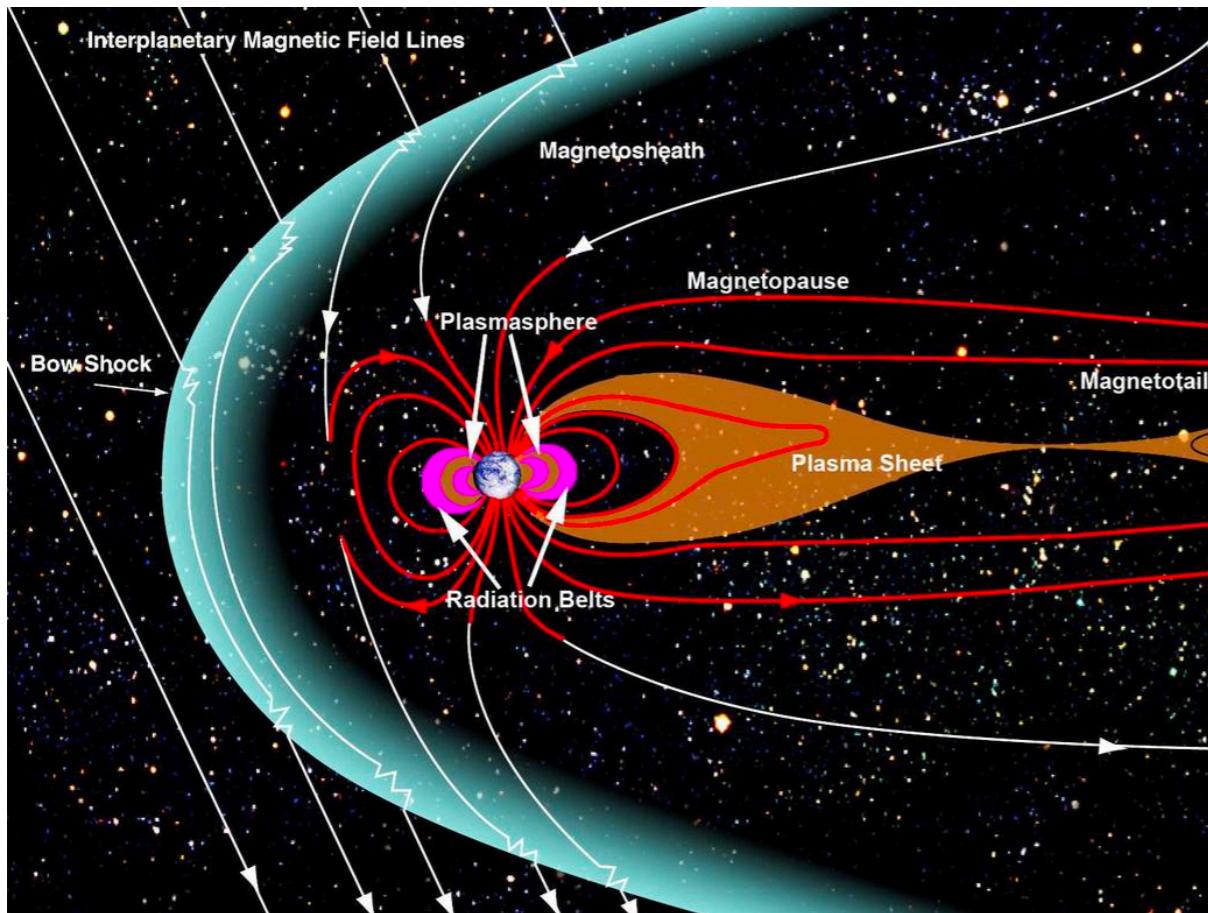


DD6  
Cluster衛星のデータから見る  
磁気リコネクションの様子



# 地球磁気圏と太陽風の相互作用

