

ボック・グロビュールの密度構造と力学的安定性

神鳥 亮¹、直井隆浩²、中島 康³、田村元秀³、立松健一³

他IRSF/SIRIUSチーム

1.総研大/ALMA準備室、2.東京大学、3.国立天文台

イントロダクション

1. 研究目的について
2. 本研究の概要

研究目的 (Motivation)

- ★ 分子雲コアの進化過程と星形成の初期条件の理解

観測対象

- ★ ボック・グロビュール (孤立分子雲コア)

近赤外線イメージング観測 : コアの密度構造

電波分子輝線マッピング観測 : コアの速度構造

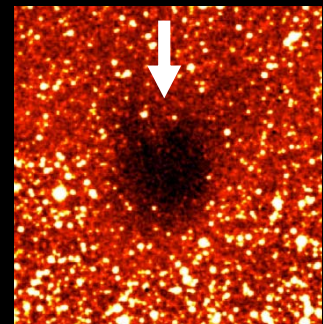


モデルとの比較



多数の分子雲コアの
物理的性質の決定

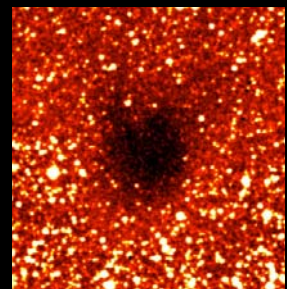
グロビュールの例
CB 184
(DSS-II)



3

グロビュールについて

- **グロビュールの特徴**
 - 孤立した分子雲コア
 - シンプルな形・内部構造
 - 光学写真上で減光で見える(太陽系近傍に位置)
 - 小質量星を形成しているグロビュールもある
- **これらの特徴は次のような研究に有利**
 - 分子雲コアの内部構造(密度・運動)のモデリング
 - 分子雲コアの進化 (初期状態～重力収縮～星形成)
 - 分子雲コアの化学進化、分子ガスのdepletion



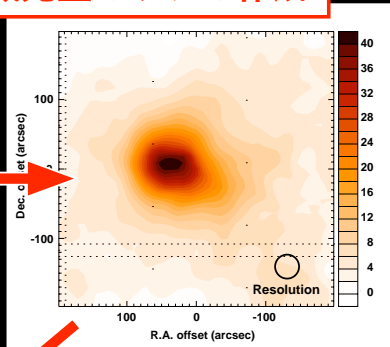
4

本研究の概要：解析の流れ

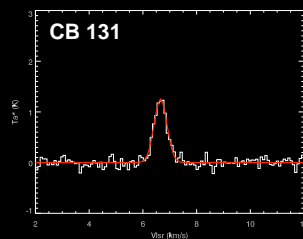
近赤外イメージング



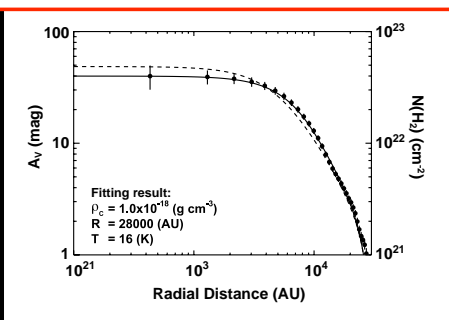
減光量マップの作成



ライン幅測定(電波)



柱密度プロファイル+モデルフィット



コアの実効的溫度
(乱流込み)を測定

コアの物理的性質の決定
(密度構造、サイズ、質量、溫度、
力学的安定性....)

観測

1. 観測諸元
2. 観測天体

観測(1) /観測諸元/

- **近赤外線イメージング**
 - 望遠鏡：IRSF 1.4m鏡 @南アフリカ天文台
 - 検出器：SIRIUS (JHKs同時撮像, 1kX1k, 視野~7.8')
 - 期間：約40夜 (July-Aug 2002, June-July 2003)
 - 天体数：グローバル90天体
- **電波分子分光+マッピング**
 - 望遠鏡：野辺山45m電波望遠鏡
 - 受信機：BEARS (25素子マルチビーム, 5X5), H22
 - 期間：160時間 (Mar-Apr 2003, Jan-Feb 2004)
 - ライン：C18O (1-0), N2H+ (1-0), NH3
 - 天体数：グローバル14天体



観測(2) /観測天体 10/90 sources/

Name	R.A. (J2000) ^a	Dec. (J2000) ^a	Distance (pc)	IRAS ^b	Other names	References ^c
CB 87	17 25 05	-24 07 19	160	No	Barnard 74, Lynds 81	1,2
CB 110	18 05 55	-18 25 10	180	No	Lynds 307	1,3,4
CB 131	19 17 00	-18 01 52	180	No	Barnard 93, Lynds 328	1,3,4
CB 134	18 22 45	-01 42 40	260	No		1,5,A
CB 161	18 53 56	-07 26 29	400	No	Barnard 118, Lynds 509	1,6
CB 184	19 31 52	+16 27 14	300	No ^d	Lynds 709	1,3,4
CB 188	19 20 16	+11 36 15	300	Yes ^e	Lynds 673-1	1,3,4
FeSt 1-457	17 35 45	-25 33 11	160	No		1,3,4,B
Lynds 495	18 38 58	-06 44 00	200	No		1,7,C
Lynds 498	18 40 11	-06 40 45	200	No		1,7,C

グローバルの選出条件:

- (1) 視直径が5'未満で、シンプルな形状を持つこと。
- (2) 太陽系近傍(D<500pc)にあること。
- (3) 銀河面の近くに位置すること。
- (4) 北天からも観測できること。

^aReferences/Remarks on the cloud distance: (1) Dutra, C. M. & Bica, E. 2002, A&A, 383, 631; (2) Huard, T. L., Sandell, G., & Weintraub, D. A. 1999, ApJ, 526, 833; (3) Launhardt, T., & Henning, T. 1997, A&A, 326, 329; (4) Dame, T. M., Ungerechts, H., Cohen, R. S., De Geuss, E. J., Grenier, I. A., May, J., Murphy, D. C., Nyman, L. -Å., & Thaddeus, P. 1987, ApJ, 322, 706; (5) Straizys, V., Cernis, K., & Bartasiute, S. 1996, Baltic Astronomy 5, 125; (6) Leung, C. M., Kutner, M. L., & Mead, K. N. 1982, ApJ, 262, 583; (7) Schneider, S., & Elmegreen, B. G. 1979, ApJS, 41, 87; (A) Assumed to have same distance as Serpens molecular cloud.; (B) Assumed to have same distance as Barnard 83.; (C) Assumed to have same distance as GF 5 dark cloud filament.

