

Desconexión de la cola de plasma de un cometa



Pedro I. Deaza

Profesor Campos
Electromagnéticos,
Universidad Distrital
Francisco José
de Caldas

Un cometa consta de tres partes: el núcleo, fuente de todos los procesos cometarios. De forma cuasi esférica, es una estructura congelada de Dióxido de Carbono CO_2 , Cianuro de Hidrogeno HCN, Amoniaco NH_3 , Metano CH_4 , Monóxido de Carbono CO y otros compuestos de Carbono y Azufre, generalmente volátiles, que rodean un parte central mas interior al parecer de silicatos de Hierro, Magnesio y Manganeso.

La coma o atmósfera, no se forma hasta que el núcleo se halle a una distancia al sol menor o igual a 6 unidades astronómicas; distancia a la cual el material de la superficie se sublima violentamente formando la coma de tamaños que oscilan entre 10^3 y 50×10^6 kilómetros de radio.

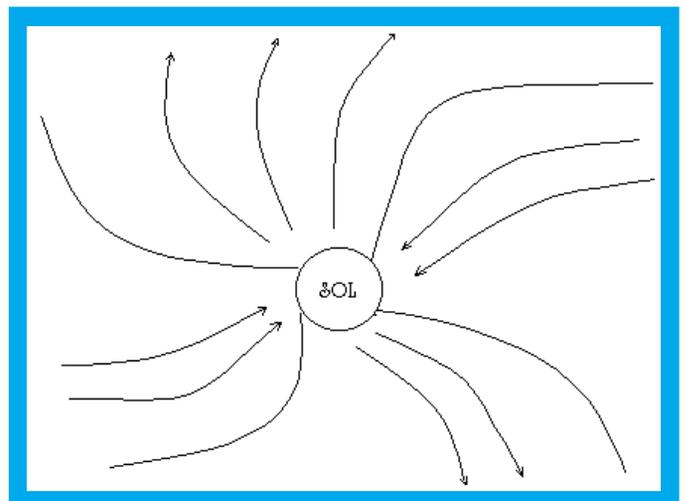
La cola de polvo, está formada por partículas micrométricas y que se extiende desde el cometa en dirección radial respecto al sol, hacia el exterior del sistema solar. La cola iónica o de plasma, esta constituida por material ionizado, debido a la radiación electromagnética y a partículas provenientes del sol. Su estructura y conducta física se explican a partir del estudio de su interac-

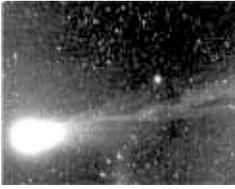
ción con el flujo de partículas, los campos electromagnéticos, especialmente el magnético, originados en el sol. Las colas alcanzan longitudes de 50 a 300 millones de kilómetros.

Cuando un cometa se acerca al sol, el núcleo absorbe radiación electromagnética, aumentando su energía interna hasta alcanzar la temperatura de sublimación, entonces el material de la superficie pasa del estado sólido al gaseoso, los gases escapan a velocidades de algunas décimas de kilómetros por segundo. Una simulación con ordenador de esos eventos predice unos 1200 procesos y reacciones.

Hannes Alfvén, del Real Instituto de Tecnología de Estocolmo, propuso la novedosa idea de que la materia que hace parte del "viento solar",

El resultado de la interacción entre la cola iónica de un cometa y el campo magnético solar, es la desconexión de la cola iónica cometaria





Desconexión de la cola de plasma cometa Hyakutake. Cortesía ENCKE-NASA

transportaría el campo magnético solar hacia el exterior. Su trabajo mostró que el campo magnético juega un papel primordial en el acoplamiento del plasma solar con el plasma cometario y la posterior formación de la cola iónica o de plasma. Este modelo que incluye el concepto del campo "congelado", goza hoy de aceptación general. Las observaciones y estudios de John C Brandt y Malcolm B. Niedner de Arizona han permitido profundizar en el mencionado modelo teórico.

El viento solar y su campo magnético, fluyen hacia el exterior a unos 400 kilómetros por segundo. Los iones del cometa se dirigen hacia el sol, al parecer a unos pocos kilómetros por segundo. Cuando ocurre la colisión la fuerza de Lorentz nos permite establecer que pasa con cada ion: Si el campo eléctrico $\mathbf{E}=0$

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = q \frac{\vec{v} \times \beta}{c}$$

- m:** masa de iones.
- \vec{v} : velocidad de unión.
- q:** carga eléctrica.
- β : campo magnético.
- c:** rapidez de propagación O.E.M. en el vacío.

