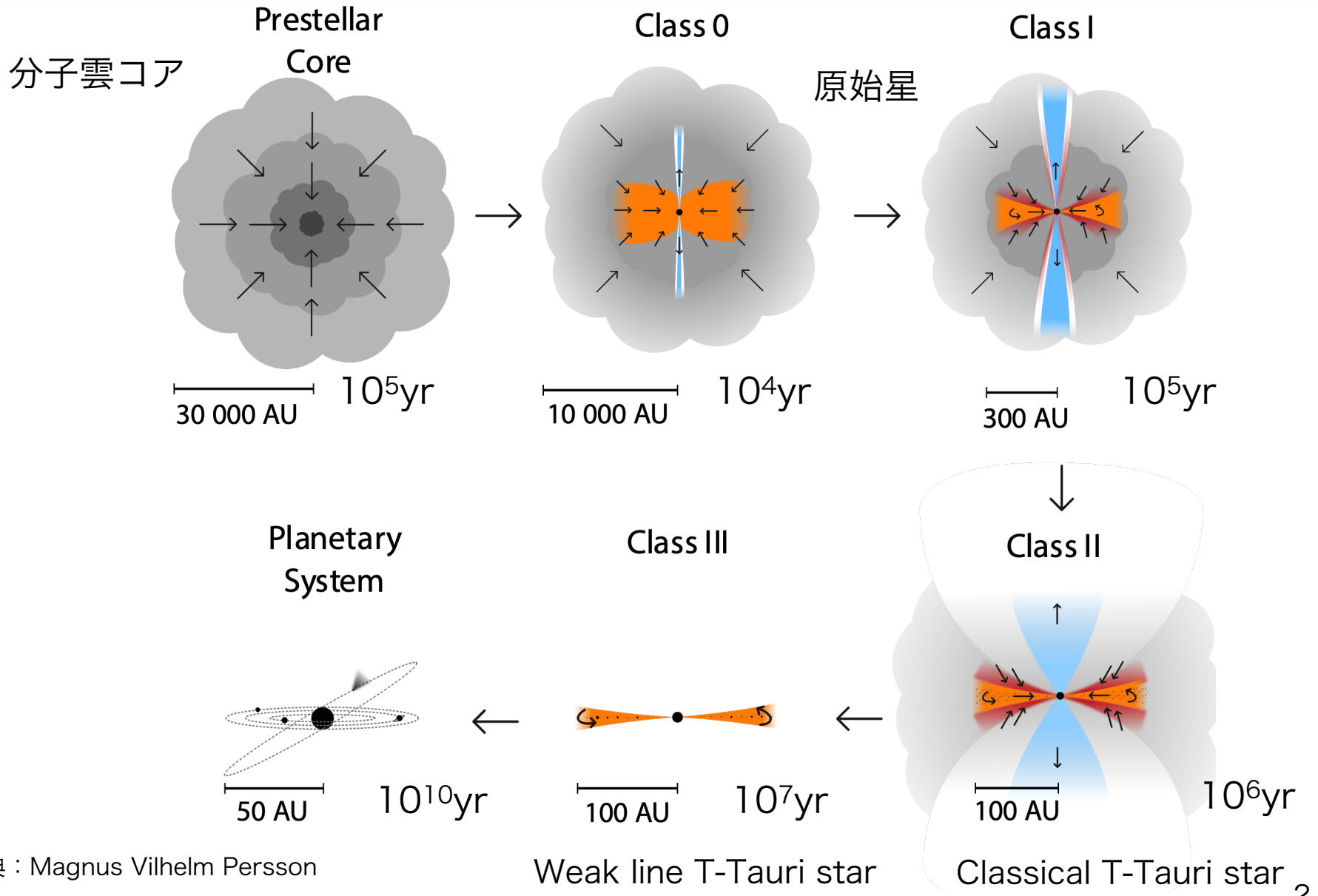


原始星収縮 原始星・円盤・アウトフロー

松本倫明（法政大学）

星形成のステージ



出典：Magnus Vilhelm Persson

Weak line T-Tauri star

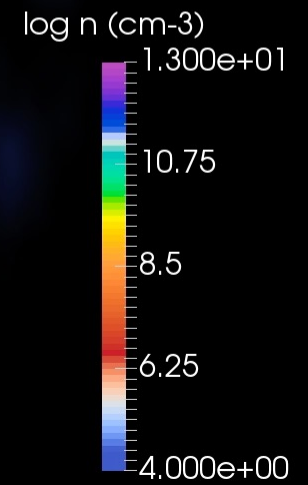
Classical T-Tauri star ₂

星形成の始動

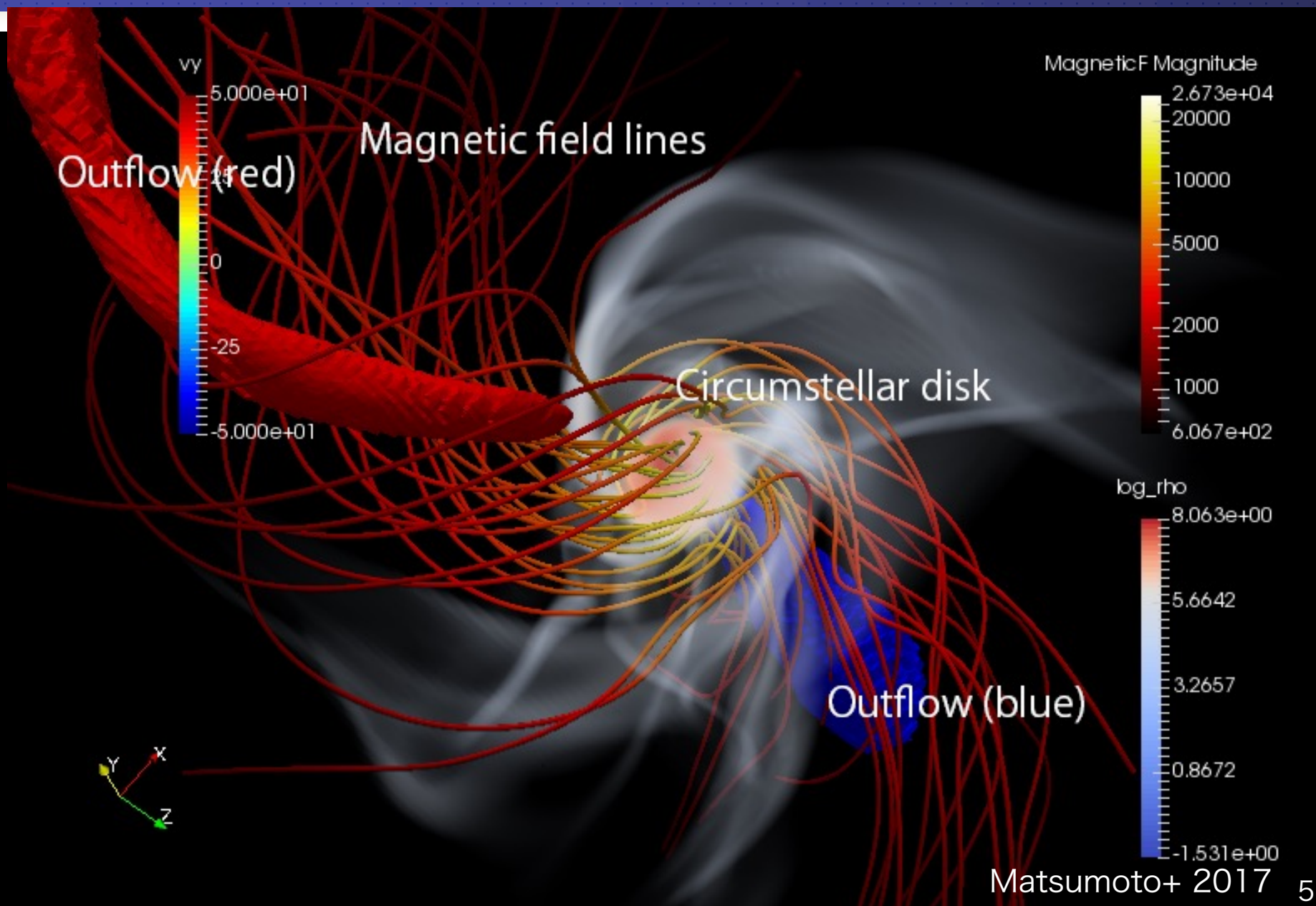
分子雲コア → Class 0

再掲

Model M1B01
 $t = 1.53452e+05$ yr



アウトフローもあるよ

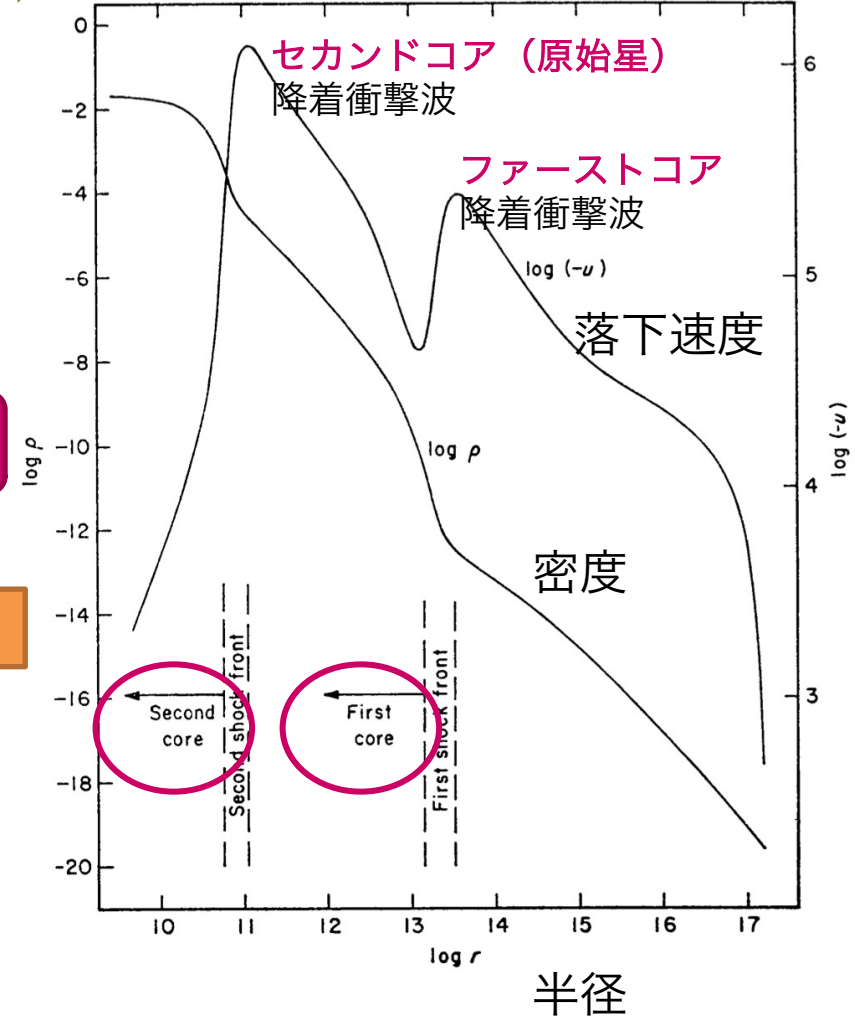
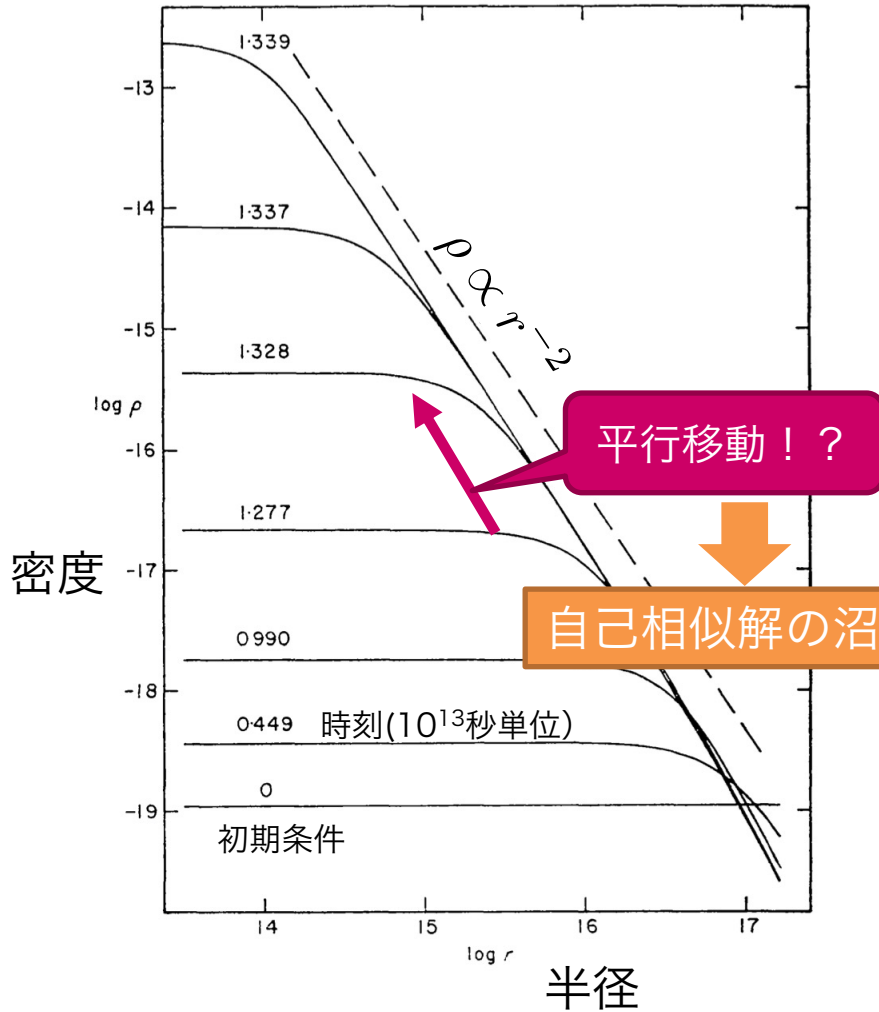
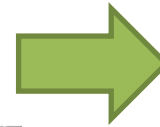


分子雲コア → Class 0

Larson 1969
doi:10.1093/mnras/145.3.271

等温収縮 (暴走収縮期)
Collapse

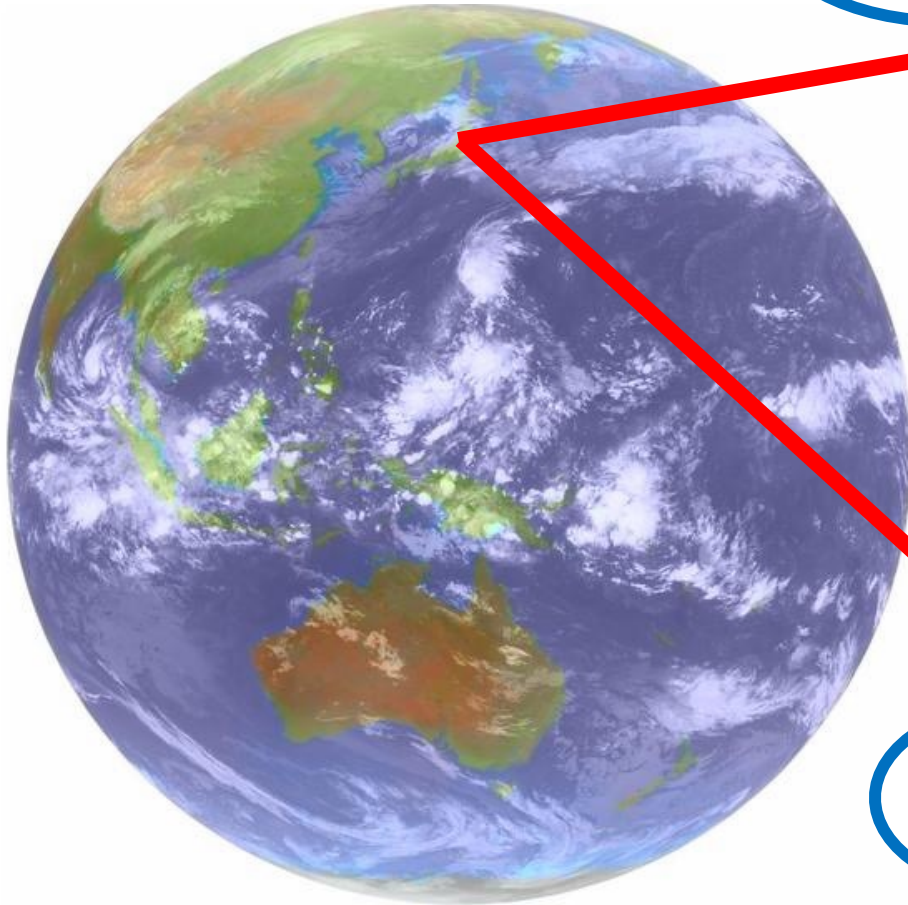
断熱コア形成後 (質量降着期)
Accretion



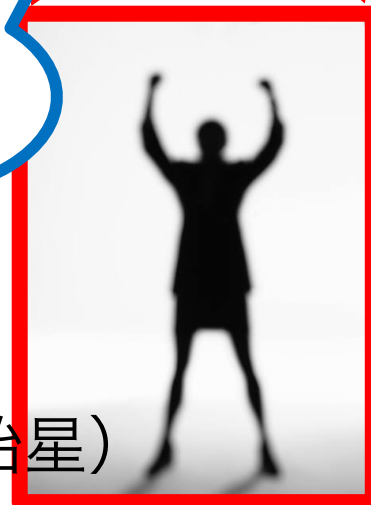
分子雲コア

-5

ファーストコア



-2



分子雲コアから原始星の形成
スケールの比較

セカンドコア (原始星)

