

中性鉄輝線で探る 超新星残骸における低エネルギー宇宙線

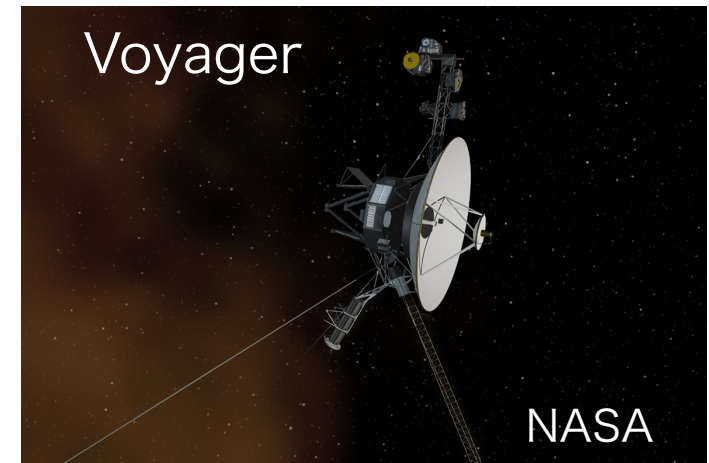
信川 久実子
(奈良女子大学)

なぜ低エネルギー宇宙線

SNRで銀河宇宙線の何割を説明できるのか？

「SNRで加速される宇宙線の総量」は観測的に未解明
数が多いはずの低エネルギー側 (keV-MeV) は未測定

直接観測 太陽変動の影響を受ける
=> 唯一の観測例がVoyager
(Stone+2013)



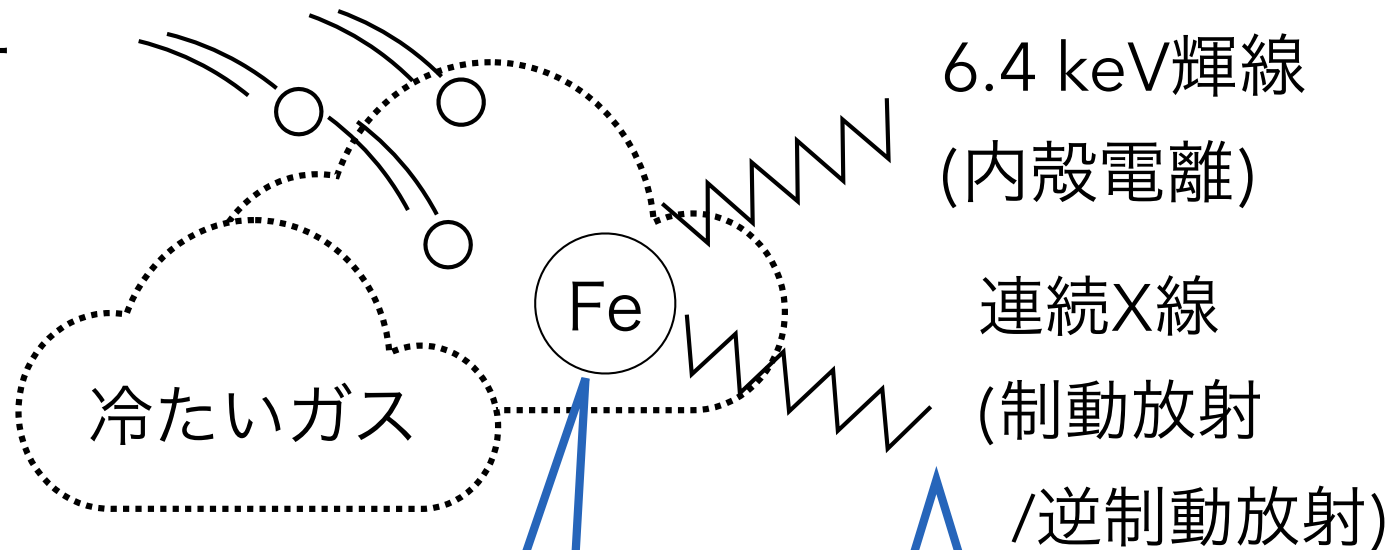
間接観測

- 電離率 ζ (H_3^+ 、 $\text{DCO}^+/\text{HCO}^+$)
=> 宇宙線密度やスペクトルは測定不可
(Indriolo & McCall 2012, Ceccarelli+2011)
- GeV ガンマ線観測 (π^0 崩壊)
=> 原理的に $> 280 \text{ MeV}$ の陽子を観測
(Ackermann+2013)

