卒業研究P6 解析班
最終発表

塚本博丈 斉藤裕次郎 前田裕成

研究目的

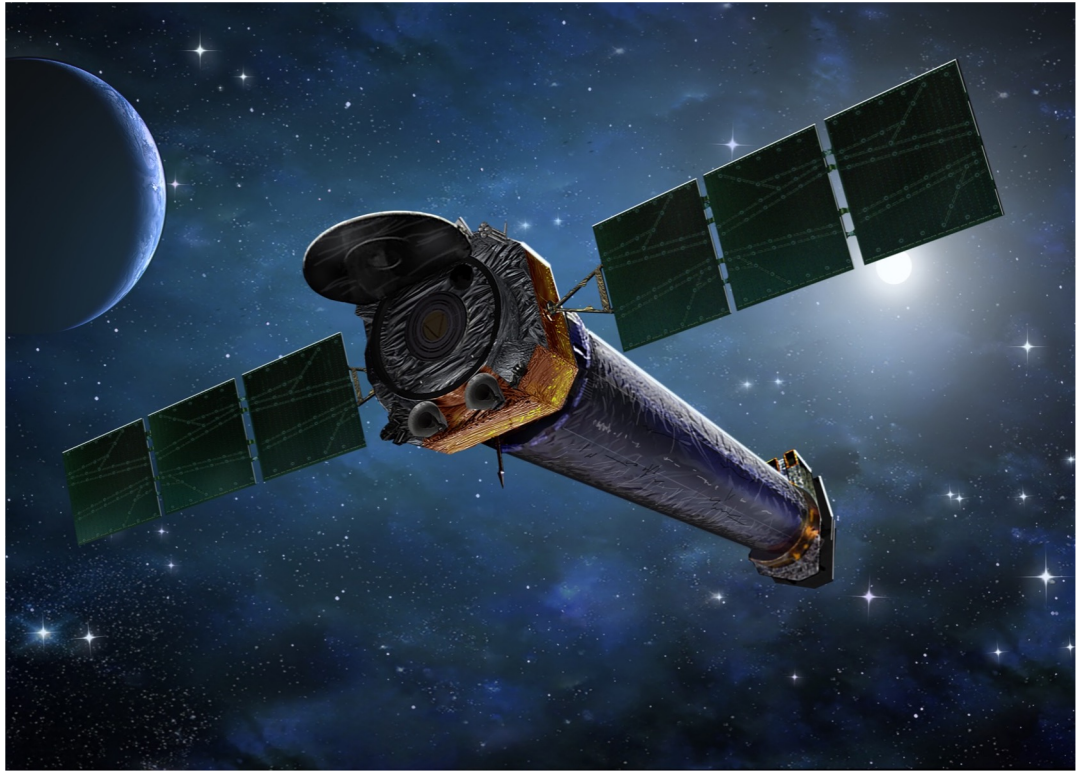
研究目的

- 銀河中心（Sgr A*）付近の広範囲のX線mapを、Chandra衛星の観測データを用いて作成し、何か新しい構造を発見できないだろうか。

Chandra衛星について

Chandra衛星

- 1999年にNASAが打ち上げたX線天文衛星
- 現在も稼働中



https://chandra.harvard.edu/about/spacecraft.htmlより

Chandra衛星の性能について

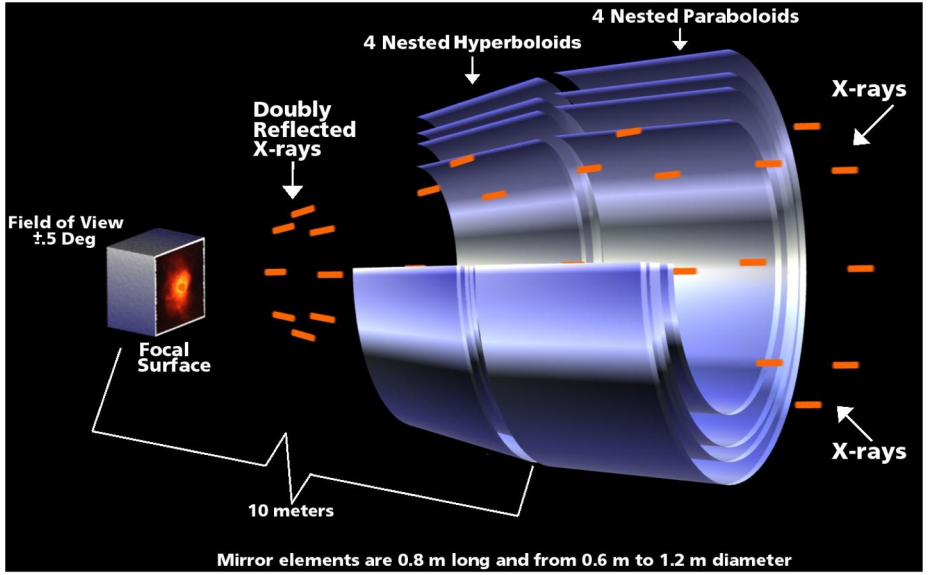
- Chandra衛星は特に角度分解能に優れている

	Chandra	XMM-Newton	Suzaku
検出器名	CIAO	EPIC	XIS
角度分解能	0.5''	6''	2''
検出器の エネルギー分解能	150 eV (at 5.9 keV)	150 eV (at 6.4 keV)	130 eV (at 6 keV)
観測可能な エネルギー範囲	0.1-10 keV	0.15-15 keV	0.2-12 keV

各衛星の公式サイトより塚本が作成

ChandraのX線反射鏡

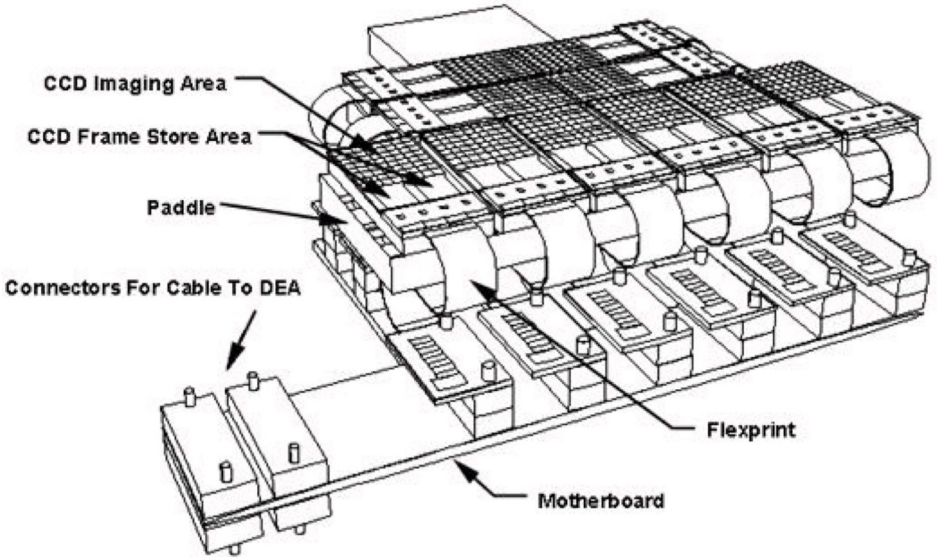
- ウォルターI型X線反射鏡
  - 回転放物面・回転双曲面の２つの反射鏡で全反射させて集光している



https://chandra.harvard.edu/about/telescope_system.htmlより

Chandraの検出器

- ACIS
  - Advanced CCD Imaging Spectrometer
  - CCDを10個組み合わせている

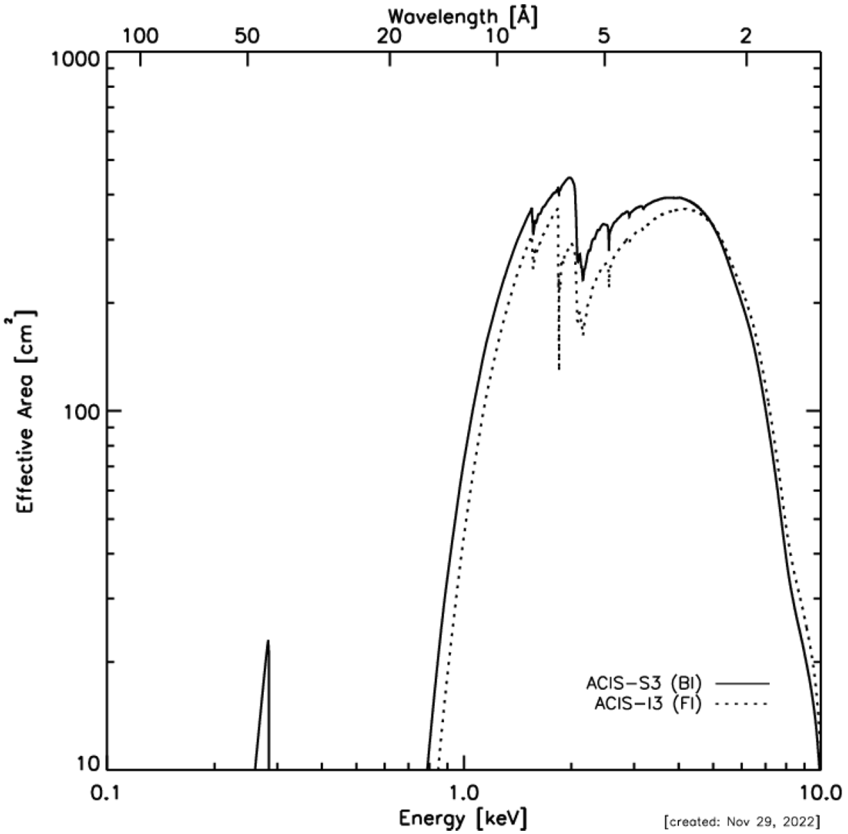


https://chandra.harvard.edu/about/science_instruments.htmlより

検出器の有効面積

- 有効面積が全体として小さい
  - cf.) XMM-Newton
    1~10 keVで約1000 cm^2
  - 特に1 keV未満が小さい

データ数が少ないことによる
統計性の問題の一因



https://cxc.harvard.edu/proposer/POG/html/chap6.html#tth_sEc6.5より

解析手順

使用するソフト等

- ESASky
  - 様々な衛星等による観測データへのポータルサイト
- CIAO
  - Chandra衛星の観測データ用の解析ソフト
- SAOImageDS9
  - 天文データを可視化、画像表示するためのソフト
- Heasoft
  - X線天文学の解析に用いるソフトの総称
  - XImage：X線データを画像化するためのソフト
  - farith：入力ファイルの演算を実行するソフト

詳細な手順

1.ESASkyを用いて解析するデータを決定する

約800の観測データ

１人300弱のデータを解析

2.Obs_Idを参照して観測データをダウンロード

3.ダウンロードしたデータをreprocess

reprocess：ダウンロードした生の観測データを

解析に利用できるように処理する過程

詳細な手順

4.reprocessしたデータから画像を作成する

エネルギーバンドを指定して作成

RGB画像

red：0.5-1.0 keV
green：1.0-2.0 keV
blue：2.0-7.0 keV

輝線

S：2.35-2.56 keV
Ar：3.0-3.2 keV
Ca：3.8-4.0 keV
Fe-Kα：6.3-6.5 keV
He-like Fe：6.62-6.80 keV

