

超新星残骸における 宇宙線研究の到達点と展望: 電波天文学の立場から

佐野 栄俊（名古屋大学 高等研究院）

超新星残骸における宇宙線加速の理解には、 星間ガス(分子+原子)の精査が本質的

■ 陽子起源ガンマ線の特定

- 星間ガスは、陽子起源ガンマ線の発生の標的粒子
→ 星間ガスの精密定量 (Fukui+12,13,17; Fukuda+14; HS+18a)

■ 衝撃波と非一様星間ガスの衝突

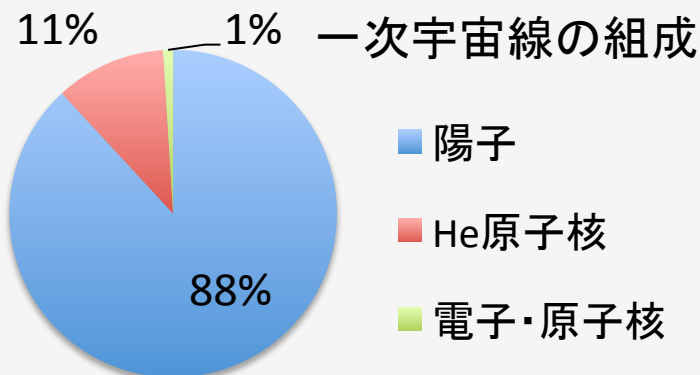
- ガス塊周辺での乱流・磁場増幅が、X線増光や粒子加速に効く
(HS+10,13,15,17a,b; HS16; Inoue+09, 12)

■ 次世代ガンマ線望遠鏡 (CTA) に向けて

- より遠く、視直径の小さな天体へ(系内/マゼラン雲など)
- 宇宙線加速やガス加熱の本質に迫る
(HS+15,17c,18b; Kuriki+17; Yamane+18)

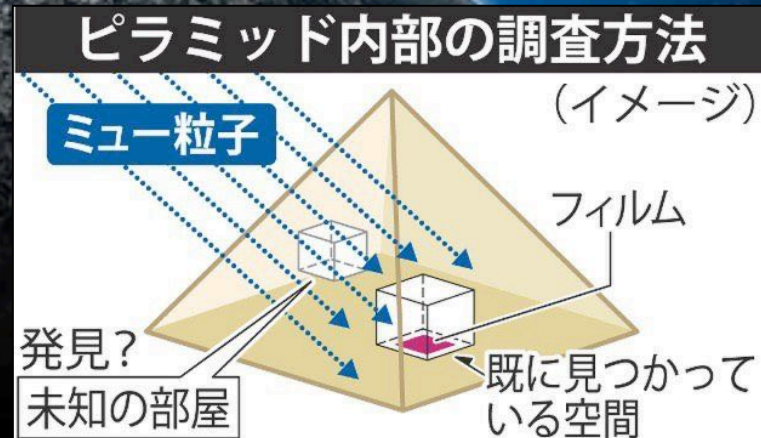
一次宇宙線

宇宙から地球に降り注ぐ高エネルギー粒子



二次宇宙線

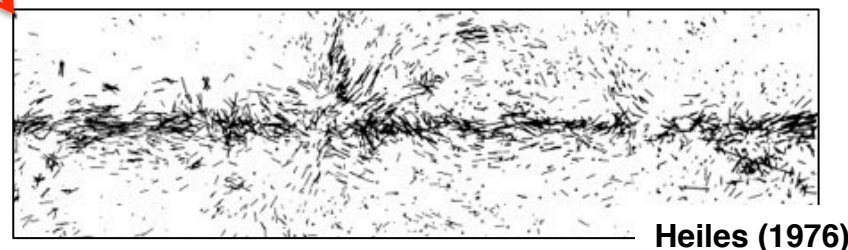
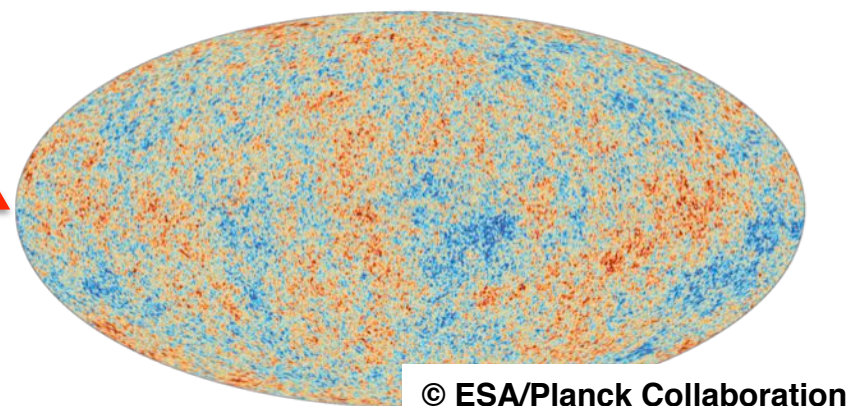
一次宇宙線が大気中の原子核と相互作用して生成（ μ 粒子など）



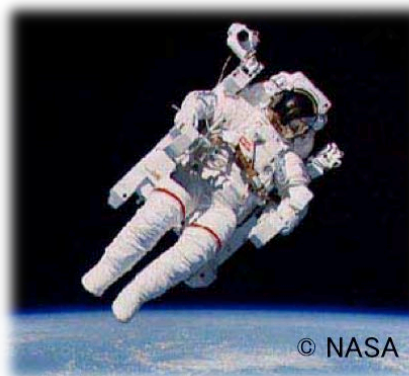
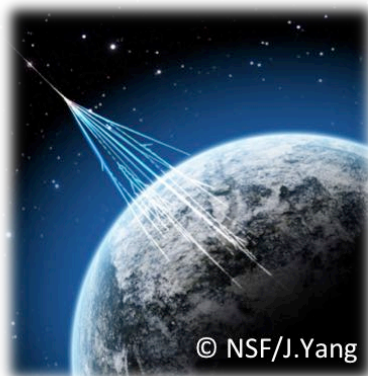
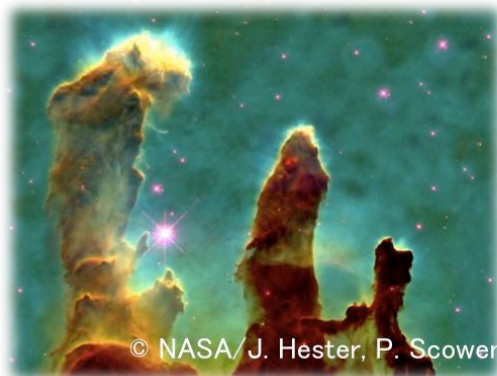
宇宙線の起源を探る

■ 宇宙の主要構成要素として、星間空間に多大な影響を与える

宇宙の構成要素	エネルギー密度
宇宙マイクロ波背景放射	0.27 eV cm ⁻³
星明かり	0.54 eV cm ⁻³
磁場	0.89 eV cm ⁻³
乱流	0.22 eV cm ⁻³
ダスト放射	0.31 eV cm ⁻³
宇宙線	1.39 eV cm⁻³



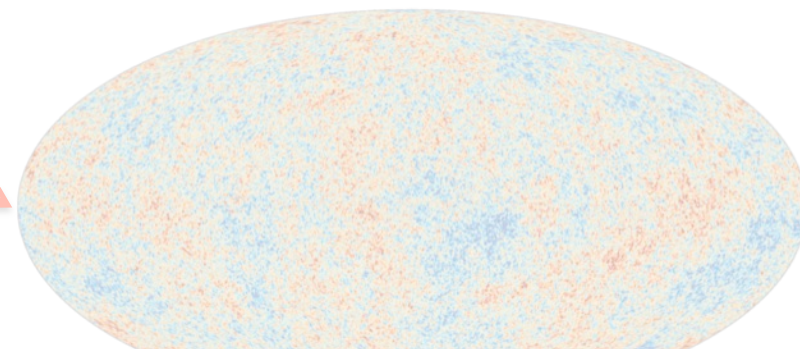
Draine 11



宇宙線の起源を探る

- 宇宙の主要構成要素として、星間空間に多大な影響を与える

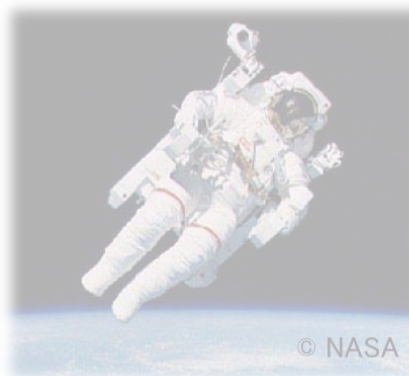
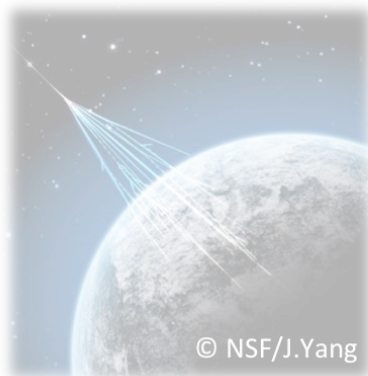
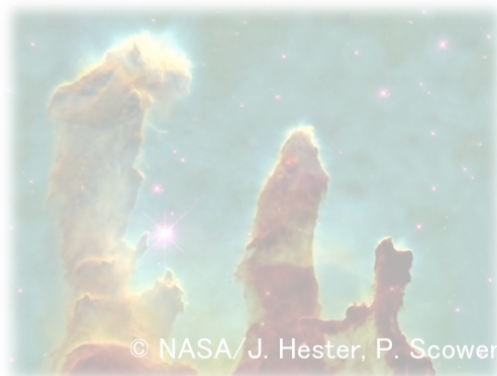
宇宙の構成要素	エネルギー密度
宇宙マイクロ波背景放射	0.27 eV cm^{-3}
星明かり	0.54 eV cm^{-3}
磁場	0.89 eV cm^{-3}



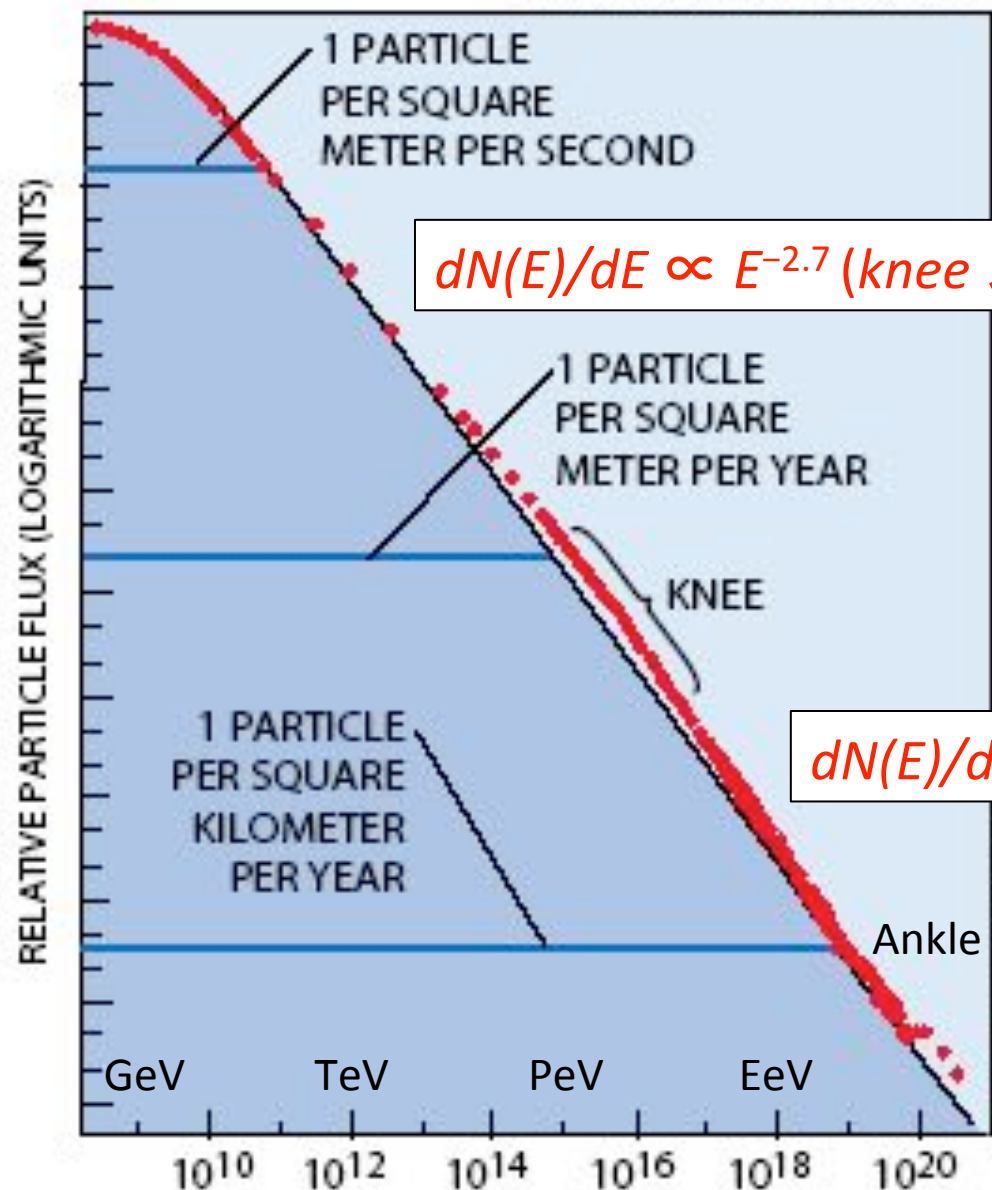
宇宙線の発見(1912年)から100年経った今も、
その加速源は明らかになっていない

Draine 11

Heiles (1976)



Scientific American, (c) 1998



$$dN(E)/dE \propto E^{-2.7} \text{ (knee 以下)}$$

$$dN(E) \propto E^{-p} dE$$

N : number of particles with kinetic energy E
 p : spectral index

銀河系内超新星残骸の衝撃波
 Diffusive Shock Acceleration (DSA)

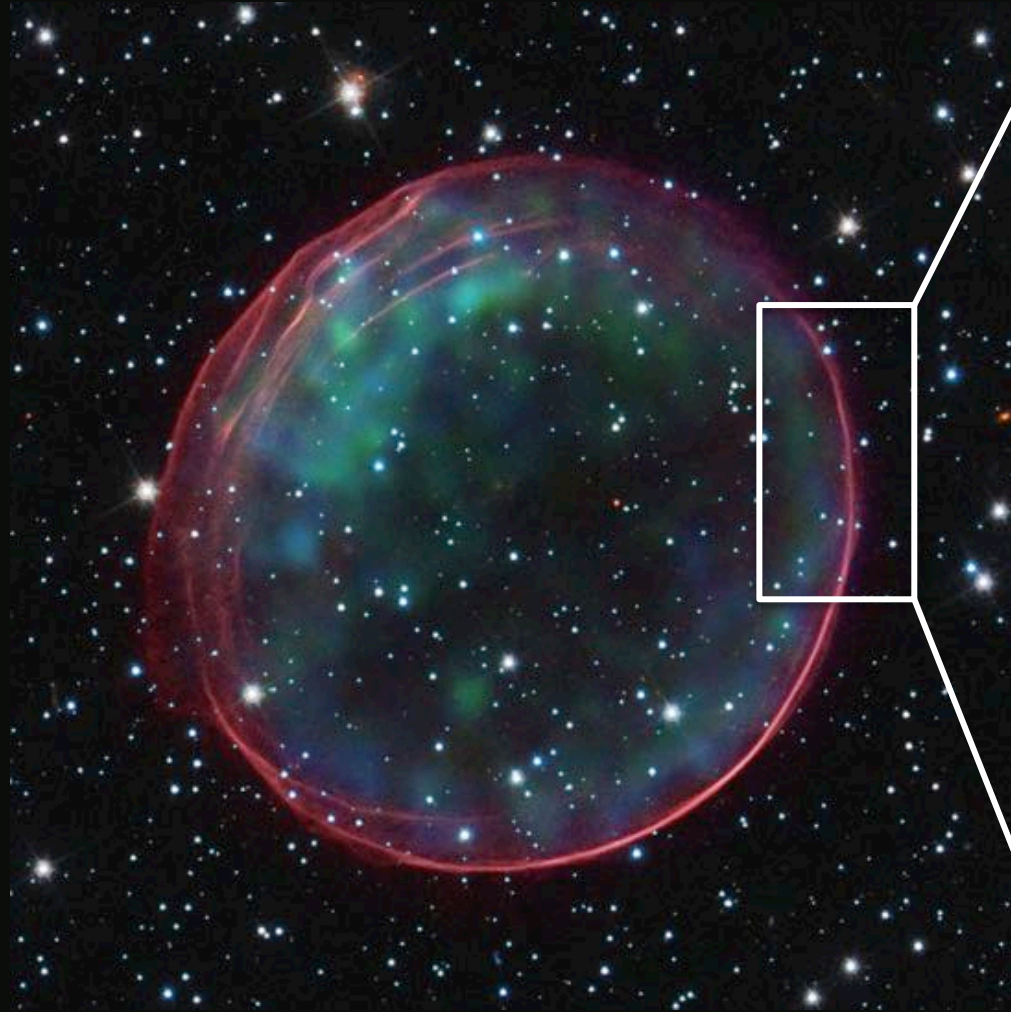
$$dN(E)/dE \propto E^{-3.0} \text{ (Ankle 付近)}$$

銀河系外为天体起源
 (AGN, *starburst galaxies*, GRB...)

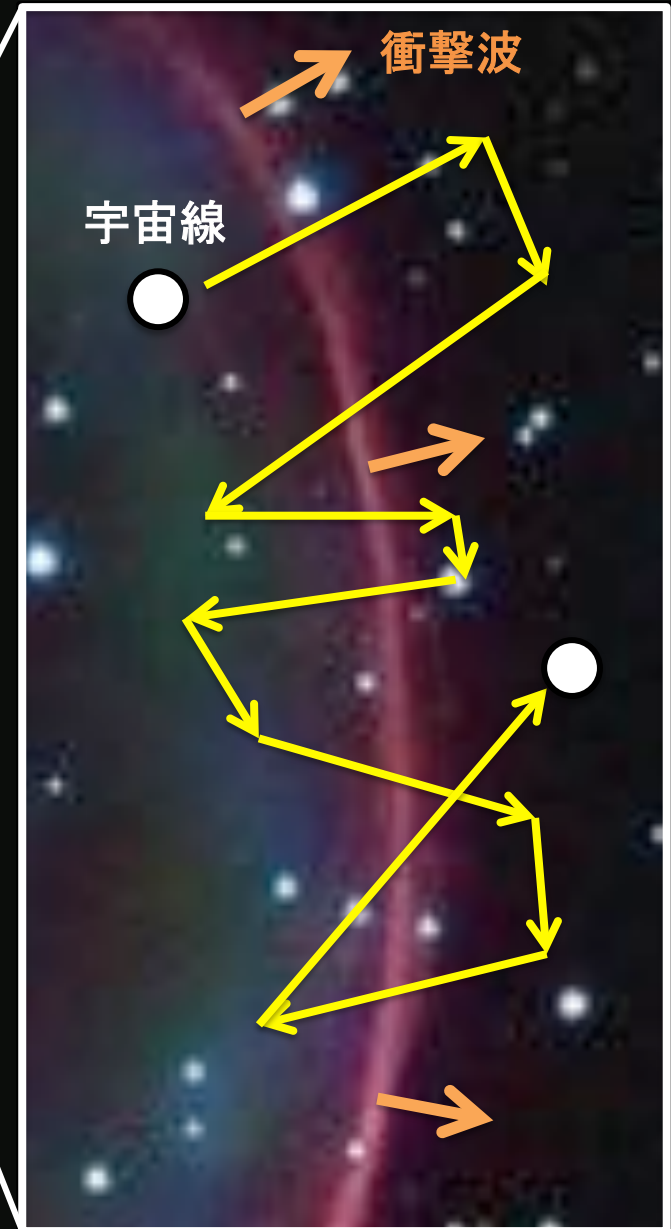
The Pierre Auger Collaboration et al. (2017)

- An explosion that occurs during the death of massive star or white dwarf(s)
- The shock waves is as fast as $3,000 \text{ km s}^{-1}$, which accelerates cosmic-rays





大マゼラン雲の超新星残骸 B0509-67.5



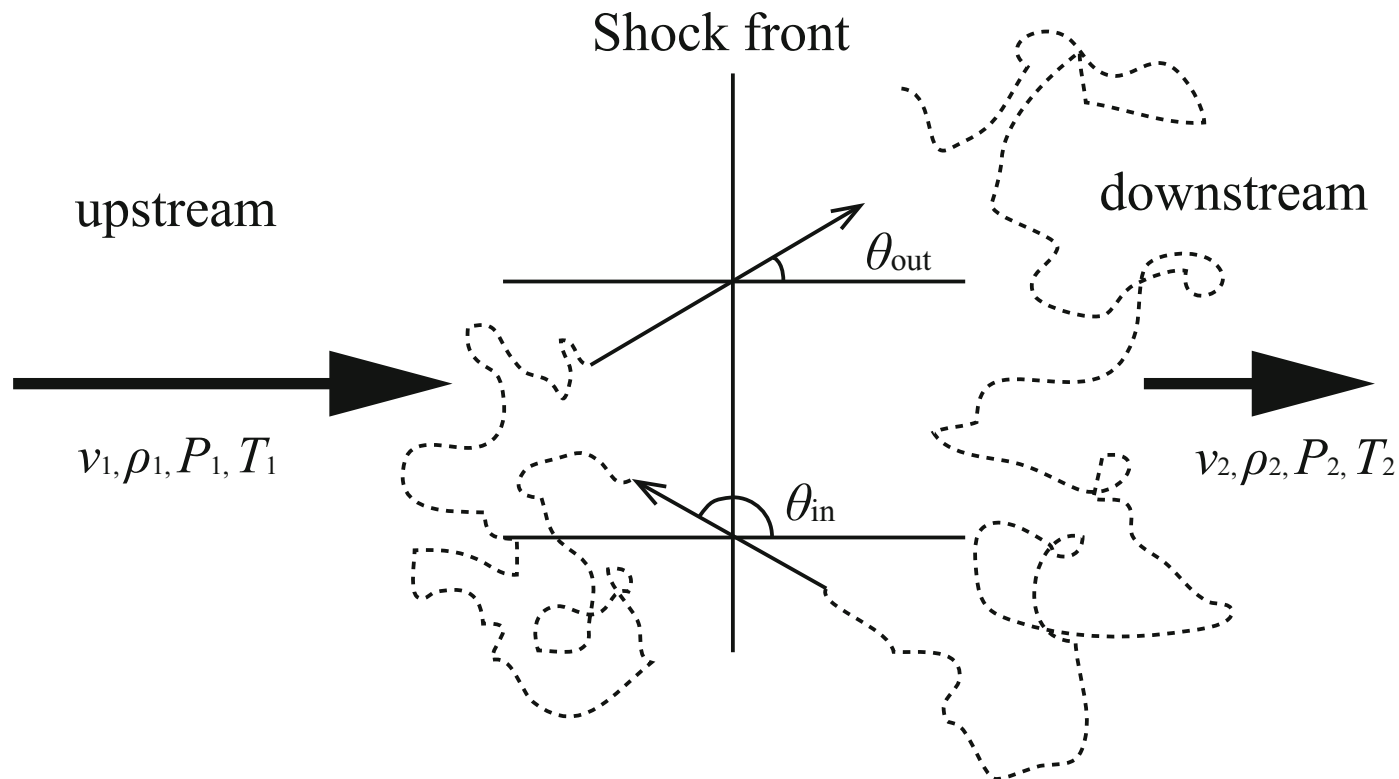
Rankine-Hugnoiot equation

$$\rho_1 v_1 = \rho_2 v_2 \quad (\text{Mass conservation})$$

$$P_1 + \rho_1 v_1^2 = P_2 + \rho_2 v_2^2 \quad (\text{Momentum conservation})$$

$$\rho_1 v_1 \left(\frac{v_1^2}{2} + \frac{P_1}{\rho_1} + u_1 \right) = \rho_2 v_2 \left(\frac{v_2^2}{2} + \frac{P_2}{\rho_2} + u_2 \right),$$

(Energy conservation)



1 往復あたりの energy gain ΔE

$$\Delta E = \frac{v_1 - v_2}{c} (\cos \theta_{\text{in}} - \cos \theta_{\text{out}}) E.$$

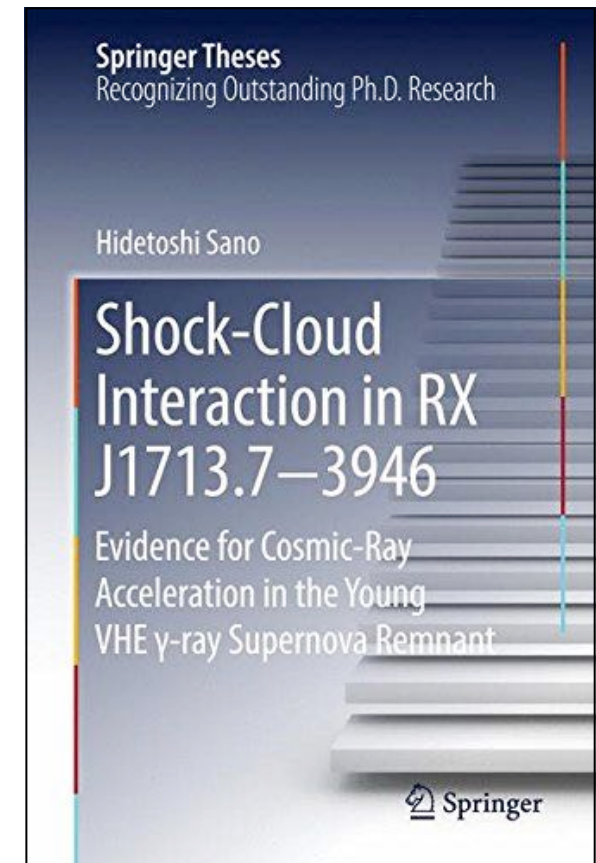
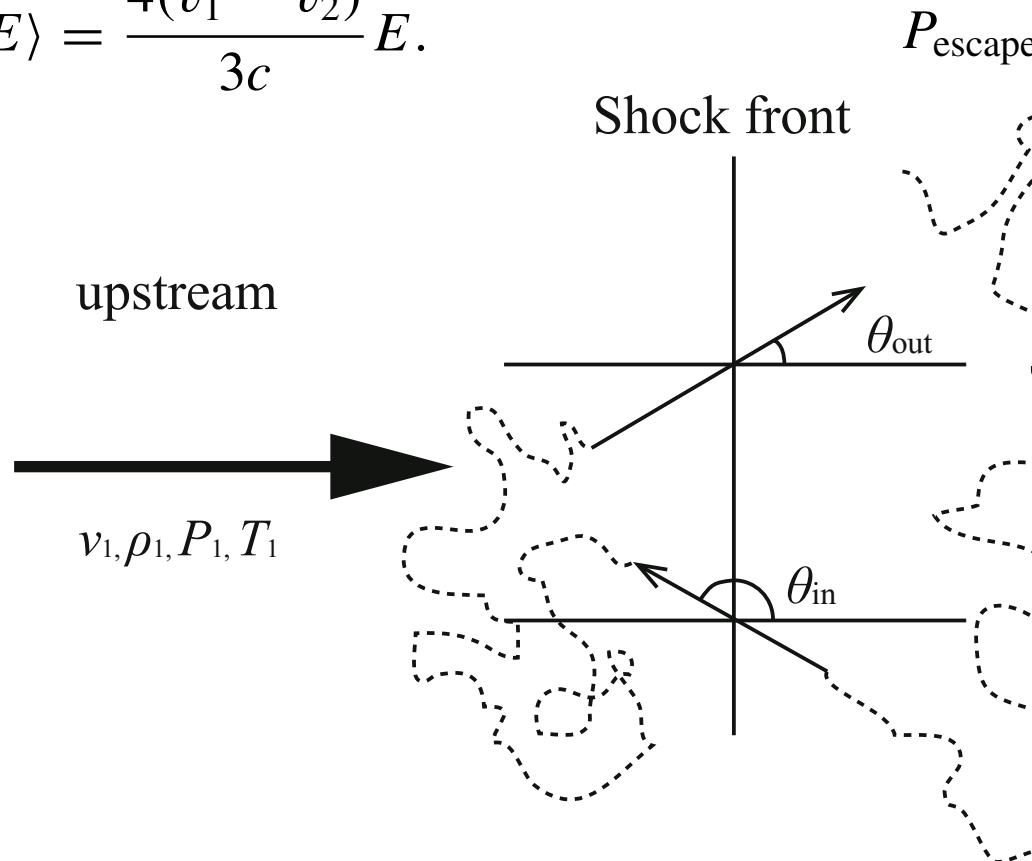
1 往復あたりの averaged energy gain $\langle \Delta E \rangle$

$$\langle \Delta E \rangle = \frac{4(v_1 - v_2)}{3c} E.$$

n 往復あたりの averaged energy gain E_n

$$E_n = E_0 \left(1 + \frac{4(v_1 - v_2)}{3c} \right)^n$$

n 往復あたりの escape probability P_{escape}



Energy spectrum of accelerated particles dN/dE

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\frac{3v_2}{v_1-v_2}-1} = E^{-\alpha},$$