中性鉄輝線@6.4 keV

(e.g. Tatischeff 03)

低エネルギー
電子・陽子
(keV-MeV)



アバundanceも蛍光収率も高い
=> 中性元素からの蛍光X線の中で
鉄輝線が最も観測しやすい

電子か陽子かで連続X線の
強度異なる
=> 等価幅で粒子を区別可

5 keV以上で低バックグラウンドかつ有効面積大きい

「すざく」のデータを用い、SNRで中性鉄輝線探查

これまでの観測結果

10天体以上から低エネルギー宇宙線 (多くは陽子) 起源の
中性鉄輝線検出

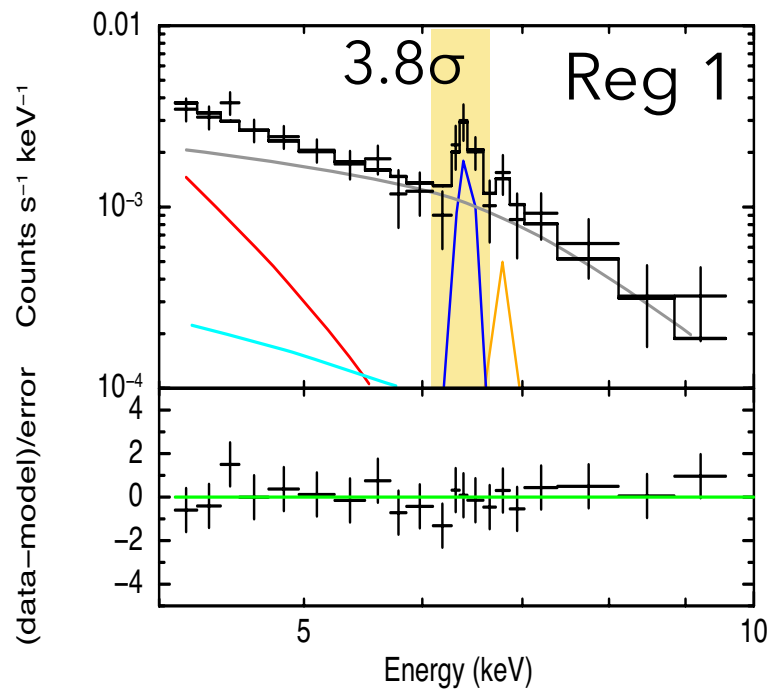
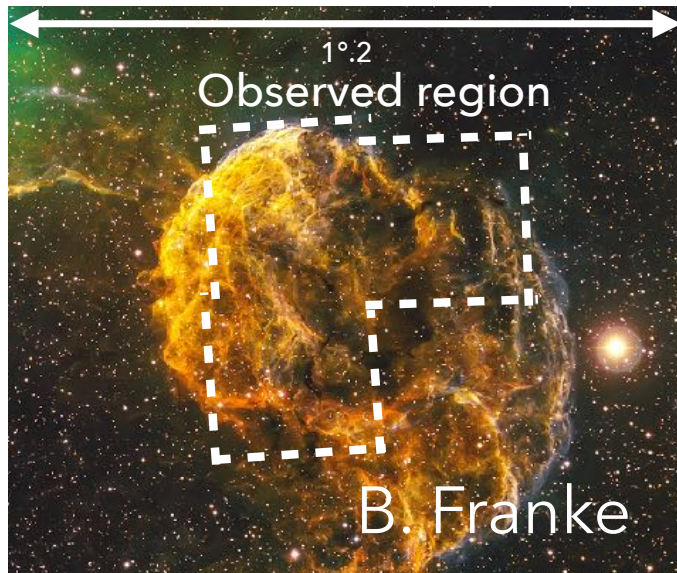
- W28 (Nobukawa+18, Okon+18)
- Kes 67 (Nobukawa+18)
- Kes 69 (Nobukawa+18)
- Kes 78 (Nobukawa+18)
- Kes 79 (Sato+16)
- 3C 391 (Sato+14)
- W44 (Nobukawa+18)
- G323.7-1.0 (Saji, Nobukawa+18)
- G330.2+1.0 (佐治D論18)
- G346.6-0.2 (佐治D論18)
- G348.5+0.1 (佐治D論18)
- Kes 17 (佐治D論18)
- N132D (Bamba, Nobukawa+18)
- IC 443 (Hirayama, Nobukawa+19)
- W51C (*preliminary*)

