



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE CIENCIAS

Dinámica de las partículas de polvo en el Medio  
Interplanetario

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Física

PRESENTA:

Karla Montserrat Vargas Rojas

TUTOR

Dr. José Alberto Flandes Mendoza

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

**Hoja de Datos del Jurado**

## 1. Datos del alumno

Vargas

Rojas

Karla Montserrat

5554627243

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Física

310072197

## 2. Datos del tutor

Dr.

José Alberto

Flandes

Mendoza

## 3. Datos del sinodal 1

Dr.

José Antonio

García

Barreto

## 4. Datos del sinodal 2

Dr.

Rogelio Antonio

Caballero

López

## 5. Datos del sinodal 3

Dr.

Diego López

Cámara

Ramírez

## 6. Datos del sinodal 4

Dr.

Luis

Benet

Fernández

## 7. Datos del trabajo escrito

Dinámica de las partículas de polvo en el Medio Interplanetario

98 páginas

2019

Esta tesis fue realizada bajo la supervisión del Dr. Alberto Flandes en el Instituto de Geofísica. En su realización conté con el apoyo del Departamento de Ciencias Espaciales y recibí apoyo económico de los proyectos PAPIIT IN105016 e IN105818.

*Dedicada a José Roberto Rojas Betancourt,  
siempre vivo en mi corazón y mente.*

“You taught me the courage of stars before  
you left, how light carries on endlessly even  
after death...”

# *Resumen*

Al igual que la luz de una estrella, de una galaxia o de un planeta, el polvo interplanetario o interestelar nos da información relevante del universo en el que habitamos. Estas partículas de polvo nos ayudan a recolectar información de fuentes remotas o inaccesibles, por tal motivo su estudio es de gran relevancia. En general, la gran mayoría de este polvo interplanetario proviene de meteoritos, asteroides o de la erosión de cuerpos planetarios y para lograr identificar de cuál de todas estas fuentes provino el polvo, es necesario analizar las propiedades físicas y químicas.

En esta tesis me enfoco en las propiedades físicas y la dinámica de las partículas de polvo interplanetarias bajo la influencia del viento solar ambiente y de eyecciones de masa coronal (o CMEs).

El Sol pierde masa en forma de viento solar o de eyecciones de masa coronales debido a la expansión de su atmósfera y de efectos electromagnéticos aún no determinados. El material -esencialmente protones y electrones- es expulsado y llena su espacio circundante hasta los límites del sistema solar formando el medio interplanetario. Una partícula de polvo que se encuentra en el medio interplanetario estará bajo la influencia del viento solar (VS), incluyendo a las CMEs y a las regiones de interacción corotantes (CIRS). Las CMEs, igual que cualquier fracción del viento solar, arrastran los campos electromagnéticos del Sol. El polvo interplanetario se carga eléctricamente con facilidad por lo que sentirá fuerzas electromagnéticas de una CME o del viento solar, en general. El polvo, debido a su masa, también sentirá el campo gravitacional debido al Sol. Por tanto, para analizar la dinámica de una partícula de polvo es necesario incluir tanto las fuerzas electromagnéticas, como la fuerza gravitacional del Sol.

En esta tesis, se estudia la dinámica de partículas micrométricas y submicrométricas de dos composiciones en las cercanías de la órbita de la Tierra bajo la influencia del VS y de una CME. Se toma como referencia una CME cuyo choque fue detectado por el satélite ACE (NASA) el 22 de enero del 2004. Se utilizaron los datos que abarcan desde el 21 hasta el 30 de enero del 2004 para, así, poder analizar la dinámica de la partícula antes y después de la CME.

En el Capítulo 1 se analizan las principales propiedades, tanto físicas como químicas, del polvo interplanetario o interestelar, mientras que en el Capítulo 2 se presentan las principales propiedades del viento solar, haciendo énfasis en las CMEs, considerando que los efectos del viento solar se magnifican bajo la influencia de CMEs. Además, se hace un resumen de las mediciones del viento solar en la órbita de la Tierra y se presentan los datos y propiedades de la CME y del viento solar ambiente que se usan en nuestro estudio.

En el Capítulo 3 se hace un análisis detallado de estos procesos de carga. Para el análisis de la dinámica fue necesario determinar la posible carga eléctrica de nuestra partícula de estudio considerando tres corrientes distintas, una debida a la captura de electrones del viento solar, otra debida a la emisión de fotoelectrones producto de la radiación solar y otra debida a la emisión secundaria de electrones. De igual forma, se presentan los resultados que se obtuvieron al considerar cada una de las corrientes ya mencionadas, donde la única corriente relevante en nuestro período de estudio es la corriente debida a la captura de electrones.

Observamos que la partícula alcanza una carga de equilibrio (ya no gana, ni pierde  $e^-$ ) rápidamente ( $t \leq 3.9 \times 10^{-9}$  s), con lo que se puede considerar constante.

Una vez encontrada la carga de la partícula de polvo se procede a obtener la dinámica bajo la influencia de los campos electromagnéticos y gravitacionales producidos por Sol y el VS. En el Capítulo 4 se presenta con detalle la ecuación de movimiento que se aplica para obtener la dinámica de una partícula de polvo. De igual forma, se describe el modelo numérico que se utilizó (Runge-Kutta de orden 4) para la obtención de los resultados de esta tesis. Los resultados obtenidos son presentados en el Capítulo 5.

Se hizo el análisis para partículas con 5 tamaños diferentes (de  $10^{-9}$  m a  $10^{-5}$  m) suponiendo que se encuentran en la posición del punto lagrangiano L1. Suponiendo partículas de diferentes fuentes, se tomaron en cuenta dos densidades: hielo de agua ( $H_2O$ ) y silicatos ( $SiO_x$ ).

Se observa en los resultados, que las partículas de polvo con menor densidad y tamaño, son aceleradas con mayor facilidad, lo cual era de esperarse. Además, en el caso de las partículas más pequeñas el cociente  $|m_p/q|$  es menor, por lo que los efectos electromagnéticos dominan, y entonces el radio de giro se vuelve un factor importante en la dinámica de dichas partículas. El aumento del campo magnético dentro de la CME provoca que la trayectoria de la partícula de polvo sea desviada produciendo un movimiento de ciclotrón. En esta tesis es posible observar que las partículas con radios mayores a  $10^{-8}$  m aumentan considerablemente su cociente masa-carga, por lo que los efectos electromagnéticos se desprecian, además su radio de giro es ( $r > 10^7$  m) lo que provoca que no sea visible un cambio en la dirección de movimiento.

Como primera aproximación, el trabajo ejemplifica los efectos dinámicos de una CME y del viento solar en las partículas de polvo interplanetario, sin embargo aún queda mucho por resolver y considerar. Como trabajo futuro queda mejorar el método numérico, considerar otros efectos, como las variaciones del campo magnético en el plasma, considerar los efectos de las regiones corrotantes o CIRs que son otras estructuras importantes del viento solar, hacer el análisis a una escala de tiempo mayor (meses e inclusive años),

analizar la dinámica para distancias heliocéntricas mayores a  $1 UA$  e incluir otras fuerzas no consideradas (por ejemplo, la presión de radiación).

# *Abstract*

Just like the light of a star, a galaxy or a planet, the interplanetary or interstellar dust provides relevant information about the universe. Dust particles help us gather information of remote or inaccessible sources. For this reason, its study is of great importance. In general, the large majority of this interplanetary dust comes from meteorites, asteroids or from the erosion of planetary bodies, therefore, in order to identify from which source a particular dust grain comes, it is necessary to know its physical and chemical properties.

In this thesis, I focus on the physical properties and the dynamics of interplanetary dust particles under the influence of the solar wind and, in particular, of coronal mass ejections (or CMEs).

The Sun loses mass in form of the solar wind or coronal mass ejections, due to the expansion of its atmosphere and other not well known processes. The material -essentially protons and electrons- is expelled and fills its surrounding space up to the limits of the Solar System forming the interplanetary medium. A dust particle in the interplanetary medium will be under the influence of the solar wind, including CMEs as well as Co-rotation or stream interaction regions (CIRs or SIRs). In general, interplanetary dust gets electrically charged quite easily, thus dust grains are sensitive to electromagnetic forces from CMEs or the solar wind. Due to its mass, dust grains will also feel the gravitational field from the Sun. Therefore, in order to analyze the dynamics a single dust particle, it is necessary to include, at least, both the solar electromagnetic and gravitational forces.

In this thesis, I study the dynamics of micrometric and submicrometric particles of two different compositions at the orbit of the Earth under the influence of the SW and CMEs. I take a CME that was detected by the ACE satellite (NASA) on January 22, 2004 as a model CME. The data used covers from January 21 to January 30 of 2004 in order to analyze the grain dynamics before and after the CME.

In the Chapter one, the physical and chemical properties of interplanetary or interstellar dust are analyzed. In Chapter two, the main properties of the solar wind are presented, but emphasizing those of the CMEs, considering that the effects of the solar wind are magnified under their influence. Additionally, a brief summary of solar wind measurements at the orbit of the Earth is done. The data and the properties of the CME and the environment solar wind that we use in our study are presented.

In the Chapter three, a detailed analysis of the dust charging processes is done. For the analysis of the dynamics it was necessary to determine the possible electric charge of

the particles of study, considering three different currents: one, due to the capture of electrons from the solar wind, other, due to the emission of photoelectrons produced by the solar radiation and another due to the secondary emission of electrons. I present the results considering each current. I obtain that the only relevant current for our study is the current due to the capture of electrons.

We observe that particles reach equilibrium (i. e., they do not gain or loose  $e^-$ ) quickly ( $t \leq 3.9 \times 10^{-9}$  s), therefore the equilibrium charge can be considered constant afterwards.

Once the charge of the dust particle is determined, I define its dynamics under the influence of the electromagnetic and gravitational fields produced by the Sun and the solar wind. In Chapter four we analyze the equation of motion that is applied to obtain the dynamics of the dust particle. Likewise, I present the numerical model that was used ( $4^{th}$  order Runge - Kutta method) to solve this equation.

Results are presented in Chapter five. The latter analysis is made for particles with five different sizes (from  $10^{-9}$  m to  $10^{-5}$  m) assuming that they are originally at the Lagrangian point, L1 (where ACE is located). Supossing particles from different sources, we take into account two densities: water ice ( $H_2O$ ) and silicates ( $S_iO_x$ ). In Chapter five, the error of the numerical method (the truncation error and the analysis of the second derivatives) is also analyzed to show how reliable our method is. We concluded that the error was small enough that it can be neglected in the interval that was studied.

Results show that dust particles with smaller densities are accelerated more easily, something that was expected. Additionally, in the case of the smallest particles, the quotient  $|m_p/q|$  is smaller, so the electromagnetic effects dominate and then the Larmor's radius becomes an important factor in the dynamics of the particles. The increase in magnetic field linked to the CME deviates the trajectory of the dust particle. Smallest grains undergo a cyclotron motion. In this thesis it is possible to observe that particles with radii  $> 10^{-8}$  m have very large mass-charge quotient, so that the electromagnetic effects can be neglected, besides their gyroradius is  $r > 10^7$  m, which causes that a change in the direction of the motion is not distinguishable.

This work gives an idea of the dynamical effects of CMEs and the solar wind on interplanetary dust particles, but only to a first approximation, however there is still much to be resolved and considered. In a future work I plan to improve the numerical method used. I also have to consider the effects due to the variations of the magnetic field of the plasma, and other structures of the solar wind, like CIRs. It will also be of interest to extend the analysis for larger time scales (months and even years), and to include other forces that were not considered in this work, like the radiation pressure.

## *Objetivos*

El objetivo general de esta tesis es analizar la dinámica de partículas de polvo interplanetario (IDPs) bajo la influencia del viento solar, específicamente bajo la influencia de eyecciones de masa coronal (CMEs), considerando la atracción gravitacional debida al Sol y la fuerza de Lorentz producida por los campos del viento solar.

Los objetivos particulares son los siguientes:

- Estudiar y describir las propiedades relevantes de las partículas de polvo interplanetario, tales como: tamaños, densidades, fuentes de origen y mecanismos de producción.
- Entender y describir las propiedades principales del viento solar, enfocándonos en las CMEs.
- Definir y describir los principales mecanismos de carga eléctrica en una partícula de polvo bajo la influencia del viento solar, así como los tiempos de carga y el potencial de equilibrio, para así determinar cuál es el mecanismo de carga que domina en esta tesis.
- Estudiar las fuerzas básicas que determinan la dinámica de una partícula de polvo inmersa en el viento solar, para así poder implementar un modelo numérico (en IDL) que ayude a resolver su ecuación de movimiento.
- Evaluar el método numérico utilizado.

## *Hipótesis*

- La dinámica de las partículas de polvo interplanetario puede ser afectada por el viento solar.
- Las eyecciones de masa coronal, magnifican los efectos del viento solar en las partículas de polvo y pueden acelerar las partículas considerablemente.
- La dinámica general de las partículas de polvo interplanetario puede describirse con una aproximación gravito-electrodinámica.
- El cociente  $|m_p/q|$  de las partículas de polvo interplanetario, con  $m_p$  y  $q$  la masa y carga de la IDP, es un factor determinante en su dinámica.

# *Aportaciones*

Este trabajo aporta lo siguiente:

- Un análisis de las corrientes eléctricas en la superficie del polvo interplanetario a  $1UA$ .
- Un estudio de la dinámica de una partícula de polvo interplanetaria bajo la influencia del viento solar, en particular, de las eyecciones de masa coronal a  $1UA$ .

## *Agradecimientos*

Agradezco a mi familia por el apoyo incondicional que me brindan y por siempre estar ahí. En especial agradezco a mis padres Ana Laura y Eduardo por todo el amor y paciencia, por siempre impulsarme a estudiar, superarme a mi misma y luchar por aquel sueño que desde los seis años se me metió a la cabeza y al corazón. Gran parte de lo que he hecho se los debo a ustedes y siempre les estaré infinitamente agradecida.

Así mismo agradezco a mis hermanas Karina y Fernanda, por toda su paciencia, porque realmente ustedes me soportaron en mis diferentes facetas por las que atravesé durante mi carrera y quizá no les quedaba de otra, pero siempre soportaron mis locuras. Gracias Kary por evitar hacer ruido en las mañanas cuando me desvelaba (casi siempre), y a ti Fercha qué te puedo decir, cada vez que sentía que ya no podía siempre encontrabas la forma de hacerme reír y ver la vida más simple. No sé que haría sin ustedes, son y serán lo mejor que me ha pasado.

A mami, Lucy, Ricardo, Roger y por supuesto a ti Pepe ya que ustedes son lo más importante y siempre han estado ahí, en las buenas y en las malas. Ustedes me enseñaron el significado de familia, mi familia son ustedes. A mi tío Rafa por su presencia y apoyo.

De igual forma, quiero agradecer a todos mis sinodales por brindarme su tiempo y conocimiento para que esta tesis estuviera lo mejor hecha posible, en especial quiero agradecerle a mi tutor y director de tesis, el Dr. Alberto Flandes, por la infinita paciencia, apoyo y confianza; por todas las enseñanzas, consejos y todo su tiempo dedicado. Sin él, no hubiera sido posible la realización de ésta tesis. Gracias por haber guiado mi camino y por introducirme a un campo de estudio lleno de misterio y belleza a la vez.

En la UNAM conocí a los mejores profesores que he tenido en la vida, y sin duda uno de ellos es el Dr. Alberto. Gracias UNAM y Facultad de Ciencias por haberme dado la oportunidad de conocer a grandes compañeros, amigos y maestros, por abrirme las puertas y por permitirme estudiar en esta hermosa casa de estudio, soy y seré siempre orgullosamente UNAM.

Gran parte de mi tesis la realicé en el Departamento de Ciencias Espaciales de la UNAM, por lo que agradezco tanto a los investigadores, estudiantes y al personal administrativo del mismo.

Por último, agradezco a todas esas amistades que están o estuvieron y que forman parte importante de mi vida. A Vero, Ximena, Mary, Andy, Mayis, Diana, Dianis, Juan, Álvaro, Richie, Andrés, Jorge, Pedro y Ángel por hacerme más leves esos momentos de presión y por haber hecho mi tiempo en la Facultad mucho más agradable.

# Índice general

Resumen	v
Abstract	viii
Objetivos	x
Hipótesis	xi
Aportaciones	xii
Agradecimientos	xiii
Lista de Figuras	xvii
Lista de Tablas	xx
Abreviaturas	xxi
Variables	xxii
Constantes	xxiii
<b>1. Polvo en el Sistema Solar</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción . . . . .	1
1.2. Propiedades básicas . . . . .	3
1.3. Polvo interestelar . . . . .	8
1.4. Propiedades ópticas . . . . .	9
1.4.1. Presión de radiación . . . . .	9
1.4.2. Parámetro $\beta$ . . . . .	9
1.5. Efecto Poynting-Robertson . . . . .	11
1.6. Mecanismos de carga . . . . .	13
1.7. Plasma polvoso . . . . .	14
1.8. Erosión (Sputtering) . . . . .	14
1.8.1. Tiempo de vida del polvo interplanetario a 1UA . . . . .	14
1.9. Fuerzas básicas . . . . .	15

<b>2. Viento Solar</b>	<b>16</b>
2.1. Origen . . . . .	16
2.2. Propiedades básicas . . . . .	17
2.3. Estructura básica . . . . .	17
2.4. Regiones de interacción de corrientes (SIRs) . . . . .	18
2.5. Eyecciones de masa coronal (CMEs) . . . . .	20
2.6. Límites del Sistema Solar . . . . .	21
2.7. Satélites de observación solar y del medio interplanetario . . . . .	22
2.7.1. ACE . . . . .	24
2.8. Datos del viento solar usados en esta tesis . . . . .	26
<b>3. Mecanismos de carga</b>	<b>29</b>
3.1. Introducción . . . . .	29
3.2. Corrientes debidas a la captura de iones o electrones . . . . .	31
3.3. Corrientes debidas a la emisión fotoelectrónica . . . . .	33
3.4. Corrientes debidas a la emisión secundaria de electrones . . . . .	33
3.5. Resultados: Potencial de equilibrio y tiempos de carga por emisión fotoelectrónica. . . . .	35
3.6. Resultados: Potencial de equilibrio y tiempos de carga por emisión secundaria . . . . .	37
3.7. Resultados: Potencial de equilibrio y tiempos de carga por captura electrónica . . . . .	38
<b>4. Dinámica de una partícula de polvo.</b>	<b>40</b>
4.1. Suposiciones básicas . . . . .	41
4.2. Fuerzas básicas en una partícula cargada . . . . .	42
4.3. Método Runge-Kutta de cuarto orden (RK4) . . . . .	43
4.4. Error de truncamiento local relacionado al método RK4 . . . . .	45
4.5. Aplicación del método RK4 . . . . .	46
4.5.1. Diagrama de flujo . . . . .	49
<b>5. Resultados y discusión</b>	<b>51</b>
5.1. Trayectorias de las partículas de polvo . . . . .	53
5.2. Propagación del error debido al truncamiento . . . . .	59
5.3. Discusión de los resultados . . . . .	61
5.4. Proyección a escalas de tiempo mayores. Un mes de Viento Solar. . . . .	63
<b>6. Conclusiones</b>	<b>66</b>
<b>A.</b>	<b>69</b>
A.1. Campos magnéticos y eléctricos en diferentes sistemas de referencia . . . . .	69
<b>B.</b>	<b>71</b>
B.1. Número de electrones capturados por una partícula de polvo en el medio interplanetario . . . . .	71



# Índice de figuras

1.1. La luz zodiacal es producida por la dispersión de la luz solar en las partículas de polvo interplanetarias las cuales se encuentran distribuidas a lo largo del plano de la eclíptica. Esta imagen fue tomada con el telescopio de Mauna Kea, Hawaii, con una cámara análoga. El brillo de la luz zodiacal forma una banda tenue casi horizontal. Cortesía: Masateru Ishiguro, JAXA, Japón. . . . .	2
1.2. Agregados de partículas de polvo cuya fuente es el cometa 67P. La primera imagen (aglomerado de 2 mm) corresponde a un aglomerado de partículas de $\approx 100 \mu m$ de tamaño, iluminado con luz de fondo y producido en condiciones de microgravedad. Los otros aglomerados son medidos por Rosetta/COSIMA (superior derecha) y Rosetta/MIDAS (las dos imágenes inferiores), para más detalle ver Güttler et al. (2019). . . . .	4
1.3. Imagen de una partícula compuesta por un aglomerado, obtenida en los experimentos de calibración del instrumento Rosette/MIDAS, ver Güttler et al. (2019). . . . .	5
1.4. Partículas de polvo cósmico de la altura atmosférica de la Tierra vistas bajo el microscopio electrónico: a) partícula de polvo compuesta por silicatos pegada a una esfera de óxido de aluminio; b) partícula de varios tipos de silicatos y carbono probablemente de origen meteorítico; c) esfera de vidrio parcialmente cubierta del gel usado en las trampas de partículas de las sondas y satélites espaciales, y d) partícula de vidrio con incrustaciones de hierro, níquel y sulfuros, provenientes del medio interestelar, para más detalle ver <a href="http://www.geofisica.unam.mx/ciencias_espaciales/modulos/files/misterios_jupiter.pdf">http://www.geofisica.unam.mx/ciencias_espaciales/modulos/files/misterios_jupiter.pdf</a> , Flandes (2007). . . . .	6
1.5. Distribución de diversos materiales en el medio interplanetario, dependiendo de la temperatura y de la distancia medida desde el Sol. . . . .	7
1.6. Gráfica log-log de la fuerza de presión de radiación relativa, $\beta = F_{pr}/F_g$ , en función del tamaño de las partículas para tres composiciones típicas del polvo, y dos materiales estándar de comparación, Burns et al. (1979b)	10
1.7. Gráfica semilog de la fuerza de presión de radiación relativa, $\beta = F_{pr}/F_g$ , en función del tamaño de las partículas para 6 composiciones típicas del polvo interplanetario y un material ideal, Burns et al. (1979b). . . . .	11
1.8. Radiación solar (S) y radiación térmica de una partícula vista (a) desde el marco de referencia de la partícula en movimiento y (b) desde el marco de referencia del Sol. . . . .	12
2.1. Representación artística de la hoja neutra de campo magnético interplanetario y la espiral de Parker (falda de bailarina). El Sol se encuentra girando en el centro. Crédito: NASA . . . . .	18
2.2. Estructura típica de una CIR/ SIR. . . . .	19

2.3.	Ejemplo de una CIR observada por Ulysses entre los días 147 y 213 del 2004. Se muestra la velocidad del viento solar $V$ , la densidad de protones $N_p$ , la temperatura de los protones $T_p$ , la intensidad del campo magnético interplanetario IBI y el ángulo azimutal $\phi$ . . . . .	20
2.4.	Representación de la heliosfera. Crédito: NASA/JPL. . . . .	22
2.5.	Representación de la posición de ACE en el punto lagrangiano 1. Credito: NASA/H. Zell . . . . .	23
2.6.	Representación de ACE y sus instrumentos. Crédito: ESA . . . . .	26
2.7.	CME observada por ACE con una resolución de 1 min. Se puede observar la magnitud del campo magnético, velocidad del flujo del viento solar, la densidad de protones, la temperatura y el campo eléctrico respectivamente. La zona sombreada corresponde a la región de compresión o funda de la CME. La CME comienza inmediatamente después (a la derecha de la línea roja punteada). . . . .	27
2.8.	CME observada por ACE con una resolución de 1 min. Se puede observar las componentes del campo magnético medidas en nanoteslas ( $nT$ ). $B_x \approx 3 nT$ , $B_y \approx -2 nT$ , $B_z \approx -1.5 nT$ y $ \vec{B}  \approx 8.8 nT$ . . . . .	28
2.9.	CME observada por ACE con una resolución de 1 min. Se muestran las componentes de la velocidad medidas en km/s. $ \vec{V}  \approx 502 km/s$ . . . . .	28
3.1.	Eficiencia como función de la energía incidente de los electrones para partículas de silicatos $SiO_x$ (curva negra) e hielos de agua $H_2O$ (curva roja). . . . .	37
4.1.	Esquema representativo del sistema de referencia utilizado en esta tesis. T representa a la Tierra, S representa al Sol y A representa a ACE. Todo fue medido desde el sistema de referencia de la Tierra, el vector representado por los signos de interrogación es la distancia que nos interesa en este estudio, la cual es la diferencia entre el vector $\mathbf{r}$ (distancia calculada numéricamente) y el vector $X'$ (distancia de la Tierra a ACE). . . . .	42
4.2.	Diagrama de flujo del código implementado. . . . .	48
4.3.	Diagrama de flujo del código implementado para poder obtener la carga eléctrica de la partícula de polvo, analizando los tres procesos ya mencionados. Aquí $\rho$ , $r$ , $\chi$ son la densidad, radio, factor de eficiencia de la partícula; mientras que $\delta_m$ es la eficiencia de la partícula -relación entre los electrones emitidos y los incidentes- y $E_m$ es la energía característica a la cual la liberación de un electrón secundario alcanza un máximo. . . . .	49
4.4.	Diagrama de flujo del código implementado para poder obtener la dinámica de la partícula de polvo aplicando el método Runge-Kutta de cuarto orden para resolver la ecuación diferencial. Aquí $\rho$ , $r$ , $\chi$ , $s_2$ , $s_4$ , $s_6$ , $s_1$ , $s_3$ y $s_5$ son la densidad, radio, factor de eficiencia, posiciones iniciales y velocidades iniciales de la partícula; mientras que $\delta_m$ es la eficiencia de la partícula -relación entre los electrones emitidos y los incidentes- , $E_m$ es la energía característica a la cual la liberación de un electrón secundario alcanza un máximo, $\phi$ es el potencial de equilibrio que alcanza la partícula de polvo. . . . .	50

5.1. Trayectorias y velocidades para una partícula de polvo de $a = 10^{-9} m$ compuestas de hielo de agua (caso 1) y silicato (caso 2). La velocidad inicial en los dos casos es de $0 m/s$ en las 3 direcciones y una posición inicial en L1. . . . .	55
5.2. Trayectorias y velocidades para una partícula de polvo de $a = 10^{-8} m$ compuestas de hielo de agua (caso 1) y silicato (caso 2). La velocidad inicial en los dos casos es de $0 m/s$ en las 3 direcciones y una posición inicial en L1. . . . .	56
5.3. Trayectorias y velocidades para una partícula de polvo de $a = 10^{-7} m$ compuestas de hielo de agua (caso 1) y silicato (caso 2). La velocidad inicial en los dos casos es de $0 m/s$ en las 3 direcciones y una posición inicial en L1. . . . .	57
5.4. Trayectorias y velocidades para una partícula de polvo de $a = 10^{-6} m$ compuestas de hielo de agua (caso 1) y silicato (caso 2). La velocidad inicial en los dos casos es de $0 m/s$ en las 3 direcciones y una posición inicial en L1. . . . .	58
5.5. Trayectorias y velocidades para una partícula de polvo de $a = 10^{-5} m$ compuestas de hielo de agua (caso 1) y silicato (caso 2). La velocidad inicial en los dos casos es de $0 m/s$ en las 3 direcciones y una posición inicial en L1. . . . .	59
5.6. Normalización del error para cada una de las componentes considerando una partícula de $SiO_x$ con $a = 10^{-7} m$ . . . . .	60
5.7. Trayectorias y velocidades para una partícula de polvo de $a = 10^{-5} m$ compuestas de hielo de agua (caso 1) y silicato (caso 2) durante un periodo de tiempo del 1 de enero al 30 de enero del 2004. La velocidad inicial en los dos casos es de $0 m/s$ en las 3 direcciones y una posición inicial en L1. . . . .	64

