

「すざく」衛星による地球外圏からの 電荷交換X線放射の系統探査

石川 久美

2013年6月19日

本日のお話

1. Introduction

2. 解析手順

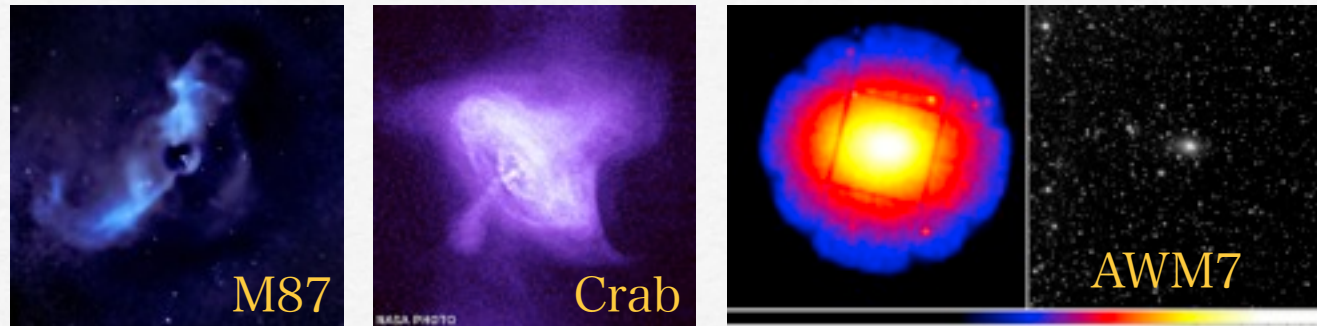
3. 結果

4. 考察

5. まとめ

宇宙からのX線放射

- 1960年代：本格的なX線宇宙観測スタート



強重力・磁場、超高温：
普通じゃない環境からX線発生

ブラックホール、中性子星、
超新星残骸、銀河団、などから発見

しかし！

- 1996年：冷たいガスから熱い発見

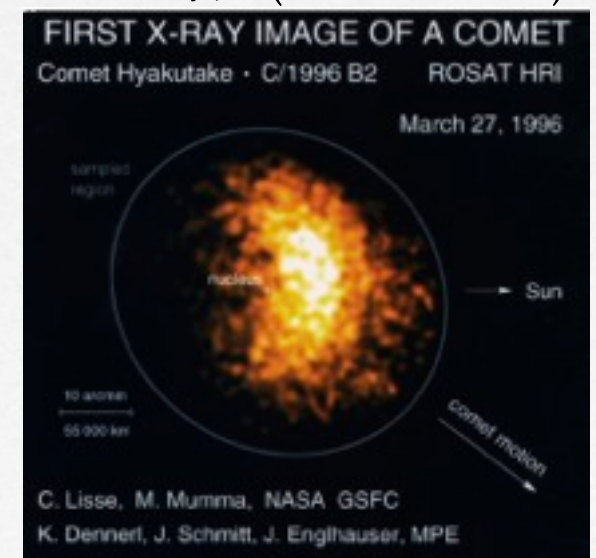
- 百武彗星からX線 (独 ROSAT衛星)
→ 高温ガスも磁場もなしでX線が？

- 新しいX線放射メカニズム
→ 電荷交換反応によるX線放射

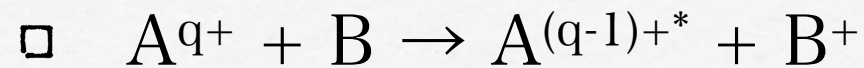
可視光



X線 (Lisse+96)



電荷交換反応 (CX : Charge eXchange)



□ 特徴

□ 散乱断面積が大きい ($\sim 10^{-15} \text{ cm}^2$)

→ 希薄なガスで起きる

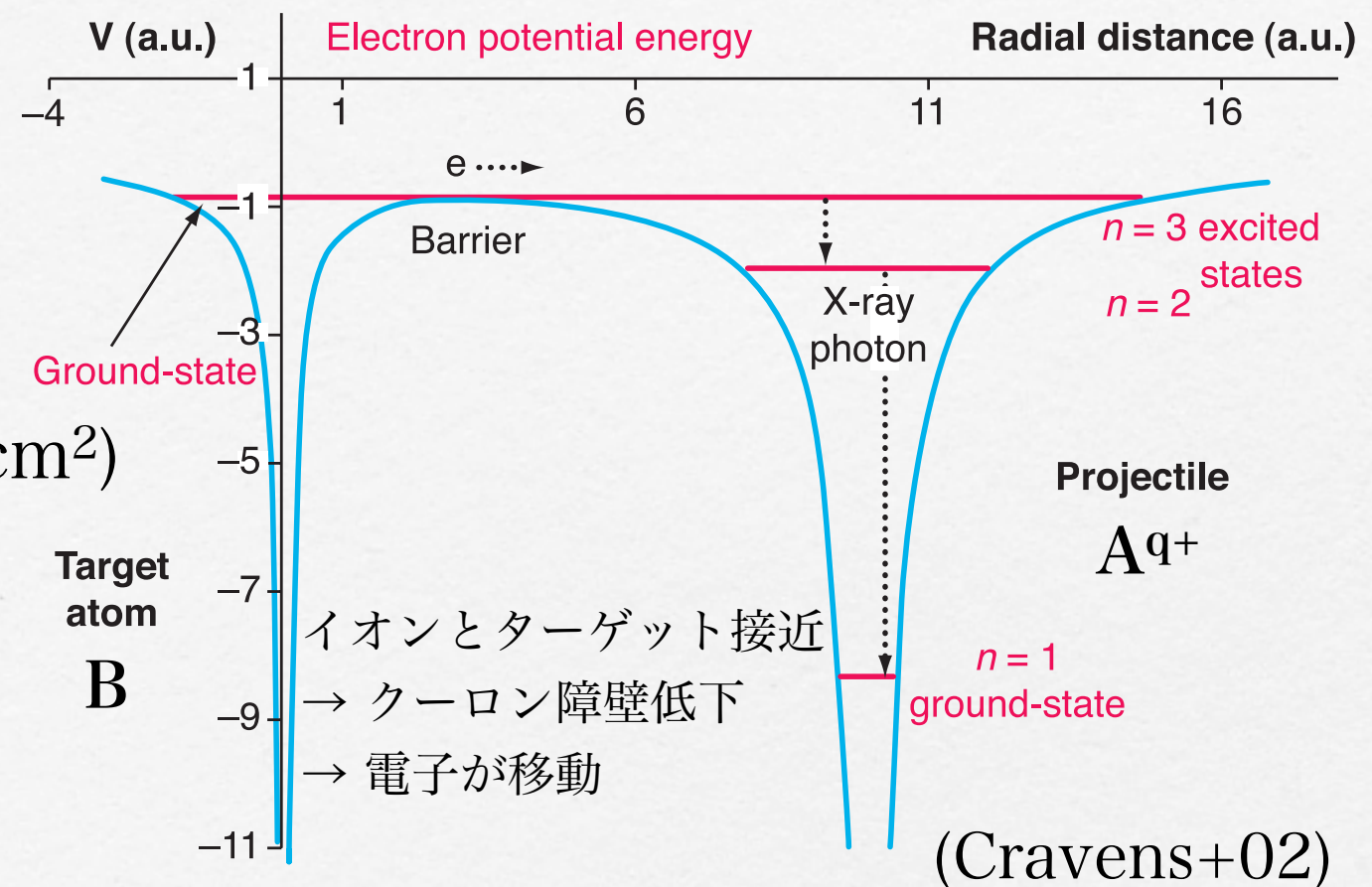
□ イオンが太陽風起源

→ SWCX (Solar Wind CX)

□ 太陽系内：太陽風 + 希薄な大気 → X線

例) 彗星コマ、惑星の最外層大気 (外圏) など

□ 地球外圏 SWCX 放射に注目



地球外圏での SWCX 1(地球物理、惑星プラズマ)^{1. Introduction}

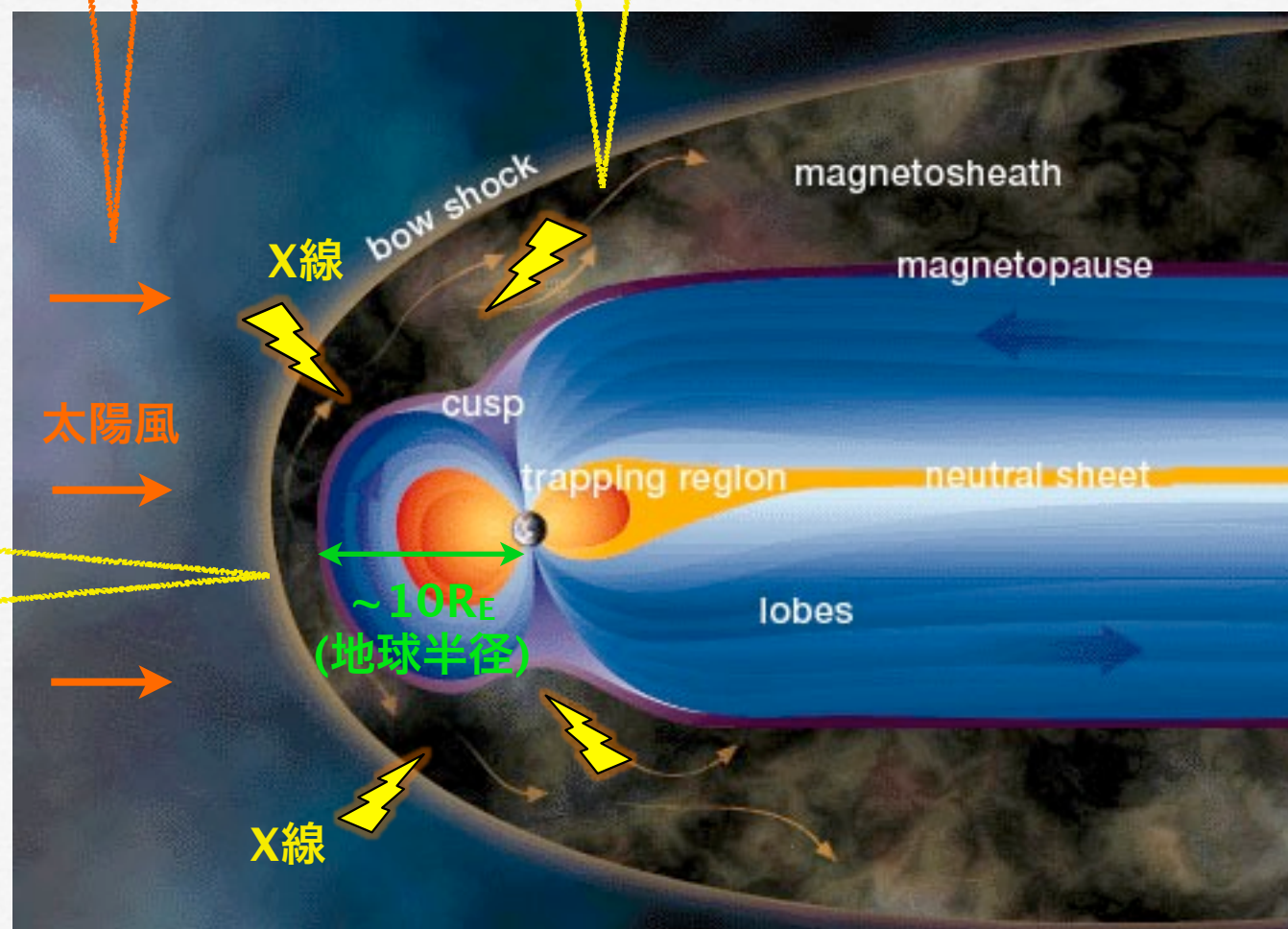
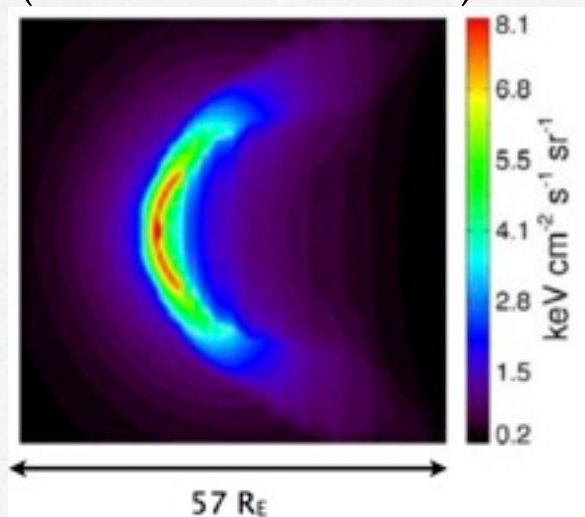
- 1990年：月のX線イメージ + 彗星X線の発見から期待

太陽風：

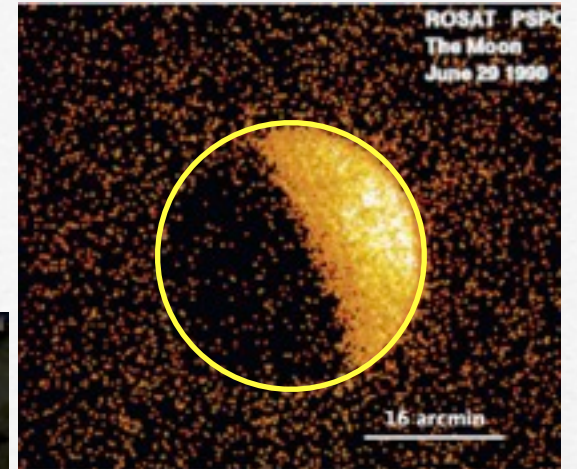
~400 km/s, ~10 /cc @ 地球

外圏の中性水素 +
地球周辺に到達した太陽風イオン

SWCXのX線画像
シミュレーション
(Robertson+06)



X線 (Schmitt+91)



イメージ図

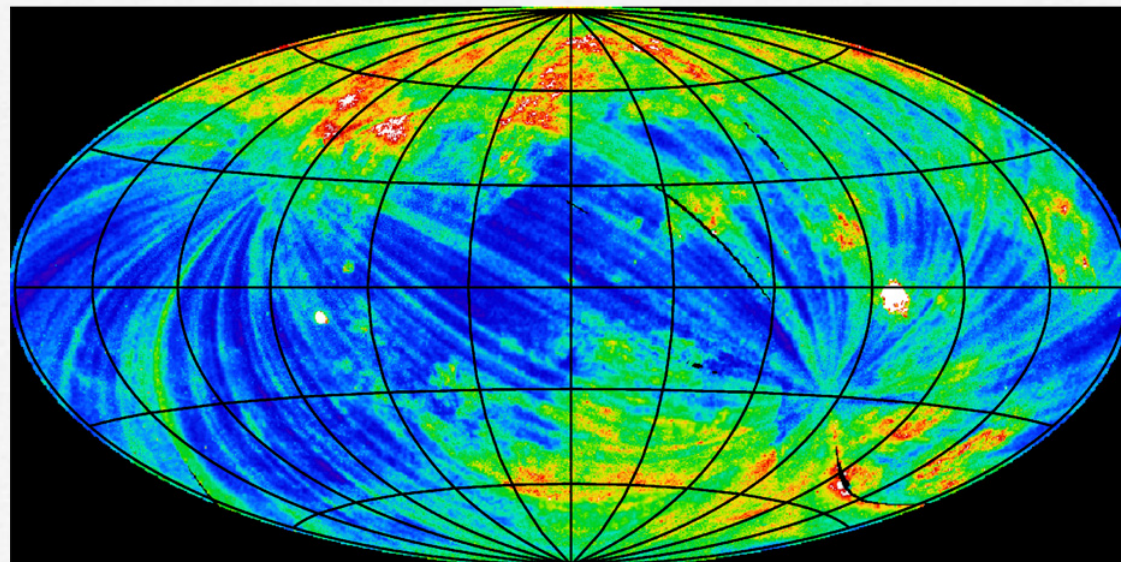
- 地球SWCXのX線観測：磁気圏の可視化に期待

地球外圏での SWCX 2 (X線観測の前景放射)

