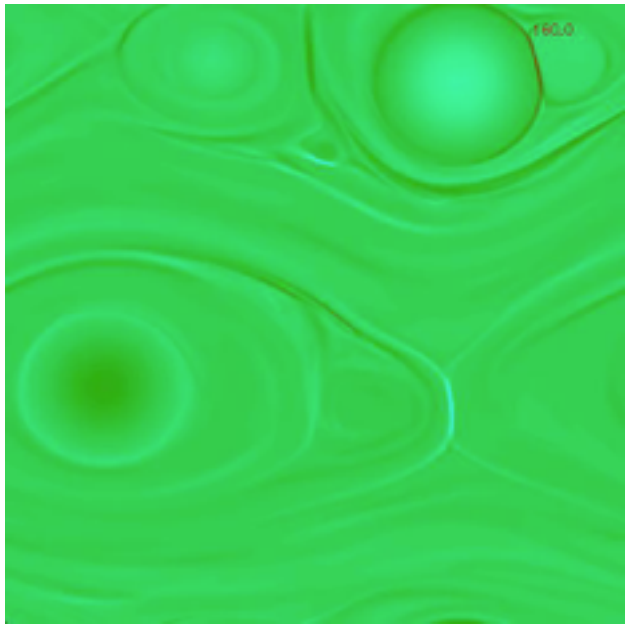
Inestabilidades, shocks y turbulencia en plasmas espaciales y astrofísicos

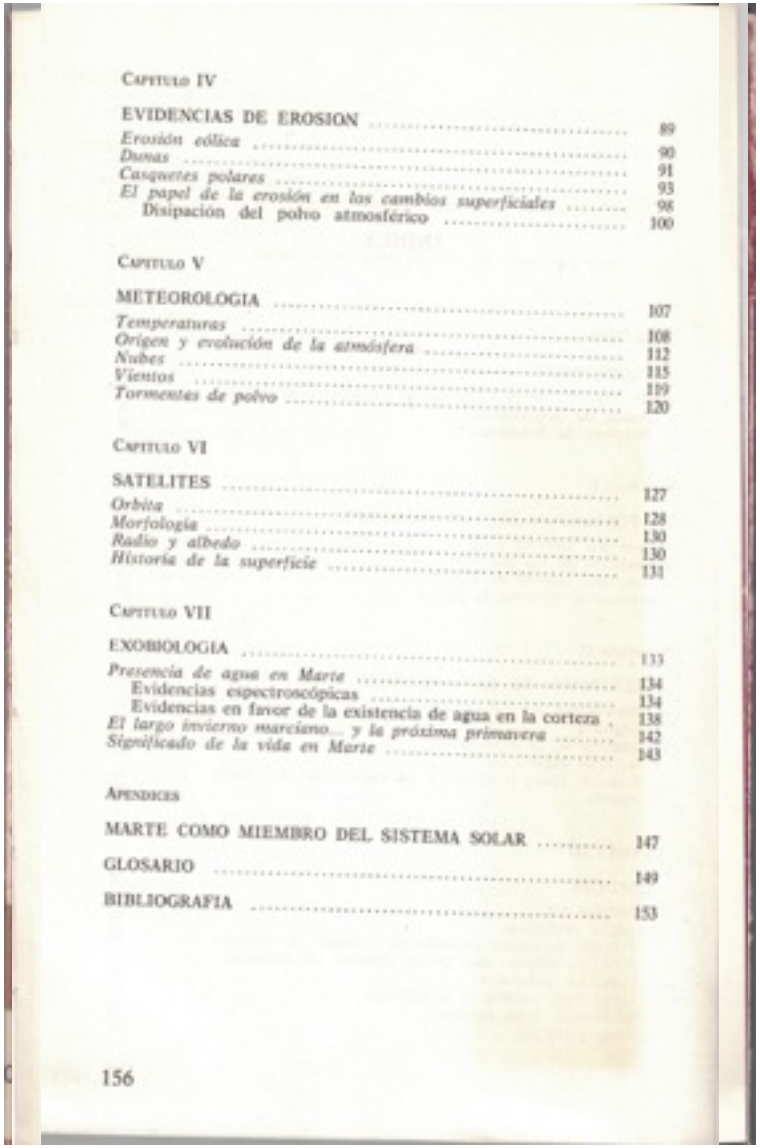
Daniel Gómez



universidad de buenos aires - exactas
departamento de física
Juan José Giambiagi

I A F E
CONICET
U B A

El Dr Sersic



Capitulo IV

EVIDENCIAS DE EROSION 89
Erosión eólica 90
Dunas 91
Casquetes polares 93
El papel de la erosión en los cambios superficiales 98
Disipación del polvo atmosférico 100

Capitulo V

METEOROLOGIA 107
Temperaturas 108
Origen y evolución de la atmósfera 112
Nubes 115
Vientos 119
Tormentas de polvo 120

Capitulo VI

SATELITES 127
Orbita 128
Morfología 130
Radio y albedo 130
Historia de la superficie 131

Capitulo VII

EXOBIOLOGIA 133
Presencia de agua en Marte 134
Evidencias espectroscópicas 134
Evidencias en favor de la existencia de agua en la corteza 138
El largo invierno marciano... y la próxima primavera 142
Significado de la vida en Marte 143

Apendices

MARTE COMO MIEMBRO DEL SISTEMA SOLAR 147
GLOSARIO 149
BIBLIOGRAFIA 153

156

✦ José Luis Sersic es uno de los astrónomos mas prestigiosos y reconocidos en la comunidad astronómica internacional.

✦ Tal vez por su libro sobre *Extragalactic Astronomy*, pero ciertamente no solo por eso.

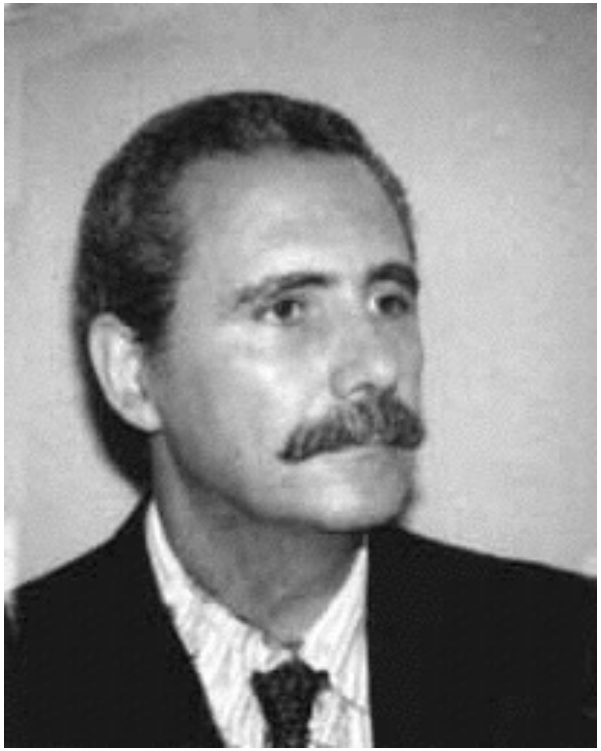
✦ Ha sido tambien un extraordinario divulgador, escribiendo excelentes libros como por ejemplo *La exploración de Marte*.