表面輝度 = several $\times 10^{-9}$ – several $\times 10^{-8}$ ph/s/cm²/arcmin²

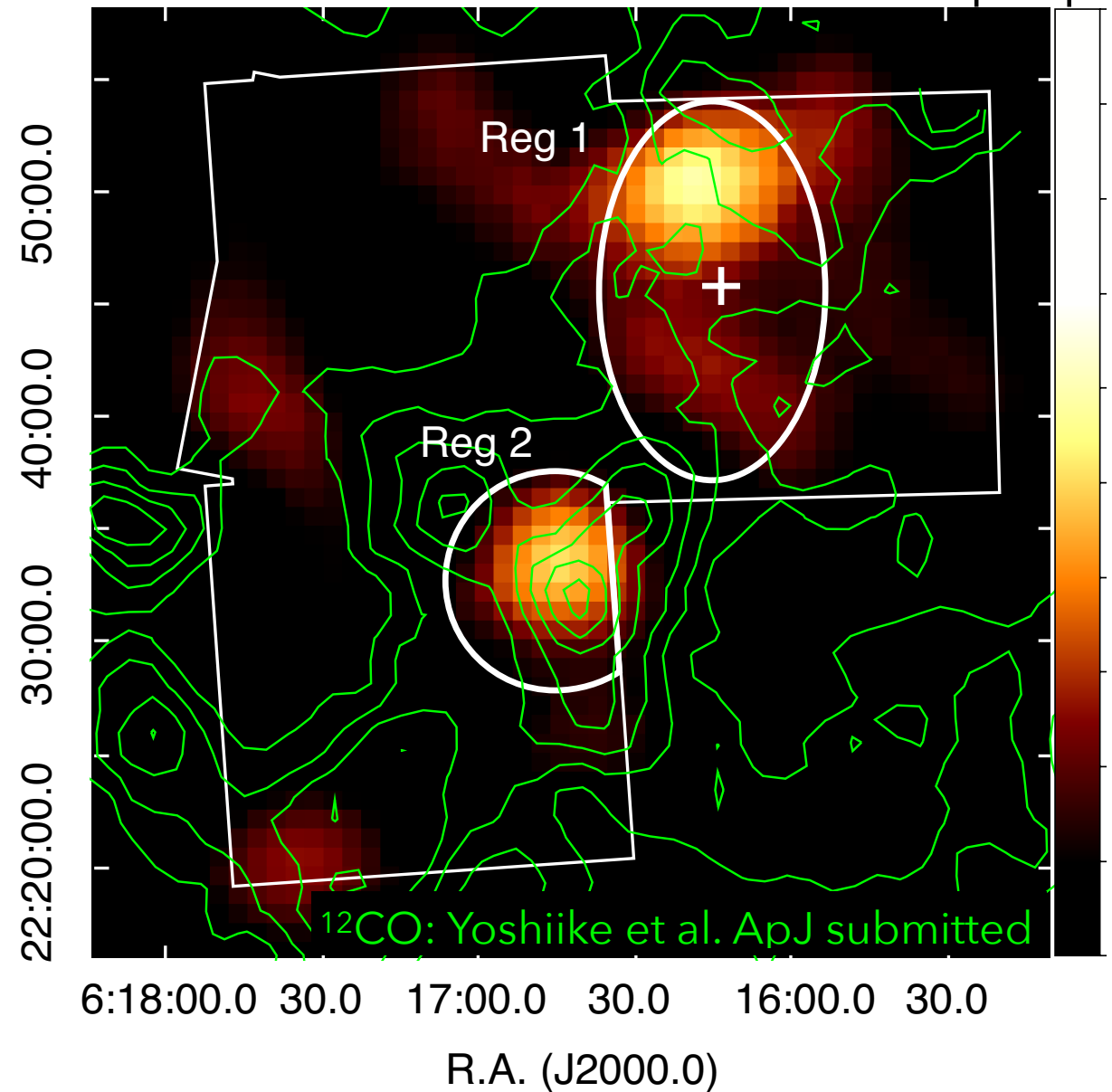
宇宙線のエネルギー密度 (MeV band) ~ 10 – 100 eV cm⁻³

