

へびつかい座 ρ 分子雲の構造解析

Maruta et al, Apj, **714** 680(2010)の論文レビュー

新潟大学自然科学研究科M1 神 貴志

導入

銀河系の多くの星は集団的に形成されている。

へびつかい座分子雲

⇒ 近傍にある暗黒星雲であり、小質量星 ($M \leq 1M_{\odot}$) が集団的に形成されている。

特にへびつかい座ρ分子雲は非常に活発な星形成領域



非常に良い研究対象

集団的星形成を理解していくうえで、この環境下でのコアの性質を調べる必要がある



分子雲コアの力学的状態の評価を行い、集団的星形成の環境下でのコアの性質について議論を行う。

解析に使用したデータ

◎データ

国立天文台野辺山アーカイブデータ

◎観測期間

2002年3月～2003年5月

◎観測対象

へびつかい座 ρ 分子雲 (ρ Oph)

距離: 125pc

◎観測領域

1.5pc \times 1.3pc

◎観測輝線

$\text{H}^{13}\text{CO}^+ (J = 1 - 0)$

◎観測機器

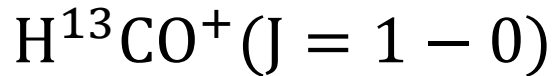
野辺山45m電波望遠鏡

メインビーム効率: 0.51

空間分解能: $21''$ (0.013pc)

速度分解能: 0.13km s^{-1}

◎対象輝線について



コアは高密度であるため高密度トレーサーである

$\text{H}^{13}\text{CO}^+ (J = 1 - 0)$ が観測に最適

- 86.75433GHz
- 光学的に薄い。(水素に対して H^{13}CO^+ の存在量が少ない。)
 - ⇒ 散乱・自己吸収の効果は無視
 - ⇒ 自発放射係数と衝突係数から臨界密度を推定可能

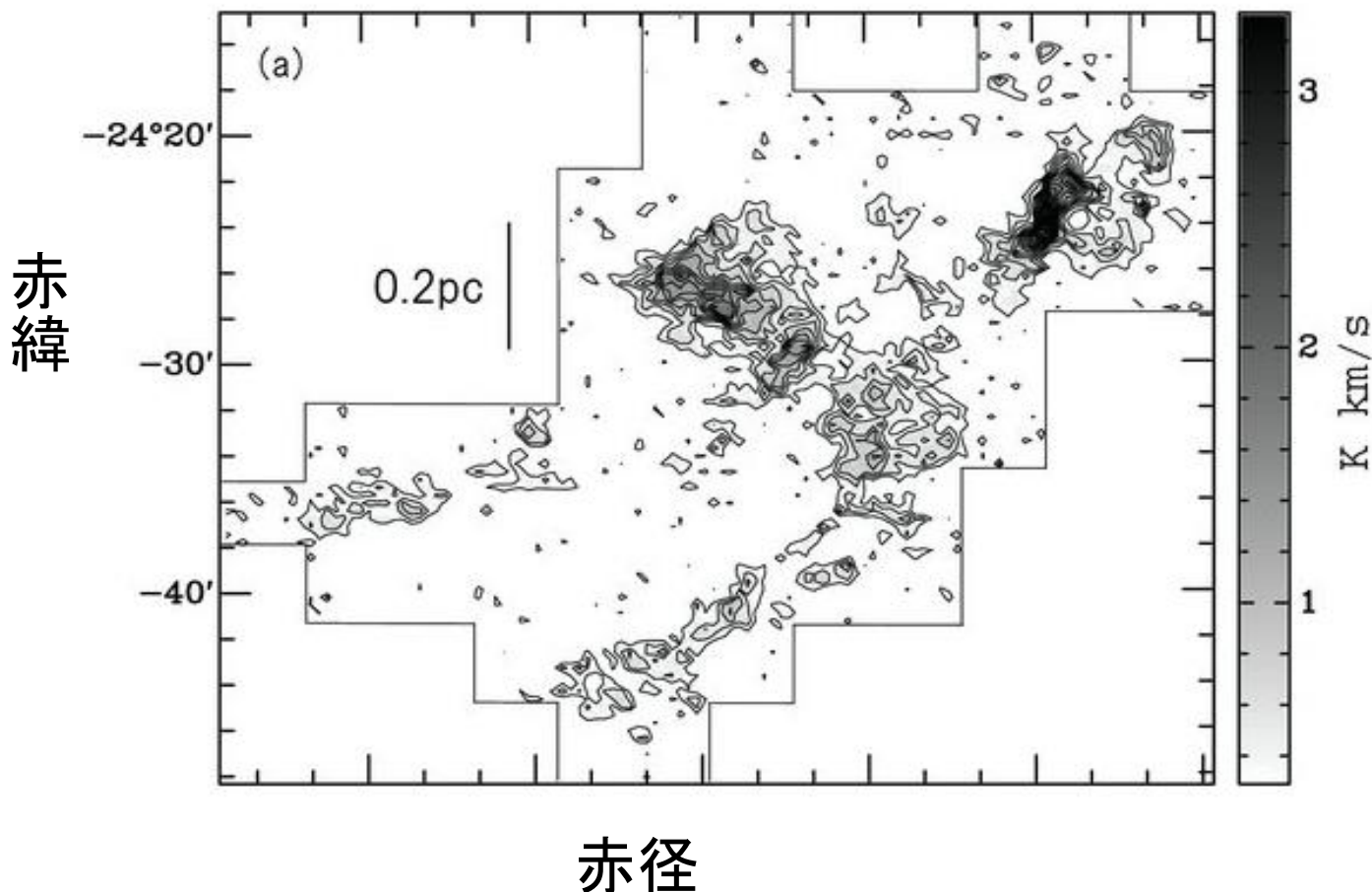
臨界密度: $\sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$ (主にトレースできる n_{H_2})