Strong shock $\rightarrow \alpha = 2.0$

地球近傍での観測結果 $\rightarrow \alpha = 2.7$

(energy 高い方から拡散するので無矛盾)

Maximum energy of accelerated particles $E_{\max}$

$$E_{\max} \sim 100 \times \eta^{-1} Z_e \left(\frac{v_s}{5000 \text{ km s}^{-1}} \right) \left(\frac{B}{10 \text{ } \mu\text{G}} \right) \left(\frac{R}{10 \text{ pc}} \right) \text{ TeV}.$$

$\eta = (B / \delta B)^2$ (磁場乱流度の指標、 $\eta = 1$ が最も乱流度が高い)

Z_e : charge of accelerated particle

例えば、宇宙線陽子の場合

衝撃波統計加速 DSA では、少なくとも $\sim 100 \text{ TeV}$ まで加速される

完全電離した鉄原子核 (Fe^{+26}) の場合は、 $\sim 3 \text{ PeV}$ 程度まで加速可 ($\sim \text{knee energy}$)

Injection rate of cosmic-rays L_{CR}

$$L_{\text{CR}} = \frac{V \varepsilon_{\text{CR}}}{\tau_{\text{esc}}} \sim 10^{41} \text{ erg s}^{-1},$$

V : 銀河円盤の体積 ($= \pi R^2 h \sim 4 \times 10^{66} \text{ cm}^3$, 半径 $R \sim 15 \text{ kpc}$, 厚さ $h \sim 200 \text{ pc}$)

ε_{CR} : 宇宙線のエネルギー密度 ($= 1.39 \text{ eV cm}^{-3} = 2.2 \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-3}$)

τ_{esc} : escape time scale ($\sim 3 \times 10^6 \text{ yr}$, e.g., Gabich 2013)

Total power of supernova explosion P_{SNR}

$$P_{\text{SNR}} = \frac{E_{\text{SN}}}{f_{\text{SN}}} \sim 10^{42} \text{ erg s}^{-1},$$

E_{SN} : 典型的な超新星爆発のエネルギー ($\sim 10^{51} \text{ erg}$)

f_{SN} : 超新星爆発の頻度 ($= 30 \text{ 年に1回}$)

従って、各超新星爆発の運動エネルギーの $\sim 10 \%$ が宇宙線に変換されれば良さそう

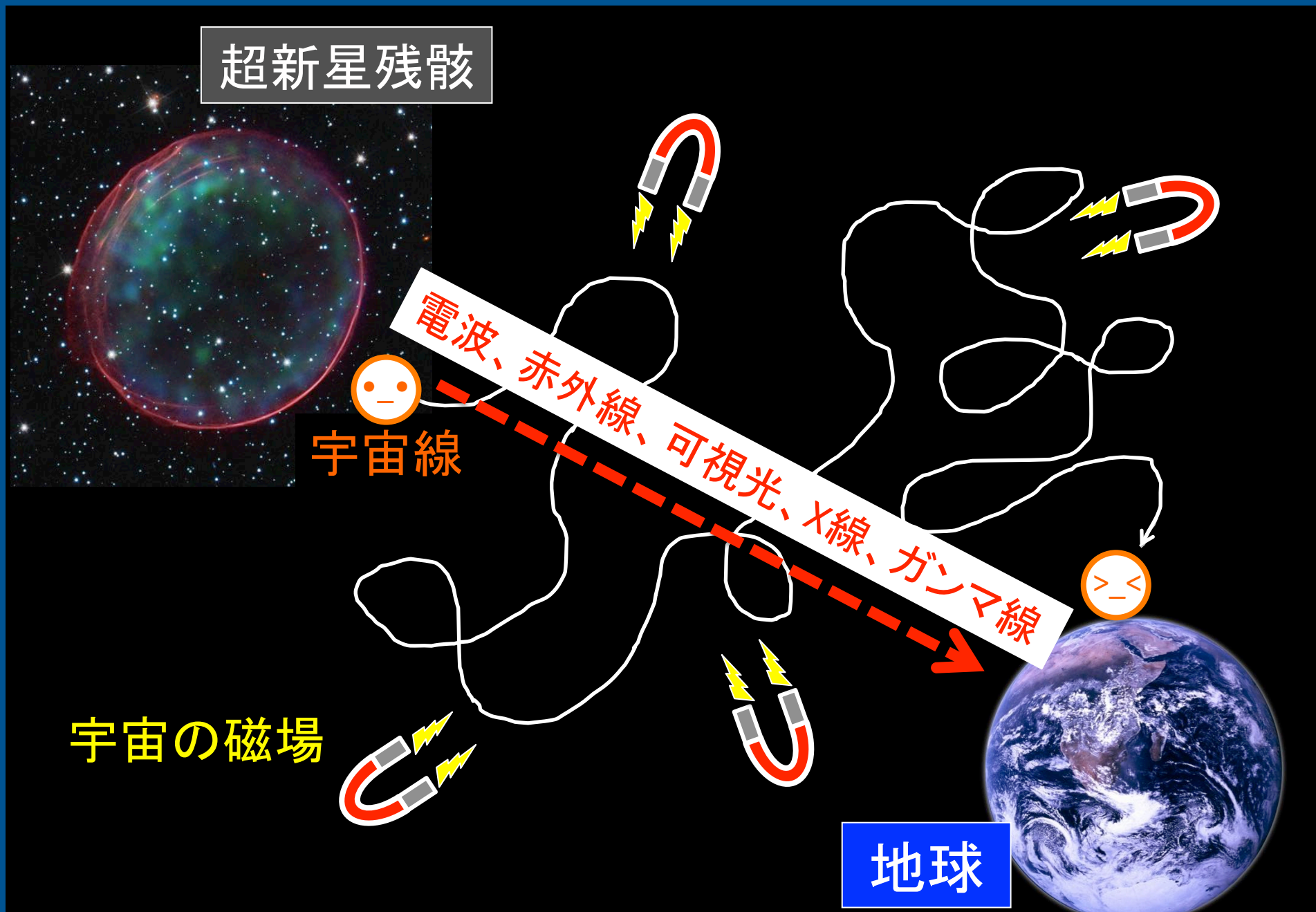
超新星残骸

宇宙線

宇宙の磁場

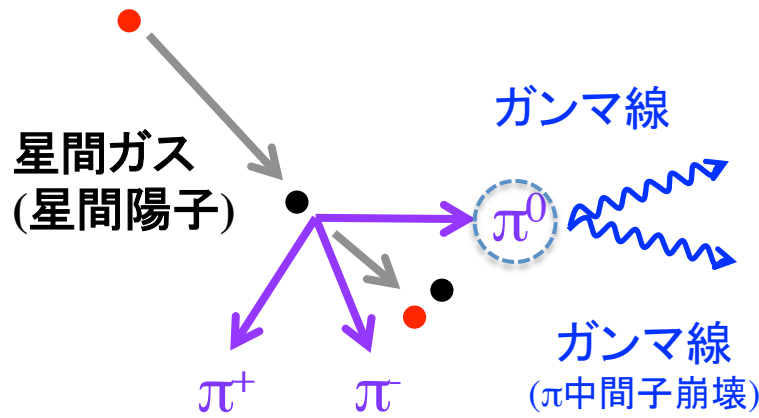
電波、赤外線、可視光、X線、ガンマ線

地球



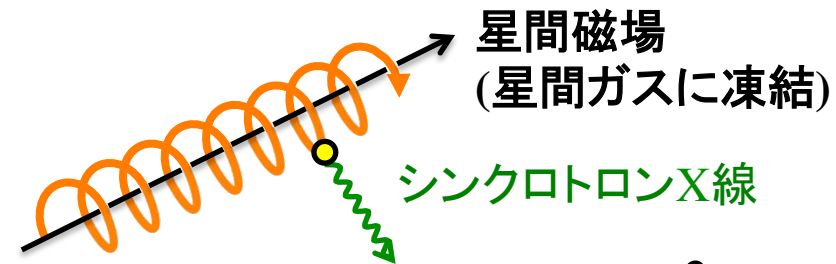
宇宙線陽子

【陽子起源】

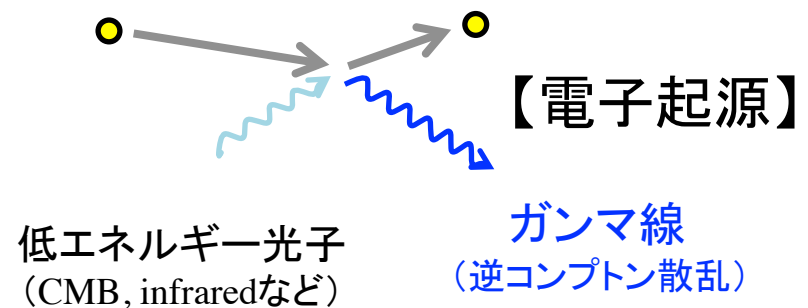


$$F \propto \frac{W_p n}{d^2} \left[\begin{array}{l} F: \text{ガンマ線フラックス} \\ W_p: \text{陽子の全エネルギー} \\ n: \text{星間ガス密度} \\ d: \text{SNRまでの距離} \end{array} \right]$$

宇宙線電子

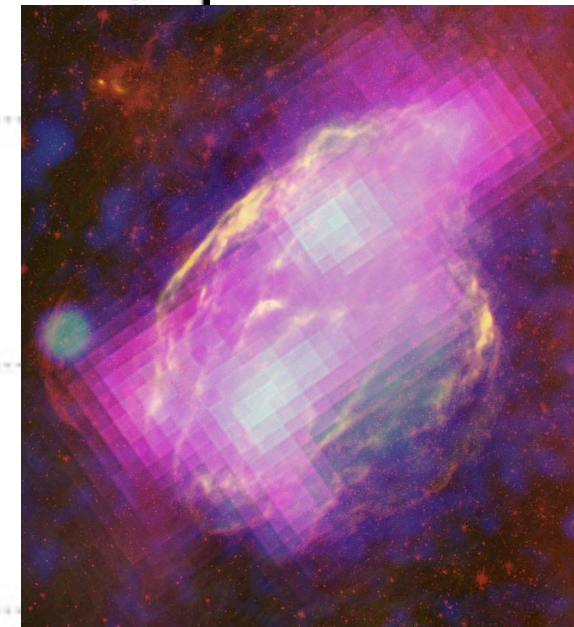
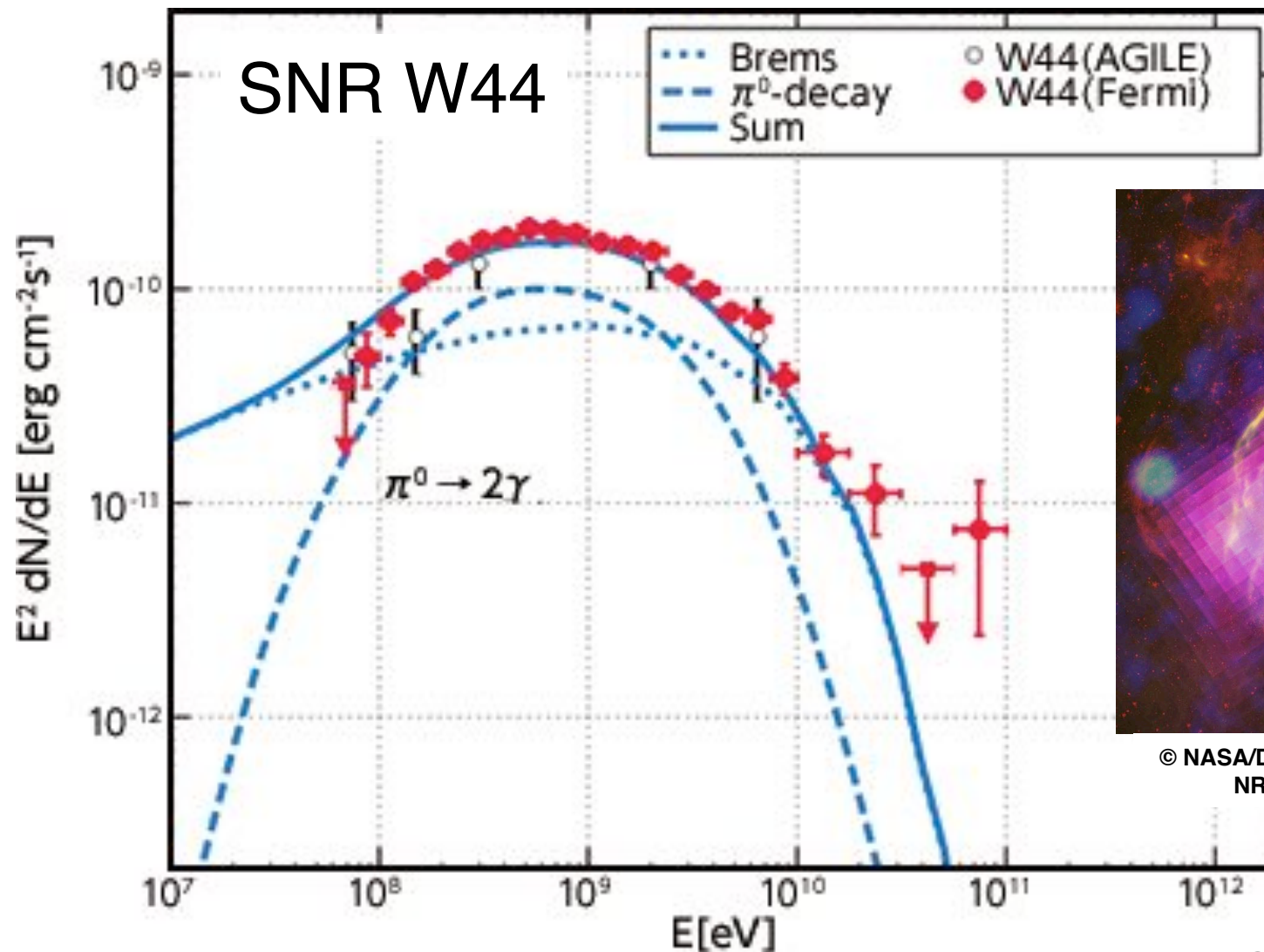


$$F \propto B^2$$

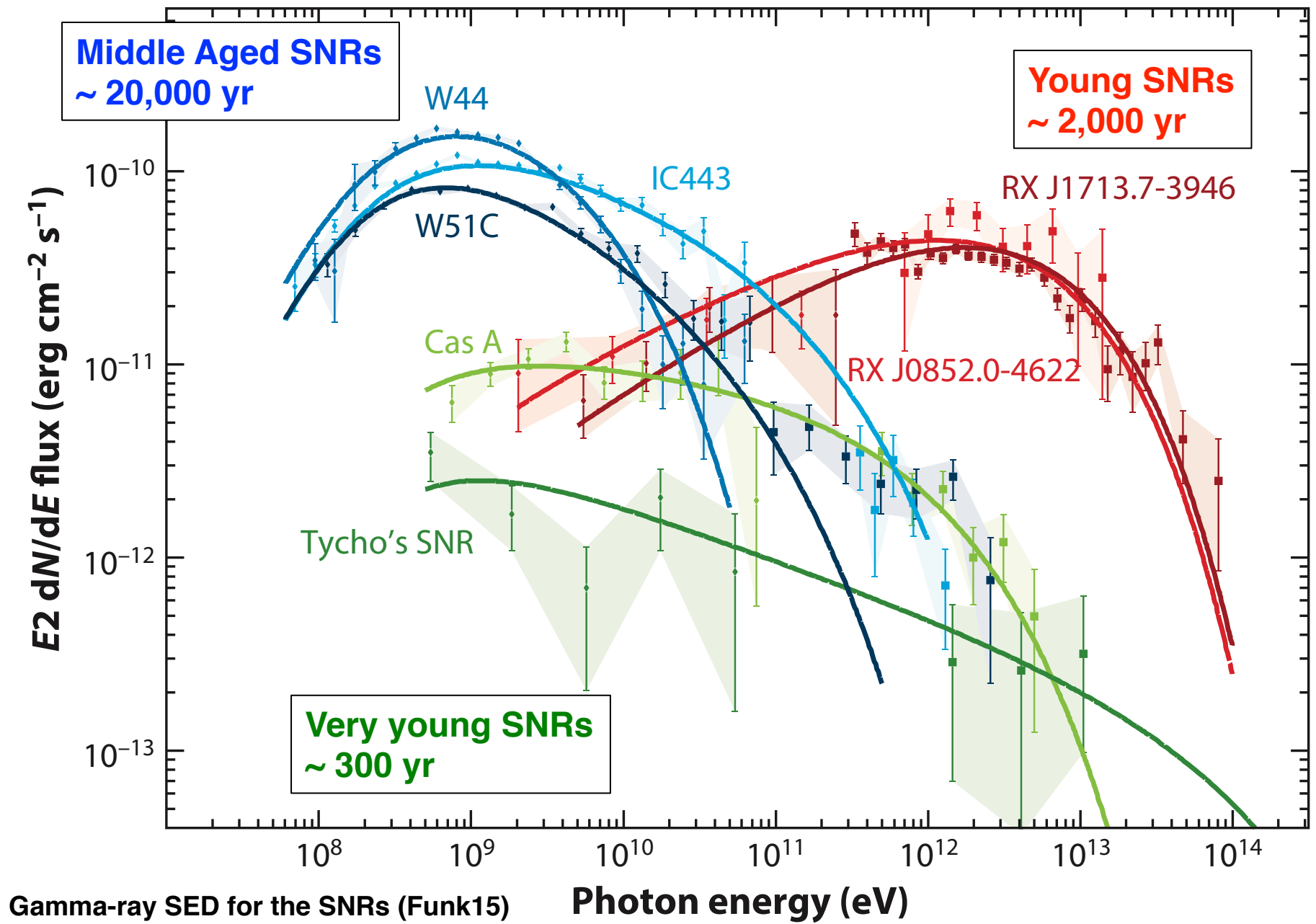


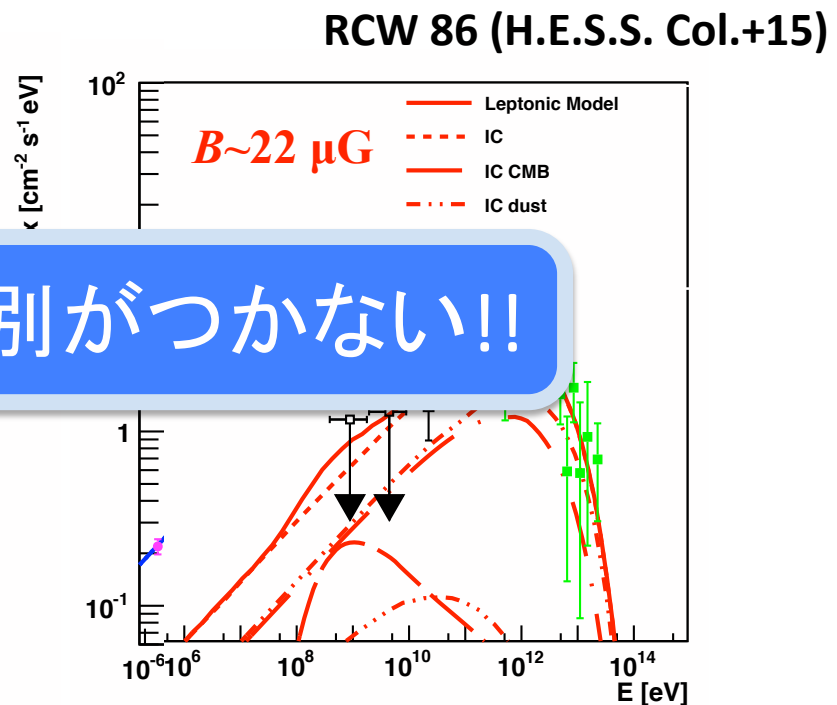
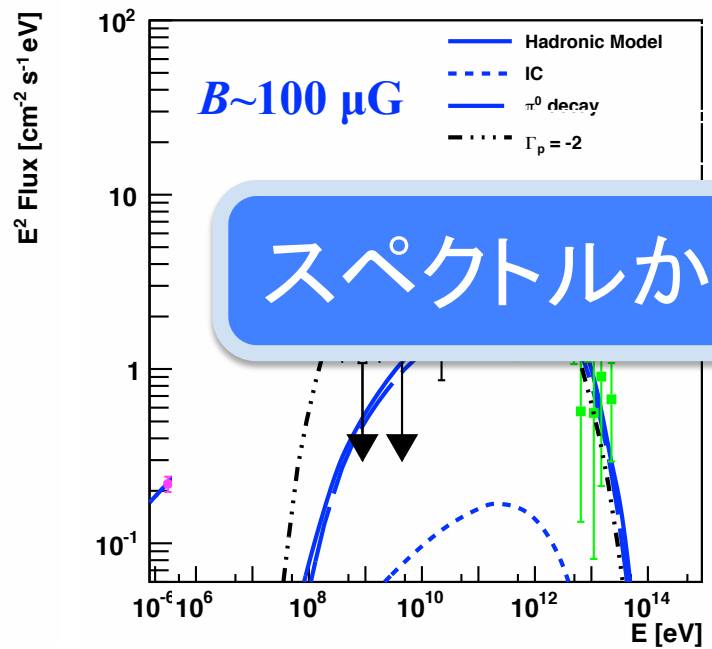
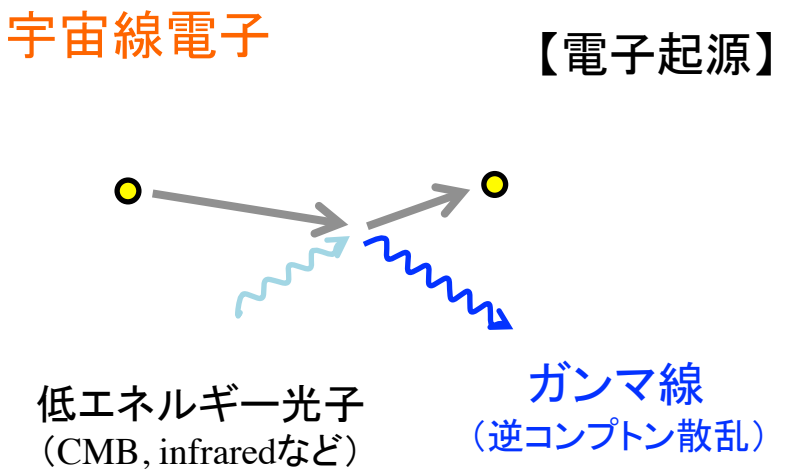
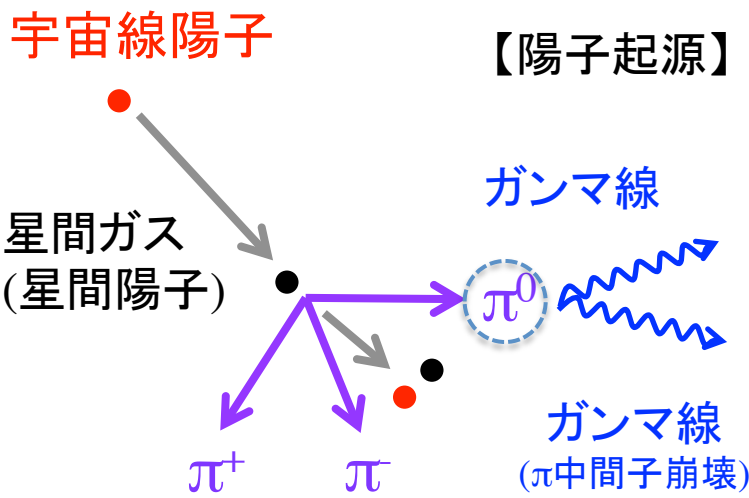
陽子起源ガンマ線を観測的に証明できれば、
超新星残骸での宇宙線加速を捉えたことになる

■ 陽子起源ガンマ線の場合、~100 MeV のスペクトルに折れ曲り

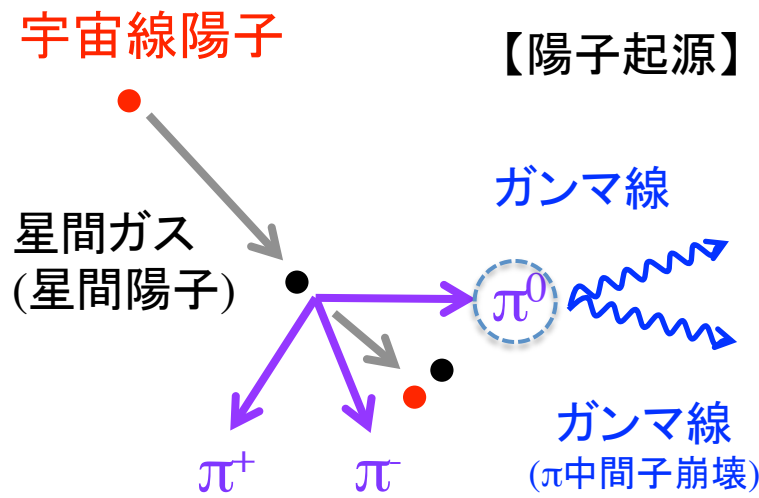


© NASA/DOE/Fermi LAT Collaboration,
NRAO/AUI, JPL-Caltech, ROSAT





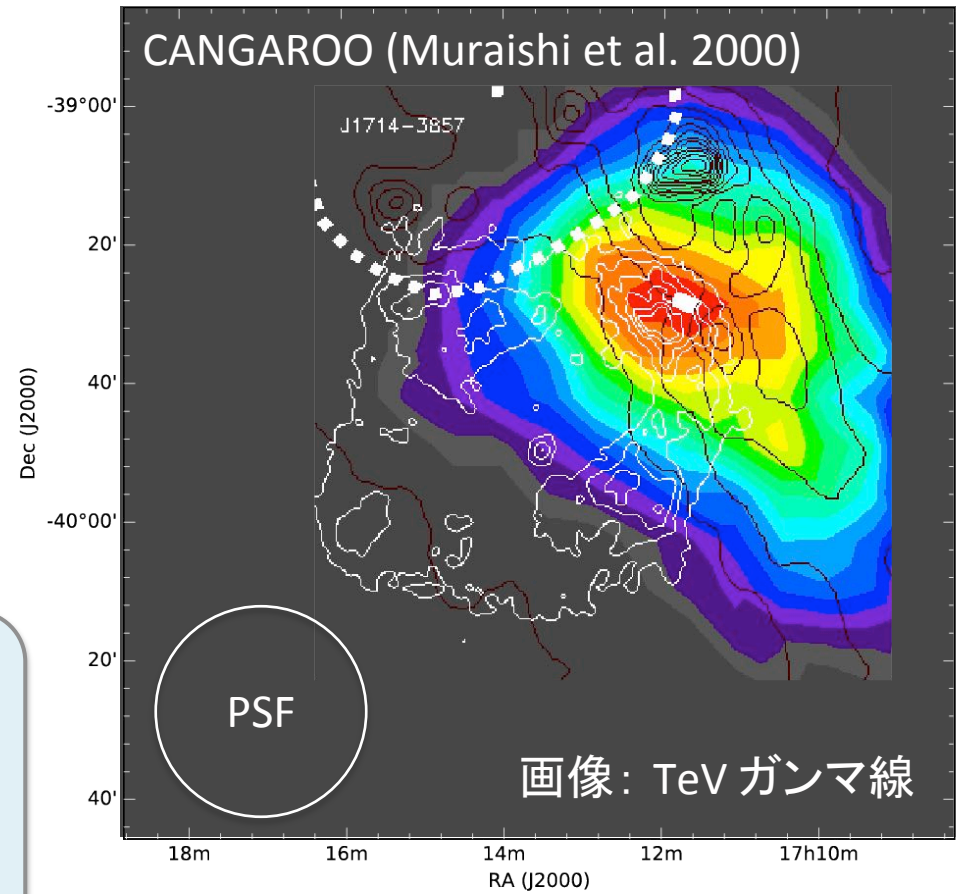
スペクトルからは区別がつかない!!