IC 443

Nobukawa+ in prep.



Dec. (J2000.0)



本講演のトピック

これまでの観測結果をふまえ、以下を議論する

- ✓ 超新星残骸ではいつまで粒子加速を行っているか？
- ✓ 低エネルギー宇宙線のエネルギー論
- ✓ 高エネルギー宇宙線との比較
- ✓ 将来の低エネルギー宇宙線研究

中性鉄輝線とSNRの年齢

Very young (< 1000 yr)	none
Young (< 10,000 yr)	G330.2+1.0 / N132D
Middle-aged (< 100,000 yr)	W28 / Kes 69 / Kes 78 Kes 79 / 3C 391 / W44 G323.7-1.0 / G346.6-0.2 G348.5+0.1 Kes 17 IC 443 / W51C
Old (~100,000 yr)	Kes 67

✓ほとんどがMiddle-aged (+ old)

中性鉄輝線とSNRの年齢

観測バイアス

- 宇宙線起源の中性鉄輝線は微弱で、若いSNRでは埋もれる
 - 強いシンクロトロン放射 (例: RX J1713.7-3946)
 - 低電離プラズマ (鉄イジェクタ) からの ~ 6.4 keV輝線
(e.g. RCW86)

粒子加速への示唆

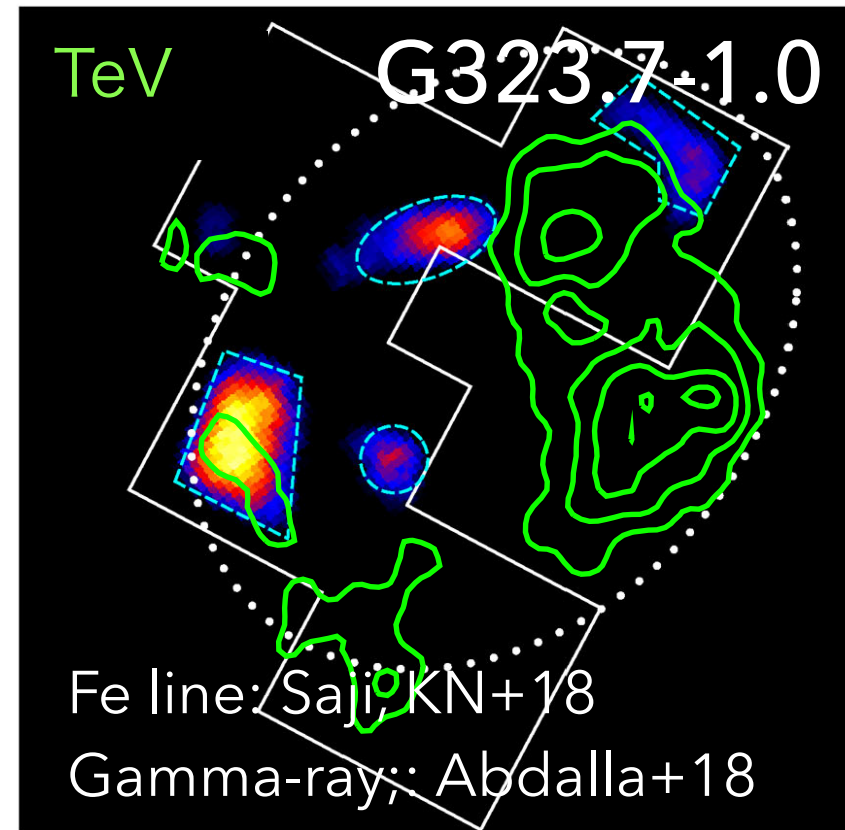
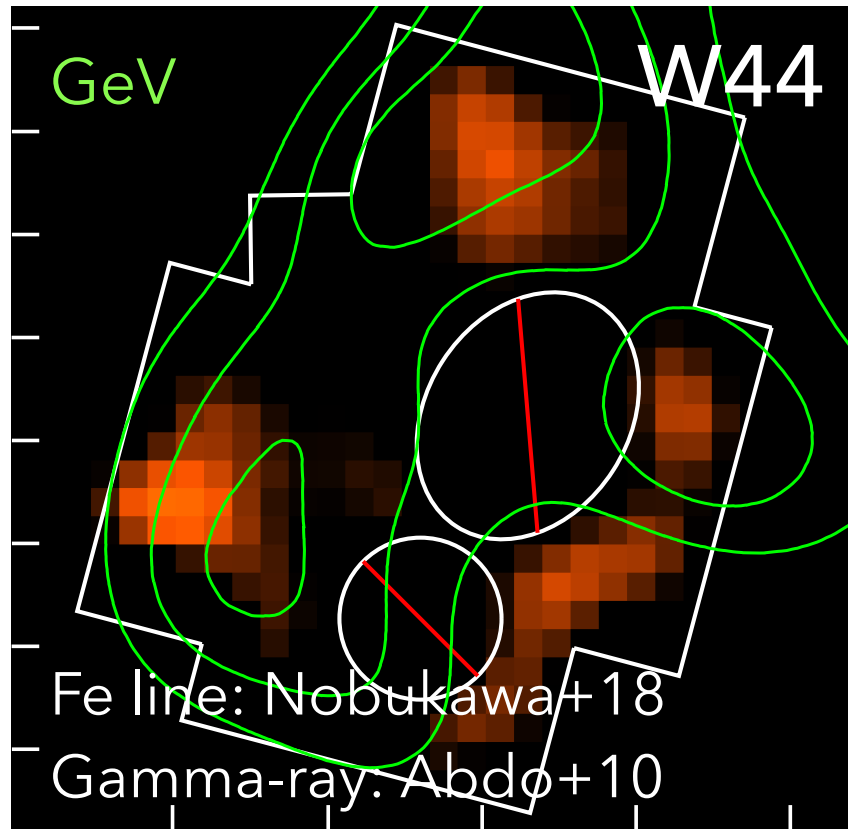
- 低エネルギー宇宙線はすぐ冷える (10^2 – 10^3 yr) @ 100 – 1000 cm $^{-3}$
- => 宇宙線起源の中性鉄輝線の存在は、middle-agedやold SNRで
少なくともMeVまで粒子加速が継続していることを示唆

中性鉄輝線とガンマ線

GeV	W44 / Kes 17 / 3C 391
GeV + TeV	W28 / Kes 78 G323.7-1.0 / G348.5+0.1 W51C / IC 443 / N132D
Non-detection	Kes 67 / Kes 69 / Kes 79 G330.2+1.0 / G346.6-0.2

