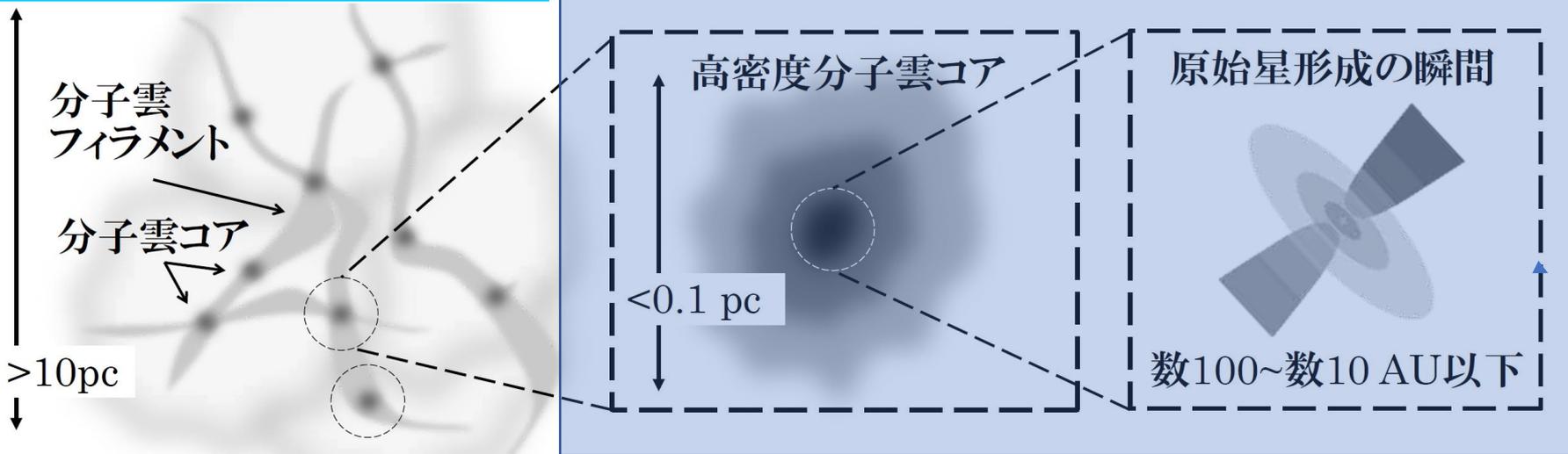


星形成理論の構築に向けて 近年の発展と今後の課題

町田正博 (九州大学)

星形成シナリオ

大阪府大の徳田君の発表ファイルから



井上君

Inutsuka et al. (2015)

Inutsuka (2012)

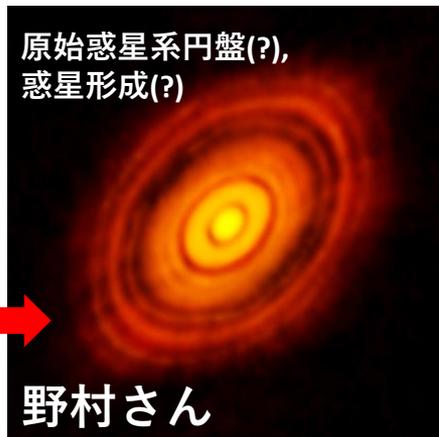
星形成の初期条件:
分子雲コア
(観測から良く分かっている)

星形成の結果:
原始星, ジェット, アウトフロー,
星周円盤, 磁場構造
(観測から良く分かっている)

この話で扱う星形成

- 分子雲コアの重力収縮
- 原始星の誕生
- 星周円盤の形成と成長
- アウトフロー、ジェットの駆動
- 質量降着段階の終了

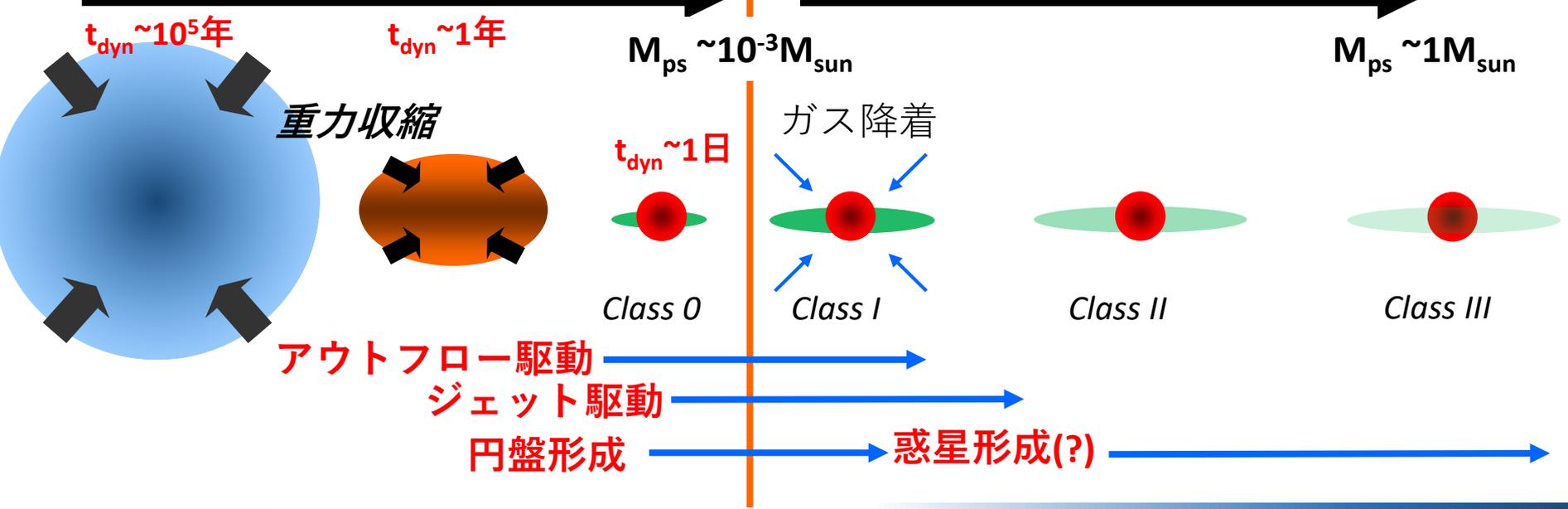
星形成理論は、まだ、
ここまで届いていない



星形成：時系列

ガス収縮段階(前期段階)

ガス降着段階(後期段階)



観測可

観測困難
(空間・時間スケール)

観測可

理論研究で補完・理解

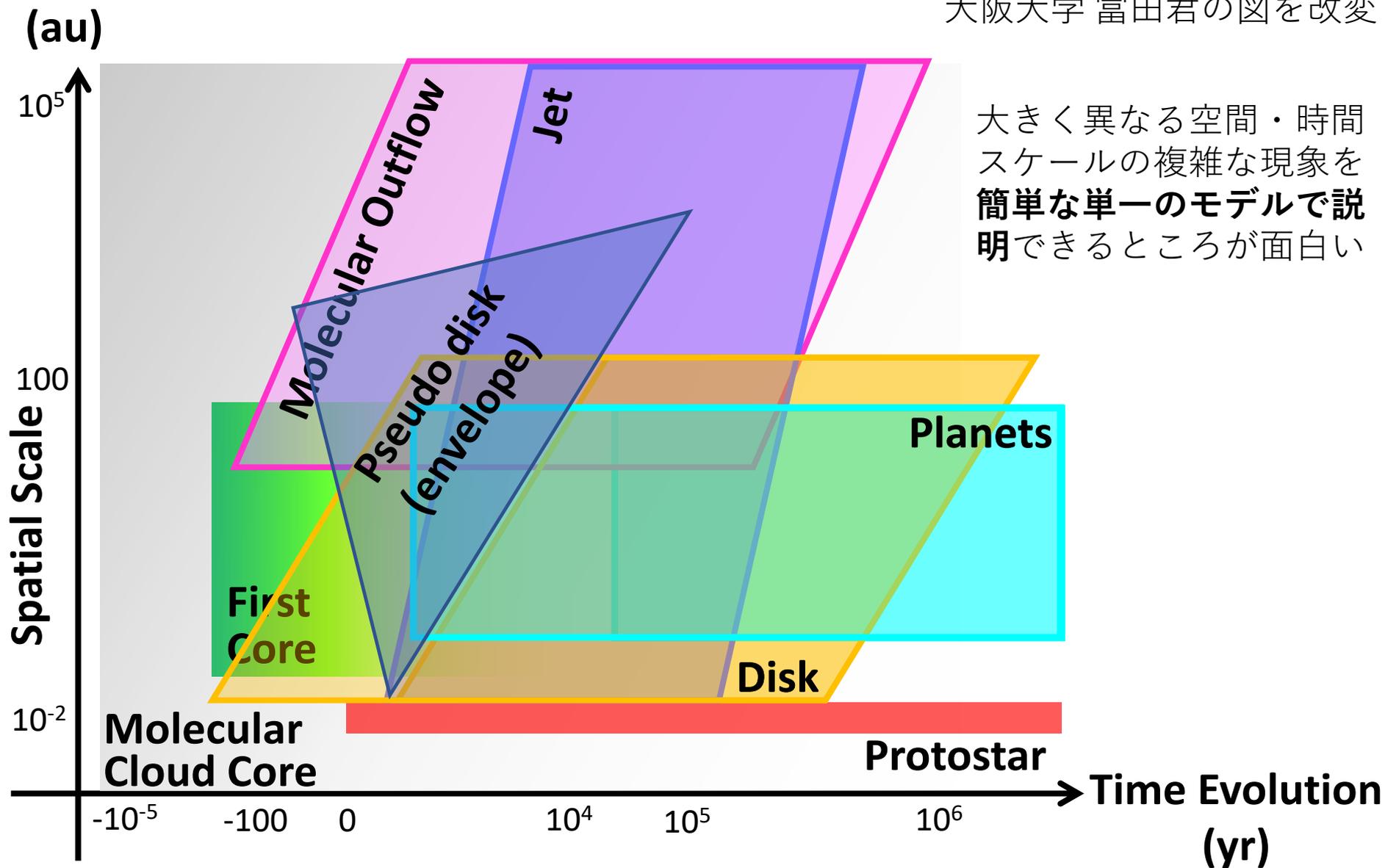
理論研究可
(原始星まで空間分解)

星形成の理論研究困難
(長時間積分・空間スケール；
惑星形成は適当な初期条件で)

星形成過程での様々な現象 (これまでの観測と観測からの示唆)

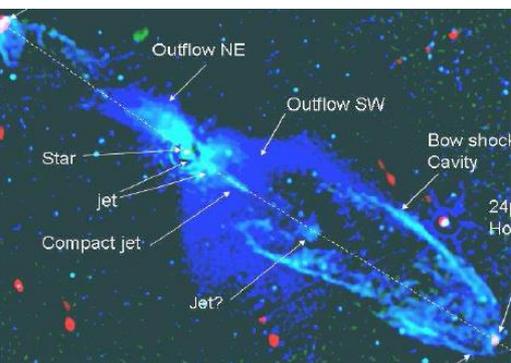
説明すべき異なる空間, 時間の構造と現象

大阪大学 富田君の図を改変

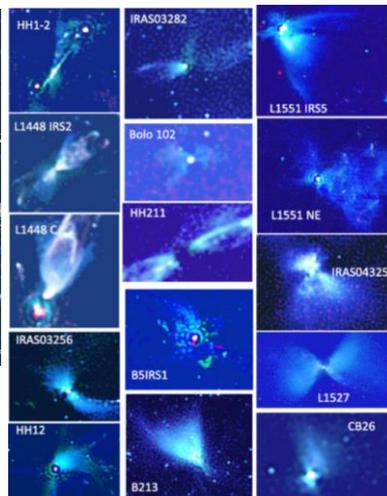


大きく異なる空間・時間スケールの複雑な現象を簡単な単一のモデルで説明できるところが面白い

星形成過程で観測される現象: ジェット・アウトフロー



Velusamy et al. (2007)

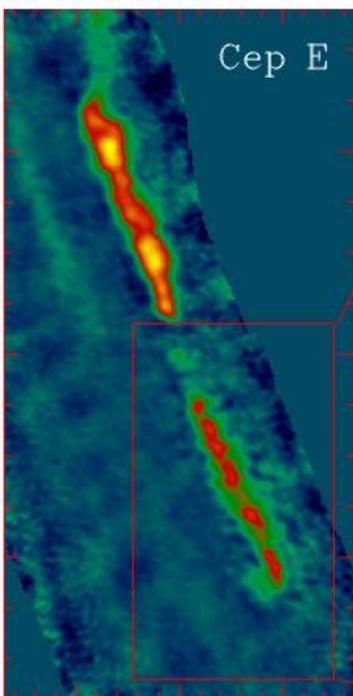


Velusamy et al. (2014)

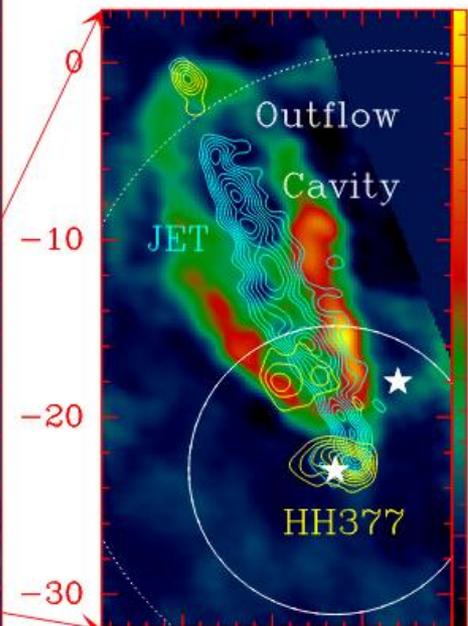


Astronomers using the Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array (ALMA) have imaged the episodic outflow of a young protostar known as CARMA-7. The twin jets — each nearly 1.5 trillion kilometers long — have distinct gaps, revealing that the star is growing by fits and starts. (Image courtesy of B. Saxton, NRAO/AUI/NSF; A Plunkett et al.; ALMA, NRAO/ESO/NAOJ)

Lefloch et al. (2015)

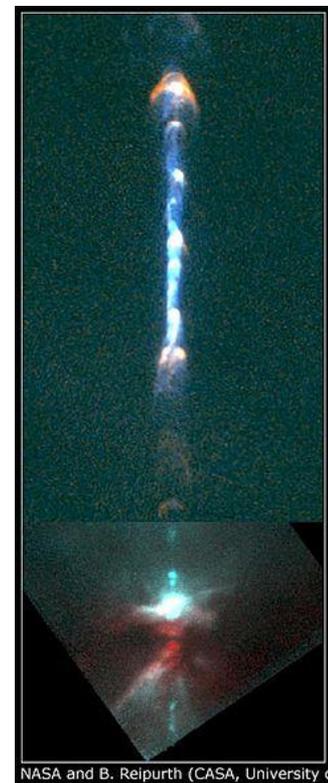
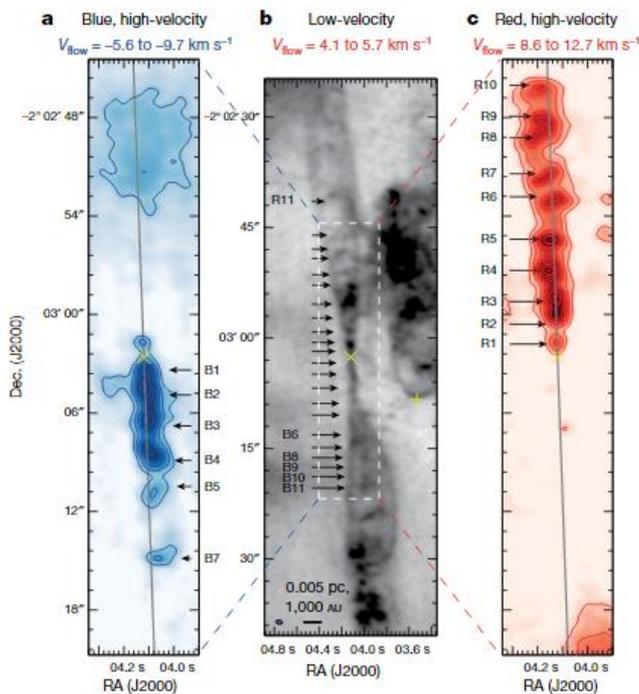


$\Delta\alpha$ (")



$\Delta\alpha$ (")

