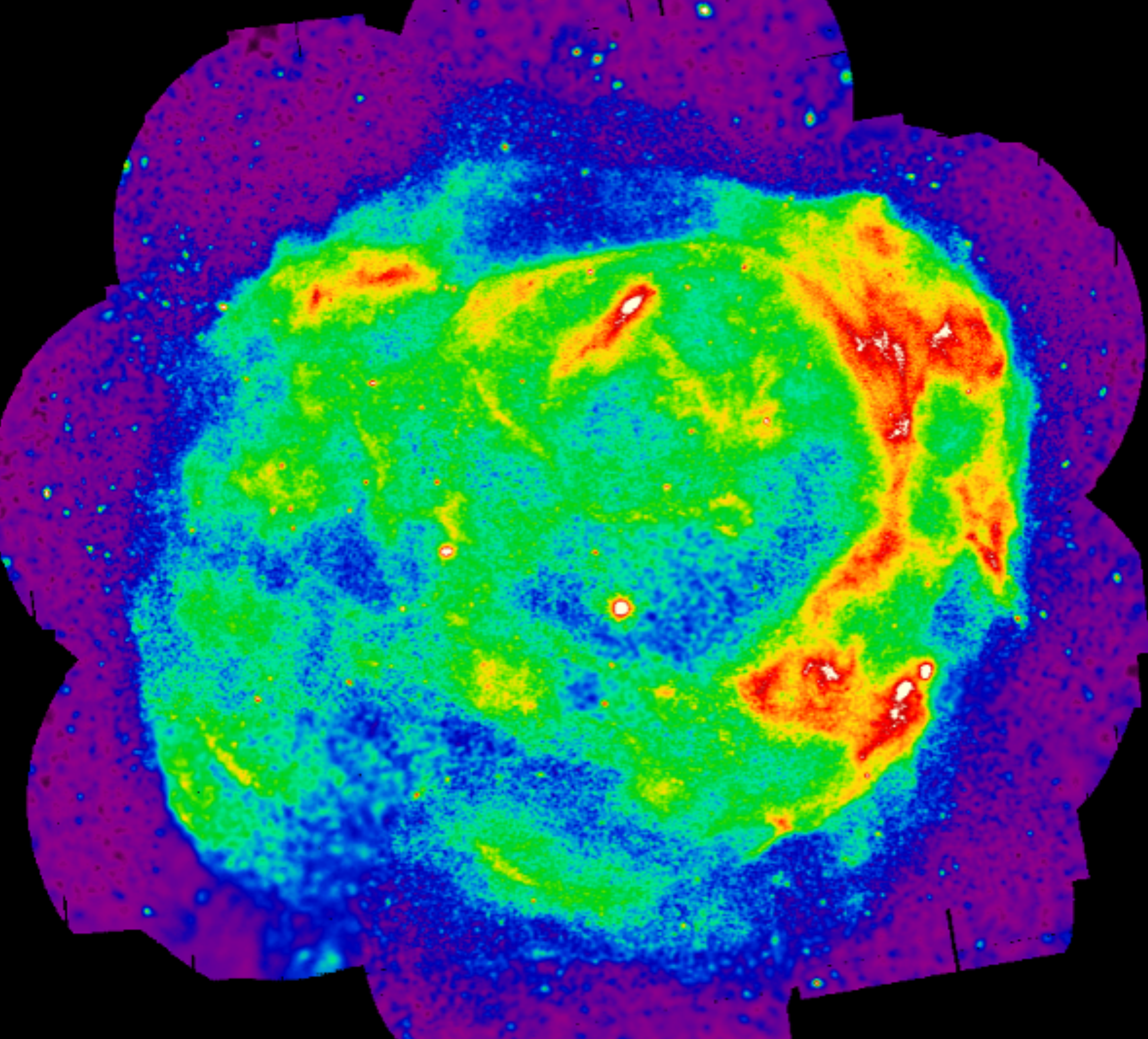


高エネルギー宇宙物理学研究会2020  
2020年12月14日(月) 9:45-9:55



ALMA 電波干渉計による  
ガンマ線超新星残骸  
RX J1713.7-3946 北西部の観測

佐野 栄俊 (国立天文台)

共同研究者: 井上剛志, 徳田一起, 田中孝明, 山崎了, 犬塚修一郎, F. Aharonian, G. Rowell, M. D. Filipovic, 山根悠望子, 吉池智史, N. Maxted, 内田裕之, 早川貴敬, 立原研悟, 内山泰伸, 福井康雄

web URL



**Sano, Inoue, Tokuda et al. 2020c, ApJ Letters, 904, 24**

*ALMA CO Observations of the Gamma-Ray Supernova Remnant RX J1713.7-3946:  
Discovery of Shocked Molecular Cloudlets and Filaments at 0.01 pc scales*

XMM-Newton 1-5 keV (Credit: H. Sano)





## ■ 超新星残骸衝撃波における粒子加速

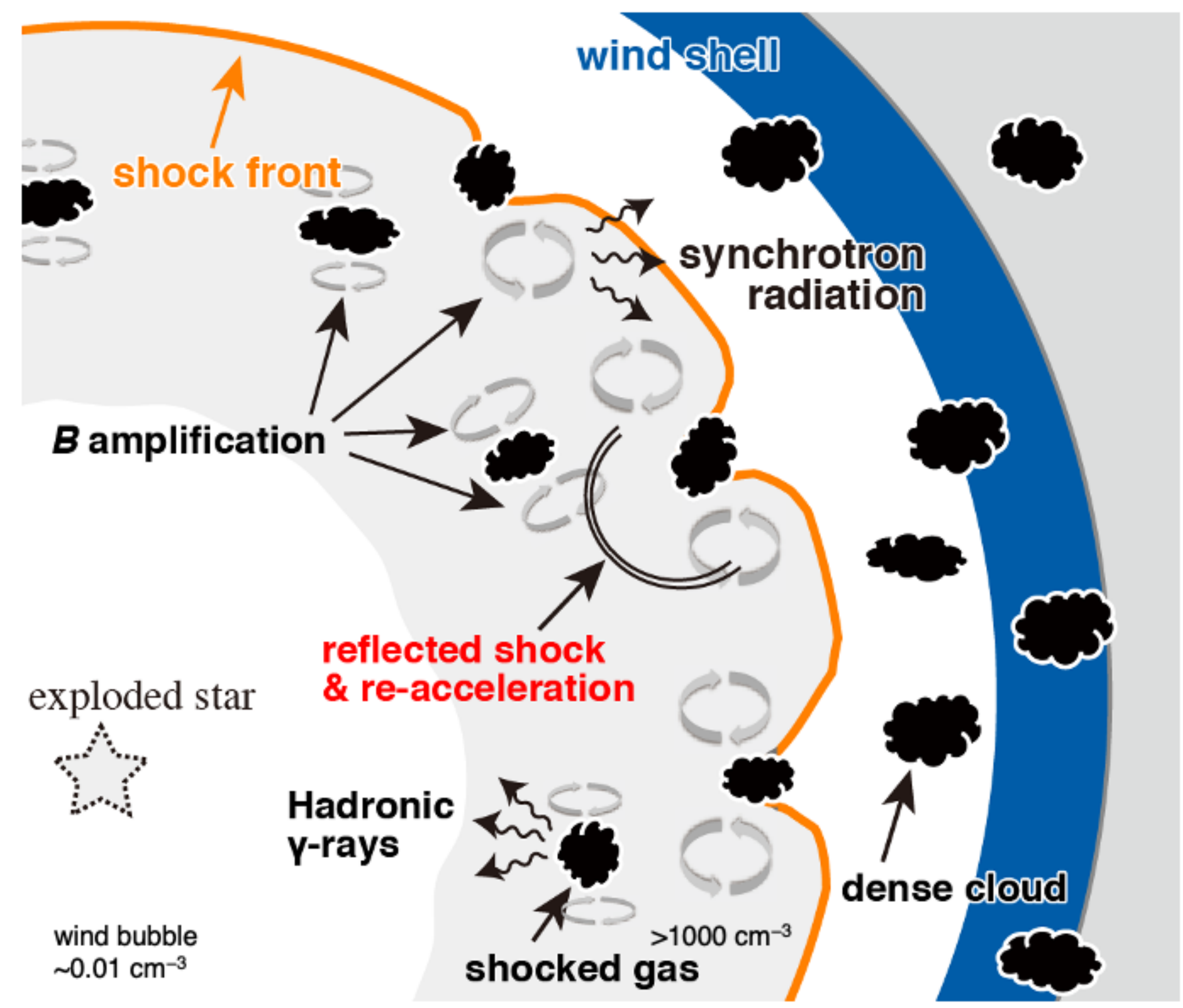
- 理想: 一様な媒質中の衝撃波伝搬+加速
- 現実: 星間媒質は高度に非一様 ( $\sim 10^5$ )  
→ 観測/定量して理論計算へフィードバック

## ■ ALMA電波干渉計によるCO輝線観測

- RX J1713 北西部 (分解能 $\sim 0.02$  pc)
- 希薄な星間空間中 ( $\sim 0.1 \text{ cm}^{-3}$ ) に、  
数十の粒状分子雲 ( $\sim 0.01$  pc,  $\sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$ )
- 分子雲周辺で非熱的X線増光+強度時間変動  
→ 衝撃波-星間雲相互作用による磁場増幅  
→ ガンマ線/X線のスペクトル変調

## ■ 今後の展望

- 電波干渉計を用いた超新星残骸研究の促進
- 陽子/電子起源ガンマ線分離の新しい試み  
(Fukui, Sano et al. in preparation)



衝撃波-星間雲相互作用モデル (Inoue et al. 2012, ApJ, 744, 71, 一部改訂)



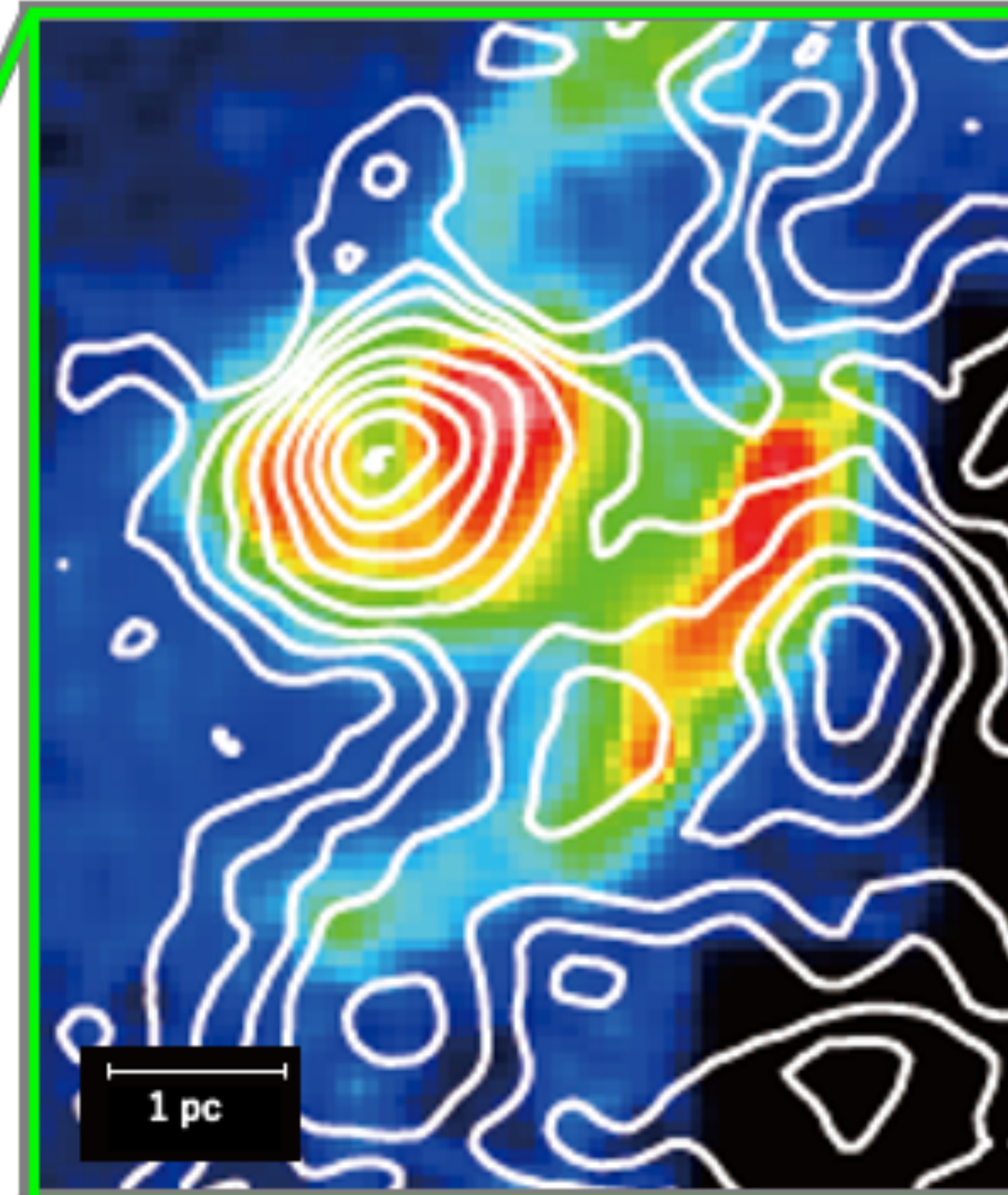
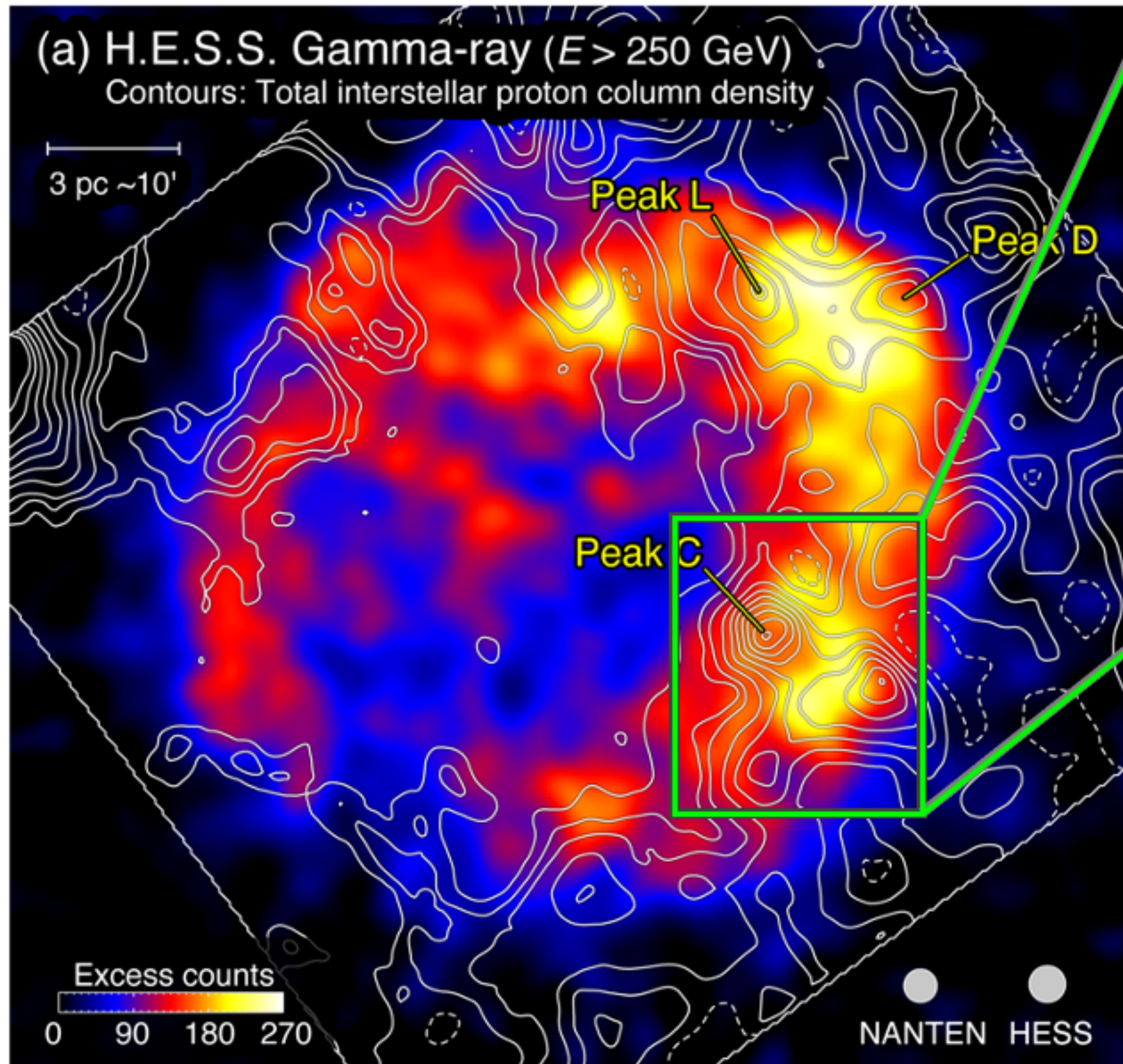


