

2018年11月3日

分子雲コアの進化における 外部圧力の重要性

新潟大学宇宙物理学研究室 M1 渡辺大輝

1 参考文献

- Ikeda et al Apj,665,1194(2007)
- Maruta et al Apj,714 680(2010)
- Williams et al Apj,428,693(1994)

2 目的

- へびつかい座 ρ 分子雲について、野辺山の45m電波望遠鏡で観測した $\text{H}^{13}\text{CO}^+(J=1-0)$ のデータからコアを同定。
- 同定したコアに対しビリアル解析を適用することで、分子雲コアの形成と進化において外部からの圧力が重要な役割を果たすことを示す。

3 イン트로ダクション

- 星間空間には希薄な星間物質が存在。
 - 高密度領域 ($10^2 \sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$): 主成分の水素が分子になっている星間分子雲。
 - さらに高密度領域 (10^4 cm^{-3} 以上): 分子雲コア。収縮し星が形成されると考えられている。
- 銀河系の星形成の多くはクラスター(集団)でなされている。以前の研究では比較的孤立した星形成に焦点があてられ、クラスター環境での星形成はあまり理解されていない。

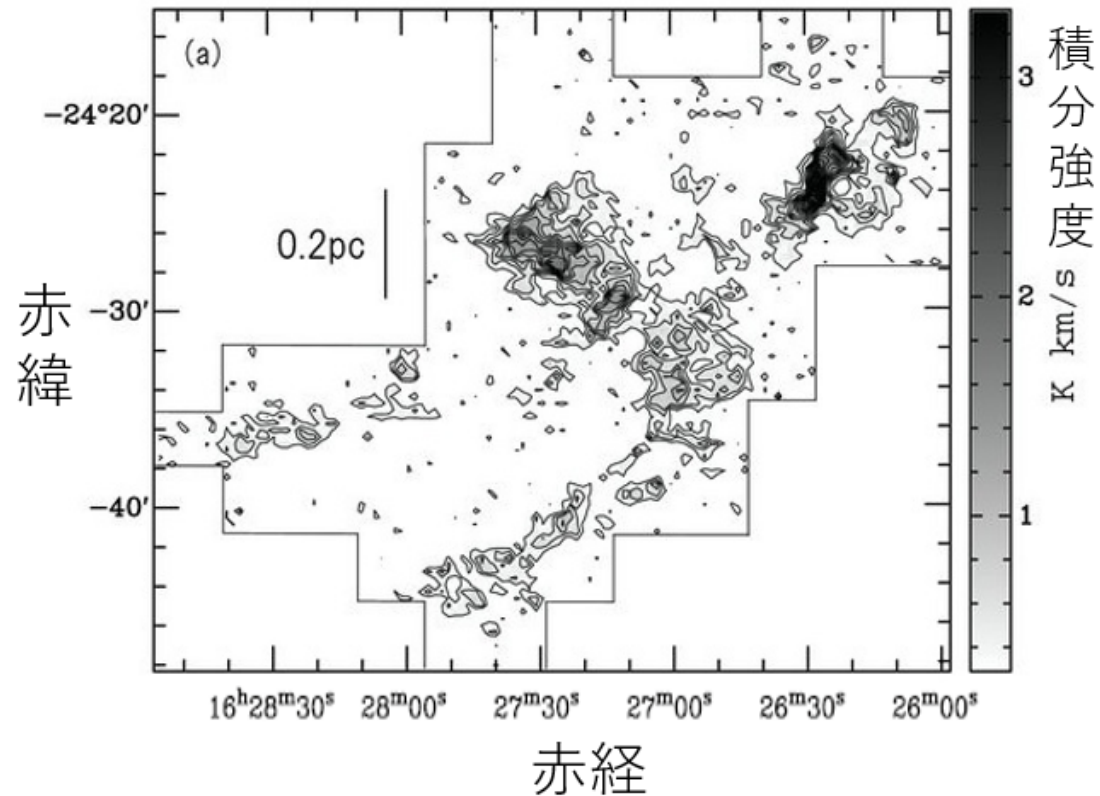
- へびつかい座 ρ 分子雲
太陽系近傍にある暗黒星雲で集団的星形成領域。その近さと若い星の多さ、現在でも星形成が活発に行われていることなどからとてもよい研究対象である。
- 分子雲コアは高密度であるため、高密度トレーサーである $\text{H}^{13}\text{CO}^+(J=1-0)$ が観測に適している。

