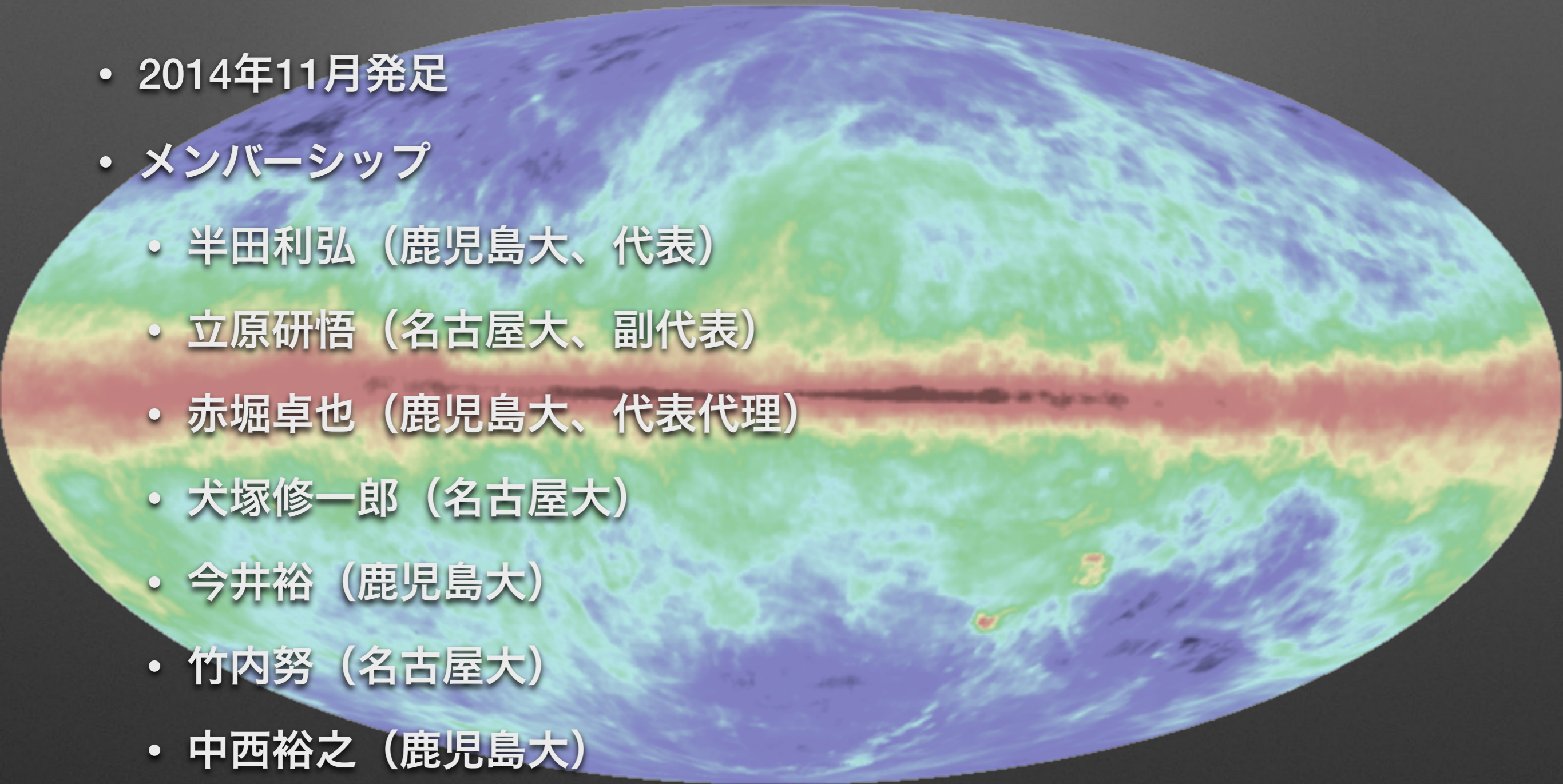


SKAによる星間物質の研究

立原研悟（名古屋大学）

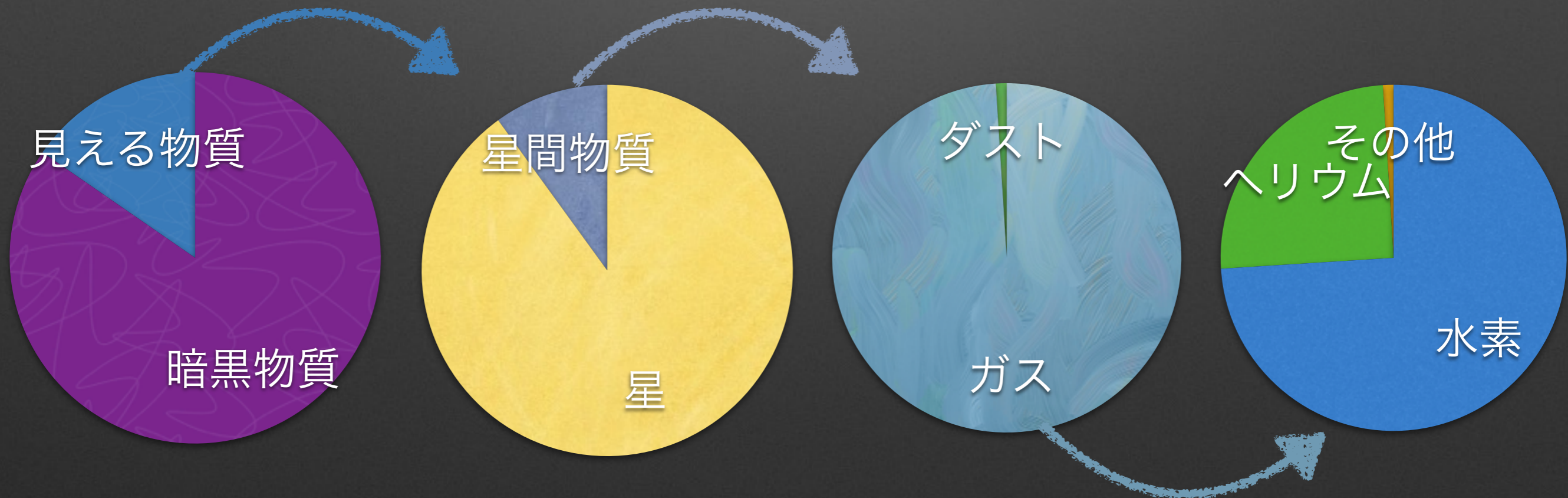
SKA-JP ISM Working Group

- 2014年11月発足
- メンバーシップ
 - 半田利弘（鹿児島大、代表）
 - 立原研悟（名古屋大、副代表）
 - 赤堀卓也（鹿児島大、代表代理）
 - 犬塚修一郎（名古屋大）
 - 今井裕（鹿児島大）
 - 竹内努（名古屋大）
 - 中西裕之（鹿児島大）
 - 井上剛志（国立天文台）



星間物質

- 銀河にある恒星の質量の10%は星間物質
- 星間物質の質量の99%はガス、1%が塵（ダスト）
- ガスの74%は水素、25%がヘリウム
- 星形成を通して物質進化・循環に寄与



宇宙の物質循環

原子雲



分子雲



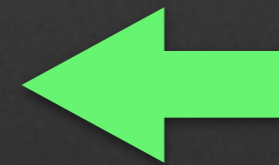
実は分子雲がどうできるのか、あまりよく分かっていない

惑星状星雲

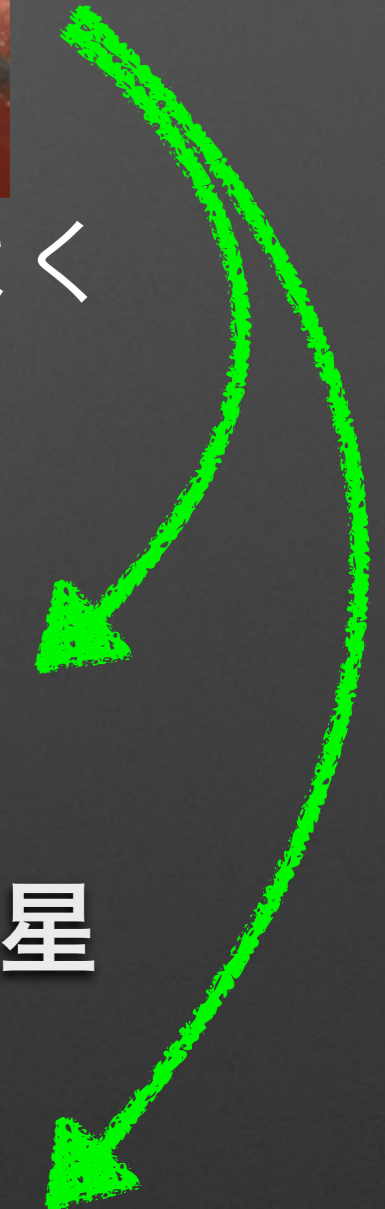
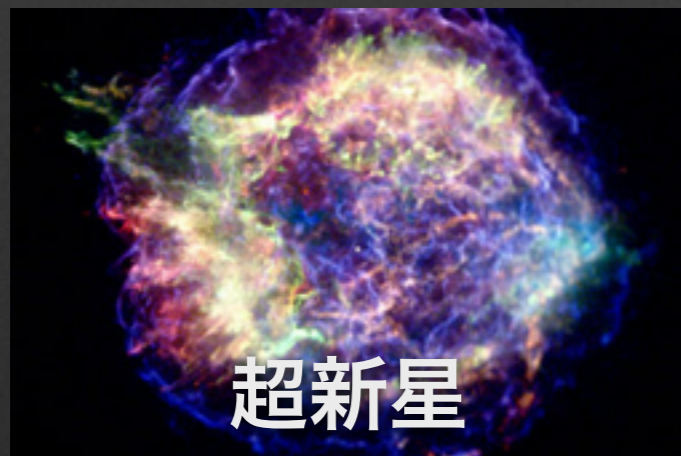


赤色(超)巨星

主系列星



超新星



Phases of Interstellar Gas

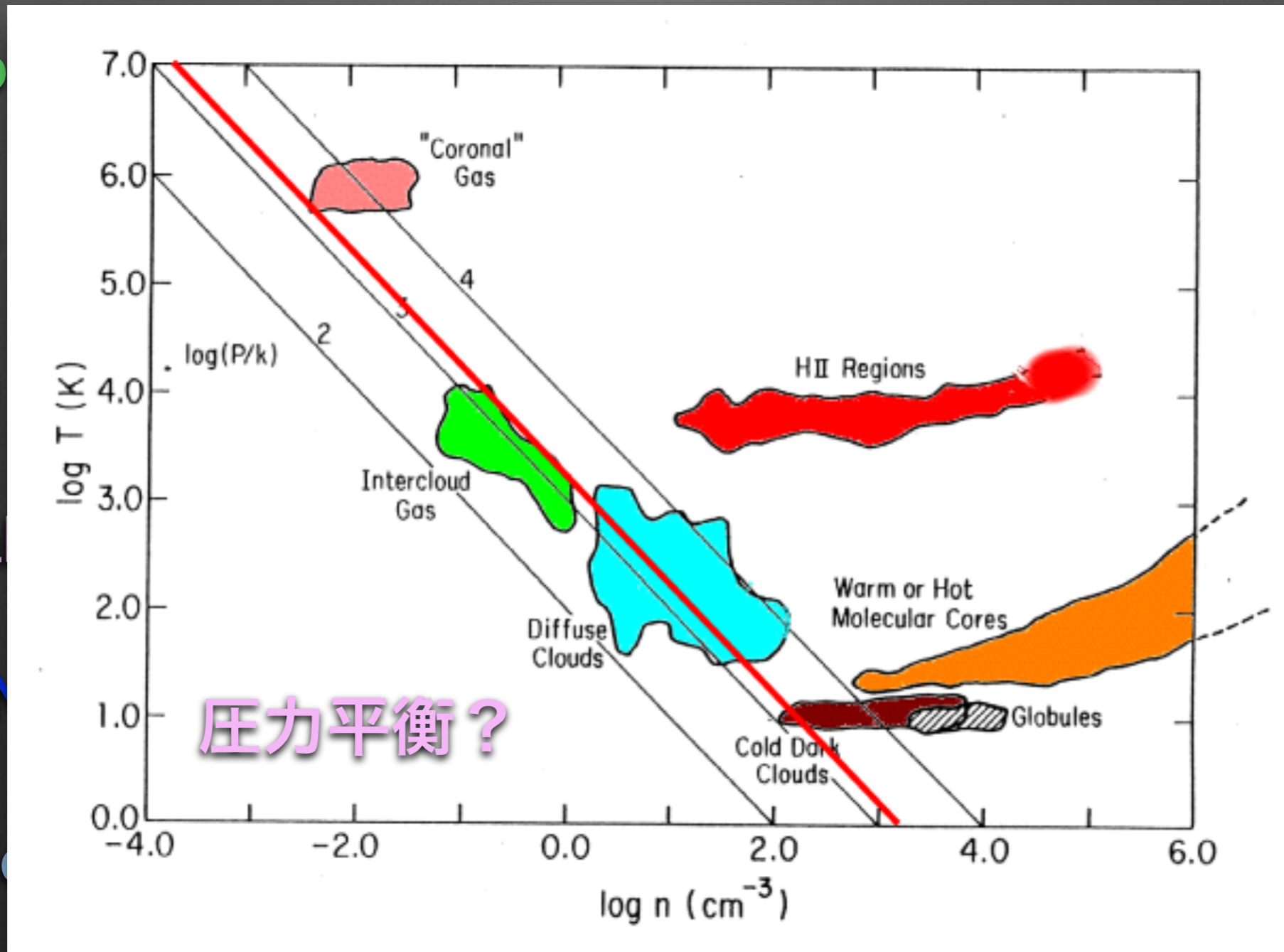
- Hot Ionized Medium (HIM; $\sim 10^6$ K) ●●● Coronal gas, SNR
- Warm Ionized Medium (WIM; $\sim 10^4$ K) ●●● HII region
- Warm Neutral Medium (WNM; $\sim 10^3$ K) ●●● Diffuse HI
- Unstable Neutral Medium (UNM) ●●● rare?
- Cold Neutral Medium (CNM; $\lesssim 100$ K) ●●● Cold HI
- Molecular Medium (MM; ~ 15 K) ●●● CO cloud