連続成分

2-7 keV ― 各輝線のバンド、4-7 keV ― Fe-Kα線、4.0-6.3 keV

詳細な手順

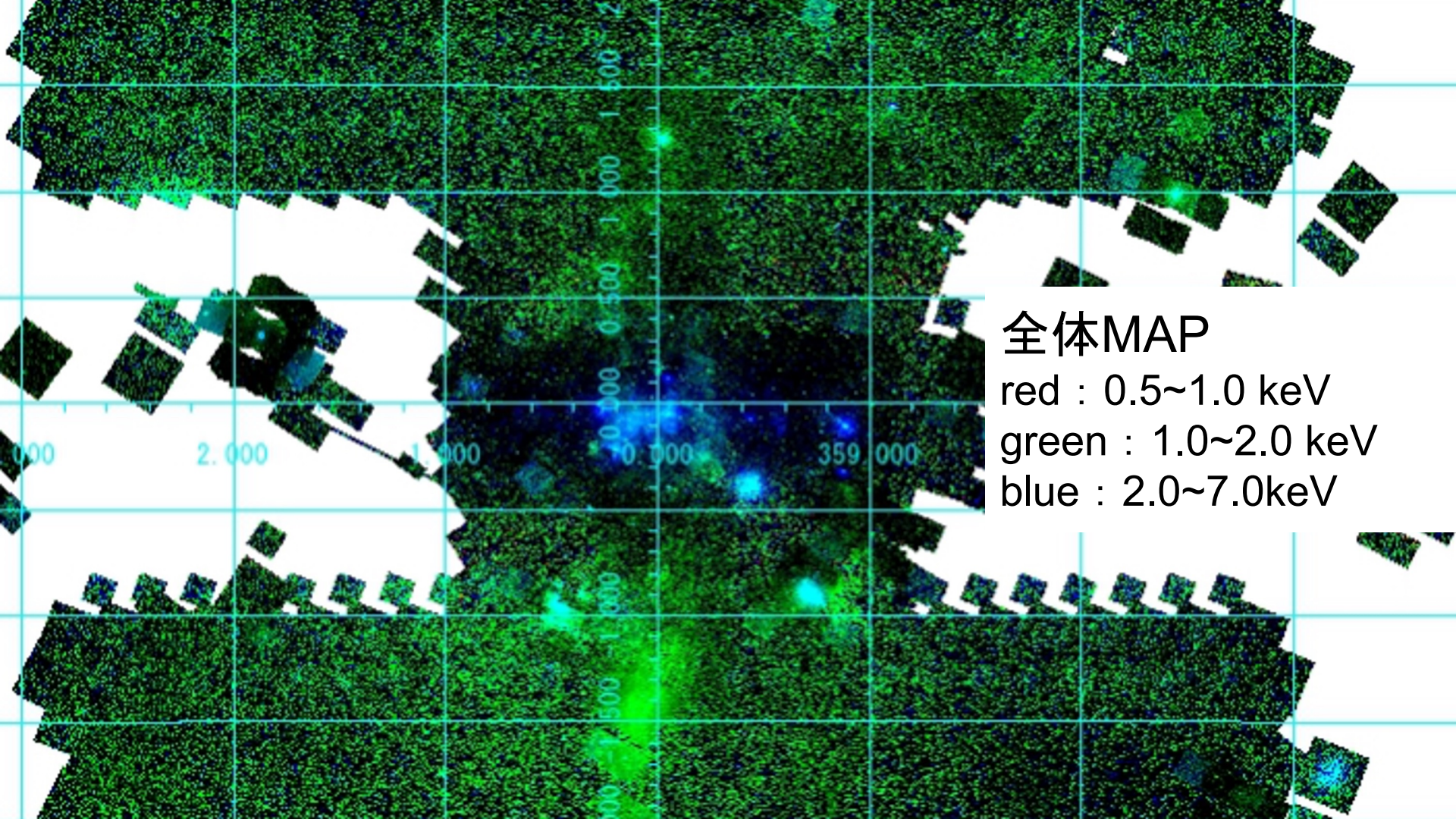
5.作成した画像を合成する

２種類の合成手順：merge→XImageと２段階で合成

6.観測期間ごとの合成

Ｘ線画像の時間発展を見る(M. Clavel+ 2013)ため
十分な統計のある銀河中心に絞る
3等分：1999/9～2021/7を約7年毎
10等分：1999/9～2021/7を約2年毎

