

Diseño, mejora y caracterización del front-end con fotomultiplicadores de silicio para los detectores de AMIGA del Observatorio Pierre Auger

Design, upgrade and characterization of the silicon photomultiplier front-end for the AMIGA detector at the Pierre Auger Observatory

Presentación: 06/10/2020

Doctorando:

Alan Fuster

Facultad Regional Buenos Aires (FRBA), Universidad Tecnológica Nacional (UTN) - Argentina

Instituto de Tecnologías en Detección y Astropartículas (ITeDA) - Argentina

alan.e.fuster@gmail.com

alan.fuster@iteda.cnea.gov.ar

Director/es:

Manuel Platino

Co-director/es:

Alberto Etchegoyen

Resumen

AMIGA (Auger Muons and Infill for the Ground Array) es una mejora del Observatorio Pierre Auger con el objetivo de complementar el estudio de los rayos cósmicos de ultra alta energía (UHECR) mediante la medición del contenido muónico de las cascadas atmosféricas extensas (EAS). Éste consiste en un arreglo de 61 detectores de agua de efecto Cherenkov ubicado en un espacio más denso en combinación con detectores de centelleo enterrados bajo tierra utilizados para la medición de densidad de muones. Cada detector esta compuesto por tres módulos centelleadores, con un área de detección de 10 m^2 por módulo, enterrados a 2.3 m de profundidad, resultando un área total de detección de 30 m^2 . Fotomultiplicadores de silicio (SiPM) miden la cantidad de luz de centelleo generada por las partículas cargadas que atraviesan los módulos. En este trabajo, el diseño de la electrónica del front-end para procesar las señales de esos SiPMs, y los resultados de pruebas realizadas en el laboratorio como también en el sitio del Observatorio Pierre Auger son descriptos. Comparado con el diseño anterior, esta nueva electrónica muestra un mayor rendimiento, una mayor eficiencia y un menor consumo de potencia, e incluye además, un nuevo sistema de adquisición con un rango dinámico ampliado que permite realizar mediciones cercanas al núcleo de la lluvia. El nuevo sistema de adquisición esta basado en la medición de la carga total que la componente muónica de la lluvia cósmica genera en el detector.

Palabras clave: electrónica de front-end para lectura de detectores, métodos de caracterización y ajuste, detectores de partículas, rendimiento de detectores físicos de altas energías, diseño de circuitos impresos de alta frecuencia, medición de carga, electrónica de bajo consumo.

Abstract

AMIGA (Auger Muons and Infill for the Ground Array) is an upgrade of the Pierre Auger Observatory to complement the study of ultra-high-energy cosmic ray (UHECR) by measuring the muon content of extensive air showers (EAS). It consists of an array of 61 water Cherenkov detectors on a denser spacing in combination with underground scintillation detectors used for muon density measurement. Each detector is composed of three scintillation modules, with 10 m^2 detection area per module, buried at 2.3 m depth, resulting in a total detection area of 30 m^2 .

Silicon photomultipliers sensors (SiPM) measure the amount of scintillation light generated by charged particles traversing the modules. In this work, the design of the front-end electronics to process the signals of those SiPMs and test results from the laboratory and from the Pierre Auger Observatory are described. Compared to our previous prototype, the new electronics shows a higher performance, higher efficiency and lower power consumption, and it has a new acquisition system with increased dynamic range that allows measurements closer to the shower core. The new acquisition system is based on the measurement of the total charge signal that the muonic component of the cosmic ray shower generates in the detector.

Keywords: front-end electronics for detector readout, characterization and fitting methods, particle detectors, performance of high-energy physics detectors, high frequency pcb design, charge measurement, low power electronics.