^dIRAS 19116+1623 (Class II located at core boundary): Launhardt, R. 1996, Ph.D. thesis, Univ. of Jena

^eIRAS 19179+1129 (Class I with outflow): Launhardt, R. 1996, Ph.D. thesis, Univ. of Jena; Yun, J. L., & Clemens, D. P. 1992, ApJ, 385, L21

結果

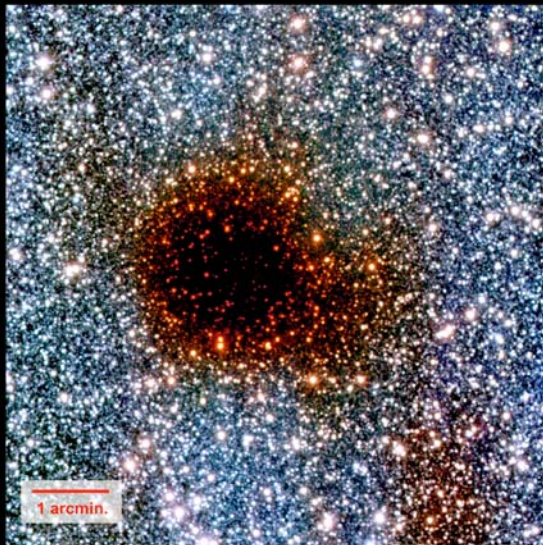
1. 近赤外線観測結果
2. 電波観測結果

9

結果(1) /近赤外観測結果: JHKs合成画像/

Dark Cloud FeSt 1-457

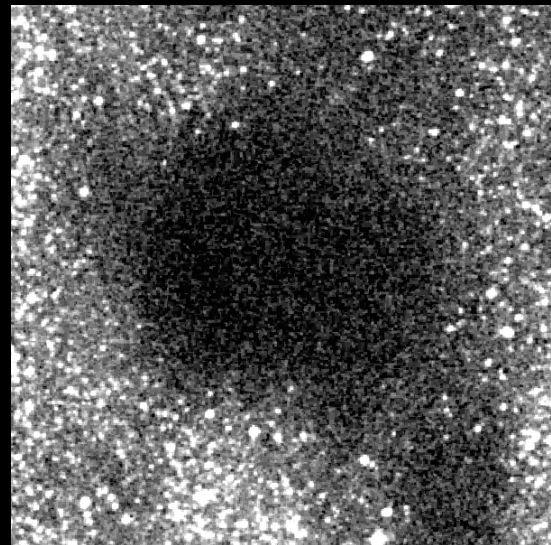
Three Color Composite Image (Blue:J, Green:H, Red:Ks)



*Simultaneous-3color InfraRed Imager
for Unbiased Survey*

SIRIUS

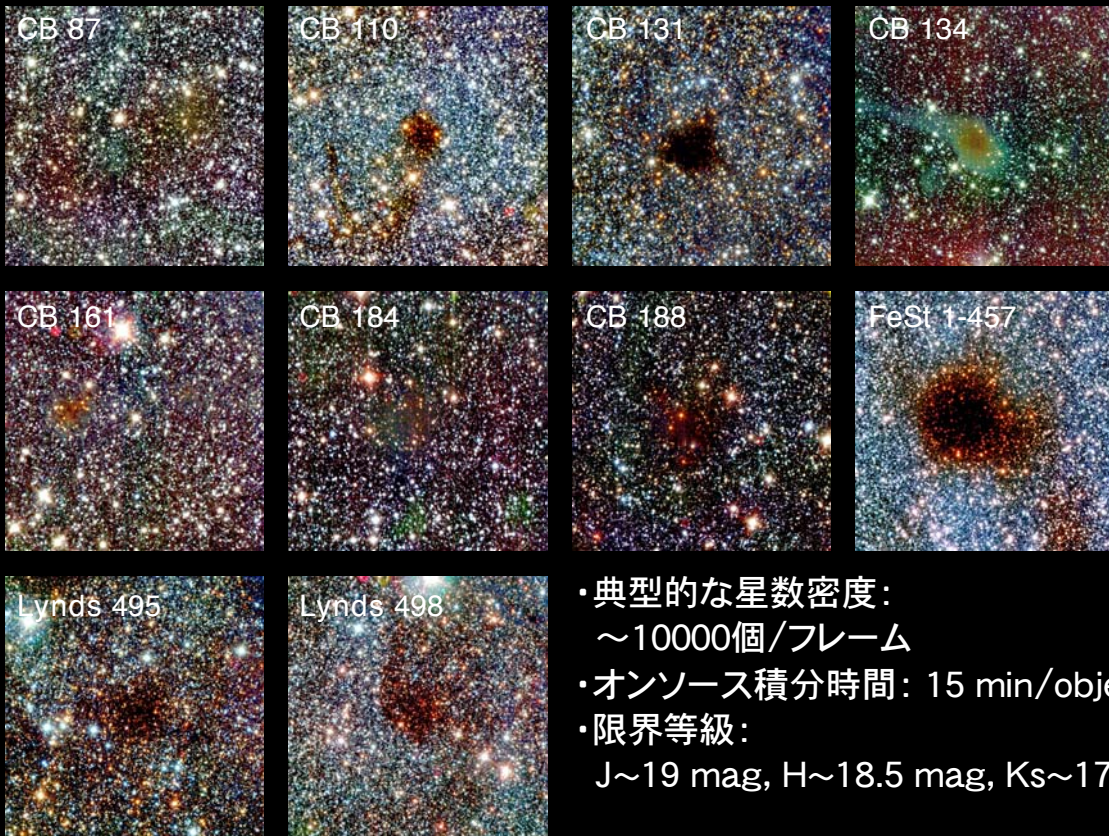
Field of View: 7 arcmin.