✓ 中性鉄輝線SNRの半分以上はガンマ線放射あり

中性鉄輝線とガンマ線

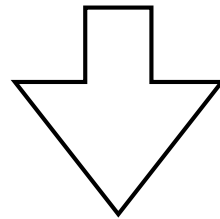


中性鉄輝線とガンマ線放射はいつも相関があるわけではない

- 低エネルギー側と高エネルギー側の拡散 or 逃亡の違い
- 低エネルギー宇宙線は加速されているが高エネルギーまでは加速されていない

エネルギー論

- ✓ 中性鉄輝線の強度から分かる低エネルギー宇宙線の総エネルギー量と爆発エネルギーの比較はあまり意味がない
- ✓ 低エネルギー宇宙線はすぐ冷える (10^2 - 10^3 yr)
 - $\Leftrightarrow$ GeV宇宙線の冷却時間 $\gtrsim$ middle-aged SNRの年齢
- ✓ MeV陽子の運動エネルギーから中性鉄輝線光度への変換率 10^{-7} (Tatischeff et al. 2012)



最近 10^2 - 10^3 yrで低エネルギー宇宙線加速に注入されたエネルギー
W44、IC443 $\Rightarrow \sim 10^{38}$ erg/s

Middle-aged でもこの程度のエネルギーは加速に使われている

これまでの研究で分かってきたこと

✓ 超新星残骸ではいつまで粒子加速を行っているか？

- Middle-aged以上でも低エネルギー宇宙線は加速されている

✓ 低エネルギー宇宙線のエネルギー論

- Middle-aged SNRでも 10^{38} erg/s のエネルギーが低エネルギー宇宙線加速に使われている

✓ 高エネルギー宇宙線との比較

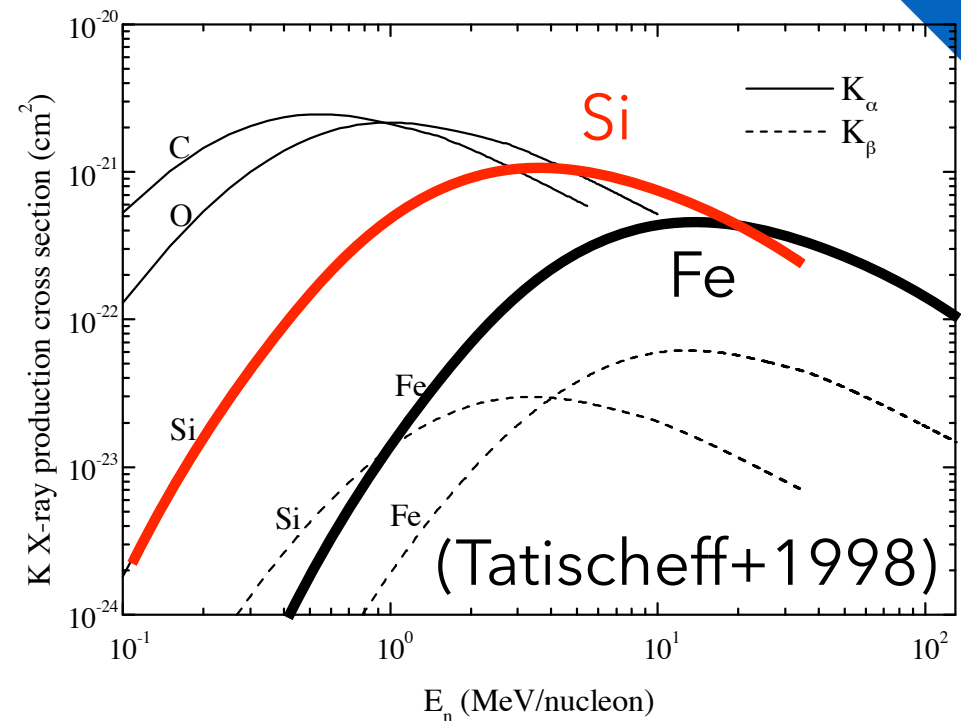
- 中性鉄輝線とガンマ線放射に必ずしも空間的相関はない
- escape modelで低エネルギー側 (MeV) と高エネルギー側 (GeV–TeV) を同時に説明する解はある