Image: Suzaku X-rays  
Contours: NANTEN2 CO

Sano et al. 2010, 2013

## RX J1713.7-3946

- Age:  $\sim 1,600$  yr
- Distance:  $\sim 1$  kpc
- Size:  $\sim 18$  pc
- Core-collapse SNR
- Associated with MCs  
(resolution up to  $\sim 0.3$  pc,  $\sim 90''$ )

### ガンマ線・X線放射の鍵を握る「粒状」の星間雲

陽子起源ガンマ線 (Fukui+03,12)

→ 星間雲とガンマ線の空間一致 (Fukui+03,12)

→ 宇宙線陽子の浸透長とガンマ線スペクトル変調 (e.g., Inoue+12,19)

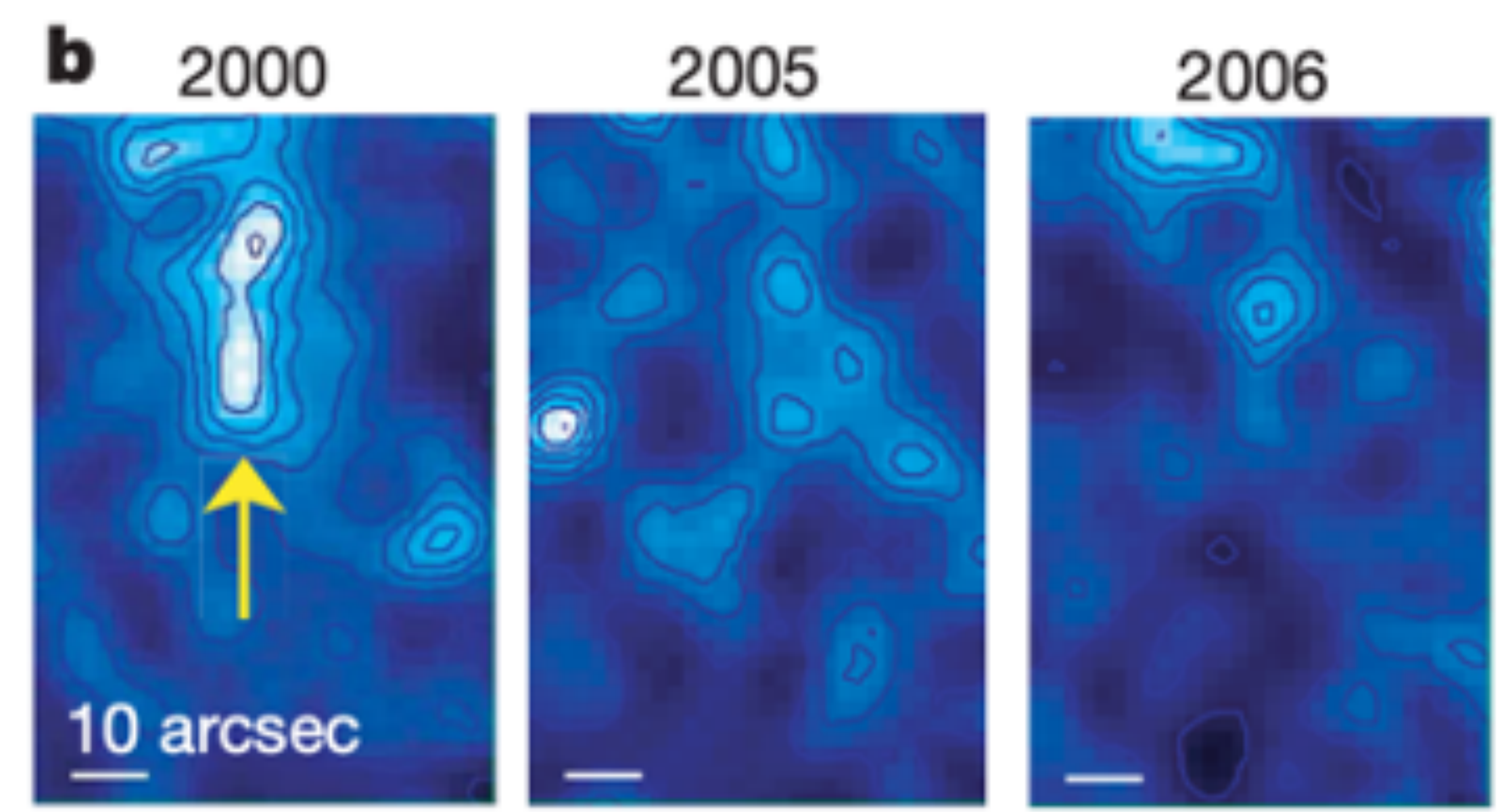
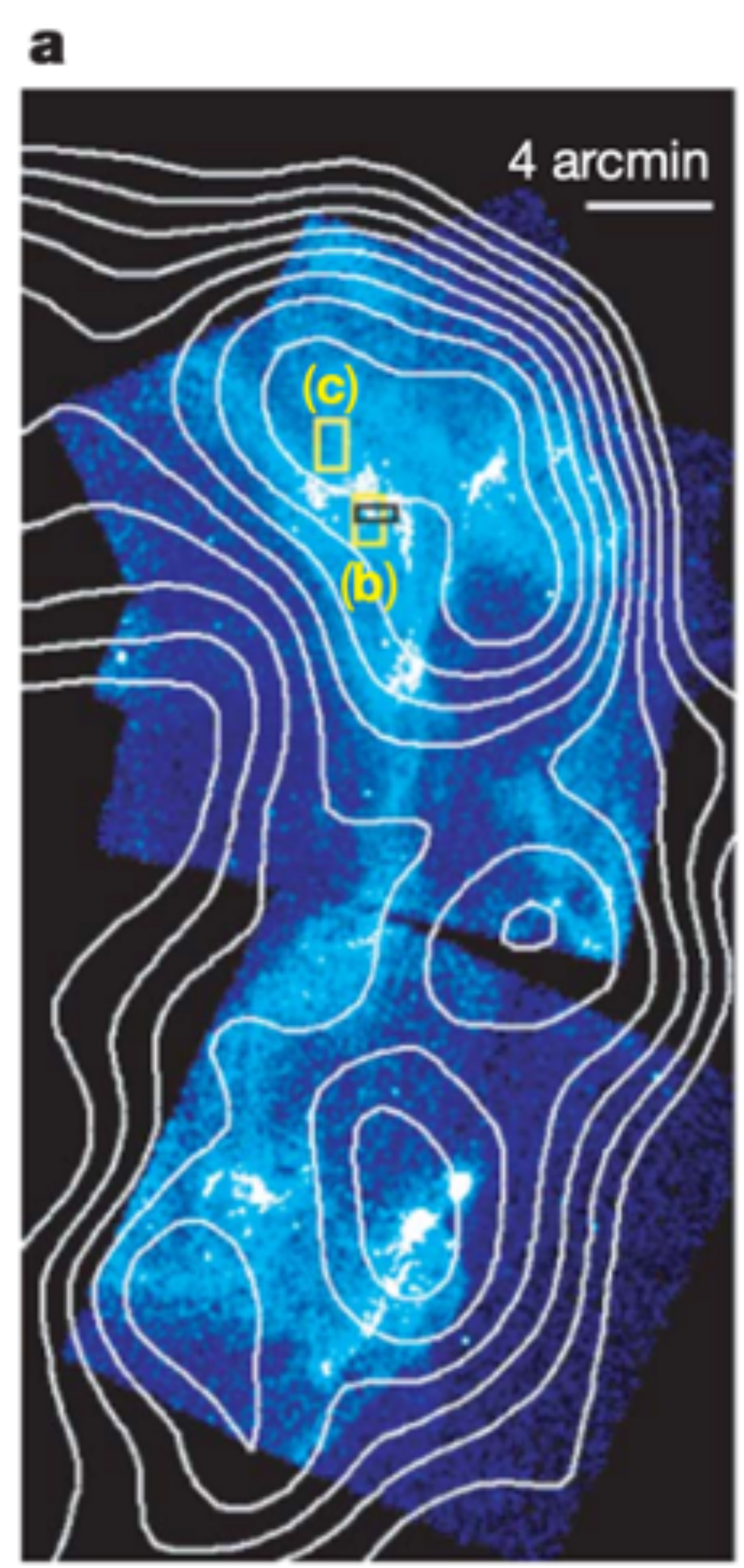
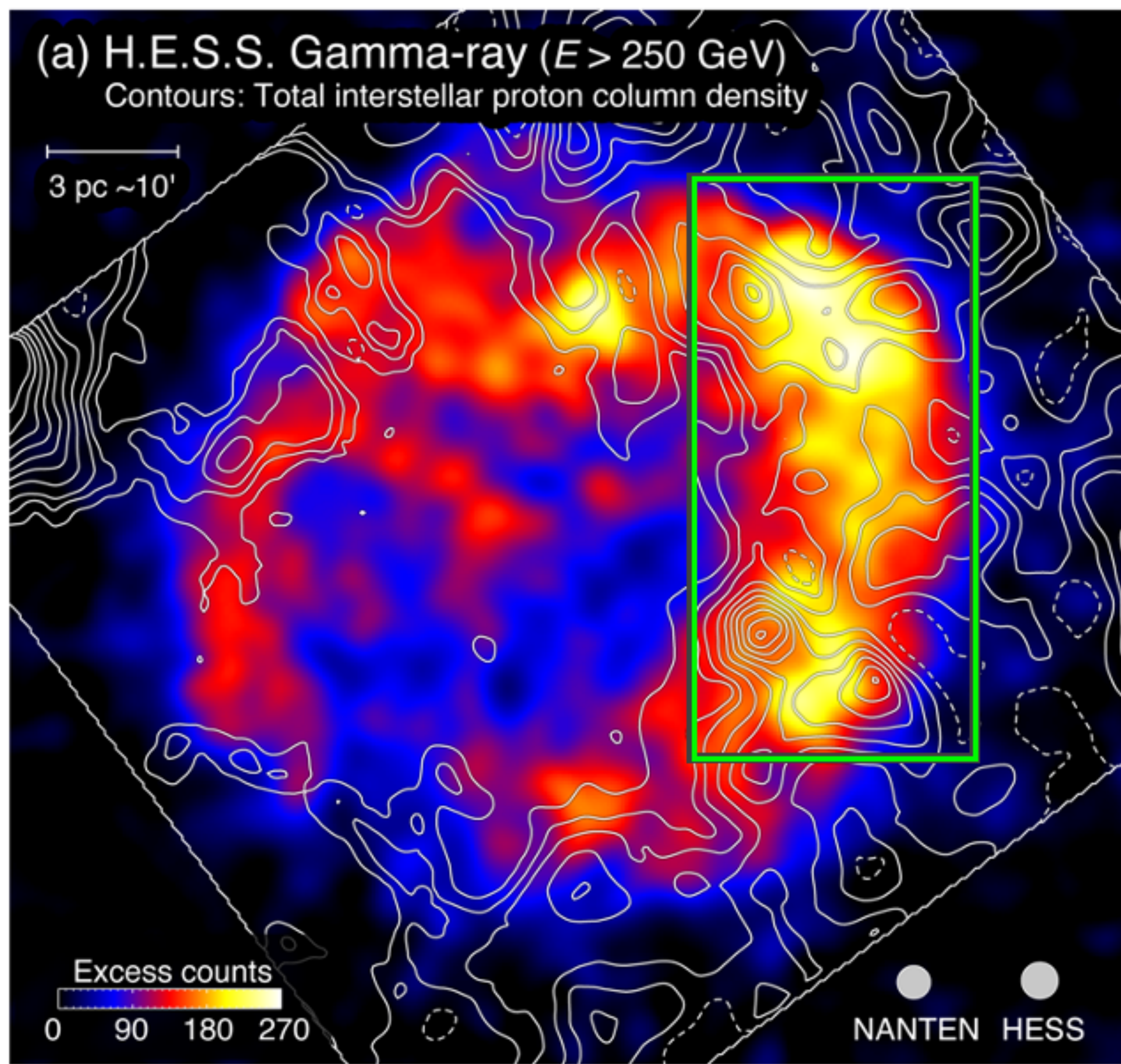
衝撃波-星間雲相互作用による乱流磁場の増幅 (e.g., Inoue+09,12,19)

