

超新星残骸W28領域における ガンマ線放射と星間ガス

吉池 智史 (名大理)

福田 達哉, 佐野 栄俊, 鳥居 和史, 早川 貴敬,
山本 宏昭, 立原 研悟, 福井 康雄 (名大理)

▶ 宇宙線の加速と伝搬

■ 宇宙線

- 高エネルギー荷電粒子 ($10^8 - 20$ eV)
+ 陽子、電子、原子核
- エネルギー密度 ~ 1 eV / cm³

■ 銀河宇宙線の加速

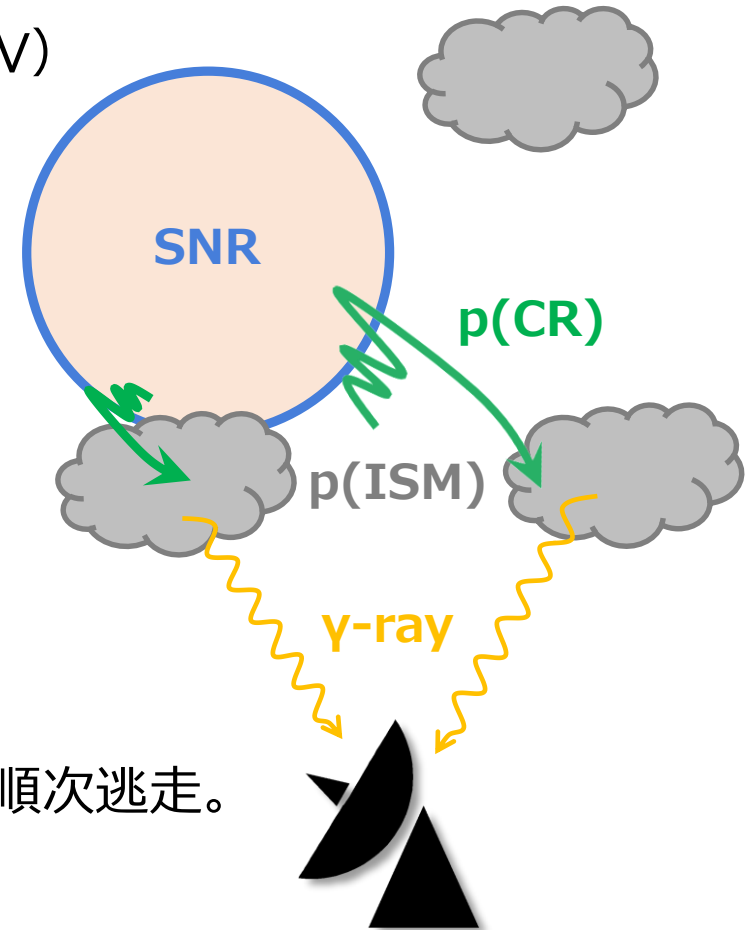
- 加速源：超新星残骸 (SNRs)
- 衝撃波統計加速 (DSA)
- $E_{SN} \sim 10^{51}$ erg
- 加速効率 $\sim 1 - 10$ %
→ エネルギー密度を説明可

