

Dinámica de Eyecciones Coronales de Masa



Trabajo Especial de Licenciatura

Estudiante: Abril Sahade ¹

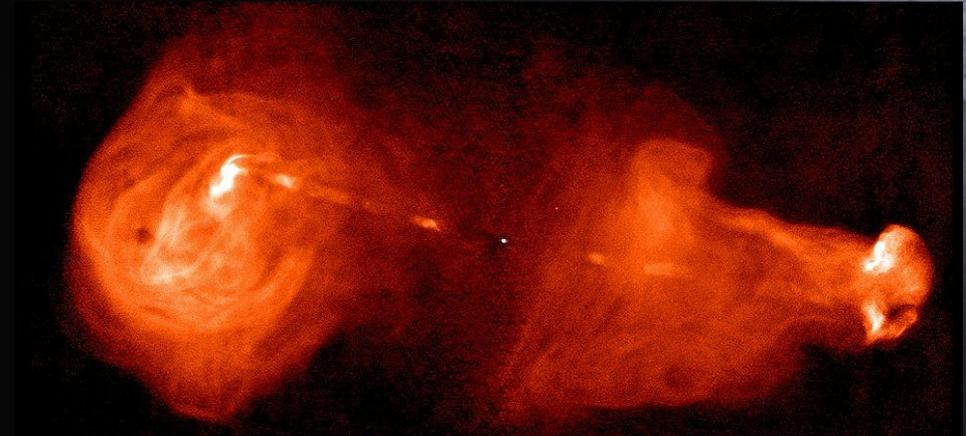
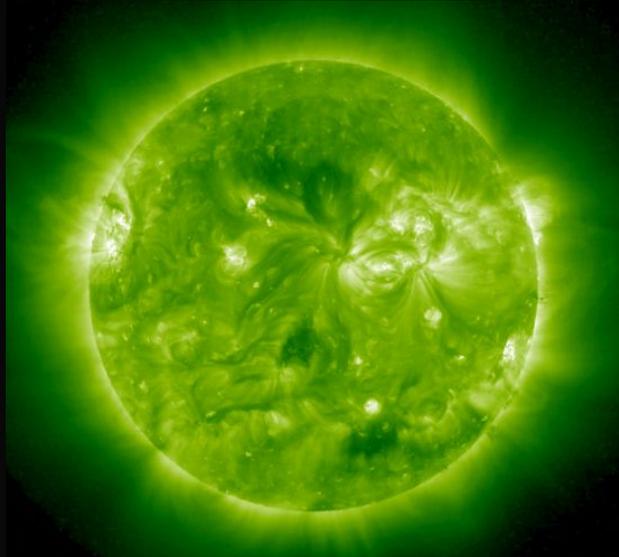
Directores: Dra. Mariana Cécere ², Dr. Gustavo Krause ³

Contenidos

- **Introducción**
 - Plasmas Astrofísicos
 - El Sol
 - Eyecciones coronales de masa
- **Trabajo observacional**
 - Herramientas
 - Resultados y Conclusiones
- **Trabajo numérico**
 - Herramientas
 - Resultados y Conclusiones
- **Trabajo Futuro...**

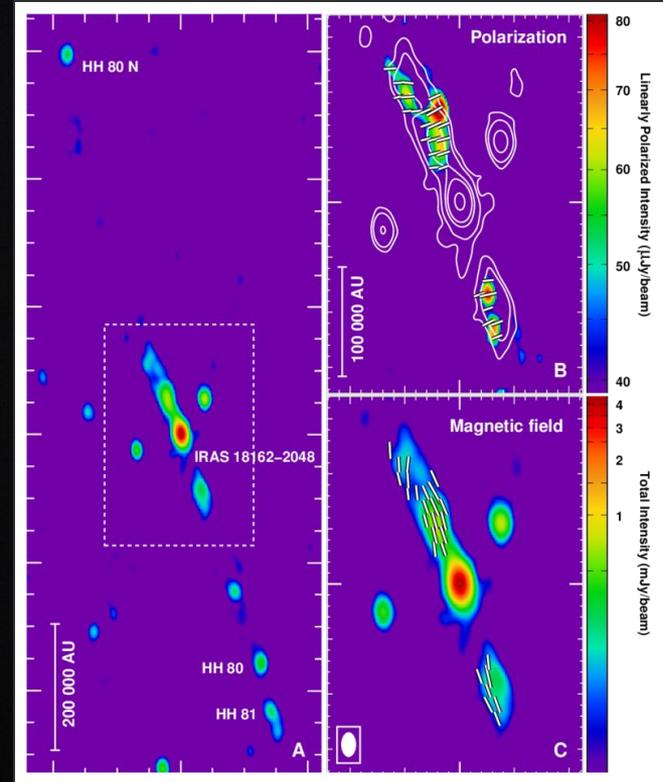
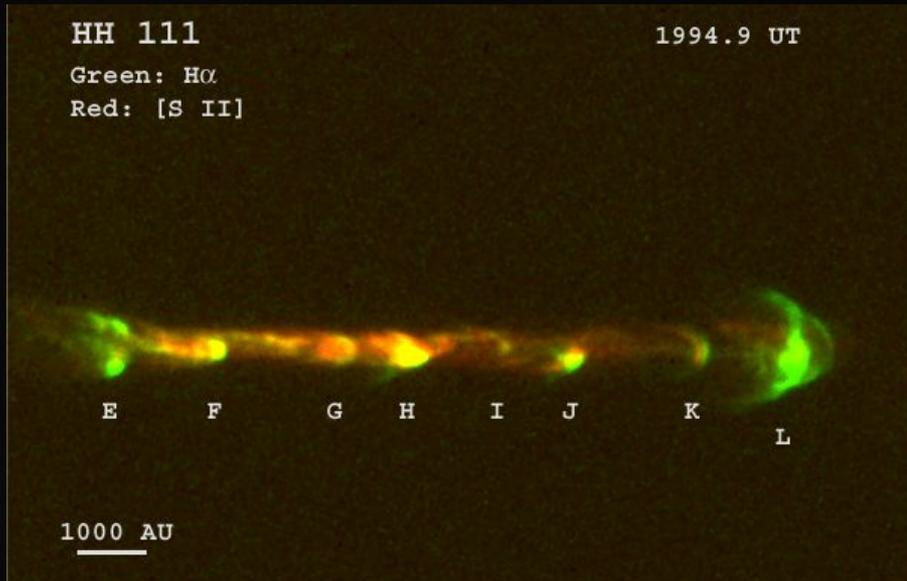
Plasmas astrofísicos

El 99% del Universo bariónico
se encuentra en estado de plasma.



Plasmas astrofísicos

Emisión de objetos Herbig Haro y sus campos magnéticos.

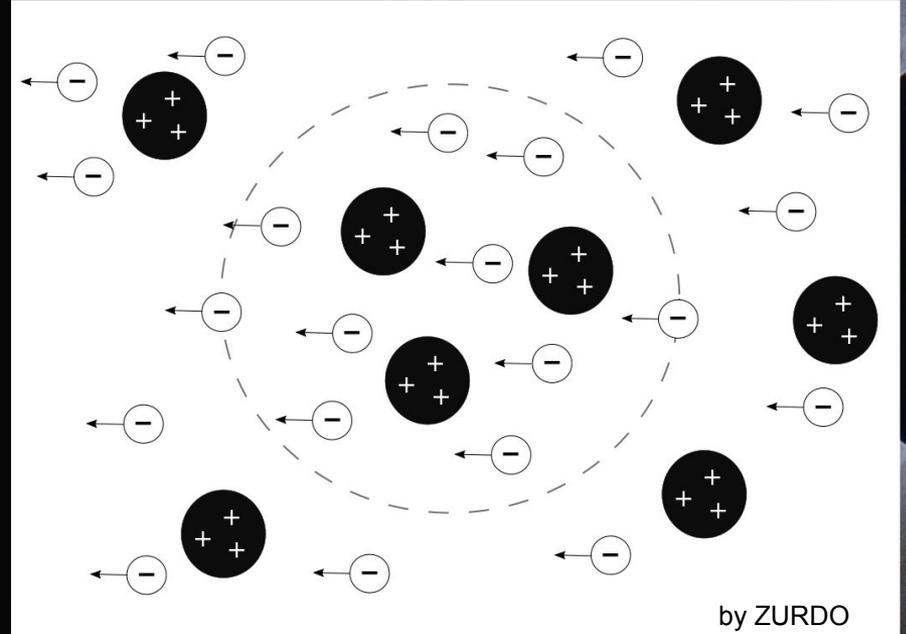


CARRASCO-GONZÁLEZ ET AL. (2010)

Plasmas astrofísicos: Teoría MHD

El plasma se estudia como un fluido conductor.

Se estudia la dinámica macroscópica, no cómo se mueve cada partícula.



Plasmas astrofísicos: Teoría MHD

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p + \mathbf{j} \times \mathbf{B} + \rho_c \mathbf{E} + \rho \mathbf{g}.$$

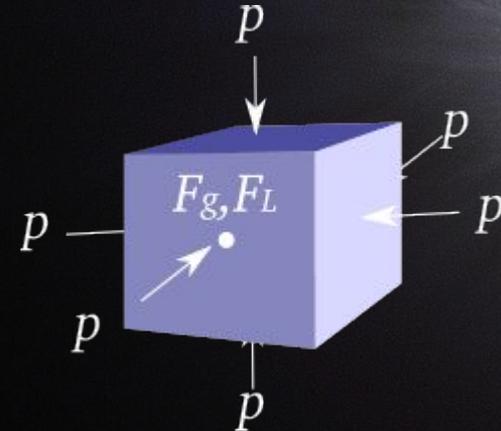
Fuerza sobre un elemento de volumen

Presión de elementos vecinos

Término magnético de la Fuerza de Lorentz

Término eléctrico de la Fuerza de Lorentz

Fuerza de gravedad



Plasmas astrofísicos: Teoría MHD ideal

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0.$$

$$\nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p + \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} + \rho \mathbf{g}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

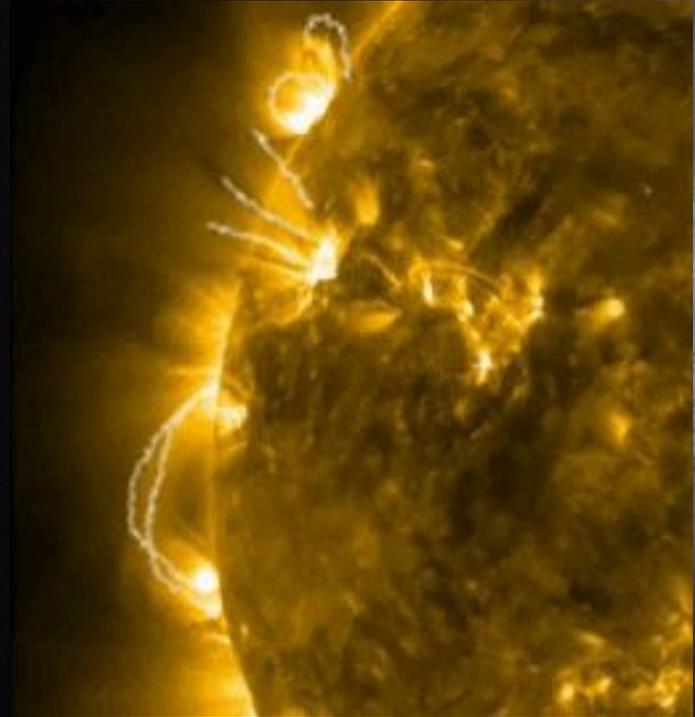
$$\frac{\partial p}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla p + \gamma p \nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j}$$

Plasmas astrofísicos: Teoría MHD ideal

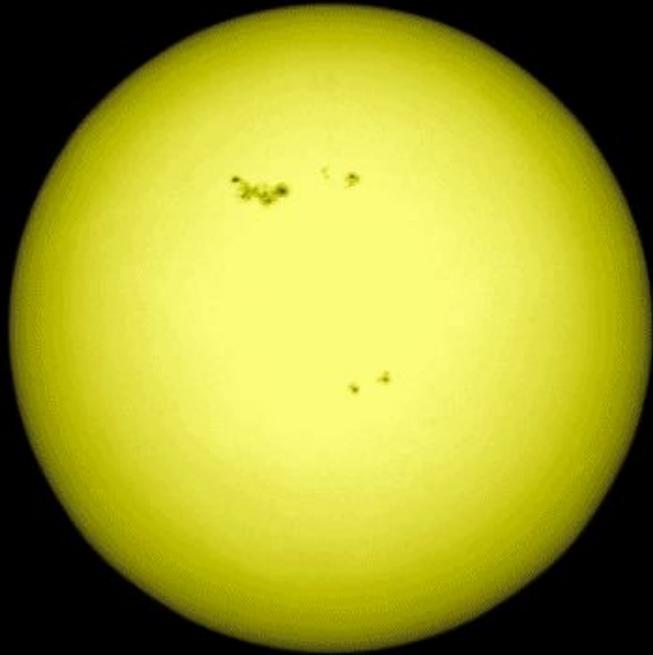
Las líneas de campo magnético son iguales a las líneas de corriente del fluido.

El plasma y el campo magnético se mueven solidariamente.