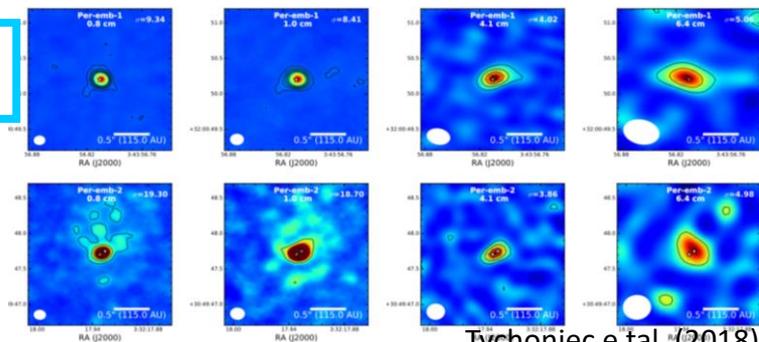
駆動領域は $<0.01\text{AU}$ 、広がりは $>1\text{pc}$
Plunkett et al. (2015), Nature



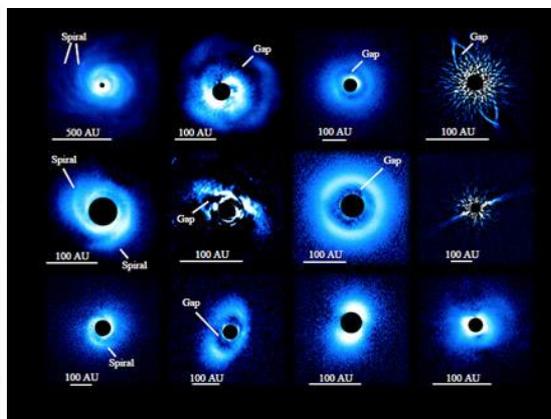
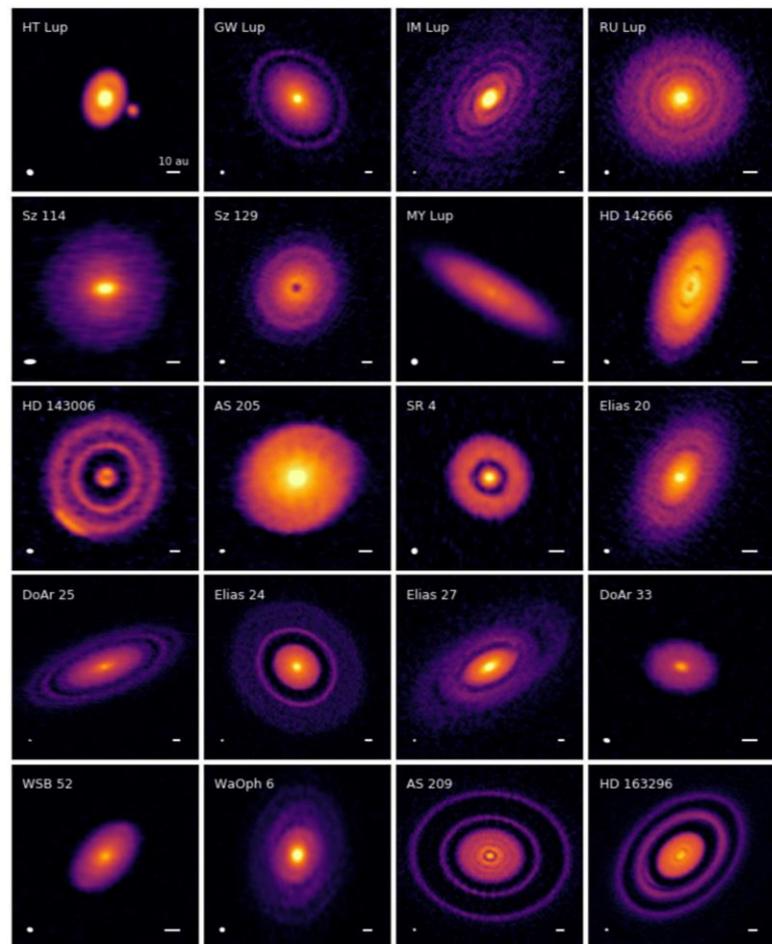
NASA and B. Reipurth (CASA, University of

星形成過程で観測される現象:星周円盤

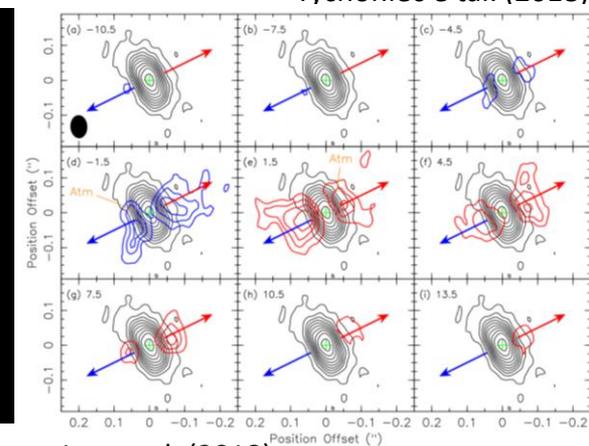
- 単に参考のための観測結果
- 進化段階、観測波長、空間解像度など各々異なるので注意
- ようやく若い段階の円盤の姿が分かるようになってきた



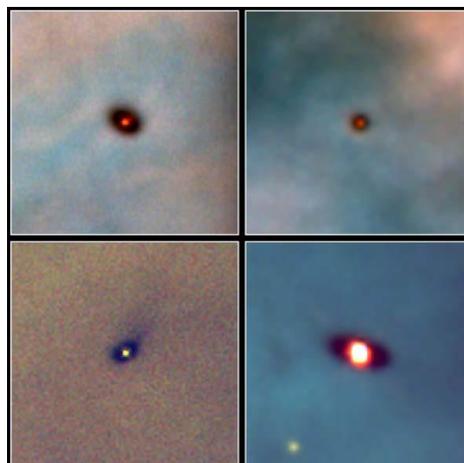
Tychonic et al. (2018)



SEEDSプロジェクトから



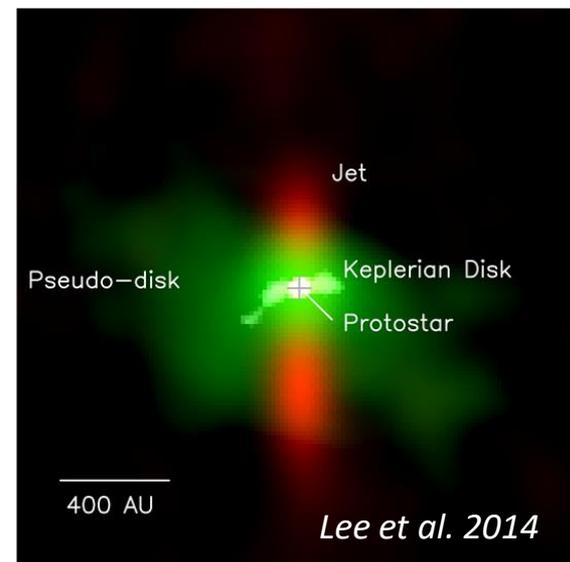
Lee et al. (2018)



Protoplanetary Disks
Orion Nebula

HST · WFPC2

PRC95-45b · ST ScI OPO · November 20, 1995
M. J. McCaughrean (MPIA), C. R. O'Dell (Rice University), NASA



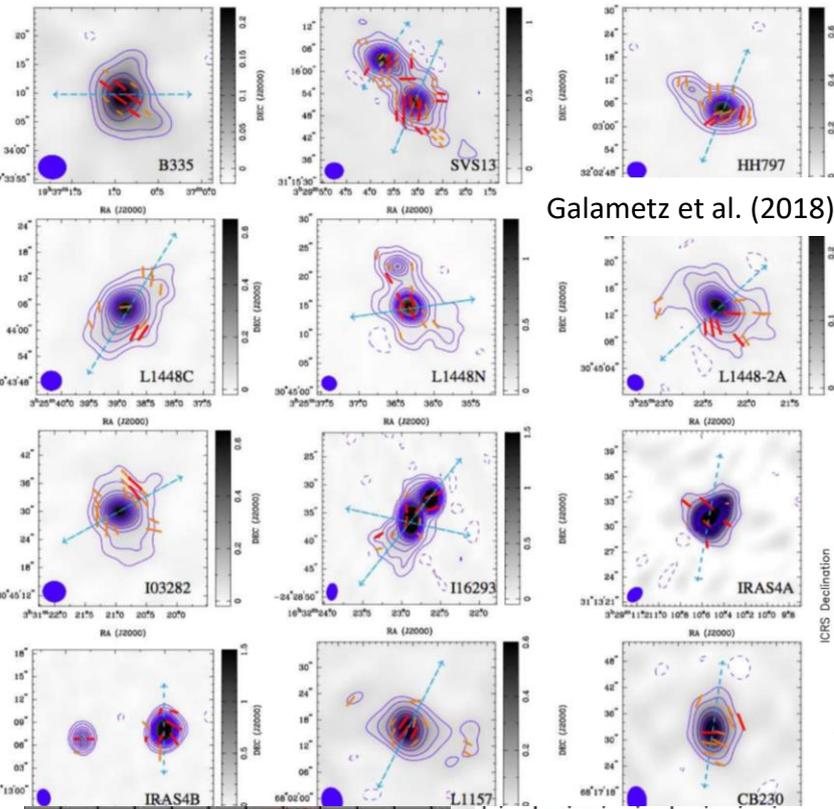
Lee et al. 2014

Disk Substructures at High Angular Resolution Project

Andrews et al. (2018):ただしより後期の段階

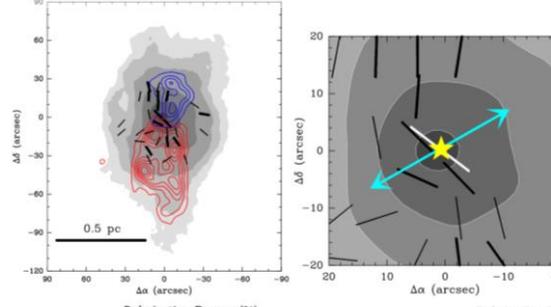
星形成過程で観測される現象:磁力線

Qiu et al. (2014)

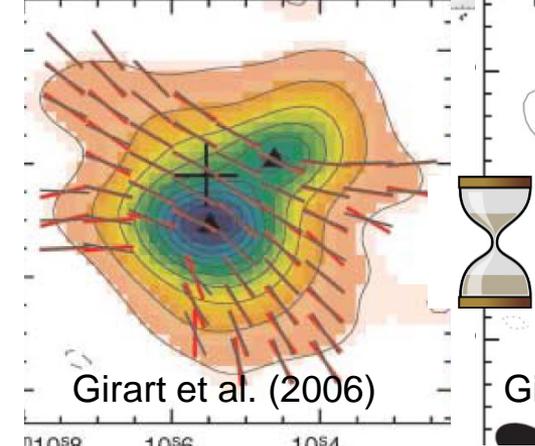
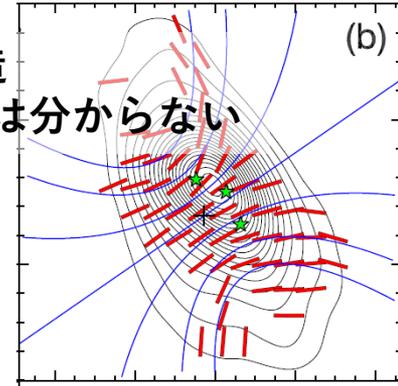


Galamez et al. (2018)

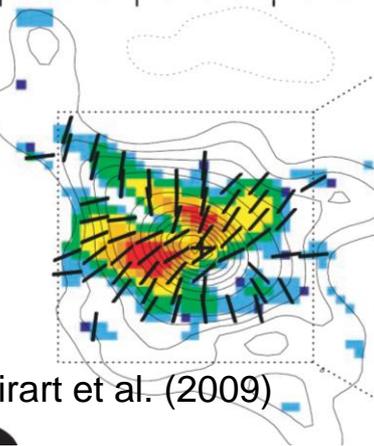
偏光観測から推測される磁場構造
ただし、本当にB-vectorかどうかは分からない



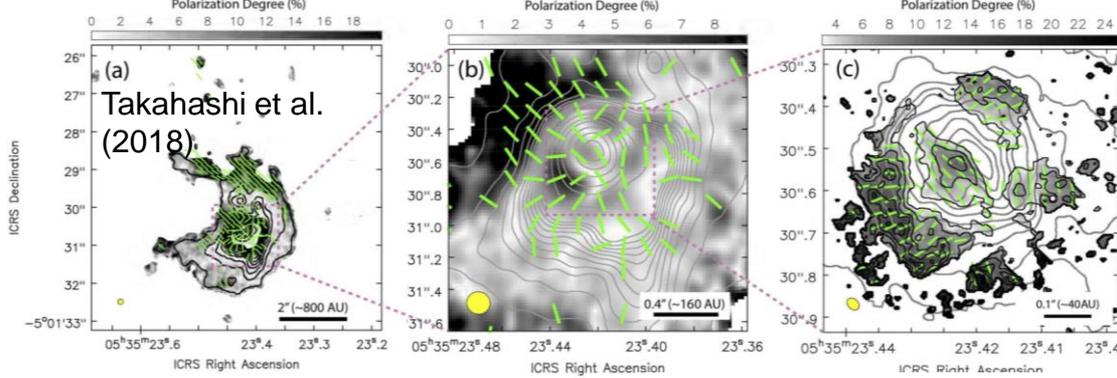
Shinnaga et al. (2012)



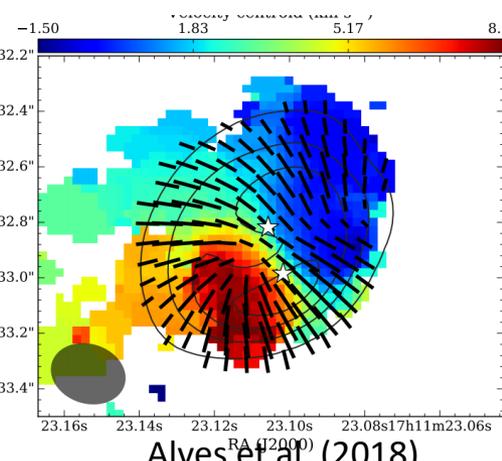
Girart et al. (2006)



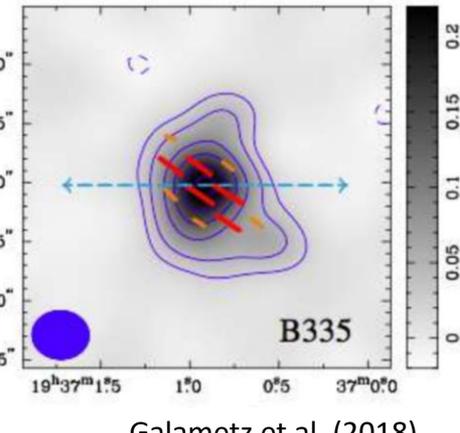
Girart et al. (2009)



Takahashi et al. (2018)



Alves et al. (2018)



Galamez et al. (2018)

