

ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE ACTIVIDAD SOLAR A LARGO PLAZO
SOBRE EL FLUJO DE RAYOS CÓSMICOS SECUNDARIOS EN EL
OBSERVATORIO PIERRE AUGER

Autora

Jennifer Grisales Casadiegos

Director

PhD. Luis A. Núñez
Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander

Codirector

PhD. Roberto Mussa
Instituto Nacional de Física Nuclear, Sección de Turin

Propuesta de trabajo de grado presentada como requisito del programa de
Maestría en Física

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ciencias
Escuela de Física - 2021

Índice general

Resumen	III
Introducción	1
1. Planteamiento del problema	2
1.1. Pregunta de investigación	3
2. Estado del arte	4
2.1. Detector de Fluorescencia FD	5
2.2. El detector de Superficie SD	5
2.3. Fondo de radiación en el Observatorio Pierre Auger	6
2.3.1. El modo Scaler	6
2.3.2. Modulación del flujo con la actividad solar	7
3. Objetivos	12
3.1. Objetivos Generales	12
3.2. Específicos	12
4. Metodología	13
4.1. Cronograma	14
4.2. Recursos humanos	14
Bibliografía	17

Resumen

En este trabajo proponemos identificar y estudiar el efecto de ~~los~~ fenómenos solares, a largo plazo, en la modulación de rayos cósmicos galácticos ~~RGC~~. Para tal fin usaremos los datos del modo de detección de baja energía de los detectores Cherenkov de agua del Observatorio Pierre Auger.

Estudios previos enfocados en los datos de baja energía han evidenciado la sensibilidad de estos a las fluctuaciones en la actividad solar ~~X~~. En ese orden de ideas, describimos la metodología del trabajo enfocada en los datos correspondientes a los años 2005 a 2020, con el fin de correlacionar el flujo medido con las temporadas de mayor y menor número de manchas solares.

Adicionalmente realizaremos una exploración estadística para identificar posibles correlaciones entre el ciclo solar y la frecuencia de decrecimientos Forbush. Finalmente parte de los datos procesados para este trabajo serán liberados al público. Y junto a los datos, se crearán y habilitarán herramientas computacionales para la identificación de fenómenos solares.

que permitan la difusión de la Física de RAYOS cósmicos en alumnos y docentes de educación secundaria

Esta tesis se realiza en el marco de la participación de la UIS en el observatorio Pierre Auger

Introducción

El conocimiento del Sol, en especial de la heliósfera y su interacción con el campo geomagnético es un tema que en las últimas décadas ha cobrado cada vez más interés. Esto se debe a la fuerte sensibilidad de nuestra tecnología a las variaciones en el viento solar, dando origen a un área completa de estudio llamada Clima Espacial.

El Observatorio Pierre Auger, creado inicialmente para el estudio de rayos cósmicos de ultra alta energía (UHECR), ha implementado desde el 2005 dos modos de detección en un rango de baja energía. El principal objetivo de estos modos es la búsqueda de huellas de destellos de rayos gamma GRBs. Posteriormente, se comenzó a aprovechar para el monitoreo del flujo de rayos cósmicos galácticos, RCG [1]. Estos modos de detección extienden las capacidades del Observatorio incorporándolo a la red global de detectores dedicados al estudio del clima espacial.

Se ha encontrado en estudios anteriores que los modos de detección de baja energía son muy sensibles a las condiciones del medio interplanetario determinadas por la actividad solar [2]. Además, se ha desarrollado una metodología para el tratamiento de datos que permite el análisis de fenómenos a largo plazo, como los ciclos solares [3].

En el presente documento, se propone el estudio de los datos de baja energía en el modo scalar para identificar la modulación de estos ciclos en el flujo de RCG. El estudio se centrará en datos correspondiente al intervalo de años entre 2005 a 2020, disponibles en el modo de baja energía en el Observatorio.

En la sección 1 se define, describe y delimita el problema, en la sección 2 se presenta un estado del arte sobre el observatorio y el estudio de la modulación del flujo de RCG. Finalmente la sección 3 y 4 describen los objetivos del trabajo y la metodología establecida que permite el desarrollo de los objetivos y la respuesta de la pregunta de investigación.

¹El modo scalar corresponde al registro de la tasa de conteo de pulsos individuales de cada detector en un segundo. (Ver sección 2.3.1)

1 — Planteamiento del problema

La ciencia del Clima Espacial se ocupa de las fluctuaciones en el tiempo de los fenómenos físicos que ocurren en la vecindad del Sistema Solar, entre ^{estos} se encuentran el viento solar, interacciones de éste con la magnetósfera, la ionósfera o la termósfera, eyecciones de masa coronal, manchas solares, estudio de los periodos de rotación del Sol, de los ciclos solares, y la interacción de la heliósfera con los rayos cósmicos galácticos RCG.

