

# 超新星残骸 RX J1713.7-3946 における 星間陽子と TeVガンマ線放射

名古屋大学大学院 理学研究科  
天体物理学研究室(Ae研) 博士課程後期1年

佐野 栄俊 (SANO Hidetoshi)

# イントロダクション

## ■ 超新星残骸：大質量星が超新星爆発した後に残されるガス雲

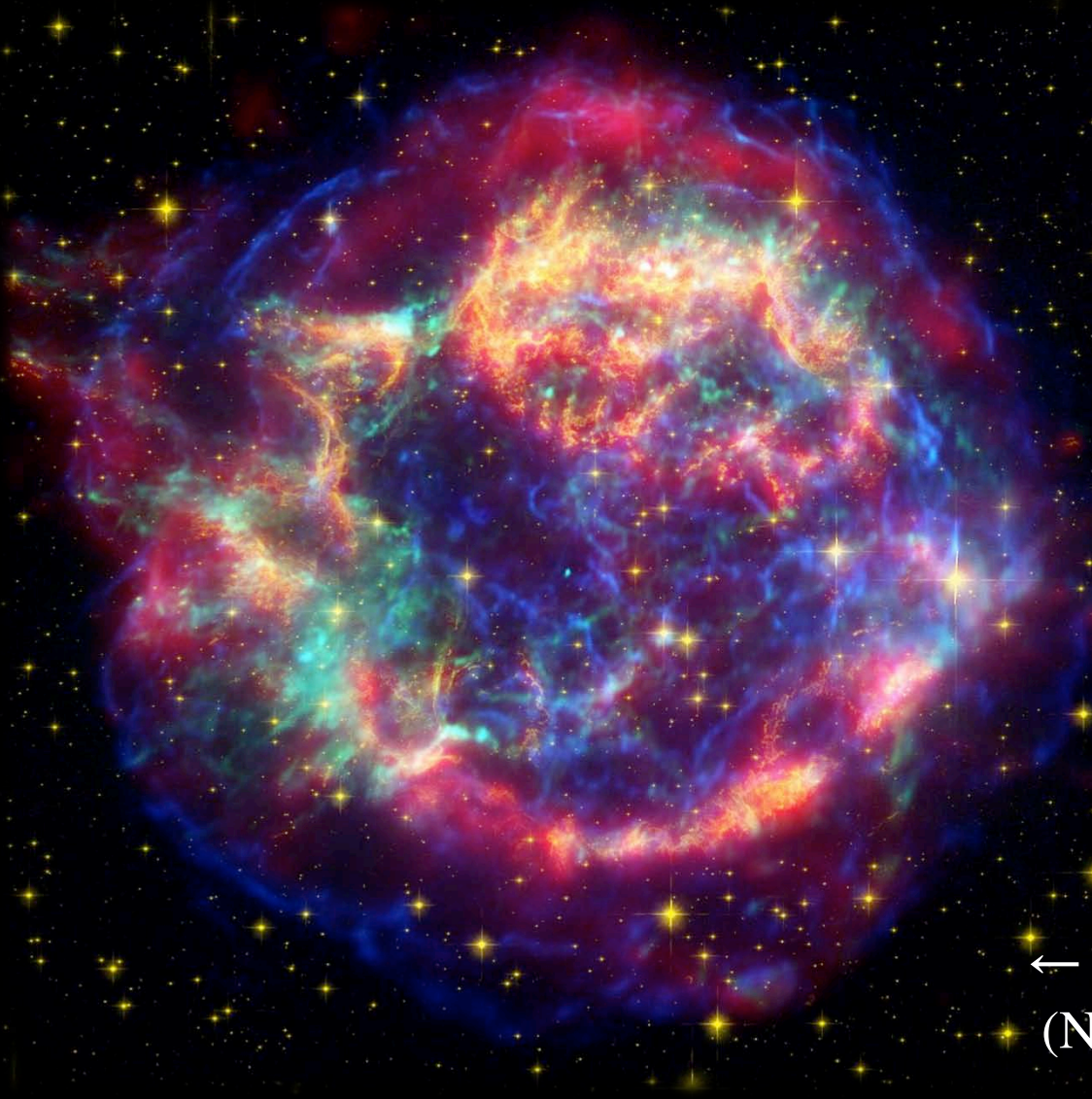
- $10^{51}$  erg のエネルギー放出
- 超音速衝撃波層の形成・膨張



星間空間へ多大な影響を与える

衝撃波と星間物質の相互作用  
衝撃波面における宇宙線加速  
etc.