等温収縮の性質

高密度部分が小さくなる

$$\lambda_J = \left(\frac{\pi c_s^2}{G\rho} \right)^{1/2}$$

暴走的に収縮する（密度が高いほど速く収縮）

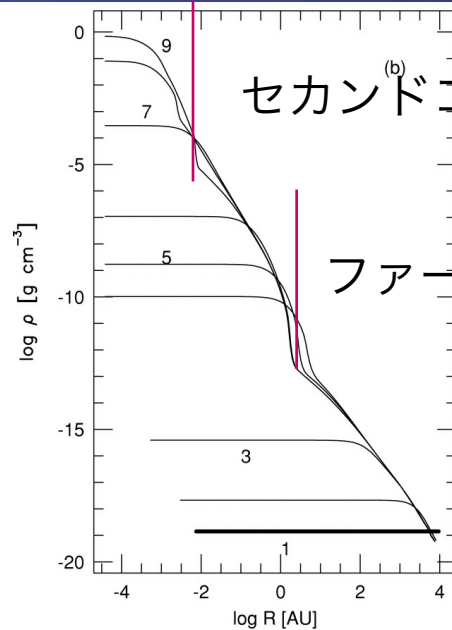
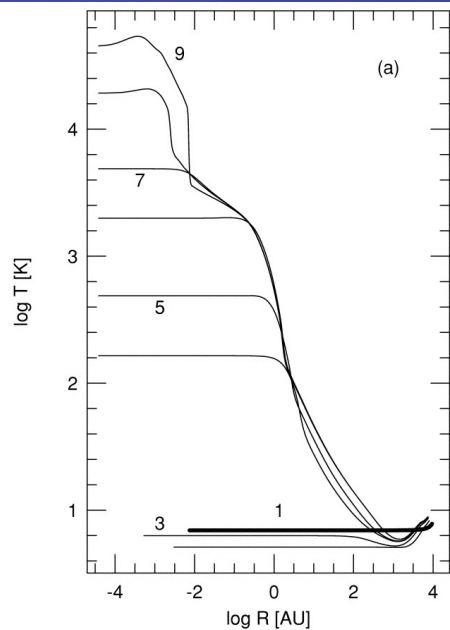
$$t_{\text{ff}} = \left(\frac{3\pi}{32G\rho} \right)^{1/2}$$

分子雲コアの質量 ($1M_{\odot}$) \gg ファーストコアの質量 ($0.001M_{\odot}$) \gg 原始星の質量
(質量降着期のはじめ)

$$M_J = \frac{\pi^{5/2} c_s^3}{6G^{3/2} \rho^{1/2}}$$

分子雲コア → Class 0 (輻射流体計算)

温度

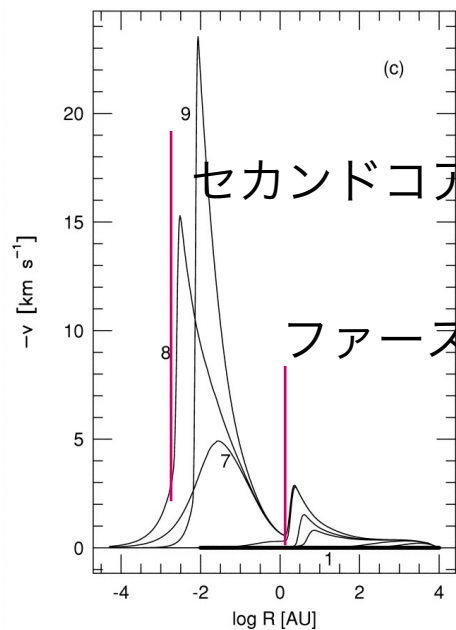


セカンドコア (原始星)

ファーストコア

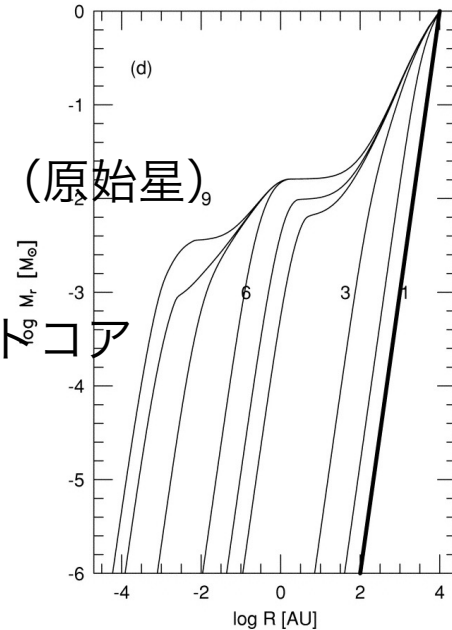
密度

落下速度



セカンドコア (原始星)

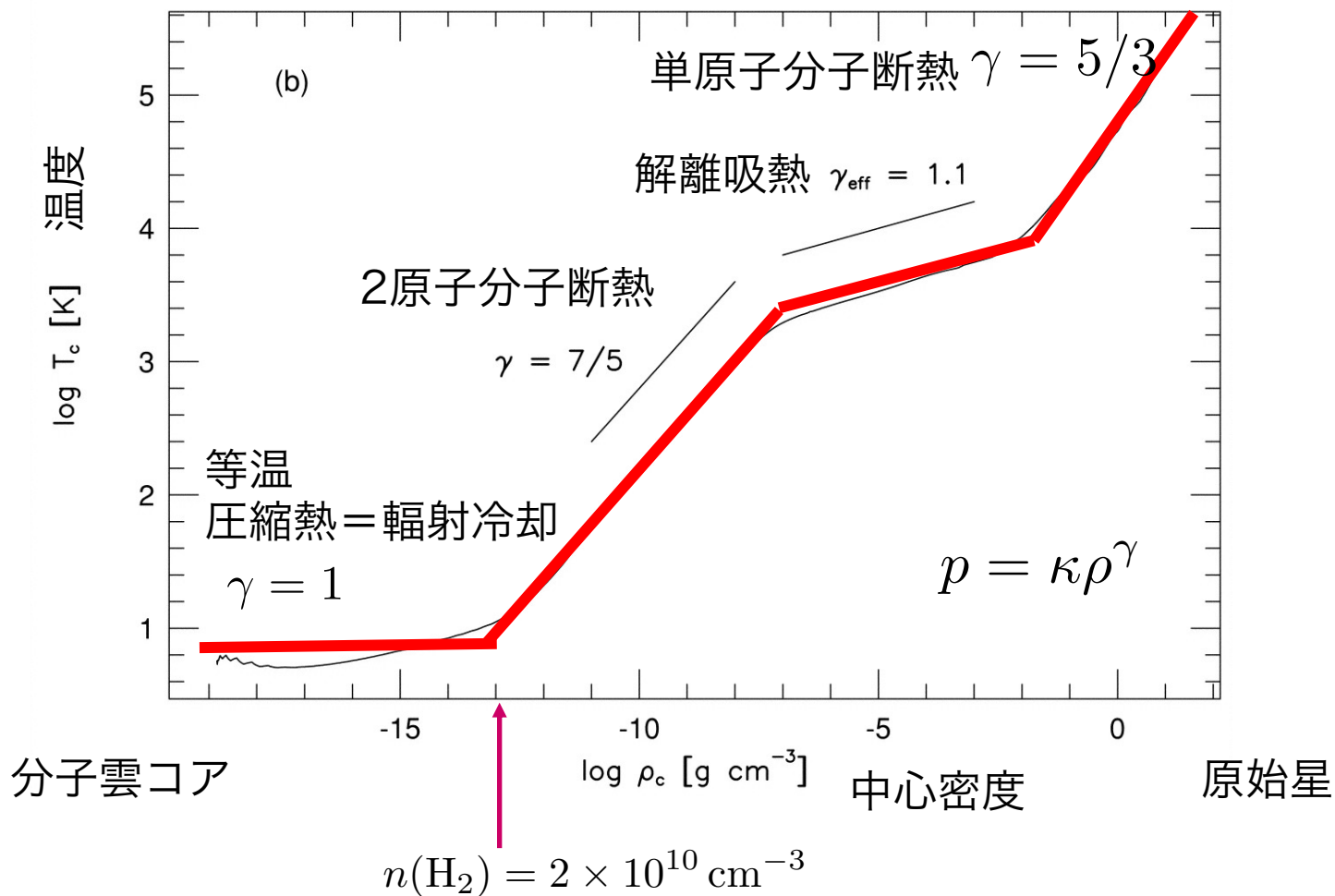
ファーストコア



累積質量

Masunaga & Inutsuka (2000)
doi:10.1086/308439
輻射流体1次元球対称計算

分子雲コア → Class 0 (輻射流体計算)



Masunaga & Inutsuka (2000)
doi:10.1086/308439
輻射流体1次元球対称計算

Collapse vs accretion

Jeans 質量

$$M_J \propto \frac{c_s^3}{\rho^{1/2}}$$



$$p = \kappa \rho^\gamma$$

$$c_s^2 = \frac{dp}{d\rho} = \gamma \kappa \rho^{\gamma-1}$$

$$\propto \rho^{(3\gamma-4)/2}$$

等温収縮期

$$\gamma < 4/3$$

M_J は ρ の減少関数

Collapse

周りを置いて
自分だけ収縮
する
(資本主義)

質量降着期

$$\gamma > 4/3$$

M_J は ρ の増加関数

Accretion

質量が増えて
(降着して)
密度が増える
(共産主義)

ファーストコア形成前後で、物理が切り替わる

事例

ファーストコア探し 分子雲コア MC27

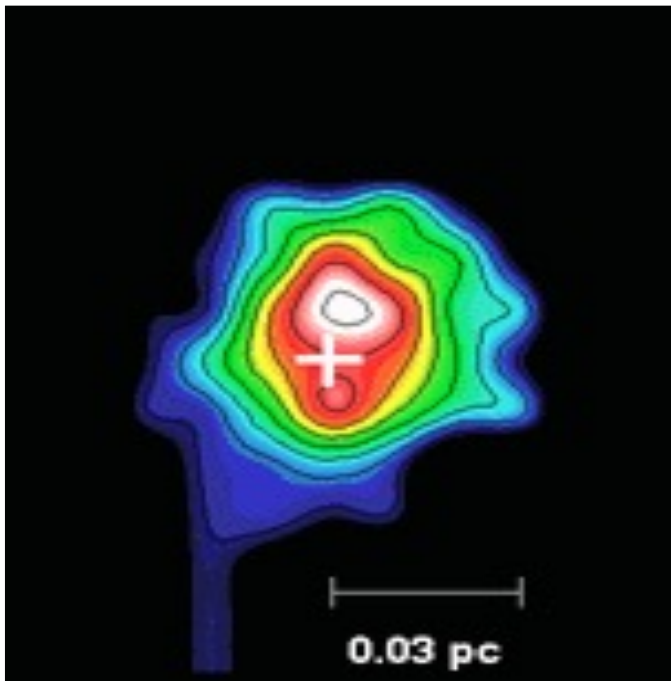
Tokuda+ 2014 doi:10.1088/2041-8205/789/1/L4
Matsumoto+ 2015 doi:10.1093/mnrasl/slv031

