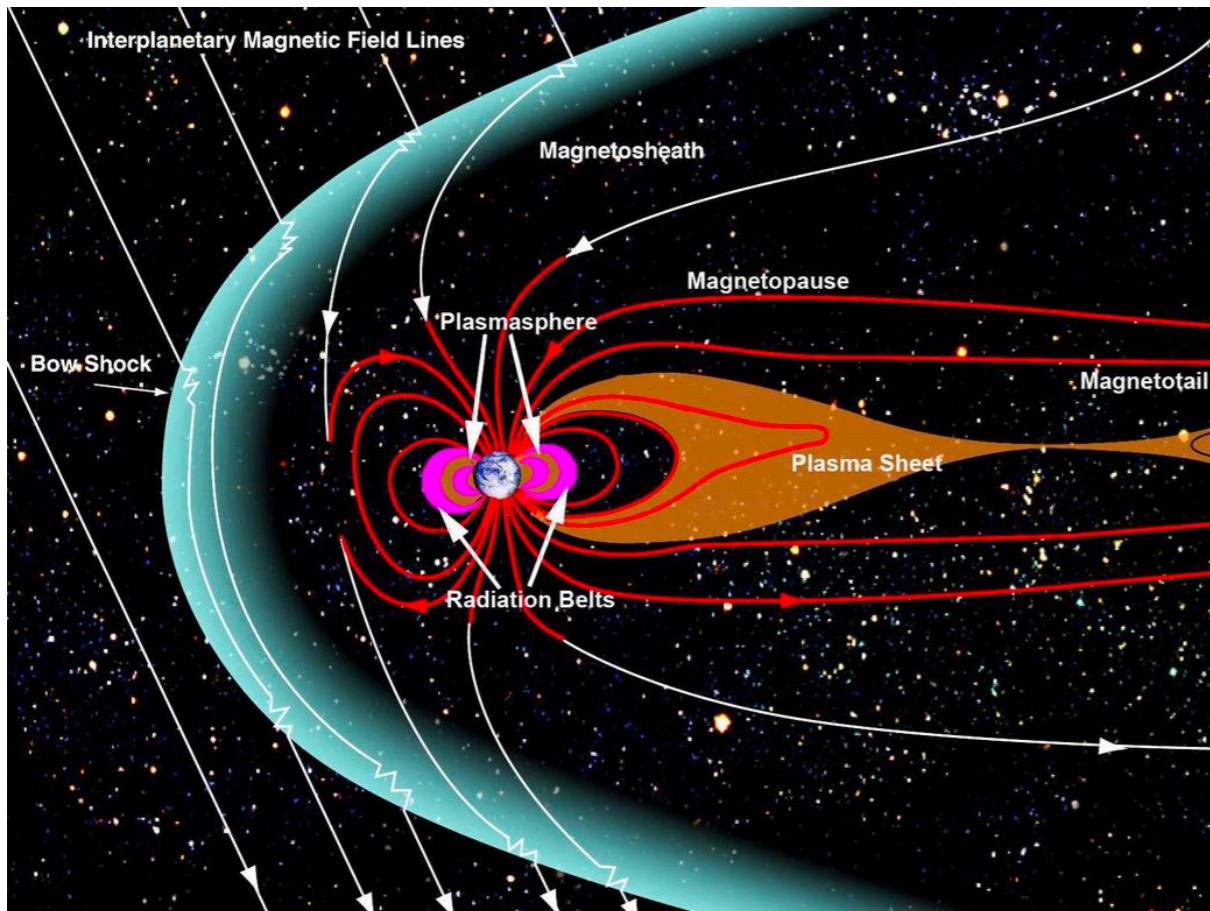


課題演習 DD6

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

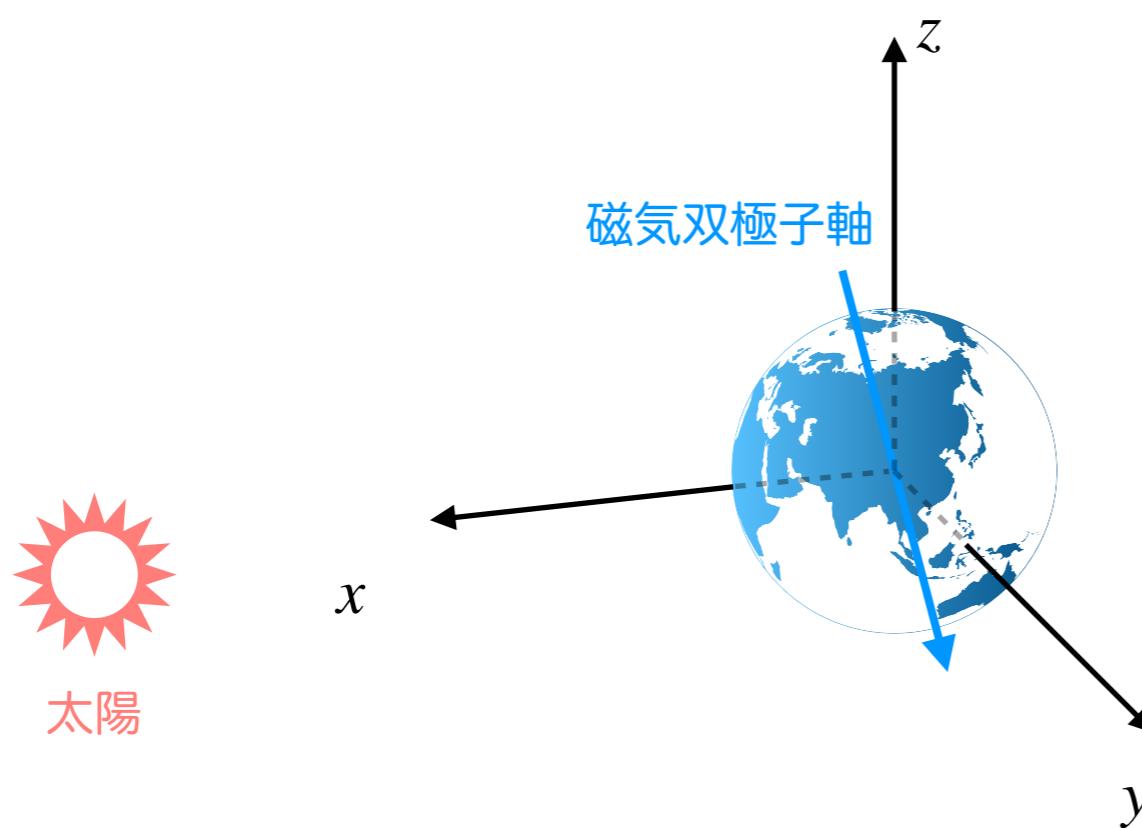
- 太陽風の動圧(ρV_{SW}^2)と地球磁場の磁気圧($B^2/2\mu_0$)が釣り合うような位置がマグネットポーズ（磁気圏境界）であり、その内側が地球磁場が支配的な磁気圏となっている。

- 今回の演習では、マグネットポーズにおける太陽風磁場と地球磁場の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。

座標系

- 磁気圏境界の現象を取り扱うときには、GSE(Geocentric Solar Ecliptic)座標系やGSM(Geocentric Solar Magnetic)座標系などの直交座標系が使われることが多い。
- その他にも磁力線に沿って座標系を定義するような曲座標系を使うこともあり、見る現象や場所に適した座標系が使用される。

