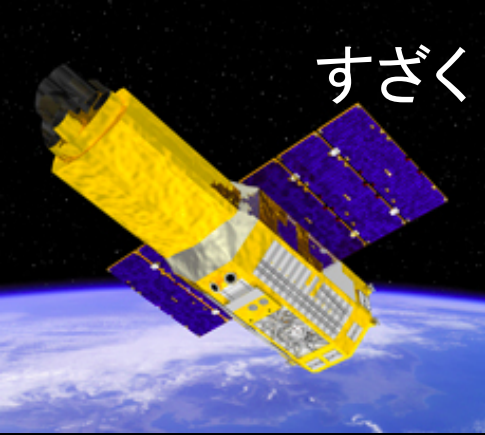


すざく



天の川銀河中心領域のX線観測

巨大ブラックホールの過去の大爆発の証拠を捉えた！

信川正順(京大白眉センター)

2013年7月30日

天文・天体物理若手夏の学校@宮城蔵王ロイヤルホテル

今日のお話

- 大学院時代の育志賞受賞
- 大学院時代の研究成果

銀河中心領域のX線観測：

銀河中心ブラックホールの活動史

成果1 鉄以外の中性元素からの輝線の発見

成果2 X線放射の時間変動

成果3 分子雲の3次元マップ

- まとめ

大学院生時代の育志賞受賞

- ・日本学術振興会が、天皇陛下から若手研究者を支援・奨励するための御下賜金 (ごかしきん) を賜った
- ・御下賜金を資として日本学術振興会が「日本学術振興会 育志賞」創設
- ・対象は、「**優秀な大学院博士後期課程の学生**」

D3のとき、第1回育志賞受賞 (2011年)
授賞式には天皇皇后両陛下がご臨席

授賞式後の茶話会にて →



大学院時代に行った研究

すざく衛星を用いた銀河中心領域の観測

銀河中心ブラックホールの過去の活動史の解明

銀河中心領域とは

すざくを用いた観測結果

成果1 鉄以外の中性元素からの輝線の発見

成果2 X線放射の時間変動

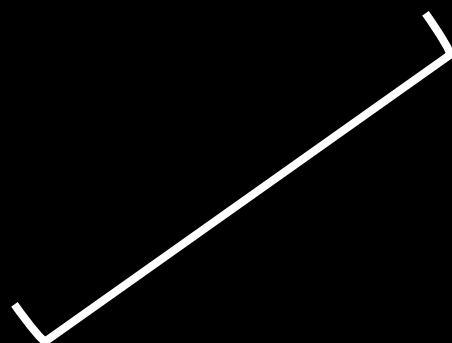
成果3 分子雲の3次元マップ

私たちが住む銀河系

- 渦巻き状の円盤構造
- 太陽系は端っこに位置

銀河系中心領域

太陽系



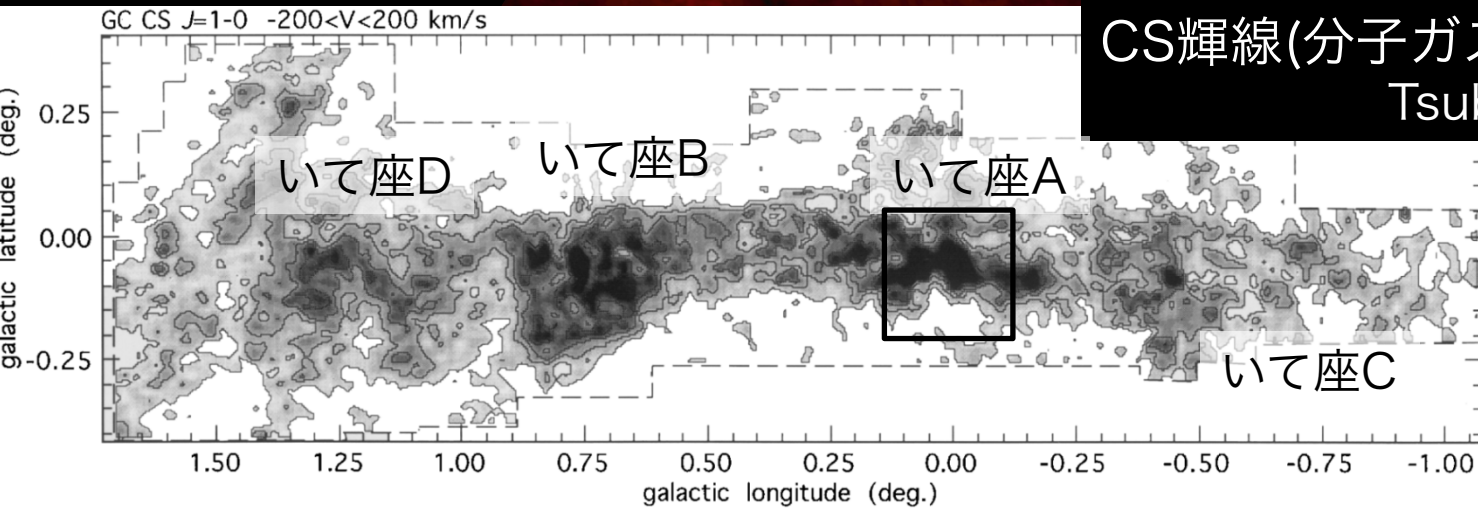
~3万光年

- 太陽の400万倍の質量を持つ
超巨大ブラックホール
- 銀河系中心領域は天体現象の宝庫

銀河中心領域

総質量 $\sim 10^8 M_{\odot}$ の分子ガス雲群

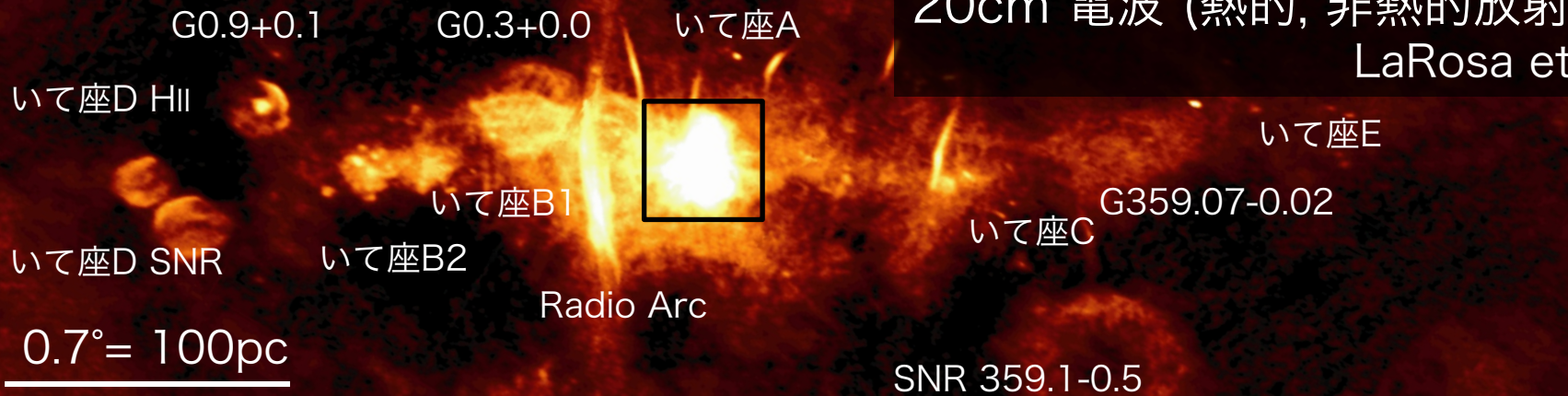
超新星残骸や電離(HII)領域、フィラメント構造(局所的に強磁場, 宇宙線電子)



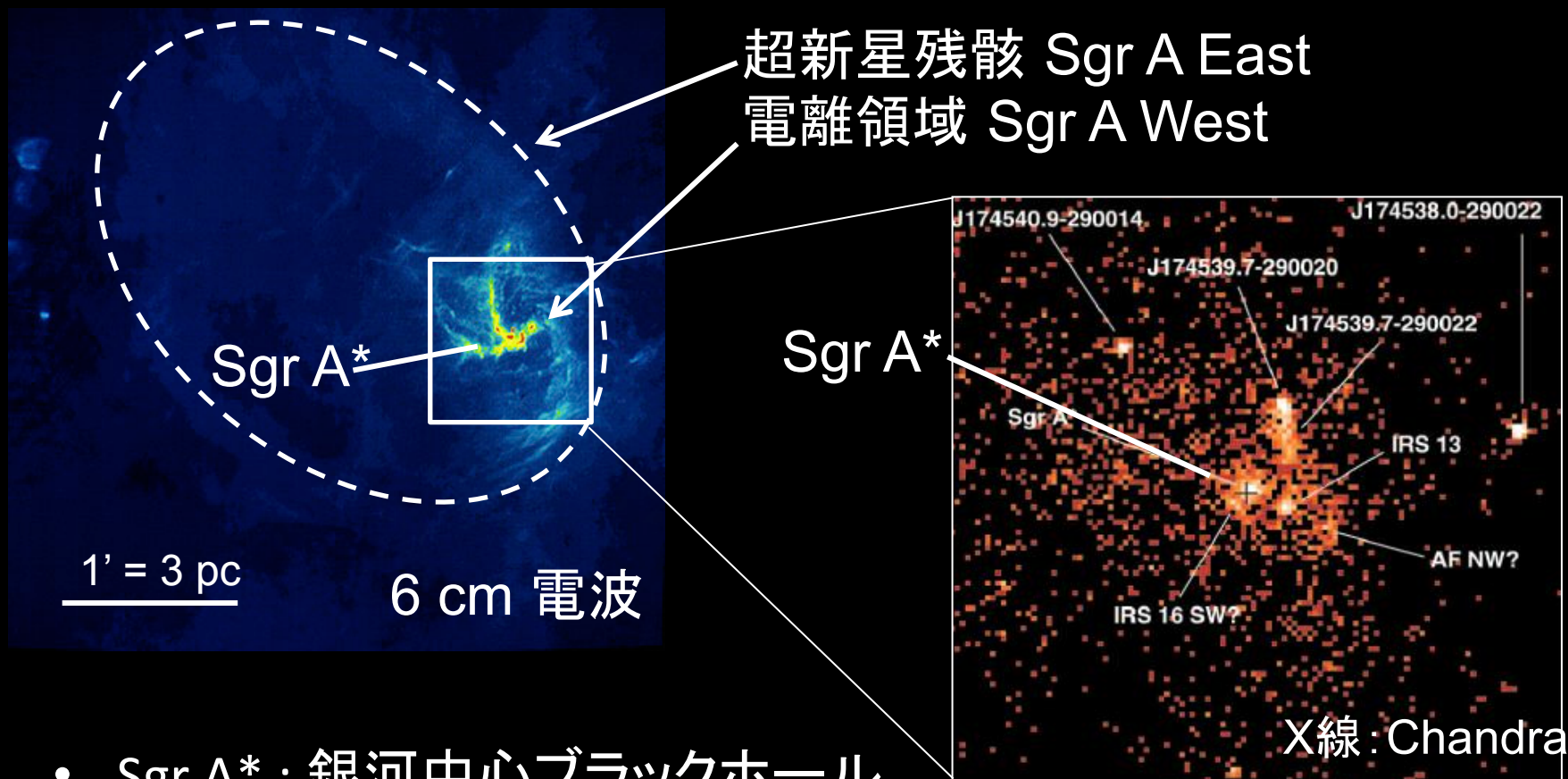
CS輝線(分子ガス)の分布

Tsuboi et al. 1999

Sgr = Sagittarius
= いて座



銀河中心ブラックホール Sgr A*



- Sgr A* : 銀河中心ブラックホール
コンパクト電波源
質量 $4 \times 10^6 M_{\odot}$ (Ghez+08) ← 星の運動

$L_x \sim 10^{33-34} \text{ erg/s}$ (低光度)