磁気圏を夕方側から見た断面

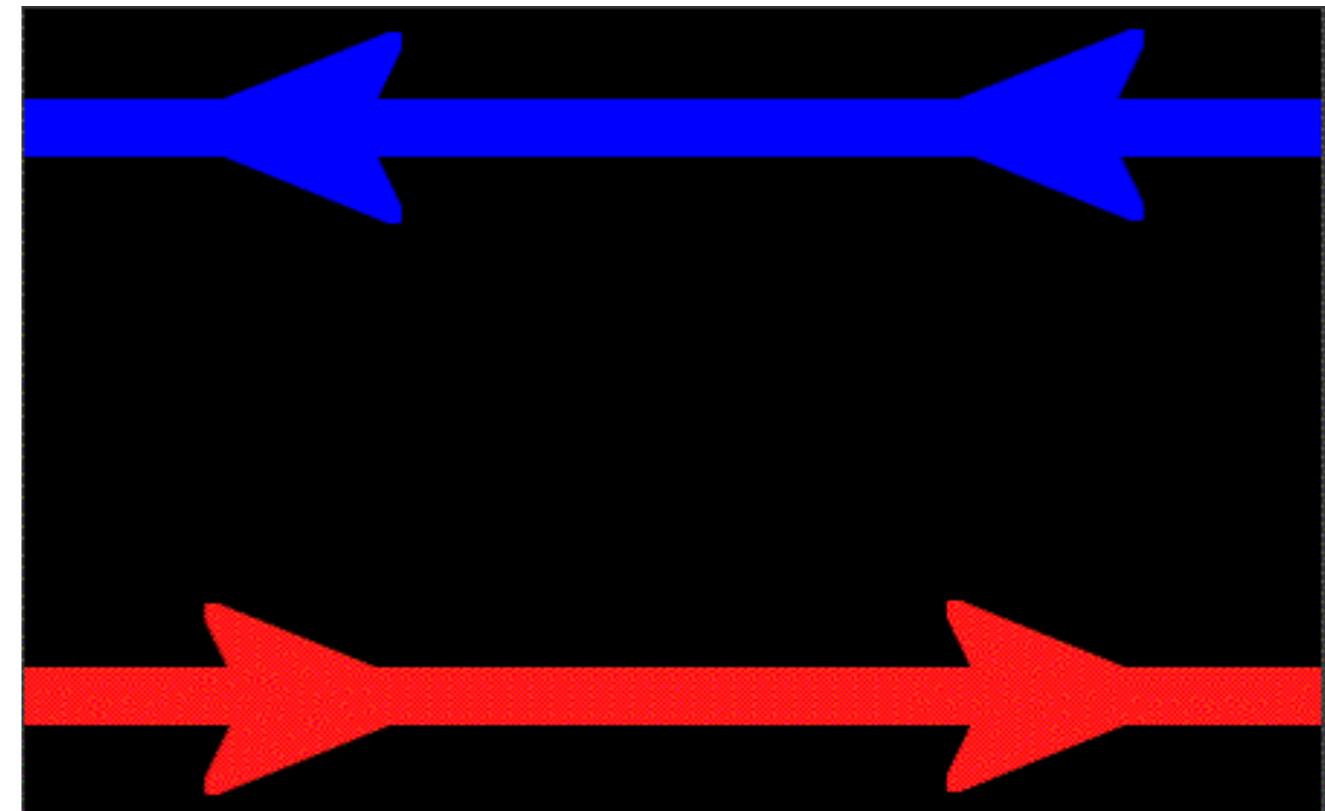
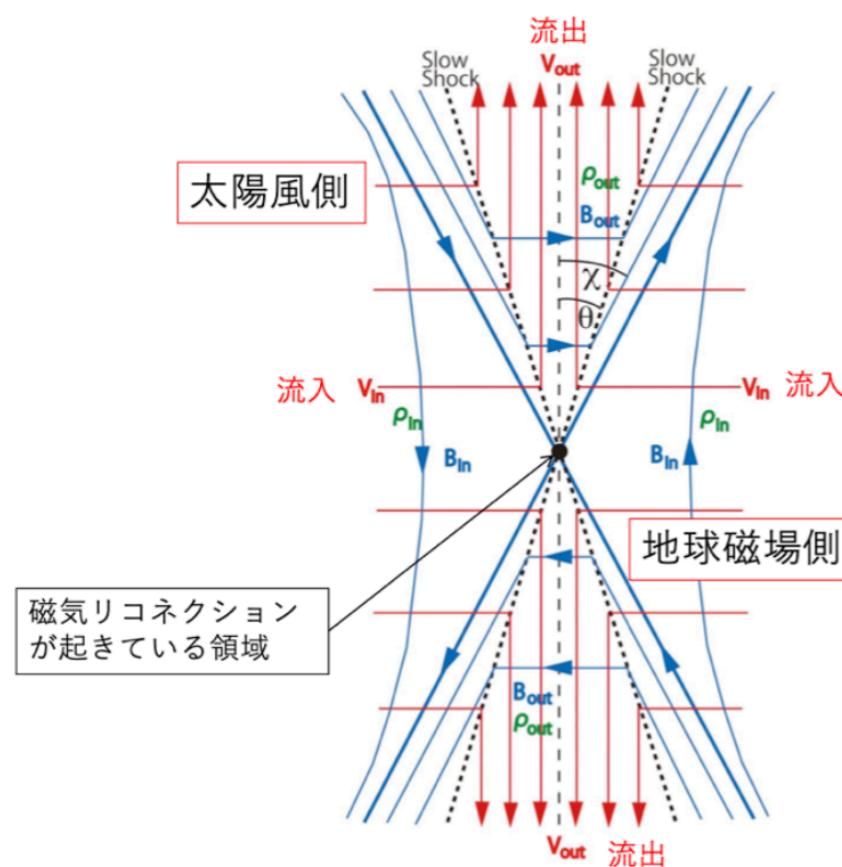


