

# SCOPE衛星搭載用 低エネルギー電子計測器の 開発

富永祐[1], 齋藤義文[2], 篠原育[2], 横田勝一郎[2]

[1]: 東京大学 大学院理学研究科 地球惑星科学専攻

[2]: ISAS/JAXA

# Contents

## 1 : Introduction

1.1 : 地球磁気圏のプラズマ環境

1.2 : SCOPE計画の概要

1.3 : SCOPE計画における低エネルギー電子計測

## 2 : 低エネルギー電子計測の原理

2.1 : 球型静電分析器

2.2 : 三重球型静電分析器

2.3 : 静電分析器と物理量の関係

## 3 : 計測器の設計と特性計算

3.1 : 高時間分解能の実現性

3.2 : 三重球型分析器の必要性

3.3 : 特性計算の手法

3.4 : 計算結果

3.5 : 太陽紫外線対策

## 4 : 数値モデル計算による観測精度評価

4.1 : 数値モデルの構築

4.2 : 計算結果

4.3 : 考察

## 5 : 複数センサー観測の問題点の評価

5.1 : センサー間の感度のバラツキが観測に与える影響

5.2 : 衛星スピンによる観測視野回転

## 6 : 磁気圏尾部リコネクション領域での観測データの再現

6.1 : 3次元粒子シミュレーションの概要

6.2 : 観測データの再現方法

6.3 : 結果と考察

## 7 : Conclusion

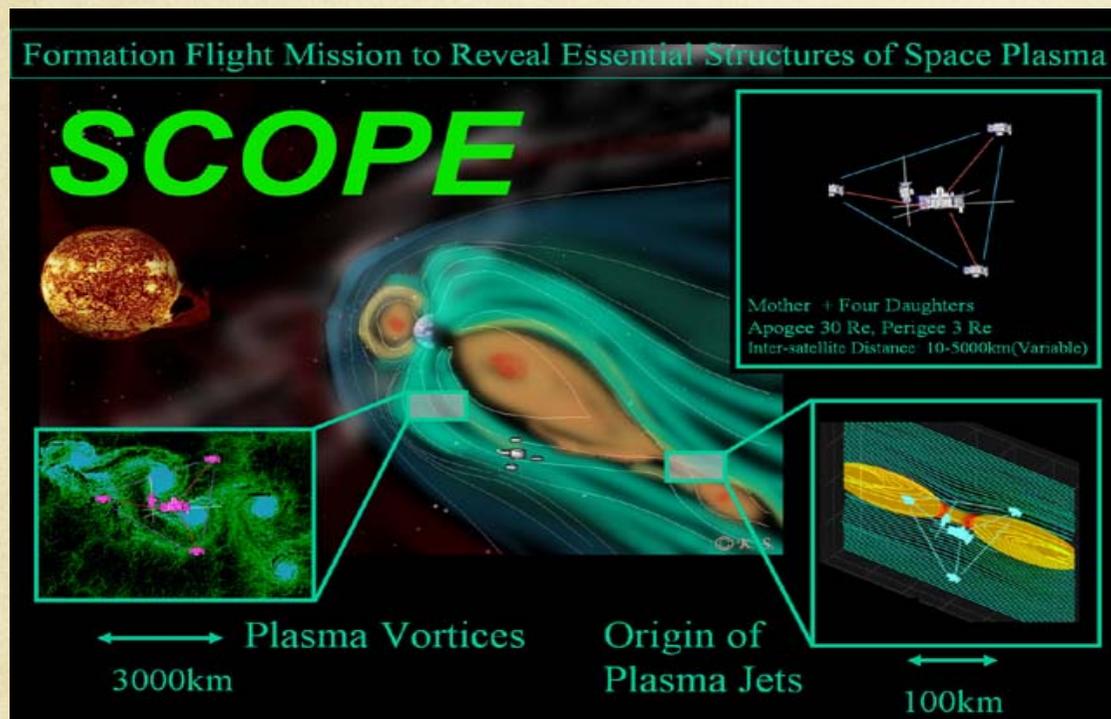
Appendix

Acknowledgements

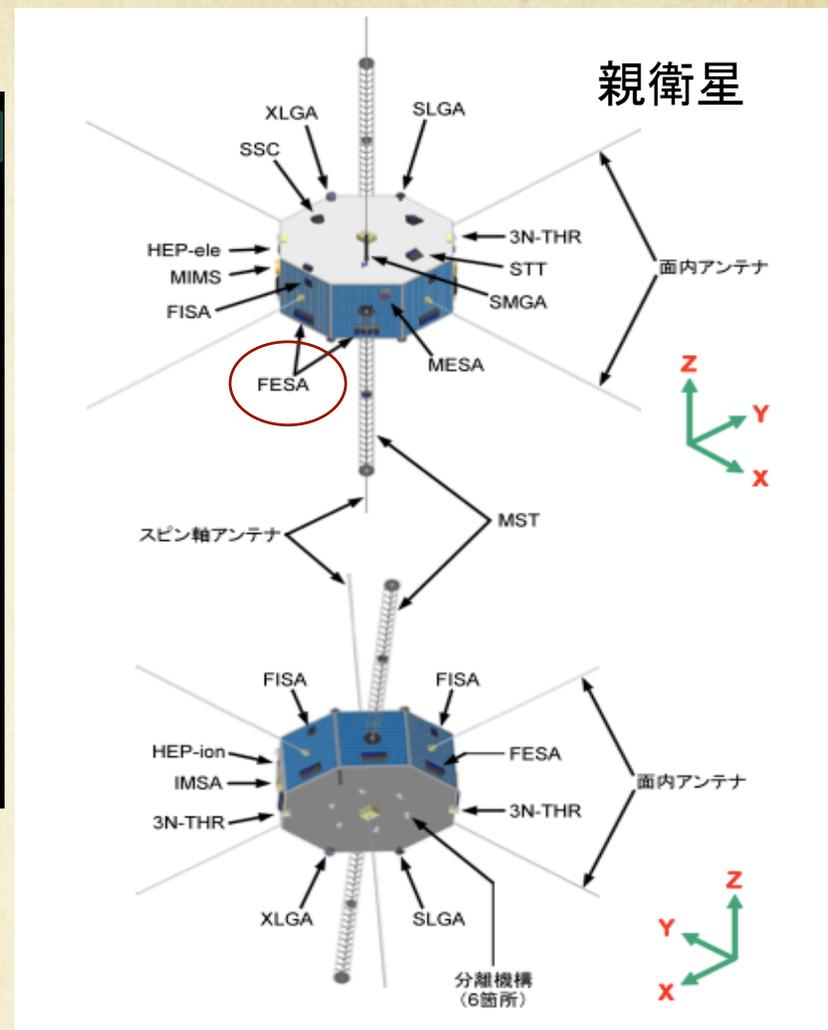
References

# 1. Introduction

## SCOPE計画の概要



<http://sprg.isas.jaxa.jp/researchTeam/spacePlasma>



5機衛星の編隊飛行による同時多点観測

- 現象の空間変化と時間変化を分離
- multi scale observation (100-5000 km, ~100 km)

# SCOPE計画での低エネルギー電子計測

- 測定エネルギー: 10 eV ~22.5 keV
- 時間分解能: 10 msec以下
- 観測視野(Field Of View) :  $4\pi$  str