✦ El libro discute en profundidad y de manera amena una diversidad de disciplinas tales como Astronomía, Meteorología y Exobiología.

El Dr Sersic

- El Dr. Sersic contribuyó activamente a la creación del IAFE, en colaboración con el Dr. Jorge Sahade.
- Contribuyó tambien a la construcción del CASLEO.
- Fundación del Instituto de Astronomía Teórica y Experimental.

Ferro



✦ El Dr. Constantino Ferro Fontán fue un prestigioso físico teórico de la UBA. Profesor del Departamento de Física e investigador del Instituto de Física del Plasma.

✦ Alrededor suyo se desarrolló y creció el Grupo de Plasmas Astrofísicos, esencialmente en el IAFE. Varios de nosotros nos formamos bajo su supervisión, y yo heredé la dirección del grupo desde su temprano fallecimiento en 2006.

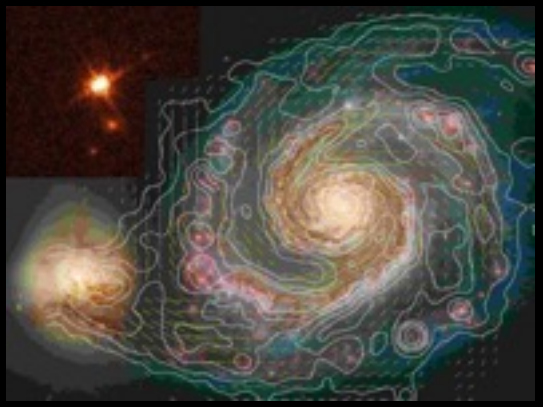
Virpi

- La Dra. Virpi Niemela fue quien me enseño Astronomía, a través de la dirección de mi Tesis de Licenciatura.

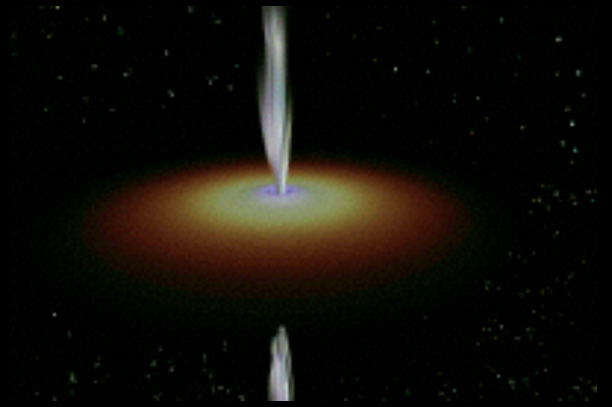
- En la foto aparecen algunos de sus discípulos del IAFE en la reunión de AAA de 2004.

Plasmas astrofísicos

Medio interestelar

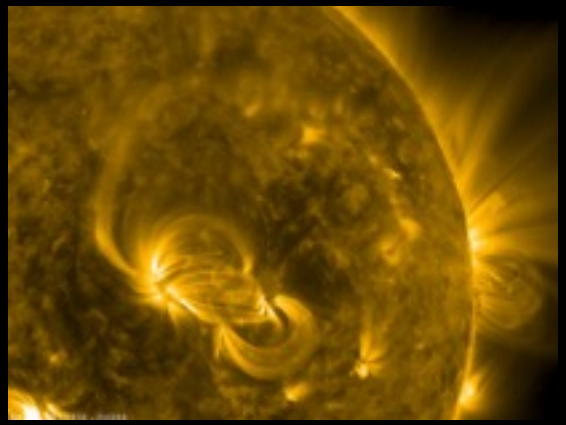


Galaxias

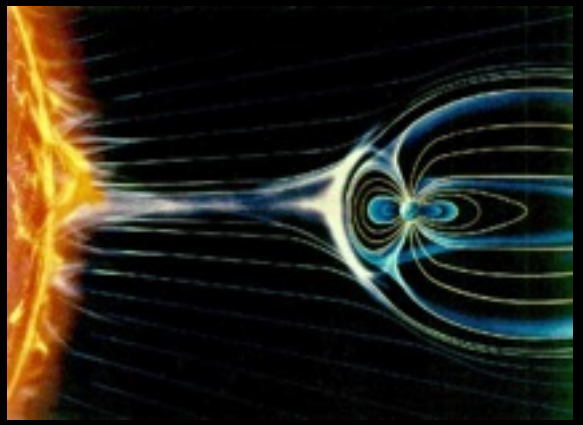


Jets y discos de acreción

Plasmas espaciales



Sol y estrellas



Viento solar y magnetosferas planetarias

Atmósfera terrestre

Que es la MHD?

- Es una descripción fluidística para la dinámica de la materia.
- La materia bariónica en el Universo es esencialmente hidrógeno. A T >10^4 K se tiene un plasma de hidrógeno, es decir, un gas de electrones y protones.
- El comportamiento de gran escala puede describirse por la ecuación de Navier-Stokes.
- Este fluido de partículas cargadas, sufre desde luego fuerzas eléctricas y magnéticas. A su vez, las cargas son la fuente de estos campos eléctricos y magnéticos. Por lo tanto, la ecuación del fluido se acopla con ecuaciones de Maxwell.
- Las ecuaciones MHD describen la dinámica del campo de velocidades y magnético

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\vec{\nabla} \bullet (\rho \vec{u}) \qquad p = p_0 (\frac{\rho}{\rho_0})^{\gamma}$$

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\rho (\vec{u} \bullet \vec{\nabla}) \vec{u} - \vec{\nabla} p + \frac{1}{4\pi} (\vec{\nabla} \times \vec{B}) \times \vec{B} + \vec{F}_{ext} + \vec{\nabla} \bullet \vec{\sigma}_{visc}$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \vec{\nabla} \times (\vec{u} \times \vec{B}) + \eta \nabla^2 \vec{B}, \qquad \vec{\nabla} \bullet \vec{B} = 0$$

- La ecuación de inducción resulta de la ley de Ohm y de la ecuación de Faraday.

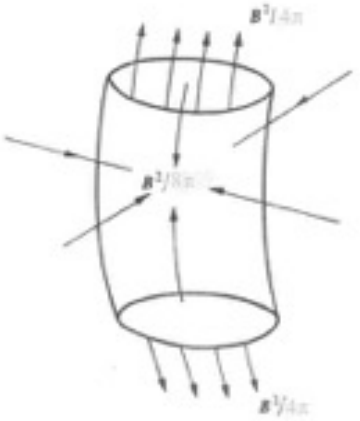
$$\vec{E} + \tfrac{1}{c} \vec{u} \times \vec{B} = \frac{1}{\sigma} \vec{J}, \qquad \eta = \frac{c^2}{4\pi\sigma}$$

- A escalas pequeñas, aparecen efectos no hidrodinámicos que deben ser tenidos en cuenta.

