

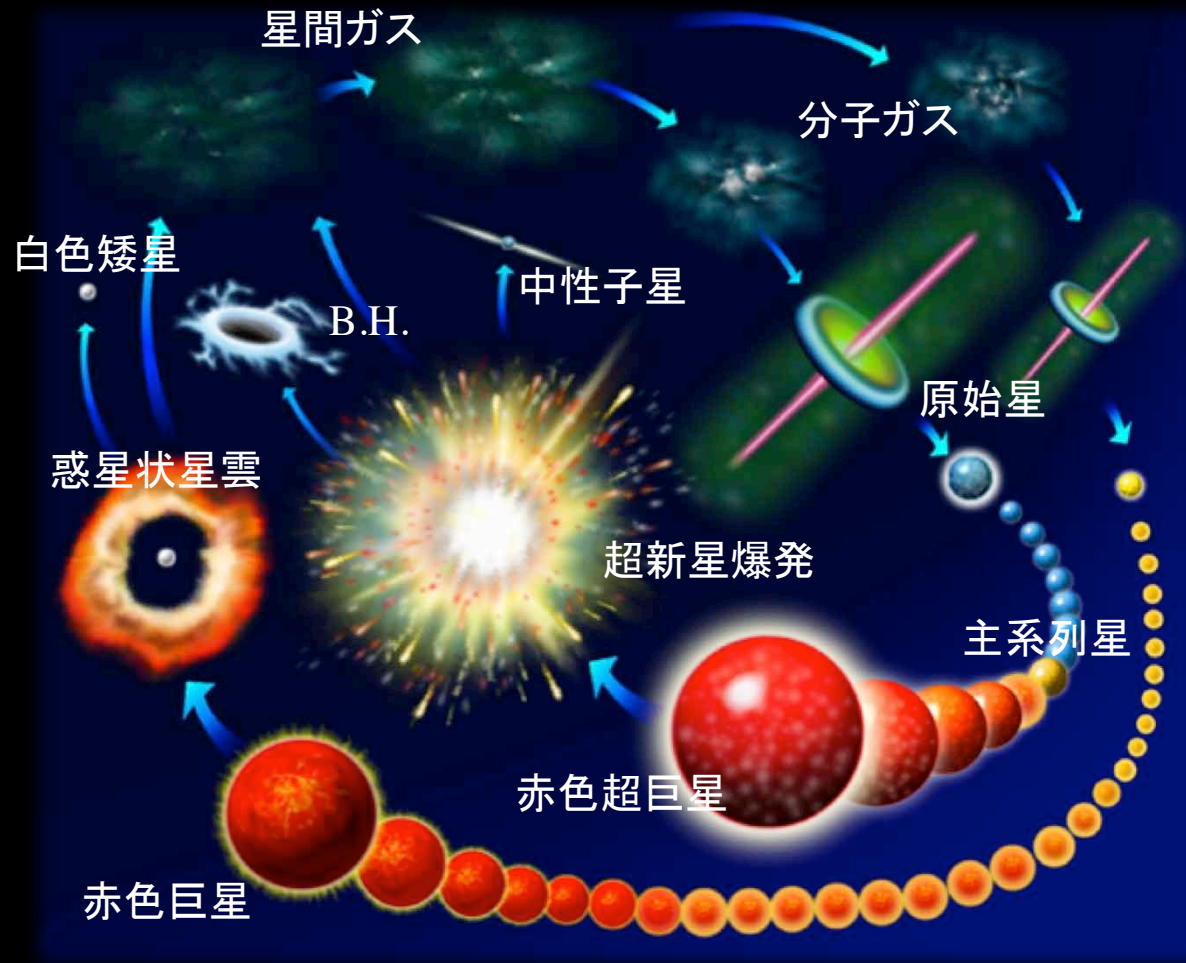
超新星残骸 RXJ1713.7–3946 における 星間ガスとX線放射

○ 佐野 栄俊 (名古屋大学 A研 D2)

福井康雄, 佐藤淳基, 洞地博隆, 早川貴敬, 鳥居和史, 河村晶子, 山本宏昭,
奥田武志, 犬塚修一郎(名大理), 水野亮(名大STE), 小川英夫, 大西利和(大阪府大理),
水野範和(NAOJ), 井上剛志(青山学院大理), Naomi McClure-Griffiths (CSIRO/ATNF),
Gavin Rowell (University of Adelaide), 田中孝明(京都大理), 松本浩典(名大KMI)

星の一生と星間ガス

- 星間ガスは星が生まれる材料であり、その最後の姿でもある



- 高密度分子ガス→星誕生
(大質量星は議論の余地有)
- SNe による重元素供給や
衝撃波相互作用
- 分子雲 / HIガス / HII領域
コロナガス / 星間微粒子

星間ガスの理解無くして、
宇宙の振る舞いを理解する
ことはできない。

超新星残骸 (Supernova Remnant; SNR)

■ 超新星残骸: 大質量星が超新星爆発した後に残される残骸

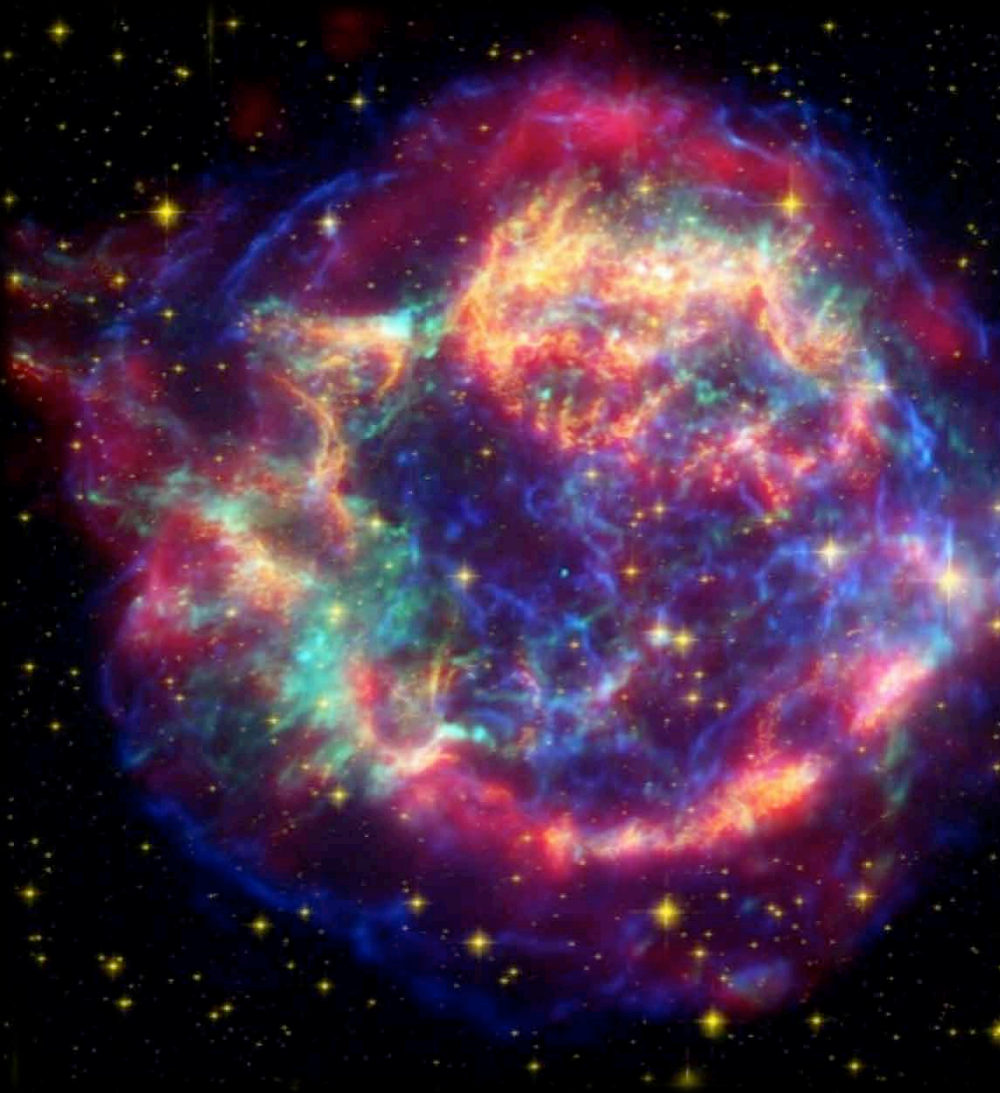
- 10^{51} erg のエネルギー放出
- 超音速衝撃波層の形成・膨張



星間空間へ多大な影響を与える

- 衝撃波と星間物質との相互作用
- 星間空間への重元素の供給
- 衝撃波面 (~ 1000 km/s) における宇宙線粒子加速 etc.