■ 加速宇宙線の逃走

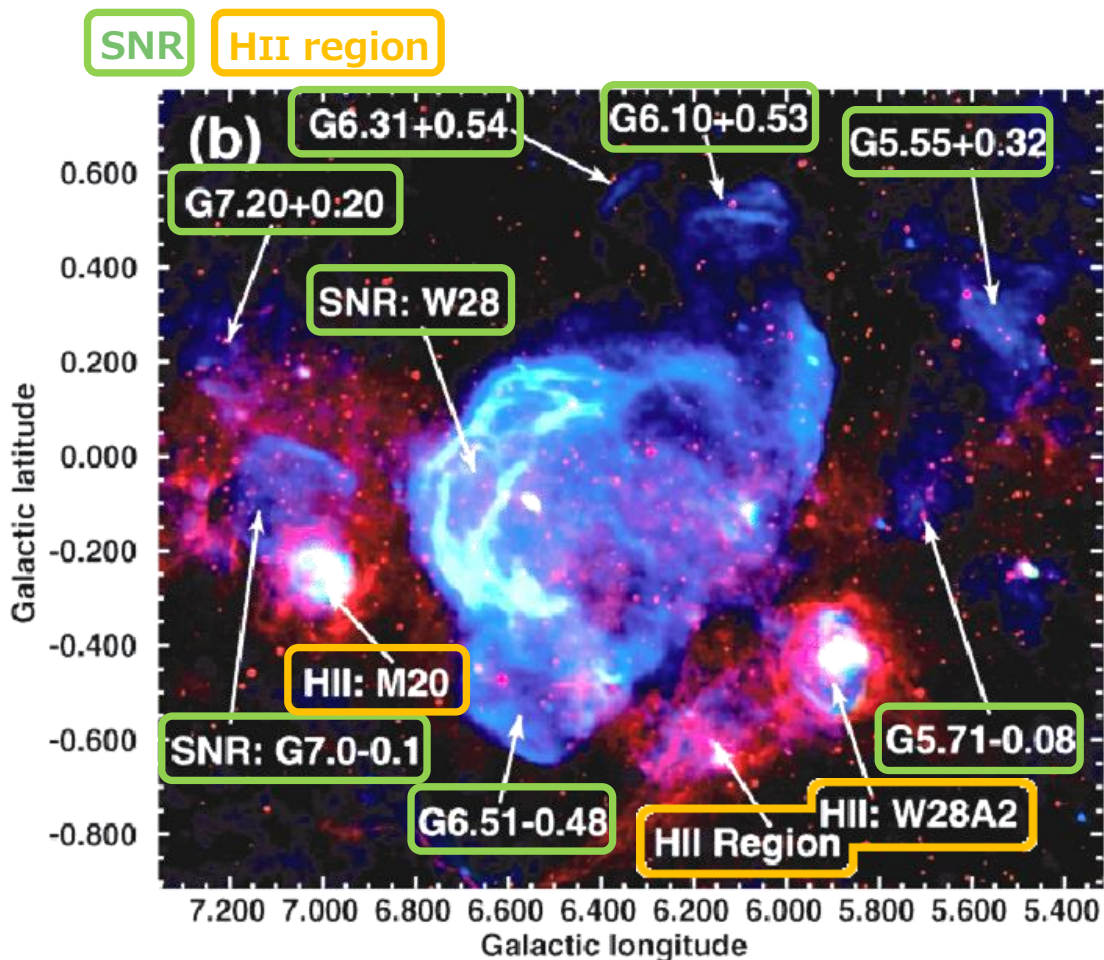
- 加速源からエネルギーに応じて、順次逃走。
- 周辺環境 (ISM, B) にも依存。

■ 宇宙線陽子による放射

- $p(\text{CR}) + p(\text{ISM}) \rightarrow p + p + \pi^0, \pi^0 \rightarrow 2\gamma$
- ガスに埋もれたSNRは、宇宙線加速・拡散の検証の有力候補。



▶ 超新星残骸W28領域



Brogan et al. (2006)

MSX 8 μ m, SGPS+VLA 20cm, VLA 90cm

■ 年齢 : $(3.5 - 15) \times 10^4$ yr
→ Middle-aged SNR

Kaspi et al. (1993)

■ 距離 : 1.9 kpc

Velázquez et al. (2002)

■ 周辺にHII region, SNRs

■ GeV-TeV ガンマ線

• TeV: H.E.S.S.

Aharonian et al. (2008)

• GeV: Fermi-LAT

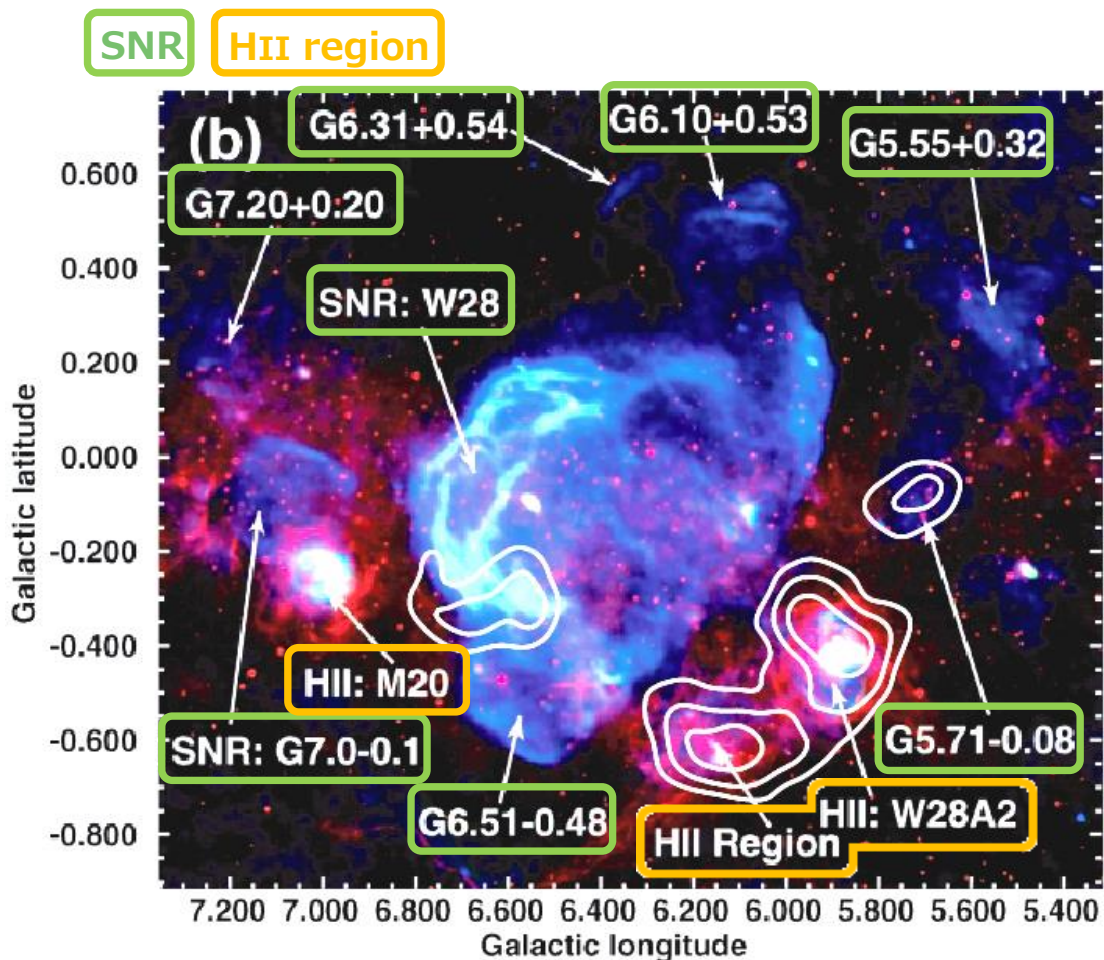
Abdo et al. (2010)