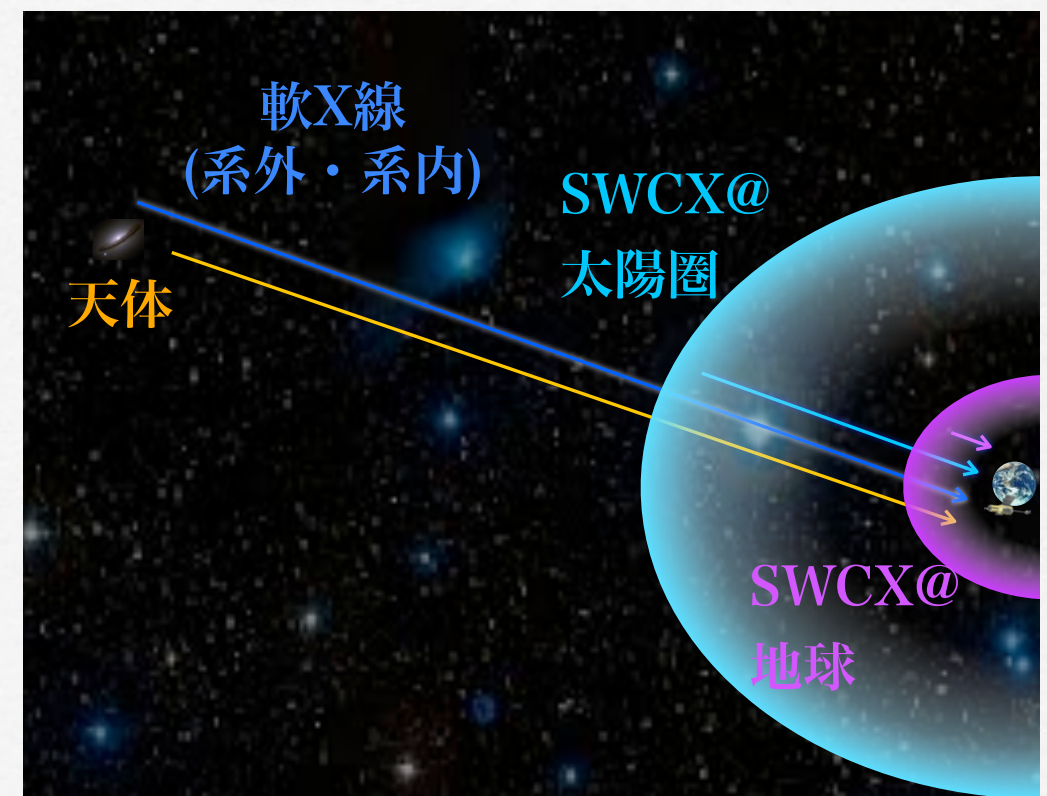
- 軟X線背景放射のうち、~日単位の時間変動成分を発見
 - 彗星X線観測：SWCX放射は太陽風の変動に伴う時間変動あり

→ 地球近傍からのSWCX放射

ROSAT X線全天マップ (Snowden+97)



(1/4 keV イメージ)



- 地球から観測した全X線データ：地球近傍からのSWCX放射が含まれる
 - X線観測にとっても地球SWCX放射は大事

X線観測衛星



- Chandra (1999-, 米) 0.1 ~ 10 keV
 - 優れた角度分解能 : 0.5 arcsec
- 月の夜側観測ではじめて地球SWCX放射を直接検出
 - 有効面積 @ 1 keV : 300 cm² (ACIS-I)



- XMM-Newton (1999-, 欧) 0.1 ~ 12 keV
 - 広い有効面積 @ 1 keV : 2000 cm² (MOS1,2, pn)



- すざく (2005-, 日) 0.1 ~ 12 keV
 - 有効面積 @ 1 keV : 1000 cm² (XIS FI x 3, BI)
 - 近地球軌道 : 検出器バックグラウンド低い

- 広がったSWCX放射の観測 : XMM-Newton と 「すざく」 が有利

XMM-Newton による地球SWCX放射の観測

□ XMMアーカイブデータを用いた系統解析 (Carter+08, 11)

- 全3012データ中、103のデータで時間変動するSWCX 放射を検出

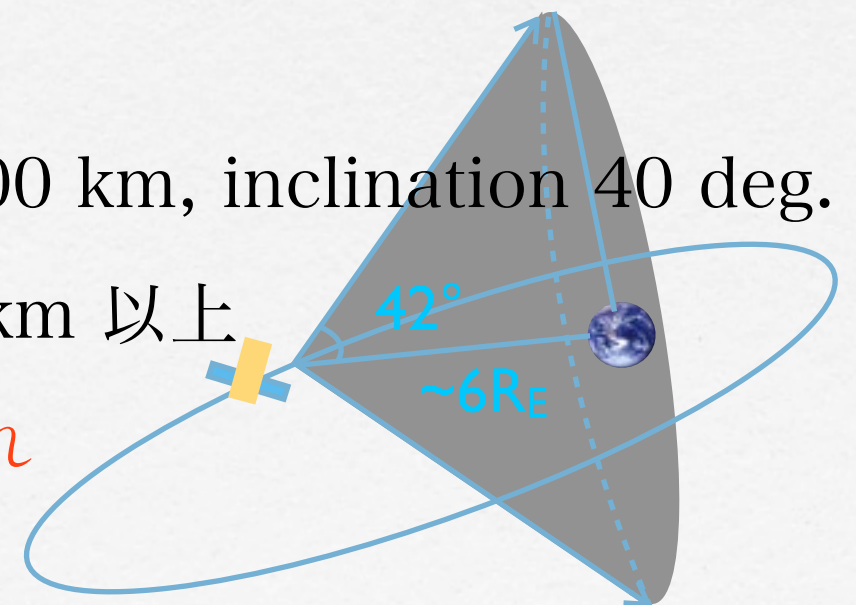
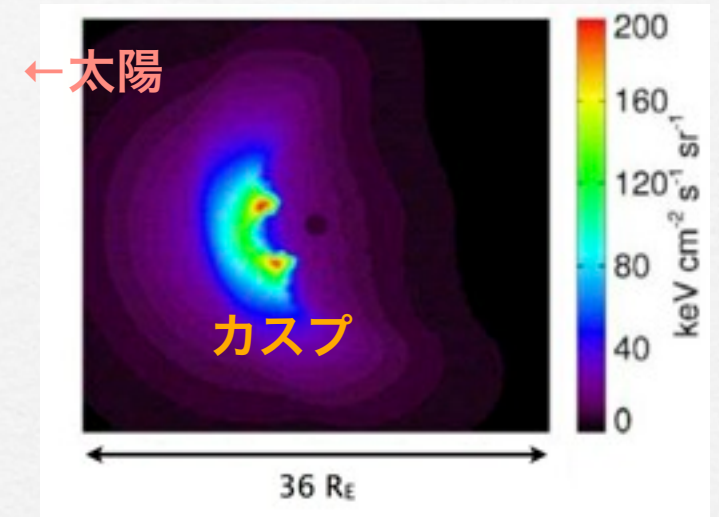
□ SWCX放射が強くなる

- 太陽側の magnetosheath :
Robertson+06モデルと一致
- CME (Coronal Mass Ejection) 発生時

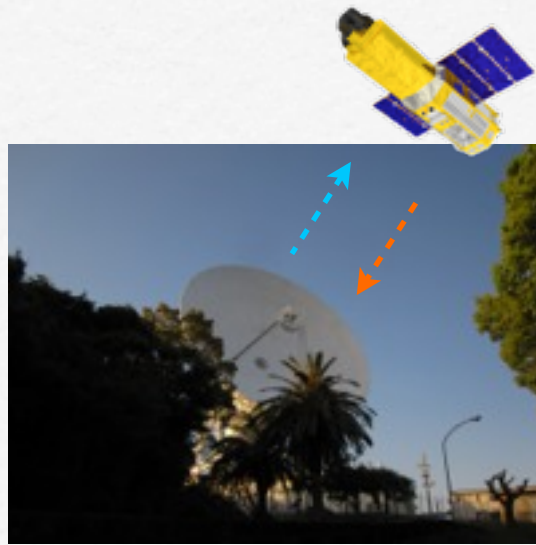
□ 問題点

- XMM軌道：近地点7000 km, 遠地点 114000 km, inclination 40 deg.
- 観測：地球方向 42 deg 以上, 高度 40000 km 以上
- 観測方向がほぼ太陽側のシース領域に限られ
カスプを含んだ地球近傍を観測できない

SWCXのX線画像
シミュレーション
(Robertson+06)

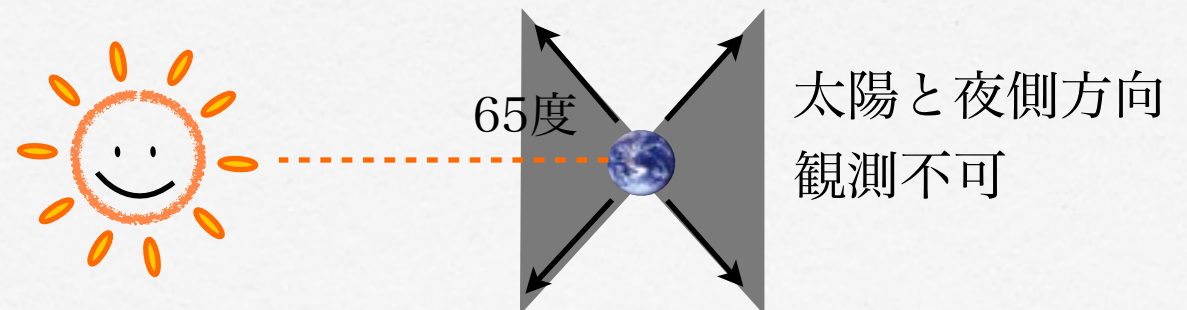
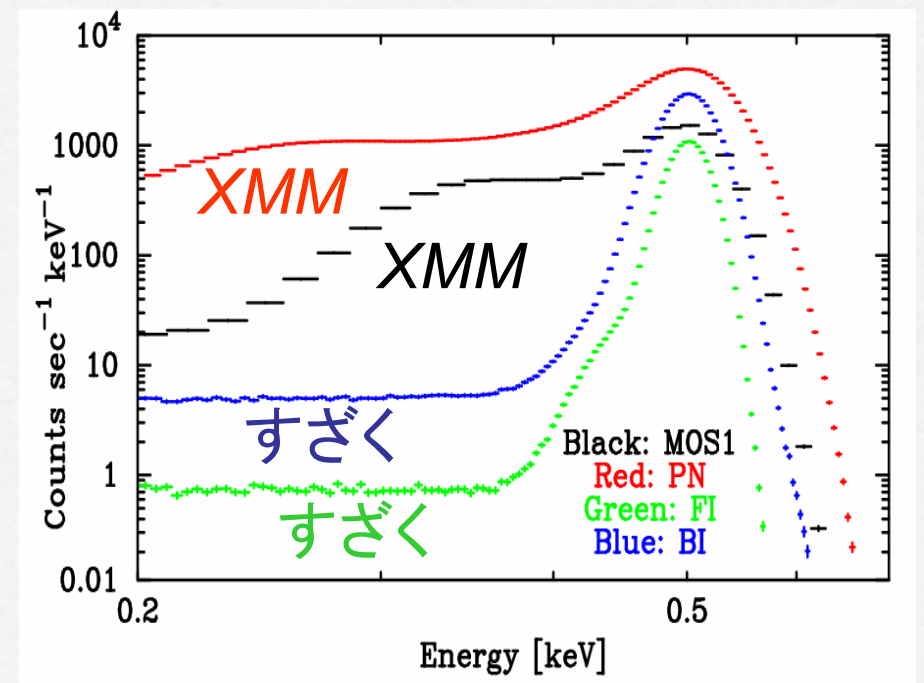


「すざく」 衛星



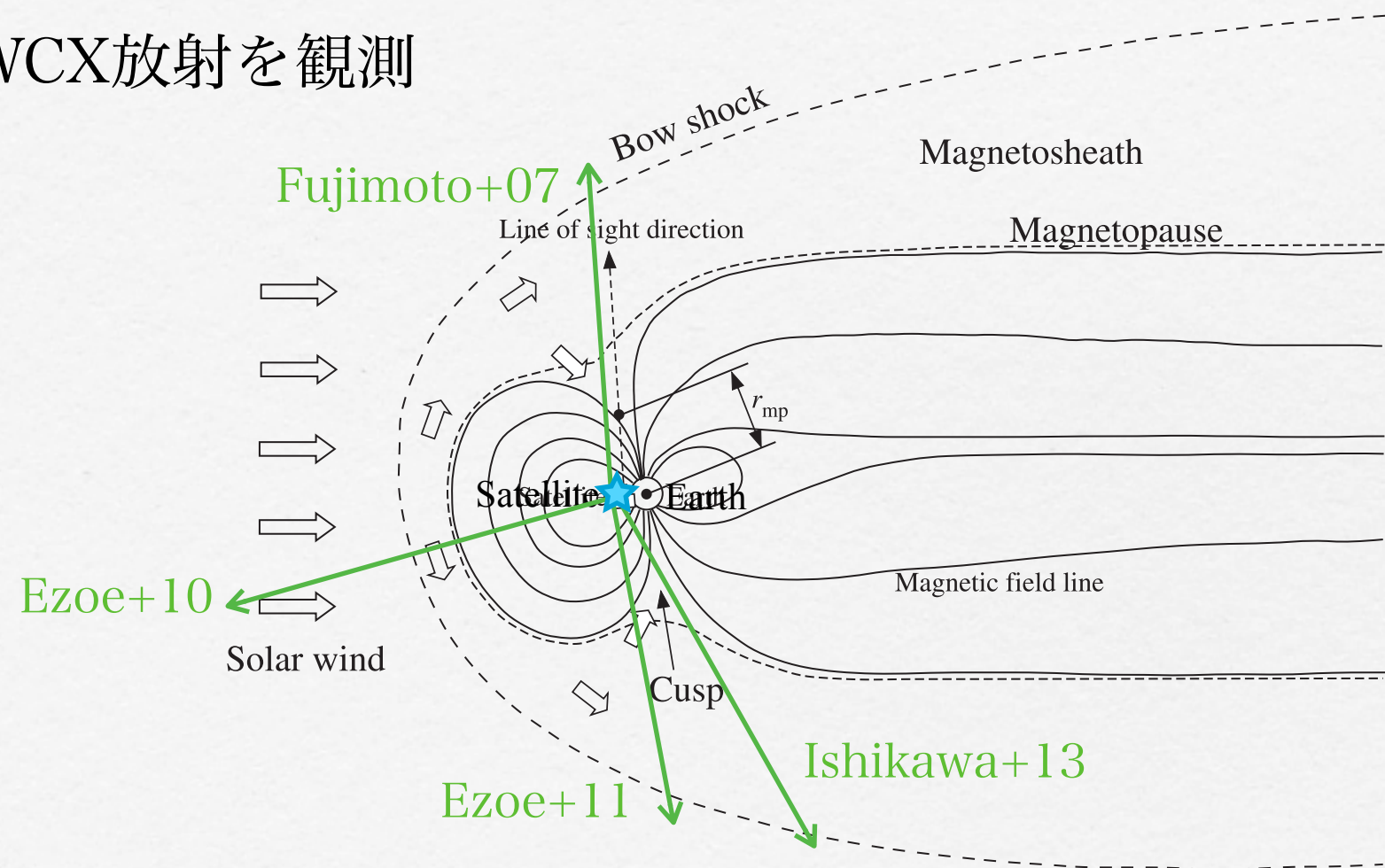
- 2005年7月打ち上げ
- 日本で5代目のX線観測衛星
 - 約1年に1度、運用当番 @ 内之浦
- 軟X線検出器：X線CCD (XIS)

- 1 keV 以下で高い輝線感度
 - SWCXによる輝線観測に適する
- 近地球軌道 (高度 ~550 km) で
 - 検出器のバックグラウンド低い
 - 視野全体に広がったSWCX放射を地球近傍まで捉えられる
- 観測方向：
 - 太陽角制限あり (65~115度で観測可)



「すざく」による地球SWCX放射の観測

- 時間変動するSWCX放射を4つのデータで検出
 - 色々な方向でSWCX放射を観測



- これまでの予想に反して、
太陽側のシース領域に限らず強いSWCX放射が出てるかも

目的のまとめ

- 軟X線背景放射：地球のSWCXがどの程度寄与しているか不明
- 地球外圏の分布：中性原子・分子は観測が難しい。特に $> \sim 10R_E$ 以上
- 地球磁気圏の可視化：磁気圏の全体像を捉える



これらを知るためには

様々な方向からの地球SWCX放射の観測が有効

- Chandra や XMM-Newton：感度や姿勢の制限から十分でない
→ 「すぎく」でしかできない
- 「すぎく」の全公開データを解析し、地球SWCX放射を探す

