

# Maan magnetosfäärin plasmafysiikkaa

Mikko Marsch



# Plasman ilmiöitä

- Plasma on ionisoitunutta kaasua, yleensä neutraalia
- Jaetaan liike magneettikenttää vastaan kohtisuoraan ja magneettikentän suuntaiseen nopeuteen  $v_{\perp}$  ja  $v_{\parallel}$
- Magneettikentässä ionit kulkevat magneettikentän suuntaisesti helikaalista rataa, jossa magneettikenttää vastaa kohtisuoran ympyräliikkeen taajuus on Larmorin taajuus ja säde Larmorin säde

$$\omega = \frac{qB}{m}$$

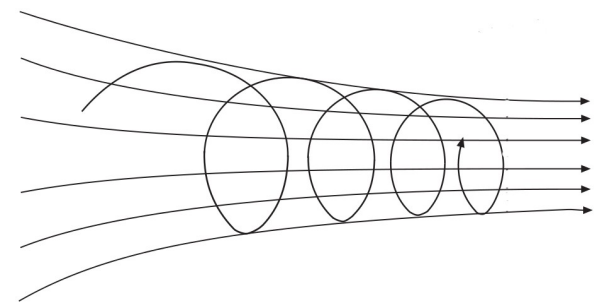
$$r_L = \frac{v_{\perp}}{|\omega|} = \frac{mv_{\perp}}{|q|B}$$

- Liikkeeseen liittyy magneettinen momentti  $\mu = I \pi r_L^2 = \frac{1}{2} \frac{mv_{\perp}^2}{B} = \frac{W_{\perp}}{B}$

- Voidaan osoittaa, että Hiukkasen radan sisään sulkema magneettivuo on vakio magneettivuontiheyden muuttuessa radalla

→ Myös magneettinen momentti säilyy

$$\Phi = B \pi r_L^2 = \frac{2\pi m}{q^2} \mu$$



# Magneettinen peili

- Kirjoitetaan magneettinen momentti helikaalisen liikkeen nousukulman  $\alpha$  avulla

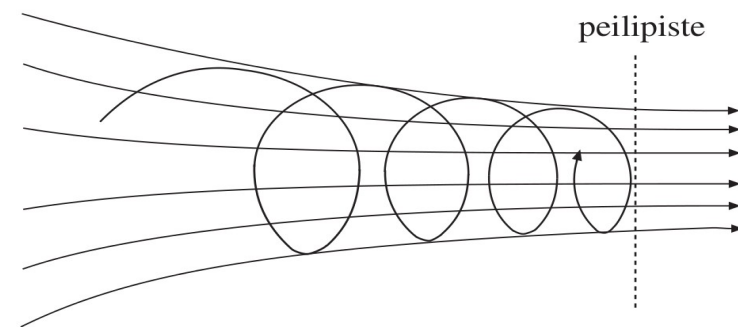
$$v_{\perp} = v \sin(\alpha) \qquad \mu = \frac{W_{\perp}}{B} = \frac{mv^2 \sin^2(\alpha)}{2B}$$

- Koska magneettikenttä ei tee työtä, niin nopeuden neliö on vakio

$$\rightarrow \frac{\sin^2(\alpha_1)}{\sin^2(\alpha_2)} = \frac{B_1}{B_2}$$

- Peilipiste löytyy kohdasta  $\sin^2(\alpha_0) = \frac{B_0}{B_m}$

- Osa hiukkasista karkaa pienillä nousukulmilla
- loput palaa peilipisteestä takaisin peilivoiman vuoksi  $F = -\mu \nabla_{\parallel} B$
- Vastakkaiset peilit muodostavat magneettisen pullon



# Kulkeutumisiilmiöt

- Kirjoitetaan hiukkaselle liikeyhtälö Lorentzin voiman magneettista komponenttia käyttäen

