

A statistical study of massive cluster-forming clumps

下井倉ともみ、土橋一仁（東京学芸大学）、
中村文隆、廣田朋也（国立天文台）、松本倫明（法政大）

Shimoikura, Dobashi, et al. 2018

星団形成のシナリオは？

様々な進化段階(星団形成前、形成初期、形成末期)のガスの物理状態を統計的に調べる必要がある



星団形成前？

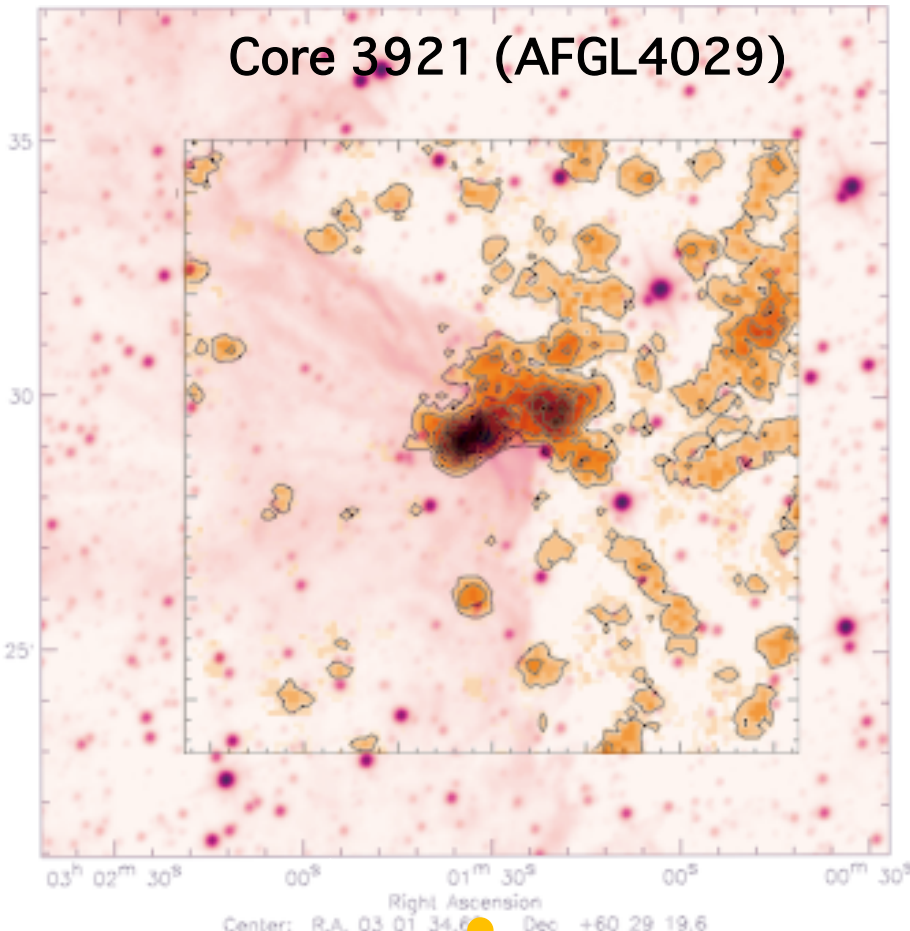


星団形成進行中

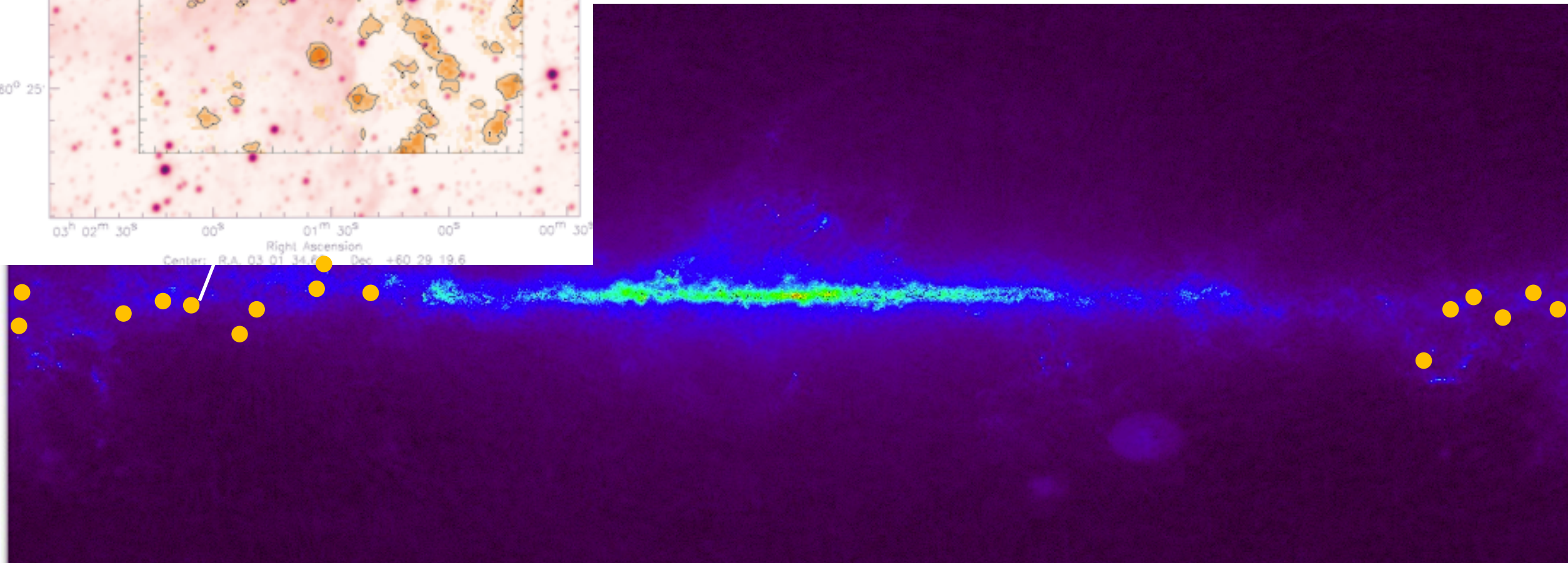


星団形成末期？

Core 3921 (AFGL4029)



若い星団(1-5Myr)が付随するコア、星団の付随しないコア、合計15の領域(距離0.8-3kpc)を、野辺山45m鏡と2MASS点源カタログを用いて調査



- 100 GHz帯 (~22")

^{12}CO : アウトフロー探査

^{13}CO , C^{18}O : クランプの同定、
質量、速度構造

SO , CS : 化学年齢の推定

- 45 GHz帯 (~40")