El monitoreo del viento solar a partir de rayos cósmicos se viene realizando mediante instrumentos espaciales y terrestres. Estos últimos predominantemente monitores de neutrones desarrollados desde principios de la década de 1950 para tal fin [1]. Este registro sistemático y casi ininterrumpido por décadas ha permitido identificar la correlación entre fenómenos solares de larga y corta duración con el flujo de RCG [4] [5] [6].

Trabajos recientes han presentado fuertes evidencias de la influencia de la actividad solar de larga duración, como los ciclos solares en la modulación de RCG [7]. Por otro lado, estudio de los datos en el modo de baja energía del Observatorio Pierre Auger, han comprobado la sensibilidad de estos datos a las fluctuaciones en la actividad solar, especialmente para fenómenos transitorios [2]. Además, se ha desarrollado una metodología para el mejoramiento de los datos que permiten el análisis de fenómenos a largo plazo, como los ciclos solares [3].

Las tasas de conteos del Observatorio corresponden a energías más altas que en los monitores de neutrones, de tal forma que las observaciones realizadas pueden ayudar a entender procesos fundamentales que afectan el transporte de RCG en la heliósfera [2]. Adicionalmente, tienen datos suficientes para estudiar más de un ciclo solar, lo que permite verificar correlaciones reportadas en la literatura. Por ejemplo, ~~identificando~~ la influencia de las manchas solares en el flujo de fondo de secundarios en la superficie de la Tierra. Por ello se plantea la siguiente pregunta de investigación:

1.1. Pregunta de investigación

¿Es posible observar efectos solares de largo plazo en los datos de baja energía del Observatorio Pierre Auger?

¿blanco
😊

2 — Estado del arte

El Observatorio Pierre Auger (figura 2.1) es uno de los observatorios más grandes jamás construidos. Con un área de detección de alrededor de 3000 km^2 enfocado en la detección de rayos cósmicos de ultra alta energía ($E > 10^{18} \text{ eV}$), cuya tasa de arribo a la tierra está entre 1 partícula $\cdot \text{km}^2 \cdot \text{year}$ a 1 partícula $\cdot \text{km}^2 / \text{century}$. El observatorio es un arreglo híbrido, que está constituido principalmente por dos tipos fundamentales de detectores: los telescopios de fluorescencia atmosférica FD y los detectores de superficie SD.

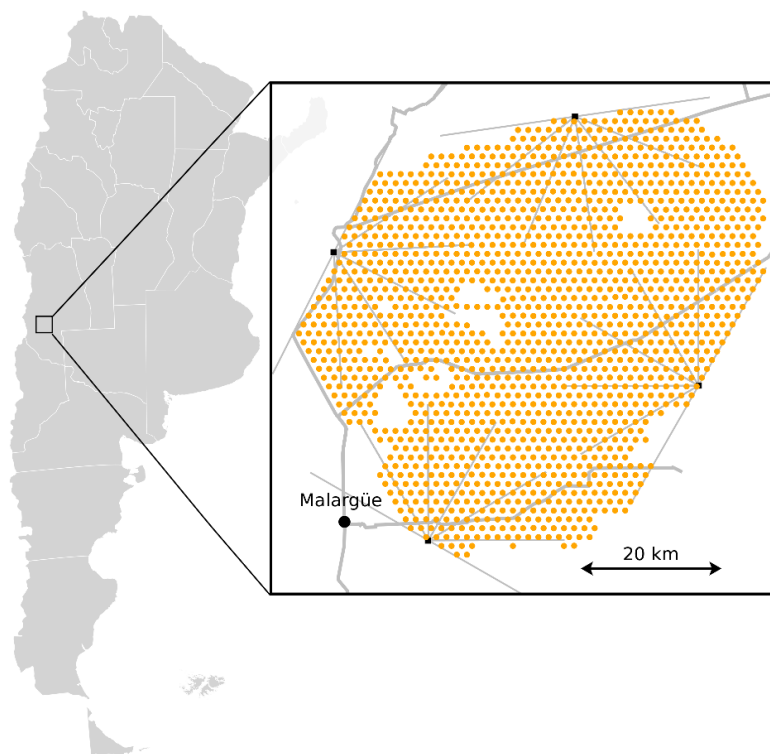


Figura 2.1: Esquema básico de la ubicación y la distribución del Observatorio Pierre Auger en Malargüe, Argentina. Los puntos amarillos corresponden a los detectores de superficie SD, y los 4 puntos negros en las fronteras, corresponden a la ubicación de los detectores de fluorescencia FD. [1]

2.1. Detector de Fluorescencia FD

El detector de fluorescencia consta de 24 telescopios independientes distribuidos en 4 sitios, cada uno con un campo de visión de $30^\circ \times 30^\circ$ [1]. Su función es detectar el desarrollo longitudinal de las lluvias de partículas secundarias generadas por rayos cósmicos de muy alta energía. Esto es posible gracias a que al propagarse por la atmósfera excitan el nitrógeno y éste a su vez libera luz fluorescente en el rango de 300nm a 430nm. En este fenómeno, el número de fotones producidos es proporcional a la energía de la componente electromagnética de la lluvia y al número total de partículas generadas a cierta profundidad atmosférica ¹ [8].