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

- Oletetaan että voima  $\mathbf{F}_{\perp}$  aiheuttaa kulkeutumisen  $\mathbf{v}_D$ . Tehdään muunnos  $\mathbf{v}_{\perp} = \mathbf{v}'_{\perp} + \mathbf{v}_D$

$$\frac{d\mathbf{v}'_{\perp}}{dt} = \frac{q}{m}(\mathbf{v}'_{\perp} \times \mathbf{B}) + \frac{q}{m}(\mathbf{v}_D \times \mathbf{B}) + \frac{\mathbf{F}_{\perp}}{m}$$

- Johtokeskuskoordinaatistossa kahden viimeisen termin on hävittävä
  - Kulkeutumisnopeus on

$$\mathbf{v}_D = \frac{\mathbf{F}_{\perp} \times \mathbf{B}}{qB^2}$$

# Kulkeutumisiilmiöt

- Gravitaatiokulkeutuminen

$$F = m \mathbf{g} \Rightarrow \mathbf{v}_g = \frac{m \mathbf{g} \times \mathbf{B}}{q B^2}$$

- Gradienttikulkeutuminen

$$F = -\mu \nabla B \Rightarrow \mathbf{v}_G = \frac{\mu}{q B^2} \mathbf{B} \times (\nabla B) = \frac{W_{\perp}}{q B^3} \mathbf{B} \times (\nabla B)$$

- Kaarevuuskulkeutuminen (kaareva dipolikenttä)

$$F = -m v_{\parallel}^2 \frac{\mathbf{R}}{R^2} \Rightarrow \mathbf{v}_c = \frac{m v_{\parallel}^2}{q} \frac{\mathbf{R} \times \mathbf{B}}{R^2 B^2} = \frac{2W_{\parallel}}{q B^3} \mathbf{B} \times (\nabla B)$$

- Muitakin on, esim. sähkökentän aiheuttama
- Huomioi suunnat!

# Aurinkotuuli

- Auringosta purkautuu plasmaa aurikotuulena, pääosin protoneja ja elektroneja
- Auringon pinnalla on magneettisesti erimerkkisiä napoja, jotka muodostavat koronaan plasmaa nostavia magneettisia peilejä
- Aurinkotuuli on jatkuvaa, mutta vaihtelu on suurta:  
 $v=200-900$  km/s,  $n= 0.1-100$  cm<sup>-3</sup>,  $B= 0,2 -80$  nT (1 AU etäisyydellä)
- Plasma liike noudattaa Auringon magneettikenttää ja toisaalta kauempana ( $>12R_A$ ), missä virtaus on yliäänistä ja yli alfvénistä, plasman virtaus ohjaa magneettikenttää. Kun virtauksen nopeus on suurempaa kuin häiriöiden (ääniaallot, Alfvénin aallot) eteneminen, niin hiukkaset eivät ehdi reagoida muutokseen, vaan virtaus muokkaa kenttää  
(esim. impulssimomentin säilymisestä johtuen magneettikenttä kiertyy aurikotuulen mukana)
- Parkerin malli on yksinkertaisin malli sille, kuinka aurinkotuuli muuttuu yliääniseksi ja Alfvéniseksi
- Auringon magneettikenttä täyttää koko aurinkokunnan
- Lisäksi roihupurkauksia ja CME:tä (=coronal mass ejection)