MHD近似が成り立たず、プラズマ粒子の振る舞いが重要となる領域を観測



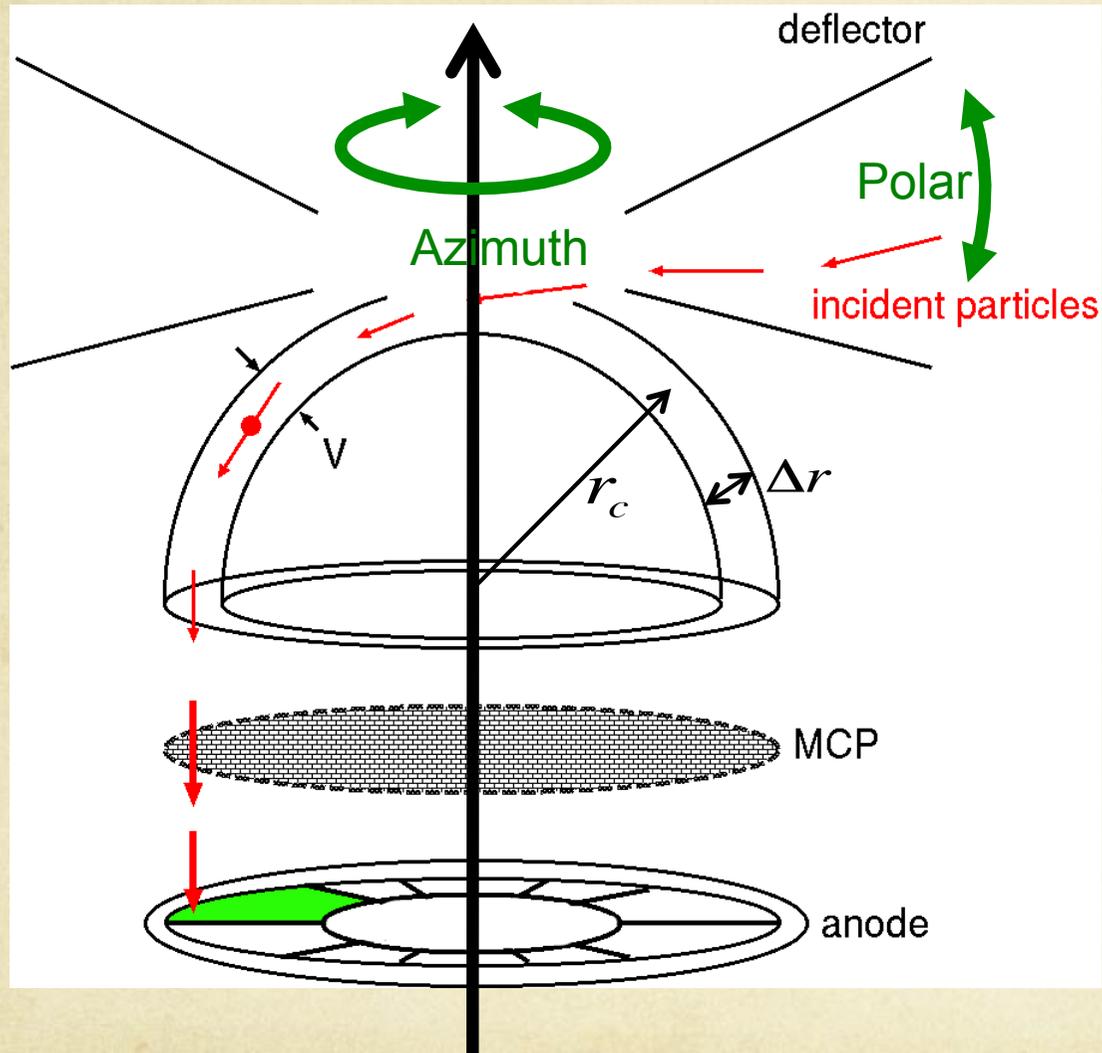
イオン(~100 msec)・電子(~10 msec)の時間スケールで測定を行う

超高時間分解能 (GEOTAIL LEPの1000倍)の低エネルギー粒子計測器が必要

Fast Electron Spectrum Analyzer (FESA) を開発

## 2. 低エネルギー電子計測の原理

# 低エネルギー電子計測の概要



観測視野・・

azimuth方向 :  $22.5 \text{ deg} \times 16 = 360 \text{ deg}$

polar方向 : several deg

10 eV ~ 22.5 keV



$$E = q \frac{V}{2} \frac{r_c}{\Delta r}$$

V: 印加電圧

E: 検出粒子のエネルギー

エネルギーEの粒子が(サンプリングタイム $\Delta t$ あたり)何個検出されるか(**C(E)**)を求める

## 2. 低エネルギー電子計測の原理

# 静電分析器と物理量の関係

$$Ef(E) = \frac{C(E)}{g\Delta t}$$

g: 装置の感度  
Δt: サンプルングタイム

...Differential energy flux  
(cm<sup>-2</sup> str<sup>-1</sup> sec<sup>-1</sup>)

4π strからの  
観測

$$F(\vec{v})$$

...Velocity distribution function  
(m<sup>-6</sup> sec<sup>3</sup>)

$$n = \iiint F(\vec{v}) d\vec{v}$$

$$\vec{P} = \iiint m\vec{v}\vec{v}F(\vec{v}) d\vec{v}$$

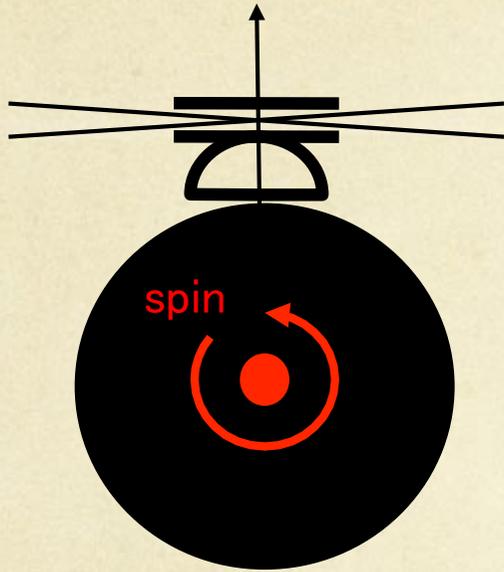
...

$$n, V, T$$

...Velocity moments  
Density, Pressure, Temperature

### 3. 計測器の設計と特性計算

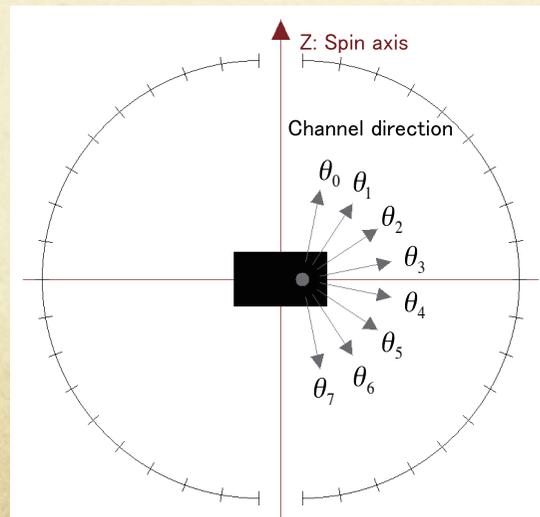
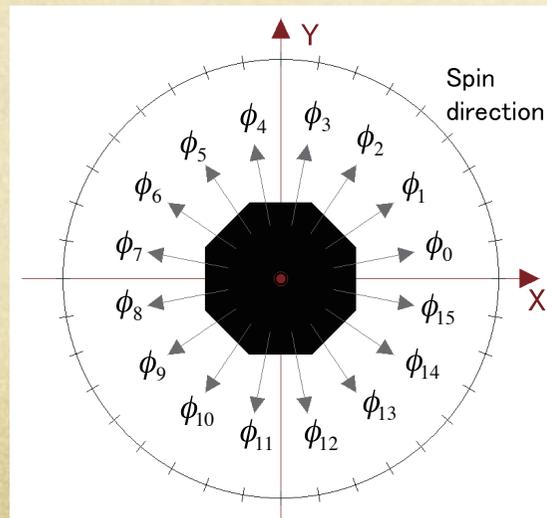
## 高時間分解能の実現性



### 過去の観測衛星

- 衛星に1台のセンサーを搭載
- 衛星スピンを利用して、 $4\pi\text{str}$ の視野を確保

：  
スピンの依存したサンプリング



### SCOPE(親衛星)

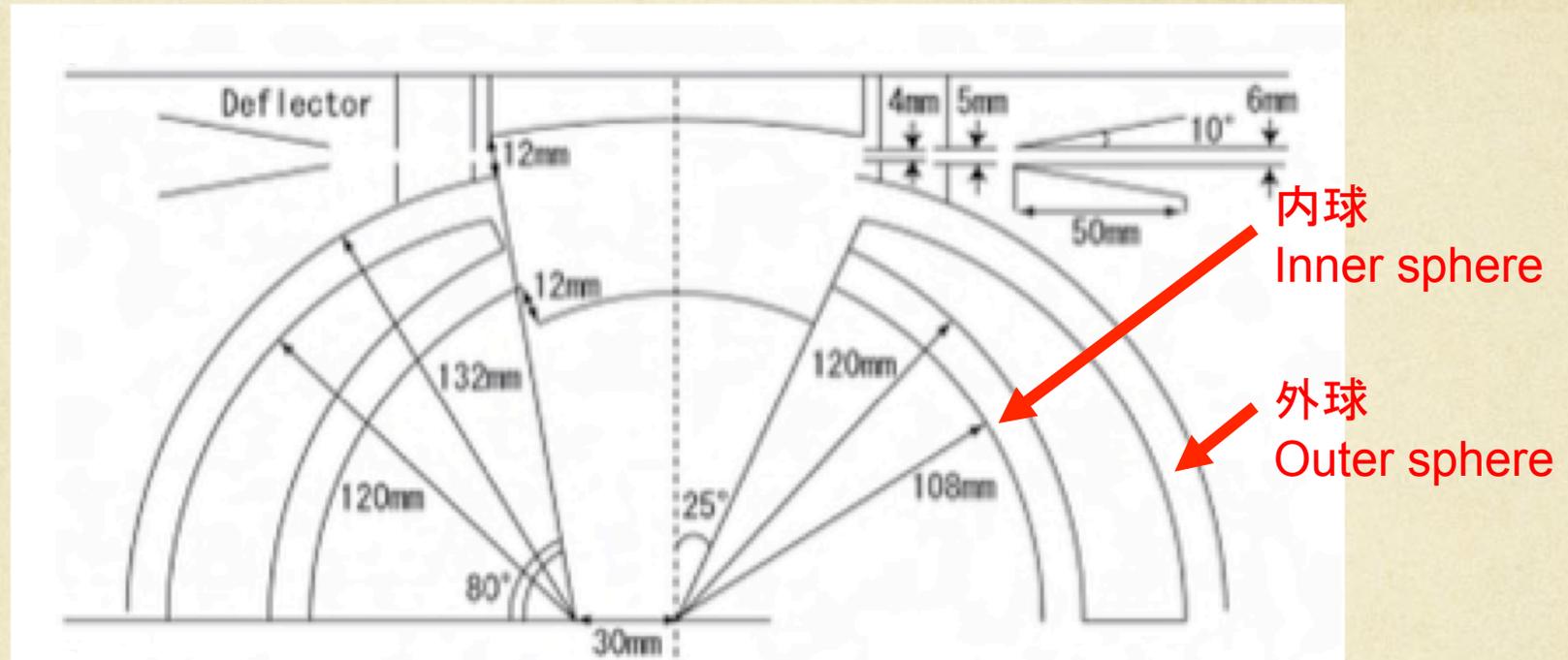
- 衛星に**複数台センサーを**搭載
- 衛星スピンを利用せず、一度に $4\pi\text{str}$ の視野を確保

