

## Plan de Trabajo

**Materia:** Tesis de Licenciatura  
**Carrera:** Licenciatura en Ciencias Físicas, FCEN, UBA.  
**Profesor:** Gustavo Lozano.

## Datos del Estudiantes

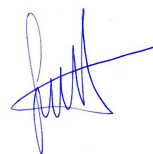
**Nombre:** Lautaro Silva Pizzi.  
**L.U:** 879/21  
**e-mail:** lautarosilvapizzi@gmail.com

## Dirección y Lugar de Trabajo

**Director:** Juan Manuel Figueira  
Investigador Adjunto (CONICET) – Profesor Adjunto (UNLAM)  
**e-mail:** juan.figueira@iteda.gob.ar  
**Codirector:** Federico Sánchez  
Investigador Independiente (CONICET) – Profesor Adjunto (UNSAM)  
**e-mail:** federico.sanchez@iteda.gob.ar  
**Lugar de trabajo:** Instituto de Tecnologías en Detección y Astropartículas  
(ITeDA) CNEA-CONICET-UNSAM  
Centro Atómico Constituyentes  
Av. Gral. Paz 1499 (B1650KNA)  
San Martín Buenos Aires, Argentina



Juan Manuel Figueira



Federico Sánchez

# Mapas y Asimetrías Azimutales de la Densidad de Muones de Lluvias Atmosféricas Extensas con el Detector Subterráneo de Muones del Observatorio Pierre Auger

## 1. OBJETIVOS

### 1.1. Objetivos Generales

En cada segundo, la atmósfera terrestre es impactada por aproximadamente diez mil partículas por metro cuadrado. Prácticamente la totalidad de estos rayos cósmicos provenientes del espacio son protones y núcleos ionizados más pesados [1]. Sus energías cubren un rango enorme, desde menos de  $10^9$  eV hasta más de  $10^{20}$  eV, tres órdenes de magnitud por encima de las energías que actualmente se pueden alcanzar con el “*Large Hadron Collider*” (LHC, CERN). Existe buena evidencia de que los rayos cósmicos con energías de hasta aproximadamente  $10^{17}$  eV se originan dentro de nuestra galaxia y se aceleran en remanentes de supernovas. Sin embargo, la situación es menos clara para energías más altas. Si bien se cree generalmente que los rayos cósmicos de ultra-alta energía ( $E \geq 10^{18}$  eV) se originan fuera de nuestra galaxia, continúa sin conocerse tanto las fuentes de donde provienen como a qué energías ocurre la transición de rayos cósmicos galácticos a extragalácticos. Dado que distintos modelos teóricos y escenarios astrofísicos hacen predicciones distintas sobre la composición de masas (o elemental) de los rayos cósmicos a las energías más altas, la identificación de parámetros observables sensibles a la masa del rayo cósmico primario y la realización de mediciones muy precisas de la composición son esenciales para proporcionar respuestas a esos interrogantes.

La forma en que se detectan los rayos cósmicos depende de su energía. Hasta aproximadamente  $10^{15}$  eV, el flujo de rayos cósmicos es lo suficientemente alto como para permitir la detección directa. En este caso, los detectores típicos son espectrómetros o calorímetros, que se colocan en globos aerostáticos o satélites. Los rayos cósmicos con energías superiores a  $10^{15}$  eV tienen un flujo tan bajo que sólo pueden ser estudiados mediante la detección de la lluvia de partículas secundarias que se crea luego de que el rayo cósmico primario interactúe con algún núcleo de la atmósfera terrestre. A esta lluvia de partículas secundarias se la conoce como “*lluvia atmosférica extensa*” (EAS, por “*Extensive Air Shower*”, sus siglas en inglés). Así, grandes observatorios terrestres posibilitan estudiar las propiedades de los rayos cósmicos primarios por medio de arreglos de distintos tipos de detectores ubicados sobre la superficie terrestre, los cuales logran detectar las partículas secundarias de la EAS a partir de distintos principios de funcionamiento. Entre este grupo de observatorios se encuentra el Observatorio Pierre Auger [2], que se caracteriza por ser el observatorio de rayos cósmicos más grande del mundo. Se encuentra ubicado en el hemisferio sur, en Malargüe,

Argentina, y cubre un área de  $\sim 3.000 \text{ km}^2$ , extensión necesaria para medir con suficiente representatividad el bajo flujo de los rayos cósmicos de ultra-alta energía.

