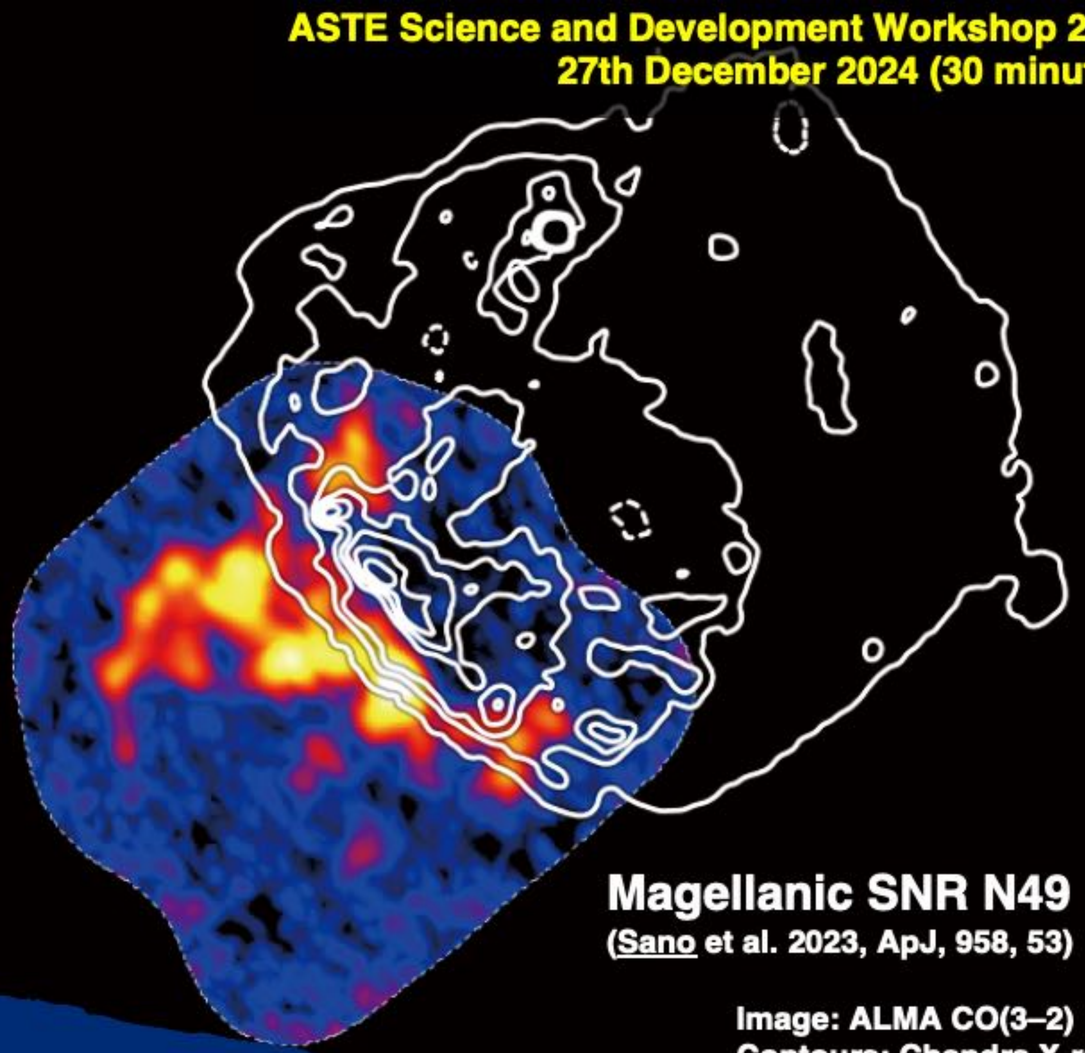
ASTE Science and Development Workshop 2024
27th December 2024 (30 minutes)







Magellanic SNR N49
(Sano et al. 2023, ApJ, 958, 53)

Image: ALMA CO(3–2)
Contours: Chandra X-rays

ASTE / ALMA を用いた超新星残骸の探究

佐野 栄俊（岐阜大学）

MAKE NEW STANDARDS.
東海国立大学機構
GIFU UNIVERSITY

最終目標: 星間空間における全ての物理過程の解明

超新星残骸 (Supernova remnant: SNR)

- 大質量星、またはある種の連星系の一生の最期の大爆発で作られる高温膨張ガス球
- 秒速 ~3,000–10,000 km の衝撃波
- 重元素や宇宙線の供給源

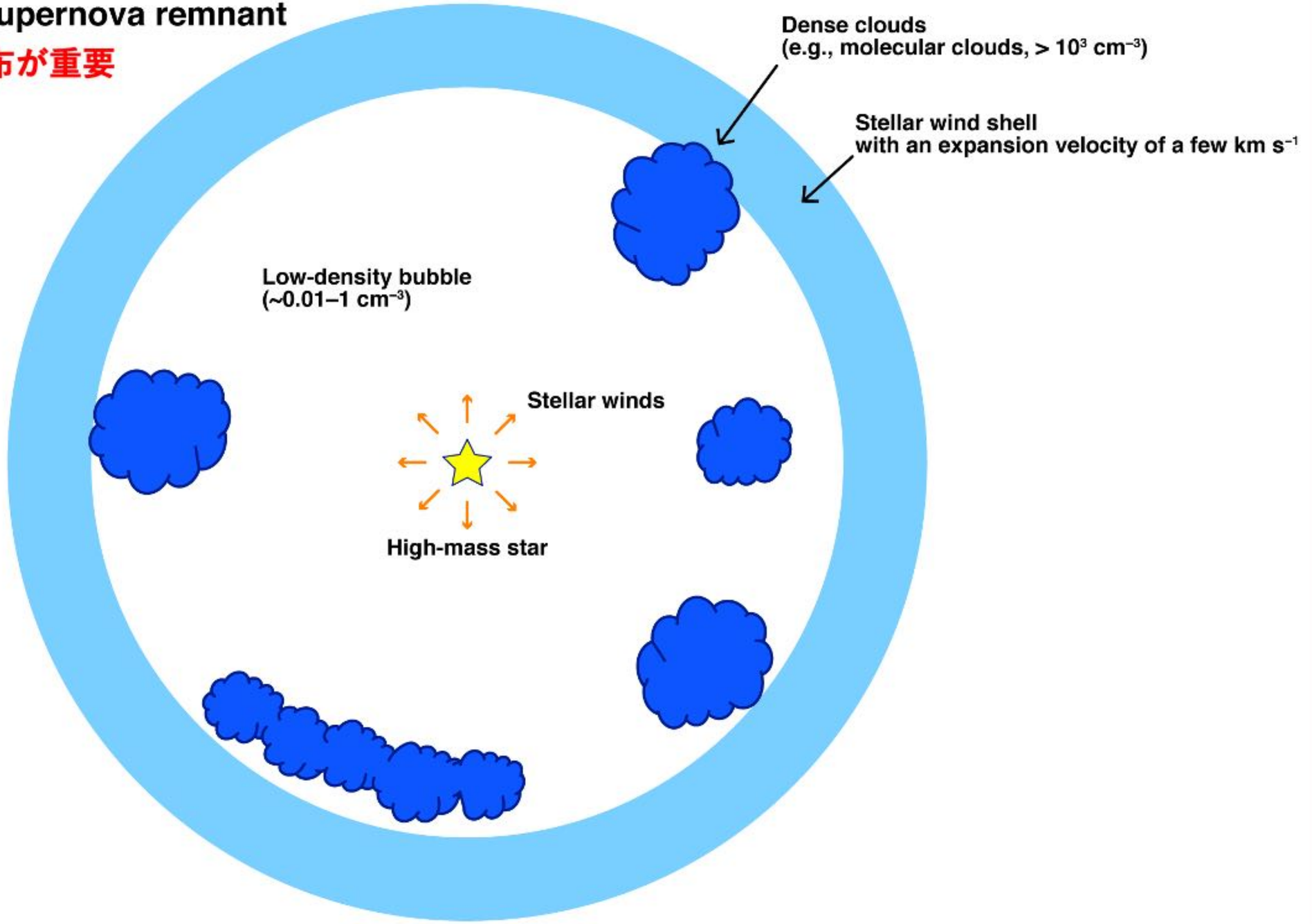
星間物質や銀河の進化 (おそらく星形成も)
を解き明かすうえで本質的な物理現象





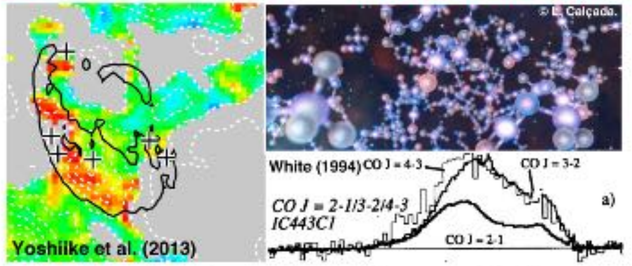
Physical processes in a supernova remnant

星間ガスの非一様(粒状)分布が重要

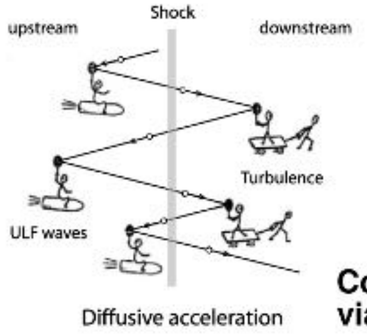


Physical processes in a supernova remnant

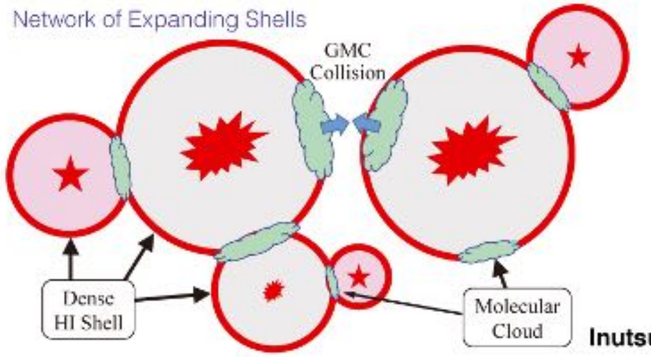
星間ガスの非一様(粒状)分布が重要



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

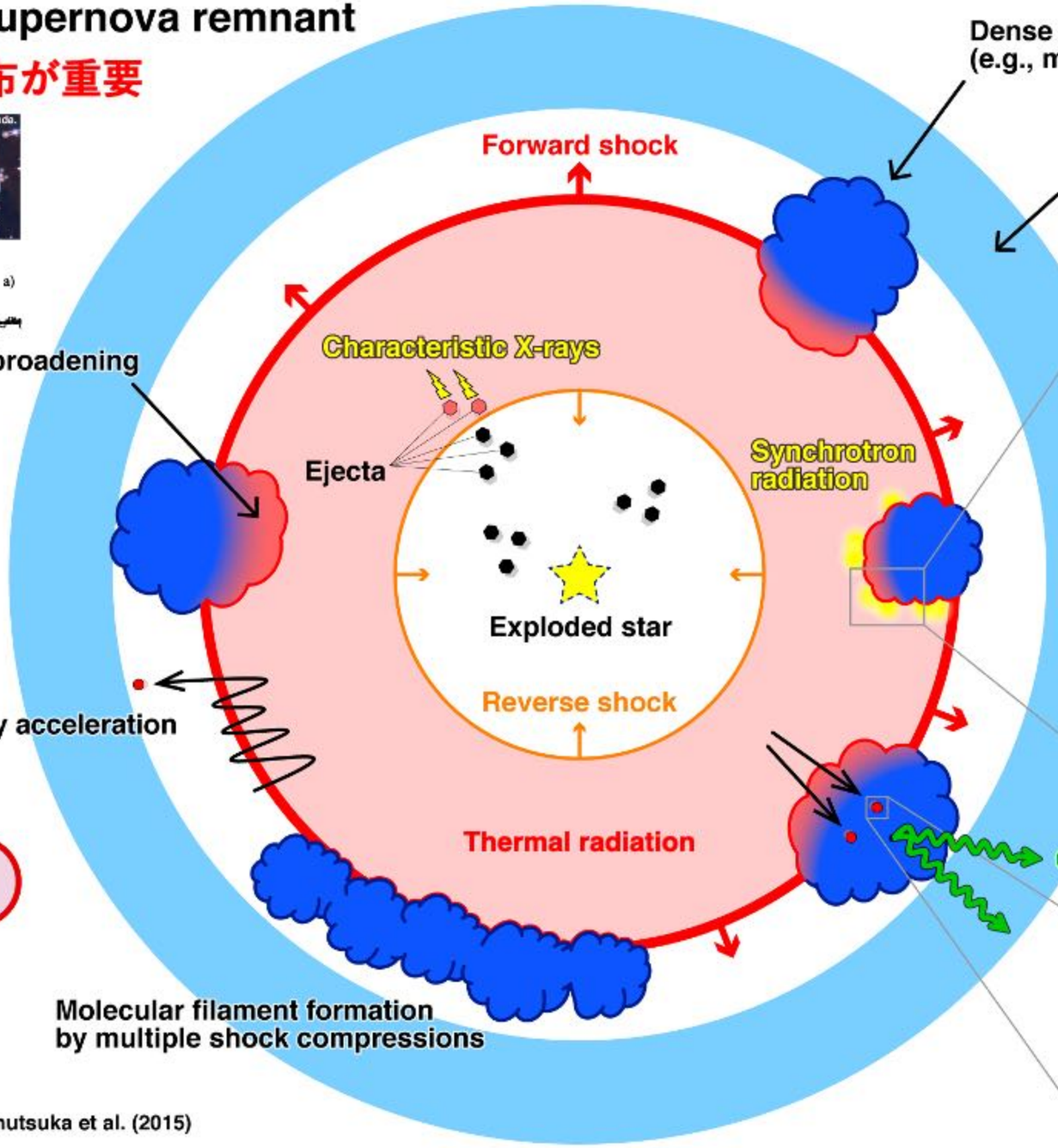


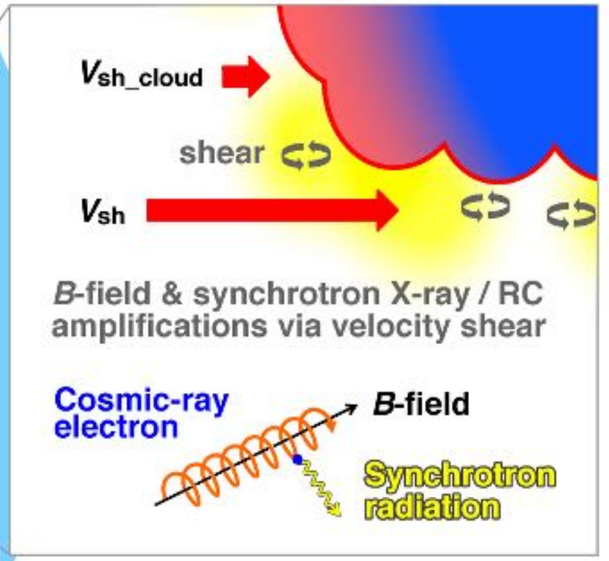
Cosmic-ray acceleration via DSA



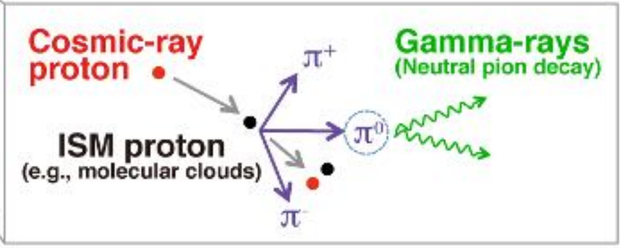
Inutsuka et al. (2015)

Molecular filament formation by multiple shock compressions



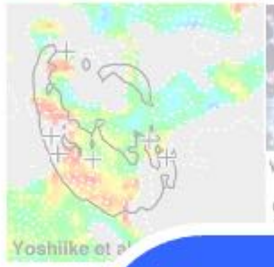


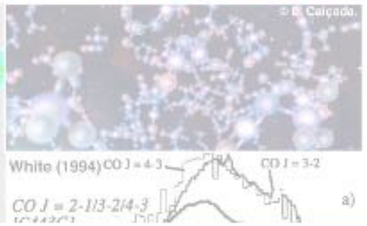
The total energy of cosmic-ray protons



Physical processes in a supernova remnant

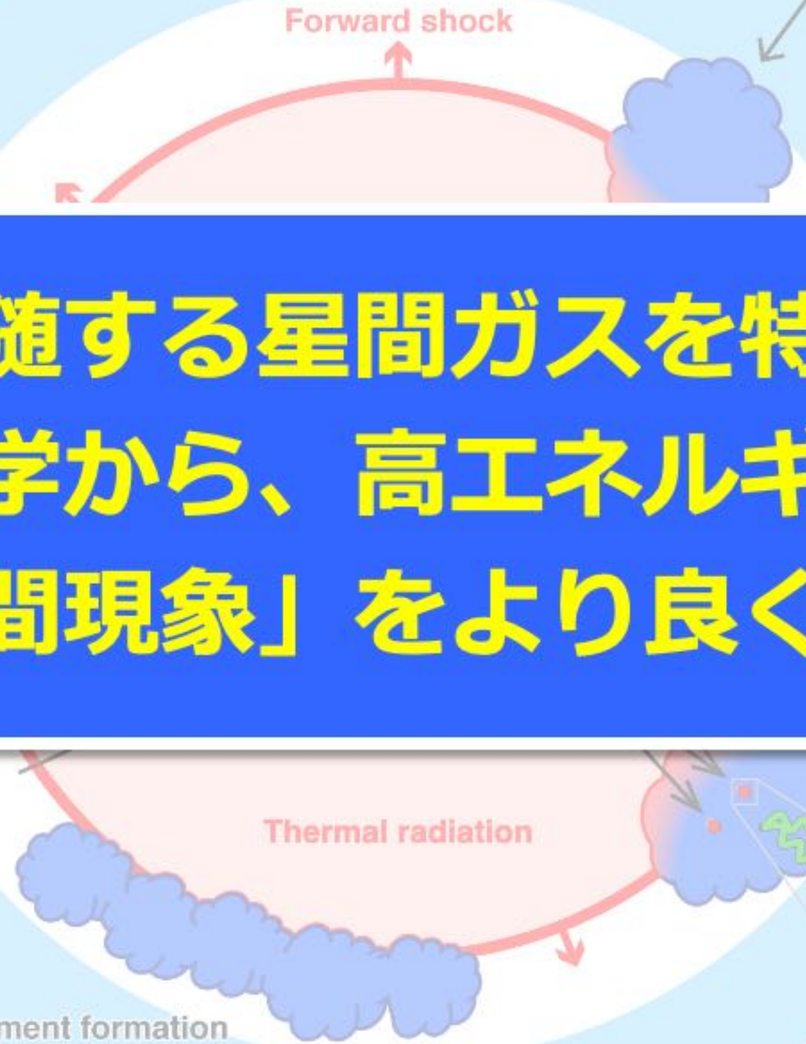
星間ガスの非一様(粒状)分布が重要



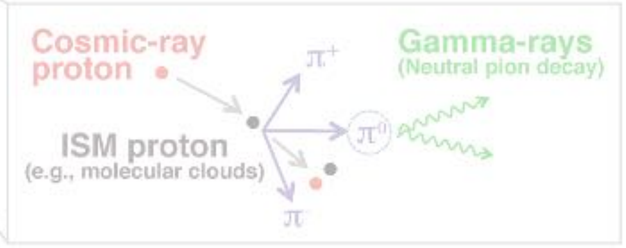


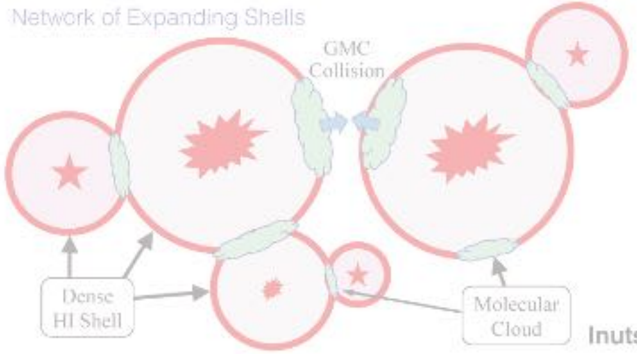
Partia
+ che
+ CI
+ Re

超新星残骸に付随する星間ガスを特定することで
星形成や星間化学から、高エネルギー物理に至る
多様な「星間現象」をより良く理解する



The total energy of cosmic-ray protons

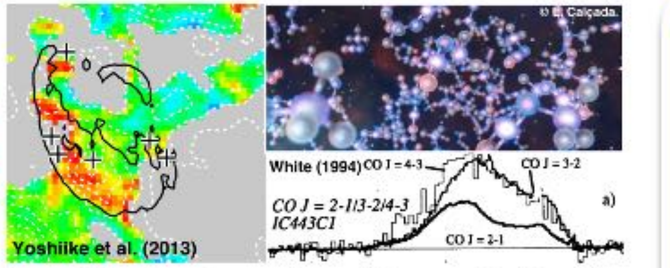




Molecular filament formation
by multiple shock compressions

Inutsuka et al. (2015)