2つの相転移 (WNM => CNM, 原子=>分子)

Phases of Interstellar Gas

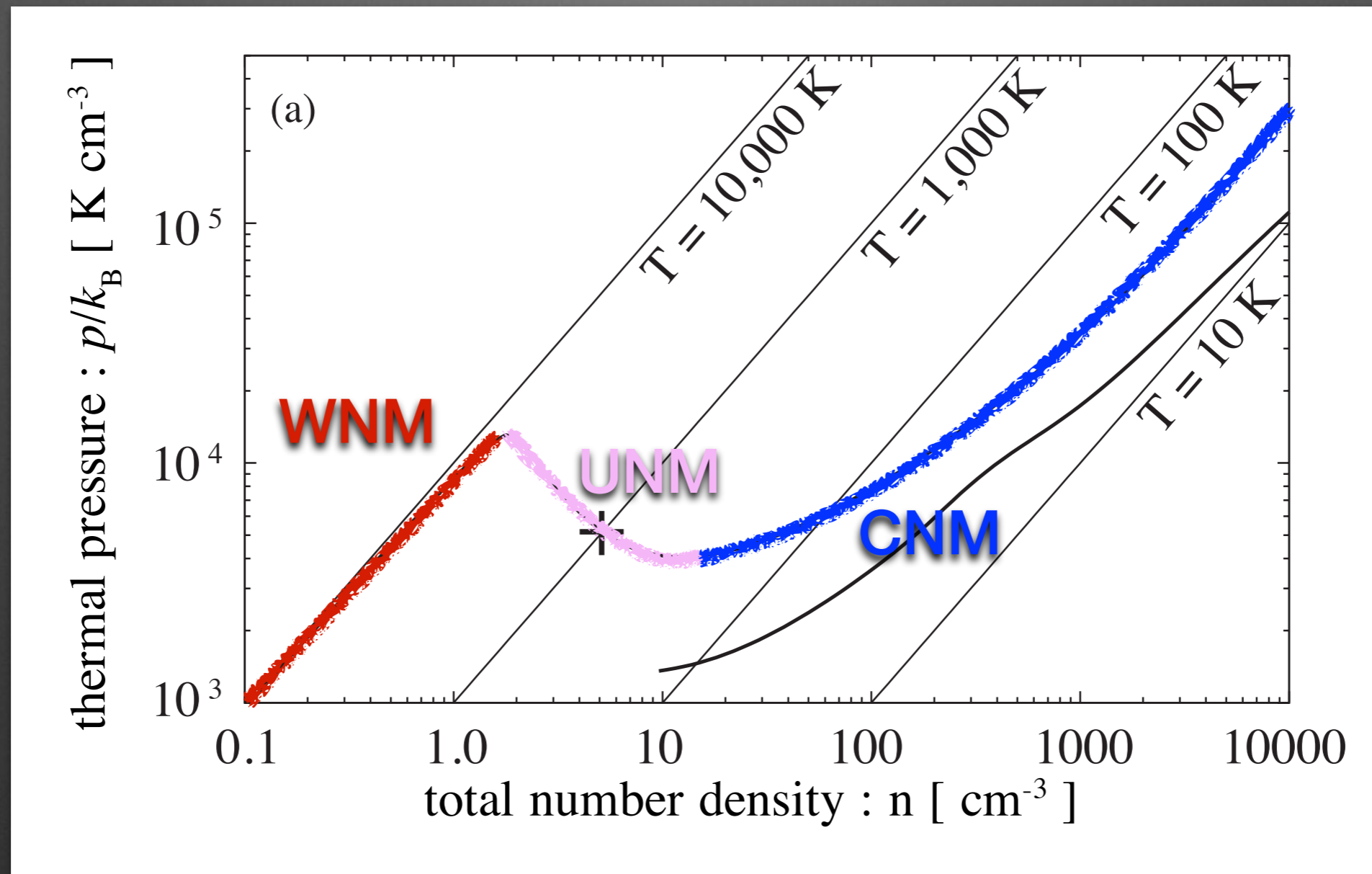
- Hot Ionized Gas, SNR
- Warm Ionized Gas
- Warm Neutral Gas
- Unstable
- Cold Neutral Gas
- Molecular Gas



Hot Ionized Gas, SNR
 Warm Ionized Gas
 Warm Neutral Gas
 HI
 Unstable
 Cold Neutral Gas
 Molecular Gas

2つの相転移 (WNM => CNM, 原子=>分子)

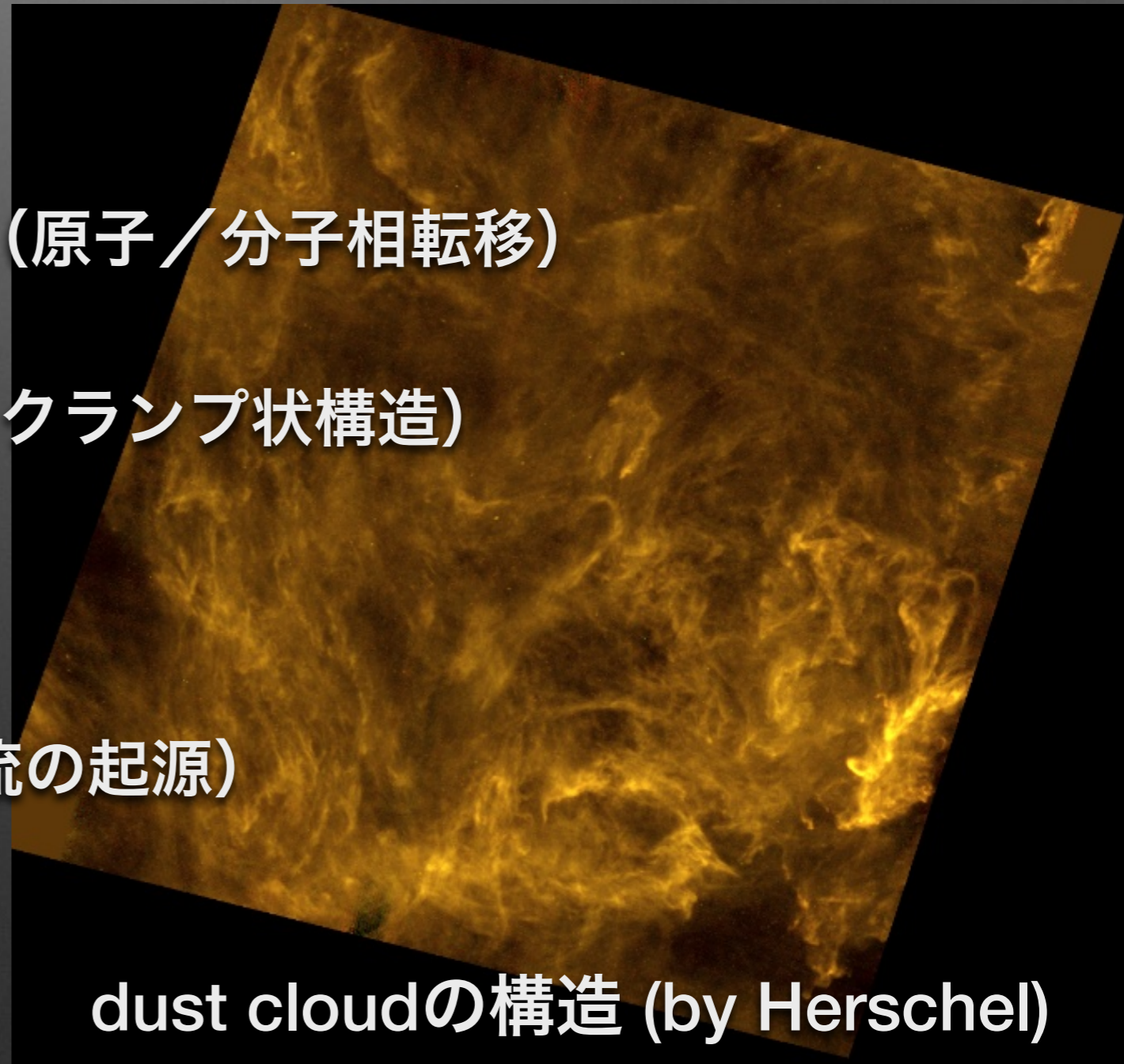
Two Phases of Interstellar Gas



(e.g., Field et al. 1969; Wolfire et al. 1995; Inoue et al. 2012)

ガスの熱力学的進化

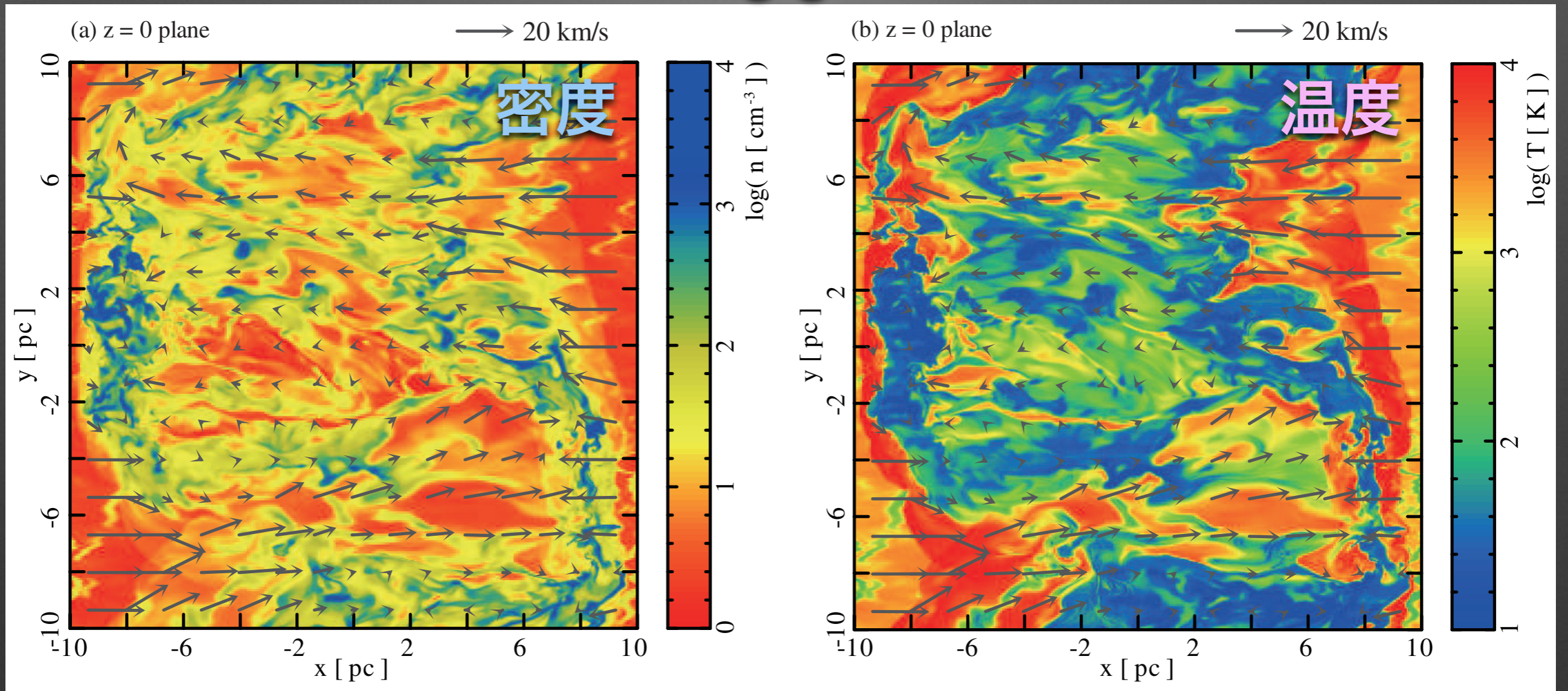
- 高いcooling rateによる熱的不安定性
- WMN => CNM 相転移
- H₂ガスがCNMの内部で形成 (原子/分子相転移)
- 構造形成 (フィラメント状、クランプ状構造)
- 磁場と衝撃波の効果
- CNMの乱流的運動 (星間乱流の起源)



dust cloudの構造 (by Herschel)

Numerical Simulations

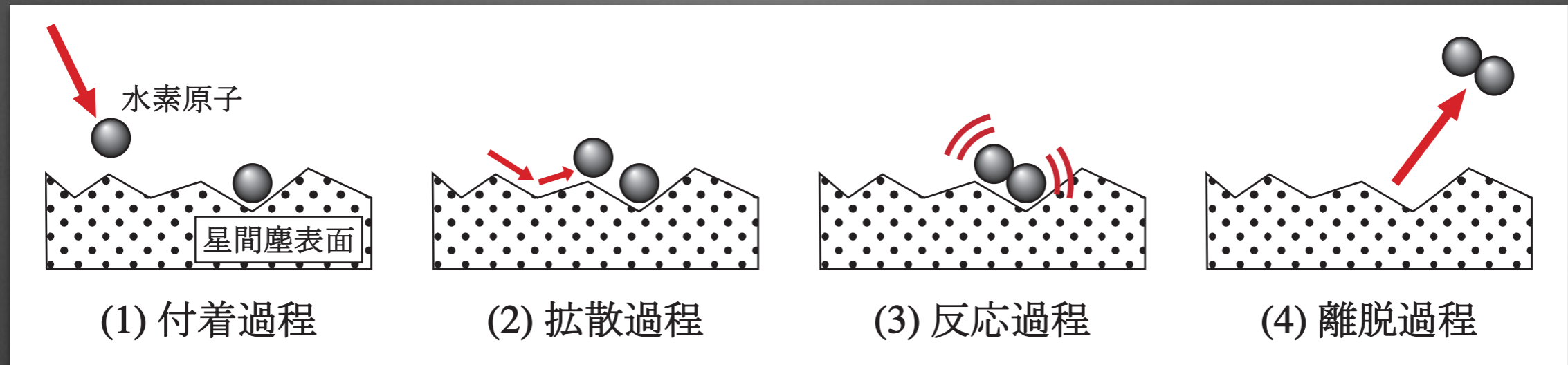
Colliding gas flow



圧縮されたWNMから、CNMの小さな(フィラメント状)構造が形成される (Inoue & Inutsuka 2012)