星の誕生のミッシングリンク

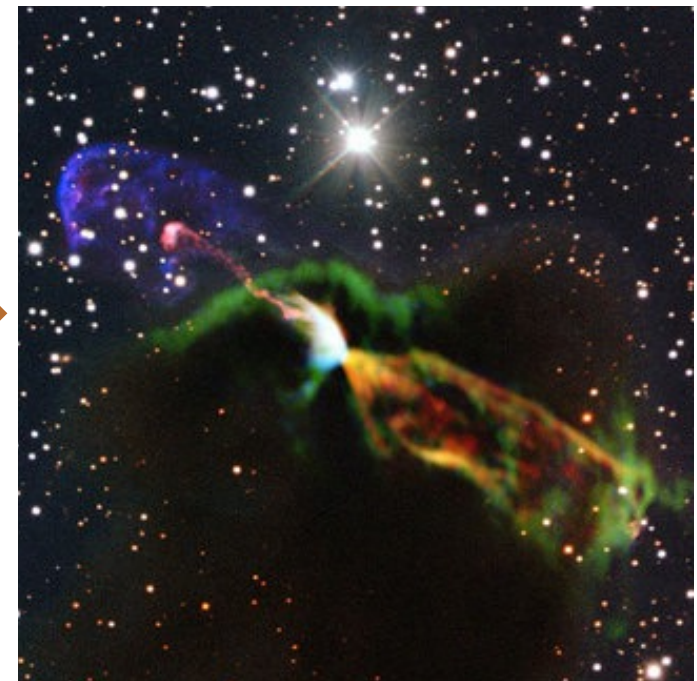
ファーストコア
1000年

分子雲コア 10万年

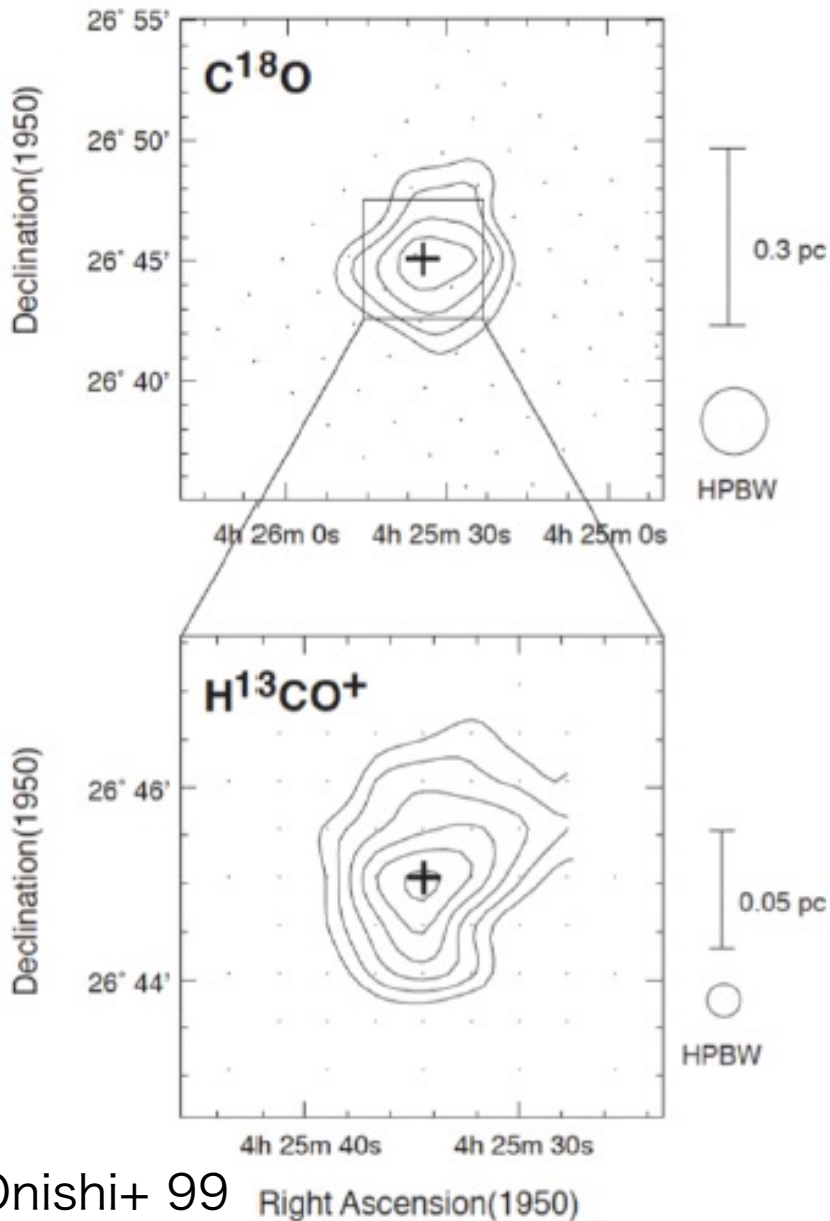
原始星 10万年



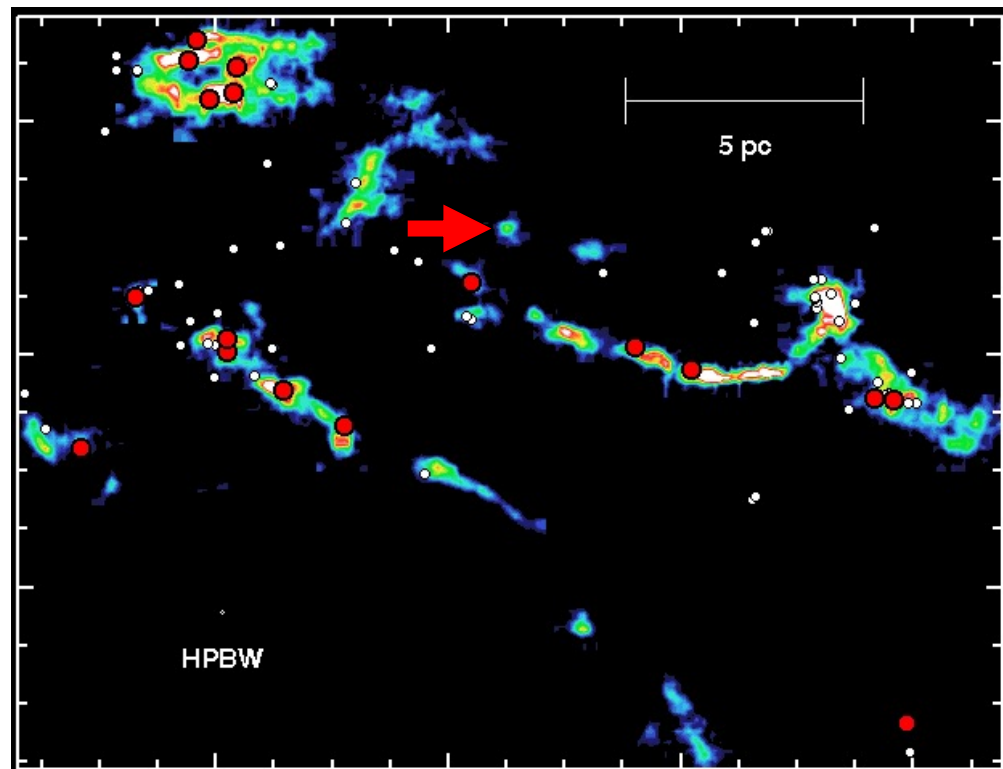
未発見



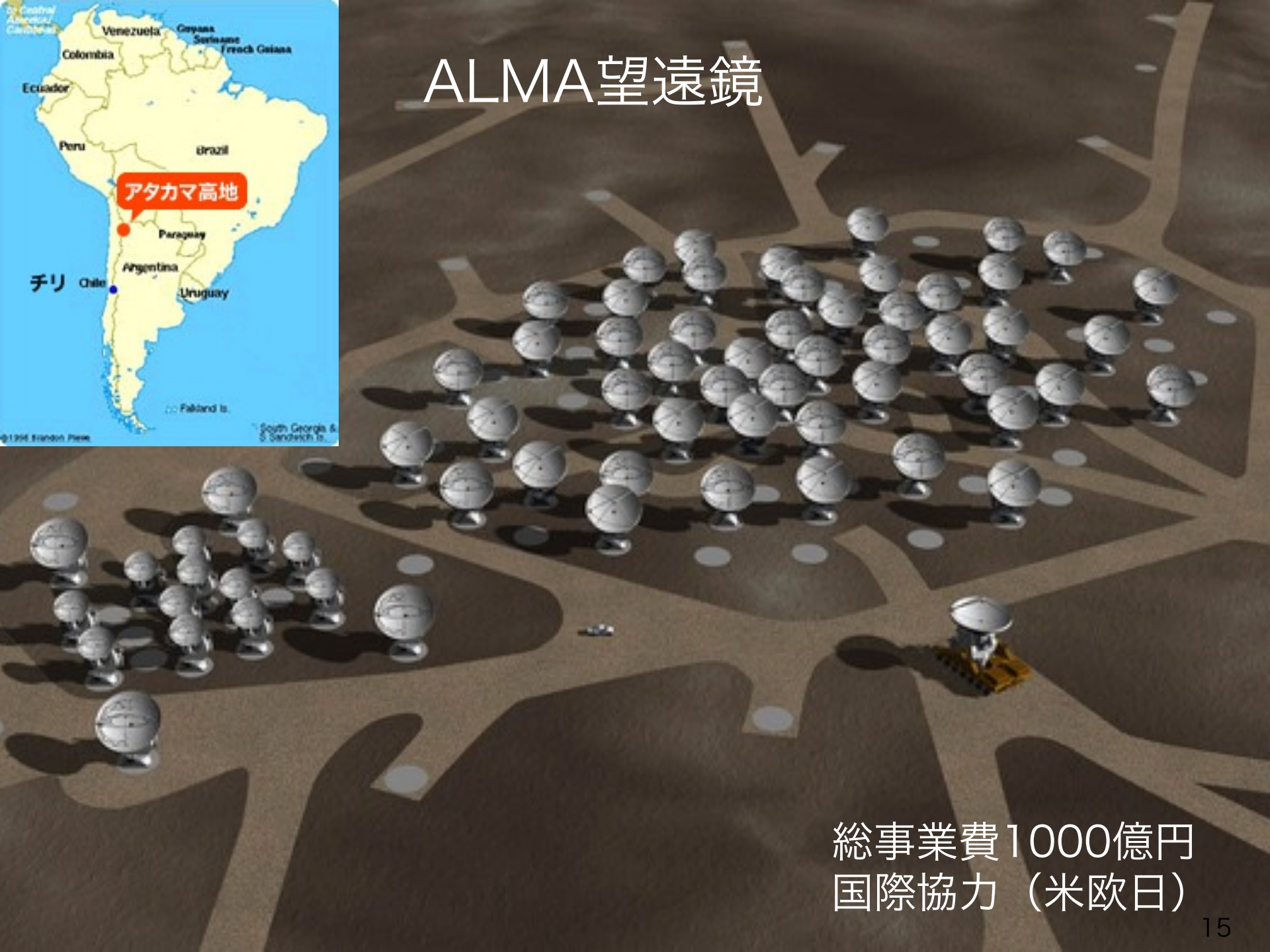
分子雲コア MC27(or L1521F)



- ✓ 中心集中したコンパクトなコア。
- ✓ この中にファーストコアが埋まっているかもしれない。



ALMA望遠鏡

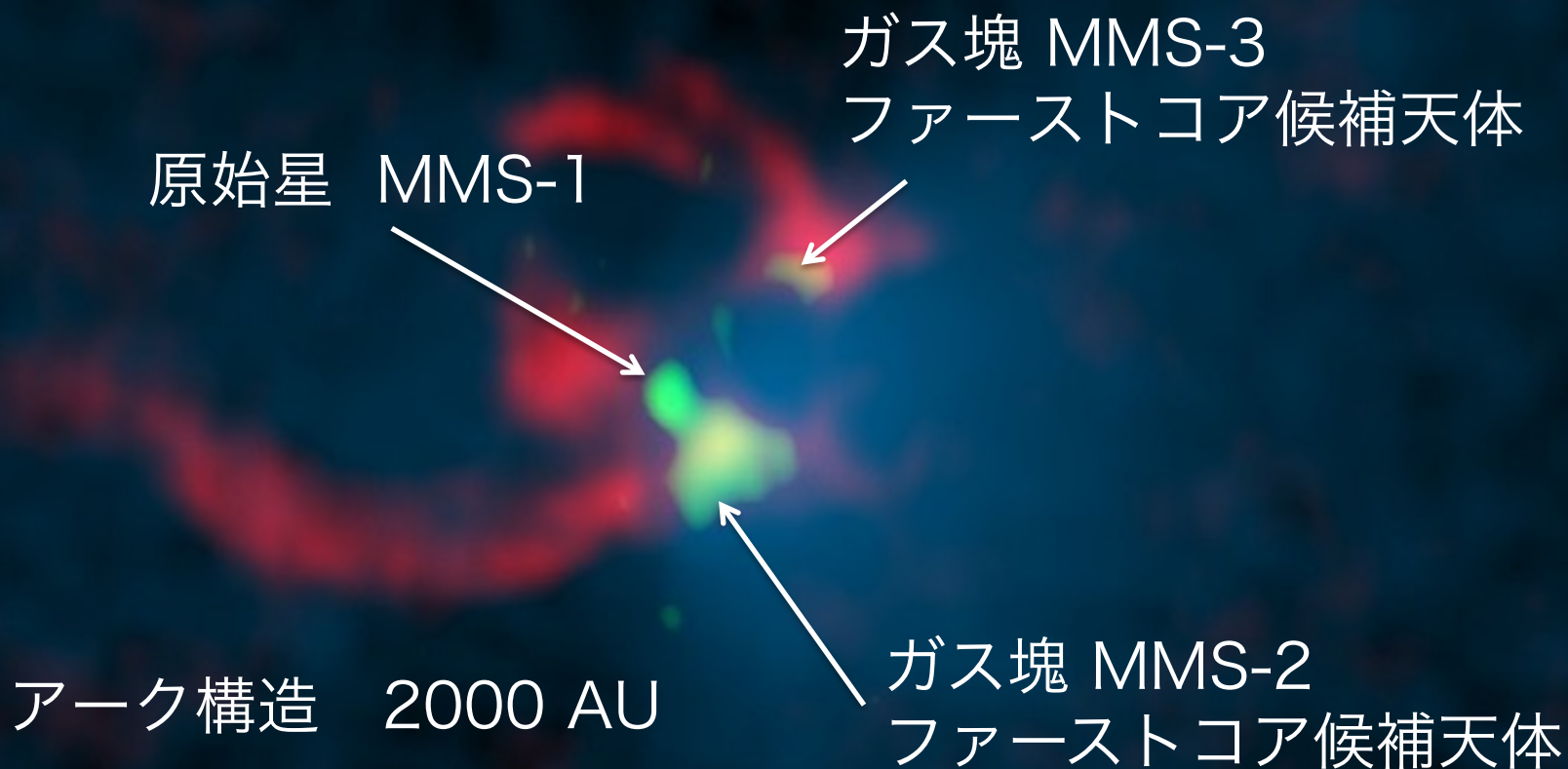


総事業費1000億円
国際協力（米欧日）

分子雲コア中心部にアーク構造
これは何？これを再現したい

(ALMA Cycle0)

Tokuda et al. (2014)



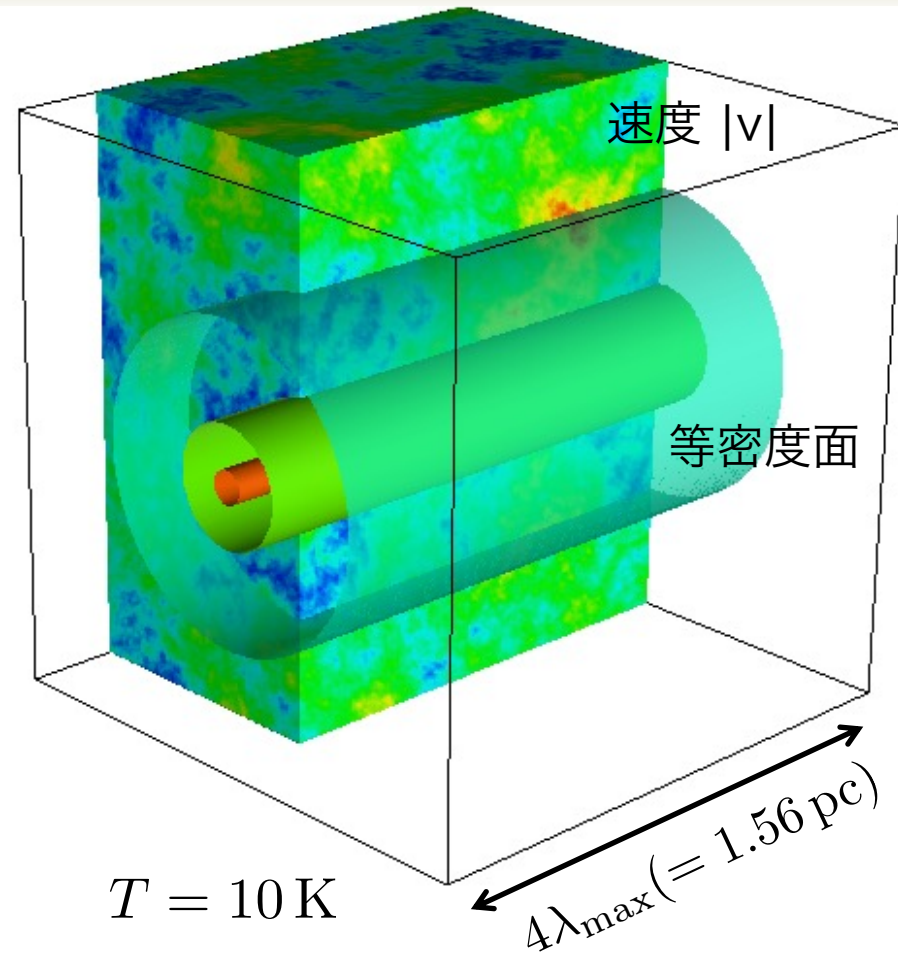
背景 : Spitzer
緑 : ダスト
赤 : HCO+ (J=3-2)

スーパーコンピュータ ATERUI

@国立天文台 水沢キャンパス



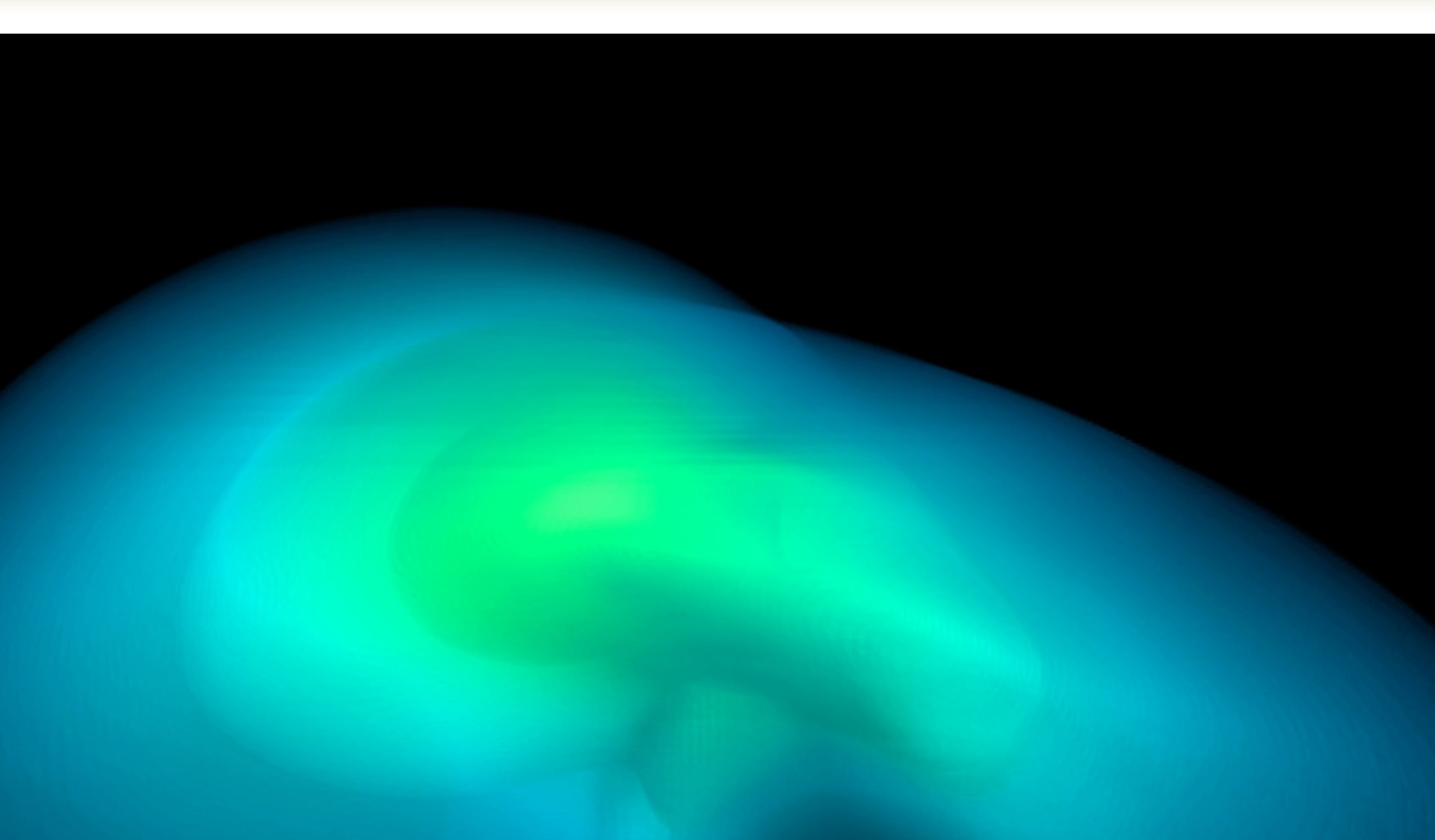
- 無限に長いフィラメント
 - 平衡状態
 - 圧力と重力がバランス
- マッハ1の等方乱流
- バロトロピック状態方程式 $P = c_s^2 \rho + \kappa \rho^{7/5}$
- 磁場は無視
- 周期境界条件
- コード：SFUMATO
 - AMR法
 - シンク粒子法



$$T = 10 \text{ K}$$

$$R_0 = 0.05 \text{ pc}$$

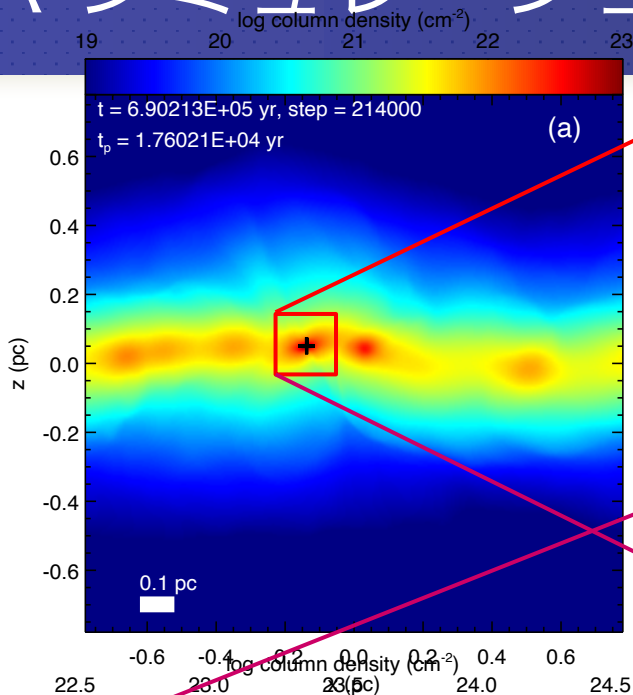
$$n_0 = 3.79 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$$



