

多重星・星団の形成

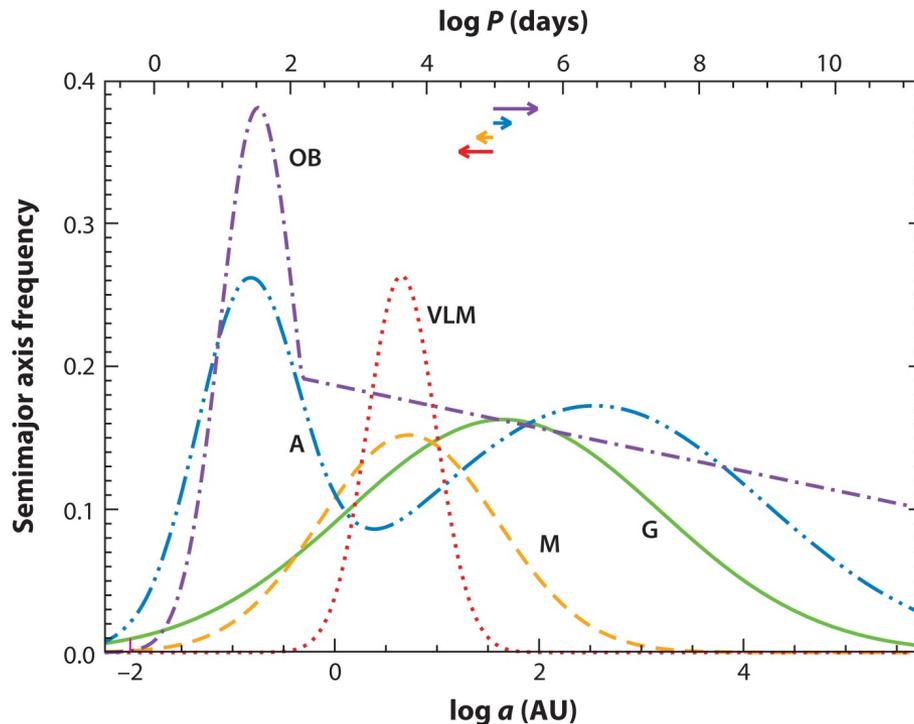
松本倫明（法政大学人間環境学部）

連星・多重星形成 観測

連星周期（連星間距離）の頻度分布

Duchêne & Kraus 2013

<https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081710-102602>



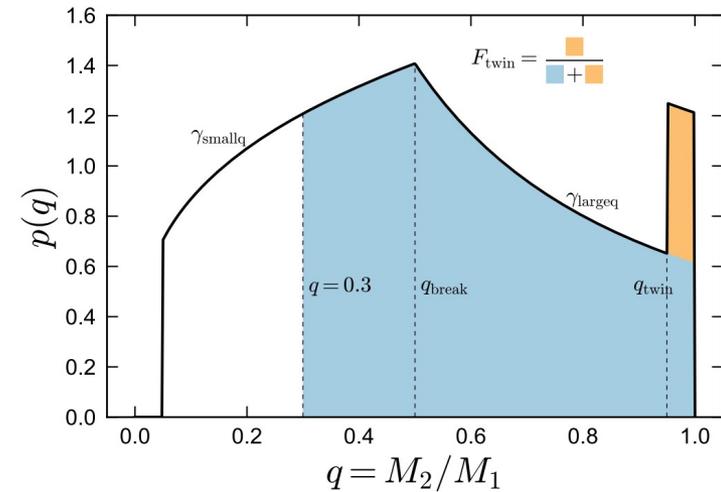
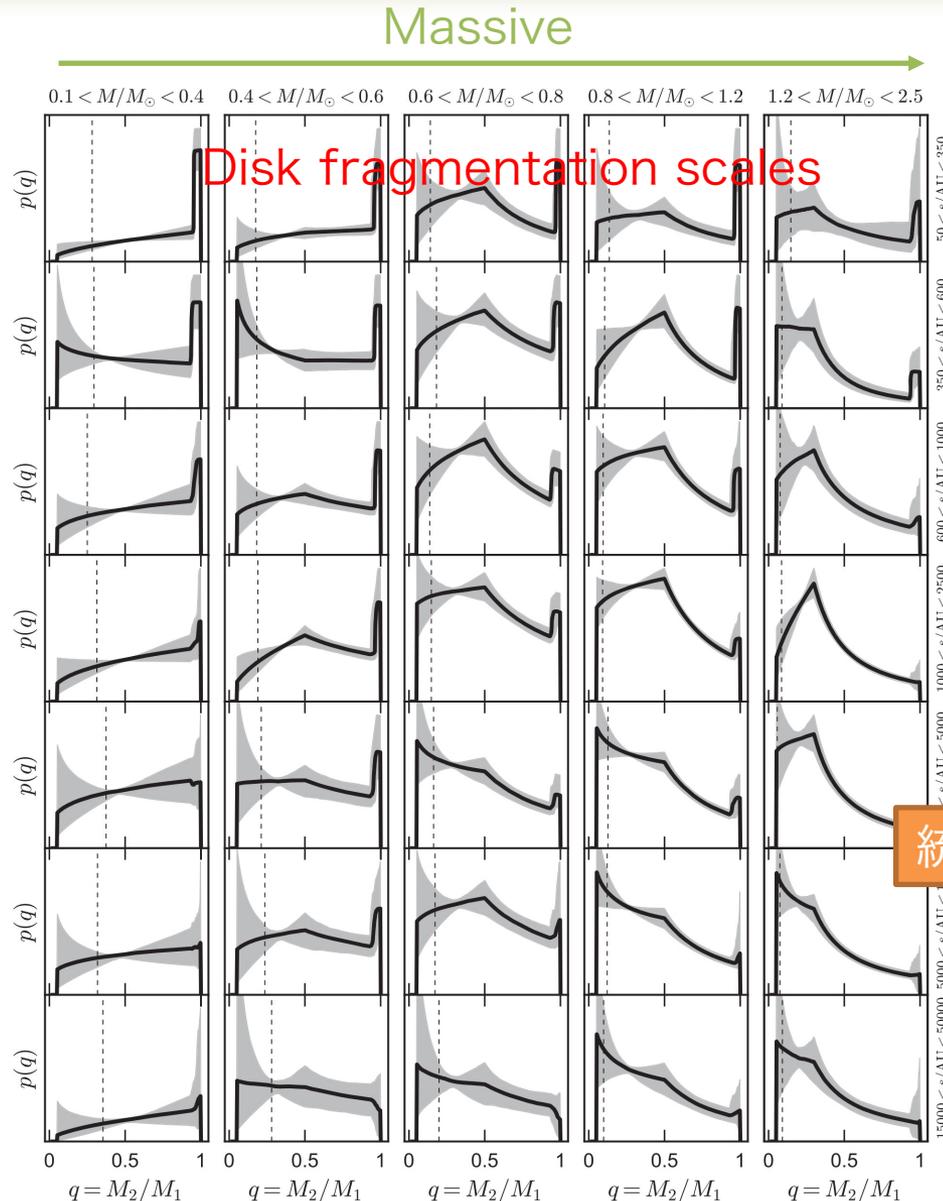
$$\text{Multiple frequency (MF)} = \frac{B + T + Q}{S + B + T + Q}$$

$$\text{Companion frequency (CF)} = \frac{B + 2T + 3Q}{S + B + T + Q}$$

Table 1 Multiplicity properties for Population I main-sequence stars and field brown dwarfs

Category	Mass Range (M_{\odot})	Multiple system/companion frequency	Mass ratio distribution	Orbital period distribution
VLM/BD	$\lesssim 0.1$	$MF = 22^{+6}_{-4}\%$ $CF = 22^{+6}_{-4}\%$	$\gamma = 4.2 \pm 1.0$	Unimodal (log-normal?) $\bar{a} \approx 4.5 \text{ AU}$, $\sigma_{\log p} \approx 0.5$
M	0.1–0.5	$MF = 26 \pm 3\%$ $CF = 33 \pm 5\%$	$\gamma = 0.4 \pm 0.2$	Unimodal (log-normal?) $\bar{a} \approx 5.3 \text{ AU}$, $\sigma_{\log p} \approx 1.3$
FGK	0.7–1.3	$MF = 44 \pm 2\%$ $CF = 62 \pm 3\%$	$\gamma = 0.3 \pm 0.1$	Unimodal (log-normal) $\bar{a} \approx 45 \text{ AU}$, $\sigma_{\log p} \approx 2.3$
A	1.5–5	$MF \geq 50\%$ $CF = 100 \pm 10\%$	$\gamma = -0.5 \pm 0.2$	Bimodal $\bar{P} \approx 10 \text{ days}$ and $\bar{a} \approx 350 \text{ AU}$
Early B	8–16	$MF \geq 60\%$ $CF = 100 \pm 20\%$
O	$\gtrsim 16$	$MF \geq 80\%$ $CF = 130 \pm 20\%$	$\gamma^{\log P \leq 3.5} = -0.1 \pm 0.6$ $\gamma^{a \geq 100 \text{ AU}} = -0.5 \pm 0.1$	Peak + power law $\bar{P} \approx 5 \text{ days}$ and $\alpha \lesssim -1$

Equal-mass binaries are frequent for all binary parameters (mass and separation)



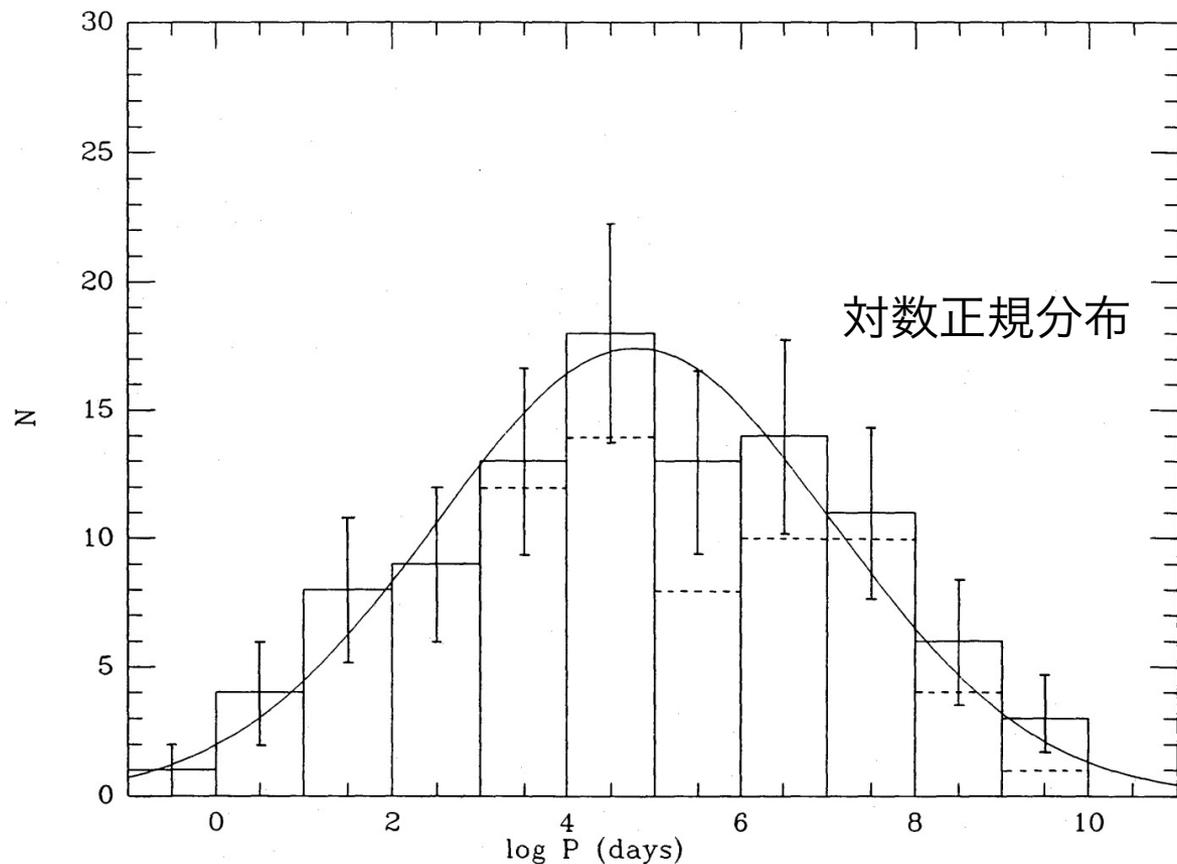
El-Badry+ 19
Gaia DR2

統一的な描像の形成メカニズムが必要

Data includes only binaries not higher order multiples.

For OB stars (Moe+ 17)

太陽近傍の太陽型星の連星間距離頻度



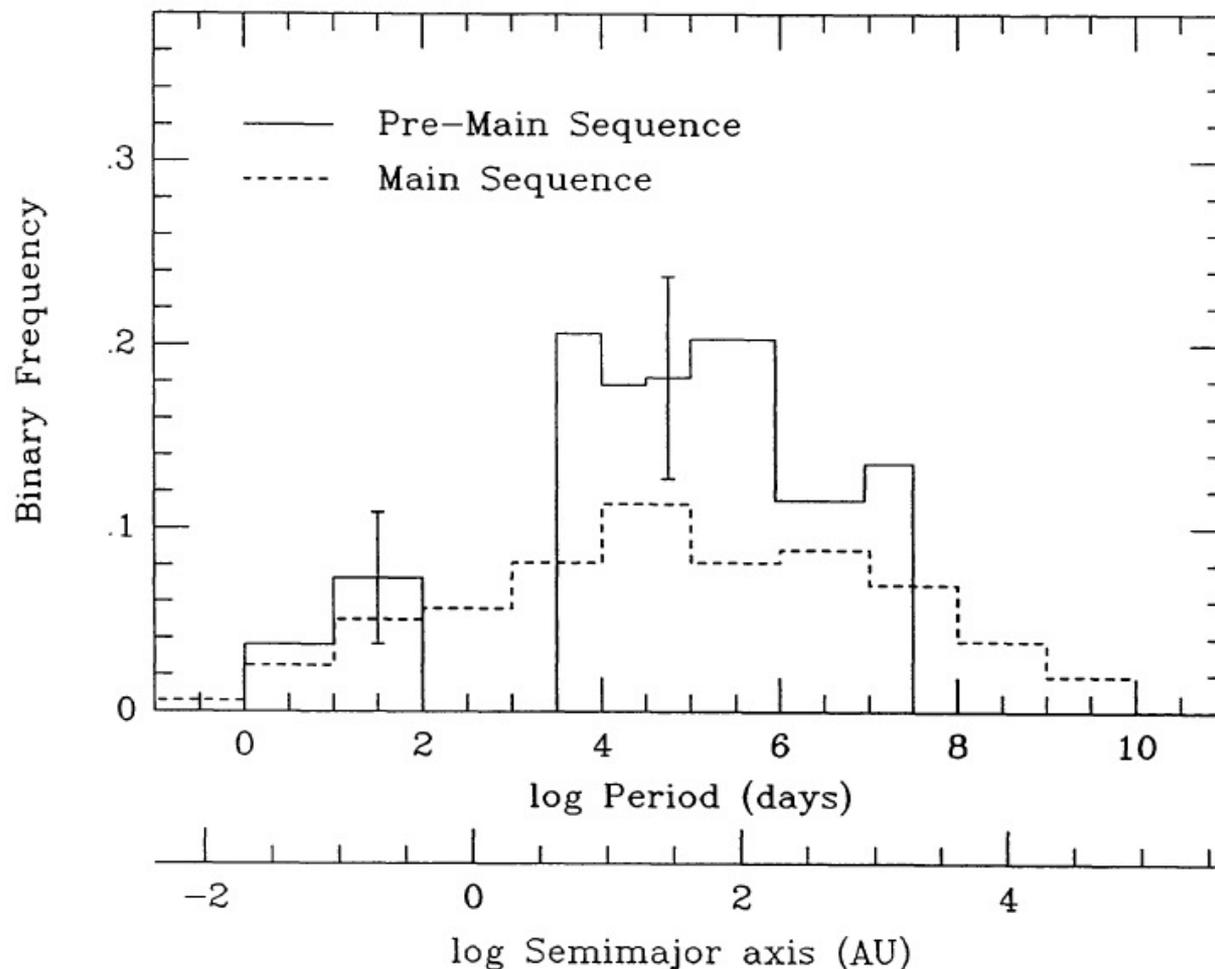
Duquennoy & Mayor 1991

サンプル：近隣の太陽型星 (G-dwarf)