Introducción

El Observatorio Pierre Auger (The PIERRE AUGER Collaboration, 2015) está ubicado al norte de la ciudad de Malargüe en la provincia de Mendoza, Argentina y abarca un área aproximada de 3000 km². El Observatorio está diseñado para detectar lluvias de rayos cósmicos de ultra alta energía (UHECR) mediante una técnica de detección híbrida. Éste consiste en 1660 detectores de agua de efecto Cherenkov (WCD) (Allekotte and et al., 2008) dispuestos en una cuadrícula triangular con una distancia de ~ 1.5 km entre las estaciones, conformando el detector de superficie (SD). Éste está complementado por 27 telescopios de fluorescencia (FD) (Abraham and et al., 2010) localizados en cuatro edificios en el perímetro del arreglo, observando la atmósfera por encima del detector SD. Actualmente, el Observatorio Pierre Auger está siendo actualizado, y AMIGA (Etchegoyen, 2007; Abraham and et al., 2009a,b) (Auger Muons and Infill for the Ground Array) es uno de las principales mejoras. Los dos principales objetivos de AMIGA son la medición de observables sensibles a la composición de las cascadas atmosféricas extensas (EAS) y el estudio de las características de las interacciones hadrónicas. Que estos objetivos puedan ser alcanzados con una técnica de detección de muones fue probado por varios experimentos como KASCADE (Antoni and et al., 2003) y KASCADE-Grande (Apel and et al., 2010) con un gran impacto en la física de los rayos cósmicos.

Los detectores de AMIGA están instalados y asociados con 61 WCD, los cuales se encuentran desplegados en una cuadrícula triangular de menor separación de 750 m entre estaciones, en un nuevo arreglo añadido de 23.5 km². Tres módulos de 10 m² forman una estación del Underground Muon Detector (UMD) asociado a su correspondiente WCD. Cuando una lluvia de rayos cósmicos dispara a un WCD, el disparo es redirigido a la estación del UMD asociado. Cada módulo de AMIGA está enterrado a 2.3 m debajo de la tierra para poder aislarlo de la componente electromagnética de las lluvias de rayos cósmicos. Cada módulo consiste de 64 barras centelladoras (400 cm de longitud, 4 cm de ancho y 1 cm de espesor) y 64 fibras ópticas WLS (WaveLength-Shifting) de 1.2 mm de diámetro, las cuales están pegadas en una ranura longitudinal en cada barra centelladora. La luz de centelleo producida en la barra es absorbida por la fibra óptica. Las moléculas excitadas de la fibra decaen y emiten fotones, luego estos son propagados mediante reflexión total interna hacia el final de la fibra para ser detectados en un canal de un detector de fotones multicanal. El diseño del módulo está optimizado para obtener la mayor cantidad de luz posible y por lo tanto, para un eficiente conteo de los muones que impactan en los 10 m² de área del módulo. El diseño mecánico del UMD está determinado y detallado en (Aab and et al., 2016). Hasta Septiembre de 2016, un arreglo de ingeniería (EA) de siete estaciones del UMD estaban equipadas con fotomultiplicadores de tubo de vacío multiánodo (MPPMT). Para la etapa final de producción de AMIGA, los MPPMTs van a ser reemplazados por fotomultiplicadores de silicio (SiPM) (Aab and et al., 2017). Las electrónicas con MPPMT comenzaron a ser reemplazadas una por una desde Octubre de 2016.

Desarrollo

El diseño de este nuevo front-end para SiPM está basado en la experiencia adquirida en la fase de ingeniería de AMIGA, pero éste incluye, además, la medición de carga como nueva característica y mejora otras partes.

Las especificaciones de este nuevo diseño están detalladas en (Aab and et al., 2017); tomando en cuenta la experiencia obtenida a partir del diseño del prototipo de ingeniería anterior que utilizaba MPPMT. Para la lectura y acondicionamiento de las señales de los SiPMs, se utiliza el circuito integrado de aplicación específica (ASIC) CITIROC (Cherenkov Imaging Telescope Integrated ReadOut Chip) de Weeroc (Weeroc, 2014). Éste integrado provee las etapas de acondicionamiento, conformadores de señales y conversores analógicos digitales para luego, ser adquiridos por el back-end. A su vez, éste chip permite la configuración individual de cada uno de los píxeles del SiPM. En nuestro caso, se utilizan dos integrados CITIROC ya que cada uno provee 32 canales, para lograr los 64 canales en total que se necesitan. Todo esto conforma el sistema de medición de “conteo de muones”, a partir de ahora se denominan canales binarios.