本日のお話

1. Introduction

2. 解析手順

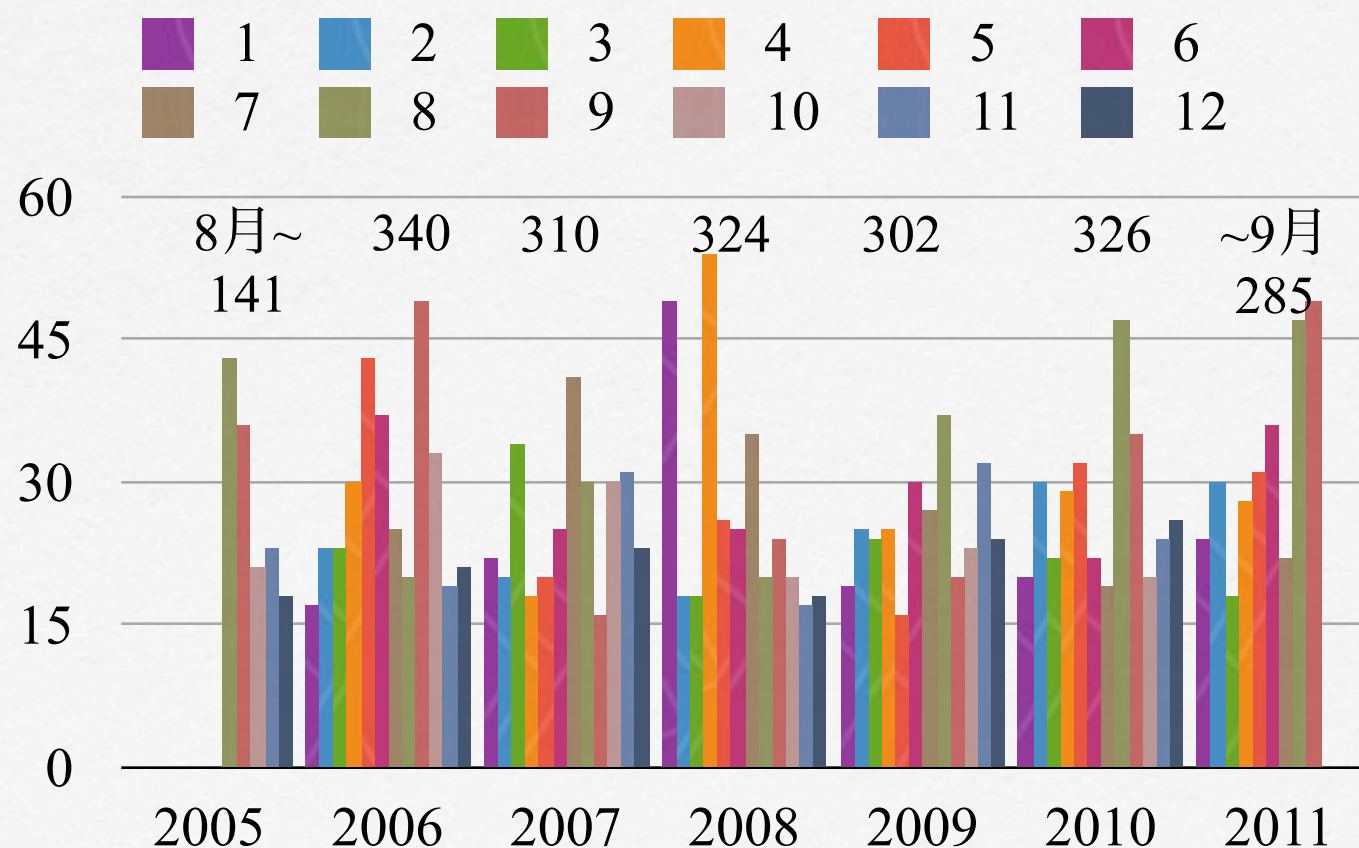
3. 結果

4. 考察

5. まとめ

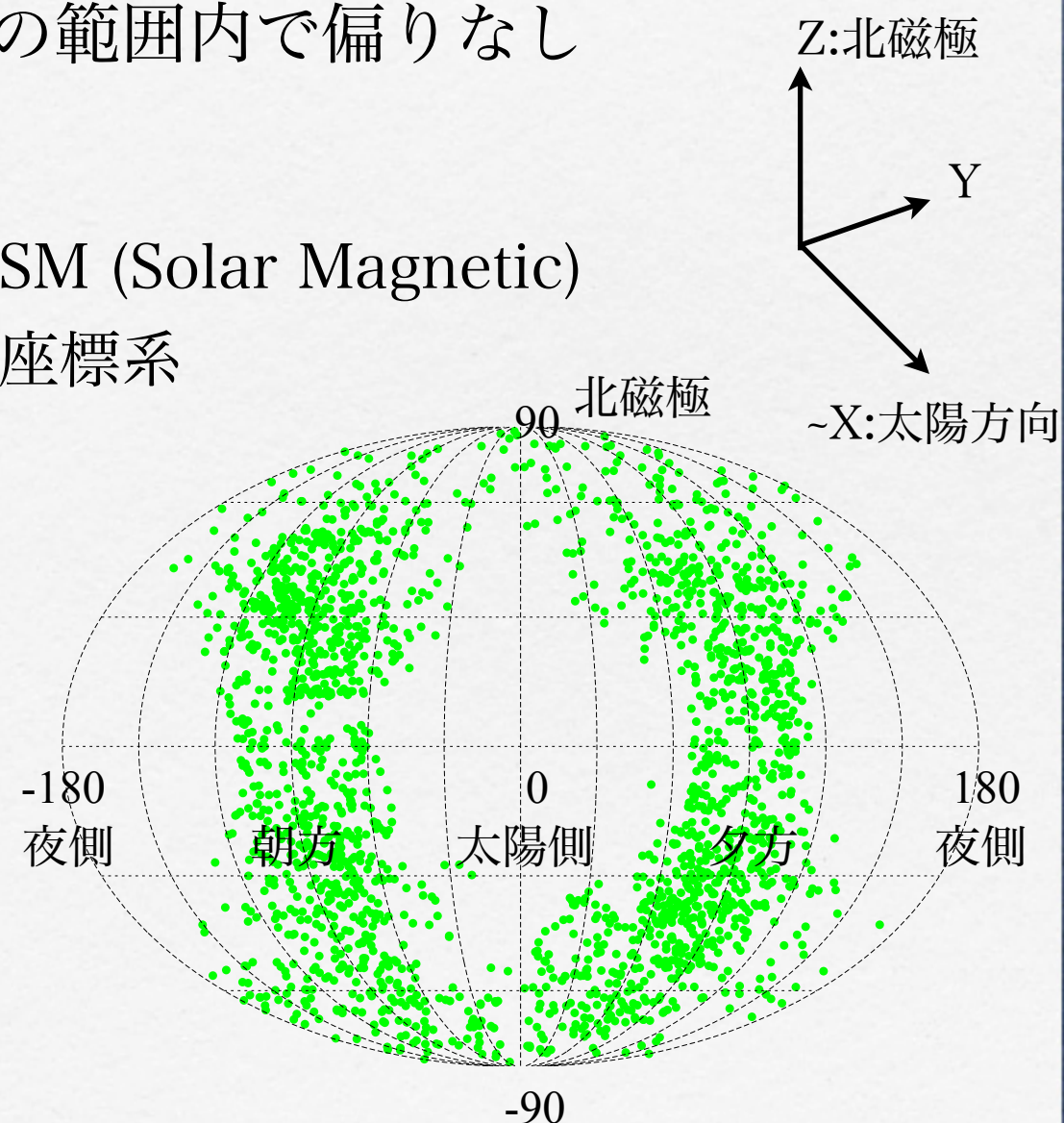
解析データ

- 「すざく」全公開データ(2005年8月~2011年9月)を解析：2031 データ
- 全データ数：観測年の偏りなし
- 全データの視線方向：「すざく」の太陽角の範囲内で偏りなし



SM (Solar Magnetic)

座標系



解析概要

- 天体を含むデータからSWCX放射を抽出する：Ezoe+11 で方法確立



- 軟X線カウントレートと太陽風フラックスの変動を探す

解析手順 : flowchart

step 1

- X線カウントレートに変動あるか
- 太陽風プロトンフラックスに変動あるか

2031 データ



step 2

- 軟X線が増光している領域を確認
- 太陽風とX線に正の相関あるか



step 3

- スペクトル作成
- SWCXの輝線モデルで再現できたか



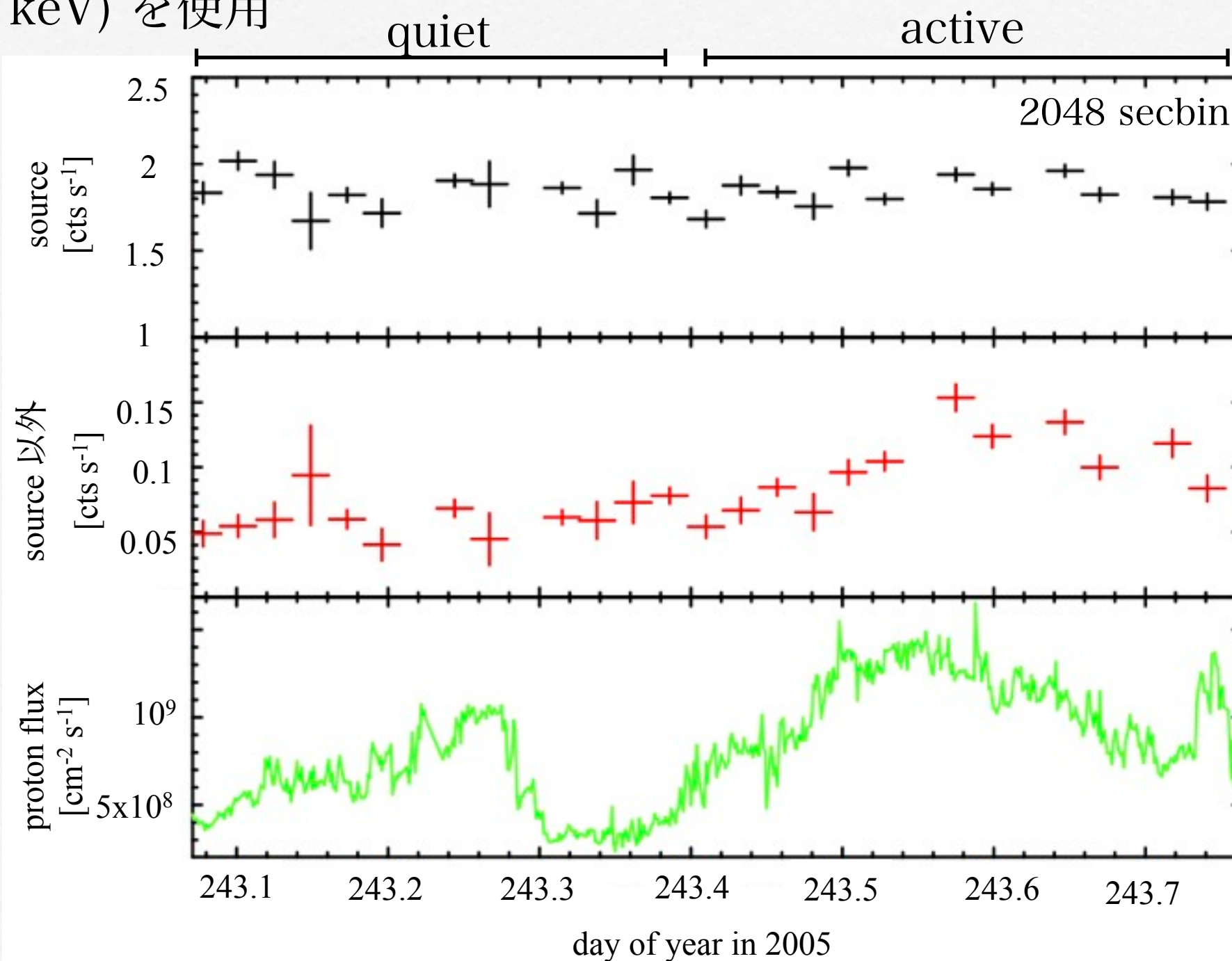
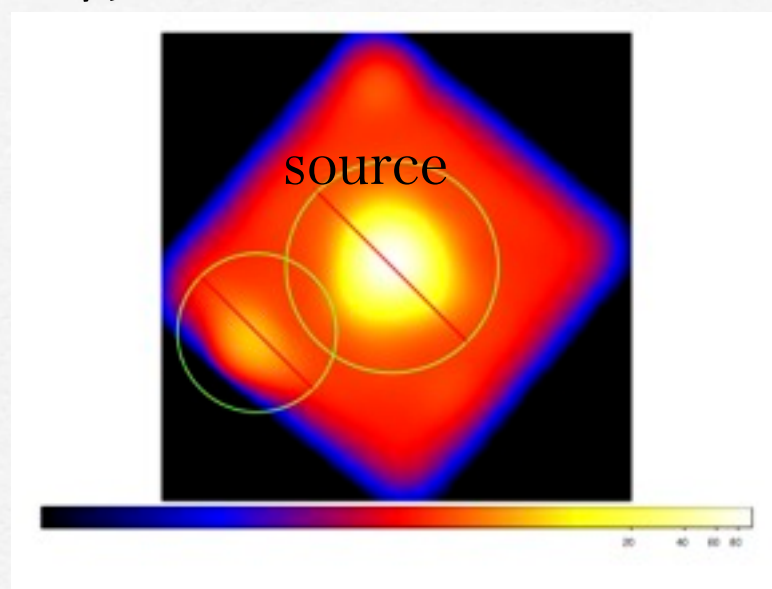
step 4

- X線カウントレート vs 太陽風フラックスを作成

Step 1 : X線の変動探し

- 酸素ライン(0.5-0.7 keV) を使用

X線イメージ



- quiet / active 決定

解析手順 : flowchart

step 1

- X線カウントレートに変動あるか
- 太陽風プロトンフラックスに変動あるか

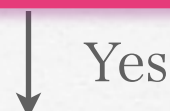
2031 データ



step 2

- 軟X線が増光している領域を確認
- 太陽風とX線に正の相関あるか

~50 データ



step 3

- スペクトル作成
- SWCXの輝線モデルで再現できたか



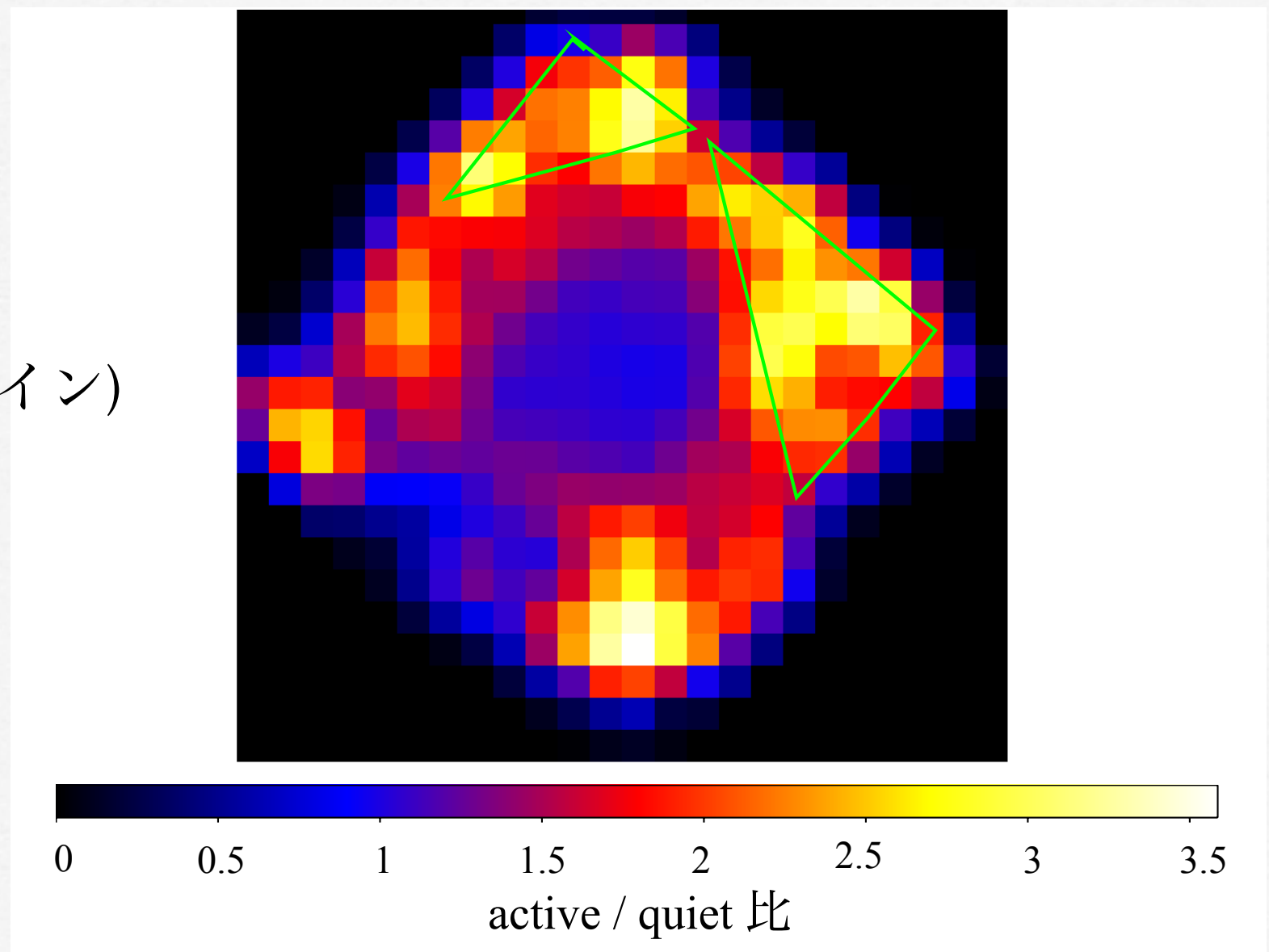
step 4

- X線カウントレート vs 太陽風フラックスを作成

Step 2 : イメージ解析 + 太陽風との相関

- ratio map 作成 :
active / quiet
- X線増光している領域 :
以降の解析で使用
- X線カウントレート(酸素ライン)
とプロトンフラックスの
相関係数 : 0.5
正の相関を確認

