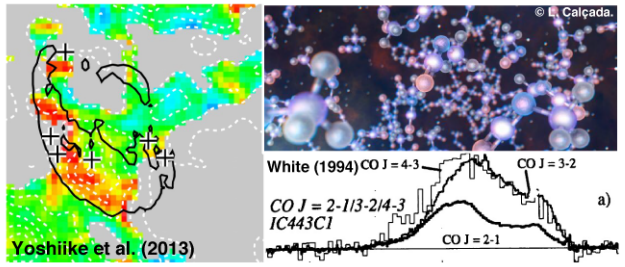
ASTE Science and Development Workshop 2024
2024/12/27 (金) 11:00–11:15

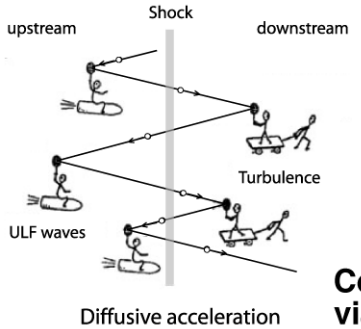
ASTE および ALMA ACA を用いた LMC SNR N157B に付随する分子雲の観測的研究

井上陽登, 佐野栄俊 (岐阜大学)
ほか SNR N157B チーム

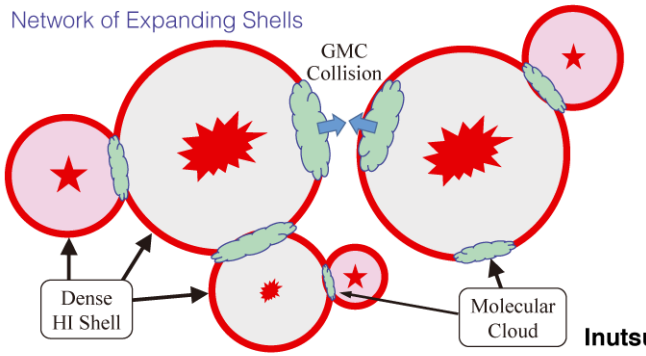
Physical processes in a supernova remnant



Partially heating of gas/dust with line broadening
+ chemical evolution of the ISM
+ CI chemistry in the vicinity of SNRs
+ Recombining plasma production



Cosmic-ray acceleration via DSA



Inutsuka et al. (2015)

Molecular filament formation by multiple shock compressions

Dense clouds
(e.g., molecular clouds, > 10^3 cm^{-3})

Stellar wind shell
with an expansion velocity of a few km s^{-1}

Forward shock

Characteristic X-rays

Ejecta

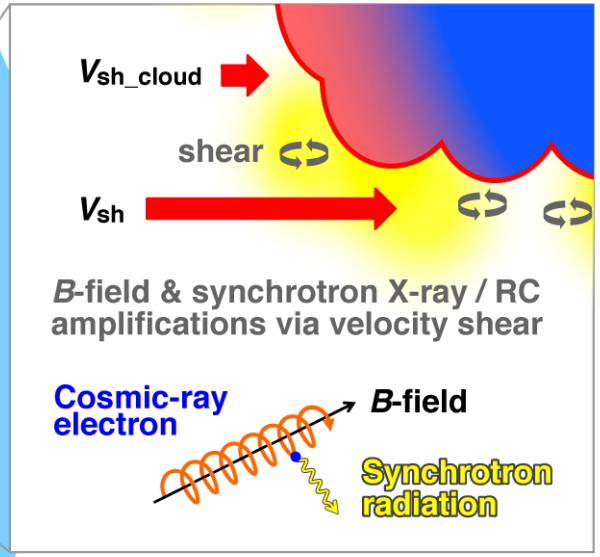
Synchrotron radiation

Exploded star

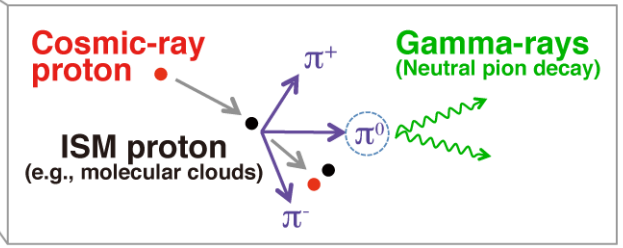
Reverse shock

Thermal radiation

Gamma-rays

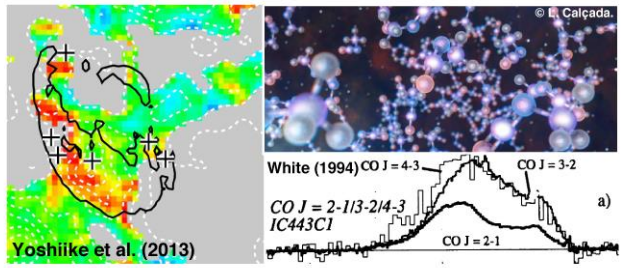


The total energy of cosmic-ray protons



press release!

Physical processes in a supernova remnant



Partially heating of gas/dust with line broadening
+ chemical evolution of the ISM
+ CI chemistry in the vicinity of SNRs
+ Recombining plasma production

SNR 衝撃波による分子雲の加熱・圧縮・破壊

Dense clouds
(e.g., molecular clouds, > 10^3 cm^{-3})

Stellar wind shell
with an expansion velocity of a few km s^{-1}

Forward shock

Ejecta

Synchrotron radiation

Exploded star

Reverse shock

Thermal radiation

Gamma-rays

V_{sh_cloud}

shear

V_{sh}

B-field & synchrotron X-ray / RC amplifications via velocity shear

Cosmic-ray electron

B-field

Synchrotron radiation

The total energy of cosmic-ray protons

Cosmic-ray proton

Gamma-rays
(Neutral pion decay)

ISM proton
(e.g., molecular clouds)

π^+

π^0

π^-

press release!

