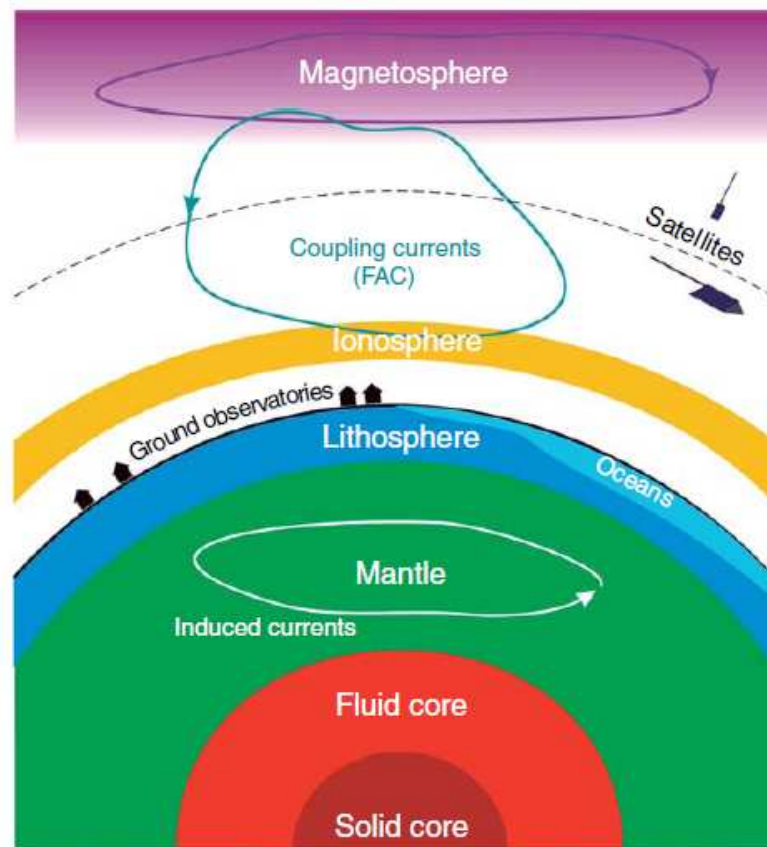


# 10 El campo magnético externo



# 10.1 Introducción

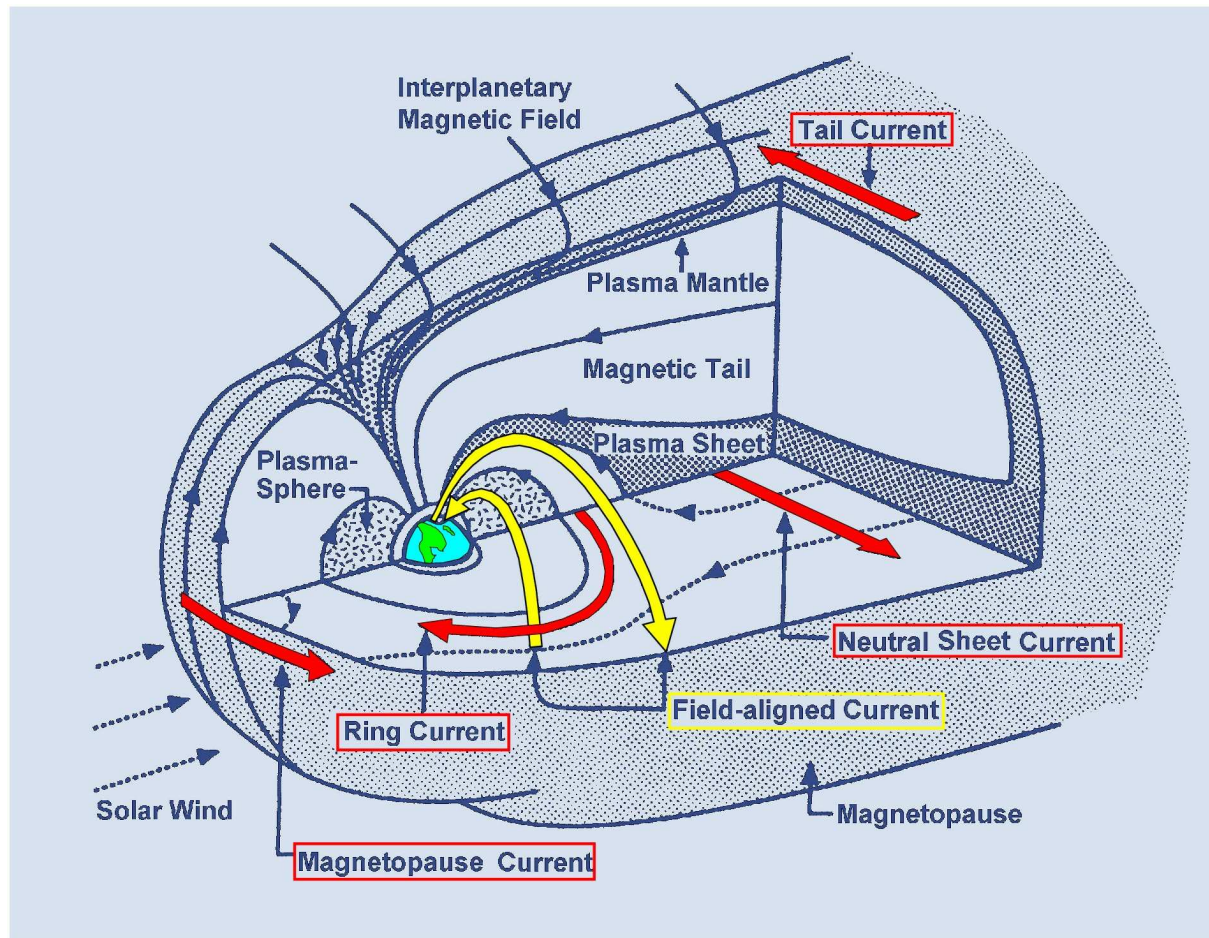


- Las varias fuentes que contribuyen al campo magnético en la superficie de la Tierra.

# 10.1 Introducción

- El campo magnético terrestre es creado y gobernado por los procesos dentro de la Tierra.
- Este campo alcanza a distancias lejos de la superficie de la Tierra hasta el espacio.
- El espacio no es un vacío, de una altura de  $\sim 100$  km contiene partículas de gas ionizado.
- El gas ionizado es un plasma de iones positivas y electrones.
- El movimiento de las cargas en el campo magnético resulta en un flujo de corriente significativo.
