

Instrumentación para detección de astropartículas y clima espacial en la UNACH.

Instrumentation for astroparticles and space weather detection at UNACH.

Karen Salomé Caballero Mora* (1).

Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas, Benemérita Universidad Autónoma de Chiapas (FCFM-UNACH).

karen.mora@unach.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en agosto 22, 2025; aceptado en octubre 03, 2025.

Resumen.

Se presenta una introducción a las astropartículas, seguida de un resumen sobre las distintas técnicas de detección que se utilizan para medirlos, en especial se pone énfasis en las técnicas cultivadas en el Laboratorio de Astrofísica y Altas Energías de la Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas de la Benemérita Universidad Autónoma de Chiapas (FCFM-UNACH). Se menciona la técnica de centelleo (Escaramujo), la detección de luz Cherenkov en agua (WCD, LAGO, Auger-SD, HAWC y SWGO), detección con luz de Fluorescencia (FD, Auger), antenas para medir ondas de radio (Auger), satélites y la cámara de placas resistivas (RPC, MATHUSLA). Igualmente se explica en qué consiste el clima espacial y las técnicas usadas en la UNACH para estudiarlo, en especial la técnica con el detector Escaramujo y la antena CALLISTO.

Palabras claves: Astropartículas, clima espacial, detectores, instrumentación, rayos cósmicos.

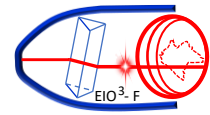
Abstract.

An introduction to astroparticles is presented, followed by a summary of the different detection techniques used to measure them, with special emphasis on the techniques cultivated at the Astrophysics and High Energy Laboratory of the Faculty of Physics and Mathematics of the Benemérita Universidad Autónoma de Chiapas (FCFM-UNACH). The scintillation technique (Escaramujo), Cherenkov light detection in water (WCD, LAGO, Auger-SD, HAWC and SWGO), fluorescence light detection (FD, Auger), antennas for measuring radio waves (Auger), satellites and the resistive plate chamber (RPC, MATHUSLA) are mentioned. Space weather is also explained, as well as the techniques used at UNACH to study it, especially the technique with the Escaramujo detector and the CALLISTO antenna.

Keywords: Astroparticles, cosmic rays, detectors, instrumentation, space weather.

1. Descripción de la conferencia.

Las partículas elementales son los constituyentes de la materia y no están constituidas por partículas más pequeñas ni se conoce que tengan estructura interna. Se clasifican en fermiones y bosones de norma; dentro de los fermiones se mencionan los leptones (neutrinos, electrones, muones y tau, y sus antipartículas), los quarks (arriba, abajo, fondo, cima, extraño y encanto); dentro de los bosones de norma se mencionan los fotones (portadores de la fuerza electromagnética), W, Z (portadores de la fuerza electrodébil), gluones (portadores de la interacción fuerte) (Menchaca,



2017)., Higgs (mecanismo de la creación de masa), y los gravitones (hipotéticamente debería ser la portadora de la interacción gravitacional). Los ladrones, por otra parte, están formados por otras partículas, los mesones están formados por un par quark-antiquark (piones, kaones, eta), los bariones están formados por tres quarks diferentes (protón, neutrón, delta, lambda, sigma, xi y omega). La fuerza fuerte es la responsable de mantener a los ladrones en el núcleo atómico, al unirse los electrones se crea un átomo y cuando se unen los átomos se forman los elementos de la tabla periódica. Las partículas y sus interacciones se estudian en la Tierra gracias a experimentos como el Gran Colisionador de Hadrones (LHC), localizado en la frontera entre Suiza y Francia, es una colaboración internacional y en él se hacen chocar partículas aceleradas a energías muy altas para poder estudiar las partículas resultantes después de la colisión (LHC,CERN).

Las astropartículas a su vez, son partículas que provienen del espacio exterior, los rayos gamma no tienen carga ni masa en reposo, los neutrinos no tienen carga y su masa es muy pequeña y no se ha podido determinar con total certeza (KATRIN, KIT). Por su parte, los rayos cósmicos (RC) son núcleos de átomos y partículas cargadas que llegan a la Tierra desde el espacio exterior, todavía no se sabe exactamente su influencia en la vida en el planeta, sin embargo, ésta ha sido posible con su presencia. Se sabe que son responsables de la creación de algunos elementos como el litio o el berilio y el famoso carbono 14, usado para datar restos orgánicos antiguos. Los rayos cósmicos fueron descubiertos cuando en 1912 Víctor Hess, físico austriaco, estudiaba la radiación en la atmósfera, y descubrió que mientras más ascendía en el globo aerostático en el que viajaba, la radiación medida aumentaba, concluyendo que ésta debería provenir del espacio exterior. Desde entonces a esta radiación se le llamó cósmica, o *rayos cósmicos* (Hess, 1912); uno de los investigadores más activos y pioneros en su estudio fue el mexicano Manuel Sandoval Vallarta, cuyos trabajos llevaron a la conclusión de que la naturaleza de los RC era de núcleos atómicos (protones) (Otaola, 2015).

Los RC fueron por varias décadas la única fuente de información sobre las partículas elementales, un ejemplo de ello es el pion, una partícula predicha teóricamente (1935), que se descubrió en mediciones de RC (1947). Posteriormente los aceleradores y colisionadores construidos por los seres humanos, permitieron observar a las partículas en ambientes controlados y a las energías deseadas. No obstante, cuando las energías de interés fueron subiendo cada vez más, se llegó a un límite, pues las dimensiones de los aparatos necesarios para alcanzar energías hasta 10^{17} eV¹ o más eran inviables tecnológicamente y económicamente. A estas energías los RC, son llamados ultra-energéticos (RCUE), y vuelven a ser las únicas fuentes de información disponibles. Los misterios a investigar de los RCUE, incluyen conocer cuáles son y dónde están las fuentes de donde provienen, cómo se aceleran, y cómo se propagan en los entornos magnetizados del universo. La retroalimentación que se puede obtener de ellos y la física fundamental está en los temas de su interacción con la atmósfera y la información de temas más allá del Modelo Estándar de las partículas elementales que se puede obtener de ellos.

