

TeVガンマ線超新星残骸 RX J1713.7-3946 における星間陽子

○ 佐野 栄俊 (名古屋大学)

福井康雄¹, 佐藤淳基¹, 洞地博隆¹, 早川貴敬¹, 鳥居和史¹, N. M. McClure-Griffiths²,
G. Rowell³, 井上剛志⁴, 犬塚修一郎¹, 河村晶子¹, 山本宏昭¹, 奥田武志¹, 水野範和^{1,5},
大西利和^{1,6}, 水野亮¹, 小川英夫⁶

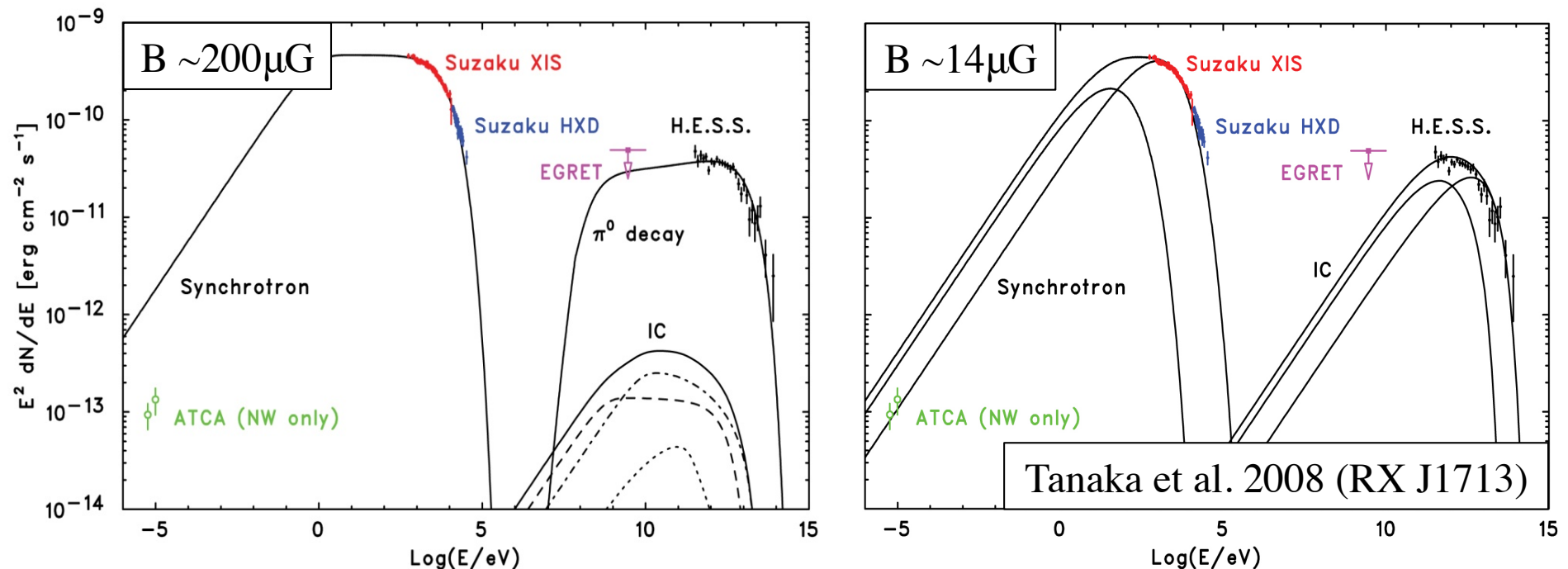
(1: 名大, 2: CSIRO/ATNF, 3: Adelaide Univ., 4: 青山学院大, 5: NAOJ, 6: 大阪府立大)

SNR as Cosmic Ray Accelerator

■ SNR は knee energy ($\sim 10^{15}$ eV) 以下の宇宙線加速現場

宇宙線電子: シンクロトンX線放射などにより確認 (ex. Koyama et al. 1995)

宇宙線陽子: スペクトルの違いから区別が可能と論じられてきた。磁場の問題や密度依存性を考慮すると、簡単でないことが明らかになっている。



【Hadronic Scenario】 p (宇宙線) + p (星間陽子) $\rightarrow \pi_0 \rightarrow 2\gamma$ (π_0 decay)

【Leptonic Scenario】 宇宙線電子が CMBなどの光子を γ -ray まで叩き上げる (IC)

本研究の狙いと特徴

もしガンマ線放射が宇宙線陽子起源であるならば、
宇宙線陽子のターゲットとなる星間陽子が必要



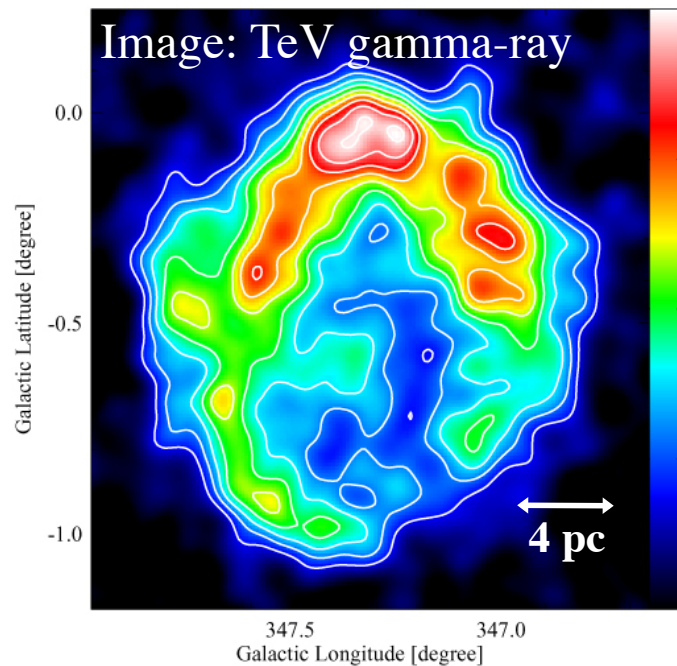
分子雲(高密度水素分子 H_2): 密度 10^2cm^{-3} 以上, $T_k=10\text{-}20\text{K}$
原子ガス(中性水素原子 HI): 密度 $1\text{-}100\text{cm}^{-3}$, $T_k=30\text{-}100\text{K}$