：  
**スピンの依存しないサンプリング**

### 3. 計測器の設計と特性計算

# 装置設計

先行研究 (saito et al., 2009)



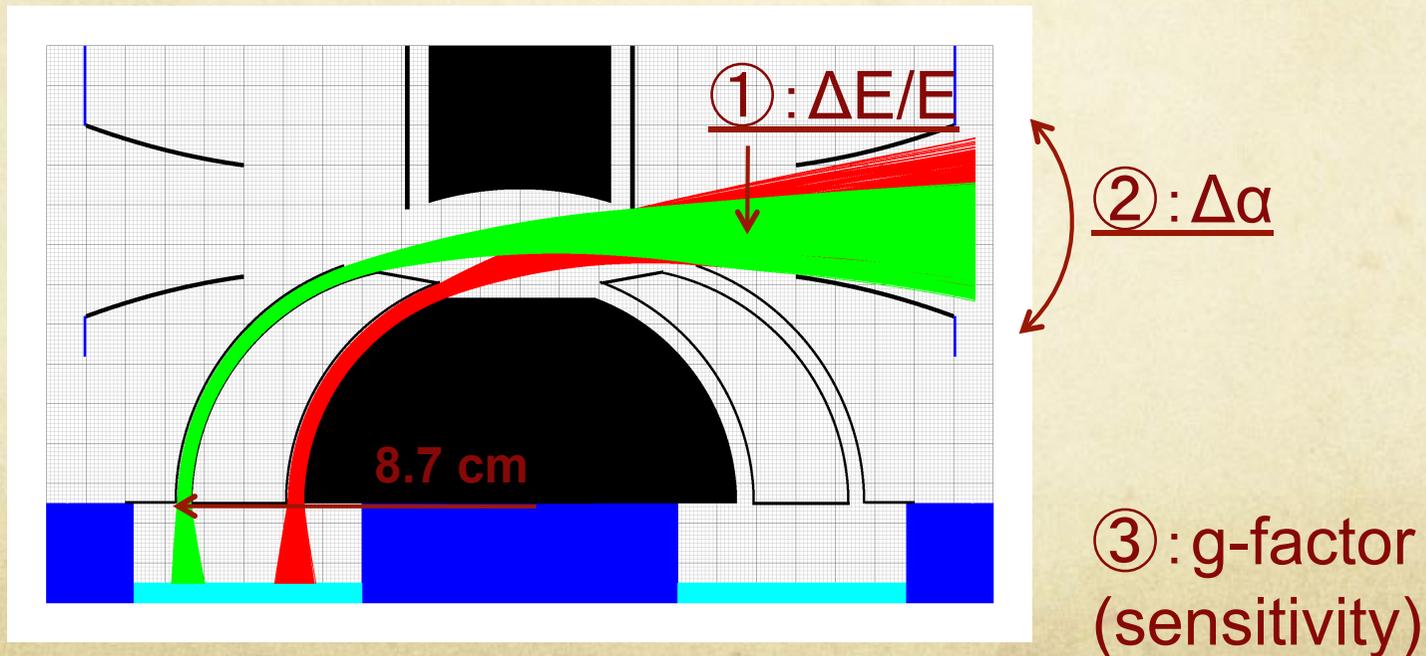
- 3重球静電分析器...同時に2つのエネルギー帯を測定
- サイズが大きすぎて、衛星に搭載できない

### 3. 計測器の設計と特性計算

## 特性計算

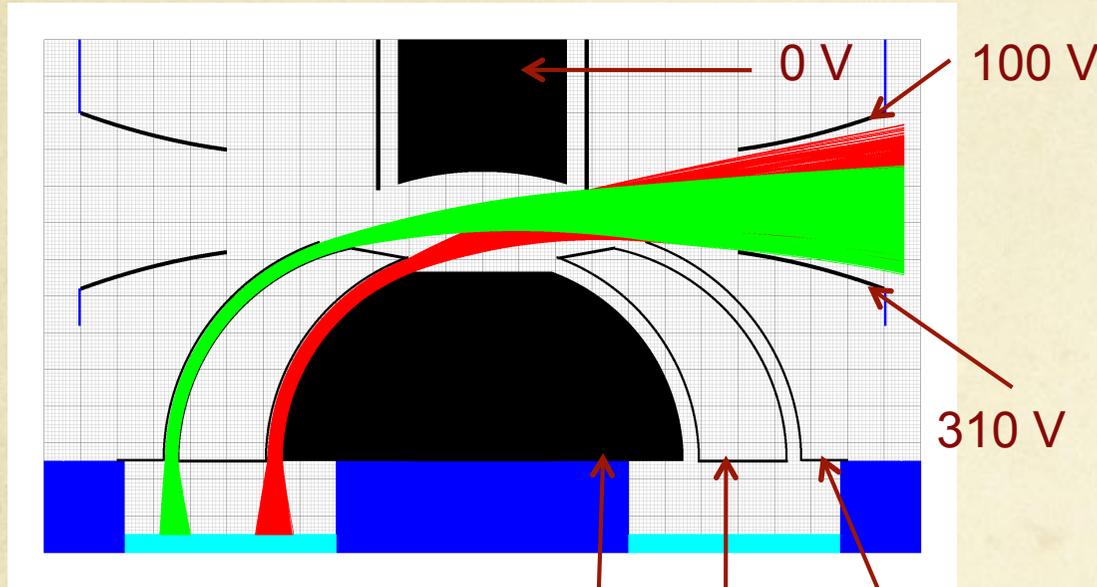
先行研究(Saito et al., 2009)から、  
衛星に**搭載可能なサイズまで縮小**  
ただし、**感度(g-factor)**は同水準に保つ