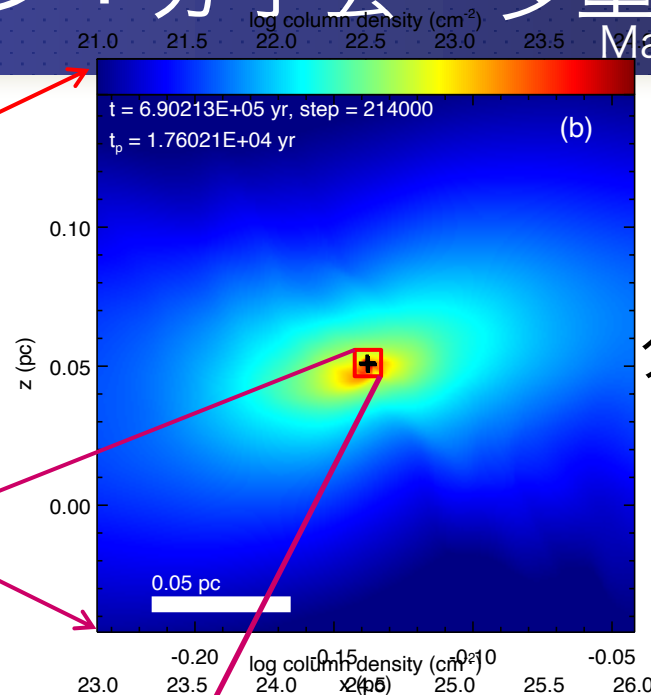
AMR シミュレーション：分子雲→多重星

Matsumoto+ 15

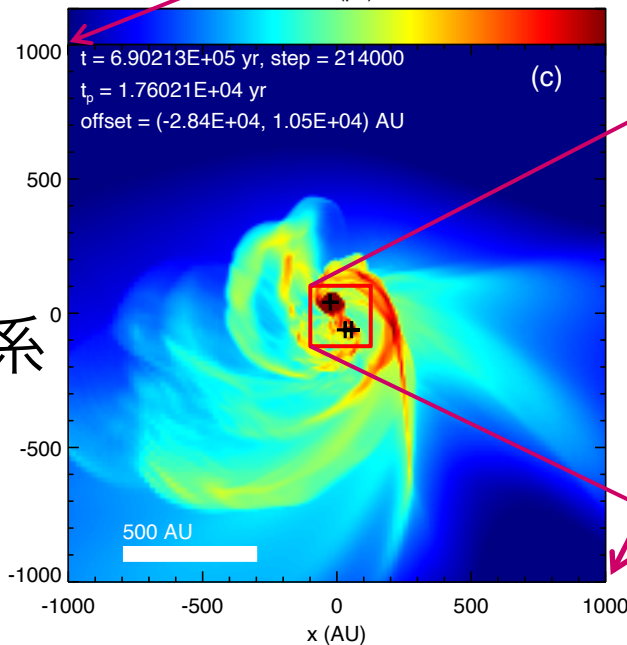
分子雲



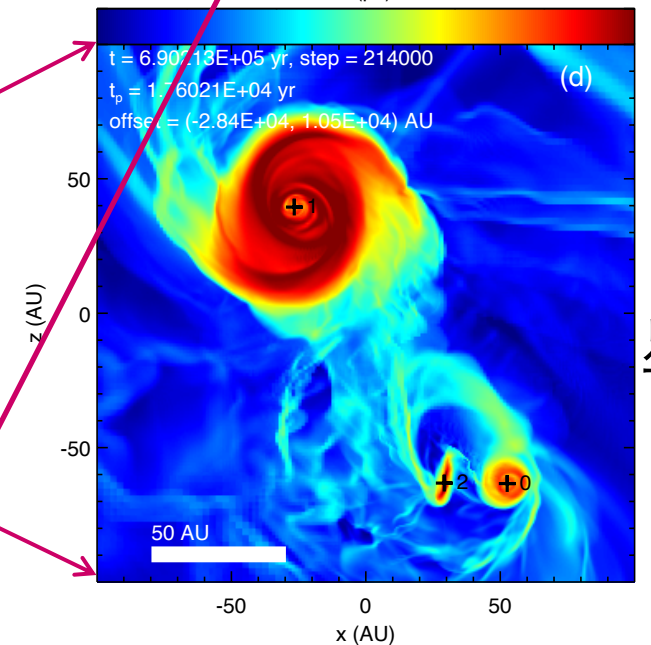
分子雲コア



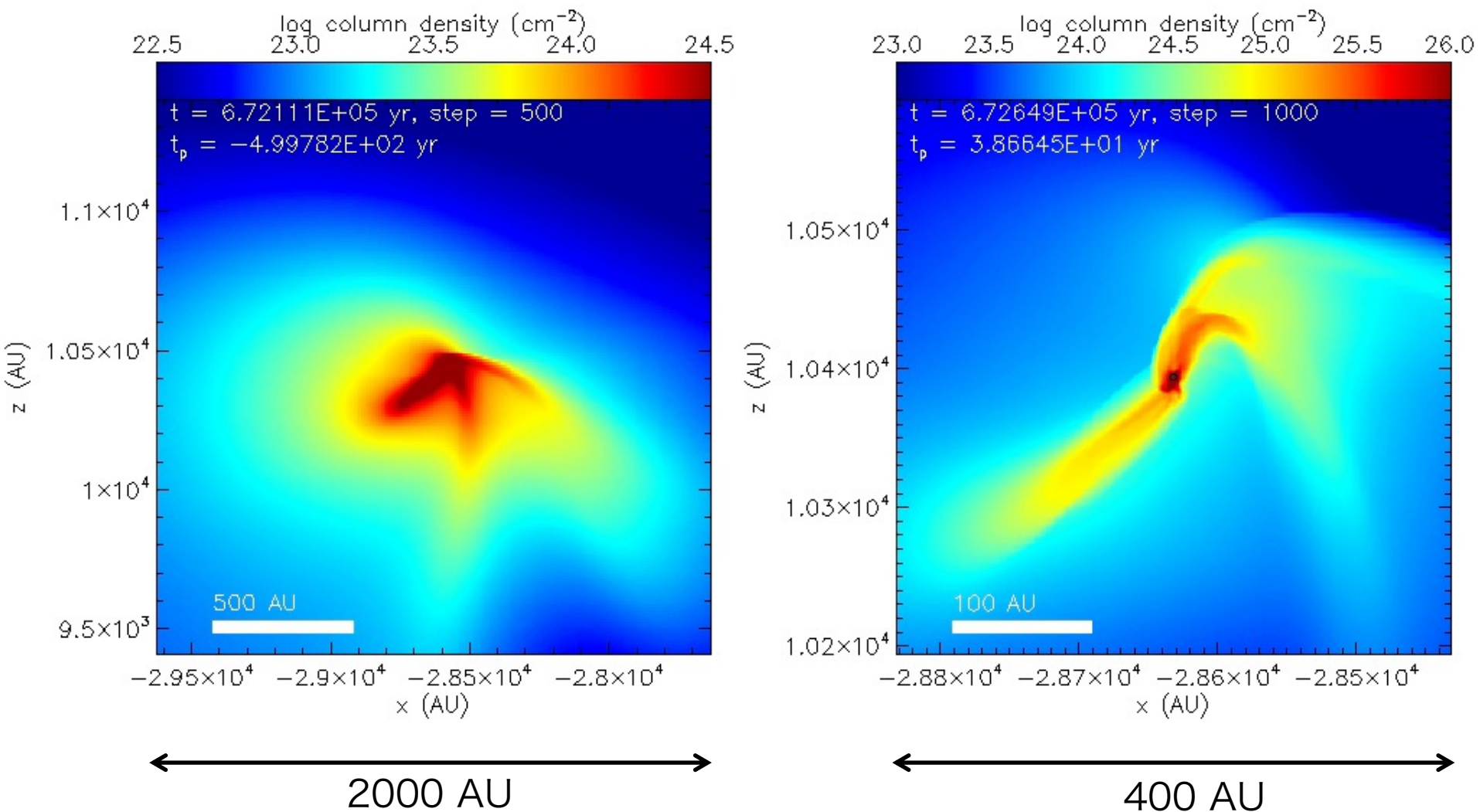
多重星系
アーク



星周円盤

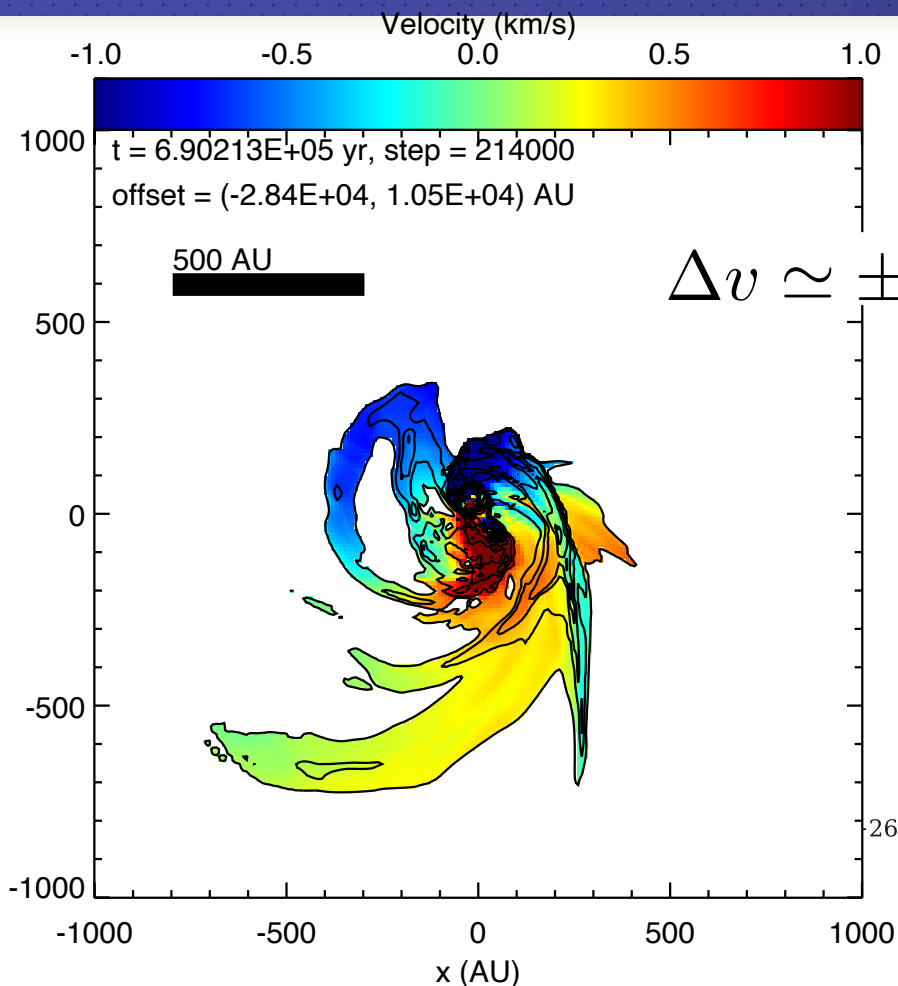


多重星からの擾乱がアークを作る。 Matsumoto+ 15



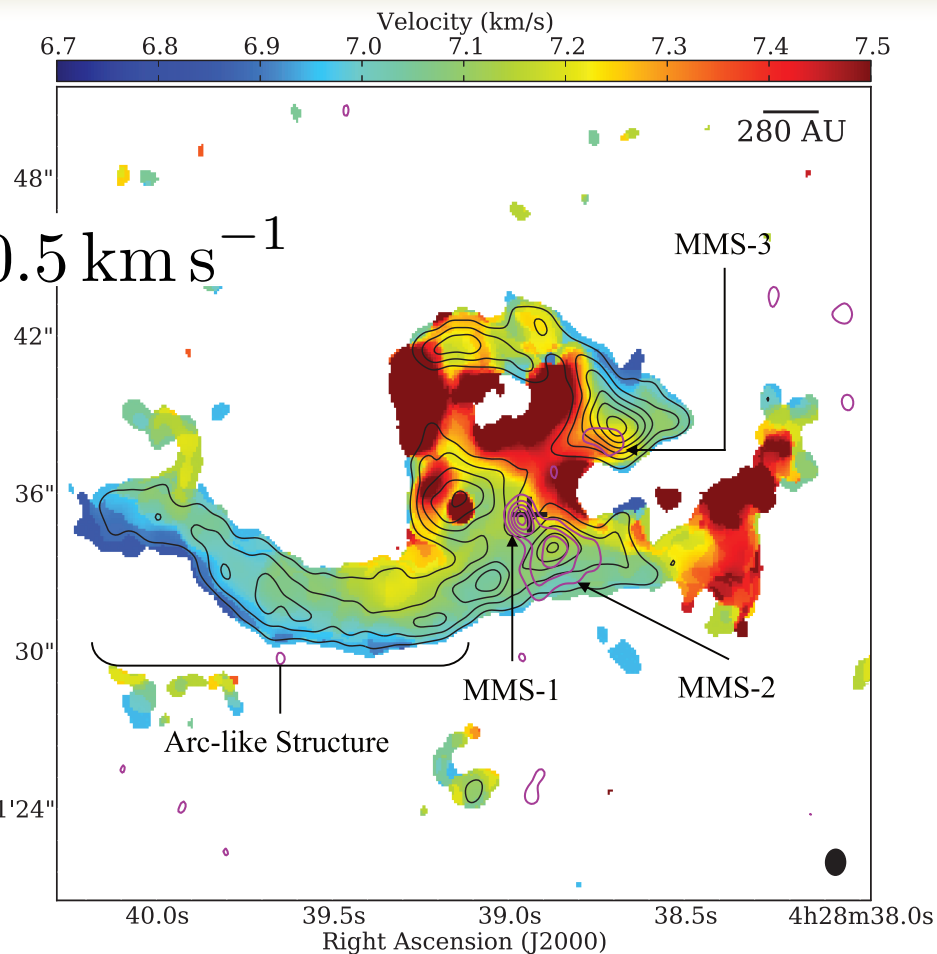
4D2U による可視化 https://youtu.be/_2d8p-NRuBc

形だけでなく、速度も一致。



理論

Matsumoto+ 15



観測 HCO+ (J=3-2)

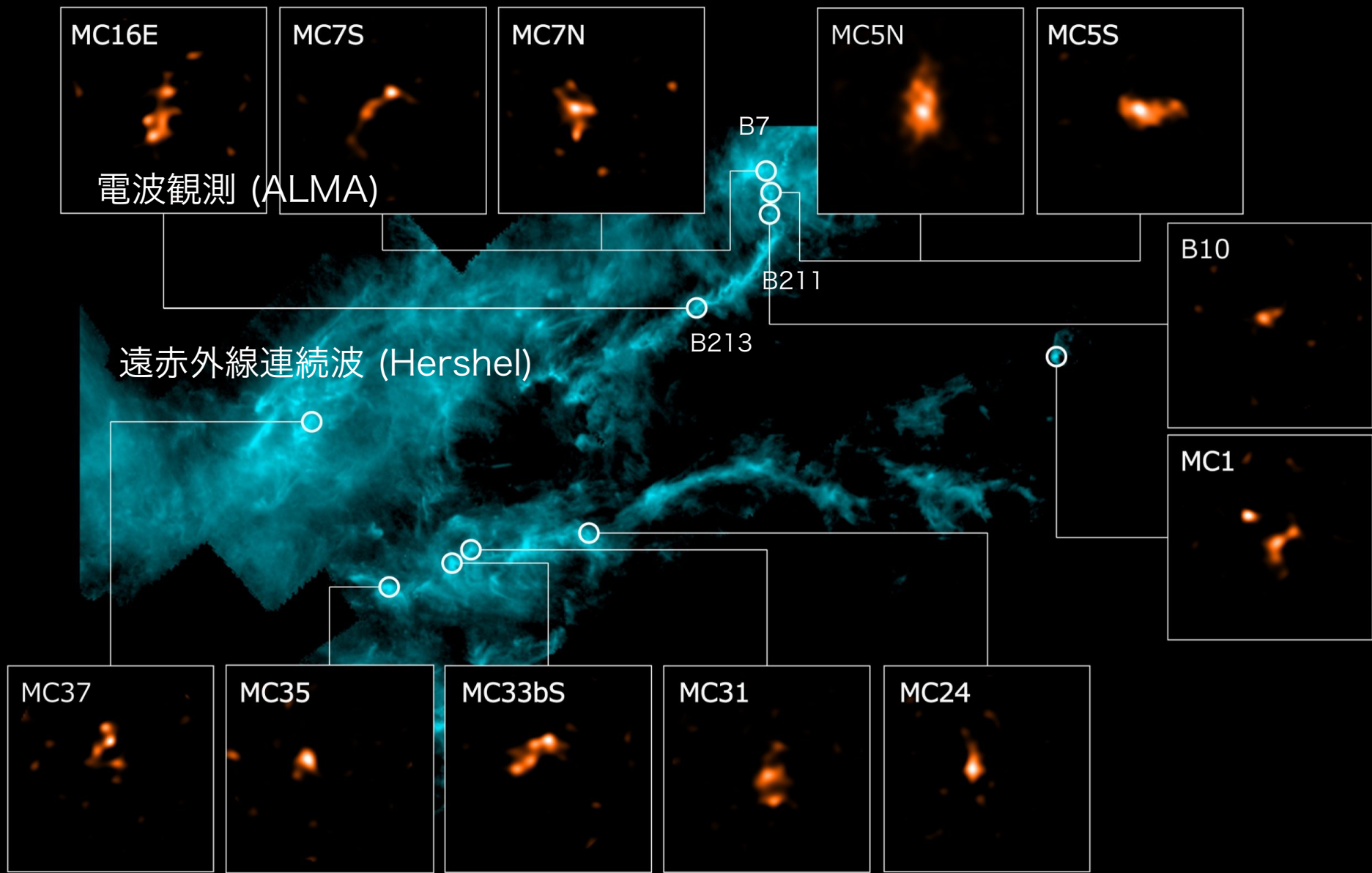
Tokuda+ 14

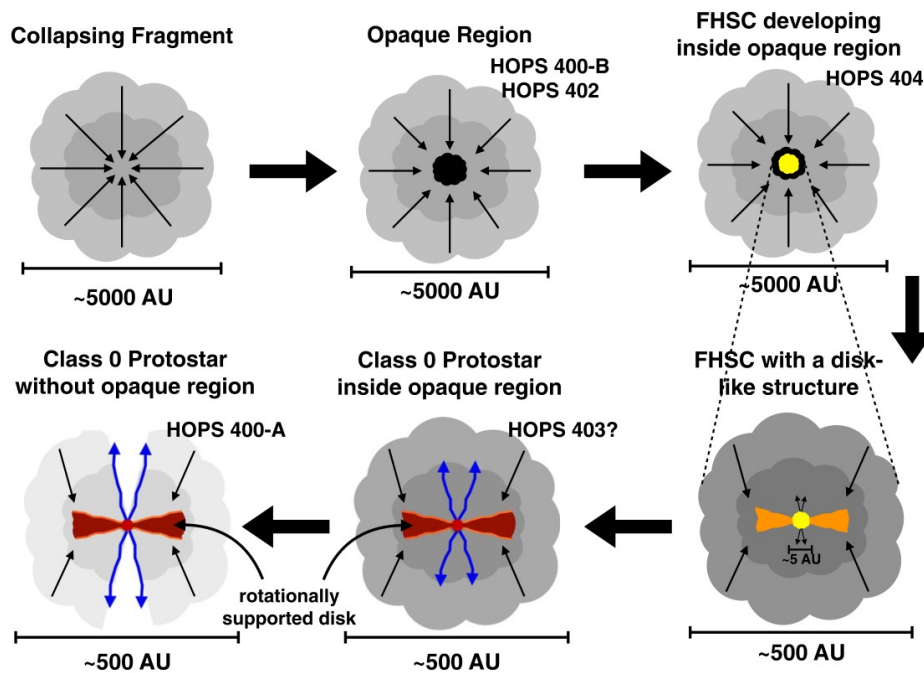
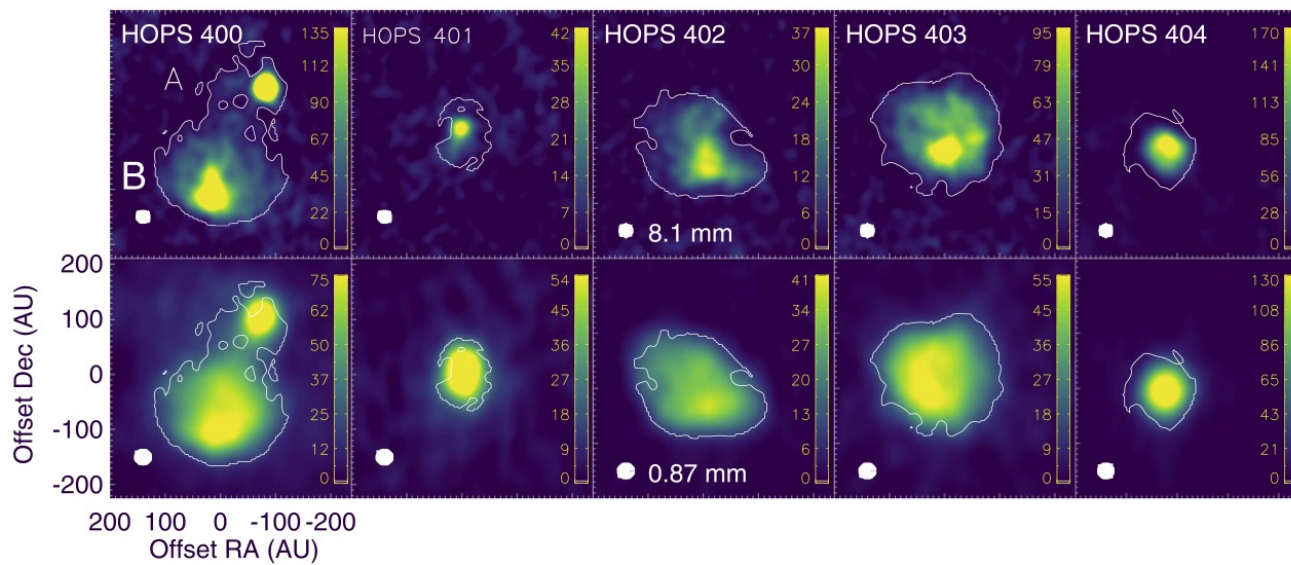
まとめ
理論と観測が
直接比較可能。
新しい時代の到来。