- El sistema de corrientes resulta en variaciones magnéticas medibles en la superficie terrestre.

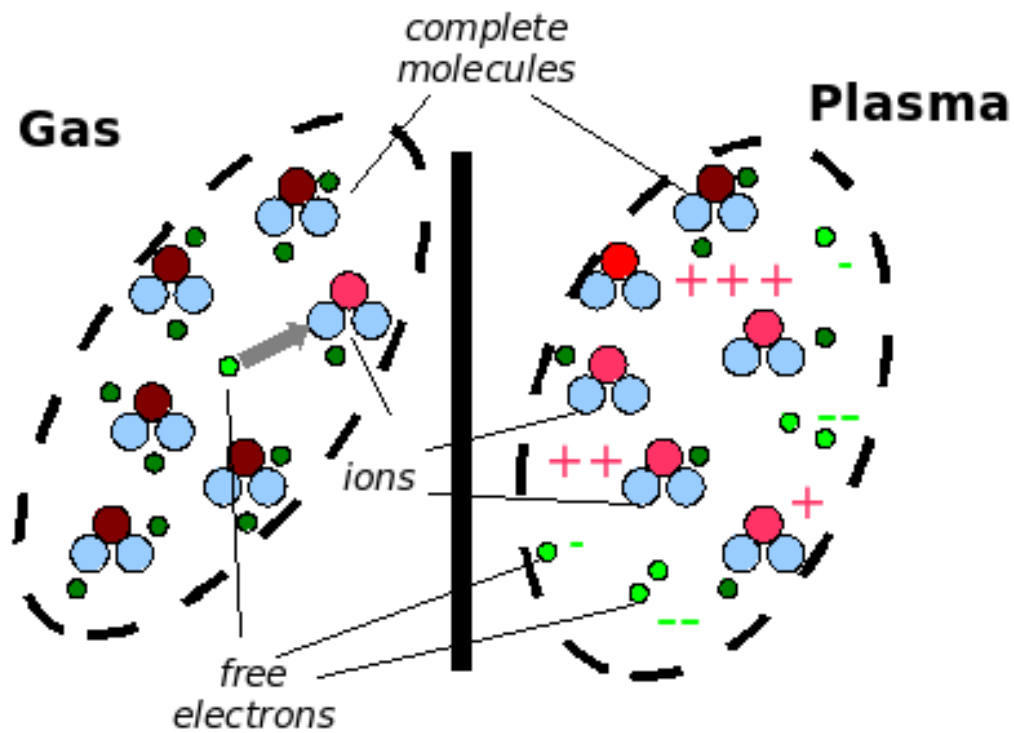
# 10.1 Introducción



## 10.2.1 Los plasmas geofísicos

- Un plasma es un gas de partículas cargadas, pero su comportamiento es bastante diferente de lo de un gas.
- En promedio, un plasma es eléctricamente neutro, porque sus cargas se cancelan.
- Aún, un plasma es sensible a campos eléctricos y magnéticos, y es capaz de soportar corrientes.
- Las partículas cargadas en un plasma están libres, y se necesita una temperatura alta para que los iones se desacoplen (mayor que  $10^5$  K).
- Cerca la superficie de la Tierra, plasmas naturales son producidos por relámpagos.
- Desde la ionosfera hacia afuera, los plasmas son más abundantes.