DSSII (Red) Image

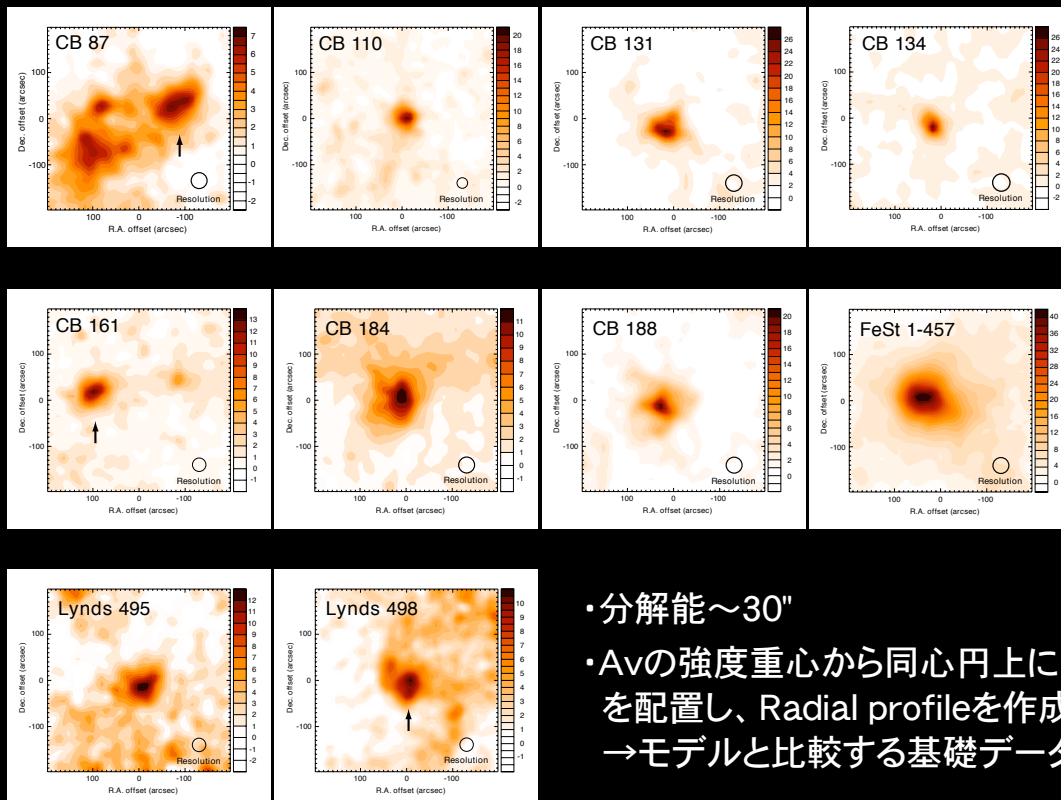
10

結果(1) /近赤外観測結果: JHKs合成画像/



- 典型的な星数密度: ~10000個/フレーム
- オンソース積分時間: 15 min/object
- 限界等級: J~19 mag, H~18.5 mag, Ks~17 mag

結果(1) /減光量(A_v)マップ(作成手法は省略)/



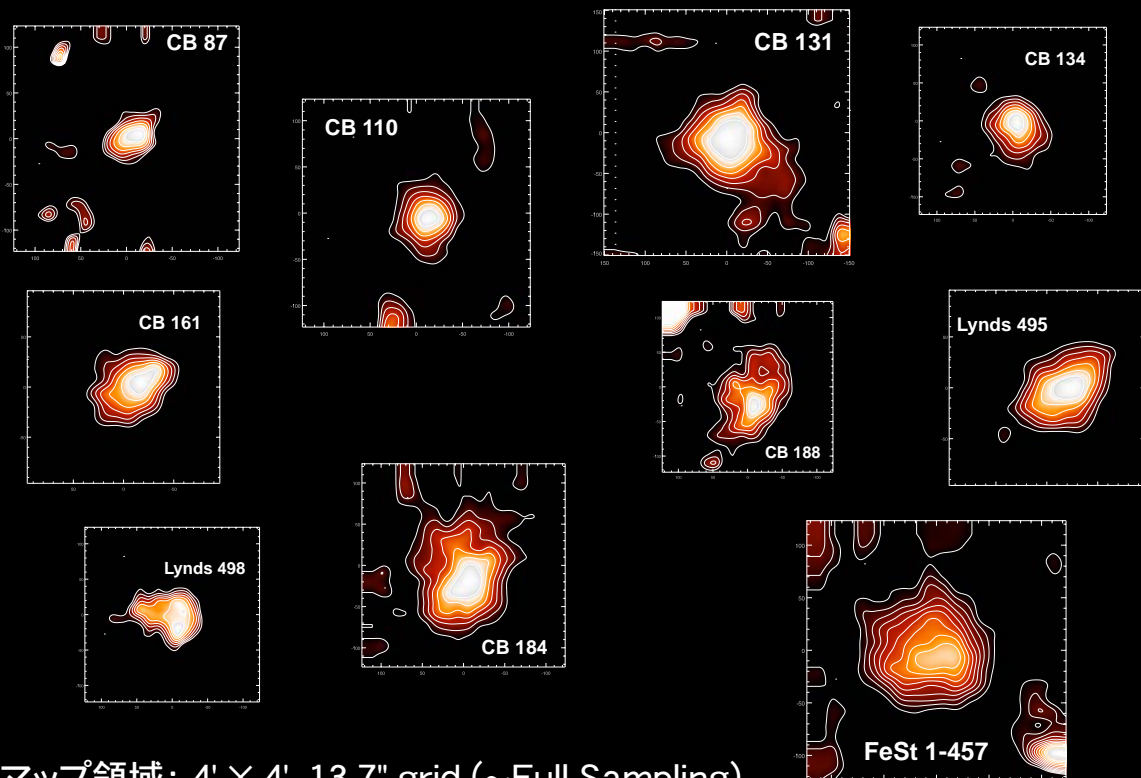
- 分解能~30"
- Avの強度重心から同心円上に円環を配置し、Radial profileを作成。→モデルと比較する基礎データ

結果

1. 近赤外線観測結果
2. 電波観測結果

13

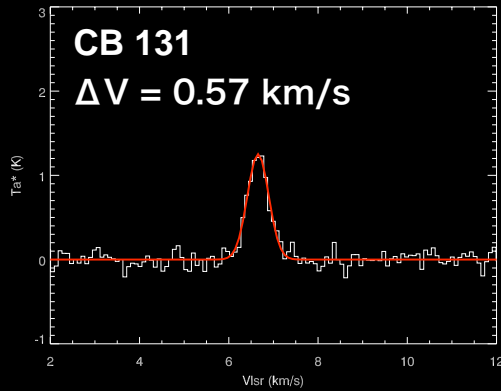
結果(2) /ミリ波ライン観測: 積分強度図/



・マップ領域: 4' × 4', 13.7" grid (~Full Sampling)

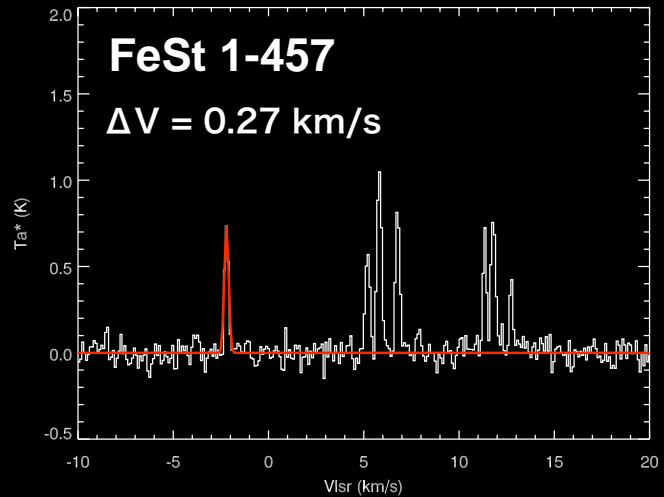
14

結果(2) /ミリ波ライン観測: プロファイルの例/



← C180 (J=1-0)

