

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES UNIDAD MORELIA
CIENCIAS ATMOSFÉRICAS, ESPACIALES Y PLANETARIAS

**ESTUDIO DE LA CONFIGURACIÓN MAGNÉTICA
DE ESTRUCTURAS DE GRAN ESCALA EN EL
MEDIO INTERPLANETARIO**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
Doctor en Ciencias de la Tierra

PRESENTA:
Carlos Arturo Pérez Alanis

DIRECTOR DE TESIS:
Dr. Ernesto Aguilar Rodríguez
Instituto de Geofísica Unidad Michoacán

COMITÉ TUTOR:
Dra. Teresa Nieves-Chinchilla
NASA/Goddard Space Flight Center
Dr. Julio César Mejía Ambriz
SCiESMEX, Instituto de Geofísica Unidad Michoacán

Morelia, Michoacán, 9 de junio del 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CÓDIGO DE ÉTICA

“Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a, las obras de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales”.



Carlos Arturo Pérez Alanís

A mi papá, por ser la estrella más brillante que ilumina el cielo.

Agradecimientos

- A mi tutor, el Dr. Ernesto Aguilar-Rodríguez por brindarme todo su apoyo, confianza y amistad durante mis estudios, es algo que siempre valoraré.
- A mi jurado examinador por dedicar parte de su tiempo en sus valiosos comentarios, los Dres. Mario Rodríguez, Esmeralda Romero, y en especial al Dr. Pedro Corona, por ofrecerme su apoyo y sus valiosos consejos que me brindo durante mis estudios.
- Agradezco infinitamente a la Dra. Miho Janvier y al Dr. Pascal Démoulin por brindarme su apoyo y confianza durante el proceso del artículo.
- Especialmente a la Dra. Teresa Nieves-Chinchilla, la cual le tengo un profundo agradecimiento por todo el apoyo, confianza y mucha paciencia que me brindo durante todo el doctorado. Gracias por recibirme en la NASA, apoyarme en el artículo, y por todos los consejos que me dio, sin duda fue una excelente mentora.
- A mis compañeros del IGUM por hacer más amenos mis días en el cubículo, gracias a Gris, Made y Silver por su amistad incondicional que siempre me brindaron. Así como a mis profesores y administrativos que estuvieron aquí desde el primer día que llegue al Instituto, sin duda fueron una parte importante.
- Con mucho agradecimiento al apoyo financiero otorgado por STEREO funds para realizar la visita a NASA Goddard Space Flight Center, así como también un agradecimiento especial a las misiones espaciales de WIND y STEREO-A/B, así como a NASA's Space Physics Data Facility (SPDF) por proporcionarme los datos que use para realizar este trabajo de investigación.
- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para la realización de mis estudios de doctorado.
- Al apoyo otorgado por DGAPA/PAPIIT proyecto IN103821.

- Con mucho cariño a mi familia, a mi mamá, a mi hermana y a mis perrillos Jacko y Hanna. Creo que no existen las palabras suficientes para expresarles todo mi agradecimiento y cariño que les tengo. Gracias por todo su apoyo incondicional sin importar el rumbo que he decidido tomar. Por todas las penas y alegrías que hemos compartido, sin duda a ustedes les debo todo. Han sido la mejor familia que pude pedir.
- Y en especial, a mi dos personas especiales que no alcanzaron a llegar, a mi abue, ya que gracias a ella me convertí en la persona que soy, y siempre estará conmigo. Y a mi papá, por tanto y por todo, ya que gracias a él estoy aquí, siempre te llevaré conmigo.

Resumen

El estudio de las Eyecciones de Masa Coronal (EMCs), así como los choques interplanetarios (IPs), a través de observaciones in-situ son de gran relevancia debido a que éstos son el principal vínculo entre la actividad solar y el entorno terrestre. El propósito de esta tesis es presentar un estudio estadístico de las principales propiedades de EMCs y choques IPs mediante un análisis basado en observaciones in-situ de distintas misiones espaciales situadas a diferentes distancias heliocéntricas.

En el primer análisis se emplearon observaciones de plasma y campo magnético de la misión Wind durante el periodo 2016-2021, y por la misión STEREO-A/B durante el periodo 2007-2020. Esto con la finalidad de compilar un catálogo completo de EMCs con base en sus diferentes configuraciones magnéticas. Además, utilizando la lista de EMCs de Nieves-Chinchilla et al. (2018; 2019), se analizaron diferentes parámetros físicos relacionados con la configuración magnética en la estructura interna de las EMCs para estudiar qué factores determinan que estas estructuras se distorsionen debido a la interacción con el viento solar a 1 UA. Para el segundo análisis, se emplearon distintos catálogos de choques IPs y EMCs, que existen en la literatura, de diferentes misiones espaciales en distintos periodos de tiempo: de 0.29 a 0.9 UA con Helios-1/2 (1975-1981); a 1 UA con Wind (1994-2017), STEREO-A/B (2007-2014) y ACE (1998-2013); y de 1.3 a 5.4 UA con Ulysses (1990-2009). En este análisis se estudiaron las distribuciones de las propiedades de los choques IPs y sus variaciones con la distancia heliocéntrica, además de explorar si existe alguna dirección privilegiada que obedece el choque.

Los resultados derivados de este trabajo pueden ser útiles para futuros análisis con observaciones de las nuevas misiones espaciales como la sonda espacial Parker y Solar Orbiter, así como ofrecer un mayor entendimiento sobre la evolución de los choques IPs y EMCs detectados en toda la heliosfera interna.

Abstract

The study of Coronal Mass Ejections (CMEs) and interplanetary (IP) shocks by using in-situ observations are relevant due they are the main link between solar activity and the terrestrial environment. The purpose of this thesis is to present a statistical study of the main properties of CMEs and IP shocks through an analysis based on in-situ observations using observations from several space missions located at different heliocentric distances.

In the first analysis, we used plasma and magnetic field observations from the Wind mission during 2016-2021, and by the STEREO-A/B mission during 2007-2020. In order to compile a complete catalog of EMCs (based on their different magnetic parameters) and, with the list of EMCs by Nieves-Chinchilla et al. (2018; 2019), we analyzed different physical parameters related to the magnetic configuration in the internal structure of the CMEs. In order to explore what factors determine that these structures are distorted due to the interaction with the solar wind at 1 AU. For the second analysis, we used different catalogs of IP shocks and CMEs, which exist in the literature, from several space missions in different periods of time: from 0.29 to 0.9 AU with Helios-1/2 (1975-1981); at 1 AU with Wind (1994-2017), STEREO-A/B (2007-2014), and ACE (1998-2013); and from 1.3 to 5.4 AU with Ulysses (1990-2009). In this analysis, we studied the distribution of the properties of IP shocks and their variations with heliocentric distance, in addition to exploring whether there is any privileged direction that follows the direction of the shock.

The results derived from this work may be useful for future analyzes with observations from new space missions such as the Solar Parker Probe and Solar Orbiter as well as offer a better understanding of the evolution of IP shocks and CMEs detected throughout the inner heliosphere.

Índice General

| | |
|---|-----------|
| Preámbulo | xv |
| 1 Introducción | 1 |
| 1.1 El viento solar | 1 |
| 1.2 El campo magnético interplanetario | 5 |
| 1.3 La espiral de Parker | 6 |
| 2 Estructuras de gran escala en el medio interplanetario | 9 |
| 2.1 Eyecciones de masa coronal | 9 |
| 2.2 Origen, evolución y propagación en el medio interplanetario | 10 |
| 2.3 Técnicas de observación | 12 |
| 2.4 Nubes magnéticas | 14 |
| 2.5 Choques interplanetarios | 14 |
| 2.6 Evolución de EMCIs y choques IP a través de la heliosfera interna | 17 |
| 3 Estudio de la configuración magnética interna de las EMCIs | 23 |
| 3.1 Análisis de la configuración magnética de EMCs a 1 UA | 23 |
| 3.1.1 EMCs y OMs observadas por WIND y STEREO-A/B durante 1995-2021 | 24 |
| 3.1.2 Velocidad de expansión y parámetro de distorsión | 26 |
| 3.1.3 Evolución de OMs a 1 UA | 30 |
| 3.1.4 Discusión | 39 |
| 4 Análisis estadístico de choques IPs a través de la heliosfera interna | 41 |
| 4.0.1 Artículo: Statistical Analysis of Interplanetary Shocks from Mercury to Jupiter | 42 |
| 5 Conclusiones y comentarios finales | 71 |
| A Apéndice | 75 |
| Referencias | 91 |

Preámbulo

La dinámica de gran escala en el medio interplanetario está dominada por estructuras en el viento solar, tales como las eyecciones de masa coronal (EMCs) o eventos asociados a éstas como lo son los choques interplanetarios. Debido al impacto que tienen estas estructuras sobre el entorno terrestre, es de gran relevancia comprender la propagación de estos fenómenos solares a través de toda la heliosfera interna. Empleando diferentes tipos de observaciones, es posible rastrear el sistema eyecta-choque en su viaje, desde que se manifiestan muy cerca del Sol, hasta que se detectan en el entorno terrestre muy lejos de éste. Algunos ejemplos son: mediciones in-situ de naves espaciales localizadas a distintas distancias heliocéntricas para estudiar las variaciones de los propiedades físicas de EMCs y choques, imágenes en luz blanca para conocer la morfología de la EMC/choque, así como modelos teóricos, basados en observaciones in-situ, que estiman la propagación, evolución y geometría de estas estructuras en el medio interplanetario.

Por otra parte, a través de los distintos métodos de observación expuestos anteriormente, se han propuesto distintos escenarios de (1) cómo es la variación de los parámetros físicos relacionados con los choques conducidos por EMCs o por regiones de interacción (RICs); y (2) bajo qué consideraciones físicas es posible que sea distorsionada la configuración magnética en la estructura interna de EMCs.

El objetivo principal de este trabajo es estudiar la evolución heliocéntrica de EMCs y choques IPs usando observaciones in-situ de distintas naves espaciales. Por una parte, a partir de distintos catálogos de choques y EMCs detectados por diferentes misiones, desde 0.29 hasta 5.4 UA, se analizaron las variaciones en las distribuciones de los choques, así como sus posibles diferencias y similitudes cuando los choques eran conducidos por EMCs o RICs. Además, estudiar si existe alguna dirección preferencial que siguen los choques. Por otra parte, analizando perfiles de campo magnético y viento solar de nubes magnéticas observadas a 1 UA, se exploró bajo qué escenarios físicos son deformadas estas estructuras en su interacción con el viento solar, o la posible expansión de las nubes magnéticas en su viaje a través del medio interplanetario.

Estructura de la tesis: La tesis esta dividida en 5 capítulos. El primer capítulo presenta una breve introducción del viento solar, así como una descripción del campo magnético interplanetario y la espiral de Parker. En el capítulo 2 nos centramos en describir las principales características de las eyecciones de masa coronal, choques interplanetarios y nubes magnéticas, además de dar una breve reseña sobre la importancia de estudiar la evolución heliocéntrica de estas estructuras. En el capítulo 3 presentamos el análisis de los eventos de EMCs y su clasificación de acuerdo con su configuración magnética, mediante observaciones in-situ usando las misiones Wind y STEREO-A/B. En el capítulo 4 se presenta el artículo de investigación derivado del análisis estadístico de las propiedades de los choques a través de la heliosfera interna: *Statistical Analysis of Interplanetary Shocks from Mercury to Jupiter*. Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones y comentarios finales del estudio.

Introducción

El Sol es una estrella muy activa y en su superficie suceden una gran variedad de eventos explosivos de gran escala que liberan grandes cantidades de masa y energía al medio interplanetario (IP). A este conjunto de explosiones se les conocen como tormentas solares. Cuando el material expulsado de las tormentas solares impacta sobre nuestra atmósfera terrestre, puede llegar a producir una serie de fenómenos físicos tales como las auroras en los polos o las tormentas geomagnéticas, estas últimas las responsables de afectar nuestros sistemas de telecomunicaciones tanto en la Tierra como en el espacio, así como también alterar las órbitas de los satélites, líneas de transmisión eléctrica, entre otros. De aquí la importancia de estudiar este tipo de manifestaciones solares, en particular las eyecciones de masa coronal (EMCs) así como los choques IPs, que juegan un papel muy importante en la relación Sol-Tierra.

1.1 El viento solar

Históricamente, el descubrimiento del viento solar (VS) estuvo relacionado con los intentos por explicar los mecanismos físicos que producían las tormentas solares. A principios de 1900, Kristian Birkeland realizó una serie de experimentos para explicar la causa de las auroras, argumentando que eran producidas por partículas cargadas provenientes de material expulsado por el Sol, pero sus ideas fueron ignoradas por la comunidad científica. Más adelante, Chapman and Ferraro (1929) sugirieron que las tormentas geomagnéticas eran causadas por corrientes de partículas provenientes de las fulguraciones, viajando a través del espacio vacío, que se creía que existía entre el Sol y la Tierra. Posteriormente, para intentar explicar porqué la cola de los cometas se aleja del Sol, Biermann (2013) propuso, de acuerdo con Birkeland, que el Sol emitía un flujo constante de partículas que nombraron radiación corpuscular solar. Chapman and Zirin (1957) publicaron formalmente un modelo para la corona solar en expansión, donde consideraron una corona estática y simétricamente esférica. Dedujeron que la corona se extendía más allá de la Tierra. Sin embargo, la dificultad de este modelo fue que a grandes distancias, la presión excedía por arriba de cualquier valor razonablemente físico y la densidad se extendía al infinito. Fue entonces que Eugene Parker (1958) resolvió estas inconsistencias sugiriendo que la corona solar se encuentra en continua expansión, donde en ausencia de una alta presión que la mantenga atada, ésta debería escaparse del Sol y permear todo el medio interplanetario, como

un viento solar. Su modelo consideró una atmósfera en equilibrio hidrostático y esféricamente simétrica, además de tomar en cuenta el principio de conservación de masa y de momento. La ecuación que describe una atmósfera en equilibrio estacionario está dada como (Parker, 1965)

$$v \frac{dv}{dr} \left(1 - \frac{c^2}{v^2} \right) = R(r), \quad (1.1)$$

donde la temperatura, $T(r)$, está expresada en términos de la velocidad térmica $c(r) = (2kT(r)/M)^{1/2}$, el potencial gravitatorio se encuentra en la velocidad de escape $w = (GM_*/a)^{1/2}$, y la función $R(r)$ está dada como

$$R(r) \equiv -r^2 \frac{d}{dr} \left(\frac{c^2}{r^2} \right) - \frac{w^2 a}{r^2}, \quad (1.2)$$

donde $a = r$, denota el valor en la base de la atmósfera. Adicionalmente, se supone que $T(r)$ disminuye asintóticamente a cero cuando $r = \infty$. Distintos tipos de soluciones de 1.1 se ilustran en la Figura 1.1. Las soluciones de las regiones I y II son para cuando $r \ll a$ y $r \gg a$, es decir, en regiones muy alejadas de la corona solar. Las soluciones en la región III son para cuando la velocidad del viento solar sobrepasa a la velocidad de la corona ($v > v_a$), que resulta no ser muy convincente. Por lo tanto, las únicas soluciones físicamente posibles para el viento solar sería en las regiones V y IV. Sin embargo, en V la velocidad del viento solar es subsónica y la presión se acercaría a un valor constante mientras $r \rightarrow \infty$. Por lo tanto, las soluciones en la región IV corresponderían al viento solar, aquí se tienen velocidades subsonicas ($v < v_a$) cuando $r < r_a$, muy cerca de la corona, después existe un punto crítico A donde, $(v, r) = (v_a, r_a)$, la velocidad alcanza valores supersónicos ($v > v_a$), además de que la densidad decae como $\rho \sim r^{-2}$. Parker encontró soluciones donde la presión tiende a cero mientras aumenta la distancia. Sin embargo, estas ideas no fueron completamente aceptadas en la comunidad científica. Transcurrieron más de dos años, hasta que observaciones directas del viento solar comenzaron a ser reportadas por Gringauz et al. (1960) y Shklovsky (1961), a cargo de la sonda espacial soviética Lunik II, que posteriormente fueron confirmadas por Gringauz (1961) y Bonetti (1963), esta vez a cargo de la misión espacial Lunik III. Finalmente, fue hasta 1962 cuando observaciones hechas por la sonda espacial de la NASA, Mariner II, confirmaron la existencia del viento solar.

El viento solar es un plasma compuesto principalmente por electrones, protones y trazas de iones más pesados (principalmente núcleos de helio.) Debido a que el VS posee una alta conductividad eléctrica, ésta le permite llevar consigo al campo magnético (Burlaga, 1984; Friedberg, 1987; Kivelson and Russell, 1995; Aschwanden, 2006). Observaciones registradas por las misiones espaciales Helios, lanzadas en 1974 y 1976, lograron identificar dos patrones de velocidades en el viento solar según la región donde se originan. De acuerdo con su velocidad

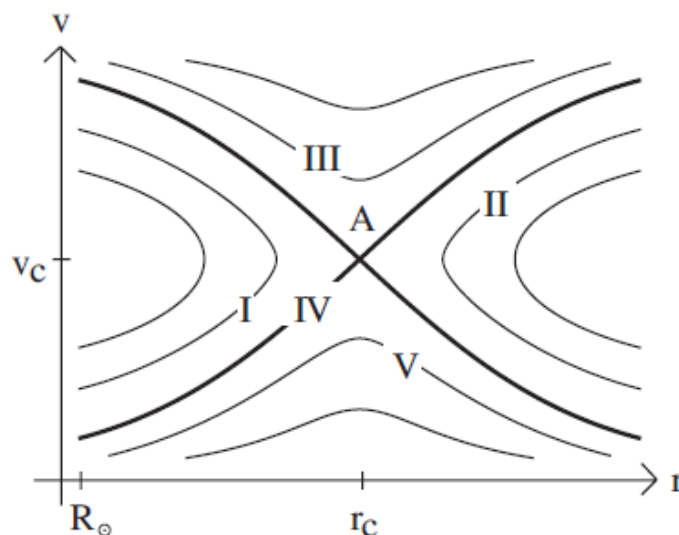


Fig. 1.1.: Ilustración donde se muestran las soluciones a las distintas soluciones para describir la expansión del viento solar. El punto crítico (A) es cuando $v = v_c$ y $r = r_c$. [Tomada de Priest, 2014].

y características físicas (densidad, temperatura y campo magnético) existen dos tipos de viento solar: rápido y lento.

La principal diferencia entre el VS rápido y el lento es su origen. Mientras que el VS lento generalmente se asocia a regiones donde el campo magnético localmente es cerrado (a la altura del ecuador solar), el VS rápido tiene su origen en las regiones con campo magnético localmente abierto (hoyos coronales). A la altura de la órbita terrestre el VS lento se expande con una velocidad aproximada de 450 km/s, y la densidad promedio de protones es de $7 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$, mientras que el VS rápido, a 1 UA¹, se registra con velocidades cercanas a los 750 km/s y la densidad promedio es de $2.5 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$.

En la Figura 1.2 se muestran las mediciones de la velocidad y campo magnético del VS a diferentes latitudes, durante la fase máxima y mínima del ciclo solar, hechas por la nave espacial Ulysses. Esta nave ha sido la única en orbitar al Sol fuera del plano de la eclíptica; su órbita heliocéntrica iba desde la órbita de Júpiter hasta 1.4 UA, alrededor del Sol, con un periodo de 6.2 años. Las gráficas fueron adaptadas sobre una imagen de rayos X suaves del satélite Yohkoh (durante el máximo y el mínimo) superpuesta sobre una imagen del coronógrafo C1 de SOHO. Las mediciones mostraron la estructura tridimensional del viento solar. De acuerdo a las observaciones de Ulysses, durante la fase mínima los hoyos coronales están a altas latitudes y por lo tanto, el VS rápido emana más de las zonas polares, mientras que el VS lento se origina a

¹Unidad Astronómica 1 UA = $149.6 \times 10^6 \text{ km}$

latitudes medias. Cuando nos encontramos en la fase máxima del ciclo de actividad, los hoyos coronales migran hacia latitudes medias, generando la compleja configuración de corrientes del VS que se observa del lado derecho. Las gráficas también muestran cómo es la configuración del campo magnético. Las líneas en color azul corresponden a líneas de campo magnético que entran hacia el Sol (polaridad negativa), mientras que en color rojo son las que salen (polaridad positiva). Entonces el patrón de las corrientes del VS está directamente relacionado con la configuración del campo magnético del Sol.

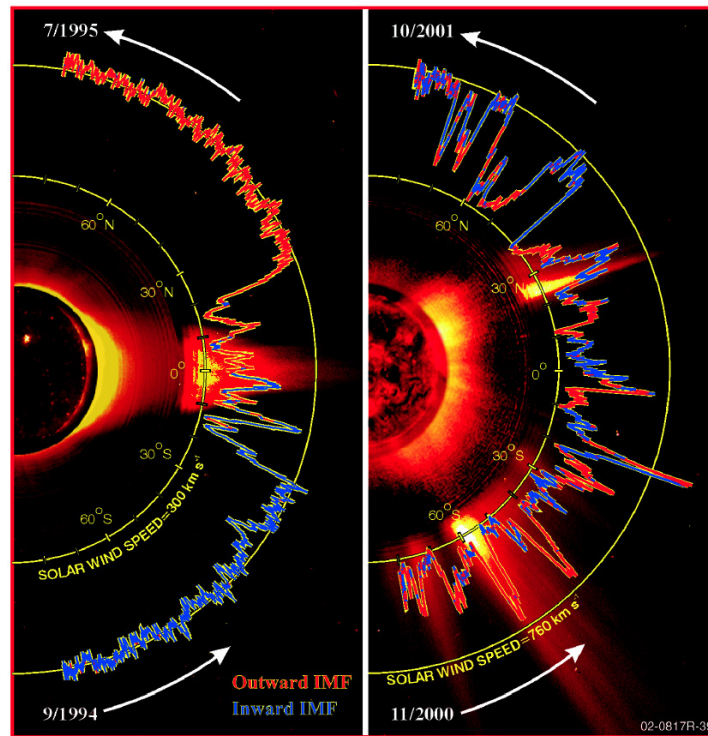


Fig. 1.2.: Mediciones hechas por la nave espacial Ulysses donde se muestran las distintas configuraciones del viento solar durante el mínimo y máximo solar, evidenciando la relación directa con la configuración magnética del Sol. [Tomada de <http://solarprobe.gsfc.nasa.gov/solarwind.jpg>].

Después de que Parker (1958) predijera la existencia del viento solar, un conjunto de misiones espaciales se ha encargado de medir el viento solar que incide sobre el entorno terrestre. Para esto, los satélites artificiales se encuentran orbitando en la posición correcta, donde la atracción gravitatoria entre el Sol y la Tierra se combinan para hacer que la nave orbite alrededor del Sol, a la misma velocidad angular que la Tierra. A estas posiciones orbitales se les conoce como puntos de Lagrange, y se definen como las posiciones donde un objeto pequeño puede estar teóricamente estacionario respecto a dos objetos más grandes. Los puntos de Lagrange marcan las posiciones donde la atracción gravitatoria, combinada de las dos masas grandes, proporciona la fuerza centrípeta necesaria para rotar sincrónicamente con la menor de ellas. El punto L1

del sistema Sol-Tierra, es el punto ideal para realizar observaciones del Sol, la sonda espacial SOHO o el satélite ACE se encuentran orbitando alrededor del punto L1. Las misiones espaciales deben de contar principalmente con instrumentos para detectar plasma y campo magnético, esto con la finalidad de realizar observaciones continuas típicas del viento solar a través del medio interplanetario.

Es importante hacer énfasis en las variaciones que pueden llegar a sufrir los valores típicos del VS, en función de la actividad solar. Gosling et al. (1971; 1976) encontraron que durante el mínimo solar en 1964 al máximo solar en 1969, la diferencia de velocidad solo difería un 25%, por lo que concluyó que la variabilidad de la velocidad del viento solar, respecto a la actividad solar, era muy pequeña. Estudios similares a cargo de Feldman et al. (1978), y Lazarus et al. (1988), discutieron las variaciones en la densidad y temperatura del VS, después del mínimo solar en 1977. Sin embargo, no encontraron alguna correlación con la actividad solar. Otros estudios más recientes han estudiado la variabilidad del VS durante los dos últimos ciclos solares, 23 y 24 (Jian et al., 2011; Jian et al., 2013)

1.2 El campo magnético interplanetario

Una clave fundamental para entender la actividad solar y sus efectos sobre las condiciones en el entorno terrestre, yace en comprender el origen del campo magnético del Sol y su estructura sobre la heliosfera interna. Está aceptado, de forma general, que el campo magnético solar se origina en el interior del Sol mediante un mecanismo de dínamo. Básicamente, el dínamo solar funciona como un generador eléctrico natural al interior del Sol, produciendo corrientes eléctricas y campo magnético, que siguen las leyes de la magnetohidrodinámica. Una serie de trabajos teóricos enfocados en explicar el mecanismo físico del dínamo solar fueron hechos por Cowling (1933; 1945), Elsasser (1946), Bullard (1949), Parker (1955), Ferraro (1937), Biermann (1950), y Takeuchi and Shimazu (1952). Por ejemplo, Parker (1955) propuso que, debido a los movimientos convectivos dentro de la zona de convección en el Sol, éste sería capaz de ser una fuente autosostenible para generar campos magnéticos. Durante los años 80 Moreno-Insertis (1983), Parker (1984) y Choudhuri and Gilman (1987) obtuvieron algunos resultados donde proponían que en las regiones donde existía un mayor movimiento convectivo, el campo magnético podría llegar a 10^4 o $10^5 G^2$. Sin embargo, estos resultados aún son inciertos.

Usualmente se asume que la configuración magnética en la superficie del Sol se comporta como un dipolo magnético. Schatten et al. (1969) desarrollaron las bases del modelo del campo

²Un gauss (G) es una unidad de campo magnético donde en el sistema CGS equivale a 1 gauss= 1 maxwell/cm².

potencial, cuyo propósito fue hacer un mapeo del campo magnético en la fotosfera, entre $1.5R_{\odot}$ y $2.5R_{\odot}$ y tomando como valores iniciales mediciones directas del campo magnético mediante magnetogramas. Observaciones remotas del campo magnético fotosférico permiten darnos un panorama global de la estructura del campo magnético del Sol. Por otro lado, algunos trabajos sugieren que la intensidad del campo magnético en la fotosfera varía de acuerdo a su localización, que en promedio se encuentra entre 100 – 500 G (Stenflo, 1982; Faurobert-Scholl, 1991), mientras que en los hoyos coronales, durante el mínimo solar, el campo magnético ronda de 5 a 10 G (Priest, 2014).

Debido a la gran actividad que existe en la corona solar, y en general en el Sol, la ocurrencia de tormentas solares y claras variaciones en la radiación solar, son indicaciones directas de la asociación entre estos fenómenos con variaciones en la configuración del dipolo magnético en el Sol. El campo magnético tiene variaciones tanto temporales como espaciales, y éste conduce muchos efectos que colectivamente se le conoce como actividad solar. Entonces, la actividad solar está relacionada con la configuración del campo magnético del Sol, y éste con el ciclo de manchas solares. Durante el máximo solar se incrementa la frecuencia de manifestaciones en el Sol, así como en el número de manchas solares, mientras que en el mínimo solar disminuye drásticamente la actividad solar.

La extensión del campo magnético del Sol hacia el medio interplanetario se le conoce como campo magnético interplanetario (IMF por sus siglas en inglés), o también referido como campo magnético heliosférico (HMF). En la corona solar, la presión magnética excede por mucho a la presión térmica, por lo que el plasma se encuentra confinado por el campo magnético. Sin embargo, mientras aumenta la altura, la presión del plasma supera a la presión magnética, ocasionando una aceleración en el VS. Además, por la alta conductividad en la corona, el viento solar “arrastra” las líneas de campo a través de toda la heliosfera, formando así el campo magnético interplanetario.

1.3 La espiral de Parker

Parker (1958; 1963) predijo que los componentes el campo magnético interplanetario, en coordenadas esféricas, deberían de variar con la distancia R respecto al Sol, y la latitud heliográfica θ como (Burlaga, 1995)

$$B_R(R, \theta, \phi) = B_1 \left(\theta, \phi - \frac{R\Omega}{V} \right) \left(\frac{R_1}{R} \right)^2, \quad (1.3)$$

$$B_{\theta}(R, \theta, \phi) = 0, \quad (1.4)$$

$$B_{\phi}(R, \theta, \phi) = B_1 \left(\theta, \phi - \frac{R\Omega}{V} \right) \left[\left(\frac{R_1\Omega}{V} \right) \left(\frac{R_1}{R} \right) \cos(\theta) \right]. \quad (1.5)$$

Donde B_1 es la intensidad del campo magnético a 1 UA ($R_1 = 1$ UA), Ω es la velocidad de rotación del Sol y V es la velocidad del VS. A este conjunto de ecuaciones se le conoce como el modelo de la espiral de Parker. En este modelo, Parker enunció dos importantes suposiciones; 1) la velocidad de rotación del Sol (Ω) es una constante, y 2) se considera que la velocidad (V) del VS fluye radialmente e independiente de la distancia al Sol (R), pero varía en función de la latitud (θ). El esquema físico que describe el modelo de Parker, es una espiral de Arquímedes, tomando como punto de referencia al Sol como el origen. La geometría del campo magnético interplanetario puede entenderse considerando un viento solar estacionario y fluyendo radialmente a una velocidad constante. Debido a que el VS está ligado al campo magnético por efectos de la magnetohidrodinámica, por lo que las líneas del campo magnético están vinculadas al material del plasma y asumen una forma de la espiral de Arquímedes (Burlaga, 1995).

El modelo de la espiral de Parker ha sido comprobado mediante observaciones hechas a 10 UA (Behannon, 1978; Thomas and Smith, 1980; Burlaga, 1984; Behannon et al., 1989), y también más allá de 30 UA el modelo sigue siendo válido (Burlaga and Ness, 1993). Observaciones hechas por la misión espacial Voyager, y predichas por el modelo de Parker, muestran que la magnitud del campo magnético interplanetario decae con el inverso del cuadrado de la distancia radial (Burlaga, 1984; Klein et al., 1987). La influencia de la espiral de Parker a través de toda la heliosfera, es sumamente importante ya que nos permite estudiar y comprender la estructura del medio interplanetario, así como una representación cinemática y dinámica del paso del viento solar a través del medio interplanetario, y cómo éste pudiera influenciar a su llegada al entorno terrestre.

Estructuras de gran escala en el medio interplanetario

2.1 Eyecciones de masa coronal

Debido a algunos procesos físicos que ocurren en el interior del Sol, éste experimenta una serie de cambios morfológicos y energéticos que pueden dar lugar a la formación de regiones donde se llevan a cabo manifestaciones propias de la actividad solar. Una de las principales y más importantes manifestaciones de la actividad solar son las eyecciones de masa coronal (EMCs). Una de las definiciones más acertadas para las EMCs es de Hundhausen et al. (1984) y Schwenn (1996), enunciada como, una EMC es un cambio observable en la estructura coronal que ocurre usualmente en una escala de tiempo de unos pocos minutos o varias horas, y que involucra la aparición y movimiento hacia afuera de una luz blanca y brillante en el campo de visión del coronógrafo. Está ampliamente aceptado que las EMCs son fenómenos eruptivos que consisten en la liberación de grandes cantidades de plasma magnetizado (Kunow et al., 2006), y pueden llegar a tener un tamaño entre 0.25–1UA (Bothmer and Schwenn, 1997). Las EMCs son de suma importancia por distintas razones. Por ejemplo, algunas EMCs pueden conducir choques interplanetarios que aceleran partículas energéticas (Cane and Lario, 2006; Klecker et al., 2006), además de que las EMCs son las principales responsables de provocar intensas tormentas geomagnéticas (Zhang et al., 2007; Echer et al., 2008; Berdichevsky et al. 2009). Las EMCs modulan la intensidad de los rayos cósmicos galácticos (Cane, 2000), y pueden influenciar la propagación de partículas energéticas solares en la heliosfera (Cane et al., 1996). Por otro lado, las EMCs contienen material que ha sido procesado durante una erupción en la corona solar y proveen información de las condiciones durante estas erupciones. Las EMCs juegan un papel importante en la evolución y estructura de la corona solar y son el principal eslabón entre la actividad solar y el clima espacial.

2.2 Origen, evolución y propagación en el medio interplanetario

Está ampliamente aceptado que muchas EMCs parecen provenir de estructuras cerradas de campo magnético, como las protuberancias o arcos corales. De acuerdo con Wilston et al. (1991), los arcos de campo magnético intentan redistribuirse entre ellos mismos a una configuración más estable, desencadeando una fulguración o que las líneas de campo magnético se abran. Las EMCs parecen estar más ligadas con estructuras de gran escala de campos magnéticos débiles en lugar de regiones de pequeña escala con campos magnéticos intensos (Webb, 1998). Se cree que las EMCs energéticas son el rompimiento de un arco coronal existente, el cual va aumentando en brillantez y tamaño durante días, antes de erupcionar como una EMC (Hundhausen, 1993). Por lo general, las EMCs se originan cerca del ecuador solar, donde se superponen una o más líneas de campo magnético. Cerca del mínimo solar, las líneas de campo magnético se encuentran cerca de los polos, por lo que las EMCs se encuentran confinadas casi por completo a bajas latitudes. Sin embargo, cerca del máximo solar, las líneas de campo magnético se encuentran en un amplio rango de latitudes solares, por lo que las EMCs comúnmente ocurren a latitudes medias (McComas et al., 2000).

De acuerdo con las teorías acerca de la naturaleza física de las EMCs, éstas son más bien descriptivas que predictivas, es decir, se enfocan en estudiar los mecanismos físicos existentes desde su inicio en la corona solar, hasta su propagación a través del medio interplanetario. Por ejemplo, Forbes (2000) describe la configuración de una EMC donde menciona que existe material siendo arrastrado al exterior del Sol, acompañado por una región de material muy denso y caliente. Algunos modelos que intentan describir el inicio de una EMC están basados en la premisa que las EMCs obtienen su energía del campo magnético almacenado en la corona. Flujos de campo magnético que se acumulan en la corona, van evolucionando a través del tiempo hasta que alcanzan un estado donde ya no es posible un equilibrio estable. Es entonces cuando el campo hace erupción; si ésta es suficientemente fuerte y el campo magnético adyacente no es capaz de constriñir el plasma, éste es eyectado a través del medio interplanetario (Webb and Howard, 2012). Es un poco incierto lo que causa la desestabilización del campo magnético, pero puede involucrar un proceso de reconexión magnética. Este proceso ocurre en plasmas altamente conductores donde las líneas de campo magnético se empalman una con la otra, cambiando sus topologías magnéticas. Trabajos más recientes enfocados en estudiar lo que sucede con el campo magnético, una vez que la EMC erupciona, han sido propuestos por Rachmer et al. (2009), donde el campo debería de *estirarse* hasta alcanzar su estado natural. Otros trabajos enfocados en explicar la liberación espontánea de energía magnética, es el modelo llamado de *escape* (breakout model) (Antiochos et al., 1999; Lynch et al., 2008), en el cual se asume que

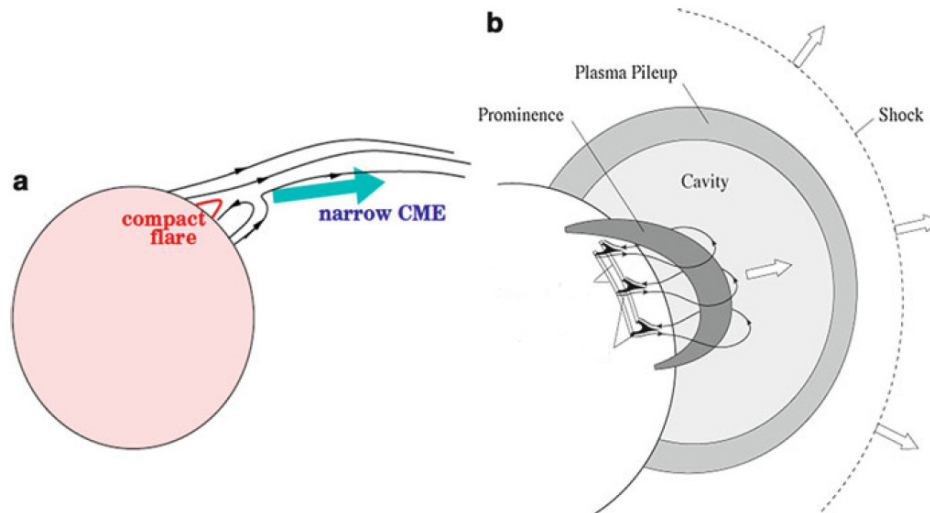


Fig. 2.1.: (a) Representación esquemática de una EMC asociada con una fulguración y (b) asociada con una protuberancia. Para el último caso, el material solar es arrastrado por la EMC y está acompañada de una onda de choque interplanetaria. [Tomadas de: Chen, 2011].

la reconexión magnética ocurre en la parte superior de un filamento, y existe una topología magnética coronal tipo multipolar. Después de que la EMC erupciona, el campo magnético dejado atrás finalmente se cierra, probablemente a través de alguna forma de reconexión magnética a gran escala (ver Figura 2.1). Los modelos que describen la fase tardía del proceso magnético en una EMC los podemos encontrar en Švestka & Cliver (1992).

Luego de una abrupta liberación de material solar, la EMC se propaga a través del medio interplanetario como una eyección de masa coronal interplanetaria (EMCI). El término interplanetario fue originalmente usado para diferenciar EMCs observadas por un coronógrafo y aquellas observadas en el medio interplanetario. Hay observaciones importantes que se toman en cuenta cuando una EMC viaja a través del medio interplanetario, tales como: velocidad inicial (cerca del Sol) de la EMC, aceleración o desaceleración entre el Sol y la Tierra, tamaño y razón de expansión de la EMC a 1 UA, valores típicos de la intensidad del campo magnético y densidad de la masa, entre otras (Gopalswamy, 2006). Estudios hechos por Yashiro et al., 2004 mostraron que las EMCs lentas ($V \leq 250 \text{ km s}^{-1}$) muestran una aceleración, mientras que las EMCs rápidas ($V \geq 900 \text{ km s}^{-1}$) muestran una desaceleración, sugiriendo que la interacción entre una EMC y el VS es el principal mecanismo que determina la dinámica de las EMCs en el MI. Estudios hechos por St. Cyr et al., 1999 mostraron que las velocidades típicas de las EMCs vistas con un coronógrafo varían entre $100\text{-}2000 \text{ km s}^{-1}$, mientras que las correspondientes a las EMCIs en el medio interplanetario difieren solamente de $100\text{-}200 \text{ km s}^{-1}$ del viento solar. Entonces las fuerzas que actúan sobre las EMCIs tienden a equiparar las velocidades de las EMCs y del viento solar, a una distancia heliocéntrica estimada de $25 - 30R_{\odot}$ (Corona-Romero and

Gonzalez-Esparza, 2011). A esta fuerza se le conoce como *fuerza de arrastre viscoso* y existe por la interacción por contacto de un cuerpo con un fluido viscoso (en nuestro caso la interacción entre la EMC con el VS). Otra de las observaciones importantes es la velocidad de expansión, en un análisis hecho por Owens and Crooker, 2006, encontraron una relación empírica entre la razón a la que el radio de la EMCI se incrementa respecto a la velocidad de la parte superior de la EMC. Respecto a la sección transversal de una EMCI a 1 UA, vista desde un coronógrafo cerca del Sol es aproximadamente circular, sin embargo debido a las fuerzas que actúan sobre una EMCI en dirección perpendicular a su movimiento, es útil considerarlas como una forma elíptica como aproximación a primer orden (Vršnak and Gopalswamy, 2002; Cargill, 2004).

2.3 Técnicas de observación

Tradicionalmente, las observaciones de las EMCs han sido obtenidas mediante coronógrafos en luz blanca. Algunas de estas observaciones han sido documentadas en distintos catálogos realizados por distintas misiones espaciales tales como P78-1/Solwind, el Solar Maximum Mission o el catálogo en línea del CDAW Data Center de la NASA, usando el sistema de coronógrafos de LASCO, C2 y C3, de la nave espacial SOHO. Uno de estos catálogos es hecho por el software automático CACTus (Robbrecht et al., 2009), el cual usa la transformada de Hough como método para identificar estructuras brillantes en la corona solar. Por otro lado, catálogos como SEEDS (Omedo et al., 2008) y ARTEMIS (Boursier et al., 2009) están basados en la detección automatizada de EMCs usando el coronógrafo C2 de LASCO observadas a $\sim 2 - 6R_{\odot}$ (ver Figura 2.2). Algunas comparaciones entre estos distintos catálogos son posibles hacerlas, por ejemplo Robbrecht et al. (2009) encontró que el software automático CACTus identificó muchos más eventos que el catálogo CDAW, pero estos eventos eran de EMCs con un ancho angular de $\sim 20^{\circ}$. Además de estos coronógrafos situados a distintas latitudes de la atmósfera terrestre, también es posible tener observaciones de EMCs desde la Tierra. Coronógrafos situados en la Tierra como el coronógrafo Mark IV, del observatorio Mauna Loa Observatory (MLSO) ha sido capaz de realizar observaciones de la corona de $1.08 - 2.85R_{\odot}$ cada 3 minutos. El coronógrafo Mark IV complementa bastante bien las observaciones hechas por LASCO de la corona solar. Hasta el momento, los coronógrafos de LASCO nos han permitido profundizar en las propiedades básicas de las EMCs. Futuras misiones, como la sonda espacial Parker o la sonda Orbiter, permitirán extender nuestros conocimientos sobre este interesante fenómeno solar.

Por otro lado, también es posible identificar EMCs propagándose a través del medio interplanetario, mediante algunos parámetros físicos como velocidad, densidad, temperatura y campo magnético, en el viento solar. Y en algunos casos, funciones de distribución y abundancias en los estados de ionización o distintos isótopos dentro del plasma (Zurbuchen & Richardson, 2006;

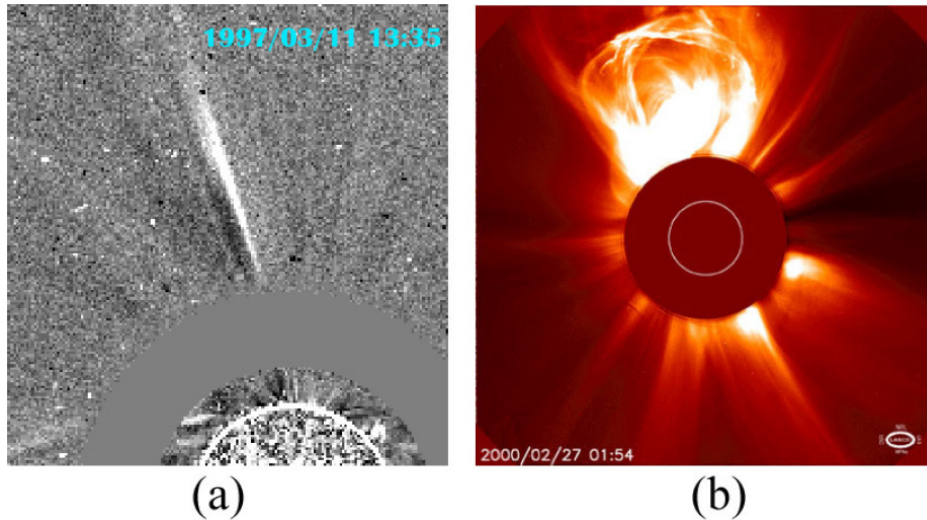


Fig. 2.2.: Comparación de dos distintas observaciones de EMCs con un corónografo, en (a) una EMC con un ancho angular $< 20^\circ$, mientras que en (b) una típica EMC donde se muestran los principales componentes de su morfología. [Tomadas de: SOHO/LASCO].