← Supernova Remnant Cassiopeia A  
(NASA/JPL-Caltech/STScI/CXC/SAO)

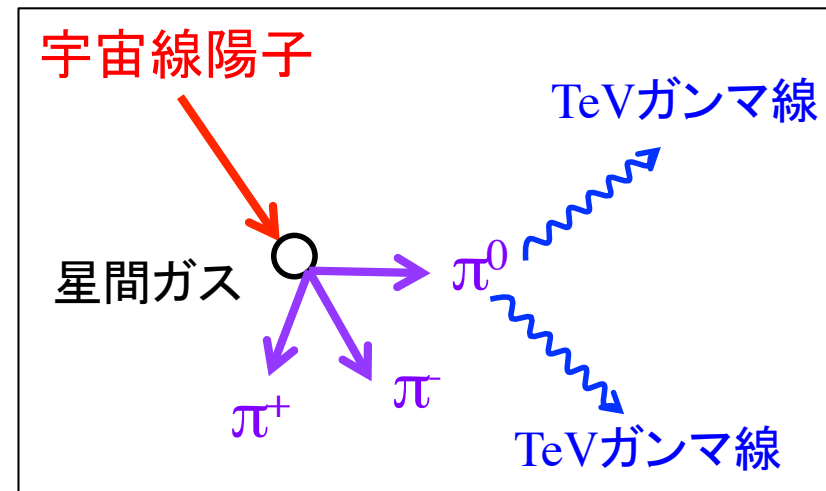
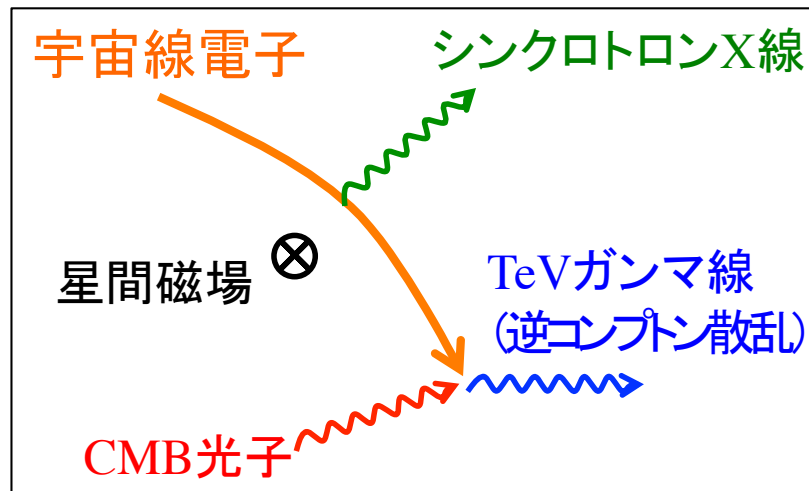