解析結果

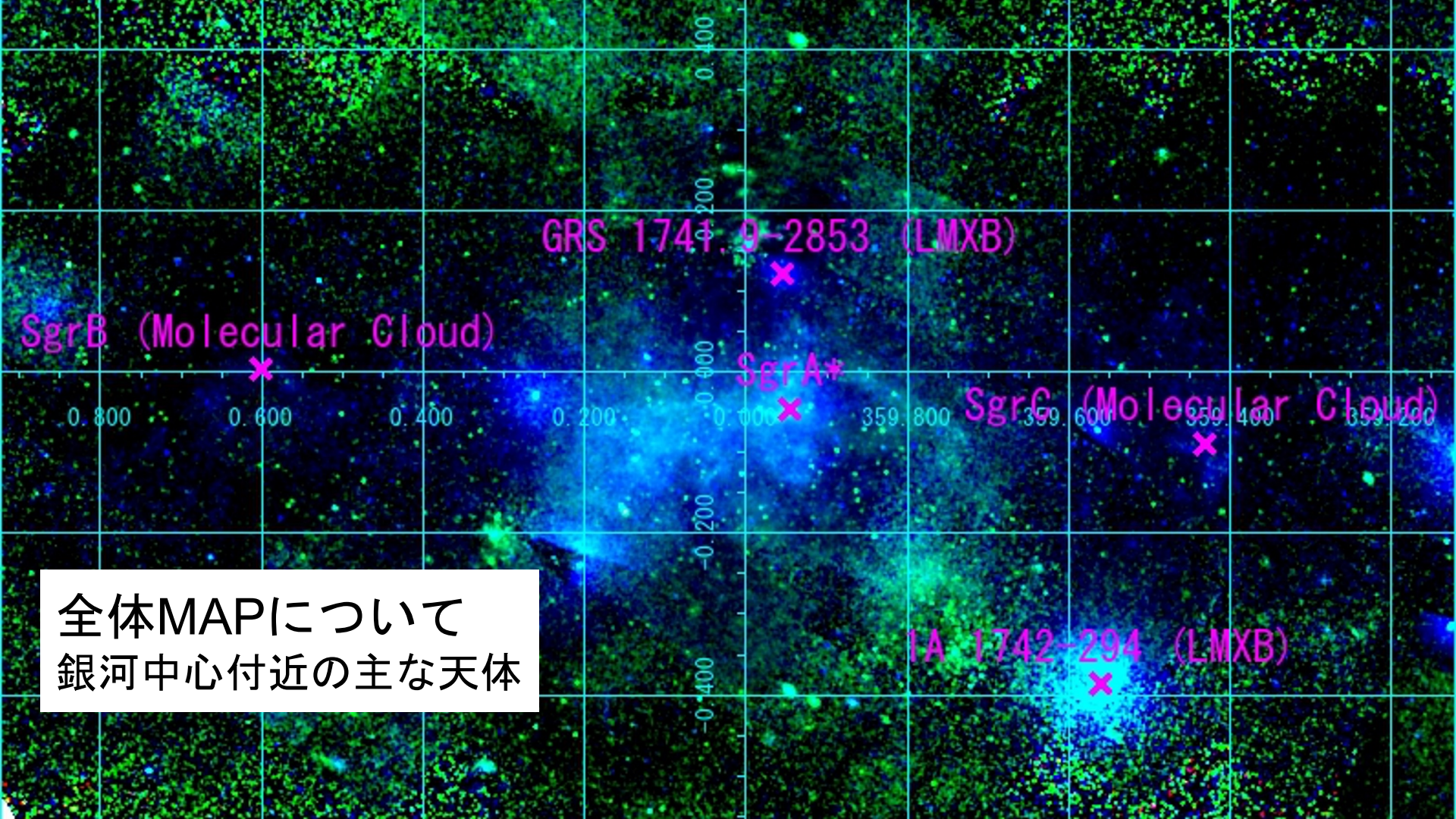


全体MAP

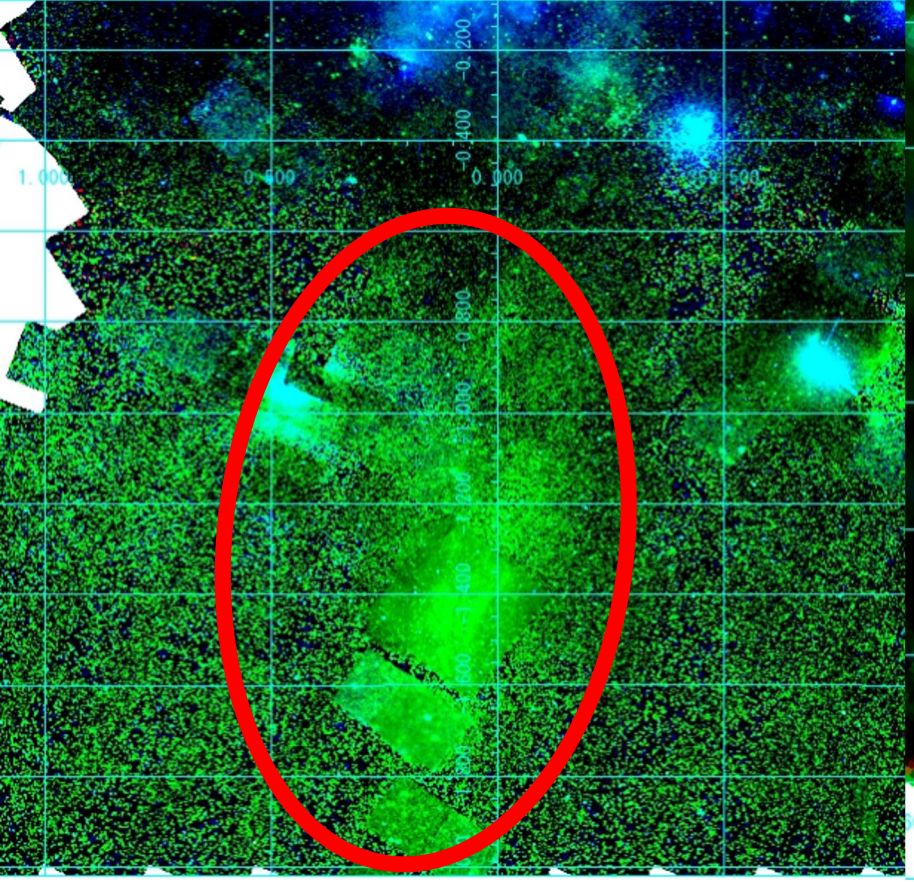
red：0.5~1.0 keV

green：1.0~2.0 keV

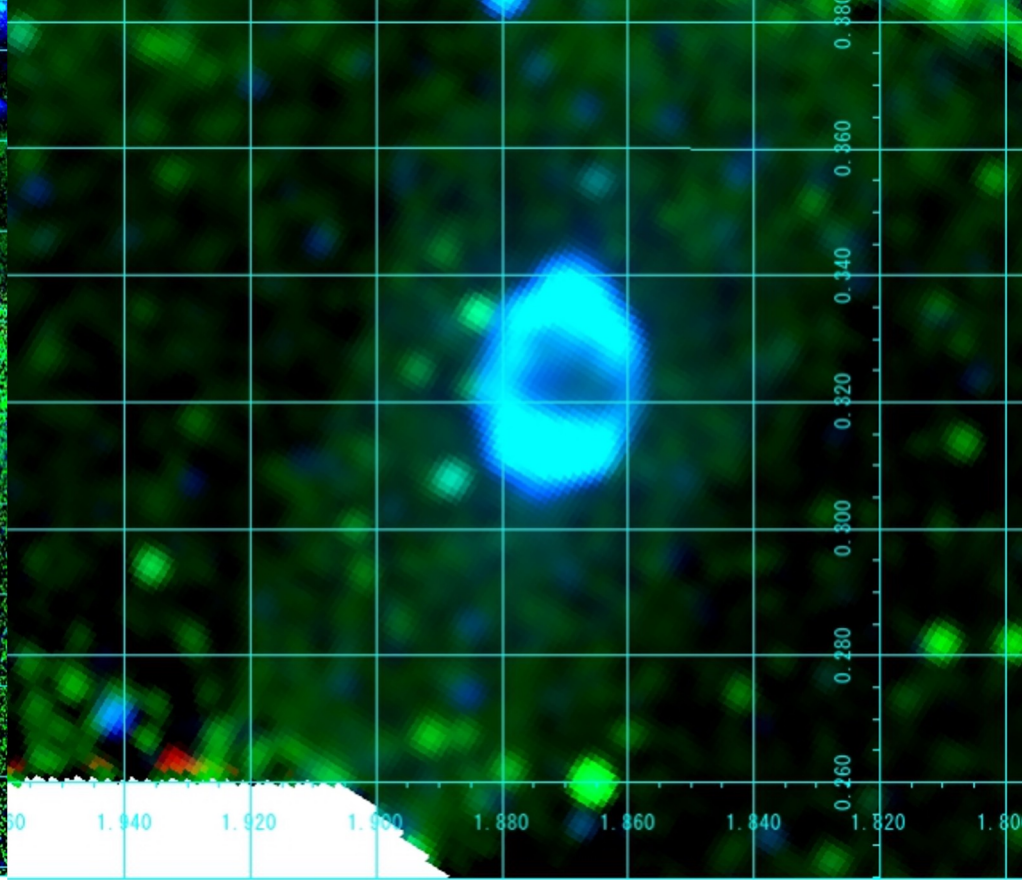
blue：2.0~7.0keV



全体MAPについて
銀河中心付近の主な天体



chimney

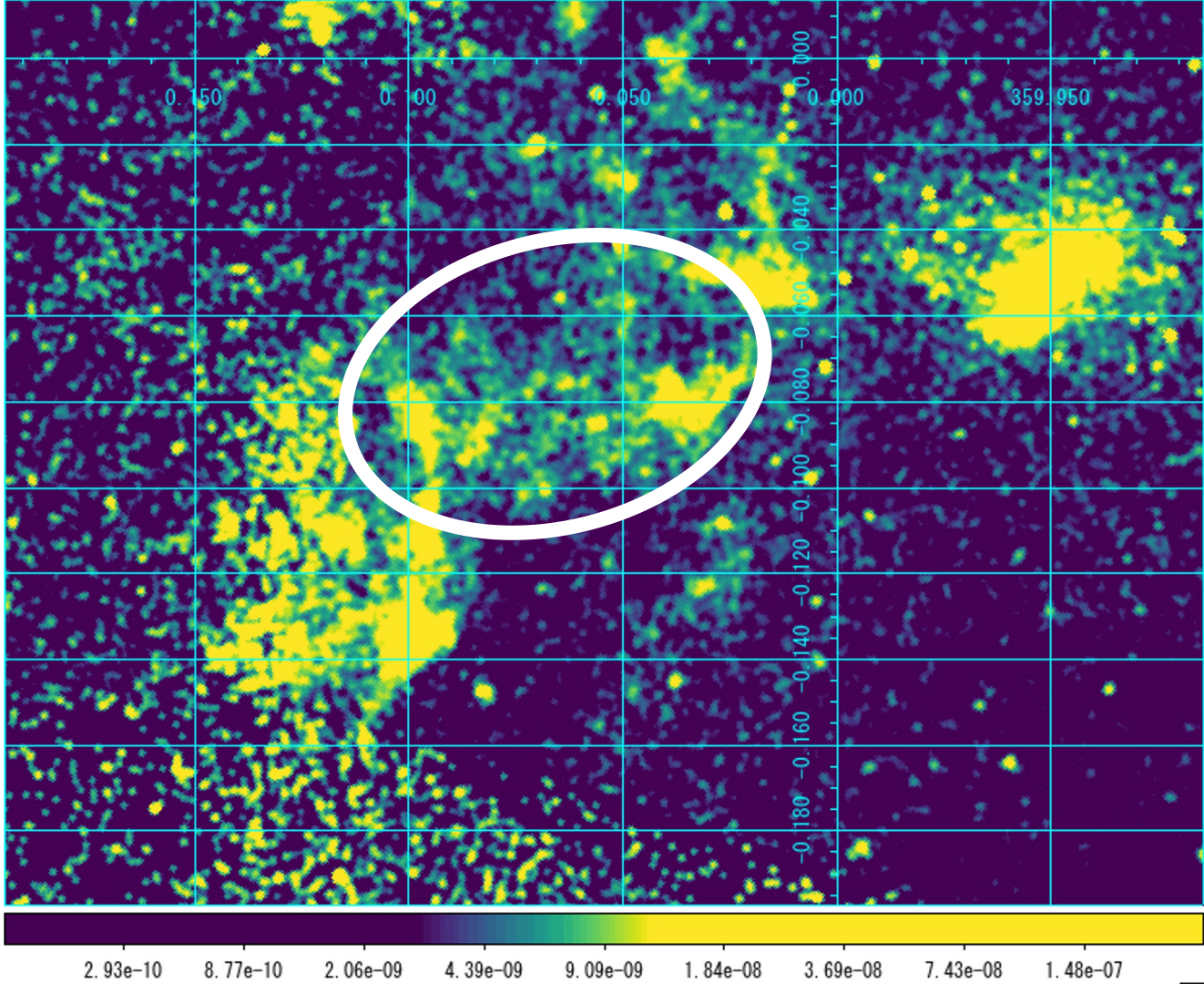


SNR G1.9+0.3

全体MAPについて：その他の構造・天体

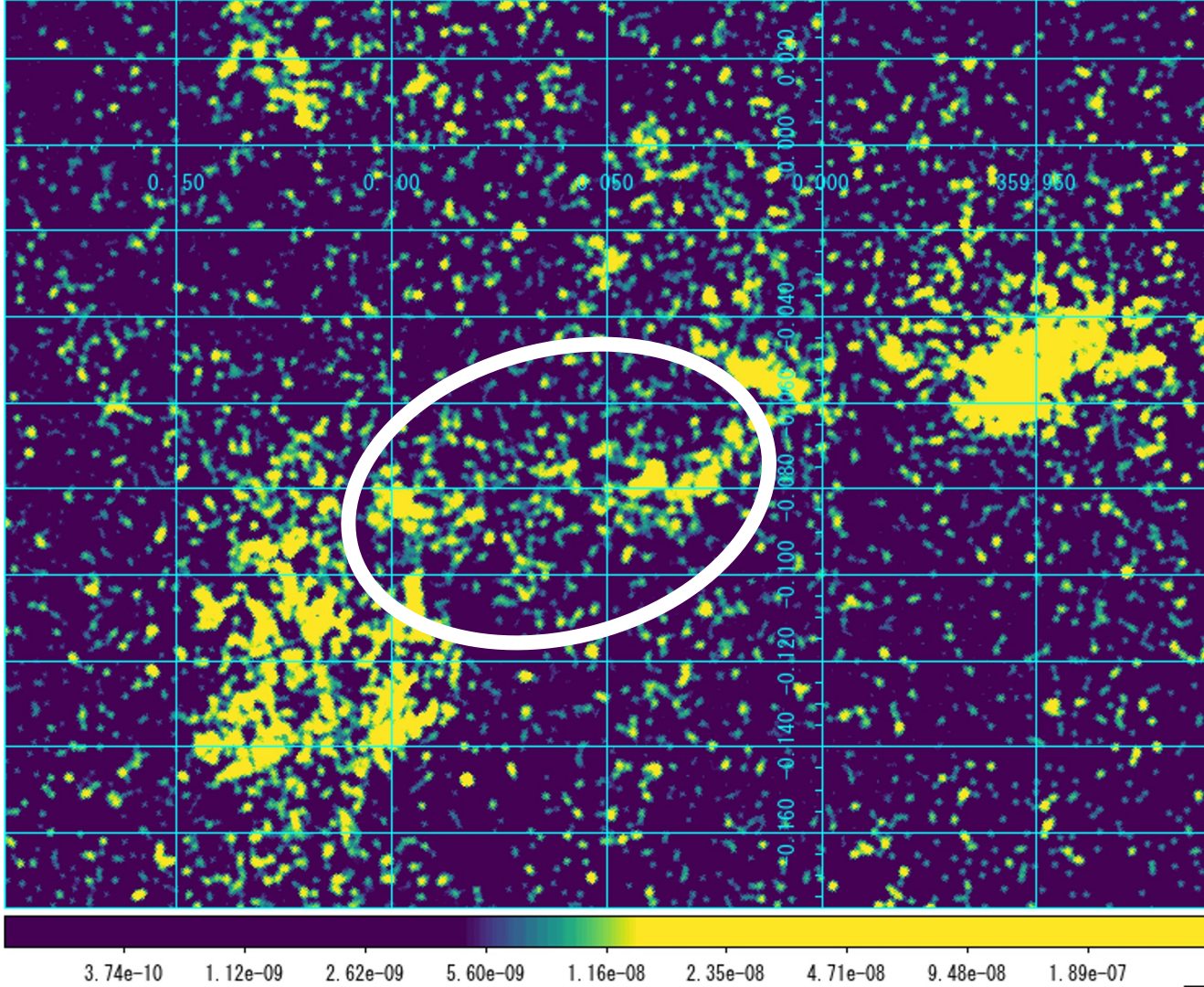
Fe-Kα線(6.3-6.5 keV)の3等分(7年毎)画像

Sgr A*から遠ざかる方向へ時間変動している