Hanabata et al. (2014)

AGILE

Giuliani et al. (2010)

▶ 超新星残骸W28領域



Brogan et al. (2006)

MSX 8 μ m, SGPS+VLA 20cm, VLA 90cm

+ コントア : H.E.S.S TeV γ -ray (*Aharonian et al. 2008*)

■ 年齢 : $(3.5 - 15) \times 10^4$ yr
→ Middle-aged SNR

Kaspi et al. (1993)

■ 距離 : 1.9 kpc

Velázquez et al. (2002)

■ 周辺にHII region, SNRs

■ GeV-TeV ガンマ線

• TeV: H.E.S.S.

Aharonian et al. (2008)

• GeV: Fermi-LAT

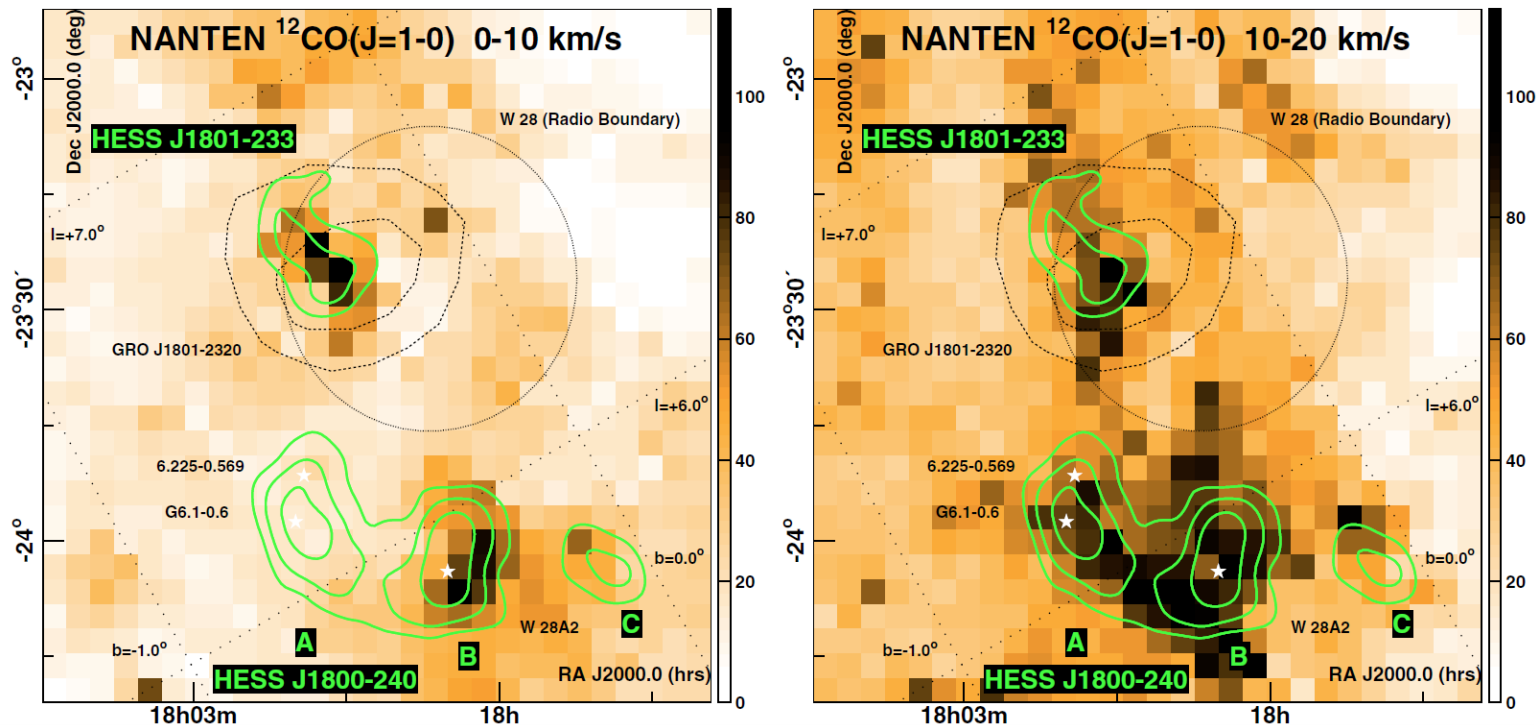
Abdo et al. (2010)

