



Calibración del detector de rayos cósmicos instalado en la base Antártica Argentina Marambio

N.A. Santos¹, S. Dasso^{1,2,3}, A.M. Gulisano^{2,3,4}, O. Areso² & M. Pereira² for the LAGO Collaboration

¹ Grupo LAMP, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA, Argentina

² Grupo LAMP, Instituto de Astronomía y Física del Espacio, CONICET-UBA, Argentina

³ Grupo LAMP, Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA, Argentina

⁴ Grupo LAMP, Instituto Antártico Argentino, Dirección Nacional del Antártico, Argentina

Contacto / nsantos@at.fcen.uba.ar

Resumen / Durante 2019 el grupo LAMP (Laboratorio Argentino de Meteorología del espacio) desarrolló el laboratorio Antártico de Meteorología del Espacio en la base Argentina Marambio, en la Península Antártica. El principal instrumento instalado fue un detector de rayos cósmicos basado en el efecto Cherenkov en agua. Este detector es el primer nodo antártico permanente de la colaboración LAGO (*Latin American Giant Observatory*). El transporte de rayos cósmicos galácticos de baja energía se ve afectado por estructuras transitorias en la heliósfera. Por lo tanto, estudiar las variaciones temporales del flujo de partículas cósmicas secundarias observadas en tierra es de relevancia para la Meteorología del Espacio. En este trabajo presentamos y analizamos el primer año de observaciones del flujo de rayos cósmicos secundarios de este detector.

Abstract / In 2019 an Antarctic Space Weather laboratory was deployed by the LAMP group (Laboratorio Argentino de Meteorología del espacio) at Marambio base, in the Antarctic Peninsula. The main instrument installed was a cosmic ray detector based on water Cherenkov radiation. This detector is the first permanent antarctic node of the LAGO Collaboration (*Latin American Giant Observatory*). Transient heliospheric structures affect lowest-energy galactic cosmic rays transport. Thus, study temporal variations of the observed flux at Earth is relevant for Space Weather. We present and analyze one-year observations of the flux of secondary cosmic rays observed by this detector.

Keywords / astroparticle physics — instrumentation: detectors — solar–terrestrial relations

1. Introducción

El flujo de rayos cósmicos galácticos está modulado por la manifestación interplanetaria de eventos solares transitorios. En este sentido, poseer detectores de partículas al nivel del suelo que observen las variaciones del flujo de rayos cósmicos secundarios, es de vital importancia para el desarrollo de estudios en Meteorología del Espacio. Por ejemplo, los decrecimientos Forbush son observados tanto por monitores de neutrones como también por detectores Cherenkov en agua (Pierre Auger Collaboration et al., 2011). Los decrecimientos Forbush están asociados con estructuras interplanetarias como las eyecciones de masa coronales interplanetarias y regiones de interacción entre flujos de viento solar rápido y lento (p.ej. Melkumyan et al., 2021).

Los detectores Cherenkov son altamente sensibles a los decrecimientos Forbush (p.ej. Pierre Auger Collaboration et al., 2011 y Dasso et al., 2012). Esta clase de detectores tienen la ventaja de ser robustos, de bajo costo, de fácil mantenimiento y amigables con el medio ambiente. En este trabajo presentamos al detector Cherenkov en agua instalado en el laboratorio Antártico Argentino de Meteorología del Espacio en la base Marambio (64.24°S, 56.62°O; altitud: 196 m s.n.m.). Este detector forma parte de un proyecto multidisciplinario que

involucra diferentes instituciones (ver Gulisano et al., 2021) y, además, es parte de la red internacional *Latin American Giant Observatory* (LAGO)* (Asorey et al., 2016; Dasso et al., 2016; Sidelnik, 2016). Este es el único detector Cherenkov en agua en la Antártida que está midiendo de forma operativa e ininterrumpida el flujo de rayos cósmicos secundarios, desde su instalación en marzo de 2019. El laboratorio también cuenta con un magnetómetro, una estación meteorológica, un receptor GPS para generar la estampa de tiempo correspondiente a los datos observados y un sistema de telemetría que provee los datos en tiempo real a un servidor en Buenos Aires (Gulisano et al., 2021).