X線イメージ (0.5-0.7 keV)



解析手順 : flowchart

step 1

- X線カウンtrateに変動あるか
- 太陽風プロトンフラックスに変動あるか

2031 データ



step 2

- 軟X線が増光している領域を確認
- 太陽風とX線に正の相関あるか

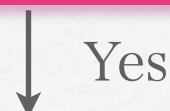
~50 データ



step 3

- **スペクトル作成**
- **SWCXの輝線モデルで再現できたか**

~40 データ



step 4

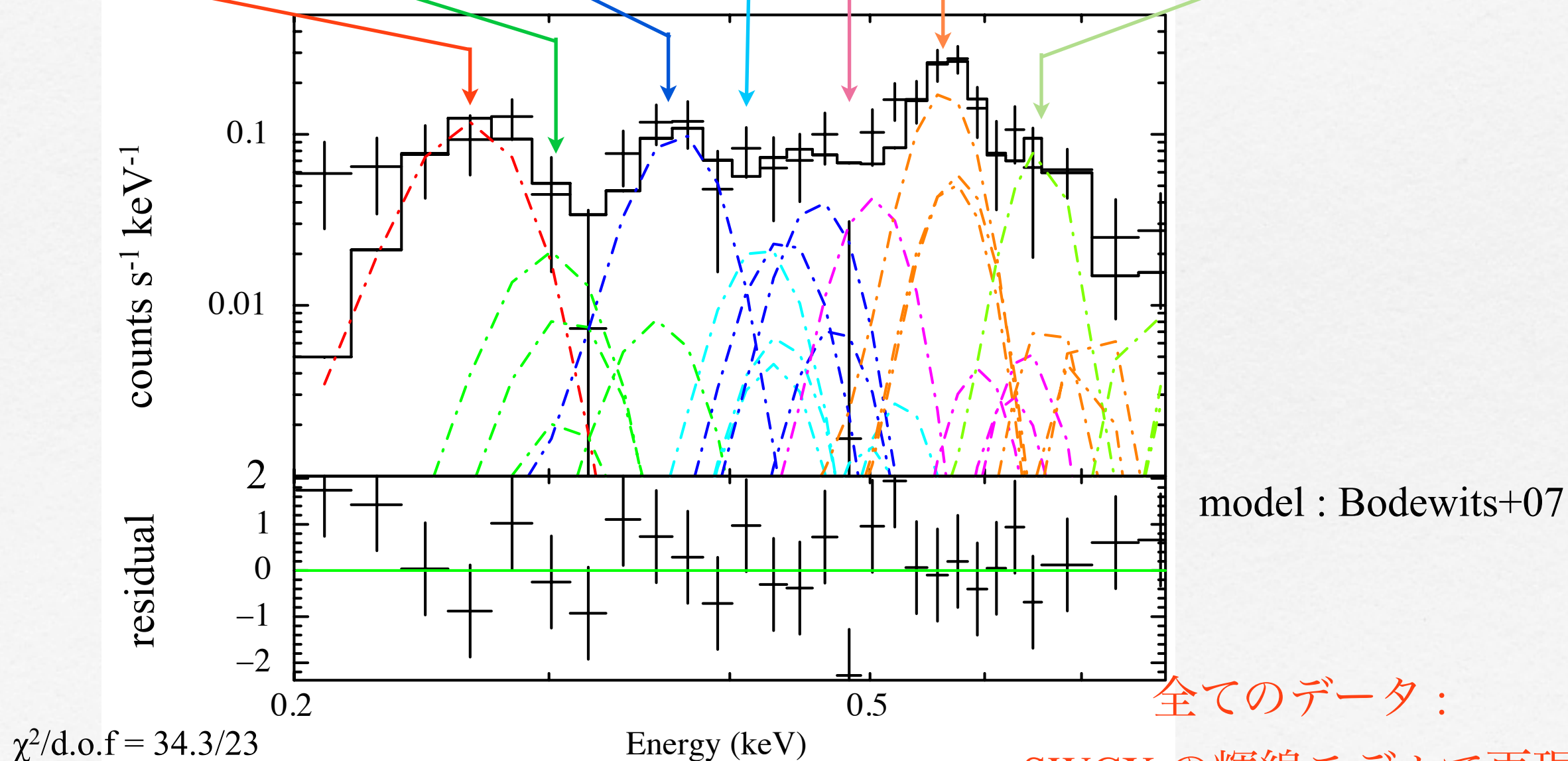
- X線カウンtrate vs 太陽風フラックスを作成

Step 3 : スペクトル解析

- active のスペクトル作成 (quiet を差し引いた)

(LU = $\text{ph cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{str}^{-1}$)

C band 35^{+14}_{-12} [LU] C_V 183^{+53}_{-63} [LU] C_{VI} 59 ± 10 [LU] N_{VI} 29^{+5}_{-3} [LU] N_{VII} 26^{+5}_{-4} [LU] O_{VII} 52 ± 5 [LU] O_{VIII} 23 ± 5 [LU]



SWCX の輝線モデルで再現

解析手順 : flowchart

step 1

- X線カウントレートに変動あるか
- 太陽風プロトンフラックスに変動あるか

2031 データ



step 2

- 軟X線が増光している領域を確認
- 太陽風とX線に正の相関あるか

~50 データ



step 3

- スペクトル作成
- SWCXの輝線モデルで再現できたか

~40 データ



step 4

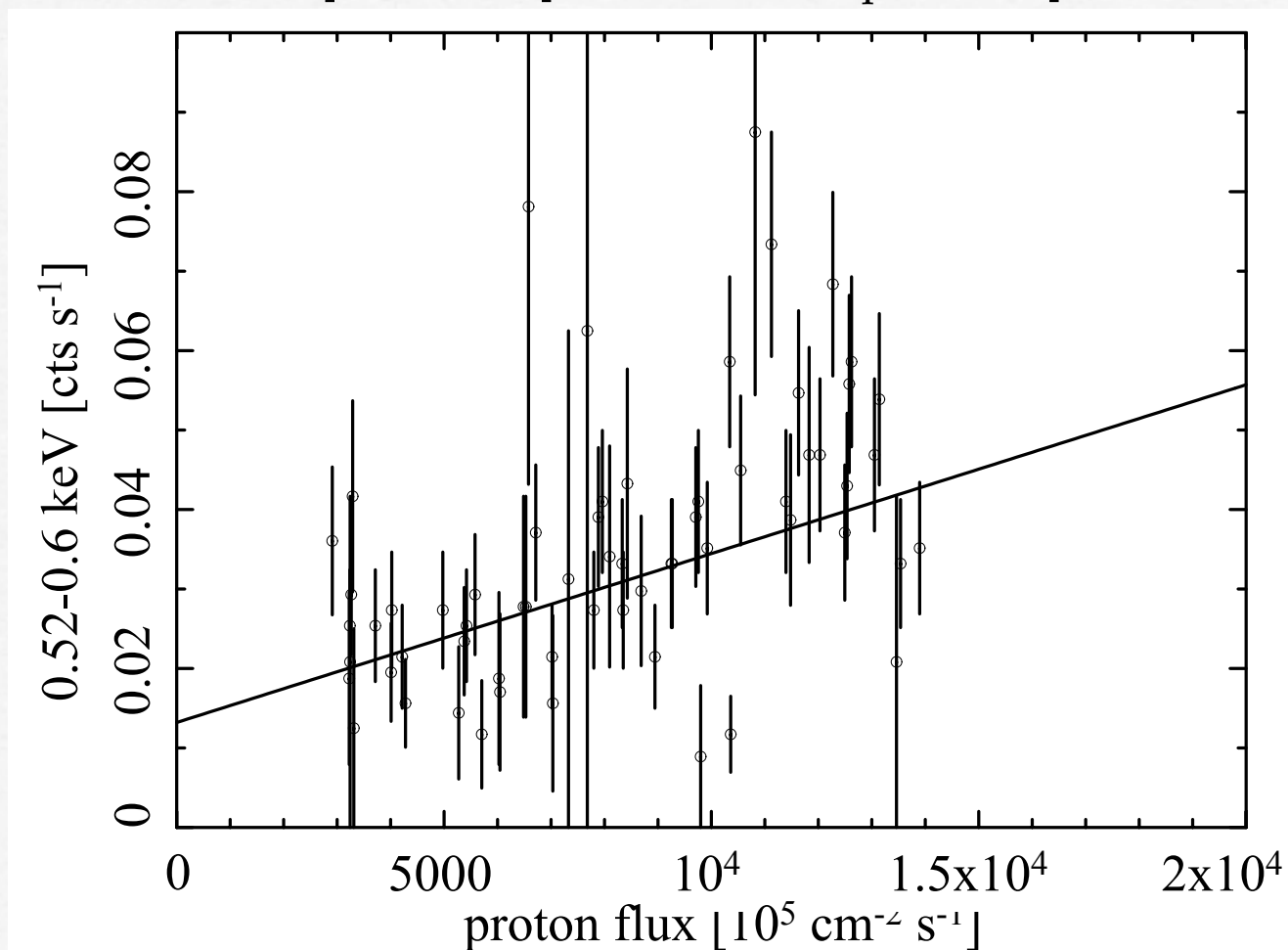
- X線カウントレート vs 太陽風フラックスを作成

38 データ

Step 4 : emissivity

- プロトンフラックスと酸素(OVII)の輝線フラックス

直線でフィット : $C_{\text{XIS}} [\text{cts s}^{-1}] = a \times C_{\text{proton}} [10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}] + b$



直線でフィット
 $\chi^2/\text{d.o.f} = 99.58/61$

- 切片 $b = 8 \pm 13$ [LU] : バックグラウンド放射 (検出器+sky+天体の漏れ込み)
- 傾き $a : 0.005 \pm 0.002$ [LU/proton flux ($10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)] : SWCX emissivity

本日のお話

1. Introduction

2. 解析手順

3. 結果

4. 考察

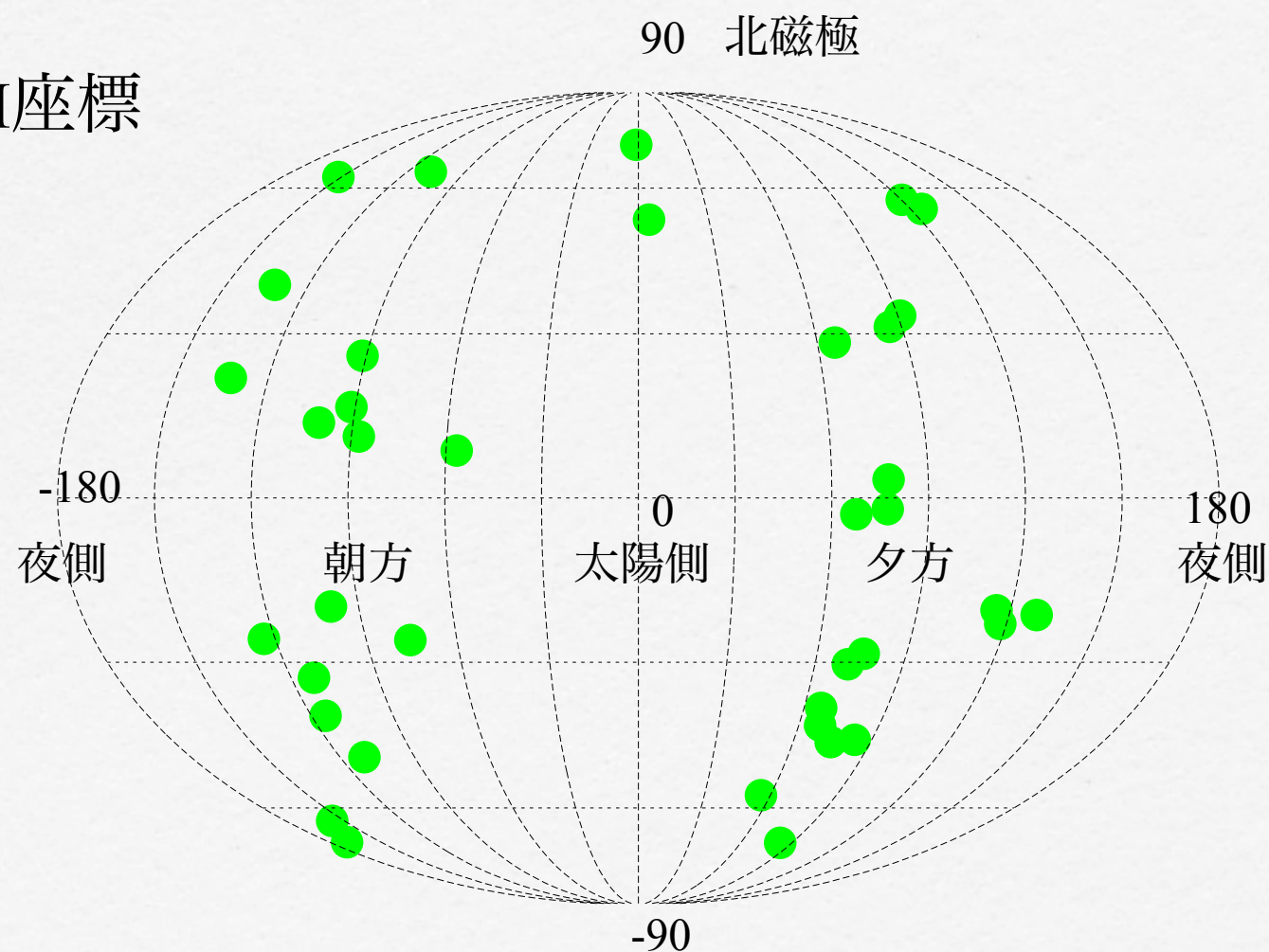
5. まとめ

SWCX放射の検出数 1 : 視線方向

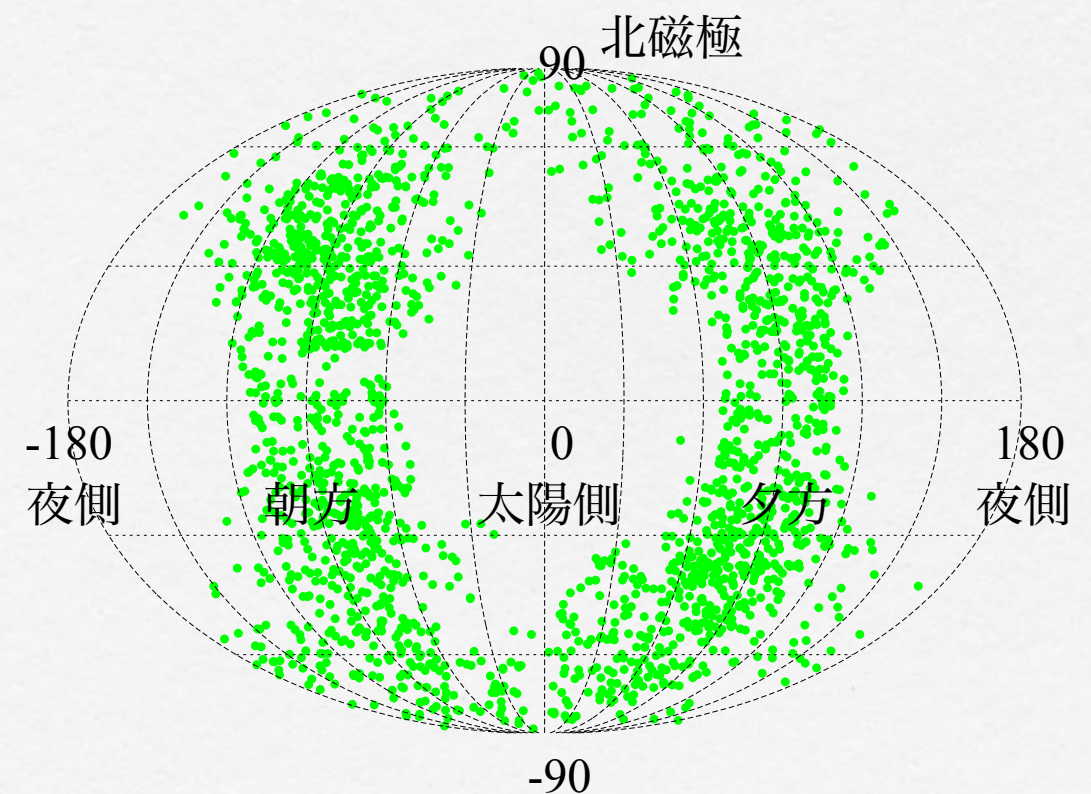
- 検出総数 : 38データ (全観測の~2%)
- 視線方向 : 特に方向性の偏りなし