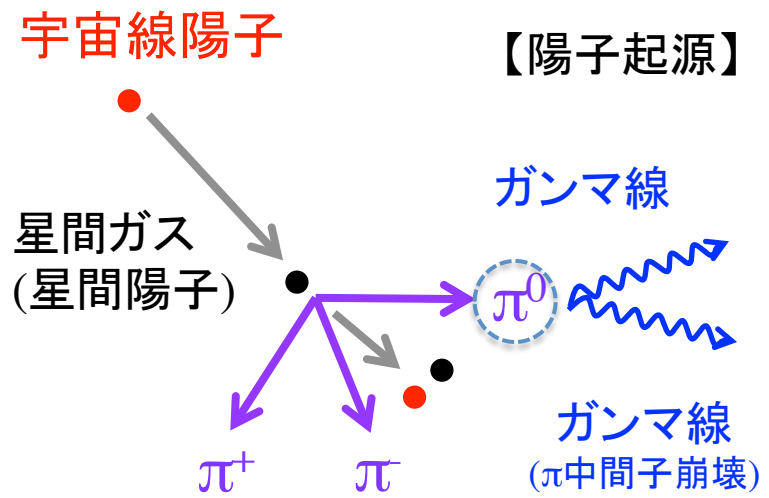
$$F \propto \frac{W_p n}{d^2}$$

F : ガンマ線フラックス
 W_p : 陽子の全エネルギー
 n : 星間ガス密度
 d : SNRまでの距離

ガンマ線フラックス
 $\propto$ 星間ガスの密度分布



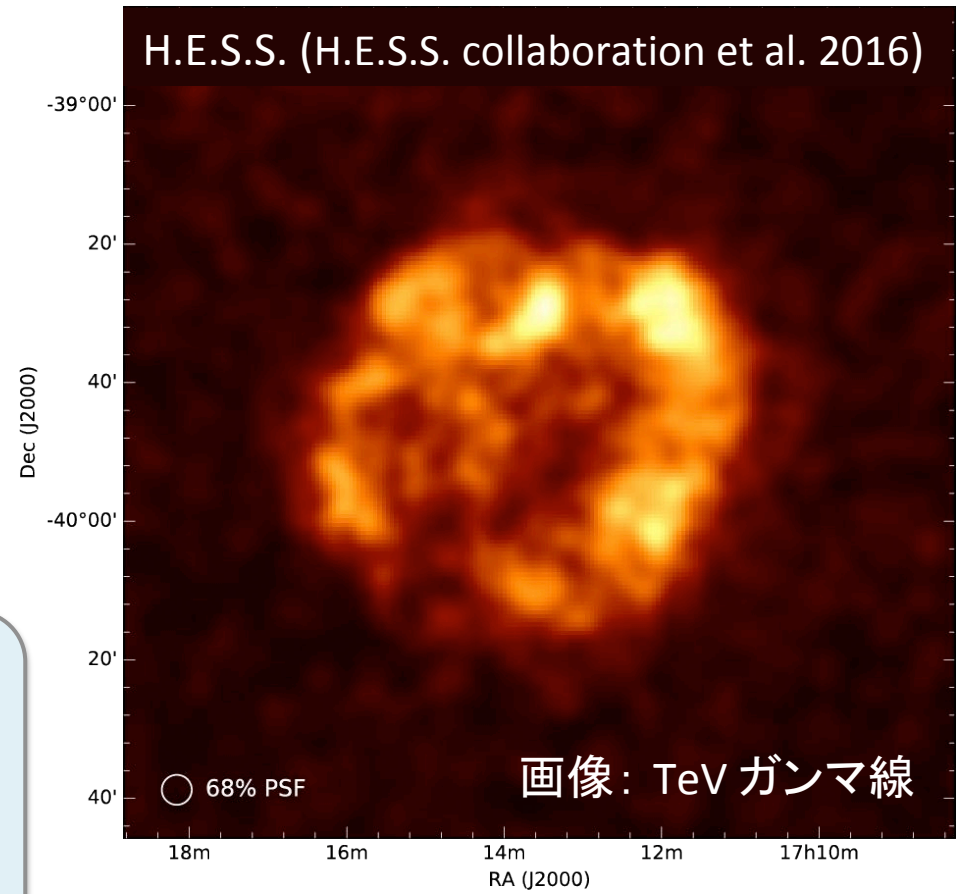
一昔前の RX J1713.7-3946 のガンマ線分布



$$F \propto \frac{W_p n}{d^2}$$

F : ガンマ線フラックス
 W_p : 陽子の全エネルギー
 n : 星間ガス密度
 d : SNRまでの距離

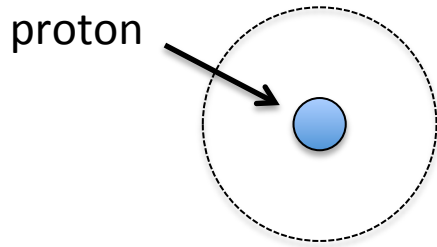
ガンマ線フラックス
∝ 星間ガスの密度分布



最新の RX J1713.7-3946 のガンマ線分布
→ ガス分布と比較できる時代が来た!!

- ガス層中では、イオン、原子、分子の形態で存在
- 大量の水素、若干のヘリウムほかから構成される

電離ガス (HII)

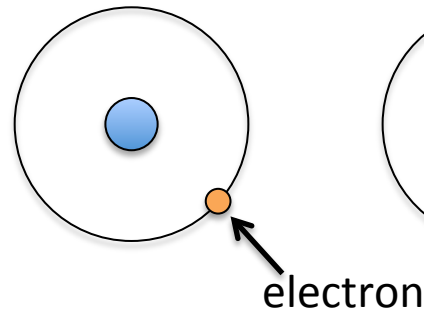


質量 (fraction) $\sim 1.12 \times 10^9 M_{\odot}$
(23%)

密度 $\sim 0.1 - 10^4 \text{ cm}^{-3}$

温度 $> 10^4 \text{ K}$

水素原子 (HI)

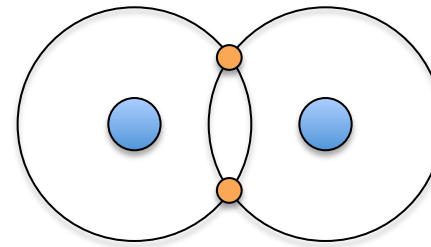


$\sim 1.9 \times 10^9 M_{\odot}$
(60%)

$\sim 1 - \text{数}100 \text{ cm}^{-3}$

$\sim 30 - 5000 \text{ K}$

水素分子 (H2)

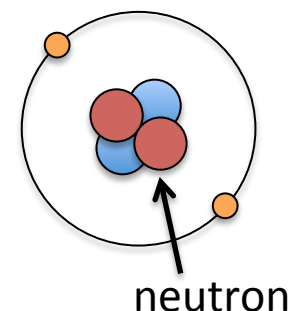


$\sim 0.84 \times 10^9 M_{\odot}$
(17%)

$\sim 10^3 - 10^6 \text{ cm}^{-3}$

$\sim 10 - 50 \text{ K}$

ヘリウム (He)



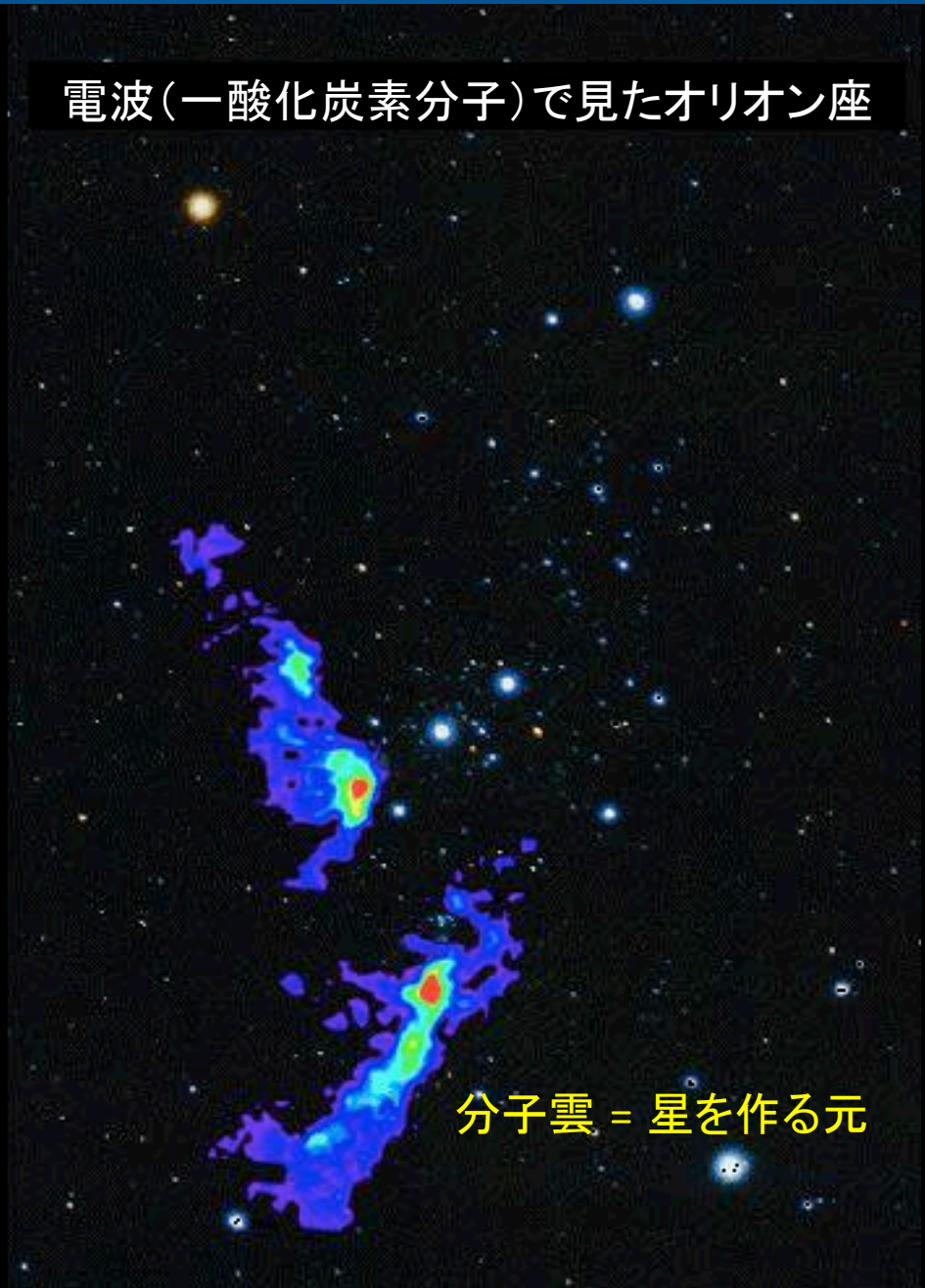
$\sim 1.8 \times 10^9 M_{\odot}$
($\text{H}_2 : \text{He} = 1 : 0.6$)

超新星残骸では、水素原子・分子ガスが重要

可視光で見たオリオン座



電波(一酸化炭素分子)で見たオリオン座



分子雲 = 星を作る元

分子雲

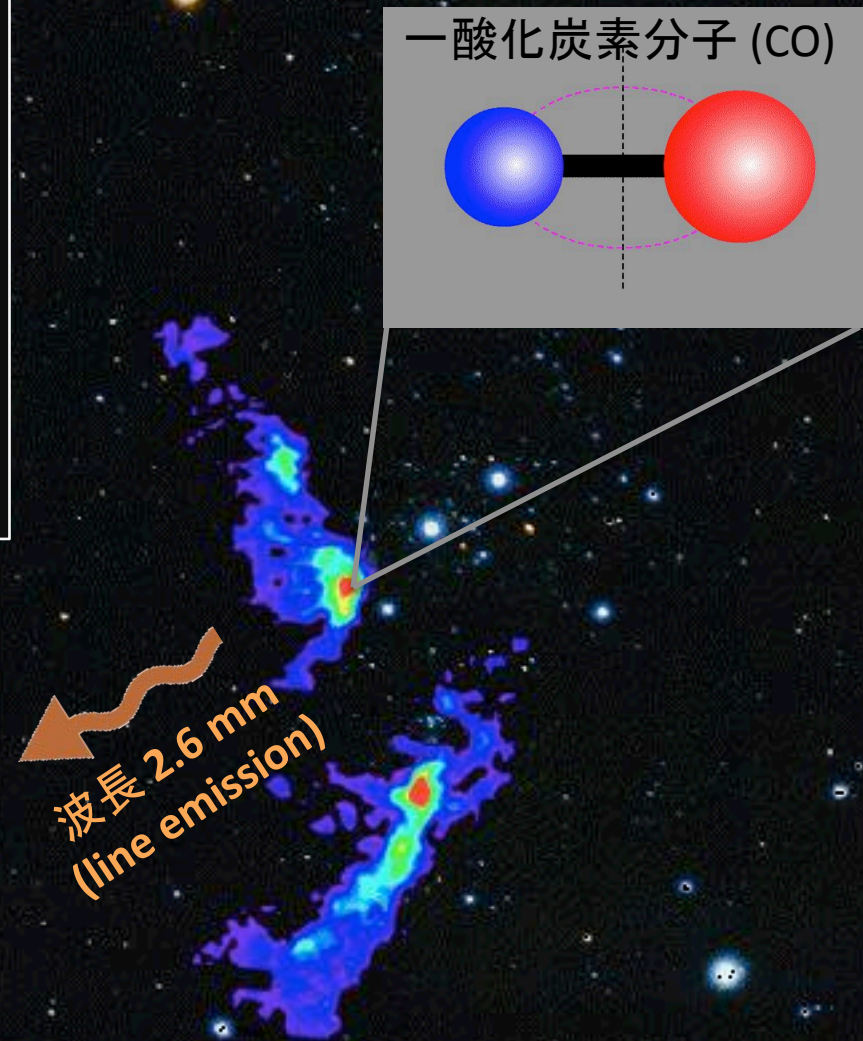
- 主成分は水素分子ガス (H_2)
- H_2 は $\sim 10 \text{ K}$ では励起されない
- 分子雲のトレーサーとして、
一酸化炭素分子 (CO) を使う
- $\text{H}_2 : \text{CO} \sim 10000 : 1$
- $\sim 5 \text{ K}$ で励起 ($J = 1-0$)

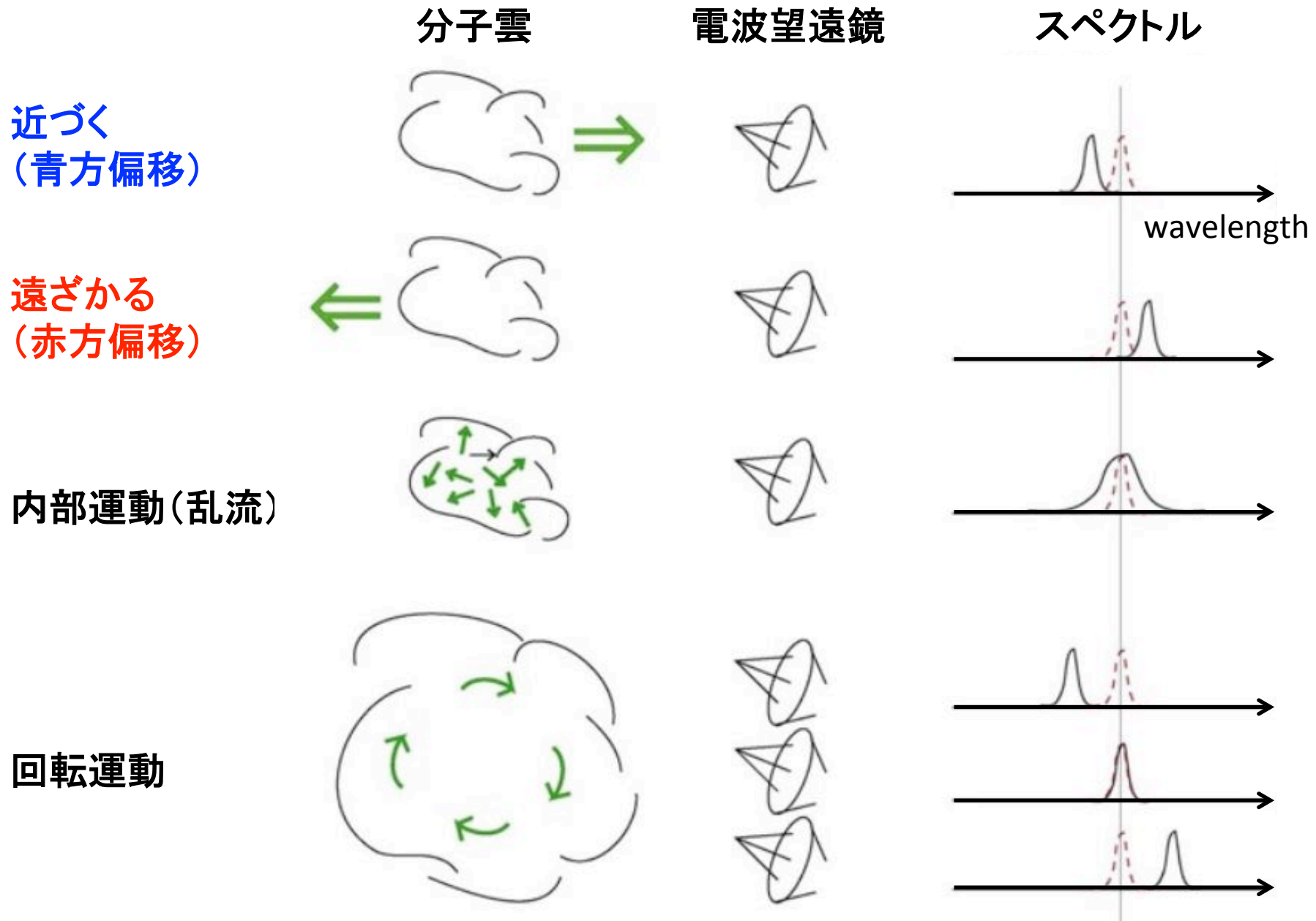
電波望遠鏡



- 分子雲の空間分布
- ガスの量・密度・温度
- 視線方向の運動 (速度)

電波(一酸化炭素分子)で見たオリオン座

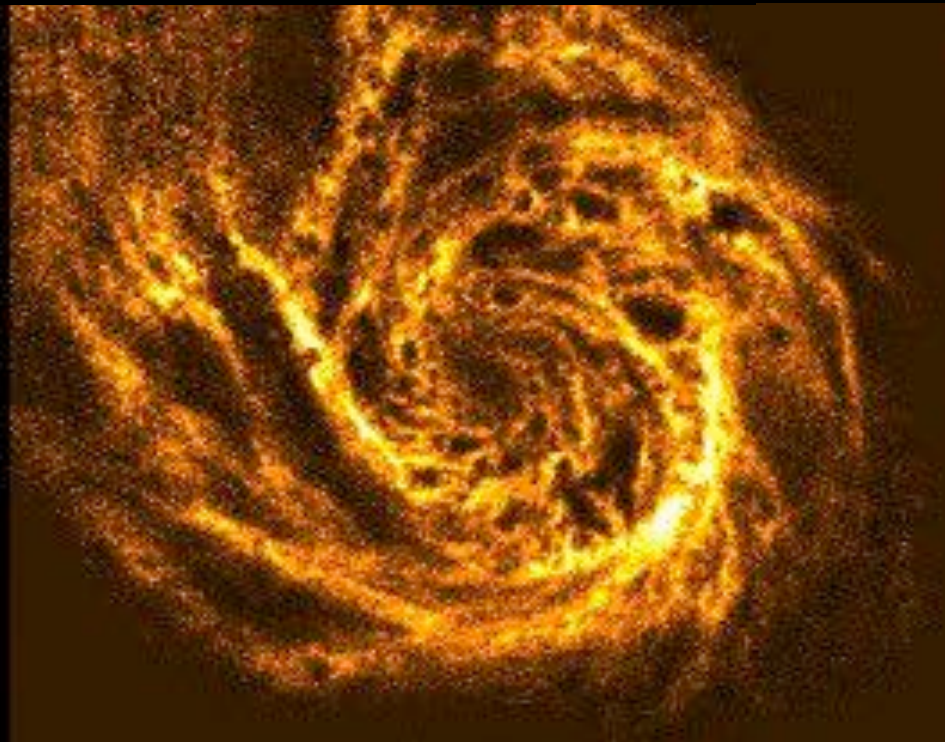




可視光で見た銀河 NGC 5457

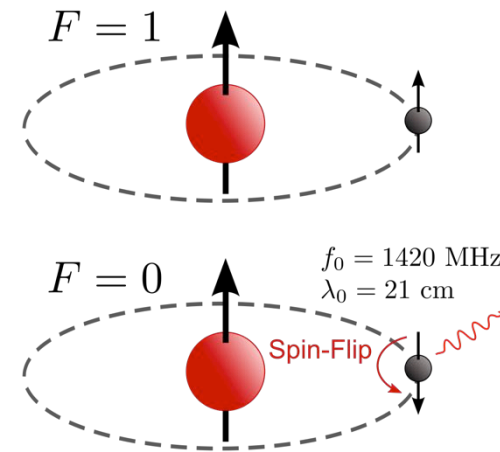


HI 21 cm 電波で見た銀河 NGC 5457



原子ガス

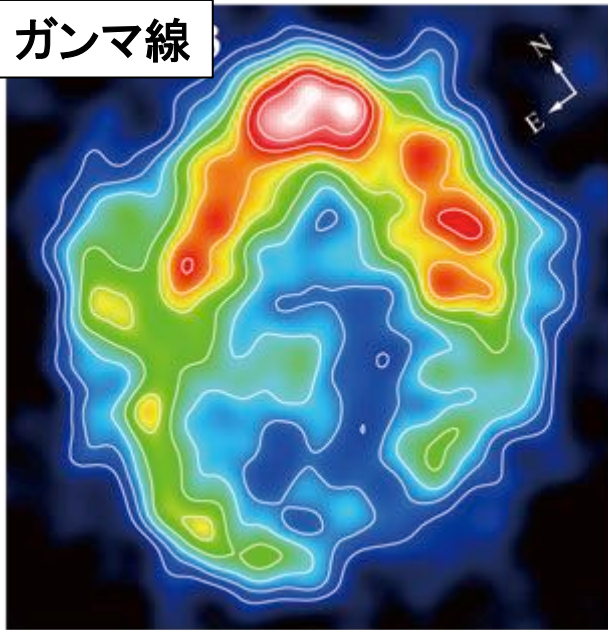
- 主成分は水素原子(HI)
- 銀河系の腕構造に沿って分布
- **HI 21cm 輝線**で観測
- ガスの分布/質量/密度/速度等



