

AMIGA con SiPMs

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivos Generales

El objetivo general de este plan de trabajo se enmarca en el proyecto AMIGA (Auger Muons and Infill for the Ground Array) en su etapa de pre-producción y producción luego de haber concluido exitosamente, en 2017, su etapa de prototipos. El proyecto AMIGA forma parte de la extensión y mejora del sistema de detección del Observatorio Pierre Auger (PAO) que prolongará la vida útil del mismo hasta 2023 y busca establecer, de forma definitiva, la composición química y el origen de los rayos cósmicos de energía superior a 10^{17} eV, AugerPrime [1].

El Observatorio Pierre Auger [2,3], cuenta con 1600 detectores de superficie (SD-1500m) de efecto Cherenkov en agua (WCDs) dispuestos en una grilla triangular de 1500m de lado, otros 60 WCDs que componen una grilla de 750m de espaciamiento (SD-750m). Ambas grillas, de 3.000 km² y 23.5km² respectivamente, constituyen el detector de superficie (SD) mientras que 27 telescopios de fluorescencia conforman el detector de fluorescencia (FD).

La principal innovación que AMIGA ha incorporado al PAO es un dispositivo dedicado exclusivamente a la medición de la componente muónica de lluvias atmosféricas extensa, el Underground Muon Detector (UMD). En su diseño original propuesto a, y aprobado por, la Colaboración Internacional, el UMD estaba equipado con tubos foto-multiplicadores multi-ánodos (MPMTs) y con estos dispositivos opto-electrónicos se construyó el primer arreglo de prototipos que estuvo operativo desde principios de 2013. Sin embargo, desde ese año se llevó adelante un fuerte programa de Investigación y Desarrollo (I&D) para analizar la viabilidad de reemplazar los delicados MPMTs por una tecnología más moderna, robusta, versátil y de menor consumo como los foto-detectores de estado sólido a base de Silicio (SiPMs). En 2015 se tuvo un primer prototipo equipado con estos dispositivos y en 2016 se completó con el diseño y fabricación de una nueva electrónica frontal basada en Application-Specific Integrated Circuits (ASICs). Desde octubre 2016, el arreglo de prototipos del UMD cuenta con 28 detectores instalados con MPMTs y 9 con SiPM por un total de 290m² de superficie sensible. En 2018, en la etapa de pre-producción, se preve reemplazar todos los MPMTs de los detectores ya operativos en el PAO por SiPMs.

El objetivo general de esta propuesta es validar la respuesta del arreglo de prototipos del UMD antes de pasar a la etapa de producción final de AMIGA.

1.2. Objetivos Específicos

El objetivo específico de este plan de trabajo es generar el conjunto de requerimientos óptimos para la electrónica frontal de los detectores del UMD equipados con SiPM. En la etapa actual de pre-producción, las 6 estaciones restantes aún equipadas con PMTs serán reemplazadas por SiPM. La lectura de las señales de los SiPM será con una electrónica basada en ASICs ya desarrollados por otros grupos en Francia pero adaptables a los requerimientos de AMIGA. Las necesidades y tiempos del proyecto, impidieron hacer la necesaria Investigación y Desarrollo para diseñar un ASIC con los requerimientos óptimos para AMIGA. En particular, dada la lógica del proceso de conteo de muones y la distribución temporal de los fotones de los centelladores plásticos, son de particular interés el tiempo de decaimiento de las señales de los SiPM así como el “undershoot” que les sigue. Las metas específicas del plan son:

- 1) Validar la respuesta del sistema de detección del UMD basado en SiPM.

- 2) Validar el diseño actual de la electrónica frontal con ASICs disponibles en el mercado
- 3) Generar un conjunto de requerimientos óptimos para las necesidades del UMD aplicables a ASICs

Estos tres tópicos cerrarán la etapa de pre-producción del UMD y darán como resultado los requerimientos para el diseño de un nuevo ASIC que se llevará adelante por el equipo de ingenieros electrónicos del Instituto de Tecnologías en Detección y Astropartículas (ITeDA) cuyo plan e trabajo es parte sustantiva del Proyecto Estratégico de dicha Unidad Ejecutora.

