



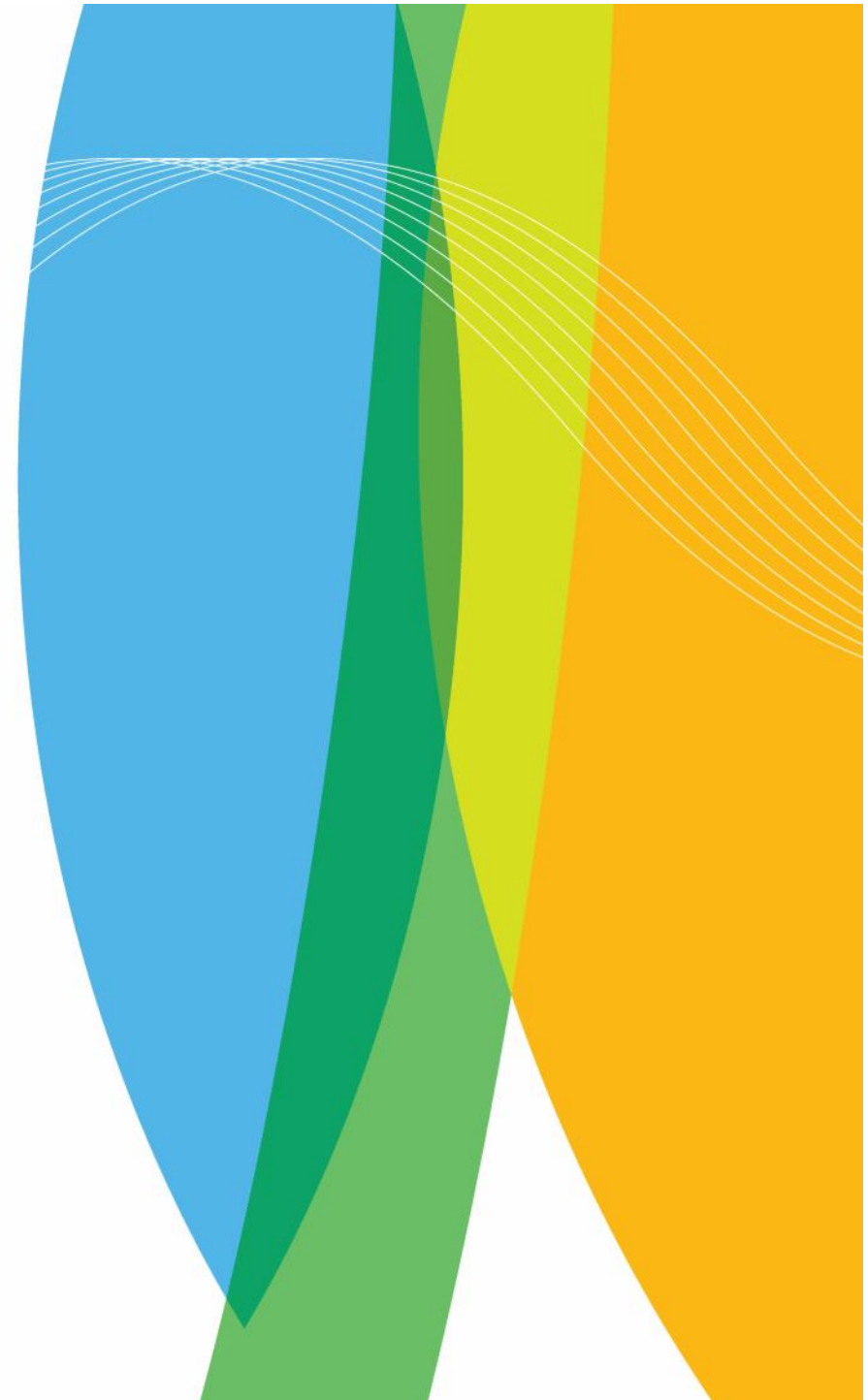
ILMATIETEEN LAITOS
METEOROLOGISKA INSTITUTET
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

Rekonnektio magnetosfäärissä

Tiera Laitinen

**Aurinko–Maa-kytkennän
tutkijaseminaarissa**

Helsingin yliopistossa 3.2.2006





1. Miten ideaali-mhd rikotaan ja säilytetään yhtä aikaa

- Magneettisen rekonnektion käsite ja tärkeimmät ominaisuudet

2. Minkä edessään avaa, sen takanaan sulkee

- Magnetosfäärin rekonnektiopaikat: nokka ja pyrstö
- Pyrstön rekonnektio mhd-simulaatiossa: miltä se näyttää?
- Nokan rekonnektio: missä se luuraa?

3. Lataa ja laukaise, vai: aurinkotuulen tahdissa mars!

- Mikä rekonnektioprosesseja säätelee?
- Avoimia kysymyksiä



Magneettinen rekonnektio

Rekonnektiosta puhuttaessa tausta-ajatuksena on ideaalisen mhd:n kuva plasmaan jäätyneestä magneettikentästä.

- Ääretön sähkönjohtavuus, ”kenttä liikkuu plasman mukana”
- Hiukkaskuva: johtokeskusaproksimaatio voimassa.

Rekonnektio on käsite, jonka avulla tämän idealisoidun kuvan puitteissa voidaan käsitellä sen **paikallisen** rikkoutumisen seurauksia.

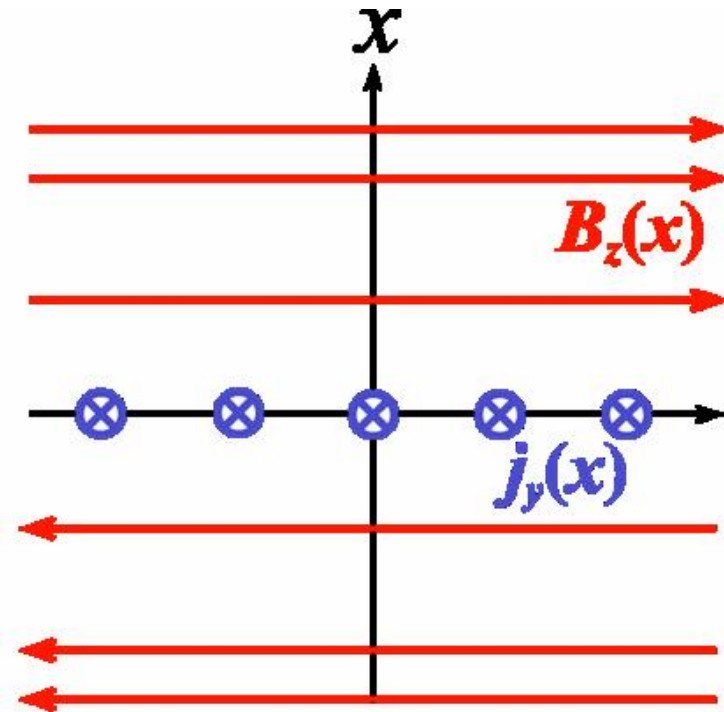
- Paikallista resistiivisyyttä, kenttäviivat ”sulavat” irti plasmasta ja kytkeytyvät uudella tavalla
- Hiukkaskuva: johtokeskusaproksimaatio pettää.



Yksinkertainen virtalevy

Ampèren laki: $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}$

- Erisuuntaisten magneettikenttien välissä kulkee sähkövirtaa
- Yksinkertainen esimerkki: yksiulotteinen virtalevy
- Ideaaliplasmassa tilanne voisi pysyä, mutta miten resistiivisyys vaikuttaa?

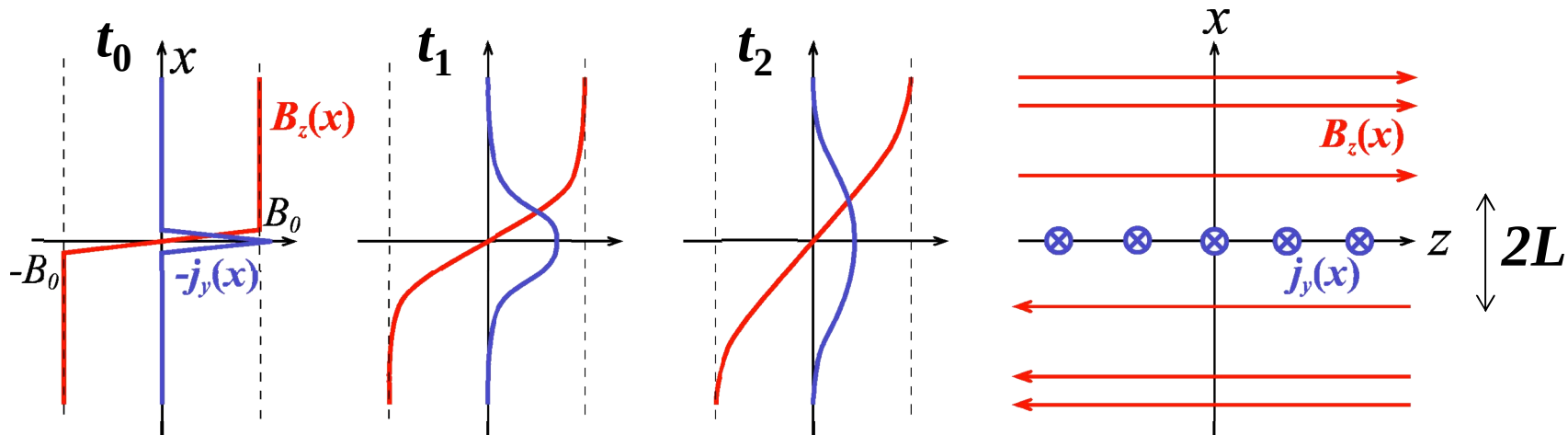




Magneettinen diffuusio

Joulen lämmitys: $P = \frac{1}{\sigma} J^2$

- Resistiivisyys syö magneettista energiaa ja kuumentaa plasmaa
- Magneettikentän muutos loivenee ja virtalevy paksunee.





Lisätään sähkökenttä

Ohmin laki: $\mathbf{E} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B} + \frac{1}{\sigma} \mathbf{J}$

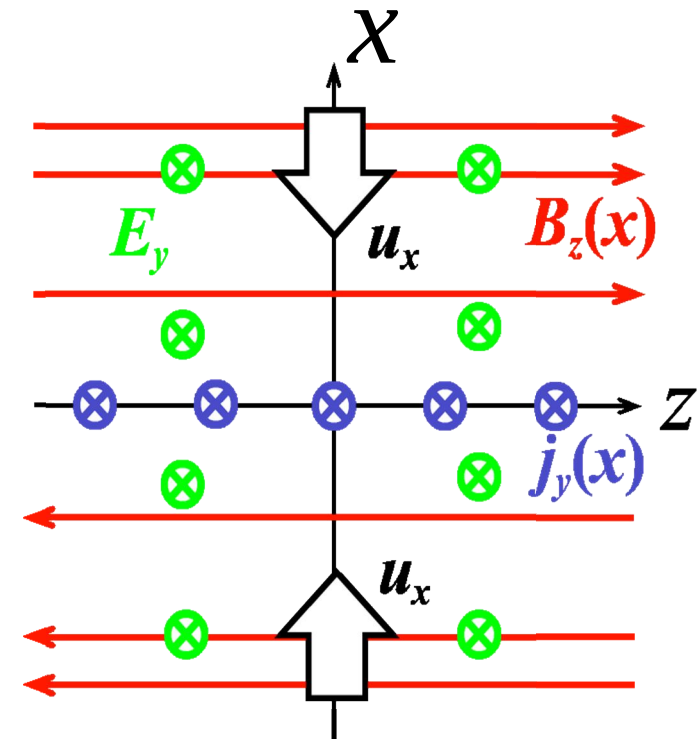
- Stationaarisessa tilassa $E(x)$ on vakio (Faradayn lain nojalla).

Virtalevyn ulkopuolella: $\mathbf{E} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B}$

- plasmaa ja magneettivuota ajautuu kohti virtalevyä.

Virtalevyn keskellä: $\mathbf{E} = \frac{1}{\sigma} \mathbf{J}$

- resistiivisyys kuumentaa plasmaa
- diffuusio tuhoaa magneettivuota
- mutta minne plasma menee?