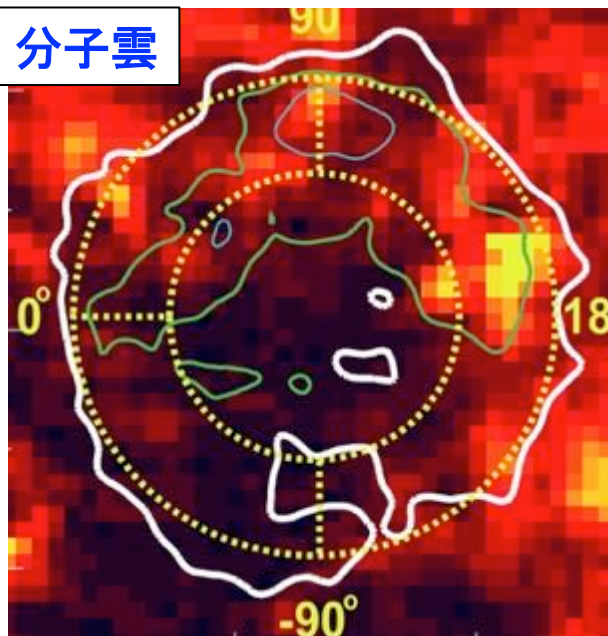
電波望遠鏡



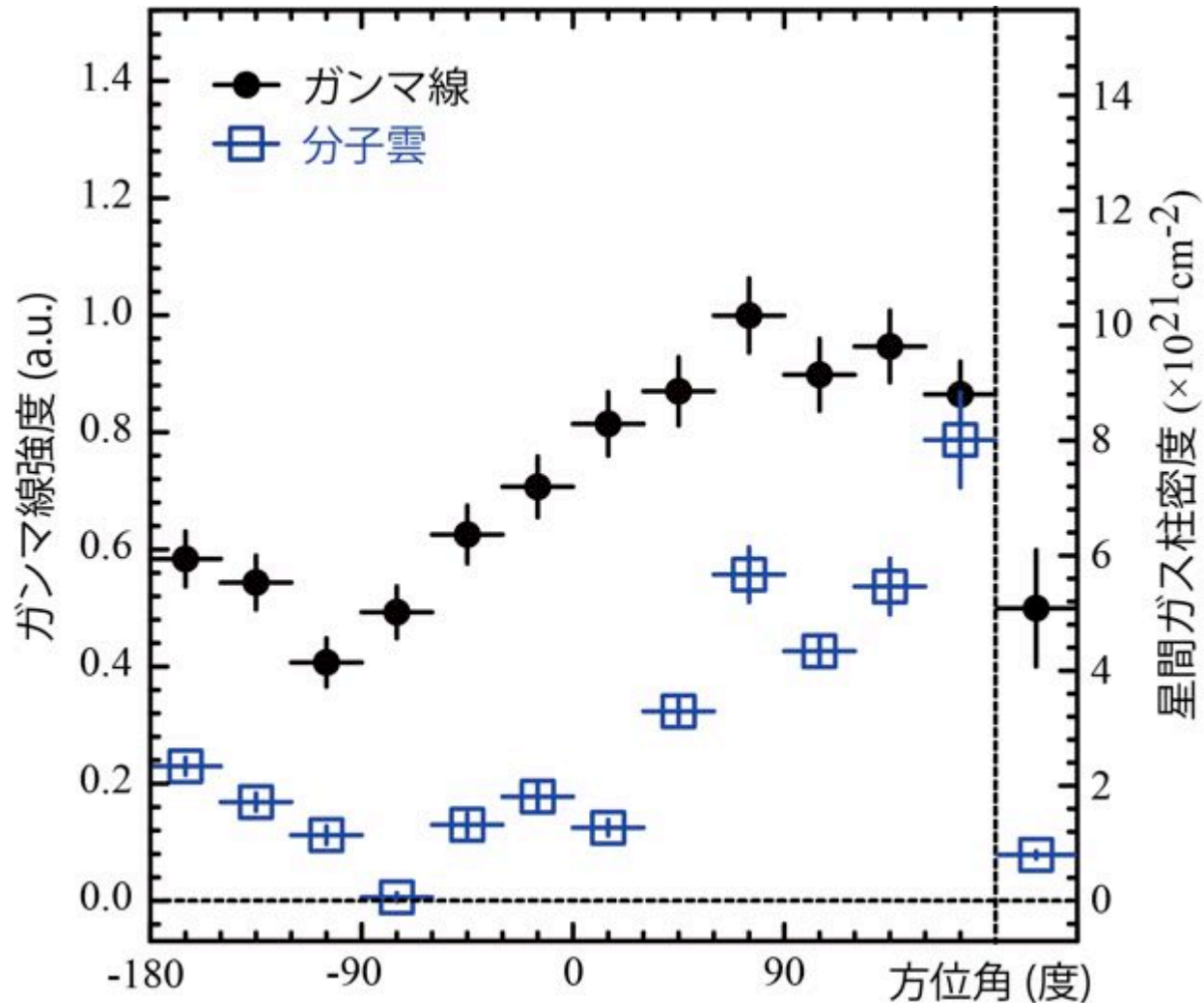
ガンマ線



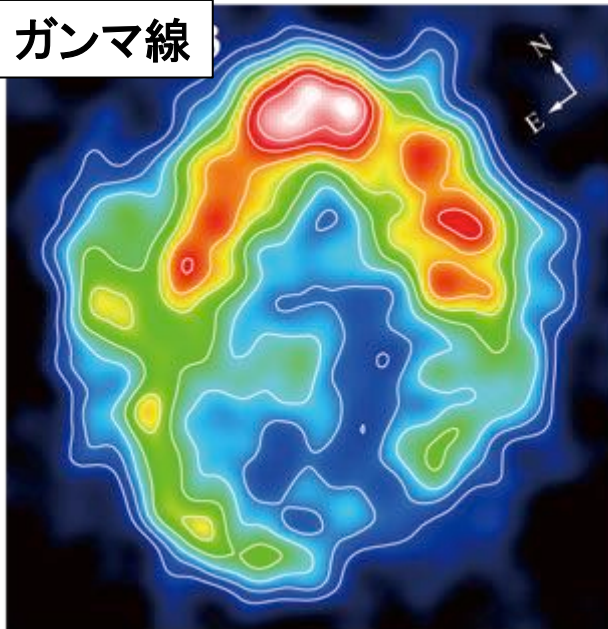
分子雲



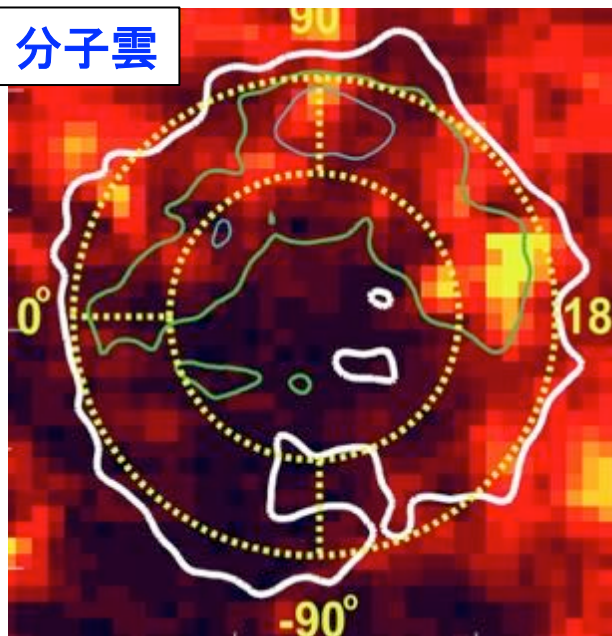
ガンマ線と分子雲分布の傾向は似ている
一部でガンマ線に対応する分子雲が無い



ガンマ線

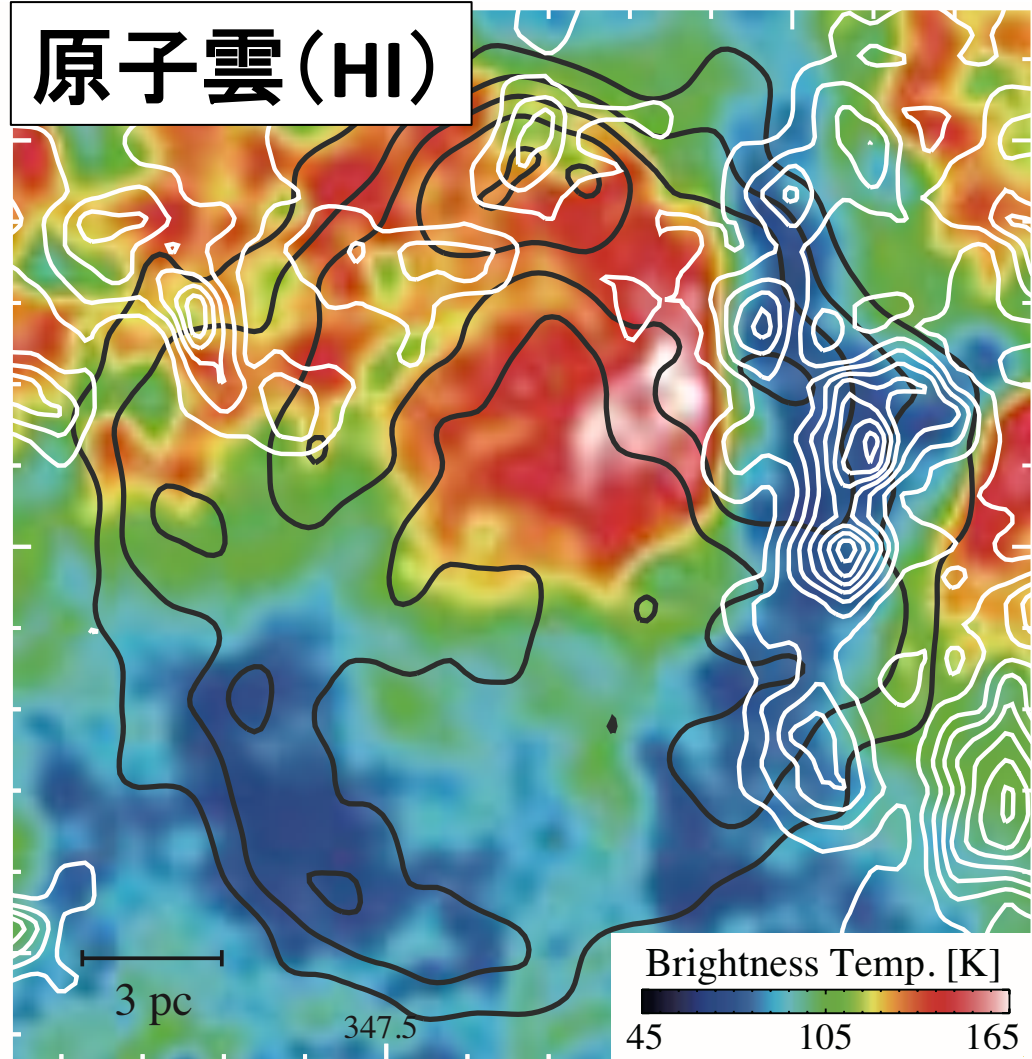


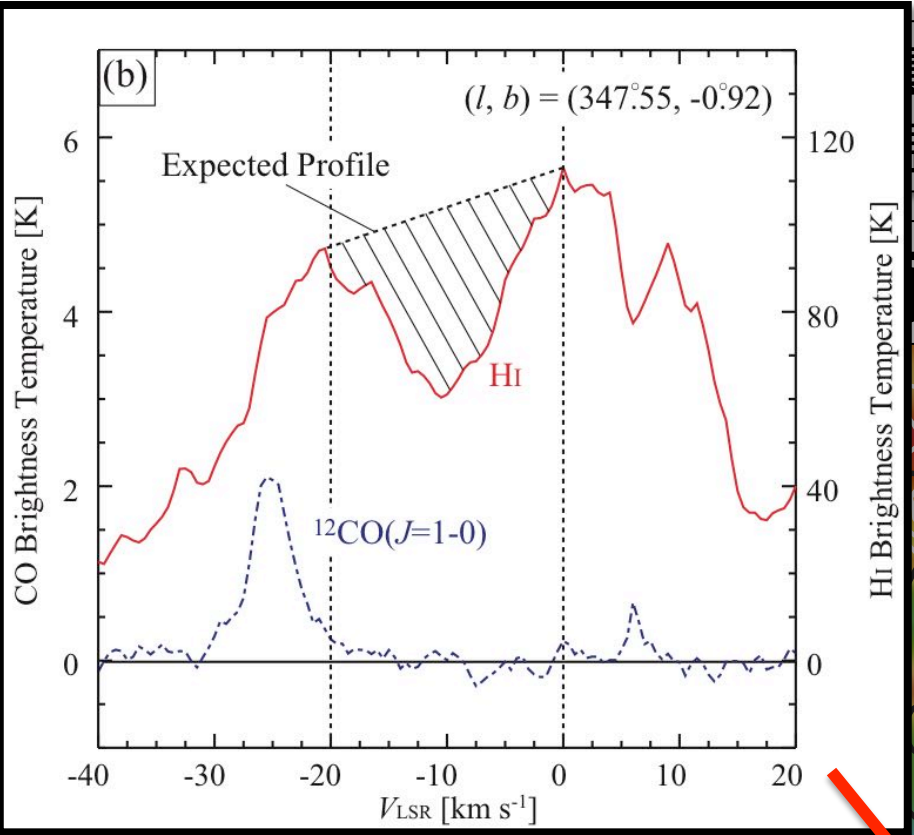
分子雲



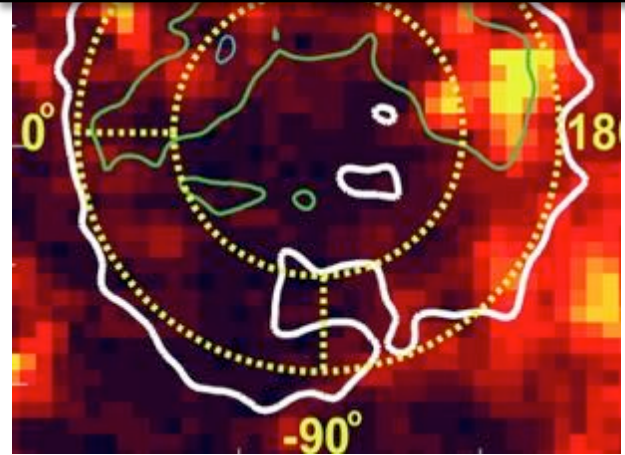
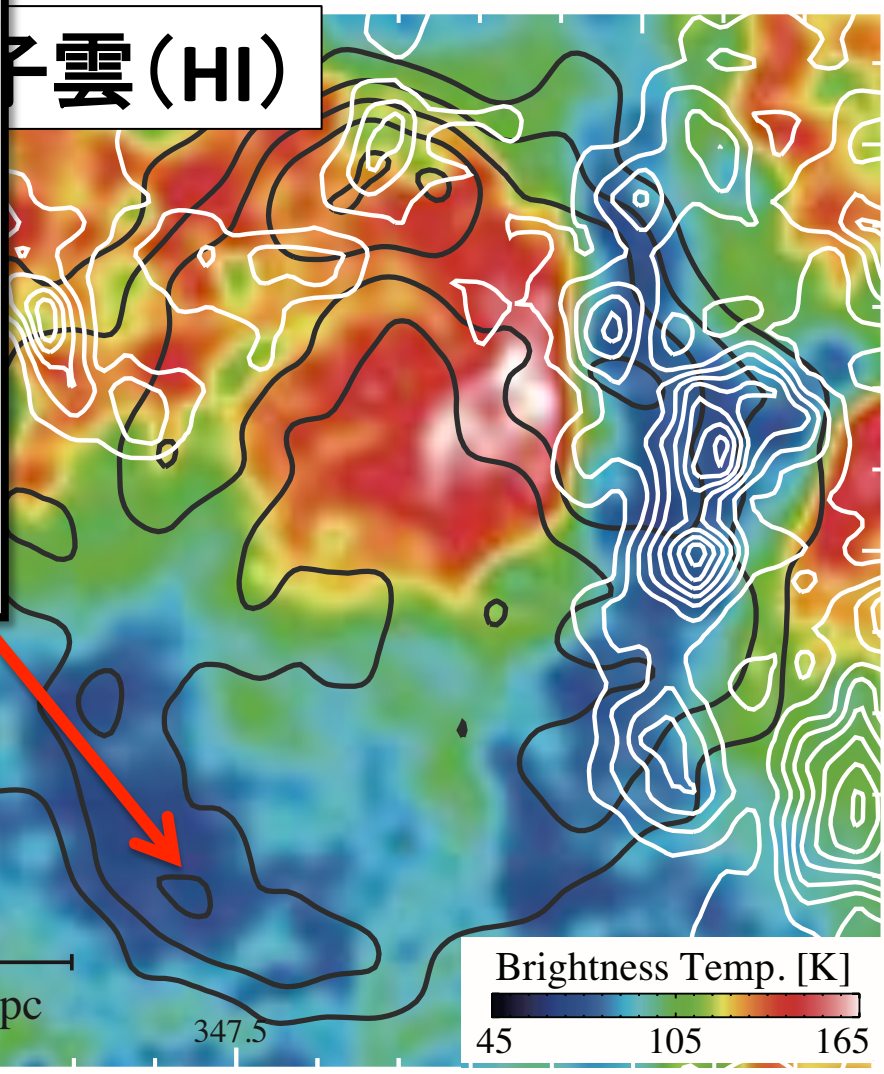
分子雲が無かった場所に、冷たい原子雲
→ 低温 (~ 40 K)、高密度 (~ 100 個/cc)

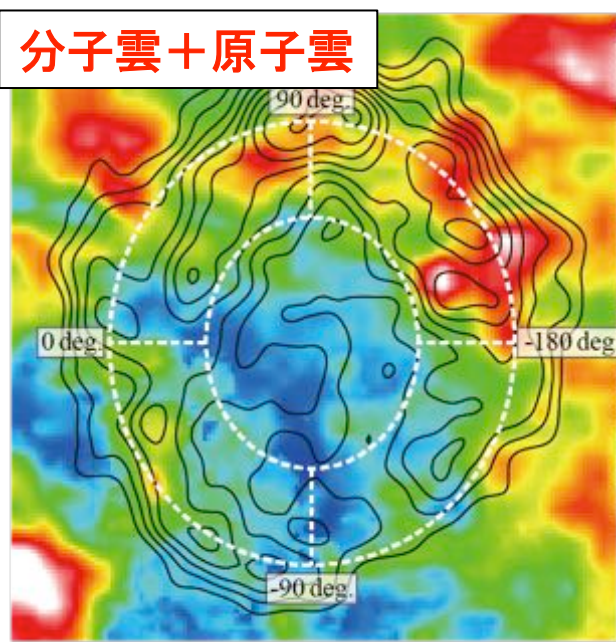
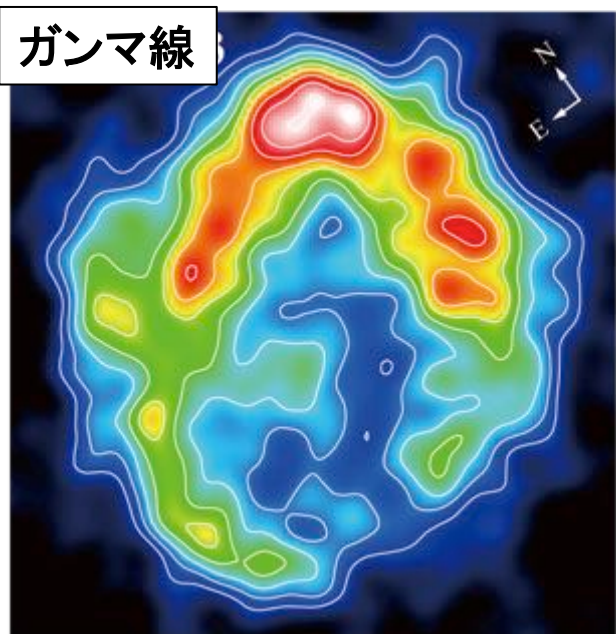
原子雲(HI)





雲が無かった場所に、冷たい原子雲
盤 (~ 40 K)、高密度 (~ 100 個/cc)





ガンマ線と星間陽子(分子+原子)の一致
→ 陽子起源ガンマ線、加速効率 $\sim 0.1\%$

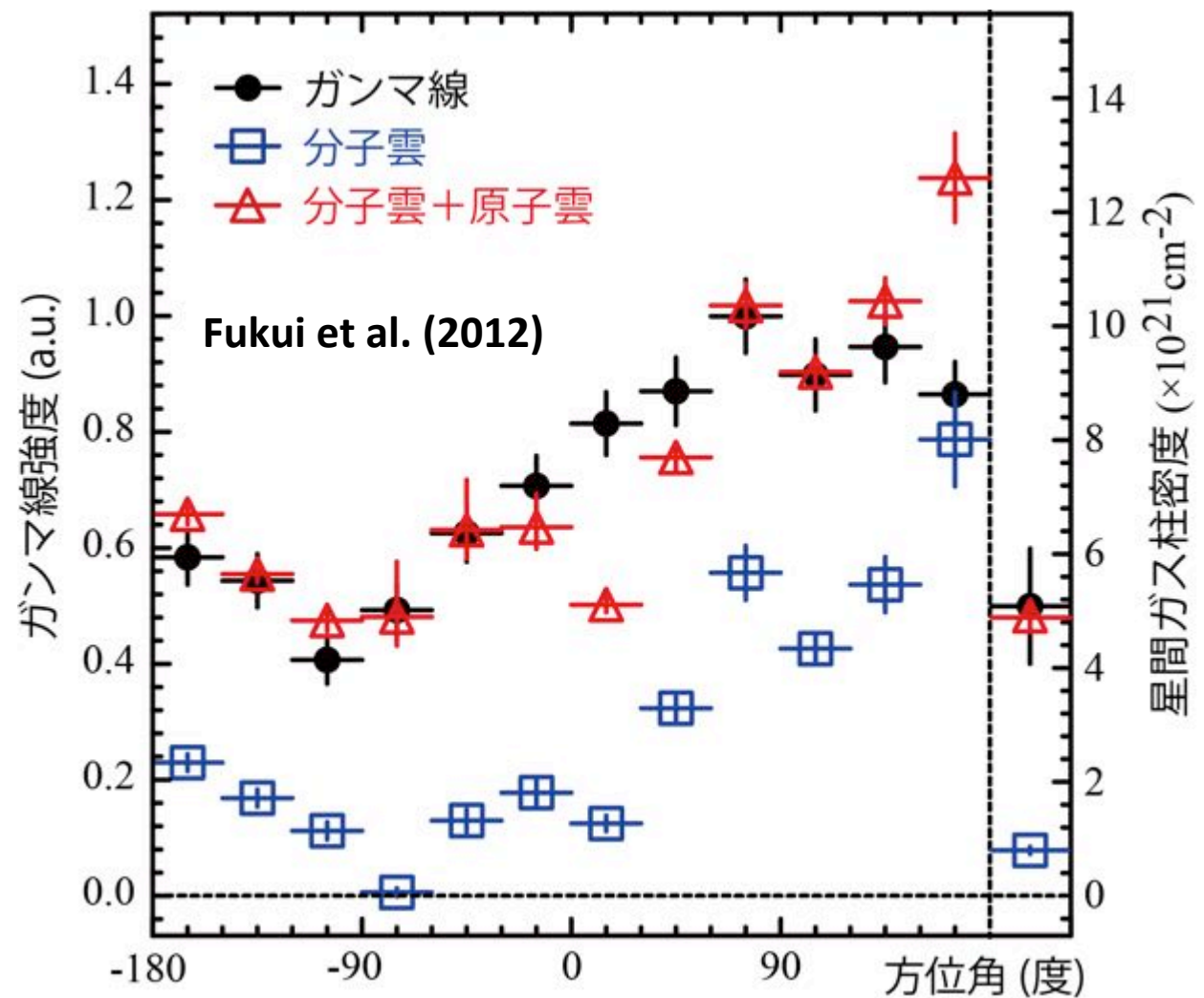
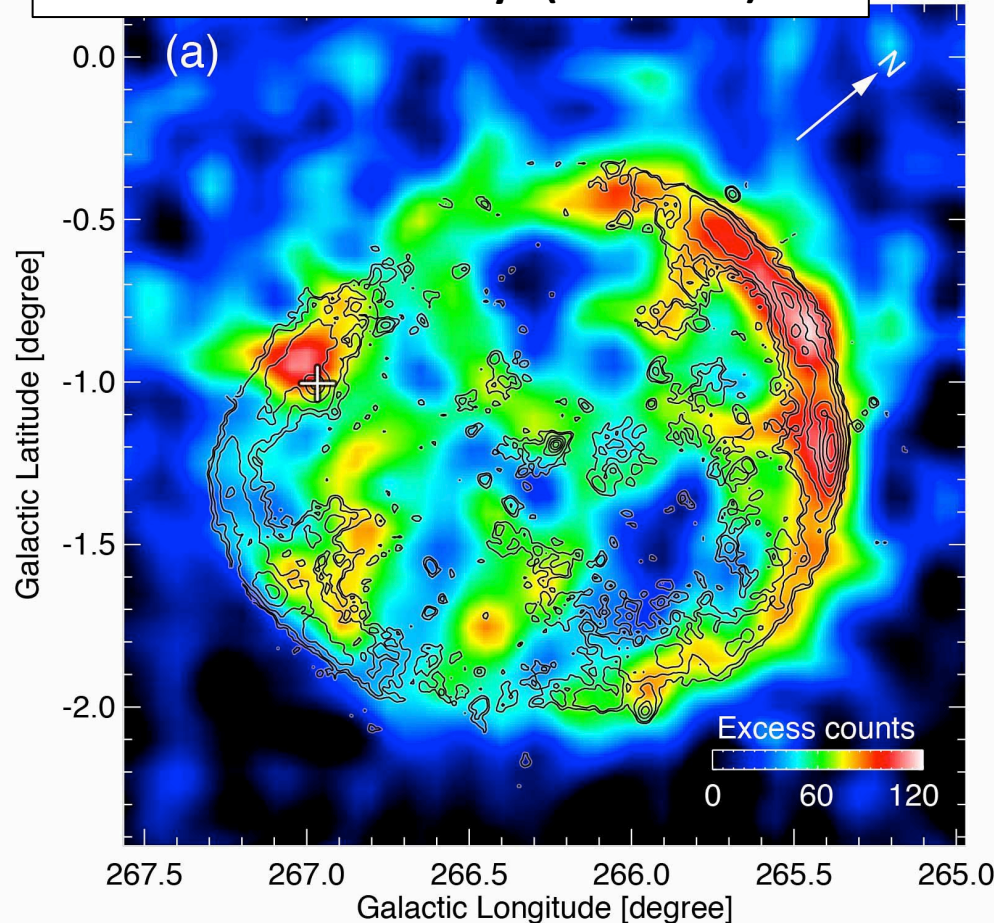
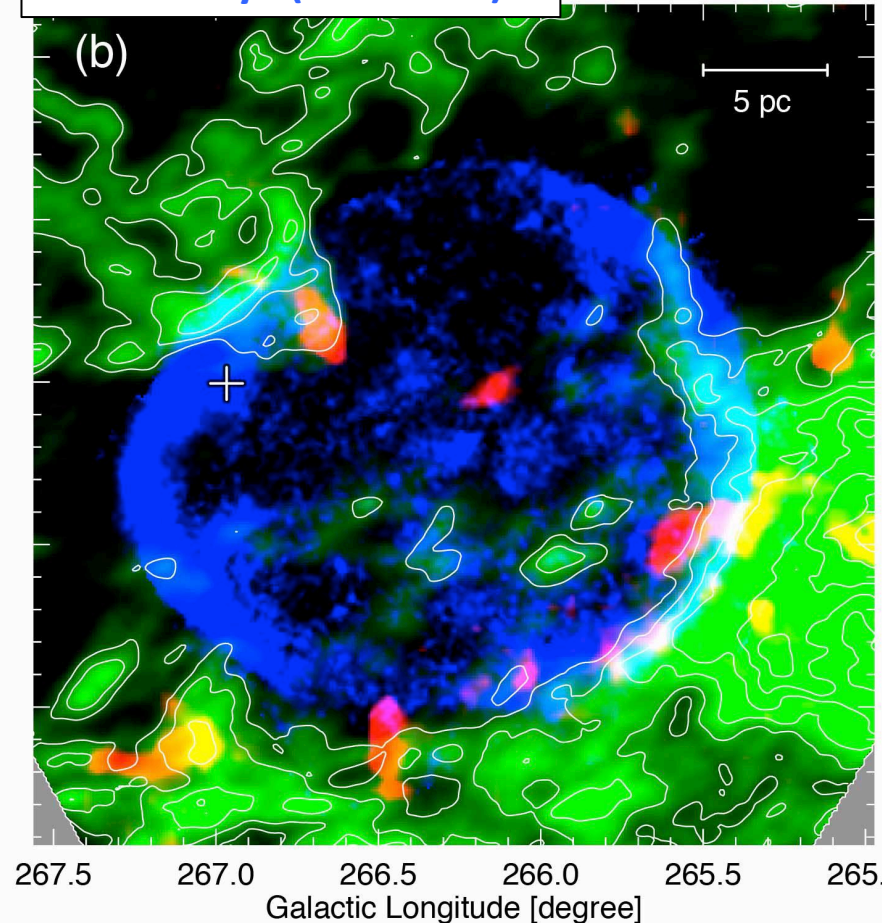


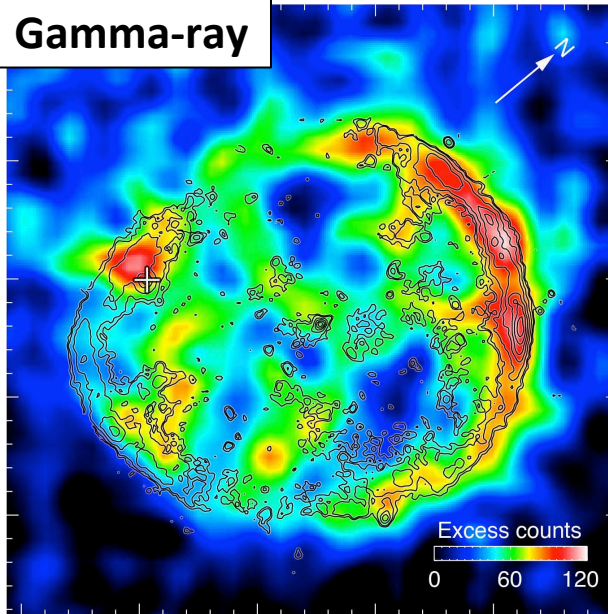
Image: TeV Gamma-ray (Aharonian+07)
Contours: Suzaku X-rays (2-5.7 keV)



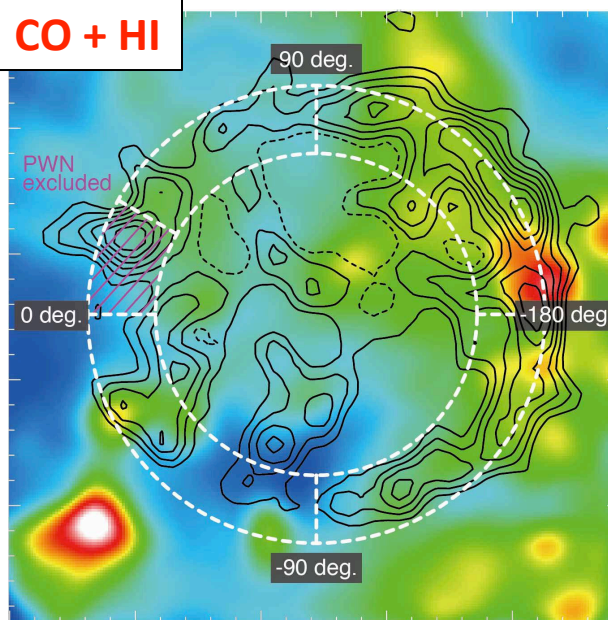
Red: NANTEN CO 1-0
Green: ATCA & Parkes HI
Blue: X-rays (2-5.7 keV)