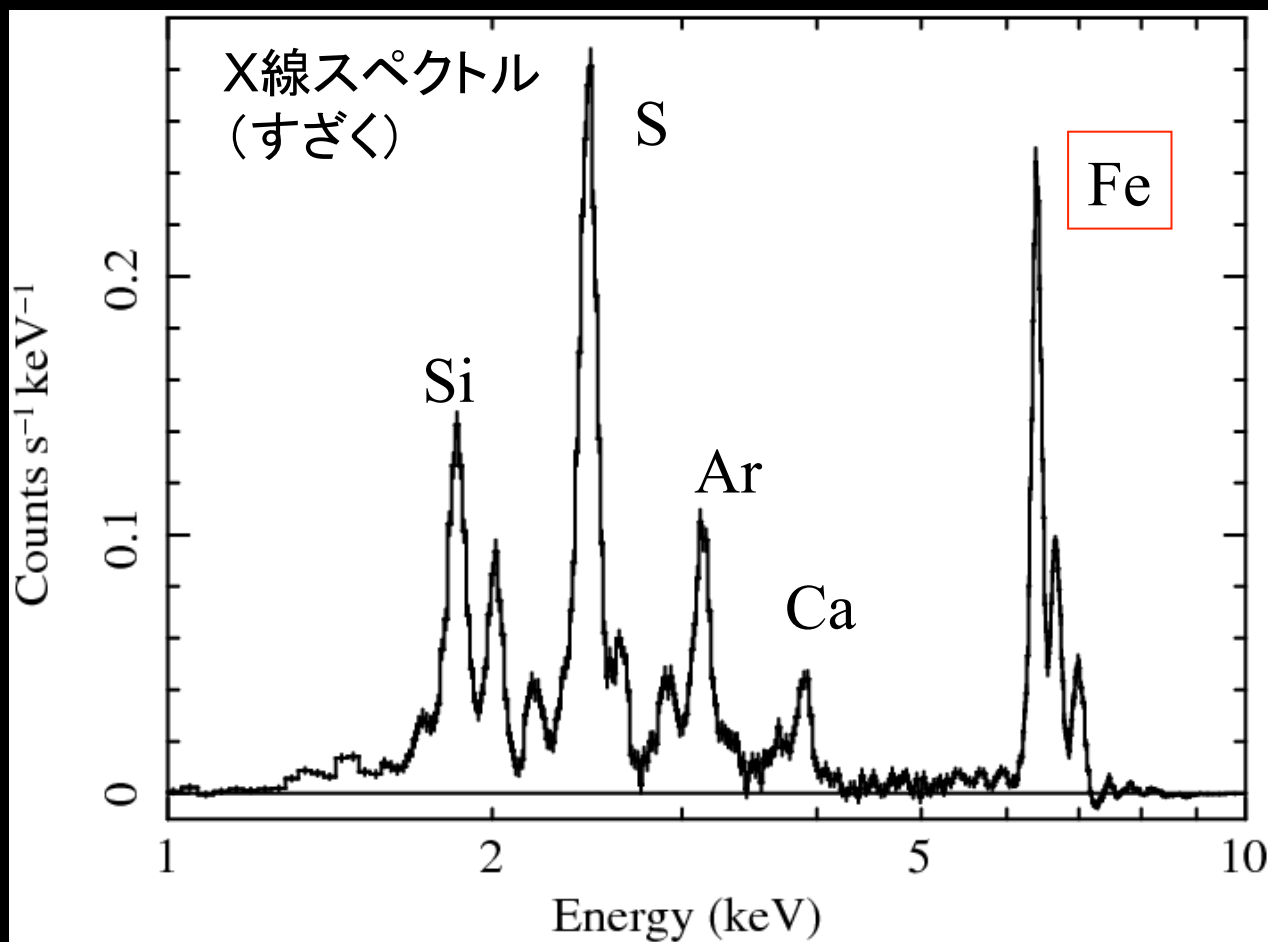
活動銀河核 $L \sim 10^{40-44} \text{ erg/s}$

なぜSgr A*の活動性が低いのか分かっていない

銀河中心領域のX線スペクトル

強いX線放射の存在 (Koyama et al. 1986)

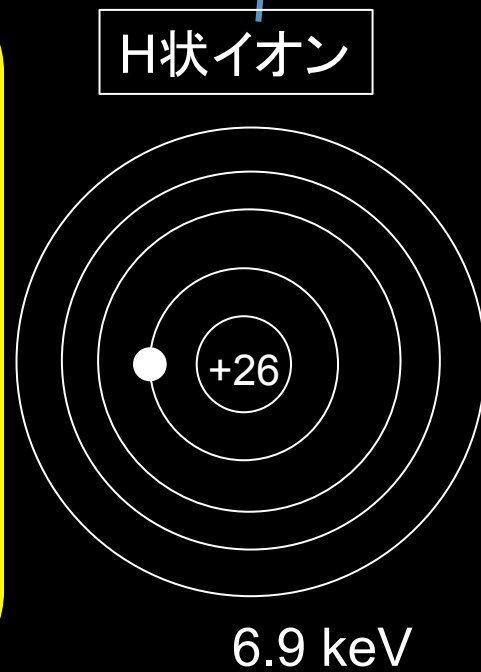
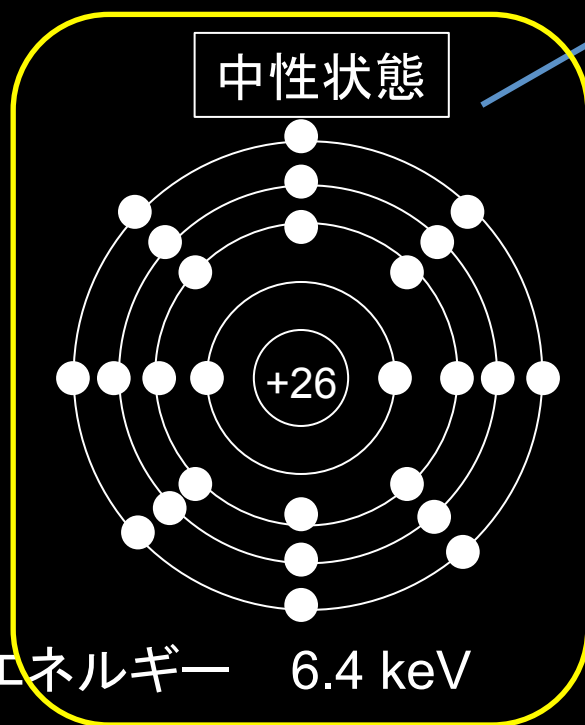
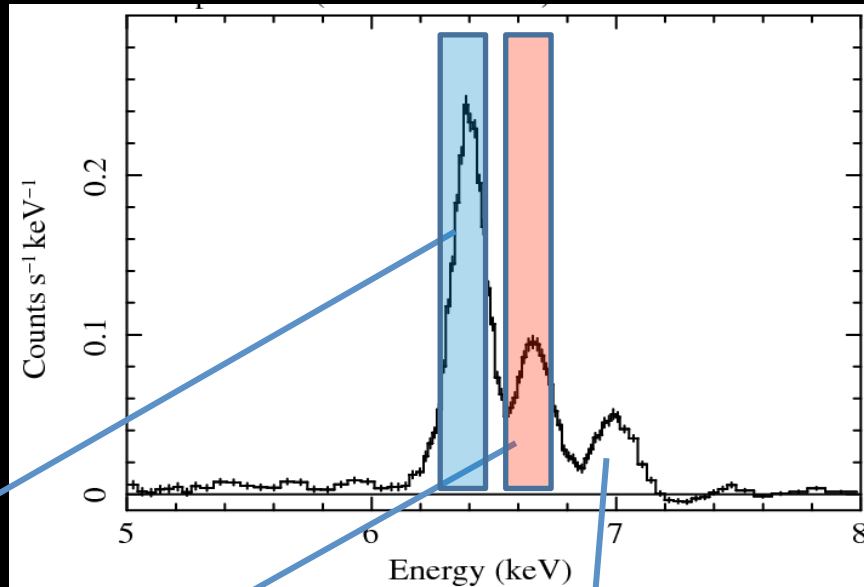
→ 高エネルギー現象の探査



- 重元素の特性X線
- 多数の成分の存在
異なる電離状態
- 特に鉄に注目

3つの鉄輝線

- 特性X線(輝線)のエネルギーは電離状態を示す指標
- 高温ほど、電子がなくなる(電離する): エネルギー準位が変化
- L → K殻: 蛍光放射 = $K\alpha$ 輝線



温度 1万度以下 1000—10000万度

銀河中心のX線イメージ(すざく衛星)

中性鉄(6.4 keV) = 100 K

低温物質からのX線

Sgr A*



電離鉄(1000万度以上)