暗黒星雲の典型的な密度

分子雲: $10^2 \sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$

分子雲コア: 10^4 cm^{-3} 以上

$\text{H}^{13}\text{CO}^+ (J = 1 - 0)$ の全積分強度図

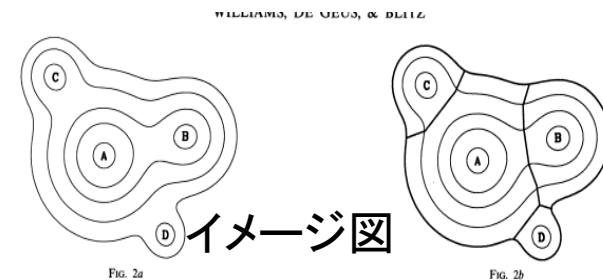


図は視線速度 $1\text{--}6\text{ km s}^{-1}$ の範囲を積分 単位は K km s^{-1}
強度が強いところほどガスが密集

コアの同定方法

- 輝線データにclump find algorismを適応。
⇒機械的にコアを同定
- 1. コントラ間隔と下限を設定。
⇒ William et al(1994)の値を採用。
- 2. 以下のコアは切り捨て(コアの誤同定が少ない)
 - 連続速度チャンネルに二つ以上含まれない。3ピクセル以上を占めていない。
 - 空間と速度分解能以下のコア候補。
 - 観測領域の端

- 3. コアの分割も機械的に行う。
⇒ピクセルがどちらのコアに入ってくるかが重要



以上の手続きから68個のコアを同定

コアの主な物理量について

- コアの半径 : R_{core}
2 σ レベルで囲まれた領域を計算
- コアの内部速度分散 : dv_{core}
- 局所熱平衡状態でのコアの質量 : M_{LTE}
光学的に薄いことからの H^{13}CO^+ ($J = 1$) 存在量の情報をダイレクトに得られる。
(自己吸収・散乱されないため)



熱平衡状態での H^{13}CO^+ ($J = 1 - 0$) の水素に対する存在量を用いて M_{LTE} を導出

同定したコアの物理量

同定した68個のコアの平均物理量

- 平均半径: $R_{\text{core}} = 0.045 \pm 0.011 \text{ pc}$
- 平均速度分散: $dv_{\text{core}} = 0.49 \pm 0.14 \text{ km s}^{-1}$
- 平均LTE質量: $M_{\text{LTE}} = 3.4 \pm 3.6 M_{\odot}$

ビリアル質量(M_{vir})

