



Modulación interplanetaria del flujo de rayos cósmicos galácticos

C. Gutierrez¹ & S. Dasso^{1,2,3}

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

² Grupo LAMP, Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA, Argentina

³ Grupo LAMP, Instituto de Astronomía y Física del Espacio, CONICET-UBA, Argentina

Contacto / cgutierrez@iafe.uba.ar

Resumen / La manifestación interplanetaria de eyecciones coronales de masa solar (en inglés *Interplanetary Coronal Mass Ejections*, ICMEs) son consecuencias de inestabilidades de estructuras en la corona del Sol. Las regiones de interacción de corrientes de flujo (en inglés *Stream Interaction Regions*, SIRs) constan de plasma interplanetario que surge de la consecuente interacción entre viento solar rápido y lento. Es bien sabido que tanto las ICMEs como los SIRs son potenciales causas de decrecimientos Forbush (en inglés, *Forbush Decreases*, FDs), los cuales consisten en un decrecimiento repentino en el flujo de rayos cósmicos galácticos (en inglés *Galactic Cosmic Rays*, GCRs) observados en superficie, por ejemplo por monitores de neutrones. En este trabajo se estudiaron un gran número de eventos ICMEs y SIRs de distintos catálogos, analizando las propiedades del viento solar de los instrumentos MAG y SWEPAM a bordo de la nave espacial ACE con una resolución temporal de 16 y 64 segundos respectivamente. Los datos correspondientes a los GCRs se obtuvieron de los monitores de neutrones de la base antártica MacMurdo, con una resolución temporal de 1 hora. El objetivo de este trabajo es encontrar las diferencias en los FDs que resultan de distintos eventos ICMEs y SIRs. Los resultados presentados ayudarán a entender mejor los mecanismos físicos involucrados en la modulación de rayos cósmicos debido a estructuras transitorias del viento solar.

Abstract / Interplanetary coronal mass ejections (ICMEs) are the manifestations of instabilities in the solar corona. Stream Interaction Regions (SIRs) are interplanetary plasma that arise from the interaction between a fast solar wind stream and slow solar wind stream. It is well known that both ICMEs and SIRs are potential drivers of Forbush Decreases (FDs), which consist in an abrupt decrease in the galactic cosmic rays (GCRs) flux observed on the Earth's surface, for example using Neutron Monitors (NMs). In this work we study a large number of ICMEs and SIRs events from different catalogues, analyzing the solar wind properties with data from MAG and SWEPAM instruments aboard the ACE spacecraft with a time resolution of 16 and 64 seconds, respectively. GCRs data were obtained from the Mc Murdo NM, with a time cadence of 1 hour. The main aim of this work is to find the difference between the FDs resulting from different ICMEs and SIRs events. The results presented here will help to better understand the physical mechanisms involved in the GCRs modulation due to solar wind transient structures.

Keywords / Sun: heliosphere — Sun: solar wind — ISM: cosmic rays

1. Introducción

Las eyecciones de masa coronal (en inglés *Coronal Mass Ejections*, CMEs) están asociadas a inestabilidades magnéticas que ocurren en la corona solar y en ciertas ocasiones están asociados a fulguraciones solares. Cuando sus manifestaciones interplanetarias (ICMEs) llegan al entorno espacial de la tierra, se observa un decrecimiento en el flujo de los rayos cósmicos galácticos (GCRs). Este decrecimiento abrupto en el flujo de GCRs se conoce como decrecimiento Forbush (FD) y tiene una duración que va desde unas pocas horas a varios días.

Las mediciones simultáneas a través de varios monitores de neutrones (NMs), así como también las mediciones in situ del campo magnético interplanetario (IMF) y de las propiedades del viento solar fueron fundamentales para entender los fenómenos físicos asociados a los FDs (Cane, 2000). Los FDs se producen principalmen-

te por (1) las distintas subestructuras de las ICMEs, y (2) las Regiones de Interacción de Flujo (SIRs). Las SIRs se forman cuando un flujo de viento solar rápido alcanza un flujo de viento solar lento, formando una estructura en compresión que se traslada radialmente desde el sol. El origen de las SIRs radica en regiones solares de viento solar rápido, las cuales co-rotan con el Sol. Así, si la región fuente sobrevive a una rotación solar completa, la estructura SIR resulta ser recurrente y vuelve a observarse en el entorno terrestre luego de ~ 27 días. Al subconjunto de SIRs recurrentes se las denomina CIRs (del inglés *Co-rotating Interacting Regions*). Así, los FDs pueden dividirse en dos categorías: los FDs recurrentes (generadas por CIRs) y los FDs no-recurrentes (generadas tanto por ICMEs como por SIRs-no-CIRs). Una comparación entre FDs originados por ICMEs/SIRs, utilizando parámetros termodinámicos medios del medios interplanetarios fue realizada por

Melkumyan (Melkumyan et al., 2021).