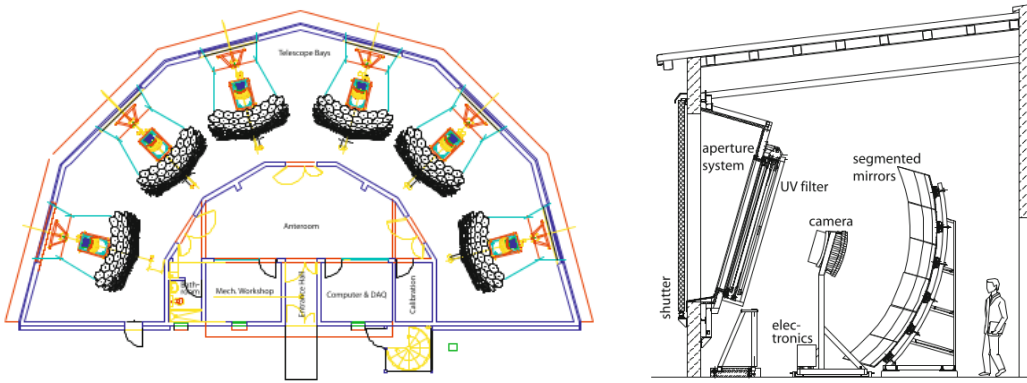


Figura 2.2: Estructura y distribución de los telescopios de fluorescencia FD: A la izquierda se observa la vista superior de uno de los 4 FD, se aprecian los 6 telescopios individuales que lo componen, logrando un campo de visión de 180° . A la derecha tenemos una visión lateral de uno de los telescopios, en donde se aprecian sus principales componentes (espejo principal, cámara con fotomultipladores, el filtro UV, y las compuertas.) tomado de [8]

2.2. El detector de Superficie SD

El detector de superficie del Observatorio Pierre Auger es un arreglo de 1660 detectores Cherenkov de agua WCD, cubriendo un área total de 3000 km^2 , tiene como finalidad estudiar el desarrollo transversal de las lluvias generadas por rayos cósmicos, a nivel del suelo. Estos detectores están conectados a través de una red inalámbrica de área local WLAN cuyo receptor principal es el FD más cercano que se encarga de transmitir los datos a la central de recopilación principal.

¹La profundidad atmosférica X , es un parámetro que permite estimar la cantidad de materia con la que ha interactuado el primario al penetrar en la atmósfera. La expresión:

$$X_v = \int_h^\infty \rho(h') dh', \quad (2.1)$$

Cada SD consta de un tanque cilíndrico de $10m^2$ ^{de base} con $12 m^3$ de agua ultra pura que permita una baja absorción del ultravioleta cercano, dentro de una bolsa con un material reflectante realizada en Tyvek de muy baja absorción. La radiación Cherenkov producida por el paso de partículas relativistas a través del volumen de agua, es reflejada y difundida por el Tyvek en el interior, maximizando la probabilidad de detección [1].

Además, para la recolección de los fotones Cherenkov, el SD cuenta con 3 tubos fotomultiplicadores (en adelante PMT por sus siglas en inglés), de 9 pulgadas de diámetro, ubicados de forma simétrica en la parte superior del tanque. Cada PMT registra el pulso que genera la detección de fotoelectrones este pulso se caracteriza por tener un crecimiento rápido y un posterior decaimiento exponencial.