Este plan de trabajo se enmarca en el desafío fundamental de elucidar la naturaleza de los rayos cósmicos de ultra-alta energía. Su objetivo general es realizar un estudio sistemático y de alta precisión sobre la componente muónica de las lluvias atmosféricas extensas. La finalidad de este enfoque es doble: por un lado, avanzar en la determinación de la composición de masas de los primarios y, por otro, confrontar rigurosamente las predicciones de los modelos de interacciones hadrónicas (tales como EPOS-LHC y QGSJET-II-04). Estos modelos son, en la actualidad, la principal fuente de incertidumbre sistemática que limita la interpretación física de las EAS. La investigación se llevará a cabo utilizando los datos del Observatorio Pierre Auger y se concentrará en el crucial rango de energías por encima de  $1 \times 10^{17} \text{ eV}$ , donde los indicios de una transición de fuentes galácticas a extragalácticas hacen que la determinación de la composición de masas sea de especial interés.

## **1.2. Objetivos Específicos**

Los rayos cósmicos de ultra-alta energía (UHECRs) representan uno de los mayores enigmas de la física de astropartículas moderna. Su origen, los mecanismos capaces de impartirles energías tan extremas y su composición de masa son aún objeto de intensa investigación.

La detección y caracterización de los rayos cósmicos de ultra-alta energía se realiza principalmente a través del estudio de las lluvias atmosféricas extensas que los mismos inducen al colisionar con algún núcleo de la atmósfera terrestre. El Observatorio Pierre Auger, ubicado en Argentina, es el detector más grande del mundo dedicado a esta tarea. Una de las herramientas fundamentales para analizar estas lluvias es la Función de Distribución Lateral (LDF), que describe cómo se distribuyen las partículas en un plano perpendicular al eje de la lluvia.

Estudios previos con los detectores de superficie (SD) del observatorio han revelado que, para lluvias inclinadas, la LDF no es circularmente simétrica [3–10]. Esta asimetría es un fenómeno en el cual los detectores ubicados a la misma distancia perpendicular al eje de una lluvia inclinada registran, en promedio, señales sistemáticamente distintas según su posición azimutal relativa respecto del eje de la lluvia entrante. Fundamentalmente, se observa una asimetría "temprano-tardía", donde la señal registrada difiere en la dirección de avance de la lluvia y en la dirección opuesta. Esta asimetría, originada principalmente por la diferencia en la atenuación de la componente electromagnética y por efectos geométricos, ha demostrado ser un poderoso indicador del estado de desarrollo de la lluvia, correlacionándose con la profundidad del máximo desarrollo de la lluvia,  $X_{\text{max}}$ , un observable clave para la determinación de la composición de masa [8].

Los mapas de muones son representaciones espaciales de la densidad de muones a una determinada profundidad atmosférica [9]. Se construyen típicamente en el plano perpendicular al eje de la lluvia, donde cada punto del mapa corresponde a una medición de la densidad de

muones en una posición relativa al eje y al frente de la cascada. Estos mapas pueden mostrar variaciones con el ángulo azimutal  $\zeta$  y la distancia radial  $r$ , revelando estructuras no isotrópicas relacionadas con el desarrollo de la lluvia atmosférica y la geometría del arreglo de detectores.

Este trabajo de tesis se propone, por primera vez, trasladar este tipo de análisis a la componente muónica pura de la lluvia, utilizando las mediciones del Detector Subterráneo de Muones (UMD, por “*Underground Muon Detector*”, sus siglas en inglés) [11–13] del Observatorio Pierre Auger. Al estar ubicado bajo tierra, el UMD ofrece una oportunidad única para estudiar los muones de forma aislada, libres de la contaminación de electrones y fotones.

Los objetivos específicos de este trabajo son construir y analizar mapas de muones en el plano de la lluvia, utilizando los datos recolectados por el UMD, permitiendo identificar si una asimetría azimutal de este tipo persiste en la distribución de muones y, en caso afirmativo, realizar la primera caracterización de las asimetrías azimutales en la distribución lateral de muones registradas por el UMD, intentar comprender el origen de estas asimetrías en la componente muónica pura de las lluvias y evaluar su potencial como nueva herramienta para el estudio de la composición de masa de los rayos cósmicos de ultra-alta energía.

Para alcanzar el objetivo específico, se plantean los siguientes pasos:

- Familiarizarse con el software de simulación y reconstrucción (Offline) del Observatorio Pierre Auger, así como con el formato de datos del UMD.
- Adaptar la metodología de análisis de asimetrías, desarrollada para los detectores de superficie (SD) del Observatorio Pierre Auger, para su aplicación a los datos del UMD, que mide exclusivamente muones [5, 7, 8].
- Analizar un conjunto de simulaciones Monte Carlo (CORSIKA) de lluvias iniciadas por protones y núcleos de hierro para elaborar mapas de muones y estudiar el comportamiento de la asimetría muónica en anillos concéntricos al eje de la lluvia a distancias típicas entre 300 y 1500 m, y para distintas masas, energías y ángulos cenitales del rayo cósmico primario.
- Desarrollar una parametrización funcional para la asimetría observada en densidad de muones en función del ángulo azimutal y la distancia al eje de la lluvia, siguiendo el formalismo de modulación sinusoidal propuesto en estudios previos para la señal total [5, 8].
- Definir un parámetro de asimetría  $A$  que compare la densidad de muones en la región “temprana” con la “tardía” de la lluvia.
- Estudiar la dependencia del parámetro de asimetría  $A$  con la distancia al eje de la lluvia, la energía primaria, el ángulo cenital y la masa del primario.
- Estudiar la sensibilidad de  $A$  como discriminador de masa.
- Aplicar la metodología desarrollada a un conjunto de datos reales del detector AMIGA para realizar la primera medición de esta asimetría.
- Comparar los resultados obtenidos con datos reales con las predicciones de los modelos de interacción hadrónica (e.g., QGSJET-II.04, SIBYLL 2.1) para evaluar la consistencia y extraer conclusiones sobre la física subyacente.

- Elaborar la tesis documentando procedimiento, resultados y conclusiones del trabajo.

## 2. ANTECEDENTES

La reconstrucción de eventos en grandes arreglos de detectores de superficie se basa en el supuesto de que la densidad de partículas de una lluvia atmosférica presenta una simetría circular en el plano perpendicular a su eje de propagación. Sin embargo, para lluvias inclinadas, esta simetría se rompe. Se ha observado una sistemática diferencia en la densidad de partículas entre la región "temprana" (o *upstream*) y la región "tardía" (o *downstream*) de la traza de la lluvia en el suelo.

Los primeros estudios sobre asimetrías en el SD demostraron que la hipótesis de simetría circular en el plano de la ducha se rompe por la evolución longitudinal de la lluvia y efectos geomagnéticos, dando lugar a patrones azimutales bien definidos en la distribución lateral de cargas en superficie [3]. Billoir *et al.* propusieron parametrizaciones de la función de distribución lateral que incorporan términos de asimetría para ajustar mejor los datos del SD, y luego identificaron que su origen radica principalmente en una combinación de efectos [5, 6]:

1. Atenuación atmosférica: Las partículas que llegan a la región tardía han atravesado una mayor profundidad atmosférica, por lo que la componente electromagnética de la lluvia sufre una mayor atenuación. Este efecto es significativo, ya que esta componente domina la señal en los tanques Cherenkov para lluvias de bajo y mediano ángulo cenital.
2. Efectos geométricos: La divergencia de las partículas respecto al eje de la lluvia, combinada con la inclinación del frente de la misma, produce una asimetría puramente geométrica al proyectar las densidades en el plano de la lluvia.

Por su parte, con la actualización AugerPrime, Bradfield desarrolló un análisis sistemático de asimetrías en el SD y en los detectores de superficie centelladores, corroborando su utilidad para estudios de composición [8]. En estos estudios previos se sugiere que, debido a su mayor poder de penetración, la asimetría es menor para los muones que para las partículas electromagnéticas. Esto abre una pregunta fundamental: ¿Qué magnitud y origen tiene la asimetría temprano-tardía en una señal pura de muones, como la medida por el UMD? Este trabajo se propone responder a esta pregunta, investigando si la atenuación o efectos geométricos generan una asimetría medible y si esta puede ser utilizada como una nueva herramienta para el estudio de la composición.

## 3. ACTIVIDADES Y METODOLOGÍA

El desarrollo del trabajo seguirá un cronograma estructurado y combinará el análisis de simulaciones y datos experimentales.

En una fase inicial, de aproximadamente dos meses, el estudiante deberá adquirir los conocimientos generales del área de conocimiento relativa a los rayos cósmicos de ultra-alta

energía. Luego, deberá comprender los principios de funcionamiento de los detectores utilizados en el Observatorio Auger. A continuación, deberá familiarizarse con las herramientas de análisis básicas utilizadas en el área de física de altas energías. En particular, deberá dominar la utilización del código OFFLINE, software oficial de la colaboración Auger, el cual posibilita realizar las simulaciones y el análisis de los datos del observatorio.

Una vez finalizada la preparación, el núcleo de la investigación, que se extenderá por unos cuatro meses, se centrará en el análisis de simulaciones Monte Carlo. Se utilizarán librerías de simulaciones CORSIKA para lluvias iniciadas por protones y núcleos de hierro. Estas simulaciones se procesarán a través de la simulación del UMD para obtener la densidad de muones esperada en cada detector para cada evento. Se implementará un algoritmo que, para cada evento reconstruido, proyecte las posiciones de los detectores activados al plano de la lluvia para obtener sus coordenadas radial y azimutal. Los eventos simulados se agruparán en bins de energía y ángulo cenital. Para cada bin, se construirán mapas de muones en coordenadas  $(r, \zeta)$ . Se estudiará la dependencia de la densidad de muones con el ángulo azimutal  $\zeta$  y se ajustará a una función sinusoidal del tipo  $\rho_{\mu}(\zeta) = \rho_{\mu,0}(1 + A \cos \zeta)$  para cuantificar la amplitud de la asimetría  $A$ . Se parametrizará la dependencia de  $A$  con la distancia al eje de la lluvia  $r$ , y el ángulo cenital  $\theta$ , para primarios de protón y hierro.