# 研究目的: 超新星残骸と星間ガスの相互作用の解明

## ■ 超新星残骸の衝撃波面は、宇宙線の加速現場の候補

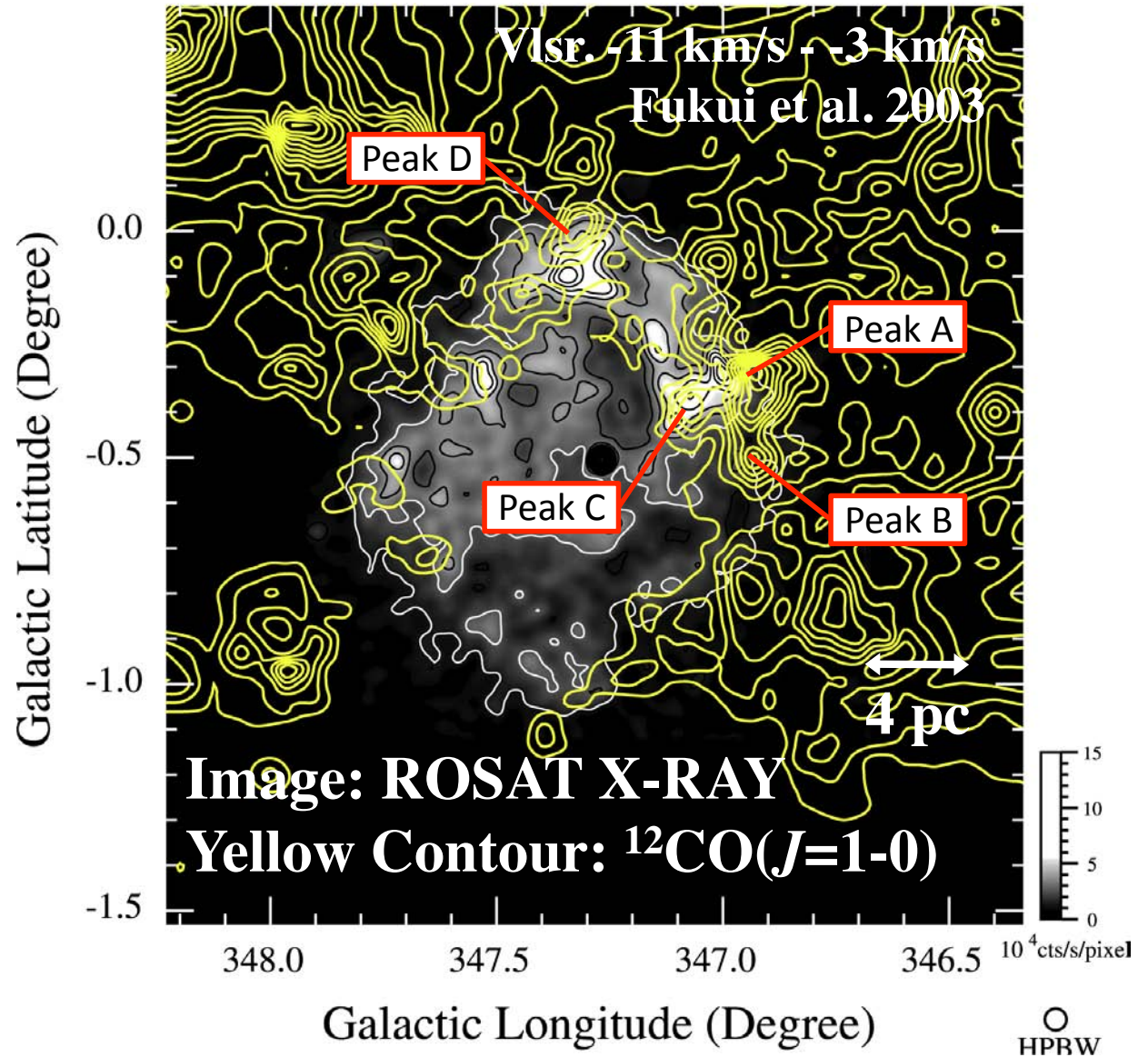
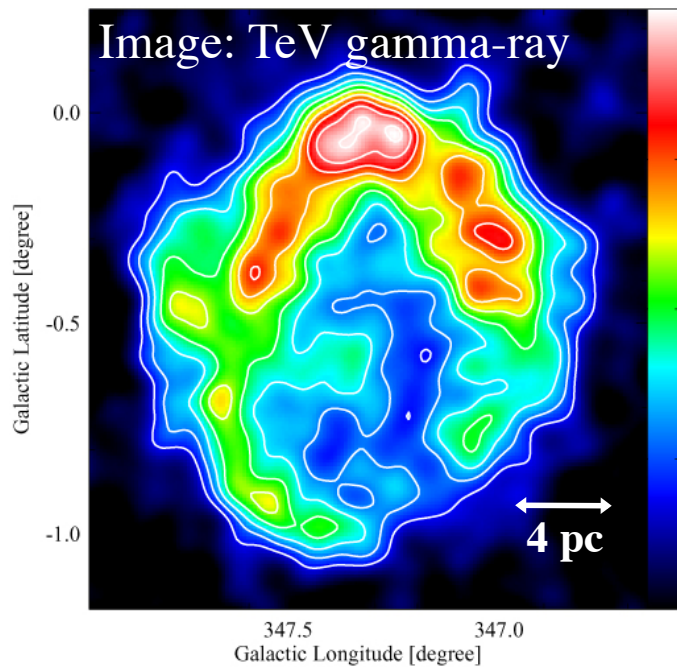
### —宇宙線—

- ・knee energy ( $\sim 3 \times 10^{15}$  eV) 以下の高エネルギー陽子、電子、原子核
- ・星間磁場によって曲げられるため直接観測では加速現場を検証できない