N₂H⁺ (J=1-0) →



15

結果(2) /ミリ波ライン観測: ライン幅と T_{eff} の測定/

Name	ΔV (km/s)	T_{eff} (K)	ΔV_{tot}	ΔV_{nth}	Molecular Line
CB 87	0.26	12.7	0.50	0.23	C ¹⁸ O (1-0)
CB 110	0.50	22.0	0.66	0.48	C ¹⁸ O (1-0)
CB 131	0.57	25.8	0.71	0.27	C ¹⁸ O (1-0)
CB 134	0.27	12.9	0.50	0.24	C ¹⁸ O (1-0)
CB 161	0.31	14.1	0.53	0.28	C ¹⁸ O (1-0)
CB 184	0.39	17.0	0.58	0.37	C ¹⁸ O (1-0)
CB 188	0.48	21.0	0.64	0.46	C ¹⁸ O (1-0)
FeSt 1-457	0.27	12.9	0.50	0.24	N ₂ H ⁺ (1-0)
Lynds 495	0.33	14.8	0.54	0.31	C ¹⁸ O (1-0)
Lynds 498	0.25	12.4	0.49	0.22	C ¹⁸ O (1-0)

• 全天体が、ほぼサーマル・サポート

※ $\Delta V_{\text{th}} = 0.443$ km/s

• $T_{\text{eff}} = T_{\text{th}} + T_{\text{nth}}$ (乱流サポート込みの実効的温度)

※ $T_{\text{th}} = 10$ Kと仮定

解析・議論

1. Bonnor-Ebertモデルについて
2. Bonnor-Ebert球の安定性
3. Bonnor-Ebert球でのフィッティング
4. グロビュールの力学的安定性

17

解析(1) /Bonnor-Ebertモデルについて/

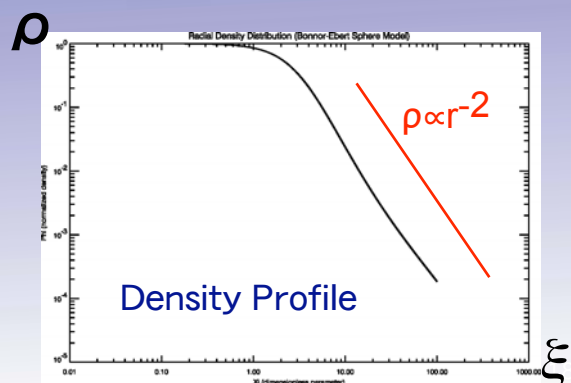
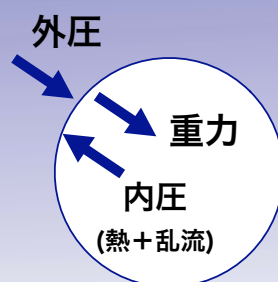
— Pressure-boundで静水圧平衡にある等温ガス球モデル (Bonnor 1956, Ebert 1955)。有限の半径。外側は外圧で押さえられる。

Bonnor-Ebertモデル

$$\frac{1}{\xi^2} \frac{d}{d\xi} \left[\xi^2 \frac{d\phi}{d\xi} \right] = e^{-\phi} \quad \left\{ \begin{array}{l} \rho = \rho_c e^{-\phi(\xi)} \\ \xi = \left[\frac{r}{C_s} \right] \sqrt{4\pi G \rho_c} \end{array} \right.$$

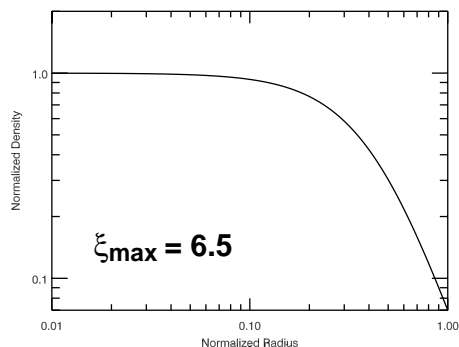
※境界条件は $\xi=0$ で、

$$\phi = 0 \quad \frac{d\phi}{d\xi} = 0$$

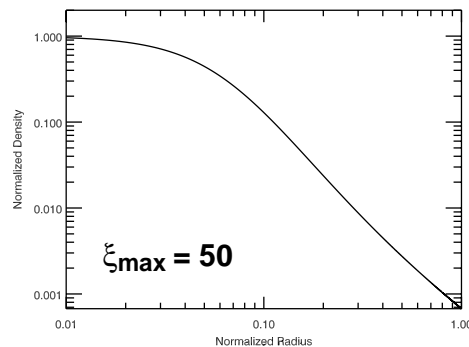


解析(1) / Bonnor-Ebert球の安定性/

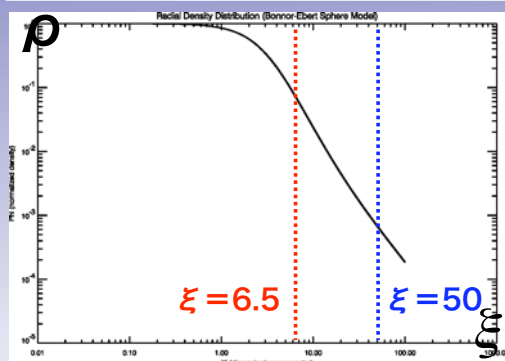
密度プロファイルの形は ξ_{\max} で決まる



密度コントラスト=14



密度コントラスト=1500



力学的安定性の指標 ξ_{\max} :

= コア半径での ξ 値。この無次元パラメータがBE球の密度分布と平衡解の安定性を決める。

$\xi_{\max} = 6.5$ (Critical), $\xi_{\max} > 6.5$ (不安定)

$$\xi_{\max} = \frac{R_{\text{ext}}}{C_s} \sqrt{4\pi G \rho_c}$$

19

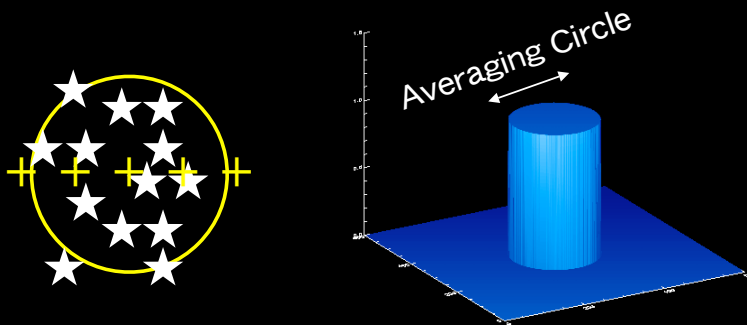
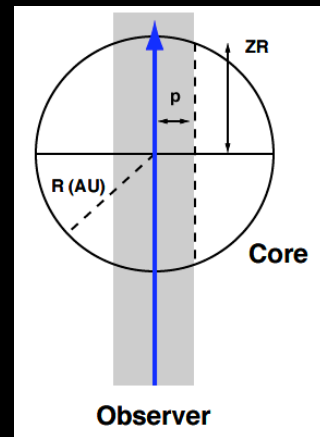
解析・議論