La medición de la carga total es una mejora del front-end de AMIGA para extender su rango dinámico de detección de partículas. De esta forma, cada módulo es capaz de poder medir en la región de altas densidades de partículas. Estas regiones están ubicadas cerca del punto de impacto del núcleo de la EAS. El nuevo sistema de adquisición determina la carga total generada por la componente muónica de las EAS durante su impacto en el UMD. Éste sistema está implementado en dos canales independientes de resoluciones diferentes: un canal de alta ganancia (HG) y un canal de baja ganancia (LG). La figura 1 muestra los rangos de operación del canal HG, canal LG y los canales binarios. Los rangos de operación de HG y LG empiezan en el mismo valor de bajas densidades de partículas que los canales binarios, pero alcanzan valores más altos que éste último. Simultáneamente, el canal LG satura a valores superiores de carga que el canal HG, permitiendo medir hasta valores muy altos de densidades de partículas. Que los tres rangos comiencen en el mismo valor permite en primer lugar, obtener mediciones complementarias en esos valores y en segundo lugar, efectuar la comparación de los canales binarios con los canales HG y LG. La principal diferencia en la superposición de los rangos es la resolución. Los canales binarios tienen una mejor resolución a bajas densidades de partículas, mientras que la resolución de los canales HG y LG mejoran a medida que la cantidad de partículas que arriban al detector aumenta. La determinación de la carga total está dividida en tres etapas: Adder Amplifiers Stage, Differential Output Amplifier Stage y Analog To Digital Converter Stage como se muestra en la figura 2.

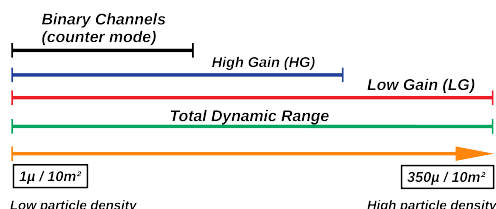


Figura 1: Rangos de operación de los diferentes canales y sistemas de medición. Se logra un rango de densidades de partículas ampliado mediante la superposición de los rangos operativos de los canales binarios y de los canales HG y LG.

Con el fin de obtener un bajo consumo de potencia, el esquema de fuentes de alimentación del front-end utiliza una combinación de conversores switching, cuando la diferencia entre la tensión de entrada y salida es significativa, y reguladores lineales LDO (low-dropout voltage), cuando la diferencia entre la tensión de entrada y salida es pequeña y se requiere un alto nivel de rechazo al ripple. La frecuencia de trabajo máxima del front-end es de 200 MHz, por lo tanto, el material elegido para el PCB (printed circuit board) es FR4 (frecuencia de trabajo hasta 500 MHz). A su vez, se utilizaron líneas de transmisión de impedancia controlada para todas las pistas de señales de alta frecuencia.

Resultados

Se realizaron diferentes pruebas en el laboratorio utilizando un setup construido con los mismos materiales de los módulos de AMIGA e imita el comportamiento de los módulos de 10 m^2 instalados en el sitio del Observatorio. Como resultados de estas pruebas, se obtuvo el valor de carga promedio que deja un muon tanto en el canal HG

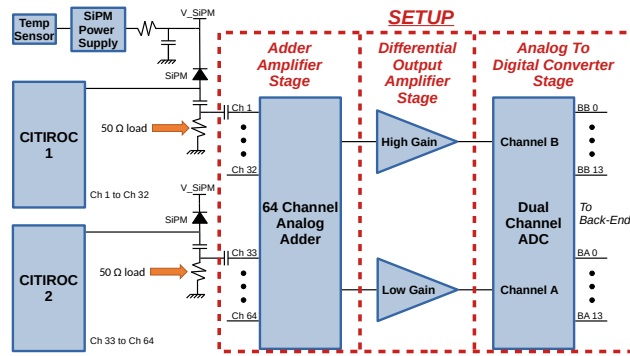


Figura 2: Esquema de los canales HG y LG. Las señales de los 64 píxeles del SiPM se suman en una primera etapa (Adder Amplifiers Stage), se amplifican y se dividen en dos canales de alta ganancia y baja ganancia (Differential Output Amplifier Stage) y se digitalizan mediante un ADC de doble canal (Analog To Digital Converter Stage). Todo el sistema presenta una carga de 50Ω hacia las entradas de los CITIROCs.

y LG, y a su vez, la curva de atenuación característica de la fibra óptica (ver figura 3). Con estos valores de carga promedio obtenidos y utilizando el sistema existente de caracterización de los anteriores MPPMTs (Suarez and et al., 2011), se obtuvieron las curvas de linealidad para los canales HG y LG (ver figura 4).