適切な設計を見つけるために、数値シミュレーションによるセンサの特性計算をおこなった



### 3. 計測器の設計と特性計算

## ① エネルギー分解能 $\Delta E/E$

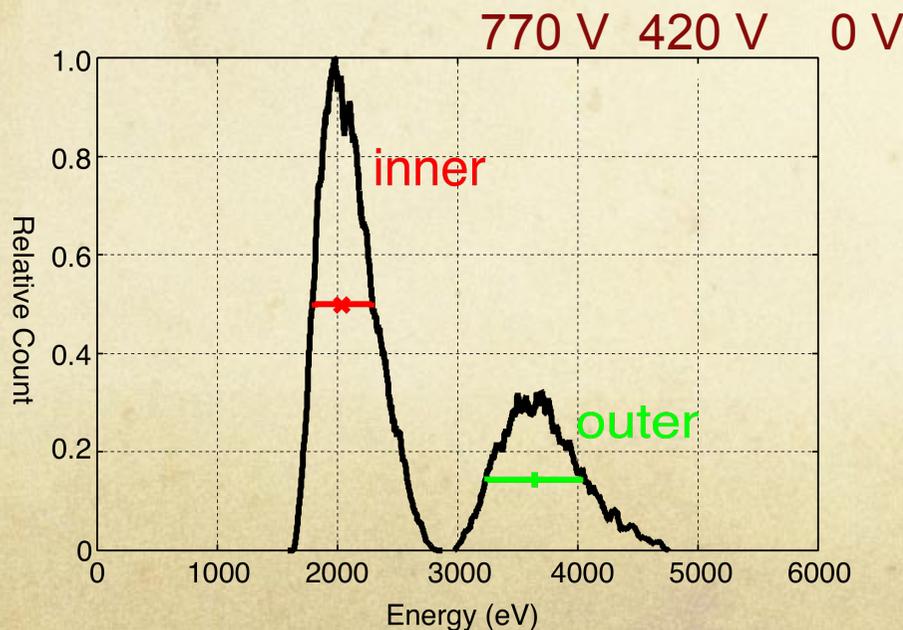


$$V_{in} = 350 \text{ (V)} \quad V_{out} = 420 \text{ (V)}$$

$$E = q \frac{V}{2} \frac{r_c}{\Delta r}$$

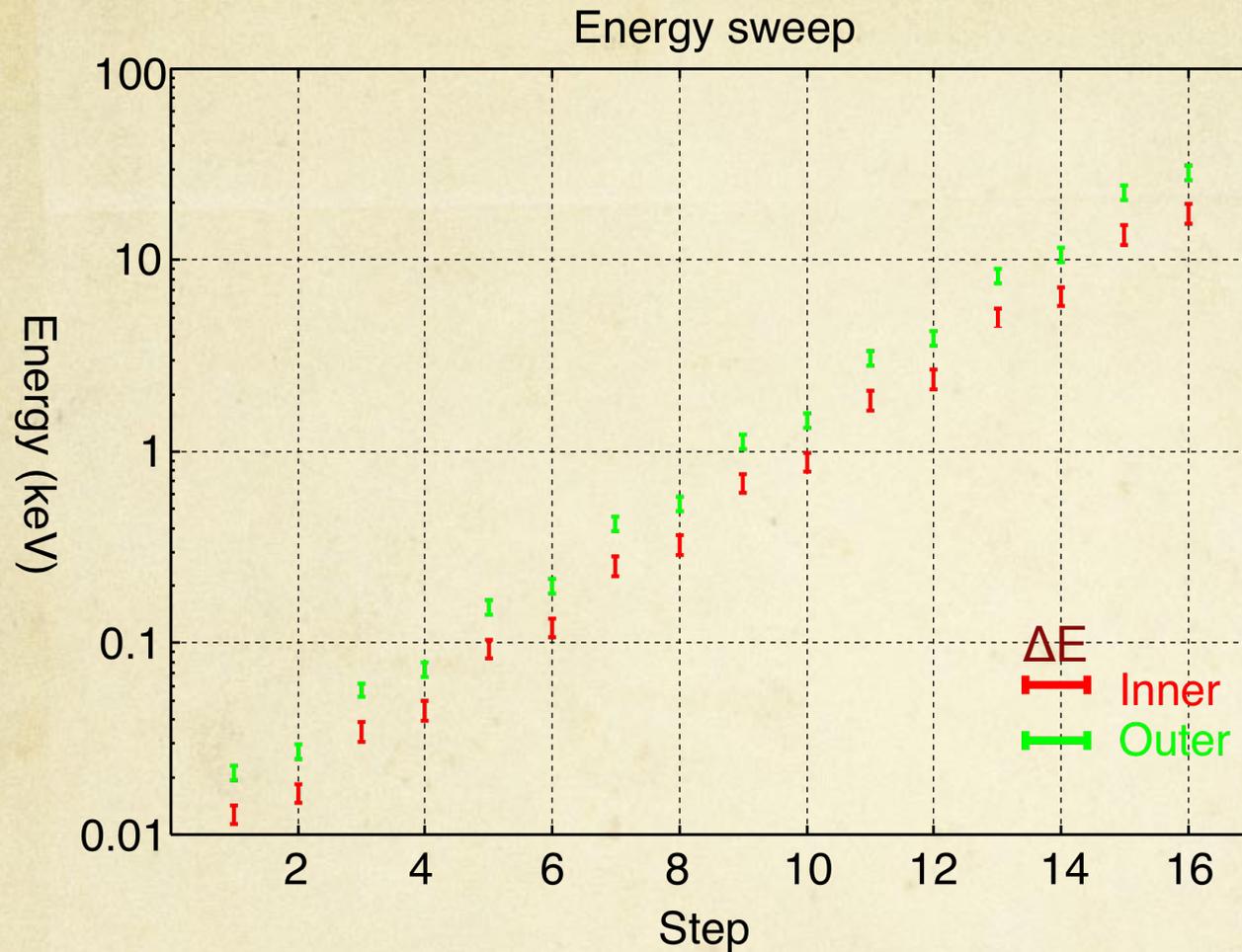
$$E_{in} \sim 2500 \text{ (eV)}$$

$$E_{out} \sim 3200 \text{ (eV)}$$



$$\Delta E/E = 23 \% \text{ (inner)}$$
$$17 \% \text{ (outer)}$$

### 3. 計測器の設計と特性計算

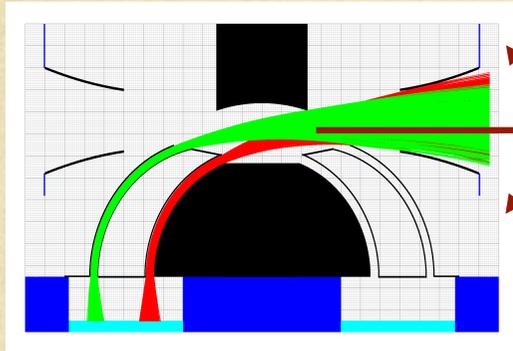


測定エネルギー帯を  
ムラ無く、隙間無く  
カバーする

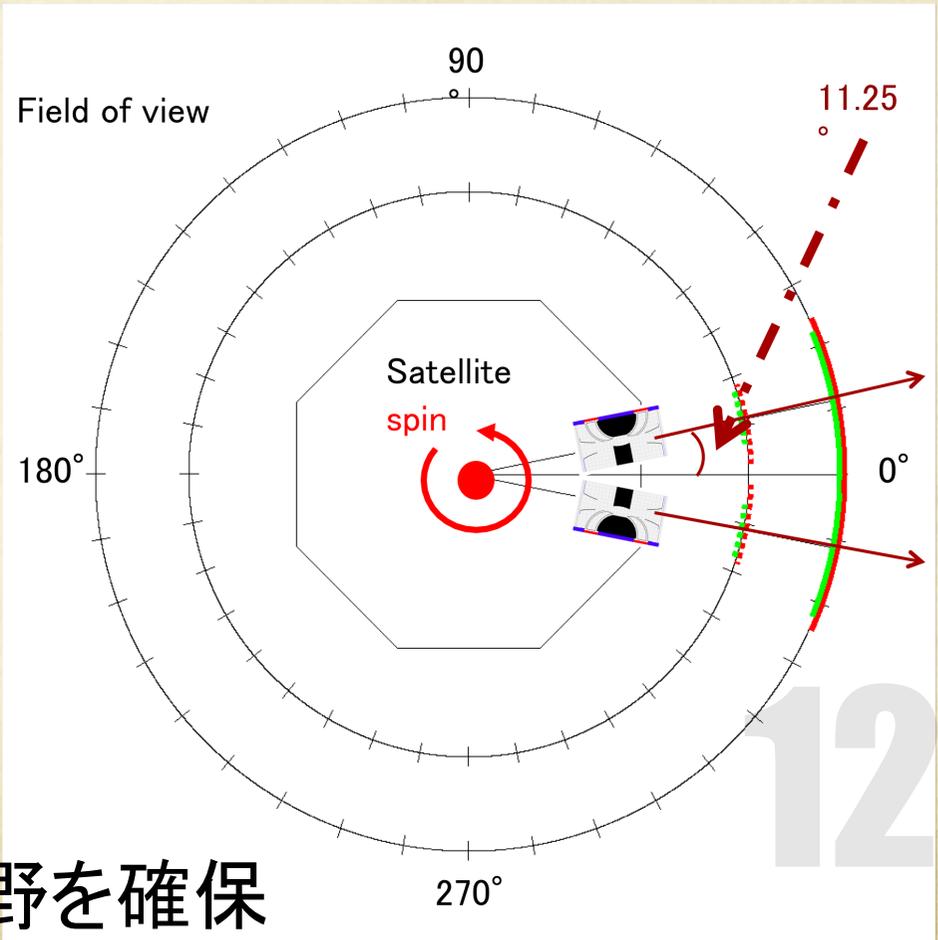
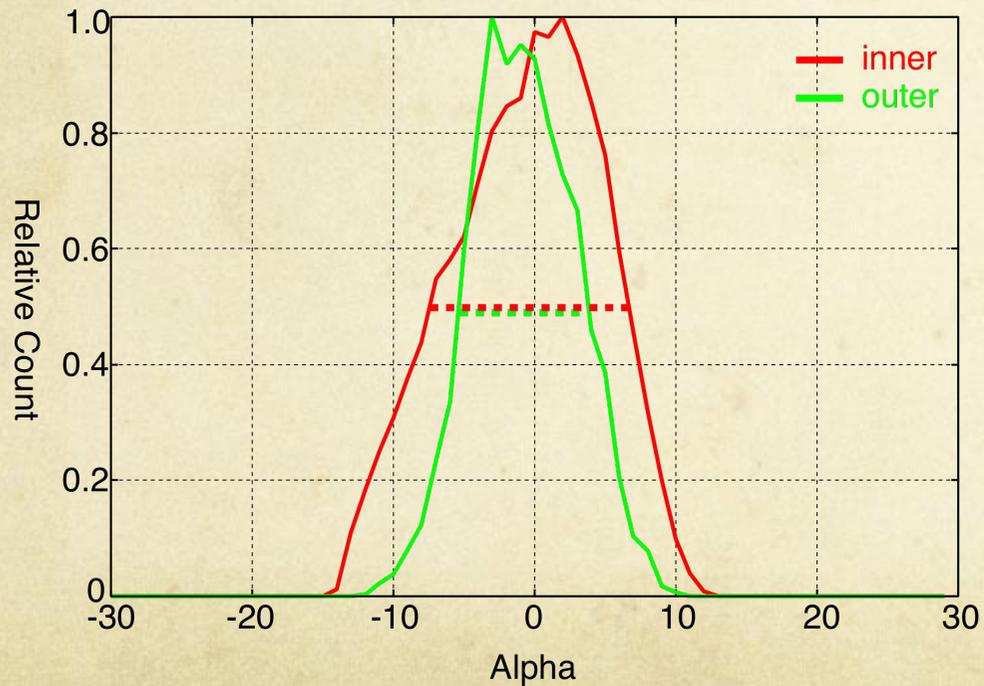
- 10 eV ~ 22.5 keV までを 32 step に分けて測定
- 一度に 2 step 測定 → 電圧を 16 回切り替え
- dt=0.5 msec → 時間分解能は  $0.5 \times 16 = 8$  msec