Wimmer et al., 2006). La mayoría de las observaciones de EMCs en el medio interplanetario se hacen muy cerca del entorno terrestre, en el punto de Lagrange L1, tales como WIND o ACE. Sin embargo, misiones como los Voyagers, Helios o Ulysses han explorado más allá de los $0.3R_\odot$, fuera del plano de la eclíptica o fuera de la heliopausa. Cuando una nave espacial en el medio interplanetario detecta el paso de una EMC, ésta puede ser identificada por firmas características relacionadas con las propiedades del plasma y campo magnético que la componen. Sin embargo, no todas las EMCs presentan firmas bien definidas y tampoco existe una característica distintiva que esté presente en las EMCs observadas por una nave espacial. Las firmas características que pueden presentar las EMCs observadas, y que las diferencian del viento solar ambiente, son

- Un incremento en la magnitud del campo magnético seguido por un decrecimiento suave (Pudovkin et al., 1979; Klein y Burlaga, 1982).
- Rotación en los componentes del campo magnético, en especial de su componente B_z (Klein y Burlaga, 1982, Leppig et al., 1979).
- Baja densidad de electrones respecto al viento solar ambiente (Richardson et al., 2000).
- Temperatura de iones y/o electrones inusualmente baja respecto al viento solar ambiente (Richardson y Cane, 1995).
- Anomalías en las abundancias de otras especies o elementos de iones.

En la Figura 2.3 se muestra un ejemplo de una EMC detectada in-situ, durante los días 13 al 18 de mayo de 2005. En esta figura se muestran algunas firmas que anteriormente citamos, pero como ya hemos mencionado, no necesariamente aparecen todas en este evento.

2.4 Nubes magnéticas

Existen firmas bien definidas, dadas por los perfiles de plasma y campo magnético, que nos permiten agrupar a un subconjunto de EMCIs conocidas como nubes magnéticas (NMs). El término de nube magnética fue definido por Burlaga et al. (1981). Las NMs se caracterizan por tener un valor de beta (la razón entre la presión térmica y la presión magnética) mucho menor a la unidad ($\beta \ll 1$), esto debido a que, en ausencia de interacciones dinámicas, la intensidad del campo magnético dentro de una NM a 1 UA, es mayor que la intensidad del campo magnético que se encuentra afuera de ésta, por lo tanto la presión magnética en una NM, es mayor que la presión del viento solar ambiente. Por otro lado, la dirección de las componentes del campo magnético rotan suavemente, así como la intensidad del campo magnético que se encuentra dentro de una NM es mayor a la que se encuentra fuera de ésta. Y por último, la temperatura de protones es menor a la del viento solar ambiente (Burlaga et al., 1981). Para explicar la rotación en las componentes del campo, Goldstein (1983) sugirió que el campo magnético en una NM puede ser descrito por una cuerda de flujo magnético libre de fuerzas, donde $\nabla \times B = \alpha B$. Burlaga (1988) asumió como constante α , y en tal caso, esta cuerda de flujo satisface la solución de Lundquist (Lundquist, 1950) y puede ser expresada en términos de las funciones de Bessel. Esta descripción física ha sido ampliamente usada para describir la estructura de las NMs.

Se cree que las NMs representan un tercio del total de EMCs observadas (Gosling, 1990; Richardson & Cane, 2010). Sin embargo, otros estudios han propuesto que es incluso más alto el porcentaje de EMCIs que son NMs, por ejemplo, un estudio hecho por Li et al. (2011) y Marubashi (2000) estimaron que la proporción de NMs debía ser del 50% y 80%, respectivamente. Otros autores han estudiado la variación de NMs respecto a EMCIs durante el ciclo solar (Kilpua et al., 2011; Richardson & Cane, 2010) y encontraron que varía un 100% cerca del mínimo solar y $\sim 20 - 25\%$ en el máximo solar.

2.5 Choques interplanetarios

Las ondas de choque son consecuencias de los efectos de compresibilidad que toman importancia cuando la velocidad del flujo se aproxima a la velocidad del sonido. Cuando una onda que se mueve a través del plasma magnetizado viaja más rápido que la velocidad Alfvén del viento

mayo de 2005

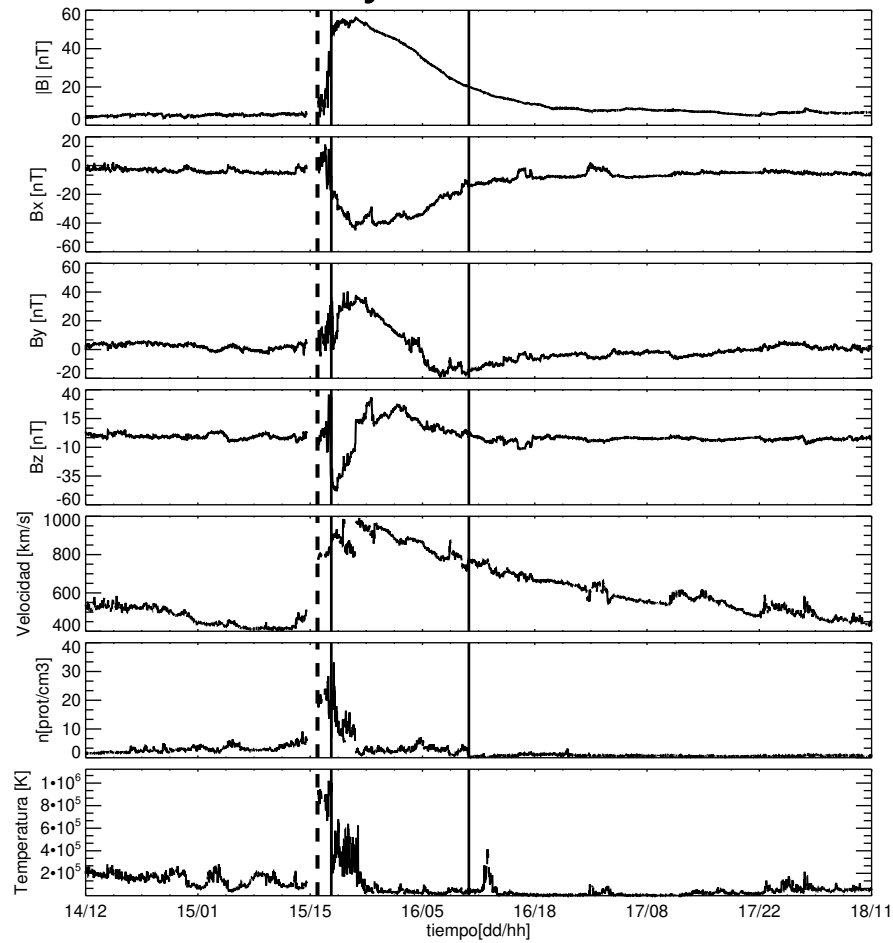


Fig. 2.3.: Ejemplo de una EMC detectada in-situ usando datos del sitio web CDAWeb (<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>). Los paneles corresponden a: magnitud del campo magnético, así como sus componentes (B_x , B_y y B_z), velocidad del VS, densidad y temperatura de protones. La línea punteada indica el comienzo del evento, y mediante líneas continuas verticales representan el tránsito de la EMC.

solar, la amplitud de esta onda aumenta rápidamente y los efectos no lineales se vuelven importantes, por lo que eventualmente se produce una onda de choque (Burgess y Scholer, 2015). La transición repentina entre flujos supersónicos y subsónicos a través de un choque se caracteriza por un cambio abrupto en la presión, temperatura y la densidad en el medio.

En el medio interplanetario, los choques son causados principalmente por EMCIs, cuando éstas alcanzan una velocidad supersónica, propagándose y expandiéndose a través del medio IP (Gosling et al., 1968). En otros casos, algunos choques pueden ser generados por regiones de interacción entre flujos, lentos y rápidos, de viento solar. (Gosling et al., 1972, 1976). Adicionalmente a las típicas firmas in-situ de los choques IPs, existen también otras observaciones que indican la presencia de otros fenómenos en la física solar. Por ejemplo, las emisiones de radio como los estallidos de radio Tipo II (Ginzburg y Zhelezniakov, 1958; Ledenev, 1996) proporcionan información sobre la aceleración y transporte de partículas energéticas solares (SEPs) asociados con choques (Reames, 1990, 1995). Además, las observaciones en luz blanca proporcionan información sobre la forma y dirección del choque (Ontiveros y Vourlidas, 2009; Frassati et al., 2019). Generalmente, la geometría de toda la estructura choque-EMCs se considera como una burbuja que se expande mientras se aleja del Sol, esto debido a la expansión radial de la EMC (Berdichevsky et al., 2000, 2003). Sin embargo, una representación más confiable de la morfología tridimensional de la estructura choque-EMC se mantiene reducida debido a las limitaciones para identificar y rastrear estas estructuras utilizando la técnica tradicional de procesamiento de imágenes (Ontiveros y Vourlidas, 2009; Howard et al., 2006; Thernisien, 2011). Así como también a las limitaciones que ofrecen las observaciones in-situ, debido a que solo proporcionan una única observación puntual sobre toda la estructura, por lo que los resultados obtenidos son limitados.

En general, los principales parámetros de los choques son:

- La velocidad de una onda de choque se define por su número de Mach (M). Se define como el cociente entre la velocidad de propagación del choque (V_s) y la velocidad a la cual se propagan las ondas en el medio (V_f). El número de Mach nos indica cuantitativamente qué tan intenso es el choque, y cuando $M > 1$, se dice que es un choque supermagnetosónico

$$M = \frac{V_s}{V_f}. \quad (2.1)$$

- El ángulo θ_{B_n} , se define como el ángulo entre el campo magnético corriente arriba (upstream) (\vec{B}_u) y la normal al choque \vec{n} . Los choques interplanetarios se clasifican en función de su ángulo θ_{B_n} , como: paralelos ($\theta_{B_n} = 0^\circ$), cuasi-paralelos ($0 < \theta_{B_n} < 45^\circ$),

cuasi-perpendiculares ($45^\circ < \theta_{B_n} < 90^\circ$) y perpendiculares ($\theta_{B_n} = 90^\circ$) (Anderson, 1963).

2.6 Evolución de EMCIs y choques IP a través de la heliosfera interna

Estudiar las propiedades de los choques y las EMCs en función de la distancia heliocéntrica también ha sido de interés en la comunidad científica. Lai et al. (2012) concluyeron que no existe correlación alguna entre la intensidad del choque y la distancia radial de 0.28 a 1 UA. Hoang et al. (1995) extendieron este estudio, caracterizando las propiedades de choques observados entre 1 y 5 UA, por la misión Ulysses, concluyendo que la intensidad de los choques asociados con EMCs no muestran una dependencia con la distancia. Sin embargo, en los choques asociados con regiones de interacción, la intensidad de éstos mostraron un incremento con la distancia heliocéntrica. Por otro lado, diversos estudios se han enfocado en estudiar la variación de los parámetros de los choques y EMCs en función del ciclo solar (Berdichevsky et al., 2000, Kilpua et al., 1995, 2011, Jian et al., 2011). Adicionalmente a estos resultados, diversos estudios se han enfocado en caracterizar la forma global del sistema choque/EMC, así como la posibles deformaciones que puede manifestar esta estructura a través del MI. Por ejemplo, Möstl et al. (2015), a través de un modelo analítico que describe el choque como una elipse, encontró que un choque/EMC sufre una distorsión desde que sale expulsada del Sol hasta la detección con la nave espacial. Isavnin (2016) amplió estos resultados mediante un modelo tridimensional de una EMC donde considera su estructura magnética interna. Concluyendo la necesidad de considerar las posibles deformaciones (rotación, deflexión, aplanamiento frontal) que presenta una EMC a cualquier distancia radial, para obtener resultados más confiables. Por otro lado, Kwon et al. (2014) concluyeron, a través de un modelo geométrico, que la morfología de una EMC se puede representar como una burbuja conducida por un frente de choque, o a través de una configuración cilíndrica en forma de cuerda donde la masa es transportada hacia afuera por la estructura magnética.

Por otra parte, algunos estudios han caracterizado la forma genérica del sistema EMC/flux-rope/choque por medio de observaciones-situ. A partir de un gran conjunto de nubes magnéticas, Janvier et al. (2013) emplearon un método estadístico para estimar la forma más probable que puede presentar una nube magnética. Este tipo de estudio se extendió con choques IPs asociados con EMCs por Janvier et al. (2014). Ellos concluyeron que la morfología del frente del choque, detectada a 1 UA, es compatible con una simetría axial. Finalmente, Janvier et al. (2015) compararon distintos modelos analíticos para deducir la forma del frente del choque y

la NM, explorando distintas geometrías , concluyendo que una elipse se ajusta mejor con las observaciones in-situ.

A pesar de los intentos que se han hecho por obtener un imagen más completa de EMCs/NMs/choques, tanto de su morfología como sus propiedades, a su paso por el medio interplanetario. Aún son necesarios modelos y observaciones más precisas que nos permitan obtener una mejor comprensión sobre la evolución de estas estructuras en toda la heliosfera interna.

En las siguientes figuras, mostramos algunos ejemplos de choques asociados con EMCs observados a tres distintas distancias heliocéntricas. En la Figura 2.4, Helios-1 detectó en sus instrumentos de plasma y campo magnético un choque cerca del Sol, a 0.31 UA. El choque atravesó la nave el 29 de mayo de 1980 a las 11:05 UT, seguido por una EMC comenzando a las 16:03 UT del mismo día, finalizando hasta el 31 de mayo a las 22:13 UT. Para este choque, la intensidad del campo magnético aumento de 50 nT (upstream) hasta 150 nT (downstream), es decir triplicó su valor en el brinco de la discontinuidad. En la Figura 2.5, se muestran las firmas de plasma y campo magnético de un choque y una EMC observada a 1 UA por la misión Wind. De acuerdo a los instrumentos de la nave, el evento comenzó el 26 de noviembre de 2012 a las 04:32 UT. En este caso, la intensidad del campo magnético dio un brinco de 5 nT hasta 11 nT, en la discontinuidad del choque, con una razón de 2.2 (downstream/upstream), un menor valor al choque detectado a 0.31 UA. Finalmente, en la Figura 2.6 se muestra un choque con una EMC observada mas lejos del Sol, a 4.65 UA y a 32.2° de latitud, por Ulysses. El evento comenzó a las 02:03 UT el 9 de junio de 1993, finalizando hasta el 12 de junio a las 20:15. Debido a que la intensidad del campo magnético disminuye con la distancia heliocéntrica, este choque registró un brinco de 0.4 nT hasta 1.2 nT, aun así su amplitud fue similar a los casos anteriores (downstream/upstream ~ 3).

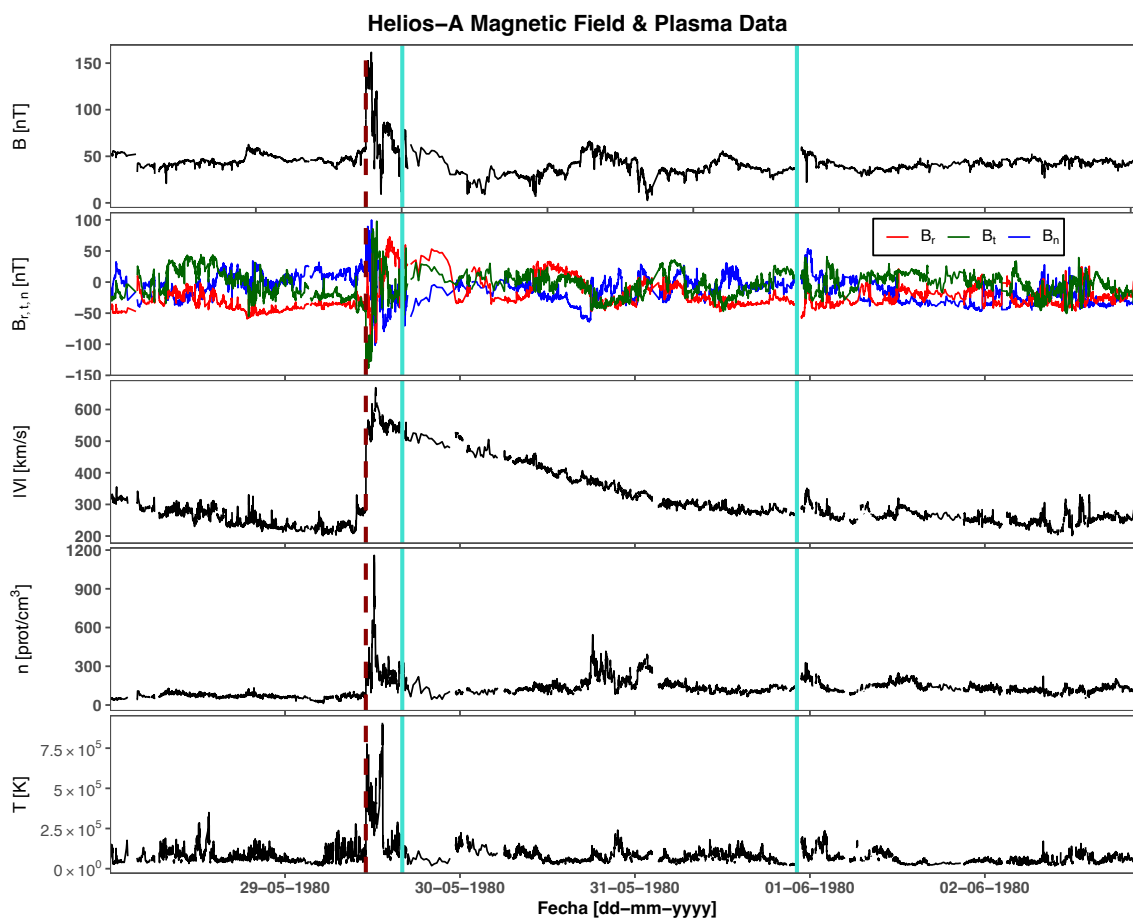


Fig. 2.4.: Choque IP y EMC observada cerca del Sol, a 0.31 UA, por los instrumentos de plasma y campo magnético a bordo de la misión Helios-1. De arriba hacia abajo: magnitud del campo magnético y sus componentes en coordenadas RTN, velocidad del VS, y densidad y temperatura de protones. La línea vertical punteada indica el paso del choque a través de la nave, y las líneas verticales continuas indica la presencia de la EMC.

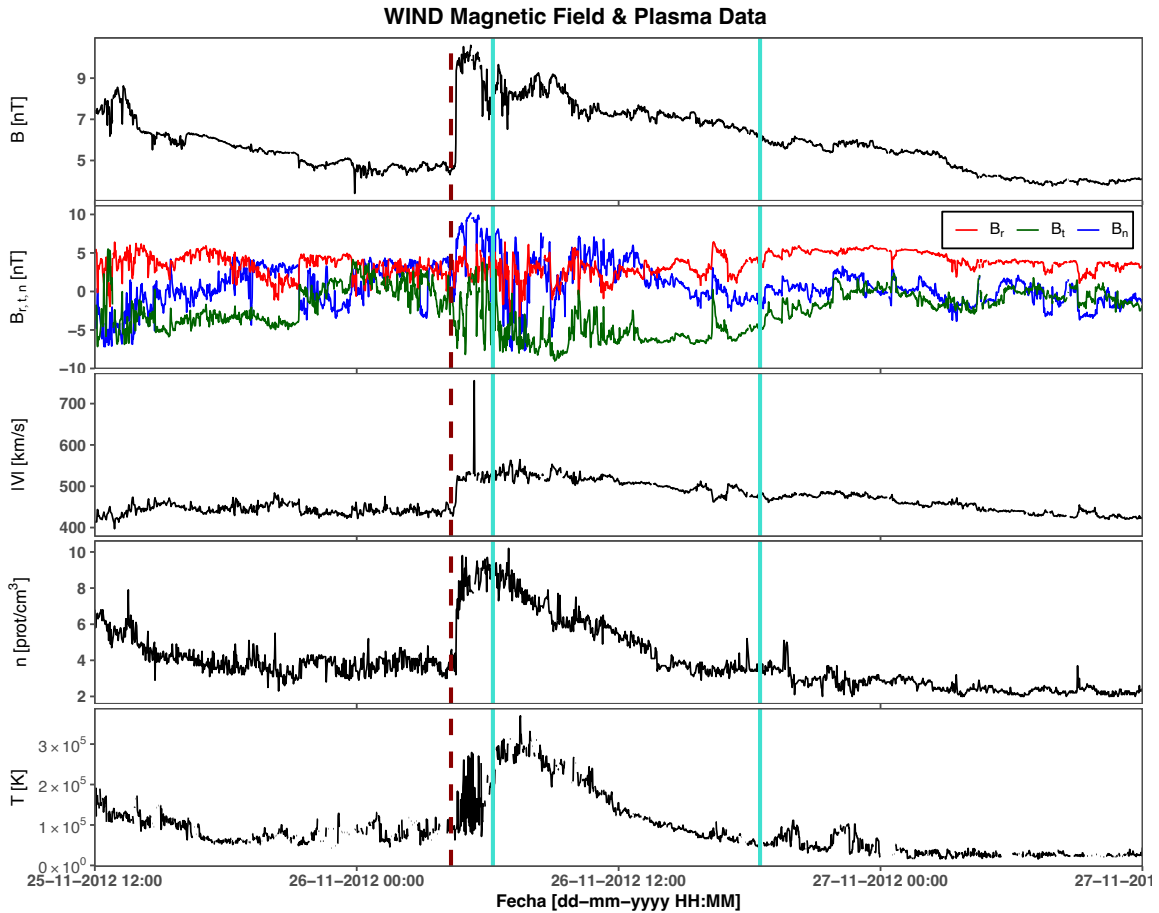


Fig. 2.5.: Choque IP y EMC observada cerca del Sol, a 1 UA, por los instrumentos de plasma y campo magnético a bordo de la misión Wind. De arriba hacia abajo: magnitud del campo magnético y sus componentes en coordenadas GSE, velocidad del VS, y densidad y temperatura de protones. La línea vertical punteada indica el paso del choque a través de la nave, y las líneas verticales continuas indican la presencia de la EMC.

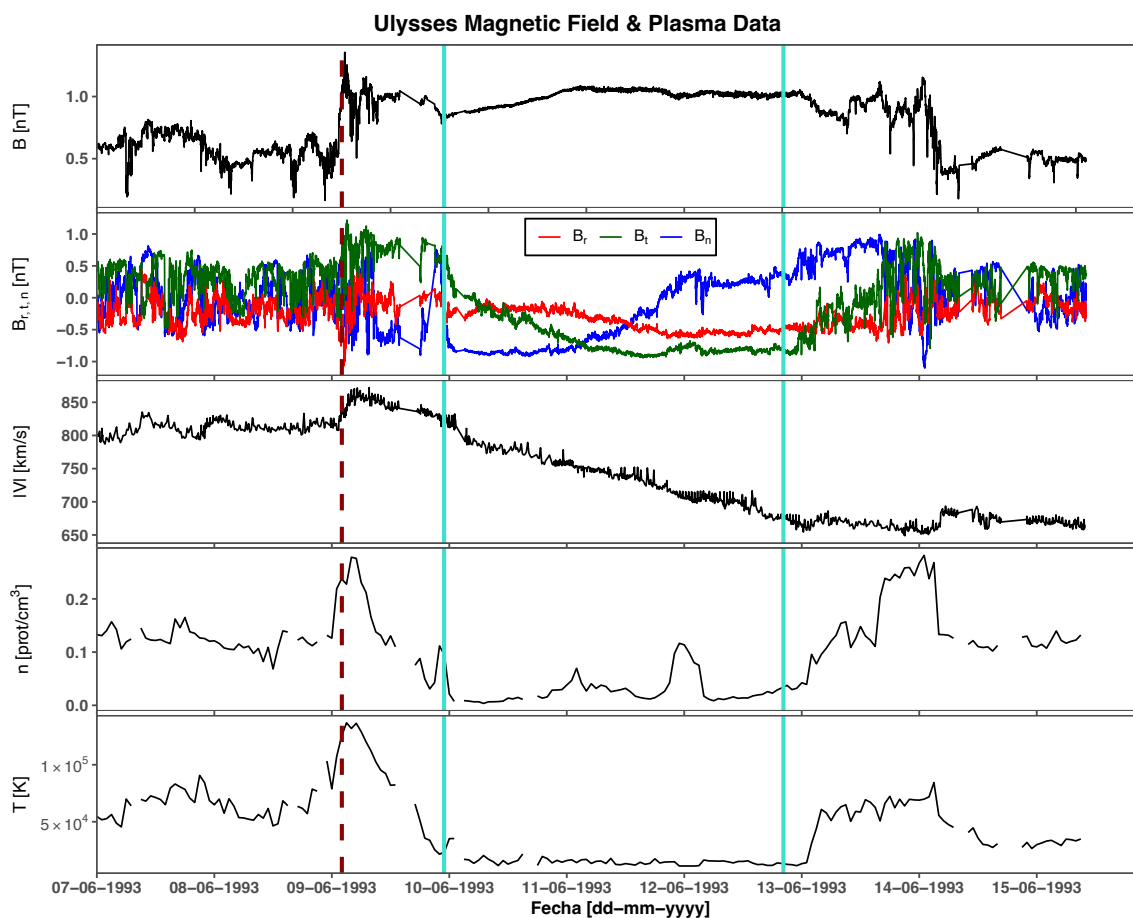


Fig. 2.6.: Choque IP y EMC observadas muy lejos del Sol, a 4.65 AU, por los instrumentos de plasma y campo magnético a bordo de la misión Ulysses. De arriba hacia abajo: magnitud del campo magnético y sus componentes en coordenadas RTN, velocidad del VS, y densidad y temperatura de protones. La línea vertical punteada indica el paso del choque a través de la nave, y las líneas verticales continuas indica la presencia de la EMC.

Estudio de la configuración magnética interna de las EMCs

En este capítulo presentamos un análisis de la configuración interna que presentan las EMCs a 1 UA. Nos enfocamos en estudiar la asimetría en los perfiles de campo magnético y viento solar de aquellas EMCs que presentan distintas configuraciones magnéticas, detectadas por las misiones Wind y STEREO-A/B durante el periodo 1995-2021. Esto con la finalidad de ofrecer un panorama más amplio acerca de la configuración magnética en la estructura interna de las EMCs y sus posibles distorsiones que sufren estas estructuras debido a su interacción con el viento solar a través del medio interplanetario.

3.1 Análisis de la configuración magnética de EMCs a 1 UA

En Heliofísica, una cuerda de flujo (o flux-rope, FR) puede ser definido como plasma magnetizado confinado dentro de las líneas de campo magnético envueltas alrededor de un eje. Este es el escenario de una estructura en la que las líneas de campo magnético pueden ser no ordenadas o helicoidalmente bien organizadas. Comúnmente, las cuerdas de flujo están generalmente asociadas con EMCs, esto se ve evidenciado con firmas in-situ bien definidas de la topología de una cuerda de flujo (ver Secc. 2.4), o a través del campo de visión de los coronógrafos suele observarse una región oscura rodeada de un brillo, generalmente esto se considera como la cavidad del FR y se asocia como las firmas del campo magnético de ésta.

Sin embargo, en el medio interplanetario los FRs no son estáticos. Distintos trabajos han demostrado que los FRs pueden llegar a ser más complejos debido a distintos factores, tales como la expansión, rotación, deflexión y distorsión (Kilpua et al., 2019; Luhmann et al., 2020), por la interacción de eventos complejos (Lugaz et al., 2017; Owens, 2020), o debido a un efecto en la proyección de una estructura 3D en el plano del cielo, aparentando una distorsión (Vourlidis et al., 2011). Adicionalmente, se ha propuesto distintos modelos de reconstrucción de FRs considerando distintos escenarios, desde los primeros estudios realizados por Lundquist (1950) and Burlaga (1988) donde asumían a la estructura magnética como un

cilindro axialmente simétrico y despreciando la expansión o distorsión en la sección transversal del cilindro, posteriormente hubo trabajos donde consideraban distintas suposiciones físicas y geométricas en la reconstrucción del FR (Hidalgo, 2003; Nieves-Chinchilla et al., 2016; Nieves-Chinchilla, 2018).

Otra característica de las NMs que se observa mediante datos in-situ, es la compresión del campo magnético en el frente de ésta. Esta asimetría en la intensidad del campo magnético respecto al centro de la NM es abordada en distintos modelos dinámicos como una expansión radial/axial de la estructura (Berdichevsky et al., 2003; Wang et al., 2015), o como una evidencia en la distorsión en la sección transversal del FR (Hidalgo et al., 2002; Berdichevsky, 2013).

Para estudiar estas distintas configuraciones magnéticas internas en una EMC, y siguiendo con la misma nomenclatura de Nieves-Chinchilla et al. (2018), adoptamos el término de "obstáculo magnético", OM, (MO por sus siglas en inglés) para describir la estructura magnética interna en una EMC. El criterio usado para definir un OM en una EMC, incluye cuando el valor de la beta de plasma (la razón entre la presión térmica y la presión magnética) sea mucho menor a la unidad ($\beta \ll 1$), y en algunos casos rotaciones monótonas en las componentes del campo magnético (Jian et al., 2006).

En este capítulo exploramos la suposición de que la asimetría del campo magnético en las EMCs es una evidencia de la expansión y analizamos los orígenes de esta asimetría en perfiles de campo magnético a lo largo de tres ciclos solares (SC22, SC23 y SC24), observados por las naves espaciales WIND y STEREO-A/B.

3.1.1 EMCs y OMs observadas por WIND y STEREO-A/B durante 1995-2021

Con base en catálogos existentes de EMCs observadas por las misiones WIND y STEREO-A/B, se compiló una lista general de EMCs y OMs basándonos en el catálogo presentado por Nieves-Chinchilla et al. (2018) and Nieves-Chinchilla et al. (2019), durante el periodo de 1995 al 2015. Esta lista presenta, para cada evento, la fecha inicial de la EMC/OM, su duración, la media del campo magnético, velocidad del viento solar y densidad de protones durante el tiempo que transcurre el obstáculo magnético, así como parámetros relacionados con sus características geométricas. Haciendo uso de las observaciones de plasma y campo magnético obtenidas por los instrumentos Magnetic Field Investigation (MFI, Lepping et al., 1999) y Solar Wind Experiment (SWE, Ogilvie et al., 1995), montados en la nave Wind, a través de una inspección visual de estas observaciones y siguiendo el criterio de Jian et al. (2006, 2013) y Nieves-Chinchilla et al. (2018, 2019), se identificaron un total de 93 eventos de EMCs/OMs del 2016 al 2021, así

como también se determinaron los mismos parámetros mencionados anteriormente. Esto con la finalidad de actualizar el catálogo de EMCs y OMs hasta 2021.

Para EMCs detectadas por la misión STEREO-A/B se consultó el catálogo hecho por Jian et al. (2006, 2013) y con base en éste, a través de observaciones de plasma (IMPACT, Acuña et al., 2008; Lunhmann et al., 2008) y campo magnético (PLASTIC, Galvin et al., 2008), se compiló una lista general de EMCs/OMs, similar a Nieves-Chinchilla et al. (2018, 2019). Detectándose un total de 318 eventos de EMCs/MOs durante el periodo 2007-2020.

De acuerdo al análisis hecho por (Nieves-Chinchilla et al., 2019), las estructuras magnéticas en una EMC pueden ser clasificadas en tres categorías: (F), una cuerda de flujo (o flux-rope) que dependiendo de la longitud en la rotación de su campo magnético se dividen en tres tipos: (F_r), una FR con una rotación entre $90^\circ - 180^\circ$; (F^-) una FR con una rotación debajo de 90° ; y (F^+) una FR con una rotación mayor a 180° . Por otro lado, también se tienen los eventos con múltiples rotaciones o estructuras complejas (C_x), y eyectas (E) que muestran rotaciones no definidas. En el Apéndice A.1 se muestra la lista completa de EMCs y OMs observadas por ambas misiones espaciales, durante el periodo 2007-2021. En las primeras columnas se indica el número del evento, seguido por la nave espacial que lo detectó, año y separación angular entre STEREO-A/B con la Tierra. Seguido por la fecha y hora en que se detectó la EMC y OM, así como su duración (en horas). En las últimas columnas, se encuentran los valores promedios del campo magnético, velocidad del viento solar y densidad de protones durante la duración del obstáculo magnético, así como la velocidad de expansión, parámetro de distorsión y el tipo de evento (flux-rope, eyecta o un evento complejo).

En las Figuras 3.1 y 3.2 se muestran dos ejemplos de EMCs detectadas por las misiones de Wind y STEREO-A, respectivamente. En la Figura 3.1a se muestran observaciones del campo magnético y viento solar, del 6 al 10 de junio del 2016. Durante estos días, los instrumentos de plasma y campo magnético montados en la misión Wind, detectaron el paso de una EMC comenzando el día 6 de junio a las 13:40 UT (indicado con una línea vertical continua), y finalizando el 7 de junio a las 12:00 UT. En líneas verticales punteadas indicamos la duración de la nube magnética, comenzando el 5 de junio a las 18:23 UT, hasta el 6 de junio a las 13:40 TU. La nube magnética se caracteriza por un incremento en la magnitud del campo magnético y suaves rotaciones en las componentes del campo magnético, así como un decremento en la velocidad térmica del plasma y cuando la presión magnética domina sobre la presión del plasma ($\beta \ll 1$). En el panel (b) de la misma figura, se muestran los hodogramas de las componentes del campo magnético, e indicado con una línea azul superpuesta, el promedio de los datos del campo magnético por cada hora durante la duración de la nube magnética. Se observa que en los hodogramas $B_y - B_x$ y $B_z - B_x$ las rotaciones no están muy definidas. Sin embargo, la presencia de un flux-rope está evidenciada por una rotación de 180° en el campo

magnético mostrado por el hodograma $B_z - B_y$. En la Figura 3.2 se muestra otro ejemplo de un OM dentro de la EMC observada por STA el 16 de octubre del 2009. El evento comenzó a las 14:57 UT, a partir del 16 del mismo mes a las 21:35 UT y hasta el día 17 a las 22:16, duró el obstáculo magnético. Este evento se considera como F_r debido a que exhibe rotación mayor a 180° mostrado en los hodogramas $B_y - B_x$ y $B_y - B_z$

3.1.2 Velocidad de expansión y parámetro de distorsión

Las observaciones in-situ de las estructuras magnéticas dentro de las EMCs suelen revelar una asimetría en los perfiles de la intensidad del campo magnético y velocidad del viento solar. En ocasiones, estas observaciones detectan velocidades mayores en el frente del obstáculo magnético que en el reverso de éste. Esto suele interpretarse como una evidencia de la expansión auto-similar de la eyecta (Démoulin et al, 2008; 2009). Por otro lado, se observa una compresión del campo magnético en el frente del OM. Esta aparente asimetría en la intensidad del campo magnético respecto al centro del OM es descrita en diversos modelos dinámicos como una expansión radial/axial de estas estructuras (Berdichevsky et al., 2003; Hidalgo, 2003).

Para cuantificar esta asimetría en los perfiles del campo magnético y velocidad del viento solar de OMs, determinamos la velocidad de expansión y el parámetro de distorsión.

De acuerdo a Nieves-Chinchilla et al. (2018), la aparente velocidad de expansión (V_{exp}) es la velocidad proyectada en la trayectoria de la nave espacial. V_{exp} es calculada a partir de un ajuste lineal del viento solar durante la duración del obstáculo magnético,

$$V_{\text{exp}} = \frac{(V_s - V_e)}{2}, \quad (3.1)$$

donde V_s (velocidad inicial) es la velocidad obtenida del ajuste en el frente de la estructura, y V_e (velocidad final) es la velocidad obtenida del ajuste de la parte trasera de la estructura. Valores positivos implica una expansión en la estructura y valores negativos una compresión. (ver Figura 3.3).

Para cuantificar los efectos de la distorsión en el obstáculo magnético provocado por la interacción con el viento solar ambiente, introducimos el concepto del parámetro de distorsión (DiP) derivado a partir de un promedio temporal del campo magnético (Nieves-Chinchilla et al., 2018),

$$\langle B(t) \rangle_t = \frac{1}{T_d} \int_{t_{\text{start}}}^t B(t) dt, \quad (3.2)$$

donde $B(t)$ es la magnitud del campo magnético y $T_d = t_{\text{end}} - t_{\text{start}}$ es el tiempo de duración del obstáculo magnético. Entonces, a partir del promedio total del campo magnético, el valor

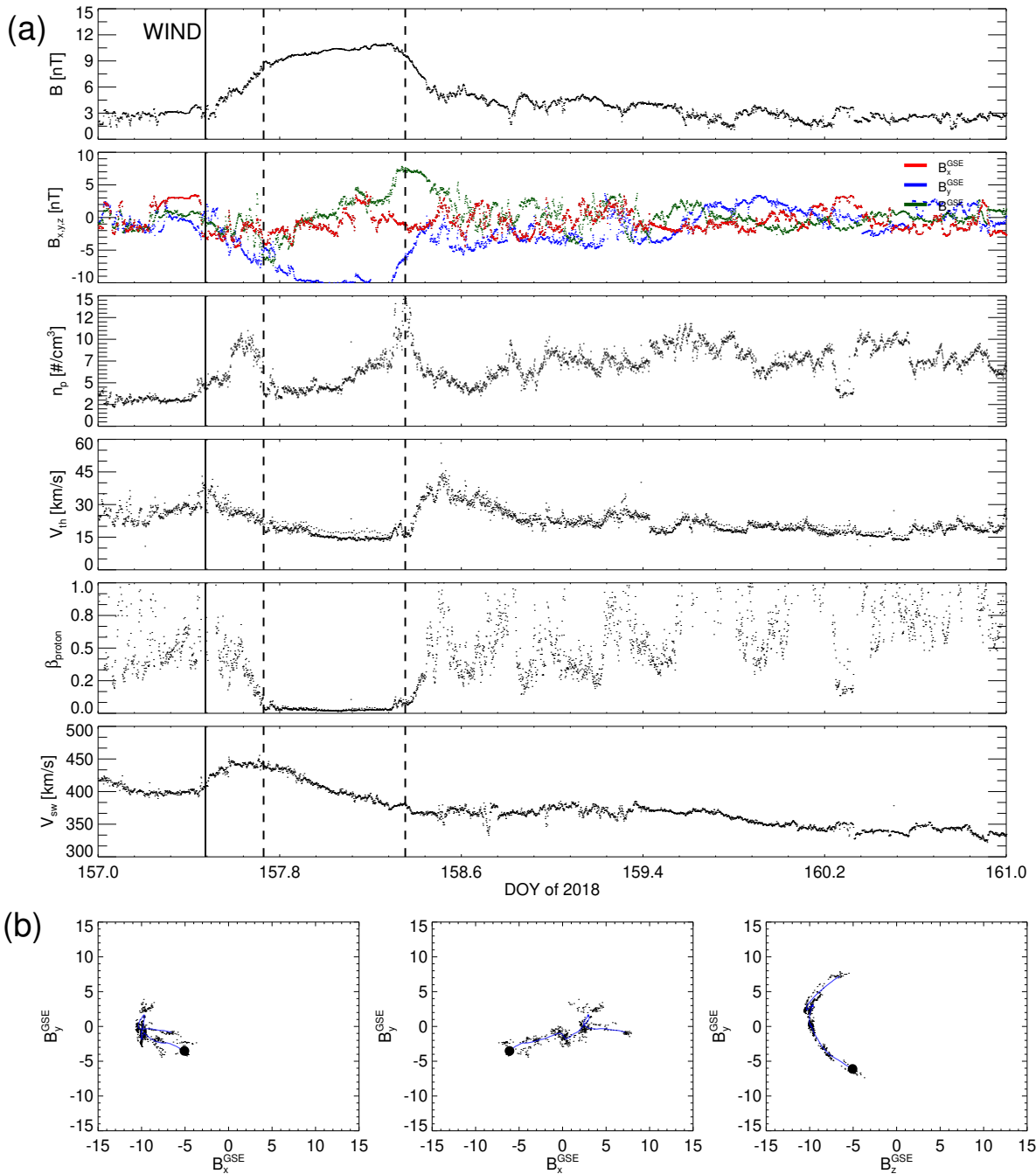


Fig. 3.1.: (a) EMC detectada por los instrumentos SWE y MFI a bordo de Wind, a partir del 5 de junio del 2008. De arriba a abajo, se grafican observaciones de la magnitud y sus componentes del campo magnético, seguido por la densidad de protones, velocidad térmica, beta del plasma, velocidad del viento solar y temperatura. La línea vertical continua indica el paso de la EMC y las líneas verticales punteadas la duración del obstáculo magnético. (b) Hodogramas magnéticos en coordenadas GSE.

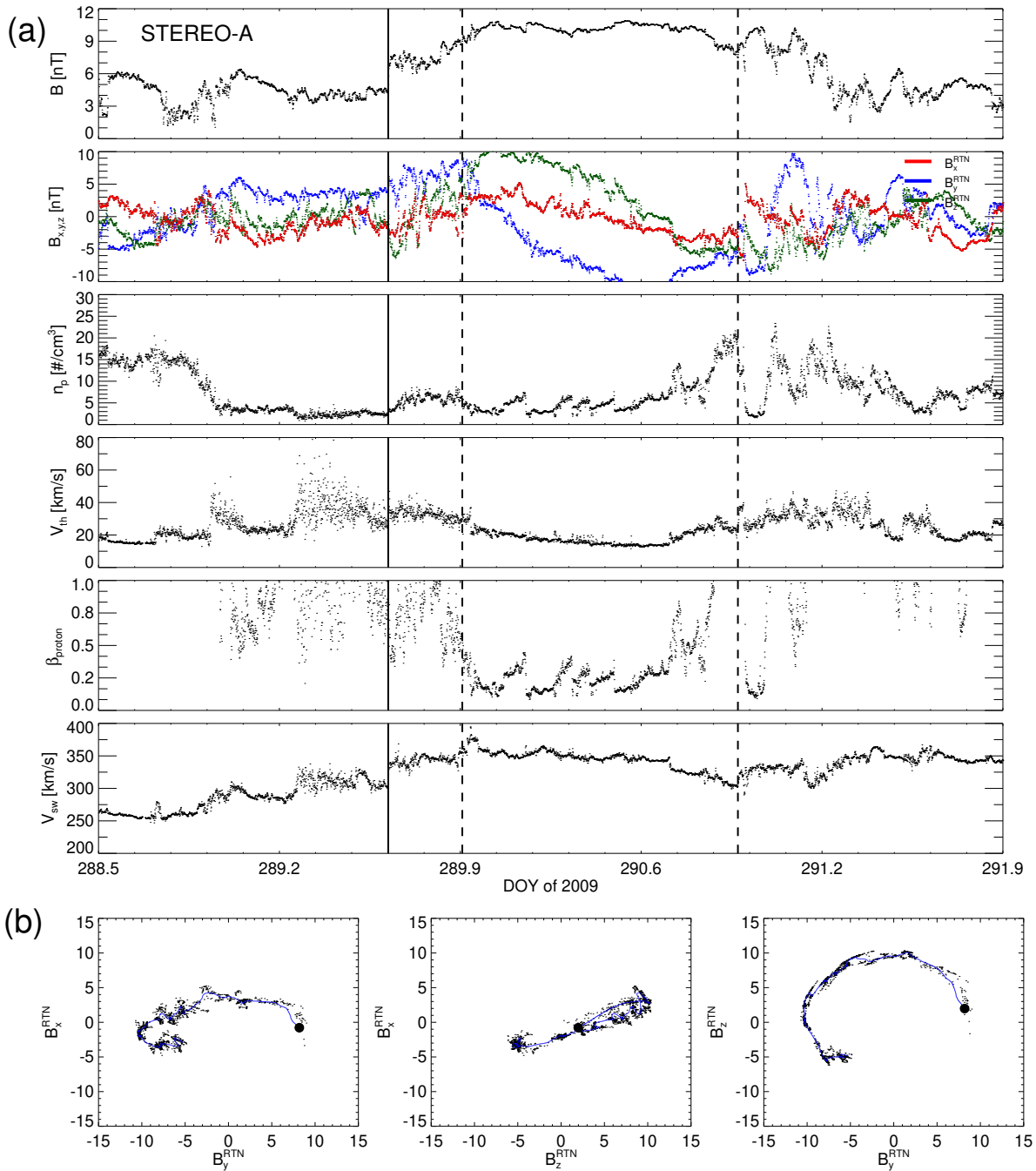


Fig. 3.2.: (a) EMC detectada por los instrumentos IMPACT y PLASTIC a bordo de STEREO-A, a partir del 16 de octubre del 2009. De arriba a abajo, se grafican observaciones de la magnitud y sus componentes del campo magnético, seguido por la densidad de protones, velocidad térmica, beta del plasma, velocidad del viento solar y temperatura. La línea vertical continua indica el paso de la EMC y las líneas verticales punteadas la duración del obstáculo magnético. (b) Hodogramas magnéticos en coordenadas RTN.

de DiP será una fracción del intervalo T_d donde el promedio del campo magnético acumulado alcance un valor del 50%. Valores de DiP < 0.5 indican que existe una compresión en el frente de la estructura y valores de DiP > 0.5 , una compresión en el reverso. Y en los casos cuando DiP = 0.5 implica una simetría en los perfiles de la magnitud del campo magnético.