高温プラズマが広がっている

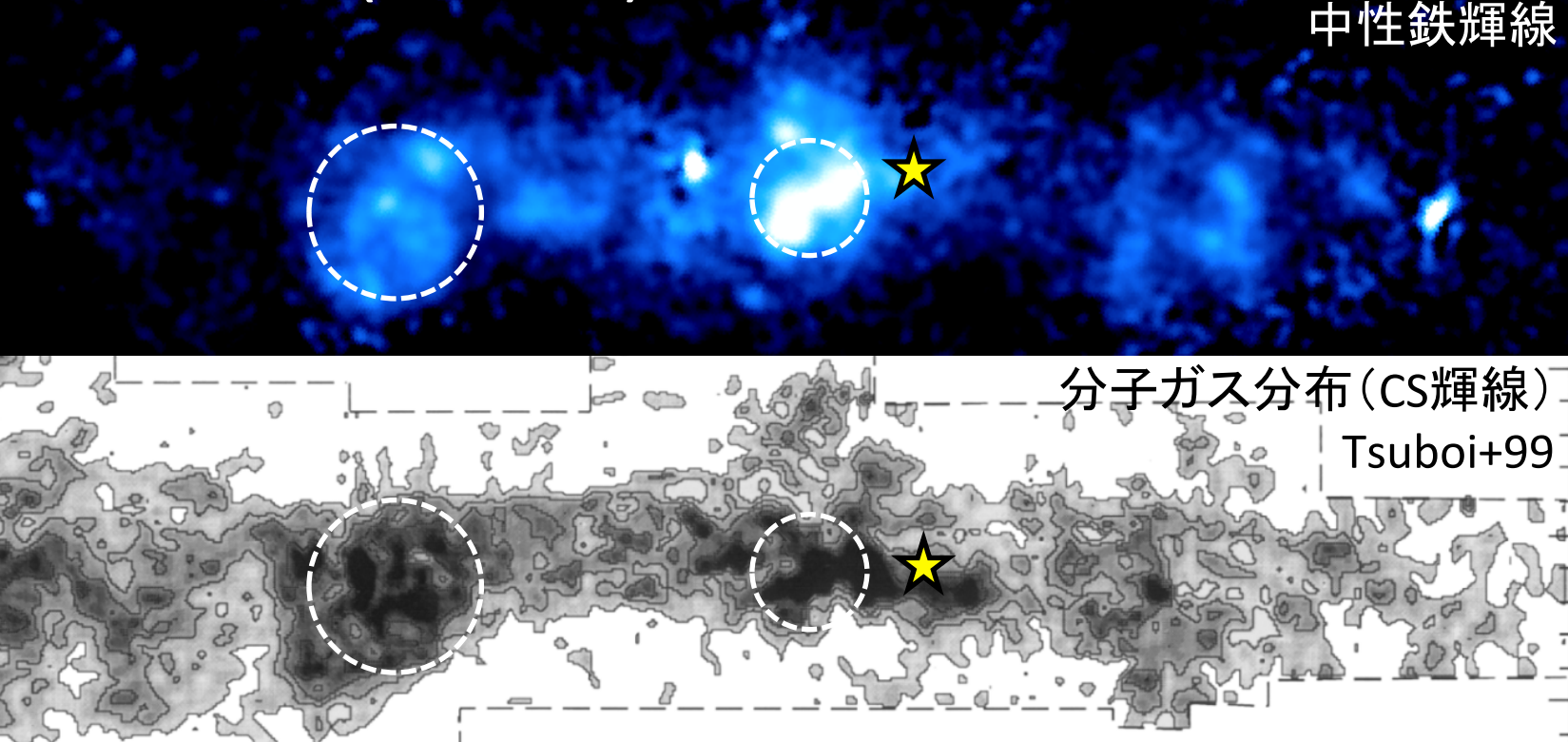


300光年



中性鉄(6.4 keV)輝線放射


中性鉄輝線



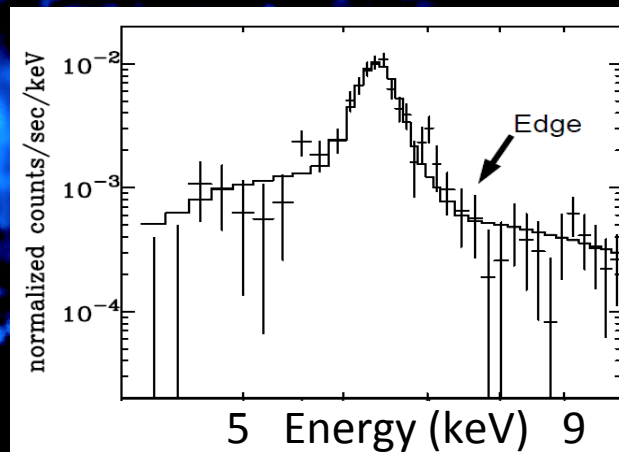
- 巨大分子雲 ($T \sim 10 - 100$ K) との相関
- 外部粒子 ($E > 7.1$ keV, Fe-K吸収端)による鉄原子の電離
→ 蛍光放射(中性鉄輝線)

背後に高エネルギー現象が存在

中性鉄輝線の起源

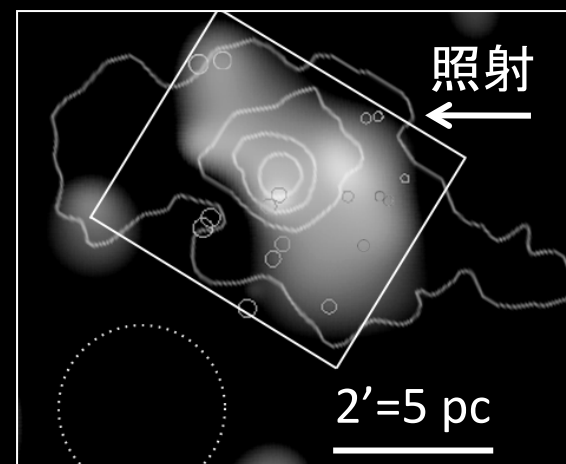
Sgr B2 

X線スペクトル



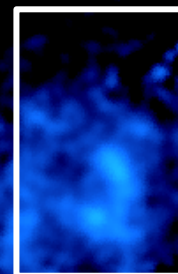
X線による光電離 (Koyama+96; Murakami+00)

- スペクトル(強い鉄輝線/鉄の吸収端)
 - ピークのずれ(銀河中心方向から照射)
 - 時間変動 (e.g. Inui+09)
- Sgr A*の過去の活動 (現在の100万倍)



X線強度 +
分子輝線 (コントア)
(Murakami+00)

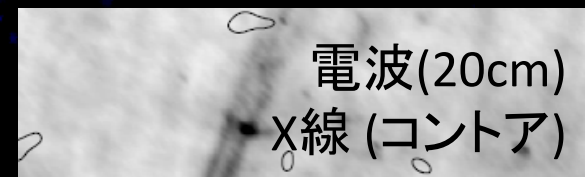
中性鉄輝線の起源



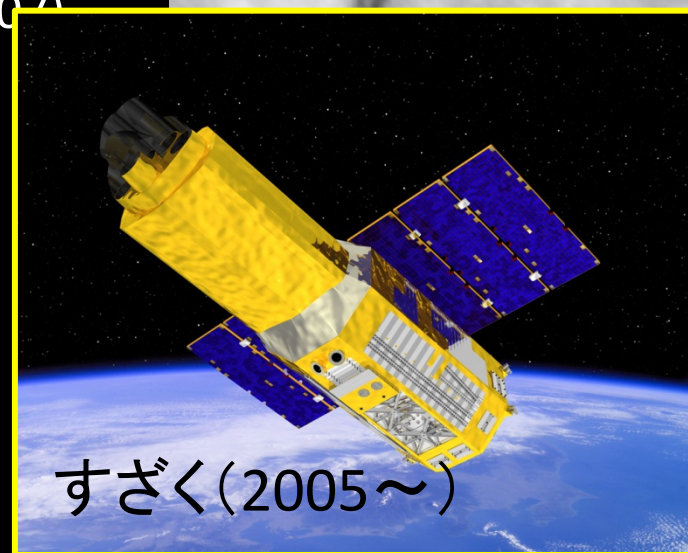
Sgr C

低エネルギー宇宙線による衝突電離

- 電子 ($E=10-100$ keV) (Valinia+00; Yusef-Zadeh+07)
 - 非熱的電波フィラメントとの相関 (GeV電子によるSynchrotron)
 - 分子雲加熱 / TeVガンマ線放射
- 陽子 ($E\sim 10$ MeV) (e.g. Dogiel+09)
 - Sgr A*が供給？



電波(20cm)
X線 (コントラ)



すざく(2005~)

- 銀河中心のX線放射の起源解明
- Sgr A*の過去の活動史

10 pc

Yusef-Zadeh+07

銀河中心領域

すざくを用いた観測結果

成果1 鉄以外の中性元素からの輝線の発見

成果2 X線放射の時間変動

成果3 分子雲の3次元マップ

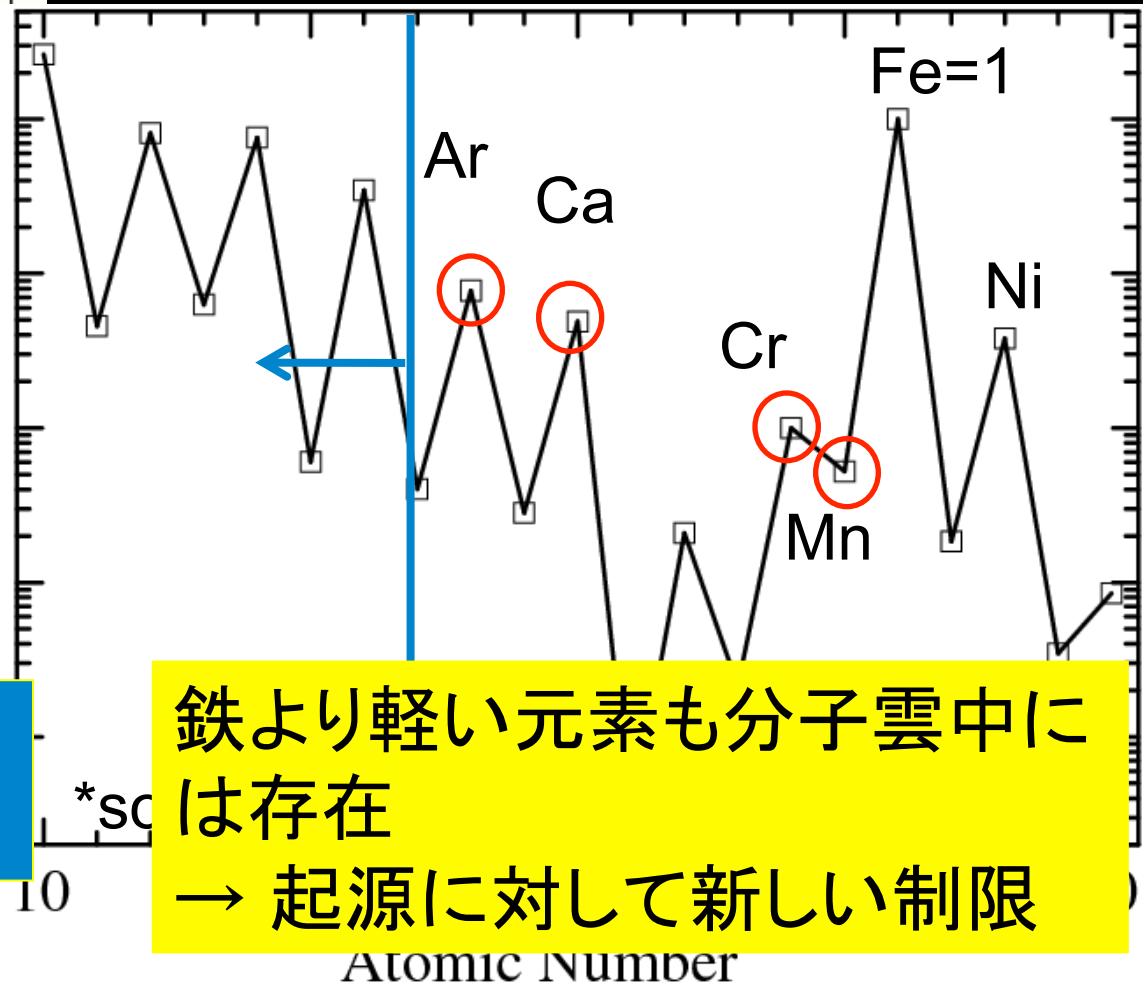
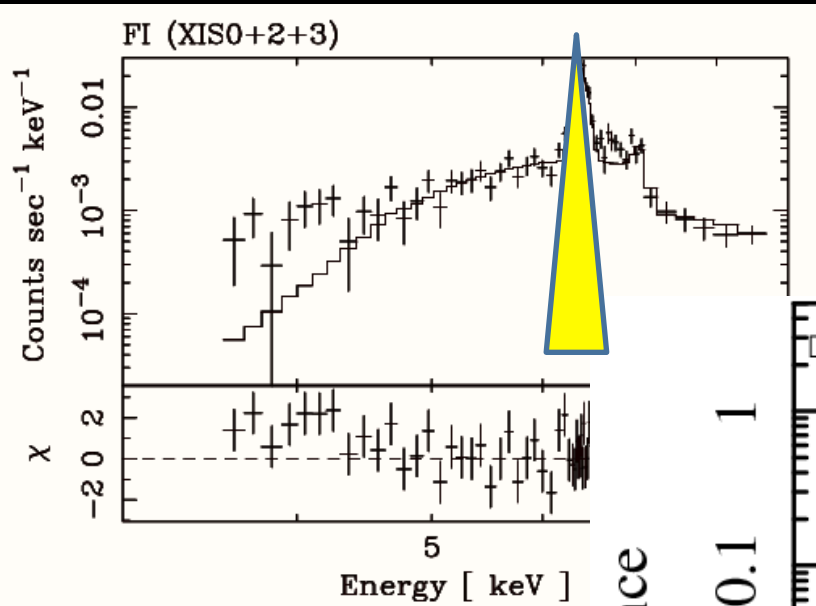
X線放射の起源は？