Hanabata et al. (2014)

AGILE

Giuliani et al. (2010)

超新星残骸W28領域



イメージ：(左) CO(1-0) [0 - 10 km/s] / (右) CO(1-0) [10 - 20 km/s]
コントア：TeV γ -ray
Aharonian et al. (2008)

- ガンマ線に対応する分子ガスの存在。
→ SNRから逃走した宇宙線陽子起源の可能性を示唆。
- 星間分子ガス観測：
 - + グリッドが荒く、対応する陽子成分を正確に抽出できてない。
 - + 観測範囲が狭く、ガンマ線ソース全体をカバーできてない。
- 水素原子 (HI) についても考慮する必要あり。

▶ 使用データ

NANTEN2



ATCA



Parkes

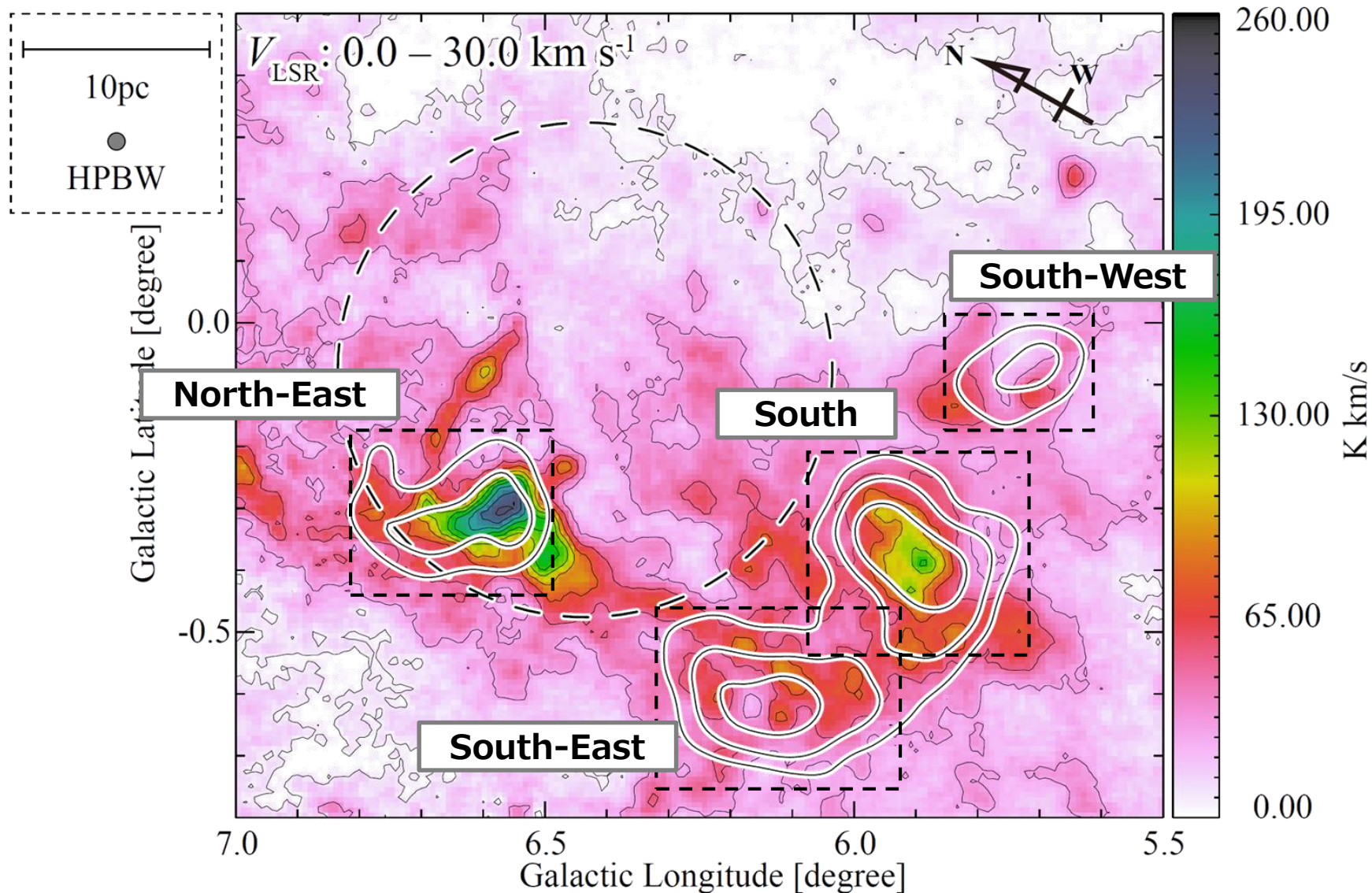