Fe-Kα線(6.3-6.5 keV)の10等分(2年毎)画像

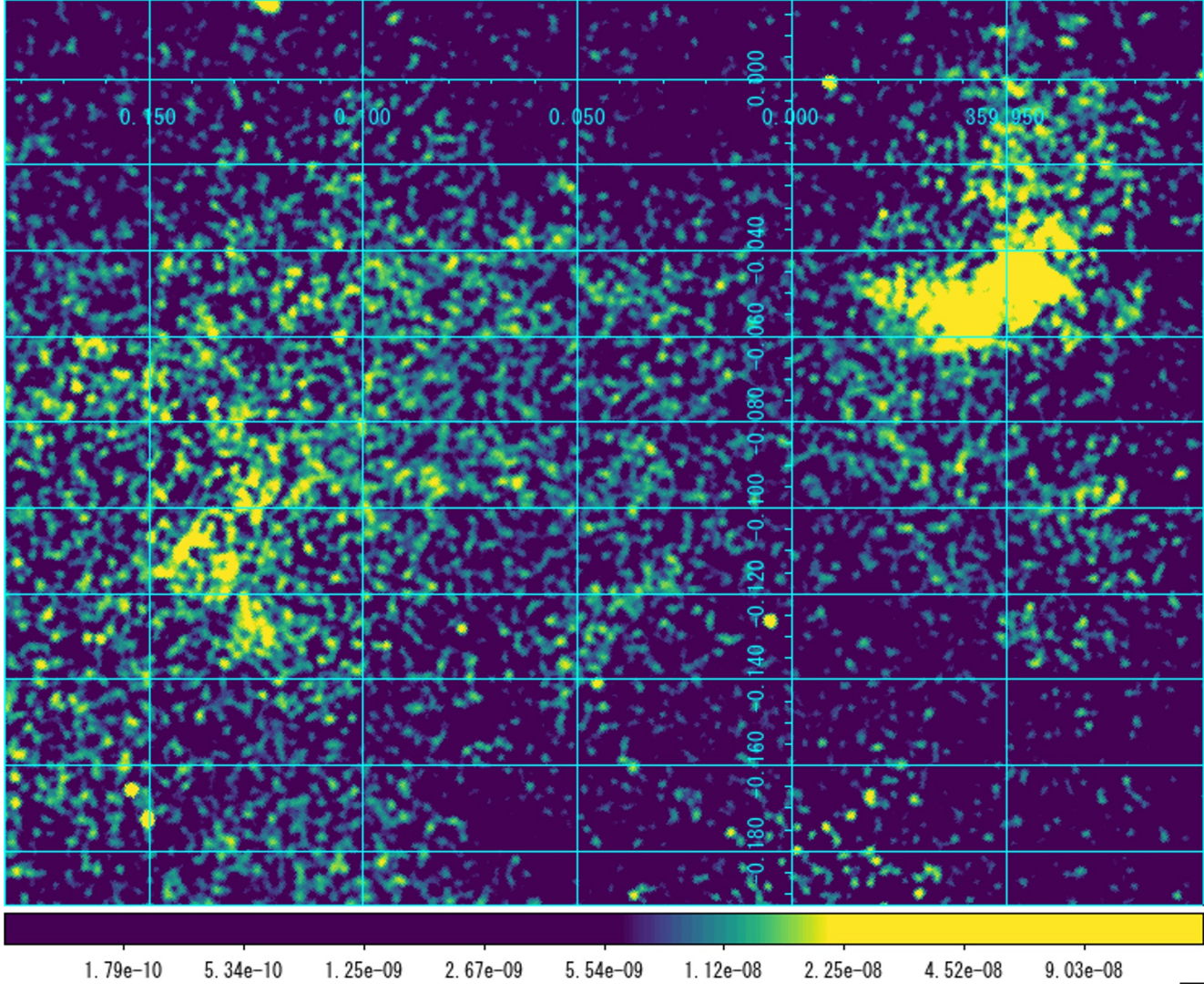
同様の時間変動がみられる



S輝線(2.35-2.56 keV)の10等分(2年毎)画像

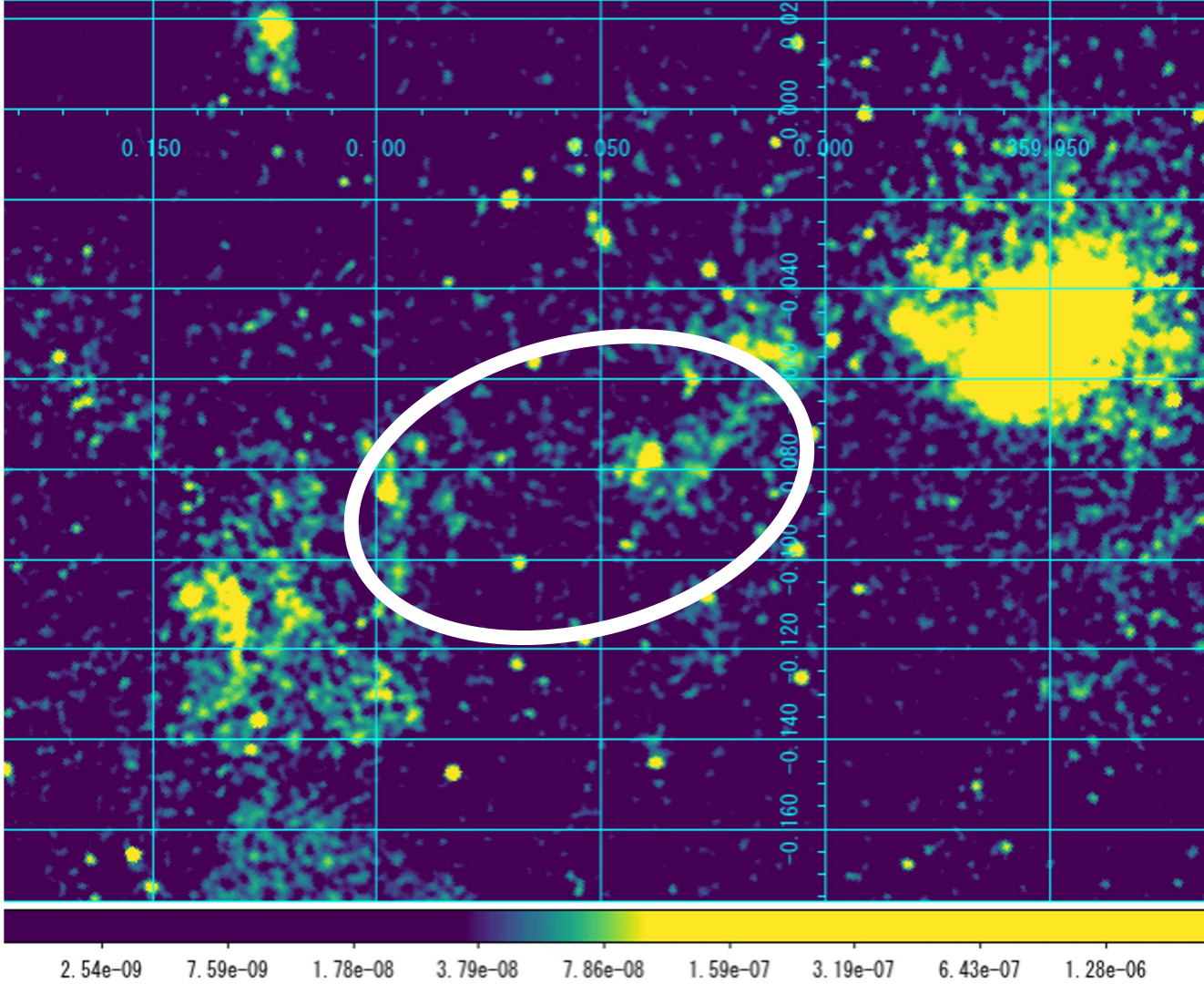
Fe-Kα線のような時間変動は見られない

他の輝線も同様



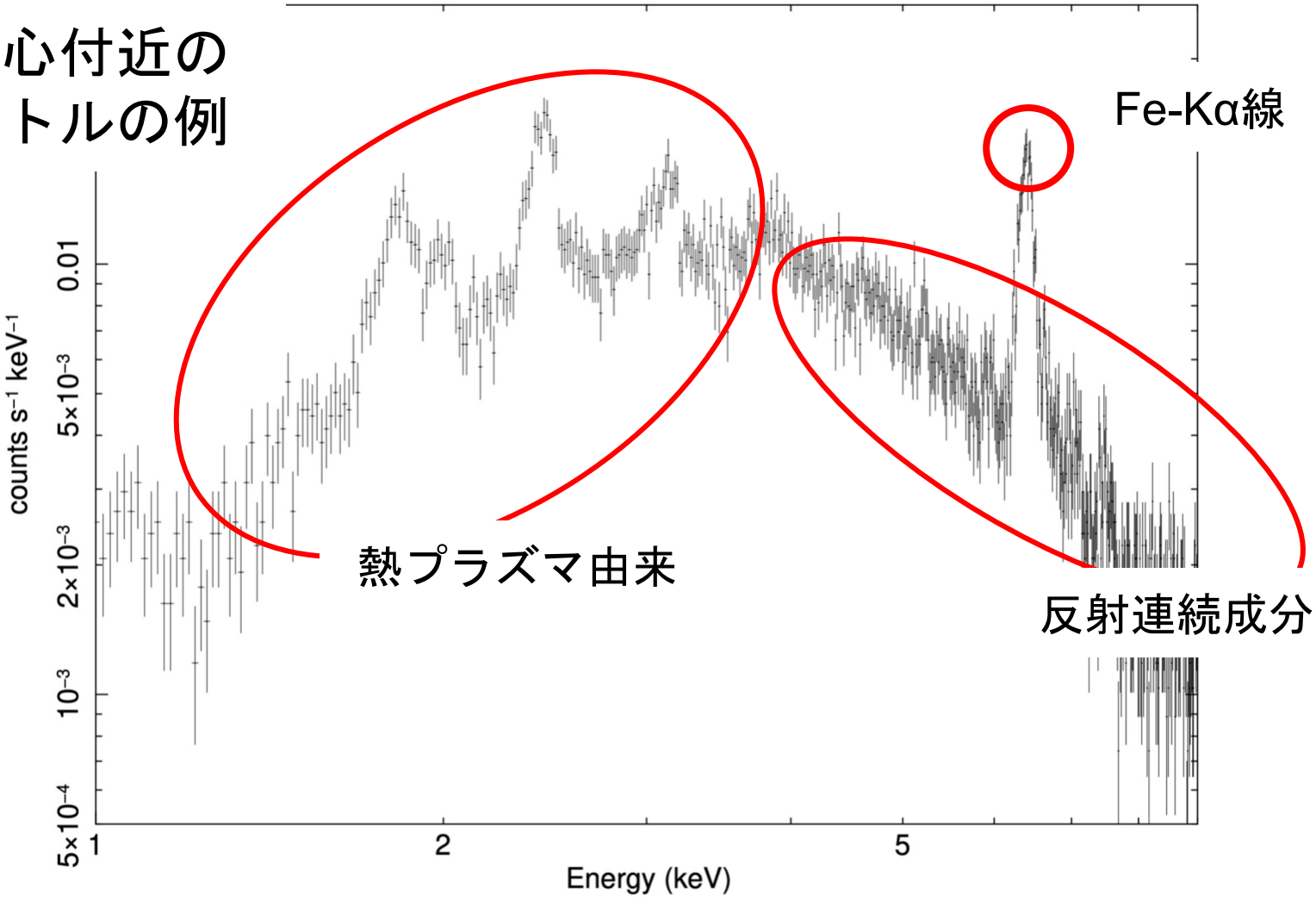
連続成分(4-7 keV ー Fe-Kα線)の10等分(2年毎)画像

連続成分においてもFe-Kα線と同様の時間変動の様子が見られた



スペクトル解析

銀河中心付近のスペクトルの例

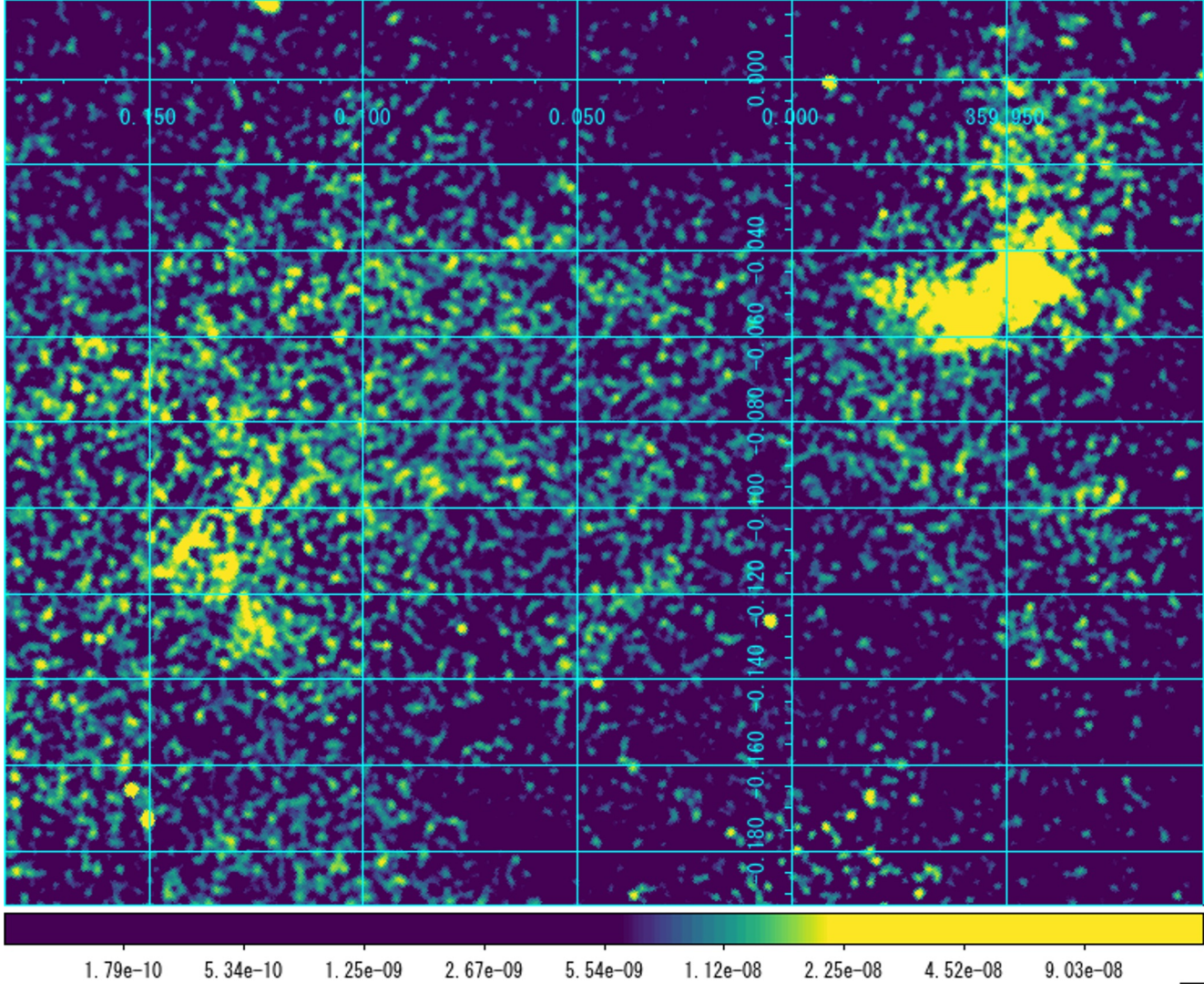


プラズマ由来の放射

- 制動放射による連続成分＋各元素(S, Ar, Caなど)の輝線
  - 本実験での観測領域ではほぼ一様