# Índice de tablas

1.1. Principales componentes minerales de las condritas carbonáceas dados por Divine et al. (1986). . . . .	5
3.1. Parámetros de emisión secundaria obtenidos por Draine & Salpeter (1979)	34
3.2. Eficiencia de electrones secundarios medidos y estimación de la eficiencia y energía de rendimiento máxima $\delta_m$ y $E_m$ respectivamente para cuatro tipos de hielos Suszcynsky et al. (1992). . . . .	35
3.3. Resultados obtenidos al analizar el tiempo de carga que tendría una partícula debido al efecto de emisión fotoelectrónica. Se hizo el análisis para los cinco radios diferentes a 1 UA, de igual forma se calculó el tiempo de carga para partículas de polvo tanto de Silicatos (columna 4) como de hielos (columna 6) ambos dados en días. Las corrientes de emisión fotoelectrónica están dadas en $e/s$ , con $e$ la carga del electrón. . . . .	36
3.4. Resultados de los procesos de carga, (1) muestra el radio de la partícula en metros, (2) es el material de la partícula, (3) muestra la eficiencia electrónica ( $\delta_y(E)$ ), (4) la corriente debida a la emisión de fotoelectrones, (5) el tiempo en días que tarda en cargarse la partícula debido a dicha corriente, (6) es el potencial de equilibrio que alcanza la partícula al atrapar $ne$ electrones (7), y por último, (8), muestra el tiempo que tarda en llegar la partícula de polvo al potencial de equilibrio. . . . .	39
4.1. Radio, densidad, masa, número de electrones capturados por la partícula, carga, relación masa-carga eléctrica y la velocidad promedio de las partículas de polvo, $ \vec{v} $ obtenida de resolver la ecuación de movimiento en un periodo de tiempo de 9 días. . . . .	41

# Abreviaturas

<b>IDP</b>	<b>I</b> nterplanetary <b>D</b> ust <b>P</b> article
<b>IMF</b>	<b>I</b> nterplanetary <b>M</b> agnetic <b>F</b> ield
<b>SS</b>	<b>S</b> istema <b>S</b> olar
<b>VS</b>	<b>V</b> iento <b>S</b> olar
<b>HCS</b>	<b>H</b> eliospheric <b>C</b> urrent <b>S</b> heet
<b>CIR</b>	<b>C</b> o-rotating <b>I</b> nteraction <b>R</b> egions
<b>CME</b>	<b>C</b> oronal <b>M</b> ass <b>E</b> jections
<b>ICME</b>	<b>I</b> nterplanetary <b>C</b> oronal <b>M</b> ass <b>E</b> jections
<b>ACE</b>	<b>A</b> dvanced <b>C</b> omposition <b>E</b> xplorer
<b>CRIS</b>	<b>C</b> osmic <b>R</b> ay <b>I</b> sotope <b>S</b> pectrometer
<b>MAG</b>	<b>M</b> agnetómetro
<b>UA</b>	<b>U</b> nidad <b>A</b> stronómica
<b>UT</b>	<b>U</b> niversal <b>T</b> ime
<b>IDL</b>	<b>I</b> nteractive <b>D</b> ata <b>L</b> anguage
<b>rpm</b>	revoluciones <b>p</b> or <b>m</b> inuto
<b>MIDAS</b>	<b>M</b> icro <b>I</b> maging <b>D</b> ust <b>A</b> nalysis <b>S</b> ystem
<b>COSIMA</b>	<b>C</b> ometary <b>S</b> econdary <b>I</b> on <b>M</b> ass <b>A</b> nalyser

# Variables

Cantidad	unidades	Descripción
$a$	$[m]$	Radio de la partícula de polvo
$\rho$	$[g/cm^3]$	Densidad de la partícula de polvo
$m$	$[kg]$	Masa de la partícula de polvo
$A$	$[m^2]$	Sección transversal de una partícula de polvo
$q$	$[C]$	Carga eléctrica de la partícula
$N_p$	$[cm^{-3}]$	Densidad de protones del viento solar
$m_e$	$[kg]$	Masa del electrón
$q_e$	$[C]$	Carga del electrón
$\epsilon_0$	$[C^2/Nm^2]$	Permitividad eléctrica del vacío
$k$	$[J/K]$	Constante de Boltzman
$I_\nu$	$[q_e/seg]$	Corriente debida a la emisión fotoelectrónica
$n_e$		Número de electrones que puede capturar una partícula de polvo
$R_E$	$[m]$	Radio de la Tierra
$\bar{V}$	$[m/s]$	Velocidad del viento solar
$\bar{v}$	$[m/s]$	Velocidad de la partícula de polvo
$\bar{r}_p$	$[m]$	Vector posición de la partícula de polvo
$G$	$[m^3/kg s^2]$	Constante de Gravitación Universal
$M_\odot$	$[kg]$	Masa del Sol
$r_\odot$	$[m]$	Distancia Tierra-Sol
$E$	$[mV/m]$	Campo eléctrico inducido
$\lambda_D$	$[m]$	Longitud de Debye del plasma
$\phi_{eq}$	$[Volts]$	Potencial de equilibrio de una partícula de polvo
$\beta$		Beta del plasma

# Constantes

Constante de Gravitación Universal	$G$	$6.673 \times 10^{21} \text{ Nkg}^{-2}\text{m}^2$
Constante de Boltzmann	$k$	$1.38 \times 10^{-23} \text{ m}^2\text{kg s}^{-2}\text{K}^{-1}$
Carga elemental	$e$	$1.60217662 \times 10^{-19} \text{ C}$
Permitividad del vacío	$\epsilon_0$	$8.8541 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$
Masa del electrón	$m_e$	$9.1094 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Masa solar	$M_\odot$	$1.989 \times 10^{30} \text{ kg}$
Unidad Astronómica	$UA$	$(149597870691 \pm 3) \text{ m}$
Nanómetro	$nm$	$1 \times 10^{-9} \text{ m}$

# Capítulo 1

## Polvo en el Sistema Solar

### 1.1. Introducción

Al igual que la luz de una estrella, de una galaxia o de un planeta, el polvo interplanetario o interestelar nos da información relevante del universo en el que habitamos. Estas partículas de polvo nos ayudan a recolectar información de fuentes remotas o inaccesibles, por tal motivo su estudio es de gran relevancia. De la misma forma que podemos obtener información importante de la radiación electromagnética en las observaciones astronómicas ópticas, también podemos obtener información valiosa del estudio del polvo que llena los espacios interplanetarios e interestelares. La gran mayoría de este polvo interplanetario proviene de meteoritos, asteroides o de la erosión de cuerpos planetarios en general, entonces, para lograr identificar de cuál de todas estas fuentes provino el polvo, es necesario conocer las propiedades tanto físicas como químicas de estas partículas de polvo interplanetarias, [Mann et al. \(2004\)](#).

El polvo interplanetario e interestelar son partículas sólidas con radios  $10^{-9} m \lesssim a \lesssim 10^{-4} m$ . Se compone principalmente de silicatos ( $SiO_x$ ), algunos metales como hierro y aluminio y otros minerales y materiales basados en el carbono o carbonáceos. Por definición el polvo interplanetario está ligado al Sol. Puede estar, simplemente en órbita alrededor del Sol o ligado a un cuerpo planetario. La diferencia entre el polvo interplanetario y el polvo interestelar está en su origen y el medio en el que se encuentra. El polvo interestelar ocupa los espacios entre las estrellas fuera del sistema solar y se mezcla con

el medio interestelar. Ejemplos de éste podrían ser también el polvo que compone a las nebulosas o algunos cúmulos estelares, [Mann et al. \(2014\)](#).

La existencia de partículas de polvo Interplanetarias se dedujo de las observaciones de la *luz zodiacal* que se observa como una banda luminosa al amanecer y al atardecer. La luz zodiacal es el resultado de la dispersión de la luz Solar y la emisión térmica de las partículas de polvo a lo largo del plano de la eclíptica (es decir, el plano formado por el conjunto de puntos de la órbita de la Tierra alrededor del Sol). El brillo de la luz zodiacal va disminuyendo conforme nos vamos alejando del Sol.

Las observaciones de la luz zodiacal describen predominantemente partículas de polvo en un intervalo de tamaños que van de 1-100  $\mu m$ , con un intervalo de masas que van desde los  $10^{-14} - 10^{-8} kg$ .



FIGURA 1.1: La luz zodiacal es producida por la dispersión de la luz solar en las partículas de polvo interplanetarias las cuales se encuentran distribuidas a lo largo del plano de la eclíptica. Esta imagen fue tomada con el telescopio de Mauna Kea, Hawaii, con una cámara análoga. El brillo de la luz zodiacal forma una banda tenue casi horizontal. Cortesía: Masateru Ishiguro, JAXA, Japón.

Todos los cuerpos sólidos del sistema solar pueden producir polvo, por ejemplo, por desgasificación, por dispersión de material en un impacto de un meteoro y también a través de procesos volcánicos. Probablemente, la mayoría del polvo interplanetario proviene de la desgasificación y el desgaste de los cometas que se acercan al Sol o de la erosión de las superficies de los cuerpos planetarios y de las colisiones entre asteroides. Por lo mismo, las partículas de polvo interplanetario juegan un papel importante para

lograr entender los procesos y composición cometarios, asteroidales y planetarios. Al final, la importancia del polvo radica en que nos permite obtener información relevante y de primera mano, de fuentes remotas o inaccesibles.

De aquí en adelante y en muchos casos, usaré simplemente los términos *partícula o partículas* para referirme a una partícula de polvo o a un conjunto de partículas de polvo. A menos que se indique lo contrario, estos términos se referirán sólo a partículas de polvo interplanetario.

## 1.2. Propiedades básicas

Un buen número de sondas espaciales, como las naves Ulysses<sup>1</sup>, Stardust<sup>2</sup> y Cassini<sup>3</sup>, han logrado hacer mediciones in situ para determinar las propiedades físicas y químicas del polvo, al igual que su órbita, con lo que hemos podido determinar algunas de las fuentes de estas partículas. Este tipo de mediciones se han hecho a distancias heliocéntricas que van desde  $\approx 0.3UA$  a  $\approx 9UA$ .<sup>4</sup>

Algunas de las propiedades básicas del polvo interplanetario se han derivado de mediciones directas de partículas capturadas en la atmósfera alta o en las cercanías de la Tierra, ver Figura 1.4. Por ejemplo, se pueden encontrar partículas en los casquetes polares terrestres, donde se acumulan una gran cantidad de ellas y que, generalmente, van desde  $3 - 100 \mu m$  de tamaño (Leinert & Grun, 1990), dicho rango de tamaños coincide con los tamaños de partículas que se han observado en la luz zodiacal. De igual forma, se pueden recolectar de la estratósfera y, en algunos casos, en las profundidades del mar.

Con lo anterior, se logró determinar con mayor precisión la composición principal de estas IDP (cuyas principales fuentes son los cometas y asteroides), la cual se distribuye como sigue: condritas, 60 %, hierro, azufre y níquel tienen aproximadamente un 30 % de su composición, y por último tenemos un 10 % de silicatos máficos, que son silicatos ricos en hierro y magnesio (u olivinos y piroxenos), Brownlee (1978).

---

<sup>1</sup><https://www.jpl.nasa.gov/missions/ulysses/>

<sup>2</sup><https://www.jpl.nasa.gov/missions/stardust/>

<sup>3</sup><https://www.jpl.nasa.gov/missions/cassini-huygens/>

<sup>4</sup>1 UA es una unidad astronómica que da la distancia del semieje mayor de la órbita de la Tierra alrededor del Sol. Su valor en unidades físicas es:  $(149, 597, 870, 691 \pm 3) m$  (Jet Propulsion Laboratory).

La mayoría de las partículas de polvo interplanetarias son agregados de partículas más pequeñas, que forman cúmulos. Por ejemplo, en la Figura 1.2 se muestran agregados de partículas de polvo cometarias del 67P, cuyos diámetros son  $2\text{ mm}$ ,  $200\ \mu\text{m}$ ,  $10\ \mu\text{m}$  y  $3\ \mu\text{m}$ .

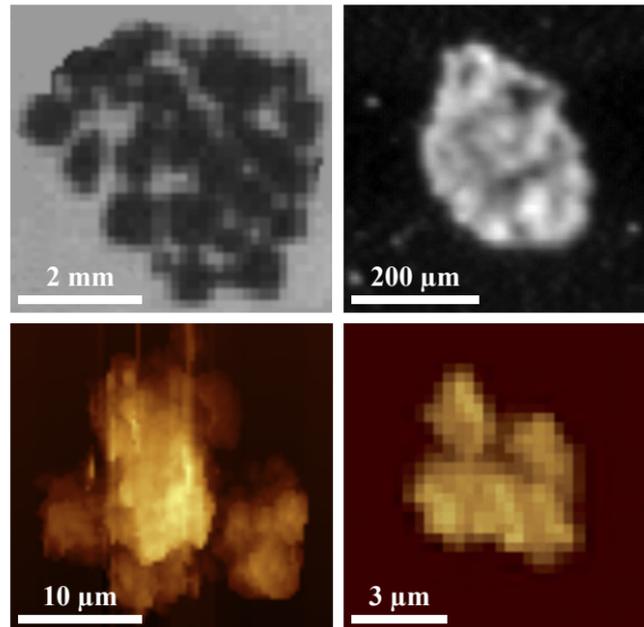


FIGURA 1.2: Agregados de partículas de polvo cuya fuente es el cometa 67P. La primera imagen (aglomerado de  $2\text{ mm}$ ) corresponde a un aglomerado de partículas de  $\approx 100\ \mu\text{m}$  de tamaño, iluminado con luz de fondo y producido en condiciones de microgravedad. Los otros aglomerados son medidos por Rosetta/COSIMA (superior derecha) y Rosetta/MIDAS (las dos imágenes inferiores), para más detalle ver [Güttler et al. \(2019\)](#).

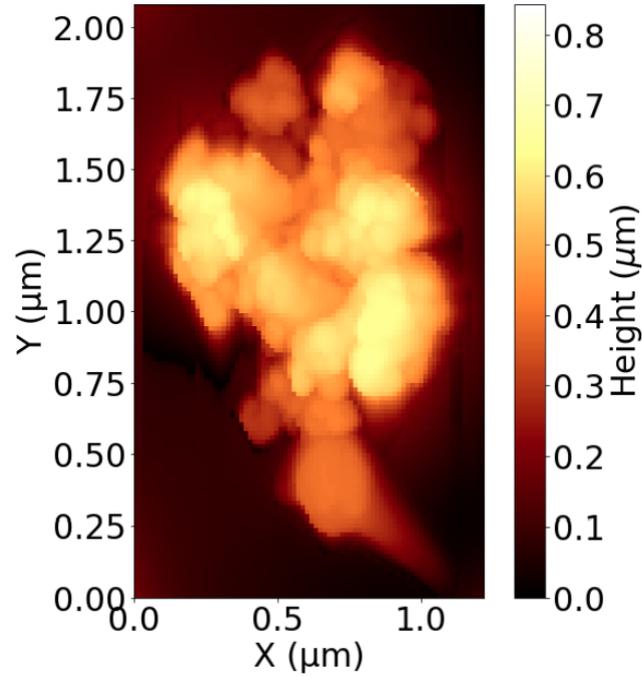


FIGURA 1.3: Imagen de una partícula compuesta por un aglomerado, obtenida en los experimentos de calibración del instrumento Rosette/MIDAS, ver Güttler et al. (2019).

Dado que las partículas condriticas carbonáceas dominan en el medio interplanetario (Divine et al., 1986), a continuación se muestran los principales minerales que componen a las condritas carbonáceas, Tabla 1.1.

Mineral	Nomenclatura
Clinopiroxeno	$(Mg, Fe, Ca)SiO_3$
Yeso	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
Magnetita	$Fe_3O_4$
Melilita	$Ca_2Al_2SiO_7$
Olivino	$(Mg, Fe)_2SiO_4$
Ortopiroxeno	$(Mg, Fe)SiO_3$
Plagioclasa	$Na, Al, Si_3O_8 \dots Ca, Al_2, Si_2, O_8$
Troilita	FeS
Agua	$H_2O$

TABLA 1.1: Principales componentes minerales de las condritas carbonáceas dados por Divine et al. (1986).

Particularmente, las partículas de polvo que son capturadas por la Tierra se contaminan con desechos de combustible de cohetes y satélites y, es común, ver estos contaminantes adheridos a las partículas, lo que hace aún más complicada la identificación de su composición, densidad, tamaño y los efectos superficiales de carga, ver Figura 1.4.a.

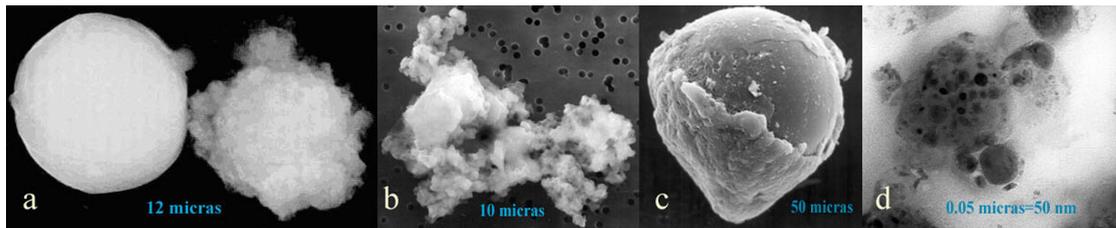


FIGURA 1.4: Partículas de polvo cósmico de la altura atmosférica de la Tierra vistas bajo el microscopio electrónico: a) partícula de polvo compuesta por silicatos pegada a una esfera de óxido de aluminio; b) partícula de varios tipos de silicatos y carbono probablemente de origen meteorítico; c) esfera de vidrio parcialmente cubierta del gel usado en las trampas de partículas de las sondas y satélites espaciales, y d) partícula de vidrio con incrustaciones de hierro, níquel y sulfuros, provenientes del medio interestelar, para más detalle ver [http://www.geofisica.unam.mx/ciencias\\_espaciales/modulos/files/misterios\\_jupiter.pdf](http://www.geofisica.unam.mx/ciencias_espaciales/modulos/files/misterios_jupiter.pdf), Flandes (2007).

En el medio interplanetario las propiedades de polvo se alteran tanto física como químicamente, debido a la radiación y a la interacción con el plasma interplanetario. En particular, las partículas que se mueven más cerca del Sol sufren una mayor alteración que las que se mantienen lejos o más allá de la órbita de Júpiter. Las alteraciones que sufren las partículas de polvo modifican sus propiedades originales. Si se quiere comprender a los granos de polvo interplanetario originales es necesario examinar los procesos físicos que los alteran. Por ejemplo, Bartlett & Duley (1996) estimaron, a partir de datos de laboratorio, el cambio químico en las especies de carbono después de la irradiación con iones y electrones de alta energía. Específicamente, el  $CH_4$  se transformó en  $CH_n$  ( $n < 4$ ) después de la radiación.

Como ya mencionamos, una de las principales fuentes del polvo interplanetario son los cometas. Los cometas están conformados por partículas de hielo de  $H_2O$ , 90 %, y 10 % material orgánico como  $CO$  y  $CO_2$ . Dado que en cada acercamiento al Sol éstos pierden parte de su masa, entonces es de esperar que encontremos partículas de hielo de agua en el medio interplanetario, por ejemplo, en la nube zodiacal.

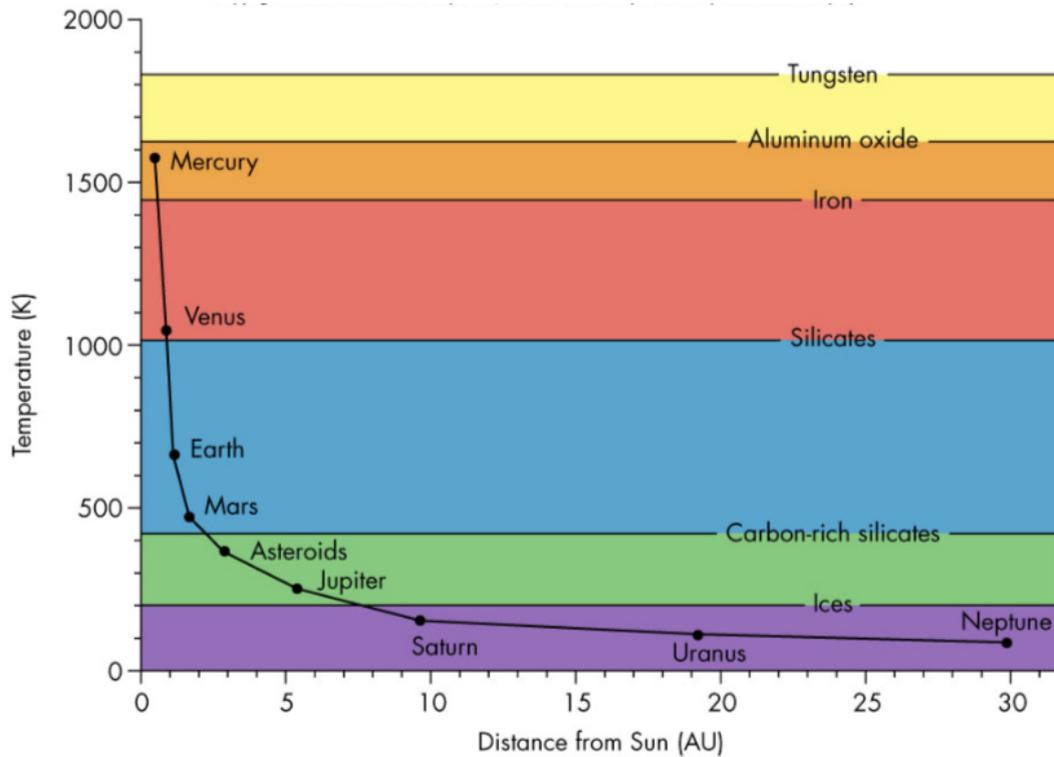


FIGURA 1.5: Distribución de diversos materiales en el medio interplanetario, dependiendo de la temperatura y de la distancia medida desde el Sol.

En particular a 1  $UA$  dominan las partículas más densas ( $\rho > 2000 \text{ kg/m}^3$ ), dada la forma en la que se va distribuyendo la materia en función de sus puntos de fusión y densidad. Los materiales más pesados tienden a acomodarse en el interior del sistema solar y los elementos más livianos, es decir menos densos ( $\rho < 2000 \text{ kg/m}^3$ ), se encuentran principalmente en el sistema solar exterior. En la Figura 1.5 se puede observar la distribución de diversos materiales en el medio interplanetario (franjitas de colores) dependiendo de la temperatura y la distancia heliocéntrica. Por ejemplo, para distancias menores o iguales a 1  $UA$ , la temperatura del medio interplanetario es  $T > 600 \text{ K}$ , por lo que los materiales que predominan son los más densos, es decir, los silicatos, hierro, óxidos de aluminio y el tungsteno, cuyas densidades son  $\geq 2000 \text{ kg/m}^3$ . Para distancias mayores a 1  $UA$ ,  $T < 600 \text{ K}$ , y por lo tanto predominan los materiales menos densos, como los silicatos, los silicatos ricos en carbono y los hielos, de hecho se puede ver que a la distancia que se encuentra Saturno, Urano y Neptuno, las partículas de hielo son las que predominan.

Además, dado que una gran parte de las IDPs están conformadas por material tipo condrítico (ver Tabla 1.1) es posible observar que el silicato es parte de muchos de los

minerales principales que componen los materiales condríticos y dada su densidad de los silicatos ( $\approx 2650 \text{ kg/m}^3$ ) es común encontrar IDPs de silicatos a 1 UA de distancia. Por otra parte, si usamos la densidad del hielo de agua ( $\approx 1000 \text{ kg/m}^3$ ) como referencia, consideramos que todas las demás densidades de partículas que se puedan encontrar en el medio interplanetario serán un múltiplo de la densidad del hielo de agua por un factor de entre 1 y 5.

Por tal razón, en el análisis de esta tesis se consideran partículas de silicatos y de hielo de agua, con radios que van desde  $1 \times 10^{-9} \text{ m} - 1 \times 10^{-5} \text{ m}$ , pues son los tamaños más comunes a esa distancia.

### 1.3. Polvo interestelar

Cerca de la órbita de Júpiter, la nave Ulysses de la NASA midió partículas que impactaban en sus detectores con velocidades  $\gg 15 \times 10^3 \text{ m s}^{-1}$  (Swamy, 2005), que parecían ser mayores a la velocidad de escape del Sistema Solar ( $> 40 \times 10^3 \text{ m s}^{-1}$ ), además de que se observó que la órbita de estas partículas era retrógrada (en sentido horario, visto desde el polo norte solar) y en la misma dirección del flujo de gas interestelar. En contraste, las partículas de polvo interplanetarias son prógradas. Gracias a este tipo de mediciones sabemos que existen partículas de polvo interestelares que atraviesan continuamente el Sistema Solar desde todas las latitudes por encima del plano de la eclíptica, en contraste con las partículas interplanetarias que, esencialmente, se concentran en el plano de la eclíptica Altobelli et al. (2016); Baguhl et al. (1995).

Antes de los hallazgos de Ulysses, se creía que el campo magnético interplanetario, que acompaña al viento solar (ver Capítulo 2), impedía que el polvo interestelar cargado penetrara al interior del Sistema Solar (ver Levy & Jokipii (1976)), sin embargo, Gustafson B. A.S. (1979) demostraron que ésto depende del ciclo solar que altera el estado energético del plasma solar.

En la Figura 1.4.d se puede observar una partícula de vidrio con incrustaciones de hierro, níquel y sulfuros proveniente del medio interestelar, la cual fue observada a la altura de la Tierra.

## 1.4. Propiedades ópticas

Debido al pequeño tamaño y masa de los granos de polvo ( $a < 10^{-2} m$  y  $m < 0.1 kg$ ), la radiación electromagnética solar tiene efectos importantes sobre ellos. Los efectos de la radiación son proporcionales a la sección transversal de los granos ( $A = \pi a^2$ ). Específicamente, la sección transversal *efectiva* de interacción con la radiación electromagnética es  $Q\pi a^2$ , donde  $Q$  es el factor de eficiencia y es dependiente de la composición y de las propiedades físicas de las partículas, así como de la longitud de onda de la radiación implicada en la interacción, [Swamy \(2005\)](#).

Si consideramos la presión de radiación debida al intercambio de momento de los fotones, debe considerarse el factor de eficiencia ( $Q_{pr}$ ) que se define como:

$$Q_{pr} = Q_{ext} - Q_{sca} \cos\theta \quad (1.1)$$

donde  $Q_{ext}$  y  $Q_{sca}$  son los coeficientes de extinción y de dispersión.

### 1.4.1. Presión de radiación

Si se quiere obtener la fuerza debida a la presión de radiación que experimenta una partícula de polvo es necesario aplicar la llamada *Teoría de Mie*, la cual explica la solución a la dispersión de la radiación electromagnética para una partícula esférica inmersa en un medio homogéneo e isotrópico e iluminada por una onda plana. Combinando la teoría de Mie con las ecuaciones de Maxwell se pueden calcular los factores de eficiencia,  $Q_{pr}$ , para las diversas propiedades ópticas en las diferentes longitudes de onda.