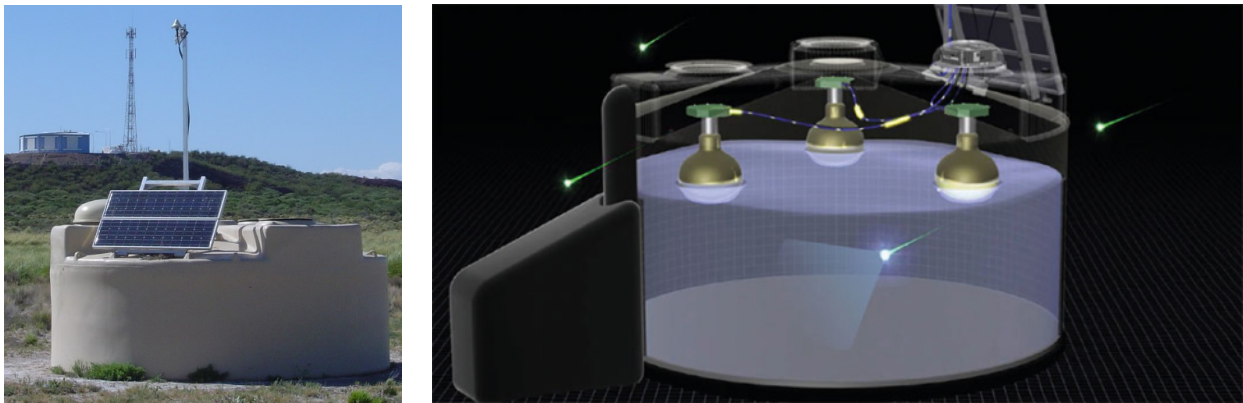


Figura 2.3: Estructura de un detector de superficie SD. A la izquierda se observa el exterior de un detector WCD del Observatorio ubicado en la Pampa Amarilla. A la derecha vemos una representación de su interior: Al entrar la partícula cargada al agua se produce un cono de luz Cherenkov, estos fotones son reflejados por las paredes del detector y recogidos por los PMT ubicados simétricamente en la superficie superior. [9]

2.3. Fondo de radiación en el Observatorio Pierre Auger

A pesar que el Observatorio Pierre Auger está optimizado para la identificación de partículas de ultra alta energía, este tiene dos modos de detección alternativos de baja energía que registran el flujo de secundarios al nivel de los SD: El modo Scaler y el modo Histograma. Para el caso de esta propuesta de investigación, nos enfocaremos únicamente en el modo scaler.

2.3.1. El modo Scaler

En 1997, se propuso la implementación en el observatorio de un modo de detección que estuviera destinado a la búsqueda de lluvias atmosféricas extendidas

originadas por los fotones provenientes de GRBs (destellos de rayos gamma) [1]. Los GRB consisten en una emisión súbita de rayos gamma en periodos cortos de tiempo ($\cdot 10^{-3}s - \cdot 10^2s$) que continúa en la emisión de fotones cada vez menos energéticos (rayos X hasta radio).

El modo scalar consiste en determinar las tasas de conteo de pulsos individuales de cada SD en escalas de tiempo de un segundo [1]. Con este método, se puede determinar el flujo de fondo sobre el arreglo y a partir de éste, identificar excesos generados por fenómenos transitorios como por ejemplo un GRB o un decrecimiento Forbush.

ojo que tienen escalas de tiempos muy distintas

Como es de esperarse, no todas las señales registradas con el SD corresponden a datos válidos para la determinación de este flujo. En primer lugar, la diferencia entre la línea base y el voltaje del pico del pulso debe cumplir las siguientes condiciones:

- Del 20 de Marzo hasta el 20 de Septiembre de 2005, este voltaje debe ser mayor a 3ADC
- Desde el 21 de Septiembre del 2005, la diferencia de voltajes debe comprender entre: $3ADC < (V_p - V_b) \leq 20ADC$

explicar por qué

Los pulsos recopilados son guardados enviados una vez por segundo para su almacenamiento. Cada segundo de datos contiene: el tiempo en que se realizó el registro, número de estaciones activas, el número total de pulsos contados en todo el arreglo, y los conteos de pulsos para cada SD. Finalmente se obtiene un archivo de datos por día. Luego de esto, se deben eliminar los detectores que muestren inestabilidades respecto a la media, ruido producido por rayos, inestabilidades térmicas y relámpagos originados en tormentas eléctricas.

2.3.2. ~~Modulación del flujo con la actividad solar~~

muy interesante

La sensibilidad de los modos de baja energía del Observatorio está entre los GeV a los TeV que corresponden con los RCG [1]. El transporte es modulado por diversos mecanismos físicos como la interacción de éstos con la heliósfera y el campo magnético, o eyecciones de masa coronal. La duración puede estar entre varios ciclos solares (largo plazo), hasta horas (transitorios) [10].

muy confuso

El estudio de la modulación en el flujo de RCG provee información sobre dicho transporte en la heliósfera y de las partículas que ingresan al sistema solar provenientes del medio interestelar [10]. Estos estudios se han realizado principalmente a través de monitores de neutrones enfocados en medir estos flujos para energías de primarios mayores a 1GeV, detectando neutrones secundarios con energías mayores a 10 MeV [1].