SDO-AIA 171Å

El Sol

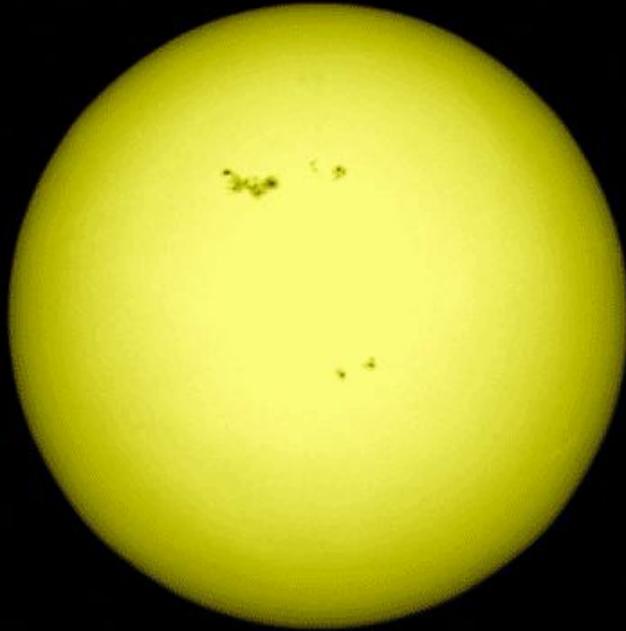


AIA 4500

2012-03-08 05:00:08

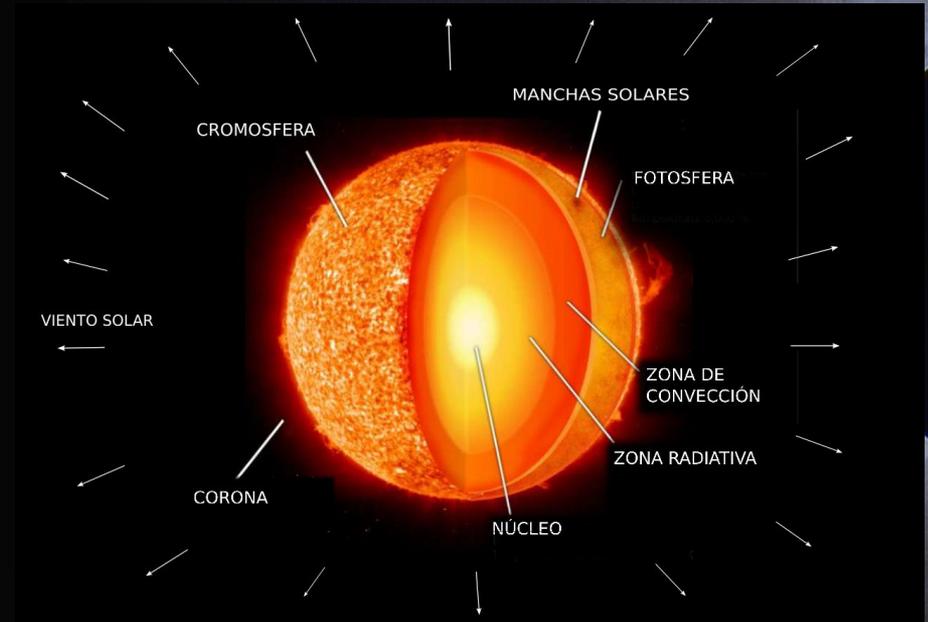


El Sol



AIA 4500

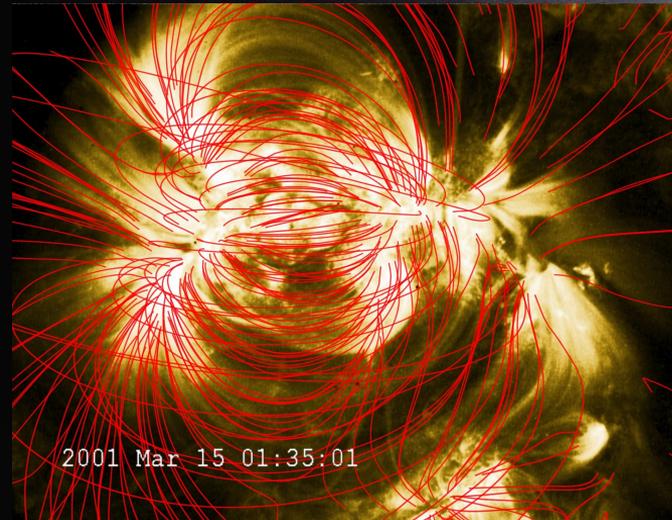
2012-03-08 05:00:08



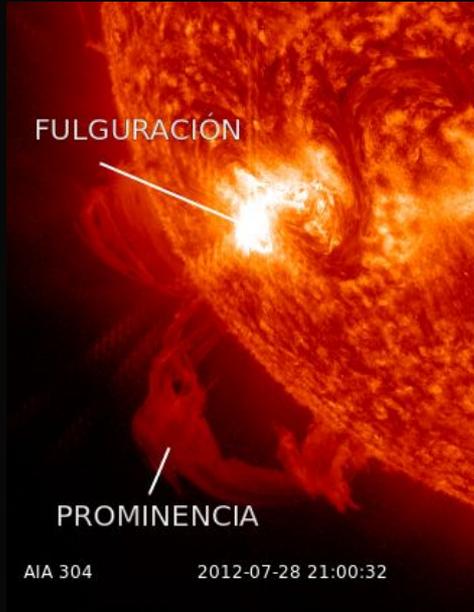
El Sol: Campo Magnético



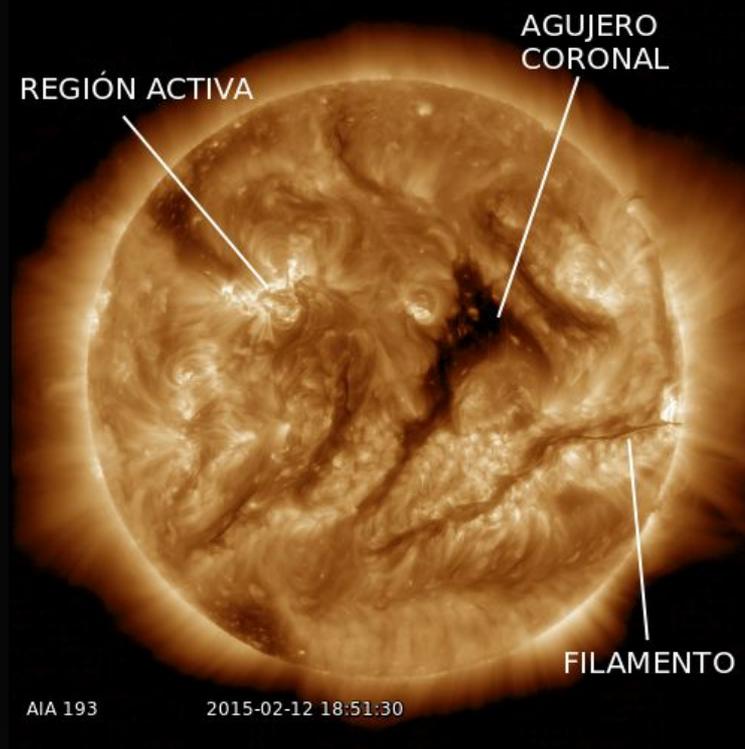
El campo magnético sobre la fotosfera solar afecta la dinámica del plasma cromosférico y coronal.



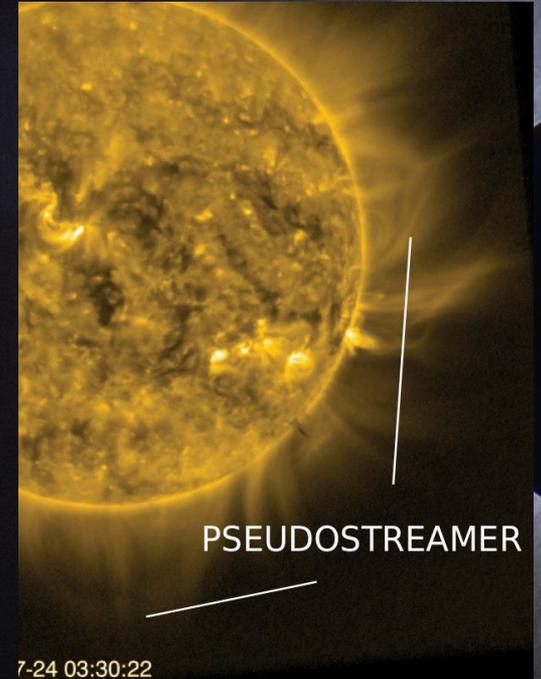
El Sol: Estructuras Coronales



SDO-AIA 304Å

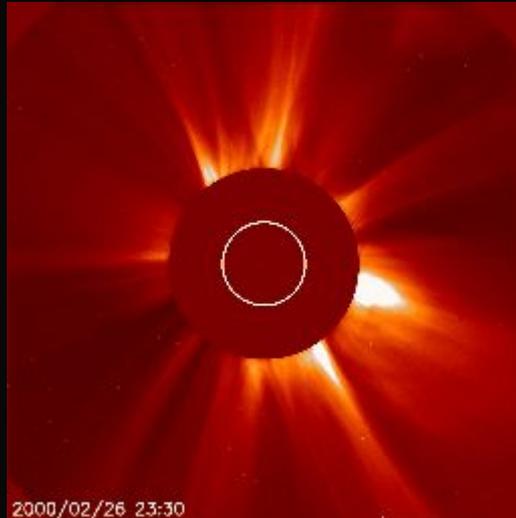


SDO-AIA 193Å



PROBA2-SWAP 174Å

Eyecciones coronales de masa



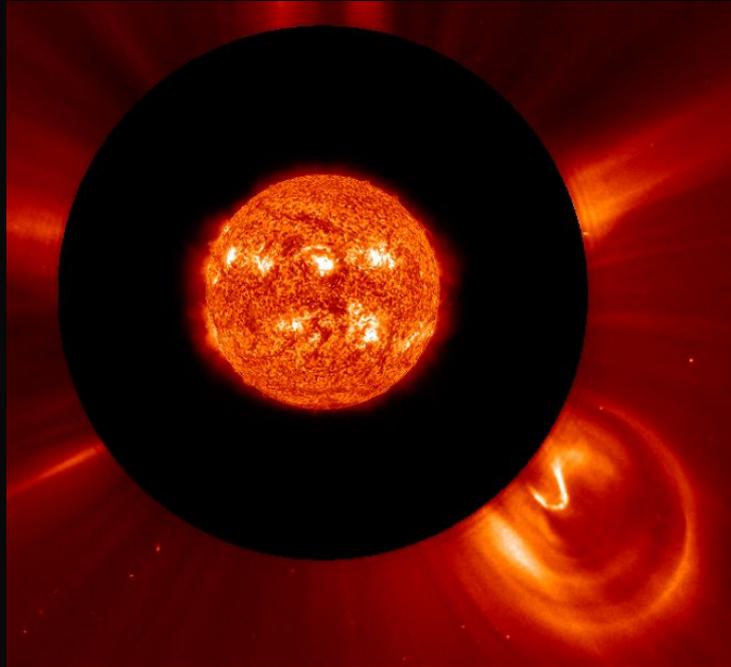
SOHO/LASCO

Las CMEs son nubes de plasma que se desprenden del Sol.

Generalmente, se observan con coronógrafos.

Vemos la proyección 2-D de la estructura 3-D.

Eyecciones coronales de masa



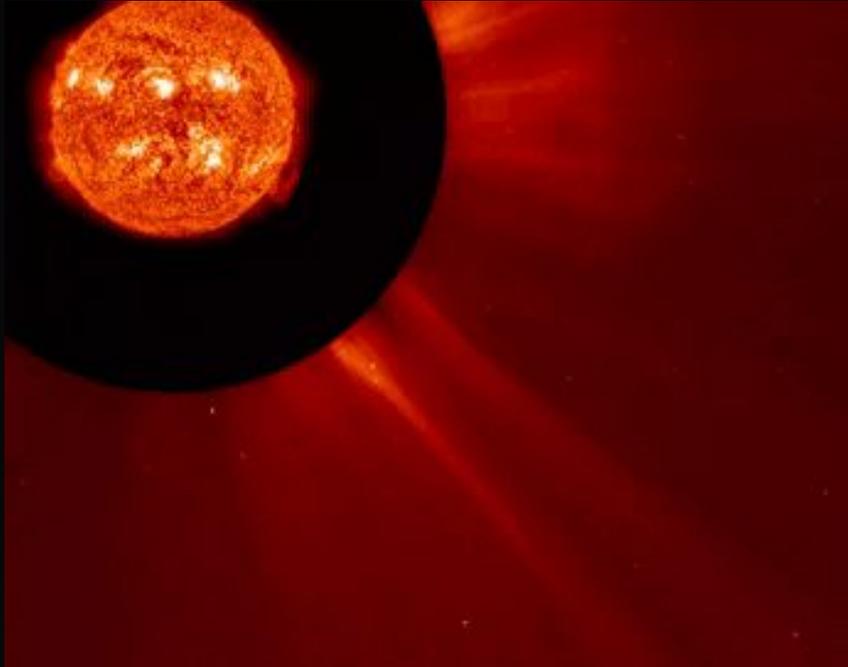
SDO-AIA 304Å + SOHO/LASCO

Las CMEs “normales” tienen:

- Frente brillante
- Cavity oscura
- Núcleo brillante

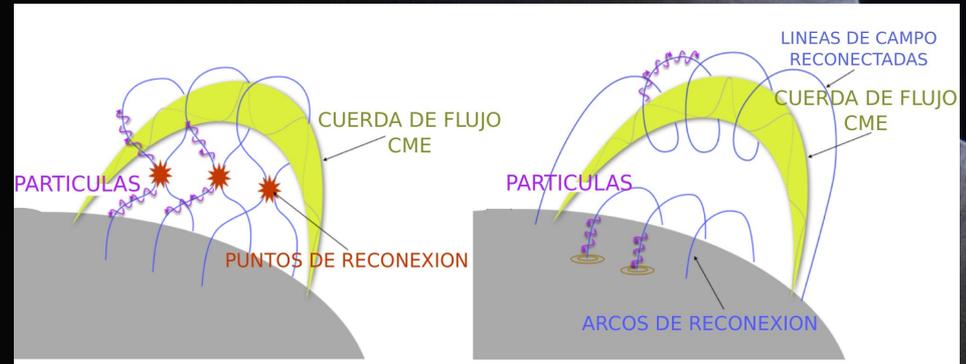
Los modelos proponen una configuración magnética para reproducir estas estructuras.