Shock- and/or CR induced chemistry & astrophysics

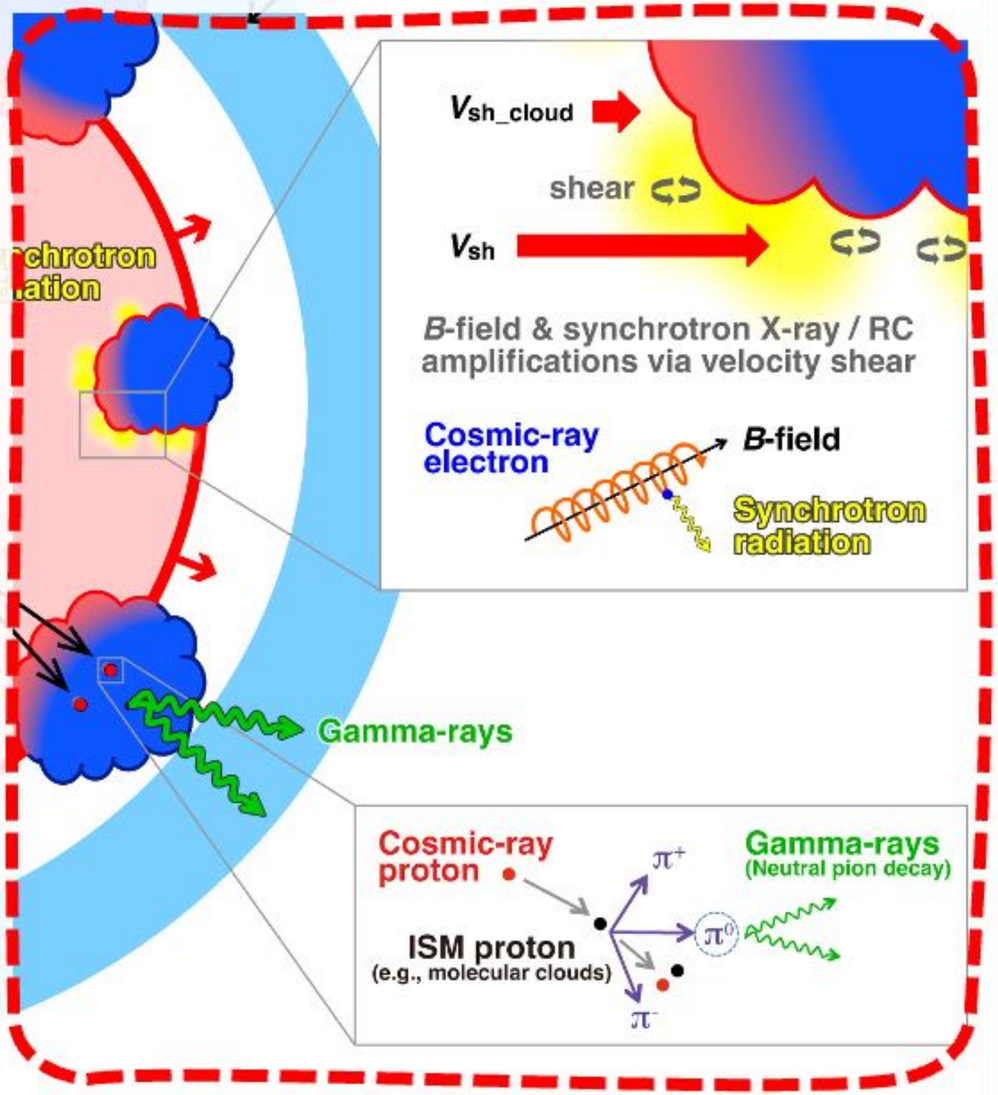


Partially heating of gas/dust with line broa
+ chemical evolution of the ISM
+ CI chemistry in the vicinity of SNRs

井上さん: LMC N157B
(ALMA synergy)

泉さん: LMC N63A
([CI] CR/FUV chemistry)

The origin of CRs



ASTE を用いた最近 (2017年以降) の SNR 論文

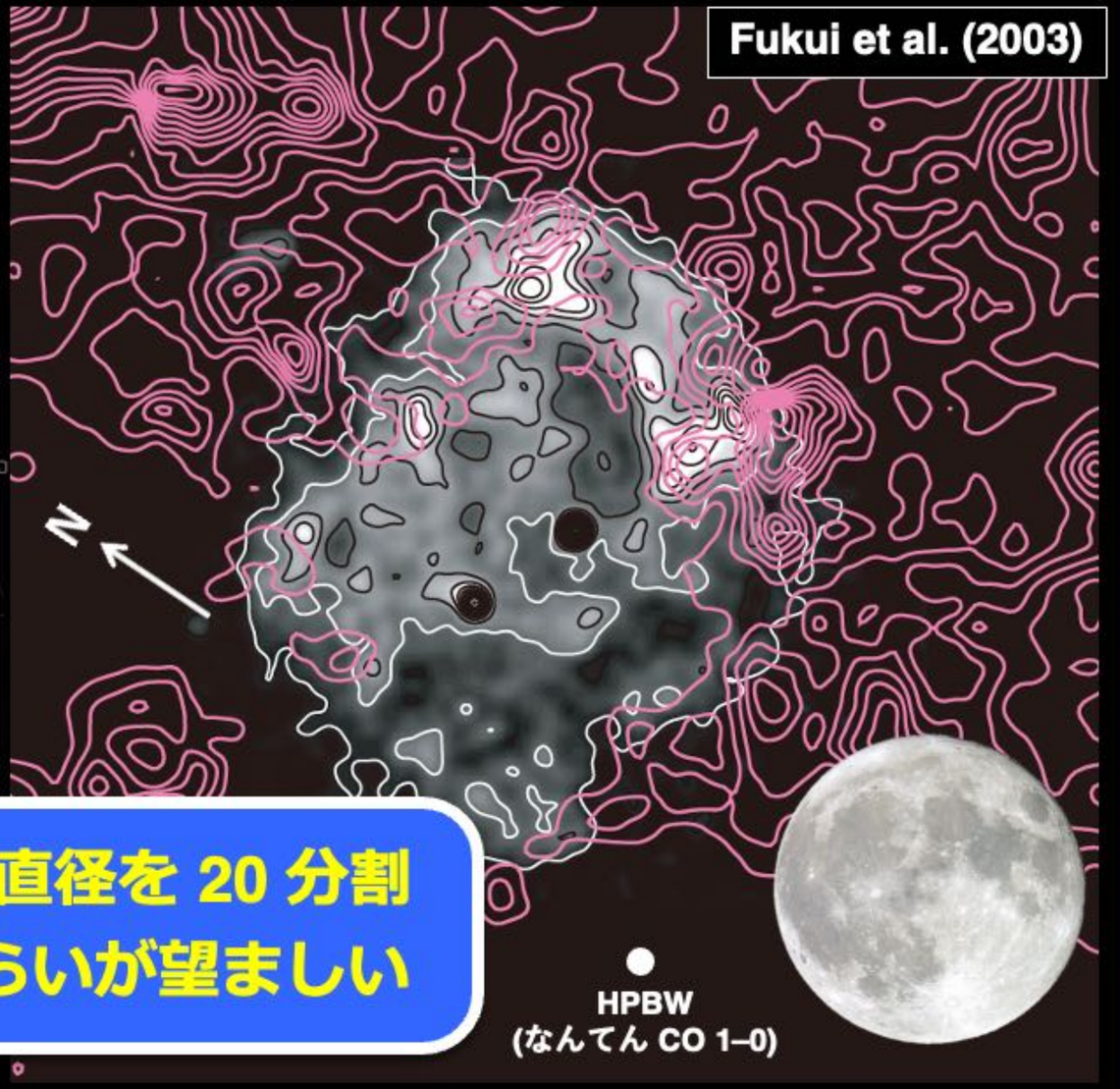
- Sakemi et al. (2023), PASJ, 75, 338 → NRO45 (W50)
- Yamagishi, Sano et al. (2023), PASJ 75, 883 → NRO45 (W51)
- Sano, Furuya et al. (2023), ApJ, 958, 53 → ALMA (LMC N49)
- Liu, Hu et al. (2022), MNRAS,510, 4952 → Archival data (W44)
- Sano & Fukui, (2021), Ap&SS, 366, 58 → ALMA (Invited review)
- Yamane, Sano et al. (2021), ApJ, 918, 36 → ALMA (LMC 30 Dor C)
- Tanaka et al. (2021), ApJ, 915, 79 → NRO45 (Sgr A East)
- Sano, Plucinsky et al. (2020), ApJ, 902, 53 → ALMA (LMC N132D)
- Sano, Matsumura et al. (2019), ApJ, 881, 85 → Mopra (SMC RXJ0046)
- Sano, Matsumura et al. (2019), ApJ, 873, 40 → ALMA (LMC N63A)
- Sano, Yamane et al. (2018), ApJ, 867, 7 → ALMA (LMC N103B)
- Yamane, Sano et al. (2021), ApJ, 863, 55 → ALMA (LMC N49)
- Yamada, Oka et al. (2017), ApJL, 834, 3 → NRO45 (W44)

単一鏡観測による超新星残骸研究の到達点と展望

「なんてん」および「NANTEN2」を用いた単一鏡観測により，
視直径の大きな天体 (~ 1 度角) に付随する星間雲が特定され，
超新星残骸における物理過程の理解が大幅に促進された．
→ 詳しくは, レビュー論文 (Sano & Fukui 2021) を参照:D



画像: 天の川想像図 [NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC/Caltech)]
● 単一鏡観測で付随ガス定量済みのガンマ線超新星残骸



**SNR の視直径を 20 分割
できるくらいが望ましい**

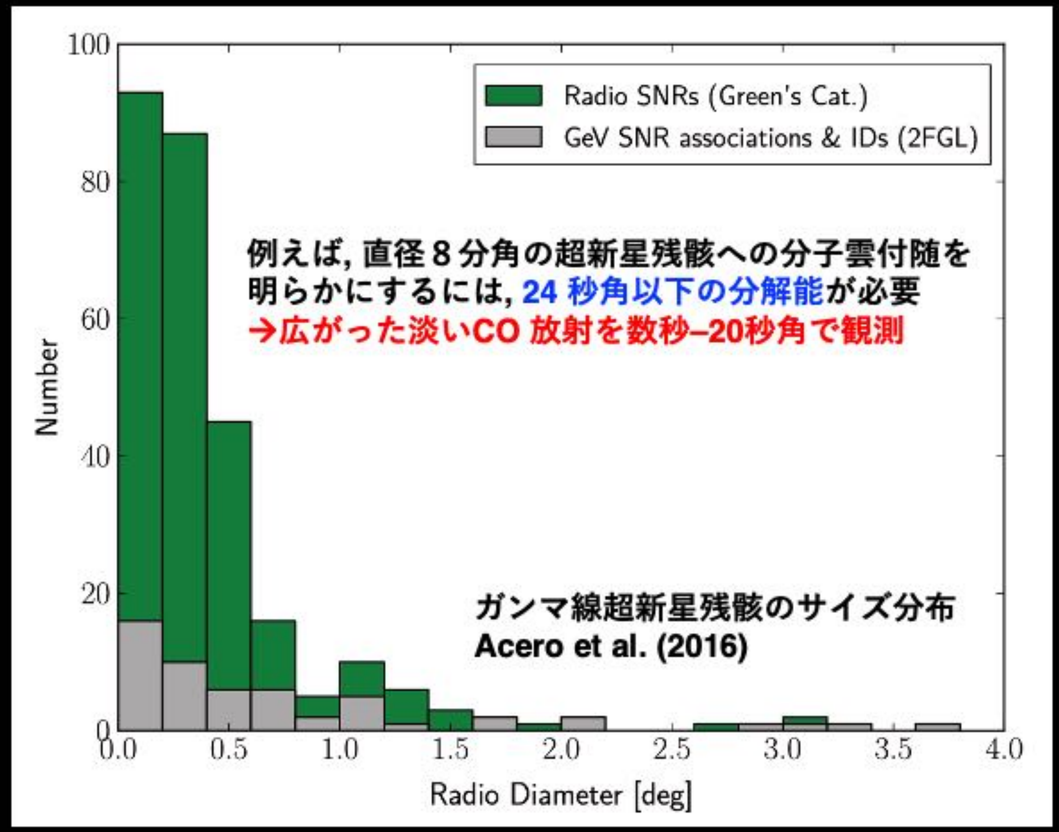
Image: *ROSAT* X-rays
Contours: NANTEN CO(1–0) [$\Delta\theta$~2.6', ~0.8 pc@1 kpc]

単一鏡観測による超新星残骸研究の到達点と展望

「なんてん」および「NANTEN2」を用いた単一鏡観測により，
視直径の大きな天体 (~ 1 度角) に付随する星間雲が特定され，
超新星残骸における物理過程の理解が大幅に促進された．
→ 詳しくは, レビュー論文 (Sano & Fukui 2021) を参照:D



画像: 天の川想像図 [NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC/Caltech)]
● 単一鏡観測で付随ガス定量済みのガンマ線超新星残骸

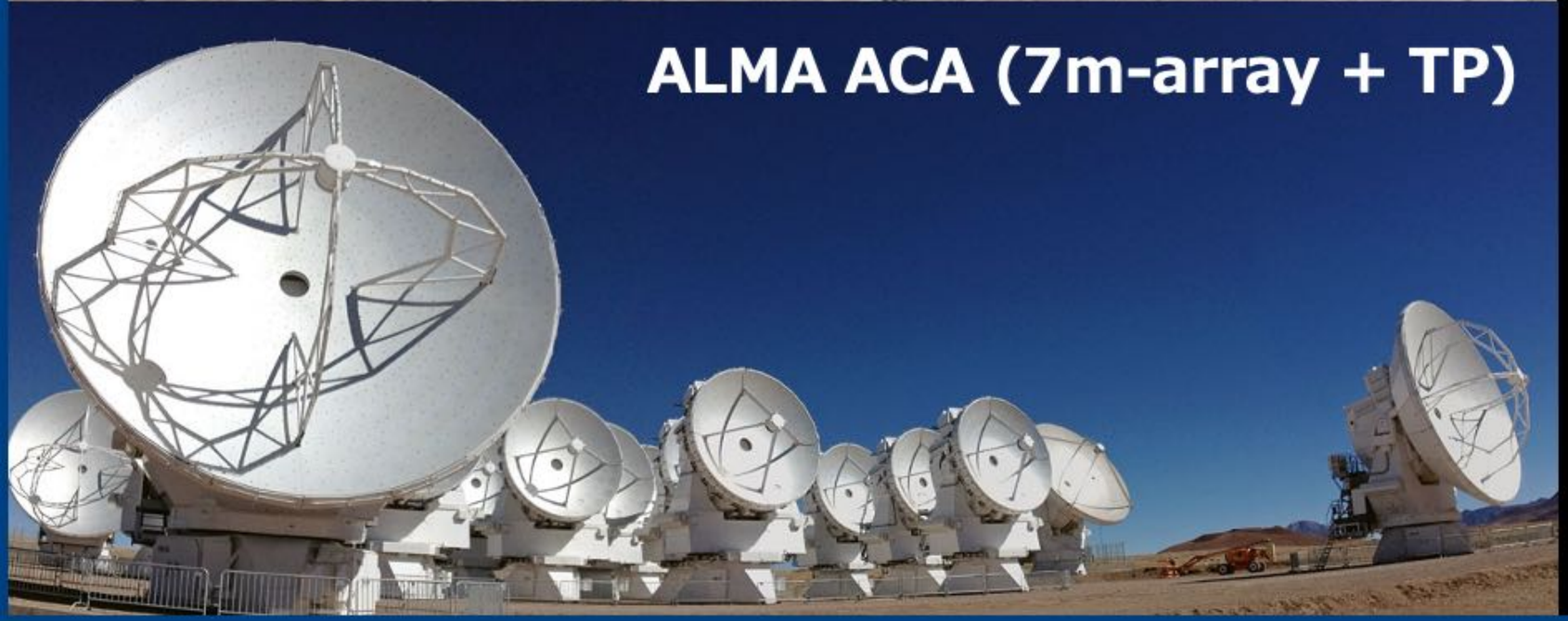


今後の展望

1. 研究対象を銀河全体あるいは系外銀河に拡張
   → 現象の普遍性やダイバーシティを理解する
2. 付随分子雲の**物理量・化学状態**にアプローチ

ASTE / ALMA を用いた超新星残骸の探究





ASTE 10-m

- 南半球の 10-m 級のサブミリ望遠鏡の中で,
  日本人が唯一アクセス可能な単一鏡望遠鏡!!
- CO(3–2) [$\Delta\theta$ ~22"]
  CO(4–3), [CI](1–0) [$\Delta\theta$ ~17"]
  CO(7–6), [CI](2–1) [$\Delta\theta$ ~ 8"]

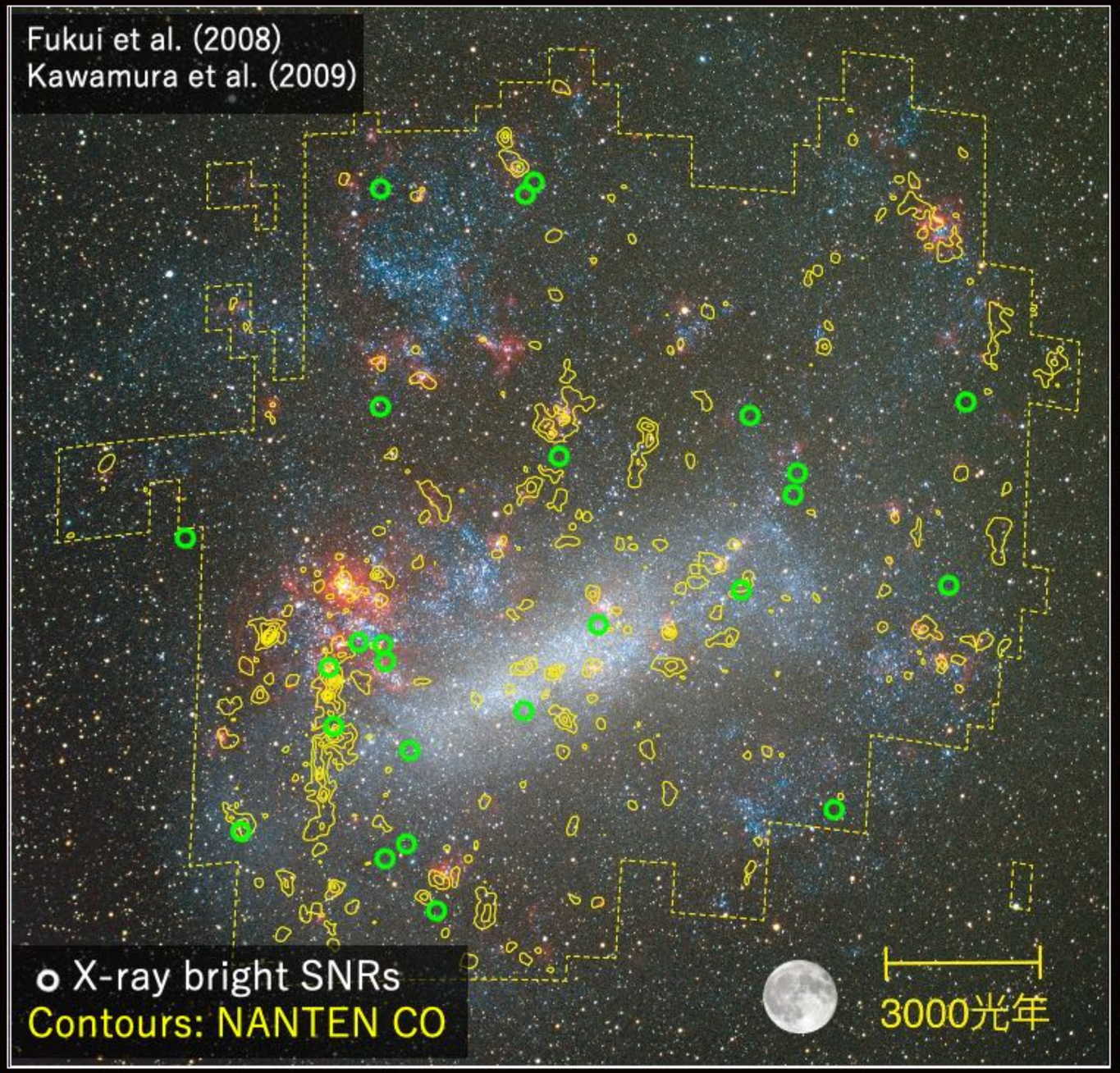
ALMA Band 10 TP が提供されていないため,
ASTE Band 10 TP が今後大事になってくる!?

ALMA ACA

- ACA stand-alone mode で見える世界は,
  ASTE との相性がバツグン!!
- Band 3 CO(1–0) [$\Delta\theta$ ~12“]
  Band 6 CO(2–1) [$\Delta\theta$ ~ 6”]
  Band 7 CO(3–2) [$\Delta\theta$ ~ 4“]

ASTE のデータをもとにした ALMA フォローアップ観測をしつつ, ASTE + ALAM ACA で先駆的な研究を進めることができるはず...!!