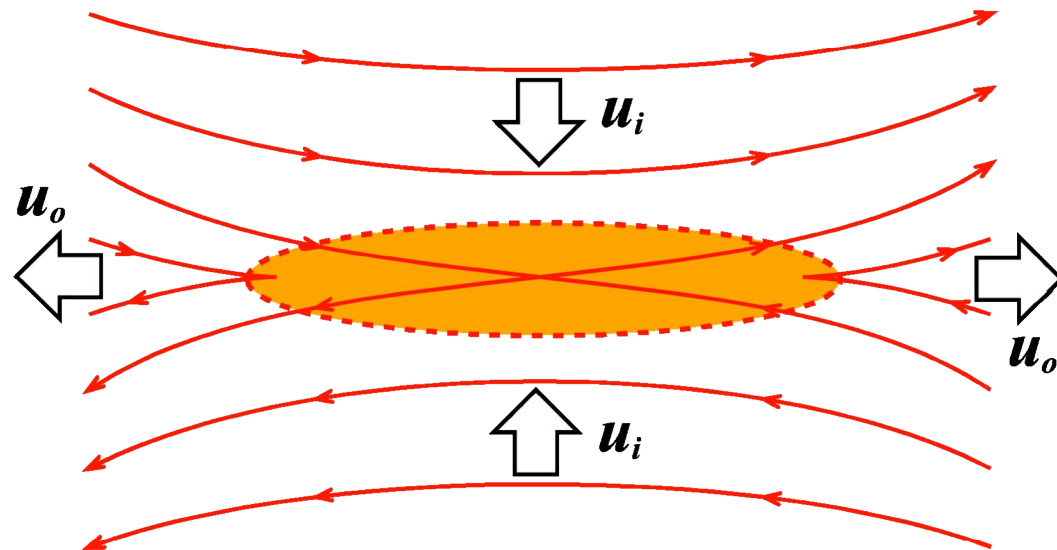
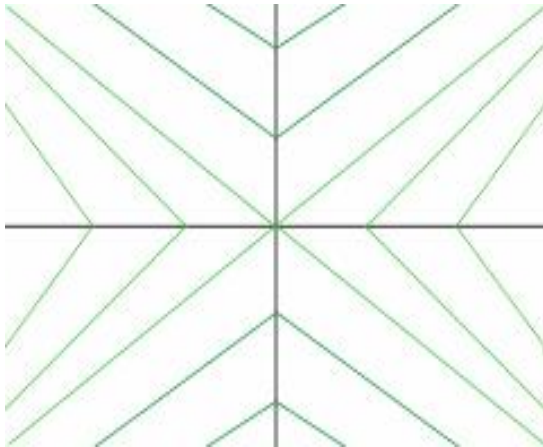




Sweetin ja Parkerin rekonnektio

Kaksiulotteinen x-viivageometria

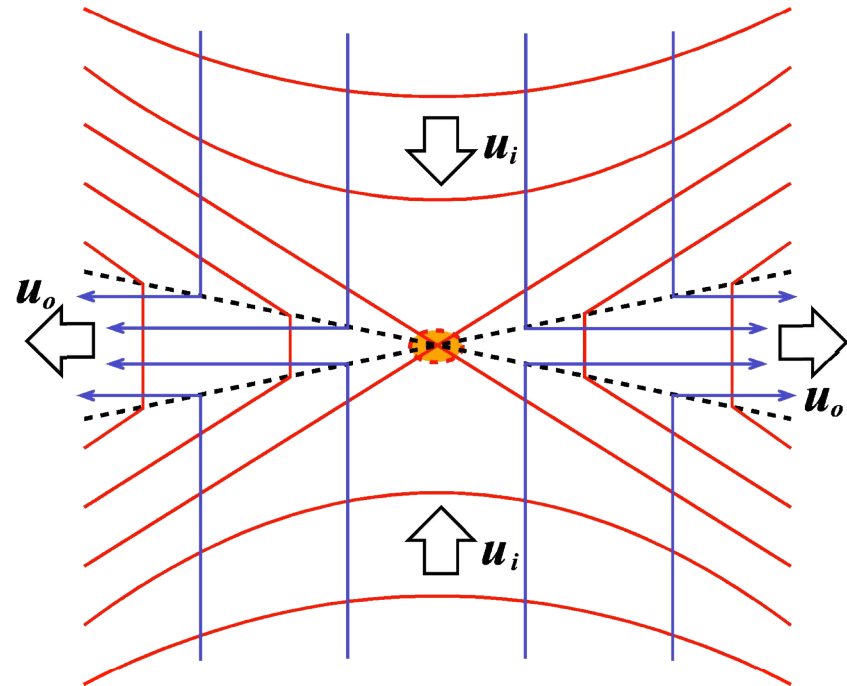
- Äärellisen kokoinen diffuusioalue äärettömän virtalevyn sijaan
- Plasma virtaa pois diffuusioalueen reunoilta





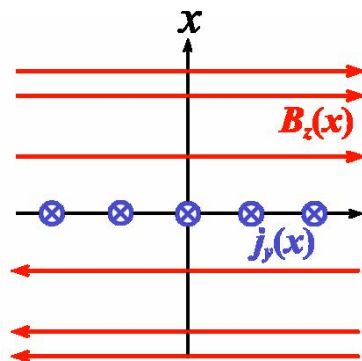
Petschekin rekonnektio

- Pieni diffuusioalue keskellä
- Diffuusioalueeseen liittyy neljä sokkirintamaa
- Plasman kiihdytystä ja kuumennusta myös sokeissa
- Paljon nopeampi ja tehokkaampi kuin Sweetin ja Parkerin malli.
- Monimutkaisempiakin on...



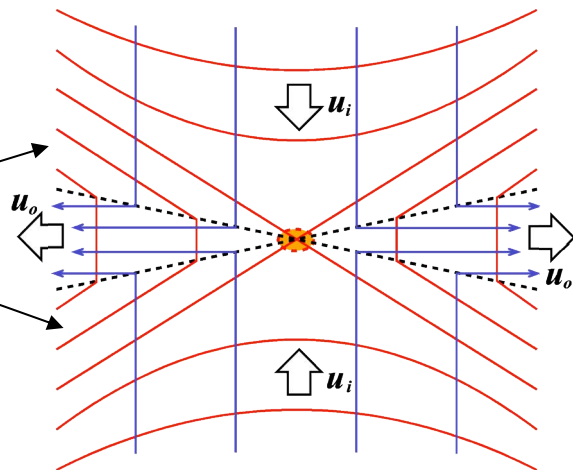


Mikä siinä nyt niin erinomaista on?



topologisesti
erilliset
magneettikentät

magneettinen
kytkentä eri
alueiden välillä



- Avaa topologisen rajapinnan plasman läpivirtaukselle
- Muuntaa magneettista energiaa plasman liike- ja lämpö-energiaksi

kuuma ja nopea
ulosvirtaus



1. Miten ideaali-mhd rikotaan ja säilytetään yhtä aikaa

- Magneettisen rekonnektion käsite ja tärkeimmät ominaisuudet

2. Minkä edessään avaa, sen takanaan sulkee

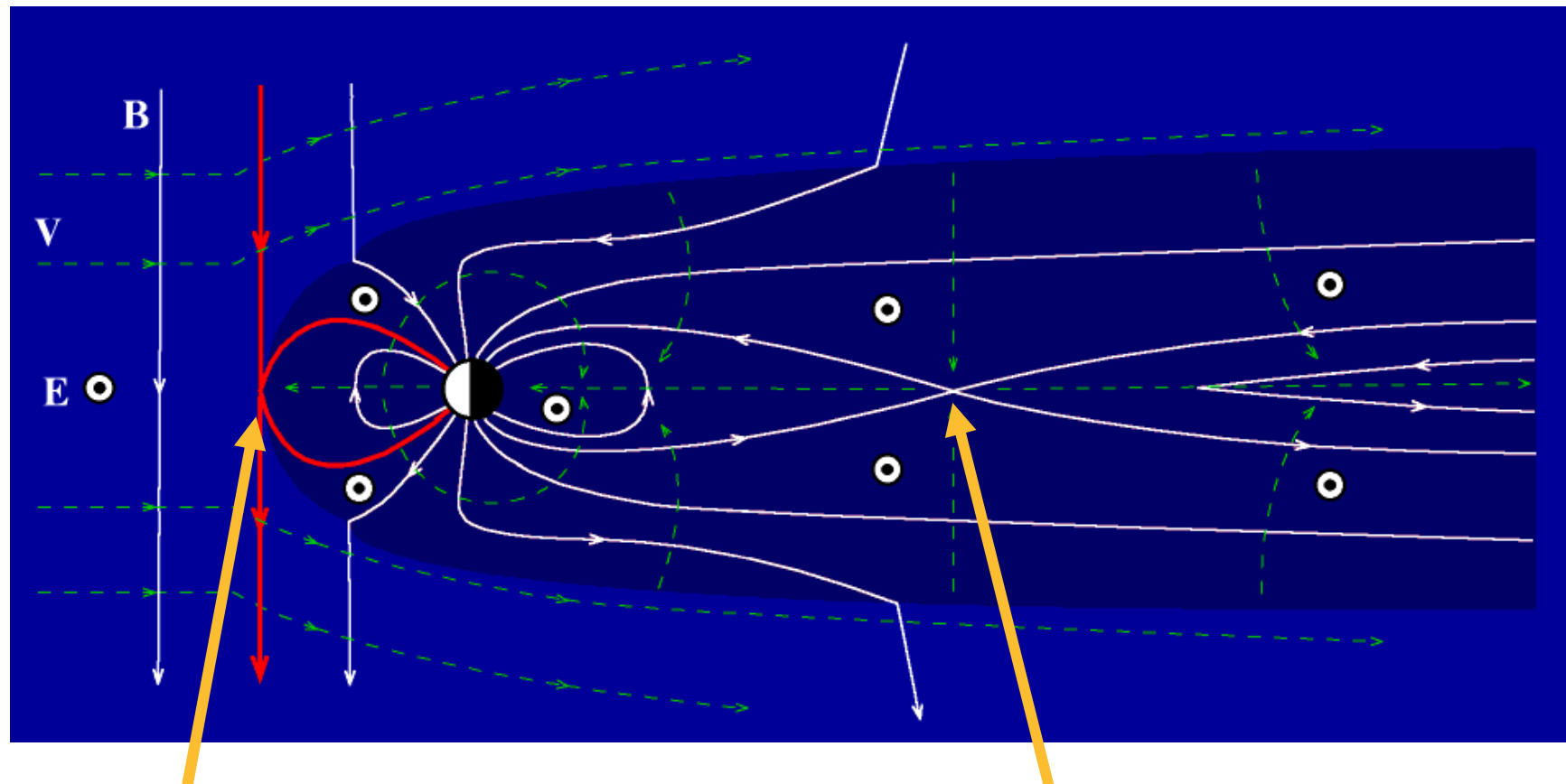
- Magnetosfäärin rekonnektiopaikat: nokka ja pyrstö
- Pyrstön rekonnektio mhd-simulaatiossa: miltä se näyttää?
- Nokan rekonnektio: missä se luuraa?