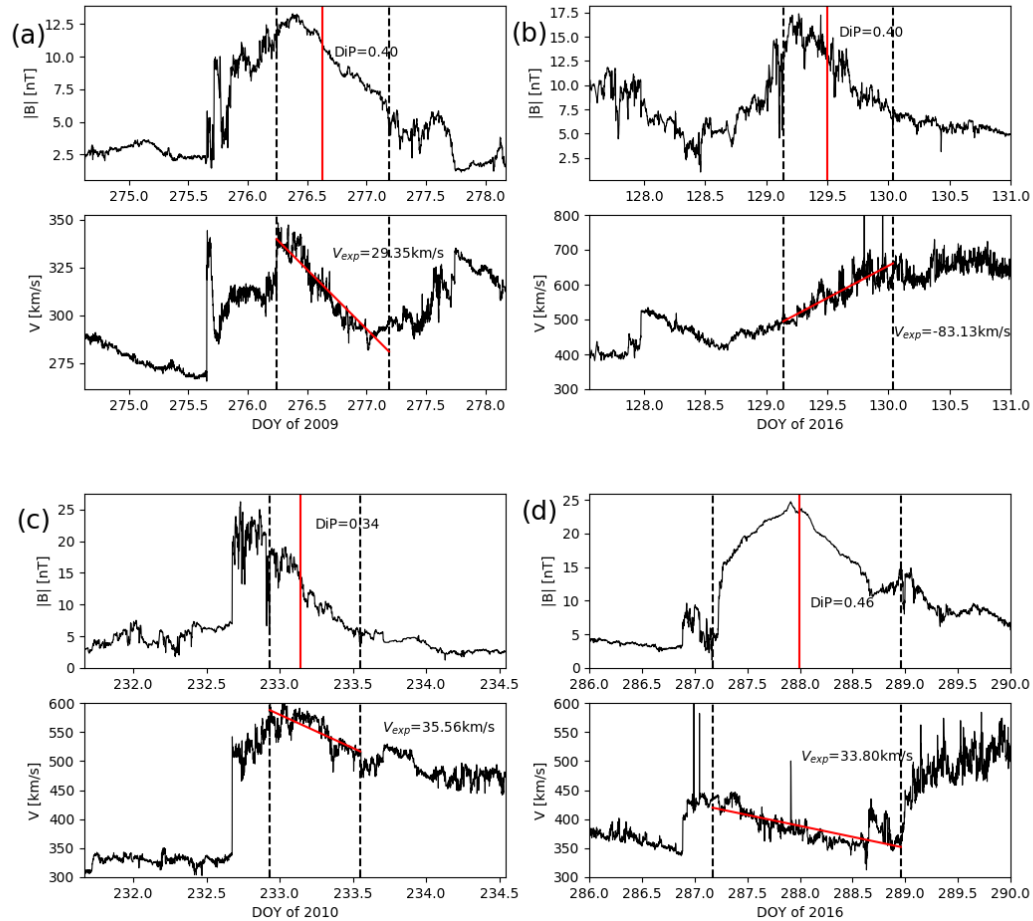


Fig. 3.3.: Magnitud del campo magnético y velocidad del viento solar de cuatro EMCs observadas por Wind y STEREO-A/B: (a) 2 de octubre de 2009 por STB, (b) 7 de mayo de 2015 por Wind, (c) 20 de agosto de 2010 por STA, y (d) 12 de octubre de 2016 por Wind. Para cada figura, el OM se encuentra delimitado por dos líneas verticales punteadas. Así como en la parte superior de cada figura se grafica la magnitud del campo magnético, la línea vertical roja indica el valor de DiP de acuerdo a la Ec. 3.2. Y en la parte inferior, se grafica la velocidad del viento solar y el valor de la velocidad de expansión a partir del ajuste lineal indicado con la línea roja.

En la Figura 3.3 graficamos los perfiles de campo magnético y velocidad del viento solar, correspondientes a cuatro EMCs observadas por Wind y STEREO-A/B. En cada panel, delimitamos el obstáculo magnético mediante líneas verticales punteadas, y con línea vertical roja indicamos el valor donde el promedio del campo magnético acumulado ha alcanzado un 50% de su valor total (DiP) (de acuerdo a la Eq. 3.2) y la velocidad de expansión. En el panel (a) y (b) se obtuvo

un valor de DiP = 0.40 evidenciando una compresión en el frente de ambas estructuras. Sin embargo, para el evento (a), su velocidad de expansión es positiva, indicando que la estructura se expandió mientras viajaba a través del MI, y por otro lado, en el evento (b) la velocidad de expansión fue negativa, indicando una compresión. El OM del evento (c) también tuvo una compresión en el frente, y el OM en (d) mostró una asimetría en la intensidad del campo magnético (DiP \approx 0.5), ambos OMs sufrieron una expansión.

En la Tabla 3.1 mostramos el mínimo, máximo y media de la magnitud del campo magnético, velocidad del viento solar, densidad de protones y la beta del plasma durante el paso del OM, así como la velocidad de expansión y el parámetro de distorsión de los eventos durante 1995 al 2018. Para propósitos estadísticos, incluimos en este análisis las OM/EMCs reportadas por Nieves-Chinchilla et al. (2018) and Nieves-Chinchilla et al. (2019).

| Parámetro | Min | Max | Media |
|----------------------------------|-------|-------|-------|
| B (nT) | 4.8 | 14.3 | 9.8 |
| V ($km.s^{-1}$) | 372.3 | 606.3 | 436.4 |
| N _p (cm^{-3}) | 2.22 | 38.79 | 6.79 |
| β | 0.07 | 8.95 | 0.43 |
| V _{exp} ($km.s^{-1}$) | -136 | 270 | 24 |
| DiP | 0.19 | 0.67 | 0.46 |

Tab. 3.1.: Mínimo, máximo y media de la magnitud del campo magnético (B), velocidad del viento solar (V), beta del plasma (β), densidad de protones (N_p), velocidad de expansión (V_{exp}) y parámetro de distorsión (DiP), para OM/EMCs observadas por Wind y STEREO-A/B durante el periodo 1995-2018.

3.1.3 Evolución de OMs a 1 UA

Para investigar la ocurrencia de las EMCs observadas por Wind y STEREO-A/B a través de los ciclos solares, 22, 23 y 24, en la Figura 3.4, de abajo hacia arriba, se muestran los histogramas de estos eventos, de acuerdo a su clasificación en la configuración magnética (C_x , E, F^- , F^+ y F_r) (ver subsección 3.1.1). Adicionalmente, comparamos esta evolución con la variación del número de manchas solares durante el mismo periodo de tiempo (datos tomados del sitio <https://www.swpc.noaa.gov/>). En líneas verticales punteadas se indica el mínimo del SC22 y SC23, y en líneas verticales continuas se indican el máximo del SC23 y SC24. Es evidente que la frecuencia de las FR/EMCs observadas durante estos años siguen la tendencia del ciclo solar. Sin embargo, se observa que a pesar que el ciclo solar 23 fue más activo que el ciclo solar 24, hubo una mayor frecuencia de EMCs observadas durante el SC24 que el SC23. Por otro lado, las EMCs que muestran una configuración tipo F_r , (con una rotación entre 90° y 180° en las componentes de su campo magnético), fueron las más frecuentes en observarse durante ambos ciclos solares. Mientras que los eventos complejos (C_x) o aquellas EMCs que no exhiben una

configuración magnética bien definida (E) predominan solamente durante el máximo solar, en particular durante el máximo del SC24.

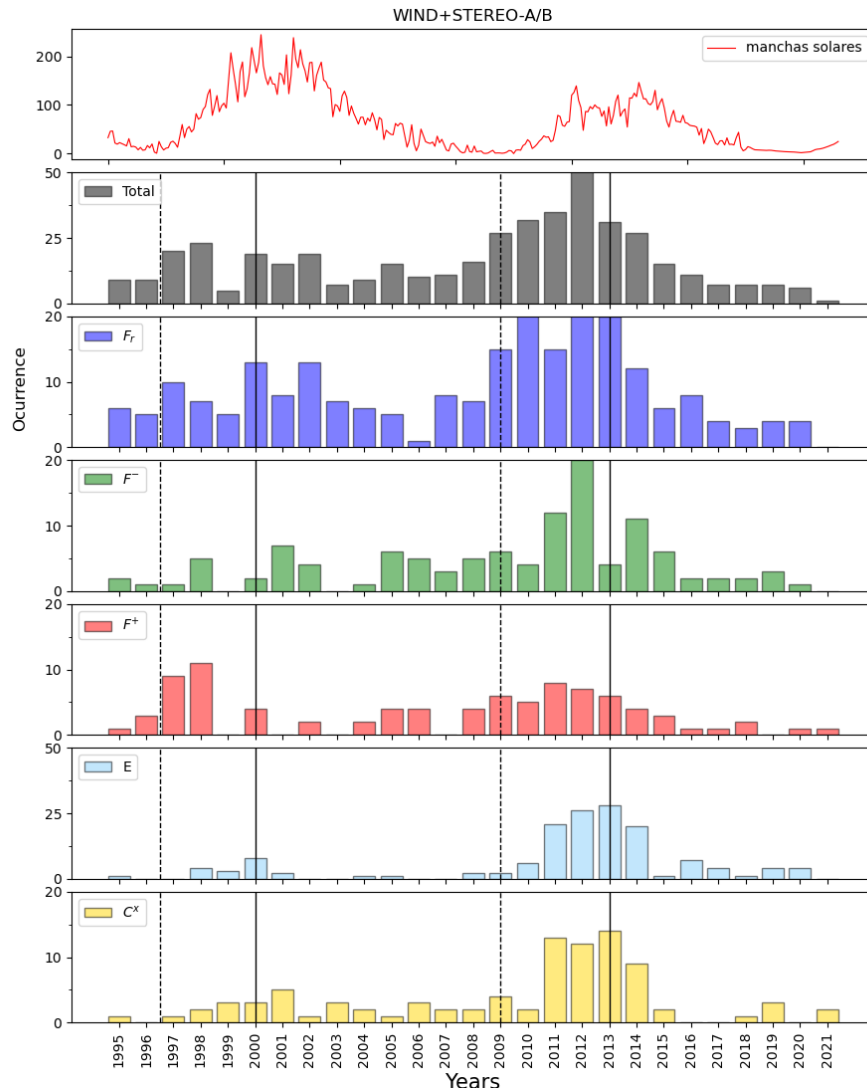


Fig. 3.4.: De arriba hacia abajo, variación temporal del número de manchas solares durante 1995 al 2021. Enseguida, los histogramas representan la población anual de cada una de las categorías de los flux-ropes, (C_x , E, F^- , F^+ y F_r , y el total de los tipo F). Las líneas verticales continuas indican el mínimo solar, así como las líneas verticales punteadas indican el máximo solar, para cada uno de los ciclos solares considerados en este estudio.

En la Tabla 3.2 se muestran los resultados de las EMCs observadas entre 1995 y 2021 correspondientes a cada ciclo solar. Para el SC22 solamente consideramos el final de este (1995 y 1996), el SC23 del 1 de junio de 1996 al 31 de diciembre de 2008, y el SC24 a partir de enero de 2009 hasta el 2021. El SC24 reportó un mayor número de EMCs observadas con un 63%, casi el doble que en el SC23. Así como un mayor número de FRs observadas por cada año, con

23.7 y 13.69, respectivamente. Sin embargo, los valores promedio de la magnitud del campo magnético y parámetros del plasma, son mayores en el SC23 que en el SC24, esto indica que el SC24 fue más débil que el SC23 aunque con una mayor frecuencia de EMCs observadas.

En la Figura 3.5 graficamos la distribución anual de los eventos de EMCs detectados durante 1995 al 2018. En el panel (a), mediante graficas circulares, se muestra cada una de las categorías de EMCs (F_r , F^- , F^+ , y C_x) durante los ciclos solares mencionados anteriormente. En cada ciclo solar, las FRs fueron observados con una mayor frecuencia (45%), mientras que los eventos complejos y F^+ fueron los que se observaron con menor frecuencia (16%). En el panel (b) se muestran las variaciones anuales de flux-ropes (F) y eventos complejos (C_x) durante el mismo periodo de tiempo. De arriba hacia abajo se grafica la variación del número de manchas solares con el fin de evaluar la ocurrencia de los eventos (F y C_x) durante el ciclo solar. En los dos últimos paneles se muestran los histogramas de los flux-ropes y los eventos complejos, en cada color hacemos la distinción de cada misión espacial que observó estos eventos. Mediante líneas verticales punteadas indicamos el mínimo del SC22 y SC23, y las líneas verticales continuas indican el máximo del SC23 y SC24. Durante el máximo del SC23 y SC24, el número de eventos aumentó, esto es evidente ya que el máximo del ciclo solar se caracteriza por el aumento en la frecuencia de eventos solares observados. Por otro lado, la misión Wind observó un mayor número de eventos FRs que STEREO-A/B, esto probablemente debido a que el catálogo que se usó para EMCs observadas por Wind, se descartaron aquellos eventos donde no se detectaron firmas bien definidas por una nube magnética. En general, la variación de eventos FRs domina respecto al total de eventos observados. No obstante, durante los años que observó STEREO-A/B, a excepción de 2011 y 2013, hubo un mayor número de eventos observados C_x respecto a F_r . La razón de esto fue que el catálogo de OM/EMCs por Nieves-Chinchilla et. al (2018, 2019) se centraron principalmente en eventos F_r , que finalizó hasta el 2015.

| Parámetro | SC22 | SC23 | SC24 |
|-------------------------------------|---------|-----------|-----------|
| Número Eventos | 11 (%3) | 227 (%34) | 419 (%63) |
| Número F-Eventos/año | 9 | 13.69 | 23.7 |
| Duración (hr) | 26.5 | 23.57 | 24.61 |
| $\langle B \rangle$ (nT) | 10.4 | 11.12 | 9 |
| $\langle V \rangle$ ($km s^{-1}$) | 379.5 | 465.4 | 407.9 |
| $\langle N_p \rangle$ (cm^{-3}) | 9.8 | 7.2 | 5.9 |
| $\langle q \rangle$ (Pa) | 7 | 7.9 | 5 |
| V_{exp} ($km s^{-1}$) | 15.6 | 24.9 | 22.9 |

Tab. 3.2.: Número de eventos, media del número de eventos por año, duración, y media de la magnitud del campo magnético (B), velocidad del viento solar (V), beta del plasma (β), densidad de protones (N_p), presión dinámica (q) y velocidad de expansión (V_{exp}), para EMCs observadas por Wind, STEREO-A/B durante cada ciclo solar, SC22, SC23 y SC24.

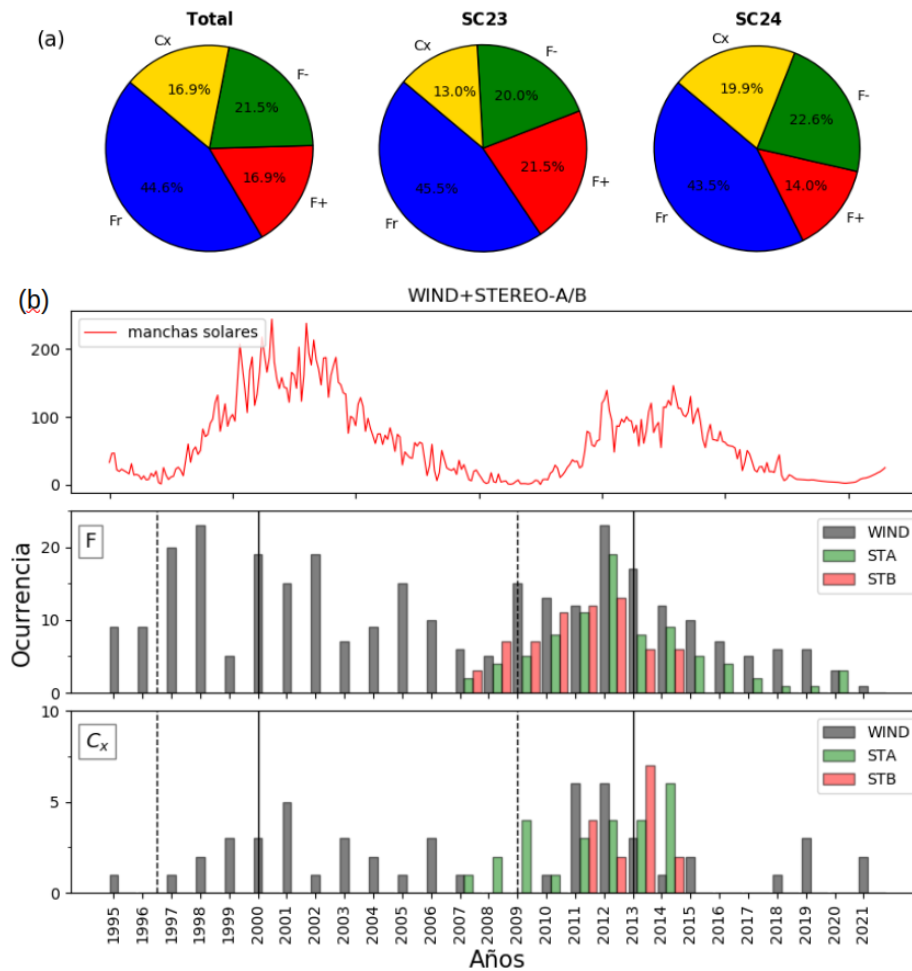


Fig. 3.5.: (a) Frecuencia de las distintas categorías de EMCs (F_r , F^- , F^+ , C_x y E) durante SC23 y SC24. (b) Frecuencia de eventos FR y C_x observados durante 1995 al 2018.

En la sección 3.1.2 introdujimos el concepto de velocidad de expansión (V_{exp}) y parámetro de distorsión (DiP). Ambas cantidades cuantifican el grado de distorsión que es afectado por una sección transversal en el obstáculo magnético. Por definición, el valor de DiP varía de 0 (frente del OM) a 1 (reverso del OM). Valores de DiP < 0.5 implica una compresión en el frente, mientras que DiP > 0.5 , la compresión yace en el reverso. Cuando el valor de DiP se acerca a 0.5 se considera que el obstáculo magnético presenta una simetría en su estructura interna magnética. En las Figuras 3.6 y 3.7, ilustramos el comportamiento en la variación de la compresión tanto en el frente como en el reverso de los obstáculos magnéticos detectados durante 1995 al 2021. En ambos histogramas, se grafica la frecuencia de los valores de DiP (normalizados) para aquellos eventos, F^+ , F^- , F_r , y el total F, donde DiP ≤ 0.5 (Figura 3.6) (es decir, aquellas estructuras magnéticas donde la compresión yace en el frente de éstas), y cuando DiP ≥ 0.5 (Figura 3.7) (donde la compresión ocurre en el reverso de la estructura). En

ambas figuras también se grafica la variación anual en el número de las manchas solares, así como el mínimo y máximo de cada ciclo solar indicado mediante líneas verticales punteadas y continuas, respectivamente.

Se observa que la compresión de las estructuras magnéticas observadas sigue ligeramente la variación con el ciclo solar. Esto indicado en ligeros incrementos en la ocurrencia de los eventos, $F^+ + F^- + F_r$, durante el máximo del SC23 y SC24 (Figura 3.6). Sin embargo, no existe esta tendencia para aquellas estructuras magnéticas donde la compresión se encuentra en el reverso de éstas (Figura 3.7). Por otro lado, en ambas figuras no se muestra una clara tendencia para cada uno de los distintos tipos de FRs (F^+ , F^- y F_r) con el ciclo solar.

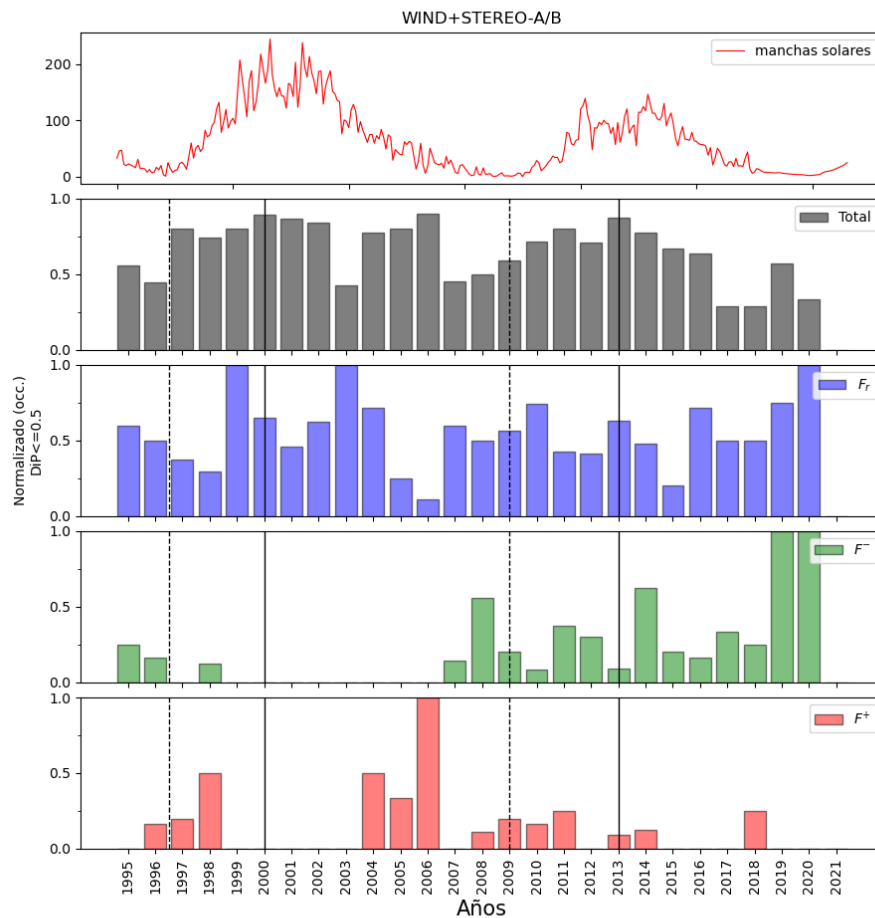


Fig. 3.6.: Histograma de valores de DiP (normalizados) de aquellos eventos (F_r , F^- y F^+) con $\text{DiP} \leq 0.5$ durante el ciclo solar.

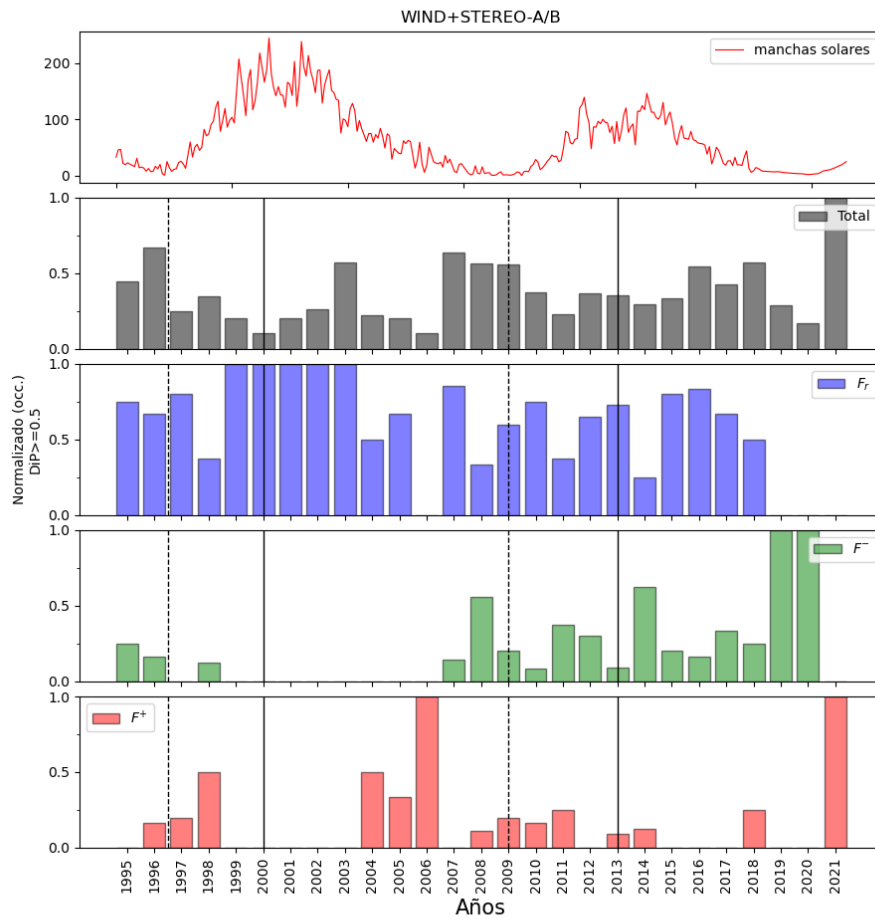


Fig. 3.7.: Histograma de valores de DiP (normalizados) de aquellos eventos (F_r , F^- y F^+) con $\text{DiP} \geq 0.5$ durante el ciclo solar.

A continuación mostramos la frecuencia en los eventos, F_r , F^- y F^+ , durante el ciclo solar dependiendo de la velocidad de expansión. Además, se indica el mínimo y máximo de cada ciclo solar mediante líneas verticales punteadas y continuas, respectivamente. En la Figura 3.8 se muestra el histograma de aquellas estructuras magnéticas que exhiben una expansión en el viento solar, caracterizadas con una velocidad de expansión positiva ($V_{\text{exp}} > 0$). Como se puede observar en la figura, la tendencia de los eventos observados F_r y F^+ sigue el ciclo solar, en particular existe un incremento mayor durante el máximo del SC24. Sin embargo, los FRs tipo F^- no muestran una tendencia clara, a excepción de un ligero incremento durante el máximo del SC24. Lo anterior podría ser un indicativo que las EMCs presentan una mayor expansión

cuando éstas interactúan con el viento solar perturbado.

Por otro lado, en la Figura 3.9 se grafica la ocurrencia de aquellos eventos FRs cuando presentan una compresión, es decir, cuando la velocidad de expansión es negativa ($V_{exp} < 0$). En este caso, existe un número menor de eventos observados durante ambos ciclos solares, y para cada caso, no existe una tendencia clara a través de los años. A excepción de ligeros incrementos durante el máximo del ciclo solar 24. Esto evidenciaría que la compresión del viento solar, dentro de una estructura magnética, no está influenciada por el ciclo solar.

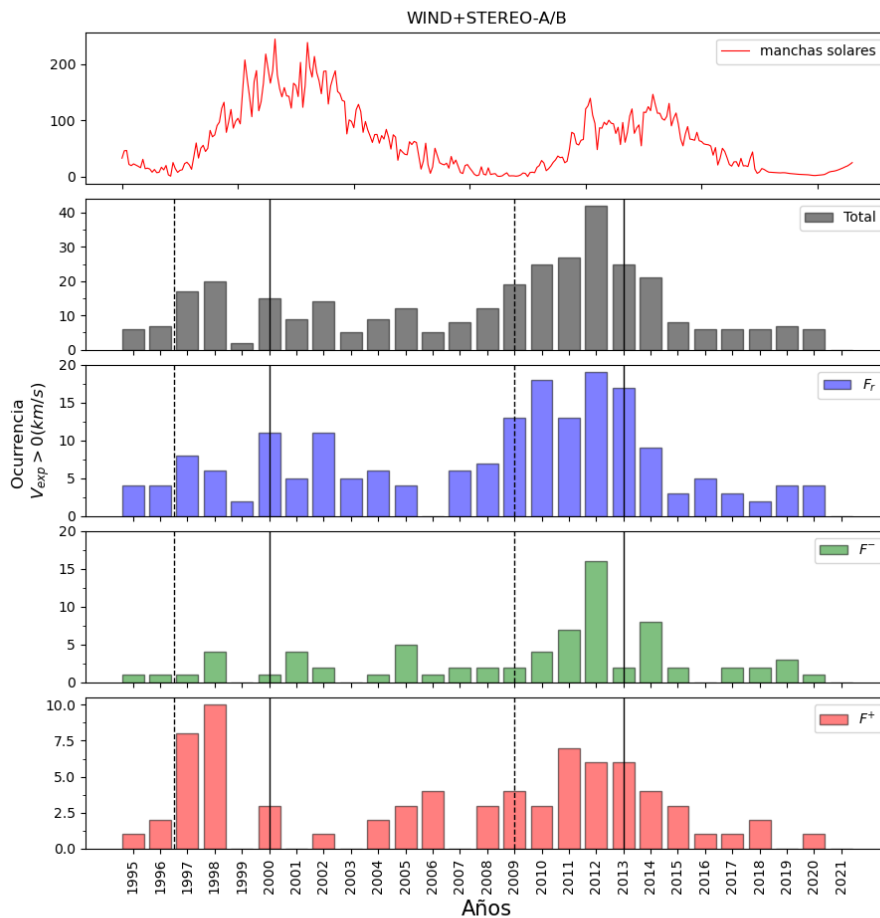


Fig. 3.8.: Histograma de eventos F_r , F^- y F^+ donde la velocidad de expansión es positiva ($V_{exp} > 0$), es decir, aquellas estructuras magnéticas que exhiben una expansión.

Como se mencionó al inicio de este capítulo, en ocasiones se observa una asimetría en los perfiles en la intensidad del campo magnético y viento solar de la estructura interna de las

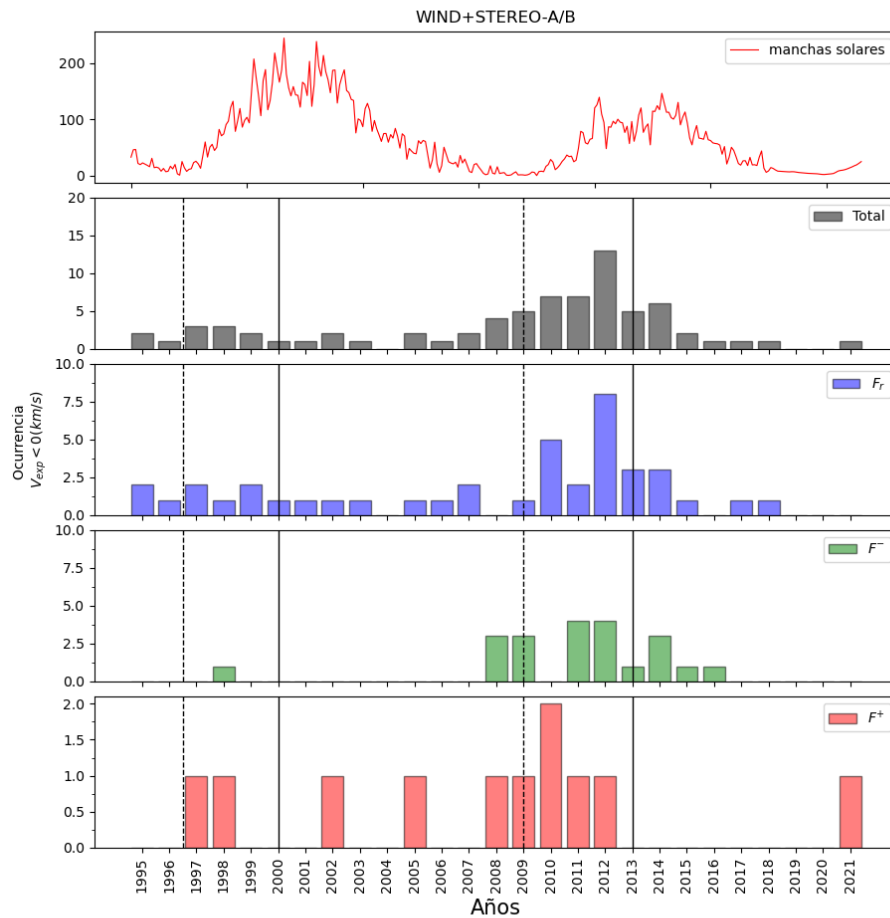


Fig. 3.9.: Histograma de eventos F_r , F^- y F^+ donde la velocidad de expansión es negativa ($V_{exp} < 0$), es decir, aquellas estructuras magnéticas que exhiben una compresión.

EMCs. Esto puede deberse debido al efecto en el tiempo de retardo que existe entre la detección del frente de la EMC respecto al reverso de la estructura. Por lo tanto, en una cuerda de flujo en expansión, el campo se debilitará durante el tiempo en que ésta pase a través de la nave espacial, lo que resultará en una disminución en la intensidad del campo magnético desde el frente hacia el reverso del OM, y una aparente compresión cerca del frente de la estructura. Bajo este escenario, en la Figura 3.10 se muestra una gráfica de DiP vs. V_{exp} dividida en cuatro cuadrantes distintos. El cuadrante A1 corresponde aquellos eventos (F_r , F^- y F^+) con $V_{exp} > 0$ (expansión) y $DiP < 0.5$ (compresión en el frente). Este es el perfil esperado en OM/EMCs, mientras aumenta la velocidad, también lo hace la compresión en la parte delantera. Esto lo

confirma la Tabla 3.3 con un 53% de eventos observados que cumplen estas características, con una media de $V_{\text{exp}} = 40$ km/s, y $\text{DiP} = 0.43$. El caso opuesto se presenta cuando la velocidad de expansión es negativa, por lo que la intensidad en el campo magnético debería de aumentar en el reverso de la estructura y por ende existiría una compresión (cuadrante A3). Solamente el 7% de los eventos se encontraron en esta categoría, con valores promedios de V_{exp} y DiP de -15 km/s y 0.56, respectivamente. Para los cuadrantes restantes, A2 y A4, tenemos distintos casos. En el cuadrante A2 corresponde aquellos eventos con una compresión mayor en el reverso de la estructura ($\text{DiP} > 0.5$), mientras se va expandiendo ($V_{\text{exp}} > 0$ km/s). Una posible interpretación a esto es que la curvatura del flux-robe produce un incremento en la intensidad del campo magnético, en el reverso de la estructura. Por otro lado, en el cuadrante A4, hay una compresión en el frente mientras la velocidad de expansión disminuye, indicando que la estructura se esta contrayendo. En la Tabla 3.3 mostramos también los resultados para cada ciclo solar, con diferencias no significativas para cada uno de ellos.

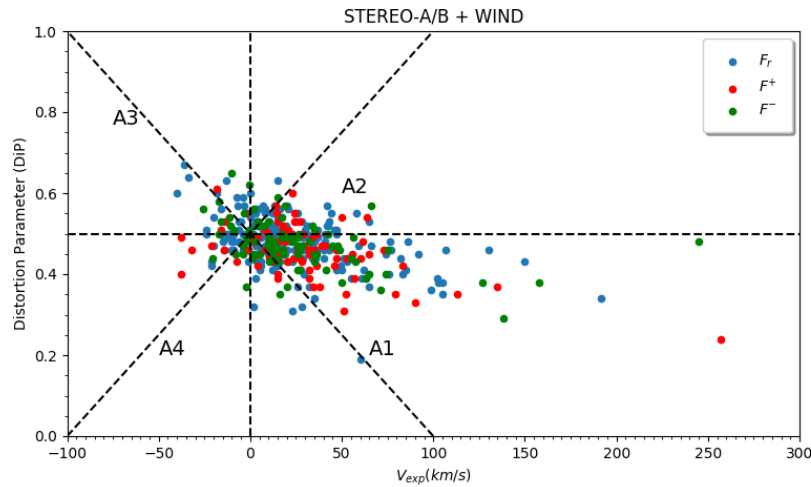


Fig. 3.10.: Parámetro de distorsión vs. velocidad de expansión para eventos F_r , F^- y F^+ . Valores negativos en la velocidad de expansión indica una expansión. El parámetro de distorsión representa una característica en los perfiles de la intensidad del campo magnético, donde $\text{DiP} < 0.5$ la compresión yace en el frente, mientras que $\text{DiP} > 0.5$ la compresión es en el reverso de la estructura.

| Cuadrante | Eventos (%) | V_{exp}^{SC22} | V_{exp}^{SC23} | V_{exp}^{SC24} | \bar{V}_{exp} | DiP^{SC22} | DiP^{SC23} | DiP^{SC24} | $\overline{\text{DiP}}$ |
|-----------|-------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|
| A1 | 53 | 39 | 47 | 37 | 40 km/s | 0.45 | 0.43 | 0.42 | 0.43 |
| A2 | 16 | 4 | 24 | 28 | 26 km/s | 0.53 | 0.55 | 0.55 | 0.54 |
| A3 | 7 | -17 | -13 | -15 | -15 km/s | 0.59 | 0.54 | 0.56 | 0.56 |
| A4 | 9 | - | -31 | -13 | -19 km/s | - | 0.44 | 0.43 | 0.43 |

Tab. 3.3.: Resultados estadísticos y valores promedios (V_{exp} y DiP) de eventos (F) observados en cada uno de los cuadrantes y ciclo solar.

3.1.4 Discusión

El estudio de la configuración magnética en la estructura interna de EMCs aún es tema abierto a la comunidad científica. Esto se debe principalmente a que existe todavía mucha incertidumbre entre distintos modelos de campo magnético, así como modelos de reconstrucción basados en observaciones in-situ. Actualmente, las reconstrucciones in-situ de flux-ropes consideran una geometría cilíndrica circular como una buena aproximación a los datos observados. Esta suposición geométrica requiere un perfil simétrico en la intensidad del campo magnético observado. Sin embargo, las observaciones in-situ suelen mostrar una asimetría en estos perfiles. El objetivo del trabajo mostrado anteriormente, fue cuantificar la relación entre la asimetría observada en la intensidad del campo magnético de obstáculos magnéticos y la velocidad de expansión, con el fin de explorar los distintos panoramas que se puedan presentar.

En este capítulo definimos el término de obstáculo magnético (basado en distintos trabajos de Nieves-Chinchilla et al., 2018, 2019) que considera topologías más complejas y diversas. A través de un estudio estadístico de 653 OM/EMCs observadas durante 1995 al 2021, en conjunto con Wind y STEREO-A/B, estudiamos la variación de los principales parámetros de los OMs durante este periodo de tiempo, así como la relación entre la velocidad de expansión y el parámetro de distorsión.

Los resultados mostrados a 1 UA indican que existe una mayor ocurrencia en observarse EMCs con una estructura magnética bien definida, F_r , F^- y F^+ , con un 65.4%. Mientras que solamente se observaron estructuras complejas (C_x) y eyectas (aquellas que no muestran rotaciones bien definidas) con un 13.28% y 21.3%, respectivamente. Esto puede deberse a distintas razones, una de ellas podría surgir debido a las limitaciones en las observaciones de las misiones espaciales, debido a que éstas solamente detectan una pequeña región de la EMC (con un promedio de 45° de su tamaño angular), por lo que se consideran puntuales. Esto ocasiona que no se observa la estructura magnética de las EMCs o en algunos casos, solamente se detectan los flancos de la EMC, por lo que un solo punto de observación no representa el panorama global de las EMCs. Por lo tanto, una gran parte de EMCs que no se identifican como FRs, corresponden a una cuerda de flujo que no fue detectada por la nave espacial o se encontró demasiado lejos del eje de la cuerda de flujo.

Por otro lado, el análisis estadístico llevado a cabo durante el SC23 y SC24, indicó que, a pesar que el ciclo solar 23, en comparación con el SC24, fue más intenso con un mayor incremento en el conteo de las manchas solares, durante el SC24 hubo una mayor frecuencia de EMCs observadas.

Adicionalmente, se observó que la compresión en el frente de las estructuras sigue el ciclo solar, evidenciando que un viento solar más perturbado distorsiona o modifica la estructura magnética interna dentro de las EMCs. Con un total del 53% del total de eventos (F_r , F^- y F^+), mostraron una compresión en el frente y una velocidad de expansión positiva, este es el perfil esperado

que consideran algunos modelos de reconstrucción magnética. Casos como una expansión y compresión en el reverso (16%), así como una velocidad de expansión negativa y compresión en el frente (9%), son interpretaciones geométricas que consideran efectos en la curvatura de la cuerda de flujo.

Por otro lado, a pesar que en este estudio no se abordó la influencia que tiene el cruce de la nave y la geometría del obstáculo magnético. Distintos trabajos han abordado esta cuestión, Nieves-Chinchilla et al., 2019 mostrarán que, suponiendo una geometría circular-cilíndrica, los eventos F^- son considerados FRs atravesados por la nave espacial con un parámetro de impacto muy grande (la distancia de la nave espacial al centro del flux-rope). Adicionalmente, los FRs tipo F^+ con un parámetro de impacto muy pequeño, es decir, la nave espacial cruza muy cerca el eje de la cuerda de flujo

Con base en lo anterior, se puede concluir que no existe una única configuración magnética en la estructura interna de EMCs, lo cual se tendría que tomar en cuenta en las técnicas de reconstrucción, basados en observaciones in-situ, y de esta manera desarrollar modelos más confiables de flux-ropes. Finalmente, también es importante mencionar que la elección de los límites temporales de una nube magnética es un problema a considerarse, ya que puede llegar a ser totalmente arbitraria por el criterio del autor. Esto puede prestarse a ciertas inconsistencias para definir que tipo de obstáculo magnético se está considerando.

Sin embargo, la interrogante de si la estructura global de los FRs puede estar distorsionada o no, aún está abierta a la comunidad científica.

Análisis estadístico de choques IPs a través de la heliosfera interna

Desde el comienzo de la era espacial, distintas misiones interplanetarias han operado y observado las propiedades del viento solar, así como eventos solares transitorios en la heliosfera interna. La misión soviética Luna 1 (1959) y la sonda americana Mariner 2 (1962) fueron las primeras misiones en estudiar el viento solar, así como en detectar partículas energéticas provenientes del Sol. Posteriormente, Helios-1 y Helios 2, lanzadas en 1974 y 1976, respectivamente, fueron las primeras misiones interplanetarias que estuvieron más cerca del Sol, con un perihelio de 0.29 UA, obteniendo mediciones del viento solar y campo magnético desde esas distancias. En 1990, se lanzó la misión Ulysses para estudiar el viento solar desde altas latitudes solares, con una órbita inclinada a 80° con respecto a la eclíptica, que pasaba sobre los polos solares. Adicionalmente, distintas misiones ubicadas en el punto de Lagrange L1, como ACE, Wind o las sondas STEREO, que ofrecen dos puntos de observación del Sol (uno por delante y uno por detrás de la Tierra), nos proporcionan mejores observaciones in-situ para una mejor comprensión de los fenómenos solares a través del medio interplanetario. Sin embargo, debido a que las mediciones in-situ de las naves espaciales solo proporcionan un único punto de observación en la propiedades de algunos fenómenos solares, tales como los choques interplanetarios y EMCs, éstas se consideran locales por lo que los resultados obtenidos están limitados.

