

LOS RAYOS CÓSMICOS ANÓMALOS: EL CORRIMIENTO EN SU ESPECTRO DE ENERGÍA

Dr. Oscar G. Morales Olivares

Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas



CONTENIDO:

- El Sol
 - Estructura interna
 - La atmosfera
- La Heliosfera
 - Estructura
 - Campo magnético
- Los Rayos C3smicos
 - Componentes de la radiaci3n c3smica
 - Fuentes
- Modulaci3n Solar de los Rayos C3smicos
 - Procesos f3sicos
 - La ecuaci3n de transporte
- Conclusiones

Intergalactic Magnetic Field

Neutrino

Photon

Proton

Heavy Nucleus



el SOL

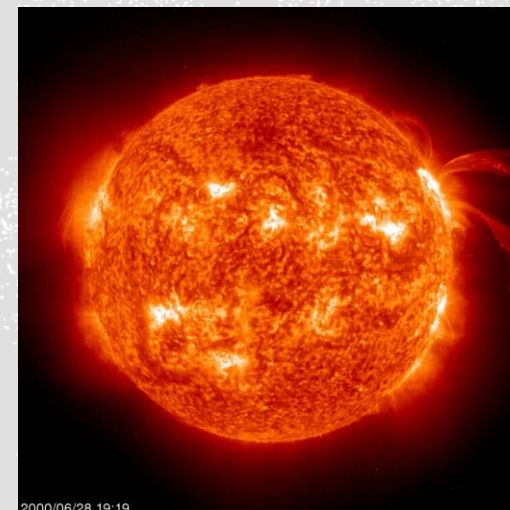
capas a escala



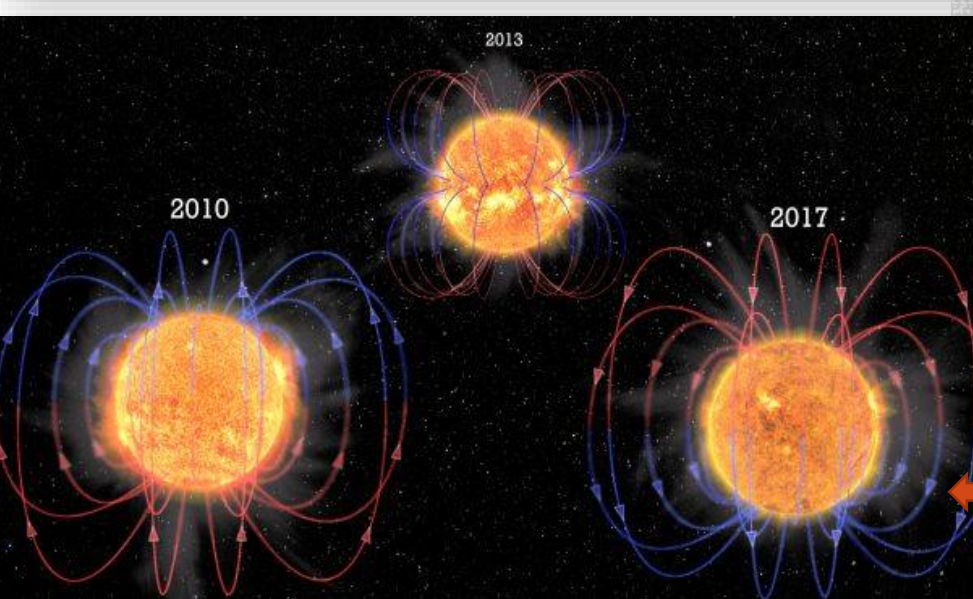
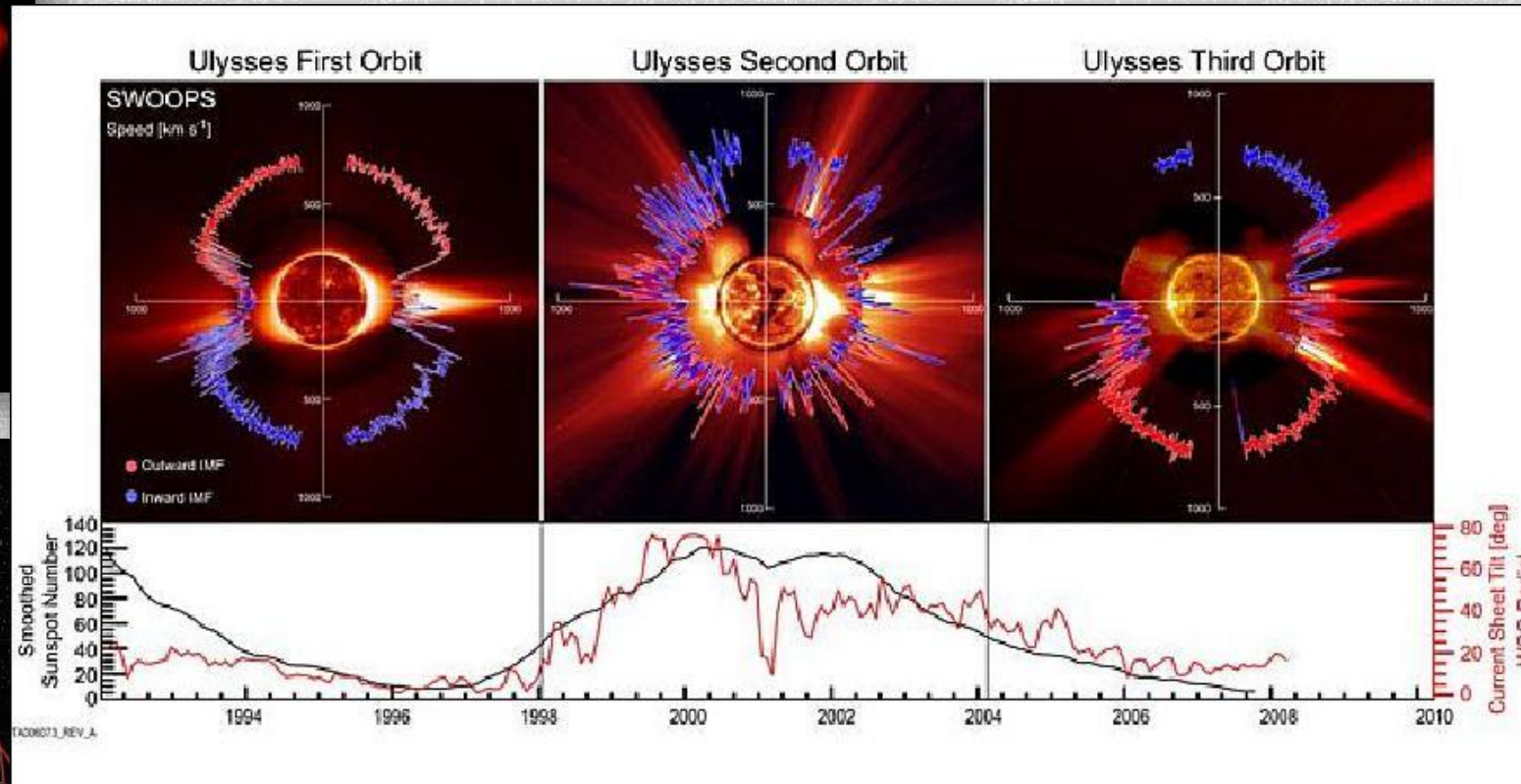
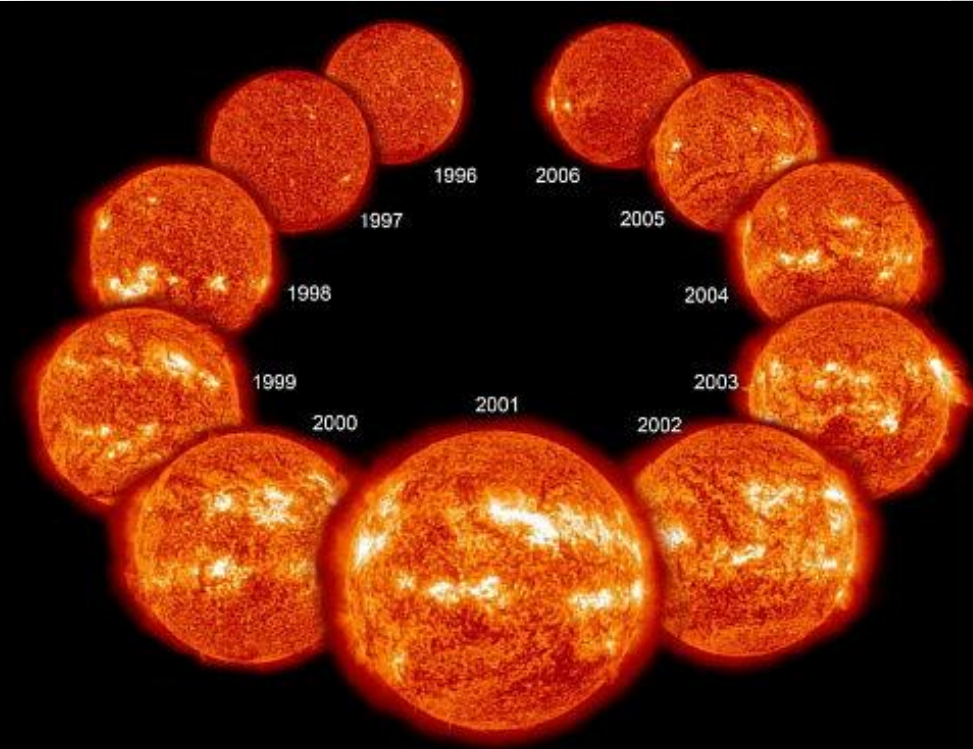
EL SOL

- Estrella Tipo G
- Diámetro 1391016 km
- Temperatura superficial ~5700 K
- Masa 19891×10^{30} kg
- Densidad 1411 kg/m^3

▪ ...