観測からの示唆

□ ジェット・アウトフロー

- コリメートした高速流(ジェット)
- 開口角が広い低速流(アウトフロー)
- **ジェットは非定常**
- **ジェットはアウトフローに囲まれている**

□ 円盤

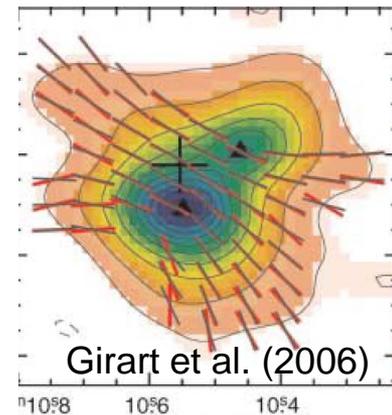
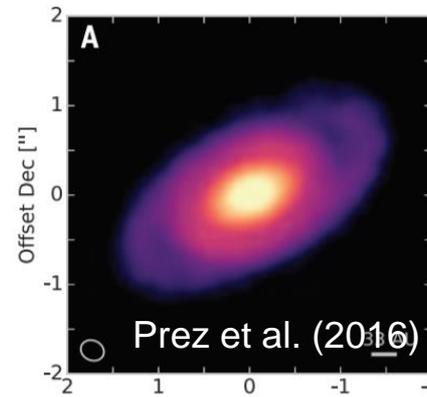
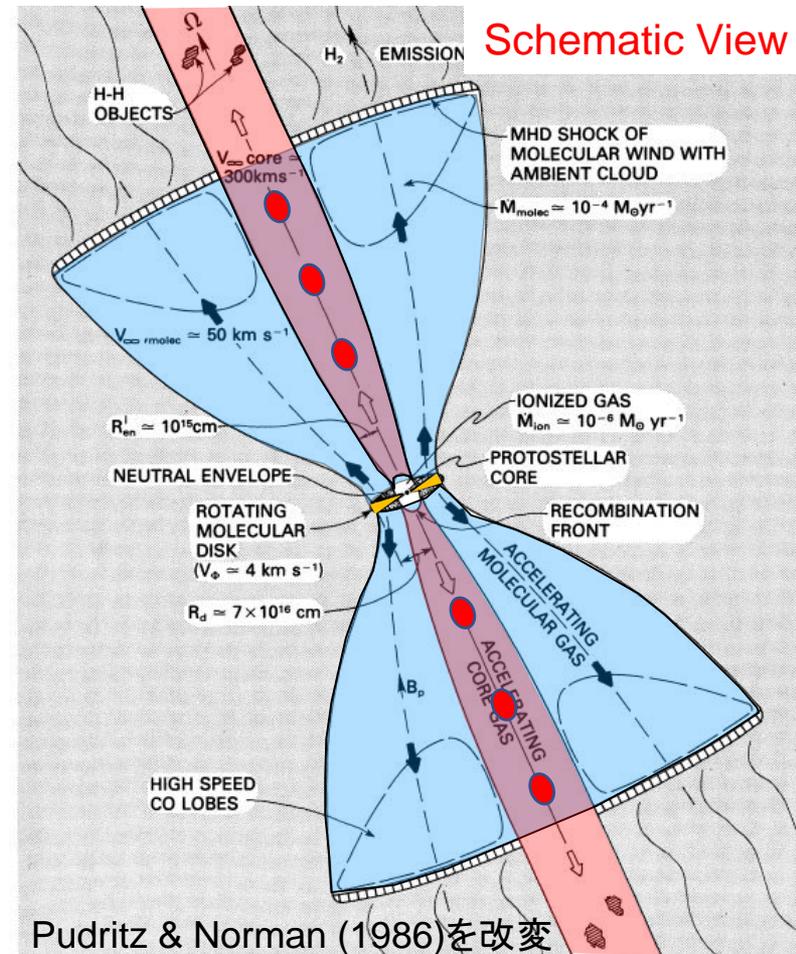
- **若い段階から存在(後述)**
- **複雑な形状(スパイラル、非対称性)**
- ほぼアウトフロー、ジェットと垂直方向
- 若い段階では、Pseudo diskとKeplerian diskの区別が困難

□ 磁場構造

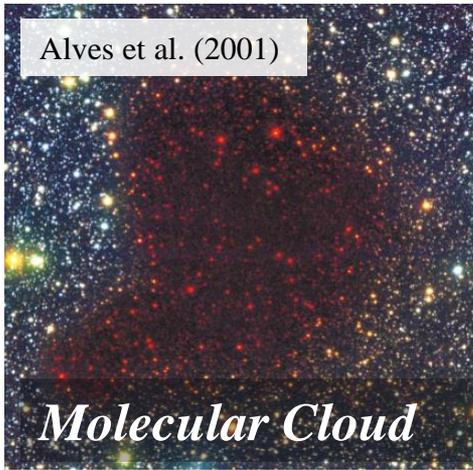
- ラージスケールでは**砂時計形状**(重力収縮の証拠)
- アウトフローの磁力線(ポロイダル、トロイダルどちらも)
- スモールスケールでは複雑だが、偏光から磁場形状が推測出来るかは不明

□ 解明すべきこと

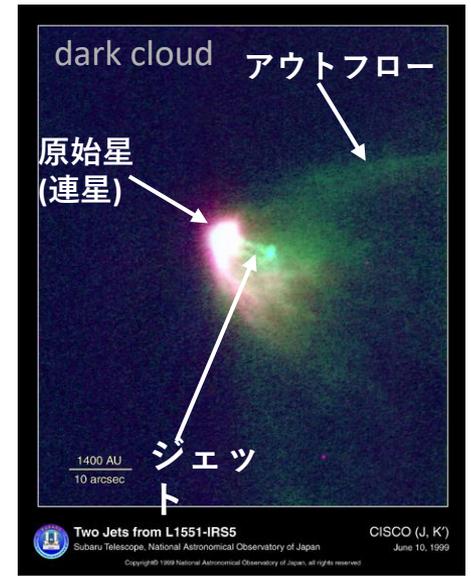
- 何故、ジェット、アウトフローが出現?
- 円盤いつ形成、どう進化
- 磁場の役割



星形成のシナリオ



大雑把な星形成シナリオは既に構築されているが説明すべき事柄がいくつか残されている

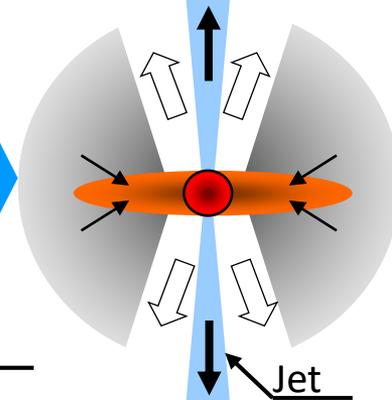
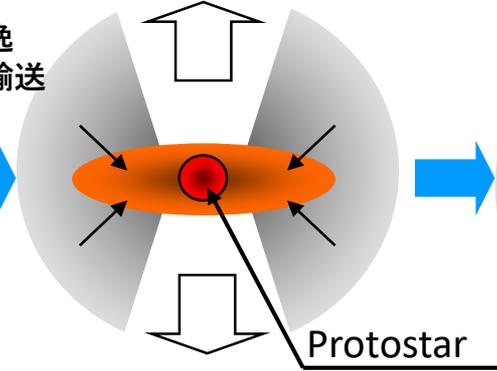
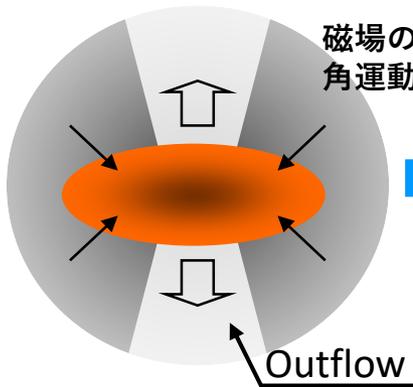
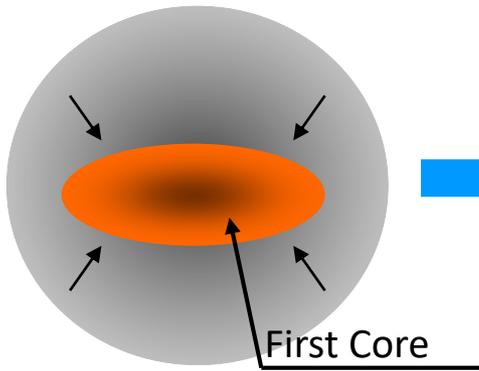


重力収縮

アウトフローの駆動

原始星形成

ジェット駆動



論争中

磁場？ or 乱流？

円盤出来る？
or 出来ない？

Outflowは二次的？
or 直接駆動？

Feedback: 輻射？
or 磁気円盤風？

解決すべき問題：対立するモデル

角運動量問題 & 磁束問題



□ ジェット・アウトフロー駆動問題：

Entrainment vs. **Direct driven outflow**

□ 円盤形成問題：

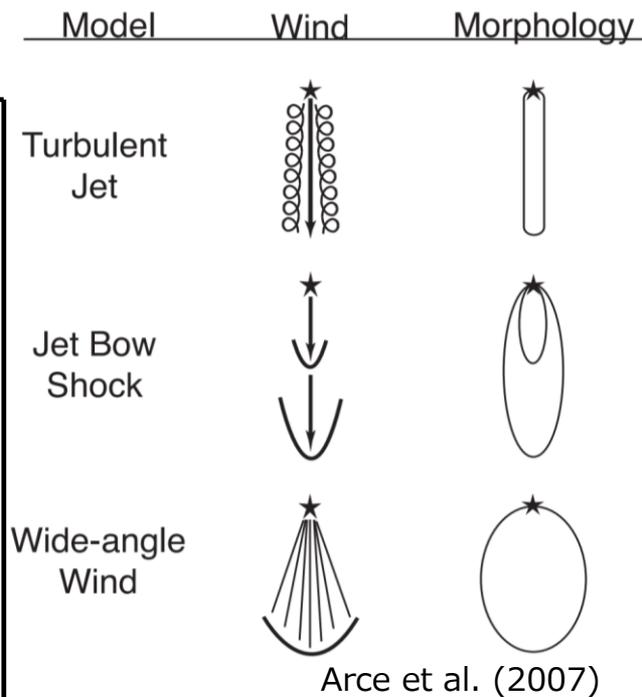
Magnetic braking catastrophe vs. **Early disk formation**

□ 星形成効率問題：

Turbulence vs. **Magnetic field**

解決すべき問題

Entrainmentのモデル



ジェット駆動問題: entrainment vs. direct driven outflow

- アウトフローはジェットに引きずられて生じる (entrainment) ジェットが本体で、アウトフローは副次的
- Direct driven outflow: 円盤の各々の場所からアウトフロー、ジェットは駆動

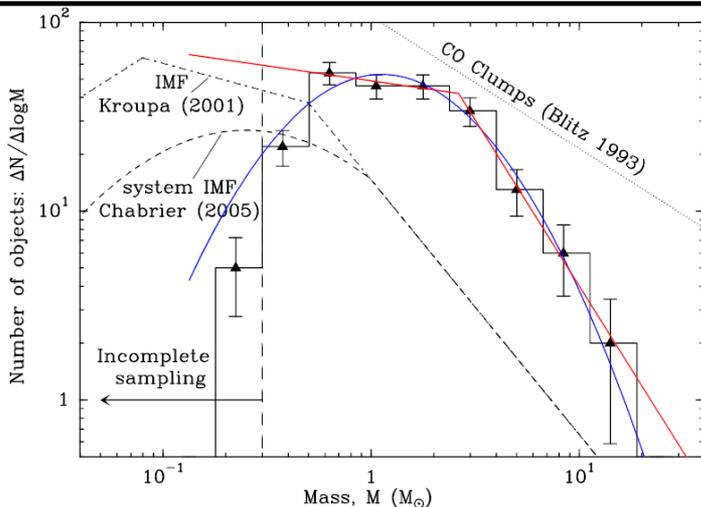
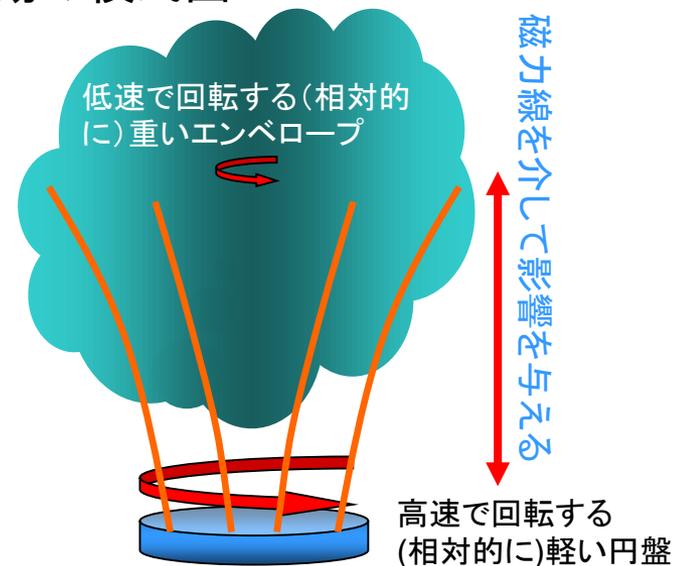
円盤形成問題: 磁気制動 vs. early disk formation

- 磁場によって角運動量を輸送しすぎて円盤出来ない
- 磁場散逸? 乱流? $B \parallel \Omega$?

星形成(効)率問題: turbulence vs. magnetic field

- 分子雲コアのある一定の割合しか星にならない
- 乱流 or 磁場が重力収縮を障害
- Primary feedbackは?

磁気制動の模式図



Core mass function と IMF

Andre et al. (2013)

近年の観測による決定的な証拠

Protostars & Planets VI (2013): 星惑星分野の国際会議 (レビュー講演)

- 会議の内容

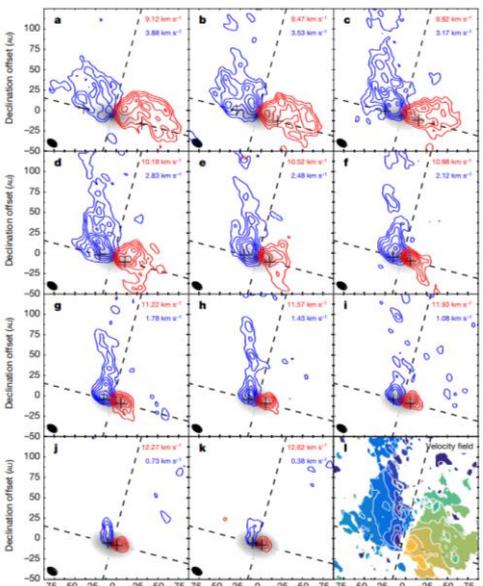
- ほとんどの講演が問題を提起してALMAによって解決されるだろうで終わった (進展が何も分からなかった)

- 5年後 (2018年) : 確かに大体ALMA観測によって解決された!

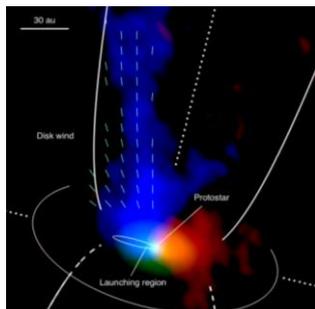
- 今日の講演

- 何が解決されたか?
- 何が課題として残っているのか?

決定的な証拠(アウトフロー・ジェット) : 回転／駆動領域を捉えた



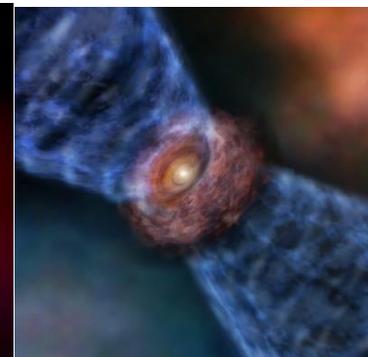
Outflow rotation



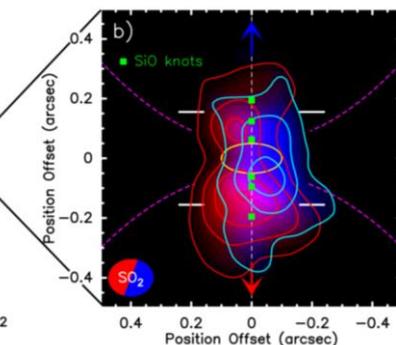
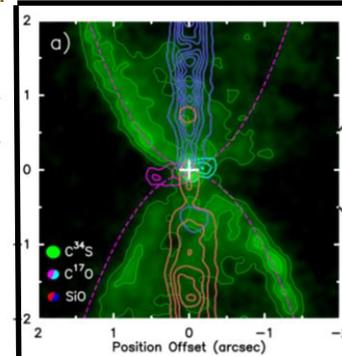
Extended Data Figure 5 | Inferred launching region of the disk wind. This illustrative figure is overlaid on a three-colour background image, showing the blueshifted (blue) and redshifted (red) ^{13}CO emission together with the continuum emission (green). The outflow emission is integrated from $\pm(2.5-10) \text{ km s}^{-1}$ with respect to the systemic velocity 6.4 km s^{-1} . The outlines of the disk and the outflow and the axes of the disk



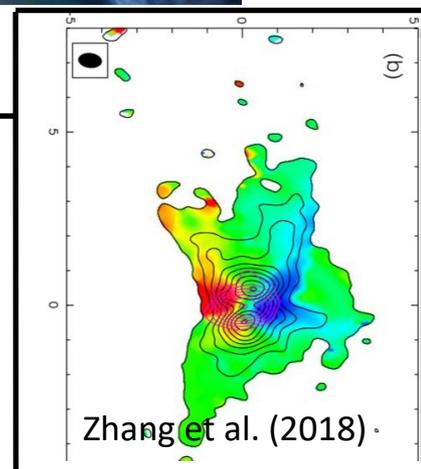
Hirota et al. 2017



Bjerkeli et al. (2016)