成果1: 多種元素の中性輝線

(信川+2010, PASJ)

典型的なX線スペクトル

鉄輝線 + 吸収を受けた連続成分



低エネルギーの輝線は星間物質に吸収される

鉄より軽い元素も分子雲中には存在
→ 起源に対して新しい制限

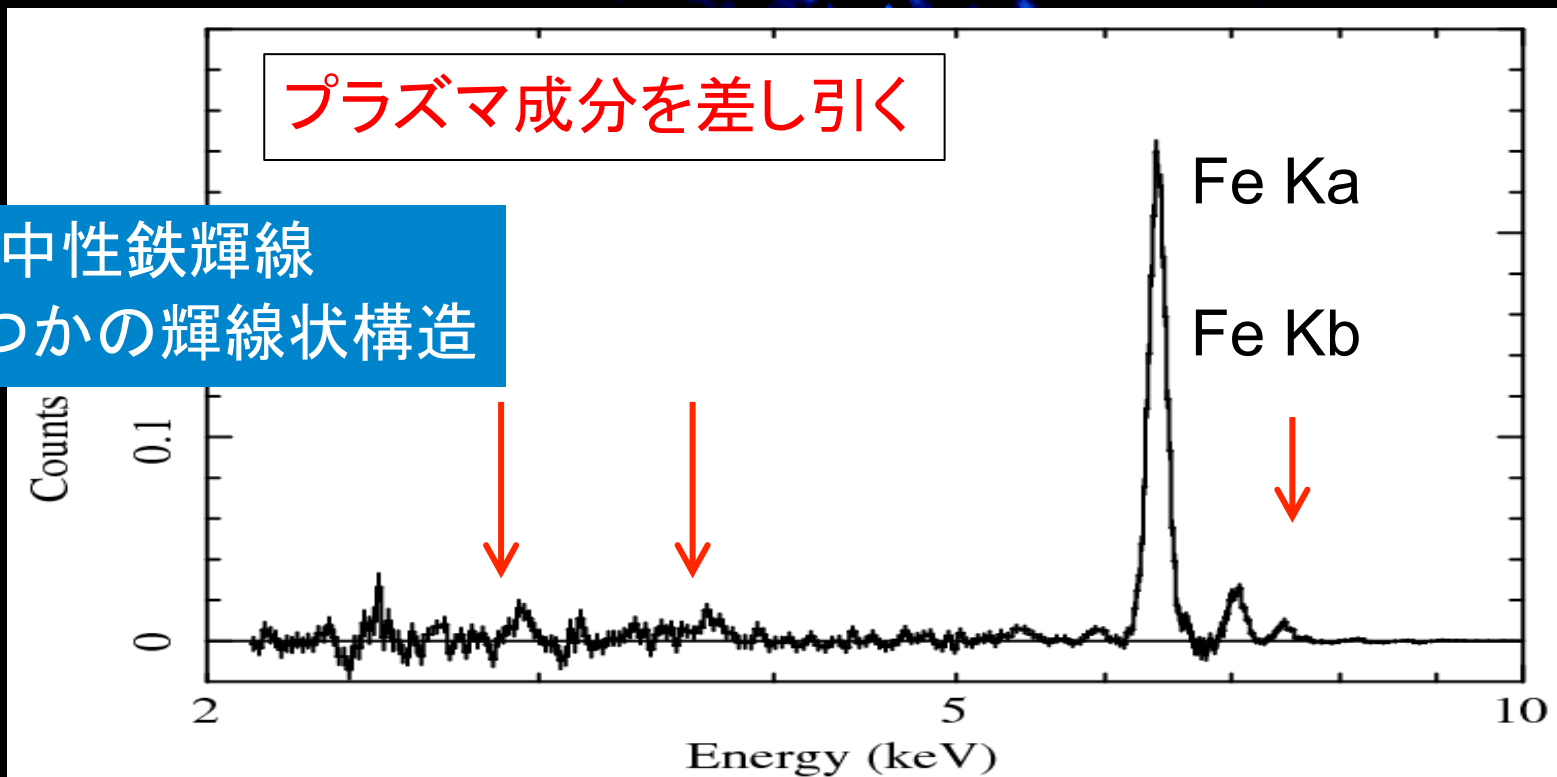
ターゲットは最も明るい分子雲

300光年



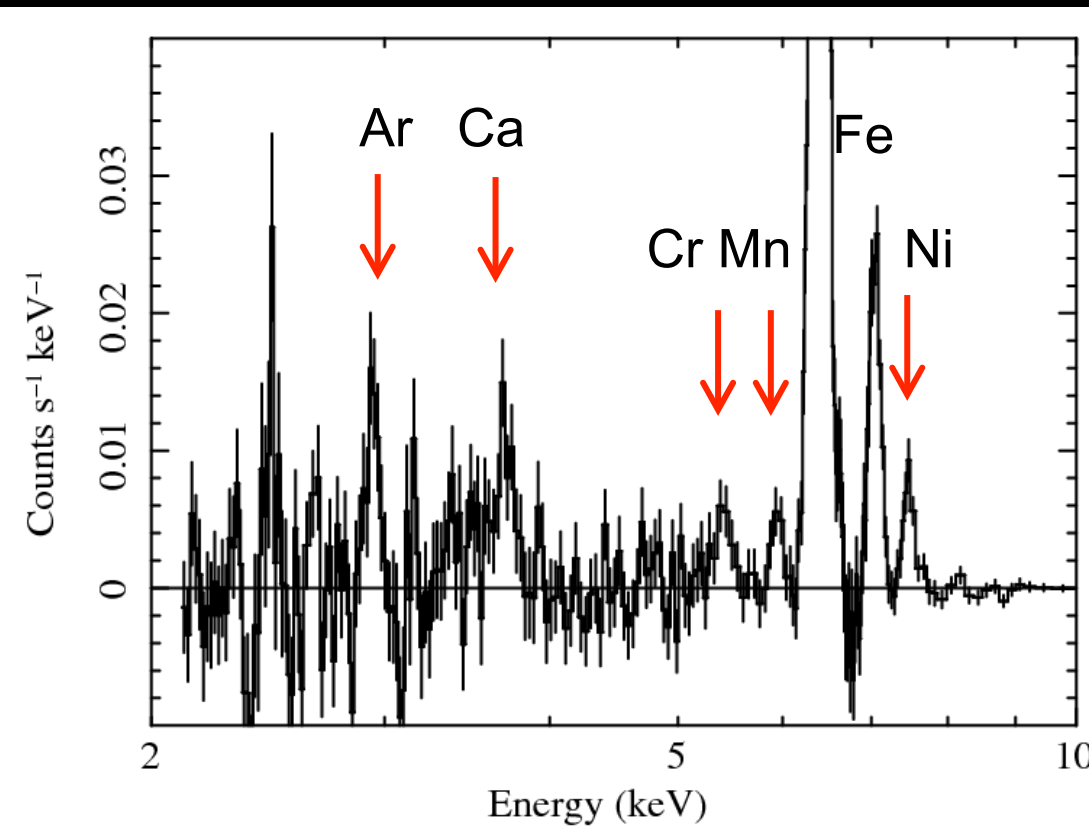
プラズマ成分を差し引く

- 強い中性鉄輝線
- いくつかの輝線状構造



Other components were subtracted

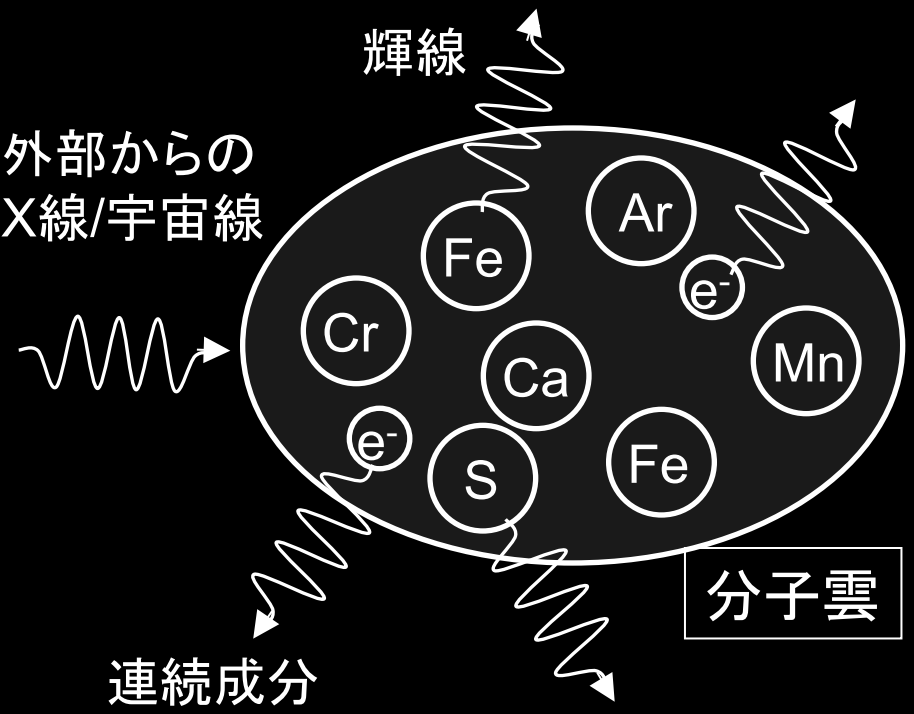
鉄以外の重元素からの輝線



	理論値 (keV)	測定値 (keV)
Ar	2.96	2.94±0.02
Ca	3.69	3.69±0.02
Cr	5.41	5.41±0.04
Mn	5.90	5.94±0.03
Fe	6.40	6.40±0.01
Ni	7.48	7.47±0.02