### 1.4.2. Parámetro $\beta$

Se suelen caracterizar los efectos de la radiación electromagnética sobre las partículas usando el parámetro  $\beta$ , que se define como el cociente de las fuerzas debidas a la radiación y las fuerzas gravitacionales:

$$\beta = \frac{F_{pr}}{F_g} = \left( \frac{3L}{16\pi GMc} \right) \left( \frac{Q_{pr}}{\rho a} \right) = 5.7 \times 10^{-5} \left( \frac{Q_{pr}}{\rho a} \right) \quad (1.2)$$

La expresión anterior es válida en unidades de centímetro, gramo y segundo (cgs).  $\rho$  es la densidad de la partícula, que se asume esférica,  $a$  es el radio de la misma, y  $Q_{pr}$  se promedia sobre todo el espectro solar [Amara L.Graps \(2000\)](#).

En las figuras 1.6 y 1.7 reportadas por [Burns et al. \(1979b\)](#), se muestra la fuerza de presión de radiación relativa  $\beta$  (ecuación 1.2) como función del tamaño de las partículas para diferentes materiales (grafito, hierro, basalto, hielo, obsidiana, cuarzo amorfo y magnetita), que representan la composición típica del polvo interplanetario.

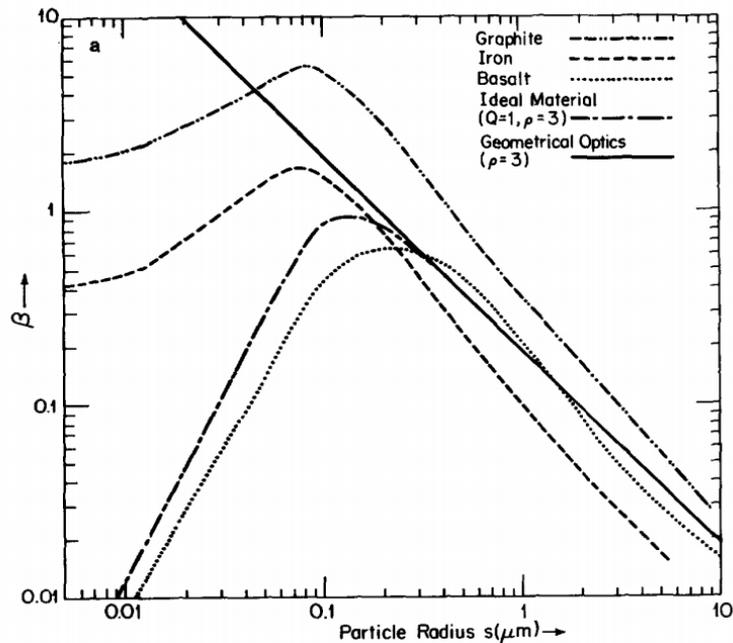


FIGURA 1.6: Gráfica log-log de la fuerza de presión de radiación relativa,  $\beta = F_{pr}/F_g$ , en función del tamaño de las partículas para tres composiciones típicas del polvo, y dos materiales estándar de comparación, [Burns et al. \(1979b\)](#)

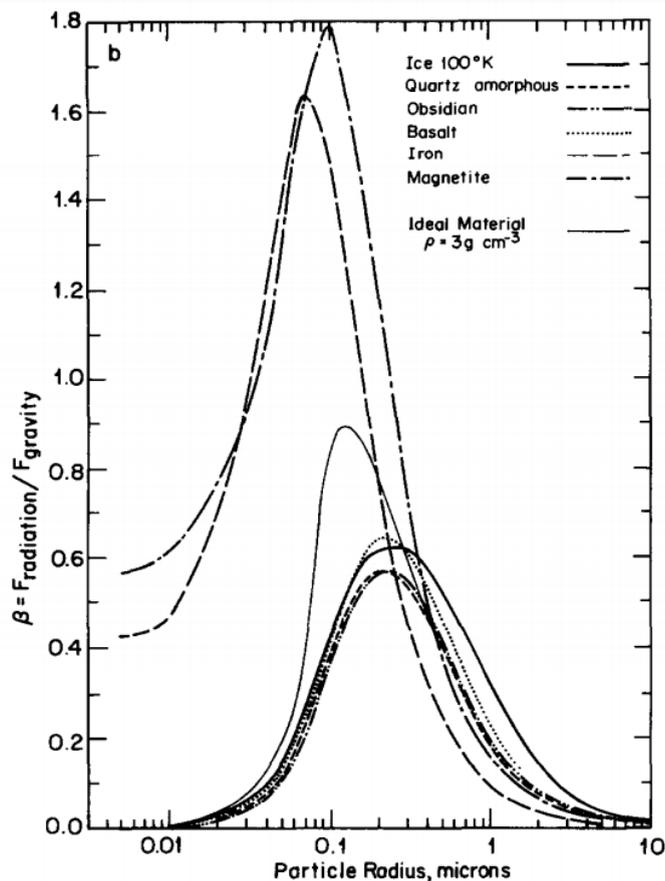


FIGURA 1.7: Gráfica semilog de la fuerza de presión de radiación relativa,  $\beta = F_{pr}/F_g$ , en función del tamaño de las partículas para 6 composiciones típicas del polvo interplanetario y un material ideal, Burns et al. (1979b).

## 1.5. Efecto Poynting-Robertson

La radiación solar también hace que una partícula de polvo en órbita alrededor de una estrella (en este caso al Sol) intercambie momento angular con los fotones incidentes y radiados, provocando que las partículas de polvo no sigan órbitas estables, sino trayectorias espirales en torno al Sol, a lo cual se le conoce como el efecto Poynting-Robertson.

El efecto se puede entender de dos maneras, dependiendo de qué marco de referencia se esté tomando. Visto desde el marco de referencia de una partícula de polvo orbitando al Sol (ver Figura 1.8 (a)), la radiación solar incidente parece venir de una dirección ligeramente hacia adelante (aberración de la luz), por lo tanto, la absorción de esta radiación conduce a una fuerza con una componente en contra de la dirección de movimiento. Visto desde la perspectiva del Sol (Figura 1.8 (b)), el grano de polvo absorbe la totalidad de la luz solar que recibe desde la dirección radial, de este modo el momento angular del

grano se mantiene sin cambiar. Sin embargo, al absorber fotones, la partícula de polvo adquiere energía (que puede ser cinética o térmica). Si el polvo adquiere energía cinética, aumenta su velocidad, y por conservación de momento angular se moverá a una órbita con menor distancia al Sol (*cae* en una órbita más baja).

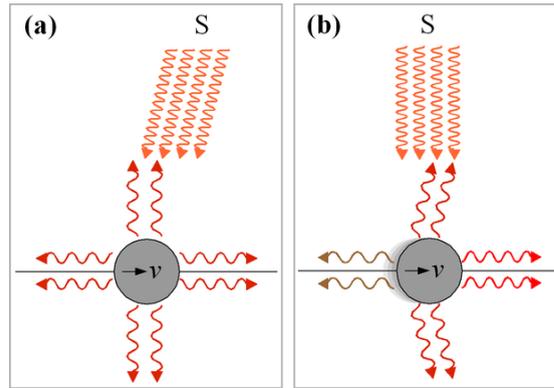


FIGURA 1.8: Radiación solar (S) y radiación térmica de una partícula vista (a) desde el marco de referencia de la partícula en movimiento y (b) desde el marco de referencia del Sol.

El efecto resultante puede verse como una fuerza opuesta a la dirección de movimiento orbital de la partícula. Mientras la partícula se mueve lentamente hacia el Sol en su movimiento orbital, la velocidad orbital se incrementa continuamente.

La fuerza producida por el efecto Poynting-Robertson es la siguiente:

$$F_{pr} = \frac{W v_p}{c^2} = \frac{r_p^2}{4c^2} \sqrt{\frac{GM_\odot L_\odot^2}{r^5}} \quad (1.3)$$

donde  $W$  es la potencia de la radiación incidente,  $v_p$ ,  $r_p$  son la velocidad y el radio de la partícula,  $c$  es la velocidad de la luz,  $M_\odot$  y  $L_\odot$  son la masa del Sol y la luminosidad solar y  $r$  es el radio de la órbita de la partícula de polvo.

Dado que la potencia que recibe y radia depende del cuadrado del radio de la partícula, entonces el efecto Poynting-Robertson se vuelve más pronunciado conforme el radio de las partículas va disminuyendo. Además como se puede ver en la ecuación 1.3, el efecto varía como  $r^{-5/2}$ , lo que hace que el efecto sea mayor cuando la partícula se aproxima al Sol, lo que tiende a reducir la excentricidad de la órbita de la partícula.

Dado que la intensidad del efecto Poynting-Robertson es muy baja, al tratarse de un efecto acumulativo será efectivo después de un periodo de tiempo suficientemente largo

(meses, años). Por tal motivo se puede despreciar este efecto en el análisis de esta tesis, debido a que el periodo de tiempo que se estudia es de 9 días.

## 1.6. Mecanismos de carga

En el medio interplanetario, las partículas de polvo ganan y pierden iones y electrones con facilidad debido a las diferentes tipos de corriente eléctrica que se generan en sus superficie. Para una partícula tan pequeña, perder o ganar un electrón o un ión altera sensiblemente su carga eléctrica total (que normalmente se expresa como potencial superficial eléctrico). El hecho es que uno de los factores que define la trayectoria de una partícula de polvo es su carga eléctrica superficial,  $q$ . Para determinar  $q$ , hay que analizar las diversas fuentes y mecanismos de carga. Los mecanismos dependerán del ambiente en el que se mueve la partícula. En general, la carga de las partículas es variable, pero podríamos considerarla constante bajo ciertas condiciones (como se explica en detalle en el Capítulo 3).

La evolución temporal de la carga de una partícula puede ser representada con la siguiente ecuación:

$$\frac{dq}{dt} = \sum_k I_k = I_{sec} + I_{e,i} + I_\nu \quad (1.4)$$

Las corrientes  $I_k$  son función de las propiedades de la partícula. Entre los mecanismos de carga más relevantes en el medio interplanetario está el bombardeo continuo de los iones y electrones del viento solar que genera una corriente electrónica  $I_e$  y una corriente iónica  $I_i$ . Si las energías de impacto del plasma son suficientemente altas, puede darse una dispersión de electrones e iones de la superficie del grano conocidas como emisión secundaria ( $I_{i,sec}$  y  $I_{e,sec}$ ). Adicionalmente, la radiación electromagnética puede producir corrientes de fotoelectrones ( $I_\nu$ ) y, en mucho menor medida, podría darse un efecto termoiónico ( $I_{th}$ ) si la temperatura de la partícula de polvo es suficientemente alta (Grün et al., 2001).

En el Capítulo 3 se explica con más detalle cada uno de los procesos anteriores y se muestran los resultados que se obtuvieron al analizar dichos mecanismos para partículas de polvo específicas cuya dinámica se analiza en el Capítulo 4.

## 1.7. Plasma polvoso

En los ambientes interplanetarios el polvo coexiste con el plasma creando así al llamado *plasma polvoso*.

Los plasmas polvosos contienen granos cargados eléctricamente cuyo movimiento es influenciado, no solo por la gravedad y la presión de radiación, sino también por el arrastre del plasma y fuerzas electromagnéticas.

Debido al movimiento de las partículas cargadas eléctricamente, entonces, se generará una corriente eléctrica inducida por el movimiento de éstas, esta corriente a su vez, producirá un campo magnético, el cual será de gran importancia al analizar la dinámica de una partícula de polvo dentro de este *plasma polvoso*.

## 1.8. Erosión (Sputtering)

### 1.8.1. Tiempo de vida del polvo interplanetario a 1UA

El tiempo de vida de las partículas de polvo interplanetario es limitado, en particular está modulado por la pérdida de masa por erosión (sputtering) y también evaporación/sublimación.

El constante bombardeo de partículas energéticas en las partículas de polvo provocan la dispersión de átomos y moléculas de la superficie. Esta erosión conocida en inglés como sputtering casi siempre es independiente de la temperatura de las partículas de polvo, sin embargo, para las partículas de hielo hay un incremento repentino cerca de la temperatura de sublimación del hielo. Por lo tanto el tiempo de vida para partículas de hielo en el sistema solar exterior es mucho más corto que para los granos minerales.

Para magnetitas con radios entre  $1-10 \mu m$  a  $0.5 UA$ , el tiempo de vida para esas partículas es de  $10^{10} s$  ( $\sim 317$  años) y  $10^{12} s$  ( $\sim 31709$  años) (Mukai, 1981) respectivamente, dependiendo del radio de la partícula. Por otra parte, para partículas compuestas de hielo de agua con los mismos radios pero a  $5 UA$ , el tiempo de vida de la partícula es de  $\approx 10^{11} s$  ( $\sim 3170$  años) y  $10^{13} s$  ( $\sim 317097$  años) (Mukai & Schwehm, 1981).

## 1.9. Fuerzas básicas

Como conclusión para este capítulo podemos decir que una partícula inmersa en el medio interplanetario se encuentra sujeta a la influencia de varios campos, por ejemplo, electromagnéticos y gravitacionales, los cuales definen su dinámica. En nuestro caso, debemos considerar que las trayectorias de las partículas son susceptibles de ser modificadas debido a la interacción con el viento y la radiación solar. En esta tesis, se consideran sólo el campo gravitacional del Sol y los campos electromagnéticos que acompañan al viento solar. La ecuación de movimiento básica -en el marco de referencia de la Tierra- es la siguiente:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{q}{m} \left[ \vec{E} + (\vec{v} \times \vec{B}) \right] + \frac{GM_{\odot}}{|\vec{r}|^2} \hat{r} \quad (1.5)$$

con  $\vec{E} = -\vec{V} \times \vec{B}$  el campo eléctrico visto desde el marco de referencia de la Tierra,  $\vec{V}$  y  $\vec{B}$  son la velocidad y el campo magnético del viento solar. Recordemos que el campo eléctrico que se produce en el plasma es inductivo, siendo cero en el sistema de referencia del plasma (para más detalle ver Apéndice A).

Aquí  $\vec{v}$ ,  $q$  y  $m$  son la velocidad, la carga y la masa de la partícula de polvo.  $M_{\odot}$  es la masa del Sol y  $\hat{r}$  es el vector unitario que nos da la posición de la partícula con respecto al Sol.  $|\vec{r}|$  es la distancia entre la partícula de polvo y el Sol. Se analiza esta ecuación en detalle en el Capítulo 4 y con ella se obtienen los resultados más importantes de esta tesis.

## Capítulo 2

# Viento Solar

En este capítulo se presentan las propiedades físicas básicas del viento solar y, en particular, de las CMEs. Se presentan además, los datos de viento solar que se usaron en nuestro análisis de interacción con el polvo interplanetario.

### 2.1. Origen

El Sol es una estrella de tipo espectral G y de secuencia principal, es decir, existen reacciones termonucleares en su centro, convirtiendo  $H$  en  $H_e$ . Por ser nuestra estrella más cercana, es la más estudiada, pero, por su complejidad, su estructura y procesos siguen sin entenderse en detalle.

Nuestro interés se enfoca en la atmósfera del Sol que se compone de tres regiones, la fotosfera, la cromósfera y la corona Solar que es la capa más externa y donde se genera el llamado viento solar. Se puede considerar al viento solar como una extensión de la atmósfera solar.

El viento solar es un flujo de plasma eyectado desde el Sol a velocidades supersónicas ( $V > 340 \text{ m/s}$ ), el cual es generado debido a la expansión de la corona, en parte, por su alta temperatura ( $\sim 10^6 \text{ K}$ ) y a las diferencias de presión que existen entre la corona solar baja y el espacio circundante, sin embargo, también están involucrados efectos electromagnéticos.

## 2.2. Propiedades básicas

Desde la superficie del Sol, el viento solar transporta  $\approx 10^9 \text{ kg/s}$  de protones, electrones y  $He^{++}$  y  $\approx 0.1\%$  de elementos más pesados como helio, oxígeno e incluso hierro en diferentes estados de ionización. Se pueden observar dos regímenes, el viento solar lento y el rápido (emitido a través de la parte central de los hoyos coronales). En promedio, a una distancia de  $1 \text{ UA}$  -a la distancia de la órbita de la Tierra-, las velocidades que puede alcanzar el viento solar lento van de  $3 \times 10^5$  a  $5 \times 10^5 \text{ m/s}$ , su temperatura es de  $\approx 1.4 \times 10^6 \text{ K}$  y su composición es similar a la de la corona solar (73% hidrógeno y un 25% helio). Por otro lado, el viento solar rápido tiene unas velocidades  $> 7 \times 10^5 \text{ m/s}$ , una temperatura de  $\sim 10^5 \text{ K}$  y su composición es más parecida a la de la fotosfera solar [Geiss et al. \(1995\)](#).

## 2.3. Estructura básica

El Sol rota una vez cada 27 días. Las líneas de campo que se emanan del Sol están ancladas a la superficie solar, por lo que también giran. Las líneas de campo magnético, tanto del norte como del sur, se encuentran en direcciones opuestas, hacia afuera en un hemisferio y hacia adentro en otro. La *hoja de corriente heliosférica* (HCS) separa las líneas de campo del norte y del sur del ecuador magnético del Sol. Como las líneas de campo se encuentran ancladas al Sol y giran con él, adquieren una forma espiral llamada *espiral de Parker*. Sin embargo, la inclinación del dipolo solar con respecto al eje de rotación solar hace que la hoja de corriente oscile de norte a sur generando una superficie ondulada que se asemeja a una falda de una bailarina de ballet, ver [Figura 2.1](#).

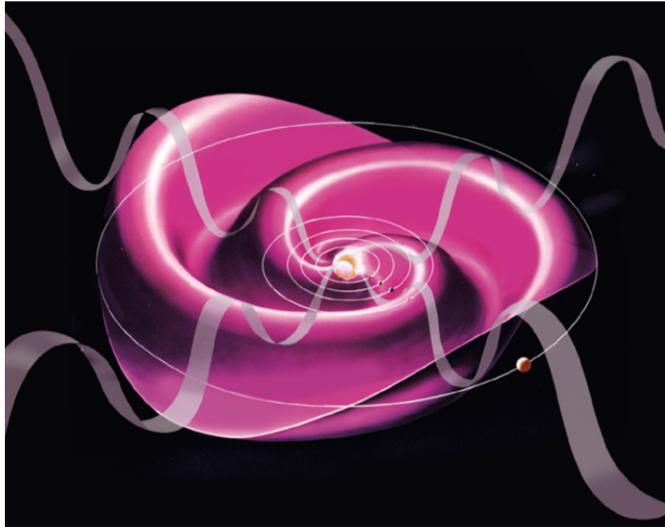


FIGURA 2.1: Representación artística de la hoja neutra de campo magnético interplanetario y la espiral de Parker (falda de bailarina). El Sol se encuentra girando en el centro. Crédito: NASA

## 2.4. Regiones de interacción de corrientes (SIRs)

Las regiones de interacción de corrientes (SIRs) o regiones de interacción co-rotantes (CIRs) son estructuras del medio interplanetario donde el viento solar rápido choca con el lento formando zonas de compresión que siguen también una estructura espiral. Esta interacción produce ondas de choque por delante (choque de proa) y por detrás (choque de popa) que pueden acelerar partículas energéticas como los rayos cósmicos.

Las velocidades del viento solar van desde pocos cientos de  $km/s$  a miles de  $km/s$  dependiendo de las condiciones en la corona donde el viento solar tiene su fuente. Los vientos de baja velocidad vienen de las regiones cercanas al ecuador, mientras que los vientos de alta velocidad provienen de los hoyos coronales donde las líneas de campo se abren hacia el espacio interplanetario. Cuando un agujero coronal se encuentra en latitudes bajas y de frente a la Tierra, unos días después ( $\approx 3.5$  días) su influencia se siente en los alrededores de la Tierra. Si el agujero coronal en cuestión permanece en las mismas latitudes por varios meses, su influencia será recurrente, con un periodo aproximado de 27 días.

Los principales rasgos de una CIR que pueden observarse en los datos son los siguientes:

- Dos choques, el primero debido a que el viento solar rápido alcanza al viento solar lento, designado choque de proa o delantero, y un choque de popa o de reversa (también trasero) generado cuando la zona de compresión rápida trata de desacoplarse del viento lento que se mueve por detrás. Los choques son transiciones donde las propiedades del plasma cambian de un estado de equilibrio a otro. Las relaciones físicas en ambos lados de un choque se pueden obtener utilizando las ecuaciones de conservación (momento, masa, energía) en la teoría magnetohidrodinámica.
- Una zona de compresión debido a que el viento solar rápido se mueve hacia el viento solar lento, comprimiendo así el medio.
- Aumento en la densidad de protones debido a la compresión del medio.
- Campo magnético alto con respecto al ambiente.
- Aumento en la temperatura de los protones del plasma y en la velocidad del viento solar .
- Rotación del campo magnético.

En la Figura 2.2 se puede observar una esquematización de una CIR (tomada de: [Tappin & Howard \(2009\)](#))

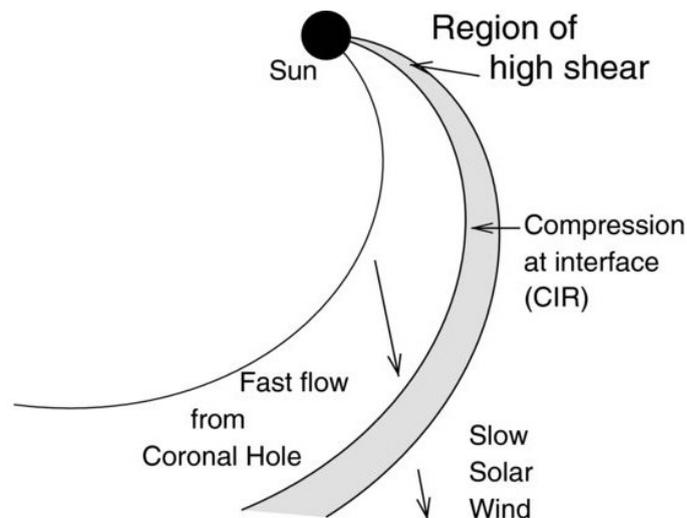


FIGURA 2.2: Estructura típica de una CIR/ SIR.

En la Figura 2.3 mostramos datos de varias CIRs consecutivas observadas por la nave Ulysses entre el día 147 y 213 del año 2004, los datos fueron tomados de [Flandes et al. \(2011\)](#). La región sombreada delimita a la CIR entre el choque delantero y el choque

trasero. En la figura se muestran la velocidad del viento solar  $V$ , la densidad de los protones  $N_p$ , la temperatura de los protones  $T_p$ , la intensidad del campo magnético interplanetario  $|Bl|$  y el ángulo azimutal  $\phi$  que se forma entre el choque y el campo magnético. Las propiedades anteriores se magnifican en la región de compresión. Se puede observar que el campo magnético del viento solar ambiente oscila entre  $0.2$  y  $0.5 nT$ , mientras que el campo magnético dentro de las regiones de compresión es  $> 0.5 nT$ . Para el caso de la densidad de protones, en el viento solar ambiente  $N_p < 0.4 cm^{-3}$  y en las regiones de compresión  $N_p > 0.4 cm^{-3}$ .

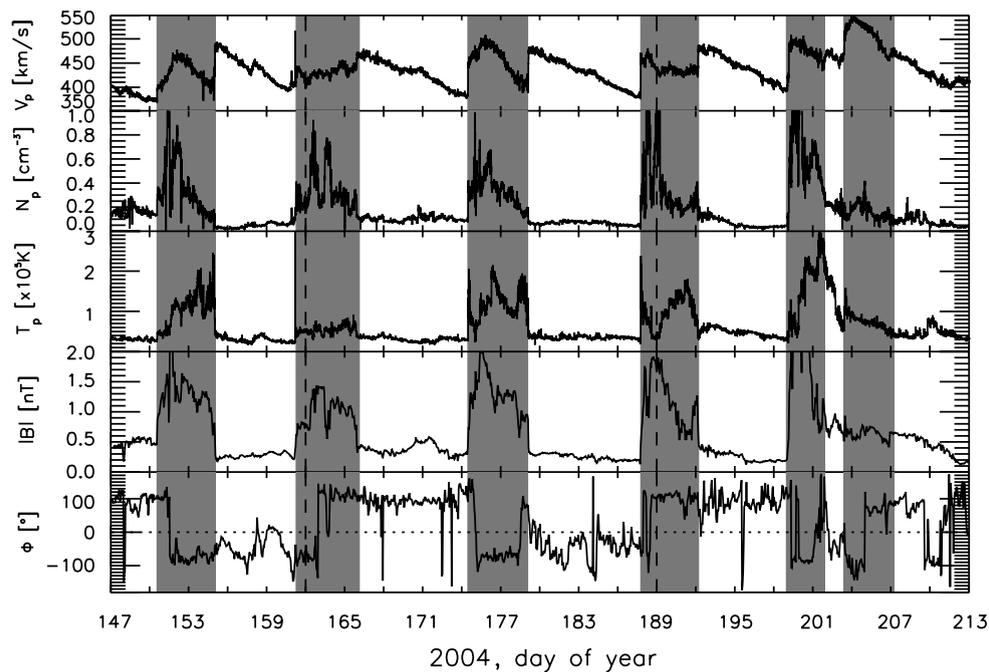


FIGURA 2.3: Ejemplo de una CIR observada por Ulysses entre los días 147 y 213 del 2004. Se muestra la velocidad del viento solar  $V$ , la densidad de protones  $N_p$ , la temperatura de los protones  $T_p$ , la intensidad del campo magnético interplanetario  $|Bl|$  y el ángulo azimutal  $\phi$ .

## 2.5. Eyecciones de masa coronal (CMEs)

Las eyecciones de masa coronal son grandes expulsiones de plasma y campo magnético que se producen desde la parte más baja de la corona solar y que se extienden a través de la heliósfera. Son consecuencia de la actividad solar más intensa (específicamente, de las variaciones que se producen en la configuración magnética en la corona solar). Alrededor del periodo de mayor actividad solar, las CMEs son un fenómeno tan frecuente que es posible observar varias CMEs durante un día.

Las CMEs se distinguen del viento solar ambiente porque tiene una temperatura más baja, un campo magnético más alto, una composición química diferente, entre otras características. Comúnmente, a las CMEs se les llama ICMEs (o CMEs interplanetarias) cuando están suficientemente lejos del Sol.

Una ICME típica tiene una masa de  $10^{10} \text{ kg} \lesssim m \lesssim 10^{13} \text{ kg}$  (Vourlidas et al., 2002) y una velocidad entre  $1 \times 10^4 \text{ m s}^{-1} \lesssim v \lesssim 2 \times 10^6 \text{ m s}^{-1}$ , alcanzando, a veces, velocidades superiores cerca del Sol ( $\approx 35 \times 10^5 \text{ m/s}$ ) (Yashiro et al., 2004). En promedio, a 1 UA las CMEs tienen velocidades que van desde los  $3 \times 10^5 \lesssim v \lesssim 10 \times 10^5 \text{ m s}^{-1}$  (Gopalswamy, 2006). Las energías asociadas a las CMEs son del orden de  $10^{24} \text{ J} \lesssim E \lesssim 10^{25} \text{ J}$ .

Adicionalmente, cuando la velocidad de una ICME es suficientemente alta ( $> 4.6 \times 10^5 \text{ m s}^{-1}$ ) con respecto a la velocidad del viento solar ambiente, se crea una onda de choque que es seguida por una región de compresión, en la cual la velocidad, la temperatura, la densidad y el campo magnético se amplifican, ambas, por delante de la ICME.