upstream

Shock

downstream

Turbulence

ULF waves

Diffusive acceleration

Cosmic-ray acceleration via DSA

Network of Expanding Shells

GMC Collision

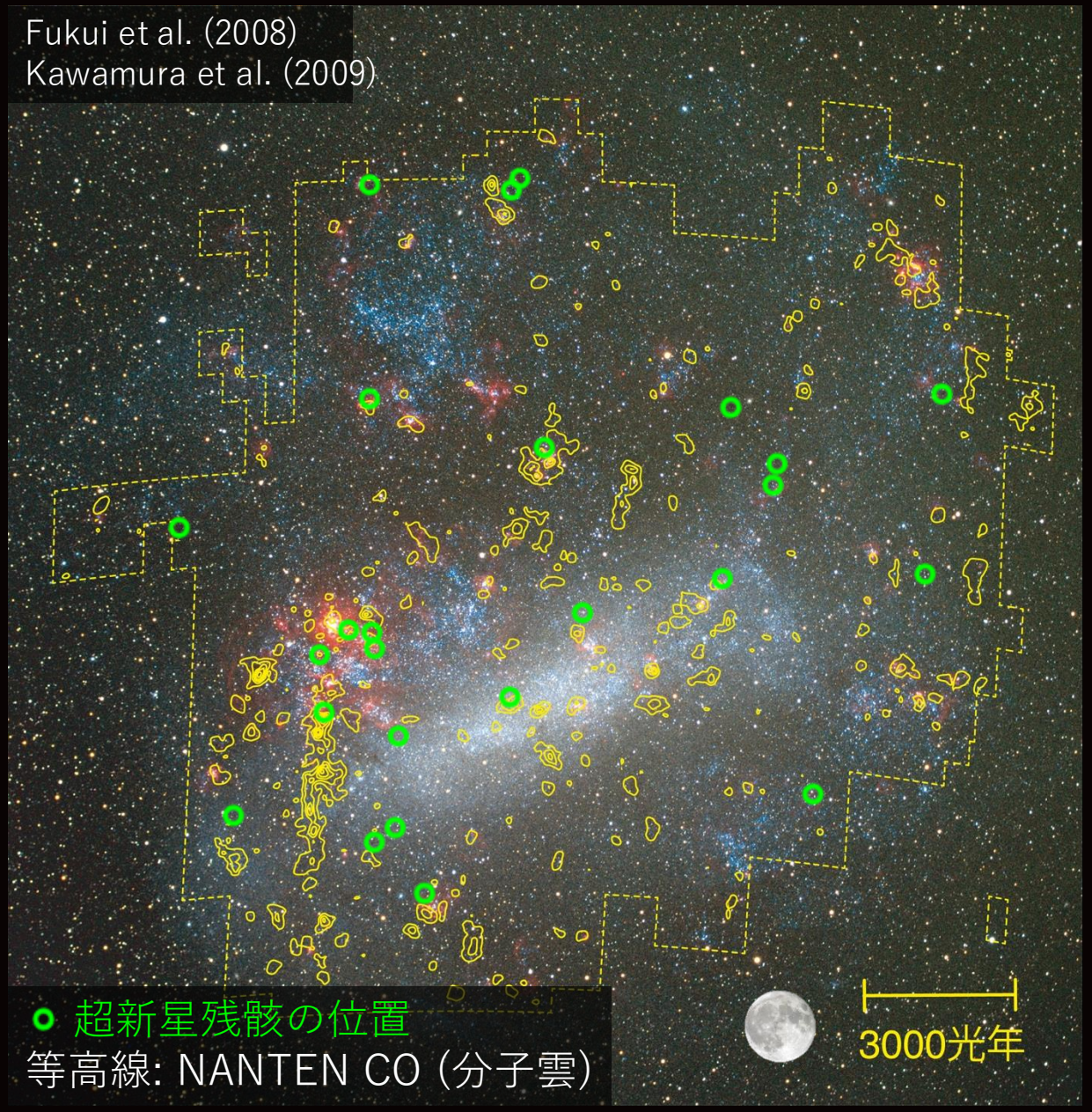
Dense HI Shell

Molecular Cloud

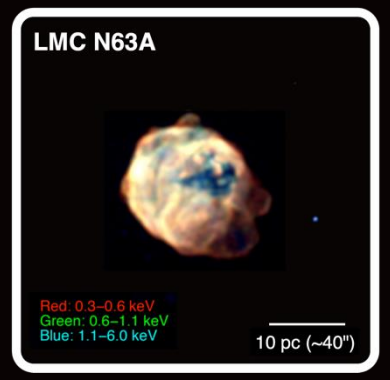
Inutsuka et al. (2015)

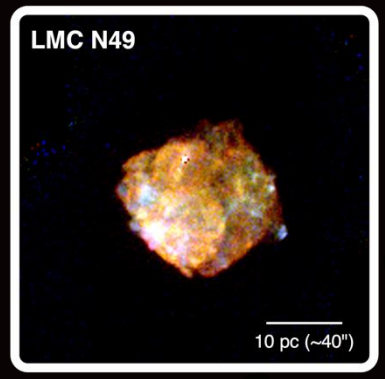
Molecular filament formation
by multiple shock compressions

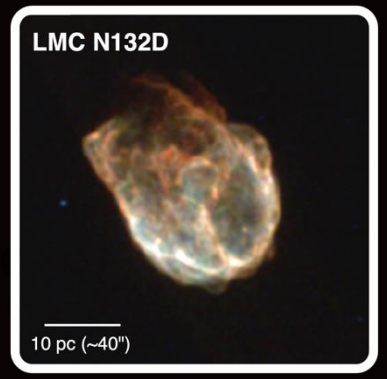
大マゼラン雲の超新星残骸



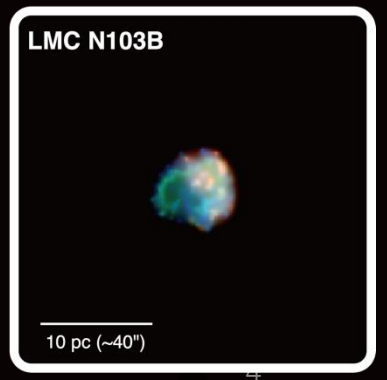
1. **Well-known distance**
   50 ± 1.3 kpc for the LMC (Pietrzyński et al. 2013)
2. **Low ISM metallicity**
   ~0.3–0.5 $Z_{\odot}$ for the LMC (Westerlund 1997)
3. **Smaller contamination along the line of sight**