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



Cosmic Rays (CRs)

■ Cosmic Rays

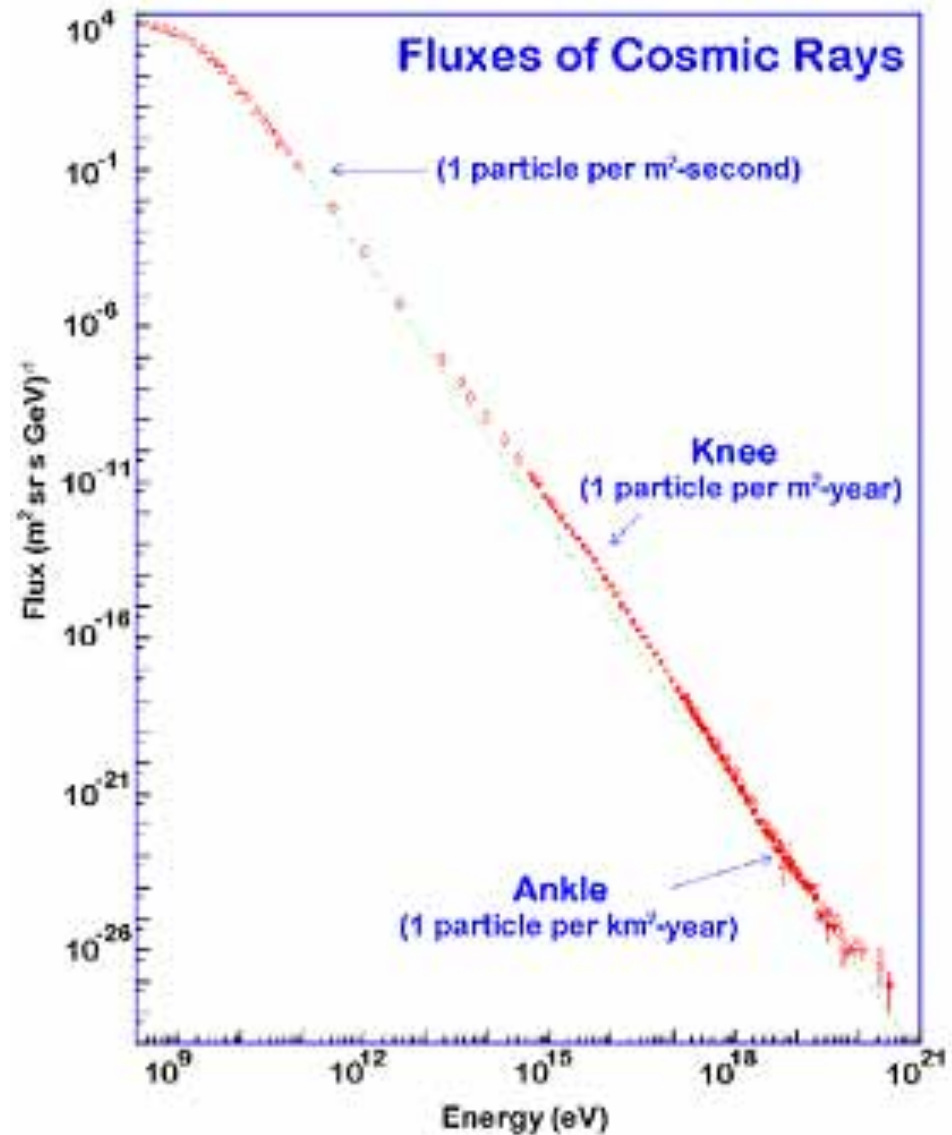
- Discovered by V. Hess in 1912.
- Energetic charged particles (proton/electron/nucleus etc.)

■ Cosmic Rays problem

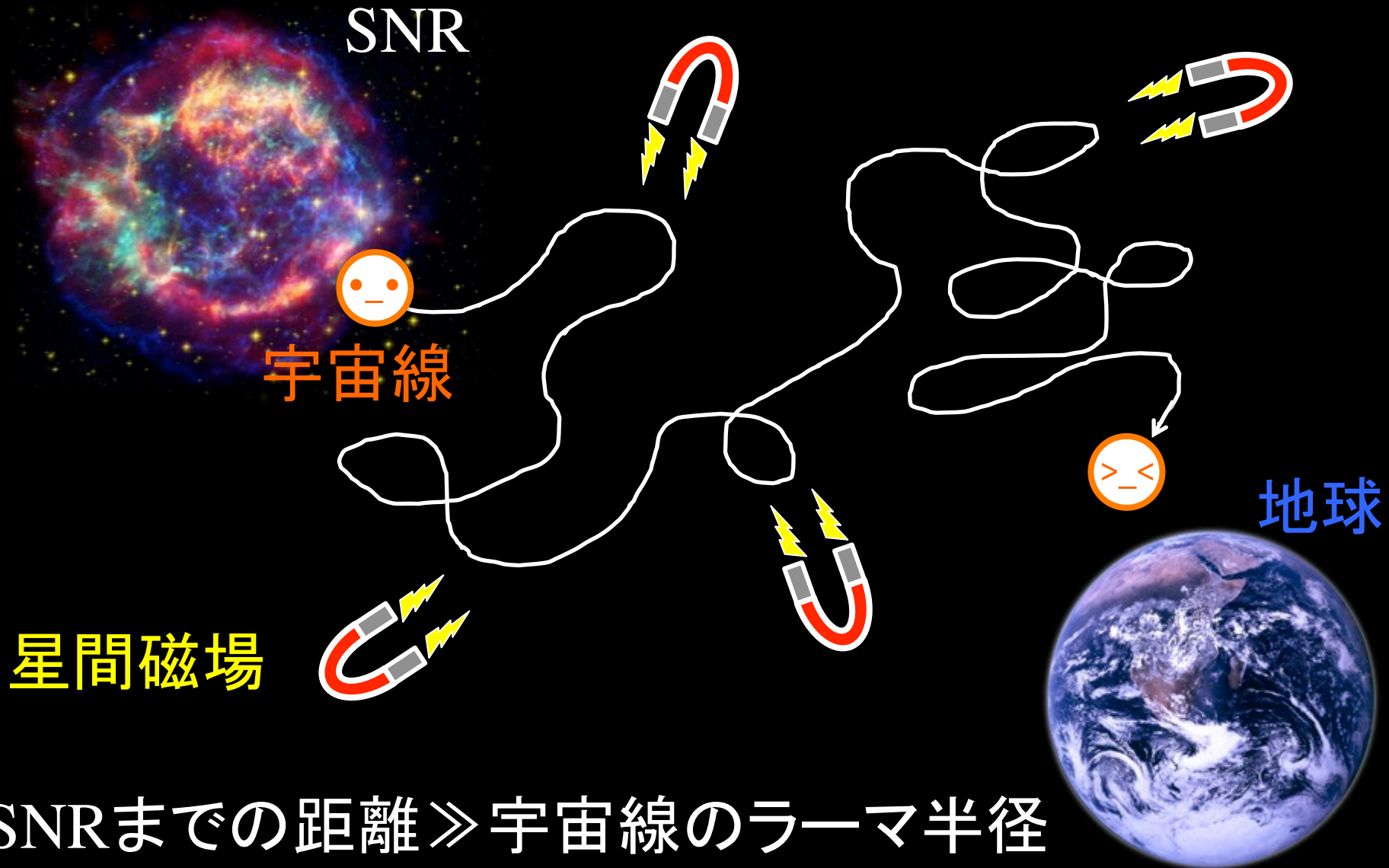
- Maximum energy
- What is the dominant acceleration mechanism?
- Acceleration efficiency
- **Where the CRs are accelerated ?**



SNRs are believed to be the sources of CRs the energy below “Knee”.



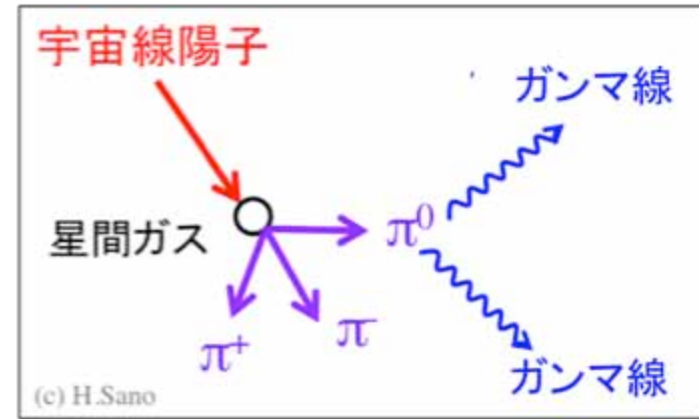
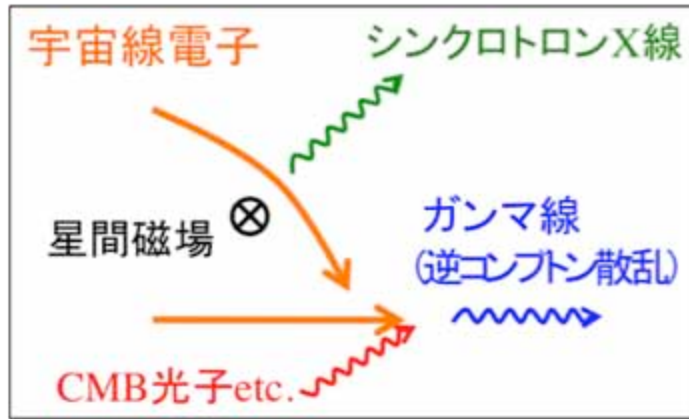
宇宙線を直接観測しても、加速現場は検証できない...