Decrecimientos Forbush

La variabilidad temporal del flujo ha permitido identificar y estudiar la anticorrelación entre el flujo de RCG y el número de manchas solares [4], la modulación con período de rotación del Sol y modulaciones en períodos más cortos de tiempo (transitorios) [6], comprendiendo desde algunas horas hasta varios días [7].

Los eventos transitorios son llamados decrecimientos Forbush. Este fenómeno comienza por una disminución rápida y pronunciada en el flujo de RCG en períodos de algunas horas, seguidas por una recuperación exponencial del mismo en períodos de una o dos semanas como se observa en la figura 2.4 [6]. Generalmente se observan en correlación con el arribo de Eyecciones de Masa Coronal Interplanetarias (ICMEs, por sus siglas en inglés).

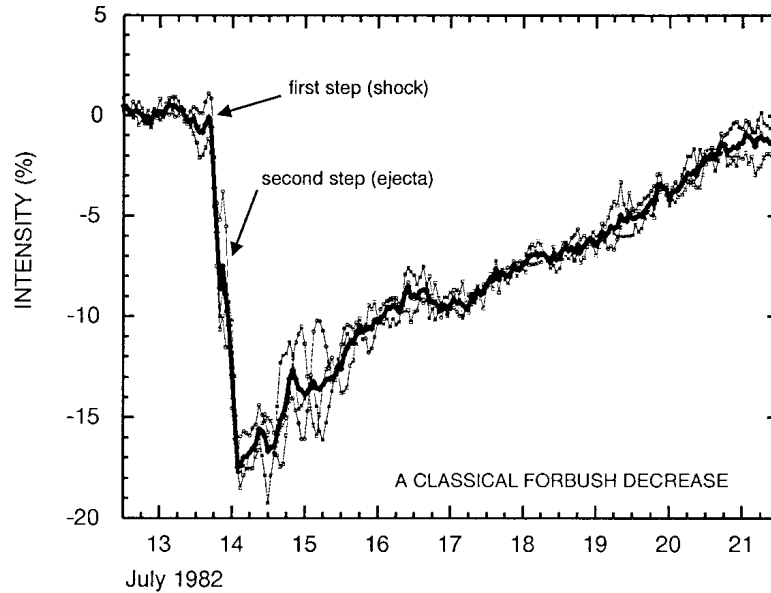
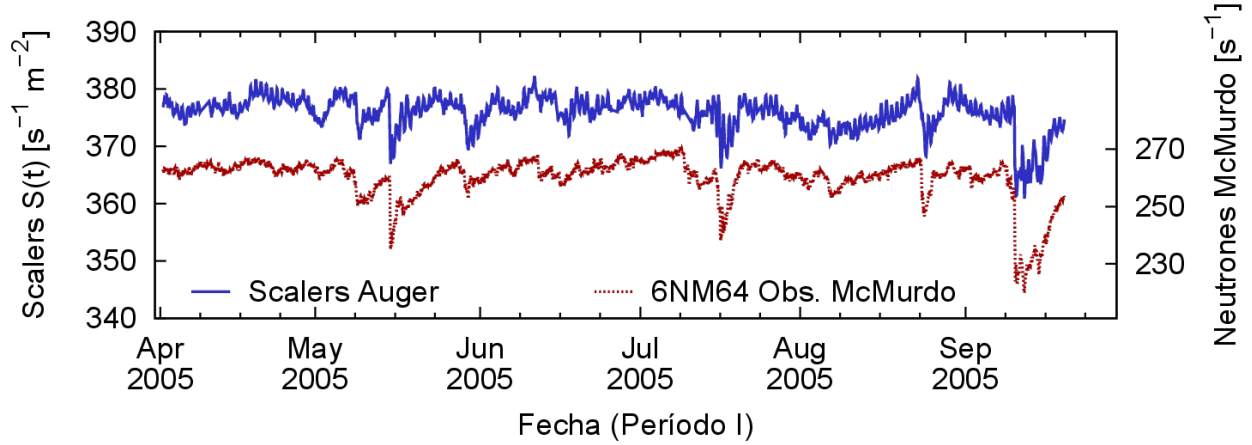


Figura 2.4: Decrecimiento Forbush en el conteo de neutrones observado en tres monitores de neutrones. La línea gruesa indica la media de las tasas de recuento que es una medida aproximada de la intensidad isotrópica. [6]