→ 分子雲周辺での非熱的X線増光 (Sano+10,13; Okon+18; Tanaka+20)

→ X線スペクトル変調 (Sano+15; Tanaka+20) + 熱的X線抑制 (Inoue+12)

→ 月/年単位で強度変動するX線hot spot (Uchiyama+07; Higurashi+20)





□ Cooling time scale  
 $t_{\text{synch}} \sim 1.5 (B/1\text{mG})^{-1.5} (\epsilon/1\text{keV})^{-0.5}$  yr

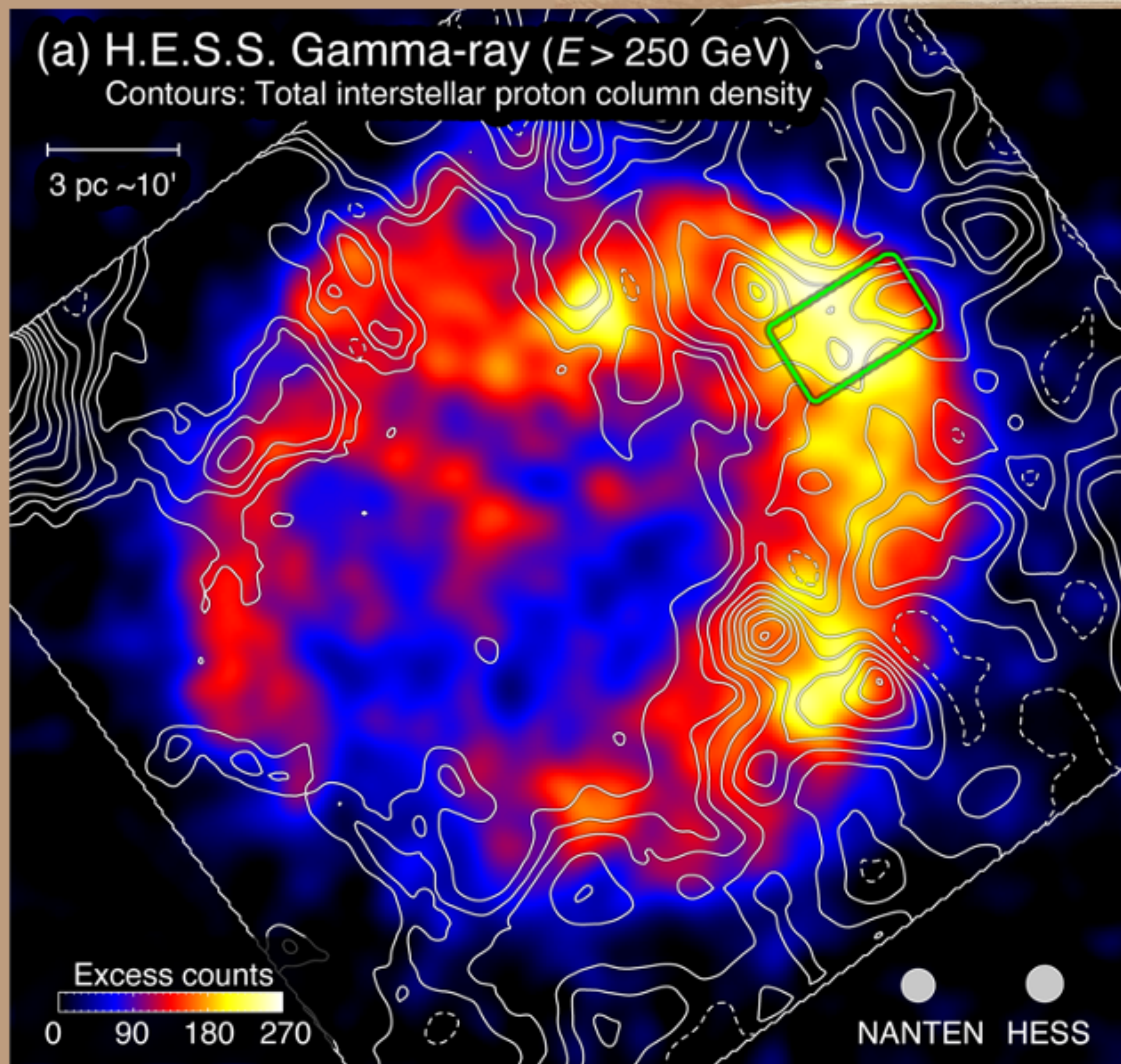
□ Acceleration time scale  
 $t_{\text{acc}} \sim \ln(\epsilon/1\text{keV})^{-0.5} (B/1\text{mG})^{-1.5} (V_{\text{sh}}/3000\text{kms}^{-1})^{-2}$  yr

Uchiyama+07

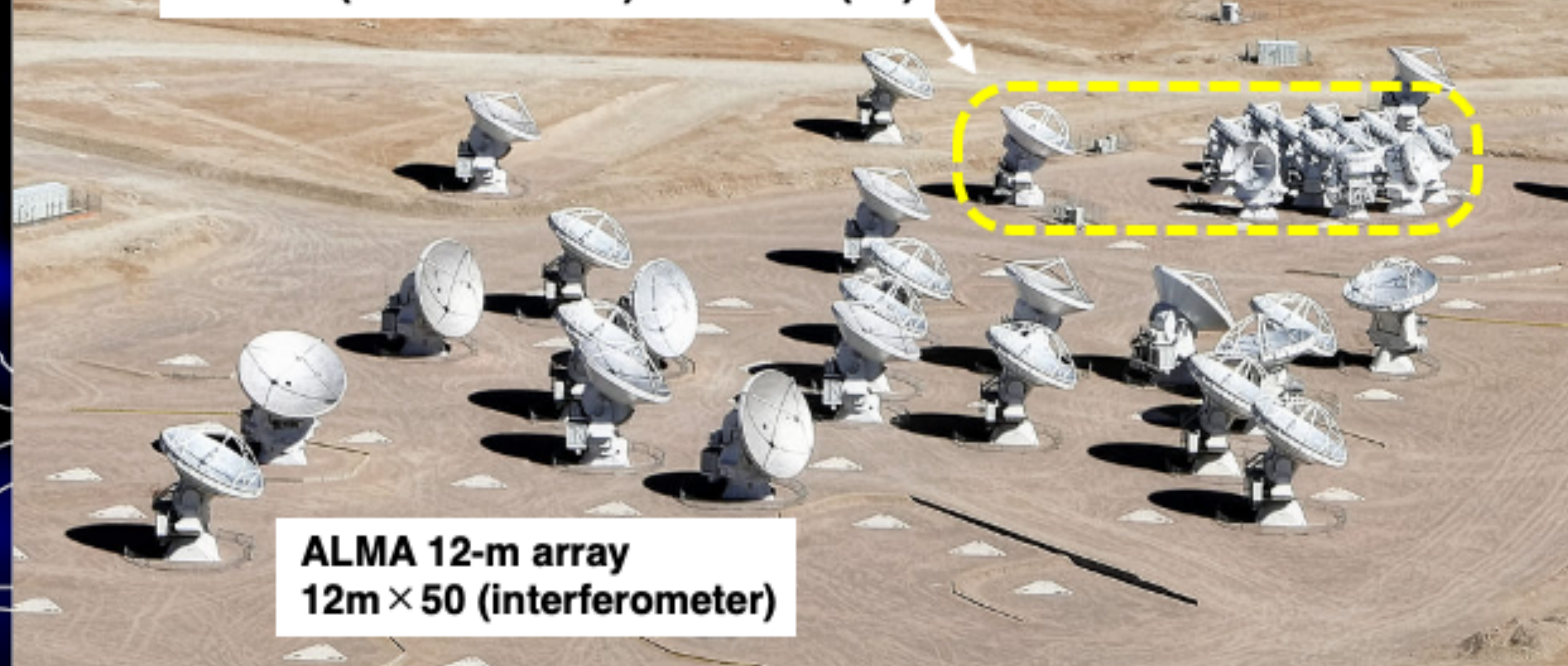
0.05 pc (10秒角) スケールで  $B \sim 1$  mG  
 → 衝撃波-星間雲相互作用が正しければ  
 対応する 小さな分子雲 が存在する?

衝撃波-星間雲相互作用による乱流磁場の増幅 (e.g., Inoue+09,12,19)  
 → 分子雲周辺での非熱的X線増光 (Sano+10,13; Okon+18; Tanaka+20)  
 → X線スペクトル変調 (Sano+15; Tanaka+20) + 熱的X線抑制 (Inoue+12)  
 → 月/年単位で強度変動するX線hot spot (Uchiyama+07; Higurashi+20)



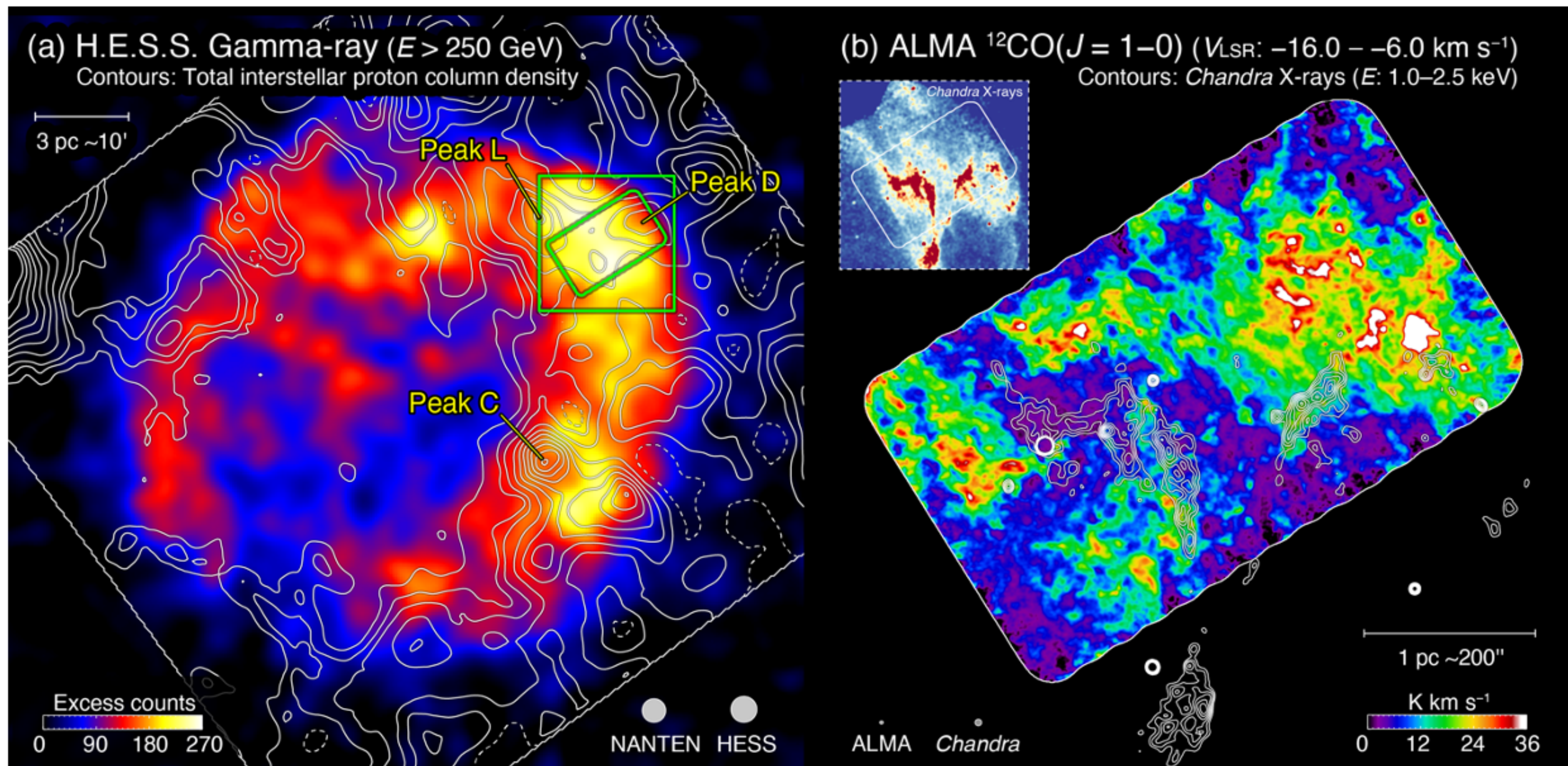


Atacama Compact Array (ACA)  
7m  $\times$  12 (interferometer) + 12m  $\times$  4 (TP)