### 3. 計測器の設計と特性計算

## ② 角度分解能 $\Delta\alpha$



$$\Delta\alpha_{50\%} = 14.3 \quad \text{inner}$$
$$\Delta\alpha_{50\%} = 9.2 \quad \text{outer}$$



センサー2台で $45^\circ$ の視野を確保

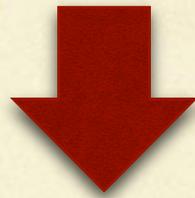
## 先行研究との比較

	Saito et al.		本研究	
gfactor (cm <sup>2</sup> str eV/eV/22.5deg)	8.65*10 <sup>-3</sup> (inner)	9.07*10 <sup>-3</sup> (outer)	7.17*10 <sup>-3</sup> (inner)	8.88*10 <sup>-3</sup> (outer)
Δ α (50%)	6.4 deg	4.6 deg	14.3 deg	9.2 deg
dE/E(50%)	18.8	14.5	23	17

- 感度(g-factor)を同水準に保ったまま、サイズを2/3に縮小
  - 角度・エネルギー分解能が、先行研究と比べ大きくなっている
- ...エネルギーのカバーレージ(10eV~22.5keV)、スピン方向に22.5degの分割で観測を行う上では十分である

## 本章での目標

磁気圏尾部リコネクション領域の3次元粒子シミュレーション結果の中で、仮想的にSCOPE衛星(親機)による高時間分解能(8 msec)電子観測を行う

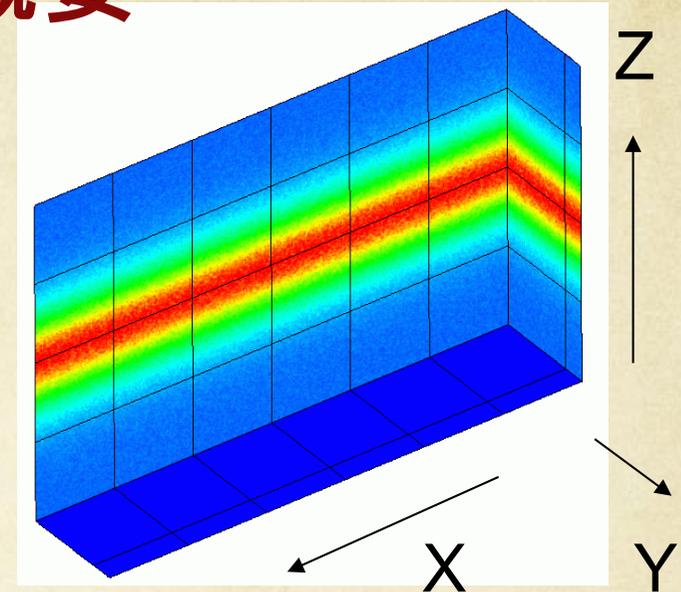


- 設計した計測器での観測視野・時間分解能で、どのような観測データを取得できるかを理解
- 衛星スピンによる観測視野回転の影響の評価(ET図が描けるかどうか)

# 3次元粒子シミュレーションの概要

- 1次元 Harris current sheet
- 中心カレントシートの厚さ:  $0.5\lambda_i$
- $m_i/m_e = 400$   $T_i/T_e = 8$
- X, Y方向: 周期境界 Z方向: 固定

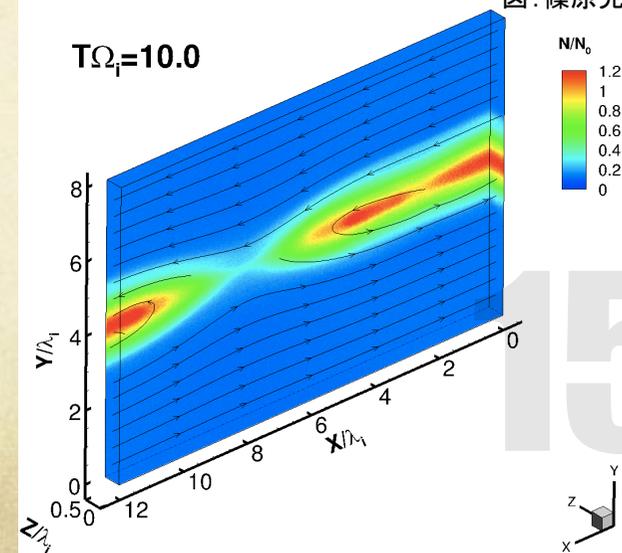
図: 篠原先生より



- $\lambda_i$ : イオン慣性長  $\rightarrow 322$  km  
(カレントシートの密度を  $0.5$  /ccとした)
- 電子熱速度 =  $c/3$  ( $c$ : 光速) =  $10000$  km  
(速度は  $c$  で規格化  $c = 3 \times 10^7$ )

$\sim 10^9$  particles

図: 篠原先生より



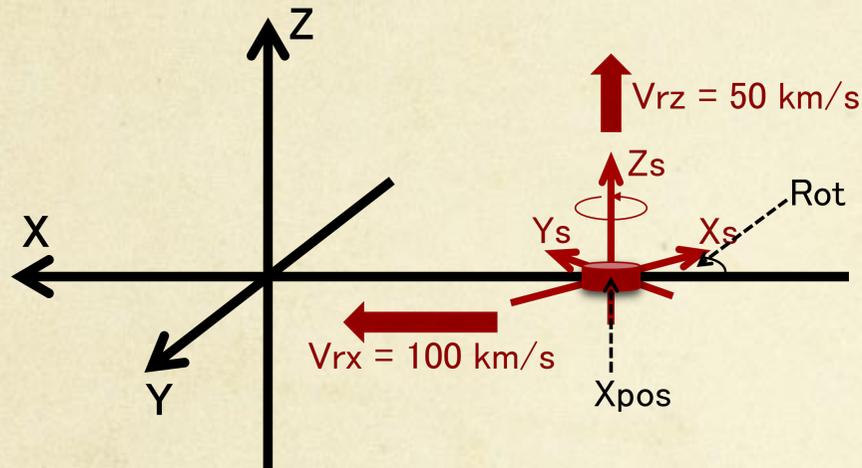
$T\Omega_i = 10$ におけるデータ内で観測データの再現を行う

## 6.磁気圏尾部リコネクション領域での観測データの再現

# 観測のデータ再現方法

現象は衛星に対し、X,Z方向に相対速度 $V_{rx}$ , $V_{rz}$ で流れる

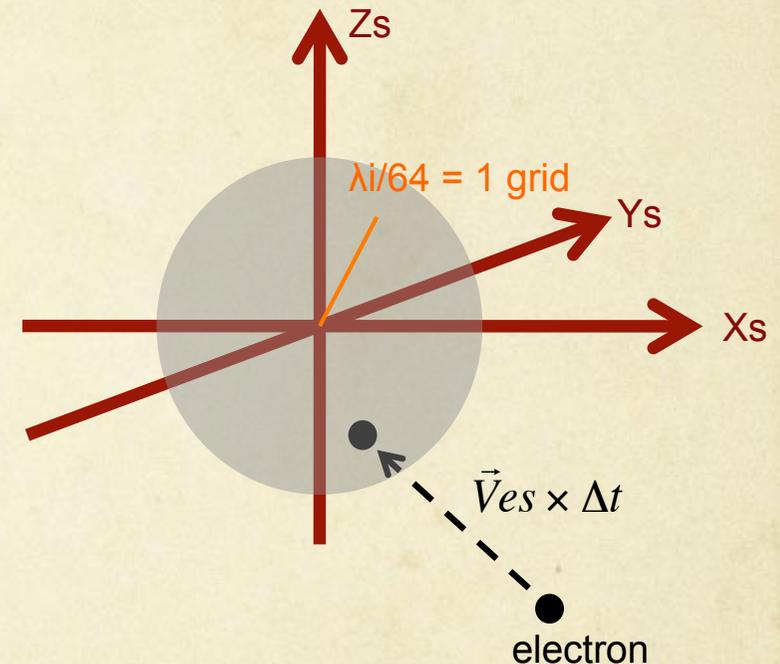
→本計算では、衛星をシミュレーションボックス内でX,Z方向に飛ばす



$$X_{pos} = X_{start} + V_{rx} \times t$$

$$Rot = Rot_{start} + \frac{360 \text{ deg}}{\text{spinrate}} \times t$$

$$t = n \times 16dt$$



simulation座標系→衛星固定座標系に変換

- 衛星固定座標系で、dt後に原点から半径1gridの球内に入る電子を検出
- $v_{es}$ の方向から、センサー番号・チャンネルを決める
- $X_{pos}$ , $Rot$ は、1時間分解能(8 msec)毎に計算