■ TeVガンマ線と星間陽子(水素分子+原子)の比較

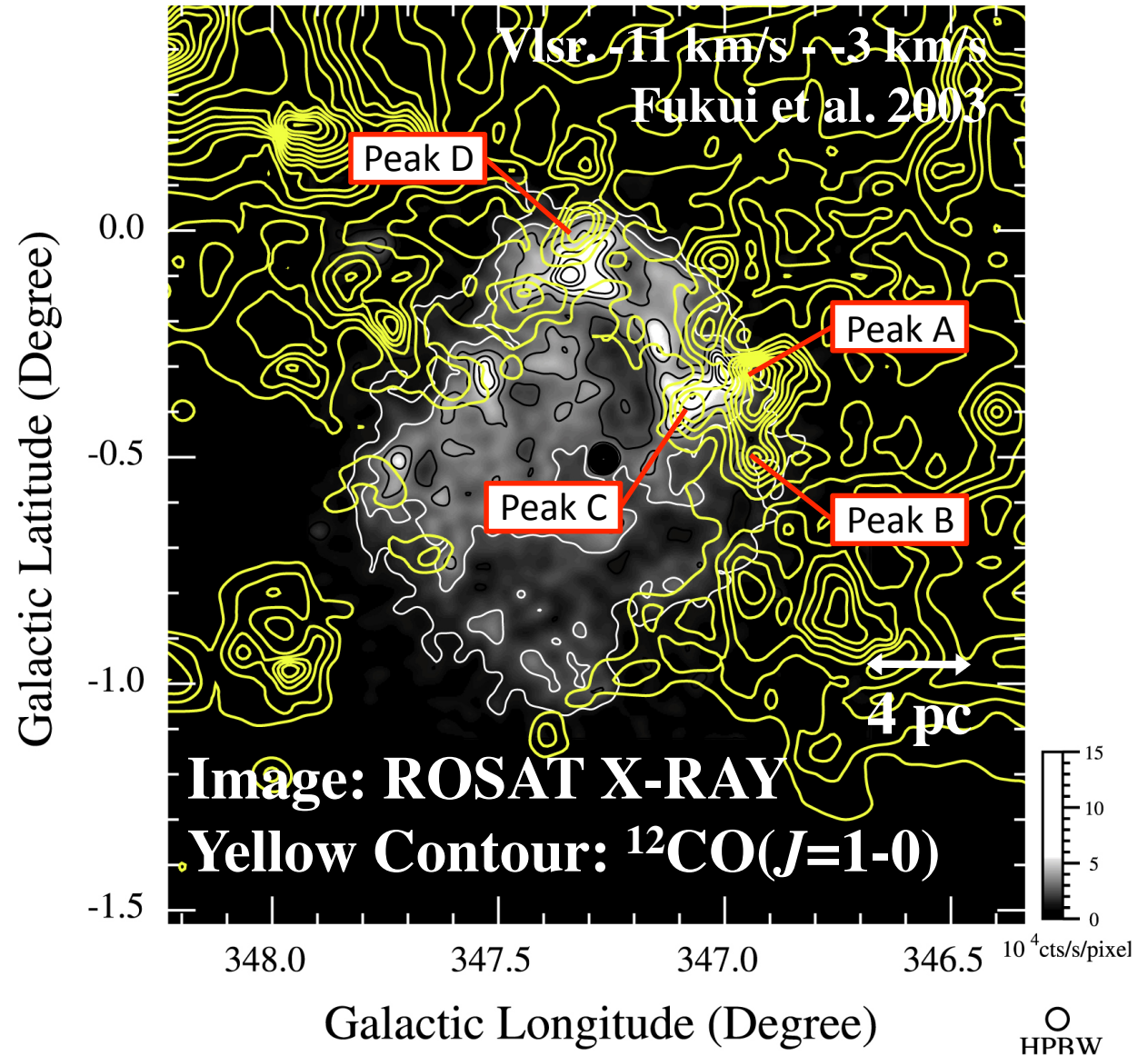
- 一 陽子起源なら、そのターゲットとなる星間ガスとTeVガンマ線が相関
- 一 星間陽子の密度から、宇宙線陽子の加速効率を推定

星間陽子とTeVガンマ線の空間分布を、
観測結果に基づいた、かつてない高分解能で解析・議論

TeV γ 線 超新星残骸 RX J1713.7-3946 (G347.3-0.5)



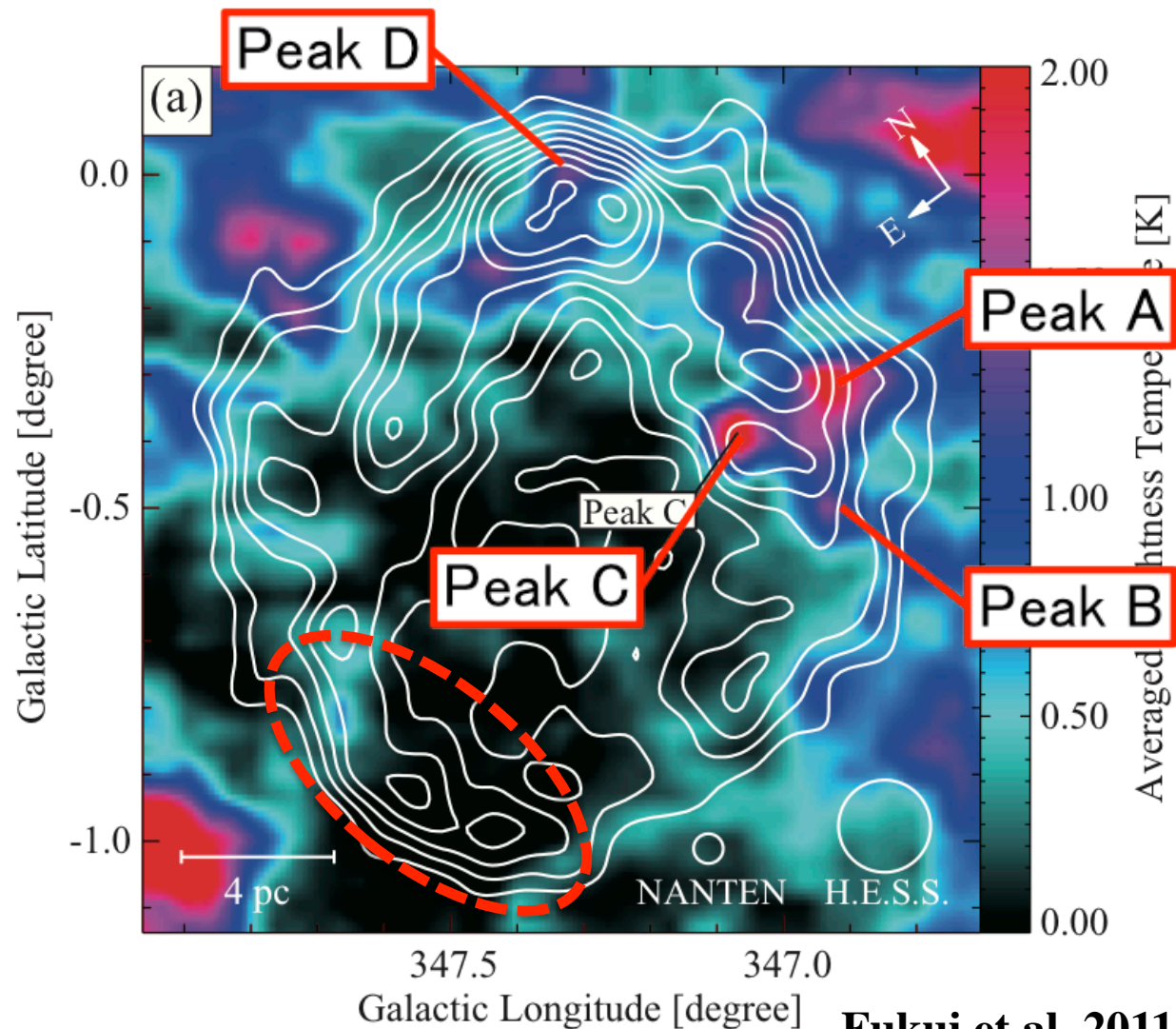
- RX J1713.7-3946 の特徴
- 距離..... 1 k pc
 - 直径..... 18 pc
 - 年齢..... 1600 yr
 - 進化段階..... 自由膨張期
 - 衝撃波速度.. 3000 km s^{-1}



↑ Fukui et. al 2003, Moriguchi et al. 2005, Uchiyama et al. 2007

Molecular Cloud vs. TeV Gamma-Ray

■ 分子雲と TeV ガンマ線の空間分布の比較



- 大局的には、分子雲とTeVガンマ線の分布が良く一致
- 分子雲Peak方向(PeakA-D)
–特に相関が顕著
- SNR左下の領域
–TeVガンマ線(強い)
–分子雲(存在しない)