→ 鉄以外の中性状態の輝線の発見
(太陽系外の天体から初検出)

中性輝線の起源



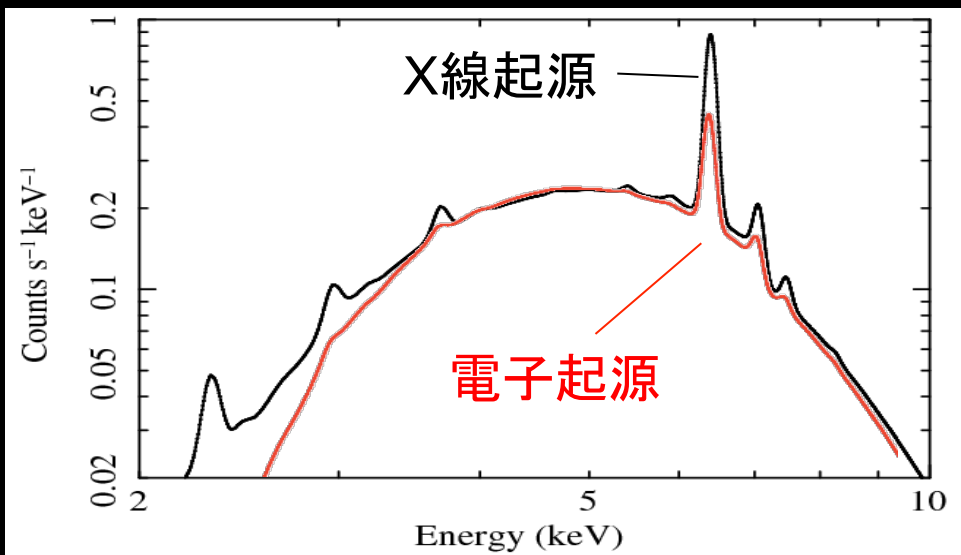
中性輝線:

外部粒子が原子を電離することによる

連続成分:

- X線・・・トムソン散乱
- 電子・・・制動放射
- 陽子・・・逆制動放射

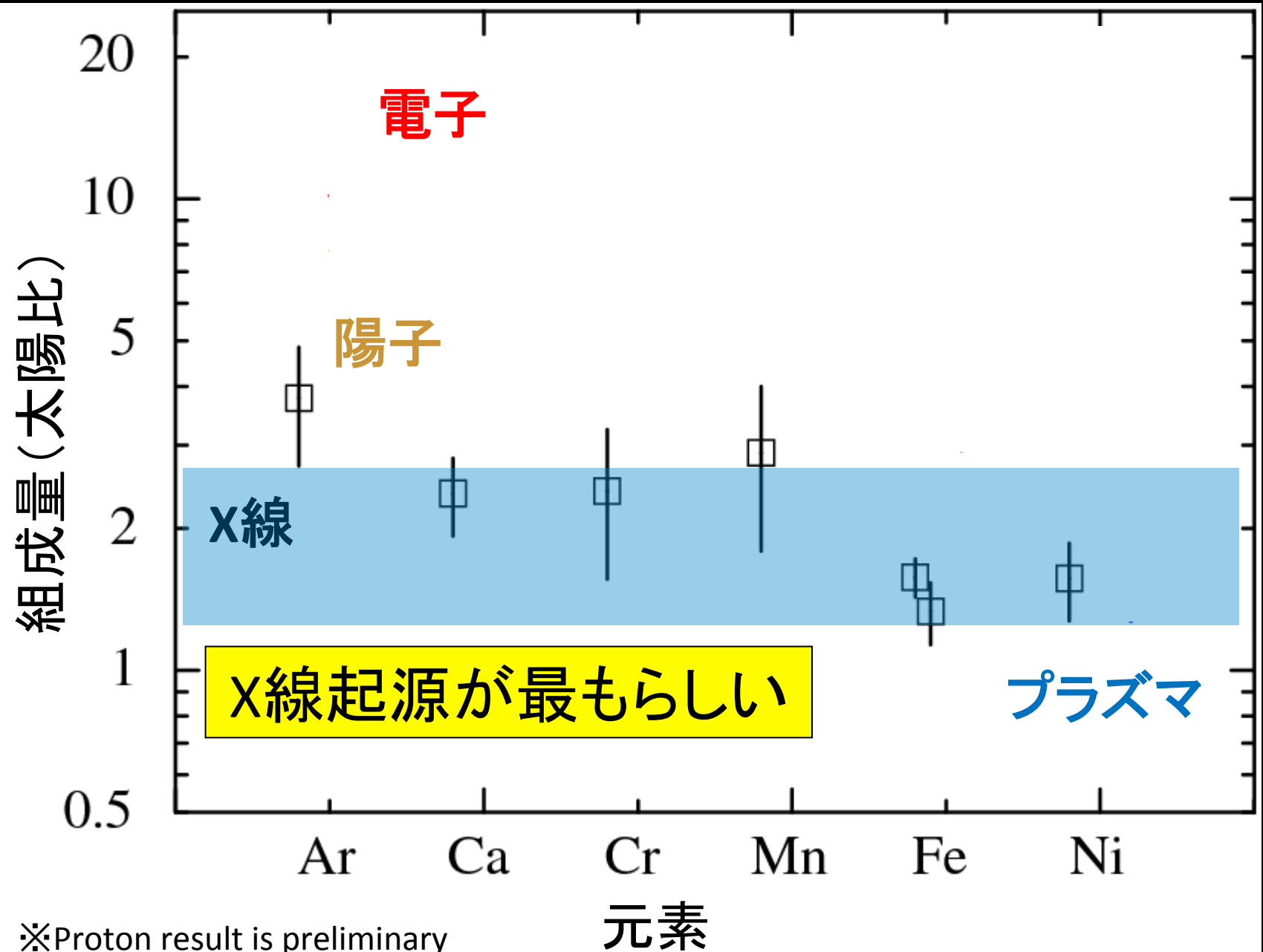
各モデルではX線放射過程が異なる



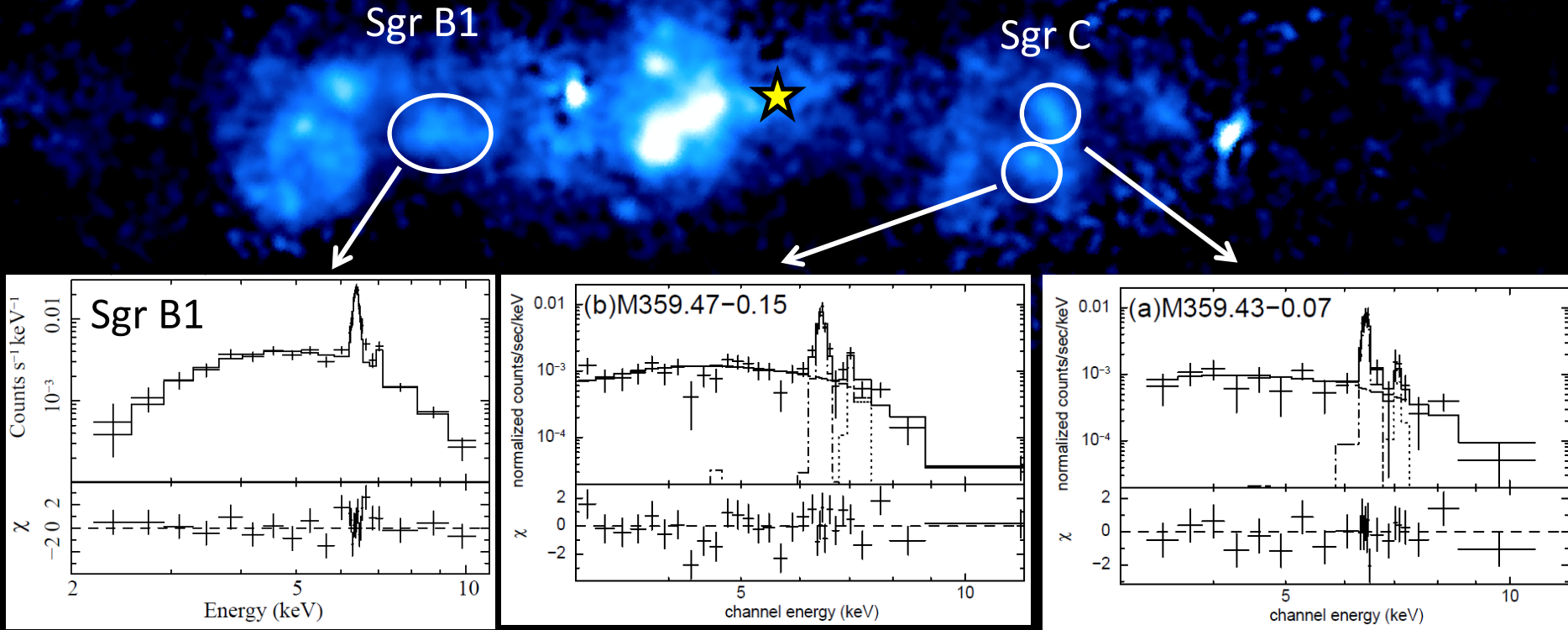
異なるX線スペクトル

各モデルで元素量の見積もりに違い

各モデルでの元素量の見積もり



他の分子雲 (Sgr B1, Sgr C領域)



いずれも

- ・硬い連続成分: $\Gamma=1.6-1.8$
- ・強い鉄輝線:

(太陽組成)

- X線起源 : ~ 1 solar
- 電子起源 : 3-5 solar
- 陽子起源 : 2-3 solar

外部からのX線照射

銀河中心領域

すざくを用いた観測結果

成果1 鉄以外の中性元素からの輝線の発見

成果2 X線放射の時間変動

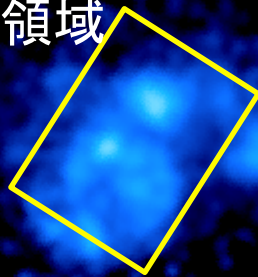
成果3 分子雲の3次元マップ

分子雲はどこからどのように
照らされているのか？

成果2 X線放射の時間変動

(信川+11, ApJL)

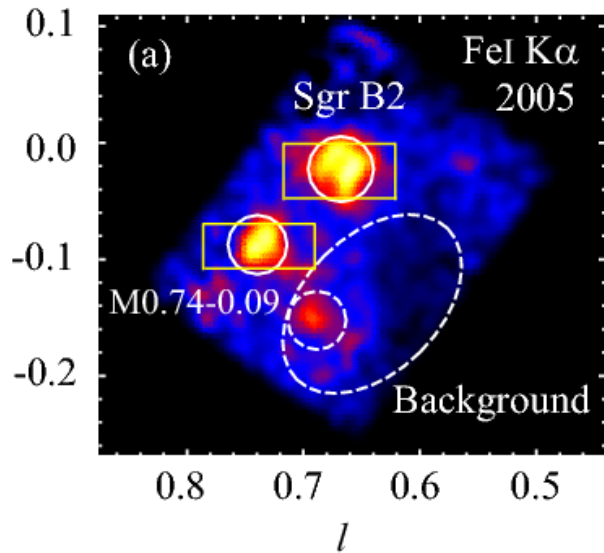
Sgr B2領域



300 光年

- 時間変動
 - 照射天体への有力な制限
- Sgr B2領域から時間変化の兆候
 - 複数の衛星間の系統誤差
- 2005年、2009年に同一衛星・同じ位置・ロール角で長時間観測