La ventaja de tener un detector en altas latitudes es que esas regiones poseen una rigidez de corte magnética baja, respecto de sitios que se encuentran en bajas latitudes (en Marambio $R_c = 2.32$ GV, Masias-Meza, 2014) y, por lo tanto, los rayos cósmicos galácticos con menor energía logran llegar a la superficie.

El flujo de partículas secundarias observado en la superficie depende tanto de la modulación interplanetaria de partículas cósmicas primarias, como así también de las condiciones de la atmósfera donde se desarrolla la lluvia extendida. Esta lluvia se origina a partir de

*<http://lagoproject.net>

la interacción entre los rayos cósmicos primarios y las partículas presentes en la atmósfera. Así, es importante conocer el detalle de los efectos atmosféricos para recuperar una señal proporcional al flujo de primarios.

En la sección 2 describimos al detector y su calibración. En la sección 3 exponemos las primeras observaciones y el conteo de partículas corregido por presión. En la sección 4 comparamos el conteo observado con el detector Cherenkov respecto del conteo observado con un monitor de neutrones ubicado en Oulu (64.05°N, 25.47°E). Finalmente, en la sección 5 presentamos las conclusiones.

2. Detector Cherenkov en agua para Meteorología del Espacio

El laboratorio Antártico Argentino de Meteorología del Espacio fue desarrollado por el grupo LAMP (Laboratorio Argentino de Meteorología del espacio)** en la base Marambio entre enero y marzo del 2019.

El principal instrumento instalado fue el detector Cherenkov en agua llamado Neurus. El detector Neurus consiste en un tanque cilíndrico de acero inoxidable (diámetro: 0.96 m, altura: 1.20 m) que fue llenado con agua purificada. Cuando una partícula con carga eléctrica ingresa al detector con una velocidad mayor a la de la luz en agua produce radiación Cherenkov que es detectada por un tubo fotomultiplicador. Un recubrimiento interno hecho con Tyvek® asegura la reflexión y difusión de los fotones Cherenkov dentro del tanque. Es sabido que, de todas las partículas secundarias generadas en la lluvias atmosféricas extendidas, los detectores Cherenkov son sensibles principalmente a la componente muónica y electromagnética, las cuales están dominadas por μ^\pm , e^\pm y γ (p.ej. Sarmiento-cano et al., 2019).

Desde marzo de 2019, y durante el primer año de operación, estuvieron funcionando dos sistemas de adquisición en paralelo. Por un lado, un osciloscopio operando en modo tasa, cuenta los pulsos que exceden un umbral de pico. El umbral fue elegido de forma tal de incluir la detección de partículas secundarias con energía depositada asociada a la componente electromagnética. Estos datos los vamos a presentar en la siguiente sección.

Por otro lado, una placa Red Pitaya STEMlab***, operando en modo osciloscopio, registra la traza de tres pulsos por segundo seleccionados al azar, limitado por la velocidad de adquisición de la Red Pitaya y la comunicación con la computadora que registra los datos. El área bajo la curva de voltaje $V(t)$ de cada pulso (o carga), representa la energía depositada por cada partícula en el detector.

En la Fig. 1 presentamos el histograma de carga para los pulsos registrados durante los primeros 10 meses de operación del detector, entre el 25 de marzo del 2019 y el 11 de enero del 2020. Para generarlo consideramos 300 intervalos de carga y los 73 218 009 pulsos registrados. El máximo en bajos valores de carga está relacionado con el nivel de disparo y está generado principalmente

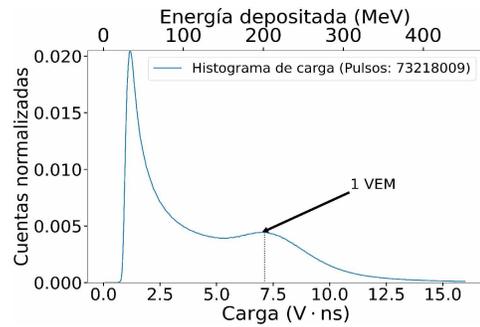


Figura 1: Histograma de carga calibrado de Neurus. Datos adquiridos desde 25/03/19 hasta el 11/01/20.

