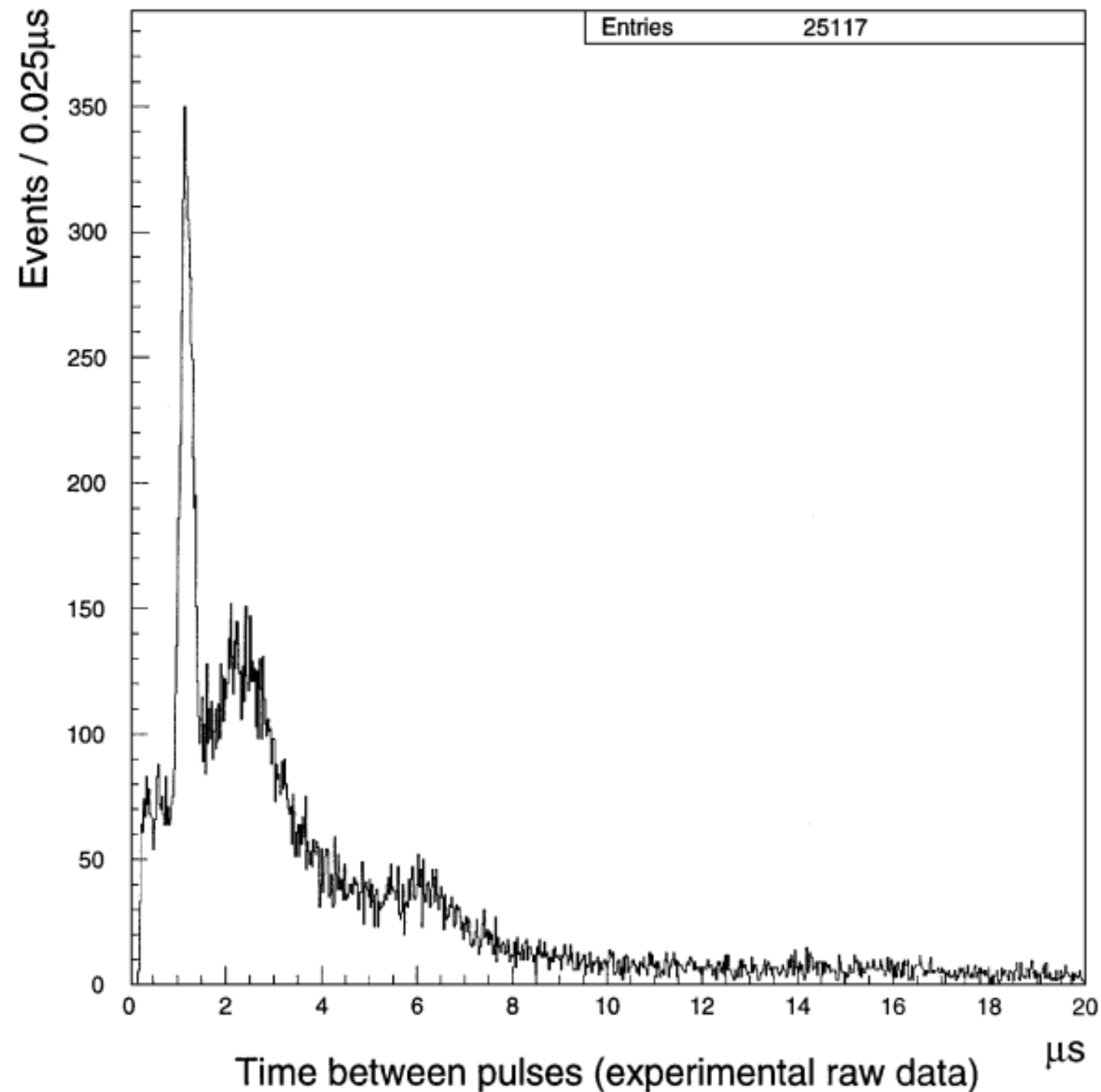
# DECAIMIENTO DE MUONES DENTRO DEL TANQUE



**Muones de hasta 300MeV tienen la probabilidad de decaer dentro del tanque. El electrón producto de dicho decaimiento de conoce como electrón de Michel.**

# Histograma de diferencias temporales

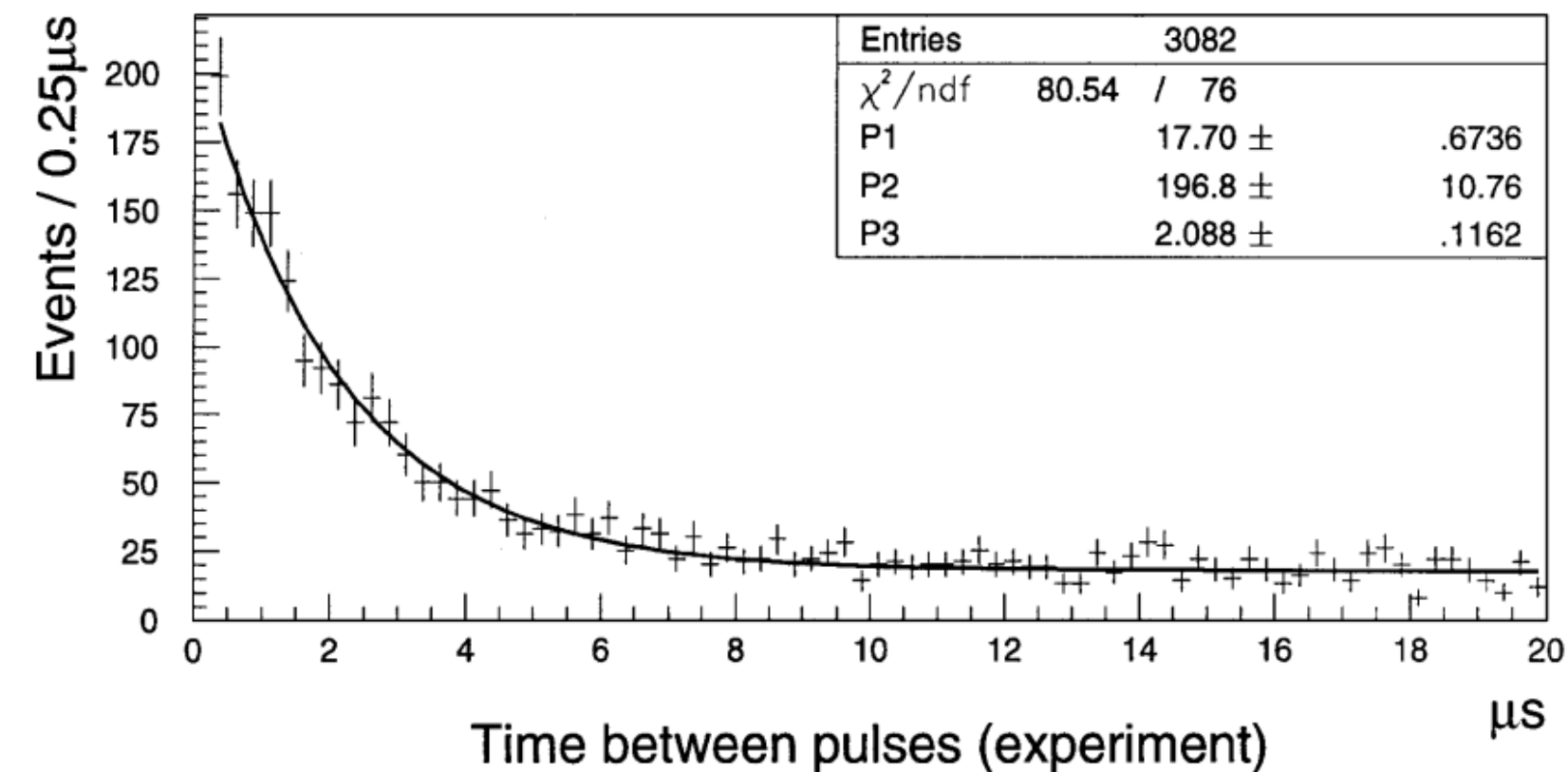
## Datos en bruto



Filtro



## Datos filtrados



**Figura 12: Histograma de diferencias temporales (M. Alarcón, F. Alcaraz y et al. 1999)**

# LIMPIEZA DE DATOS

## PRIMER FILTRO: TRIGGER EN EL CUARTO BIN

Los pulsos de ruido tienen tiempos característicos de pocos nanosegundos de duración (debería levantarse solo el tercer bin).

Podemos agregar un umbral o trigger al cuarto bin para eliminar pulsos de corta duración.