A través de un estudio estadístico de los parámetros del plasma y campo magnético de choques IPs observados por distintas misiones espaciales, desde 0.29 hasta 0.99 UA (Helios-1/2); a 1 UA (Wind, ACE y STEREO-A/B); y de 1.35 hasta 5.4 UA (Ulysses). Se llevó a cabo un análisis de la variación en las distribuciones de los parámetros de los choques, asociados con EMCs y regiones de interacción (RICs), en función con la distancia heliocéntrica. Así como también la correlación que existe entre el ángulo de localización λ (el ángulo entre el vector normal del choque y la dirección radial) con la distancia. Adicionalmente, a través del ángulo de inclinación i (introducido para cuantificar la inclinación entre el vector de proyección $\hat{n}_{shock,yz}$ y la dirección \hat{y}), se exploró la existencia de una posible asimetría, entre la geometría del choque y la dirección de éste, inducida por la espiral de Parker. El artículo derivado de este estudio se adjunta a continuación.

4.0.1 Artículo: Statistical Analysis of Interplanetary Shocks from Mercury to Jupiter

RESUMEN. El estudio de las observaciones in-situ de eyecciones de masa coronal (EMCs) interplanetarias (IPs) y choques IPs son de vital importancia, ya que son los componentes principales de la actividad solar. Cientos de choques IPs han sido detectados por diferentes misiones espaciales en distintos momentos y distancias heliocéntricas. Algunos de éstos van seguidos de sus impulsores claramente identificados, mientras que otros no. En este estudio, llevamos a cabo un análisis estadístico de las distribuciones de los parámetros de plasma y campo magnético de choques IPs detectados a diferentes distancias del Sol. Clasificamos los choques de acuerdo con la distancia heliocéntrica: de 0.29 a 0.99 ua (Helios-1/2); cerca de 1 ua (Wind, ACE y STEREO-A/B); y de 1.35 a 5.4 ua (Ulysses). También distinguimos los choques IPs en dos poblaciones, aquellos con una EMCI detectada y aquellos sin ella. Encontramos, como se esperaba, que no existe una diferencia significativa en los resultados de las naves espaciales posicionadas a 1 ua. Además, las distribuciones de los parámetros del choque, así como el vector normal al choque, no tienen variaciones significativas con la distancia heliocéntrica. Adicionalmente, investigamos cómo el número de choques asociados con regiones de interacción de corriente (RICs) incrementa con la distancia en proporción con las EMCIs/choques. De 1 a 5 ua, la ocurrencia de RICs/choques aumenta ligeramente de 21% a 34%, en contraste con la ocurrencia de EMCIs/choques decrece de 47% a 17%. También encontramos una indicación de una asimetría inducida por la espiral de Parker para las RICs y ninguna para las EMCIs.



Statistical Analysis of Interplanetary Shocks from Mercury to Jupiter

Carlos Arturo Pérez-Alanis¹ · Miho Janvier² · Teresa Nieves-Chinchilla³ · Ernesto Aguilar-Rodríguez⁴ · Pascal Démoulin^{5,6} · Pedro Corona-Romero^{7,8,9}

Received: 29 November 2022 / Accepted: 10 April 2023
© The Author(s) 2023

Abstract

In situ observations of interplanetary (IP) coronal mass ejections (ICMEs) and IP shocks are important to study as they are the main components of solar activity. Hundreds of IP shocks have been detected by various space missions at different times and heliocentric distances. Some of these are followed by clearly identified drivers, while some others are not. In this study, we carry out a statistical analysis of the distributions of plasma and magnetic parameters of the IP shocks recorded at various distances to the Sun. We classify the shocks according to the heliocentric distance, namely from 0.29 to 0.99 AU (Helios-1/2); near 1 AU (Wind, ACE, and STEREO-A/B); and from 1.35 to 5.4 AU (Ulysses). We also differentiate the IP shocks into two populations, those with a detected ICME and those without one. As expected, we find that there are no significant differences in the results from spacecraft positioned at 1 AU. Moreover, the distributions of shock parameters, as well as the shock normal, have no significant variations with the heliocentric distance. Additionally, we investigate how the number of shocks associated with stream-interaction regions (SIRs) increases with distance in the proportion to ICME/shocks. From 1 to 5 AU, SIRs/ shock occurrence increases slightly from 21% to 34%; in contrast, ICME/shock occurrence decreases from 47% to 17%. We also find indication of an asymmetry induced by the Parker spiral for SIRs and none for ICMEs.

Keywords Interplanetary Shocks · Coronal Mass Ejections (CMEs) · Solar Wind Disturbances

1. Introduction

Since the beginning of the space age, several space missions have carried out in situ measurements of the properties of the heliosphere. Space missions, such as Ulysses, focused on studying the solar wind from high solar latitudes, and different missions located at 1 AU, such as ACE, WIND, or the twin STEREO spacecraft, provided us with better in situ observations to improve our understanding of solar phenomena through the interplanetary (IP) medium. Furthermore, new solar missions, such as the Parker Solar Probe (PSP) spacecraft and Solar Orbiter, are currently improving our understanding of solar processes and knowledge of solar wind at different locations in the solar system.

Extended author information available on the last page of the article

The solar wind is characterized by a decrease in its density while we move outward from the Sun into the IP medium. The solar wind does not smoothly flow out, and there is the place where transients such as shocks (Cane, 1985; Cane, Sheeley, and Howard, 1987), coronal mass ejections (CMEs; Gopalswamy, 2006) and stream interaction regions (SIRs) between slow and fast solar winds (Jian et al., 2009) occur. Shocks take place when a wave experiences a steepening process in a collisionless plasma, and the mean free path of particles is around 1 AU (Parks, 1991). When a wave that moves through the magnetized plasma travels faster than the solar-wind Alfvén speed, the amplitude of this wave increases rapidly, and the nonlinear effects become important, so a shock wave eventually occurs (Burgess and Scholer, 2015). The sudden transition between supersonic and subsonic flows across a shock is characterized by an abrupt change in pressure, temperature, density, and magnetic field intensity in the medium (Burlaga and Chao, 1971; Eselevich, 1982; Sagdeev and Kennel, 1991). In the IP medium and close to the Sun, shocks are mainly caused by IP CMEs (ICMEs), when they propagate faster than the fast mode wave speed with respect to the ambient solar wind and expand through the IP medium (Gosling et al., 1968). The solar-wind material behind the shock is named an ICME sheath. Behind the ICME sheath, the region where there are less intense magnetic fluctuations than in the sheath is known as the magnetic ejecta (Winslow et al., 2015). In other cases, shocks can also be generated by the interaction between high- and low-speed solar streams, which form SIRs (Gosling et al., 1972, 1976; Richardson, 2018).

Coronagraphic and heliospheric observations indicate that IP shocks propagate through the solar wind along a broad and roughly spherical front, ahead of plasma and magnetic field ejected from the CME (Hundhausen, 1976). In general, the geometry of the whole ICME/shock structure can be identified as a bubble expanding as it moves away from the solar source (Berdichevsky et al., 2000; Berdichevsky, Lepping, and Farrugia, 2003). However, the true three-dimensional geometry or morphology of the ICME/shock structure has remained not well constrained due to the limitations in identifying and tracking them using the traditional image processing technique (Howard et al., 2006; Ontiveros and Vourlidis, 2009; Thernisien, 2011). Several authors have studied the morphology and propagation of an IP shock through the bow shock and magnetosheath using numerical magnetohydrodynamic (MHD) simulations (Koval et al., 2005; Samsonov, Němeček, and Šafránková, 2006). On the other hand, since measurements detected by in situ spacecraft only provide a single observation point (apart from rare events of longitudinally aligned spacecraft, i.e., during the early mission years of the twin STEREO spacecraft), the in situ data of the ICME/shock properties are considered local, and the obtained results are therefore limited.

In recent years, some studies analyzed the shock properties as a function of their distances to the shock apex. Using a sample of in situ observations by the Ulysses mission, (Hoang et al., 1995) investigated the correlation of the shock strength with the heliocentric distance. This kind of study was extended to shocks detected from 0.28 to 1 AU by Lai et al. (2012). They concluded that there was no correlation between the shock magnetic-field enhancement and the radial distance. Finally, Janvier, Démoulin, and Dasso (2014) and Janvier et al. (2015), from the statistical analysis of a large set of IP shocks observed at 1 AU, found that there is no privileged direction of the shock normal vector around the Sun apex line.

In this study, we aim to understand the spatial and temporal variation of the IP-shock structures throughout different locations in the inner heliosphere. The paper is structured as follows: Section 2 presents the catalogs of IP shocks that we use to form our set of events to be analyzed throughout this study. In Section 3, we investigate at 1 AU the distributions of the upstream/downstream parameters of shocks as well the correlation between the location angle λ (the angle between the shock normal and the radial direction), which allows us to

define the position of the shock crossing of the spacecraft with respect to the shock front for a given shock shape. We extend this study for different heliospheric distances in Section 4 and also explore a possible asymmetry between the shapes of the shock driver with the east/west direction of the structure. We discuss and conclude the study in Section 5.

2. IP Shocks Selection: Catalogs Covering Heliospheric Distances 0.3 to 5.4 AU

2.1. Missions Included in the Present Study

Several authors have previously studied IP shocks using in situ observations. The duration of some space missions has allowed reporting all these IP shocks in catalogs of events spanning a few years up to several solar cycles. Based on these previous studies, we made an inspection throughout different websites and research papers to obtain IP shocks and, if available, ICMEs associated with IP shocks detected at 1 AU and completed the dataset with IP shocks observed by Helios-1/2 as well as Ulysses.

The Helios-1 and Helios-2 space missions were launched in 1974 and 1976, respectively, and covered the heliospheric distance range between 0.29 and 0.99 AU from the Sun. The main purpose of the missions was to make pioneering measurements of the IP medium from the vicinity of the Earth to near the Sun. Measurements of the IP medium were made with the Helios magnetic-field and plasma experiments, described in Neubauer et al. (1976) and Rosenbauer et al. (1977).

For the data at 1 AU, we used a combination of data from the Wind, ACE, and STEREO A-B missions. The Wind spacecraft was launched on 1 November 1994 with the aim of studying the IP medium and its effects on the Earth's magnetosphere. After several orbits through the magnetosphere, the Wind spacecraft was placed in a halo orbit around the L1 Lagrange point, where it currently remains and constantly records measurements of the solar wind from its instruments on board (Ogilvie and Desch, 1997). The main instruments detecting shocks are the Magnetic Field Investigation (MFI, Lepping et al., 1995), the Solar Wind Experiment (SWE, Ogilvie et al., 1995) and the Radio and Plasma Wave Investigation (WAVES, Bougeret et al., 1995).

The Advanced Composition Explorer (ACE) space mission was designed to study space-borne energetic particles and solar-weather monitoring from the Sun-Earth L1 Lagrange point. Since its launch on 25 August 1997, it has continued to provide near-real-time coverage of solar-wind parameters and to measure solar energetic particle intensities. For the shock determination, magnetic-field and plasma parameters are given by the Magnetic Field Instrument (MAG) and the Solar Wind Electron, Proton, and Alpha Monitor (SWEPAM, Smith et al., 1998).

The Solar Terrestrial Relations Observatory (STEREO) is a solar space mission with two identical spacecraft that were launched on 26 October 2006. Once in heliospheric orbit, STEREO-B trails the Earth (at 1.05 AU) while STEREO-A leads it (at 0.95 AU). As viewed from the Sun, the two spacecraft separate at approximately 44 to 45 degrees per year (Kaiser et al., 2008). The data are provided by the instruments IMPACT (Acuña et al., 2008; Luhmann et al., 2008) and PLASTIC (Galvin et al., 2008).

Finally, we also considered data from the Ulysses mission (Wenzel et al., 1992). This mission was unique in the history of the exploration of our solar system: launched in October 1990 to explore the heliosphere within a few astronomical units of the Sun over a full range of heliographic latitudes, passing over the south pole of the Sun in mid-1994 and

over the north pole in mid-1995. Advanced scientific instrumentation on board the spacecraft provides a comprehensive set of observations to study the solar wind at all latitudes. Among the main instruments, the data for the shocks come from the magnetic fields experiment (VHM/FGM, Balogh et al., 1992) and solar wind-plasma experiment (SWOOPS, Bame et al., 1992).

2.2. Interplanetary Shocks, ICMEs, and SIRs Databases

2.2.1. Interplanetary Shock Database

While several papers have reported different catalogs for IP shocks detected by the space missions described above, it is also important that the shock analysis is consistent from one catalog to another. On the one hand, numerous techniques are aimed at determining shock normals, shock speeds, values of upstream/downstream plasma, and field parameters, such as magnetic/velocity coplanarity or mixed mode method (Paschmann and Daly, 1998). On the other hand, the detection of IP shocks depends on the temporal accuracy of the measurements, as well as a definition of what is considered the upstream and downstream intervals of the shock. Therefore, the databases must be consistent from one catalog to another to provide well-documented shocks for future investigations and to evaluate the accuracy of several shock normal determination techniques (Russell et al., 1983).

In our study, we chose the comprehensive Heliospheric Shock Database (HSD) (www.ipshocks.fi/), which provides shock properties detected by different missions (Kilpua et al., 2015). This database was compared with the Harvard Smithsonian Center of Astrophysics Wind shock database (CfA Interplanetary Shock Database), which can be found at lweb.cfa.harvard.edu/shocks/. The latter also provides detailed analyses of IP shocks observed at 1 AU by Wind and ACE spacecraft. Since each database offers different methods to identify and characterize the observed shocks, we compared in Appendix both databases, through the correlation of the shock normal values, derived by different methods, finding that the mixed-mode method offers the best correlations. We found a good agreement between the two databases, which gives us the confidence to use the data within HSD in the following.

In this database, the shocks are identified using two techniques: (1) through visual inspection of the solar-wind plasma and magnetic-field observations, and (2) with an automated shock detection algorithm (see the documentation available on the website, and references therein). For each spacecraft, the parameters available in the database are: the IP magnetic-field vector, the solar-wind velocity and the bulk speed of protons/ions, the solar-wind proton/ion number density, the solar-wind proton/ion temperature or the most probable thermal speed, the spacecraft position, and the shock type (fast forward (FF) or fast reverse (FR)). The upstream and downstream intervals were chosen so that the mean values are taken sufficiently far from the peak of the shock and determined over a fixed analysis interval (~ 8 minutes). Additionally, the number of data points depends on the resolution of the plasma data of each spacecraft and the shock type.

We only considered the FF shocks that propagate away from the Sun. These types of shocks are the most commonly observed in the solar wind up to 1 AU (Pitňa et al., 2021). The FR shocks propagate toward the Sun but are carried outward from the Sun by the solar-wind flow. Additionally, we only considered shocks that satisfy the following upstream/downstream conditions: (1) the magnetic field ratio $B_d/B_u \geq 1.2$, (2) the proton density ratio $N_p^d/N_p^u \geq 1.2$, (3) the proton temperature ratio $T_p^d/T_p^u \geq 1.2$, and (4) the magnetosonic Mach number $M_A > 1$. This allows us to compare our results with the statistical study by Kilpua et al. (2015).

Table 1 Summary of the number of shocks detected at different heliocentric distances by Helios-1/2, Wind, ACE, STEREO-A/B, and Ulysses spacecraft, as well as the sources for the catalogs used.

| Total number of IP shocks | | | | |
|--|---------------|-----------|--------|------------|
| Spacecraft | Time coverage | R [AU] | Source | No. events |
| Helios-1/2 | 1975–1981 | 0.29–0.99 | a | 103 |
| Wind | 1994–2017 | 1 | a | 469 |
| ACE | 1998–2013 | 1 | a | 255 |
| STEREO-A/B | 2007–2014 | 0.95/1.05 | a | 204 |
| Ulysses | 1990–2009 | 1.3–5.4 | a | 238 |
| Number of shocks with an associated ICME | | | | |
| Helios-1/2 | 1975–1981 | 0.29–0.99 | e | 30 |
| Wind | 1994–2017 | 1 | b | 185 |
| ACE | 1998–2013 | 1 | c | 125 |
| STEREO-A/B | 2007–2014 | 1 | d | 98 |
| Ulysses | 1990–2009 | 1.3–5.4 | f | 38 |
| Number of shocks with an associated SIR | | | | |
| Helios-1/2 | 1975–1981 | 0.29–0.99 | e | 9 |
| Wind, ACE and STEREOs | 1994–2017 | 1 | g | 90 |
| Ulysses | 1990–2009 | 1.3–5.4 | h | 80 |

^a ipshocks.fi/.

^b Nieves-Chinchilla et al. (2018).

^c Regnault et al. (2020).

^d Jian et al. (2006, 2013).

^e Lai et al. (2012).

^f Richardson (2014).

^g Jian et al. (2006, 2019).

^h Jian et al. (2008).

2.2.2. ICME Database

Whenever possible, we associate IP shocks with a driver, namely an ICME, by cross-referencing the list of shocks with that of reported ICMEs. Unfortunately, the number of ICMEs detected by the Helios mission being scarce for a statistical study (30 events), we focus here on ICME-driven shocks detected close to the Earth's orbit and Ulysses.

For the near-Earth analysis, we used the Wind data catalog from Nieves-Chinchilla et al. (2018), which can also be found on the Wind NASA website.¹ In this catalog, the authors report the start and end time of the ICME and magnetic ejecta. For ACE data, we used the catalog provided by Regnault et al. (2020) from 1997 to 2017, which is based on the revision of the Richardson and Cane ICME list (Cane and Richardson, 2003; Richardson and Cane, 2010). Finally, Jian et al. (2006, 2013) provide us with an ICME list observed by STEREO-A/B between 2006–2014. For ICMEs observed by Ulysses, we used the list provided by Richardson (2014), which covers three spacecraft orbits, during 1996–2009, along with the

¹ wind.nasa.gov/ICMEindex.php.

Table 2 Number of fast-forward shocks observed by Ulysses, during 1990–2009, organized by different radial and latitude intervals.

| Radial distance [AU] | Heliographic latitude [θ] | | |
|----------------------|------------------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| | $ \theta < 30^\circ$ | $30^\circ < \theta < 60^\circ$ | $ \theta > 60^\circ$ |
| [1, 2.5] | 27 | 5 | 11 |
| [2.5, 4] | 13 | 22 | 7 |
| [4, 5.5] | 133 | 20 | 0 |
| Total | 173 | 47 | 18 |

start/end time of the events, solar-wind parameters during the ICME interval, the spacecraft heliocentric distance, heliolatitude, among others.

Through an inspection of both IP shock and ICMEs databases, we associate each ICME with the closest shock from the HSD list by comparing the time difference of the shock and the disturbance of the ICME. We select events with a time difference of less than two hours between the ICME fronts and shocks, leading to the creation of a catalog of ICME-associated IP shocks observed by all these spacecraft.

2.2.3. SIRs Database

Stream interaction regions (SIRs) are characterized by a fast wind catching up with a slower one. This induces a region of compression, and the total pressure (P_t) reaches a maximum inside. Other characteristics may also be present in SIRs, such as the compression of proton number density and the magnetic field, as well as a significant temperature increase. The plasma flow deflection, both in the preceding and the following fast wind, is also frequently observed. These properties are useful for the better identification of SIRs. We used several catalogs of SIRs around L1: for Wind and ACE we considered the catalog developed by Jian et al. (2006) covering the period of 1995–2004 (Wind) and 1998–2004 (ACE). For SIRs observed by STEREO-A/B, we used the catalog provided by Jian et al. (2019) between 2007–2016. In the case of the Ulysses mission, we used the list of SIR events based on studies developed by Jian et al. (2008) from 1992 to 2005. For each catalog, the authors report the start and end time of the SIRs, whether a forward/reverse shock or an ICME associated with the SIR is detected, the total pressure across the discontinuity and the maximum value of the solar-wind speed, proton temperature and magnetic-field magnitude. In addition, we also use in situ observations of plasma and magnetic field, for each mission, to identify SIRs, following the criteria mentioned above, and complement the catalogs presented.

The numbers of events and results from associating shocks, ICMEs, and SIRs as well as the time coverage, heliocentric distance, and the sources used in this study, are all reported in Table 1.

2.3. Latitude of Shocks Observed by Ulysses

The Ulysses orbit is highly inclined at approximately 80 degrees to the heliographic equator, allowing it to scan the heliosphere at different heliographic latitudes and, in particular, to pass nearly over the poles of the Sun. To investigate shock properties at different heliospheric distances, we first analyze how many IP shocks were observed by the spacecraft within different latitude ranges so as to not mix the latitude and radial dependencies.

To investigate the properties of the IP shocks detected by Ulysses and their behavior throughout Solar Cycle 22 (SC22) and 23 (SC23), the second row of Figure 1 shows the

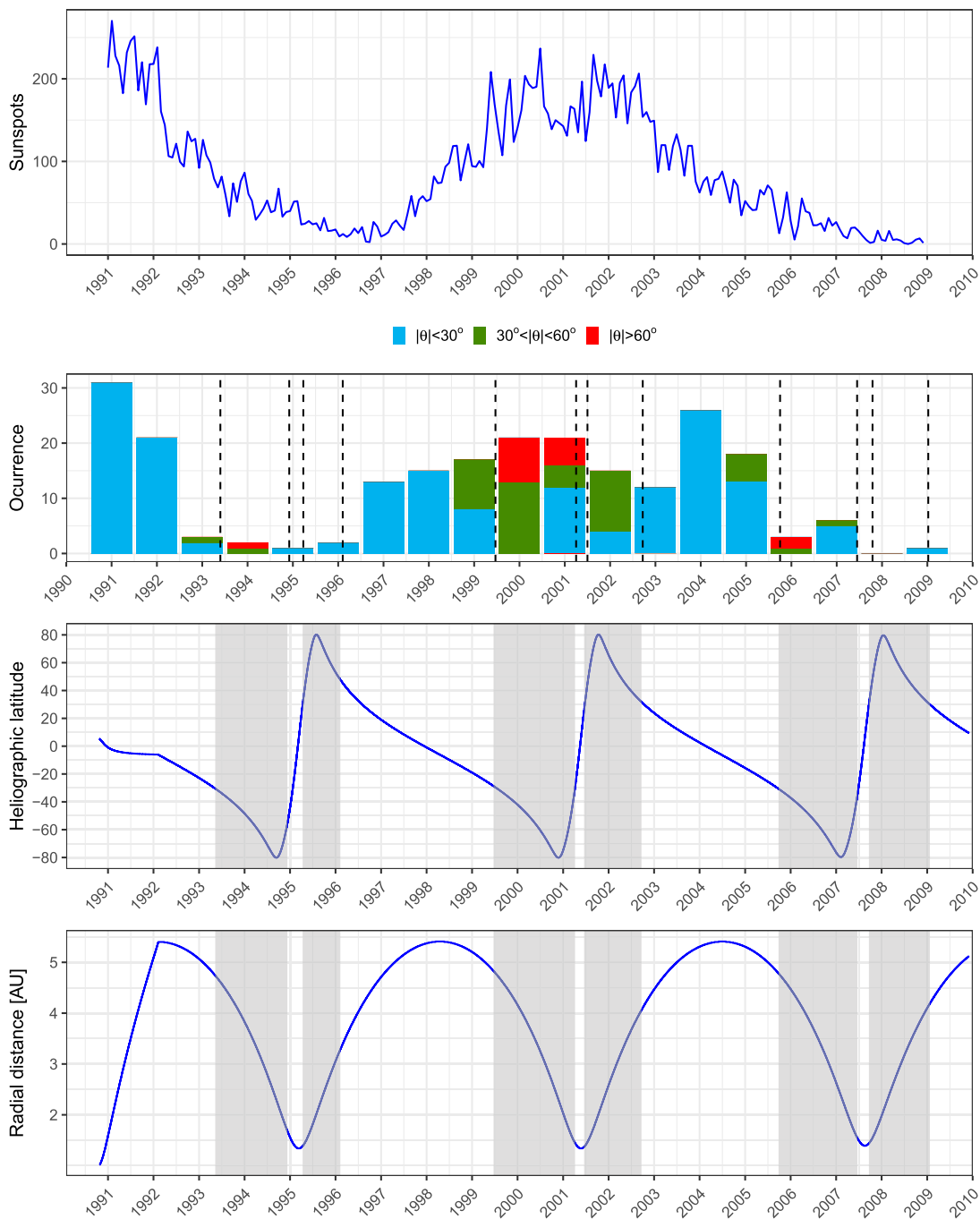


Figure 1 First panel: the sunspot temporal variation between 1991 and 2009 (binned to 12 days). Second panel: distribution of the IP shocks detected by Ulysses represented with a stacked histogram of the occurrence of the shocks for three categories of observed Heliospheric latitude θ : in blue for shocks detected with $|\theta|$ below 30° , in green $|\theta|$ between 30° and 60° , and in red those observed with $|\theta|$ greater than 60° . The third panel shows the Ulysses heliographic latitude of Ulysses, with the shaded area showing the time intervals when Ulysses $|\theta|$ goes above 30° . Finally the last panel shows the radial position of Ulysses.

occurrence of these events. We separate these shocks into three latitude ranges, displayed in a stacked histogram. We compare this evolution with the sunspot-number variation throughout the whole mission in the first row (data taken from the site www.swpc.noaa.gov/). In

Table 2, we indicate the number of all shocks during 1990–2009, separated within three different radial and latitude intervals.

The occurrence of events shows a correlation with the solar activity, with a larger number of events after the maximum of the SC22 (in 1990) and SC23 (in 2000). Next, the radial and latitude position of Ulysses is changing with time (last two rows of Figure 1). The radial evolution could affect the number of detected cases if the angular width of the shocks, as seen from the Sun, evolves with distance. Next, most of the shocks were detected at low latitudes, at less than 30° , and at distances greater than 4 AU, with 133 shocks observed. A possible explanation is that fast and slow winds are found at low latitude (Goldstein et al., 1996; Neugebauer et al., 1998), creating an environment where it is easier to create a shock even with moderately fast ICMEs. These results agree with those of González-Esparza et al. (1996), since they found a decrease in the number of forward shocks, during 1990–1994, at high latitudes (greater than 38°). In the case of CIR-forward shocks, they found that these events are stronger at low latitudes, but weaker and unlikely at high latitudes. We should also note that these detections are also biased by the length spent in these latitude intervals, as Ulysses spent comparatively little time at high latitudes. More precisely, Ulysses spent 3503 days orbiting at less than 30° in absolute heliographic latitude, 2100 days between 30° and 60° , and only 1208 days greater than 60° . Besides, the combination of Ulysses latitude and solar activity modulates the number of shocks in each year. In both sets of solar minimum, in high latitude phases, Ulysses spent many months in continuous fast coronal hole solar wind, and therefore very few shocks were detected, in contrast to the significant number of events even at high latitudes during the solar maximum phases, when coronal streamers and regions of slow solar wind spanned all latitudes.

The event counting is also biased in the radial direction since Ulysses spent a total of 3673 days orbiting between 4 and 5.5 AU, while in the intervals [1,2.5] AU and [2.5,4] AU, respectively, the spacecraft only spent 1414 and 1748 days. Considering that most of the shocks detected at low latitudes were in the interval [4,5.5] AU, we will focus in Section 4 on this interval, which provides a large enough number of cases to investigate statistical distributions. Besides, the other intervals, especially those closer to Earth, are covered by the large statistics at 1 AU.

3. Multi-Spacecraft Analysis of Interplanetary Shocks at 1 AU

In this section, we focus on the results obtained for spacecraft positioned at 1 AU: ACE, Wind and STEREO-A/B. We compare the results with each other and investigate the importance of the resulting differences. We also study the relationship between the shock parameters and the location angle. While a similar study was conducted by Janvier, Démoulin, and Dasso (2014) for shocks at 1 AU, the large coverage of years and spacecraft from the HSD source allows us to look at the results in a more thorough way.

3.1. Comparing Spacecraft Results at 1 AU

Figure 2 shows the shock parameter distributions for all the IP shocks detected by spacecraft positioned around 1 AU, namely by ACE (the first row), Wind (the second row), and STEREO-A/B (the third and the fourth rows). From left to right, we report the distributions of the magnetic-field ratio, the jump in the solar-wind speed, and the proton-temperature ratio at the shock. All the events reported for each spacecraft have been grouped into 24 bins.

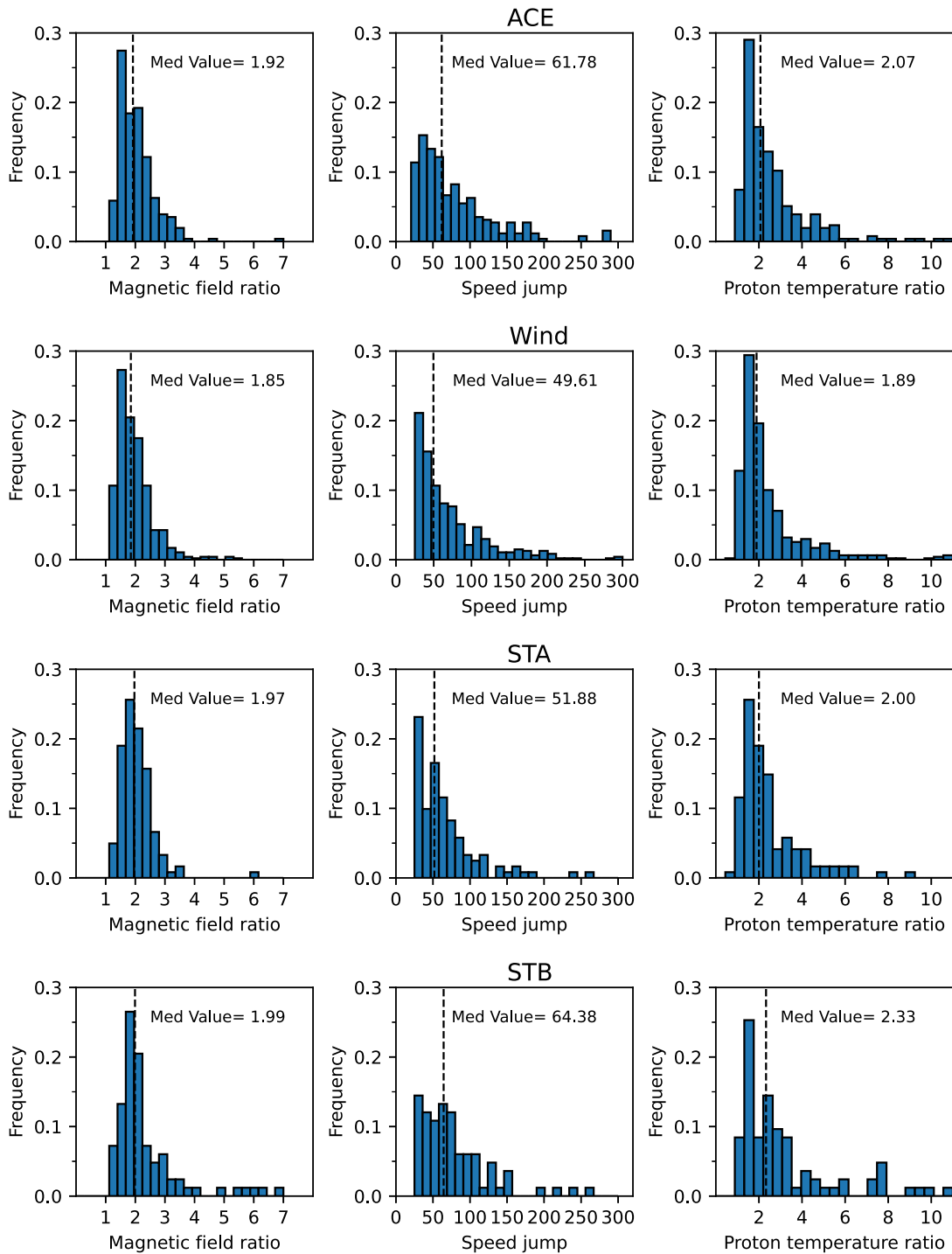


Figure 2 Distributions of the plasma and magnetic properties for all the IP shocks detected at 1 AU. From left to right: the magnetic-field ratio, the solar-wind speed jump, and the proton-temperature ratio. The first row corresponds to shocks detected by ACE, the second row to Wind, and the third and fourth rows to the STEREO-A and B missions. The vertical dashed line indicates the median value of each distribution.

All the histograms display a normalized frequency (probability), allowing a direct comparison between the different rows/columns. We indicate the median value for each histogram with a vertical dashed line.

Table 3 Statistical quantities from the ratio distributions of the IP shocks detected at 1 AU (see [Appendix](#)). The parameters are: the magnetic field ratio B_d/B_u (where the subscript d is for downstream and u for upstream), the proton density ratio N_p^d/N_p^u , the proton-temperature ratio T_p^d/T_p^u , the magnetosonic Mach number M_A , the velocity jump $\Delta V = V_d - V_u$, and the shock velocity V_{sh} . The units of ΔV and V_{sh} are km s^{-1} .

| s/c | Number | Most probable value | | | | | | Median value | | | | | |
|----------------|--------|---------------------|---------------|---------------|-------|------------|----------|--------------|---------------|---------------|-------|------------|----------|
| | | B_d/B_u | N_p^d/N_p^u | T_p^d/T_p^u | M_A | ΔV | V_{sh} | B_d/B_u | N_p^d/N_p^u | T_p^d/T_p^u | M_A | ΔV | V_{sh} |
| ACE | 255 | 1.54 | 1.76 | 1.54 | 1.54 | 41.5 | 462 | 1.9 | 2.0 | 2.0 | 1.7 | 61.8 | 509 |
| WIND | 469 | 1.54 | 1.76 | 1.54 | 1.26 | 30.5 | 462 | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 1.6 | 49.6 | 457 |
| STA | 121 | 1.82 | 1.76 | 1.54 | 1.27 | 30.5 | 374 | 1.9 | 2.4 | 2.0 | 1.4 | 51.9 | 408 |
| STB | 83 | 1.82 | 1.76 | 1.54 | 1.26 | 30.5 | 418 | 1.9 | 2.5 | 2.3 | 1.4 | 64.3 | 423 |
| All spacecraft | 928 | 1.54 | 1.76 | 1.54 | 1.26 | 30.5 | 418 | 1.9 | 2.0 | 1.9 | 1.6 | 55 | 457 |

We find that most of the distributions for the same parameters display similar trends, as seen by the shape of the histograms (Figure 2) as well as the most probable values and medians (Table 3). The distributions for the speed present slight variations between spacecraft results, probably due to the statistical fluctuations. Still, the most probable values do not present important variations from one spacecraft to another.

More precisely, the distributions of the magnetic-field ratios start with an abrupt increase to the peak and a tail extending toward ~ 4 . The speed jump and the temperature ratio distribution show a similar tendency, with a shape similar to a Gamma distribution. Quantitative results are summarized in Table 3. The standard deviations obtained with different spacecraft are similar, then we only report the standard deviation grouping all the spacecraft data: $\sigma_{B_d/B_u} = 0.69$, $\sigma_{N_p^d/N_p^u} = 1$, $\sigma_{T_p^d/T_p^u} = 2.62$, $\sigma_{M_A} = 0.89$, $\sigma_{\Delta V} = 51 \text{ km s}^{-1}$, and $\sigma_{V_{sh}} = 151 \text{ km s}^{-1}$. These values are lower than the median values as shown in Table 3.

In conclusion, we do not find major differences between the 4 different spacecraft positioned at 1 AU, especially when considering the spacecraft with the highest number of detected shocks (ACE and Wind). This is expected for ACE and Wind, which are both spatially and temporally close. Within the limitation due to statistical fluctuations of STEREO results, this is extended to broader longitude and time differences.

We further investigated the evolution of the parameters with the solar cycle and found no significant variations with the solar cycle (not shown). This agrees with Figure 3 of Kilpua et al. (2015), where the authors presented the solar cycle variations of annual medians of the shock parameter between 1993 to 2013. They found no significant variations in the shock parameters with the solar cycle, and our study confirms this.

3.2. Properties Distributions of IP Shocks, with and without a Detected ICME

Having checked that there are no significant biases between different spacecraft, we next investigate whether shocks with a detected or a non-detected ICME are different at 1 AU.

Figure 3 shows the distributions of all the shock properties shown in Figure 2 for all the spacecraft considered together. Since Wind and ACE are orbiting around L1, in some cases, the same shock has been observed for both spacecraft. Therefore, for these events, we might be adding the same shock twice in our statistics. To solve this, we compared the starting time of each event for Wind, ACE, and STEREO-A/B. Then, we set an interval of 2 hours, $|t_{\text{Wind}} - t_{s/c}| < 2 \text{ h}$, as a condition to consider that two events are the same (where the subscript “s/c” represents ACE or one of the STEREOs). We, therefore, end up keeping

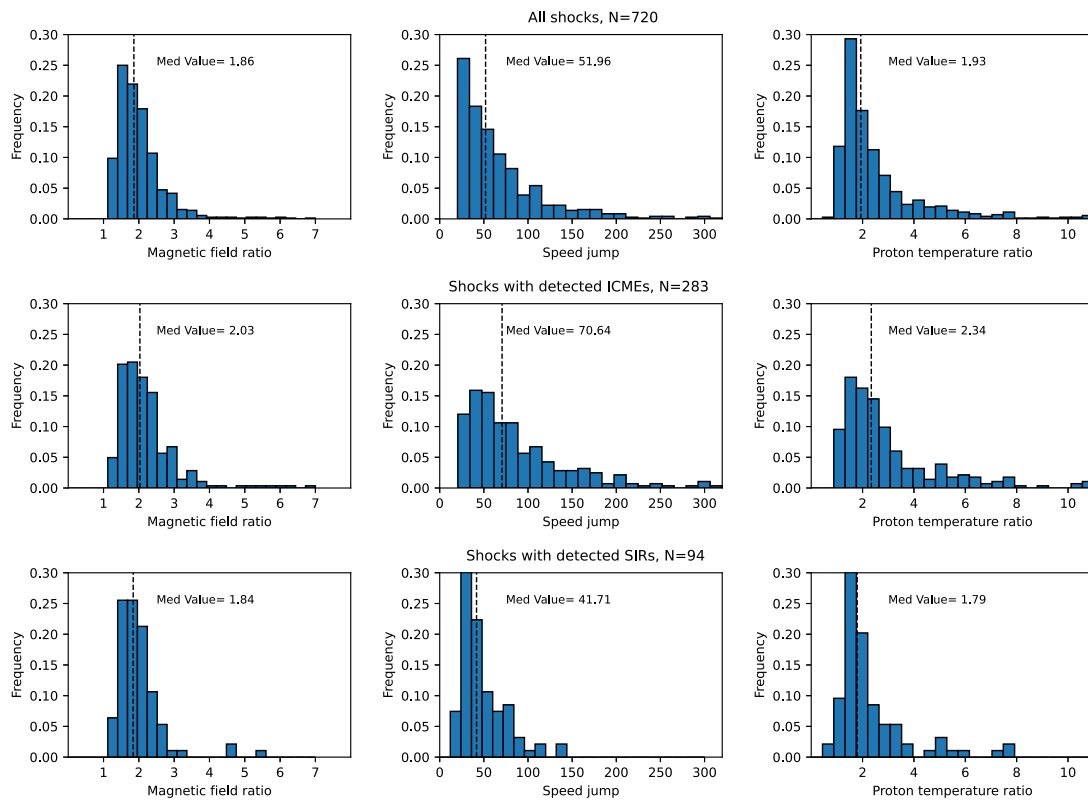


Figure 3 Distributions of the IP shock ratio properties using observations at 1 AU. From left to right: magnetic-field ratio, solar-wind speed jump, and proton-temperature ratio. The first row indicates all the shocks reported at 1 AU, keeping only Wind data for shocks observed by several spacecraft. The second row corresponds to all shocks with a clearly identified ICME in the downstream region of the shock, and the third-row shocks with SIRs detected. The dashed line indicates the median value of each distribution.

only the Wind events and removing from the list the same events observed by ACE and STEREOs. In total, we found 235 events that met this condition and were discarded from the overall 1 AU shock list.

In Figure 3, in the first row, we report all the IP shocks; in the second row, all the IP shocks with a clearly identified magnetic ejecta in the downstream region of the shock; and in the third row, IP shocks with SIRs detected. The total number for each category is indicated in the title of each row, and the median value of each distribution is also indicated. We also report in Table 4 the most probable value and the median value for each distribution, as well as the median values obtained in Kilpua et al. (2015) for shocks detected with a following ICME and shocks with a SIR detected.

Overall, the distributions of Figure 3 follow the same tendencies as reported in Figure 2, with similarities to the results found by Janvier, Démoulin, and Dasso (2014) with fewer shocks. However, with the higher number of cases studied here, we also find some differences when comparing the second and third rows. For all the parameters, we find that the spread of the distributions is larger for shocks with a detected ICME, with a tail that is longer toward the higher values of each parameter. This is probably due to the fact that ICME/shocks have a longer tail composed of stronger shocks than SIR/shocks since the observations made with these spacecraft and even more with Ulysses showed that the fast coronal hole wind (which drives SIRs) has an upper limit of speeds around 800 km s^{-1} while ICME shocks can exceed this, with occasional events exceeding 1000 km s^{-1} . This implies

that the width of the distribution of the parameters is smaller in the case of the shocks with a detected SIR.

Table 4 shows that our values are similar to those reported in Kilpua et al. (2015) for shocks detected with a following ICME. The magnetic field, proton density ratio, and speed shock are the same. However, the Mach number is higher (2.1) for Kilpua et al. (2015) compared to our value of 1.7.

In the case of shocks with detected SIRs, the values are similar, with the exception of the shock speed and Mach number that are higher for Kilpua et al. (2015). The standard deviations do not present important changes for each set of data (they are similar to the values given in Section 3.1). Furthermore, Kilpua et al. (2015) found that CME-driven shocks are, on average, slightly stronger and faster and show broader distributions of shock parameters than the shocks driven by SIRs. We found the same result in our sample.

The similarity of the distribution shapes, as well as the proximity in the values of the maximum values for all the parameters, indicate that the most typical shocks with and without a detected ICME are similar therefore confirming the conclusion from Janvier, Démoulin, and Dasso (2014) that shocks at 1 AU are most likely to be ICME-driven, while the detection of magnetic ejecta is not necessarily made in situ. Indeed, the results derived by Richardson (2018) and Lai et al. (2012) show that the shocks driven by ICMEs often form well inside 1 AU. Furthermore, the rate of shocks associated with ICMEs only changes slightly with solar distance, increasing from 0.72 to 1 AU, then decreasing slightly beyond 1 AU (Jian et al., 2008). In contrast, the occurrence of shocks associated with SIRs increases with heliocentric distance. They are less frequent within 0.5 AU of the Sun (at a low rate of around one shock every 200 days) than at 0.5–1 AU (around one shock per 100 days to the Sun), and by 3–5 AU, over 90% of interaction regions were found to have forward shocks and 75% have reverse shocks, far higher rates than found at 1 AU or at Helios (Richardson, 2018). Indeed, SIR-driven shocks were reported to start forming at 0.4 AU (Lai et al., 2012), and the shock association rate with SIRs increases rapidly, from 3% to 91%, as they evolve from 0.72 to 5.3 AU (Jian et al., 2008).

3.3. Geometrical Properties of the Shocks

In the previous studies by Janvier, Démoulin, and Dasso (2014) and Janvier et al. (2015), the generic shape of the shock front of ICMEs was characterized by a statistical study of shock orientations from in situ spacecraft data at L1. To do so, the authors introduced the location angle λ defined as the angle between the shock normal $\hat{\mathbf{n}}_{\text{shock}}$ and the radial direction $-\hat{\mathbf{x}}_{\text{GSE}}$. The location angle λ can be directly deduced from the components of the normal vector $\hat{\mathbf{n}}_{\text{shock}}$ as:

$$\tan \lambda = \sqrt{n_y^2 + n_z^2} / n_x. \quad (1)$$

For ICME shocks, this parameter is linked to the relative position of the spacecraft crossing the shock. If the location angle $\lambda \sim 0^\circ$, then the spacecraft has crossed the IP shock close to its apex, while an increasing value of $|\lambda|$ up to 90° means that the spacecraft is crossing away from the “nose” of the shock (see Figure 4a).