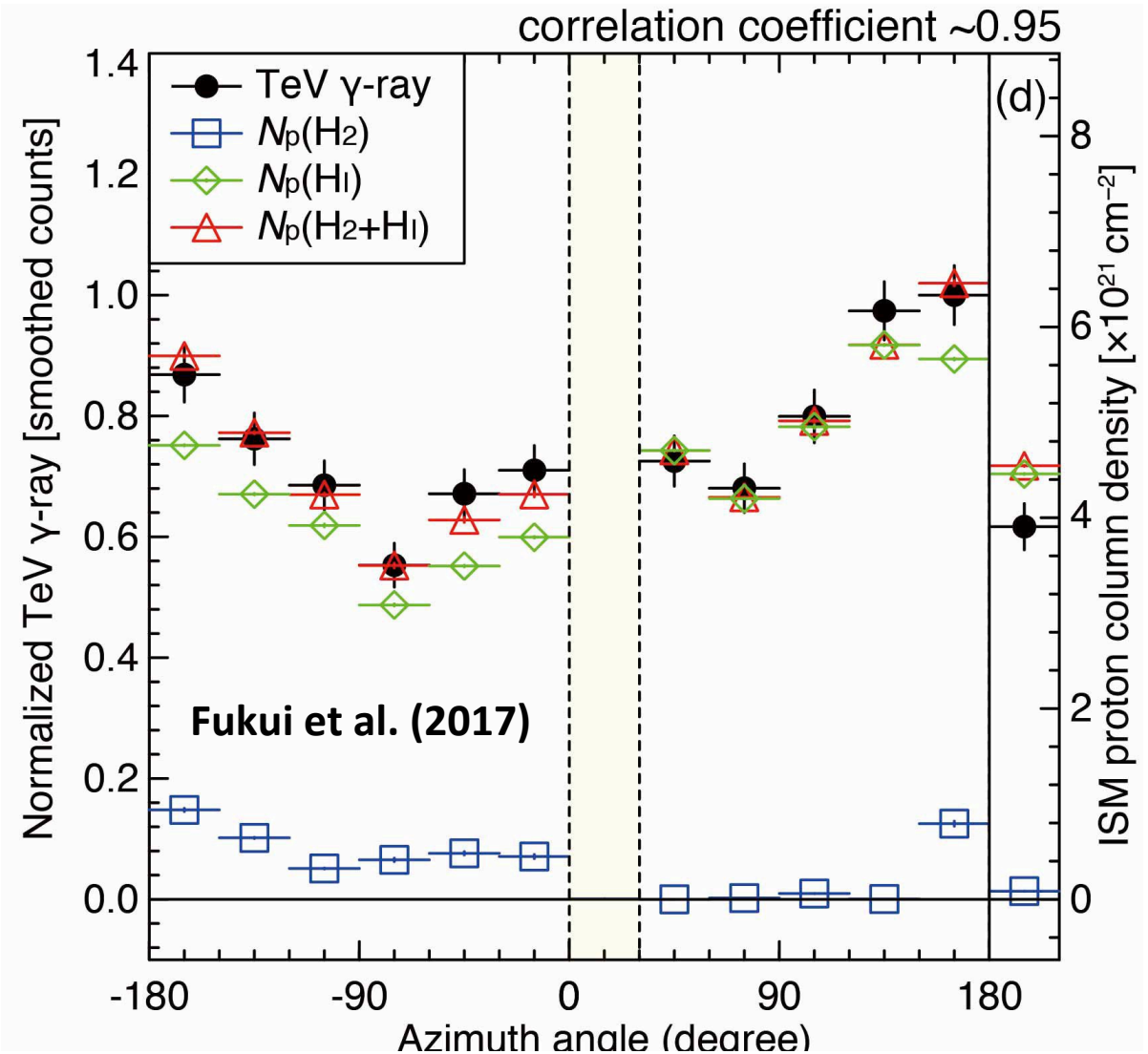
Gamma-ray



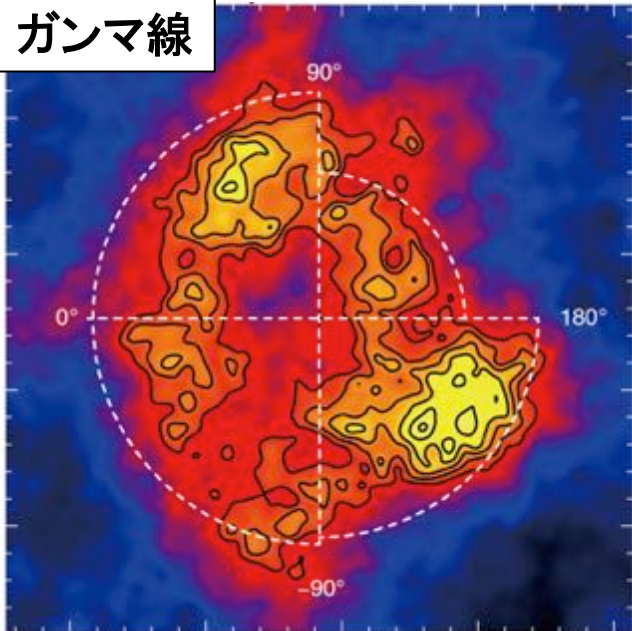
CO + HI



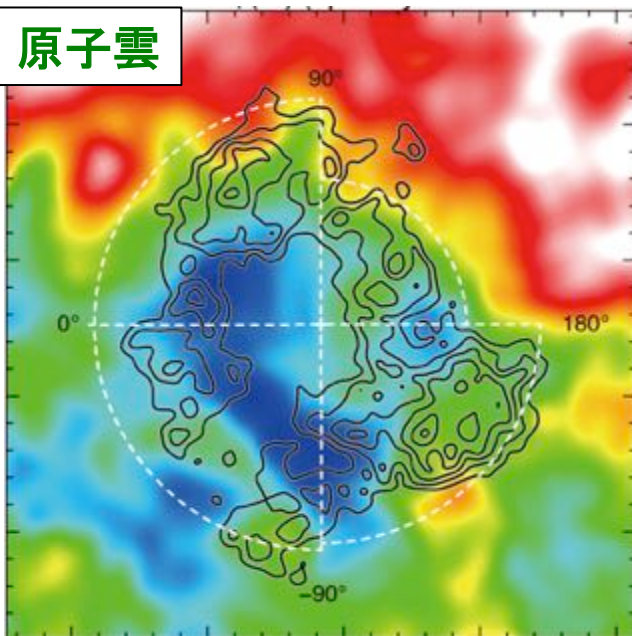
Spatial correspondence between the interstellar protons & TeV gamma-rays



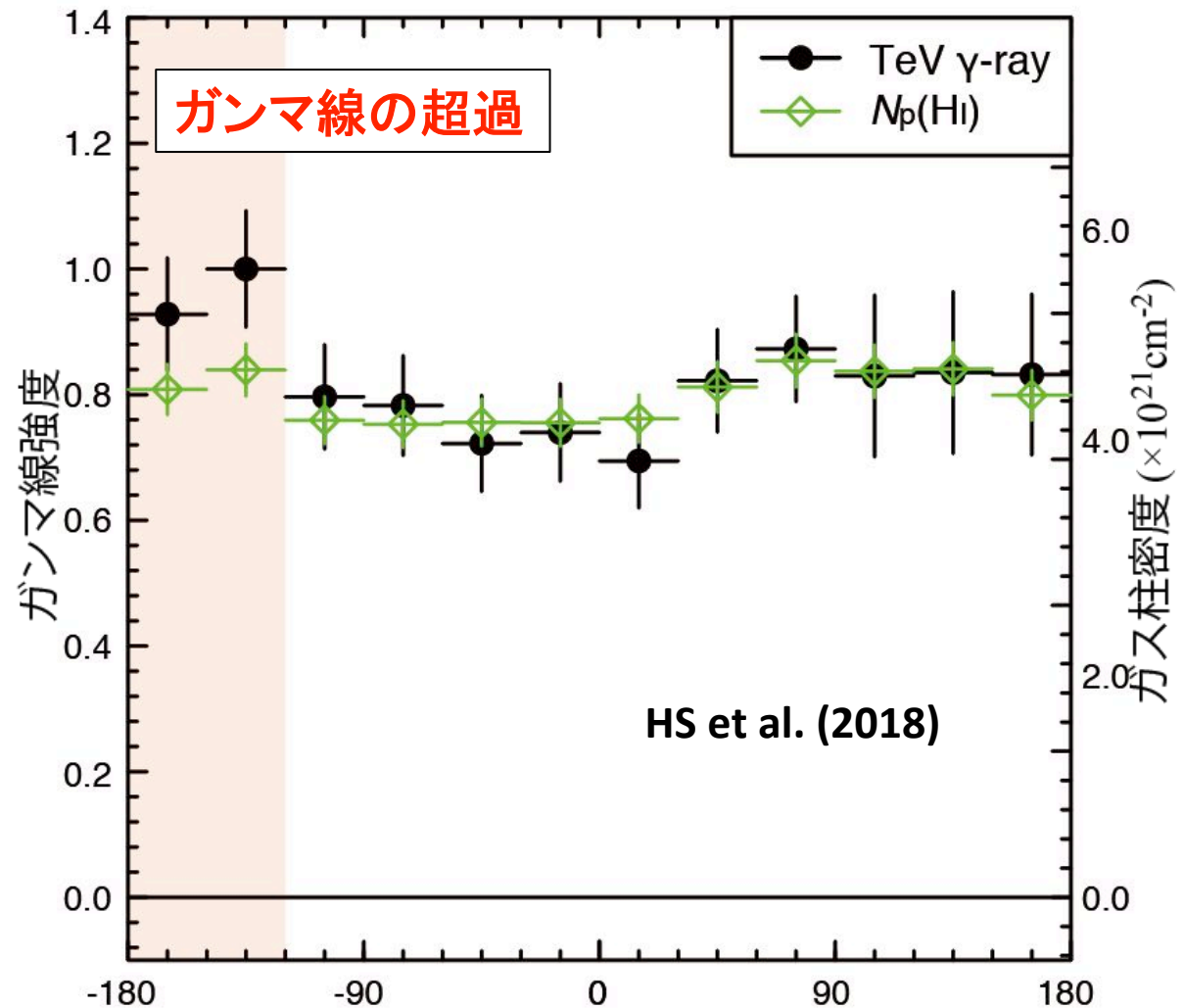
ガンマ線



原子雲



全体としては、ガンマ線とガス分布は一致
一部でガンマ線釣超過 → 電子起源の寄与



$$W_{pp}^{\text{tot}} \sim t_{pp \rightarrow \pi_0} \times L_\gamma$$
$$t_{pp \rightarrow \pi_0} \sim 4.5 \times 10^{15} \left(n / 1 \text{ cm}^{-3} \right)^{-1} \text{ s}$$

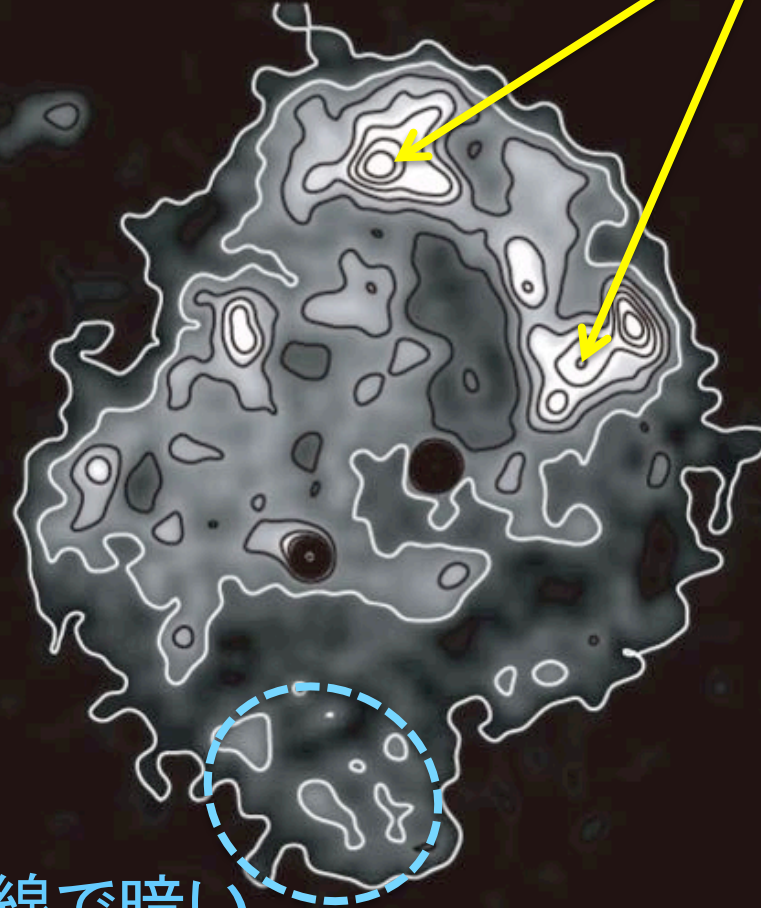
conventional expectations
of $W_{pp} \sim 10^{50} \text{ erg}$ ($\sim 10 \%$)

	Fukui+12	HS+18a	Fukui+17	Fukuda+14	HS+ in prep.
	RXJ1713	RCW86	Vela Jr.	HESSJ1731	HESSJ1912
Age (yr)	1600	1800	2400	4000	> 2300
Distance (kpc)	1	2.5	0.75	5.2	2.1
Radius (pc)	8.2	7.5	5.9	11	18
Atomic mass ($10^4 M_\odot$)	1.1	2.0	2.5	1.3	4.2
Molecular mass ($10^4 M_\odot$)	0.9	-----	0.1	5.1	1.8
Total gas mass ($10^4 M_\odot$)	2.0	2.0	2.6	6.4	6.0
Gas density (cm^{-3})	130	75	100	60	130
W_{pp} (10^{48} erg)	0.4	1.2	0.7	7	1.4
SNR Type	CC	Type Ia	CC?	CC	CC?

■ $W_{pp} \sim 10^{48-49} \text{ erg}$ は安全な下限値を与える

Fukui+03, PASJ, 55, 61

シンクロtronX線で明るい



シンクロtronX線で暗い

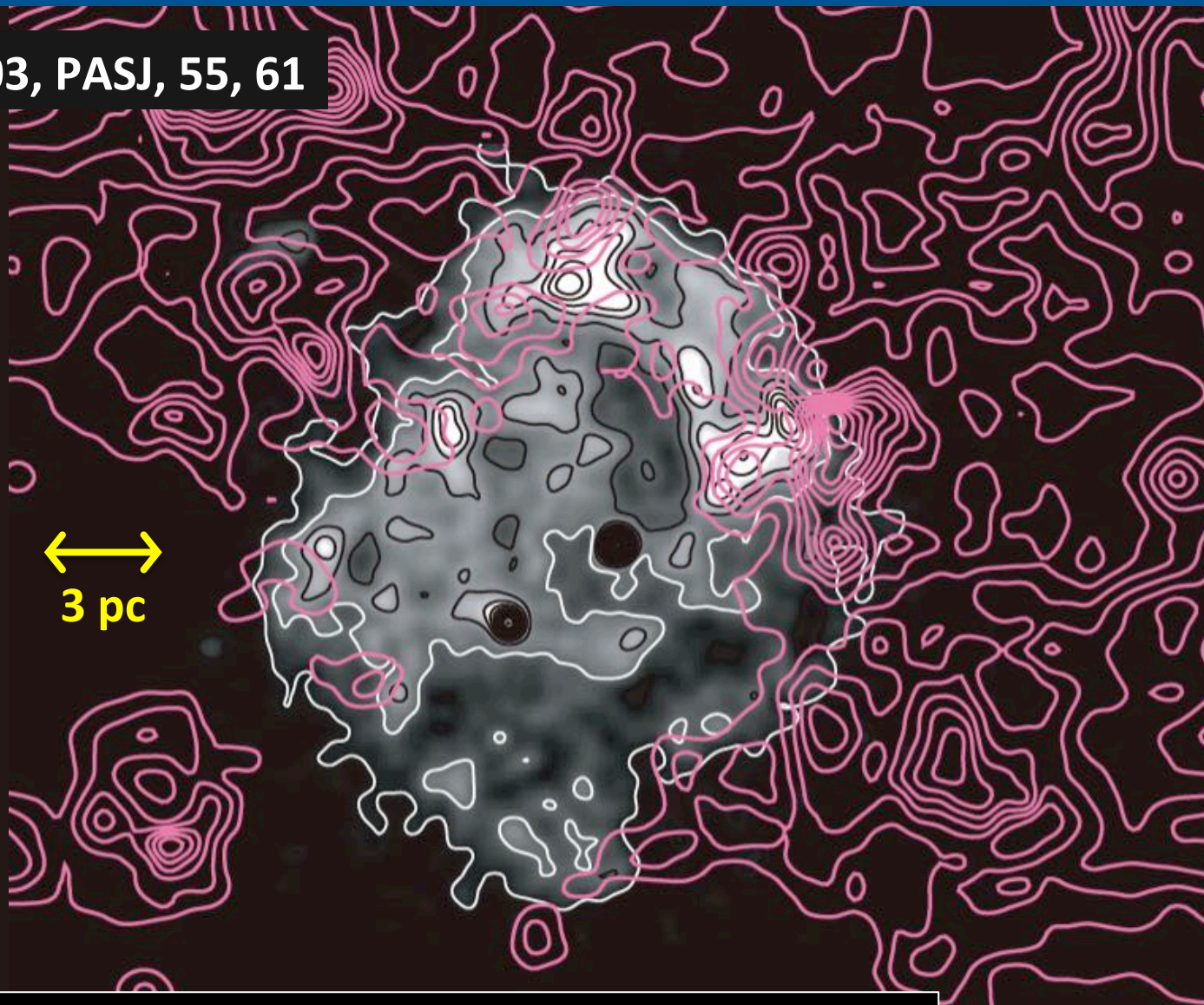
- Age: $\sim 1,600$ yr
- Distance: ~ 1 kpc
- Size: ~ 19 pc
- Core-collapse SNR

画像: シンクロtronX線 (ローサットX線天文衛星)



- 南米チリ共和国
- 名古屋大学が運用
- 日本で初めての
海外電波天文台
- 標高 2,400 メートル
- 1996年-2003年
- 115 GHz: CO $J=1-0$
($\Delta\theta \sim 2.6'$)

Fukui+03, PASJ, 55, 61



画像:シンクロtronX線 (ローサットX線天文衛星)
等高線:分子雲 (なんてん電波望遠鏡)

■ 場所

南米チリ北部 アタカマ高地 (~4,865 m)

■ 国際共同研究 (主導: 名古屋大学)

日本(2), ドイツ(2), オーストラリア(~10), チリ(1), 韓国(1), スイス(1)

■ 観測周波数

115 GHz: CO $J=1-0$ ($\Delta\theta \sim 2.6'$)

230 GHz: CO $J=2-1$ ($\Delta\theta \sim 1.3'$)

460 GHz: CO $J=4-3$ ($\Delta\theta \sim 38''$)

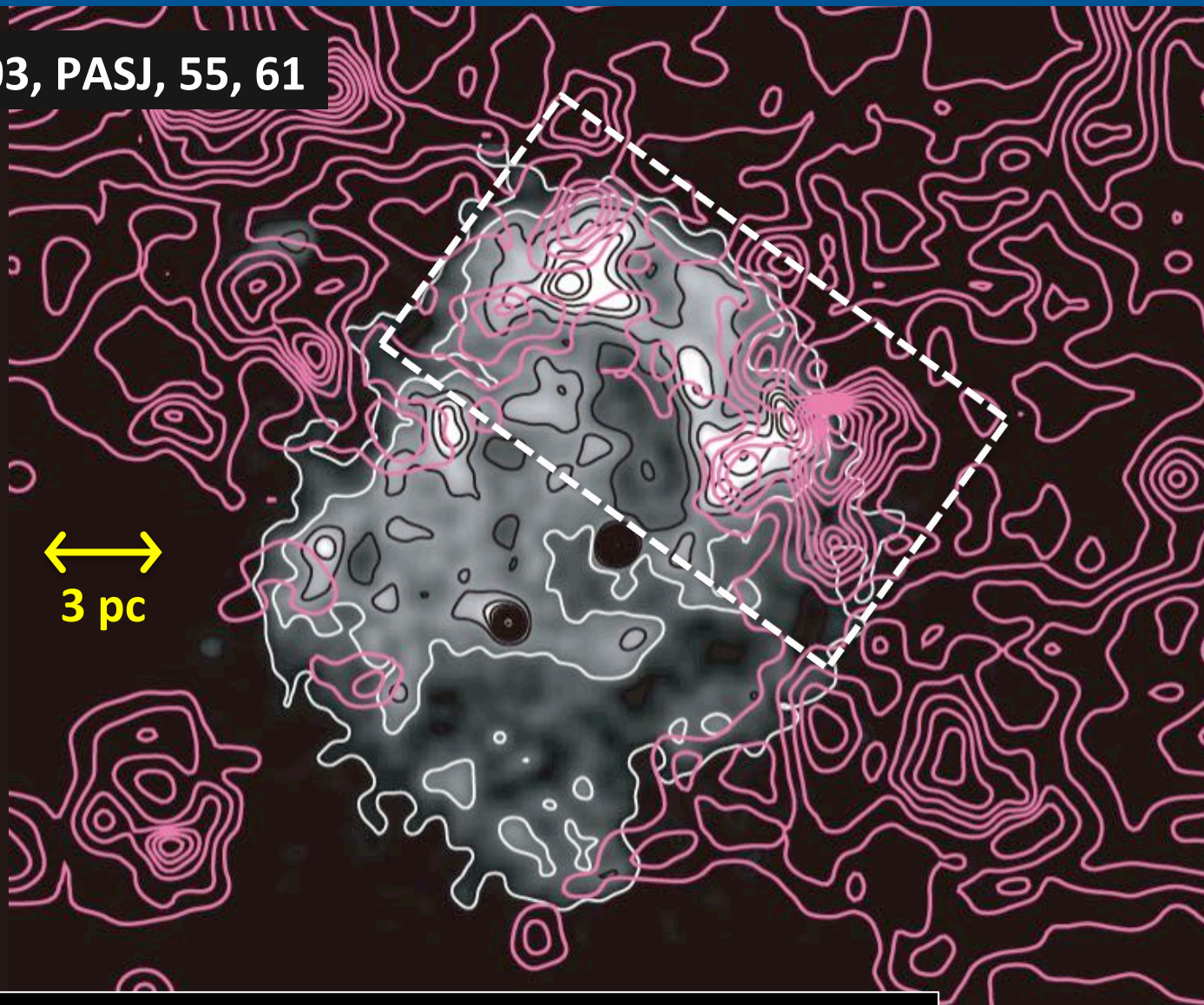
CI $^3P_1-^3P_0$

810 GHz: CO $J=7-6, 8-7$

CI $^3P_2-^3P_1$ ($\Delta\theta \sim 22''$)



Fukui+03, PASJ, 55, 61

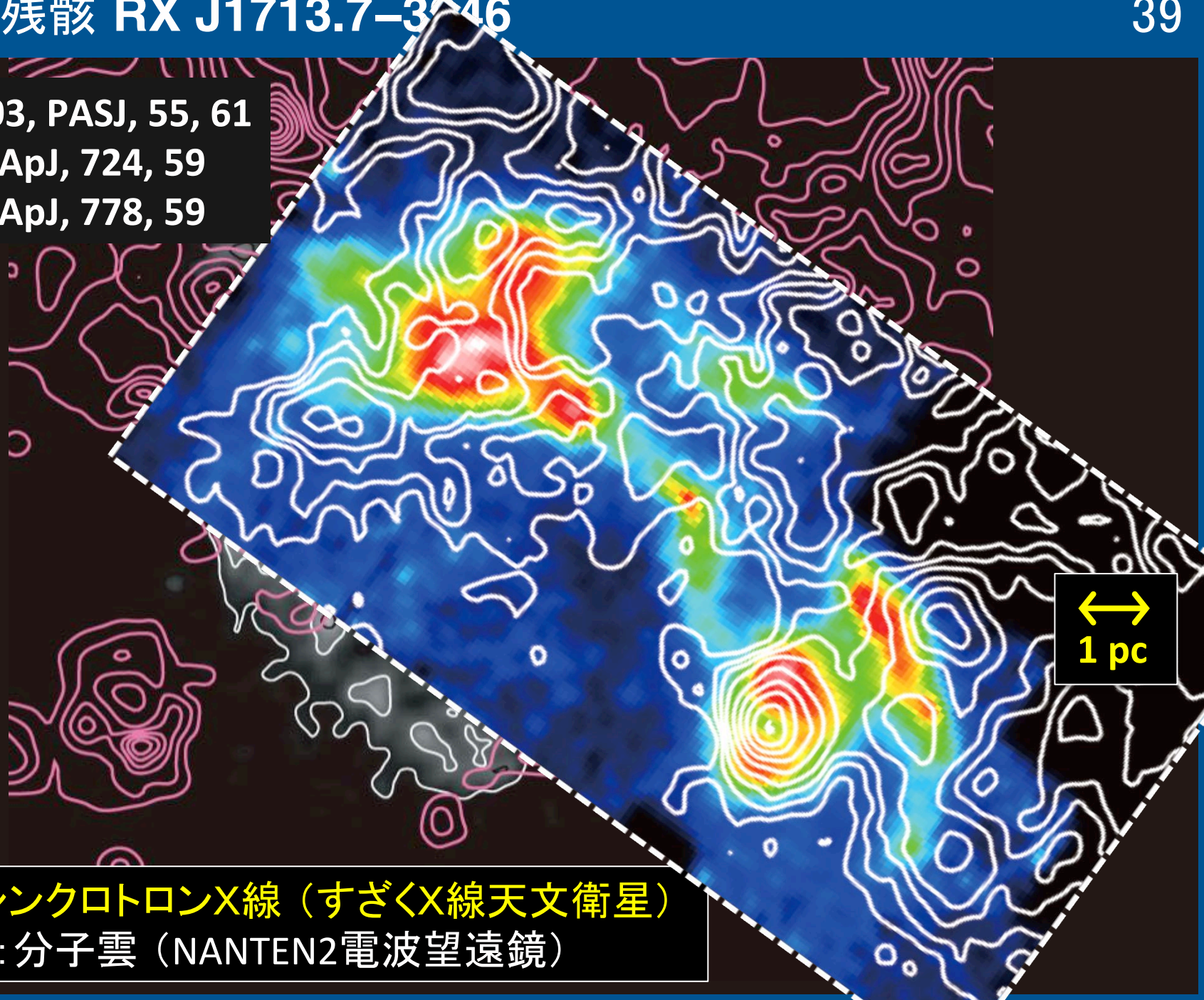


画像:シンクロtronX線 (ローサットX線天文衛星)
等高線:分子雲 (なんてん電波望遠鏡)