CCS , HC_3N : 化学年齢の推定

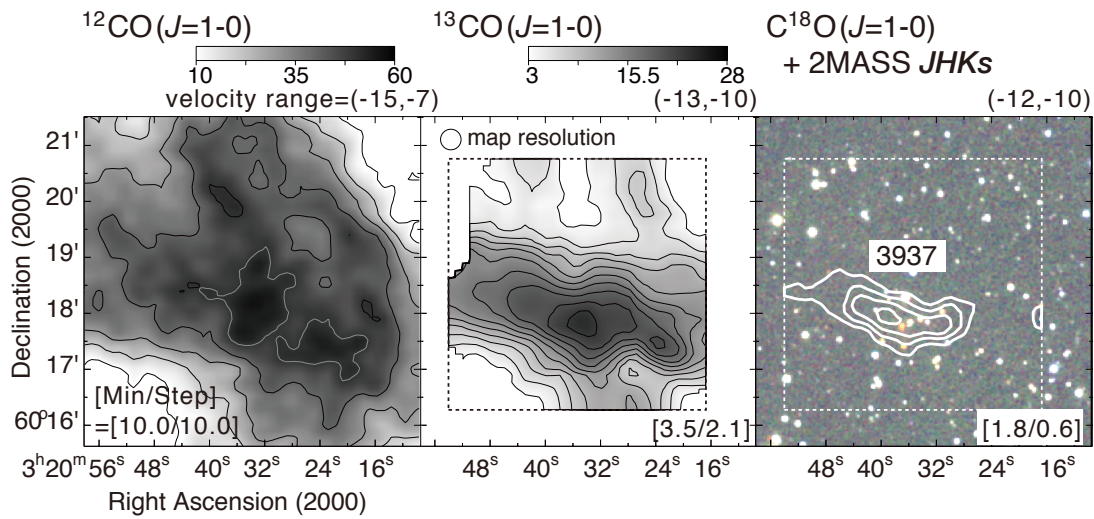
- 2MASS PSC

星団の同定、星団の星の数等の調査
母体クランプとの関係

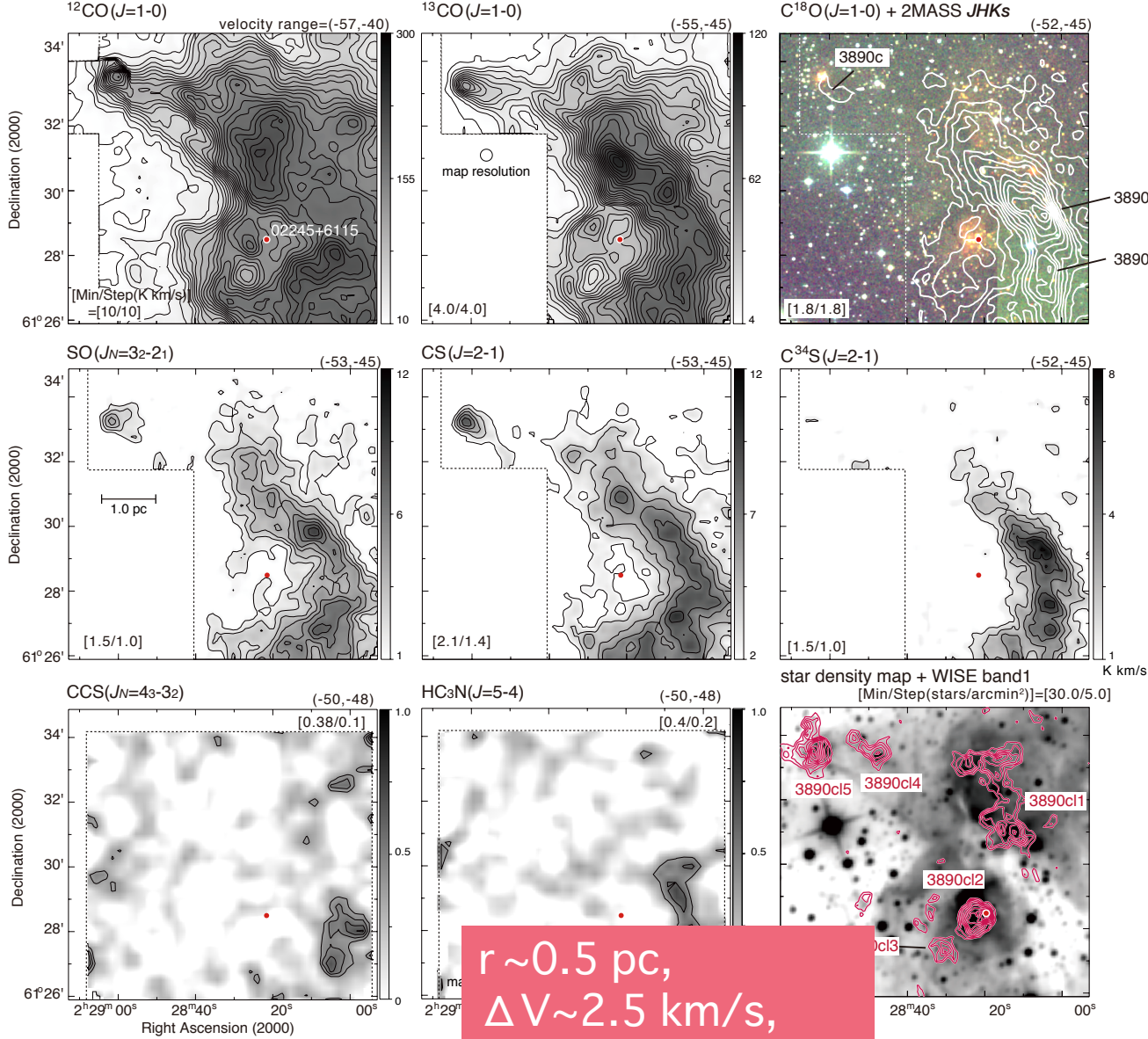
星団の付随しない領域の例

core 3890 (AFGL333)