2. Datos y metodología

Para estudiar las propiedades del campo magnético interplanetario se utilizaron los datos del instrumento *MAG* de la sonda espacial *ACE* con una resolución temporal de 16 segundos. Las propiedades del plasma del viento solar se estudiaron con los datos del instrumento *SWEPA*M de *ACE*, los cuales tienen una cadencia temporal de 64 segundos. Para el análisis del flujo de GCRs se utilizaron los datos del monitor de neutrones MC Murdo, los cuales presentan una resolución temporal de 1 hora. Para el análisis de las ICMEs se utilizó el catálogo de Richardson & Cane 2010* y el catálogo de Regnault et al. 2020**. Se estudiaron todas las ICMEs del período (1998-2016). Para el análisis de SIRs se utilizó la lista de Jian et al. 2006***. Se estudiaron todos los SIRs del período (1995-2009). Las ICMEs se dividieron en tres categorías mediante un criterio de velocidad media acorde con resultados de Masías-Meza (Masías-Meza et al., 2016). Las ICMEs cuya velocidad media es menor a 450 km s^{-1} se categorizaron como ICMEs lentas, las ICMEs cuya velocidad media superaba los 550 km s^{-1} se definieron como ICMEs rápidas, y las que están entre ambas se categorizaron como ICMEs intermedias.

3. Resultados y Discusión

En la Figura 1 se muestra una ICME rápida observada por *ACE* el 11 de Abril de 2011. En el primer panel se observa el campo magnético interplanetario y sus componentes en el sistema GSE, en el segundo panel la velocidad del viento solar en la dirección Sol-Tierra ($-V_x$ en GSE) y en el último panel se aprecia el flujo de GCRs. El flujo relativo de GCRs se definió como:

$$GCR[\%] = \frac{GCR(t) - \overline{GCR}}{\overline{GCR}} * 100, \quad (1)$$

donde $\overline{GCR}$ es el valor medio del flujo de GCRs anterior considerando una ventana temporal de igual tamaño que el evento ICME/SIR a la ICME o a la SIR, y $GCR(t)$ es el valor del flujo en el momento t . En la Figura 2 se observa un evento SIR. Los paneles contienen la misma información que los de la Figura 1. Vale la pena observar que el decrecimiento en el flujo de los GCRs en el caso de la ICME rápida es de $\sim 10\%$ mientras que el decrecimiento en el caso de la SIR es de apenas $\sim 2\%$. En la ICME se pueden apreciar los dos descensos en el flujo de los GCRs asociados a la llegada del choque interplanetario (primero) y a la estructura magnética que la genera (después). En el caso de la SIR se observa un decrecimiento en el flujo de GCRs más gradual.

En la Figura 3 se muestra el gráfico de dispersión entre la máxima amplitud de los FDs (A_{FD}) y el campo magnético máximo (B_{max}) de las ICMEs (rojo) y