ビリアル質量は

$2U + \Omega = 0$ を仮定したときの質量。

(U : 内部の運動エネルギー、 Ω : 重力エネルギー)

$$M_{\text{vir}} = 209a^{-1} \left(\frac{R_{\text{core}}}{\text{pc}} \right) \left(\frac{dv_{\text{tot}}}{\text{km s}^{-1}} \right)^2 M_{\odot}$$

a : 1程度の定数

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

平均ガスの
速度分散

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

※ T の評価について 多少高温領域: $T=18\text{K}$

残りの領域: $T=12\text{K}$

ビリアル比(α_{vir})

- $\alpha_{\text{vir}} \equiv M_{\text{vir}}/M_{\text{LTE}}$

$\alpha_{\text{vir}} < 2$ の値を持つコア ($T < |W|$)

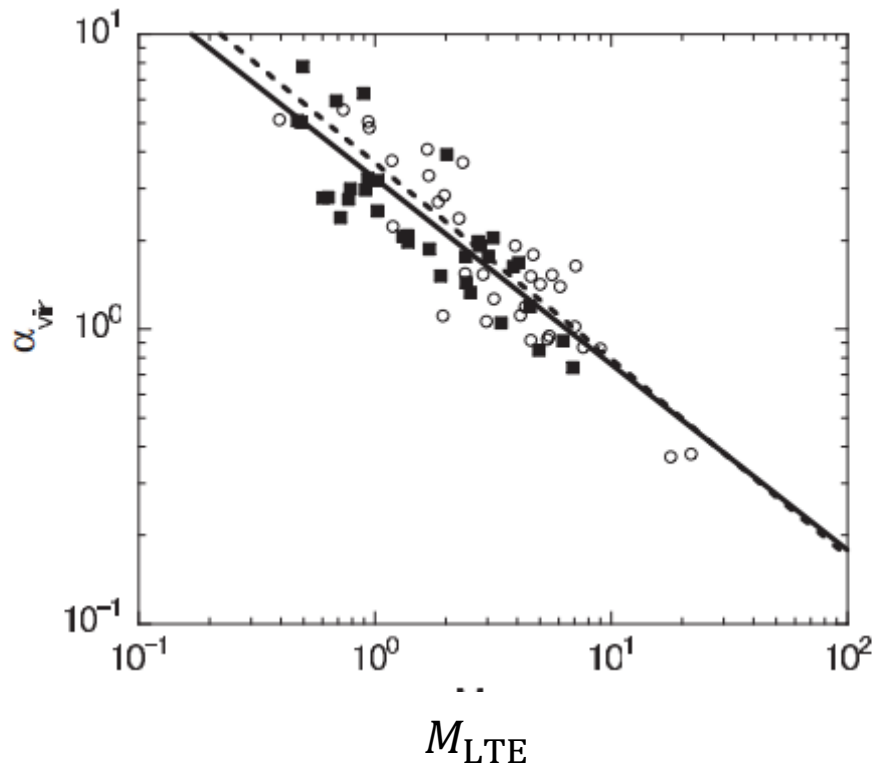


自己重力が効いているコア

同定したコアの約60%を占めている

これらのコアは一時的な構造ではなく、
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



実線: best fit power law
破線: 圧力に閉じ込められた
自己重力コアのpower law
(Bertoldi, F. & McKee, C. F., 1992)



実線と破線はほぼ一致。

※○は原始星が付随しているコア ■は原始星が付随していないコア

同定したコアの力学的状態は自己重力とコアの周りからの圧力が重要な役割を果たしている。

ビリアル解析

ビリアル解析⇒対象の力学的状態を評価

コアが膨張or収縮？

どの力が優勢なのか？



同定した68個のコアにビリアル解析を行う

※簡単のためコアは一様球と近似

・一様球でのビリアル方程式

$$\frac{1}{2} \frac{d^2 I}{dt^2} = U + W + S + B$$

I : 慣性モーメント、 U : 内部の運動エネルギー、 W : 重力エネルギー、
 S : 表面圧力項、 B : 磁場エネルギー

$$\frac{1}{2} \frac{d^2 I}{dt^2} > 0 \quad \Rightarrow \quad \text{コアは膨張}$$

$$\frac{1}{2} \frac{d^2 I}{dt^2} < 0 \quad \Rightarrow \quad \text{コアは収縮}$$

・一様球でのビリアル方程式

$$\frac{1}{2} \frac{d^2 I}{dt^2} = U + W + S + B$$

・ビリアル方程式の右辺は物理量を用いて以下のように表される。

内部エネルギー: $U = \frac{3Mdv_{\text{tot}}^2}{8\ln 2}$

重力エネルギー: $W = -\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R_{\text{core}}}$