破線：補正なし

実践：補正あり

PMSとMSにおける連星間距離の頻度分布

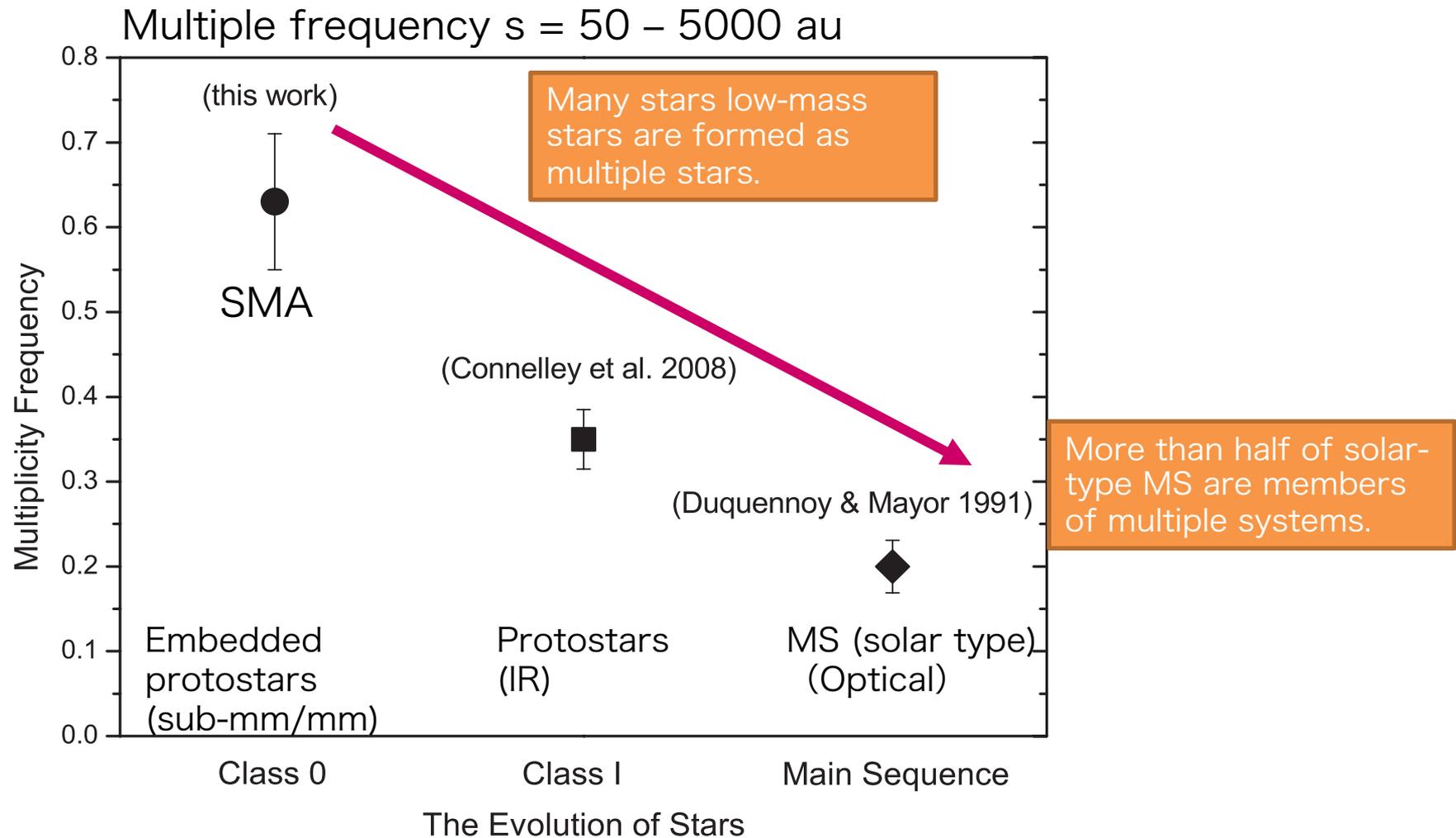


3重星は連星2個とカウント

Mathieu 1994

doi:10.1146/annurev.aa.32.090194.002341

Introduction: Binary/multiple star formation is major mode



$$\text{multiplicity frequency (MF)} = \frac{B + T + Q}{S + B + T + Q},$$

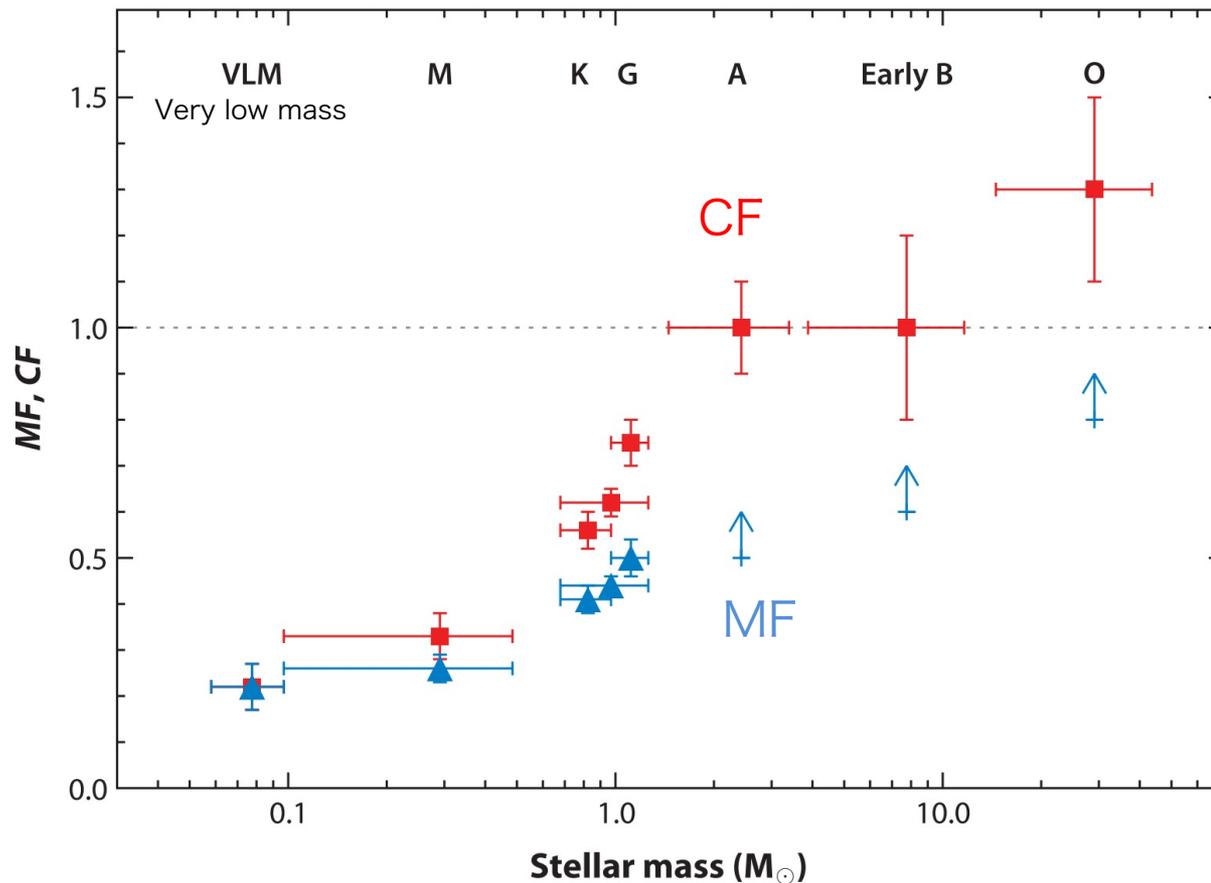
Chen+ 2013

doi:10.1088/0004-637X/768/2/110

Binary/multiple depends on stellar masses for MS

Duchêne & Kraus 2013

<https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081710-102602>

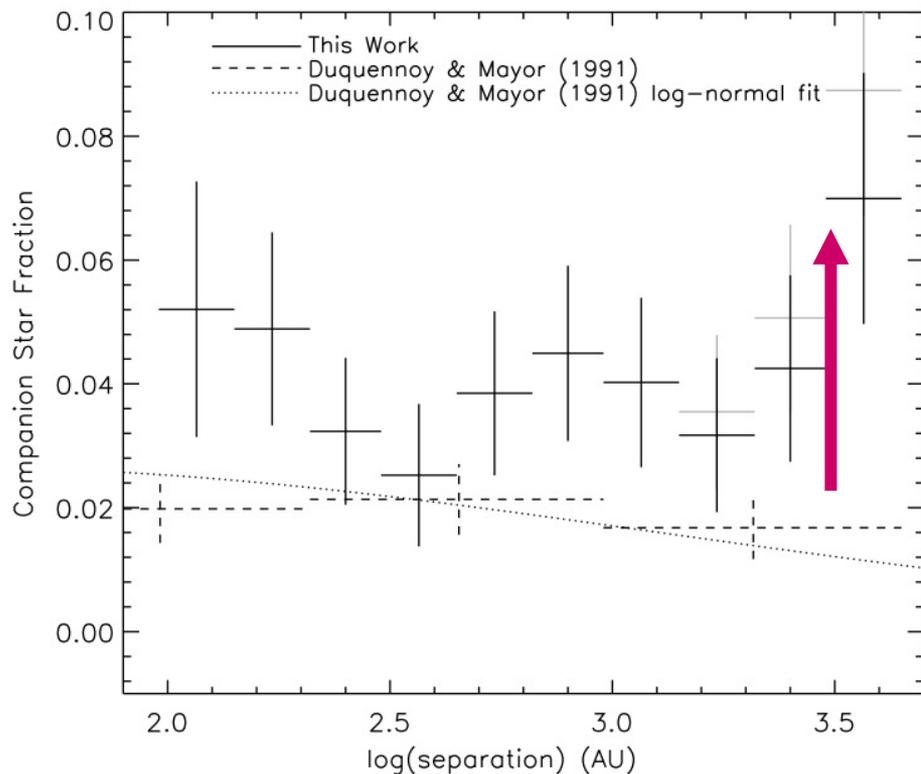


MF: fraction of multiple systems

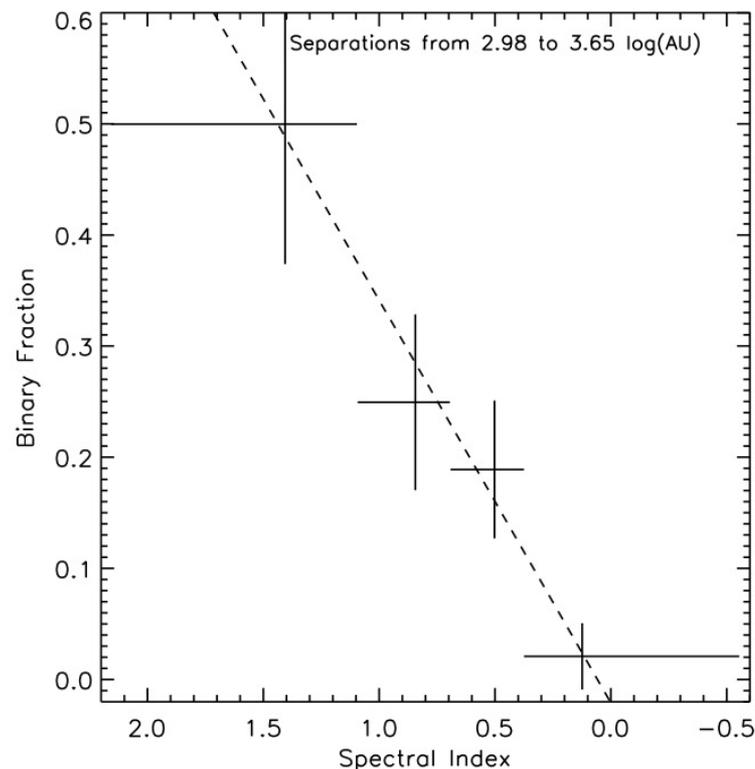
CF: average number of companions per target

Class I 原始星の連星頻度

Wide binary に超過



超過は進化とともに減少

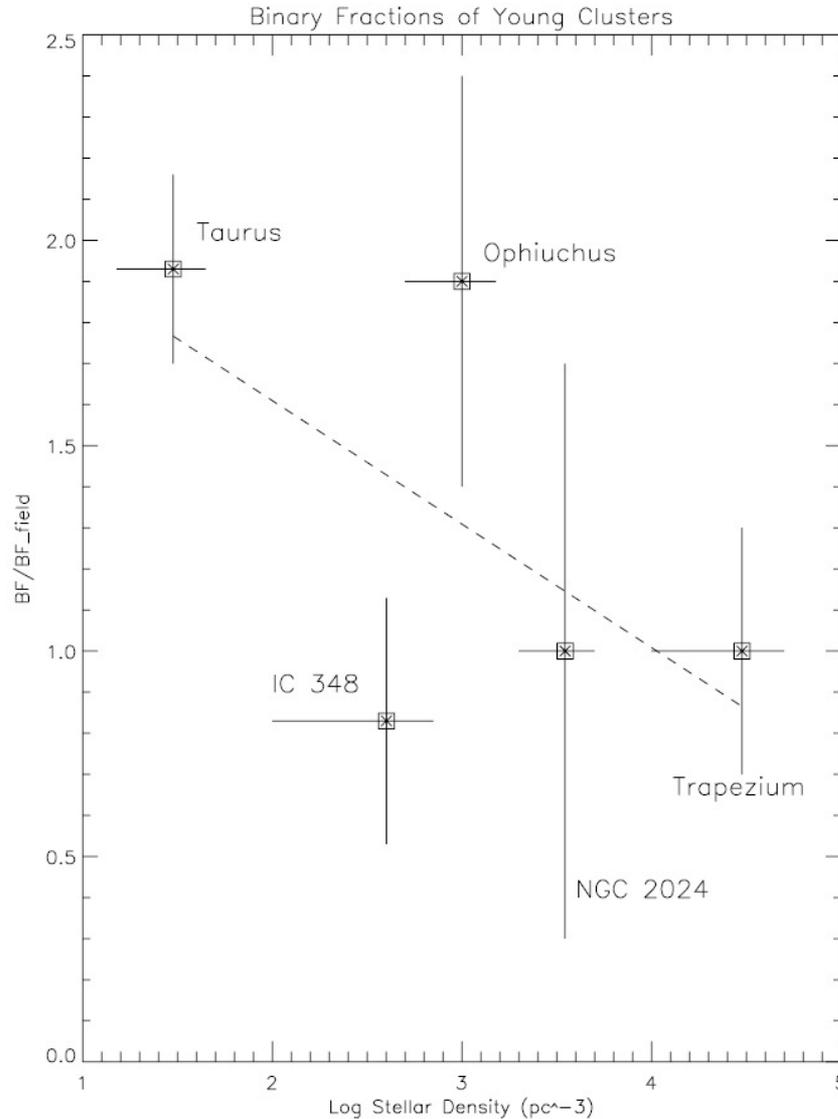


力学進化の過程で判星の放出

Connelley+ 2008

<http://dx.doi.org/10.1088/0004-6256/135/6/2526>

星形成領域間の比較



集団的星形成では
連星頻度は低い

HST/NCMOSで
NGC2024

Liu+ 2003
doi:10.1086/377620

連星・多重星形成 形成理論

連星・多重星の形成シナリオ

- 円盤分裂
 - 星周円盤が分裂して判星を形成
 - 星周円盤が重いとき（中心星が軽いとき）に起こる： $M_{\text{disk}}/M_{*} > 0.1$
- 乱流分裂
 - 乱流が擾乱を作り、ガス雲が分裂する

現状：「円盤分裂と乱流分裂のどちらが正しい？」というテーマが散見される。

円盤分裂と乱流分裂は共存するのでは？排他的ではない。

Disk fragmentation

初期条件：分子雲コア
回転、バーゆらぎ
磁場なし

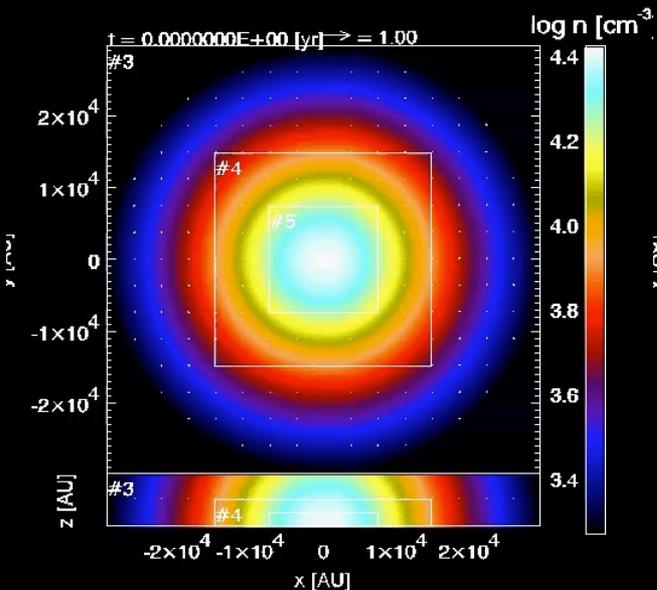
Matsumoto & Hanawa 2003
doi:10.1086/377367
Vizualization: 4D2U

Disk fragmentation をサブタイプに分類

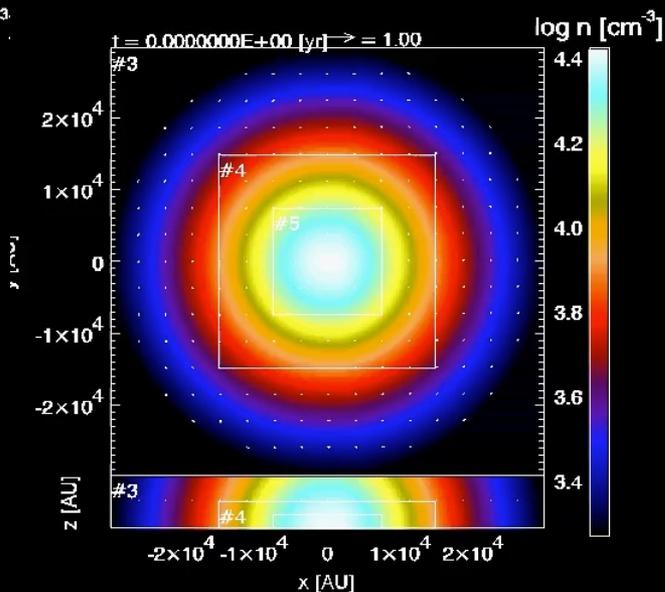
初期条件：分子雲コア
回転、バーゆらぎ
磁場なし

Matsumoto & Hanawa 2003
doi:10.1086/377367

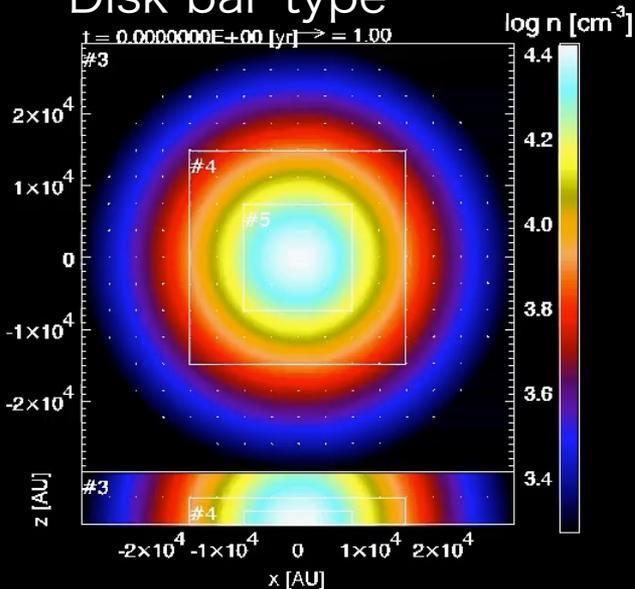
Disk



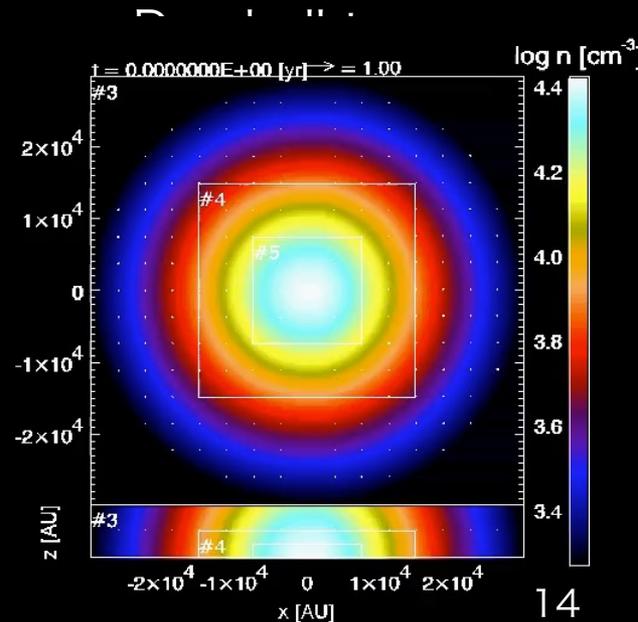
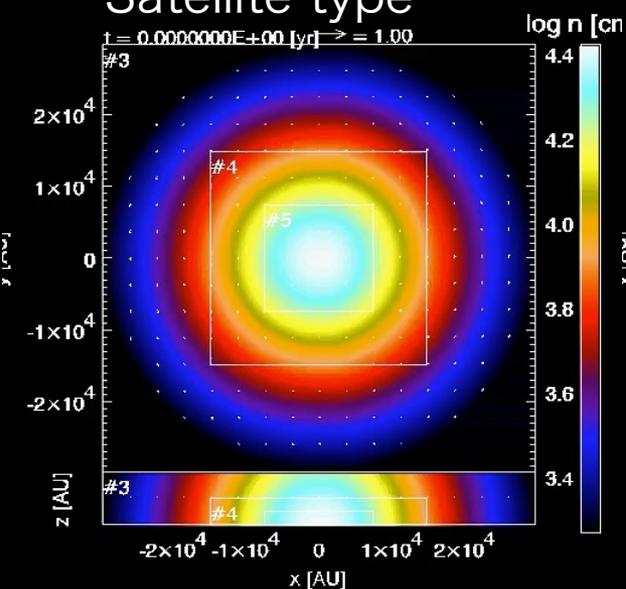
Ring-bar type



Disk bar type



Satellite type



回転円盤の安定性

回転している無限に薄い一様な円盤を考える

分散関係

$$\omega^2 = k^2 c_s^2 - 2\pi G \Sigma |k| + \kappa^2$$

Epicyclic frequency (動径方向の振動数)

$$\kappa^2 = R \frac{d\Omega^2}{dR} + 4\Omega^2$$

剛体回転

$$\Omega = \text{const.}, \quad \kappa = 2\Omega,$$

回転速度一定 $\Omega \propto R^{-1}, \quad \kappa = \sqrt{2}\Omega,$

ケプラー回転 $\Omega \propto R^{-3/2}, \quad \kappa = \Omega,$

k についての2次方程式なので、こう変形する

$$\omega^2 = c_s^2 \left(k - \frac{\pi G \Sigma}{c_s^2} \right)^2 + \kappa^2 \left[1 - \left(\frac{\pi G \Sigma}{c_s \kappa} \right)^2 \right]$$

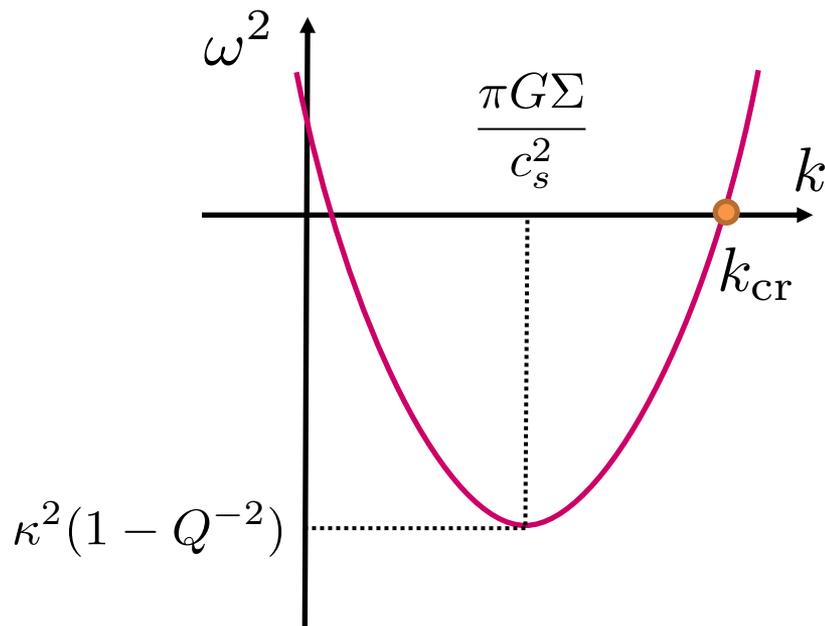
回転円盤の安定性

分散関係

$$\omega^2 = c_s^2 \left(k - \frac{\pi G \Sigma}{c_s^2} \right)^2 + \kappa^2 \left[1 - \left(\frac{\pi G \Sigma}{c_s \kappa} \right)^2 \right]$$

= 1/Q とおく

$$Q = \frac{c_s \kappa}{\pi G \Sigma} \quad \text{Toomre Q-parameter}$$



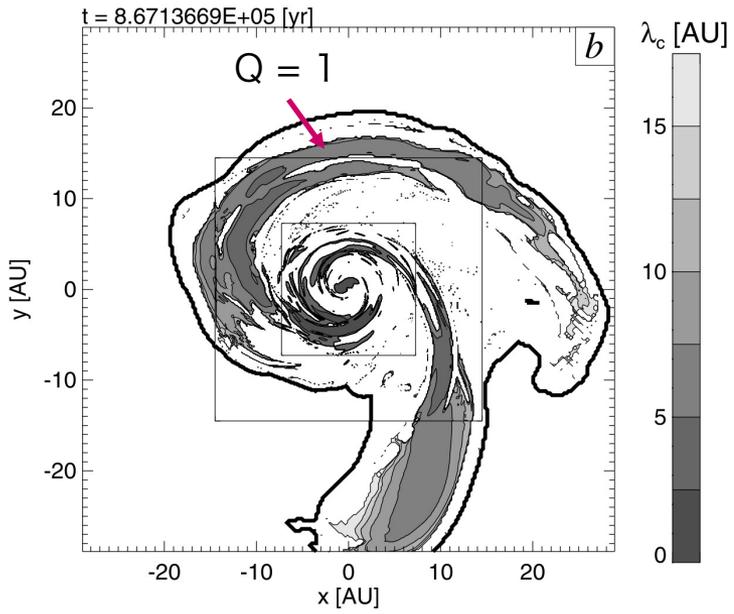
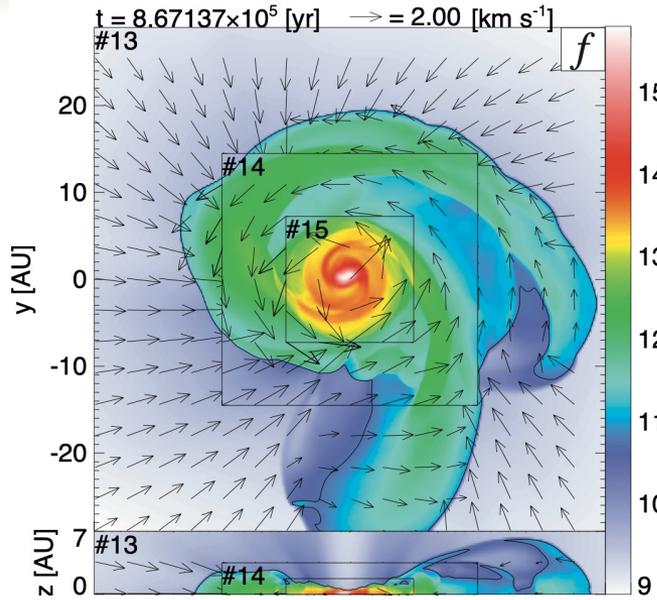
$$k_{cr} = \frac{\pi G \Sigma}{c_s^2} \left(1 \pm \sqrt{1 - Q^2} \right)$$

$$\lambda_{cr} = \frac{2\pi}{k_{cr}} = \frac{2c_s^2}{G \Sigma \left(1 \pm \sqrt{1 - Q^2} \right)}$$