1. Bonnor-Ebertモデルについて
2. Bonnor-Ebert球の安定性
3. Bonnor-Ebert球でのフィッティング
4. グロビュールの力学的安定性

解析(3) /Bonnor-Ebert球でのフィッティング/

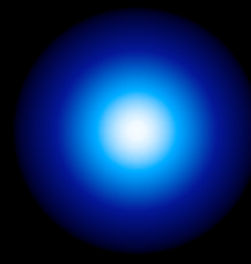
観測データへのフィット

- 3パラメータ(ρ_c : 中心密度、R: コア半径、T: 温度)を振りながら、Bonnor-Ebert球の密度分布を計算
- BE密度分布を視線方向で積分→BE柱密度分布図
- BE柱密度分布図を、Avマップと同じビームでコンボリューション→BE柱密度プロファイル
- 観測データとBE柱密度プロファイルとの間で、 χ^2 -fit (全パラメータ空間をサーチ)



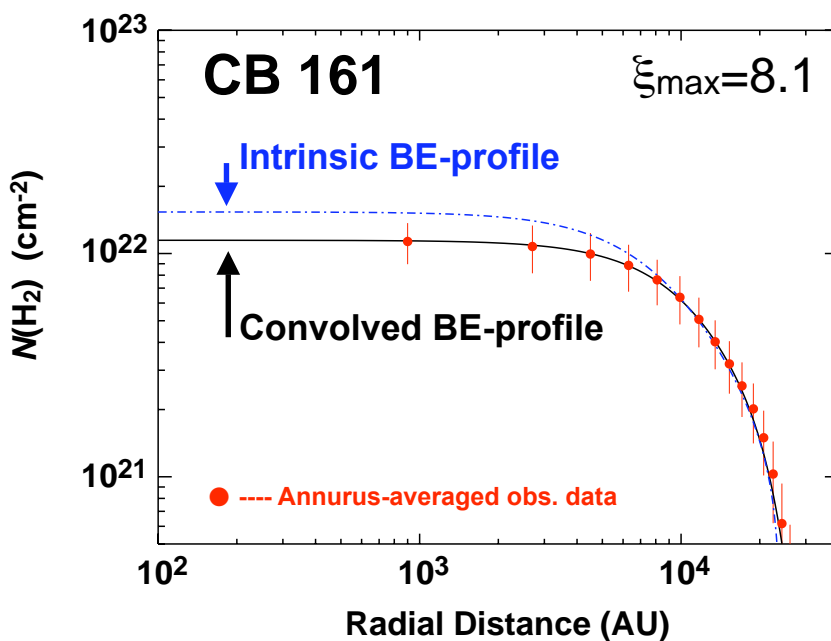
星数orカラー測定

Av測定時の円柱ビームの例

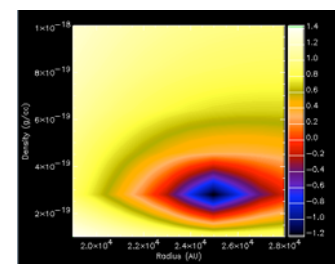


Bonnor-Ebert球を2次元に投影した例

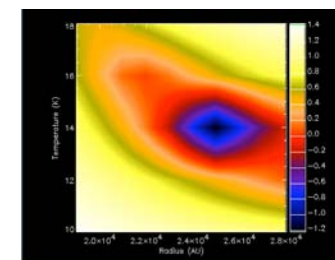
解析(3) /Bonnor-Ebert球でのフィッティング/



χ^2 の収束性

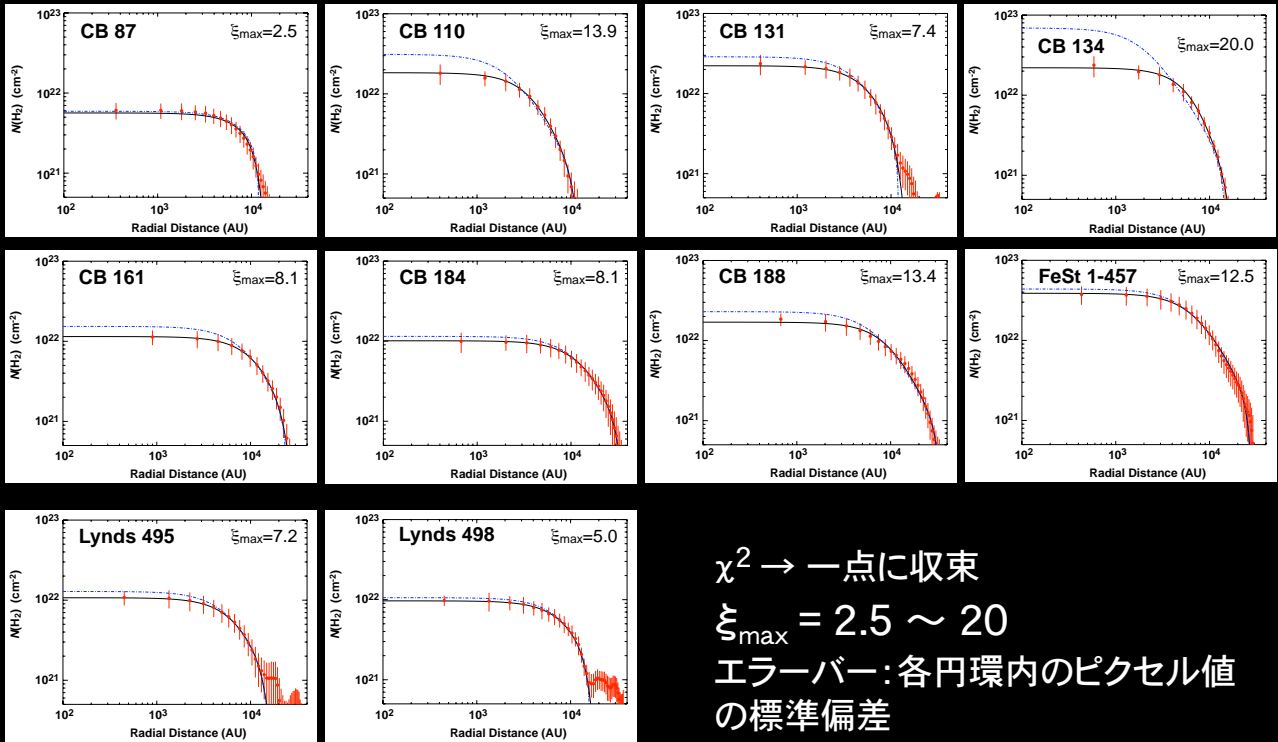


Radius - Density



Radius - Temperature

解析(3) /Bonnor-Ebert球でのフィット結果/



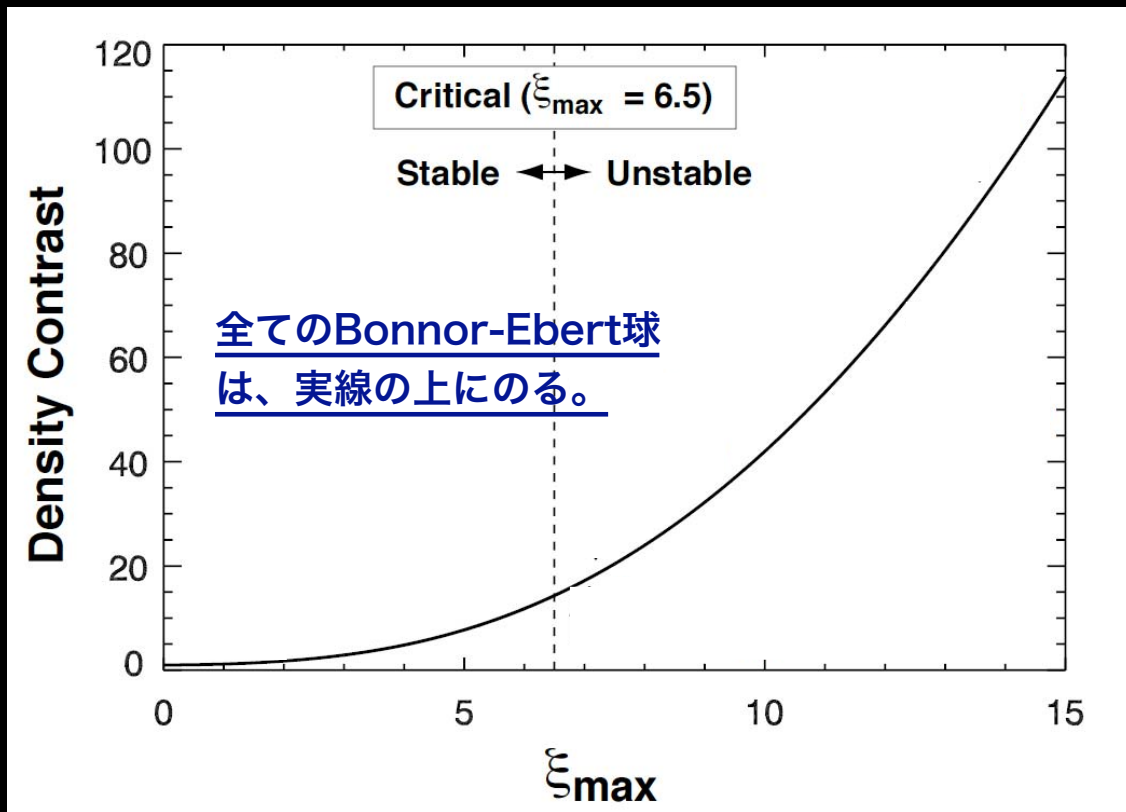
Name	θ_R (arcsec)	ξ_{\max}	$\rho_c / \rho_{\text{edge}}$	Stability
CB 87	75±2.2	2.52±0.21	2.3	Stable
CB 110	61±3.7	13.9±3.18	95	Unstable
CB 131	67±4.1	7.38±1.64	20	Unstable
CB 134	56±3.0	19.9±5.60	220	Unstable
CB 161	63±7.5	8.14±1.47	25	Unstable