LA ACTIVIDAD SOLAR



Inversión en la polaridad del campo magnético



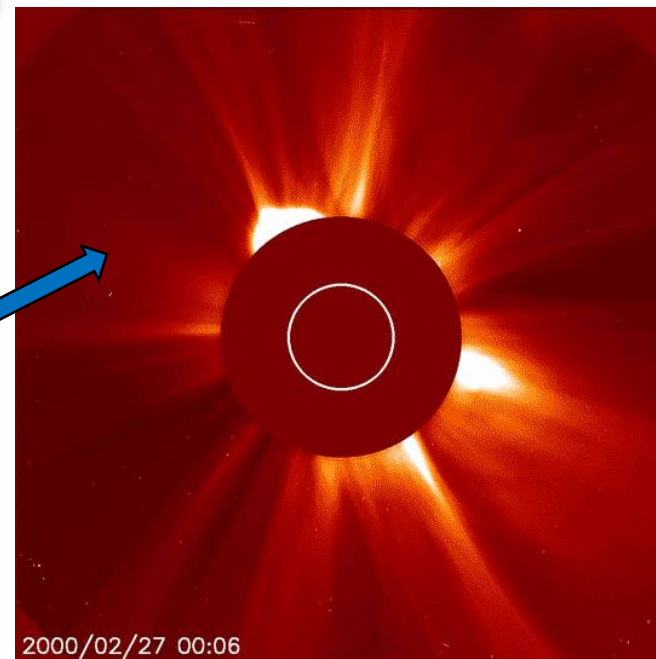
LA ATMOSFERA SOLAR — LA CORONA

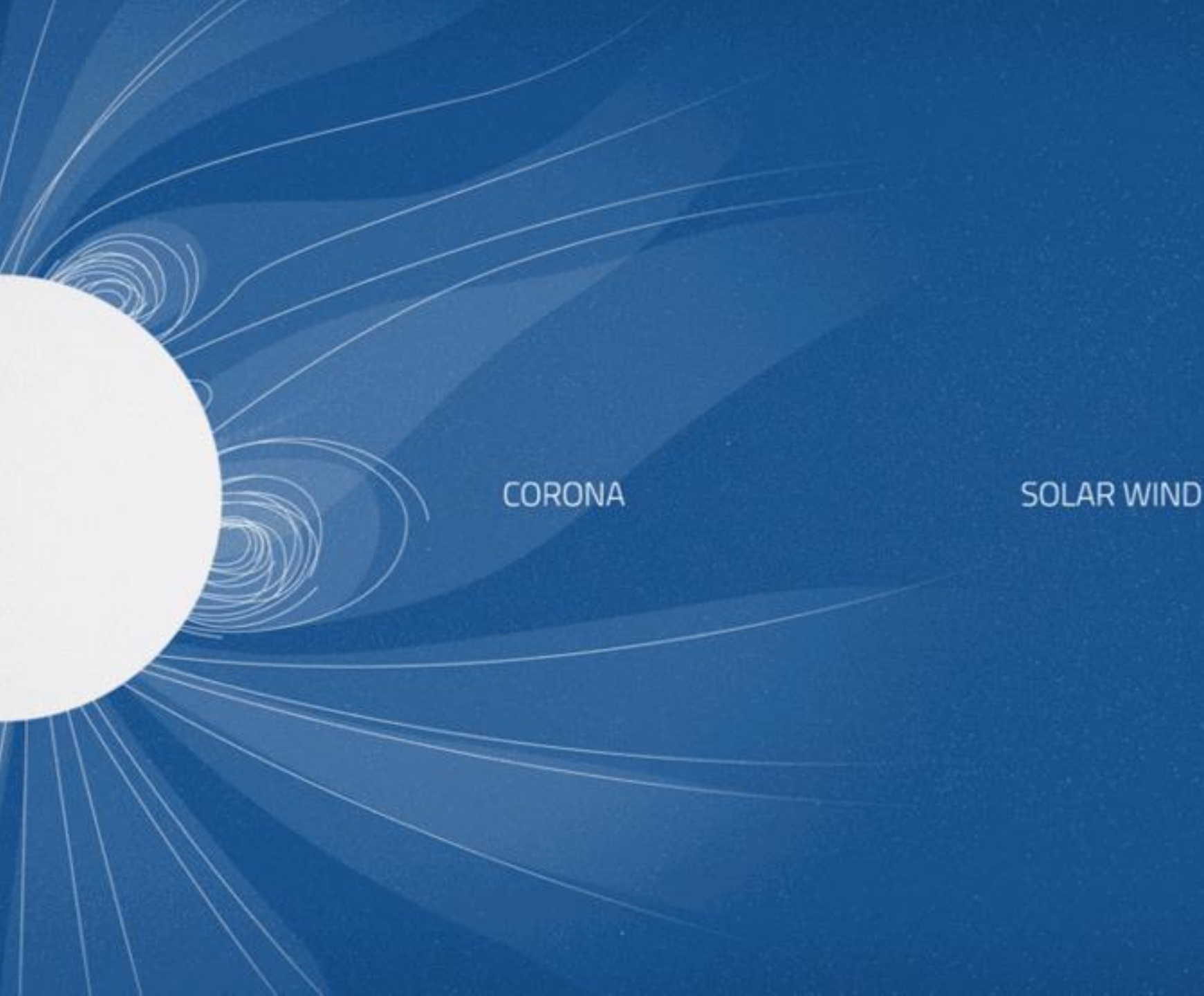


S. Habbal, M. Druckmüller and P. Aniol



Eyección de masa coronal

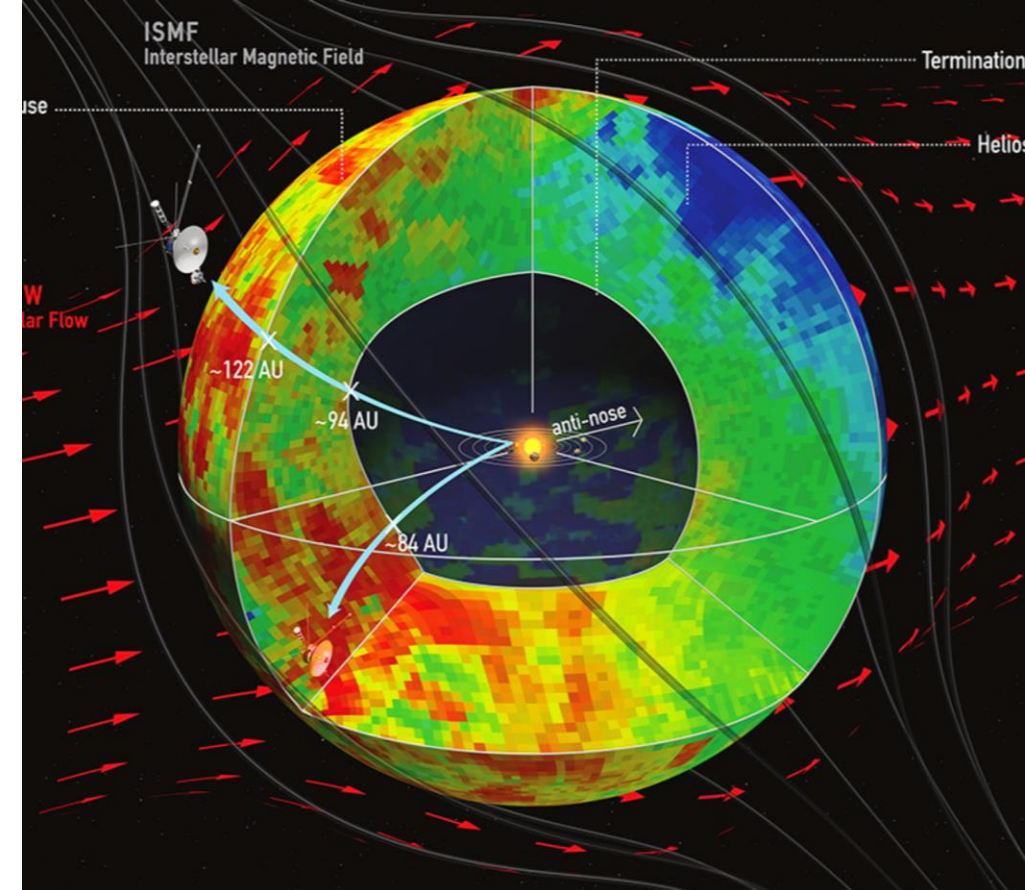
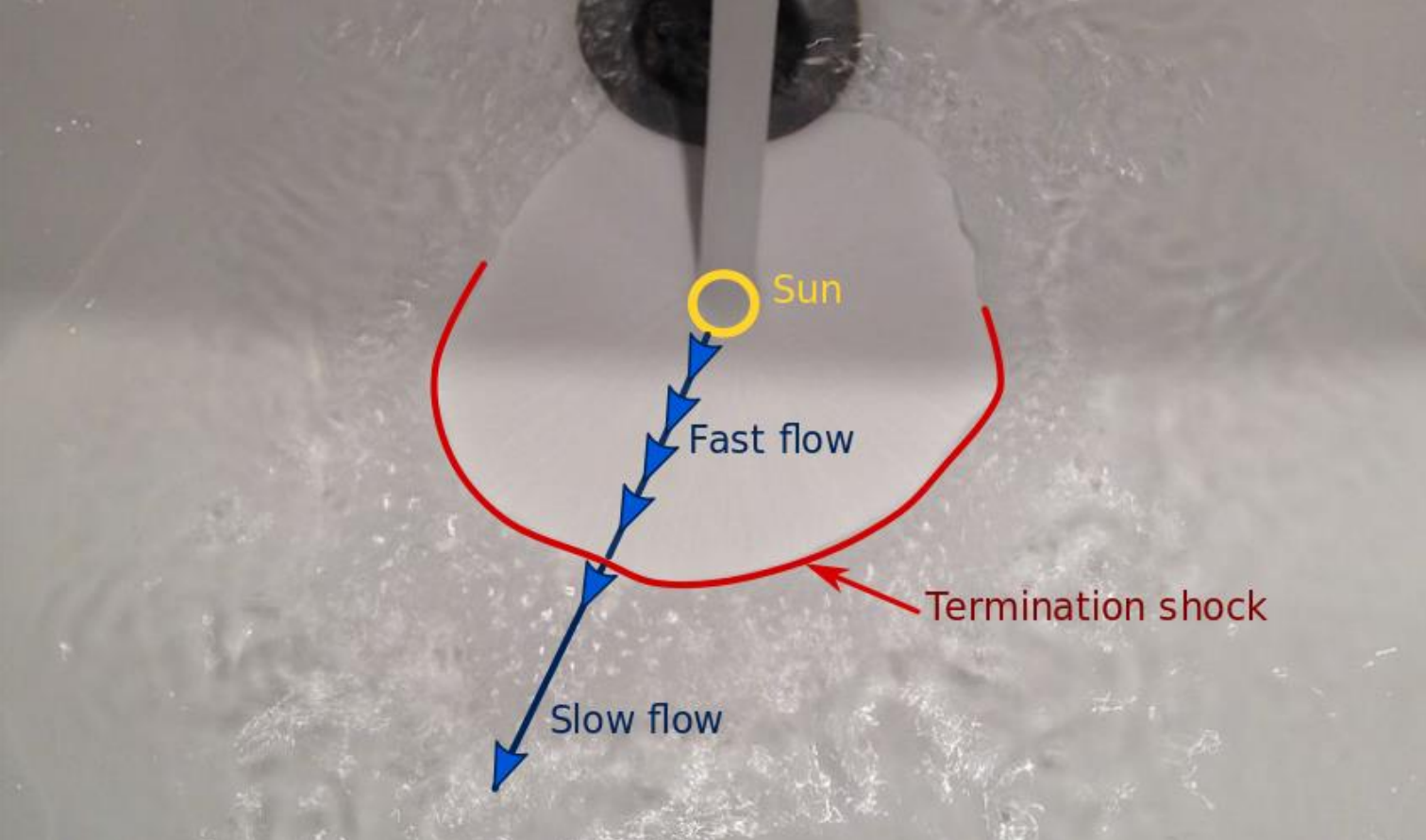




LA EXPANSIÓN DE LA CORONA: EL VIENTO SOLAR

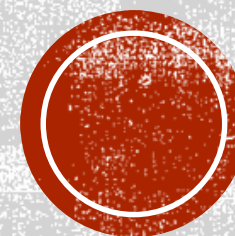
- La presión magnética ya no puede competir con la presión dinámica.
- El plasma de la corona fluye radialmente y a velocidad supersónica formando al Viento Solar (VS).