En los datos de los satélites o naves dedicados a la medición del viento solar, las ICMEs muestran rasgos particulares que se listan a continuación:

- Campo magnético alto del orden de varios  $nT$ .
- Rotación suave del campo magnético.
- Corrientes bidireccionales de electrones supratérmicos e iones energéticos.
- Incremento en la abundancia de átomos de helio.
- Estados inusuales de ionización de iones pesados.

Una ICME no necesariamente muestra todos estos rasgos, pero sí la mayoría.

## 2.6. Límites del Sistema Solar

El viento solar, junto con el campo magnético solar anclado en él, se expanden hasta que es frenado y encapsulado por el medio interestelar. Esta interacción forma una onda de

choque, que se conoce como *choque terminal*. Por detrás del choque está la heliofunda y, antes, la heliopausa, que es la frontera entre el plasma solar y el del medio interestelar.

Las naves espaciales Viajero 1<sup>1</sup> y Viajero 2<sup>2</sup>, lanzadas en 1977, son las naves que han llegado más lejos de la Tierra. A comienzos de 2004, el Viajero 2 se encontraba a 75 UA, mientras que el Viajero 1 se encontraba aproximadamente a 90 UA, más del doble de la distancia a la que se encuentra Plutón ( $\approx 39$  UA).

Durante el mínimo de actividad solar, el viento solar fluye a mayor velocidad, por lo tanto, es capaz de empujar más hacia afuera al choque terminal. En los últimos años de investigación se ha propuesto que el choque terminal se encuentra entre  $90 \text{ UA} \lesssim R \lesssim 120 \text{ UA}$ , sin embargo, una serie de cálculos más elaborados proponen que la heliopausa se encuentra entre  $150 \text{ UA} \lesssim R \lesssim 300 \text{ UA}$  (Kim et al., 2017).

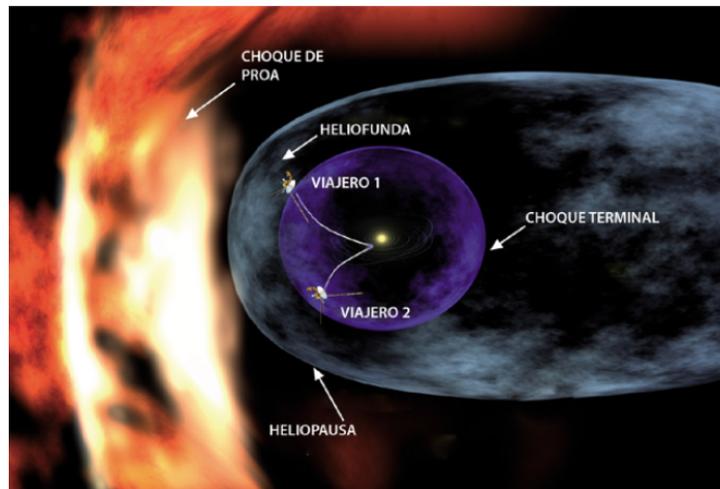


FIGURA 2.4: Representación de la heliosfera. Crédito: NASA/JPL.

## 2.7. Satélites de observación solar y del medio interplanetario

Varios satélites han sido lanzados para estudiar el viento solar, por ejemplo, WIND<sup>3</sup>, ACE<sup>4</sup> y Ulysses. WIND, por ejemplo fue lanzado el 1 de noviembre de 1994 y se colocó en una órbita halo. Una órbita Halo es una órbita periódica tridimensional la cual se encuentra cerca de los puntos Lagrangianos L1, L2 o L3 en un sistema de 3 cuerpos (ver

<sup>1</sup><https://www.jpl.nasa.gov/missions/voyager-1/>

<sup>2</sup><https://www.jpl.nasa.gov/missions/voyager-2/>

<sup>3</sup><https://wind.nasa.gov/>

<sup>4</sup><https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/services/missions/solarsystem/ACE.html>

Figura 2.5). Son usadas para lograr poner en órbita un satélite. En éste caso las órbitas de halo son el resultado de la atracción gravitacional de dos cuerpos celestes o planetarios junto con las fuerzas de Coriolis y las aceleraciones centrífugas en la nave espacial. El principal objetivo de WIND es poder comprender mejor la física de las relaciones sol-Tierra, de tal manera que está diseñado para el estudio del viento y las partículas solares. Por otra parte, Ulysses, fue lanzada el 6 de Octubre de 1990 y fue diseñada para estudiar los polos norte y sur del Sol, los cuales no habían sido estudiados anteriormente. Durante los 18 años que duró la misión, Ulysses completó casi 3 órbitas alrededor del Sol. Gracias a sus 10 instrumentos a bordo logró revelar por primera vez detalles del viento solar fuera del plano de la eclíptica.<sup>5</sup>

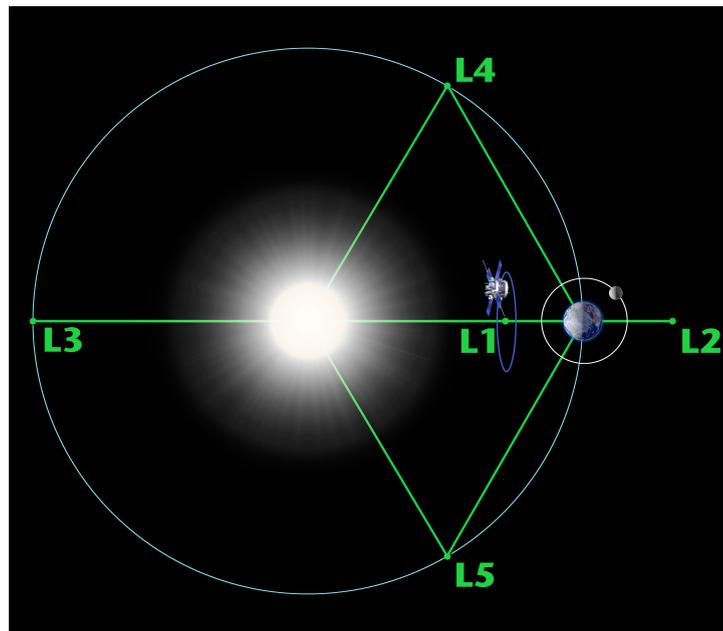


FIGURA 2.5: Representación de la posición de ACE en el punto lagrangiano 1. Credito: NASA/H. Zell

Otro ejemplo son los satélites gemelos STEREO A y B (Solar TERrestrial RELations Observatory)<sup>6</sup>. El objetivo principal de STEREO era tener una imagen 3D del viento solar y entender el origen y las consecuencias de las las CMEs. Lograr tal perspectiva requiere alejarse del punto de observación habitual en la Tierra, por eso ambas naves se mueven por delante y por detrás de la Tierra en su órbita para tener una visión estereoscópica del Sol.

<sup>5</sup><https://www.jpl.nasa.gov/missions/ulysses/>

<sup>6</sup><https://stereo.gsfc.nasa.gov/>

### 2.7.1. ACE

El Advanced Composition Explorer (ACE) es un satélite de la NASA que observa partículas de origen solar, interplanetario, interestelar y galáctico abarcando rangos de energías que van desde  $\approx 100$  eV/nucleón (iones del viento solar) hasta  $\approx 500$  MeV/nucleón <sup>7</sup> (núcleos de rayos cósmicos galácticos) para así tener un mayor entendimiento del comportamiento del viento solar, del medio interplanetario y de otras fuentes de partículas.

ACE fue lanzado el 25 de agosto de 1997 a bordo de un cohete Delta II y actualmente se encuentra en las cercanías del punto de Lagrange 1 (L1, régimen de Lissajous), situado entre el Sol y la Tierra, aproximadamente a  $1.5 \times 10^9$  m de la Tierra (en el mismo plano de la órbita de la Tierra) y  $148.5 \times 10^9$  m del Sol (véase Figura 2.5). La nave tiene 1.6 m de ancho y 1 m de alto, sin incluir los 4 paneles solares y los brazos del magnetómetro que están conectados a dos de los paneles. Su masa inicial era de 785 kg de los cuales 189 kg eran de combustible. Los paneles solares generan alrededor de 500 vatios de potencia. Ace gira a 5 rpm, con su eje de giro generalmente apuntando a lo largo de la línea Tierra-Sol y gran parte de los instrumentos apuntando hacia el Sol.

ACE tiene como objetivos generales:

- Distinguir los procesos de formación dominantes del viento solar.
- Estudiar las condiciones de plasma en las fuentes del viento solar y de partículas energéticas midiendo y comparando los estados de carga de ambas poblaciones.
- Estudiar los procesos de aceleración del viento solar.
- Estudiar los flujos de viento solar.

Los instrumentos de ACE (de acuerdo a <http://www.srl.caltech.edu/ACE/>) son:

- CRIS: Cosmic Ray Isotope Spectrometer (Espectrómetro de isótopos de rayos cósmicos). Estudia la composición isotópica de los rayos cósmicos para poder entender mejor su origen.

---

<sup>7</sup><http://www.srl.caltech.edu/ACE/>

- SWIMS: Solar Wind Ion Mass Spectrometer (Espectrómetro de masas de iones del viento solar). Mide la composición química, isotópica y el estado de carga del viento solar para cada elemento entre *He* y *Ni*.
- SWICS: Solar Wind Ion Composition Spectrometer (Espectrómetro de masas para la composición de iones del viento solar). Era el encargado de medir la composición química y de carga iónica del viento solar, también medía las velocidades térmicas y promedios de velocidades de todos los iones principales del viento solar.
- ULEIS: Ultra-Low Energy Isotope Spectrometer (Espectrómetro de isótopos de ultra alta energía). Este instrumento mide la composición de partículas y el flujo de iones en el rango de masas que va del helio al níquel, para así determinar las características de las partículas energéticas solares.
- SEPICA: Solar Energetic Particle Ionic Charge Analyzer (Analizador de carga de las partículas solares energéticas). Este instrumento determina la carga y la energía cinética de los iones del viento solar. Ayuda a distinguir el tipo de iones.
- SIS: Solar Isotope Spectrometer (Espectrómetro de isótopos solares). Mide las abundancias isotópicas de partículas energéticas solares, en un rango de energía de  $\sim 10$  a  $\sim 100$  MeV/nucleón. Durante los momentos de menor actividad solar SIS mide los isótopos de los rayos cósmicos galácticos de baja energía y la composición de los rayos cósmicos anómalos que se originan en el medio interestelar.
- SWEAPAM: Solar Wind Electron, Proton and Alpha Monitor (Monitor de electrones, protones y partículas alfa del viento solar). Proporciona mediciones de alta resolución de los flujos de electrones e iones en el rango de energías bajas del viento solar.
- MAG: Magnetometer (Magnetómetro). Este magnetómetro - uno de los instrumentos más importantes para la obtención de resultados de esta tesis- mide la dirección (en sus tres componentes) y la magnitud del campo magnético local en el medio interplanetario de manera continua. MAG consiste en un par de sensores gemelos de flujo triaxial, los dos sensores triaxiales proporcionan un instrumento vectorial equilibrado el cual permite una mejor evaluación del campo magnético.

En la Figura 2.6 se puede observar con más detalle los instrumentos que lleva a bordo ACE.

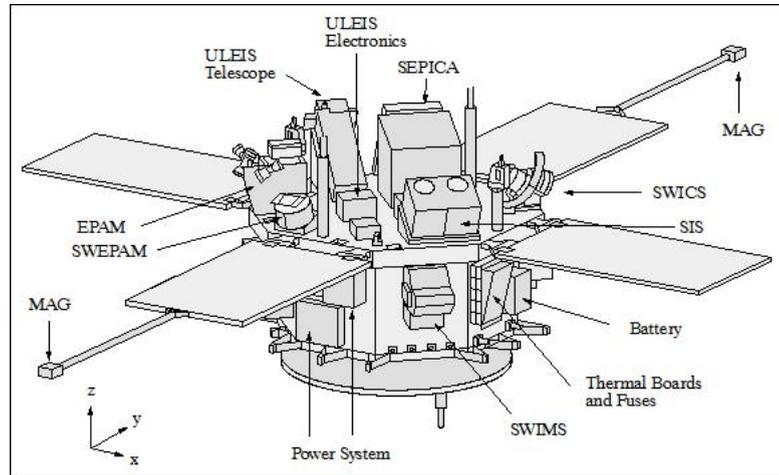


FIGURA 2.6: Representación de ACE y sus instrumentos. Crédito: ESA

ACE aún tiene suficiente combustible a bordo para mantenerse en órbita en L1 aproximadamente hasta el 2024.

## 2.8. Datos del viento solar usados en esta tesis

Para nuestro estudio se considera una ICME que la nave ACE observó: Primero, detectó un choque a las 01:04 UT del 22 de enero del 2004, alrededor de las 11:00 UT de ese mismo día detectó la ICME moviéndose con una velocidad de  $6.5 \times 10^5 \text{ m/s}$ . La velocidad de los protones antes del choque fue de  $4.75 \times 10^5 \text{ m/s}$ . El tiempo de viaje de la CME desde el Sol hasta la Tierra es de  $\approx 59$  horas considerando que fue observada inicialmente por el satélite LASCO/C2 en la superficie del Sol el 20 de enero del mismo año a las 00:06 UT. A medida que se alejaba más la ICME la velocidad detectada fue disminuyendo (Durand-Manterola et al., 2017; Lara et al., 2011; Flandes et al., 2011).

Los datos de la nave ACE se descargaron de CDAWeb de la NASA (<https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/index.htm>). Los datos usados cubren del 21 de enero del 2004 al 30 de enero del mismo año para incluir el viento solar de fondo, además de la ICME para una mejor comparación. Los datos usados tienen una resolución de 1 minuto.

En la Figura 2.7 se puede observar las magnitudes tanto del campo magnético, velocidad, la densidad de los protones, la temperatura, y el campo eléctrico del evento. La región

sombreada corresponde a la región de compresión generada por el choque y el frente de la CME, representada por la línea punteada.

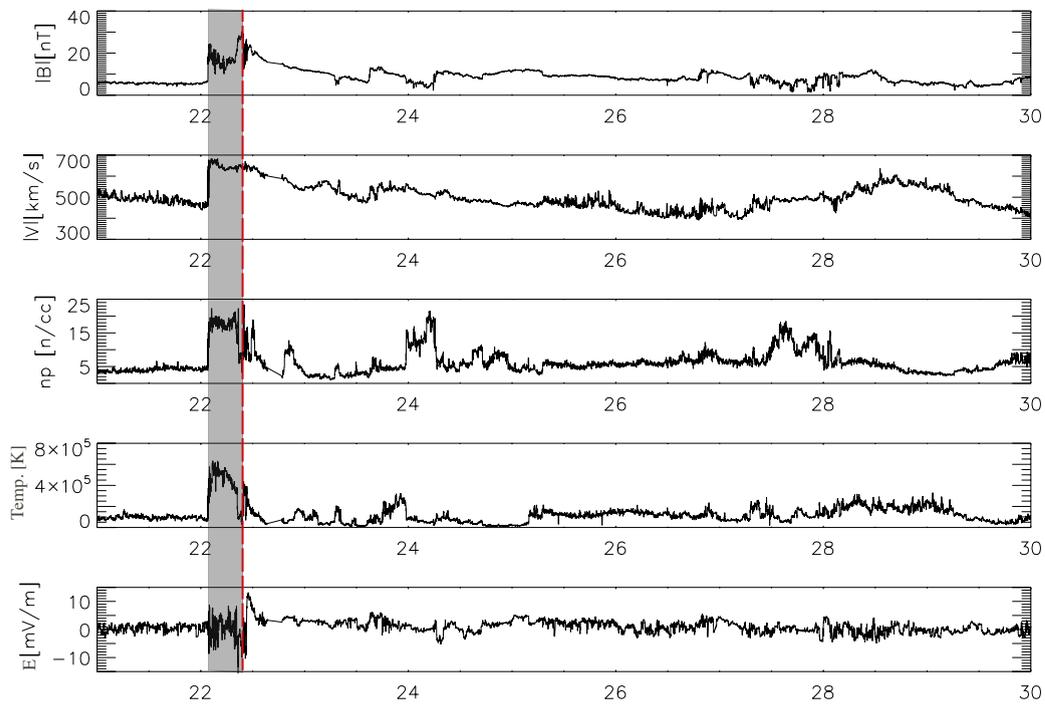


FIGURA 2.7: CME observada por ACE con una resolución de 1 min. Se puede observar la magnitud del campo magnético, velocidad del flujo del viento solar, la densidad de protones, la temperatura y el campo eléctrico respectivamente. La zona sombreada corresponde a la región de compresión o funda de la CME. La CME comienza inmediatamente después (a la derecha de la línea roja punteada).

En los datos de ACE (Figura 2.7) se puede observar claramente el choque entre el día 22 y el día 23 y un posterior incremento, tanto en el campo magnético como en la velocidad del flujo del viento solar y la densidad de protones correspondientes a una región de compresión o funda de la CME (región sombreada). La funda precede a la CME (línea punteada). Uno de los aspectos importantes al detectar el comienzo de una CME es el decaimiento en la densidad de protones, tal como se muestra en la gráfica después de la línea punteada. Las componentes del campo magnético están representadas en la Figura 2.8 en la cual podemos observar que la componente  $X$  es más susceptible al campo magnético, de hecho en la componente  $X$  se alcanzan los máximos valores de campo magnético medido en  $nT$ , cuyo valor promedio es de  $B_x \approx 3 nT$ .

Analizando las componentes de la velocidad de la CME (Figura 2.9) tenemos que la componente  $X$  disminuye en el momento del choque y posteriormente aumenta, sin embargo el comportamiento en las otras dos direcciones no es muy claro ya que el valor de

la velocidad oscila en magnitud y dirección. A pesar de eso, si analizamos la magnitud de la velocidad es posible observar con claridad el aumento de la misma al momento del choque.

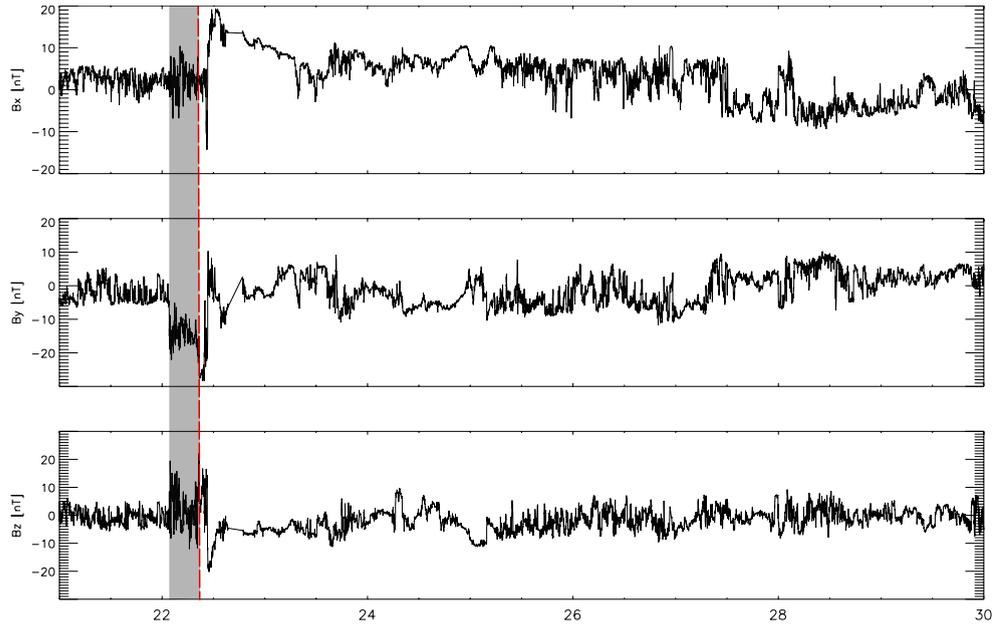


FIGURA 2.8: CME observada por ACE con una resolución de 1 min. Se puede observar las componentes del campo magnético medidas en nanoteslas ( $nT$ ).  $B_x \approx 3 nT$ ,  $B_y \approx -2 nT$ ,  $B_z \approx -1.5 nT$  y  $|\vec{B}| \approx 8.8 nT$

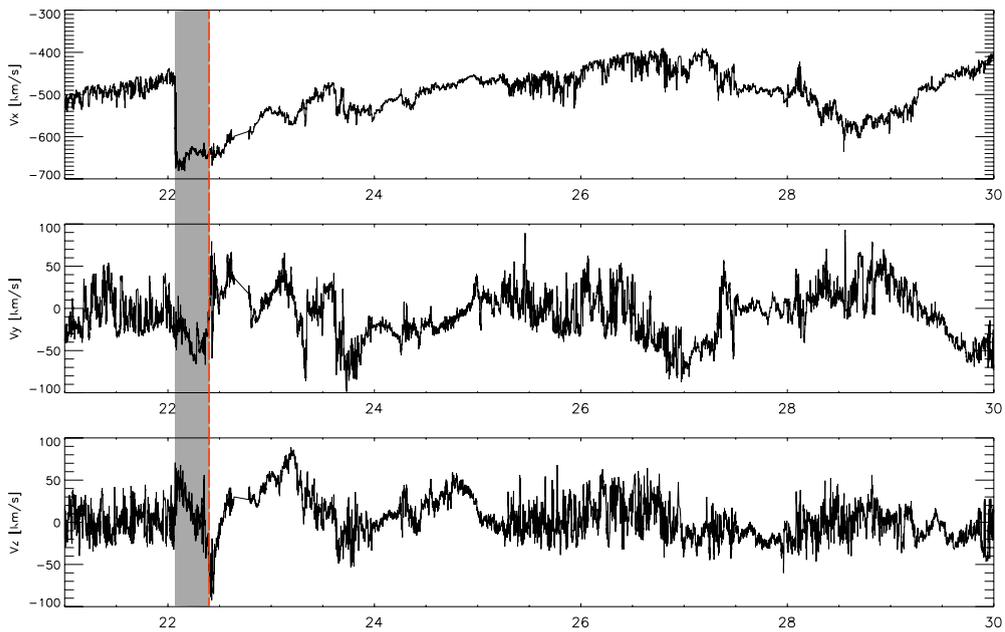


FIGURA 2.9: CME observada por ACE con una resolución de 1 min. Se muestran las componentes de la velocidad medidas en  $km/s$ .  $|\vec{V}| \approx 502 km/s$

## Capítulo 3

# Mecanismos de carga

En este capítulo se analizan con más detalle los mecanismos básicos de carga (mencionados en el Capítulo 1) de las partículas de polvo a través de las posibles corrientes eléctricas que pudieran generarse en su superficie. Esas corrientes son las que determinarán la carga eléctrica final de las partículas. Hacemos un análisis de tres mecanismos (captura de electrones, emisión de fotoelectrones y emisión secundaria de electrones) para después estimar el tiempo en el cual la partícula de polvo llega a su potencial de equilibrio para determinar el o los mecanismos dominantes.

### 3.1. Introducción

El cambio en el tiempo de la carga eléctrica  $q$  de una partícula de polvo interplanetaria dentro de un plasma (en nuestro caso del viento solar) es descrito por la contribución de cada una de corrientes que circulan en la superficie de la partícula de polvo en su camino por el plasma. Por lo general, en el viento solar dominan las corrientes debidas a la emisión secundaria de electrones, las generadas por la emisión de fotoelectrones y las generadas por la captura de iones o electrones.

La expresión que representa dicho cambio temporal de la corriente se expuso en el Capítulo 1 (ver ecuación 1.4), pero aquí la presentamos nuevamente:

$$\frac{dq}{dt} = \sum_k I_k = I_{sec} + I_{e,i} + I_\nu \quad (3.1)$$

Cada una de las corrientes es función de las propiedades del viento solar (p. e., densidad, energía, temperatura y composición) y de las propiedades tanto físicas como químicas de las partículas de polvo (p. e., tamaño, velocidad, densidad y composición).

Conforme se va acumulando la carga en la partícula de polvo, cambiará la distribución del potencial electrostático en su superficie y en su entorno.

Si el grano recolecta inicialmente más electrones que iones, entonces se desarrollará un potencial negativo a su superficie, lo cual repelerá a los electrones incidentes haciendo que el flujo de los mismos disminuya, mientras que el flujo de iones aumentará. El pequeño tamaño de los granos de polvo hace que se pueda despreciar la fuerza de Lorentz sobre las partículas de plasma cuando se calculan las corrientes, ya que las partículas de polvo son mucho menores que el radio de Larmor  $r$  de las partículas del plasma del medio interplanetario definido como:

$$r = \frac{m_p v_{\perp}}{qB} \quad (3.2)$$

donde  $m_p$  y  $q$  son la masa y carga de las partículas del plasma, en este caso del viento solar, y  $v_{\perp}$  es la velocidad de las partículas del plasma perpendicular al campo magnético  $B$ .

Es posible asumir que los flujos recolectados son determinados por los movimientos girotrópicos de la partícula de polvo (sin colisiones o barreras de potencial), ya que por lo general, la partícula es mucho más pequeña que el camino libre medio de las partículas del plasma y la longitud de Debye del plasma dada por:

$$\lambda_D = \left( \frac{\epsilon_0 k_B T}{ne^2} \right)^{1/2} \quad (3.3)$$

donde  $n$  y  $T$  corresponden aquí a la densidad y la temperatura del viento solar,  $\epsilon_0$  es la permitividad eléctrica del vacío,  $k_B$  es la constante de Boltzmann y  $e$  es la carga del electrón.

Hay otras cantidades que deben de ser consideradas en el problema de la carga de los granos: primero, la separación promedio de las partículas del plasma (sin importar la especie) que es  $\approx n_d^{-1/3}$  (donde  $n_d$  es la densidad de partículas en el plasma), y segundo,

el *radio de Landau* que es la distancia a la cual la energía potencial electrostática entre dos electrones del plasma ( $e^2/4\pi\epsilon_0 r_L$ ) es igual a su energía térmica ( $\approx k_B T$ ). De acuerdo a lo anterior, el radio de Landau se define por:

$$r_L = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 k_B T} \quad (3.4)$$

Si  $a \ll r_L$  (con  $a$  el radio de la partícula de polvo), entonces  $n_i \approx n_e$  y se puede despreciar la polarización del grano o suponer que  $q \approx 0$ .

### 3.2. Corrientes debidas a la captura de iones o electrones

La captura de electrones o iones es uno de los mecanismos de carga más comunes en el medio interplanetario. En nuestro caso, consideramos que la partícula de polvo se encuentra en reposo dentro del viento solar, por lo que las corrientes de electrones o iones serán estacionarias, es decir, no dependen del tiempo.

El tamaño de la partícula de polvo es importante para este tipo de mecanismo, ya que si el tamaño aumenta entonces puede recolectar más electrones o iones del viento solar (sin importar la especie). Otro factor importante para la captura de electrones o iones es la densidad del plasma, pues dependiendo de cuál sea la densidad del viento solar, será la frecuencia con la cual colisionan, tanto los iones, como electrones en la partícula.

Como ya se explicó anteriormente, se puede asumir que  $a \ll \lambda_D \ll \lambda$ . Para este caso, [Horányi \(1996\)](#) da una expresión para las corrientes de electrones o iones producidas por los bombardeos de éstas sobre una partícula de polvo de radio dado, la cual es expresada de la siguiente forma:

$$I_{e,i} = 4\pi a^2 n_{e,i} \sqrt{\frac{kT_{e,i}}{2\pi m_{e,i}}} \begin{cases} \exp(-\psi_{i,e}) & \psi_{i,e} > 0 \\ 1 - \psi_{i,e} & \psi_{i,e} < 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

donde

$$\psi_{i,e} = \mp \frac{q_e \phi}{kT_{e,i}} \quad (3.6)$$

y el  $\mp$  indica si se trata de electrones o iones.  $\phi$  es el potencial superficial de la partícula de polvo.