CB 184	112±20	8.11±1.62	25	Unstable
CB 188	110±5.0	13.4±1.34	87	Unstable
FeSt 1-457	169±8.8	12.4±1.21	72	Unstable
Lynds 495	75±8.5	7.22±1.39	19	Unstable
Lynds 498	80±3.8	4.97±0.45	7.6	Stable

Bonnor-Ebert球でのフィット結果

※Free Parameter : 視半径、中心密度、距離
 ※Fit Error ~ 10 - 20%
 ※T_{eff}は電波観測で求めた値を使用。

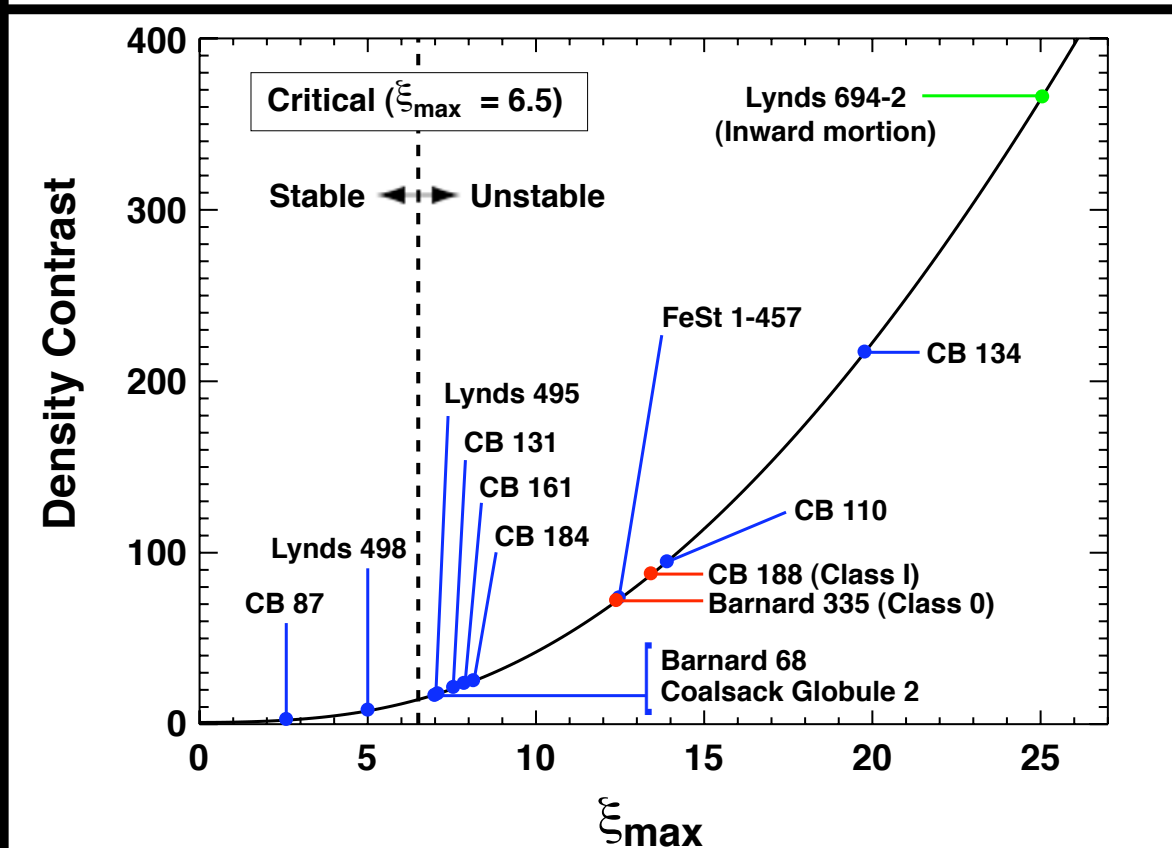
Name	T _{eff} (K)	Distance (pc)	R (AU)	n _c (cm ⁻³)	n _{edge}	M _{BE} (M _⊙)	P _{ext} (K cm ⁻³)
CB 87	12.7	169	12700	2.0×10 ⁴	8.9×10 ³	0.83	13.8×10 ⁴
CB 110	22.0	566	34500	1.4×10 ⁵	1.5×10 ³	7.30	4.0×10 ⁴
CB 131	25.8	332	22200	1.2×10 ⁵	5.9×10 ³	5.67	18.1×10 ⁴
CB 134	12.9	240	13400	1.2×10 ⁶	5.3×10 ³	1.56	8.0×10 ⁴
CB 161	14.1	403	25400	6.0×10 ⁴	2.4×10 ³	3.56	4.0×10 ⁴
CB 184	17.0	364	40800	2.9×10 ⁴	1.1×10 ³	6.93	2.2×10 ⁴
CB 188	21.0	394	43300	8.3×10 ⁴	0.9×10 ³	8.83	2.3×10 ⁴
FeSt 1-457	12.9	76	12900	5.0×10 ⁵	6.9×10 ³	1.64	10.1×10 ⁴
Lynds 495	14.8	370	27800	4.1×10 ⁴	2.2×10 ³	4.07	3.8×10 ⁴
Lynds 498	12.4	225	18000	3.8×10 ⁴	5.1×10 ³	2.00	7.2×10 ⁴