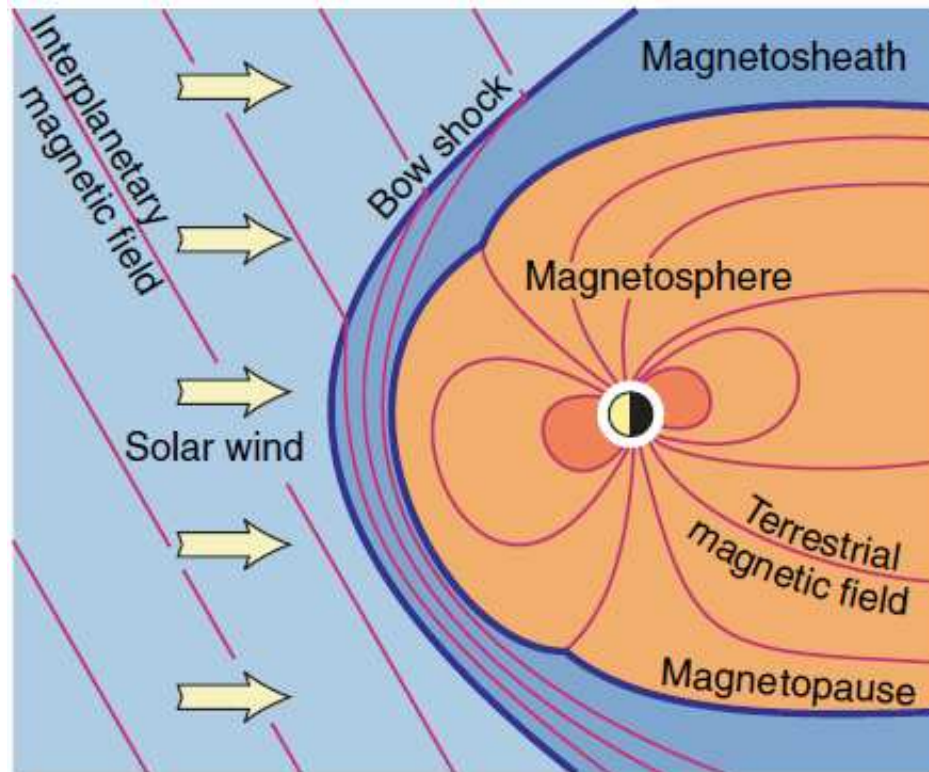
## 10.2.1 Los plasmas geofísicos



## 10.2.2 El viento solar

- El Sol emite un plasma conductivo en el espacio interplanetario - el viento solar.
- Este consiste mayormente de electrones y protones (con  $\sim 5\%$  de iones de helio).
- En el viento solar cerca la Tierra, la densidad de electrones y la temperatura son  $\sim 5 \text{ cm}^{-3}$  y  $10^5 \text{ K}$  respectivamente. Fluye con una velocidad de  $\sim 500 \text{ kms}^{-1}$ .
- El campo magnético interplanetario cerca la Tierra es del orden de 5 a 10 nT.
- Cuando el viento solar encuentra el campo magnético terrestre, disminuye su velocidad y es deflectado alrededor de la Tierra.
- Un arco de choque (bow shock) se genera, donde el plasma desacelera y una fracción de la energía cinética de las partículas se convierte en energía térmica.
- El plasma debajo del arco de choque se llama “magnetosheath” (envoltura magnética) y tiene plasma mas denso, a mayor temperatura y un campo magnético mayor.
- La magnetopausa separa el magnetosheath con el campo magnético terrestre.
- [www.spaceweather.com](http://www.spaceweather.com) contiene buena información acerca de la actividad solar.