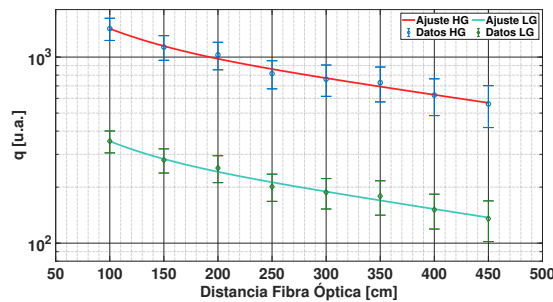
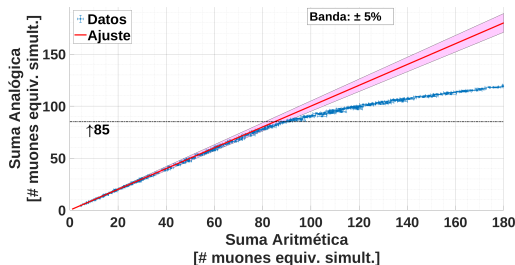
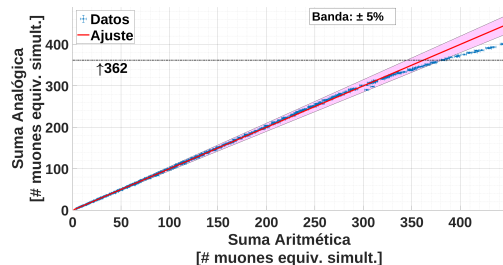


Figura 3: Atenuación de la señal de carga de muones a lo largo de la barra centelladora (fibra óptica) para HG (puntos azules) y LG (puntos verdes). Las curvas roja y verde son la función de ajuste de una doble exponencial. La forma de las funciones de atenuación de ambos canales es similar ya que depende principalmente de las propiedades ópticas. Las diferentes escalas absolutas refleja las diferentes ganancias de los canales.



(a) HG.



(b) LG.

Figura 4: Curvas de linealidad para los canales HG (a) y LG (b). La línea discontinua indica el valor máximo de muones donde el canal es lineal dentro de una banda de desviación del 5 %.

Por último, utilizando los datos de los detectores de AMIGA instalados en el sitio del Observatorio, se obtuvieron los valores de carga promedio para cada uno de los módulos de la estación elegida (ver figura 5). Esta estación, al ser parte del arreglo de ingeniería, posee una disposición de ocho módulos divididos en cuatro módulos en el

norte y cuatro en el sur. De esta forma, es posible realizar comparaciones entre los distintos grupos de módulos y se muestran en la figura 6.

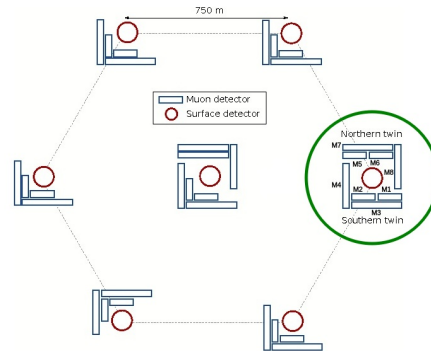
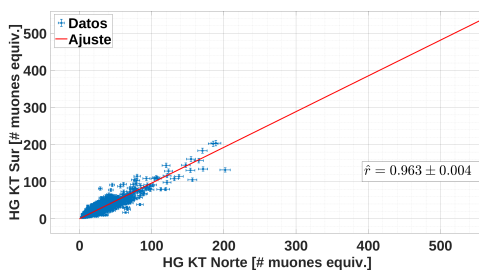
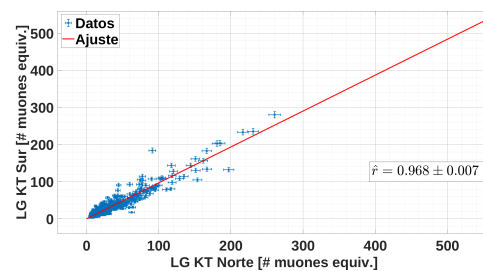


Figura 5: Esquema del arreglo de ingeniería del UMD. Cada círculo representa una posición del detector SD y cada rectángulo representa un módulo del UMD. La estación de UMD (Kathy Turner, KT) con ocho módulos es la utilizada para este análisis (indicada con un círculo verde).