[https://www.nasa.gov/sites/default/files/images/470173main\\_magnetosphere2\\_full.jpg](https://www.nasa.gov/sites/default/files/images/470173main_magnetosphere2_full.jpg)

- 太陽風の動圧( $\rho V_{SW}^2$ )と地球磁場の磁気圧( $B^2/2\mu_0$ )が釣り合うような位置がマグネットポーズ（磁気圏境界）であり、その内側が地球磁場が支配的な磁気圏となっている。
- 今回の演習では、マグネットポーズにおいて太陽風磁場と地球磁場が繋ぎ変わる磁気リコネクションによって、イオンが加速される過程を衛星データを通して見ていく。

# 磁気リコネクション

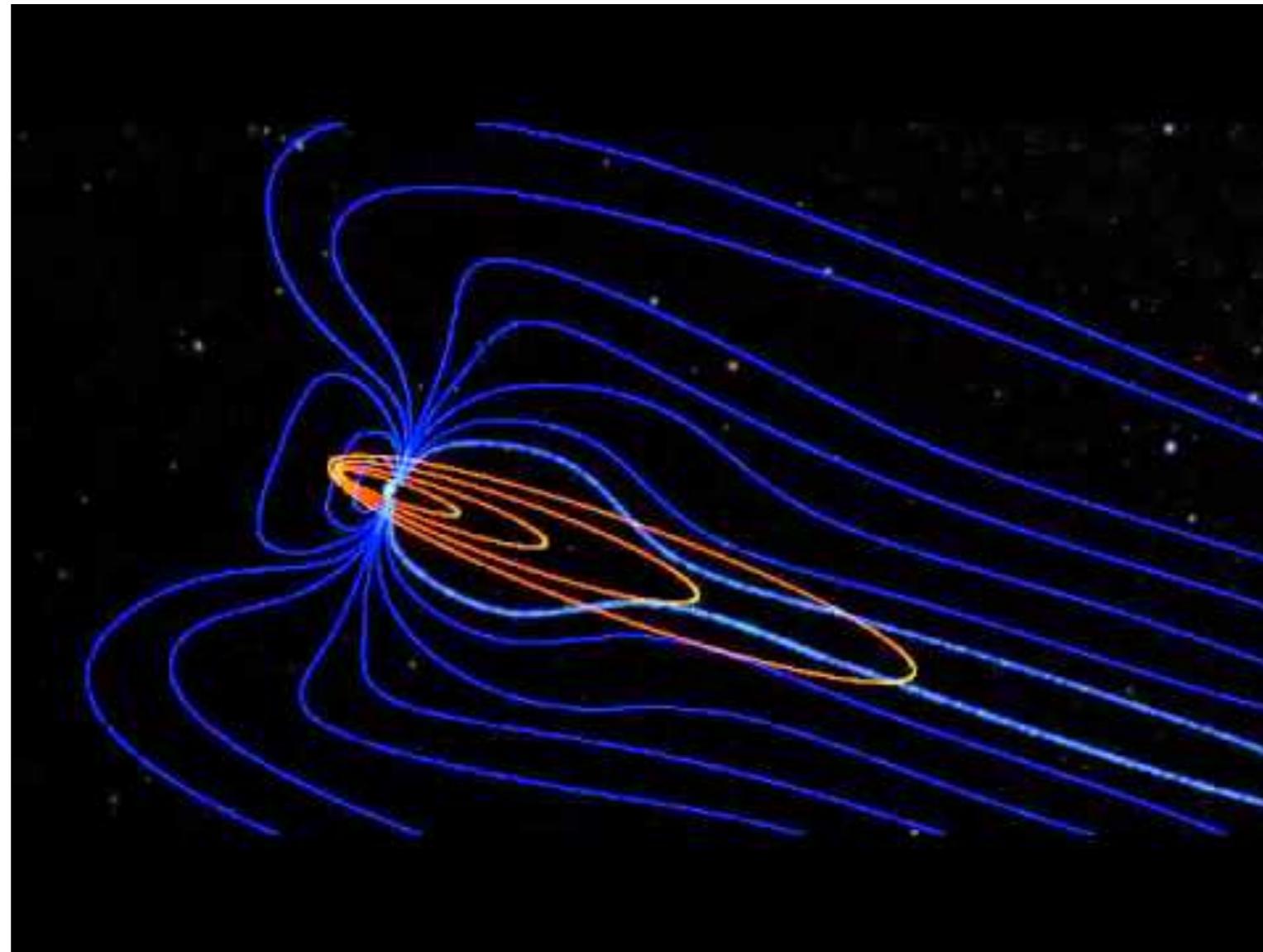
磁気リコネクションの形状（低緯度マグネットポースでの場合）



[https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2006/05/  
Schematic\\_of\\_magnetic\\_field\\_lines\\_during\\_reconnection](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2006/05/Schematic_of_magnetic_field_lines_during_reconnection)

- 反平行な磁力線同士が”繋ぎ変わる”。
- 繋ぎ変わった後は磁場強度が減少し、その分の磁場エネルギーが  
プラズマの運動エネルギーや熱エネルギーへと変換される。

