

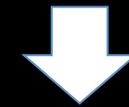
# 若いTeVガンマ線超新星残骸における 星間ガスとガンマ線・X線放射

○ 佐野 栄俊 (名大理D2)

佐藤淳基, 福田達哉, 吉池智史, 鳥居和史, 早川貴敬, 山本宏昭, 奥田武志,  
犬塚修一郎, 福井康雄 (名大理), 田中孝明 (京大理), 松本浩典 (名大KMI),  
内山泰伸 (Stanford 大KIPAC/JAXA), 井上剛志 (青山学院大理), 河村晶子,  
水野範和 (NAOJ), 水野亮 (名大STE), 西村淳, 大西利和 (大阪府立大理),  
他NANTENチーム

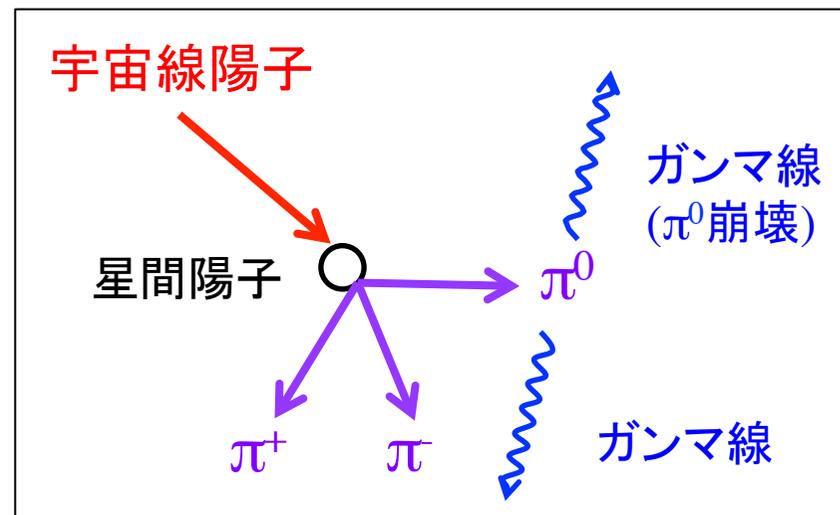
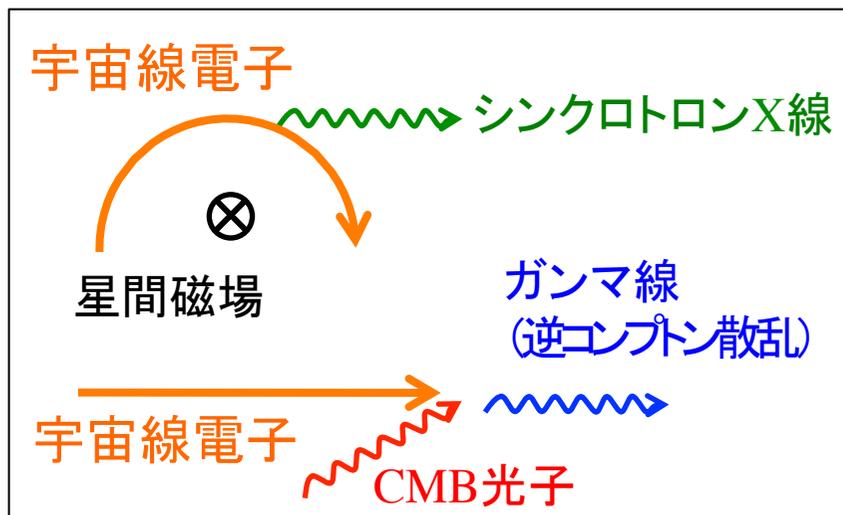
## ■ 超新星残骸：大質量星が超新星爆発した後に残される残骸

- $10^{51}$  erg のエネルギー放出
- 超音速衝撃波層の形成・膨張



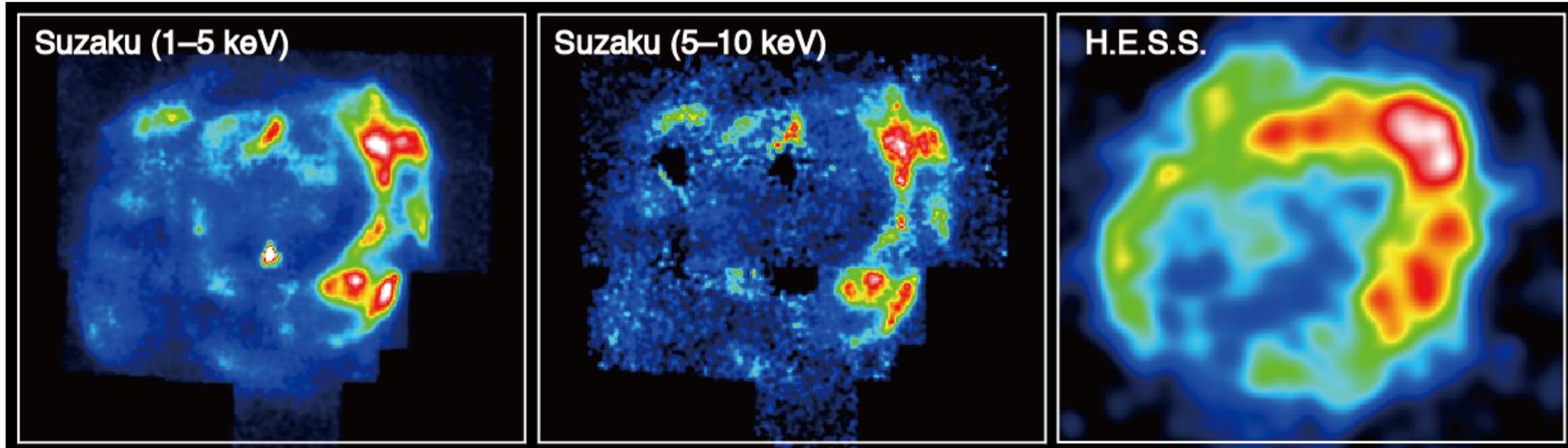
星間空間へ多大な影響を与える

- 衝撃波と星間物質との相互作用
- 星間空間への重元素の供給
- 新たな星の誕生(e.g., Sano+10)
- 衝撃波面 ( $\sim 1000$  km/s) における宇宙線粒子加速 etc.



- 宇宙線電子: シンクログロンX線の検出により、加速は証明 (e.g., Koyama+95)
- 宇宙線陽子: スペクトルの違いから I.C. と  $\pi_0 \rightarrow 2\gamma$  を切り分ける試みが進められ、Middle Aged SNR については、加速が示唆されつつある
  - ⇒ 非一様ISM中にあるSNRは、スペクトルによる切り分けは困難 (Inoue+12)

SNRで宇宙線陽子が加速されているか否かを明らかにすることが、この研究分野の最大の焦点の1つ



## ■ RX J1713.7–3946 (G347.3–0.5)

### ○ 非熱的X線 (TeV電子 Synchrotron 放射)

Koyama+97, Slane+99, Uchiyama+03,07, Lazendic+03,+04, Cassam-Chenai+04, Hiraga+05, Tanaka+08, Takahashi+08, Acero+09

### ○ TeVガンマ線で明るい

Muraishi+00, Enomoto+02, Aharonian+04,06,07

### ○ 年齢 $\sim 1600$ yr, 距離 $\sim 1$ kpc

Fukui+03, Wang+97

### ○ 星間ガスとの相互作用

- 恒星風による高真空キャビティー
- 高密度分子雲が球殻状に分布

$$H_2: 0.9 \times 10^4 M_{\odot} \simeq HI: 1.1 \times 10^4 M_{\odot}$$

Fukui+03,+12, Moriguchi+05, Uchiyama+05, Sano+10

## ■ RX J0852.0–4622 (Vela Jr.)

### ○ 非熱的X線+熱的X線 (後者はVela SNR)

Tsunemi+00, Slane+01 (ASCA), Iyudin+05 (XMM-Newton), Bamba+05 (Chandra), Hiraga+08 (Suzaku)

### ○ TeVガンマ線で明るい

Katagiri+05, Enomoto+06 (CANGAROO), Aharonian+05, +07, Arribas+12 (H.E.S.S.), Tanaka+12 (Fermi)

### ○ 年齢 $\sim 2000$ yr, 距離 $\sim 750$ pc

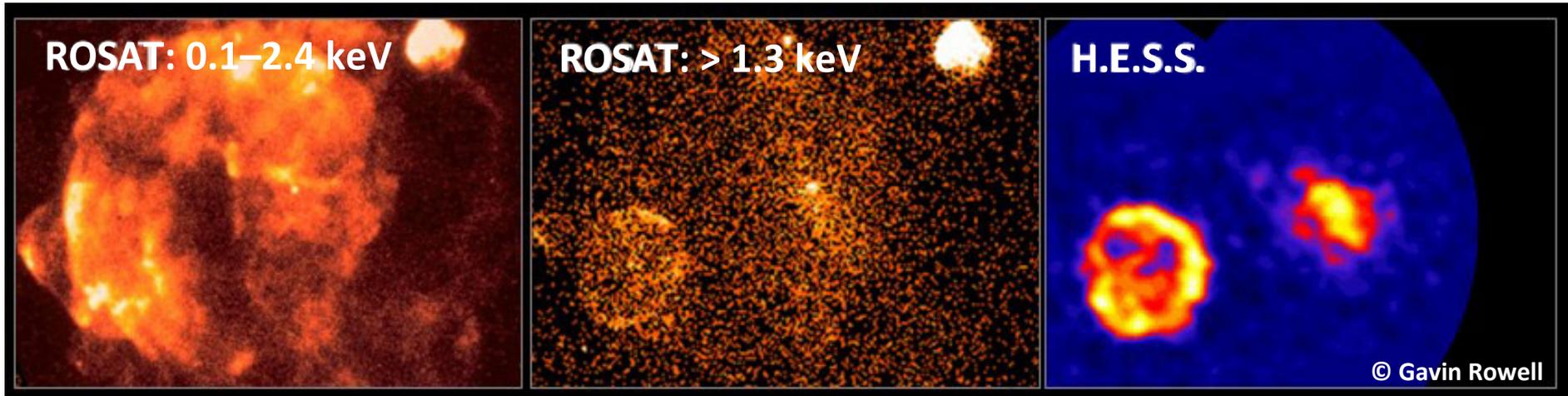
Katsuda+08

### ○ 星間ガスとの相互作用

- 恒星風によるHIシェルを形成
- わずかだが分子雲も存在

$$H_2: 0.1 \times 10^4 M_{\odot} \ll HI: 1.0 \times 10^4 M_{\odot}$$

Fukui, Sato, Sano+12 in prep., Sano+12 in prep.



