

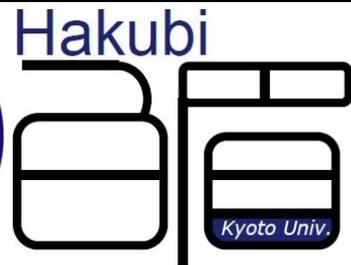
銀河中心領域の 巨大分子雲からの X線放射

信川 正順

(京都大学白眉センター/理学研究科)

2011年3月 博士(理学)@京都大学

2011年8月10日 第11回高宇連研究会@早稲田大学



第11回高宇連研究会@早稲田大学



目次

1. 銀河中心領域
2. すざくを用いた観測結果
 - 3-1. 鉄以外の中性元素からのK輝線の発見
 - 3-2. その他の6.4 keV 分子雲 (Sgr B1、Sgr C領域)
 - 3-3. Sgr B2領域からX線放射の時間変動
3. 総合議論
4. まとめ

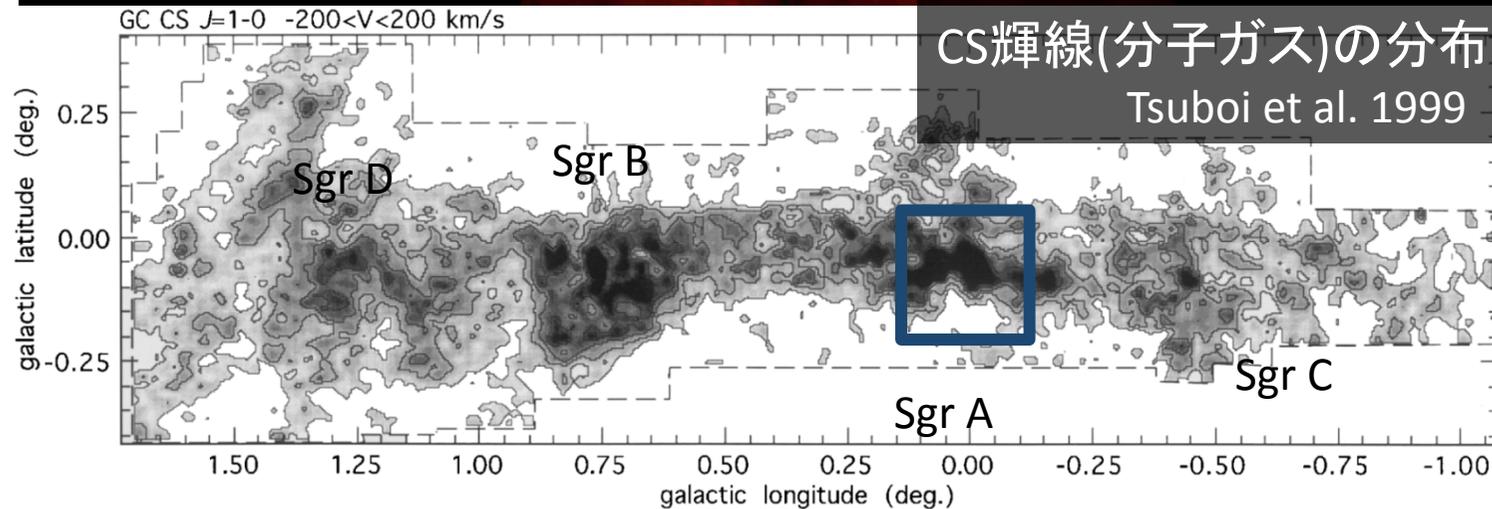
目次

1. 銀河中心領域
2. すざくを用いた観測結果
 - 3-1. 鉄以外の中性元素からのK輝線の発見
 - 3-2. その他の6.4 keV 分子雲 (Sgr B1、Sgr C領域)
 - 3-3. Sgr B2領域からX線放射の時間変動
3. 総合議論
4. まとめ

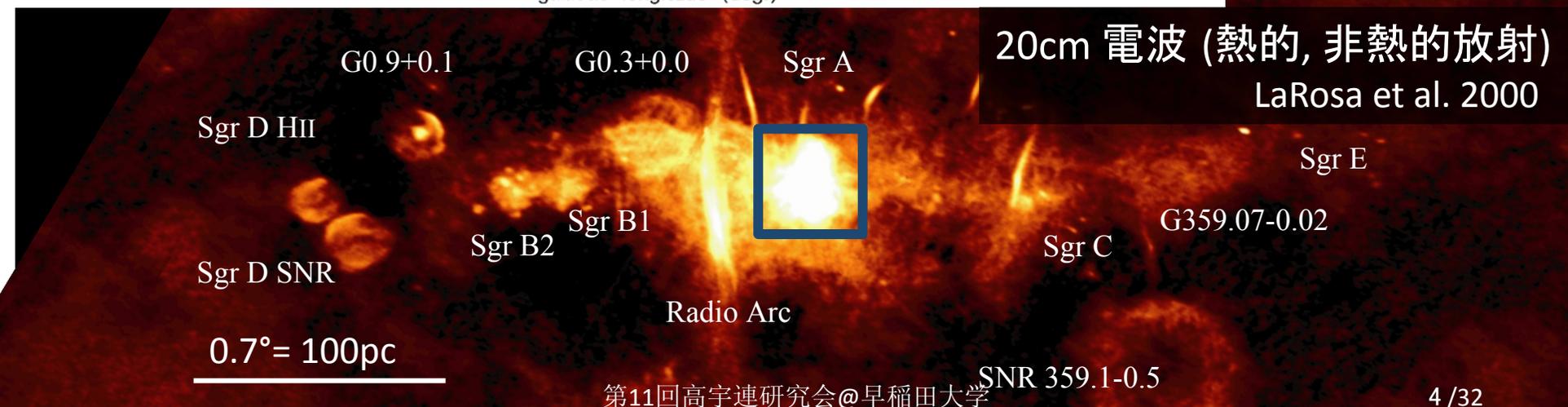
1-1. 銀河中心領域

総質量 $\sim 10^8 M_{\odot}$ の分子ガス雲群

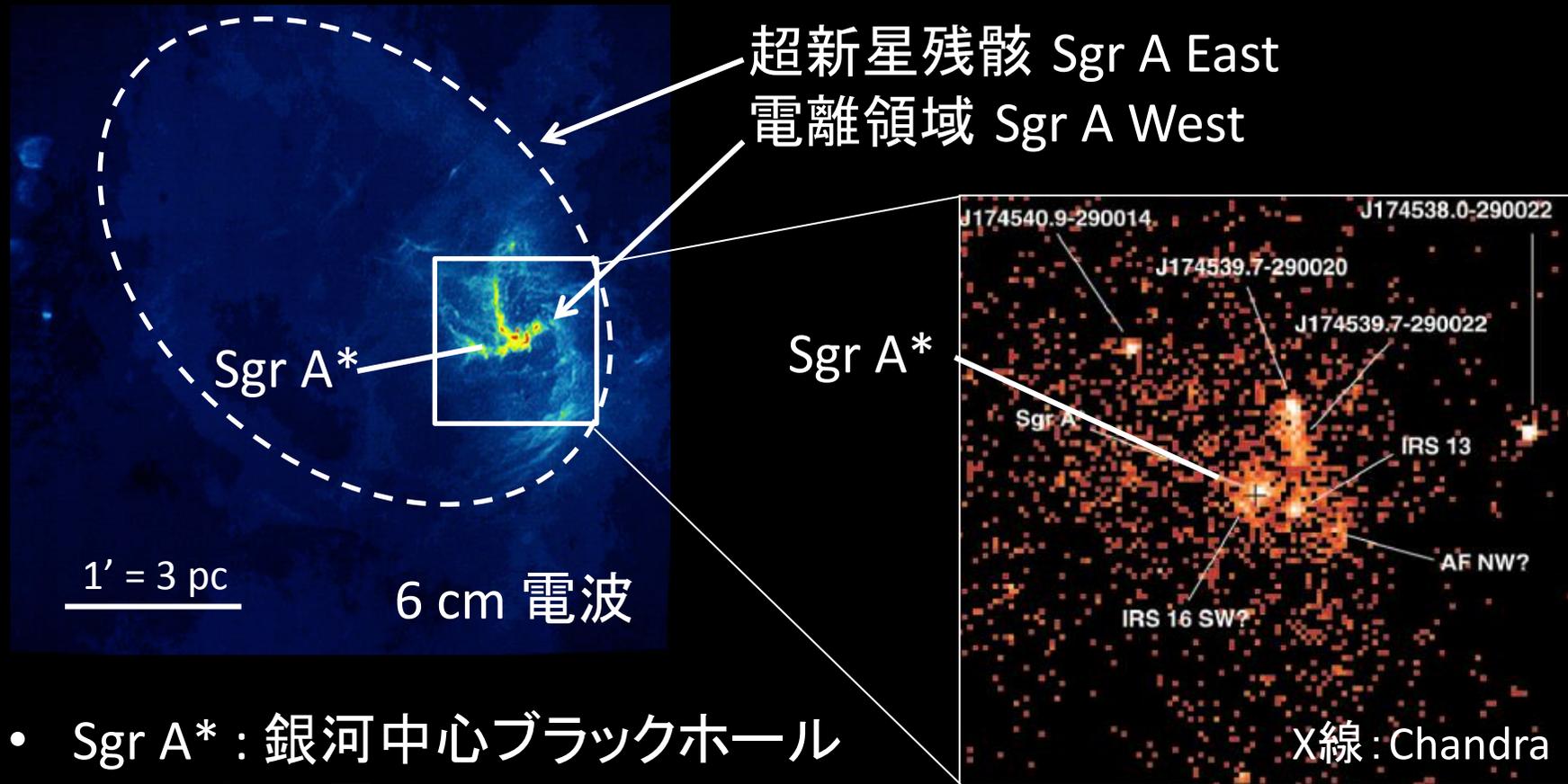
超新星残骸や電離(HII)領域、フィラメント構造(局所的に強磁場)



Sgr = Sagittarius
= 射手座



銀河中心ブラックホール Sgr A*

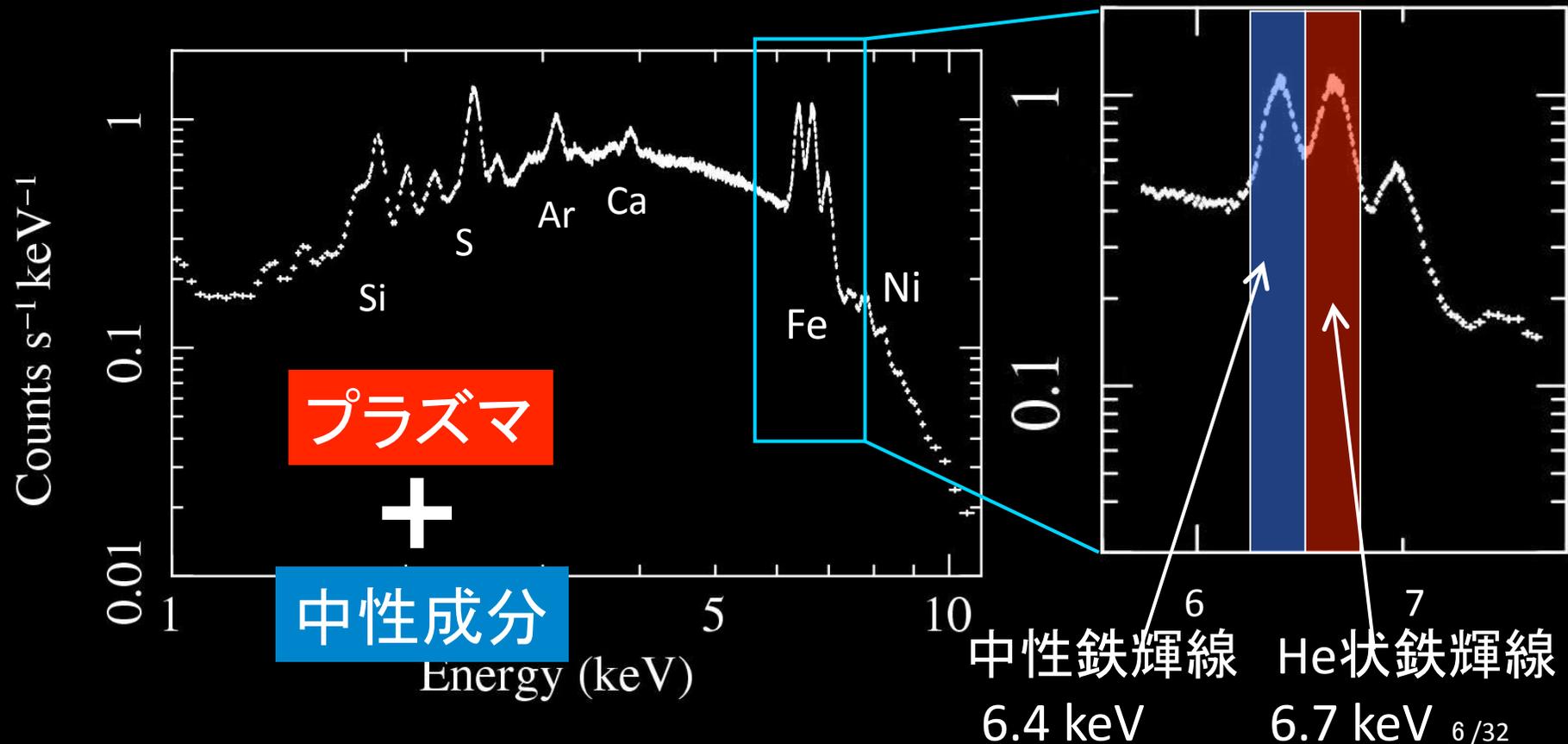


- Sgr A* : 銀河中心ブラックホール
コンパクト電波源
質量 $4 \times 10^6 M_{\odot}$ (Ghez+08) ← 星の運動
 $L_x \sim 10^{33-34} \text{ erg/s}$ (低光度)
活動銀河核 $L \sim 10^{40-44} \text{ erg/s}$

Sgr A*の活動性は低い

銀河中心領域からのX線放射

- $\sim 100\text{pc}$ に広がったX線放射・・・鉄輝線が付随
- Si, S, Ar, Ca, Fe, NiのHe- (電子が2個) H-状 (電子が1個) 輝線
+ 中性輝線



鉄輝線強度マップ

中性鉄輝線

6.4 keV

本研究の主題

Sgr A*
★

He状鉄輝線

6.7 keV

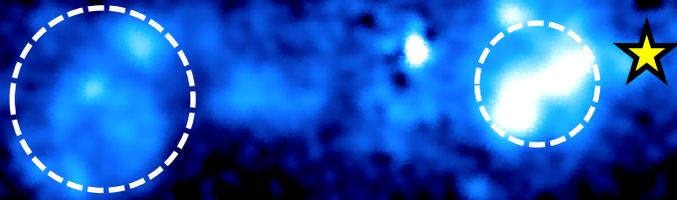
高温プラズマ

★

100 pc = 300光年

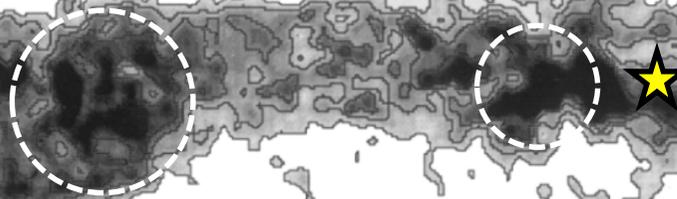
1-2. 中性鉄(6.4 keV)輝線放射

6.4 keV輝線



分子ガス分布(CS輝線)

Tsuboi+99



- 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)