Molecular Gas Formation

非効率的な分子ガス形成 ($\tau \sim 10^7$ yr; Goldsmith+ 2007)

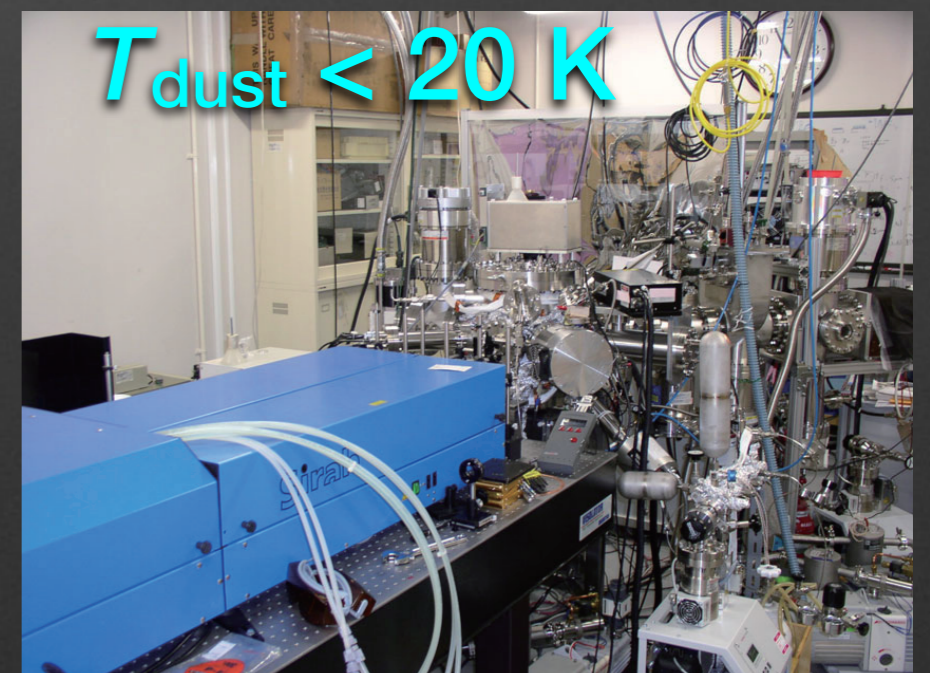


(高橋 2000)

物理的要求

- (1) 低温、高密度なISM
- (2) スムースなダストの表面

北海道大学低温科学研究所
2010年プレスリリースより



All-sky HI survey

- 2005年 Leiden/Argentine/Bonn (LAB) サーベイ完成

- 全天の水素原子ガスの分布を明らかにした

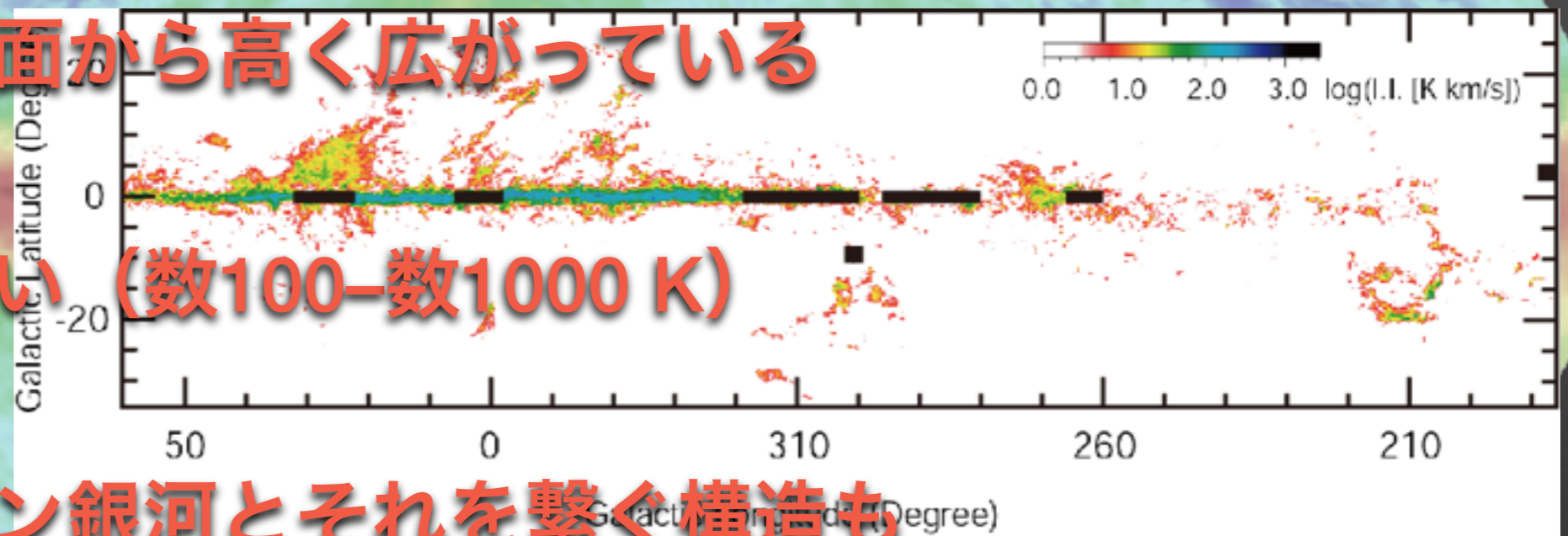
- 天の川の赤道面から高く広がっている

- ガス温度は高い (数100–数1000 K)

- 2つのマゼラン銀河とそれを繋ぐ構造も

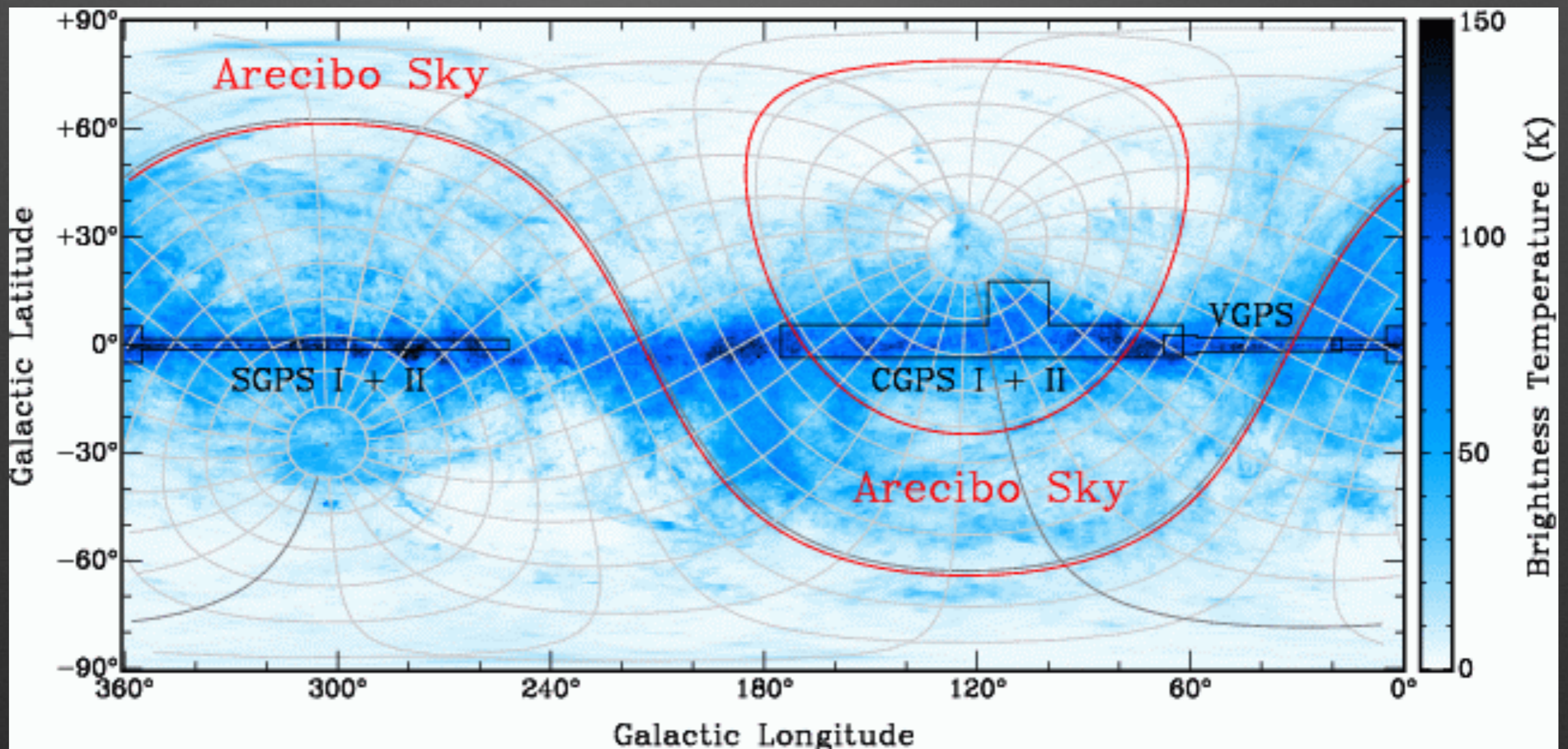
NANTEN CO サーベイ

- ただし分解能は0.5度

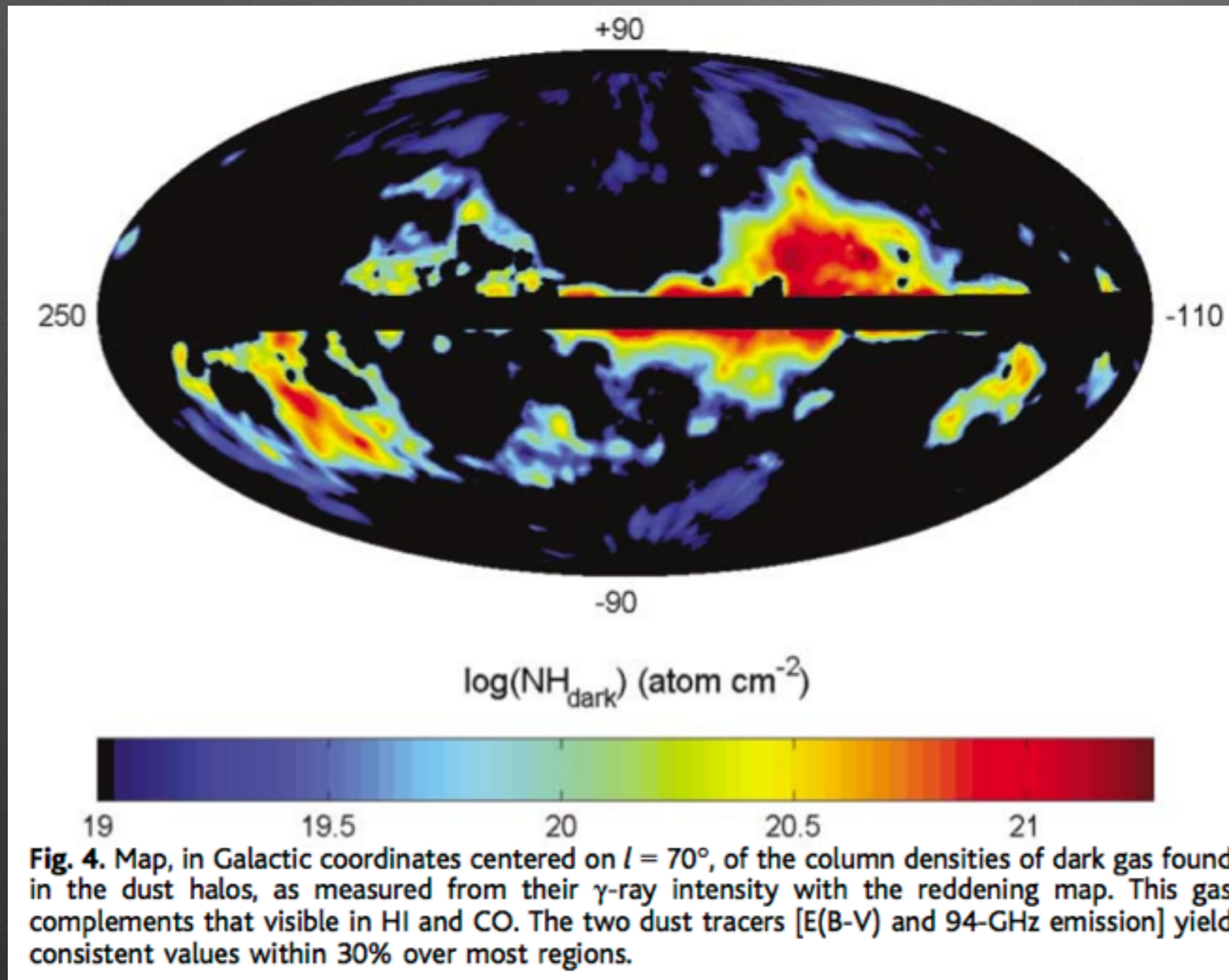


GALFA HI survey

- アレシボ300m鏡により、分解能は4分角に改善
- 固定鏡のため、帯状の観測領域のみ



The Dark Gas



γ -ray flux – N_{H}

(Grenier et al. 2005)

