

1秒角分解能で探る原子雲から分子雲への進化 の革新的探求：星のゆりかごの種を探せ！

山本宏昭（名古屋大学）

SKA-JP SWG ISM group

を代表して

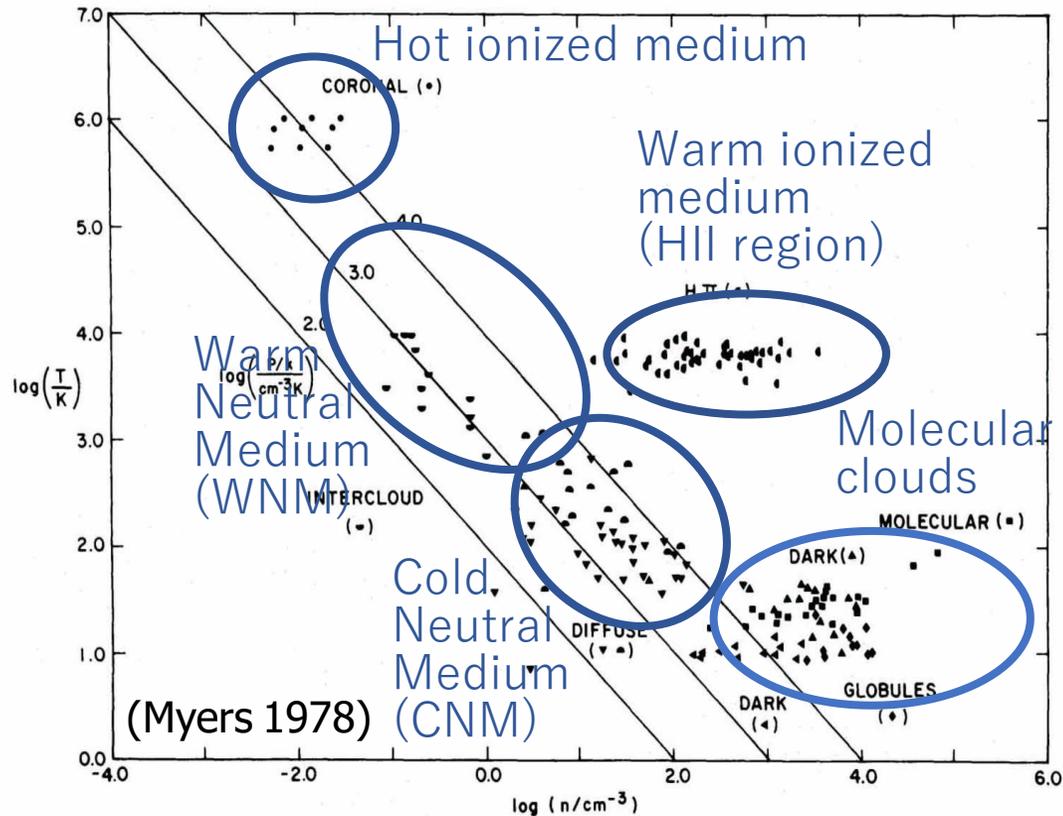
SKA-JP ISM group

スタッフ・PD 20名、学生 6名

代表：中西(鹿児島大学)、副代表：山本(名古屋大学)

SKA-JP SWG
ISM group

Multi-phase of the ISM



Hot ionized medium

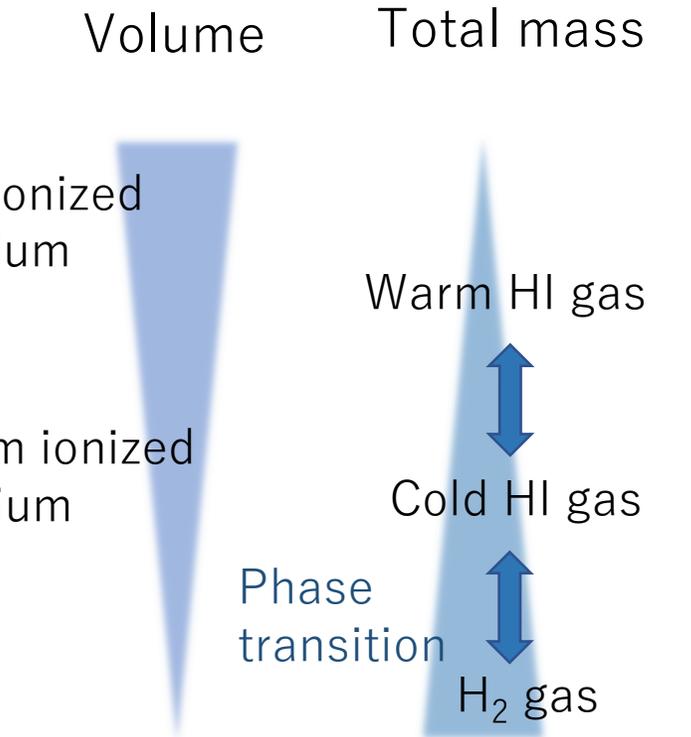
Physics of ballistic wave
Synchrotron radiation, cosmic-ray interaction etc.

Warm ionized medium

Feedback from star formation

WNM

Formation and growth of turbulence by ballistic wave
Structure of the HI • turbulent • scale height