- El campo magnético del Sol fluye “congelado” en el VS.
- Hay dos tipos de flujos:
 - VS Rápido ~ 800 km/s
 - VS Lento ~ 400 km/s





LA HELIOSFERA

Es una región alrededor del Sol permeada por el plasma solar y su campo magnético



LOS VIAJEROS 1 Y 2



Ambas misiones fueron lanzadas en los años 70

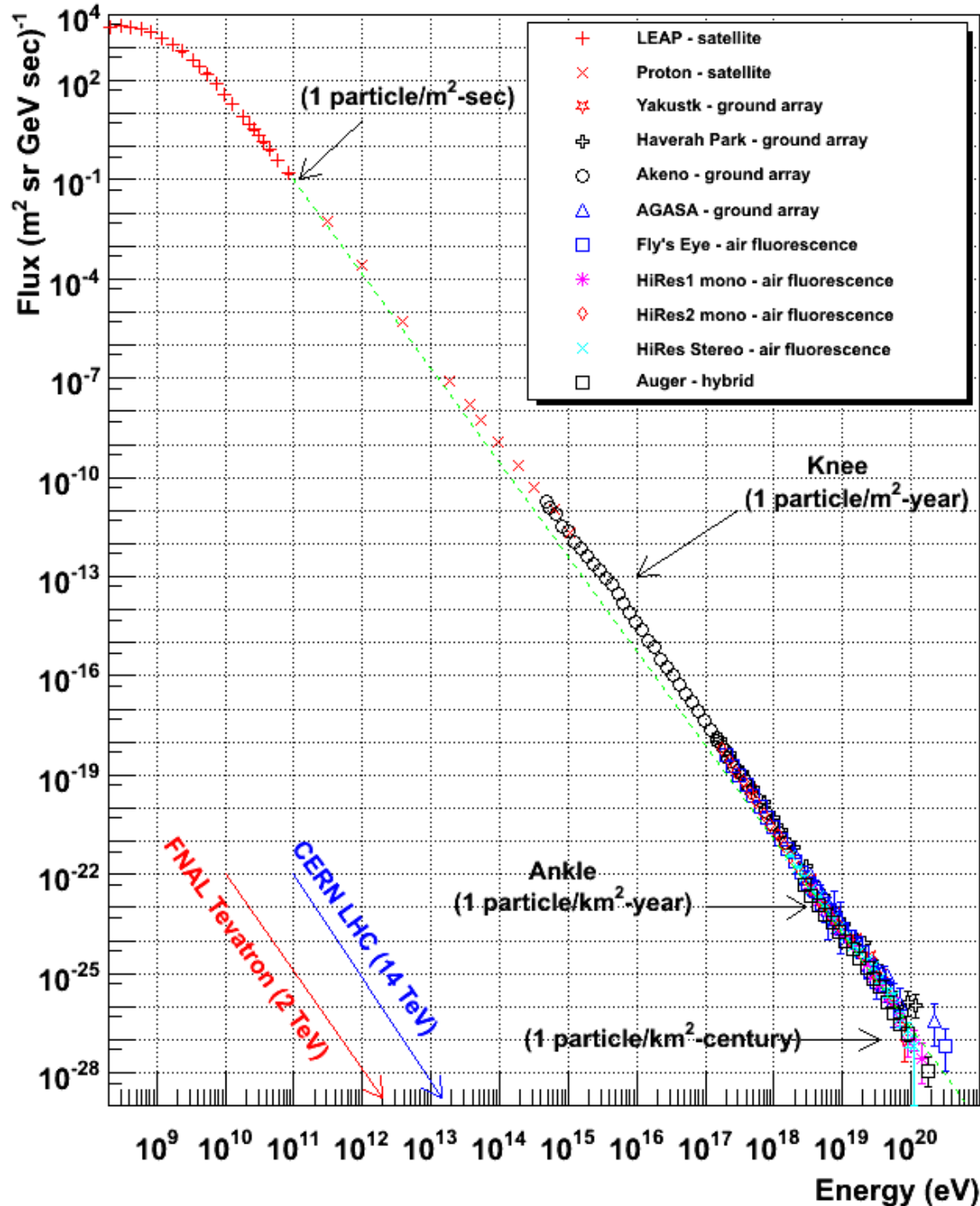
Fueron las primeras naves en explorar los planetas externos (Saturno y Jupiter)

!!! Tanto el V1 como el V2 han salido de la Heliosfera y ahora están explorando el medio interestelar local!!!