3. Lataa ja laukaise, vai: aurinkotuulen tahdissa mars!

- Mikä rekonnektioprosesseja säätelee?
- Avoimia kysymyksiä



Magnetosfäärin rekonnektiopaikat

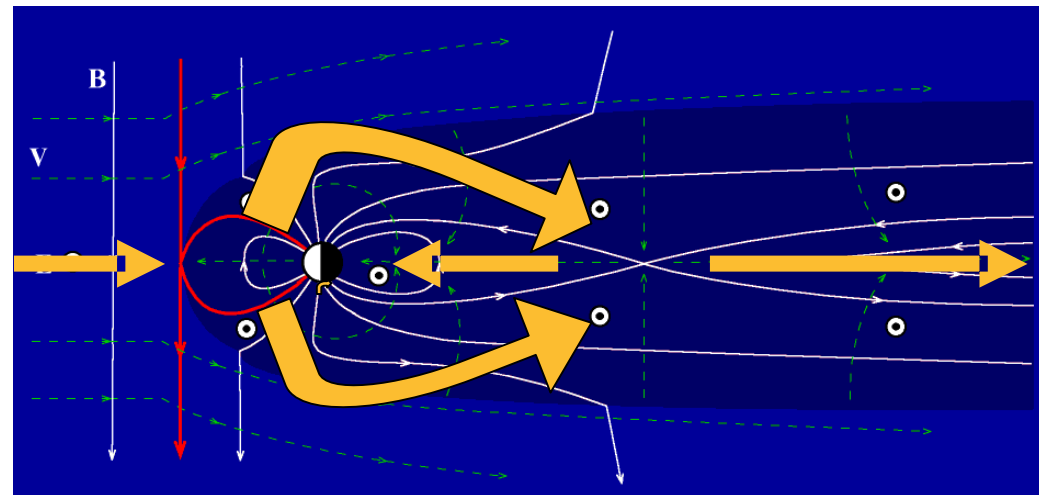


magnetopausilla

pyrstölohkojen välissä



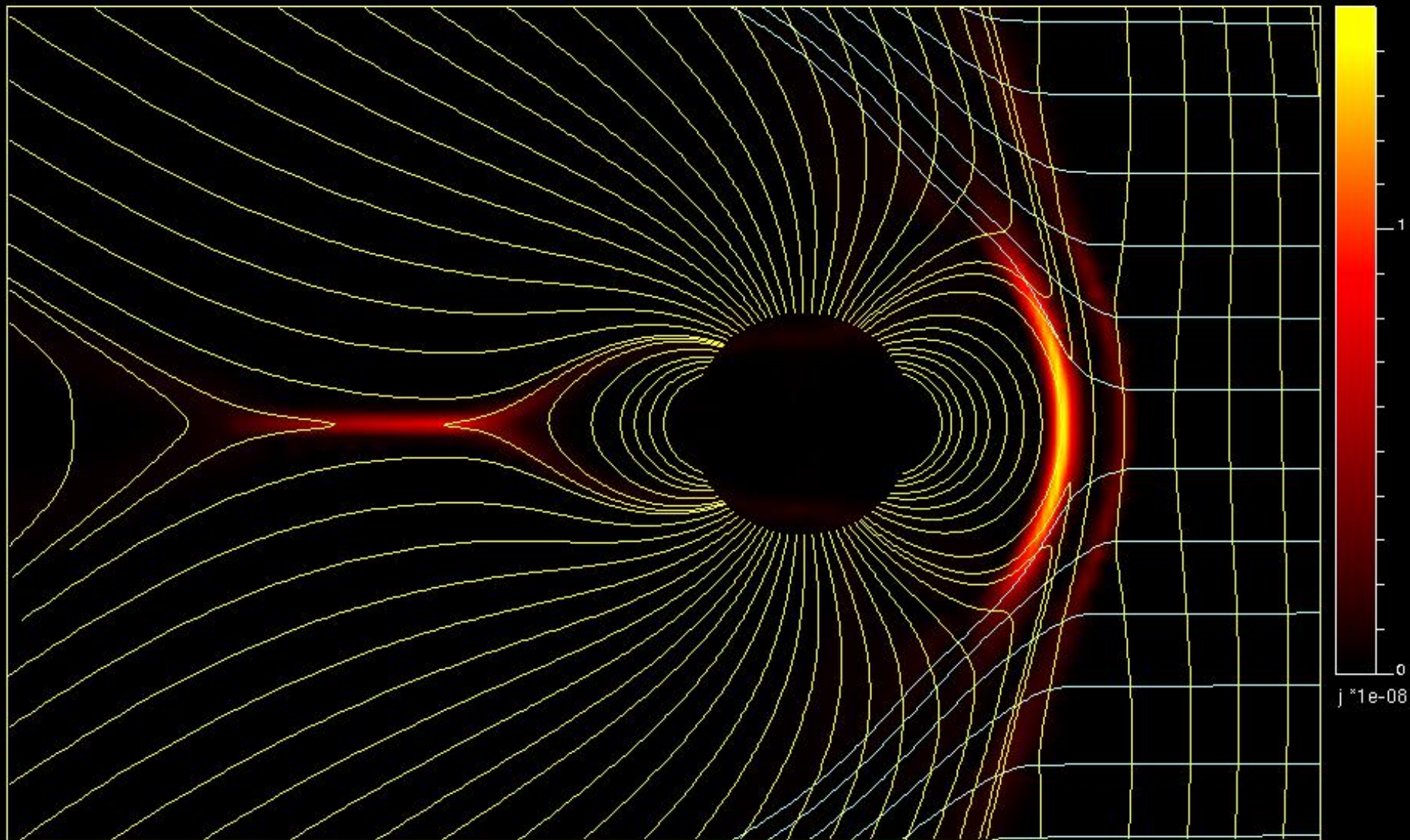
Kun aurinkotuulen $B_z < 0$,
erisuuntaiset kentät painautuvat vastakkain nokalla.
Silloin rekonnektio avaa Maan dipolikentän kenttäviivoja.
Avoin magneettivuo konvektoituu pyrstölohkoihin.



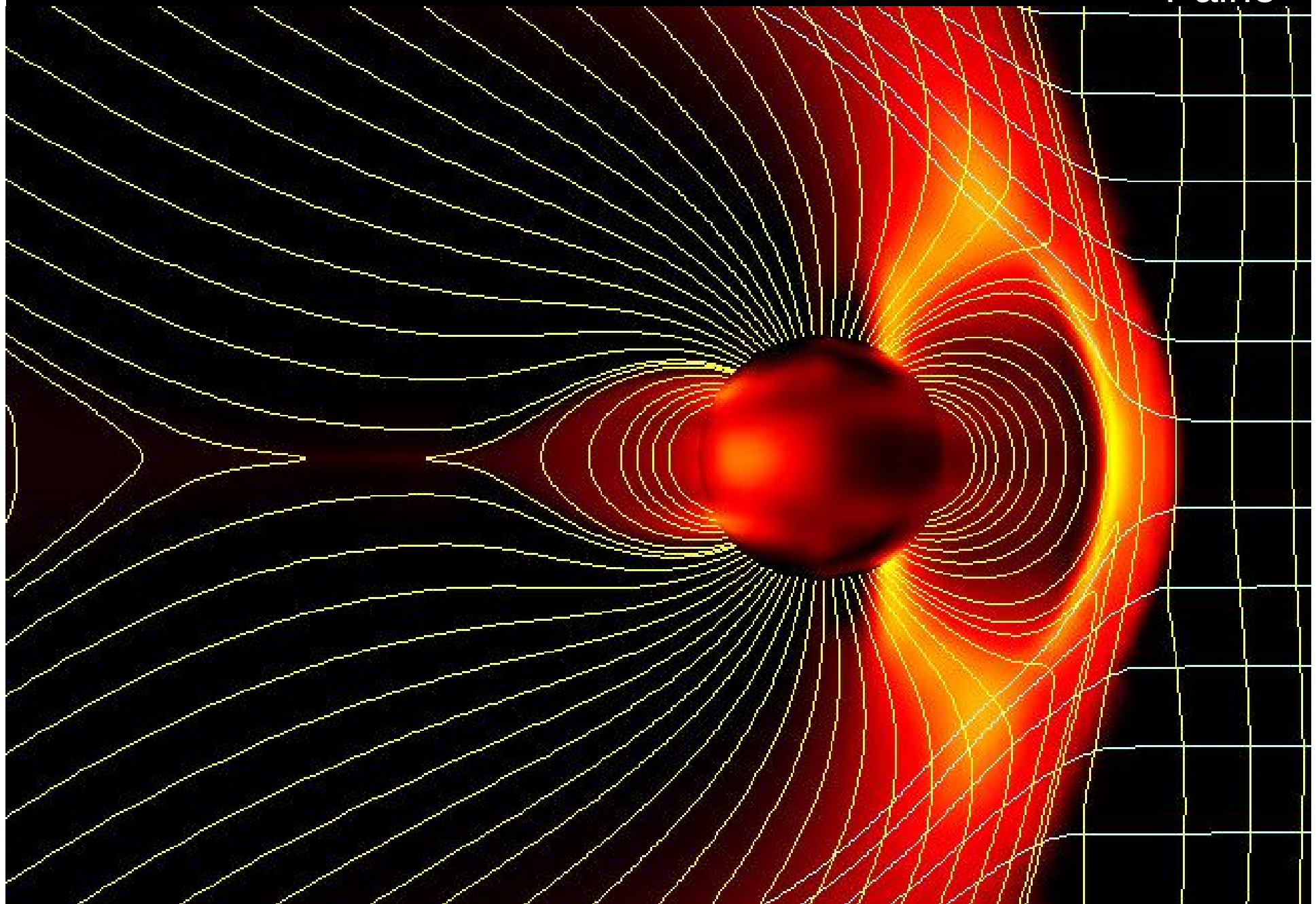
Pyrstölohkojen kentät ovat aina vastakkaissuuntaiset.
Kun konvektio painaa niitä vastakkain, ne rekonnektoituvat,
ja avoimia kenttäviivoja sulkeutuu dipolimuuotoisiksi.
Irrallista magneettivuota poistuu pyrstöön.