磁場エネルギー: $B = \frac{3}{5} \frac{GM^2}{R_{\text{core}}} \left(\frac{\Phi}{\Phi_{\text{cr}}} \right)^2$

表面圧力項: $S = -4\pi R^3 P_{\text{ex}}$

次にそれぞれの項の評価を行う

内部の運動エネルギーの評価

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

(I) M はコアの質量 $\Rightarrow M_{\text{LTE}}$ を採用。

(II) dv_{tot}^2 は平均ガスの速度分散

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

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

※ T の評価について 多少高温領域: $T=18\text{K}$

残りの領域: $T=12\text{K}$

重力エネルギーの評価

$$W = -\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R_{\text{core}}}$$

(I) M は先ほどと同様に M_{LTE} を採用。

(II) R_{core} は同定したコアの半径

磁場エネルギーの評価

$$B = \frac{3}{5} \frac{GM^2}{R_{\text{core}}} \left(\frac{\Phi}{\Phi_{\text{cr}}} \right)^2$$

(Ⅰ) M は先ほどと同様に M_{LTE} を採用。

(Ⅱ) R_{core} は同定したコアの半径

(Ⅲ) Φ はコアを貫く磁束

Φ_{cr} は臨界磁束

(磁気力と重力がつり合うときの磁束)