- Están fuera del plano de la eclíptica, una en dirección norte (V1) y otra en dirección sur (V2)



LOS RAYOS CÓSMICOS



- Son núcleos de átomos completamente ionizados y que se caracterizan por su gran energía, desde unos cuantos cientos de MeV hasta 10^{20} eV
- Esta radiación cósmica esta constituida principalmente por protones ($\sim 87\%$) y He ($\sim 12\%$), la fracción restante se compone de núcleos más pesados, además de electrones y positrones.
- Se clasifican en:
 - Rayos Cósmicos Solares
 - Rayos Cósmicos Galácticos
 - Rayos Cósmicos Extra-galácticos
- Fuentes:
 - El Sol
 - Remanentes de supernovas
 - Y ...



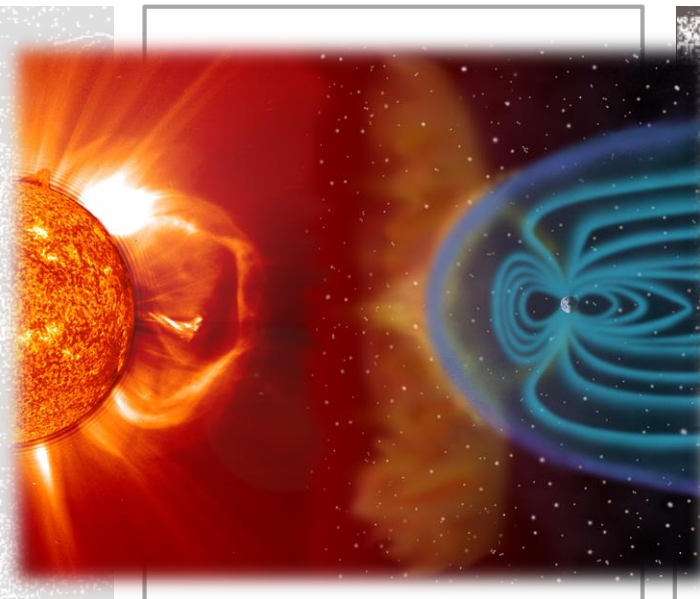
ACELERACIÓN DE LOS RAYOS CÓSMICOS

- Ráfagas solares
- Ondas de choque en remanentes de supernovas

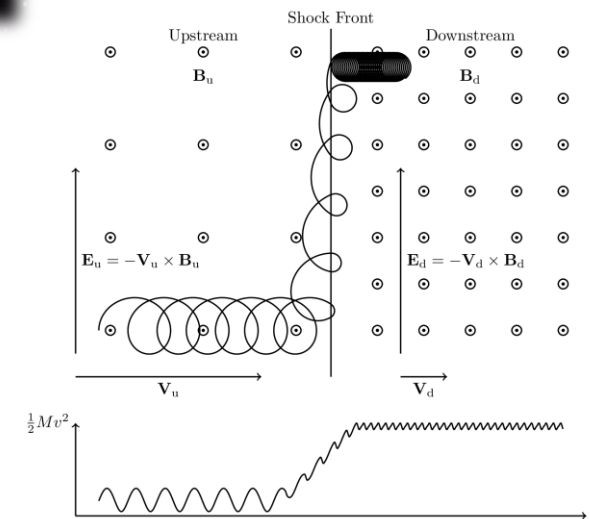
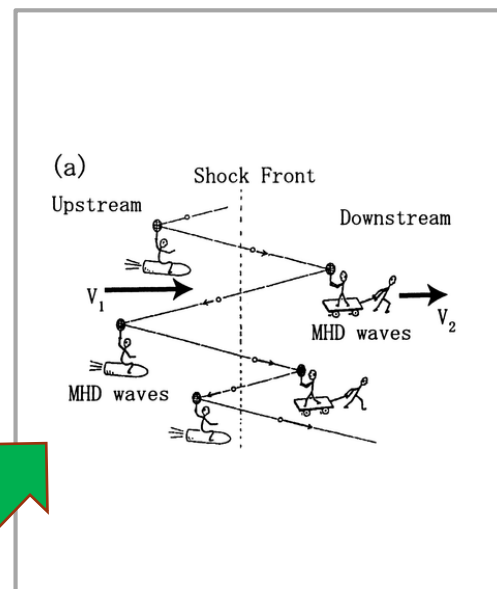
Procesos

- Aceleración de Fermi
 - Primer orden (difusivo)
 - Segundo orden
- Reconexión magnética
- ...

Aceleración Difusiva



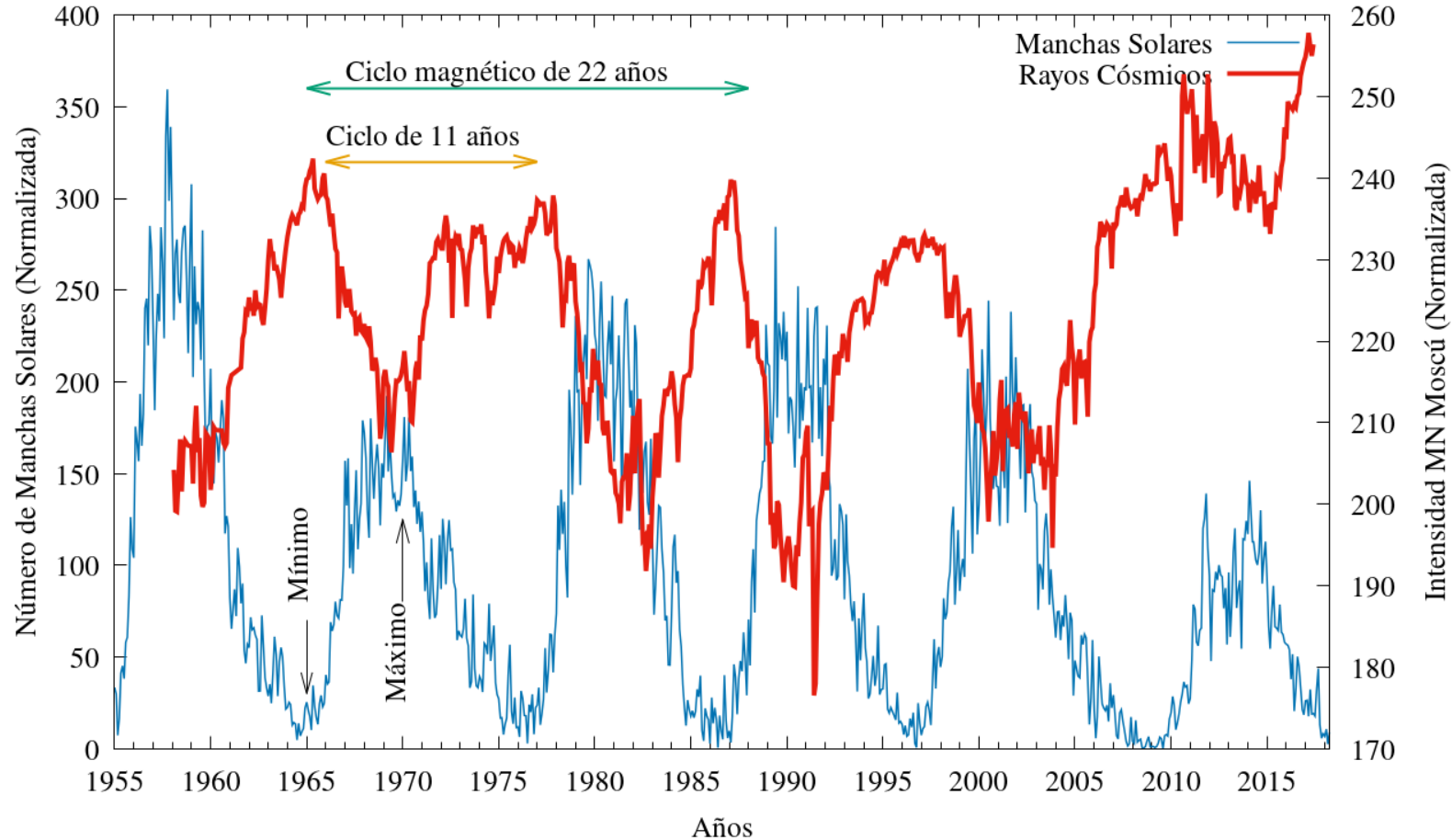
Deriva de choque



Aceleración sin dispersión



MODULACIÓN SOLAR DE LOS RAYOS CÓSMICOS



- Procesos de modulación
 - **Convección**
 - **Difusión**
 - **Desaceleración Adiabática**
 - **Derivas: por gradiente y curvatura del campo magnético**