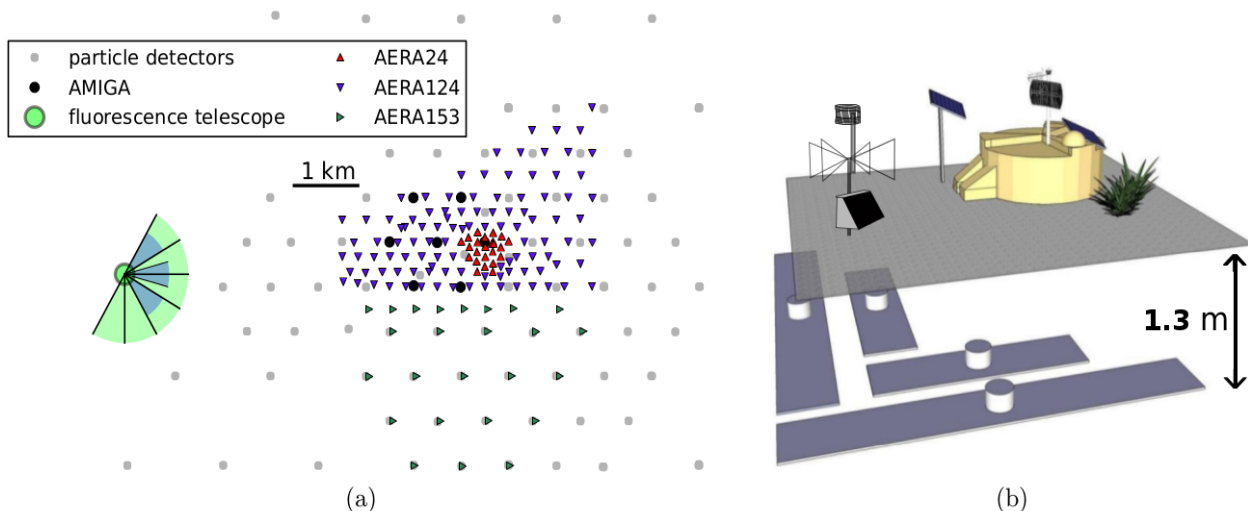


Fig 1. (a) Mapa de las estaciones donde se encuentran los 4 sistemas de detección: detectores de superficie SD-750m y SD-1500m, centelladores enterrados de AMIGA (UMD), antenas de radio (AERA) y detectores de fluorescencia (FD) del sitio de Coihueco-HEAT. (b) Vista esquemática de los 4 sistemas.

2. Antecedentes

En septiembre de 2011 se completó el emplazamiento del arreglo SD-750m de WCDs de AMIGA que ya a dado importantes resultados [4,5]. Desde principios de 2015 el nuevo detector de muones enterrado completó su arreglo de ingeniería consistente en 7 estaciones del UMD de 30m² cada una apareadas a WCDs en una disposición hexagonal (Celda Unitaria, CU). En la Fig. 1 se muestran las estaciones del SD-750m junto con un esquema de una estación del UMD asociada a cada uno de los 7 WCDs que forman el arreglo de prototipos del UMD.

Para poder dar respuestas finales en el campo de los rayos cósmicos, es necesario mejorar la sensibilidad en composición de masa del Observatorio Pierre Auger. La componente más sensible a la naturaleza química del rayo cósmico primario que induce el enjambre de partículas secundarias (chubasco atmosférico extenso o EAS) que se propagan por la atmosfera hasta la superficie terrestre, es la componente muónica. Por este motivo, el grupo de científicos de ITeDA propuso en 2006 un detector dedicado a este fin: AMIGA, es decir el arreglo SD-750m y el UMD. Este plan de trabajo, enmarcado en la propuesta de líneas estratégicas del proyecto asociado a ITeDA, es la continuación de la líneas de investigación llevadas adelante por el Instituto en los últimos años. Hoy en día, el UMD constituye una parte de vital importancia dentro de la extensión y mejora del PAO denominada, AugerPrime. Pues es la que permitirá validar los métodos de deconvolución de las componentes de las EAS basados en el principio de *Universalidad*.