4 使用データ

- 国立天文台野辺山アーカイブデータ
- 観測対象:へびつかい座 ρ 分子雲 (ρ Oph)、
距離:125pc
- 観測期間:2002年3月～2003年5月
- 観測輝線: $\text{H}^{13}\text{CO}^+ (J=1-0)$
- 観測機器:国立天文台野辺山45m電波望遠鏡

{ 空間分解能:21'' (0.013pc)
{ 速度分解能:0.13km s⁻¹

5 $\text{H}^{13}\text{CO}^+(J=1-0)$ の積分強度マップ



色が濃くなっているところほどガスが密集している。

6 分子雲コアの同定

- 輝線データに Williams et al(1994) の clumpfind アルゴリズムを適用。
- Williams et al(1994) の閾値とステップサイズを採用。
- 精度を良くするためにいくつかの条件を課した。
→ 68 個のコアを同定。

clumpfind アルゴリズムのイメージ図



強度のピークをコアとみなし強度レベルを下げていく。
別のコアと混ざった場合はコア同士の間で分割する。
強度の最低レベルまで繰り返す。
以上のことを機械的に行う。

7 同定したコアの物理量

- コアの半径: R_{core}
- コア内部の速度分散: dv_{core}
- 局所熱平衡状態 (LTE) でのコアの質量: M_{LTE}
- ビリアル質量: M_{vir}
- コアの平均数密度: \bar{n}

Table 2
Summary of the Physical Properties of the H^{13}CO^+ Cores

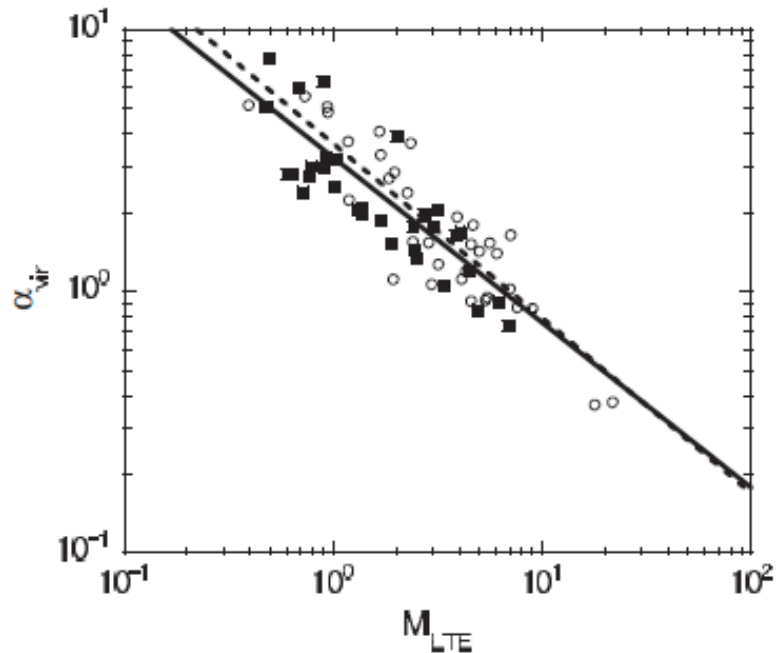
Property	Minimum	Maximum	Mean ^a	Median
R_{core} (pc)	0.0221	0.0692	0.0450 ± 0.0113	0.0451
dv_{core} (km s^{-1})	0.186	0.765	0.488 ± 0.142	0.474
M_{LTE} (M_{\odot})	0.39	21.79	3.35 ± 3.57	2.42
$M_{\text{vir}}/M_{\text{LTE}}$	0.368	7.76	2.37 ± 1.57	1.89
\bar{n} (cm^{-3})	3.70×10^4	5.77×10^5	$(1.35 \pm 0.96) \times 10^5$	1.35×10^5
Aspect ratio	1.01	2.33	1.34 ± 0.33	1.22

Note. ^a With standard deviation.