議論(4) / グロビュールの密度構造と力学的安定性/



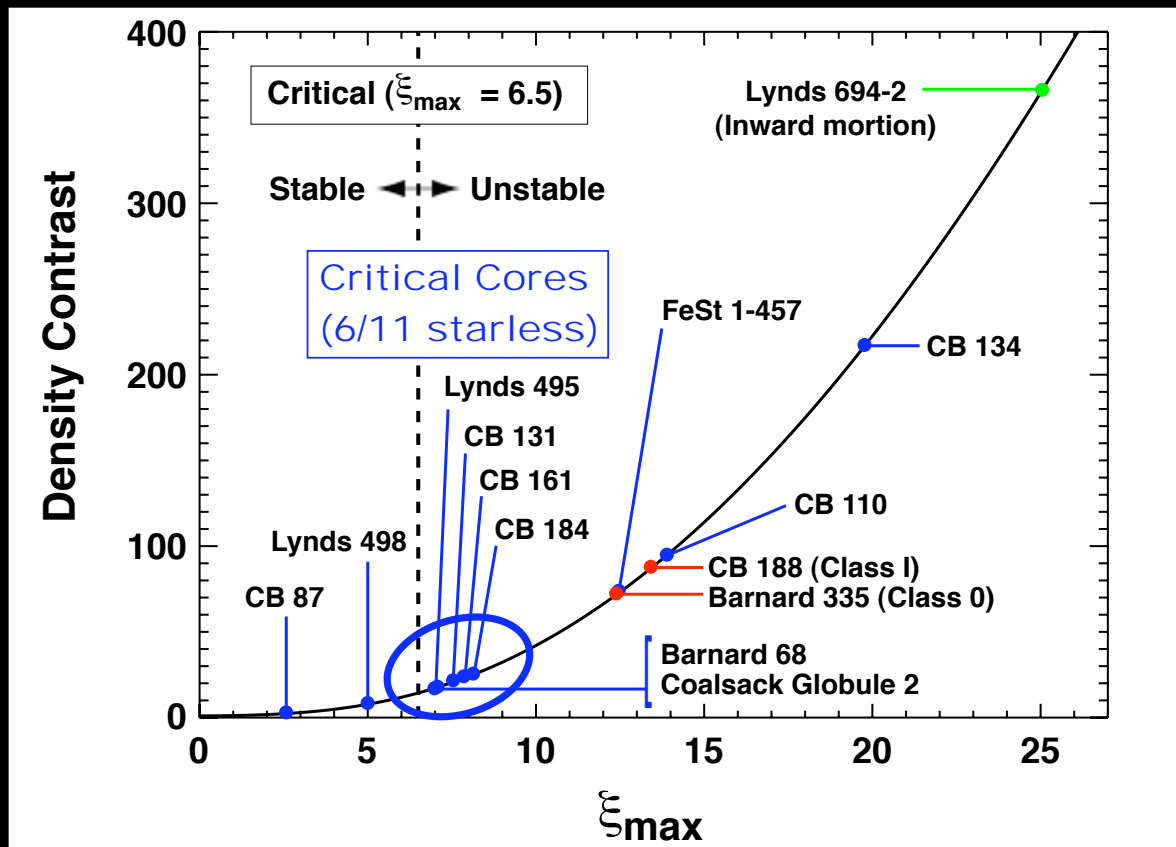
25

議論(2) / グロビュールの密度構造と力学的安定性/



26

議論(2) / グロビュールの密度構造と力学的安定性/



27

議論(4) / グロビュールの密度構造と力学的安定性/

BE球フィット結果のカテゴリ別天体数

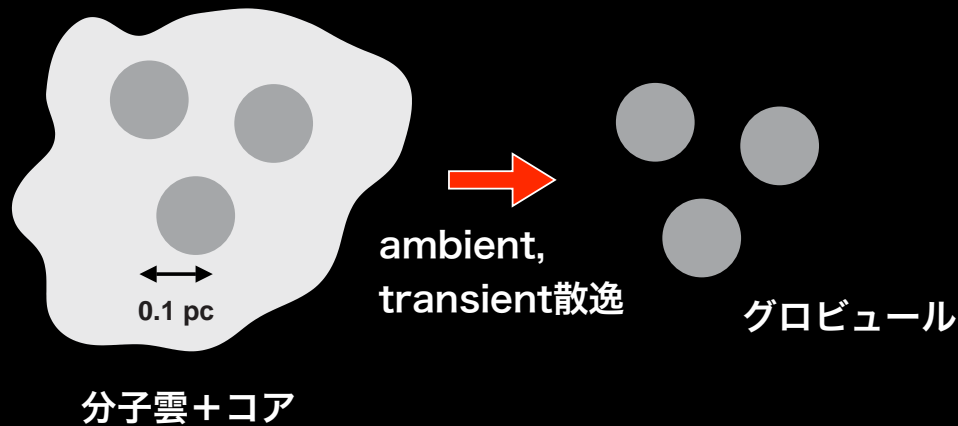
中心集中度(ξ_{\max} 値)	$\xi_{\max} < 6.5$ (Stable)	$\xi_{\max} \sim 6.5$ (Critical or slightly unstable)	$\xi_{\max} \gg 6.5$ (Super critical)
天体数 (Star-forming)	2 (0)	6 (0)	6 (3+?)