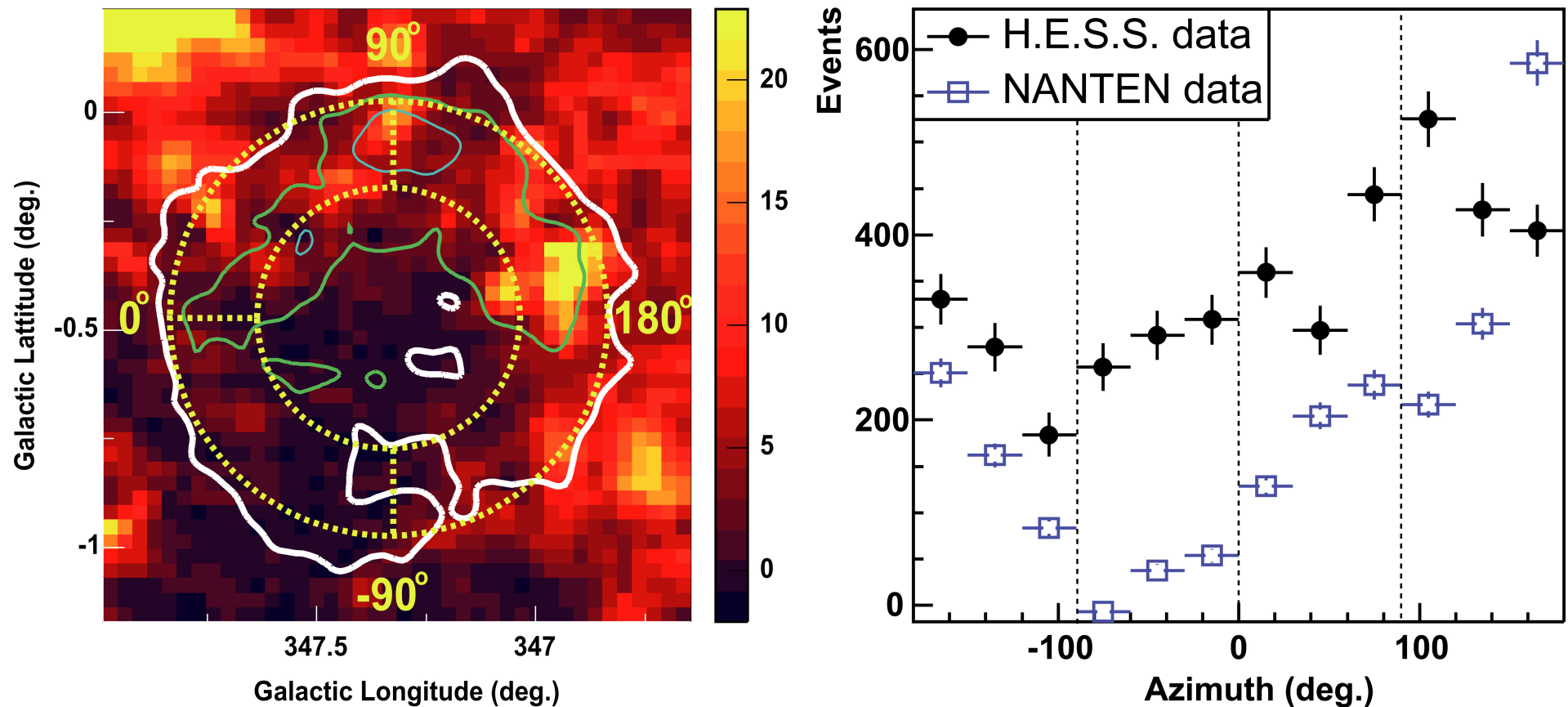
イメージ:CO($J=1-0$) 平均強度
Vlsr: -20 - -0 km/s
コントア: TeVガンマ線強度
20 から10 count毎

Azimuth Profile Plot (Aharonian et al. 2006)

■ 分子雲と TeV ガンマ線の Azimuth Profile Plot

– 大局的な空間分布の傾向は良く一致

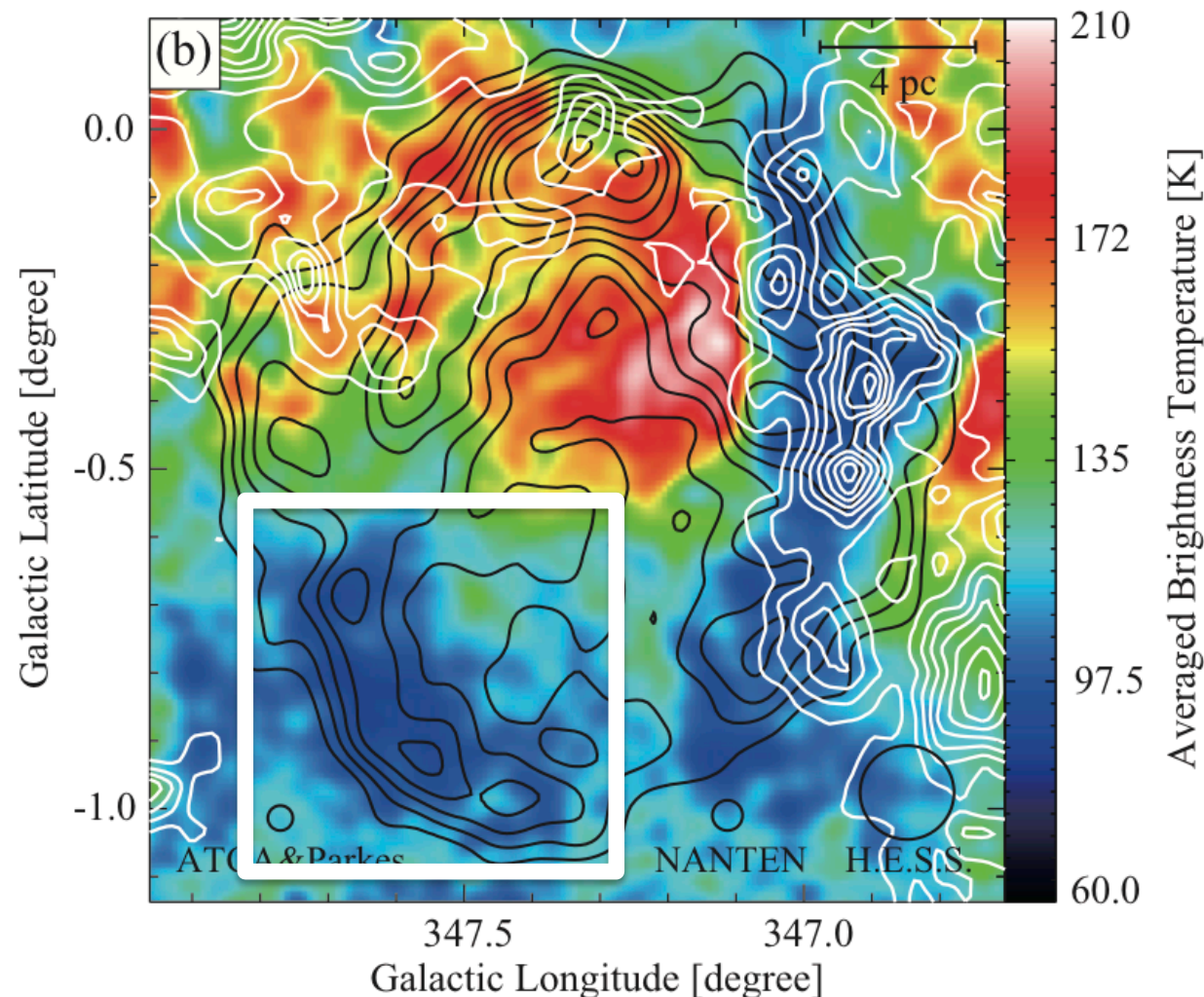
– ターゲット不足の領域(e.g., -30 - -90 deg) ⇒ 星間陽子を全てトレースできてない



イメージ: $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ 積分強度 ($V_{\text{l sr}}: -11 - -3 \text{ km/s}$), コントア: TeV ガンマ線カウント (30, 60, 90)