- ・ **星形成はダイナミック**

おうし座分子雲で観測されたファーストコア候補天体（原始星直前の天体）

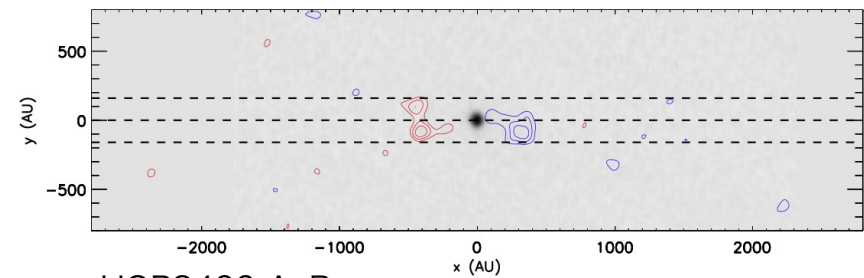
再掲



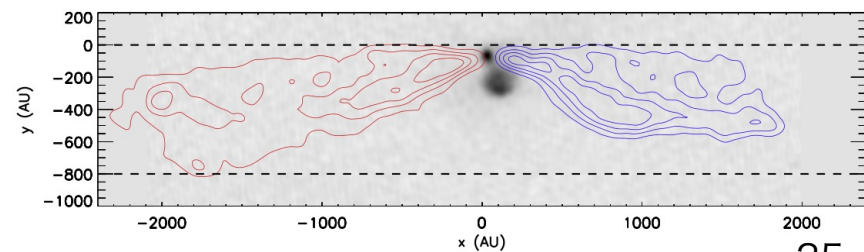


短いアウトフロー

HOPS404



HOPS400 A, B



アウトフロー・
ジェット

アウトフロー・ジェット

分子雲コアはいろいろ捨てないと、星になれない。

捨てるもの1： 熱エネルギー
捨てる人： 輻射

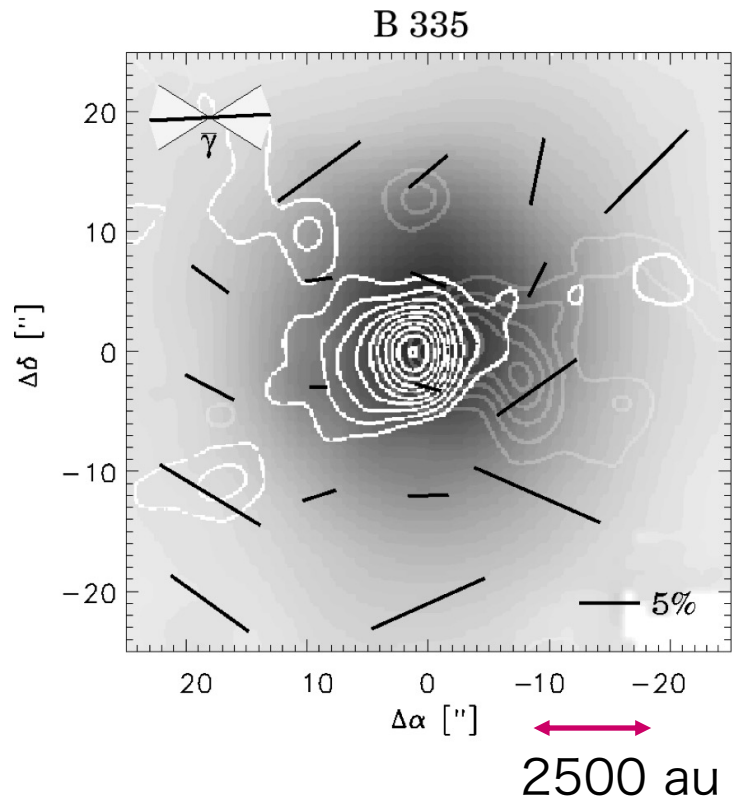
角運動量問題

捨てるもの2： 角運動量
捨てる人： アウトフロー・ジェット・磁気制動

磁束問題

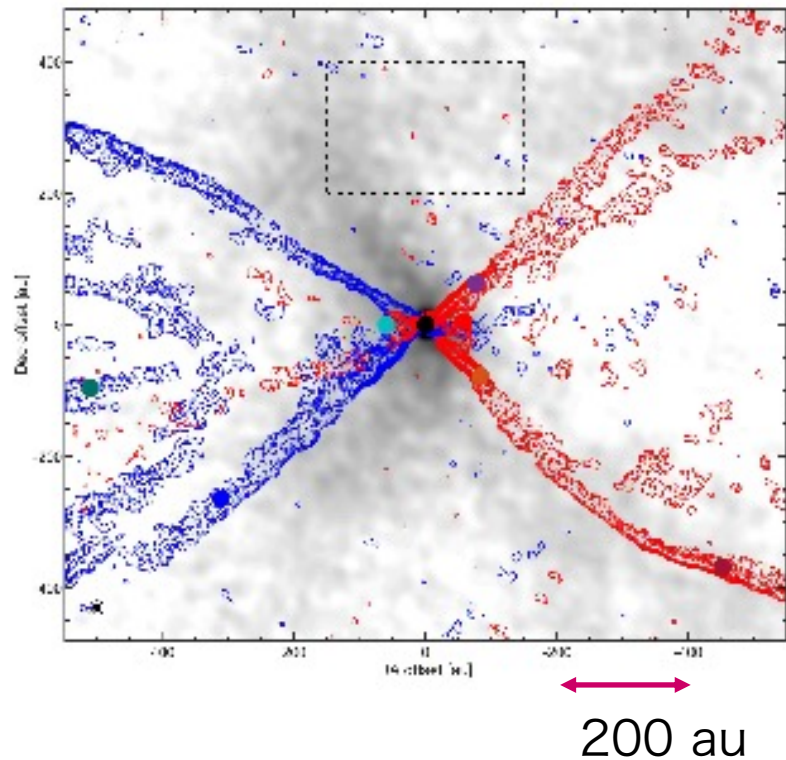
捨てるもの3： 磁束
捨てる人： 磁気散逸 (AD, HE, OD)

アウトフロー (B335)



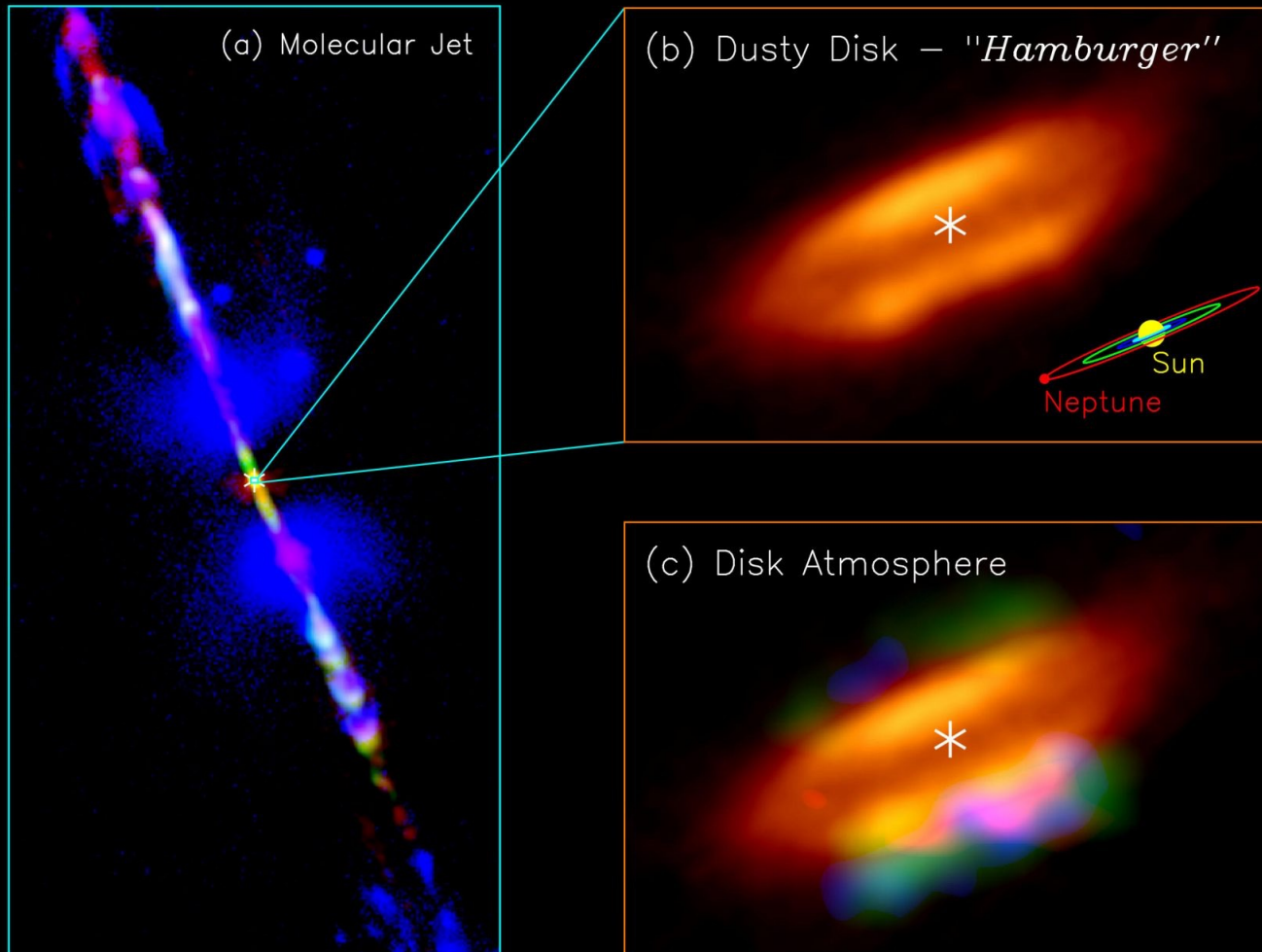
SCUBA $850\mu\text{m}$
Wolf+ 2003
doi:10.1086/375622

v_{LSR} から $\pm (2 - 6) \text{ km/s}$



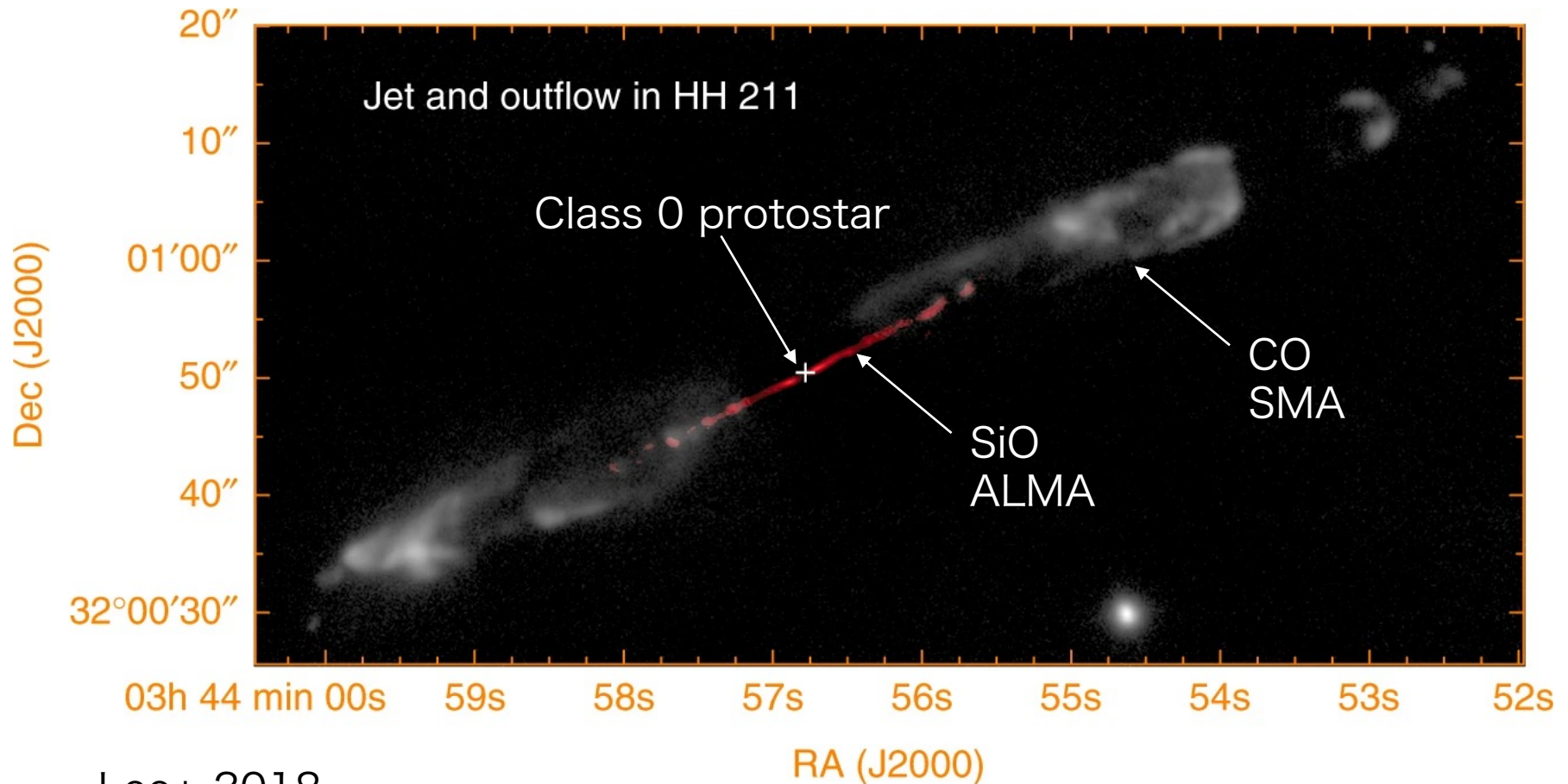
12CO ALMA
Bjerkeli+ 2019
doi:10.1051/0004-6361/201935948