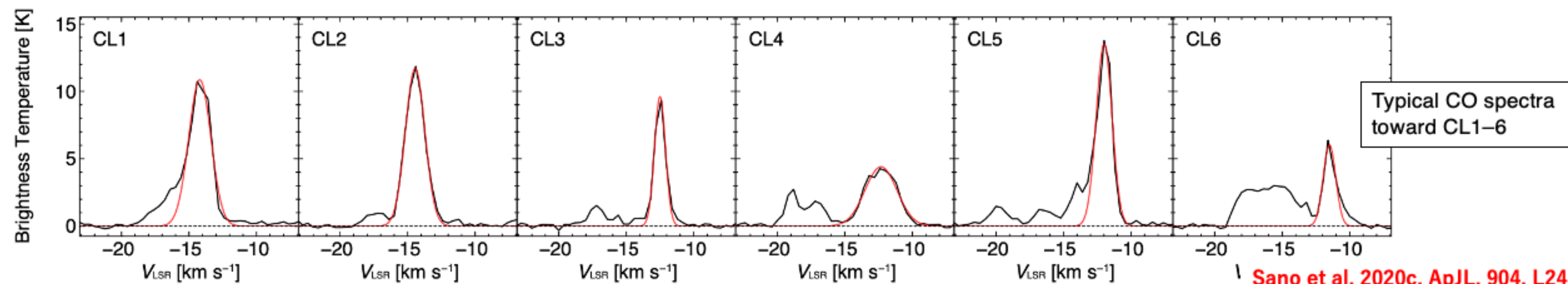
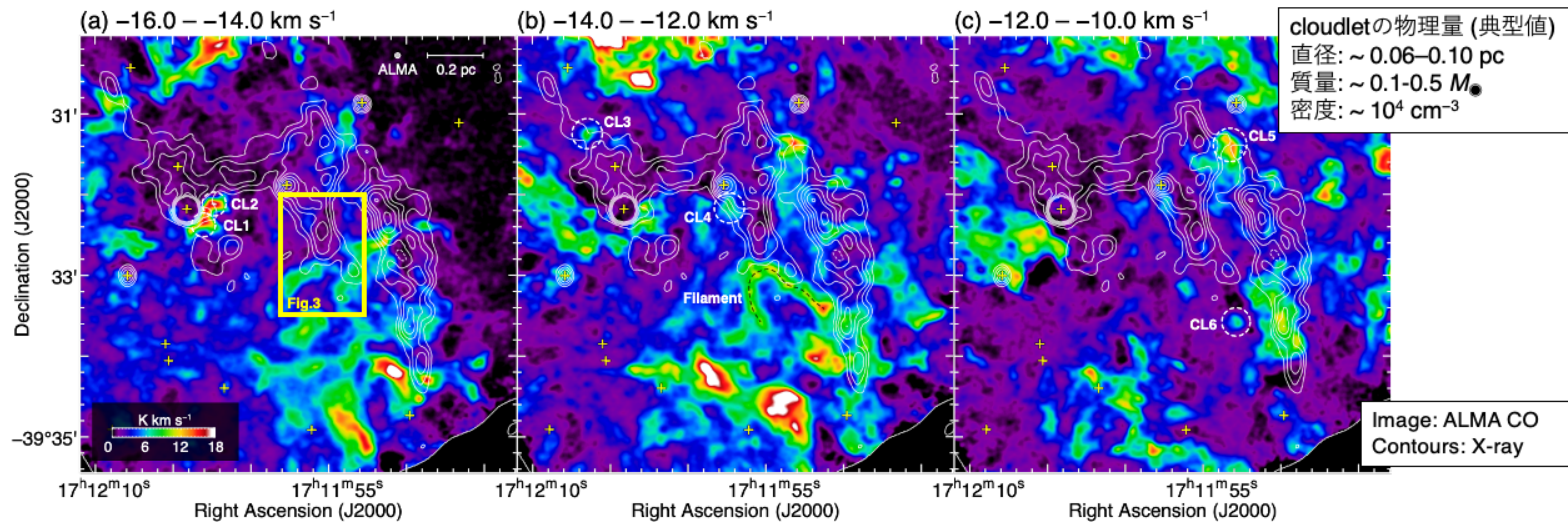


Project# (Cycle / PI)	2017.1.01406.S (Cycle 5 / H.Sano)
Target line	$^{12}\text{CO}$ ( $J = 1-0$ )
Observed area	11.1' $\times$ 6.4' (mosaic mode)
Antennas	12-m array + ACA (7-m array + TP)
<b>Observing time</b>	<b>5.3 hrs (12-m) + 45.3 hrs (ACA)</b>
Baseline ( $u-v$ dist.)	8.9–313.7 m (3.4–120.6 $k\lambda$ )
<b>Beam size</b>	<b>4.37" <math>\times</math> 3.89" (<math>\sim</math> 0.02 pc)</b>
RMS noise level	$\sim$ 0.13 K @ 0.4 km s $^{-1}$

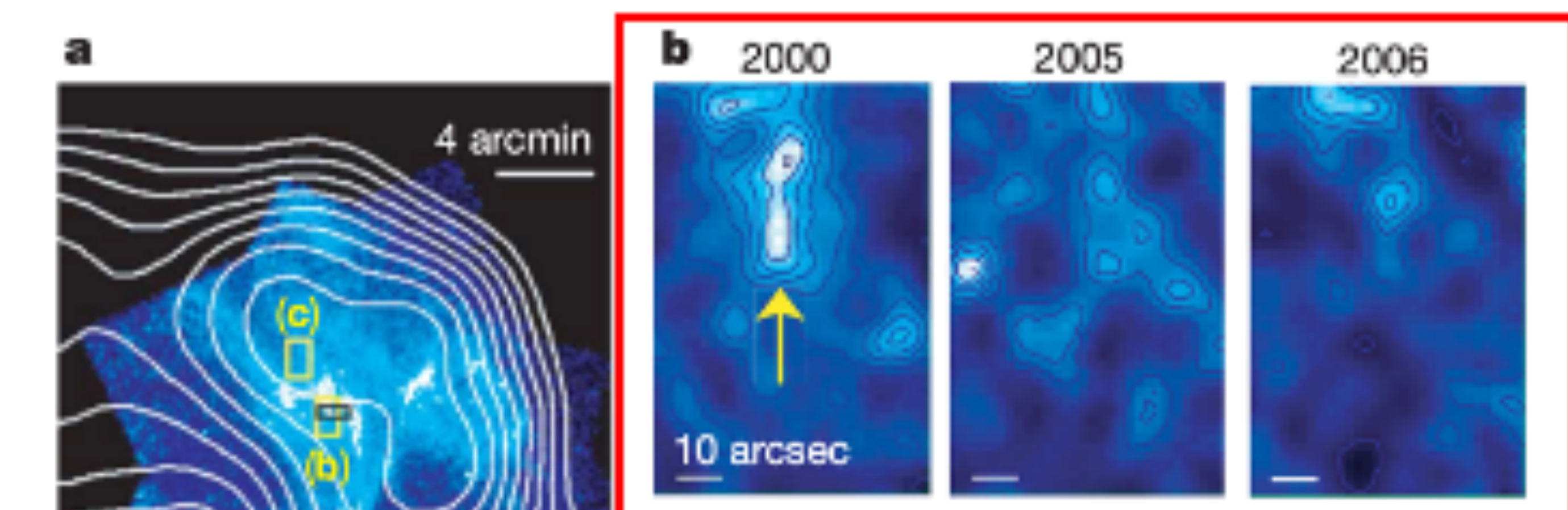
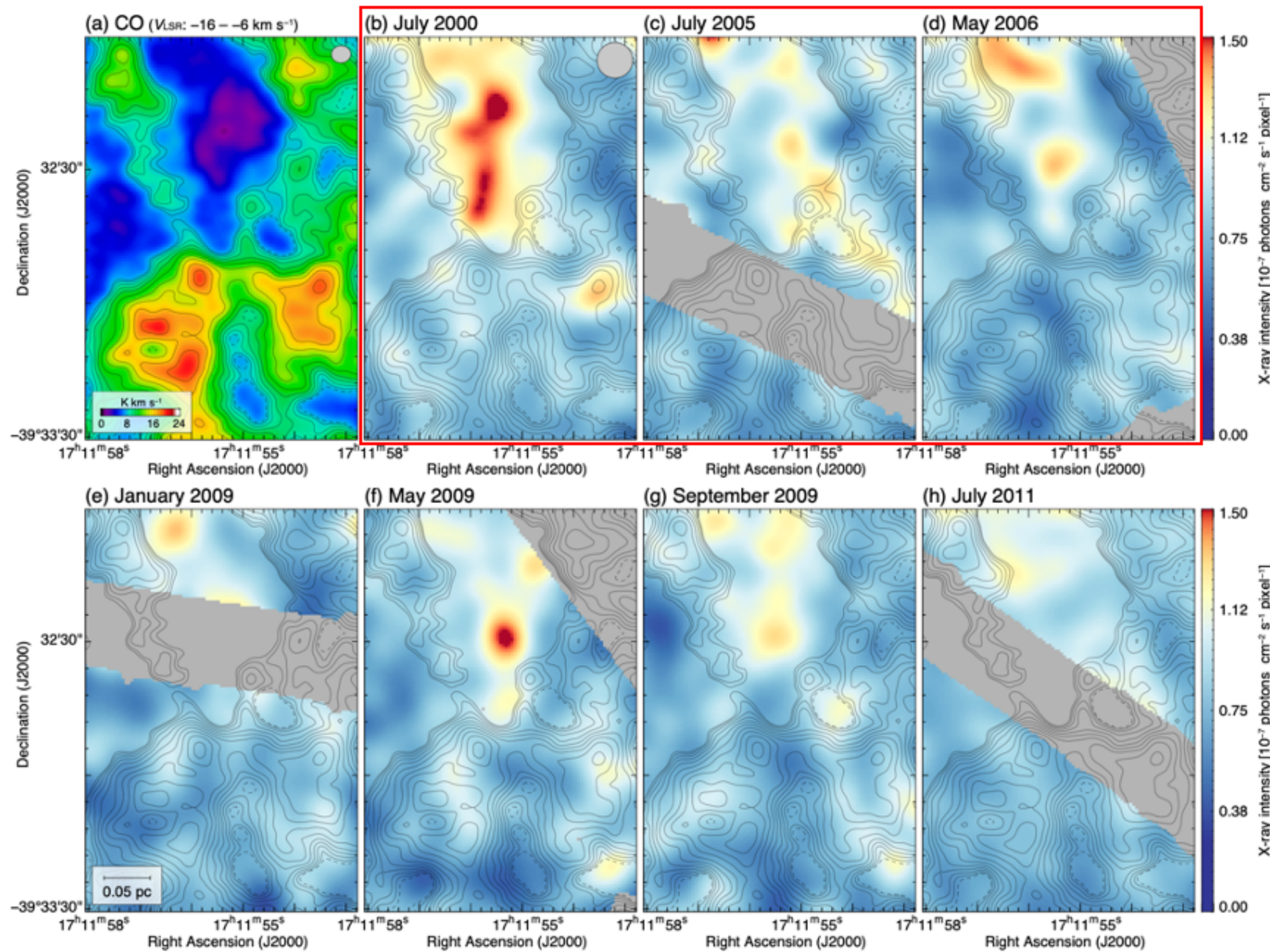












Uchiyama et al. (2007)の領域とほぼ同じ表示範囲

- May09 に新たなhotspot ( $\sim 4\sigma$ )
- 磁場強度は  $\sim 0.3\text{--}3$  mG  
(加速時間  $< 3$ 年, 冷却時間  $< 4$ ヶ月)
- Cloudlet とX線 hotspot の距離:  
 $\sim 0.05\text{--}0.15$  pc

Image: (a) ALMA CO ( $V_{\text{LSR}}: -16\text{--}6$  km s $^{-1}$ )  
(b-h) Chandra X-rays (2-7 keV)  
Contours: ALMA CO ( $V_{\text{LSR}}: -16\text{--}6$  km s $^{-1}$ )



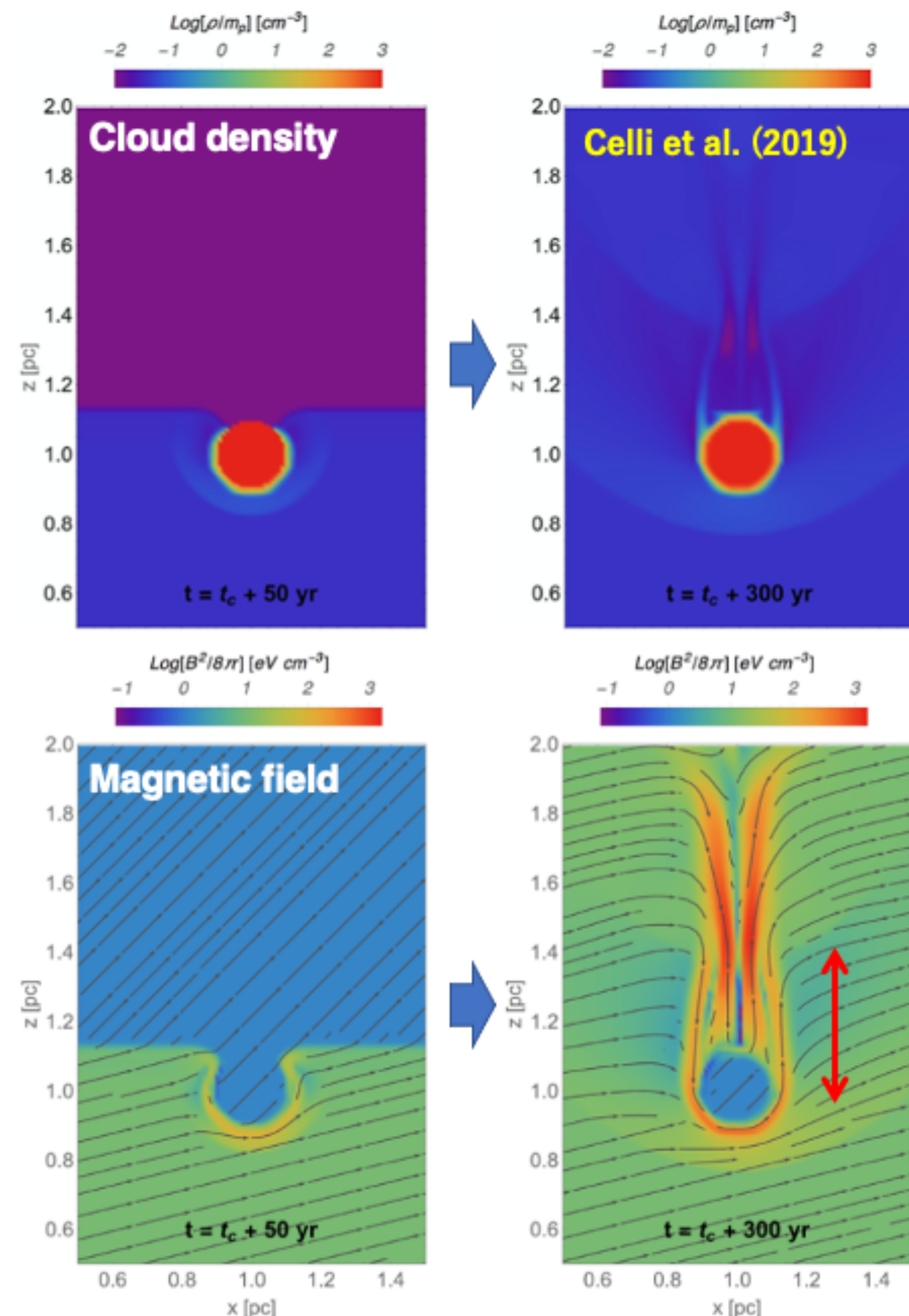
- Cloudlets 周辺でのX線増光および X線 hotspot の存在は、衝撃波相互作用による磁場増幅で理解できる  
 → Celli et al. (2019) による数値計算との比較が有効

	Celli+2019	This study
分子雲の直径 [pc]	0.2	~0.06-0.10
分子雲の密度 [ $\text{cm}^{-3}$ ]	$10^3$	$\sim 10^4$
分子雲間領域の密度 [ $\text{cm}^{-3}$ ]	0.01	$\sim 0.1_{\times 1}$
ISM 密度コントラスト	$10^5$	$\sim 10^5$
磁場 / X線の増光	主に分子雲周辺	分子雲周辺
分子雲-最大磁場間の距離 [pc]	~0.4	-----
分子雲-X線hotspotの距離 [pc]	-----	~0.05-0.15

Celli+2019 の分子雲直径を 0.06-0.10 pc に焼きなおすと、分子雲-最大磁場間の距離 0.12-0.20 pc となり観測結果と良く一致

## Future prospects

cloudlets 空間分布に沿ってX線スペクトル解析を行うことで spectral modulation がより顕著に見えるはずでは?