Atomic Hydrogen vs. TeV Gamma-Ray

■ 水素原子と TeV ガンマ線の空間分布の比較



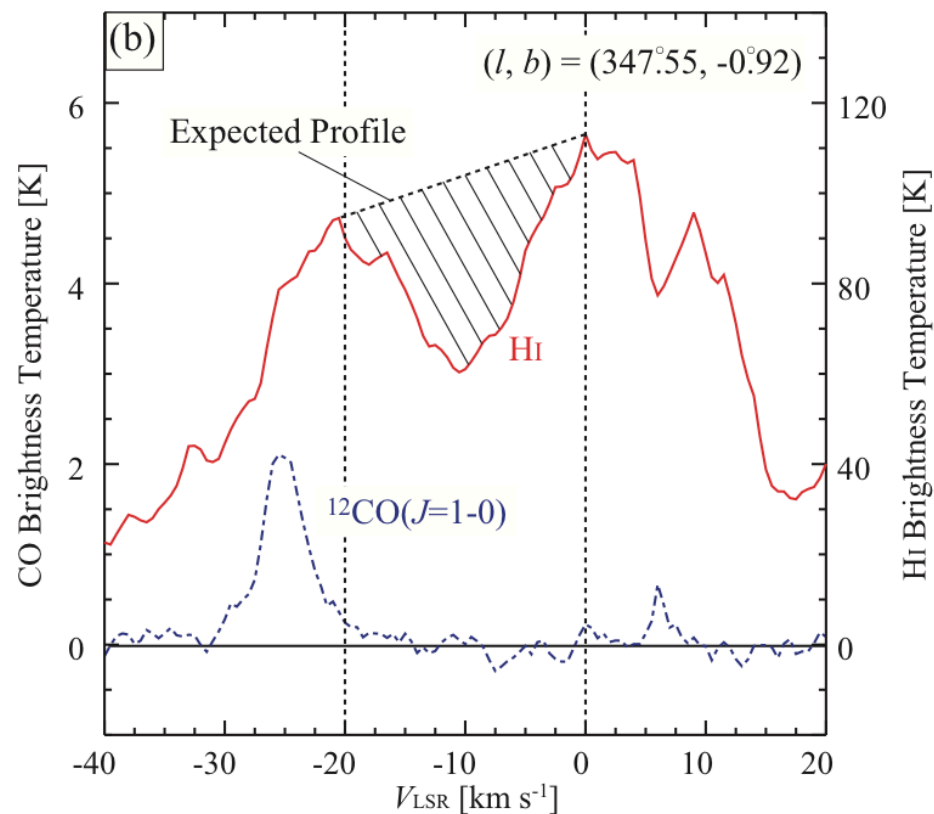
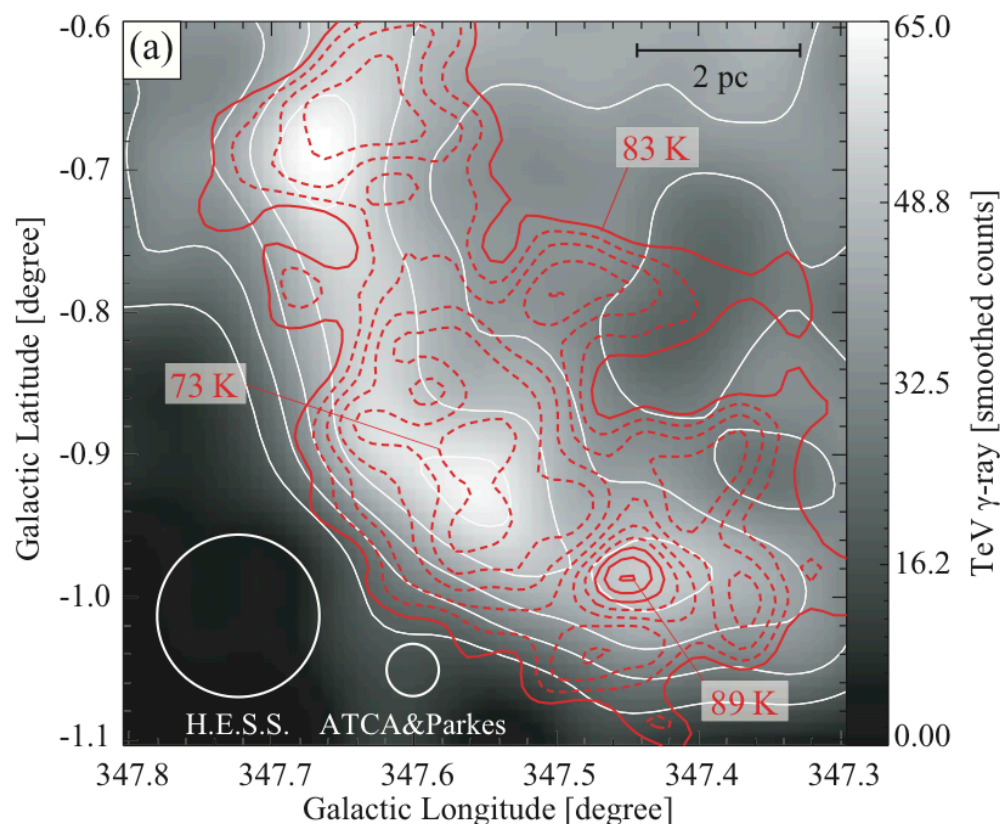
- SNR左下の領域
- 分子雲の無かった場所に
冷たい水素原子が存在
- SNR右側の領域
- 分子雲と冷たい水素原子
が混在している

イメージ: HI 21cm 平均強度
Vlsr: -8 - -6 km/s
黒コントア: TeV ガンマ線
白コントア: CO($J=1-0$)

Dark HI SE Cloud (Self-Absorption)

イメージ: TeVガンマ線強度分布(SNR左下の領域)

コントア: HI 21cm線積分強度 (V_{lsr} : -15 - 5 km/s; 73 - 83 K, 83 - 89 K)