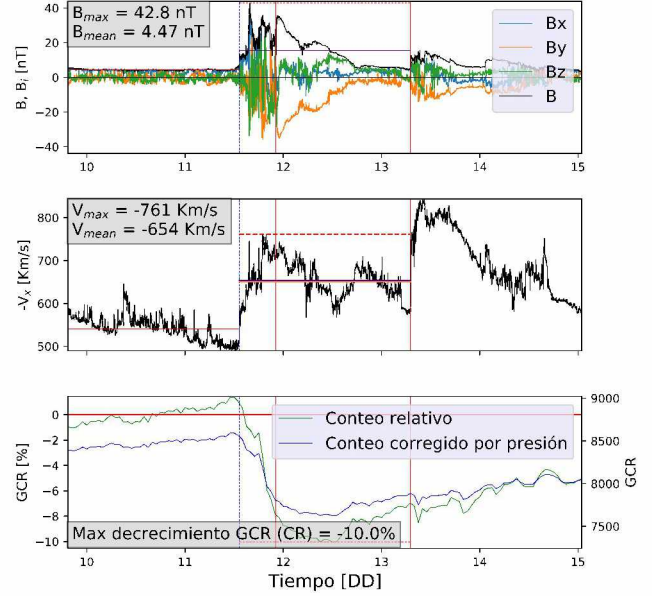


Figura 1: ICME rápida observada el 11 de Abril de 2011. *Panel superior*: Campo magnético interplanetario en módulo (negro) y sus tres componentes en GSE. *Panel medio*: Velocidad del viento solar en la dirección Sol-Tierra ($-V_x$ en GSE). *Panel inferior*: Flujo de GCRs, en azul el flujo total corregido por presión, en verde el flujo relativo. La línea punteada de color azul indica la llegada del choque interplanetario, las líneas rojas verticales indican el inicio y el final de la nube magnética que contiene la ICME respectivamente. Las líneas rojas punteadas horizontales indican el máximo valor del campo magnético interplanetario, el máximo de $-V_x$ y el mínimo flujo de GCR relativo durante la ICME respectivamente, mientras que la línea azul horizontal indica el valor medio de B y de $-V_x$ durante la ICME.

de las SIRs (azul). Uno de los resultados más evidentes es que hay una mayor correlación entre B_{max} y A_{FD} ($r = 0.68$) para ICMEs que la correlación correspondiente entre B_{max} y A_{FD} ($r = 0.32$) para SIRs. Otro resultado que se puede inferir de la Figura 3 es que la amplitud de los FDs causados por las ICMEs es mayor a la de los causados por SIRs. Un aspecto común a ambas estructuras es que a mayor B_{max} , mayor es la amplitud del FD. En la Figura 4 se muestran dos histogramas. En el primer histograma se observan las amplitudes máximas de los FDs causados por las ICMEs rápidas y las amplitudes máximas de los FDs causados por las ICMEs lentas. Se concluye que las ICMEs rápidas causan FDs más intensos que las ICMEs lentas ya que las amplitudes son mayores para las ICMEs rápidas. En el segundo histograma se tienen las amplitudes máximas de los FDs causados por todos los eventos ICMEs y todos los eventos SIRs analizados. Analizando el histograma podemos inferir que los FDs causados por los SIRs en general no superan amplitudes de 5% y suelen tener amplitudes que van de 0% a 5% , mientras que las ICMEs tienen un espectro de amplitudes mayor, pudiéndose observar FDs con amplitudes de más de 20% .

*<http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level13/icmetable2.htm>

**https://idoc.ias.u-psud.fr/sites/idoc/files/CME_catalog/html/ACE-ICMEs-list-dates-quality-nosheath-forweb.html

***<http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level13/>

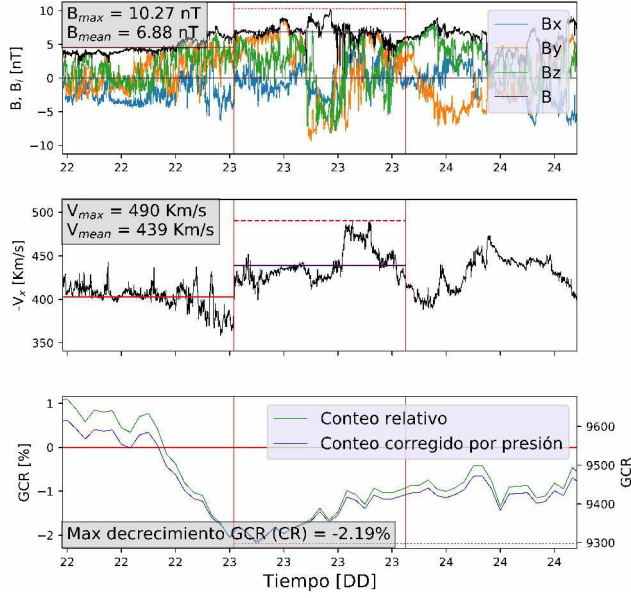


Figura 2: Región de Interacción de Flujo (SIR) ocurrida el 23 de Mayo de 1999 y sus efectos sobre el flujo de GCRs. La figura tiene la misma información y formato que la Figura 1