- (Ⅲ)の続き

$\frac{\Phi}{\Phi_{\text{cr}}}$ の評価に関して

- Crutcher(1999)は観測からへびつかい座ρ分子雲の低密度領域の $\frac{\Phi}{\Phi_{\text{cr}}}$ の評価を行った。

$$\frac{\Phi}{\Phi_{\text{cr}}} \cong 0.4$$

この値を全てのコアに採用したとき重力エネルギーの16%のみ

- 観測から個々のコアの $\frac{\Phi}{\Phi_{\text{cr}}}$ を評価は非常に困難。
⇒ 高密度なコアの磁束は分からない。

ここでは簡単のために $\frac{\Phi}{\Phi_{\text{cr}}} = 0$ と仮定して評価を行う。

表面圧力項の評価

$$S = -4\pi R^3 P_{\text{ex}}$$

P_{ex} (表面圧力) の評価に関して



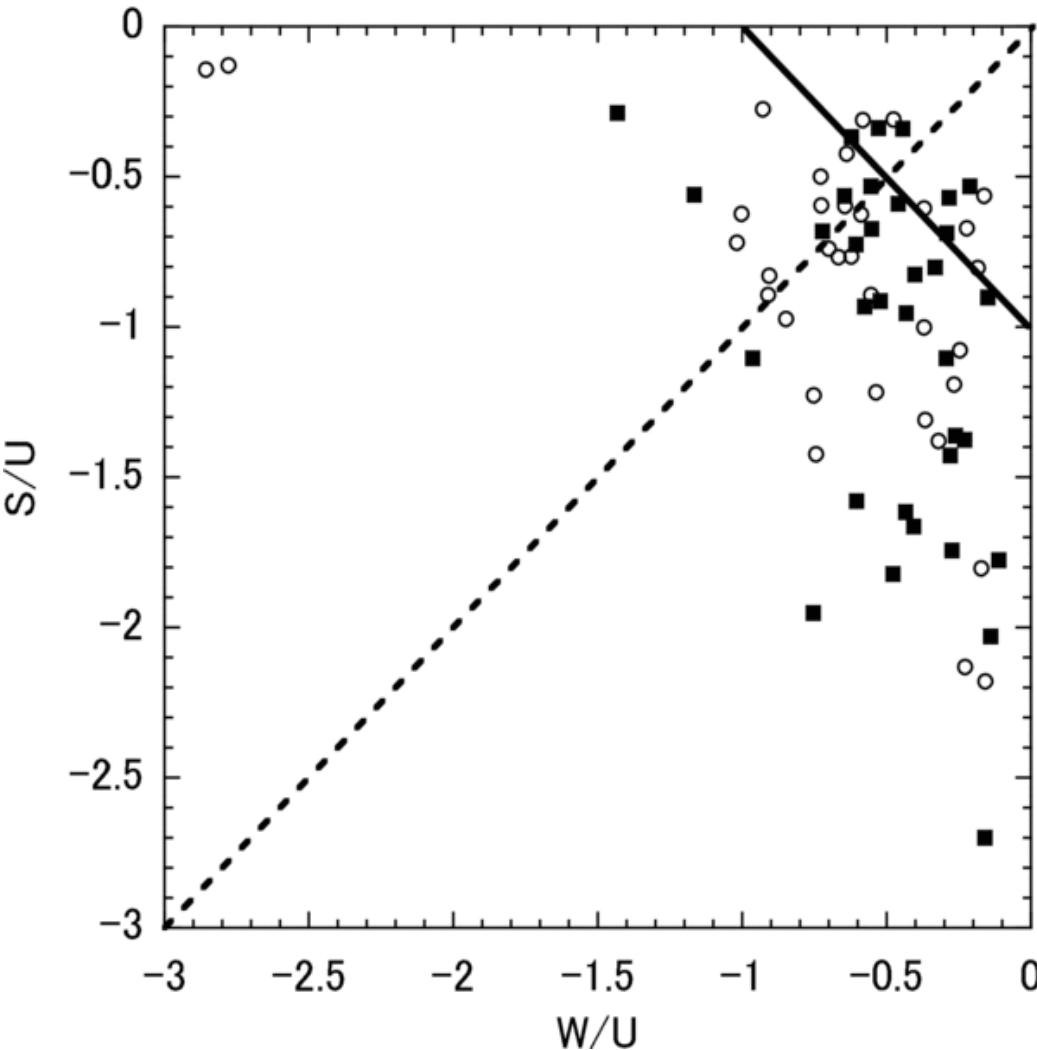
平均量で評価

へびつかい座 ρ 分子雲の subclump の平均密度と平均速度分散を使う。

$$\langle P_{\text{ex}} \rangle \approx \langle \rho \rangle \langle \sigma \rangle^2 \Rightarrow \langle P_{\text{ex}} \rangle / k_{\text{B}} \approx 3 \times 10^6 \text{ K cm}^{-3}$$