El espectro de energía de los RC abarca el rango de 10 eV- 10^{20} eV y expresa el flujo de RC como función de la energía, conforme la energía aumenta, el flujo disminuye y es más difícil poder medirlos. Tiene distintas estructuras que son indicativas del cambio en el origen y mecanismos de aceleración y propagación de los RC, se pueden mencionar la rodilla, la segunda rodilla, el tobillo y el empuje, los nombres obedecen a su similitud con una pierna humana (Masip, 2016), la **Fig. 1** muestra el espectro más reciente reportado por el Particle Data Group (Espectro, PDG).

Cuando los RC llegan a la atmósfera terrestre, interactúan con las moléculas y se forma un chubasco atmosférico extendido (CAE). Los CAE's son lluvias de partículas secundarias que se forman a una altura de entre 8 km y 10 km, tienen tres componentes, la hadrónica, que alimenta al CAE durante todo su desarrollo, la electromagnética que es la más abundante y la muónica, que es la más penetrante. Lo que se observa de los CAE en la Tierra es su desarrollo y las partículas que alcanzan la superficie; una vez detectadas estas partículas secundarias, se reconstruye la energía de la partícula inicial, así como su dirección de llegada y otras observables que pueden servir para estimar su origen y su naturaleza (composición química).

Durante la conferencia se describen las distintas técnicas de medición usadas para detectar los RC, haciendo énfasis en las que se cultivan en el Laboratorio de Astrofísica y Altas Energías de la Facultad de Ciencias en Física y

¹ Un electronvolt (eV) se define como la energía cinética de un electrón cuando atraviesa una diferencia de potencial de 1 Volt.

Matemáticas de la Benemérita UNACH (LabAstro-UNACH). De igual manera se describe la conexión con los estudios de clima espacial. El clima espacial se define como la medición y el análisis en tiempo real del conjunto de propiedades físicas del Sol, el medio interplanetario, la magnetosfera, la atmósfera y la superficie terrestre que se encuentran influenciadas directa o indirectamente por la actividad solar y las cuales tienen un impacto en la infraestructura, tecnología, sociedad y salud (Clima,sciesmex).

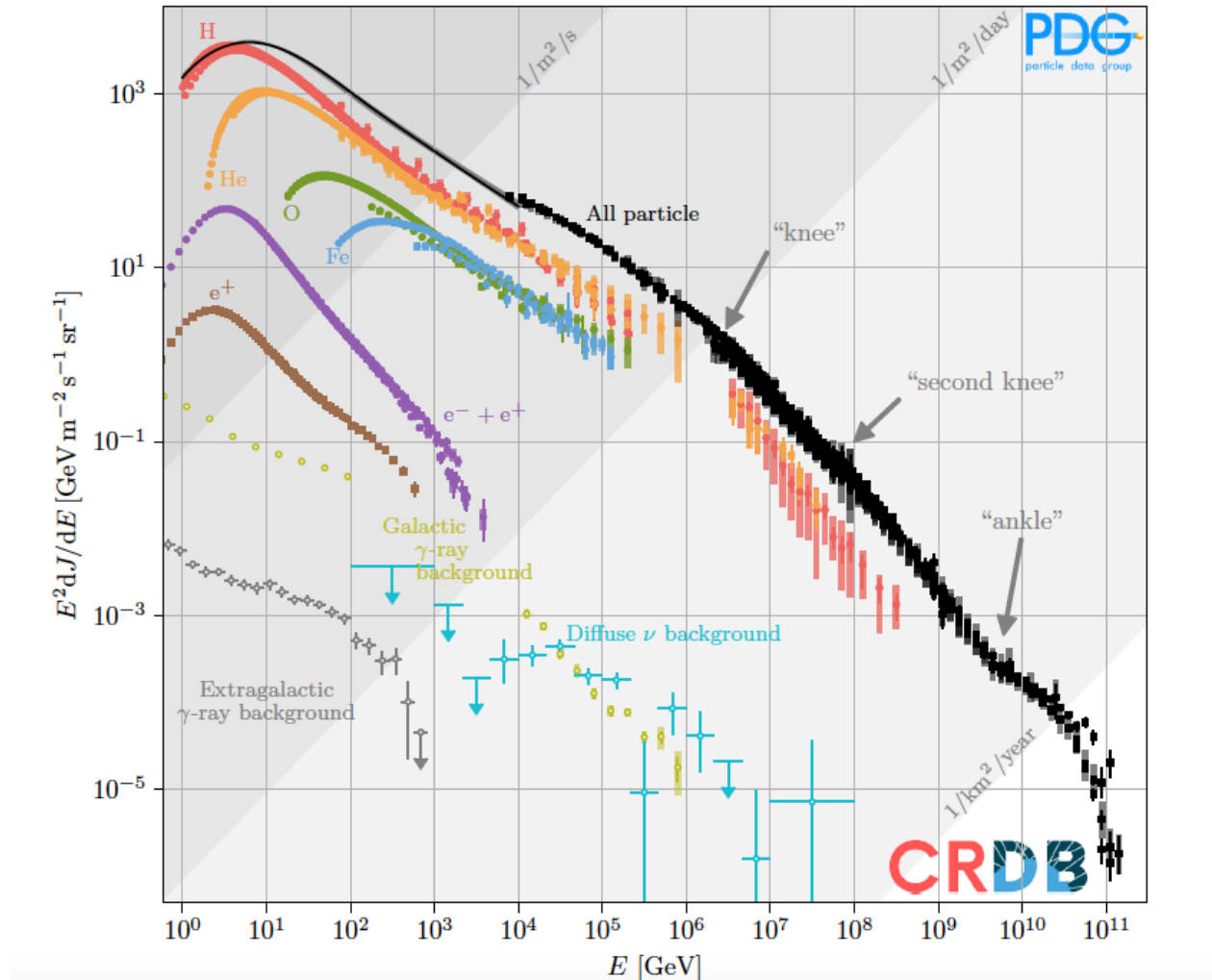
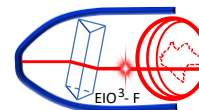


Figura 1. Espectro de energía de los RC, reportado en 2024 por el Particle Data Group (PDG).