Sähkövirta

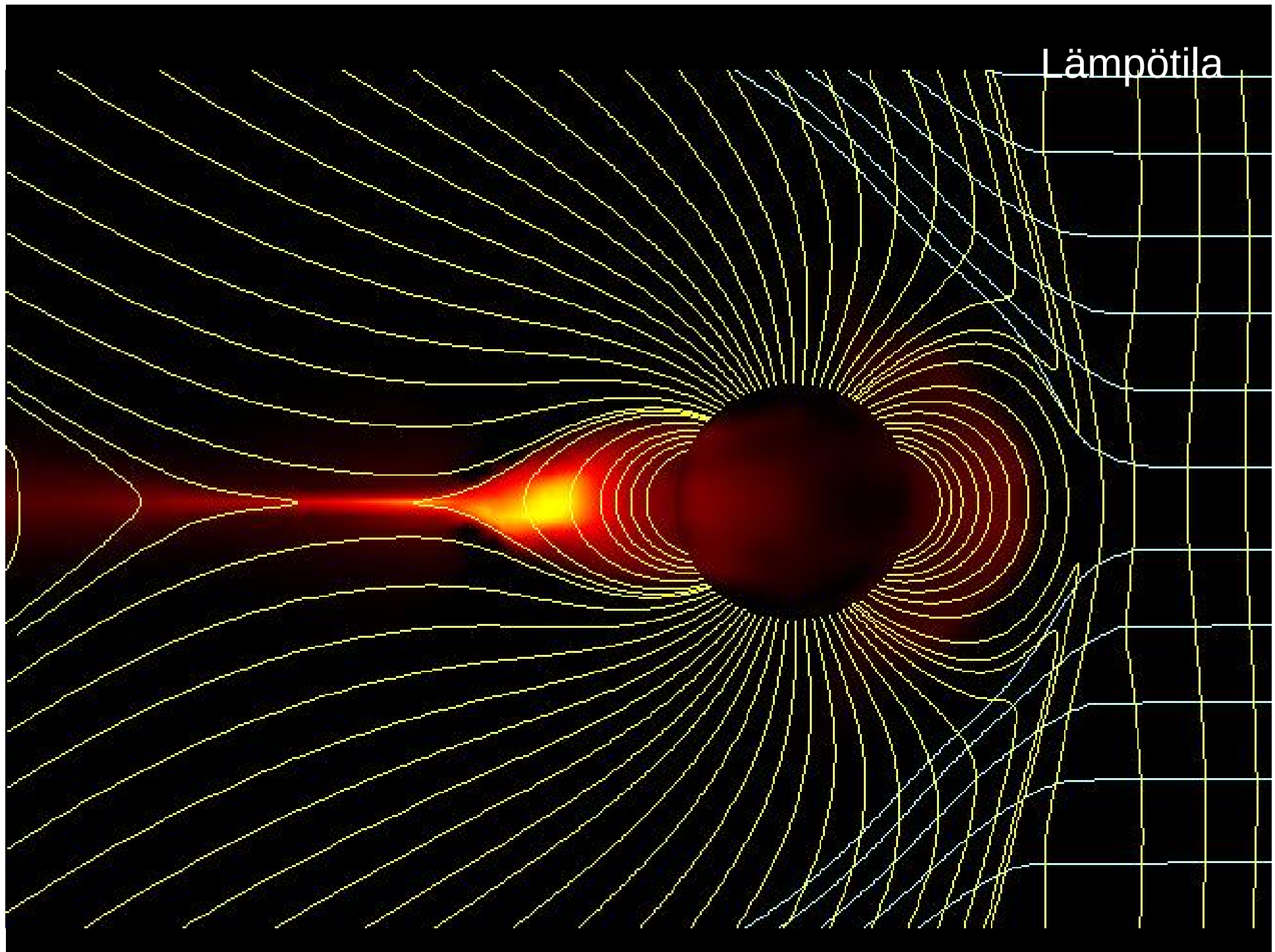
mstate20200401_041500.hc



Paine



Lämpötila



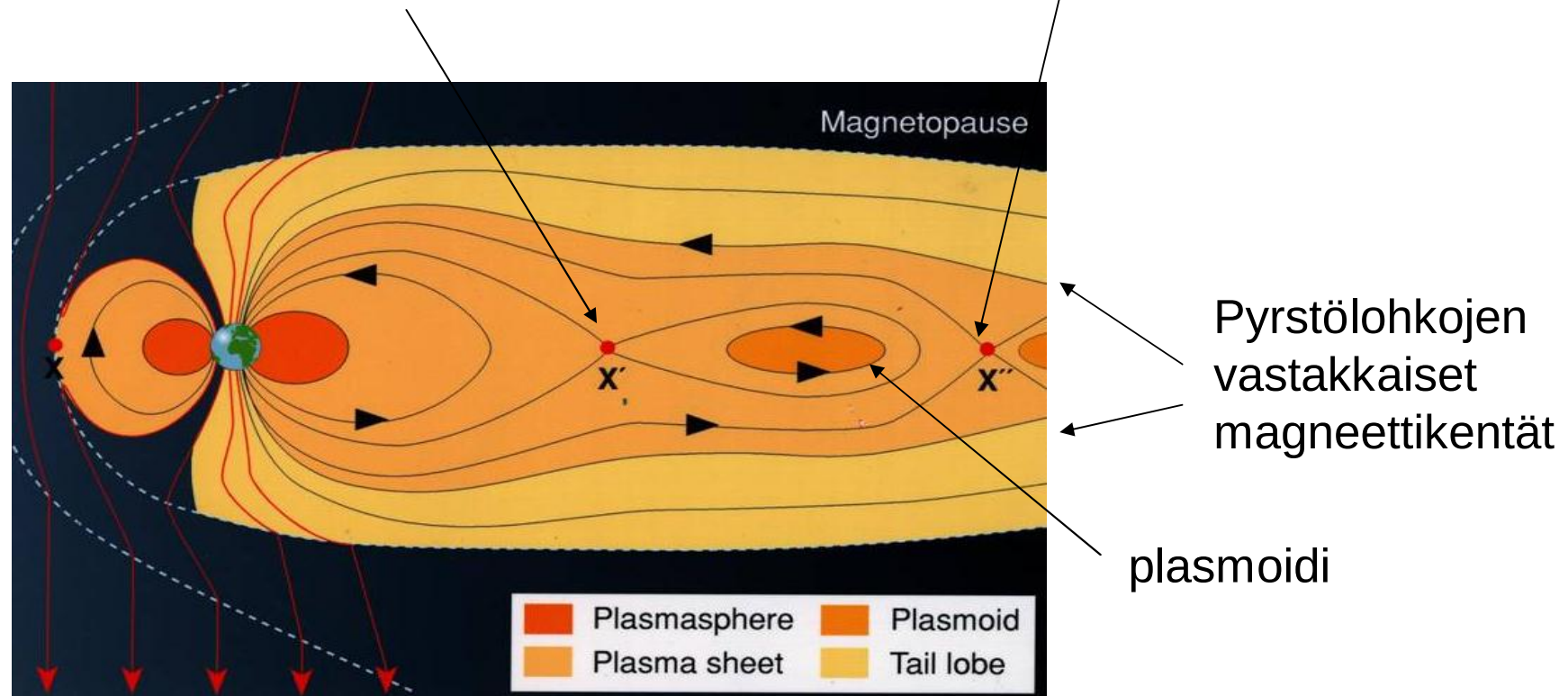


Keskitytään ensin pyrstön läheiseen x-viivaan

Läheinen neutraaliviiva, $\sim 20 R$

- syntyy ajoittain vahvan konvektion aikana
- osallisena alimyrskyissä.

Kaukainen neutraaliviiva, $\sim 100 R$

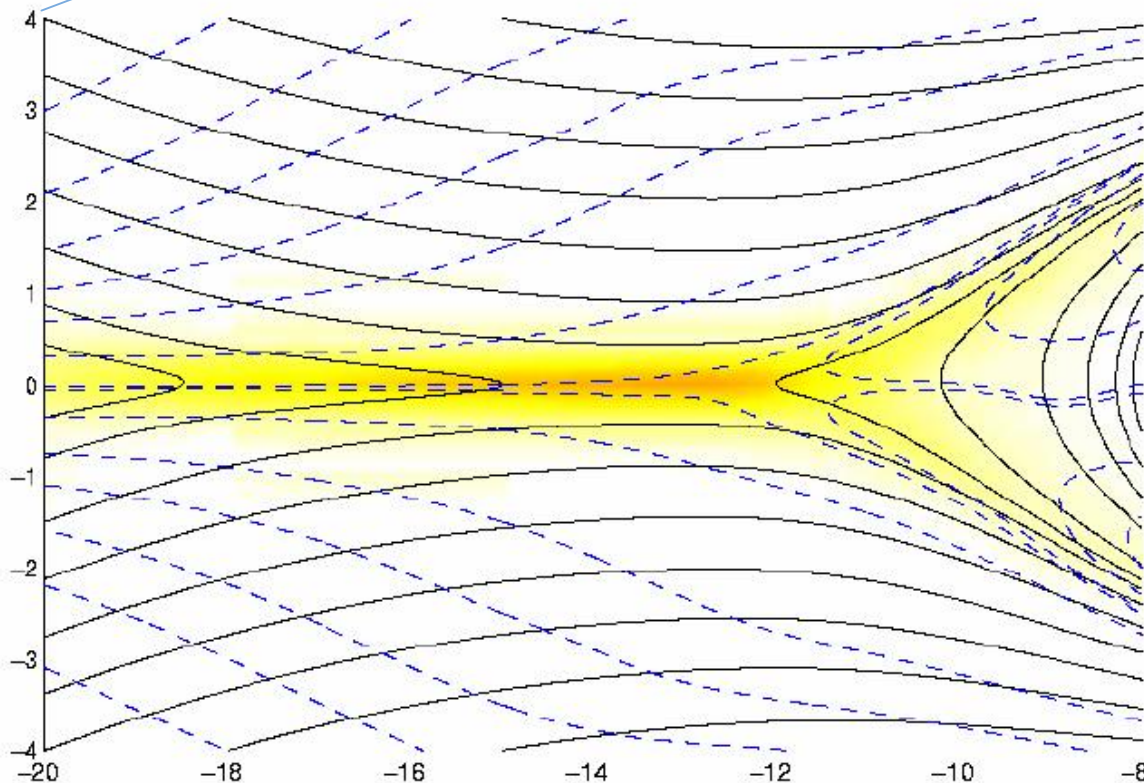


Rekonnektio magnetosfäärissä



Simulaatiossa

- Selvästi tunnistettava 2-
ulotteinen x-viivageometria

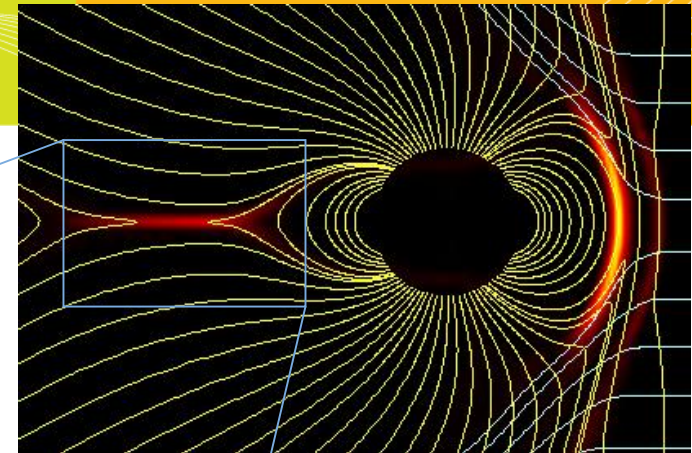


**Eroja teoreettisiin
malleihin:**

plasman nopea ja
hyvin vino sisäänvirtaus

Maan dipolikentän
vaikutus

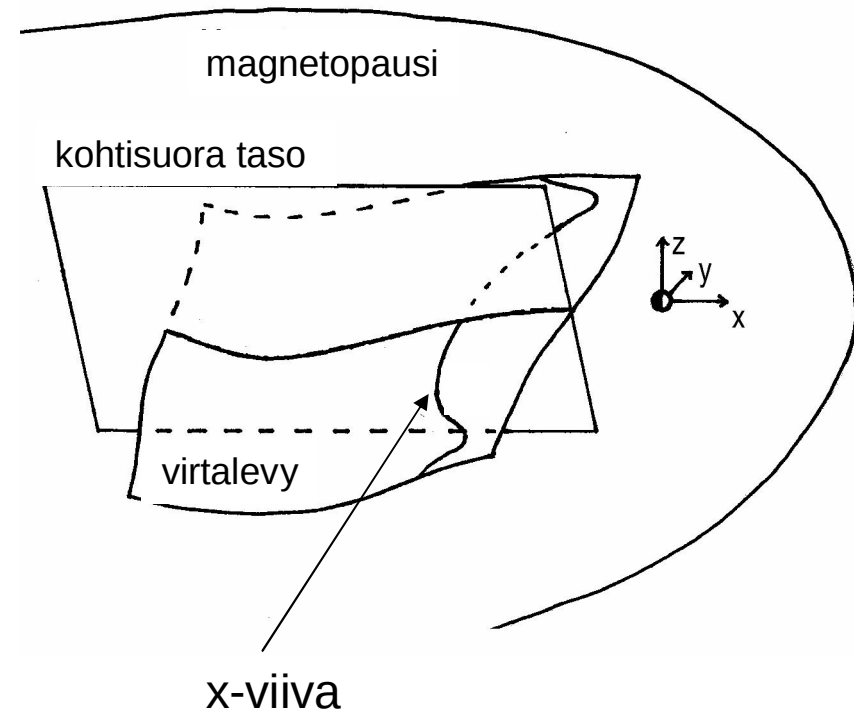
hidas ulosvirtaus
Maahan päin
(nopea poispäin)





Pyrstön rekonnektioalueen etsiminen

- **Virtalevy: $B_x = 0$**
 - pyrstölohkojen välissä
 - löytyy magneettikentän suunnanmuutoskohtana
 - varsin tarkasti suurimman virrantiheyden pinta.
- **X-viiva: $B_n = 0$**
 - rekonnektion ”ydin”.
- **Kohtisuora taso**
 - avuksi havainnollistamiseen.

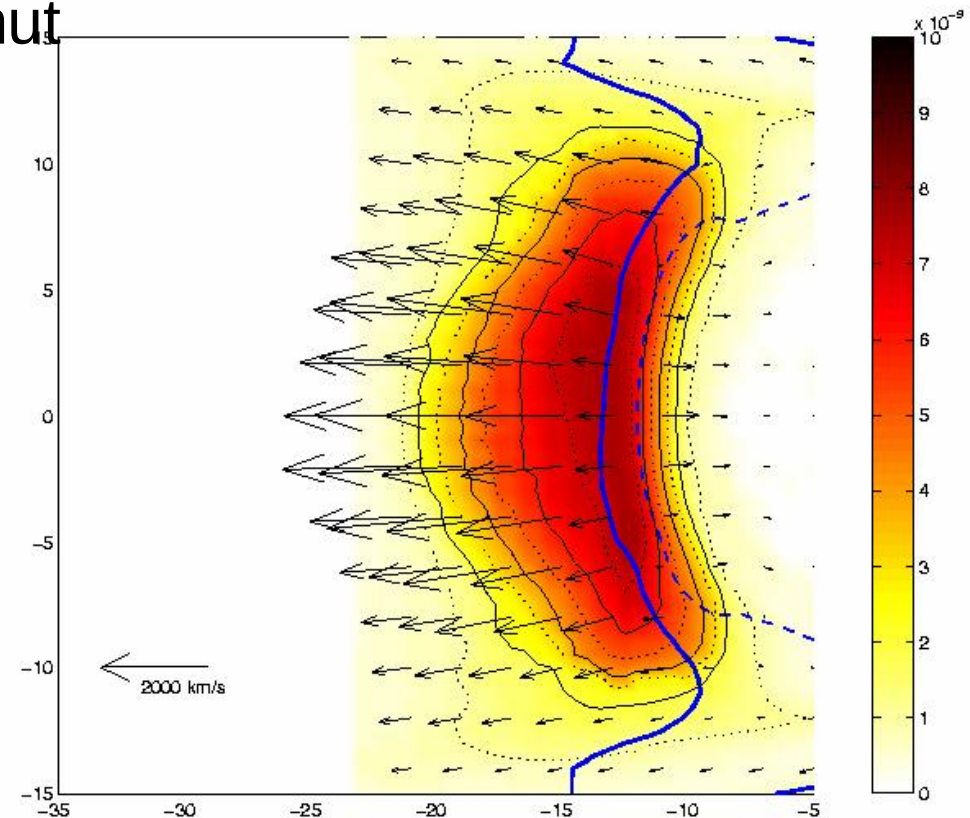
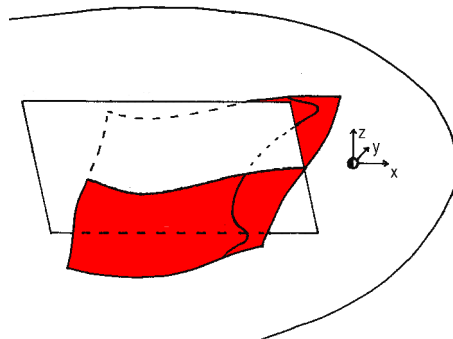