衝撃波がどのように星間ガスと相互作用しているか？  
それが宇宙線などの高エネルギー現象とどう関係するか？

# TeV $\gamma$ 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..  $3000 \text{ km s}^{-1}$

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

# 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



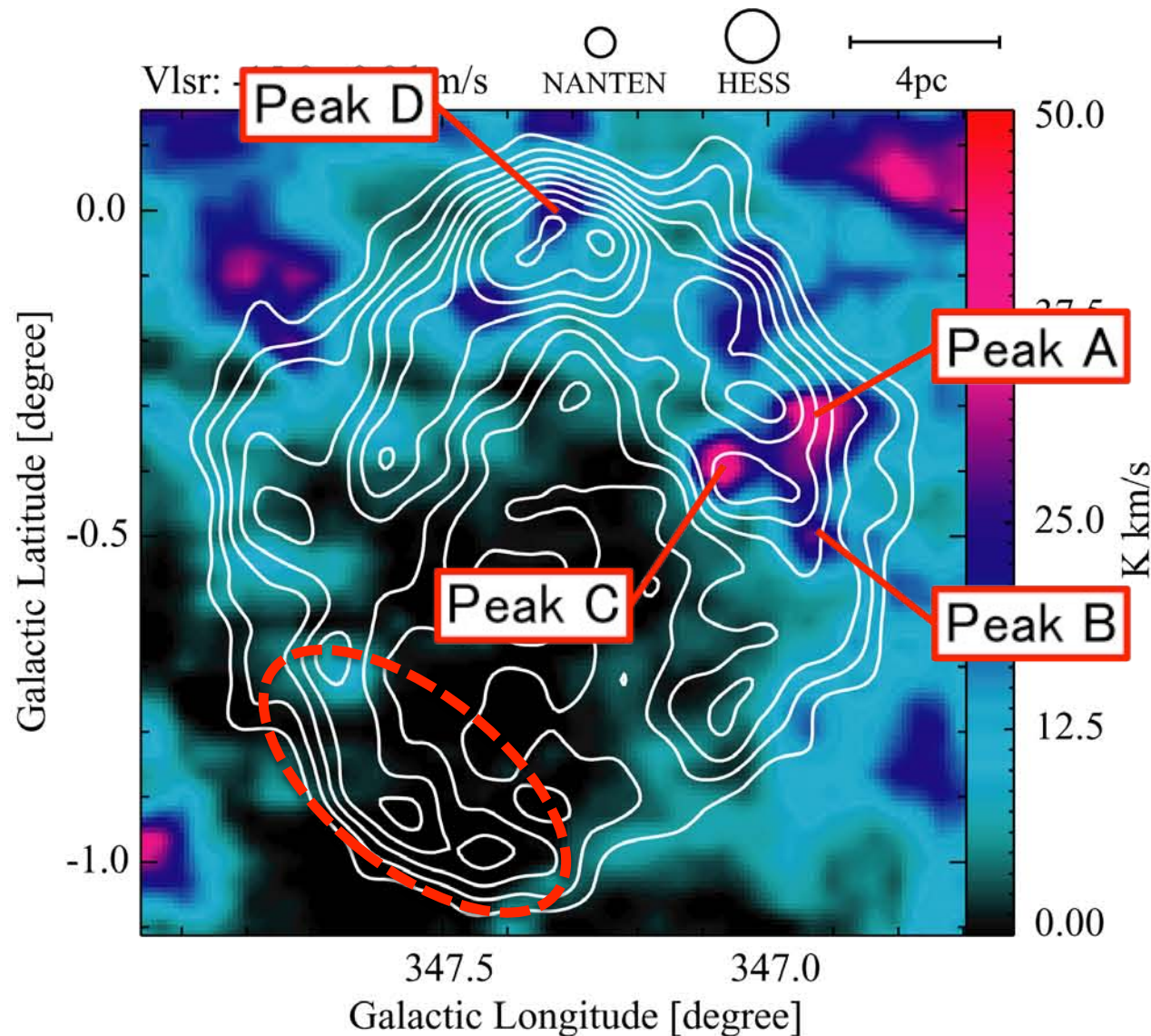
分子雲(高密度水素分子H<sub>2</sub>): 密度 $10^2\text{cm}^{-3}$ 以上,  $T_k=10\text{-}20\text{K}$   
原子ガス(中性水素原子HI): 密度 $1\text{-}100\text{cm}^{-3}$ ,  $T_k=30\text{-}100\text{K}$