## 10.2.2 El viento solar

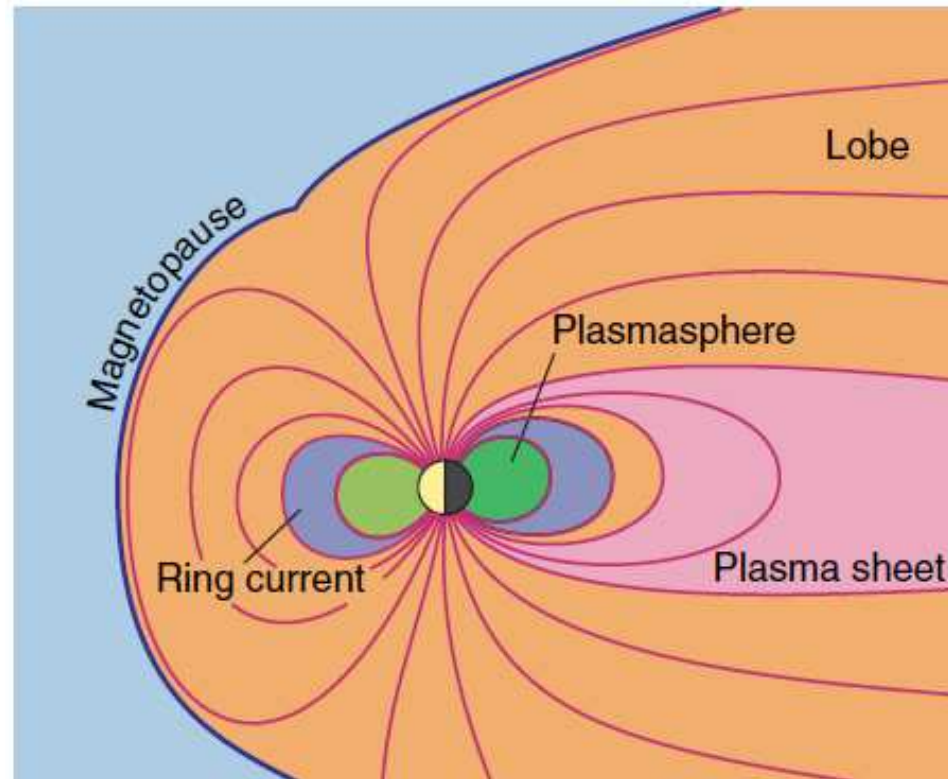




## 10.2.3 La magnetosfera

- Las líneas del campo interplanetario no penetran las líneas del campo terrestre y las partículas del viento solar, en general, no salen de las líneas del campo interplanetario.
- La cavidad generada por el campo terrestre se llama magnetosfera.
- La “presión cinética” del plasma del viento solar deforma la parte exterior del campo terrestre. En el lado de día comprime el campo, en el lado de noche el campo magnético es estirado en la magnetocola que alcanza a distancias mayores que la Luna.
- El plasma en la magnetosfera consiste de mayormente electrones y protones que vienen del viento solar y la ionosfera. El plasma dentro de la magnetosfera no tiene una distribución homogénea.
- La corriente del anillo ocurre en el plano ecuatorial entre 4 y 6  $R_T$ . El campo magnético en esta región es del orden de  $\sim 300$  nT.
- Una gran cantidad del plasma de la magnetocola es concentrado en una lámina de plasma que contiene un campo de 10-20 nT.

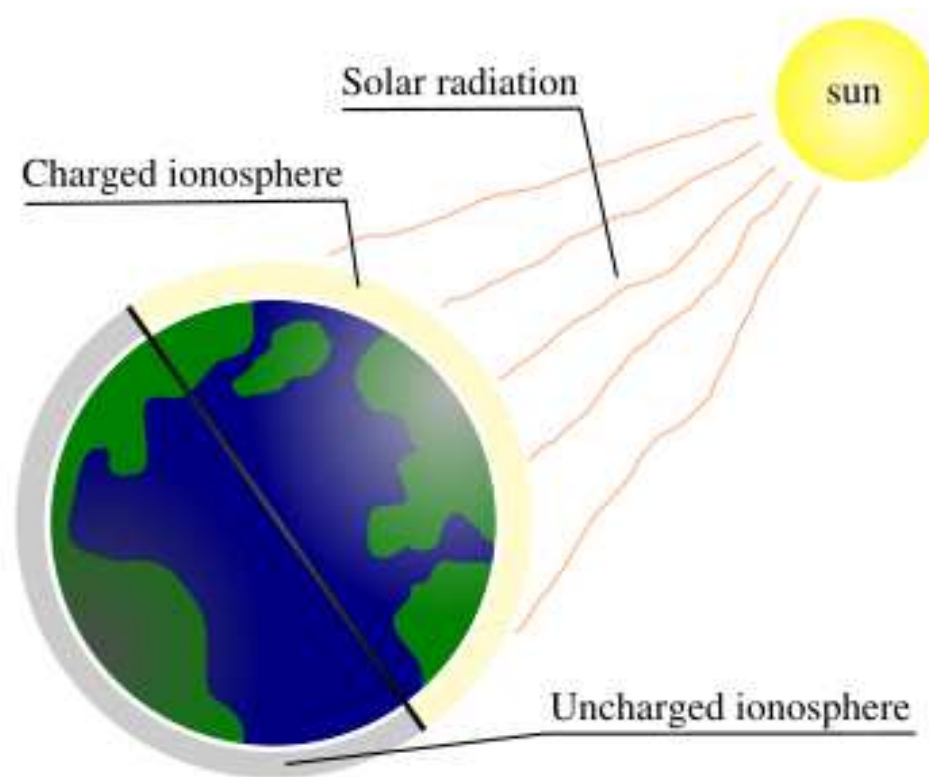
## 10.2.3 La magnetosfera



## 10.2.4 La ionosfera

- La luz solar (específicamente la radiación EM con frecuencias ultravioleta y mayor) que llega a la atmósfera de la Tierra ioniza una fracción de ella. A alturas sobre  $\sim 80$  km, las colisiones entre los iones son demasiado infrecuentes para recombinación, y una región ionizada es formada que se llama la ionosfera.
- La ionosfera extiende a alturas de  $\sim 1000$  km, donde se une gradualmente con la plasmosfera. La plasmosfera es un volumen dentro de la corriente de anillo que contiene una plasma del origen de la ionosfera.
- A altas latitudes, los electrones en la plasmosfera pueden precipitarse por las líneas del campo magnético hasta alturas de la ionosfera, donde colisionen y ionizan partículas neutros de la atmósfera. Los fotones emitidos en este proceso crean la luz polar - los auroras.