core 3937



$r \sim 0.2$ pc,
 $\Delta V \sim 1.0$ km/s,
 $M_{\text{LTE}} \sim 100 M_{\odot}$

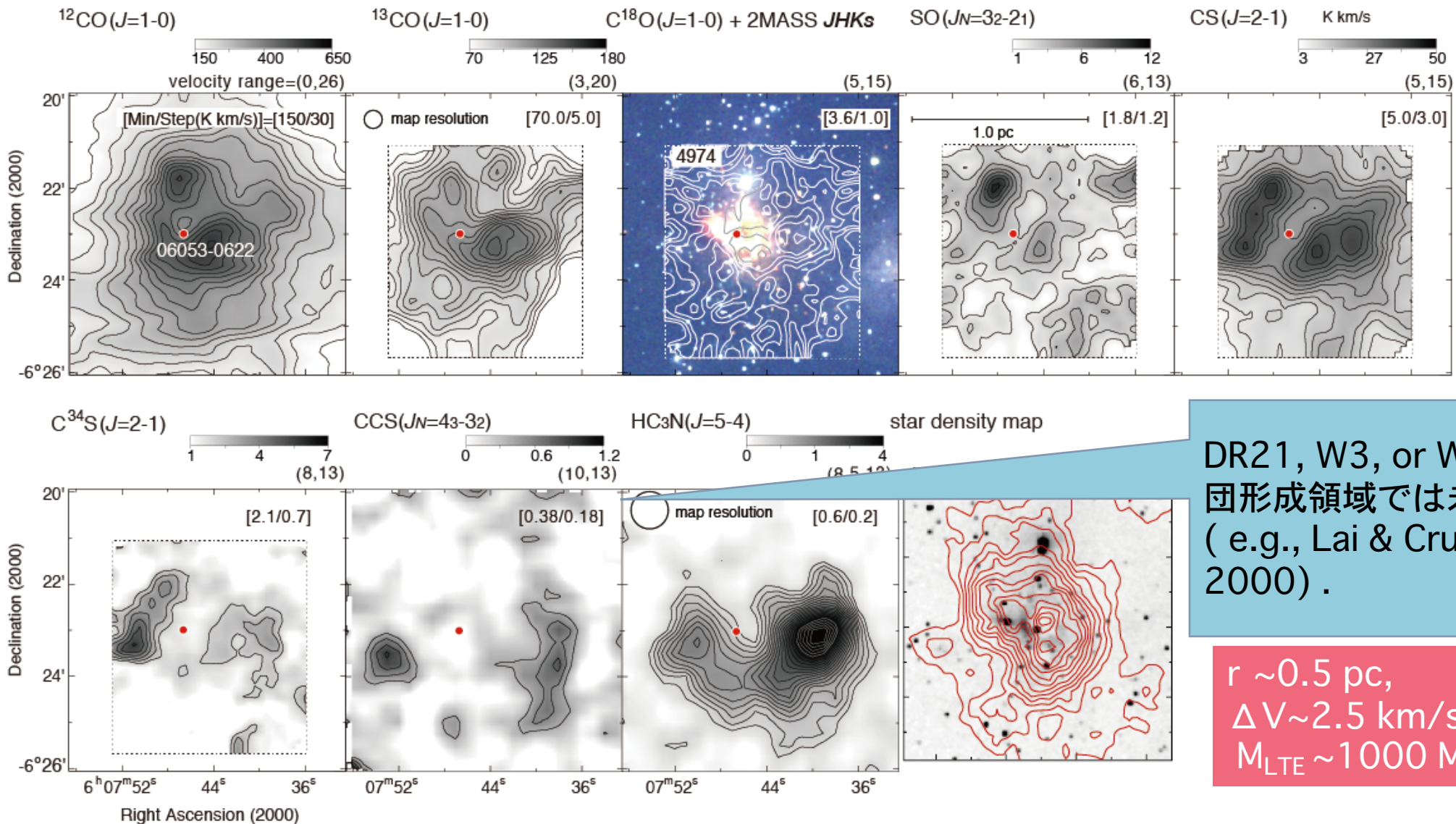


$r \sim 0.5$ pc,
 $\Delta V \sim 2.5$ km/s,
 $M_{\text{LTE}} \sim 4000 M_{\odot}$

星団形成領域の例

core 4974 (Mon R2)

15の星形成領域の観測から
 ⇒24個のクラumpを同定
 ⇒23個の星団を同定



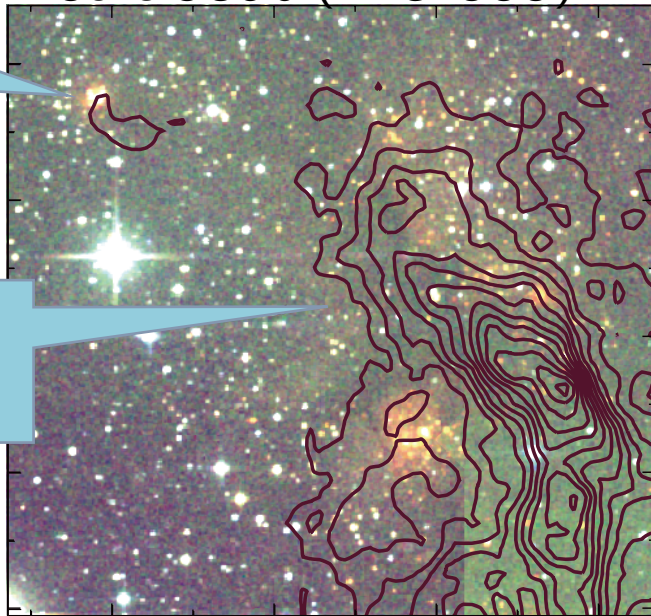
DR21, W3, or W40 等の星団形成領域では未検出 (e.g., Lai & Crutcher 2000) .

$r \sim 0.5 \text{ pc}$,
 $\Delta V \sim 2.5 \text{ km/s}$,
 $M_{\text{LTE}} \sim 1000 M_{\odot}$

クランプと星団の関係

コンター： C¹⁸O (クランプ)
背景： 2MASS JHK 3色合成(星団)

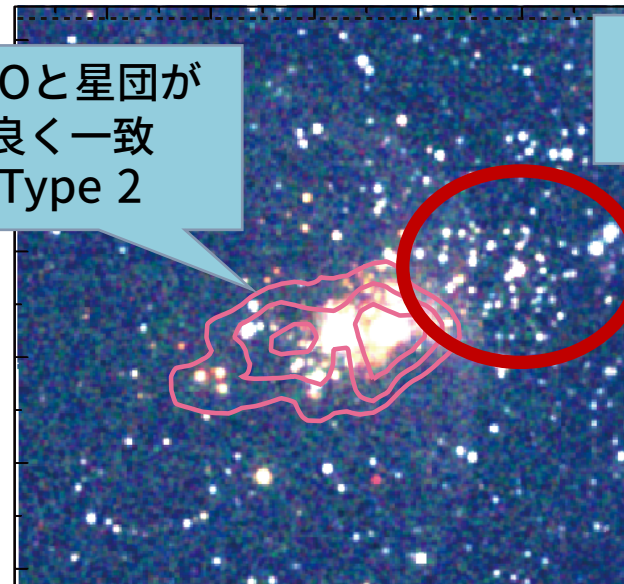
Core 3890 (AFGL333)



C¹⁸Oが
わずかしか付随しない
星団
Type 3

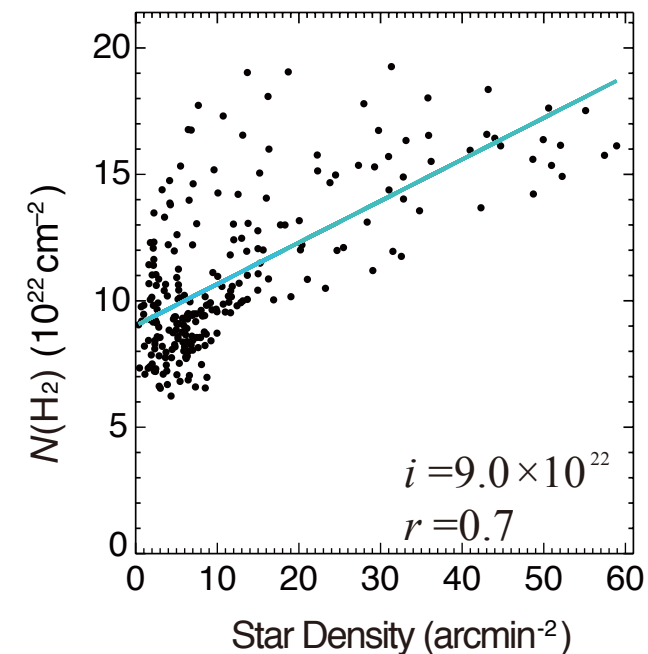
星団が付随しない
クランプ
Type 1

Core 3921 (AFGL4029)