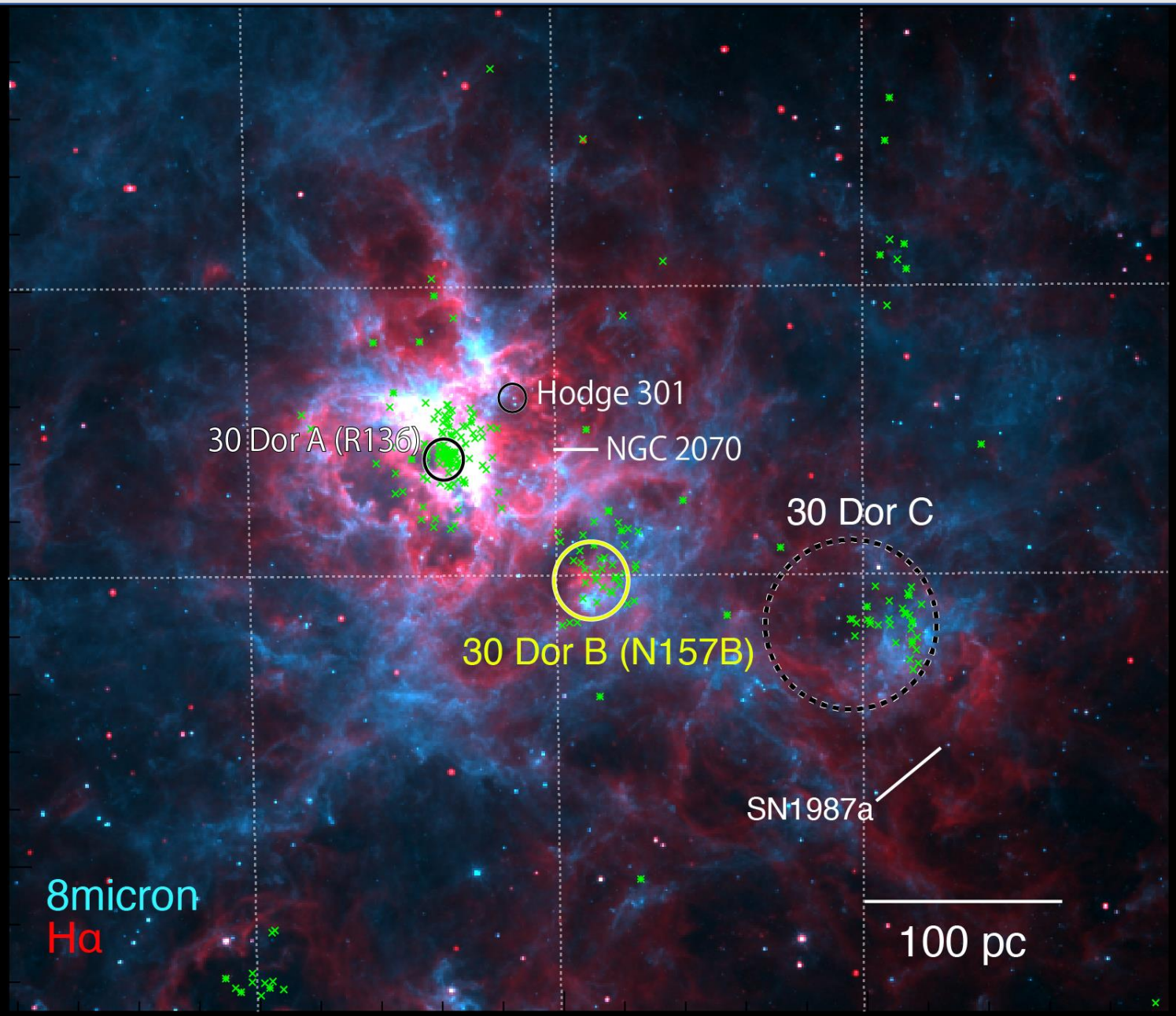






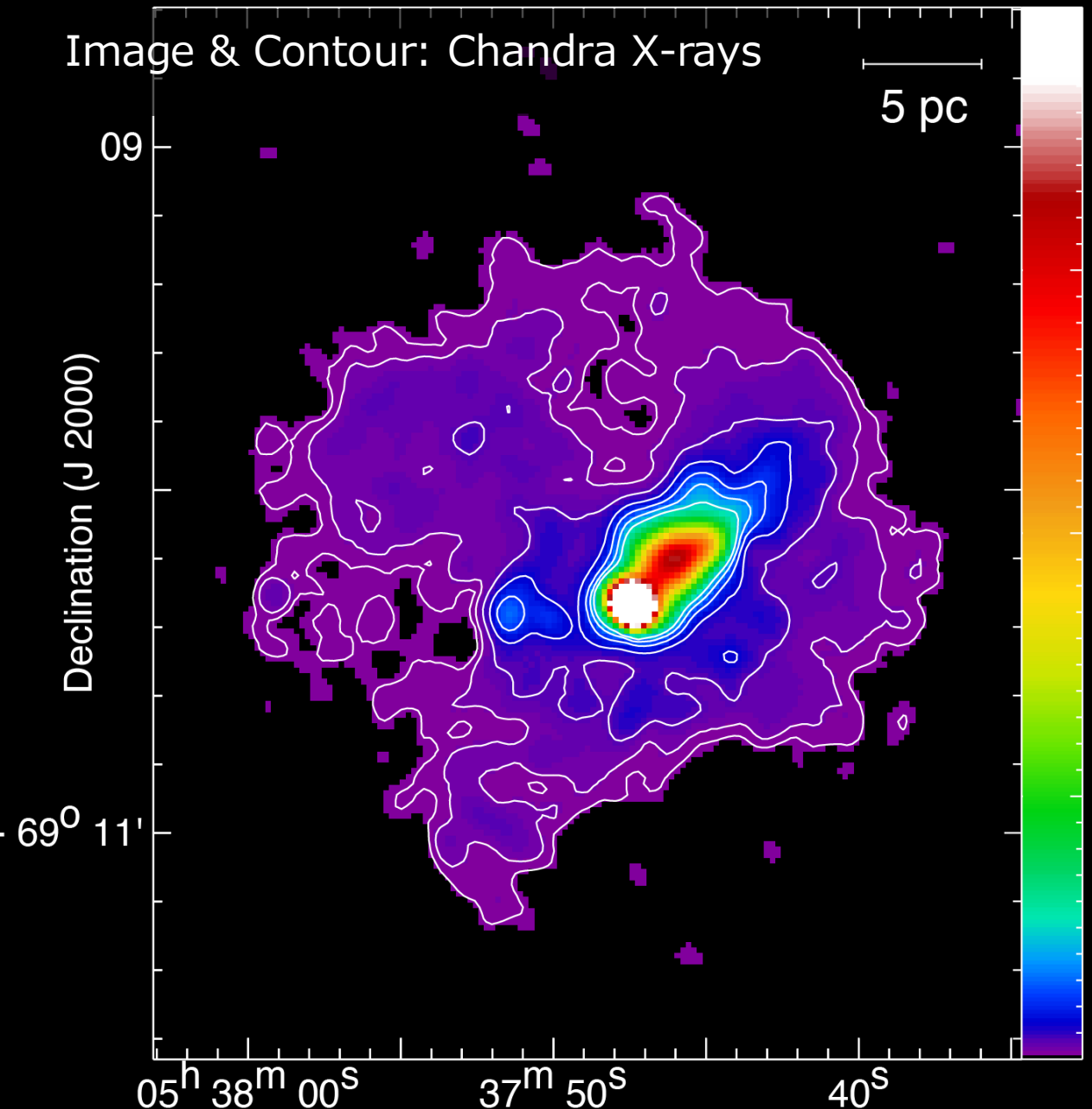


30 Doradus 領域



- 大マゼラン雲南東部にある若い大質量星団 R136 を中心とする HII 領域
- 視直径:　およそ 40' × 25'
  (Davis R.D. et al. 1976)
- 大質量星団
  - 30 Dor A (R136)
  - Hodge 301 ほか
- 超新星残骸
  - **30 Dor B (N157B)**
  - SN 1987a など
- スーパーバブル
  - 30 Dor C

SNR N157B (NGC 2060, 30 Dor B)



- 大質量星団 LH99 による HII 領域内に位置 (Chu et al. 1992)
- 中心集中型 SNR (Fesen 1997)
- 年齢: ~5,000 yr (Marshall et al. 1998; Wang & Gotthelf 1998)
- 直径: ~20 pc (Wang & Gotthelf 1998) (e.g., Marshall et al. 1998)
- ミリ秒パルサー PSR J0537−6910 を内包
- 大マゼラン雲で最も明るいガンマ線天体
  - ➡ パルサー風星雲で発生した宇宙線電子による、逆コンプトン散乱起源が最有望 (e.g., HESS collaboration 2015)
  - ➡ 一方, 付随星間雲がないと仮定して, 陽子起源放射を棄却している点が問題 (Johansson et al. 1997)
- SESTによって GMC は検出 (30Dor-18)
  - ➡ **SNR との付随関係は議論されていない (分解能Δθ~45”と粗く、感度も不足)**

研究目的および手法

目的

SNR N157B に付随する分子雲を, 十分な角度分解能と感度で特定・定量し、
星団やSNRとの比較を通して、SNRが分子雲に与える影響 (加熱・破壊)や、ガンマ線の起源に迫る。

手法

▪ 温度・密度の導出 (LVG解析)

異なる励起準位、同位体のCO輝線強度を用いることで、輻射輸送方程式を簡略化し、
温度・密度を導出する (Castor 1970; Goldreich & Kwan 1974)

➡ 衝撃波による加熱や、密度の増加が見られるか検証する

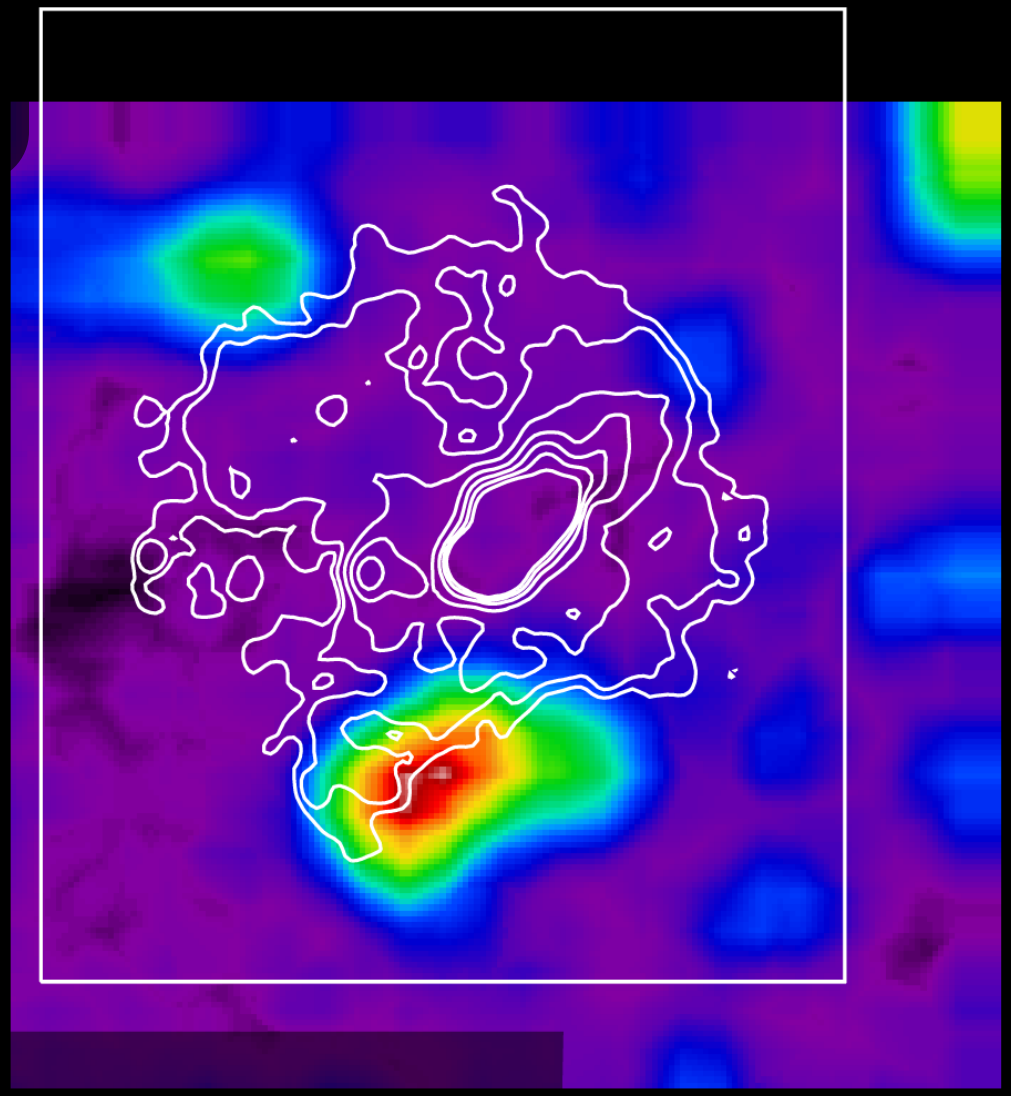
▪ 質量の導出

①ビリアル質量 $M_{\rm vir}$　② CO-to-H_2 変換係数を用いた質量 $M_{\rm CO}$

➡ 衝撃波を受けている場合、$M_{\rm vir} \gg M_{\rm co}$ となるはず (e.g., Banas et al. 1987)