SNRまでの距離 ≫ 宇宙線のラーマ半径

宇宙線と高エネルギー放射

■ 相互作用により生じた光子を観測することで加速現場を検証する



○ 宇宙線電子: シンクロtron X線の検出により、SNRでの加速は証明されている
⇒ SNR周辺の星間ガスとの関係はよくわかっていない

○ 宇宙線陽子: ガンマ線を出すSNRはある。でも、電子or陽子起源かわからない。
⇒ 宇宙線陽子起源のガンマ線なら、星間ガス密度 \propto ガンマ線Flux
〔ガンマ線スペクトルの違いから切分ける試みが進められてきたが、
星間ガスの密度が非一様の場合、陽子/電子を切り分けられない!〕

宇宙線陽子の加速現場を突き止めることが、この分野の最大の焦点。

■ RX J1713.7–3946 (G347.3–0.5)

○ 非熱的X線 (TeV電子によるSynchrotron放射)

Koyama+97, Slane+99, Uchiyama+03,07, Lazendic+03,+04,
Cassam-Chenai+04, Hiraga+05, Tanaka+08, Takahashi+08,
Acerro+09

○ TeVガンマ線で明るい

Muraishi+00, Enomoto+02, Aharonian+04,06,07

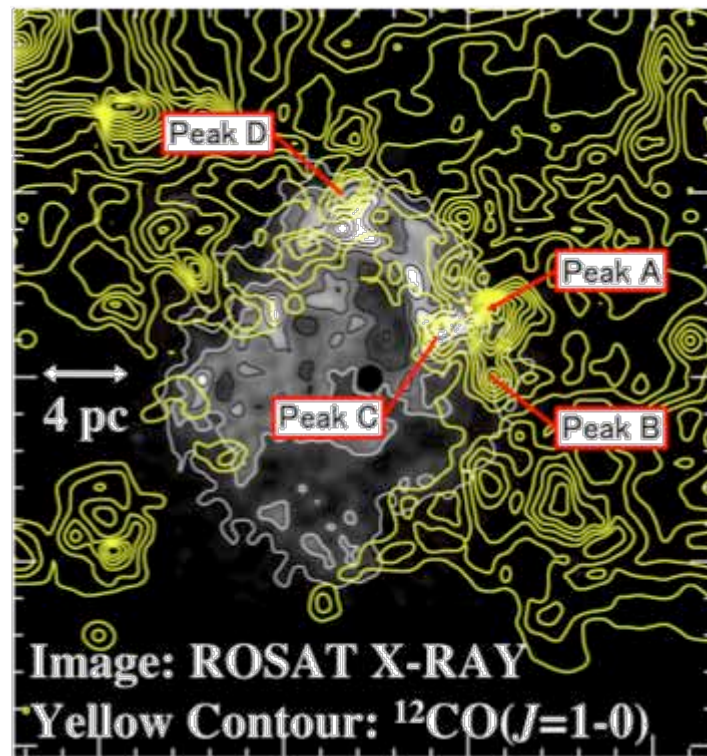
○ 年齢 ~1600yr, 距離 ~1 kpc と若くて近い

Fukui+03, Wang+97

○ 星間ガスとの相互作用

シェル内部は、母天体の恒星風より高真空
周辺には掃き集められ高密度になったガスが分布
非常に非一様なガス分布

Fukui+03, Moriguchi+05, Uchiyama+05, Sano+10,
Fukui+12, Maxted+12, Inoue+12



Fukui+03

○ SNRと濃い星間ガスが相互作用しており、 π_0 起源ガンマ線放射の可能性大

○ X線を取り囲むように分子雲が分布、両者の強度ピークが~1pcで空間的に一致

星間ガスとSNRの関係を探る上で、最も良いターゲットの1つ

Previous Study (Importance of the ISM)

■ 分子雲とシンクロtronX線 (Sano+10)

○ ~ 1 pc で相関 (Fukui+03)、 ~ 0.1 pc で反相関

■ 星間ガスとTeVガンマ線放射 (Fukui+12)

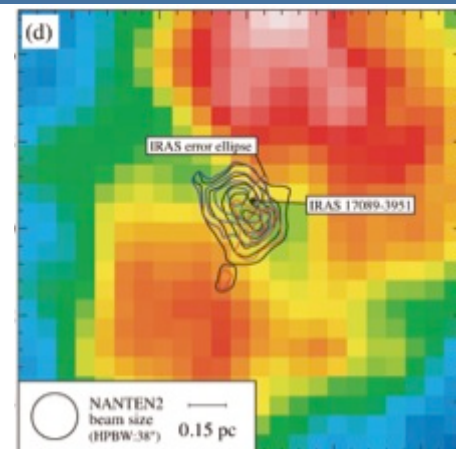
宇宙線陽子起源のガンマ線なら、**星間ガス密度 \propto ガンマ線 Flux**

○ 全星間陽子 $N_p(\text{H}_2+\text{HI})$ と TeV ガンマ線が空間的に相関

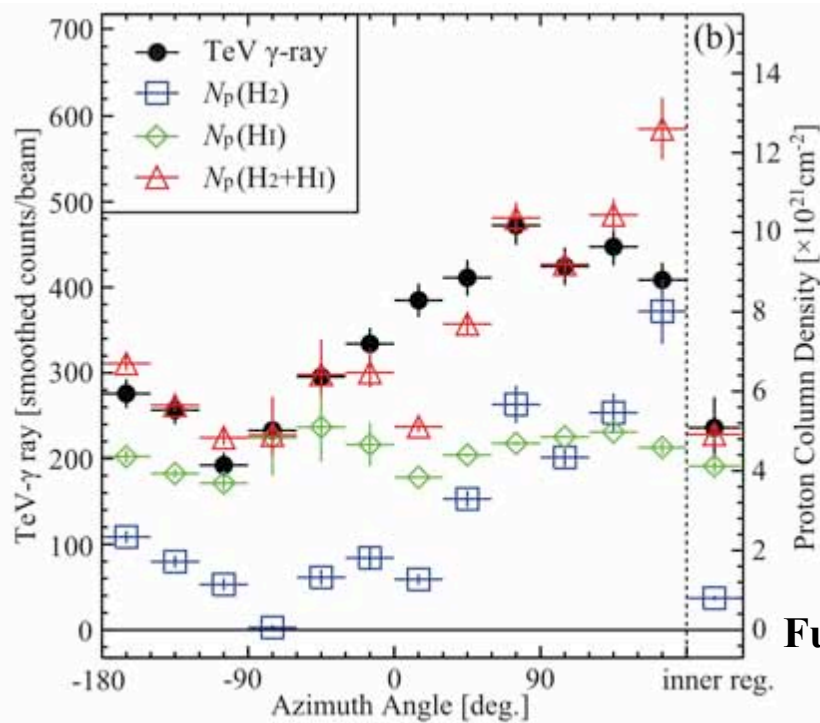
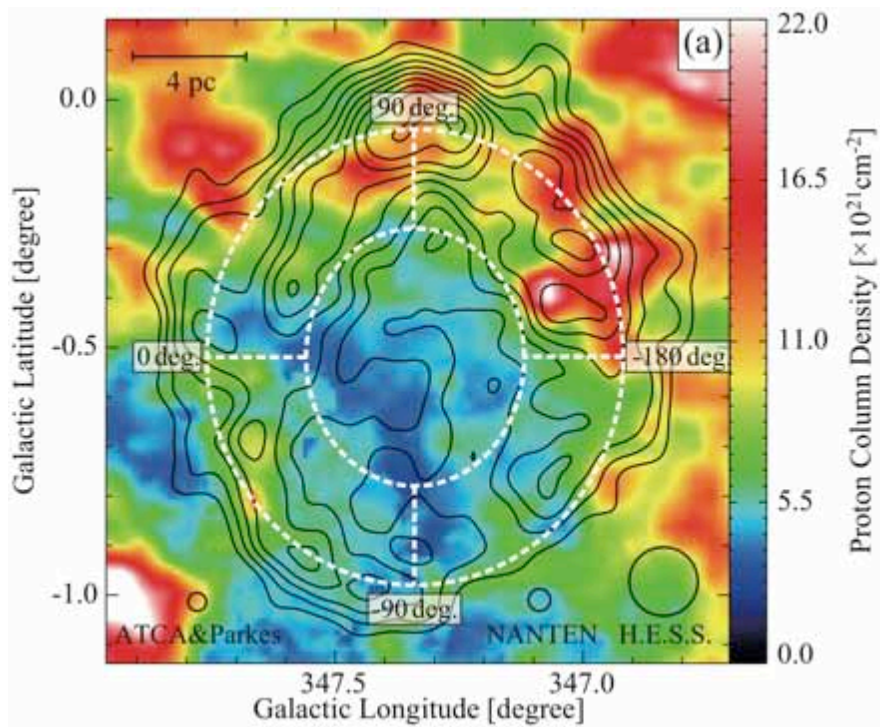
○ 宇宙線陽子起源のガンマ線と考えると矛盾しない

↓ (a) イメージ: $N_p(\text{H}_2+\text{HI})$, コントア: TeVガンマ, (b) 方位角分布

Sano+10



↑ イメージ: *Suzaku* 5–10 keV
 コントア: $^{12}\text{CO}(J=4-3)$ I.I.