Efectos MHD

- La fuerza magnética puede descomponerse en …

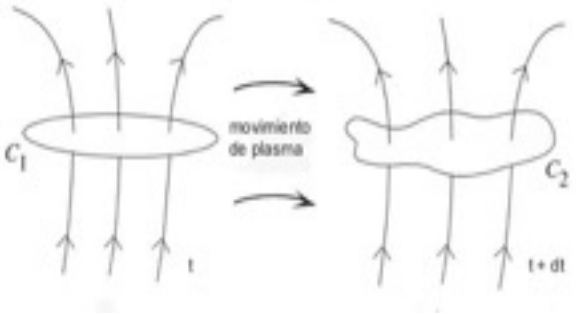
$$\frac{1}{4\pi}(\vec{\nabla}\times B)\times B=\frac{1}{4\pi}(B\cdot\vec{\nabla})B-\vec{\nabla}\left(\frac{B^2}{8\pi}\right)$$



… tensión y presión magnética.

- En el límite de resistividad eléctrica despreciable …

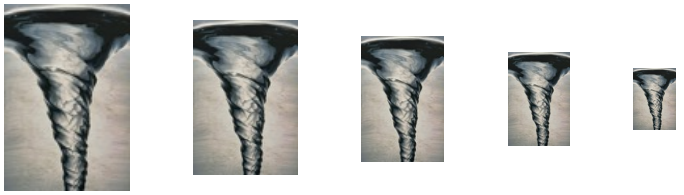
$$\frac{\partial B}{\partial t}=\vec{\nabla}\times(u\times B)$$

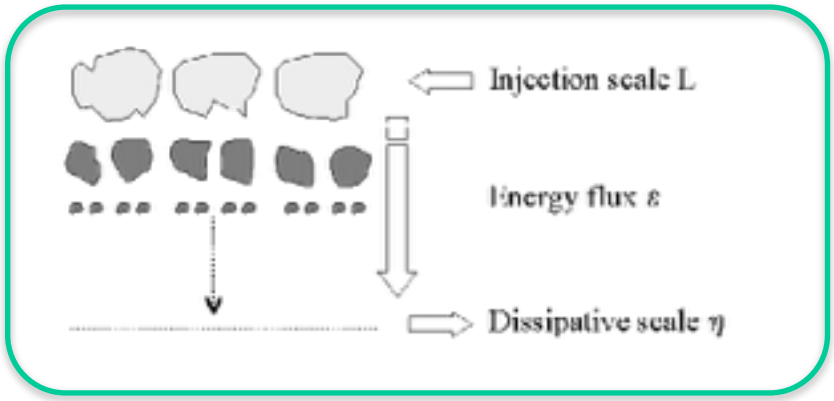


… congelamiento campo-materia.

- En el límite ideal (sin disipación) las ecuaciones MHD exhiben invariancia de escala (r → a.r).
- Al considerar disipación (viscosa o resistiva), se introduce una longitud de disipación muy pequeña.
- A escalas mayores, la invariancia de escala es consistente con la presencia de vórtices de todos los tamaños

Turbulencia MHD

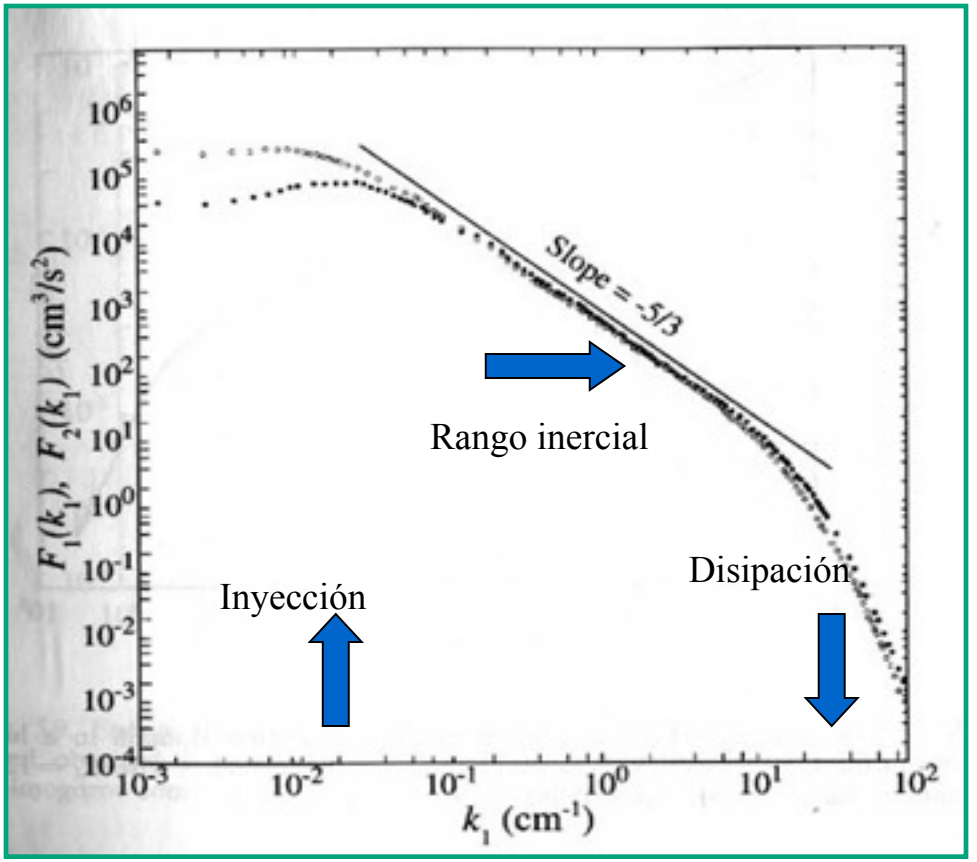




- Cascada de energía
  - flujo de energía hacia alto k → $\varepsilon_k \approx \frac{u_k^2}{\tau_k}$
  - ruptura de vórtices

$$\tau_k \approx \frac{1}{k u_k} \quad , \quad \varepsilon_k \approx \frac{u_k^2}{\tau_k} = const.$$

- Invariancia de escala
  - Flujo de energía en k
  - Espectro de energía → $E_k \approx \frac{u_k^2}{k}$
- Entonces →

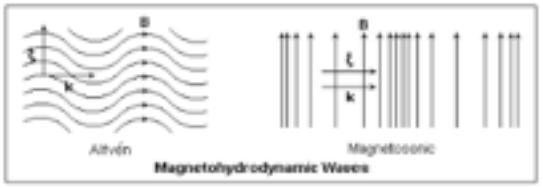


Espectro de Kolmogorov (K41)

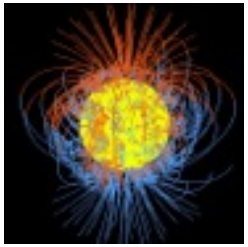
$$E_k \approx \frac{u_k^2}{k} = \varepsilon^{\frac{2}{3}} k^{-\frac{5}{3}}$$

Aplicaciones de la MHD

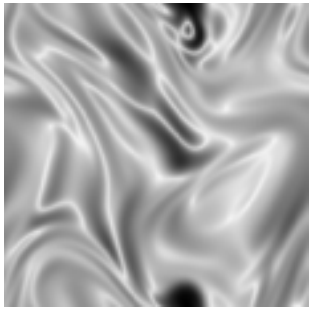
Con este nivel de descripción, hay un número importante de aplicaciones que se han estudiado tradicionalmente en la literatura, tales como