# リコネクションによる磁気圏対流



<https://www.youtube.com/watch?v=8NDPsSZCcz0>

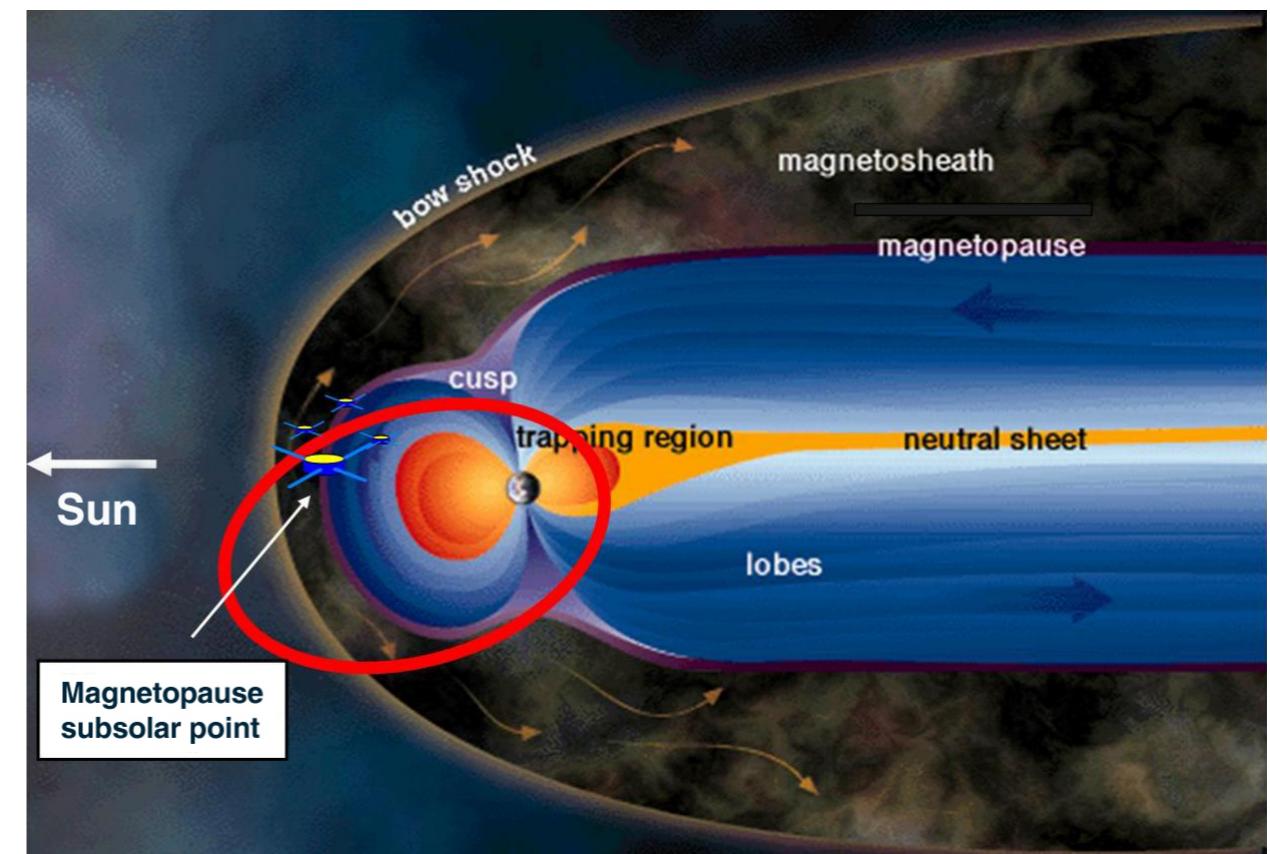
- ・ リコネクションにより歪んだ磁力線は磁気張力を持つため対流していく。この時、プラズマは磁力線に引きずられながら移動する。
- ・ リコネクションは磁気圏のグローバルなプラズマの動きに影響する。

# Cluster衛星

- 地球磁気圏の境界領域の観測を目的に打ち上げられた4機編隊の衛星群で、互いに数100 kmの間隔で飛行している。
- 磁場、イオン、電子、電磁波の様々な種類のデータを観測している。

|             |  |
|-------------|--|
| Operation   | 2000/10/10 ~<br>2000/10/10   |
| Orbit       | Apogee: km<br>Perigee: km  |
| Period      | ~ days   |
| Instruments | <ul style="list-style-type: none"><li>• <b>CIS (Ion)</b></li><li>• <b>FGM(Magnetic Field)</b></li><li>• PEACE(Electron)</li><li>• EFI(Electric Field, ~ 0.25 Hz)</li><li>• STAFF(Wave, ~8 kHz)</li><li>...</li></ul> |