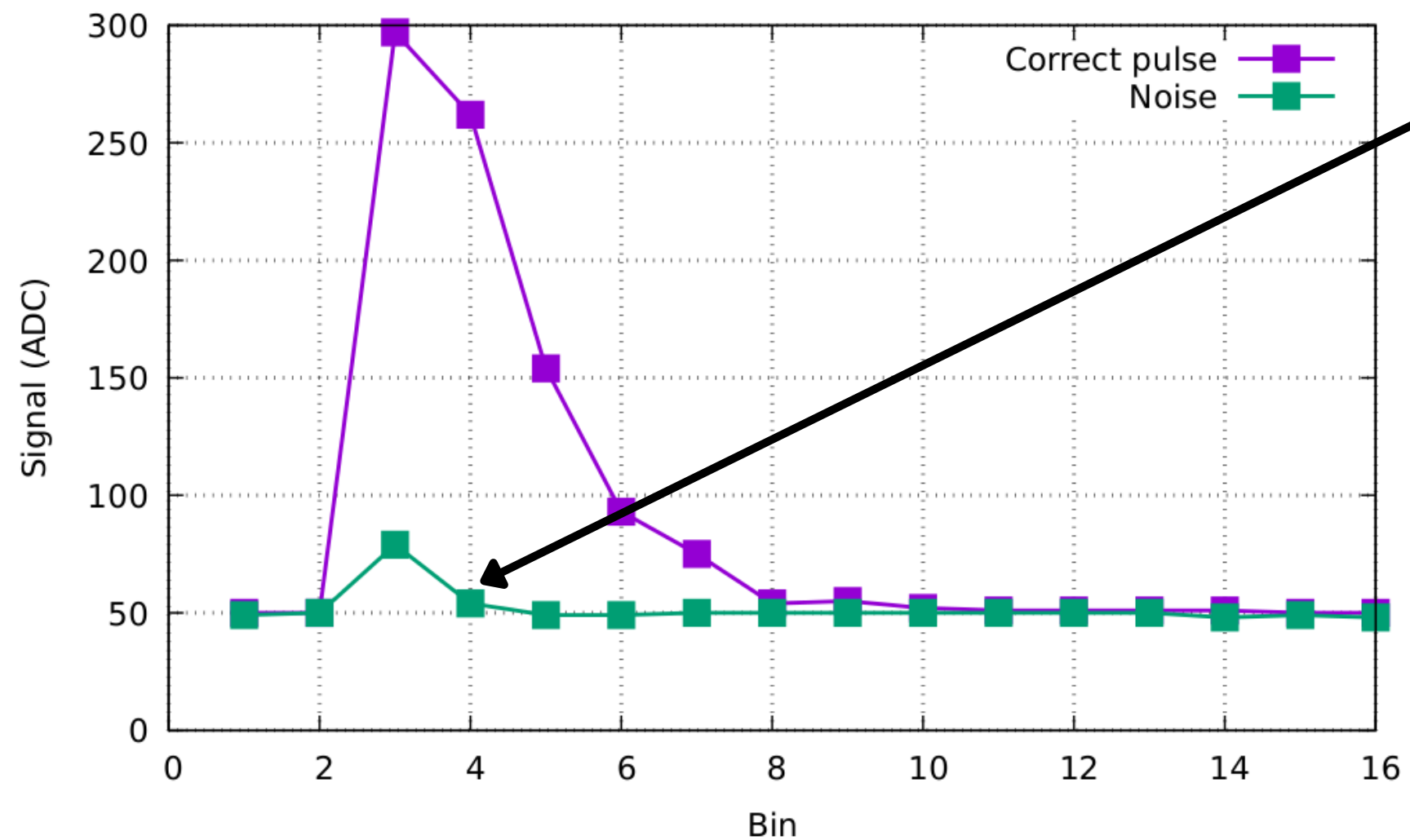


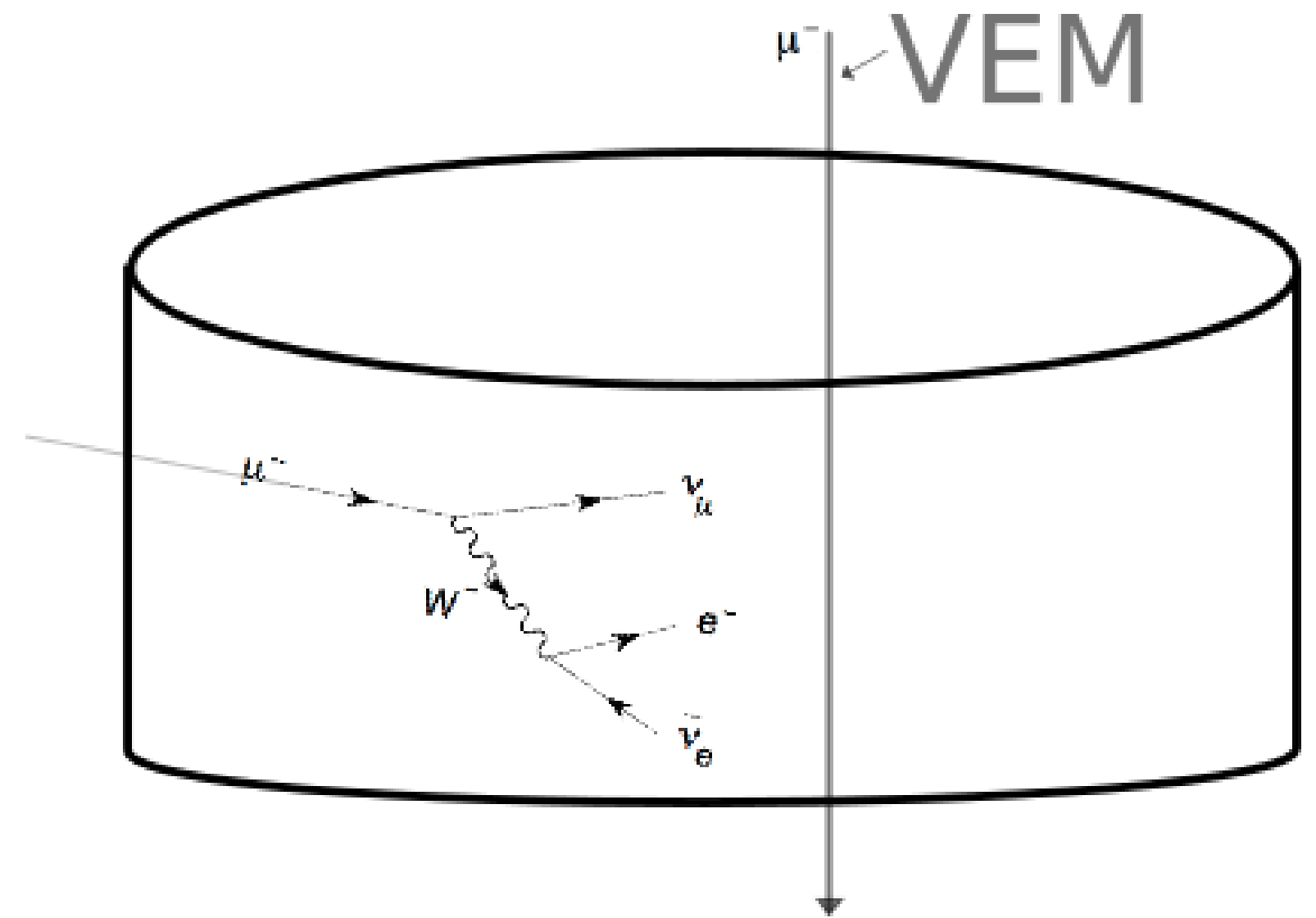
Figura 13: Pulso de ruido de corta duración (línea verde)

```
51 50 50
52 50 50
55 50 89
50 50 60
52 50 54
50 51 52
51 50 50
50 49 51
49 50 51
51 51 52
50 50 52
50 50 50
51 51 49
51 50 50
50 51 49
50 51 50
# t 4 39582675
# c 148796391
```

# HIPÓTESIS DEL CORTE DE VEM

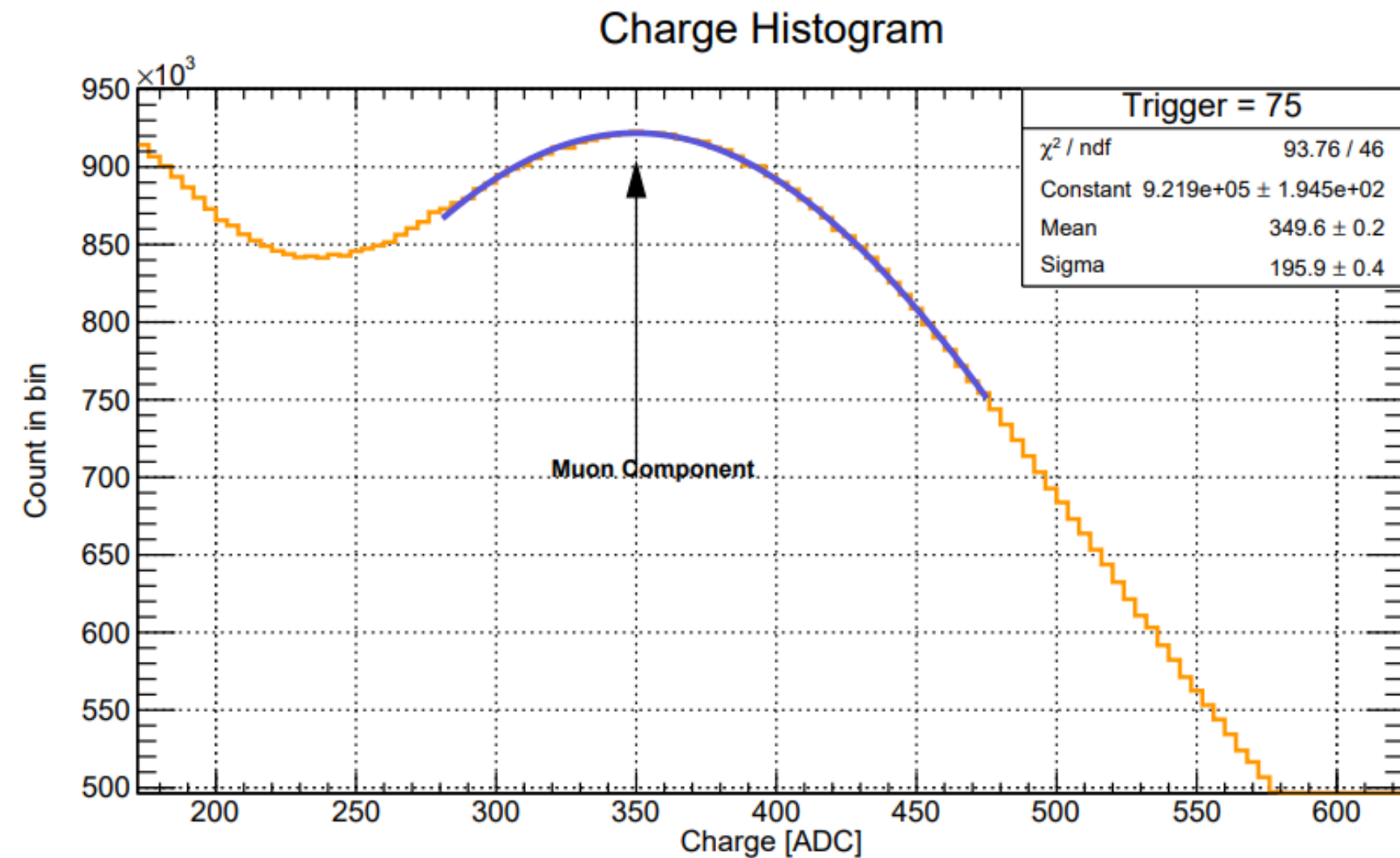
Por lo expuesto anteriormente, podemos tomar dos pulsos consecutivos de los cuales se espera que el primero se deba al muón decayente y el segundo al electrón resultante, por ende, la señal detectada del muón decayente debe ser menor que la señal de muón que atraviesa verticalmente el tanque (VEM).

Para realizar un procedimiento sistemático vamos a tomar distintas fracciones del VEM.



**FIGURA 14: DECAIMIENTO DE UN MUON EN UN TANQUE CHERENKOV Y LA SEÑAL DEL VEM**

# CALIBRACIÓN ADC VS ENERGÍA



**Figura 15: Ajuste Gaussiano para la determinación del VEM y equivalencia a energía (Machado Perez et al, 2019).**

1 En el Histograma de carga, identificar la región correspondiente a las partículas muónicas.

2 Ajustar una función gaussiana para encontrar el máximo de la componente muónica :

$$f(x)=a*\exp(-(x-b)^2)/c$$

3 La energía correspondiente a dicho máximo es decir la energía depositada más probable será el producto del nivel del agua por el stopping power en el agua:

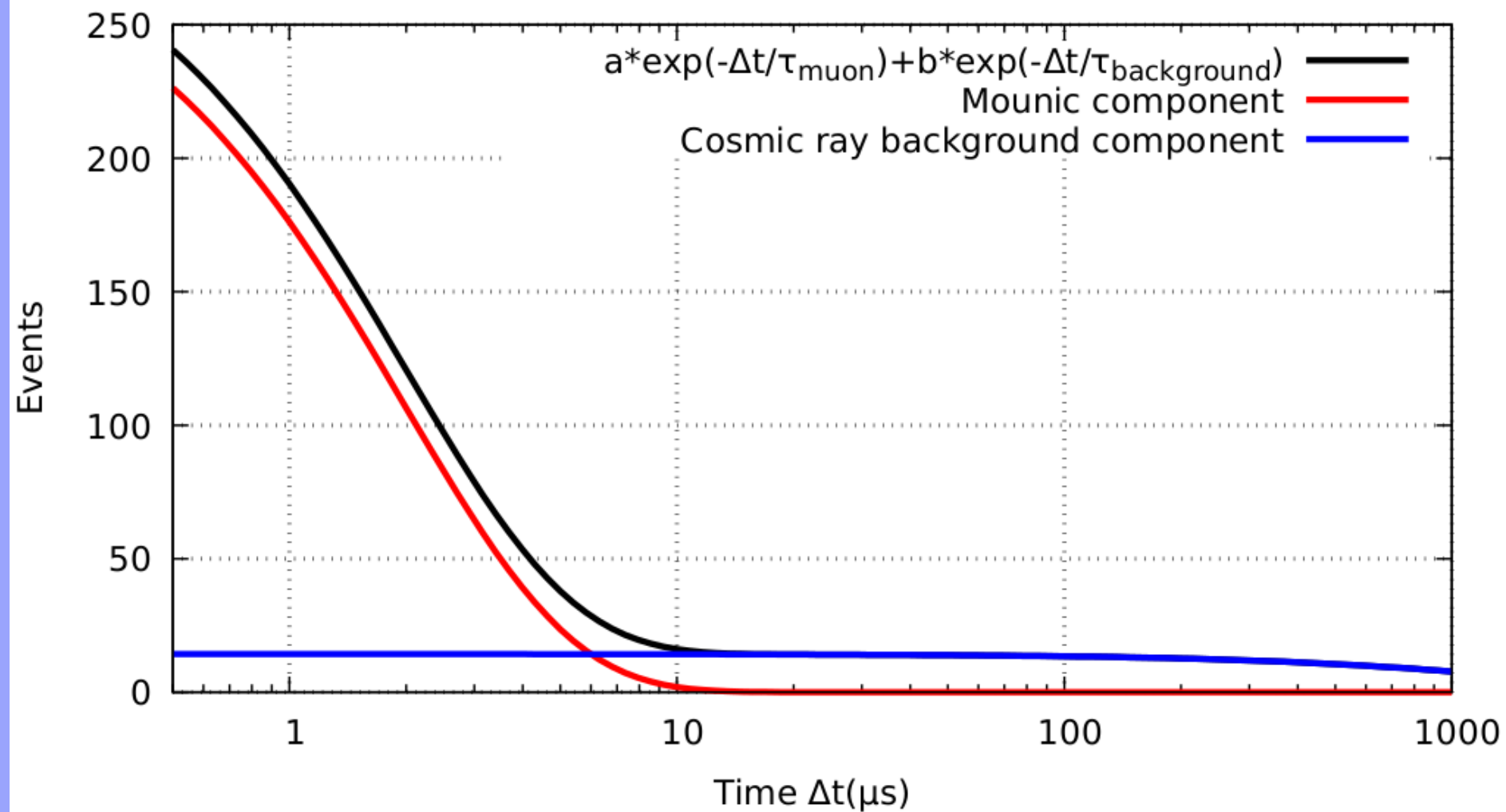
$$h(\text{cm}) \times 2,0 \text{ MeV/cm} = Y \text{ (Mev)}$$