Fukui+03, PASJ, 55, 61

HS+10, ApJ, 724, 59

HS+13, ApJ, 778, 59



↔
1 pc

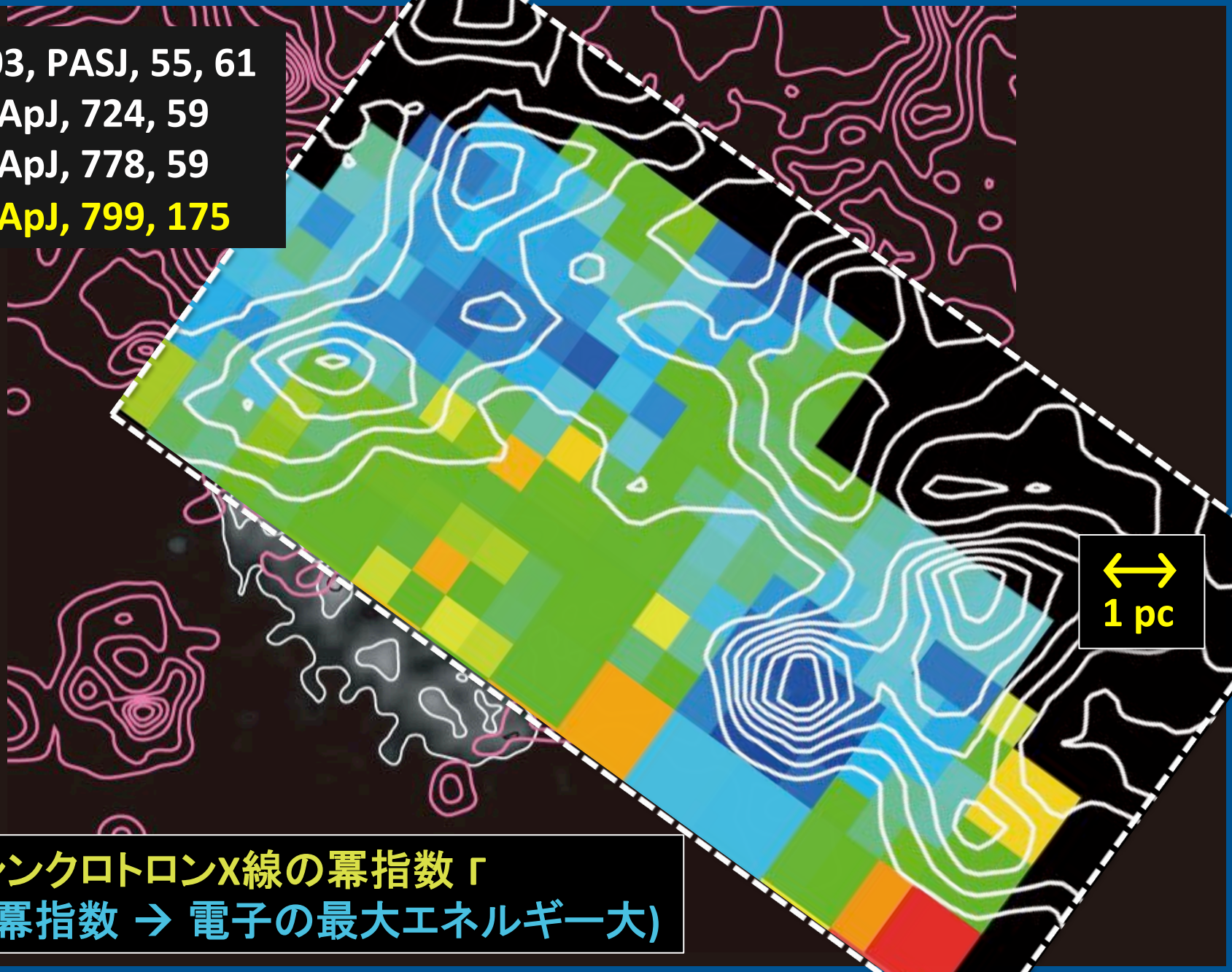
画像:シンクロtronX線 (すざくX線天文衛星)
等高線:分子雲 (NANTEN2電波望遠鏡)

Fukui+03, PASJ, 55, 61

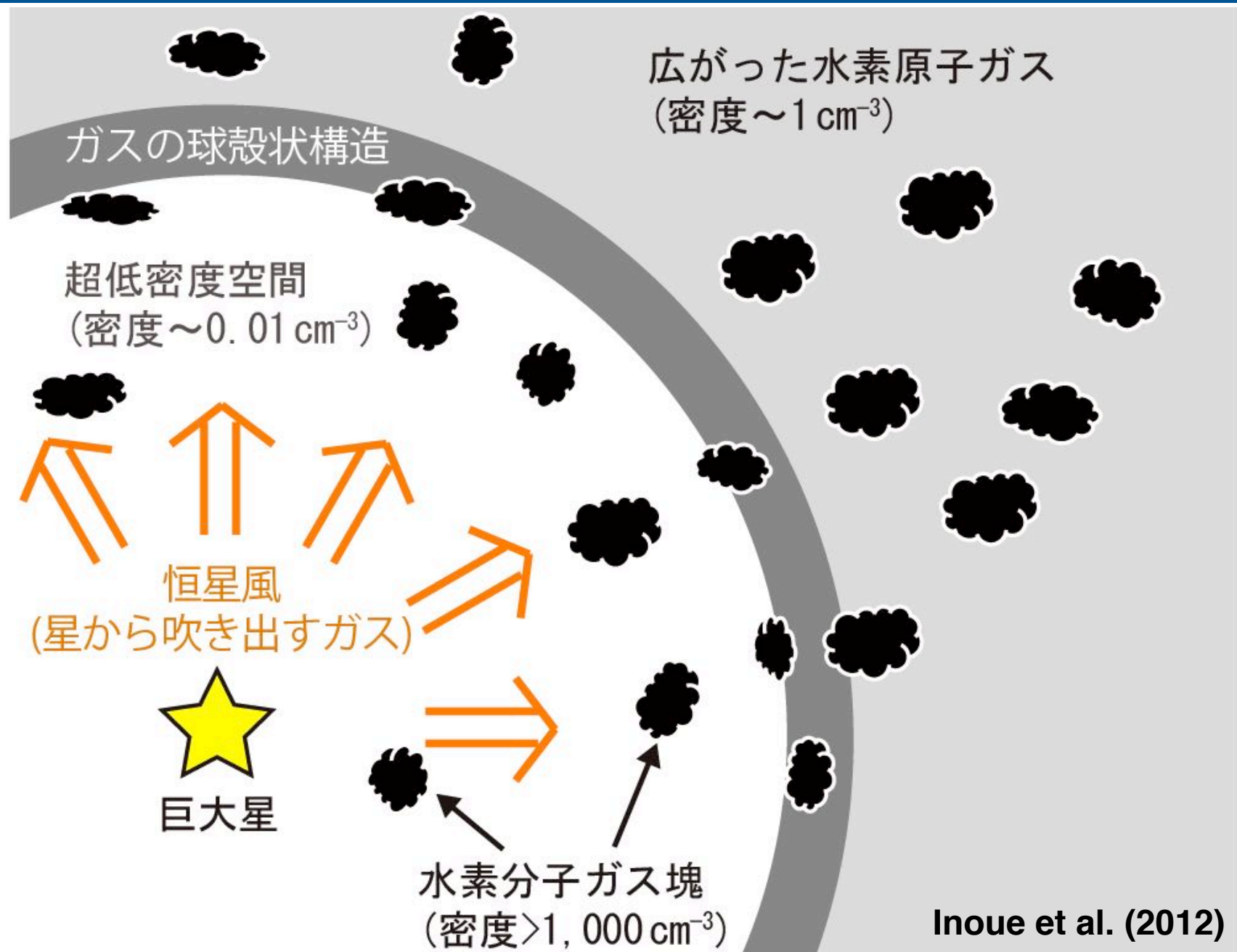
HS+10, ApJ, 724, 59

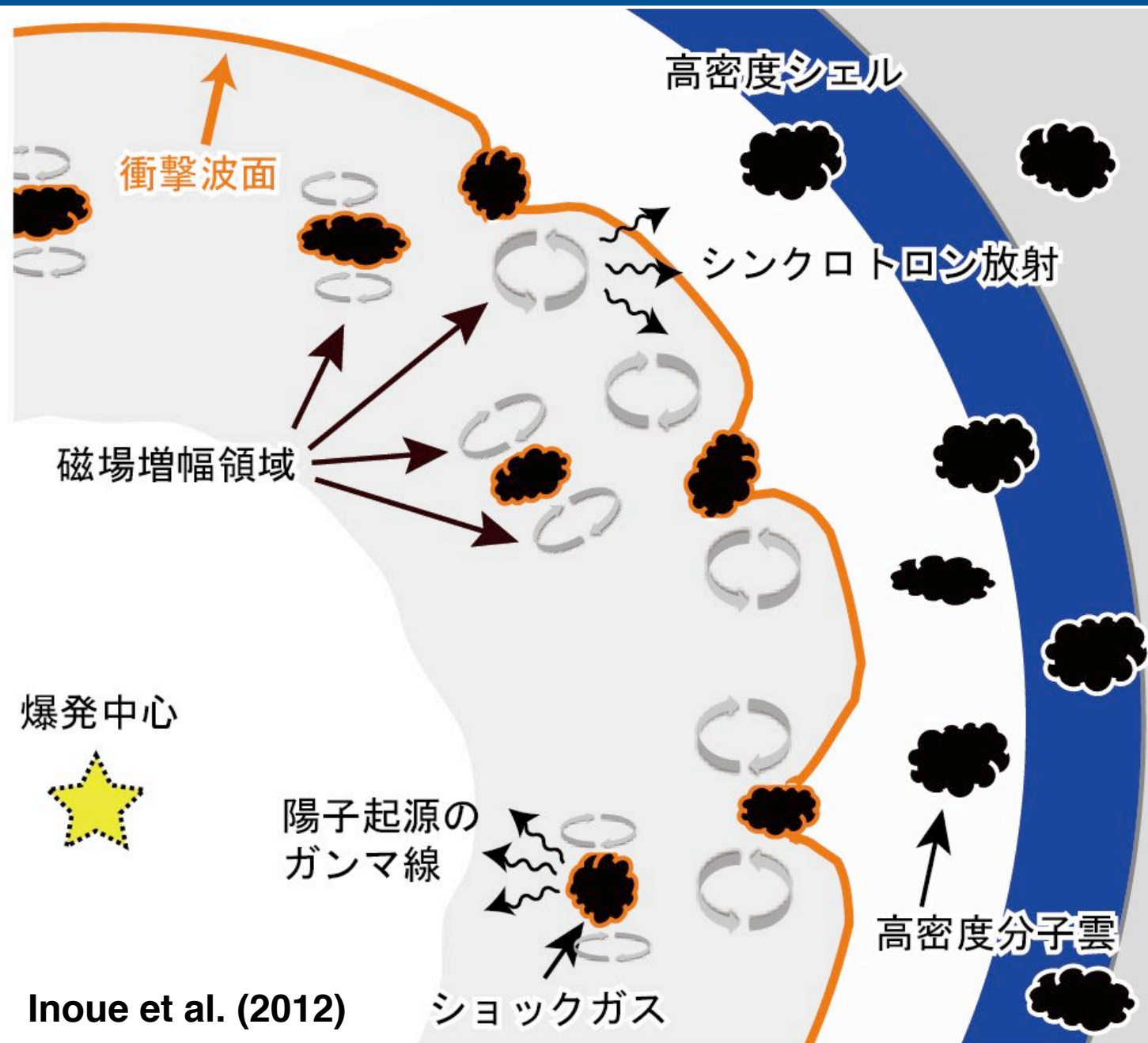
HS+13, ApJ, 778, 59

HS+15, ApJ, 799, 175



画像: シンクロトンX線の幂指数「
(小さい幂指数 → 電子の最大エネルギー大)

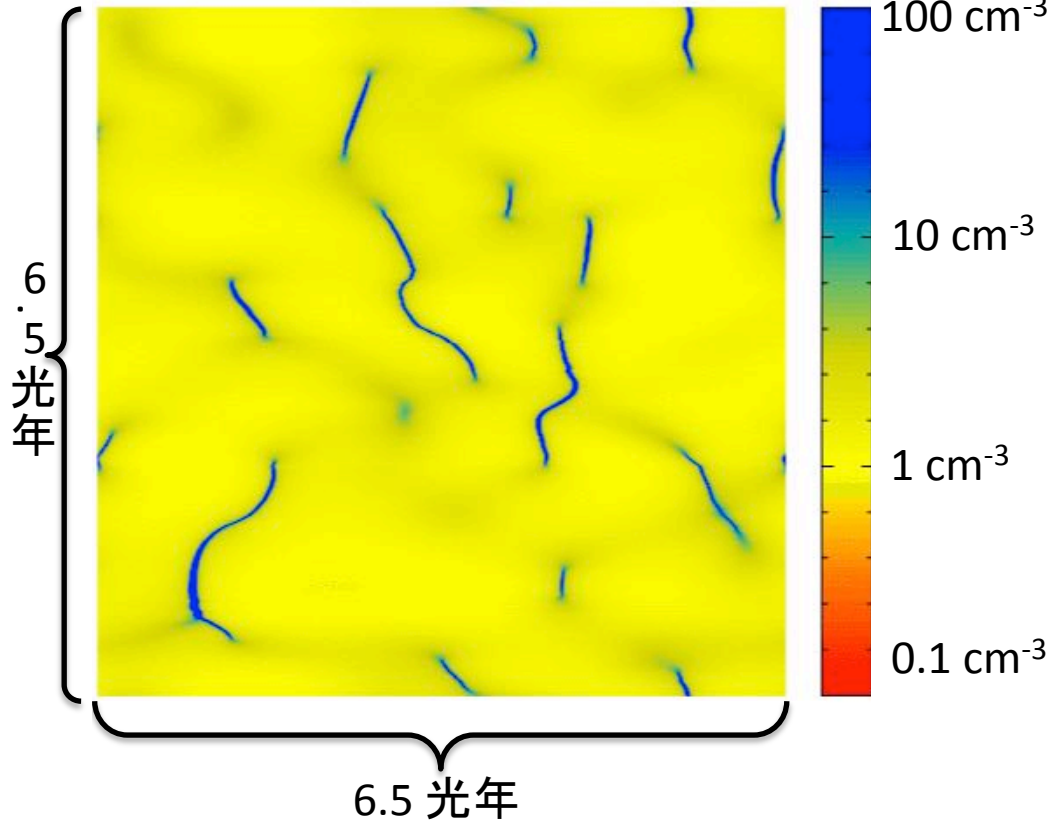




衝撃波-中性星間ガスの相互作用 (3D MHD 計算, Inoue+12)

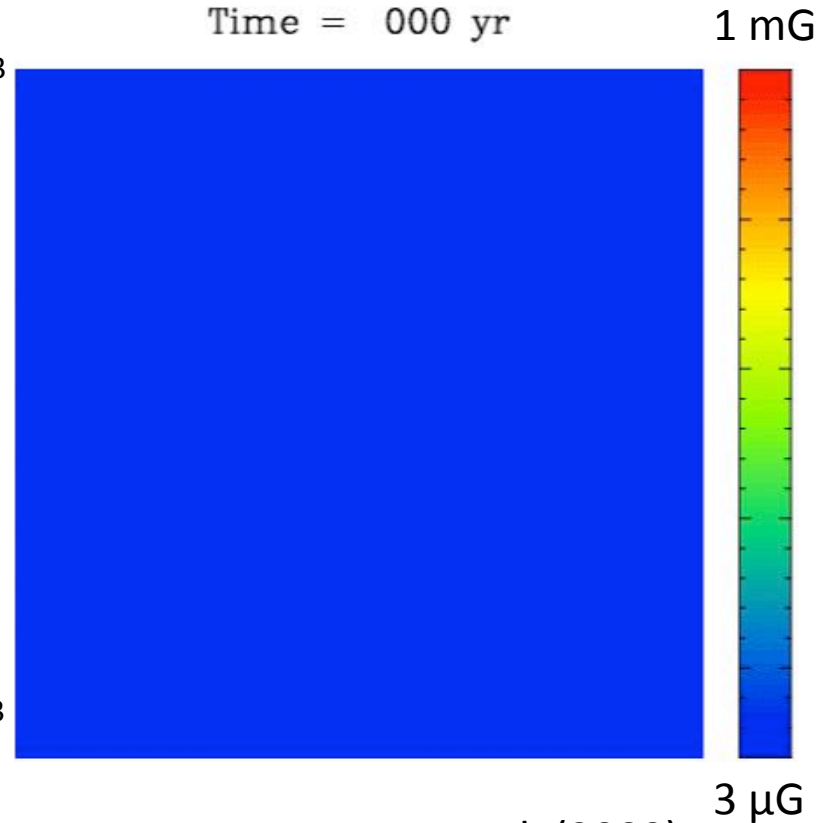
中性星間ガス密度

Time = 000 yr



星間磁場強度

Time = 000 yr

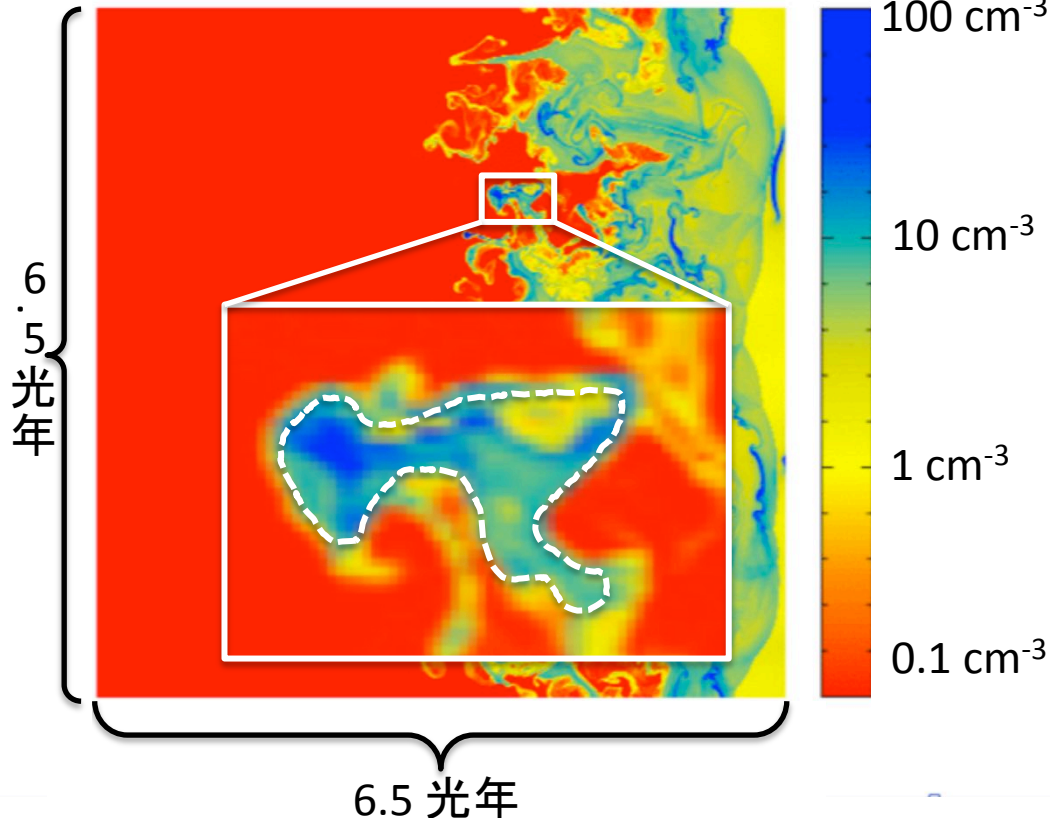


Inoue et al. (2009)

衝撃波-中性星間ガスの相互作用 (3D MHD 計算, Inoue+12)

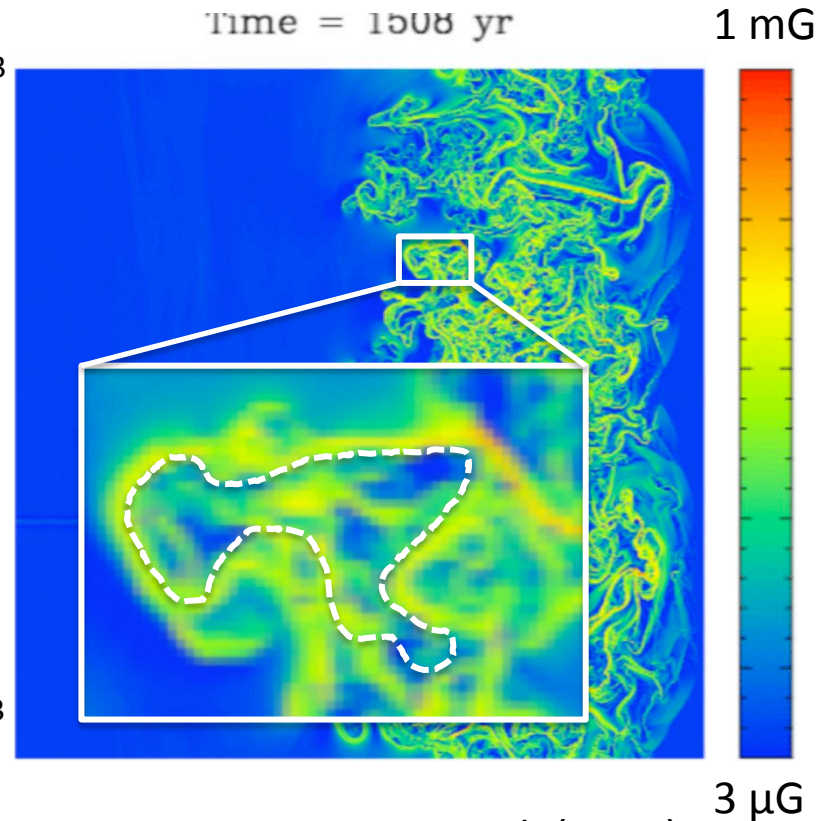
中性星間ガス密度

Time = 1508 yr



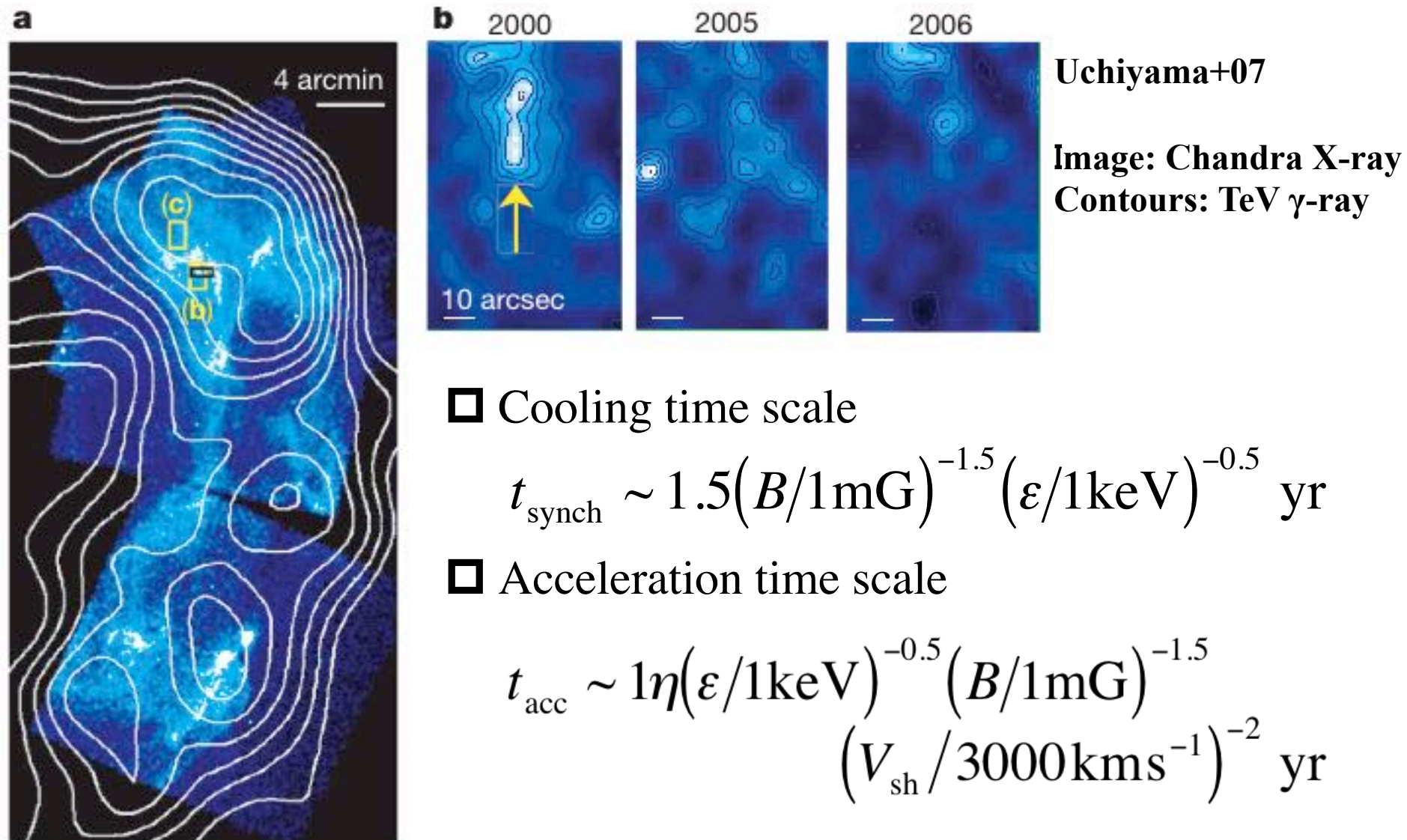
星間磁場強度

Time = 1508 yr



Inoue et al. (2009)

- 分子雲周辺で磁場が最大 1 mG 程度まで増幅
 - 分子雲周辺でのシンクロトロンX線の増光とコンシステント
 - 乱流増幅が、分子雲方向で宇宙線電子の最大エネルギーを高めた



We need a strong magnetic field at least ~ 1 mG in the small spots!

陽子：ガンマ線

ガンマ線 flux $\propto$ ガス密度



ガンマ線とガスの空間分布一致

(e.g., Fukui+12; Fukui13; Fukuda+14)

電子：シンクロtron X線

衝撃波－星間ガス相互作用



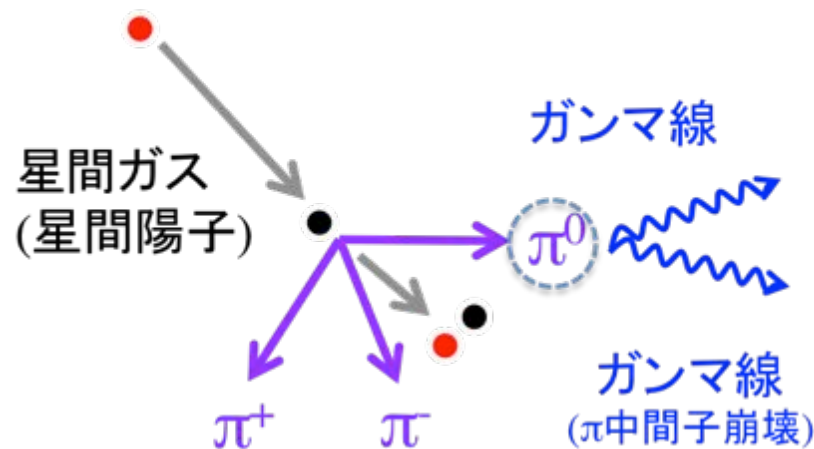
磁場増幅によるX線の増光

宇宙線電子の $E_{\max}$ が 変化

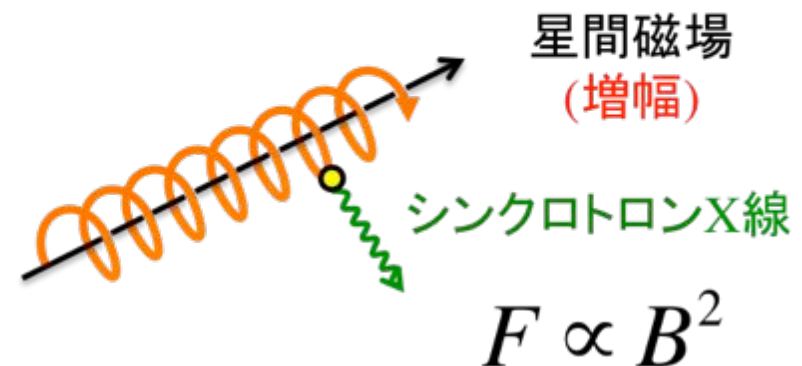
(e.g., HS+10, 13, 15; Fukuda+15 in prep.)