Fukui+12

本研究の背景と目的

背景: 星間ガスとTeVガンマ線の関係は明らかになった(Fukui+12)
しかし、シンクロトロンX線放射との関係は、まだ良くわかっていない

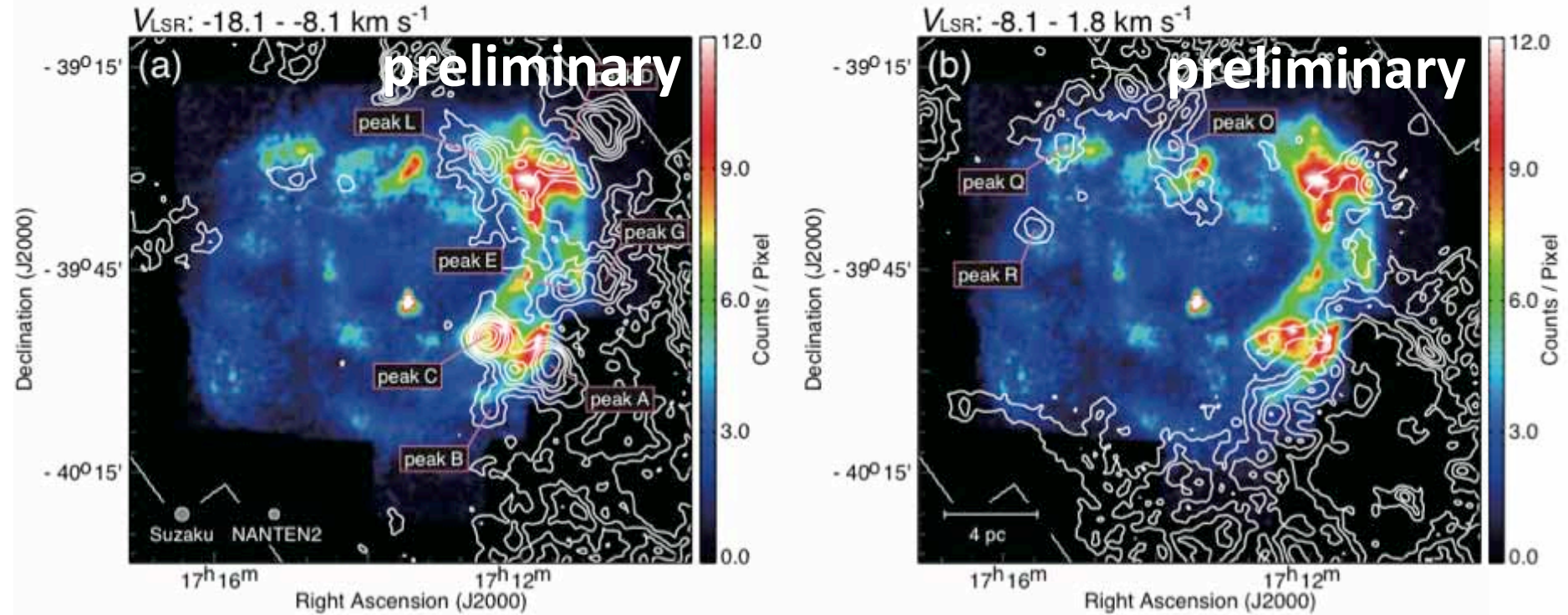
目的: 星間ガスとX線の関係性を、SNR全体について詳細に明らかにする

↓
*Suzaku*衛星によるX線観測データ: イメージ&スペクトル解析

- SNR全体についての星間ガスとX線強度分布の比較
- スペクトル解析により { **スペクトルのベキ指数** } 分布を解明+比較
 { **星間吸収量(光電吸収)** }

**X線の吸収に寄与する星間ガスの特定や、
光子指数分布と星間ガスの関係などを、明らかにできるかもしれない**

Suzaku X-rays (1–5 keV) and Molecular Clouds

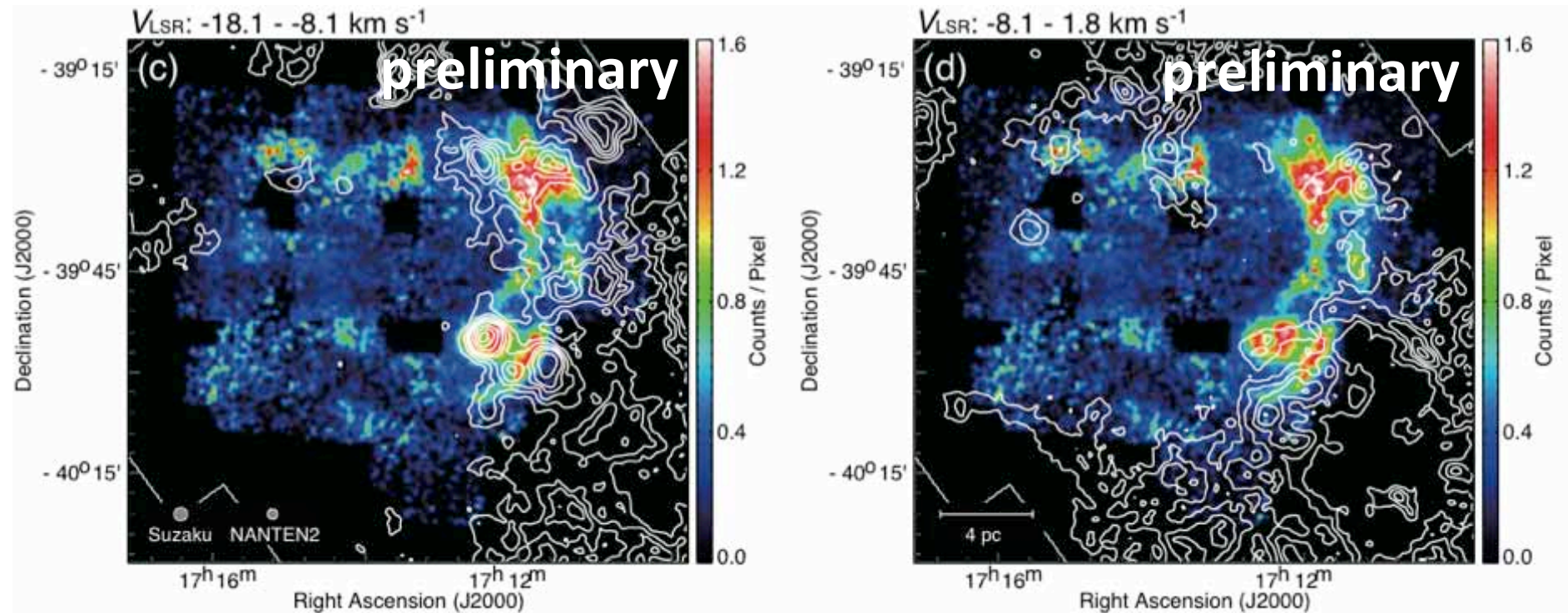


Sano+12a in prep.