Eyecciones coronales de masa

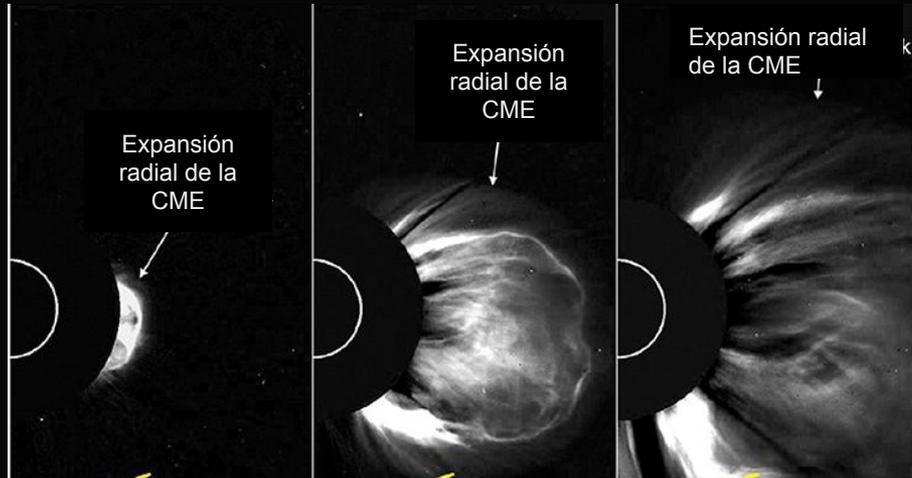


SDO-AIA 304Å + SOHO/LASCO

Modelo de *cuerda de flujo*: CME con forma de “medialuna”, el núcleo es la prominencia.

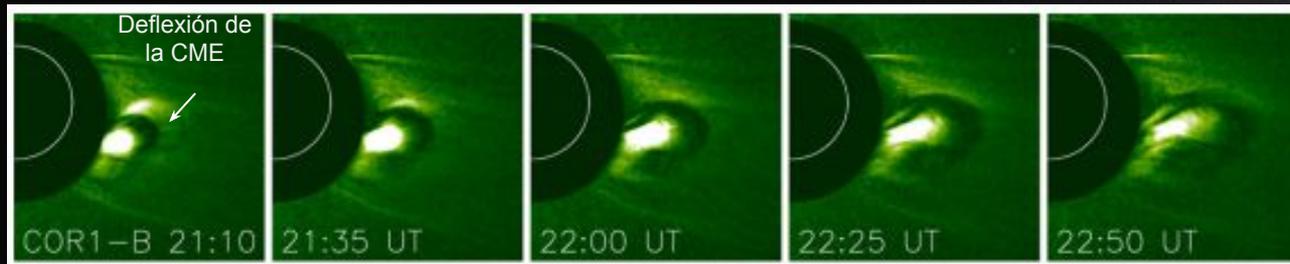


Eyecciones coronales de masa

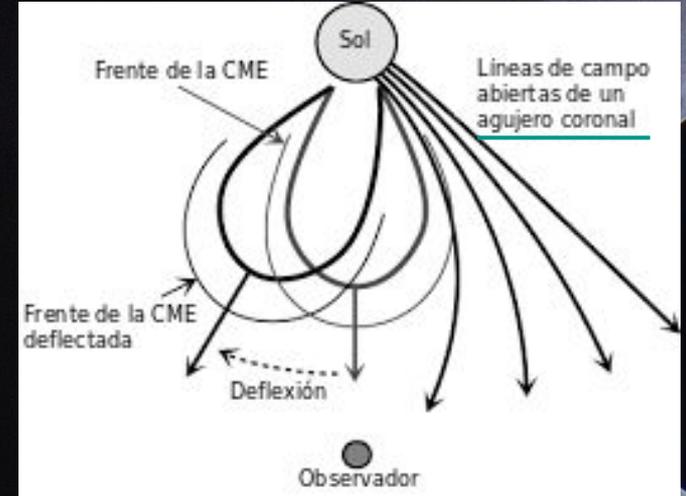
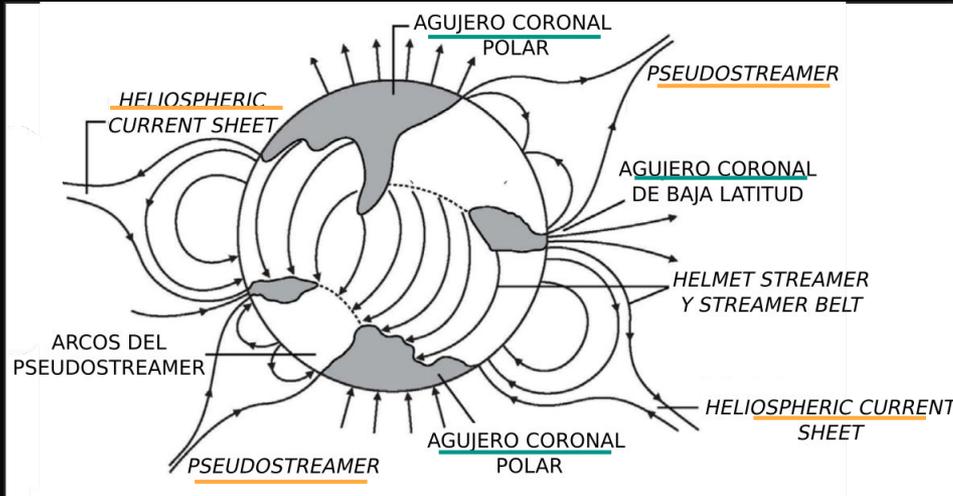


Se observa que algunas CMEs se propagan radialmente y otras se deflectan.

Cómo evolucionan depende del ambiente magnético.



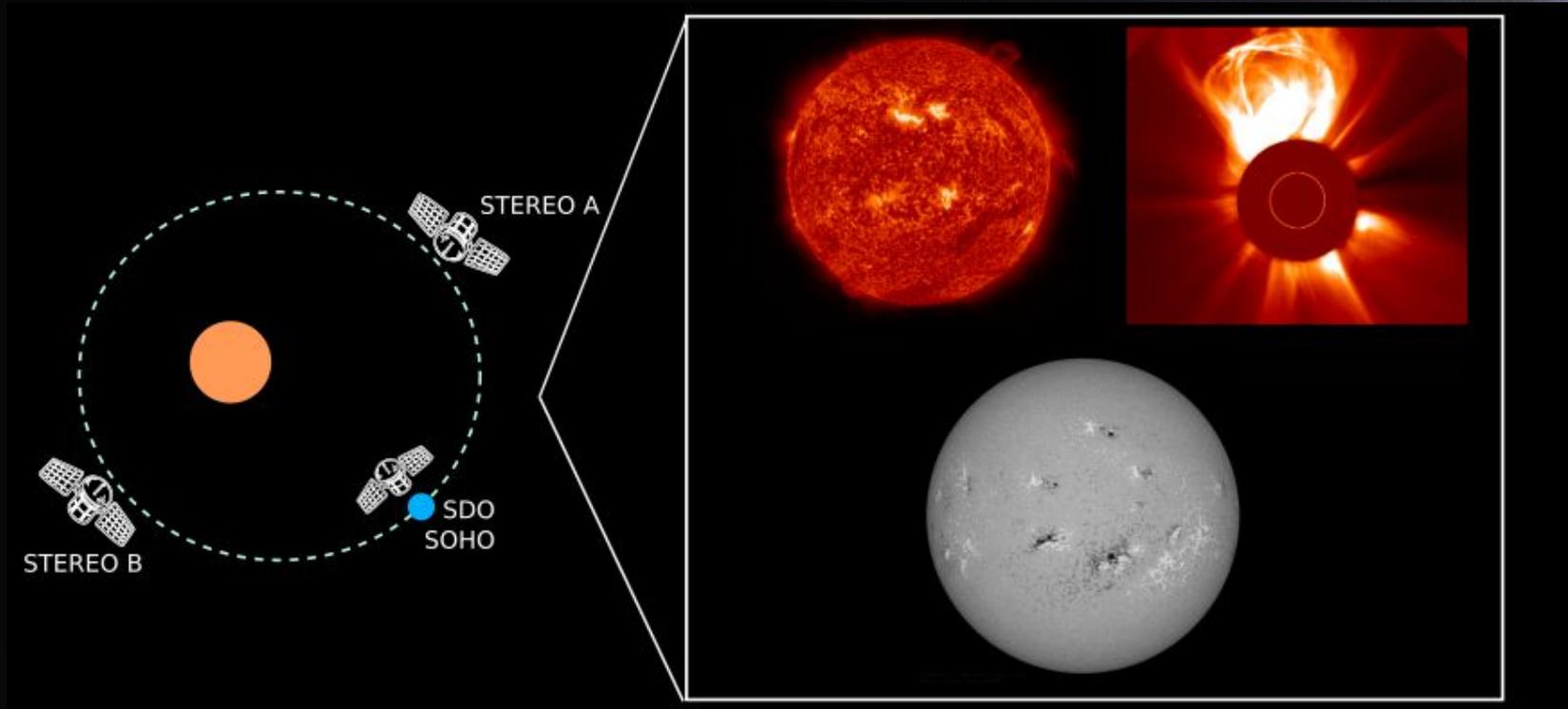
Eyecciones coronales de masa



Las CMEs se deflejan **alejándose** de los agujeros coronales y **acercándose** a los mínimos de energía magnética.

Herramientas observacionales

Telescopios solares y los datos que proveen

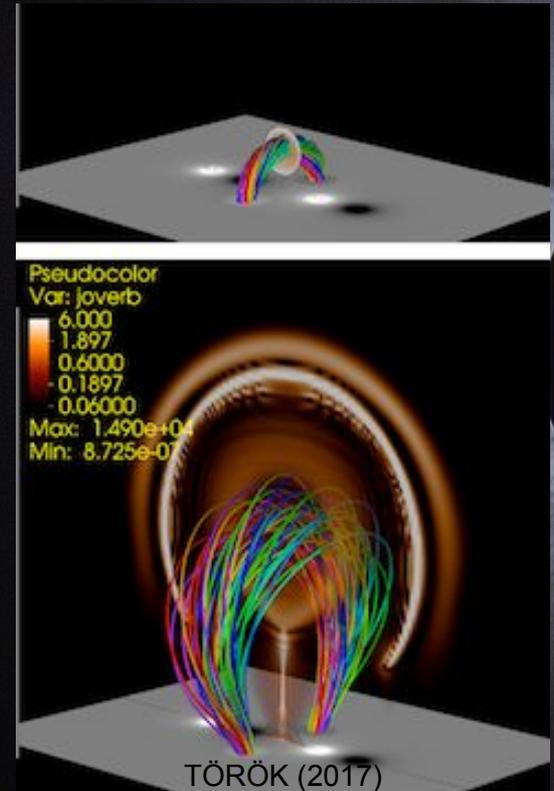


Herramientas observacionales

En el modelo, la prominencia se expande manteniendo su forma.

La cuerda de flujo rodea y sostiene a la prominencia.

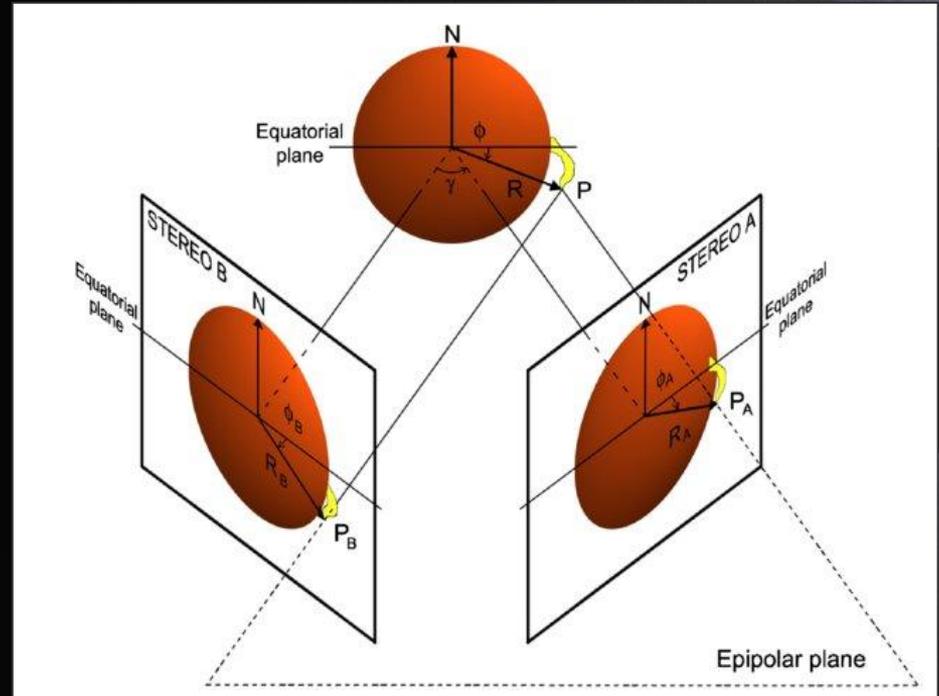
Explica la CME “clásica”.