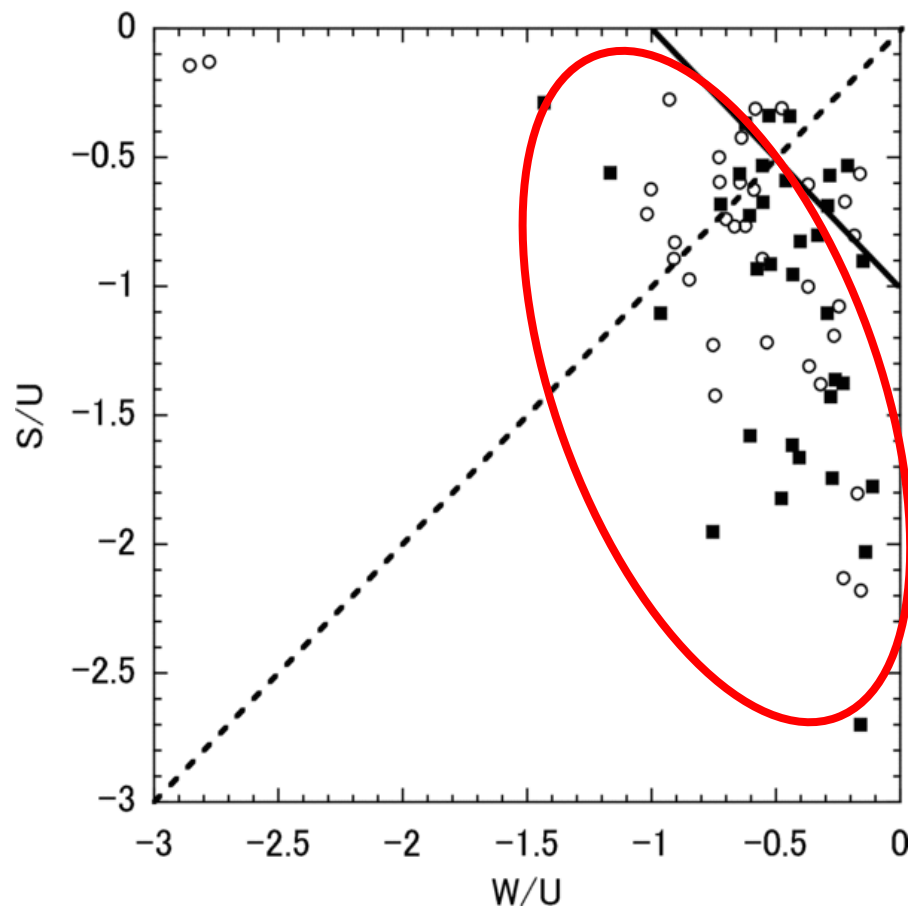
全てのコアに対してここから得られる値を採用。

重力項(W)と表面項(S)を内部の運動エネルギー(U)で規格化したグラフ



- 実線はビリアル平衡状態を表す。 $1 + \frac{W}{U} + \frac{S}{U} = 0$
- 破線は $W = S$ となる状態を表す。
- ○は原始星が付随しているコア
- ■は原始星が付随していないコア