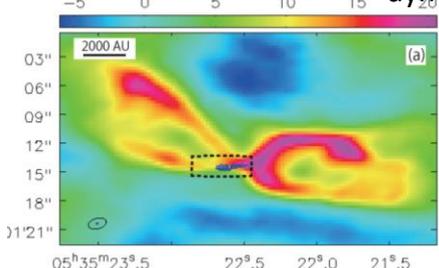


Tabone et al. (2018)

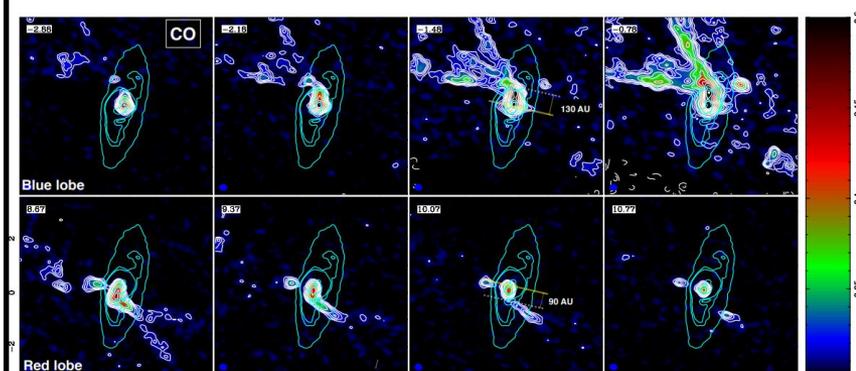
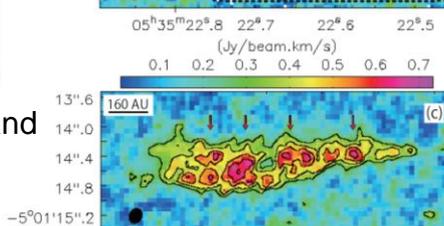
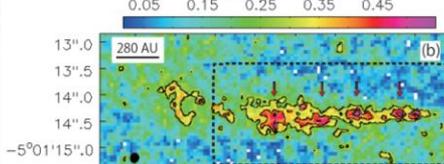


Zhang et al. (2018)

Very young stage: $t_{\text{dyn}} \lesssim 1000 \text{ yr}$ Matsushita et al. (2019)

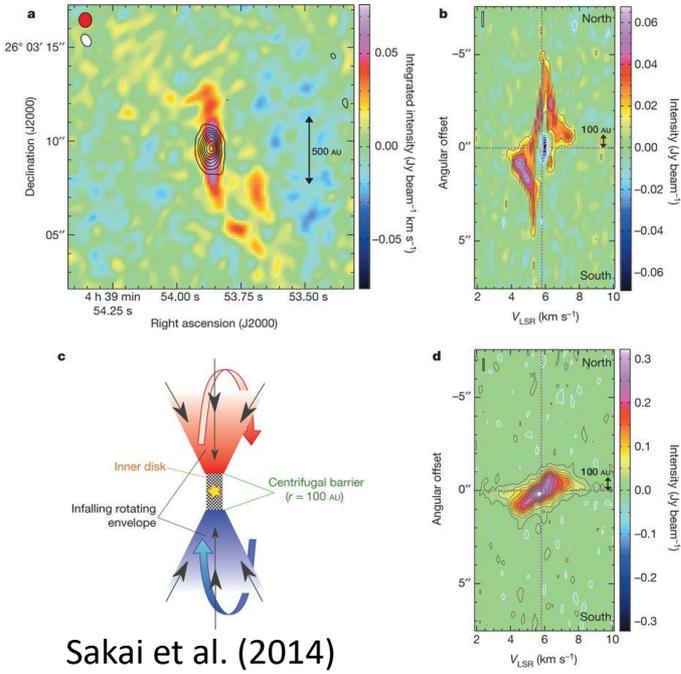


Misalignment between low- and high-velocity component

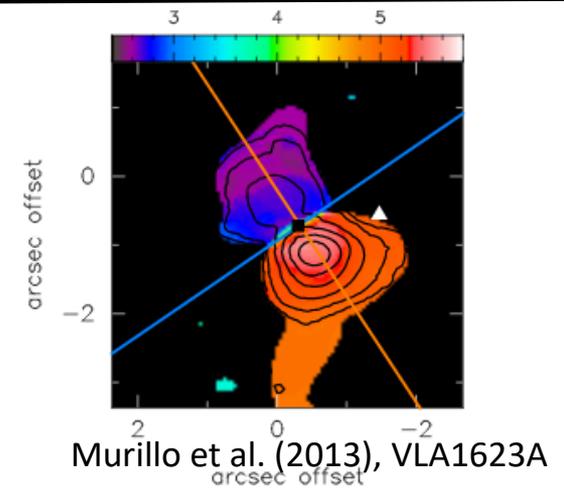
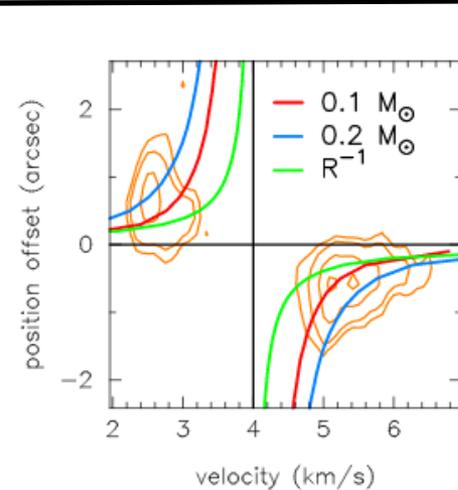
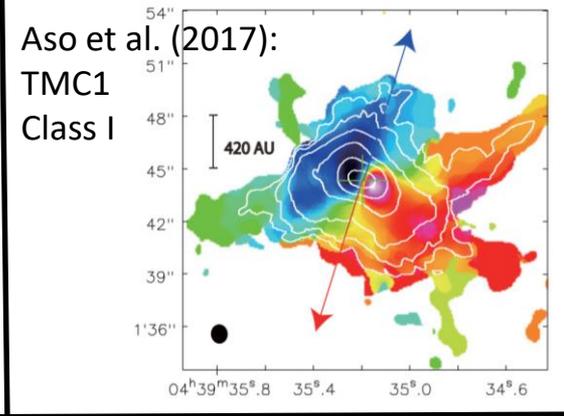
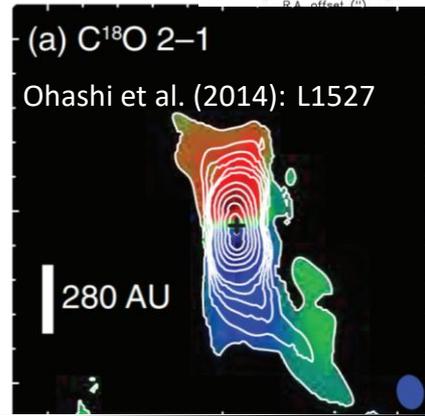
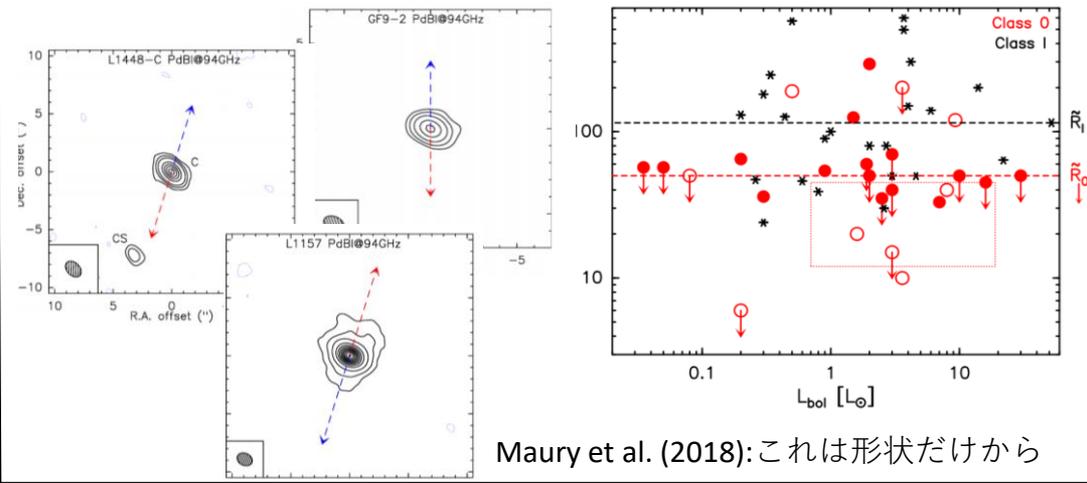
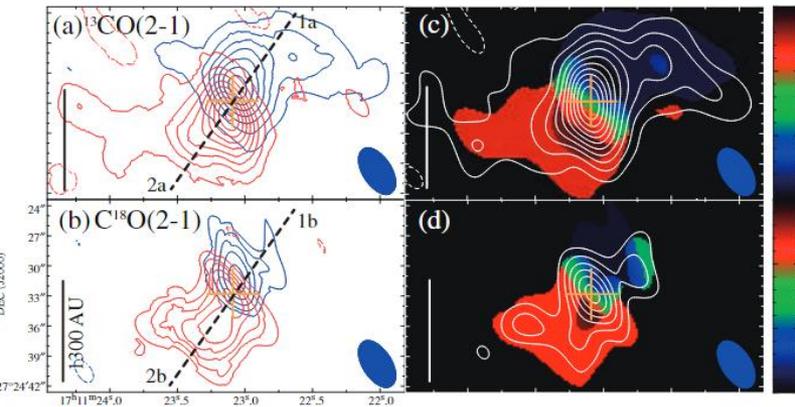


Outflow driven by the disk outer edge Alves et al. (2017)

決定的な証拠: 若い段階で ケプラー円盤が観測された!

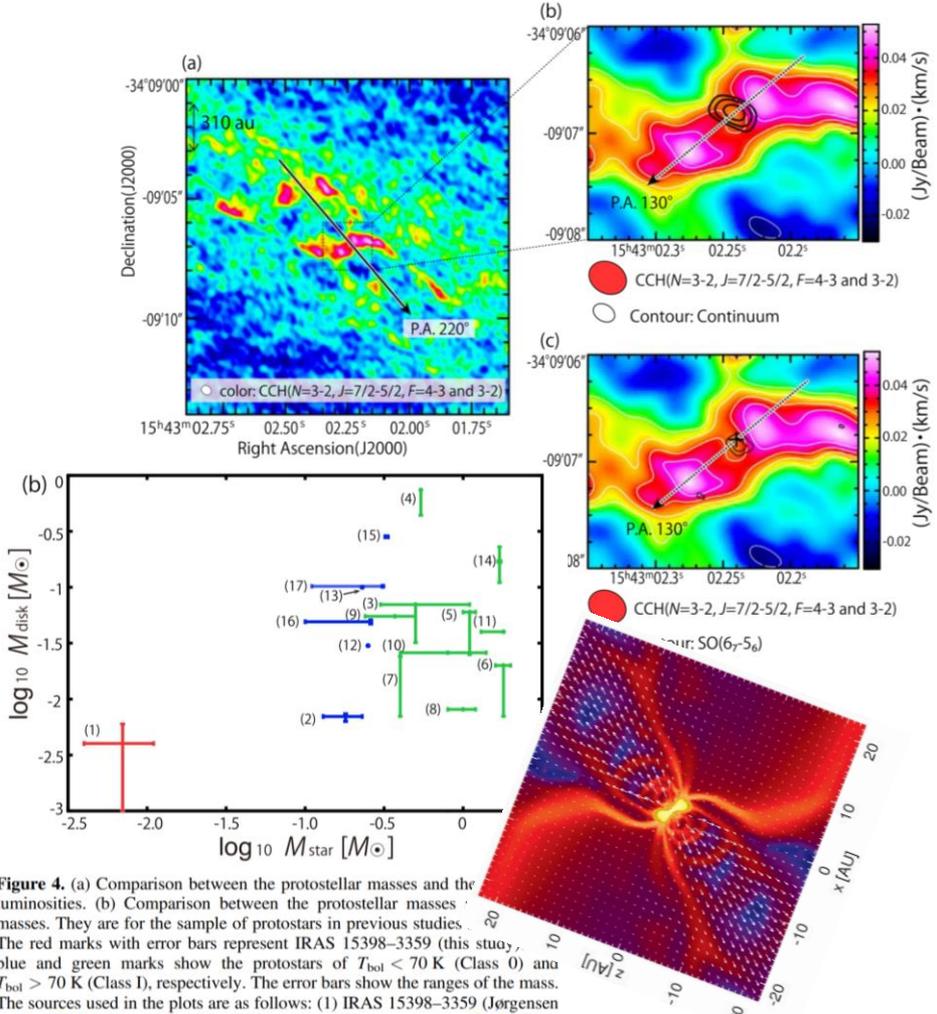


Hara et al. (2013), B59#11

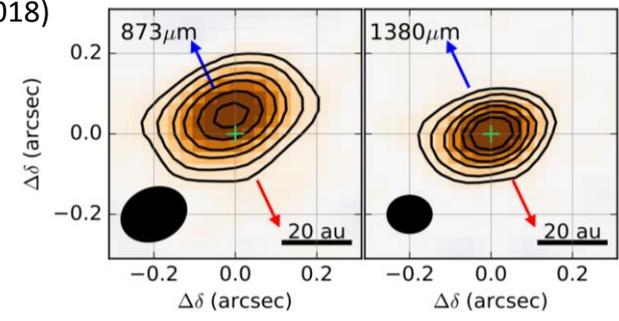


決定的な証拠：非常に若い段階でも円盤が見つかった！？

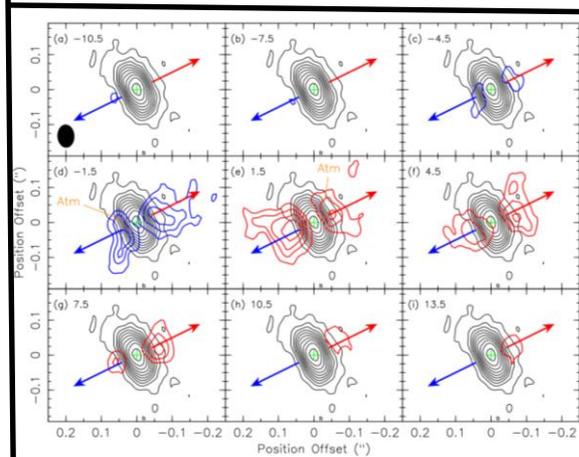
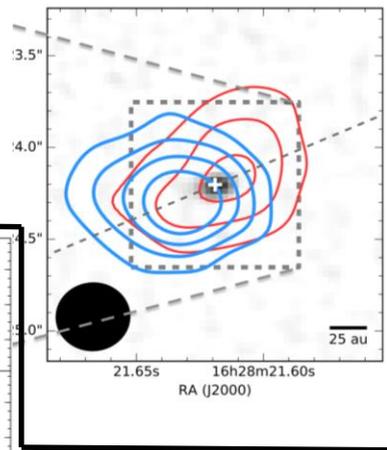
Okoda et al. (2018)



Hsieh et al. (2018)



Vellosの周りの円盤
力学的に見積もった質量：0.028-0.12 Msun



Lee et al. (2018)