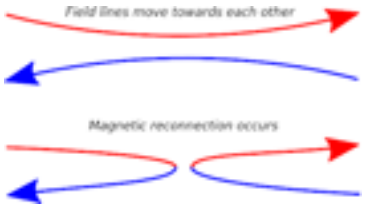
- Inestabilidades y propagación de ondas de Alfven y magnetosónicas
  - Gómez et al. 2016, ApJ
  - Gómez et al. 2014, PRE
  - Bejarano et al. 2011, ApJ



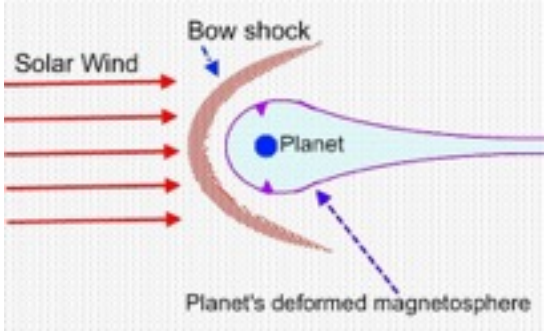
- Mecanismos de dínamo para generar campos magnéticos
  - Mininni et al. 2003, ApJ
  - Mininni et al. 2005, ApJ
  - Gómez et al. 2010, PRE



- Turbulencia MHD
  - Gómez & FFontán 1988, Solar Phys
  - Dmitruk & Gómez 1997, ApJ
  - Dmitruk & Gómez 1999, ApJ

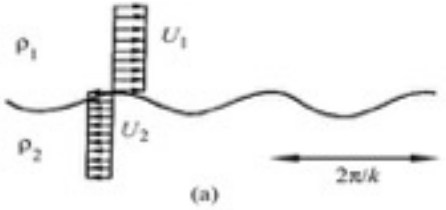


- Reconexión magnética
  - Morales et al. 2005, JGR
  - Morales et al. 2006, Adv. Sp. Res.
  - Andrés et al. 2014a, PoP



- Generación y propagación de shocks
  - Gómez et al. 2017, ApJ, in prep.

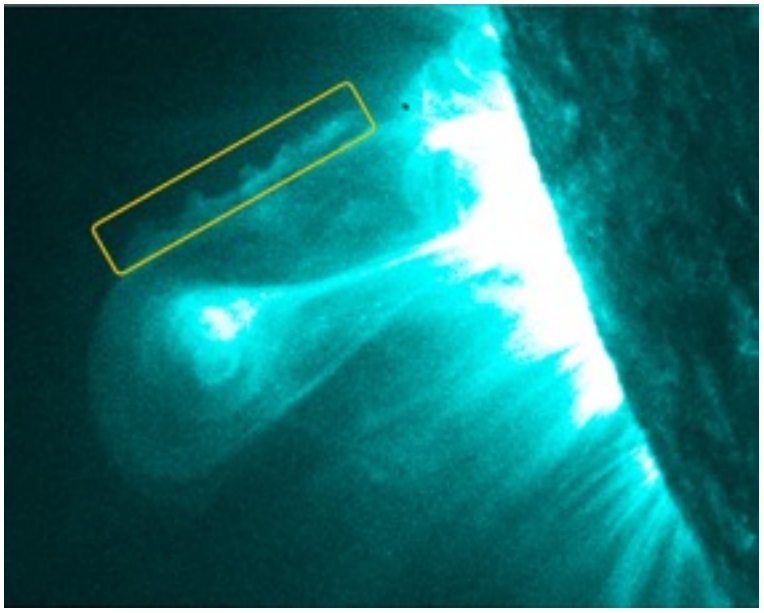
Kelvin-Helmholtz en la corona solar

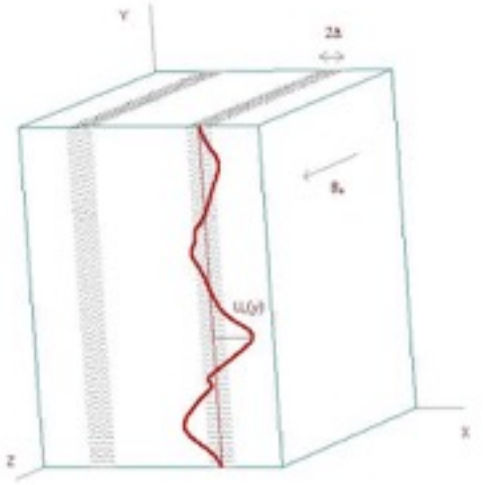


✦ Kelvin-Helmholtz es una inestabilidad macroscópica que se origina en fuertes gradientes de velocidad. Las longitudes de onda inestables son una docena de veces el espesor de la interfase.

✦ Foullon et al 2011 observaron patrones KH en imágenes UV (AIA/SDO) de la corona solar. Se observó en uno de los flancos de una CME expandiéndose en la atmósfera coronal.

✦ La tasa de crecimiento medida es mas alta que la teórica.

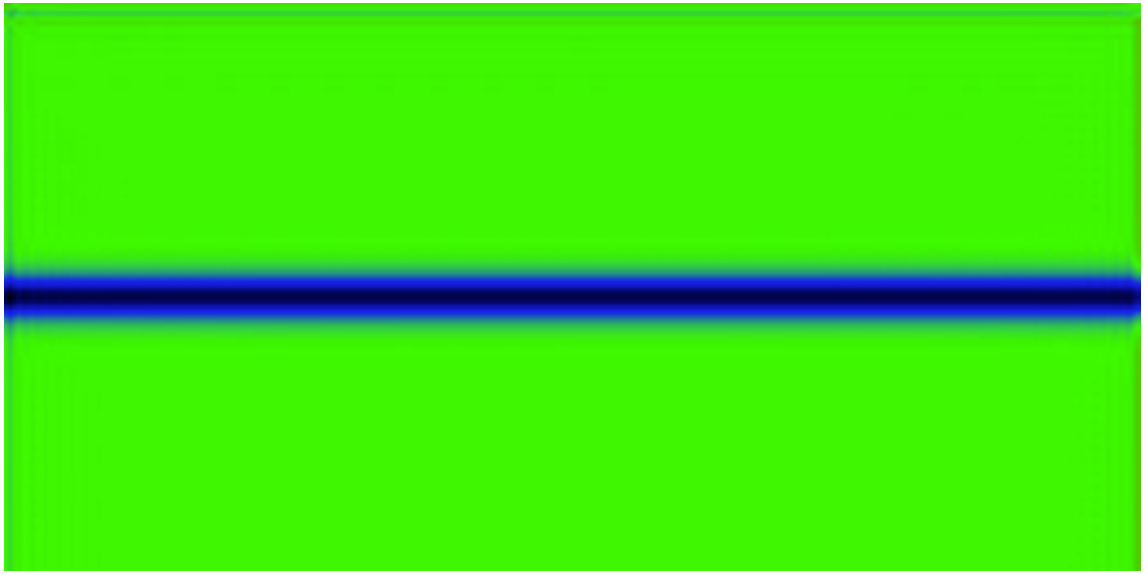




✦ La naturaleza turbulenta de la atmósfera coronal se evidencia en el ancho de líneas espectrales de 50-60 km.s^{-1}.