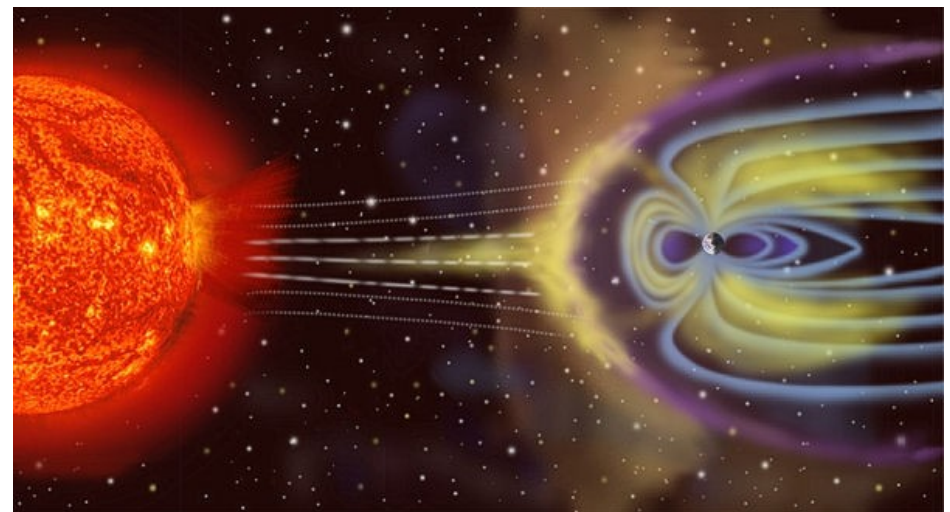
$$v_A = \sqrt{\frac{B^2}{\mu_0 \rho_m}}, \quad v_s = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho_m}}$$

# Maan magnetosfääri

- Maan oma magneettikenttä on melko lähellä dipolikenttää
- Aurinkotuulen dynaaminen paine litistää kenttää Auringon puolelta ja venyttää yöpuolelta
- Yöpuolella hiukkasvirran energiaa siirtyy vuorovaikutuksessa magneettiseksi energiaksi
- Maan kentän magneettinen paine ja aurinkotuulen dynaaminen paine on tasapainossa
- Varsinainen syy magneettikentän muutokseen tulee hiukkasten aiheuttamasta sähkövirrasta törmäyksessä magnetosfääriin
  - Auringon puolella eri merkkiset varaukset ohjautuvat maan magneettikentässä eri suuntiin => nettovirta

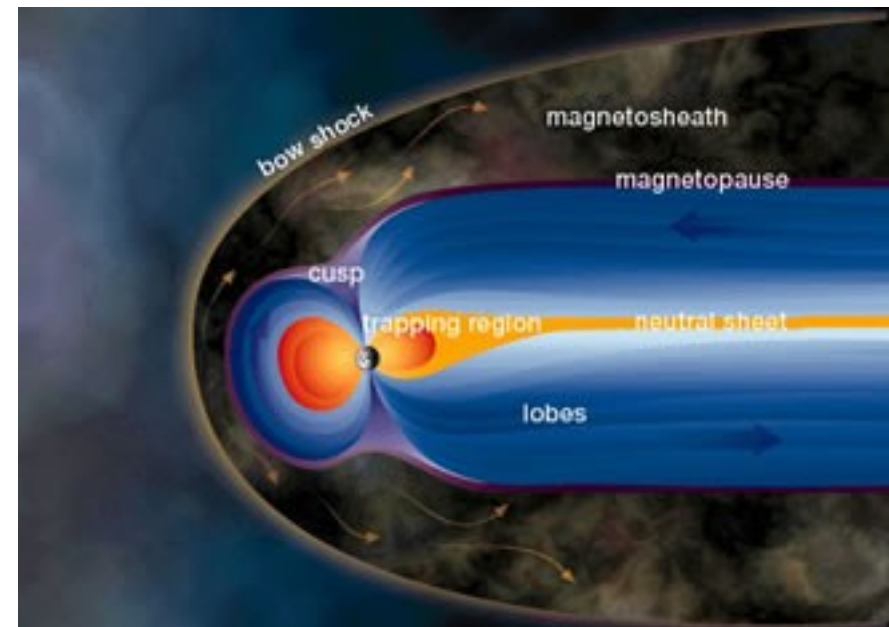
$$K \rho_m V^2 \cos(\phi) = \frac{B^2}{2\mu_0}, \quad K = 0.9$$