8 ビリアル比 (α_{vir})

- ビリアル比 (ビリアル質量とLTE質量の比):
重力エネルギーに対する内部運動エネルギーの
2倍に等しい $\alpha_{\text{vir}} \equiv M_{\text{vir}}/M_{\text{LTE}}$ として定義。
- $\alpha_{\text{vir}} < 2$ ($T < |W|$) となるコア
→ 自己重力が効いているコア
今回のデータでは約60%、38個のコアが該当。
コアの大部分で自己重力が効いていると考えら
れる。

$\alpha_{\text{vir}} - M_{\text{LTE}}$ グラフ



○:原始星を含むコア

■:原始星を含まないコア

実線:best-fit power law

破線:周囲の圧力で閉じ

込められた自己重力コア

(Bertoldi & McKee 1992)

ずれはとても小さい

↓

同定したコアの力学的状態
は自己重力と周囲からの圧
力の両方が重要な役割を果
たしている。

9 ビリアル解析

ビリアル解析は高密度コアの力学的状態を調べるのに有用。

今回同定した68個のコアに対してビリアル解析を行う。

簡単のためにコアは一様な球だと近似。

一様球のビリアル方程式は

$$\frac{1}{2} \frac{\partial^2 I}{\partial t^2} = U + W + S. \quad (1)$$

$\frac{1}{2} \frac{\partial^2 I}{\partial t^2} > 0 \Rightarrow$ コアは膨張、 $\frac{1}{2} \frac{\partial^2 I}{\partial t^2} < 0 \Rightarrow$ コアは収縮。

ここで、 I は慣性モーメント、 U は内部運動エネルギー、 W は磁場の効果を含む重力エネルギー、 S は表面圧力項。それぞれ

$$U = \frac{3M dv_{\text{tot}}^2}{8\ln 2}, \quad (2)$$

$$W = -\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R_{\text{core}}} \left[1 - \left(\frac{\Phi}{\Phi_{\text{cr}}} \right)^2 \right], \quad (3)$$

$$S = -4\pi R^3 P_{\text{ex}}. \quad (4)$$

Φ と P_{ex} 以外の項は観測データから得られる。

内部運動エネルギー $U = \frac{3M dv_{\text{tot}}^2}{8 \ln 2}$ について

- M : コアの質量。今回はコアのLTE質量 M_{LTE} を採用。
- dv_{tot}^2 は

$$dv_{\text{tot}} = \left[dv_{\text{core}}^2 + 8 \ln 2 \left\{ k_{\text{B}} T \left(\frac{1}{\mu m_{\text{H}}} - \frac{1}{m_{\text{obs}}} \right) \right\} \right]^{1/2}$$

平均分子量 $\mu = 2.33$ 、 m_{H} : 水素原子の質量、
 m_{obs} : H^{13}CO^+ の質量。

磁場の効果を含む重力エネルギー

$$W = -\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R_{\text{core}}} \left[1 - \left(\frac{\Phi}{\Phi_{\text{cr}}} \right)^2 \right] \text{ について}$$

- M :同様に M_{LTE} を採用。
- R_{core} :同定したコアの半径。
- Φ :コアを貫く磁束。
- Φ_{cr} :臨界磁束 (磁場と自己重力がつりあうときの磁束)。

$\frac{\Phi}{\Phi_{\text{cr}}}$ の項について

- Crutcher(1999) が Crutcher et al. (1993) の観測からへびつかい座 ρ 分子雲の低密度領域の $\frac{\Phi}{\Phi_{\text{cr}}}$ が $\frac{\Phi}{\Phi_{\text{cr}}} \simeq 0.4$ と推定。