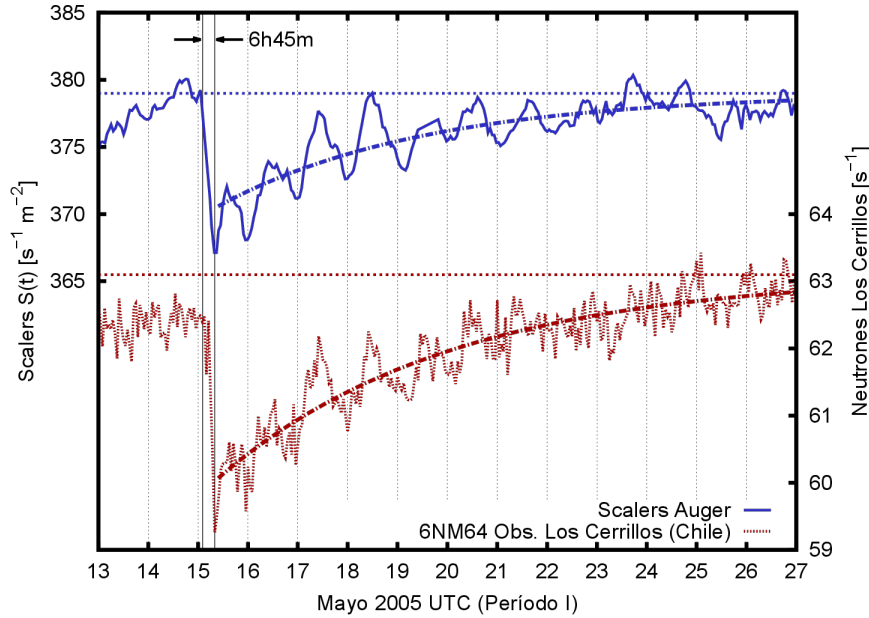
Los criterios de detección descritos anteriormente para el modo de baja energía disponible en el Observatorio Pierre Auger tienen la sensibilidad suficiente para la observación de fenómenos de modulación solar de los RCG. La figura 2.5 muestra una clara correlación entre las detecciones de eventos Forbush entre el Observatorio y el monitor de neutrones de McMurdo en Estados Unidos para la misma serie temporal. Estas comparaciones deben ser realizadas con precaución pues el flujo de secundarios depende de la rigidez de corte ² en

²La rigidez de corte magnético (R_m) es un parámetro que determina si una partícula cargada, que se propaga a través de un campo magnético, llega o no a cierta posición dentro de dicho campo. [10]

la ubicación del detector y puede generar discrepancias intrínsecas hasta del 100 %.



(a) Comparación de la evolución temporal de los datos de baja energía en modo scaler $S(t)$ con los conteos del monitor de neutrones McMurdo para el margen temporal correspondiente al periodo I del Observatorio Pierre Auger.



(b) Comparación de un decrecimiento Forbush detectado en mayo del 2005 en los datos de scaler de Pierre Auger en contraste con el mismo Forbush detectado por el monitor de neutrones de Los Cerrillos en Chile. Las localizaciones tiene una rigidez de corte similar.

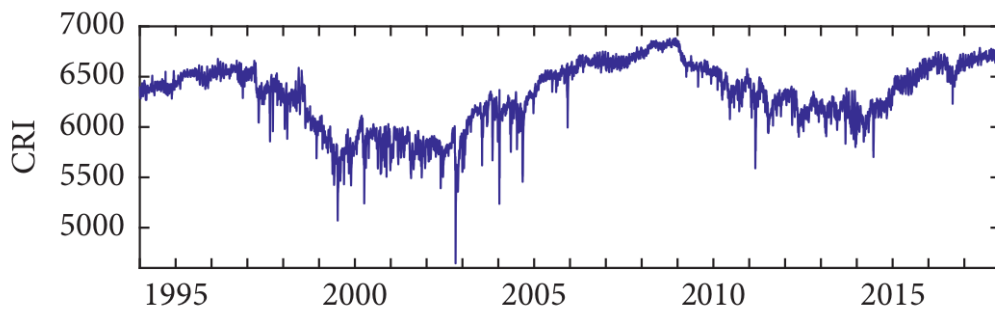
Figura 2.5: Comparación de los flujos obtenidos a partir de los datos modo scaler del Observatorio Pierre Auger en contraste con el monitor de neutrones McMurdo y Los Cerrillos. Tomado de [1]

Efectos a largo plazo

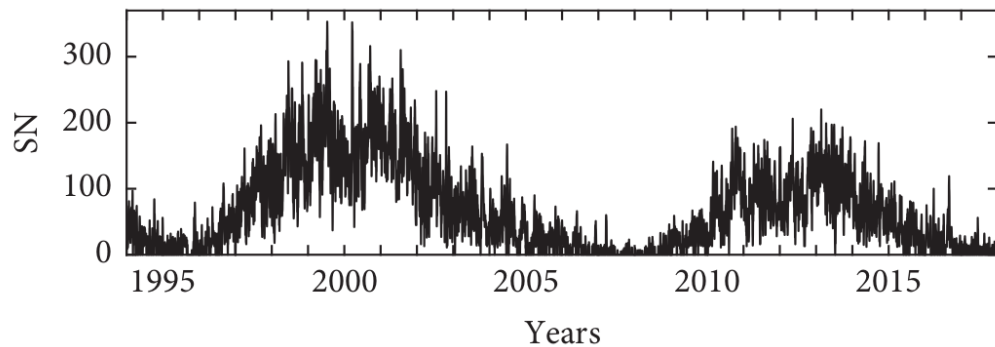
Estudios previos han reportado evidencia que la velocidad del viento solar tiene una correlación positiva con la intensidad de RCG para el ciclo solar