38データの観測方向

SM座標

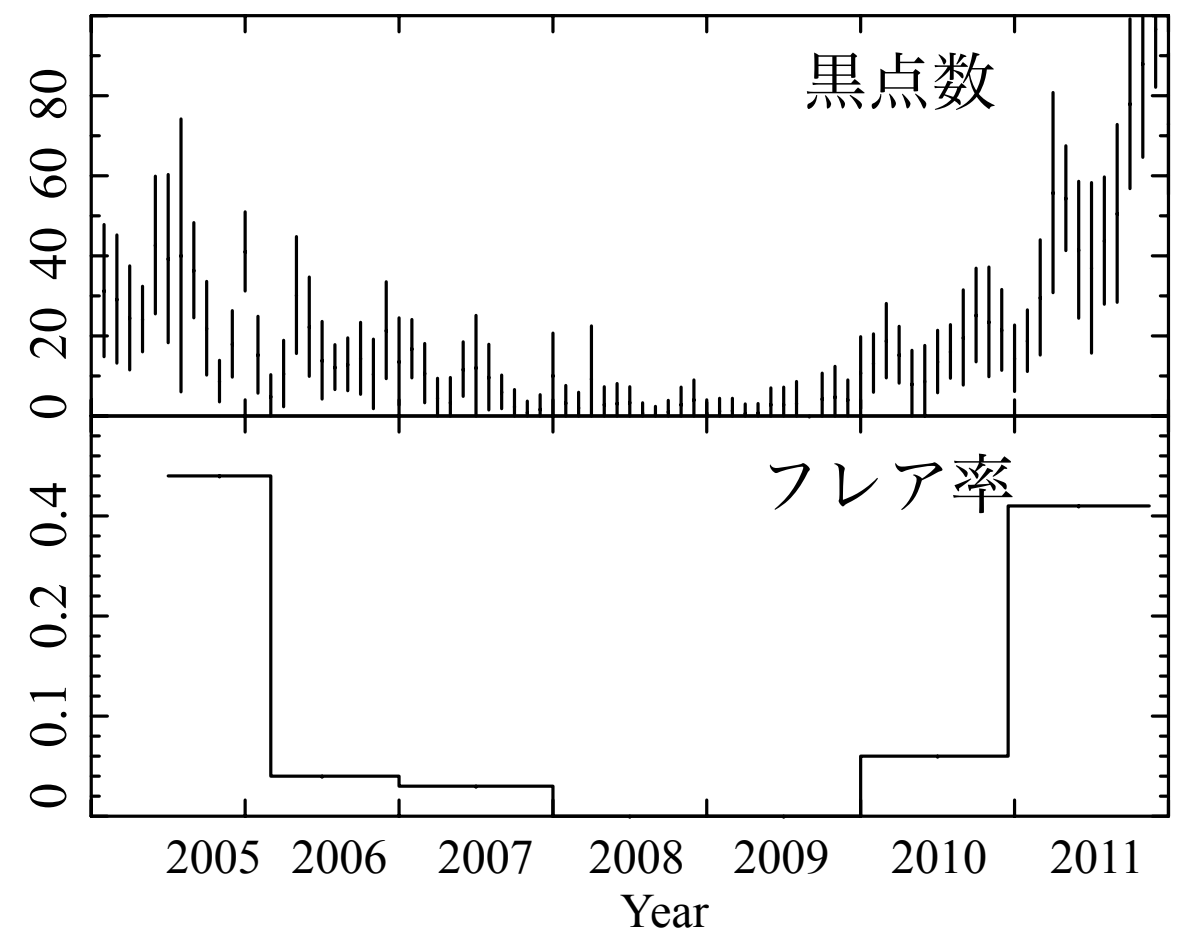
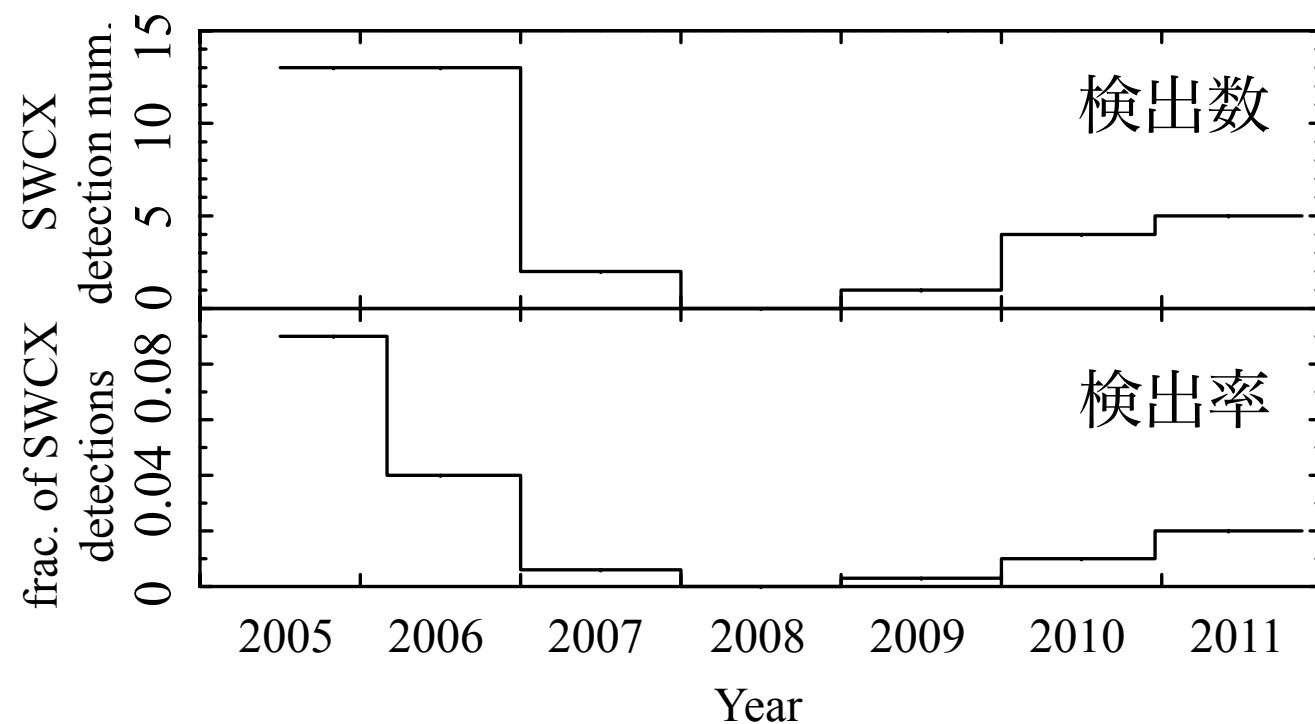


「すざく」の全観測方向



SWCX放射の検出数 2 : 太陽活動との関係

- 検出率 : 検出数 / 各年の全データ数
- 太陽活動度(黒点数), Mクラス以上のフレア数
- 太陽活動サイクルやフレア数と似た傾向で検出数が変動



本日のお話

1. Introduction

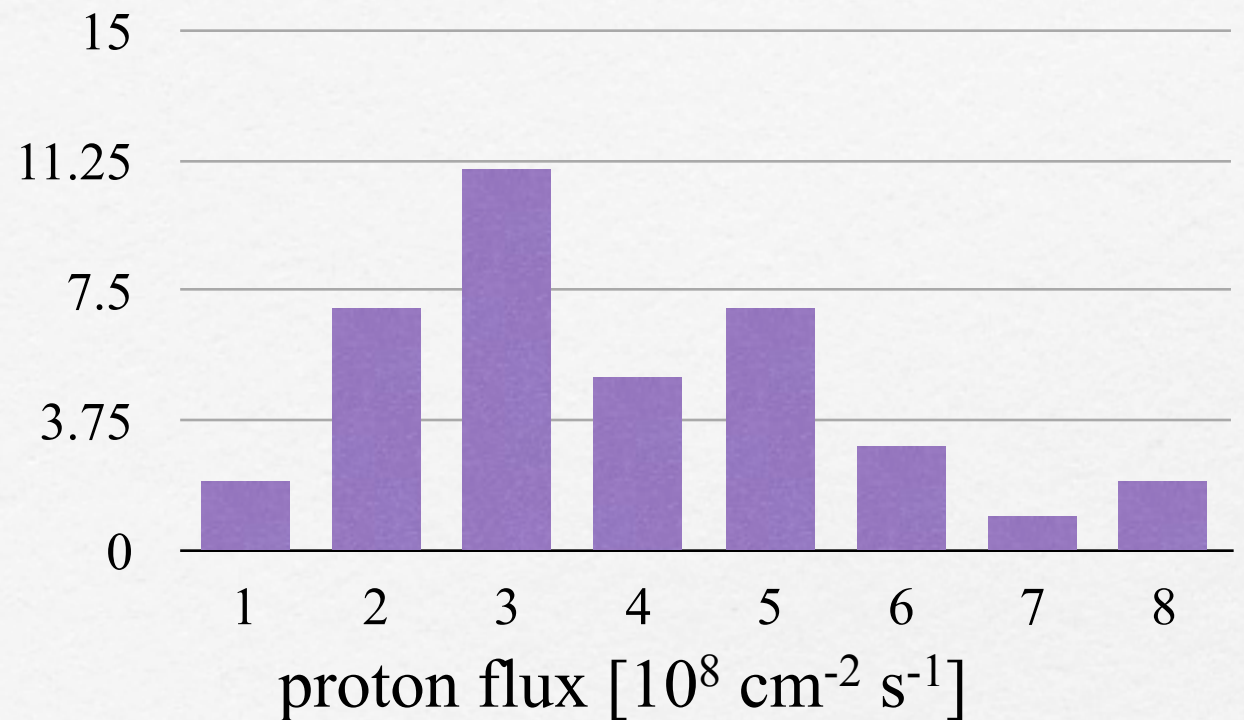
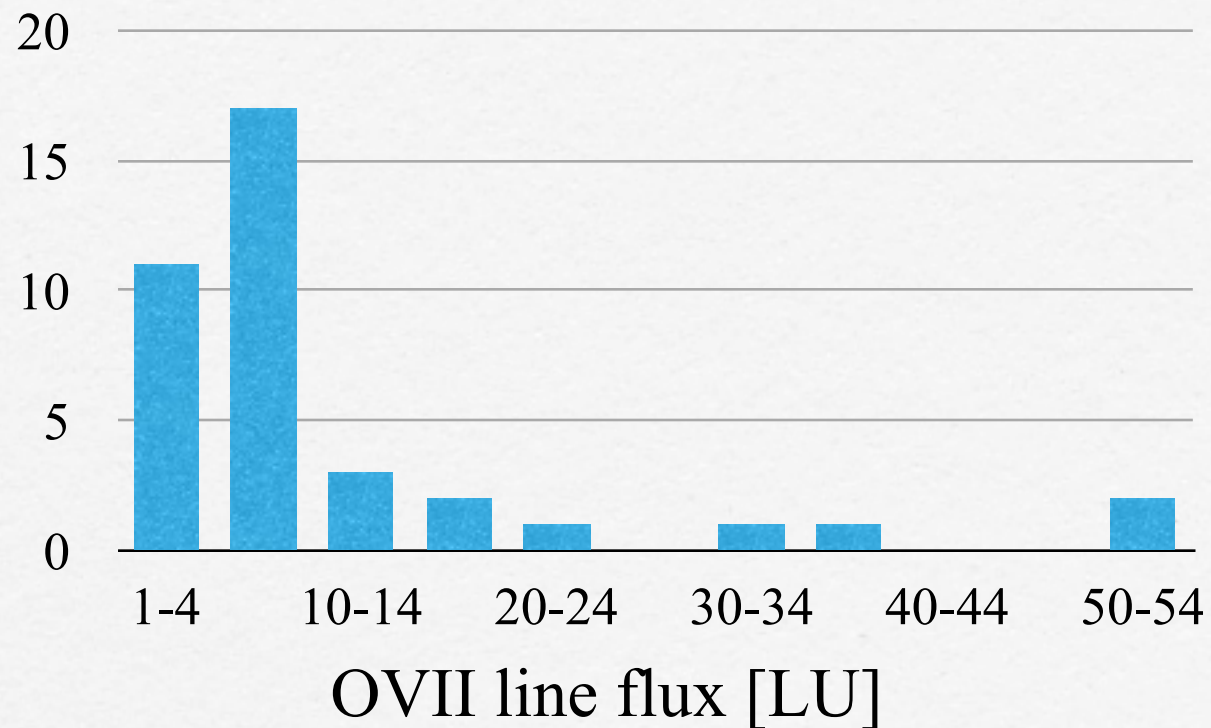
2. 解析手順

3. 結果

4. 考察

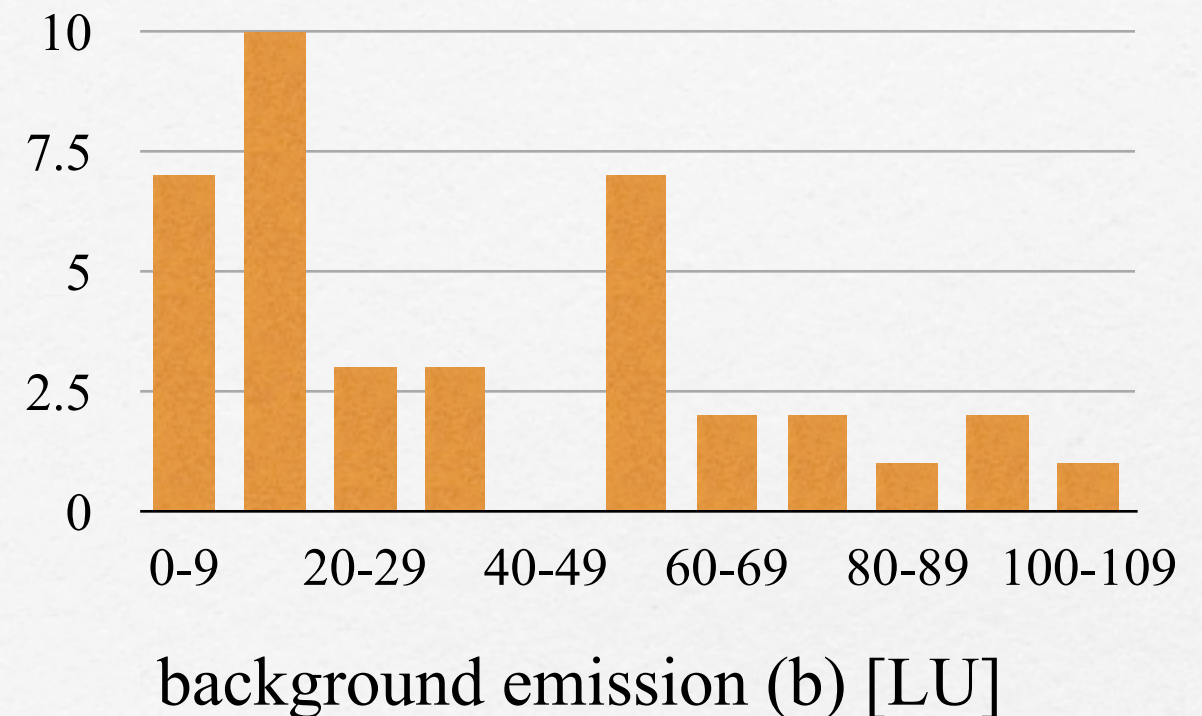
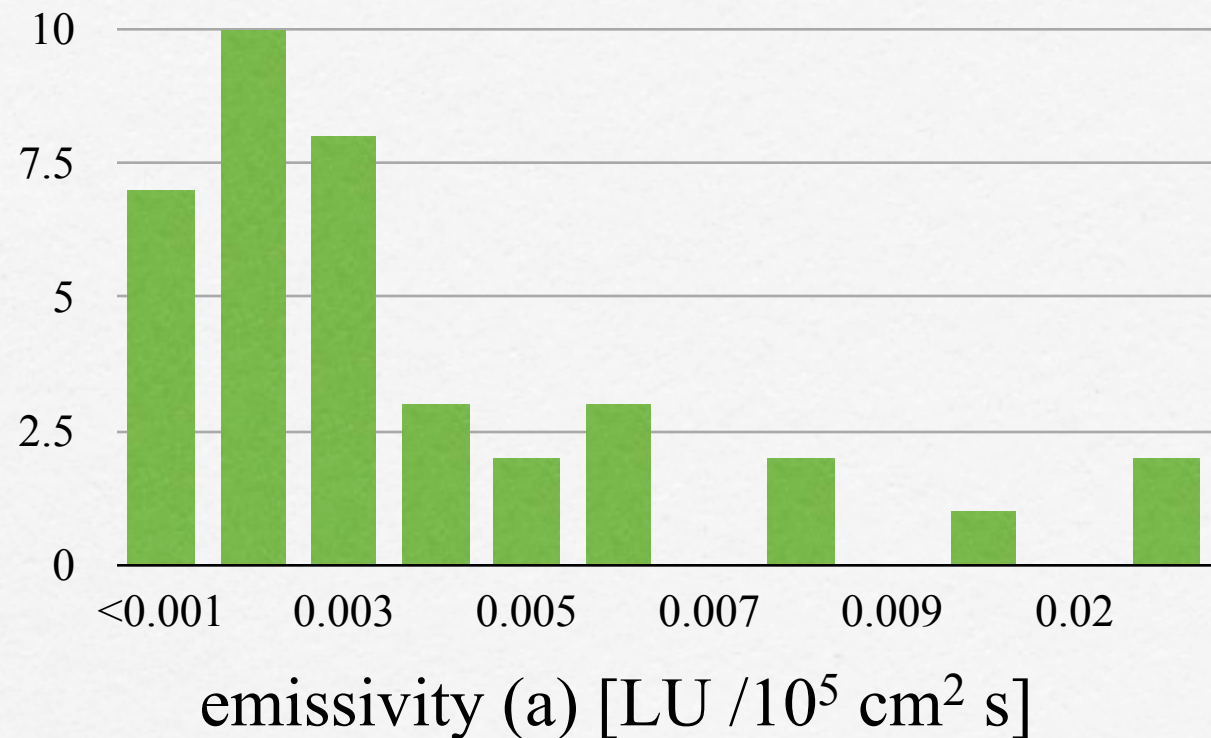
5. まとめ