Virtalevy: rekonnektio ylhäältä

Rekonnektion tunnusmerkit:

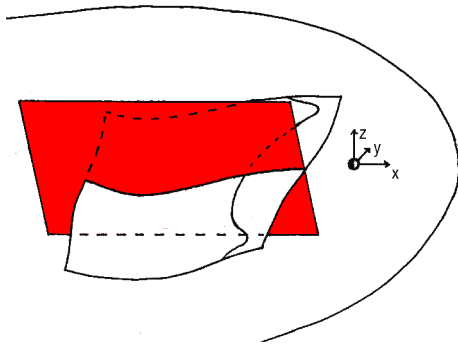
- suuri virrantiheys – ohentunut virtalevy
- plasman kiihdytys ja nopea ulosvirtaus
- x-viiva ja plasmanjakaja lähekkäin



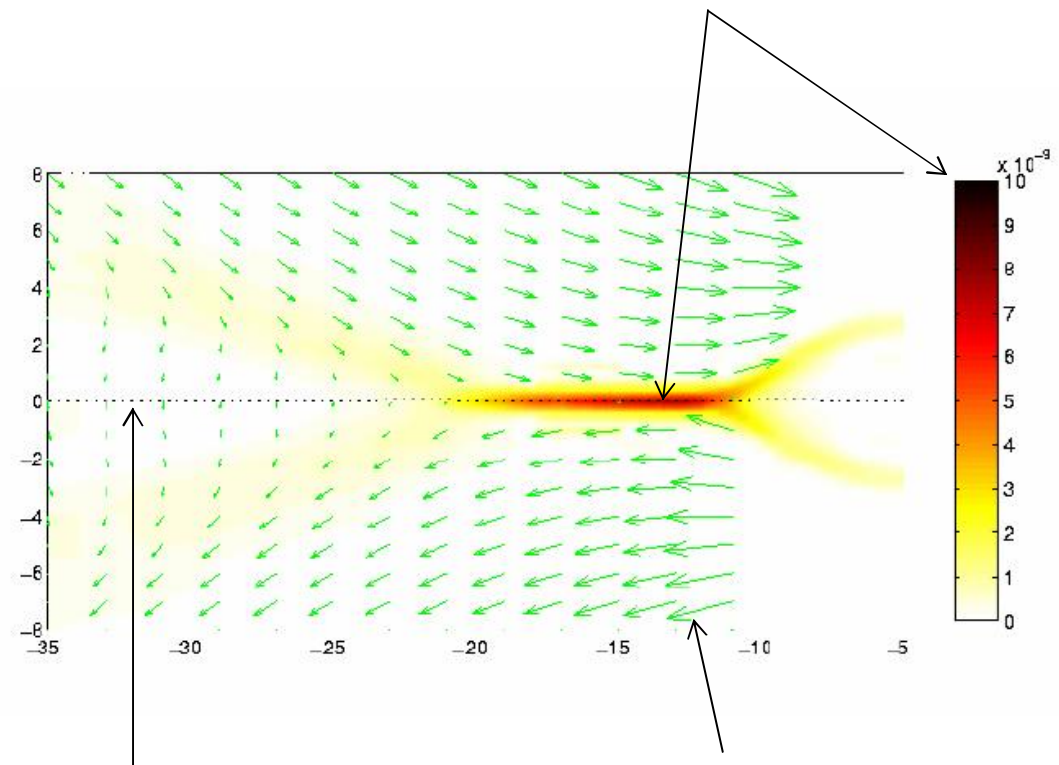


Rekonnektio sivulta

- Poikkileikkaus keskeltä äsken nähtyä aluetta
- Nähdään magneettikentän geometrian muuntuminen



virrantiheys 0 – 10 nA/m²



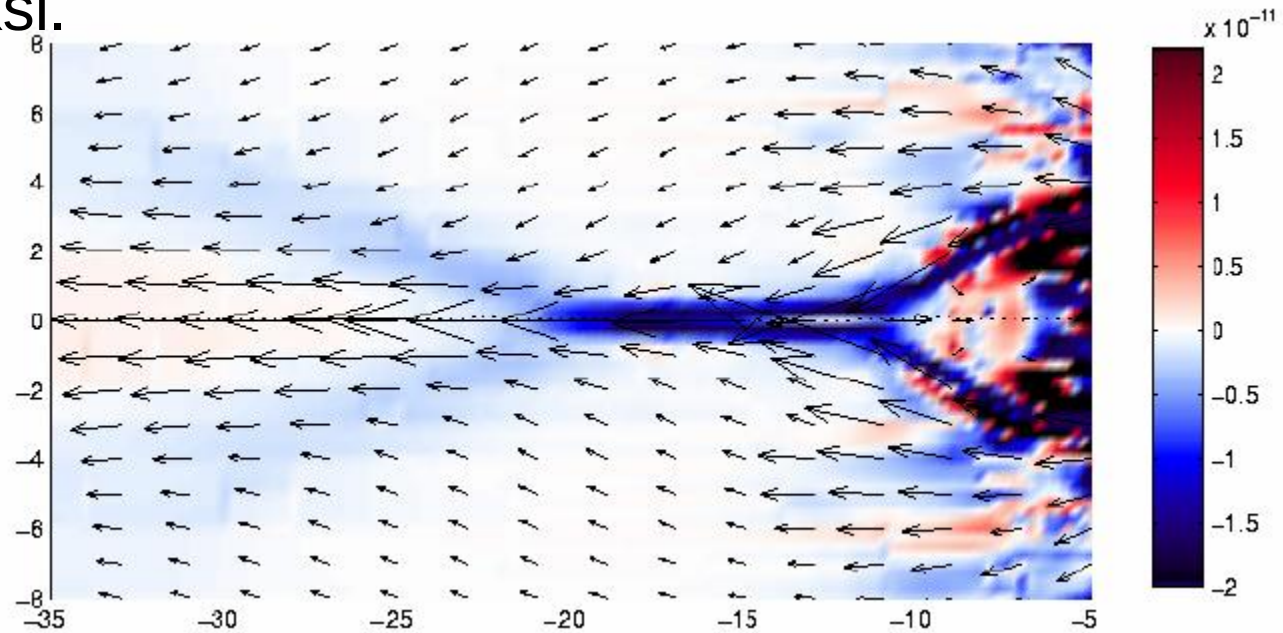
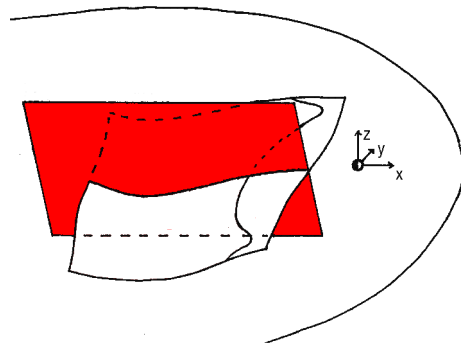
virtalevyn leikkaus

magneettikenttä-
vektoreita



Rekonnektio on magneettinen moottori

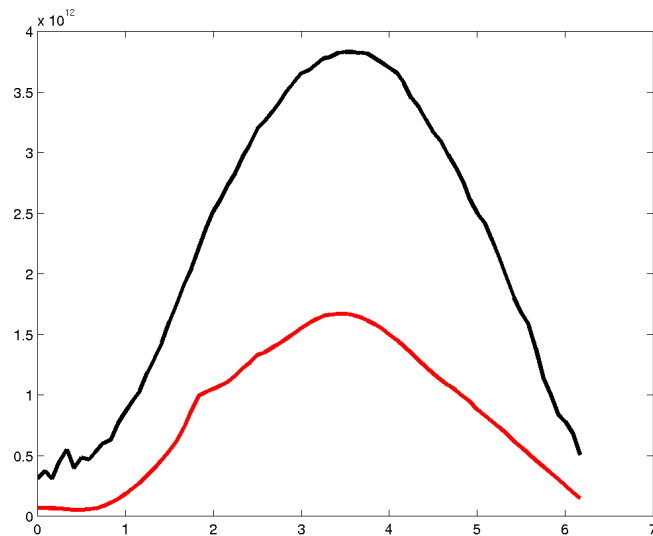
- Poyntingin vektorin divergenssi (väri) mittaa paikallisesti energianmuuntotehoa.
- Magneettikentän energia muuttuu plasman liike- ja lämpöenergiaksi.