  - 時間変動はしない
  - 低エネルギー側（3~4keV未満）で支配的

S輝線(2.35-2.56 keV)の10等分(2年毎)画像

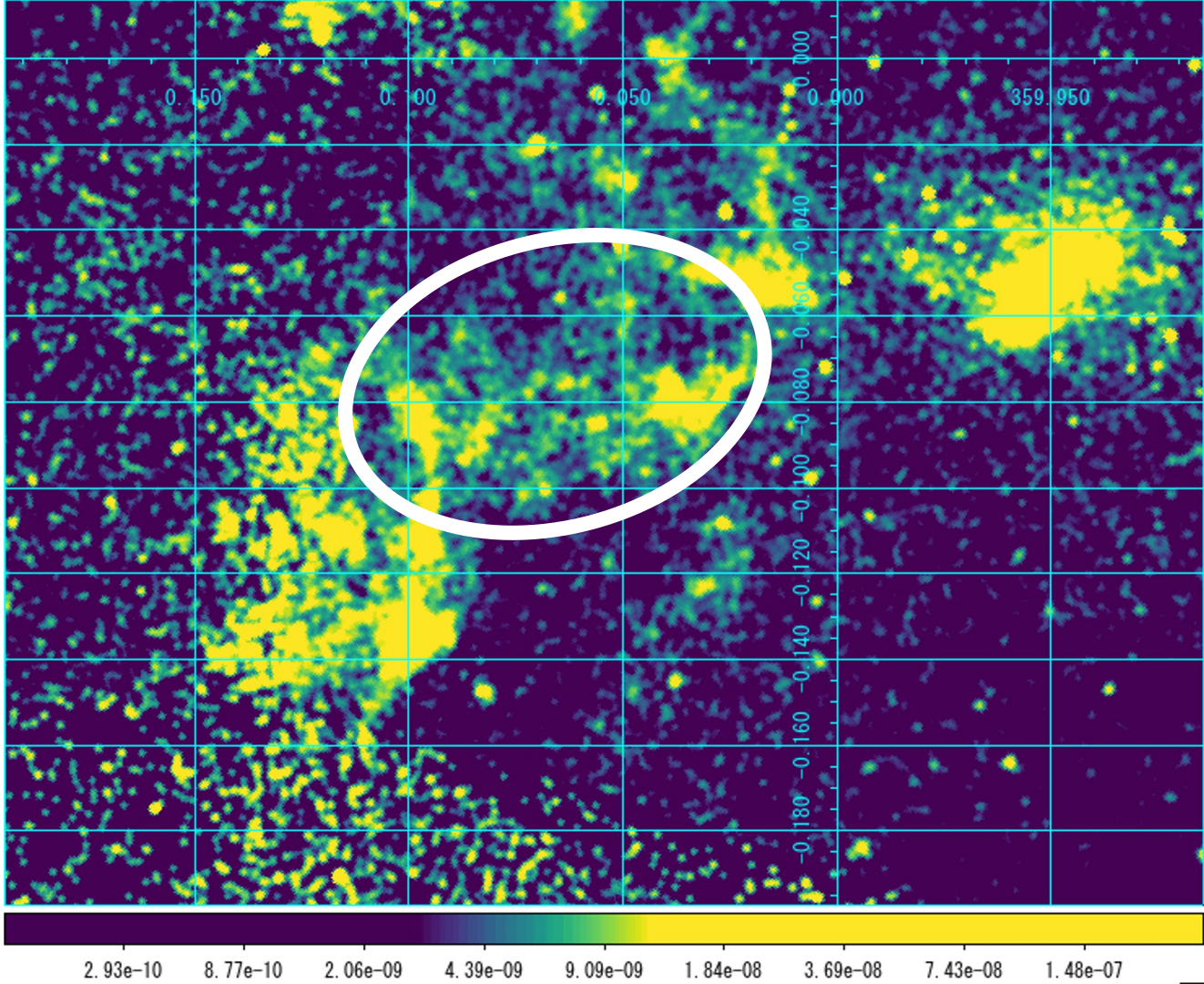
時間変動していない



Fe-Kα線

- 外部からの強い放射で励起されたことによる、分子雲中の中性鉄原子の特性X線（6.4keV）
  - SgrA*からの放射由来、時間変動する
  - 外部放射ー視線方向の角度依存性なし

Fe-Kα線(6.3-6.5 keV)の3等分(7年毎)画像



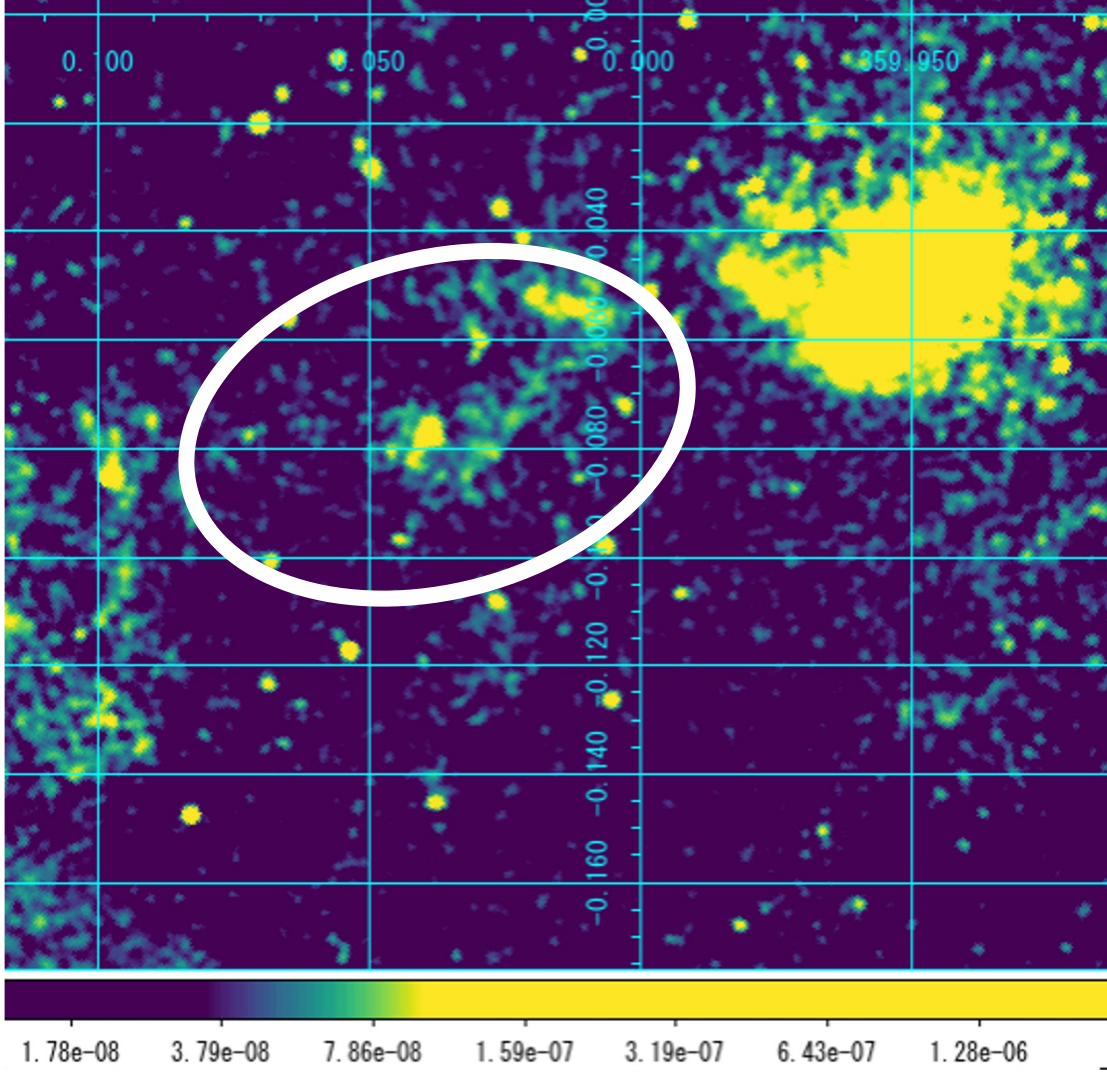
時間変動している

反射連続成分

- 外部からの放射が分子雲中の原子に反射されたもの
  - トムソン散乱による連続成分
  - SgrA*からの放射由来、時間変動する
  - 外部放射ー視線方向の角度依存性あり