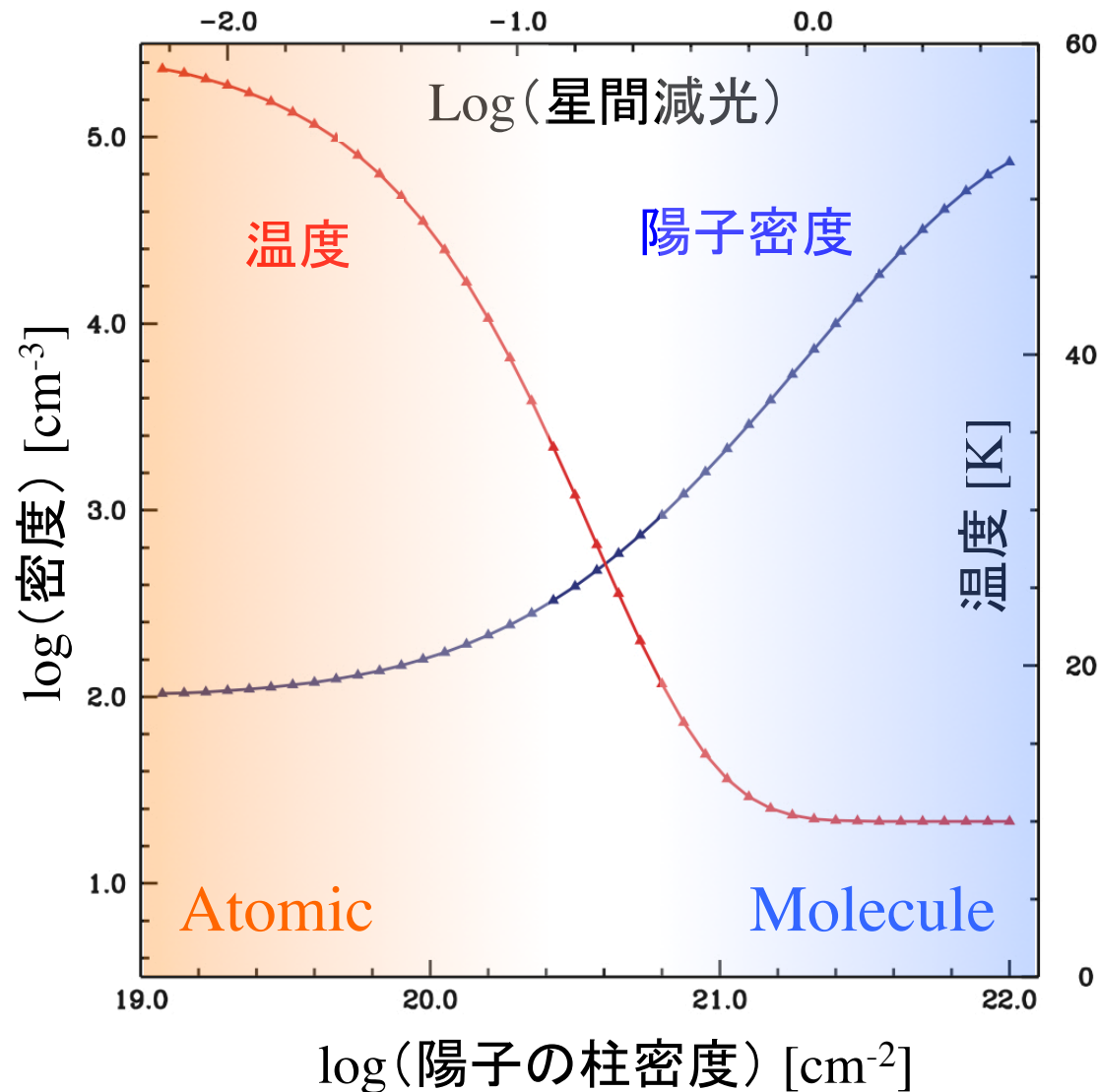


■ HIの中心の方が強度が弱くなっている

⇒ 自己吸収により本来の放射がシールドイングされている

The Transition of Hydrogen from Atomic to Molecular

■ 水素原子から分子へ



▪ SNR右側における水素原子と分子の混在は、ISMの進化途中の現場

▪ 密度が高いと放射はシールドされ、冷たくなって自己吸収を起こす

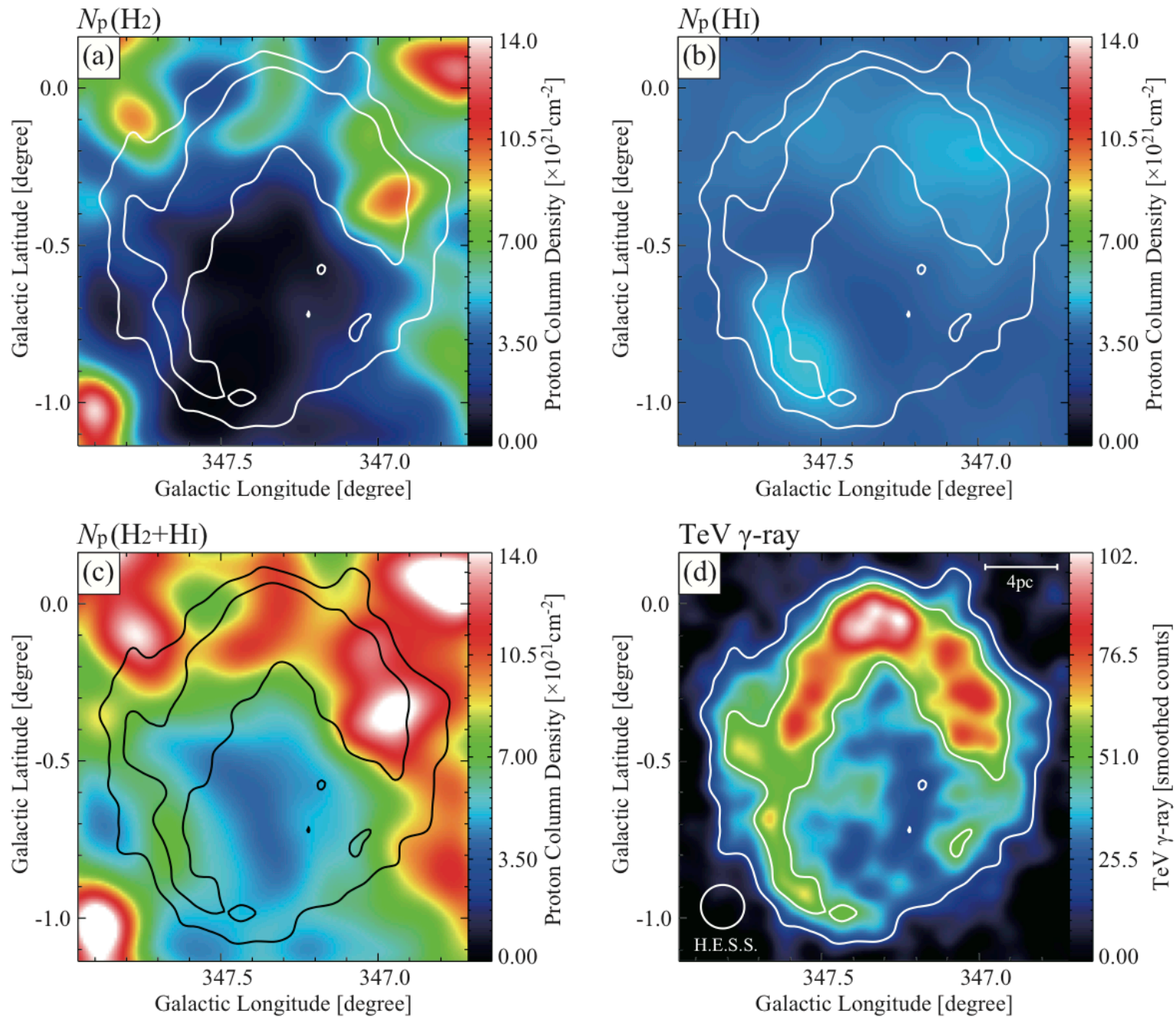
▪ SNR左下(分子雲無し+冷たいHI)
–密度(高), 温度(低), 光学的に厚い水素原子の存在を示唆。



宇宙線陽子のターゲットになりうる

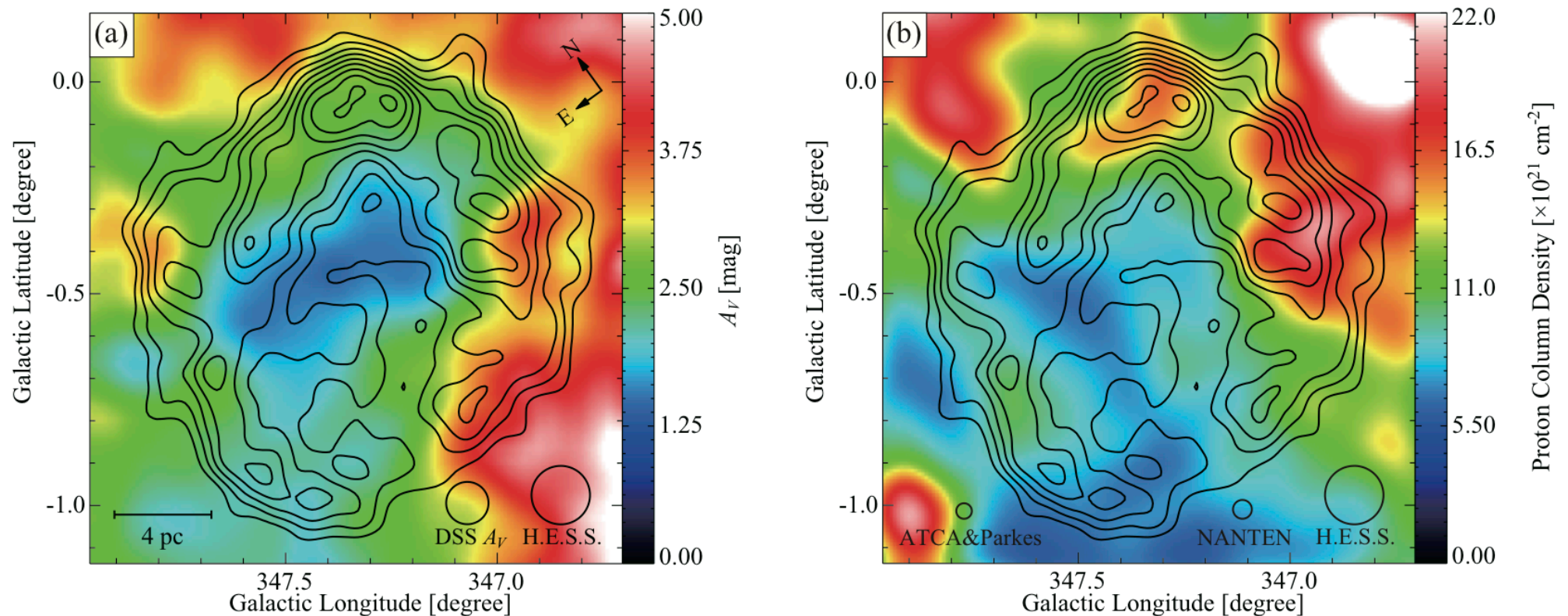
← Goldsmith et al. (2007) Fig. 2

ISM Proton Column Density



Distribution of A_V & Proton Column Density

イメージ: (左) A_V map, (右) $N_p(\text{H}_2+\text{HI})$ (V_{lsr} : -20 – 10 km/s)
コントア: TeV ガンマ線強度分布 (20から10カウントごと)