C¹⁸Oと星団が
良く一致
Type 2

C¹⁸Oが
付随しない星団
Type 4





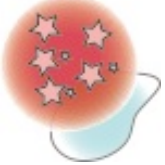

星団形成の進化段階が異なると思われる4つのタイプに分類

(1) 星団が付随しないクランプ Type 1

(2) $N(\text{H}_2)$ とstar densityの相関を調べた結果、相関係数が0.5以上 Type 2

(3) 相関係数0.4以下 Type 3

(4) クランプが付随しない星団 Type 4

Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
 <p>C¹⁸Oのみ</p>	 <p>C¹⁸Oと星団の 相関が良い</p>	 <p>C¹⁸Oと星団の相 関が無い</p>	 <p>星団のみ</p>
個数 : 8	7	9	6

Type 1 → Type 2 → Type 3 → Type 4で進化？

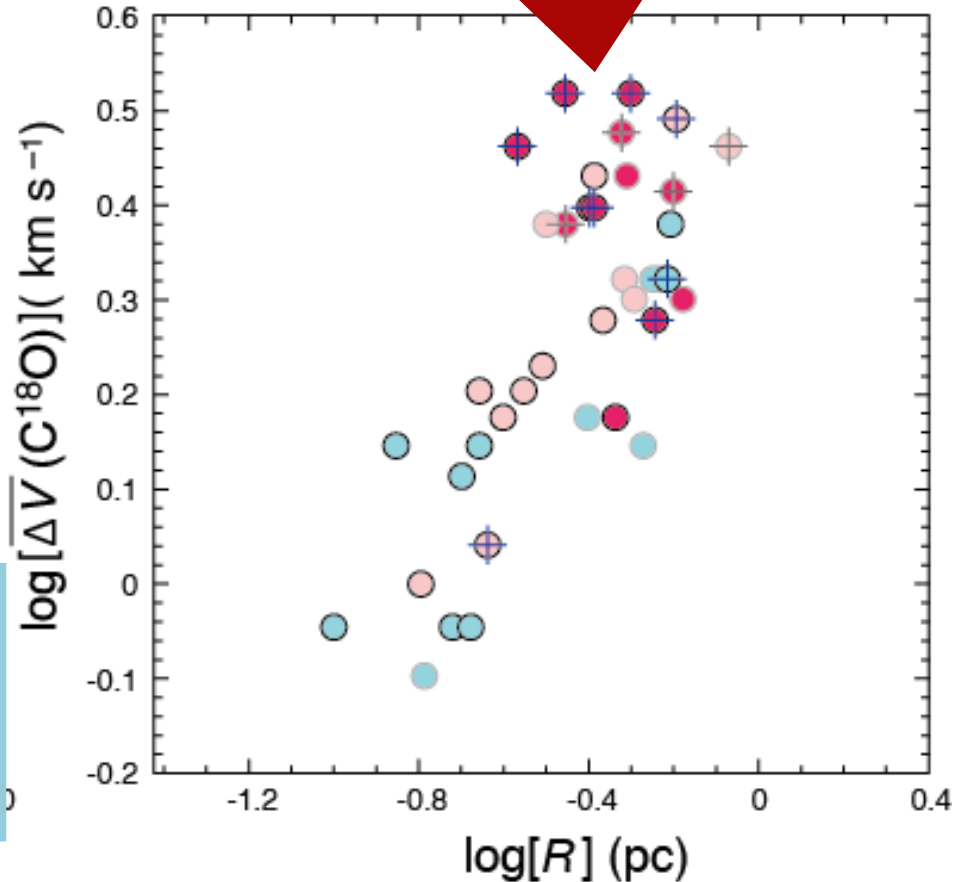
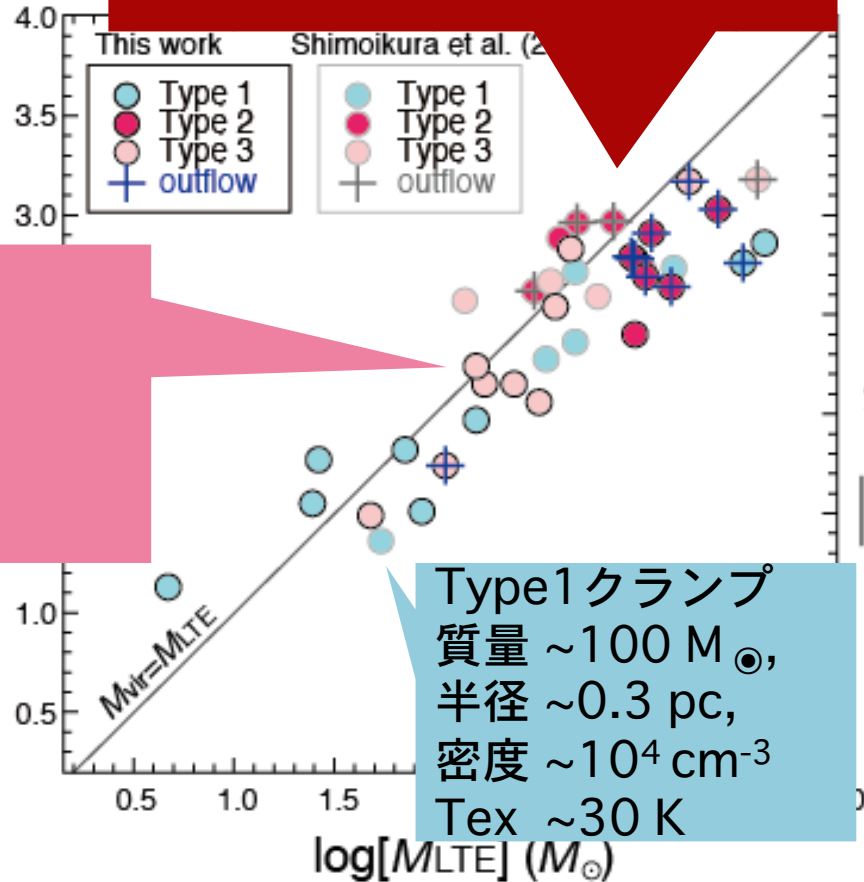
質量、半径、線幅の関係

Type2クランプ
 質量 $\sim 1000 M_{\odot}$, 半径 ~ 0.5 pc,
 密度 $\sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$
 $T_{\text{ex}} > 50$ K