- Auringonpurkaukset aiheuttavat magneettisia myrskyjä



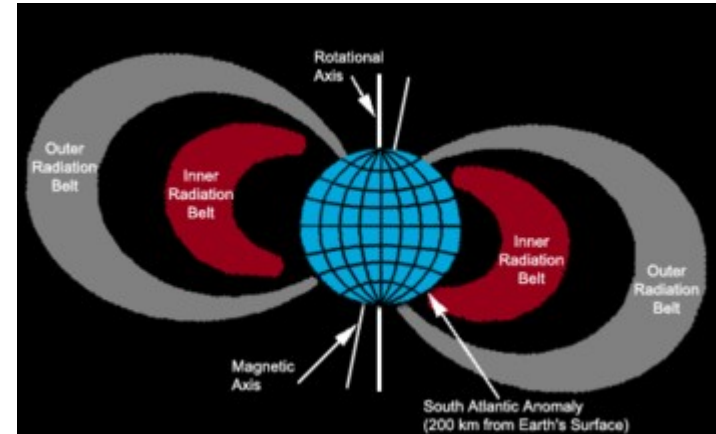
# Revontulet

- Auringon magneettikentän ja Maan magneettikentän hiukkaset ovat jäätyneet omiin kenttiin, ja hiukkaset eivät suoraan sekoitu
- Nopea (yliääninen ja Alfvéninen) aurinkotuulen virtaus aiheuttaa shokkirintaman ja magnetopausin ja shokin välistä aluetta kutsutaan magnetosheathiksi
- Kohdissa, missä eri kentillä on vastakkaiset komponentit, voi syntyä neutraali alue, jossa sekoittumista voi tapahtua (rekonnektio)
- Hiukkaset eivät voi kulkea magneettikenttää vastaan kohtisuoraan, joten hiukkaset eivät pääse syvälle magneettikenttään, paitsi aurinkotuulen muokkaamaan kenttään muodostuneista napaonkaloista
- Plasmaa pääsee virtaamaan magneettikentän suuntaisesti kohti ilmakehää revontuliovaaleiksi kutsutuille vyöhykkeille
- Varauksellisten hiukkasten liike magneettikentässä aiheuttaa sähkökenttiä, jotka kiihdyttävät revontuliovaalille kulkevia elektroneja. Revontulien esiintyminen korreloi magneettisten myrskyjen kanssa
- Ilmakehän yläosiin törmätessään elektronit virittävät ilmakehän molekyylejä, jolloin molekyylit emittoivat niille tyypillisiä valon aallonpituuksia. Vihreä O, punainen O<sub>2</sub> ja sininen N<sub>2</sub>
- Sähkökenttien aiheuttama kulkeutuminen ohjaa plasmaa jonkin verran myös magneettikenttää vastaan kohtisuoraan ( $E \times B$ )



# Van Allenin säteilyvyöt

- Kaksi vyötä
  - Sisempi vyö protoneja n.  $2R_E$  0,1-40 MeV
  - Ulompi vyö elektroneja n.  $5R_E$  keV-MeV