Spitzer (1941) presenta una solución para el caso en el cual únicamente hay corrientes de carga debidas a las corrientes de electrones e iones. En este caso, si las temperaturas de iones y electrones se consideran iguales ( $T = T_e = T_i$ ), el potencial de equilibrio de una partícula de polvo dentro del viento solar es:

$$\phi_{eq} = -\beta \frac{kT}{e} \quad (3.7)$$

$\beta$  es una constante experimental que depende de la composición del plasma y que se denomina como la  $\beta$  del plasma. En éste caso, se hizo el promedio de  $\beta$  que midió la nave ACE durante el evento analizado en esta tesis, durante un período de 9 días, el cual abarca del 21 de enero al 30 de enero del 2004, ( $\beta = 1.391$ ), y entonces aplicando la ecuación 3.7,  $\phi_{eq} = -14.644$  Volts.

Para una partícula de polvo aislada, el potencial superficial  $\phi$  se puede relacionar directamente con la carga eléctrica. Considerando a las partículas de polvo como capacitores esféricos de una sola placa, cuya capacitancia está dada por  $C = q/\phi = 4\pi\epsilon_0 a$ , entonces  $q = C\phi = ne$  ( $n$  indica el número de cargas fundamentales  $e$ ). Reescribiendo  $q$  de las expresiones anteriores tenemos que:

$$q = 4\pi\epsilon_0 a\phi = ne \quad (3.8)$$

Haciendo un poco de álgebra, utilizando unidades  $mps$  por conveniencia y expresando el radio en micras, la expresión anterior se puede reducir a lo siguiente (ver apéndice B).

$$n \approx 700a_\mu\phi \quad (3.9)$$

Con el potencial ( $\phi$ ) en Volts.

Debido a que los electrones tienen una masa menor que la de los iones, se mueven mucho más rápido a la misma temperatura (ya que  $\frac{1}{2}mv_{e,i}^2 = kT$ ), eso provoca que el grano se cargue negativamente más fácilmente. La carga negativa acumulada repele los electrones

incidentes, reduciendo su flujo incidente. Se alcanza un equilibrio cuando no entran ni salen cargas de la superficie del grano.

### 3.3. Corrientes debidas a la emisión fotoelectrónica

Cuando los electrones superficiales de un grano de polvo absorben suficiente radiación solar UV, escapan y se liberan fotoelectrones y, por tal motivo, se genera una corriente de carga positiva en su superficie.

Horanyi et al. (1988) propone la siguiente aproximación para la producción de fotoelectrones (o corriente de fotoelectrones) debido a la radiación solar ultravioleta:

$$I_\nu = \begin{cases} \pi a^2 q_e f_1 & \text{si } \phi < 0 \\ \pi a^2 q_e f_1 \exp(-q_e \phi / kT) & \text{si } \phi > 0 \end{cases} \quad (3.10)$$

donde  $kT_e$  es el promedio de energía de los fotoelectrones y  $f_1 [cm^{-2} s^{-1}] \approx 2.5 \times 10^{10} \chi / R^2$  es el flujo de emisión fotoelectrónica a 1 UA,  $\chi$  es el factor de eficiencia el cual toma un valor de  $\approx 1.0$  para granos conductores (silicatos). Para partículas dieléctricas (como el hielo de agua) se tiene que  $\chi \approx 0.1$  y  $R$  representa la distancia heliocéntrica en unidades astronómicas.

Para la producción de ese tipo de corrientes, las propiedades químicas del grano serán de gran relevancia, ya que el factor  $\chi$  depende del tipo de material del cuál está compuesta la partícula de polvo.

### 3.4. Corrientes debidas a la emisión secundaria de electrones

Si una partícula de polvo interplanetario es bombardeada por electrones y/o iones solares suficientemente energéticos ( $> 50$  eV) podría producirse lo que se conoce como emisión secundaria de electrones (o iones). En el caso de la emisión secundaria de electrones por electrones incidentes se tiene la dispersión de electrones de la partícula de polvo. A los electrones que son dispersados se les conoce como electrones secundarios. El flujo de estos

electrones secundarios depende de la energía relativa con la cual impactan los electrones -primarios- del viento solar, también del potencial superficial y de la composición química de la partícula de polvo. Ese flujo de electrones se caracteriza por el parámetro de eficiencia  $\delta_y$ , [Sternglass \(1954\)](#). Si  $\delta_y > 1$ , entonces el polvo tendrá mayormente una carga positiva.

La eficiencia,  $\delta_m$ , o la relación entre los electrones emitidos y los incidentes, es una función del material de la partícula de polvo y de la energía cinética ( $E$ ) de los electrones primarios en el marco inercial de la partícula de polvo. [Sternglass \(1954\)](#) propone la siguiente expresión para la corriente secundaria producida por los impactos de los electrones:

$$\delta_y(E) = 7.4 \delta_M \left( \frac{E}{E_M} \right) \exp \left[ -2 \left( \frac{E}{E_M} \right)^{1/2} \right] \quad (3.11)$$

donde  $E_m$  es la energía característica a la cual la liberación de un electrón secundario alcanza un máximo. Experimentalmente se ha comprobado que el rendimiento tiene un máximo de  $\delta_y = \delta_M$  (de 1-10 ) con respecto a la energía incidente  $100 \text{ eV} \lesssim E_M \lesssim 1000 \text{ eV}$ .

[Draine & Salpeter \(1979\)](#) obtuvieron algunos valores representativos para rendimientos máximos ( $\delta_m$ ) a energías máximas dadas ( $E_m$ ) que se muestran en la Tabla 3.1. Los parámetros que están en negritas son los que se usaron en esta tesis al analizar partículas de silicatos.

TABLA 3.1: Parámetros de emisión secundaria obtenidos por [Draine & Salpeter \(1979\)](#)

Material	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	$\delta_m$	$E_m$ [eV]
Grafito	2.26	1	250
<i>SiO<sub>2</sub></i>	<b>2.65</b>	<b>2.9</b>	<b>420</b>
Mica	2.8	2.4	340
Fe	7.86	1.3	400
Al	2.70	0.95	300
MgO	3.58	23	1200
Polvo Lunar	3.2	1.5	500

La eficiencia de dispersión de los electrones primarios también influyen en la carga de los granos de polvo. Para las partículas de hielo con cuatro composiciones, [Suszcynsky et al. \(1992\)](#) obtuvieron un estimado de la eficiencia máxima  $\delta_m$  y la energía asociada a esta eficiencia,  $E_m$  que se muestran en la Tabla 3.2. De igual forma, los valores marcados en negritas son los que se usaron en la tesis al analizar partículas de hielo de agua.

TABLA 3.2: Eficiencia de electrones secundarios medidos y estimación de la eficiencia y energía de rendimiento máxima  $\delta_m$  y  $E_m$  respectivamente para cuatro tipos de hielos [Suszcynsky et al. \(1992\)](#).

Material	Rango de Energía [keV]	Rendimiento medido	$\delta_m$	$E_m$ [eV]
$H_2O$	<b>2-30</b>	<b>1.2-0.1</b>	<b>3.2</b>	<b>406</b>
$CO_2$	2-30	0.3-0.1	1.2	467
$NH_3$	2-30	0.7-0.1	2.2	362
$CH_3OH$	2-30	0.35-0.05	1.6	235

Para una partícula con composición dada que es impactada por iones, [Horanyi et al. \(1988\)](#) obtienen la siguiente expresión para la eficiencia de dispersión:

$$\delta(E) = 2\delta_m \frac{E}{E_m} \frac{\sqrt{E/E_m}}{[(1+E)/E_m]} \quad (3.12)$$

### 3.5. Resultados: Potencial de equilibrio y tiempos de carga por emisión fotoelectrónica.

Supongamos partículas que se encuentran en reposo respecto la Tierra (i.e.,  $v_x = v_y = v_z = 0$  m/s), lo que equivale a partículas que, inicialmente, orbitan junto la Tierra, por ejemplo, partículas de polvo que quedaron ahí después del paso de un cometa o de la desintegración de algún asteroide, y cuyas velocidades no fueron suficientes como para permitirles escapar de la órbita terrestre. Estas partículas están inmersas en el viento solar que lo caracterizamos con datos de ACE entre el 21 de enero del 2004 y el 30 de enero del 2004, presentados en el Capítulo 2. En sus superficies se generan las corrientes eléctricas escritas en las secciones anteriores.

Consideramos partículas con cinco radios distintos en el intervalo  $10^{-9} m \leq a \leq 10^{-5} m$  y de dos tipos de materiales: hielo de agua ( $H_2O$ ) y silicatos ( $SiO_x$ ).

Calculamos la corriente neta,  $I$ , con la ecuación 3.10 suponiendo un potencial superficial  $\phi < 0$ . Una vez obtenidas las corrientes, es posible encontrar el tiempo que le tomaría a la partícula de polvo alcanzar un potencial  $\phi \approx 1 \text{ Volt}$  a través de la emisión fotoelectrónica, ya que al liberar fotoelectrones la partícula quedará cargada positivamente facilitando así la producción de corrientes positivas.

Para determinar el tiempo de carga usamos la ecuación siguiente:

$$t = \frac{q}{I} \tag{3.13}$$

donde la carga eléctrica  $q$  viene dada por la ecuación 3.8. Si combinamos las ecuaciones 3.13 y 3.8 tenemos la siguiente ecuación 3.14, que nos da el tiempo de carga de una partícula de polvo de radio  $a$ .

$$t = \frac{4\pi\epsilon_0 a \phi}{I_\nu} \tag{3.14}$$

Mostramos los resultados numéricos en la Tabla 3.3, en la cual se puede ver que el tiempo que le llevaría a una partícula de polvo con  $10^{-9} \text{ m} \leq a \leq 10^{-5} \text{ m}$  ya sea de silicato o hielo de agua, en cargarse debido al efecto de emisión fotoelectrónica es de días. Más adelante se mostrarán los tiempos debidos a otro tipo de corrientes, para así poder hacer una comparación en los tiempos y así quedarnos con la corriente que domina en el problema analizado en esta tesis.

TABLA 3.3: Resultados obtenidos al analizar el tiempo de carga que tendría una partícula debido al efecto de emisión fotoelectrónica. Se hizo el análisis para los cinco radios diferentes a 1 UA, de igual forma se calculó el tiempo de carga para partículas de polvo tanto de Silicatos (columna 4) como de hielos (columna 6) ambos dados en días. Las corrientes de emisión fotoelectrónica están dadas en  $e/s$ , con  $e$  la carga del electrón.

R [UA]	$a$ [m]	$I_{\nu SiO_x}$ [e/s]	$t_{SiO_x}$ [días]	$I_{\nu H_2O}$ [e/s]	$t_{H_2O}$ [días]
1	$10^{-9}$	$7.85 \times 10^{-8}$	102	$7.85 \times 10^{-9}$	1024
	$10^{-8}$	$7.85 \times 10^{-6}$	10	$7.85 \times 10^{-7}$	102
	$10^{-7}$	$7.85 \times 10^{-4}$	1	$7.85 \times 10^{-5}$	10
	$10^{-6}$	$7.85 \times 10^{-2}$	0.102	$7.85 \times 10^{-3}$	1
	$10^{-5}$	7.853	0.0102	0.785	0.102

### 3.6. Resultados: Potencial de equilibrio y tiempos de carga por emisión secundaria

Ahora analizamos el efecto de emisión secundaria de electrones en las partículas haciendo las mismas variaciones tanto de radio y densidad de la partícula, utilizando la expresión dada por la ecuación 3.11, donde se puede ver que depende de la energía de incidencia de los electrones. Para hallar dicha energía se considera que la velocidad promedio de los electrones dentro de la CME y el viento solar es de  $V_{electrones} = V_{iones} \approx 5.02 \times 10^5 \text{ m/s}$ , por lo que su energía cinética es de  $E \approx 0.715 \text{ eV}$ . Se supondrá que para silicatos,  $\delta_m = 2.9$ ,  $E_M = 420 \text{ eV}$  y  $\delta_y(E) = 0.036$  y para hielos de agua,  $\delta_m = 3.2$ ,  $E_M = 406 \text{ eV}$  y  $\delta_y(E) = 0.042$ .

Si hacemos un análisis con las diversas energías de incidencia de electrones para poder determinar cuál sería la máxima eficiencia para partículas de silicatos y hielos de agua con un radio cualquiera (ya que es independiente de dicho valor), podremos notar que, tanto para una partícula de silicato o de hielo de agua, la eficiencia máxima se da con energías incidentes entre  $400 \text{ eV}$  y  $420 \text{ eV}$ , cuyos valores son  $\delta_y(E) \approx 7.8$  y  $\delta_y(E) \approx 8.7$  respectivamente (ver Figura 3.1).

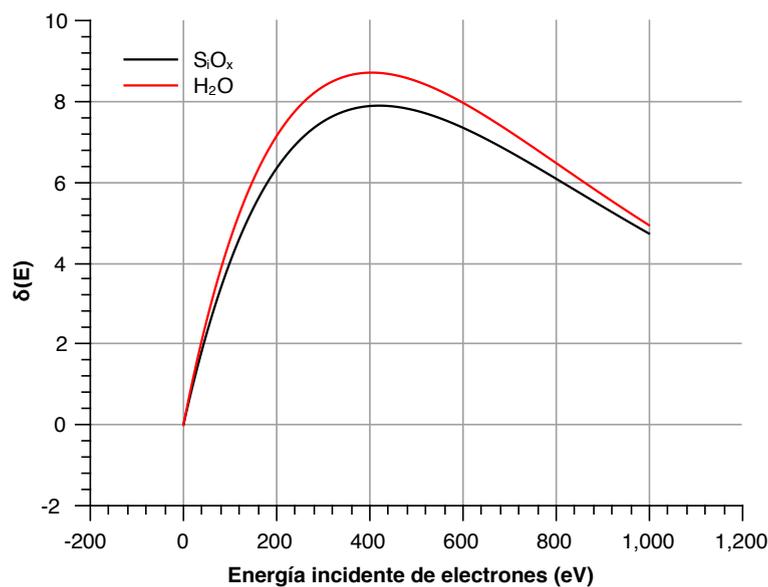


FIGURA 3.1: Eficiencia como función de la energía incidente de los electrones para partículas de silicatos  $\text{SiO}_x$  (curva negra) e hielos de agua  $\text{H}_2\text{O}$  (curva roja).

Si comparamos las energías que se necesitan para que la partícula alcance el rendimiento máximo con las energías que portan los electrones de la CME ( $E \approx 0.715 \text{ eV}$ ), podemos observar que éstas últimas son mucho más bajas, por lo que se puede decir que el plasma es demasiado frío y entonces no es suficientemente energético como para producir la emisión secundaria de electrones.

### 3.7. Resultados: Potencial de equilibrio y tiempos de carga por captura electrónica

Al despreciar tanto las corrientes fotoelectrónicas como las corrientes de emisión secundaria de electrones, entonces el único efecto que tenemos es el de las corrientes de electrones, por lo que es posible usar la expresión dada por [Spitzer \(1941\)](#) para calcular el potencial de equilibrio, ver ecuación 3.7. Una vez calculado el potencial de equilibrio se calculó el número de electrones que puede capturar la partícula de polvo con la ecuación 3.9.

Para hallar el tiempo que le tomaría a la partícula recolectar un cierto número,  $n$ , de electrones sabemos que

$$\tau = \left| \frac{q}{I_e} \right|, \quad (3.15)$$

$$\tau_{eq} = \left| \frac{q}{en_e V \sigma_g} \right| \quad (3.16)$$

donde  $V$  es la velocidad de las partículas del viento solar,  $\sigma_g$  es la sección transversal de la partícula de polvo,  $e$  es la carga del electrón y  $n_e$  es el número de electrones que pueden ser capturados por la IDP.

Los valores tanto del potencial de equilibrio considerando únicamente esta corriente, como del tiempo que le toma a la partícula llegar a dicho potencial son presentados en la columna (6) y (8) de la Tabla 3.4. Además se presenta un comparativo con el tiempo calculado considerando una corriente debida a la emisión fotoelectrónica (columna (5)) y la eficiencia electrónica  $\delta_y(E)$  (columna (3)).

TABLA 3.4: Resultados de los procesos de carga, (1) muestra el radio de la partícula en metros, (2) es el material de la partícula, (3) muestra la eficiencia electrónica ( $\delta_y(E)$ ), (4) la corriente debida a la emisión de fotoelectrones, (5) el tiempo en días que tarda en cargarse la partícula debido a dicha corriente, (6) es el potencial de equilibrio que alcanza la partícula al atrapar  $ne$  electrones (7), y por último, (8), muestra el tiempo que tarda en llegar la partícula de polvo al potencial de equilibrio.

$a$ [m] (1)	Material (2)	$\delta_y(E)$ $\times 10^{-2}$ (3)	$I_\nu$ [e/s] (4)	$\tau_\nu$ [días] (5)	$\phi_{eq}$ [V] (6)	$ne$ (7)	$\tau_{ne}$ [s] (8)
$10^{-9}$	$SiO_x$	3.65	$7.85 \times 10^{-8}$	102	-14.64	10	$\tau < 10^{-9}$
$10^{-9}$	Hielo de $H_2O$	4.16	$7.85 \times 10^{-9}$	1024	-14.64	10	$\tau < 10^{-9}$
$10^{-8}$	$SiO_x$	3.65	$7.85 \times 10^{-6}$	10	-14.64	102	$\tau < 10^{-9}$
$10^{-8}$	Hielo de $H_2O$	4.16	$7.85 \times 10^{-7}$	102	-14.64	102	$\tau < 10^{-9}$
$10^{-7}$	$SiO_x$	3.65	$7.85 \times 10^{-4}$	1	-14.64	1025	$\tau < 10^{-9}$
$10^{-7}$	Hielo de $H_2O$	4.16	$7.85 \times 10^{-5}$	10	-14.64	1025	$\tau < 10^{-9}$
$10^{-6}$	$SiO_x$	3.65	$7.85 \times 10^{-2}$	0.102	-14.64	10250	$\tau < 10^{-9}$
$10^{-6}$	Hielo de $H_2O$	4.16	$7.85 \times 10^{-3}$	1	-14.64	10250	$\tau < 10^{-9}$
$10^{-5}$	$SiO_x$	3.65	7.85	0.0102	-14.64	102509	$3.90 \times 10^{-9}$
$10^{-5}$	Hielo de $H_2O$	4.16	0.785	0.10	-14.64	102509	$3.90 \times 10^{-9}$

En esta tesis se considerará que la carga eléctrica de la partícula de polvo es constante ya que de acuerdo al análisis se puede observar que la partícula alcanza su potencial de equilibrio en segundos tomando en cuenta una corriente debida a la captura de electrones (ver columna (8) de la Tabla 3.4), eso quiere decir que ya no puede almacenar más carga eléctrica después de ese tiempo y entonces, la carga permanece constante después de dicho proceso de carga si las condiciones del plasma se mantienen estables. Por ese motivo, se desprecia la corriente producida por la emisión secundaria de electrones y la debida a la emisión fotoelectrónica, considerando en todo el análisis únicamente la corriente debida a la captura de electrones.

## Capítulo 4

# Dinámica de una partícula de polvo.

Las partículas de polvo pueden tener una dinámica muy compleja debido a las fuerzas que alteran su movimiento. Como ya se mencionó en el capítulo anterior, únicamente se tomarán en cuenta la fuerza gravitacional generada por el campo gravitacional del Sol y las fuerzas debidas a los campos electromagnéticos que acompañan al viento solar. A continuación se presenta el análisis de la dinámica de una partícula de polvo interplanetaria cargada eléctricamente en un periodo de  $\approx 9$  días y a  $r \approx 1 UA$  que es aproximadamente la distancia a la que se encuentra ACE medido desde el Sol.

Las propiedades tanto físicas como químicas de las partículas de polvo analizadas en esta tesis se muestran en la Tabla 4.1. Se puede observar el radio ( $a$ ), la densidad ( $\rho$ ), la masa ( $m_p$ ), el número de electrones capturados por la partícula ( $n_{e^-}$ ), la carga eléctrica ( $q$ ), la relación masa-carga ( $|m_p/q|$ ) y la velocidad promedio ( $|\vec{v}|$ ) de las partículas de polvo que se analizaron en esta tesis, la cual fue obtenido directamente de resolver la ecuación de movimiento (ecuación 4.1).

TABLA 4.1: Radio, densidad, masa, número de electrones capturados por la partícula, carga, relación masa-carga eléctrica y la velocidad promedio de las partículas de polvo,  $|\vec{v}|$  obtenida de resolver la ecuación de movimiento en un periodo de tiempo de 9 días.

$a$ [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$m_p$ [kg]	$ne^-$	$q$ [C]	$ m_p/q $ [kg/C]	$ \vec{v} $ [m/s]
$10^{-9}$	2610.0	$1.09 \times 10^{-23}$	10	$-1.6 \times 10^{-18}$	$6.83 \times 10^{-6}$	31717.88
	916.8	$3.84 \times 10^{-24}$	10	$-1.6 \times 10^{-18}$	$2.40 \times 10^{-6}$	90778.17
$10^{-8}$	2610.0	$1.09 \times 10^{-20}$	102	$-1.63 \times 10^{-17}$	$6.69 \times 10^{-4}$	315.40
	916.8	$3.84 \times 10^{-21}$	102	$-1.63 \times 10^{-17}$	$2.35 \times 10^{-4}$	898.02
$10^{-7}$	2610.0	$1.09 \times 10^{-17}$	1025	$-1.64 \times 10^{-16}$	$6.66 \times 10^{-2}$	3.22
	916.8	$3.84 \times 10^{-18}$	1025	$-1.64 \times 10^{-16}$	$2.34 \times 10^{-2}$	9.0
$10^{-6}$	2610.0	$1.09 \times 10^{-14}$	10250	$-1.64 \times 10^{-15}$	6.66	0.64
	916.8	$3.84 \times 10^{-15}$	10250	$-1.64 \times 10^{-15}$	2.34	0.65
$10^{-5}$	2610	$1.09 \times 10^{-11}$	102509	$-1.64 \times 10^{-14}$	666.57	$\sim 0.64$
	916.8	$3.84 \times 10^{-12}$	102509	$-1.64 \times 10^{-14}$	234.14	$\sim 0.64$

En la Tabla 4.1 se puede ver que conforme el radio de la partícula de polvo,  $a$ , aumenta, también aumentan tanto la masa como la carga de la misma, y por lo tanto el valor  $|m_p/q|$ . El cociente  $|m_p/q|$  nos dice qué fuerzas son las que están dominando, por lo que si  $|m_p/q|$  aumenta entonces los efectos gravitacionales se vuelven más relevantes en comparación con los electromagnéticos.

A continuación se describe la ecuación de movimiento, la cual no es posible resolver analíticamente por lo que fue necesario aplicar un método numérico (Runge-Kutta de orden 4).

## 4.1. Suposiciones básicas

Para el análisis de la dinámica se utilizan coordenadas cartesianas en un sistema de referencia inercial (la Tierra en este caso). Además, se supone que la partícula está inicialmente a la misma distancia que se encuentra ACE, es decir, en L1, y que su velocidad inicial es de  $0 \text{ m/s}$  con respecto a la Tierra, es decir, se encuentra orbitando a la misma.

A continuación se presenta el esquema que representa el sistema de referencia que se utilizó para todo el análisis hecho en esta tesis. Todo fue medido desde el sistema de

referencia de la Tierra, el vector representado por los signos de interrogación es la distancia que nos interesa en este estudio, la cual es la diferencia entre el vector  $\mathbf{r}$  (distancia calculada numéricamente) y el vector  $X'$  (distancia de la Tierra a ACE).

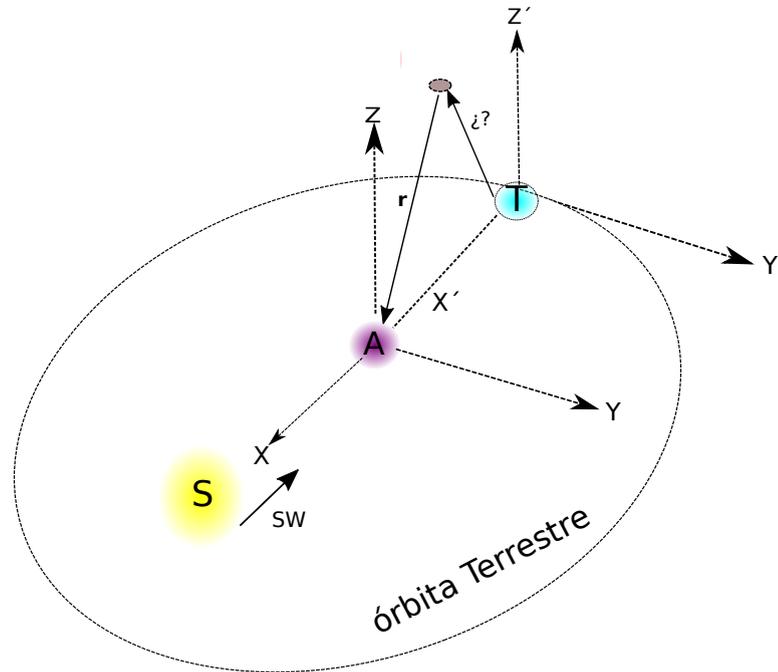


FIGURA 4.1: Esquema representativo del sistema de referencia utilizado en esta tesis. T representa a la Tierra, S representa al Sol y A representa a ACE. Todo fue medido desde el sistema de referencia de la Tierra, el vector representado por los signos de interrogación es la distancia que nos interesa en este estudio, la cual es la diferencia entre el vector  $\mathbf{r}$  (distancia calculada numéricamente) y el vector  $X'$  (distancia de la Tierra a ACE).

## 4.2. Fuerzas básicas en una partícula cargada

Las únicas fuerzas que se consideran en el análisis para esta tesis son la fuerza gravitacional que ejerce el Sol sobre una partícula de polvo, y la fuerza electromagnética

(Lorentz), la cual está representada en la ecuación 4.1, que aquí escribimos nuevamente:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{q}{m} \left[ \vec{E} + (\vec{v} \times \vec{B}) \right] + \frac{GM_{\odot}}{|\vec{r}|^2} \hat{r} \quad (4.1)$$

donde  $v$  es la velocidad de las partículas de polvo, y  $\vec{E} = -\vec{V} \times \vec{B}$ , con  $\vec{V}$  la velocidad del viento solar.

Consideramos a estas dos fuerzas, las más relevantes en la dinámica de la partícula, debido a que la escala de tiempo de análisis es muy corta.

Separando la ecuación 4.1 por componentes en coordenadas cartesianas y considerando al centro de la Tierra como el origen del sistema de referencia fijo, tenemos el siguiente sistema de ecuaciones.

$$\ddot{x} = \frac{q}{m_p} (V_z B_y - B_z V_y + B_z v_y - B_y v_z) + \frac{GM_{\odot}(1.5 \times 10^{11} - x_p)}{((1.5 \times 10^{11} - x_p)^2 + y_p^2 + z_p^2)^{3/2}} \quad (4.2)$$

$$\ddot{y} = \frac{q}{m_p} (B_z V_x - B_x V_z + B_x v_z - B_z v_x) + \frac{GM_{\odot} y_p}{((1.5 \times 10^{11} - x_p)^2 + y_p^2 + z_p^2)^{3/2}} \quad (4.3)$$

$$\ddot{z} = \frac{q}{m_p} (B_x V_y - B_y V_x + B_y v_x - B_x v_y) + \frac{GM_{\odot} z_p}{((1.5 \times 10^{11} - x_p)^2 + y_p^2 + z_p^2)^{3/2}} \quad (4.4)$$

donde  $x_p$ ,  $y_p$  y  $z_p$  son las posiciones finales de la partícula en tales direcciones, las cuales son el resultado de aplicar el método numérico Runge-Kutta de cuarto orden (RK4).