El sistema de detección de AMIGA y, muy en particular, el diseño de su UMD ha surgido fundamentalmente de ITeDA. El arreglo de centelladores enterrados embebidos en el arreglo SD-750m, de 23.5km^2 , se sitúa con centro a 6 km del FD conocido como HEAT-Coihueco. Los contadores de muones enterrados han sido diseñados y fabricados por ITeDA, siendo este el grupo que lidera también el análisis de los datos con estos detectores. Cada contador del UMD cubre 30 m^2 de área y se encuentra enterrado [6,7] a 2,3 m de profundidad de forma tal de blindarlo de la componente electromagnética del chubasco de partículas secundarias. Cada contador del UMD está dividido en 3 ó 4 módulos, los cuales a su vez consisten en 64 varillas de plástico centellador de 4 m longitud x 4,1 cm ancho x 1 cm espesor con un surco sobre su cara superior en el cual se pega una fibra óptica que conduce la señal a un píxel de un tubo fotomultiplicador. La alta segmentación del detector es clave pues es lo que permite contar directamente el número de muones: cada barra centelladora activada, en una cierta ventana temporal, corresponde a un muón. La ventaja de este método es que evita la necesidad de conocer la carga depositada media de un muón y minimiza por tanto, las fluctuaciones del observable obtenido. La limitación del método está dada por el número máximo de muones que pueden impactar simultáneamente en un contador del UMD. Por esta razón, la electrónica asociada a los módulos permite también integrar la carga total para medir el número de muones cerca del eje del chubasco donde el número de partículas es muy elevado y, por lo tanto, produce apilamiento de muones (pile-up) en una misma barra centelladora prohibiendo el conteo individual directo. La señal integrada se utiliza para recuperar, en estos casos particulares cercanos al eje del chubasco, el número de muones con un error estadístico reducido dado la gran densidad de partículas involucrada que suaviza las fluctuaciones de la señal. La primera fase del UMD fue finalizada en Febrero de 2015 cuando superó satisfactoriamente el "Operation Readiness Review of the AMIGA Unitary Cell" con la participación de 15 referees internacionales, miembros de la Colaboración Auger especialistas en las varias subtarefas de asociadas al sistema de detección y su física asociada.

El grupo de investigadores de ITeDA ha trabajado en este proyecto prioritariamente en los últimos años, incluyendo la búsqueda y desarrollo del sitio de emplazamiento de los detectores, parámetros de diseño, caracterización del sistema opto-electrónico, la electrónica asociada a la adquisición y el desarrollo del software para la simulación, reconstrucción y análisis de los datos [3,6,7,8,9]. El arreglo prototipo de contadores de muones que se encuentra actualmente adquiriendo datos en el Observatorio y que constituye una parte vital de AugerPrime [1], son el corolario de varios años de investigación y desarrollo del grupo de científicos de ITeDA.

3. Actividades y Metodología

Como se mencionara anteriormente, AMIGA consiste en pares de detectores formados por un detector de superficie de Auger más un contador de muones de 30 m^2 enterrado en sus cercanías, a 2.3m de profundidad. El diseño de estos 30m^2 es modular pues está dividido en detectores de 5 m^2 y 10 m^2 . Los fotones producidos en cada una de sus barras centelladoras por efecto de centelleo cuando una partícula cargada las atraviesa, es conducida a un foto-sensor (PMT o SiPM) y cada pulso producido es amplificado y digitalizado mediante un comparador que define una señal con un ancho temporal proporcional al tiempo que el pulso de entrada está por encima de un cierto umbral en amplitud. Estos umbrales pueden ser variados individualmente para cada canal. Estas señales digitales son posteriormente muestreadas a razón de 3.125 ns (320 MHz) por un dispositivo lógico programable (FPGA), para conformar así una secuencia binaria de '0s' y '1s'. Esta secuencia binaria, de 2048 dígitos de longitud, constituye la señal cruda de cada barra centelladora del UMD (el arreglo de prototipos tiene 2368 barras/canales).