連続成分(4-7 keV
— Fe-Kα線)の10
等分(2年毎)画像

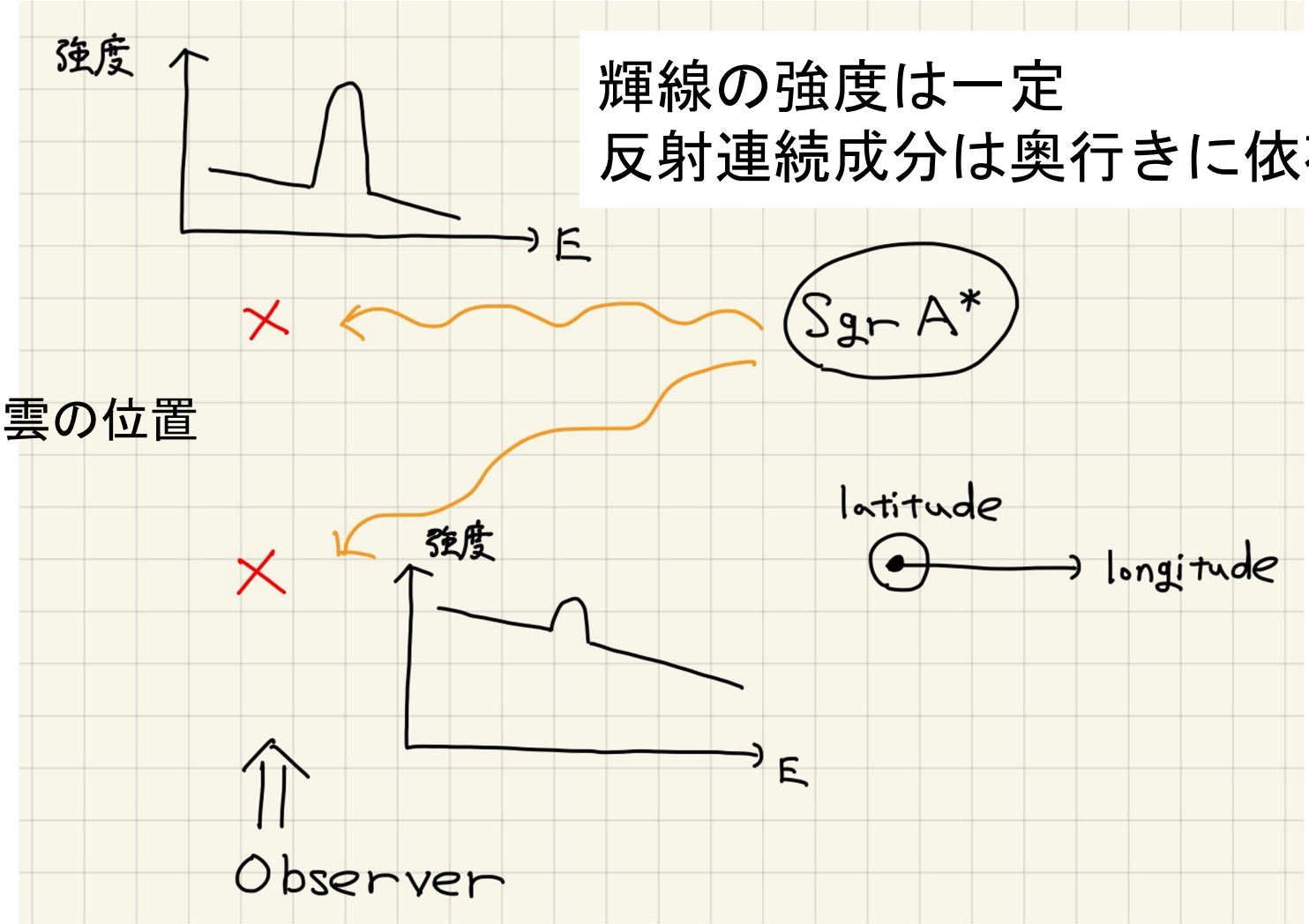
時間変動している



スペクトル強度の角度依存性

- Fe-Kα線
  - 角度依存性なし
- 反射連続成分
  - 角度依存性あり

輝線の強度は一定
反射連続成分は奥行きに依存



スペクトル強度の角度依存性

- Fe-Kα線
  - 角度依存性なし
- 反射連続成分
  - 角度依存性あり

角度依存性の違いから、観測している領域の分子雲の三次元的な構造が分かるのではないか

分子雲の三次元的構造について

- 現在でも銀河中心付近の分子雲（CMZ）の三次元的構造は議論が続いているトピック
- 例えば星形成の研究と関連がある
  - CMZは分子雲ガス密度が非常に高い領域だが、通常よりも星形成の効率がとても低い
  - CMZの分子雲の位置を知った上で、分子雲ガスからの星形成との関連から星形成理論そのものを解明しようとする研究も

スペクトル強度の角度依存性

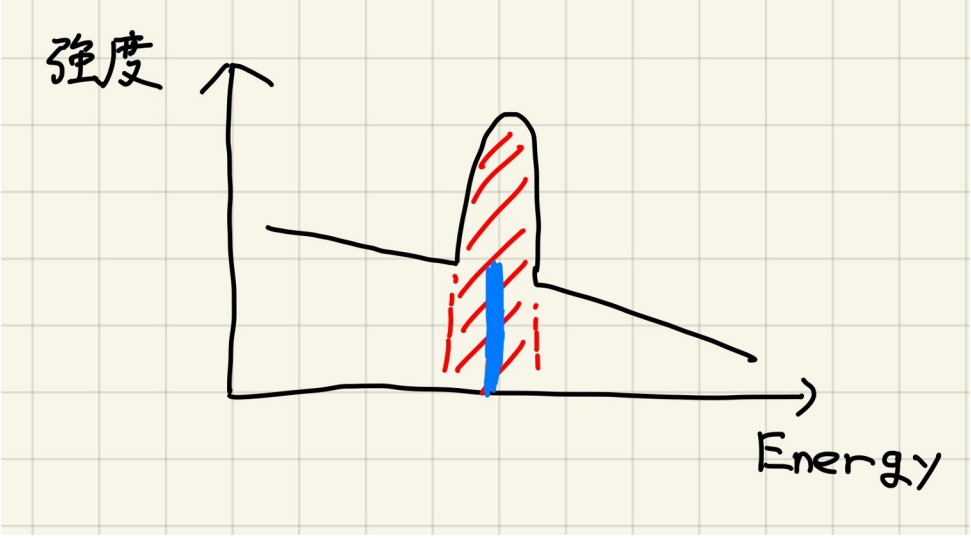
- Fe-Kα線
  - 角度依存性なし
- 反射連続成分
  - 角度依存性あり

角度依存性の違いから、観測している領域の分子雲の三次元的な構造が分かるのではないか

⇒ Equivalent Widthを領域ごとに求める

Equivalent width

- 輝線の面積 / 連続成分の強度
- 連続成分に対する輝線の指標



使用したソフト

- SAOImageDS9
  - fitsファイルの可視化,領域の作成
- CIAO
  - chandra衛星用の解析ツール,スペクトルの作成
- Xspec
  - x線のスペクトル解析用のソフト,スペクトルの可視化とフィッティング

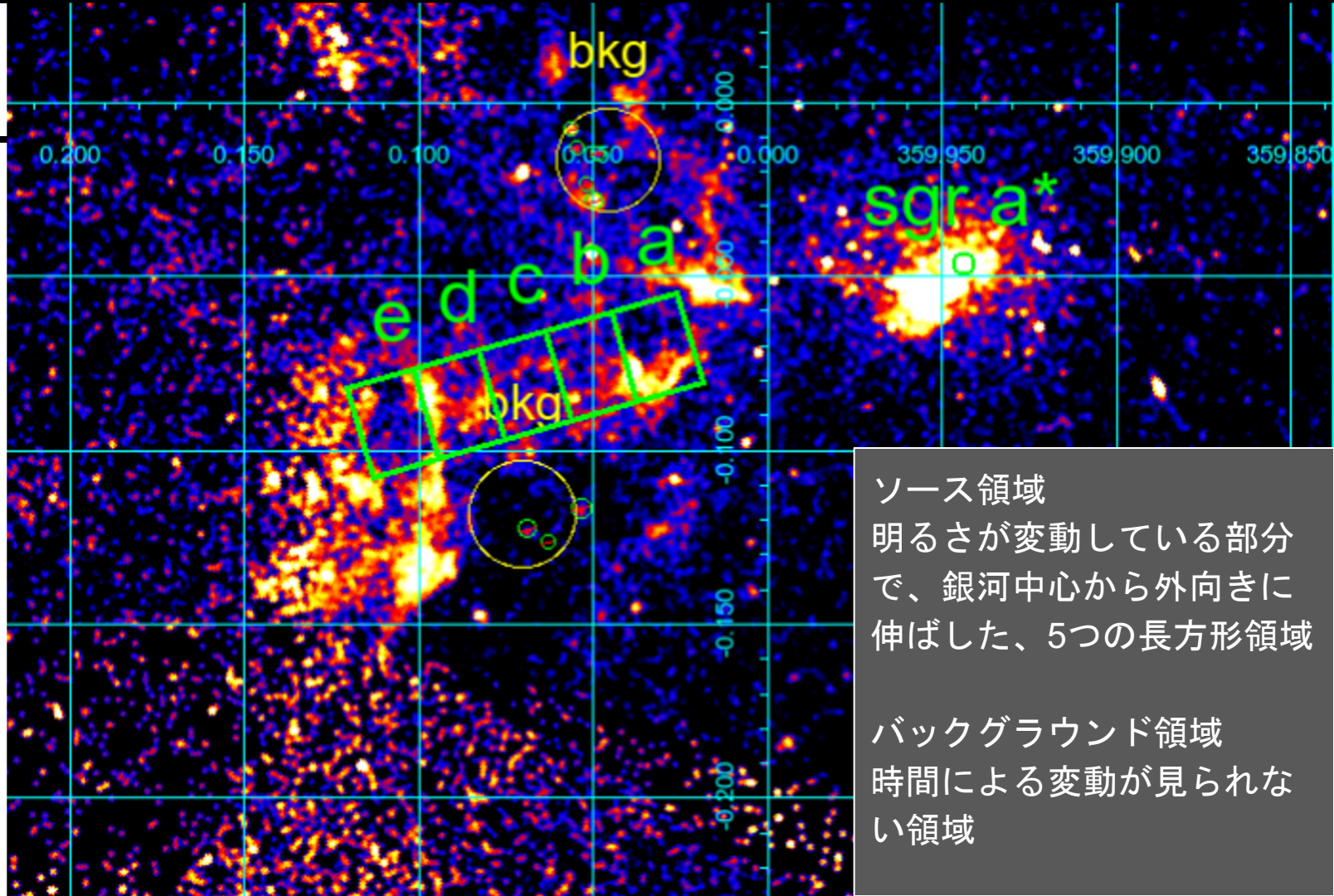
解析の流れ

1. ソース・バックグラウンド領域を作成

1. 各観測に対して、スペクトルを作成し、時刻によりデータを10等分に分けて、それらを合成。

1. 合成したスペクトルをモデル関数でフィッティング、equivalent widthを求める。

領域



ソース領域
明るさが変動している部分で、銀河中心から外向きに伸ばした、5つの長方形領域

バックグラウンド領域
時間による変動が見られない領域

モデル関数とフィッティング

モデル: tbabs*(pow+gauss)