- 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

# Molecular Cloud vs. TeV Gamma-Ray

## ■ 分子雲と TeV ガンマ線の空間分布の比較

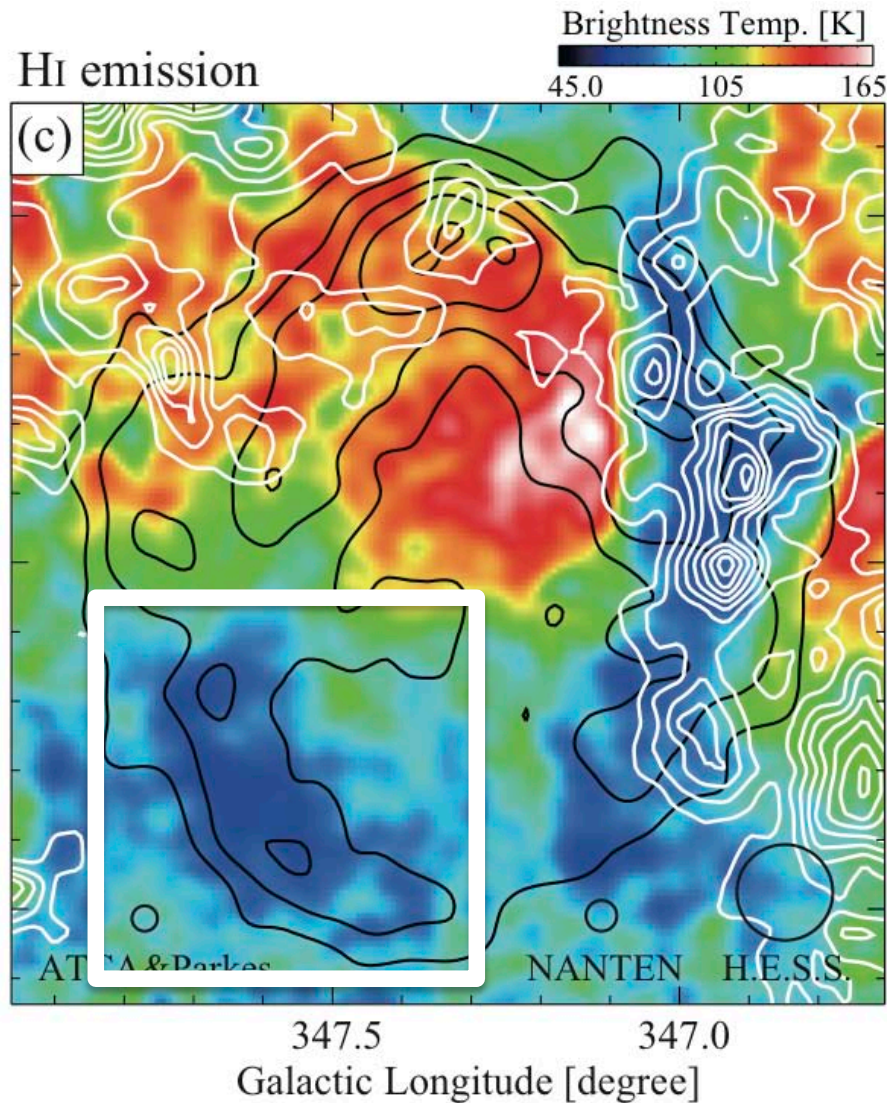


- 大局的には、分子雲とTeVガンマ線の分布が良く一致
- 分子雲Peak方向(PeakA-D)  
-特に相関が顕著
- SNR左下の領域  
-TeVガンマ線(強い)  
-分子雲(存在しない)