### 4.3. Método Runge-Kutta de cuarto orden (RK4)

Para resolver la ecuación 4.1 aplicamos el método de Runge-Kutta de cuarto orden, o también conocido como RK4. Los métodos Runge-Kutta son un conjunto de métodos iterativos que se usan para aproximar la solución a un problema de valores iniciales con una ecuación diferencial ordinaria la cual no tiene una solución analítica o es muy compleja hallarla.

El método de Runge-Kutta de orden cuarto es uno de los más utilizados y más precisos de este tipo de métodos iterativos, [Anagnostopoulos \(2016\)](#).

Se define un problema de valores iniciales de la siguiente forma:

$$y' = f(t, y) \quad y(t_0) = y_0 \quad (4.5)$$

El método RK4 para un problema dado por la ecuación 4.5 viene dado por la siguiente ecuación (4.6), Anagnostopoulos (2016) :

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (4.6)$$

donde  $h$  es el tamaño de paso, y los coeficientes  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  y  $k_4$  se definen de la siguiente manera:

$$k_1 = fh(t_n, y_n) \quad (4.7)$$

$$k_2 = fh\left(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_1}{2}\right) \quad (4.8)$$

$$k_3 = fh\left(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_2}{2}\right) \quad (4.9)$$

$$k_4 = fh(t_n + h, y_n + k_3) \quad (4.10)$$

Estos coeficientes indican la pendiente de la función en tres puntos diferentes: al comienzo ( $k_1$ ), el punto medio ( $k_2$  y  $k_3$ ) y al final ( $k_4$ ). La pendiente es un promedio ponderado de dichas pendientes.

Conociendo los  $k$ -coeficientes, la solución para el siguiente paso de tiempo se puede calcular con la ecuación 4.6.

#### 4.4. Error de truncamiento local relacionado al método RK4

En nuestro caso no contamos con una solución analítica del problema, por tal razón, no podemos comparar el método numérico con la solución exacta. Existen diversos tipos de errores numéricos (inherentes, de truncamiento y de redondeo son los más comunes), en este caso nos enfocaremos en el error de truncamiento local, que fue el que se analizó en esta tesis.

Los errores de truncamiento son los que se producen por truncar un proceso matemáticamente infinito, que es justo lo que sucede al evaluar series por medio de sumas finitas, derivadas por aproximaciones en diferencias finitas, o integrales usando fórmulas de cuadraturas.

El método RK4 tiene un error de truncamiento local de  $O(h^5)$ . Existen diversos métodos que proporcionan los términos de orden  $h^5$ . El método que se utilizó en esta tesis es el de hacer una evaluación adicional a la función  $f(y)$ , para así poder estimar el error sobre dos pasos consecutivos iguales, [Shampine & Watts \(2010\)](#).

$$k_0 = hf(y_n) \tag{4.11}$$

$$k_1 = hf\left(y_n + \frac{1}{2}k_0\right) \tag{4.12}$$

$$k_2 = hf\left(y_n + \frac{1}{4}k_0 + \frac{1}{4}k_1\right) \tag{4.13}$$

$$k_3 = hf\left(y_n - k_1 + 2k_2\right) \tag{4.14}$$

$$y_{n+1} = y_n + \frac{1}{6}(k_0 + 4k_2 + k_3) \tag{4.15}$$

$$k_4 = hf(y_{n+1}) \tag{4.16}$$

$$k_5 = hf(y_{n+1} + \frac{1}{2}k_4) \quad (4.17)$$

$$k_6 = hf(y_{n+1} + \frac{1}{2}k_4 + \frac{1}{4}k_5) \quad (4.18)$$

$$k_7 = hf(y_n - \frac{1}{6}k_0 - 16k_1 + \frac{46}{3}k_2 - \frac{121}{6}k_3 + 24k_4 + k_5 - 2k_6) \quad (4.19)$$

donde el error de truncamiento local en  $t_{i+2}$  sobre los dos pasos es:

$$\epsilon \approx \frac{1}{90}(k_0 - 4k_2 - 17k_3 + 23k_4 + 4k_6 + k_7) \quad (4.20)$$

## 4.5. Aplicación del método RK4

Aplicamos el método RK4 con  $h = (t_{n+3} - t_n)/n \approx 4 \text{ min}$ , con  $n$  el número total de líneas de la matriz de datos que son utilizados (en nuestro caso  $n = 10966$ ). Fue necesario limpiar los datos, ya que los datos mostraban un buen número de puntos de saturación.

Para resolver el sistema de ecuaciones anterior (ver ecuaciones 4.2, 4.3 y 4.4) fue necesario disminuir su orden y así poder trabajar sólo con seis ecuaciones diferenciales de primer orden en vez de tres ecuaciones de segundo orden.

Definiendo

$$s_1 = \dot{x} \rightarrow \dot{s}_1 = \ddot{x}, s_2 = x \quad (4.21)$$

$$s_3 = \dot{y} \rightarrow \dot{s}_3 = \ddot{y}, s_4 = y \quad (4.22)$$

$$s_5 = \dot{z} \rightarrow \dot{s}_5 = \ddot{z}, s_6 = z \quad (4.23)$$

Entonces tenemos el siguiente sistema que describe la dinámica de una partícula de polvo cargada eléctricamente:

$$\dot{s}_1 = \frac{q}{m_p}(V_z B_y - B_z V_y + B_z s_3 - B_y s_5) + \frac{GM_\odot(1.5 \times 10^{11} - s_2)}{((1.5 \times 10^{11} - s_2)^2 + s_4^2 + s_6^2)^{3/2}} \quad (4.24)$$

$$\dot{s}_2 = s_1 \quad (4.25)$$

$$\dot{s}_3 = \frac{q}{m_p}(B_z V_x - B_x V_z + B_x s_5 - B_z s_1) + \frac{GM_\odot s_4}{((1.5 \times 10^{11} - s_2)^2 + s_4^2 + s_6^2)^{3/2}} \quad (4.26)$$

$$\dot{s}_4 = s_3 \quad (4.27)$$

$$\dot{s}_5 = \frac{q}{m_p}(B_x V_y - B_y V_x + B_y s_1 - B_x s_3) + \frac{GM_\odot s_6}{((1.5 \times 10^{11} - s_2)^2 + s_4^2 + s_6^2)^{3/2}} \quad (4.28)$$

$$\dot{s}_6 = s_5 \quad (4.29)$$

donde  $s_1[0] = s_3[0] = s_5[0] = 0$  m/s, son las velocidades iniciales de la partícula de polvo, es decir se encuentran inicialmente orbitando a la Tierra, por lo que viajan con la misma velocidad orbital de la Tierra,  $V_{orbital} = \sqrt{\frac{GM_\odot}{R_{ST}}} \approx 29800$  m/s (suponiendo órbitas circulares). Por otra parte,  $s_2[0] = 1.49 \times 10^9$  m,  $s_4[0] = 0 = s_6[0] = 0$  m, son las posiciones iniciales de la partícula.

Se implementó entonces un código en IDL (Interactive Data Language) el cual resuelve cada una de las ecuaciones anteriores, 4.24-4.29 (con el método RK4) para así obtener la dinámica de la partícula de polvo interplanetaria. El cálculo de la primera pendiente en todos los casos es calculado en el tiempo  $t = t_i$ , la segunda pendiente en el tiempo  $t = t_{i+1}$ , la tercera pendiente en  $t = t_{i+2}$  y la cuarta pendiente en el tiempo  $t = t_{i+3}$  donde  $i = 0, 1, \dots, n - 4$ . Se hizo de tal manera, ya que así al calcular cada una de las pendientes se contaba con los valores tanto de campo eléctrico y magnético, como de la velocidad del viento solar en esos puntos.

Por último se presentan tres diagramas de flujo, uno general en el cual sólo se dan los pasos relevantes que se realizaron, y los otros dos son diagramas de flujo computacional.

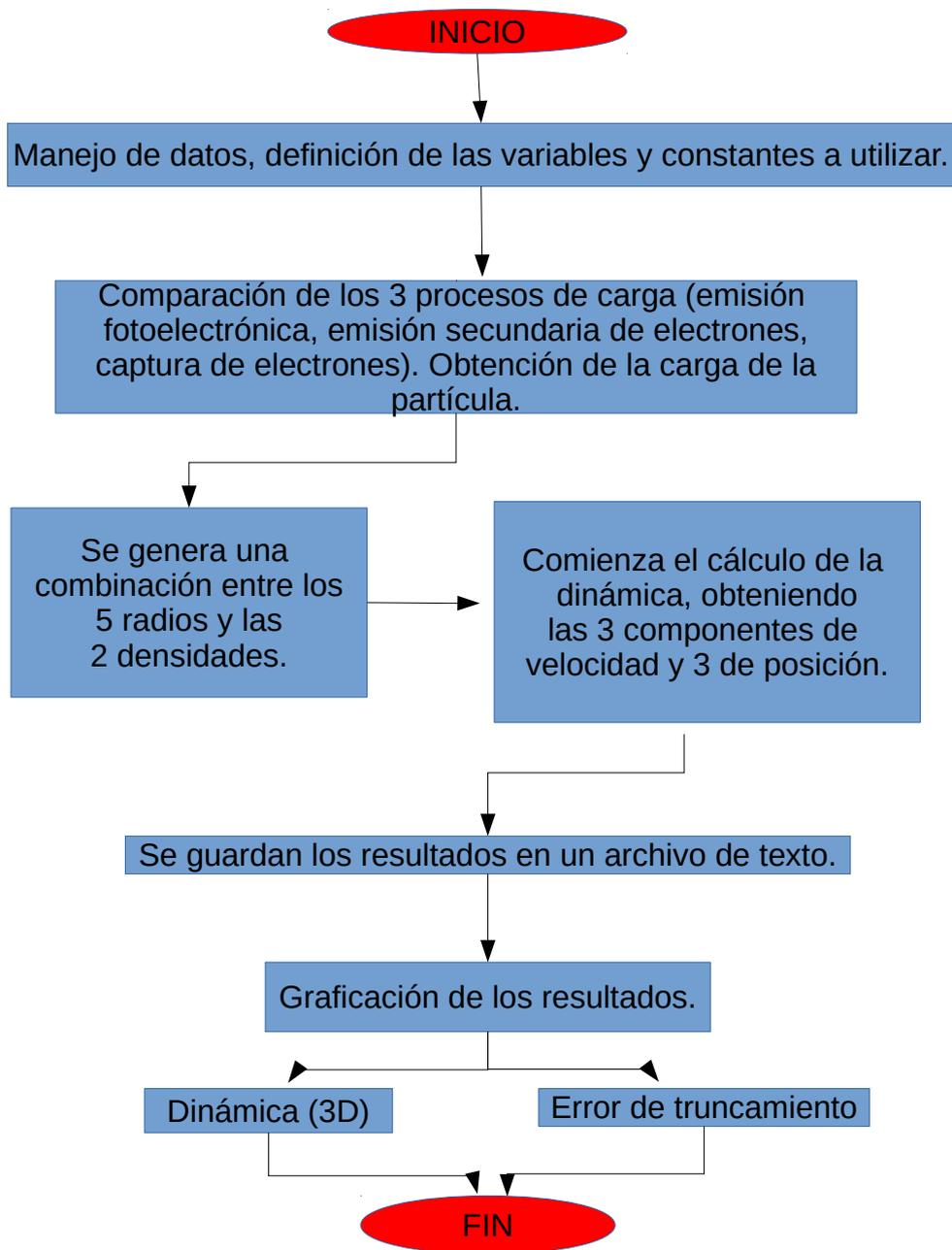


FIGURA 4.2: Diagrama de flujo del código implementado.

4.5.1. Diagrama de flujo

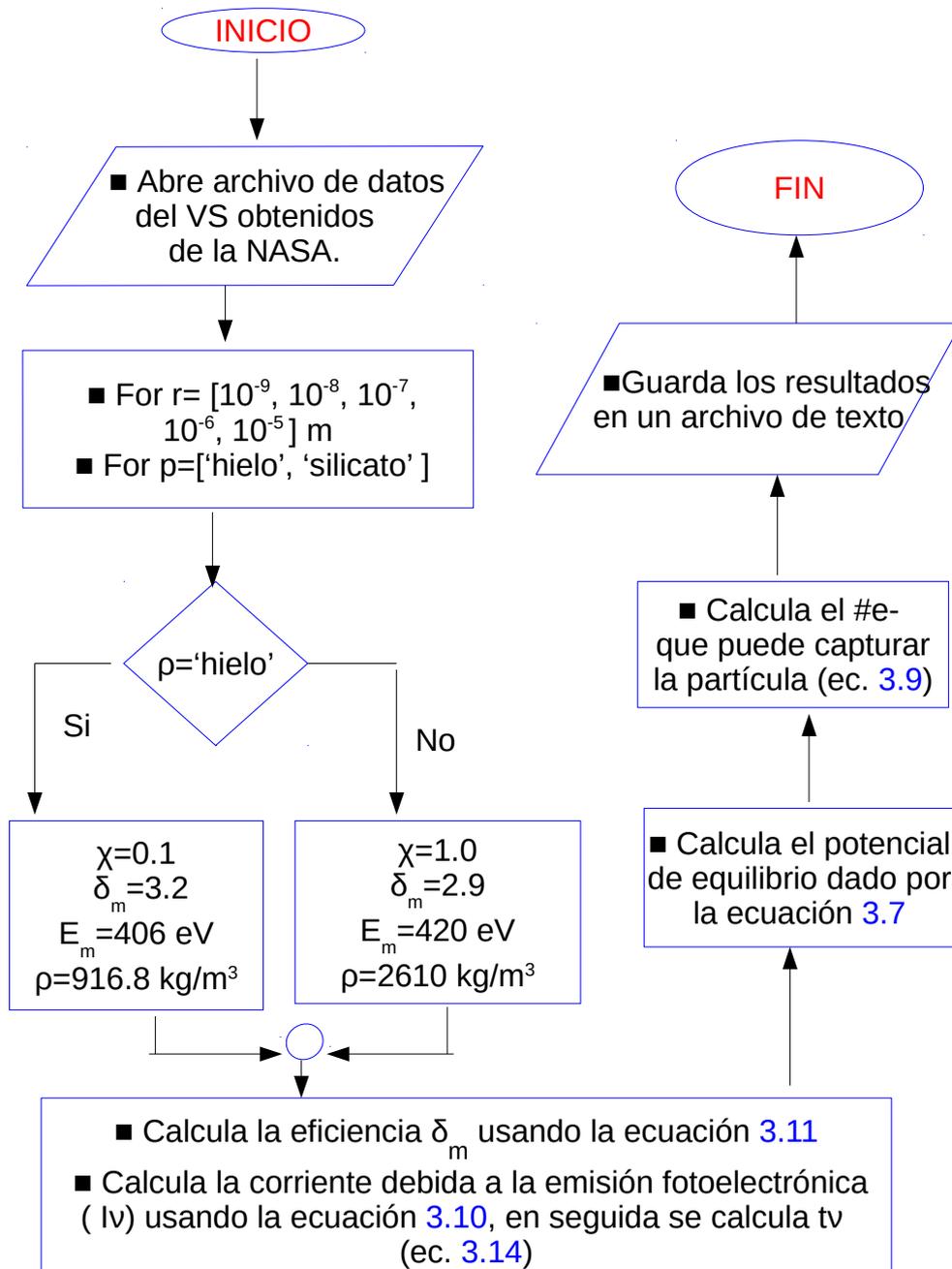


FIGURA 4.3: Diagrama de flujo del código implementado para poder obtener la carga eléctrica de la partícula de polvo, analizando los tres procesos ya mencionados. Aquí  $\rho$ ,  $r$ ,  $\chi$  son la densidad, radio, factor de eficiencia de la partícula; mientras que  $\delta_m$  es la eficiencia de la partícula -relación entre los electrones emitidos y los incidentes- y  $E_m$  es la energía característica a la cual la liberación de un electrón secundario alcanza un máximo.

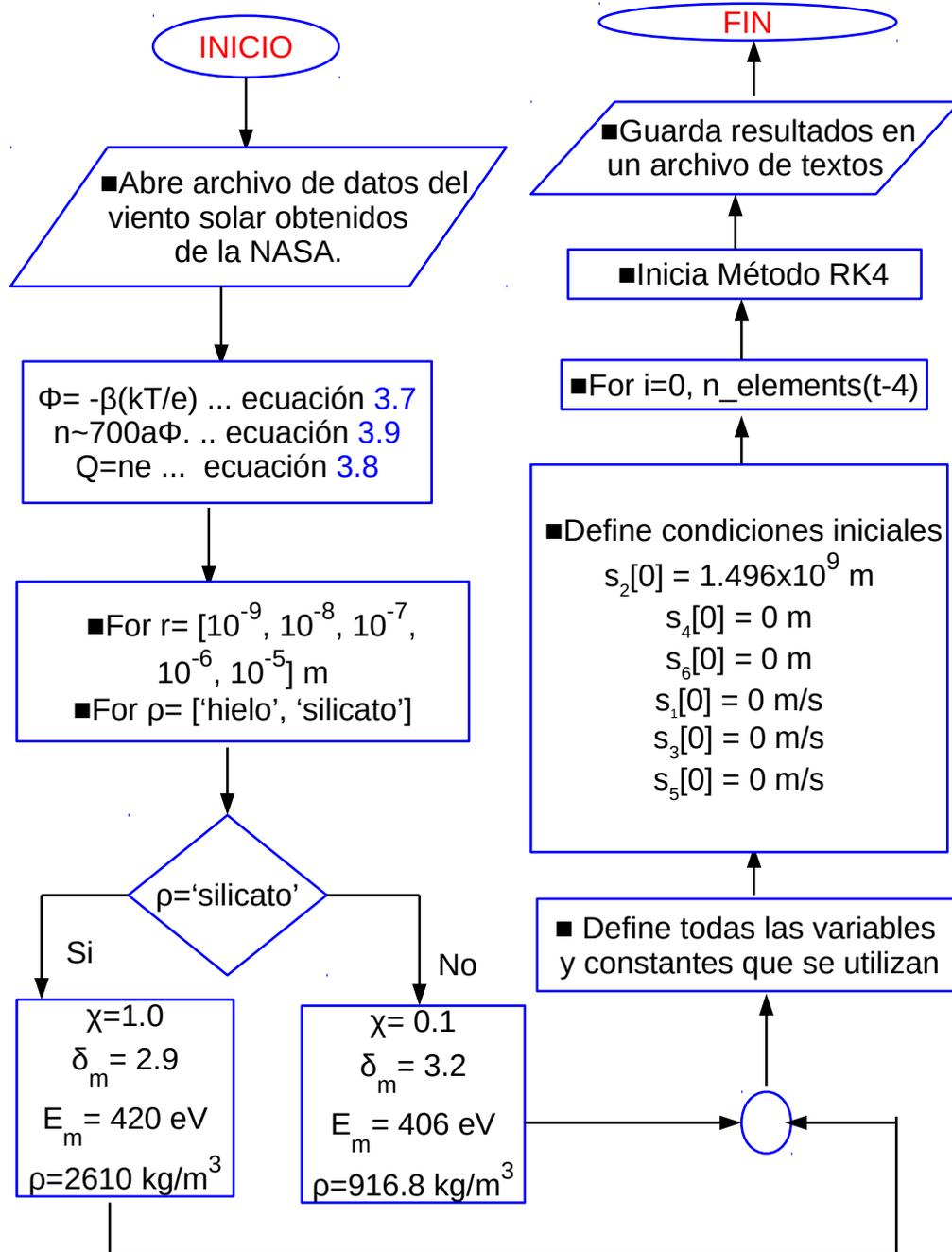


FIGURA 4.4: Diagrama de flujo del código implementado para poder obtener la dinámica de la partícula de polvo aplicando el método Runge-Kutta de cuarto orden para resolver la ecuación diferencial. Aquí  $\rho$ ,  $r$ ,  $\chi$ ,  $s_2$ ,  $s_4$ ,  $s_6$ ,  $s_1$ ,  $s_3$  y  $s_5$  son la densidad, radio, factor de eficiencia, posiciones iniciales y velocidades iniciales de la partícula; mientras que  $\delta_m$  es la eficiencia de la partícula -relación entre los electrones emitidos y los incidentes-,  $E_m$  es la energía característica a la cual la liberación de un electrón secundario alcanza un máximo,  $\phi$  es el potencial de equilibrio que alcanza la partícula de polvo.

## Capítulo 5

# Resultados y discusión

La dinámica de una partícula cargada en presencia de campos electromagnéticos, y en este caso gravitacional también, dependerá de las condiciones iniciales y del ambiente en el que nos encontremos. En esta tesis se estudió a una partícula de polvo interplanetario en presencia de los campos electromagnéticos que acompañan al viento solar y del campo gravitacional del Sol.

El cociente masa-carga nos da una idea de qué fuerza es la que está dominando. Conforme el cociente  $|m_p/q|$  aumenta, los efectos electromagnéticos se vuelven despreciables y entonces la fuerza gravitacional domina. En esta tesis se trabajó con partículas de polvo cuyo cociente masa-carga es  $6.83 \times 10^{-6} \leq |m_p/q| \leq 666.57 \text{ kgC}^{-1}$ , siendo las partículas con radios más pequeños ( $a = 10^{-9}$  y  $10^{-8} \text{ m}$ ) los que tienen un valor de  $|m_p/q|$  más pequeño ( $\sim 10^{-6}$  y  $\sim 10^{-4} \text{ kgC}^{-1}$  respectivamente), por lo tanto, para esas partículas los efectos electromagnéticos dominarán, ver Tabla 4.1.

Si los efectos electromagnéticos dominan, entonces  $\vec{F}_L > \vec{F}_G$ , donde  $\vec{F}_L$  es la fuerza de Lorentz y  $\vec{F}_G$  es la fuerza gravitacional. Un parámetro importante en la dinámica de una partícula cuando los efectos electromagnéticos son relevantes es el radio de giro, o radio de Larmor. El radio de Larmor es el radio de la trayectoria circular que se genera debido a la fuerza magnética que experimenta una partícula cargada en movimiento en presencia de un campo magnético uniforme. Como la fuerza magnética ( $\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B})$ ) es perpendicular a la dirección de movimiento de la partícula de polvo,  $\vec{F} \perp \vec{v}$ , la partícula describirá un movimiento circular, [Chen \(1984\)](#). La expresión que define el radio de giro

se presentó en el Capítulo 3, pero la volvemos a definir a continuación:

$$r = \frac{m_p v_{\perp}}{qB} \quad (5.1)$$

donde  $m_p$ ,  $v_{\perp}$  y  $q$  son la masa, la velocidad perpendicular al campo magnético y la carga de la partícula de polvo, y  $B$  es el campo magnético externo. Cabe mencionar que sobre las líneas de campo magnético, es decir  $v_{\parallel}B$  no se produce una aceleración en las partículas de polvo.

Se puede ver en la ecuación 5.1 que el radio de giro es directamente proporcional a la masa y a la velocidad perpendicular al campo magnético de la partícula de polvo, e inversamente proporcional a la carga eléctrica y a la intensidad del campo magnético.

En nuestro caso es complicado obtener un valor preciso del radio de giro, ya que tanto el campo magnético como la velocidad de las partículas de polvo están variando, por lo que se tendría que calcular la componente perpendicular al campo magnético de la velocidad para cada posición de la partícula de polvo, y así poder obtener el radio de giro para cada posición. Sin embargo, podemos tener una idea de cómo será el radio de giro de la misma si se considera que el promedio de la velocidad de la partícula es perpendicular al campo magnético. Se puede hacer esa suposición ya que si vemos la Tabla 4.1, el promedio de las velocidades es  $1 \lesssim |\vec{v}| \lesssim 91 \times 10^3 \text{ m/s}$ , por lo que casi todas las partículas analizadas en esta tesis, con excepción a las de hielo de agua con  $a = 10^{-9} \text{ m}$ , quedarán orbitando la Tierra ya que sus velocidades no son suficientes para escapar de la órbita. Si se consideran órbitas circulares entonces podemos hacer la suposición de que las partículas tendrán  $|\vec{v}| \perp \vec{B}$ . Con esta suposición se calculó el radio de giro para las partículas analizadas en esta tesis usando la expresión 5.1 y utilizando los valores de la masa, carga y velocidad de las partículas de polvo dadas en la Tabla 4.1. Para el valor del campo magnético se consideró el promedio del mismo, es decir,  $|\vec{B}| \approx 8.8 \text{ nT}$ . Los valores del radio de giro para las partículas, tanto de hielo de agua como de silicatos, con  $10^{-9} \leq a \leq 10^{-5} \text{ m}$  son de  $2.4 \times 10^7 \leq r \leq 4.87 \times 10^{10} \text{ m}$ .

El tiempo en el que una partícula de polvo da una vuelta completa, considerando una trayectoria circular, se puede calcular de la siguiente forma:

$$T = \frac{d}{v} = \frac{2\pi r}{v_{\perp}} \quad (5.2)$$

donde  $r$  es el radio de Larmor y  $v_{\perp}$  es la componente de la velocidad perpendicular al campo magnético.

El período para las partículas de esta tesis es  $0.01 \leq T \leq 5521038$  días, por lo que únicamente será posible visualizar el radio de giro para aquellas cuyo  $T < 9$  días, es decir, para partículas con  $a = 10^{-9}$  y  $10^{-8} m$ . Más adelante se mostrarán las gráficas en las cuales se visualiza la dinámica de las partículas de polvo.

A continuación se muestran los resultados que se obtuvieron al resolver la ecuación 4.1, de acuerdo al método que se explicó en el Capítulo 4. Además se presenta el error asociado al truncamiento.

## 5.1. Trayectorias de las partículas de polvo

Para las diferentes composiciones (densidades) y radios se obtuvieron 20 gráficas. Diez muestran la trayectoria que siguen las partículas de polvo interplanetarias durante nueve días de influencia de viento solar. Las otras diez muestran la velocidad de las partículas durante el mismo periodo de tiempo. Para una mejor visualización se agrupan por radio, de tal forma que quedan agrupadas la trayectoria y la velocidad para partículas de hielo de agua y de silicatos con el mismo radio.

El análisis se hizo en las 3 direcciones (el eje  $x$  es la dirección radial; hacia el Sol ( $+x$ ) o alejándose de la Tierra ( $-x$ ), el eje  $y$  representa la dirección tangencial con respecto a la eclíptica; este ( $+y$ ) u oeste ( $-y$ ), y el eje  $z$  es la dirección normal, norte ( $+z$ ) o sur ( $-z$ ). Ver Figura 4.1.

Se pudo observar que partículas con menor densidad -en este caso las partículas de hielo de agua- y con  $a = 1 nm$  son aceleradas con mayor facilidad, moviéndose hacia el noroeste del plano de la eclíptica. Las partículas compuestas de silicatos con tamaños de nanómetros se alejan en dirección radial del Sol, aproximadamente  $2 \times 10^5 m$ , mientras que se mueven aproximadamente  $3 \times 10^6 m$  hacia el Oeste y unos  $5 \times 10^6 m$  al Norte, por lo que el movimiento de esas partículas de polvo es hacia el noroeste con respecto a L1. Para partículas compuestas de hielo de agua con el mismo tamaño se tiene que se alejan del Sol ( $\approx 2 \times 10^6 m$ ). Se mueven al Oeste  $\approx 9 \times 10^7 m$  y hacia el Norte  $\approx 1.4 \times 10^7 m$ .