Type2クランプの線幅 $\sim 3 \text{ km/s}$
 その内部では、2つの速度成分がある。

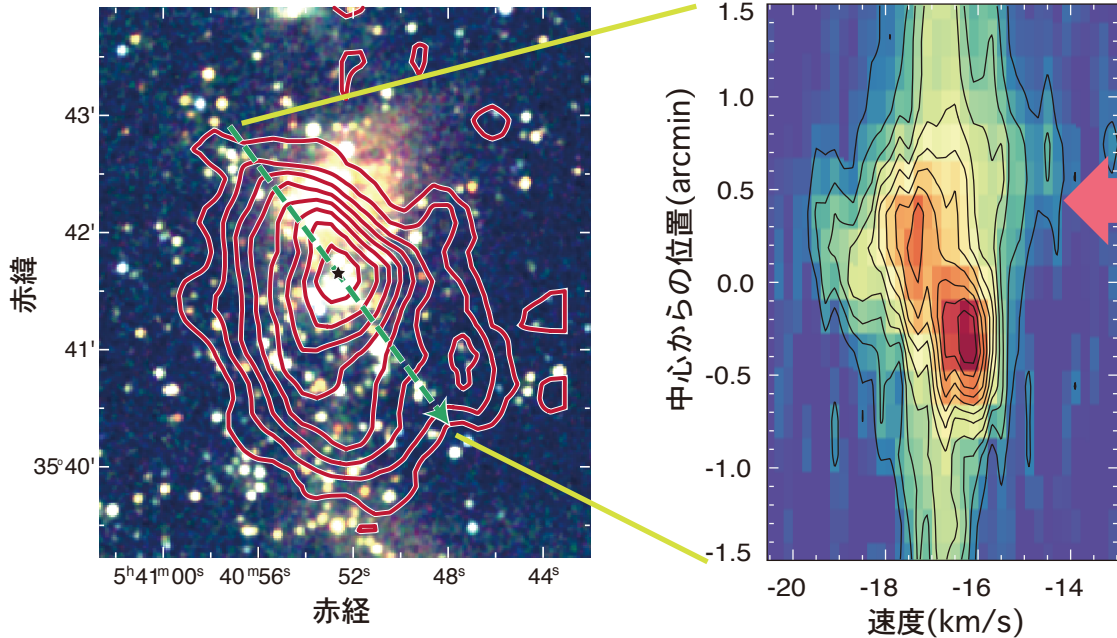
Type3クランプ
 質量 $\sim 300 M_{\odot}$,
 半径 ~ 0.5 pc,
 密度 $\sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$
 $T_{\text{ex}} \sim 40$ K

Type1クランプ
 質量 $\sim 100 M_{\odot}$,
 半径 ~ 0.3 pc,
 密度 $\sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$
 $T_{\text{ex}} \sim 30$ K

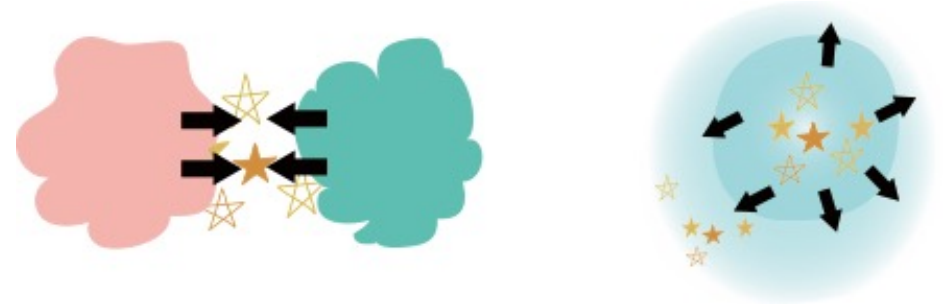


速度の違う2つのガス,何を意味するか？

Core 4423 (S235AB)



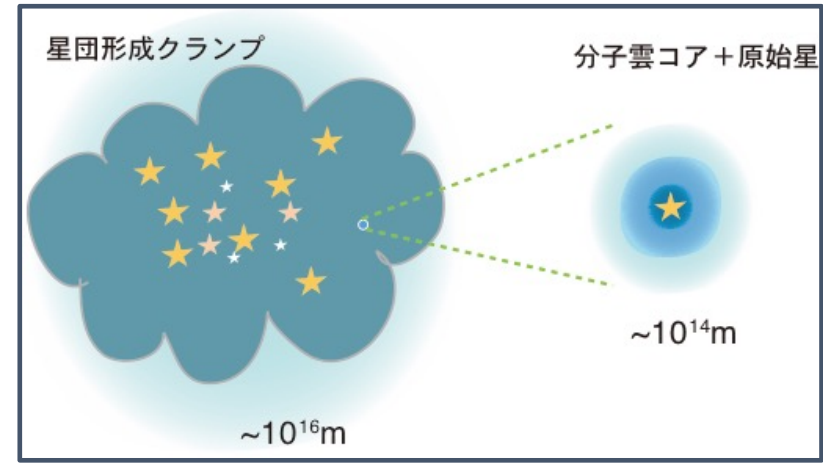
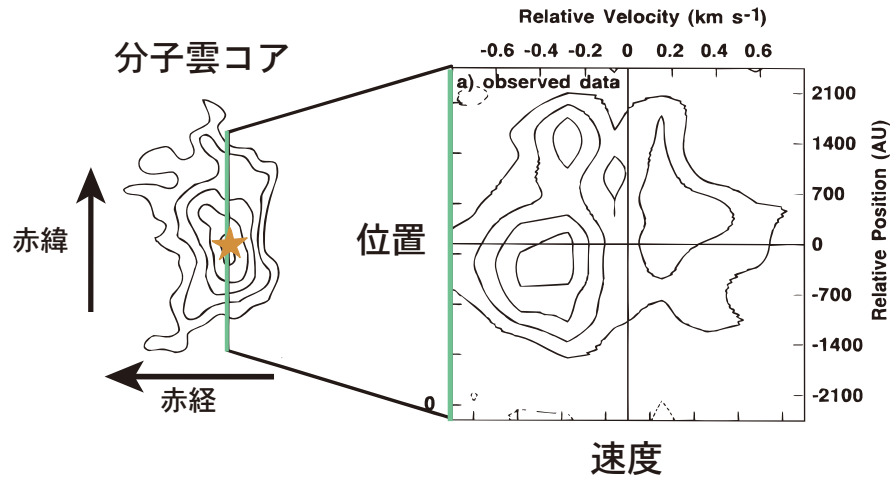
Type 2 クラump (7つのうち3つ) の特徴
* PV図で2つ目 (^{13}CO , C^{18}O)
* 速度差 $\sim 1.5\text{km/s}$
* 見かけの形状は楕円形



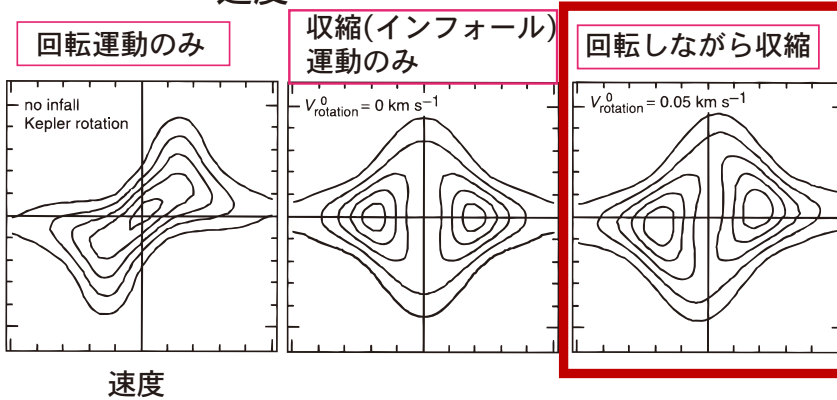
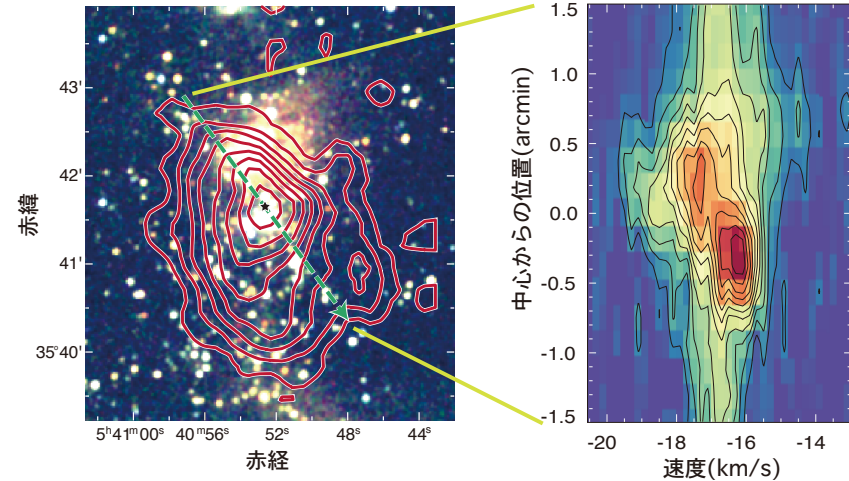
<複数の速度成分の発見 従来の解釈>