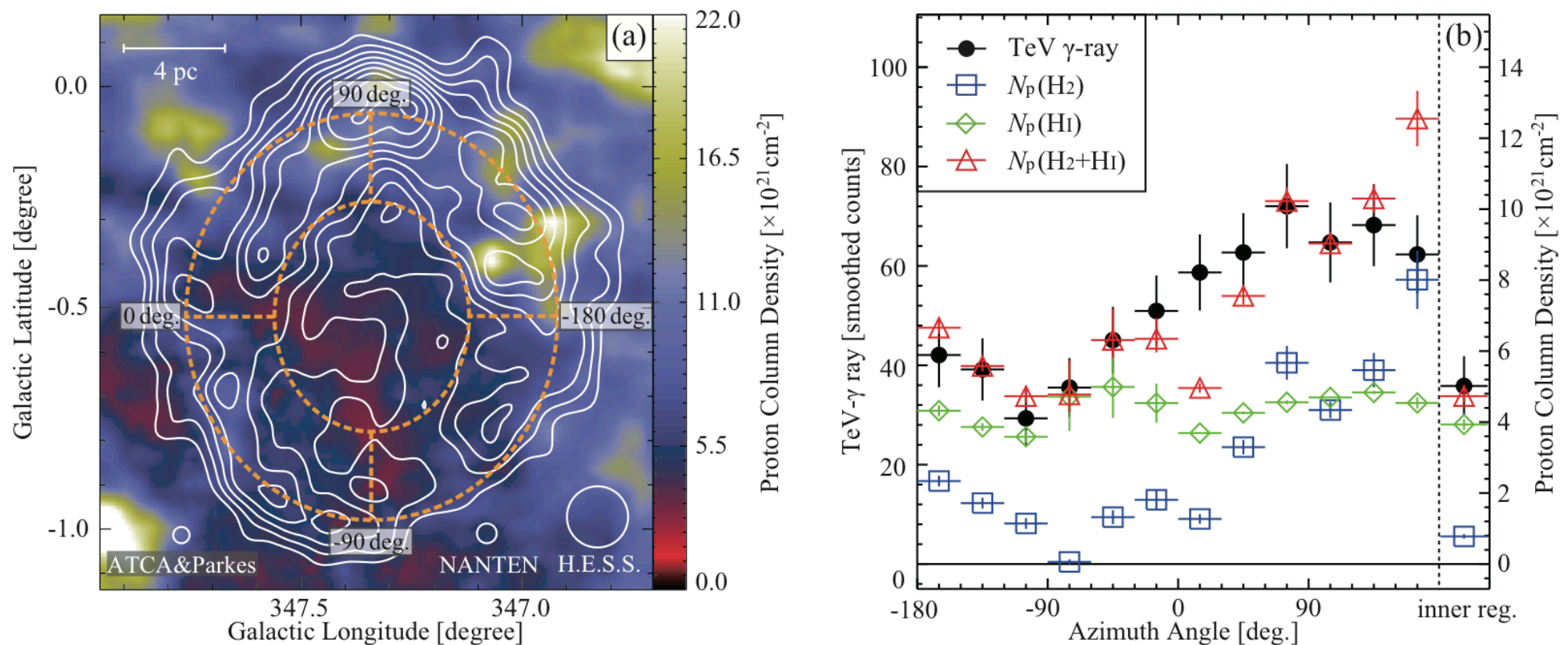


- A_V mapにおいても、ガンマ線との相関が見えている
自己吸収を見積もったSE cloudにおいても、減光が見えている

Azimuth Profile Plot (TeV Gamma-ray vs. ISM)

イメージ: $N_p(\text{H}_2+\text{HI})$ (Vlsr: -20 - 0 km/s)

コントア: TeV ガンマ線強度分布 (20から10カウントごと)



■ 星間陽子とTeV γ 線のRadial Profile Plot

星間陽子を水素分子+原子としたことで、TeV γ 線との良い相関を示した

⇒宇宙線陽子起源のTeVガンマ線放射と考えても矛盾しない

議論I - 宇宙線陽子の加速効率 -

- SNR と相互作用する星間陽子の数密度 $\sim 150 \text{ cm}^{-3}$ 以上
半径10 pc 程度のシェル + 星間陽子の柱密度から計算

- 宇宙線陽子の全エネルギー W_p^{tot}
観測されたスペクトル(0.2-40TeV)から計算(Aharonian+06)

$$W_p^{\text{tot}} \sim 6 \times 10^{49} (d/1 \text{ kpc})^2 (n/1 \text{ cm}^{-3})^{-1} \text{ erg}$$

d: 天体までの距離[pc]、 n : 星間陽子の平均密度[cm^{-3}]

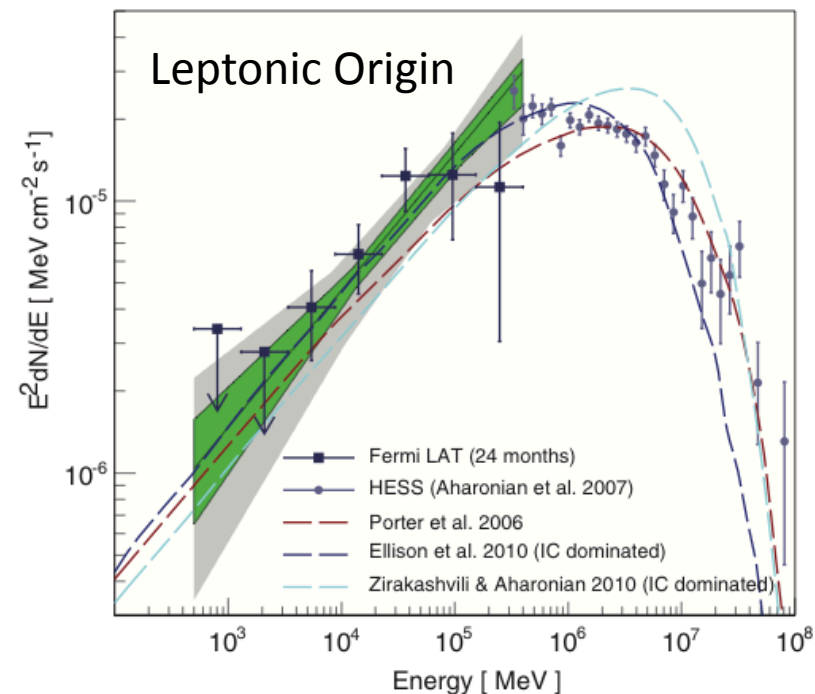
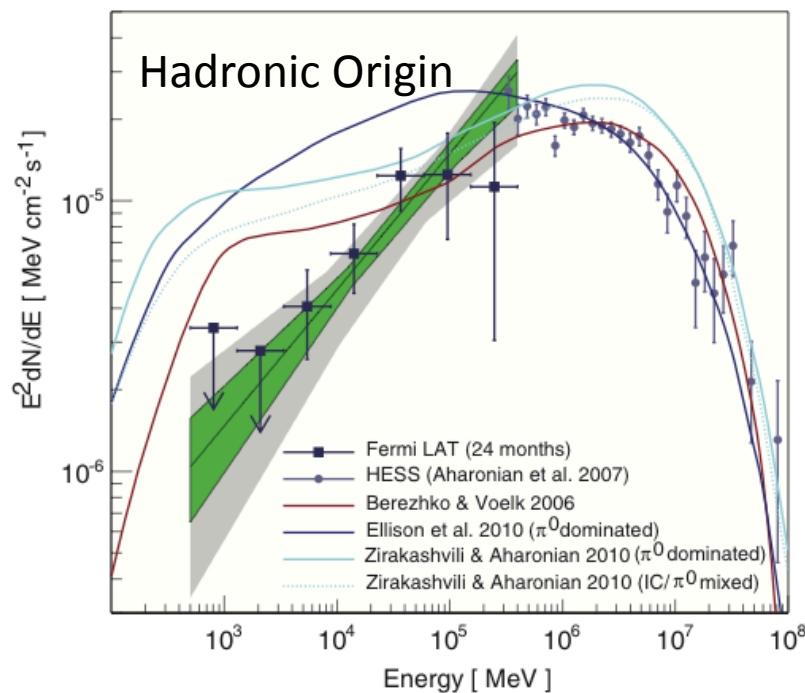
従って $n=150 \text{ cm}^{-3}$ とすると、RX J1713.7-3946 の場合