$$b \text{ (ADC)} = Y \text{ (Mev)}$$

# MODELO DE AJUSTE

$$f(t) = Ae^{-\frac{t}{B}} + Ce^{-\frac{t}{D}}$$

Histogram of time differences

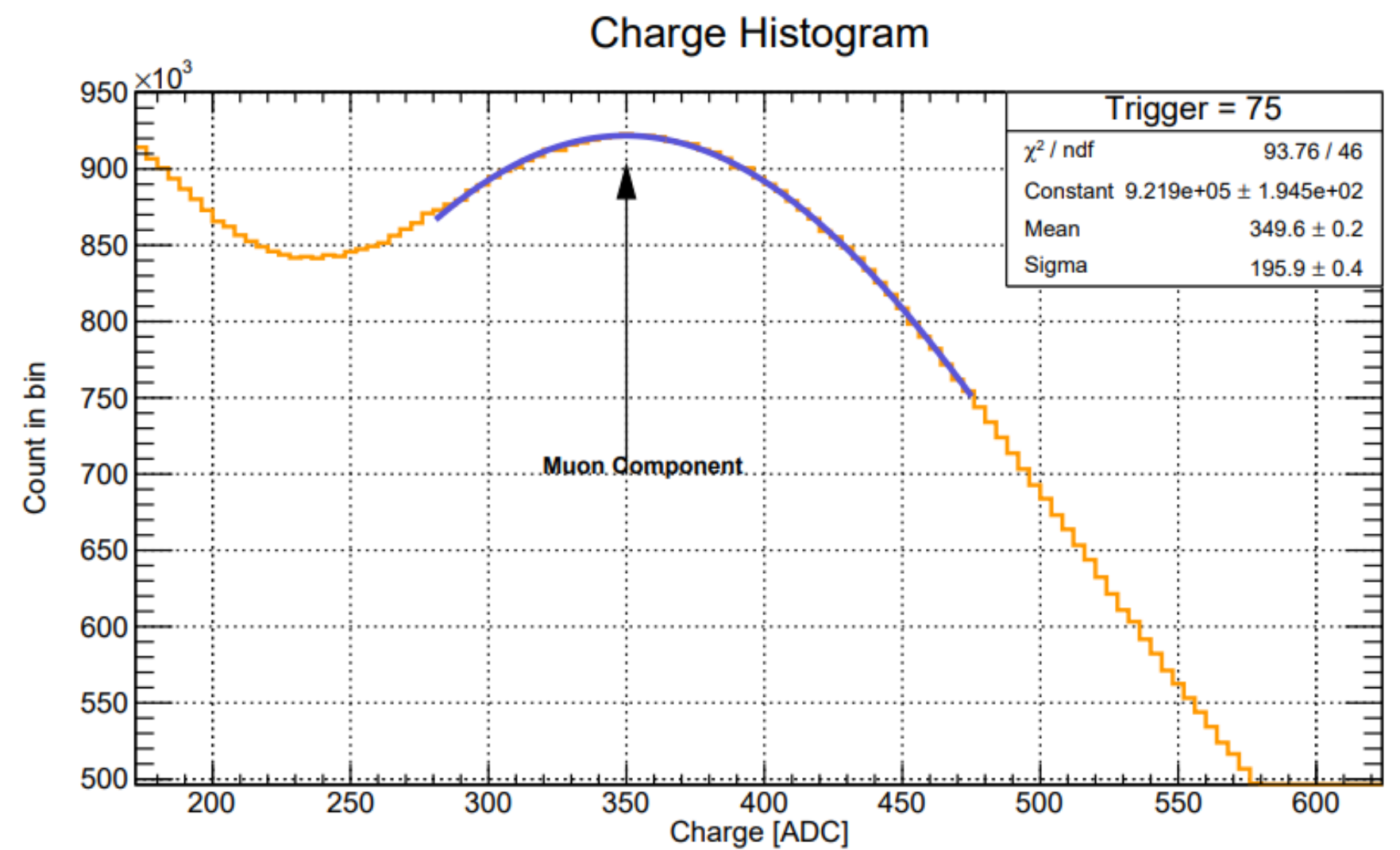
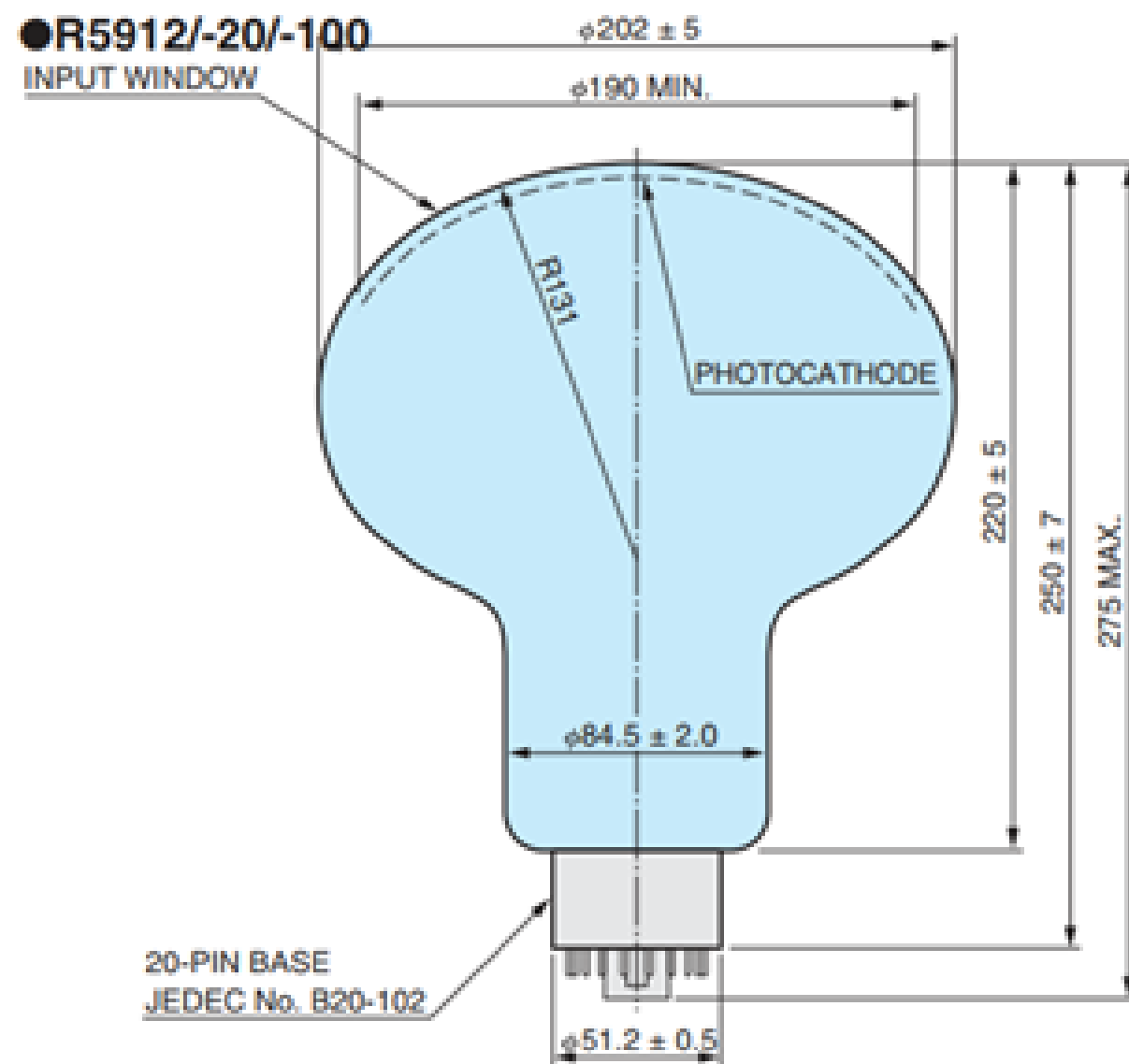


**Figura 16: Espectro de diferencial temporales esperado, y su ajuste.**

Seguidamente, se pasa a obtener el porcentaje de abundancia de componente muónica frente a rayos cósmicos para en el histograma. Este porcentaje de abundancia se calcula resolviendo la integral con los parámetros de ajuste en un intervalo de tiempo donde domina la componente muónica.



# RESULTADOS Y DISCUSIONES



# HISTOGRAMAS TÍPICOS

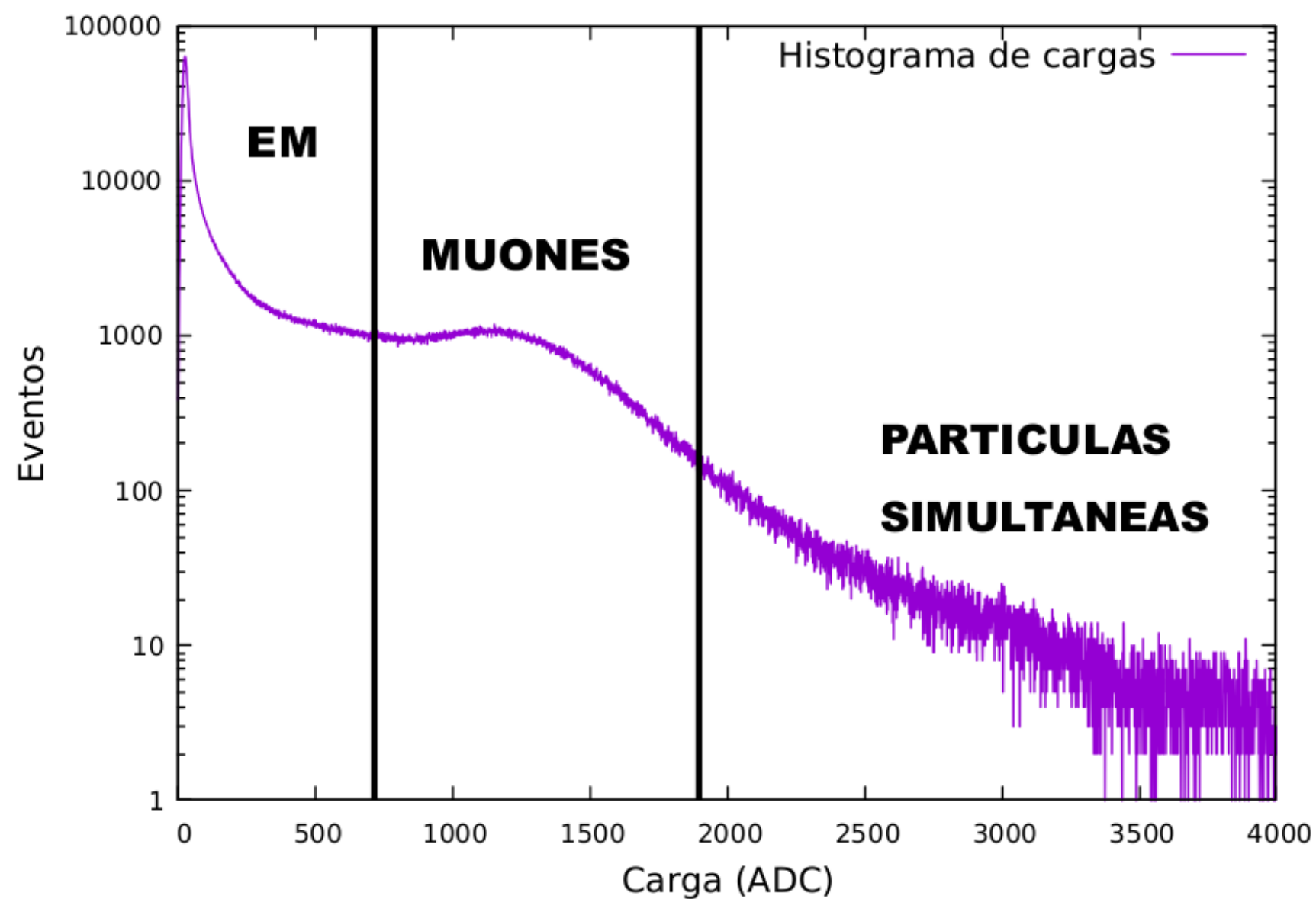


Figura 17: Histograma de cargas.