- clump-clump collisions (e.g., Higuchi et al. 2009, Torii et al. 2011) 、
filament-filament collisions (e.g., Dobashi et al. 2014)
- Compact HII region の expanding shell (e.g., Shimoikura et al. 2015)

太陽程度の星の周りのガスの運動(Ohashi et al., 1997)



星団形成クランプ



長軸方向のPV図は、Ohashi et al. (1997)や Momose et al. (1998) によって研究された小質量星周の「**回転+インフォール運動**」によるPV図によく似ている。

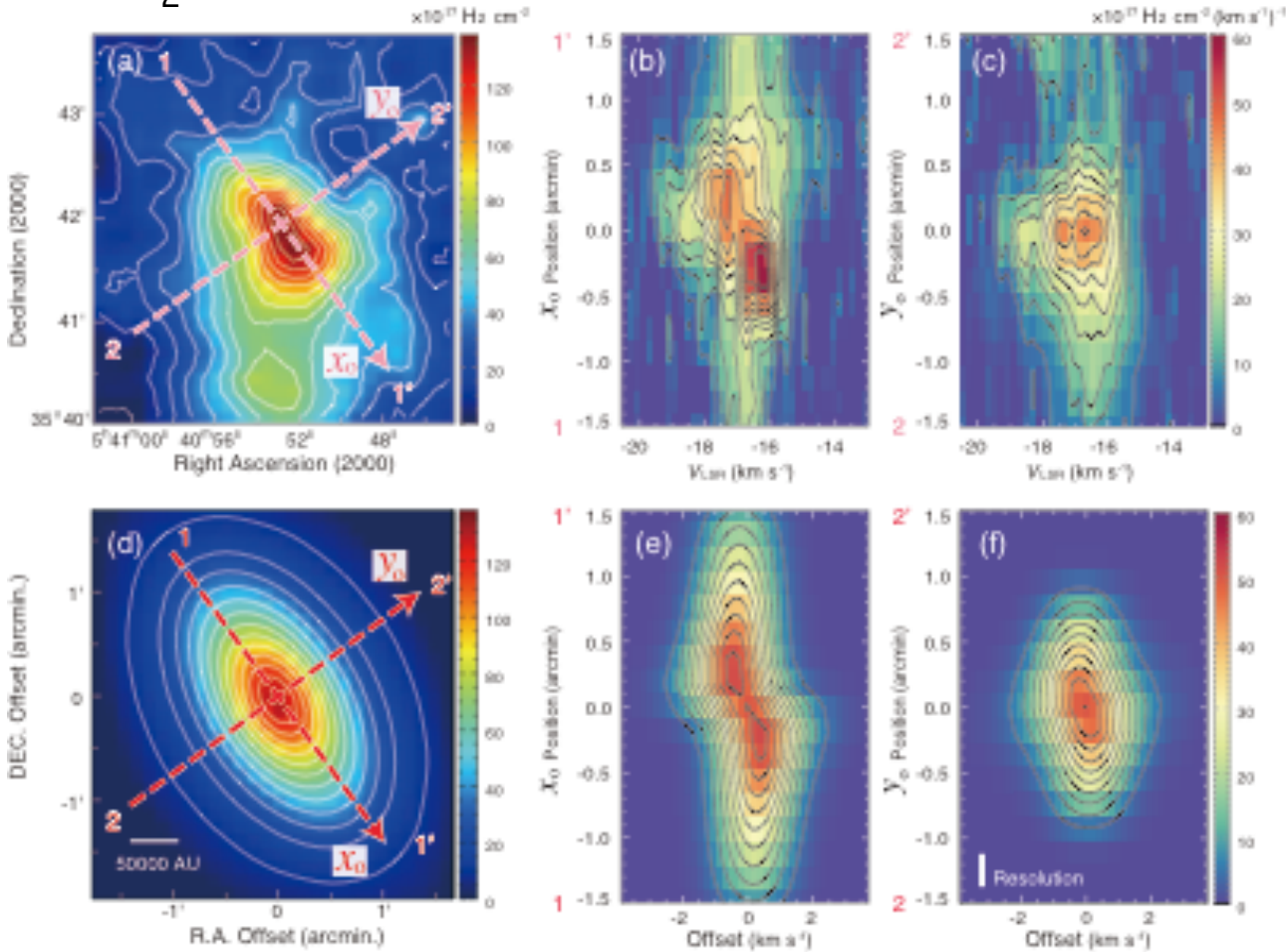
→ **スケールアップ**されたただで、同じ現象が起きていると思われる。

ベストモデル

H₂

PV(長軸)

PV(短軸)