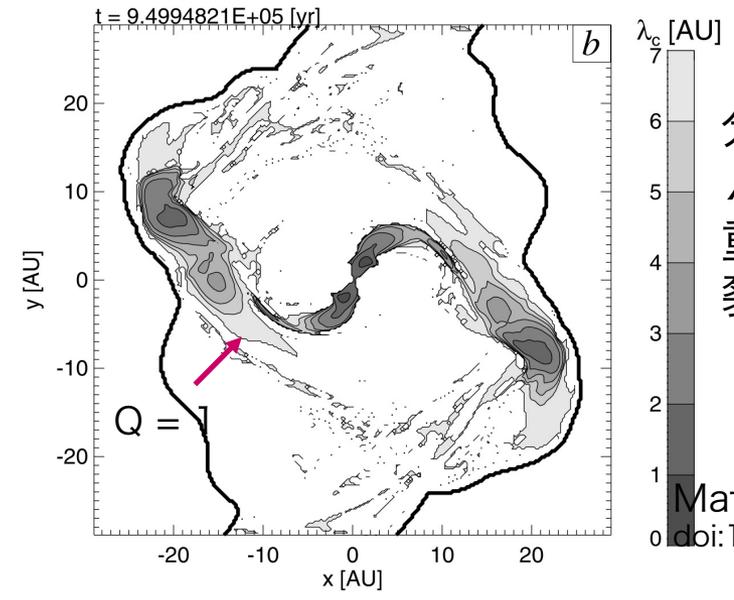
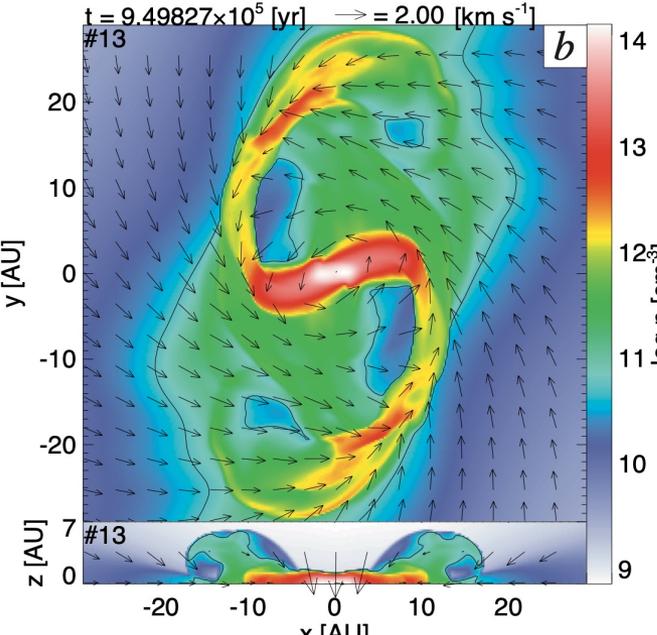
$Q > 1$ 安定

$Q < 1$ 不安定

臨界ジーンズ波長とToomre Q-パラメータ



渦状腕の幅 = λ_{cr}
 渦状腕は重力不安定で形成



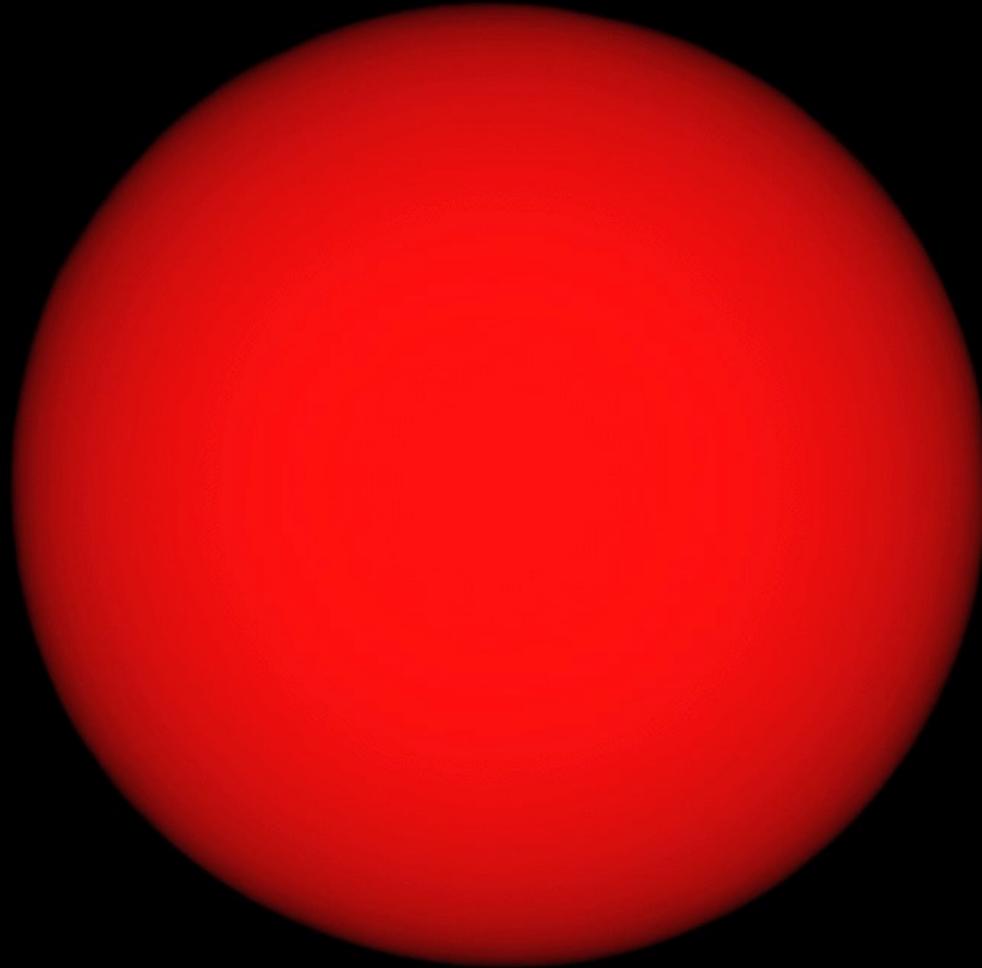
分裂片の大きさ = λ_{cr}
 重力不安定で円盤分裂

※ Q = 2でも渦状腕が形成することが知られている

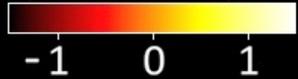
Matsumoto & Hanawa 2003
 doi:10.1086/377367

$Z=Z_{\odot}$

0 yr



$\log(\text{Col. Density [g/cm}^2\text{)})$



Matthew Bate
University of Exeter



連星形成のメカニズムは様々

近接連星 ($s < 10$ au, $M_1 = 0.1 - 1.5 M_{\odot}$) の形成メカニズムの分類

Metallicity (Z_{\odot})	Numbers of close binaries formed by various formation mechanisms					Total
	Separate-SD	Filament-SD	Exchange	Filament-Network	Disc-Frag	
0.01	3*	7	4*	0	5*	17
0.1	10	4	3*	0	3*	19
1	2*	12	1*	6	5	25
3	7	2	7	0	0	16

Separate-SD: 別々のコア/フィラメントで形成し、星-円盤相互作用で連星に

Filament-SD: 同じフィラメントで形成し、星-円盤相互作用で連星に

Exchange: 多重星系同士が相互作用

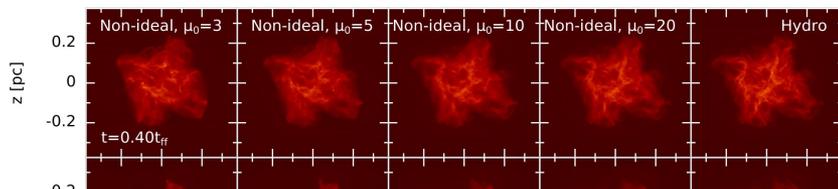
Filament-Network: フィラメントネットワークで分裂し、力学相互作用で近接連星に

Disc-Frag: 円盤分裂

Bate+ 19

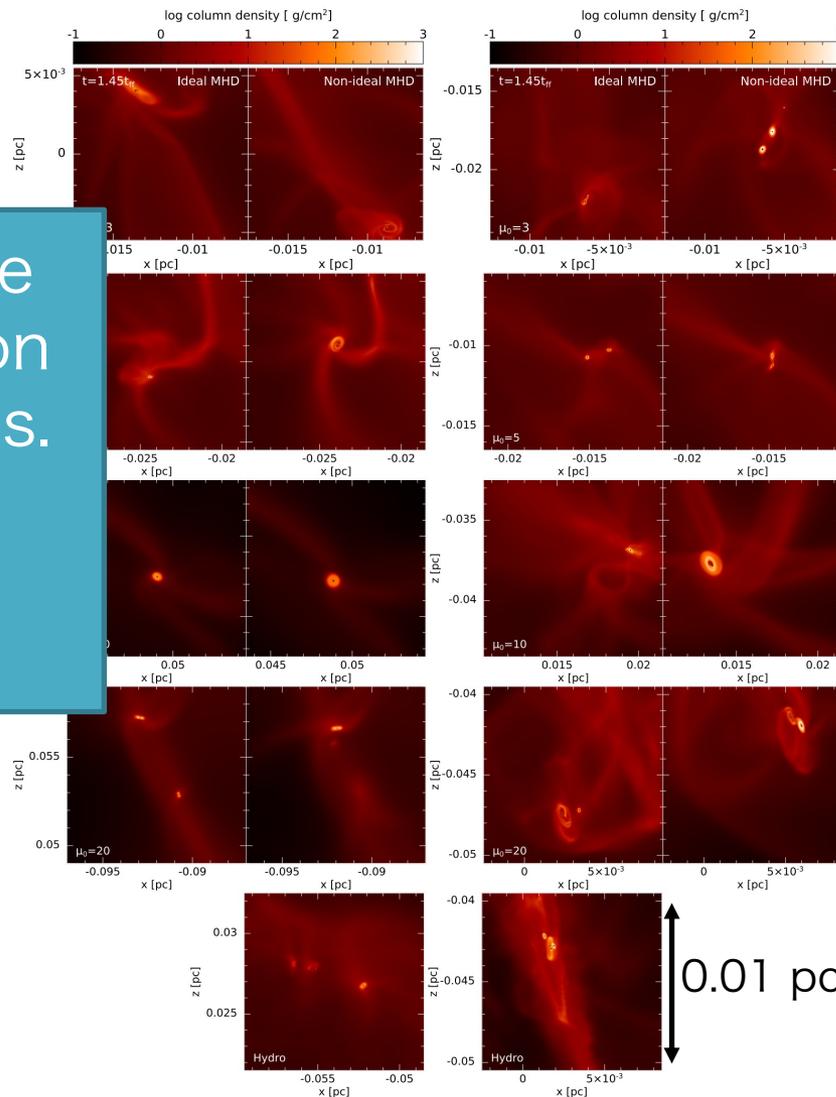
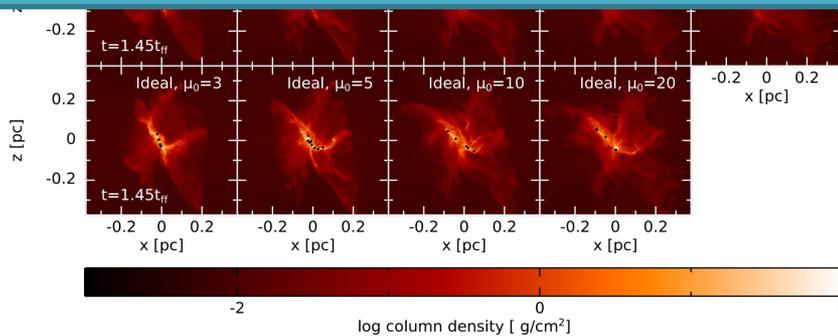
doi:10.1093/mnras/stz103

Disk fragmentation in turbulent fragmentation w/ very high resolution.



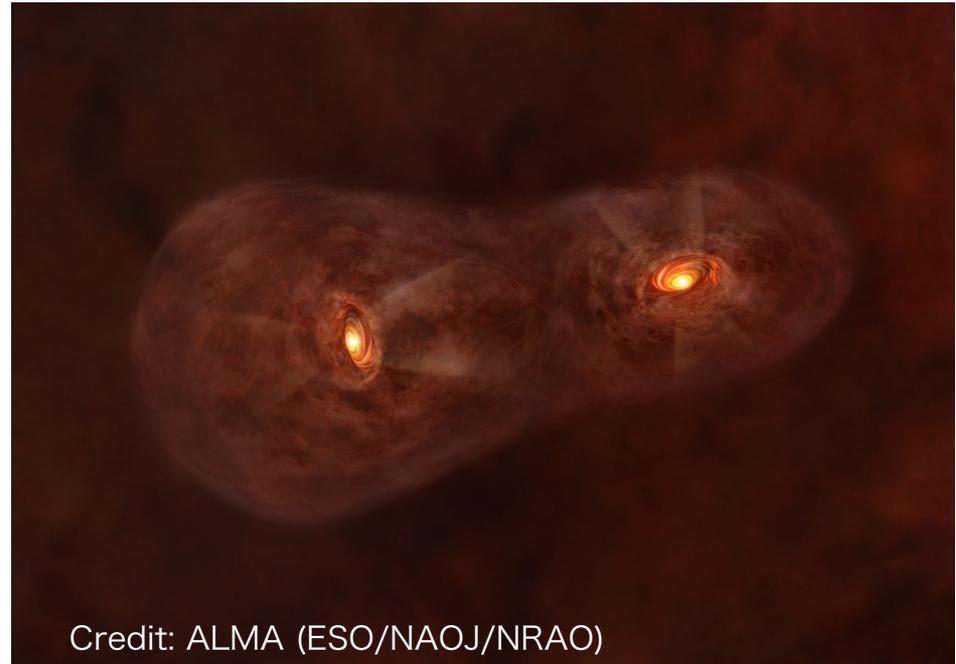
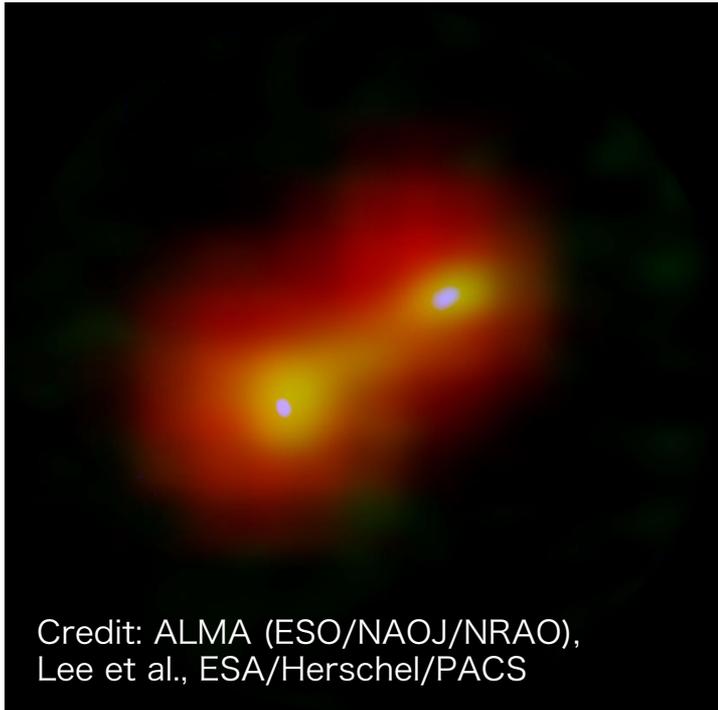
These simulations reproduce large disks and fragmentation even for initial strong B-fields.

No magnetic braking catastrophe!



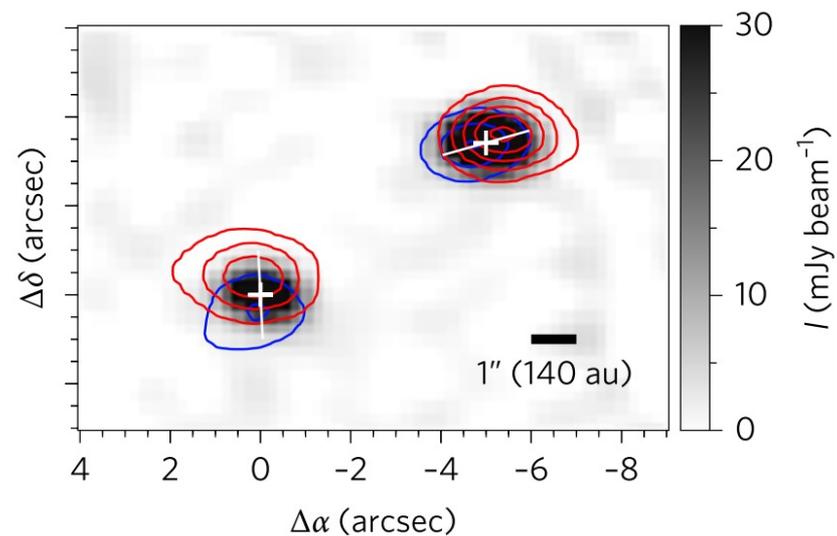
Sink radius =

ALMA reveals diversity in binary/multiple formation (turbulent fragmentation)

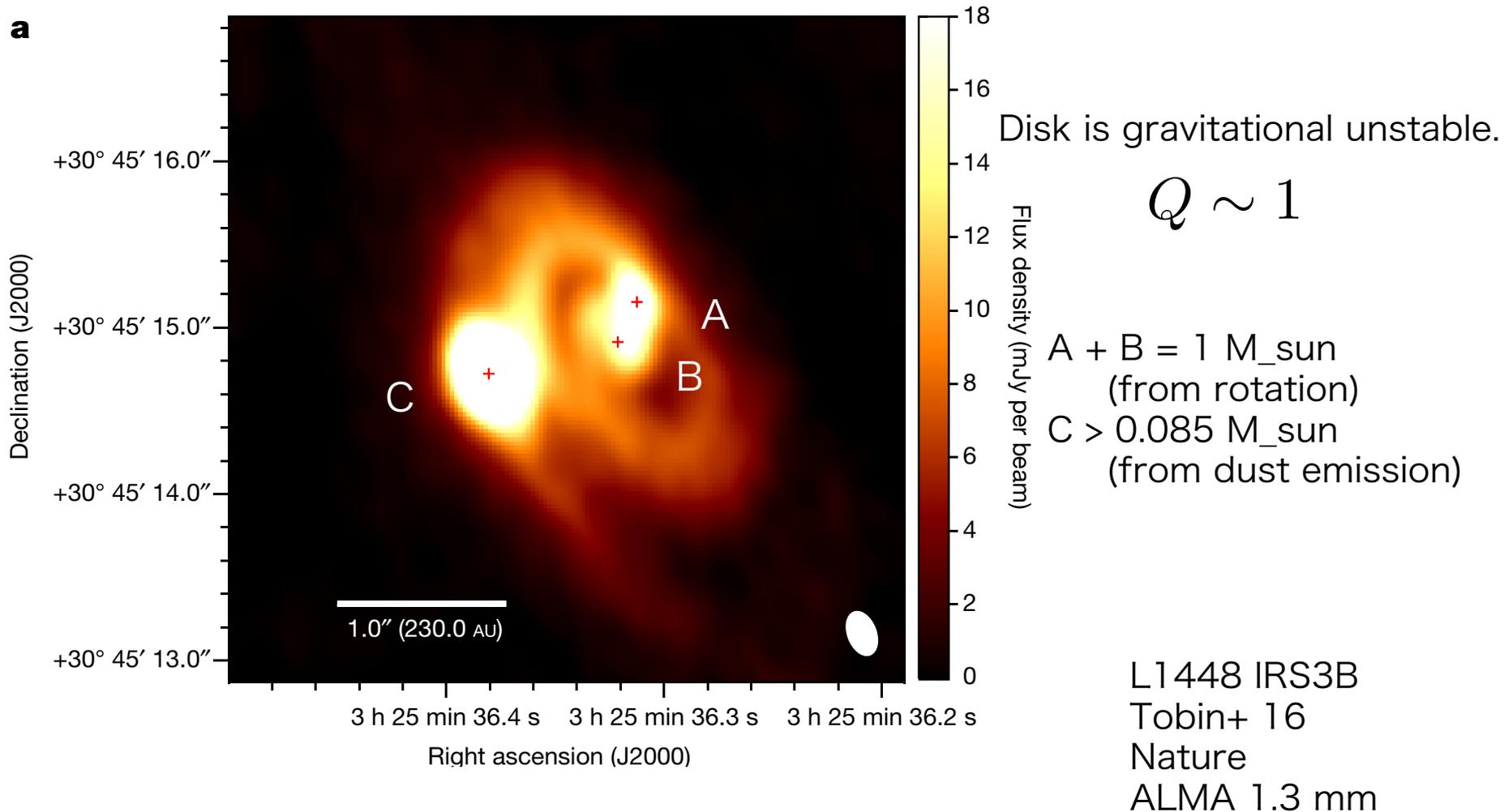


Lee+ 2017

<https://doi.org/10.1038/s41550-017-0172>



ALMA reveals diversity in binary/multiple formation (disk fragmentation)



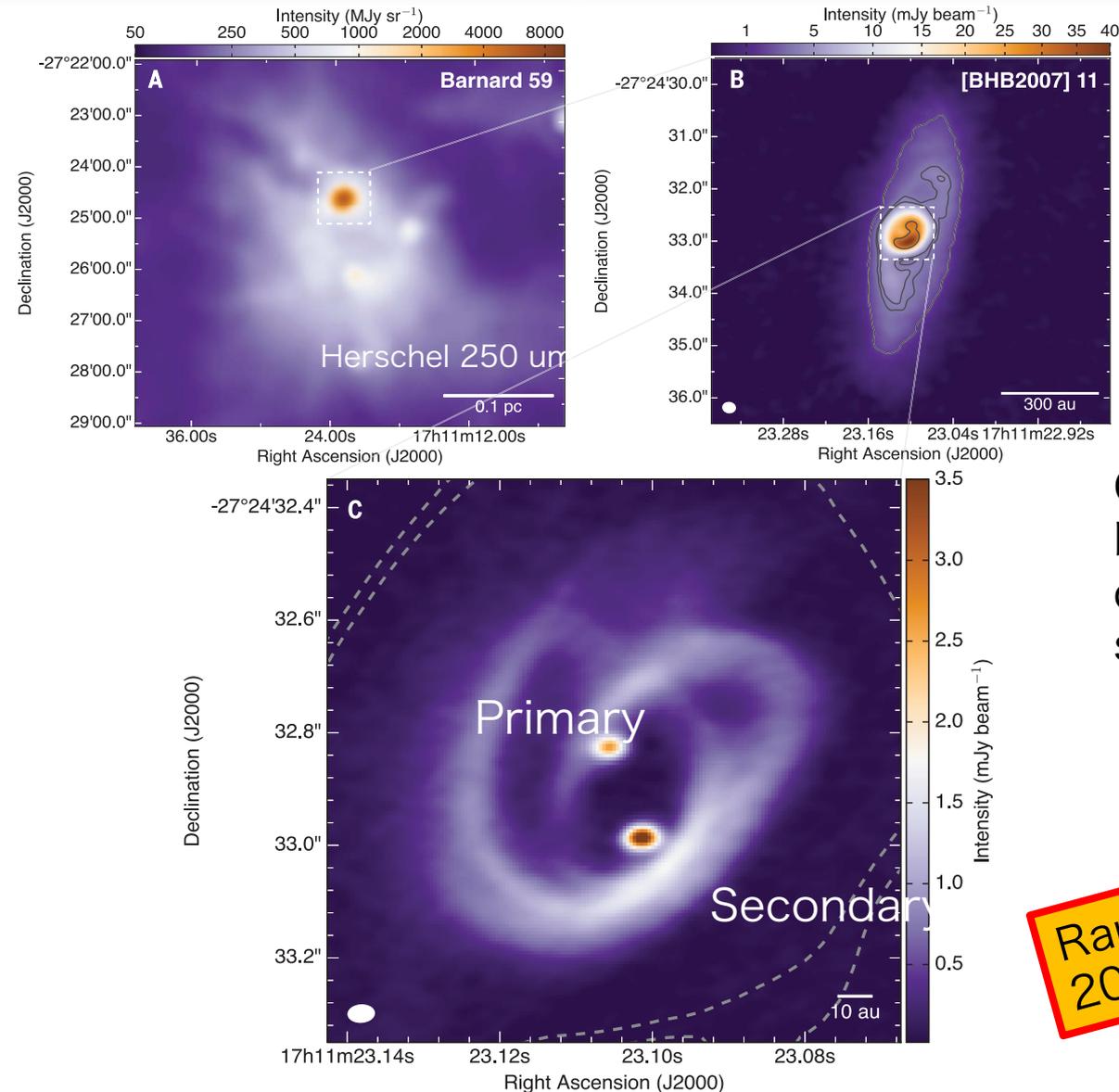
ALMA reveals diversity in binary/multiple formation (disk fragmentation?)