CNM

Structure and properties of CNM
Formation of molecular clouds

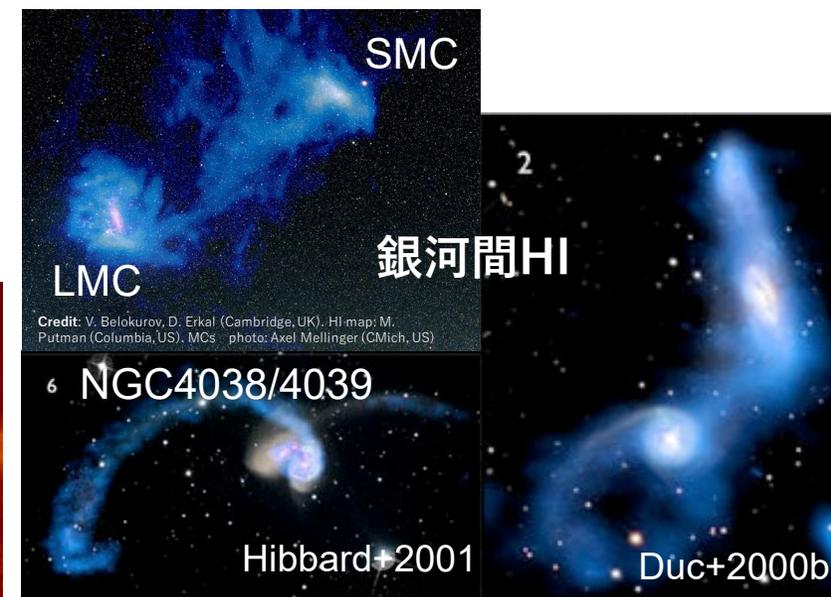
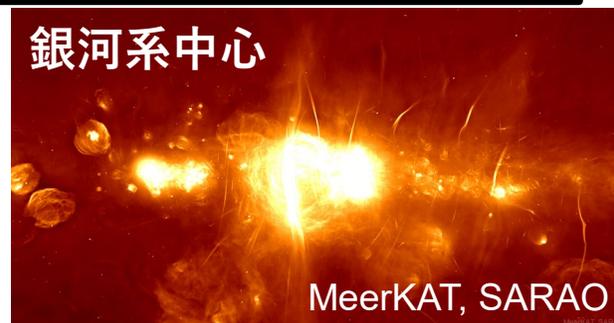
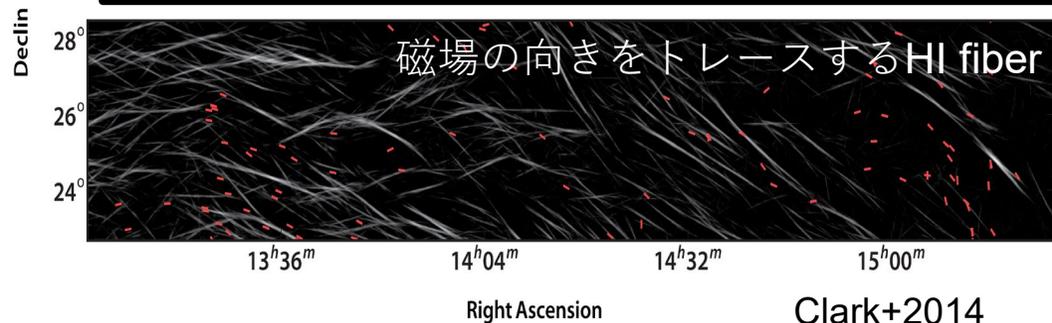
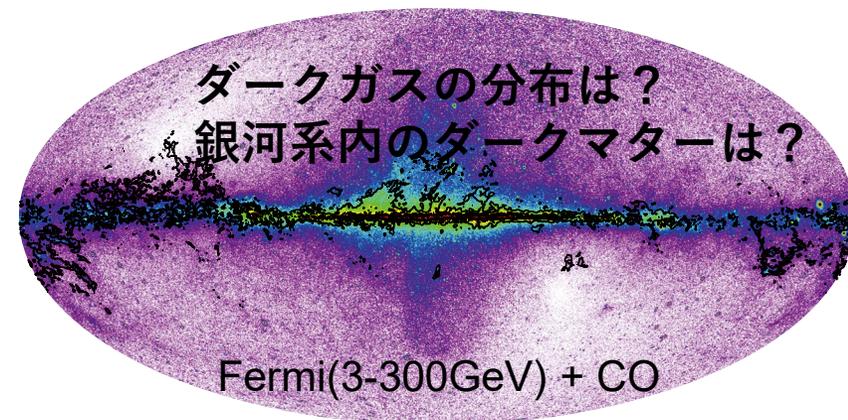
Molecular clouds

Evolution of molecular clouds
Molecular cloud core
Magnetic field strength

星間物質の研究

- 星間物質の研究は非常に多岐にわたる。
 - ✓ ダークマターを含む銀河構造・運動
 - ✓ ダークガスに関する研究
 - ✓ 近傍銀河の銀河間物質(HI)
 - ✓ メタリシティを含めた研究
 - ✓ 星間物質と高密度天体のジェットとの相互作用
 - ✓ Beyond Band 5: アンモニアコアサーベイ など
- ISMグループとしてALMAとのシナジーのユースケースに7つの観測を提案。

SKAは他にない「**L-band帯の1秒角高感度観測**」というのをキーワードにサイエンスターゲットを決定

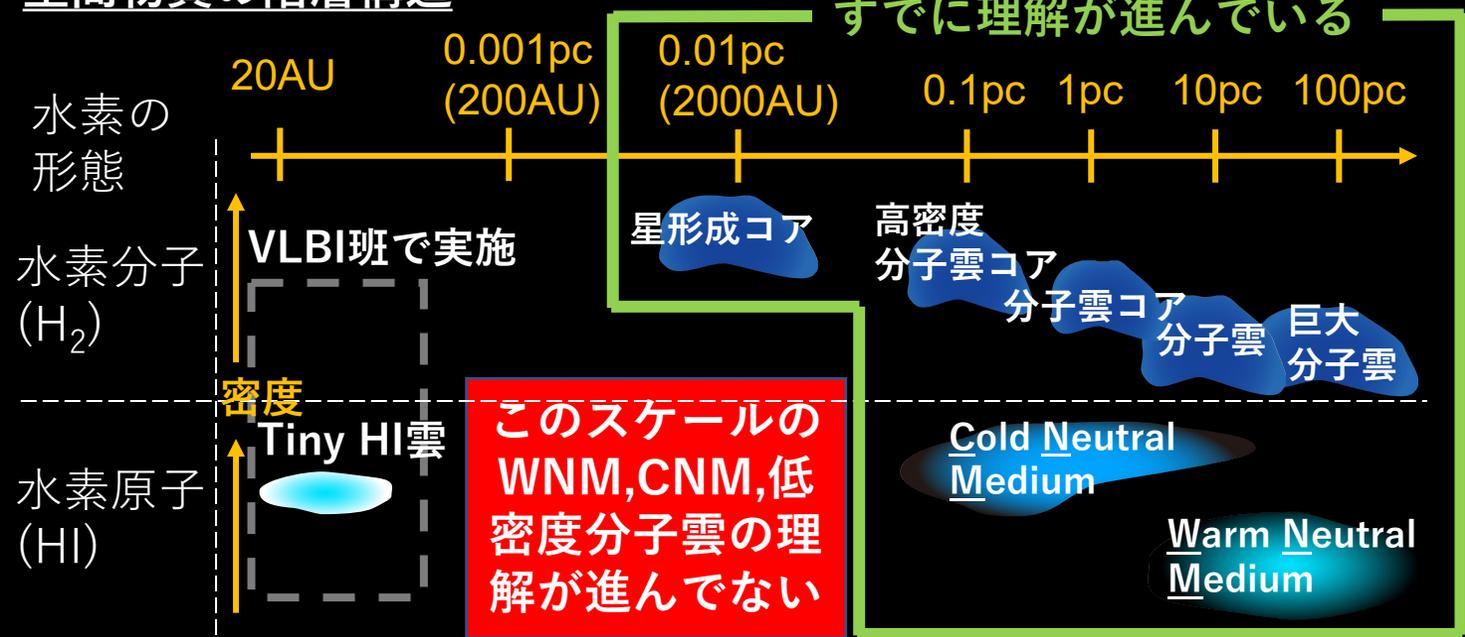


1秒角分解能で探る原子雲から分子雲への進化の革新的探求：星のゆりかごの種を探せ！

SKA-JP SWG
ISM group

概要 pcスケール以上の星間物質の理解は進んでいる一方、サブpcスケール以下の水素原子雲の理解は進んでいない。星間物質は2度の相転移を経て最終的に分子雲へと進化するが、この相転移は数千AUスケールで起こると考えられる。この相転移の現場をとらえるためには1"角の分解能が必要である。以下の点についてSKA時代に残された課題を明らかにする。**1. Tiny HI雲からCNMの進化、2. 小スケールでのCNMの構造、質量関数などの物理、3. 水素分子形成の環境、4. 星間ガスの乱流の起源**