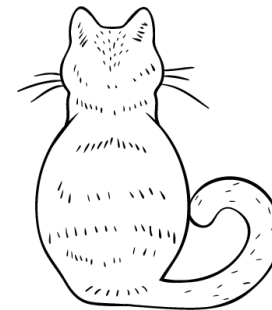
LA ECUACIÓN DE TRANSPORTE

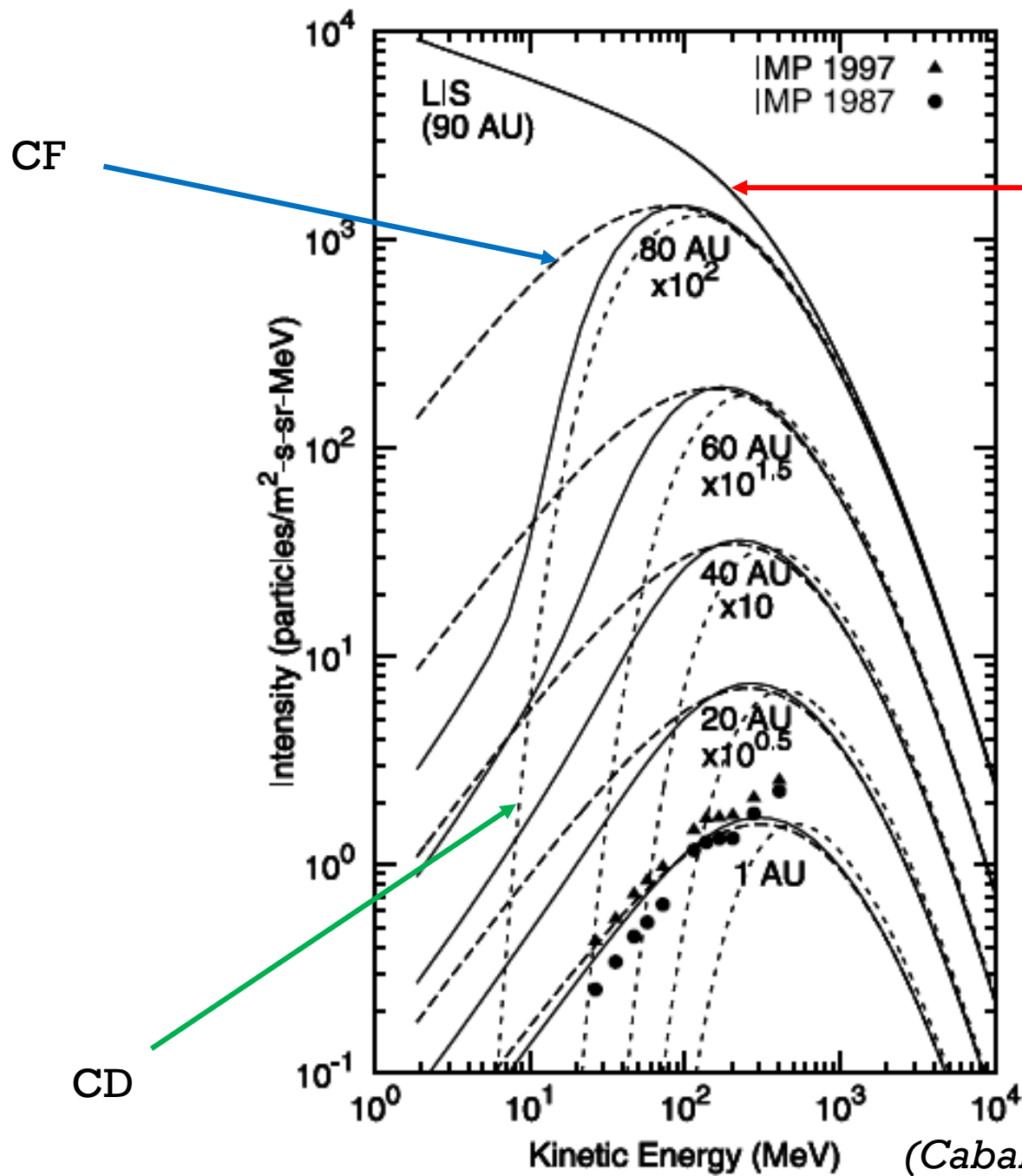
- Es una ecuación de continuidad para la función de distribución omnidireccional $f(\vec{r}, \vec{p}, t)$ (Parker, 1965; Gleeson y Axford, 1967):

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{V} f - \vec{K} \cdot \nabla f) - \frac{1}{3p^2} (\nabla \cdot \vec{V}) \frac{\partial}{\partial p} (p^3 f) = Q$$

donde \vec{V} es la velocidad del VS, p el momento de la partícula, Q las fuentes o sumideros y \vec{K} el tensor de difusión.

- No tiene solución analítica  solución numérica
- Hay dos aproximaciones:
 - **Convección-Difusión**
 - **Campo de Fuerza**





Intensidad:
 $J_T = p^2 f$

LA SOLUCIÓN NUMÉRICA COMPLETA

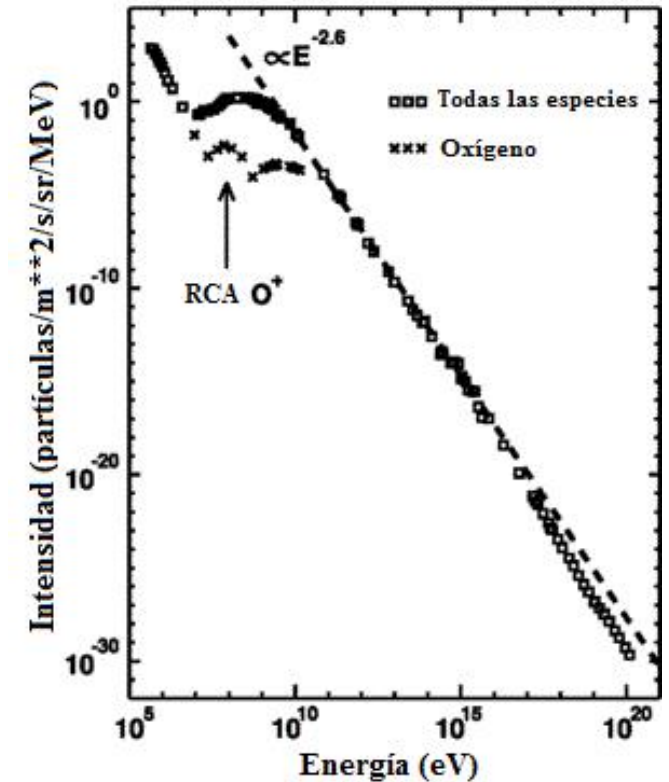
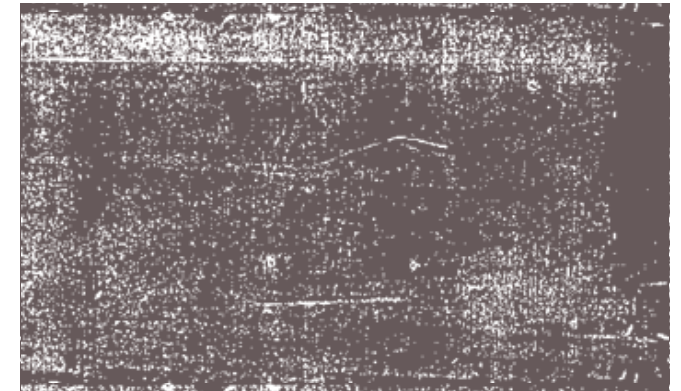
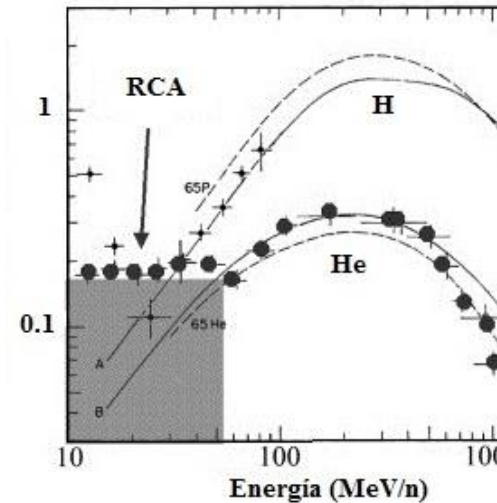
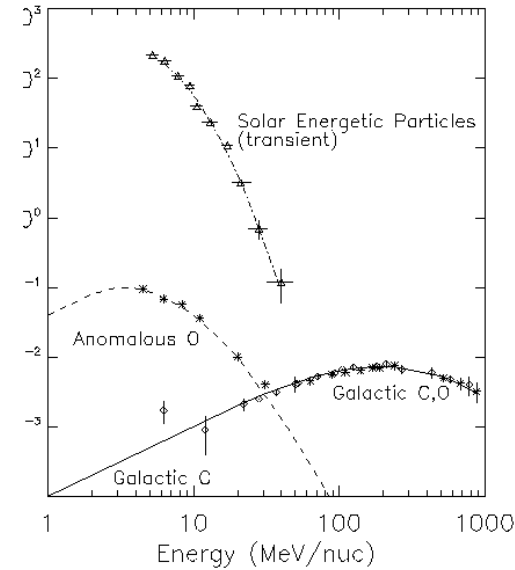
1. Convección-Difusión es una buena aproximación en la Heliosfera externa, donde las pérdidas de energía no son significativas.
2. Campo de Fuerza es válida en la Heliosfera interna (~10 UA), donde los cambios de energía son importantes.