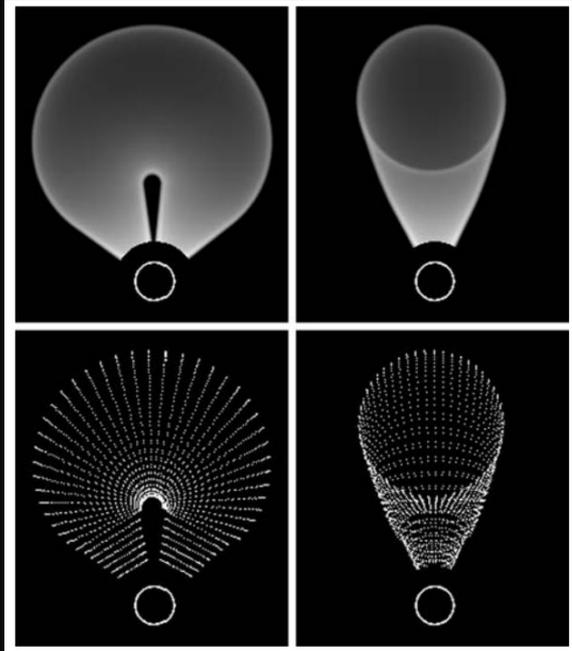
Herramientas observacionales: Triangulación

La triangulación determina geoméricamente la posición de la prominencia.

Se triangula el ápex de la prominencia durante su evolución.



Herramientas observacionales: *Forward modeling*



THERNISIEN ET AL. (2006)

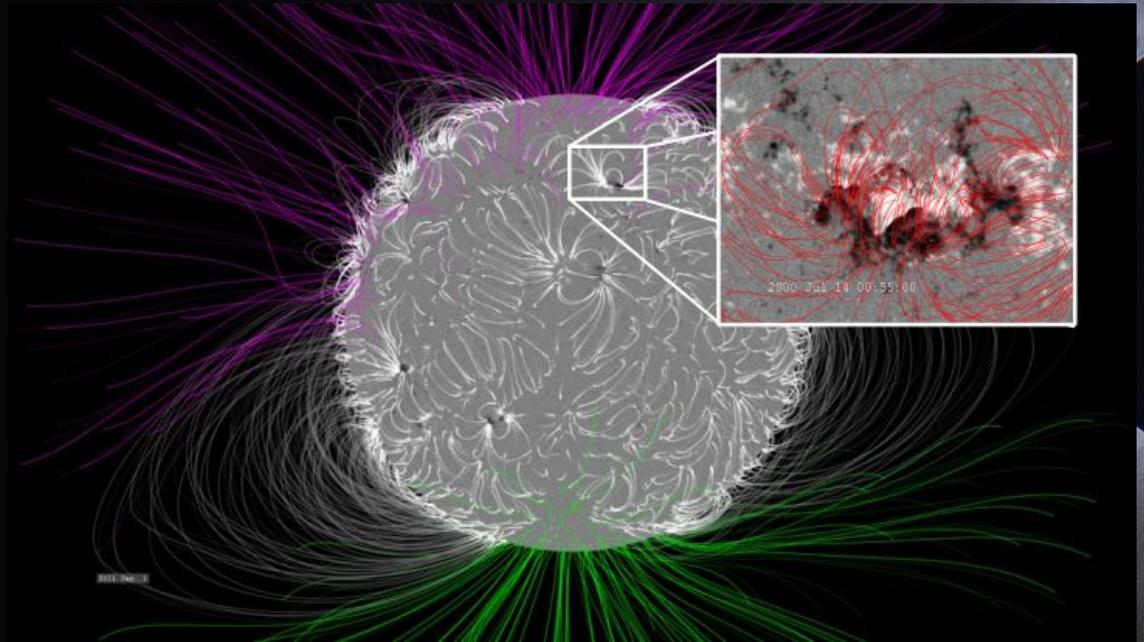
El *Forward modeling* busca la “medialuna” que más se parece a la CME observada.

Permite conocer la posición 3D del borde brillante.

Herramientas observacionales: Reconstrucción de B

Se reconstruye el campo magnético coronal de la medición fotosférica.

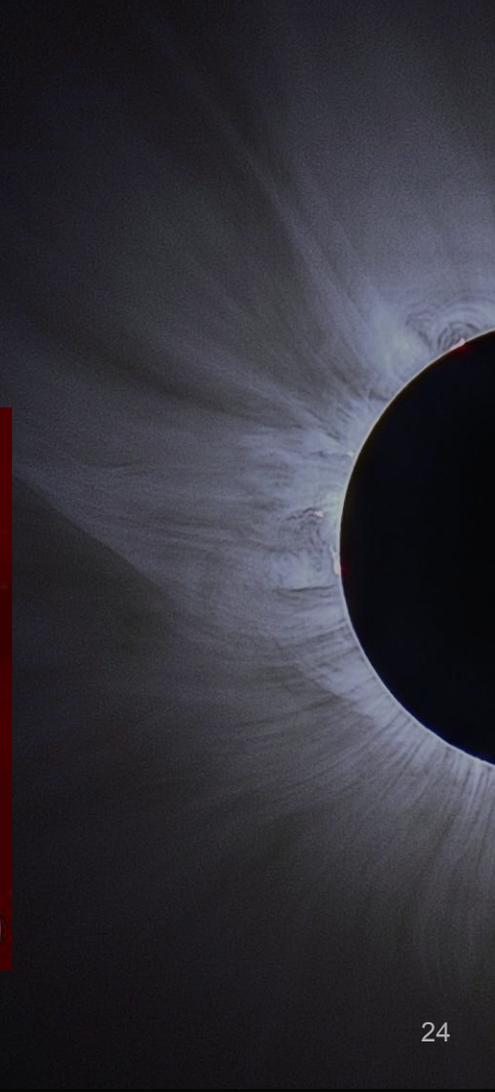
Así se conoce el ambiente magnético que atraviesa la CME.



Resultados observacionales

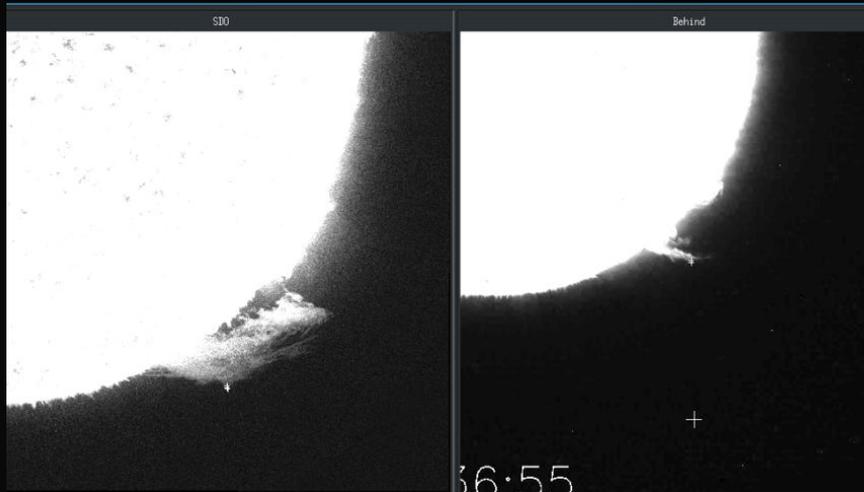
Resultados observacionales

Prominencia progenitora y CME del 24/01/2011

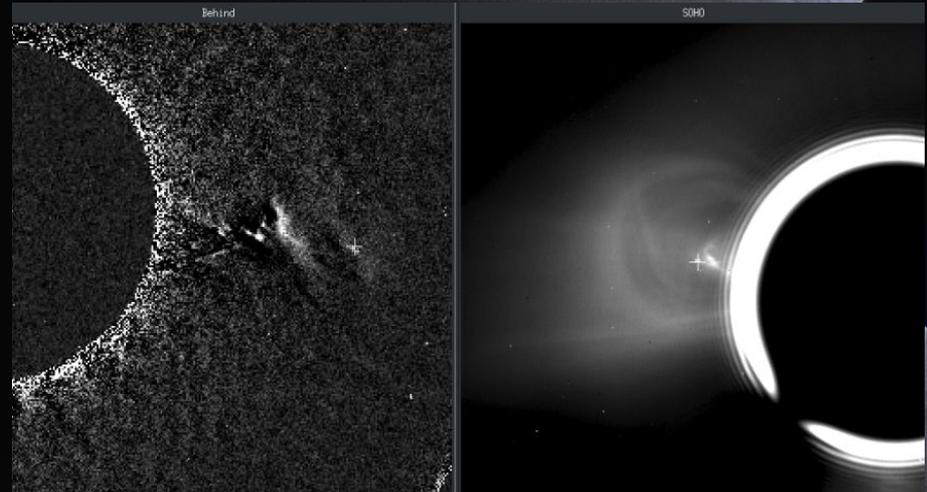


Resultados observacionales

Triangulación de la prominencia



↑ SDO/AIA, STEREO B/EUVI ↑

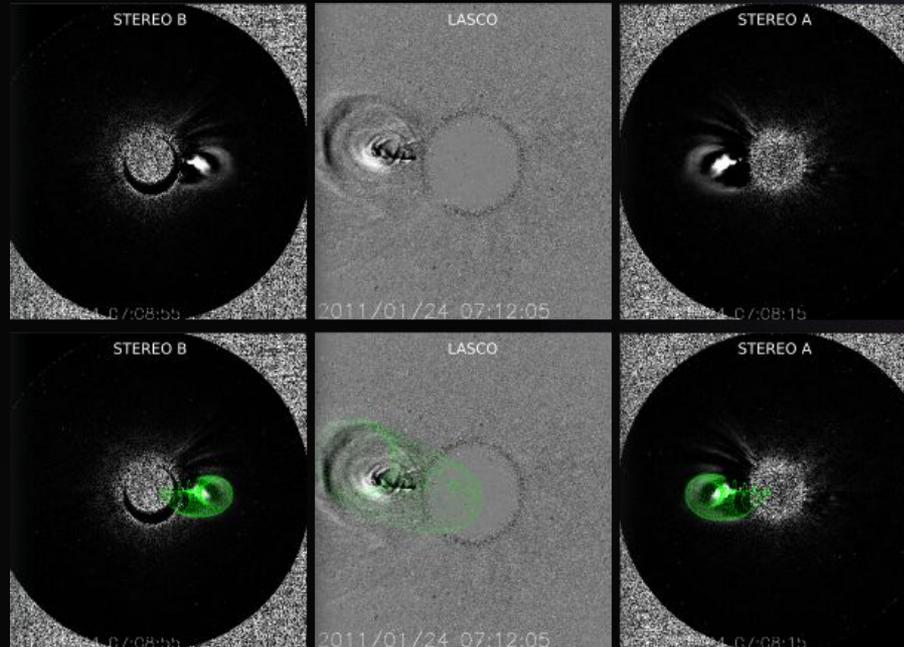


↑ STEREO B/COR1, SOHO/LASCO ↑

SIEYRA ET AL. (En prep.)

Resultados observacionales

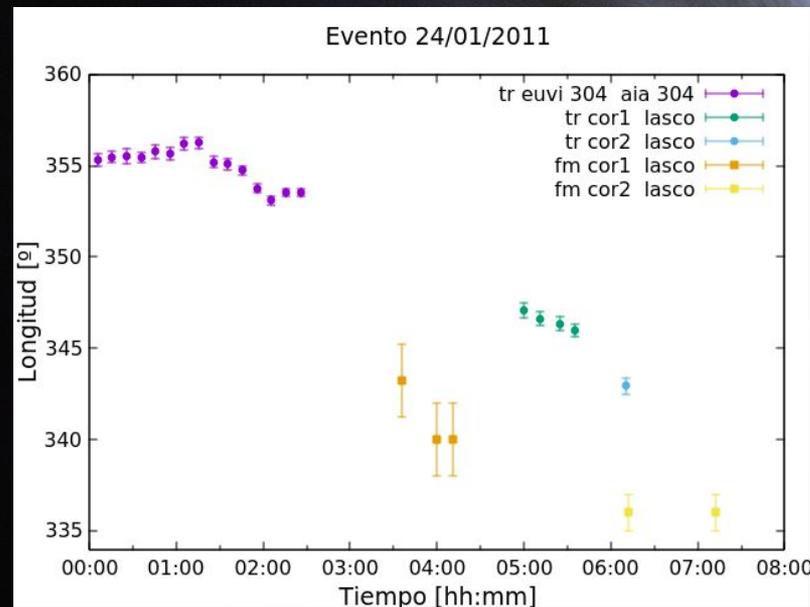
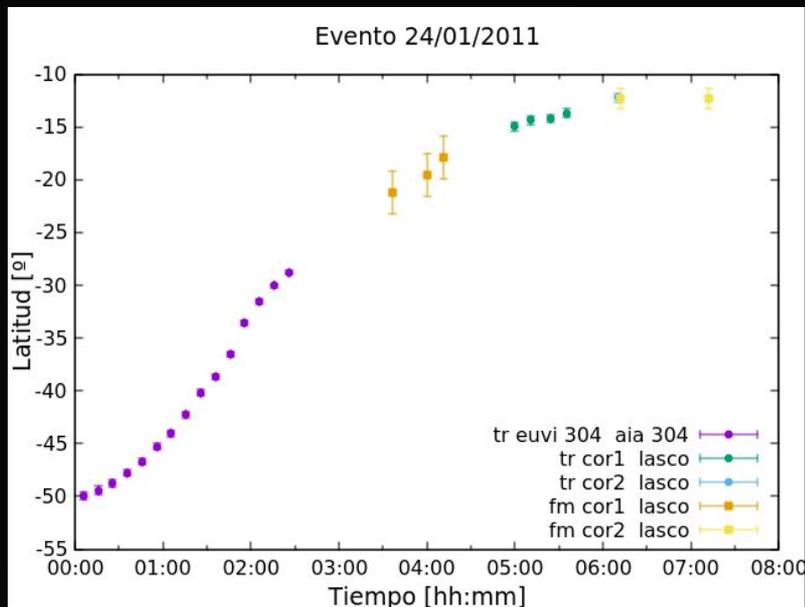
Ajuste con *Forward modeling* de la CME



SIEYRA ET AL. (En prep.)