望遠鏡	ターゲット	角度分解能/ グリッド	速度分解能	ノイズレベル
NANTEN2	$^{12,13}\text{CO}(J=1-0)$	200"/60"	1 km/s	0.3 K
	$^{12,13}\text{CO}(J=2-1)$	100"/30"	0.5 km/s	0.3 K
ATCA+Parkes [†]	HI	2.2'/40"	0.82 km/s	2.8 K

[†] SGPSアーカイブデータ (McClure-Griffith et al. 2005)

▶ 分子ガス分布 - W28領域全体 -

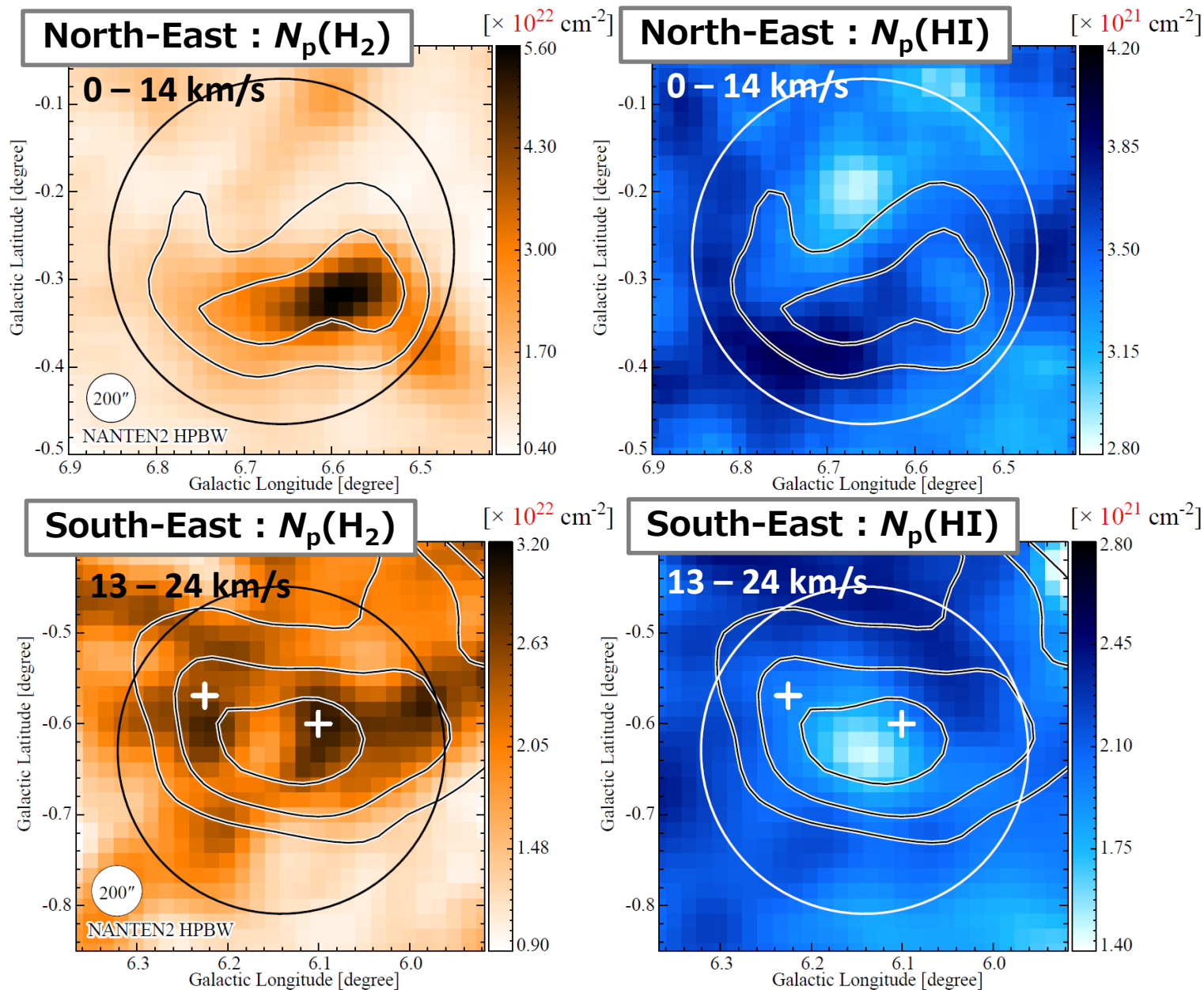
イメージ: $^{12}\text{CO}(J=2-1)$, コントア (Bold): TeV γ -ray (H.E.S.S.)