✦ Realizamos simulaciones MHD 3D que combinan el flujo inestable KH en la macroescala con la turbulencia en escala micro, usando parámetros compatibles con las observaciones.

✦ Utilizando intensidades de turbulencia consistentes con los anchos espectrales medidos, obtuvimos tasas de crecimiento para la inestabilidad compatibles con las observaciones (Gomez et al, ApJ, 2016)



Pequeña escala: plasma multi-especie

- Un modelo multi-especies incorpora física nueva y nuevas escalas espaciales y temporales.
- Para cada especie s tenemos (Goldston & Rutherford 1995):
  - Conservación de masa $\frac{\partial n_s}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (n_s \vec{U}_s) = 0$
  - Ecuación de movimiento $m_s n_s \frac{d\vec{U}_s}{dt} = q_s n_s (\vec{E} + \frac{1}{c}\vec{U}_s \times \vec{B}) - \vec{\nabla} p_s + \vec{\nabla} \bullet \vec{\sigma}_s + \sum_{s'} \vec{R}_{ss'}$
  - Tasa de intercambio de momento $\vec{R}_{ss'} = -m_s n_s \upsilon_{ss'} (\vec{U}_s - \vec{U}_{s'})$
- Las cargas en movimiento actúan como fuente de campos eléctrico y magnético:
  - Densidad de carga $\rho_c = \sum_s q_s n_s \approx 0$
  - Densidad de corriente $\vec{J} = \frac{c}{4\pi} \vec{\nabla} \times \vec{B} = \sum_s q_s n_s \vec{U}_s$
- En el límite incompresible: $n_s = 0$ $\qquad \vec{\nabla} . \vec{U}_s = 0$
- En el caso mas simple de un plasma de dos fluidos (iones y electrones), esta descripción introduce dos escalas espaciales (Andrés, Dmitruk & Gómez 2014a, PoP)

$\lambda_i = \frac{c}{w_{pi}} = \sqrt{\frac{m_i c^2}{4\pi e^2 n}}$ longitud inercial de iones

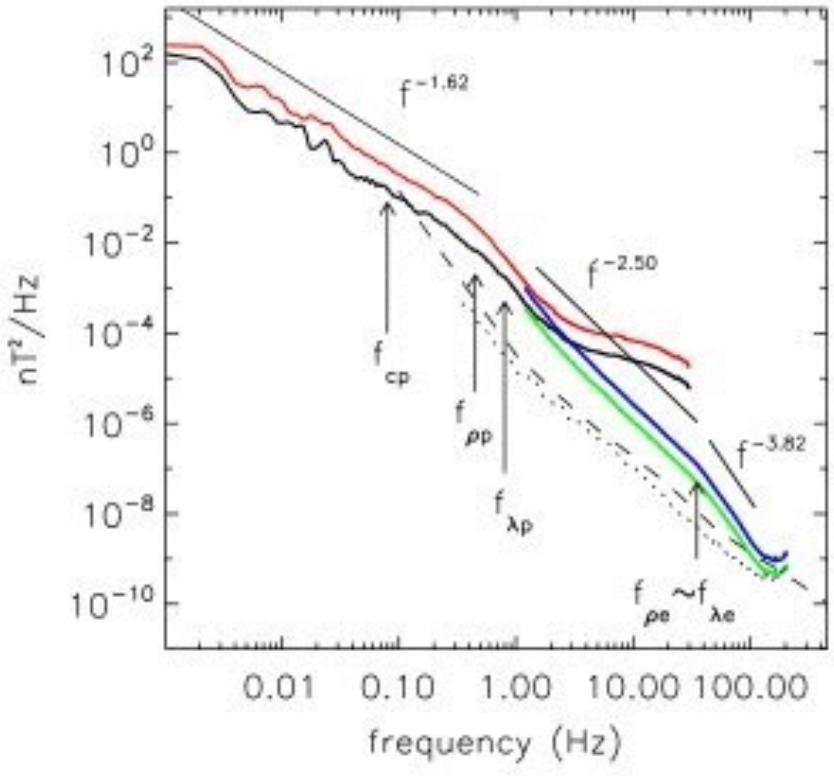
$\lambda_e = \frac{c}{w_{pe}} = \sqrt{\frac{m_e c^2}{4\pi e^2 n}}$ longitud inercial de electrones

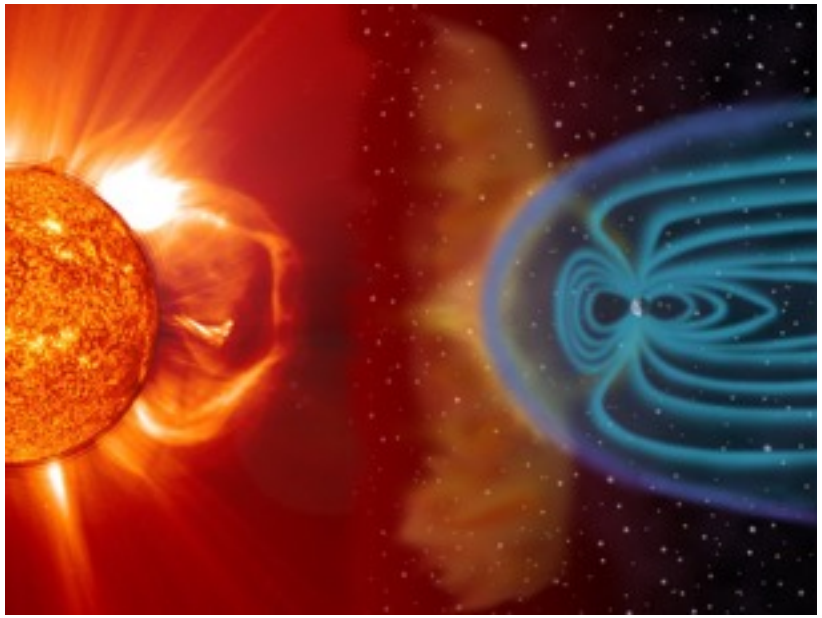
Turbulencia en el viento solar

✦ El viento solar es un flujo de plasma que se origina en la atmósfera del Sol e impacta sobre las magnetosferas planetarias.

✦ Innumerables estudios con mediciones in-situ desde los años 70 (Belcher & Davis 1971) mostraron un espectro de energía del viento solar compatible con K41.

✦ Sahraoui et al. 2009 usaron magnetogramas de la misión Cluster para obtener el espectro de energía magnética.





✦ Combinaron datos de baja cadencia del magnetómetro FGM (componentes **paralela** y **perpendicular**) con los de alta cadencia de STAFF-SC (**paralela** y **perpendicular**).

✦ En la macro-escala obtuvieron un espectro de energía consistente con K41 ($k^{-1.62}$).

✦ A escalas menores identificaron dos quiebres, un rango intermedio con ley de potencias $k^{-2.50}$, y en la micro-escala un espectro con pendiente mas pronunciada ($k^{-3.82}$).