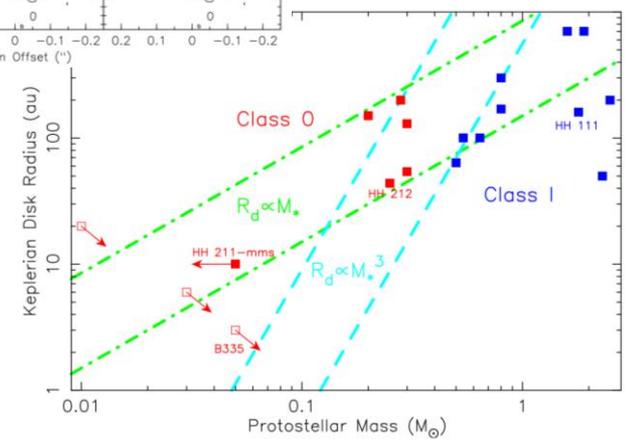
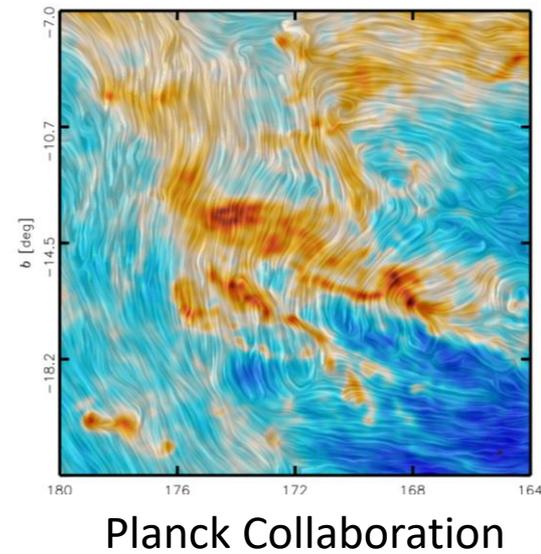
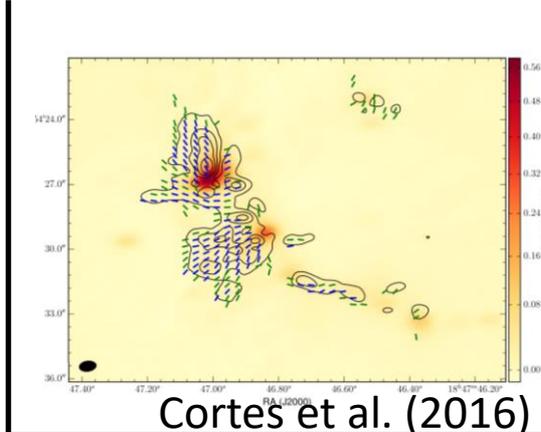
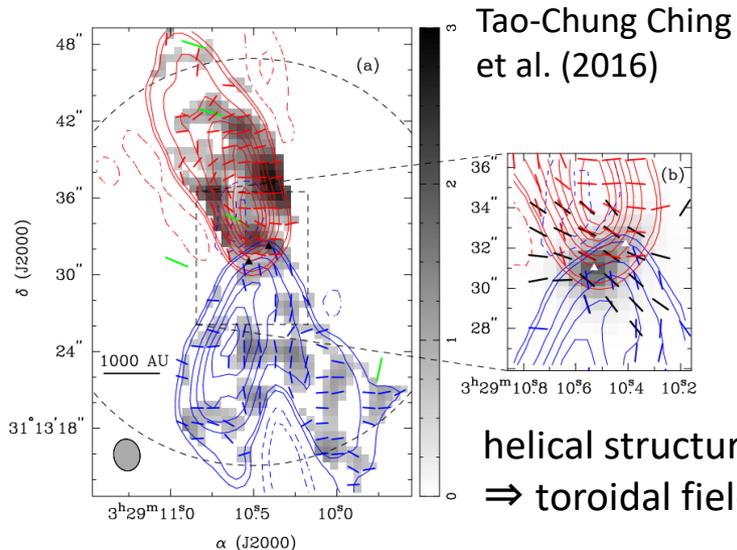


Figure 4. (a) Comparison between the protostellar masses and the luminosities. (b) Comparison between the protostellar masses and luminosities. They are for the sample of protostars in previous studies. The red marks with error bars represent IRAS 15398–3359 (this study), blue and green marks show the protostars of $T_{\text{bol}} < 70$ K (Class 0) and $T_{\text{bol}} > 70$ K (Class I), respectively. The error bars show the ranges of the mass. The sources used in the plots are as follows: (1) IRAS 15398–3359 (Jørgensen et al. 2013; this work); (2) L1527 IRS (Kristensen et al. 2012; Tobin et al. 2012; Sakai et al. 2014b); (3) L1551 IRS5; (4) TMC1; (5) TMC1A; (6) L1489 IRS; (7) L1536; (8) IRS 43; (9) IRS 63; (10) L1551NE (Chou et al. 2014); (11) HH111 (Lee 2011; Lee et al. 2018); (12) HH212 (Lee et al. 2017); (13) Lupus3 MMS (Yen et al. 2017); (14) BHB07-11 (Yen et al. 2015; Alves et al. 2017); (15) IRAS 03292+3039; (16) L1448 IRS2; and (17) L1448C (Tobin et al. 2015; Yen et al. 2015). In some protostars, only the range of the protostellar mass and that of the disk mass are estimated. In this case, we employ the maximum range.

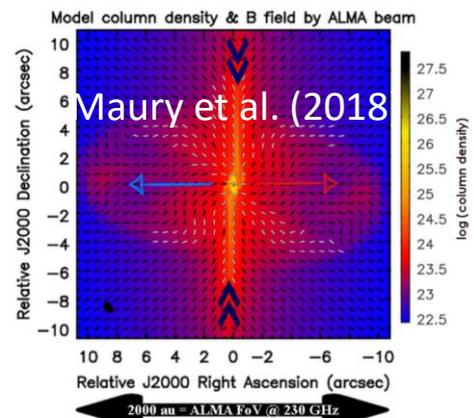
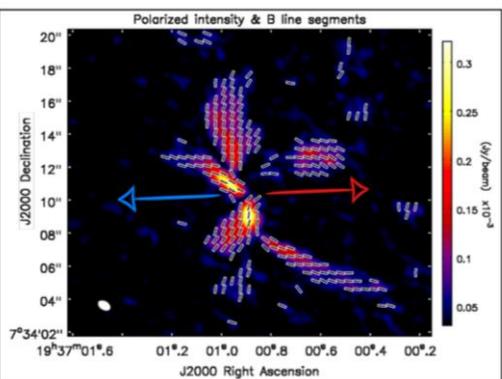
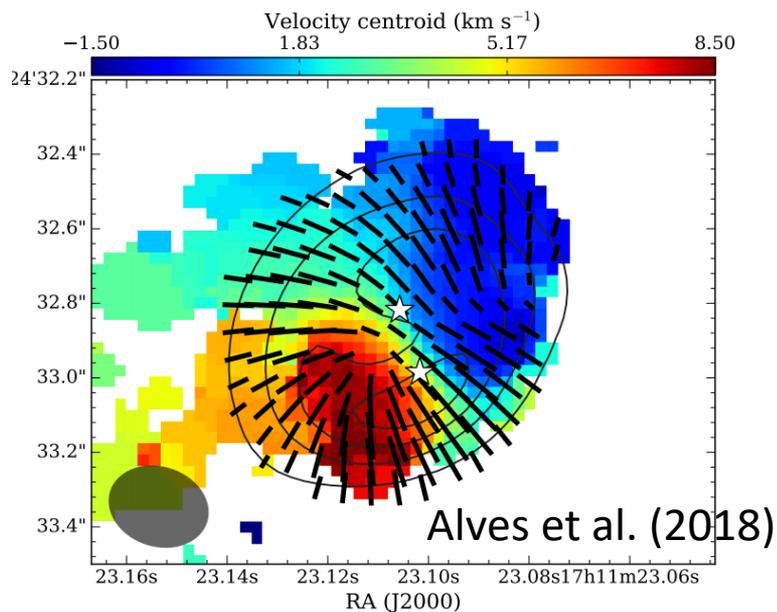
磁場の観測(主に偏光):さらなる観測必要

- 予測: 乱流によって、どこかのスケールでは磁場が全く揃っていない
- **どのスケールでも磁場はよく揃っていた!**
- まだ、反対している研究者も or 揃っていないように見える解釈も



helical structure
⇒ toroidal field of outflow?

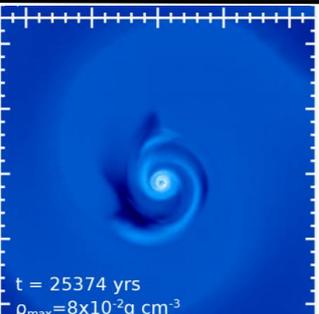
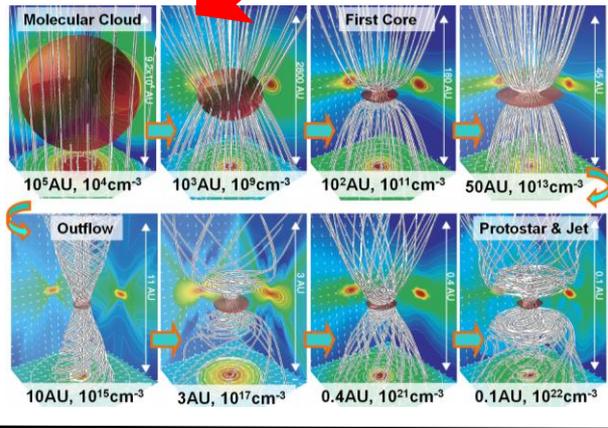
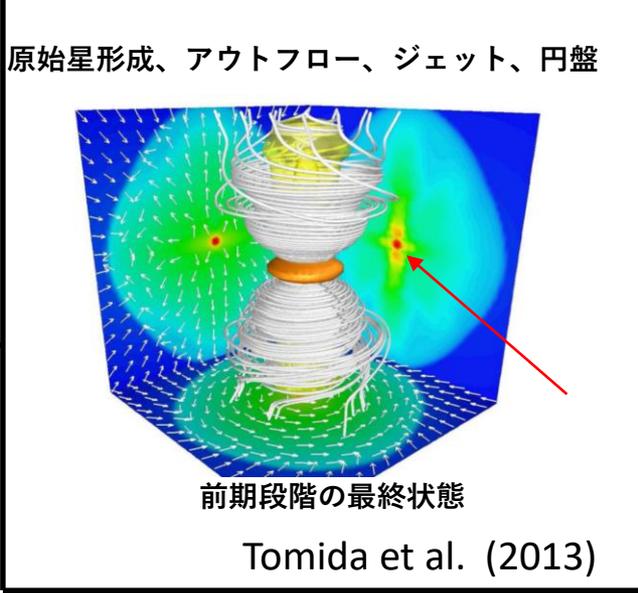
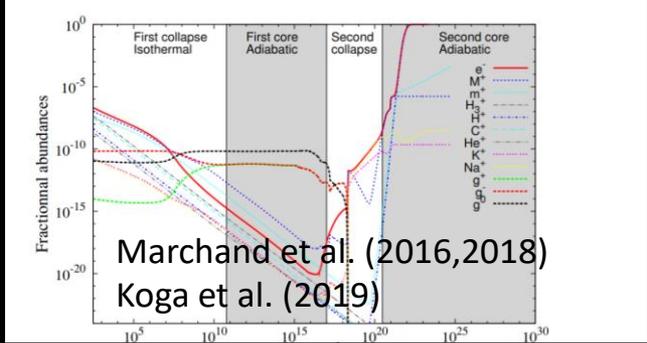
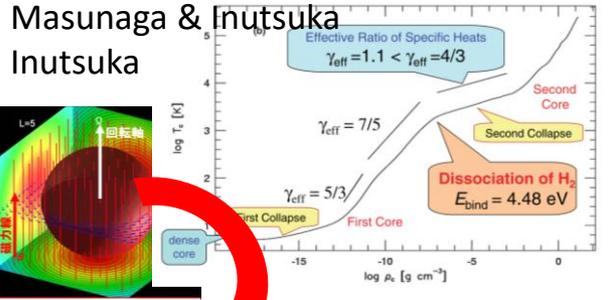
FIG. 4.— A composite map of CO $J = 3-2$, $J = 2-1$, and $870 \mu\text{m}$ dust polarization maps. The CO $J = 3-2$ polarization maps integrated over $\Delta V = \pm 3.5-12.0 \text{ km s}^{-1}$ with respect to the systematic velocity of IRAS 4A. The contour levels of CO $J = 3-2$ emission are $-10, -5, 5, 10, 40, 70, 100, 130, 160$ and 190 times $\sigma = 0.48 \text{ Jy beam}^{-1} \text{ km s}^{-1}$. The red and blue segments represent the CO $J = 3-2$ polarizations in the red-shifted and blue-shifted emission. The green segments represent the CO $J = 2-1$ polarizations (Girart et al. 1999). The black segments show the magnetic fields inferred from dust polarizations. The length of the segments is unified. (a) CO polarization map of IRAS 4A outflows. The gray scale shows the CO $J = 3-2$ polarized intensity in units of $\text{Jy beam}^{-1} \text{ km s}^{-1}$. (b) CO polarization map overlapped with the dust polarization map in the central region. The gray scale represents the dust Stokes I emission.



理論研究による進展

前期段階: 終了!

- 前期段階(星が出来る前まで)は、終了 ⇒ 原始星形成までが解明された
- 輻射磁気流体、磁場散逸、Hall効果など
- ファーストコア形成、アウトフローの駆動、磁場の散逸、原始星形成



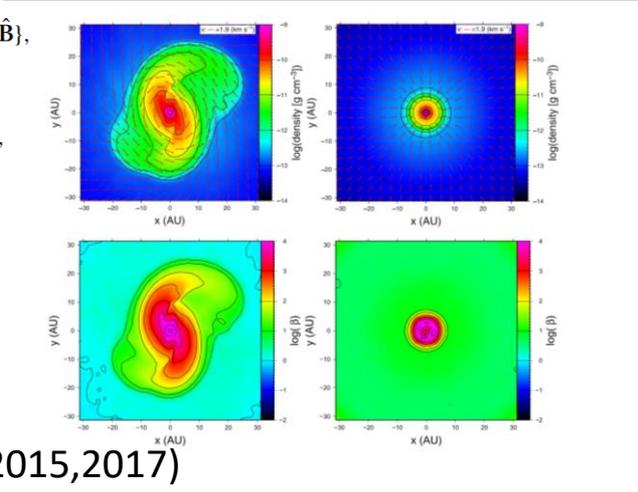
$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \left[\nabla \left(P + \frac{1}{2} |\mathbf{B}|^2 \right) - \nabla \cdot (\mathbf{B}\mathbf{B}) \right] - \nabla \Phi,$$

$$\frac{D}{Dt} \left(\frac{\mathbf{B}}{\rho} \right) = \left(\frac{\mathbf{B}}{\rho} \cdot \nabla \right) \mathbf{v} - \frac{1}{\rho} \nabla \times \{ \eta_0 (\nabla \times \mathbf{B}) + \eta_{\text{H}} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \hat{\mathbf{B}} - \eta_{\text{A}} [(\nabla \times \mathbf{B}) \times \hat{\mathbf{B}}] \times \hat{\mathbf{B}} \},$$

$$\frac{D}{Dt} \left(\frac{E_{\text{r}}}{\rho} \right) = -\frac{\nabla \cdot \mathbf{F}_{\text{r}}}{\rho} - \frac{\nabla \mathbf{v} : \mathbb{P}_{\text{r}}}{\rho} + \kappa_{\text{p}} c (a_{\text{r}} T_{\text{g}}^4 - E_{\text{r}}),$$