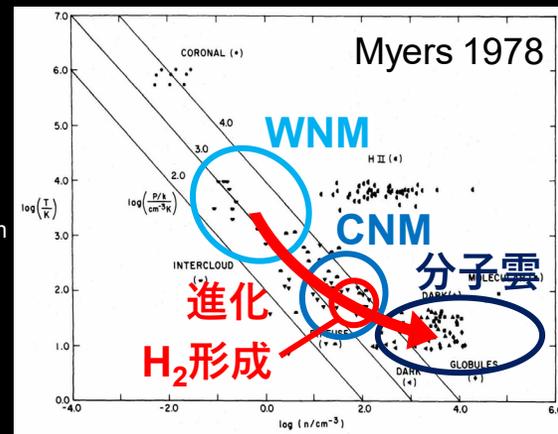
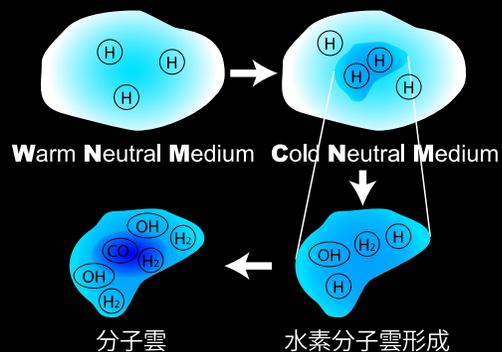
星間物質の階層構造



1秒角分解能の必要性

SKA時代で明らかにすべき星間物質の空間構造は数千AU以下のスケール。1秒角は100pcの距離で100AUである。銀河系内の近傍の星間物質であれば、密度・スケールのパラメータ空間の未開拓部分に踏み込むことができる。

星間物質の進化



WNMから2回の相転移(WNM→CNM, CNM→水素分子形成)を経て分子雲へと圧力平衡状態で進化

SKA時代の星間物質の解決すべき課題

- ✓ 数10AUスケールからサブpcまでのTiny HI雲の存在は観測的に明らか。構造・分布・物理の詳細は？
- ✓ 分解能リミットによる未開拓の小スケールのCNMの物理は？
- ✓ ダスト表面で形成される水素分子の形成条件・環境は？
- ✓ 星間物質の乱流の起源は？ CNM、形成直後の分子雲の運動が関係しているのか？

星間物質 - 一般的描像と階層構造 -

一般的描像

Cold Neutral Medium (HI)

局所的に分布

$T \sim 100 - 200 \text{ K}$

$n \sim 10 - 100 \text{ cm}^{-3}$

Warm Neutral Medium (HI)

広がって分布

$T \sim 1000 \text{ K}$,

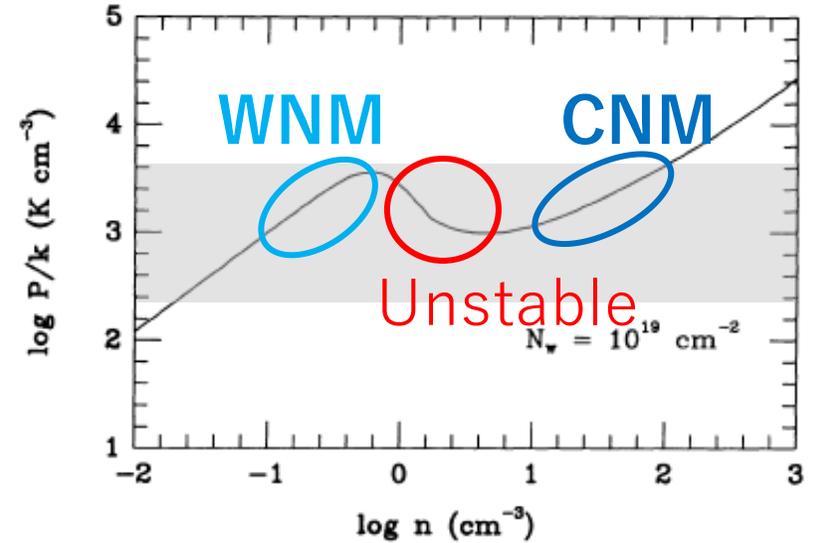
$n \sim 0.1 - 10 \text{ cm}^{-3}$

分子雲 (H_2)