(Caballero-López y Moral, 2006)

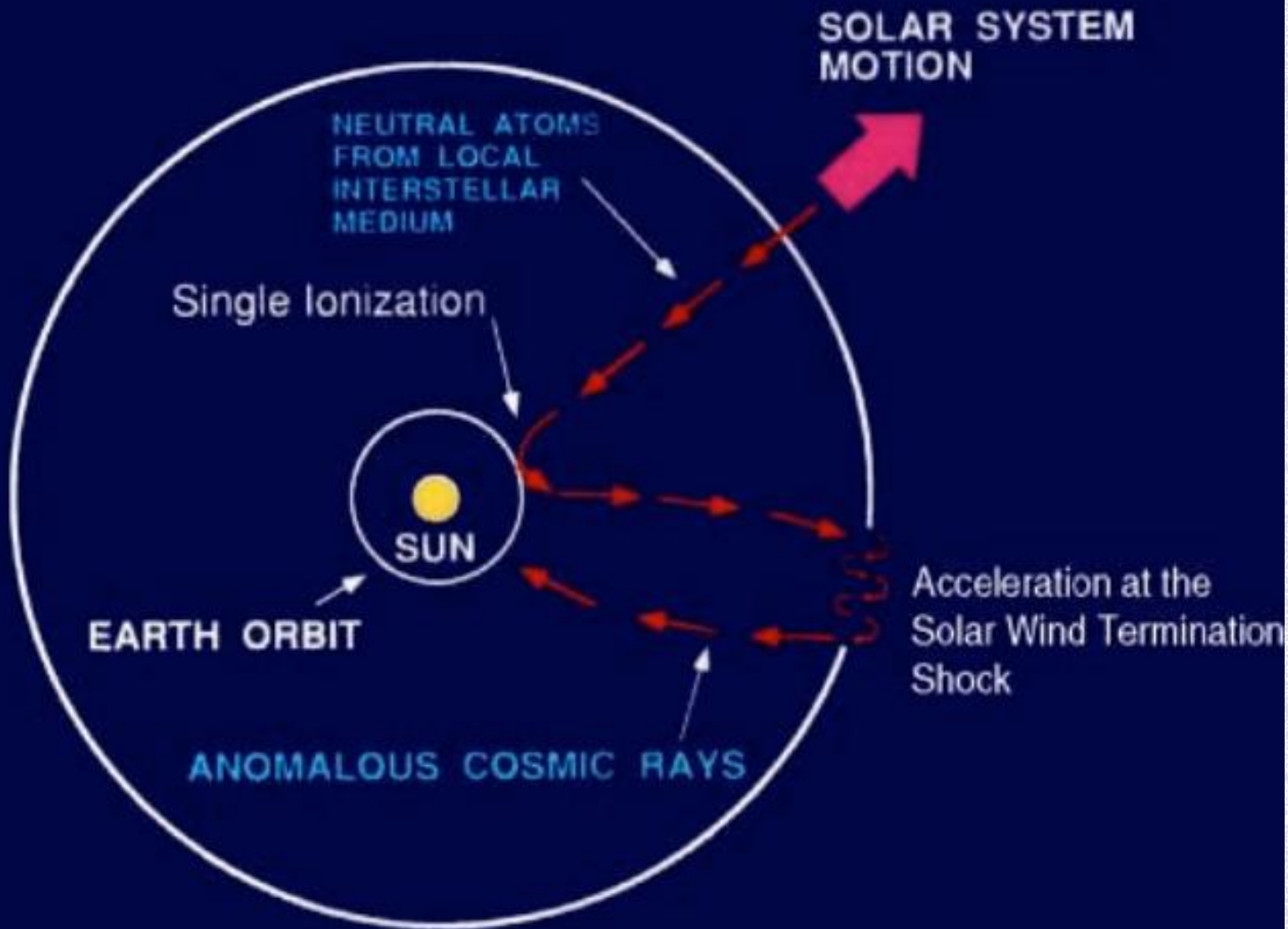


LOS RAYOS CÓSMICOS ANÓMALOS

- Se observaron por primera vez en la década de los 70, al estudiar el espectro de energía de iones con energía entre 10-50 MeV.
- Al analizar los datos de distintas naves espaciales, durante periodos de mínima actividad, se observaron incrementos inusuales en la intensidad (*García-Muñoz y col., 1973; Hovestandt y col., 1973; McDonald y col., 1974*)
- Los incrementos más notables se observaron en el He y el O.



ORIGIN OF ANOMALOUS COSMIC RAYS



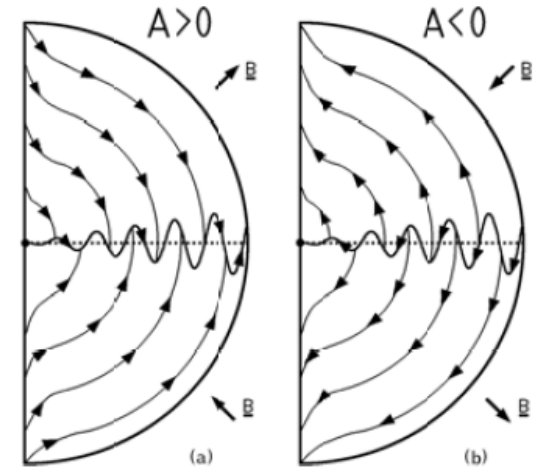
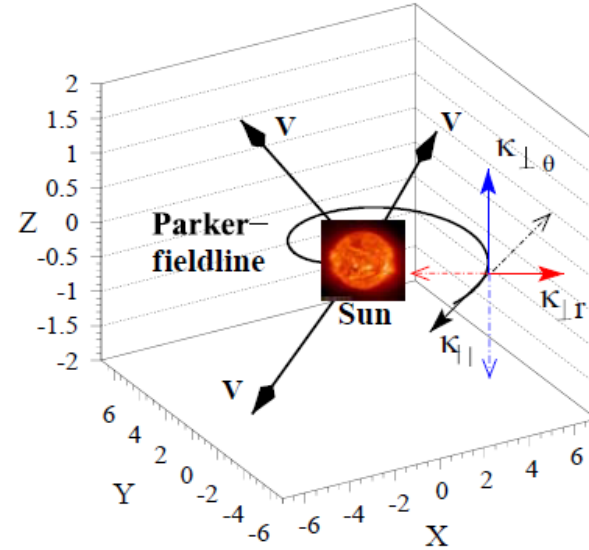
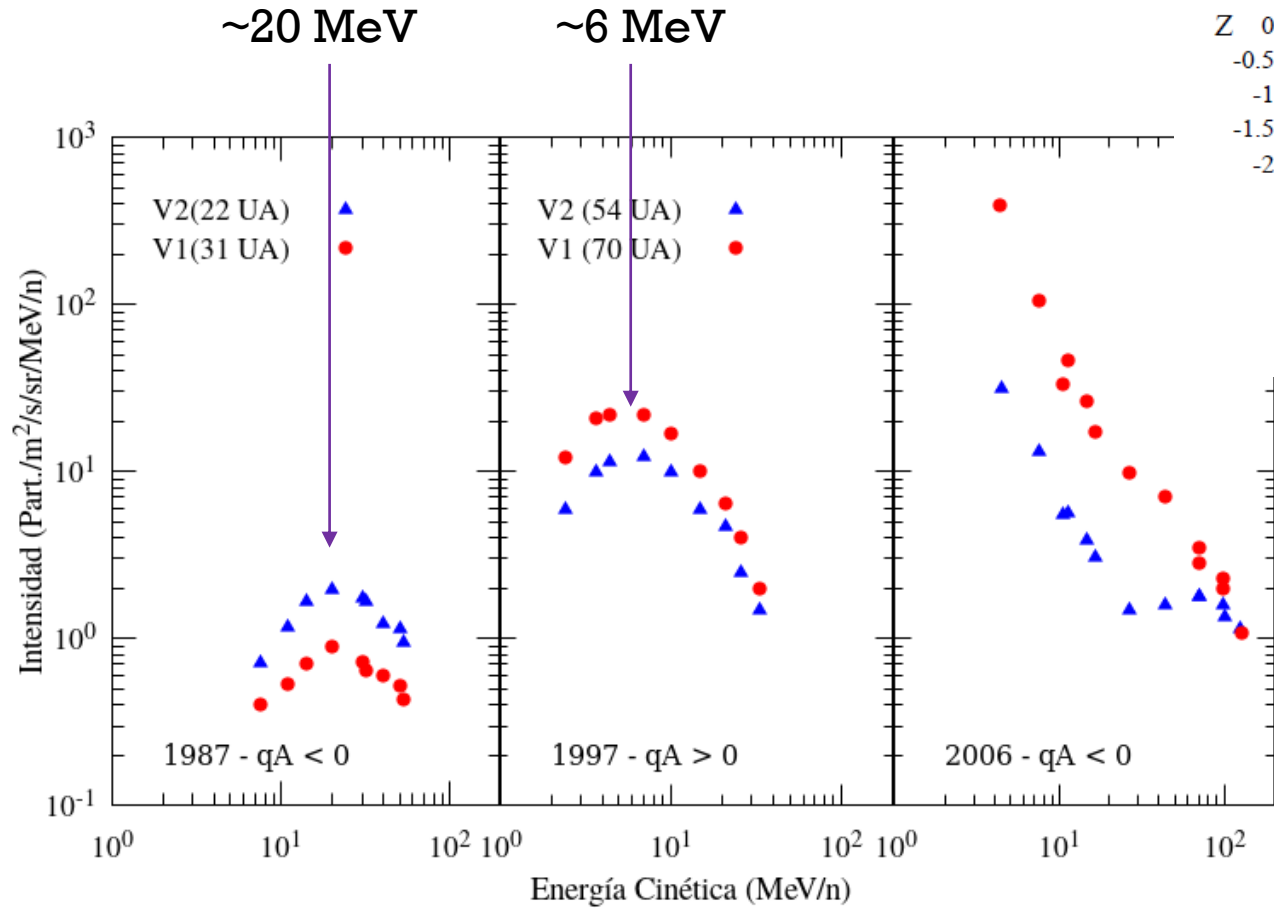
ORIGEN DE LOS RC ANÓMALOS