It is possible to deduce the mean shape of the shock front comparing between the observed distribution of the shock orientations and the synthetic distribution of the parameter λ . The distribution of the location angle can then be used to infer the general structure of the shock in front of ICMEs (see, e.g., Janvier, Démoulin, and Dasso, 2014). Furthermore, the

Table 4 Most probable values, medians, and standard deviations of the distributions of parameter defined in Table 3 caption for IP shocks detected at 1 AU, with a detected ICME and a detected SIR, compared with the results of Kilpua et al. (2015) of IP shocks with a detected ICME and SIR, respectively.

| Data sets | N | Most probable value | | | | | | Median value | | | | | | Standard deviation | | | | | |
|--------------------------------|-----|---------------------|------------|---------------|---------------|----------|------|--------------|------------|---------------|---------------|----------|------|--------------------|------------|---------------|---------------|----------|------|
| | | B_d/B_u | ΔV | N_p^d/N_p^u | T_p^d/T_p^u | V_{sh} | MA | B_d/B_u | ΔV | N_p^d/N_p^u | T_p^d/T_p^u | V_{sh} | MA | B_d/B_u | ΔV | N_p^d/N_p^u | T_p^d/T_p^u | V_{sh} | MA |
| All shocks | 720 | 1.54 | 30.5 | 1.76 | 1.54 | 418 | 1.3 | 1.9 | 2.0 | 1.9 | 450 | 1.5 | 0.7 | 51 | 1.1 | 2.7 | 146 | 0.8 | |
| ICME/shocks | 283 | 1.57 | 45.6 | 2.2 | 1.37 | 467 | 1.2 | 2 | 2.2 | 2.3 | 488 | 1.7 | 0.8 | 61 | 1.2 | 3.3 | 178 | 1.1 | |
| Kilpua et al. (2015) with ICME | 351 | - | - | - | - | - | - | 2 | 2.2 | - | 482 | 2.1 | - | - | - | - | - | - | - |
| SIR/shocks | 94 | 1.5 | 31.8 | 1.8 | 1.3 | 412 | 1.2 | 1.8 | 2 | 1.8 | 402 | 1.4 | 0.6 | 25.7 | 1 | 1.3 | 78 | 0.4 | |
| Kilpua et al. (2015) with SIR | 131 | - | - | - | - | - | - | 1.7 | 1.9 | - | 415 | 1.8 | - | - | - | - | - | - | - |
| shocks w/o detected ICME/SIR | 343 | 1.54 | 31.8 | 1.4 | 1.37 | 413 | 1.3 | 1.7 | 1.8 | 1.7 | 441 | 1.4 | 0.5 | 41 | 1 | 2.3 | 118 | 0.6 | |

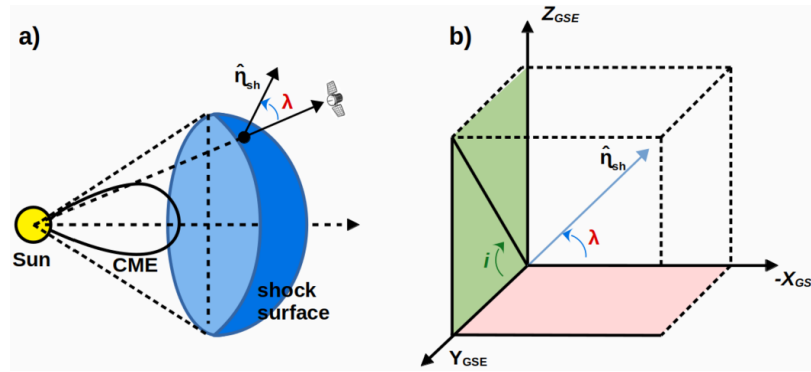


Figure 4 Illustration of the generic shape of the shock front represented by geometric values in GSE coordinates: **a)** the shock surface is represented here as driven by an ICME. **b)** The location angle λ is the angle between the shock normal vector $\hat{\mathbf{n}}_{\text{shock}}$ and the radial direction $-\hat{\mathbf{x}}_{\text{GSE}}$, and the inclination angle i measures the inclination between the projected vector $\hat{\mathbf{n}}_{\text{shock,yz}}$ and the direction $\hat{\mathbf{y}}$.

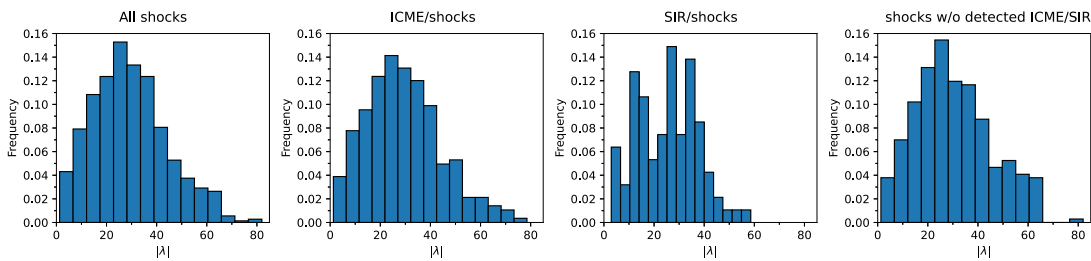


Figure 5 Distributions of the location angle λ using observations at 1 AU. From left to right: all shocks, the next panel corresponds to all shocks with an ICME detected, the third panel the shocks with detected SIRs, and the last panel shocks without detected ICMEs/SIRs.

location angle can be used to study the distribution of the shock properties along the shock, from the nose to the wings (see, e.g., Démoulin et al., 2016).

Figure 5 shows the distribution of the λ angle for shocks detected at 1 AU for each category. We found similar distributions for shocks detected with ICMEs and those with non-detected ICMEs. Both distributions have similar shape and the same trend, with an abrupt increase at low $|\lambda|$ values and a similar peak location. A slight difference is for the tails. The distribution of shocks with detected SIRs indicates that there are less shocks associated with SIRs for large $|\lambda|$ values.

A second parameter is the inclination angle i on the ecliptic, introduced to quantify the inclination between the projected vector $\hat{\mathbf{n}}_{\text{shock,yz}}$ (orthogonal to $-\hat{\mathbf{x}}_{\text{GSE}}$) and the direction $\hat{\mathbf{y}}$ (defining $i = 0$ in GSE coordinates), directed toward the solar east, where i ranges from -180° to 180° (see Figure 4b).

With the coordinate system for spacecraft near Earth, the x -axis is toward the Sun, and the z -axis is directed northward, while y -axis completes the orthonormal direct base. We define the value of i as:

$$i = \text{atan2}(\mathbf{n}_z, \mathbf{n}_y). \quad (2)$$

In the RTN system, R is radially outward from Sun. T is roughly along the planetary orbital direction; N is northward; and the RN plane contains the solar rotation axis. Keeping

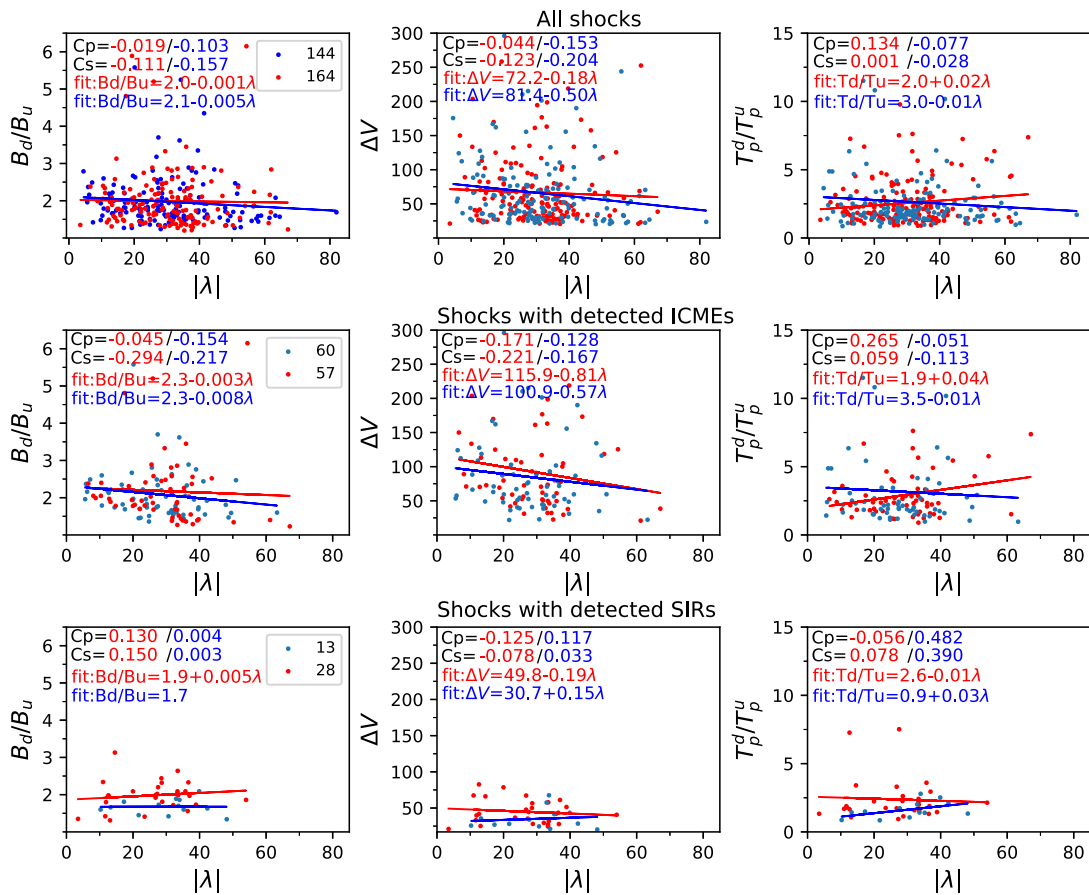


Figure 6 Correlations between λ and the shock parameters for different datasets at 1 AU. The first row corresponds to all IP shocks, the second row to shocks associated with an ICME, and the third row to shocks with detected SIR. In blue are shocks with their normal mostly directed in the solar east direction (with i between $[320^\circ, 40^\circ]$ with GSE coordinates), and in red in the west direction (i between $[140^\circ, 220^\circ]$). The Pearson, C_p , and Spearman, C_s , correlation coefficients are given, as well as the fit function.

the solar east for the origin of i :

$$i = \text{atan2}(\mathbf{n}_N, -\mathbf{n}_T). \tag{3}$$

Figure 6 shows the correlations between the λ angle and the shock parameters (magnetic-field ratio, speed jump, and proton-temperature ratio) at 1 AU for all the IP shocks in the first row, shocks with a detected ICME in the second row, and shocks with a detected SIR in the third row. The Pearson and Spearman coefficients (C_p and C_s) are given for each distribution as well as the linear fitting function. The red/blue codes east/west directions. We analyze below first the red/blue results together before investigating a possible east/west asymmetry.

We examined possible tendencies between the shock parameters with the location angle λ along the shock structure. For the whole data set, the absolute values of the correlation coefficients show that none of the shock parameters, apart from V_{sh} , is correlated with the location λ angle. As in Janvier, Démoulin, and Dasso (2014), the shock speed, V_{sh} , is related to its local radial velocity, V_ρ , away from the Sun, with the expression $V_{sh} = V_\rho \cos(\lambda)$. In the simplest case of a self-similar expansion of an ICME propagating through the solar wind, the outward velocity of the ICME is expected to be radial. In this context, we expect a $\cos(\lambda)$ -

dependence of V_{sh} , where V_{ρ} is independent of λ with shocks. So, the weak dependence of V_{sh} is a projection effect.

We investigate a possible asymmetry between the shape of the ICME shock, related to the interaction with the Parker spiral, so a possible east/west asymmetry. The east/west direction is defined by the solar convention. For that, we select from the whole data set two ranges of i : in blue color for those shocks where the angle i is between $[320^{\circ}, 40^{\circ}]$ in GSE coordinates, corresponding to the east direction ($\pm 40^{\circ}$), and in red color for those shocks with i between $[140^{\circ}, 220^{\circ}]$, corresponding to the west direction. We did not find a significant east-west asymmetry (only three parameters are shown in Figure 6, while similar results are obtained for the other plasma parameters as the ones included in Table 4).

In summary, having found no relevant correlations between the shocks parameters and λ , we confirm with a bigger sample of IP shocks the results previously found by Janvier, Démoulin, and Dasso (2014). The shock shape, deduced from λ distribution, does not depend on any parameter of the shocks, i.e., statistically, the shock has a comparable shape regardless of its ICME driver.

4. Statistical Analysis of Shock Properties at Different Heliospheric Distances

In the following section, we analyze the distributions of IP shocks properties and their possible evolution at different heliocentric distances using Helios-1/2, 1 AU spacecraft, and Ulysses data for all the IP shocks detected at different intervals of distances from 0.3 to 5.5 AU.

In Figure 7, we present the distributions of the shock properties reported at $[0.3, 0.8]$ AU by the Helios missions, then at 1 AU and by Ulysses spacecraft at three different distances intervals, $[1, 2.5]$, $[2.5, 4]$, and $[4, 5.5]$ AU, and also at low latitudes $\pm 30^{\circ}$ degrees. For the cases at $[0.3, 0.8]$ AU, $[1, 2.5]$ and $[2.5, 4]$ AU the histograms present irregular shapes due to the low number of events.

4.1. Evolution of Shock Properties with Solar Distance

The distributions of the shock parameters are shown as a function of the solar distance in Figure 7. To outline the radial variation of the mean and median values of the shock properties, we have fitted these quantities using a quadratic regression (Figure 8). We separate shocks with an ICME, solid-line, and shocks without an ICME (excluding the SIR shocks), dotted line. For both data sets, the green symbols and lines indicate the mean values, and the red symbols and lines represent the median values.

The colored symbols in Figure 8 show more deviations of the mean than the median compared to the global change with distance outlined by the quadratic regressions. Indeed, Figure 3 shows distributions with elongated tails for large values. These tails have a low number of cases, so they are more affected by statistical noise than the distribution core. This result at 1 AU extends to other distances (Figure 7). The mean is sensitive to the presence of large values in the tail, while the median is more robust to these outliers, then the results with the median are more robust to the statistical fluctuations, so medians are more trustable.

With the quadratic fit, which has only three free parameters, the results, obtained in five distance intervals, are coupled together. This implies that the fitted polynomials are less sensitive to statistical fluctuations than within individual intervals. In particular, the fits of the means and of the medians are nearby with all the parameters (Figure 8). Then, while the

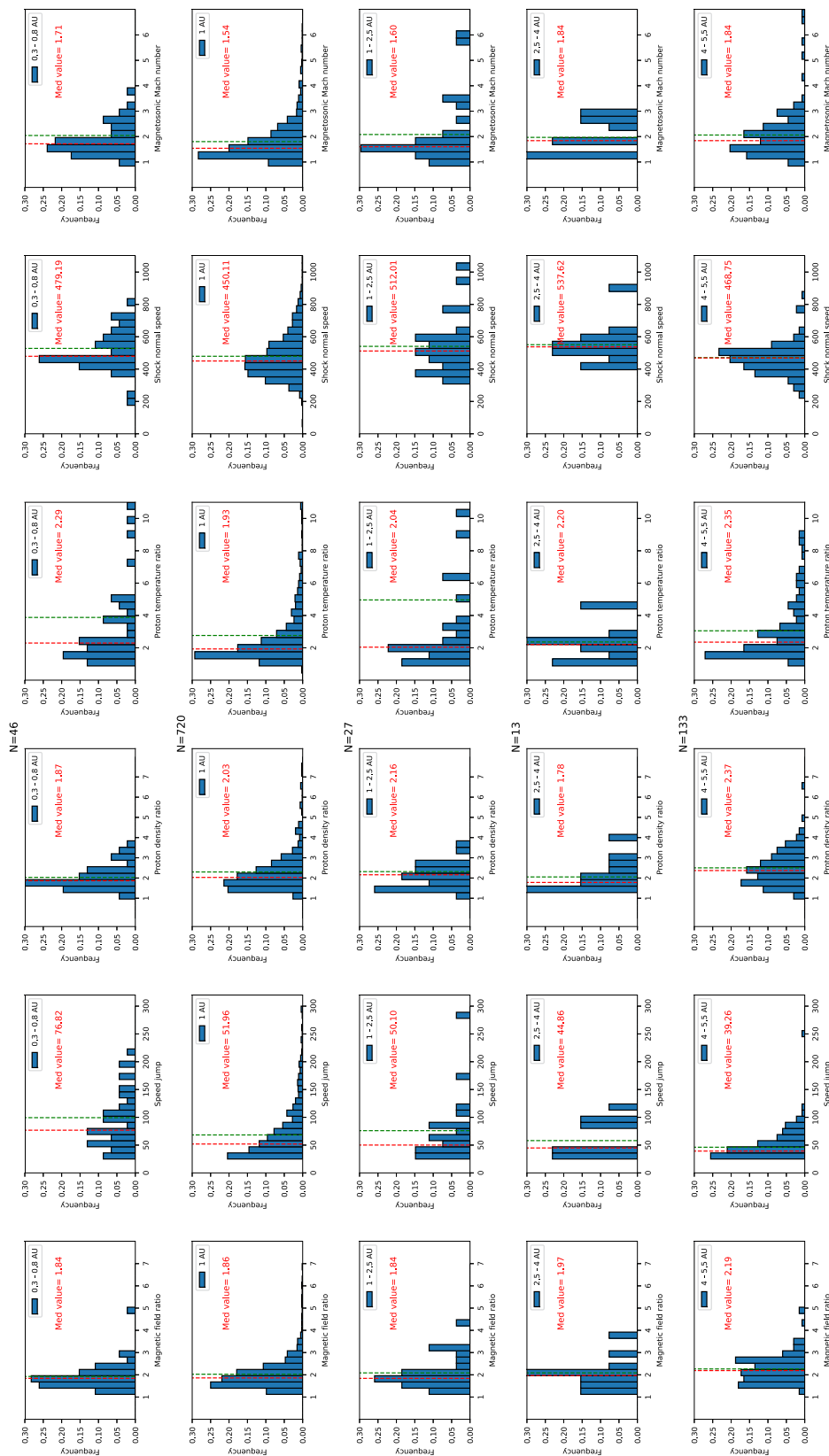


Figure 7 Distributions for all shocks, at different heliocentric intervals, of the magnetic-field ratio, the speed jump, the proton-density ratio, the proton-temperature ratio, the shock normal speed and the magnetosonic mach number. From top to bottom, the rows are for all the shocks reported at [0.3,0.8] by Helios missions, then by 1 AU missions. And finally, by Ulysses spacecraft at three different distances intervals, [1,2.5], [2.5,4] and [4,5.5] AU, and at low latitudes $\pm 30^\circ$ degrees, as well. Green and red dashed-lines indicate the mean and median value, respectively.

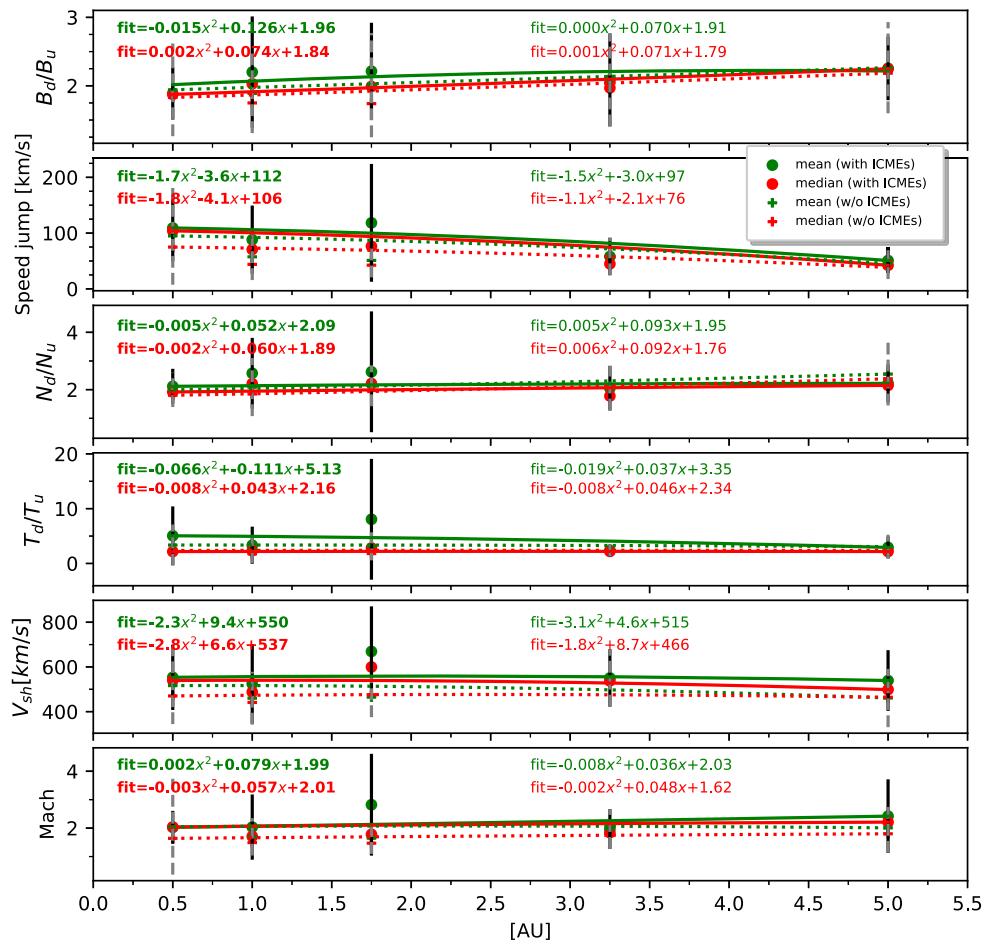


Figure 8 Variation of the mean (green line) and median (red line) values of the shock ratio properties, from 0.3 to 5.5 AU, for shocks with ICMEs (solid line) and shocks without ICMEs (excluding the SIR shocks) detected (dotted line). In each panel, the general trend of the mean and median values are indicated using a quadratic regression, and the standard deviation of each point is indicated as error bars.

number of shocks is limited, especially with Ulysses data, the quadratic fits are expected to provide robust enough results.

While the fits are quadratic, the results for all parameters are nearly linear with distance. The largest curvature is obtained with speed jump ΔV , but within the error bars this curvature is likely not trustable. The field ratio, B_d/B_u , has the largest increase with distance. This increase is still relatively modest, about a factor of 1.17 from 0.5 to 5 AU. This means that B_{up} is decreasing faster than B_{down} with the distance. This may be due to the strong decrease of the magnetic field in the ambient solar wind with distance from the Sun, as well as the greater presence of rarefaction regions between SIRs reducing the background field at further distances. Both the speed jump ΔV and the shock speed have a moderate decrease by a factor of 0.45 and 0.89 from 0.5 to 5 AU, respectively. Other parameters remain constant within the error bars. We also investigated the radial variations of the distributions of IP shock properties with a detected SIR (not shown here). However, we found no significant evolution with distance, probably, due to the few events detected.

In summary, the shock properties have a weak evolution with heliocentric distances. This agrees with results obtained by Lai et al. (2012) of radial variation of IP shocks from 0.2 to 1 AU. This weak evolution of the shock parameters contrasts with the intrinsic change of

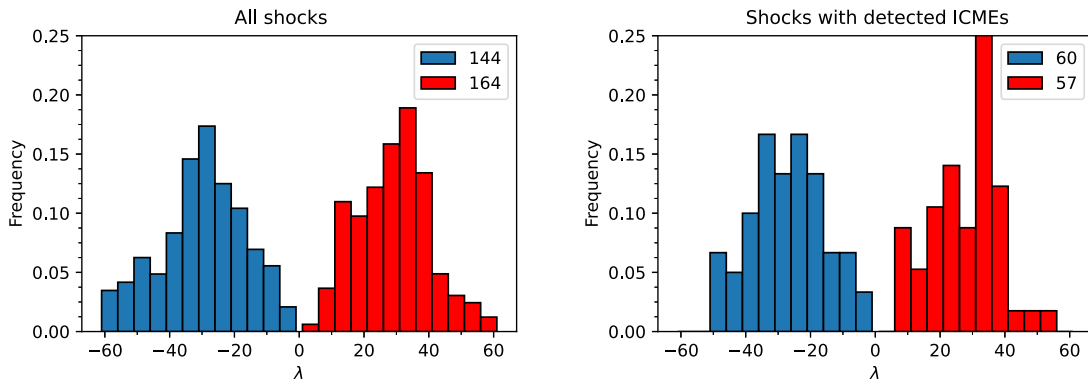


Figure 9 Distributions of the location angle λ using observations at 1 AU with on the left all shocks reported at 1 AU, and on the right, all shocks with an ICME detected behind. The shock normals directed eastward, with i between $[320^\circ, 40^\circ]$, are set to artificial negative λ values and are shown in blue. The shock normals directed westward, i between $[140^\circ, 220^\circ]$ are set to positive λ values and are shown in red.

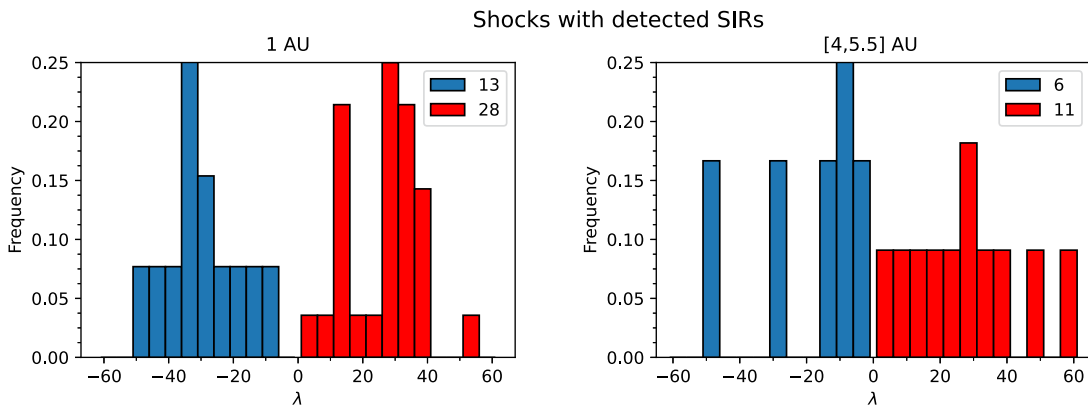


Figure 10 Distributions of the location angle λ for shocks with detected SIRs at 1 AU and $[4,5.5]$ AU, respectively. The blue color is for those shocks where the angle i is between $[320^\circ, 40^\circ]$ (shock normal towards east direction, λ set artificially negative), and the red color for those shocks with i between $[140^\circ, 220^\circ]$ (shock normal toward the west direction, λ positive).

some parameters, like magnetic-field strength, plasma density and temperature, since they change by a factor of 10 to 100 between 0.5 and 5 AU.

We also investigated the correlations between the location angle λ and shock parameters, detected from 0.3 to 5.5 AU (not shown). Similarly to 1 AU results (Figure 6), we found no relevant correlation between any shock parameters, apart from V_{sh} and λ . The slight dependency between the shock speed (V_{sh}) with λ is shown by both correlation coefficients $|C_p|$ and $|C_s|$ greater than 0.3. They increase slightly with solar distance since $|C_p|$ and $|C_s|$ are between 0.3 and 0.5, between 2 and 5 AU. We interpret this dependence as at 1 AU (Section 3.2).

4.2. Distribution of the Location Angle λ

Considering the number of shocks detected at 1 AU in our study (720 events), we are extending the shocks database from Janvier, Démoulin, and Dasso (2014) to obtain more reliable results. Since most of the shocks, detected from Ulysses, were between 4 and 5.5 AU and at low latitudes $\pm 30^\circ$, in the present section, we will focus on this interval. To further investigate a possible asymmetry between the shape of the ICME/shock, we have separated

eastward and westward values as an artificial construction with the east/west solar direction of the shock normal. In Figure 9, the λ distributions for those shocks where the angle i is between $[320^\circ, 40^\circ]$, corresponding to the east solar direction ($\pm 40^\circ$), are in blue, and for those shocks with i between $[140^\circ, 220^\circ]$, corresponding to the west solar direction ($\pm 40^\circ$), are in red. The λ values are separated in negative (red) and positive (blue) to investigate the shape asymmetry of the ICME/shock.

In both directions, east and west, we found similar distributions for all shocks detected at 1 AU (Figure 9, left panel), so there is no indication of a bias induced by the Parker spiral. The low number of ICME shocks (middle panel) detected for small values of $|\lambda|$ values can be explained by the small extension of the shock surface near the apex (Janvier, Démoulin, and Dasso, 2014). So that there is less chance of crossing the shock near its apex than other parts of the structure. Next, for large values of $|\lambda|$, between 50° and 60° , there are more shocks without than with ICME behind (not shown). Indeed, when a spacecraft crosses the structures farther from the apex, the encounter with the following ICME is likely too near its boundary to detect the ICME or even the crossing can be outside the ICME. Then, shocks with large $|\lambda|$ values are expected to be more associated with non-detected ICMEs.

In Figure 10, we plotted the λ distributions, with 15 bins, for all shocks detected with SIRs at 1 AU and between 4 and 5.5 AU. As the number of cases at 1 AU is reduced to about the number observed between 4 and 5.5 AU, the distribution becomes less regular. Despite the limited statistics, one would expect more westward-oriented shock events with SIRs compared to eastward-oriented ones, given the spiral geometry of interaction regions in the ideal corotating geometry, and, indeed, this is the case by a factor of two at both distances.

From Ulysses data, most shocks have no detected ICME behind them, while it is the opposite at and below 1 AU. Indeed, with Ulysses data, SIRs are the primary drivers of FF shocks (34%), while ICMEs represent only 17%, so the rest, 49% have no detected structure behind them. Furthermore, from 1 to 5 AU, the fraction of shocks with SIRs increased slightly from 21% to 34%, and the fraction of shocks with ICMEs decreased from 47% to 17%. A possible interpretation is that shocks detected by Ulysses are most likely to be CIR/SIR, as the interaction between fast and slow winds needs time, so distance, to build up in a strong shock. In contrast, ICMEs are typically launched fast from the Sun; then they progressively slow down toward the surrounding solar speed. Then, ICME shocks are expected to be stronger in the inner heliosphere. Then, shocks within 1 AU are expected to be dominantly ICME driven, while those detected by Ulysses are most likely to be CIR/SIR driven.

5. Conclusions

The main aim of this paper is to present a statistical study of a large number of shocks to understand the evolution of shock properties with heliospheric distance, as well as to study if there is a possible preferential orientation of shocks as a function of the inclination angle i and the location angle λ .

Our study is based on a series of catalogs reporting parameters associated with ICMEs, IP shocks, and SIRs detected at several heliocentric distances, from 0.29 to 0.99 AU with Helios-1/2; near 1 AU using Wind, ACE, and STEREO-A/B; and 1.3 to 5.4 AU with Ulysses. We developed a multi-spacecraft analysis of interplanetary shocks at 1 AU to investigate spacecraft biases. We present a comparison between the shock normal vectors, for those events detected at 1 AU by Wind, reported in two different databases: from the Heliospheric

Shock Database and CfA Interplanetary Shock Database. From this comparison, we found a strong correlation (above 0.8) between the normal components from the HSD and the shock normal methods reported in CfA database. This result gave us confidence that the Heliospheric Shock Database offers us quite reliable results.

We do not find significant differences, in the shock properties, for spacecraft positioned at 1 AU, as expected. We investigated the distribution of all shocks with detected and non-detected ICMEs at 1 AU. Shocks associated with detected ICME showed higher mean values of the downstream-to-upstream ratios of the shock for the magnetic-field strength, density, and temperature than the shocks without a detected ICME. The obtained result that faster and stronger shocks are associated with ICMEs agrees with several related studies (Janvier et al., 2019, and references therein). Moreover, the similarity of the shock distributions reinforces the conclusion from Janvier, Démoulin, and Dasso (2014) that shocks at 1 AU are most likely to be ICME-driven, while the detection of a magnetic ejecta is not necessarily made in situ (the shock being more extended ortho-radially than the magnetic ejecta). Next, we examined the relationship between the shock properties with the location angle λ , which defines, for a given shock shape, the location of the spacecraft crossing the ICME/shock structure. In accordance with the results found by Janvier, Démoulin, and Dasso (2014), with a bigger sample of shocks, we do not find the relation between the shock parameters with the location angle, so the shock front has statistically uniform properties.

We next analyzed the shock properties by an interval of latitude with Ulysses. We found that most shocks were detected at low latitudes within $\pm 30^\circ$ and beyond 4 AU. We also studied the distributions of shock properties and their possible evolution with distance from the Sun with Helios-1/2, 1 AU missions, and Ulysses (latitude below 30°) spacecraft. We found at most 15% variation with solar distance (0.5–5 AU) in the parameter ratios at the shock. This is in contrast with a typical factor of 10 or 100, depending on the parameter of the corresponding plasma parameters in the solar wind and in ICMEs. We found no relevant variations in the λ distributions with heliocentric distance, as well as the preferential direction of \hat{n}_{shock} around the Sun apex line, by separating east/west oriented ICME/shocks. In contrast, SIR/shocks are about twice more numerous with a westward than eastward shock normal orientation.

We have studied the variation, spatial and temporal, of the distribution of shock properties from several space missions. Our statistical analysis developed in this study can be applied to understand the evolution of ICME/shocks with distance in the inner Heliosphere. We need a consistent set of in-situ observations to obtain more reliable results. In that sense, new missions such as Parker Solar Probe (Case et al., 2020) and Solar Orbiter (Müller et al., 2020) will be of great help in studying the evolution and propagation of ICMEs and interplanetary shocks at closer solar distances.

Appendix: How Well is the Shock Normal Determined?

In the present study, we used the IP shock catalog provided by the Heliospheric Shock Database (HSD) maintained at the University of Helsinki to calculate the location angle λ and compare it using different datasets of shock normal to check whether it is a quantity that is well-defined. Two methods to identify shocks have been used to construct this database: (1) through a visual inspection of solar-wind plasma and magnetic-field parameters, simultaneously looking for sudden jumps in the plasma and magnetic field parameters. These jumps should satisfy the shock wave signatures to be considered as forward (FF) or fast reverse shock (FR), and (2) using an automated shock detection machine-learning algorithm called IPSVM (InterPlanetary Support Vector Machine) (Isavnin, 2017).

According to the documentation of the HSD, the shock normal vector ($\hat{\mathbf{n}}_{\text{shock}}$) is calculated using the mixed-mode method (MD3). This method follows the conditions that the cross product of the upstream and downstream magnetic fields should be perpendicular to the shock normal, provided there are no gaps in the velocity components. In the case of a data gap in the velocity components, the normal vector is calculated using magnetic-field coplanarity, the most widely used method. It relies on the coplanarity theorem and is based on the idea that the normal vector to a planar surface can be determined if two vectors lie within this surface.

For compressible shocks, the magnetic field on both sides of the shock and the shock normal all lie in the same plane. Thus, a variety of vectors lie in the shock plane. These include the change in magnetic field, the cross-product of the upstream and downstream magnetic field (which is perpendicular to the coplanarity plane), and the cross-product between the upstream or downstream magnetic field and their difference with the change in bulk velocity (Paschmann and Schwartz, 2000 and references therein). The magnetic coplanarity normal uses the cross-product of the upstream and downstream magnetic field, and although it is easy to apply, it fails for $\theta_{B_n} = 0^\circ$ or 90° . Regardless of the method used to determine the shock normal vector and related parameters, its determination may have significant errors depending on the upstream and downstream values chosen for each shock. In order to obtain the correct results of the shock parameters, the shock has to be entirely excluded from the upstream and downstream data points and not consider disturbances unrelated to the shock. However, the upstream and downstream intervals vary depending on the shock, and in most cases, there are no well-defined criteria for choosing these intervals.

We then calculated the angle λ from the normal shock vectors applying Equation 1. This database has the advantage of applying the same method to a large set of spacecraft data (see Section 2) and therefore ensures consistency throughout the analysis. However, other authors have also worked on the detection as well as the characterization of the shock parameters, including the normal vector that we use to obtain the location angle. In the following, we, therefore, compare different available datasets of shock normal to check whether it is a quantity that is well determined.

Shocks at 1 AU

For shocks detected at 1 AU, the CfA Interplanetary Shock Database² provides IP shocks observed by the Wind spacecraft. Therefore, in the following, we explore the different methods used in this database and compare the location angle outputs with that of the Heliospheric Shock Database.

In the CfA Interplanetary Shock Database, the events are listed by year with a detailed analysis for each shock detected. Each shock was analyzed with the shock normal vectors derived by three methods: magnetic coplanarity (MC), velocity coplanarity (VC), and three mixed mode (MX1).

The velocity coplanarity (VC), not used in the Heliospheric database, offers a good approximation to the normal vector, which is valid at high Mach numbers and for θ_{B_n} near 0° or 90° (Daly and Paschmann, 2000). The three mixed mode method, referred to as MX1 in the following, requires both plasma and field data to calculate the components of the shock normal vector. For this, each component of the upstream, downstream, and magnitude of the magnetic field is used.

²web.cfa.harvard.edu/shocks/.

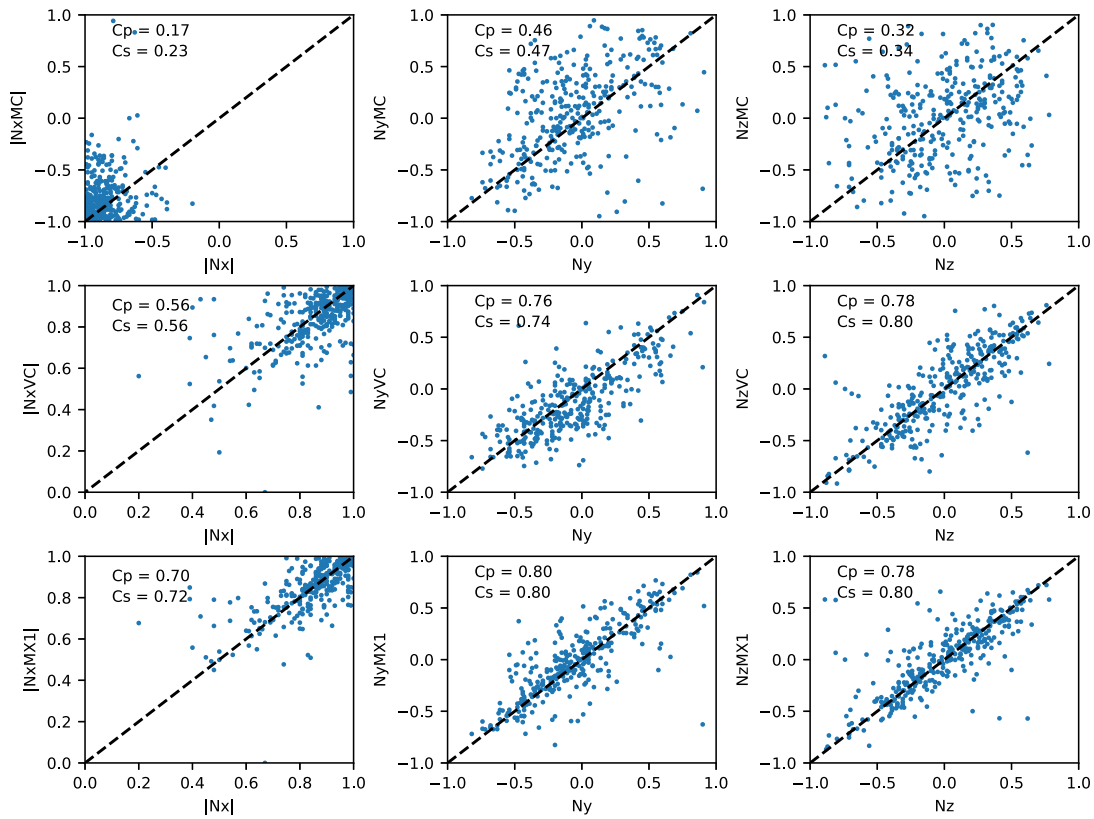
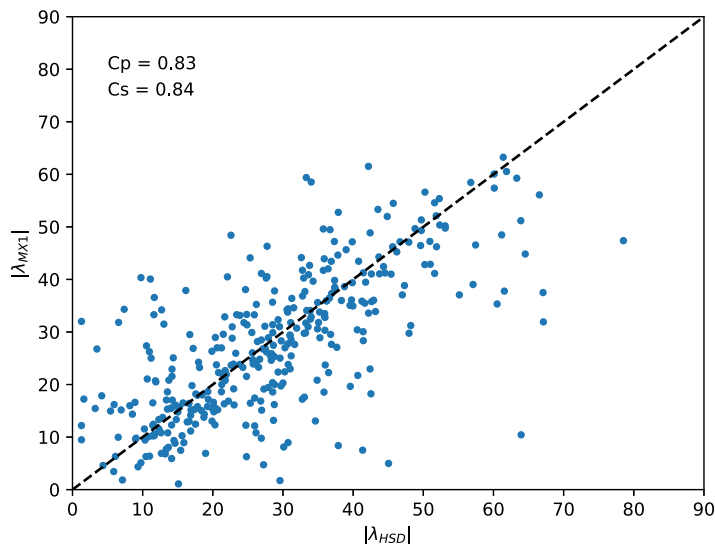


Figure 11 Correlations between each component of the shock normal, calculated with three methods (the CfA shock database), MC, VC, and MX1, with the mixed mode method (Heliospheric Shock Database) (see Section 2.2). For each graph, we have indicated the Pearson and Spearman correlation coefficients, C_p and C_s .

Figure 12 Correlation between the λ derived by the mixed mode method (λ_{HSD}) with λ calculated from the MX1 (λ_{MX1}). The Pearson and Spearman correlation coefficients have been added in the top left corner.



Through a comparative analysis, we selected events with 1 hour or less difference between the detection time reported in both catalogs. Most events can be found in both catalogs, so we ended up with 358 total events, around 69% of the total amount of events reported in the Heliospheric Shock Database.

Figure 11 shows the correlations between each component of the normal vector (N_x , N_y , N_z) from the Heliospheric Shock Database with the normal component of the CfA Interplanetary Shock Database from each method: (N_{xMC} , N_{yMC} , N_{zMC}) for the magnetic coplanarity method, (N_{xVC} , N_{yVC} , N_{zVC}) for the velocity coplanarity method and (N_{xMX1} , N_{yMX1} , N_{zMX1}) for the three mixed mode method.

We use the absolute value of the x -component to compare positive values. These components are grouped in a small region (Figure 11, right panels). We find that the MC method shows the lowest correlation with the results from the HSD, as shown in the first row, and the MX1 method shows the best correlations for all components, with Pearson and Spearman correlation around $0.7 \sim 0.8$ for all components.

In Figure 12, we show the correlation between the location angle derived by the shock normal vector from the mixed mode method (λ_{HSD} reported in the Heliospheric Shock Database), with the location angle derived by the shock normal vector from the MX1 method (λ_{MX1} , reported in the CfA Interplanetary Shock Database). Both Pearson and Spearman coefficients (C_p and C_s) indicate a strong correlation between both λ values with 0.83 and 0.84, respectively.

In summary, we do not find significant differences between the λ values derived by different shock normal methods. The strongest correlations are obtained, as expected, for the mixed mode method used for both the HSD and the CfA Interplanetary shock database. Since the results are highly correlated, with correlation coefficients above 0.8, this comparison gives us confidence that the Heliospheric Shock Database offers us quite reliable results while also providing broad coverage of several spacecraft at different heliodistances.