En la etapa de producción del UMD se emplearán SiPMs en lugar de PMTs debido a sus ventajas comparativas: menor precio, mayor eficiencia en producción de luz, menor consumo, menor voltaje de operación, mejor definición de SPE (“Single Photo Electron”, señal equivalente a un único fotón) y crosstalk óptico despreciable entre canales vecinos. El plan de trabajo de la presente propuesta comenzará con el análisis de la respuesta de los módulos contadores del UMD equipados con SiPMs (1 posición de 60m^2 dividida en 8 módulos). El objetivo es comprobar la validez del diseño con herramientas similares a las que se usaron para validar el diseño de PMTs y que fueran presentadas en distintas conferencias internacionales [10,11,12,13,14].

La calibración de este nuevo sistema opto-electrónico basado en SiPM, a cargo exclusivamente de ITeDA, es sin dudas el primer punto a analizar en vistas a caracterizar el nuevo diseño. Se planea que dicha calibración consista en fijar el nivel de discriminación en 3 SPEs (el nivel de 3 SPEs se obtiene con mediciones de frecuencia de pulsos de cuentas oscura de cada SiPM). Se identificará como un muón aquella señal que produzca 3 o más SPEs. Experiencias de laboratorio señalan que con esta calibración el nivel de sobre conteo de muones es menor que el 2% y la eficiencia de conteo integrada a lo largo de la barra es mayor al 96% [15]. Una vez realizada la instalación de las nuevas electrónicas en todo el arreglo de prototipos, esta calibración deberá ser evaluada también desde el punto de vista de la física, es decir, de respuesta del detector frente a los chubascos cósmicos en el sitio del Observatorio. Este análisis será el que verifique el comportamiento adecuado de los detectores de muones, en particular el conteo de muones, y su eficiencia de detección. En particular, el análisis incluye comparar la respuesta de los contadores según su área sensible sea de 10m^2 o de 5m^2 . Dentro de las fluctuaciones estadísticas, los detectores de igual área deberán contar igual número de muones. Por otro lado, los detectores de 10m^2 deberán contar el doble que los de 5m^2 . Esta verificación es muy importante, pues por estar contruidos con barras del doble de longitud, en promedio, se producirán señales por muón más pequeñas por la atenuación de la luz a lo largo de la fibra óptica. El diseño del detector será válido si la eficiencia de todos los módulos es cercana al 100%.

Una vez establecido el correcto funcionamiento del detector de muones como contador, se procederá a calibrar su comportamiento como integrador. A tal fin se estudiarán en detalles eventos en los cuales haya el suficiente número de muones en el detector tal que pueda ser usado como integrador, pero sin embargo que no sean tantos que no pueda ser usado como contador (rango de número de muones que nos permita comparar los resultados de ambos métodos). De esta manera se podrá estimar la nueva distancia respecto al eje de la lluvia a la cual puede estar uno de los contadores sin que la señal medida esté saturada.

Parte de este plan, si bien no es parte de los objetivos particulares propuestos, es la adaptación de las simulaciones numéricas y de los algoritmos de reconstrucción asociados, ya desarrolladas para emular la respuesta de los contadores equipados con PMTs, a la nueva situación de prototipos equipados con SiPMs.

4. Factibilidad

Este proyecto propone objetivos concretos alcanzables dados los recursos disponibles en ITeDA. Los objetivos propuestos se basan en experiencia previa desarrollada en el instituto. Este plan se inserta dentro de la Colaboración Auger. El trabajo se desarrollará en las instalaciones que ITeDA posee en el Centro Atómico Constituyentes (CAC) de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). Los objetivos de este plan están contenidos dentro del alcance de AMIGA, el proyecto bandera de los últimos años de ITeDA. Adicionalmente, dado el carácter internacional de la Colaboración Auger y de AMIGA en particular, se colaborará con el Karlsruhe Institut für Technologie (KIT), socio de ITeDA en el programa de doble doctorado en Astrofísica KIT-UNSAM.

El aporte de los científicos, ingenieros y personal técnico de ITeDA es de suma relevancia para alcanzar los objetivos propuestos en tiempo y forma. El asiduo intercambio entre los miembros de ITeDA está garantizado por una dinámica de trabajo colaborativa firmemente establecida.