宇宙線陽子

【陽子起源】



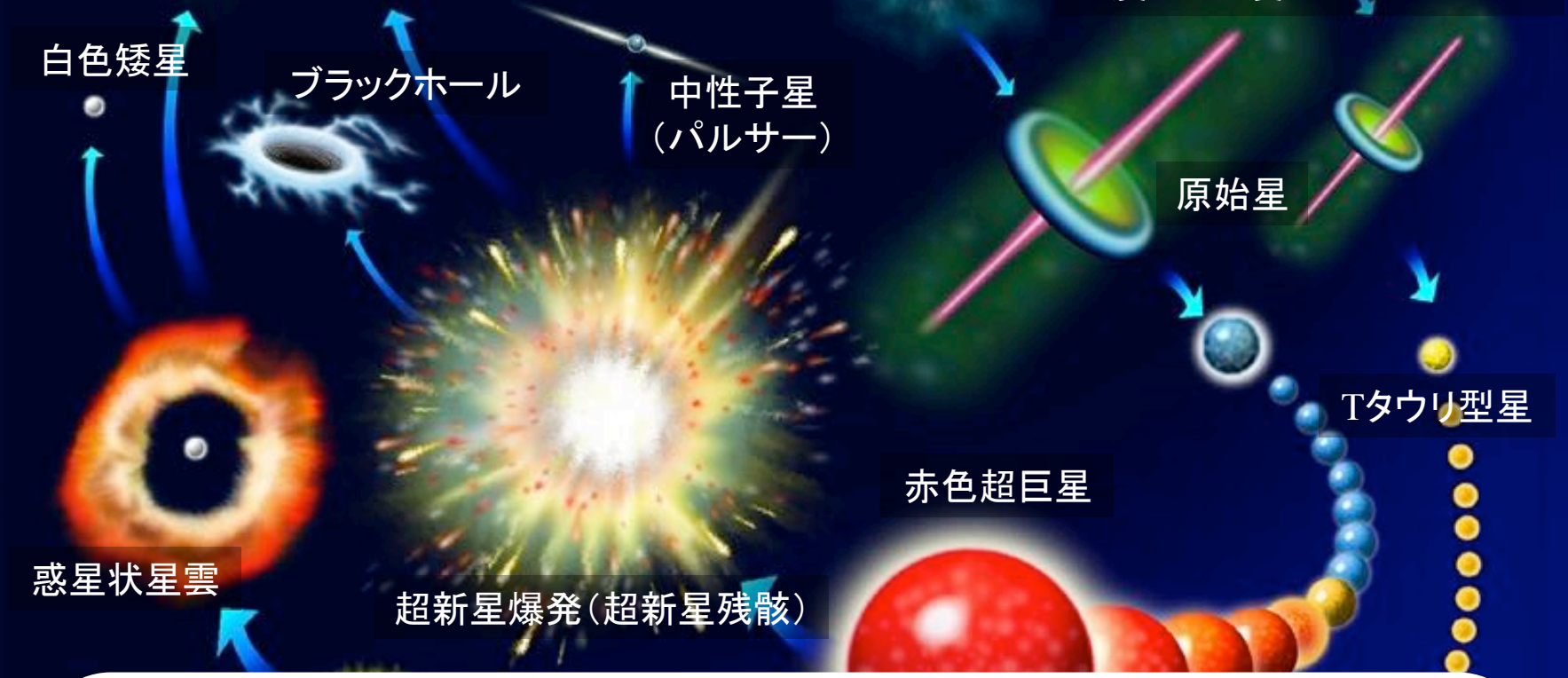
宇宙線電子



星間物質の精査＋エックス・ガンマ線との比較が本質的

水素原子ガス
密度: $1-100\text{ cm}^{-3}$, 温度: $-243 - 4700\text{度}$

水素分子ガス
密度: $1,000 - 100,000\text{ cm}^{-3}$
温度: -263度



水素とヘリウム以外の重元素は全て、星の誕生と消滅の過程で形成 = 私たちは星屑から生まれた!

赤色巨星

主系列星

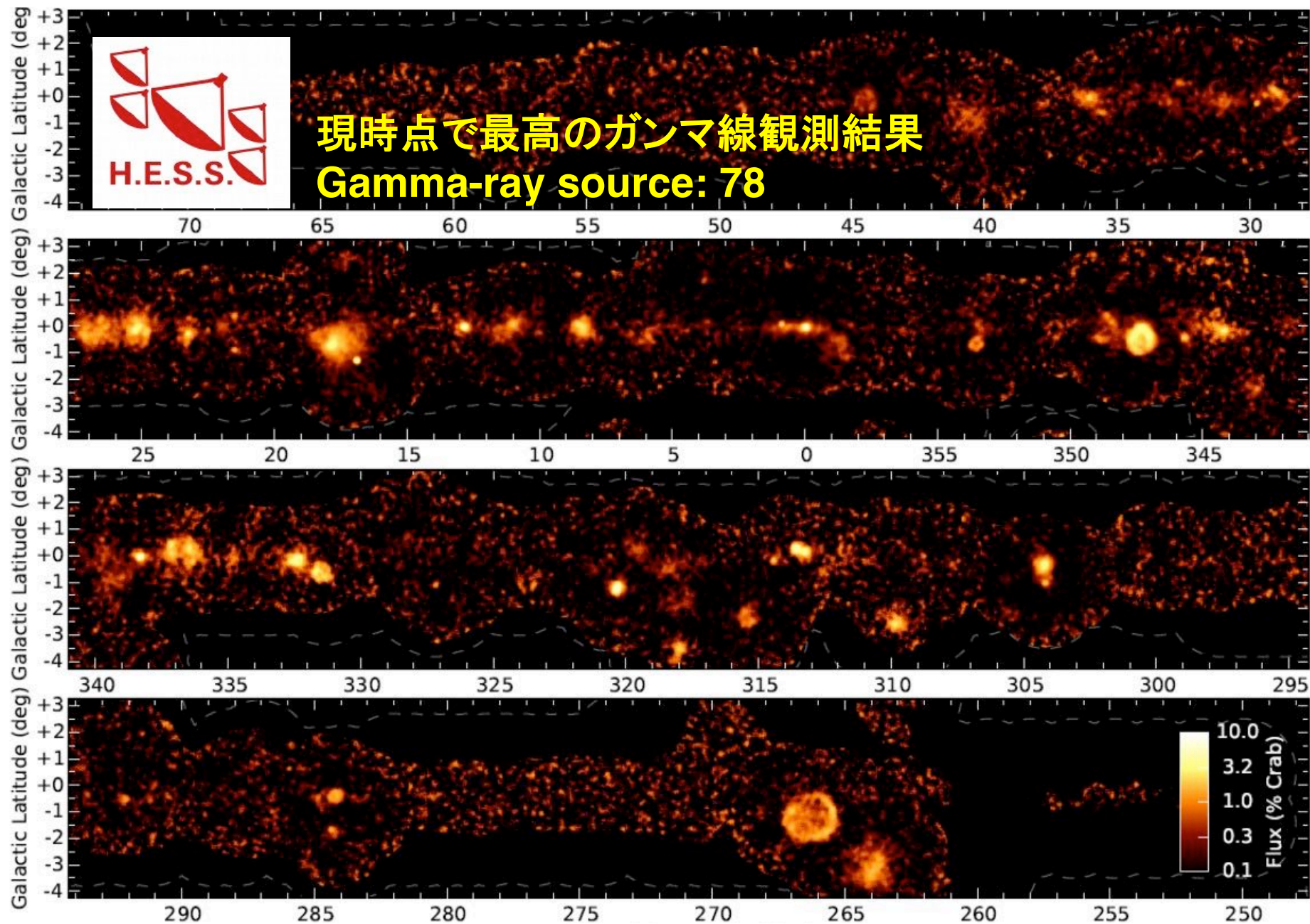
福井康雄著「大宇宙の誕生」より一部改変

Cherenkov Telescope Array (CTA)

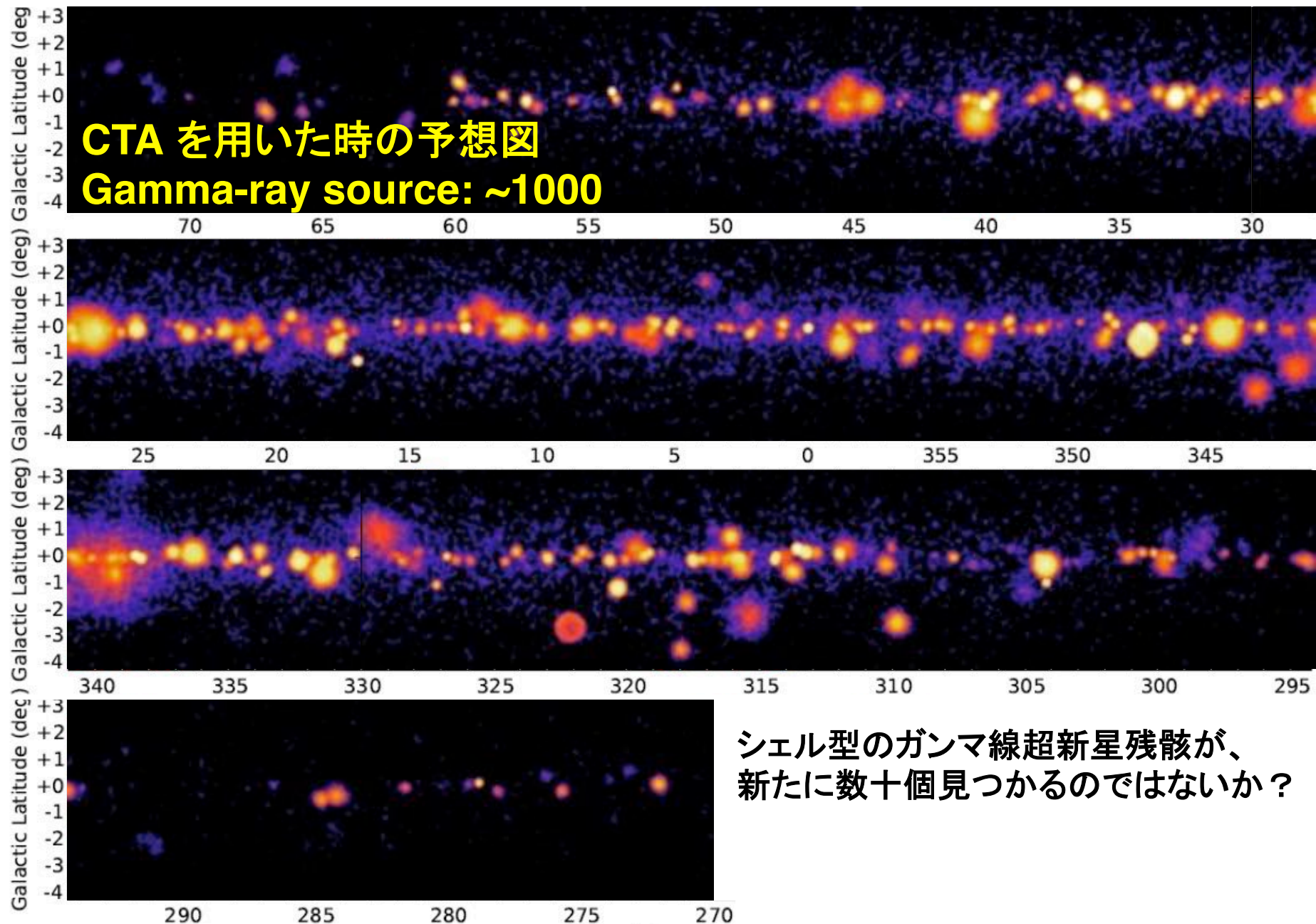
- 次世代ガンマ線チェレンコフ望遠鏡（今年稼働開始、2021-22年に本格運用開始）
- 角度分解能が 0.6–1.5分角程度まで向上（従来は4分角程度）
- 感度が約10倍向上 → より暗い天体も見えてくる



Current VHE gamma-ray map (HESS Col.+17)

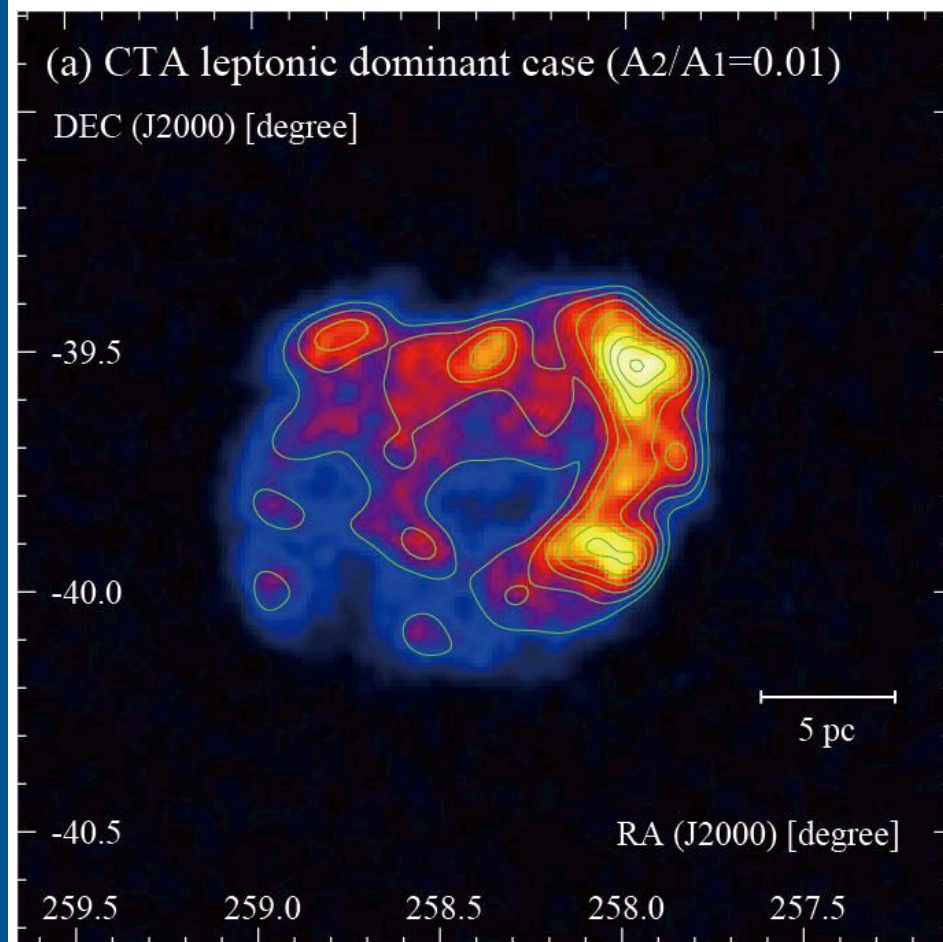


VHE gamma-ray map using CTA (simulated)

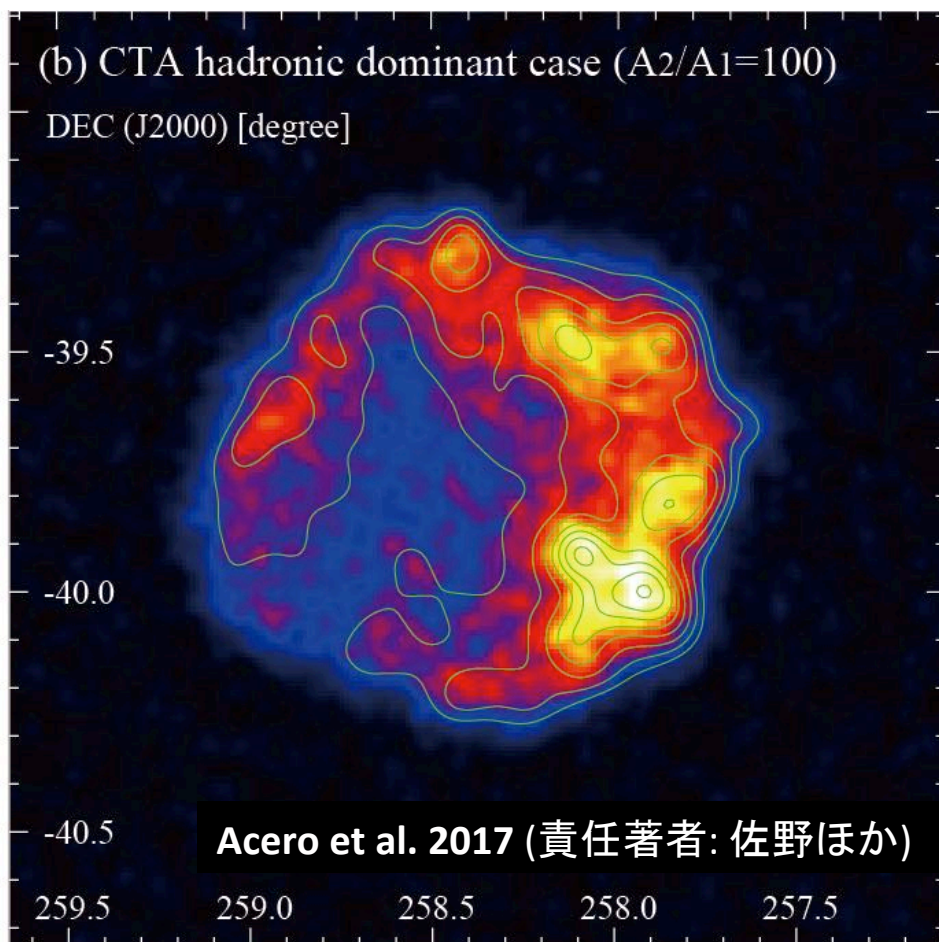


CTA 時代に向けて(1): 擬似観測

電子起源ガンマ線



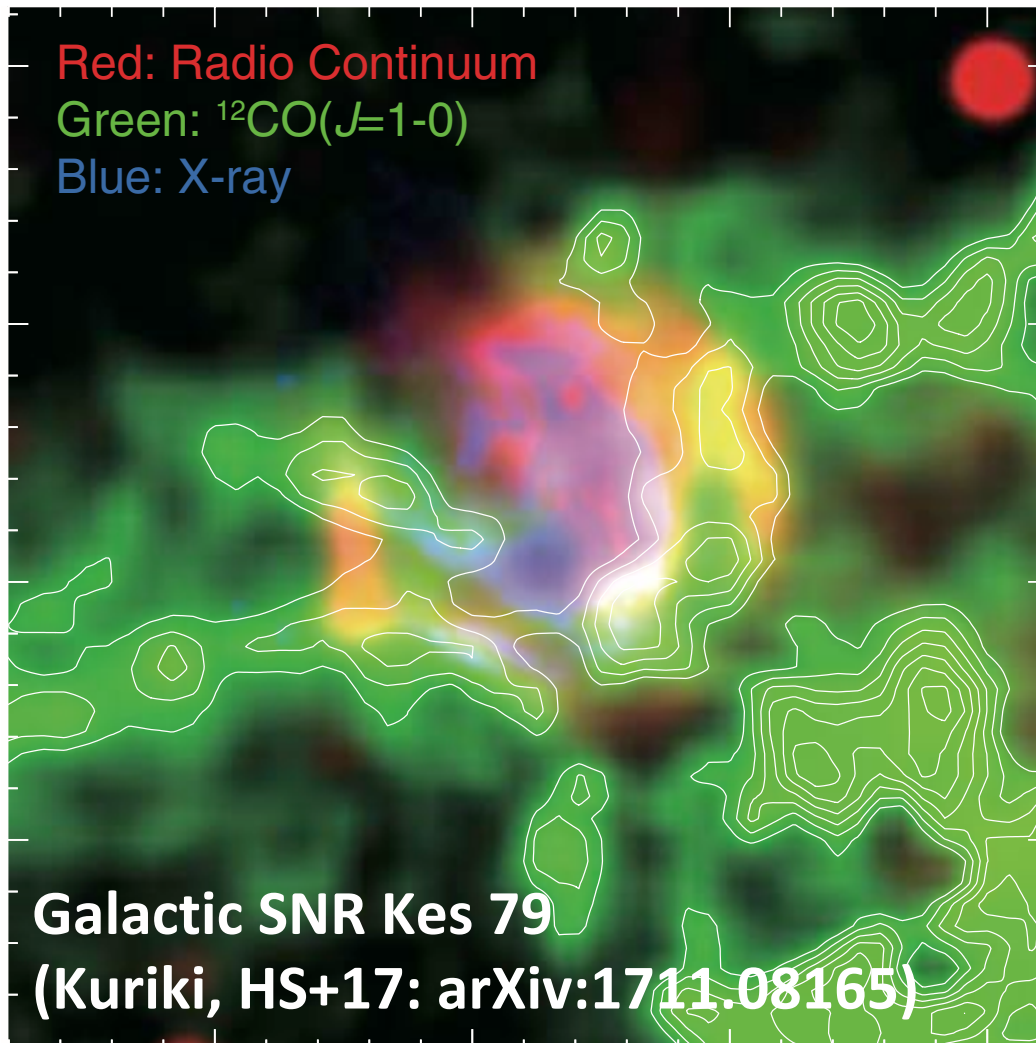
陽子起源ガンマ線



- RXJ1713 からのガンマ線が、CTA を用いるとどう見えるか、数値計算を行った
 - 電子起源と陽子起源ガンマ線で、空間分布がはっきりと異なるはず...!!
- 世界でまだ一例のみ。今後、多くの天体についてシミュレーションしておく必要

■ 銀河系 & マゼラン雲の超新星残骸サーベイ

→ 付随ガスの特定 & シンクロトロンX線・電波との比較研究



野辺山 45-m 電波望遠鏡



例) FUGIN データを用いた研究

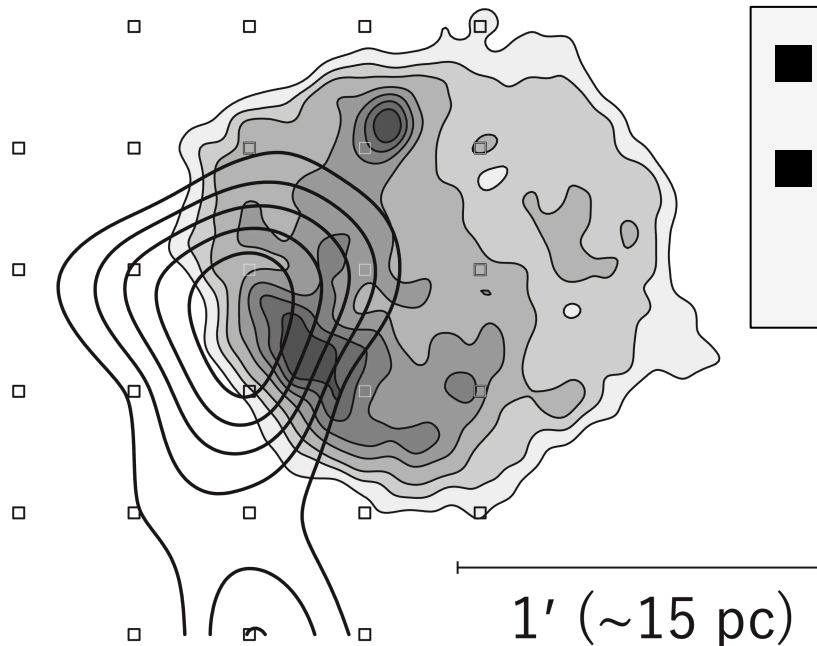
- SNR 研究に重要な CO 1-0 サーベイ
- 極めて高い角度分解能 ($\sim 20''$) により、視直径の小さな SNR も研究対象に

■ ほぼ Face on 銀河

- 銀河系内天体に比べて視線方向への物質の重なりが少なく、付随する星間ガスの特定が容易

■ 距離 ~50 kpc

- 物理量の推定が容易 & 均一なサンプルを得ることができる



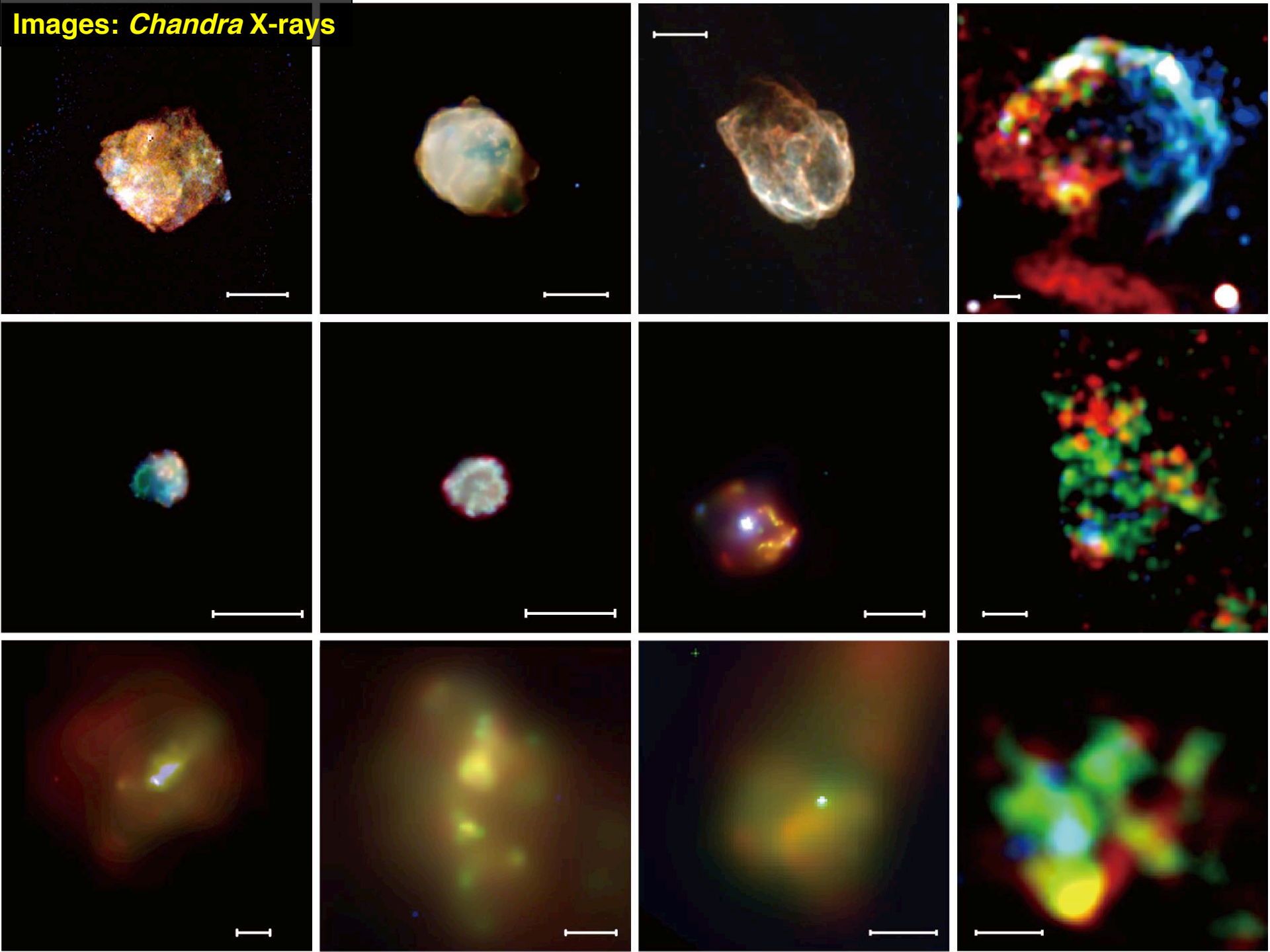
- 59個の超新星残骸 (e.g., Bozzetto+17)
- 分子雲の先駆的観測研究はあるが、感度不足＋網羅的観測なし