Acknowledgments Carlos Pérez-Alanis and Ernesto Aguilar-Rodríguez acknowledge support from DGAPA/PAPIIT project IN103821. We recognize the collaborative and open nature of knowledge creation and dissemination, under the control of the academic community as expressed by Camille Noûs at www.cogitamus.fr/indexen.html.

Author contributions 1- Perez-Alanis wrote the main manuscript, as well as did the data analysis and prepared the figures. 2-Janvier, 3-Nieves-Chinchilla and 5-Démoulin they contributed to the interpretation of the results, they also contributed to the writing of the manuscript, and they provided ideas for carrying out the study. 4-Aguilar-Rodríguez and 6-Corona-Romero they contributed ideas to the study and contributed to the analysis of the data. All authors reviewed the manuscript.

Declarations

Competing interests The authors declare no competing interests.

Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

References

Acuña, M., Curtis, D., Scheifele, J., Russell, C., Schroeder, P., Szabo, A., Luhmann, J.: 2008, The stereo/impact magnetic field experiment. *Space Sci. Rev.* **136**, 203.

- Balogh, A., Beek, T.J., Forsyth, R., Hedgecock, P., Marquedant, R., Smith, E., Southwood, D., Tsurutani, B.: 1992, The magnetic field investigation on the Ulysses mission-instrumentation and preliminary scientific results. *Astron. Astrophys. Suppl.* **92**, 221.
- Bame, S., McComas, D., Barraclough, B., Phillips, J., Sofaly, K., Chavez, J., Goldstein, B., Sakurai, R.: 1992, The Ulysses solar wind plasma experiment. *Astron. Astrophys. Suppl.* **92**, 237.
- Berdichevsky, D., Lepping, R., Farrugia, C.: 2003, Geometric considerations of the evolution of magnetic flux ropes. *Phys. Rev. E* **67**, 036405.
- Berdichevsky, D.B., Szabo, A., Lepping, R.P., Viñas, A.F., Mariani, F.: 2000, Interplanetary fast shocks and associated drivers observed through the 23rd solar minimum by wind over its first 2.5 years. *J. Geophys. Res.* **105**, 27289.
- Bougeret, J.-L., Kaiser, M.L., Kellogg, P.J., Manning, R., Goetz, K., Monson, S., Monge, N., Friel, L., Meetre, C., Perche, C., et al.: 1995, Waves: the radio and plasma wave investigation on the wind spacecraft. *Space Sci. Rev.* **71**, 231.
- Burgess, D., Scholer, M.: 2015, Collisionless shocks in space plasmas: Structure and accelerated particles.
- Burlaga, L., Chao, J.: 1971, Reverse and forward slow shocks in the solar wind. *J. Geophys. Res.* **76**, 7516.
- Cane, H.: 1985, The evolution of interplanetary shocks. *J. Geophys. Res.* **90**, 191.
- Cane, H., Richardson, I.: 2003, Interplanetary coronal mass ejections in the near-Earth solar wind during 1996–2002. *J. Geophys. Res.* **108**, 1156.
- Cane, H., Sheeley Jr, N., Howard, R.: 1987, Energetic interplanetary shocks, radio emission, and coronal mass ejections. *J. Geophys. Res.* **92**, 9869.
- Case, A.W., Kasper, J.C., Stevens, M.L., Korreck, K.E., Paulson, K., Daigneau, P., Caldwell, D., Freeman, M., Henry, T., Klingensmith, B., et al.: 2020, The solar probe cup on the Parker solar probe. *Astrophys. J. Suppl.* **246**, 43.
- Daly, P.W., Paschmann, G.: 2000, Analysis methods for multi-spacecraft data. ISSI Scientific Report SR-001. (Electronic edition 1.1).
- Démoulin, P., Janvier, M., Masías-Meza, J.J., Dasso, S.: 2016, Quantitative model for the generic 3d shape of ices at 1 au. *Astron. Astrophys.* **595**, A19.
- Eselevich, V.: 1982, Shock-wave structure in collisionless plasmas from results of laboratory experiments. *Space Sci. Rev.* **32**, 65.
- Galvin, A.B., Kistler, L.M., Popecki, M.A., Farrugia, C.J., Simunac, K.D., Ellis, L., Möbius, E., Lee, M.A., Boehm, M., Carroll, J., et al.: 2008, The plasma and suprathermal ion composition (plastic) investigation on the stereo observatories. *Space Sci. Rev.* **136**, 437.
- Goldstein, B., Neugebauer, M., Phillips, J., Bame, S., Gosling, J., McComas, D., Wang, Y., Sheeley, N., Seuss, S.: 1996, Ulysses plasma parameters: latitudinal, radial, and temporal variations. *Astron. Astrophys.* **316**, 296.
- González-Esparza, J., Balogh, A., Forsyth, R., Neugebauer, M., Smith, E., Phillips, J.: 1996, Interplanetary shock waves and large-scale structures: Ulysses' observations in and out of the ecliptic plane. *J. Geophys. Res.* **101**, 17057.
- Gopalswamy, N.: 2006, Properties of interplanetary coronal mass ejections. *Space Sci. Rev.* **124**, 145.
- Gosling, J., Asbridge, J., Bame, S., Hundhausen, A., Strong, I.: 1968, Satellite observations of interplanetary shock waves. *J. Geophys. Res.* **73**, 43.
- Gosling, J., Hundhausen, A., Pizzo, V., Asbridge, J.: 1972, Compressions and rarefactions in the solar wind: Vela 3. *J. Geophys. Res.* **77**, 5442.
- Gosling, J., Asbridge, J., Bame, S., Feldman, W.: 1976, Solar wind speed variations: 1962–1974. *J. Geophys. Res.* **81**, 5061.
- Hoang, S., Lacombe, C., Mangeney, A., Pantellini, F., Balogh, A., Bame, S., Forsyth, R., Phillips, J.: 1995, Interplanetary shocks observed by Ulysses in the ecliptic plane as a function of the heliocentric distance. *Adv. Space Res.* **15**, 371.
- Howard, T., Webb, D., Tappin, S., Mizuno, D., Johnston, J.: 2006, Tracking halo coronal mass ejections from 0–1 au and space weather forecasting using the solar mass ejection imager (smei). *J. Geophys. Res.* **111**, A04105.
- Hundhausen, A.: 1976, Coronal expansion and solar wind. [ADS](#).
- Isavnin, A.: 2017, Ipsvm – machine learning detection of interplanetary shock waves. <https://www.researchgate.net/project/IP SVM-machine-learning-detection-of-interplanetary-shock-waves>.
- Janvier, M., Démoulin, P., Dasso, S.: 2014, Mean shape of interplanetary shocks deduced from in situ observations and its relation with interplanetary cmes. *Astron. Astrophys.* **565**, A99.
- Janvier, M., Dasso, S., Démoulin, P., Masías-Meza, J., Lugaz, N.: 2015, Comparing generic models for interplanetary shocks and magnetic clouds axis configurations at 1 au. *J. Geophys. Res.* **120**, 3328.
- Janvier, M., Winslow, R.M., Good, S., Bonhomme, E., Démoulin, P., Dasso, S., Möstl, C., Lugaz, N., Amerstorfer, T., Soubrié, E., et al.: 2019, Generic magnetic field intensity profiles of interplanetary coronal mass ejections at Mercury, Venus, and Earth from superposed epoch analyses. *J. Geophys. Res.* **124**, 812.

- Jian, L., Russell, C., Luhmann, J., Skoug, R.: 2006, Properties of interplanetary coronal mass ejections at one au during 1995–2004. *Solar Phys.* **239**, 393.
- Jian, L., Russell, C., Luhmann, J., Skoug, R., Steinberg, J.: 2008, Stream interactions and interplanetary coronal mass ejections at 5.3 au near the solar ecliptic plane. *Solar Phys.* **250**, 375.
- Jian, L., Russell, C., Luhmann, J., Galvin, A., MacNeice, P.: 2009, Multi-spacecraft observations: stream interactions and associated structures. *Solar Phys.* **259**, 345.
- Jian, L., Russell, C., Luhmann, J., Galvin, A., Simunac, K.: 2013, *Solar Wind Observations at Stereo: 2007–2011, AIP Conference Proceedings* **1539**, American Institute of Physics, New York 191.
- Jian, L., Luhmann, J., Russell, C., Galvin, A.: 2019, Solar terrestrial relations observatory (stereo) observations of stream interaction regions in 2007–2016: relationship with heliospheric current sheets, solar cycle variations, and dual observations. *Solar Phys.* **294**, 1.
- Kaiser, M.L., Kucera, T., Davila, J., Cyr, O.S., Guhathakurta, M., Christian, E.: 2008, The stereo mission: an introduction. *Space Sci. Rev.* **136**, 5.
- Kilpua, E., Lumme, E., Andreeova, K., Isavnin, A., Koskinen, H.: 2015, Properties and drivers of fast interplanetary shocks near the orbit of the Earth (1995–2013). *J. Geophys. Res.* **120**, 4112.
- Koval, A., Šafránková, J., Němeček, Z., Přeč, L., Samsonov, A., Richardson, J.: 2005, Deformation of interplanetary shock fronts in the magnetosheath. *Geophys. Res. Lett.* **32**, L15101.
- Lai, H., Russell, C., Jian, L., Blanco-Cano, X., Anderson, B., Luhmann, J., Wennmacher, A.: 2012, The radial variation of interplanetary shocks in the inner heliosphere: observations by helios, messenger, and stereo. *Solar Phys.* **278**, 421.
- Lepping, R., Acuña, M., Burlaga, L., Farrell, W., Slavin, J., Schatten, K., Mariani, F., Ness, N., Neubauer, F., Whang, Y., et al.: 1995, The wind magnetic field investigation. *Space Sci. Rev.* **71**, 207.
- Luhmann, J., Curtis, D., Schroeder, P., McCauley, J., Lin, R., Larson, D., Bale, S., Sauvaud, J.-A., Aoustin, C., Mewaldt, R., et al.: 2008, *STEREO IMPACT Investigation Goals, Measurements, and Data Products Overview* Springer, New York, 117, 978-0-387-09649-0. DOI.
- Müller, D., Cyr, O.S., Zouganelis, I., Gilbert, H.R., Marsden, R., Nieves-Chinchilla, T., Antonucci, E., Auchère, F., Berghmans, D., Horbury, T., et al.: 2020, The solar orbiter mission-science overview. *Astron. Astrophys.* **642**, A1.
- Neubauer, F., Beinroth, H., Barnstorf, H., Dehmel, G., et al.: 1976, Initial results from the helios-1 search-coil magnetometer experiment. *J. Geophys. Res.* **42**, 599.
- Neugebauer, M., Forsyth, R., Galvin, A., Harvey, K., Hoeksema, J., Lazarus, A., Lepping, R., Linker, J., Mikic, Z., Steinberg, J., et al.: 1998, Spatial structure of the solar wind and comparisons with solar data and models. *J. Geophys. Res.* **103**, 14587.
- Nieves-Chinchilla, T., Vourlidas, A., Raymond, J., Linton, M., Al-Haddad, N., Savani, N., Szabo, A., Hidalgo, M.: 2018, Understanding the internal magnetic field configurations of icmes using more than 20 years of wind observations. *Solar Phys.* **293**, 25.
- Ogilvie, K., Desch, M.: 1997, The wind spacecraft and its early scientific results. *Adv. Space Res.* **20**, 559.
- Ogilvie, K., Chornay, D., Fritzenreiter, R., Hunsaker, F., Keller, J., Lobell, J., Miller, G., Scudder, J., Sittler, E., Torbert, R., et al.: 1995, Swe, a comprehensive plasma instrument for the wind spacecraft. *Space Sci. Rev.* **71**, 55.
- Ontiveros, V., Vourlidas, A.: 2009, Quantitative measurements of coronal mass ejection-driven shocks from lasco observations. *Astrophys. J.* **693**, 267.
- Parks, G.K.: 1991, Physics of space plasmas. An introduction. ADS.
- Paschmann, G., Daly, P.W.: 1998, *Analysis methods for multi-spacecraft data. ISSI scientific reports series SR-001, ESA/ISSI, vol. 1. ISBN 1608-280x, 1998.* In: *ISSI Scientific Reports Series 1*.
- Paschmann, G., Schwartz, S.: 2000, ISSI book on analysis methods for multi-spacecraft data. In: *Cluster-II Workshop Multiscale/Multipoint Plasma Measurements* **449**, 99.
- Pitňa, A., Šafránková, J., Němeček, Z., Ďurovcová, T., Kis, A.: 2021, Turbulence upstream and downstream of interplanetary shocks. *Front. Phys.* **8**, 654.
- Regnault, F., Janvier, M., Dèmolun, P., Auchère, F., Strugarek, A., Dasso, S., Noûs, C.: 2020, 20 years of ace data: how superposed epoch analyses reveal generic features in interplanetary cme profiles. *J. Geophys. Res.* **125**(11), e2020JA028150.
- Richardson, I.: 2014, Identification of interplanetary coronal mass ejections at Ulysses using multiple solar wind signatures. *Solar Phys.* **289**, 3843.
- Richardson, I.G.: 2018, Solar wind stream interaction regions throughout the heliosphere. *Living Rev. Solar Phys.* **15**, 1.
- Richardson, I.G., Cane, H.V.: 2010, Near-Earth interplanetary coronal mass ejections during solar cycle 23 (1996–2009): catalog and summary of properties. *Solar Phys.* **264**, 189.
- Rosenbauer, H., Schwenn, R., Marsch, E., Meyer, B., Miggenrieder, H., Montgomery, M., Mühlhäuser, K., Pilipp, W., Voges, W., Zink, S.: 1977, A survey on initial results of the helios plasma experiment. *J. Geophys. Z. Geophys.* **42**, 561.

- Russell, C., Mellott, M., Smith, E., King, J.: 1983, Multiple spacecraft observations of interplanetary shocks: four spacecraft determination of shock normals. *J. Geophys. Res.* **88**, 4739.
- Sagdeev, R.Z., Kennel, C.F.: 1991, Collisionless shock waves. *Sci. Am.* **264**, 106.
- Samsonov, A., Němeček, Z., Šafránková, J.: 2006, Numerical mhd modeling of propagation of interplanetary shock through the magnetosheath. *J. Geophys. Res.* **111**, A08210.
- Smith, C.W., L'Heureux, J., Ness, N.F., Acuna, M.H., Burlaga, L.F., Scheifele, J.: 1998, The ace magnetic fields experiment. *Space Sci. Rev.* **86**(1), 613.
- Thernisien, A.: 2011, Implementation of the graduated cylindrical shell model for the three-dimensional reconstruction of coronal mass ejections. *Astrophys. J. Suppl.* **194**, 33.
- Wenzel, K., Marsden, R., Page, D., Smith, E.: 1992, The Ulysses mission. *Astron. Astrophys. Suppl.* **92**, 207.
- Winslow, R.M., Lugaz, N., Philpott, L.C., Schwadron, N.A., Farrugia, C.J., Anderson, B.J., Smith, C.W.: 2015, Interplanetary coronal mass ejections from messenger orbital observations at Mercury. *J. Geophys. Res.* **120**, 6101.

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Authors and Affiliations

Carlos Arturo Pérez-Alanis¹ · Miho Janvier² · Teresa Nieves-Chinchilla³ · Ernesto Aguilar-Rodríguez⁴ · Pascal Démoulin^{5,6} · Pedro Corona-Romero^{7,8,9}

✉ C.A. Pérez-Alanis
cpereza.art@igeofisica.unam.mx

M. Janvier
miho.janvier@universite-paris-saclay.fr

T. Nieves-Chinchilla
Teresa.Nieves@nasa.gov

E. Aguilar-Rodríguez
ernesto@igeofisica.unam.mx

P. Démoulin
pascal.Demoulin@obspm.fr

P. Corona-Romero
p.coronaromero@igeofisica.unam.mx

- ¹ Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, CDMX, Mexico
- ² Université Paris-Saclay, CNRS, Institut d'Astrophysique Spatiale, Orsay, France
- ³ Heliophysics Science Division, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, USA
- ⁴ Instituto de Geofísica, Unidad Michoacán, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, Morelia, Mexico
- ⁵ LESIA, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, Université Paris Cité, 5 place Jules Janssen, 92195 Meudon, France
- ⁶ Laboratoire Cogitamus, 75005 Paris, France
- ⁷ Cátedras-CONACyT, Instituto de Geofísica Unidad Michoacán, Universidad Nacional Autónoma de México, 58190 Morelia, Michoacán, Mexico
- ⁸ Space Weather National Laboratory (LANCE), Instituto de Geofísica, Unidad Michoacán, Universidad Nacional Autónoma de México, 58190 Morelia, Michoacán, Mexico
- ⁹ Mexican Space Weather Service (SCIESMEX), Instituto de Geofísica, Unidad Michoacán, Universidad Nacional Autónoma de México, 58190 Morelia, Michoacán, Mexico

Conclusiones y comentarios finales

El objetivo principal de esta tesis fue presentar un estudio estadístico de EMCs y choques interplanetarios observados por distintas misiones espaciales, para entender la evolución que presentan estas estructuras en toda la heliosfera interna. Para llevarlo a cabo usamos mediciones in-situ de plasma y campo magnético de las misiones Wind y STEREO-A/B, así como a través de una serie de catálogos que reportan los parámetros asociados con EMCs y choques IPs detectados desde 0.29 hasta 1.54 UA.

En la primera parte de este estudio, nos enfocamos en comprender la estructura magnética interna en las EMCs y las propiedades intrínsecas de los obstáculos magnéticos a 1 UA. Para ello, analizamos los datos de plasma y campo magnético, así como los distintos catálogos de EMCs detectadas por STEREO-A/B (2007-2016) y Wind (2016-2021) durante tres ciclos solares, finales del SC22 (1995-1996), SC23 (1996-2008) y SC24 (2008-2021). Se llevó a cabo un estudio de la variación de las EMCs, dependiendo de su clasificación, ya sean aquellos eventos donde no presentan rotaciones bien definidas en los componentes de su campo magnético (E), aquellos eventos complejos (C_x), o con una rotación bien definida (FRs). Durante el periodo de tiempo de estudio, encontramos que existe una mayor ocurrencia en detectarse aquellas EMCs que presentan una configuración tipo flux-rope, con un 65% respecto del total de eventos. Durante el ciclo solar 23 y 24, como era de esperarse, la frecuencia de los eventos sigue el ciclo solar. Además, existe un mayor incremento en aquellos eventos que presentan una configuración magnética interna más compleja (E y C_x) durante el máximo solar, lo que parece consistente de que este tipo de eventos están ligados con regiones activas magnéticamente complejas.

Respecto a los tipo F, el 35.3% corresponden flux-ropes que exhiben las típicas rotaciones de un flux-rope ideal con un geometría axialmente simétrica. En el caso de los eventos F^- (16.7%) y F^+ (13%), son cuerdas de flujo que son atravesadas por la nave espacial con un parámetro de impacto muy grande, por lo tanto, no se detecta una rotación completa del campo magnético (Demoulin et al., 2013; Nieves-Chinchilla et al., 2019).

Ahora bien, para cuantificar el grado de distorsión que experimentan estas estructuras a 1 UA, introducimos el concepto de parámetro de distorsión y velocidad de expansión, que son valores evaluados durante la duración del obstáculo magnético. En ambos ciclos solares, no se observó una tendencia clara de que las EMCs sufren alguna compresión, tanto en el frente o reverso. Sin embargo, se observó que las EMCs exhiben una mayor expansión en la velocidad

de expansión durante el máximo del ciclo solar. Encontramos que el 53% de los casos presentan una compresión en el frente de la estructura, mientras se va expandiendo. Este es el panorama más aceptado dentro de la comunidad, ya que existen algunos modelos de nubes magnéticas donde consideran una velocidad de expansión positiva dentro de la estructura Lynnyk and Vandas (2009). Por otro lado, casos con una expansión negativa pero una compresión en el reverso pudiera deberse a la curvatura que presenta la sección transversal del flux-rope en el paso de la nave espacial.

Por otro lado, es importante resaltar algunos trabajos que han abordado la asimetría en los perfiles de la intensidad de campo magnético como una consecuencia de la expansión de las NMs. Démoulin et al. (2008) mostraron que la expansión en estas estructuras tiene como resultado que el campo magnético en la parte delantera, de la NM, es más fuerte que en la trasera, nombrando este efecto como "aging" (efecto envejecimiento). El efecto de "envejecimiento" se refiere al cambio en las características de la EMC durante el tránsito de la nave espacial a través de la estructura de la EMC, dicho cambio se debe principalmente a la expansión de la EMC. Adicionalmente, Démoulin and Dasso (2009) demostraron que la rápida disminución en la presión total del viento solar, con la distancia heliocéntrica, es el principal impulsor en la expansión del FR. Por otro lado, Corona-Romero and Riley (2020) a través de un formalismo semi-empírico, discuten los efectos que tiene la trayectoria de la nave espacial sobre el perfil del campo magnético observado. Encontrando que, la asimetría/simetría en los perfiles de campo magnético esta directamente relacionado con una expansión de desaceleración pequeña/grande de las EMCs observadas. Sin embargo, los distintos escenarios que se presentan aquí respecto a la distorsión en la estructura interna de las EMCs evidencian el grado de distorsión o deformación que experimentan estas estructuras a 1 UA, y este tipo de resultados mostrados en este trabajo pueden contribuir en gran medida a la comprensión de la evolución de las EMCs y NMs.

La segunda parte de esta tesis fue presentar un estudio estadístico de un gran conjunto de choques IPs detectados por diferentes misiones espaciales situadas a distintas distancias heliocéntricas: de 0.3 a 0.8 UA por Helios-1/2; cerca de 1 UA usando Wind, ACE y STEREO-A/B; y de 1.3 a 5.4 UA por la misión Ulysses. Por un lado, desarrollamos un análisis multi-nave de choques detectados a 1 UA para investigar los sesgos de las naves espaciales, obteniendo resultados similares. Sin embargo, las distribuciones de las propiedades de los choques presentaron una mayor dispersión en aquellos eventos de choques con EMCs que con RICs asociadas. Esto puede deberse al hecho de que las EMC/choques tienen una cola más larga causada por choques más intensos que aquellos eventos de RIC/choques, ya que las observaciones realizadas por las naves espaciales situadas a 1 UA y por Ulysses, mostraron que el viento rápido del agujero coronal (que impulsa las RICs) tienen un límite superior de alrededor de 800 km/s mientras que los EMC/choques llegan a exceder velocidades de 1000 km/s. Adicionalmente, investigamos las variaciones de las propiedades de los choques, asociados con EMCs y RICs, a diferentes distancias heliocéntricas, desde 0.3 hasta 5.4 UA. Los resultados obtenidos no mostraron una

variación significativa con la distancia. Sin embargo, el número de choques asociados con RICs incrementan con la distancia de 1 a 5 UA un 21% a 34%, mientras que los choques asociados con EMCs decrecen un 47% a 17%. La mayoría de los choques observados por Ulysses fueron detectados a bajas latitudes ($\pm 30^\circ$) y a distancias mayores a 4 UA. Una posible interpretación es que los choques están asociados con regiones de interacción, debido a que la interacción entre los vientos rápidos y lentos necesitan tiempo, y por lo tanto distancia para acumularse en un choque intenso. Por el contrario, las EMCs son expulsadas desde el Sol donde progresivamente disminuye su velocidad con la velocidad del viento solar ambiente. Por lo que se espera que los choques hasta 1 UA sean predominantemente impulsados por EMCs, mientras que los choques detectados a distancias más lejanas probablemente sean impulsados por RICs.

Finalmente, no encontramos variaciones relevantes en las distribuciones del ángulo entre la dirección del choque con la dirección radial, ni evidencia de una dirección preferencial del vector normal del choque al separar los choques/ICME orientados al este/oeste solar. En contraste, los choques asociados con RICs fueron aproximadamente dos veces más numerosos, con una orientación normal de choque hacia el oeste que hacia el este. A pesar de que las estadísticas son limitadas, uno podría esperar más eventos de choques con RICs orientados hacia el oeste, en comparación con choques orientados hacia el este. Es decir, existe una ligera asimetría inducida por la espiral de Parker para los eventos observados de RICs, mientras que para las EMCs, ninguna.

El análisis estadístico desarrollado en esta tesis puede ser aplicado para entender la evolución de los choques IPs a través de toda la heliosfera interna. Sin embargo, es necesario un conjunto consistente de observaciones in-situ para obtener resultados más confiables. En este sentido, las nuevas misiones espaciales como la sonda espacial Parker o Solar Orbiter, que viajan a distancias más cercanas al Sol que las misiones actuales, serán de gran ayuda para comprender la evolución y propagación de las EMCs y choques interplanetarios a distancias solares más cercanas.

Apéndice

A

Catálogo de EMCs y MOs observados por STEREO-A/B (2007-2020) y Wind (2016-2021) organizado de la siguiente forma: (1) número de evento; (2) nave espacial; (3) año; (4) separación entre STA y STB, (5) fecha en que se detectó la EMC y MO al entorno terrestre en formato mm/dd hhmm (DOY); (6) duración del MO; (7) media de la intensidad del campo magnético (del MO); (8) media de la velocidad del vs (del MO); (9) media de la densidad de protones (del MO); (10) velocidad de expansión; (11) parámetro de distorsión; (12) tipo de MO.

| E | SC | Year | Δ ($^{\circ}$) | $ICME_s$ (DOY) MO_s (1) | ΔT_{MO} (hrs) | B (nT) | V_{sw} (km s $^{-1}$) | N_p (cm $^{-3}$) | V_{exp} (km s $^{-1}$) | DiP | MO |
|----|----|------|----------------------------|------------------------------|--------------------------|-------------|-----------------------------|------------------------|------------------------------|------|----|
| 1 | A | 2007 | 1.93 | 03/24 0515 (083) 03/24 0515 | 7.25 | 10.01 | 362 | 9.17 | -0.34 | 0.43 | Fr |
| 2 | A | 2007 | 5.98 | 05/22 1400 (142) 05/22 1400 | 23.50 | 9.62 | 498 | 4.42 | 21.70 | 0.56 | E |
| 3 | A | 2007 | 5.95 | 05/22 0445 (142) 05/22 0445 | 17.25 | 8.75 | 533 | 9.54 | 43.02 | 0.38 | E |
| 4 | B | 2007 | 3.1 | 05/22 0420 (142) 05/22 0420 | 17.67 | 13.51 | 441 | 11.90 | 21.63 | 0.49 | E |
| 5 | A | 2007 | 6.02 | 05/23 0100 (143) 05/23 0100 | 11.50 | 10.99 | 491 | 2.39 | 18.14 | 0.50 | Fr |
| 6 | A | 2007 | 7.53 | 06/08 0545 (159) 06/08 1345 | 23.50 | 5.13 | 355 | 4.63 | 23.38 | 0.49 | E |
| 7 | A | 2007 | 15.33 | 08/25 2030 (237) 08/25 2327 | 16.55 | 13.00 | 351 | 12.70 | -8.95 | 0.50 | E |
| 8 | A | 2007 | 20.38 | 11/19 2200 (323) 11/19 2200 | 29.28 | 9.93 | 418 | 10.10 | 0.10 | 0.60 | F+ |
| 9 | B | 2007 | 18.03 | 10/23 1035 (296) 10/23 1650 | 7.28 | 9.08 | 371 | 2.83 | 22.43 | 0.49 | E |
| 10 | B | 2007 | 18.06 | 10/23 1645 (296) 10/23 1645 | 7.00 | 9.09 | 371 | 2.74 | 23.18 | 0.49 | E |
| 11 | B | 2007 | 20.43 | 11/19 2250 (323) 11/19 2250 | 8.10 | 13.77 | 434 | 16.30 | 14.30 | 0.42 | Fr |
| 12 | B | 2007 | 20.5 | 11/20 0045 (324) 11/20 0045 | 8.68 | 11.67 | 432 | 13.60 | 4.84 | 0.41 | E |
| 13 | B | 2008 | 23.7 | 03/06 1215 (066) 03/06 1215 | 4.75 | 15.18 | 390 | 17.70 | -0.62 | 0.51 | E |
| 14 | A | 2008 | 23.25 | 03/21 0640 (081) 03/21 0833 | 10.10 | 8.15 | 446 | 1.17 | -0.61 | 0.51 | E |
| 15 | B | 2008 | 23.7 | 06/06 2200 (158) 06/06 2200 | 14.25 | 13.62 | 390 | 4.88 | 25.50 | 0.49 | Fr |
| 16 | A | 2008 | 32.05 | 07/04 0530 (186) 07/05 1330 | 28.75 | 7.92 | 320 | 9.19 | 11.65 | 0.56 | Fr |
| 17 | A | 2008 | 32.23 | 07/05 0048 (187) 07/05 0634 | 35.43 | 7.82 | 326 | 8.55 | 20.70 | 0.56 | F+ |
| 18 | B | 2008 | 27.67 | 07/10 2245 (192) 07/10 2245 | 8.75 | 9.58 | 554 | 5.03 | -6.05 | 0.58 | Fr |
| 19 | B | 2008 | 31.05 | 08/15 1130 (228) 08/15 1130 | 13.50 | 7.92 | 342 | 11.50 | 8.23 | 0.53 | F |
| 20 | A | 2008 | 33.26 | 09/04 0525 (248) 09/04 1330 | 22.50 | 8.74 | 319 | 15.60 | 20.78 | 0.49 | F+ |
| 21 | B | 2008 | 36.11 | 09/28 0230 (272) 09/28 0230 | 11.50 | 7.85 | 360 | 7.11 | -16.19 | 0.53 | F- |
| 22 | A | 2008 | 40.53 | 10/14 1845 (288) 10/14 1845 | 19.00 | 6.10 | 443 | 2.11 | 14.53 | 0.57 | E |
| 23 | A | 2008 | 41.24 | 10/31 1210 (305) 10/31 1210 | 18.83 | 12.25 | 478 | 18.10 | -156.10 | 0.45 | E |
| 24 | A | 2008 | 41.47 | 11/07 0200 (312) 11/07 0200 | 23.25 | 5.36 | 340 | 3.10 | 33.09 | 0.45 | F+ |

| | | | | | | | | | | | | |
|----|---|------|-------|------------------|------------|-------|-------|-----|-------|--------|------|----|
| 25 | A | 2008 | 42.03 | 11/28 0745 (333) | 11/28 0745 | 10.65 | 6.07 | 289 | 11.50 | -11.52 | 0.49 | E |
| 26 | A | 2008 | 42.05 | 11/28 2149 (333) | 11/28 2149 | 13.52 | 13.01 | 442 | 13.60 | -76.88 | 0.39 | E |
| 27 | B | 2008 | 23.63 | 02/05 2037 (036) | 02/05 2037 | 38.22 | 7.66 | 351 | 5.86 | 20.51 | 0.55 | E |
| 28 | B | 2008 | 23.7 | 03/06 1235 (066) | 03/06 1235 | 4.47 | 15.35 | 390 | 17.90 | -0.12 | 0.50 | E |
| 29 | B | 2008 | 24.01 | 04/29 1410 (120) | 04/29 1534 | 15.43 | 7.92 | 445 | 9.87 | -23.33 | 0.50 | E |
| 30 | B | 2008 | 24.45 | 05/15 2300 (136) | 05/15 2300 | 19.00 | 3.39 | 431 | 2.21 | 35.09 | 0.51 | F |
| 31 | B | 2008 | 25.36 | 06/06 1536 (158) | 06/06 2215 | 14.28 | 13.60 | 389 | 4.97 | 25.31 | 0.49 | F+ |
| 32 | B | 2008 | 31.05 | 08/15 1200 (228) | 08/15 1200 | 10.00 | 8.12 | 346 | 10.50 | 3.22 | 0.55 | Fr |
| 33 | B | 2008 | 38.46 | 10/17 1000 (291) | 10/17 1000 | 19.75 | 6.61 | 330 | 5.51 | 12.02 | 0.47 | F+ |
| 34 | B | 2008 | 38.66 | 10/19 0102 (293) | 10/19 0102 | 34.50 | 6.53 | 328 | 6.13 | 17.63 | 0.49 | F+ |
| 35 | B | 2008 | 41.97 | 11/16 2045 (321) | 11/16 2045 | 16.75 | 5.07 | 324 | 3.79 | 4.09 | 0.52 | F |
| 36 | B | 2008 | 44.12 | 12/08 1700 (343) | 12/08 1700 | 3.50 | 13.98 | 343 | 20.10 | -4.88 | 0.54 | Fr |
| 37 | B | 2008 | 44.78 | 12/16 0930 (351) | 12/16 0930 | 20.75 | 5.56 | 329 | 6.49 | 3.95 | 0.57 | E |
| 38 | A | 2009 | 42.99 | 01/26 0140 (026) | 01/26 0140 | 32.25 | 9.80 | 371 | 7.70 | 12.04 | 0.49 | Cx |
| 39 | A | 2009 | 50.83 | 06/03 0000 (154) | 06/03 0642 | 39.97 | 8.61 | 369 | 7.31 | 43.84 | 0.49 | Cx |
| 40 | A | 2009 | 54.69 | 07/11 2310 (192) | 07/11 2310 | 30.58 | 7.94 | 304 | 13.80 | 18.12 | 0.51 | F+ |
| 41 | A | 2009 | 62.13 | 10/16 1457 (289) | 10/16 2135 | 24.68 | 10.05 | 343 | 6.32 | 24.81 | 0.50 | F+ |
| 42 | A | 2009 | 62.66 | 10/30 0140 (303) | 10/30 0140 | 18.33 | 5.45 | 381 | 4.71 | 12.97 | 0.48 | E |
| 43 | A | 2009 | 62.74 | 11/01 0800 (305) | 11/01 0800 | 42.00 | 6.21 | 429 | 1.24 | 86.06 | 0.51 | E |
| 44 | A | 2009 | 63.13 | 11/14 0800 (318) | 11/14 2000 | 25.50 | 8.17 | 303 | 9.21 | 11.08 | 0.50 | Fr |
| 45 | A | 2009 | 63.41 | 11/25 2300 (329) | 11/25 2300 | 9.50 | 9.25 | 360 | 4.06 | -18.41 | 0.36 | E |
| 46 | A | 2009 | 63.67 | 12/08 2338 (342) | 12/09 0900 | 38.22 | 9.33 | 311 | 18.00 | 14.94 | 0.48 | Cx |
| 47 | B | 2009 | 46.59 | 01/13 0522 (013) | 01/13 0522 | 16.63 | 9.20 | 377 | 4.89 | -1.29 | 0.43 | Fr |
| 48 | B | 2009 | 47.6 | 06/19 0024 (170) | 06/19 0740 | 26.33 | 10.51 | 345 | 6.78 | -23.15 | 0.49 | F+ |
| 49 | B | 2009 | 48.99 | 07/16 1708 (197) | 07/16 1708 | 23.87 | 8.12 | 299 | 7.27 | 10.47 | 0.53 | F+ |
| 50 | B | 2009 | 52.95 | 08/30 0250 (242) | 08/30 1620 | 13.33 | 8.77 | 334 | 3.95 | -10.52 | 0.50 | Fr |
| 51 | B | 2009 | 54.16 | 09/09 1717 (252) | 09/09 1717 | 34.93 | 6.66 | 303 | 6.25 | 12.31 | 0.52 | F+ |
| 52 | B | 2009 | 56.45 | 09/28 0310 (271) | 09/28 0310 | 9.08 | 5.93 | 316 | 2.02 | -4.73 | 0.50 | Fr |
| 53 | B | 2009 | 57.03 | 10/02 1542 (275) | 10/03 0548 | 22.73 | 9.97 | 310 | 8.14 | 29.35 | 0.40 | Fr |
| 54 | B | 2009 | 62.28 | 11/10 1848 (314) | 11/10 1848 | 16.20 | 9.69 | 329 | 3.72 | 15.03 | 0.54 | Fr |
| 55 | B | 2009 | 64.45 | 11/27 1236 (331) | 11/27 1236 | 8.13 | 9.78 | 318 | 9.30 | -4.64 | 0.50 | E |

| | | | | | | | | | | | | |
|----|---|------|-------|------------------|------------|-------|-------|-----|-------|---------|------|----|
| 56 | B | 2009 | 68.06 | 12/29 1715 (363) | 12/30 0150 | 7.50 | 10.25 | 304 | 4.45 | 5.89 | 0.46 | Fr |
| 57 | A | 2010 | 64.78 | 02/05 0333 (036) | 02/05 1240 | 13.33 | 12.88 | 400 | 8.20 | 1.64 | 0.48 | F+ |
| 58 | A | 2010 | 65.82 | 03/05 1825 (064) | 03/05 1825 | 15.75 | 10.57 | 356 | 10.10 | -10.23 | 0.46 | E |
| 59 | A | 2010 | 68.97 | 04/23 0035 (113) | 04/23 0627 | 7.65 | 10.48 | 415 | 6.84 | 11.07 | 0.47 | F+ |
| 60 | A | 2010 | 72.29 | 05/30 1500 (150) | 05/31 0026 | 13.57 | 7.08 | 407 | 5.54 | 3.75 | 0.43 | F+ |
| 61 | A | 2010 | 72.66 | 06/03 0836 (154) | 06/03 1230 | 14.27 | 11.38 | 368 | 11.20 | 0.66 | 0.48 | E |
| 62 | A | 2010 | 73.98 | 06/16 1620 (167) | 06/16 1620 | 35.40 | 7.48 | 446 | 4.86 | 47.34 | 0.51 | E |
| 63 | A | 2010 | 79.84 | 08/17 1740 (229) | 08/18 0735 | 22.42 | 5.98 | 336 | 4.42 | 18.79 | 0.49 | F- |
| 64 | A | 2010 | 80.08 | 08/20 1614 (232) | 08/20 2222 | 14.87 | 11.39 | 552 | 13.70 | 35.56 | 0.34 | E |
| 65 | A | 2010 | 80.87 | 08/30 2138 (242) | 08/30 2138 | 11.90 | 13.56 | 444 | 5.30 | -25.85 | 0.39 | E |
| 66 | A | 2010 | 81.4 | 09/07 0829 (250) | 09/07 0829 | 24.58 | 7.92 | 486 | 7.85 | 42.02 | 0.39 | E |
| 67 | A | 2010 | 81.67 | 09/11 0659 (254) | 09/11 1645 | 37.17 | 11.56 | 470 | 4.19 | 102.25 | 0.39 | Fr |
| 68 | A | 2010 | 82.09 | 09/17 2234 (260) | 09/18 0622 | 23.98 | 12.48 | 384 | 2.79 | 27.10 | 0.44 | F+ |
| 69 | A | 2010 | 64.28 | 01/14 1716 (014) | 01/15 1020 | 17.67 | 9.34 | 332 | 15.80 | -33.60 | 0.51 | E |
| 70 | B | 2010 | 69.88 | 01/20 2020 (020) | 01/20 2020 | 26.47 | 6.25 | 316 | 4.98 | 15.66 | 0.50 | F+ |
| 71 | B | 2010 | 71.08 | 02/14 0750 (045) | 02/14 0750 | 25.73 | 5.77 | 389 | 0.37 | 42.39 | 0.51 | E |
| 72 | B | 2010 | 70.95 | 04/13 2211 (103) | 04/13 2211 | 11.58 | 11.88 | 414 | 10.50 | -0.50 | 0.51 | Fr |
| 73 | B | 2010 | 69.79 | 06/07 0408 (158) | 06/07 2221 | 14.15 | 8.24 | 369 | 10.80 | 23.34 | 0.39 | E |
| 74 | B | 2010 | 69.77 | 06/15 0404 (166) | 06/15 0404 | 33.93 | 4.80 | 387 | 3.93 | 76.11 | 0.48 | Fr |
| 75 | B | 2010 | 69.83 | 06/23 0800 (174) | 06/23 0800 | 43.50 | 5.99 | 454 | 5.49 | 58.85 | 0.54 | E |
| 76 | B | 2010 | 71.3 | 08/03 0500 (215) | 08/03 0500 | 4.83 | 27.78 | 634 | 4.44 | -32.80 | 0.49 | E |
| 77 | B | 2010 | 75.3 | 09/16 1050 (259) | 09/16 1050 | 20.37 | 9.75 | 420 | 3.35 | -131.01 | 0.50 | E |
| 78 | B | 2010 | 75.71 | 09/19 2322 (262) | 09/19 2322 | 7.38 | 4.73 | 497 | 0.60 | 13.51 | 0.46 | E |
| 79 | B | 2010 | 81.18 | 10/30 1730 (303) | 10/30 1730 | 13.83 | 7.87 | 372 | 6.43 | 8.09 | 0.42 | E |
| 80 | B | 2010 | 82.41 | 11/08 0246 (312) | 11/08 0246 | 30.33 | 16.19 | 398 | 4.09 | -15.79 | 0.51 | F+ |
| 81 | B | 2010 | 84.14 | 11/19 2026 (323) | 11/20 0634 | 26.60 | 10.37 | 399 | 3.00 | 59.36 | 0.47 | Fr |
| 82 | B | 2010 | 85.92 | 12/02 0240 (336) | 12/02 0955 | 25.27 | 6.36 | 341 | 3.20 | 9.53 | 0.45 | E |
| 83 | B | 2010 | 87.98 | 12/16 2000 (350) | 12/17 0150 | 32.92 | 8.37 | 353 | 2.45 | 52.93 | 0.44 | F+ |
| 84 | B | 2010 | 89.17 | 12/25 2020 (359) | 12/25 2020 | 33.67 | 8.62 | 304 | 5.50 | 3.30 | 0.58 | F+ |
| 85 | A | 2011 | 85.86 | 01/16 0540 (016) | 01/16 0540 | 28.50 | 14.50 | 421 | 6.79 | 7.99 | 0.51 | F+ |
| 86 | A | 2011 | 86.13 | 01/26 1509 (026) | 01/26 1509 | 11.93 | 7.66 | 448 | 1.48 | 2.88 | 0.53 | F+ |