ITeDA posee tres sedes:

- i) ITeDA-BuenosAires, con un laboratorio de 400 m² en el Centro Atómico Constituyentes.
- ii) ITeDA-Mendoza, localizado en la Regional Cuyo de CNEA.
- iii) ITeDA-UNSAM, aprobada por el Consejo Superior de la UNSAM y por el CONICET que será situado en el Campus Migueletes de la UNSAM.

ITeDA es un Instituto con triple dependencia de CNEA, CONICET y UNSAM que también trabaja con las regionales Buenos Aires y Mendoza de la UTN. Sumada a la infraestructura propia de ITeDA, CNEA tiene talleres generales y centros regionales en diferentes partes del país y acceso a la librería electrónica del MinCyT. ITeDA tiene un presupuesto asignado por el MinCyT, CNEA, el Gobierno de Mendoza y el CONICET. Además ha ganado PIPs y PICTs. ITeDA representa a Argentina ("Country Representative") en Auger y es el responsable de la concreción de AMIGA.

Referencias

- [1] The Pierre Auger Observatory Upgrade: AugerPrime (Preliminar Design Review), A. Aab et al. [Pierre Auger Collaboration], arXiv:1604.03637 (2016)
- [2] Properties and performance of the prototype instrument for the Pierre Auger Observatory, The Pierre Auger Collab., Nucl. Instrum. and Meth. A 523, 50 (2004)
- [3] The Pierre Auger Cosmic Ray Observatory, The Pierre Auger Collab., Nucl. Instrum. and Meth. A 798, 172 (2015)
- [4] The flux of ultra-high energy cosmic rays after ten years of operation of the Pierre Auger Observatory, I. Valiño for the Pierre Auger Collaboration, 34th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2015), The Hauge, Netherlands
- [5] Indications of anisotropy at large angular scales in the arrival directions of cosmic rays detected at the Pierre Auger Observatory, I. Al Samarai for the Pierre Auger Collaboration, 34th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2015), The Hauge, Netherlands
- [6] Underground Muon Counters as a Tool for Composition Analyses; A. D. Supanitsky, A. Etchegoyen, G. Medina-Tanco, I. Allekotte, M. Gómez Berisso, and M. C. Medina; Astroparticle Physics, 29; 461-470 (2008).
- [7] The AMIGA Muon Detectors of the Pierre Auger Observatory: Overview and Status, F. Suarez for the Pierre Auger Collaboration, 33th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2013), Rio de Janeiro, Brazil.
- [8] Invited Plenary talk to the VIII L. A. Symposium on Nuclear Physics and Applications; A. Etchegoyen et al. for Pierre Auger Collab., AIP Conf. Proc.1265, 129 (2010) y arXiv:1004:2537v1 [astro-ph:HE].
- [9] The prototype muon module for the AMIGA project of the Pierre Auger Observatory, The Pierre Auger Collab., enviado a JINST 11 (2016).
- [10] The AMIGA Muon Counters of the Pierre Auger Observatory: Performance and Studies of the Lateral Distribution Function, B. Wundheiler for the Pierre Auger Collaboration, 34th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2015), The Hauge, Netherlands
- [11] Measurement of the energy spectrum of cosmic rays above 3×10^{17} eV using the AMIGA 750 m surface detector array of the Pierre Auger Observatory, D. Ravignani for the Pierre Auger Collaboration, 33rd International Cosmic Ray Conference (ICRC 2013), Rio de Janeiro, Brazil.

- [12] The AMIGA detector of the Pierre Auger Observatory: An overview, F. S´anchez for the Pierre Auger Collaboration, 32nd International Cosmic Ray Conference (ICRC 2011), Beijing, China.
- [13] The AMIGA muon counters of the Pierre Auger Observatory: Performance and first data, B. Wundheiler for the Pierre Auger Collaboration, 32nd International Cosmic Ray Conference (ICRC 2011), Beijing, China.
- [14] The AMIGA infill detector of the Pierre Auger Observatory: Performance and first data , I. C. Maris for the Pierre Auger Collaboration, 32nd International Cosmic Ray Conference (ICRC 2011), Beijing, China.
- [15] Muon counting using silicon photomultipliers in the AMIGA detector of the Pierre Auger observatory, The Pierre Auger Collaboration, JINST (2017) 12