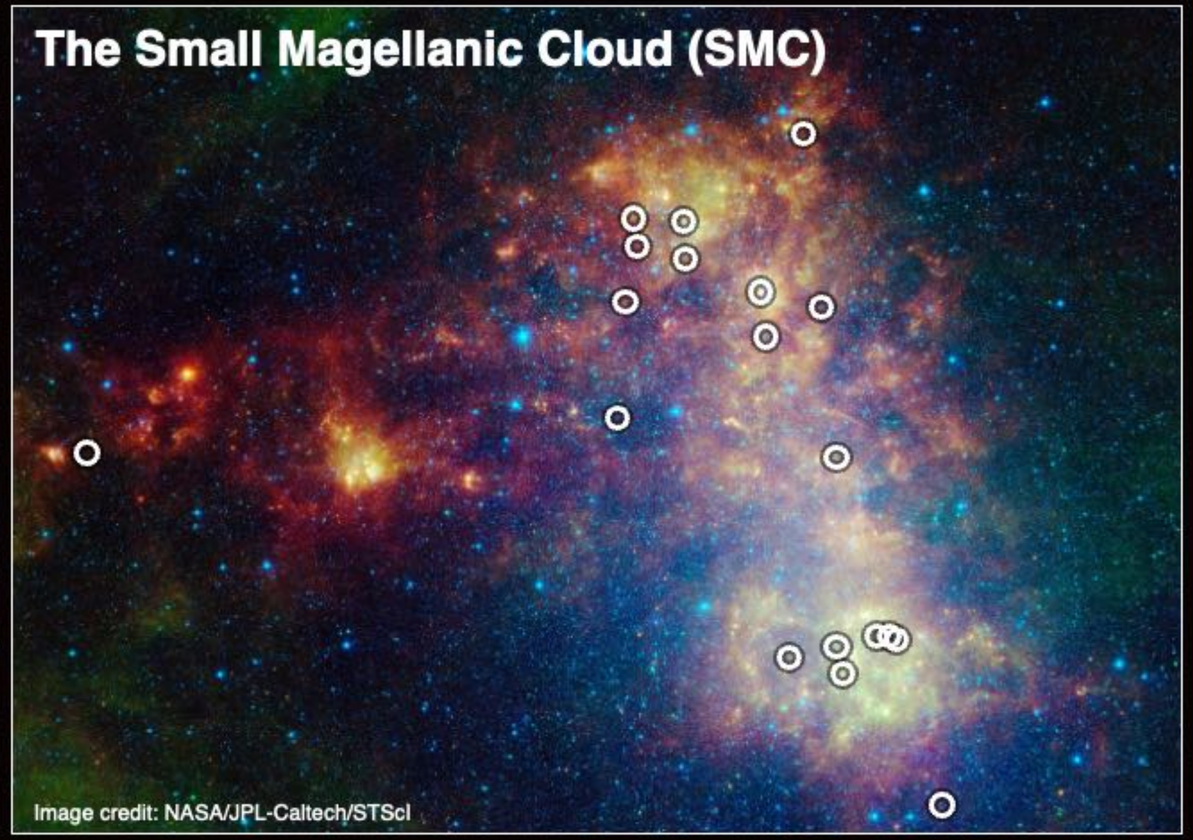
Supernova Remnants in the Magellanic Clouds



1. **Well-known distance**
   50 ± 1.3 kpc for the LMC (Pietrzyński et al. 2013)
   ~ 60 kpc for the SMC (Hilditch et al. 2005)

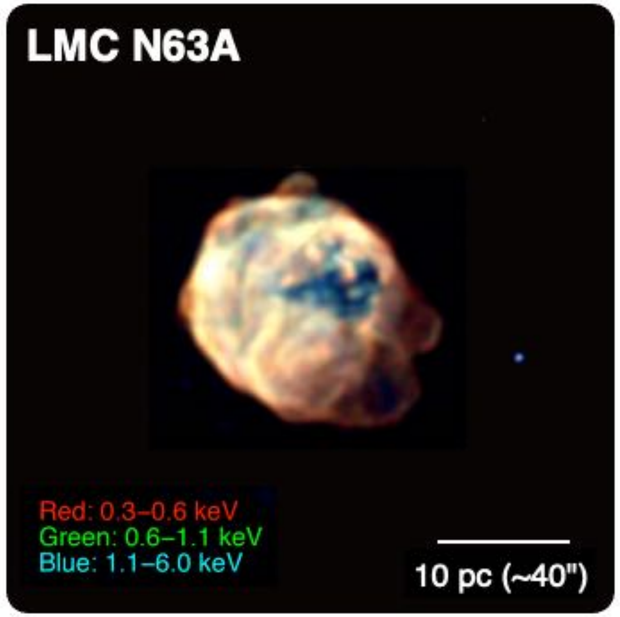
2. **Low ISM metallicity**
   ~0.3–0.5 $Z_\odot$ for the LMC (Westerlund 1997)
   ~0.05–0.2 $Z_\odot$ for the SMC, (Russell & Dopita 1992; Rolleston et al. 1999)

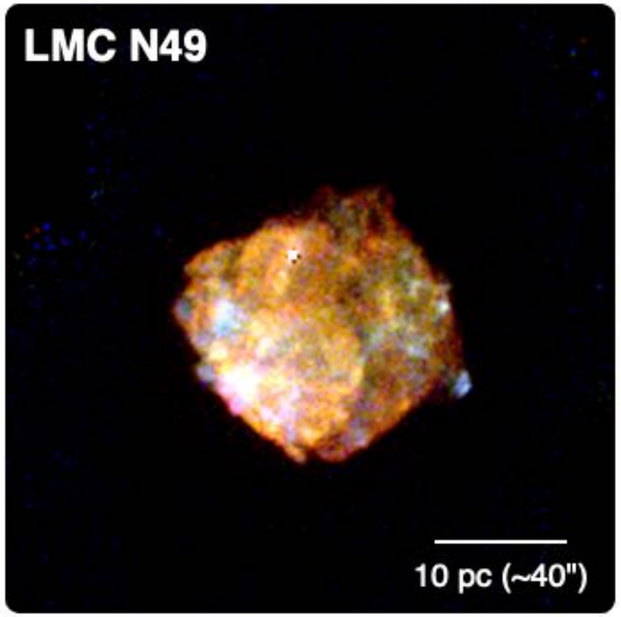
3. **Smaller contamination along the line of sight**

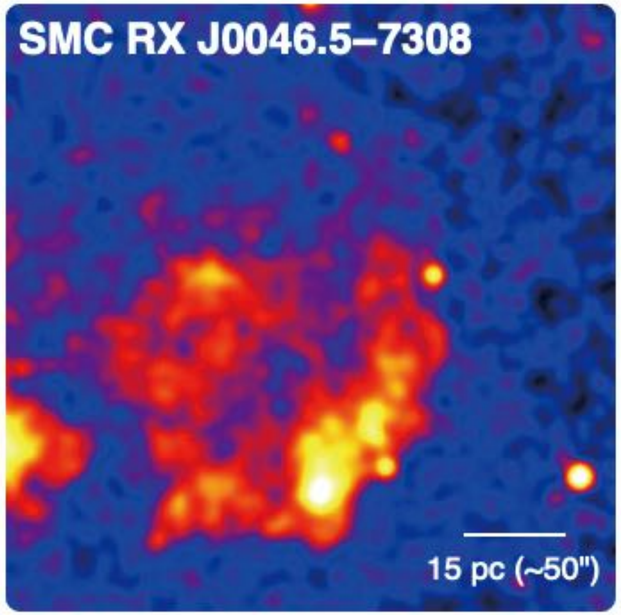


X-ray views of the Magellanic SNRs

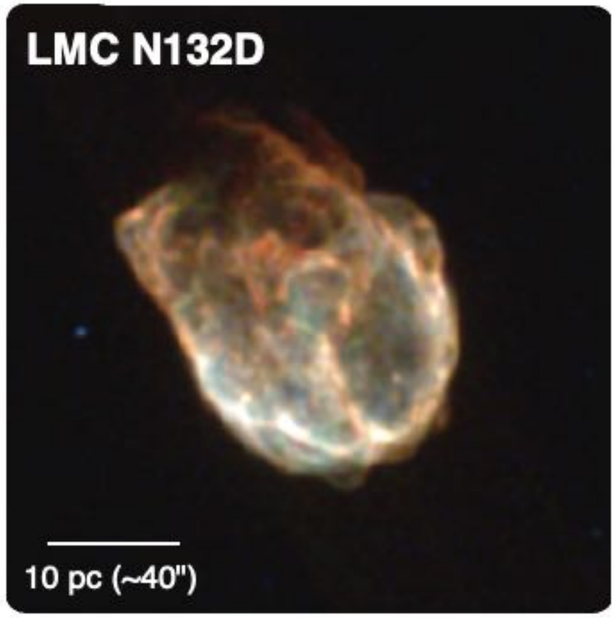
Images: X-ray images obtained using Chandra or XMM-Newton

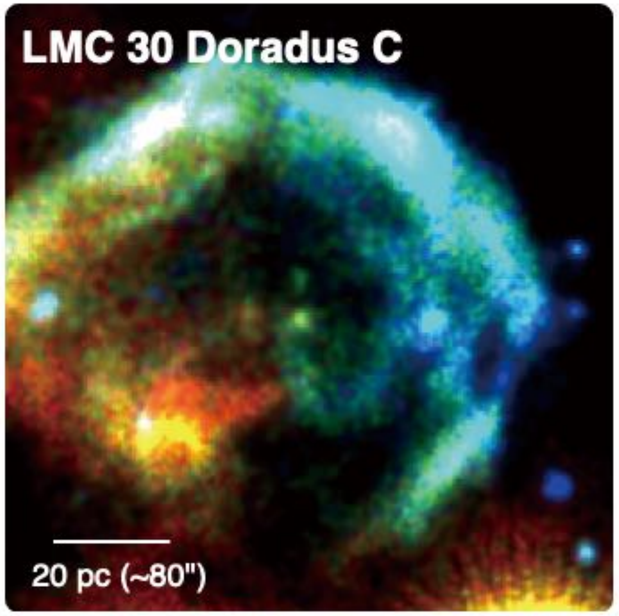


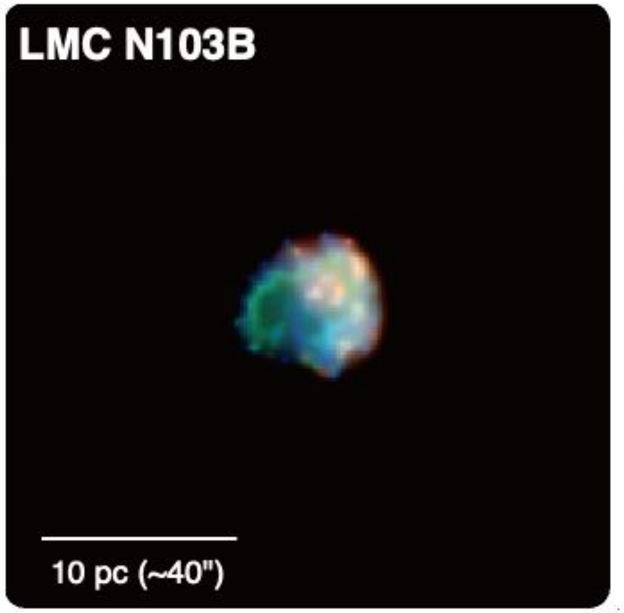










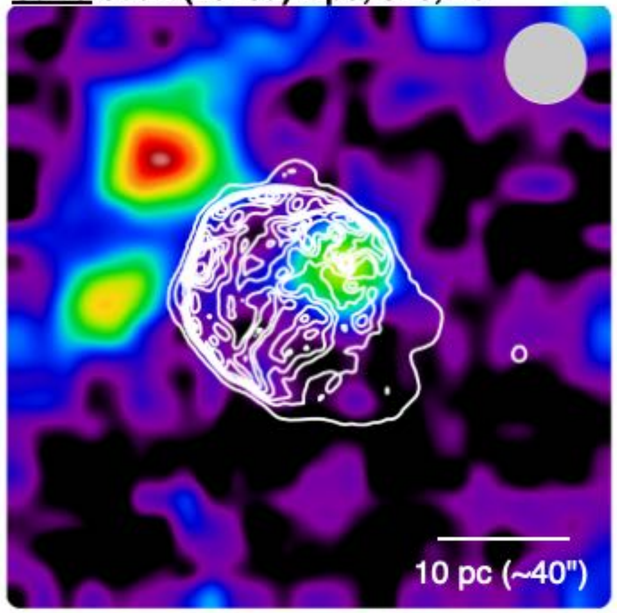




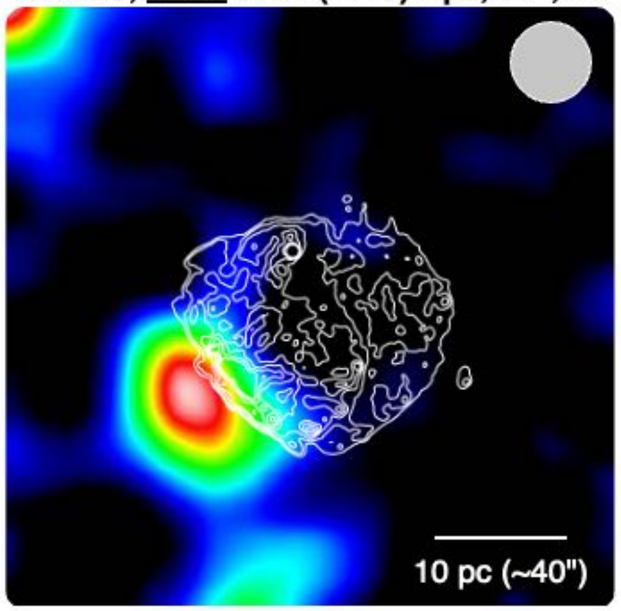
ASTE CO results toward the Magellanic SNRs