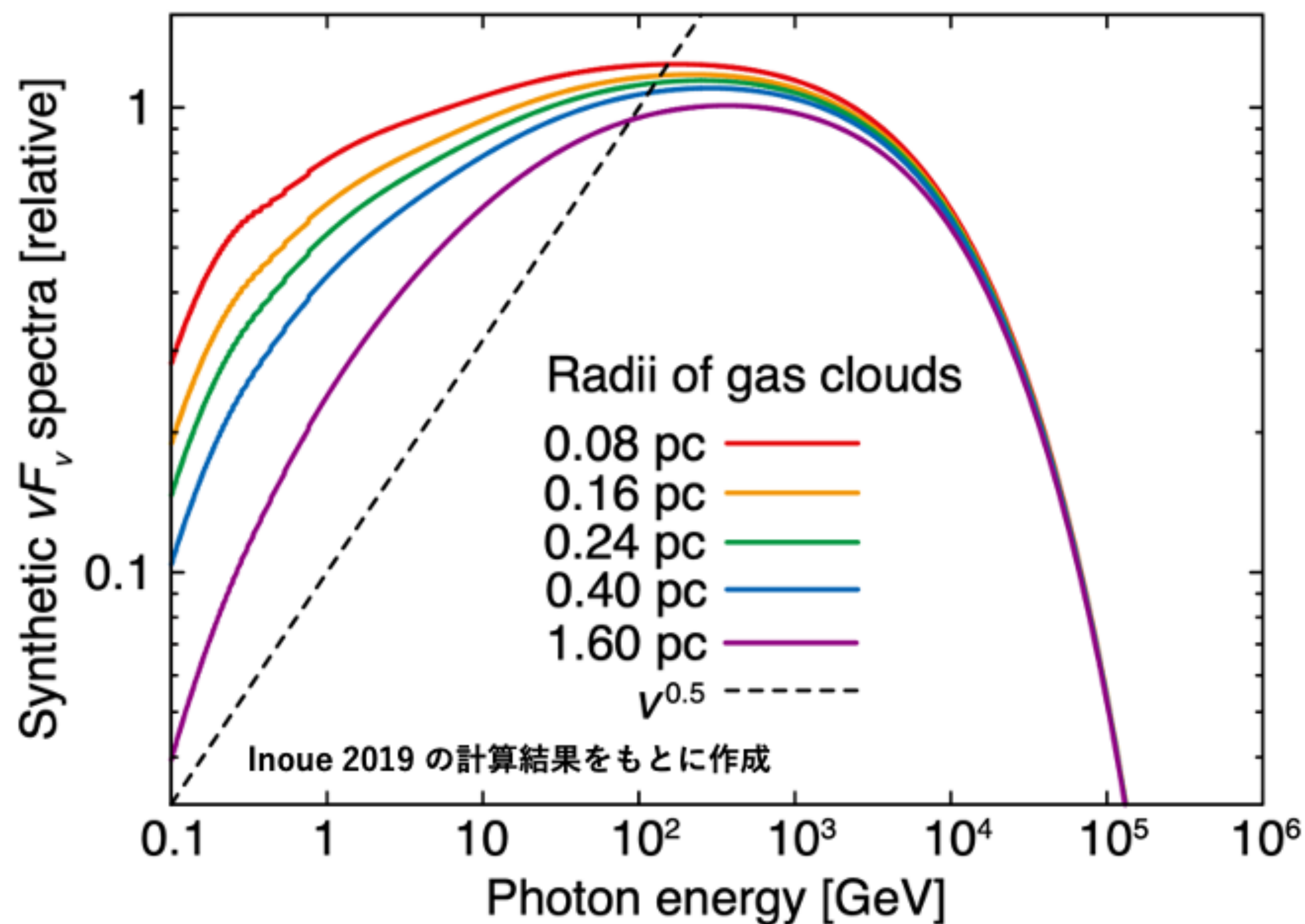




$$l_{\text{pd}} \simeq (\kappa_d t)^{1/2} = 0.1 \eta^{1/2} \left( \frac{E}{10 \text{ TeV}} \right)^{1/2} \left( \frac{B}{100 \mu\text{G}} \right)^{-1/2} \left( \frac{t_{\text{age}}}{10^3 \text{ yr}} \right)^{1/2} \text{ pc},$$

Inoue et al. (2012)

$l_{\text{pd}}$ : penetration depth,  
 $\eta$ : gyro factor,  
 $E$ : CR proton energy,  
 $B$ : magnetic field,  
 $t_{\text{age}}$ : SNR age



RXJ1713 北西領域では、他の領域 (例えば peak C) よりもフラットな  $\nu F_\nu$  スペクトルが期待できる

\* RXJ1713に付随する分子雲の典型的な半径  
 ~1-2 pc (Moriguchi et al. 2005)

特に peak C は高度に中心集中 & 内部構造無し

\* RXJ1713 NW の cloudlets の半径  
 ~0.03-0.05 pc (this study)