実線より下に位置しているコア



$$1 + \frac{W}{U} + \frac{S}{U} < 0$$

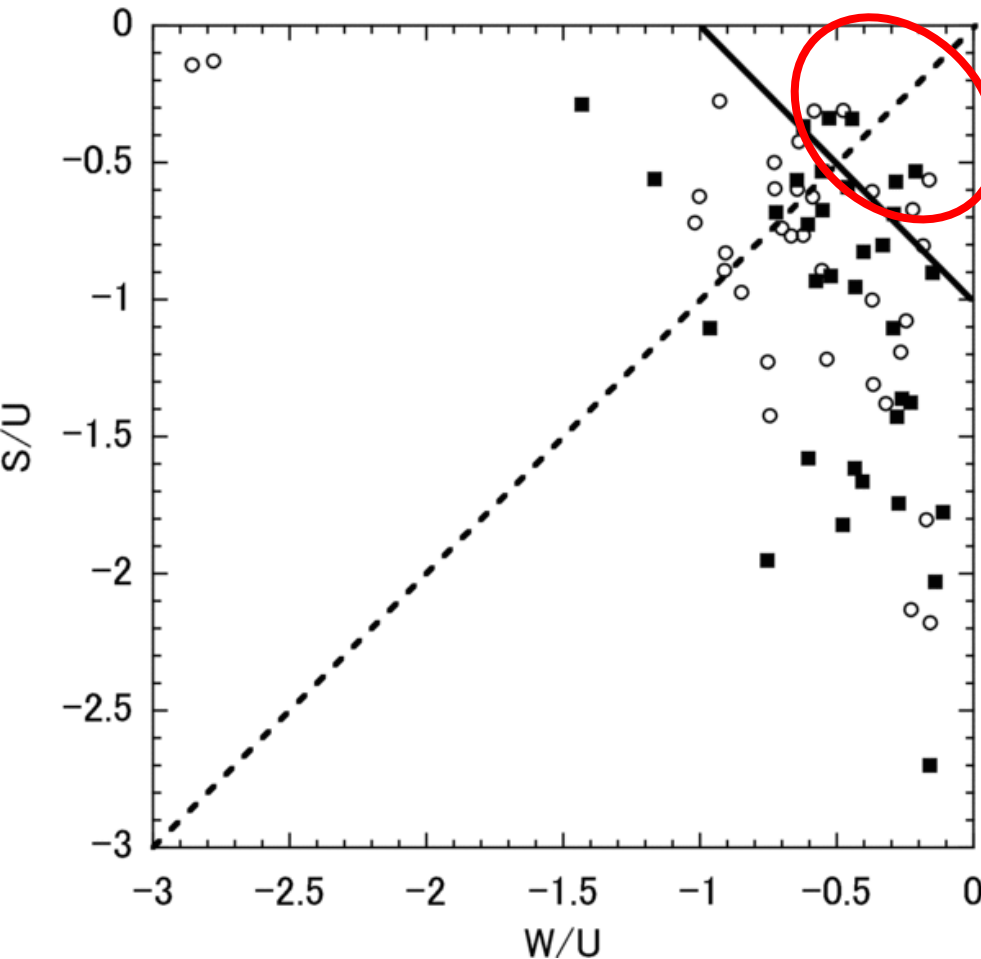


コアが束縛された状態

大部分のコアが占めている。

大部分のコアが収縮している。
星形成が行われていると考えられる。

実線より上に位置しているコア



$$1 + \frac{W}{U} + \frac{S}{U} > 0$$



コアは非束縛状態

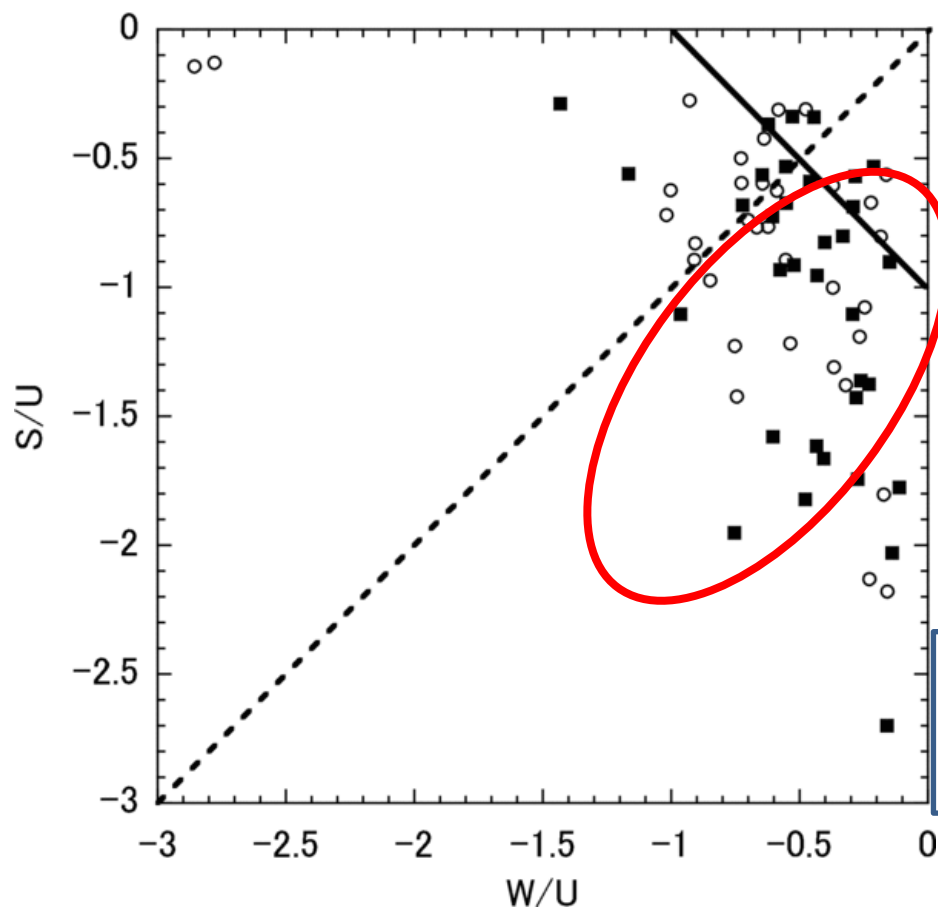
原始星が付随している理由として

⇒ 評価の精度がよくない

⇒ アウトフローにより

膨張していく可能性

・破線より下に位置しているコア ($|W| < |S|$)