Image: ASTE ^{12}CO(J = 3–2)
Contours: *Chandra* X-rays

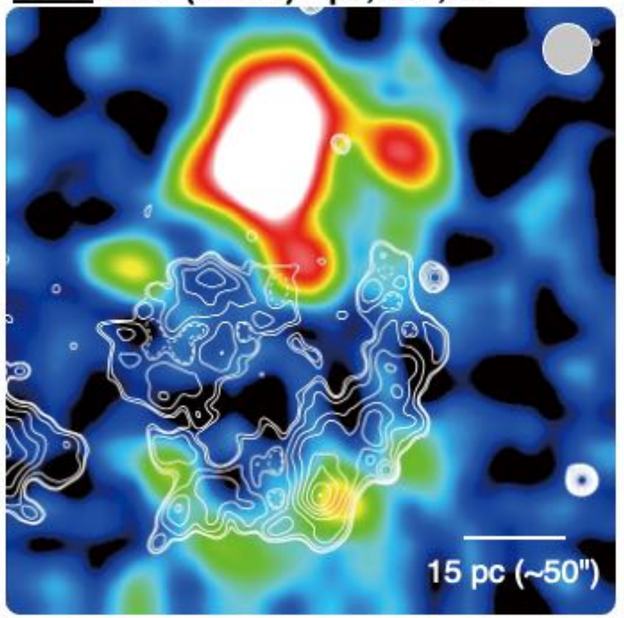
Sano et al. (2019a) ApJ, 873, 40



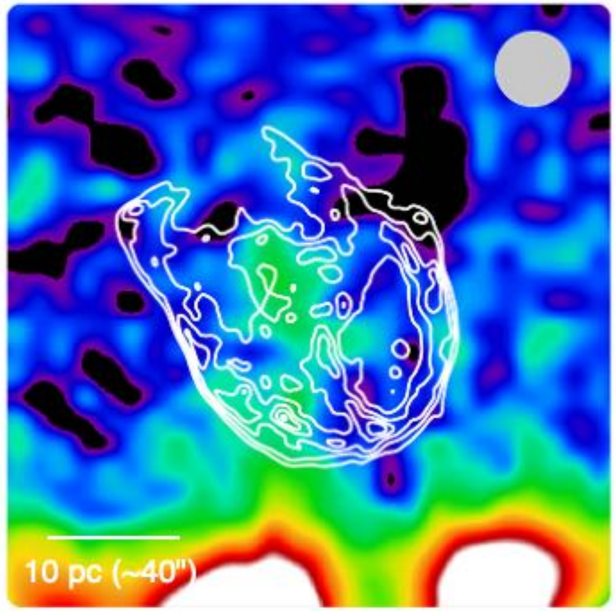
Yamane, Sano et al. (2018) ApJ, 864, 12



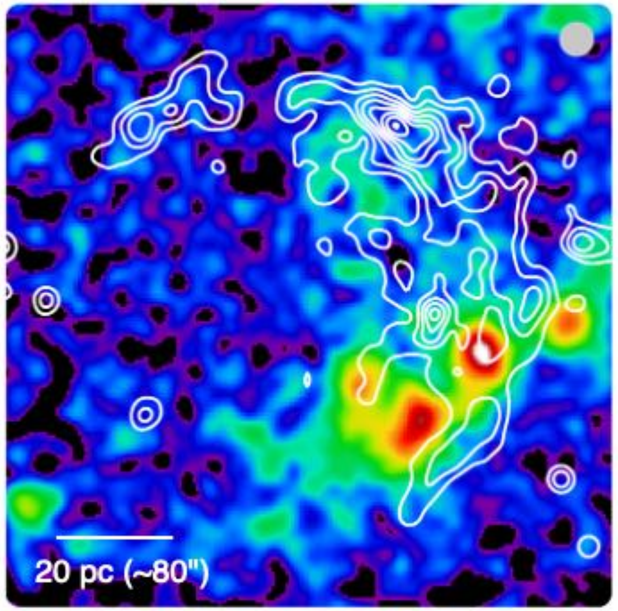
Sano et al. (2019b) ApJ, 881, 85



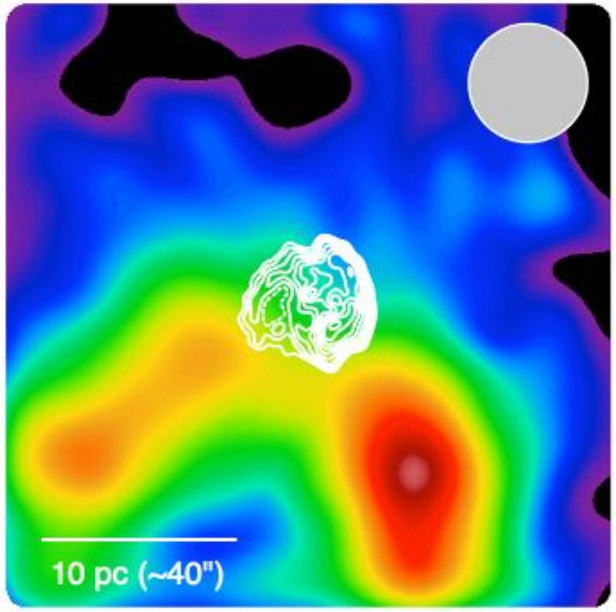




Sano et al. (2020) ApJ, 902, 53



Yamane, Sano et al. (2021) ApJ, 916, 36

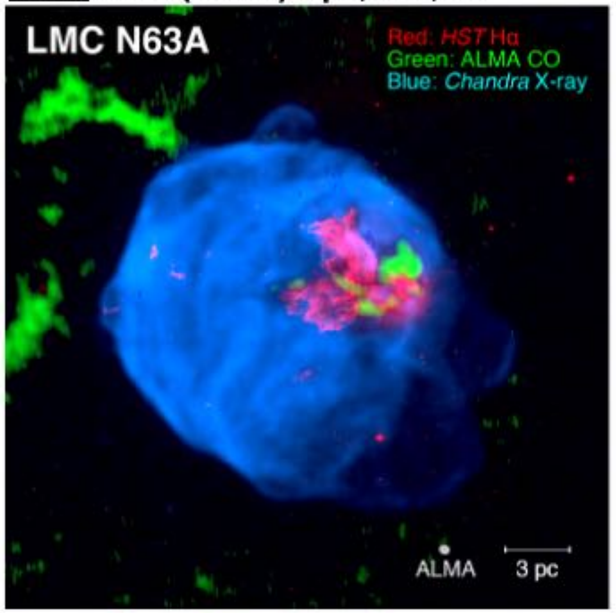


Sano et al. (2018) ApJ, 867, 7

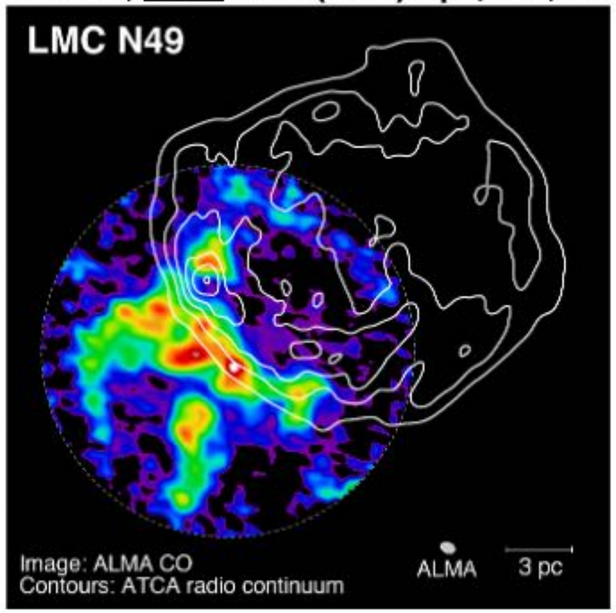


ALMA CO results toward the Magellanic SNRs

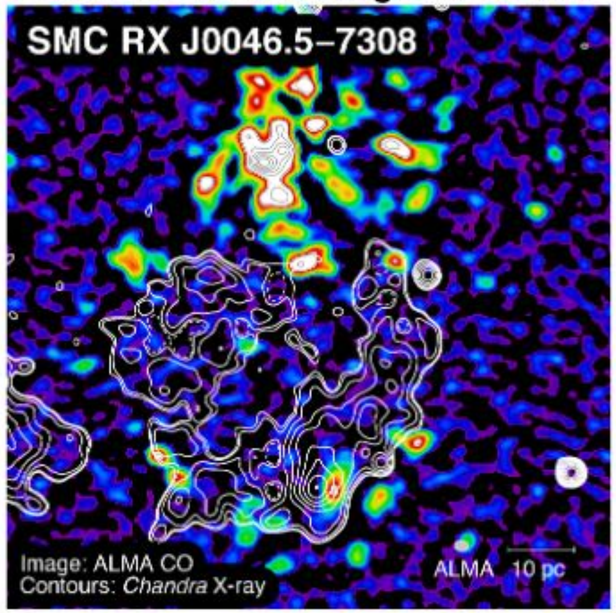
Sano et al. (2019a) ApJ, 873, 40



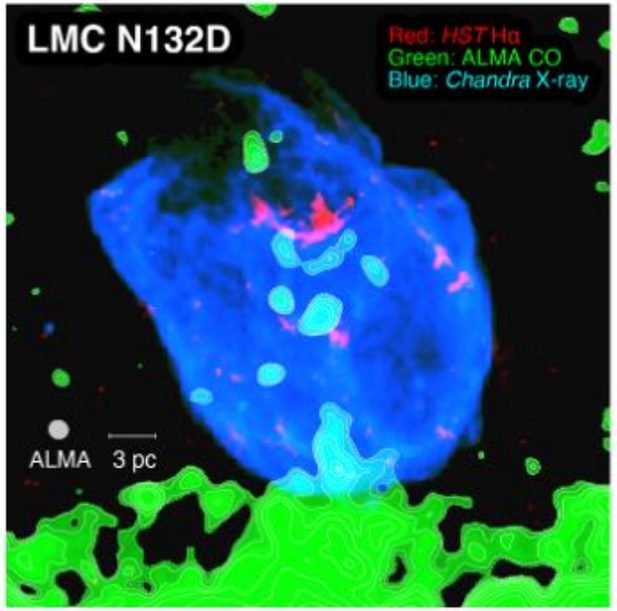
Yamane, Sano et al. (2018) ApJ, 864, 12



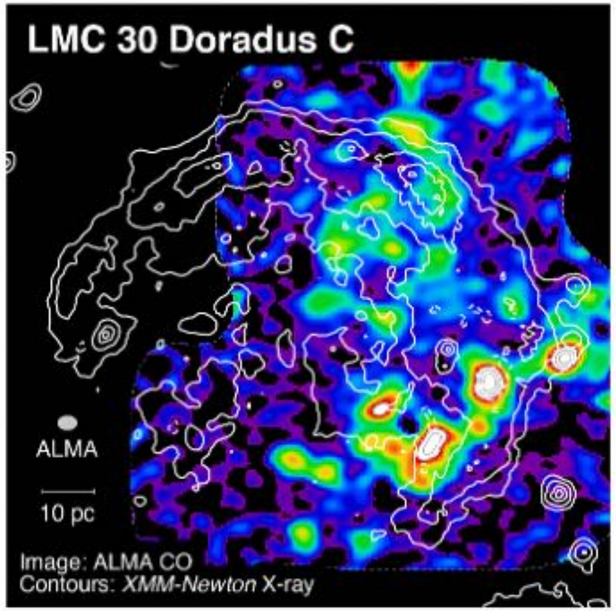
From archival data using ACA Band 6



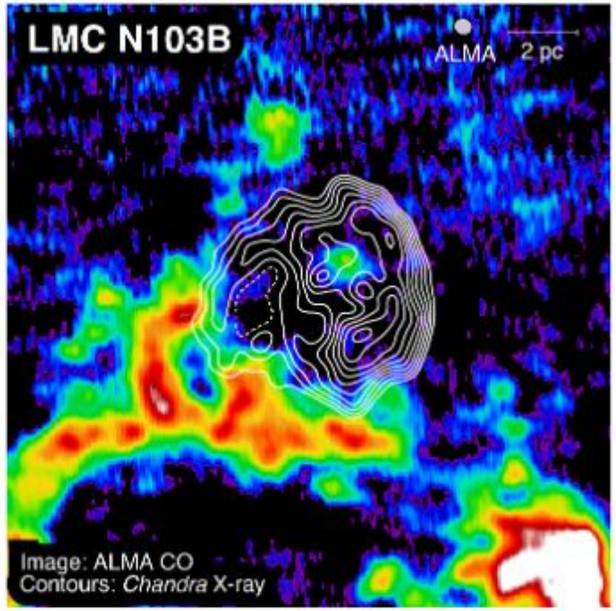




Sano et al. (2020) ApJ, 902, 53



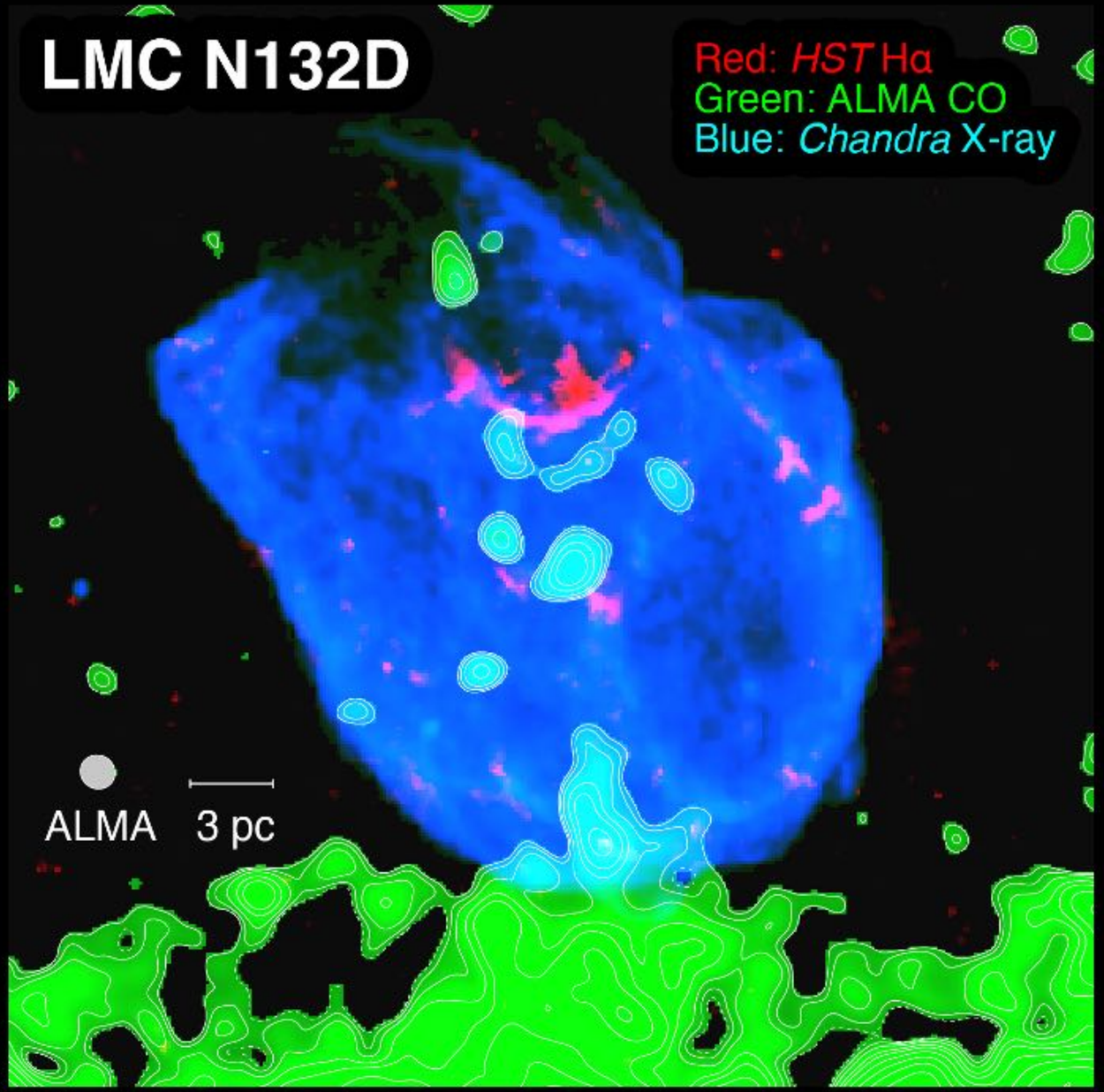
Yamane, Sano et al. (2021) ApJ, 916, 36



Sano et al. (2018) ApJ, 867, 7



Magellanic SNR N132D

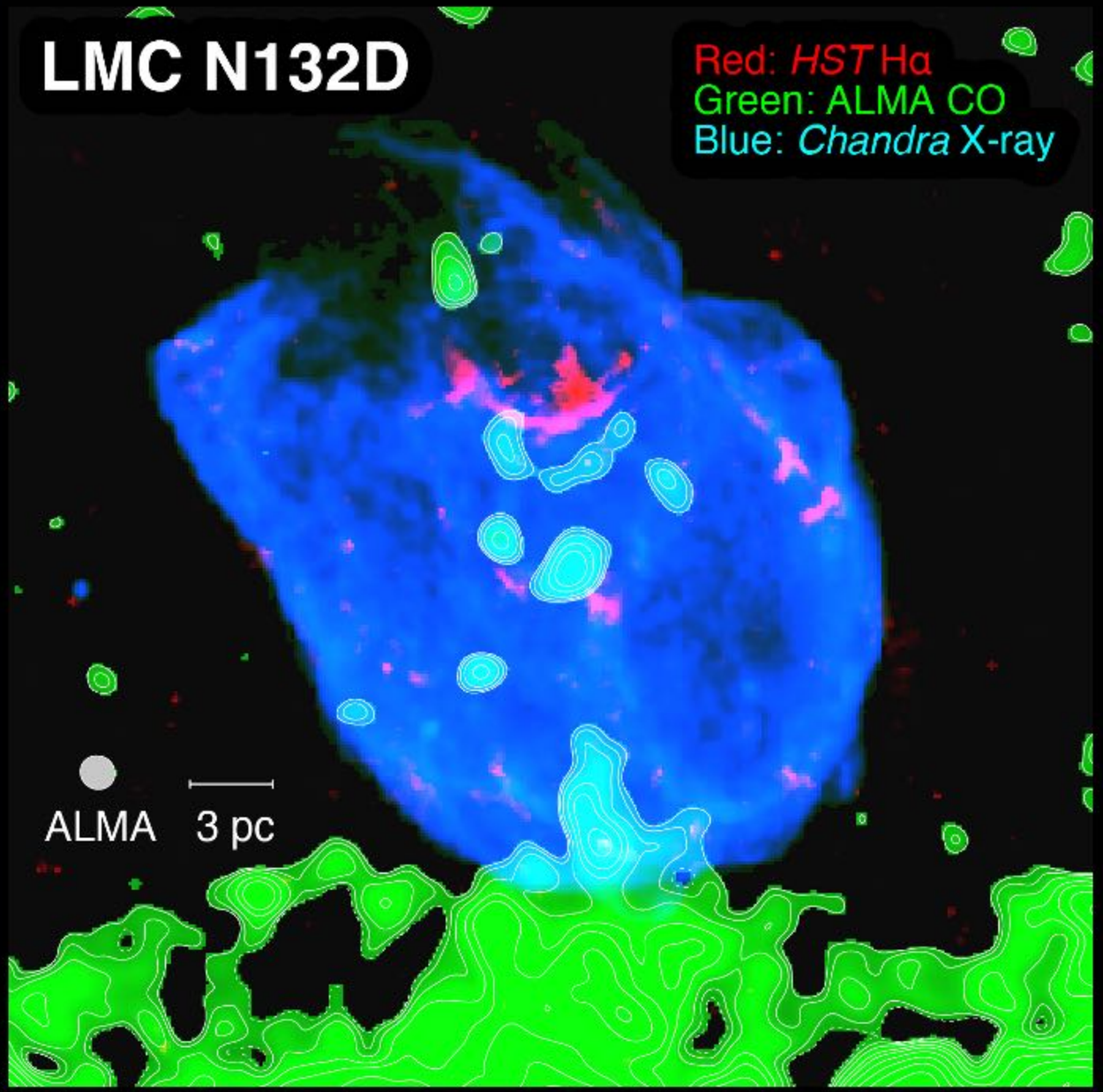


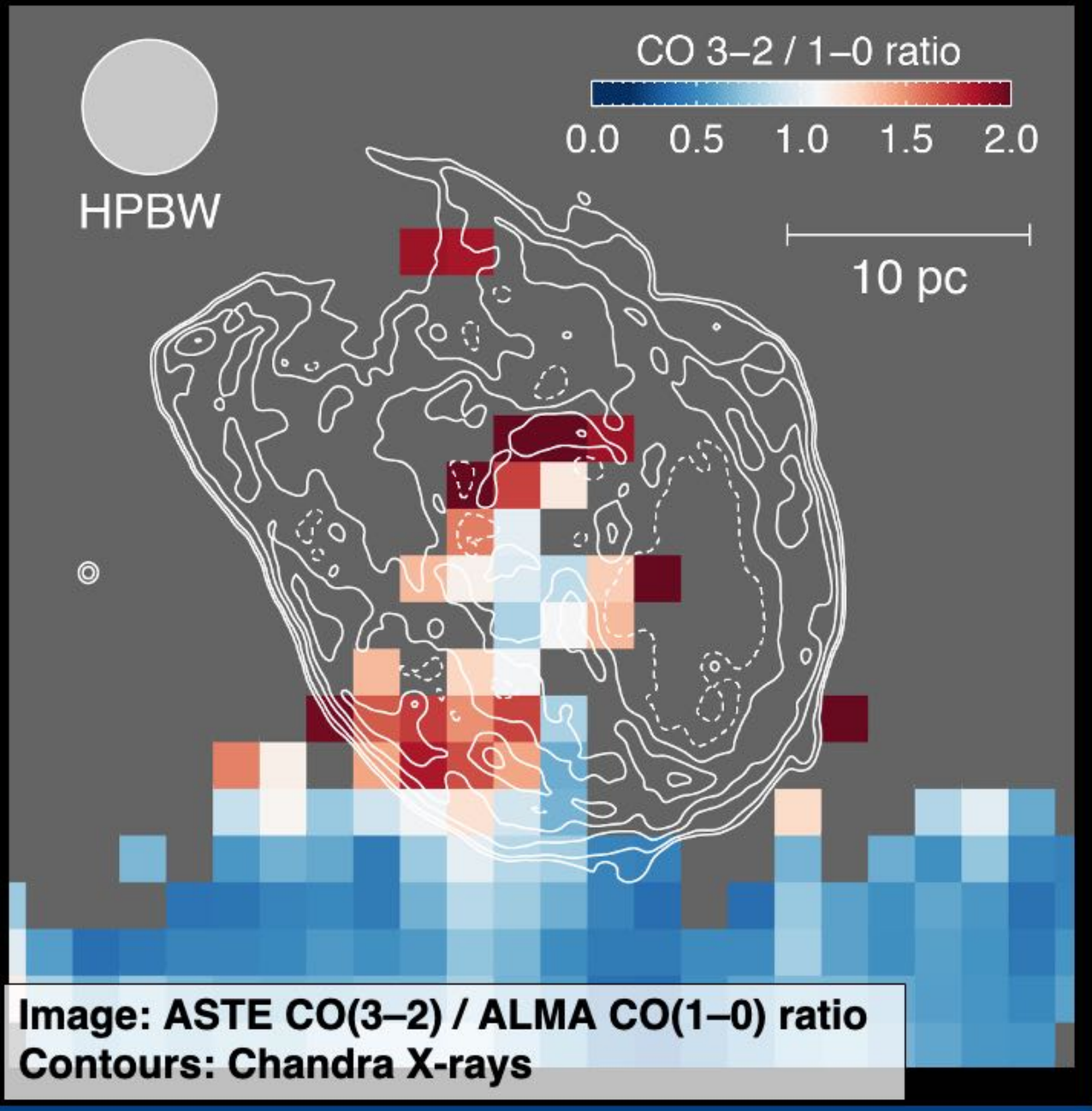
Sano et al. (2020) ApJ, 902, 53

Magellanic SNR N132D

- Core-collapse
  (e.g., e.g., Yamaguchi et al. 2014; Sharda et al. 2020)
- Diameter: ~25 pc (114" × 90")
  (e.g., Bozzetto et al. 2017)
- Age: ~2500 年
  (e.g., Vogt & Dopita 2011; Law et al. 2020)
- O-rich ejecta
  (e.g., Lasker 1978; Blair et al. 2000)
- Bright in Thermal X-rays & GeV gamma-rays
  (e.g., Acero et al. 2020)
- TeV Gamma-ray detected
  non-thermal X-ray $F_{2\text{-}10\ \mathrm{keV}} < 2.0 \times 10^{35}$ erg s^{-1}
  → Likely hadronic gamma-rays
  (H.E.S.S. Collaboration 2015, 2021; Bamba et al. 2018)
- Recombining plasma
  (Bamba et al. 2018; Hitomi Collaboration 2018)
- Molecular cloud interactions
  (Banas et al. 1997; Sano et al. 2015, 2017, 2020)

Magellanic SNR N132D



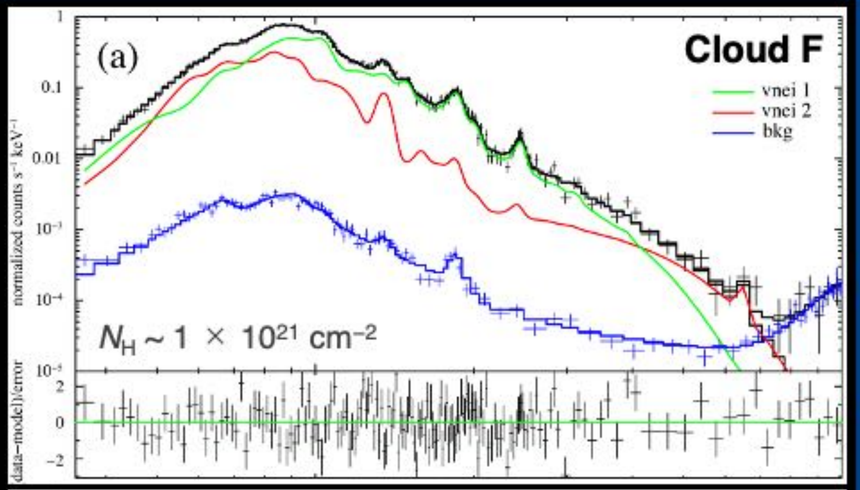


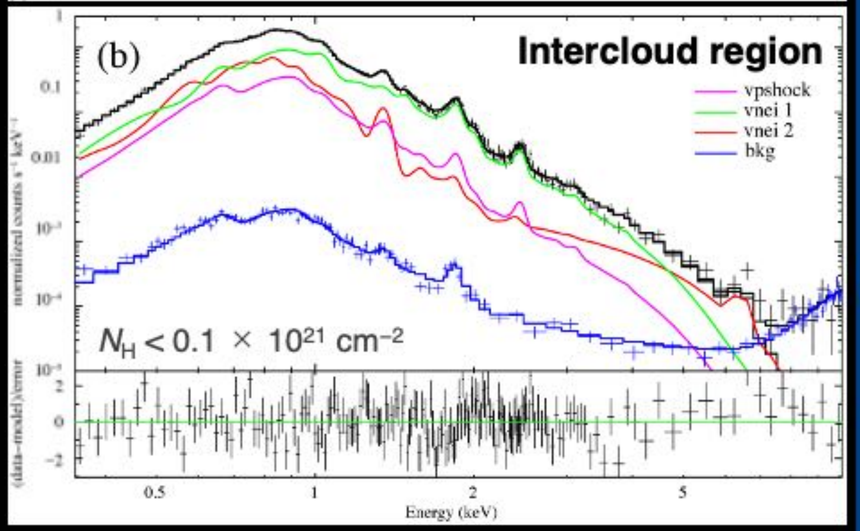
Sano et al. (2020) ApJ, 902, 53

X-ray spectroscopy toward the shocked cloud & intercloud region

Red: 0.35–0.85 keV
Green: 0.85–1.6 keV
Blue: 1.6–6.0 keV

Cloud C
Cloud B
Cloud D
Cloud E
CO Cloud F
Cloud F
X-ray filament
Intercloud region
Cloud G
Cloud H
Cloud I





- Cloud F: CIE + NEI
- Intercloud: CIE + NEI + vpshock

Forward shock has been terminated in Cloud F
➡ The ISM-based X-ray spectroscopy is needed

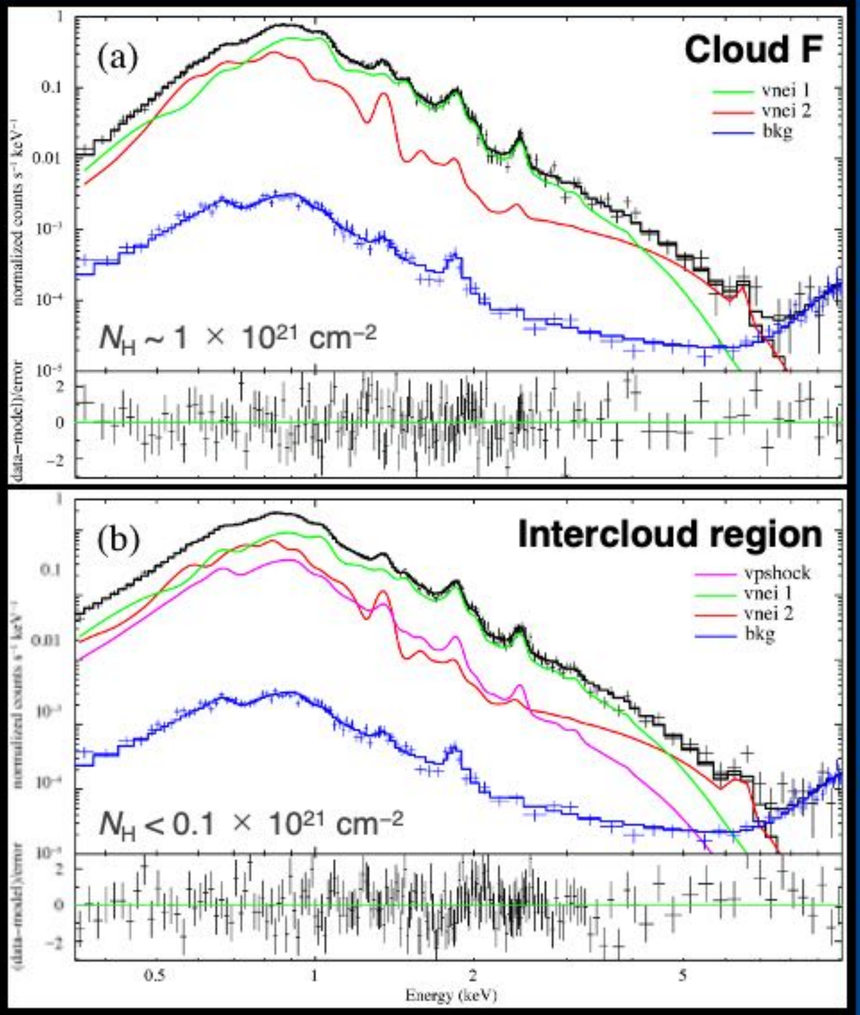
[Japanese KAKENHI grant has been accepted (PI: Sano)]
[Chandra Large proposal has been accepted (PI: Plucinsky, Co-I: Sano)]

X-ray spectroscopy toward the shocked cloud & intercloud region

Red: 0.35–0.85 keV
Green: 0.85–1.6 keV
Blue: 1.6–6.0 keV

Cloud C
Cloud B
Cloud D
Cloud E
Cloud F
CO Cloud F
X-ray filament
Intercloud region
Cloud G
Cloud H
Cloud I

ALMA ACA CO(3–2)