Con la metodología ya validada, la siguiente etapa de tres meses consistirá en aplicar la misma cadena de análisis a un conjunto de datos reales de alta calidad recolectados por el UMD. Esto permitirá obtener la primera medición de la asimetría azimutal en la distribución de muones. Los resultados de la asimetría medida se compararán directamente con las predicciones de las simulaciones. Se buscará extraer conclusiones sobre la composición de masa promedio de los rayos cósmicos en el rango de energía estudiado.

Los últimos meses del proyecto se dedicarán a la fase de interpretación y escritura de la tesis.

## 4. FACTIBILIDAD

La sede del Instituto de Tecnologías en Detección y Astropartículas (ITeDA, CNEA-CONICET-UNSAM) en Buenos Aires, ubicada en el Centro Atómico Constituyentes, dispone de más de 400 m<sup>2</sup> de laboratorios y oficinas, y cuenta con un centro de cómputo de alto rendimiento dedicado al almacenamiento, análisis y simulación de datos. Su equipamiento se financia con un presupuesto anual de CNEA, mientras que CONICET cubre bienes de capital y gastos operativos; además, la Universidad Nacional de General San Martín aporta un subsidio para programas de intercambio de jóvenes investigadores con la Asociación Helmholtz de Alemania.

Este proyecto de tesis es totalmente factible en el plazo de un año, ya que se apoya en una metodología de análisis robusta y validada en los detectores de superficie del Pierre Auger. Los recursos necesarios para la realización del plan de trabajo son el acceso a un centro de cómputo, a las librerías de simulación de lluvias extensas (CORSIKA), a la base de datos

completa del Observatorio (incluido el UMD) y a los códigos de simulación y análisis (OFFLINE). ITeDA garantiza tanto el respaldo institucional como todos los recursos necesarios para el desarrollo del trabajo.

El plan de trabajo está claramente definido y acotado, representando un estudio original y viable para ser completado en el plazo de un año, para lo cual se contará con la guía adecuada que asegure el cumplimiento de los objetivos propuestos.

## 5. REFERENCIAS

- [1] T. K. Gaisser, R. Engel, and E. Resconi, *Cosmic Rays and Particle Physics*, 2<sup>nd</sup> Edition, Cambridge University Press, 2016, doi:10.1017/CBO9781139192194.
- [2] Pierre Auger Collaboration, Nucl. Inst. and Meth. A 798, 172 (2015).
- [3] C. Pryke, *Asymmetry of Air Showers at Ground Level*, Pierre Auger Observatory Internal Note GAP-1998-034 (1998).
- [4] X. Bertou, and P. Billoir, *On the Origin of the Asymmetry of Ground Densities in Inclined Showers*, Pierre Auger Observatory Internal Note GAP-2000-017 (2000).
- [5] P. Billoir, P. Da Silva, and X. Bertou, *Checking the origin of the Asymmetry of the Surface Detector signals*, Pierre Auger Observatory Internal Note GAP-2002-074 (2002).
- [6] P. Billoir, and P. Da Silva, *Towards a Parametrization of the Lateral Distribution Function and its Asymmetries in the Surface Detector*, Pierre Auger Observatory Internal Note GAP-2002-073 (2002).
- [7] D. García Pinto, *Time Asymmetry in UHE Cosmic Ray Showers: Mass Composition Studies in the Pierre Auger Observatory*, Ph.D. thesis, Universidad Complutense de Madrid (2009).
- [8] F. Bradfield, *Extensive air shower asymmetry and cosmic ray mass composition with the upgraded Pierre Auger Observatory*, Ph.D. thesis, The University of Adelaide (2002). <https://core.ac.uk/works/139312743/>.
- [9] H. Dembinski, T. Hebbeker, and M. Leuthold, *A comparison of Monte-Carlo generated Muon Maps with near horizontal SD showers*, Pierre Auger Observatory Internal Note GAP-2007-054 (2007).
- [10] The Pierre Auger Collaboration, Physical Review D 93, 072006 (2016).
- [11] Pierre Auger Collaboration; Journal of Instrumentation 11, P02012 (2016).
- [12] Pierre Auger Collaboration; Journal of Instrumentation 12, P03002 (2017).
- [13] Pierre Auger Collaboration; Journal of Instrumentation 16, P04003 (2021).