- Los RCA se originan dentro de la Heliosfera.
- Proviene a partir de átomos neutros que ingresan a la Heliosfera y conforme se acercan al Sol son ionizados por fotoionización o por intercambio de cargas.
- Una vez ionizados son asimilados por el viento solar y transportados hasta en choque terminal.
- Ya en el choque, las partículas son aceleradas via un proceso de aceleración difusivo (Fermi de primer orden).

Fisk y col., 1974; Krymkii, 1977; Bell, 1978; Blandford y Orstriker, 1978; Axford, 1981



EL CORRIMIENTO EN EL ESPECTRO

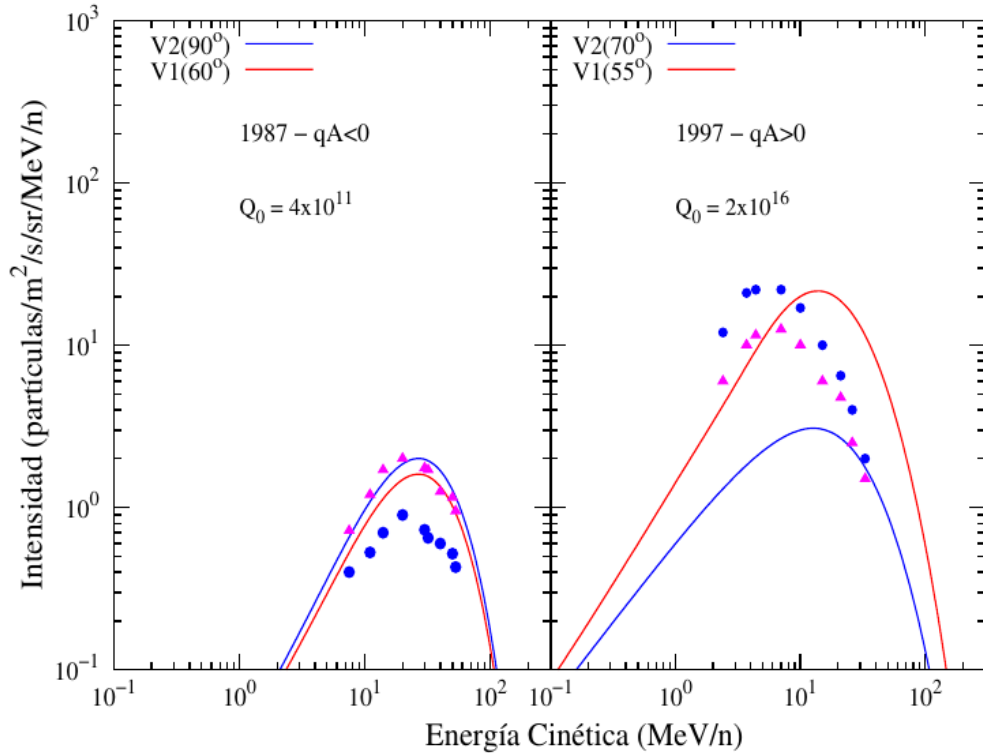


↑

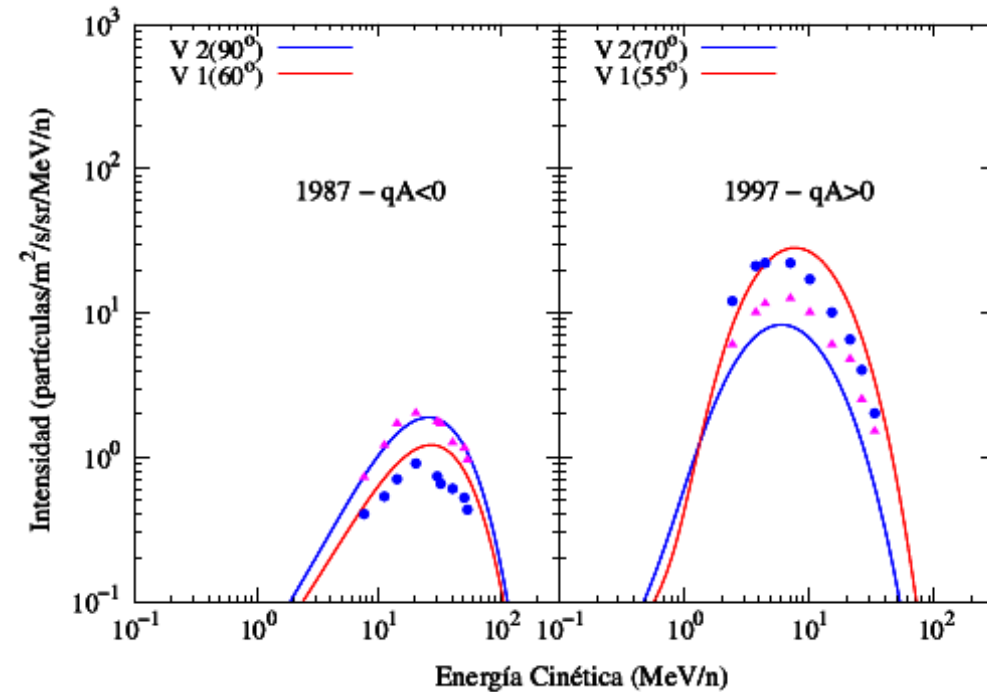
Estados de derivas



RESULTADOS A PARTIR DE LA SOLUCIÓN NUMÉRICA



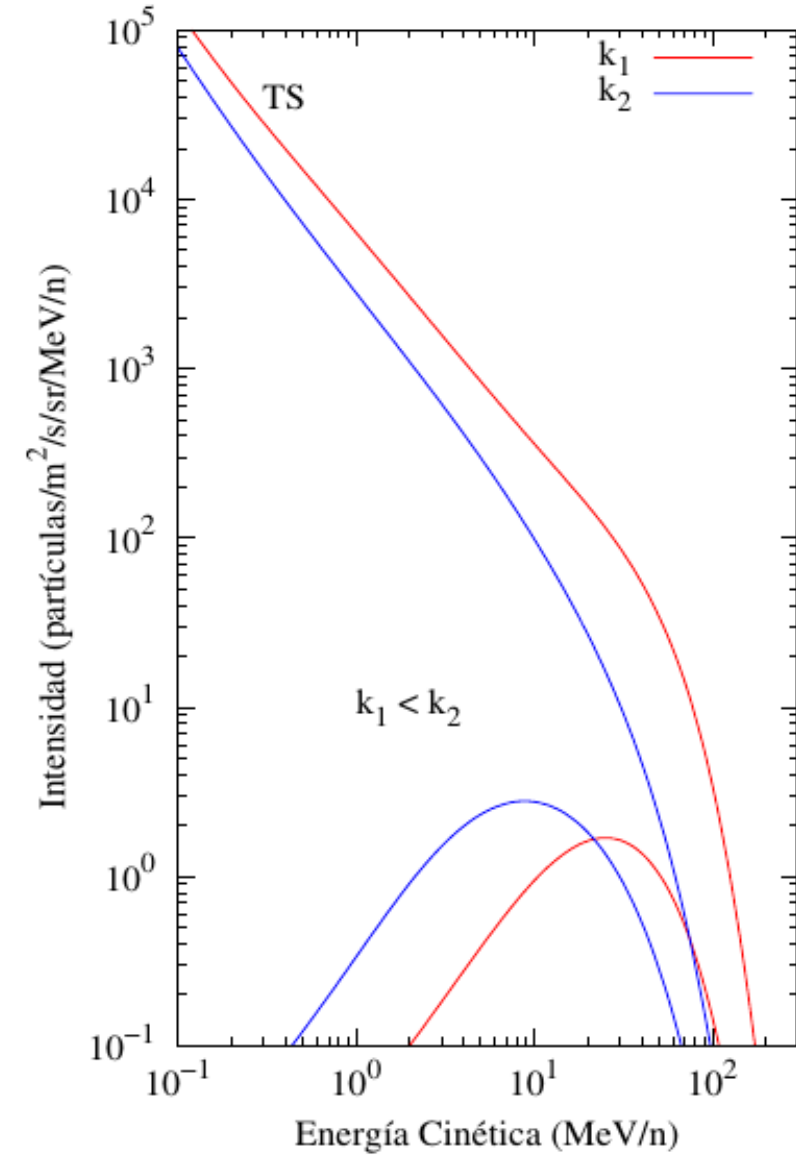
Inyección preferencial



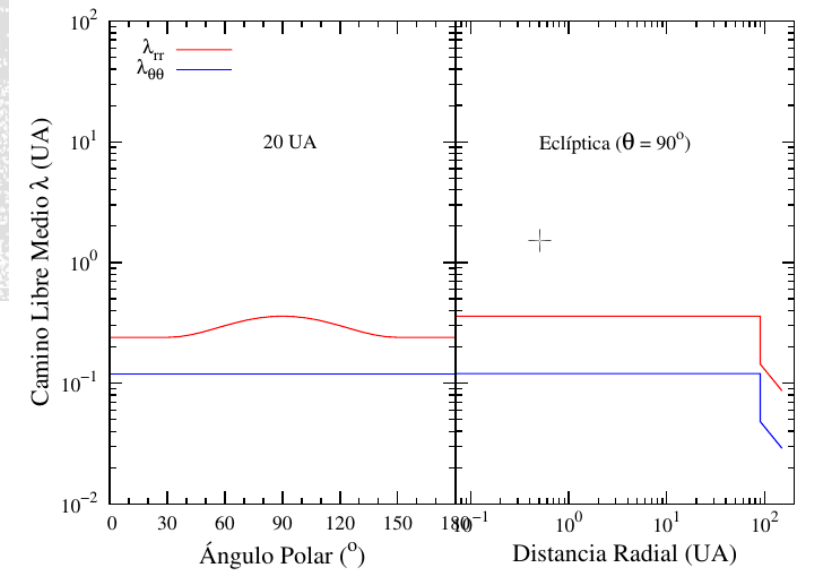
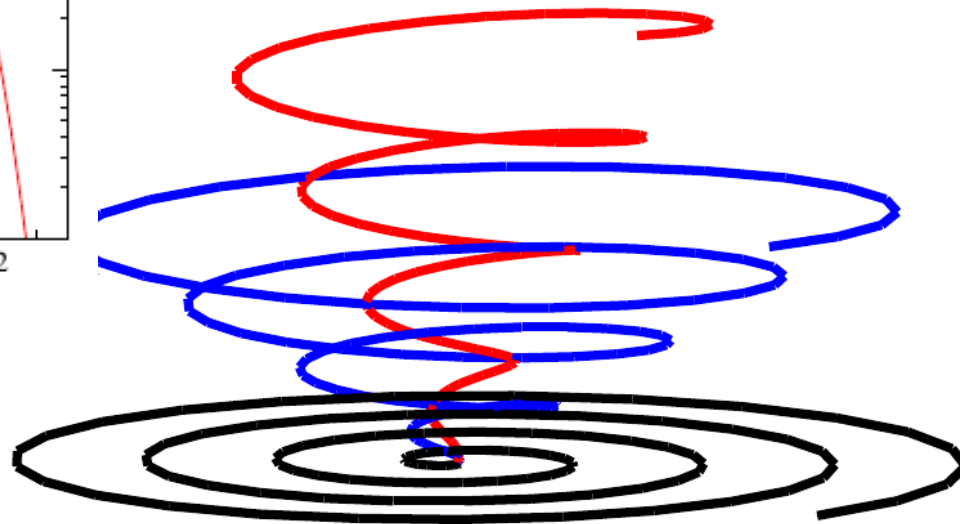
Inyección uniforme



LA DIFUSIÓN Y OTROS PARÁMETROS A CONSIDERAR



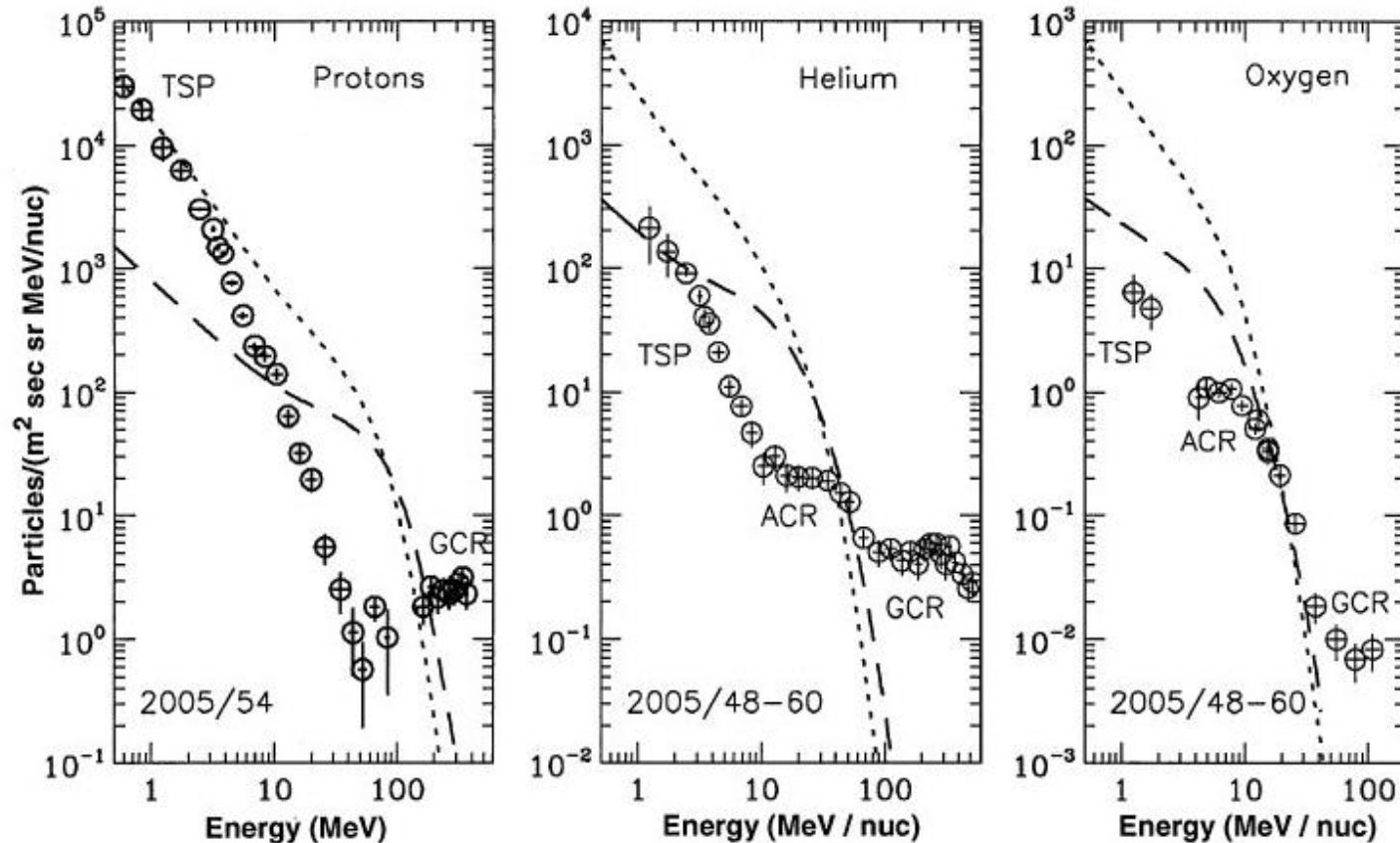
Campo espiral de Parker,
1958.



EL ESPECTRO EN EL CHOQUE

El cruce del CT dio origen a tres distintas escuelas que intentan explicar como y donde se origina la componente anómala.

1. Esta componente es producto de la aceleración de Fermi, pero únicamente en regiones preferentes a lo largo del choque (*McComas y Schwadron, 2006*)
2. Los RCA son adicionalmente re-acelerados en la Heliofunda por difusión en el espacio de momento (*Zhang, 2006; Ferreira, 2007; Jokipii y Kota, 2008*)
3. La componente anómala es producto de otros procesos, por ejemplo reconexión magnética y procesos en cascadas de energía (*Lazarind y Opher, 2009; Drake y col., 2012*)



Observaciones del Viajero 1 en el año 2005



CONCLUSIONES

- Para poder explicar el corrimiento en el espectro de energía es necesario que los parámetros de difusión sean mayores en los periodos de deriva positiva (1987) respect a los periodos de deriva negativa.
- Este incremento en los coeficientes de difusión se ve reflejado en la energía máxima que las partículas pueden ganar en el CT.
- Al considerar la geometría real del choque, es posible que haya regions donde la inyección de partículas sea más favorable.