2. Métodos.

En el LabAstro-UNACH se cuenta con cuatro instrumentos de medición de RC y clima espacial, el detector Escaramujo que usa la técnica de detección por centelleo, el tanque *Jaguarito*, parte del experimento LAGO, que mide la luz Cherenkov en agua (WCD), una cámara de placas resistivas (RPC) y una antena de radio que es parte de la red mundial e-CALLISTO y del Laboratorio Nacional de Clima Espacial (LANCE). Por otro lado, el LabAstro-UNACH también tiene colaboración con el Observatorio Pierre Auger (Auger), el experimento HAWC y SWGO, además del experimento MATHUSLA; por tal motivo también se mencionan otras técnicas usadas en Auger, tal como la detección de luz de fluorescencia en la atmósfera (FD), plásticos centelladores subterráneos y antenas de radio. También se menciona brevemente el papel de los satélites e instrumentos colocados en estaciones espaciales, que tienen el objetivo de medir RC, ya que el LabAstro-UNACH también contribuyó en un estudio relacionado con uno de estos instrumentos



(COLMENA). Todas las técnicas usadas en el estudio de los RC se conocen como mediciones indirectas, ya que con ellas no se mide exactamente el RC primario, sino los cambios que éste produce en los distintos detectores, o en su paso por la atmósfera. Debido a que los RC perturban los distintos medios usados en los detectores, produciendo en su mayoría luz, el uso de fibras ópticas y detectores de luz tales como los tubos fotomultiplicadores (PMT) o los fotomultiplicadores de silicio (SiPM), se vuelve indispensable. El contar con todos estos instrumentos permitirán eventualmente realizar estudios complementarios con distintas técnicas de medición y con distintas frecuencias.

3. Desarrollo.

Escaramujo (Plástico centellador y SiPM).

El detector Escaramujo fue ideado por el físico Federico Izraelevitz con el apoyo de varios colegas de Fermilab, con el objetivo de proveer a instituciones de educación superior de Latinoamérica, que no contaban con recursos, de un detector profesional de rayos cósmicos. En Chiapas se llevó a cabo un taller para armar el detector y para realizar algunas mediciones estándar con él en el año 2015, el detector quedó en donación en el LabAstro-UNACH (Escaramujo, detector). Consiste en 3 plásticos centelladores (EJ-200) y 3 fotomultiplicadores de silicio (SiPM) tipo MicroFC-600-SMT, SensL. La captura de datos se hace con una tarjeta QuarkNet, a través de la cual se digitalizan las señales, posteriormente los datos se leen con una tarjeta Raspberry PI2; cuenta también con un módulo GPS y sensor de temperatura, así como con un preamplificador para poner los voltajes de 27 V a 36 V. Actualmente también se le agregó un sensor de presión, lo que permitirá obtener datos útiles para la corrección del flujo de RC por presión y temperatura (ver Fig. 2). Cuando una partícula relacionada con RC atraviesa el plástico centellador, produce una luz que es amplificada por el SiPM y después digitalizada para su análisis. Al ser tres plásticos, se pueden medir coincidencias entre ellas. Algunas mediciones que se pueden realizar son la modulación día-noche del flujo de RC (muones atmosféricos), la vida media del muon, y fenómenos relacionados con el clima espacial, ya que mientras el sol esté activo, el flujo de RC disminuye (ver Fig. 3).

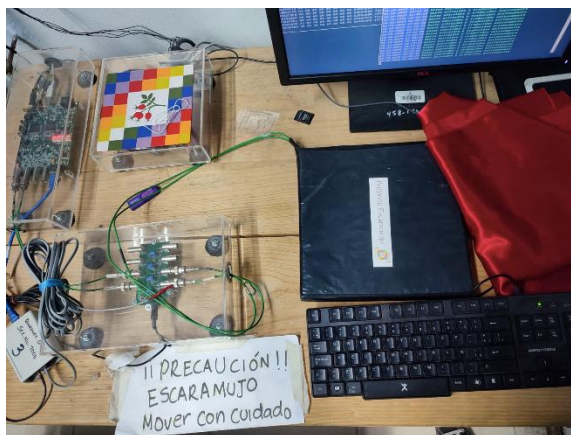


Figura 2. Detector Escaramujo trabajando.

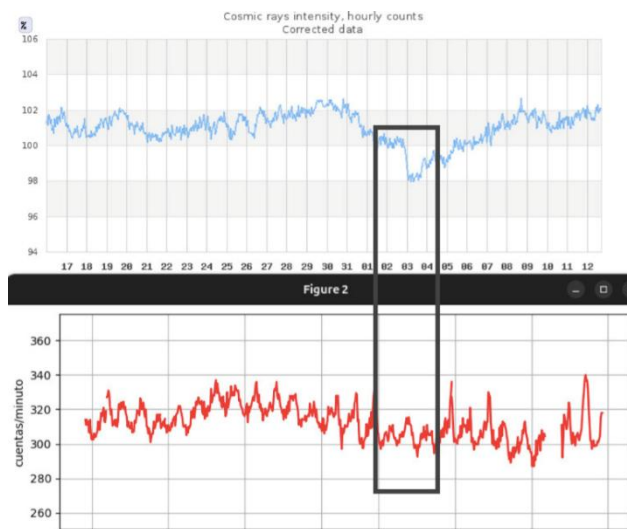
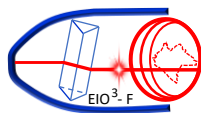


Figura 3. Medición de una disminución del flujo de RC, relacionado con la actividad solar (clima espacial), la gráfica azul muestra los datos medidos con el detector de RC de la UNAM y la roja muestra los datos obtenidos con el detector Escaramujo, se observa también una leve disminución.