イメージ:CO( $J=1-0$ ) 平均強度  
Vlsr: -15 - -0 km/s  
コントア: TeVガンマ線強度  
20 から10 count毎

# Atomic Hydrogen vs. TeV Gamma-Ray

## ■ 水素原子と TeV ガンマ線の空間分布の比較



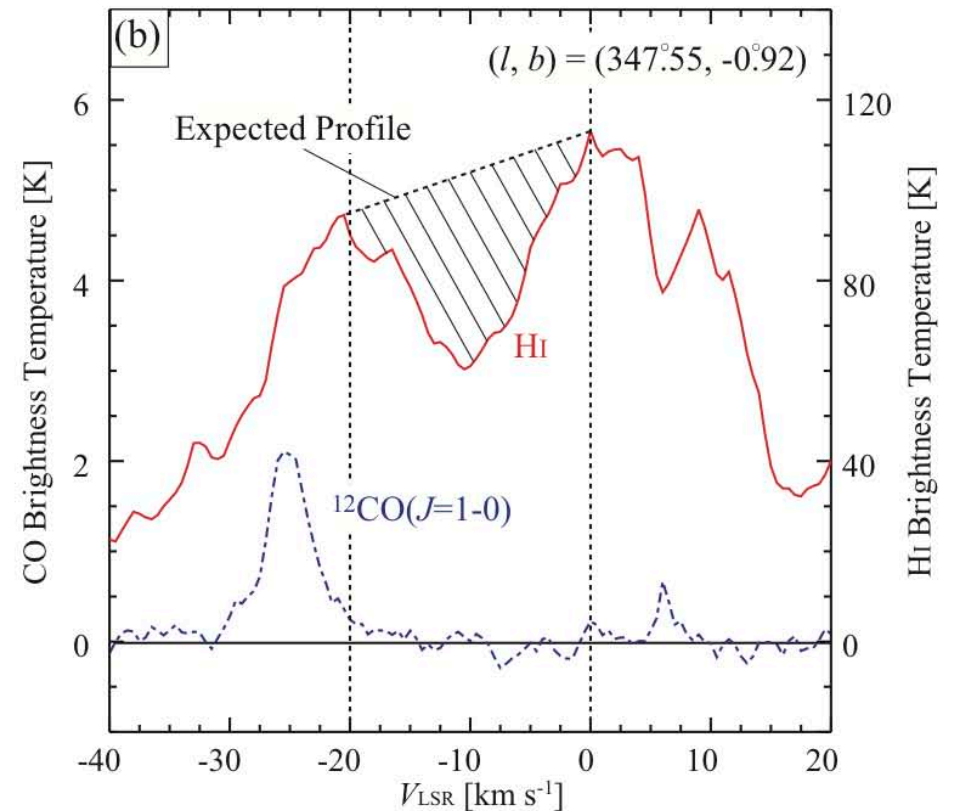
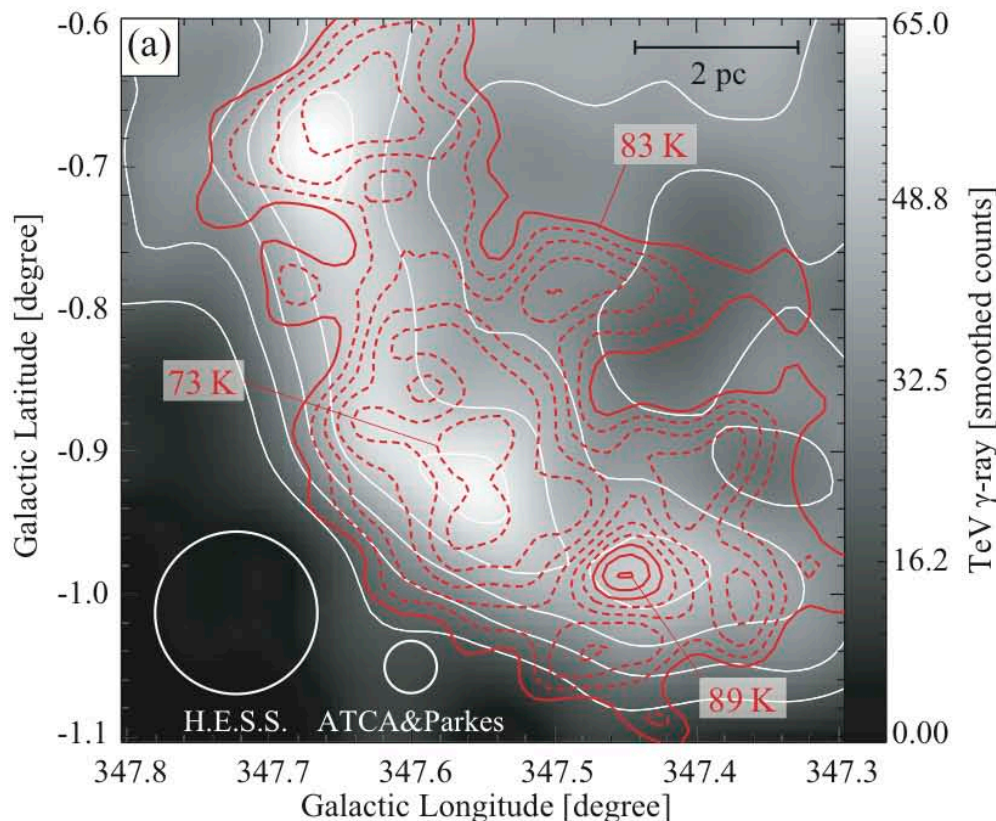
- SNR左下の領域  
- 分子雲の無かった場所に  
冷たい水素原子が存在
- SNR右側の領域  
- 分子雲と冷たい水素原子  
が混在している