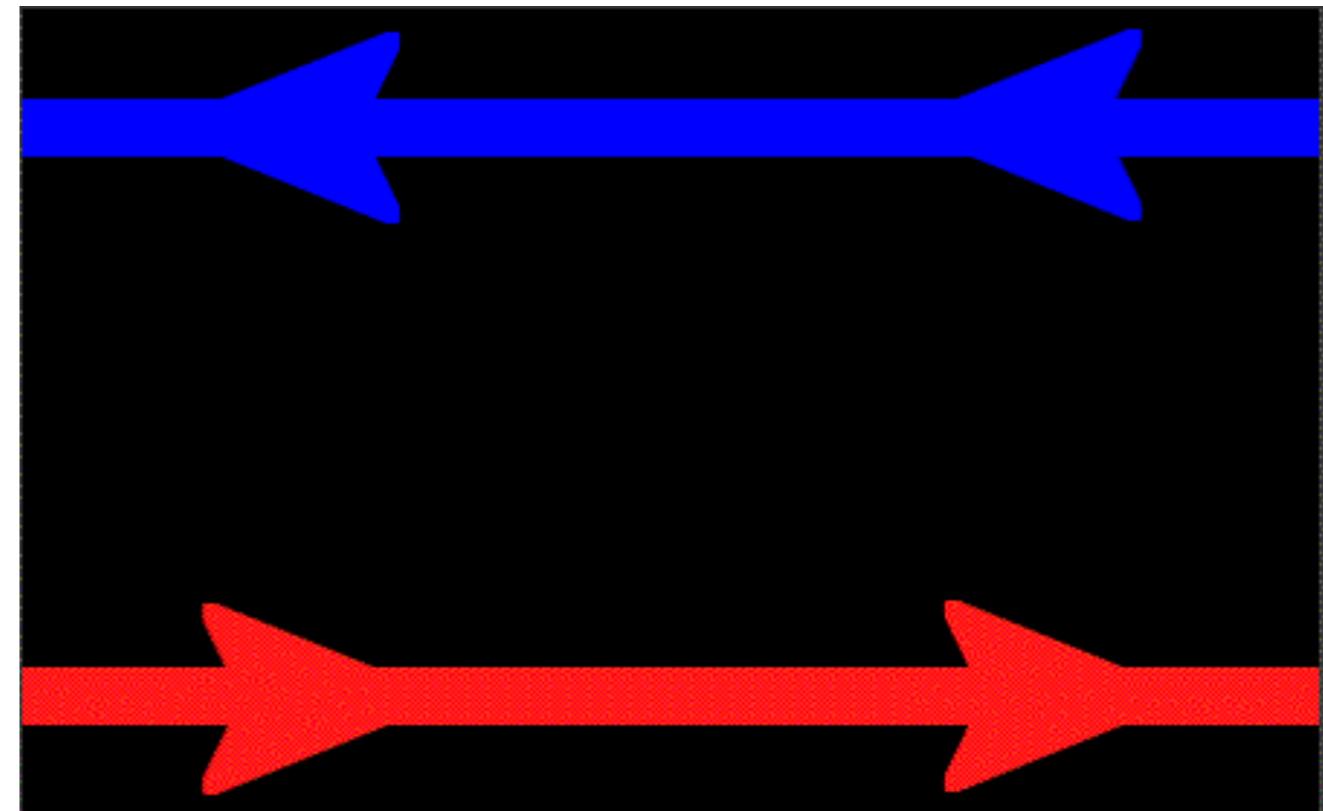
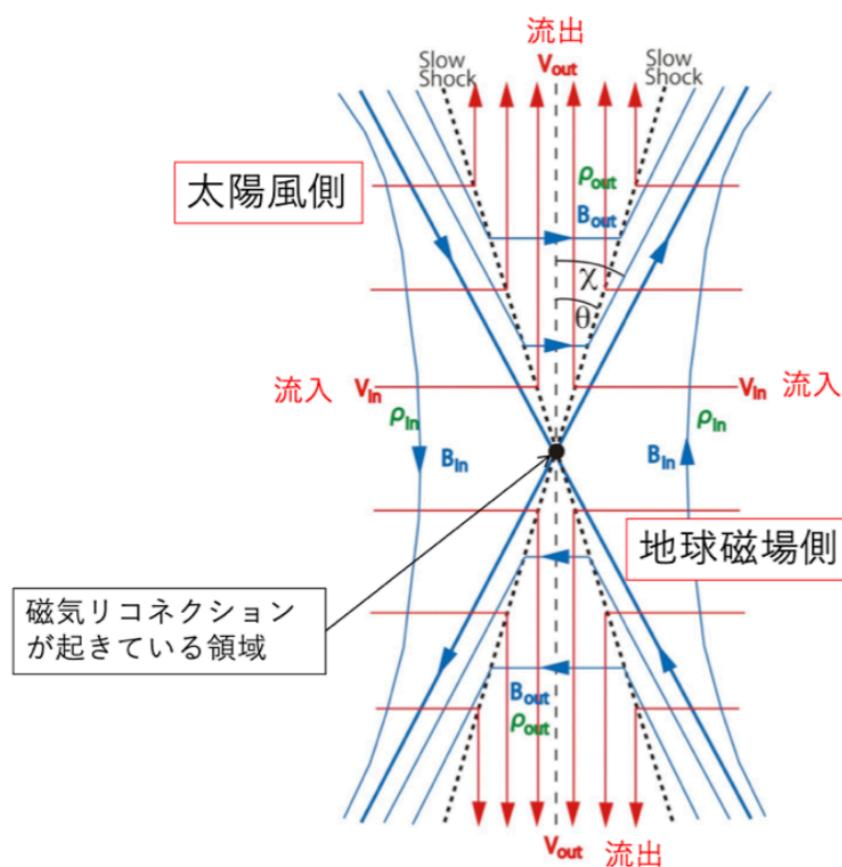
GSM座標系の定義