21 [4]. También se piensa que la variación del parámetro angular observacional del ecuador heliográfico puede cambiar la intensidad de los RCG [11]. En general se puede decir que la evolución de los rayos cósmicos a largo plazo puede indicar el efecto del ciclo solar. En este sentido se ha observado una disminución del flujo de GCR relacionado a un aumento de la intensidad del campo magnético interplanetario [5].

Análisis realizados a partir de datos diarios ³ entre dos ciclos solares completos (enero de 1995 hasta diciembre de 2018), confirmaron que la intensidad de los rayos cósmicos se correlaciona ~~negativamente~~ ^{inversamente} con el número de manchas solares (ver figura 2.6). Esta tendencia sugiere una modulación de 11 años que depende principalmente de la actividad solar en la heliosfera [7].



(a) Conteo de rayos cósmicos obtenido con el monitor de neutrones de la Universidad de Oulu entre los años 1995 a 2016



(b) Conteo de manchas solares entre los años 1996 a 2016

Figura 2.6: Comparación entre el flujo de rayos cósmicos medido mediante el detector de neutrones de Oulu con el número de manchas solares para el mismo intervalo de tiempo. Se observa una anti-correlación. Tomado de [7].

Hasta ahora, los principales observatorios dedicados al estudio de la actividad solar están formados por arreglos de detectores de neutrones o detectores de muones, que pueden ser complementados por los datos de los modos de baja energía del Observatorio Auger, con el fin de aumentar la comprensión actual

³Los datos utilizados en este trabajo son tomados a partir del detector de neutrones de la Universidad de Oulu en Finlandia. [7]

de la variedad de estructuras dinámicas que presenta la heliósfera y el entorno espacial cercano a la Tierra [2].

Para tal fin utilizaremos las series temporales registradas en los modos de baja energía del Observatorio previamente corregidos por presión, y se compararán los mismos con los datos registrados en los monitores de neutrones.

3 — Objetivos

3.1. Objetivos Generales

Identificar los efectos a largo plazo de la actividad solar en el flujo de fondo de rayos cósmicos de baja energía del Observatorio Pierre Auger.

3.2. Específicos

1. Identificar los efectos de la modulación del ciclo solar sobre la radiación de fondo de rayos cósmicos.
2. Evaluar una posible correlación entre períodos de intensa actividad solar con un mayor número de decrecimientos Forbush.
3. Generar dataset depurados de los datos provenientes de los scalers del observatorio Pierre Auger entre los años 2005 y 2020 para liberarlos al público.
4. Generar una conjunto de herramientas computacionales y de visualización que puedan ser utilizados por el público para realizar investigación sobre los set de datos seleccionados.

4 — Metodología

Identificar los efectos de la modulación del ciclo solar sobre la radiación de fondo de rayos cósmicos

1. Selección y depuración estadística de los datos.
2. Corregirlos por presión y temperatura.
3. Realizar las correcciones para el análisis de largo plazo [2].
4. Comparar los años y asociarlos con la actividad solar, específicamente con el rate de manchas solares en el mismo intervalo de años del estudio.

Evaluar una posible correlación entre períodos de intensa actividad solar con un mayor número de decrecimientos Forbush .

1. Aislar los períodos de decrecimiento Forbush.
2. Determinar una metodología estadística para identificar correlación entre los periodos de decrecimiento Forbush y abundancia de manchas solares en los periodos de baja y alta actividad solar.

Generar dataset depurados de los datos provenientes de los scalers del observatorio Pierre Auger entre los años 2005 y 2020 para liberarlos al público.

1. Realizar el pre-procesado de los datos.
2. Definir el método para la selección de la fracción a datos a liberar.
3. Crear los dataset con la documentación auxiliar.

Generar una conjunto de herramientas computacionales y de visualización que puedan ser utilizados por el público para realizar investigación sobre los set de datos seleccionados.

1. Crear una notebook en python que permita usar los datos en el modo scaler para identificar decrecimientos Forbush

2. Crear una notebook que permita usar los datos en modo scaler para el uso de métodos estadísticos.
3. Crear una notebook que permita correlacionar los datos en modo scaler con el ciclo solar.