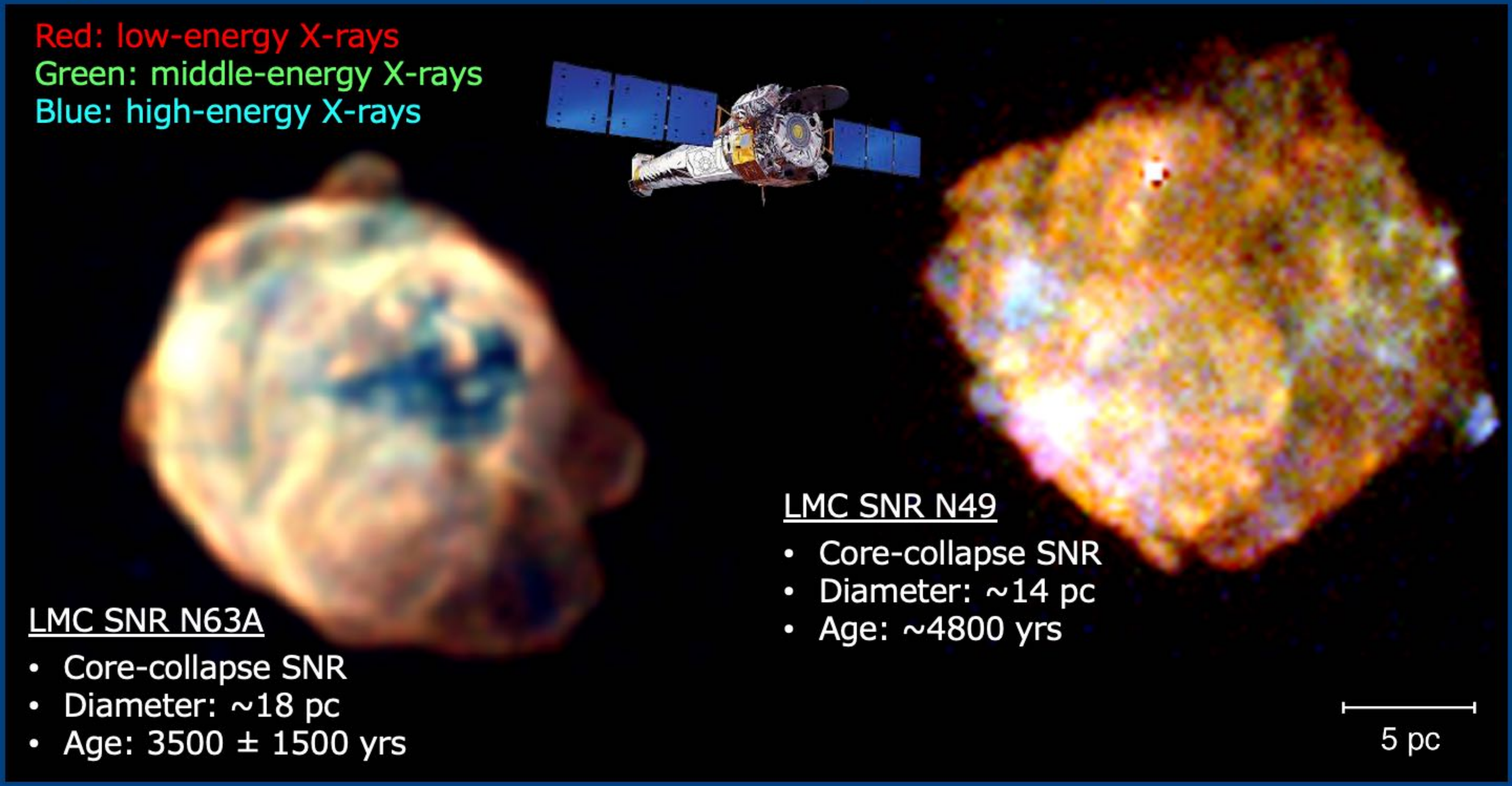


- Cloud F: CIE + NEI
- Intercloud: CIE + NEI + vpshock

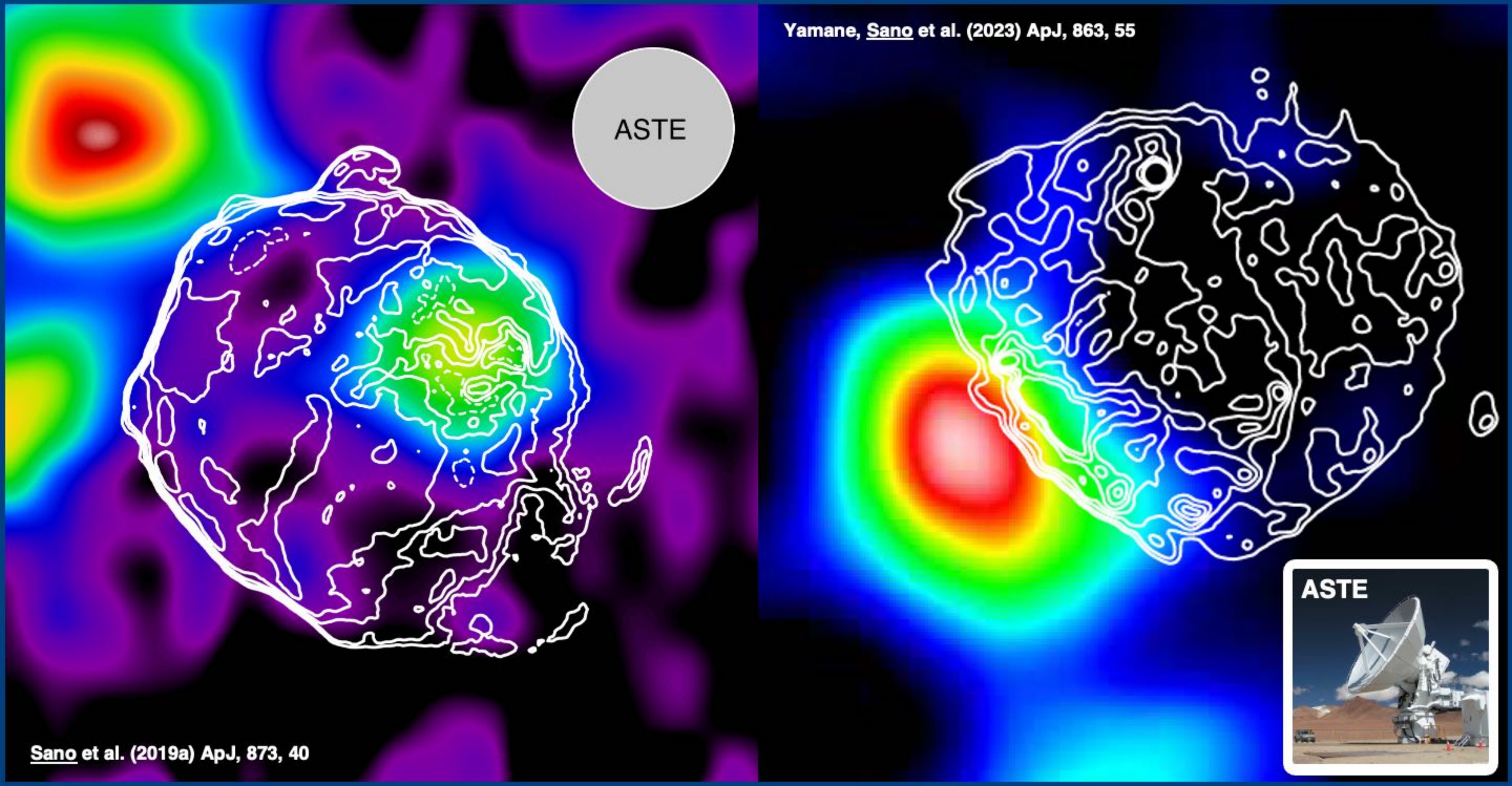
Forward shock has been terminated in Cloud F
➡ The ISM-based X-ray spectroscopy is needed

[Japanese KAKENHI grant has been accepted (PI: Sano)]
[Chandra Large proposal has been accepted (PI: Plucinsky, Co-I: Sano)]

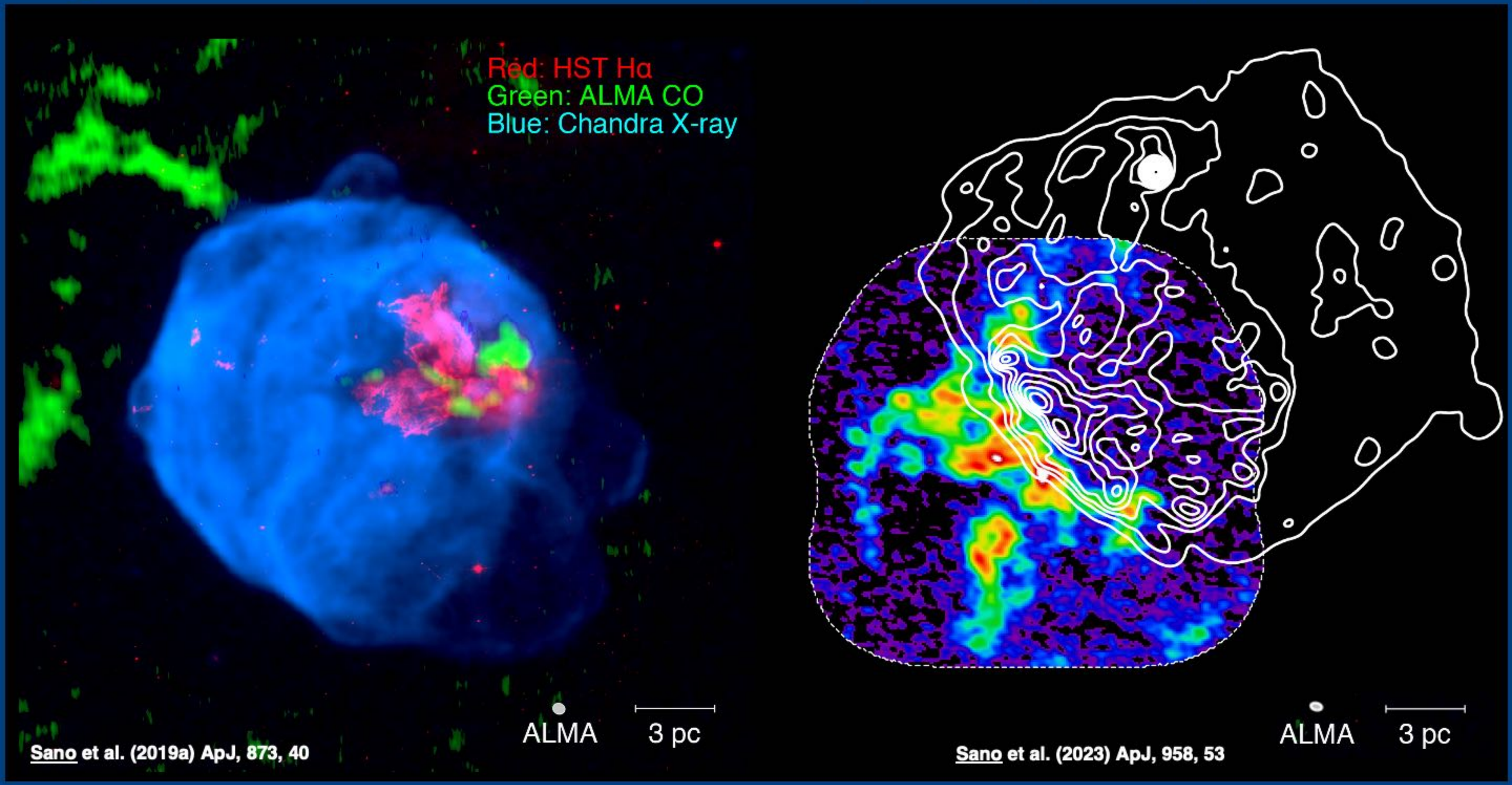
Magellanic SNRs N63A and N49 seen by Chandra (PSF~0.5")



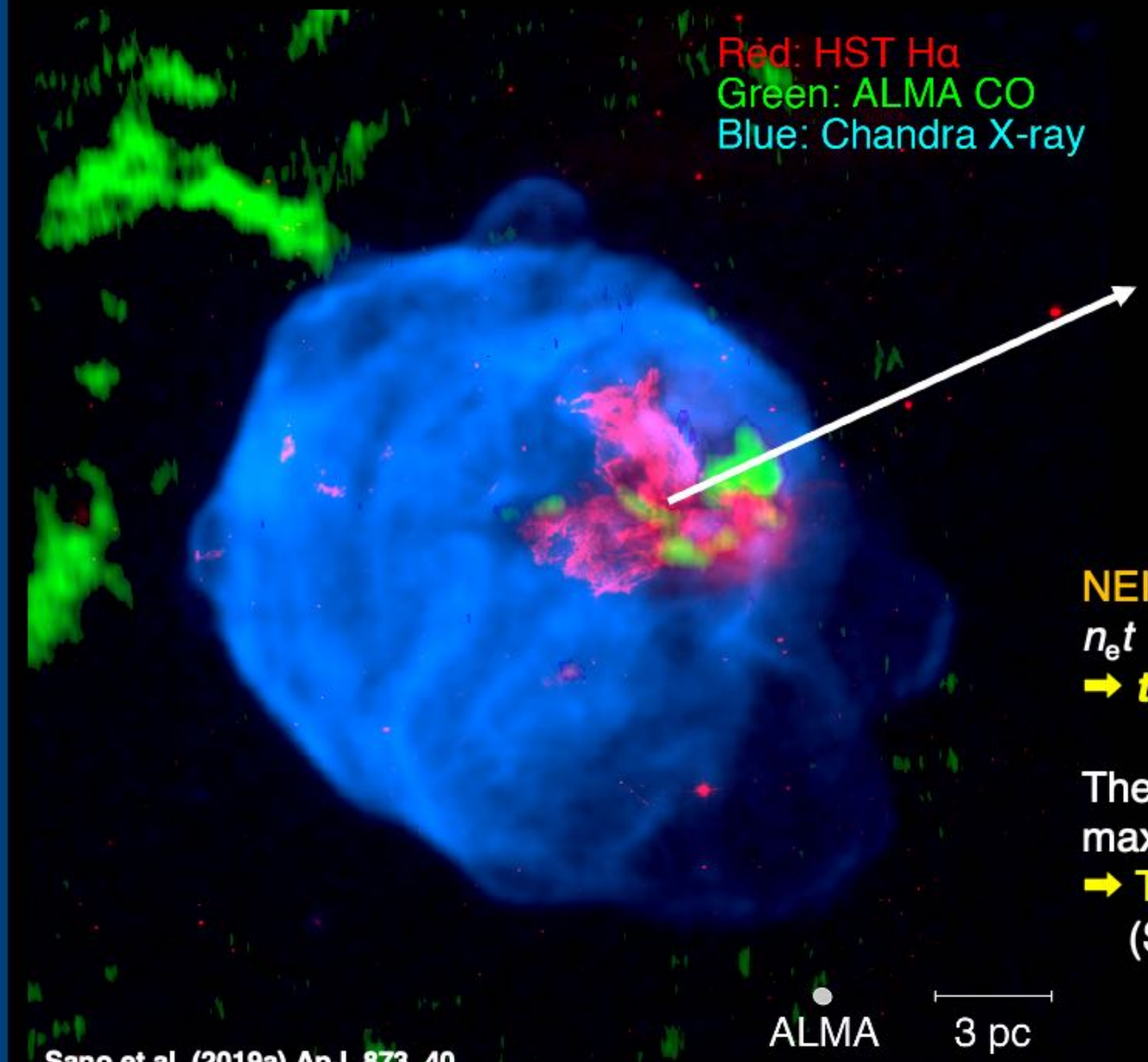
Magellanic SNRs N63A and N49 seen by ASTE (Δθ~24")

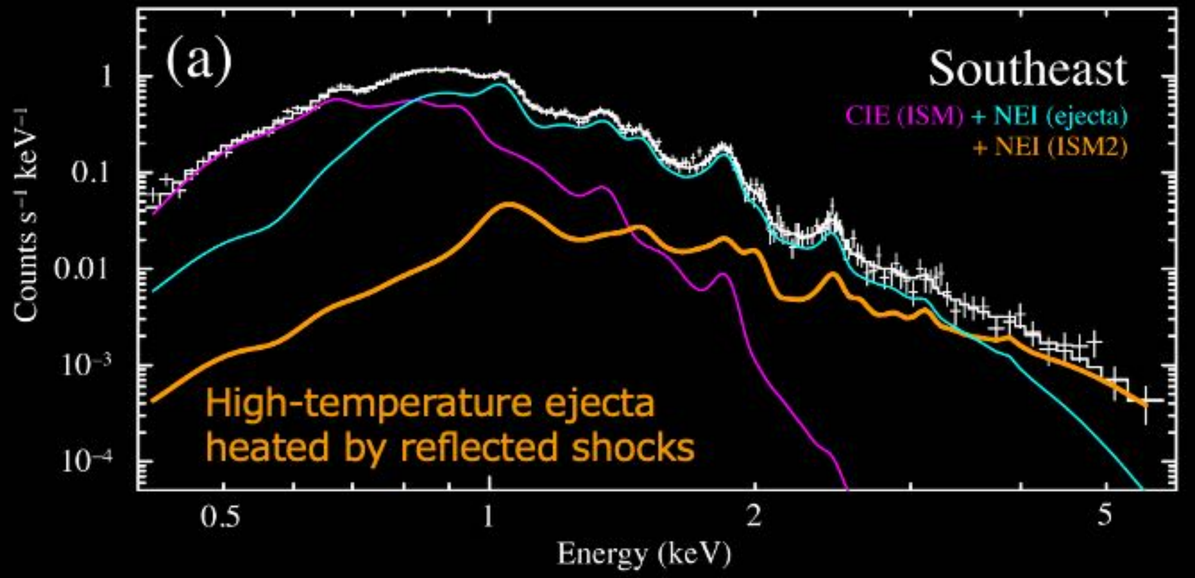


Magellanic SNRs N63A and N49 seen by ALMA (Δθ~2")



Multiple-reflected shocks enhance high-temperature plasma





NEI (ISM2)

$n_e t = 1.0 \times 10^{11}$ cm^{-3} s ($n_e = 2.5\, f^{-0.5}$ cm^{-3})

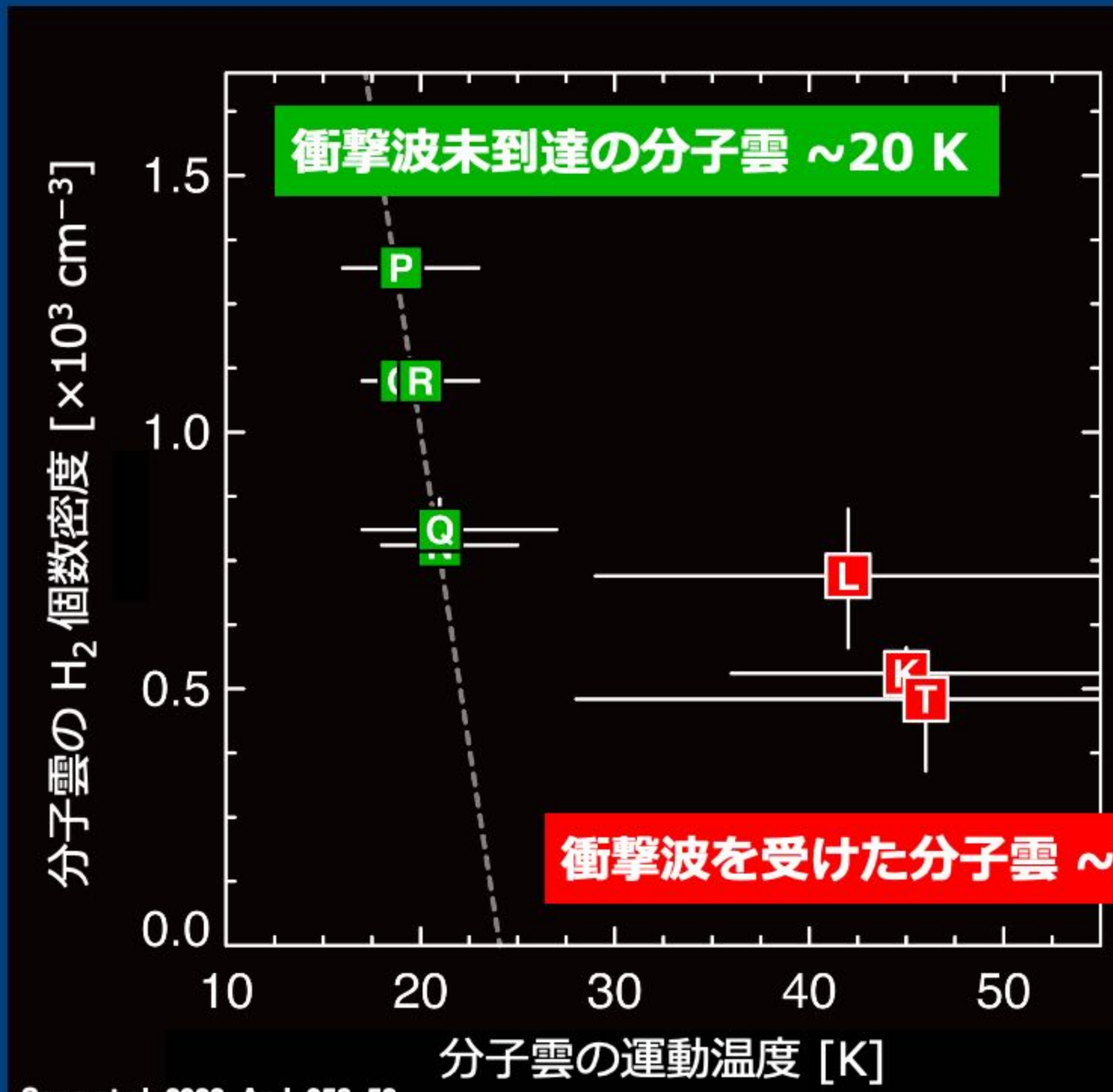
➡ **$t = 4.0 \times 10^{10}\, f^{-0.5}$ s < 1,300 yrs**

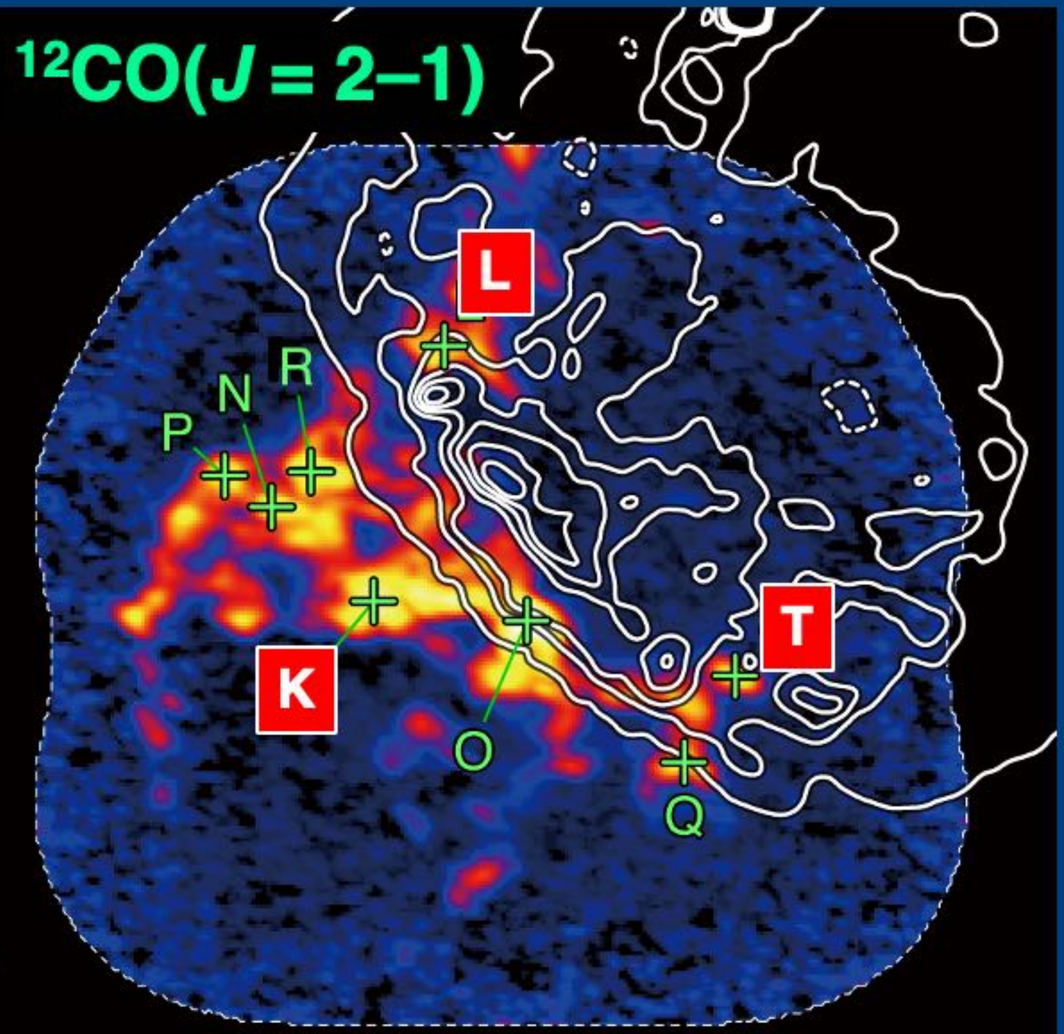
The shock elapsed time is much lower than the maximum SNR age of ~5,000 yrs,