## 6.磁気圏尾部リコネクション領域での観測データの再現

# 結果と考察

### 速度モーメント: 密度

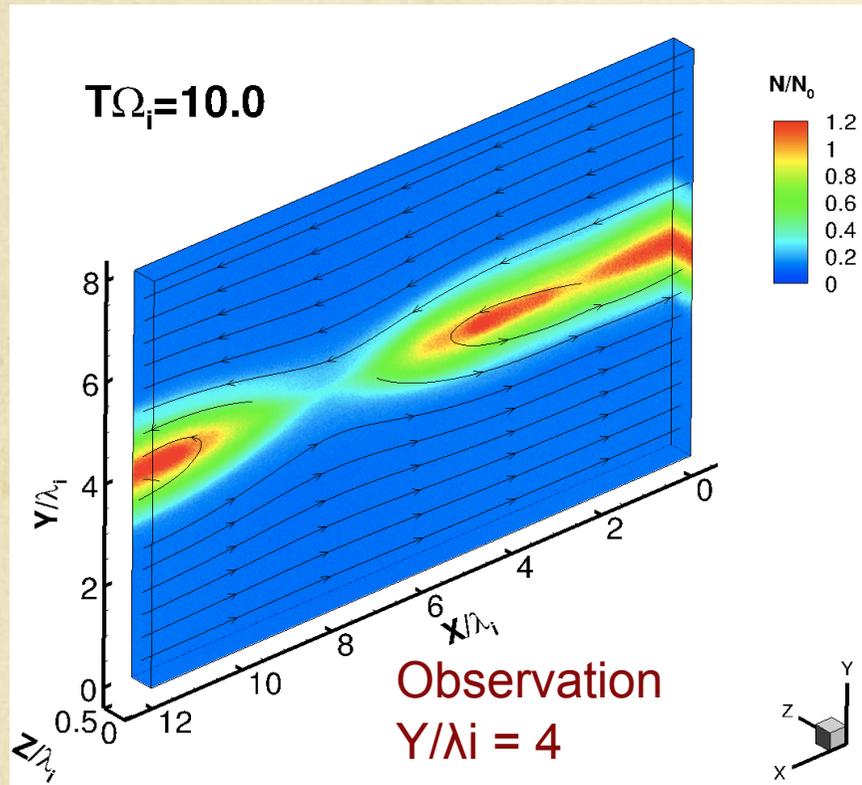
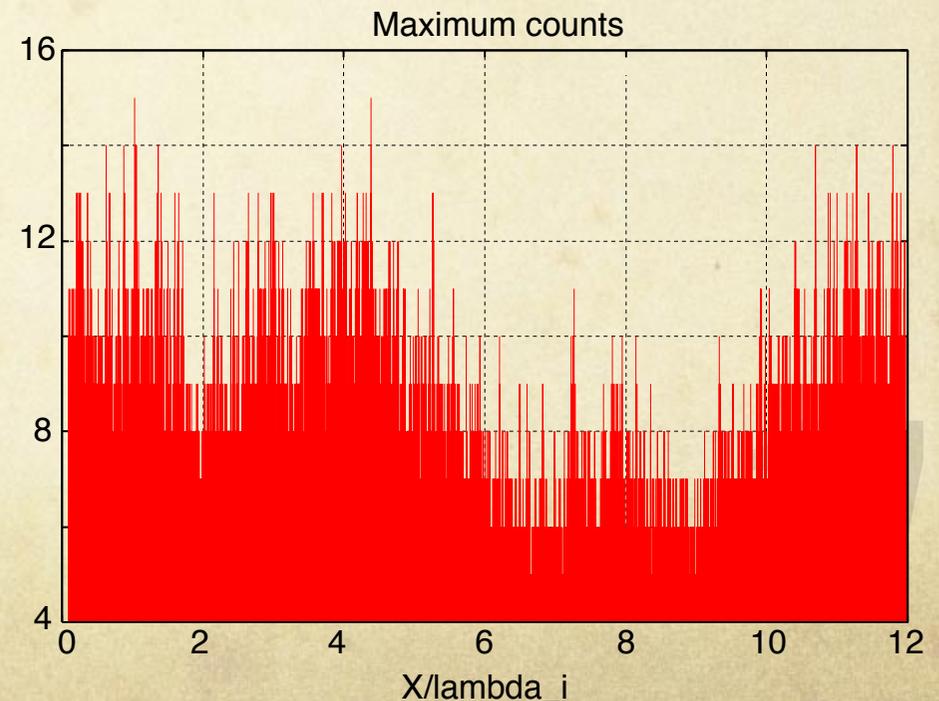
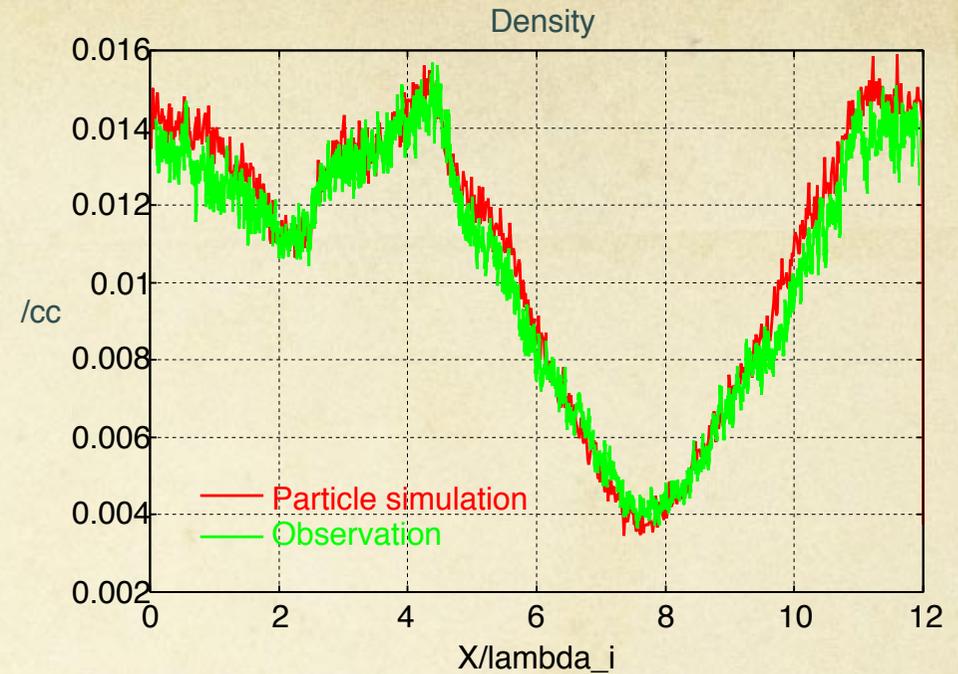