por la componente electromagnética de las lluvias extendidas. Valores altos de carga corresponden a la entrada simultánea de múltiples partículas. Valores intermedios están asociados a muones. En particular el segundo máximo, conocido como joroba del muón, corresponde a la energía depositada por muones que ingresan verticales al detector. Teniendo en cuenta esto, el histograma de carga puede ser re-interpretado en función de la energía depositada por muones verticales. Asumiendo que un muón deposita 2 MeV s^{-1} en agua (p.ej. Asorey, 2011) y sabiendo que el nivel de altura de agua en el tanque es de 100 cm, el valor de un VEM (*Vertical Equivalent Muon*) es equivalente a $(200 \pm 10) \text{ MeV}$. Esta calibración permite estudiar la evolución temporal de los eventos transitorios heliosféricos para diferentes bandas de energía depositada.

3. Correcciones de la tasa de conteo de partículas secundarias

En modo tasa, el sistema registra el número total de partículas por segundo que ingresan al tanque. La contribución más importante a este conteo está dado por partículas secundarias de bajas energías. El promedio temporal de la tasa es de 160 partículas por segundo. En este trabajo construimos el promedio horario de la tasa de conteo (S) y de las variables atmosféricas para el período estudiado.

Para observar el comportamiento del flujo de rayos cósmicos primarios, debemos eliminar efectos atmosféricos presentes en el flujo de secundarios. Uno de los efectos más importantes está vinculado con la variación de la presión atmosférica (P). Llamamos S_0 y P_0 a la media del conteo y la presión, respectivamente, durante el período de estudio. Luego, definimos los valores relativos $\Delta S = S - S_0$ y $\Delta P = P - P_0$ y el coeficiente barométrico β . Realizamos una corrección de la tasa de conteo basada en la siguiente relación entre S y las mediciones de presión atmosférica (P) en la ubicación del laboratorio: $\Delta S/S_0 = \beta \Delta P$. La Fig. 2 muestra la anticorrelación encontrada entre la tasa de conteo relativa y la variación de la presión atmosférica. El coeficiente barométrico que obtuvimos a partir de un ajuste lineal es $\beta = -(0.17 \pm 0.02) \% \text{ hPa}^{-1}$.

Después de remover el efecto de presión, realiza-

**<http://spaceweather.at.fcen.uba.ar/2/lamp>

***<http://www.redpitaya.com/>

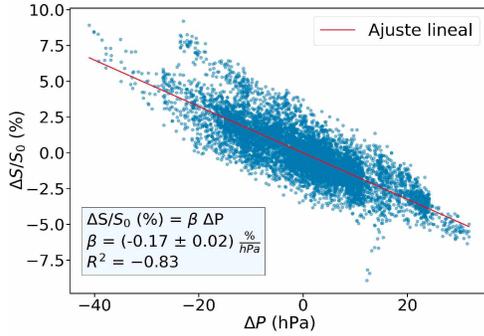


Figura 2: Anticorrelación entre la presión y la desviación relativa de la tasa de conteo durante el período considerado.

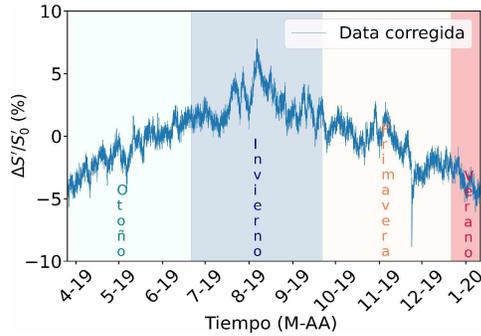


Figura 3: Serie temporal de la desviación relativa de la tasa de conteo.

mos una corrección asociada al efecto de la temperatura interna del laboratorio sobre las componentes de la electrónica. En la Fig. 3 se muestra la serie $\Delta S'/\Delta S'_0$ (desviación relativa de la tasa de conteo corregida por presión y temperatura interna). Está claro que hay una modulación estacional con un máximo en invierno y mínimo en verano. Esto es consistente con lo que se ha discutido, por ejemplo, en De Mendonça et al., 2013, y lo vamos a considerar en el futuro para evaluar una adecuada corrección de este efecto atmosférico estacional.