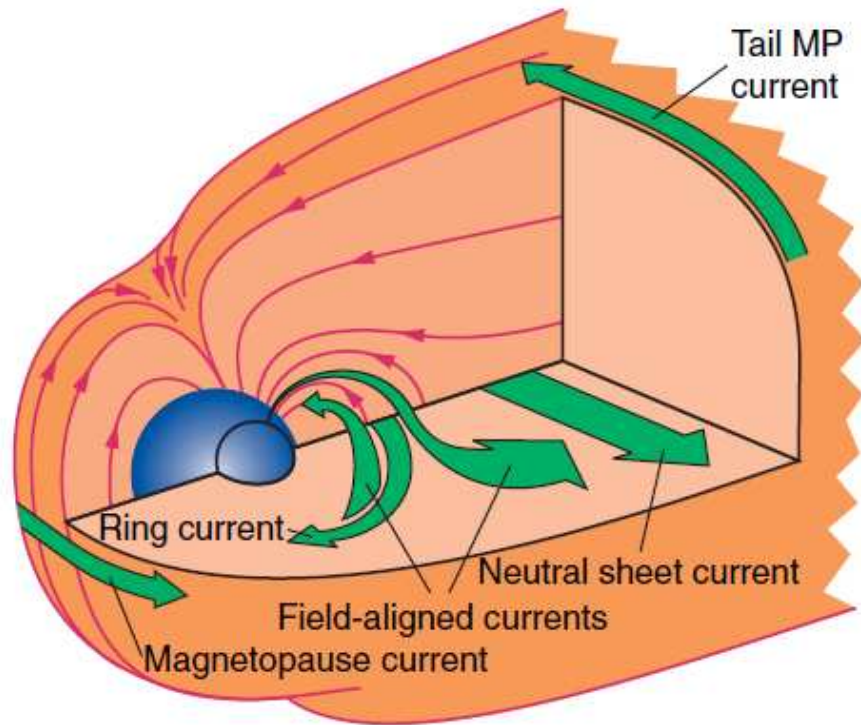
## 10.2.4 La ionosfera



## 10.2.5 Corrientes

- Los plasmas cerca la Tierra no están estacionarios pero mueven bajo la influencia de fuerzas externas. A veces iones y electrones mueven juntos, como en el caso del viento solar; alternativamente, se pueden mover en direcciones opuestas generando una corriente eléctrica. Las corrientes distorsionan el campo magnético terrestre.
- La “compresión” del campo terrestre en el lado de día es asociada con la corriente en la superficie de la magnetopausa.
- La magnetocola esta asociada con la corriente de cola y una corriente en la lámina de plasma.
- Otro sistema de corrientes es la corriente de anillo, en que partículas atrapadas se derivan alrededor de la Tierra. Los protones se derivan hacia el oeste y los electrones se derivan hacia el este que significa un movimiento de carga, entonces una corriente.
- Unos sistemas de corrientes existen en las capas de la ionosfera a alturas de aproximadamente 100-150 km (bajo debate): los electrojets aureales, corrientes Sq, y el electrojet ecuatorial.
- Unas corrientes también se fluyen a lo largo de las líneas del campo magnético. Estas corrientes conectan las corrientes magnetosféricas con ellas que fluyen en la ionosfera polar.