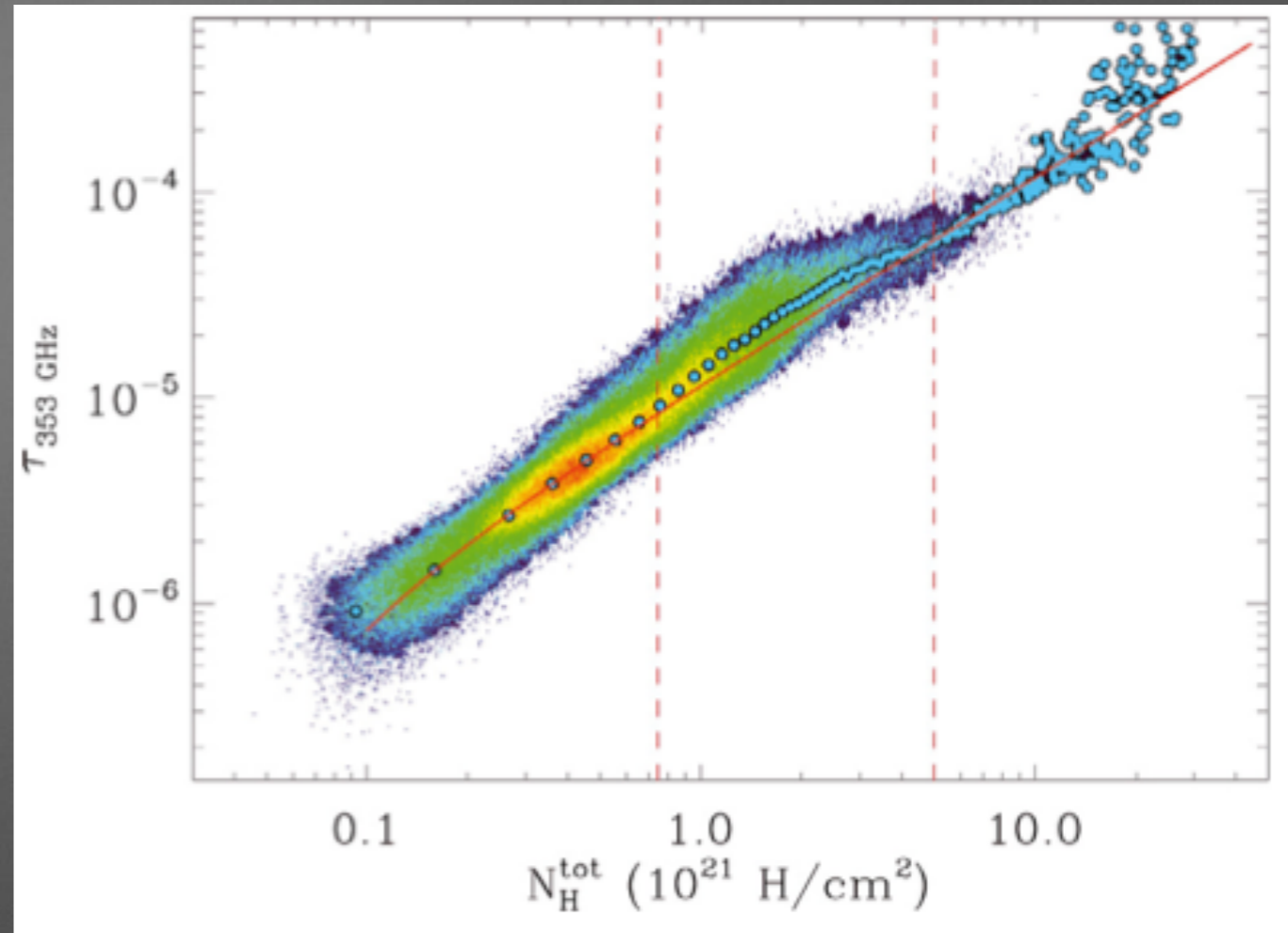
HIでもCOでも観測されないガスの存在を示唆

The Dark Gas

Dust continuum
VS Gas

可能性

- pure H₂ gas
- non-excited CO
- dust property effect
- HI opacity effect



(Planck collaboration 20012)

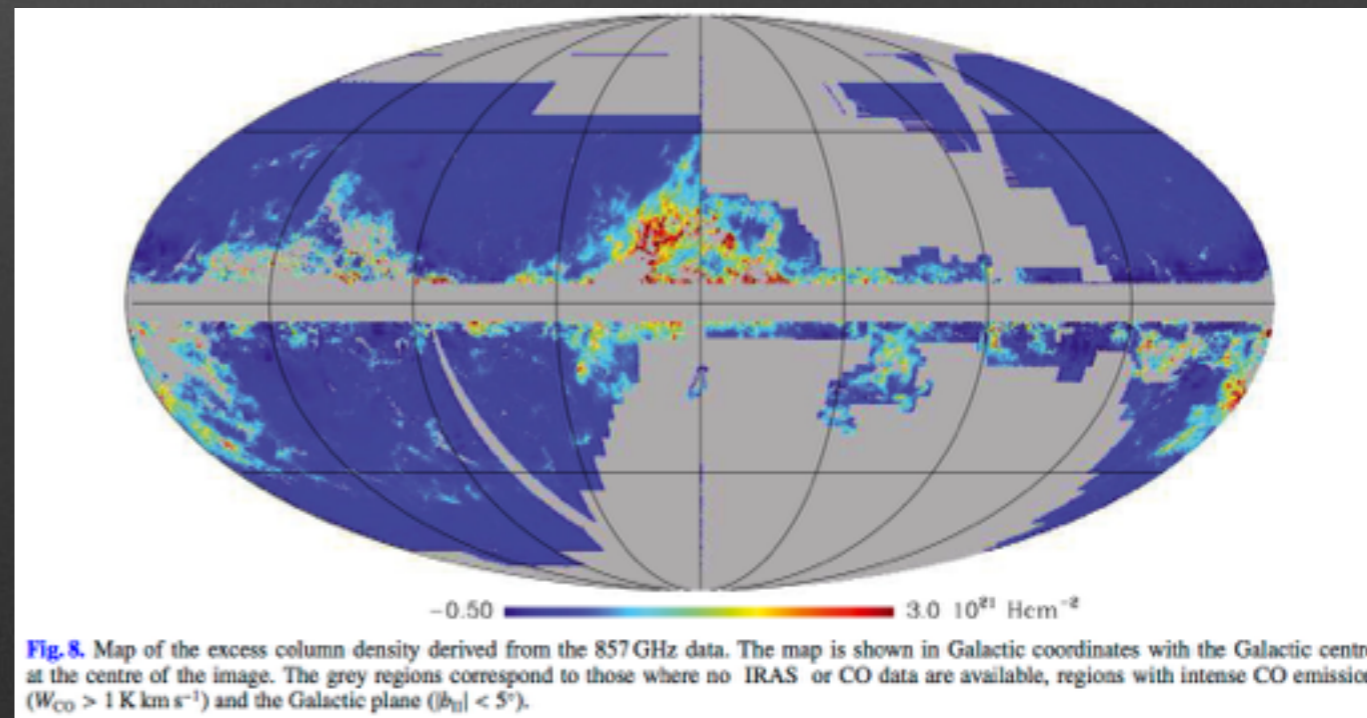
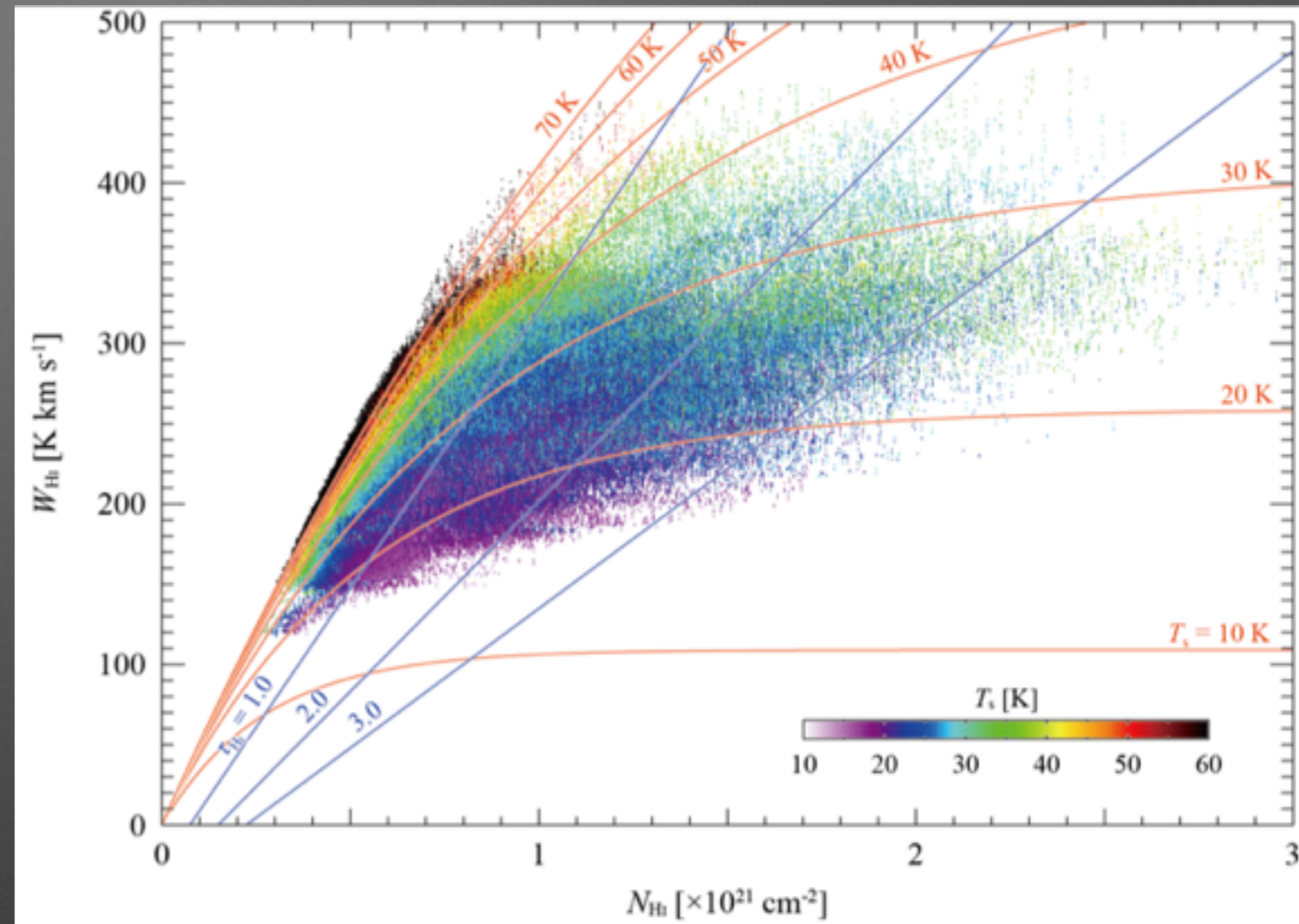
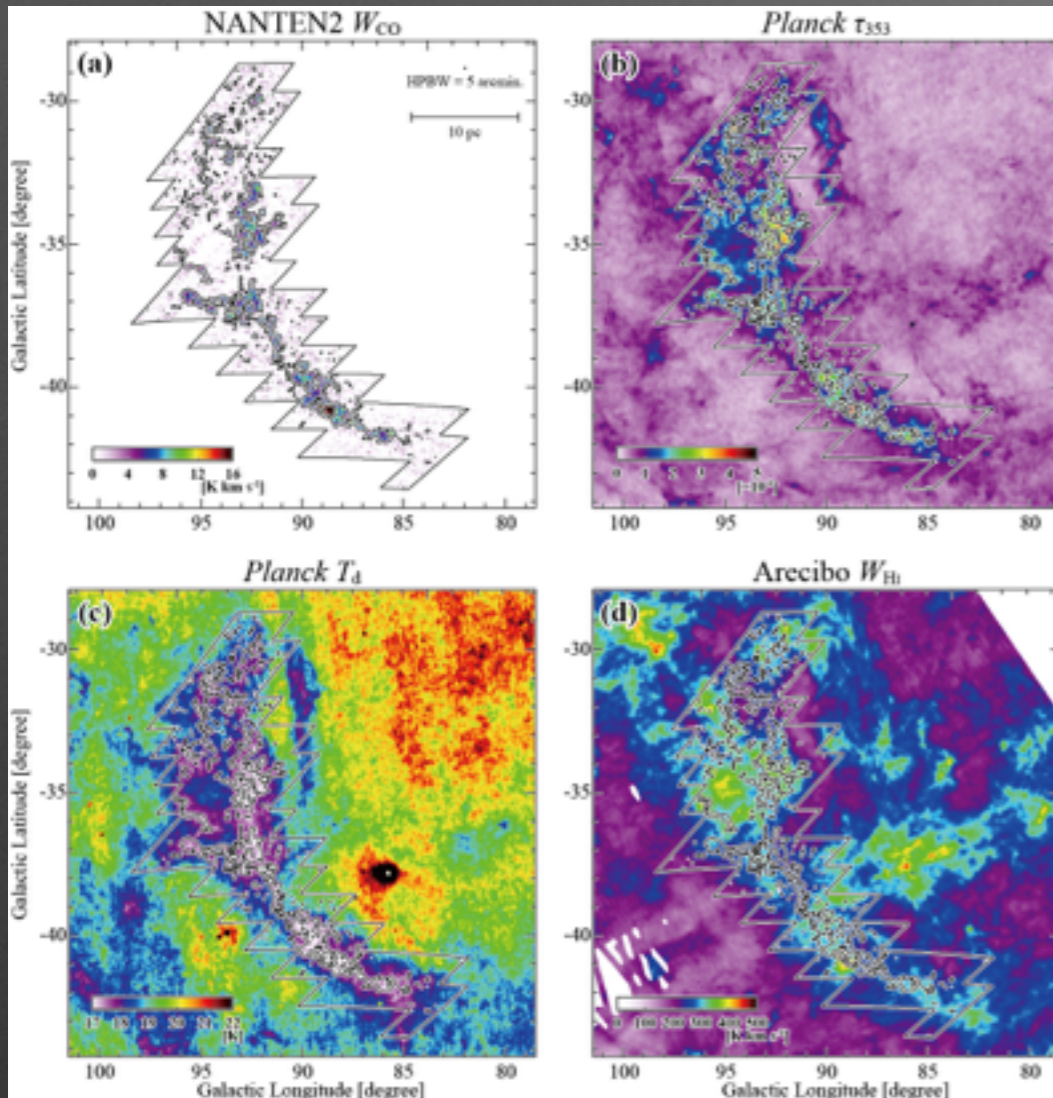


Fig. 8. Map of the excess column density derived from the 857 GHz data. The map is shown in Galactic coordinates with the Galactic centre at the centre of the image. The grey regions correspond to those where no IRAS or CO data are available, regions with intense CO emission ($W_{\text{CO}} > 1 \text{ K km s}^{-1}$) and the Galactic plane ($|b_{\text{nl}}| < 5^\circ$).