図: 篠原先生より

カウントレートが低すぎる  
... 今後の課題



## 6.磁気圏尾部リコネクション領域での観測データの再現

# 速度モーメント: バルク速度

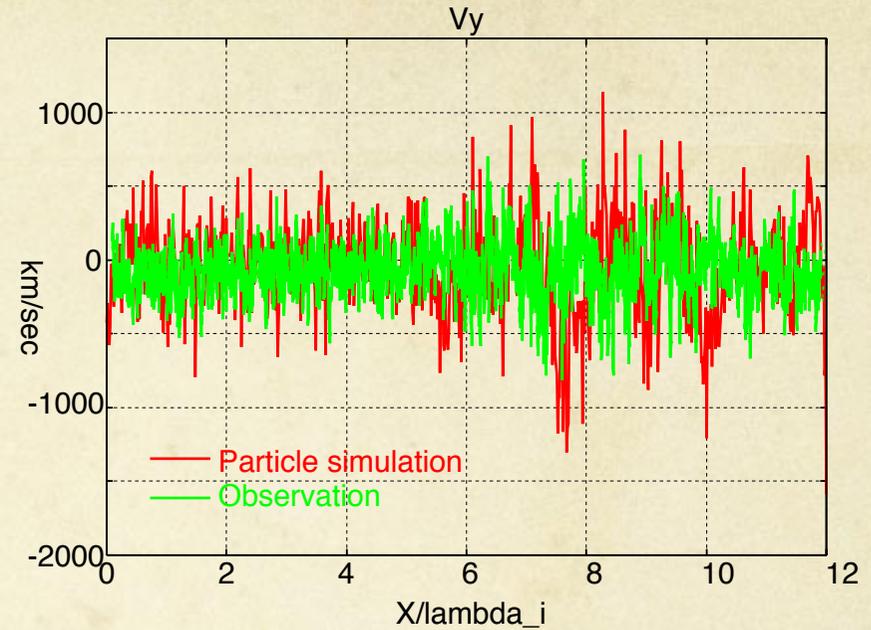
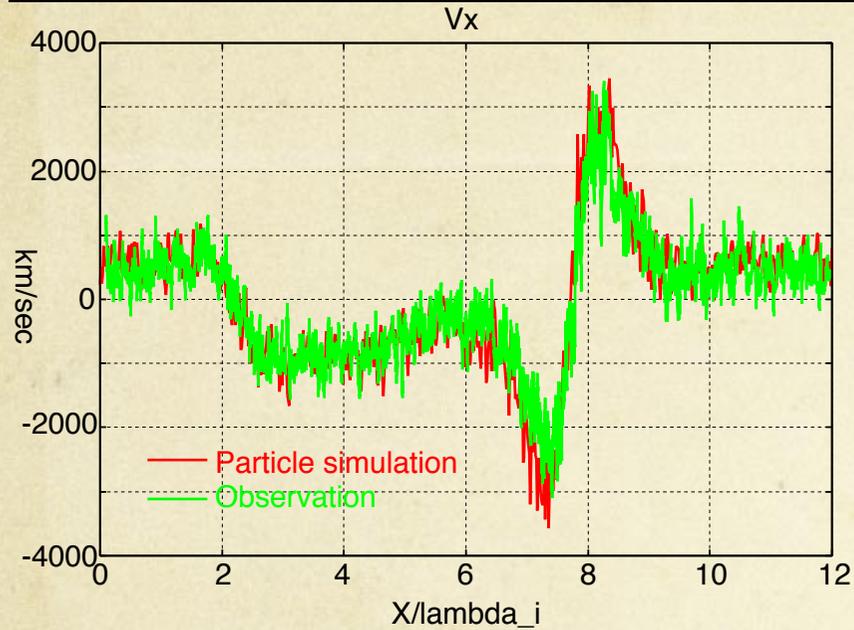
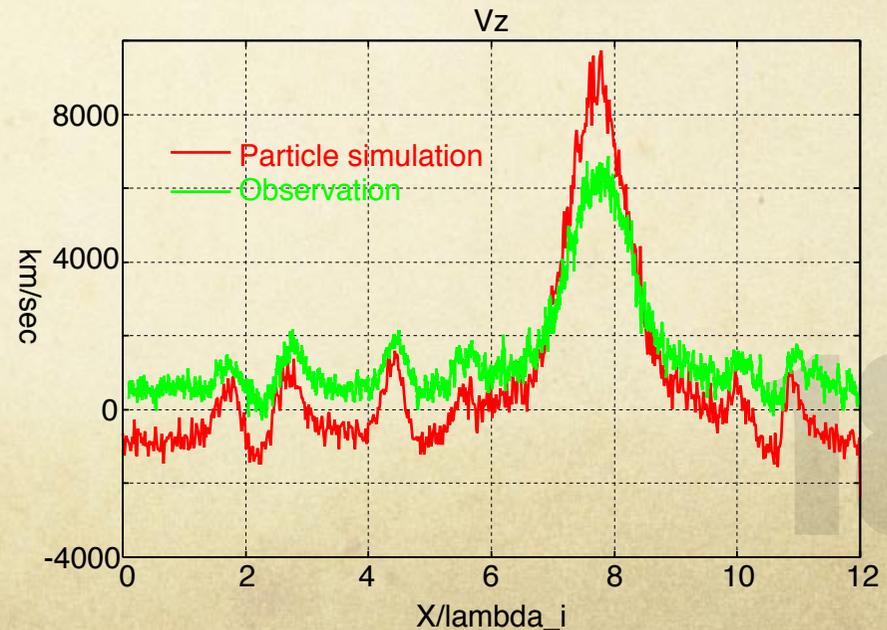
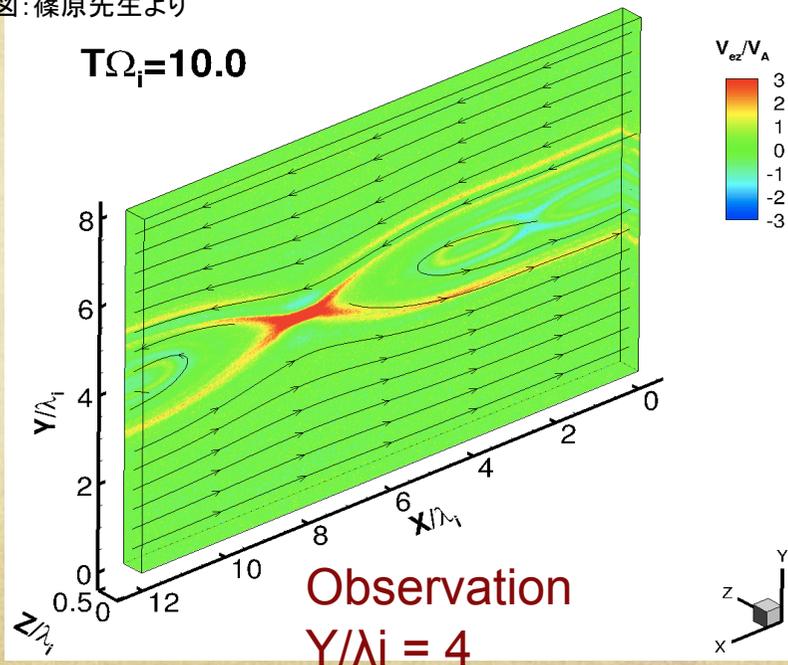
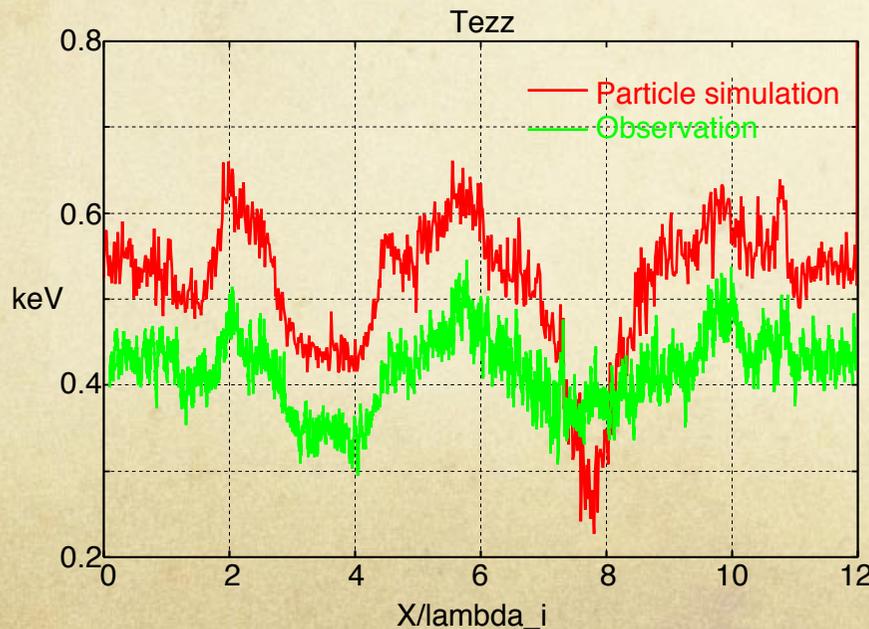
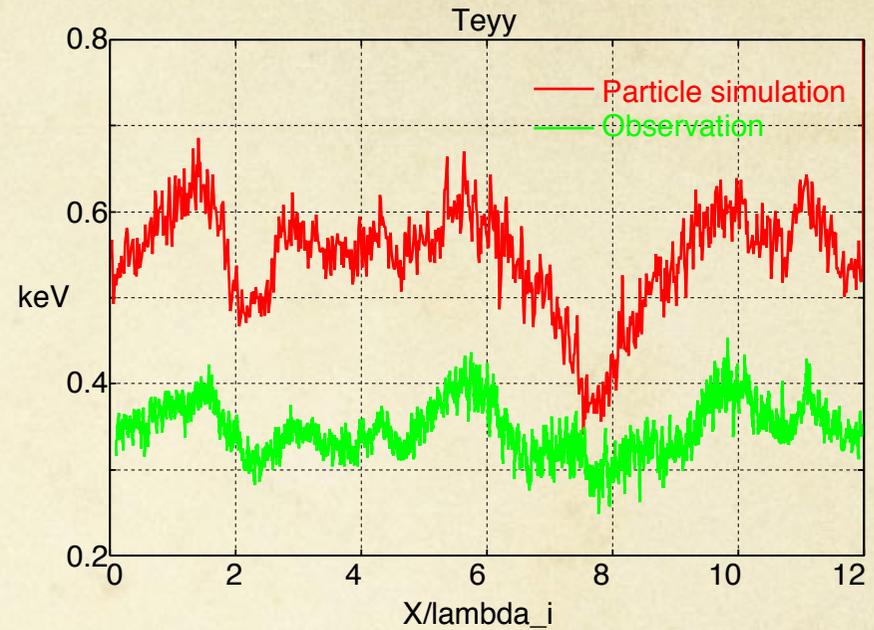
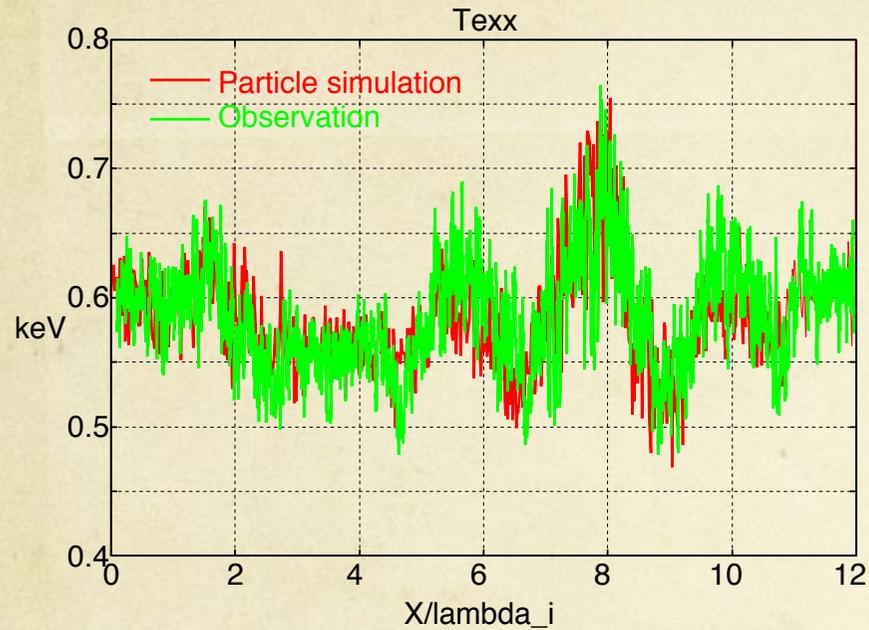