4.1. Cronograma

Actividad	Tiempo [meses]											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. Revisión bibliográfica												
2. Identificar los efectos de la modulación del ciclo solar sobre la radiación de fondo de rayos cósmicos.												
3. Evaluar una posible correlación entre periodos de intensa actividad solar con un mayor número de decrecimientos Forbush.												
4. Generar dataset depurados de los datos provenientes de los scalers del Observatorio Pierre Auger entre los años 2005 y 2020 para liberarlos al público.												
5. Generar una conjunto de herramientas computacionales y de visualización que puedan ser utilizados por el público para realizar investigación sobre los set de datos seleccionados.												
6. Escritura y sustentación del reporte final.												

4.2. Recursos humanos

Persona 1	
Institución	Universidad Industrial de Santander
Grupo de Investigación	Grupo de Investigación en Relatividad y Gravitación GIRG
Rol en el proyecto	Investigadora principal
Primer apellido	Grisales
Segundo apellido	Casadiegos
Nombre	Jennifer
Sexo	Femenino
Ciudad	Bucaramanga/Colombia
Correo electrónico	jennifer.grisales@saber.uis.edu.co
Responsabilidades	Ejecución del proyecto
Dedicación [horas/semana]	24
Meses de trabajo	12

Persona 2	
Institución	Universidad Industrial de Santander
Grupo de Investigación	Grupo de Investigación en Relatividad y Gravitación GIRG
Rol en el proyecto	Director del proyecto
Primer apellido	Núñez de Villavicencio
Segundo apellido	Martinez
Nombre	Luis Alberto
Sexo	Masculino
Ciudad	Bucaramanga/Colombia
Correo electrónico	lnunez@uis.edu.co
Responsabilidades	Director y orientador principal para el desarrollo del proyecto.
Dedicación [horas/semana]	4
Meses de trabajo	12

Persona 3	
Institución	Instituto Nacional de Física Nuclear - Torino
Rol en el proyecto	Codirector del proyecto
Primer apellido	Mussa
Nombre	Roberto
Sexo	Masculino
Ciudad	Torino, Italia
Correo electrónico	mussa@to.infn.it
Responsabilidades	Co-director y orientador principal para el desarrollo del proyecto.
Dedicación [horas/semana]	4
Meses de trabajo	12

Bibliografía

- [1] H. Asorey. *Los Detectores Cherenkov del Observatorio Pierre Auger y su Aplicación al Estudio de Fondos de Radiación*. PhD thesis, Instituto Balseiro, Universidad Nacional de Cuyo, Comisión Nacional de Energía Atómica, 2012.
- [2] J. Macías-Mesa. Transporte de rayos cósmicos en la heliosfera y en el entorno terrestre, 2017. Tesis de Doctorado, Universidad de Buenos Aires.
- [3] Jimmy Masías-Meza, Andrej Filipčič, Gašper Kukec Mezek, Ahmed Saleh, Samo Stanič, Marta Trini, Darko Veberič, Serguei Vorobiov, Lili Yang, Danilo Zavrtanik, and et al. *Solar Cycle Modulation of Cosmic Rays Observed with the Low Energy Modes of the Pierre Auger Observatory*. 2015.
- [4] Rajesh Mishra, Rekha Agarwal, Ivan Samson, and Shreyash Tiwari. Solar cycle variation of cosmic ray intensity along with interplanetary and solar wind plasma parameters. 01 2007.
- [5] H. V. Cane, G. Wibberenz, I. G. Richardson, and T. T. von Rosenvinge. Cosmic ray modulation and the solar magnetic field. , 26(5):565–568, January 1999.
- [6] Hilary V. Cane. Coronal Mass Ejections and Forbush Decreases. , 93:55–77, July 2000.
- [7] Jacob Oloketuyi, Yu Liu, Amobichukwu Amanambu, and Zhao Mingyu. Responses and periodic variations of cosmic ray intensity and solar wind speed to sunspot numbers. *Advances in Astronomy*, 2020:1–10, 02 2020.
- [8] J. Abraham, P. Abreu, and M. Aglietta for the Pierre Auger Collaboration. 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):227–251, 2010.
- [9] L’osservatorio pierre auger. <https://web.infn.it/OCRA/losservatorio-pierre-auger/>. Accedido: 2021-05-15.

- [10] M. Suarez-Duran. Modulación de rayos cósmicos secundarios a nivel del suelo por cambios en el campo geomagnético., 2015. Tesis de Maestría, Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- [11] J. R. Jokipii and B. Thomas. Effects of drift on the transport of cosmic rays. IV - Modulation by a wavy interplanetary current sheet. , 243:1115–1122, February 1981.