Optically thick HI gas



Fukui et al. 2014

ダスト連続波とHI積分強度の分布
相関の悪さはHIの光学的厚みで説明できる
銀河のガスの総質量を~1/2過小評価

CO以外の分子での分子雲サーベイ

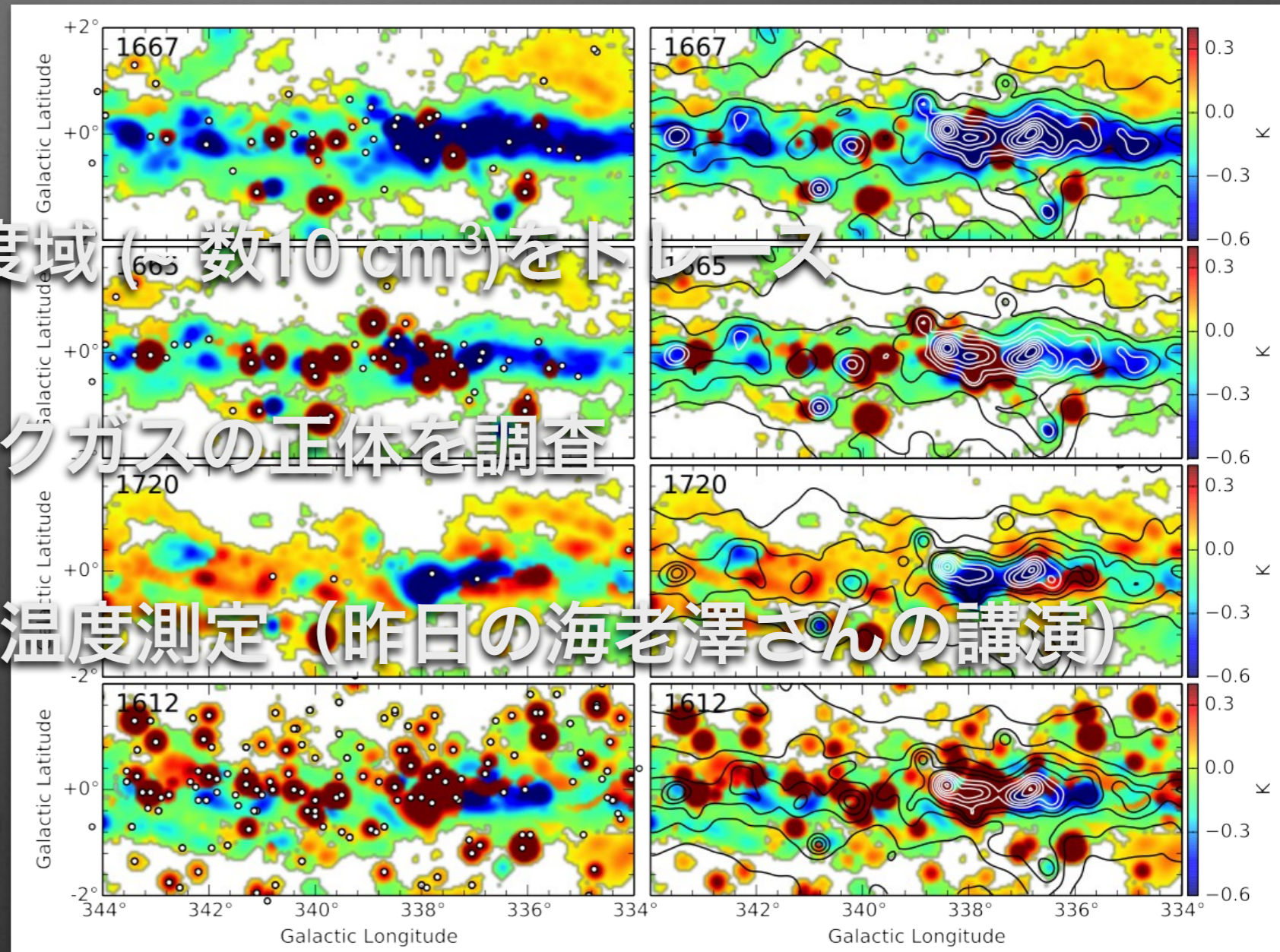
- OH 18cm線をもちいて、分子雲の高分解能、広域サーベイが可能

- HIとCOの中間の密度域 (数 10 cm^3)をトレース

- 分子ガス形成、ダークガスの正体を調査

- 超微細構造線による温度測定 (昨日の海老澤さんの講演)

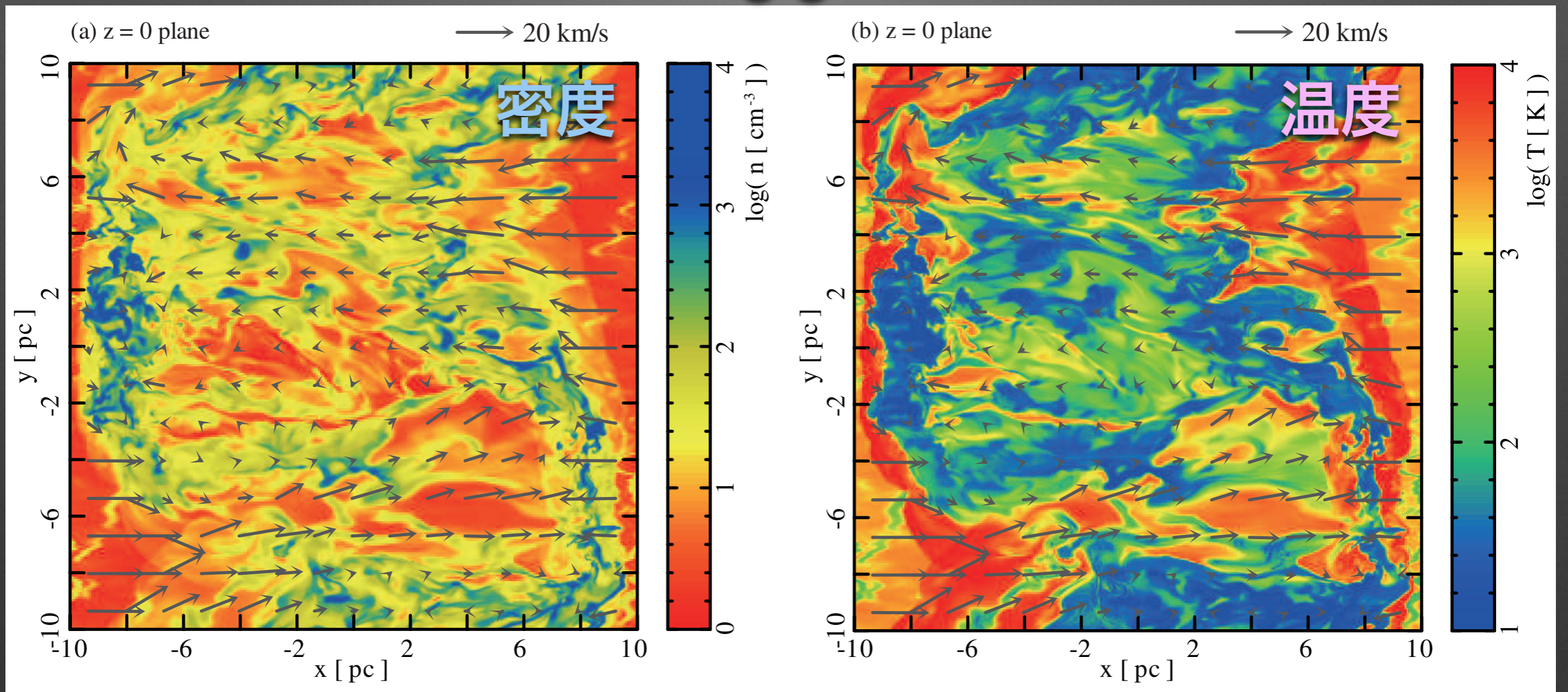
- SPLASH OH survey



- “no evidence of OH envelopes extending beyond CO...”

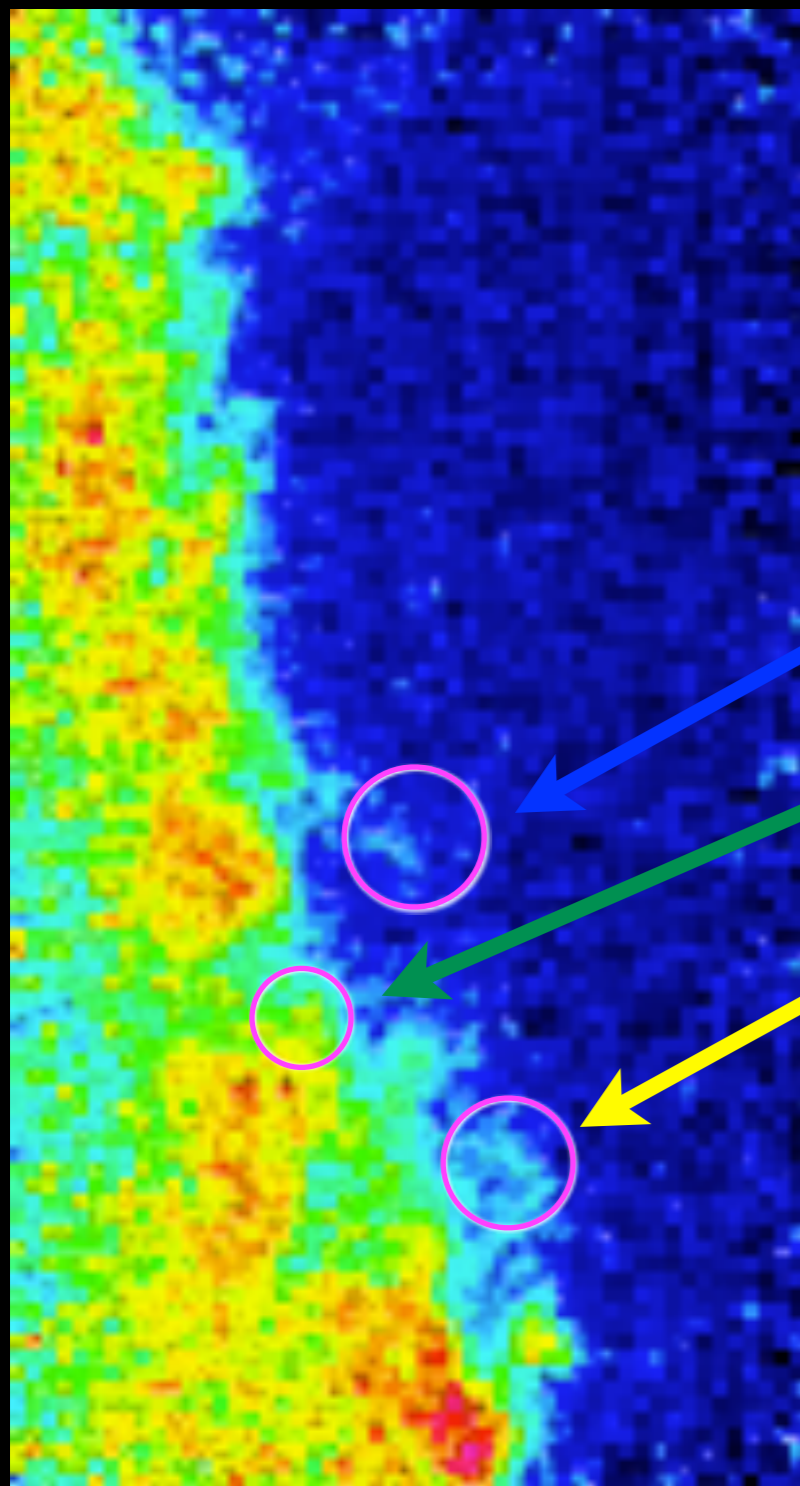
Numerical Simulations

Colliding gas flow

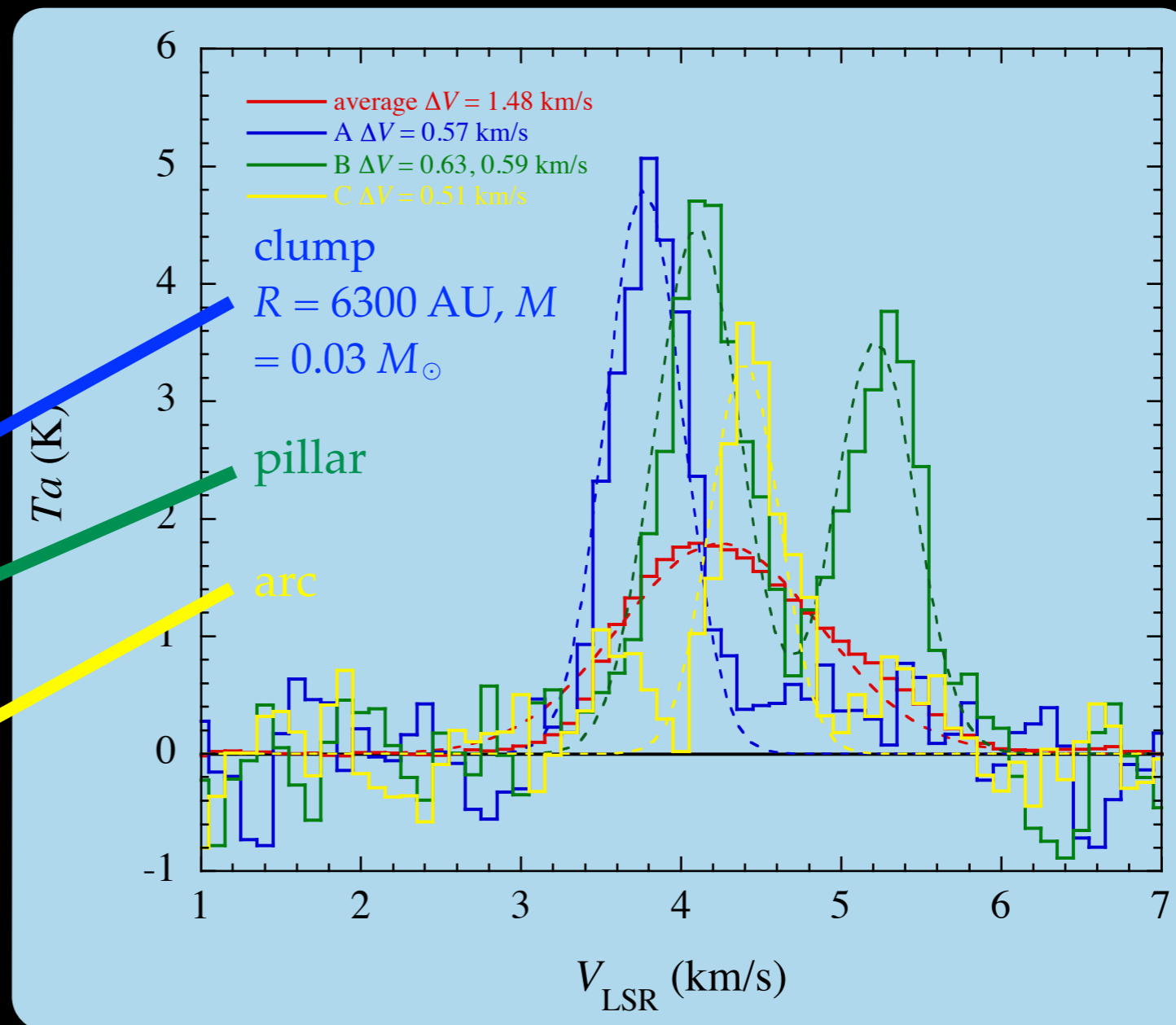


圧縮されたWNMから、CNMの小さな構造が形成される
==> 超音速乱流として見える (Inoue & Inutsuka 2012)