Por otra parte, la CME lleva consigo un incremento en el campo magnético y en la velocidad de las partículas del plasma (ver figura 2.8), que producen una aceleración de las partículas, además debido al campo magnético la trayectoria de las partículas de polvo suele curvarse.

Es de gran importancia analizar el cociente  $|m_p/q|$ , ya que si este cociente disminuye, entonces los efectos electromagnéticos son los que dominan, y por lo tanto el radio de giro se vuelve un factor importante en la dinámica. En el caso de las partículas analizadas en esta tesis sólo las partículas con  $a = 10^{-9}$  y  $10^{-8} m$  alcanzan a completar su giro en menos de 9 días, por lo que sólo en esos casos fue posible visualizar el radio de giro, ver Figura 5.1 y 5.2. Dadas las condiciones iniciales que se manejan en esta tesis, se puede observar en los resultados que sólo las partículas de hielo de agua con  $a = 1 nm$  logran alcanzar la velocidad de escape de la órbita de la Tierra con una velocidad promedio de  $\approx 90000 m/s$ , ver Tabla 4.1. La velocidad de escape para el caso de la órbita de la Tierra es,  $V_e = \sqrt{\frac{2GM_\odot}{R_{ST}}} \approx 4.2 \times 10^4 m/s$ , donde  $G$  es la Constante de Gravitación Universal,  $M_\odot$  es la masa del Sol y  $R_{ST}$  es la distancia Sol-Tierra.

A continuación se presentan los resultados obtenidos. Las gráficas se encuentran agrupadas por radio, es decir, se presentan los dos casos de densidades (hielo y silicato) para cada uno de los 5 radios utilizados en esta tesis. La figura 1a de cada caso es la trayectoria para una partícula de hielo, la 1b es la velocidad para una partícula de hielo. La figura 2a es la trayectoria para una partícula de silicato, y 2b es la velocidad para la misma partícula de silicato. Se consideró una posición inicial en L1.

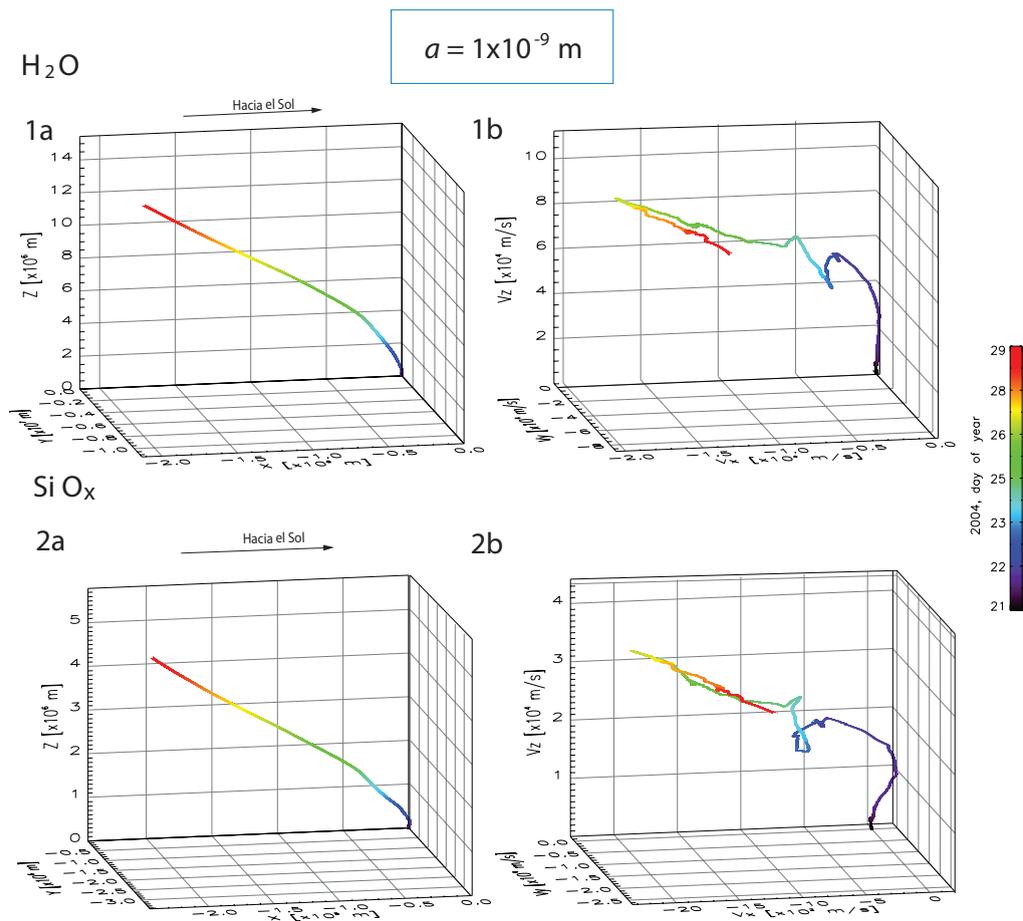


FIGURA 5.1: Trayectorias y velocidades para una partícula de polvo de  $a = 10^{-9} \text{ m}$  compuestas de hielo de agua (caso 1) y silicato (caso 2). La velocidad inicial en los dos casos es de  $0 \text{ m/s}$  en las 3 direcciones y una posición inicial en L1.

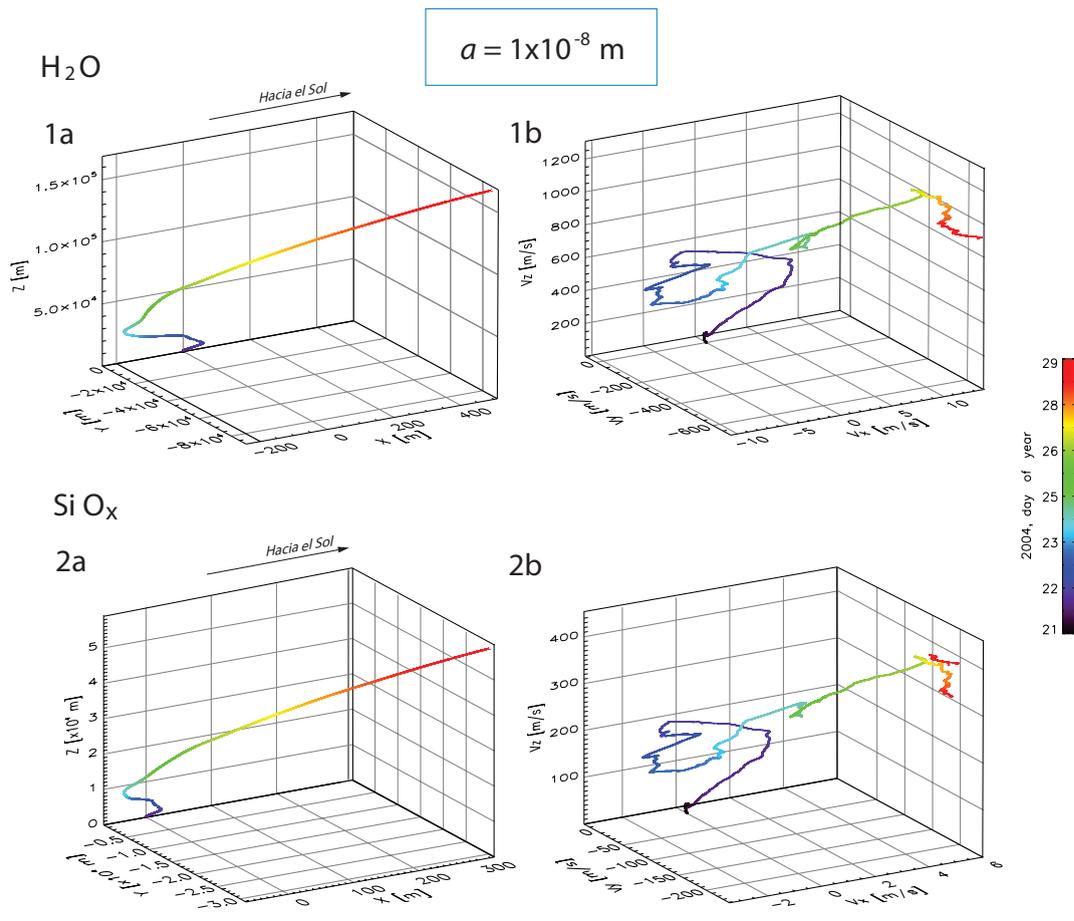


FIGURA 5.2: Trayectorias y velocidades para una partícula de polvo de  $a = 10^{-8} \text{ m}$  compuestas de hielo de agua (caso 1) y silicato (caso 2). La velocidad inicial en los dos casos es de  $0 \text{ m/s}$  en las 3 direcciones y una posición inicial en L1.

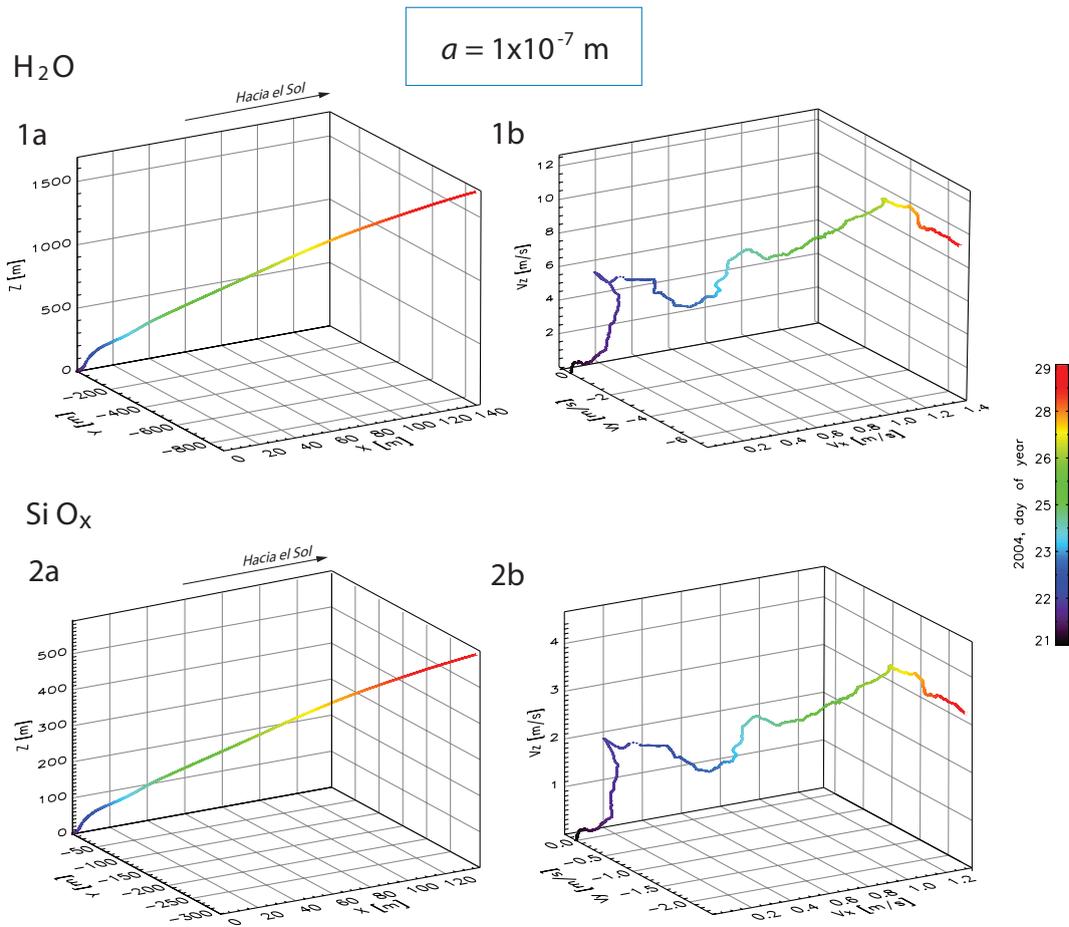


FIGURA 5.3: Trayectorias y velocidades para una partícula de polvo de  $a = 10^{-7} \text{ m}$  compuestas de hielo de agua (caso 1) y silicato (caso 2). La velocidad inicial en los dos casos es de  $0 \text{ m/s}$  en las 3 direcciones y una posición inicial en L1.

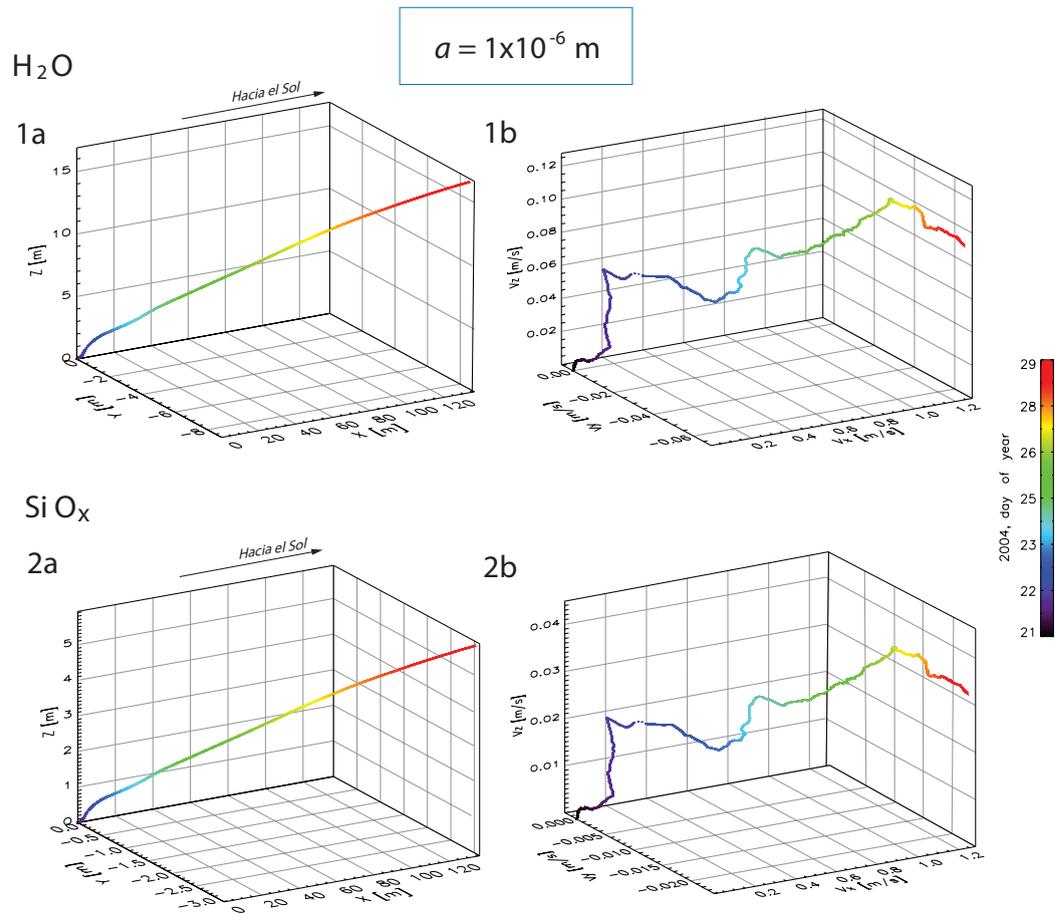


FIGURA 5.4: Trayectorias y velocidades para una partícula de polvo de  $a = 10^{-6} \text{ m}$  compuestas de hielo de agua (caso 1) y silicato (caso 2). La velocidad inicial en los dos casos es de  $0 \text{ m/s}$  en las 3 direcciones y una posición inicial en L1.

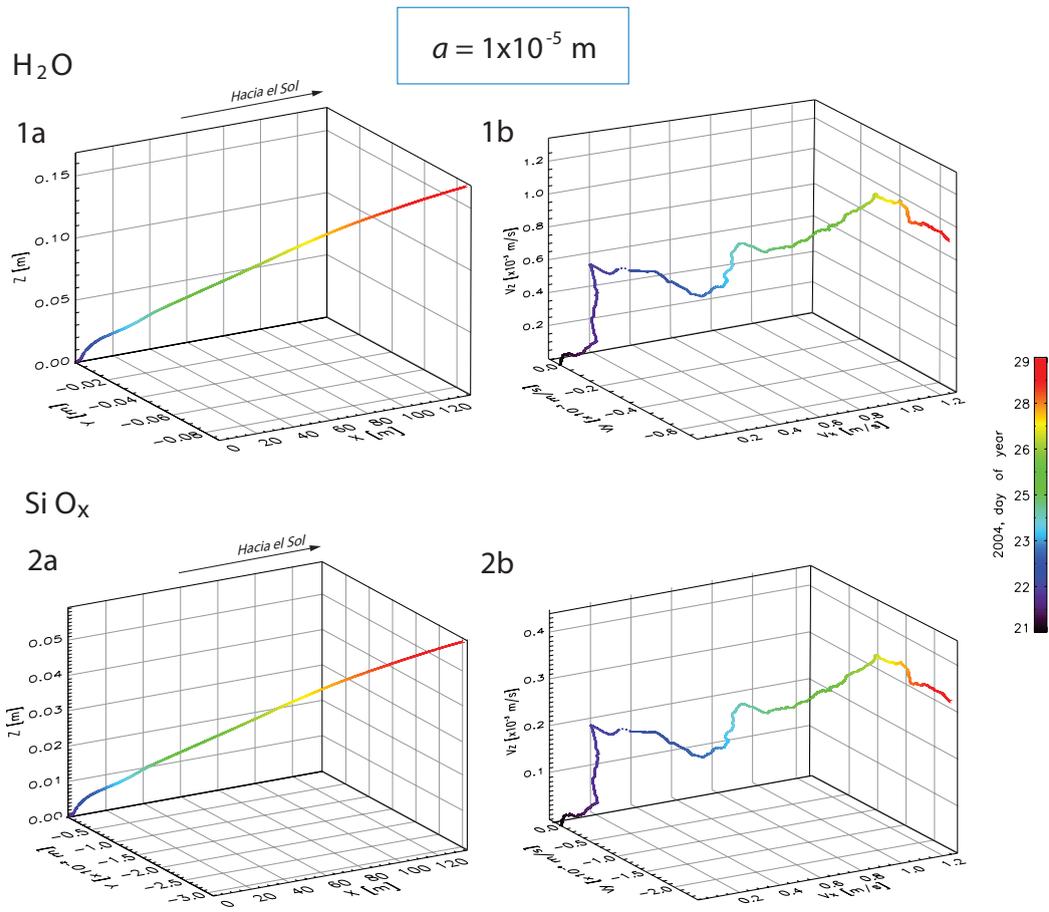


FIGURA 5.5: Trayectorias y velocidades para una partícula de polvo de  $a = 10^{-5} \text{ m}$  compuestas de hielo de agua (caso 1) y silicato (caso 2). La velocidad inicial en los dos casos es de  $0 \text{ m/s}$  en las 3 direcciones y una posición inicial en L1.

## 5.2. Propagación del error debido al truncamiento

A continuación se muestra el análisis del error asociado al método numérico aplicado en esta tesis. Se utilizaron las ecuaciones 4.11-4.20 para calcular el error de truncamiento local. El análisis se hizo únicamente para el caso de una partícula de  $\text{SiO}_x$  con  $a = 10^{-7} \text{ m}$  en las tres direcciones por separado. Se normalizó el error en cada componente para tener una mejor visualización de la propagación del mismo con respecto al tiempo.

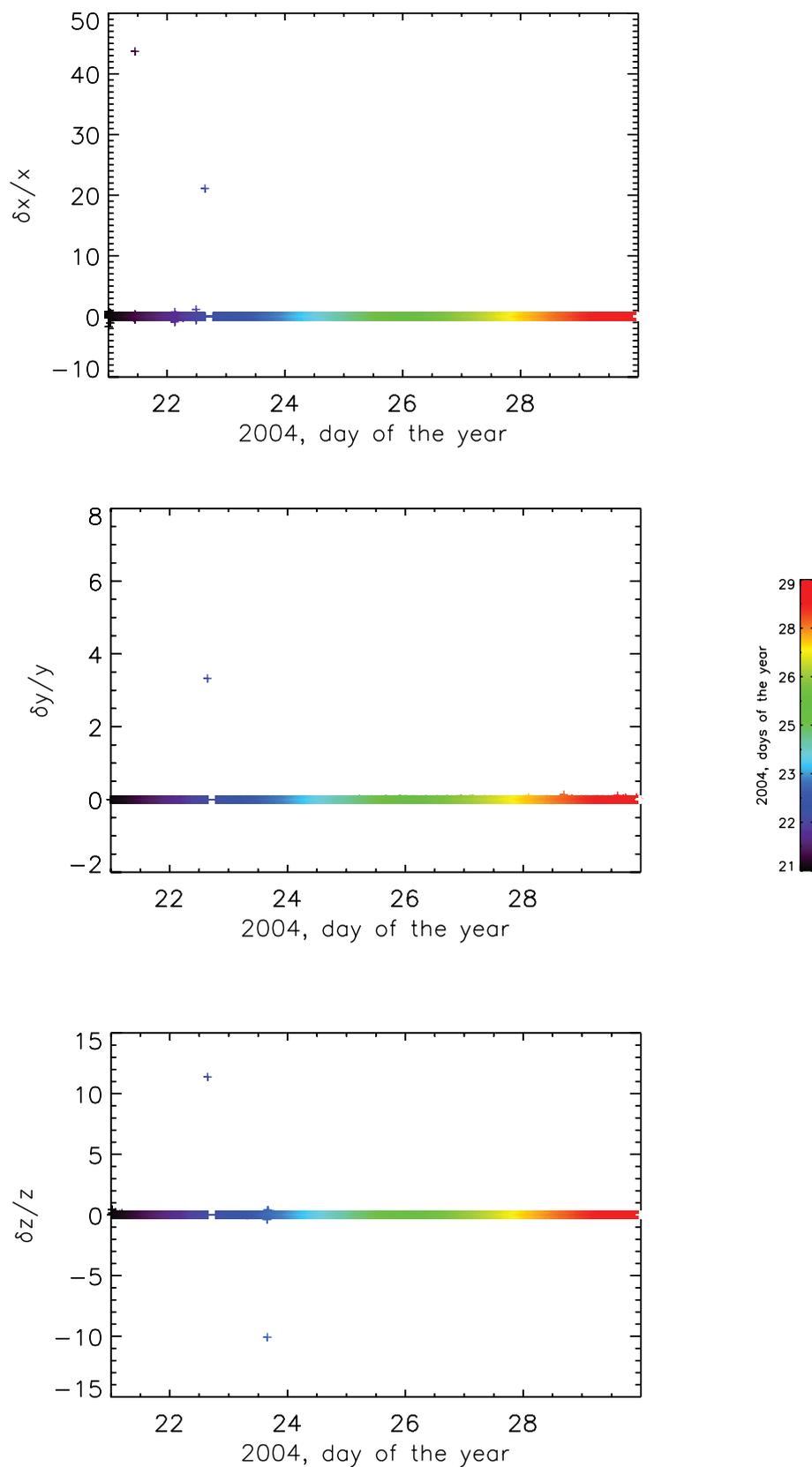


FIGURA 5.6: Normalización del error para cada una de las componentes considerando una partícula de  $SiO_x$  con  $a = 10^{-7} m$ .

Se puede observar en la Figura 5.6 que el error oscila entre el 0 y el 15 %, lo cual es aceptable, sin embargo, hay algunos puntos que alcanzan un error entre el 45 % y posiblemente se deba a que en esos puntos el valor de  $h$  aumentó debido a la falta de datos proporcionados por ACE. Aún con esos puntos, se puede decir que la solución obtenida es aceptable y con una mayor precisión que si se usa un método de un solo paso, como es el caso de Euler.

Cabe mencionar que si el valor de  $h$  aumenta, entonces el error aumentará y se tendrá que hacer una corrección al método. En esta tesis se considera que el valor de  $h$  casi permanece constante, por lo que es posible usar RK4 y calcular el error de truncamiento local usando dos pasos consecutivos.

### 5.3. Discusión de los resultados

Las partículas de polvo más livianas y con radios menores se aceleran con mayor facilidad y eso puede hacer que se alejen hacia el norte o al sur respecto al plano de la eclíptica, por lo que si se analizan las gráficas se pueden observar coincidencias y que además el movimiento es preferentemente hacia el norte de la eclíptica debido a que la componente de campo magnético predominante es la componente en  $x$ , con un valor promedio de  $B_x \approx 3 nT$ , y además dada la carga eléctrica negativa de las partículas de polvo, la dinámica se ve predominante hacia el noroeste. Por ejemplo, las partículas compuestas de silicatos (las cuales son más densas que el hielo) con  $a = 10^{-9} m$  se desplazan hacia el norte  $\approx 5 \times 10^6 m$  y hacia el oeste  $\approx 3 \times 10^6 m$  con respecto al plano de la eclíptica, además se observa que se alejan del Sol  $\approx 2 \times 10^5 m$  mientras que una partícula de hielo de agua con el mismo tamaño se desplaza  $\approx 14 \times 10^6 m$  ( $\sim 3$  veces más) hacia el norte y  $9 \times 10^7 m$  (30 veces más) al oeste respecto a la eclíptica, alejándose del Sol  $\approx 2 \times 10^6 m$  (10 veces más).

El campo magnético que acompaña al viento solar, en específico, a la CME, genera un movimiento de ciclotrón en las partículas provocando así que éstas sean aceleradas.

Se puede observar en la Tabla 4.1 que conforme el radio de la partícula de polvo va aumentando,  $10^{-9} \leq a \leq 10^{-5} m$ , la relación  $|m_p/q|$  aumenta ya que la carga aumenta,  $6.83 \times 10^{-6} \leq \left| \frac{m_p}{q} \right| \leq 666.57 kgC^{-1}$ . Si el cociente masa-carga aumenta entonces los efectos gravitacionales dominan, de hecho, en esta tesis en las partículas con  $a = 10^{-9} m$

y  $a = 10^{-8} m$  los efectos electromagnéticos son lo que dominan, por lo que su radio de giro se hace presente en las gráficas, ver Figuras 5.1 y 5.2.

De todos los casos analizados en esta tesis, únicamente las partículas de  $H_2O$  con  $a = 10^{-9} m$  superan la velocidad de escape de la órbita de la Tierra, con una velocidad promedio de  $\approx 90000 m/s$  (ver Figura 5.1.b). Para que un objeto se mantenga en la órbita de la Tierra su velocidad debe de ser  $< 42100 m/s$ .

Con lo anterior podemos destacar que la fuerza que domina en este problema en particular (dadas las condiciones iniciales del problema; como los radios, las densidades, posiciones iniciales y velocidades iniciales de la partícula de polvo) es la fuerza gravitacional que ejerce el Sol sobre las partículas, dicha fuerza atractiva hace que las partículas de polvo se mantengan en la órbita de la Tierra (excepto para partículas con  $a = 10^{-9} m$ ). A pesar de eso la fuerza de Lorentz juega un papel importante en nuestro análisis, ya que es la encargada de producir esas desviaciones en la trayectoria de la partícula de polvo debida al movimiento ciclotrónico producido por la fuerza magnética que siente la partícula. De hecho, la dirección de movimiento que sigue la partícula de polvo está regida por la dirección de los campos magnéticos del viento solar y de la CME. Si se analizan las componentes del campo magnético, domina en la dirección X con un promedio positivo, lo cual coincide con el movimiento de las partículas en dirección hacia el noroeste del plano de la eclíptica.