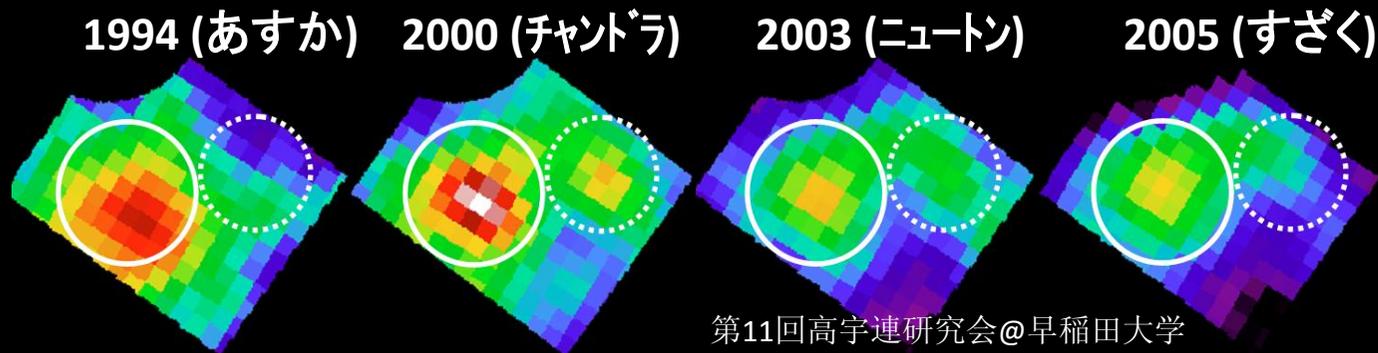
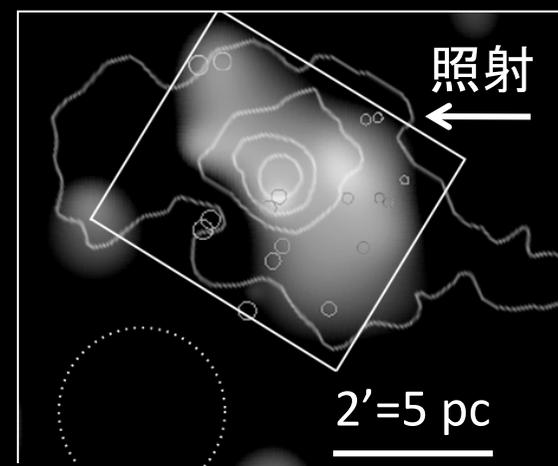
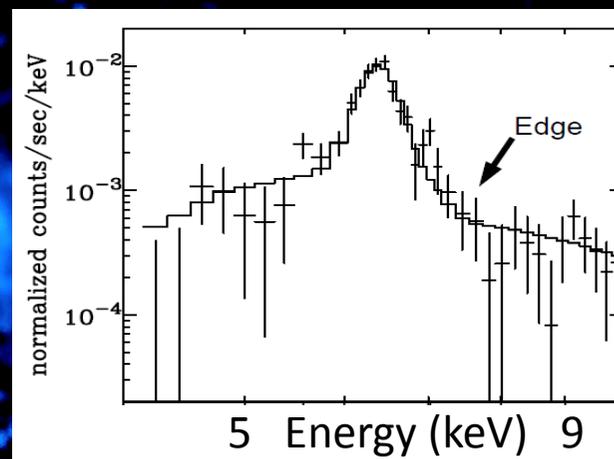
背後に高エネルギー現象が存在

中性鉄輝線の起源



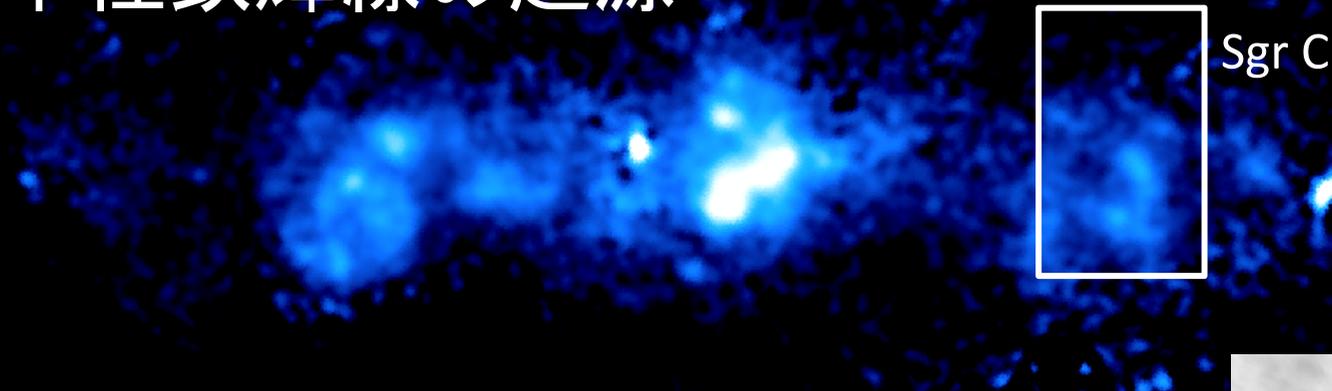
- X線による光電離 (Koyama+96; Murakami+00)
- スペクトル(強い鉄輝線/鉄の吸収端)
 - ピークのずれ
 - 時間変動 (e.g. Inui+09)
- Sgr A*の過去の活動 (現在の100万倍)

1-2. 中性鉄輝線放射



X線強度 +
分子輝線 (コントア)
(Murakami+00)

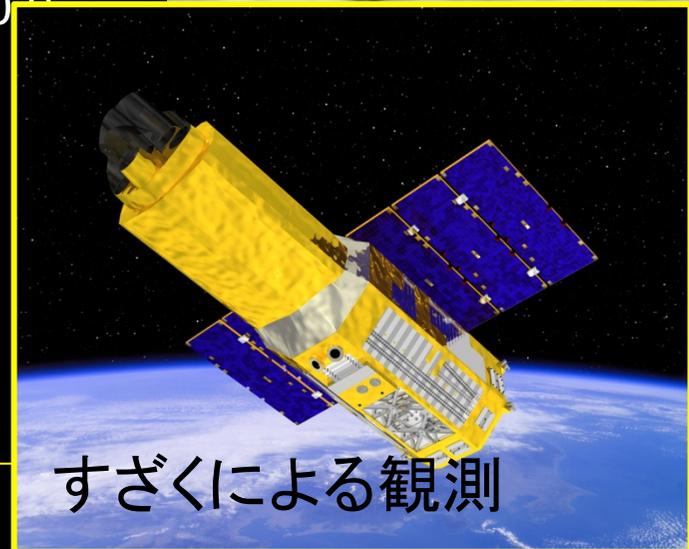
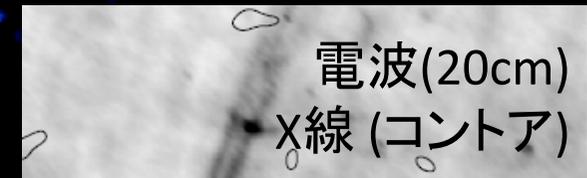
中性鉄輝線の起源



Yusef-Zadeh+07

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 / ガンマ線放射
- 陽子 ($E\sim 10$ MeV) (e.g. Dogiel+09)
 - Sgr A*が供給?



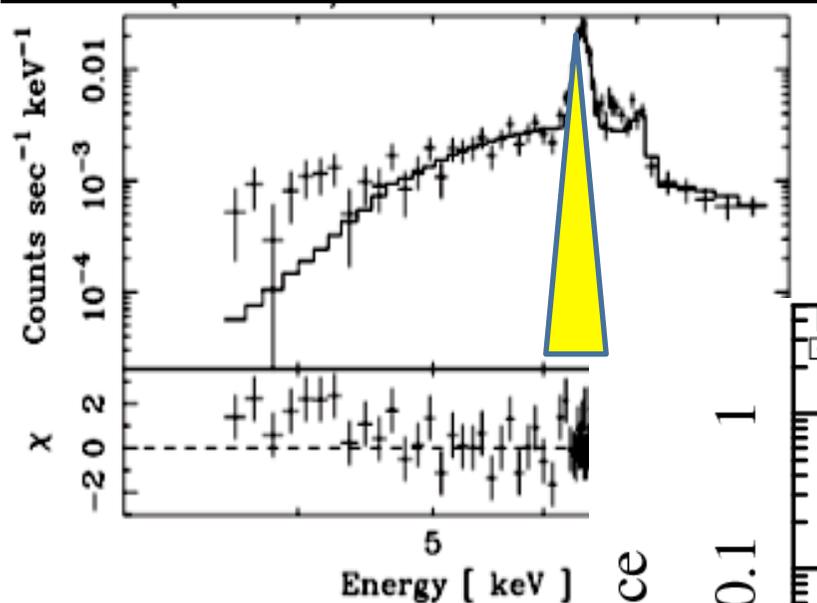
- もっと多角的な観測証拠が必要
時間変動・・・衛星間の不定性
- 照射天体に対する有意な制限 (Sgr A*?)



目次

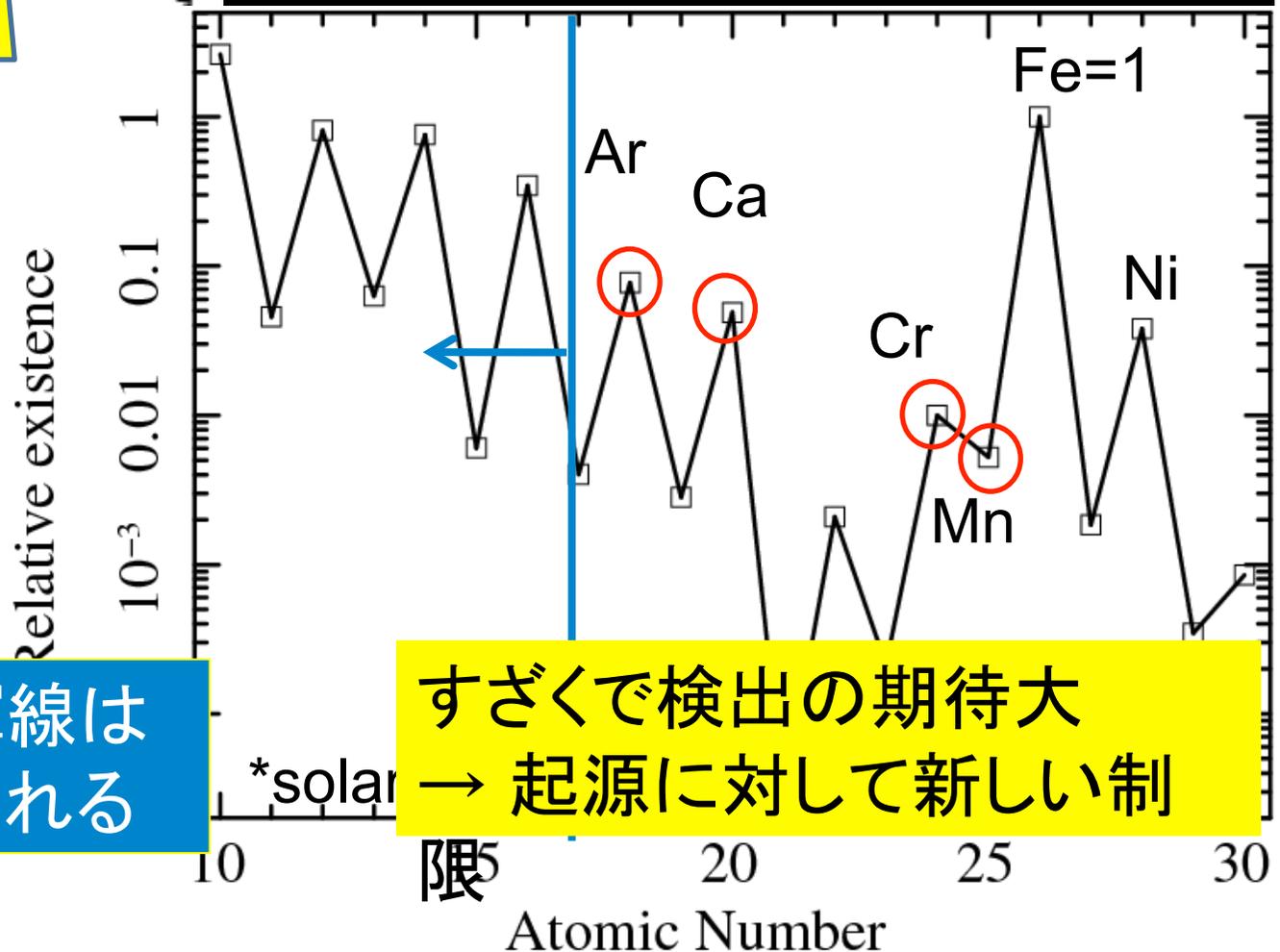
1. 銀河中心領域
2. すざくを用いた観測結果
 - 3-1. 鉄以外の中性元素からのK輝線の発見
 - 3-2. その他の6.4 keV 分子雲 (Sgr B1、Sgr C領域)
 - 3-3. Sgr B2領域からX線放射の時間変動
3. 総合議論
4. まとめ

2-1. 多種元素の中性K輝線 (MN+09)



典型的なスペクトル

鉄輝線 + 吸収を受けた連続成分

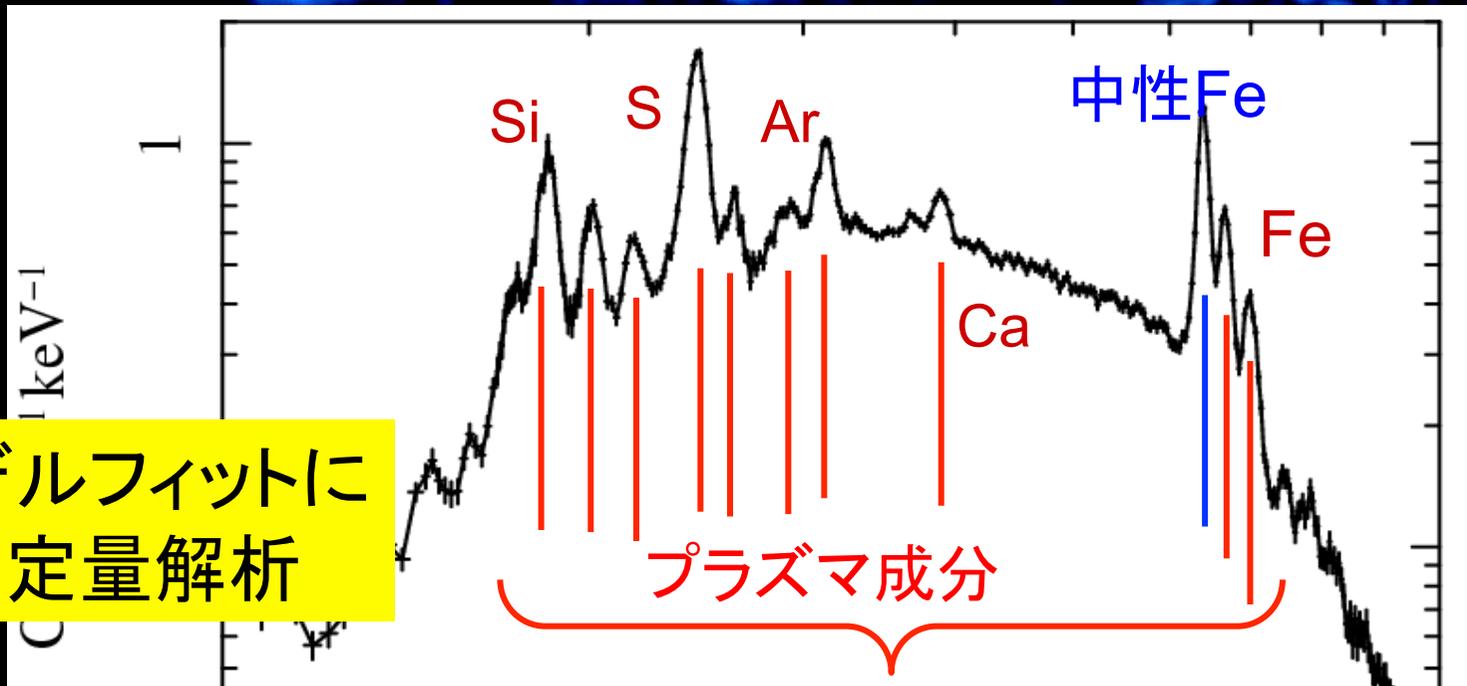
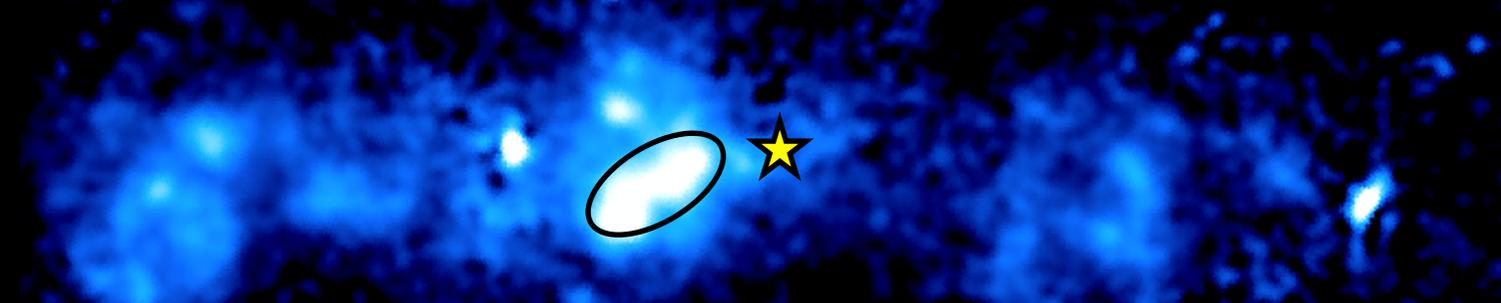