今後のCTAによる高空間分解能/高感度観測に期待

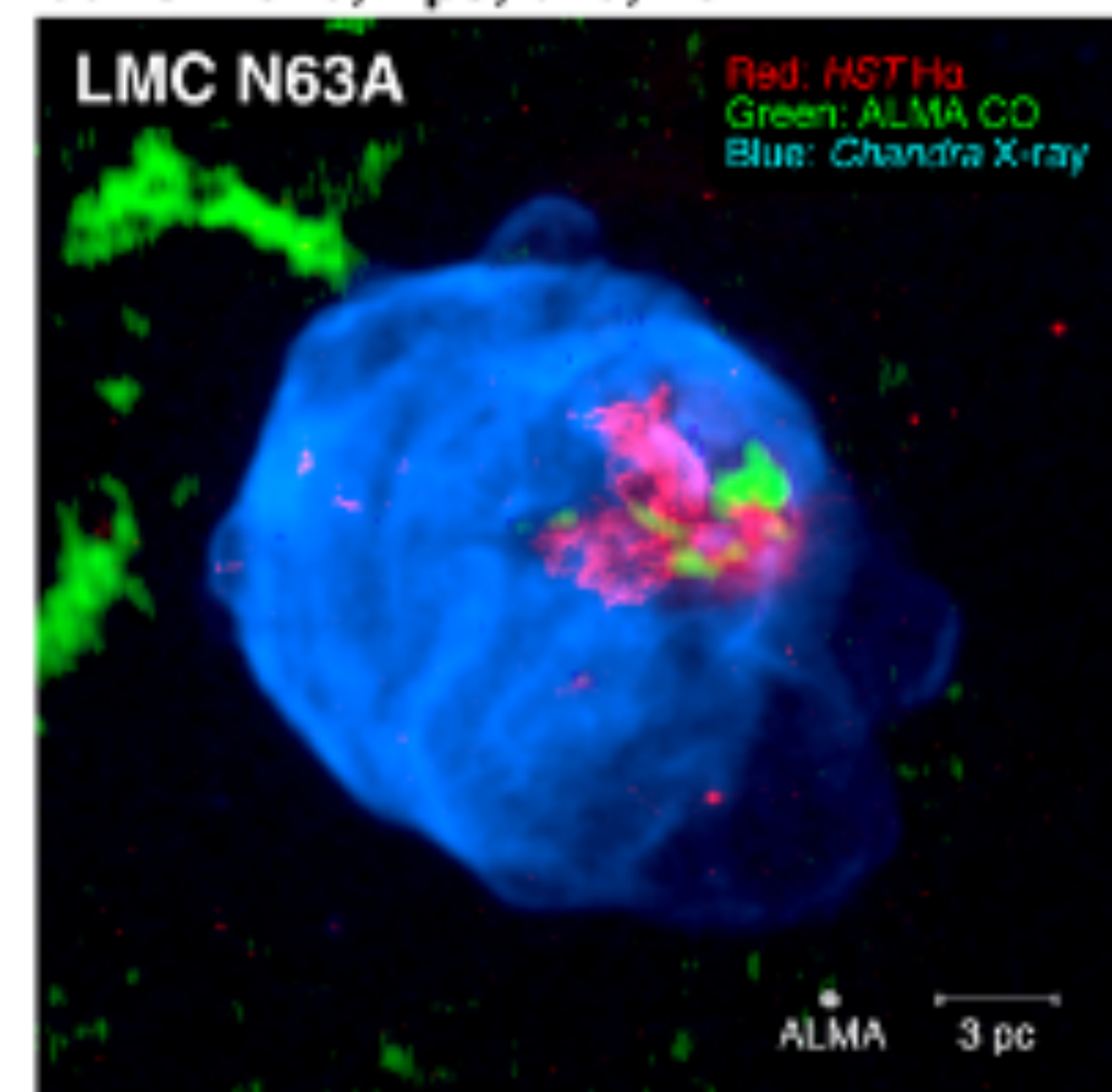


超新星残骸に付随する淡く広がった and/or 小さな粒状分子雲を電波干渉計で捉える  
ALMA 電波干渉計による銀河系内/近傍銀河の超新星残骸観測を推進中

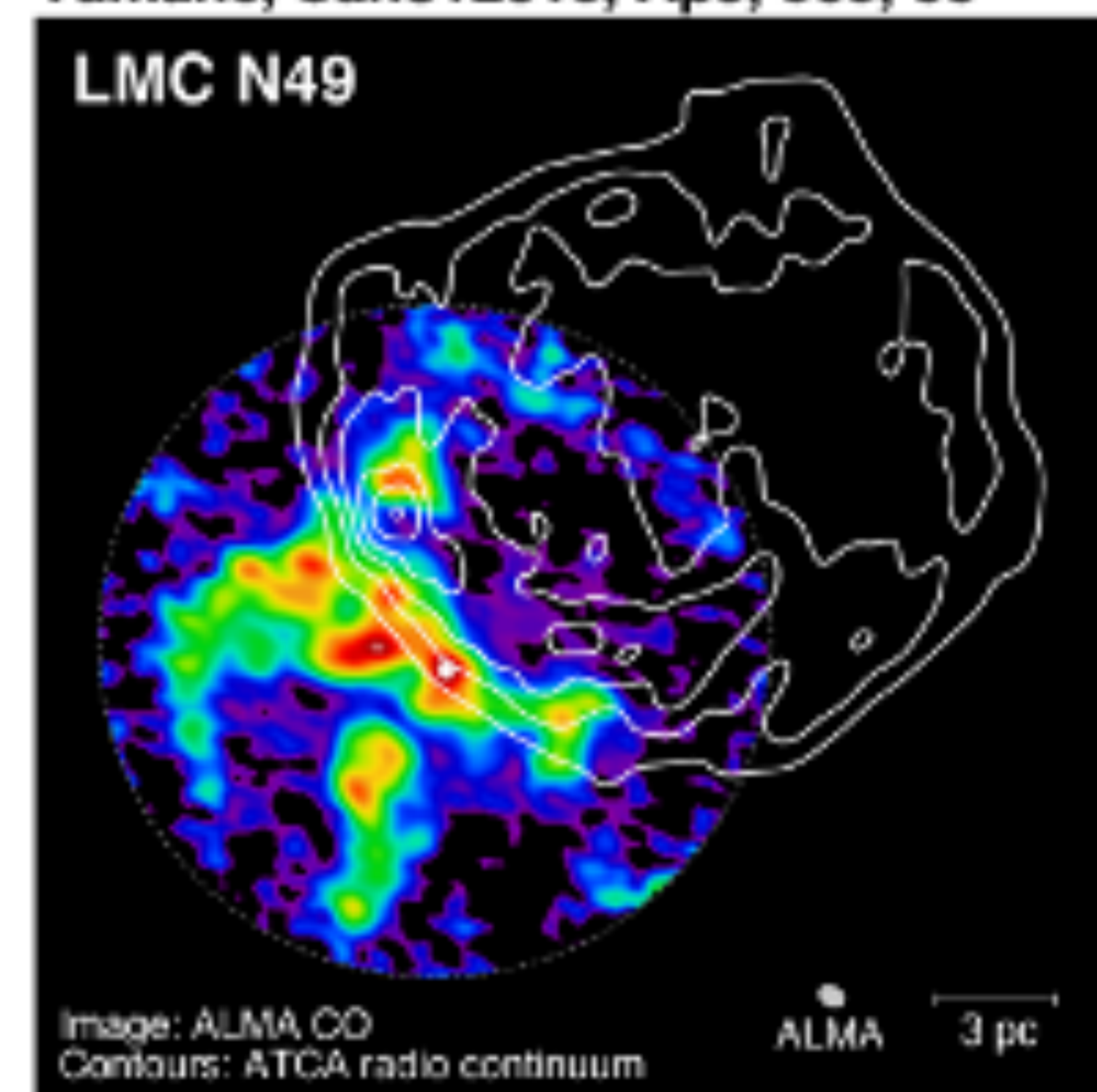
## LMC/SMC/M33の超新星残骸

## 銀河系内の超新星残骸

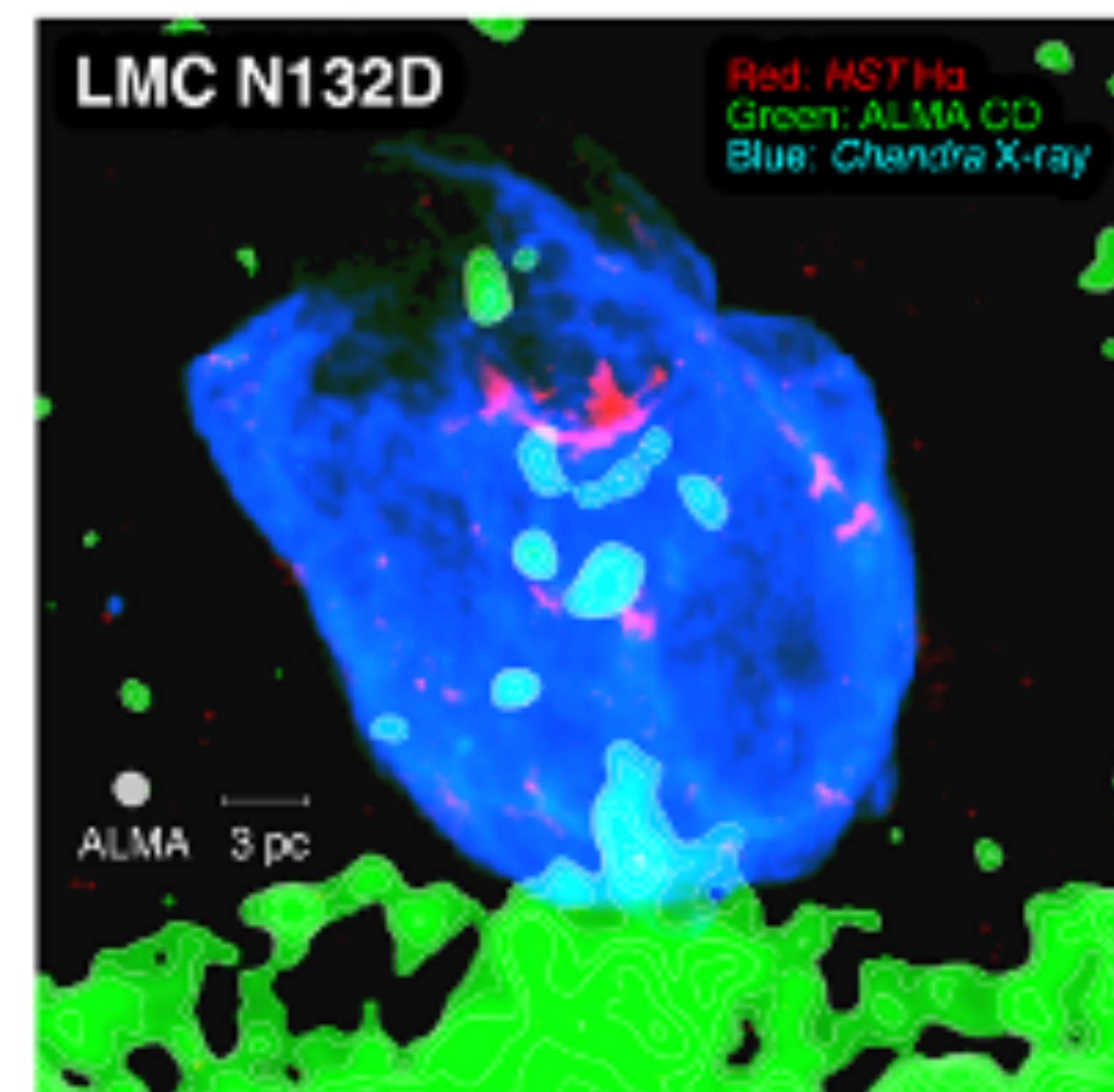
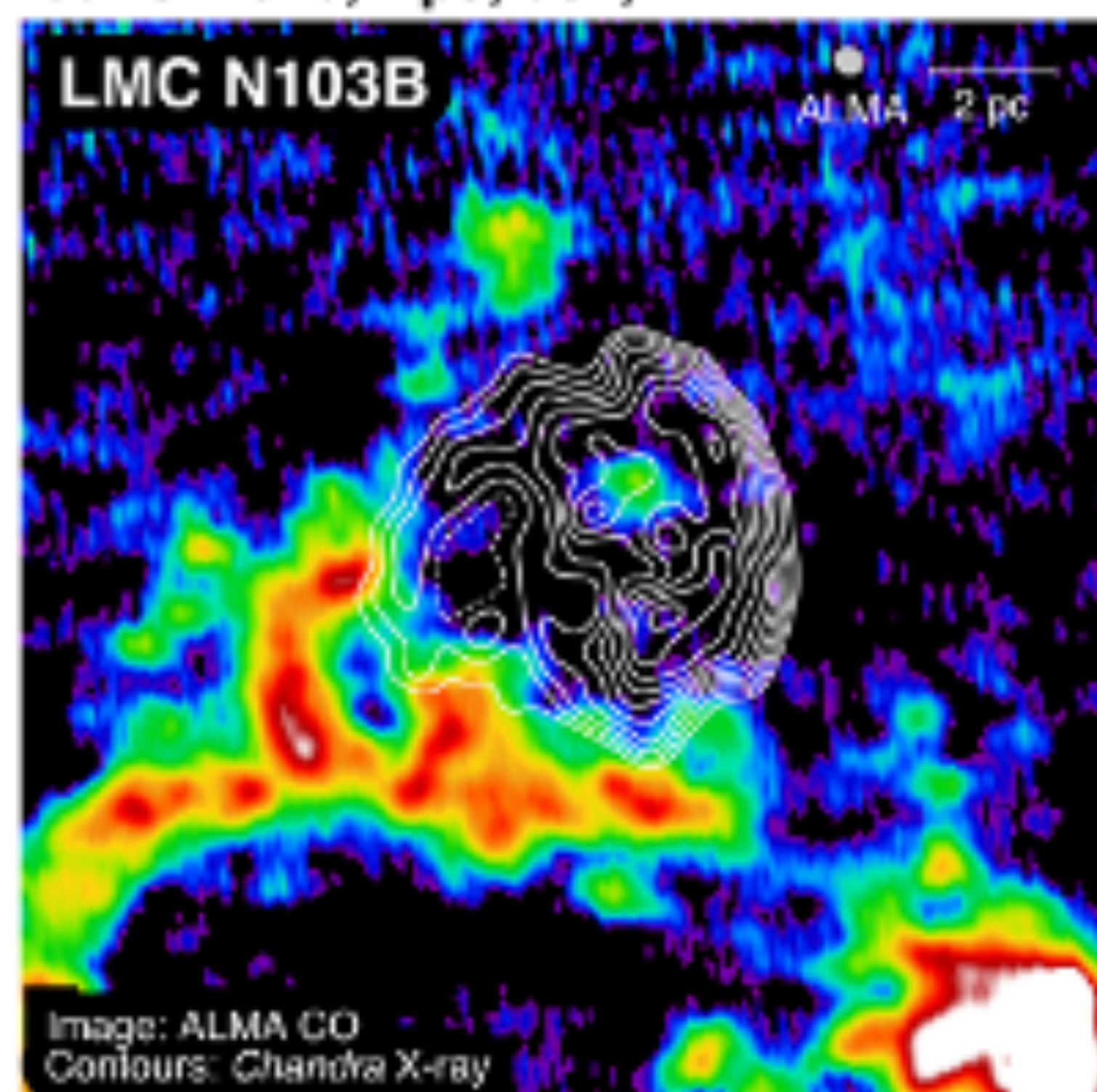
Sano+2019, ApJ, 873, 40