## ■ RX J1713.7–3946 (G347.3–0.5)

### ○ 非熱的X線 (TeV電子 Synchrotron 放射)

Koyama+97, Slane+99, Uchiyama+03,07, Lazendic+03,+04, Cassam-Chenai+04, Hiraga+05, Tanaka+08, Takahashi+08, Acero+09

### ○ TeVガンマ線で明るい

Muraishi+00, Enomoto+02, Aharonian+04,06,07

### ○ 年齢 ~1600yr, 距離 ~1 kpc

Fukui+03, Wang+97

### ○ 星間ガスとの相互作用

- 恒星風による高真空キャビティー
- 高密度分子雲が球殻状に分布

$$H_2: 0.9 \times 10^4 M_{\odot} \simeq H I: 1.1 \times 10^4 M_{\odot}$$

Fukui+03,+12, Moriguchi+05, Uchiyama+05, Sano+10

## ■ RX J0852.0–4622 (Vela Jr.)

### ○ 非熱的X線+熱的X線 (後者はVela SNR)

Tsunemi+00, Slane+01 (ASCA), Iyudin+05 (XMM-Newton), Bamba+05 (Chandra), Hiraga+08 (Suzaku)

### ○ TeVガンマ線で明るい

Katagiri+05, Enomoto+06 (CANGAROO), Aharonian+05, +07, Arribas+12 (H.E.S.S.), Tanaka+12 (Fermi)

### ○ 年齢 ~2000yr, 距離 ~750 pc

Katsuda+08

### ○ 星間ガスとの相互作用

- 恒星風によるHIシェルを形成
- わずかだが分子雲も存在

$$H_2: 0.1 \times 10^4 M_{\odot} \ll H I: 1.0 \times 10^4 M_{\odot}$$

Fukui, Sato, Sano+12 in prep., Sano+12 in prep.

これらガンマ線放射が宇宙線陽子起源 ( $\pi_0$  decay) であるならば、宇宙線陽子のターゲットとなる星間陽子が必要

$$F \propto \frac{W_p n}{d^2}$$

$W_p$  ..... Total energy in accelerated protons  
 $n$  ..... Target ISM proton density  
 $d$  ..... Distance to the SNR

分子雲 (高密度水素分子  $H_2$ ): 密度  $10^2 \text{ cm}^{-3}$  以上,  $T_k=10-20 \text{ K}$   
原子ガス (中性水素原子  $H_I$ ): 密度  $1-100 \text{ cm}^{-3}$ ,  $T_k=30-100 \text{ K}$

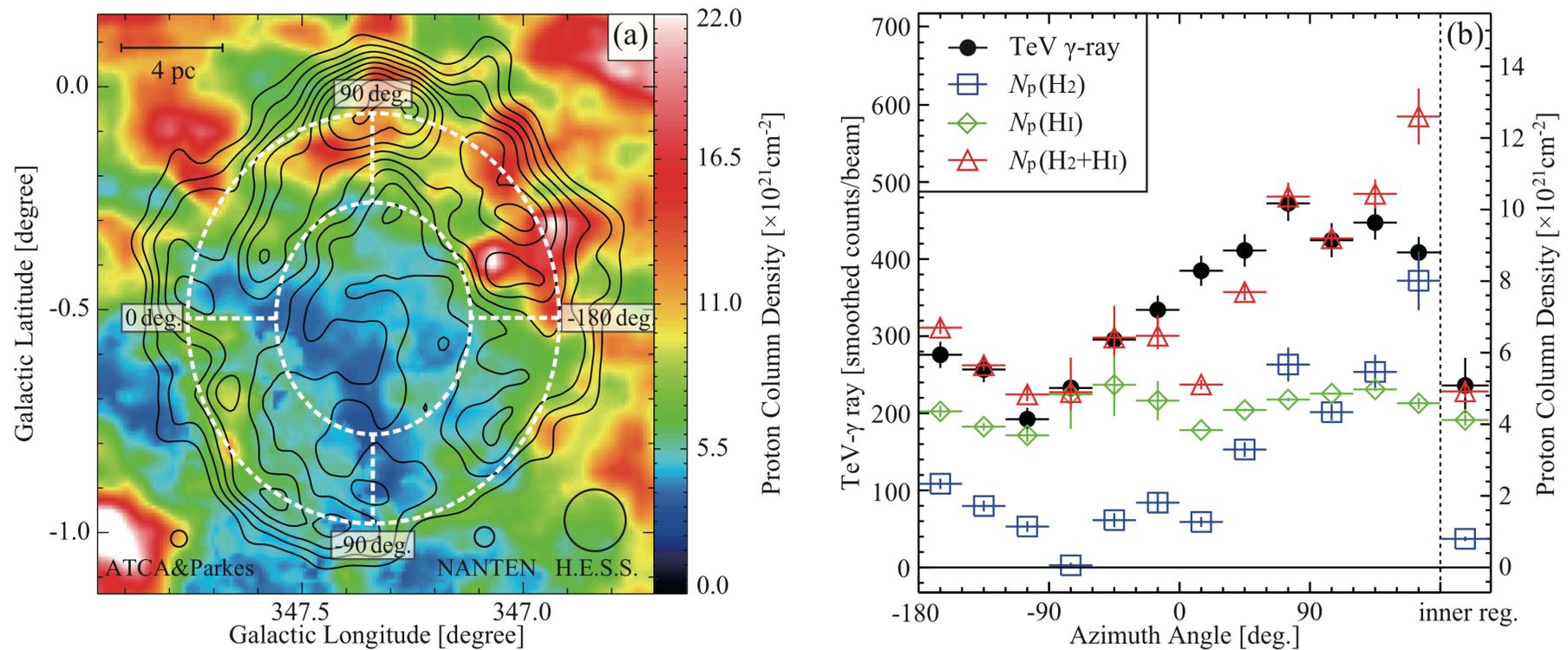
- TeVガンマ線と星間陽子 (水素分子+原子) の比較
  - $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ ,  $H_I$  ガスから全星間陽子を同定、ガンマ線と比較
  - 星間陽子密度から、宇宙線陽子の加速効率を推定

星間陽子とTeVガンマ線の空間的相関は、宇宙陽子加速の必要条件

# TeV $\gamma$ -ray vs. Target ISM Proton

## ■ RX J1713.7–3946

- 水素分子と原子の質量比は同程度 ( $H_2: 0.9 \times 10^4 M_\odot$ ,  $HI: 1.1 \times 10^4 M_\odot$ )
  - 宇宙線陽子の加速効率は  $0.1\%$  ( $\sim 10^{48}$  erg) 程度
- ⇒ 宇宙線陽子が加速されていると考えても矛盾はしない



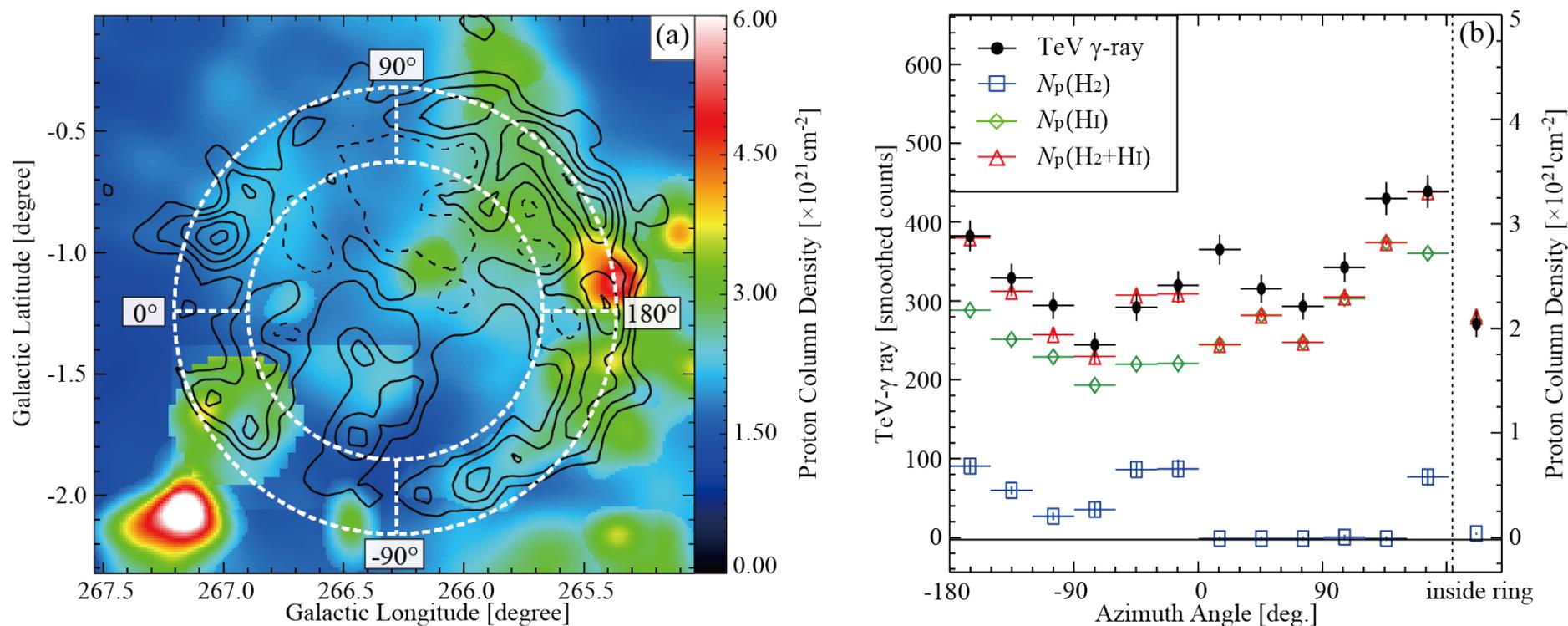
[左図] イメージ: 全星間陽子柱密度  $N_p(H_2+HI)$ , コントア: TeV ガンマ線強度 (Fukui, Sano et al. 2012)