低エネルギーの輝線は
星間物質に吸収される

すざくで検出の期待大
→ 起源に対して新しい制

*solar
限5 20 25 30
Atomic Number

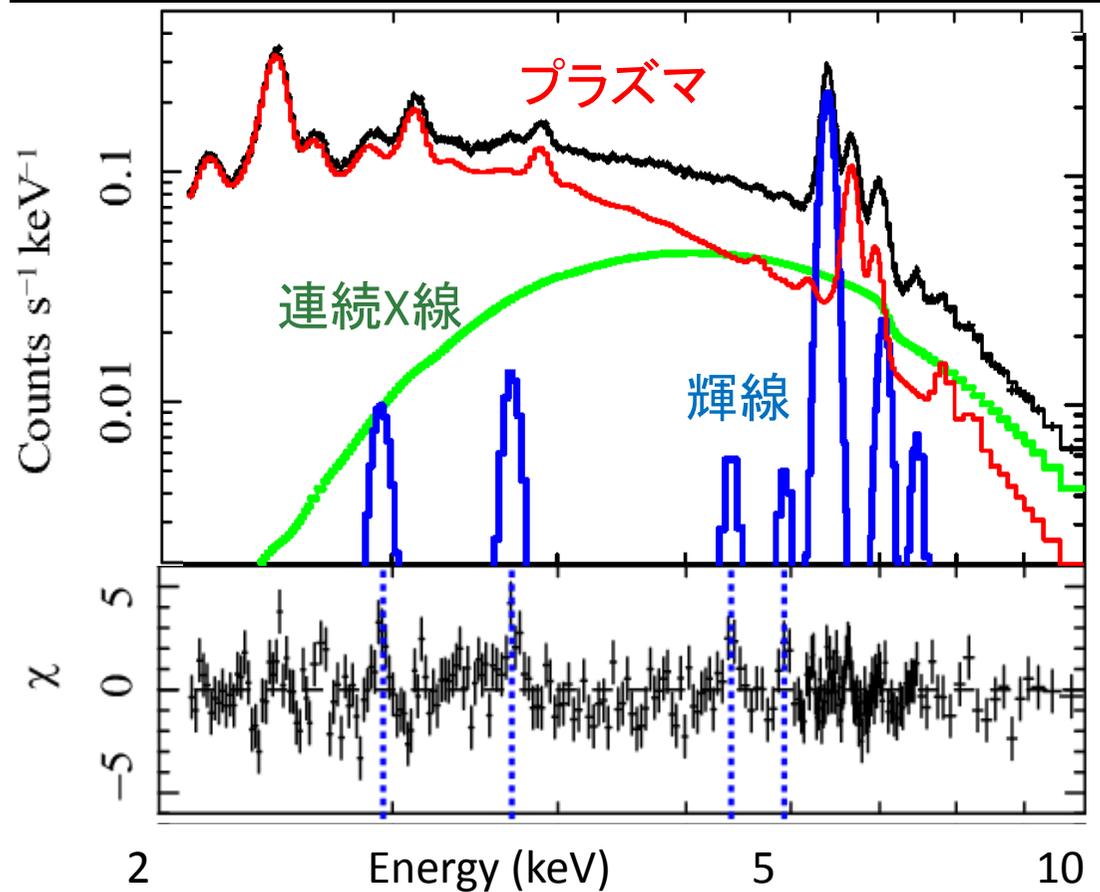
Sgr A領域の最も明るい分子雲



モデルフィットによる定量解析

$$\boxed{\text{星間吸収}} \times \left[\boxed{\text{プラズマ成分}} + \boxed{\text{分子雲の吸収}} \times \boxed{\text{中性成分 (輝線 + 連続成分)}} \right]$$

X線スペクトル



中性Fe, Niのみ (Koyama+07)

輝線状の残差

Gaussianを追加

→残差が解消

	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

→ 中性元素のK輝線

フィット結果

吸収量

$$N_{\text{H}} = 6.8 \pm 0.2 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$$

プラズマ成分: (2温度)

$$kT(\text{低温}) = 1.01 \pm 0.02 \text{ keV}$$

$$kT(\text{高温}) = 7.0 \pm 0.1 \text{ keV}$$

元素組成 1—2 solar

中性成分:

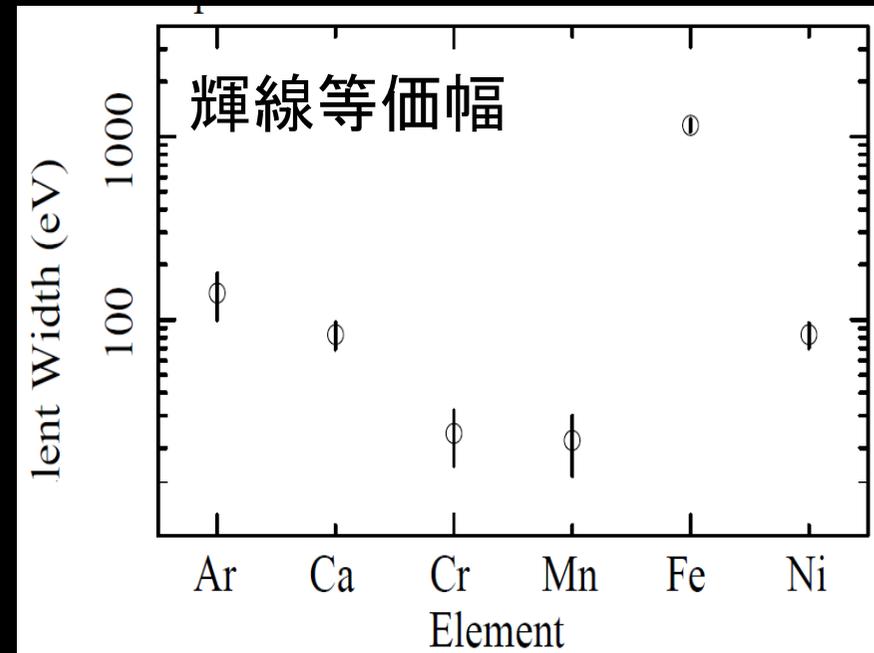
吸収量(分子雲)

$$N_{\text{H}} = 12(\pm 1) \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$$

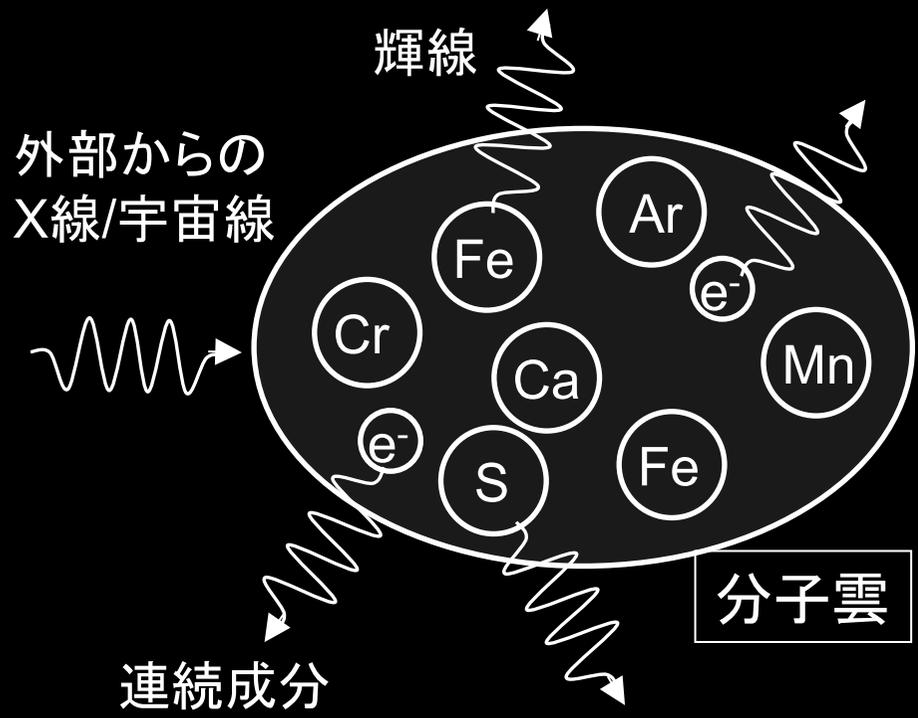
$$\text{ベキ } \Gamma = 1.87 \pm 0.04$$

中性輝線の等価幅

← GCの典型値 $6 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$
(Sakano+00, Munro+03, 06)



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

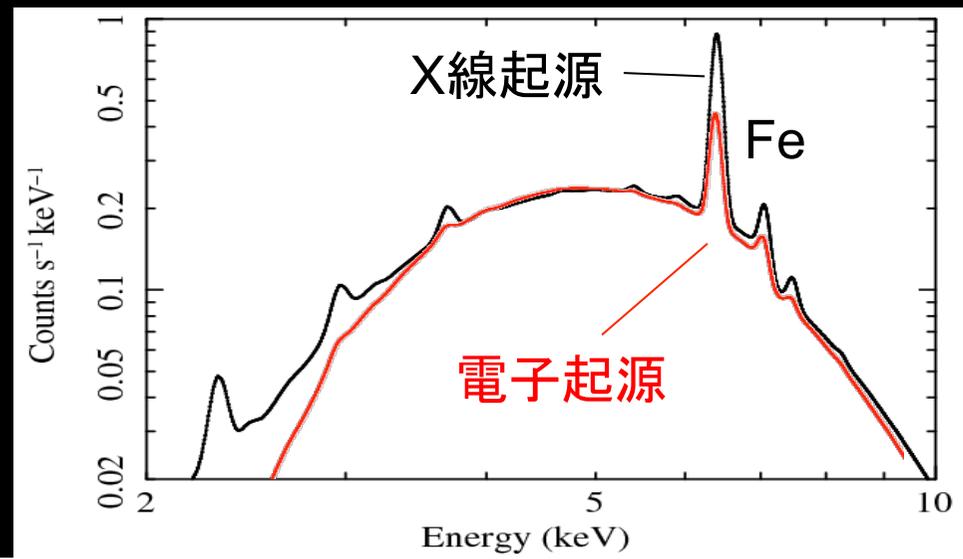
連続成分:

- 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

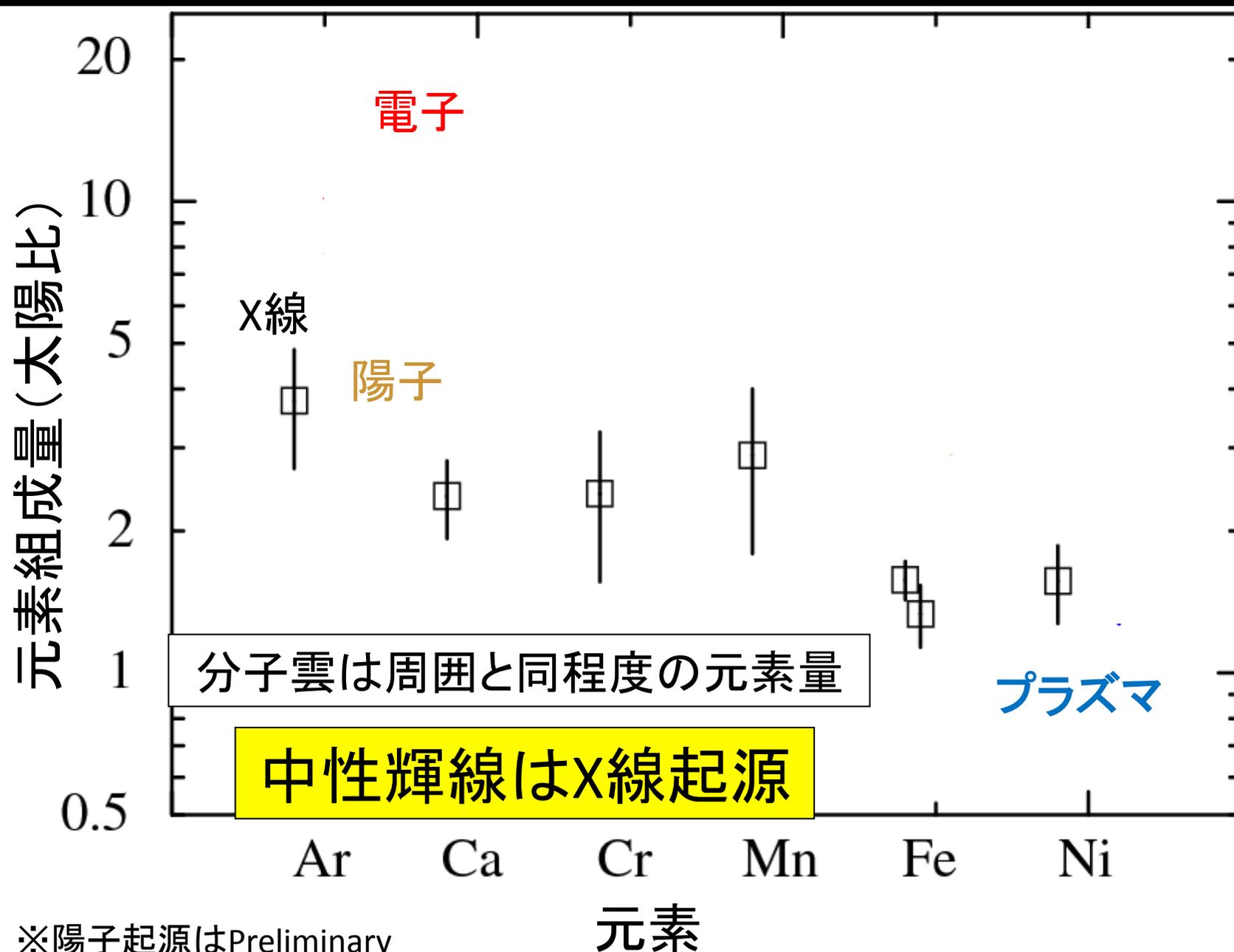
異なるX線スペクトル

等価幅 → 元素量



等価幅から元素組成量を見積もる

2-1. 多種元素の中性K輝線

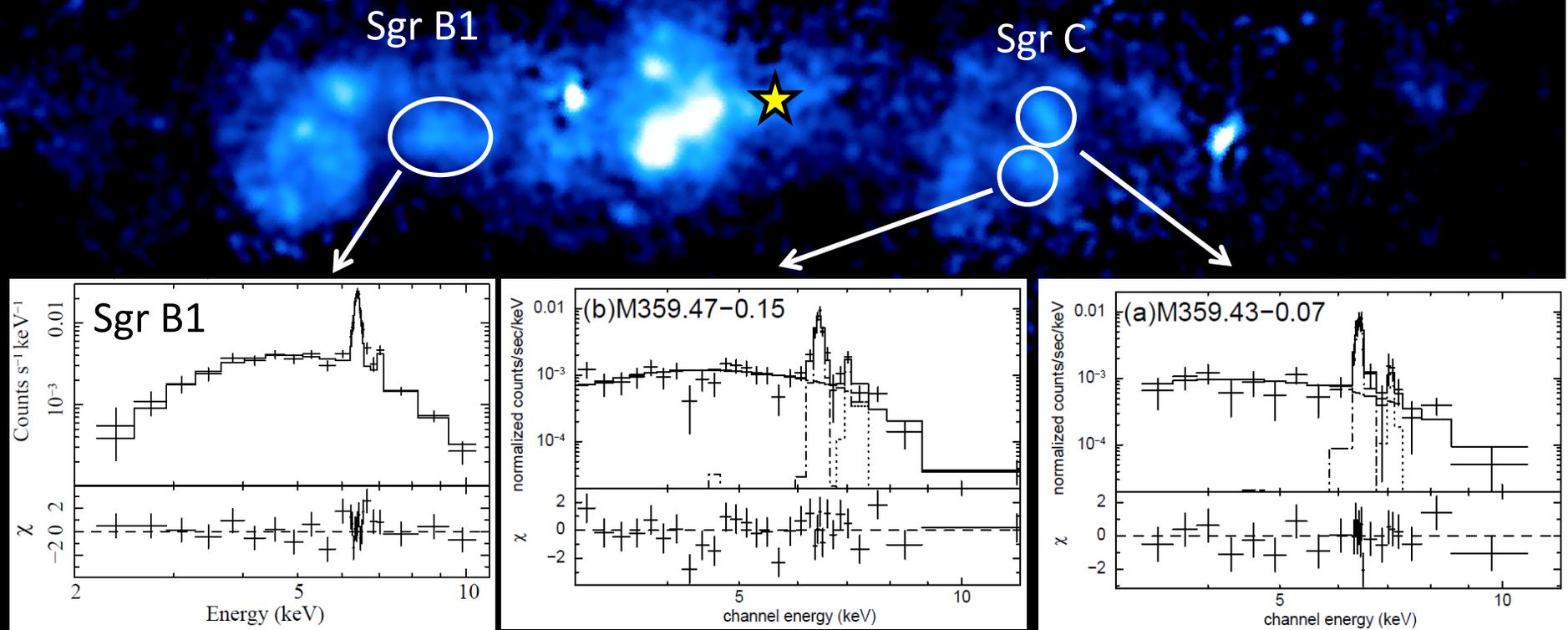


目次

1. 銀河中心領域
2. すざくを用いた観測結果
 - 3-1. 鉄以外の中性元素からのK輝線の発見
 - 3-2. その他の6.4 keV 分子雲 (Sgr B1、Sgr C領域)
 - 3-3. Sgr B2領域からX線放射の時間変動
3. 総合議論
4. まとめ

2-2. 他の分子雲 (Sgr B1, Sgr C領域)