X線イメージ



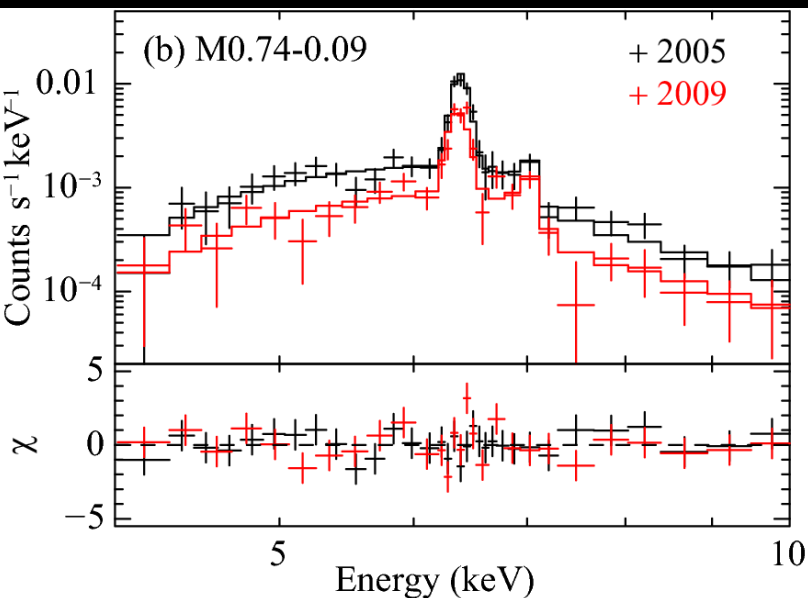
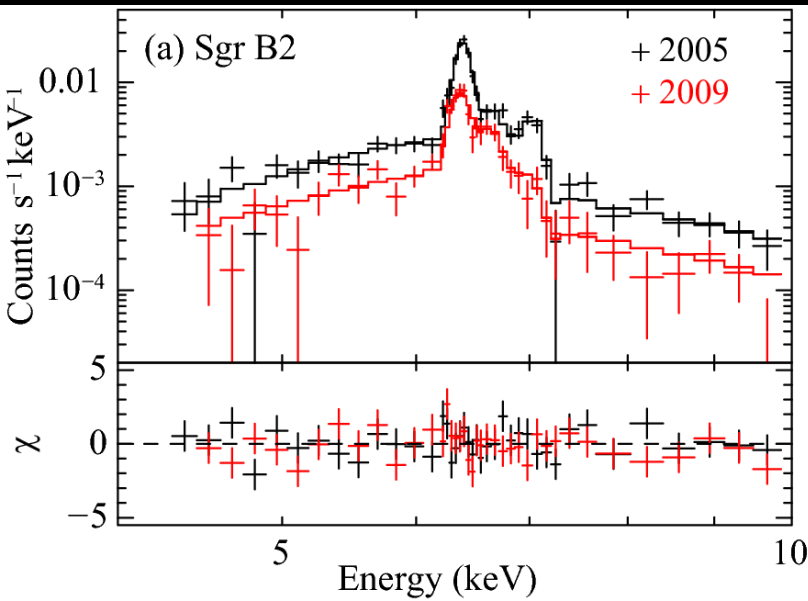
中性鉄輝線

- ・ Sgr B2とM0.74が暗くなっている
- ・ 周囲は変化なし

硬X線 (8—10 keV)

- ・ Sgr B2とM0.74が暗くなっている
- ・ 周囲は変化なし

スペクトルの変化



- スペクトル 輝線・連続成分が減少
- モデル
分子雲吸収×(鉄輝線+連続成分)

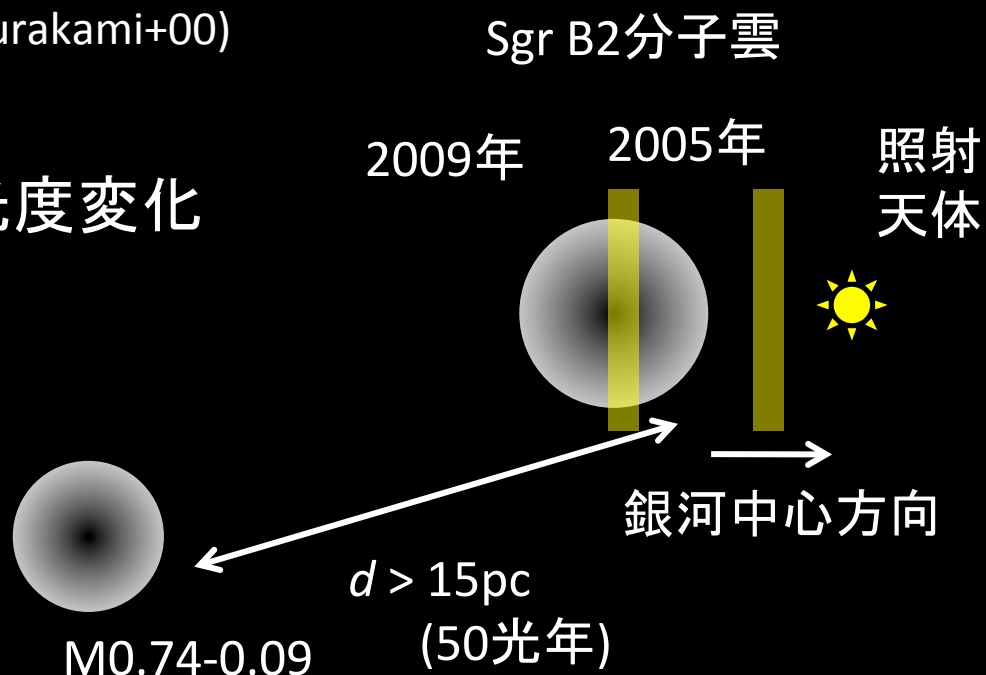
	Fluxの変化 (6.4keV)	Fluxの変化 (連続成分)
Sgr B2	~0.4倍	~0.5倍
M0.74	~0.5倍	~0.5倍

相関した変化

- 早い時間変動 4年間に半減
⇒ X線照射起源

照射天体

- 照射天体は銀河中心方向(Murakami+00)
短時間の照射 ($\Delta t < 10$ 年)
X線が分子雲中を移動 \rightarrow 光度変化
(密度 \propto X線強度)



- 2分子雲の同期した時間変動
 \rightarrow 同じ照射天体
照射天体までの距離 > 15 pc (50光年)

照射天体

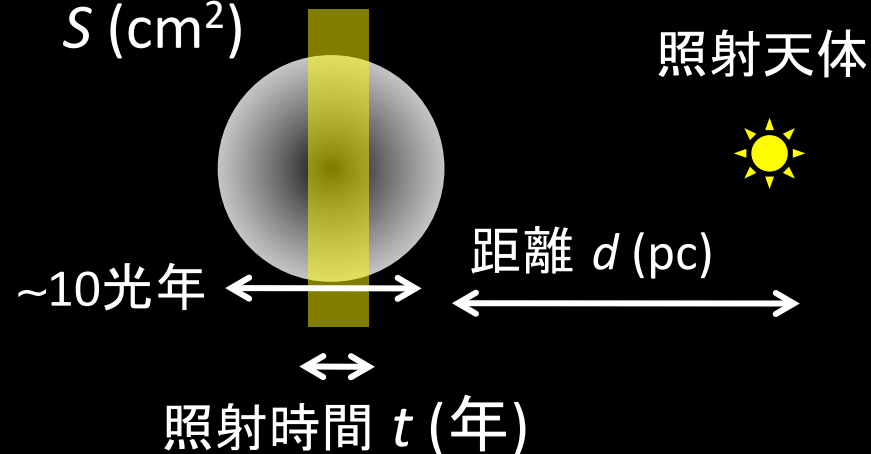
- 必要光度 X線強度 密度 照射時間 距離

$$L_{\text{req}} = 4 \times 10^{39} \left(\frac{I_{6.4\text{keV}}}{10^{-4}} \right) \left(\frac{n}{10^5} \right)^{-1} \left(\frac{\Delta t}{10\text{yr}} \right)^{-1} \left(\frac{d}{100\text{pc}} \right)^2 \text{ erg/s}$$

分子雲密度 $n = N_{\text{H}} / \sqrt{S}$

分子雲の面積
 $S (\text{cm}^2)$

スペクトルの吸収量 (cm^{-2})



$\Delta t < 10$ 年, $d > 15$ pc

- $L_x > 10^{38} \text{ erg s}^{-1} \sim L_{\text{Edd}}$ (中性子星)
定常的にこれほど明るい天体(連星系)は発見されていない
明るいtransientは短すぎる ($t < 0.1$ 年)
- 唯一の候補: 巨大ブラックホール Sgr A* ($M \sim 4 \times 10^6 M_{\odot}$)
 $L_x > 4 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ (現在見えるよりも300年前)

銀河中心領域

すざくを用いた観測結果

成果1 鉄以外の中性元素からの輝線の発見

成果2 X線放射の時間変動

成果3 分子雲の3次元マップ

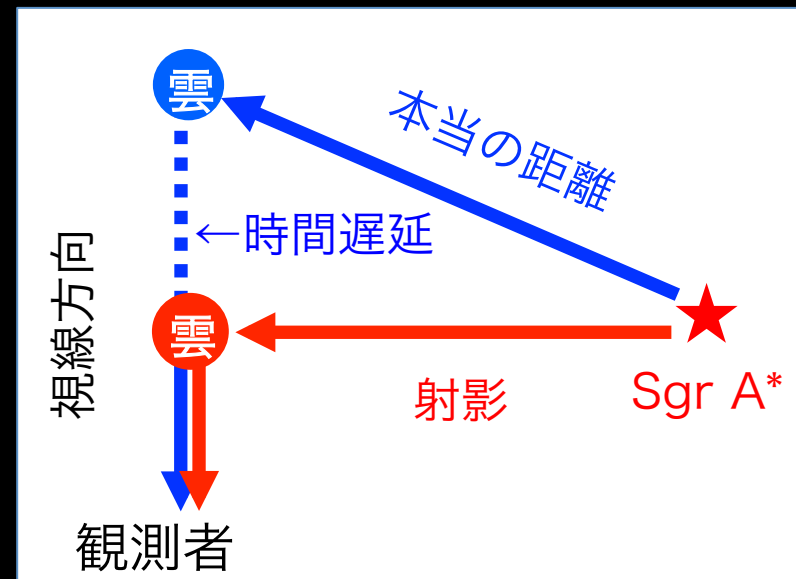
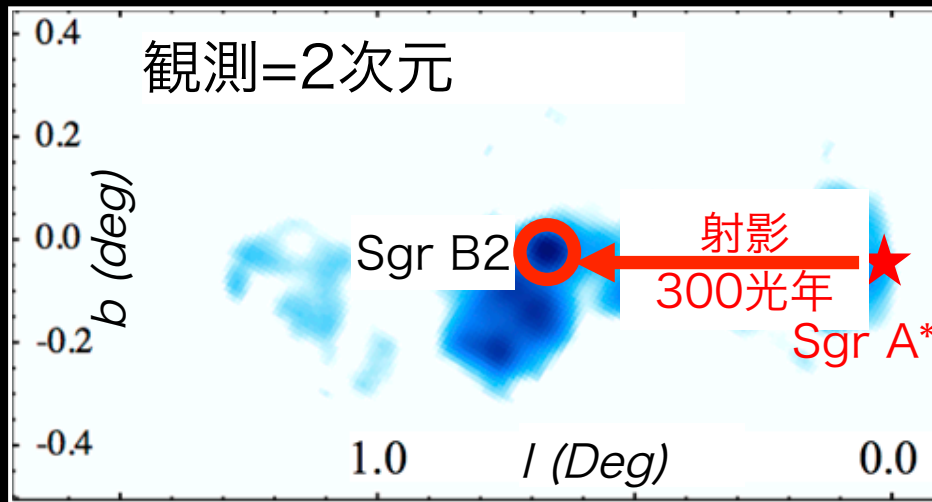
Sgr A*の過去の活動の歴史？