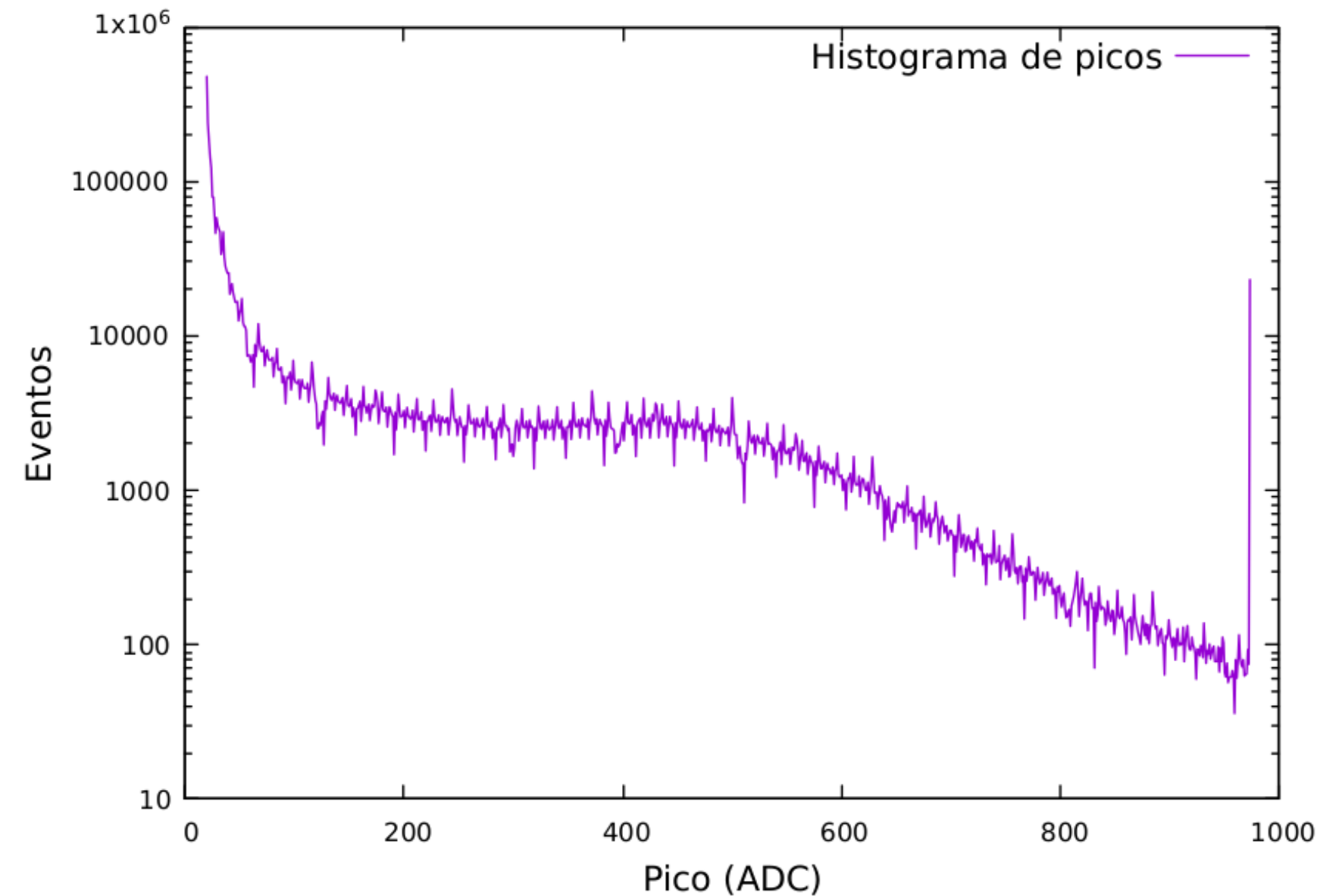
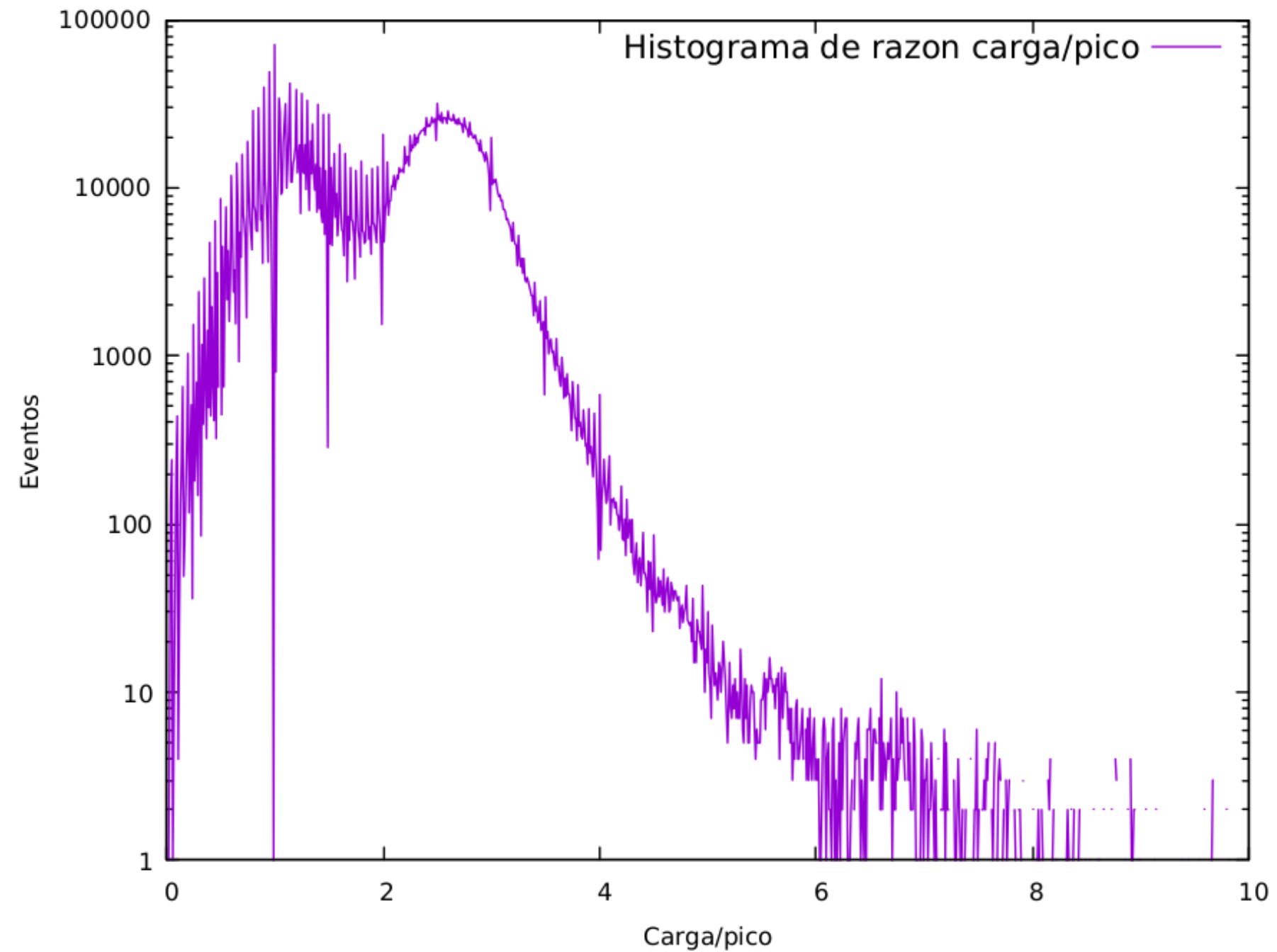