Los iones cometarios no pueden moverse libremente a través del campo magnético solar sino que describen trayectorias helicoidales alrededor de las líneas de campo

En el caso astronómico y por comodidad:

$$\beta = \beta_0 \hat{k}$$

Entonces:

$$m \frac{d}{dt} (v_x \hat{i} + v_y \hat{j} + v_z \hat{k}) = \frac{q}{c} \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ v_x & v_y & v_z \\ 0 & 0 & \beta_0 \end{vmatrix}$$

Surgen las tres ecuaciones diferenciales:

$$\begin{aligned} m \frac{dv_x}{dt} \hat{i} &= \frac{q}{c} v_x \beta \hat{i} \\ m \frac{dv_y}{dt} \hat{j} &= \frac{q}{c} v_x \beta \hat{j} \\ m \frac{dv_z}{dt} \hat{k} &= 0 \end{aligned}$$

Cuyas soluciones son:

$$\begin{aligned} v_x \hat{i} &= (v_0 \text{sen } wt) \hat{i} \\ v_y \hat{j} &= (v_0 \text{cos } wt) \hat{j} \\ v_z \hat{k} &= v_0 \hat{k} \end{aligned}$$

Las componentes en X e Y satisfacen si:

$$w = \frac{q\beta}{mc}$$

$v_z \hat{k}$ es constante.

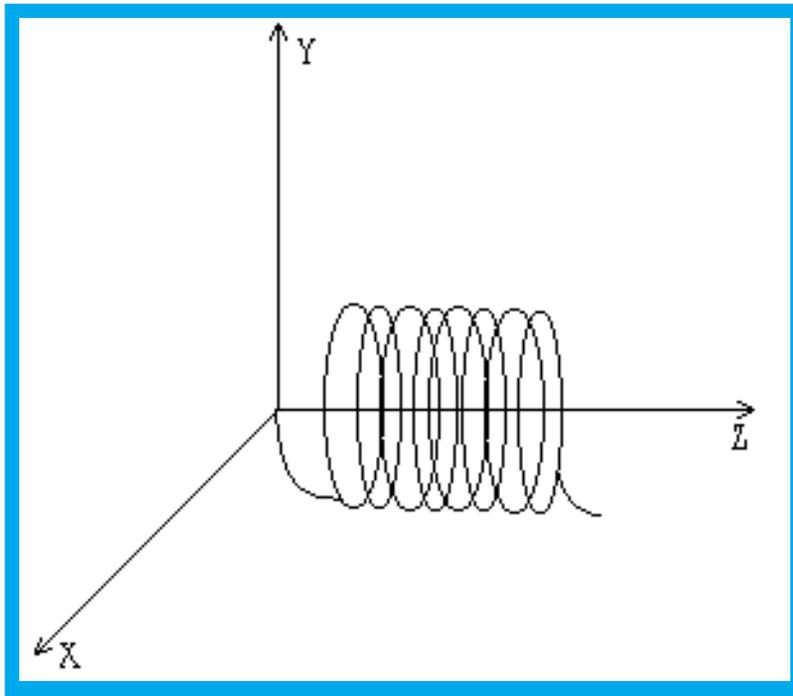
Ahora podemos escribir:

$$\begin{aligned} V_x \hat{i} &= \frac{dx}{dt} \hat{i} = \int (V_0 \text{sen } wt) dt \hat{i} \\ V_y \hat{j} &= \frac{dy}{dt} \hat{j} = \int (V_0 \text{cos } wt) dt \hat{j} \\ V_z \hat{k} &= \frac{dz}{dt} \hat{k} = \int V_0 dt \hat{k} \end{aligned}$$

Cuyas respectivas soluciones son:

$$\begin{aligned} X(t) \hat{i} &= X_0 \hat{i} - \frac{V_0}{w} (\text{cos } wt) \hat{i} \\ Y(t) \hat{j} &= Y_0 \hat{j} + \frac{V_0}{w} (\text{sen } wt) \hat{j} \\ Z(t) &= Z_0 \hat{k} + V_0 t \hat{k} \end{aligned}$$

El desplazamiento en Z es una función vectorial lineal tiempo.



Analicemos el desplazamiento en X, Y

$$r^2 = x^2(t) + y^2(t) \text{ tomando } x_0 = 0, y_0 = 0$$

$$r(t) = \sqrt{\frac{V_0^2}{w^2} \cos^2 wt + \frac{V_0^2}{w^2} \sin^2 wt}$$

$$r(t) = \frac{V_0}{w}$$

osea:

$$r(t) = r = \frac{mV_0 c}{q\beta}$$

Es el radio de giro de la partícula ionizada cuyo eje es la dirección de B. En consecuencia ω es la rapidez angular.