Image: ASTE ^{12}CO(J=3–2)
Contour: Chandra X-ray

(AC141023, PI: Fuhii, CoI: Sano)



K

0.00 0.93 1.87 2.80

5 pc

ASTE



Image: ALMA ^{12}CO(J=2–1)
Contour: Chandra X-ray

(#2021.1.00367.S, PI: Bollato)
(#2019.2.00044.S, PI: Bollato)

ALMA

K
0.00 6.67 13.33 20.00
5 pc



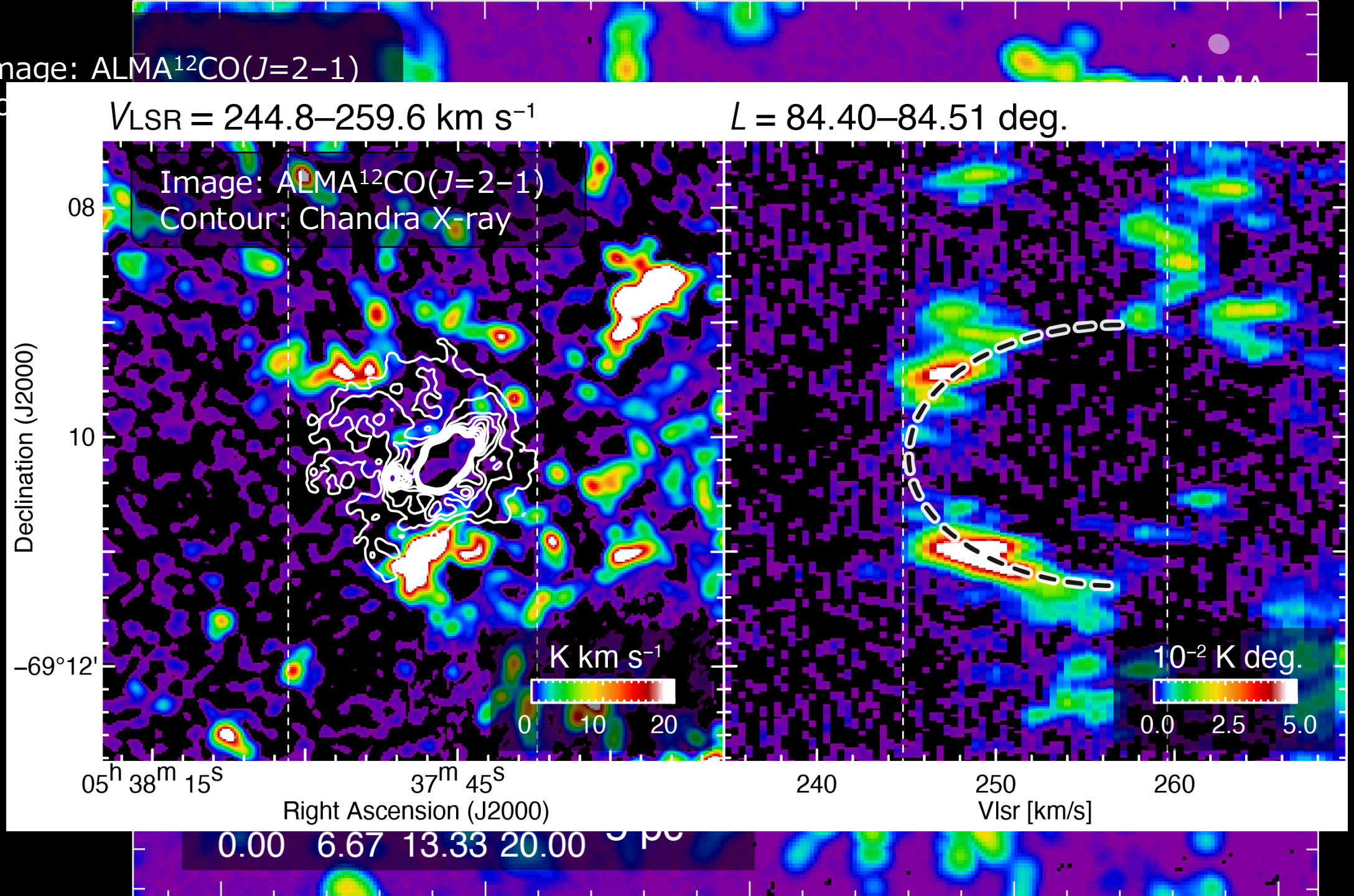
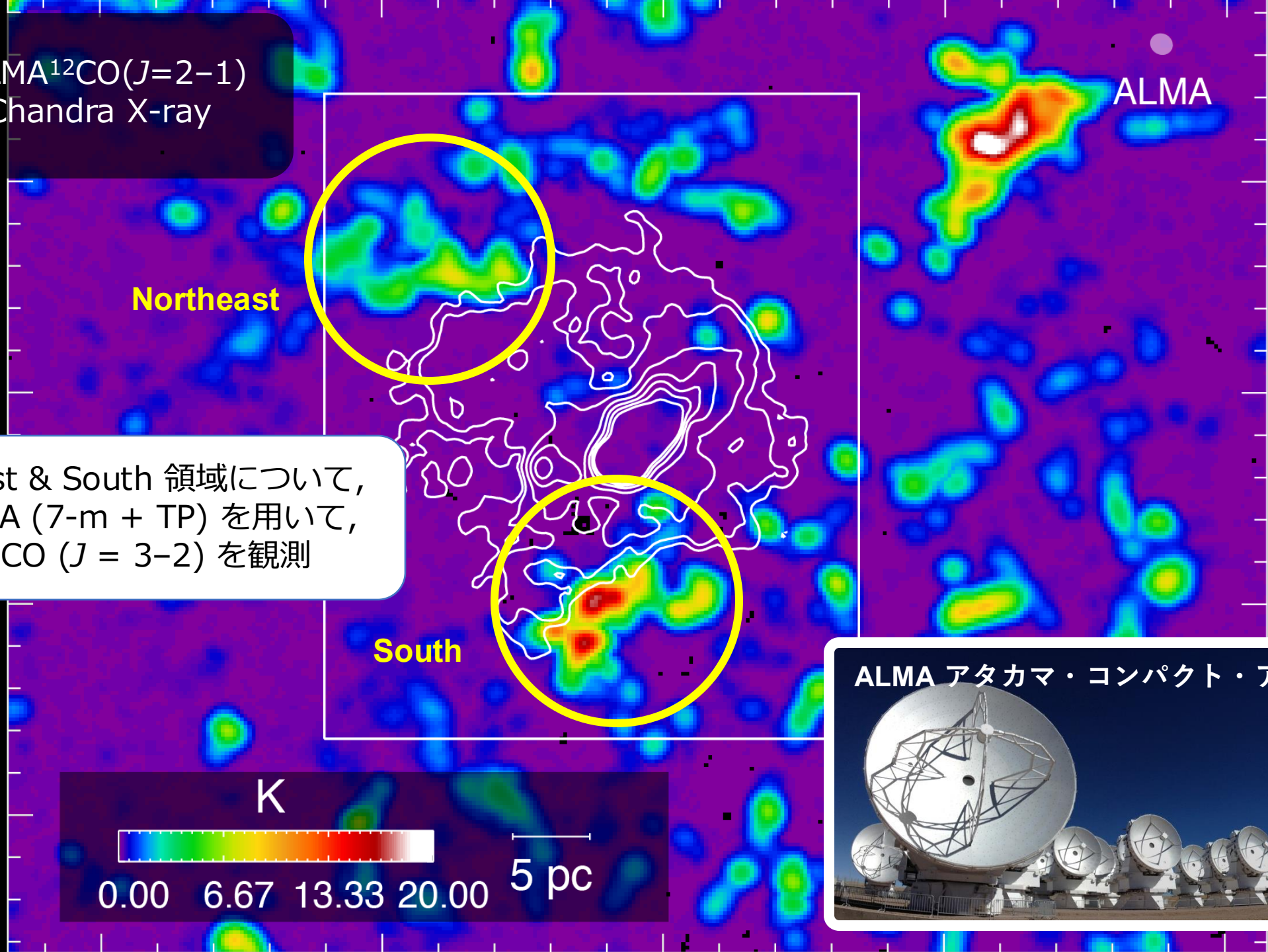