ジェット HH212



ALMA, Lee+ 2017
doi:10.1038/s41550-017-0152

アウトフローに内包されたジェット HH211



Lee+ 2018

<https://doi.org/10.1038/s41467-018-07143-8>

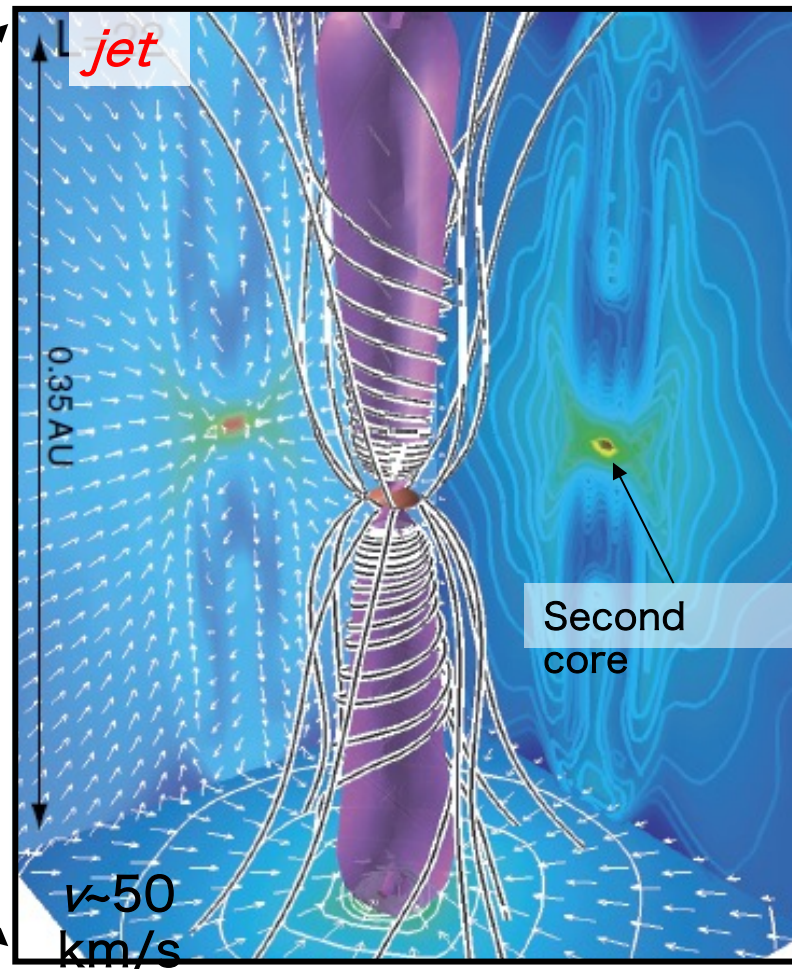
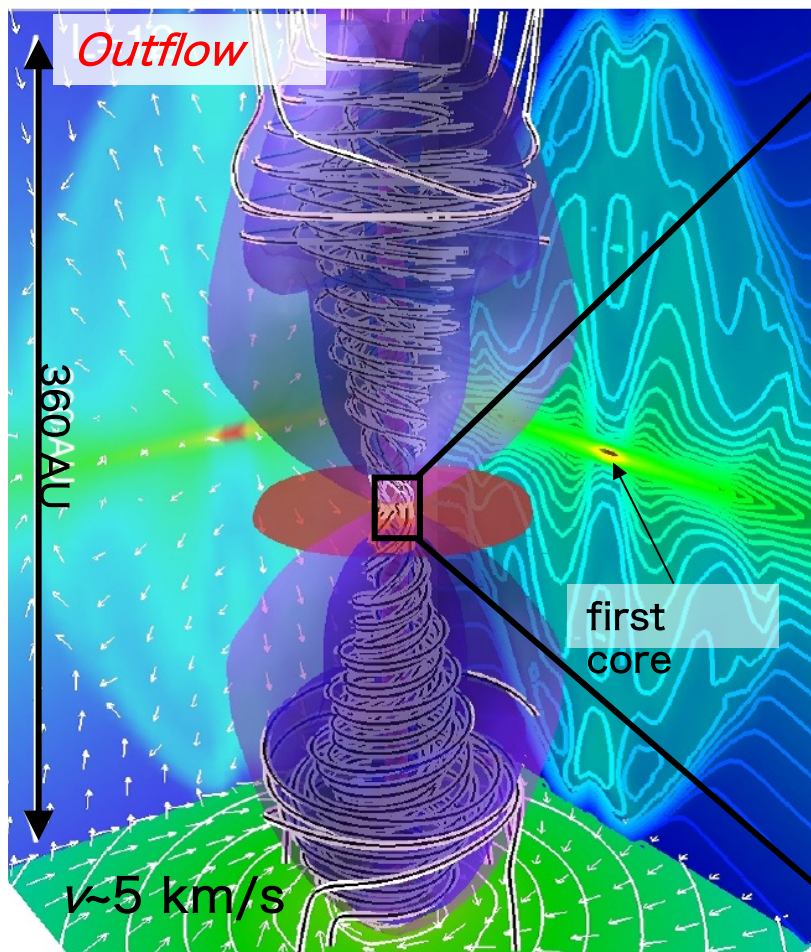
Hiran+ 2010

<https://doi.org/10.1088/0004-637X/717/1/58>

ファーストコア→セカンドコア

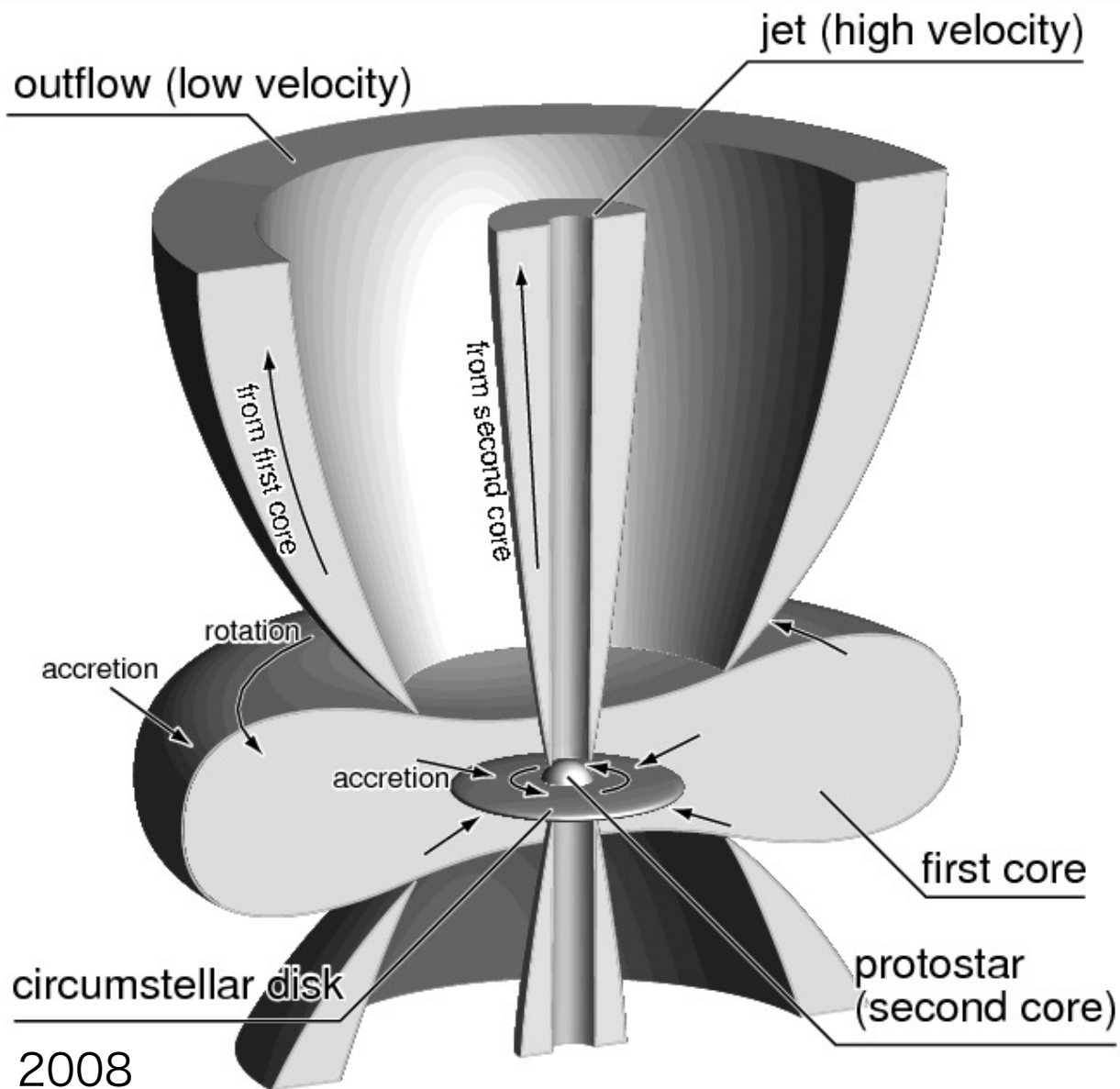
アウトフロー
広いオープニングアングル

ジェット
コリメートした高速流



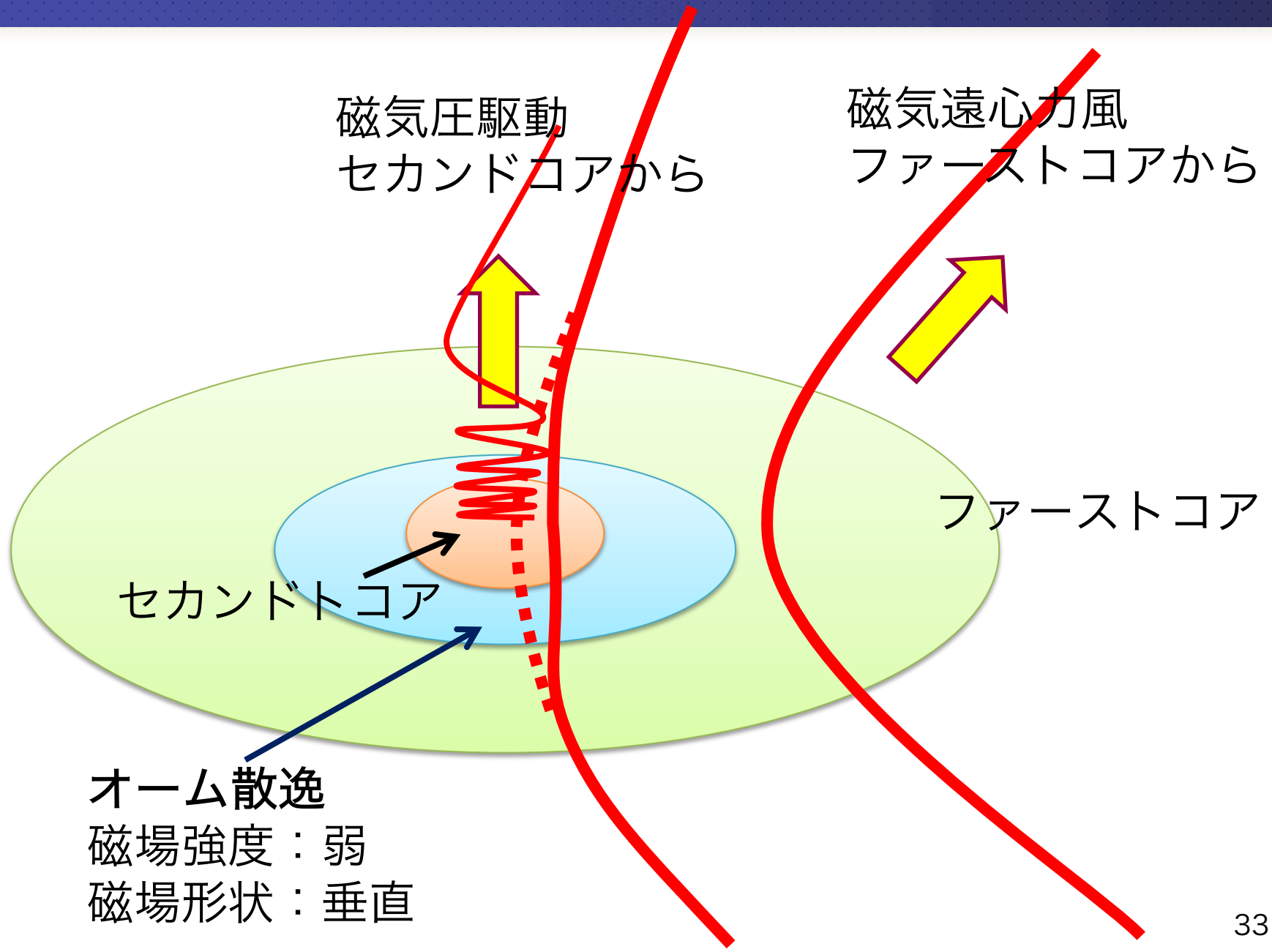
町田正博、犬塚、松本 (2008)

アウトフロー・ジェットの一貫モデル

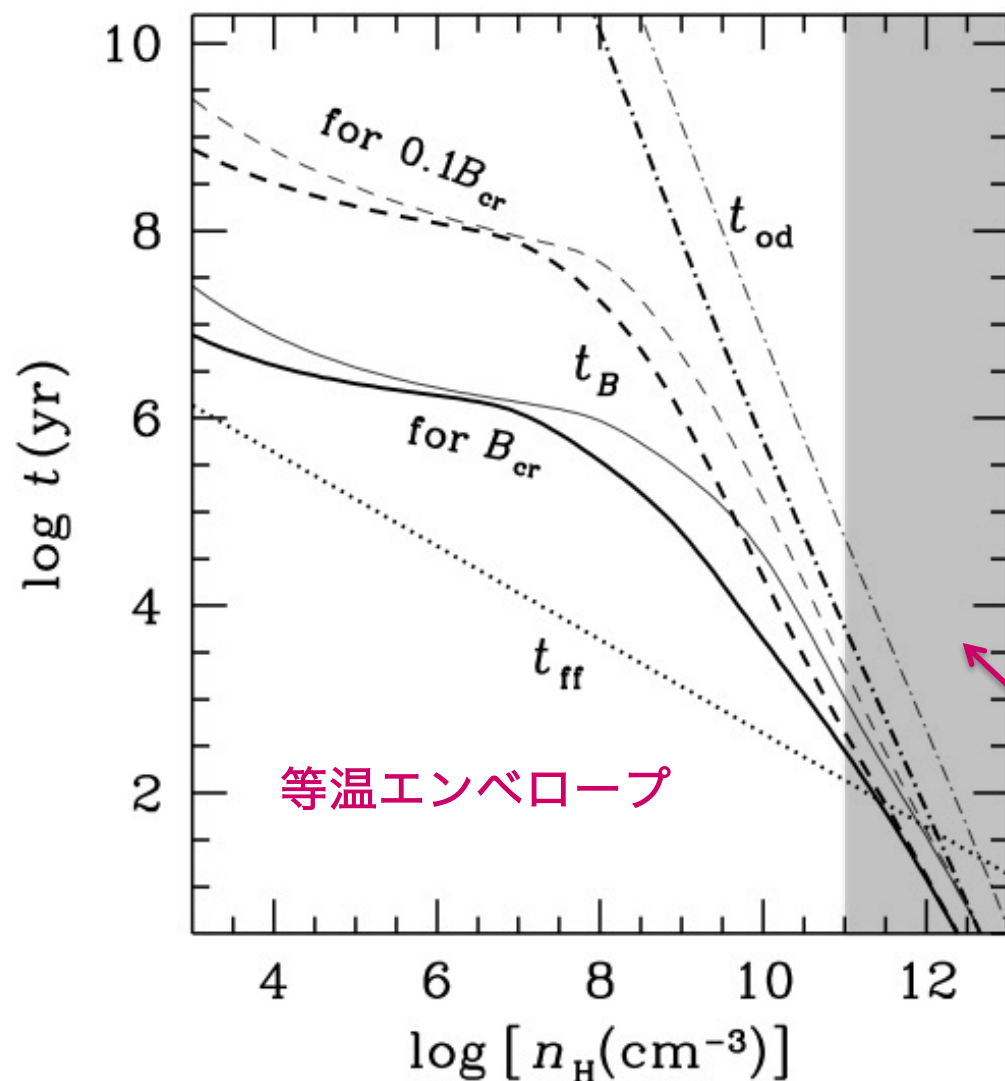


Machida et al. 2008

2種類の加速機構



磁場の散逸過程の重要性



- 高密度では $t_B < t_{ff}$
- ファーストコアでは $t_{ff} < t_{dy}$
(圧力サポート)
- ゆえに $t_B < t_{dy}$
- 天体の進化において磁場の散逸は重要

ファーストコア

- 磁気遠心力風
 - 磁場が強い場合
 - Blandford & Payne (1982)
 - Pudritz & Norman (1986)

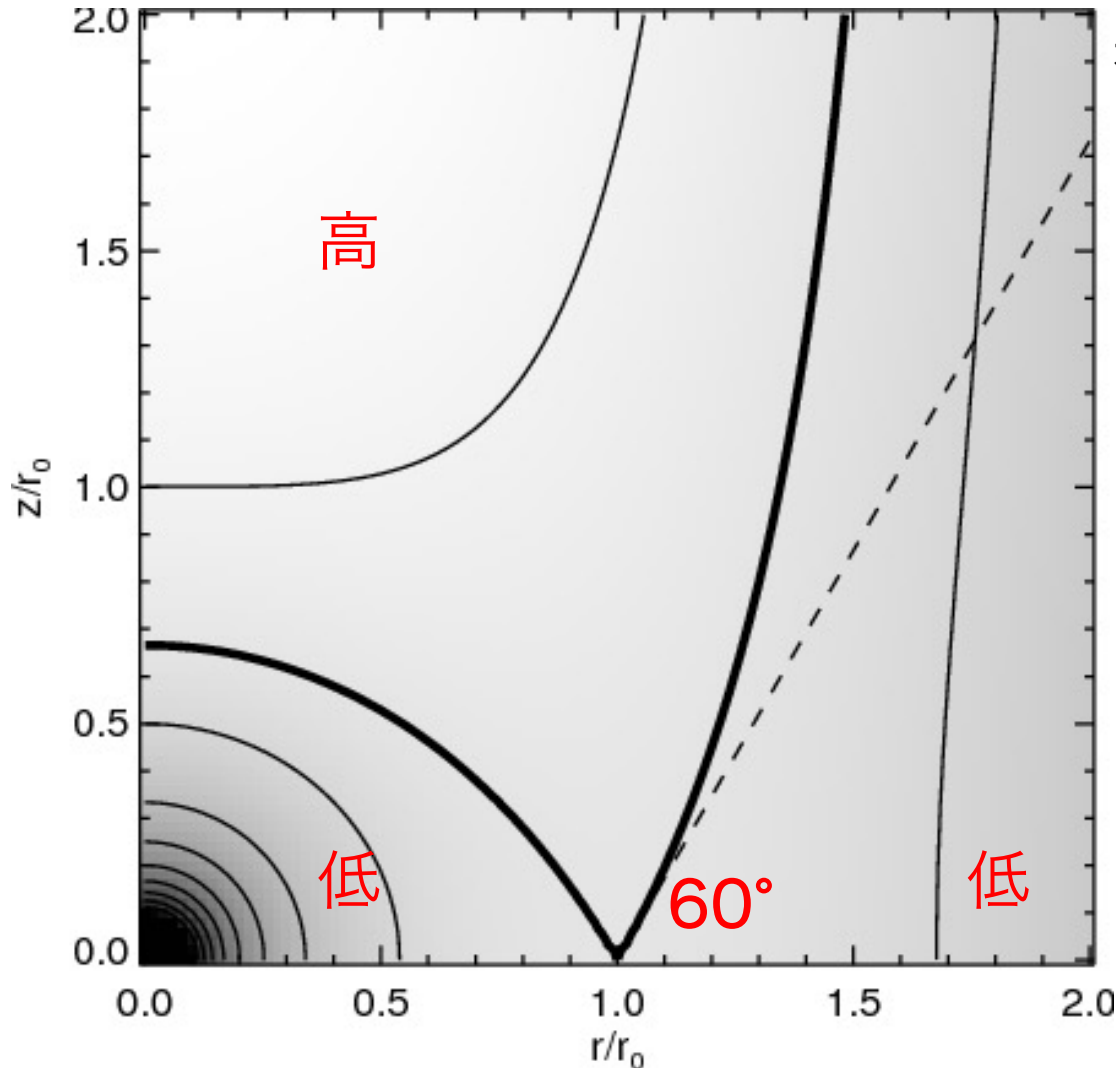
- 磁気圧加速 (Tower jet)
 - 磁場が弱い場合
 - Shibata & Uchida (1985)
 - Lynden-bell (1996)