➡ The high-temperature plasma has been heated recently!!
(Similar to the Galactic SNR RCW 86 & LMC SNR N49)

Sano et al. (2019a) ApJ, 873, 40

N49: 分子雲の温度・密度と超新星残骸フィードバック

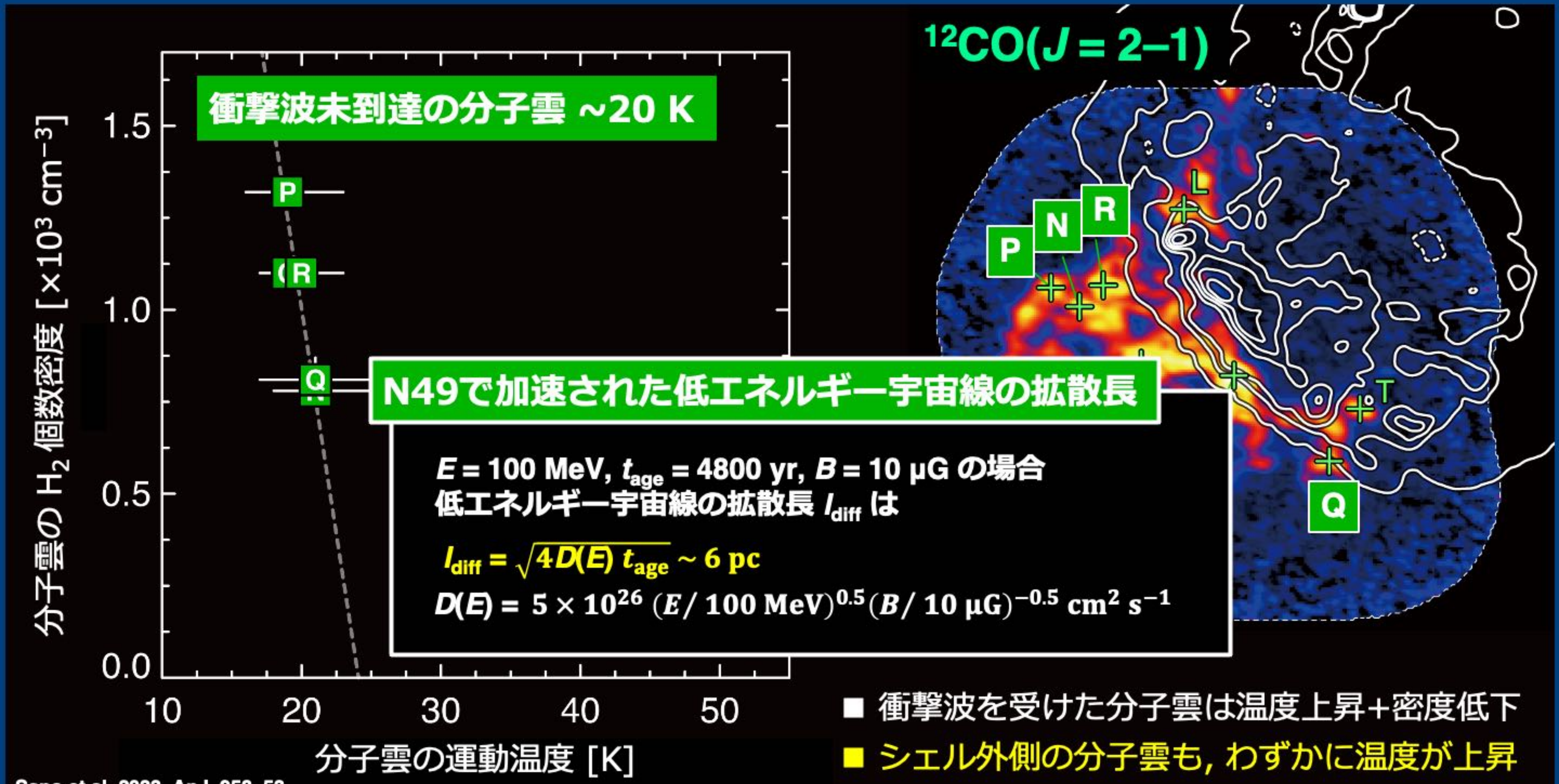




- 衝撃波を受けた分子雲は温度上昇+密度低下
- シェル外側の分子雲も, わずかに温度が上昇

Sano et al. 2023, ApJ, 958, 53

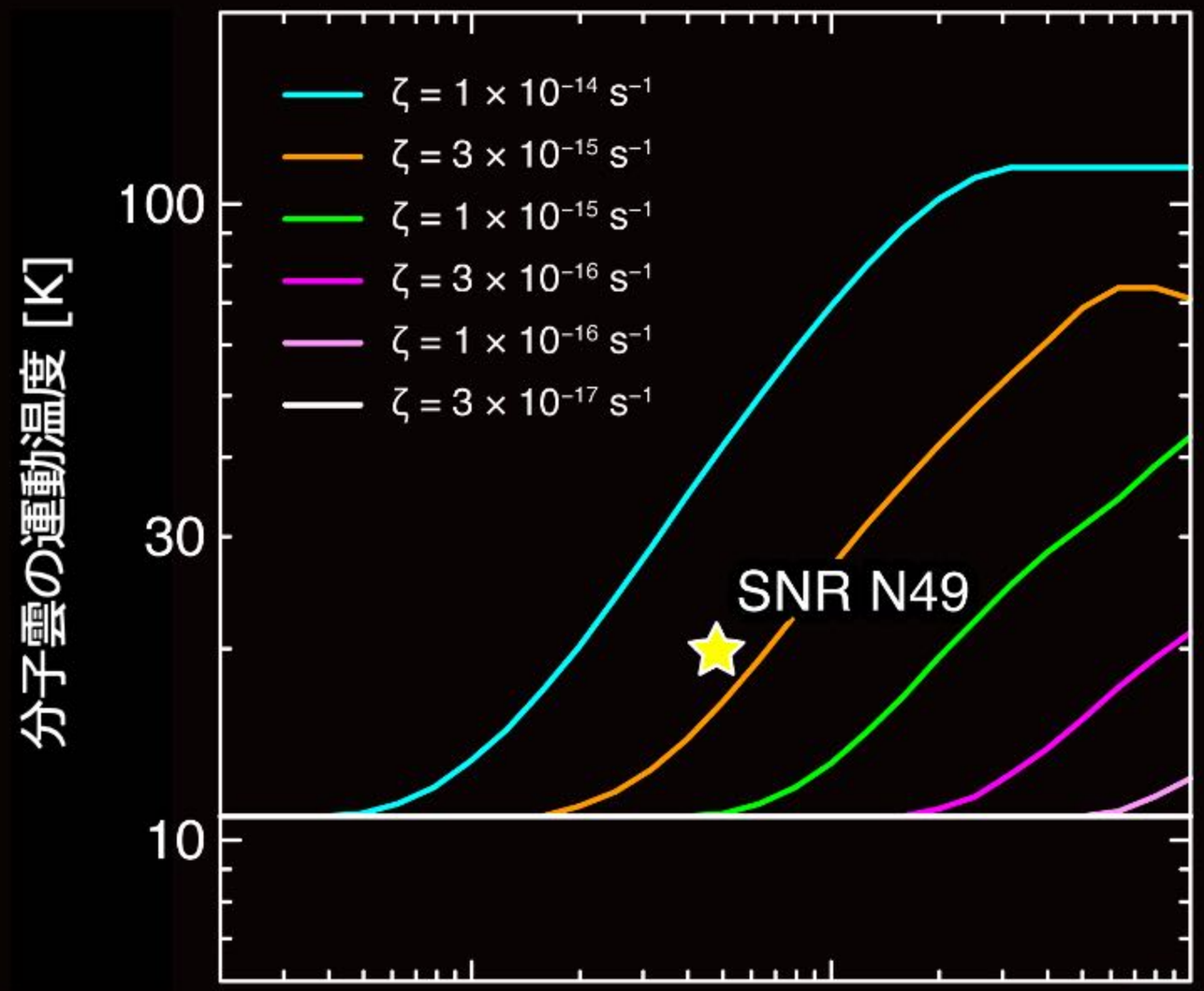
N49: 分子雲の温度・密度と超新星残骸フィードバック

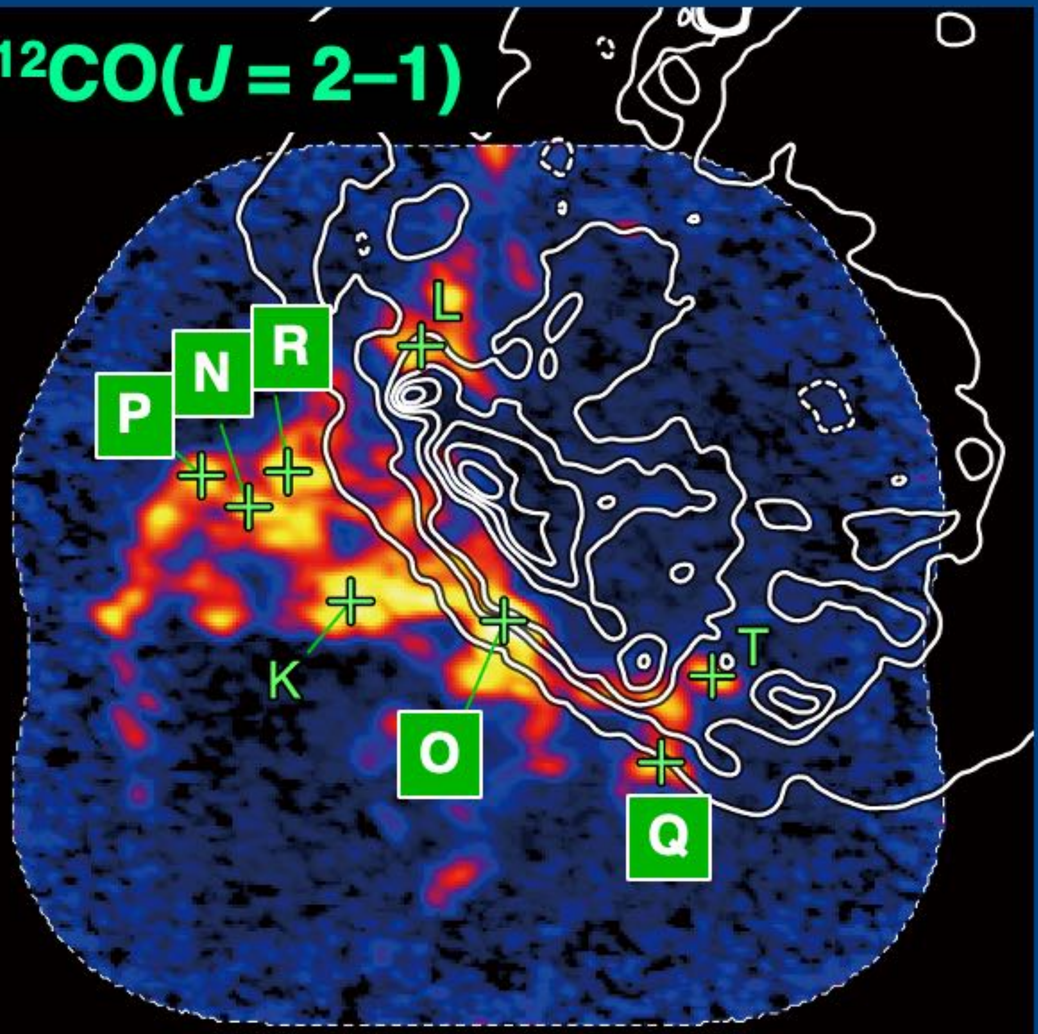


Sano et al. 2023, ApJ, 958, 53

N49: CR-induced UV による分子雲の加熱

Sano et al. 2023, ApJ, 958, 53

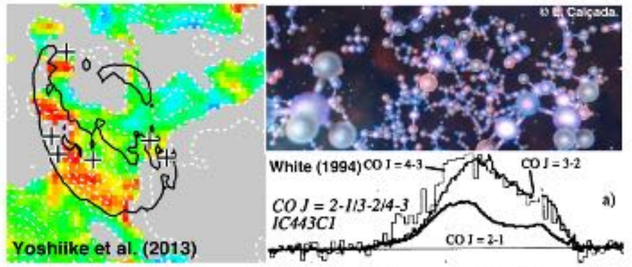




■ Furuya+22 の PDR モデルと比較すると、
宇宙線による分子雲加熱と考えて矛盾しない

➡ Solar value の 400 倍程度の宇宙線電離率!?

Cosmic-rays and/or shock induced chemistry



Partially heating of gas/dust with line broade
+ chemical evolution of the ISM
+ CI chemistry in the vicinity of SNRs

A review for the cosmic-ray ionization rate

Caselli et al. (1998), ApJ, 499, 234
Shingledecker et al. (2016), ApJ, 830, 151
Gabici (2022), A&A Rev., 30, 4

Cosmic-ray ionization rate toward supernova remnants

Indriolo et al. (2010), ApJ, 724, 1357 → H_3^+ (IC443)
Ceccarelli et al. (2011), ApJL, 740, 4 → $[DCO^+]/[HCO^+]$ (W51C)
Vaupré et al. (2014), A&A, 568, 50 → $[DCO^+]/[HCO^+]$ (W44)
Tanaka et al. (2021), ApJ, 915, 79 → [CI] (Sgr A East)
Yamagishi, Sano et al. (2023), PASJ 75, 883 → [CI] (W51)
Indriolo (2023), ApJ, 950, 64 → H_3^+ (Vela & W28)
Sano, Furuya et al. (2023), ApJ, 958, 53 → CO multi-*J* LVG (LMC N49)

Shock chemistry in supernova remnants

e.g., Mazumdar et al. (2022), A&A, 668, 180
→ Detections of many molecules CH_3OH, H_2CO, SO, SiO, CN, CCH, NO, CS, HCO^+, HCN, HNC, N_2H^+, and CO toward the SNR W28F

CR ionization rate of molecular clouds

$$H_2 + CR \longrightarrow H_2^+ + e^- + CR.$$

$$H_2^+ + H_2 \longrightarrow \boxed{H_3^+} + H$$

$$H_3^+ + e^- \longrightarrow H + H + H \quad \text{or} \quad H_2 + H.$$

$$H_3^+ + CO \longrightarrow HCO^+ + H_2$$

$$H_3^+ + HD \leftrightarrow H_2D^+ + H_2.$$

$$H_2D^+ + CO \longrightarrow \boxed{DCO^+} + H_2 \text{ or } \boxed{HCO^+} + HD.$$

H_3^+ is the best tracer of ionization rate ζ, because of its simple chemical reaction.

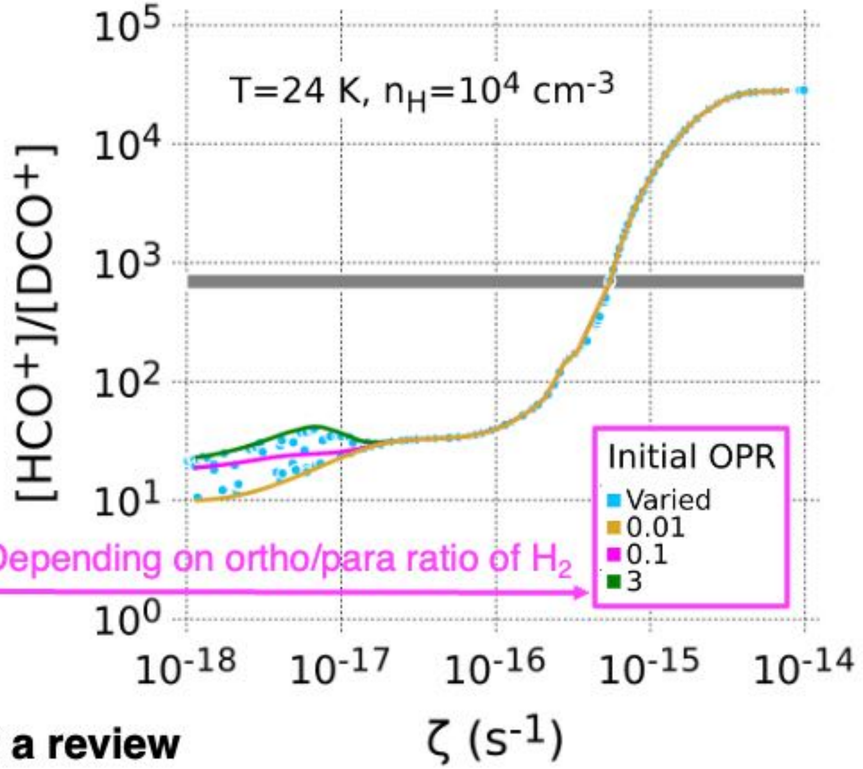
➡ However, observations are not easy...

* Bright background sources
* High-sensitivity & -spectral resolution

DCO^+ / HCO^+ is an alternative method to measure ζ

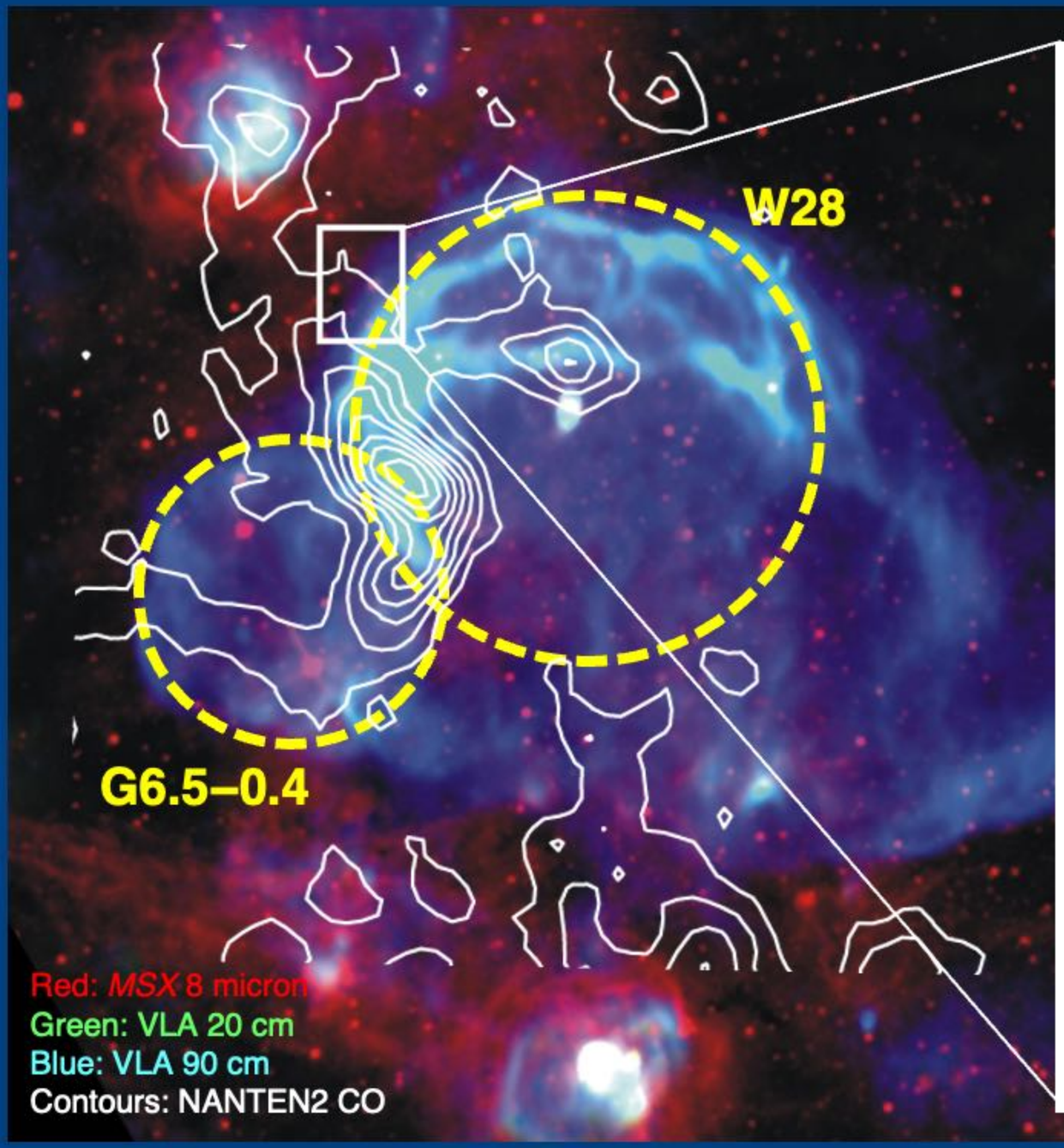
$$R_D = \frac{n(HCO^+)}{n(DCO^+)} = 3\left(\frac{n(H_3^+)}{n(H_2D^+)}\right) = 3 \times \left(\frac{k_2\, n(CO) + k_{H_2D^+-e}\, n(e) + k_{HD}\, n(HD) + k_{3b}\, n(H_2)}{k_{3f}\, n(HD)}\right)$$