Image: ALMA 12CO(J=2–1)
Co
VLSR = 244.8–259.6 km s−1
L = 84.40–84.51 deg.
Image: ALMA 12CO(J=2–1)
Contour: Chandra X-ray
08
10
−69°12'
Declination (J2000)
K km s−1
0
10
20
10−2 K deg.
0.0
2.5
5.0
05h 38m 15s
37m 45s
Right Ascension (J2000)
240
250
260
Vlsr [km/s]
0.00 6.67 13.33 20.00

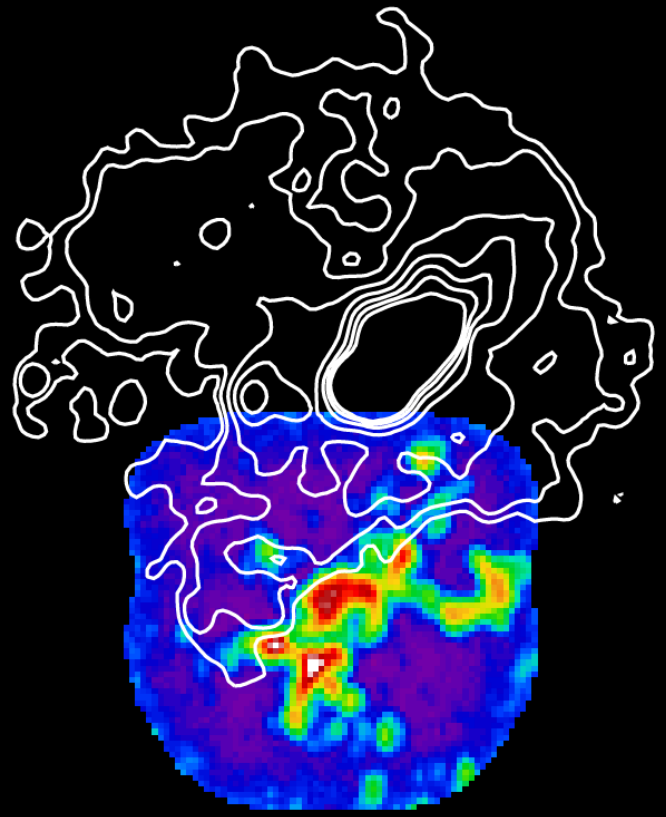
Image: ALMA ^{12}CO(J=2–1)
Contour: Chandra X-ray



Northwest & South 領域について,
ALMA ACA (7-m + TP) を用いて,
^{12}CO & ^{13}CO (J = 3–2) を観測

Image: ALMA ^{12}CO(J=3–2)
Contour: Chandra X-ray

(#2021.2.00008.S, PI: Sano)

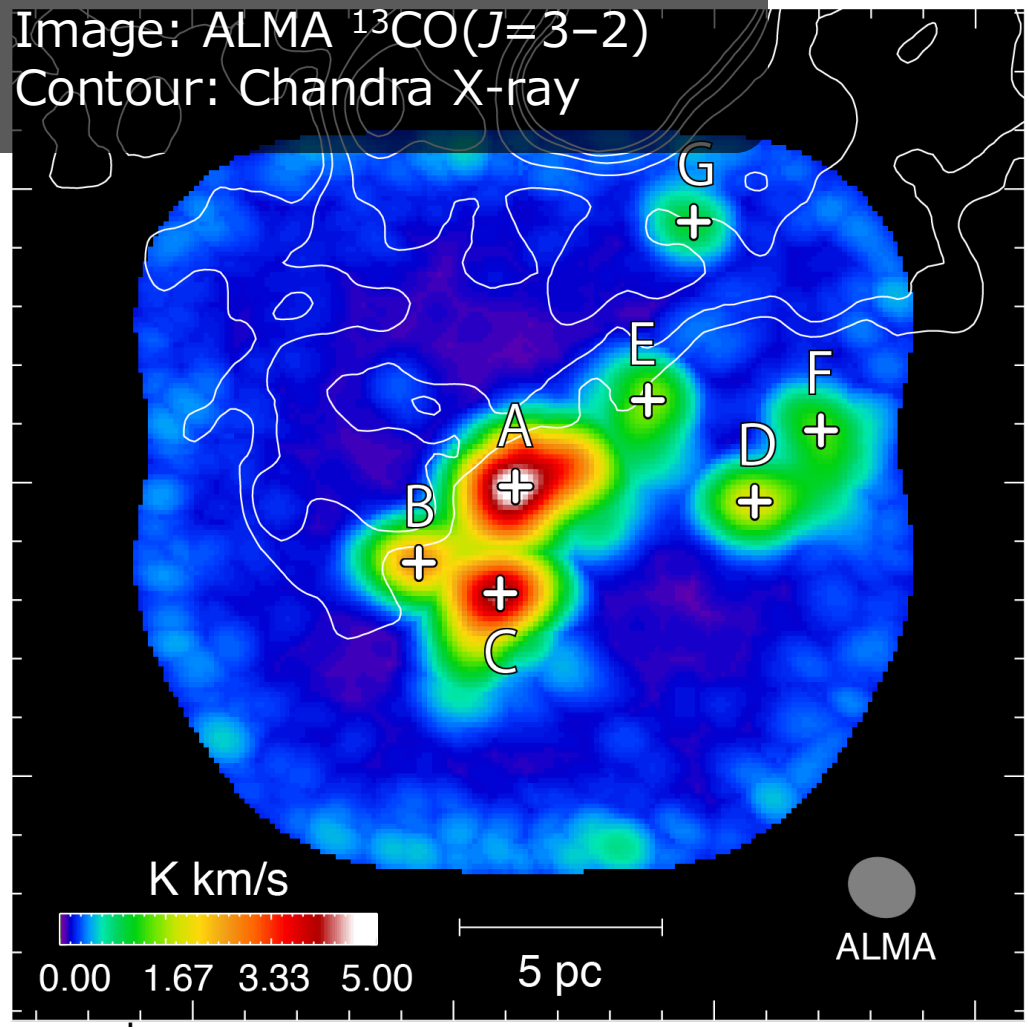


South 領域





分子雲クランプの物理量



Diameter (A~G)	1.1–1.8 pc

分子雲	$M_{\rm CO}$ [$\times 10^3\,M_\odot$]	$M_{\rm vir}$ [$\times 10^3\,M_\odot$]
A	2.4	3.6
B	0.6	0.7
C	1.3	1.0
D	0.4	0.6
E	0.5	0.8
F	0.4	0.6
G	0.1	0.4