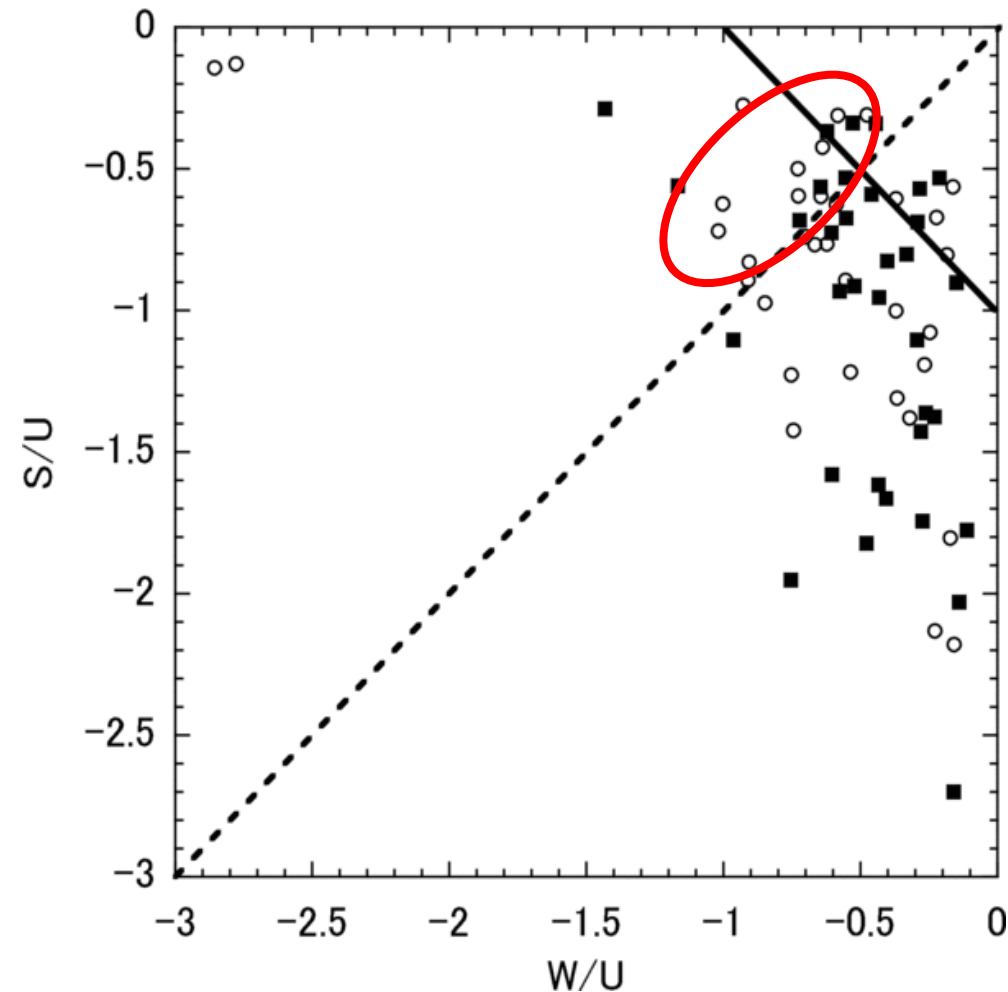
S (表面項)が W (重力エネルギー)より優勢



多くのコアが占めている。

多くのコアは外圧が重要な役割を果たしている。

破線より上に位置しているコア ($|W| > |S|$)



破線より上に位置している大部分のコアは破線からのズレが小さい。



表面項も力学的に重要。

まとめ

- ・アーカイブデータにclump find algorism を適用することで68個のコアを同定

- ・同定したコアにビリアル解析を用いることで大部分のコアが束縛されている

これらのコアは収縮して星が形成され则认为られる。

- ・多くのコアが重力項より外圧の項が重要であり、集团的星形成領域でのコアの形成と進化は外圧によって制御されていることが考えられる。

議論

- 外圧として考えられるソース



原始星によるアウトフロー

原始星によるアウトフローが周囲のコアを圧縮し集団的星形成引き起こすと考えられる。

参照論文

- Ikeda et al Apj,**665**,1194(2007)
- Maruta et al,Apj,**714** 680(2010)
- Bertoldi,F., & Mckee.C.F., Apj,**395**,140(1992)
- Nakano,T,Apj,**494**,587(1998)
- Williams,J.P.,de Geus,E.J., & Blitz,L,Apj,**428**,693(1994)
- 星間物質と星形成 日本評論社