Cloud edgeの乱流的CO



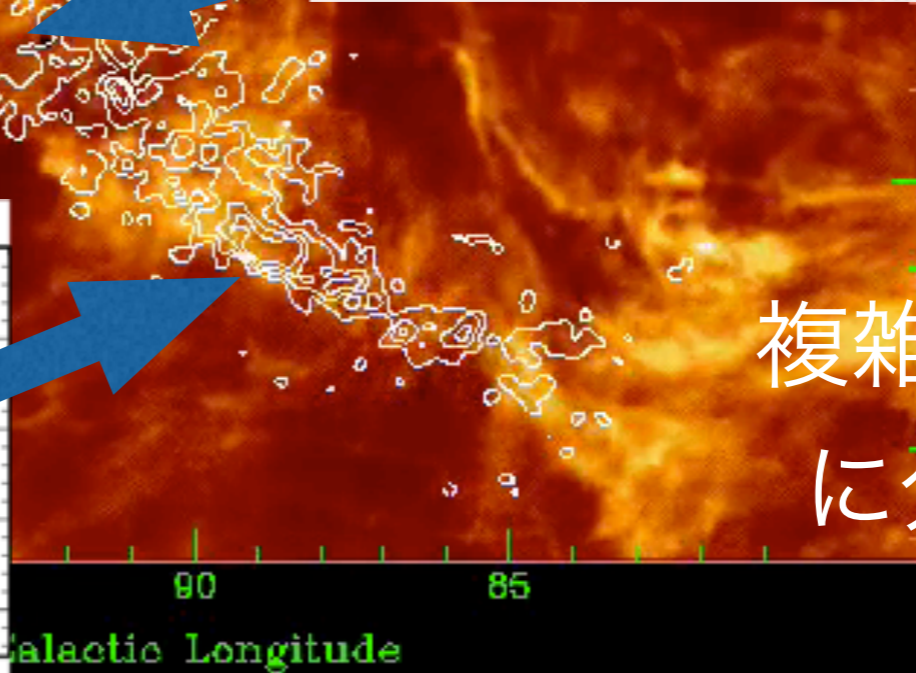
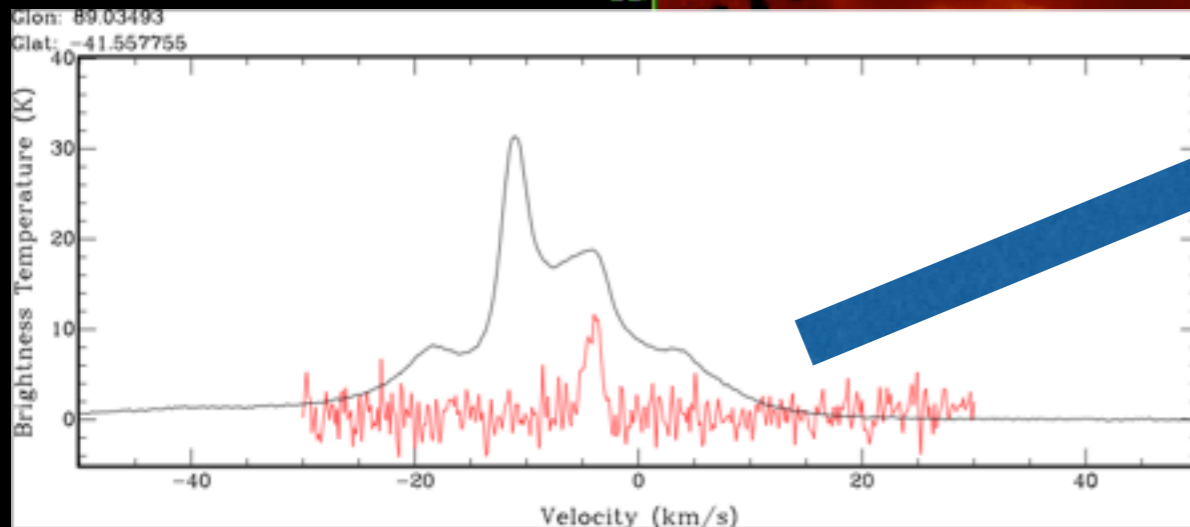
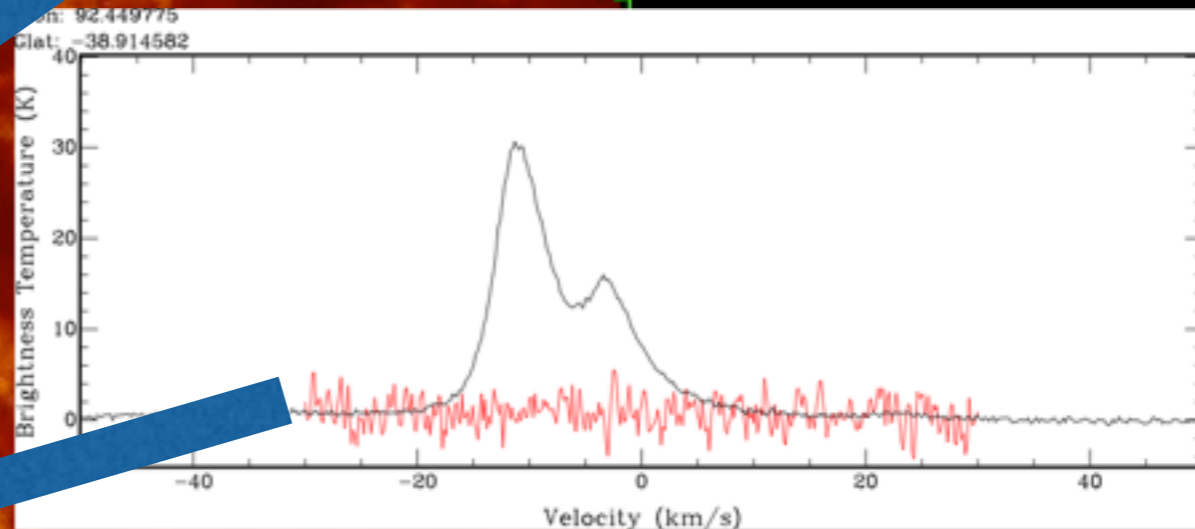
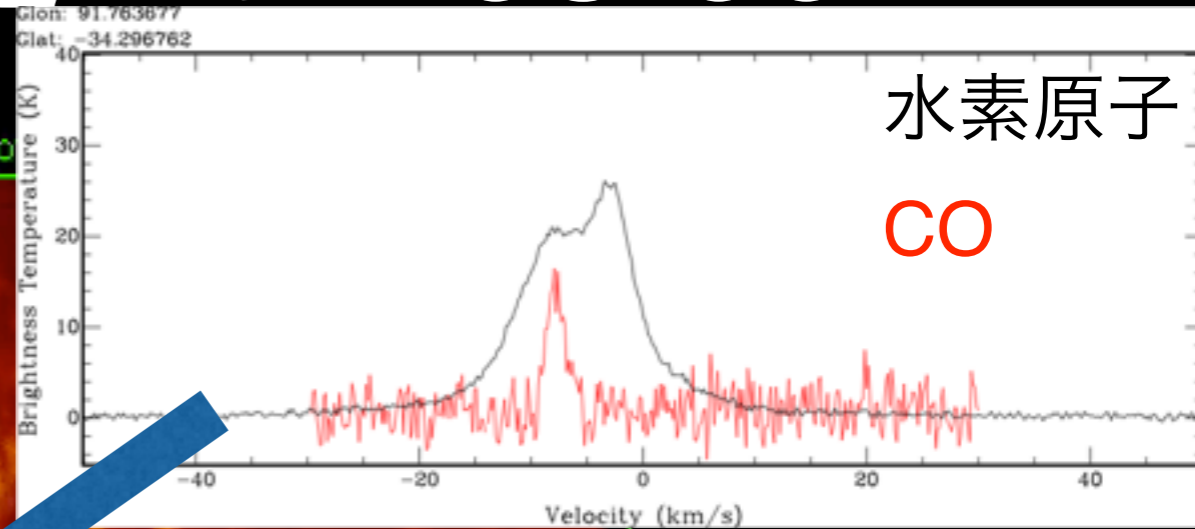
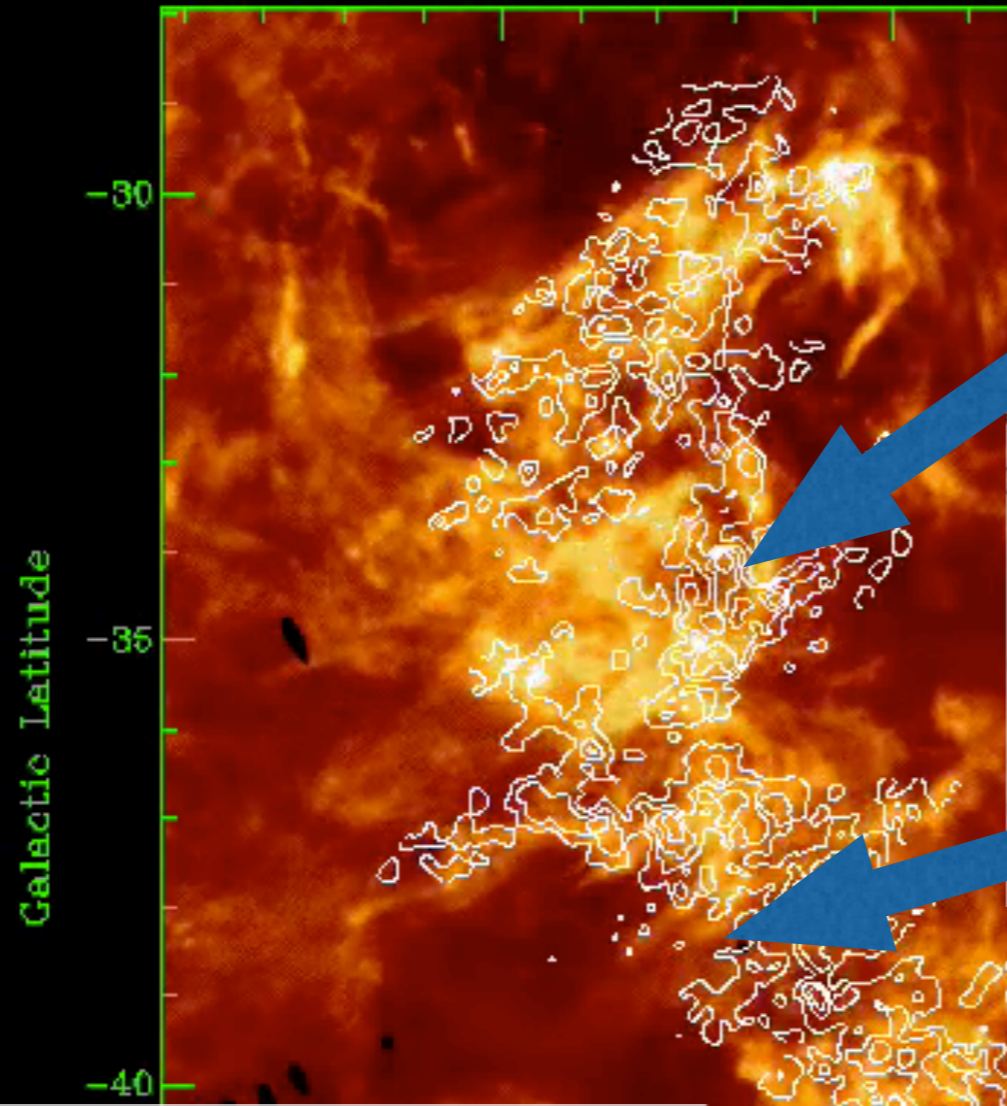
Channel map



^{12}CO spectra $\Delta V_{\text{small}} \sim 0.6$ km/s, $\Delta V_{\text{ave}} \sim 1.5$ km/s