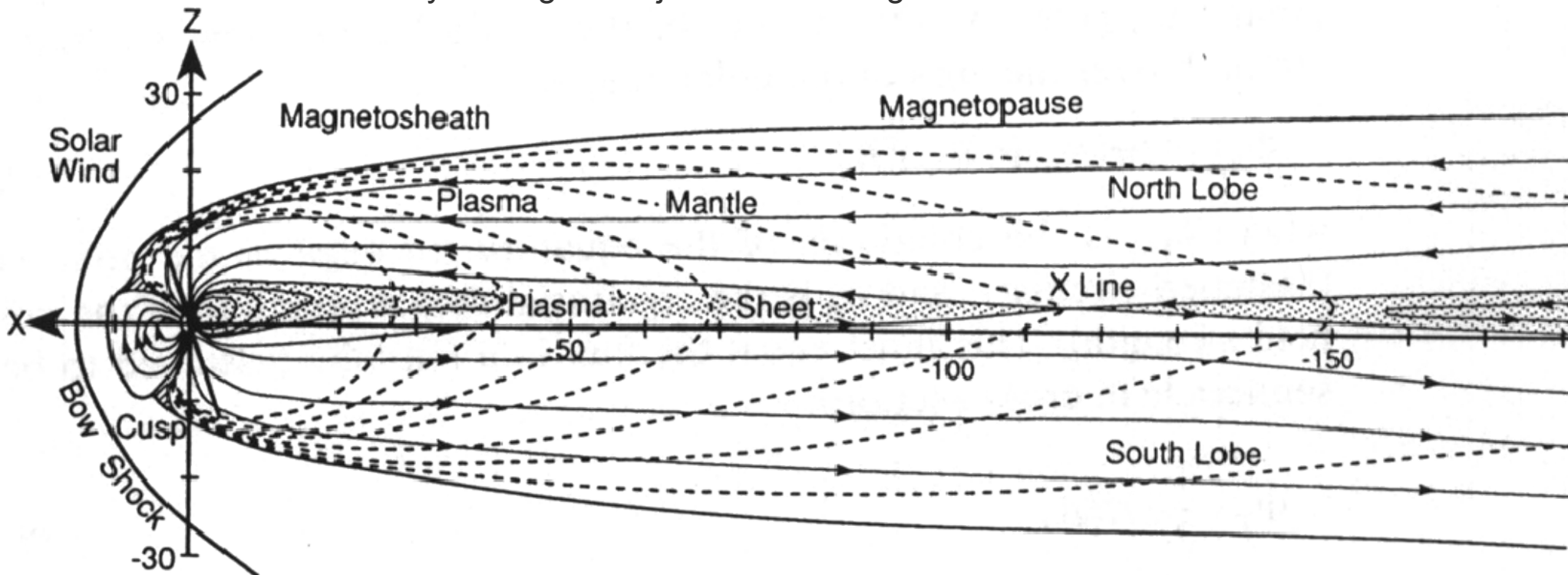
- Maan dipolikenttä luo magneettisen pullon, jossa korkeaaenergiset hiukkaset voivat pysyä pitkään
- Hiukkaset ponnahtelevat napojen välillä magneettikentän suuntaisesti
- Gradientti ja kaarevuuskulkeutuminen aiheuttaa nettovirran länteen ja se kuuluu rengasvirtaan päiväntasaajan tasolla

$$v_{GC} = \frac{W_{\perp} + 2W_{\parallel}}{q B^3} \mathbf{B} \times (\nabla B)$$

- Magneettisten myrskyjen aikana ionien määrä voi kasvaa paljon ja sitä myöten myös rengasvirta
- Relativistisilla elektroneilla kulkeutumisaika Maan ympäri voi olla vain kymmeniä minutteja

# Pyrstö

- Pyrstölohkoissa yöpuolella on revontuliovaalin sisään jäävän magneettinen vuo
- Plasmalevyjen virrat aiheuttavat lohkojen suuren koon
- Plasmamanttelin plasma on peräisin osittain napaonkaloon virtaavasta aurinkotuulesta ja myös ionosfääristä karkaavia hiukkasia
- Lohkojen väliin jäävän plasmalevyn hiukkaset ovat peräisin suurelta osin ionosfääristä
  - Lohkoihin hiukkasia päätyy napatuulena napakalotista ja napaonkalon alueelta
  - Sähköinen kulkeutuminen kuljettaa plasmaa lohkoista kohti plasmalevyä
  - Lohkoissa tiheys  $\sim 0.01 \text{ cm}^{-3}$ , plasmalevyn keskellä  $\sim 0.3 \text{ cm}^{-3}$
- Hiukkasia kulkeutuu myös rengasvirtojen alueelle magneettisten häiriöiden aikana



# Plasmalevy

- Harrisin yksiulotteinen malli:

$$\mathbf{B}(z) = B_0 \tanh(z/h) \mathbf{e}_x, \quad p(z) = \frac{P_0}{\cosh(z/h)}$$