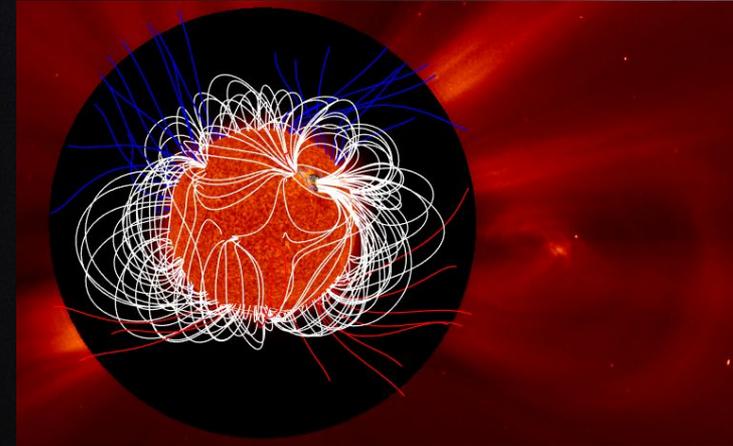
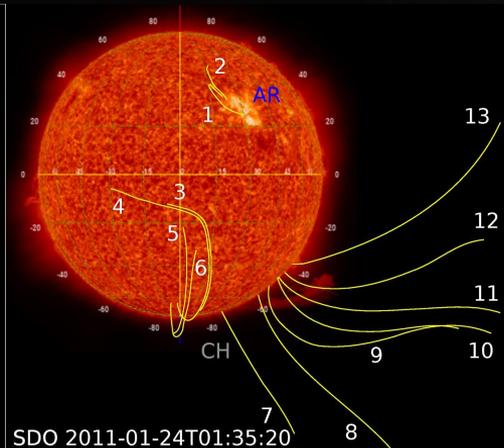
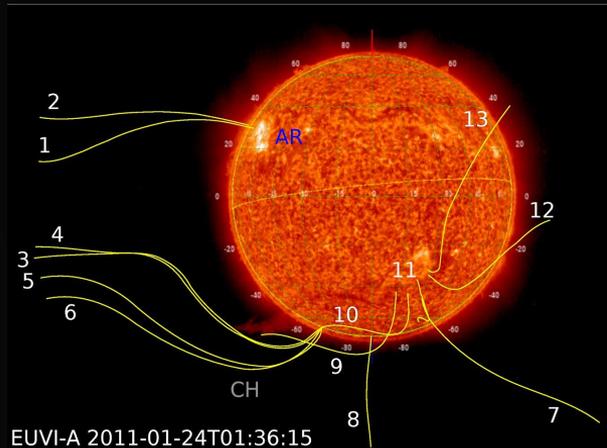
Resultados observacionales

Variación de latitud y longitud del ápex de la prominencia y de la CME



Resultados observacionales

Reconstrucción del campo magnético

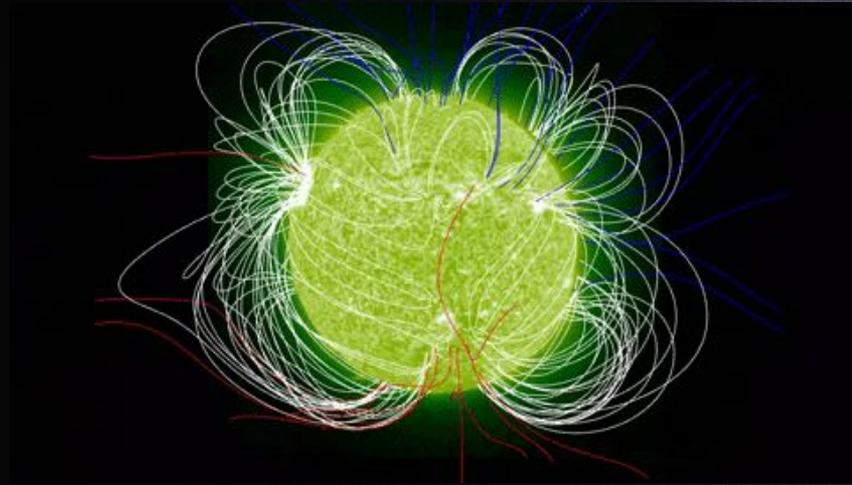


SIEYRA ET AL. (En prep.)

Conclusiones: Trabajo Observacional

La CME sufre una deflexión en latitud y en longitud desde la prominencia.

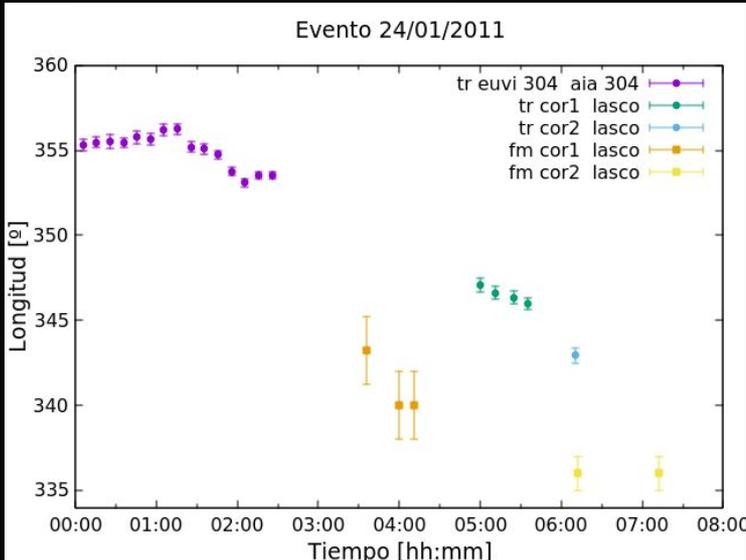
La deflexión ocurre por influencia del agujero coronal y del *pseudostreamer*.



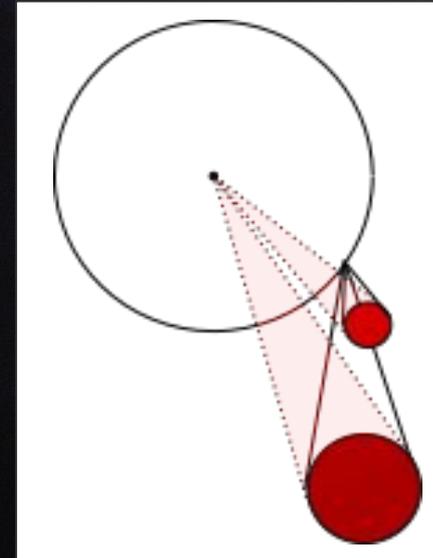
SIEYRA ET AL. (En prep.)

Conclusiones: Trabajo Observacional

El método de *Forward Modeling* puede no ser apropiado para eventos que se deflecan.



SIEYRA ET AL. (En prep.)

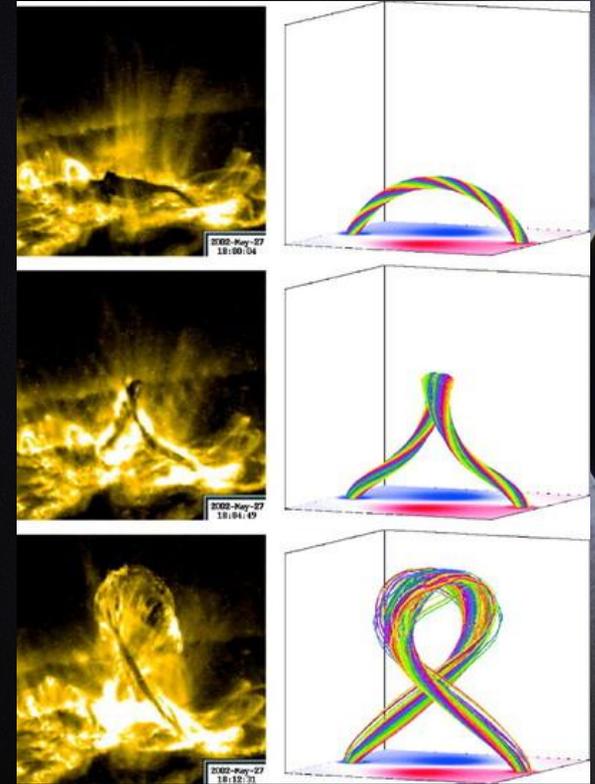


Herramientas numéricas

Se busca reproducir lo observado mediante la teoría MHD.

Se deben resolver las ecuaciones de la MHD con simulaciones numéricas.

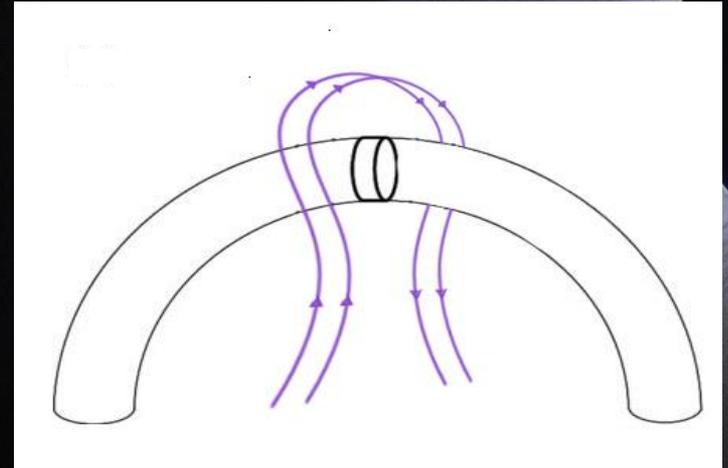
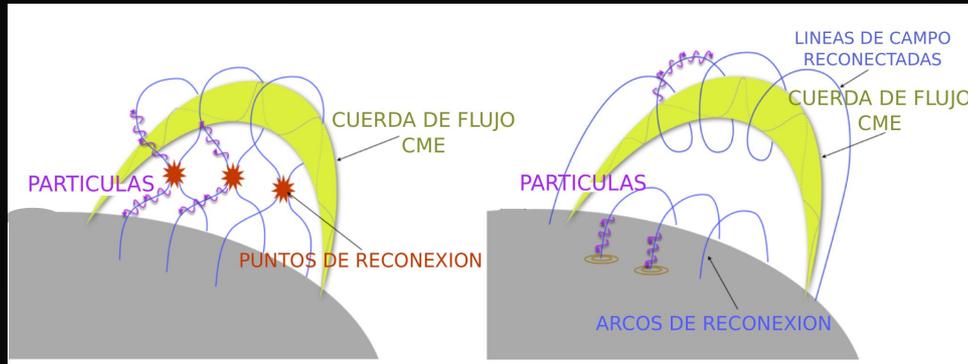
Se usan los modelos para simular la CME.



TÖRÖK & KLIEM (2005)

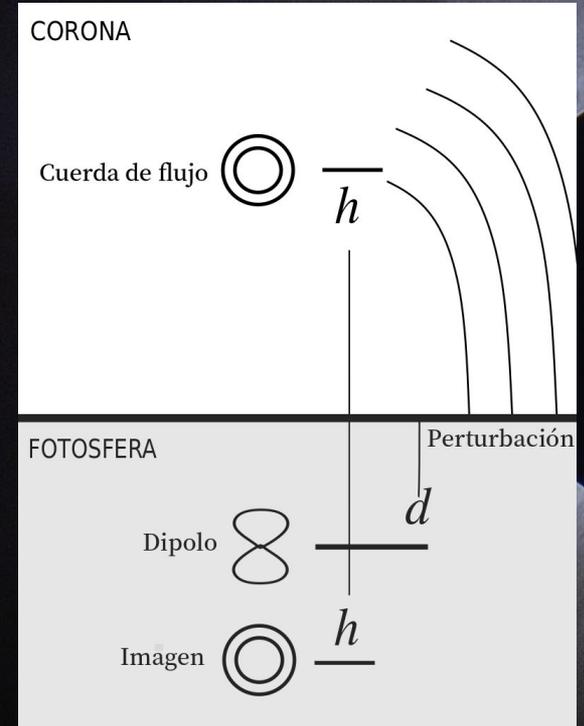
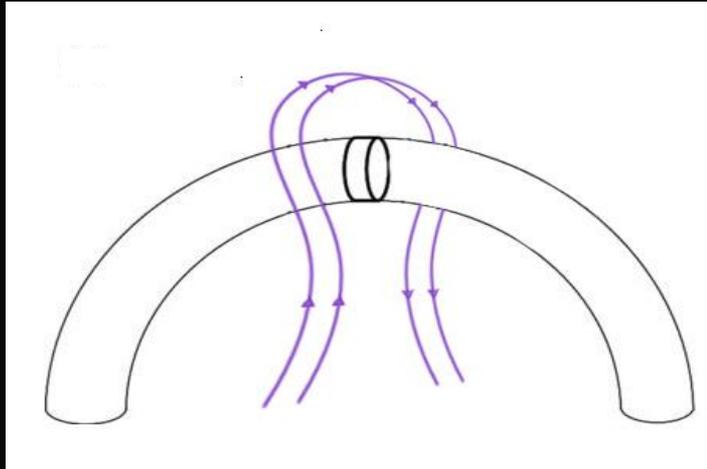
Herramientas numéricas

Usando el modelo de cuerda de flujo se simula un corte bidimensional.



Herramientas numéricas: Configuración inicial

La configuración de campo magnético se obtiene de la suma de campos.