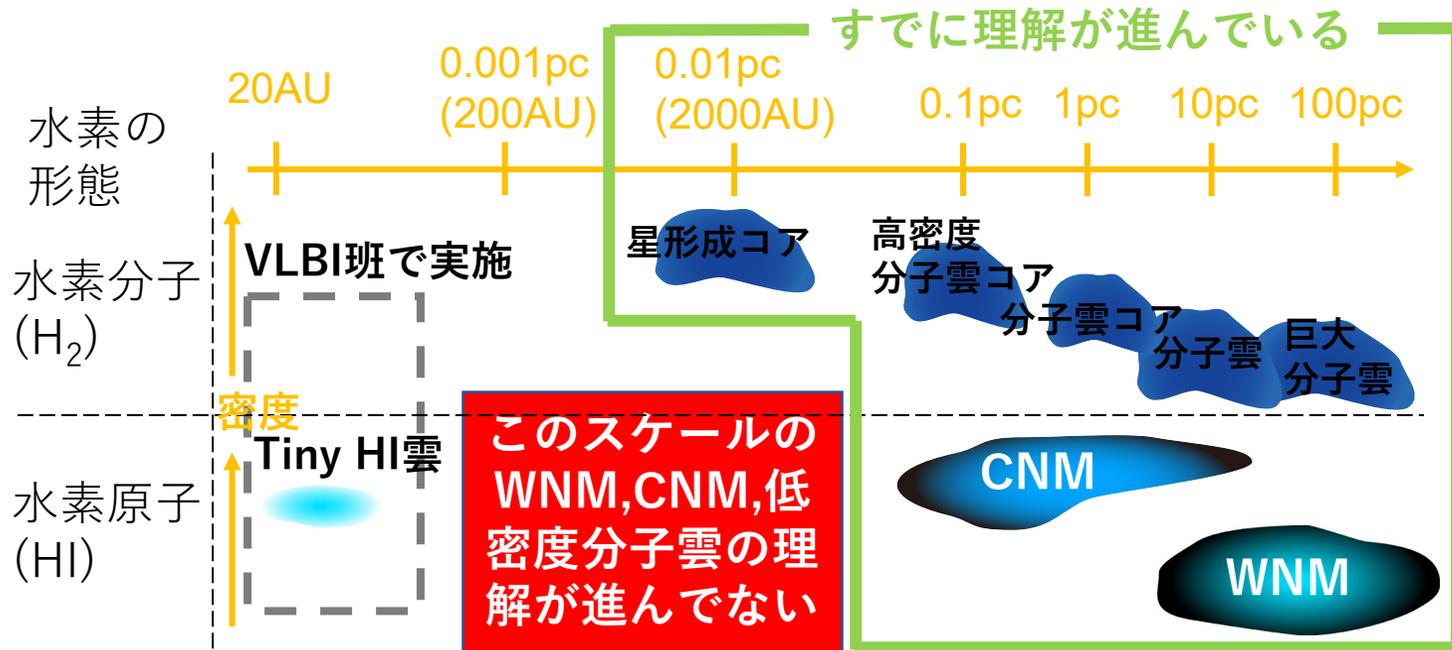
局所的に分布

$T \sim 10 \text{ K}$, $n > 100 \text{ cm}^{-3}$

星間ダストが星間ガスとよく混ざりあっており、質量比 1:100 で存在



水素原子は安定的な2つの相に分布

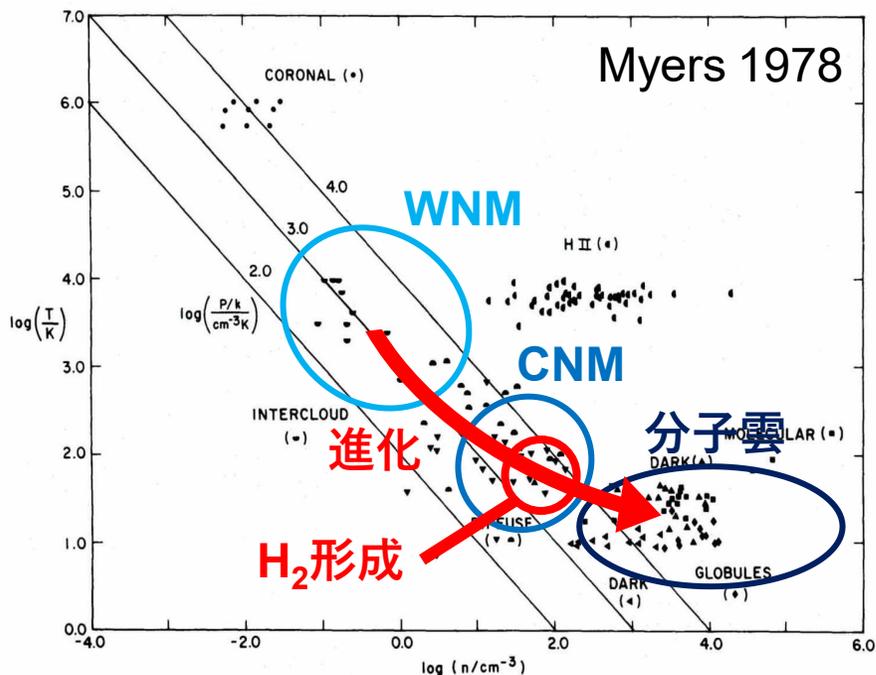
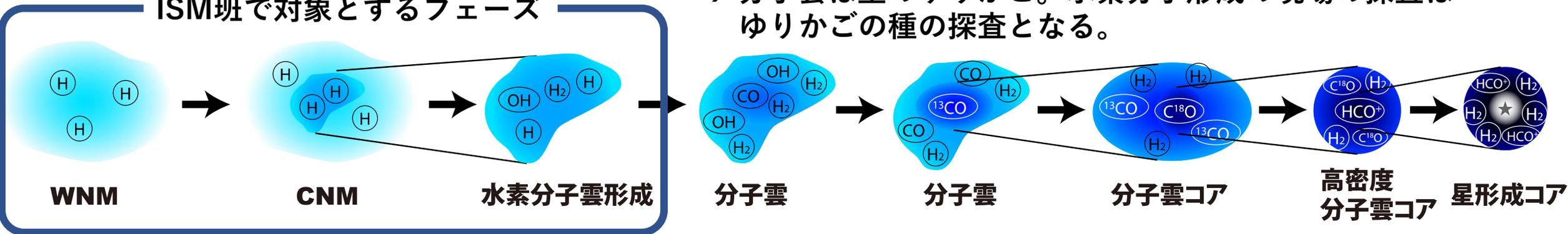


SKA時代で明らかにすべき星間物質の空間構造は数千AU以下のスケール。**1秒角**は100pcの距離で100AUである。銀河系内の近傍の星間物質であれば、密度・スケールのパラメータ空間の未開拓部分に踏み込むことができる。**未開拓の場所には未開拓の謎がある。これはSKAでしかできない。**

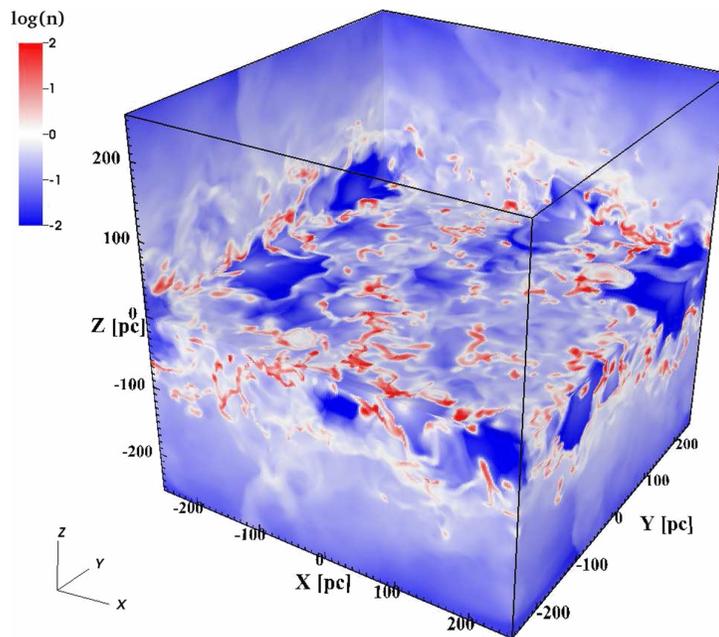
星間物質の進化

星は分子雲の密度が高くなったところで形成される。
 → 分子雲は星のゆりかご。水素分子形成の現場の探査は
 ゆりかごの種の探査となる。

ISM班で対象とするフェーズ



Kim+2013



WNMから分子雲への進化において、

- WNM → CNM
- CNM → 水素分子形成

の2つの相転移を経る。これらは基本的には圧力平衡下で起こる。

WNM中で熱的不安定性によって、CNMの種ができ (Koyama & Inutsuka 2000など)、水素分子形成へと発展する。

SKA時代の星間物質の解決すべき課題

- ✓ 数10AUスケールからサブpcまでのTiny HI雲の存在は観測的に明らか。構造・分布・物理の詳細は？
- ✓ 分解能リミットによる未開拓の小スケールのCNMの物理は？
- ✓ ダスト表面で形成される水素分子の形成条件・環境は？
- ✓ 星間物質の乱流の起源は？ CNM、形成直後の分子雲の運動が関係しているのか？

SKA時代の星間物質の解決すべき課題

✓ 数10AUスケールからサブpcまでのTiny HI雲の存在は観測的に明らか。構造・分布・物理の詳細は？

Stanimirovic & Zweibel (2018)

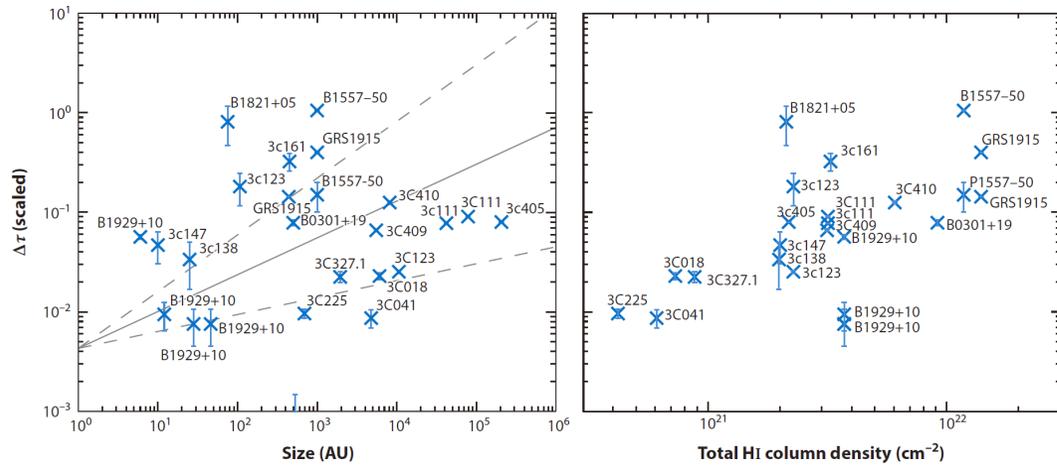


Figure 7
(a) Variations in HI optical depth as a function of spatial scale. Detections from **Tables 1** and **2** are plotted after applying scaling to bring all $\Delta\tau$ values to the common velocity resolution (see text). The solid line shows the level of fluctuations in $\Delta\tau$ as predicted by Deshpande et al. (2000), and dashed lines show $\pm 2\sigma$ slope uncertainties. (b) Variations in HI optical depth as a function of the total HI column density along the line of sight. The HI column density comes from several different surveys.