- Toteuttaa magnetohydrostaattisen tasapainoehdon

$$\mathbf{J} \times \mathbf{B} = \nabla p$$

- Kokonaispaine on helppo nähdä olevan vakio

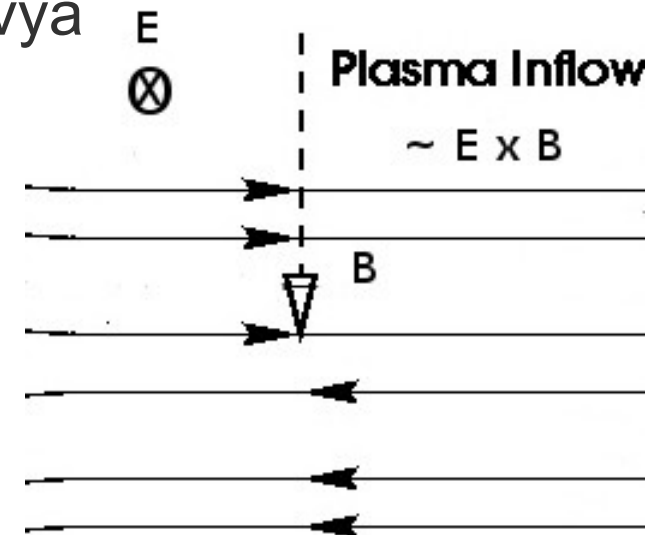
$$\frac{B_0^2}{2\mu_0}$$

- Ampèren laista nähdään että plasmalevyssä täytyy kulkea virta (eri suuntiin eri puolella levyä)  $\mu_0 \mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{B}$

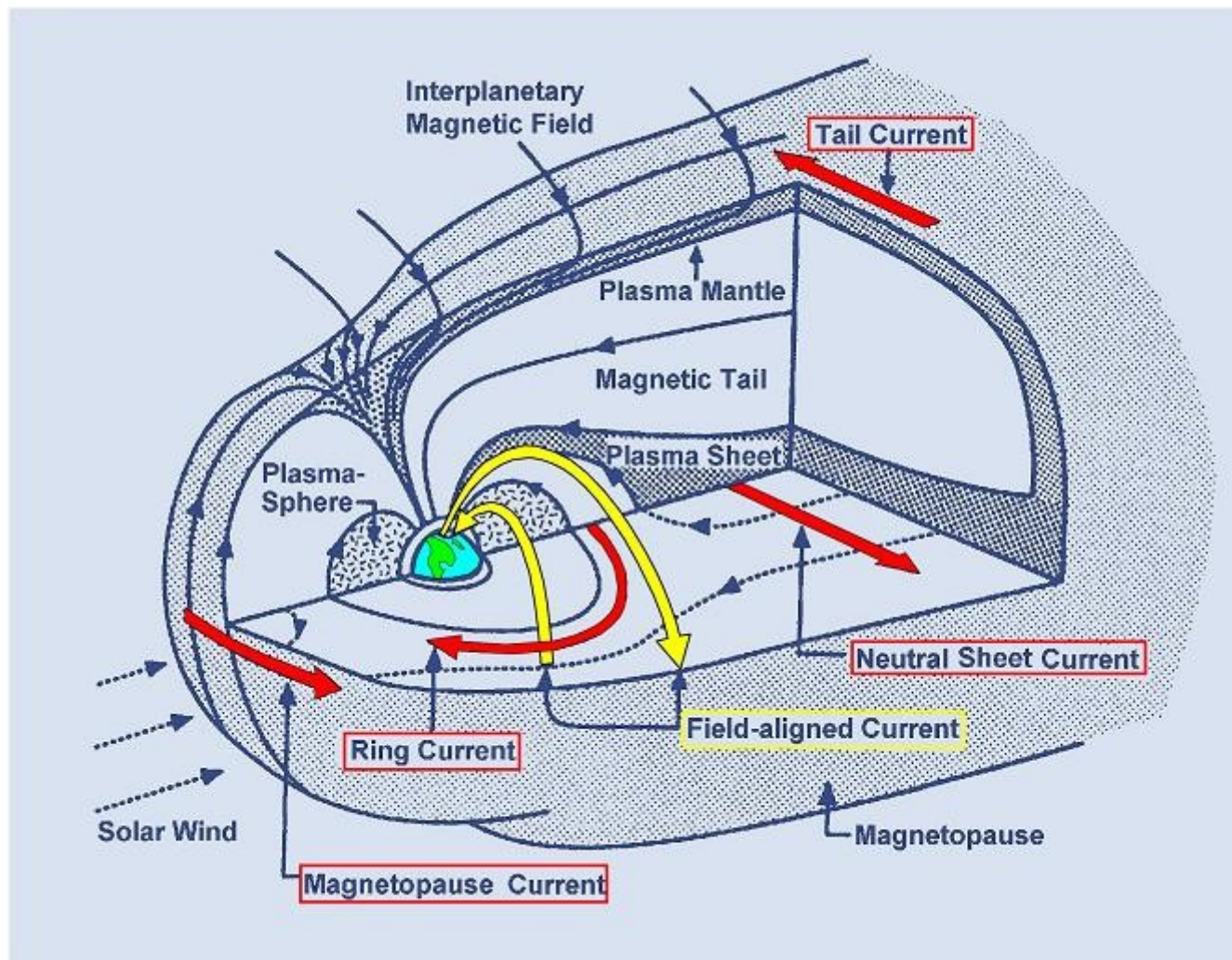
- Lisäämällä malliin konvektiosähkökentän, sähköinen kulkeutuminen ajaa plasman kohti plasmalevyä