検出データの各パラメータの分布



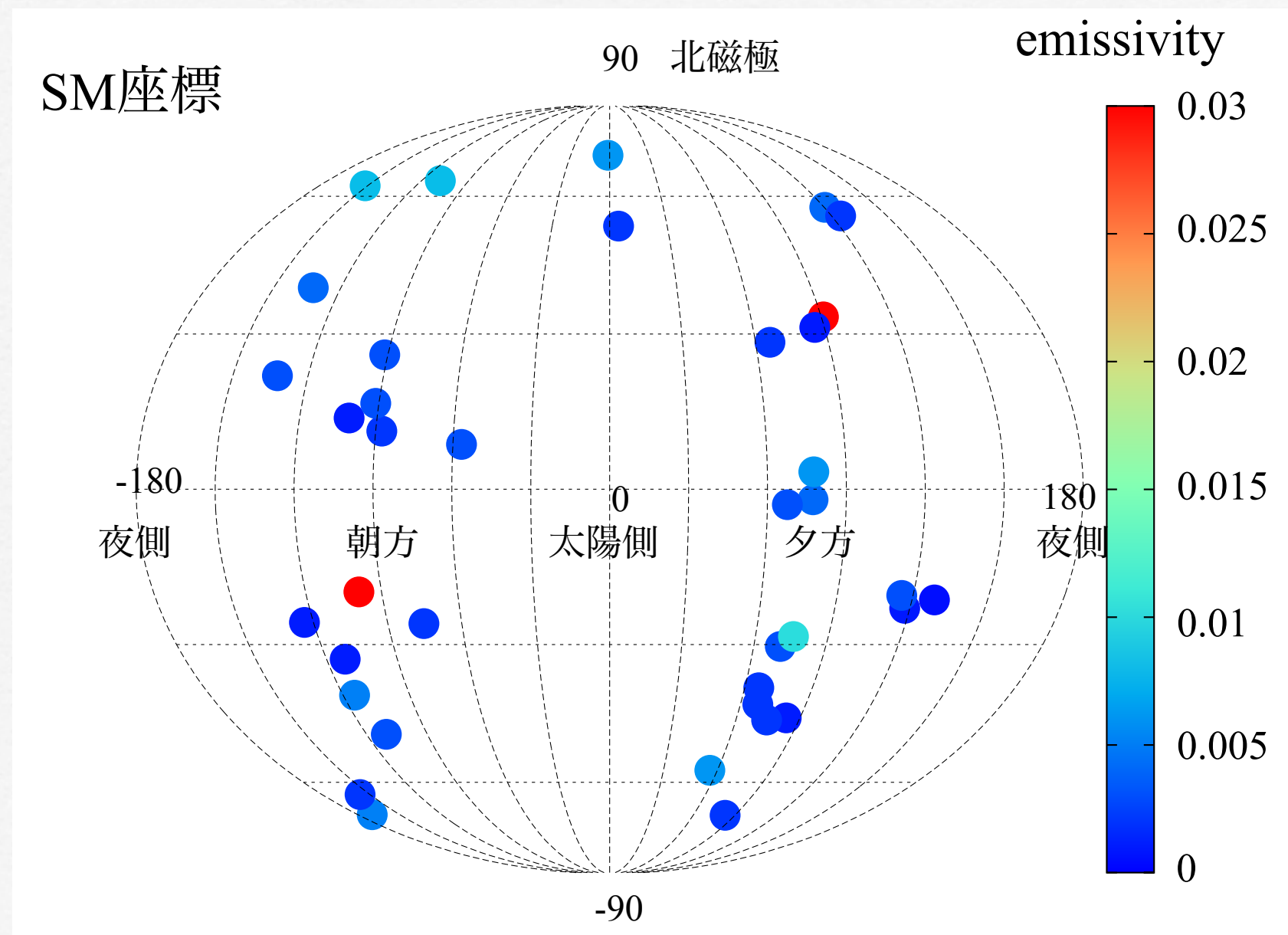
- OVII line flux ピーク値 : 5-9 LU
- プロトンフラックス : $3 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- $C_{\text{XIS}} [\text{cts s}^{-1}] = a \times C_{\text{proton}} [10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}] + b$
- SWCX emissivity $a \sim C_{\text{XIS}} / C_{\text{proton}} : 0.002 \sim 0.003 [\text{LU}/(10^5 \text{ cm}^2 \text{ s})]$

検出データの各パラメータの分布



- SWCX emissivity (a) のピーク値 : $0.002 \text{ LU} / (10^5 \text{ cm}^2 \text{ s})$
-> OVII とプロトンフラックス分布の概算と一致
- バックグラウンド放射 (b) のピーク値: 10-19 LU
-> 銀河系外 + 系内 + 太陽圏の放射 : 2~10 LU (Yoshino+09)
+ 検出器 + 中心天体からの漏れ込み : 幅広い分布

emissivityの分布



- 太陽側でemissivity強いというような傾向は見られない

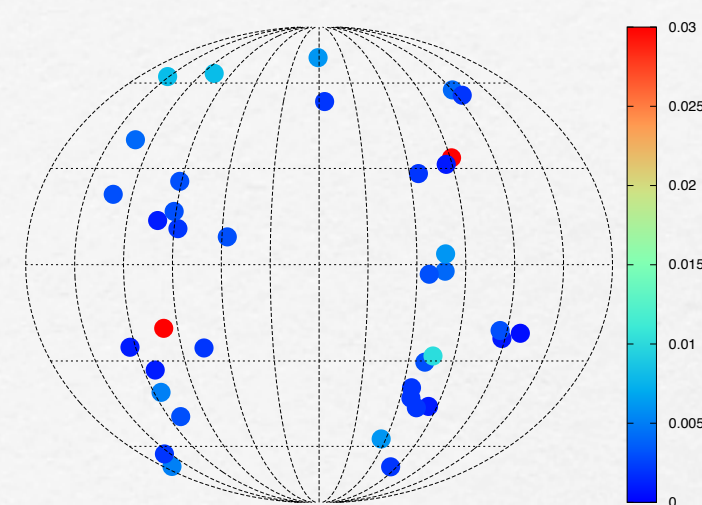
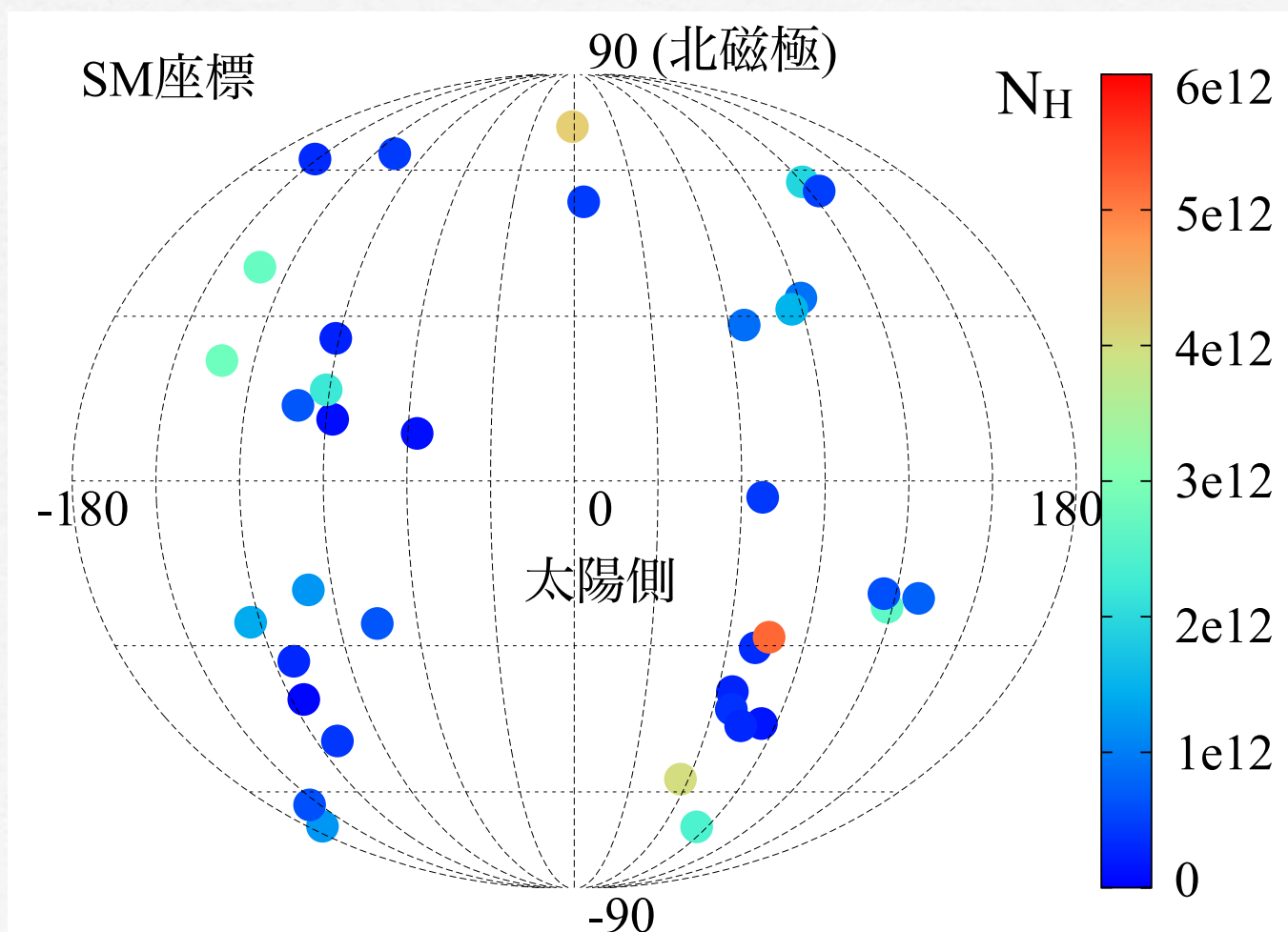
外圏水素密度 (N_H) の分布

□ emissivity $a = C_{\text{swcx}}/C_{\text{proton}} \propto N_H$

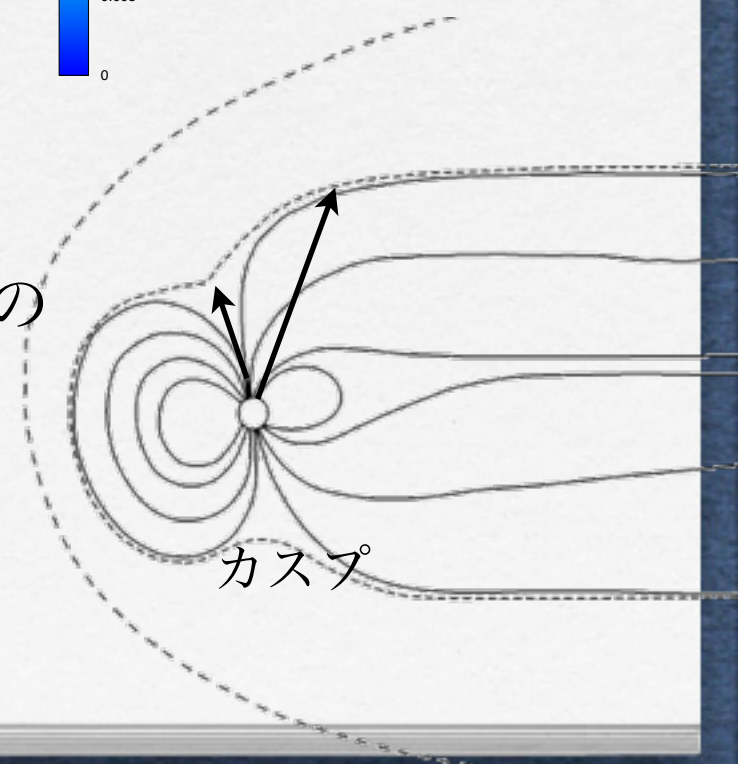
$$P_{\text{SWCX}} = \frac{1}{4\pi} \alpha P_{\text{SW}} N_H \text{ [LU]}$$

X線輝線フラックス イオンフラックス 外圏の柱密度
cross section

□ N_H : OVII 輝線フラックス, O^{7+} フラックス, $\alpha = 6 \times 10^{-15} \text{ cm}^{-2}$ (Bodewits+07)