これらは背景光源に対する吸収線の観測で検出。
 ➤ 吸収線の観測は観測できる方向が限られ、サンプルが限定的。また、HI雲の構造全体をカバーできてない可能性もある(光源のサイズに依存する)。

Brogan+2007

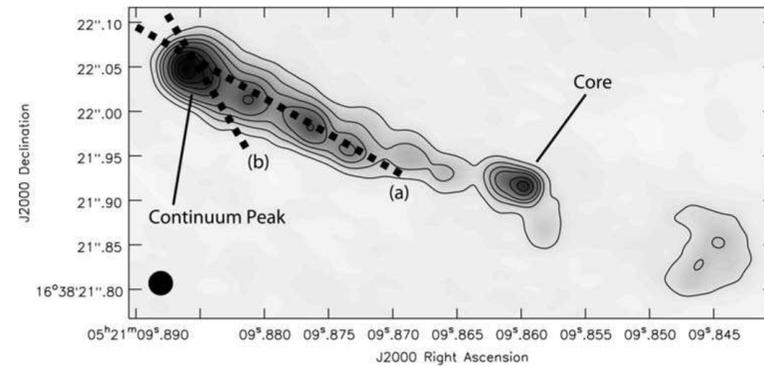


Figure 1. VLBA 21-cm continuum image of 3C 138 with 20 mas resolution from Epoch III (2002). The black contours are at 10, 30, 60, 100, 200, 300, 400, 500, and 600 mJy beam⁻¹. The peak brightness is 607 mJy beam⁻¹, and the rms noise is 0.95 mJy beam⁻¹. The 60 mJy beam⁻¹ contour level is used for a continuum cutoff in subsequent optical depth discussions. Subsequent analyses also made use of one-dimensional cross-cuts along the lines labeled (a) and (b).

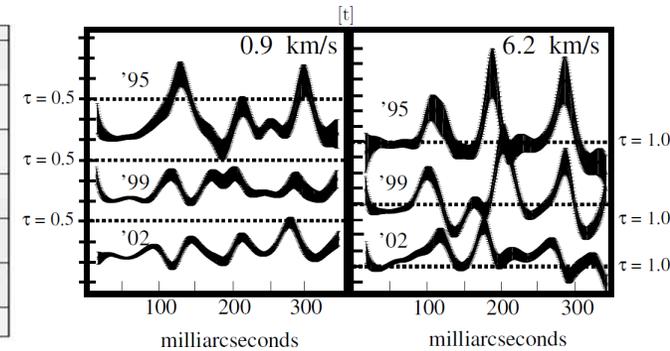


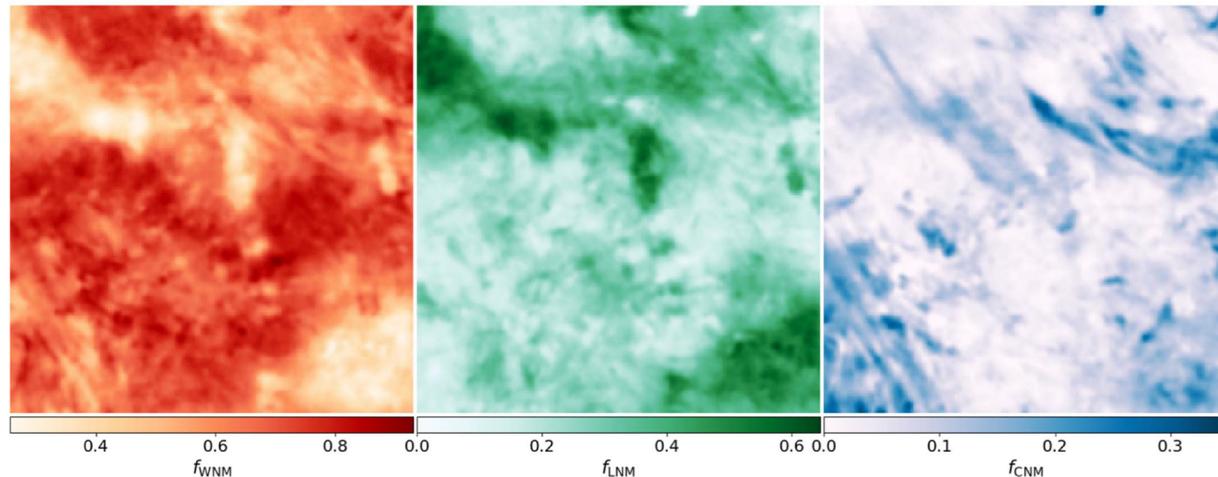
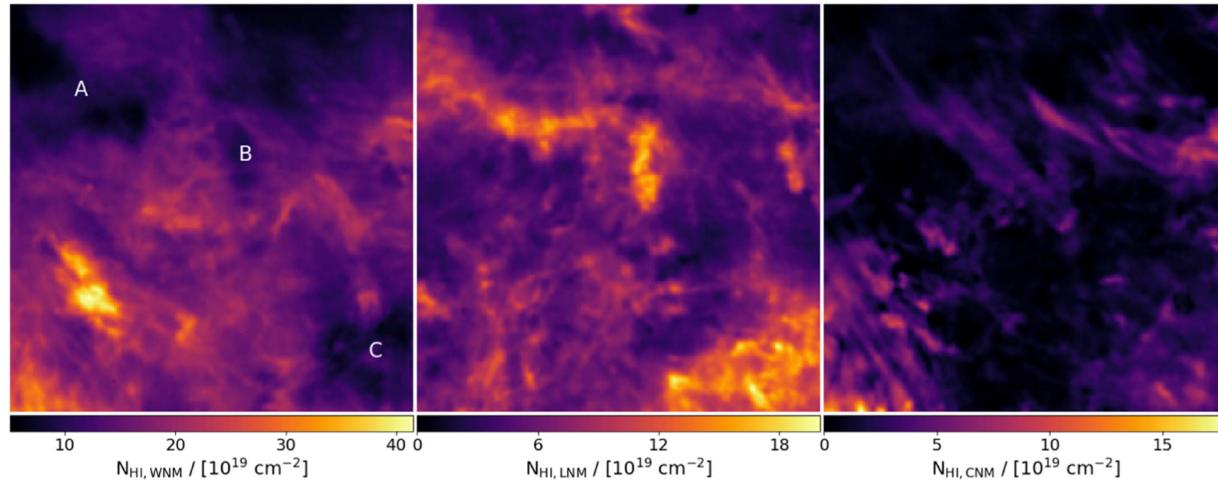
Figure 2. Optical depth crosscuts at 0.9 and 6.2 km s⁻¹ along the position marked (a) in Figure 1 for all three epochs. The vertical tic mark interval is 0.1 and the width of the shaded line is equal to $\pm 1\sigma$, where σ is the uncertainty in the measurement of τ . This figure shows that the typical linear distance between significant H I variations is 50 mas.