$M_{\rm CO}$ の 導出方法

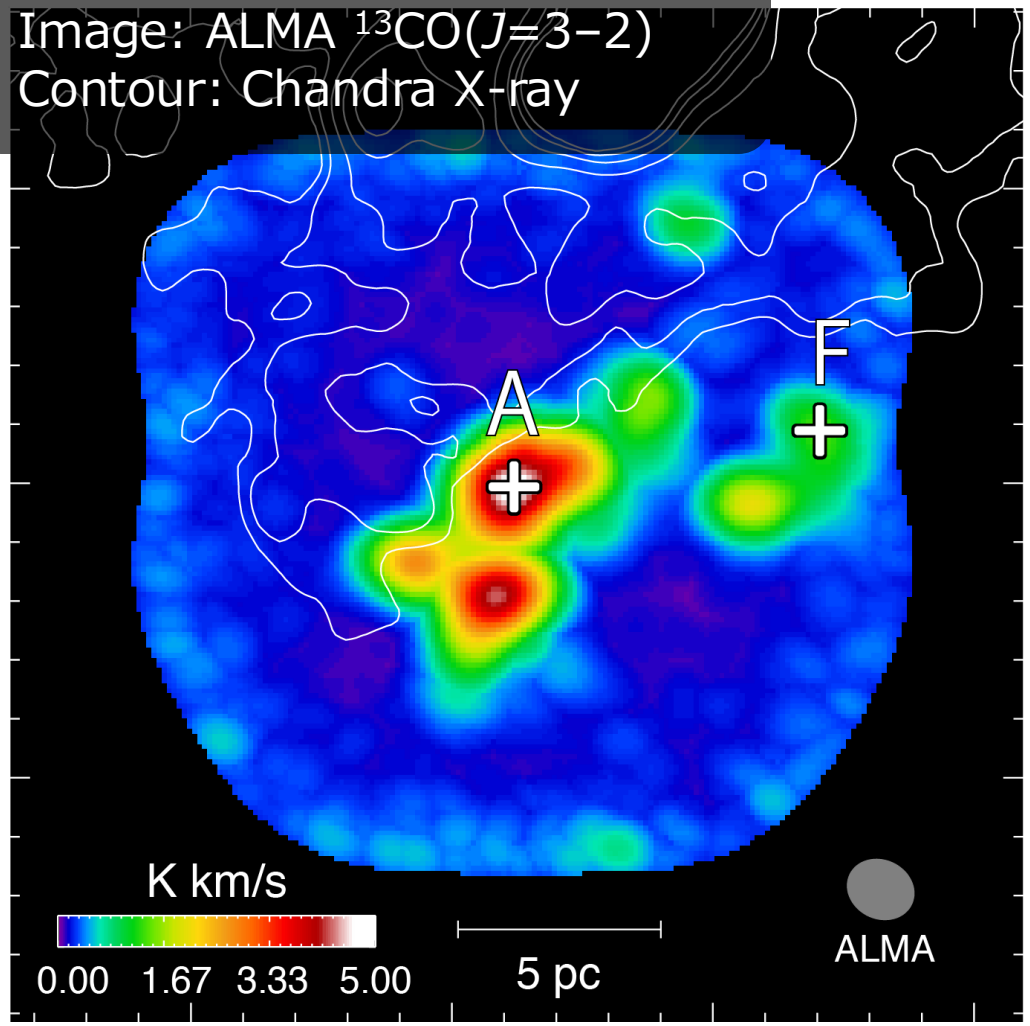
- $M_{\rm CO} = m_{\rm H} \cdot \mu \cdot D^2 \Omega \cdot \sum_i N_i({\rm H_2})$
- $N({\rm H_2}) = 2 \cdot X_{\rm CO} \cdot \frac{^{12}{\rm CO(1\text{–}0)}}{^{12}{\rm CO(3\text{–}2)}} \cdot W({\rm CO_{32}})$

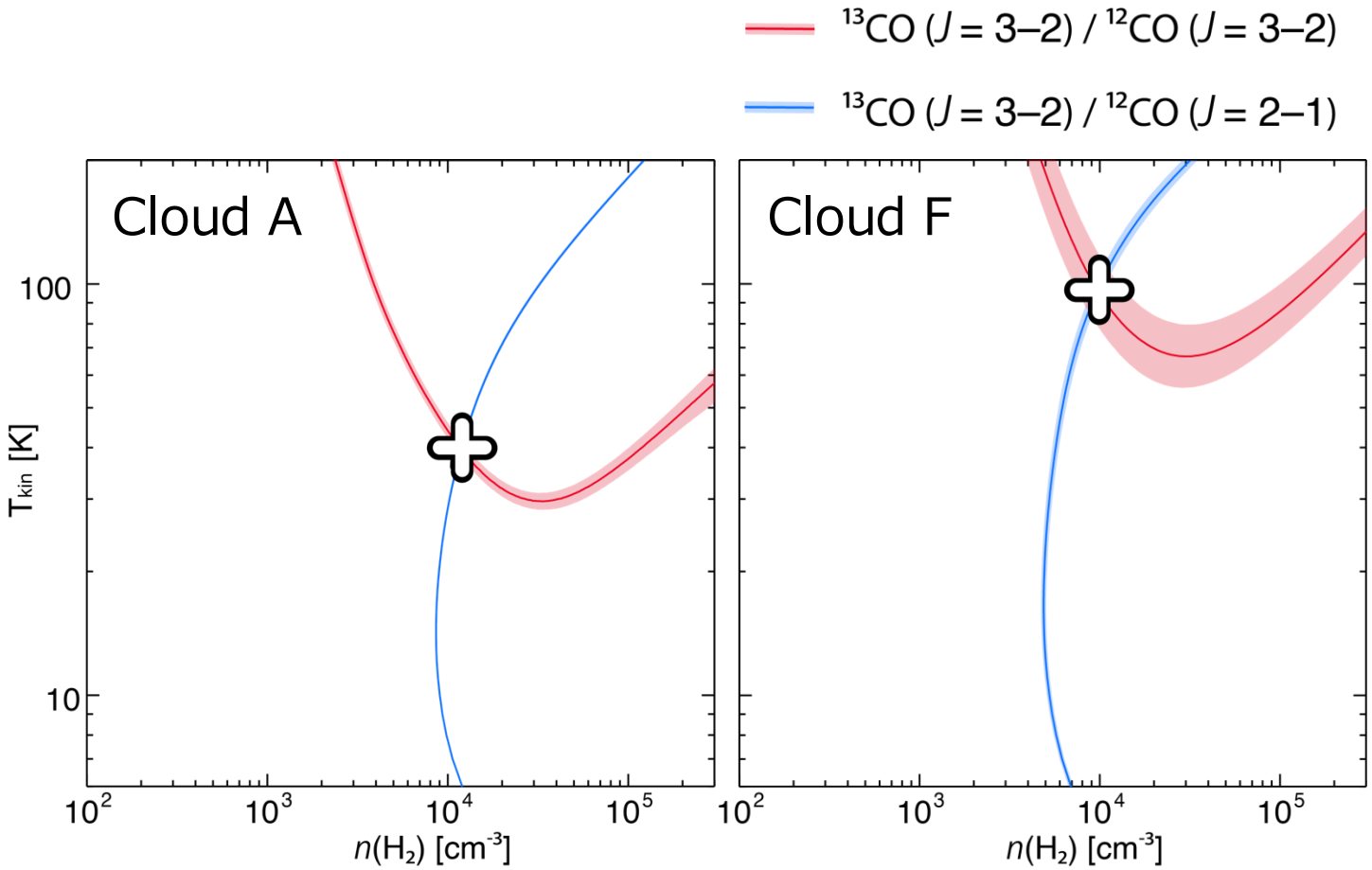
水素原子の質量 $m_{\rm H} \sim 1.67\times10^{-27}$ kg, 分子雲の平均分子量 $\mu \sim 2.74$,
天体までの距離 $D \sim 1.5\times10^{23}$ cm, 立体角 Ω

$\frac{^{12}{\rm CO(1\text{–}0)}}{^{12}{\rm CO(3\text{–}2)}} = \frac{\text{Mopra } ^{12}{\rm CO(1\text{–}0)}}{\text{ASTE } ^{12}{\rm CO(3\text{–}2)}} \sim 1.1$,
CO–to–H_2変換係数 $X_{\rm CO} \sim 2\times10^{20}$ (K km s^{-1})$^{-1}$ cm^{-2},
^{12}CO(3–2)の積分強度 $W({\rm CO_{32}})$

SNR 内部あるいはシェルの縁において $M_{\rm CO} \ll M_{\rm vir}$ が顕著 (~1.5–5倍)