[右図] TeVガンマ線, 水素分子 ( $\times 2$ )  $N_p(H_2)$ , 水素原子  $N_p(HI)$ , 全星間陽子  $N_p(H_2+HI)$  の方位角分布

# TeV $\gamma$ -ray vs. Target ISM Proton

## ■ RX J0852.0-4622

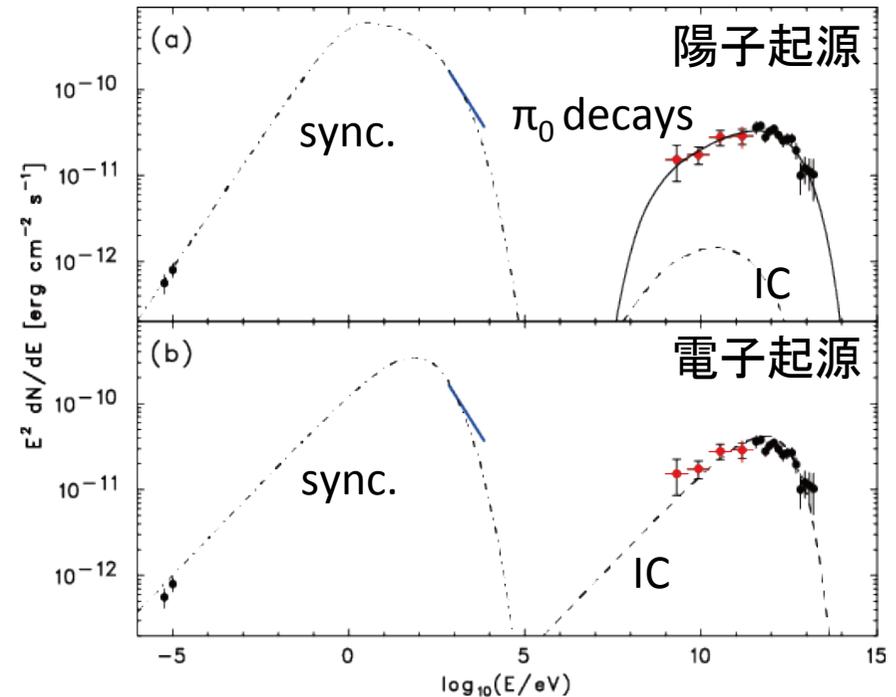
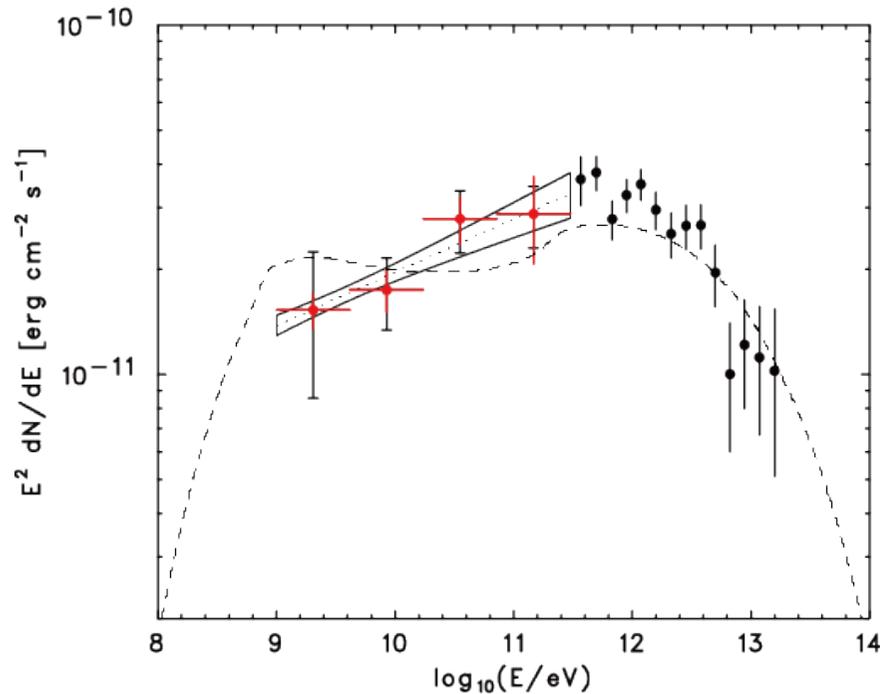
- 水素分子と原子の質量比は 1:10 で低密度 ( $H_2: 0.1 \times 10^4 M_\odot \ll HI: 1.0 \times 10^4 M_\odot$ )
  - 宇宙線陽子の加速効率は 0.1% ( $\sim 10^{48}$  erg) 程度
- ⇒ 宇宙線陽子が加速されていると考えても矛盾はしない



[左図] イメージ: 全星間陽子柱密度  $N_p(H_2+HI)$ , コントア: TeV ガンマ線強度 (Fukui, Sano et al. 2012)

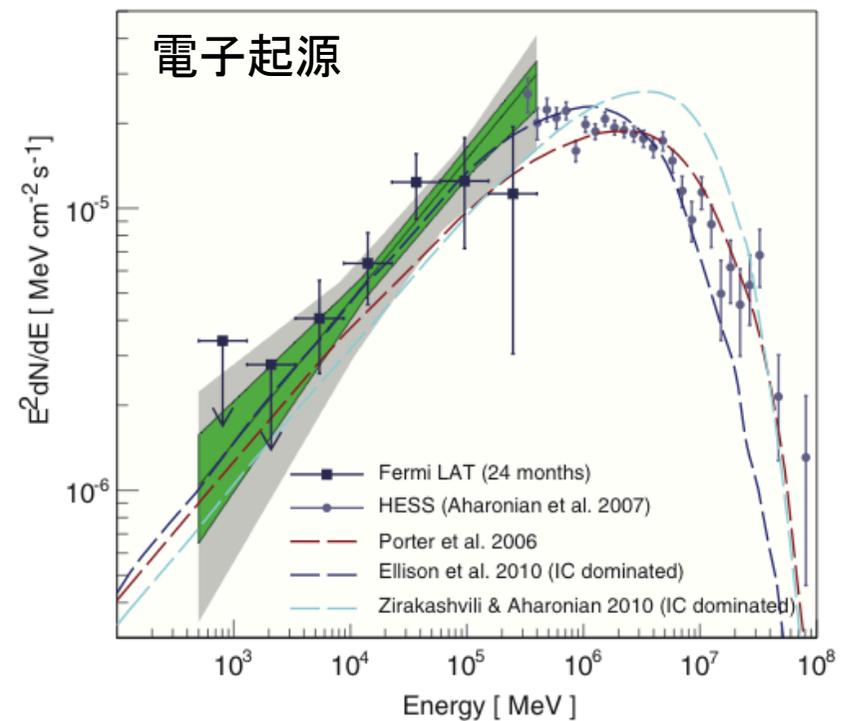
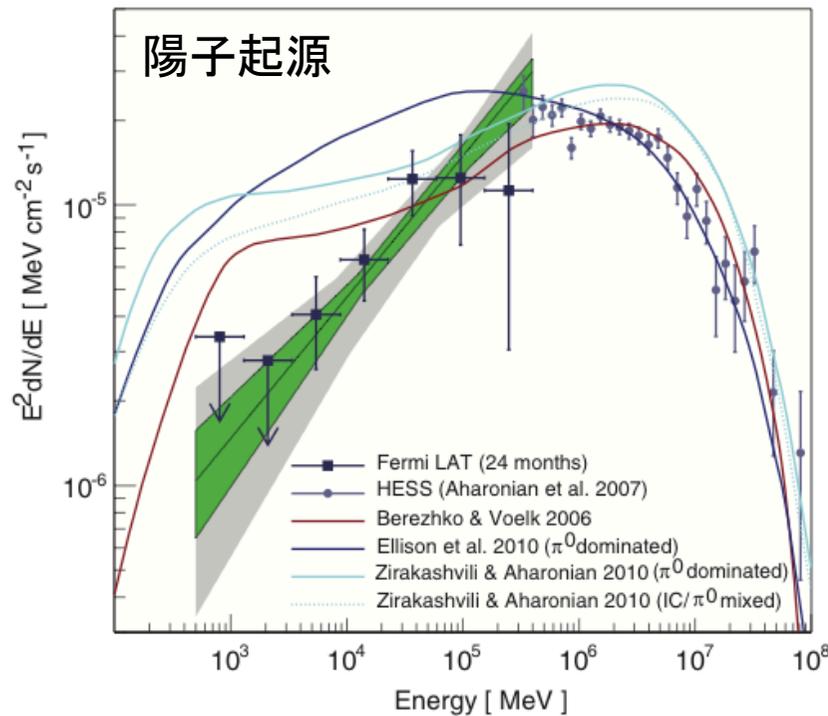
[右図] TeVガンマ線, 水素分子 ( $\times 2$ )  $N_p(H_2)$ , 水素原子  $N_p(HI)$ , 全星間陽子  $N_p(H_2+HI)$  の方位角分布

- RX J0852 のスペクトルは  $\Gamma = 1.85 \pm 0.06$  (stat)  $^{+0.18}_{-0.19}$  (sys) (Tanaka+11)  
 $\Rightarrow$  宇宙線陽子起源の方が、観測とは良く合っている



- 陽子起源の場合、最低でも  $\sim 50 \mu\text{G}$  の磁場が必要で、宇宙線陽子のエネルギー  $W_p \sim 5.2 \times 10^{50}$  erg ( $n = 0.1 \text{ cm}^{-3}$ ) も大きくなる
- 電子起源も、まだエラーの範囲内なので棄却はできない

- RX J1713 のスペクトルは  $\Gamma = 1.5 \pm 0.1$  (stat)  $\pm 0.1$  (sys) (Abde+11)  
 $\Rightarrow$  電子起源のほうが、観測結果をよく再現しているように見える



- 低エネルギー宇宙線陽子は浸透長が小さく分子雲内部へ浸透不可  
 $\Rightarrow$  GeV帯域のスペクトルは  $\Gamma \sim 1.5$  となり、**電子起源と区別がつかない**  
(Inoue+12)