LAGO (WCD).

El Observatorio Latinoamericano Gigante, o LAGO por sus siglas en inglés, es un observatorio de astrofísica a escala global, orientado a la investigación básica sobre el universo extremo (por ejemplo, destellos de rayos gamma, GRB), fenómenos de clima espacial y radiación atmosférica a nivel del suelo. LAGO también tiene el objetivo de formar gente en instrumentación sobre RC (LAGO,net). Consiste en una red de detectores de luz Cherenkov en agua (WCD), colocados a lo largo del continente latinoamericano, abarcando así una amplitud muy grande en latitud y longitud. Cuando un RC atraviesa un volumen de agua pura contenido en un WCD, excita al agua y se produce la luz Cherenkov, debido a que el RC se mueve más rápido que la luz en dicho medio. La luz producida se amplifica por un tubo fotomultiplicador (PMT de 8 pulgadas, donado por Auger), posteriormente se digitaliza la señal en una tarjeta desarrollada por la colaboración y se leen los datos, en el caso del sitio de Tuxtla, con una tarjeta Red Pitaya. El detector LAGO de Chiapas se llama *Jaguarito* y posee un circuito complementario generador de voltaje negativo y de alto voltaje, así como la instalación de un ventilador para enfriar los circuitos. Los datos se comparten con la colaboración en un repositorio en Colombia y se almacenan localmente en el Laboratorio Regional de Cómputo de Alto Desempeño (LARCAD-UNACH). Junto con el detector, también se han desarrollado simulaciones del mismo (con Geant4 (Geant4, sim)) y del flujo esperado (con CORSIKA (CORSIKA,sim)), con el objetivo de calibrarlo correctamente y monitorear su funcionamiento. La **Fig. 4** muestra el detector *Jaguarito* con el grupo que ayudó a su instalación y la **Fig. 5** muestra una medición preliminar del flujo de RC junto con la corrección por presión (barométrica). El principio de medición usado en los WCD de LAGO es el mismo que el usado en los experimentos HAWC (HAWC,web), el que se planea usar en SWGO (SWGO,web) y como se verá en la siguiente sección, por Auger (Auger,web).

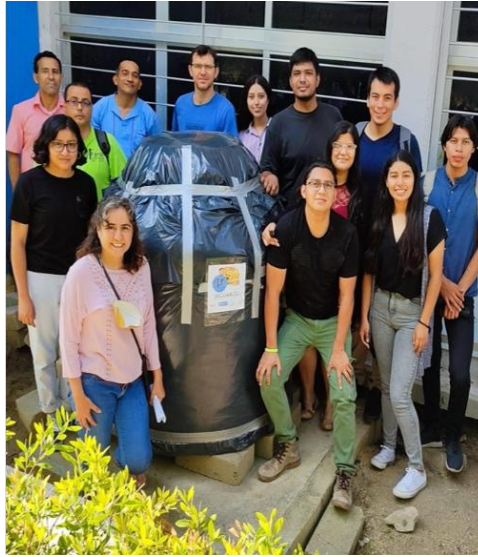


Figura 4. Grupo de estudiantes e investigadores que participaron en la instalación del detector “Jaguarito”, de LAGO en Tuxtla Gutiérrez.

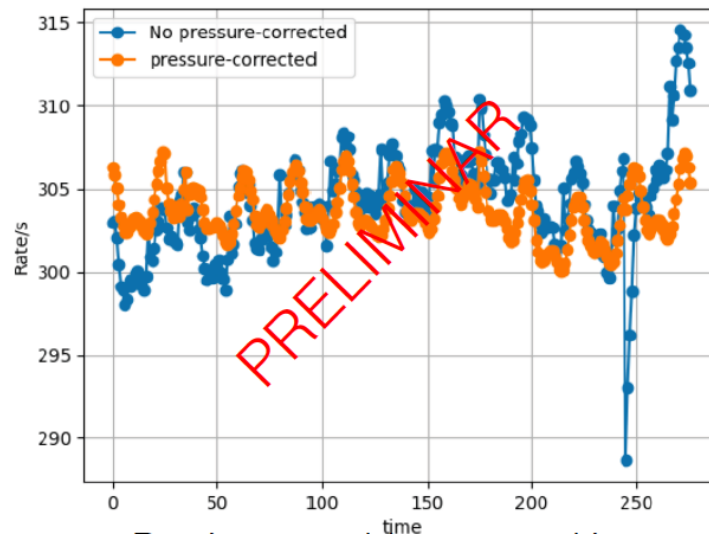
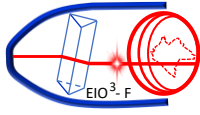


Figura 5. Flujo de RC medido en “Jaguarito” en un periodo de alrededor de 10 días, junto con la corrección del flujo por presión (corrección barométrica).

Observatorio Pierre Auger (Auger).