Si este análisis se lleva más allá de  $1 UA$  la fuerza gravitacional iría disminuyendo como  $1/r^2$  y las magnéticas como  $1/r^3$ <sup>1</sup> entonces las fuerzas dominantes serían otras dependiendo de las condiciones del problema, del tiempo que dure el evento y de las intensidades de los campos electromagnéticos.

A medida que los radios de las partículas aumentan los efectos electromagnéticos disminuyen y el movimiento queda restringido a la eclíptica (el desplazamiento en Z se vuelve despreciable).

Por otra parte, si el plasma no fuera un buen conductor entonces no se podría considerar que las líneas de campo magnético viajan con el plasma, por lo que habría que considerar la componente difusiva del campo magnético, la cual actuaría como una fuerza de

---

<sup>1</sup>Recordar que el campo magnético producido por un dipolo magnético está dado por  $\vec{B}_{dip}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1}{r^3} [3(\vec{m} \cdot \hat{r})\hat{r} - \vec{m}]$ , donde  $\vec{m}$  es el momento magnético, por lo que la intensidad del campo magnético disminuye como  $1/r^3$ . Para más detalle ver Griffiths (1999)

fricción, por lo que esta componente difusiva frenaría a las partículas de polvo, y por lo tanto, el movimiento de las mismas sería más lento. Además la variación del campo magnético induciría un campo eléctrico por la ley de la inducción electromagnética. En este trabajo únicamente se consideraron los campos electromagnéticos del plasma, es decir los campos externos a la partícula de polvo, sin embargo al moverse una partícula cargada va a inducir una corriente eléctrica la cual producirá un campo eléctrico, además el cambio temporal del campo magnético del plasma produciría otro campo eléctrico, por lo que habría que sumar todos los campos electromagnéticos para poder hacer una mejor aproximación.

#### **5.4. Proyección a escalas de tiempo mayores. Un mes de Viento Solar.**

Aplicamos el método para analizar un mes de datos y así lograr ver qué es lo que ocurre con la dinámica de una partícula de polvo al incrementar el tiempo en el cual se encuentra interaccionando con el viento solar.

A continuación se presentan los resultados que se obtuvieron al analizar la misma CME del 22 de enero del 2004, pero esta vez se tomaron datos desde el 1 de enero al 31 de enero del 2004. De igual forma se consideró la carga constante para este periodo de tiempo. Únicamente se hizo el análisis para partículas de polvo con radios de  $10^{-5} m$  ya que son los tamaños mas probables en las partículas de polvo a  $1 UA$ , de igual forma se analizaron las dos densidades que se utilizaron en toda la tesis, hielo de agua y silicato.

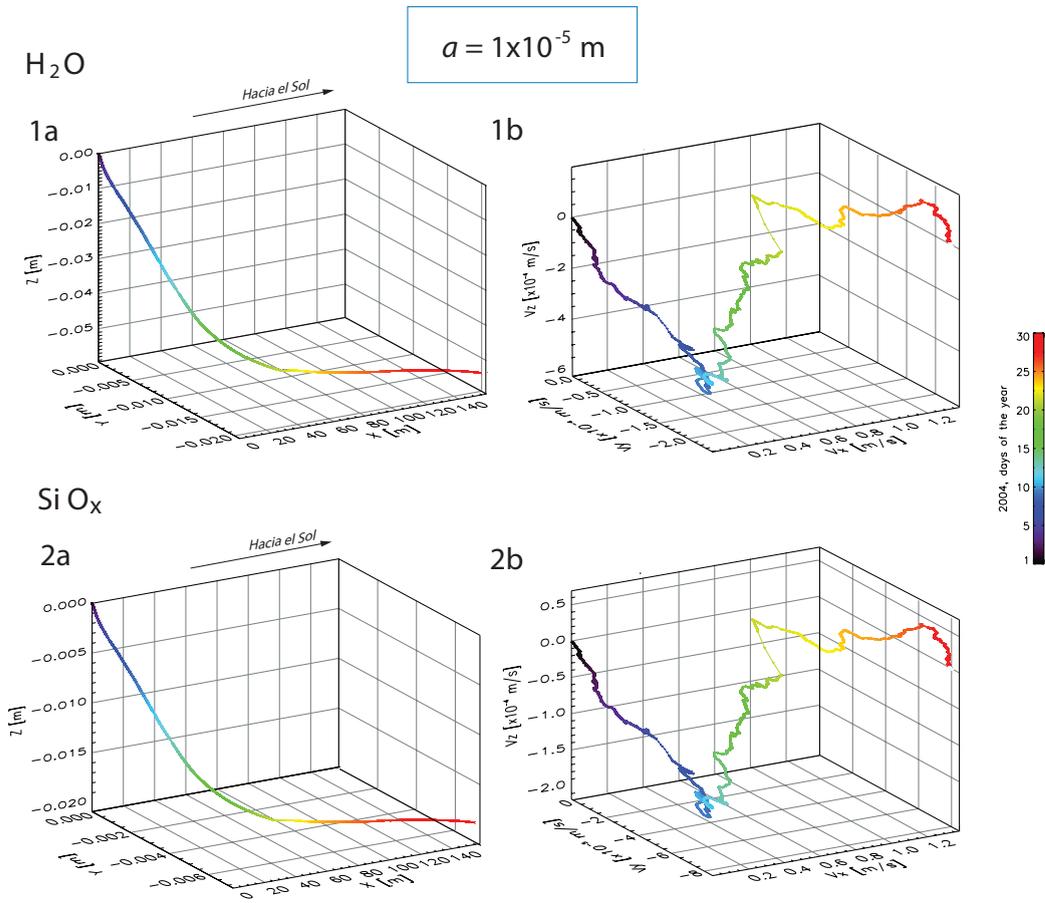


FIGURA 5.7: Trayectorias y velocidades para una partícula de polvo de  $a = 10^{-5} \text{ m}$  compuestas de hielo de agua (caso 1) y silicato (caso 2) durante un periodo de tiempo del 1 de enero al 30 de enero del 2004. La velocidad inicial en los dos casos es de  $0 \text{ m/s}$  en las 3 direcciones y una posición inicial en L1.

Si comparamos la figura 5.7.2a con 5.5.2a, se puede observar que el movimiento en el eje X (hacia el Sol) aumentó  $\approx 20 \text{ m}$ , mientras en el eje Y (oeste) disminuyó ligeramente un par de metros,  $\approx 3 \text{ m}$ . En la dirección Z el movimiento también disminuyó, generando que la partícula se desplace hacia el sur del plano de la eclíptica, caso contrario a la figura 5.5.2a. Ese movimiento hacia el sur es debido a que en este caso el campo magnético dominante es en la dirección de X con un promedio negativo  $B_x \approx -2.6 \text{ nT}$ .

Para el caso de partículas de hielo de agua, comparando 5.7.1a con 5.5.1a, se puede observar el mismo aumento en la dirección radial y una disminución en el eje Z, con la misma tendencia de movimiento hacia el Sur del plano de la eclíptica debido a la misma componente negativa del campo magnético en la dirección X. Para el eje Y hay un ligero incremento el cual es menor a  $1 \text{ m}$ , lo cual es irrelevante en comparación con las escalas que se usan en esta tesis.

Para que una partícula de polvo interplanetaria sea expulsada de la órbita Terrestre hay varias opciones, pues como se puede ver en la ecuación de movimiento (4.24, 4.26 y 4.28), la posición de la partícula depende de muchos factores entre ellos de las propiedades de la CME y del viento solar, las propiedades tanto físicas como químicas de la partícula y de las condiciones iniciales del problema. Una opción para que eso suceda es que el radio de éstas sea  $\approx 10^{-9} m$  pues como se vio en los resultados de esta tesis las partículas que se elevan más con respecto a la eclíptica son las de  $10^{-9} m$ . En realidad la mayoría del polvo interplanetario cerca de la órbita de la Tierra tiene tamaños micrométricos, ya que si tienen un tamaño menor acabarán por desintegrarse debido a todos los efectos que ya se han explicado anteriormente. Si la fuente de nuestras partículas fuera algún cometa, por ejemplo, a la hora de que éste se acerca al Sol (cerca del perihelio) pierde masa en forma de gas y polvo. Estas partículas pueden quedar confinadas a la órbita de la Tierra, sin embargo las partículas y en particular las de hielo de agua se subliman al estar cerca del Sol debido a la radiación, por lo que es raro encontrar estos tamaños y partículas de hielo a  $1 UA$ .

Como trabajo futuro queda aplicar el modelo a una sucesión de eventos (meses e incluso años), ya que con el paso del tiempo los procesos de carga a considerar serán otros y la carga no se podrá considerar constante. Otro punto a analizar en el futuro es describir la dinámica pero a grandes escalas, es decir, más allá de  $1 UA$  (llegar mínimo a  $6 UA$ ) y ver el comportamiento conforme la partícula se va alejando del Sol, por lo que será necesario agregar otro tipo de fuerzas y considerar la carga de la partícula de polvo variable.

## Capítulo 6

# Conclusiones

A continuación se enuncian las principales conclusiones a las que se llegó con la realización de esta tesis:

1. Una partícula de polvo puede ganar o perder electrones con facilidad debido a la radiación solar y al viento solar a  $1 UA$ .
2. En escalas de tiempo  $< 9$  días, la captura electrónica es el mecanismo más eficiente.
3. Si  $t < 9$  días, la carga de las partículas se puede considerar constante, ya que el tiempo que tarda la partícula para llegar a su potencial de equilibrio por captura electrónica es  $\tau \leq 3.9 \times 10^{-9} s$ . Después de ese tiempo la partícula ya no puede recolectar más electrones.
4. Conforme el cociente  $|m_p/q|$  aumenta, los efectos electromagnéticos se vuelven despreciables y, por lo tanto, la fuerza gravitacional domina.
5. El aumento del campo magnético y de la velocidad de la CME hace que las partículas de polvo cargadas eléctricamente, generen un movimiento ciclotrónico cuyo radio de giro es directamente proporcional a la masa por la velocidad perpendicular al campo magnético ( $mv_{\perp}$ ) e inversamente proporcional a la carga eléctrica por el campo magnético ( $qB$ ), generando así una aceleración.
6. Las partículas más livianas,  $m \approx 3.84 \times 10^{-24} kg$ , y con radios  $a = 10^{-9} m$ , se aceleran con mayor facilidad produciendo un movimiento hacia el suroeste del plano de la eclíptica. En este caso la partícula que más se desplazó fue la de hielo

de agua, alejándose del Sol  $\approx 2 \times 10^6 m$  y moviéndose al Oeste  $\approx 9 \times 10^7 m$  y hacia el norte  $\approx 1.4 \times 10^7 m$ .

7. Dadas las condiciones iniciales del problema, de todos los casos analizados en esta tesis, sólo las partículas de  $H_2O$  con  $a = 10^{-9} m$  superan la velocidad de escape de la órbita terrestre, con una velocidad promedio de  $\approx 9 \times 10^4 m/s$ .
8. La mayoría de las partículas de polvo analizadas en esta tesis quedan confinadas en el plano de la órbita terrestre.
9. La CME analizada en esta tesis tiene la energía necesaria para barrer partículas de polvo que se encuentren en la órbita de la Tierra, si estas partículas fueran de  $H_2O$  con  $a = 10^{-9} m$ .
10. Conforme el radio de la partícula de polvo aumenta, el cociente  $|m_p/q|$  también ya que recolectará más carga, por lo que los efectos electromagnéticos serán despreciables en comparación con los gravitacionales. Para el caso de las IDP estudiadas en esta tesis, el radio de giro es de  $2.4 \times 10^7 \leq a \leq 4.8 \times 10^{10} m$  y sólo las partículas con  $a = 10^{-9}$  y  $10^{-8} m$  logran completar su radio de giro en un periodo  $T < 9$  días.
11. El método numérico que se utilizó para el análisis de la dinámica (RK4) puede considerarse aceptable, ya que el error que se obtuvo (error de truncamiento local) casi coincide con el resultado del método como tal. El error oscila entre el 0 y el 15 %, a excepción de algunos puntos cuyo error es de  $\approx 45$  % debido al tamaño de  $h$ .
12. Aún queda abierto este trabajo ya que para poder aplicar el método RK4 se hicieron ciertas consideraciones (Capítulo 5) que no son válidas en escalas de tiempo mucho más largas. Por otra parte, debe considerarse que, al irse moviendo la partícula de polvo dentro del plasma, se generarán corrientes eléctricas las cuales no fueron consideradas en esta tesis.
13. Queda como trabajo futuro analizar la dinámica de una partícula de polvo en la gran escala, utilizando al Sol como referencia y analizar la dinámica en escalas de tiempo mayores (meses, años). Por otra parte para una aproximación más realista es necesario considerar la variación de la carga eléctrica de las partículas de

polvo, así como incluir otras fuerzas en el modelo (presión de radiación, Poynting-Robertson, básicamente). Otro punto a considerar en el futuro será considerar diversas poblaciones de partículas de polvo.

Este trabajo se hizo con el propósito de conocer la dinámica de partículas de polvo interplanetario en presencia de viento solar y, en particular, en presencia de eyecciones de masa coronal. Conocer la dinámica de las partículas nos puede ayudar a determinar sus fuentes y las propiedades de estas fuentes.

Para el caso de la Tierra, gran parte del interés está en las poblaciones de partículas de polvo que pudieran causar daño en los satélites. Si se conocen bien las poblaciones de polvo y su dinámica, se pueden desarrollar estrategias de prevención y protección contra las mismas.

# Apéndice A

## A.1. Campos magnéticos y eléctricos en diferentes sistemas de referencia

Recordando las ecuaciones de Maxwell tenemos que:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \rho/\epsilon_0 \quad (\text{A.1})$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{A.2})$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{A.3})$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{A.4})$$

con  $\rho$  y  $\vec{J}$  las densidades de carga y corriente eléctrica respectivamente.

Si consideramos un plasma cuya velocidad es no relativista ( $\vec{V}$ ) con respecto a un marco de referencia en el “laboratorio”  $R$  el cual tiene un campo eléctrico  $\vec{E}$  y un campo magnético  $\vec{B}$ , entonces los campos en el marco de referencia del plasma, es decir en el marco  $R'$  estarán dados por las transformaciones de Lorentz, es decir:

$$\vec{E}' = \vec{E} + \vec{V} \times \vec{B} \quad \vec{B}' = \vec{B} - \vec{V} \times \vec{E}/c^2 \quad (\text{A.5})$$

En el marco de referencia del plasma el campo eléctrico es nulo ya que el campo eléctrico es inducido y si nos montamos con el plasma no hay un cambio en el flujo magnético dado que se consideran que las líneas de campo magnético están *congeladas*, entonces  $\vec{E}' = 0$  en  $R'$ . Con esto los campos electromagnéticos en el sistema de referencia sin primar, es decir en el del laboratorio son entonces:

$$\vec{E} = -\vec{V} \times \vec{B} \quad (\text{A.6})$$

$$\vec{B} = \vec{B}' - \vec{V} \times (\vec{V} \times \vec{B}')/c^2 \approx \vec{B}' \quad (\text{A.7})$$

Se puede observar que el campo magnético es independiente del sistema de referencia, sin embargo el campo eléctrico depende del sistema de referencia, siendo aproximadamente cero en el marco del plasma local.

Para más detalle ver [Meyer-Vernet \(2007\)](#).

# Apéndice B

## B.1. Número de electrones capturados por una partícula de polvo en el medio interplanetario

Considerando las partículas de polvo como capacitores esféricos de una sola placa, tenemos que la carga de una partícula,  $q$ , vendrá dada por la siguiente expresión.

$$q = C\phi = 4\pi\epsilon_0 a\phi = ne \quad (\text{B.1})$$

donde  $C$  es la capacitancia,  $\phi$  el potencial superficial,  $n$  es el número de carga elemental  $e$ , para más detalle ver Capítulo 3.

Si se quiere conocer el número de carga elemental, que en el caso de esta tesis es el número de electrones que son capturados por una partícula de polvo, despejamos de la ecuación B.1  $n$ , obteniendo la siguiente expresión:

$$n = \frac{4\pi\epsilon_0 a\phi}{e} = \frac{4\pi(8.85 \times 10^{-12} C^2/Nm^2)}{1.6 \times 10^{-19} C} a\phi \quad (\text{B.2})$$

$$n = (695077374.6 C/Nm^2) a\phi \quad (\text{B.3})$$

Si el radio de la partícula,  $a$ , es expresado en micras y el potencial  $\phi$ , en Volts, entonces la expresión B.3 se reduce a :

$$n = (695077374.6 C/Nm^2) * 10^{-6} a_\mu\phi \approx 700 a_\mu\phi \quad (\text{B.4})$$

# Bibliografía

- Altobelli, N., Postberg, F., Fiege, K., Trieloff, M., Kimura, H., Sterken, V. J., Hsu, H.-W., Hillier, J., Khawaja, N., Moragas-Klostermeyer, G., Blum, J., Burton, M., Srama, R., Kempf, S., & Gruen, E. (2016). Flux and composition of interstellar dust at Saturn from Cassini's Cosmic Dust Analyzer. *Science*, 352:312–318.
- Amara L.Graps, E. G. (2000). Properties, charging, and dynamics of interplanetary dust particles in Earth's magnetosphere. *Max-Planck-Institut für Kernphysik*, 40:72.
- Anagnostopoulos, K. (2016). *Computational Physics - A Practical Introduction to Computational Physics and Scientific Computing (using C++)*, Vol. I. Number v. 1. Lulu.com.
- autores, V. (2012). Interplanetary dust particle (idp).
- Autores, V. (2018). Archivo situacionista hispano, tipo @ONLINE.
- Baguhl, M., Grün, E., Hamilton, D. P., Linkert, G., Riemann, R., Staubach, P., & Zook, H. A. (1995). The flux of interstellar dust observed by ULYSSES and Galileo. *Space Science Reviews*, 72:471–476.
- Bartlett, S. & Duley, W. W. (1996). Grain Temperature and Infrared Emission from Carbon Dust of Mixed Composition. *Astrophysical Journal*, 464:805.
- Blum, J. & Münch, M. (1993). Experimental investigations on aggregate-aggregate collisions in the early solar nebula. *Icarus*, 106:151.
- Blum, J. & Wurm, G. (2000). Experiments on Sticking, Restructuring, and Fragmentation of Preplanetary Dust Aggregates. *Icarus*, 143:138–146.
- Bradley, J. & Ireland, T. (1996). The Search for Interstellar Components in Interplanetary Dust Particles. In Gustafson, B. A. S. & Hanner, M. S., editors, *IAU Colloq.*

- 150: *Physics, Chemistry, and Dynamics of Interplanetary Dust*, volume 104 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 275.
- Brownlee, D. E. (1978). *Microparticle studies by sampling techniques*, pages 295–336.
- Burns, J., Lamy, P., & Soter, S. (1979a). Radiation forces on small particles in the solar system. *Icarus*, 40:1–48.
- Burns, J. A., Lamy, P. L., & Soter, S. (1979b). Radiation forces on small particles in the solar system. *icarus*, 40:1–48.
- Chen, F. (1984). *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion: Volume 1: Plasma Physics*. Introduction to plasma physics and controlled fusion. Plenum Press.
- Chow, V. W., Mendis, D. A., & Rosenberg, M. (1993). Role of grain size and particle velocity distribution in secondary electron emission in space plasmas. *Journal of Geophysical Research*, 98:19.
- Divine, N., Fechtig, H., Gombosi, T. I., Hanner, M. S., Keller, H. U., Larson, S. M., Mendis, D. A., Newburn, R. L., Reinhard, R., Sekanina, Z., & Yeomans, D. K. (1986). The Comet Halley dust and gas environment. *Space Science Reviews*, 43:1–104.
- Draine, B. T. & Salpeter, E. E. (1979). On the physics of dust grains in hot gas. *Astrophysical Journal*, 231:77–94.
- Durand-Manterola, H. J., Flandes, A., Rivera, A. L., Lara, A., & Niembro, T. (2017). CMEs' Speed, Travel Time, and Temperature: A Thermodynamic Approach. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 122:11.
- Flandes, A. (2007). Misterio en Júpiter. *¿Cómo ves?*, *Revista de divulgación de la Ciencia de la Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Flandes, A., Krüger, H., Hamilton, D. P., Valdés-Galicia, J. F., Spilker, L., & Caballero, R. (2011). Magnetic field modulated dust streams from Jupiter in interplanetary space. *Planetary and Space Science*, 59:1455–1471.
- Flynn, G. J. (1994). Changes to the Composition and Mineralogy of Interplanetary Dust Particles by Terrestrial Encounters. In Zolensky, E., Wilson, T. L., Rietmeijer, F. J. M., & Flynn, G. J., editors, *Analysis of Interplanetary Dust Particles*, volume 310 of *American Institute of Physics Conference Series*, page 127.

- Geiss, J., Gloeckler, G., & von Steiger, R. (1995). Origin of the Solar Wind From Composition Data. *Space Science Reviews*, 72:49–60.
- George J. Flynn (2012). Interplanetary dust particle (idp).
- Goertz, C. K. (1989). Dusty Plasmas in the Solar System . *Reviews of Geophysics*, 1:1–48.
- Gopalswamy, N. (2006). Properties of Interplanetary coronal mass ejections. *Space Science Reviews*, 109:A07105.
- Griffiths, D. (1999). *Introduction to Electrodynamics*. Prentice Hall.
- Grün, E., Gustafson, B., Dermott, S., & Fechtig, H. (2001). *Interplanetary Dust*. Astronomy and Astrophysics Library. Springer Berlin Heidelberg.
- Gustafson B. A.S., M. N. (1979). Streaming of interstellar grains in the solar system. *Nature*, 282.
- Güttler, C., Mannel, T., Rotundi, A., Merouane, S., Fulle, M., Bockelée-Morvan, D., Lasue, J., Levasseur-Regourd, A. C., Blum, J., Naletto, G., Sierks, H., Hilchenbach, M., Tubiana, C., Capaccioni, F., Paquette, J. A., Flandes, A., Moreno, F., Agarwal, J., Bodewits, D., Bertini, I., Tozzi, G. P., Hornung, K., Langevin, Y., Krüger, H., Longobardo, A., Della Corte, V., Tóth, I., Filacchione, G., Ivanovski, S. L., Mottola, S., & Rinaldi, G. (2019). Synthesis of the Morphological Description of Cometary Dust at Comet 67P. *arXiv e-prints*.
- Horanyi, M., Houppis, H. L. F., & Mendis, D. A. (1988). Charged dust in the earth's magnetosphere. I - Physical and dynamical processes. *Astrophysics and Space Science*, 144:215–229.
- Horányi, M. (1996). Charged dust dynamics in the Solar System. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 34(1):383–418.
- I.Mann, A.Pellinen-Wannberg, E. e. a. (2011). Dusty Plasma Effects in Near Earth Space and Interplanetary Medium. *Space Science Reviews*, 61 ,1-47:1–48.
- Jessberger, E. K., Bohsung, J., Chakaveh, S., & Traxel, K. (1992). The volatile element enrichment of chondritic interplanetary dust particles. *Earth and Planetary Science Letters*, 112:91–99.

- Johnson, T. V., Morfill, G., & Grün, E. (1985). Dust in jupiter's magnetosphere: An io source? *Geophysical Research Letters*, 7(5):305–308.
- Kim, T. K., Pogorelov, N. V., & Burlaga, L. F. (2017). Modeling Shocks Detected by Voyager 1 in the Local Interstellar Medium. *The Astrophysical Journal Letters*, 843:L32.
- Lara, A., Flandes, A., Borgazzi, A., & Subramanian, P. (2011). Velocity profile of interplanetary coronal mass ejections beyond 1 AU. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 116:A12102.
- Leinert, C. & Grun, E. (1990). *Interplanetary Dust*, page 207.
- Levy, E. H. & Jokipii, J. R. (1976). Penetration of interstellar dust into the solar system. *Nature*, 264:423.
- Mann, I., Kimura, H., Biesecker, D. A., Tsurutani, B. T., Grün, E., McKibben, R. B., Liou, J.-C., MacQueen, R. M., Mukai, T., Guhathakurta, M., & Lamy, P. (2004). Dust near the sun. *Space Science Reviews*, 110(3):269–305.
- Mann, I., Krivov, A., & Kimura, H. (2000). Dust cloud near the sun. *Icarus*, 146(2):568 – 582.
- Mann, I., Meyer-Vernet, N., & Czechowski, A. (2014). Dust in the planetary system: Dust interactions in space plasmas of the solar system. *Physics Reports*, 536:1–39.
- Marsch, E. (2006). Kinetic Physics of the Solar Corona and Solar Wind. *Living Reviews in Solar Physics*, 3:1.
- Meyer-Vernet, N. (1982). "flip-flop" of electric potential of dust grains in space. *Astronomy and Astrophysics*, 105:98–106.
- Meyer-Vernet, N. (2007). *Basics of the Solar Wind*. Cambridge Atmospheric and Space Science Series. Cambridge University Press.
- Mukai, T. (1981). On the charge distribution of interplanetary grains. *The Astrophysical Journal*, 99:1–6.
- Mukai, T. & Schwehm, G. (1981). Interaction of grains with the solar energetic particles. *Astronomy and Astrophysics*, 95:373–382.

- Q.Ma, L. M. & Hyde, T. (2011). Charging of harging of interplanetary dust grains and consequences for aggregation. *Center for Astrophysics, Space Physics and Engineering Research (CASPER), Baylor University, One Bear Place 97310, Waco, Texas 76798-7310, USA*, 1:1–48.
- Richardson John D. (2013). The Solar Wind and Its Interaction with the Interstellar Medium. *Physics Reports*, 1:1–48.
- Shampine, L. F. & Watts, H. (2010). Comparing error estimators for runge-kutta methods.
- Spitzer, Jr., L. (1941). The Dynamics of the Interstellar Medium. I. Local Equilibrium. *Astrophysical Journal*, 93:369.
- Spitzer, Jr., L. (1968). Diffuse matter in space. *Interscience Tracts on Physics and Astronomy*, 28.
- Sternglass, E. (1954). An experimental investigation of electron back and secondary emission from solids. *Sci. Pap. 1772*, Westing House Res. Lab., Pittsburgh, Pa:112–115.
- Suszczynsky, D. M., Borovsky, J. E., & Goertz, C. K. (1992). Secondary electron yields of solar system ices. *Journal of Geophysical Research*, 97:2611–2619.
- Swamy, K. (2005). *Dust in the Universe: Similarities and Differences*. Astronomy and Astrophysics. World Scientific.
- Tappin, S. J. & Howard, T. A. (2009). Direct Observation of a Corotating Interaction Region by Three Spacecraft. *The Astrophysical Journal*, 702:862–870.
- Vourlidis, A., Buzasi, D., Howard, R. A., & Esfandiari, E. (2002). Mass and energy properties of LASCO CMEs. In Wilson, A., editor, *Solar Variability: From Core to Outer Frontiers*, volume 506 of *ESA Special Publication*, pages 91–94.
- Weidenschilling, S. J. & Cuzzi, J. N. (1993). Formation of planetesimals in the solar nebula. In Levy, E. H. & Lunine, J. I., editors, *Protostars and Planets III*, pages 1031–1060.
- Yashiro, S., Gopalswamy, N., Michalek, G., St. Cyr, O. C., Plunkett, S. P., Rich, N. B., & Howard, R. A. (2004). A catalog of white light coronal mass ejections observed by the SOHO spacecraft. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 109:A07105.