BHB07 11 in B59 core
ALMA 1.3 mm
Alves+ 19 (Science)

$$Q \sim 3.9$$

Gravitationally stable.
Filaments are due to
dynamical interaction btw
stars and disk

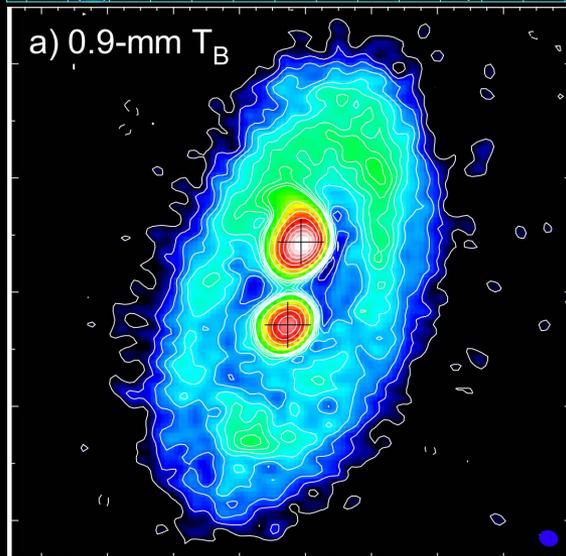
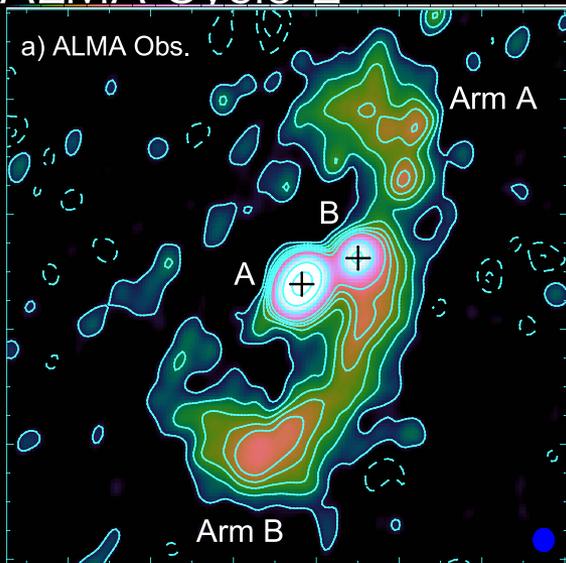
Ranked 5th in ALMA Top 10
2019 science results by NRAO



Diversity: Observed asymmetry in CBDs

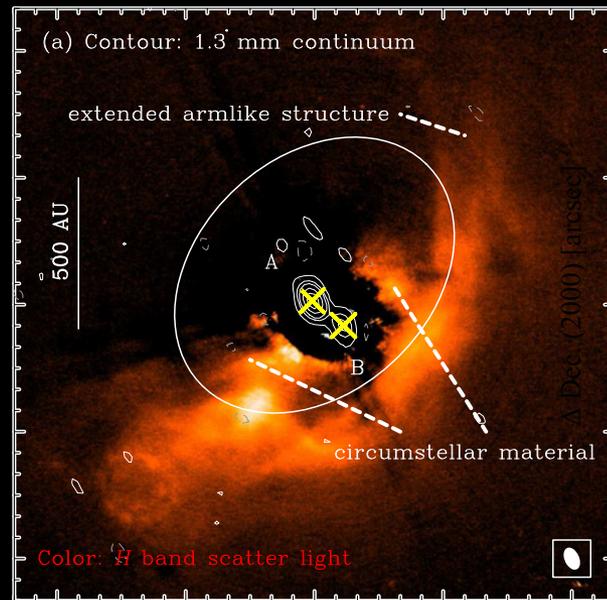
L1551 NE (Takakuwa+ 17)

ALMA Cycle-2



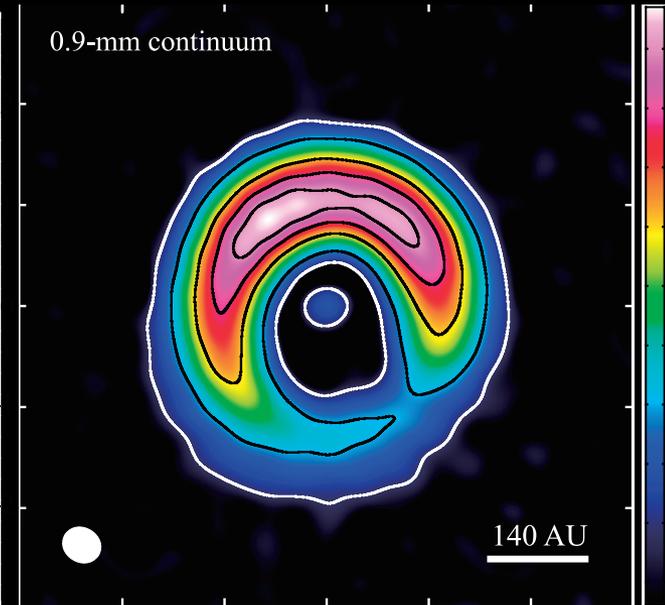
UY Aur (Tang+ 14, Hioki+ 07)

SUBARU H-band



HD 142527 (Fukagawa+ 13)

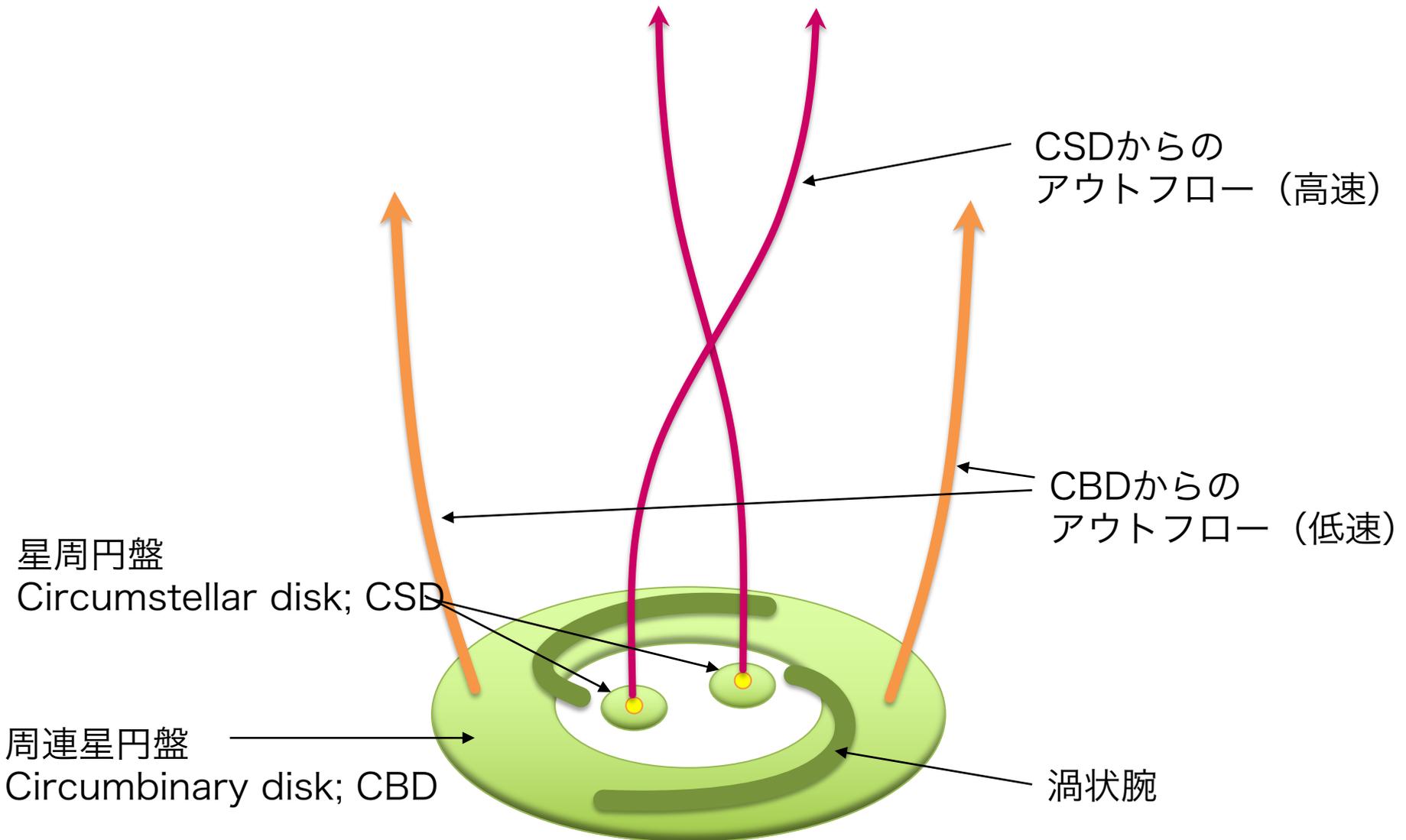
ALMA Cycle 0



L1551 IRS5 (Takakuwa+ 20)

ALMA Cycle-4

若い連星系の構造; 2重の円盤構造

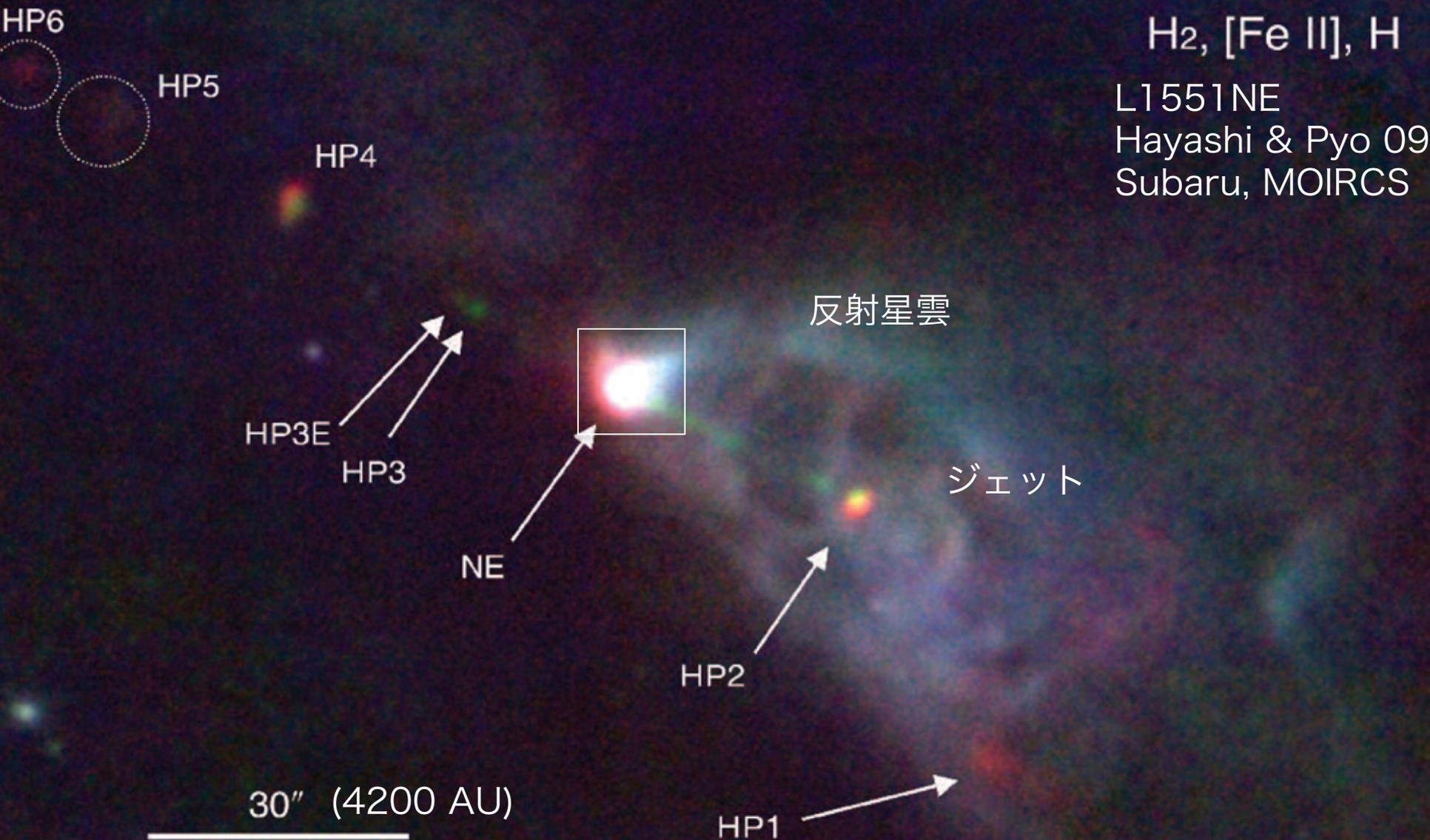


事例

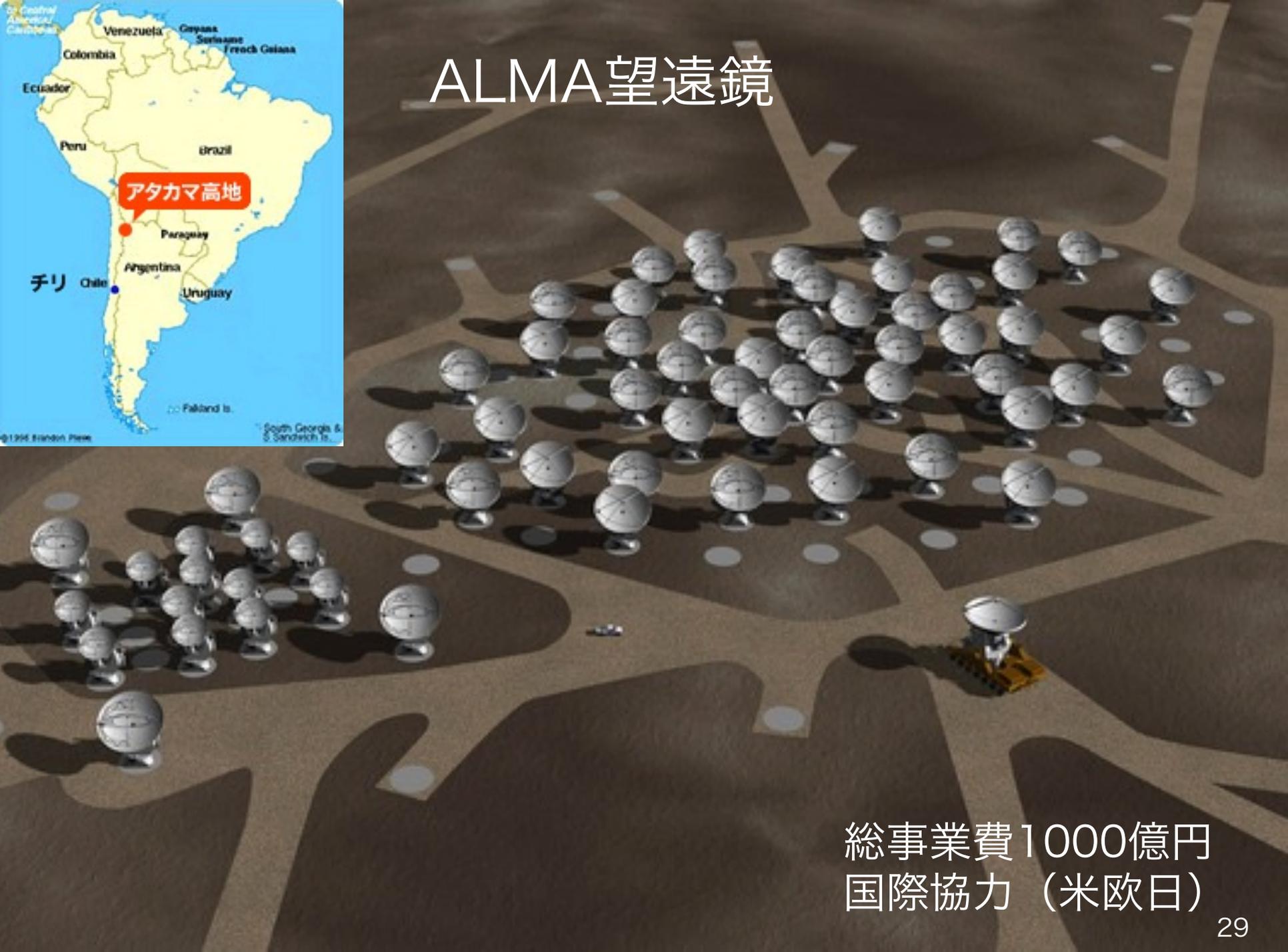
原始連星系

L1551NE

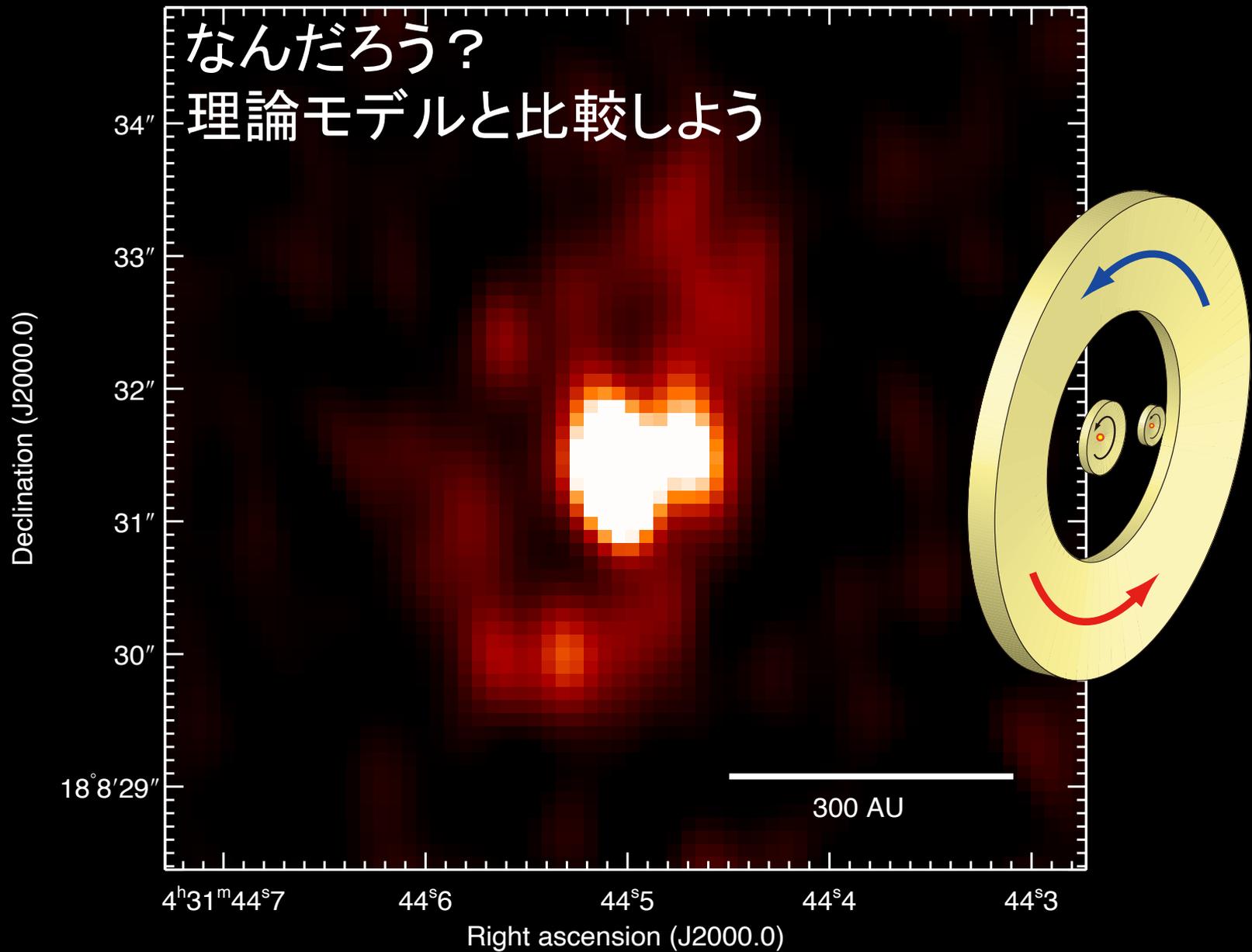
L1551 NE : 原始連星 (質量降着中)