- Levyn keskellä B on pieni, jossa hiukkaset saavat energiaa sähkökentältä

- Kokonaisvirta plasmalevyn poikki ~10 MA (sähkökentän suuntaan)



# Kokonaisuutena suurimmat virrat



- Dynamiikka on staattista tilannetta mielenkiintoisempi

# Onko plasmalla, sen virroilla ja niiden dynamiikalla merkitystä muille kuin tutkimusapurahaa saaville?

- Auringon aktiivisuus plasmapurkauksina saa aikaan nopeita muutoksia plasman määrään ja virtoihin magnetosfäärissä, joka saa aikaan magneettisia myrskyjä (ja esim. laaja-alaisia revontulia)
  - Ionosfäärin ionien määrien muutokset vaikuttavat radioliikenteeseen ja aiheuttaa häiriöitä
  - Satelliittien välittämä tietoliikenne häiriintyy ionosfäärin heijastavan vaikutuksen vuoksi (myös esim. GPS ja sääsatelliitit)
- Aurinkotuulen dynaaminen paine voi litistää magnetosfäärin alle geostationääriseen radan
  - tietoliikennesatelliitit altistuvat hiukkassäteilylle  
(Telstar 401 maksoi 200 miljoonaa dollaria+ muita kuluja)
- Suuriin sähkönsiirtolinjoihin voi indusoida jännitteitä ja ne täytyy huomioida suunnittelussa
  - Quebec, Kanada pimeänä 9 tuntia 1989
  - Malmö 2003
- Pitkien putkistojen korroosio voi kasvaa dramaattisesti, esim. öljyputket
- Avaruussäätöpalveluita kehitetään

# Lähteitä

- Johdatus plasmafysiikkaan ja sen avaruussovellutuksiin, Hannu Koskinen
- <http://www-ssc.igpp.ucla.edu/personnel/russell/papers/config.html/fig1.gif>
- <http://www.physics.usyd.edu.au/~cairns/teaching/lecture14/node4.html>
- <http://esa-spaceweather.net/spweather/BACKGROUND/EFFECTS/applications.html>