LVG解析

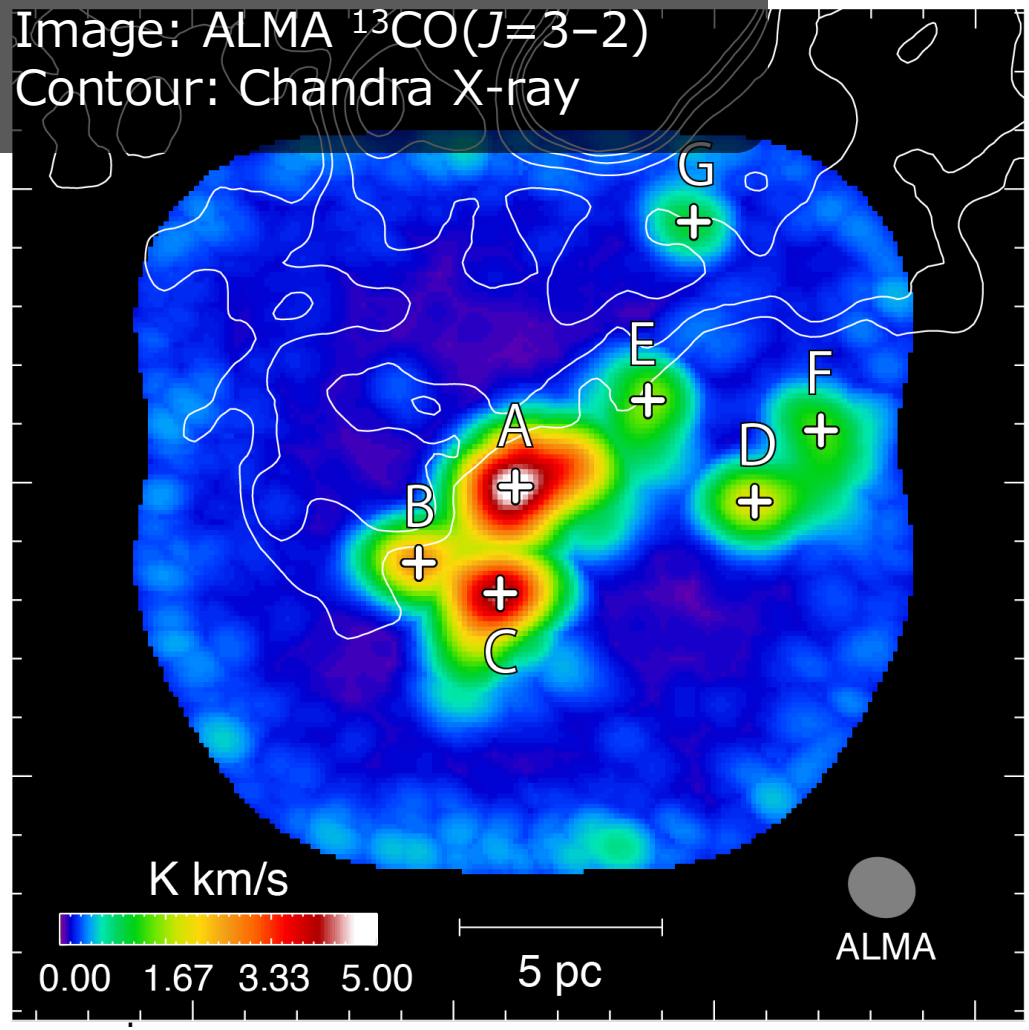




分子雲 A：$T_{\rm kin} = 40^{+1}_{-2}$ [K], $n(\mathrm{H_2}) = 12000^{+300}_{-500}$ [cm^{-3}]

分子雲 F：$T_{\rm kin} = 97^{+8}_{-9}$ [K], $n(\mathrm{H_2}) = 9770^{+1730}_{-1450}$ [cm^{-3}]

議論: SNR N157B に付随する分子雲



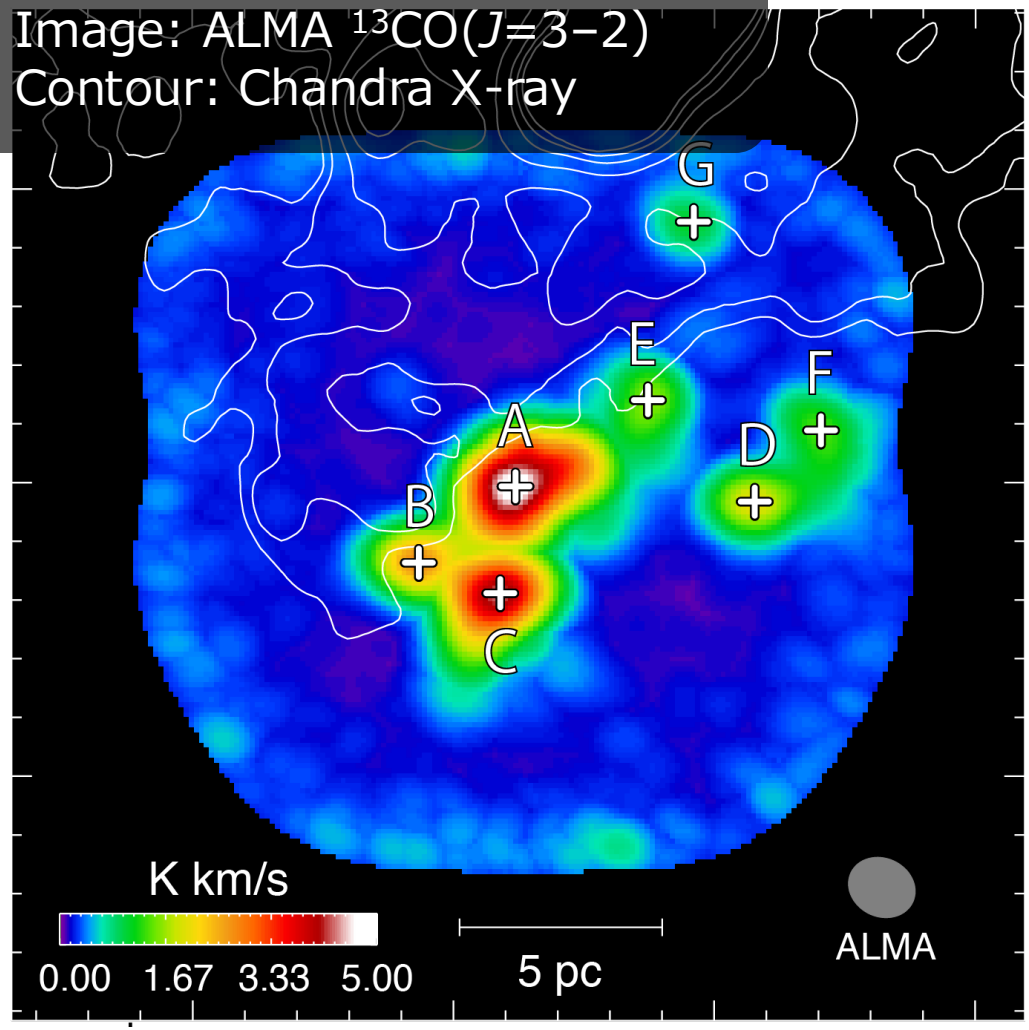
1) $V_{\rm LSR}$ ~245– 260 km s^{-1}でX線シェルに沿って分布
   - ➡ 衝撃波が分子雲に堰き止められ、シェル形状が変形
   - ➡ 衝撃波–分子雲相互作用で、熱的X線が増光