ALMA望遠鏡



総事業費1000億円
国際協力（米欧日）

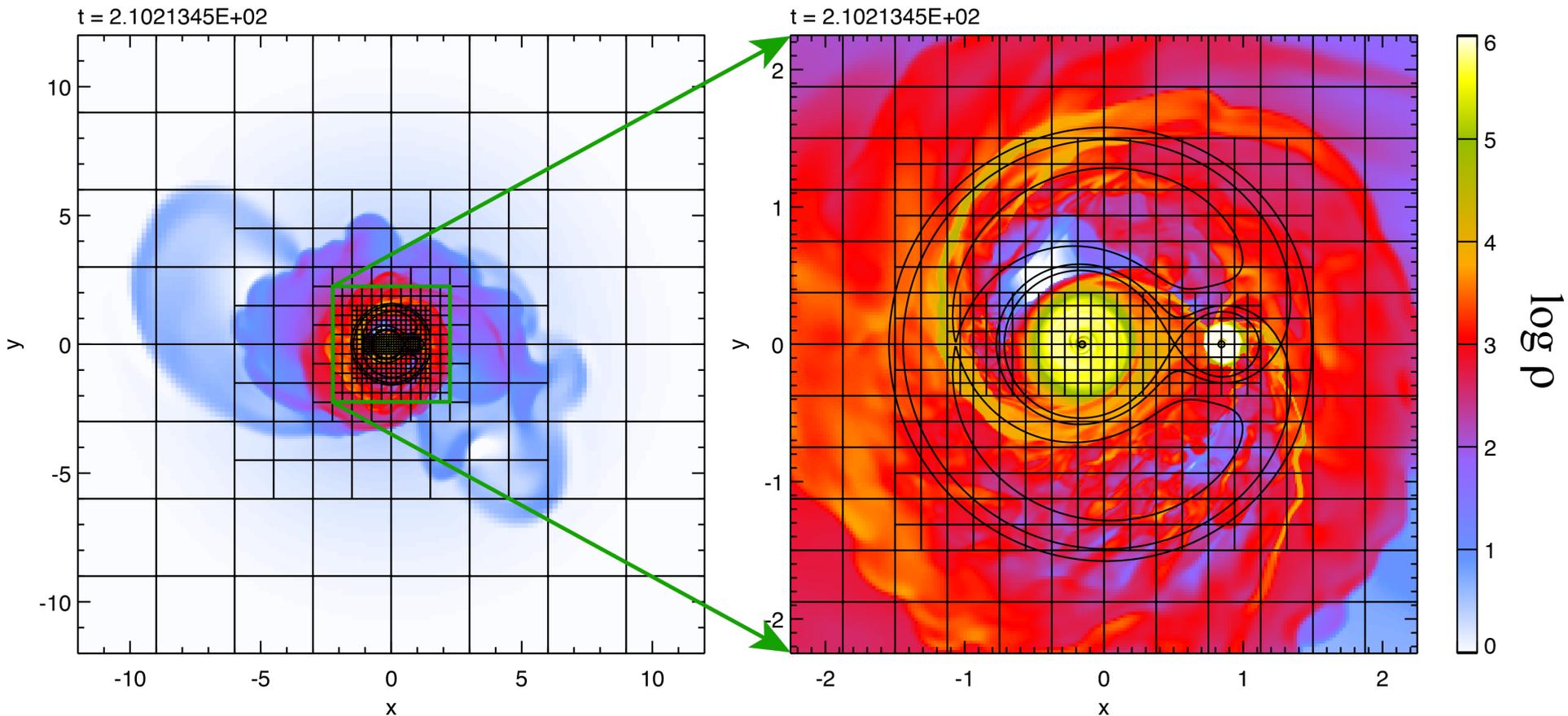


スーパーコンピュータ ATERUI

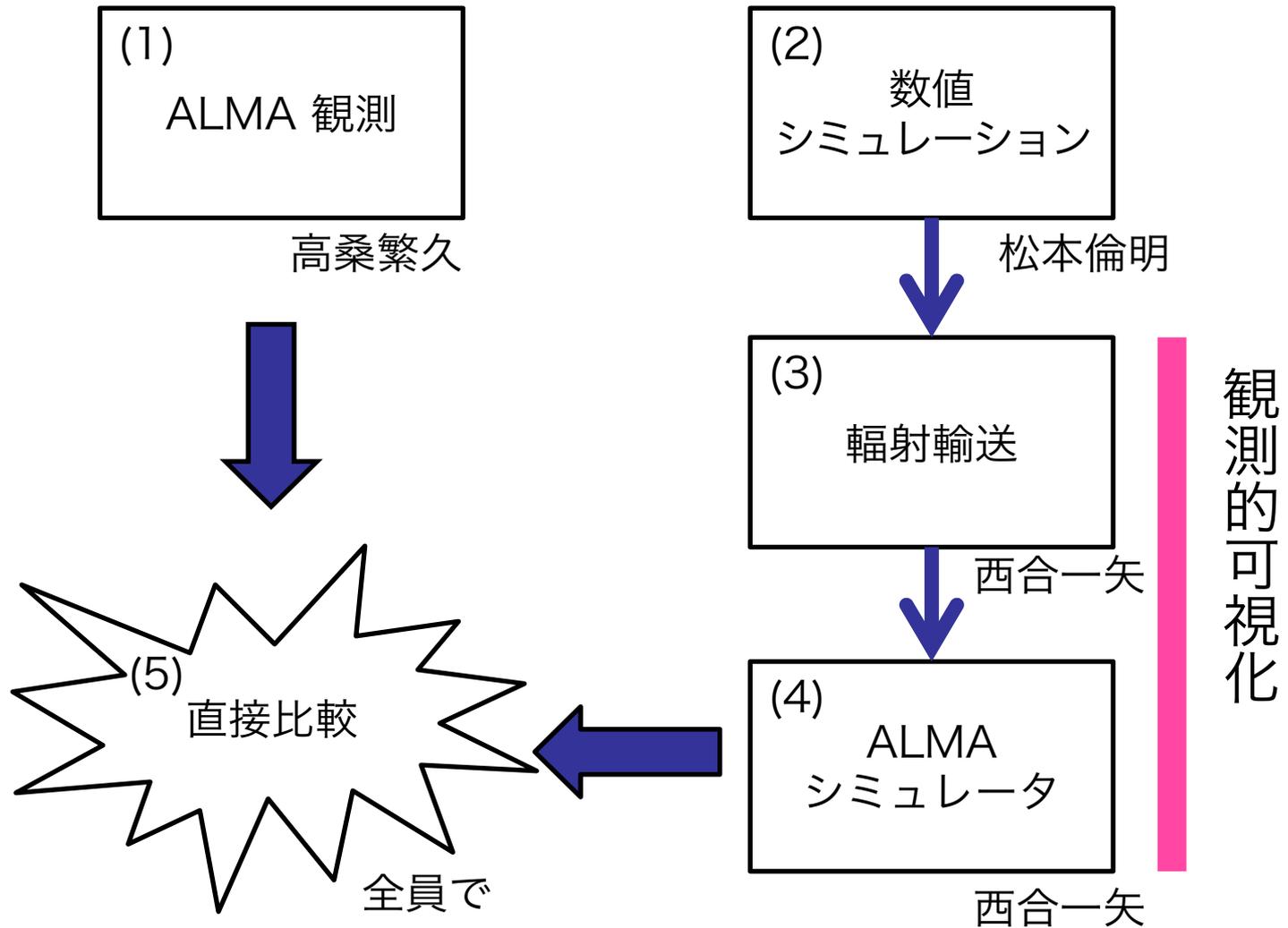
@国立天文台 水沢キャンパス

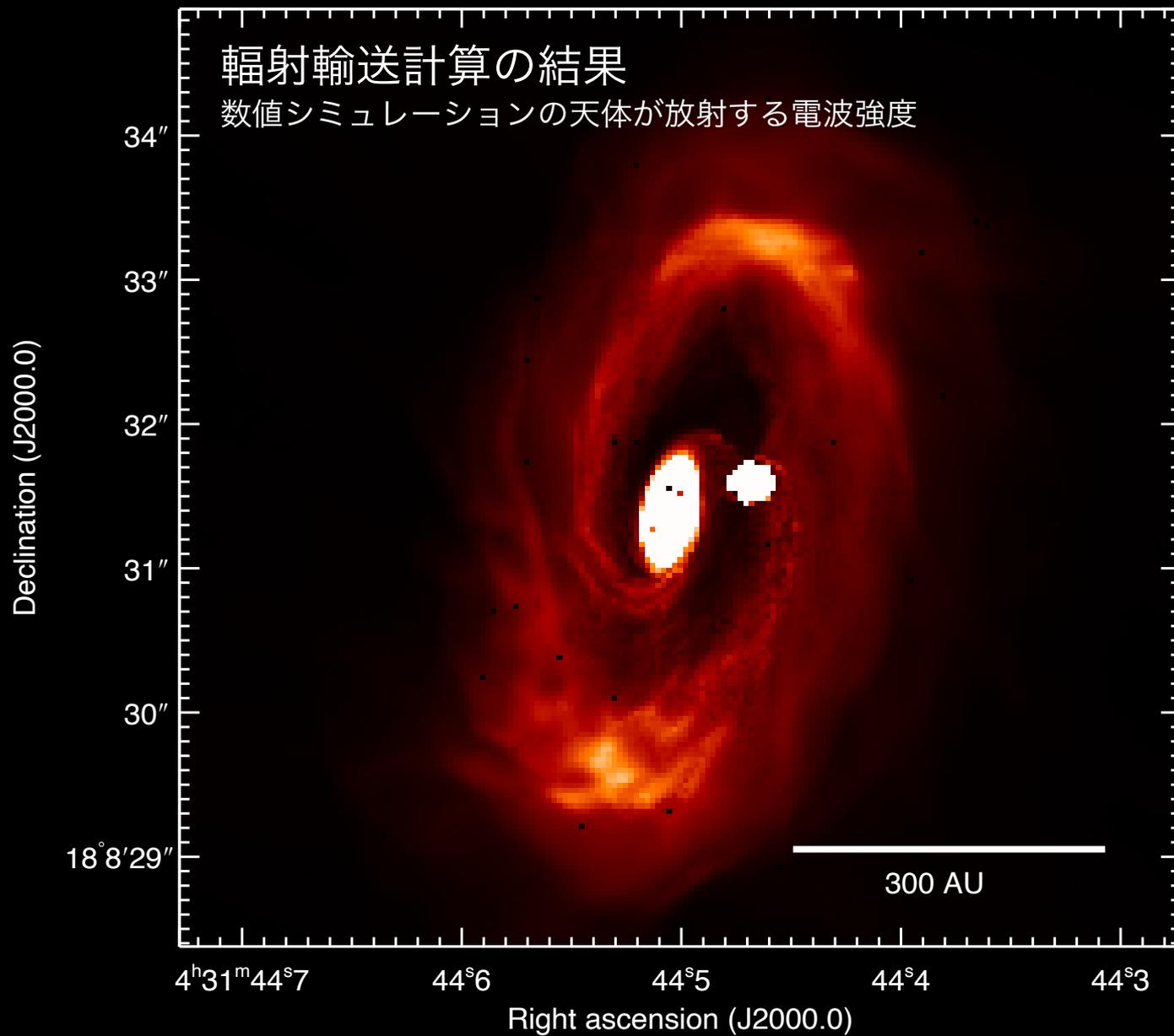


AMR (適合格子細分化法) による高解像シミュレーション

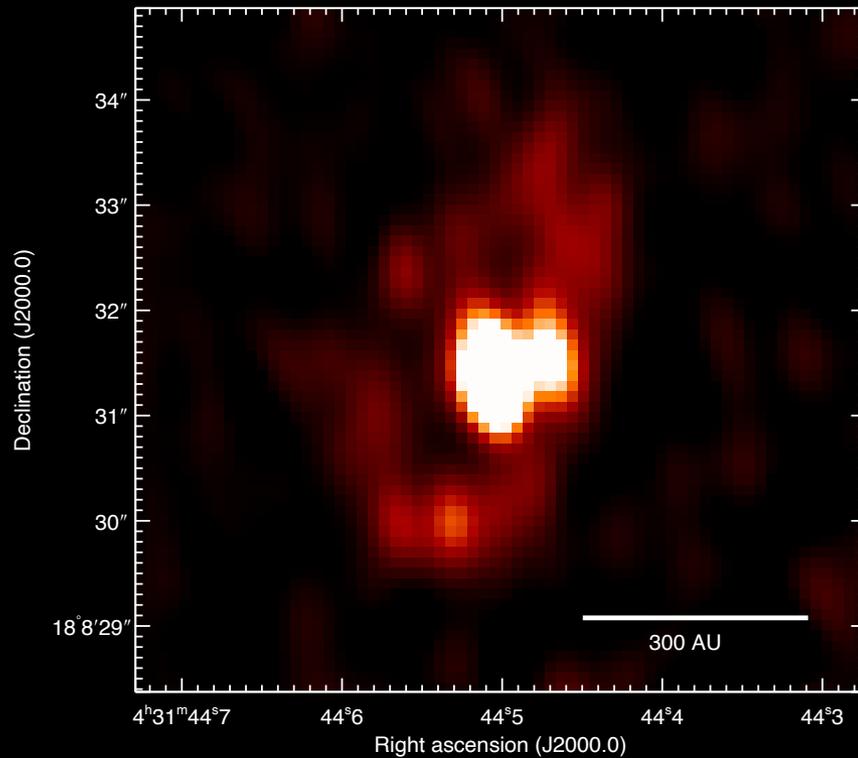


研究体制： 観測と理論の比較

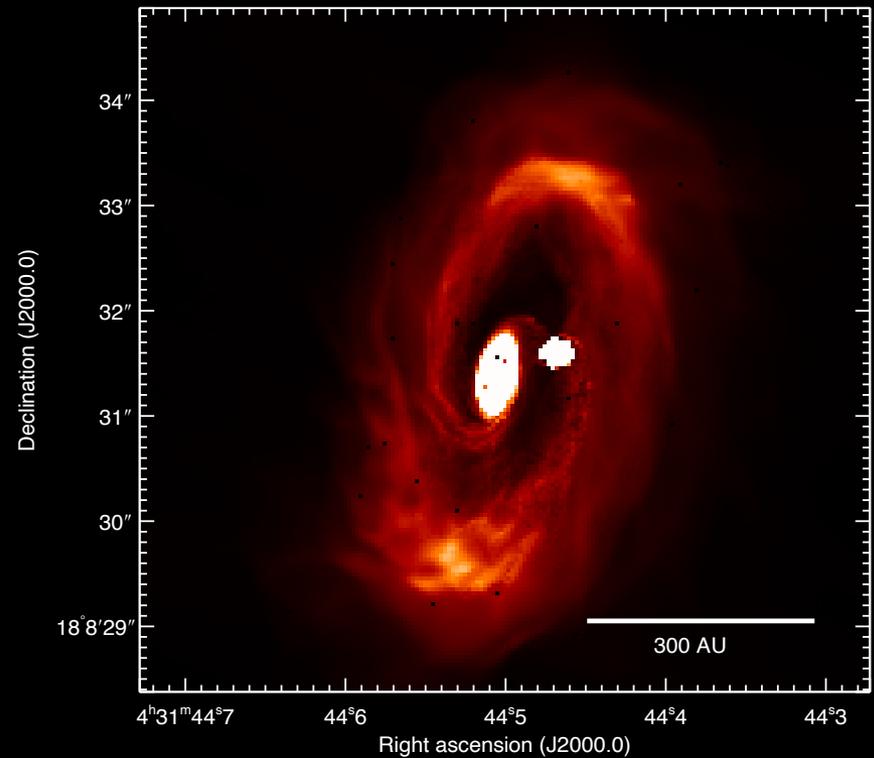




観測結果

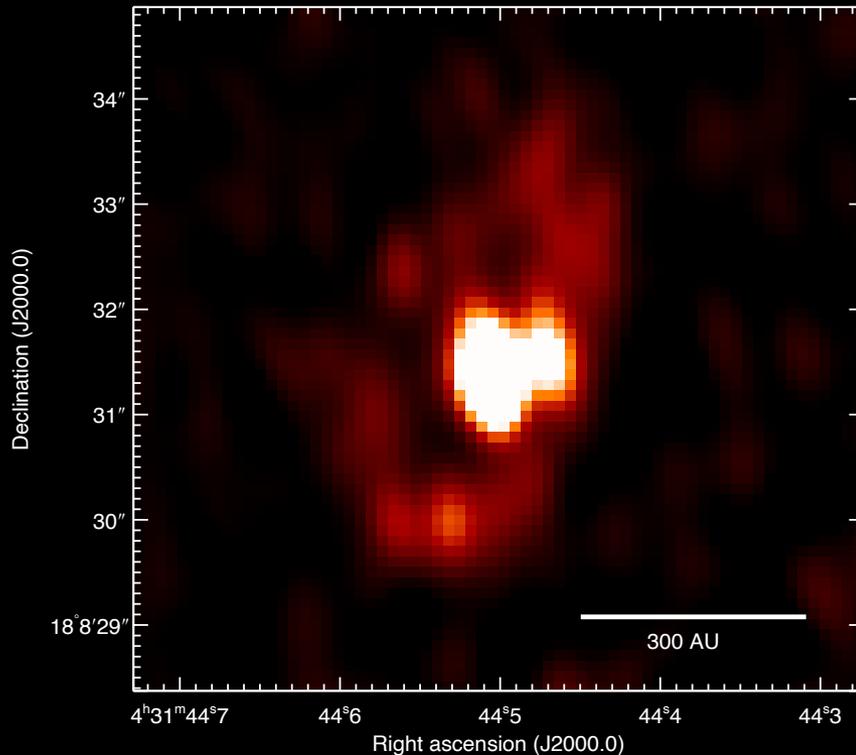


輻射輸送計算の結果

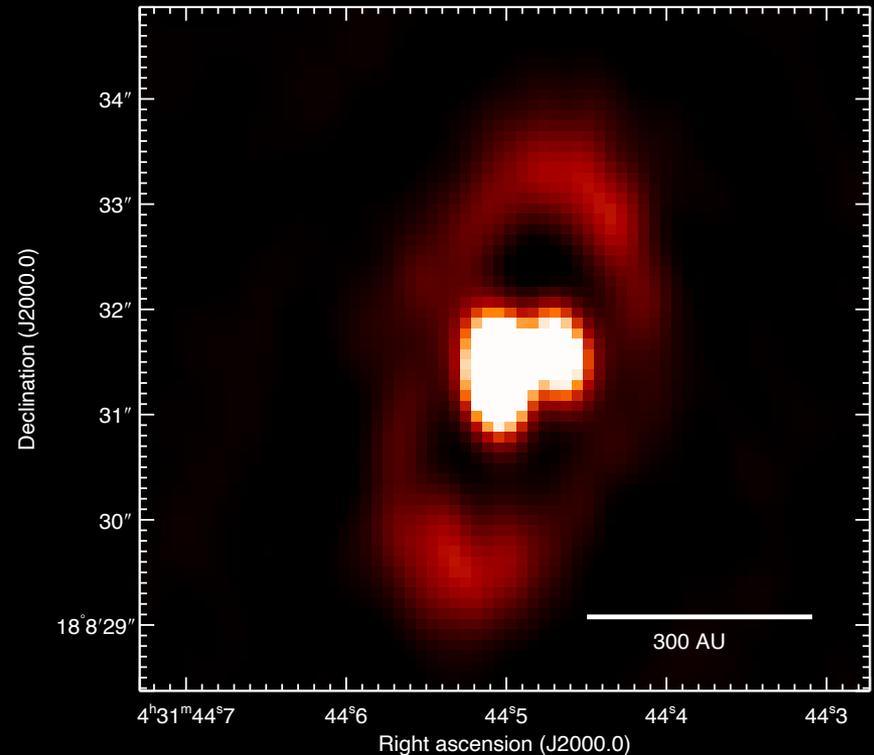


無限に性能が良い望遠鏡を仮定

観測結果



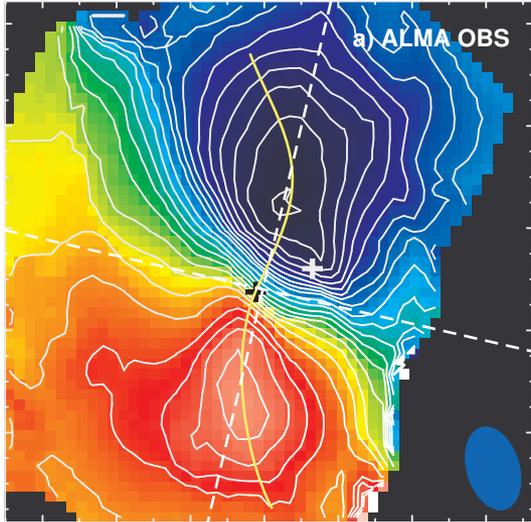
- ✓ ギャップは本物
- ✓ 渦巻きの特徴を示す速度を検出
- ✓ 連星への落下を示す速度を検出

ALMAシミュレーターによる
擬似観測の結果

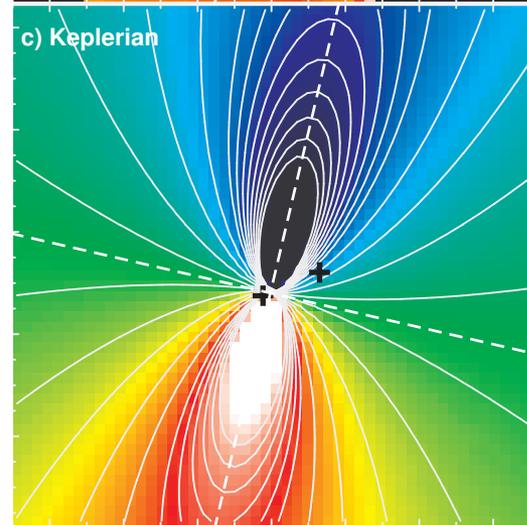
ALMA望遠鏡でシミュレーション結果を観測したらこうなるはず

ケプラー回転からの残差 (C180 観測)

視線速度 (モーメント1)

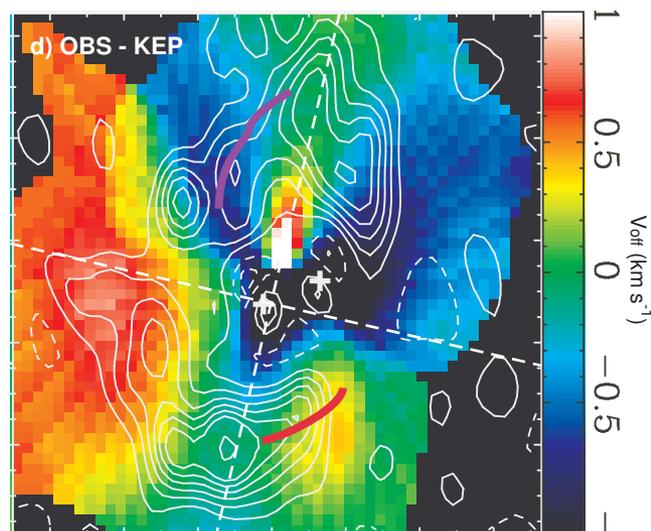


ケプラー回転 (モデル)