重要なのはこのような構造を輝線で捉えること。
 輝線であれば構造全体を検出できる。輝線検出のスケールをさらに下げ、光学的厚みの変化と輝線の輝度分布との相関が明らかにすることで、吸収線の変化が実際に何を反映しているのか理解が進むと考えられる。また、小スケールの構造の密度変化の度合いや運動を明らかにすることができる。

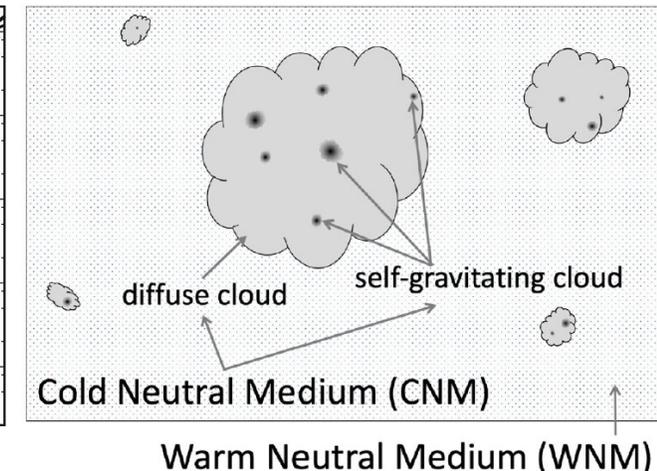
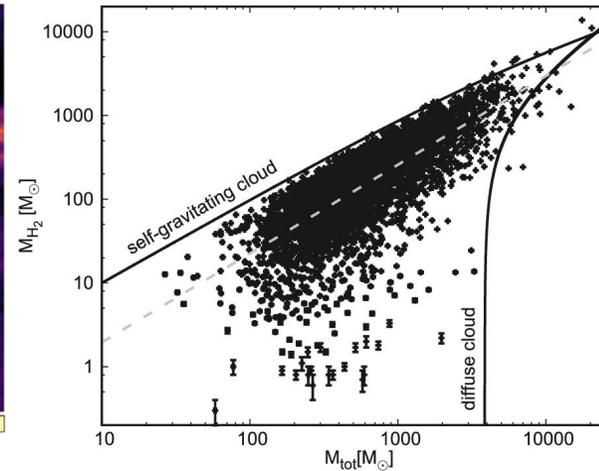
SKA時代の星間物質の解決すべき課題

✓ 分解能リミットによる未開拓の小スケールのCNMの物理は？

Marchal+2021



Nakanishi+2020



VGPS HIデータを解析に使用。空間分解能は1分角。同定されたHI雲のサイズは数pc×数pc。HI雲の質量は数千太陽質量以上。星間物質の進化を議論。

高銀緯領域において、HIのスペクトルからWNMとCNMを分離。高銀緯の広域HIデータの空間分解能は4-16分角。200pcの距離において0.2-0.9pc。

1秒角分解能になれば解像度が500倍程度よくなり、200AU程度のスケールでWNMやCNMを見ることが出来る。

Figure 3. Top: integrated column density $N_{\text{HI}}^{\text{WNM}}$, $N_{\text{HI}}^{\text{LNM}}$ and $N_{\text{HI}}^{\text{CNM}}$ fields of the three-phase model. Bottom: f_{WNM} , f_{LNM} and f_{CNM} column density fraction maps. Letters A, B, and C indicate the three anti-correlated regions of warm neutral medium and lukewarm neutral medium discussed in the text.

SKA時代の星間物質の解決すべき課題

✓ダスト表面で形成される水素分子の形成条件・環境は？

No. 1, 2004

H₂ FORMATION ON GRAIN SURFACES

235

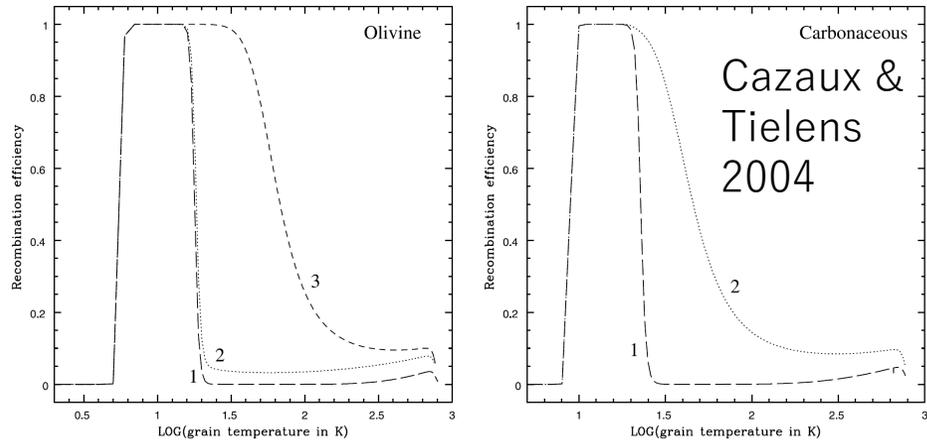
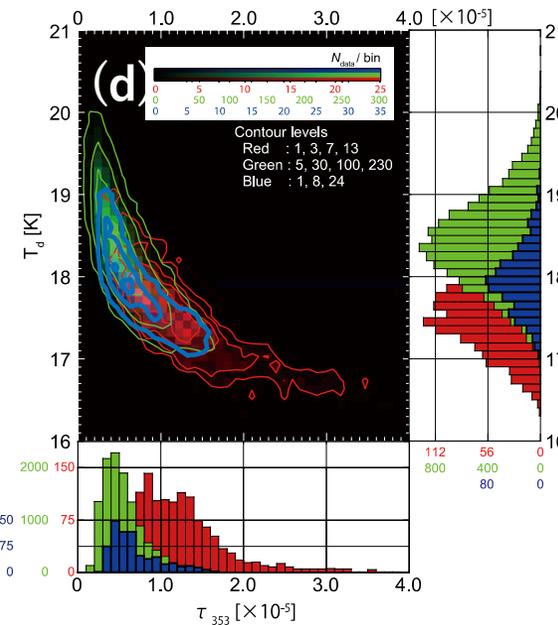
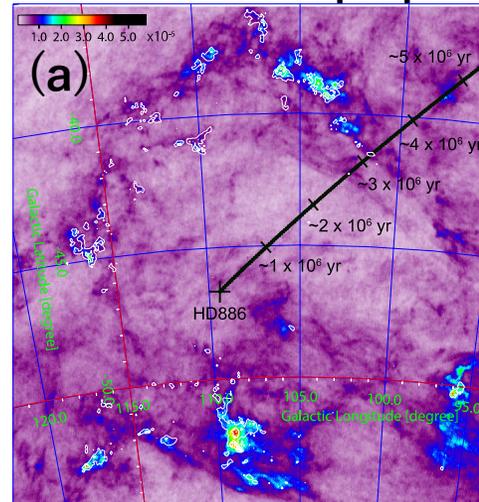


FIG. 15.—Recombination efficiency on interstellar grain surfaces as a function of grain temperature. The barrier between physisorbed and chemisorbed sites has been fixed as $a\{2m[E_p(H) - E_s]/h^2\}^{1/2} = 14.4 \pm 0.2$ for olivine and 14.0 ± 0.2 for carbonaceous surfaces. The recombination efficiency is calculated for three different barriers on an olivine surface and for two different barriers on a carbonaceous surface (see Fig. 11).