El Observatorio Pierre Auger es el observatorio de RCUE más grande del mundo. La **Fig. 6** muestra el mapa completo del Observatorio Pierre Auger (Roth,2025), indicando los lugares donde se ubican los distintos tipos de detectores. Una de las componentes es el detector de superficie (SD), formado por estaciones (tanques de 12 t de agua pura o WCD). Las estaciones están distribuidas de acuerdo con su separación (1500 m, 750 m o 433 m), en tres redes de distintos tamaños (3000 km², 24 km² y 2 km²) y número (1660, 61 y 19 estaciones). Los tamaños están directamente relacionados con la energía que son capaces de medir ($>10^{18.5}$ eV, $> 10^{17.5}$ eV y $> 6 \times 10^{16}$ eV respectivamente). Otra técnica usada en el SD es la detección de luz en fibras de plástico centellador, colocadas arriba de cada estación (SSD). El WCD y el SSD se complementan, el primero es más sensible a medir ambas componentes, la muónica y electromagnética, mientras que el segundo es más sensible a la componente electromagnética, el poder distinguirlas



ayuda a identificar la composición química del RC primario. La luz del WCD y del SSD se detecta por medio de tubos fotomultiplicadores (PMT). Además, cada estación tiene un detector de radio (RD) que mide emisión de radio (componente electromagnética) coherente del CAE en el rango de 30-80 MHz, se trata de una antena dipolar conocida como SALLA y se activa cada que el WCD también presenta alguna señal. El RD complementa las mediciones del WCD para ángulos cenitales mayores de 60° . La Fig. 7 muestra estaciones del SD, con el WCD, SSD y RD. Bajo las redes de 750 m y 433 m, se incluye un contador de muones (UMD-AMIGA) que mide en el rango de energía $> 10^{17.5}$ eV. El UMD mide la componente muónica usando 64 bandas de plástico centellador enterrado a una profundidad de 2.3 m y acopladas a matrices de SiPM's. La Figura 3 muestra una imagen del UMD.

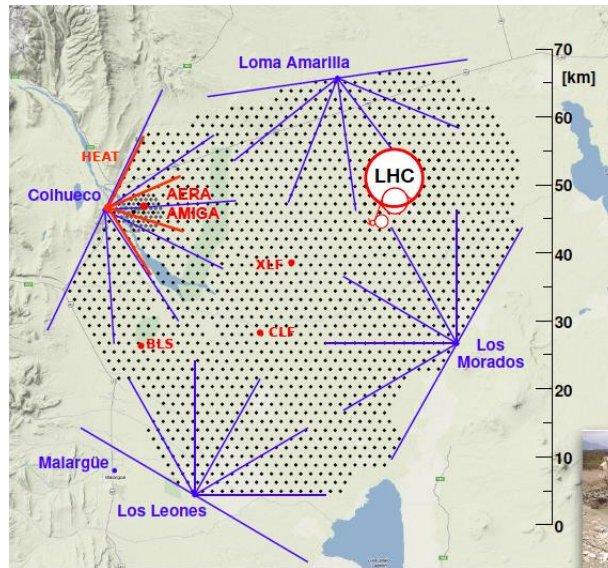
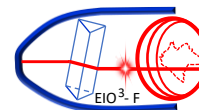


Figura 6. Mapa del Observatorio Pierre Auger. Los puntos negros son las estaciones WCD y las líneas en los lados muestran la dirección en la que observan los telescopios del FD. Se superpone el área del gran colisionador de hadrones (LHC) para comparación.



Figura 7. Estaciones del SD mostrando el WCD, SSD y el RD.

El observatorio también tiene la red de ingeniería de radio de Auger (AERA), que mide en el rango de 30 a 80 MHz, y consta de 153 estaciones abarcando un área de 17 km^2 . Con esta red además de detectar la emisión de radio proveniente de los UHECR, también se puede estudiar el clima espacial (ver Fig. 8.). En los lados del SD se acomodan cuatro edificios que conforman el detector de Fluorescencia (FD). Cada edificio tiene 6 telescopios, que observan el cielo nocturno midiendo las emisiones de fluorescencia producidas por los CAE a su paso por la atmósfera. Los telescopios consisten cada uno en un espejo esférico de $3.6 \text{ m} \times 3.6 \text{ m}$ que tiene 440 PMTs en su foco, y una cámara de $80 \text{ cm} \times 80 \text{ cm}$, que puede observar CAE's alejados más de 10 km de distancia. El rango de energía que el FD puede



medir es de $> 10^{20} \text{ eV}$. Cerca de uno de los sitios del FD, se encuentran tres telescopios de alta elevación (HEAT), los cuales aumentan el rango de visión hacia regiones más superiores de la atmósfera, permitiendo aumentar el rango de energía de medición. En total el FD tiene en total 27 telescopios funcionando durante las noches, alrededor de un 15% del tiempo (ver Fig. 9). El SD y el FD se complementan de varias maneras, una es en el tiempo en el que se toman las mediciones, ya que a diferencia del FD, el SD funciona 100% del tiempo, lo que hace que se obtengan muchos más datos. Además, el FD mide casi directamente la energía de los CAE's a través de observar las partículas que se producen en el CAE; con esta medición se puede calibrar la energía que se mide en el SD. Mientras que el FD observa el desarrollo del CAE en la atmósfera, el SD detecta la huella que deja en la superficie (ver Fig. 10). En el Observatorio también se pueden estudiar destellos descendentes de rayos gamma terrestres (TGFs), del orden de MeVs de energía, que se producen en las nubes de tormentas, usando la red de 1500 m del SD. Así también, con el FD se pueden estudiar fenómenos transitorios como las emisiones de luz y perturbaciones de baja frecuencia debido a fuentes electromagnéticas de pulsos (ELVES), que ocurren en la base de la ionosfera cuando un relámpago emite un pulso electromagnético fuerte. También se pueden medir perturbaciones estratosféricas o mesosféricas que resultan de la electrificación intensa de tormentas eléctricas (SPRITES), entre otros. Estas mediciones se mejoran con el uso de cámaras sensibles independientes que complementan al FD. Todos estos fenómenos, junto con el clima espacial, se conocen como cosmo-geofísica. Otros complementos que se pueden usar en del observatorio son los rayos láser LIDAR para monitorear el estado de la atmósfera, o globos meteorológicos que recolectan muestras de la atmósfera para mejorar las mediciones del FD. Todas las imágenes se obtuvieron de (Auger,web).



Figura 8. Estación de AERA.



Figura 9. Edificio del telescopio de FD, el recuadro superior se muestra HEAT y en la inferior un telescopio con el espejo y los PMT's.