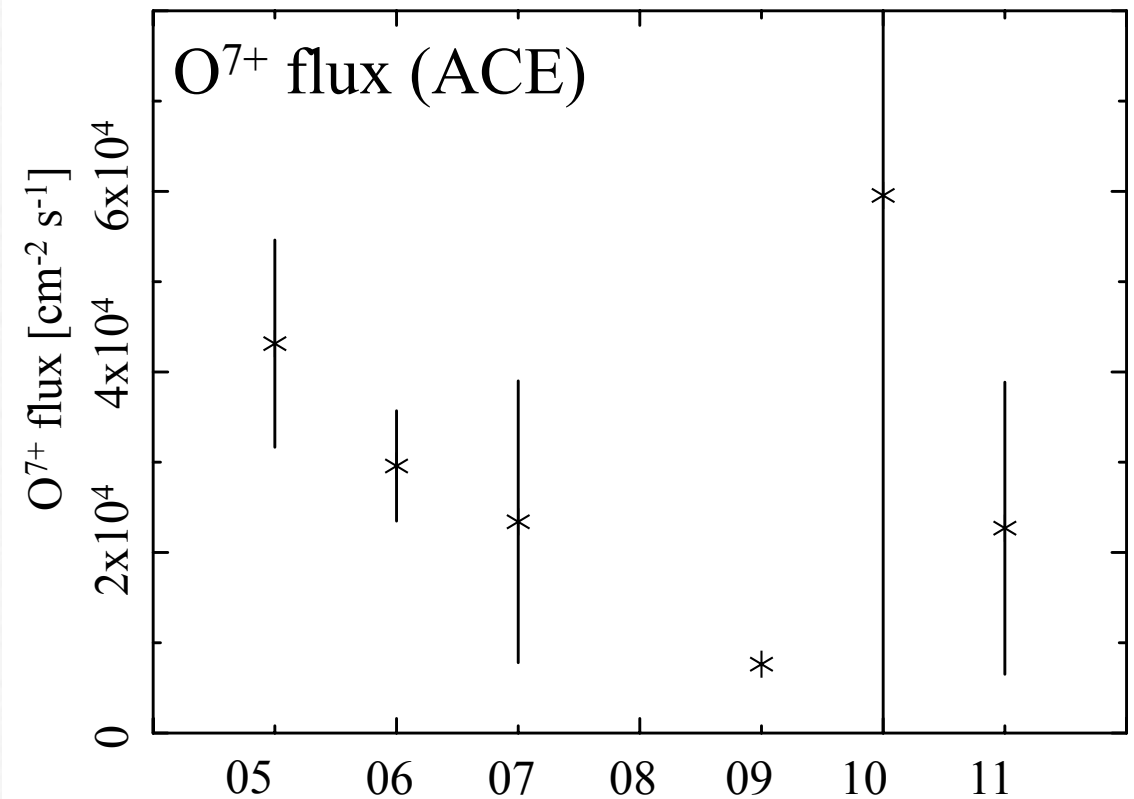
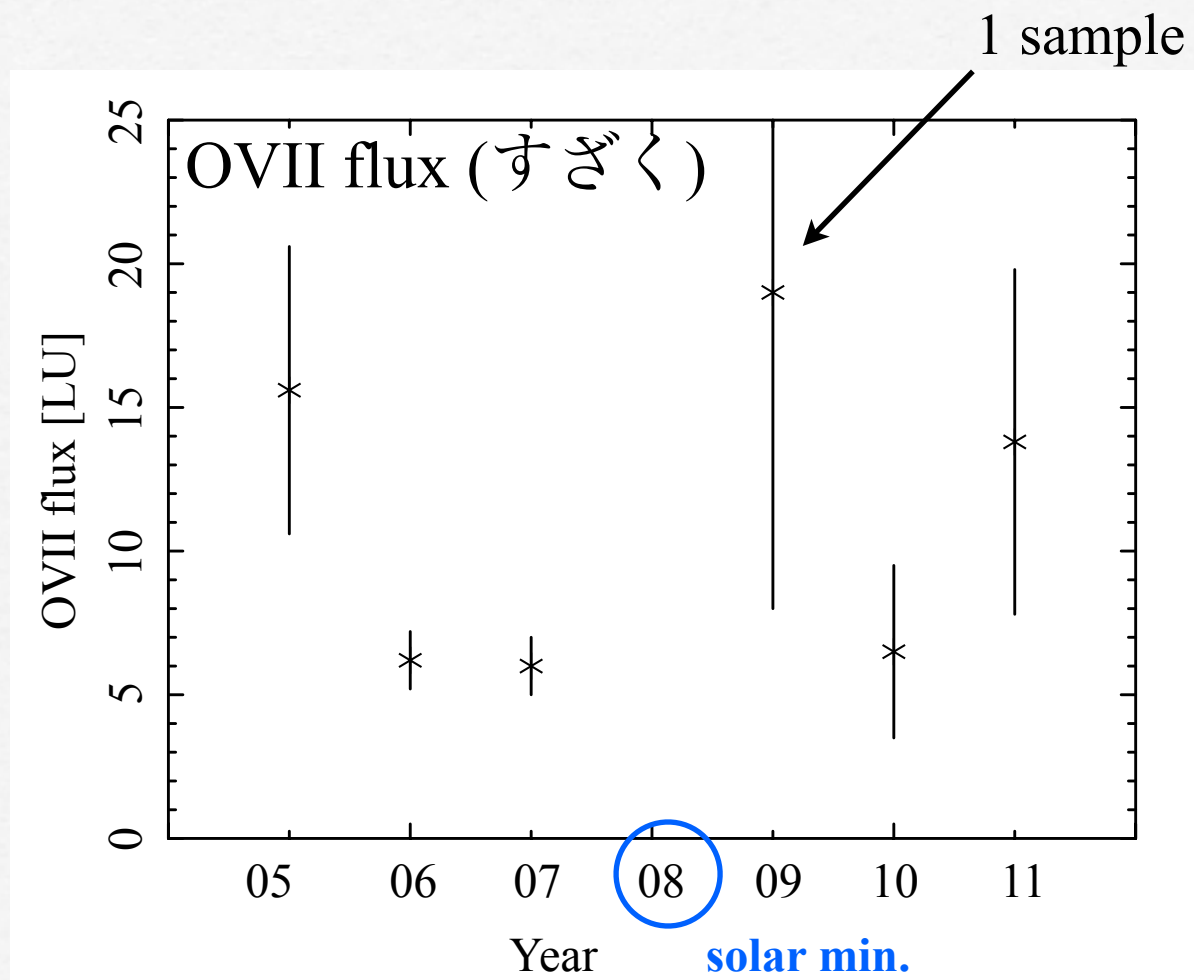
磁気圏界面までの
距離によって
 N_H 変わる



□ ある方向で強いといった傾向みられない

SWCX flux (OVII) と太陽活動の関係 1

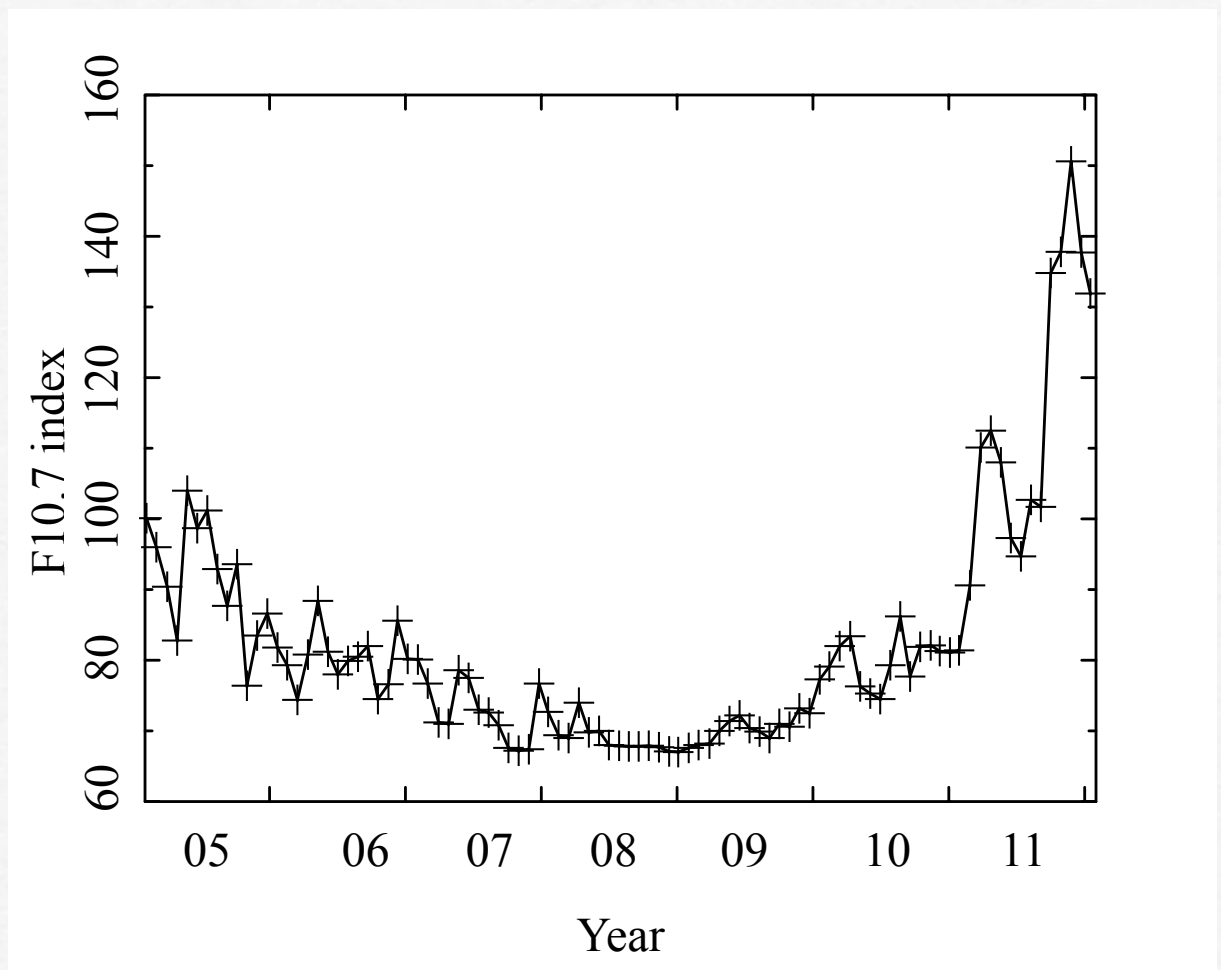
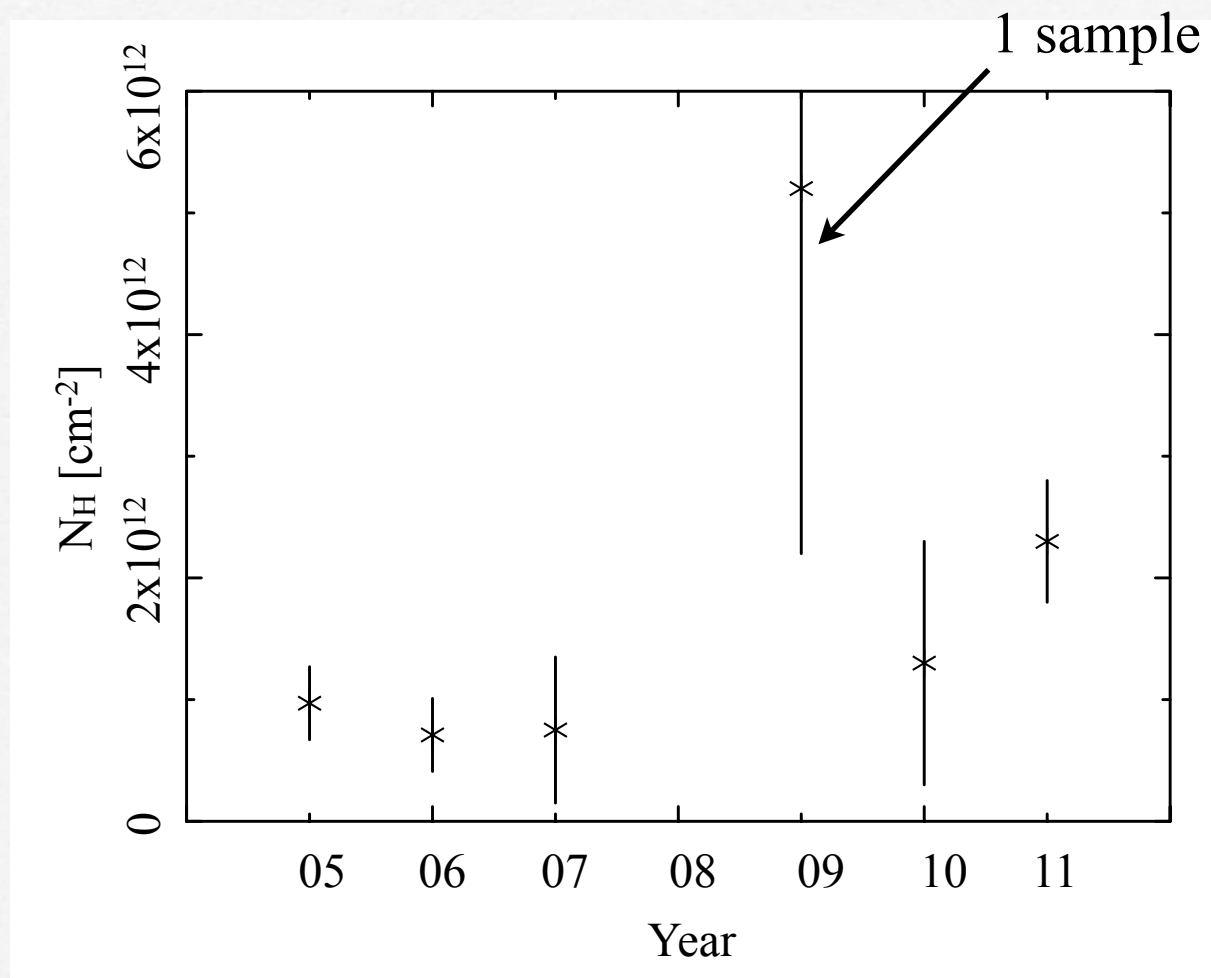
- 観測年ごとの平均 OVII flux と太陽風 O^{7+} flux



- 太陽活動の低下：太陽風 O^{7+} フラックス減少 → SWCX フラックスも減少

N_H と太陽活動の関係

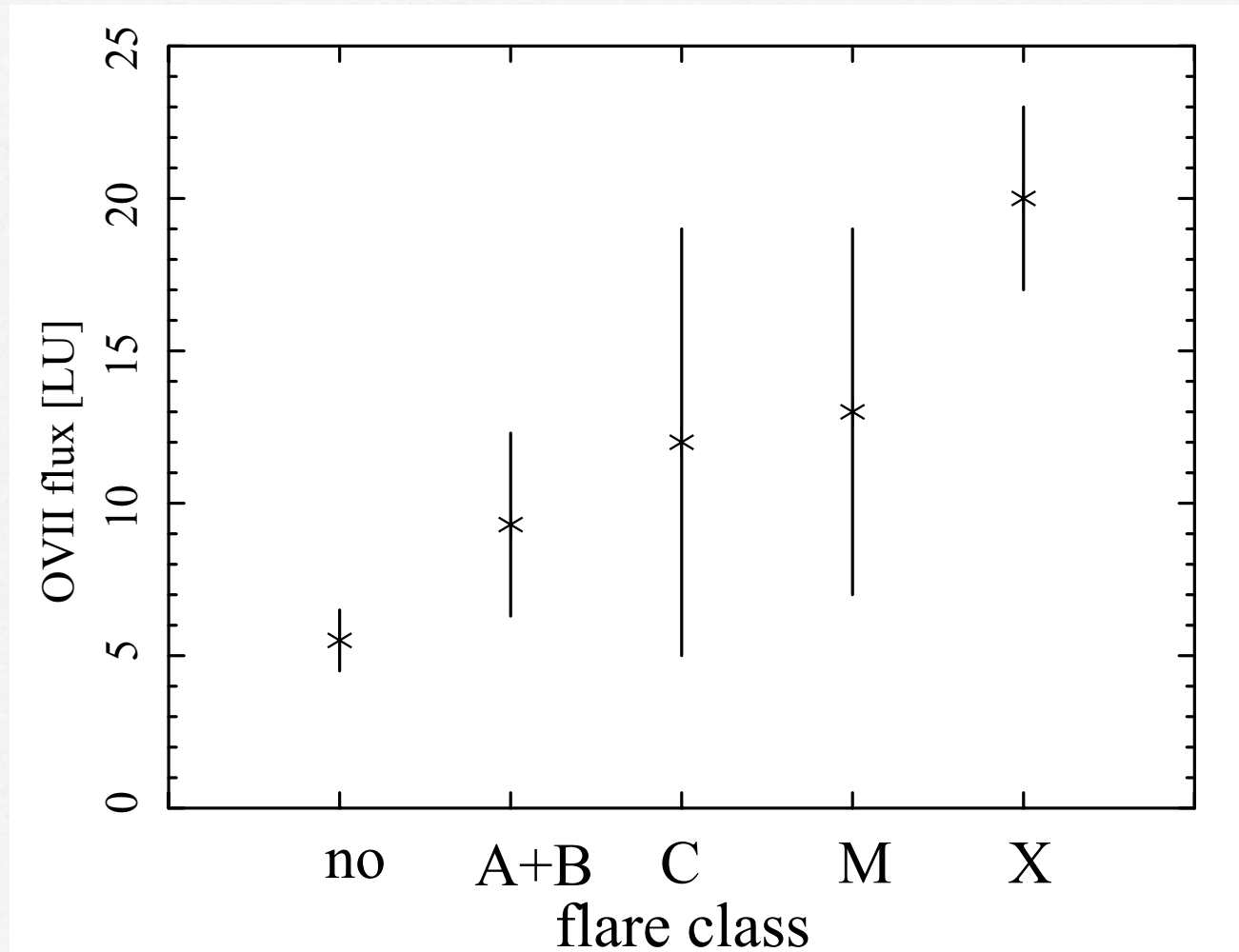
- 観測年ごとの平均 N_H と太陽EUVフラックス(上層大気を加熱)