この値を同定したコアの代表値として採用すると磁場の効果が小さくなる可能性あり。

→最近のシミュレーションから初期値は十分小さいことが示されている。

- 観測から個々のコアの $\frac{\Phi}{\Phi_{\text{cr}}}$ の値を評価することは非常に困難。

簡単のためにここでは $\frac{\Phi}{\Phi_{\text{cr}}} = 0$ と仮定。

表面圧力項 $S = -4\pi R^3 P_{\text{ex}}$ について

- P_{ex} : 表面圧力。データから個々のコアにかかる表面圧力を直接推定するのは困難。

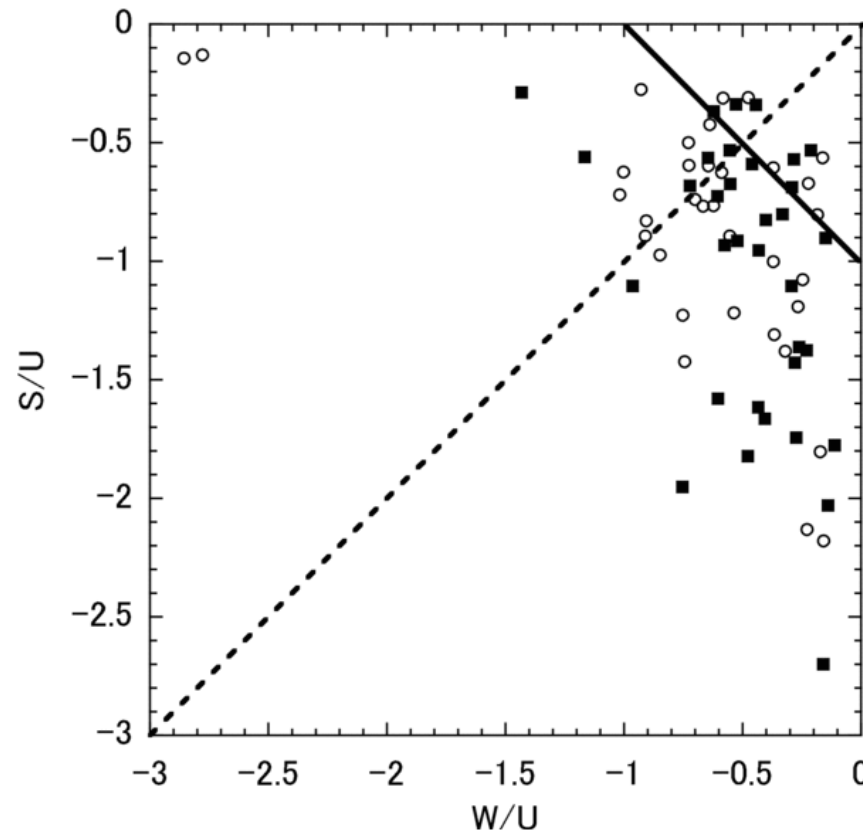
→導出する代わりに ρOph の subclump で測定された平均密度 $\langle\rho\rangle$ と平均速度分散 $\langle\sigma\rangle$ から決まる表面圧力

$$\langle P_{\text{ex}} \rangle \approx \langle \rho \rangle \langle \sigma \rangle^2 \quad (5)$$

$$\rightarrow \langle P_{\text{ex}} \rangle / k_{\text{B}} \approx 3 \times 10^6 \text{ K cm}^{-3}. \quad (6)$$

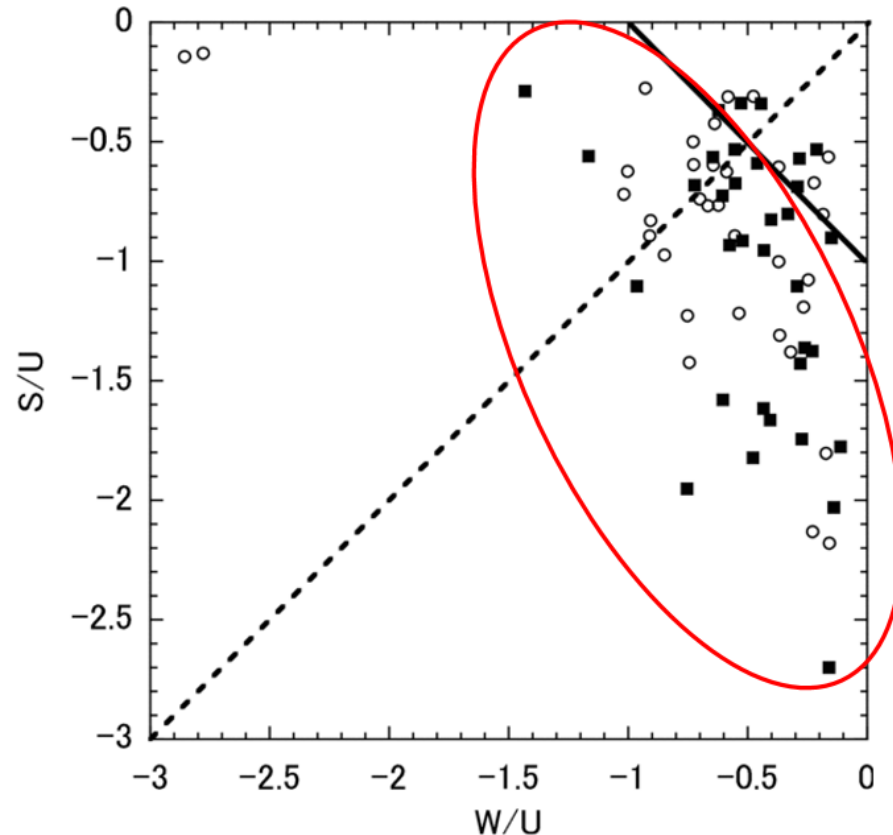
を採用。

重力エネルギー項 W と表面圧力項 S を内部運動エネルギー項 U で規格化したグラフ



- ・ 実線: ビリアル平衡
状態 $1 + \frac{W}{U} + \frac{S}{U} = 0$
を表す。
- ・ 破線: $W = S$ の状態
を表す。
- : 原始星を含むコア
- : 原始星を含まないコア