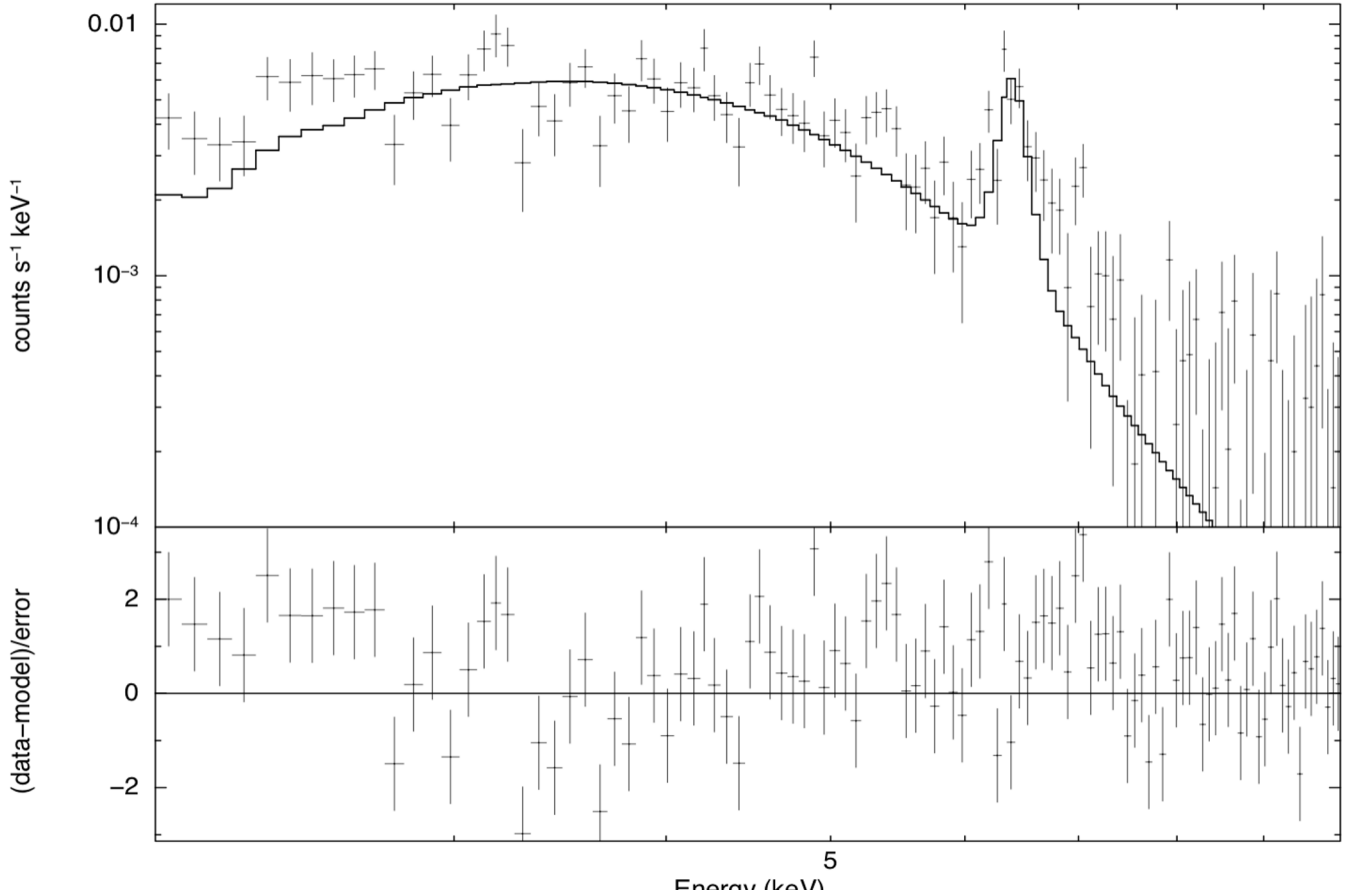
tbabs: 星間吸収(分子雲-観測者間の吸収の影響)