1. X軸を地球中心から太陽の向きにとる。
2. Y軸をX軸と磁気双極子軸の外積の向きにとる。
3. Z軸をXY軸と右手形をなすようにとる。

磁気リコネクション

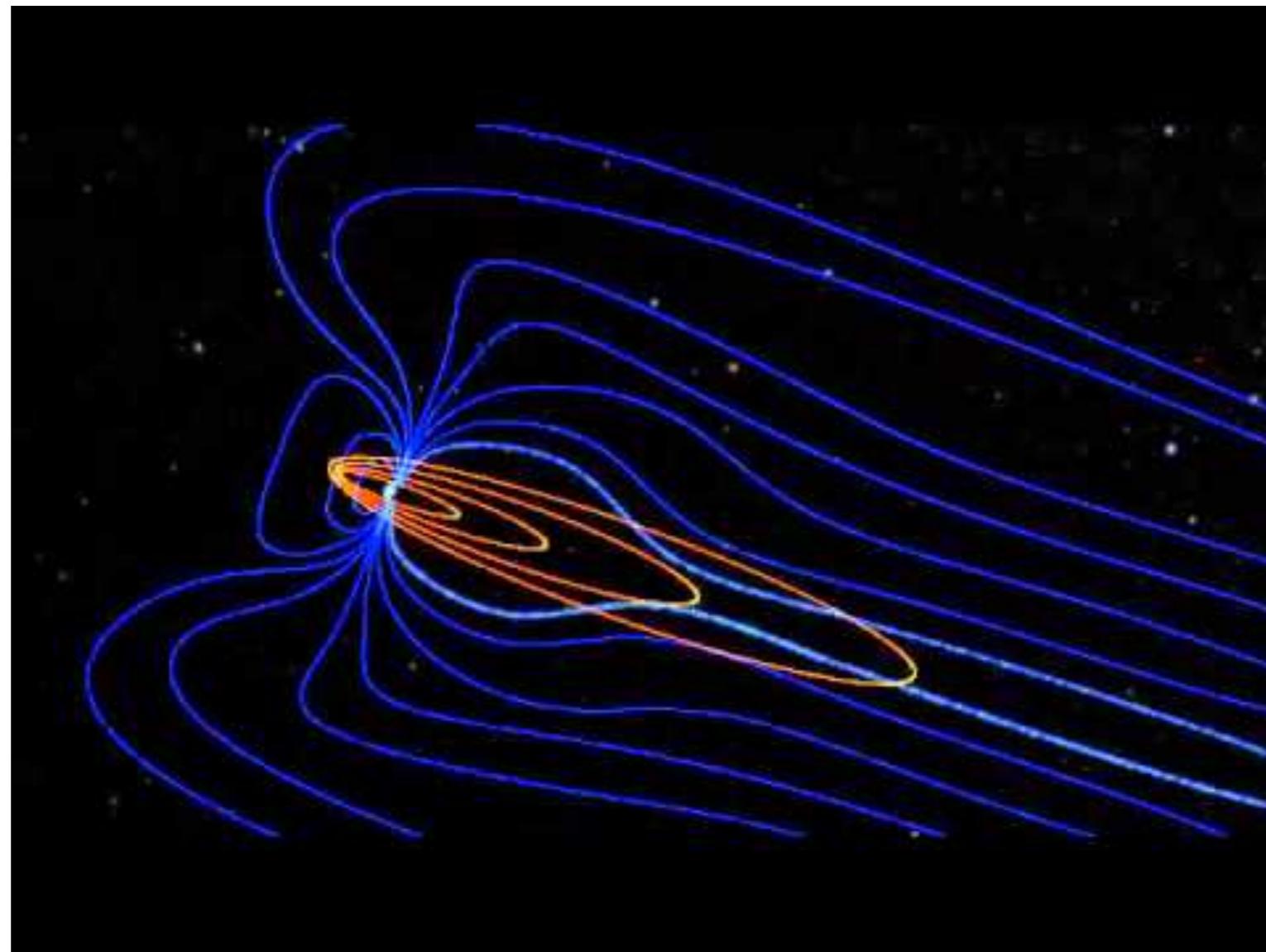
磁気リコネクションの形状（低緯度マグネットポースでの場合）



[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>

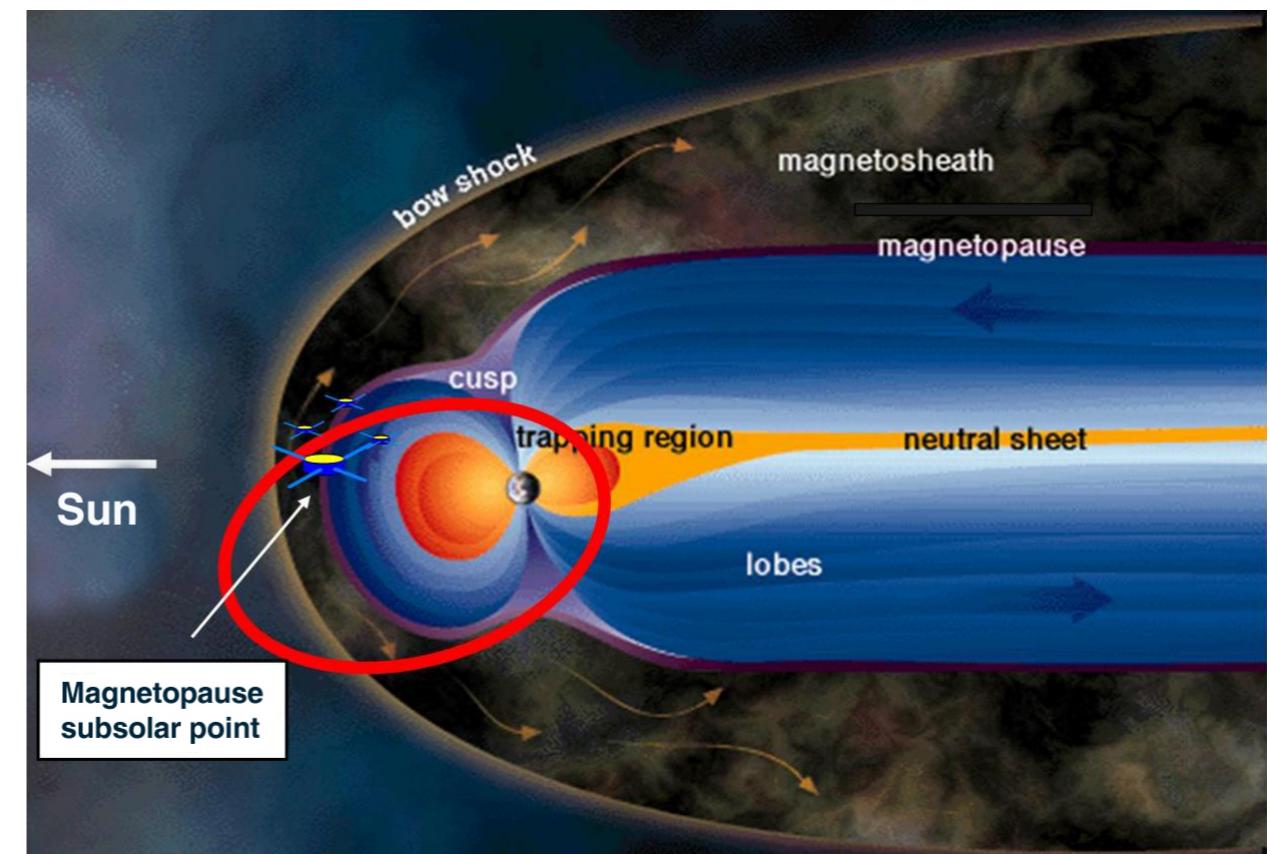
- ・ リコネクションにより形成される歪んだ磁力線は磁気張力を持つことになるため、プラズマを加速する（磁気流体力学の範囲）。
- ・ リコネクションは磁気圏のグローバルなプラズマの動きに影響する。

Cluster衛星

- 太陽風と磁気圏の相互作用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。
- イオン、電子、電磁場等の様々な種類のデータを観測している。

| | |
|-------------|---|
| Launch | July, 16, 2000 |
| Orbit | Apogee: $18.7 R_E$ (119,000 km) Perigee: $3 R_E$ (19,000 km) |
| Period | 57 hours |
| Instruments | <ul style="list-style-type: none">CIS (Ion)FGM(Magnetic Field)PEACE(Electron)EFI(Electric Field)STAFF(Wave)... |