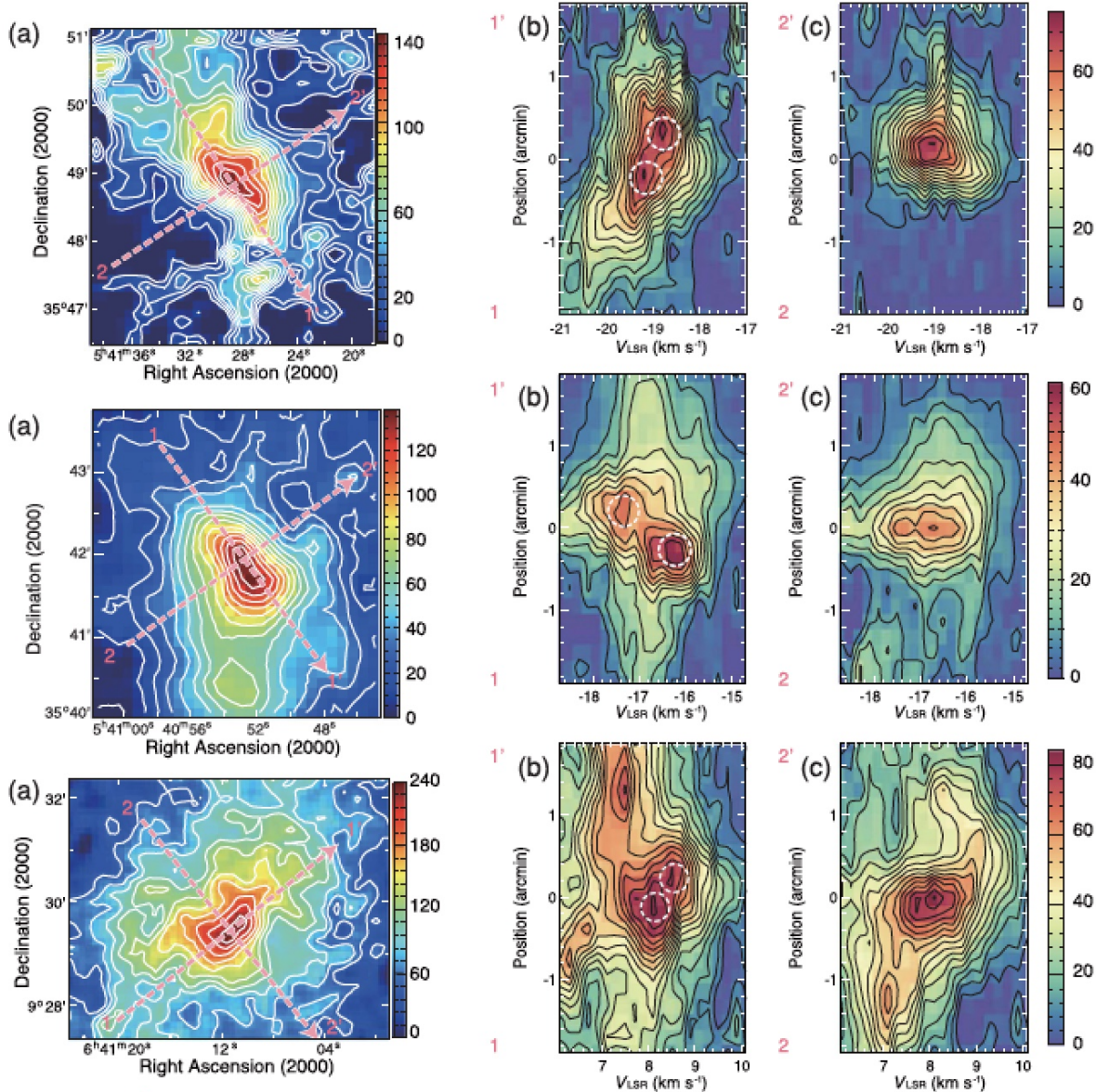


- クランプへの質量降着率
 $r \sim 100,000 \text{ au}$ (クランプのサイズ程度) で $1.2 \times 10^{-3} M_{\odot} / \text{yr}$
- インフォール速度と回転速度が変化する
中心からの距離
 $r \sim 6400 \text{ au} \rightarrow$ この半径内の質量 $\sim 4 M_{\odot}$ 。
このクランプの中心に付随するコアの質量 (Felli et al. 2004) と同程度
- クランプの中心に最も重たい星 ($11 M_{\odot}$) の存在 (Dewangan & Anandarao 2011)

回転+インフォールモデルで
観測結果が再現できた！

クランプ中心に向かって重力収縮している現場：星団形成の初期の段階？

星団形成クランプの「回転+インフォール」運動を提案



* 観測した7個のType 2クランプのうち3個には、「2つ目玉」が見える。

→どのクランプにも、中心に massive coreとYSOが付随する。

* その他の4個にも、回転を示唆する急な速度勾配がみられる。

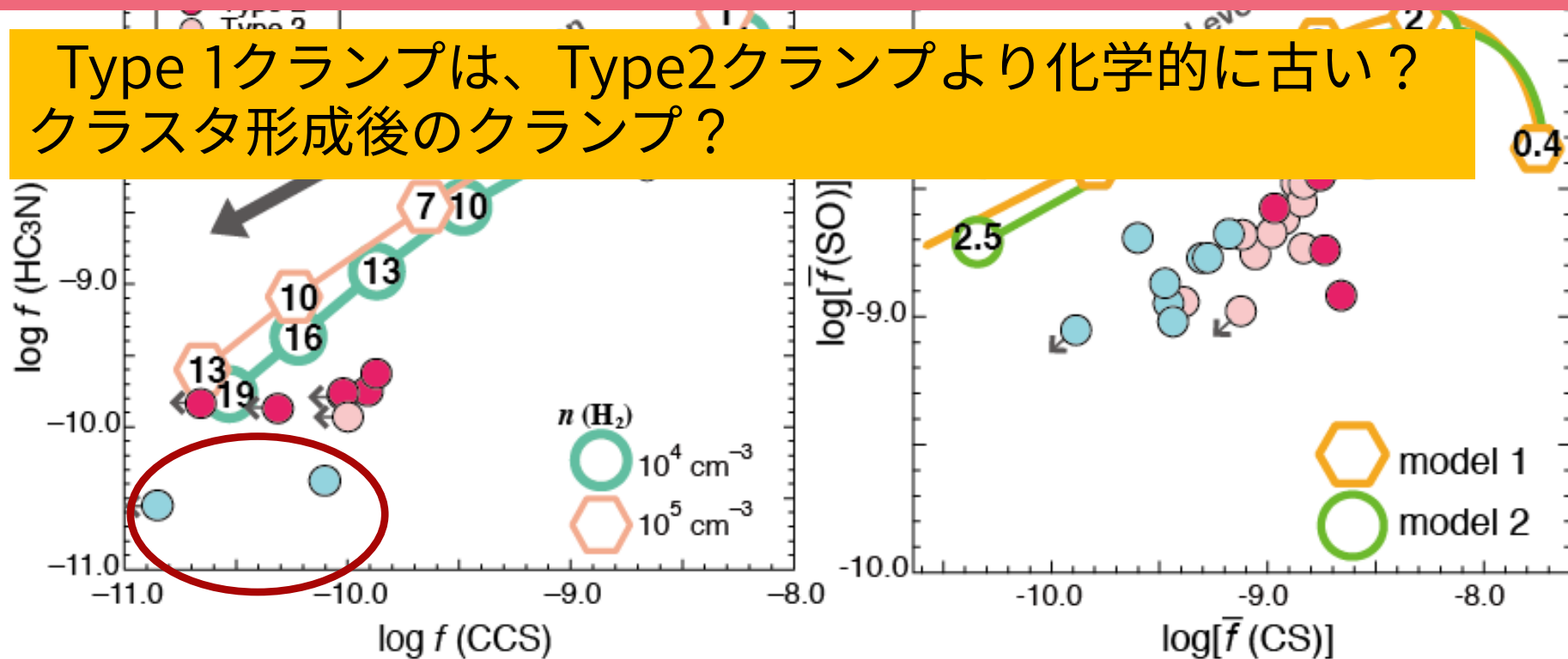
* 最近、45mでType2探しを行った結果→15個中6個で回転インフォールを示唆するPV図

クランプの回転+インフォール運動は、星団形成の初期（Type2クランプ）に広く見られる一般的な現象である、と考えられる。

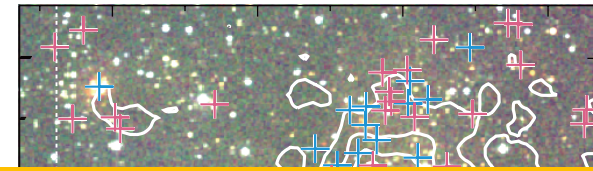
クランプの化学的な進化段階を推定

- タイプ別で分布に差がある。
- Type2クランプが化学的に最も若い
- $T > 100\text{K}$ のモデル計算でも、CCS等は 10^5yr をピークに減っていく(e.g., Chapman et al. 2009)ので、Type1-3クランプが同じスタートで進化したのであれば温度が高い($T_{\text{ex}} > 50\text{K}$)Type2クランプほど進化が早く進むはず→結果はそうではない。