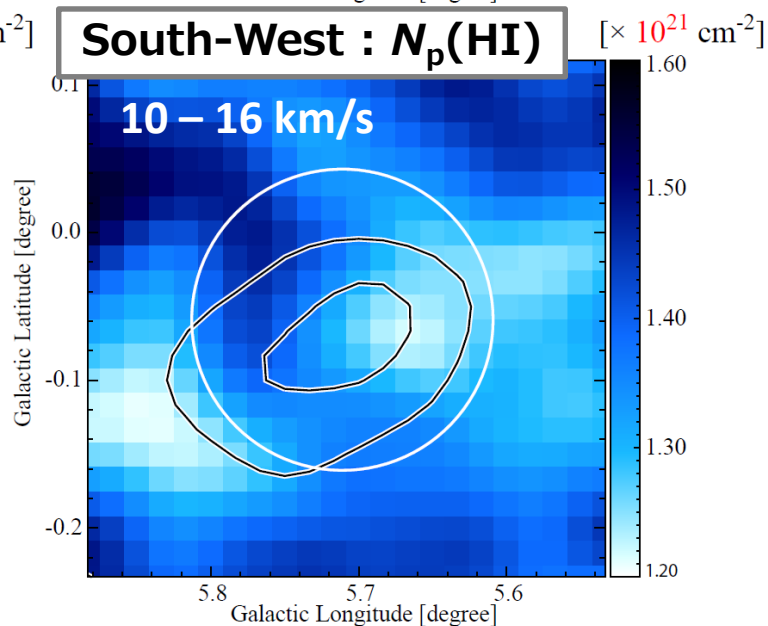
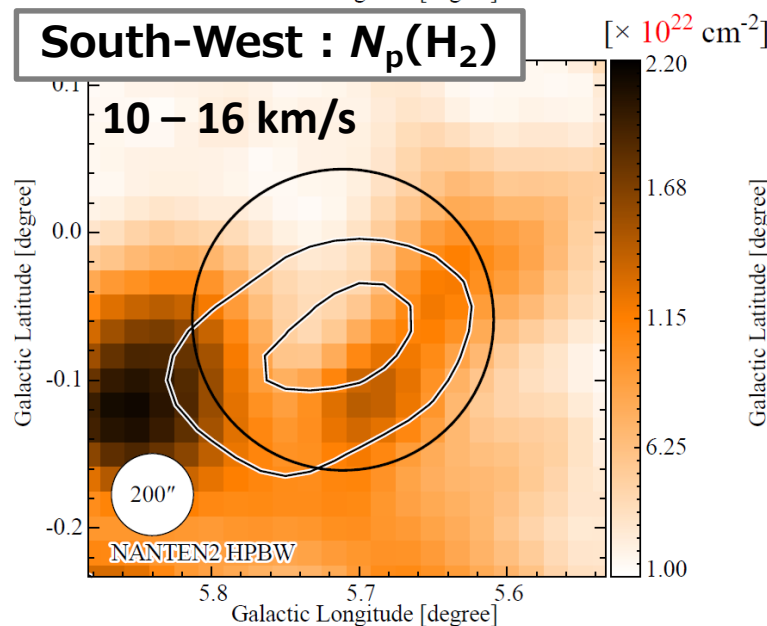
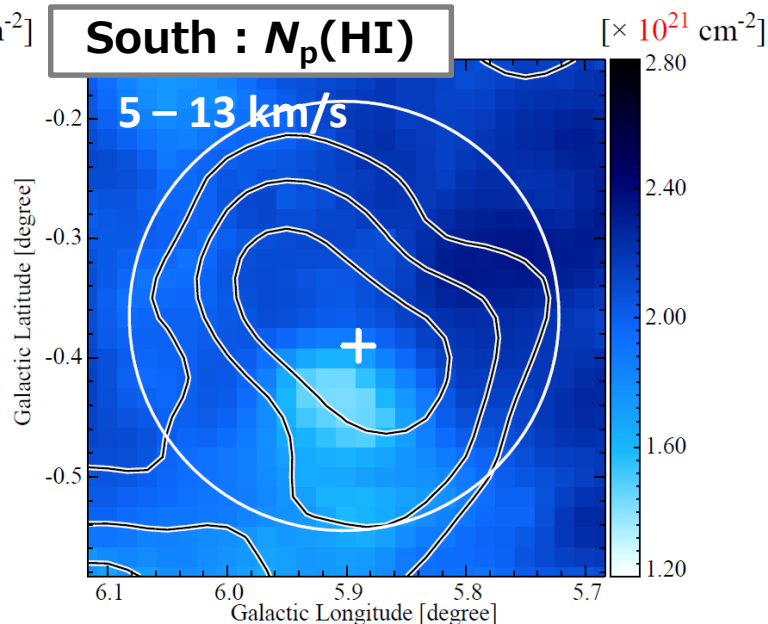
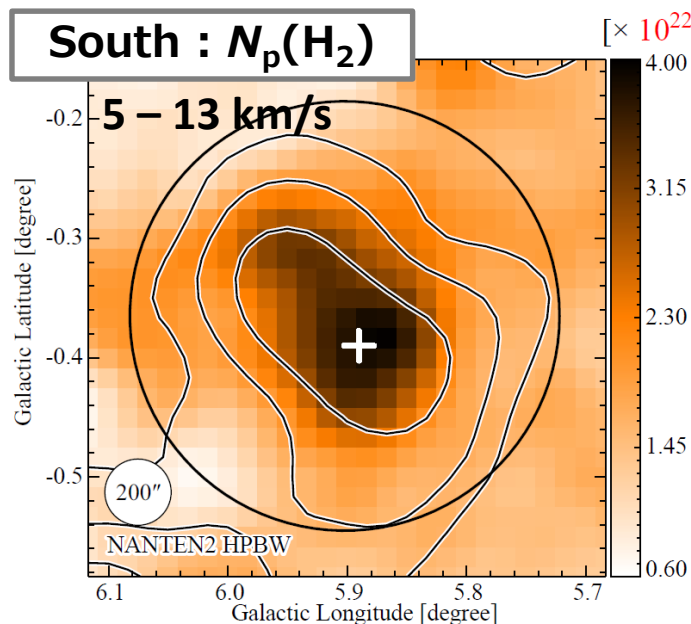
▶ 星間陽子柱密度の導出