← 大マゼラン雲の超新星残骸 N49

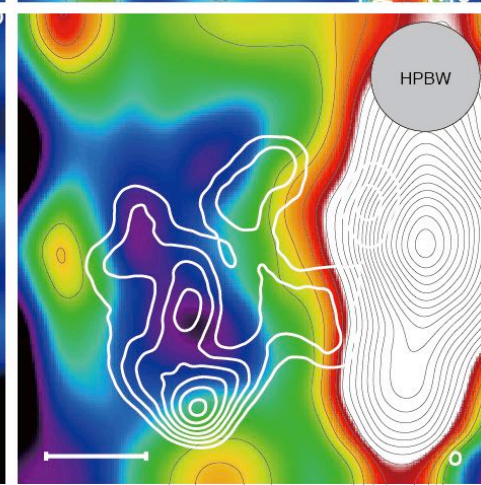
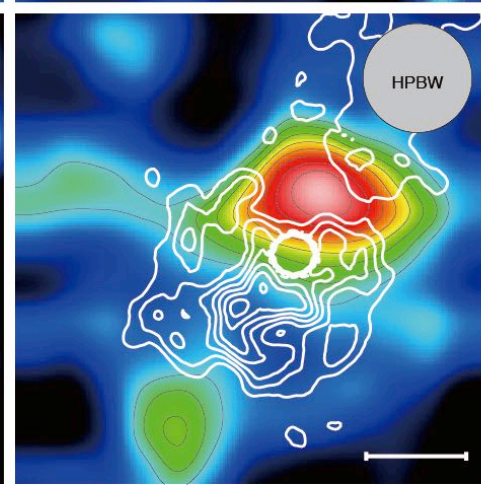
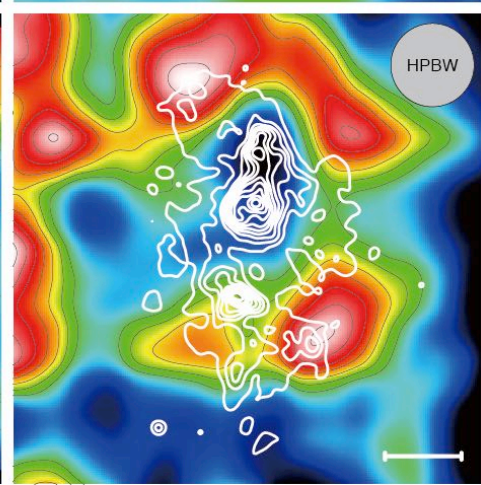
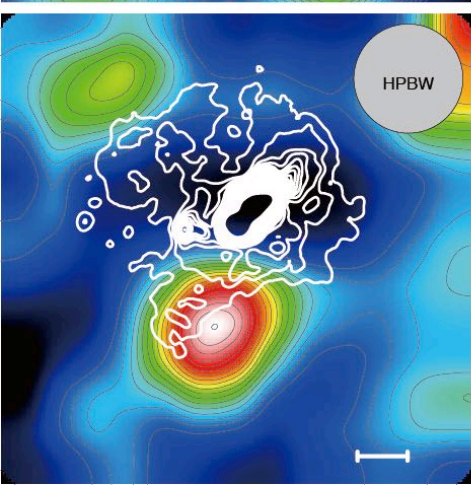
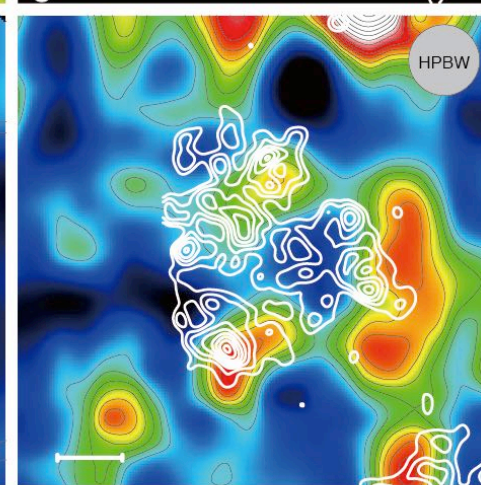
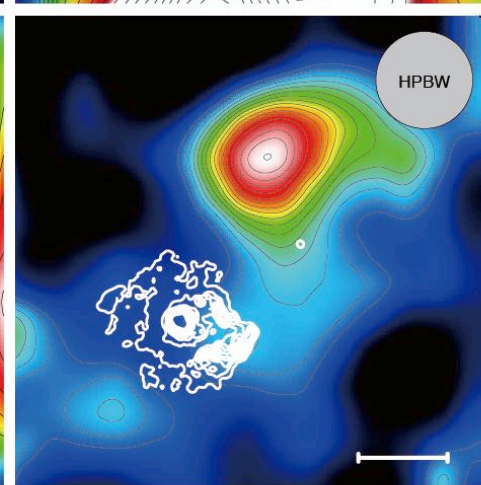
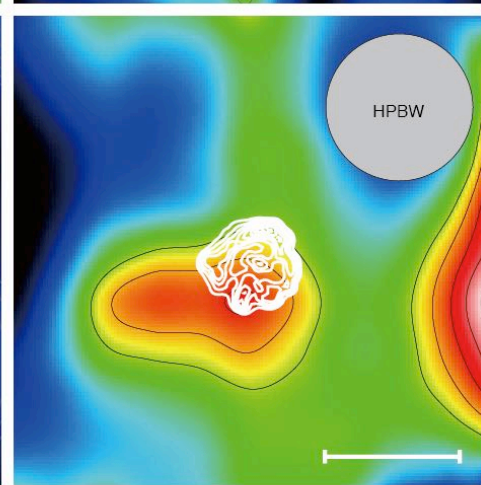
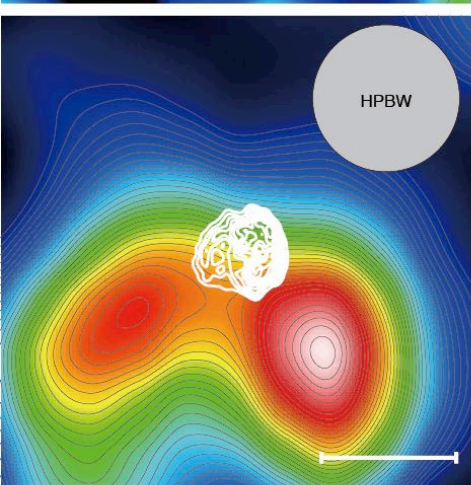
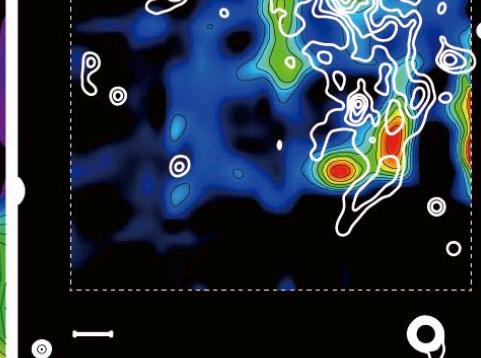
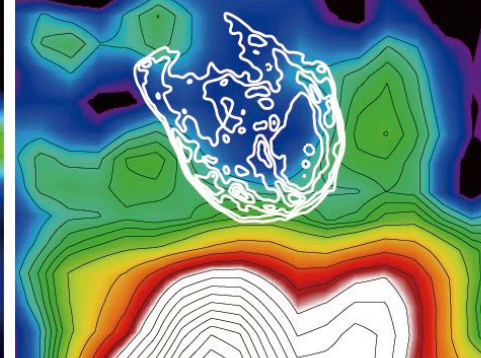
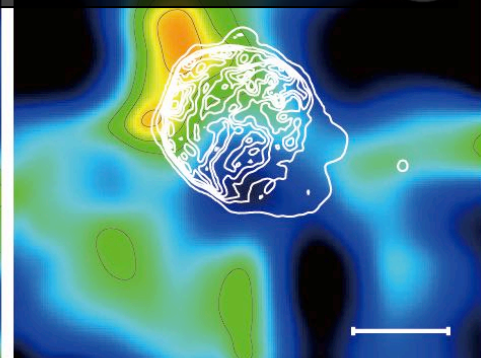
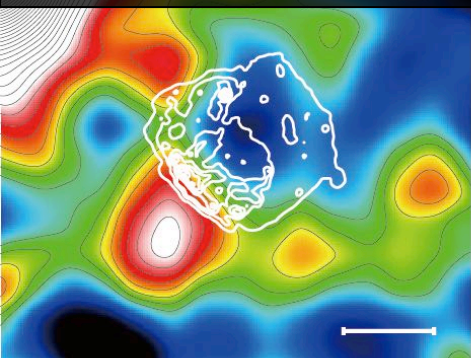
イメージ: ローサットによるエックス線

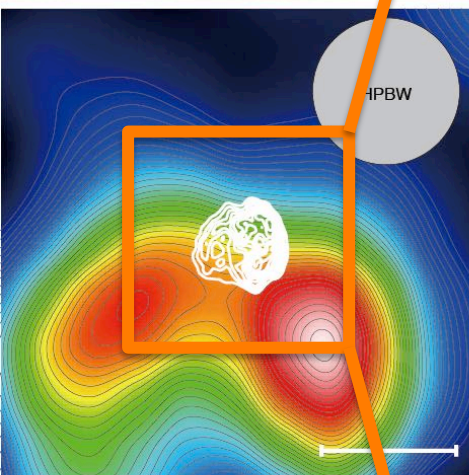
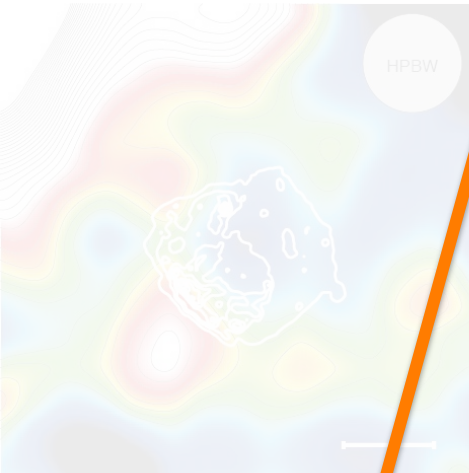
コントア: SEST による CO 分布 (Banas+97)。

Images: *Chandra* X-rays



Images: Mopra CO (Sano+17a, +18 in prep.)
Contours: *Chandra* X-rays





SNR N103B

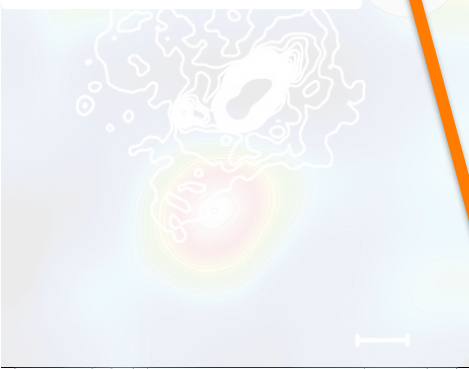
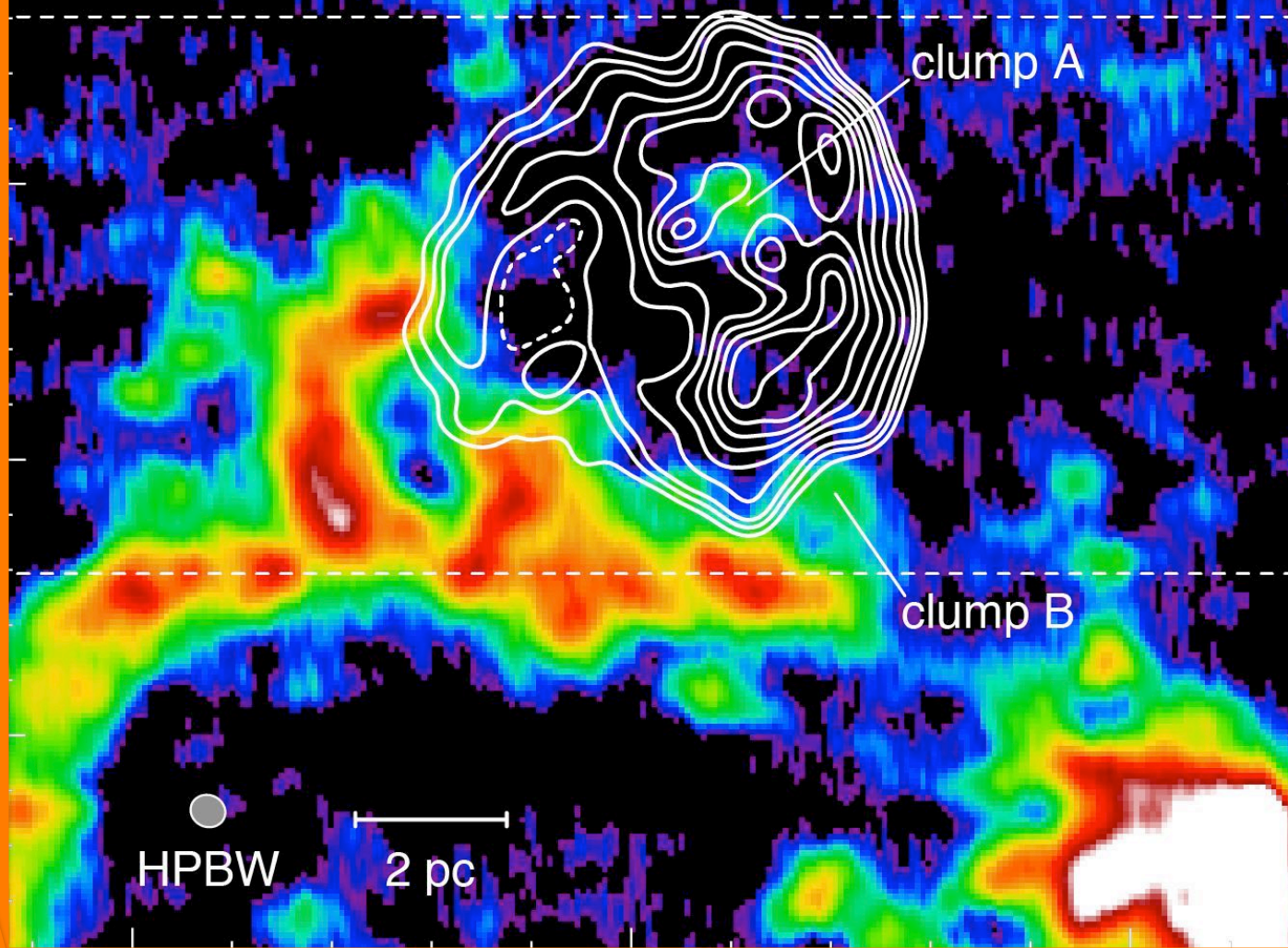
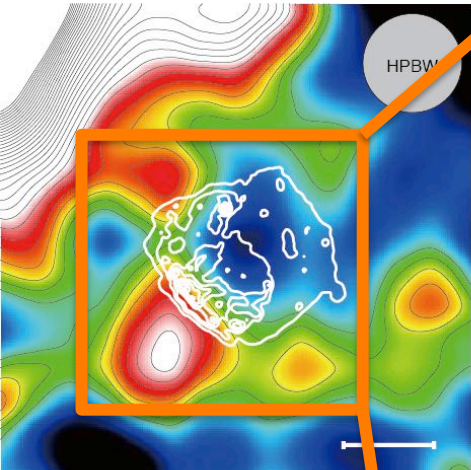


Image: ALMA CO 1-0 ($\Delta\theta \sim 3''$)
Contours: *Chandra* X-rays (0.3-7 keV)

HS+18,
submitted to ApJ





SNR N49



Image: ALMA CO 1-0 ($\Delta\theta \sim 3''$)

Contours: Chandra hard X-rays (2-7 keV)

HPBW

5pc

Yamane, HS+18
accepted for ApJ

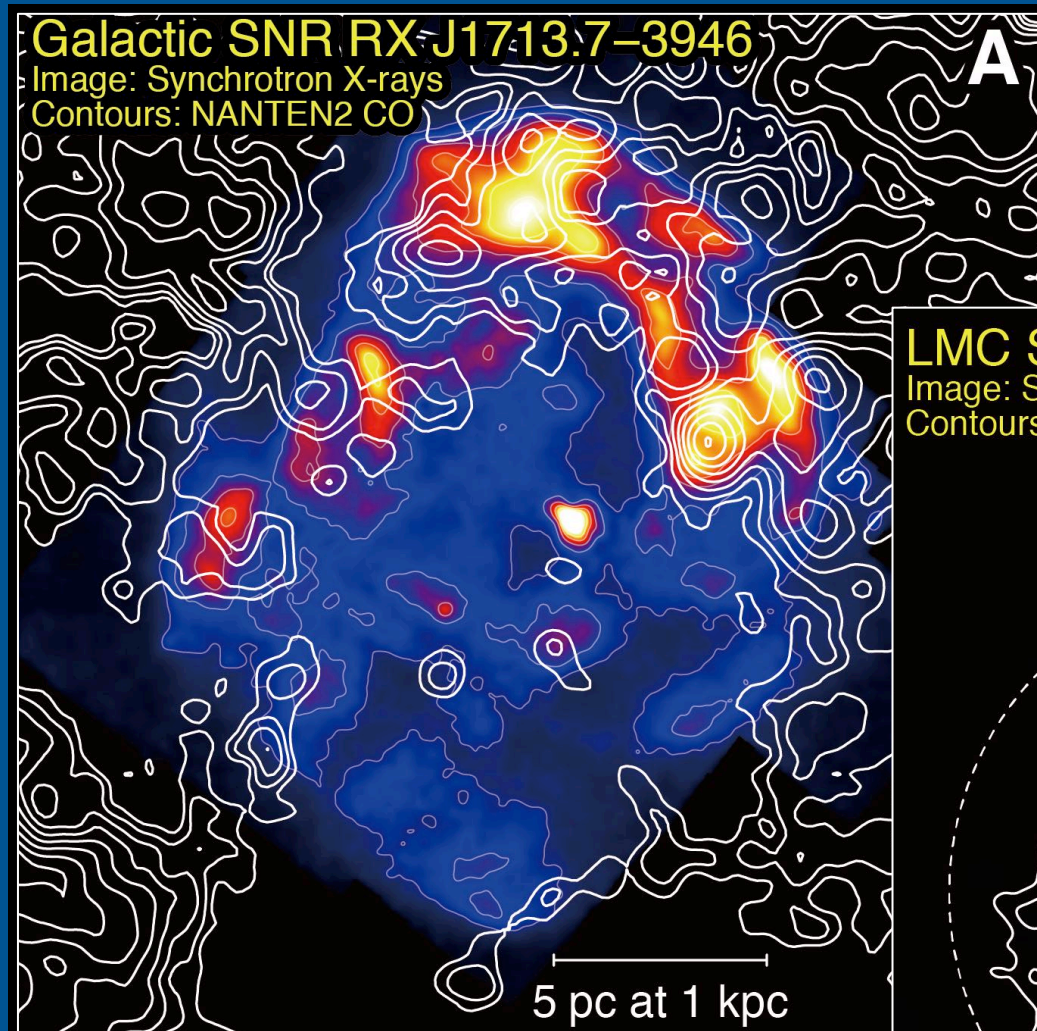
K km/s

0.0

7.0

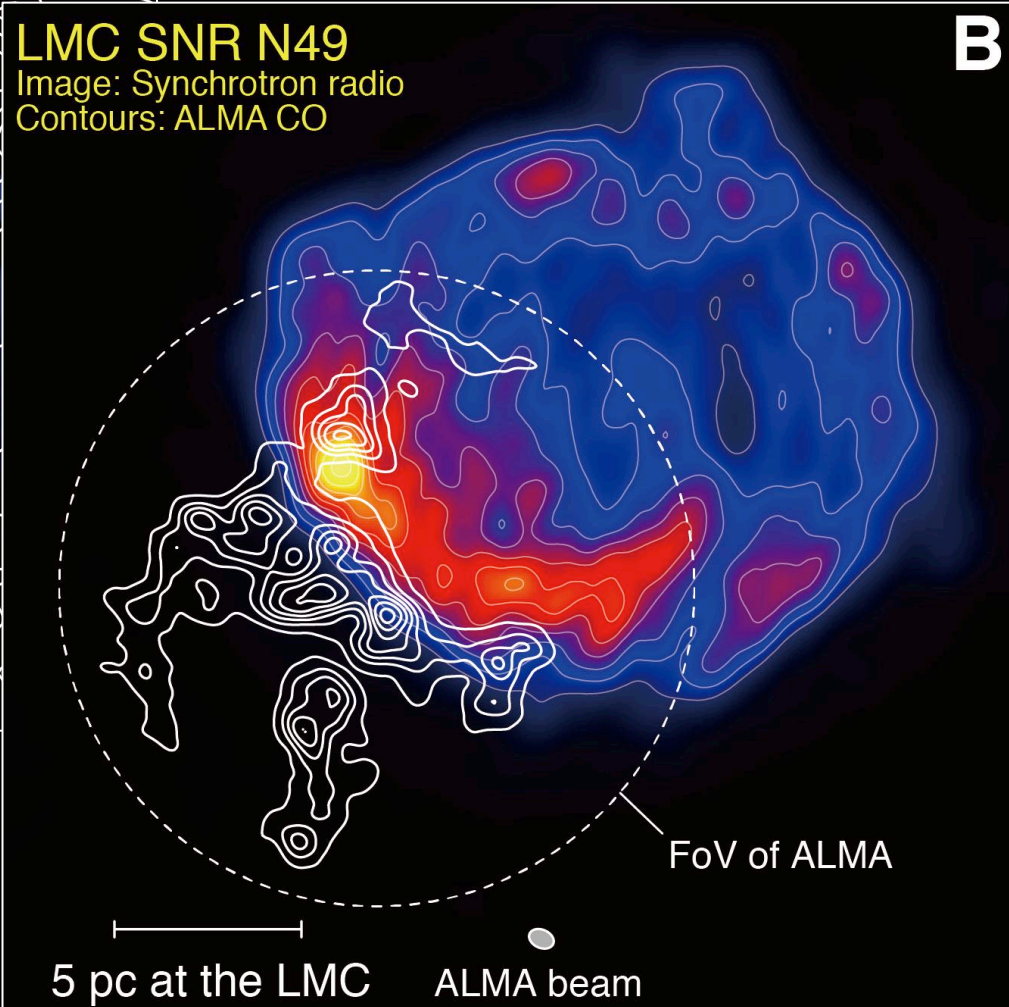
14.0

CTA 時代に向けて(2): 宇宙線電子の知見を深める

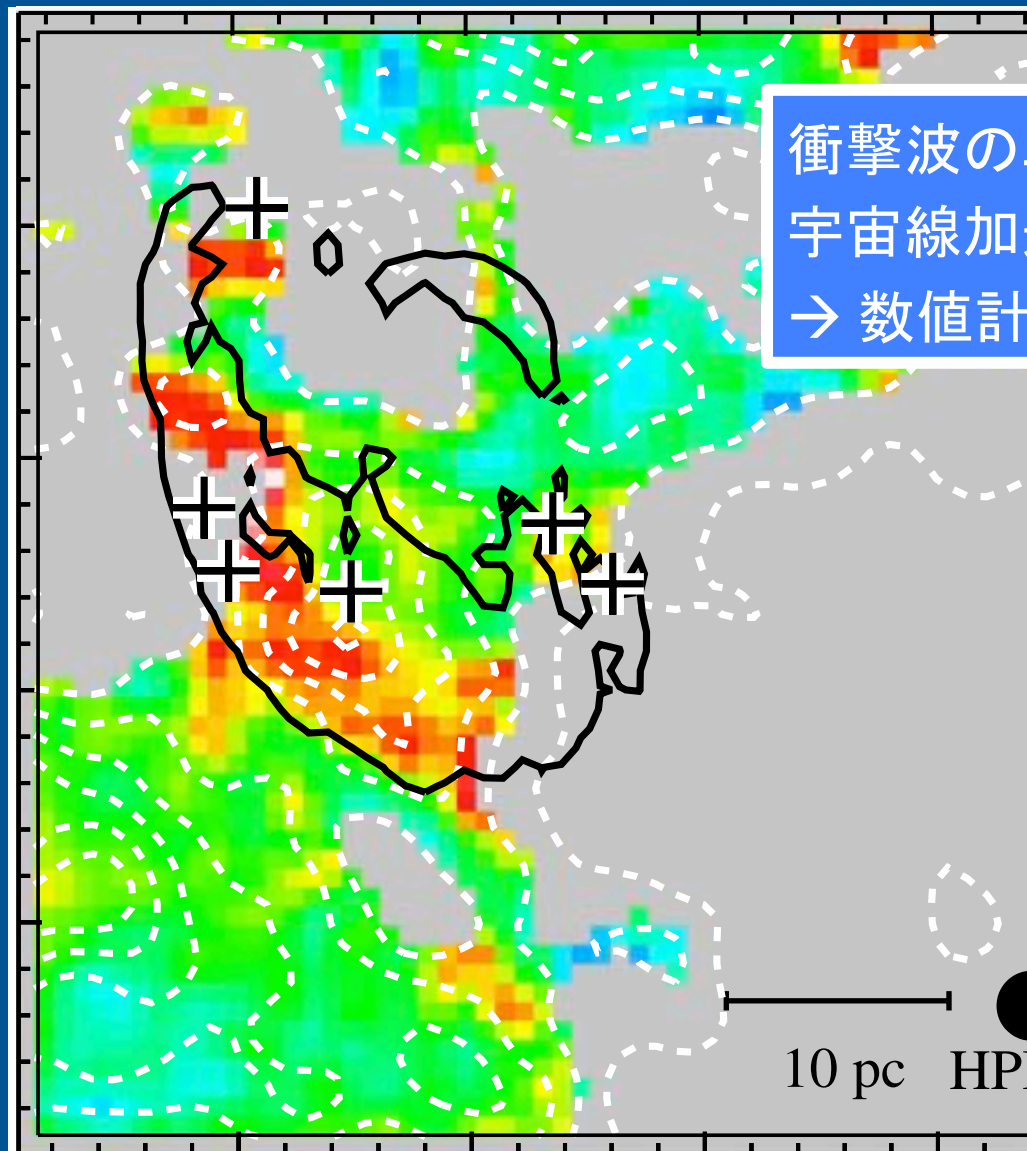


- ← Fukui+03, PASJ, 55, 61
- ← HS+10, ApJ, 724, 59
- ← HS+13, ApJ, 778, 59
- ← HS+15, ApJ, 799, 175
- ↓ Yamane+18, accepted for ApJ

LMC SNR N49
Image: Synchrotron radio
Contours: ALMA CO

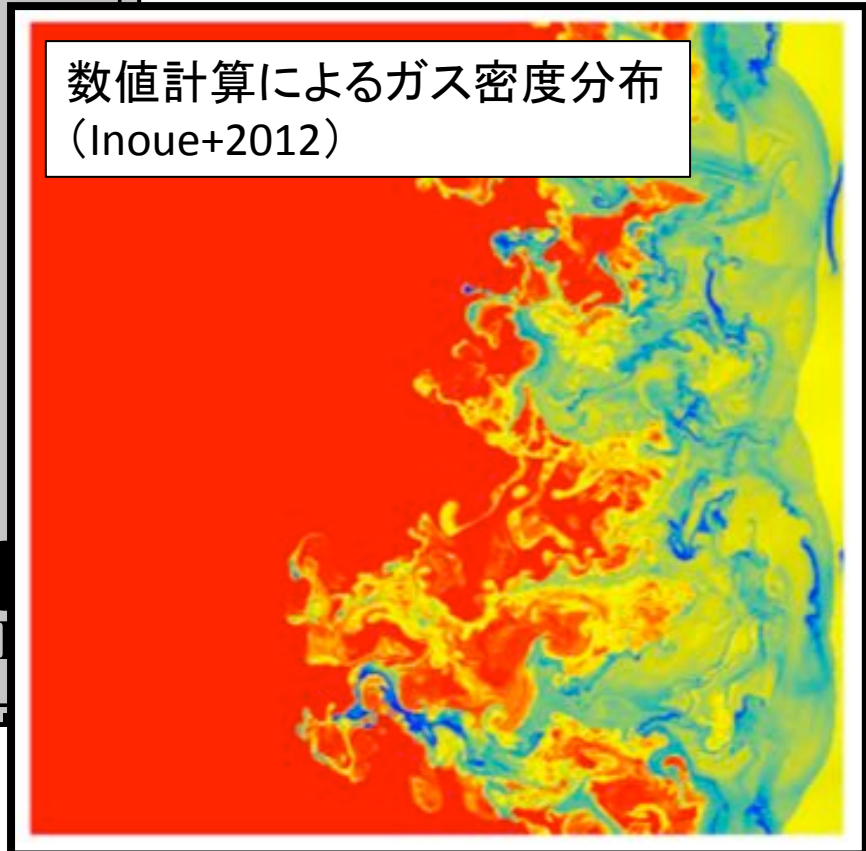


分子雲の周りで、宇宙線電子からの
シンクロトン放射が増光



衝撃波のエネルギーが、周辺ガスの加熱と、
宇宙線加速にどう分配されるか？
→ 数値計算によるアプローチ

数値計算によるガス密度分布
(Inoue+2012)



↑ W44 (Yoshiike+2013)

イメージ: CO 2-1/1-0, コントア: 電波連続波シェル

超新星残骸における宇宙線加速の理解には、 星間ガス(分子+原子)の精査が本質的

■ 陽子起源ガンマ線の特定

- 星間ガスは、陽子起源ガンマ線の発生の標的粒子
→ 星間ガスの精密定量 (Fukui+12,13,17; Fukuda+14; HS+18a)

■ 衝撃波と非一様星間ガスの衝突

- ガス塊周辺での乱流・磁場増幅が、X線増光や粒子加速に効く
(HS+10,13,15,17a,b; HS16; Inoue+09, 12)

■ 次世代ガンマ線望遠鏡 (CTA) に向けて

- より遠く、視直径の小さな天体へ(系内/マゼラン雲など)
- 宇宙線加速やガス加熱の本質に迫る
(HS+15,17c,18b; Kuriki+17; Yamane+18)