次の図

実験！

磁気遠心力風の加速機構

$$\Phi_{\text{eff}} = -\frac{GM}{r_0} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 + \frac{r_0}{(r^2 + z^2)^{1/2}} \right]$$

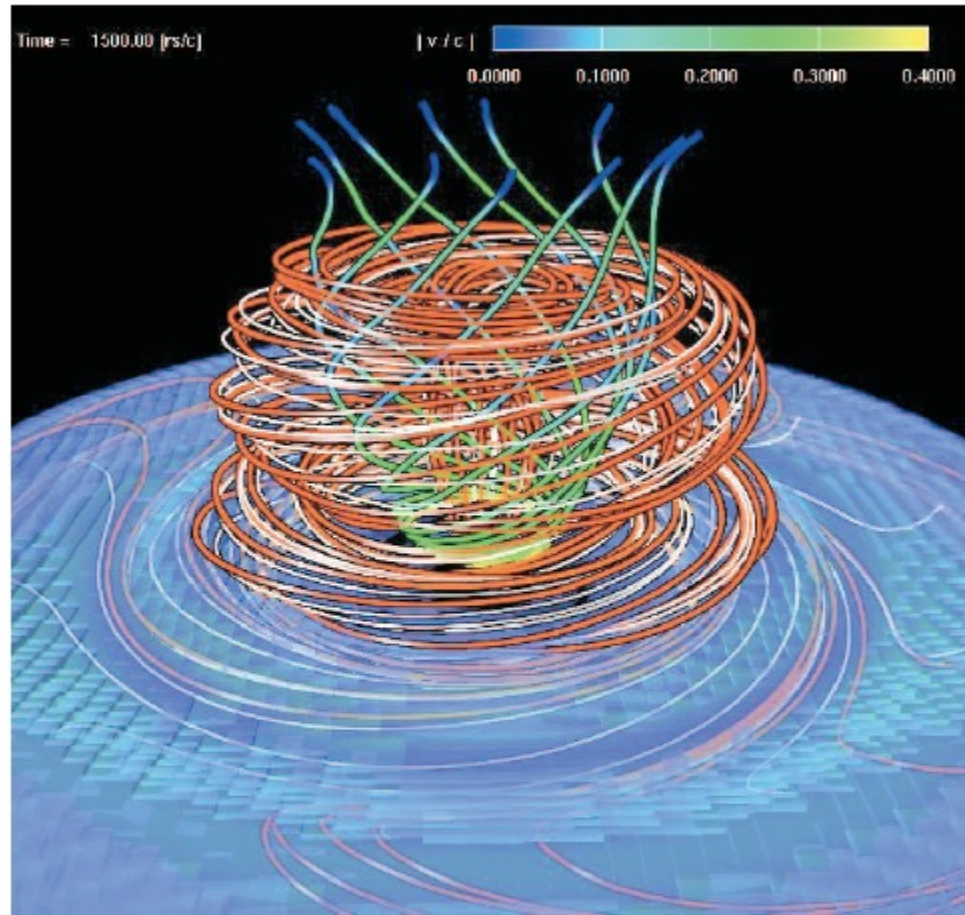


有効ポテンシャル (回転+重力)

Blandford & Payne 1982
doi:10.1093/mnras/199.4.883

Pudritz & Norman 1986
doi:10.1086/163924

磁気圧で加速されるジェット



Kato et al. (2004)

FIG. 3.—Perspective view of magnetic field lines in phase I of model A. Thick red (or thin white) lines indicate magnetic field lines that are anchored to the innermost (somewhat outer) zones at $(r,z) = (1, 1.5)$ [$(r,z) = (56, 10)$]. Thick green lines denote the streamlines of velocity vectors integrated from $(r,z) = (8.5, 7)$, whereas the color bar indicates the velocity. The light-blue shaded region indicates the isovolume of the density ($\rho = 0.025\rho_0$). Accumulated toroidal fields emerging from the disk produce a magnetic tower, thereby driving an MHD jet. Jet material is surrounded by toroidal magnetic fields, whereas poloidal (vertical) fields dominate inside the jet.

ALMAでアウトフローの加速機構が見えた

30 au

Blue/red: $12\text{CO} \pm(2.5-10)\text{km/s}$
Green: continuum
Vectors indicate foot points

Disk wind

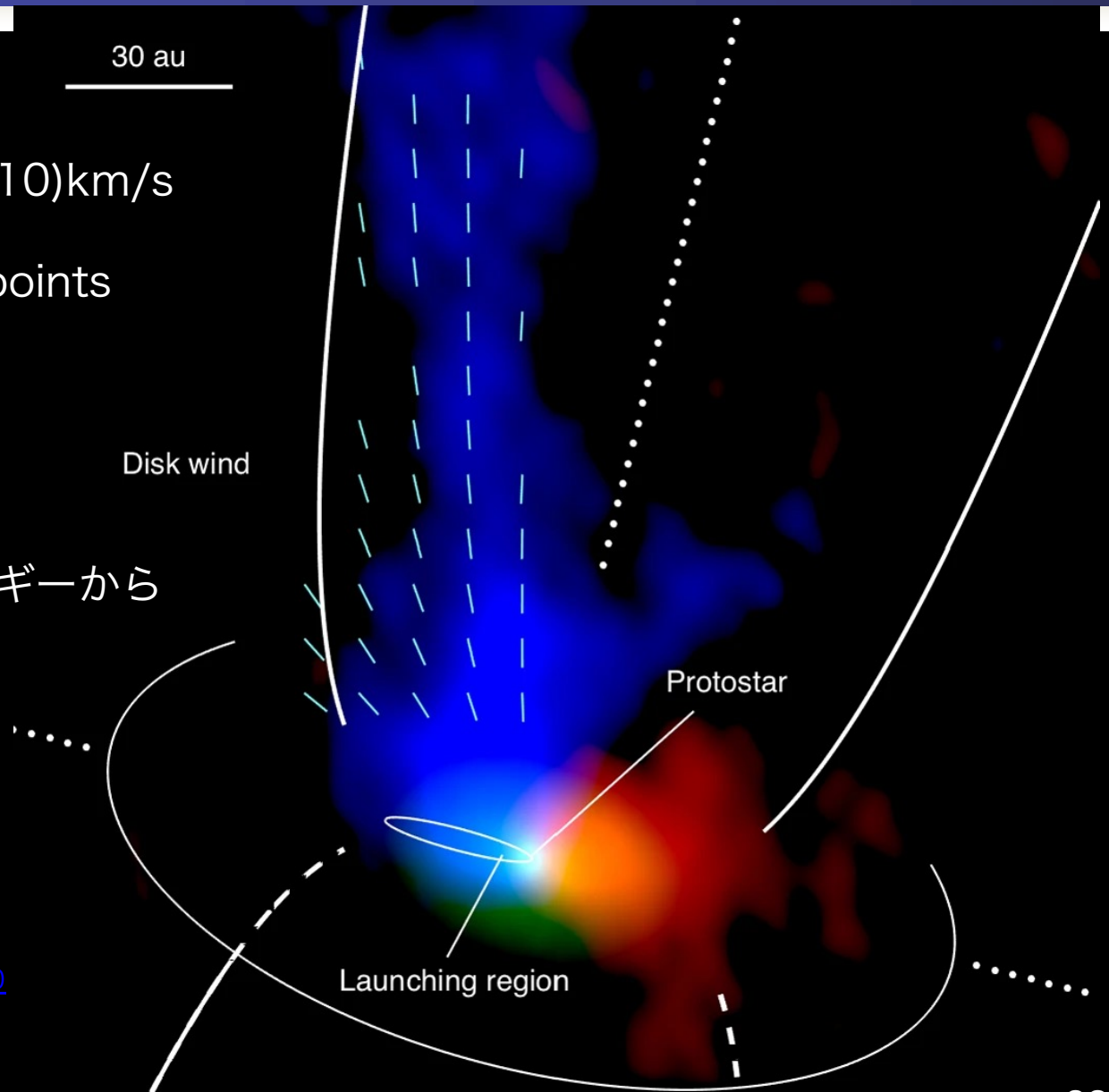
ガスの角運動量とエネルギーから
foot point を割り出す

Protostar

TMC1A, ALMA
Bjerkeli+ 2016

<https://doi.org/10.1038/nature20600>

Launching region



磁気遠心力風

ベルヌイの定理

磁場成分

$$E = \frac{1}{2}(v_p^2 + \Omega^2 r^2) + h + \Phi + \Omega_0(\Omega_0 r_A^2 - \Omega r^2)$$

$$v_p = v_\infty$$

遠方のポロイダル速度を求める

$$\Omega \ll \Omega_0$$

$$v_\infty = \sqrt{2}\Omega_0 r_A$$

$$\frac{v_\infty}{\Omega_0 r_0} = \sqrt{2} \frac{r_A}{r_0}$$

アウトフローの速度 / 円盤の回転速度
 \equiv Alfvén半径 / フットポイント

Alfvén半径 $r_A : v_p = B_p / (4\pi\rho)^{1/2}$

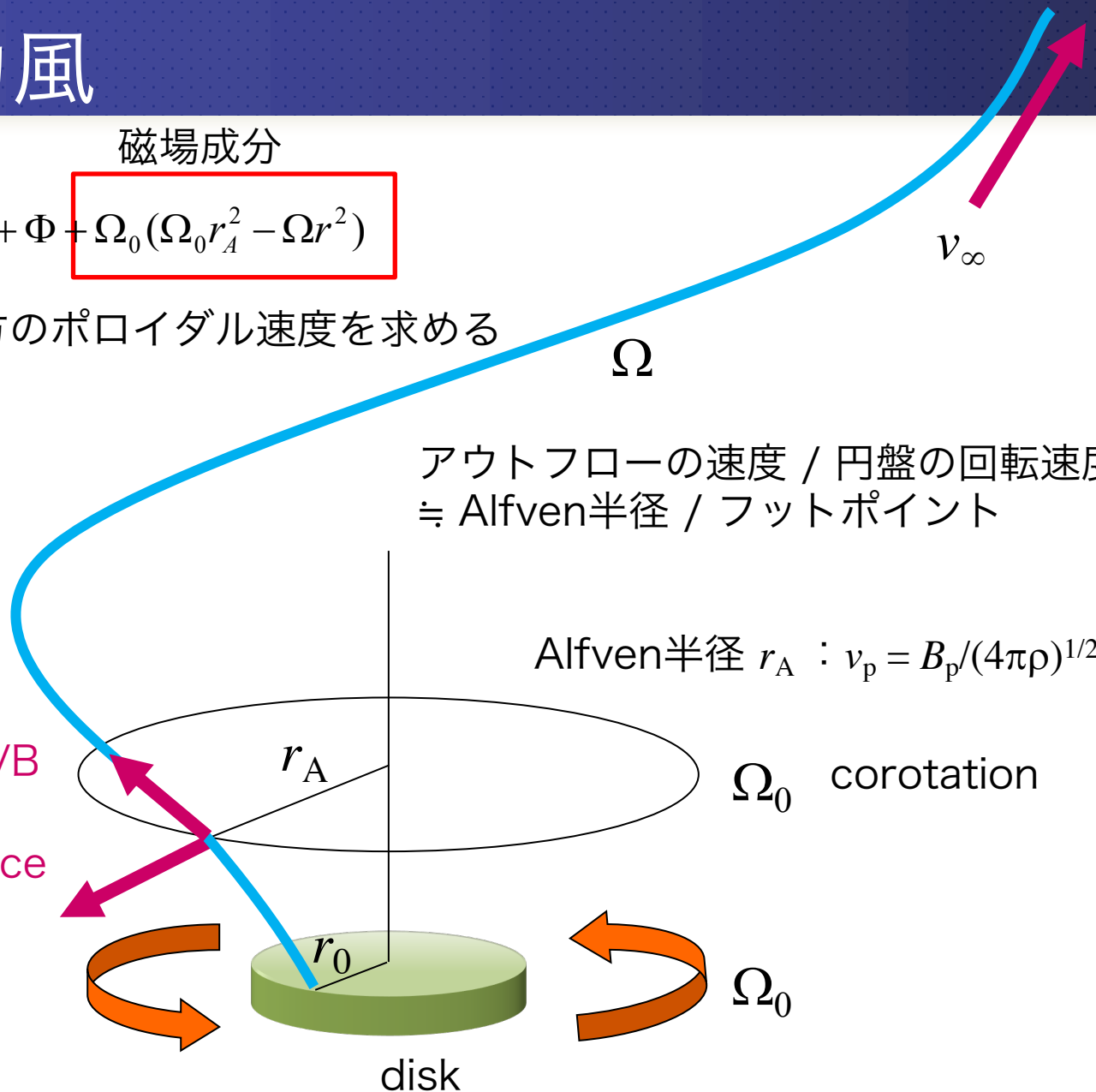
Ω_0 corotation

$F_c \cdot B_p/B$

Centrifugal Force

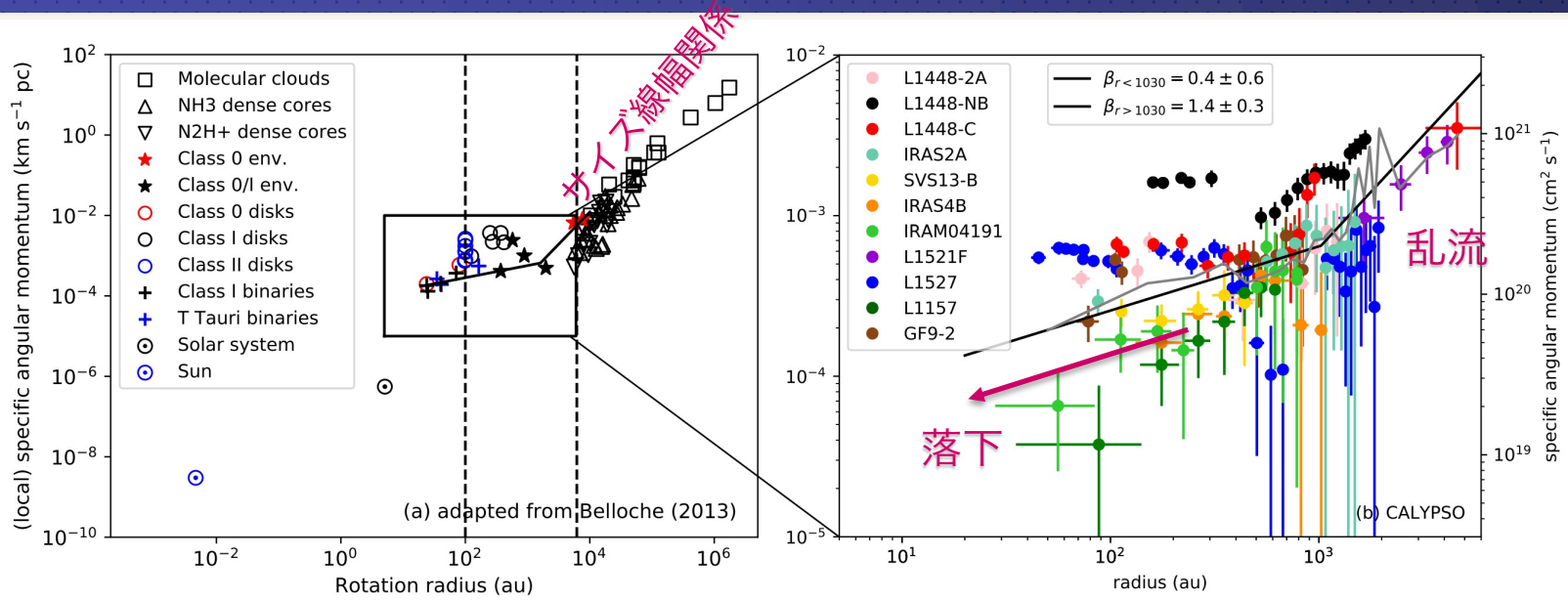
$$\dot{M}_{acc} \approx \left(\frac{r_A}{r_0}\right)^2 \dot{M}_{wind}$$