カラーイメージ: Suzaku XIS 0+2+3 (1–5 keV) count map (exposure + vignetting + NXB補正)
コントア: $^{12}\text{CO}(J=2-1)$ 積分強度 (左図 $V_{\text{LSR}}: -18.1 - -8.1 \text{ km s}^{-1}$, 右図 $V_{\text{LSR}}: -8.1 - 1.8 \text{ km s}^{-1}$)

- 分子雲とX線の空間分布は、 $\sim 1 \text{ pc}$ で相関、 $\sim 0.1 \text{ pc}$ で反相関
 - 星間吸収を受けにくい 5–10 keV でも、同様の関係が見えている
- ⇒ 衝撃波との相互作用による、分子雲周辺での粒子加速 and/or 磁場増幅

Suzaku X-rays (5–10 keV) and Molecular Clouds



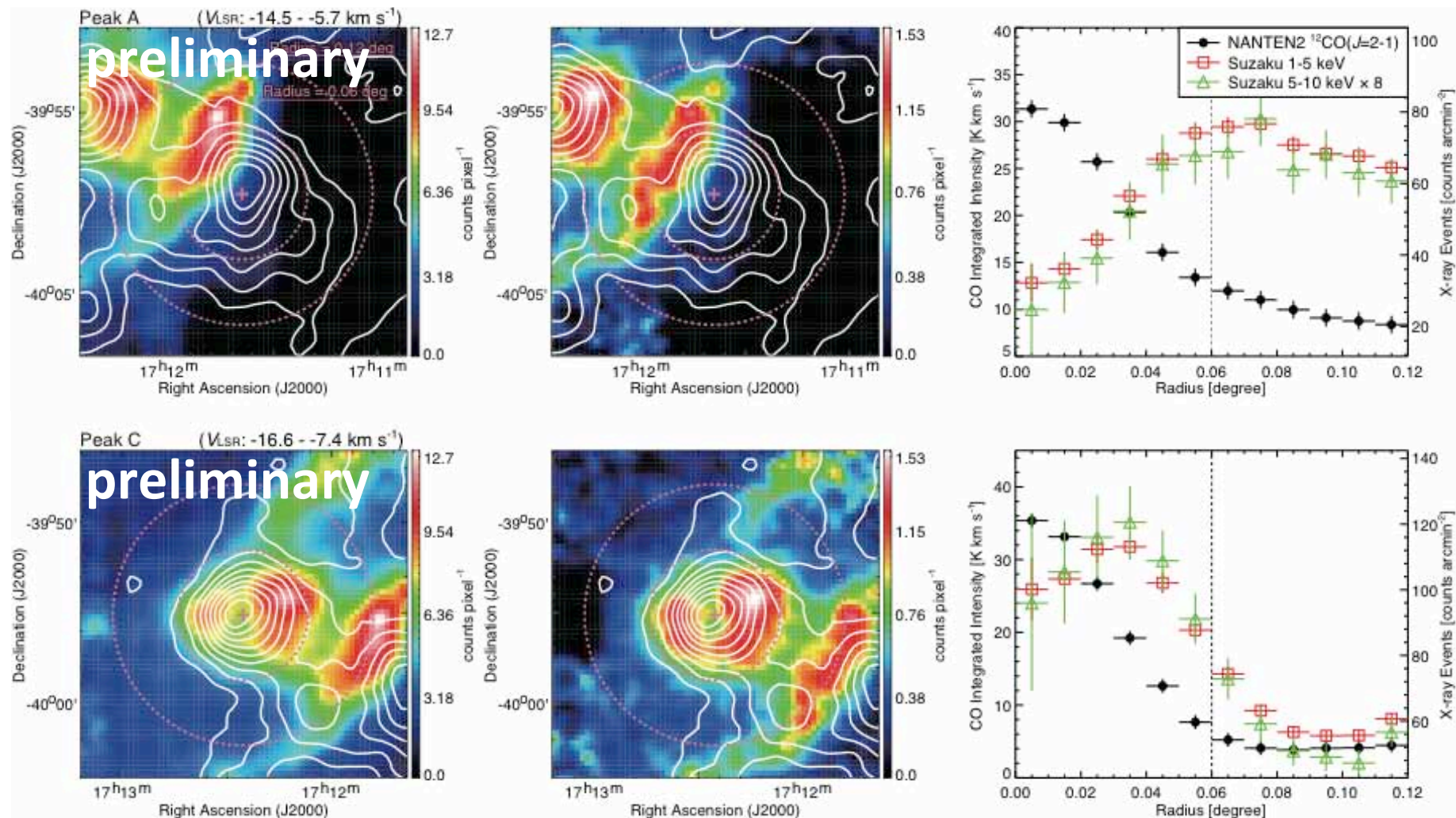
Sano+12a in prep.

カラーイメージ: Suzaku XIS 0+2+3 (5–10 keV) count map (exposure + vignetting + NXB補正)
コントア: $^{12}\text{CO}(J=2-1)$ 積分強度 (左図 $V_{\text{LSR}}: -18.1 - -8.1 \text{ km s}^{-1}$, 右図 $V_{\text{LSR}}: -8.1 - 1.8 \text{ km s}^{-1}$)

- 分子雲とX線の空間分布は、 $\sim 1 \text{ pc}$ で相関、 $\sim 0.1 \text{ pc}$ で反相関
 - 星間吸収を受けにくい 5–10 keV でも、同様の関係が見えている
- ⇒ 衝撃波との相互作用による、分子雲周辺での粒子加速 and/or 磁場増幅

Suzaku X-rays and Molecular Cloud Cores

カラーイメージ: Suzaku count map (左1-5 keV, 右5-10 keV), コントア: $^{12}\text{CO}(J=2-1)$ 積分強度

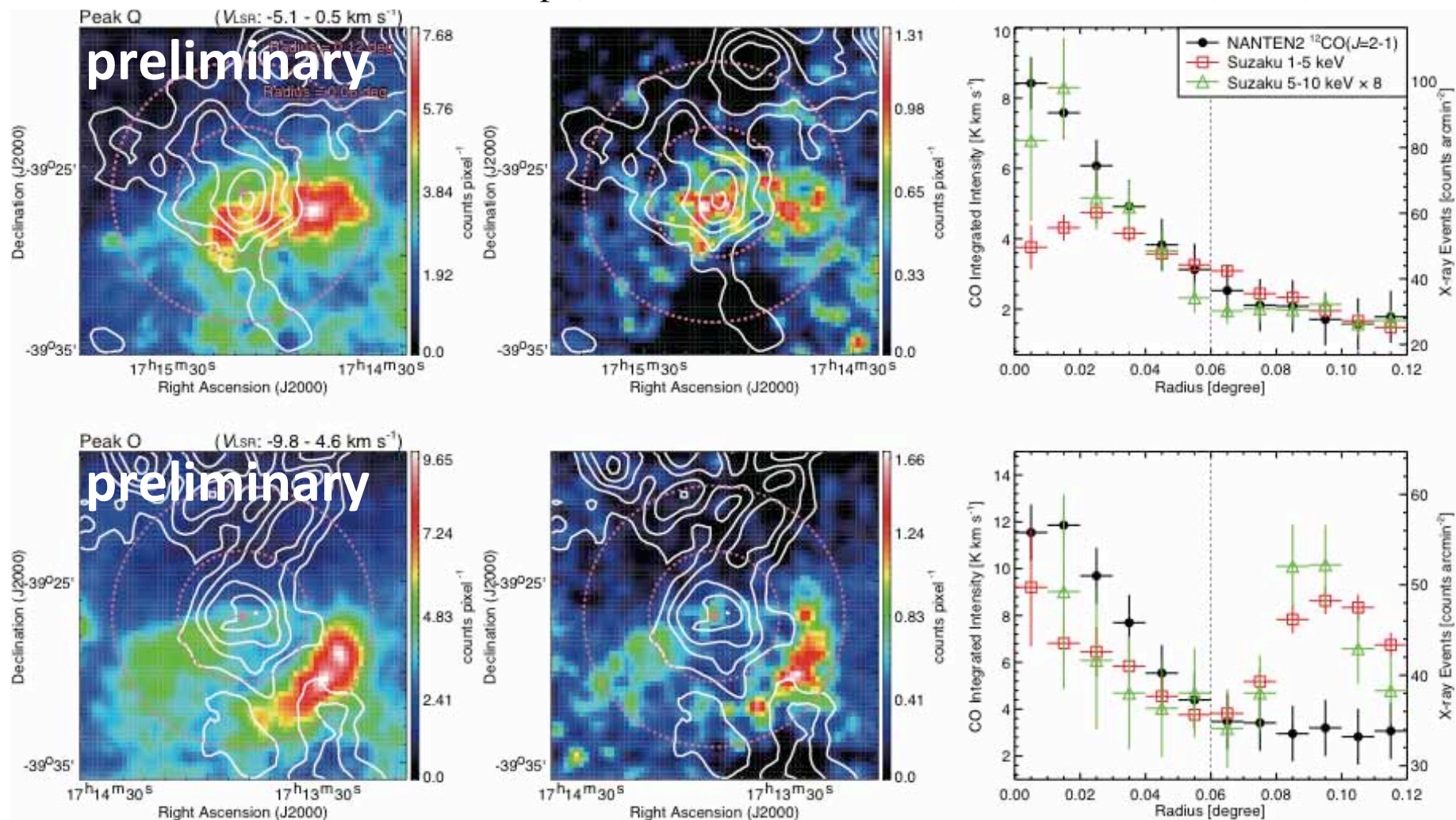


Sano+12a in prep.