イメージ: HI 21cm 平均強度  
V<sub>lsr</sub>: -8 - -6 km/s  
白コントア: TeV ガンマ線  
緑コントア: 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 ( $V_{\text{lsr}}$ : -15 - 5 km/s; 73 - 83 K, 83 - 89 K)



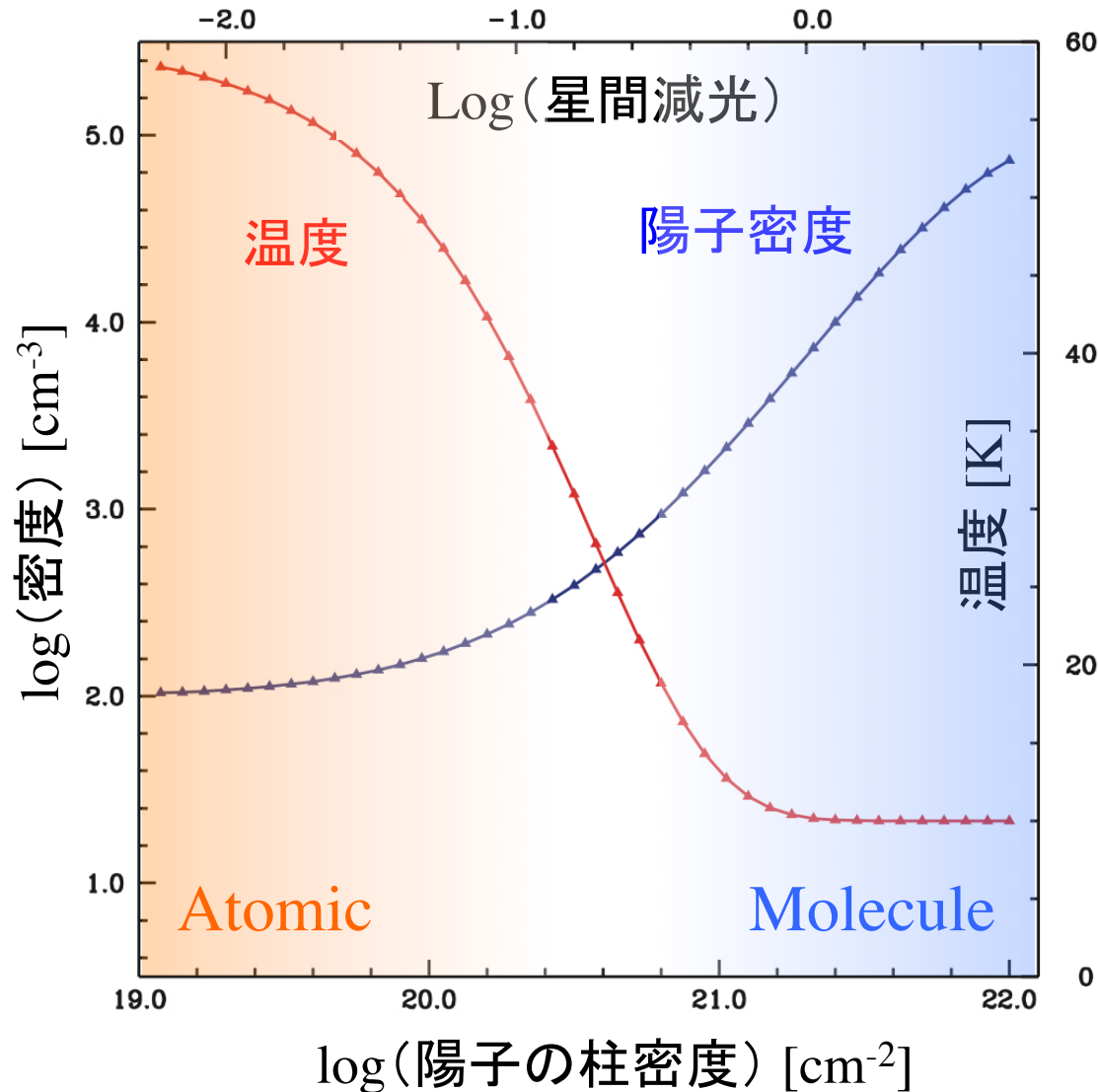
■ HIの中心の方が強度が弱くなっている

⇒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。



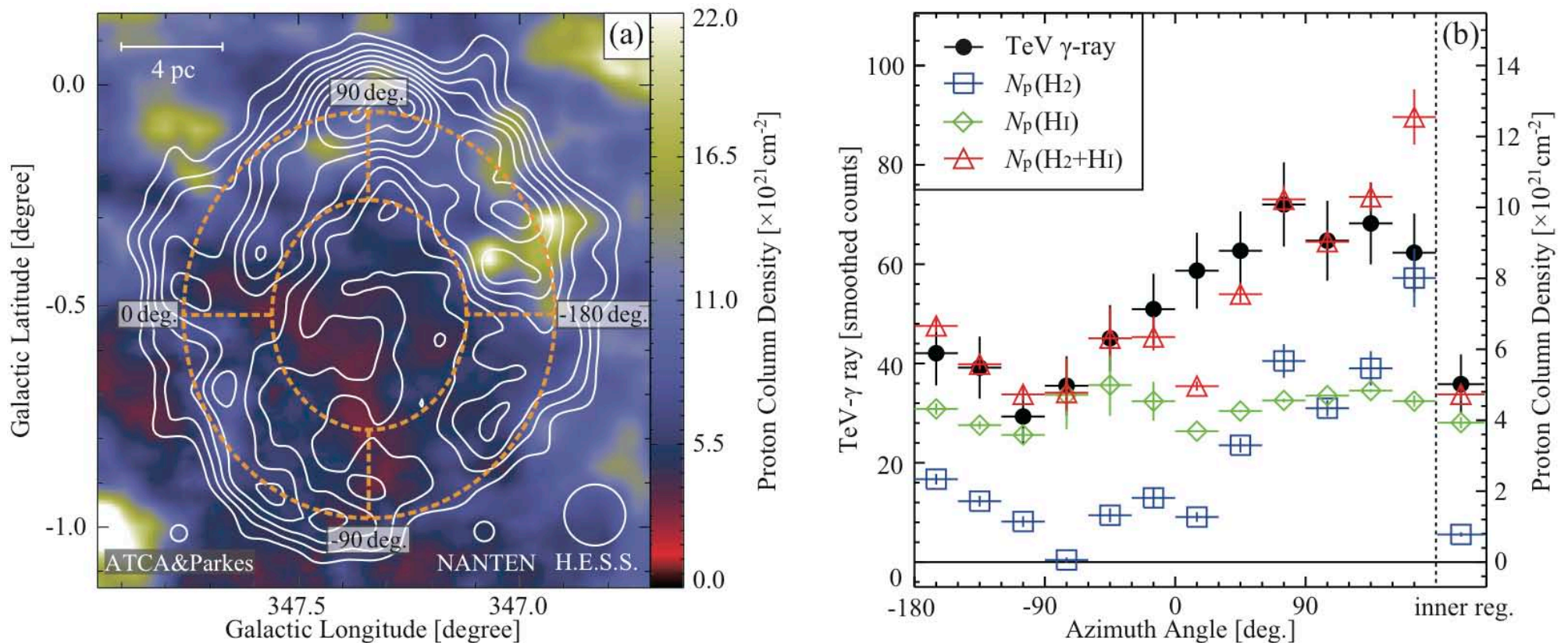
宇宙線陽子のターゲットになりうる

← Goldsmith et al. (2007) Fig. 2

# 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 $\gamma$ 線のRadial Profile Plot

星間陽子を水素分子+原子としたことで、TeV  $\gamma$ 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  $W_p^{\text{tot}}$   
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[ $\text{cm}^{-3}$ ]  
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

# まとめ

---

## ■ 宇宙線陽子: TeV $\gamma$ 線 と星間ガス

- SNR左下の領域にTeV $\gamma$ 線と関連した低温原子ガス( $\sim 150 \text{ cm}^{-3}$ )の発見
- 宇宙線陽子のターゲット(分子+原子)とTeVガンマ線の関連
- 全エネルギー  $W_p^{\text{tot}} \sim 10^{49} \text{ [erg]}$  (加速効率1%)以下

## ■ 宇宙線陽子と電子の加速領域と標的

- 低密度領域( $0.1 \text{ cm}^{-3}$ )で加速、高密度分子・原子( $\sim 150 \text{ cm}^{-3}$ 以上)が標的
- 星間ガスの非一様性が重要
- 宇宙線陽子は分子雲内部へ浸透、電子は表面で散乱される

NANTEN  
Submillimeter Observatory