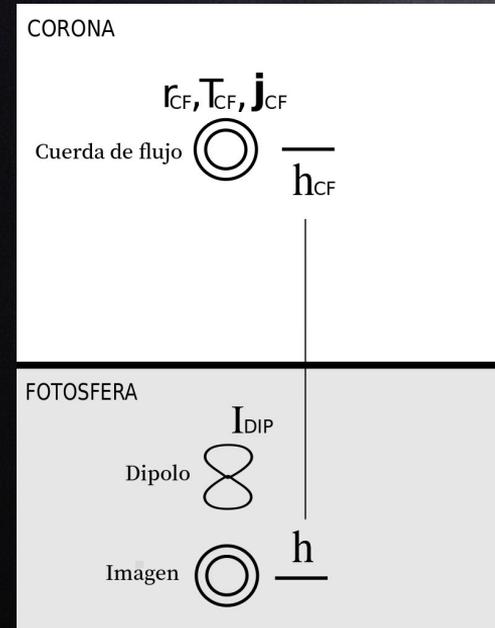


Resultados Numéricos

Resultados numéricos: Implementación

Barrido de parámetros en configuración sin deflexión:

- Temperatura de la Cuerda de Flujo (T_{CF})
- Densidad de corriente de la CF (j_{CF})
- Radio de la CF (r_{CF})
- Altura de la CF (h_{CF})
- Intensidad del dipolo (I_{DIP})



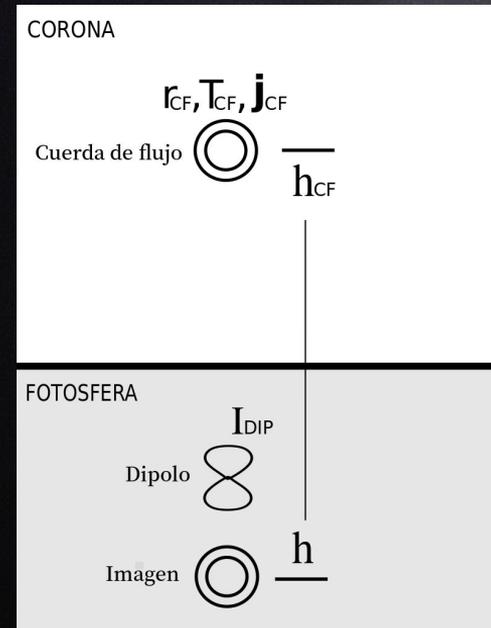
Resultados numéricos: Implementación

Barrido de parámetros en configuración sin deflexión:

- Temperatura de la Cuerda de Flujo (T_{CF})

MÁS $T_{CF} \Rightarrow$ MÁS V_{CF}

- Densidad de corriente de la CF (j_{CF})
- Radio de la CF (r_{CF})
- Altura de la CF (h_{CF})
- Intensidad del dipolo (I_{DIP})



Resultados numéricos: Implementación

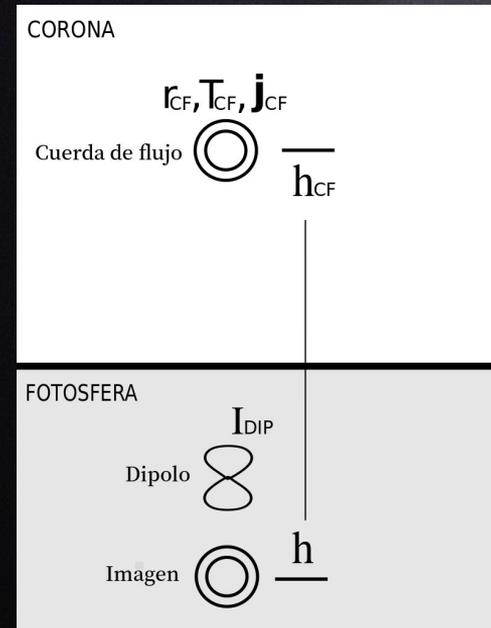
Barrido de parámetros en configuración sin deflexión:

- Temperatura de la Cuerda de Flujo (T_{CF})

MÁS $T_{CF} \Rightarrow$ MÁS V_{CF}

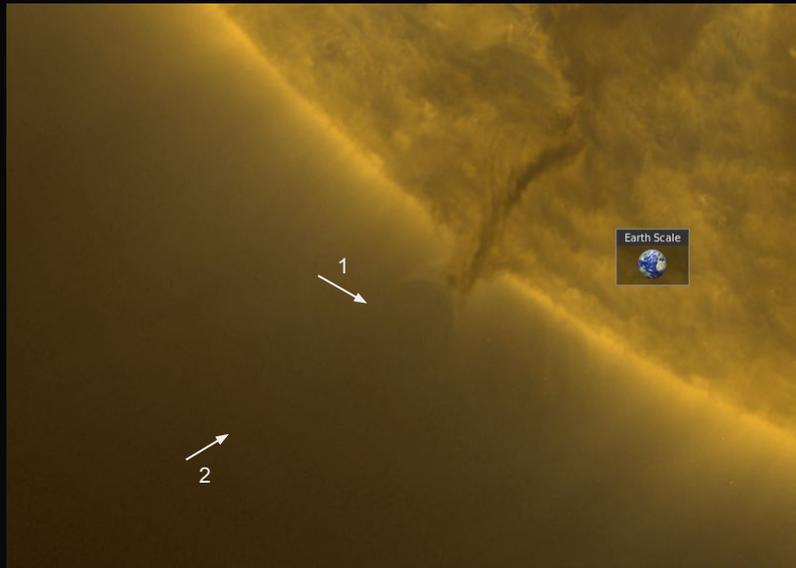
- Densidad de corriente de la CF (j_{CF})
- Radio de la CF (r_{CF})
- Altura de la CF (h_{CF})
- Intensidad del dipolo (I_{DIP})

MENOS $I_{DIP} \Rightarrow$ MÁS V_{CF}

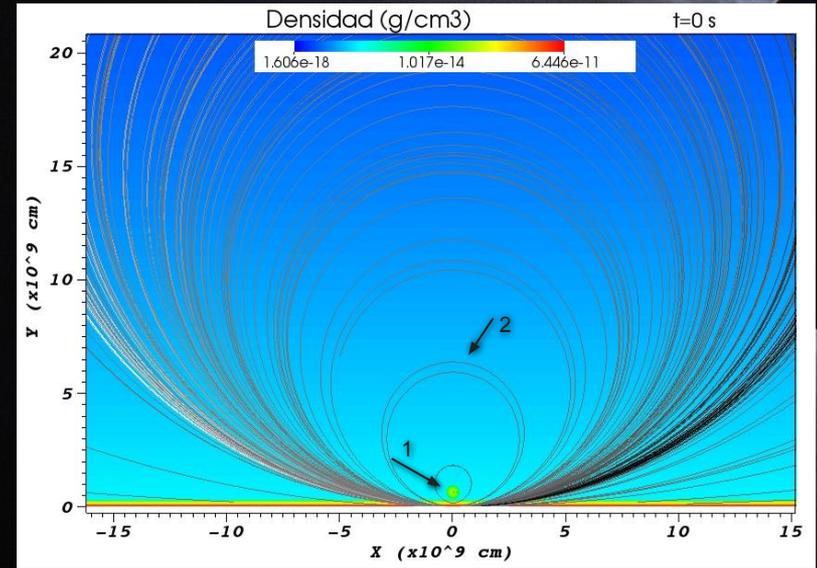


Resultados numéricos: Implementación

Observación vs. simulación de cuerda de flujo



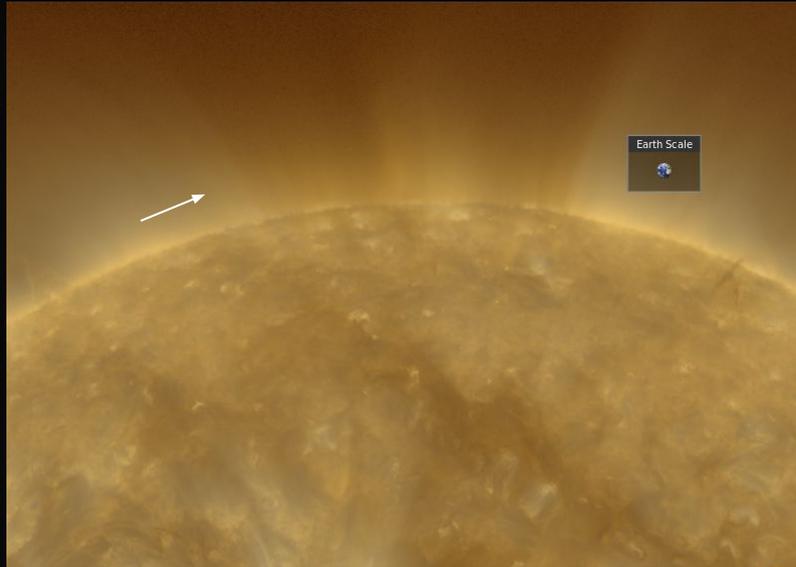
SDO-AIA 171Å + 193Å



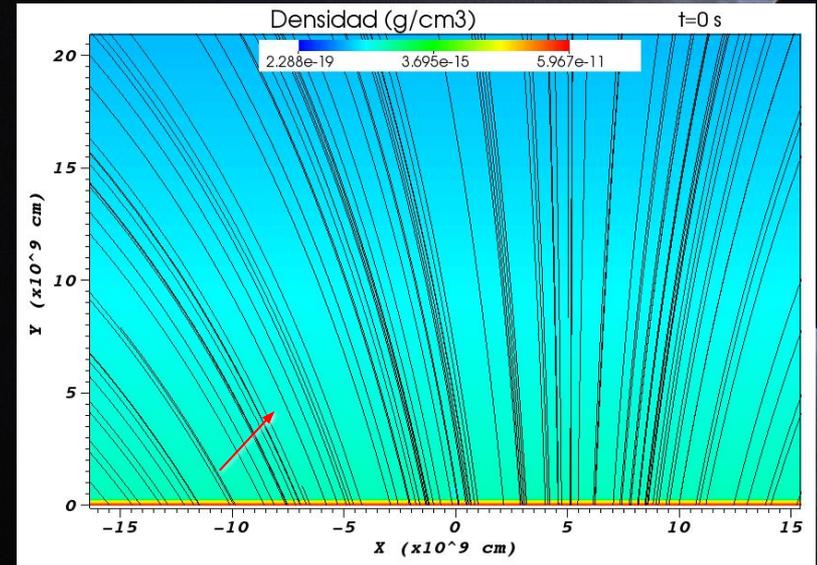
SAHADE ET AL. (En prep.)

Resultados numéricos: Implementación

Observación vs. simulación de agujero coronal

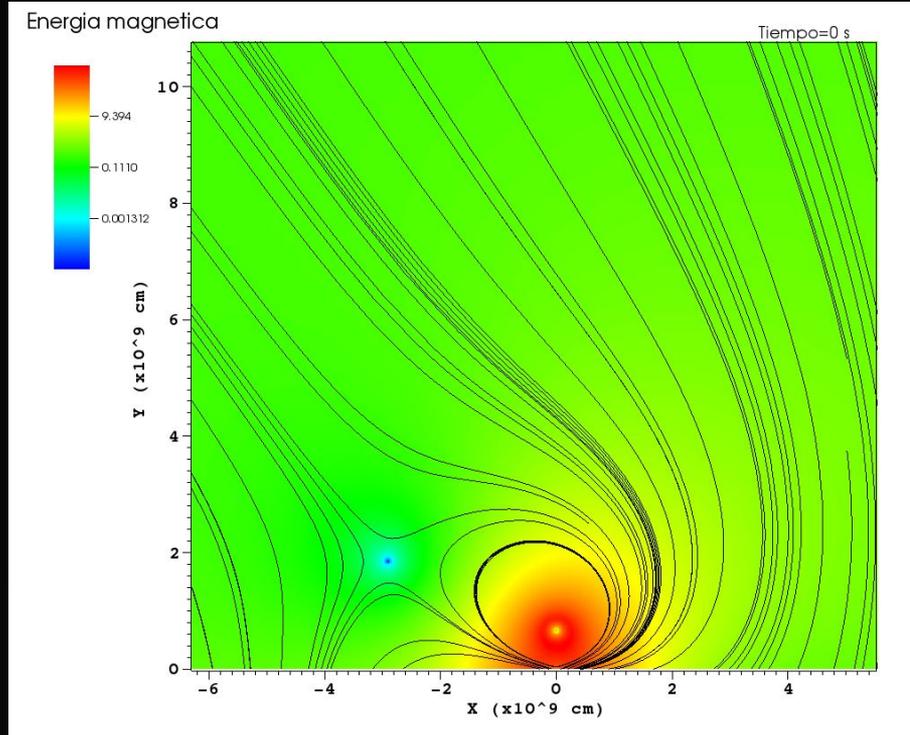


SDO-AIA 171Å +193Å



SAHADE ET AL. (En prep.)

Resultados numéricos: Implementación



SAHADE ET AL. (En prep.)

Al sumar los campos magnéticos se forman mínimos de energía.

En las observaciones los agujeros coronales alejan la CME y los mínimos las atraen.