○ 分子雲ピークから offset したところで X線強度がピークとなる
 コア毎に距離が異なるのは **projection の効果** ⇒ 位置関係を知る手掛り

Suzaku X-rays and Molecular Cloud Cores

カラーイメージ: Suzaku count map (左1-5 keV, 右5-10 keV), コントア: $^{12}\text{CO}(J=2-1)$ 積分強度

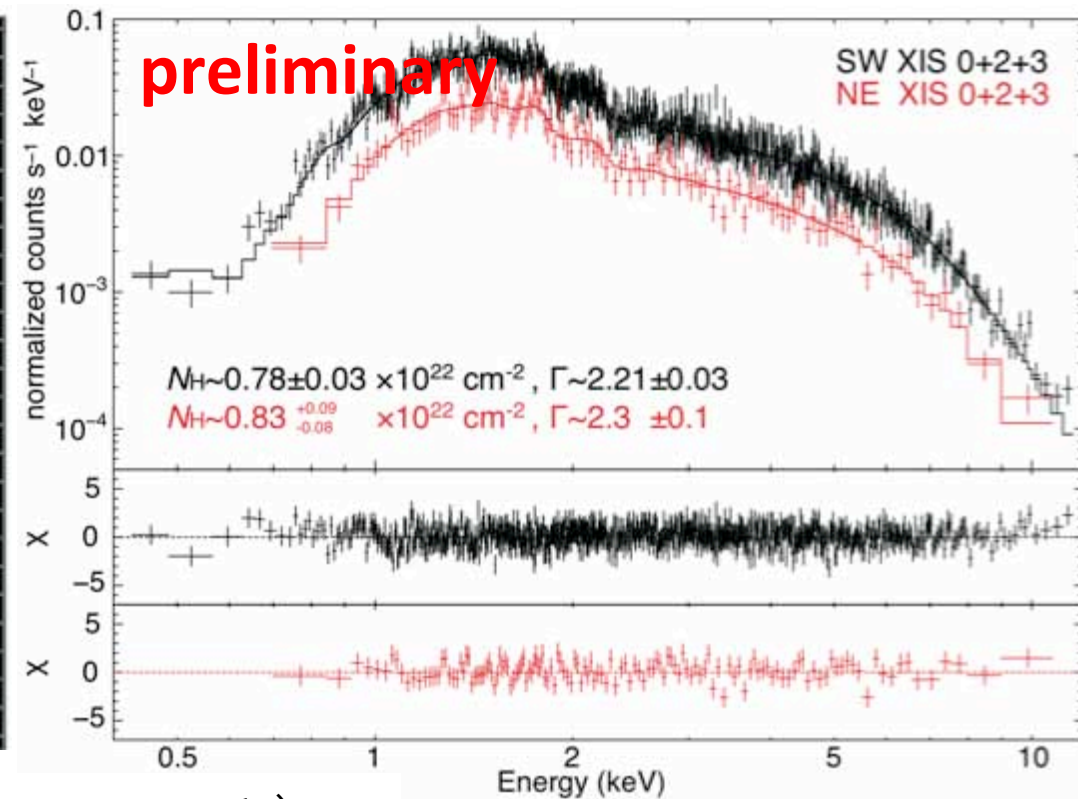
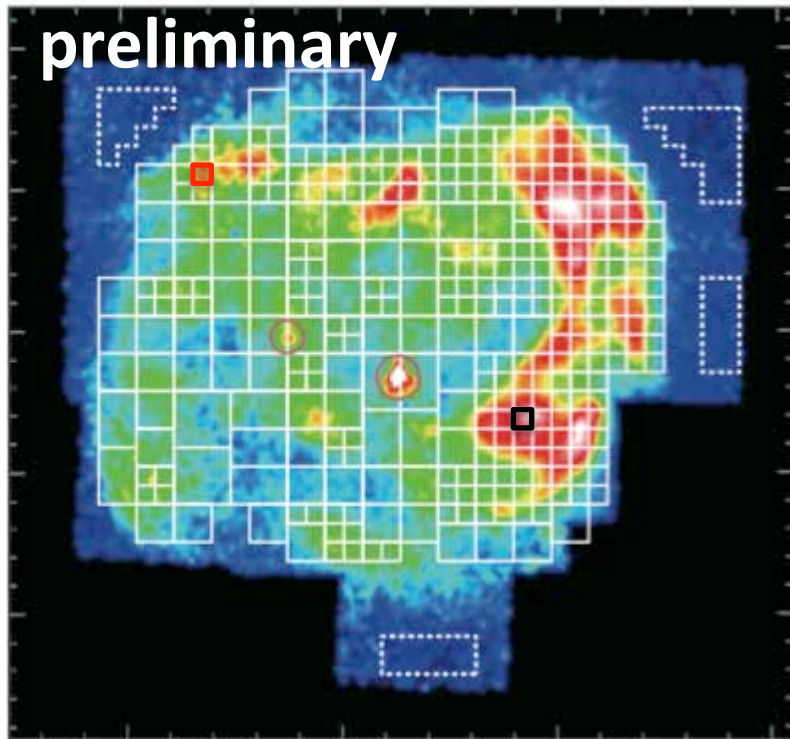


○ 分子雲ピークから offset したところで X線強度がピークとなる
 コア毎に距離が異なるのは **projection の効果** ⇒ 位置関係を知る手掛り

X-ray Spectrum Fitting

■ *Suzaku*衛星によるX線データを用い、SNR全体についてスペクトル解析

- 星間吸収による **absorption** と、synchrotron放射の **power law** で fitting
- 2つの point source (1WGA J1714.4–3945, 1WGA J1713.4–3949) のある領域は解析から除外

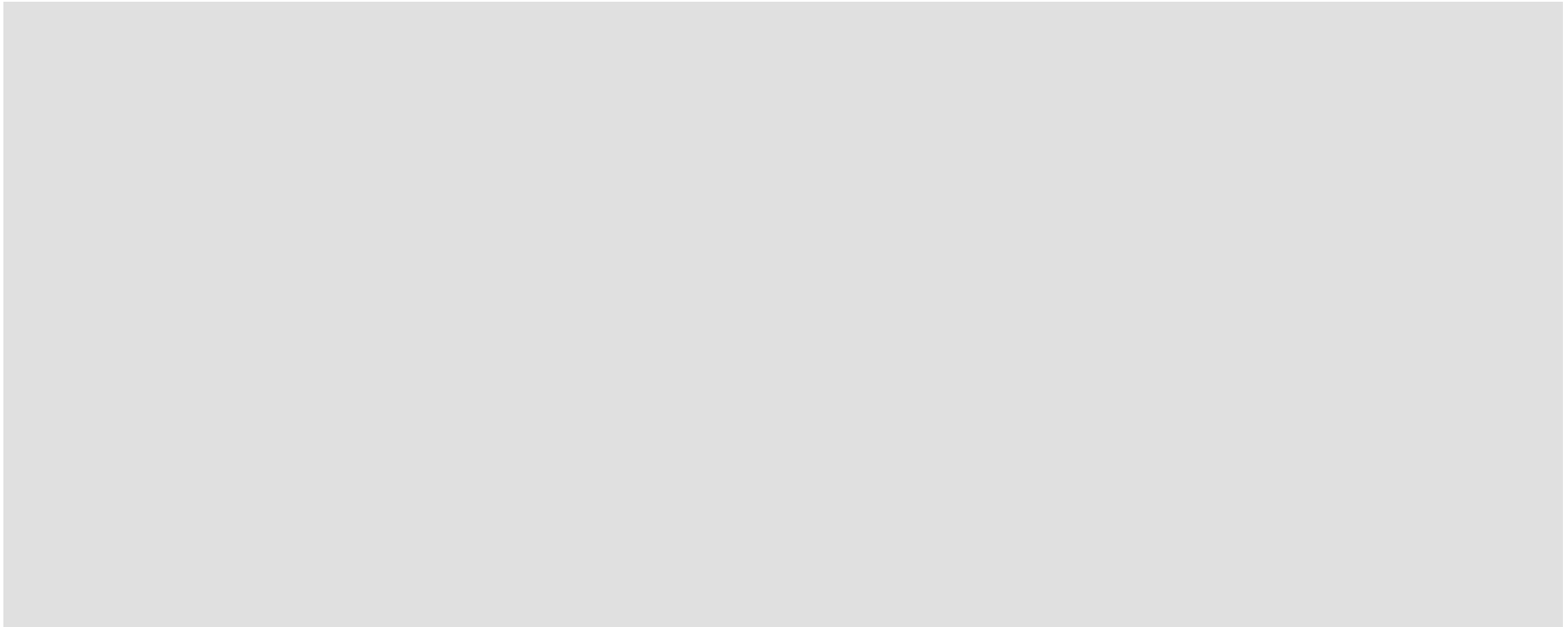


カラー: *Suzaku* XIS 0+2+3 (1–5 keV; square root scale)

実線: スペクトル抽出領域, 点線: B.G. 抽出領域

Sano+12 in prep.

Absorbing Column and Photon Index



Sano+12b in prep.