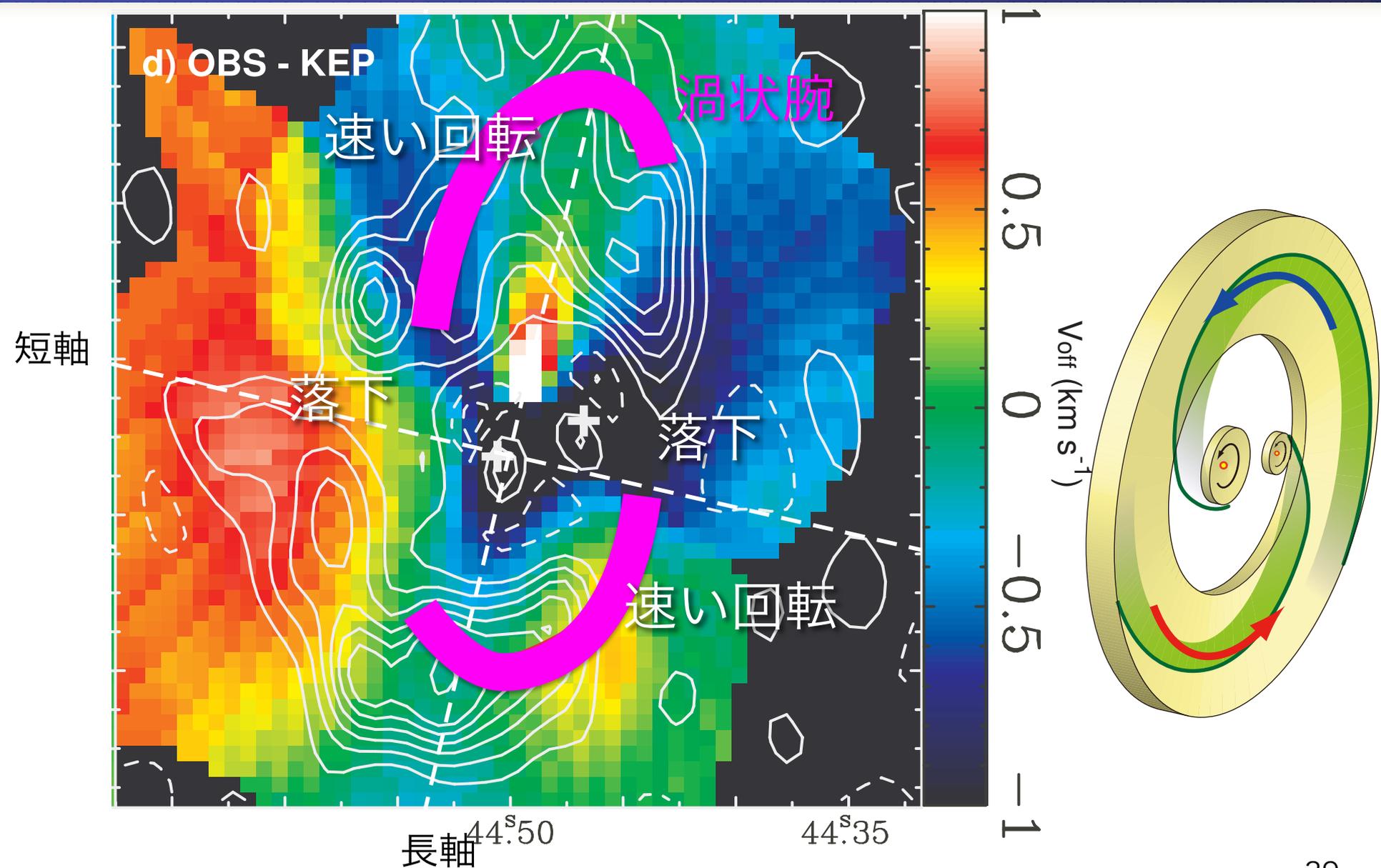


残差図

=

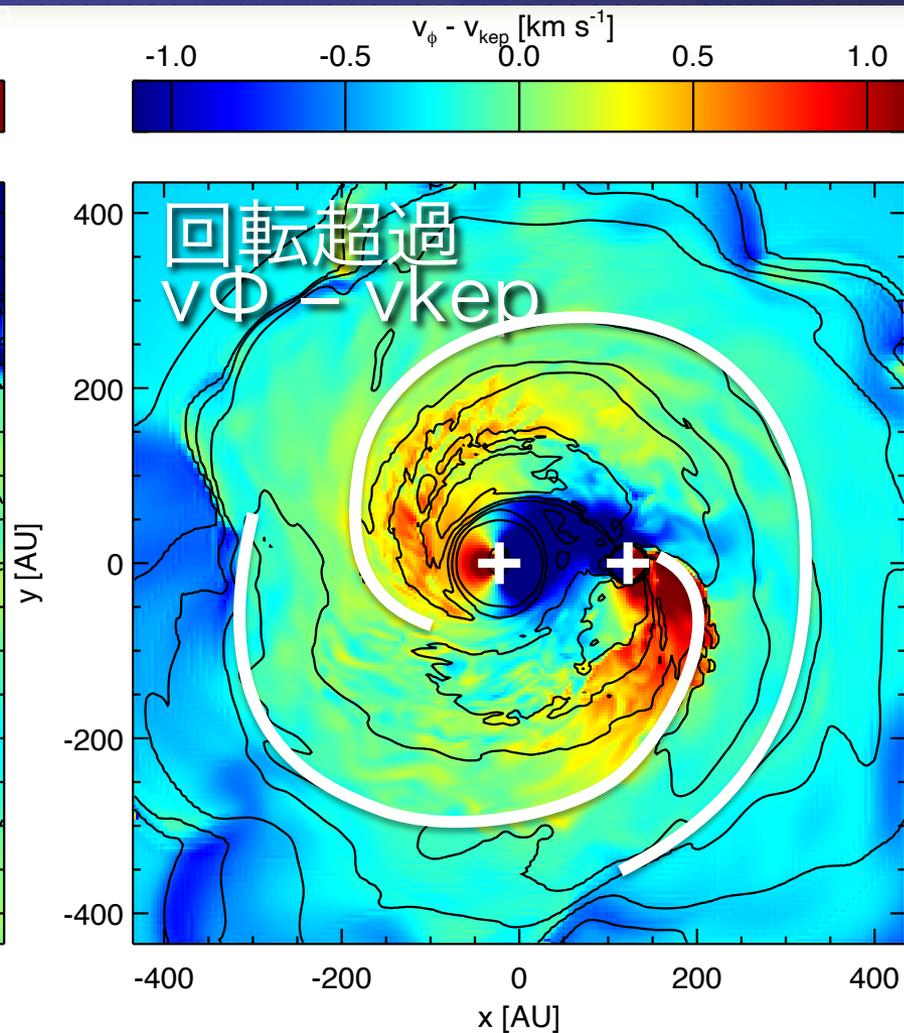
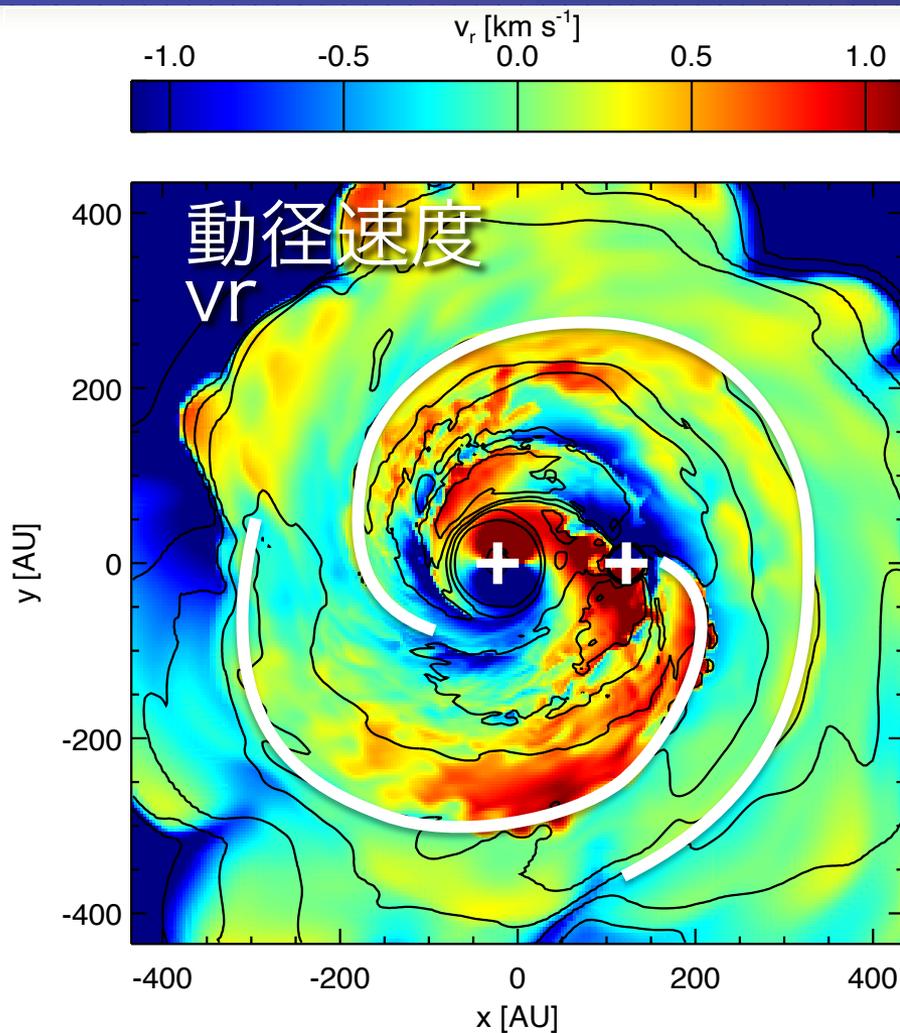


速度構造（観測） ケプラー回転との差



円盤の速度分布 (理論)

色： 速度
コントア： 面密度



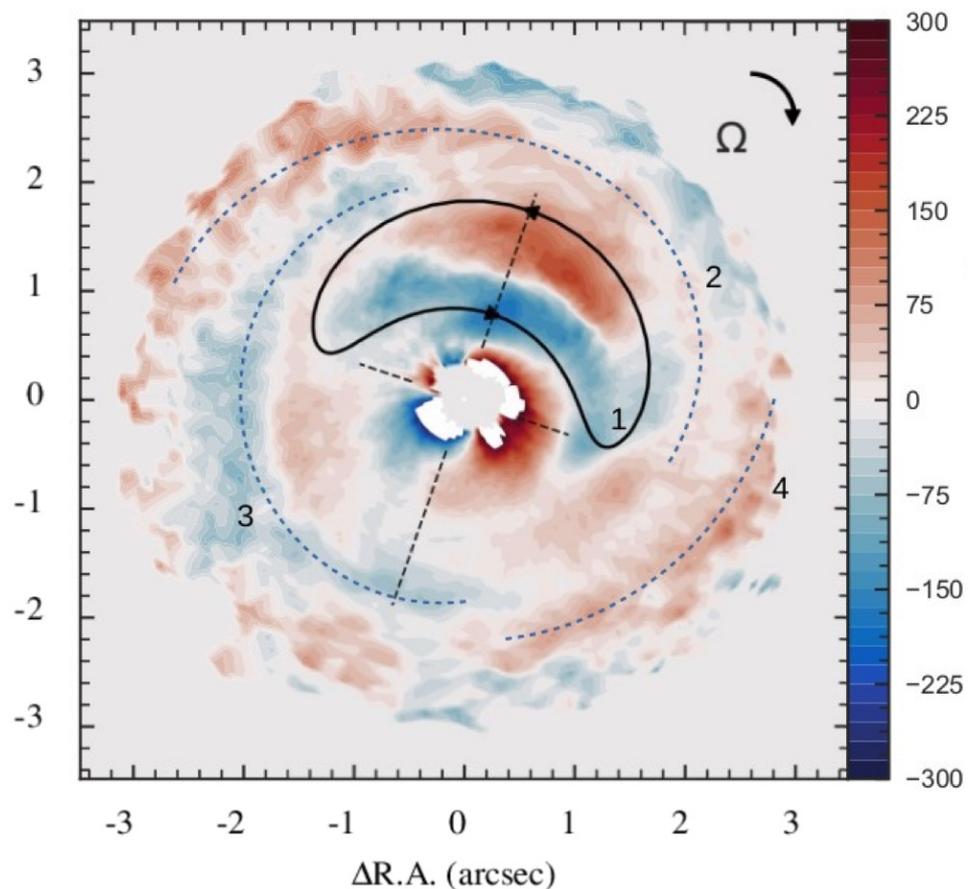
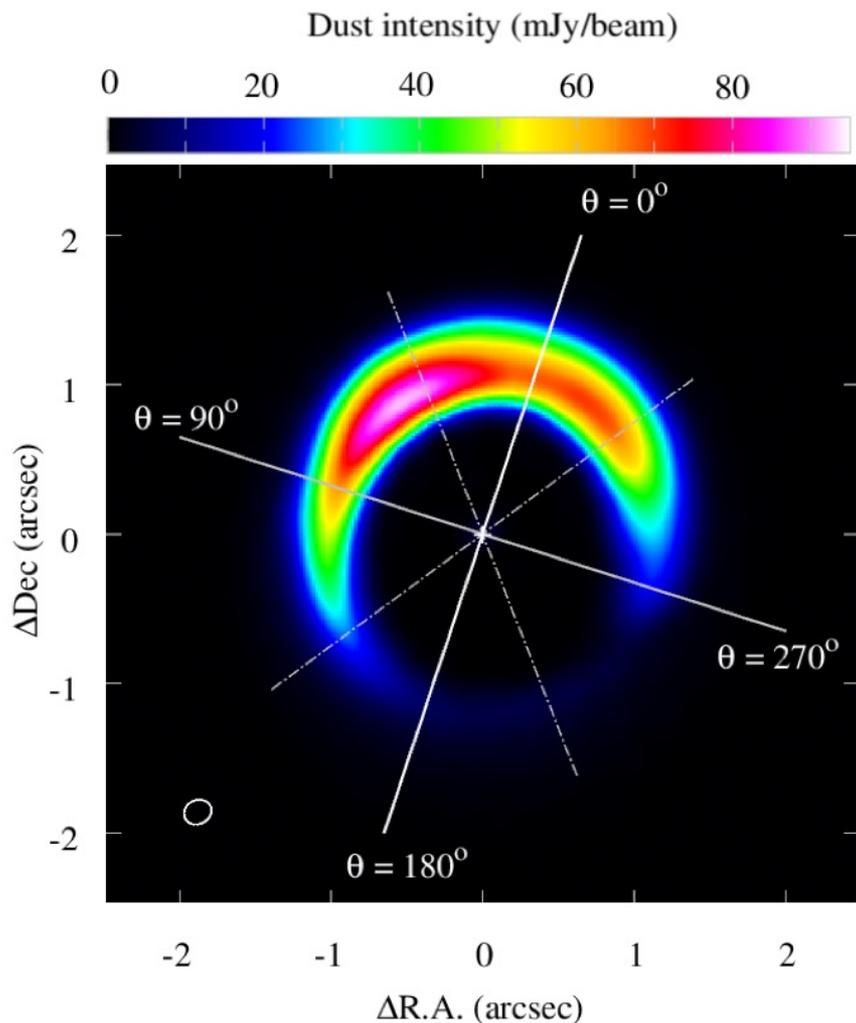
- ✓ $v_r > 0$ @ 渦状腕
- ✓ $v_r < 0$ @ 渦状腕の間

- ✓ $v_\phi > v_{\text{kep}}$ @ 渦状腕

まとめ
理論と観測が
直接比較可能。
新しい時代の到来。

- ・ 周連星円盤の渦巻きをはじめて検出
- ・ 連星へのガスを落下を検出

連星円盤に渦を観測

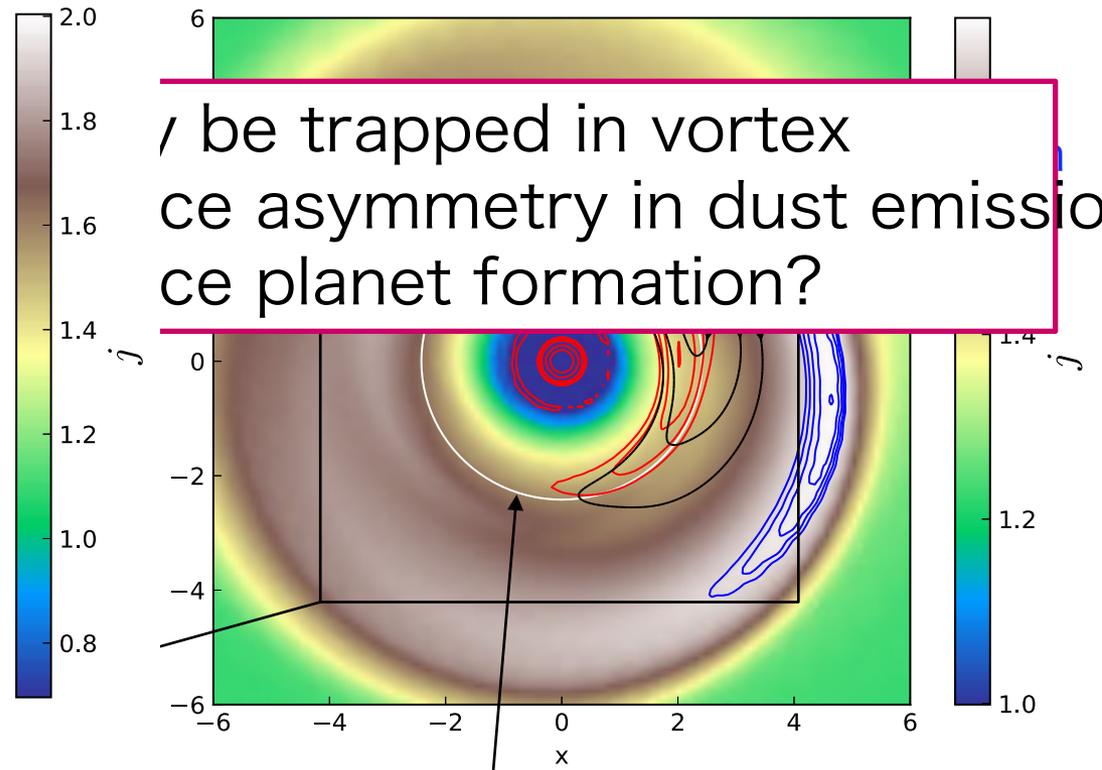
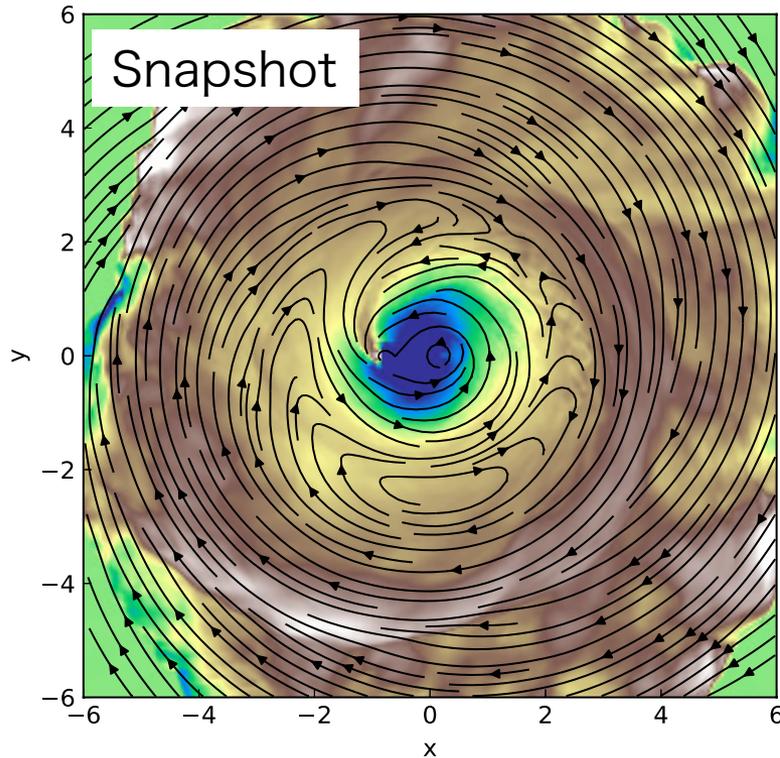


Boehler 2021

<https://doi.org/10.1051/0004-6361/202040089>

Vortex produces asymmetry in CBD

Time average btw 80-100 rev in the rotating frame with Ω_p (rotation with



Centrifugal radius with Ω_p

Gravitational torque

- j increases
- exchange radial position
- vortex
- density bump (e.g., RWI)
- asymmetry

(注釈) もっと低温な場合には secular mode による非対称性が知られている (Munoz & Lithwick 20)。

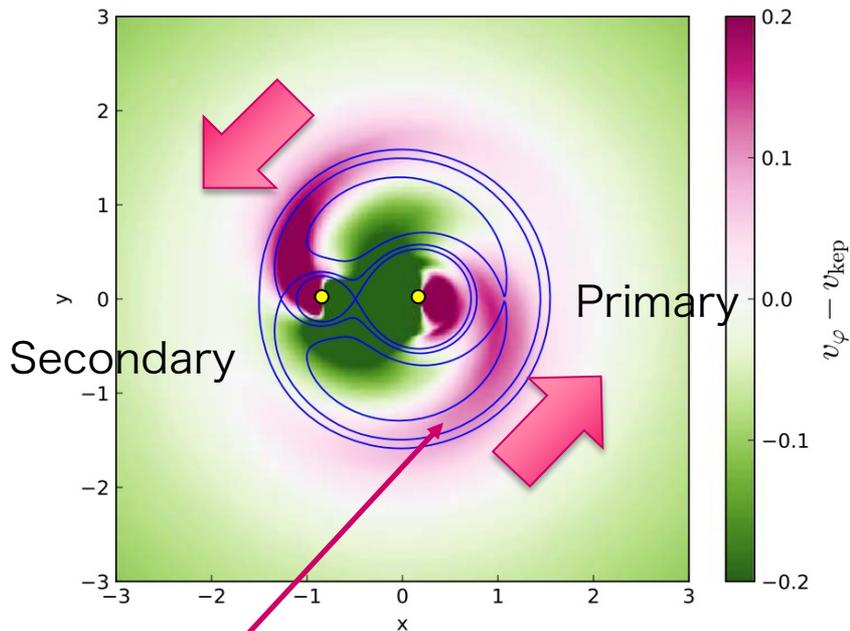
Matsumoto+ 19

doi:10.3847/1538-4357/aaf6ab

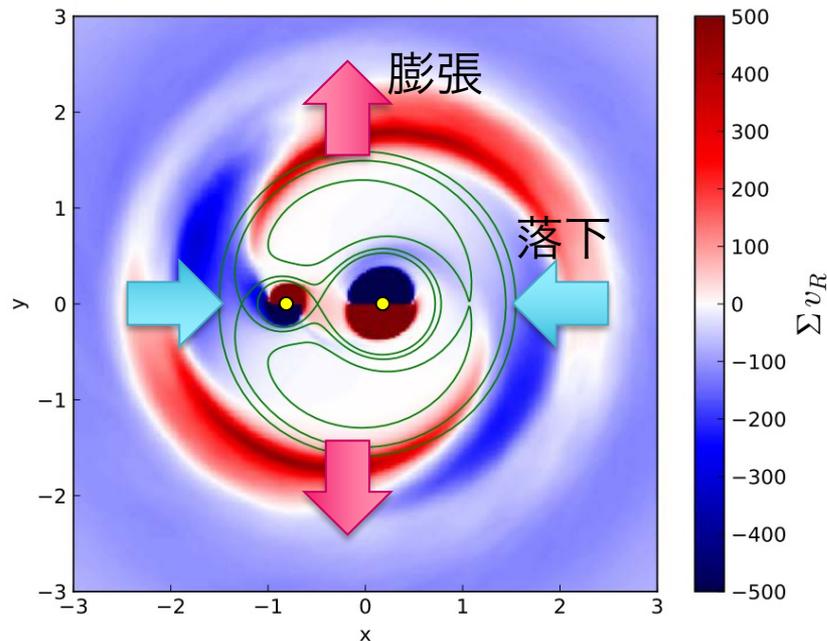
Velocity structure: infall & expansion

Temporal average in rotation frame

Excess from Kepler rot.