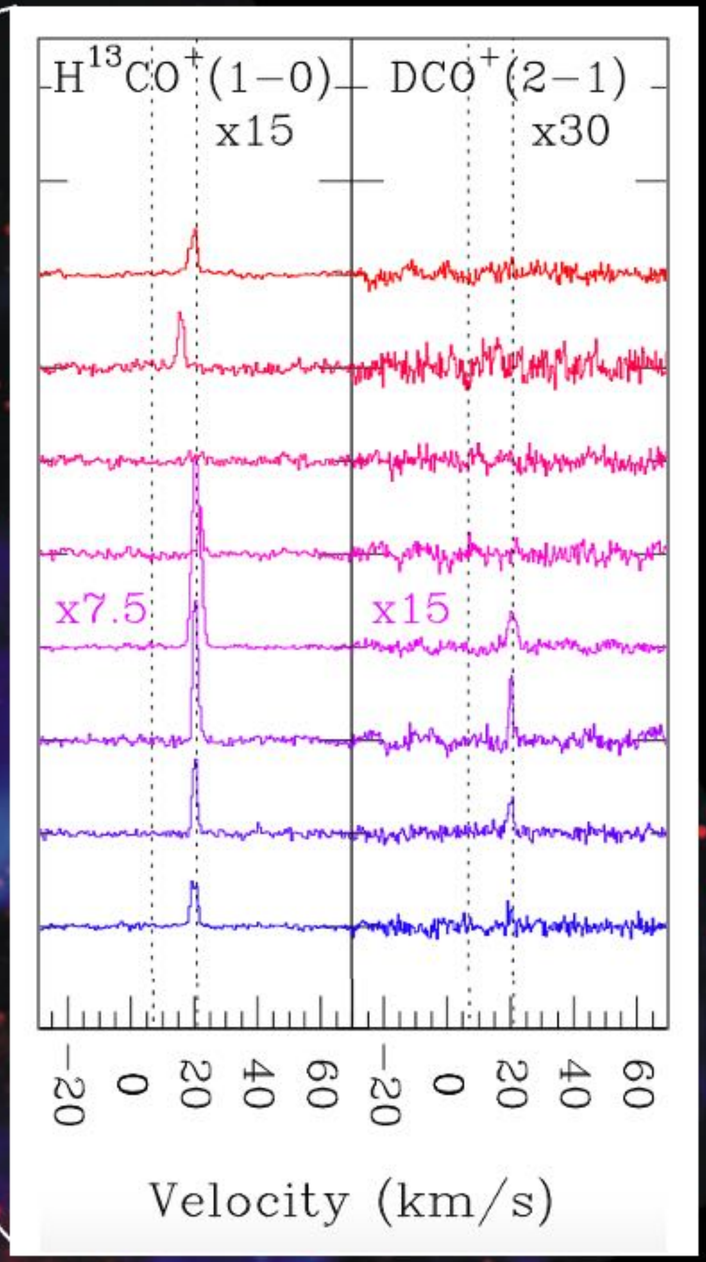
Depending on ortho/para ratio of H_2



See also Caselli et al. (1998), Shingledecker et al. (2016), and Gabici (2022) for a review

Measurement of the CR ionization rate in W28





$\zeta > 40 \times 10^{-17}$ s^{-1}

$\zeta > 260 \times 10^{-17}$ s^{-1}

$\zeta > 130 \times 10^{-17}$ s^{-1}

$\zeta = 130\text{–}400 \times 10^{-17}$ s^{-1}

$\zeta = 130\text{–}330 \times 10^{-17}$ s^{-1}

$\zeta > 13 \times 10^{-17}$ s^{-1}

Vaupré et al. (2014)

Atomic carbon [CI] as an alternative tracer of CRs

- **Sub-millimeter lines**

  [CI] $^3P_1$–$^3P_0$: 492.161 GHz

  [CI] $^3P_2$–$^3P_1$: 809.344 GHz

- **Critical density**

  CI(1–0): ~ 500 cm^{-3}

  CI(2–1): ~ 3000 cm^{-3}

  (Zmuidzinas et al. 1988)

- **Characteristics**

  - PDR tracer
  - Similar distribution to ^{13}CO

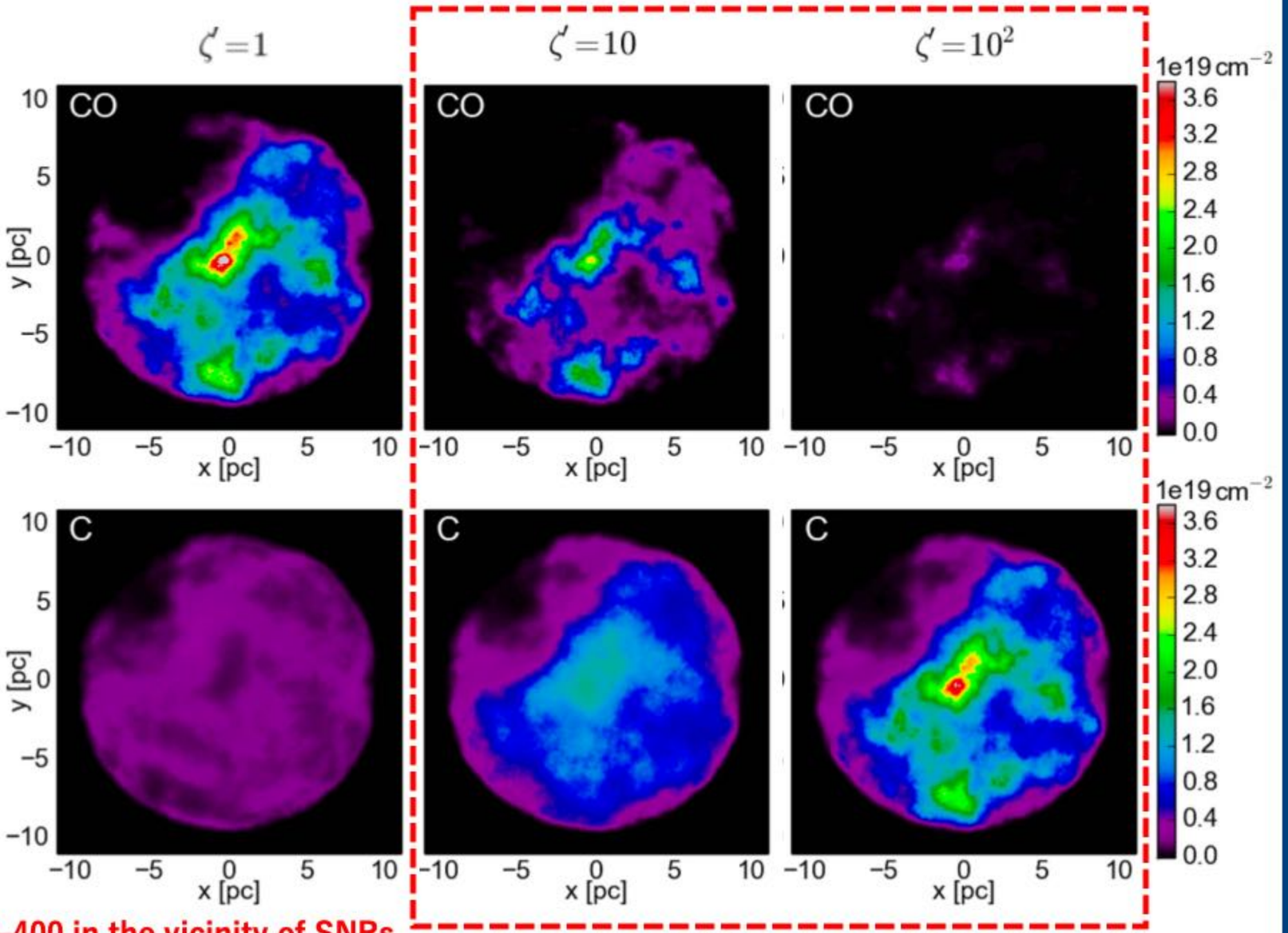
  (e.g., Ikeda+02; Plume+00; Shimajiri+13)

  - Alternative H_2 tracer

  (e.g., Papadopoulous+04; Tachihara+18)

  - Indicator of CRs !?

  (e.g., Bisbas+15, 17)



ζ ~10–400 in the vicinity of SNRs
(Ceccarell et al. 2011; Vaupré et al. 2014)

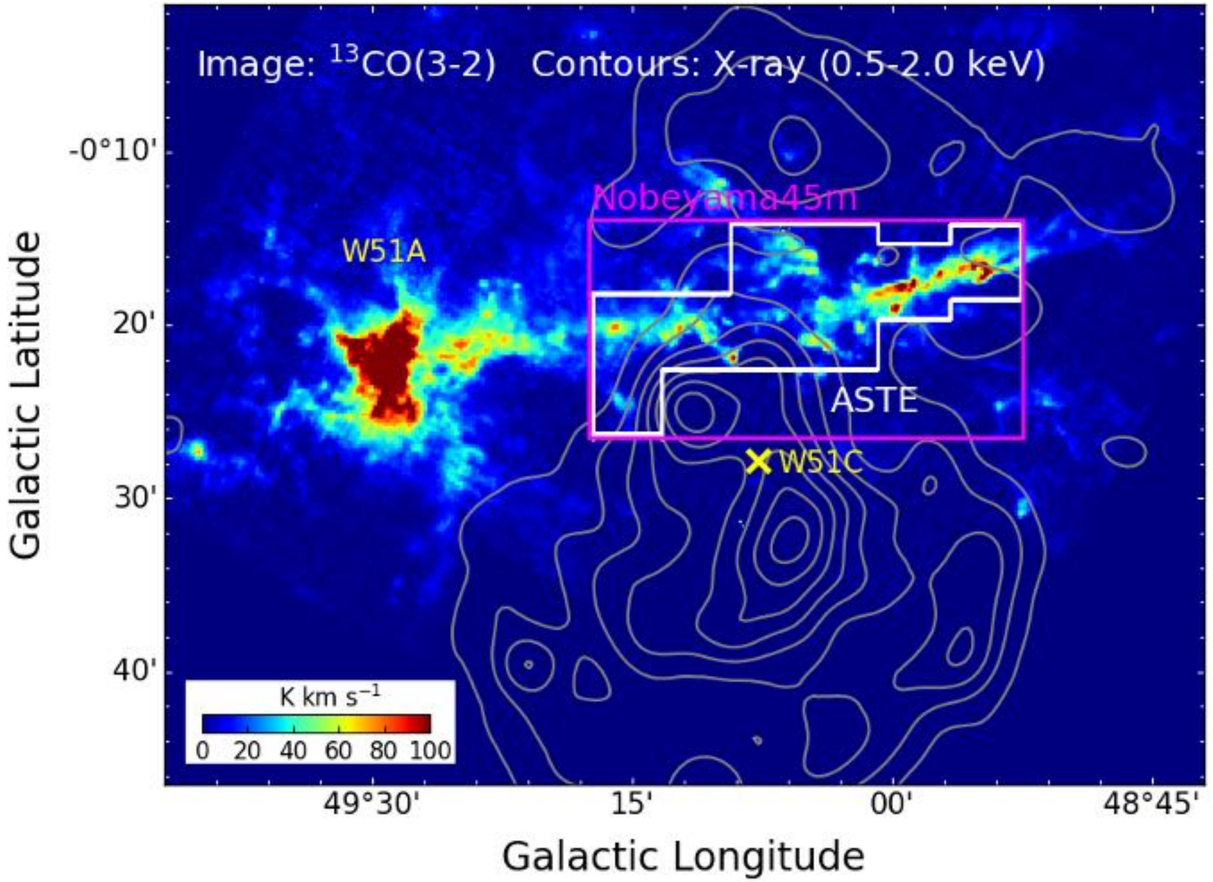
Bisbas et al. (2015, 2017)

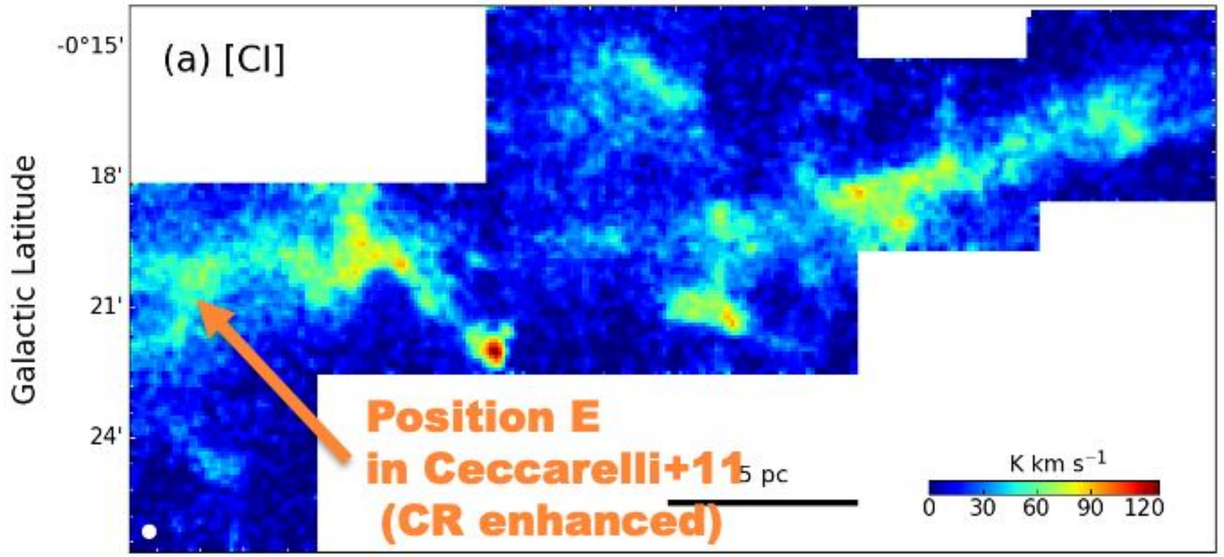
[CI] observation in W51C (Yamagishi et al. 2023)

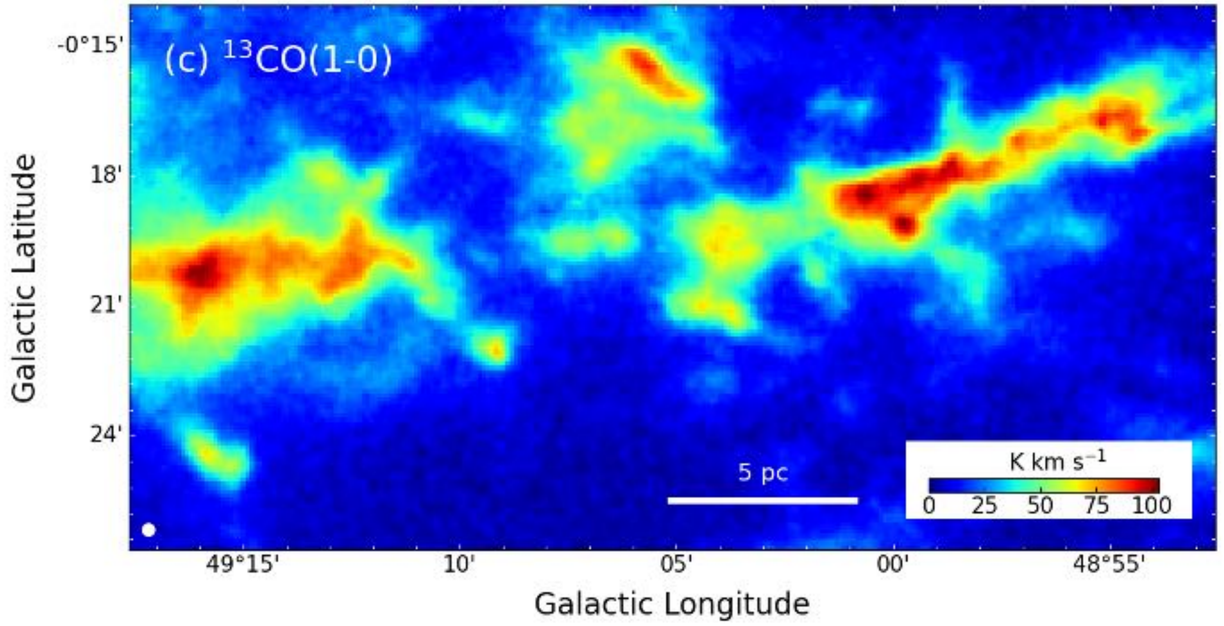
SNR W51C (age: 30,000 yr)

Yamagishi, Furuya, Sano et al. (2023)

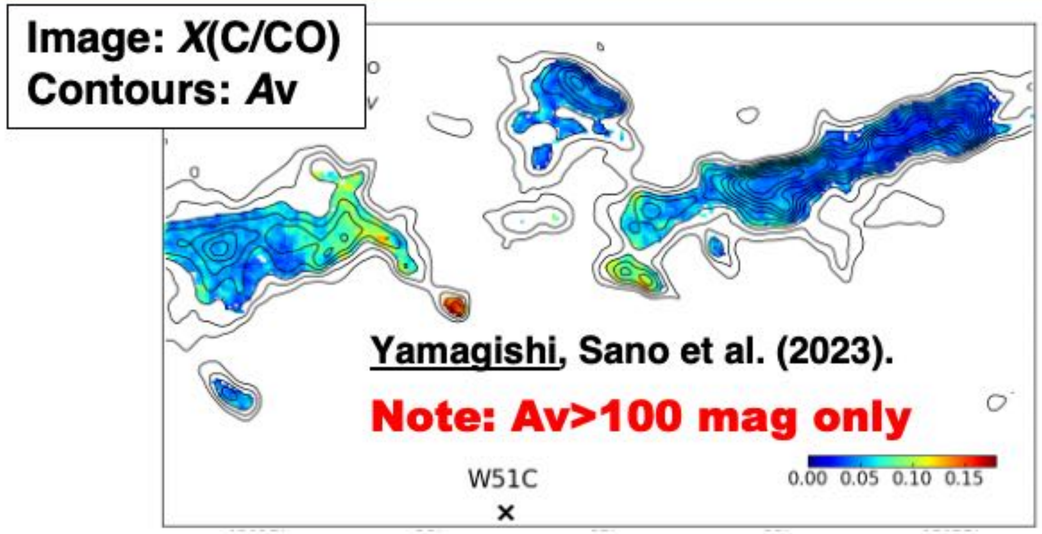
$\times 10^2$ enhancement of ζ found by DCO^+ /HCO^+ observations (Ceccarelli+11)

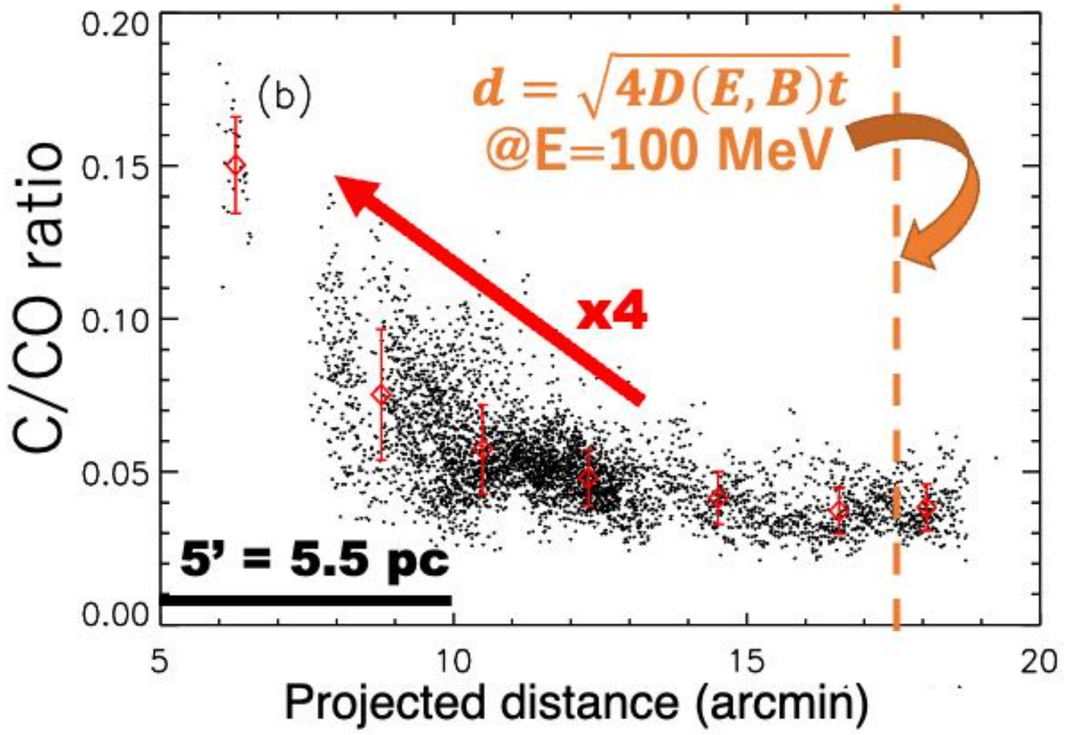






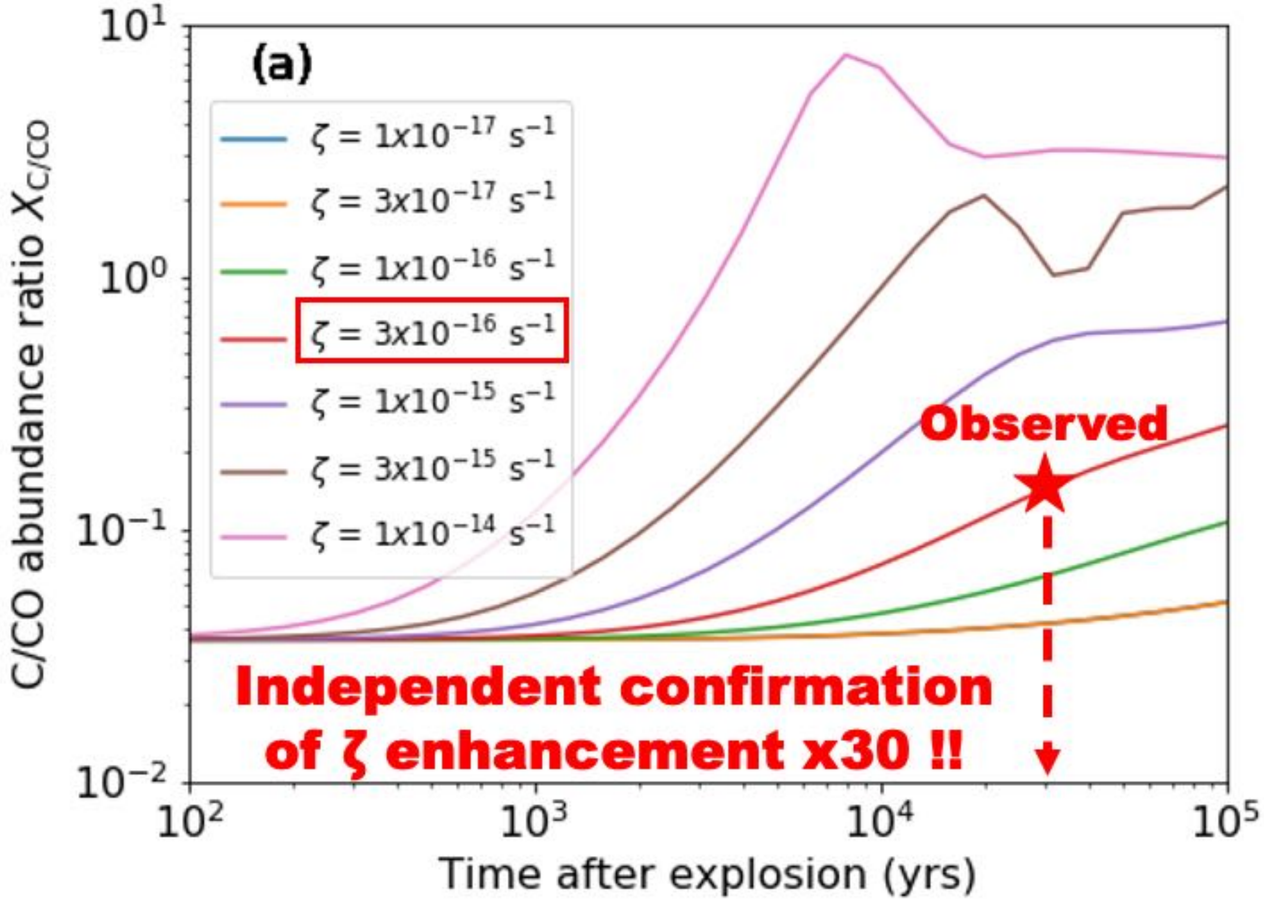
[CI] observation in W51C (Yamagishi et al. 2023)