Sgr A*の活動史

過去の活動史の制限は
一致していない

	Nobukawa +11	Ponti +10	Cap +12
時期	~300 年前	~400 & 100年前	~100年前
光度 erg/s	~ 10^{39}	~ 10^{39}	~ 10^{38}
回数	1回	2回?	1回?

重要な情報 (3次元位置関係)



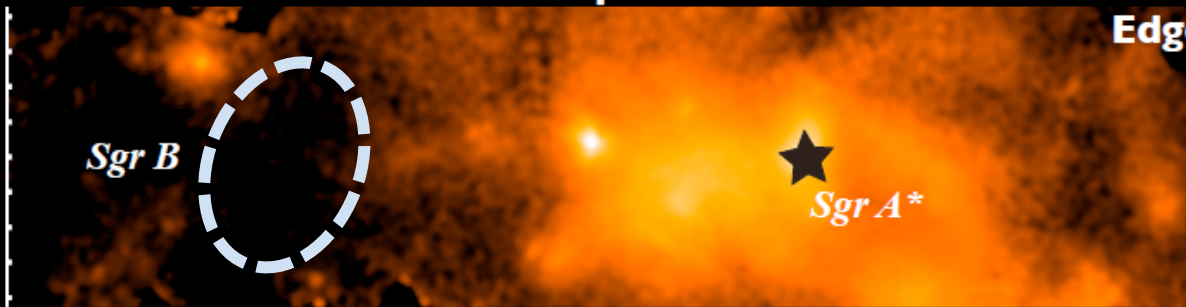
3次元位置関係が Sgr A* の活動史解明の鍵

成果3 X線反射分子雲の3次元位置測定

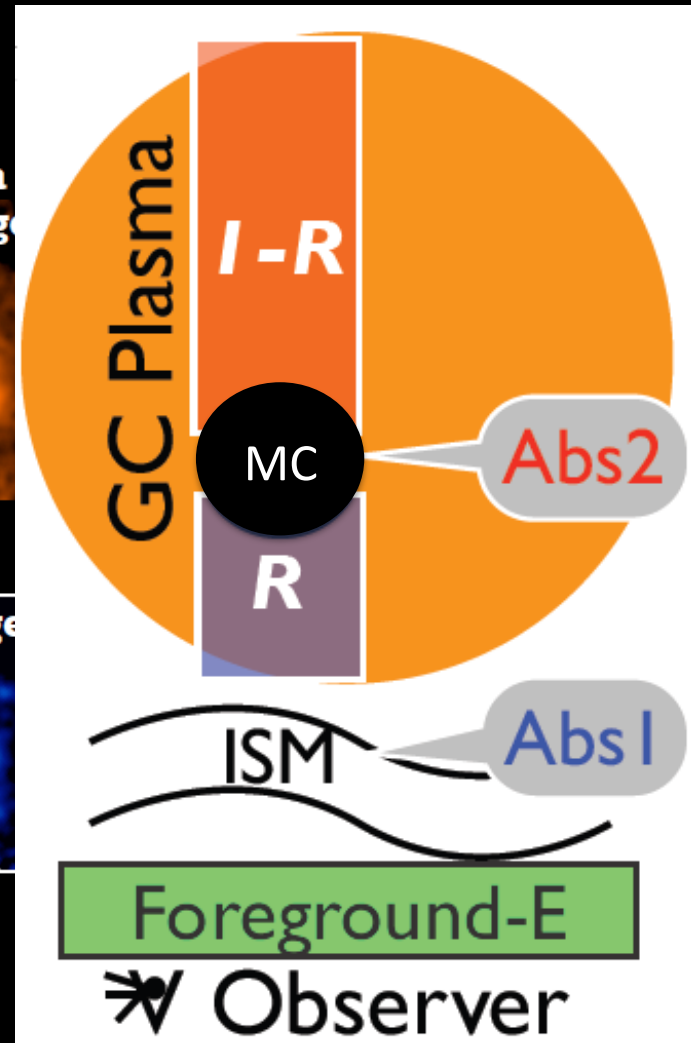
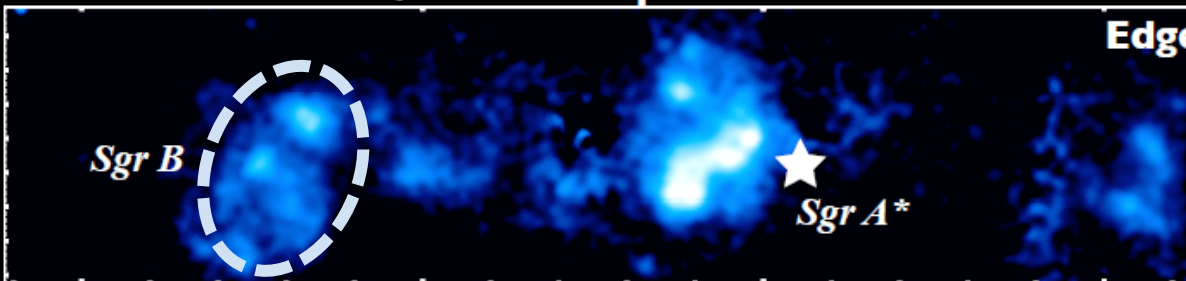
劉、信川+09, 13, PASJ

- 分子雲とプラズマの反相関
- プラズマ放射の一部が分子雲に吸収されている

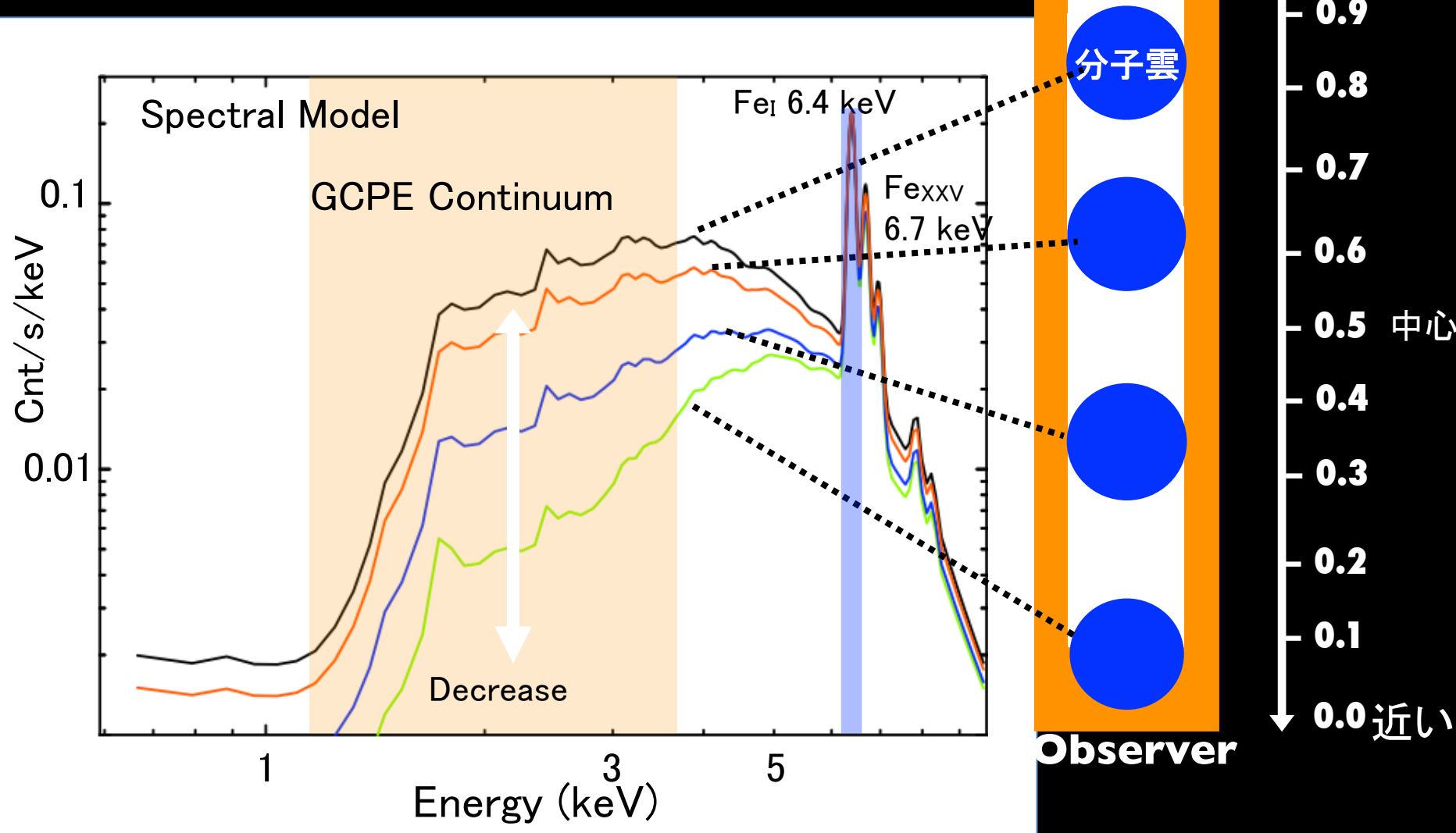
2-3 keV Band Map : Soft Continuum of Plasma