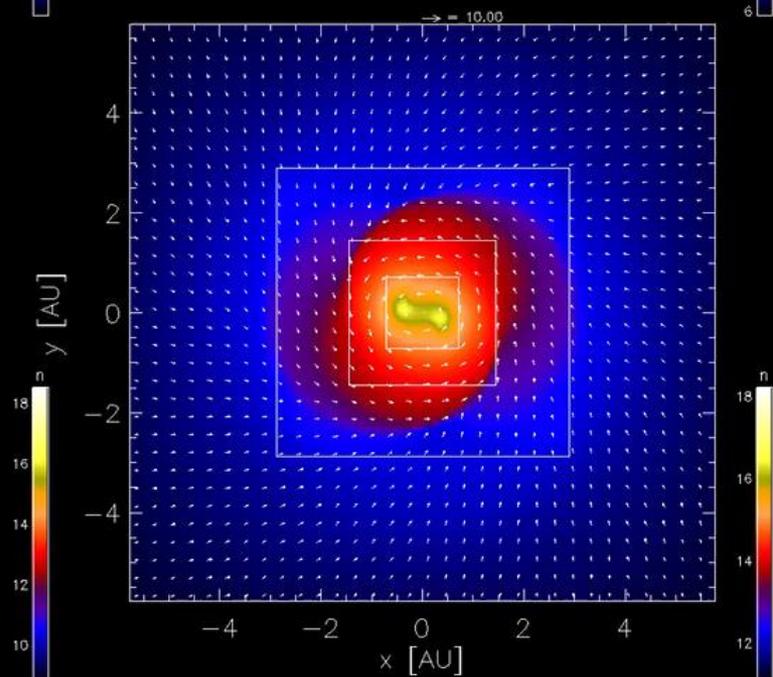
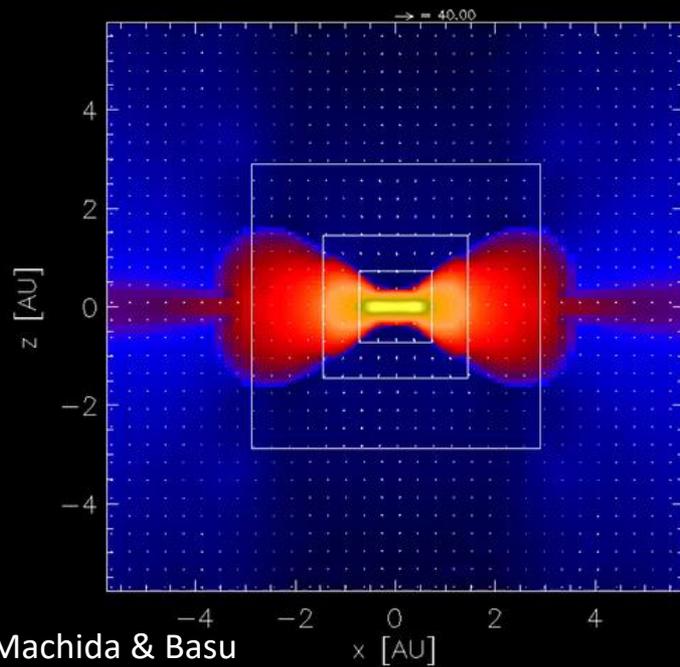
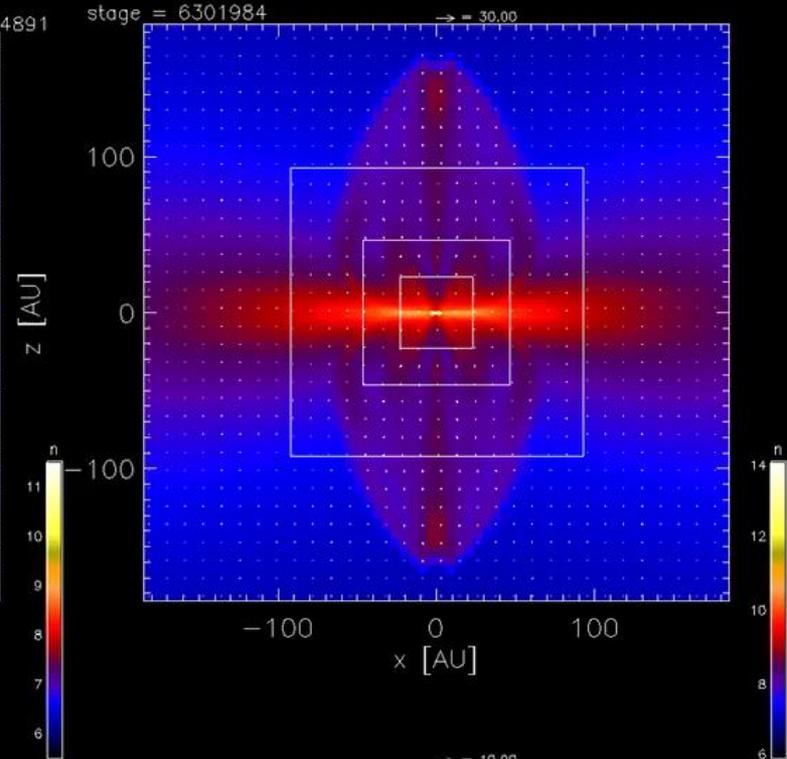
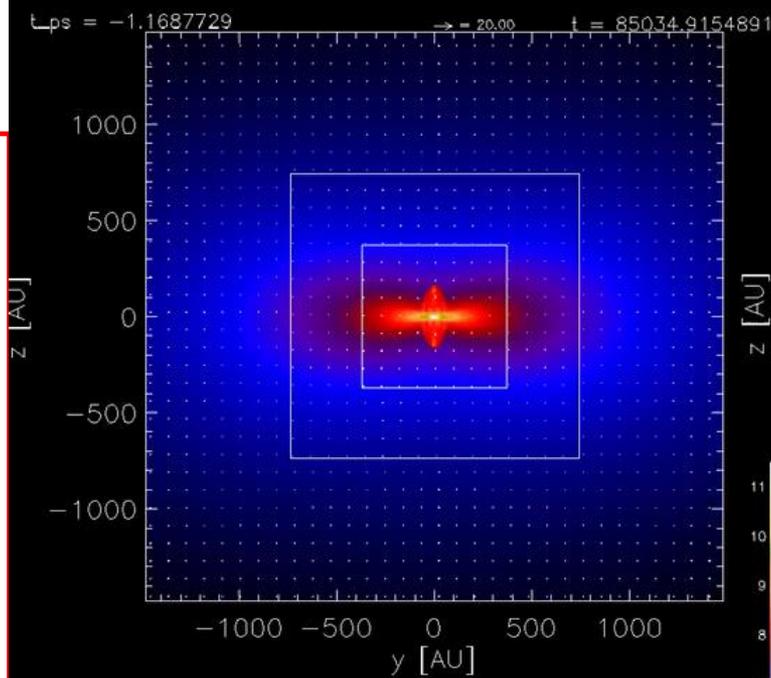
$$\frac{D}{Dt} \left(\frac{e}{\rho} \right) = -\frac{1}{\rho} \nabla \cdot \left[\left(P + \frac{1}{2} |\mathbf{B}|^2 \right) \mathbf{v} - \mathbf{B} (\mathbf{B} \cdot \mathbf{v}) \right] - \kappa_{\text{p}} c (a_{\text{r}} T_{\text{g}}^4 - E_{\text{r}}) - \mathbf{v} \cdot \nabla \Phi - \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \{ (\eta_0 (\nabla \times \mathbf{B}) + \eta_{\text{H}} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \hat{\mathbf{B}} - \eta_{\text{A}} [(\nabla \times \mathbf{B}) \times \hat{\mathbf{B}}] \times \hat{\mathbf{B}}) \times \mathbf{B} \},$$

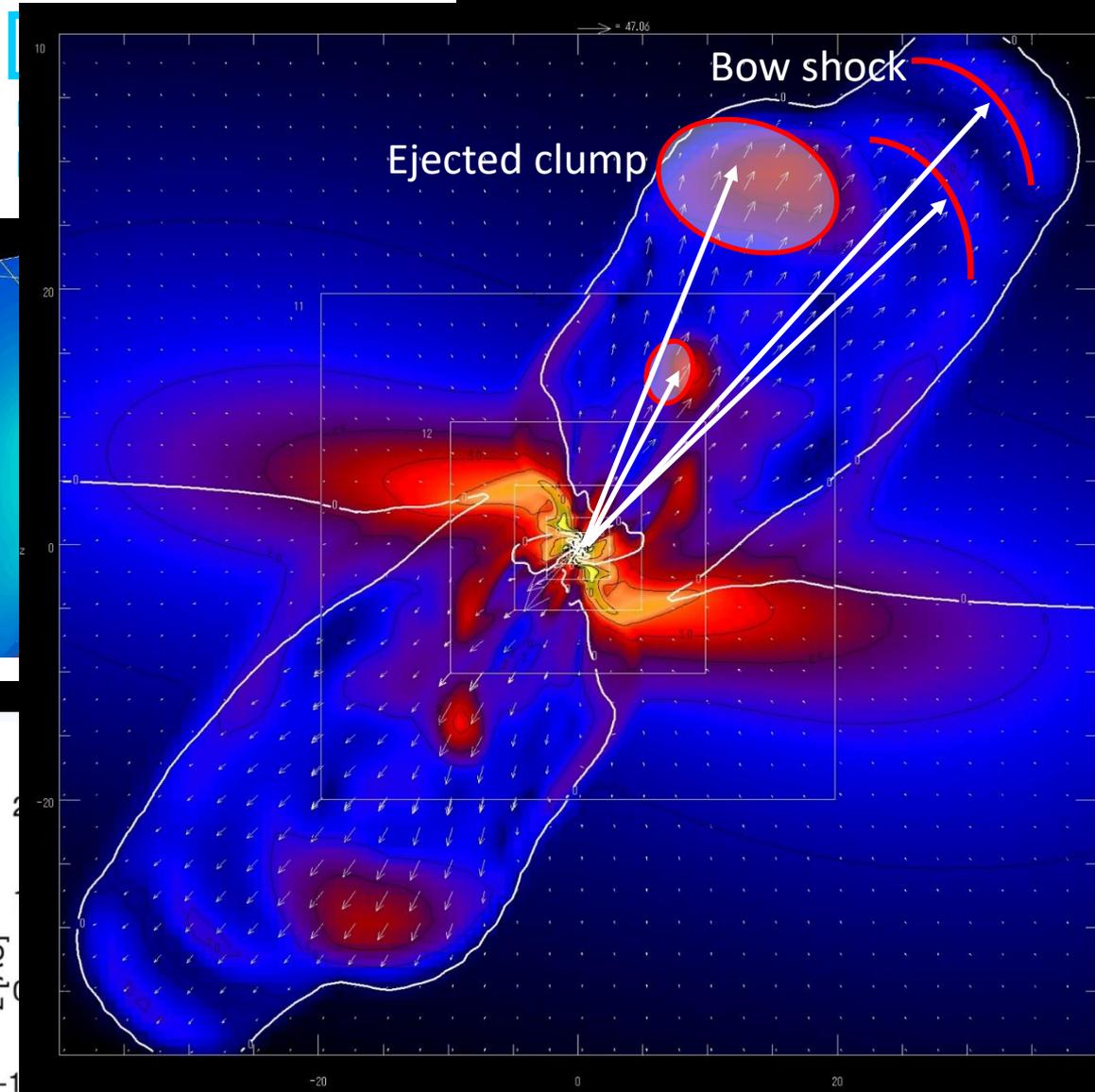
$\nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho.$ Tsukamoto et al. (2015,2017)



後期段階

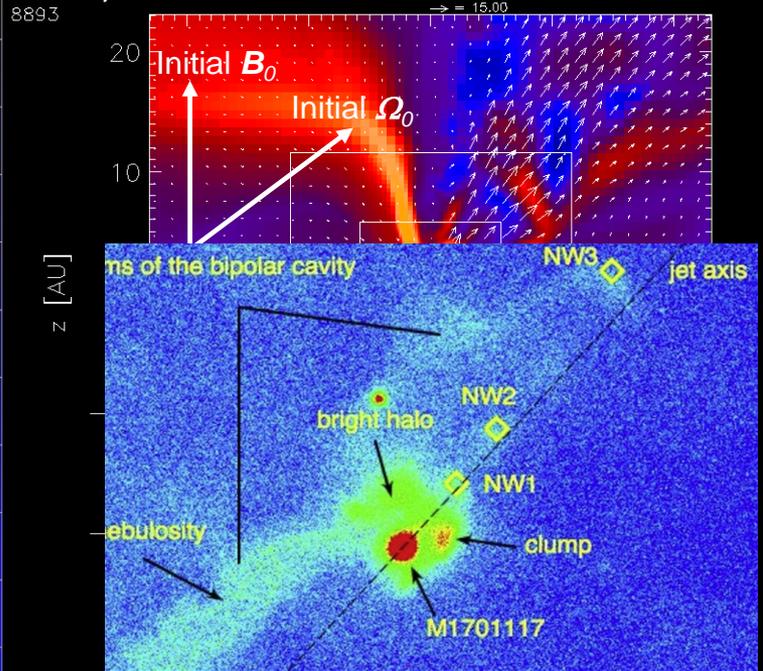
- 前期段階から接続するので、分子雲コアから計算する必要
- 前期段階は、タイムスケールが短いため観測困難
- 後期段階の計算で、ようやく観測と比較可能てきた
- 星形成過程の現象を全て再現
 - 円盤形成
 - 円盤重力不安定
 - ジェット
 - アウトフロー
 - 磁気駆動風によるフィードバック
 - ジェットによるCavity
- しかし、まだ原始星形成後2000年



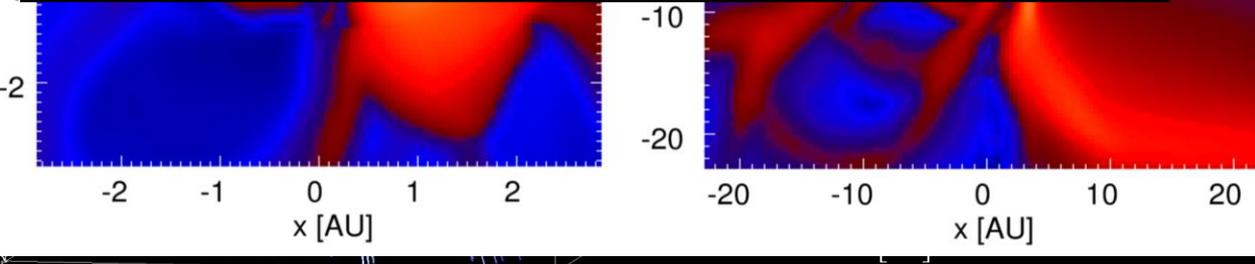
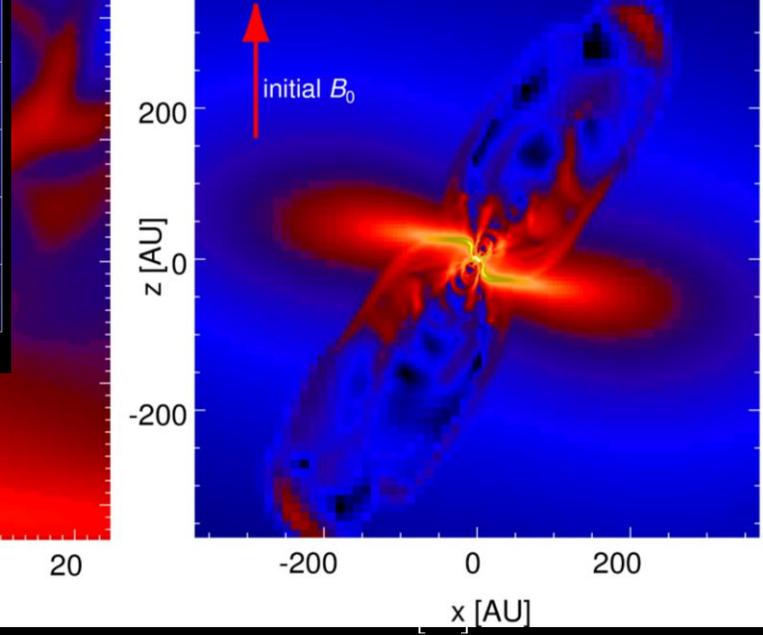


50 AU

$y=0$ cutting plane (~ 50 AU)

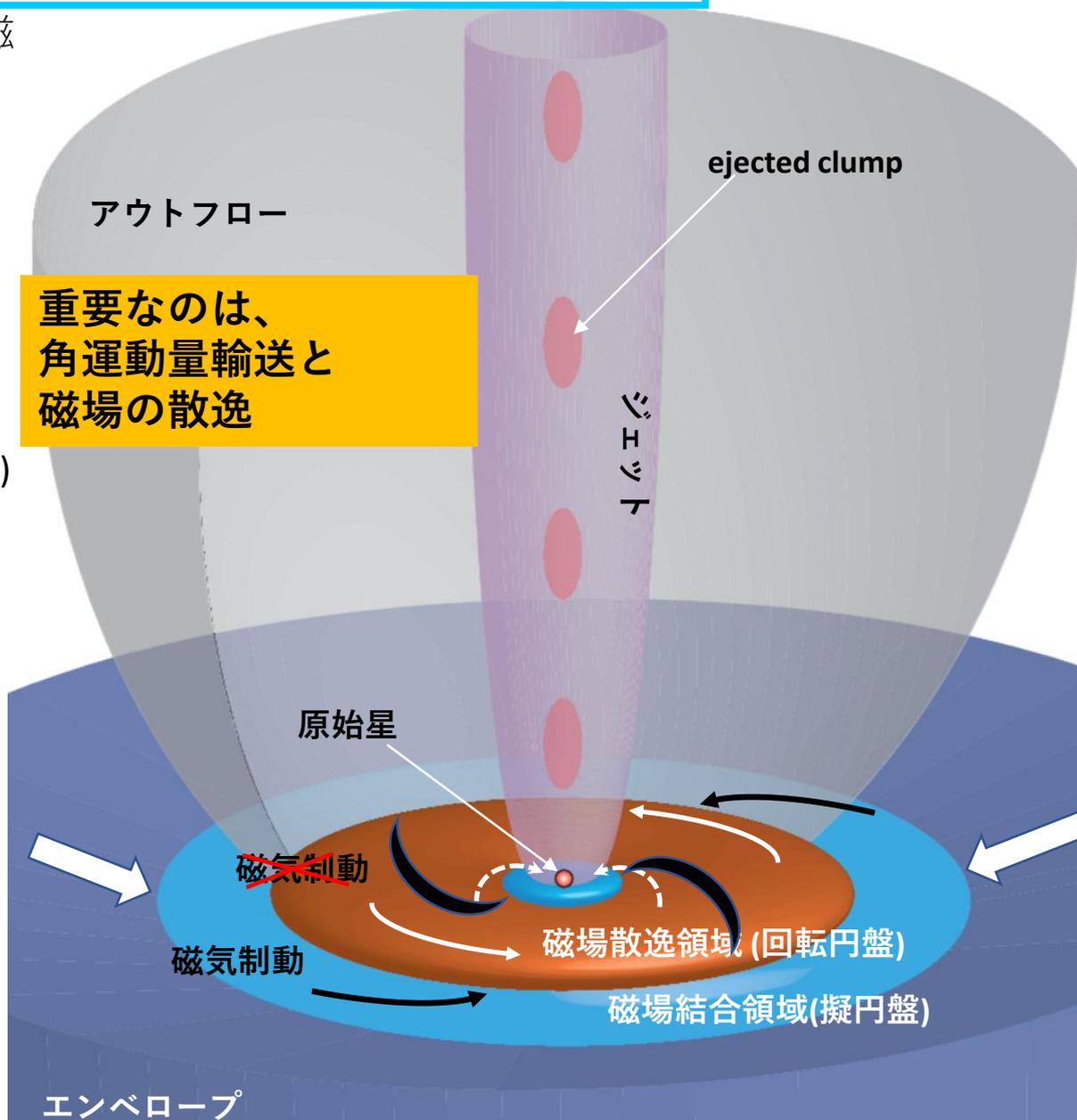


$y=0$ cutting plane (~ 2 AU)