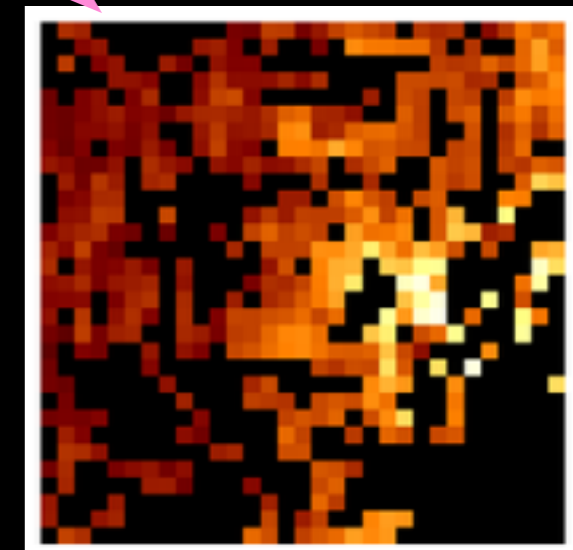
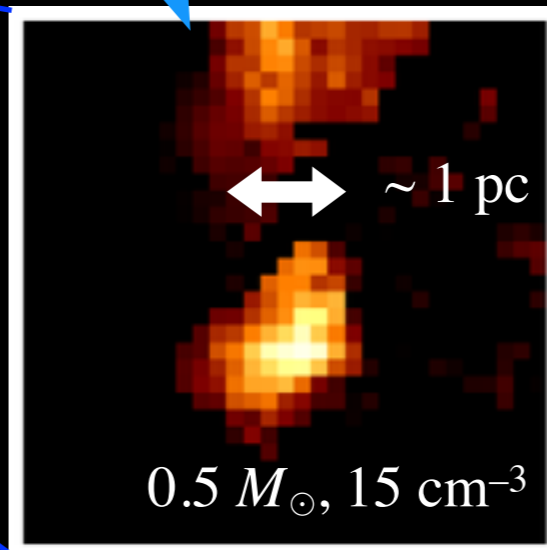
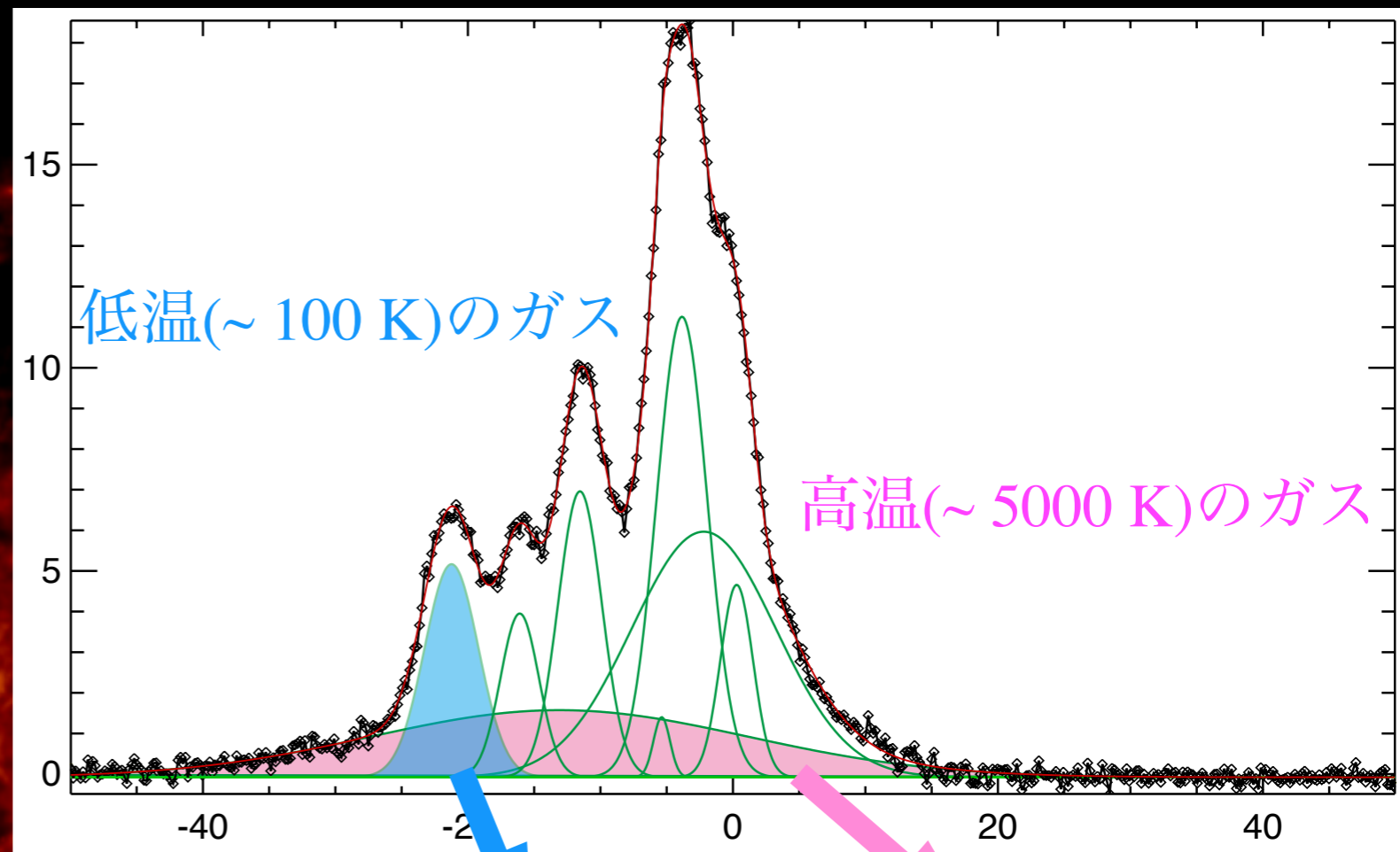
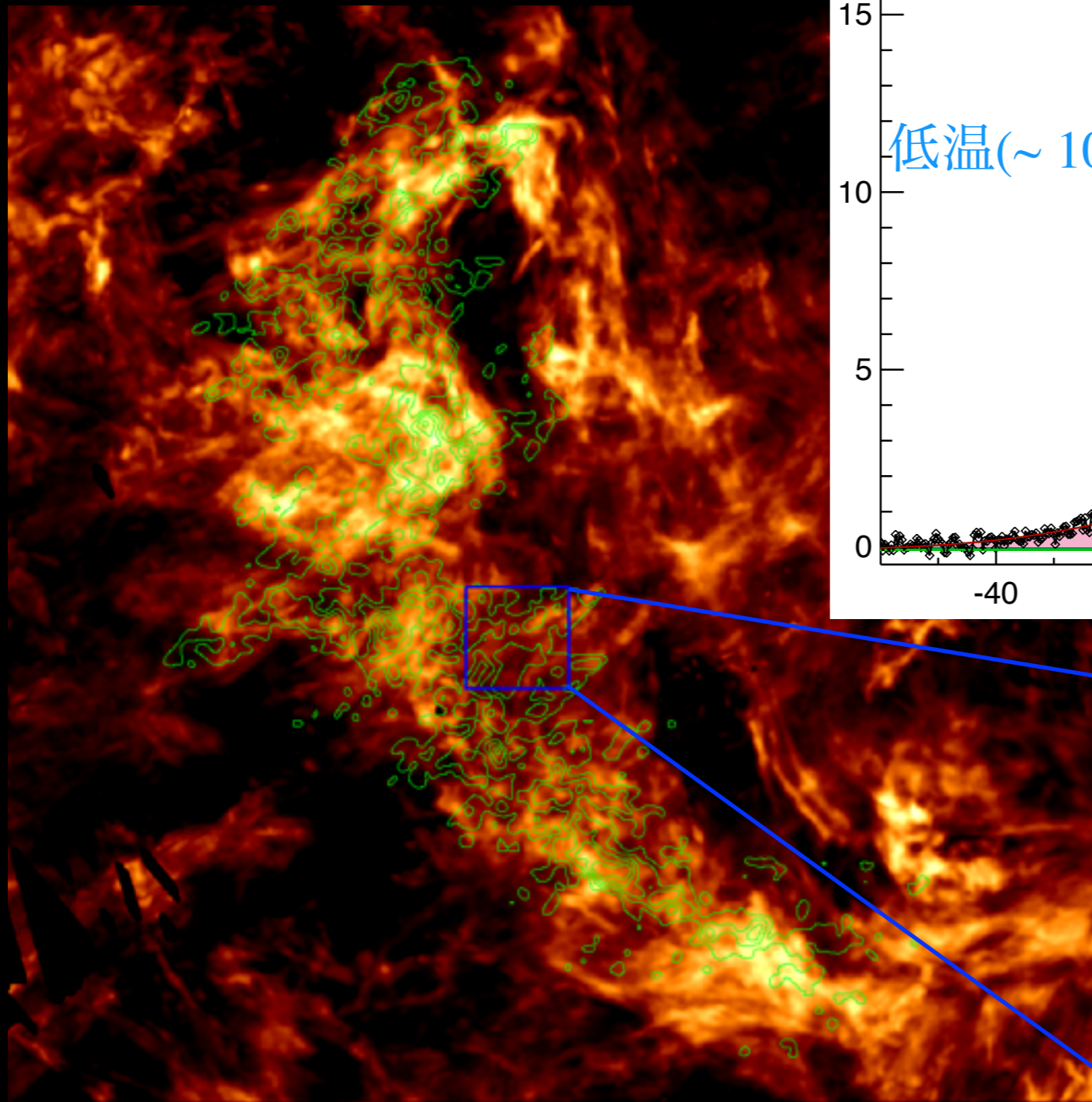
原子ガスの速度構造 MBM53-55

Velocity: -4.51 km/s
GALFA-HI RA+DEC Tile 356.00+34.3



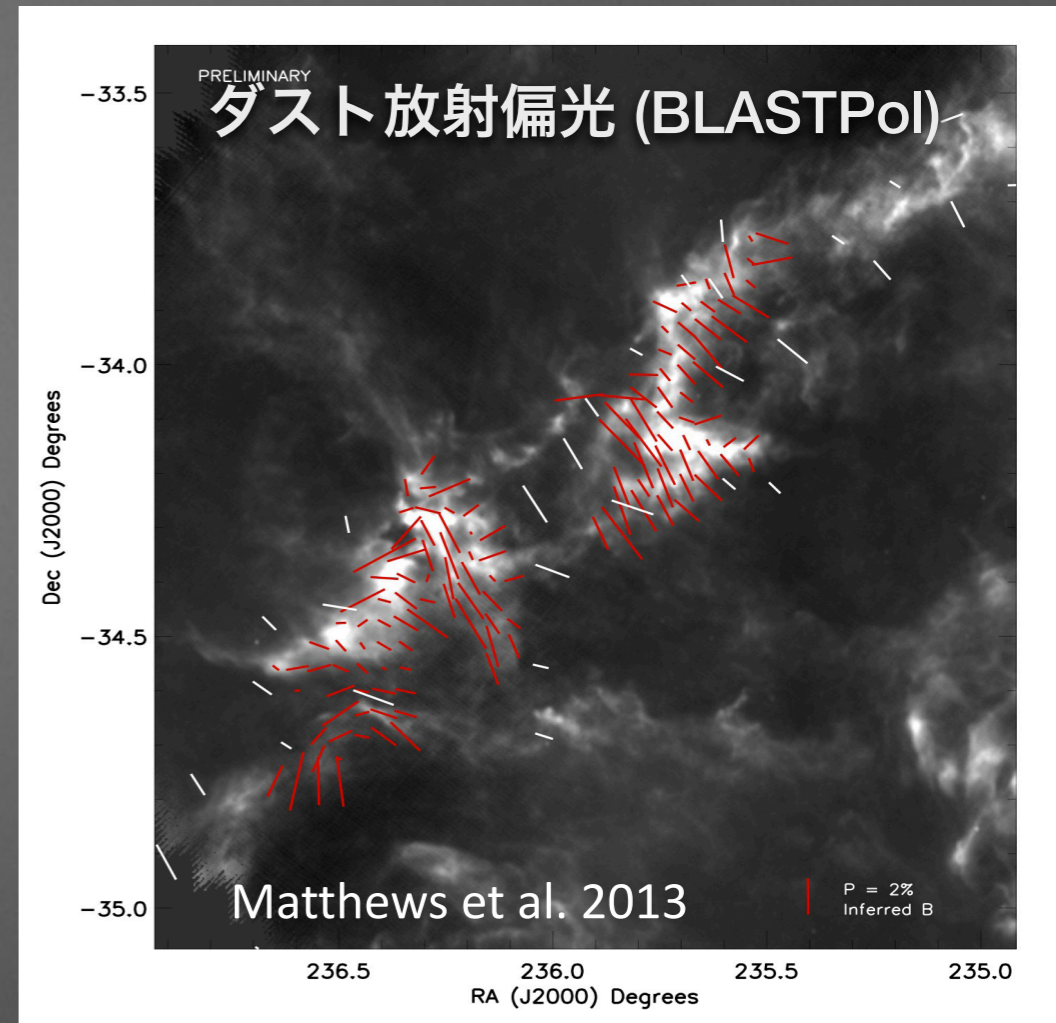
複雑な速度構造
に分解される

HI spectra



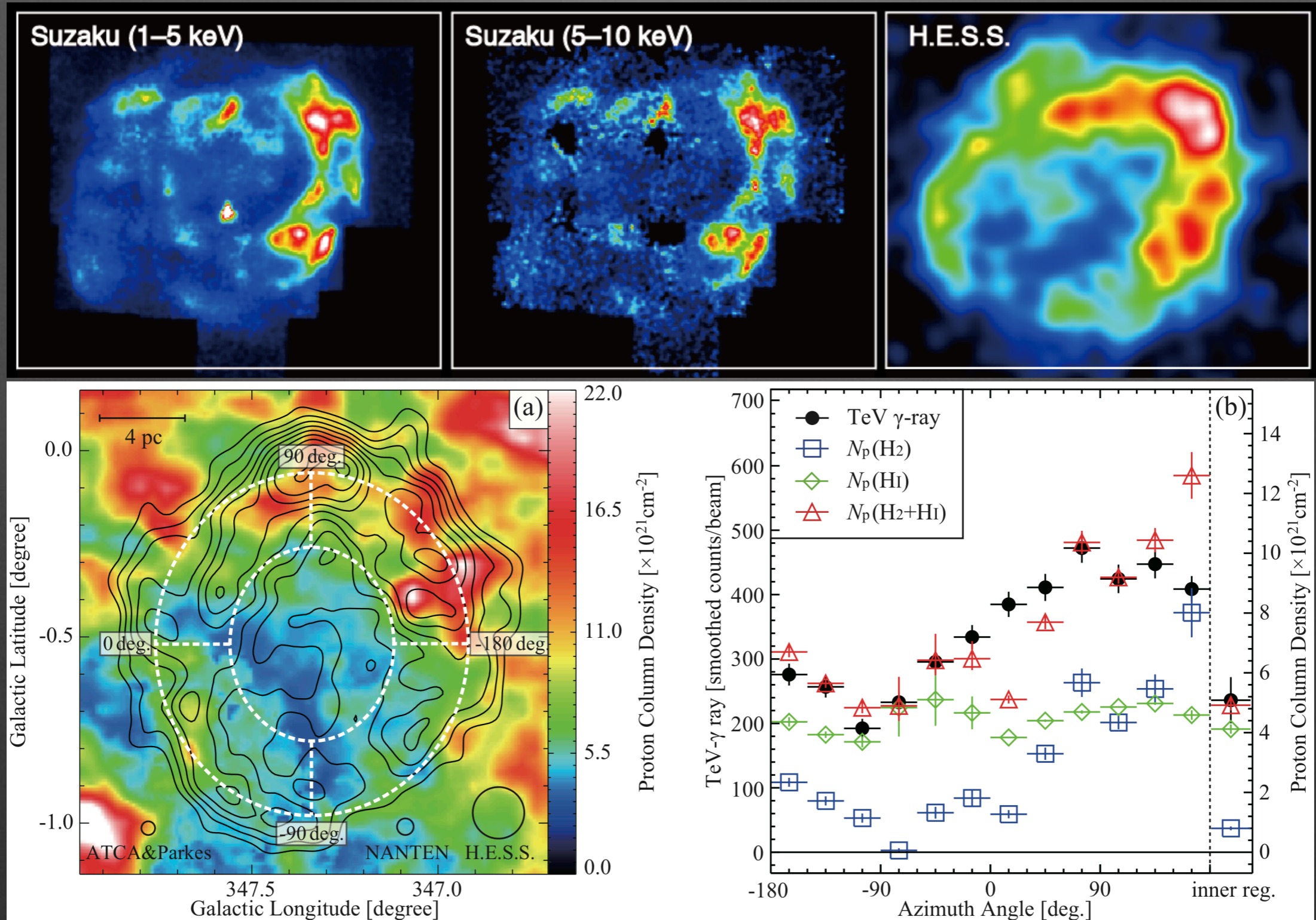
星間磁場の観測

- 分子雲のフィラメント状構造は星間磁場とよく相関
- 偏光による磁場構造
- HI, OHのZeeman効果による磁場強度の定量
- 構造形成の理解には低密度領域の磁場構造の理解が大事