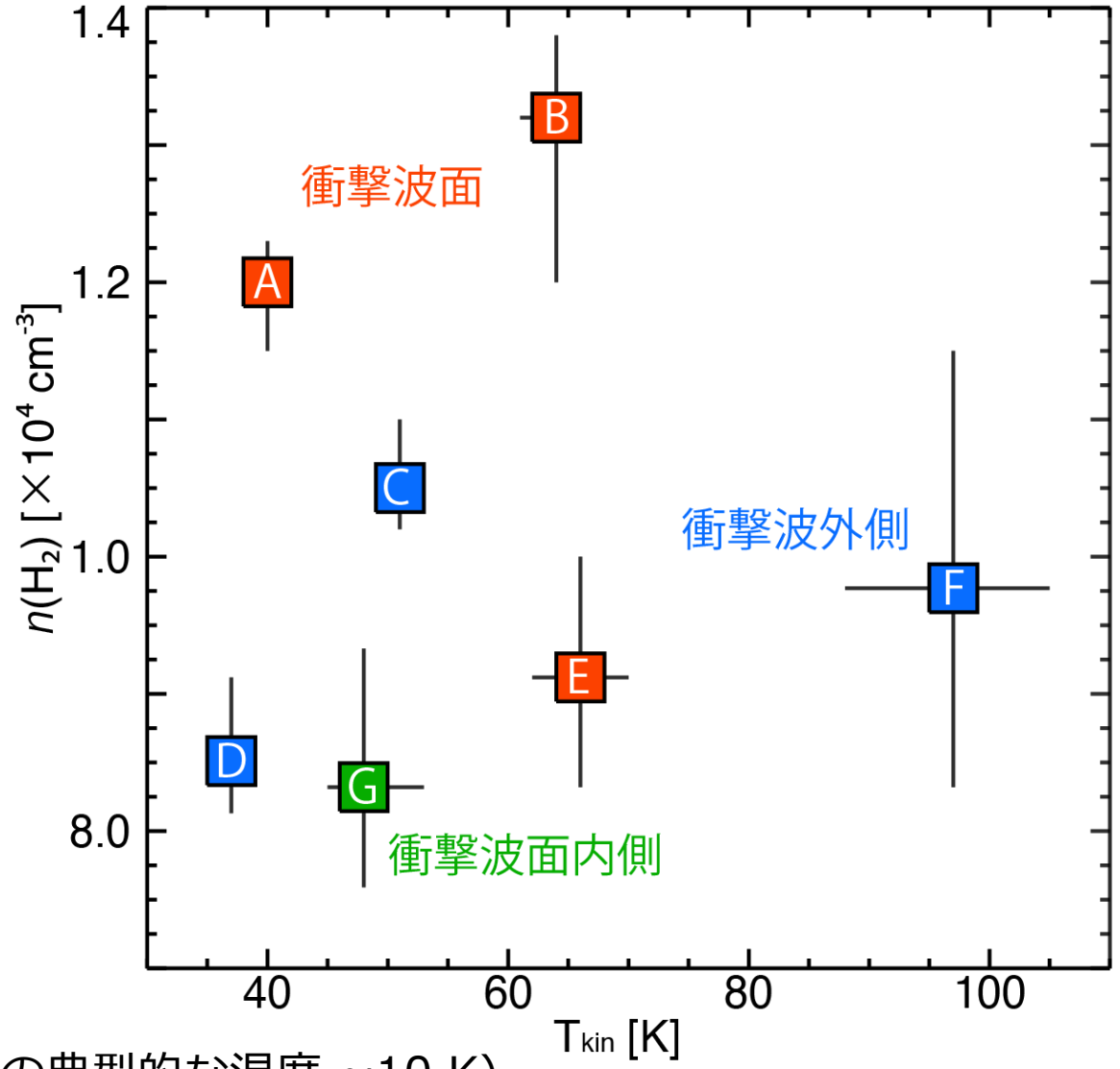
2) SNRシェルとほぼ同じ広がりをもつガス膨張運動
   - ➡ SNR 衝撃波 and/or 母天体の恒星風により形成

3) SNR 内部またはシェルの縁の分子雲について、
   $M_{\rm CO} \ll M_{\rm vir}$ が顕著に見られた
   - ➡ SNR 衝撃波によって線幅が増大し、
     ビリアル平衡から外れることが原因 (e.g., Banas+98)

以上 1)–3) を踏まえて, $V_{\rm LSR}$ ~245– 260 km s^{-1} の分子雲が、
SNR N157B に付随 (物理的に関連) していると結論した。

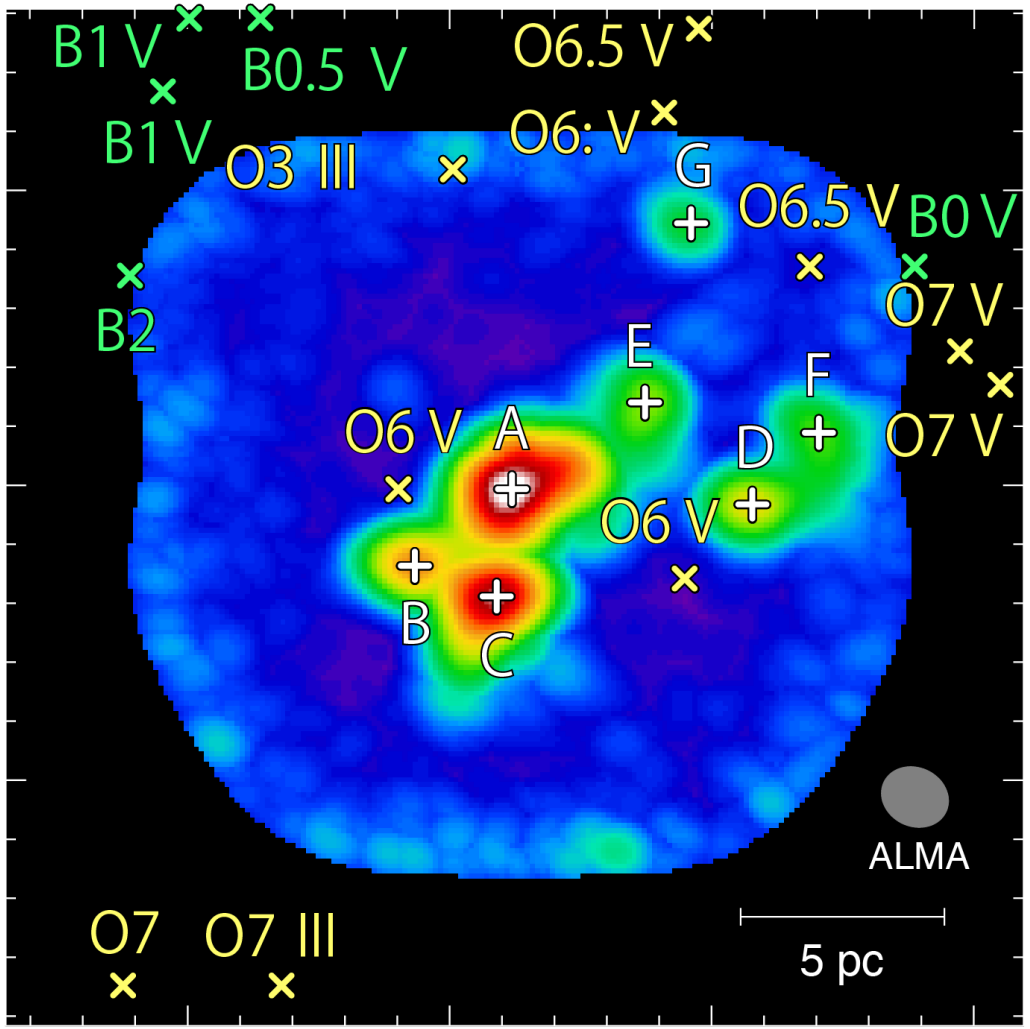
議論: 分子雲の加熱機構





- 全体的に ~40–100 K と高温 (分子雲の典型的な温度 ~10 K)
- SNR衝撃波近傍あるいは内側と、外側の分子雲とで、温度・密度に有意な傾向なし

議論: 分子雲の加熱機構



(Bonanos+2009)

Image: ALMA ^{13}CO(J=3–2)
O型・B型星をそれぞれクロスとxで重ねた

- SNR衝撃波以外の加熱メカニズム？
  ＝ 大質量星からの UV 放射による加熱

N157B は 大質量星団 LH99 に位置しており、
分子雲クランプ周辺にも、
おおよそ 10 個のO型星と5個のB型星が位置している。

N157B に付随している分子雲は、
主に大質量星団からの UV放射による加熱を受けて
高温になっていると考えられる。

大事な点は、これだけのSNR 衝撃波や、
大質量星からUV放射に晒されても、
分子雲は壊されずに生き残っていることにある

まとめ、今後の展望

目的

SNR N157B に付随する分子雲を, 十分な角度分解能と感度で特定・定量し、
星団やSNRとの比較を通して、SNRが分子雲に与える影響 (加熱・破壊)や、ガンマ線の起源に迫る。

結果・議論

N157B に付随する分子雲の物理状態
- 分子雲 A–G すべてが典型値と比べて加熱されている (~40–110 K)
- 衝撃波面にあたる分子雲と内外の分子雲で、温度・密度の違いは見られなかった

➡ SNR衝撃波よりも、大質量星による UV 放射が主に効いている可能性

展望

・N157B North East領域 における物理状態を探る
・ガンマ線放射の起源を探る

^{13}CO(J=3–2) CREAN済
^{12}CO(J=3–2) 未CREAN (#2021.2.00008; PI: H.Sano)
➡ 2025年春季天文学会で講演予定