$$\sim 10\dot{M}_{wind} \quad (for \frac{r_A}{r_0} \sim 0.3)$$

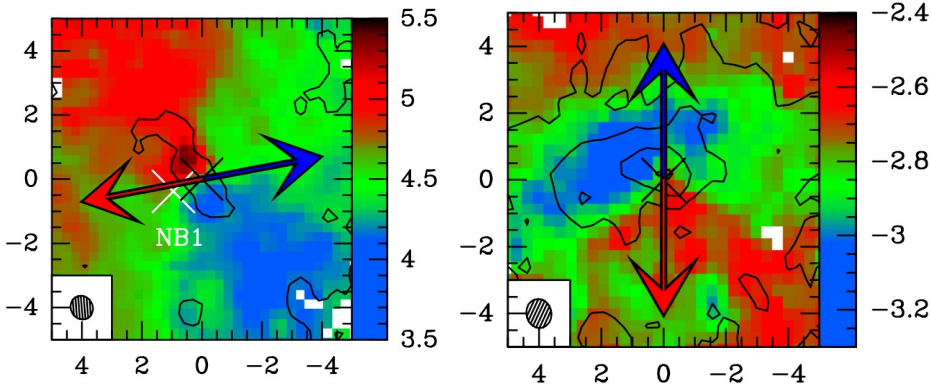


分子雲・分子雲 コアとの接続

Class 0 天体の比角運動量 Gaudel+ 2020 doi:10.1051/0004-6361/201936364



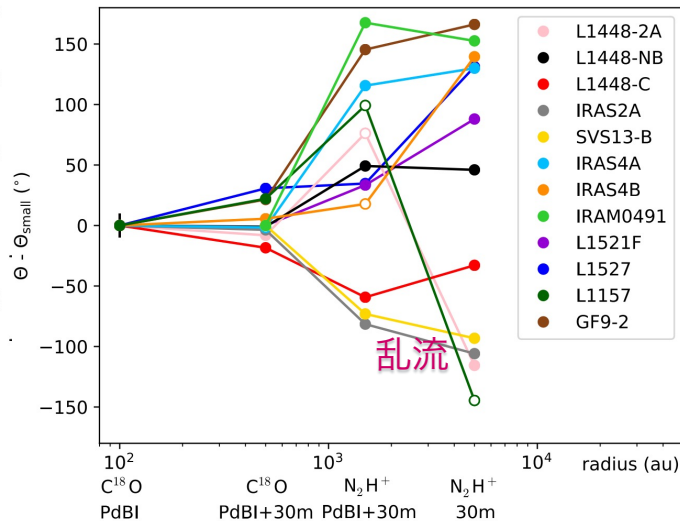
C18O moment 1 maps



L1448-NB

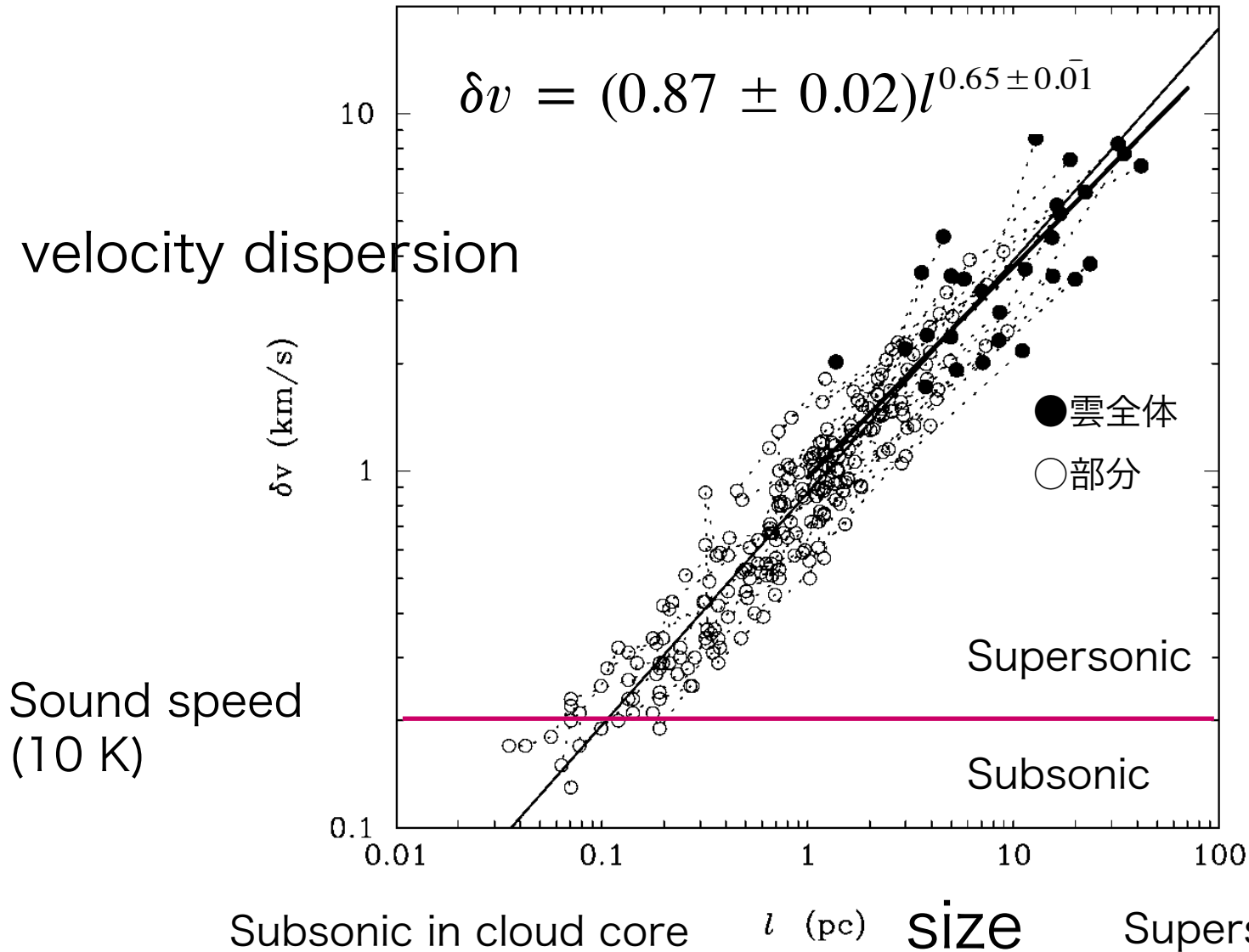
GF9-2

速度勾配の方向のズレ

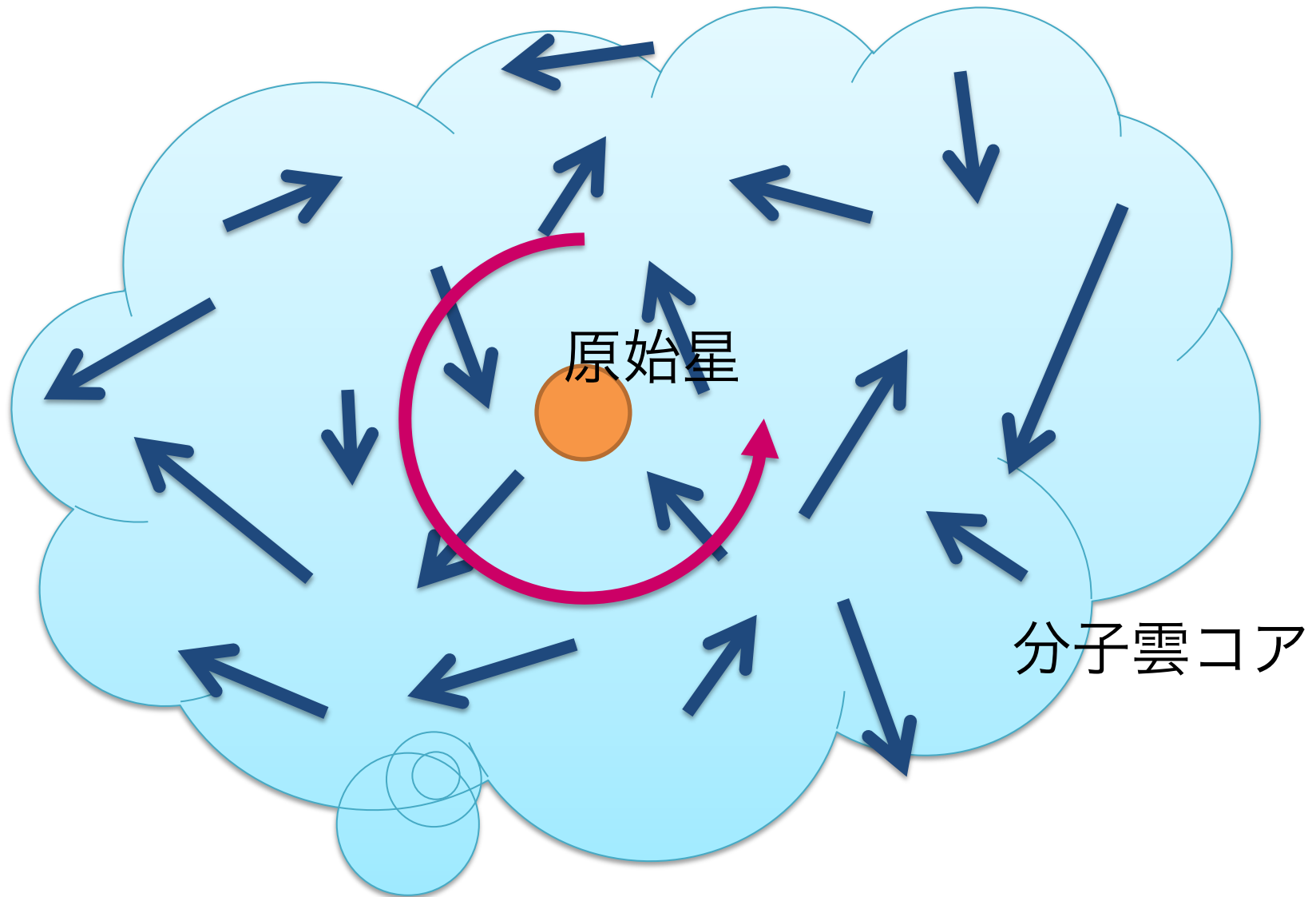


Size-linewidth relation

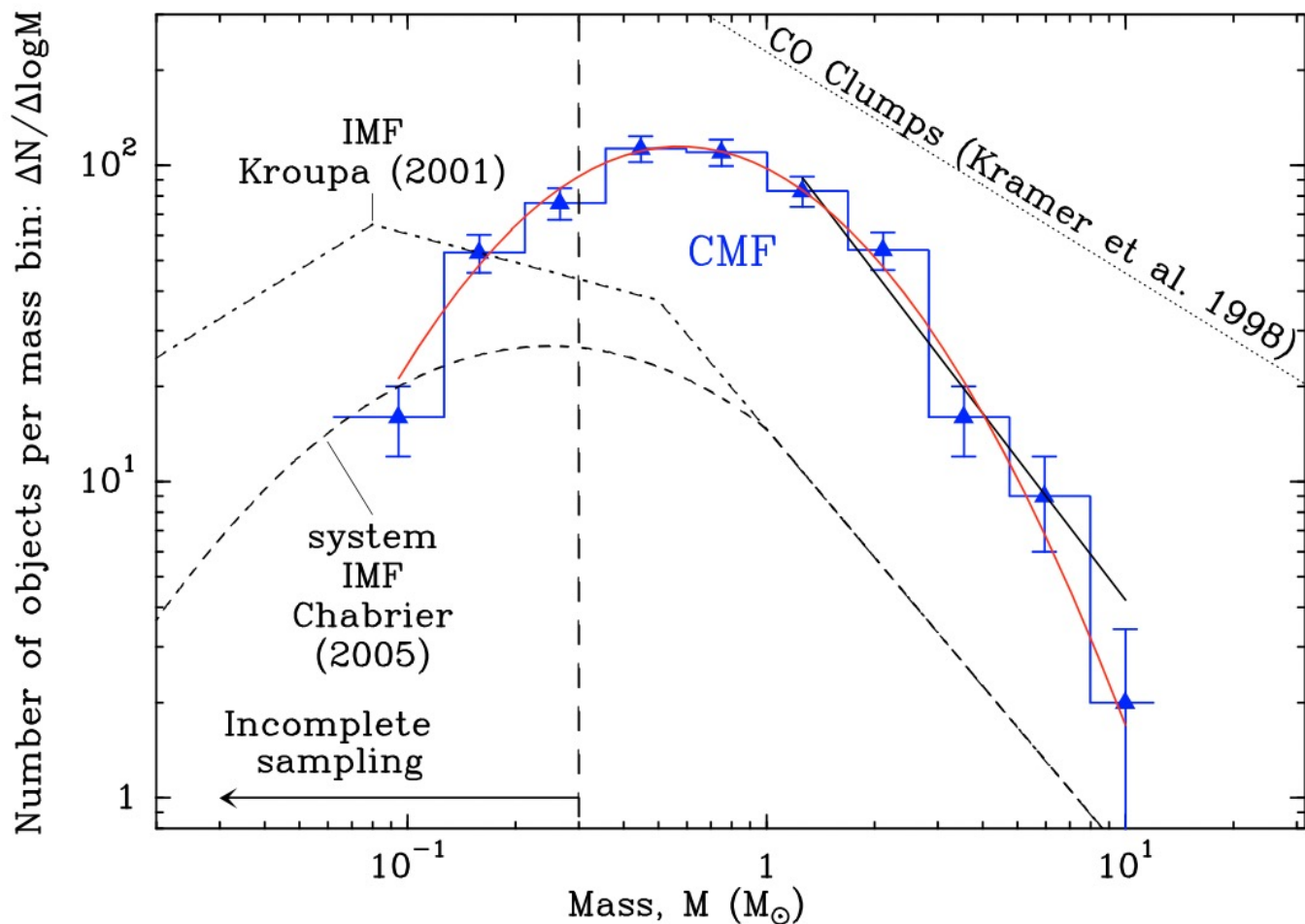
再掲



Heyer+04
doi:10.1086/425978
c.f., Larson 81



CMF と IMF



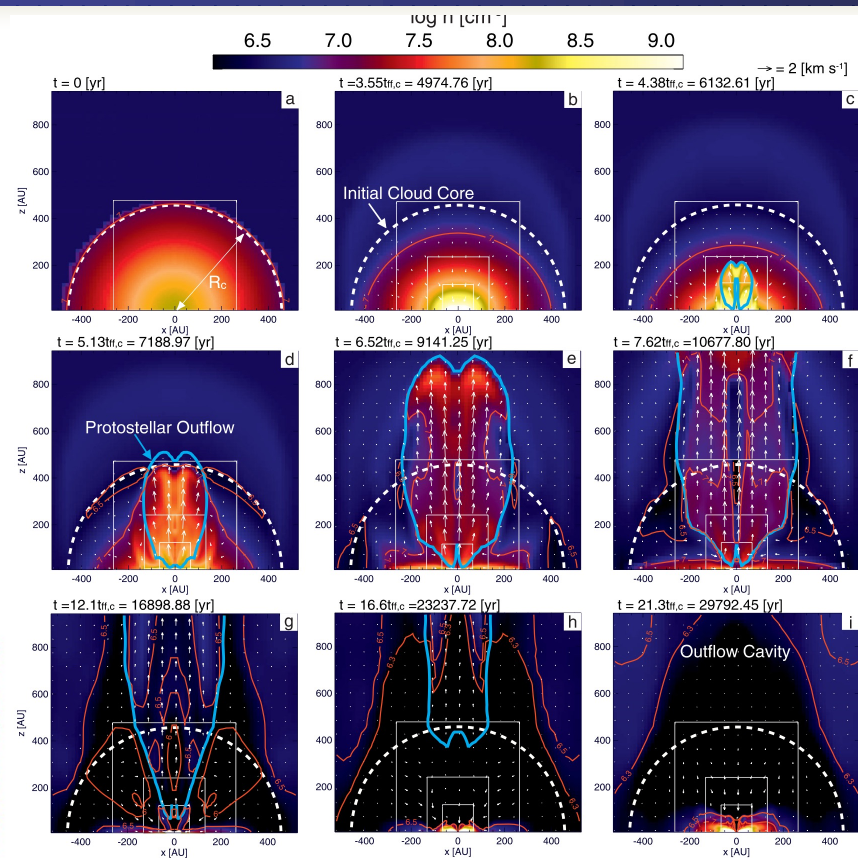
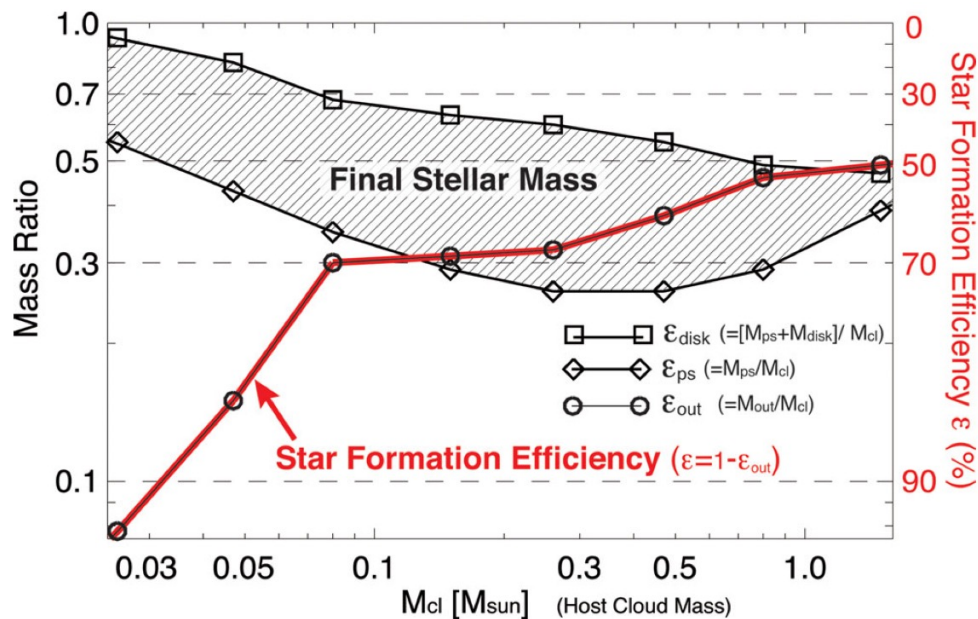
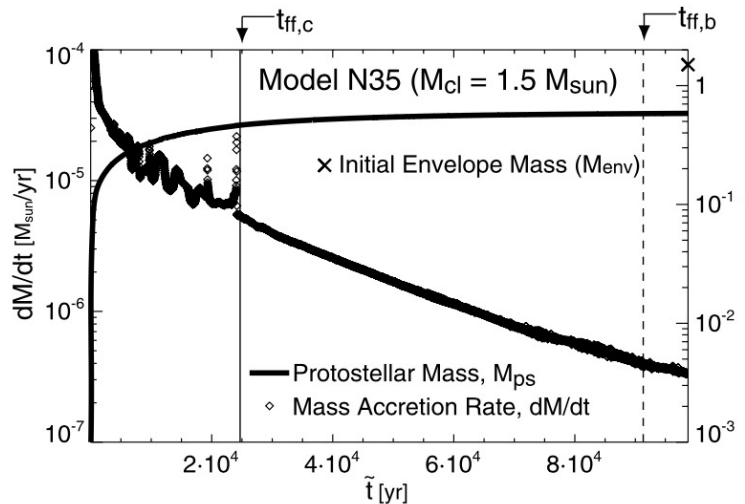
分子雲コアから星が生まれる。
星形成効率は一定と整合する。

Herschel Gould Belt Survey
Andre+ 2010

DOI: 10.1051/0004-6361/201014666

星形成効率

Machida+ 2012
doi:10.1111/j.1365-2966.2011.20336.x



アウトフローが分子雲コアを散逸
質量降着が終了→星の質量が決定

この分野で残された話題

- 星形成の始動条件
 - 観測的に分子雲コアの収縮条件を確立
- 分子雲コアの形成と散逸
 - なんとなく理解しているが…
- ファーストコアの確認
 - 現状は候補天体どまり
- ジェットとアウトフローの加速機構
 - 独立な加速機構を観測で確認したい
- 原始星円盤の観測的研究
 - 惑星形成と関連
- 円盤から原始星への質量降着
 - シナリオにもとづく理論モデルはある