カラーイメージ: (a) 吸収柱密度 N_{H} [$\times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$], (b) 光子指数 Γ (power lawのベキ)
コントア: Suzaku XIS 0+2+3 1–5 keV 強度分布 (square root scale)

- $0.4 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2} < N_{\text{H}} < 1.5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ (Cassam-Chennai+04とほぼ同じ)
- スペクトルのベキが場所によって大きく変化 ($1.8 < \Gamma < 3.4$)
⇒ 効率よい粒子加速 and/or 磁場増幅の存在を示唆している

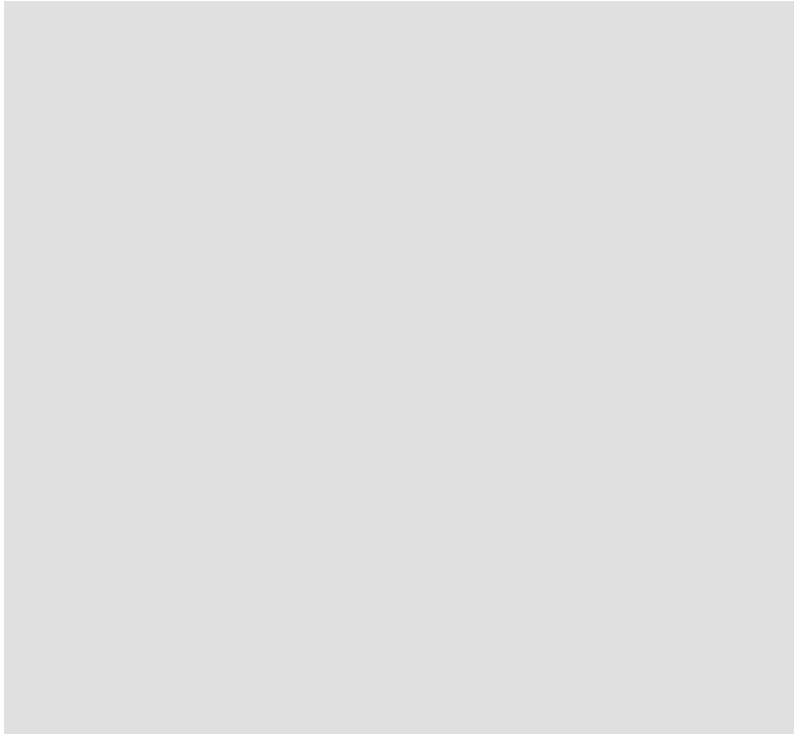
Absorbing Column – Foreground Component

Sano+12b in prep.

- 吸収には効いているが、SNRとは無関係の、太陽系近傍の星間ガス (Moriguchi+05) の柱密度 $N_p(\text{Fg})$ を、COとHIの観測結果から導出
- SNRと相互作用作用するガス $N_{\text{H}} - N_p(\text{Fg})$ は、SNRを取り囲むように分布
⇒ 宇宙線陽子起源のTeVガンマ線 (Fukui+12) と矛盾しない

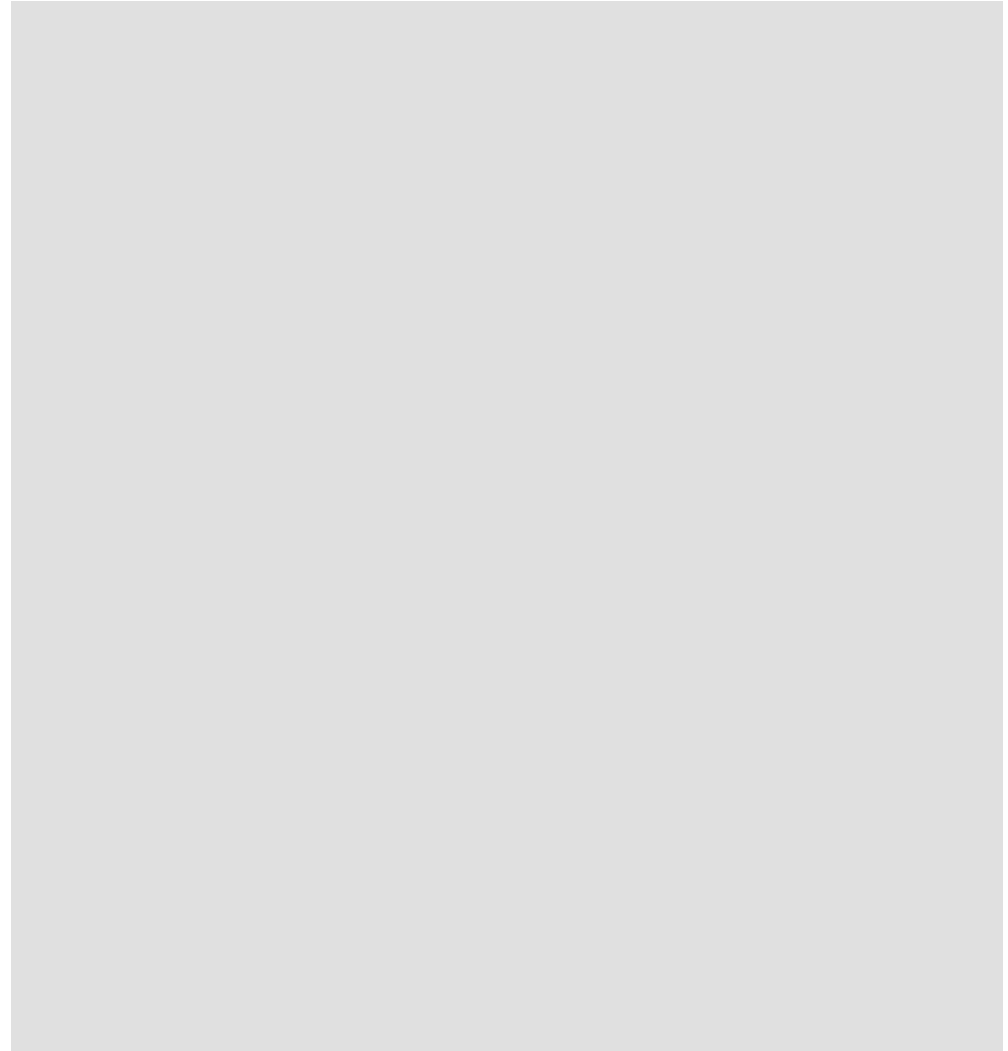
カラーイメージ: (a) N_{H} , (b) $N_p(\text{Fg})$, (c) $N_{\text{H}} - N_p(\text{Fg})$, (d) $N_p(\text{HI})$, (e) $N_p(\text{H}_2)$, コントア: TeVガンマ線

Absorbing Column vs. $N_p(\text{H}_2+\text{HI})$



カラーイメージ: (a) $N_{\text{H}}-N_{\text{p}}(\text{Fg})$ [$\times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$]
コントラスト: $N_{\text{p}}(\text{H}_2+\text{HI})$ ($V_{\text{l sr}}: -18 - 2 \text{ km/s}$)

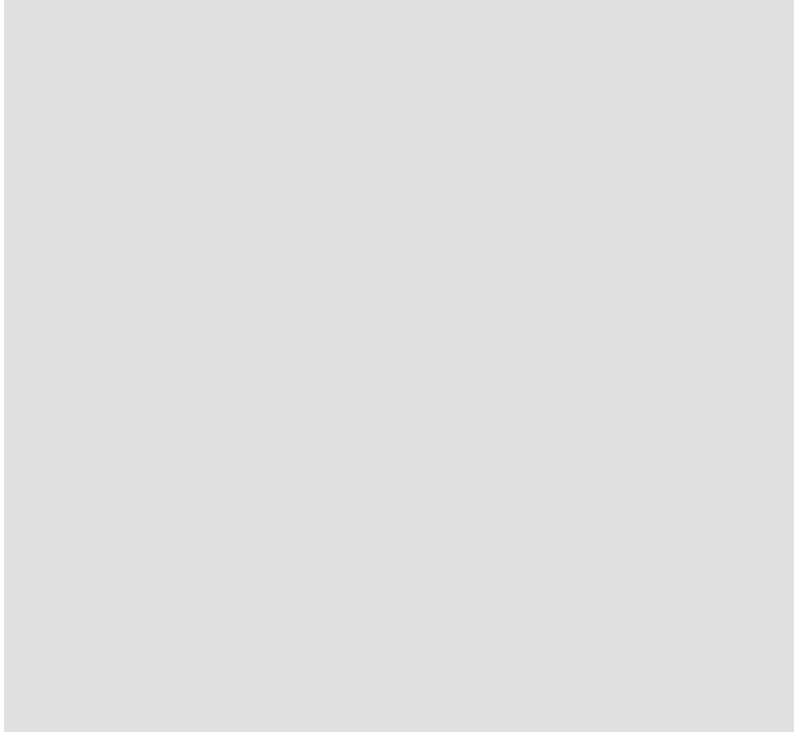
Sano+12b in prep.