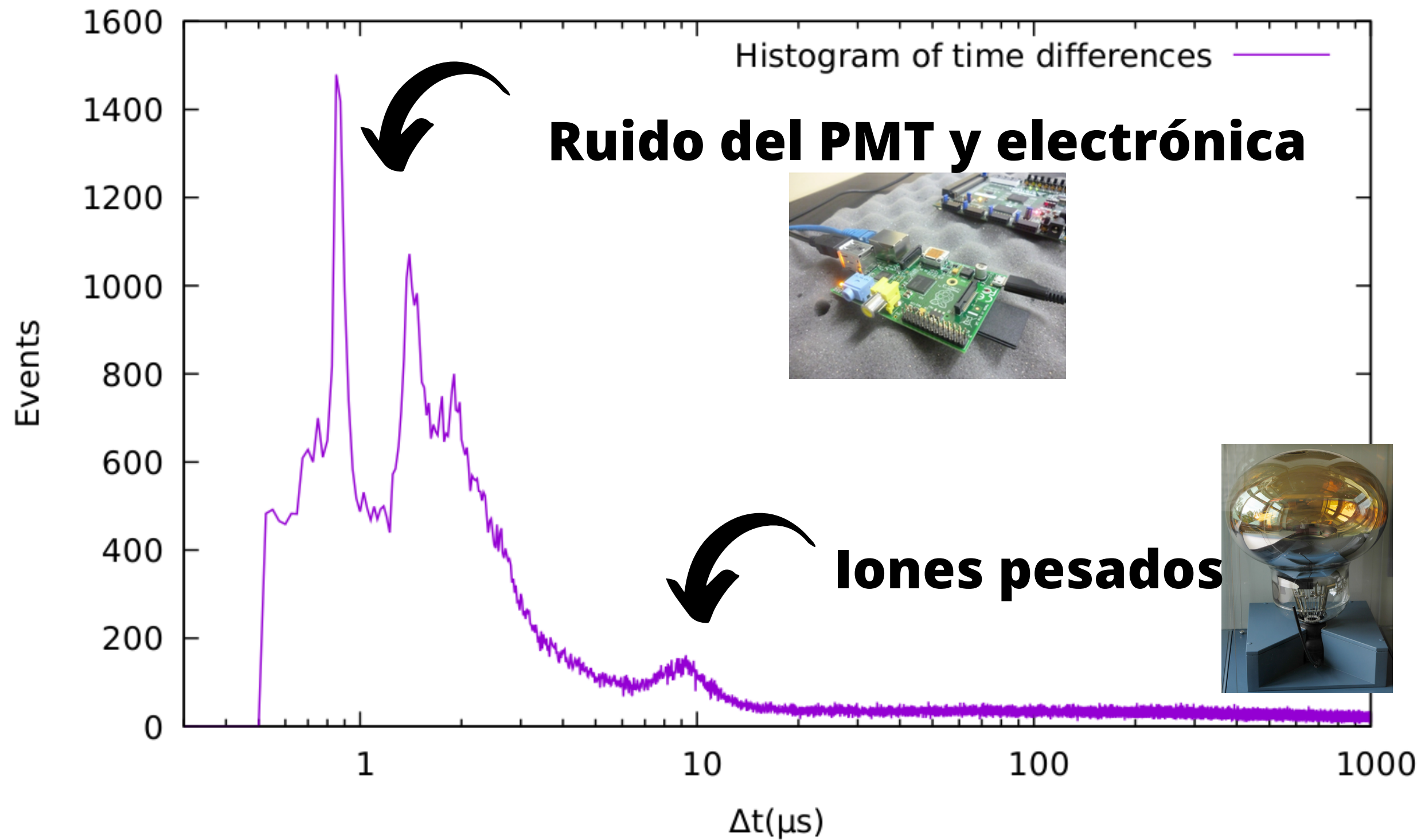
Figura 18: Histograma de picos

# HISTOGRAMAS TÍPICOS

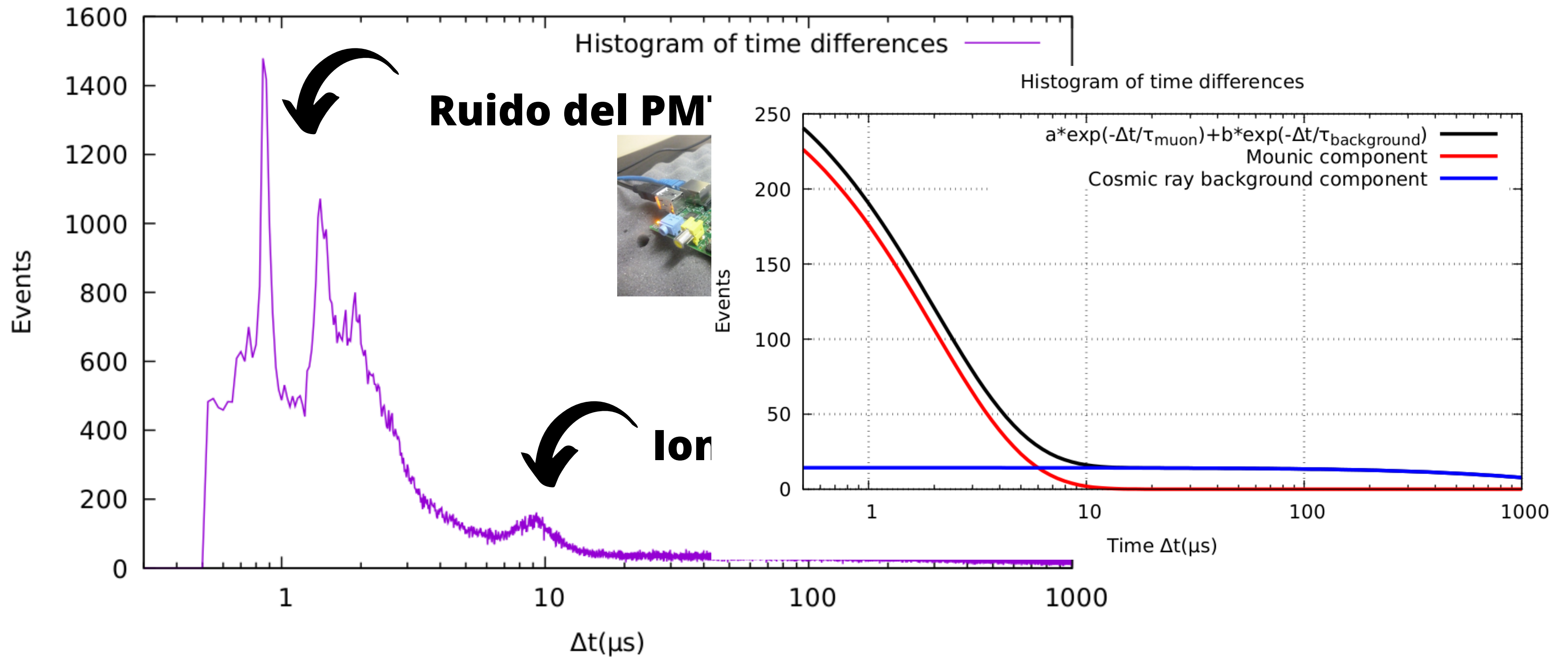


**Figura 19: Histograma de la razón carga entre pico.**

# HISTOGRAMA DE DIFERENCIAS TEMPORALES OBTENIDO



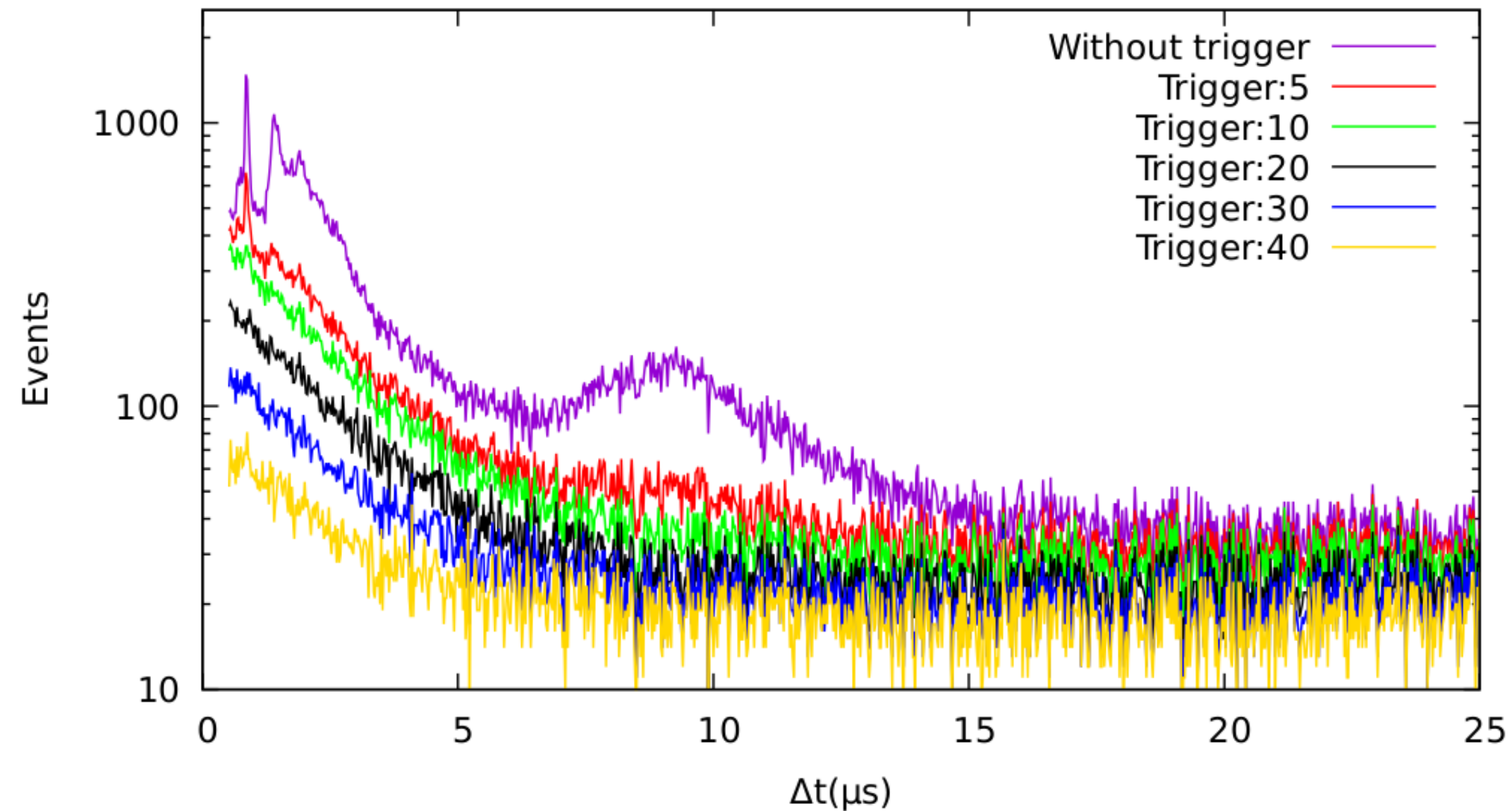
# HISTOGRAMA DE DIFERENCIAS TEMPORALES OBTENIDO



# LIMPIEZA DE DATOS

## PRIMER FILTRO: TRIGGER EN EL CUARTO BIN

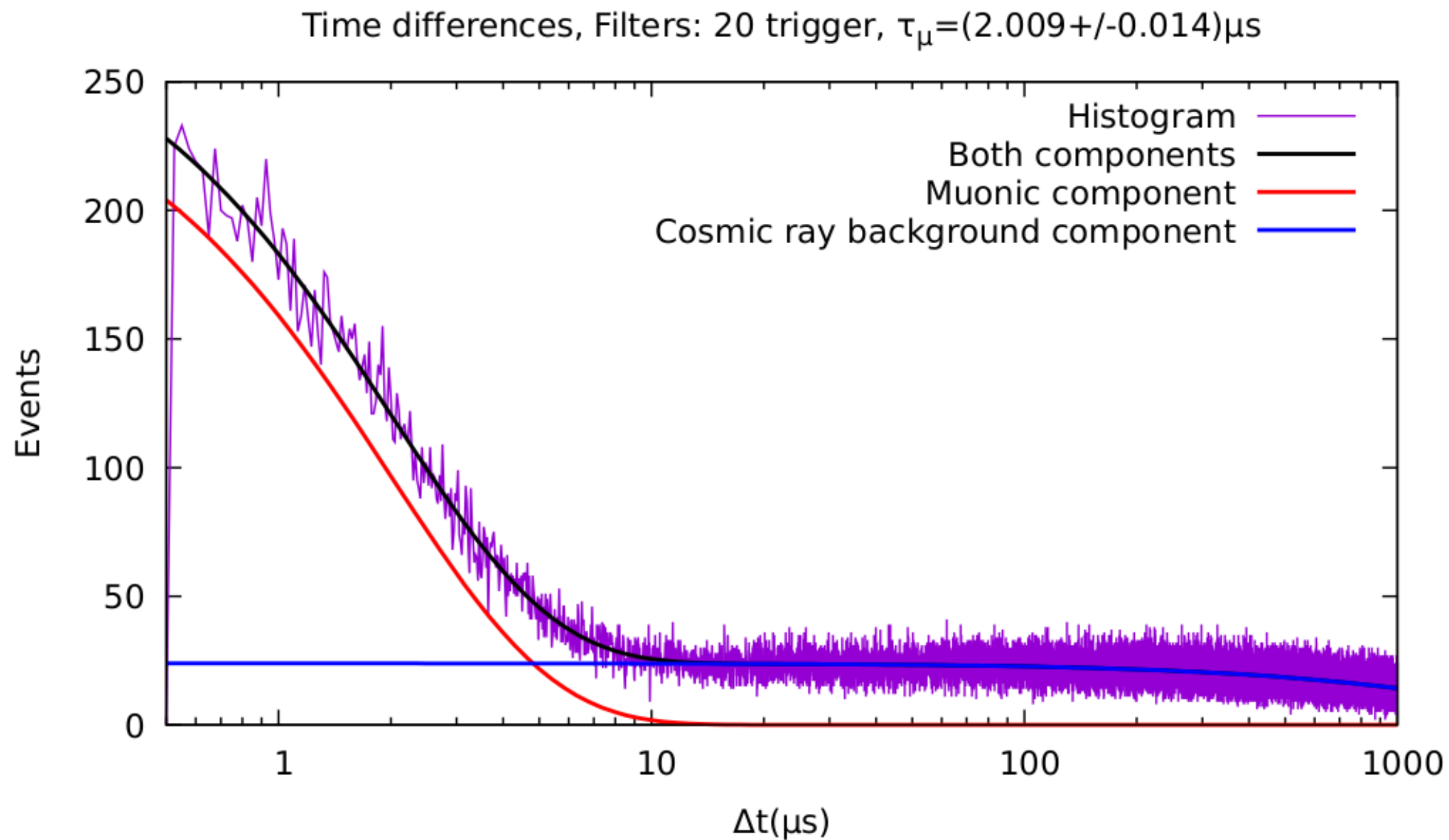
Histogram of time differences with different level of trigger