## 10.2.5 Corrientes



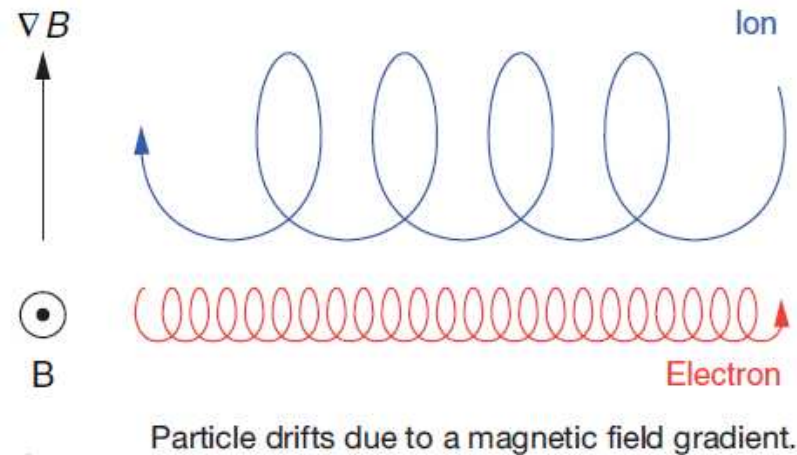
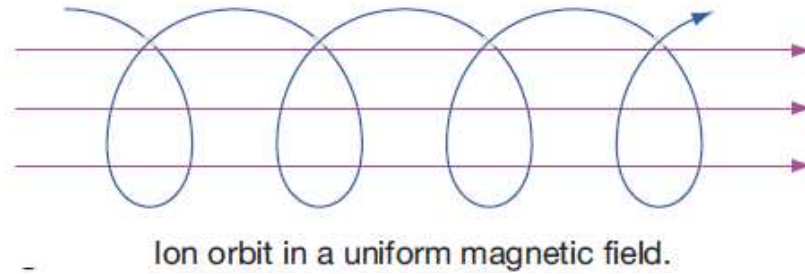
## 10.3.1 Movimiento de partículas

- La ecuación de movimiento de una carga  $q$  bajo de las fuerzas de Coulomb y Lorentz es:

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

- En la ausencia de un campo eléctrico, y en un campo magnético homogéneo, esta ecuación representa un movimiento circular de la carga alrededor del campo magnético (el sentido de la rotación depende del signo de la carga).
- Con una velocidad constante de la carga paralelo al campo magnético, la trayectoria de la carga representa una hélice.
- En un campo magnético que tiene un pendiente en la fuerza del campo, el radio de giro de la trayectoria varía en una órbita.

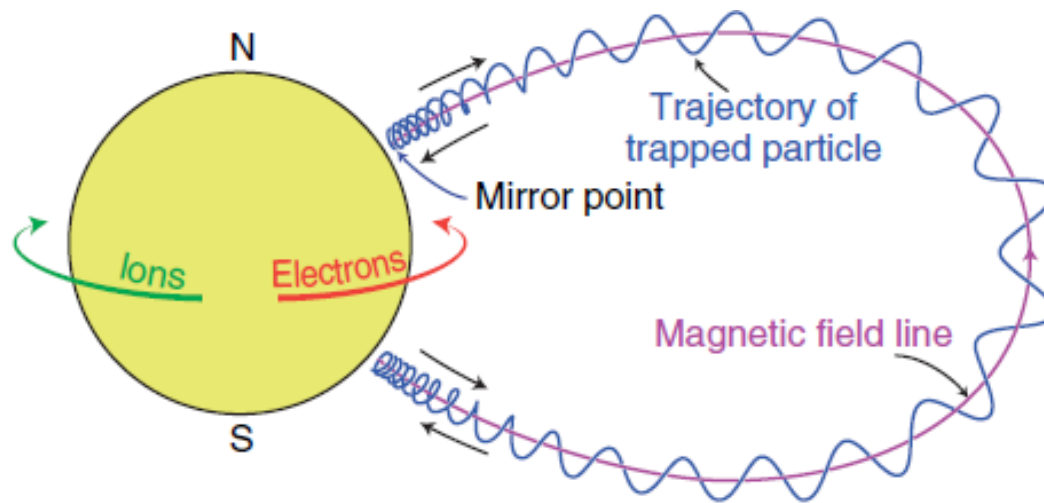
## 10.3.1 Movimiento de partículas





## 10.3.2 Partículas atrapadas

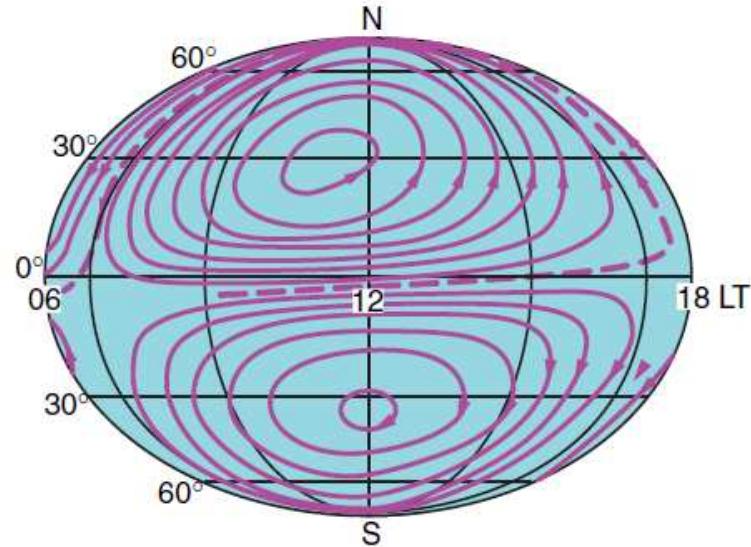
- En un campo dipolar unas partículas son atrapadas y mueven entre los dos hemisferios. Las partículas tienen una deriva azimuthal debido al gradiente y curvatura del campo dipolar; los iones se derivan hacia el oeste y los electrones se derivan hacia el este (corriente de anillo).