Los iones cometarios no pueden moverse libremente a través del campo magnético solar sino que describen trayectorias helicoidales alrededor de las líneas de campos magnéticos. A 1 millón de kilómetros, o más del núcleo, los iones ya capturados por las líneas de campos magnéticos se mueven ahora hacia el cometa, en la misma dirección que el viento solar. En la medida en que el viento solar recibe iones cometarios, va experimentando un aumento en su masa, que lo obliga a desacelerarse conservando así su

cantidad de movimiento. Con el tiempo la masa de iones capturados es tal, que las presiones hacia al exterior del cometa por parte de sus gases y sus iones se compensan con las ejercidas por el viento solar. El movimiento se detiene. Los campos magnéticos comprimidos sin solución de continuidad forman una barrera magnética también en reposo. Entonces de acuerdo con Alfvén el campo magnético se halla congelado en la materia.

Si \vec{J} es el vector densidad de corriente y \vec{H} la intensidad de campo magnético:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}$$

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0$$

$$\vec{J} = \sigma(\vec{E} + \mu \vec{v} \times \vec{H})$$

Donde μ es la permeabilidad magnética, σ la conductividad y $\vec{B} = \mu \vec{H}$

Si p es la densidad, la ecuación de continuidad es:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (p\vec{v}) = 0$$

Escribiendo:

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{E}$$

Y reemplazando E:

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \nabla \times \left(\frac{\vec{J}}{\sigma} - \mu \vec{v} \times \vec{H} \right)$$

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{v} \times \vec{H}) - \frac{1}{\mu \sigma} \nabla^2 \times \vec{J}$$

como:

$$\nabla \times \vec{J} = \nabla \times \nabla \times \vec{H} = \nabla(\nabla \cdot \vec{H}) - \nabla^2 \vec{H}$$

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{v} \times \vec{H}) - \frac{1}{\mu \sigma} \nabla^2 \times \vec{H}$$

Cuando el cometa, en su movimiento orbital pasa de un sector de campo magnético solar, a otro cuyas líneas de campo tienen sentido contrario, la respuesta de la cola iónica a esta inversión magnética, es su desconexión del cometa

Ya que:

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0$$

En el medio interplanetario la resistencia R tiende a cero, entonces σ se hace infinita y con ello:

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{v} \times \vec{H})$$

La anterior ecuación me permite tratar el evento una vez el sistema a abandonado el estado de reposo y continúa moviéndose contra el cometa y hacia el exterior. La ecuación nos dice que la materia arrastra en su movimiento a las líneas de campo, y si el movimiento relativo entre la materia y las líneas de campo es despreciable, el campo magnético continúa congelado en la materia.

Esta configuración física se consolida con el tiempo y se hace dominante, hasta tal punto que cuando el cometa, en su movimiento orbital pasa de un sector de campo magnético solar, a otro cuyas líneas de campo tienen sentido contrario, la respuesta de la cola iónica a esta inversión magnética, es su desconexión del cometa y esté en plena actividad inmediatamente genera una nueva cola acoplada al nuevo sector magnético la cola desconectada continúa su trayectoria acoplada al viento solar y a su antiguo campo magnético. Si deseamos estudiar como se modifica el campo magnético por un desplazamiento en el interior de la materia entonces:

$$\nabla \times (\vec{v} \times \vec{H}) = \vec{v}(\nabla \cdot \vec{H}) - \vec{H}(\nabla \cdot \vec{v}) + (\vec{H} \cdot \nabla)\vec{v} - \vec{v}(\vec{v} \cdot \nabla)\vec{H}$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \text{ y } \nabla \cdot \vec{v} = 0$$

Pues la trayectoria es helicoidal, entonces:

$$\nabla \times (\vec{v} \times \vec{H}) = (\vec{H} \cdot \nabla)\vec{v} - \vec{v}(\vec{v} \cdot \nabla)\vec{H}$$

Podemos entonces escribir las siguientes expresiones:

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = (\vec{H} \cdot \nabla)\vec{v} - (\vec{v} \times \nabla)\vec{H}$$

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla)\vec{H} = (\vec{H} \times \nabla)\vec{v}$$

Finalmente:

$$\left(\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \right) \frac{\vec{H}}{P} = \left(\frac{\vec{H}}{P} \cdot \nabla \right) \vec{v}$$

Su integración debida a Walen permite estudiar la evolución temporal del antiguo campo magnético inmerso en la cola desconectada que se aleja del cometa.



REFERENCIAS

- [1] LORRAIN P. CORSON ELECTRO-MAGNETIC FIELDS AND WAVES, FREEMAN AND COMPANY WASHINGTON U.S.A. 1970.
- [2] ALFVEN H. COSMICAL ELECTRO-DYNAMICS, OXFORD 1950.
- [3] COWLING T. MAGNETOHIDRODINÁMICA, ALHAMBRA, MADRID 1968
- [4] BRAND J, MALCOLM N, ESTRUCTURA DE LA COLA DE LOS COMETAS INVESTIGACION Y CIENCIA. MARZO 1986.
- [5] ARTSIMOVIVH L., LUKIANOV S, MOVIMIENTO DE PARTÍCULAS CARGADAS EN LOS CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNEÉTICOS MIR-MOSCÚ 1974.