$$W_p^{\text{tot}} \sim 10^{48} \text{ [erg]} \text{ (加速効率は 1\% 以下)}$$

但し、今後数万年で加速効率が10%程度に到達する可能性はある

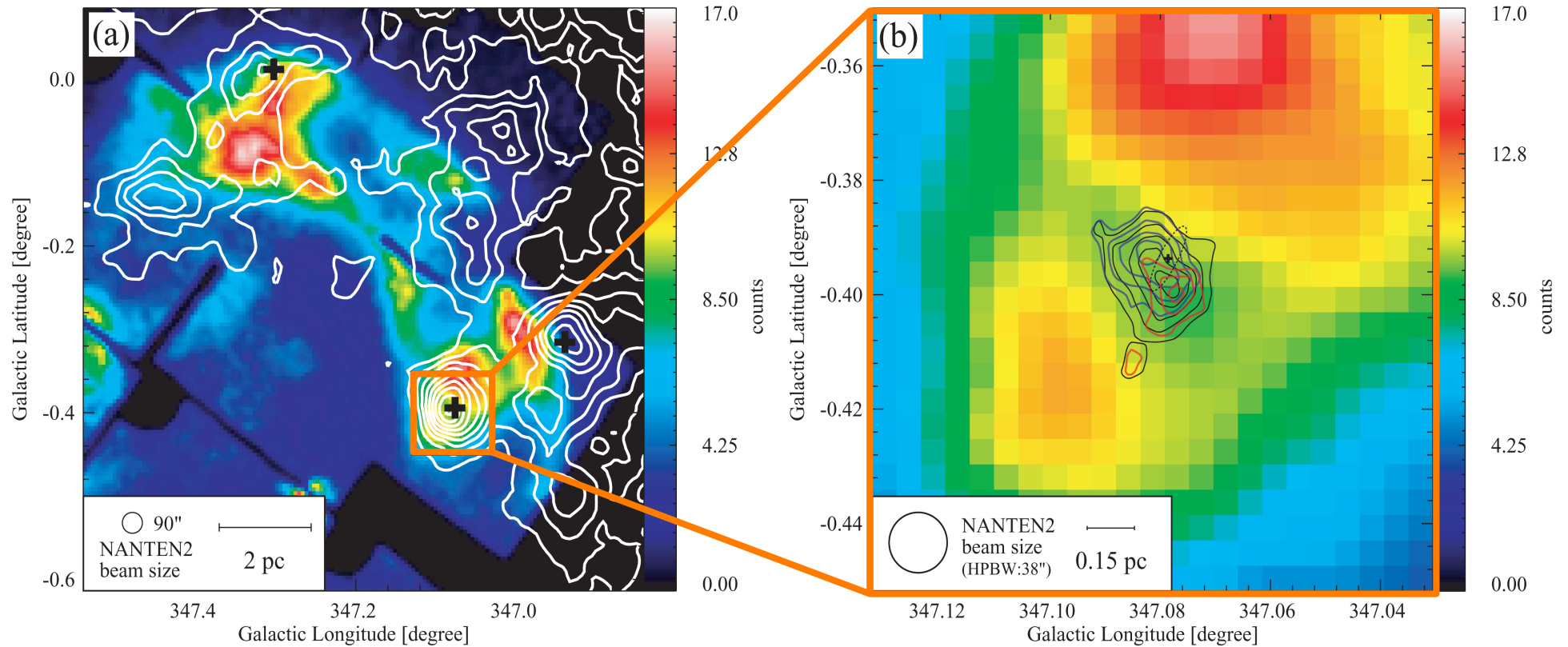
議論II - Fermi LAT Results vs. Inoue et al. 2011 -

- Fermi LAT で観測されたスペクトルは $\Gamma=1.5$ (Abdo et al. 2011)
⇒ 宇宙線電子起原のガンマ線がドミナントであると結論



- しかし宇宙線陽子起原でも $\Gamma=1.5$ をとりうる (Inoue et al. 2011)
⇒ 宇宙線が高密度ガスにどれだけ侵入出来るかは、
宇宙線のエネルギーに依存するため

Shock propagation into dense gas



$$V_{\text{sh}} \sim 3000 \text{ km s}^{-1} / \sqrt{n/n_0}$$

n : density of clump

n_0 : ambient density ($=1 \text{ cm}^{-3}$)