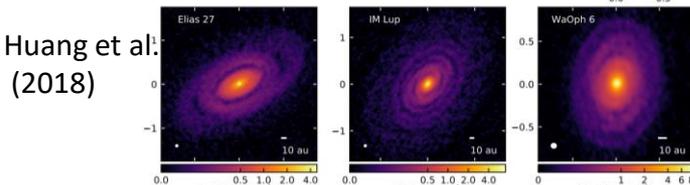
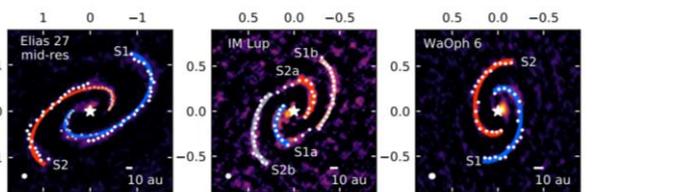


模式図:この1枚の図で星形成現象の全てが説明可!

- Pseudo disk(擬円盤)の内側領域で磁場が散逸
⇒回転円盤形成
- 回転円盤外縁で低速アウトフロー
- 回転円盤は遠心力で支えているためガスが蓄積
⇒重力不安定 (Tomida et al. 2017)
⇒非定常ガス降着
⇒非定常ジェット
- エンベロープのガスが枯渇するとともに磁気制動が効かなくなり、回転円盤急速に成長

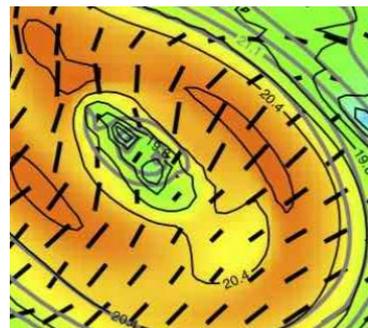
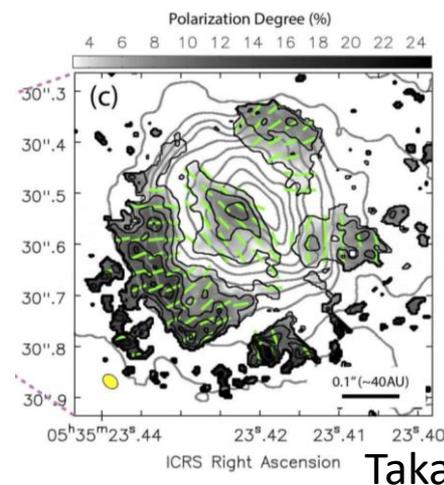


重要なのは、
角運動量輸送と
磁場の散逸



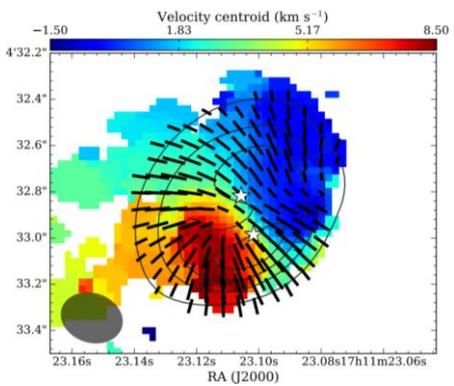
Structures of Magnetic Fields

- どのスケールの観測も1モデルの1スナップショットのシミュレーション結果で再現可能
- スケールと viewing angle を変えるだけ
- 磁場構造は複雑なので何でも合う
- 特にトロイダル優勢、ポロイダル優勢という訳ではない
- 偏光観測から何か言えるのか？
- 複雑な磁場構造は乱流と言われていたが特に必要ない (あってもいいが)
- あまり言うと、観測されなくなるので公表はしない

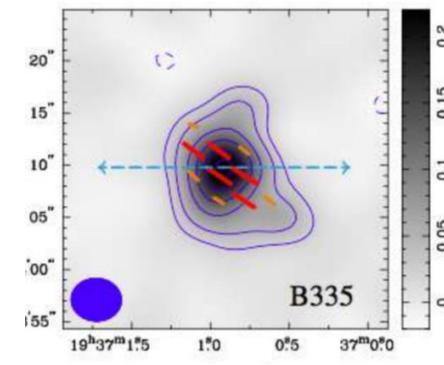


Takahashi et al. (2019)

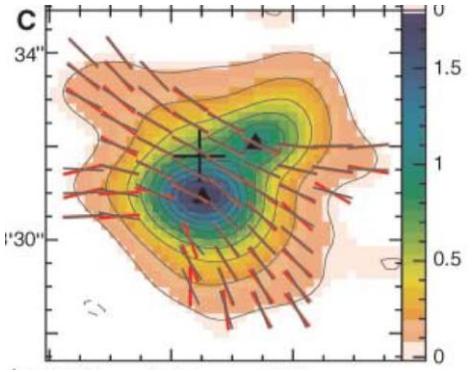
Alves et al. (2018)



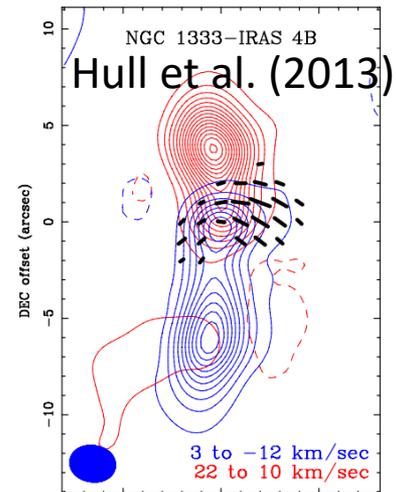
Galamez et al. (2018)



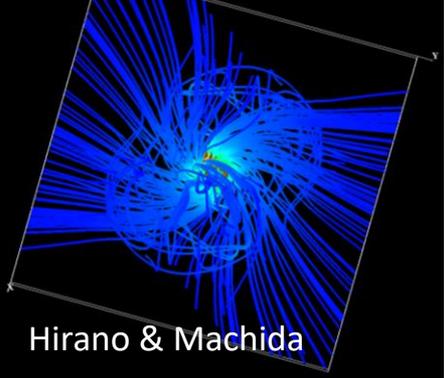
Girart et al. (2006)



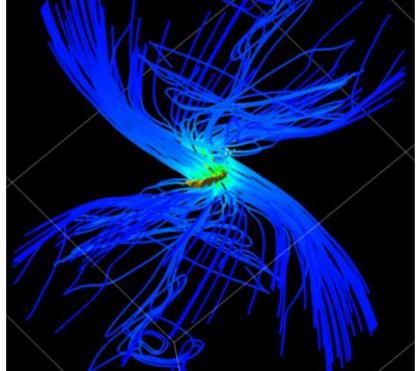
NGC 1333-IRAS 4B
Hull et al. (2013)



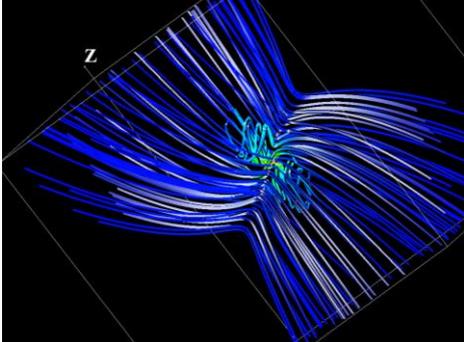
Disk scale



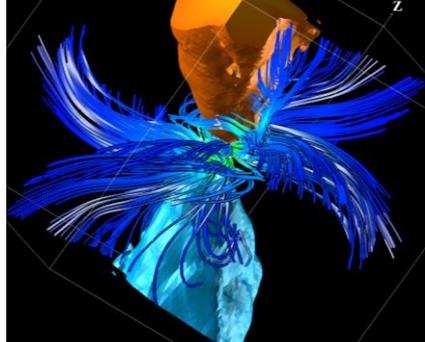
Middle scale



Cloud (large) scale

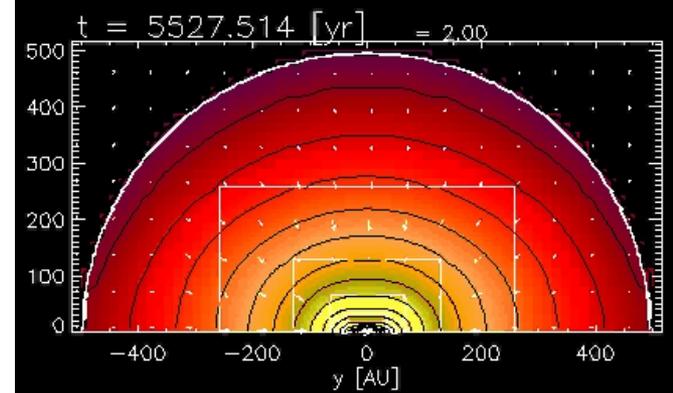
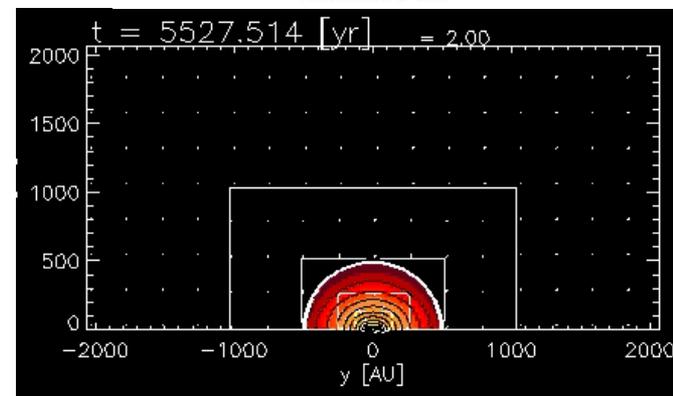
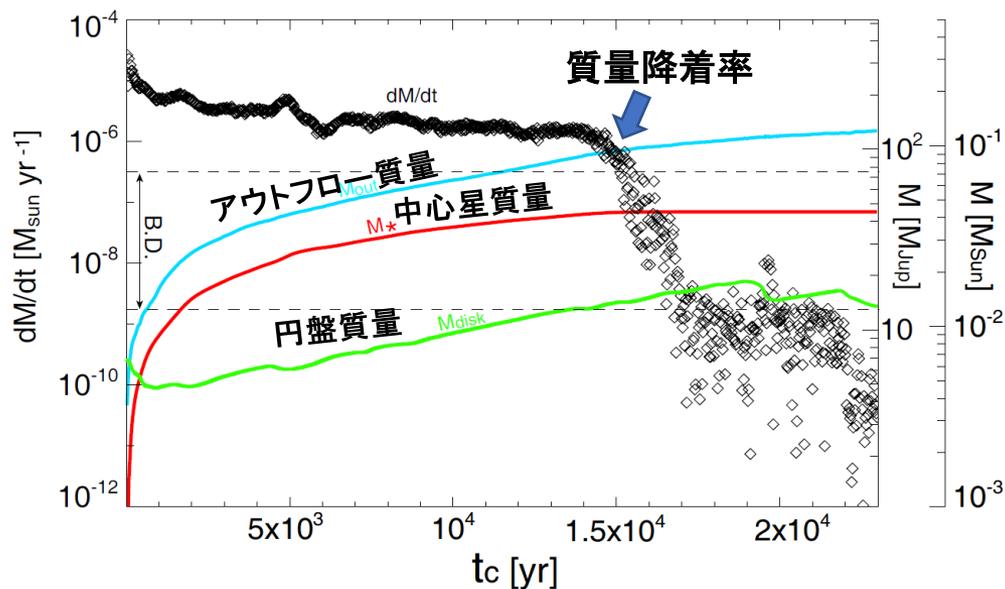
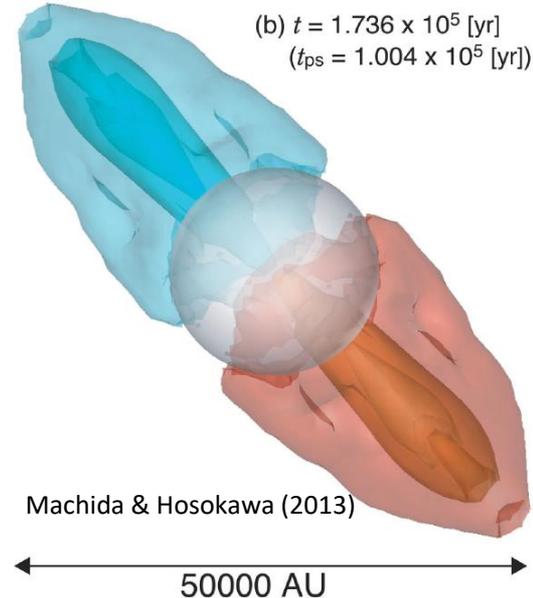


Outflow scale



後期段階長時間計算: outflow feedback

- アウトフロー、ジェットによって、**分子雲コア残骸から質量放出**
- 分子雲コアが重力ポテンシャルが浅くなる
- 分子雲コア(infalling envelope)内: **圧力勾配力 > 重力**
- **ガスの散逸** ⇒ 質量降着率の急激な現象 ⇒ 星質量の決定
- **星形成効率**(星質量/星形成コアの質量) **~20-30%**
- ほとんどのガスが星間空間に戻っていく



何が間違っていたのか？：今、振り返ると...