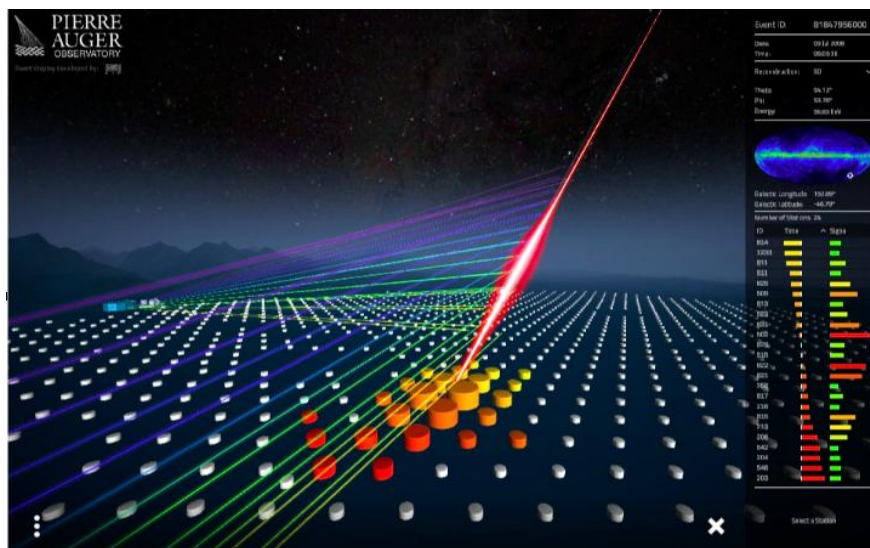


Figura 10. Recreación 3D de un evento híbrido, el CAE es el rayo rojo, las líneas de colores son las observaciones de los detectores de FD y los tanques en el suelo de distintos tamaños y colores son las estaciones del SD con distintas señales.

RPC y MATHUSLA.

Las cámaras de placas resistivas o RPC por sus siglas en inglés son detectores de RC que tienen buena resolución espacial y temporal. Están basados en el uso de un mecanismo de ionización de un gas sometido a una diferencia de potencial, el cual produce una corriente al paso de un RC. El detector que se tiene en el LabAstro-UNACH tiene un área de detección de 400 cm², placas de vidrio de 2 mm de espesor como electrodos, con una pintura resistida de grafito, cubierta con placas de cobre para capturar la corriente, todo cubierto por una caja de aluminio. Usa una mezcla de gases de ~95% de freón, ~3.9 de isobuteno y ~0.60% de hexafluoruro de azufre. Para trabajar necesita una diferencia de potencial de 7 kV a 10 kV. La [Fig. 11](#) muestra un esquema de la estructura de la RPC y la [Fig. 12](#) muestra la parte interna con las componentes usadas (Ordóñez,2020).

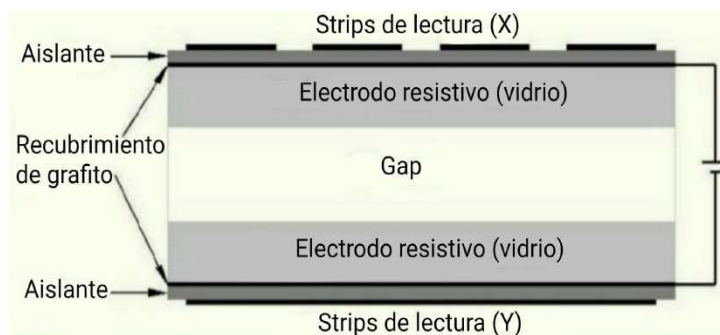


Figura 11. Esquema de la estructura de la RPC que se encuentra en el LabAstro-UNACH.

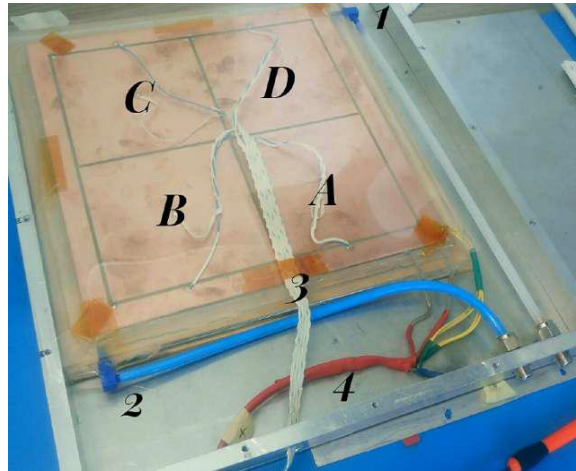
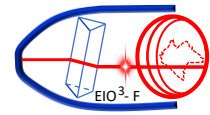


Figura 12. Componentes de la RPC; 1.-Entrada del gas, 2.-Salida del gas, 3.-Cables que guían la corriente inducida hacia el osciloscopio o contador, 4.-Alimentación de la fuente de HV a los electrodos.

Las RPC son usadas también para detectar partículas en otros experimentos tales como los que se encuentran en el LHC, en especial el LabAstro-UNACH está colaborando en la propuesta MATHUSLA, que se pretende colocar arriba del detector CMS y es un detector de partículas que usa plástico centellador. El estudio realizado pretende estimar el potencial de MATHUSLA para medir también RC del orden de PeV's, con el uso de una RPC, este es un trabajo en progreso (Alpigiani, 2023).

Satélites.

Además de las mediciones de RC que se realizan desde la Tierra, es posible detectarlos desde fuera de nuestro planeta, ya sea observando hacia la atmósfera terrestre o captando directamente los RC que pasan cerca de los detectores en el espacio exterior. Estas mediciones son posibles con el uso de detectores acoplados a satélites, así se pueden mencionar el experimento SWIFT (SWIFT,web), que puede estudiar emisiones provenientes de rayos gamma, rayos X y el visible; el telescopio FERMI (FERMI,web), que estudia rayos gamma; PAMELA (PAMELA,web), que estudia RC, antimateria, modulación solar de RC y materia oscura; AMS02 (AMS02,web), que estudia la antimateria, RC y materia oscura; el detector K-EUSO (KEUSO,web), que mide RCUE detectando fluorescencia y luz Cherenkov en la atmósfera terrestre durante las noches. En especial, en el LabAstro-UNACH se ha colaborado en simulaciones con el software SPENVIS (SPENVIS,web), para estimar la radiación cósmica a la que sería sometido un detector cargado en la misión COLMENA (COLMENA,web), esta misión pretende explorar la superficie lunar, la **Fig.13** muestra un prototipo del robot de la misión COLMENA-1.