**Distintos  
niveles de  
trigger en el  
cuarto bin**

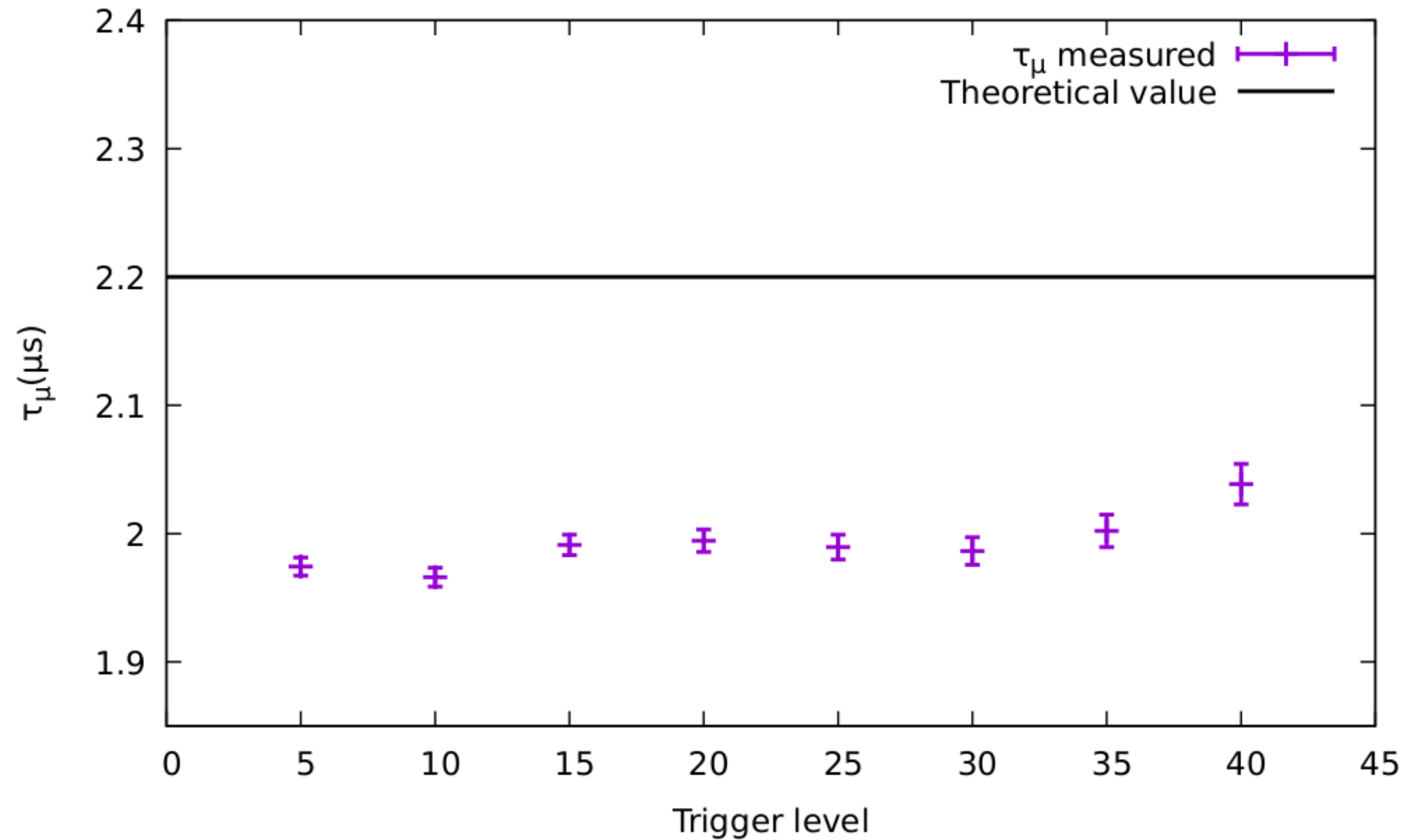
**Figura 21: Espectro de diferencial temporales para distintos niveles de trigger.**

# MODELO DE AJUSTE



**Figura 22: Modelo de ajuste de doble exponencial**

# TIEMPO DE VIDA MEDIA DEL MUÓN

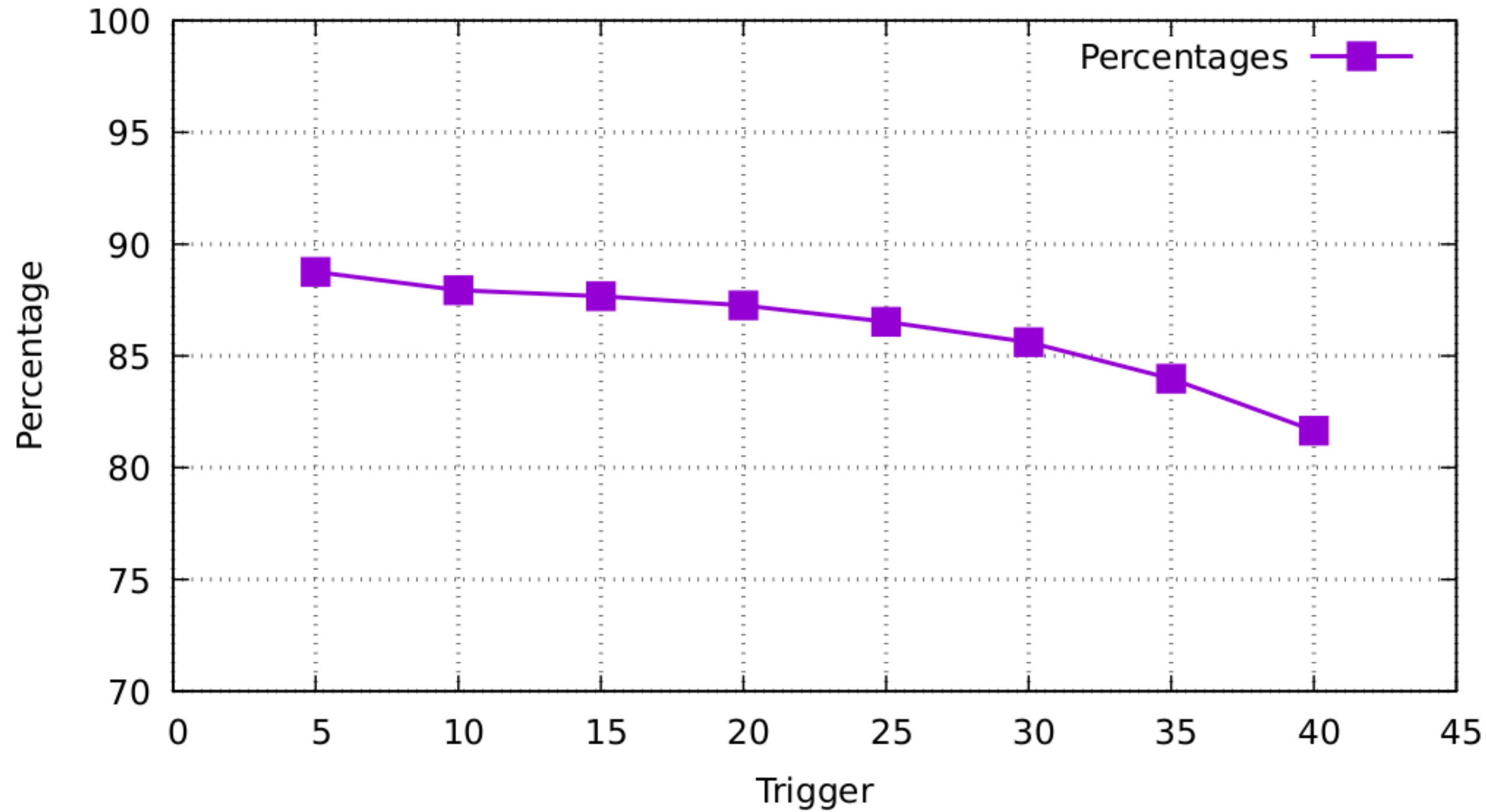


**Figura 23: Tiempo de vida media del muón, el valor experimental es menor debido a la presencia de muones negativos.**



# ABUNDANCIA DE COMPONENTE MUONICA

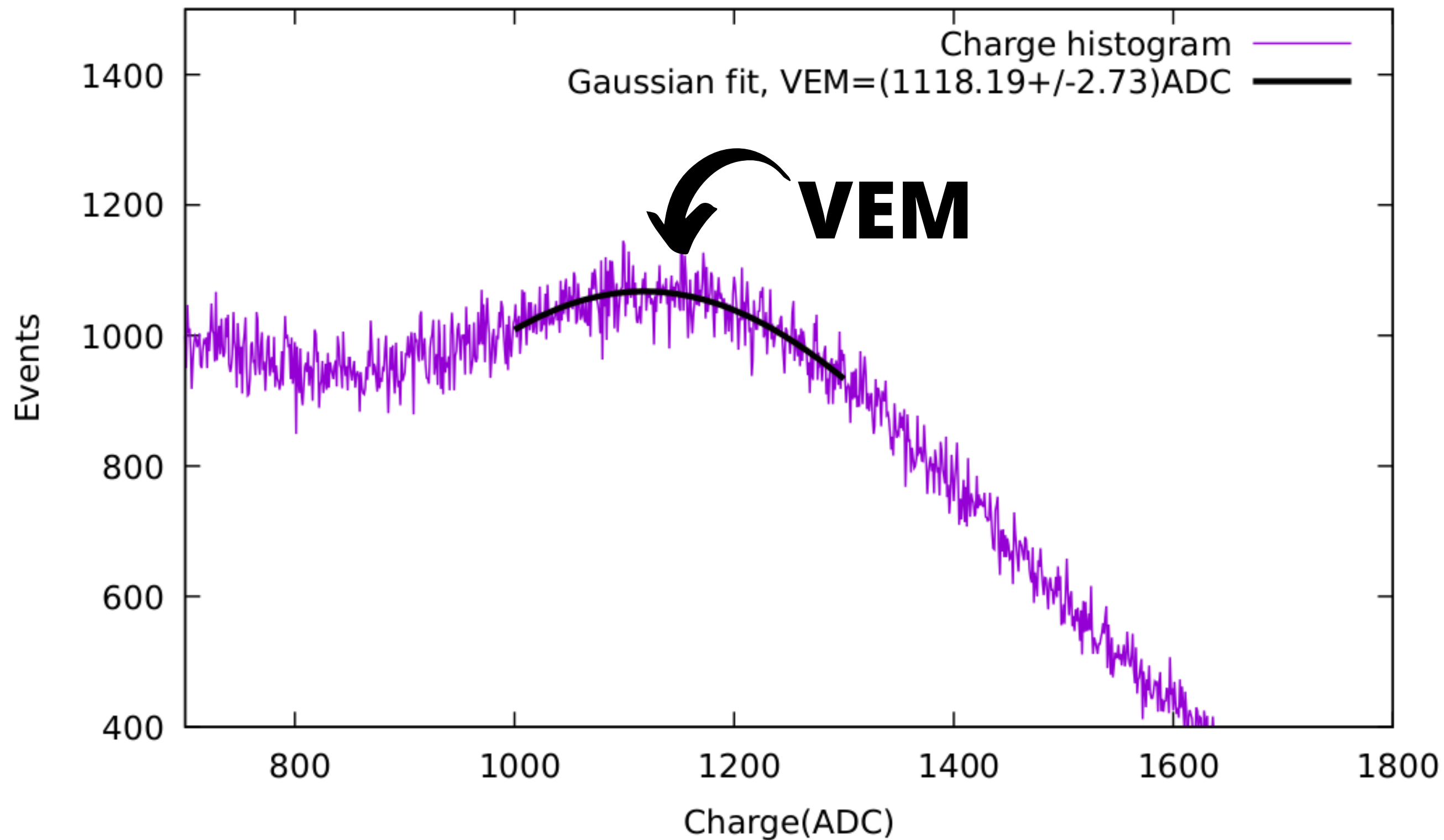
Percentage of muonic component, integrated from 0.53 to 3 $\mu$ s



**Porcentaje de componenete muonica en cada nivel de trigger, se tiene en promedio, un 85% de componente muónica.**

**Figura 24: Abundancia de componente muónica tras el corte de trigger.**

# HIPÓTESIS DEL CORTE DE VEM



Considerando el poder de frenado del agua:  $2MeV/cm$  y las dimensiones del tanque:  
Equivalencia,  
 $1118ADC=292MeV$