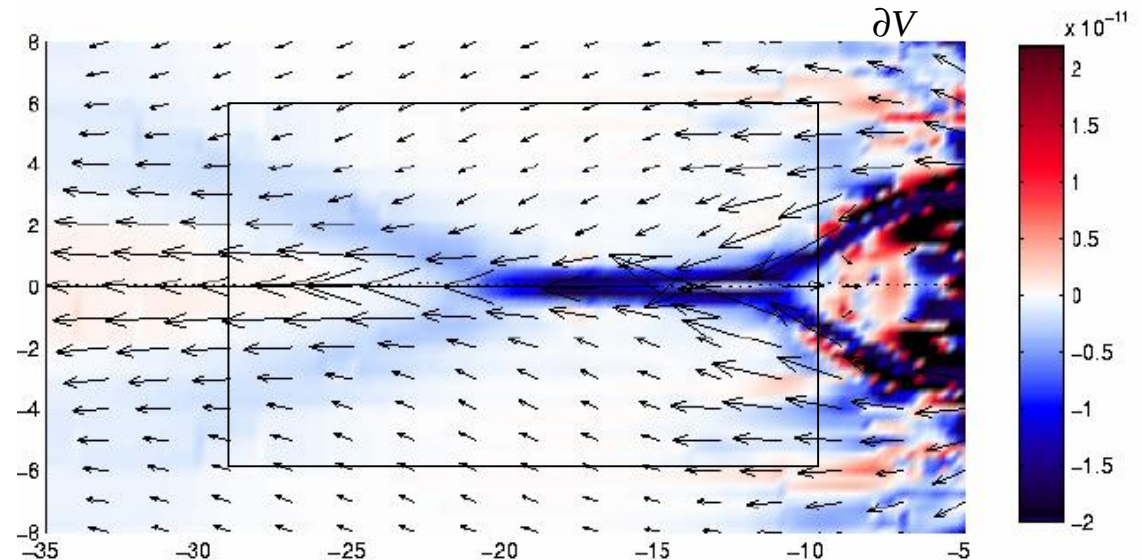


Rekonnektioteho

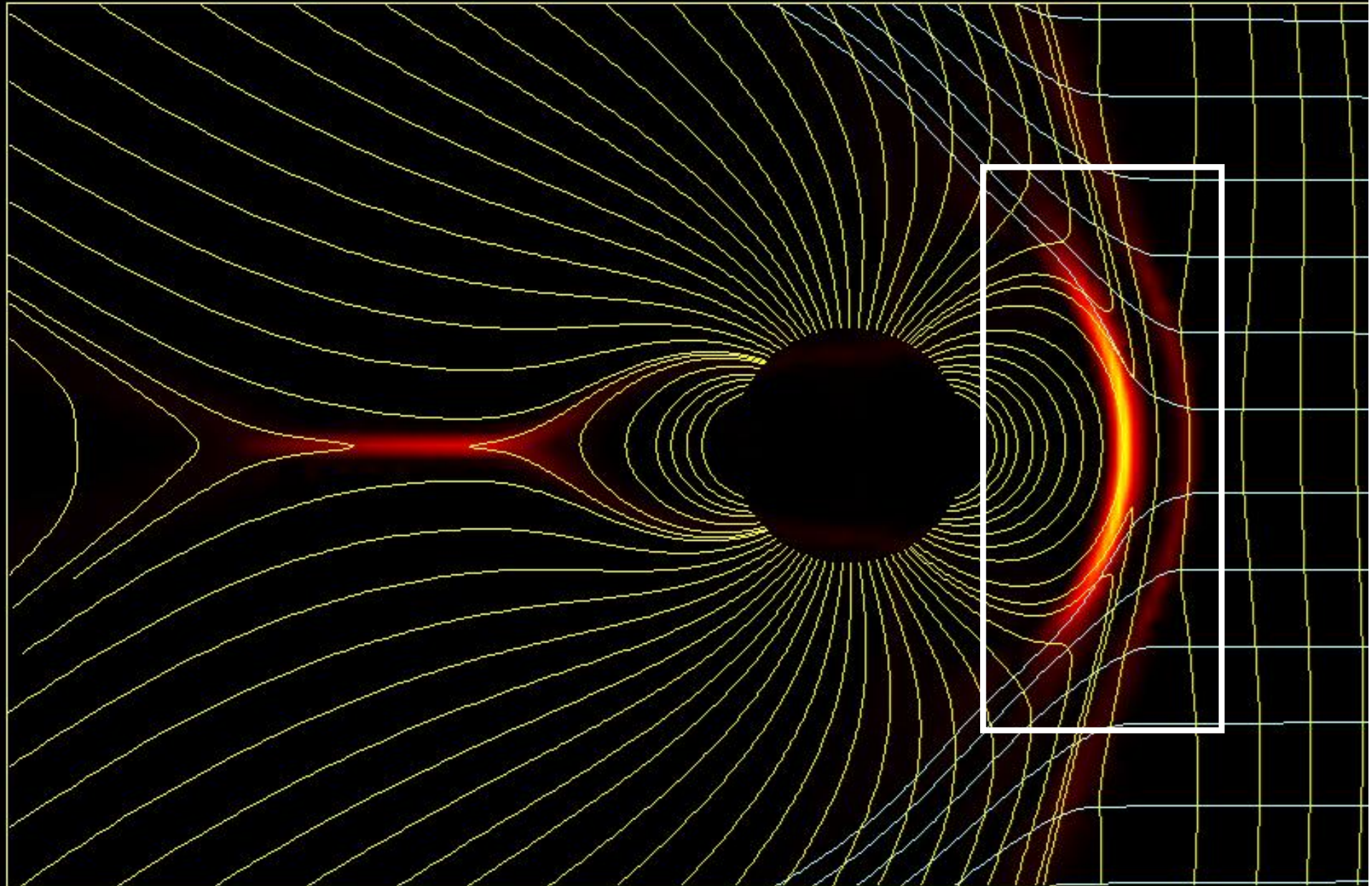
- Rekonnektionopeuden perinteinen mitta on sähkökenttä, joka ei valitettavasti mallinnu oikein ideaali-mhd:n rekonnektioalueessa.
- Tutkitaan sen sijaan, kuinka nopeasti rekonnektio muuntaa energiaa muodosta toiseen, ja määritellään: $P_{\text{rek}} = - \oint \mathbf{S} \cdot \hat{\mathbf{n}} da$



Rekonnektio magentosfäärissä

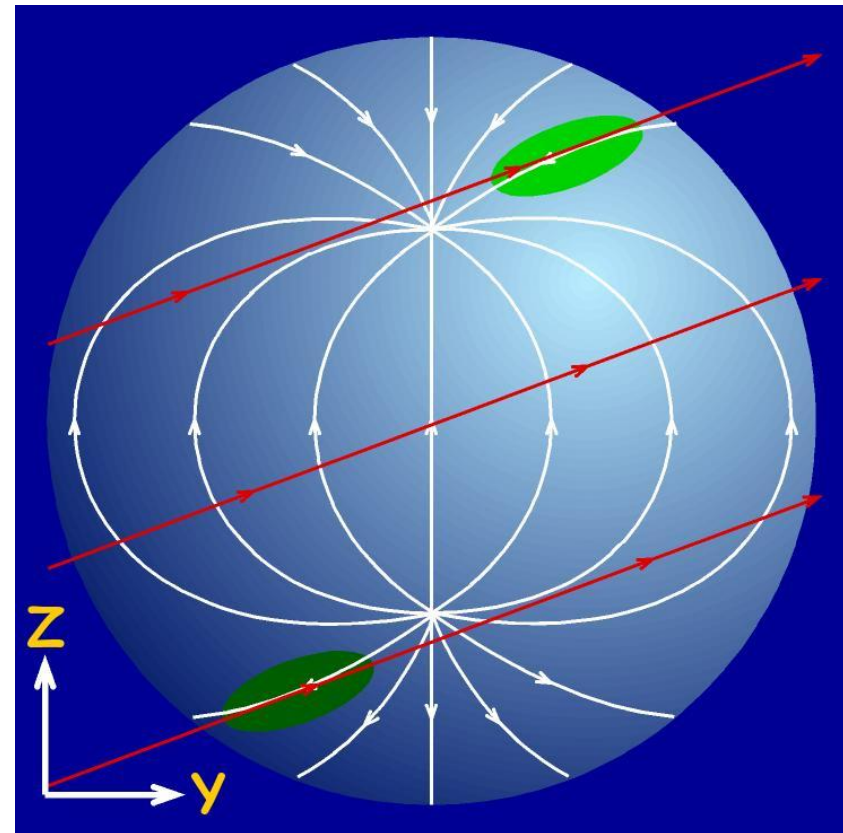
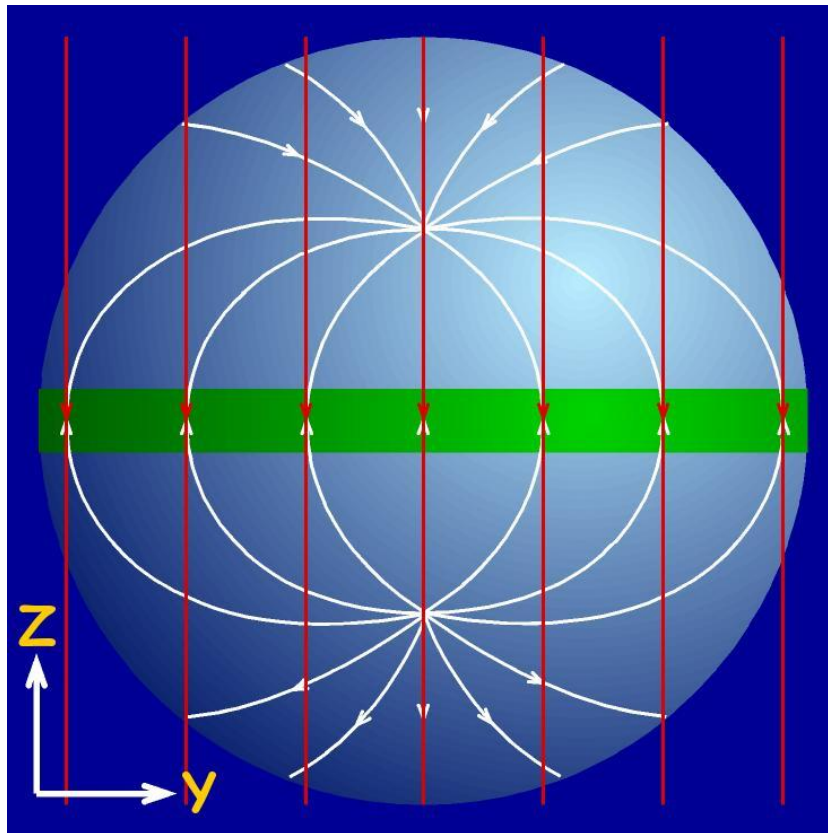


Nyt hypätään magnetopausille





Magnetopausi edestä nähtynä (teoria)

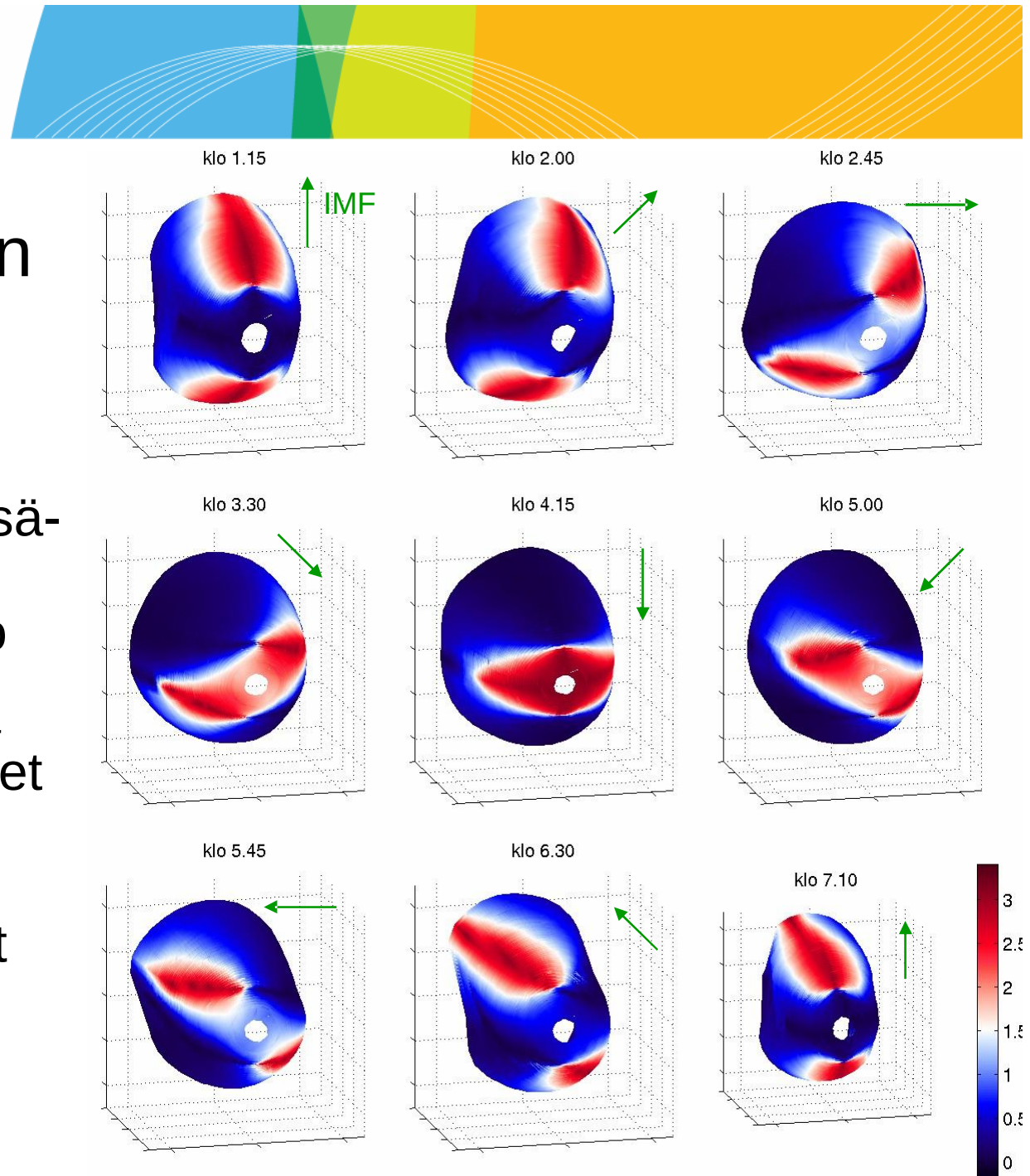


Vihreä osoittaa vastakkaisten kenttien eli todennäköisimmän rekonnektioalueen paikan.