MN+08, Nakajima, MN+09



いずれも

- ・ハードな連続成分: $\Gamma=1.6-1.8$
- ・強い鉄輝線: 等価幅 1-2 keV

外部からのX線照射

(太陽組成)

X線起源 : ~ 1 keV

電子起源 : ~ 0.3 keV

陽子起源 : ~ 0.5 keV

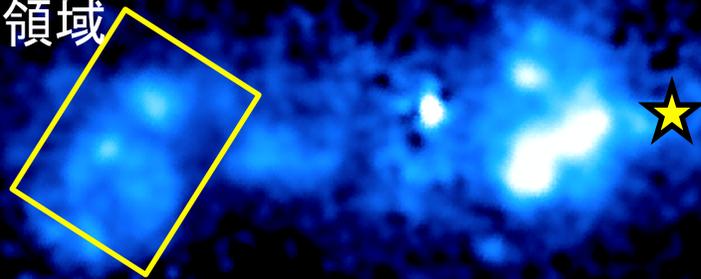
目次

1. 銀河中心領域
2. すざくを用いた観測結果
 - 3-1. 鉄以外の中性元素からのK輝線の発見
 - 3-2. その他の6.4 keV 分子雲 (Sgr B1、Sgr C領域)
 - 3-3. Sgr B2領域からX線放射の時間変動
3. 総合議論
4. まとめ

分子雲はどこからどのように
照らされているのか？

2-3. X線放射の時間変動 (MN+11)

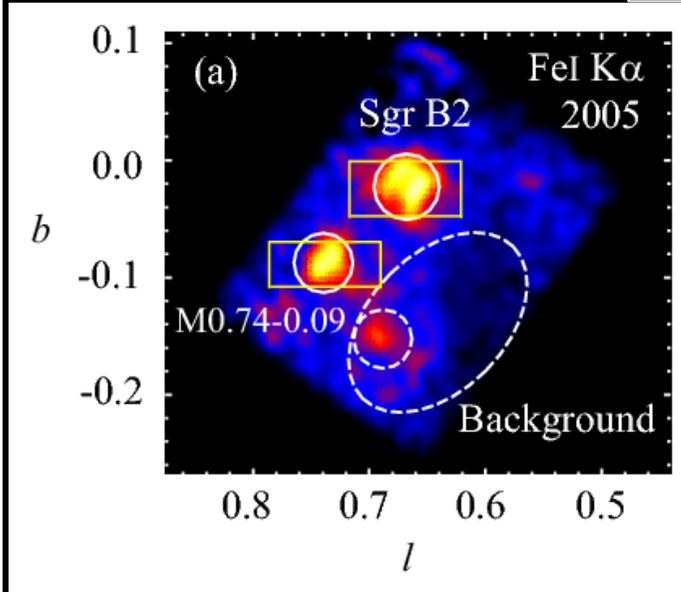
Sgr B2領域



- 時間変動
 - 照射天体への有力な制限
- 最適対象・・・Sgr B2領域
 - 明るい分子雲が存在
 - 奥行位置が既知 (Ryu+09)
 - GCプラズマが比較的弱い
- 2005年、2009年に同一衛星・同じ位置・ロール角で長時間観測
- CCDカメラの一部に不具合があったので、3/4だけを使用

X線イメージ

6.4 keV



8-10 keV

6.4 keV輝線

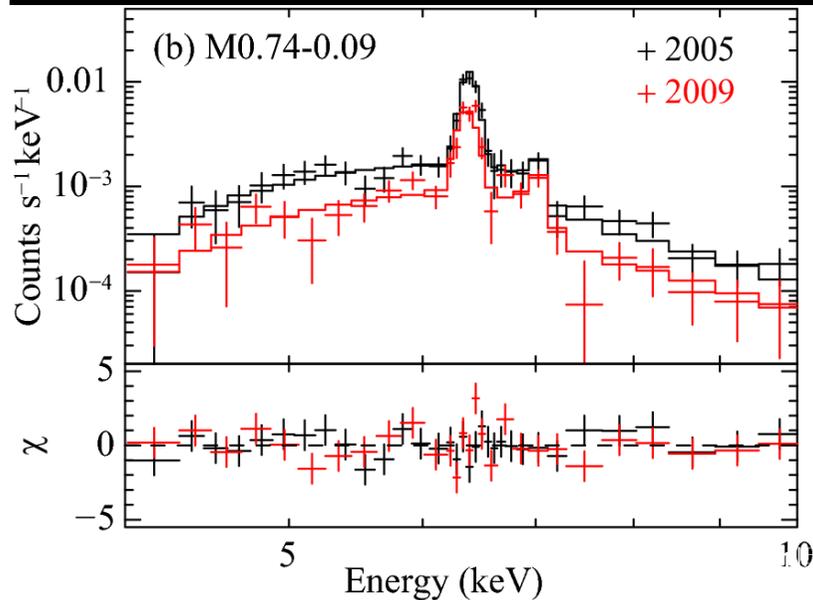
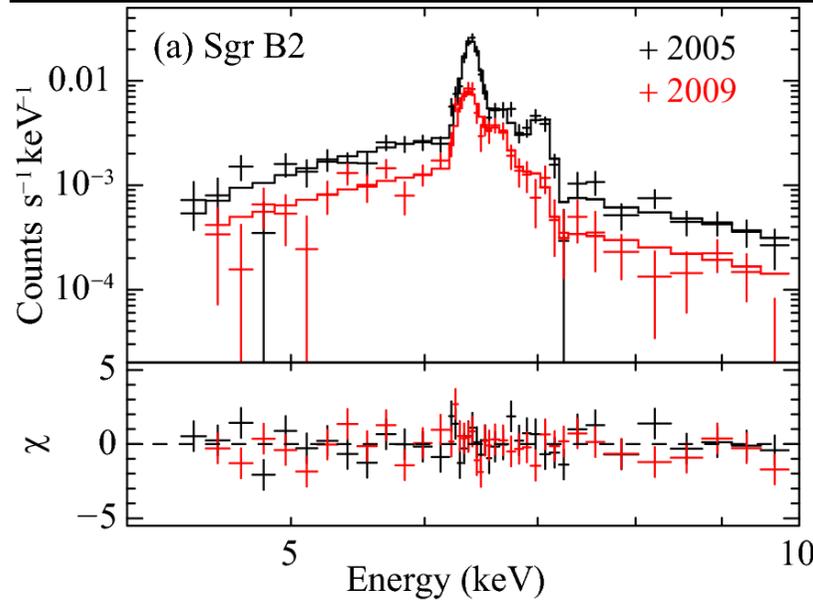
- ・Sgr B2とM0.74が暗くなっている
- ・周囲は変化なし

時間変動を確認

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



- スペクトル 輝線・連続成分が減少
- スペクトルフィット
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	0.39±0.06	0.49±0.15
M0.74	0.53±0.10	0.53±0.21

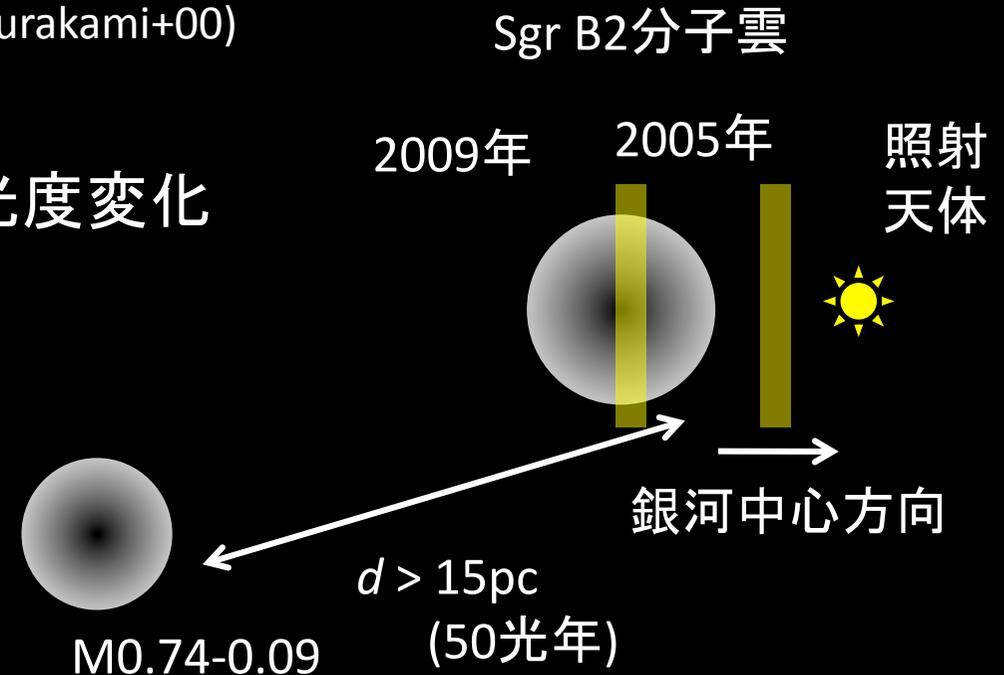
相関した変化

- 2つの分子雲が同期して変化
- 早い時間変動 4年間に半減

⇒ X線照射起源

議論：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 $> 15\text{ pc}$ (50光年)

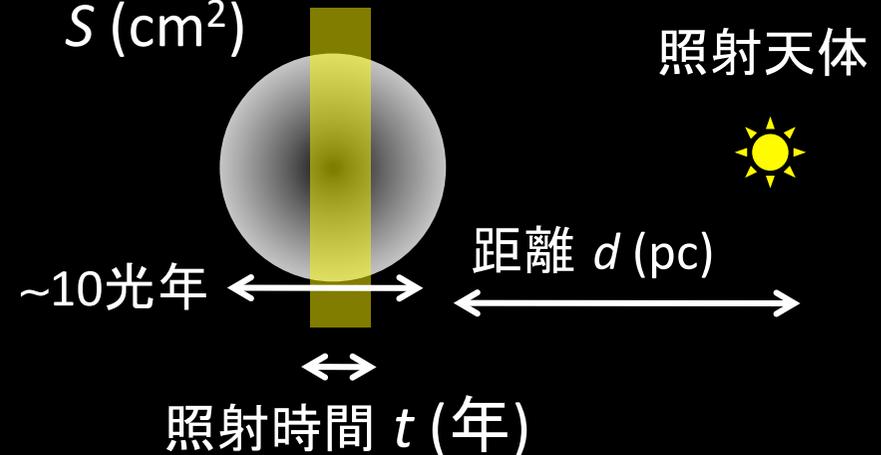
議論：照射天体

- 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

$$n = N_{\text{H}} / \sqrt{S}$$

スペクトルの吸収量 (cm^{-2})分子雲の面積
 $S (\text{cm}^2)$ 

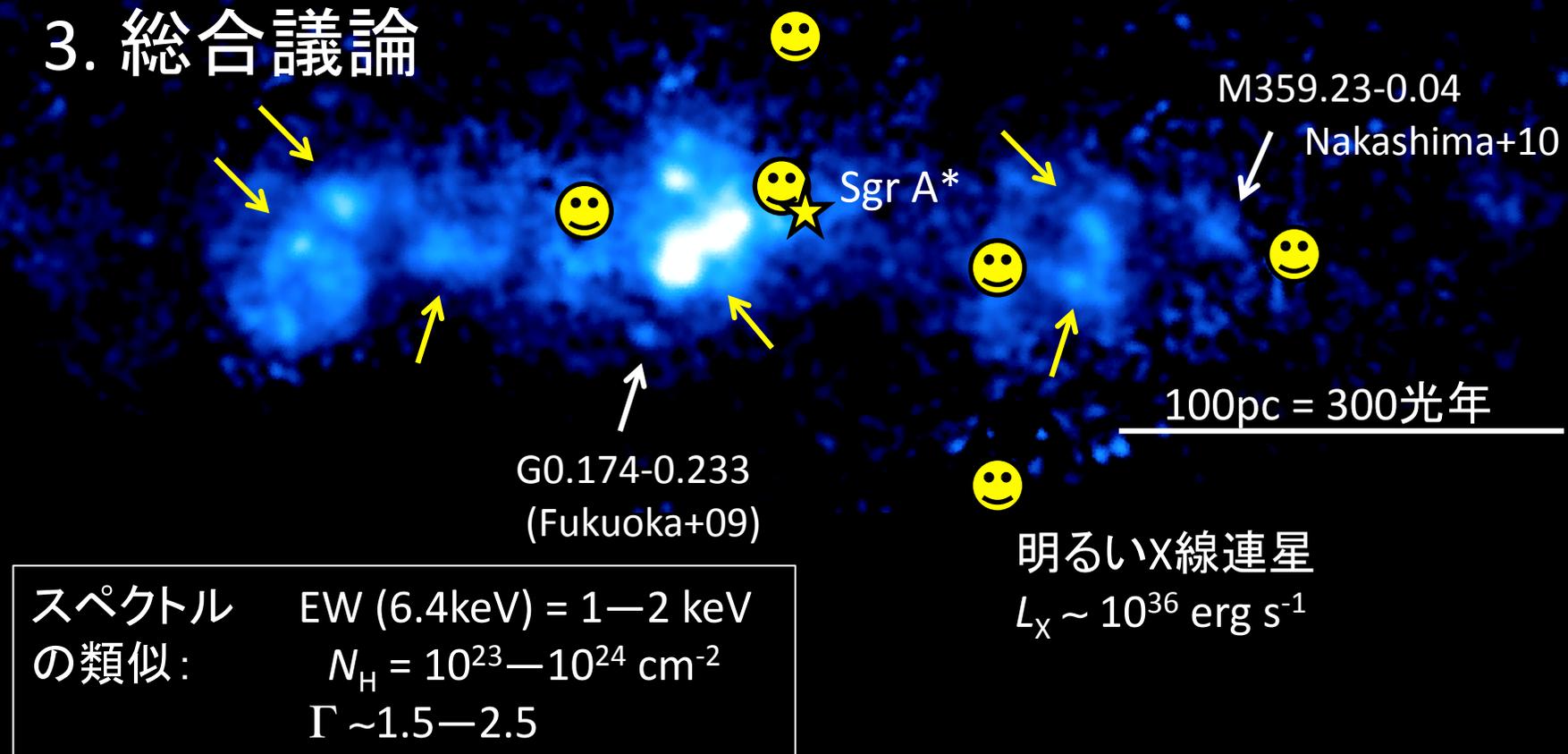
$\Delta t < 10$ 年, $d > 15$ pc

- $L_{\text{X}} > 10^{38} \text{ erg s}^{-1} \sim L_{\text{Edd}}$ (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* ($M \sim 4 \times 10^6 M_{\odot}$)
 $L_{\text{X}} > 4 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ (現在見えるよりも数百年前)

目次

1. 銀河中心領域
2. すざくを用いた観測結果
 - 3-1. 鉄以外の中性元素からのK輝線の発見
 - 3-2. その他の6.4 keV 分子雲 (Sgr B1、Sgr C領域)
 - 3-3. Sgr B2領域からX線放射の時間変動
3. 総合議論
4. まとめ

3. 総合議論

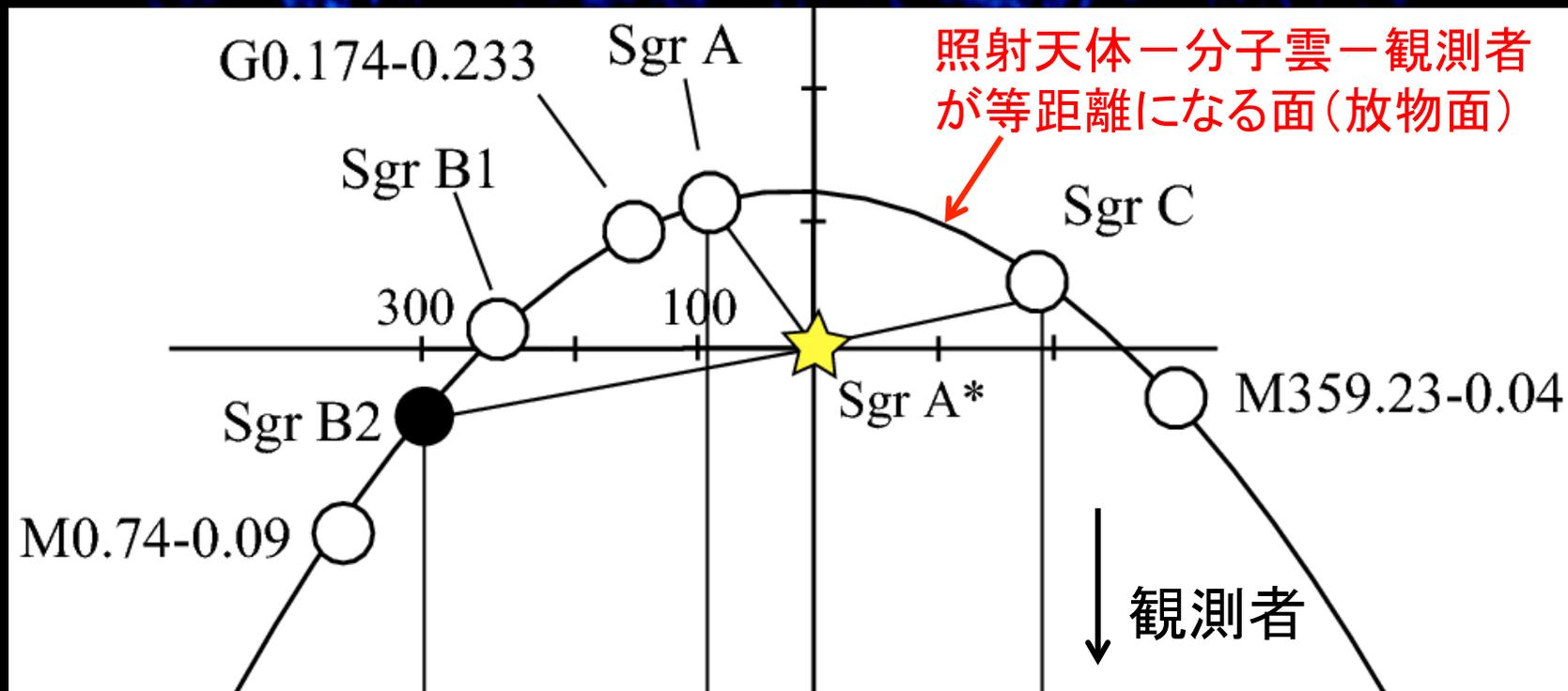


- 全体の統一的描像

- 起源は単一(Sgr A*)? / 個別天体?
- 一度のフレア?