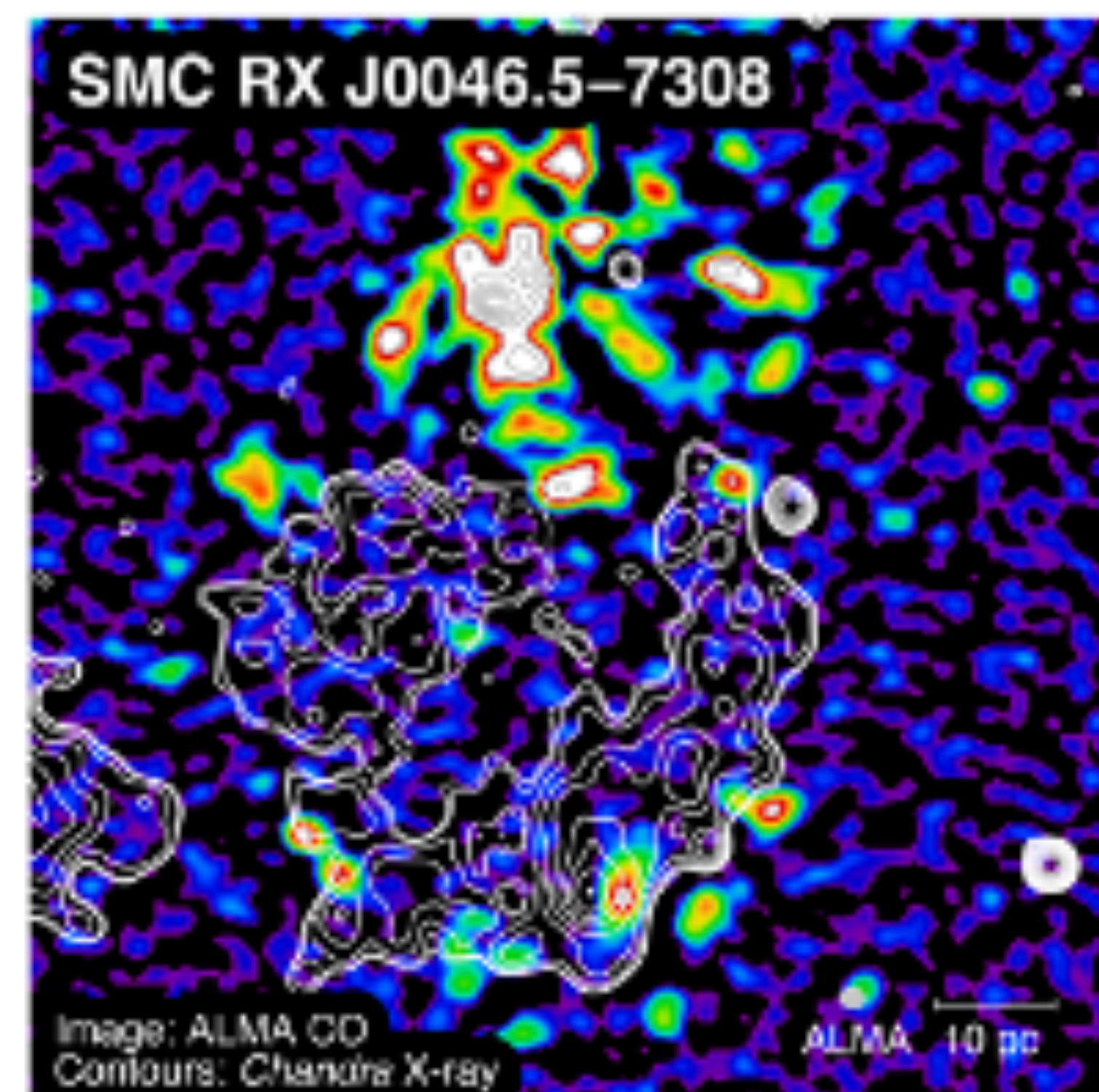
Yamane, Sano+2018, ApJ, 863, 55



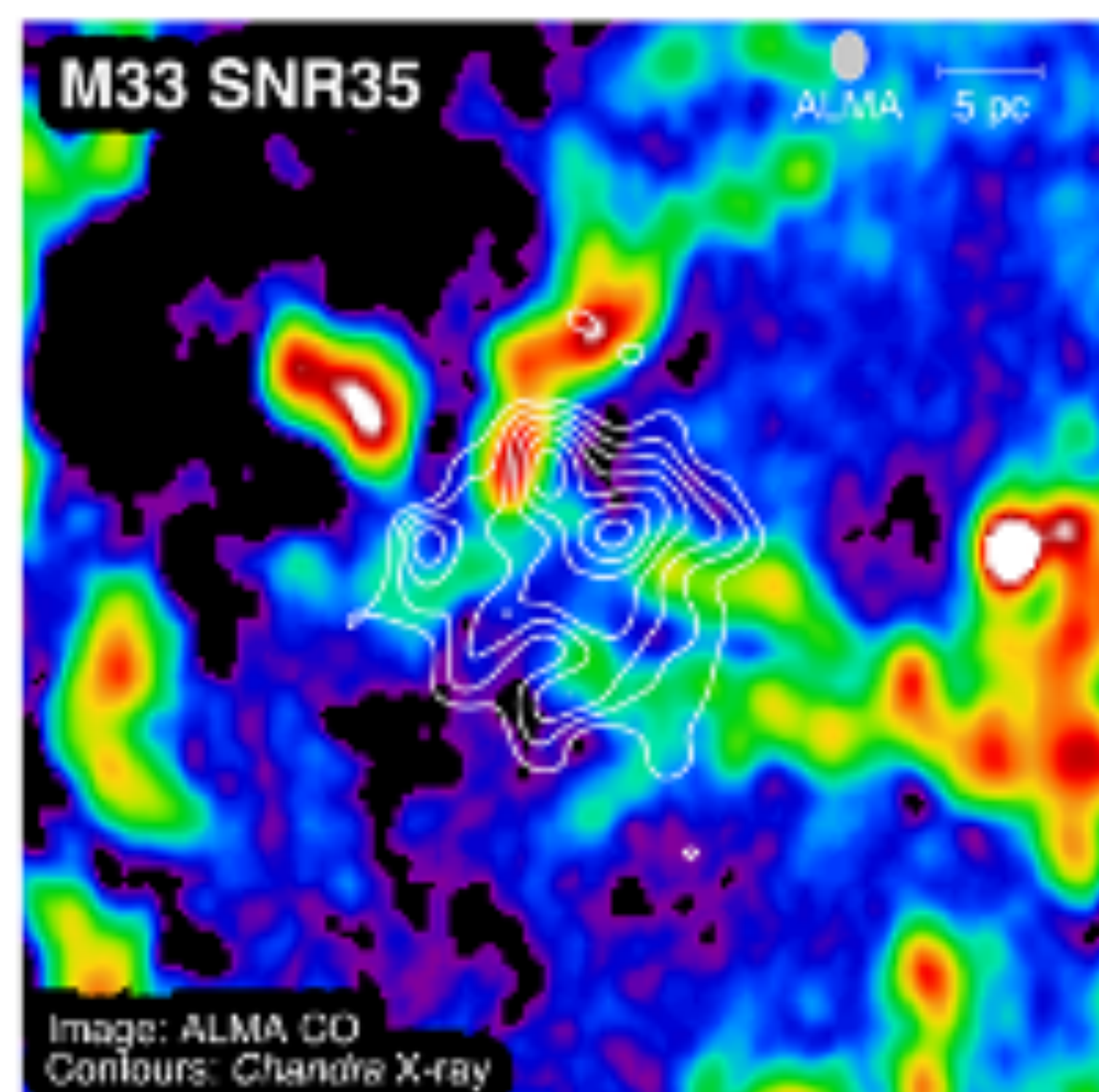
Sano+2018, ApJ, 867, 7



Sano+2020b ApJ 902, 53

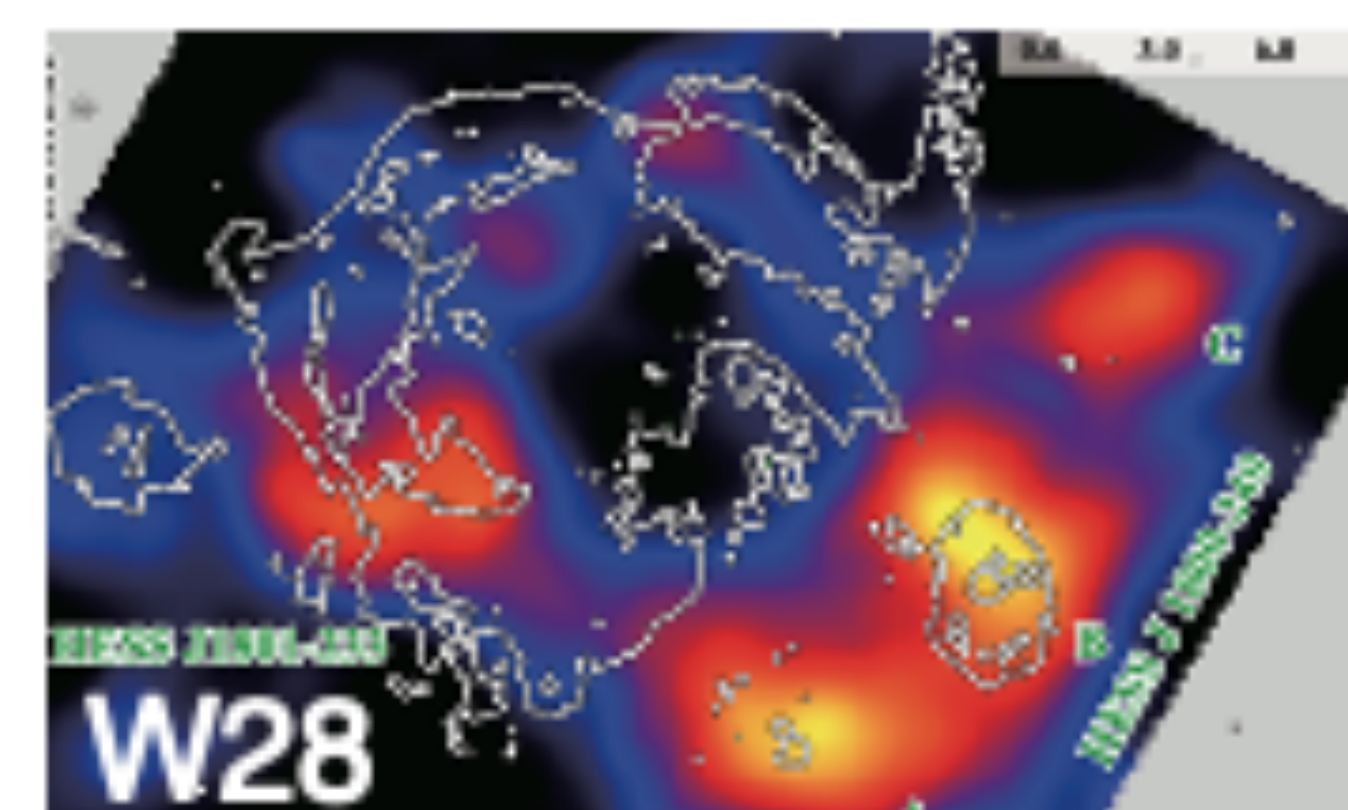
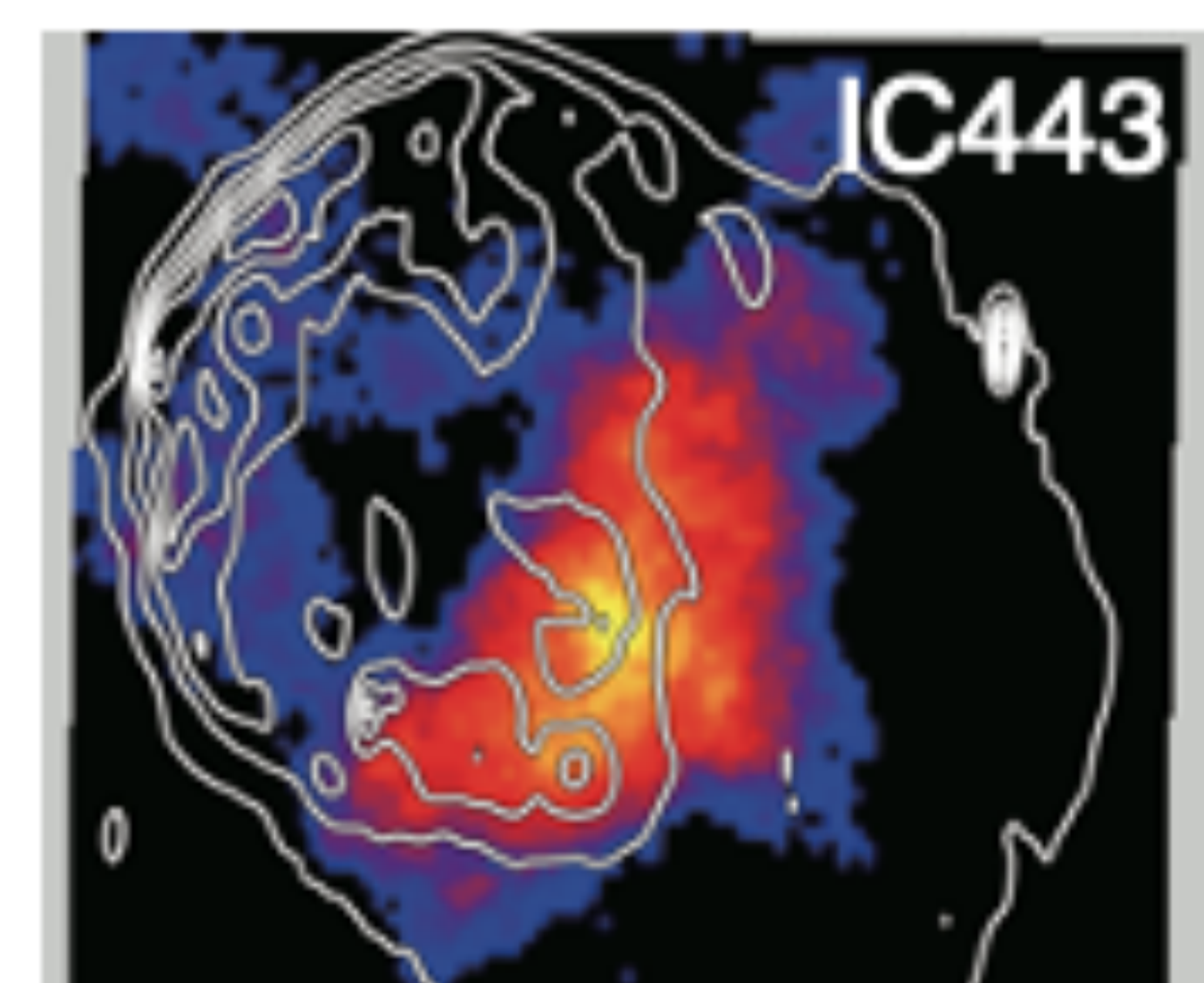
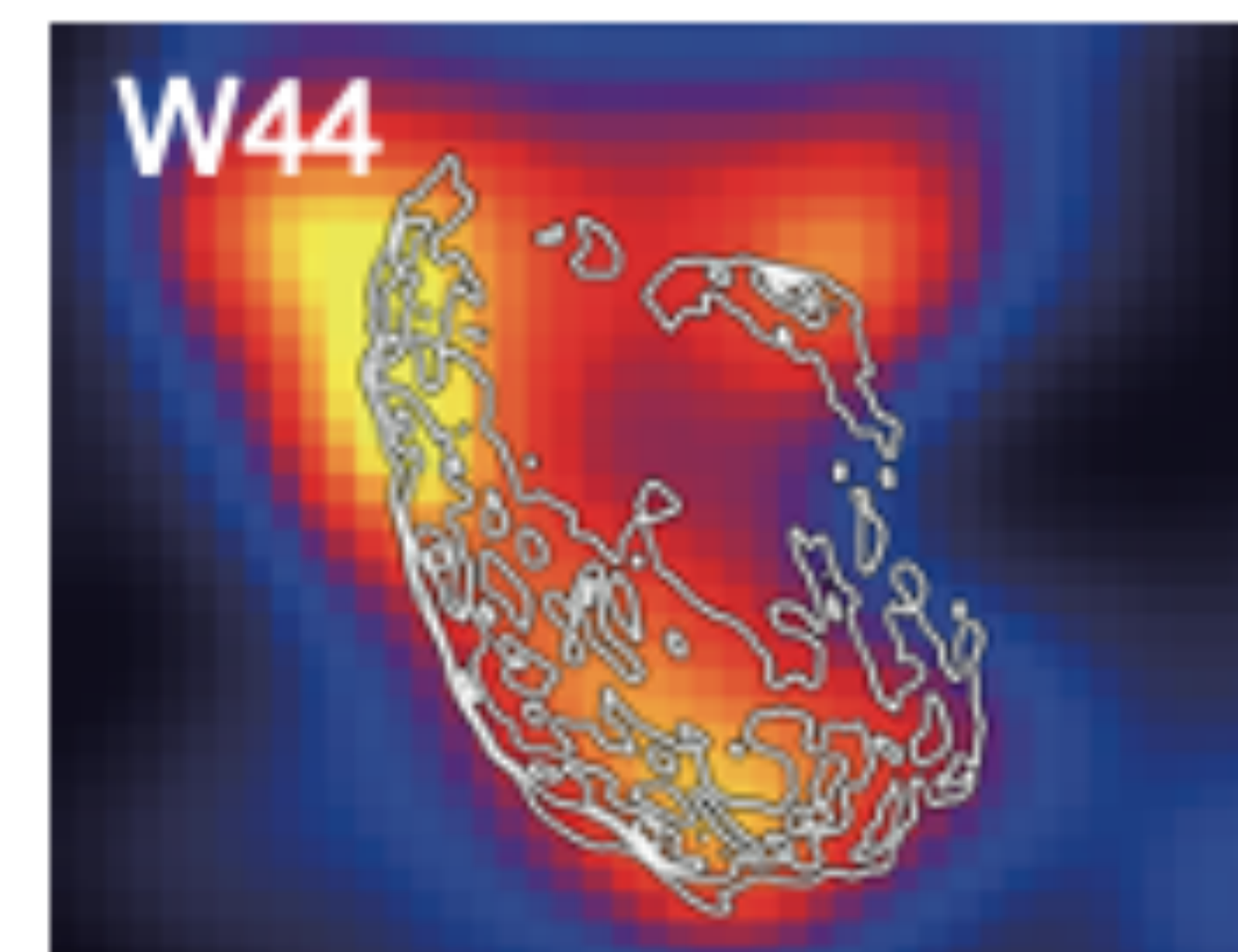