背景光偏光

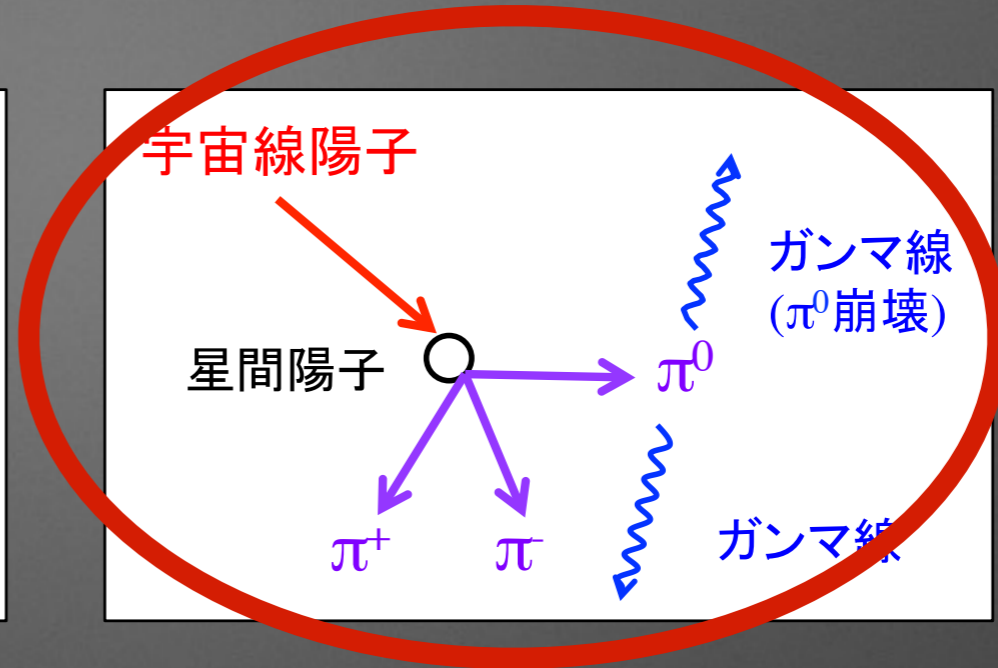
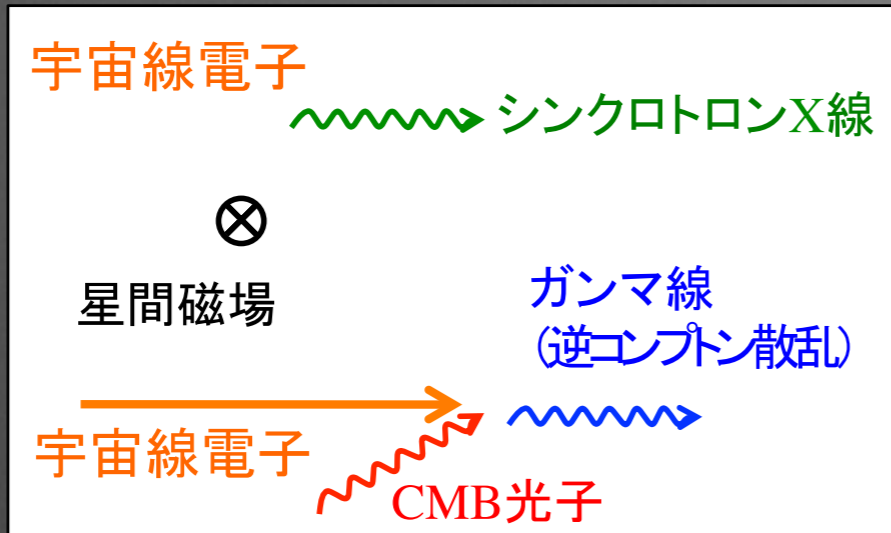
超新星爆発による宇宙線加速



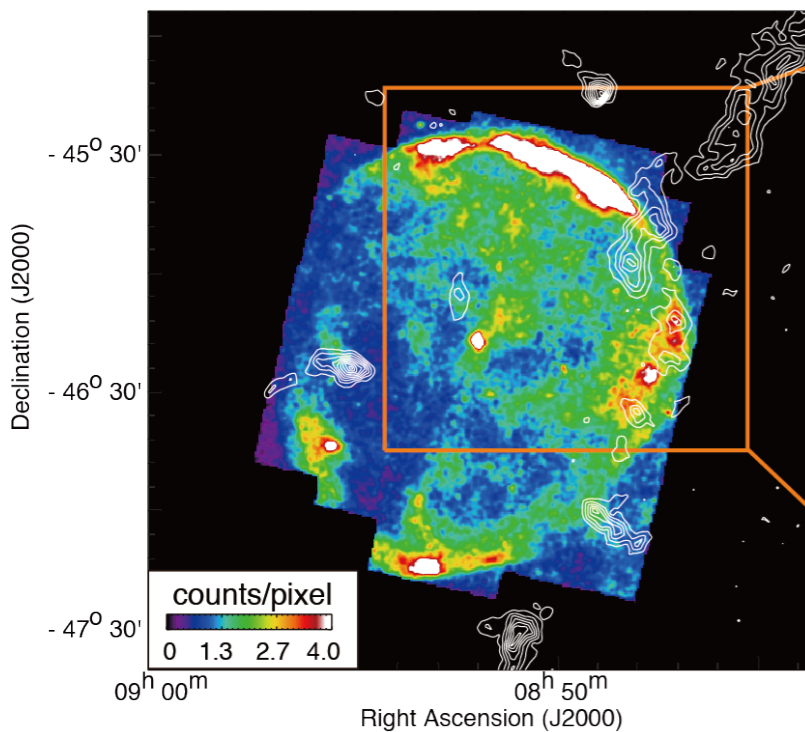
[左図] イメージ: 全星間陽子柱密度 $N_p(\text{H}_2+\text{HI})$, コントア: TeV ガンマ線強度 (Fukui, Sano et al. 2012)

[右図] TeVガンマ線, 水素分子 ($\times 2$) $N_p(\text{H}_2)$, 水素原子 $N_p(\text{HI})$, 全星間陽子 $N_p(\text{H}_2+\text{HI})$ の方位角分布

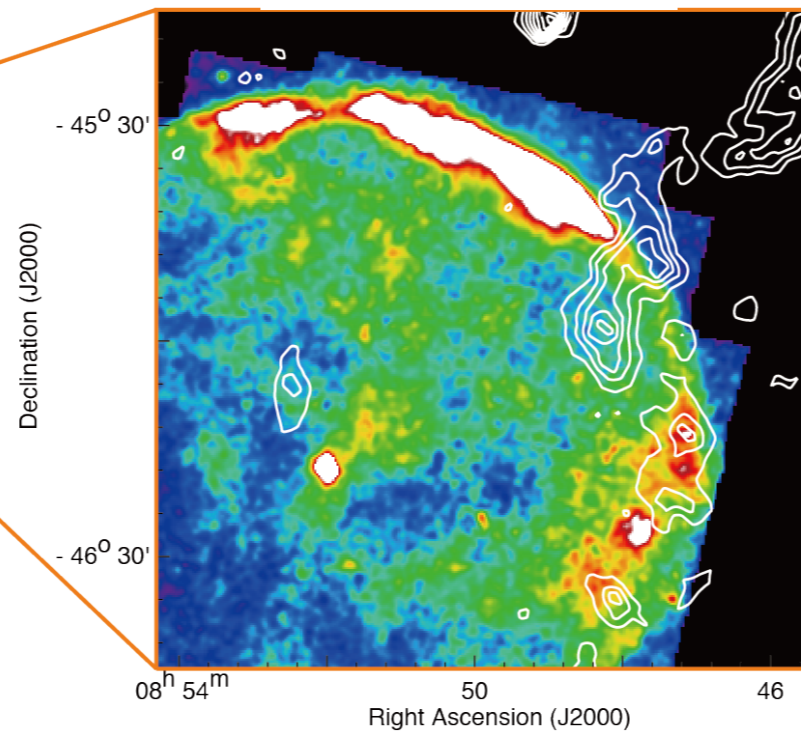
ハドロン起源による高エネルギーガンマ線



SUZAKU X-ray image



NANTEN CO contours



細かいピークのズレ
↓
不均一なISM中の衝撃波伝搬による磁場の増幅

日本からの貢献

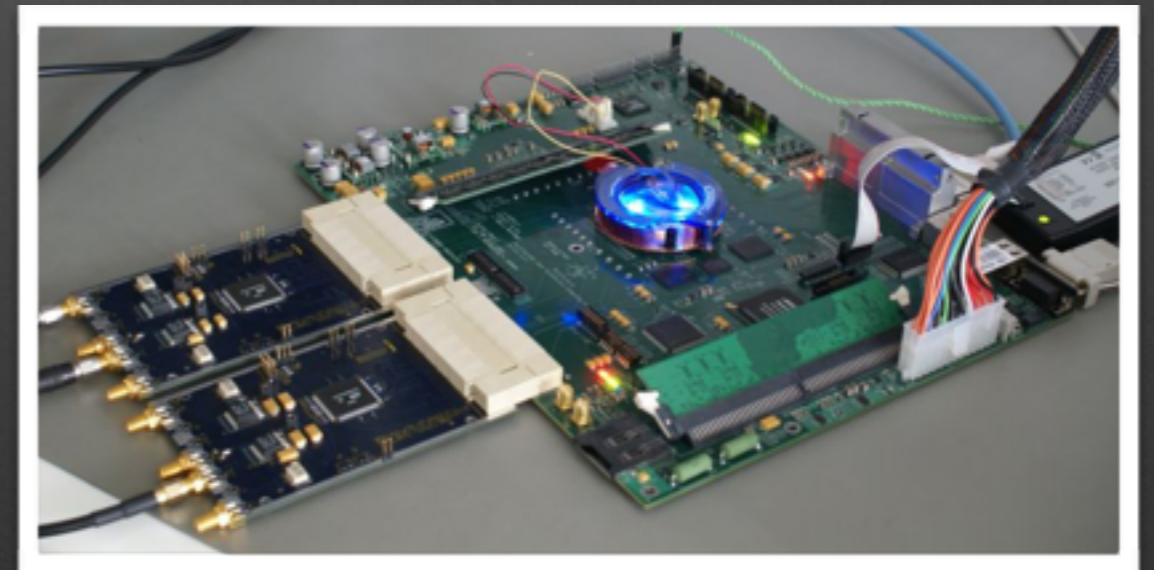
- 臼田64mアンテナによるHI観測の取り組み
- 広帯域デジタル分光計の開発



臼田64アンテナ



オーストラリアのSKA precursor, GASKAP



ROACHデジタル分光計

他のSWGとのシナジー

- 銀河進化グループ ... ダスト進化、ガス/ダスト比
- パルサーグループ ... DM, RMによる星間電子密度の測定
- 宇宙磁場グループ ... ファラデートモグラフィ法による星間磁場測定
- 宇宙論グループ ... 銀河によるCMBの前景成分の見積もり

SKAで進むISMの研究

- 高い空間的ダイナミックレンジによるHI雲のサーベイ観測
 - スケール ~ 数百 AU – 数百 pc (50 dB) ...> 1" – 40° @ 150 pc
- 高分解能 + 低いmissing flux ...> 定量的議論
- CO以外の輝線での分子雲探査
 - OHは比較的低密度の分子ガスをトレース
- HI/OH輝線Zeeman効果による低密度領域の星間磁場の測定
- CO, dustなどの観測との比較
- SKAで物質循環のmissing linkを明らかに！

Nagoya Workshop on the Interstellar Hydrogen

Date

March 26–28, 2015

Registration

March 6, 2015 明日です！

Confirmed invited speakers

- Jean-Philippe Bernard (Toulouse)
- Isabelle Grenier (Saclay) "Mapping the Gas Mass across the HI-Bright to CO-Bright Transition in Nearby Clouds"
- Tsuyoshi Inoue (NAOJ)
- Shuichiro Inutsuka (Nagoya) "The Formation and Destruction of Molecular Clouds and Galactic Star Formation"
- Ming-Yang Lee (Saclay) "The Perseus Molecular Cloud: A Local Laboratory for Studying the HI-to-H₂ Transition"
- Naomi McClure-Griffith (ANU)
- Hiroyuki Nakanishi (Kagoshima)
- Naoki Watanabe (Sapporo) "Experimental Approach to the Formation of H₂ Molecules on Dust"