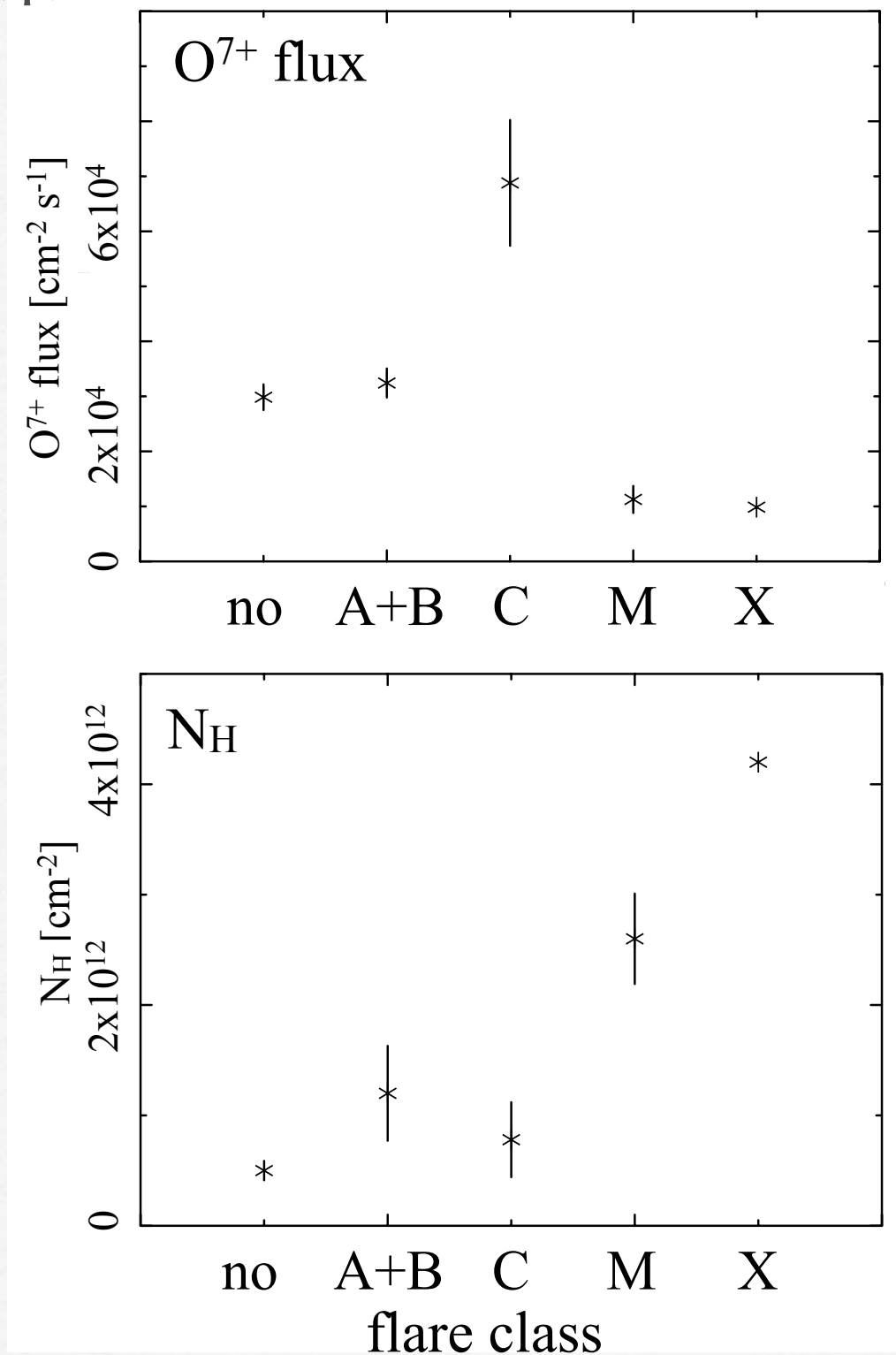
- N_H とEUVフラックスはやや相関あり → EUV による大気加熱の影響か
- SWCX放射の観測：太陽活動にともなう大気の密度変化を反映

SWCX flux (OVII) と太陽活動の関係 2

- フレア規模ごとの平均値

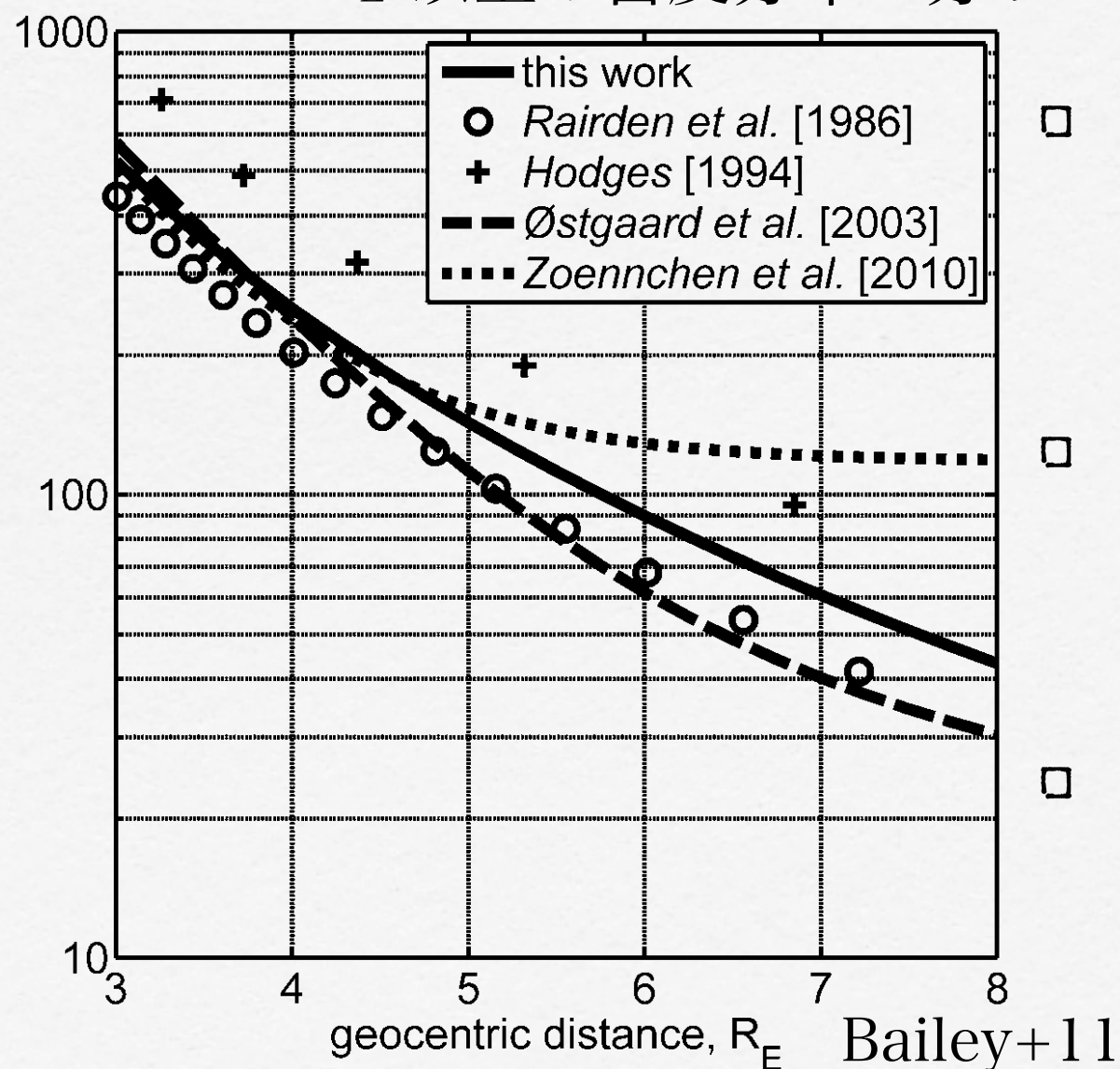


- フレア規模が大きいほど N_H 高い



N_H と外圏の密度モデル (フレアなし)

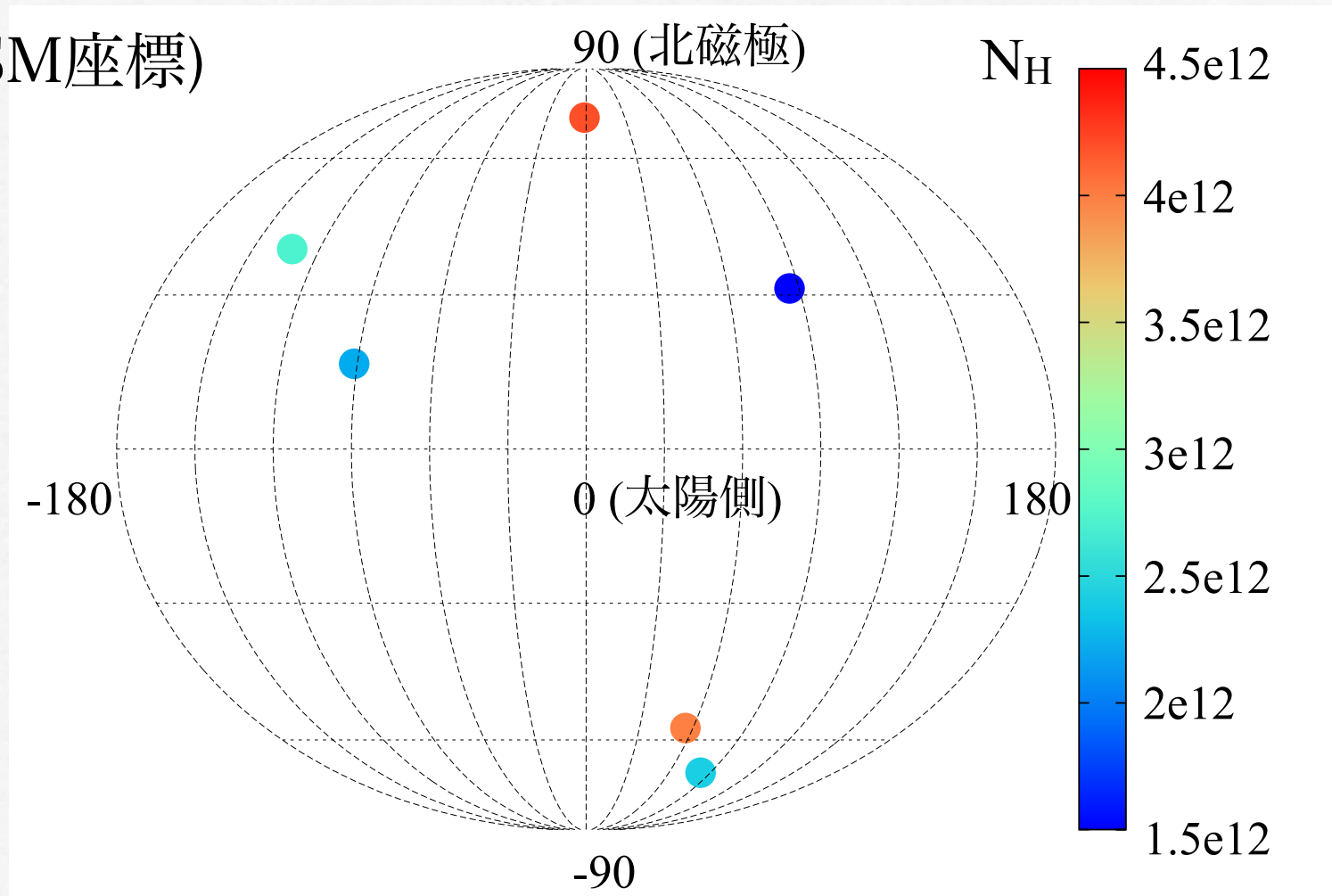
- 外圏密度モデル (シミュレーション、UV観測)
 - $\sim 5R_E$ 以上の密度分布 : モデルによってばらつく
 - $\sim 10R_E$ 以上の密度分布 : 分かっていない



- すごくの結果
フレアなしの時の平均 N_H :
 $(5.0 \pm 0.9) \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$
- 密度モデル (Ostgaard+03) の N_H :
 $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ($10 \sim 42R_E$ 積分)
→ 観測と合わない
- 数10 /cc の密度の大気が $\sim 30R_E$ まで
広がっているかも

M, X class フレアでの N_H

□ N_H の分布 (SM座標)



- 平均 N_H : $(3 \pm 0.4) \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$
- Ostgaard model での N_H ($1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$) の30倍 [10~42 R_E 積分],
 「すごく」フレアなし N_H の6倍
 → 大気密度が増加 and/or 磁気圏圧縮

本日のお話

1. Introduction

2. 解析手順

3. 結果

4. 考察

5. まとめ

まとめ

- 「すざく」の全データ(2005年8月~2011年9月)から地球SWCX放射を探した
- 2031データ中、38のデータでSWCX放射を検出
- 全てのデータで emissivity, 輝線フラックス, N_H を求めた



- 軟X線背景放射：視線方向によるSWCX放射効率の違いは見られない
→ 地球外圏のSWCX放射はあらゆる方向で影響する
- 地球外圏の分布：太陽活動により変動 +
既存の外圏密度モデルと不一致, 特に $> \sim 10R_E$
→ 超高層大気の様子をリモートで観測 +
~30 R_E 付近まで濃い外圏大気が広がっている可能性
- 地球磁気圏の可視化：シースのあらゆる方向からSWCX放射検出
→ SWCX放射の観測で磁気圏の形を捉える

将来の展望

今回の成果

太陽活動が活発
フレア

SWCX放射
強まるよ

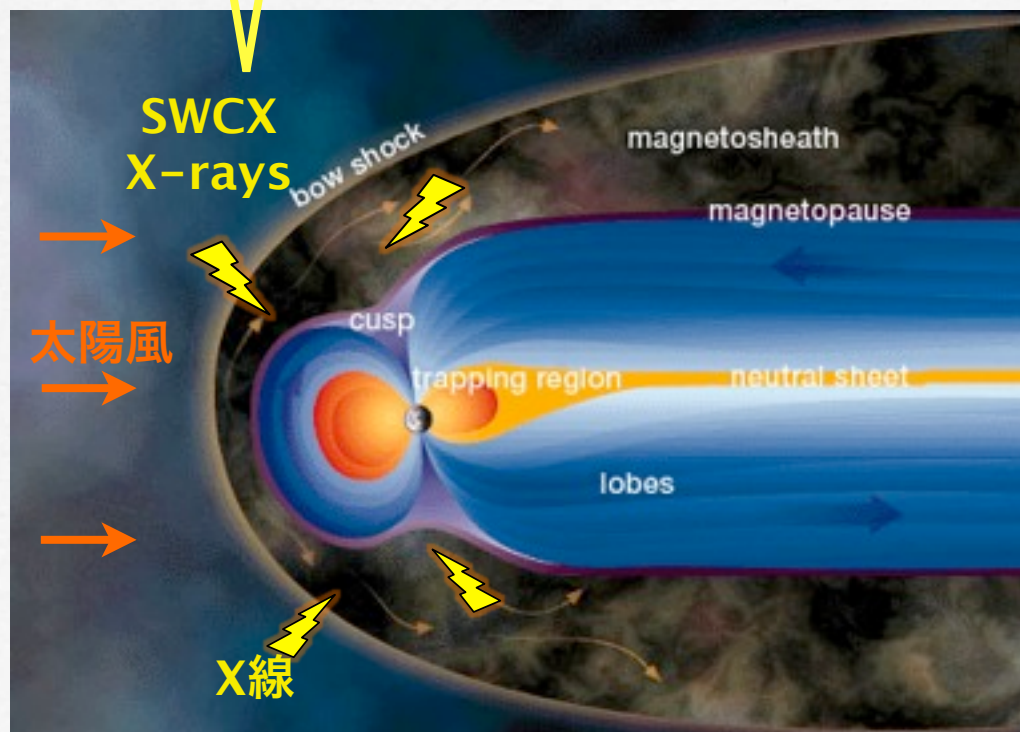
輝線エネルギー
輝線強度
輝線の強度比
輝線幅
輝線のドップラーシフト

地球外圏大気の分布・組成
磁気圏の全体像
太陽風イオンの輸送

より詳細に

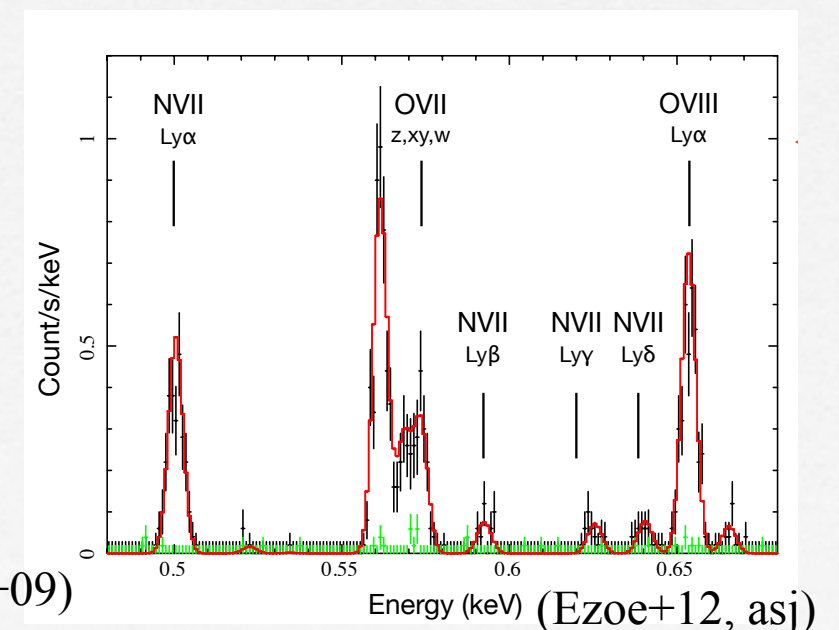
次期X線観測衛星：ASTRO-H 衛星

将来衛星：X線による磁気圏観測ミッション



シミュレーションによる
SWCX放射のスペクトル例

SWCX model : Bodewits+07
soft X-ray background (Yoshino+09)



おしまい