図: 篠原先生より



## 6.磁気圏尾部リコネクション領域での観測データの再現

### 速度モーメント:温度



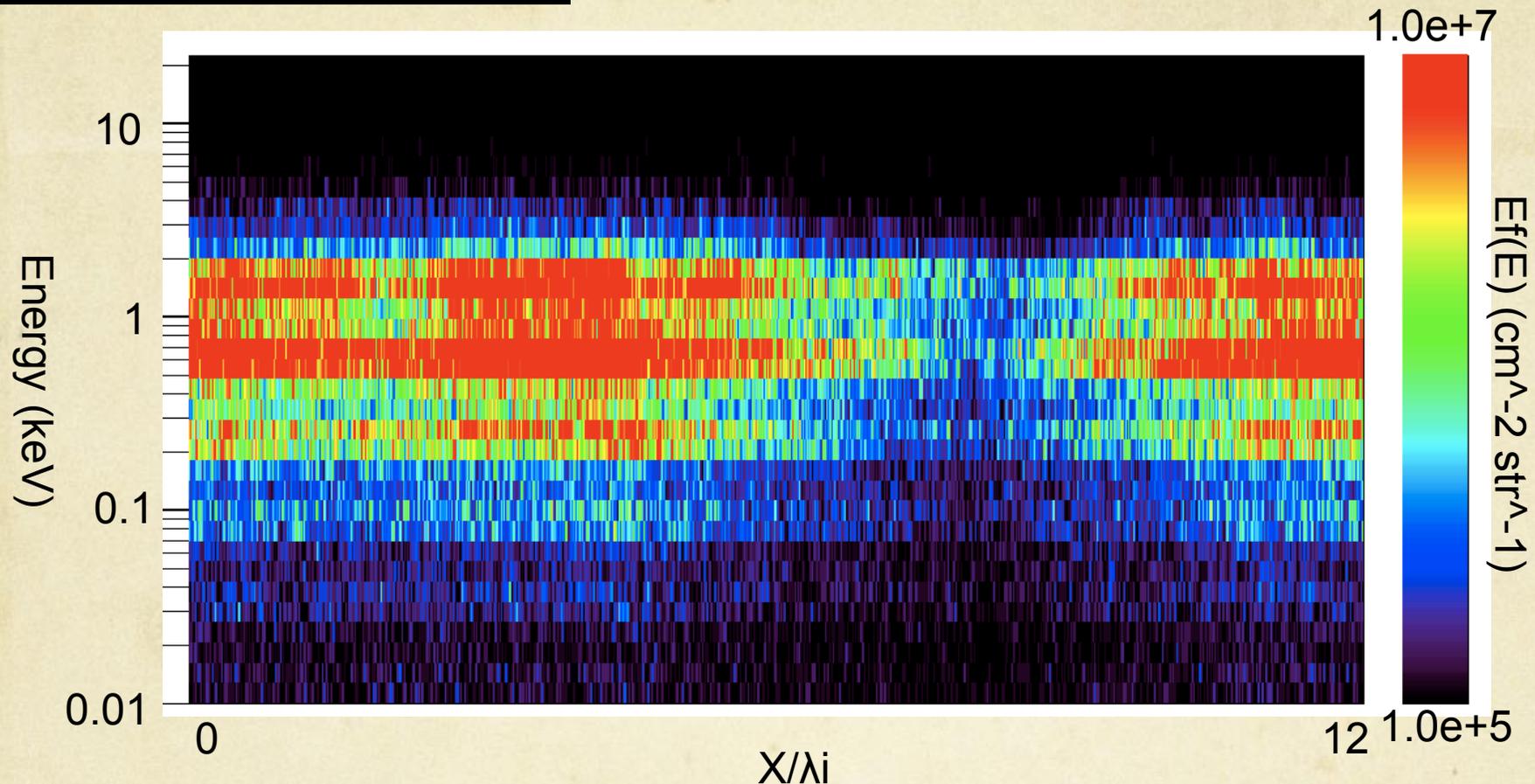
**Y・Z方向の再現性が非常に悪い**  
...原因は現時点で不明。解明が  
最終発表までの検討課題

# Summary & Conclusion

- 超高時間分解能 (8 msec) 実現のために、  
8セット (16台) の粒子計測器を衛星に搭載 ← 衛星スピ  
ンに依存しない観測  
三重球型静電分析器 ← 同時に二つのエネルギー帯の電  
子を観測
- センサーを設計し、数値シミュレーションによりセンサーの感  
度特性を求めた
- 3次元粒子シミュレーション結果から、磁気圏尾部リコネク  
ション領域での観測データの再現を行っている

## 6.磁気圏尾部リコネクション領域での観測データの再現

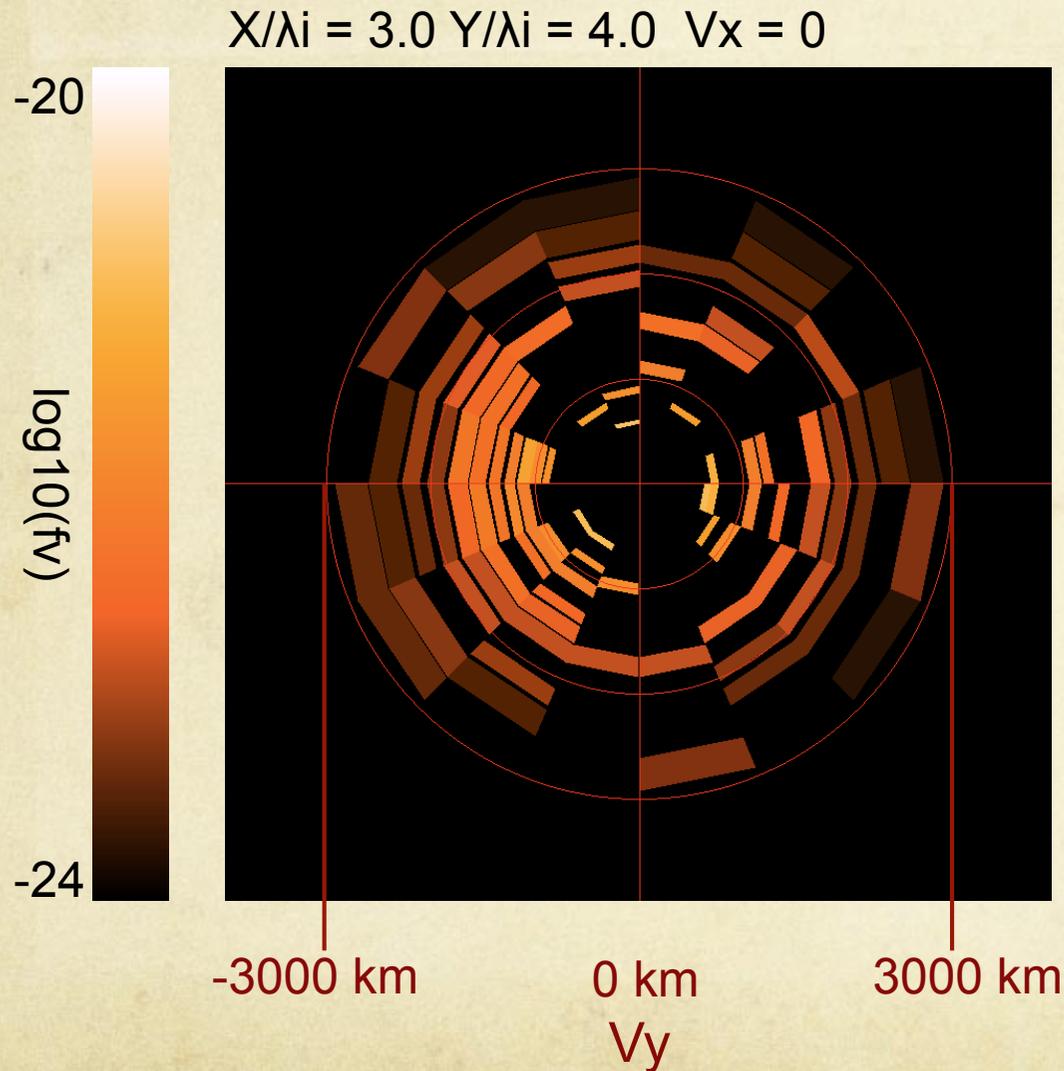
### Future work ... Et



+X方向のフラックス:ただし、これは仮想的にスピンさせないで飛ばしたSCOPE衛星による観測データ  
スピンしながら取得したデータでこれを再現できるか確かめたい

6.磁気圏尾部リコネクション領域での観測データの再現

Future work...速度分布関数



異方性のある速度分布関数を再現したい  
...Y方向にバルク速度が見えるはず

カウントレートが少ないため、速度分布関数の再現性が非常に悪い