ペガサスループの例
Yamamoto+2006,
Yamamoto in prep

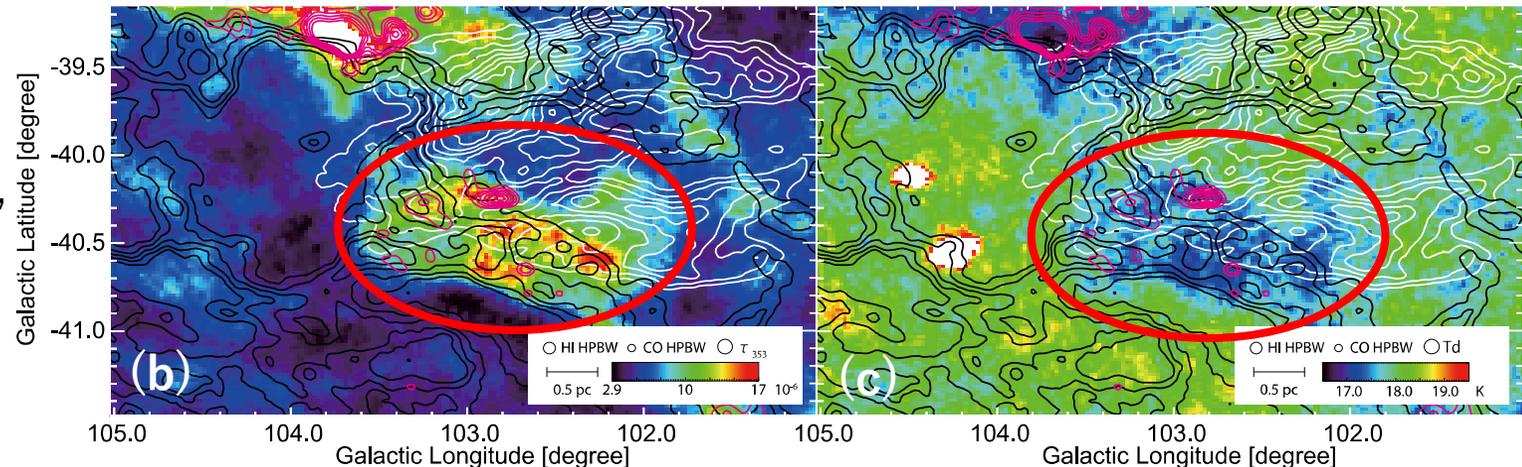


- (a) イメージ: τ_{353}
コントア: ¹²CO(J=1-0)
- (b) イメージ: τ_{353}
コントア:
白 HI(-2-+10km/s),
黒 HI(-15--6.2km/s),
マゼンダ ¹²CO
- (c) イメージ: T_d
コントア: (b)と同じ
- (d) 緑: CO非検出領域、
赤: CO検出領域、
青: (b),(c)の赤丸の領域

水素分子形成は星間ダストの表面で起こる。シミュレーションではダストの温度が~20K以下で水素原子が効率よくダストに吸着される。

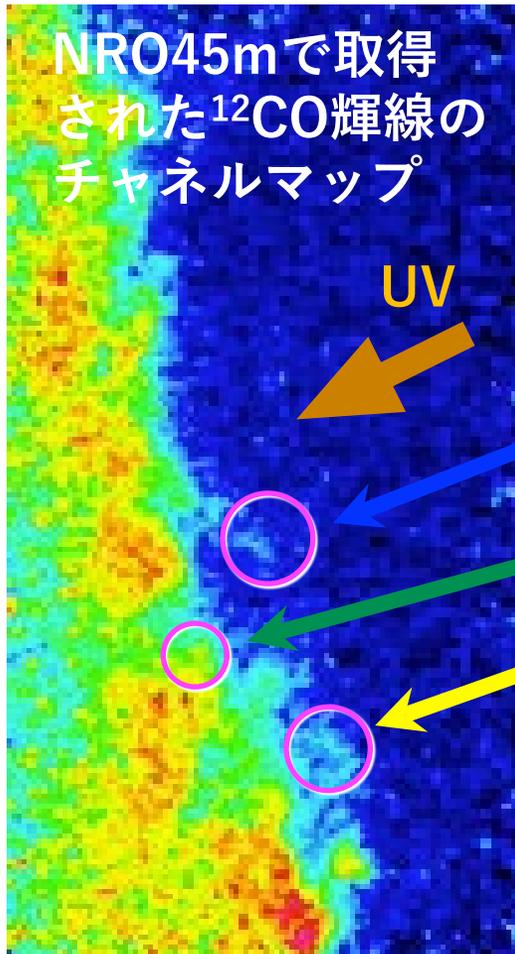
ダストの温度が周囲よりも低いところに0.1 pc(20,000AU)オーダーの分子雲が点在。(b),(c)の赤丸領域は、 τ_{353} と T_d のplot上(d)で、CO検出領域とCO非検出領域の間に分布。

→ショックによる分子雲形成。SKAでHIの構造を分解可能。

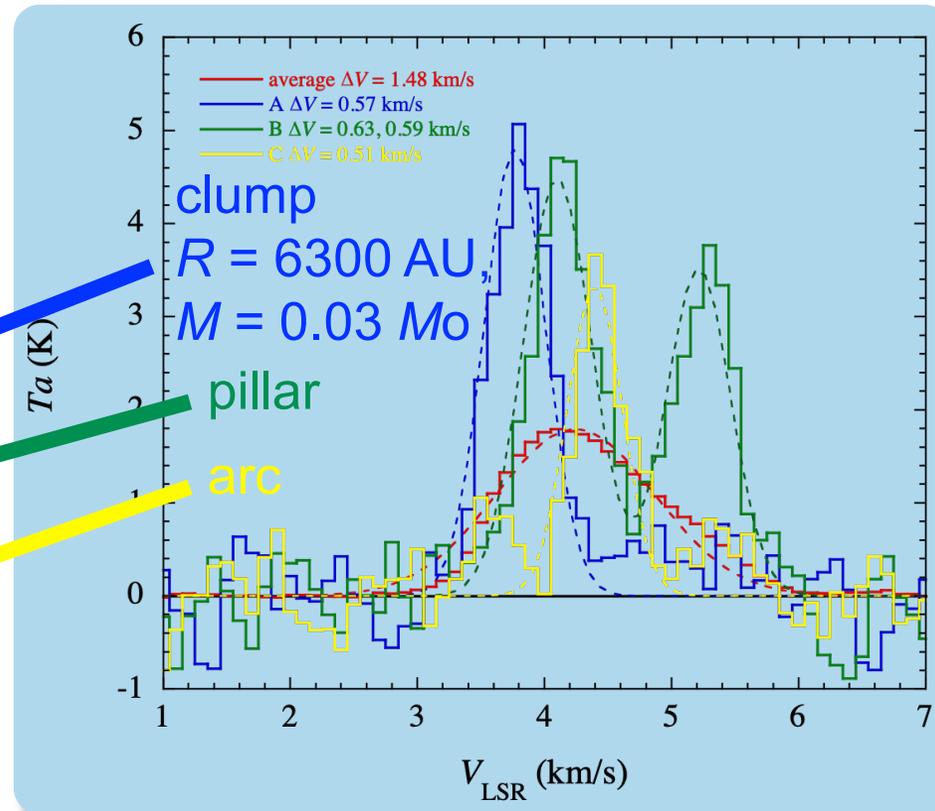


SKA時代の星間物質の解決すべき課題

✓ 星間物質の乱流の起源は？ CNM、形成直後の分子雲の運動が関係しているのか？



(Tachihara+ 2012)