## ■ MHD Simulation of Shock-cloud interaction (Inoue+12)

熱的不安定性により形成された clumpy な ISM (Inoue&Inutsuka+08,+09) へ 衝撃波伝搬

Inoue+12

### ○ Cloud とぶつかると衝撃波は減速

⇒ cloud 中では粒子は加速されない

### ○ SNR 内部で加速された粒子が cloud に拡散浸透することで、 $\pi_0$ 起源のガンマ線を放射

### ○ 加速粒子の浸透長

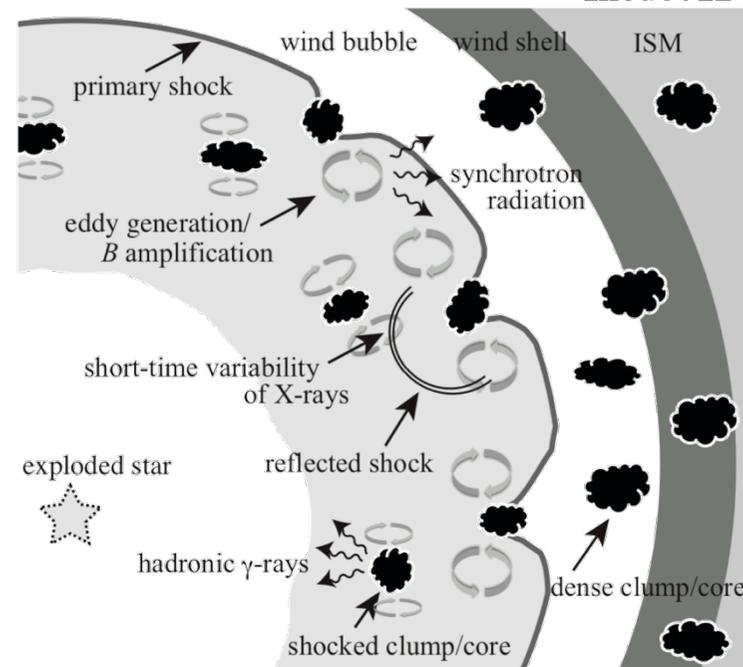
$$l_{pd} \cong (\kappa_{\text{dif}} t)^{1/2}$$

$$\sim 0.1 \eta^{1/2} (E/10 \text{ TeV})^{1/2} (B/100 \mu\text{G})^{-1/2} (t_{\text{age}}/10^3 \text{ yr})^{1/2} \text{ pc}$$

$\eta$ : gyro-factor、 $E$ : 宇宙線陽子のエネルギー、 $B$ : 磁場強度、 $t_{\text{age}}$ : 相互作用時間

⇒ target mass は  $E^{0.5}$  dependent

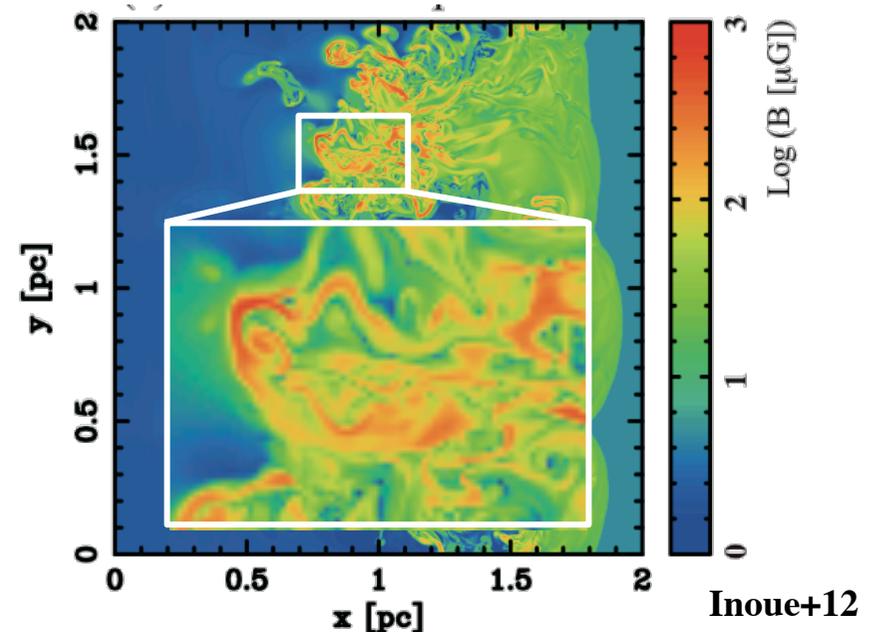
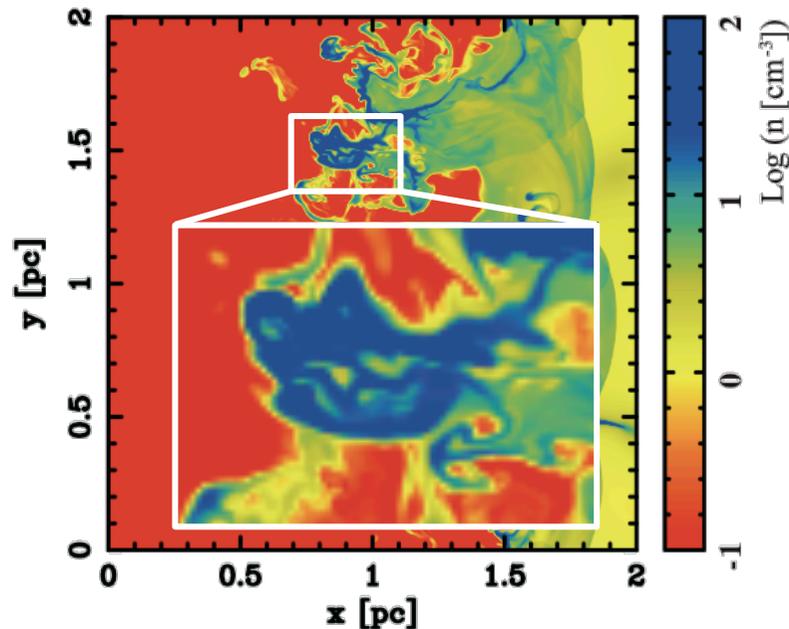
⇒ 宇宙線陽子起源のガンマ線でも、電子と同じ  $\Gamma \sim 1.5$  をとりうる



星間物質が非一様に分布している場合、  
スペクトルのみでは陽子起源か電子起源か判別は難しい  
⇒ SNRの周辺環境 (ISM etc.) を考慮して、議論する必要がある

## ■ MHD Simulation of Shock-cloud interaction (Inoue+12)

熱的不安定性により形成された clumpy な ISM (Inoue&Inutsuka+08,+09) へ 衝撃波伝搬



○ 衝撃波速度  $V_{sh}$  は  $1/(\text{星間ガス密度})^{0.5}$  で減速

⇒ 密度差の大きな分子雲周辺 ( $\Delta n \sim 10^{3-5}$ ) で速度差発生 → 乱流の生成

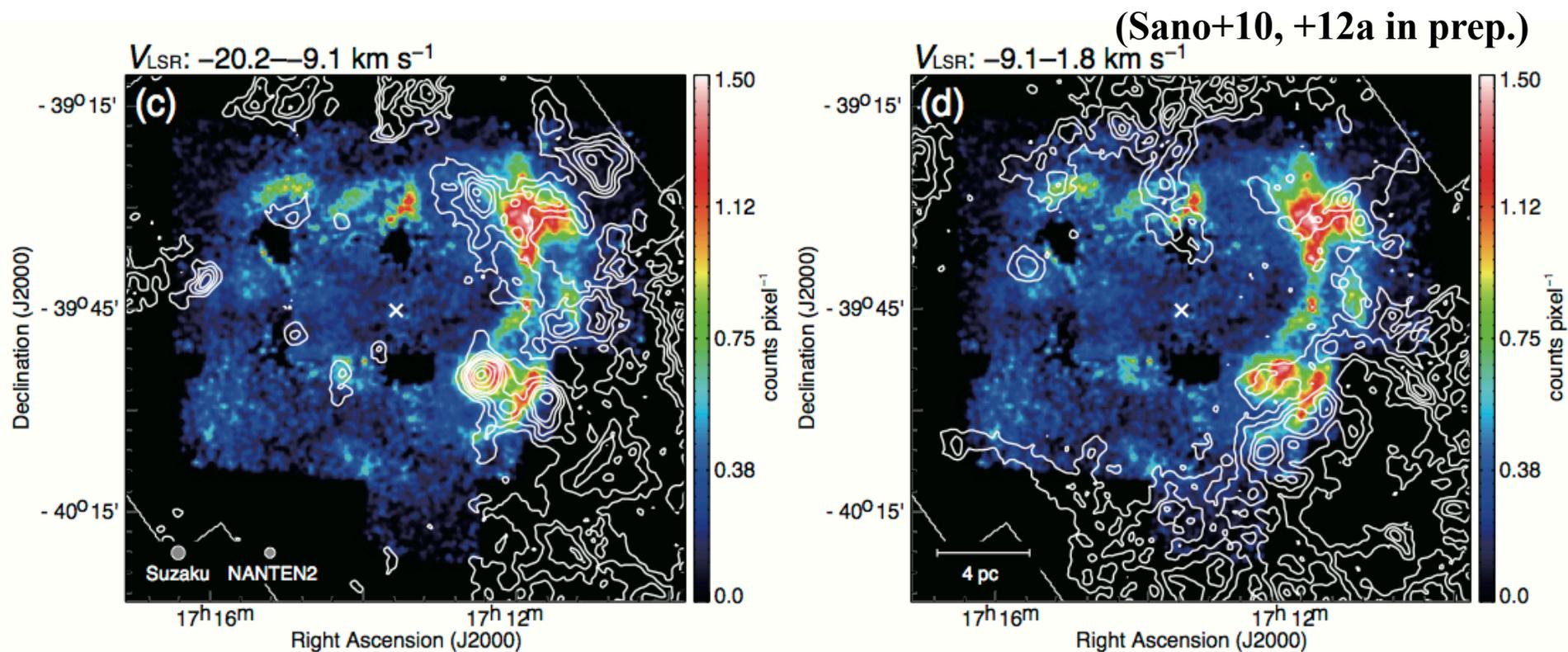
○ 分子雲近傍に強いシア流 (回転電場) + 乱流が磁場を巻き上げ増幅 (乱流ダイナモ)