Trajectories of particles trapped on closed dipolar field lines.

## 10.3.3 Corrientes de baja latitud

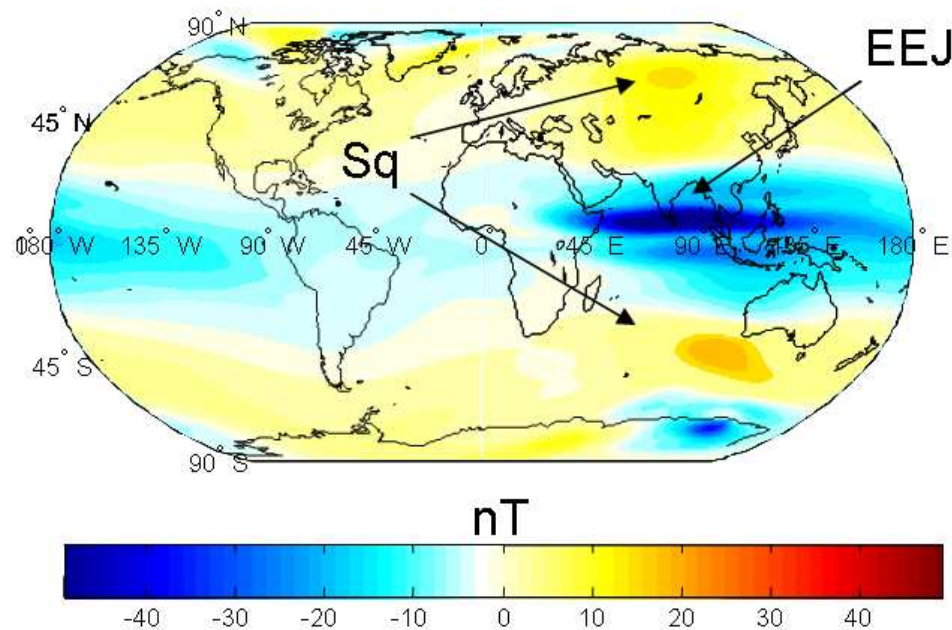
- La variación diaria en la atmósfera debido a la radiación solar produce un sistema de corrientes Sq (Solar quiet). Las corrientes Sq produce dos vórtices en los dos hemisferios que se juntan al ecuador geomagnético, y estas corrientes están concentradas en el lado del día.



Dayside view of the Sq current system.

## 10.3.3 Corrientes de baja latitud

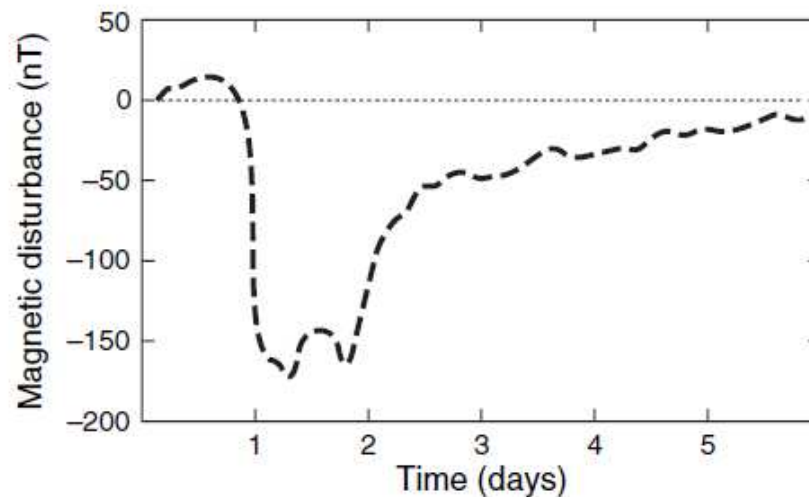
- La combinación de las corrientes  $Sq$  en el ecuador genera el electrochorro ecuatorial que es una corriente hacia el este que ocurre durante el día y disminuye el componente horizontal del campo terrestre en el ecuador.
- La deriva hacia el oeste de los iones, y la deriva hacia el este de electrones, representa una corriente hacia el oeste (la corriente de anillo) que también disminuye el campo terrestre.



La variación de la intensidad del campo magnético a una altura de 400 km debido a las corrientes ionosféricas.