低エネルギー宇宙線のスペクトル・密度は謎のまま

将来への展望①

– 超精密分光 –

- Line profile => **衝突粒子の判別**
- さらに微弱な中性鉄輝線検出
=> 若いSNRからも？
- 他の元素からの中性輝線検出
=> **宇宙線スペクトル測定**



元素	エネルギー (K α_1 , K α_2)	K輝線生成断面積	アバundance (H=1)
Fe	6404 eV 6391 eV	$4 \times 10^{-22} \text{ cm}^2$	3×10^{-5}
Si	1739 eV 1740 eV	$1 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$	3.5×10^{-5}

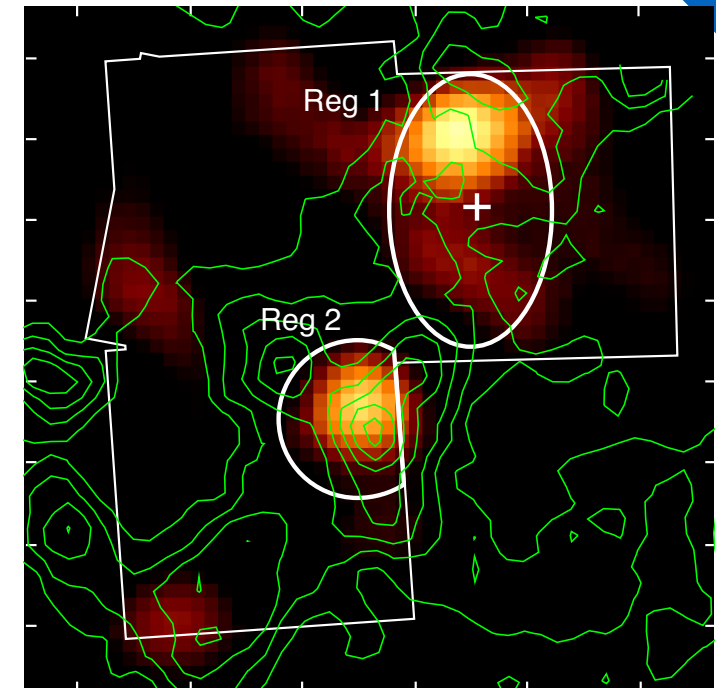
Si も Feと同程度の強度で中性輝線出ているはず

CCDでは、Si I K α は Mg XII Ly β (1745 eV) と区別が困難

将来への展望②

－ 高角度分解能 －

- 中性鉄輝線分布の詳細な構造
=> **低エネルギー宇宙線の密度分布**
- 中性鉄輝線分布の変化@10年スケール
(低エネルギー宇宙線の冷却時間100年)
=> 低エネルギー宇宙線（陽子）加速・拡散の時間発展
- 銀河面上の中性鉄輝線 (Nobukawa et al. 2015) の観測
=> **未知の加速源** (隠れたSNR、統計加速) の解明



中性鉄輝線を用いた低エネルギー宇宙線のサイエンスは、
超精密分光、高角度分解能のどちらでも面白みがある。

まとめ

中性鉄輝線を用いた低エネルギー宇宙線研究で分かってきたこと

✓ 超新星残骸ではいつまで粒子加速を行っているか？

- Middle-aged以上でも低エネルギー宇宙線は加速されている

✓ 低エネルギー宇宙線のエネルギー論

- Middle-aged SNRでも 10^{38} erg/s のエネルギーが低エネルギー宇宙線加速に使われている

✓ 高エネルギー宇宙線との比較

- escape modelで低エネルギー側 (MeV) と高エネルギー側 (GeV–TeV) を同時に説明する解はある

将来の低エネルギー宇宙線研究

✓ 超精密分光でも高角度分解能でも重要な成果

(宇宙線のスペクトル、密度の測定 + α)