⇒ 磁場  $B \sim 0.1-1 \text{ mG}$  まで増幅される → 分子雲周辺でX線放射がエンハンスされる

星間ガス周辺のX線増光が期待 ⇒ 観測でも見えはじめています

## ■ RX J1713.7–3946 は、高密度分子雲と強く相互作用

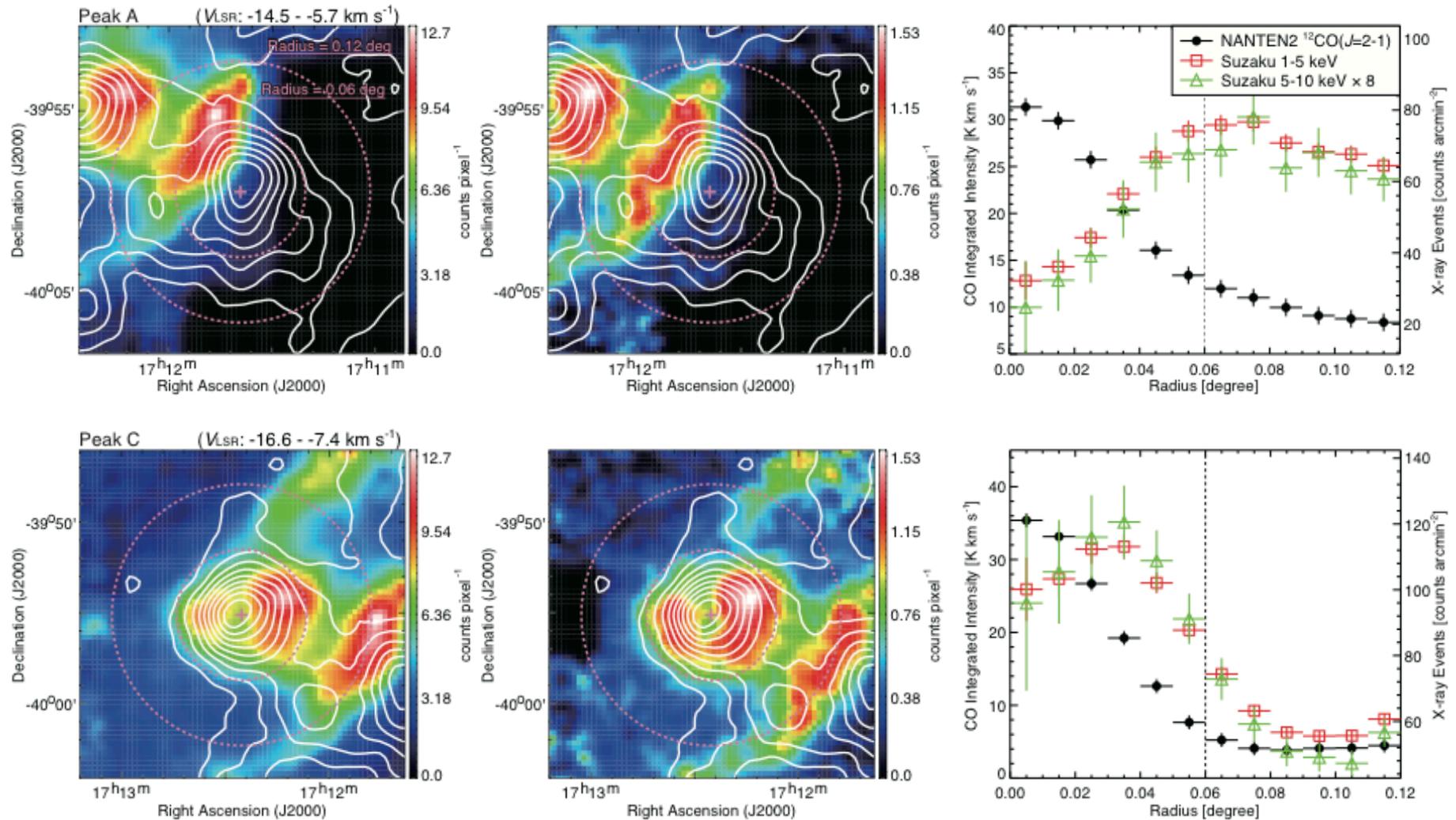
- SNR母天体による恒星風で**非一様ISM**を形成、その中を衝撃波が伝搬
- 高密度分子雲の周りでX線が増光 ( $\sim 1$  pc の相関と  $\sim 0.1$  pc の反相関)



イメージ: *Suzaku* 5–10 keV, コントア:  $^{12}\text{CO}(J=2-1)$  積分強度 (SNRと相互作用する2つの速度範囲を表示)

# RX J1713: Comparison with CO and X-ray

カラーイメージ: Suzaku count map (左1-5 keV, 右5-10 keV), コントア:  $^{12}\text{CO}(J=2-1)$  積分強度

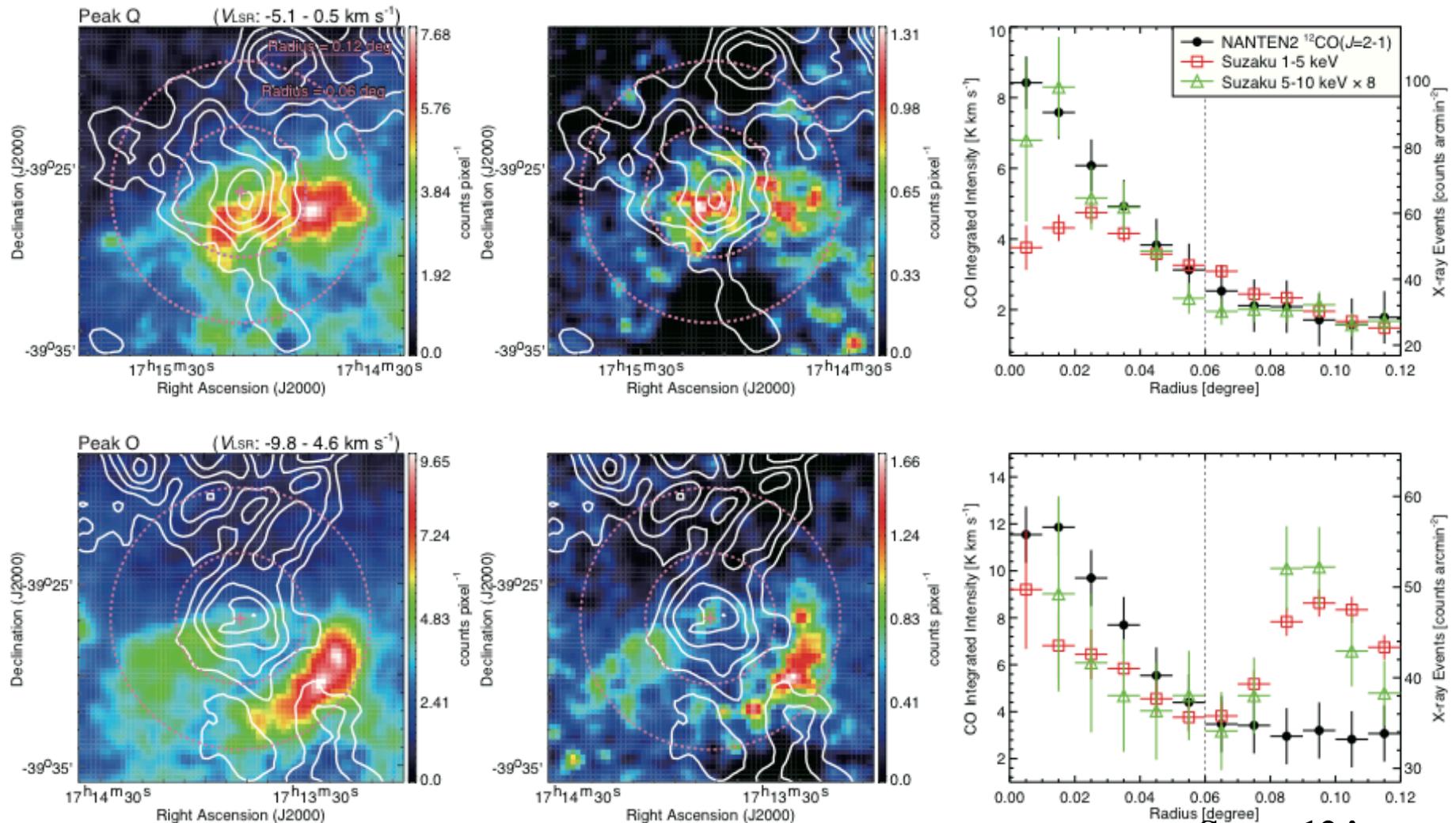


Sano+12 in prep.

○ 分子雲ピークから offset したところで X線強度がピークとなる

# RX J1713: Comparison with CO and X-ray

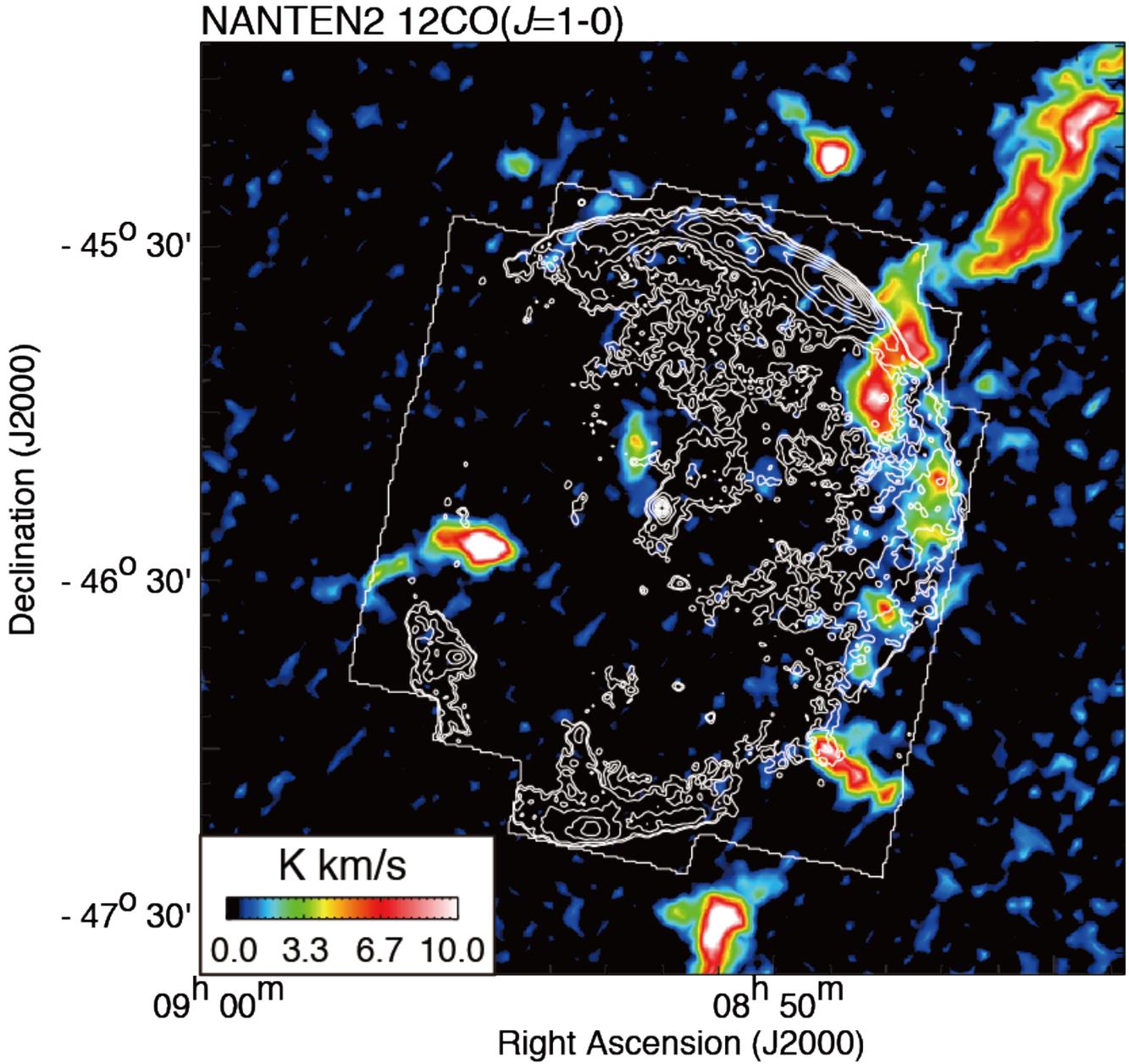
カラーイメージ: Suzaku count map (左1-5 keV, 右5-10 keV), コントア:  $^{12}\text{CO}(J=2-1)$  積分強度