近傍の天体で説明可能なのは1天体のみ (M359.23-0.04: Nakashima+10)

Sgr A*からの単一フレアが起源とすると



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

鉄輝線強度 密度 照射時間 距離

Sgr A*からの単一フレアが起源とすると



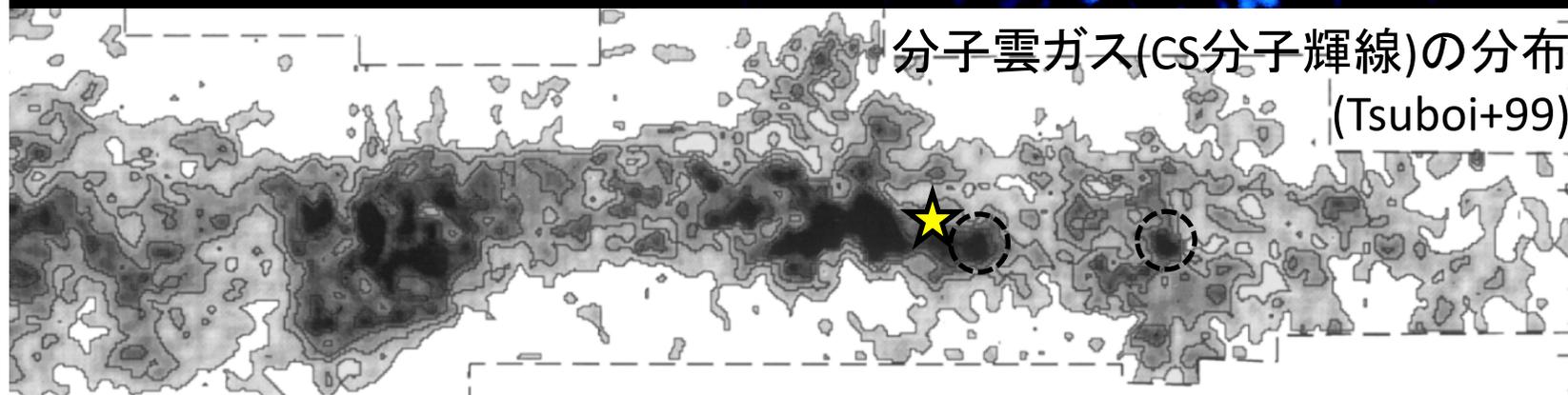
良く一致する

	密度 (cm ⁻³)	距離(pc)	光度(erg s ⁻¹)
Sgr A	4×10 ³	50	8×10 ³⁹
Sgr B2	4×10 ⁴	110	4×10 ³⁹
M0.74-0.09	3×10 ⁴	170	5×10 ³⁹
Sgr B1	3×10 ³	90	8×10 ³⁹
M359.43-0.07	~5×10 ³	75	~8×10 ³⁹
M359.47-0.15	~5×10 ³	75	~8×10 ³⁹
G0.174-0.223	~1×10 ³	75	~8×10 ³⁹
M359.23-0.04	7×10 ³	100	5×10 ³⁹

Sgr A*の数百年前のフレアが照らした分子雲

X線を出さない分子雲

6.4 keV輝線強度マップ

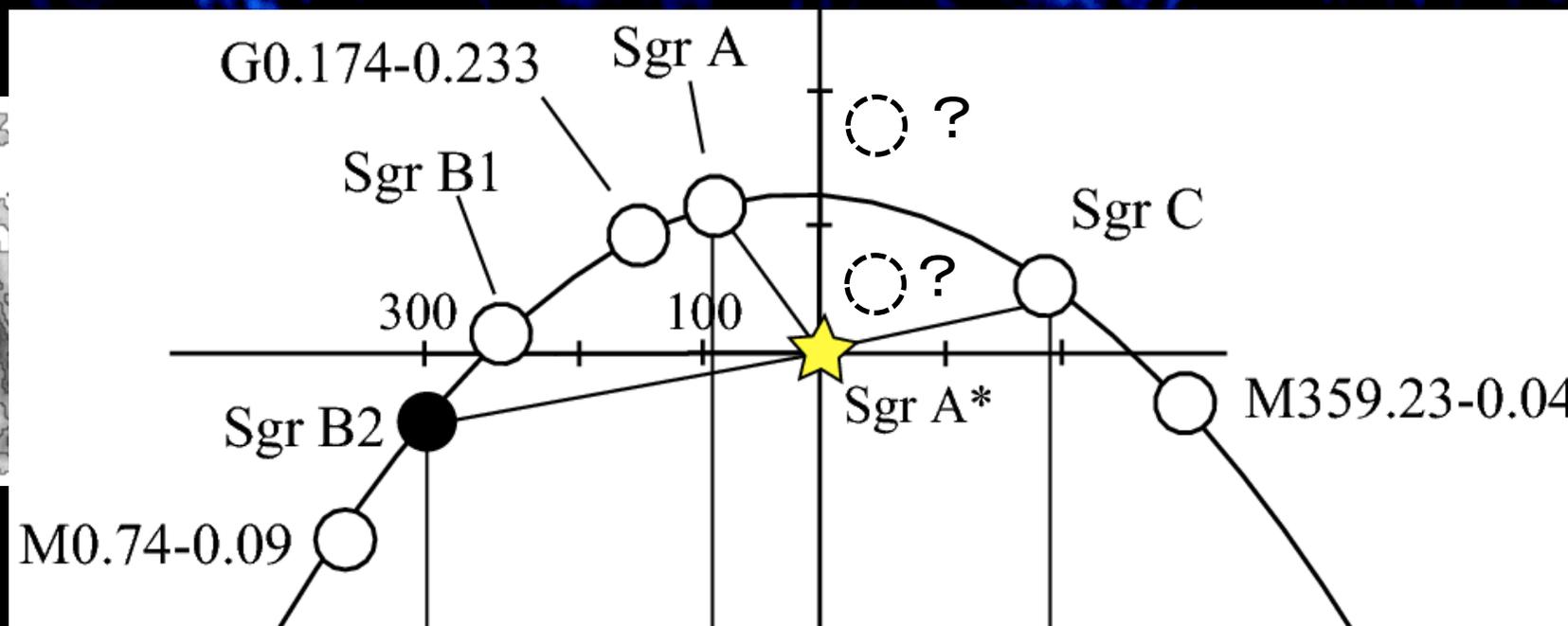


分子雲ガス(CS分子輝線)の分布
(Tsuboi+99)

巨大分子雲の中にもX線を出さないものが存在

X線を出さない分子雲

6.4 keV輝線強度マップ



巨大分子雲の中にもX線を出さないものが存在
 …既にX線フレアが通過した / 未到達

4. まとめ・・・の前に

- すざくを用いた銀河中心領域6.4 keV分子雲の観測結果
- 最も明るい分子雲 (Sgr A) : Ar, Ca, Cr, Mnの中性輝線の検出
 - 多種輝線の等価幅を使った新しい制限・・・X線起源
- Sgr B1、Sgr C領域の分子雲の詳細スペクトル
 - 強い鉄輝線： 等価幅 1–2 keV
- Sgr B2領域： 時間変動
 - 2つの分子雲から同期した時間変動を発見
 - 照射天体の必要光度 $L > 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ → SMBH Sgr A*の過去のフレア
- 銀河中心の6.4 keV分子雲の起源
 - Sgr A*からの単一フレアで説明可能

第一回 学振育志賞受賞

京都新聞2011年2月9日

2011年(平成23年)2月9日 水曜日

21 社会3

第3種郵便物認可

若手研究者の奨励のために創設された日本学術振興会育志賞の第1回受賞者にこのほど、京都大理学研究所の大学院生、信川正順さん(28)が選ばれた。日本のエックス線天文衛星「すざく」の観測から、天の川銀河中心付近の活動を研究しており、「巨大エネルギー活動の全容に迫りたい」と意気込みを見せている。

信川さんは京大宇宙線研究室のメンバーとして5年前から「すざく」に搭載されたエックス線CCDカメラ

信川正順さん

初代受賞者に京大研究生

エックス線「日本の力世界に示す」
天文学評価

(XIS)の運用とデータ解析に取り組んでいる。地球がある天の川銀河の中心付近にある分子雲を光らせている

「すざく」がとらえた分子雲からのエックス線放射(光っている部分)とブラックホールの推定位置(星印)。地球からは約3万光年離れている

京都大提供

300光年

若手研究者を奨励
大学院生(博士課程)が対象
理工・人社・医など

の研究成果が、天文学を志す大学院生(博士課程)が対象。大学推薦を受け、かつ17人が京大からはアシア・ア研究科さんの2人

の開発も観からといこの活動は、にも宇宙線クッス線放射射多。日本年度に次世線天文衛星O-HIを予定。信川機器の開発り、「銀河エネルギー活につなげたている。

34歳未満の推薦を受けかつ17人が京大からはアシア・ア研究科さんの2人

(稲庭篤)

授賞式@日本学士院



天文学会からの推薦
第1回は17名が選ばれた

両陛下と話している様子

4. まとめ

すざくを用いた銀河中心領域6.4 keV分子雲の観測結果

- 最も明るい分子雲 (Sgr A) : **Ar, Ca, Cr, Mn**の**中性輝線の検出**
 - 多種輝線の等価幅を使った新しい制限・・・X線起源
- Sgr B1、Sgr C領域の分子雲の詳細スペクトル
 - 強い鉄輝線：等価幅 1—2 keV
- Sgr B2領域：時間変動
 - **2つの分子雲から同期した時間変動を発見**
 - 照射天体の必要光度 $L > 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ → SMBH Sgr A*の過去のフレア
- 銀河中心の6.4 keV分子雲の起源
 - Sgr A*からの単一フレアで説明可能
- **日本学術振興会育志賞を受賞**

おわり

分子雲以外からの中性鉄輝線放射

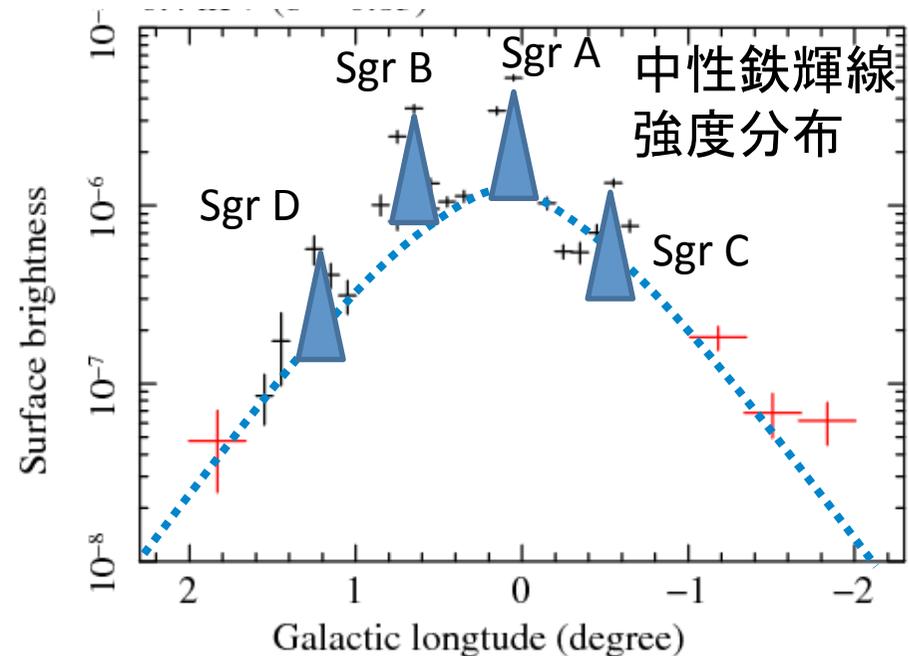
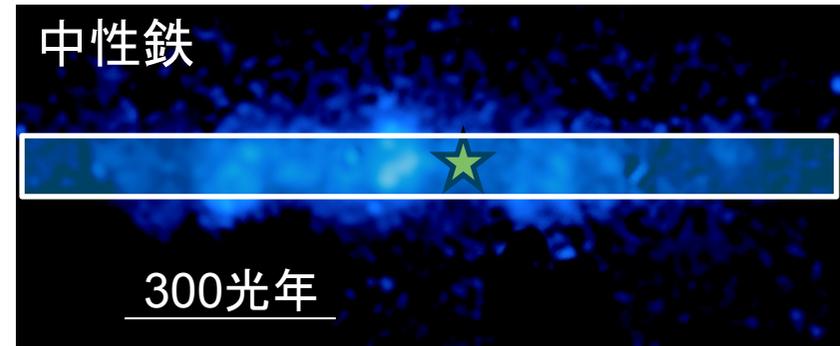
分子雲以外からの
広がった放射

=> 宇宙線電子/陽子？

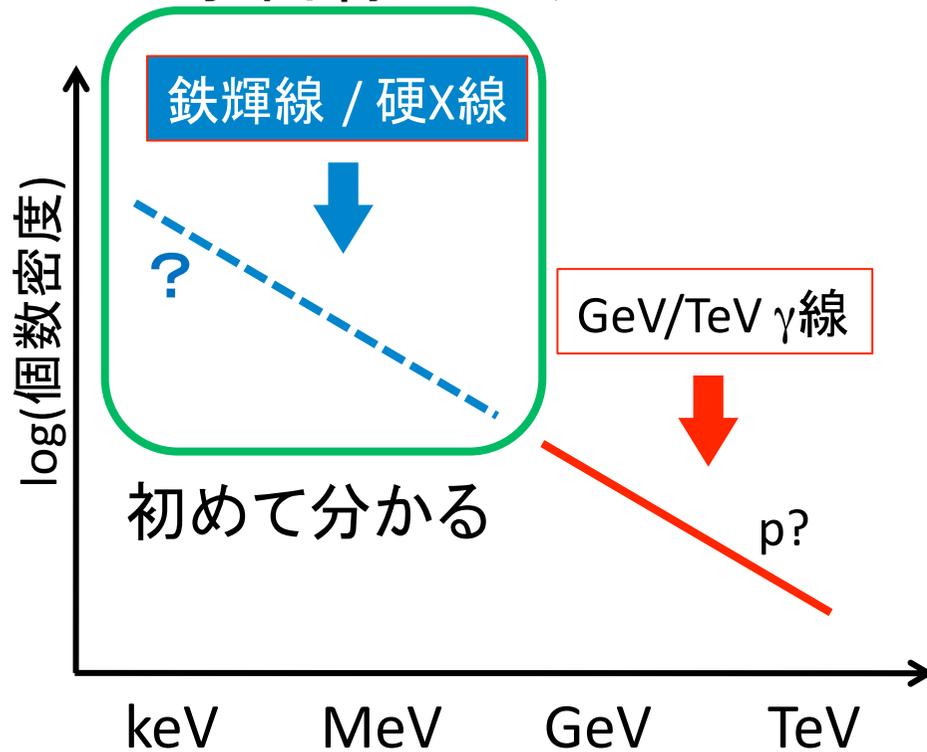
- Astro-H衛星(2013-)
- Fermi衛星 (GeVガンマ線)