## 10.3.4 Tormentas magnéticas

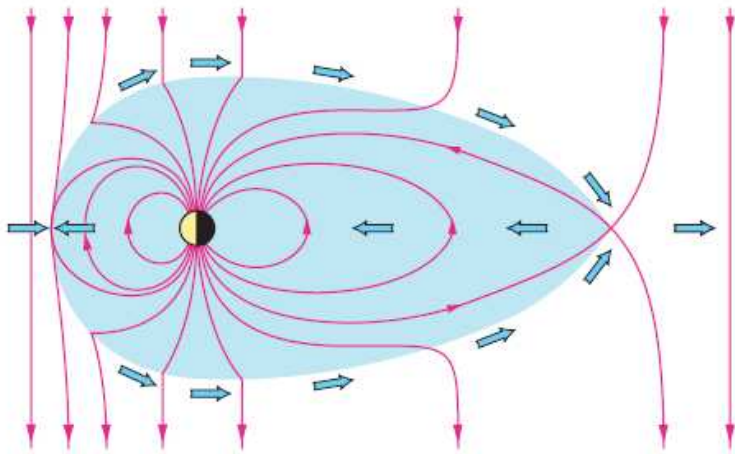
- La corriente de anillo, y las corrientes Sq, varían en tiempo debido a las fluctuaciones en la actividad solar. A veces más partículas pasan de la magnetocola a la corriente de anillo. Con este proceso, se puede obtener depresiones hasta  $\sim 3\%$  en el campo total superficial. Este fenómeno se llama una tormenta magnética.



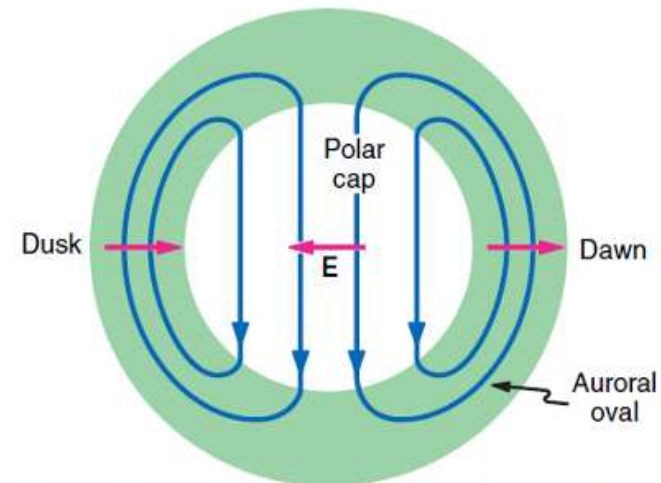
Magnetic field variation during a magnetic storm.

## 10.3.5 Corrientes de alta latitud

- Corrientes de alta latitud incluyen la convección magnetosférica, la convección ionosférica y los electrojets aurales.



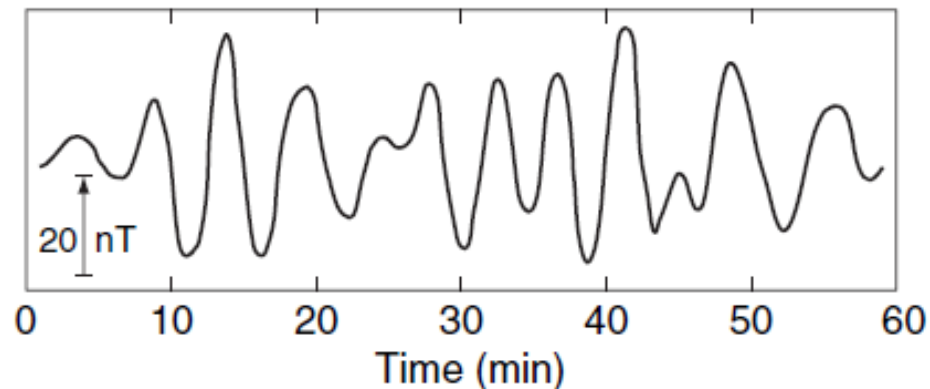
Reconnection and convection cycle in the magnetosphere.



Convection and electric field in the high-latitude ionosphere.

## 10.3.6 Pulsaciones geomagnéticas

- Un plasma contiene ondas de muchas diferentes frecuencias, de mHz hasta KHz.
- Las ondas de ultra baja frecuencia (ultra low frequency, ULF) en particular generan fluctuaciones del campo magnético en la superficie de la Tierra en el rango de frecuencia de mHz hasta Hz (este corresponde a periodos de oscilación de unos cientos segundos hasta una fracción de un segundo).
- Estos son las pulsaciones geomagnéticas.



Ground magnetic disturbance of a Pc5 pulsation.

## 10.4 Índices de la actividad geomagnética

- $K_p$  es un índice que intenta describir todas las irregularidades del campo geomagnético causadas por radiación de partículas solares. Este índice es calculado en ventanas de tiempo de 3 horas de datos de observatorios.
- $Dst$  es un índice de la amplitud de la corriente de anillo. Es determinado midiendo el campo geomagnético causado por esta corriente en observatorios de baja latitud usando promedios horarios de la componente  $H$ .
- Las variaciones temporales de los índices dependen (mayormente) sobre la actividad solar.