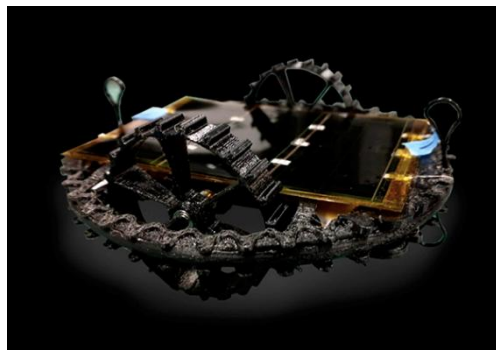
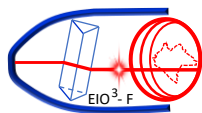


Figura 13. Imagen de uno de los robots usados en la misión COLMENA-1.



CALLISTO.

La antena CALLISTO es parte de la Red Internacional de Radiospectrómetros solares e-CALLISTO (CALLISTO,web), una colaboración que se dedica a estudiar el clima espacial. Se pueden estudiar fenómenos como erupciones solares, o eyecciones de masa coronal, usando las emisiones de radio en el rango de 45 MHz a 230 MHz. En el caso de México, se tiene la Red de Espectrómetros CALLISTO REC-Mx, que está a cargo del Instituto de Geofísica, Unidad Morelia de la UNAM (REC-MX, web) es parte del Laboratorio Nacional de Clima Espacial (LANCE) (LANCE,web). En septiembre de 2024 se instaló una antena en el campus de Ciudad Universitaria de la UNACH, esta antena opera en el rango de 45 MHz a 90 MHz debido a las interferencias en otros rangos. Se trata de una antena tipo Long Wavelength Array (LWA) y es un dipolo que a simple vista parece una sombrilla (ver Fig.14). Desde que se instaló la antena en la UNACH, ha sido de las que más ha detectado eventos a nivel mundial, colocándose siempre en los primeros 5 lugares, así también con ella se cubre la parte sur del territorio mexicano. La Fig. 15 muestra la primera medición observada con la antena de Chiapas, el 22 de septiembre de 2024. Cabe destacar que el Laboratorio Regional de Cómputo de Alto Desempeño de la UNACH (LARCAD) tiene un espejo de los datos de CALLISTO a nivel nacional.



Figura 14. Antena CALLISTO ubicada en el campus de CU de la UNACH, a cargo del LabAstro-UNACH.

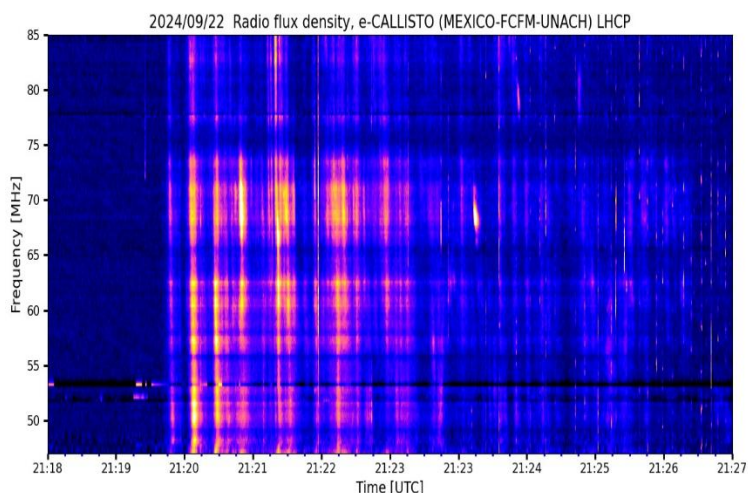
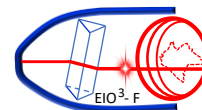


Figura 15. Primer evento medido con la antena CALLISTO de la UNACH, el 22 de septiembre de 2024.



Conclusiones.

El LabAstro-UNACH cuenta con cuatro instrumentos que explotan las técnicas de medición de RC más usadas en los grandes instrumentos que existen en la actualidad en el mundo. Con ello estudiantes de la FCFM pueden familiarizarse con los datos, las técnicas, protocolos y procesos, así como con el análisis correspondiente, adquiriendo una formación que les permitirá involucrarse en cualquier otro instrumento que tenga impacto en el desarrollo científico de esta área de investigación a nivel mundial. De igual forma tendrán la oportunidad de desarrollar nuevos detectores basados en las técnicas mencionadas, o incluso podrán idear nuevas técnicas. Además del conocimiento en RC y la física involucrada, es importante contar con la colaboración de expertos en electrónica y óptica, para caracterizar los instrumentos desarrollados de manera eficiente y correcta.

Créditos.

La autora agradece a la Benemérita UNACH, a PRODEP, a la SECIHTI (CONACYT), a la ADITECH, a L'Oréal, al DAAD, al CERN, LANCE, Fermilab, Federico Izraelevitz y al LARCAD por el financiamiento y apoyo que se ha proporcionado a lo largo de los años para que se concrete y robustezca el Laboratorio de Astrofísica y Altas Energías de la FCFM, así como a los miembros (profesores y estudiantes) de la LGAC de Astrofísica de Altas Energías de la FCFM por involucrarse en los distintos proyectos y contribuir a los avances que se han alcanzado.

Referencias bibliográficas.