Magneettikentän kiertymäkulma (simulaatio)

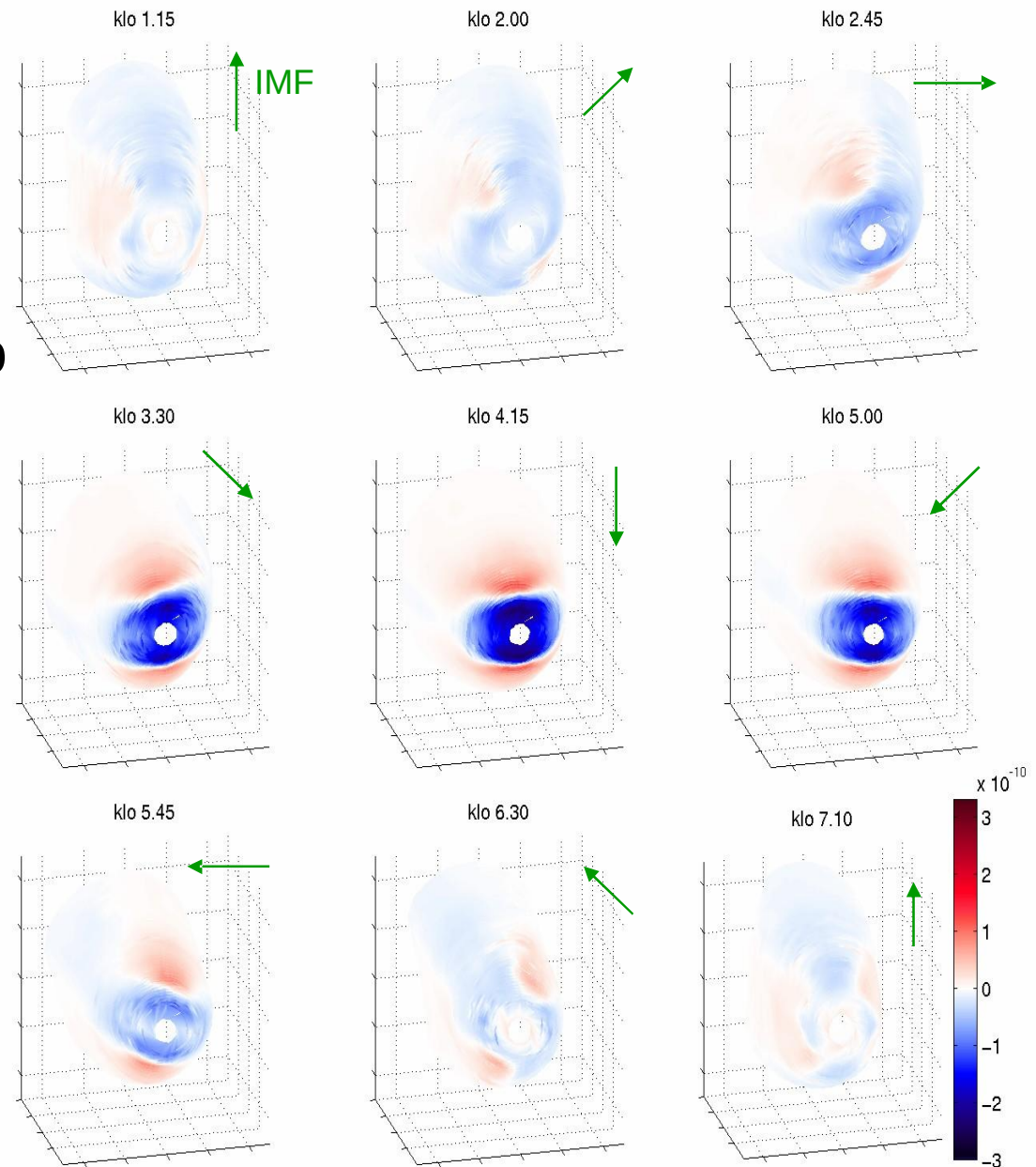
- Magnetopausin sisä- ja ulkopuolisten kenttien suuntaero
- Tummanpunaisilla alueilla vastakkaiset kentät, eli periaatteessa otollisimmat paikat rekonnektiolle.





Poyntingin divergenssi

- Magneettinen diffuusio on lähes aina suurinta nokalla
- Diffuusioalueen ylä- ja alapuolella magneettivuon tuottoa eli dynamoisuutta





Nokka

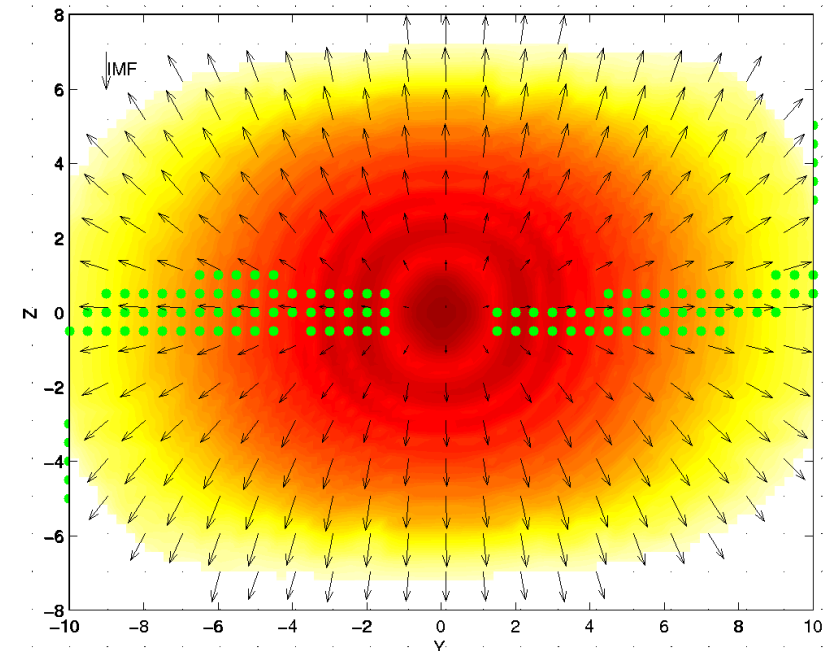
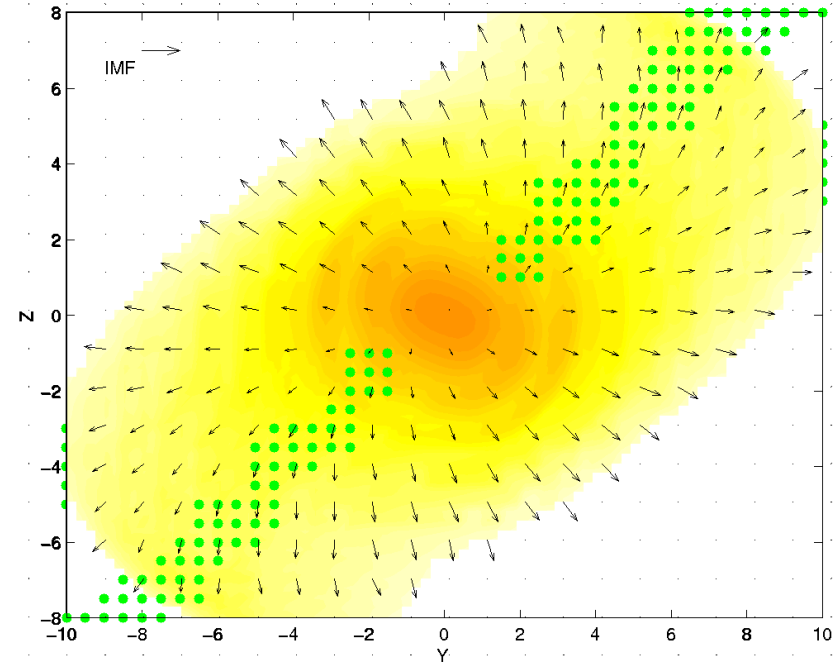
- Nokan virtalevy suoraan edestä katsottuna.

Kuten pyrstössäkin,

- suuri virrantiheys pitkulaisella alueella x-viivan ympärillä.

Toisin kuin pyrstössä,

- plasman virtauskuvio lähes kiertosymmetrinen; ei selvää plasmanjakajaa
- ulosvirtaus ei kovin nopeaa.





1. Miten ideaali-mhd rikotaan ja säilytetään yhtä aikaa

- Magneettisen rekonnektion käsite ja tärkeimmät ominaisuudet

2. Minkä edessään avaa, sen takanaan sulkee

- Magnetosfäärin rekonnektiopaikat: nokka ja pyrstö
- Pyrstön rekonnektio mhd-simulaatiossa: miltä se näyttää?
- Nokan rekonnektio: missä se luuraa?

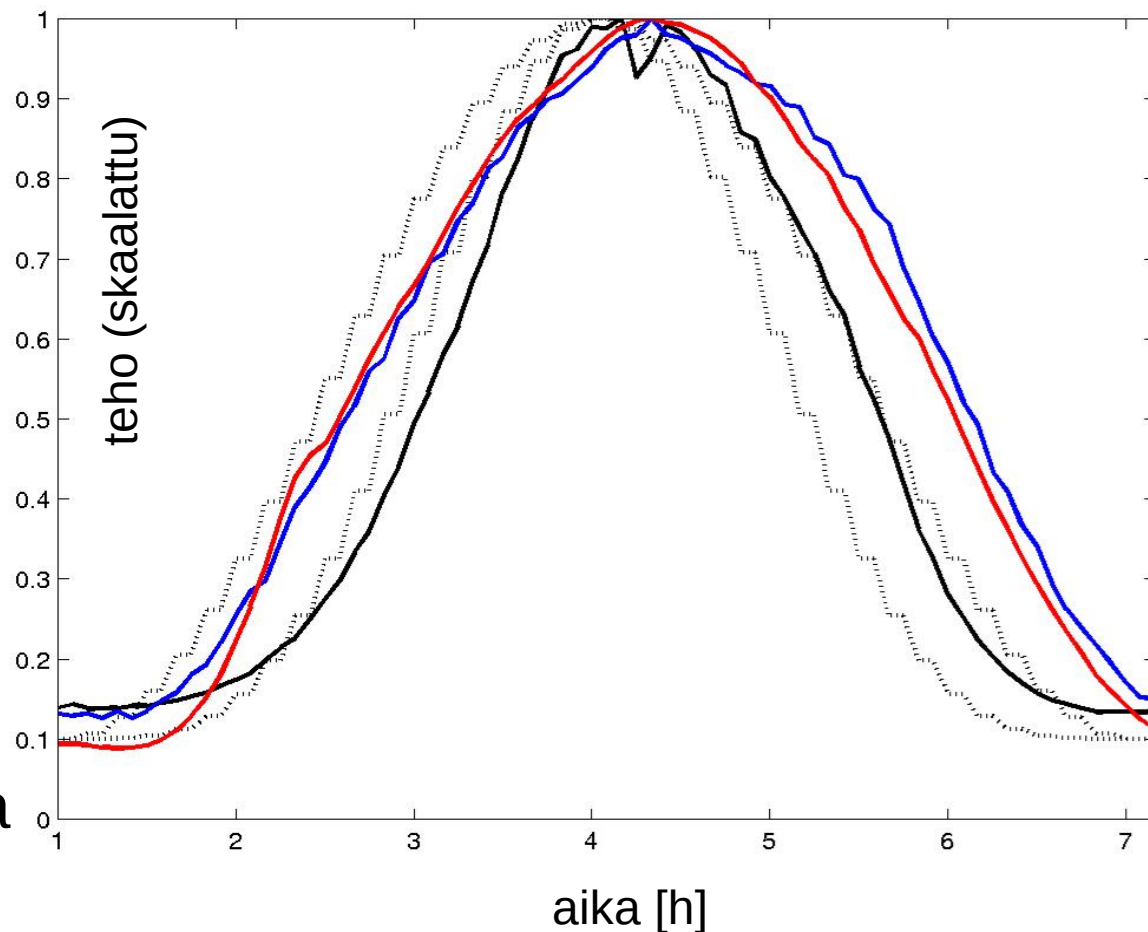
3. Lataa ja laukaise, vai: aurinkotuulen tahdissa mars!