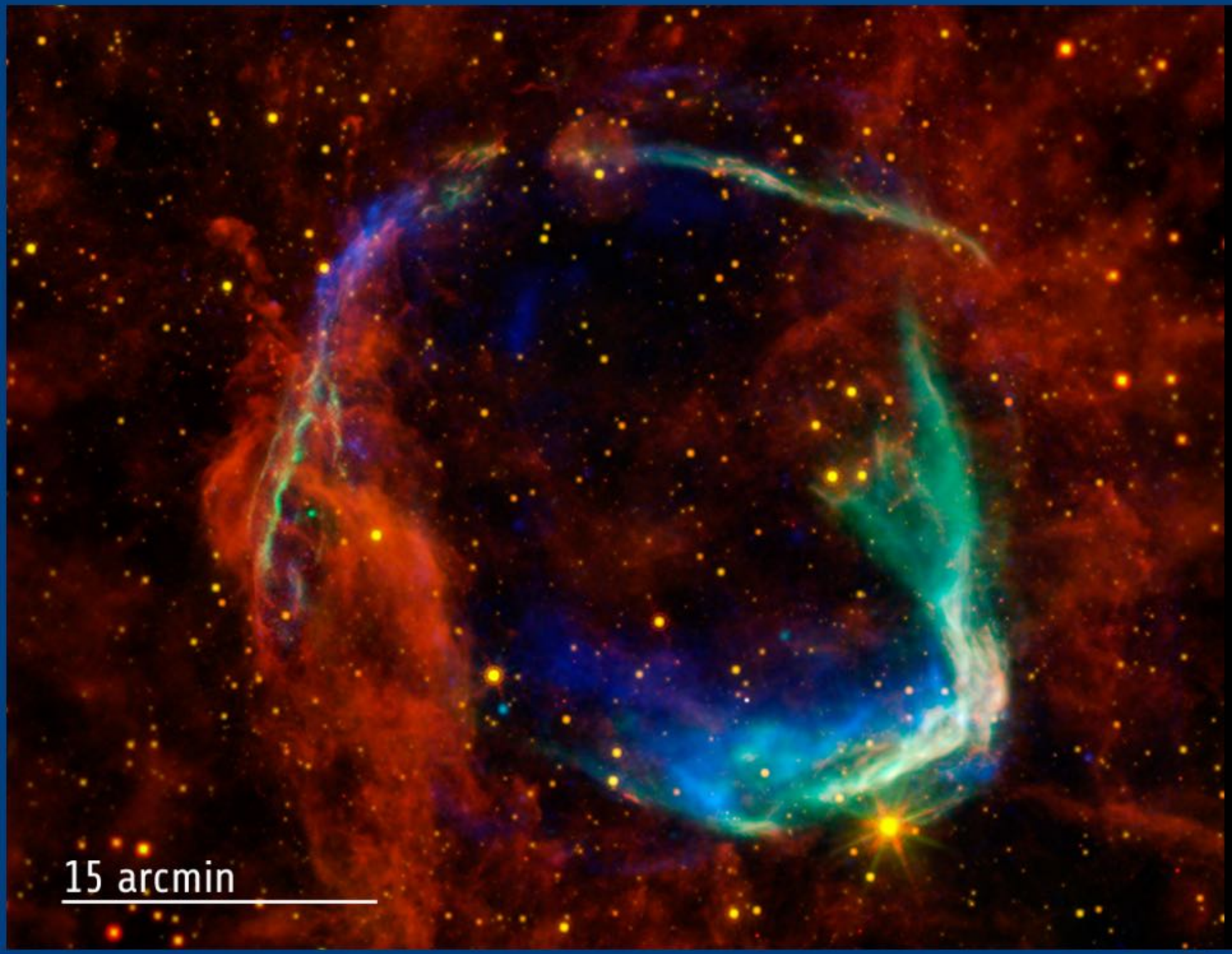


Time-dependent PDR simulation for the C/CO peak (by Furuya-san)

Chemical equilibrium (10^7 yr) → SN explosion ($\zeta \nearrow$)
Av = 170 mag, Td = 27 K, gas density: 3×10^3 cm^{-3}



若いガンマ線超新星残骸 RCW 86

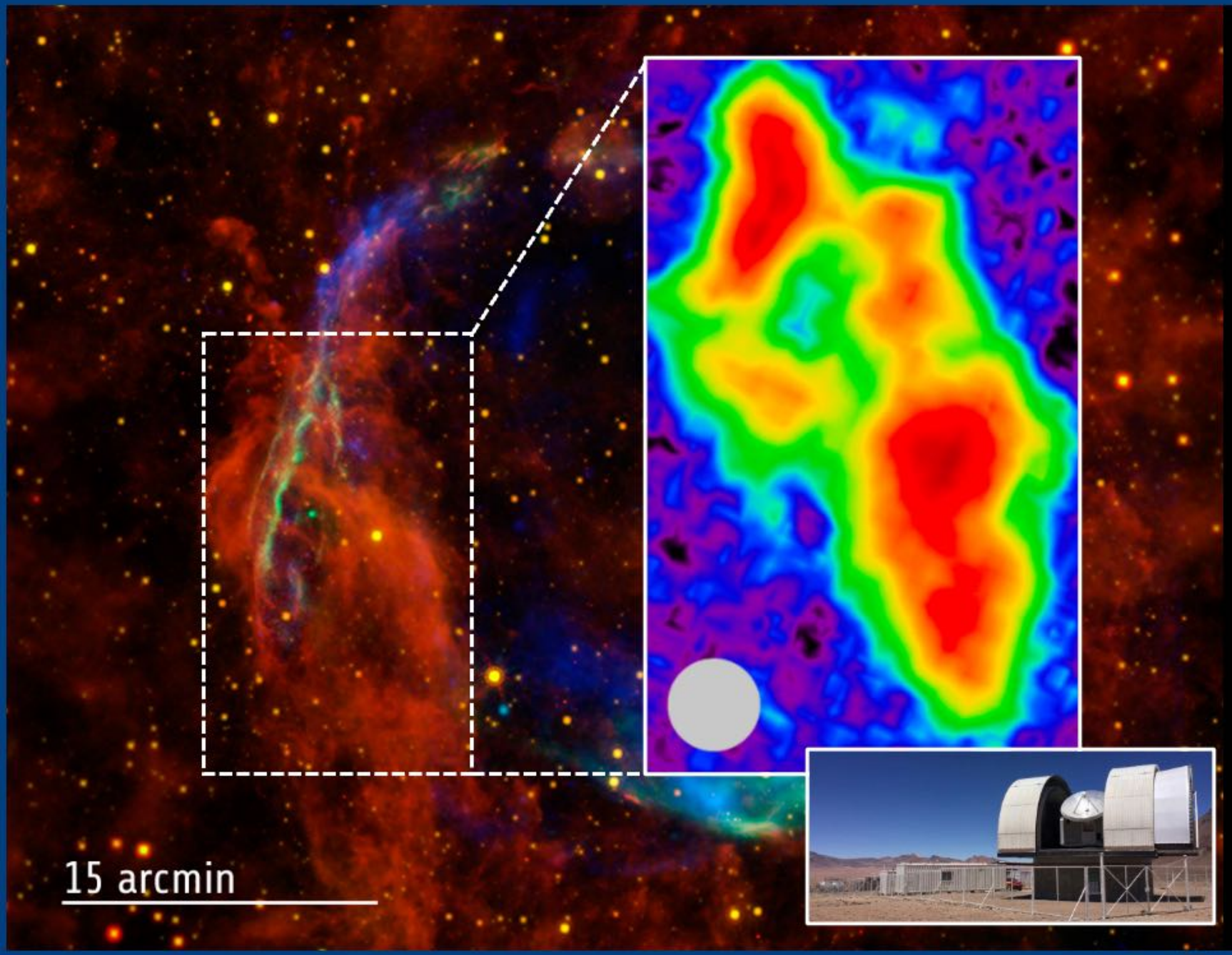


Red: WISE 12 micron
Yellow: Spitzer 8 micron
Blue: hard-band X-ray
Green soft-band X-ray

- R.A., Dec. $14^h\ 40^m$, -62° 38′
- 年齢: ~1800 年
- 距離: 2.5 kpc (8000光年)
- 直径: 100光年
- Ia 型超新星残骸
- エックス線ガンマ線で明るい
- 南東に分子雲が付随

  相互作用時間は < 400年程度

若いガンマ線超新星残骸 RCW 86



Red: WISE 12 micron
Yellow: Spitzer 8 micron
Blue: hard-band X-ray
Green soft-band X-ray

- R.A., Dec. $14^h\ 40^m$, -62° 38′
- 年齢: ~1800 年
- 距離: 2.5 kpc (8000光年)
- 直径: 100光年
- Ia 型超新星残骸
- エックス線ガンマ線で明るい
- 南東に分子雲が付随

  相互作用時間は < 400年程度

ASTE ^{12}CO(3–2)

ALMA ^{12}CO(1–0)

ALMA ^{13}CO(1–0)

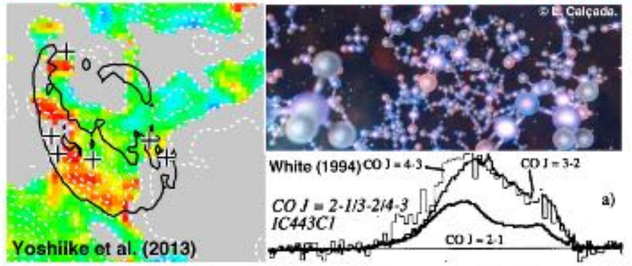
preliminary



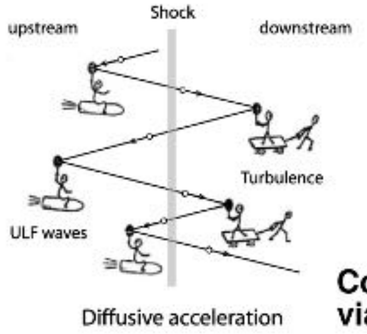


Physical processes in a supernova remnant

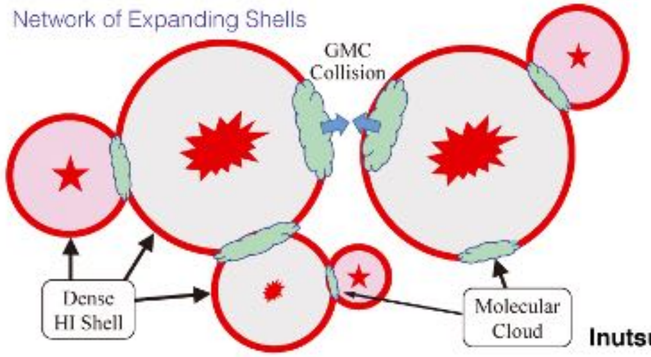
星間ガスの非一様(粒状)分布が重要



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

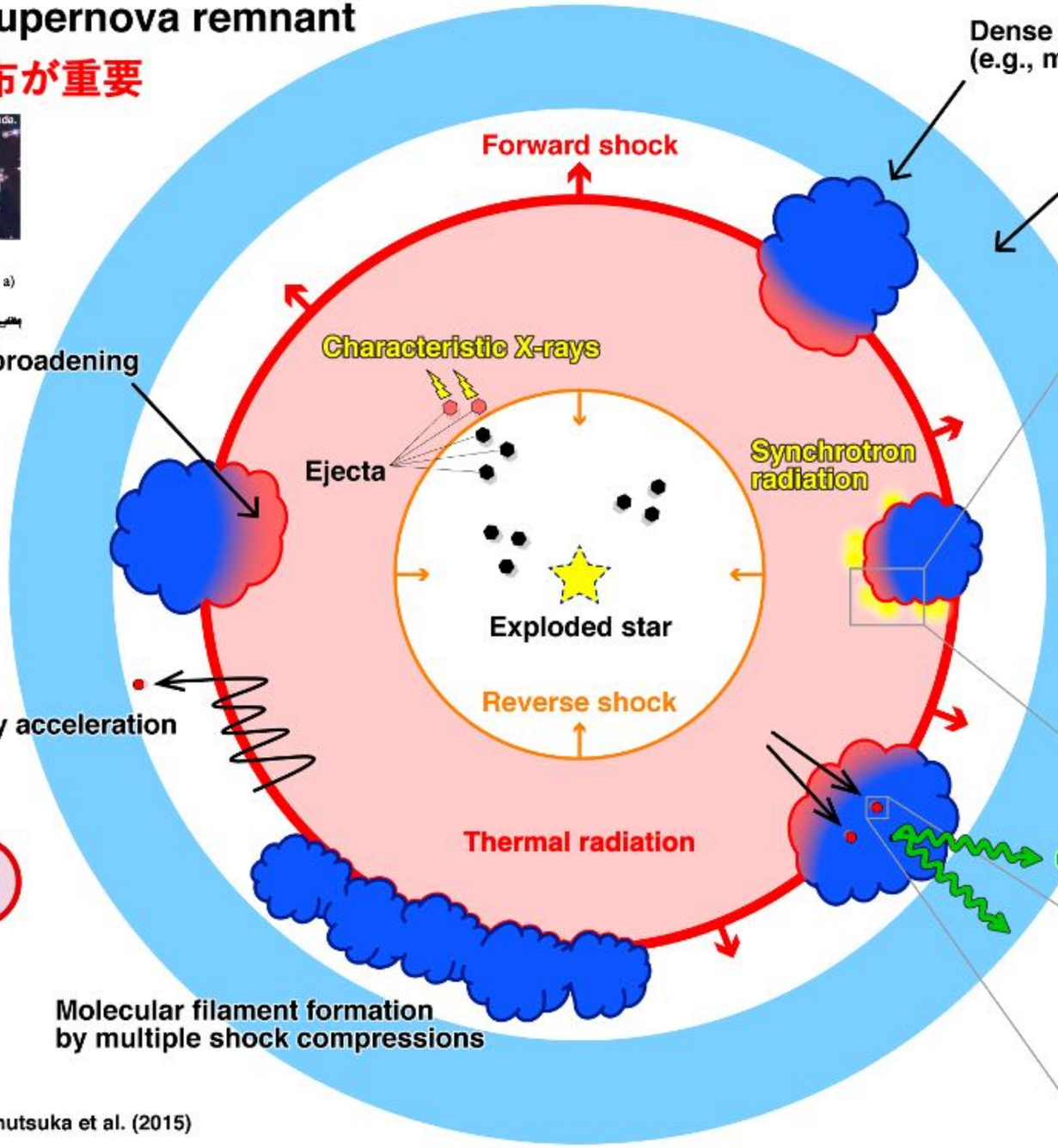


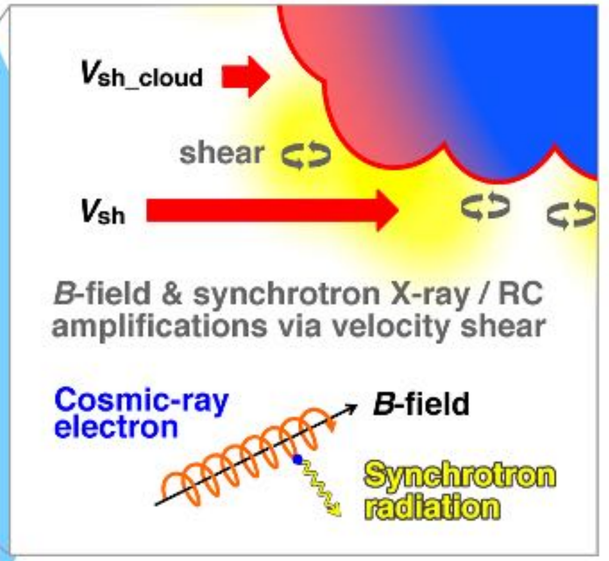
Cosmic-ray acceleration via DSA



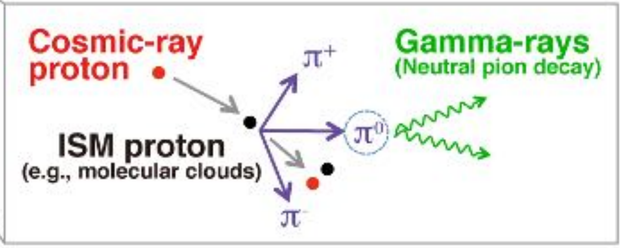
Inutsuka et al. (2015)

Molecular filament formation by multiple shock compressions





The total energy of cosmic-ray protons



おまけ

「星ナビ」2025年2月号は
2025年1月4日(土)発売!!



優美な星のラストシーン

ときめく超新星残骸

超新星残骸は星が最期に見せるドラマティックな姿です。
ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡やALMA、XRISMなどでも観測され、
天文学者にも注目されています。
かに星雲や網状星雲、ガム星雲など、天体写真の対象としても人気の高い
超新星残骸を科学的な成果を交えながら紹介していきます。

解説◎佐野栄俊（岐阜大学）



図1 かに星雲
かに星雲はおうし座に位置する超新星残骸。中心には「かにパルサー」と呼ばれる中性子星がある。1054年に観測された超新星により生まれた天体だ。JWSTによる撮影。中心集中型の超新星残骸。© NASA, ESA, CSA, STScI, Tea Temim (Princeton University)

星くずから生まれた私たち

夜空に輝く星々にも、ヒトと同じように誕生と死があります。その一生は、宇宙を漂う、水素でできた「ガス雲」からはじまります。1cm³あたり水素原子が1個しかないような環境ですが、何らかの要因でガスが集められると、水素分子から成るガス雲（分子雲）が生まれます。

約−260℃と極低温で、水素分子が1cm³あたり1,000個以上ある高密度な分子雲は、自身の重力やガス雲同士の衝突などによって、次第にあるいは急激に質量が増加し、ついにはその中で自ら輝く恒星の赤ちゃん（原始星）が作られます。

太陽と同じくらいの質量の恒星（小中質量星）は、水素を燃料として100億年ほど輝きつづけたのち、赤色巨星や惑星状星雲の段階を経た後、宇宙へ還っていきます。

一方、太陽よりも質量が8倍以上大きい大質量星は、数千万年ほどで燃料を使い果たし、最期には超新星爆発を起こします。その後には、超新星残骸と呼ばれる星雲状の天体や、恒星質量ブラックホール、中性子星を残して、また宇宙へと還っていくのです（図3）。

宇宙が始まったころ、すなわちインフレーションを経てビックバンが起きた当時は、大量の水素と少量のヘリウム、微量のリチウムしか存在していませんでした。一方で、私たちの体は、酸素、窒素、炭素、リンなど、様々な元素から構成されています。身の回りにも、鉄や銀、銅、アルミニウムやチタンなどの金属が溢れています。これらの元素が、実は「恒星の誕生と消滅の過程」で作られていたとしたら、皆さんはどう感じられるでしょうか？あるときは、主系列として輝く恒星内の核融合反応で、またあるときは、赤色巨星内部の中性子捕獲反応。そしてあるときは超新星爆発や、中性子星の合体で元素が合成され、宇宙へばら撒かれていったのです。「私たちは星くずから生まれた」と言っても過言ではないのです。

私がはじめてこの事実を知ったのは、中学生のころでした。当時の私は「ヒトはどこからきてどこに行くのか、自分が生まれたことには何か意味があるのか」などと思いを巡らせる少年でした。そんなとき、ある書籍で「星の一生が元素を作った」という記述を見つけて、身震いするような感動に包まれたことを今でも覚えています。広大で時間のスケールも異なる宇宙と、ちっぽけな自分が、目に見えなくてもどこかで確実に繋がっている——。そのつながりの一端でも解明できたら、どんなに素晴らしいことだろう。そう思って、この天文学者の道を志しました。

今宵は、星の一生の最期の姿のひとつ「超新星残骸（supernova remnant：SNR）」にスポットを当て、最新の研究成果をご紹介しながら、広大な宇宙と私たちとの繋がりに思いを馳せてみることにしましょう。



図2 かに星雲
かに星雲はM1とも呼ばれ、天体撮影の対象としても愛されている。RGB、Ha、［O Ⅲ］による撮影をコンポジットした作品。細かい「かに星雲」のディテールがよく映し出されている。（撮影／宇都正明）2023年2月号星ナビギャラリー掲載作品。

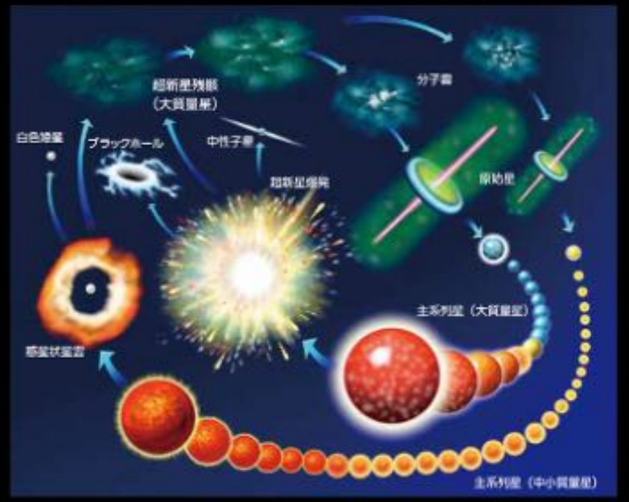


図3 星の一生　水素ガス雲から生まれた恒星は、数千万年から100億年ほどの時を経て、さまざまな元素を合成します。一生の最期にはその元素を放出し、それが新しい星の「種」となるのです。（『大宇宙の誕生』光文社より）©Yasuo Fukui

佐野栄俊（さのひでとし）

岐阜大学大学院准教授。2014年名古屋大学大学院修了。博士（理学）。超新星残骸と相互作用する星間物質の観測を通して、天文学100年来の謎である宇宙線の起源解明に挑んでいる。星ナビは高校天文部時代からの愛読書のひとつ。