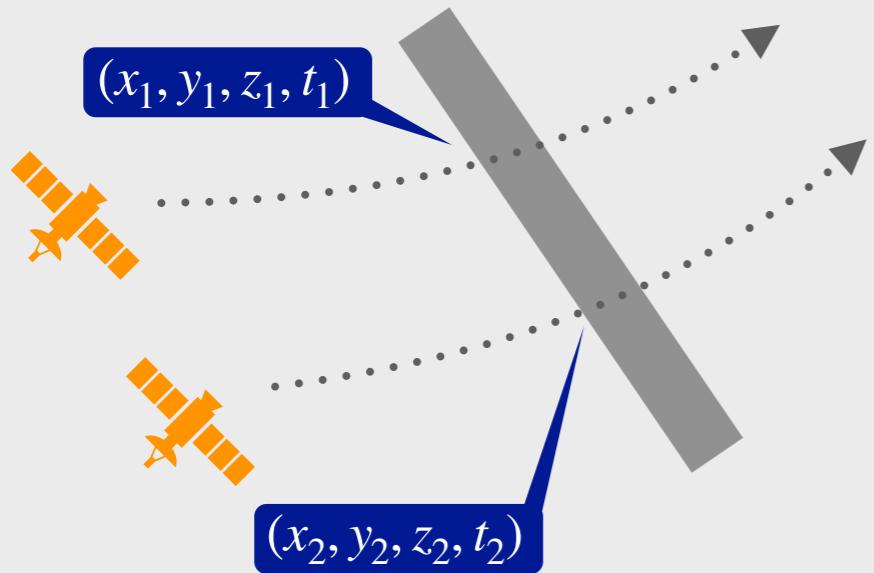
Cluster衛星の軌道



# 複数機観測のアドバンテージ

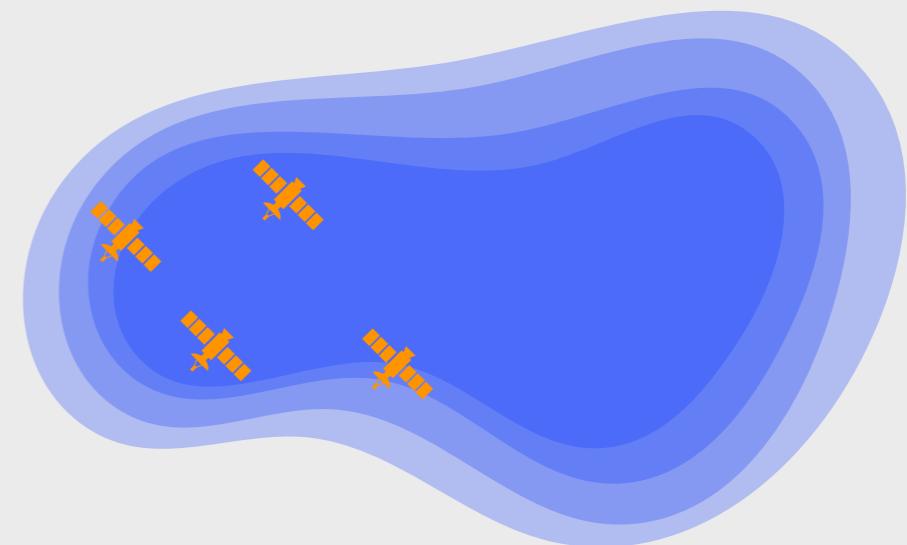
時間変化と空間変化を分離し、空間構造や構造の動きを知ることができる。

## 構造の向きや移動速度の推定



例：カレントシートの向きと移動速度

## 物理量の空間勾配の計算



例：磁場の空間勾配

- ! 例えば、空間勾配の計算のためには、衛星間の距離が変化の空間スケールよりも十分に小さい必要がある。知りたい情報が観測から引き出せるのかどうかを常に意識しなければならない。

# 目的・演習の進め方

## 目的

リコネクション領域の磁場構造とプラズマの運動の様子を衛星データを通して見ることで、地球磁気圏境界における太陽風と磁気圏の結合過程を理解する。

- ・ 私が研究のために作ったCluster衛星データの解析ツールと、衛星データ解析のライブラリであるSPEDASを組み合わせて解析を行う。
- ・ 解析ツールは以下のgithubレポジトリにおいてある。  
その他の準備の手順についてもここに書いてあるので、それに沿って進める。  
[https://github.com/HarutoKoike/DD6\\_2022](https://github.com/HarutoKoike/DD6_2022)

# データのロード・プロット

- 解析する期間を指定し、データをロードします。

```
IDL> timespan, ['2004-03-10/12:00:00', '2004-03-10/13:00:00'] ;期間の設定
```

```
IDL> cl_load, 3, /fgm, /cis ;Cluster3のFGM(磁場)とCIS(イオン)データをロード
```

- ロードしたデータはSPEDASのtplot変数に格納されます。tplot\_namesで確認してみます。

```
IDL> tplot_names ; tplot変数の名前と通し番号を表示
```

```
1 status_C3_PP_CIS  
2 N_p_C3_PP_CIS  
3 N_01_C3_PP_CIS  
. .
```

- tplot変数をプロットしてみましょう。変数名もしくは通し番号を指定します。

イオン数密度('N\_HIA\_C3\_PP\_CIS')とイオンフラックス('flux\_C3\_CP\_CIS-HIA\_HS\_1D\_PEF')をプロットする場合は以下のようにします。

```
IDL> tplot, ['N_HIA_C3_PP_CIS', 'flux_C3_CP_CIS-HIA_HS_1D_PEF']
```