$\Delta v_{\text{small}} \sim 0.6 \text{ km/s}$, $\Delta v_{\text{ave}} \sim 1.5 \text{ km/s}$

マクロで見た分子雲の超音速乱流は数千AUスケールのミクロの速度幅の狭い成分の集合体

星間物質の進化の観点から分子雲の前段階であるCNMや形成直後の分子雲の運動との関係は？

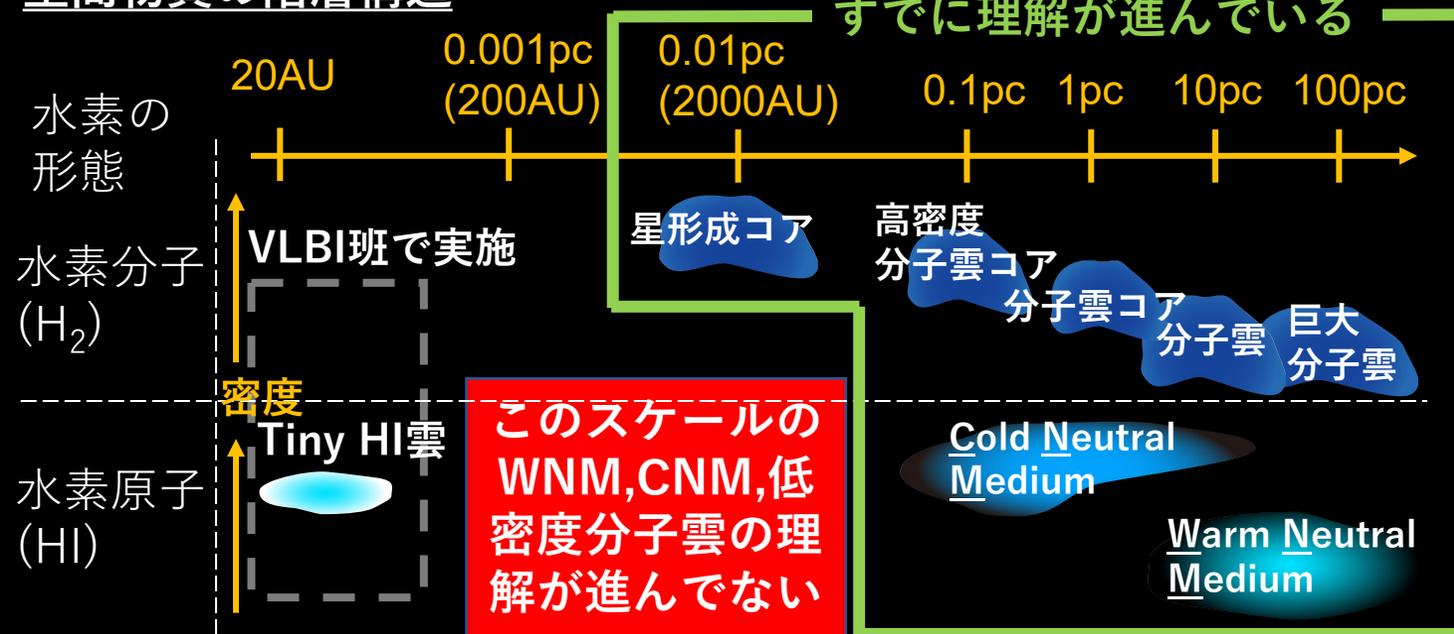
数千AUスケールでのCNMや形成直後の分子雲の構造・運動を分解する必要がある。

1秒角分解能で探る原子雲から分子雲への進化の革新的探求：星のゆりかごの種を探せ！

SKA-JP SWG
ISM group

概要 pcスケール以上の星間物質の理解は進んでいる一方、サブpcスケール以下の水素原子雲の理解は進んでいない。星間物質は2度の相転移を経て最終的に分子雲へと進化するが、この相転移は数千AUスケールで起こると考えられる。この相転移の現場をとらえるためには1"角の分解能が必要である。以下の点についてSKA時代に残された課題を明らかにする。**1. Tiny HI雲からCNMの進化、2. 小スケールでのCNMの構造、質量関数などの物理、3. 水素分子形成の環境、4. 星間ガスの乱流の起源**

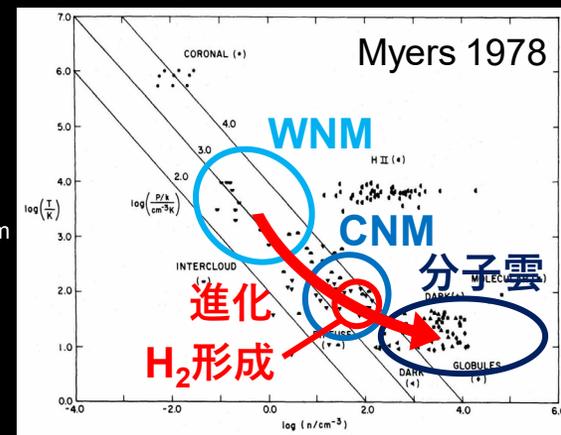
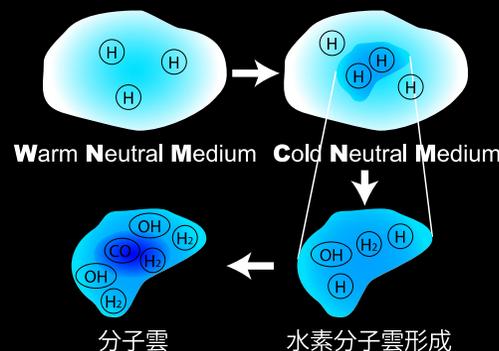
星間物質の階層構造



1秒角分解能の必要性

SKA時代で明らかにすべき星間物質の空間構造は数千AU以下のスケール。1秒角は100pcの距離で100AUである。銀河系内の近傍の星間物質であれば、密度・スケールのパラメータ空間の未開拓部分に踏み込むことができる。

星間物質の進化



WNMから2回の相転移(WNM→CNM, CNM→水素分子形成)を経て分子雲へと圧力平衡状態で進化

SKA時代の星間物質の解決すべき課題

- ✓ 数10AUスケールからサブpcまでのTiny HI雲の存在は観測的に明らか。構造・分布・物理の詳細は？
- ✓ 分解能リミットによる未開拓の小スケールのCNMの物理は？
- ✓ ダスト表面で形成される水素分子の形成条件・環境は？
- ✓ 星間物質の乱流の起源は？ CNM、形成直後の分子雲の運動が関係しているのか？