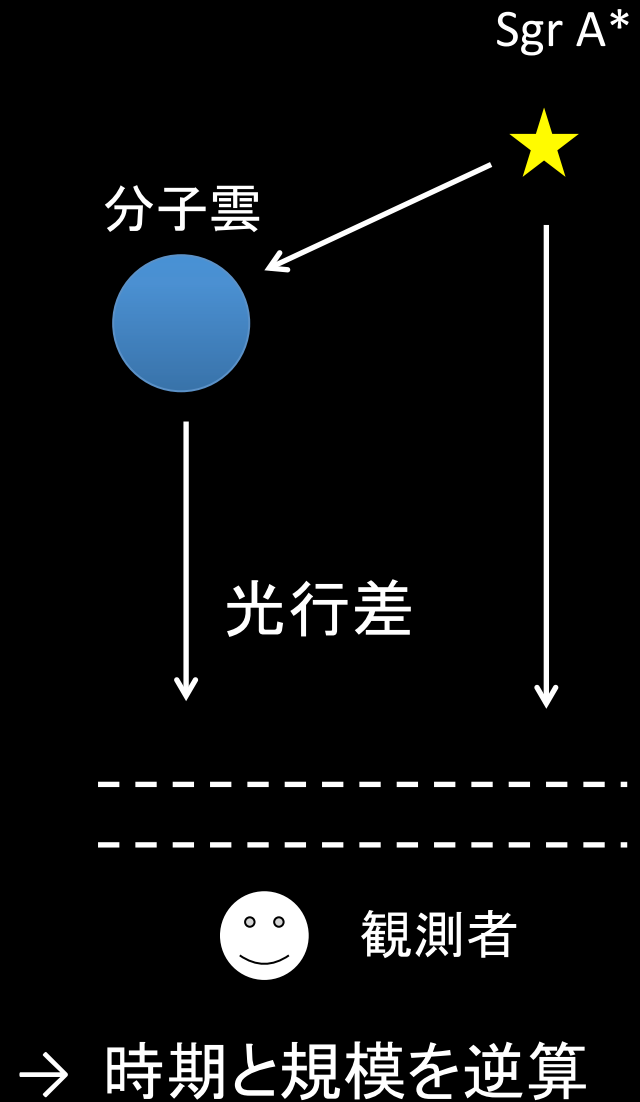
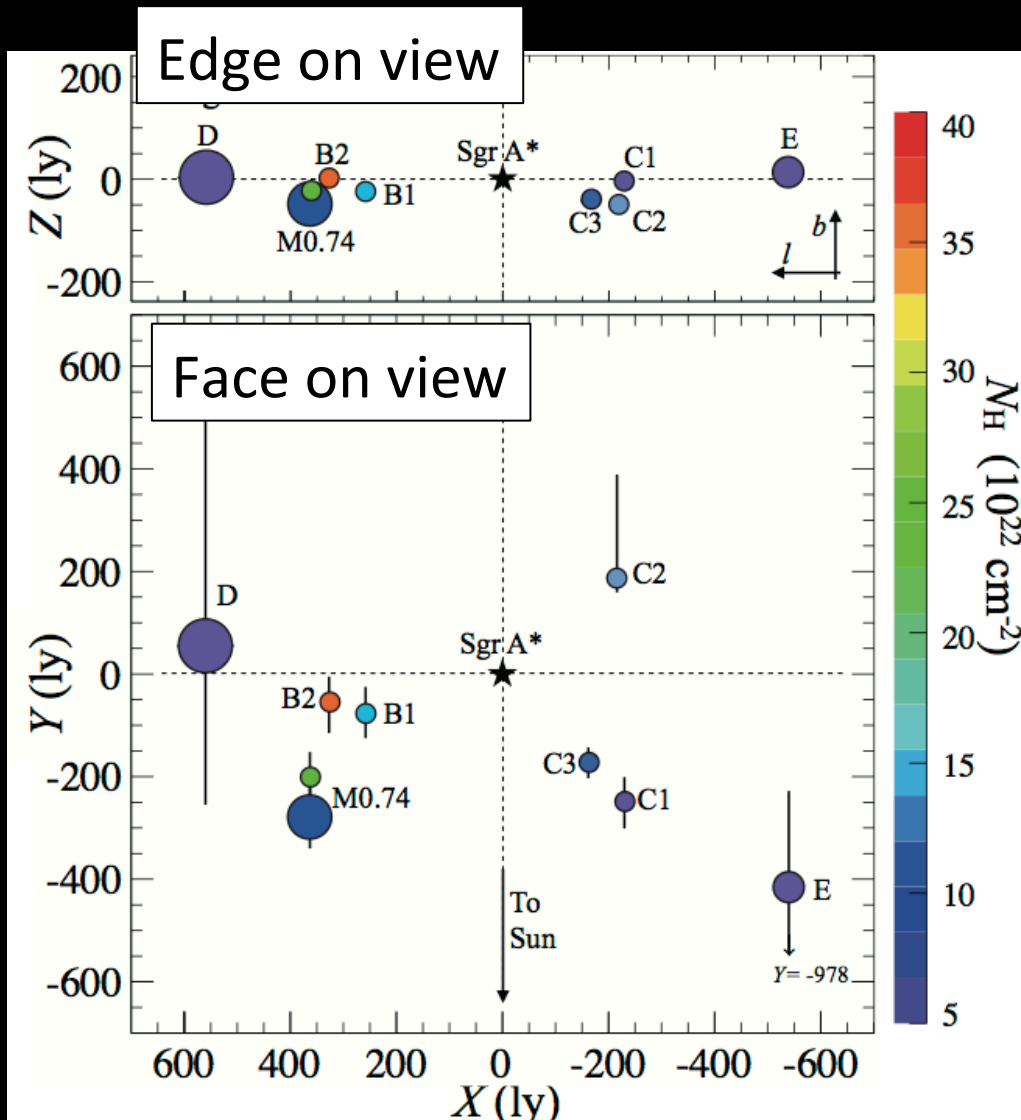
Fe_I 6.4 keV Map : Molecular Clouds



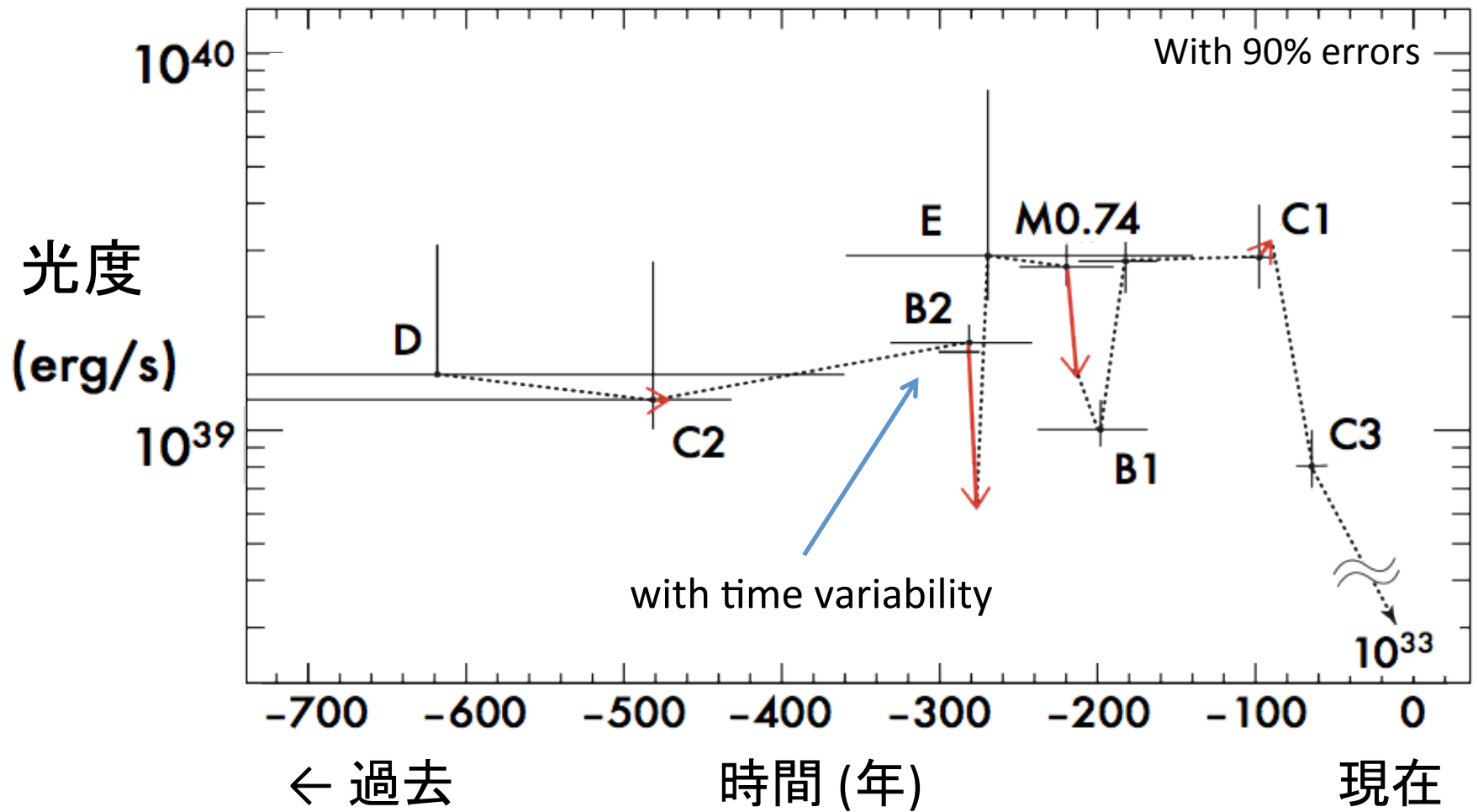
スペクトル形状 → 分子雲の奥行き位置 **LOS Position**



Sgr A*と分子雲の3次元位置関係



Sgr A*の過去のライトカーブ



- Sgr A*は少なくとも50—600年前に活動的だった
- 短い時間でのフレアも頻発していた

銀河中心領域

すざくを用いた観測結果

成果1 鉄以外の中性元素からの輝線の発見

-> X線反射起源

成果2 X線放射の時間変動

-> Sgr A*が照射源

成果3 分子雲の3次元マップ

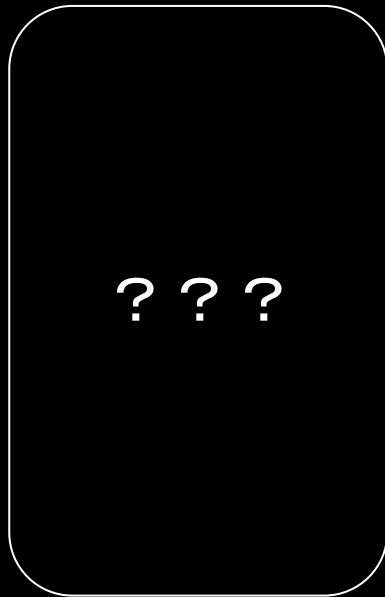
-> Sgr A*の活動の歴史

Sgr A*の活動史のまとめ

高活動



Fermiガンマ
線バブル
(Su+10)



X線反射分子雲

分子雲が落下中
来月フレア？
(Gillesen+12)



~10年間



10万年前

1000年前

現在



みなさんへメッセージ

- 研究は能動的にするもの
 - 指導者の意見は(半分くらいは)疑うこと
 - 思いついたことをトライすること
(だいたいハズれる＝経験値が低い)
 - 早くすること
- 育志賞に応募する
(ある意味ノーベル賞より条件が厳しい)