Turbulencia de dos fluidos

- Estos quiebres en el espectro no pueden explicarse en el marco de la MHD.
- Realizamos simulaciones de las ecuaciones de dos fluidos con resolución 3072x3072. Partimos de una condición inicial con toda la energía en la macro-escala y dejamos evolucionar el sistema y que se desarrolle la cascada (Andres et al. 2014,b PoP).

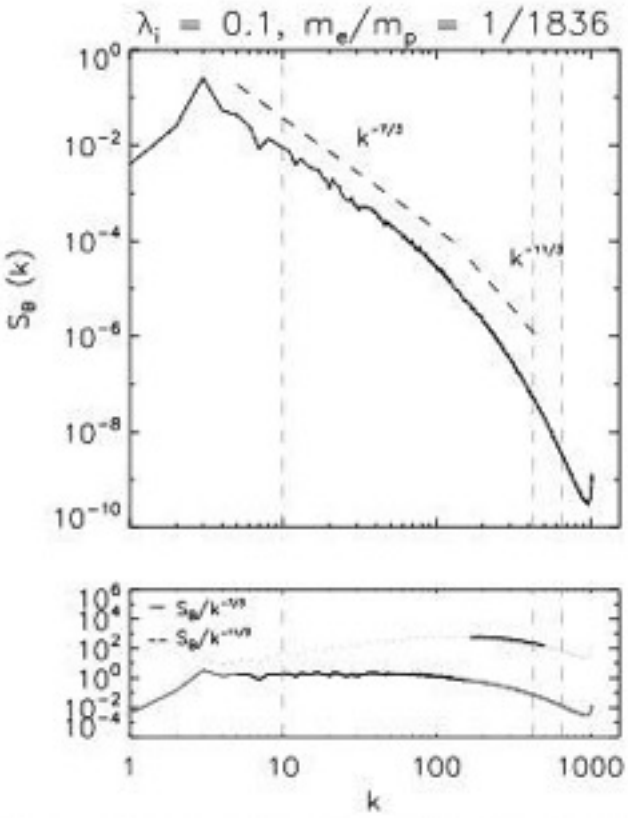
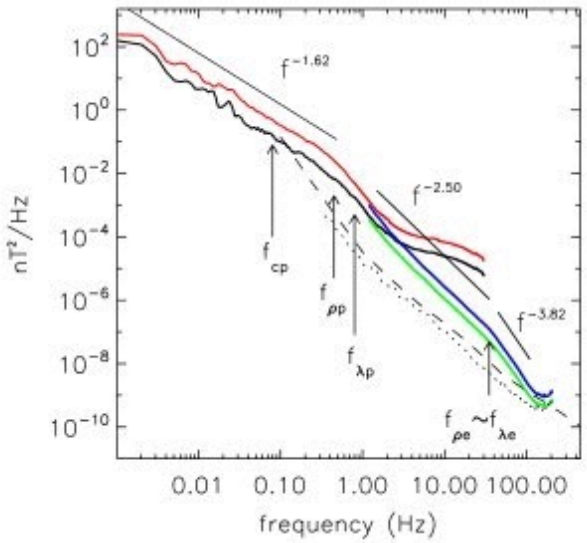


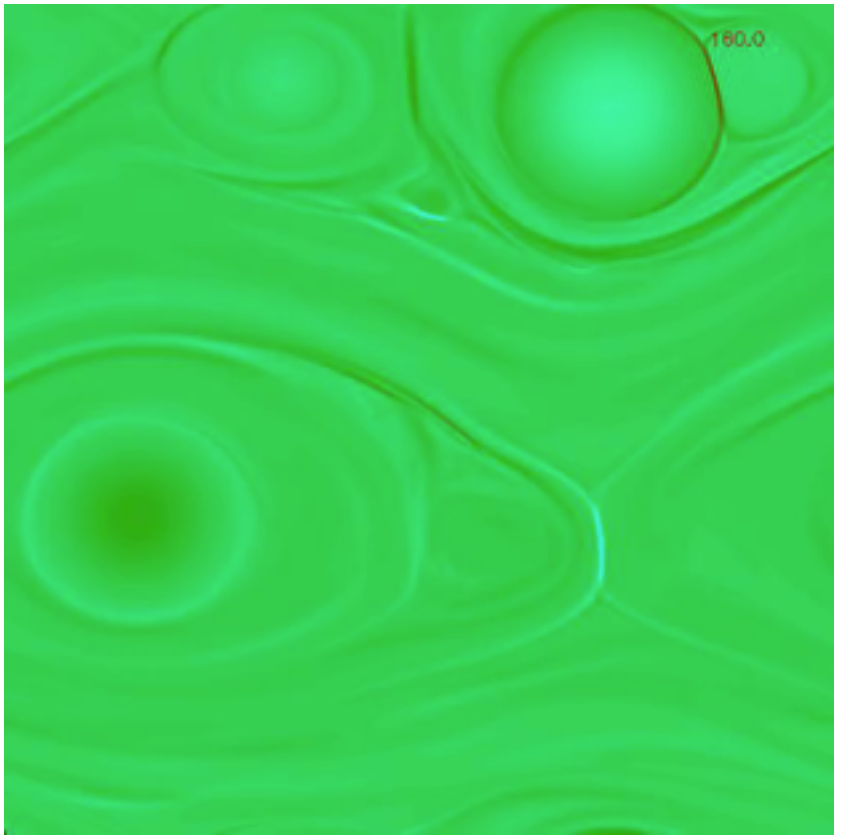
FIG. 3. Magnetic energy spectra for $m_e/m_p = 1/1836$. Vertical dashed gray lines correspond to $k_{\lambda_i} \sim 10$, $k_{\lambda_e} \sim 430$, and $k_{\nu} \sim 650$. The compensated spectrum for the HMHD (gray line) and EHMHD (green line) regions in the same format as Figure 2.



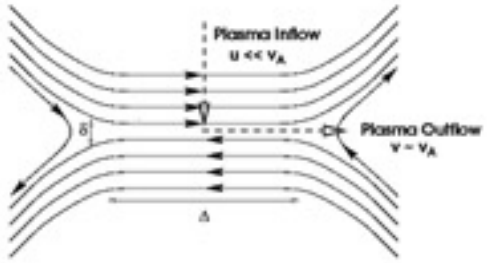
- El espectro numérico de energía magnética muestra dos quiebres, aprox. en las escalas de inercia de protones (k_p) y de electrones (k_e).
- El espectro a escalas grandes es K41 (i.e. $k^{-5/3}$) a $k << k_p$.
- A escalas intermedias ($k_p << k << k_e$) es $k^{-7/3}$.
- A escalas menores que la de electrones ($k_e << k$) se tiene $k^{-11/3}$.
- Todos estos rangos inerciales pueden confirmarse usando argumentos tipo Kolmogorov con una tasa de transferencia de energía dada por

$$F_k \simeq k(u_k^3 + u_k B_k B_k' + (1-\delta)\lambda J_k B_k B_k' + (1-\delta)\delta\lambda^2 \partial_z J_k B_k).$$

Reconexión magnética



✦ La teoría standard de reconexión MHD es el llamado **modelo de Sweet-Parker model** (Parker 1958)



✦ Sweet-Parker predice una tasa de reconexión (E_z en el centro) que escala como la raíz de la resistividad del plasma.