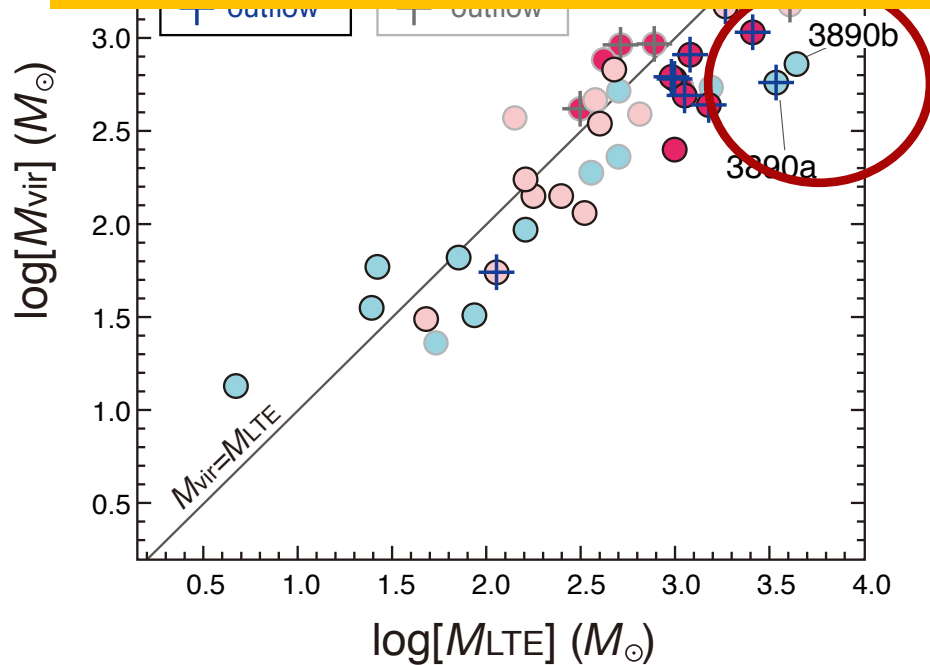
Type 1クランプは、Type2クランプより化学的に古い？
クラスター形成後のクランプ？



Massive Type1 クランプの謎



Type2クランプより若い、星団形成前のType1クランプは今回のサンプルにはなかった
 10^5cm^{-3} のクランプのfree-fall time $\sim 10^5 \text{yr}$
Type2クランプに付随の星団の年齢 $\sim 10^6 \text{yr}$
→ Type2前のType1は進化が早いため観測が困難



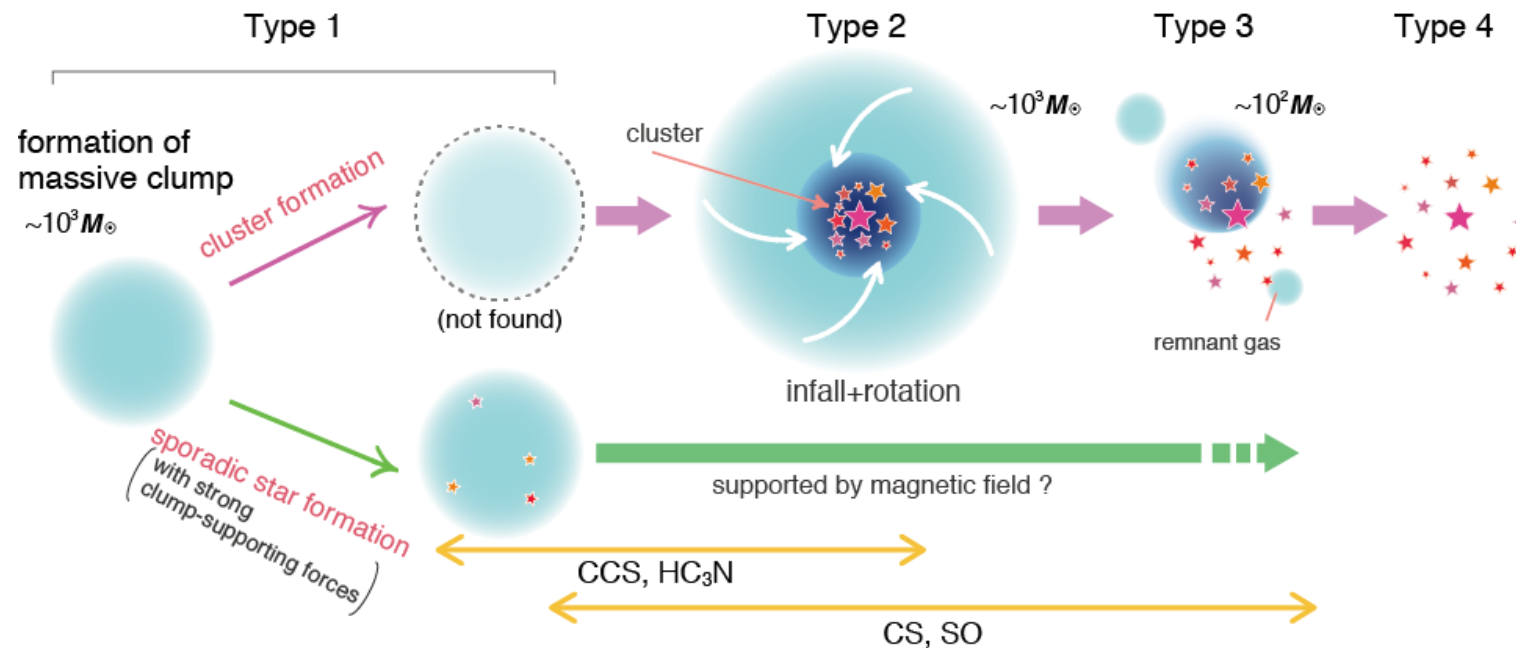
+ class I + class II

- 質量 $\sim 4000 M_{\odot}$, 密度 $\sim 10^5 \text{cm}^{-3}$, 物理量は Type2 と同程度 → 十分な材料
- PV図でダブルピークの特徴はない。
- 散発的な星形成は起きているが、大規模な星団形成は起きていない。

$$M_{\text{vir}} < M_{\text{LTE}}$$

→ 強い磁場 ($\sim 1 \text{mG}$ 程度、Crutcher et al. 2010) に支えられている可能性、
磁場がぬければビリアル平衡により近くなり Type2 へ進化?

星団形成のシナリオの提唱



- 24のクラumpと23の星団を同定し、力学的+化学的な観点から星団形成の進化を追った。
- Type2クラump7つのうち3つで回転+インフォール現象を確認。星団形成の初期に起こると考えられる。
- Type1→Type2 → Type3 → Type4で進化すると考えられる。
- 最も若いTyp1クラumpは今回のサンプルには無かった。

南極望遠鏡観測で星団形成のシナリオを 確立！

- 現在進行中
 - 磁場の効果を取り入れたシミュレーション結果(Wu et al. 2018, in prep.)と比較中
 - 大質量のType1 クランプ探し
- 南極望遠鏡での観測
 - Type1, Type2, Type3の統計的調査(Dobashi 2011のコアカタログ)
 - Type1の磁場強度の測定