Resultados numéricos: Antecedentes

Parámetros que afectan la deflexión de la CME según estudios observacionales y numéricos:

- Kay et al. (2015) → Masa y velocidad de la CME
- Cremades et al. (2006) → Área y distancia del agujero coronal
- Gopalswamy et al. (2009) → Intensidad del agujero coronal

Resultados numéricos

Se prueban diferentes configuraciones para estudiar qué parámetros modifican la deflexión:

- Diferentes Cuerdas de Flujo ante el mismo Agujero Coronal
- Misma CF ante AC de distintos anchos
- Misma CF ante AC de distintas intensidades
- Misma CF ante AC a distintas distancias
- Otros resultados interesantes

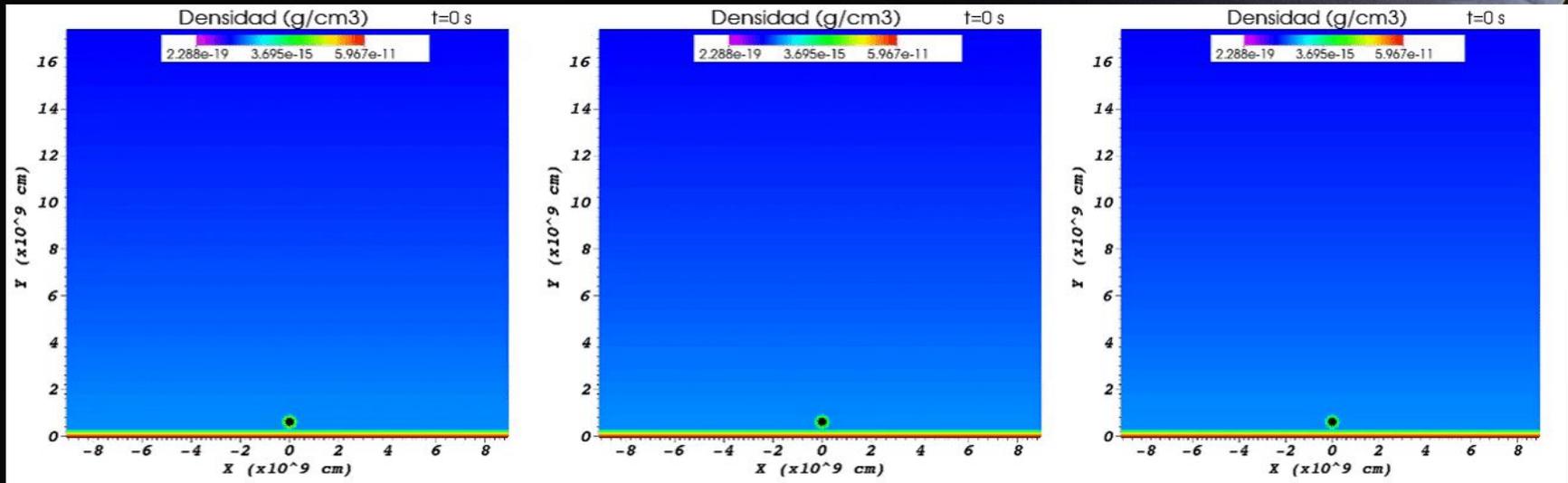
Resultados numéricos

Distintas cuerdas de flujo deflectadas por un mismo agujero coronal:

T = 1 MK

T = 2 MK

T = 5 MK

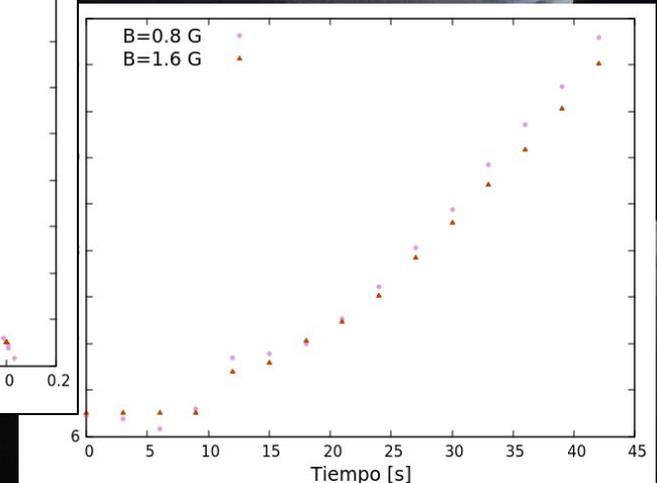
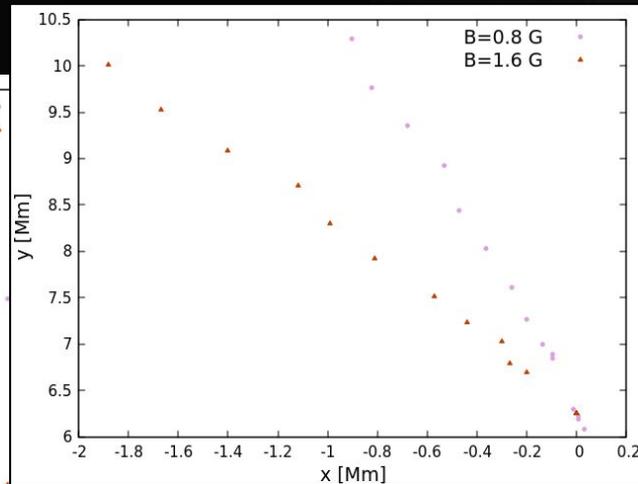
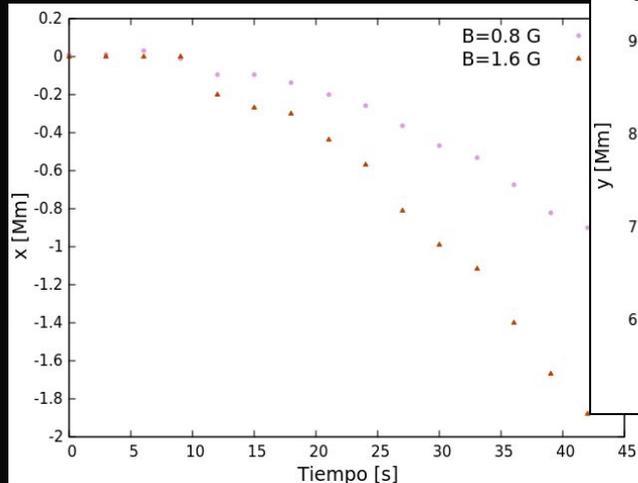


SAHADE ET AL. (En prep.)

Resultados numéricos

Misma cuerda de flujo deflectada por agujeros de distintas intensidades.

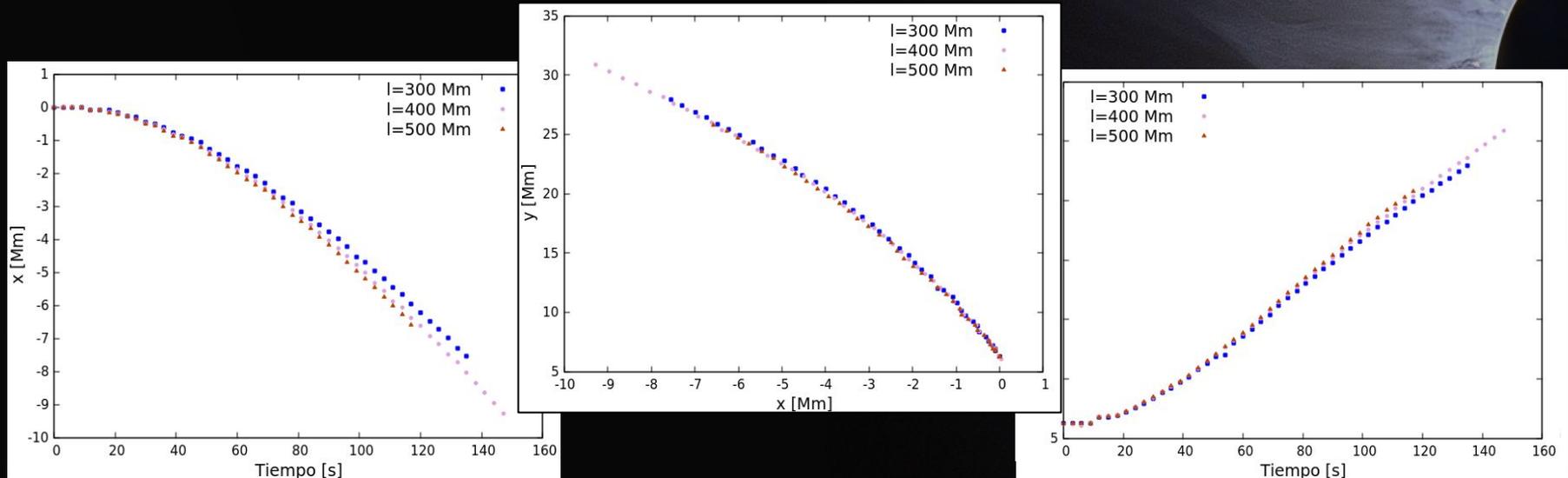
A MÁS INTENSIDAD MÁS DEFLEXIÓN



Resultados numéricos

Misma cuerda de flujo deflectada por agujeros de **distintos anchos**.

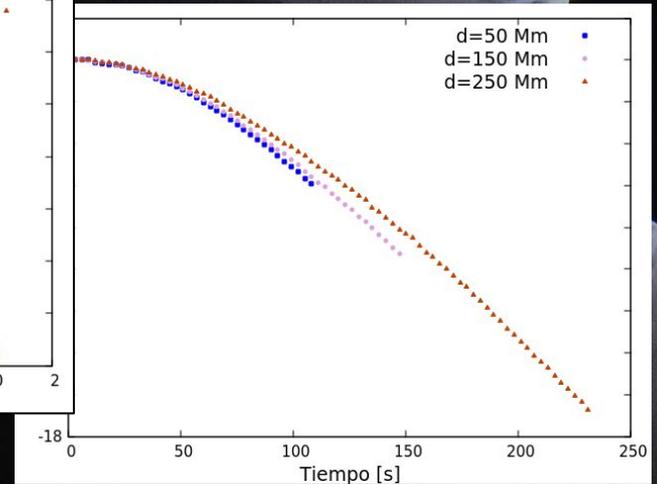
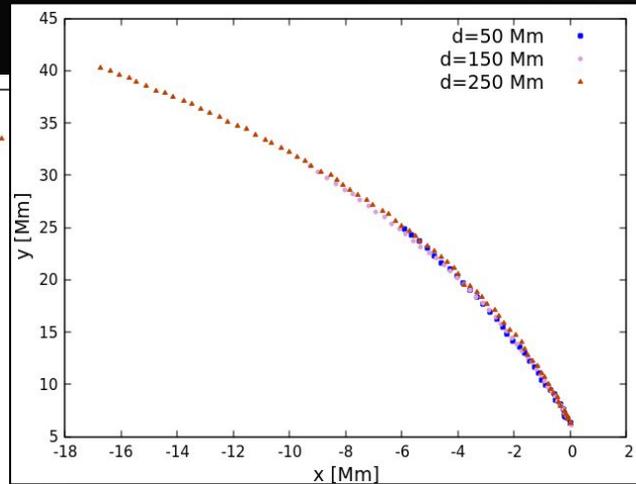
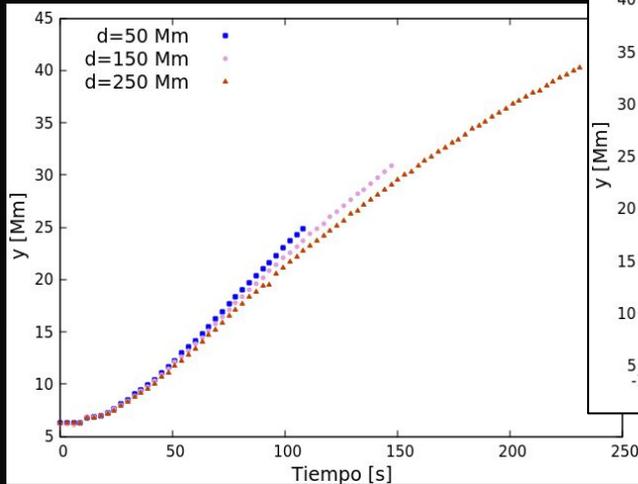
A DISTINTOS ANCHOS IGUAL DEFLEXIÓN



Resultados numéricos

Misma cuerda de flujo deflectada por agujeros a **distintas distancias**.

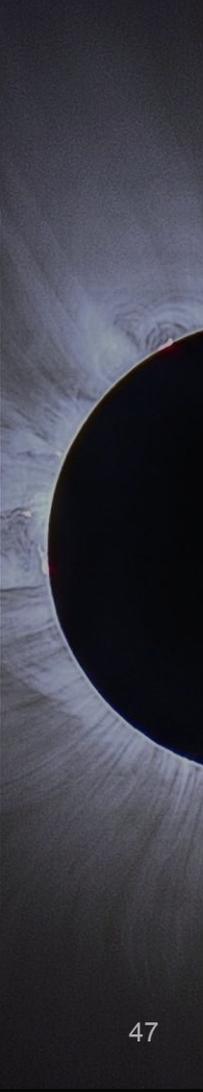
A DISTINTAS DISTANCIAS IGUAL DEFLEXIÓN



Resultados numéricos

Cuerda de flujo ante
perturbación débil.

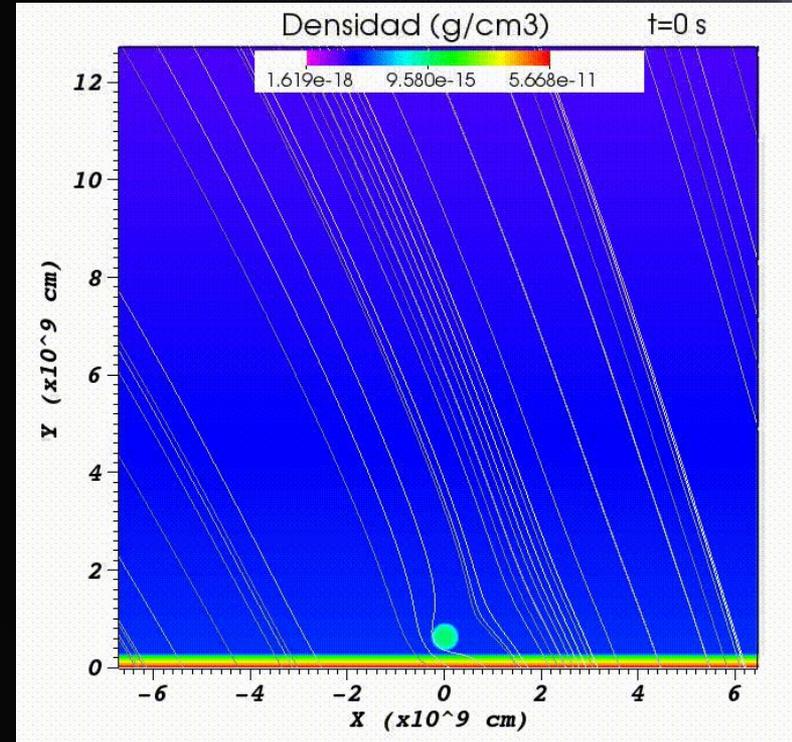
La deflexión es lenta pero
se produce igual.