✦ Excesivamente lenta para problemas espaciales o astrofísicos.

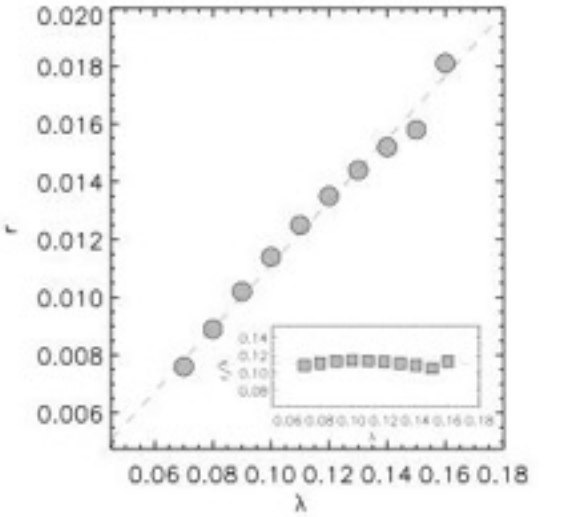


FIG. 6. Quasi-stationary reconnection rate r (gray circles) as a function of the Hall parameter λ. The best linear-fit for $\log\lambda - \log r$ is shown in gray-dashed line. Inset: Ratio between quasi-stationary reconnection rates and the Hall parameter (gray squares) as a function of the Hall parameter.

✦ La figura muestra la tasa de reconexión para simulaciones de dos fluidos con distintos valores de la longitud inercial de protones (Andrés et al. 2016, PoP).

✦ El campo Ez en estado estacionario puede aproximarse por $E_z = -\frac{m_e}{e}\hat{z}\,.\,\vec{u}_e\,x\,\vec{w}_e$

donde $\vec{u}_e \sim -\frac{1}{e\,n}\vec{j}$

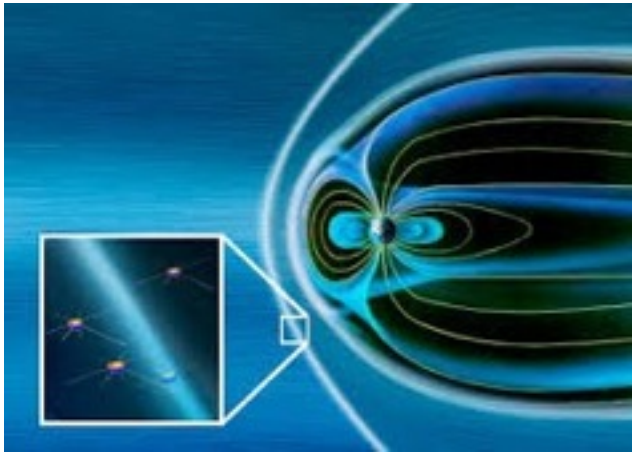
✦ La tasa de reconexión en esta descripción resulta entonces proporcional a la longitud inercial de protones y es independiente de la resistividad.

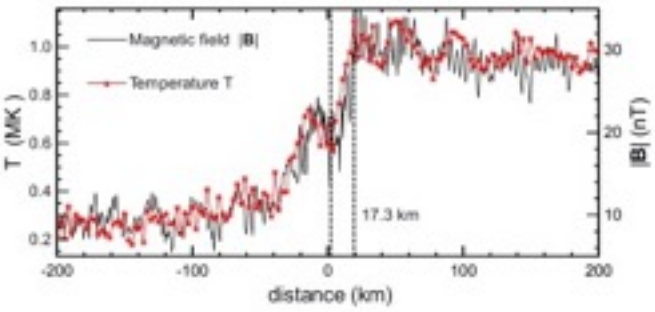
$$R = \frac{c\,E_z}{B_0\,v_A} \sim \frac{c}{w_{pi}\,L_0}$$

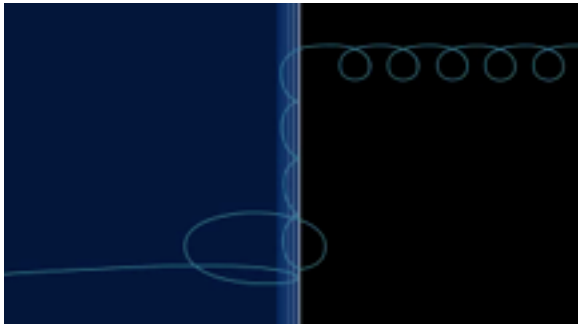
✦ Este régimen es entonces de reconexión rápida.

Shocks astrofísicos y espaciales

- Los shocks son una importante fuente de calentamiento y compresión de plasmas astrofísicos y espaciales, y también de aceleración de partículas.
- Debido a la muy baja colisionalidad, el espesor es determinado por procesos de plasma.
- Se forman por ejemplo durante la explosión de supernovas, al propagarse el frente esférico supersónico en el medio interplanetario, o también como consecuencia de la interacción del viento solar con los planetas.
- Si bien la estructura de gran escala del plasma a cada lado del shock puede describirse con MHD, la estructura interior involucra escalas mucho mas pequeñas.
- La imagen inferior muestra la estructura transversal del shock terrestre obtenida por mediciones in-situ. El espesor medido es mucho mas delgado de lo que se suponía (Schwarz 2011).





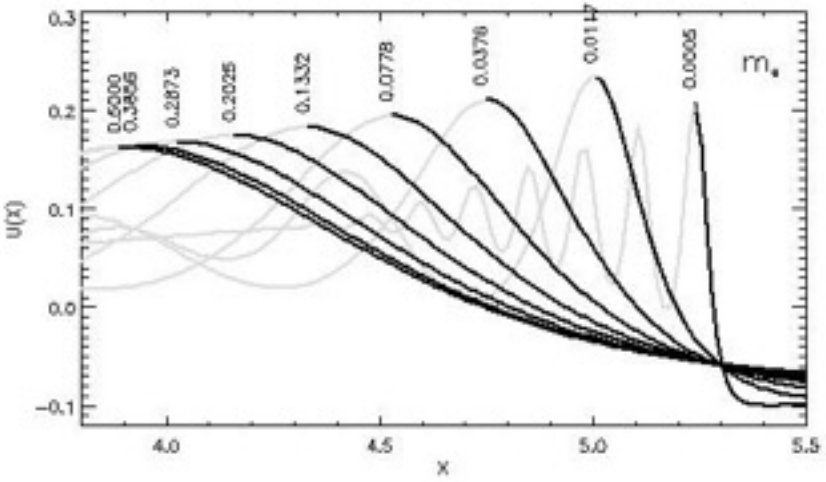


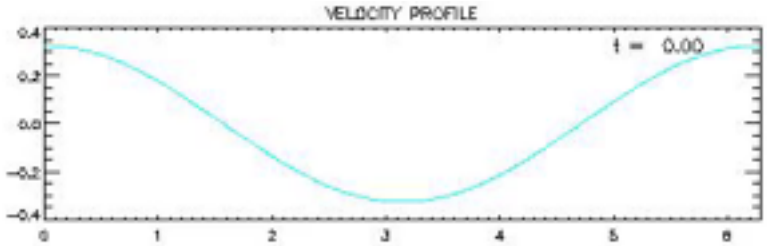
Shocks quasi-perpendiculares

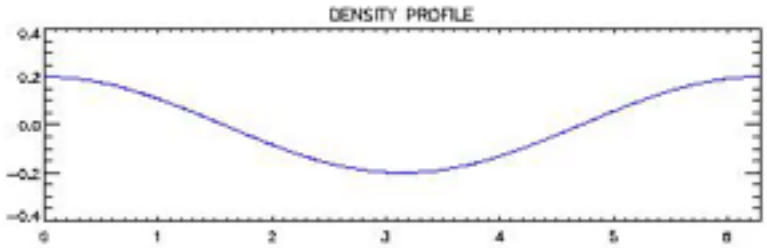
- Desarrollamos un modelo de dos fluidos para estudiar la generación del shock, así como su estructura transversal y propiedades de propagación. (Gomez et al 2017, ApJ, en prep.)