- ★ スターレス・グロビュールの典型的な密度構造は、クリティカル～やや不安定なBonnor-Ebert球でよく説明できそうである。
- ★ Stable解のコアはわずか2/14天体。
- ★ Protostellar/Contractingフェイズのグロビュールは、高い中心集中度 ($\xi_{\max} \gg 6.5$)のBonnor-Ebert球でベストフィット。

28

議論(4) / グロビュールの密度構造と力学的安定性 /

- ・ グロビュールが分子雲複合体の remnant コアだとすると、
 ビリアライズされたコアのみが、ambient 物質の散逸後も
 生き残ることになる。
 → コアの大半が Super Critical であることと矛盾しない。

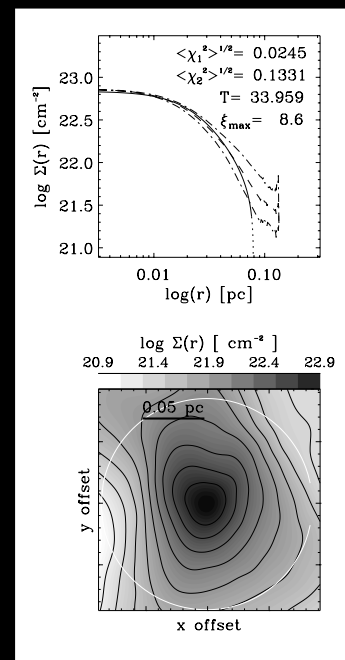
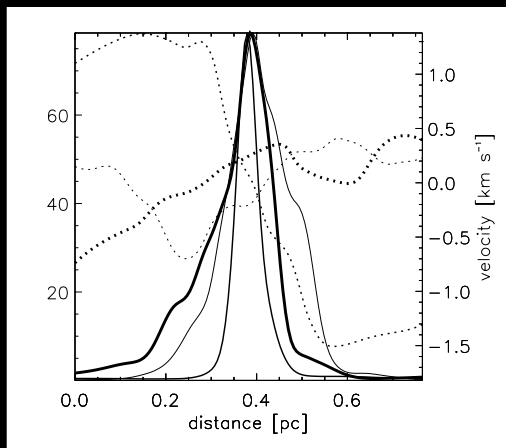


29

議論(5) / 超音速乱流星形成シナリオ /

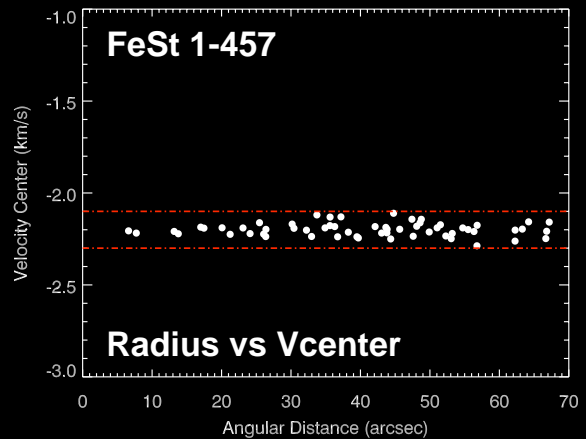
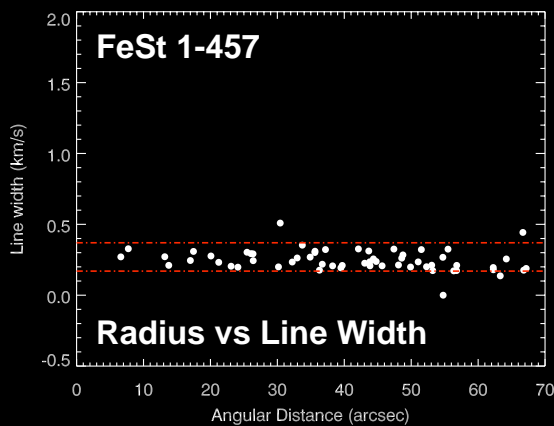
Ballesteros-Paredes (2003)

Turbulent 分子雲のシミュレーション：
 126個のコアのうち65%の密度構造が
 Bonnor-Ebert球でよくフィットできた。



30

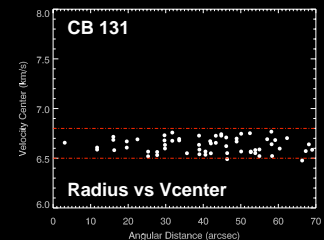
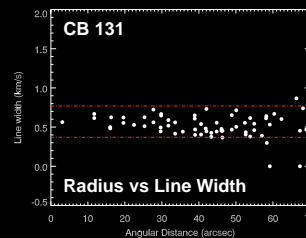
ライン幅、ピーク速度の半径依存性 (FeSt 1-457, CB 131)



Quiescentな速度構造



Supersonic turbulence
シナリオ



31

まとめ

- ★ 分解能を考慮したBonnor-Ebert球で、グローバル10天体をフィット
→ NIRでのサーベイ的研究は初。統計的研究への第一歩
- ★ サイズ、密度、温度、距離などがよく決まったWell defined sample増強
→ 多くの派生的研究が可能に(e.g., 密度 vs ダストの性質, depletion効率など)
- ★ スターレス・グローバルの典型的な密度構造は、クリティカル~やや不安定な Bonnor-Ebert球でフィットできる。
- ★ 星形成活動を示すグローバルは、高い中心集中度 ($\xi_{\max} \gg 6.5$)のBonnor-Ebert球でフィットできる。→ スターレスコアとの観測的な違いは中心集中度
- ★ 安定なBonnor-Ebert平衡解のグローバルは2天体(NIRでは初発見)。
- ★ グロビュールの速度構造(線幅分布、ピーク速度分布)は、Quiescent。
→ Turbulentシナリオには必ずしも該当しない。
- ★ グロビュールの観測的性質は、Taurusのコアと類似
(サイズ、質量、Quiescentな速度構造)
→ 臨界に近いThermalコアからの星形成 ⇄ Orion