- COデータを速度方向にスイープし、TeVガンマ線に対応するガス速度範囲を決める。
- 決めた速度範囲とCO、HIデータから、分子・原子由来の星間陽子柱密度を導出する。
 - ✓ 分子成分: $N_p(\text{H}_2) = 2 \times X_{\text{CO}} \times W_{\text{CO}(1-0)}$
 - $X_{\text{CO}} = 1.56 \times 10^{20} [\text{cm}^{-2} / (\text{K km s}^{-1})]$
Hunter et al. (1997)
 - ✓ 原子成分: $N_p(\text{HI}) = 1.823 \times 10^{18} \times W_{\text{HI}}$

星間陽子柱密度分布 [コントア : TeV γ -ray, + : HII region]



▶ 星間陽子柱密度分布 [コントア : TeV γ -ray, + : HII region]



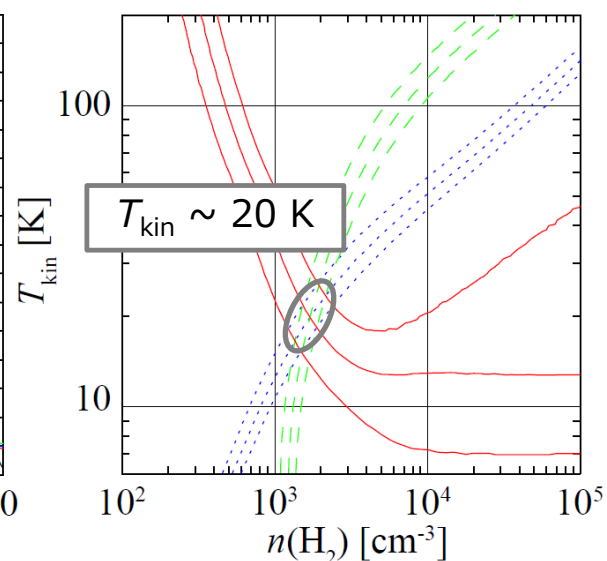
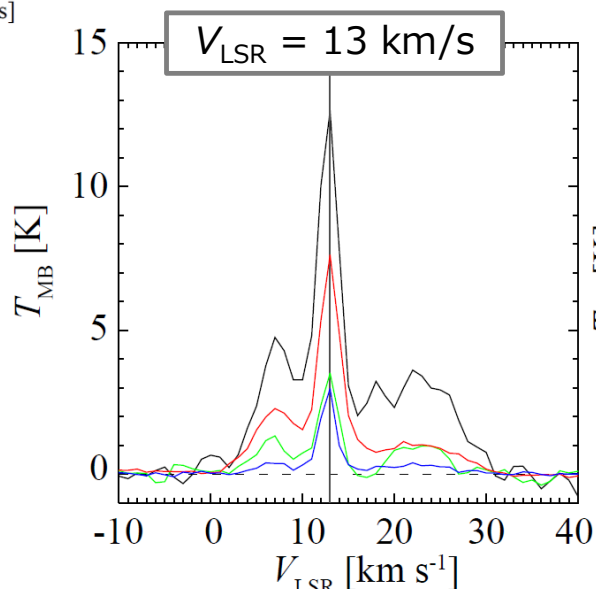
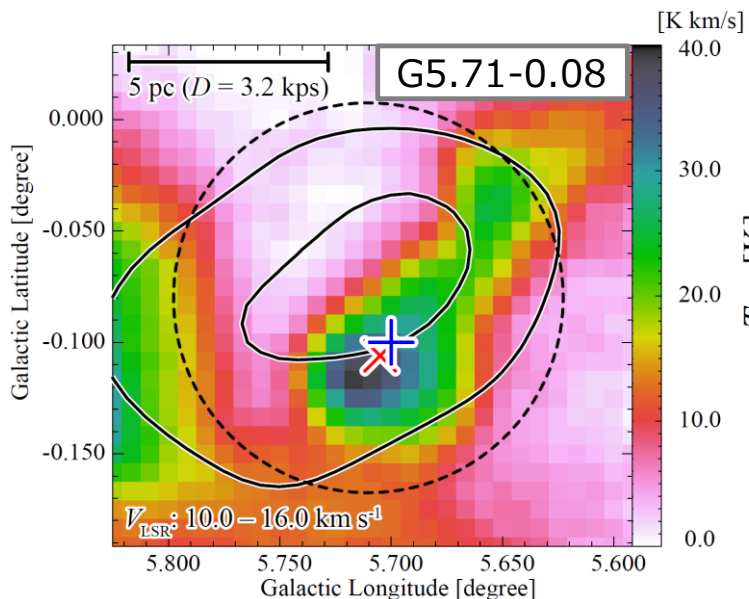
▶ 加速宇宙線陽子エネルギー