Resultados numéricos

Cuerda de flujo con baja densidad de corriente.

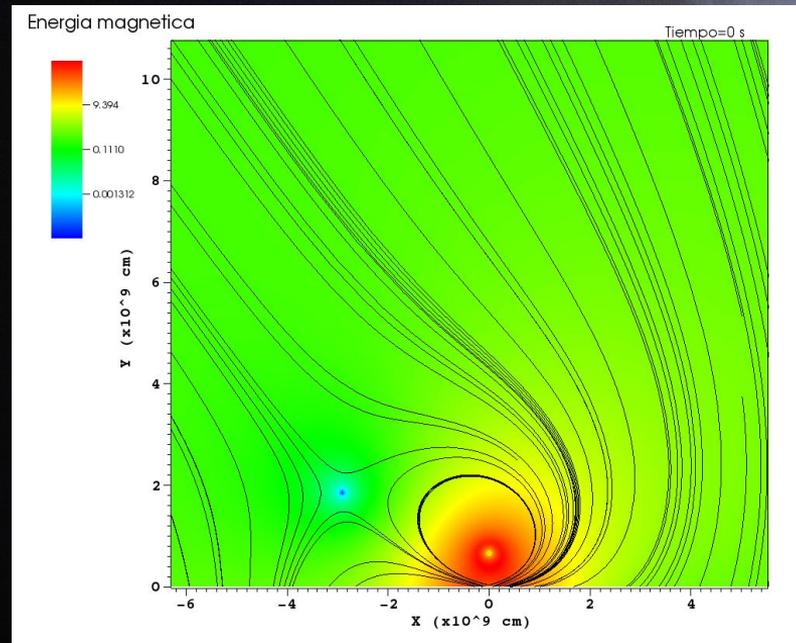
Sufre una doble deflexión.



Conclusiones: Trabajo Numérico

En las 45 simulaciones realizadas la CME se dirige al **mínimo de energía magnética**, sin importar la ubicación del AC.

No se necesitan fuertes campos magnéticos para alterar la trayectoria de la CME.

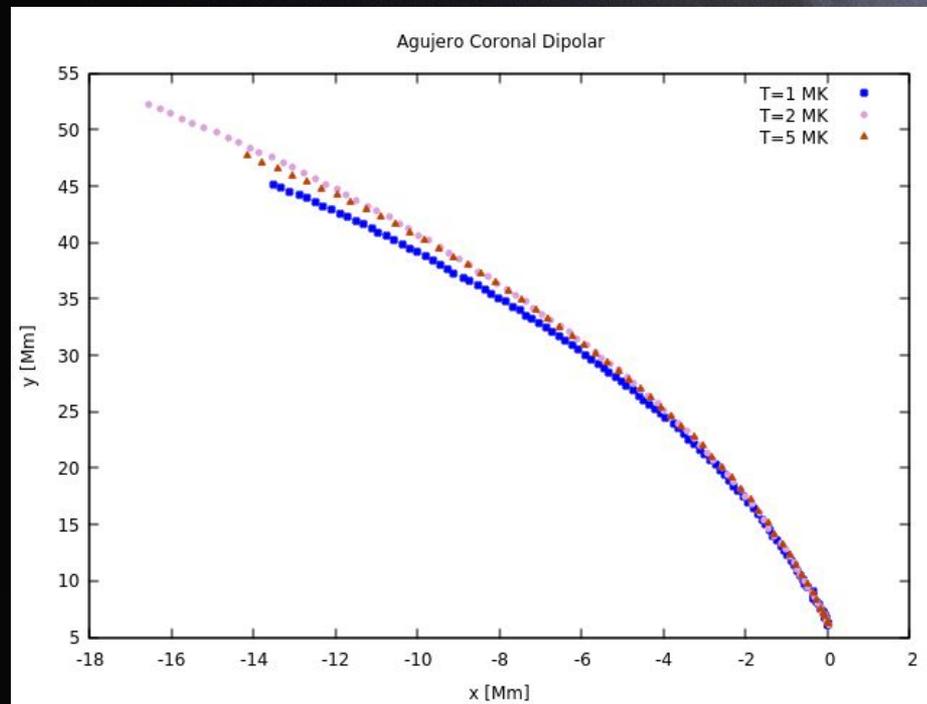


SAHADE ET AL. (En prep.)

Conclusiones: Trabajo Numérico

Al igual que en Kay et al. (2015) se obtiene una relación no-directa con la **masa** y la **velocidad**.

La CF de T=2 MK es el menos deflectado, la de T=1 MK se deflecta más que el resto.

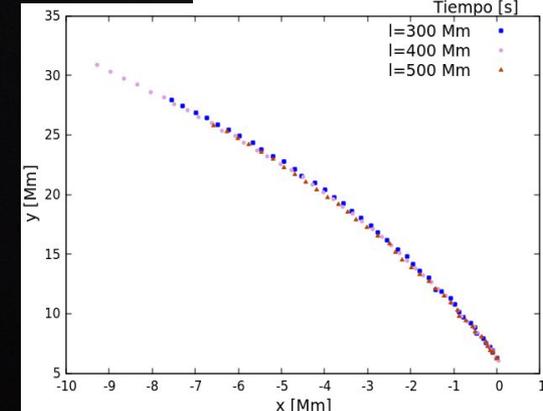
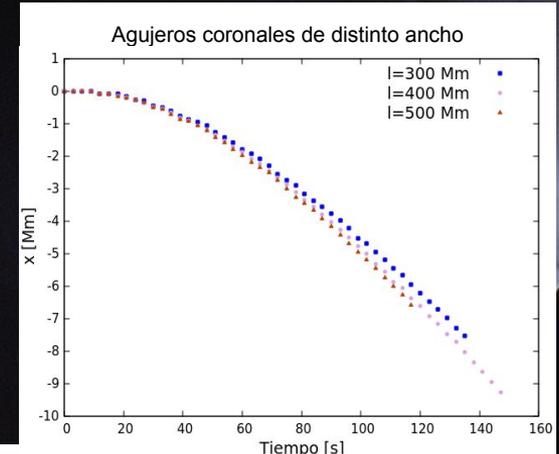


SAHADE ET AL. (En prep.)

Conclusiones: Trabajo Numérico

Al aumentar el **ancho** y disminuir la **distancia** la deflexión es más rápida; pero la trayectoria es la **misma**.

Para comparar con Cremades et al. (2006) hay que evolucionar más la cuerda de flujo.

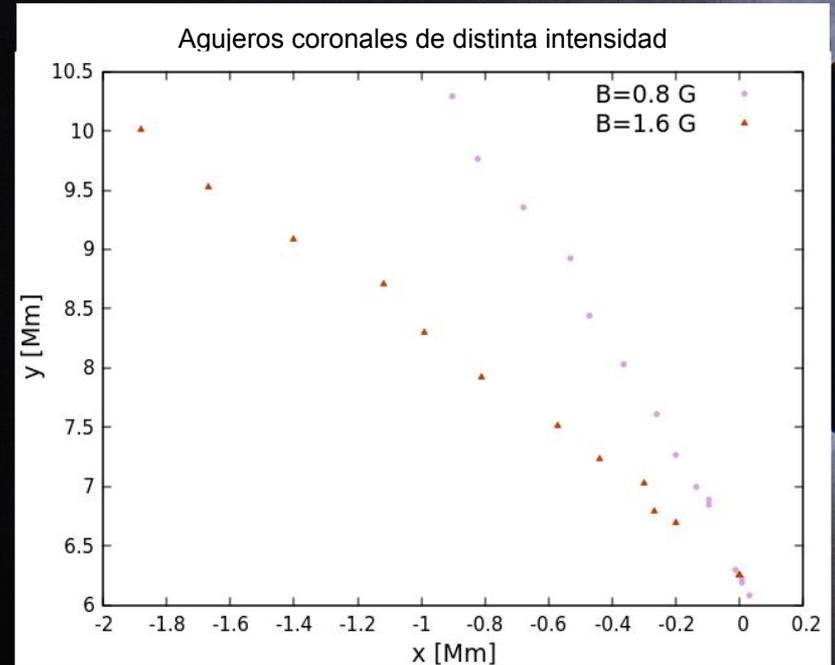


SAHADE ET AL. (En prep.)

Conclusiones: Trabajo Numérico

La cuerda de flujo se defleca más a mayor **intensidad** del agujero coronal.

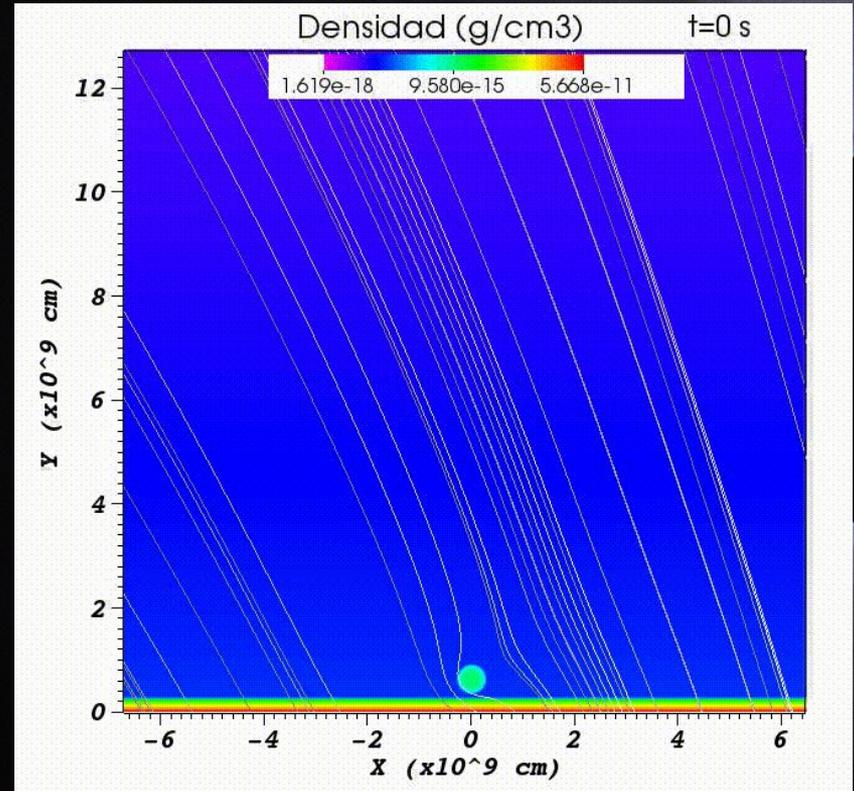
El resultado coincide con la relación observacional encontrada por Gopalswamy et al. (2009).



Conclusiones: Trabajo Numérico

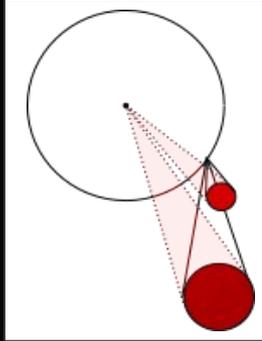
La cuerda de flujo puede sufrir una **doble deflexión** si el mínimo de energía y el agujero coronal se encuentran del mismo lado.

En Jiang et al. (2007) estudian un filamento que erupcionó hacia un AC y rebotó en él.



Trabajo Futuro

- Medir la posición de la eyección desde su **origen** (no centro del Sol)



- Continuar estudio sistemático a **etapas tardías** de la evolución
- Simular otros **perturbadores**, como *pseudostreamers*
- Estudiar las **ondas** desarrolladas en la deflexión

Referencias

- Carrasco-González, C., Rodríguez, L. F., Anglada, G., Martí, J., Torrelles, J. M., Osorio, M.: 2010, *SCIENCE* **330**, 1209
- Cremades H., Bothmer V., Tripathi D., 2006, *Adv. in Space R.* **38**, 461
- Gopalswamy N., Mäkelä P., Xie H., Akiyama S., Yashiro S., 2009, *J. of Geoph. R.* **114**, A00
- Kay, C., Opher, M., Evans, R.M.: 2015, *Astrophys. J.* **805**, 168
- Thernisien, A.F.R., Howard, R.A., Vourlidas, A.: 2006, *Astrophys. J.* **652**, 763
- Török, T., Kliem, B.: 2005, *Astrophys. J.* **630**, 97
- Török, T.: 2017, http://www.predsci.com/~tibor/cme_speed/
- Zuccarello, F.P., Bemporad, A., Jacobs, C., Mierla, M., Poedts, S., Zuccarello, F.: 2012, *Astrophys J.* **744**, 66

Fin...



Gracias por su atención

Gracias a ...

Los que más me aguantaron en este camino:
Pato, Ricky, Lali y Facu.

Mis amig@s, con los que compartí materias,
rendidas y horas de estudio. Por todo lo
compartido y su apoyo en cada momento, son
lo mejor de la facu!

Mi familia que siempre me acompañó y consultó
sus dudas astronómicas conmigo (aunque no
tuviera las respuestas).

Todas las personas que dedicaron de su tiempo
para ayudarme con los problemas que no sabía
resolver.

Mis directores y todo el grupo de Plasmas que
me ayudó un montón y me brindó muchísimo
apoyo en este último tramo.

El Tribunal por su tiempo y las correcciones.

Las y los profes que han enseñado más que
una materia.

Las personas de FAMAF que te ayudan a que la
facultad sea más amena.

A la Universidad PÚBLICA, LIBRE Y
GRATUITA!