Mass flux in R-direction

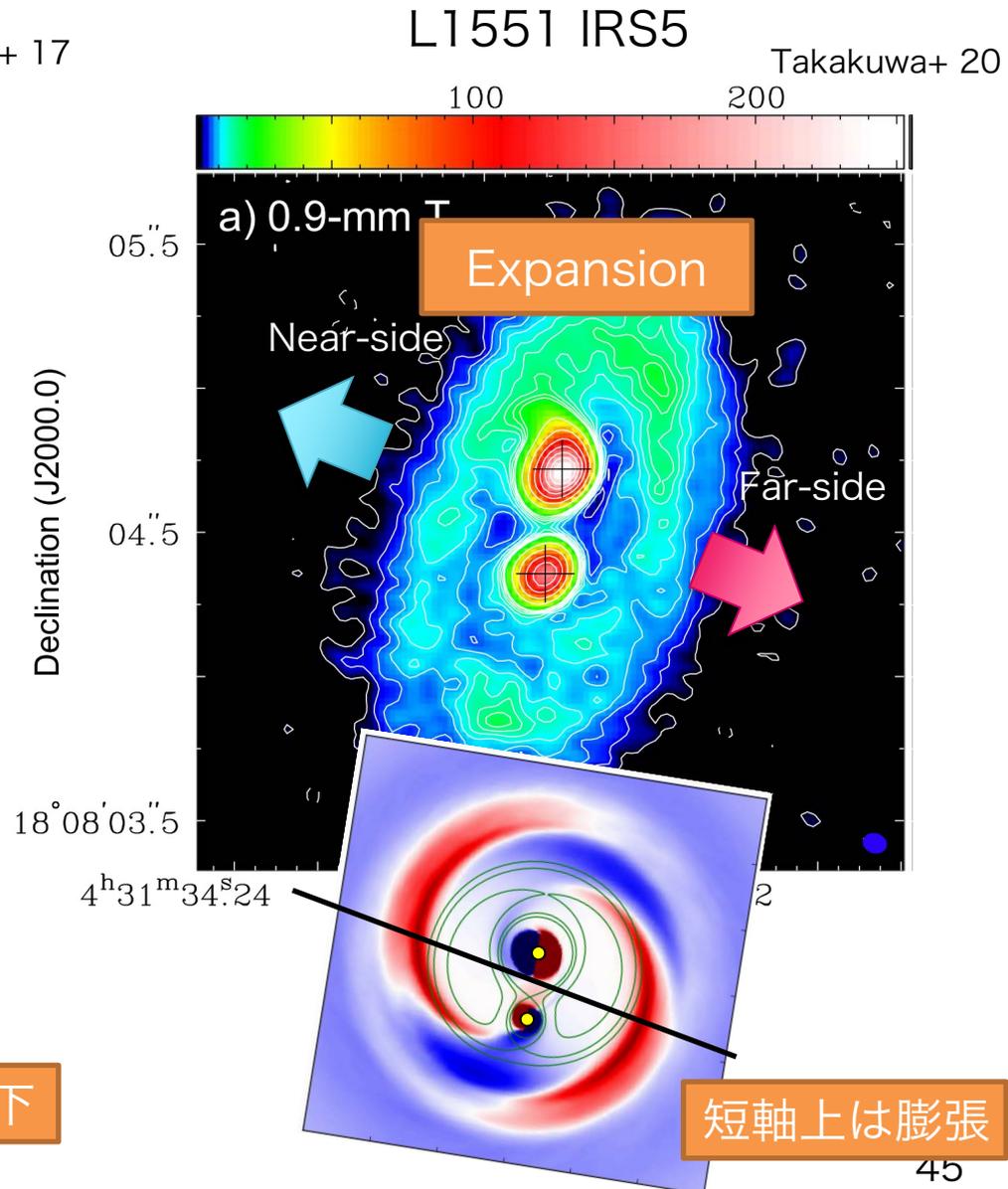
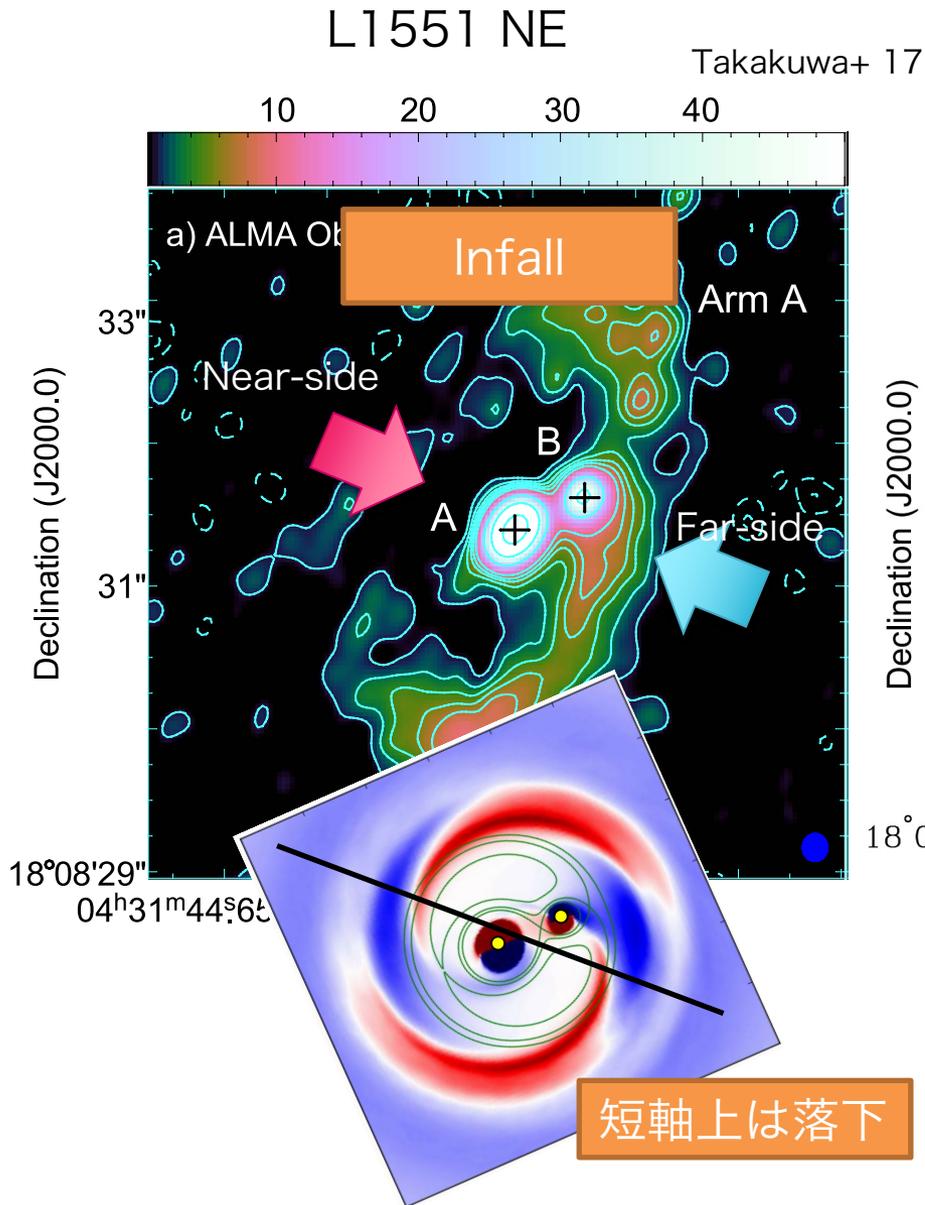


Fast rotation due to gravitational torque

落下・膨張はPAに依存

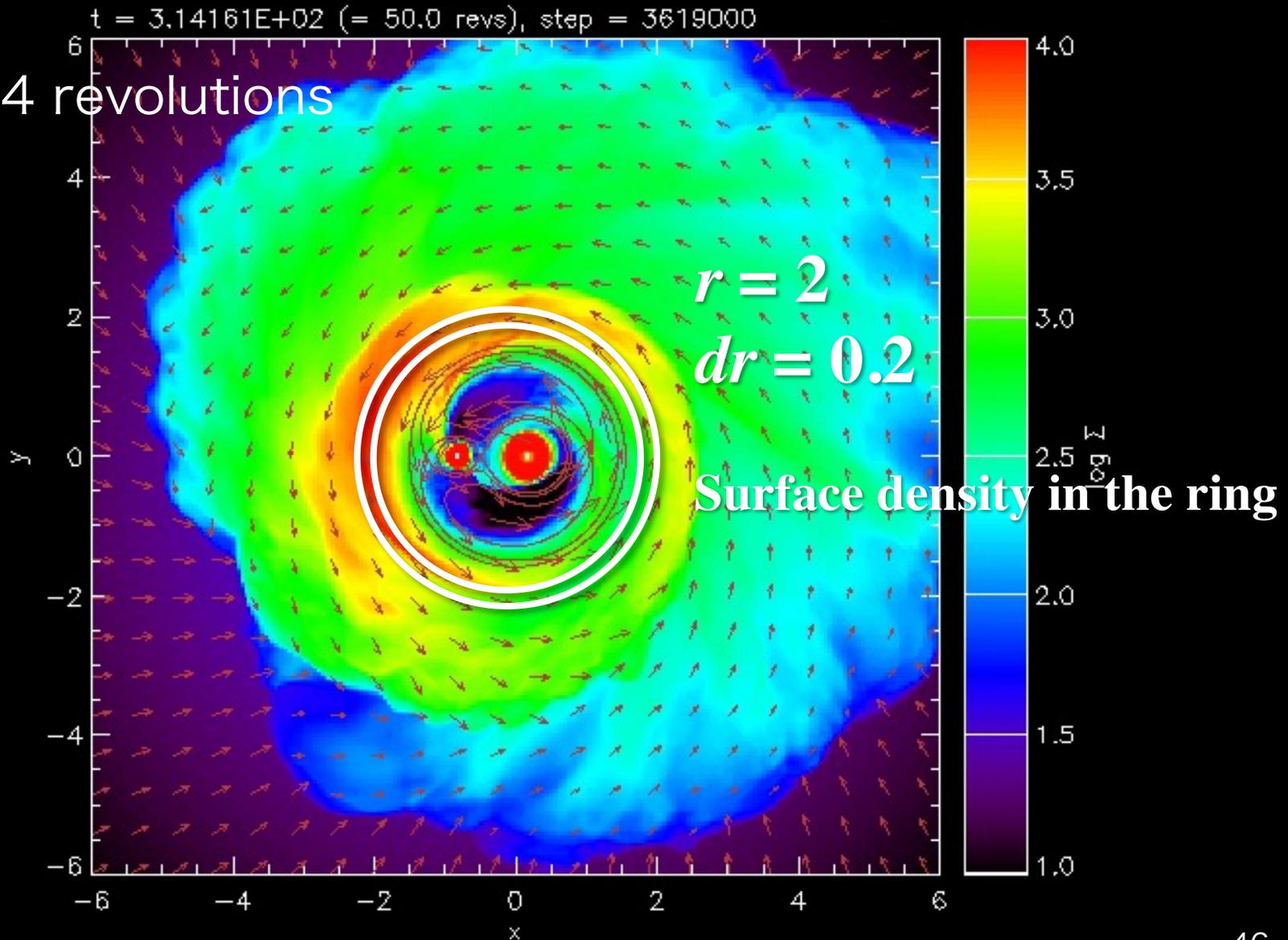
連星直線上： 落下
連星直線から垂直： 膨張

周連星円盤が落下？膨張？ 完全に理解した！

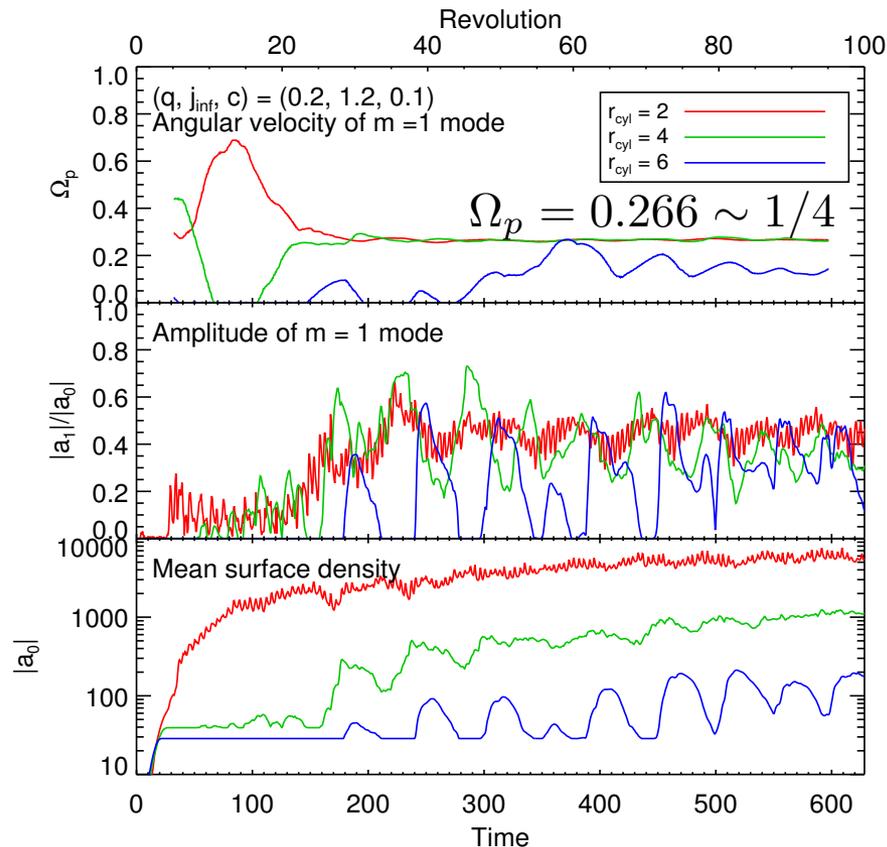
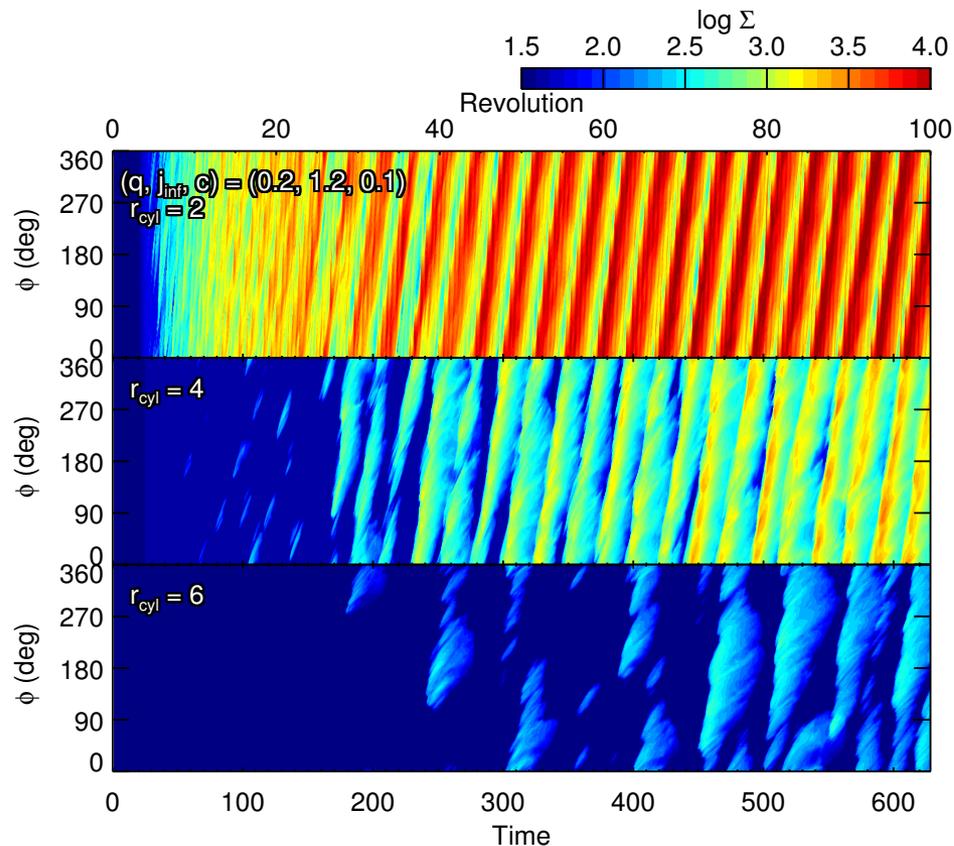


Non-axisymmetric pattern 1 rev. when binary stars 4 rev (commensurability)

50 - 54 revolutions



Non-axisymmetric pattern



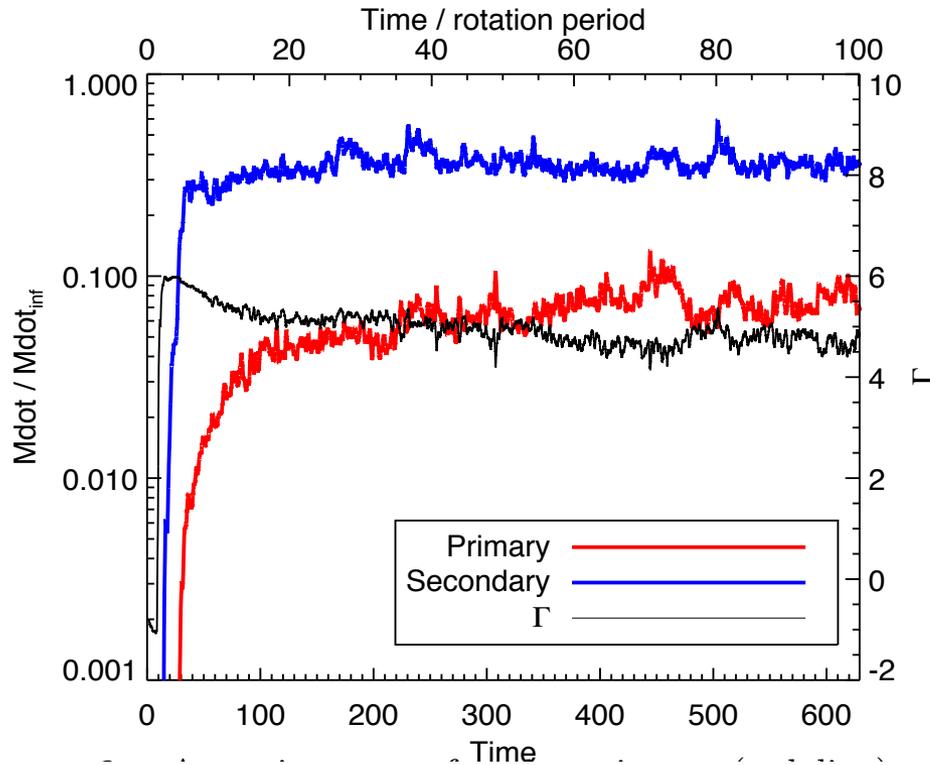
Resonance

$$\Omega_{\text{disk pattern}} : \Omega_{\text{binary}} = 1 : 4$$

主星と判星、どっちが太る？

論争があった！

(Bate & Bonnell 1997, Young+ 2015, Ochi+ 2005, Hanawa+ 2010)