# その他の操作

- tplot変数にデータを格納することで、SPEDASで用意された様々な処理ができるようになります。  
前回までの演習で使ったtlimitやctime, get\_dataなどの操作もそのうちの一つです。
- 指定した時刻に縦線を引く。

```
IDL> timebar, '2004-03-10/12:30:00'
```

- ある値のところに横線を引く。

```
IDL> options, 'N_HIA_C3_PP_CIS', 'databar', {yval:5.0}  
;変数名でなく通し番号でもよい。
```

```
IDL> tplot_apply_databar
```

- tplot変数のメタデータ（データの種類や単位）を表示する。

```
IDL> tplot_names, 'N_HIA_C3_PP_CIS', /verbose. ;変数名でなく通し番号でもよい。  
...  
CATDESC          = STRING    = 'Preliminary (CSDS PP) Cluster C3,  
Ion Density, spin resolution'  
UNITS           = STRING    = 'cm^-3'  
SI_CONVERSION   = STRING    = '1.0E6>(particles)m^-3'  
SIGNIFICANT_DIGITS = LONG    = 6  
...
```

# スクリプトの作成

- 何度も同じ操作を繰り返したり、操作が長くなる場合には、スクリプトを作つておくと便利です。
- 例えば、ある時刻の密度のデータを表示する処理を'test\_script.pro'というファイル名で保存します。  
(.proはIDLのプログラムであることを表す拡張子)

test\_script.pro

```
get_data, 'N_HIA_C3_PP_CIS', data=ni  
t = time_double('2004-03-10/12:27:00')  
tmp = min(abs(ni.x - t), idx)  
print, ni.y[idx]  
end ;最後にendを入れる。
```

- コマンドで'.r test\_script'と実行すると、スクリプトの一連の処理が実行されます。

```
IDL> .r test_script ;".pro"は含めなくてよい  
% Compiled module: $MAIN$  
2.21940 ;密度が表示されます。
```

# 課題

## 【課題5】

2004年3月10日12:00 UTからの20分間において、Cluster3の観測した①イオン数密度、②イオンフラックス、③磁場3成分(GSM)、④イオン速度(磁場平行・垂直)の4つの変数を1枚にまとめたプロットを作成せよ。磁場とイオン速度には $y=0$ の横線を引くこと。この期間でイオンのエネルギーが急激に増加している領域を衛星が通過していることが確認できる（例えば12:27 UT頃）。これはリコネクションによって加速されたイオンを衛星が捉えていることを表している。

この20分間にイオン数密度の大きさは2桁ほど変化していることがわかる。このことから衛星が地球のマグネットポーズを横切ったことがわかる。磁場やイオン速度のデータから読み取れる情報をもとに、衛星がどのような軌道を通ってきたのかを磁力線形状と共にスケッチし、なぜそのように判断したのかの理由も併せて記載せよ。ただしスケッチは、磁気圏をGSM座標の $Y=0$ の断面を夕方側（ $Y$ 軸正の方向）から見た視点で描くこと。レポートは2枚の図を用いてまとめること。