Alpigiani, C et al. (2023), *Cosmic-ray searches with the MATHUSLA detector*, Trabajo en progreso. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.07704>

AMS02,web, <https://ams02.space/detector>, consultado el 18 de octubre de 2025.

Auger,web, <https://auger.org/>, consultado el 18 de octubre de 2025.

CALLISTO,web, <https://e-callisto.org/>, consultado el 18 de octubre de 2025.

Clima, sciesmex (2025), <https://www.sciesmex.unam.mx/>, consultado el 18 de octubre de 2025.

COLMENA,web, <https://linx.nucleares.unam.mx/COLMENA-1.html>, consultado el 18 de octubre de 2025.

CORSIKA,sim, <https://www.iap.kit.edu/corsika/>, consultado el 18 de octubre de 2025.

Escaramujo, detector (2015), <http://www.escaramujo.net>, consultado el 18 de octubre de 2025.

Espectro, PDG, (2024), <https://pdg.lbl.gov/2024/reviews/rpp2024-rev-cosmic-rays.pdf>, consultado el 18 de octubre de 2025.

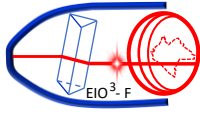
Geant4,sim, <https://geant4.web.cern.ch/>, consultado el 18 de octubre de 2025.

FERMI,web, <https://fermi.gsfc.nasa.gov/>, consultado el 18 de octubre de 2025.

HAWC,web, <https://hawc-observatory.org/>, consultado el 18 de octubre de 2025.

Hess, V. (1912), Z. Phys 13, 1089.

KATRIN,KIT, <https://www.katrin.kit.edu>, consultado el 18 de octubre de 2025.



LAGO, net, <https://lagoproject.net/> , consultado el 18 de octubre de 2025.

LANCE,web, <https://www.lance.unam.mx/>, consultado el 18 de octubre de 2025.

LHC,CERN, <https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider>, consultado el 18 de octubre de 2025.

KEUSO,web, <https://www.jemeuso.org/missions/k-euso/>, consultado el 18 de octubre de 2025.

Masip Mellado, M (2016). *Los rayos cósmicos: las energías más extremas del universo*, RBA, Barcelona, 184 pp, ISBN: 9788447385591.

Menchaca, A. (2017). *El discreto encanto de las partículas elementales*. 4a Edición, México:FCE, SEP, CONACYT, 147 pp, Colección LA CIENCIA PARA TODOS, número 68, ISBN: 9786071652645.

Ordóñez Fernández, MR (2020), *Construcción y caracterización de una cámara de placas resistivas* (Tesis de licenciatura). Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas UNACH, México.

PAMELA,web, <https://pamela-web.web.roma2.infn.it/> , consultado el 18 de octubre de 2025.

REC-MX,web, https://www.rice.unam.mx/?page_id=275, consultado el 18 de octubre de 2025.

Roth, M for the Pierre Auger Collaboration, Exploring the Ultra-High-Energy Universe: Highlights from the Pierre Auger Observatory, ICRC 2025.

SPENVIS,web, <https://www.spenvis.oma.be/>, consultado el 18 de octubre de 2025.

SWGO,web, <https://www.swgo.org/>, consultado el 18 de octubre de 2025.

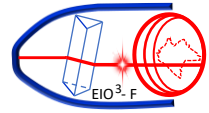
SWIFT,web, <https://swift.gsfc.nasa.gov/> , consultado el 18 de octubre de 2025.

Otaola, J & Valdés Galicia J.F. (2015). *Los rayos cósmicos: mensajeros de las estrellas*. 1a Edición, México:FCE, SEP, CONACYT, 62 pp, Colección LA CIENCIA PARA TODOS, número 108, ISBN: 9681637399.

Biografías de los investigadores.



Karen Salomé Caballero Mora Licenciada en Física por la Facultad de Ciencias de la UNAM y doctora en Ciencias Naturales por el Instituto de Tecnología de Karlsruhe (KIT), Alemania, hizo una estancia posdoctoral en la Universidad Estatal de Pensilvania (EE.UU.), otra en la Universidad de Santiago de Compostela (España) y otra en el Cinvestav Zacatenco (Ciudad de México). Se ha especializado en astropartículas y clima espacial trabajando en análisis de datos de los experimentos Observatorio Pierre Auger, IceCube, HAWC, LAGO, SWGO, MATHUSLA y CALLISTO. Sus líneas de investigación son el monitoreo del funcionamiento de detectores, estudios de composición, materia oscura, estimación de la energía, y clima espacial, entre otros. En la UNACH ha fomentado el equipamiento del Laboratorio de Astrofísica y Altas Energías, con detectores que usan distintas técnicas de medición. Igualmente estuvo involucrada en la creación del Laboratorio Regional de Cómputo de Alto Desempeño de la UNACH (LARCAD).



Ha tenido varios cargos de gestión en la UNACH como directora de la FCFM y coordinadora general adjunta del MCTP. A nivel nacional ha fungido como Secretaria de la División de Rayos Cósmicos y Presidenta de la División de Partículas y Campos de la Sociedad Mexicana de Física. De manera internacional, actualmente es representante de México ante la Colaboración Pierre Auger, y co-task líder de Educación y Divulgación de la misma Colaboración, así también fue Secretaria de la Colaboración LAGO y es responsable del sitio de Tuxtla de LAGO. Es miembro regular de la Academia Mexicana de Ciencias (AMC) desde 2024 y miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores nivel II. En 2014 fue una de las ganadoras de una beca Para la Mujer en la Ciencia de L'Oréal. Organiza varias actividades de divulgación de la ciencia para el público en general y para estudiantes de educación básica y media superior, ha organizado el Día Internacional Cósmico en Chiapas desde 2015, desde 2022 ha sido parte de la organización de la Conferencia para mujeres estudiantes de Física (CUWIP) y es parte de la Red de Mujeres Sembrando ConCiencias, que fomenta el estudio de la ciencia en estudiantes de nivel básico, medio superior y superior y ante el público en general.