実線より下にあるコア



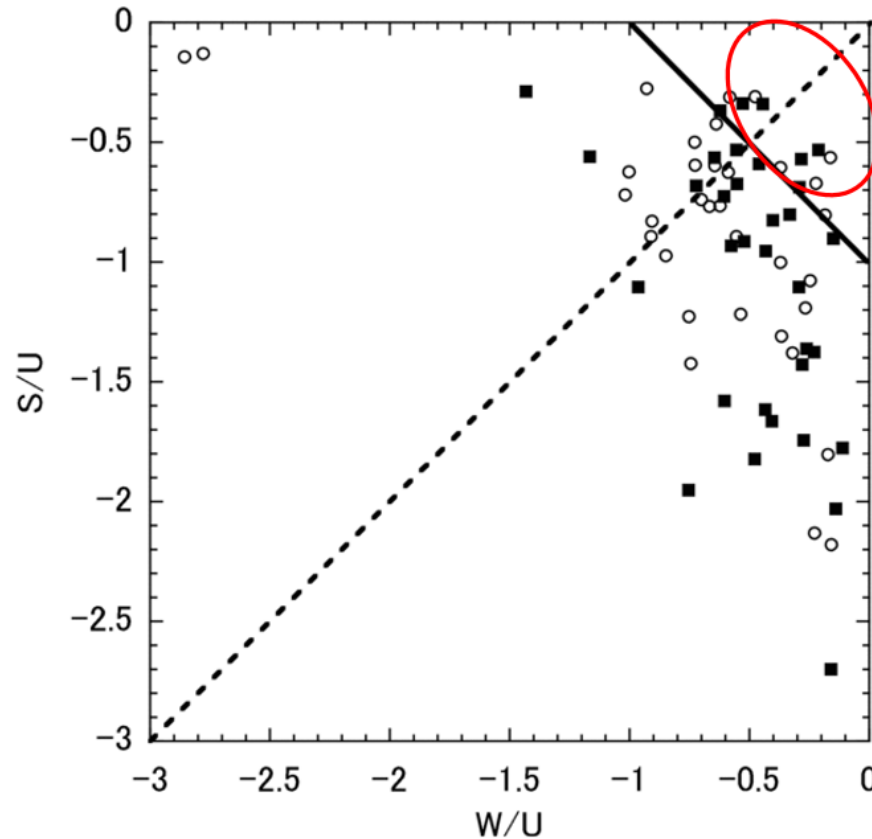
大部分のコアが
実線より下にある。

$1 + \frac{W}{U} + \frac{S}{U} < 0$
→ コアが束縛された
状態

↓

大部分のコアが収縮し
星を形成する可能性が
ある。

実線より上にあるコア



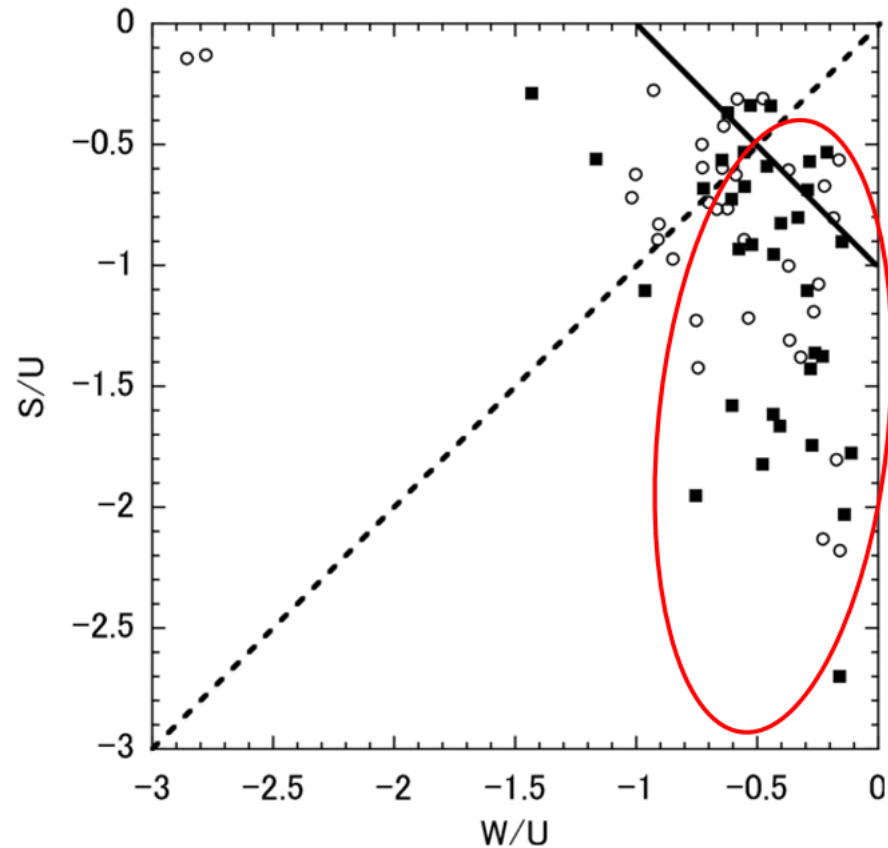
いくつかのコアが
実線より上にある。

$1 + \frac{W}{U} + \frac{S}{U} > 0$
→ コアが束縛されて
いない状態

↓

結合されずに膨張し
分散すると考え
られる。

破線より下にあるコア



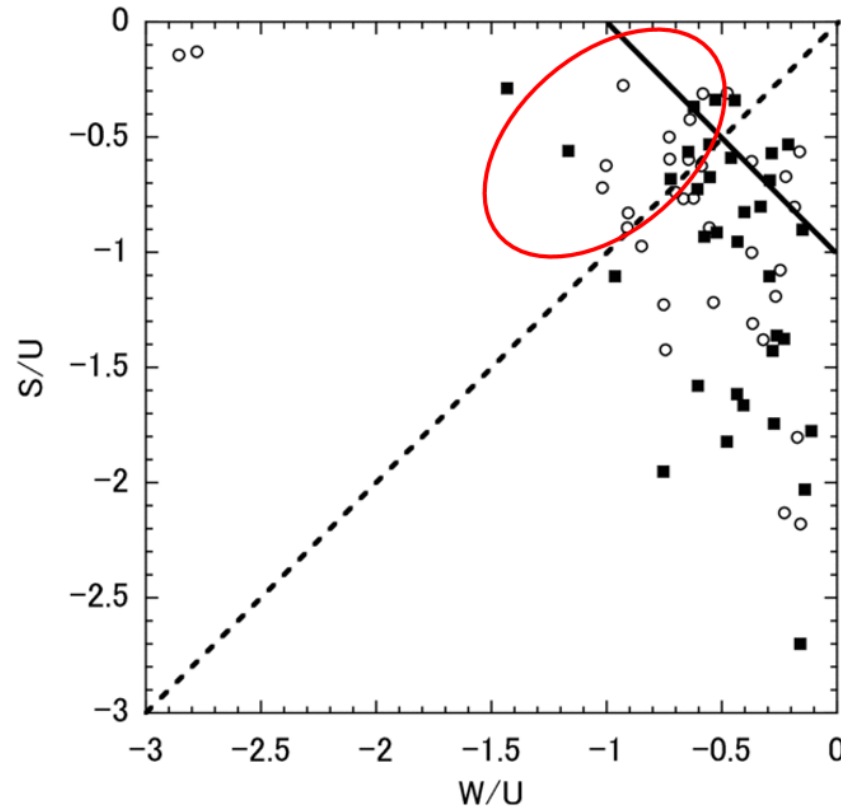
多くのコアが
破線より下にある。

$$|W| < |S|$$

↓

表面項 S が重力項 W
よりも重要である
ことを表している。

破線より上にあるコア



いくつかのコアが
破線より上にある。

$$|W| > |S|$$

その多くは破線からの
ずれは小さい



ほぼすべてのコアで
表面項は力学的に重要

10 まとめ

- へびつかい座 ρ 分子雲に対して H^{13}CO^+ の観測をもとに clump find アルゴリズムを適用することにより 68 個のコアを同定した。
- 同定したコアに対してビリアル解析を適用することで大部分のコアが束縛され収縮し星が形成されるだろうということが分かった。
- 多くのコアが重力項よりも表面項の方が重要でクラスター環境におけるコアの形成と進化に大きく影響していると考えられる。