Sano+12 in prep.

○ 分子雲ピークから offset したところで X線強度がピークとなる

# RX J0852: CO distribution (interact with the SNR)



■ CO vs. X-rays

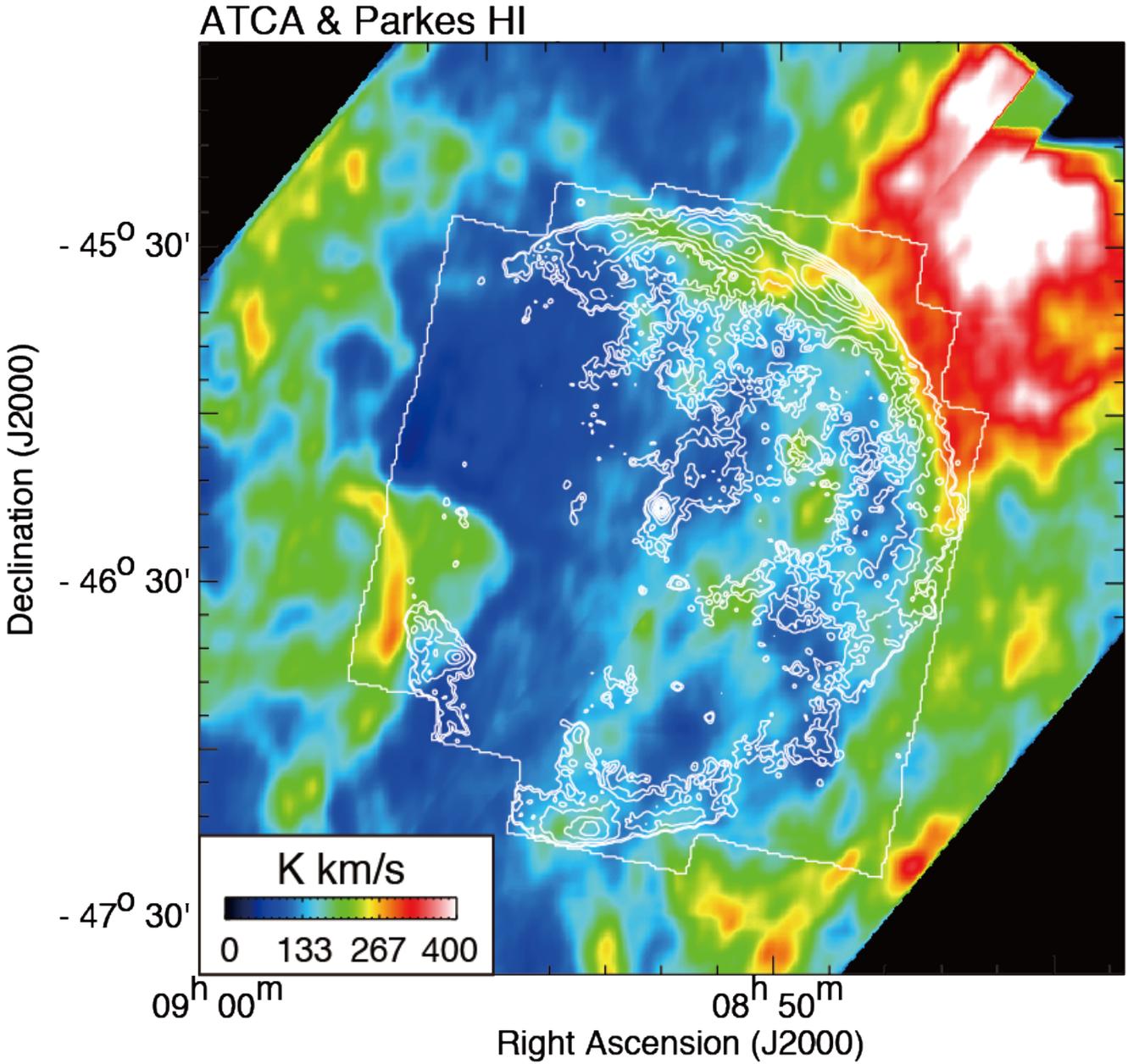
X線シェルに沿って  
CO が分布 (西側)



SNR衝撃波との相互  
作用を示唆

イメージ: CO(1-0)積分強度  
(Vlsr: 24-33 km/s)  
コントア: X線 (1-5 keV)