pow: 連続成分の冪乗近似

gauss: 6.4keVのFe-Kα線

2-10keVで、powの指数，powのnorm，gaussのnormをfreeにしてフィッティングした

スペクトルの例



パラメータ

nH 7.00000*10^22

PhoIndex 2.37944 +/- 0.131809

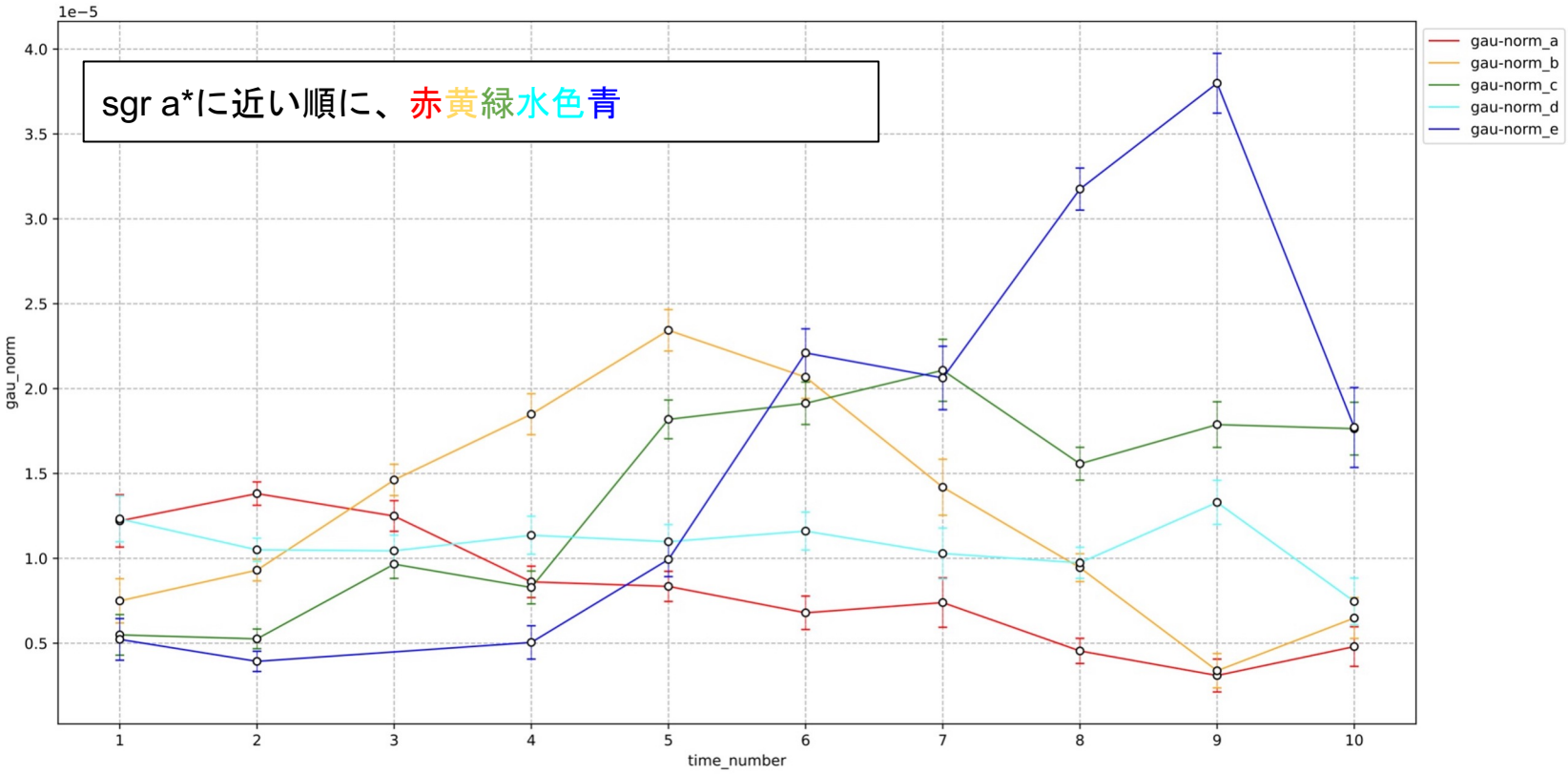
pow_norm 7.61043E-04 +/- 1.37474E-04

LineE 6.40000 keV

Sigma 0.0 keV

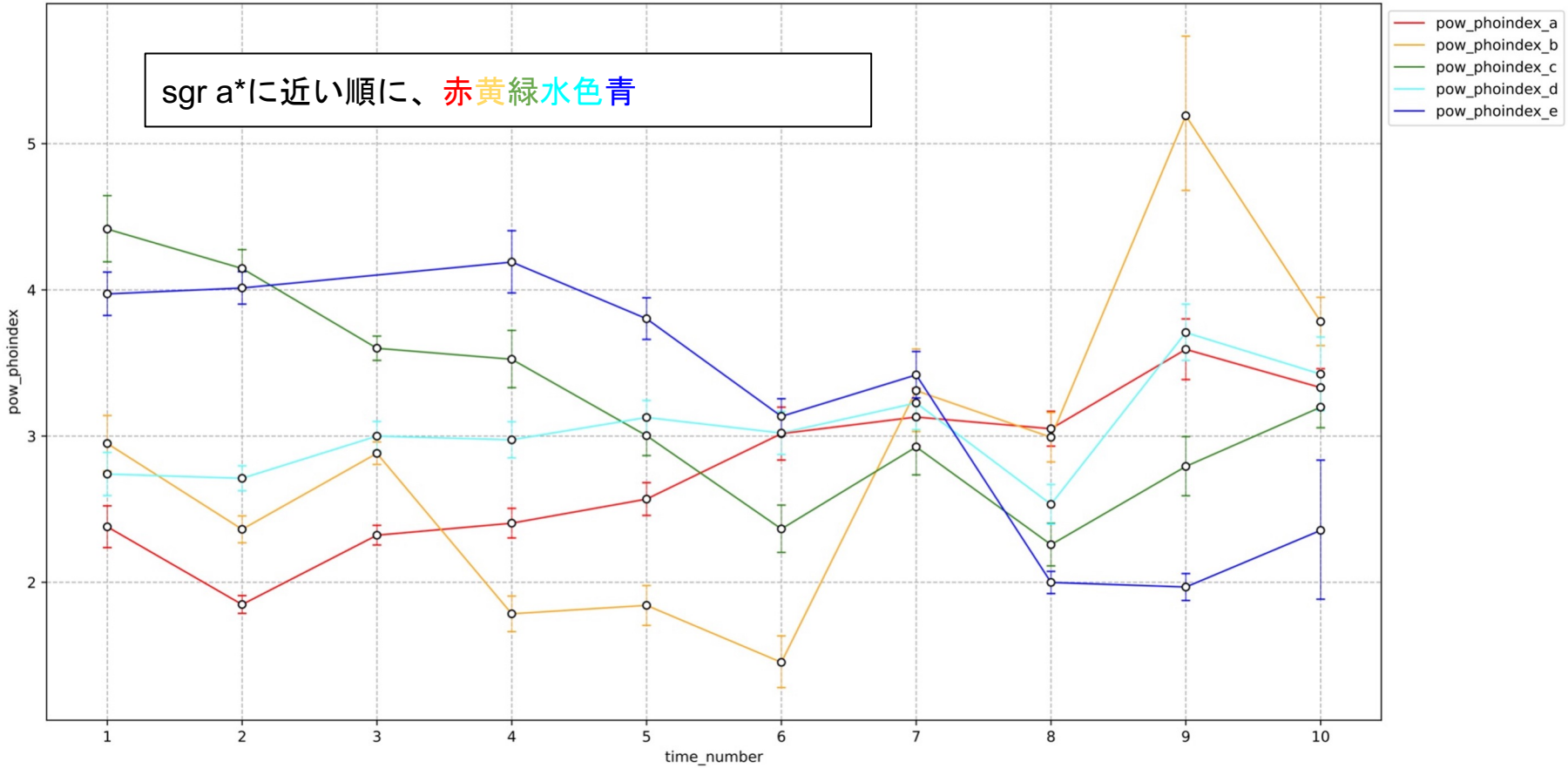
gau_ norm 1.22073E-05 +/- 1.53564E-06

gau_norm

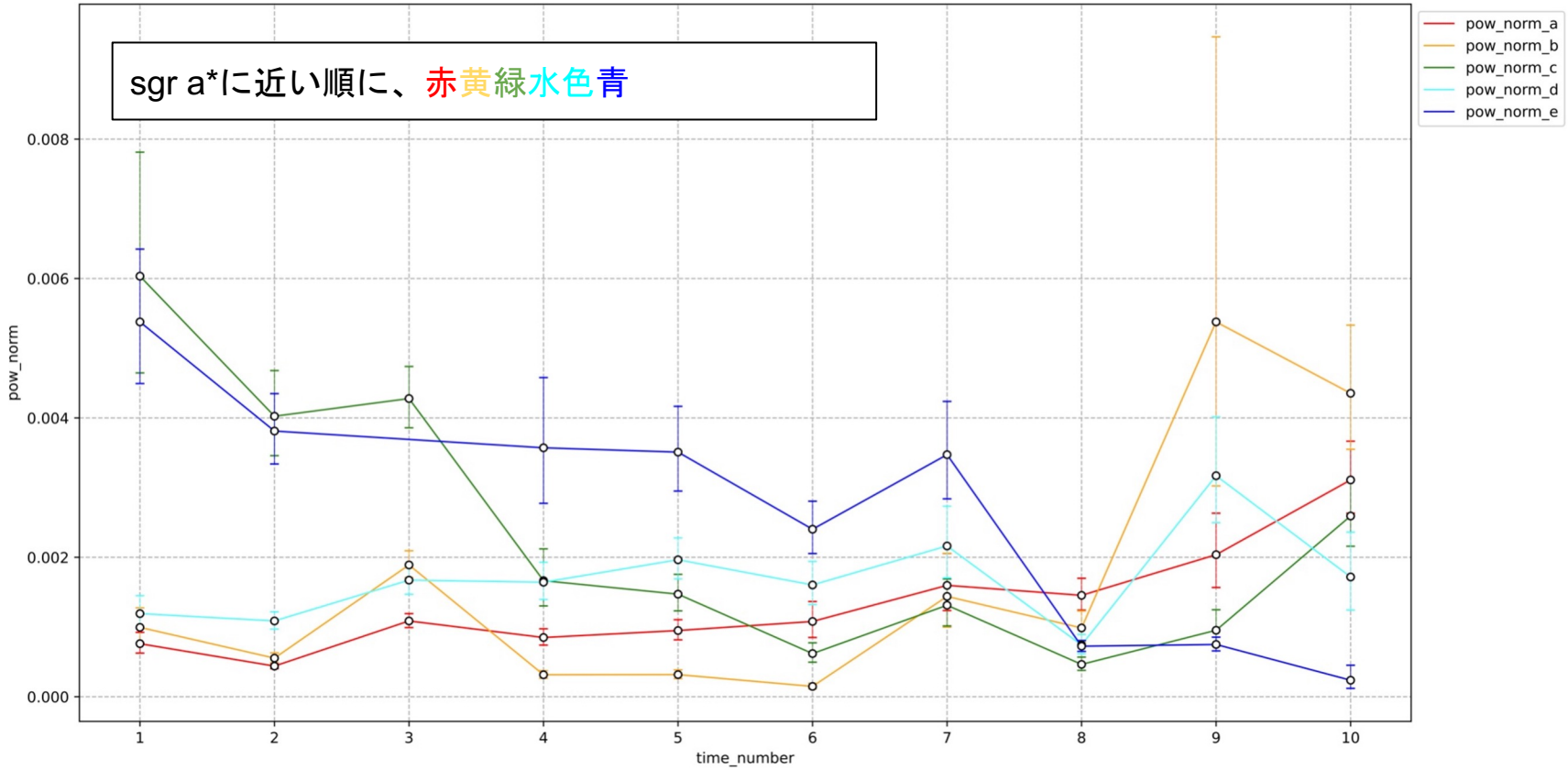


外側の領域に向かって、光度のピークが動いている

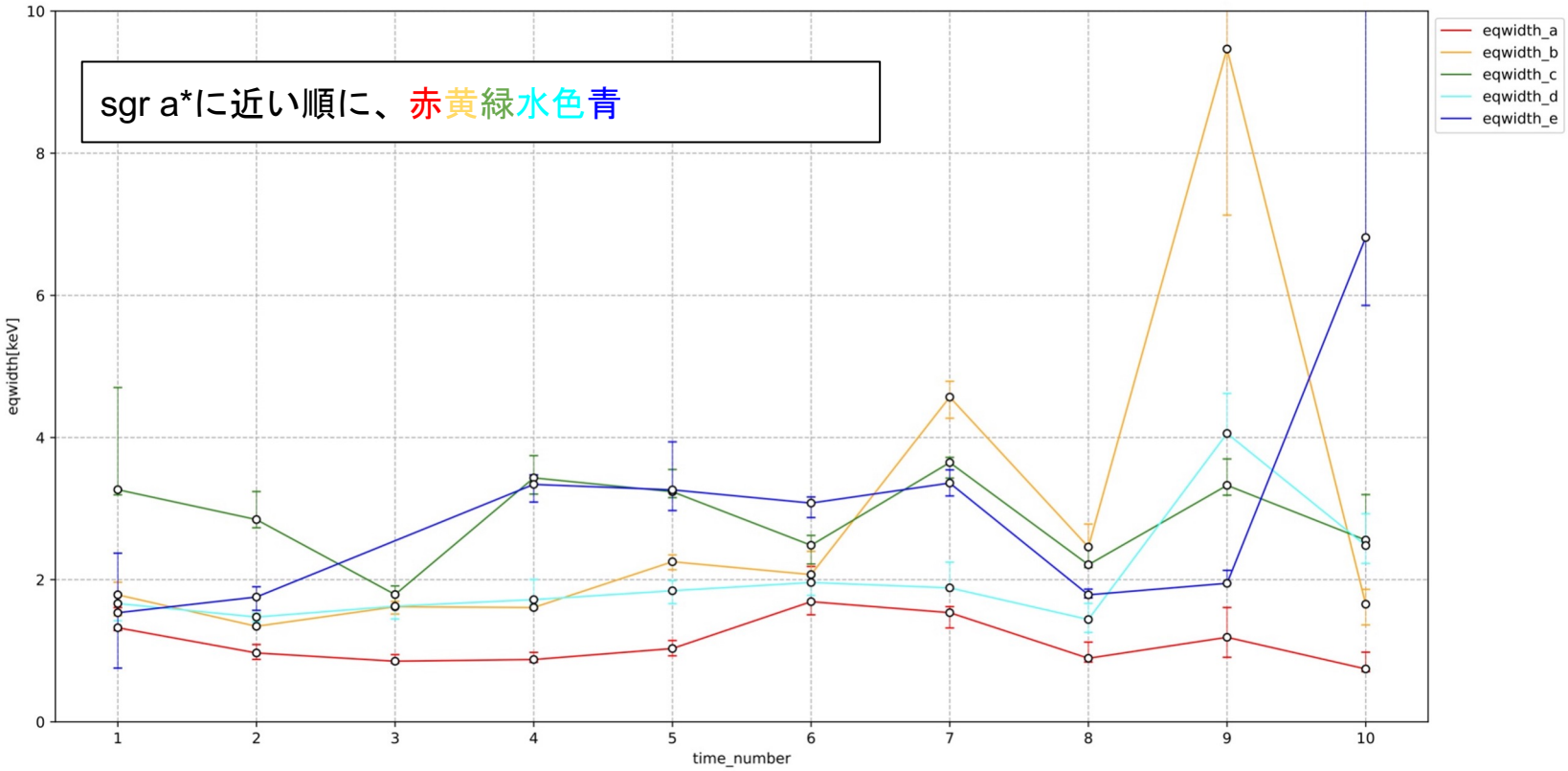
pow_phoindex



pow_norm


sgr a*に近い順に、赤黄緑水色青
pow_norm_a
pow_norm_b
pow_norm_c
pow_norm_d
pow_norm_e
pow_norm
0.000
0.002
0.004
0.006
0.008
time_number
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

eqwidth



領域ごとに有意なeqwの差 → eqwの角度依存

考察

分子雲の奥行きの違いを反映する、各領域のeqwの違いを得ることができた

より詳しく解析することで、3次元的構造を制限できる可能性

課題

pow-phoindexはあまり時間変動せず、pow-normはgau-normと同様の時間変動をすることが期待される

↓

フィッティングの改善が必要

各観測に対して、作成した領域が視野の範囲に収まらない場合がある

↓

領域の取り方を見直す

まとめ

- Chandra衛星のデータを用いて銀河中心付近のmapを作成した
- 特にFe-Kα線での時間変動を確認することができた
- 銀河中心付近のスペクトルから、分子雲の三次元構造を制限できる可能性が示唆された