**Figura 25: Ajuste Gaussiano para estimar la carga del VEM**

# TIEMPO DE VIDA MEDIA DEL MUON DESPUES DEL FILTRO

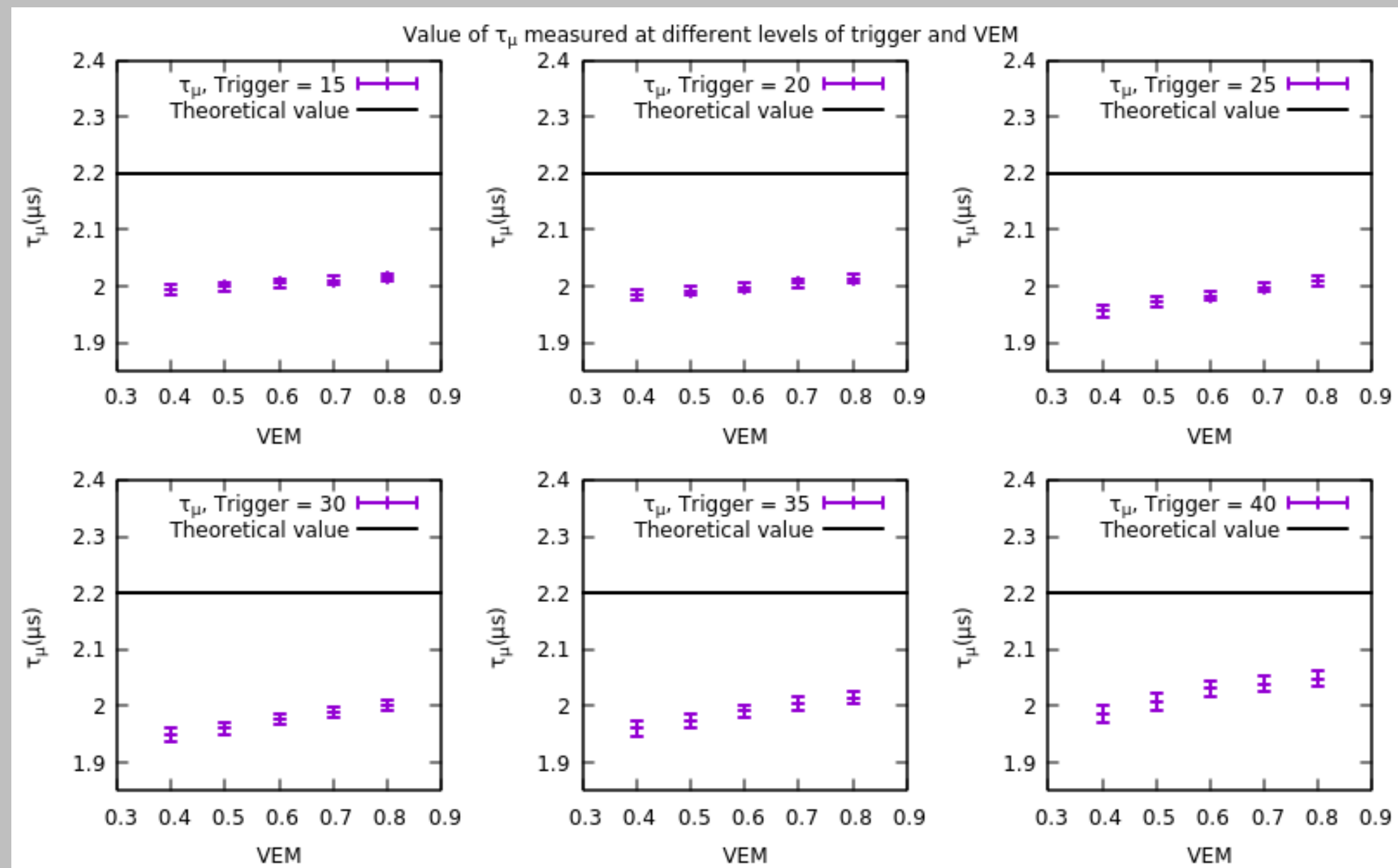


Figura 26:Tiempo de vida media del muón para para corte de trigger y VEM.

# ABUNDANCIA DE MUONES PARA CADA CORTE

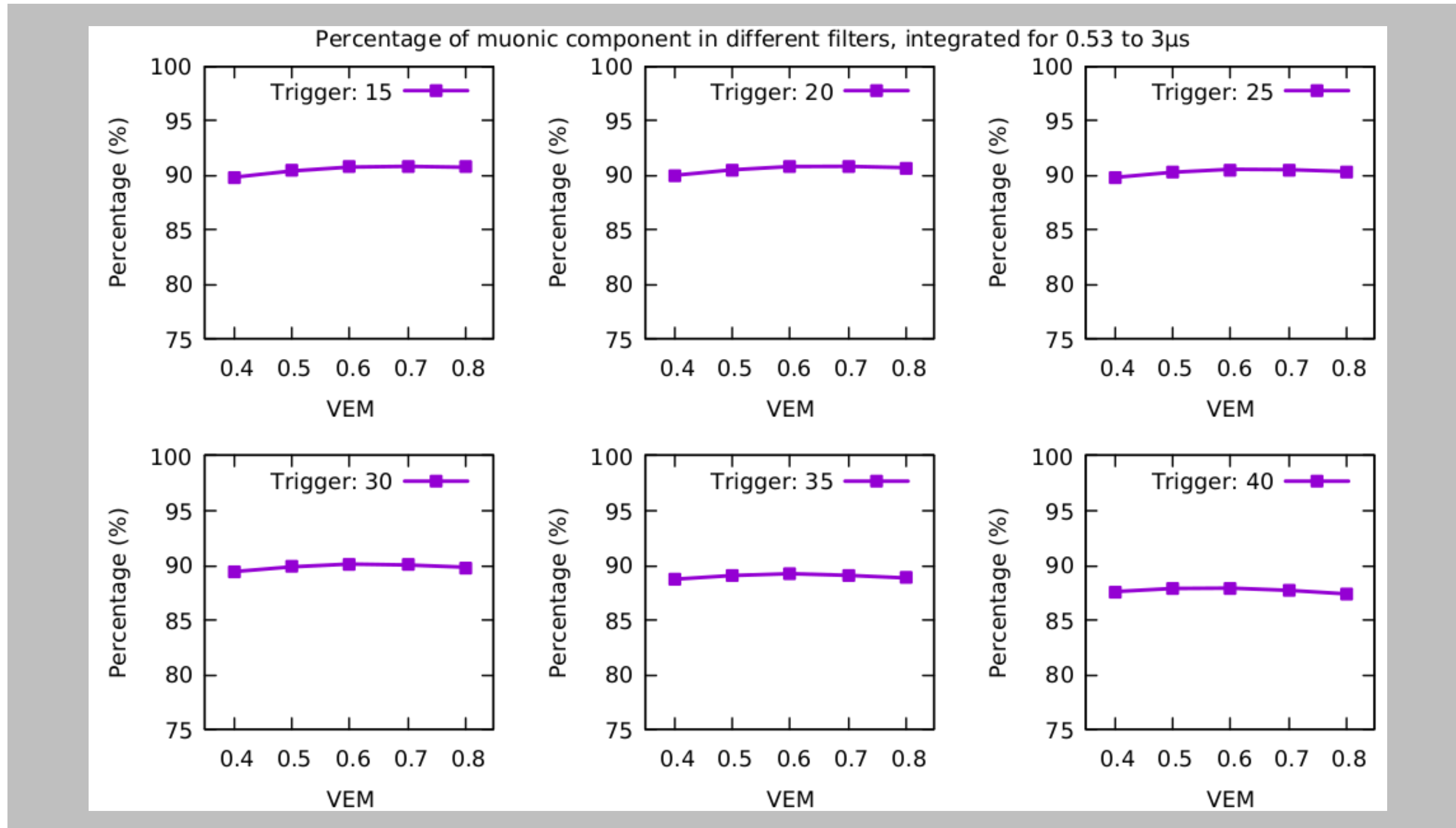
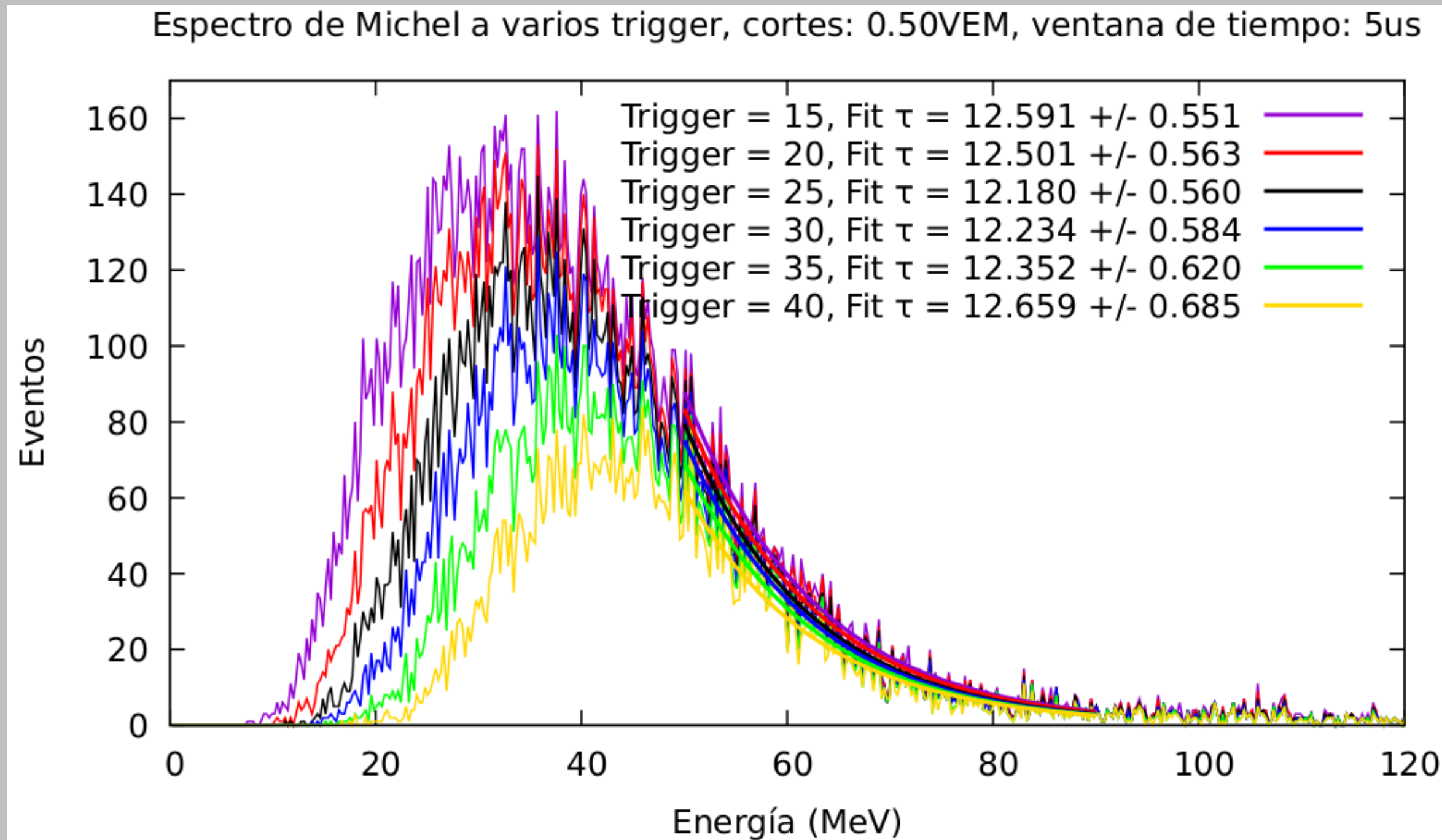


Figura 27: Abundancia de muones en el histograma de diferencias temporales. Integrando de 0.53 a 3 $\mu$ s.