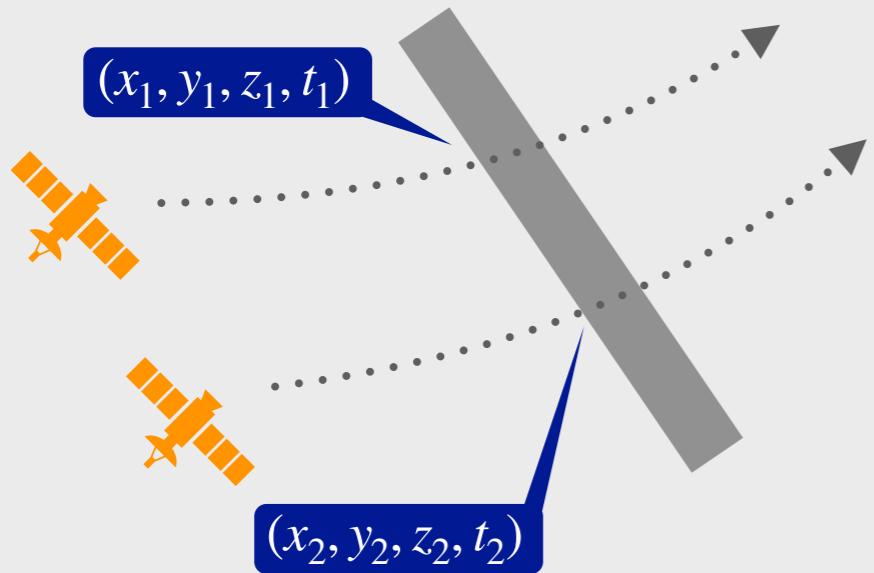
Cluster衛星の軌道



複数機観測のアドバンテージ

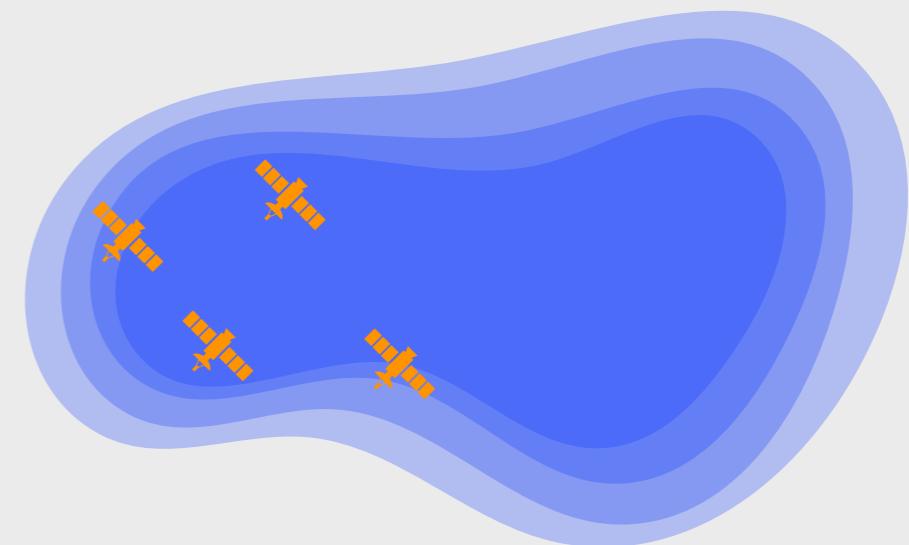
時間変化と空間変化を分離し、空間構造や構造の動きを知ることができる。

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：磁場の空間勾配から電流密度を求める

- ! 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

データのロード・プロット

- 解析する期間を指定し、データをロードする。

```
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変数に格納される。tplot_namesで確認してみる。

```
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よう。変数名もしくは通し番号を指定することでプロットできる。
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する。

```
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る。
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。

✓ 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。
- 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する。
(.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、スクリプトに書いた一連の処理が実行される。

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

課題

次の演習の日(12/6)の午前9時までに小池(koike@kugi.kyoto-u.ac.jp)に提出

【課題5】

2004年3月10日12:20 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)が、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から、衛星はマグネットポーズを横切ったことがわかる。先ほどプロットした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の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。スケッチは磁気圏をGSM座標系の $Y=0$ の断面を夕方側(Y 軸正の方向)から見た視点で描くこと。また、リコネクション領域に対する衛星の相対的な位置関係がわかるように描くこと。

(ヒント：衛星は南半球のローブ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た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上にプロットし、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縦線を引いた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、その理由を磁気圏側とマグネットシース側のプラズマのパラメータの違いに着目して考察せよ。