10^4 cm^{-3} , $t \sim 1000 \text{ yrs}$

Penetrating Depth = 0.03 pc

Sano et al. 2010

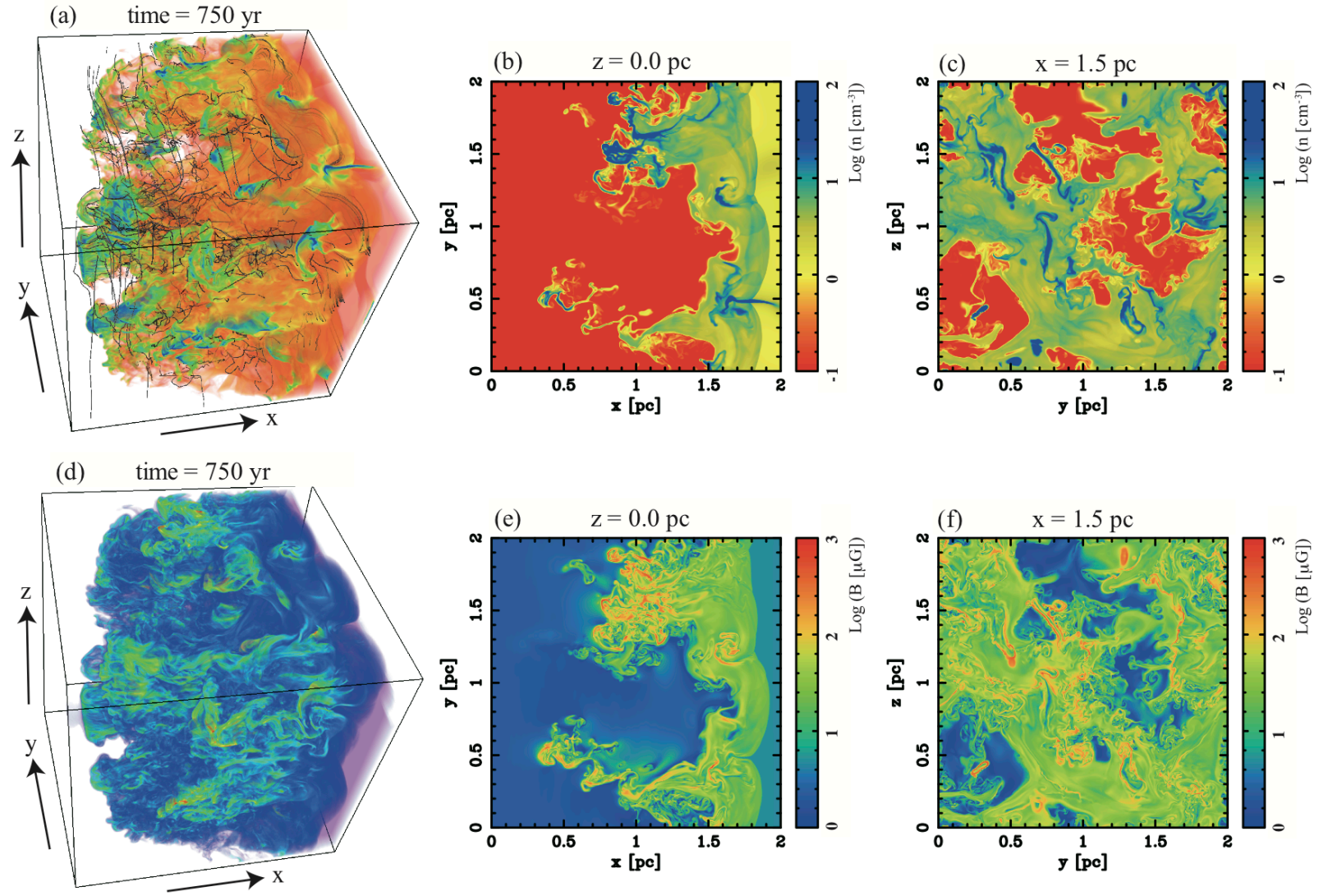
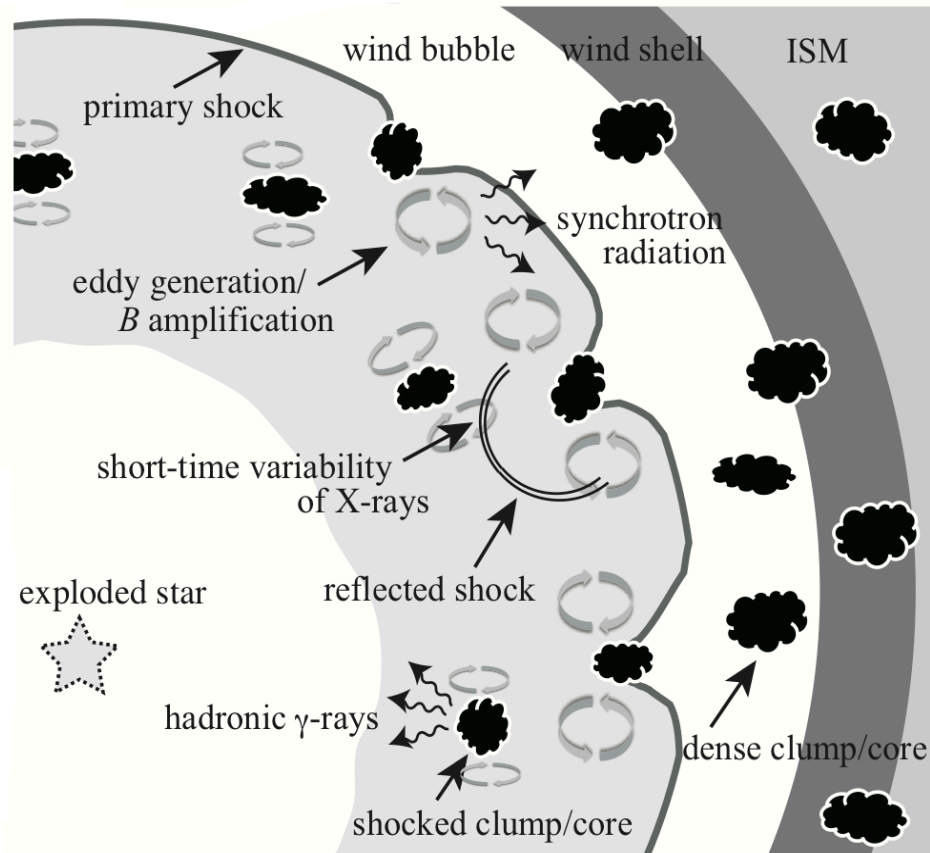
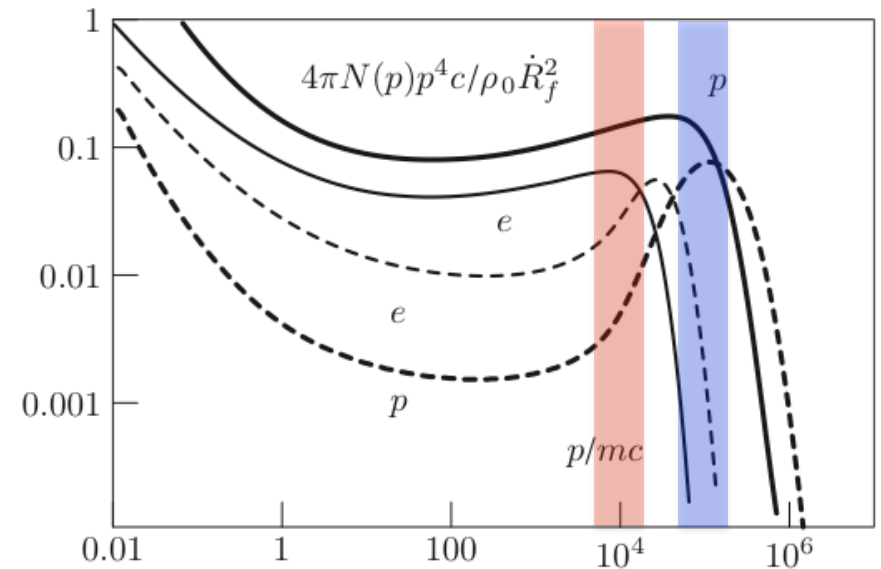


FIG. 3.— Result of the perpendicular shock case at $t = 750$ yr after the shock injection. Panel (a): number density volume rendering. Regions in green and blue indicate the density $n \sim 10 \text{ cm}^{-3}$ and $n \gtrsim 30 \text{ cm}^{-3}$, respectively, and the regions in warm colors show the shocked diffuse gas with $n \lesssim 4 \text{ cm}^{-3}$. Magnetic field lines are represented as gray lines. Panel (b): two-dimensional number density slice at $z = 0.0$ pc. Panel (c): slice of number density at $x = 1.5$ pc. Panel (d): volume rendering of magnetic field strength. Regions in blue, green and red indicate the regions with $B \lesssim 100 \mu\text{G}$, $B \gtrsim 100 \mu\text{G}$, and $B \gtrsim 500 \mu\text{G}$, respectively. Panel (e): slice of magnetic field strength at $z = 0.0$ pc. Panel (f): slice of magnetic field strength at $x = 1.5$ pc.



← Inoue et al. 2011



↑ Zirakashvili & Aharonian (2010)

■ 宇宙線のラーマー半径 R

$$R = 1.08 (E / 10^3 \text{ TeV}) Z^{-1} (B / 1 \mu\text{G})^{-1} \text{ kpc} \quad B \sim 100 \mu\text{G} \text{ とすると}$$

- ・電子は分子雲近傍磁場にトラップ
- ・陽子は分子雲内部に侵入できる

- 電子成分 $R \sim 0.1 \text{ pc}$ @ $E \sim 10 \text{ TeV}$
 - 陽子成分 $R \sim 1 \text{ pc}$ @ $E \sim 100 \text{ TeV}$
- (E: エネルギー, Z: 電荷, B: 磁場)

まとめ

■ 宇宙線陽子: TeV ガンマ線 と星間陽子

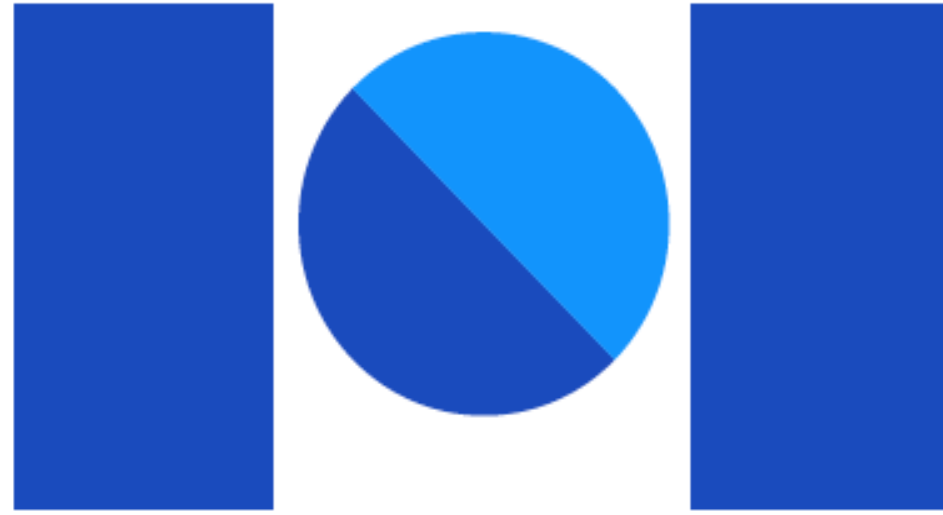
- 星間陽子(水素分子+原子; $100\text{-}10^3\text{cm}^{-3}$)とTeVガンマ線放射の空間的相関を示した。
- 宇宙線陽子の全エネルギーは $W_p^{\text{tot}} \sim 10^{48} [\text{erg}]$ @密度 $\sim 150\text{cm}^{-3}$

■ 星間陽子の定量

- 星間陽子は、COとHI(Self-Absorption)の解析から、水素分子と高密度水素原子を定量することで計算された。

■ Fermi LAT result

- 高密度ガスとの相互作用は Energy dependent であるため、 $\Gamma=1.5$ の hard なスペクトルが観測された。
必ずしも電子起原がドミナントとはいふことができない。



NANTEN
Submillimeter Observatory