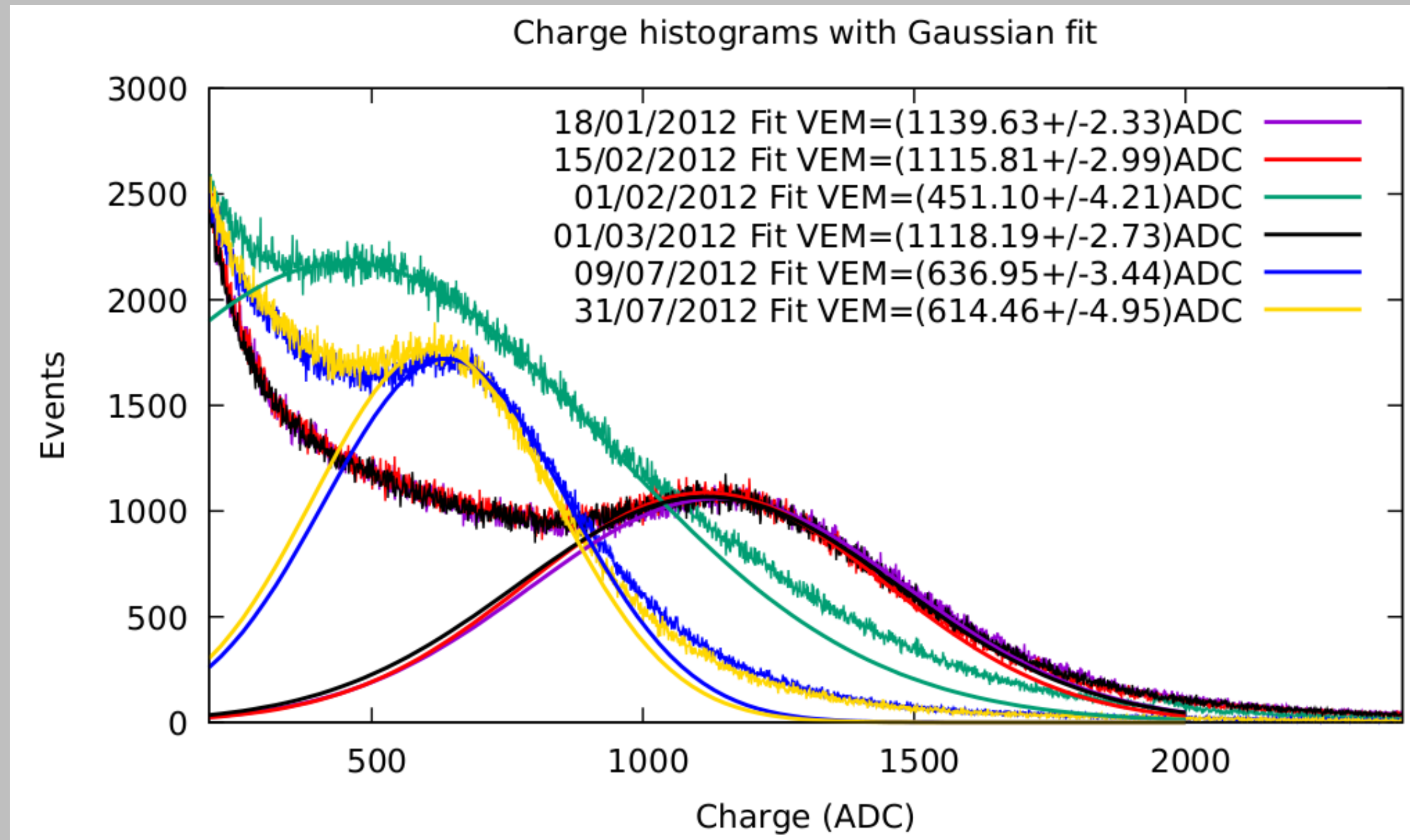
# Ajuste en el espectro de Michel a varios niveles de trigger



**Ajuste exponencial en la parte donde parecen superponerse los espectros, con la finalidad de encontrar un parámetro invariante que nos sirva como referencia.**

Figura 28: Ajuste exponencial a las partes finales del espectro.

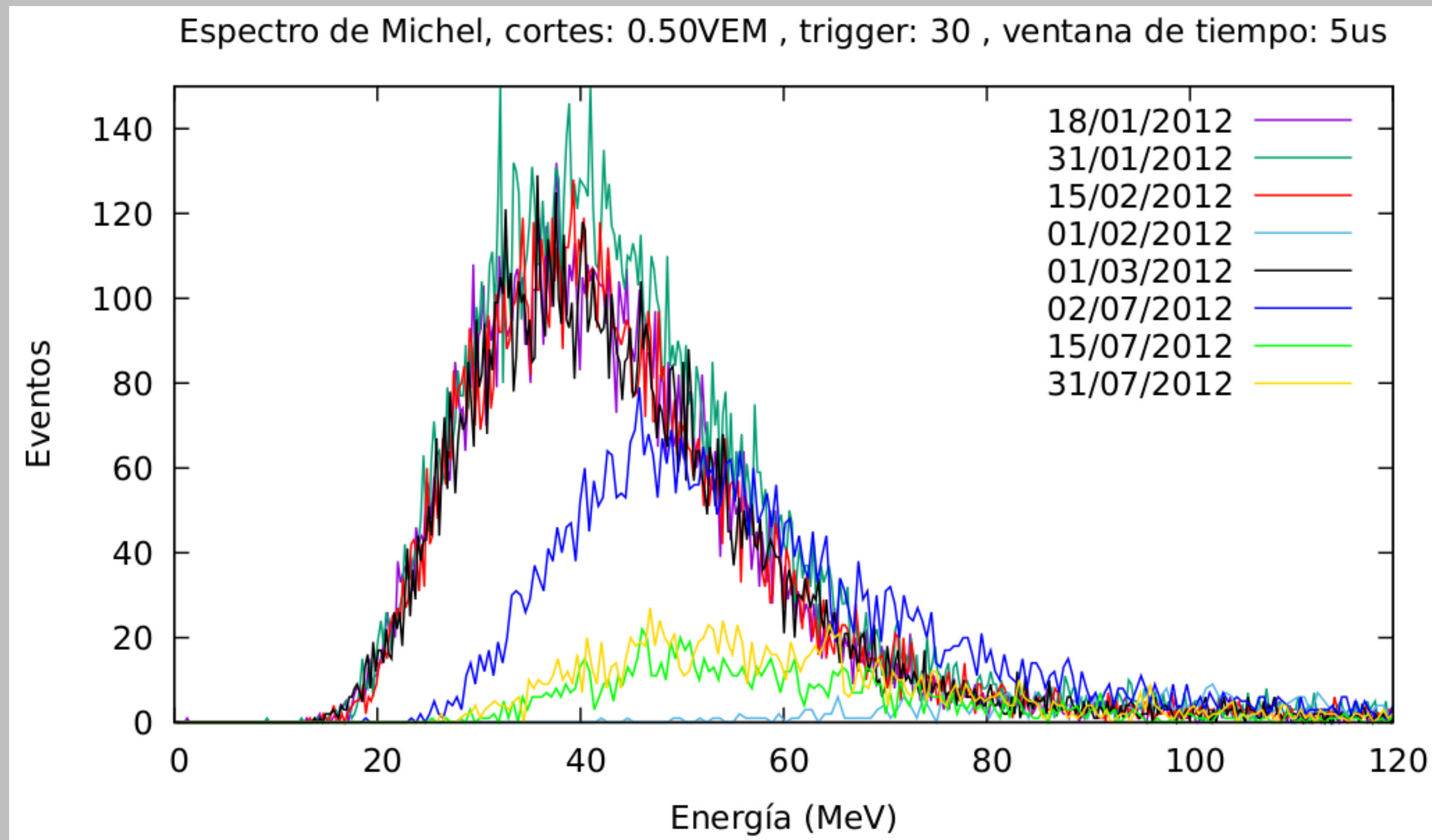
# Monitoreo del espectro de carga en distintas fechas del 2012



**Estimación del VEM para distintas fechas del 2012, notemos la variación entre los meses de Marzo y Julio.**

Figura 29: Estimación del VEM para distintas fechas.

# Monitoreo en el espectro de Michel en distintos meses



**Monitoreo del espectro de Michel para distintas fechas. Puede haber un cambio de ganancia en el detector para el mes de Julio.**

Figura 30: Espectros de Michel para distintas fechas.

# AGRADECIMIENTOS

En el presente trabajo, queremos dar un profundo agradecimiento a nuestros asesores por su continua orientación y apoyo en cuanto al desarrollo de cada actividad que se ha ido realizando. Por su parte, también agradecemos a UNSA-INVESTIGA por la subención que nos ofrece durante el desarrollo del presente trabajo siendo parte del proyecto "Detección de rayos cósmicos, rayos gamma y neutrinos en Arequipa"; así mismo, agradecemos a la colaboración LAGO por la información de la data compartida que utilizamos para la elaboración del presente trabajo.





## Conclusiones

01

Es posible la eliminación del ruido de la data usando un umbral en el cuarto bin.

02

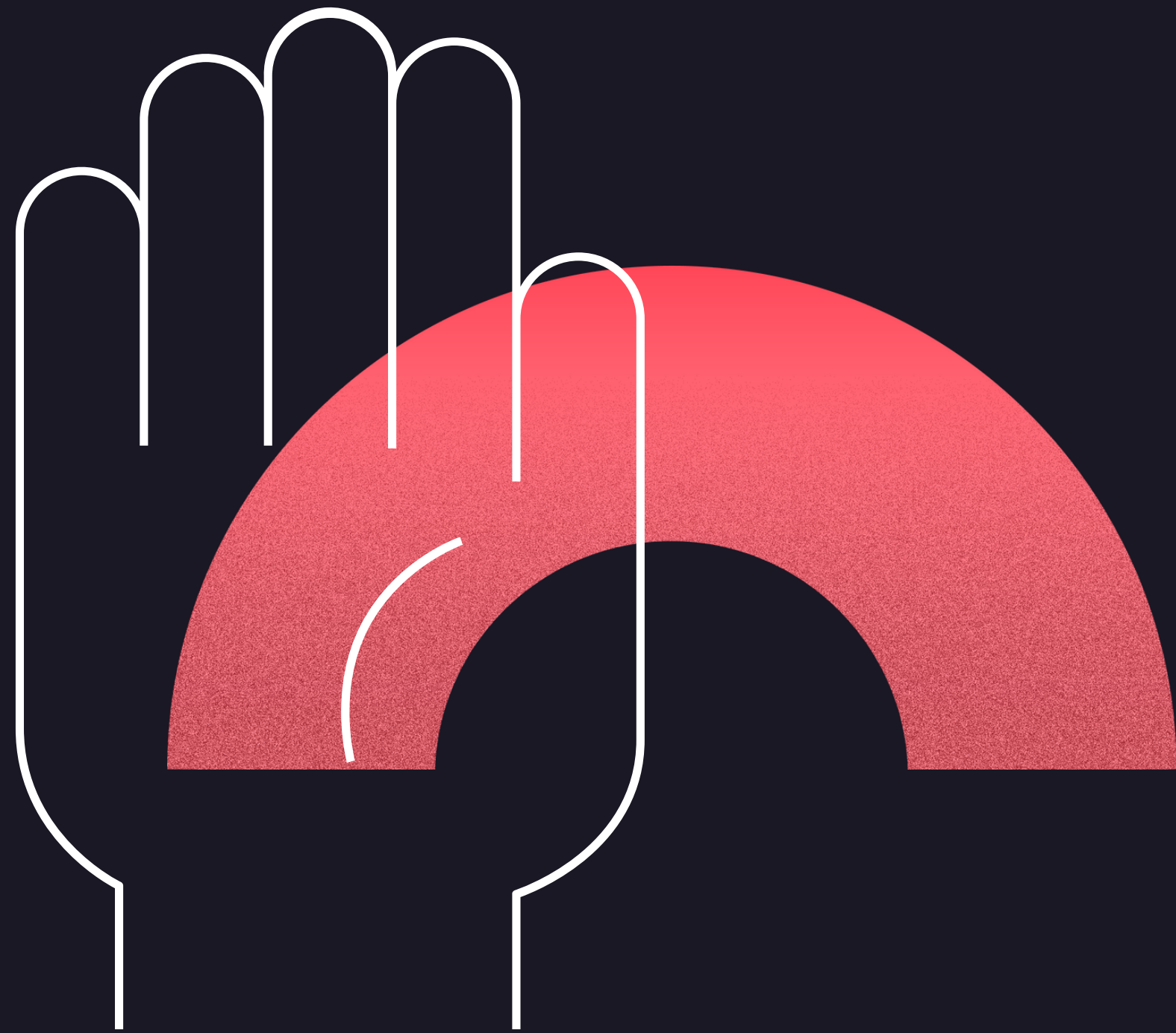
Se logró una abundancia muónica, en la región donde domina esta componente de aproximadamente un 90%, lo que nos indica la presencia de rayos cósmicos de fondo.

03

El tiempo hallado para la vida media del muón es de, en promedio  $2\mu\text{s}$ , inferior a  $2.2\mu\text{s}$  debido a la presencia e interacción de muones negativos.

04

La variación en el espectro de Michel (monitoreo de la calibración) en distintas fechas, nos indica que debemos hacer estudio más profundo acerca de lo que pudo haber ocurrido en el detector.



**GRACIAS**