（ヒント：衛星は南半球のロープ領域付近を通過していた。）

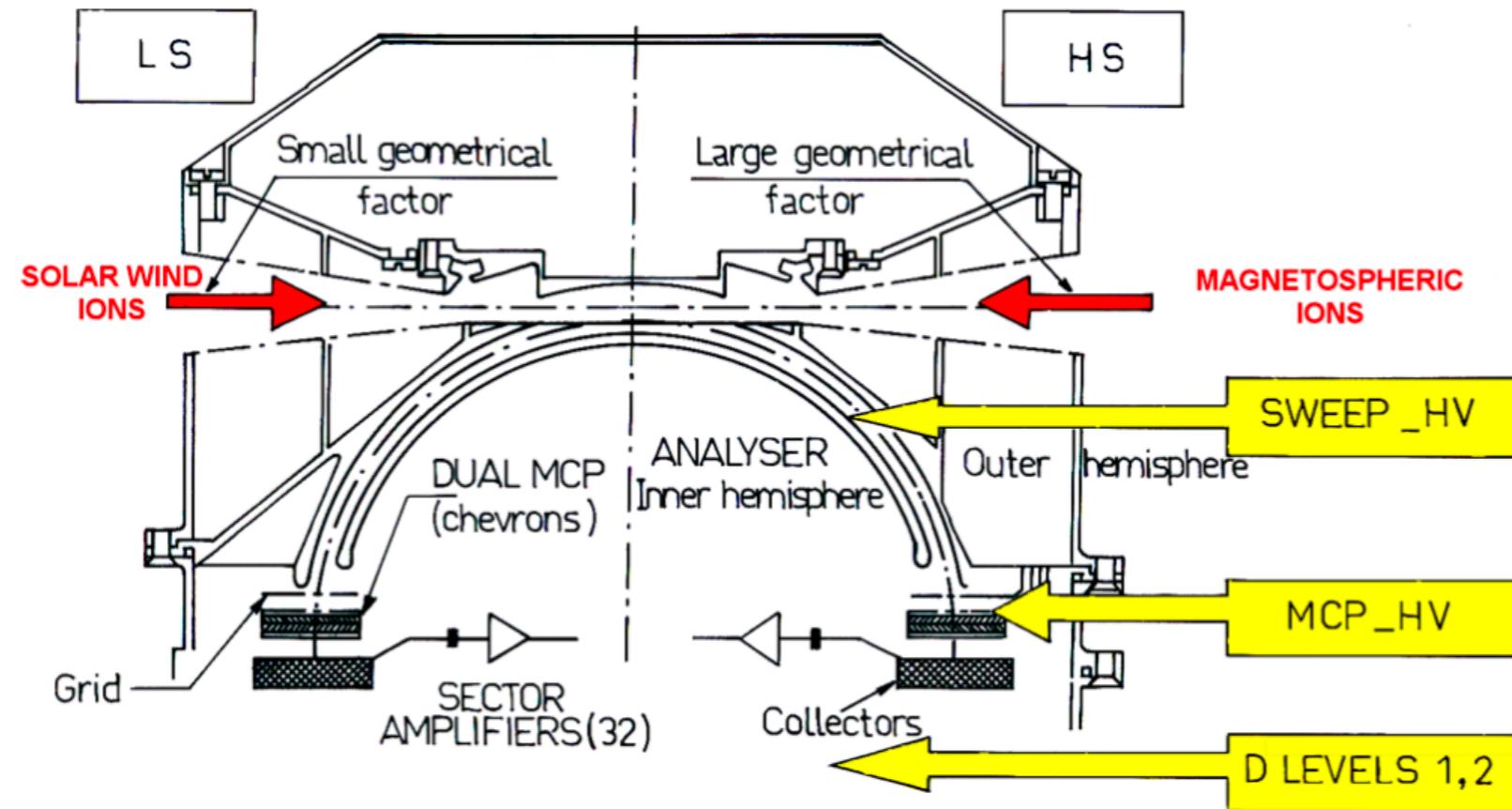
## 【課題6】

衛星がマグネットシースを通過している期間と加速されたイオンを観測した期間のそれぞれで1つ時刻を決め、その時刻でのイオンのエネルギー・フラックスを、横軸をエネルギー、縦軸をフラックスとして、両軸を対数スケールでプロットせよ。2つの時刻のフラックスは色を分けて同じウインドウにプロットし、それぞれの時刻でフラックスが最大値をとるエネルギーの位置に縦線を引くこと。縦軸と横軸には適切なキャプションをつけることを忘れないように。

次に、マグネットシースの磁場強度の大きさとイオン数密度を読み取り、その大きさに対応する磁場エネルギーが全てイオンの運動エネルギーへと変換された時のイオン速度を見積もれ。ただしイオンは全てプロトンだと仮定してよい。見積もった速度と先ほどのエネルギーを比較した場合、近い値になっているかどうかを調べよ。2つの値に開きがある場合にはその理由を考察せよ。



# Clusterに搭載された粒子計測器



- 電場を印加し、特定のエネルギー帯の電荷のみをカウントする。  
(Energy Sweep)
- 粒子計測器は常に全方向から来る粒子を計測するわけではない。
- 衛星は4秒周期でスピンしており、スピンによって計測器は全方向を計測する。