# RX J0852: HI distribution (interact with the SNR)



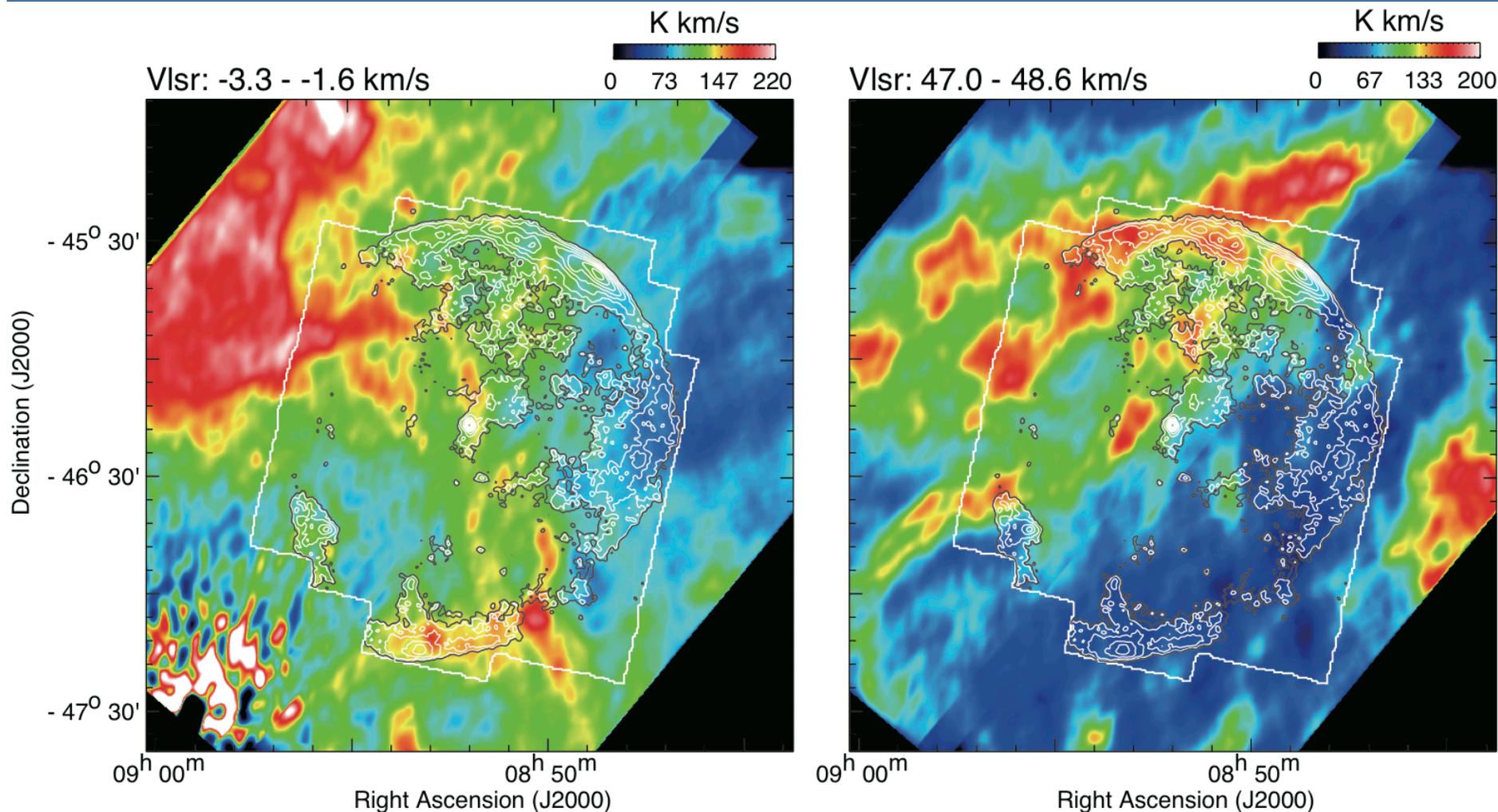
### ■ HI vs. X-rays

CO とほぼ同速度に、  
X線シェルに沿う HI  
ガスを発見



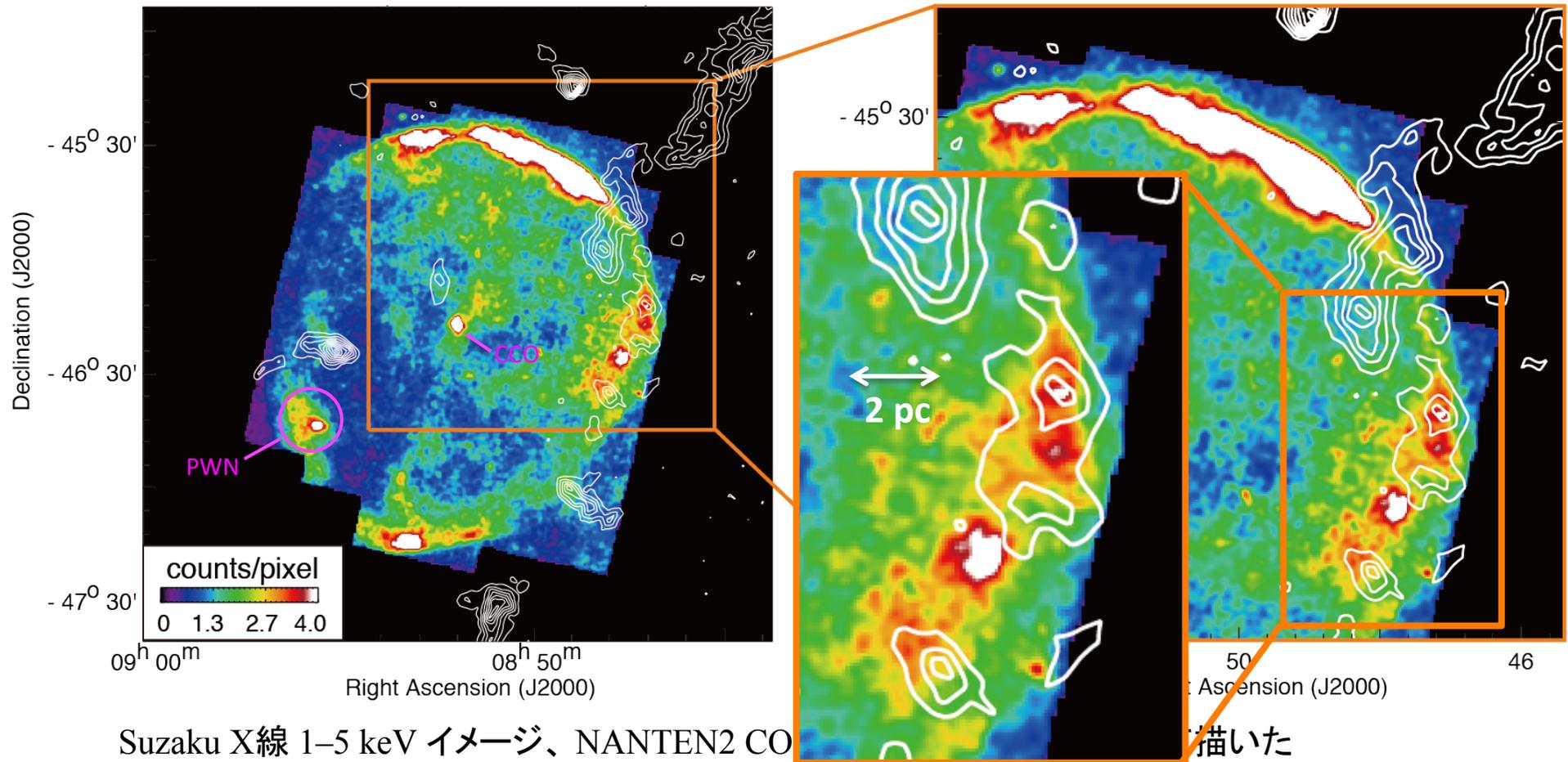
SNR 母天体 (OB星)  
の星風により、ISM  
のキャビティー形成

イメージ: HI 積分強度 (Vlsr: 28-34 km/s) コントア: X線 (1-5 keV)
---

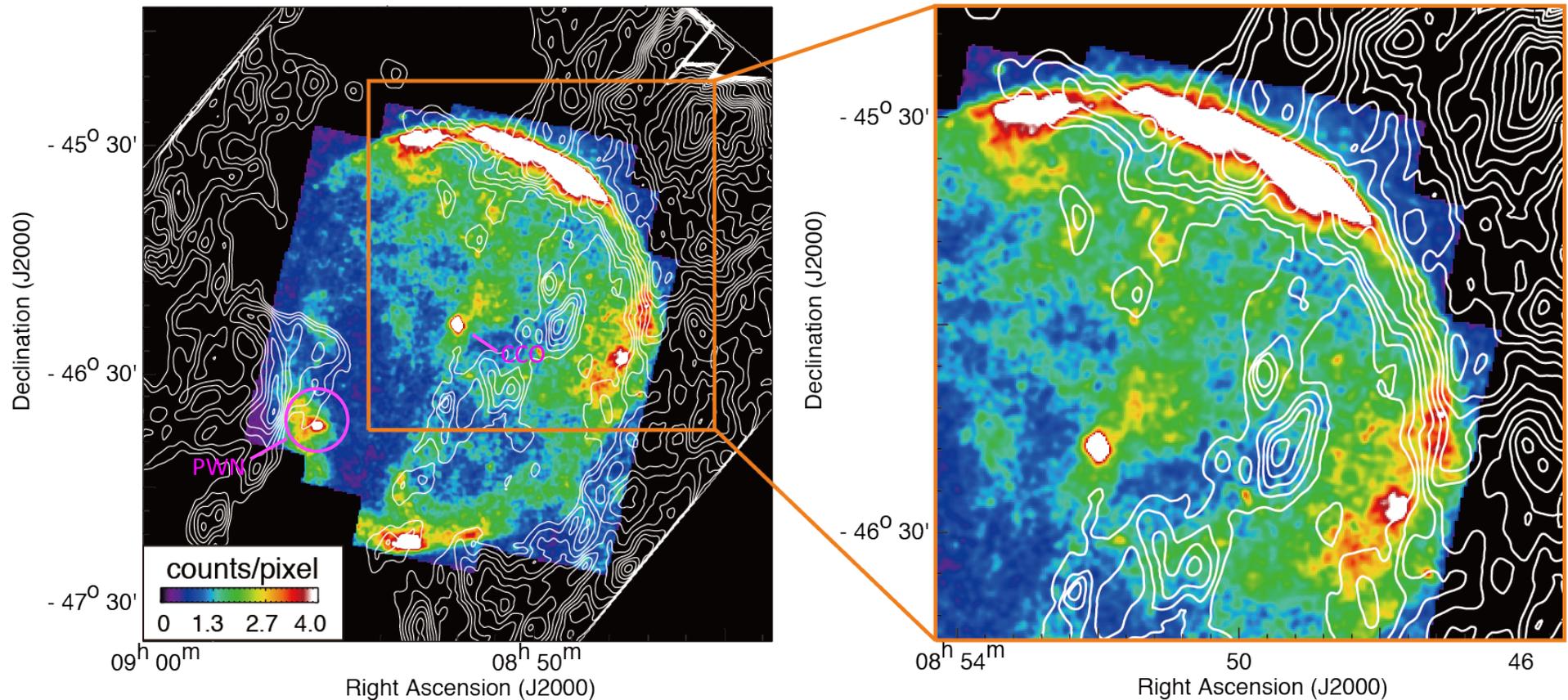


イメージ: HI (左) の積分強度図, コントア: Suzaku XIS 0+1+3 (1-5 keV) 強度分布

- South & North region にて、X線放射に対応するHIガスを検出
- この領域の速度構造は Supershell に支配されているため複雑  
⇒ これらのHIガスも、SNRと相互作用している可能性は十分にある

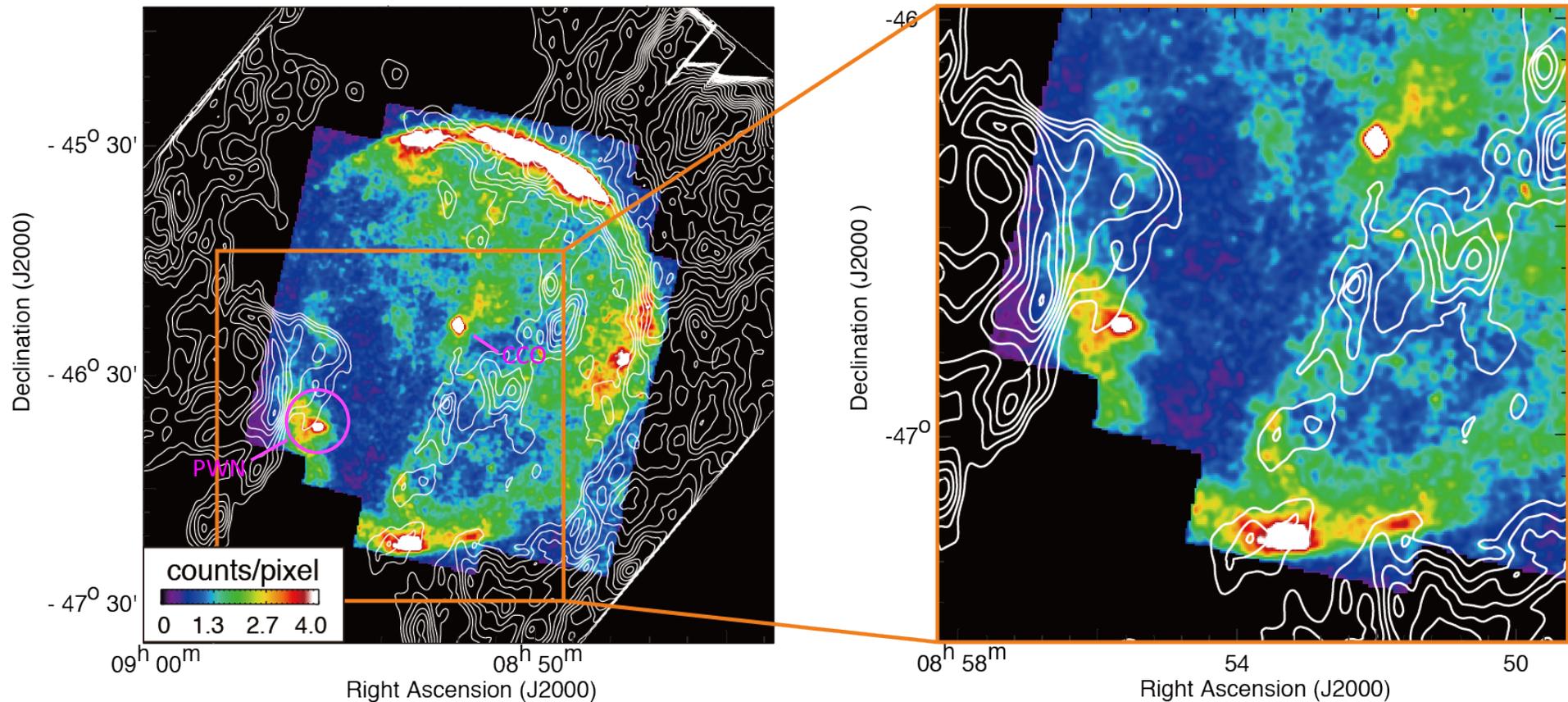


- 局所的には、X線とCOの空間分布は反相関 (強度ピークがずれている)
  - ⇒ RX J1713でみられた傾向とよく一致
  - ⇒ shock-cloud interaction による、分子雲近傍での磁場増幅と consistent