| | | | | | | | | | | | | |
|-----|---|------|--------|------------------|------------|-------|-------|-----|-------|--------|------|----|
| 87 | A | 2011 | 86.29 | 02/01 1025 (032) | 02/01 1025 | 32.25 | 9.34 | 366 | 4.06 | -14.57 | 0.55 | Cx |
| 88 | A | 2011 | 86.35 | 02/03 1035 (034) | 02/03 1035 | 5.00 | 6.98 | 350 | 2.93 | -0.31 | 0.50 | F |
| 89 | A | 2011 | 86.36 | 02/03 1700 (034) | 02/03 1700 | 9.80 | 7.49 | 335 | 5.48 | -13.60 | 0.53 | F+ |
| 90 | A | 2011 | 87.75 | 03/09 0647 (068) | 03/09 0647 | 7.22 | 12.50 | 755 | 12.00 | -41.50 | 0.29 | E |
| 91 | A | 2011 | 87.89 | 03/12 0025 (071) | 03/12 0025 | 16.37 | 5.84 | 477 | 2.29 | 28.63 | 0.49 | E |
| 92 | A | 2011 | 88.32 | 03/19 1124 (078) | 03/19 2334 | 25.93 | 9.42 | 444 | 4.32 | 42.08 | 0.42 | E |
| 93 | A | 2011 | 88.48 | 03/22 0357 (081) | 03/23 0655 | 58.58 | 6.70 | 515 | 0.95 | 158.87 | 0.32 | E |
| 94 | A | 2011 | 89.46 | 04/05 2143 (095) | 04/06 0940 | 14.02 | 10.25 | 515 | 5.49 | 3.06 | 0.39 | Fr |
| 95 | A | 2011 | 89.87 | 04/11 1208 (101) | 04/11 1814 | 16.43 | 6.43 | 657 | 1.32 | 7.77 | 0.38 | E |
| 96 | A | 2011 | 90.16 | 04/15 0752 (105) | 04/15 0752 | 25.55 | 10.46 | 413 | 6.80 | 26.99 | 0.53 | F+ |
| 97 | A | 2011 | 90.63 | 04/21 0712 (111) | 04/21 0712 | 27.77 | 8.21 | 330 | 5.07 | 28.88 | 0.58 | E |
| 98 | A | 2011 | 90.81 | 04/23 1000 (113) | 04/23 1000 | 21.53 | 6.98 | 313 | 5.35 | 27.17 | 0.45 | F |
| 99 | A | 2011 | 91.22 | 04/28 0900 (118) | 04/28 0900 | 35.12 | 6.44 | 366 | 3.39 | 57.66 | 0.36 | F |
| 100 | A | 2011 | 91.95 | 05/06 2200 (126) | 05/06 2200 | 6.18 | 13.29 | 433 | 13.70 | 8.28 | 0.55 | F+ |
| 101 | A | 2011 | 94.74 | 06/05 1859 (156) | 06/06 1222 | 13.27 | 10.92 | 922 | 0.44 | 88.47 | 0.23 | E |
| 102 | A | 2011 | 98.25 | 07/12 0347 (193) | 07/12 1800 | 18.25 | 3.71 | 419 | 1.62 | 25.72 | 0.49 | E |
| 103 | A | 2011 | 99.28 | 07/23 0941 (204) | 07/23 0941 | 26.07 | 8.96 | 373 | 10.90 | 31.61 | 0.56 | E |
| 104 | A | 2011 | 100.51 | 08/06 1242 (218) | 08/06 1638 | 27.00 | 8.97 | 473 | 5.98 | -50.80 | 0.56 | E |
| 105 | A | 2011 | 101.1 | 08/13 1943 (225) | 08/13 2240 | 16.52 | 7.30 | 453 | 2.88 | 27.89 | 0.41 | E |
| 106 | A | 2011 | 102.74 | 09/04 2240 (247) | 09/04 2240 | 12.47 | 7.64 | 325 | 11.70 | -11.02 | 0.48 | F |
| 107 | A | 2011 | 103.93 | 09/24 0830 (267) | 09/24 0830 | 33.50 | 8.46 | 466 | 9.73 | 27.75 | 0.49 | E |
| 108 | A | 2011 | 104.34 | 10/02 0653 (275) | 10/03 0627 | 27.55 | 12.38 | 444 | 5.32 | 34.74 | 0.37 | E |
| 109 | A | 2011 | 105.33 | 10/25 0451 (298) | 10/25 1547 | 24.22 | 6.50 | 405 | 4.54 | -0.09 | 0.37 | E |
| 110 | A | 2011 | 106.28 | 11/25 2139 (329) | 11/26 0130 | 12.00 | 5.84 | 444 | 4.21 | 18.12 | 0.45 | E |
| 111 | A | 2011 | 106.3 | 11/26 1809 (330) | 11/27 0020 | 28.67 | 5.89 | 460 | 5.12 | 43.02 | 0.44 | E |
| 112 | A | 2011 | 106.34 | 11/28 1451 (332) | 11/28 1920 | 26.83 | 6.12 | 464 | 3.43 | 87.95 | 0.39 | E |
| 113 | A | 2011 | 106.43 | 12/02 0545 (336) | 12/02 0545 | 14.72 | 6.15 | 427 | 1.36 | 9.04 | 0.51 | E |
| 114 | A | 2011 | 106.54 | 12/06 2243 (340) | 12/07 0655 | 11.08 | 5.84 | 333 | 8.55 | 12.05 | 0.49 | E |
| 115 | A | 2011 | 106.86 | 12/21 0927 (355) | 12/21 0927 | 31.13 | 4.49 | 579 | 3.22 | 30.50 | 0.42 | E |
| 116 | B | 2011 | 91.8 | 01/17 1546 (017) | 01/18 0000 | 9.63 | 6.79 | 339 | 5.94 | 24.35 | 0.43 | E |
| 117 | B | 2011 | 91.89 | 01/18 1250 (018) | 01/18 1250 | 9.17 | 7.29 | 322 | 1.63 | -2.06 | 0.49 | F |

| | | | | | | | | | | | | |
|-----|---|------|--------|------------------|------------|-------|-------|-----|-------|--------|------|----|
| 118 | B | 2011 | 94.63 | 02/26 0828 (057) | 02/26 1600 | 31.00 | 7.11 | 605 | 1.27 | 90.63 | 0.30 | F+ |
| 119 | B | 2011 | 94.93 | 03/07 0831 (066) | 03/07 1910 | 22.18 | 10.26 | 418 | 10.70 | 25.76 | 0.37 | F |
| 120 | B | 2011 | 95.02 | 03/11 0523 (070) | 03/11 1518 | 20.70 | 10.01 | 418 | 4.07 | 32.88 | 0.42 | E |
| 121 | B | 2011 | 95.13 | 03/20 1546 (079) | 03/21 1000 | 17.00 | 9.42 | 433 | 4.43 | 12.36 | 0.49 | E |
| 122 | B | 2011 | 95.13 | 03/28 0853 (087) | 03/28 1748 | 25.00 | 7.44 | 577 | 3.42 | 78.76 | 0.32 | E |
| 123 | B | 2011 | 95.1 | 03/31 2338 (090) | 04/01 0400 | 9.83 | 16.83 | 519 | 12.10 | 36.37 | 0.45 | E |
| 124 | B | 2011 | 95.09 | 04/01 2100 (091) | 04/01 2100 | 13.00 | 9.26 | 481 | 2.06 | 25.63 | 0.41 | E |
| 125 | B | 2011 | 95.06 | 04/04 1700 (094) | 04/04 1700 | 22.12 | 6.14 | 371 | 6.60 | 24.86 | 0.55 | F |
| 126 | B | 2011 | 94.93 | 04/12 0309 (102) | 04/12 0309 | 20.15 | 6.69 | 359 | 2.53 | 26.26 | 0.45 | E |
| 127 | B | 2011 | 94.24 | 05/04 1906 (124) | 05/04 1906 | 13.32 | 7.07 | 435 | 6.88 | -2.53 | 0.50 | E |
| 128 | B | 2011 | 93.22 | 06/01 0725 (152) | 06/01 1735 | 24.42 | 13.97 | 442 | 3.58 | 31.84 | 0.37 | E |
| 129 | B | 2011 | 92.75 | 06/17 0740 (168) | 06/17 0740 | 20.33 | 15.62 | 526 | 6.39 | 4.75 | 0.45 | E |
| 130 | B | 2011 | 92.56 | 06/26 1810 (177) | 06/26 1810 | 5.08 | 13.26 | 393 | 8.52 | -15.77 | 0.50 | E |
| 131 | B | 2011 | 92.52 | 06/30 1318 (181) | 06/30 1318 | 11.12 | 8.22 | 355 | 5.35 | -0.19 | 0.54 | F |
| 132 | B | 2011 | 92.6 | 07/23 0705 (204) | 07/23 0705 | 4.92 | 7.17 | 285 | 4.37 | 3.19 | 0.48 | F |
| 133 | B | 2011 | 96.38 | 09/21 0614 (264) | 09/21 0614 | 5.43 | 10.44 | 419 | 1.17 | 1.24 | 0.45 | E |
| 134 | B | 2011 | 96.69 | 09/24 0358 (267) | 09/24 0500 | 4.10 | 14.75 | 578 | 19.80 | 49.07 | 0.46 | E |
| 135 | B | 2011 | 96.71 | 09/24 0906 (267) | 09/24 1236 | 6.87 | 21.67 | 755 | 7.69 | 31.71 | 0.42 | E |
| 136 | B | 2011 | 97.82 | 10/03 2223 (276) | 10/04 0200 | 10.67 | 20.78 | 678 | 4.06 | 19.56 | 0.42 | E |
| 137 | B | 2011 | 98.26 | 10/07 1126 (280) | 10/07 1126 | 19.03 | 6.24 | 453 | 7.28 | 44.37 | 0.37 | E |
| 138 | B | 2011 | 99.74 | 10/18 1920 (291) | 10/18 1920 | 12.67 | 14.34 | 389 | 13.00 | 27.31 | 0.47 | E |
| 139 | B | 2011 | 101.24 | 10/29 1000 (302) | 10/29 1700 | 44.38 | 10.22 | 385 | 4.05 | 55.69 | 0.45 | F+ |
| 140 | B | 2011 | 102.39 | 11/06 0510 (310) | 11/06 2250 | 53.17 | 6.92 | 475 | 2.02 | 91.44 | 0.39 | E |
| 141 | B | 2011 | 104.59 | 11/20 1338 (324) | 11/20 2240 | 26.50 | 11.60 | 507 | 5.43 | 15.98 | 0.40 | F+ |
| 142 | B | 2011 | 106.49 | 12/02 1603 (336) | 12/02 1603 | 18.95 | 3.07 | 429 | 2.26 | -0.50 | 0.48 | E |
| 143 | B | 2011 | 110.23 | 12/26 2350 (360) | 12/27 0700 | 28.00 | 11.53 | 365 | 9.83 | -23.99 | 0.53 | Cx |
| 144 | A | 2012 | 107.11 | 01/01 1322 (001) | 01/01 1700 | 11.00 | 11.68 | 418 | 10.50 | 4.15 | 0.51 | E |
| 145 | A | 2012 | 107.21 | 01/05 2040 (005) | 01/05 2040 | 16.27 | 19.19 | 436 | 8.19 | -1.07 | 0.52 | E |
| 146 | A | 2012 | 107.77 | 01/25 2210 (025) | 01/25 2210 | 23.83 | 7.04 | 504 | 4.40 | 79.51 | 0.50 | E |
| 147 | A | 2012 | 107.88 | 01/29 1304 (029) | 01/29 1304 | 29.93 | 16.98 | 567 | 14.20 | 4.23 | 0.24 | E |
| 148 | A | 2012 | 108.76 | 02/21 0505 (052) | 02/21 0505 | 4.17 | 20.48 | 356 | 6.67 | 17.46 | 0.54 | E |

| | | | | | | | | | | | | |
|-----|---|------|--------|------------------|------------|-------|-------|-----|-------|--------|------|----|
| 149 | A | 2012 | 109.31 | 03/03 1000 (063) | 03/03 1000 | 8.00 | 13.67 | 395 | 4.88 | 26.22 | 0.50 | E |
| 150 | A | 2012 | 109.36 | 03/04 1034 (064) | 03/04 1034 | 11.43 | 9.39 | 406 | 7.13 | 5.50 | 0.41 | F |
| 151 | A | 2012 | 110.01 | 03/15 2231 (075) | 03/17 0410 | 25.83 | 4.72 | 448 | 1.77 | 31.37 | 0.35 | E |
| 152 | A | 2012 | 110.19 | 03/18 1931 (078) | 03/19 0438 | 11.37 | 13.24 | 471 | 9.21 | 19.67 | 0.52 | F+ |
| 153 | A | 2012 | 110.25 | 03/19 1917 (079) | 03/20 0500 | 9.75 | 13.45 | 641 | 3.14 | 47.39 | 0.47 | E |
| 154 | A | 2012 | 112.44 | 04/19 1007 (110) | 04/19 1007 | 10.88 | 19.57 | 374 | 12.80 | -8.44 | 0.50 | E |
| 155 | A | 2012 | 114.94 | 05/18 1243 (139) | 05/18 2122 | 11.83 | 7.47 | 779 | 0.71 | 57.68 | 0.43 | E |
| 156 | A | 2012 | 115.44 | 05/24 0100 (145) | 05/24 0100 | 18.37 | 7.81 | 425 | 5.24 | 20.45 | 0.46 | E |
| 157 | A | 2012 | 115.81 | 05/28 0248 (149) | 05/28 0900 | 19.37 | 20.61 | 761 | 1.62 | 123.53 | 0.26 | E |
| 158 | A | 2012 | 117.97 | 06/20 0820 (172) | 06/20 0820 | 20.12 | 11.78 | 359 | 4.91 | -7.65 | 0.59 | F |
| 159 | A | 2012 | 118.48 | 06/25 2055 (177) | 06/25 2055 | 86.58 | 6.78 | 383 | 3.54 | 23.58 | 0.54 | Cx |
| 160 | A | 2012 | 119.84 | 07/10 1855 (192) | 07/11 0910 | 42.83 | 6.85 | 567 | 2.80 | 131.93 | 0.33 | E |
| 161 | A | 2012 | 120.31 | 07/16 0045 (198) | 07/16 0045 | 17.25 | 6.92 | 350 | 0.16 | -1.40 | 0.48 | F |
| 162 | A | 2012 | 120.4 | 07/17 0340 (199) | 07/17 0340 | 20.75 | 5.95 | 347 | 3.14 | 9.97 | 0.53 | E |
| 163 | A | 2012 | 120.73 | 07/20 2243 (202) | 07/21 1140 | 14.83 | 7.20 | 618 | 4.38 | 41.16 | 0.41 | Fr |
| 164 | A | 2012 | 122.04 | 08/05 1537 (218) | 08/06 0400 | 26.00 | 11.12 | 413 | 6.70 | 26.80 | 0.54 | Cx |
| 165 | A | 2012 | 122.66 | 08/13 1423 (226) | 08/13 1423 | 37.87 | 8.34 | 416 | 7.66 | -6.83 | 0.42 | E |
| 166 | A | 2012 | 124.49 | 09/09 0007 (253) | 09/09 0007 | 15.75 | 9.27 | 324 | 5.42 | 1.33 | 0.50 | Fr |
| 167 | A | 2012 | 124.65 | 09/11 1710 (255) | 09/12 0734 | 41.68 | 8.96 | 344 | 4.00 | 20.37 | 0.43 | F+ |
| 168 | A | 2012 | 124.96 | 09/16 2311 (260) | 09/16 2311 | 35.95 | 7.46 | 362 | 5.72 | 40.06 | 0.48 | E |
| 169 | A | 2012 | 125.13 | 09/19 2145 (263) | 09/20 1422 | 32.22 | 9.44 | 400 | 3.00 | -3.80 | 0.46 | Fr |
| 170 | A | 2012 | 125.33 | 09/23 1428 (267) | 09/23 2100 | 14.00 | 6.81 | 538 | 3.29 | 21.79 | 0.34 | E |
| 171 | A | 2012 | 125.92 | 10/05 0251 (279) | 10/05 1610 | 43.83 | 8.61 | 383 | 4.63 | 35.90 | 0.44 | Fr |
| 172 | A | 2012 | 126.19 | 10/11 0146 (285) | 10/11 2238 | 27.87 | 9.08 | 352 | 5.06 | 13.60 | 0.43 | E |
| 173 | A | 2012 | 126.67 | 10/22 1535 (296) | 10/23 2006 | 5.45 | 7.77 | 351 | 3.02 | 10.22 | 0.49 | E |
| 174 | A | 2012 | 126.8 | 10/26 0042 (300) | 10/26 1036 | 24.40 | 8.13 | 359 | 3.99 | 7.18 | 0.50 | F+ |
| 175 | A | 2012 | 127.35 | 11/10 2230 (315) | 11/11 0045 | 12.55 | 17.07 | 473 | 17.50 | 32.76 | 0.47 | E |
| 176 | A | 2012 | 127.38 | 11/11 2119 (316) | 11/12 1523 | 23.70 | 5.72 | 429 | 1.72 | 47.19 | 0.52 | F |
| 177 | A | 2012 | 127.44 | 11/13 2057 (318) | 11/14 1042 | 46.05 | 10.63 | 374 | 3.19 | 60.89 | 0.39 | F+ |
| 178 | A | 2012 | 127.73 | 11/23 1827 (328) | 11/23 2220 | 40.10 | 6.30 | 416 | 7.22 | -0.16 | 0.38 | E |
| 179 | A | 2012 | 127.8 | 11/26 0757 (331) | 11/26 1500 | 34.37 | 9.10 | 420 | 4.65 | 61.28 | 0.46 | E |

| | | | | | | | | | | | | |
|-----|---|------|--------|------------------|------------|-------|-------|-----|-------|--------|------|----|
| 180 | B | 2012 | 112.3 | 01/10 1222 (010) | 01/11 1743 | 19.98 | 5.04 | 416 | 4.36 | 35.65 | 0.47 | E |
| 181 | B | 2012 | 113.08 | 01/16 0949 (016) | 01/17 0730 | 25.50 | 10.06 | 345 | 2.05 | 10.47 | 0.48 | F |
| 182 | B | 2012 | 113.42 | 01/19 0146 (019) | 01/19 0146 | 14.95 | 10.82 | 454 | 9.20 | 7.07 | 0.41 | E |
| 183 | B | 2012 | 114.79 | 01/30 1107 (030) | 01/30 1107 | 17.73 | 5.51 | 407 | 8.83 | 33.63 | 0.50 | E |
| 184 | B | 2012 | 117.9 | 03/08 1336 (068) | 03/09 0100 | 10.50 | 3.97 | 697 | 0.69 | 35.92 | 0.45 | F |
| 185 | B | 2012 | 118.01 | 03/10 2117 (070) | 03/11 0134 | 44.28 | 6.50 | 579 | 2.16 | 137.29 | 0.58 | Cx |
| 186 | B | 2012 | 163.24 | 03/26 1630 (086) | 03/26 1745 | 34.12 | 9.60 | 434 | 11.90 | 20.02 | 0.39 | E |
| 187 | B | 2012 | 118.55 | 03/28 2137 (088) | 03/28 2310 | 20.50 | 16.10 | 581 | 9.13 | 79.14 | 0.30 | E |
| 188 | B | 2012 | 118.57 | 03/29 2325 (089) | 03/30 0137 | 6.88 | 9.28 | 660 | 1.97 | -36.68 | 0.42 | E |
| 189 | B | 2012 | 118.54 | 04/17 0336 (108) | 04/17 0940 | 23.42 | 5.36 | 589 | 1.43 | 65.07 | 0.45 | E |
| 190 | B | 2012 | 117.97 | 05/08 1455 (129) | 05/08 1835 | 15.68 | 18.90 | 424 | 3.53 | 22.34 | 0.37 | E |
| 191 | B | 2012 | 117.93 | 05/09 1330 (130) | 05/09 1330 | 21.17 | 5.95 | 415 | 2.63 | 57.17 | 0.43 | F |
| 192 | B | 2012 | 117.8 | 05/12 2308 (133) | 05/13 0300 | 25.50 | 10.62 | 415 | 3.60 | -28.77 | 0.44 | E |
| 193 | B | 2012 | 116.46 | 06/11 2106 (163) | 06/12 0300 | 16.35 | 9.51 | 431 | 8.27 | 6.72 | 0.45 | E |
| 194 | B | 2012 | 116.18 | 06/18 0800 (170) | 06/18 2347 | 34.22 | 10.01 | 443 | 5.38 | 61.20 | 0.48 | F+ |
| 195 | B | 2012 | 115.78 | 06/28 0838 (180) | 06/28 0838 | 41.70 | 4.71 | 489 | 2.74 | 102.15 | 0.52 | E |
| 196 | B | 2012 | 115.58 | 07/04 0656 (186) | 07/04 1140 | 25.17 | 21.15 | 631 | 4.73 | 75.82 | 0.39 | E |
| 197 | B | 2012 | 115.19 | 07/23 2121 (205) | 07/24 2000 | 16.00 | 10.11 | 332 | 7.05 | -4.26 | 0.56 | E |
| 198 | B | 2012 | 115.16 | 07/28 1459 (210) | 07/28 1708 | 7.87 | 10.05 | 420 | 6.30 | 10.25 | 0.48 | F |
| 199 | B | 2012 | 115.68 | 08/24 2223 (237) | 08/24 2223 | 4.02 | 16.16 | 350 | 9.90 | 32.17 | 0.48 | E |
| 200 | B | 2012 | 115.87 | 08/29 0635 (242) | 08/29 0635 | 24.02 | 5.30 | 377 | 4.87 | 38.06 | 0.33 | E |
| 201 | B | 2012 | 116.13 | 09/03 0711 (247) | 09/04 0530 | 39.47 | 5.03 | 487 | 2.78 | 11.76 | 0.44 | E |
| 202 | B | 2012 | 117.59 | 09/23 0844 (267) | 09/23 2338 | 10.13 | 11.66 | 384 | 6.73 | -7.76 | 0.45 | F |
| 203 | B | 2012 | 117.8 | 09/25 1626 (269) | 09/26 0321 | 61.57 | 8.47 | 521 | 0.67 | 191.61 | 0.34 | Fr |
| 204 | B | 2012 | 119.5 | 10/12 0013 (286) | 10/12 0013 | 36.23 | 5.38 | 395 | 9.04 | 47.97 | 0.43 | E |
| 205 | B | 2012 | 120.14 | 10/17 0657 (291) | 10/17 1120 | 33.92 | 8.62 | 308 | 4.81 | 21.79 | 0.34 | E |
| 206 | B | 2012 | 121.23 | 10/25 1910 (299) | 10/26 0400 | 30.00 | 9.32 | 375 | 7.87 | -7.44 | 0.43 | F+ |
| 207 | B | 2012 | 122.51 | 11/04 0122 (309) | 11/04 0122 | 40.63 | 4.55 | 313 | 3.19 | 32.66 | 0.39 | E |
| 208 | B | 2012 | 123.61 | 11/11 1336 (316) | 11/11 1336 | 26.57 | 8.28 | 438 | 10.20 | 10.66 | 0.36 | E |
| 209 | B | 2012 | 124.81 | 11/19 0950 (324) | 11/19 1230 | 11.93 | 17.67 | 424 | 20.20 | 25.66 | 0.50 | E |
| 210 | B | 2012 | 124.91 | 11/20 0200 (325) | 11/20 0200 | 10.67 | 16.07 | 376 | 7.27 | 41.43 | 0.51 | E |

| | | | | | | | | | | | | |
|-----|---|------|--------|------------------|------------|--------|-------|-----|-------|--------|------|----|
| 211 | B | 2012 | 126.19 | 11/28 0336 (333) | 11/28 0737 | 23.38 | 6.22 | 314 | 4.69 | 13.82 | 0.47 | F |
| 212 | B | 2012 | 130.56 | 12/25 0037 (360) | 12/25 0633 | 15.65 | 9.48 | 368 | 11.30 | 13.35 | 0.44 | E |
| 213 | A | 2013 | 132.95 | 01/09 0225 (009) | 01/09 1038 | 30.65 | 12.30 | 444 | 6.07 | 13.88 | 0.37 | E |
| 214 | A | 2013 | 130.06 | 02/08 0744 (039) | 02/08 1822 | 32.97 | 6.45 | 301 | 4.88 | 12.54 | 0.39 | E |
| 215 | A | 2013 | 138.5 | 02/19 0744 (050) | 02/19 0744 | 22.45 | 13.56 | 398 | 5.52 | -6.46 | 0.51 | E |
| 216 | A | 2013 | 131.03 | 02/28 2114 (059) | 03/01 1330 | 102.92 | 7.57 | 390 | 1.41 | 45.00 | 0.37 | F |
| 217 | A | 2013 | 131.42 | 03/08 0220 (067) | 00/00 0220 | 30.72 | 6.04 | 350 | 9.90 | 47.56 | 0.37 | E |
| 218 | A | 2013 | 132.53 | 03/26 0245 (085) | 03/26 0916 | 11.65 | 7.58 | 446 | 5.13 | 23.02 | 0.42 | E |
| 219 | A | 2013 | 132.63 | 03/27 1609 (086) | 03/27 2032 | 9.47 | 4.82 | 408 | 3.40 | 32.19 | 0.46 | F |
| 220 | A | 2013 | 134.08 | 04/16 1536 (106) | 04/16 1536 | 29.48 | 15.45 | 433 | 4.77 | 18.36 | 0.47 | E |
| 221 | A | 2013 | 134.2 | 04/18 0610 (108) | 04/18 0610 | 5.08 | 9.22 | 353 | 1.27 | 1.76 | 0.48 | E |
| 222 | A | 2013 | 134.53 | 04/22 1008 (112) | 04/23 0000 | 19.50 | 7.28 | 544 | 2.11 | 33.82 | 0.46 | E |
| 223 | A | 2013 | 134.91 | 04/27 0419 (117) | 04/27 0655 | 16.08 | 5.70 | 376 | 5.58 | 9.25 | 0.40 | E |
| 224 | A | 2013 | 134.98 | 04/27 2332 (117) | 04/27 2332 | 19.70 | 7.65 | 393 | 5.19 | -3.33 | 0.45 | E |
| 225 | A | 2013 | 135.38 | 05/02 2102 (122) | 05/03 0550 | 34.33 | 14.82 | 468 | 4.01 | 52.73 | 0.43 | Fr |
| 226 | A | 2013 | 136.23 | 05/12 2330 (132) | 05/13 1600 | 44.60 | 3.85 | 475 | 1.74 | 67.53 | 0.48 | E |
| 227 | A | 2013 | 137.29 | 05/25 0605 (145) | 05/25 0605 | 19.42 | 9.64 | 407 | 13.10 | 8.39 | 0.42 | E |
| 228 | A | 2013 | 136.87 | 06/20 1113 (171) | 06/20 1113 | 22.40 | 13.25 | 438 | 3.50 | 29.20 | 0.47 | F+ |
| 229 | A | 2013 | 137.51 | 06/27 1617 (178) | 06/27 1617 | 8.33 | 11.46 | 358 | 7.23 | 7.24 | 0.44 | E |
| 230 | A | 2013 | 141.73 | 07/14 2320 (195) | 07/14 2320 | 38.10 | 4.72 | 296 | 0.94 | -13.87 | 0.52 | E |
| 231 | A | 2013 | 142.58 | 07/25 0612 (206) | 07/25 1152 | 24.13 | 21.97 | 471 | 15.30 | 33.88 | 0.34 | E |
| 232 | A | 2013 | 142.79 | 07/27 1852 (208) | 07/28 0150 | 21.78 | 7.64 | 529 | 4.01 | 36.51 | 0.49 | Fr |
| 233 | A | 2013 | 143.84 | 08/10 0916 (222) | 08/10 1724 | 37.60 | 11.53 | 367 | 2.19 | 51.05 | 0.39 | F+ |
| 234 | A | 2013 | 144.7 | 08/22 0705 (234) | 08/22 2315 | 48.17 | 10.28 | 393 | 1.69 | 29.56 | 0.34 | E |
| 235 | A | 2013 | 145.36 | 09/01 0110 (244) | 09/01 0947 | 10.35 | 7.10 | 344 | 2.83 | 14.62 | 0.42 | E |
| 236 | A | 2013 | 146.57 | 09/21 0600 (264) | 09/21 1820 | 29.00 | 9.20 | 380 | 3.92 | 19.48 | 0.48 | E |
| 237 | A | 2013 | 147.26 | 10/04 0428 (277) | 10/05 0108 | 45.08 | 9.35 | 307 | 3.71 | 23.45 | 0.44 | F+ |
| 238 | A | 2013 | 148.11 | 10/22 1701 (295) | 10/23 0412 | 31.42 | 7.78 | 309 | 3.92 | 18.88 | 0.45 | Fr |
| 239 | A | 2013 | 148.49 | 11/01 1055 (305) | 11/01 1055 | 37.85 | 9.07 | 431 | 10.90 | 6.77 | 0.37 | E |
| 240 | A | 2013 | 148.6 | 11/04 0856 (308) | 11/04 2000 | 29.50 | 11.61 | 538 | 3.17 | 76.79 | 0.46 | E |
| 241 | A | 2013 | 148.86 | 11/11 1031 (315) | 11/12 0200 | 25.00 | 7.51 | 372 | 2.45 | 4.42 | 0.43 | Fr |

| | | | | | | | | | | | | |
|-----|---|------|--------|------------------|------------|-------|-------|-----|-------|--------|------|----|
| 242 | A | 2013 | 148.94 | 11/13 1700 (317) | 11/13 1700 | 10.00 | 5.11 | 390 | 5.07 | 5.28 | 0.43 | E |
| 243 | A | 2013 | 148.96 | 11/14 0550 (318) | 11/14 0900 | 12.00 | 6.18 | 407 | 2.77 | -8.49 | 0.35 | E |
| 244 | A | 2013 | 149.11 | 11/18 1824 (322) | 11/19 0031 | 46.35 | 6.68 | 300 | 4.55 | 10.77 | 0.47 | E |
| 245 | A | 2013 | 149.37 | 11/26 1930 (330) | 11/26 1930 | 12.00 | 10.76 | 363 | 7.44 | -17.23 | 0.50 | E |
| 246 | A | 2013 | 149.54 | 12/01 2229 (335) | 12/02 0600 | 49.67 | 17.21 | 503 | 3.82 | 90.15 | 0.33 | E |
| 247 | A | 2013 | 150.27 | 12/25 1149 (359) | 12/25 1149 | 10.68 | 11.01 | 381 | 3.91 | -31.05 | 0.50 | E |
| 248 | A | 2013 | 150.34 | 12/27 2222 (361) | 12/27 2222 | 29.27 | 2.79 | 390 | 1.99 | 38.59 | 0.49 | E |
| 249 | B | 2013 | 137.22 | 02/08 0820 (039) | 02/08 0820 | 7.13 | 8.54 | 302 | 8.74 | -14.52 | 0.51 | E |
| 250 | B | 2013 | 138.37 | 02/18 0306 (049) | 02/18 0824 | 33.60 | 9.84 | 425 | 10.00 | -28.35 | 0.36 | E |
| 251 | B | 2013 | 140.04 | 03/07 1223 (066) | 03/08 0800 | 48.75 | 7.70 | 446 | 1.41 | -19.68 | 0.45 | E |
| 252 | B | 2013 | 141.15 | 03/24 0520 (083) | 03/24 0520 | 16.67 | 14.18 | 383 | 5.94 | -33.84 | 0.50 | E |
| 253 | B | 2013 | 141.76 | 04/09 2340 (099) | 04/09 2340 | 14.33 | 9.60 | 313 | 1.71 | 3.73 | 0.50 | E |
| 254 | B | 2013 | 141.87 | 04/27 0109 (117) | 04/27 0500 | 15.22 | 7.63 | 438 | 4.77 | 8.31 | 0.43 | F- |
| 255 | B | 2013 | 141.86 | 04/28 1938 (118) | 04/28 1938 | 21.20 | 5.80 | 376 | 3.77 | 34.53 | 0.43 | E |
| 256 | B | 2013 | 141.79 | 05/04 0452 (124) | 05/04 1500 | 42.67 | 8.86 | 373 | 2.78 | 15.10 | 0.30 | E |
| 257 | B | 2013 | 141.73 | 05/07 0437 (127) | 05/07 0437 | 14.75 | 10.70 | 361 | 8.17 | 10.30 | 0.52 | F+ |
| 258 | B | 2013 | 141.51 | 05/15 1334 (135) | 05/16 0116 | 14.73 | 6.10 | 606 | 3.03 | 31.13 | 0.30 | E |
| 259 | B | 2013 | 141.46 | 05/17 0254 (137) | 05/17 0254 | 21.10 | 7.32 | 580 | 2.81 | 50.40 | 0.48 | E |
| 260 | B | 2013 | 140.81 | 06/02 0609 (153) | 06/02 1215 | 92.62 | 6.56 | 403 | 3.14 | 71.98 | 0.38 | E |
| 261 | B | 2013 | 139.95 | 06/19 1508 (170) | 06/19 1508 | 30.87 | 8.18 | 606 | 1.86 | -34.29 | 0.47 | E |
| 262 | B | 2013 | 139.16 | 07/05 0704 (186) | 07/05 0704 | 42.72 | 7.65 | 343 | 7.33 | 28.08 | 0.45 | E |
| 263 | B | 2013 | 137.95 | 08/22 0210 (234) | 08/22 1300 | 18.00 | 6.61 | 552 | 2.41 | 26.68 | 0.42 | E |
| 264 | B | 2013 | 138.16 | 09/03 1550 (246) | 09/03 2230 | 24.28 | 6.71 | 524 | 7.35 | 73.61 | 0.51 | E |
| 265 | B | 2013 | 138.35 | 09/09 1432 (252) | 09/10 0652 | 16.02 | 6.06 | 429 | 2.83 | 4.99 | 0.27 | E |
| 266 | B | 2013 | 138.61 | 09/15 1620 (258) | 09/16 0420 | 20.08 | 5.46 | 303 | 4.41 | 9.86 | 0.50 | F+ |
| 267 | B | 2013 | 140.14 | 10/08 0454 (281) | 10/08 1725 | 30.17 | 6.02 | 416 | 3.13 | 55.16 | 0.40 | Fr |
| 268 | B | 2013 | 141.4 | 10/21 1823 (294) | 10/21 1823 | 35.12 | 7.08 | 292 | 4.12 | 0.16 | 0.56 | E |
| 269 | B | 2013 | 143.26 | 11/05 0243 (309) | 11/05 0243 | 21.07 | 9.93 | 359 | 12.90 | 26.69 | 0.41 | E |
| 270 | B | 2013 | 143.3 | 11/06 0200 (310) | 11/06 1338 | 24.37 | 4.99 | 628 | 0.97 | 64.72 | 0.40 | F- |
| 271 | B | 2013 | 143.63 | 11/08 1328 (312) | 11/08 1844 | 36.52 | 15.79 | 763 | 0.74 | 98.43 | 0.36 | E |
| 272 | B | 2013 | 145.84 | 11/24 0322 (328) | 11/24 0322 | 18.83 | 7.22 | 384 | 2.49 | 16.41 | 0.49 | F+ |

| | | | | | | | | | | | | |
|-----|---|------|--------|------------------|------------|-------|-------|-----|-------|--------|------|----|
| 273 | B | 2013 | 148.13 | 12/08 1822 (342) | 12/09 0225 | 40.25 | 4.34 | 415 | 3.84 | 35.28 | 0.44 | E |
| 274 | B | 2013 | 149.56 | 12/17 1329 (351) | 12/18 0205 | 60.92 | 3.79 | 354 | 4.14 | 43.96 | 0.34 | E |
| 275 | B | 2013 | 150.18 | 12/21 0825 (355) | 12/21 0825 | 15.58 | 7.20 | 341 | 3.15 | 34.09 | 0.48 | E |
| 276 | B | 2013 | 151.4 | 12/28 1706 (362) | 12/29 0412 | 33.80 | 14.19 | 455 | 7.62 | 55.79 | 0.40 | E |
| 277 | A | 2014 | 153.37 | 01/09 1317 (009) | 01/09 1600 | 21.55 | 13.12 | 511 | 10.10 | 19.40 | 0.39 | E |
| 278 | A | 2014 | 154.06 | 01/13 1717 (013) | 01/13 1717 | 58.25 | 9.35 | 346 | 4.56 | 11.22 | 0.60 | Cx |
| 279 | A | 2014 | 151.49 | 01/29 1813 (029) | 01/29 1813 | 16.95 | 6.78 | 433 | 7.10 | 34.96 | 0.35 | E |
| 280 | A | 2014 | 151.63 | 02/02 0018 (033) | 02/02 0018 | 35.95 | 10.63 | 379 | 11.10 | 8.26 | 0.55 | E |
| 281 | A | 2014 | 151.76 | 02/05 0327 (036) | 02/05 1000 | 21.30 | 9.42 | 428 | 6.95 | 39.72 | 0.39 | E |
| 282 | A | 2014 | 151.81 | 02/06 1134 (037) | 02/06 1134 | 32.93 | 7.42 | 394 | 2.32 | 42.78 | 0.50 | E |
| 283 | A | 2014 | 151.87 | 02/07 2059 (038) | 02/08 0636 | 19.85 | 11.54 | 410 | 5.12 | 26.53 | 0.41 | E |
| 284 | A | 2014 | 152.26 | 02/16 0750 (047) | 02/16 1506 | 25.15 | 7.00 | 583 | 3.74 | 83.97 | 0.44 | E |
| 285 | A | 2014 | 152.55 | 02/22 0800 (053) | 02/22 0849 | 12.98 | 6.60 | 398 | 5.49 | 11.21 | 0.39 | E |
| 286 | A | 2014 | 152.58 | 02/22 2306 (053) | 02/23 1015 | 7.05 | 3.99 | 418 | 3.10 | 10.54 | 0.43 | F |
| 287 | A | 2014 | 152.71 | 02/25 1215 (056) | 02/26 0038 | 7.80 | 5.61 | 377 | 2.28 | -3.17 | 0.55 | E |
| 288 | A | 2014 | 152.83 | 02/27 2046 (058) | 02/27 2046 | 45.82 | 5.06 | 399 | 4.40 | 40.40 | 0.42 | E |
| 289 | A | 2014 | 153.26 | 03/07 1835 (066) | 03/08 0238 | 20.57 | 7.21 | 480 | 5.06 | -21.71 | 0.52 | E |
| 290 | A | 2014 | 153.47 | 03/11 0937 (070) | 03/12 0249 | 46.45 | 8.73 | 421 | 2.69 | 60.22 | 0.44 | F+ |
| 291 | A | 2014 | 153.66 | 03/14 1637 (073) | 03/15 0115 | 13.17 | 8.38 | 556 | 1.94 | 96.50 | 0.48 | E |
| 292 | A | 2014 | 154.69 | 03/30 2138 (089) | 03/31 0105 | 12.25 | 13.30 | 637 | 8.23 | 65.71 | 0.42 | E |
| 293 | A | 2014 | 154.8 | 04/01 1330 (091) | 04/01 1330 | 8.22 | 8.82 | 469 | 3.63 | 22.98 | 0.48 | F+ |
| 294 | A | 2014 | 155.35 | 04/09 1307 (099) | 04/10 0605 | 9.50 | 11.35 | 388 | 8.26 | 7.42 | 0.52 | Fr |
| 295 | A | 2014 | 155.5 | 04/11 1524 (101) | 04/12 1140 | 8.88 | 7.90 | 422 | 1.88 | 17.63 | 0.46 | E |
| 296 | A | 2014 | 157.79 | 05/11 1233 (131) | 05/11 1800 | 36.00 | 14.81 | 548 | 9.47 | -12.64 | 0.45 | E |
| 297 | A | 2014 | 160.08 | 06/08 0144 (159) | 06/08 0144 | 31.75 | 8.44 | 326 | 2.81 | 9.36 | 0.49 | Fr |
| 298 | A | 2014 | 160.19 | 06/09 0930 (160) | 06/10 0410 | 19.67 | 9.09 | 367 | 5.49 | 11.66 | 0.47 | E |
| 299 | A | 2014 | 160.33 | 06/11 0014 (162) | 06/11 0014 | 12.27 | 9.77 | 412 | 13.40 | 0.47 | 0.33 | E |
| 300 | A | 2014 | 160.5 | 06/13 0053 (164) | 06/13 0053 | 7.00 | 7.10 | 374 | 2.36 | -11.36 | 0.54 | E |
| 301 | A | 2014 | 161.38 | 06/23 1100 (174) | 06/23 1100 | 48.00 | 7.66 | 301 | 2.36 | -20.03 | 0.44 | Fr |
| 302 | A | 2014 | 161.92 | 06/29 2330 (180) | 06/29 2330 | 35.20 | 9.45 | 462 | 1.90 | 40.25 | 0.42 | Fr |
| 303 | A | 2014 | 162.31 | 07/04 1653 (185) | 07/04 2227 | 10.40 | 8.24 | 326 | 6.00 | -0.37 | 0.62 | F |

| | | | | | | | | | | | | |
|-----|---|------|--------|------------------|------------|-------|-------|-----|-------|---------|------|----|
| 304 | A | 2014 | 162.97 | 07/12 1718 (193) | 07/13 0630 | 13.50 | 8.97 | 503 | 13.90 | 25.89 | 0.45 | F- |
| 305 | A | 2014 | 165.28 | 08/11 0903 (223) | 08/12 0725 | 36.67 | 13.93 | 381 | 1.03 | 55.07 | 0.39 | Fr |
| 306 | B | 2014 | 155.88 | 01/25 0200 (025) | 01/25 0200 | 13.25 | 7.89 | 370 | 0.83 | -20.75 | 0.44 | F- |
| 307 | B | 2014 | 156.52 | 01/29 0520 (029) | 01/29 1714 | 39.77 | 3.39 | 522 | 1.66 | 131.64 | 0.45 | E |
| 308 | B | 2014 | 157.65 | 02/05 1605 (036) | 02/06 1203 | 46.60 | 10.35 | 335 | 5.49 | 10.78 | 0.45 | E |
| 309 | B | 2014 | 160.67 | 02/28 0423 (059) | 02/28 0423 | 24.62 | 4.50 | 430 | 8.09 | 36.16 | 0.33 | E |
| 310 | B | 2014 | 161.11 | 03/03 2200 (062) | 03/03 2200 | 43.00 | 7.10 | 350 | 2.04 | 56.37 | 0.55 | Fr |
| 311 | B | 2014 | 161.59 | 03/08 0441 (067) | 03/08 2000 | 14.00 | 11.39 | 482 | 2.74 | 55.20 | 0.44 | E |
| 312 | B | 2014 | 162.28 | 03/14 2310 (073) | 03/15 0515 | 36.95 | 9.34 | 523 | 3.85 | 36.79 | 0.20 | E |
| 313 | B | 2014 | 162.61 | 03/18 1200 (077) | 03/18 1200 | 31.37 | 6.57 | 465 | 0.85 | 32.24 | 0.47 | E |
| 314 | B | 2014 | 164.32 | 04/12 0227 (102) | 04/12 2046 | 58.45 | 10.76 | 343 | 3.36 | 79.34 | 0.35 | F+ |
| 315 | B | 2014 | 164.96 | 05/08 0137 (128) | 05/08 2100 | 35.38 | 8.54 | 374 | 2.54 | 64.94 | 0.45 | F+ |
| 316 | B | 2014 | 164.3 | 06/09 0118 (160) | 06/10 0118 | 15.87 | 10.52 | 432 | 0.91 | 35.33 | 0.46 | F+ |
| 317 | B | 2014 | 163.24 | 07/01 1251 (182) | 07/01 2015 | 22.55 | 9.24 | 617 | 1.93 | 15.16 | 0.20 | E |
| 318 | B | 2014 | 161.32 | 08/11 0620 (223) | 08/11 0620 | 56.45 | 8.24 | 477 | 5.57 | 141.35 | 0.49 | E |
| 319 | W | 2016 | — | 01/01 1857 (001) | 01/02 0014 | 10.08 | 7.15 | 450 | 6.86 | -23.33 | 0.43 | F- |
| 320 | W | 2016 | — | 01/05 0740 (005) | 01/05 1116 | 20.88 | 10.07 | 517 | 7.36 | -106.75 | 0.41 | F- |
| 321 | W | 2016 | — | 01/11 0419 (011) | 01/11 0545 | 13.20 | 8.44 | 503 | 2.47 | -101.37 | 0.49 | Fr |
| 322 | W | 2016 | — | 01/16 1019 (016) | 01/16 1340 | 20.88 | 6.48 | 340 | 5.90 | 11.12 | 0.50 | F+ |
| 323 | W | 2016 | — | 01/24 1312 (024) | 01/24 1535 | 21.36 | 5.68 | 464 | 8.18 | 42.58 | 0.51 | Fr |
| 324 | W | 2016 | — | 01/27 0112 (027) | 01/27 0531 | 25.20 | 7.49 | 352 | 7.82 | 3.54 | 0.50 | F+ |
| 325 | W | 2016 | — | 02/02 0043 (033) | 02/02 1019 | 13.68 | 8.14 | 317 | 24.65 | -45.55 | 0.56 | Fr |
| 326 | W | 2016 | — | 02/04 0711 (035) | 02/04 1214 | 23.04 | 8.65 | 450 | 7.35 | -24.22 | 0.43 | E |
| 327 | W | 2016 | — | 02/08 1745 (039) | 02/08 2024 | 23.52 | 9.14 | 400 | 9.95 | -9.92 | 0.53 | E |
| 328 | W | 2016 | — | 02/16 0111 (047) | 02/16 0628 | 23.52 | 10.45 | 567 | 11.93 | -58.23 | 0.38 | E |
| 329 | W | 2016 | — | 03/01 0057 (061) | 03/01 0628 | 32.16 | 9.33 | 391 | 9.95 | -26.79 | 0.49 | F+ |
| 330 | W | 2016 | — | 03/05 2233 (065) | 03/06 0726 | 21.12 | 15.01 | 444 | 17.74 | -109.07 | 0.44 | E |
| 331 | W | 2016 | — | 03/11 0404 (071) | 03/11 0809 | 12.00 | 17.82 | 411 | 30.10 | -92.71 | 0.47 | E |
| 332 | W | 2016 | — | 03/13 1521 (073) | 03/14 1911 | 16.80 | 8.58 | 543 | 8.58 | -3.60 | 0.42 | F |
| 333 | W | 2016 | — | 03/16 1214 (076) | 03/16 1716 | 16.56 | 7.51 | 555 | 4.01 | -20.06 | 0.43 | E |
| 334 | W | 2016 | — | 03/20 0643 (080) | 03/20 1311 | 15.60 | 6.63 | 407 | 4.75 | 9.92 | 0.49 | F+ |