□ 円盤形成問題：Magnetic braking catastrophe

- シミュレーションの空間解像度が絶望的に足りていなかった
- 原始星まで空間分解して分かった
- 後期段階から計算を始めてはいけなかった(適切な初期条件、境界条件)

□ アウトフロー・ジェット駆動問題：Entrainment

- 観測の流れ：低速分子流の発見 ⇒ 高速(光学)ジェットの発見 ⇒ Jetがprimary に違いない
- 偉い理論家の妄想を妄信(思考停止)
- 真面目に計算すると徐々に色々分かってきた

□ 星形成率・星形成効率問題：Turbulence万能

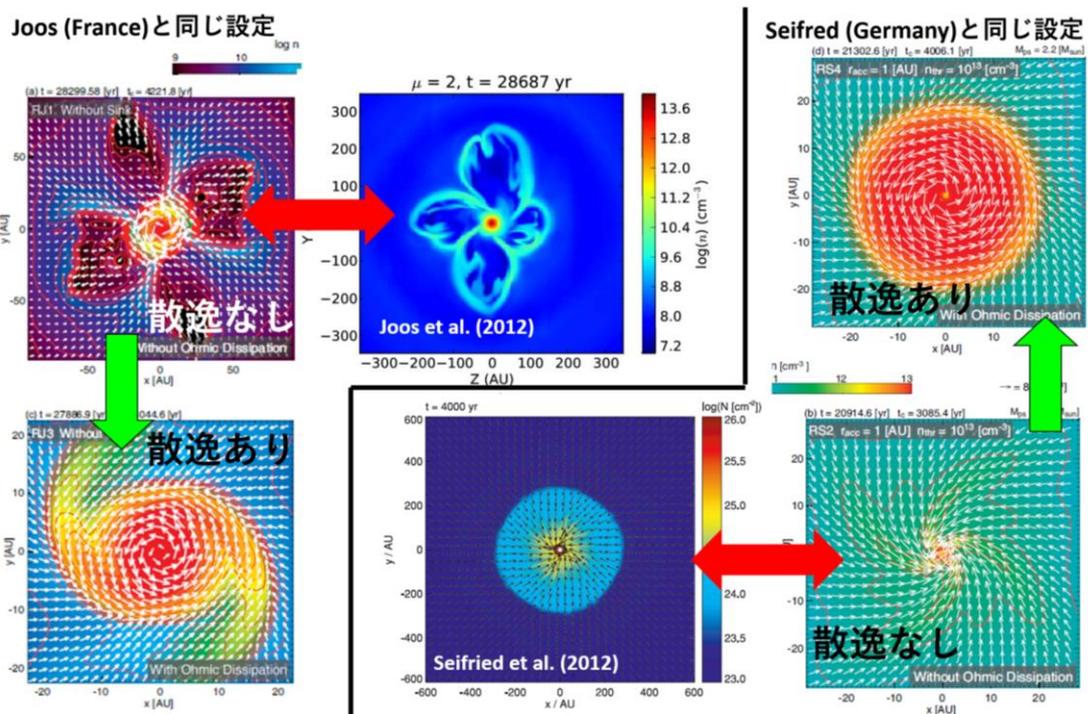
- 偏った観測の情報のみから解釈
(乱流は輝線の線幅から比較的容易に計測出来るが、Zeeman効果で磁場強度を測るのは大変)
- しかし、これはまだ検討する必要

□ (個人的な)教訓：偉い人(特に、昔偉かった人)の言うことを信じてはいけない。 自分で考える。

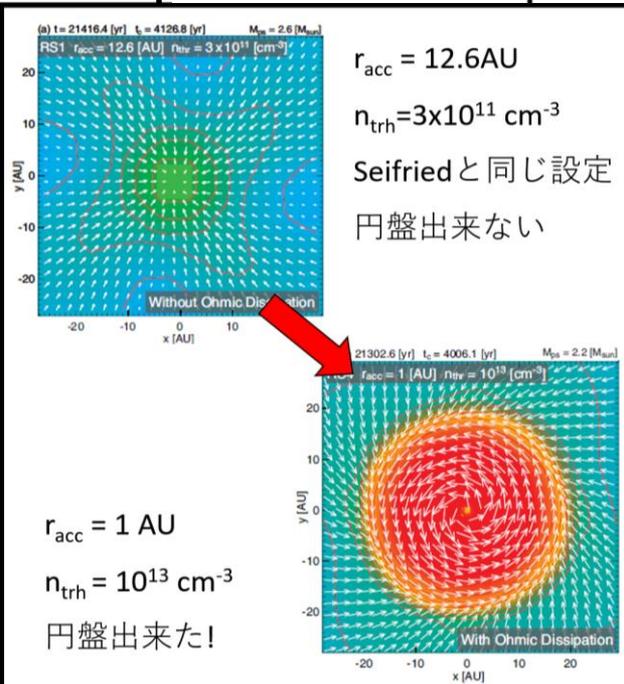
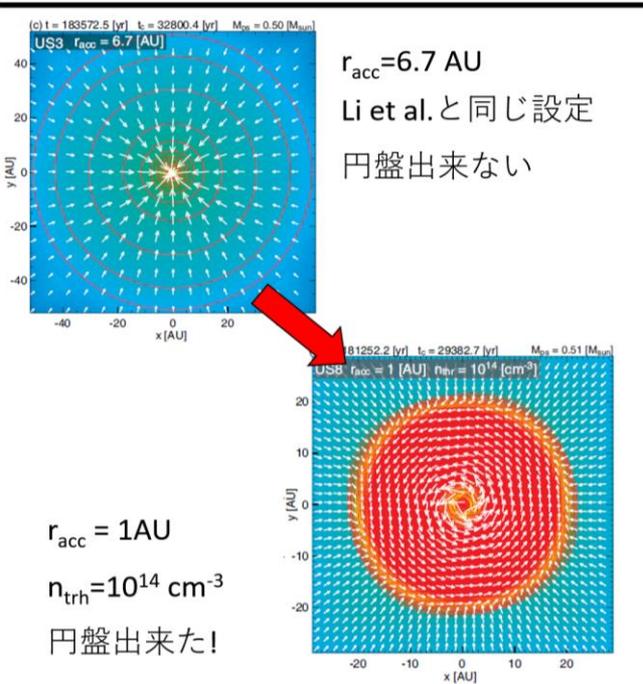
- この講演も全て講演者の妄想の可能性がります。

Sinkの注意

- 何故、アメリカ、ドイツ、フランス、日本のグループが異なる結果になるのか気になった
- 各グループと全く同じ、初期条件、境界条件、シンク条件、解像度、入っている物理をそろえて計算してみた
- 結果、全てのグループの結果を完全に再現出来た!!!



Machida, Matsumoto Inutsuka (2014)



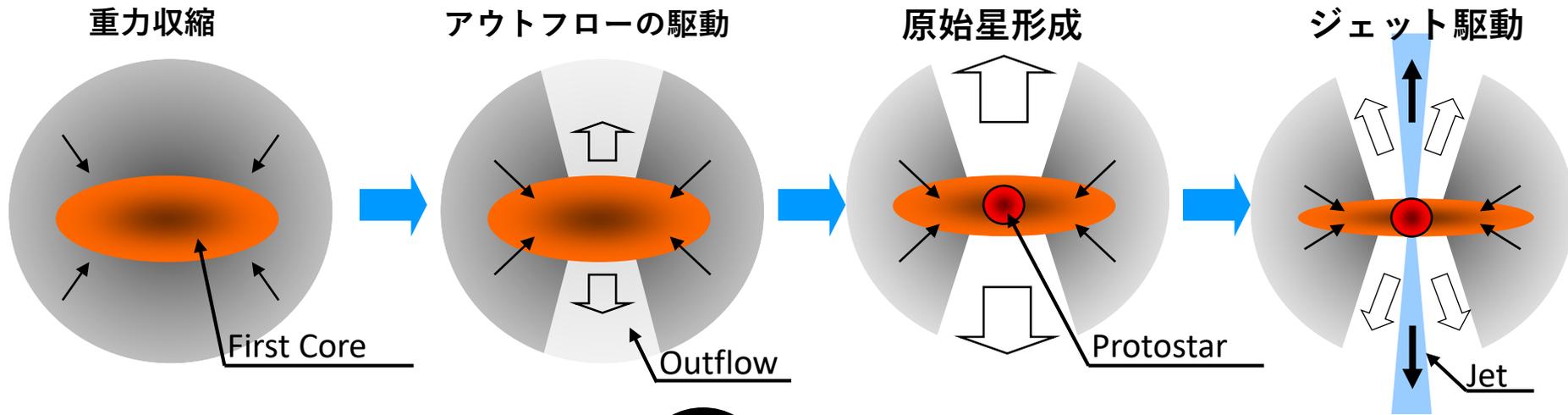
- どのグループも数値計算、数値計算コードに問題はなかった
- 単に、解像度が悪いのと、入っている物理が異なるだけだった

星形成の標準シナリオ

大体3行で

□ 星形成過程の現象は重力収縮過程で余分な角運動量と磁束を捨て去るために起こる

- 重力エネルギーが磁気エネルギーやoutflowの運動エネルギーに変換
⇒ Outflowによるガスの放出 ⇒ コアの重力 < 圧力勾配力によりエンベロープ散逸
⇒ 星の成長終了
- 余分な角運動量を捨てる：磁気制動 ⇒ outflow ⇒ 重力不安定 ⇒ jet
- 磁場の散逸により回転円盤が形成



□ ~~Entrainment~~ vs. ~~Direct driven outflow~~

□ ~~Magnetic braking catastrophe~~ vs. ~~Early disk formation~~

□ ~~Turbulence~~ vs. ~~Magnetic field~~

まとめ

□ 最近の観測と理論研究によって、星形成過程の理解は飛躍的に進んだ

□ 観測(主にALMA)

- アウトフローの回転が観測された：比角運動量から駆動半径が同定 ⇒ 原始星から遥かに離れていた
- 駆動領域そのものが観測
- 出来立ての星の周りにすでに回転円盤が存在していることが分かった(ファーストコアの間接証明)：Kepler回転まで($\propto r^{-1/2}$)
- 様々なスケールでの磁場の構造：整列した磁場 ⇒ 乱流それほど強くない？
(乱流を入れて星形成の計算すると円盤出来ない、アウトフロー出ない; Lewis & Bate 2017, Kuruwita & Federrath 2018)

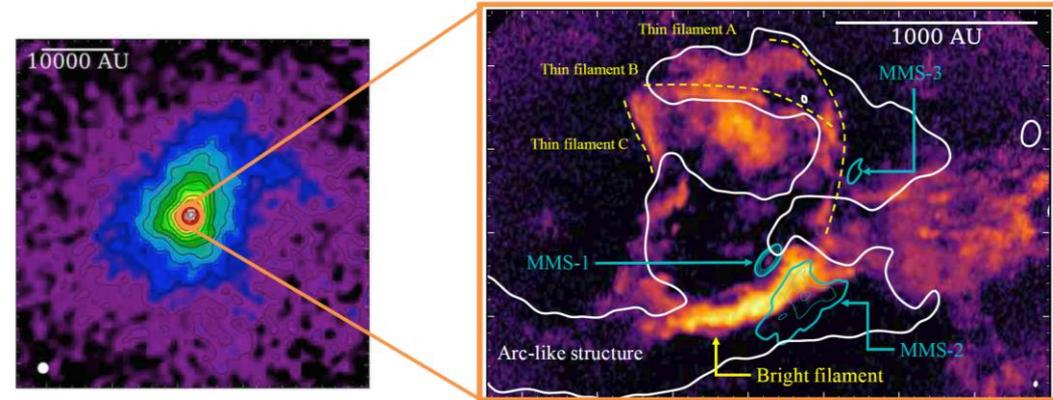
□ 理論(主にシミュレーション)

- 前期段階は終了した
- 後期段階が計算出来るようになった
- 分子雲コアを初期条件として、アウトフロー、ジェット駆動、円盤の形成、非定常降着・ガス噴出が自動的に再現
- (あまりに観測と合いすぎるので何か根本的に間違っているのではないかと不安に駆られる日々)

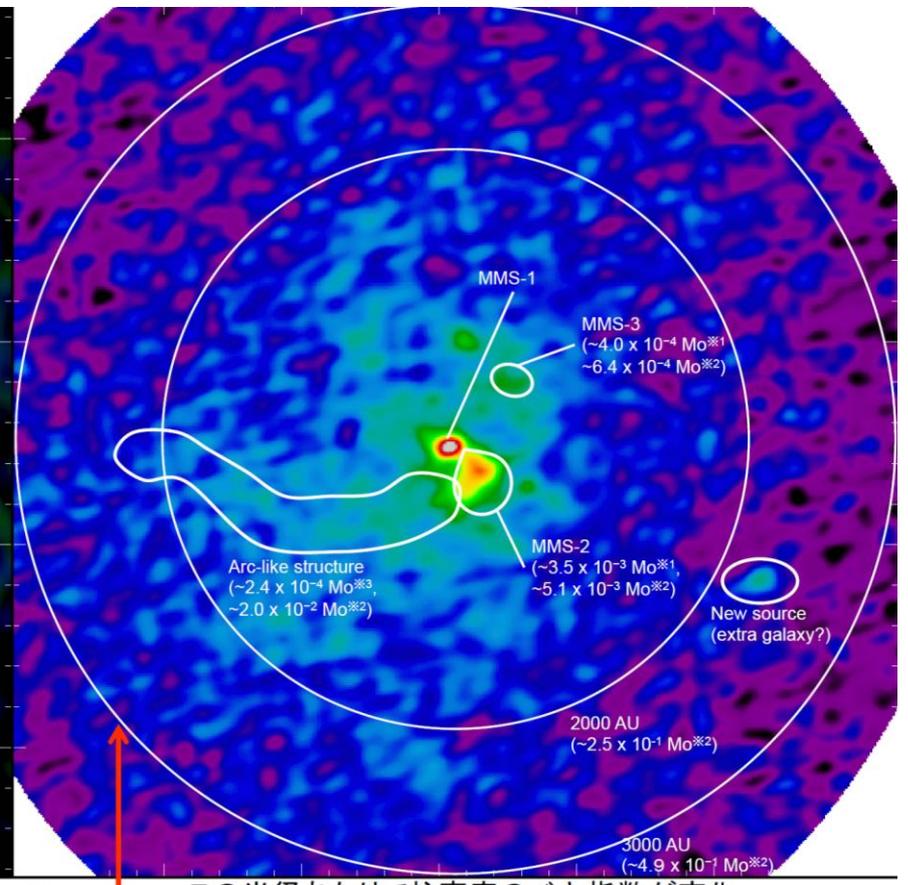
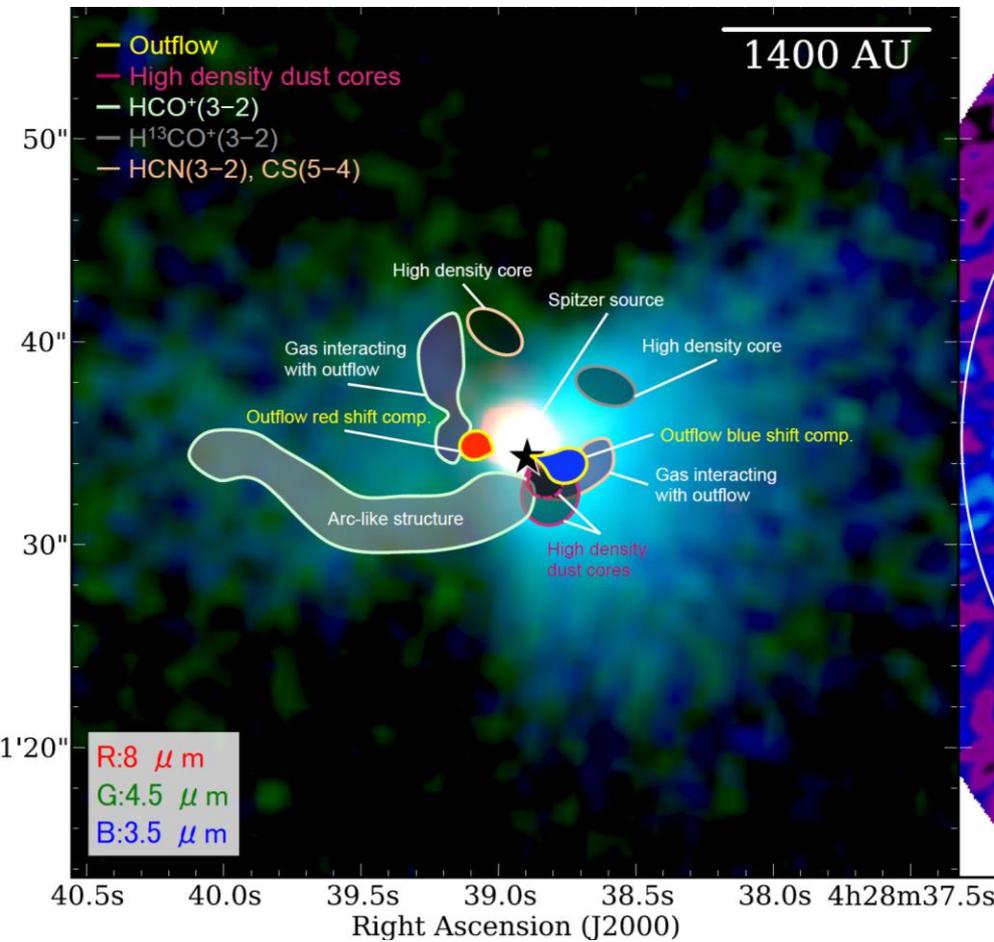
□ 今後の課題

- 降着段階から円盤の散逸、惑星形成過程までの接続
- どの質量範囲まで有効か？ 褐色矮星から大質量星まで (Tanaka K. et al. 2017, 2018)
- 連星形成
- 多くは、教科書的な天体(選択効果?)だが、中には非常に複雑な天体も

- 複雑な内部構造を持つ天体 (MC27/L1521F)
- 多くはないが、ある程度 (<10-20%)はこのような天体がある？
- 連星形成の現場？ やはり乱流？
- まだまだやることはありそう。



Tokuda et al. (2014,2016,2017,2018)



この半径あたりで柱密度のベキ指数が変化
=>内側 $\propto r^{-0.4}$, 外側 $\propto r^{-1.3}$