- Mikä rekonnektioprosesseja säätelee?
- Avoimia kysymyksiä



Energiaprosessien vertailua simulaatiossa

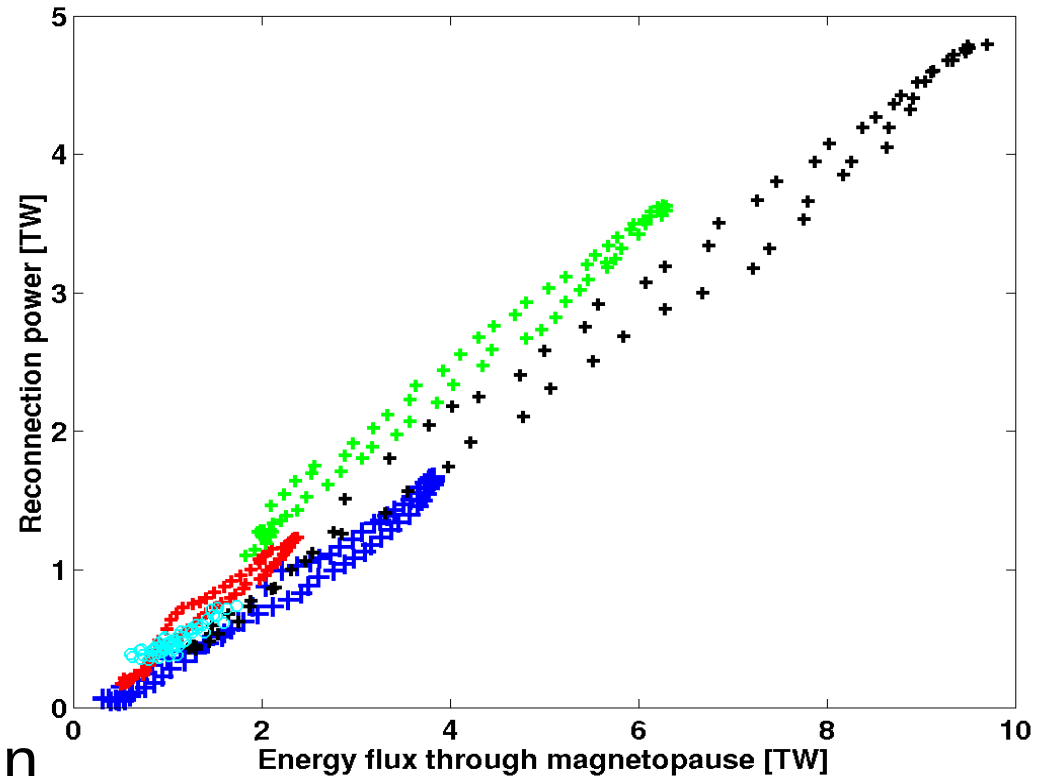
- Musta: rekonnektio-teho nokalla ($x > 5$)
- Sininen: energiavuo magnetopausin läpi
- Punainen: rekonnektioteho pyrstössä
- Pisteviivat: aurinkotuulen magneettikentän suunnasta laskettuja ennusteita





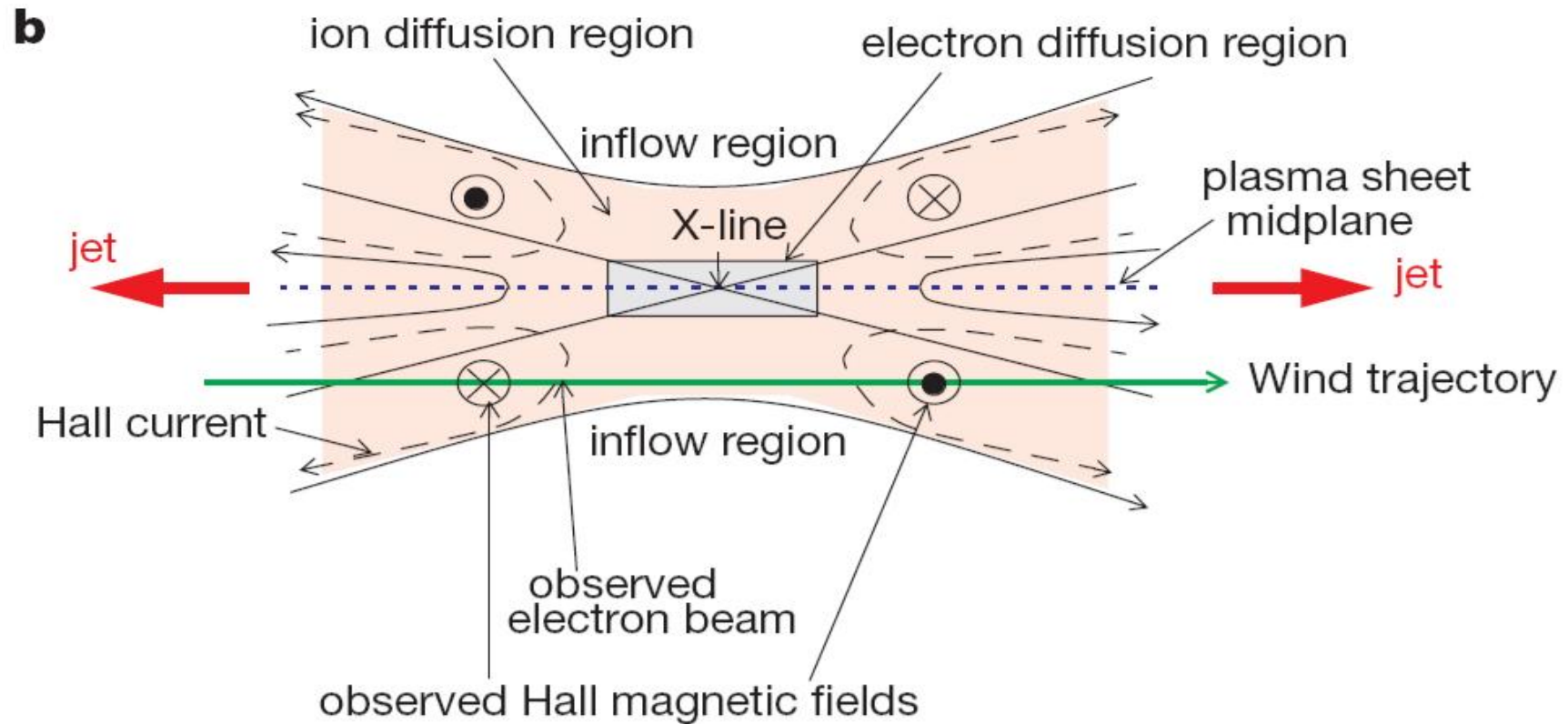
Magnetopausi säätelee pyrstörekonnektiota

- Pyrstön rekonnektioteho on puolet m:pausin läpi tulevasta energiavuosta
- Simulaatiossa pyrstö ei lataa ja laukaise, vaan marssii tiukasti m:pausin tahdissa
- Todellisuudessa ainakin rekonnektion alku on äkkinäisempi; tämän aiheuttava mikrofysiikka puuttuu simulaatiosta
- Mikä magnetopausia sitten säätelee?

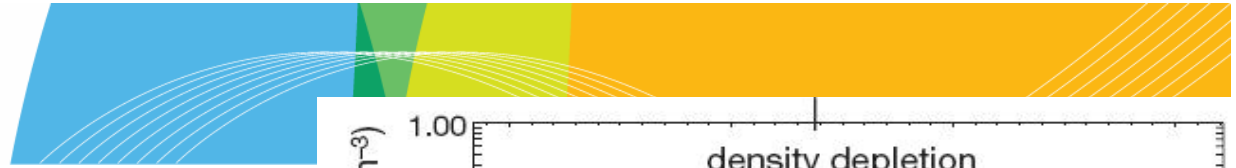




Satelliitti lentää rekonnektioalueen läpi...

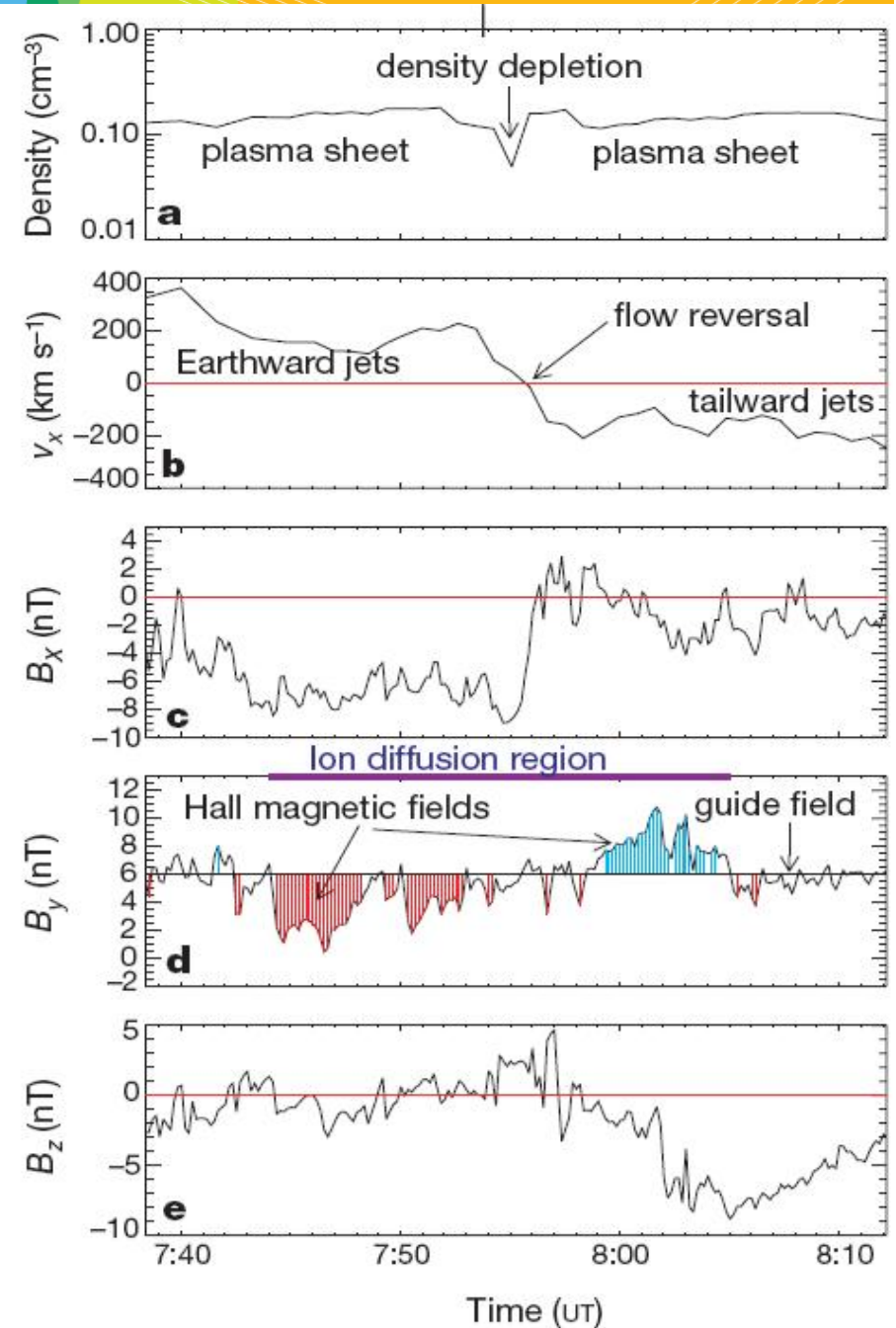


Øieroset et al., *Nature* vol. 412 s. 414, 2001



...ja tuottaa tällaista

- Käyrät ovat selvästi samastettavissa rekonnektiokuvaan, ja
- tällaisia havaintoja on riittävästi, jotta rekonnektion esiintymistä luonnossa ei tarvitse epäillä
- Silti teoria, simulaatiot ja havainnot tuntuvat vielä kulkevan jossain määrin omia polkujaan rekonnektioasiassa.





Avoimia kysymyksiä

- **Mikä synnyttää resistiivisyyden törmäyksettömässä avaruusplasmassa? (Anomaalinen resistiivisyys)**
 - Tähän mhd:lla ei ole mitään sanottavaa...
- **Magnetopausilla: komponenttirekonnektio vai vastakkaiskenttärekonnektio?**
 - Eli kuinka rekonnektionopeus riippuu rekonnektoituvien magneettikenttien välisestä kulmasta?
 - Ennustavat erilaisen x-viivan muodon magnetopausille. GUMICS näyttäisi suosivan komponenttirekonnektiota.



Lisää avoimia kysymyksiä

- **Rekonnektion jatkuvuus**

- Mhd-simulaatioissa rekonnektio on yleensä tasaisesti jatkuvaa, ja sen voimakkuus on ulkoisten reunaehtoien suoraan säätelemä.
- Havainnoissa paljon viitteitä rekonnektion purskeisuudesta: esimerkiksi roihupurkaukset Auringossa ja alimyrskyt magnetosfäärissä käynnistyvät äkkinäisesti. Myös pitkäkestoisesta tasaisesta rekonnektiosta on havaintoja.
- Lataa ja laukaise vs. suoraan ajettu konvektio: onko alimyrskyn käyttövoimana kasvuvaiheen aikana pyrstöön latautunut energia vai päävaiheen aikana aurinkotuulesta tuleva energia?



Siinä ei ollut kaikki,
ei siitä minkä tiedämme,
eikä varsinkaan siitä mitä emme tiedä.