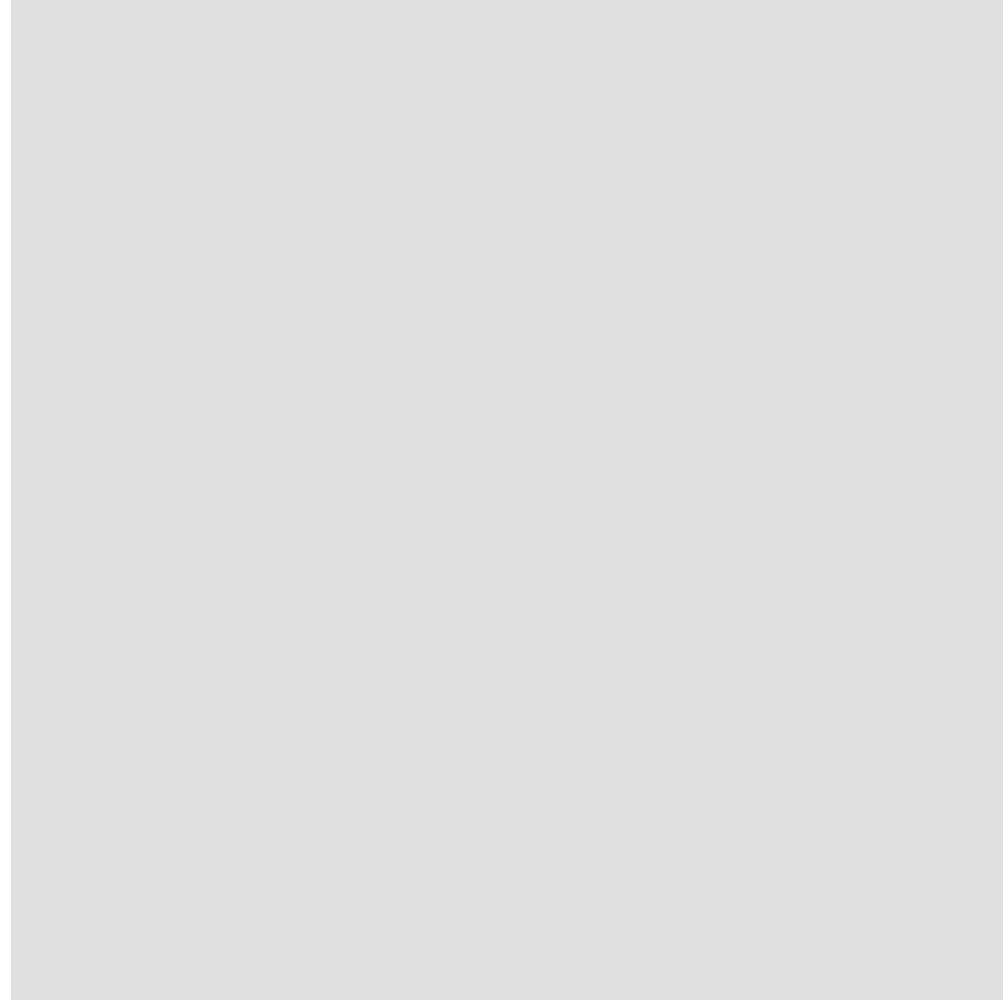
- 星間ガスの分布と大域的に一致
- 吸収に対応する分子雲, HIを特定

(※ $N_{\text{p}}(\text{H}_2)$, $N_{\text{p}}(\text{HI})$ のスケールは N_{H} の 1/2)

Photon Index vs. $N_p(\text{H}_2+\text{HI})$



カラーイメージ: (a) Γ
コントア: $N_p(\text{H}_2+\text{HI})$ ($V_{\text{l sr}}: -18 - 2 \text{ km/s}$)



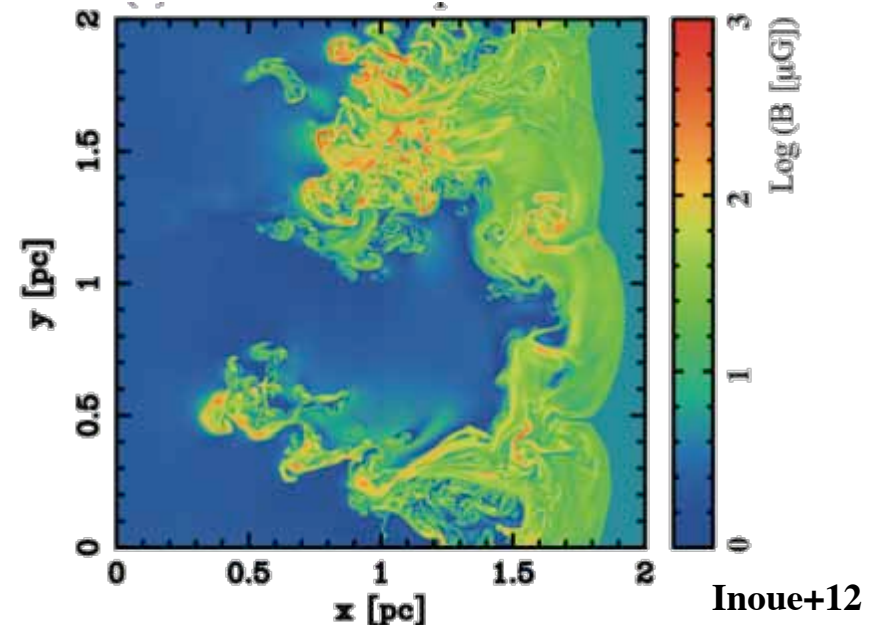
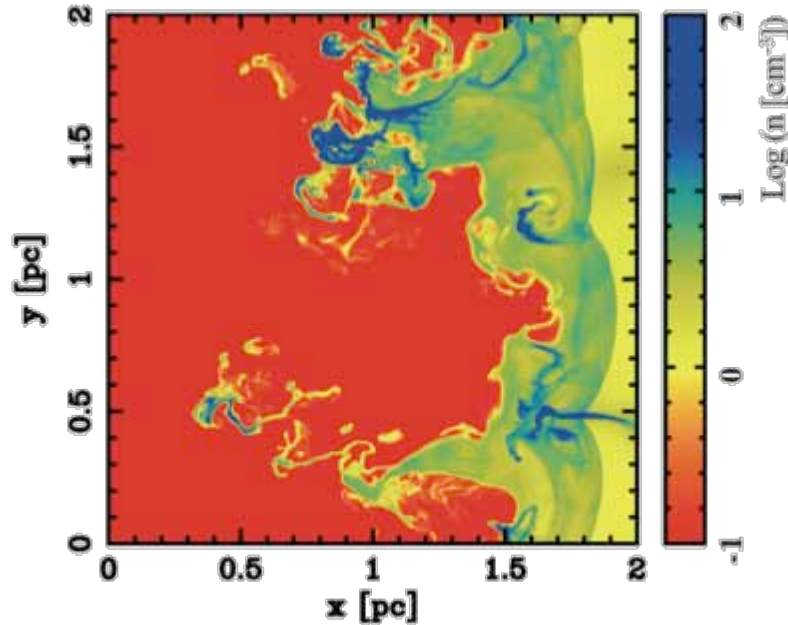
Sano+12b in prep.

- 星間ガス周りでベキが小さい
- 低密度なHIよりも、高密度な分子雲がベキに与える影響が大きい
⇒ 高密度分子雲周辺での効率の良い粒子加速

Discussion Magnetic field amplification around the MC

■ MHD Simulation of Shock-cloud interaction (Inoue+09, 12)

熱的不安定性により形成された clumpy な ISM (Inoue&Inutsuka+08,+09) へ 衝撃波伝搬



○ 衝撃波速度 V_{sh} は $1/(\text{星間ガス密度})^{0.5}$ で減速

⇒ 密度差の大きな分子雲周辺 ($\Delta n \sim 10^{3-5}$) で速度差発生 → 乱流の生成

○ 分子雲近傍に強いシア流 (回転電場) + 乱流が磁場を巻き上げ増幅 (乱流ダイナモ)

⇒ 磁場 $B \sim 0.1-1$ mG まで増幅される → 分子雲周辺でX線放射強度大

∴ シンクロトロン放射の power $P \propto B_{\perp}^{1.5}$
(宇宙線電子 $n(p) \propto p^{-2}$ と仮定)

乱流が加速効率を上げている可能性

Summary

■ *Suzaku*衛星によるX線観測データの解析

- XIS 0+2+3 1–5keV, 5–10 keV imaging (exposure + vignetting + NXB corrected)
- SNR全面について absorption と powerlaw で spectrum fitting → N_{H} と Γ のマップ

■ 星間ガスとのX線解析結果の比較

- 両者の間にある 1 pc scale での相関と、0.1 pc scaleでの反相関 $N_{\text{p}}(\text{H}_2+\text{HI})$
- $N_{\text{H}} - N_{\text{p}}(\text{Fg})$ の分布から、SNRを取り巻くようガスが分布していることを初めて示した
- X線の吸収に対応している分子雲, HIを特定、分子雲はさほど加速されてない可能性
- 高密度な星間ガス(分子雲)周辺で Γ が小さくなる傾向

■ 議論

- MHD数値計算の結果(Inoue+12)は、分子雲周辺での乱流生成+磁場増幅を示唆

星間ガスとシンクロトンX線放射の間には、非常に密接な関係がある

⇒ SNRの周辺環境(星間ガス)の理解が、今後とても重要になるだろう



NANTEN
Submillimeter Observatory