世界初の宇宙線測定法

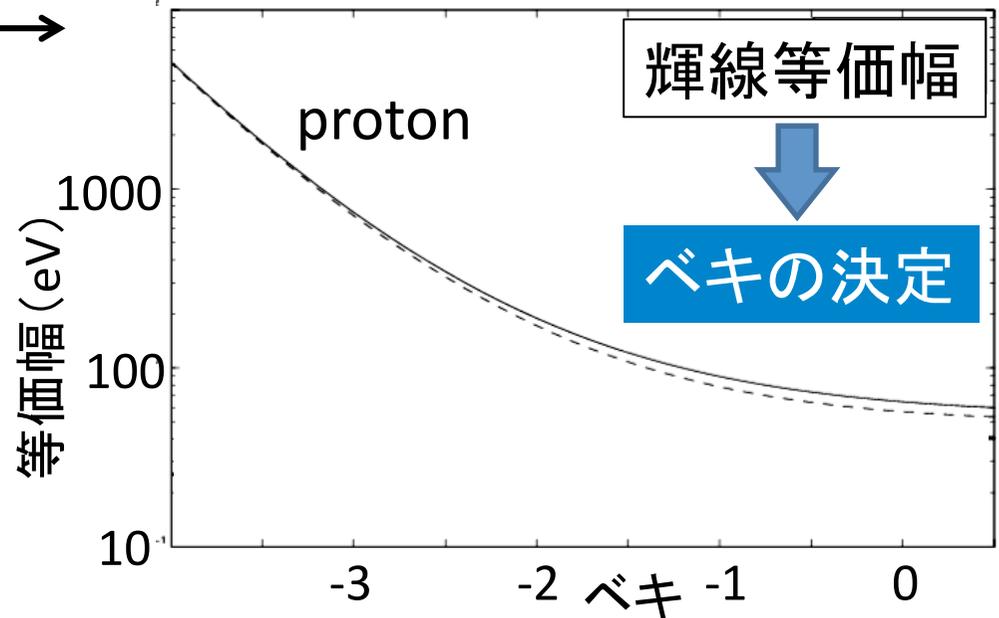
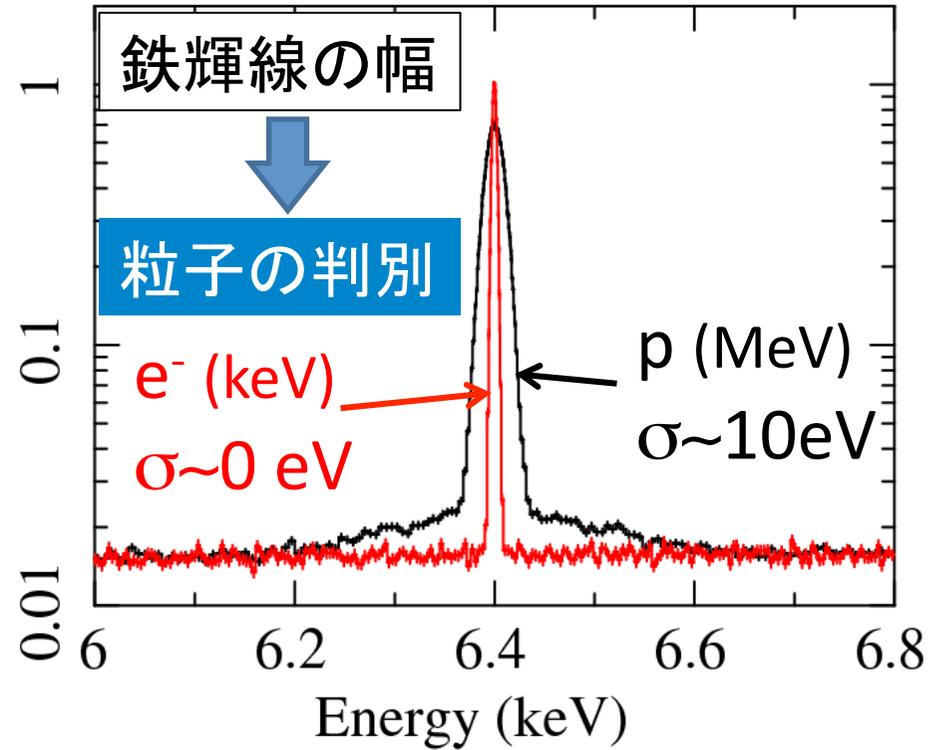
- 宇宙線分布・・・生成起源
- 銀河中心領域の高エネルギー現象



宇宙線スペクトル

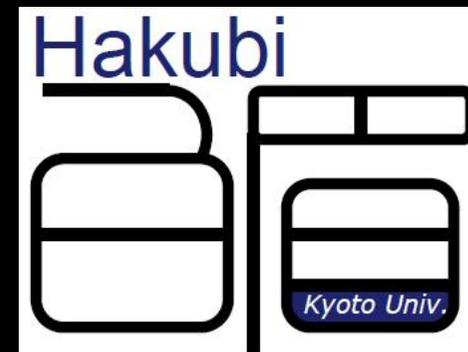


銀河中心の宇宙線分布
(エネルギー総量、ベキ)
を世界で初めて解明する





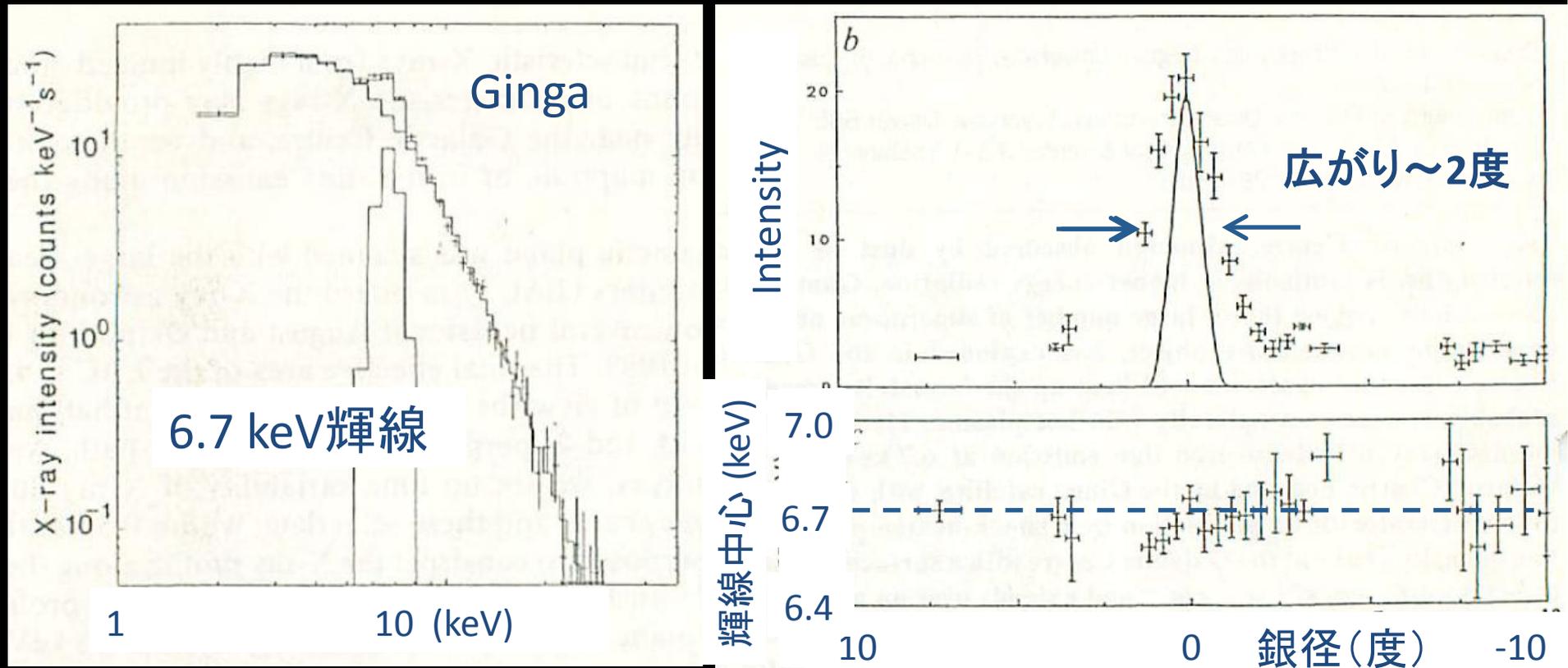
京都大学 白眉プロジェクト



- 毎年、分野を問わず20名程度を募集
- 特定教員(助教・准教授)として採用
- 5年任期: 中間評価などはない
- 研究費 100~400万円/年
- 平成24年度採用は平成23年3月から公募開始

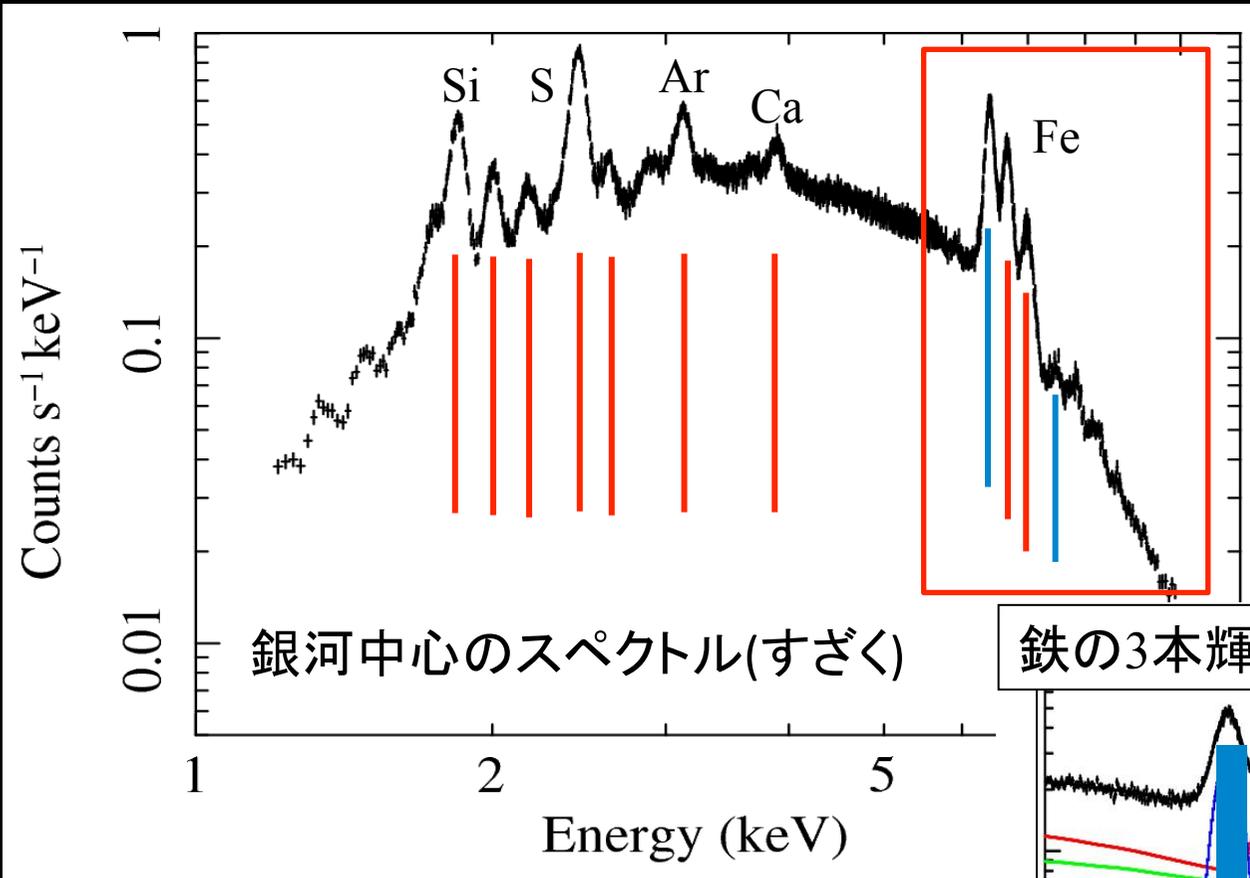
銀河中心領域の鉄輝線放射

Koyama+86; Yamauchi+90



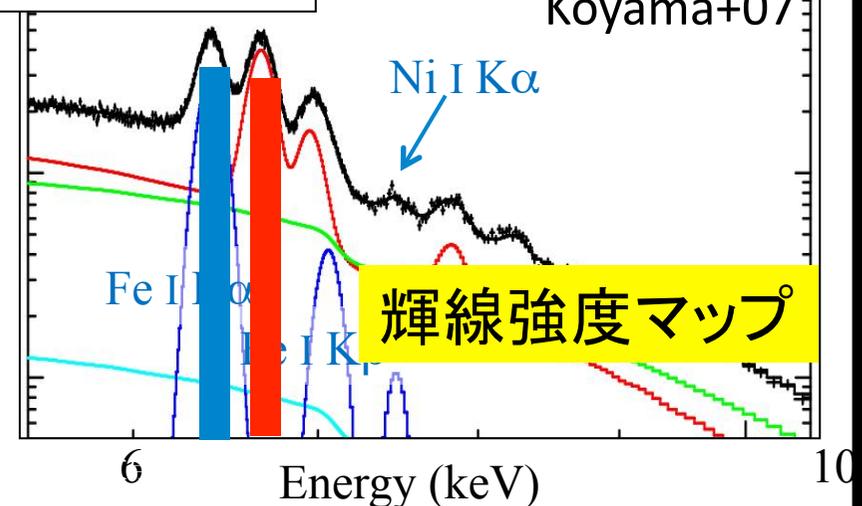
- 6.7 keV = He-like Fe 輝線 = 10^8 Kの高温プラズマ
 これまでの星間空間の常識 「中性領域 ($10-100$ K) + 電離領域 (10^4 K)」
- 銀河面に広がる成分 (~ 10 度)
 + 銀河中心に集中する成分 (~ 1 度)
- 場所によりエネルギー中心が異なる → 温度の違い/低温成分?

3つの鉄輝線



Si, S, Ar, Ca, Fe, Niの
He, H状のK輝線
Fe, Niの中性輝線

鉄の3本輝線



プラズマ + 中性成分

Abundances

6.4 keV = cold medium ($T \sim 10$ K)

Metal abundances

Sgr A*
★

X-ray origin	$1.6 Z_{\odot}$
electron origin	$4.7 Z_{\odot}$
Proton origin	$< 2 Z_{\odot}$

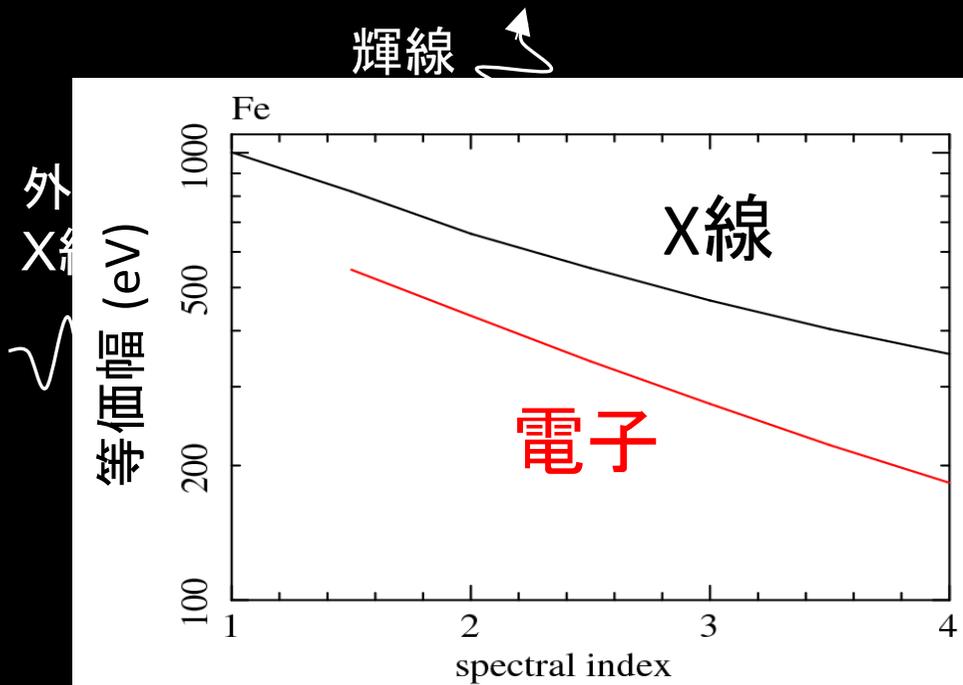
6.7 keV = hot plasma ($T \sim 10^{7-8}$ K)

★

$1-2 Z_{\odot}$

100 pc

中性輝線の起源



中性輝線:

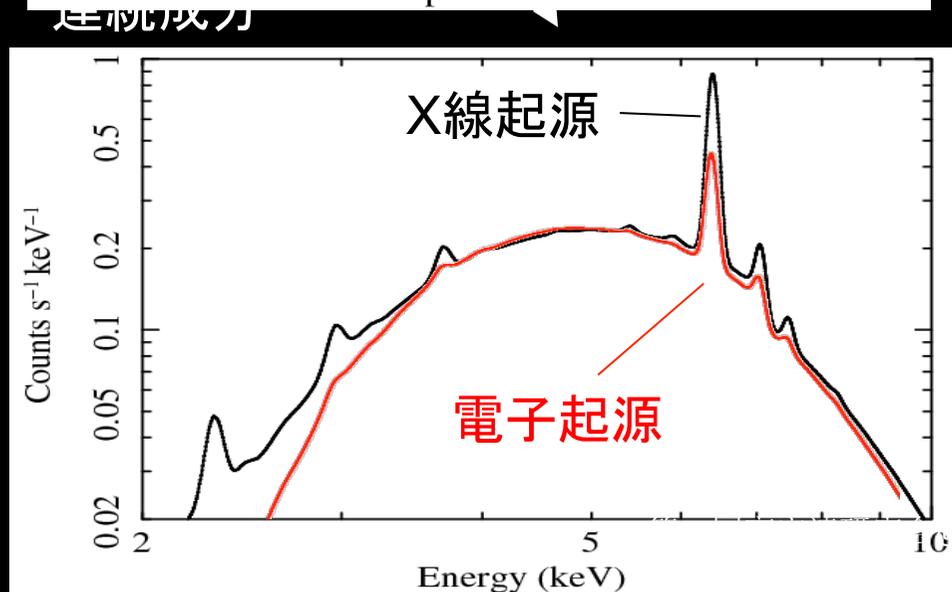
外部からのX線/電子が原子を電離することによる

連続成分:

X線・・・トムソン散乱

電子・・・制動放射

X線と電子では反応断面積のZ (原子番号)依存性が異なる



異なるX線スペクトル

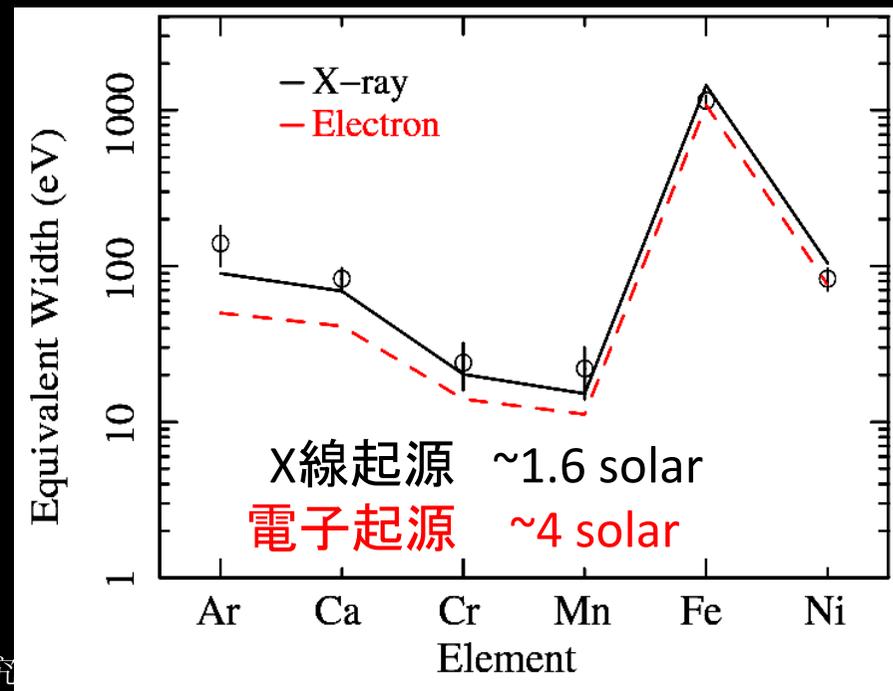
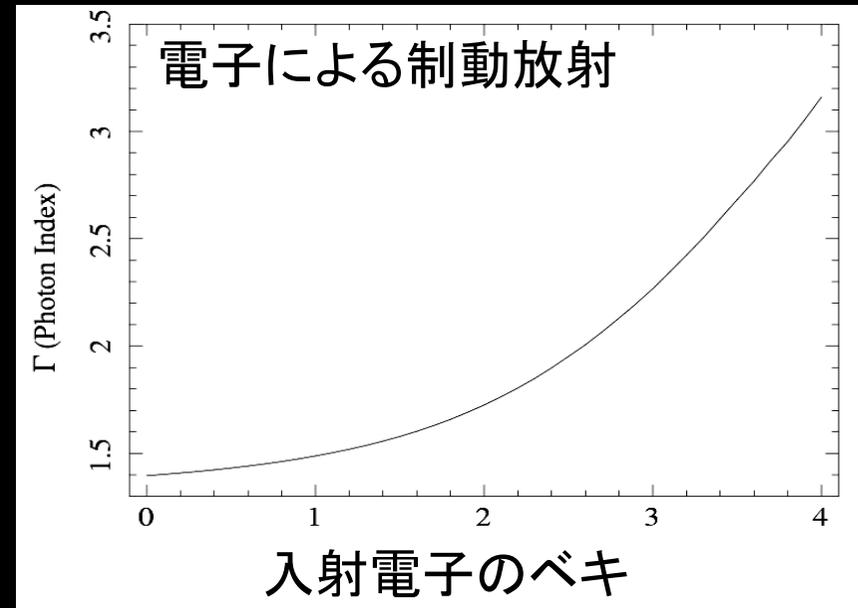
等価幅に大きな違い

※入射粒子のスペクトル形状に依存

中性K輝線の起源

- 入射粒子のスペクトル
観測値 $\Gamma=1.9$
X線起源 ベキは同じ
電子起源 ベキ $\alpha\sim 3$
- スペクトル(等価幅)
 - 電子起源... ~ 4 solar
/パターンが合わない
 - X線起源... ~ 1.6 solar
 - プラズマ... 1-2 solar

中性輝線はX線起源



Emission lines from the other atoms

- Other atoms than Fe should be exists
- Line intensity of atom M:

$$I_M = \epsilon_M \frac{\Omega}{4\pi} \int_{E_{\text{edge}}}^{\infty} (1 - e^{-N_M \sigma_M}) \underline{A E^{-\Gamma}} dE$$

ϵ : fluorescence yeild, N : column density (cm^{-2})
 σ : cross section(cm^2), E_{edge} : K-edge

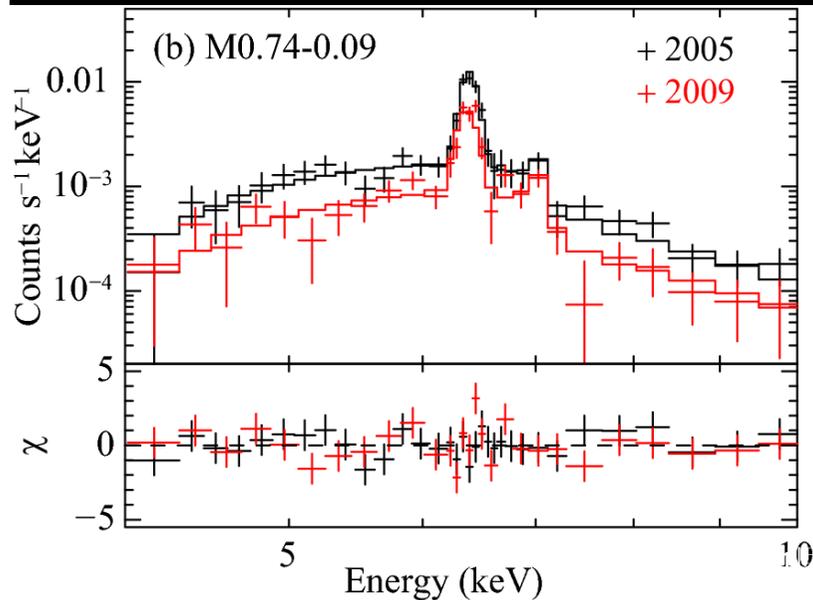
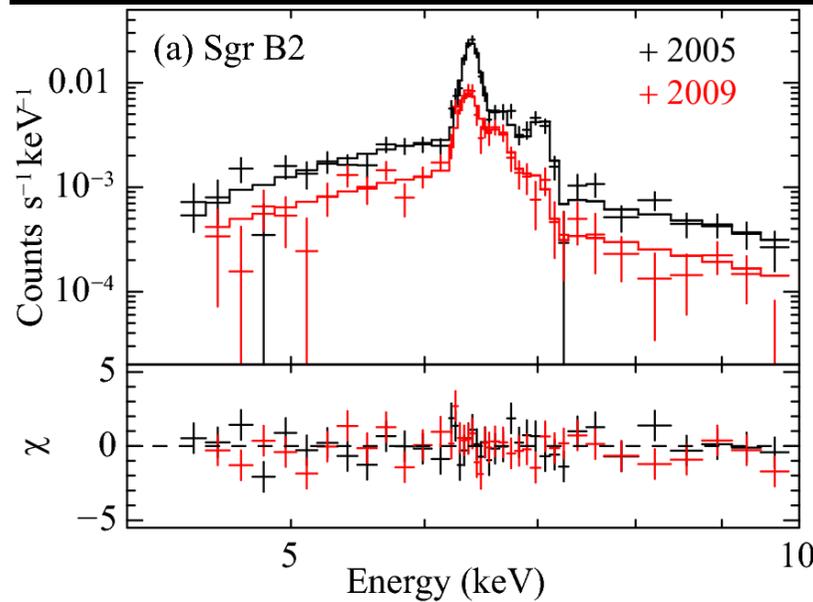
Spectrum of the irradiating source



Equivalent width (eV) (solar composition)

	Si	S	Ar	Ca	Cr	Mn	Fe
X-ray	1000	410	110	60	9	18	1200
ratio to Fe	0.8	0.3	0.1	0.05	0.008	0.02	—
Electron*	53	43	13	10	—	—	360
ratio to Fe	0.15	0.12	0.04	0.03	—	—	—

スペクトル



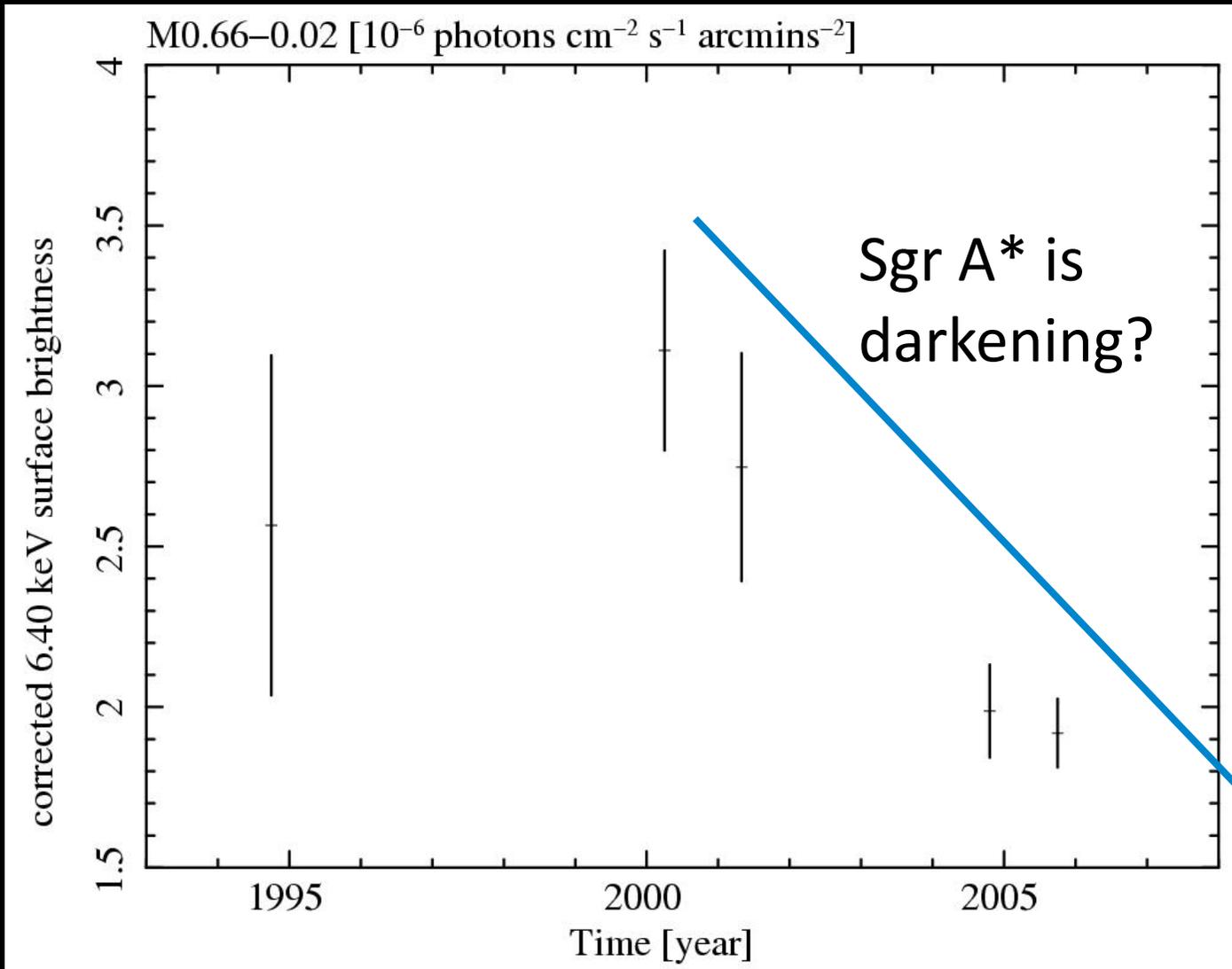
- スペクトル 輝線・連続成分が減少
- スペクトルフィット

吸収×(鉄輝線+連続成分)

	N_H 10^{23} cm^{-2}	Fluxの変化 (6.4keV)	Fluxの変化 (連続成分)
Sgr B2	6.6—11	0.39 ± 0.06	0.49 ± 0.15
M0.74	4.6—8.4	0.53 ± 0.10	0.53 ± 0.21

相関した変化

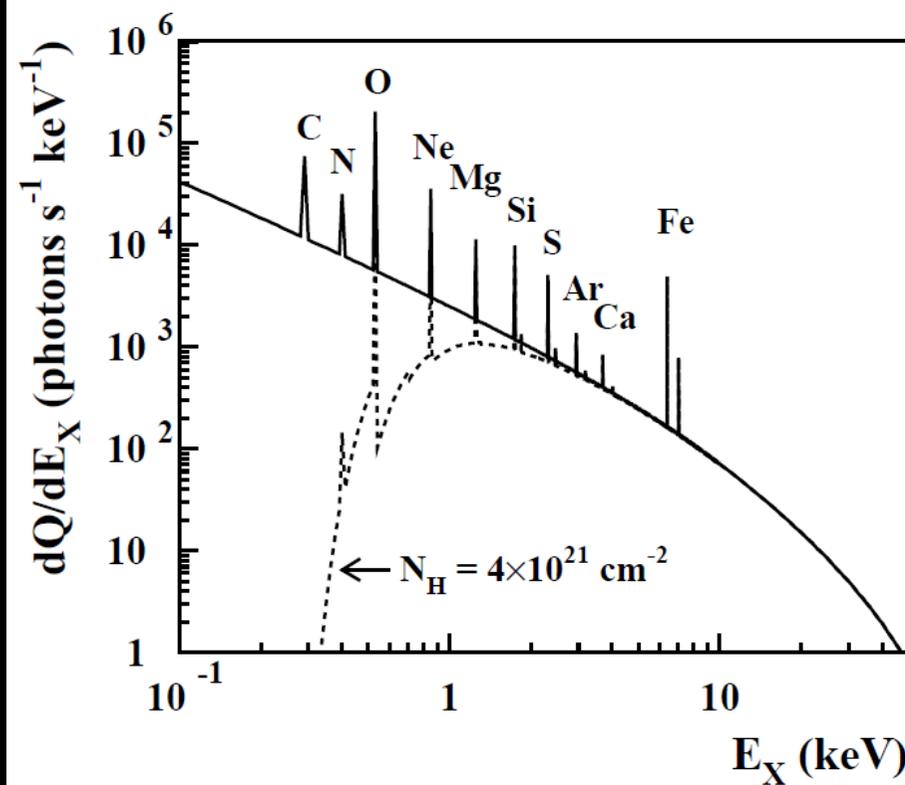
- 早い時間変動 4年間に半減
 ⇨ X線照射起源
- 等価幅 1.0—1.5 keV (X線起源~1keV)
 → 鉄の組成量 $Z_{\text{Fe}} = 1.0—1.5 \text{ solar}$
 鉄の吸収端 $Z_{\text{Fe}} = 1.3 \pm 0.5 \text{ solar}$



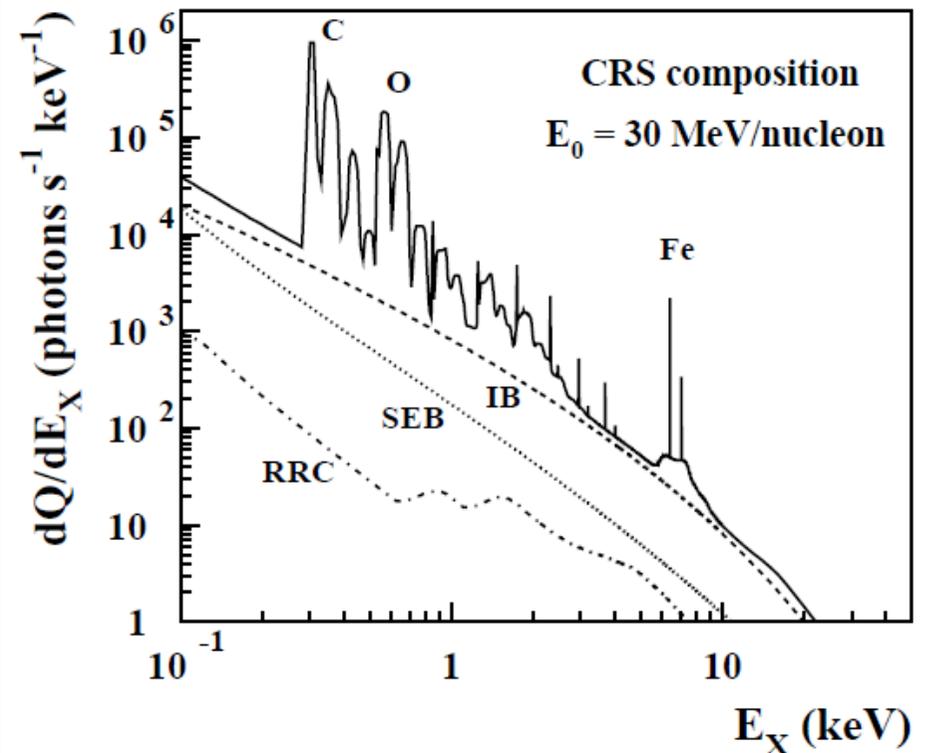
2009
+

It might be lucky that we have observed the light-echo from Sgr A*.