4. Comparación con un monitor de neutrones

Realizamos una comparación preliminar de Neurus con datos del monitor de neutrones ubicado en Oulu. La rigidez de corte magnética en Oulu es $R_c \approx 0.8$ GV, similar y ligeramente menor a la de Marambio. Para comparar la serie temporal, eliminamos el efecto estacional de Neurus. Normalizamos ambas bases de datos de forma que tengan media nula y desviación estándar igual a uno. Estas dos series de tiempo para abril de 2019 las presentamos en la Fig. 4. Podemos ver que en general ambas series temporales están en buen acuerdo. La discrepancia observada entre el 8 y 11 de abril podría estar asociada con un efecto atmosférico local, teniendo en cuenta que las partículas secundarias observadas por ambos detectores ($\mu \pm$, $e \pm$ y γ en el caso de Neurus, n en el caso de Oulu) responden distinto a las condiciones atmosféricas.

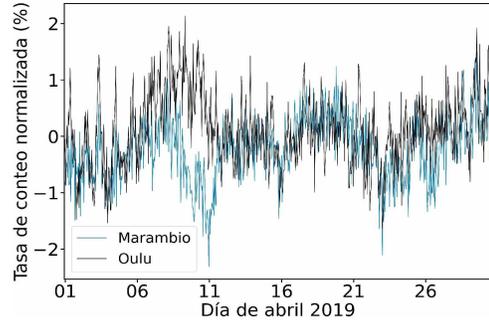


Figura 4: Comparación del conteo corregido de Neurus (detector Cherenkov) y Oulu (monitor de neutrones) durante abril de 2019.

5. Conclusiones

En este trabajo presentamos un nuevo detector de rayos cósmicos para estudios de Meteorología espacial basado en el efecto Cherenkov en agua, instalado en la Antártida en 2019, como parte de la red de detección LAGO, siendo actualmente el único nodo de la colaboración que funciona de forma operativa. Seleccionamos los primeros diez meses de funcionamiento y corregimos la tasa de conteo. Removimos el efecto de la presión atmosférica sobre la tasa de conteo a partir del coeficiente barométrico obtenido para el sitio: $\beta = -(0.17 \pm 0.02) \% \text{ hPa}^{-1}$. Presentamos la calibración del histograma de carga de Neurus y también una comparación entre Neurus y el monitor de neutrones de Oulu que resultó en buen acuerdo. A partir de las mejoras que realizamos a principios de 2020, estamos registrando la traza de todas las partículas que llegan al detector, y vamos a poder hacer un análisis más profundo de las mediciones de Neurus.

Agradecimientos: Agradecemos el soporte de los subsidios UBACYT (UBA) y PIP-11220130100439CO (CONICET). La colaboración LAGO agradece a todas las instituciones participantes y a la colaboración Pierre Auger por su apoyo continuo. Agradecemos a la base de datos NMDB, fundada bajo el programa FP7 de la Unión Europea para proporcionar datos, así como a Oulu NM (<http://cosmicrays.oulu.fi>) y el Sodankyla Geophysical Observatory.

Referencias

- Asorey H., 2011, *International Cosmic Ray Conference*, vol. 11, 467
- Asorey H., Dasso S., for the LAGO collaboration, 2016, *Proc. Sci.*, ICRC2015, 247
- Dasso S., Asorey H., for the Pierre Auger Collaboration, 2012, *Adv. Space Res.*, 49, 1563
- Dasso S., et al., 2016, *Proc. Sci.*, ICRC2015, 105
- De Mendonça R.R.S., et al., 2013, *J. Geophys. Res.*, 118, 1403
- Gulisano A.M., et al., 2021, BAAA, enviado
- Masias-Meza J. & Dasso S., 2014, *Sun geosph.*, 9, 41
- Melkumyan A.A., et al., 2021, *MNRAS*, 500, 2786
- Pierre Auger Collaboration, et al., 2011, *J. Instrum.*, 6, 1003
- Sarmiento-cano C., et al., 2019, *Proc. Sci.*, ICRC2019, 412
- Sidelnik I., 2016, *Proc. Sci.*, ICRC2015, 665