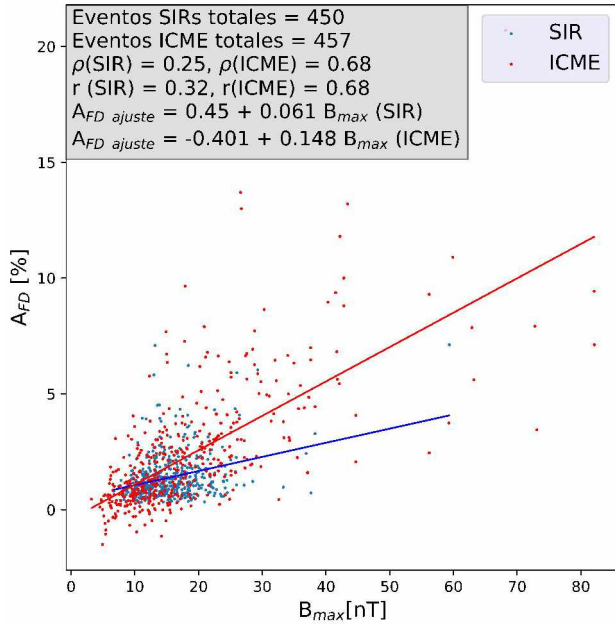


Figura 3: Diagrama de dispersión entre la amplitud máxima del FD (A_{FD}) y el campo magnético máximo (B_{max}) para las ICMEs (puntos rojos) y para las SIRs (puntos azules). Las líneas roja y azul corresponden a la recta de regresión lineal para las ICMEs y las SIRs respectivamente. ρ es el coeficiente de correlación de Spearman, r es el coeficiente de correlación de Pearson.

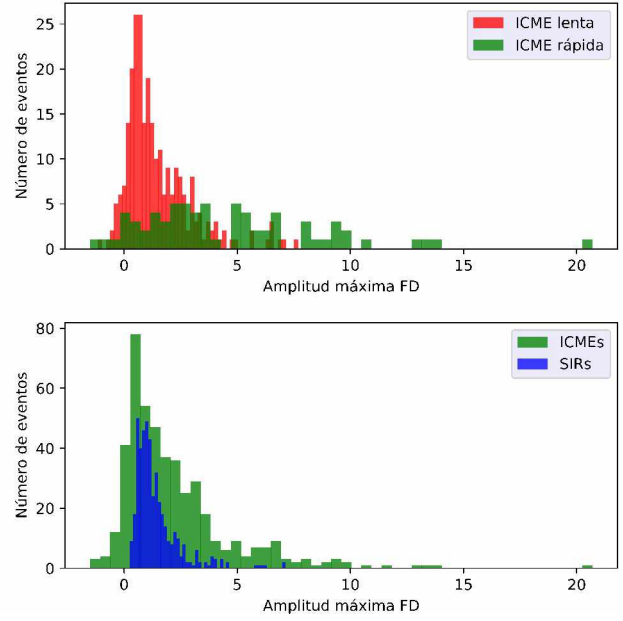


Figura 4: El primer histograma relaciona la máxima amplitud de los FDs causados por las ICMEs rápidas y las ICMEs lentas. En el eje de abscisas la amplitud máxima del FD, y en eje de ordenadas el número total de eventos. En el segundo histograma se relacionan las máximas amplitudes para los FDs causados por todos los eventos ICMEs y todos los eventos SIRs.

4. Conclusiones y trabajos futuros

Se estudiaron 457 ICMEs para un período de 20 años y 450 SIRs para un período de 15 años. Se comprobó que los FDs causados por las ICMEs poseen una mayor amplitud que los FDs causados por las SIRs. También se verificó que las ICMEs más rápidas poseen FDs más intensos respecto de los generados por ICMEs lentos, así como también que la amplitud de FDs producidos por ICMEs están mejor correlacionadas con B_{max} que los FDs producidos por SIRs. Como futuro trabajo se espera realizar un análisis de época superpuesta para encontrar patrones típicos para ambas estructuras interplanetarias, así como también modelar su perfil temporal y analizar el tiempo de recuperación de los distintos FDs.

Referencias

- Cane H.V., 2000, SSRv, 93, 55
 Jian L., et al., 2006, Solar Phys., 239, 337
 Masías-Meza J.J., et al., 2016, A&A, 592, A118
 Melkumyan A.A., et al., 2021, MNRAS, 500, 2786
 Regnault F., et al., 2020, J. Geophys. Res., in press
 Richardson I.G., Cane H.V., 2010, Solar Phys., 264, 189