Electron origin

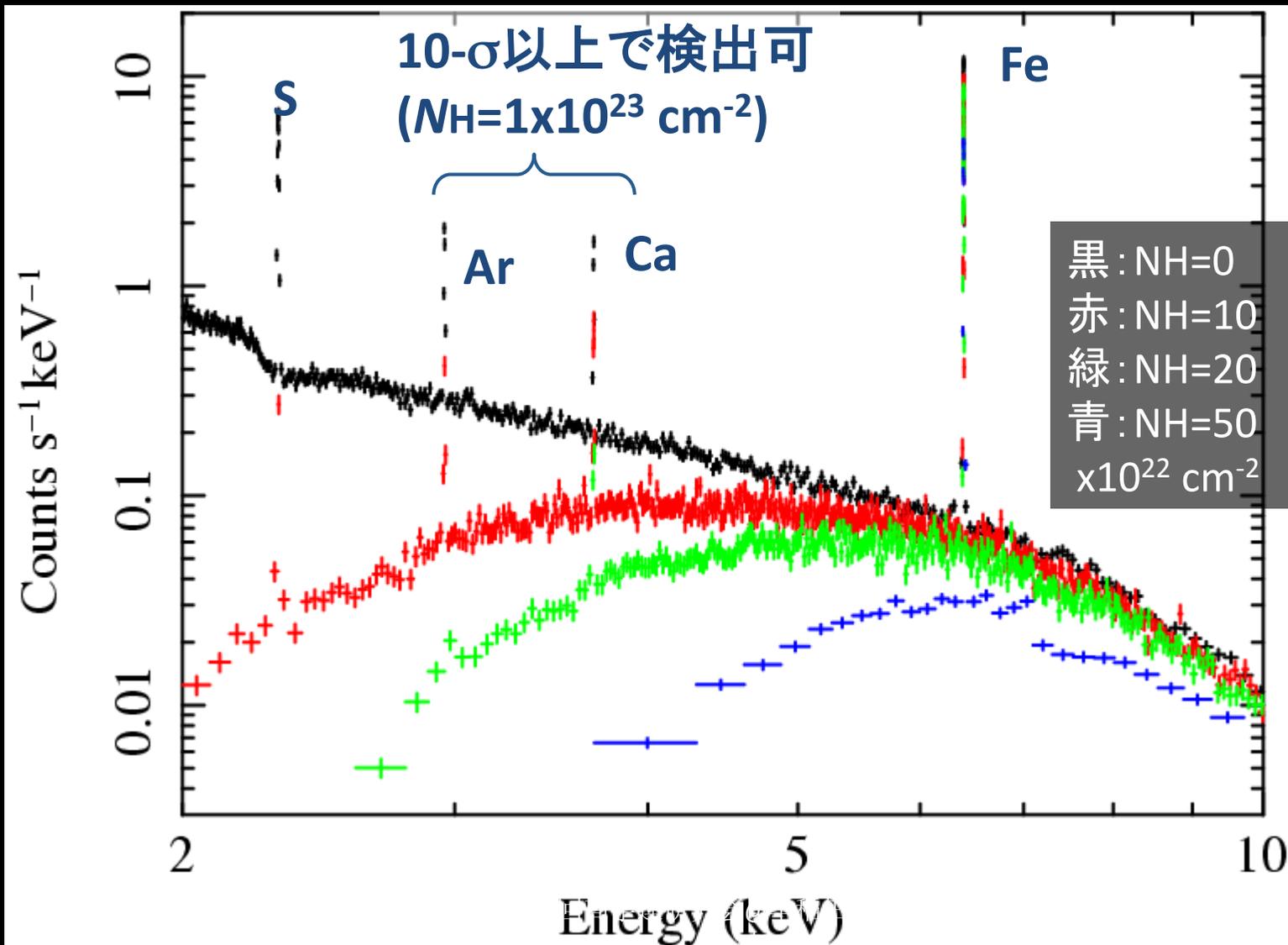


Ion origin



Tatischeff 2003

Astro-H / SXS

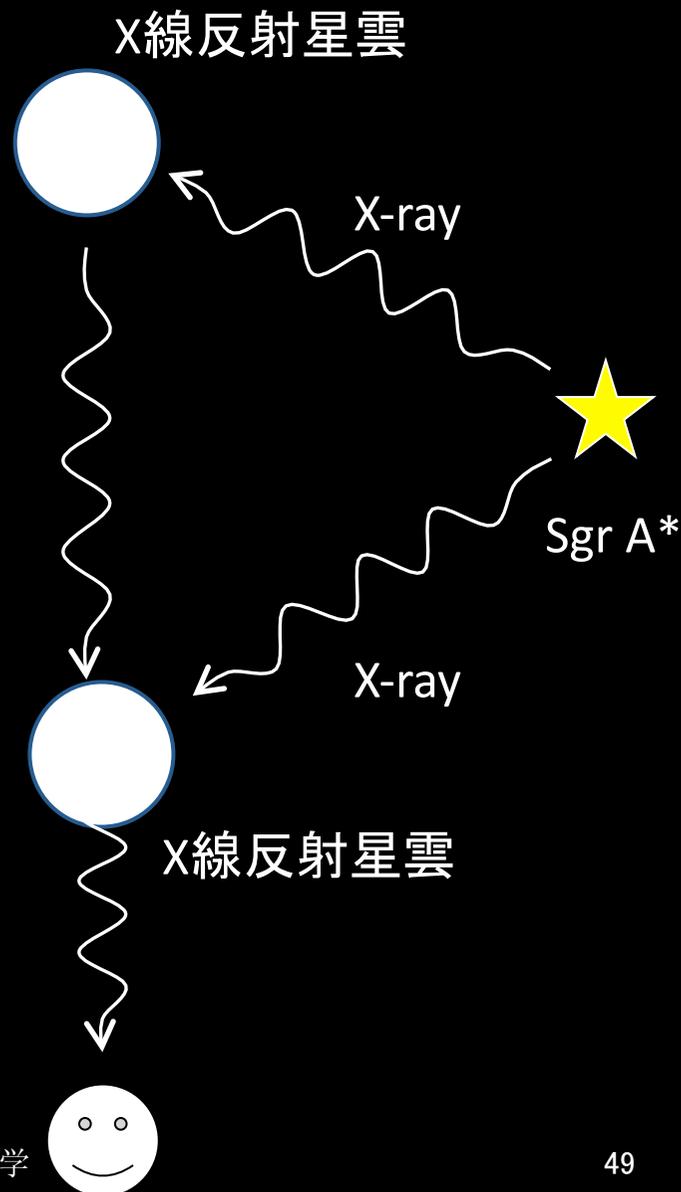
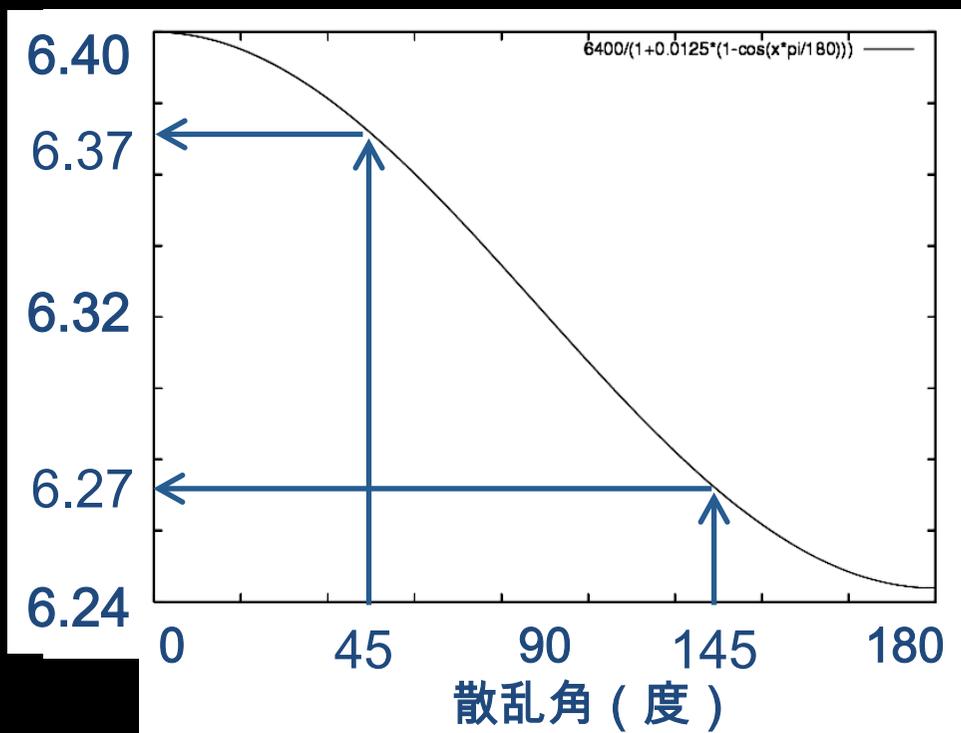


Compton shoulder

- Compton散乱の角度依存性

Compton散乱されたX線のエネルギー

$$E' = \frac{E_0}{1 + (E_0/m_e)(1 - \cos \theta)}$$

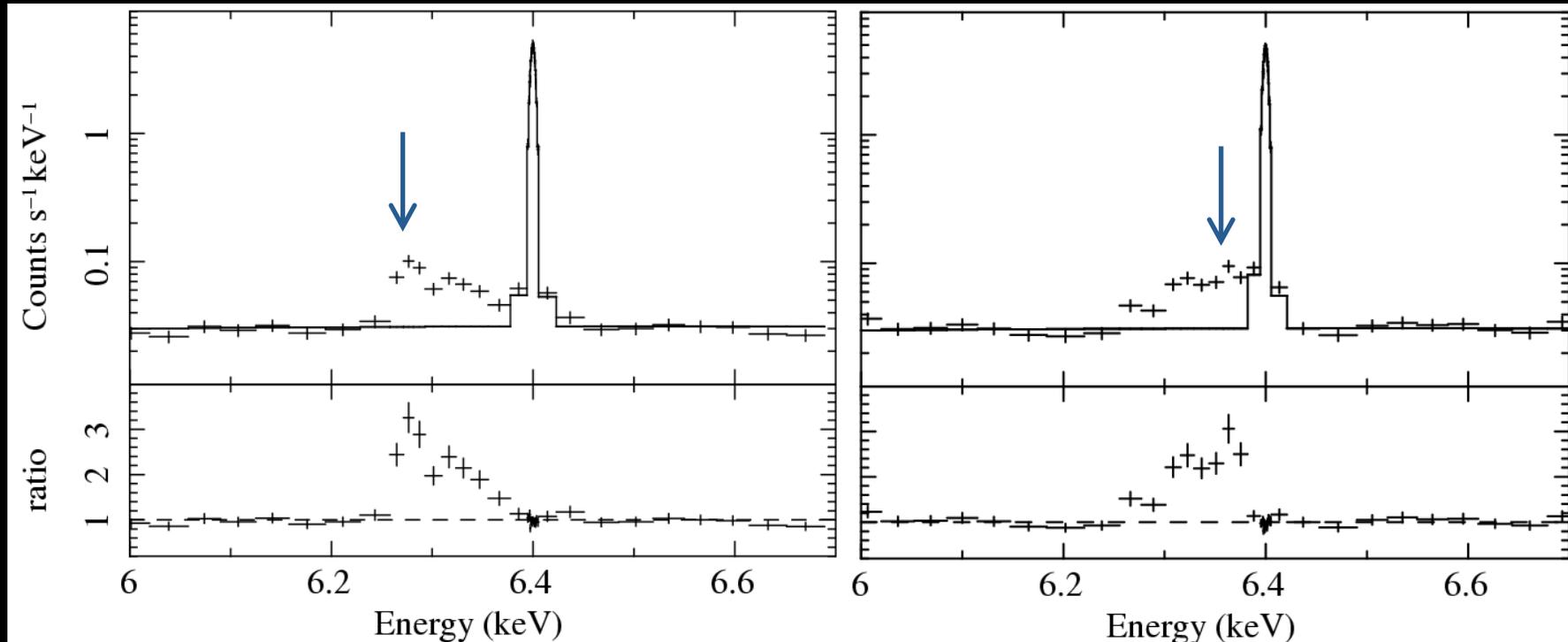


Compton shoulder

- 6.4-keV line + Compton scattered line

(broad) 分子雲が手前にある時

分子雲が奥にある時



Sgr B2分子雲と銀河中心の位置関係が分かる！！

Table 6.1: Best-fit parameters of various 6.4 keV clouds studied in this thesis.

Value	$I_{6.4\text{keV}}^\ddagger$	EW	N_{H}	Γ	n^\S	$d_{\text{proj}}^\parallel$	$d^\#$	L_{req}^{**}
Unit	$10^{-5} \text{ ph s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$	keV	10^{-23} cm^{-2}		H cm^{-3}	pc	pc	erg s^{-1}
Sgr A	34.0 ± 1.0	1.15 ± 0.09	1.9 ± 0.1	1.87 ± 0.04	4×10^3	30	50	7×10^{40}
Sgr B2	13.6 ± 0.7	1.3 ± 0.2	8.4 ± 0.9	2.5 ± 0.6	4×10^4	110	110	6×10^{40}
M 0.74–0.09	5.1 ± 0.4	1.3 ± 0.3	5.7 ± 0.4	$2.5^\dagger \ddagger$	3×10^4	120	170	8×10^{40}
Sgr B1	$2.8^{+0.2}_{-0.4}$	1.4 ± 0.3	$1.5^{+0.2}_{-0.1}$	$1.8^{+0.4}_{-0.5}$	3×10^3	90	90	1×10^{41}
M 359.43–0.07	$6.4^{+1.0}_{-1.1}$	$2.2^{+0.3}_{-0.4}$	$0.9^{+0.5}_{-0.4}$	$1.7^{+0.1}_{-0.2}$	$\sim 5 \times 10^3$	75	75	1×10^{41}
M 359.47–0.15	$8.8^{+1.2}_{-0.9}$	$2.0^{+0.2}_{-0.2}$	$0.8^{+0.4}_{-0.1}$	$1.6^{+0.3}_{-0.1}$	$\sim 5 \times 10^3$	75	75	1×10^{41}
G 0.174–0.233 [†]	0.6 ± 0.1	1.0 ± 0.2	0.8 ± 0.2	$1.7^{+0.1}_{-0.2}$	$\sim 1 \times 10^3$	50	75	1×10^{41}
M 359.23–0.04 [†]	$3.4^{+0.6}_{-0.8}$	$1.2^{+0.2}_{-0.4}$	$3.1^{+0.4}_{-1.2}$	$2.9^{+0.6}_{-0.7}$	7×10^3	100	100	8×10^{40}

* Errors are given at the 90% confidence levels.

[†] The parameters of G 0.174–0.233 and M 359.23–0.04 are referred to Fukuoka et al. (2009) and Nakashima et al. (2010), respectively.

[‡] Absorption-corrected intensity of the 6.4 keV line.

[§] Hydrogen densities in the clouds.

^{||} Projected distance to the super-massive black hole, Sgr A*.

[#] Actual distance to Sgr A* on the assumption that the clouds align on the paraboloidal surface (see text).

* Required luminosity for the 6.4 keV line if the irradiating source is Sgr A*.

^{††} Linked to the same value with that of Sgr B2.

すざくでみた銀河中心

- ◎ PV~AO3 : 6度×2度、65観測、合計時間3.5Ms
+ AO4で13視野観測予定

cf. Cygnus loop 44(PV+AO1-3) + 17 (AO4)視野