Sano+2021 to be submitted



Sano+2020a, PASJ Advance Access

Image: W49B ALMA CO (preliminary)  
Contours: Chandra X-rays



ALMA 観測提案受理済 & 観測進行中

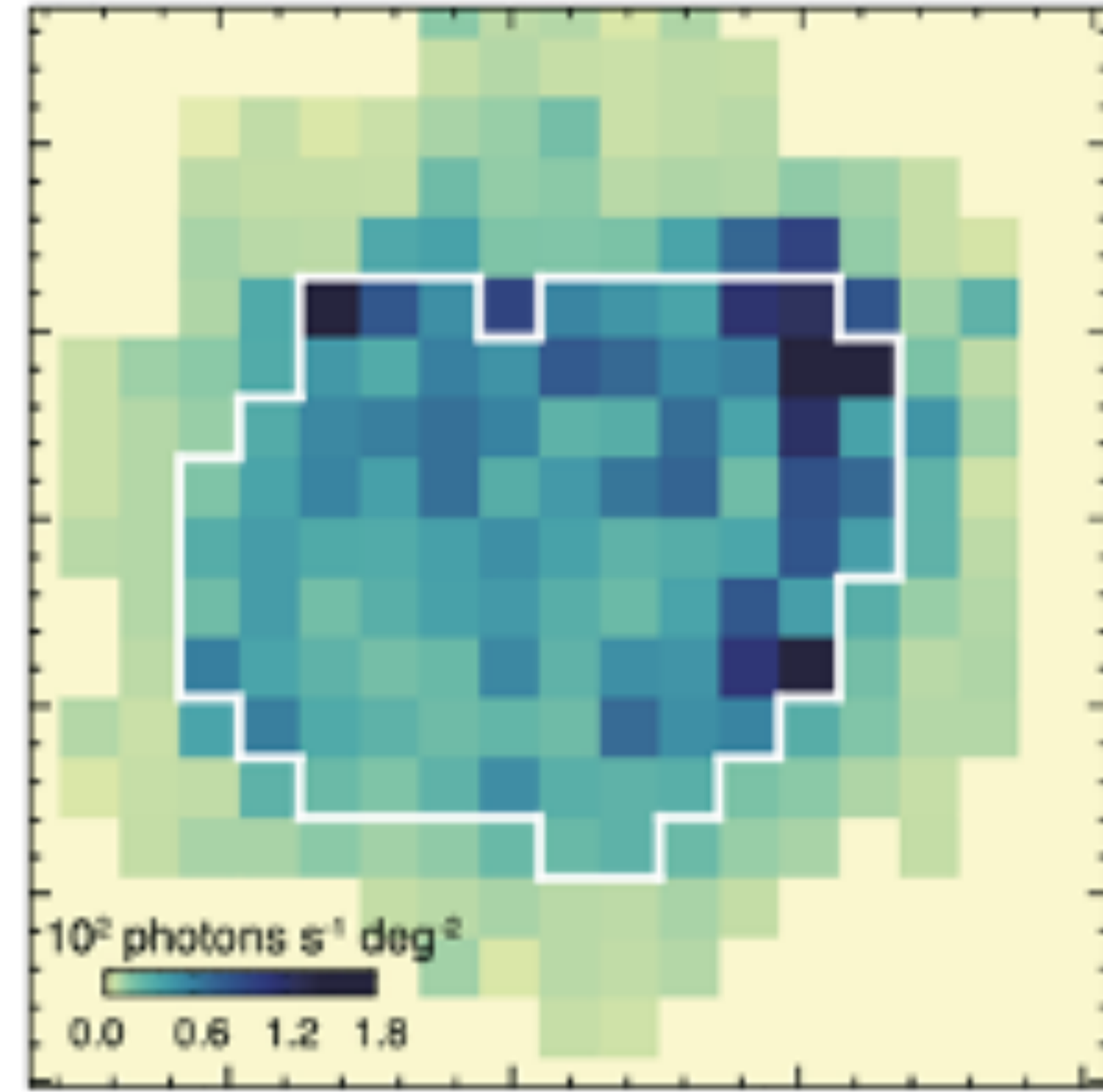
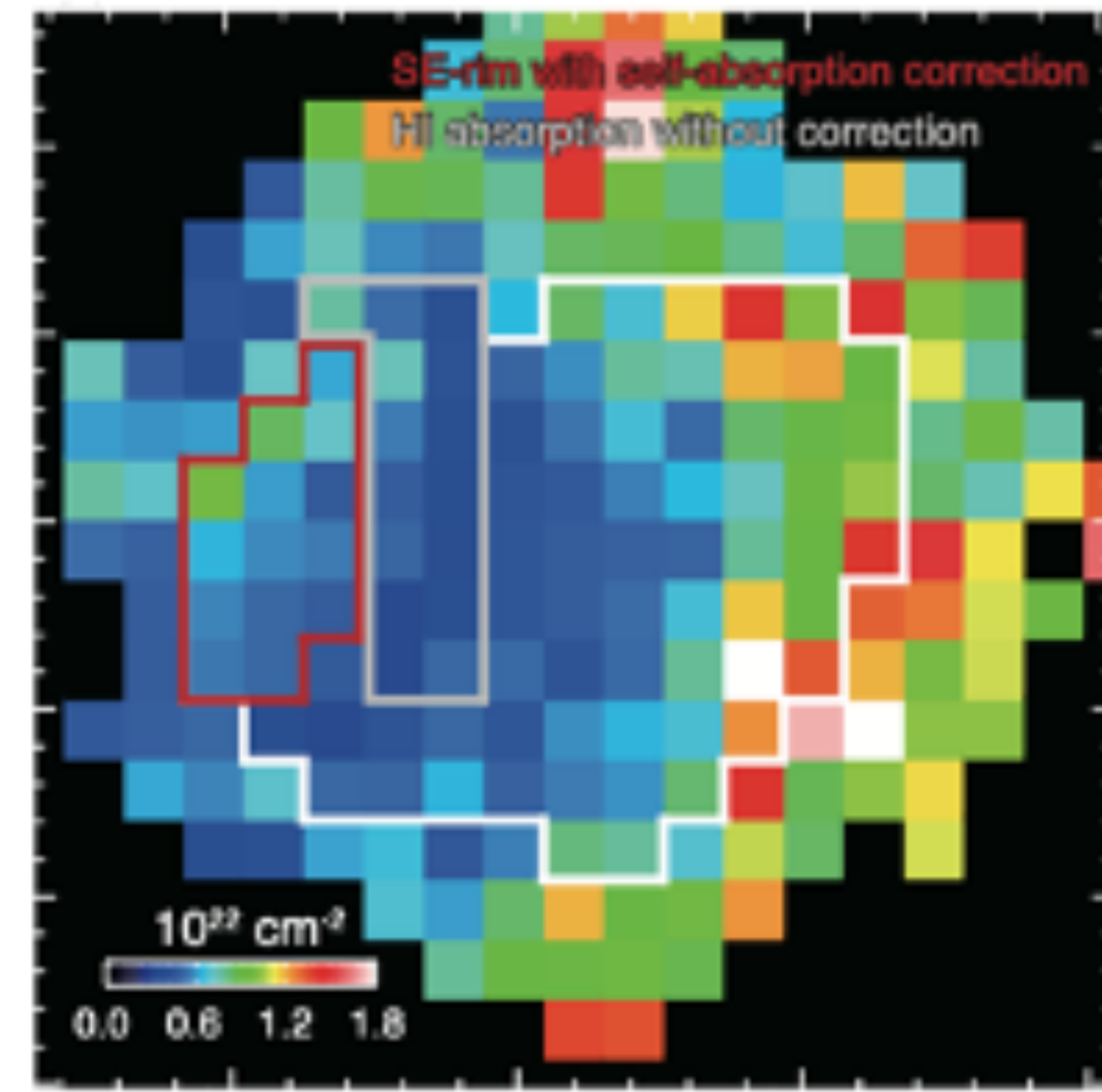
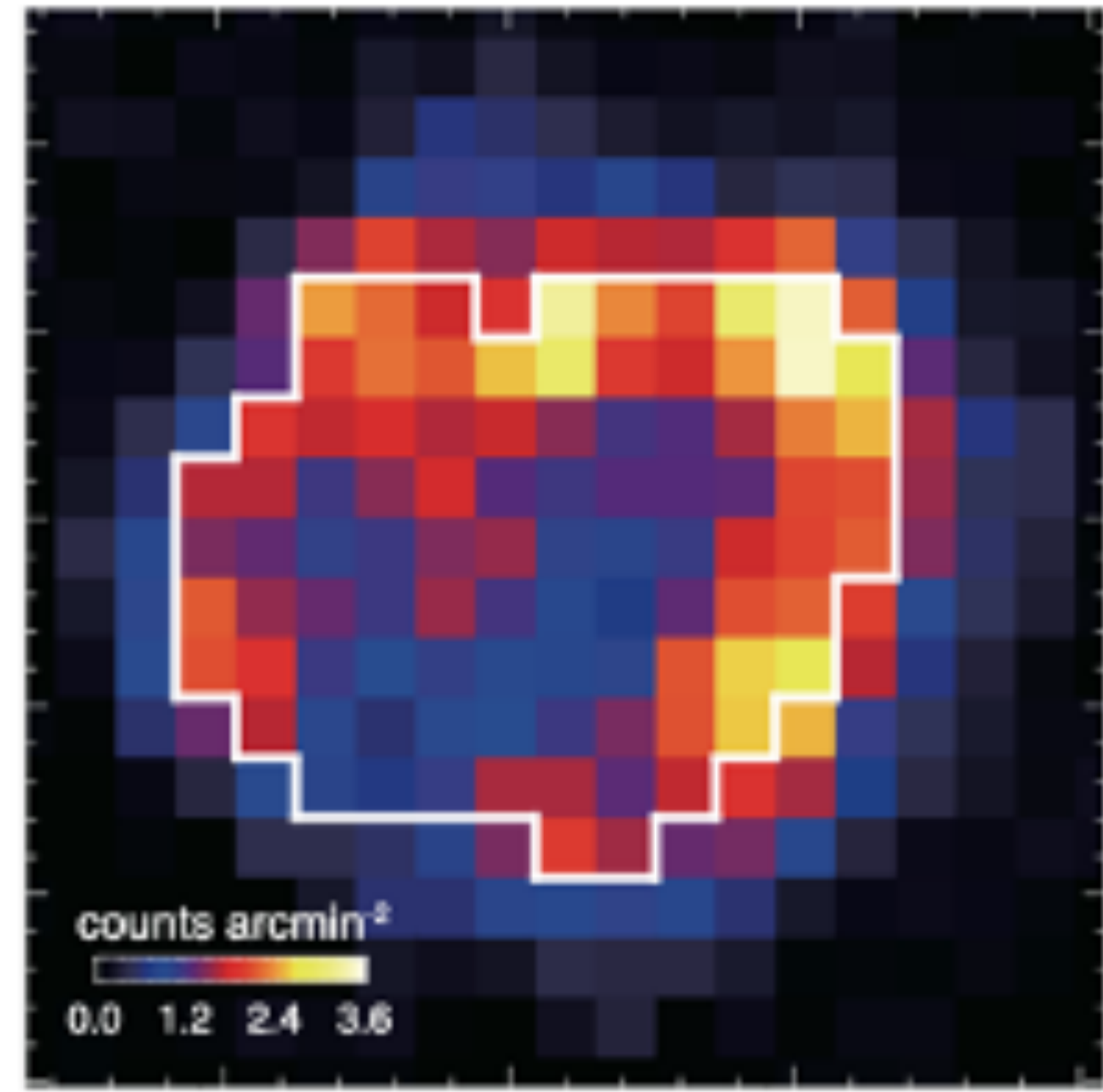
Sano+2021 to be submitted to ApJ



# 今後の展望②: 陽子/電子起源ガンマ線を切り分ける (Fukui et al., in prep.)

ガンマ線を ISM(全星間陽子) とX線の和として表現

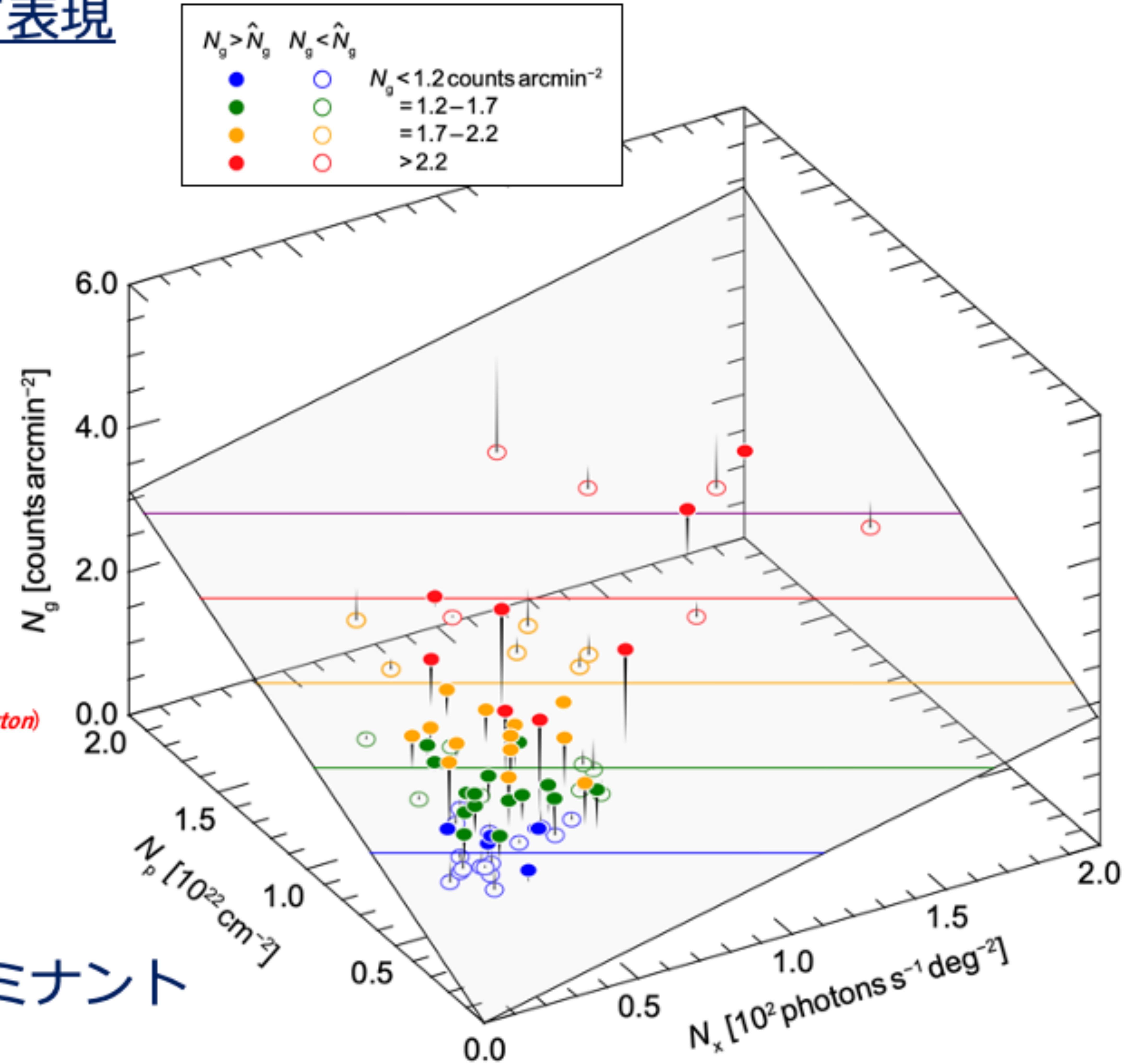
$$N_g = aN_p + bN_x$$



ガンマ線 (H.E.S.S. Col. 2018) 全星間陽子 (Fukui et al. 2012) シンクロトロンX線 (XMM-Newton)

$$\hat{N}_g = (1.57 \pm 0.14) \times N_p + (0.91 \pm 0.19) \times N_x$$

陽子起源ガンマ線:  $67 \pm 6$  %  
 電子起源ガンマ線:  $27 \pm 6$  % } 陽子起源がドミナント





- 現実的な非一様星間媒質中 (密度差 $\sim 10^5$ ) における粒子加速  
→ 電波輝線観測による星間雲の精密定量の必要性



web URL



- RX J1713.7-3946 北西部における ALMA CO 観測 (Sano et al. 2020c, ApJL, 904, 24)
  - 恒星風バブル内に位置する数十の分子雲塊 (直径 $\sim 0.01$  pc, 密度 $\sim 10^4$  cm $^{-3}$ )
  - 衝撃波相互作用によるガス塊周辺での磁場増幅 (数値計算とも無矛盾)
  - cloudlets が多い領域ではガンマ線 $\nu F_\nu$ スペクトルがフラットになる可能性
- ALMA 電波干渉計を用いた銀河系/系外銀河の超新星残骸研究  
→ LMC/SMC/M33に加え、W49B/W44/W28/IC443などの系内天体も観測中
- ガンマ線放射を ISM + X線で記述する (Fukui et al. in prep.)  
→ ガンマ線/ISM/X線空間分布の 3D fitting によってガンマ線の起源を探究