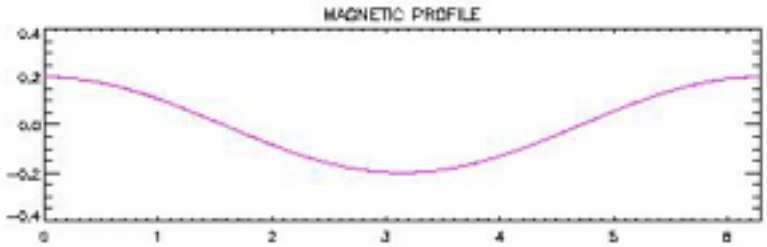
- La simulación muestra los perfiles de velocidad longitudinal, densidad y campo magnético perpendicular, a partir de una onda magnetosónica rápida de amplitud finita.

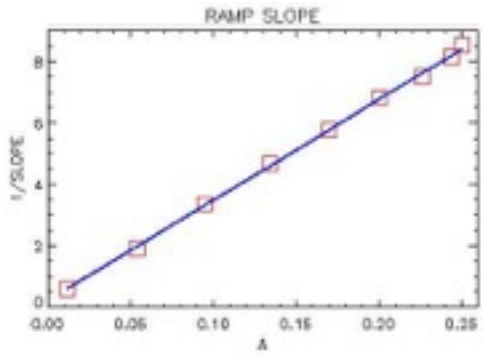
- Identificamos la pendiente de la rampa para varias simulaciones con distinto cociente de masas y comprobamos que el espesor escala con la longitud inercial de electrones.











Conclusiones

- Presentamos la descripción MHD como el marco teórico tradicional de los plasmas espaciales y astrofísicos.

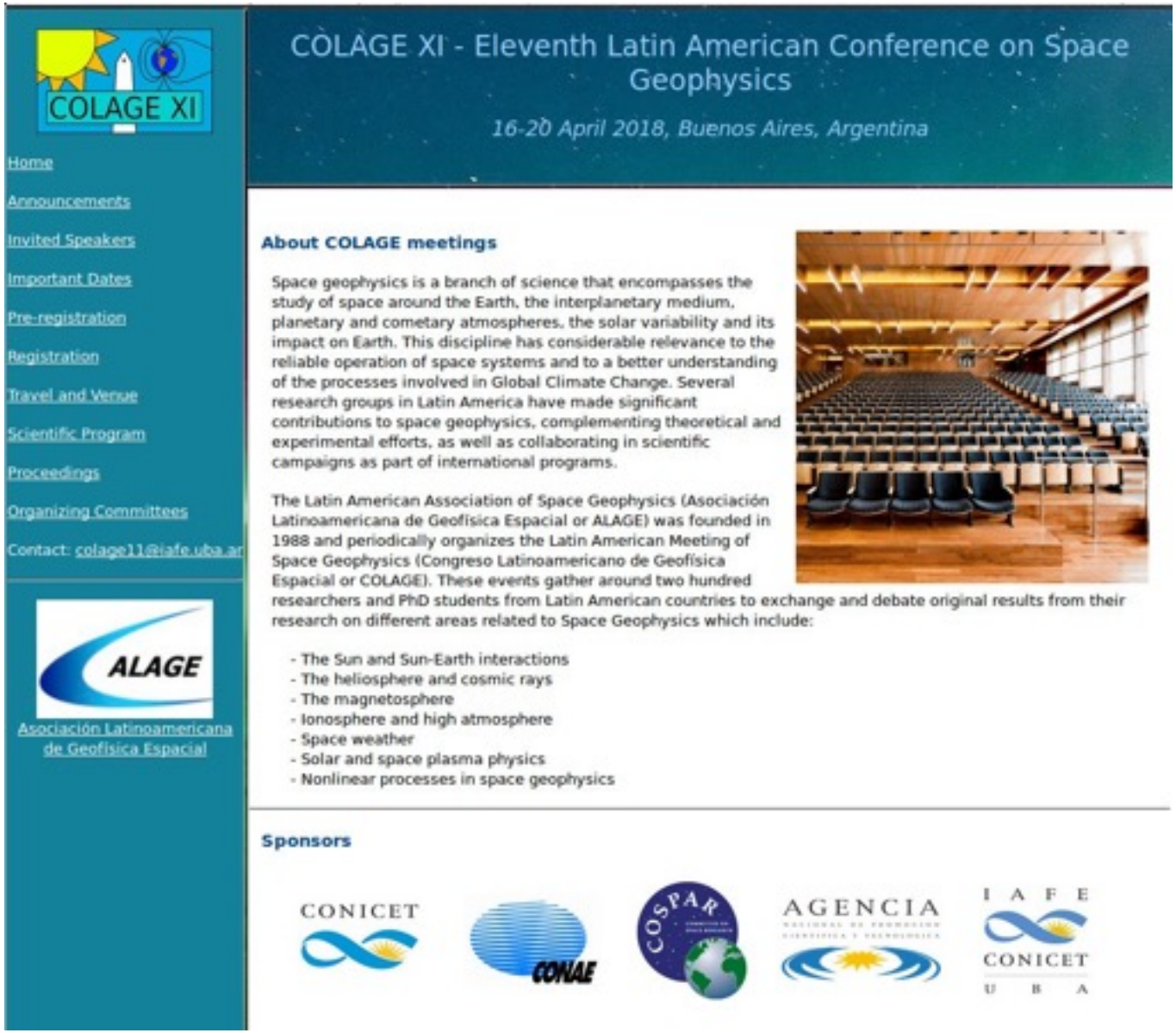
- Entre las aplicaciones MHD en las que hemos trabajado se cuentan: inestabilidades, efecto dínamo, turbulencia, reconexión magnética, y shocks.

- Mostramos la relevancia del modelo de dos fluidos para mostrar nuevos fenómenos en las escalas inerciales de iones y electrones.

- Presentamos aplicaciones a:

  - turbulencia → los quiebres observados en el espectro de energía del viento solar
  - reconexión → aparición de régimen de reconexión rápida
  - shocks → espesor del choque controlado por el cociente de masas

- Los trabajos presentados se realizaron en colaboración con Pablo Dmitruk, Pablo Mininni, Nahuel Andrés, Laura Morales, Carlos González, Cesar Bertucci, …



Mas info en: http://www.iafe.uba.ar/colage11/