Suzaku X線 1–5 keV イメージ、HI ガスの積分強度をコントアとして描いた  
 HI ガスはダイナミックレンジが広いため、ある強度以上の部分のみ表示している

- 恒星風によって形成された HI シェルに沿ってX線分布
- HI のような薄い ISM も、X線の構造形成に寄与する



Suzaku X線 1–5 keV イメージ、HI ガスの積分強度をコントアとして描いた  
 HI ガスはダイナミックレンジが広いので、ある強度以上の部分のみ表示している

- 恒星風によって形成された HI シェルに沿ってX線分布
- HI のような薄い ISM も、X線の構造形成に寄与する

# Penetration depth (CR proton vs. electron)

## ■ 宇宙線陽子の浸透長 $l_{pd}$ (Inoue+12)

$$l_{pd} \sim 0.1 \eta^{1/2} (E/10 \text{ TeV})^{1/2} (B/100 \mu\text{G})^{-1/2} (t_{age}/10^3 \text{ yr})^{1/2} \text{ pc},$$

$\eta$ : gyro-factor、 $E$ : 宇宙線陽子のエネルギー、 $B$ : 磁場強度、 $t_{age}$ : 相互作用時間

RX J1713におけるパラメタ

$\eta$ :  $\sim 1$  (Uchiyama+07)

$E$ : 10–800 TeV (Zirakashvili & Aharonian 2010)

$B$ :  $\sim 10 \mu\text{G}$  (Tanaka+08)

$t_{age}$ :  $\sim 1000 \text{ yr}$

$$l_{pd} \sim 0.3 - 2.8 \text{ pc}$$

## ■ 宇宙線電子の浸透長 $l_{pd}$ (Fukui+12)

$$l_{pd} \sim 0.026 \eta^{1/2} (B/100 \mu\text{G})^{-3/2} \text{ pc},$$

$$l_{pd} \sim 0.03 - 0.8 \text{ pc}$$

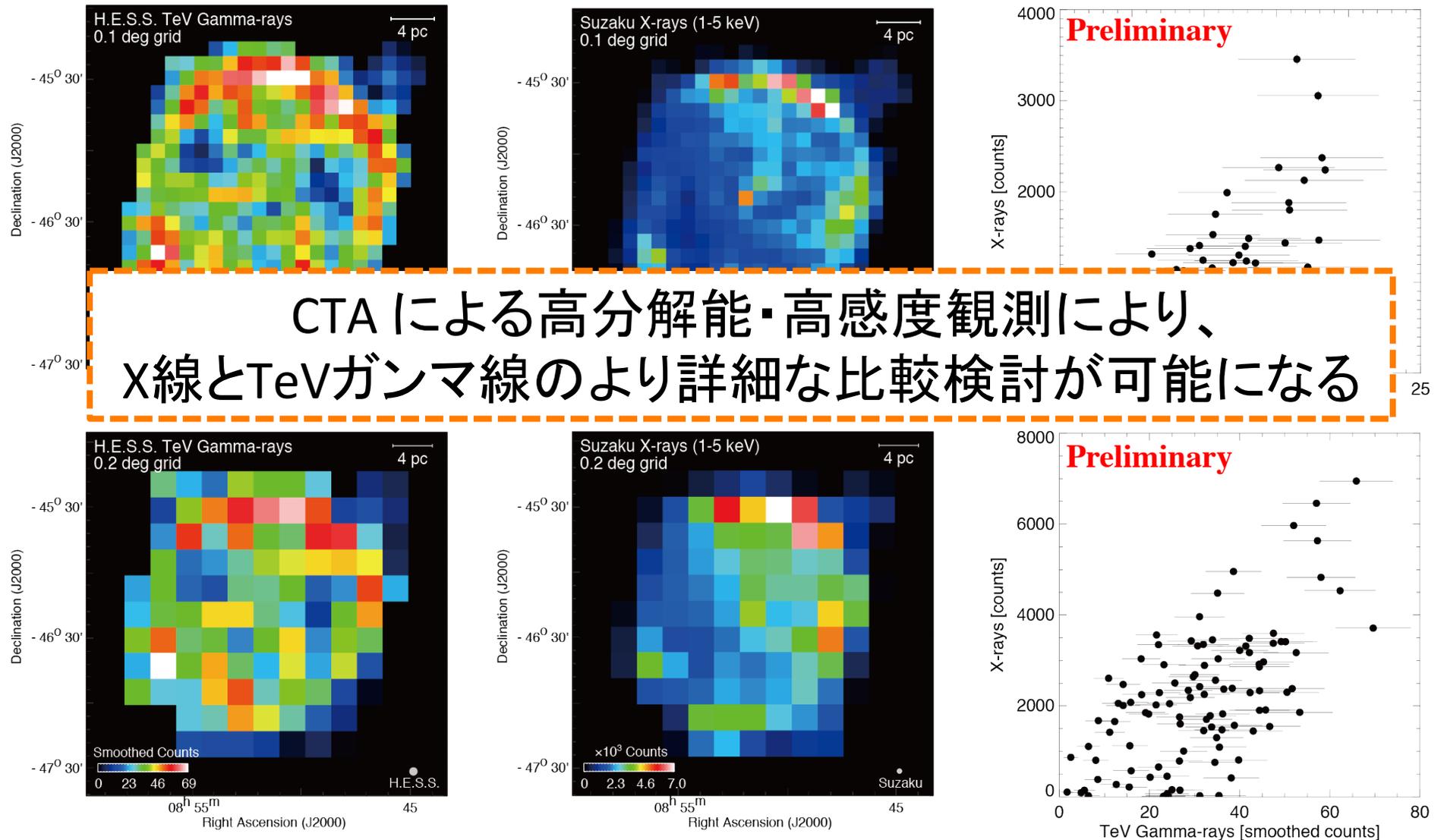
$\eta$ : gyro-factor、 $B$ : 磁場強度、( $E \sim 1-40 \text{ TeV}$ )

$\eta$ :  $\sim 1$  (Uchiyama+07),  $B$ : 10–100  $\mu\text{G}$

シンクロトロンX線(電子)と、TeVガンマ線(陽子)空間分布の差がみえるはず

# RX J0852: X-rays vs. TeV $\gamma$ -rays

- シンクロトロンX線とTeVガンマ線の空間分布の違いが見えつつある



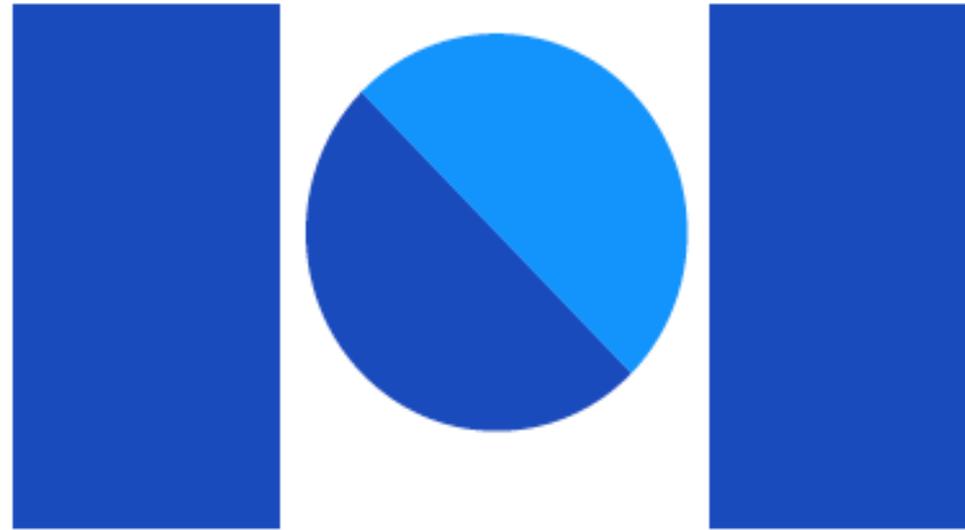
# Discussion & Summary

---

- 若い ( $\sim 2000$  yr) TeVガンマ線SNR RX J1713 & RX J0852
  - 分子雲とHIガスの分布は、TeVガンマ線のそれと良く一致
  - 宇宙線陽子の加速効率、どちらも0.1%程度 ( $\sim 10^{48}$  erg)
- Shock-Cloud Interaction と磁場増幅
  - 非一様ISMに衝撃波が伝搬すると、濃い星間ガス近傍で乱流形成 + 磁場増幅
  - 宇宙線の星間ガスへの浸透長は、Energy dependent になる
    - ⇒ 宇宙線陽子起源ガンマ線でも、GeV帯域は steep なベキをとらうる (e.g., RX J1713)
  - 観測的にも、分子雲近傍でのX線増光が確認されつつある (RX J1713, RX J0852)
  - 宇宙線陽子, 電子には浸透長に差 ⇒ X線とガンマ線の空間構造違いが現れる?

SNRにおける宇宙線加速を明らかにする為には、  
X線, ガンマ線に加えて、星間ガス(分子+原子)を考慮した議論が重要

CTAを用いた、高空間分解能 + 高感度観測により、  
TeVガンマ線, X線 そして星間ガスの詳細な比較が可能になる



**NANTEN**  
**Submillimeter Observatory**