| | | | | | | | | | | | |
|-----|---|------|---|-----------------------------|-------|-------|-----|-------|---------|------|----|
| 335 | W | 2016 | — | 04/02 0907 (093) 04/02 1521 | 20.88 | 7.72 | 445 | 8.55 | 22.62 | 0.38 | F |
| 336 | W | 2016 | — | 04/05 1536 (096) 04/07 1452 | 24.72 | 8.39 | 356 | 16.87 | 16.46 | 0.41 | F |
| 337 | W | 2016 | — | 04/12 0307 (103) 04/12 1200 | 34.32 | 8.83 | 506 | 8.61 | -80.07 | 0.36 | F |
| 338 | W | 2016 | — | 04/14 0600 (105) 04/14 0838 | 22.56 | 7.66 | 415 | 6.63 | 60.64 | 0.43 | F |
| 339 | W | 2016 | — | 04/15 1033 (106) 04/15 1745 | 13.68 | 8.44 | 390 | 8.26 | -39.44 | 0.40 | F |
| 340 | W | 2016 | — | 05/07 2233 (128) 05/08 0321 | 21.60 | 11.81 | 577 | 7.83 | -83.13 | 0.40 | F |
| 341 | W | 2016 | — | 06/05 0740 (157) 06/05 1326 | 25.68 | 8.96 | 573 | 8.48 | -46.28 | 0.35 | E |
| 342 | W | 2016 | — | 06/10 0907 (162) 06/10 1536 | 25.92 | 8.60 | 435 | 8.97 | -91.27 | 0.45 | F |
| 343 | W | 2016 | — | 06/14 1409 (166) 06/14 1926 | 17.04 | 8.51 | 618 | 5.30 | -62.79 | 0.43 | F |
| 344 | W | 2016 | — | 06/22 0838 (174) 06/22 1731 | 24.72 | 8.99 | 384 | 10.80 | -5.87 | 0.45 | F |
| 345 | W | 2016 | — | 07/02 1731 (184) 07/02 2302 | 30.48 | 7.02 | 444 | 8.03 | -8.45 | 0.43 | Fr |
| 346 | W | 2016 | — | 07/06 1731 (188) 07/07 0209 | 23.04 | 11.53 | 454 | 13.73 | -75.75 | 0.51 | E |
| 347 | W | 2016 | — | 07/11 2052 (193) 07/11 2052 | 31.20 | 6.39 | 560 | 4.05 | -74.88 | 0.46 | Cx |
| 348 | W | 2016 | — | 07/19 2219 (201) 07/20 0155 | 20.40 | 14.61 | 531 | 9.62 | 16.44 | 0.38 | F |
| 349 | W | 2016 | — | 07/24 1355 (206) 07/24 1843 | 16.08 | 8.23 | 436 | 10.65 | -3.24 | 0.41 | F |
| 350 | W | 2016 | — | 08/02 0852 (215) 08/02 1912 | 23.28 | 15.15 | 457 | 12.79 | -77.65 | 0.35 | F |
| 351 | W | 2016 | — | 08/16 0433 (229) 08/17 0643 | 25.92 | 7.45 | 378 | 4.69 | 3.61 | 0.47 | F |
| 352 | W | 2016 | — | 08/21 0433 (234) 08/21 1409 | 24.00 | 6.46 | 402 | 8.62 | -7.98 | 0.41 | F |
| 353 | W | 2016 | — | 08/23 1145 (236) 08/23 1926 | 28.56 | 8.43 | 526 | 6.21 | -15.30 | 0.32 | F |
| 354 | W | 2016 | — | 09/11 2233 (255) 09/12 0600 | 15.36 | 7.79 | 296 | 14.10 | 17.82 | 0.40 | F |
| 355 | W | 2016 | — | 09/14 0502 (258) 09/14 1145 | 26.16 | 7.62 | 310 | 12.38 | 15.03 | 0.48 | F |
| 356 | W | 2016 | — | 09/19 1340 (263) 09/19 1340 | 26.16 | 10.61 | 577 | 11.85 | -197.19 | 0.36 | E |
| 357 | W | 2016 | — | 10/04 0643 (278) 10/04 1116 | 20.64 | 5.91 | 530 | 4.62 | -4.12 | 0.37 | E |
| 358 | W | 2016 | — | 10/12 2052 (286) 10/13 0404 | 42.96 | 17.55 | 385 | 6.23 | 33.80 | 0.46 | F+ |
| 359 | W | 2016 | — | 10/25 0531 (299) 10/25 1019 | 26.16 | 8.09 | 687 | 5.66 | -28.37 | 0.34 | E |
| 360 | W | 2016 | — | 11/09 0531 (314) 11/09 1521 | 42.48 | 9.78 | 390 | 14.01 | -71.50 | 0.52 | Cx |
| 361 | W | 2016 | — | 11/22 0643 (327) 11/22 1243 | 29.28 | 6.78 | 443 | 7.14 | 13.39 | 0.31 | E |
| 362 | W | 2017 | — | 01/03 0321 (003) 01/03 1033 | 15.84 | 7.65 | 456 | 8.90 | 62.35 | 0.52 | F |
| 363 | W | 2017 | — | 01/04 0252 (004) 01/04 0516 | 17.76 | 9.29 | 482 | 7.47 | -33.43 | 0.42 | E |
| 364 | W | 2017 | — | 01/09 0419 (009) 01/09 0419 | 20.64 | 4.34 | 641 | 2.17 | 13.80 | 0.49 | F |
| 365 | W | 2017 | — | 01/17 2009 (017) 01/18 0545 | 33.36 | 8.30 | 559 | 5.84 | -75.37 | 0.34 | E |

| | | | | | | | | | | | |
|-----|---|------|---|-----------------------------|-------|-------|-----|-------|---------|------|----|
| 366 | W | 2017 | — | 01/26 0614 (026) 01/26 2038 | 27.36 | 7.22 | 581 | 5.65 | 18.58 | 0.29 | E |
| 367 | W | 2017 | — | 02/13 0711 (044) 02/13 1716 | 22.56 | 3.02 | 320 | 15.12 | 12.22 | 0.37 | Cx |
| 368 | W | 2017 | — | 03/01 0155 (060) 03/01 0950 | 33.84 | 7.35 | 653 | 5.46 | -88.53 | 0.28 | E |
| 369 | W | 2017 | — | 03/26 1536 (085) 03/27 0350 | 39.84 | 8.24 | 622 | 6.69 | -108.32 | 0.32 | E |
| 370 | W | 2017 | — | 04/04 0111 (094) 04/04 0823 | 27.12 | 10.31 | 410 | 10.87 | 14.98 | 0.38 | Fr |
| 371 | W | 2017 | — | 04/07 1438 (097) 04/07 2136 | 34.32 | 6.22 | 524 | 7.15 | -44.88 | 0.43 | Fr |
| 372 | W | 2017 | — | 04/13 1340 (103) 04/14 0209 | 35.04 | 6.05 | 368 | 6.74 | 50.57 | 0.41 | Fr |
| 373 | W | 2017 | — | 04/18 1423 (108) 04/18 2009 | 25.44 | 10.45 | 396 | 14.02 | -40.05 | 0.53 | F |
| 374 | W | 2017 | — | 05/04 1423 (124) 05/04 2038 | 28.08 | 7.12 | 379 | 7.64 | -6.37 | 0.52 | F |
| 375 | W | 2017 | — | 05/15 0155 (135) 05/15 0950 | 32.16 | 6.93 | 542 | 6.62 | -70.19 | 0.30 | E |
| 376 | W | 2017 | — | 06/15 2247 (166) 06/16 0712 | 22.80 | 8.62 | 514 | 8.43 | -0.26 | 0.37 | E |
| 377 | W | 2017 | — | 06/22 1857 (173) 06/22 1857 | 23.76 | 4.53 | 335 | 14.10 | 7.23 | 0.63 | F |
| 378 | W | 2017 | — | 07/16 0155 (197) 07/16 0823 | 28.32 | 14.41 | 537 | 6.11 | -22.69 | 0.37 | F |
| 379 | W | 2017 | — | 08/03 0852 (215) 08/03 1716 | 31.44 | 11.80 | 543 | 15.01 | -188.48 | 0.39 | E |
| 380 | W | 2017 | — | 08/30 2247 (242) 08/31 0614 | 14.40 | 7.72 | 596 | 8.10 | -21.35 | 0.31 | E |
| 381 | W | 2017 | — | 09/07 1955 (250) 09/08 0000 | 22.80 | 11.45 | 743 | 3.16 | 42.18 | 0.36 | E |
| 382 | W | 2017 | — | 09/12 1647 (255) 09/12 2038 | 24.48 | 5.53 | 482 | 9.56 | 143.90 | 0.27 | E |
| 383 | W | 2017 | — | 09/14 0809 (257) 09/14 1424 | 14.40 | 8.43 | 601 | 5.73 | -128.34 | 0.28 | E |
| 384 | W | 2017 | — | 09/26 1926 (269) 09/27 0252 | 21.36 | 10.72 | 519 | 14.41 | -161.06 | 0.53 | E |
| 385 | W | 2017 | — | 11/06 1926 (310) 11/07 0238 | 34.56 | 9.93 | 532 | 15.03 | -160.75 | 0.40 | F |
| 386 | W | 2017 | — | 11/15 0657 (319) 11/15 1535 | 27.60 | 7.40 | 469 | 8.73 | -28.89 | 0.34 | E |
| 387 | W | 2018 | — | 01/13 0252 (013) 01/13 1536 | 24.00 | 7.63 | 528 | 9.22 | -98.36 | 0.41 | E |
| 388 | W | 2018 | — | 01/24 0502 (024) 01/24 1228 | 30.72 | 7.44 | 394 | 11.57 | -22.86 | 0.47 | F+ |
| 389 | W | 2018 | — | 01/31 0140 (031) 01/31 0755 | 25.44 | 5.76 | 389 | 8.81 | -38.54 | 0.40 | Fr |
| 390 | W | 2018 | — | 02/04 1200 (035) 02/04 1200 | 19.92 | 6.11 | 379 | 11.27 | -43.03 | 0.45 | F |
| 391 | W | 2018 | — | 02/08 0448 (039) 02/08 1257 | 27.36 | 4.96 | 349 | 8.27 | 32.12 | 0.47 | F+ |
| 392 | W | 2018 | — | 02/09 1843 (040) 02/10 0155 | 29.28 | 5.57 | 347 | 11.80 | -4.98 | 0.41 | Cx |
| 393 | W | 2018 | — | 02/15 0614 (046) 02/16 0014 | 30.48 | 9.81 | 391 | 10.76 | -47.87 | 0.43 | F+ |
| 394 | W | 2018 | — | 03/02 0350 (061) 03/03 1940 | 22.08 | 5.13 | 363 | 12.55 | -16.18 | 0.28 | E |
| 395 | W | 2018 | — | 03/09 1550 (068) 03/09 2052 | 40.56 | 10.69 | 402 | 8.72 | 22.30 | 0.38 | F+ |
| 396 | W | 2018 | — | 03/18 0628 (077) 03/18 1243 | 19.20 | 6.45 | 558 | 5.01 | -29.04 | 0.41 | E |

| | | | | | | | | | | | | |
|-----|---|------|---|------------------|------------|-------|-------|-----|-------|---------|------|----|
| 397 | W | 2018 | — | 04/19 2136 (109) | 04/20 0531 | 24.00 | 9.75 | 544 | 11.08 | -112.23 | 0.32 | E |
| 398 | W | 2018 | — | 05/05 0657 (125) | 05/05 1438 | 23.28 | 7.49 | 606 | 5.81 | -71.71 | 0.35 | E |
| 399 | W | 2018 | — | 05/16 0936 (136) | 05/17 0140 | 27.60 | 6.92 | 398 | 10.39 | -28.28 | 0.44 | Fr |
| 400 | W | 2018 | — | 06/06 1423 (157) | 06/06 1536 | 26.64 | 8.26 | 394 | 6.01 | 43.74 | 0.44 | F+ |
| 401 | W | 2018 | — | 06/17 1340 (168) | 06/17 2150 | 23.76 | 11.12 | 460 | 10.88 | -86.33 | 0.35 | E |
| 402 | W | 2018 | — | 06/22 0907 (173) | 06/23 0112 | 36.72 | 7.76 | 437 | 8.68 | -57.06 | 0.33 | E |
| 403 | W | 2018 | — | 07/09 1926 (190) | 07/10 1047 | 40.32 | 8.39 | 343 | 11.77 | 0.20 | 0.44 | Fr |
| 404 | W | 2018 | — | 07/17 1926 (198) | 07/16 2009 | 23.76 | 7.00 | 392 | 11.95 | -59.55 | 0.34 | Fr |
| 405 | W | 2018 | — | 07/23 1828 (204) | 07/24 0336 | 18.24 | 6.90 | 551 | 6.61 | -41.72 | 0.35 | F |
| 406 | W | 2018 | — | 07/24 0112 (205) | 07/24 0419 | 24.72 | 6.05 | 559 | 5.22 | -24.34 | 0.33 | E |
| 407 | W | 2018 | — | 07/30 0516 (211) | 07/30 1214 | 19.44 | 6.66 | 324 | 11.46 | 2.52 | 0.43 | F |
| 408 | W | 2018 | — | 08/25 0419 (237) | 08/25 1047 | 35.52 | 14.01 | 426 | 11.89 | -41.38 | 0.48 | F+ |
| 409 | W | 2018 | — | 09/06 1926 (249) | 09/07 0000 | 22.08 | 5.94 | 441 | 8.00 | -8.17 | 0.38 | F |
| 410 | W | 2018 | — | 10/07 0321 (280) | 10/07 0935 | 24.24 | 9.31 | 516 | 10.63 | -72.02 | 0.36 | F |
| 411 | W | 2018 | — | 12/06 2024 (340) | 12/07 0238 | 28.80 | 6.93 | 474 | 8.00 | -71.10 | 0.44 | E |
| 412 | W | 2019 | — | 05/07 2100 (127) | 05/07 2100 | 18.27 | 2.79 | 333 | 10.02 | 12.01 | 0.53 | F |
| 413 | W | 2019 | — | 05/10 1142 (130) | 05/10 1704 | 52.91 | 8.34 | 348 | 7.42 | 16.39 | 0.22 | Cx |
| 414 | W | 2019 | — | 05/13 2254 (133) | 05/14 0908 | 30.56 | 8.13 | 475 | 5.20 | 70.13 | 0.65 | Cx |
| 415 | W | 2019 | — | 05/16 2254 (136) | 05/17 0125 | 31.18 | 5.34 | 440 | 4.68 | 41.28 | 0.35 | E |
| 416 | W | 2019 | — | 05/26 2250 (146) | 05/27 0749 | 16.38 | 10.52 | 338 | 6.46 | 26.94 | 0.43 | Fr |
| 417 | W | 2019 | — | 10/29 0530 (302) | 10/29 0530 | 42.38 | 8.11 | 388 | 12.08 | 26.26 | 0.48 | Cx |
| 418 | W | 2019 | — | 11/02 2110 (306) | 11/02 2110 | 9.61 | 4.40 | 336 | 10.30 | 9.05 | 0.51 | F |
| 419 | W | 2019 | — | 11/11 0624 (315) | 11/11 0942 | 24.10 | 11.47 | 359 | 11.43 | 13.67 | 0.43 | E |
| 420 | W | 2019 | — | 03/16 1220 (075) | 03/17 0115 | 17.95 | 7.64 | 397 | 5.75 | 24.39 | 0.48 | Fr |
| 421 | W | 2019 | — | 04/17 2115 (107) | 04/17 2115 | 22.37 | 4.48 | 309 | 6.91 | 25.35 | 0.82 | E |
| 422 | W | 2019 | — | 06/07 0636 (158) | 06/07 1022 | 20.95 | 5.45 | 290 | 9.62 | 25.33 | 0.45 | F |
| 423 | W | 2019 | — | 10/13 0455 (286) | 10/13 0948 | 20.33 | 2.95 | 335 | 6.99 | 16.38 | 0.37 | Fr |
| 424 | W | 2020 | — | 01/04 0948 (004) | 01/04 1422 | 15.76 | 8.69 | 358 | 5.84 | 27.28 | 0.49 | Fr |
| 425 | W | 2020 | — | 04/20 0352 (111) | 04/20 0826 | 20.63 | 14.69 | 345 | 11.49 | 17.61 | 0.46 | Fr |
| 426 | W | 2020 | — | 12/10 0534 (345) | 12/11 0434 | 53.39 | 4.72 | 426 | 4.30 | 64.80 | 0.48 | E |
| 427 | W | 2020 | — | 01/14 0250 (014) | 01/14 0821 | 20.79 | 4.59 | 316 | 6.81 | -11.14 | 0.47 | E |

| | | | | | | | | | | | |
|-----|---|------|--------|-----------------------------|-------|-------|-----|-------|-------|------|----|
| 428 | W | 2020 | — | 03/04 1202 (064) 03/04 1355 | 37.95 | 6.02 | 354 | 12.22 | 36.20 | 0.68 | E |
| 429 | W | 2020 | — | 12/06 1900 (341) 12/06 1900 | 13.53 | 6.05 | 365 | 5.27 | 11.64 | 0.55 | F |
| 430 | W | 2021 | — | 02/24 0239 (055) 02/24 0433 | 13.23 | 7.42 | 479 | 5.34 | -0.04 | 0.63 | F+ |
| 431 | W | 2021 | — | 03/11 2137 (070) 03/11 2137 | 25.68 | 6.86 | 351 | 10.24 | 9.88 | 0.35 | Cx |
| 432 | A | 2017 | 139.66 | 04/08 1751 (098) 04/08 1751 | 8.98 | 8.14 | 567 | 4.13 | 2.3 | 0.53 | F |
| 433 | A | 2017 | 136.00 | 06/02 1150 (153) 06/02 1419 | 15.83 | 15.03 | 392 | 8.81 | 4.4 | 0.48 | Fr |
| 434 | A | 2018 | 117.12 | 04/27 0348 (117) 04/27 0348 | 15.95 | 16.36 | 481 | 14.37 | -93.1 | 0.45 | E |
| 435 | A | 2018 | 111.67 | 07/09 1702 (190) 07/09 2325 | 13.11 | 7.29 | 346 | 8.11 | 6.5 | 0.69 | F |
| 436 | A | 2019 | 99.84 | 01/15 0839 (015) 01/15 0839 | 13.94 | 10.93 | 405 | 8.31 | -13.6 | 0.52 | E |
| 437 | A | 2019 | 100.02 | 01/09 1514 (029) 01/29 1514 | 12.28 | 10.80 | 465 | 4.61 | 19.5 | 0.49 | Fr |
| 438 | A | 2020 | 68.42 | 07/10 0528 (192) 07/10 0528 | 21.98 | 13.14 | 0.0 | 6.19 | 0.0 | 0.48 | F+ |
| 439 | A | 2020 | 66.17 | 08/03 0721 (216) 08/03 0721 | 20.79 | 9.29 | 0.0 | 3.13 | 0.0 | 0.45 | F+ |
| 440 | A | 2020 | 65.82 | 08/05 1433 (218) 08/05 1433 | 11.70 | 10.52 | 0.0 | 4.02 | 0.0 | 0.51 | Fr |
| 441 | A | 2020 | 64.64 | 08/19 2221 (232) 08/20 0838 | 22.09 | 12.97 | 0.0 | 12.75 | 0.0 | 0.4 | E |
| 442 | A | 2020 | 63.51 | 09/01 1107 (245) 09/01 1107 | 22.33 | 9.70 | 0.0 | 11.66 | 0.0 | 0.42 | Fr |

Referencias

- Antiochos, SK, CR DeVore, and JA Klimchuk (1999). “A model for solar coronal mass ejections”. In: *The Astrophysical Journal* 510.1, p. 485 (cit. on p. 10).
- Aschwanden, Markus (2006). *Physics of the solar corona: an introduction with problems and solutions*. Springer Science & Business Media (cit. on p. 2).
- Behannon, Kenneth W (1978). “Heliocentric distance dependence of the interplanetary magnetic field”. In: *Reviews of Geophysics* 16.1, pp. 125–145 (cit. on p. 7).
- Behannon, KW, LF Burlaga, JT Hoeksema, and LW Klein (1989). “Spatial variation and evolution of heliospheric sector structure”. In: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 94.A2, pp. 1245–1260 (cit. on p. 7).
- Berdichevsky, Daniel Benjamín (2013). “On fields and mass constraints for the uniform propagation of magnetic-flux ropes undergoing isotropic expansion”. In: *Solar Physics* 284.1, pp. 245–259 (cit. on p. 24).
- Berdichevsky, DB, RP Lepping, and CJ Farrugia (2003). “Geometric considerations of the evolution of magnetic flux ropes”. In: *Physical Review E* 67.3, p. 036405 (cit. on p. 24).
- Biermann, Ludwig F. (2013). “25. Solar Corpuscular Radiation and the Interplanetary Gas”. In: *A Source Book in Astronomy and Astrophysics, 1900–1975*. Ed. by Kenneth R. Lang and Owen Gingerich. Cambridge, MA and London, England: Harvard University Press, pp. 147–148 (cit. on p. 1).
- Bothmer, V and R Schwenn (1997). “The structure and origin of magnetic clouds in the solar wind”. In: *Annales Geophysicae*. Vol. 16. 1. Springer, pp. 1–24 (cit. on p. 9).
- Bullard, Edward Crisp (1949). “The magnetic field within the Earth”. In: *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* 197.1051, pp. 433–453 (cit. on p. 5).
- Burlaga (1995). *Interplanetary magnetohydrodynamics*. Oxford University Press on Demand (cit. on pp. 6, 7).
- Burlaga, LF (1984). “MHD processes in the outer heliosphere”. In: *Space science reviews* 39.3-4, pp. 255–316 (cit. on pp. 2, 7).
- (1988). “Magnetic clouds and force-free fields with constant alpha”. In: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 93.A7, pp. 7217–7224 (cit. on p. 23).

- Burlaga, LF and NF Ness (1993). “Large-scale distant heliospheric magnetic field: Voyager 1 and 2 observations from 1986 through 1989”. In: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 98.A10, pp. 17451–17460 (cit. on p. 7).
- Cane, Hilary V (2000). “Coronal mass ejections and Forbush decreases”. In: *Cosmic Rays and Earth: Proceedings of an ISSI Workshop, 21–26 March 1999, Bern, Switzerland*. Springer, pp. 55–77 (cit. on p. 9).
- Cane, HV and D Lario (2006). “An introduction to CMEs and energetic particles”. In: *Space science reviews* 123.1-3, pp. 45–56 (cit. on p. 9).
- Cane, HV, IG Richardson, and G Wibberenz (1996). “Energetic particles and solar wind disturbances”. In: *AIP Conference Proceedings*. Vol. 382. 1. American Institute of Physics, pp. 449–452 (cit. on p. 9).
- Cargill, Peter J (2004). “On the aerodynamic drag force acting on interplanetary coronal mass ejections”. In: *Solar Physics* 221, pp. 135–149 (cit. on p. 12).
- Chapman, Sydney and VCA Ferraro (1929). “The electrical state of solar streams of corpuscles”. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 89, p. 470 (cit. on p. 1).
- Chapman, Sydney and Harold Zirin (1957). “Notes on the solar corona and the terrestrial ionosphere”. In: *Smithsonian Contributions to Astrophysics* (cit. on p. 1).
- Choudhuri, Arnab Rai and Peter A Gilman (1987). “The influence of the Coriolis force on flux tubes rising through the solar convection zone”. In: *The Astrophysical Journal* 316, pp. 788–800 (cit. on p. 5).
- Corona-Romero, P and JA Gonzalez-Esparza (2011). “Numeric and analytic study of interplanetary coronal mass ejection and shock evolution: Driving, decoupling, and decaying”. In: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 116.A5 (cit. on p. 11).
- Corona-Romero, Pedro and Pete Riley (2020). “Development of a formalism for computing in situ transits of Earth-directed CMEs—Part 2: Towards a forecasting tool”. In: *Annales Geophysicae*. Vol. 38. 3. Copernicus GmbH, pp. 657–681 (cit. on p. 72).
- Cowling, TG (1945). “On the Sun’s general magnetic field”. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 105.3, pp. 166–174 (cit. on p. 5).
- Cowling, Thomas George (1933). “The magnetic field of sunspots”. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 94, pp. 39–48 (cit. on p. 5).
- Démoulin, Pascal and Sergio Dasso (2009). “Causes and consequences of magnetic cloud expansion”. In: *Astronomy & Astrophysics* 498.2, pp. 551–566 (cit. on p. 72).
- Démoulin, Pascal, Maria Soledad Nakwacki, Sergio Dasso, and Cristina Hemilse Mandrini (2008). “Expected in situ velocities from a hierarchical model for expanding interplanetary coronal mass ejections”. In: *Solar Physics* 250, pp. 347–374 (cit. on p. 72).
- Echer, E, WD Gonzalez, BT Tsurutani, and AL Clúade Gonzalez (2008). “Interplanetary conditions causing intense geomagnetic storms ($Dst \leq -100$ nT) during solar cycle 23 (1996–2006)”. In: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 113.A5 (cit. on p. 9).
- Elsasser, Walter M (1946). “Induction effects in terrestrial magnetism part I. Theory”. In: *Physical Review* 69.3-4, p. 106 (cit. on p. 5).

- Feldman, WC, JR Asbridge, SJ Bame, and JT Gosling (1978). "Long-term variations of selected solar wind properties: Imp 6, 7, and 8 results". In: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 83.A5, pp. 2177–2189 (cit. on p. 5).
- Ferraro, Vincent CA (1937). "The non-uniform rotation of the sun and its magnetic field". In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 97, p. 458 (cit. on p. 5).
- Forbes, TG (2000). "A review on the genesis of coronal mass ejections". In: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 105.A10, pp. 23153–23165 (cit. on p. 10).
- Gopalswamy, Nat (2006). "Properties of interplanetary coronal mass ejections". In: *Space Science Reviews* 124.1-4, pp. 145–168 (cit. on p. 11).
- Gosling, JT, JR Asbridge, SJ Bame, and WC Feldman (1976). "Solar wind speed variations: 1962–1974". In: *Journal of Geophysical Research* 81.28, pp. 5061–5070 (cit. on p. 5).
- Gosling, JT, RT Hansen, and SJ Bame (1971). "Solar wind speed distributions: 1962–1970". In: *Journal of Geophysical Research* 76.7, pp. 1811–1815 (cit. on p. 5).
- Gringauz, KI (1961). "Some results of experiments in interplanetary space by means of charged particle traps on Soviet space probes". In: *Space Research II*, p. 539 (cit. on p. 2).
- Gringauz, Konstantin Iosifovich, Vladimir Gdalevich Kurt, Vasilii Ivanovich Moroz, and Iosif Samuilovich Shklovskii (1960). "Ionized gas and high energy electrons in the vicinity of the Earth and in the interplanetary space". In: *Doklady Akademii Nauk*. Vol. 132. 5. Russian Academy of Sciences, pp. 1062–1065 (cit. on p. 2).
- Hidalgo, MA (2003). "A study of the expansion and distortion of the cross section of magnetic clouds in the interplanetary medium". In: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 108.A8 (cit. on p. 24).
- Hidalgo, MA, T Nieves-Chinchilla, and C Cid (2002). "Elliptical cross-section model for the magnetic topology of magnetic clouds". In: *Geophysical research letters* 29.13, pp. 15–1 (cit. on p. 24).
- Hundhausen, AJ (1993). "Sizes and locations of coronal mass ejections: SMM observations from 1980 and 1984-1989". In: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 98.A8, pp. 13177–13200 (cit. on p. 10).
- Hundhausen, AJ, LF Burlaga, WC Feldman, et al. (1984). "Coronal transients and their interplanetary effects." In: *NASA Reference Publication* 1120, pp. 6–1 (cit. on p. 9).
- Jian, LK, CT Russell, and JG Luhmann (2011). "Comparing solar minimum 23/24 with historical solar wind records at 1 AU". In: *Solar Physics* 274.1-2, pp. 321–344 (cit. on p. 5).
- Jian, LK, CT Russell, JG Luhmann, AB Galvin, and KDC Simunac (2013). "Solar wind observations at STEREO: 2007-2011". In: *AIP Conference Proceedings*. Vol. 1539. 1. American Institute of Physics, pp. 191–194 (cit. on p. 5).
- Kilpua, Emilia KJ, Noe Lugaz, M Leila Mays, and M Temmer (2019). "Forecasting the structure and orientation of earthbound coronal mass ejections". In: *Space Weather* 17.4, pp. 498–526 (cit. on p. 23).
- Klecker, B, E Möbius, and MA Popecki (2006). "Solar energetic particle charge states: An overview". In: *Space science reviews* 124, pp. 289–301 (cit. on p. 9).

- Klein, Larry W, LF Burlaga, and NF Ness (1987). “Radial and latitudinal variations of the interplanetary magnetic field”. In: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 92.A9, pp. 9885–9892 (cit. on p. 7).
- Kunow, H, NU Crooker, JA Linker, et al. (2006). “Coronal mass ejections: Overview of observations”. In: *Coronal Mass Ejections*, pp. 13–30 (cit. on p. 9).
- Lazarus, AJ, B Yedidia, L Villanueva, et al. (1988). “Meridional plasma flow in the outer heliosphere”. In: *Geophysical research letters* 15.13, pp. 1519–1522 (cit. on p. 5).
- Lugaz, Noe, Manuela Temmer, Yuming Wang, and Charles J Farrugia (2017). “The interaction of successive coronal mass ejections: a review”. In: *Solar Physics* 292, pp. 1–37 (cit. on p. 23).
- Luhmann, Janet G, N Gopalswamy, LK Jian, and Noe Lugaz (2020). “ICME Evolution in the Inner Heliosphere: Invited Review”. In: *Solar Physics* 295.4, p. 61 (cit. on p. 23).
- Lundquist, Stig (1950). “Magnetohydrostatic fields”. In: *Ark. Fys.* 2, pp. 361–365 (cit. on p. 23).
- Lynch, BJ, SK Antiochos, CR DeVore, JG Luhmann, and TH Zurbuchen (2008). “Topological evolution of a fast magnetic breakout CME in three dimensions”. In: *The Astrophysical Journal* 683.2, p. 1192 (cit. on p. 10).
- Lynnyk, A and M Vandas (2009). “Fitting of expanding magnetic clouds: A statistical study”. In: *Planetary and Space Science* 57.12, pp. 1375–1380 (cit. on p. 72).
- McComas, DJaal, BL Barraclough, HO Funsten, et al. (2000). “Solar wind observations over Ulysses’ first full polar orbit”. In: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 105.A5, pp. 10419–10433 (cit. on p. 10).
- Moreno-Insertis, Fernando (1983). “Rise times of horizontal magnetic flux tubes in the convection zone of the sun”. In: *Astronomy and Astrophysics* 122, pp. 241–250 (cit. on p. 5).
- Nieves-Chinchilla, T, A Vourlidis, JC Raymond, et al. (2018). “Understanding the internal magnetic field configurations of ICMEs using more than 20 years of wind observations”. In: *Solar Physics* 293.2, p. 25 (cit. on pp. ix, xi, 24, 26, 30).
- Nieves-Chinchilla, Teresa (2018). “Modeling heliospheric flux ropes: A comparative study of physical quantities”. In: *IEEE Transactions on Plasma Science* 46.7, pp. 2370–2377 (cit. on p. 24).
- Nieves-Chinchilla, Teresa, Lan K Jian, Laura Balmaceda, et al. (2019). “Unraveling the internal magnetic field structure of the Earth-directed interplanetary coronal mass ejections during 1995–2015”. In: *Solar Physics* 294.7, pp. 1–46 (cit. on pp. ix, xi, 24, 25, 30, 40).
- Nieves-Chinchilla, Teresa, MG Linton, Miguel A Hidalgo, et al. (2016). “A circular-cylindrical flux-rope analytical model for magnetic clouds”. In: *The Astrophysical Journal* 823.1, p. 27 (cit. on p. 24).
- Owens, Mathew J (2020). “Coherence of coronal mass ejections in near-earth space”. In: *Solar Physics* 295.10, p. 148 (cit. on p. 23).
- Owens, Mathew James and NU Crooker (2006). “Coronal mass ejections and magnetic flux buildup in the heliosphere”. In: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 111.A10 (cit. on p. 12).
- Parker, E. N. (1963). “Kinematical Hydromagnetic Theory and its Application to the Low Solar Photosphere.” In: *Astrophysical Journal*, vol. 138, p. 552 138, p. 552 (cit. on p. 6).

- Parker, EN (1965). "Dynamical theory of the solar wind". In: *Space Science Reviews* 4.5-6, pp. 666–708 (cit. on p. 2).
- Parker, Eugene N (1955). "Hydromagnetic dynamo models." In: *The Astrophysical Journal* 122, p. 293 (cit. on p. 5).
- Parker, Eugene N (1958). "Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields." In: *Astrophysical Journal* 128, p. 664 (cit. on pp. 4, 6).
- Parker, Eugene N (1984). "Galactic magnetic fields and magnetic monopoles". In: *Monopole'83*, pp. 125–136 (cit. on p. 5).
- Priest, Eric (2014). *Magnetohydrodynamics of the Sun*. Cambridge University Press (cit. on p. 6).
- Schwenn, Rainer (1996). "An essay on terminology, myths,-and known facts: Solar transient-flare-CME-driver gas-piston-BDE-magnetic cloud-shock wave-geomagnetic storm". In: *International Astronomical Union Colloquium*. Vol. 154. Cambridge University Press, pp. 187–193 (cit. on p. 9).
- St. Cyr, OC, JT Burkepile, AJ Hundhausen, and AR Lecinski (1999). "A comparison of ground-based and spacecraft observations of coronal mass ejections from 1980–1989". In: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 104.A6, pp. 12493–12506 (cit. on p. 11).
- Stenflo, JO (1982). "The Hanle effect and the diagnostics of turbulent magnetic fields in the solar atmosphere". In: *Solar Physics* 80, pp. 209–226 (cit. on p. 6).
- Thomas, Barry T and Edward J Smith (1980). "The Parker spiral configuration of the interplanetary magnetic field between 1 and 8.5 AU". In: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 85.A12, pp. 6861–6867 (cit. on p. 7).
- Vourlidis, A, R Colaninno, T Nieves-Chinchilla, and G Stenborg (2011). "The first observation of a rapidly rotating coronal mass ejection in the middle corona". In: *The Astrophysical Journal Letters* 733.2, p. L23 (cit. on p. 23).
- Vršnak, Bojan and Nat Gopalswamy (2002). "Influence of the aerodynamic drag on the motion of interplanetary ejecta". In: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 107.A2, SSH-2 (cit. on p. 12).
- Wang, Yuming, Zhenjun Zhou, Chenglong Shen, Rui Liu, and S Wang (2015). "Investigating plasma motion of magnetic clouds at 1 AU through a velocity-modified cylindrical force-free flux rope model". In: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 120.3, pp. 1543–1565 (cit. on p. 24).
- Webb, David F and Timothy A Howard (2012). "Coronal mass ejections: Observations". In: *Living Reviews in Solar Physics* 9.1, pp. 1–83 (cit. on p. 10).
- Yashiro, S, N Gopalswamy, G Michalek, et al. (2004). "A catalog of white light coronal mass ejections observed by the SOHO spacecraft". In: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 109.A7 (cit. on p. 11).
- Zhang, Jie, IG Richardson, DF Webb, et al. (2007). "Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storms ($Dst \leq -100$ nT) during 1996–2005". In: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 112.A10 (cit. on p. 9).

Lista de Figuras

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Ilustración donde se muestran las soluciones a las distintas soluciones para describir la expansión del viento solar. El punto crítico (A) es cuando $v = v_c$ y $r = r_c$. [Tomada de Priest, 2014]. | 3 |
| 1.2 | Mediciones hechas por la nave espacial Ulysses donde se muestran las distintas configuraciones del viento solar durante el mínimo y máximo solar, evidenciando la relación directa con la configuración magnética del Sol. [Tomada de http://solarprobe.gsfc.nasa.gov/solarwind.jpg]. | 4 |
| 2.1 | (a) Representación esquemática de una EMC asociada con una fulguración y (b) asociada con una protuberancia. Para el último caso, el material solar es arrastrado por la EMC y está acompañada de una onda de choque interplanetaria. [Tomadas de: Chen, 2011]. | 11 |
| 2.2 | Comparación de dos distintas observaciones de EMCs con un corónografo, en (a) una EMC con un ancho angular $< 20^\circ$, mientras que en (b) una típica EMC donde se muestran los principales componentes de su morfología. [Tomadas de: SOHO/LASCO]. | 13 |
| 2.3 | Ejemplo de una EMC detectada in-situ usando datos del sitio web CDAWeb (https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/). Los paneles corresponden a: magnitud del campo magnético, así como sus componentes (B_x , B_y y B_z), velocidad del VS, densidad y temperatura de protones. La línea punteada indica el comienzo del evento, y mediante líneas continuas verticales representan el tránsito de la EMC. | 15 |
| 2.4 | Choque IP y EMC observada cerca del Sol, a 0.31 UA, por los instrumentos de plasma y campo magnético a bordo de la misión Helios-1. De arriba hacia abajo: magnitud del campo magnético y sus componentes en coordenadas RTN, velocidad del VS, y densidad y temperatura de protones. La línea vertical punteada indica el paso del choque a través de la nave, y las líneas verticales continuas indica la presencia de la EMC. | 19 |

| | | |
|-----|---|----|
| 2.5 | Choque IP y EMC observada cerca del Sol, a 1 UA, por los instrumentos de plasma y campo magnético a bordo de la misión Wind. De arriba hacia abajo: magnitud del campo magnético y sus componentes en coordenadas GSE, velocidad del VS, y densidad y temperatura de protones. La línea vertical punteada indica el paso del choque a través de la nave, y las líneas verticales continuas indican la presencia de la EMC. | 20 |
| 2.6 | Choque IP y EMC observadas muy lejos del Sol, a 4.65 AU, por los instrumentos de plasma y campo magnético a bordo de la misión Ulysses. De arriba hacia abajo: magnitud del campo magnético y sus componentes en coordenadas RTN, velocidad del VS, y densidad y temperatura de protones. La línea vertical punteada indica el paso del choque a través de la nave, y las líneas verticales continuas indica la presencia de la EMC. | 21 |
| 3.1 | (a) EMC detectada por los instrumentos SWE y MFI a bordo de Wind, a partir del 5 de junio del 2008. De arriba a abajo, se grafican observaciones de la magnitud y sus componentes del campo magnético, seguido por la densidad de protones, velocidad térmica, beta del plasma, velocidad del viento solar y temperatura. La línea vertical continua indica el paso de la EMC y las líneas verticales punteadas la duración del obstáculo magnético. (b) Hodogramas magnéticos en coordenadas GSE. | 27 |
| 3.2 | (a) EMC detectada por los instrumentos IMPACT y PLASTIC a bordo de STEREO-A, a partir del 16 de octubre del 2009. De arriba a abajo, se grafican observaciones de la magnitud y sus componentes del campo magnético, seguido por la densidad de protones, velocidad térmica, beta del plasma, velocidad del viento solar y temperatura. La línea vertical continua indica el paso de la EMC y las líneas verticales punteadas la duración del obstáculo magnético. (b) Hodogramas magnéticos en coordenadas RTN. | 28 |
| 3.3 | Magnitud del campo magnético y velocidad del viento solar de cuatro EMCs observadas por Wind y STEREO-A/B: (a) 2 de octubre de 2009 por STB, (b) 7 de mayo de 2015 por Wind, (c) 20 de agosto de 2010 por STA, y (c) 12 de octubre de 2016 por Wind. Para cada figura, el OM se encuentra delimitado por dos líneas verticales punteadas. Así como en la parte superior de cada figura se grafica la magnitud del campo magnético, la línea vertical roja indica el valor de DiP de acuerdo a la Ec. 3.2. Y en la parte inferior, se grafica la velocidad del viento solar y el valor de la velocidad de expansión a partir del ajuste lineal indicado con la línea roja. | 29 |

| | | |
|------|---|----|
| 3.4 | De arriba hacia abajo, variación temporal del número de manchas solares durante 1995 al 2021. Enseguida, los histogramas representan la población anual de cada una de las categorías de los flux-ropes, (C_x , E, F^- , F^+ y F_r , y el total de los tipo F). Las líneas verticales continuas indican el mínimo solar, así como las líneas verticales punteadas indican el máximo solar, para cada uno de los ciclos solares considerados en este estudio. | 31 |
| 3.5 | (a) Frecuencia de las distintas categorías de EMCs (F_r , F^- , F^+ , C_x y E) durante SC23 y SC24. (b) Frecuencia de eventos FR y C_x observados durante 1995 al 2018. | 33 |
| 3.6 | Histograma de valores de DiP (normalizados) de aquellos eventos (F_r , F^- y F^+) con $\text{DiP} \leq 0.5$ durante el ciclo solar. | 34 |
| 3.7 | Histograma de valores de DiP (normalizados) de aquellos eventos (F_r , F^- y F^+) con $\text{DiP} \geq 0.5$ durante el ciclo solar. | 35 |
| 3.8 | Histograma de eventos F_r , F^- y F^+ donde la velocidad de expansión es positiva ($V_{\text{exp}} > 0$), es decir, aquellas estructuras magnéticas que exhiben una expansión. . | 36 |
| 3.9 | Histograma de eventos F_r , F^- y F^+ donde la velocidad de expansión es negativa ($V_{\text{exp}} < 0$), es decir, aquellas estructuras magnéticas que exhiben una compresión. | 37 |
| 3.10 | Parámetro de distorsión vs. velocidad de expansión para eventos F_r , F^- y F^+ . Valores negativos en la velocidad de expansión indica una expansión. El parámetro de distorsión representa una característica en los perfiles de la intensidad del campo magnético, donde $\text{DiP} < 0.5$ la compresión yace en el frente, mientras que $\text{DiP} > 0.5$ la compresión es en el reverso de la estructura. | 38 |

Lista de Tablas

| | | |
|-----|--|----|
| 3.1 | Mínimo, máximo y media de la magnitud del campo magnético (B), velocidad del viento solar (V), beta del plasma (β), densidad de protones (N_p), velocidad de expansión (V_{exp}) y parámetro de distorsión (DiP), para OM/EMCs observadas por Wind y STEREO-A/B durante el periodo 1995-2018. | 30 |
| 3.2 | Número de eventos, media del número de eventos por año, duración, y media de la magnitud del campo magnético (B), velocidad del viento solar (V), beta del plasma (β), densidad de protones (N_p), presión dinámica (q) y velocidad de expansión (V_{exp}), para EMCs observadas por Wind, STEREO-A/B durante cada ciclo solar, SC22, SC23 y SC24. | 32 |
| 3.3 | Resultados estadísticos y valores promedios (V_{exp} y DiP) de eventos (F) observados en cada uno de los cuadrantes y ciclo solar. | 38 |