- $W_p \sim L_\gamma \times \tau_{pp}$ [erg], $\tau_{pp} \sim 4.5 \times 10^{15} \times (n/\text{cm}^{-3})^{-1}$ [s]
 - L_γ : 0.5 GeV – 10 TeV
 - † H.E.S.S.のスペクトル (Aharonian et al. 2008) を外挿して使用。
 - † 全てのソースはW28と同じ距離 (1.9 kpc)にあると仮定。

Source	$L_\gamma^{0.5 \text{ GeV} - 10 \text{ TeV}}$ [$10^{34} \text{ erg s}^{-1}$]	$n_p(\text{H}_2)$ [cm^{-3}]	$n_p(\text{HI})$ [cm^{-3}]	$n_p(\text{total})$ [cm^{-3}]	W_p [10^{47} erg]
North-East	7.5	630	130	760	7
South-East	4.3	840	80	920	3
South	3.3	840	80	920	2
South-West	0.82	580	110	690	0.7

- 星間陽子は分子成分が優位 ($n_p(\text{HI}) / n_p(\text{H}_2) \sim 10 - 20 \%$) 。
- W_p はNorth-Eastに比べ、South-East・Southは2 – 3分の1程度。
 - † SNRからの各ソースの距離の違いによるとも考えれる。
- SNR全体での W_p : $\sim 10^{48}$ (NE x 4) – $\sim 10^{49}$ (全立体角) erg
 → 加速効率 : 0.1 – 1 %

▶ South-Westのガンマ線起原



$^{12}\text{CO}(2-1)$ 積分強度 + H.E.S.S. TeV γ -ray
 ×: 1720 MHz OH maser / +: LVG使用点

$^{12}\text{CO}(1-0)$, $^{12}\text{CO}(2-1)$
 $^{13}\text{CO}(1-0)$, $^{13}\text{CO}(2-1)$

$^{13}\text{CO}(2-1)/^{13}\text{CO}(1-0)$
 $^{13}\text{CO}(1-0)/^{12}\text{CO}(2-1)$
 $^{13}\text{CO}(2-1)/^{12}\text{CO}(2-1)$

- South-West方向
 - 別のSNR (候補) の存在 (*Brogan et al. 2006*)。
 - 1720 MHz OH maserが検出 (*Hewitt & Yusef-Zadeh 2009*)。
- OH maserの速度とCOの速度は一致 ($V_{\text{LSR}} = 13 \text{ km/s}$)。
- LVG解析: ガス温度 $\sim 20 \text{ K} > 10 \text{ K} \rightarrow$ 衝撃波相互作用による加熱の可能性。
- 力学的距離: $13 \text{ km/s} \rightarrow 3.2 \text{ kpc}$ (or 13.7 kpc)
 - この場合、 $W_p = 3 \times 10^{47} \text{ erg}$ (or $5 \times 10^{50} \text{ erg}$)。
 - SNR 1つのエネルギーとしては矛盾ない。
- W28以外のSNR起源の可能性を示唆。

▶ まとめ

- W28とその周辺のガンマ線ソースについて、CO・HI観測データから、対応する星間陽子量を導出。
- いずれも、陽子は分子成分が優位。
- 星間陽子の存在・加速宇宙線陽子のエネルギーの関係は、逃走宇宙線陽子によるガンマ線と矛盾しない。
- ただし、South-West成分は、他のSNR起源の可能性がある。
- CTAでの期待（宇宙線拡散の観点で）
 - 高エネルギー帯域観測 → 拡散係数をより制限。
 - 分解能の向上 → 星間ガスとの詳細比較が可能。
 - 高感度化 → W28、W44のような検証例の増加による、系統的な調査。