(a) HG channels.



(b) LG channels.

Figura 6: Comparación de los muones medidos en los módulos del sur frente a los módulos de norte para los canales HG (a) y LG (b). La línea roja representa un ajuste de la relación entre ambos conjuntos. El conjunto de datos corresponde al período comprendido entre Mayo de 2017 y Diciembre de 2018.

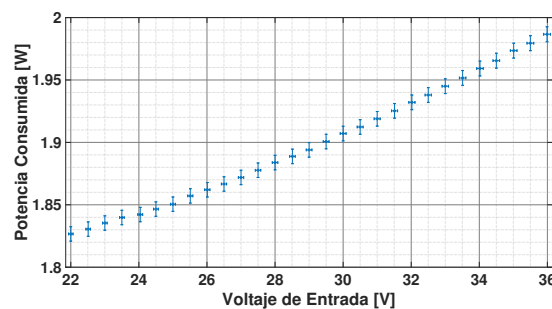


Figura 7: Consumo de potencia versus voltaje de entrada del front-end. Todos los valores están por debajo de 2 W a lo largo de todos los valores de voltaje de entrada. Todas las mediciones se realizaron con el SiPM conectado al front-end. El diseño anterior con MPPMT tenía un consumo de 2.4 W sin el fotodetector conectado.

Conclusiones

- Se logró diseñar, caracterizar y verificar el nuevo sistema de adquisición basado en la medición de carga (resultados satisfactorios en el laboratorio y en el sitio del Observatorio).

- Se logró reducir el consumo de potencia con respecto al anterior diseño con MPPMT (consumo por debajo de 2 W).

Referencias

- Aab, A. and et al. (2016). Prototype muon detectors for the AMIGA component of the Pierre Auger Observatory. *Journal of Instrumentation*, 11(02):P02012–P02012.
- Aab, A. and et al. (2017). Muon counting using silicon photomultipliers in the AMIGA detector of the Pierre Auger observatory. *Journal of Instrumentation*, 12(03):P03002–P03002.
- Abraham, J. and et al. (2009a). Operations of and Future Plans for the Pierre Auger Observatory. In *Proceedings of the 31th International Cosmic Ray Conference, Łódź, Poland*, pages 14–17.
- Abraham, J. and et al. (2009b). Operations of and Future Plans for the Pierre Auger Observatory. In *Proceedings of the 31th International Cosmic Ray Conference, Łódź, Poland*, pages 22–25.
- Abraham, J. and et al. (2010). The fluorescence detector of the Pierre Auger Observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 620(2-3):227–251.
- Allekotte, I. and et al. (2008). The surface detector system of the Pierre Auger Observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 586(3):409–420.
- Antoni, T. and et al. (2003). The cosmic-ray experiment KASCADE. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 513(3):490 – 510.
- Apel, W. and et al. (2010). The KASCADE-Grande experiment. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 620(2):202 – 216.
- Etchegoyen, A. (2007). AMIGA, Auger Muons and Infill for the Ground Array. In *Proceedings of the 30th International Cosmic Ray Conference, Merida, Mexico*, page 4.
- Suarez, F. and et al. (2011). A fully automated test facility for multi anode photo multiplier tubes a fully automated test facility for multi anode photo multiplier tubes. In *Proceedings of the 32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing, China*.
- The PIERRE AUGER Collaboration (2015). The Pierre Auger Cosmic Ray Observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 798:172 – 213.
- Weeroc (2014). *CITIROC datasheet*. <https://www.weeroc.com/en/products/citiroc-1a>.