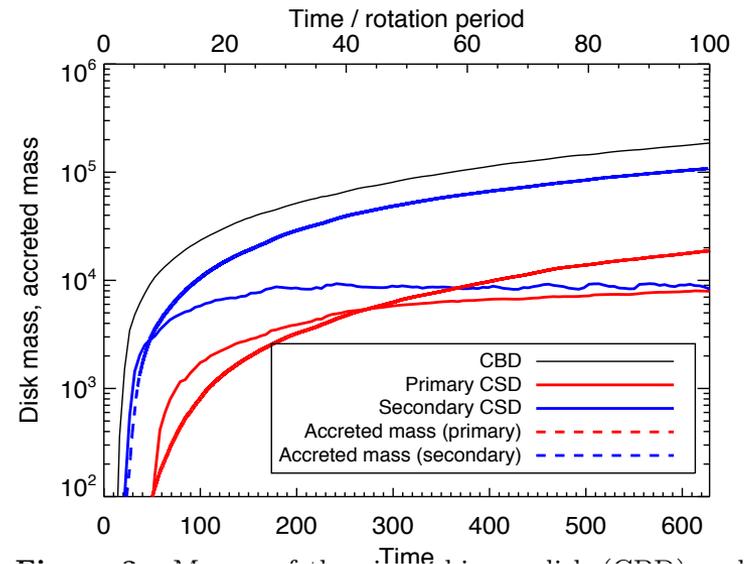


$$\Gamma = \frac{\dot{q}/q}{\dot{M}_{\text{tot}}/M_{\text{tot}}} \sim 5 \quad (\text{質量比は増加})$$

if $\Gamma > 0$ then mass ratio increases

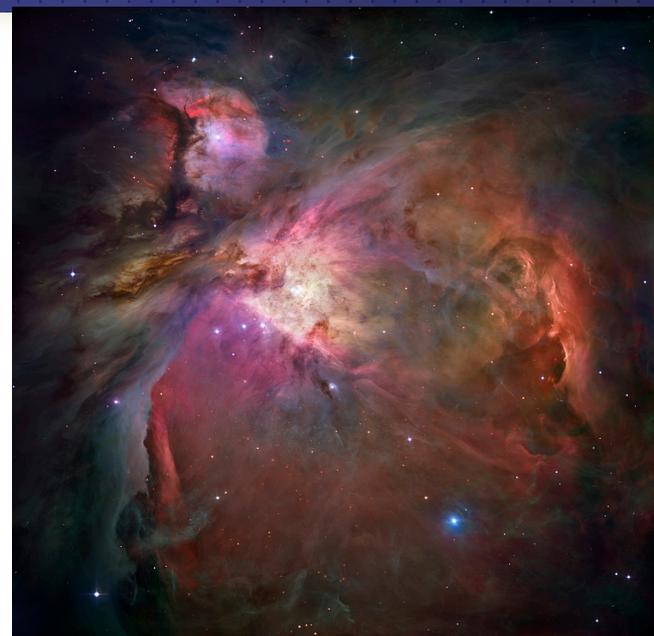
if $\Gamma < 0$ then mass ratio decreases

通常は質量比が増加（等質量連星に近づく）

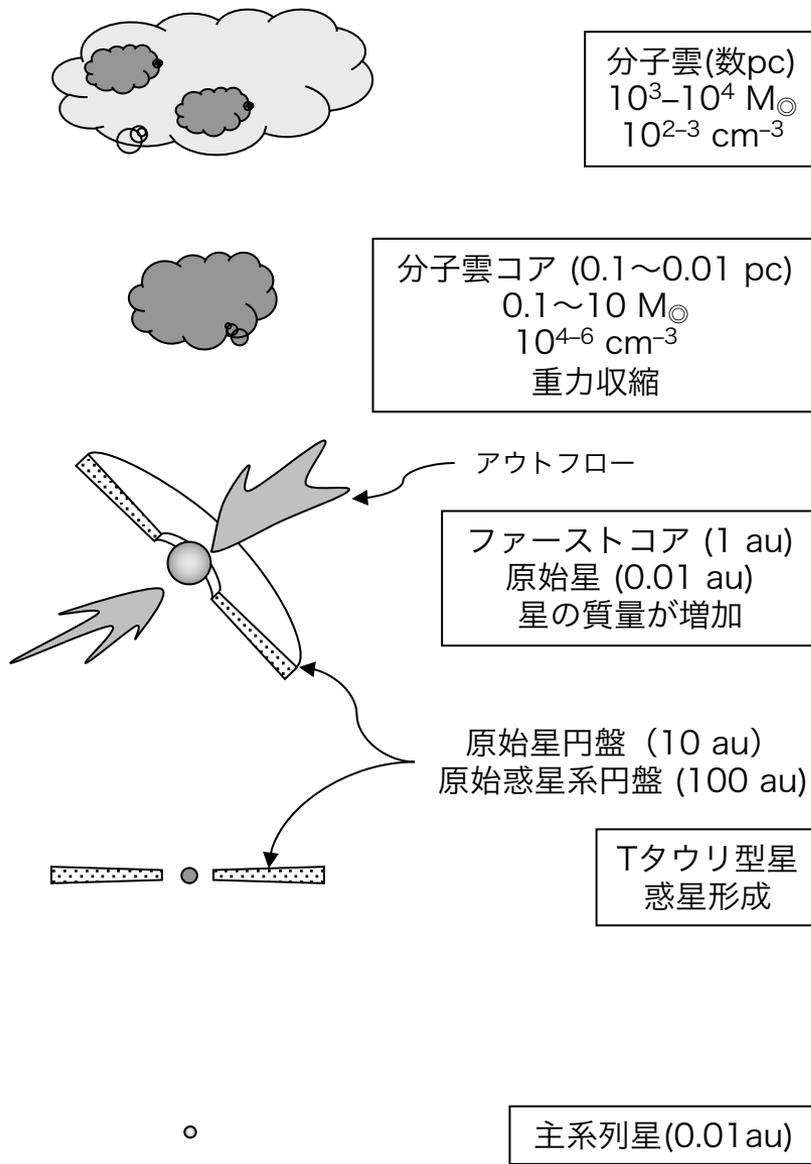


星团形成

- 大質量星形成領域
 - 集団的星形成
 - 大質量～小質量の星が形成
 - OB型星のフィードバック（UVなど）
 - 例：オリオン分子雲
- 小質量星形成領域
 - 孤立的星形成
 - 「静かな」星形成
 - 例：おうし座分子雲

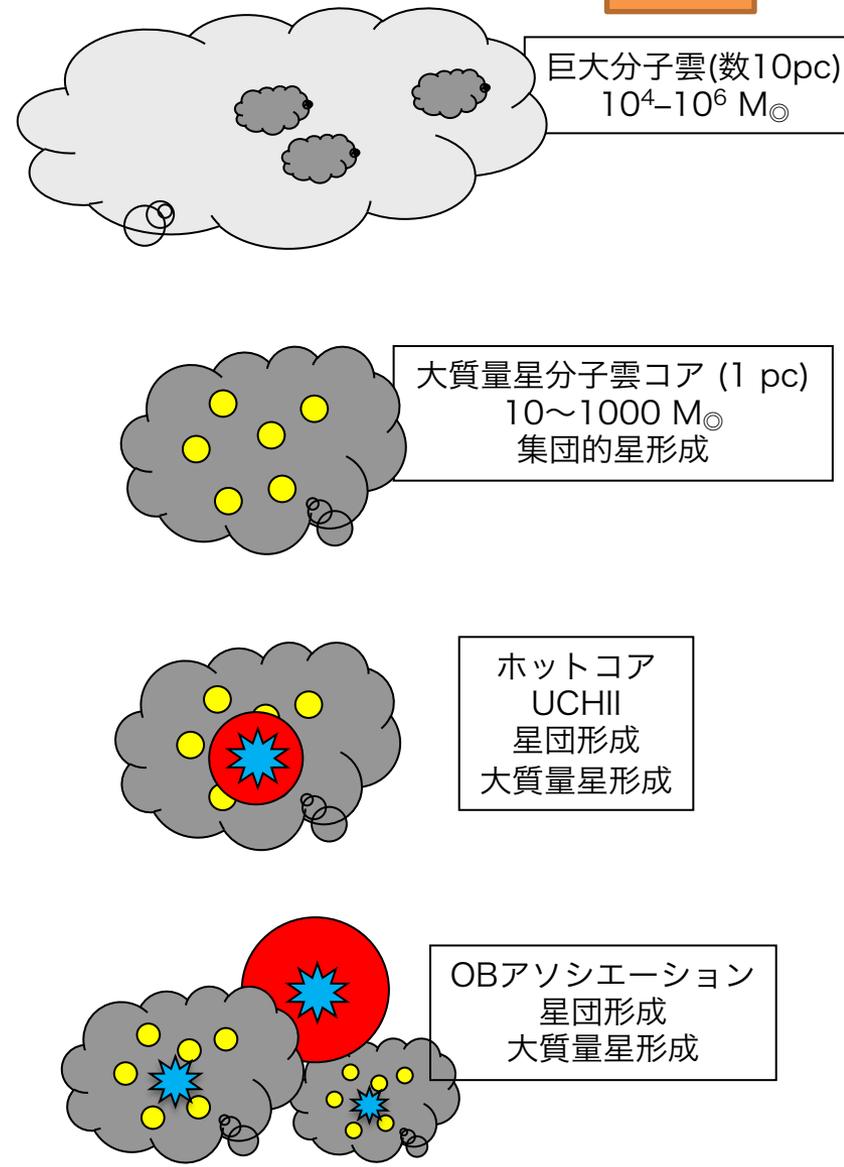


小質量星シナリオ



大質量星シナリオ

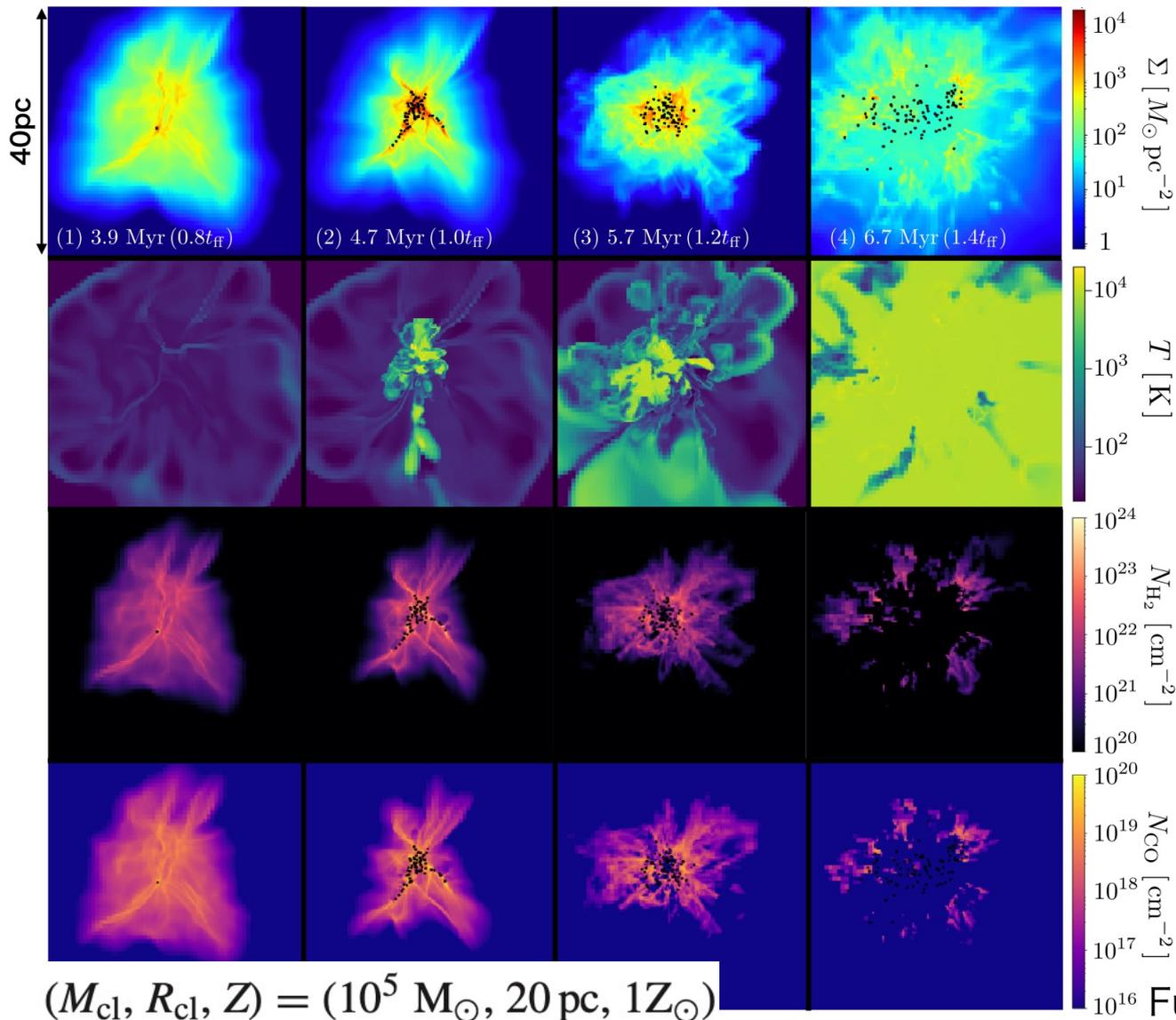
再掲



集団的星形成・星団形成の特徴

- 材料となるガスをどのように集めるか？
 - ゆっくり集めると、集めている間に孤立的星形成が起きてしまう。
 - 短い期間に集める必要がある。
 - ➔ 分子雲の衝突が提案されている。
- 星からのフィードバックで分子雲が散逸する。
 - 紫外線による加熱→散逸

星団形成シミュレーション

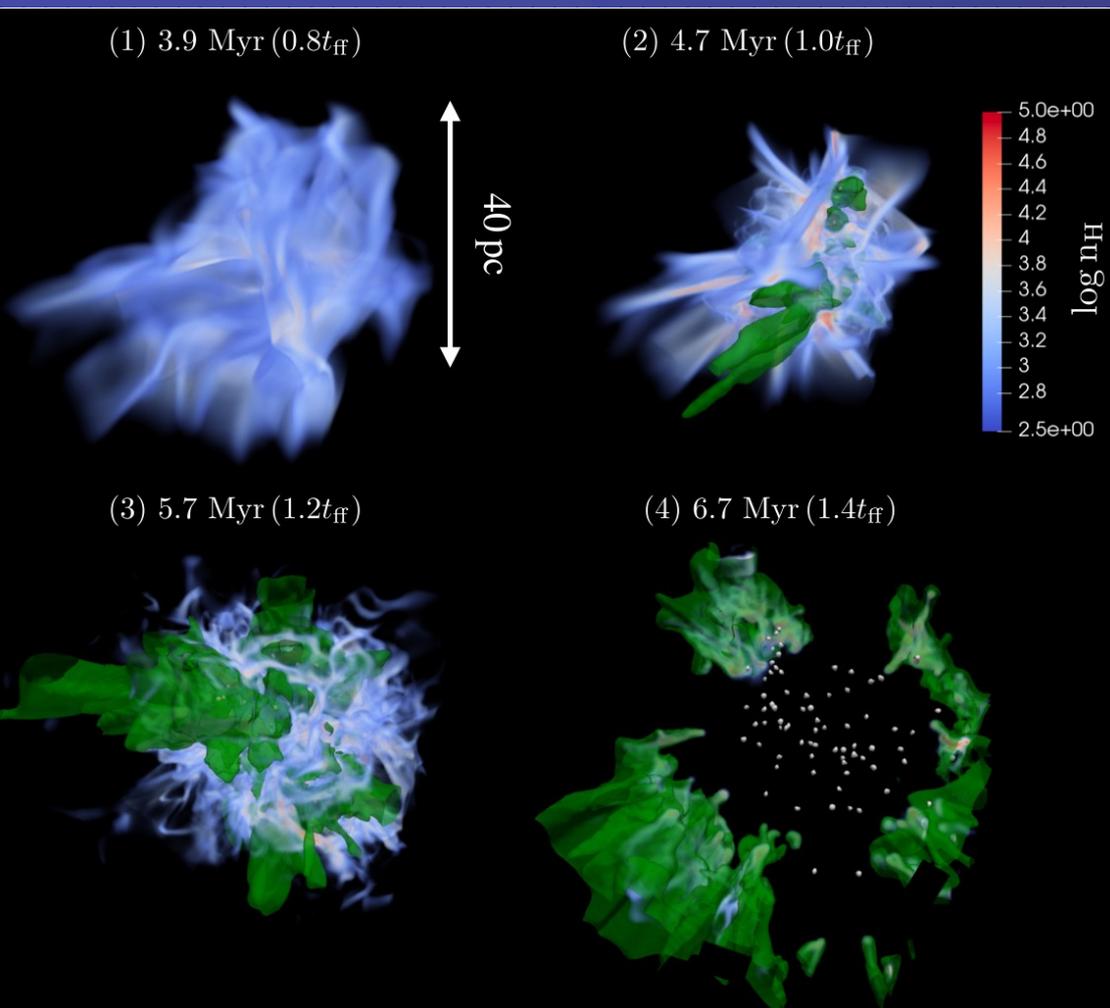


- AMR
- 自己重力
- 乱流
- 紫外線

Fukushima+ 2020

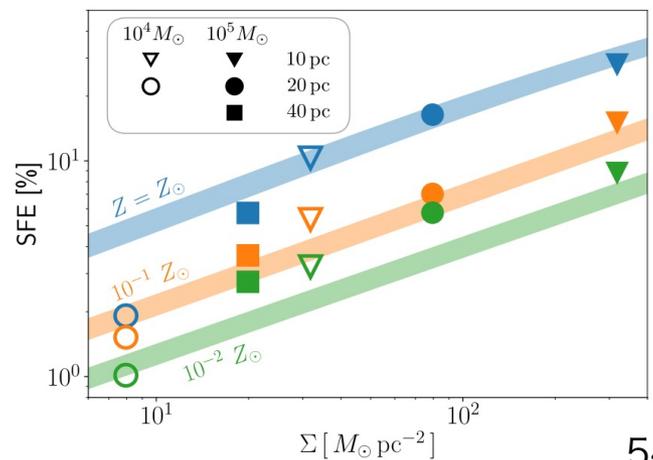
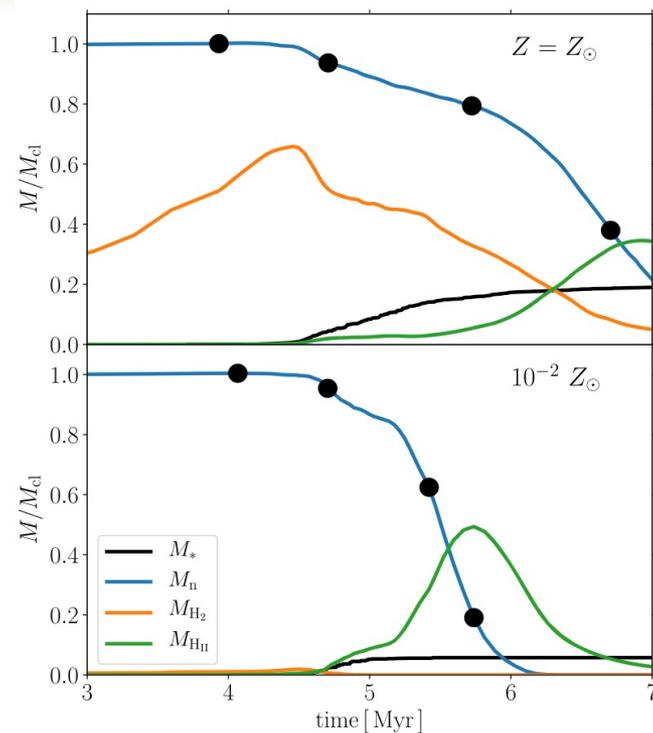
doi:10.1093/mnras/staa2062 53

星団形成シミュレーション

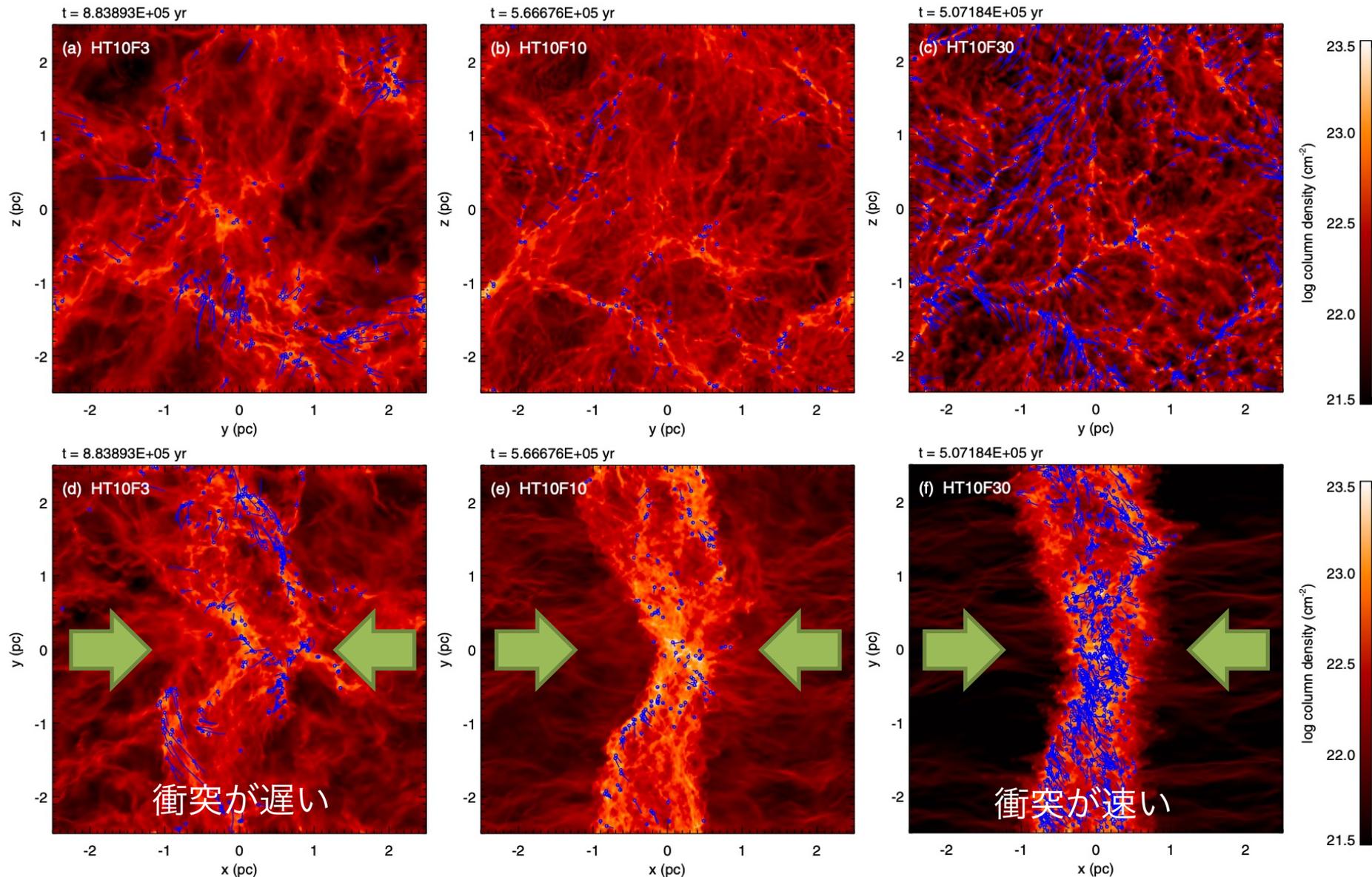


$(M_{\text{cl}}, R_{\text{cl}}, Z) = (10^5 M_{\odot}, 20 \text{ pc}, 1Z_{\odot})$

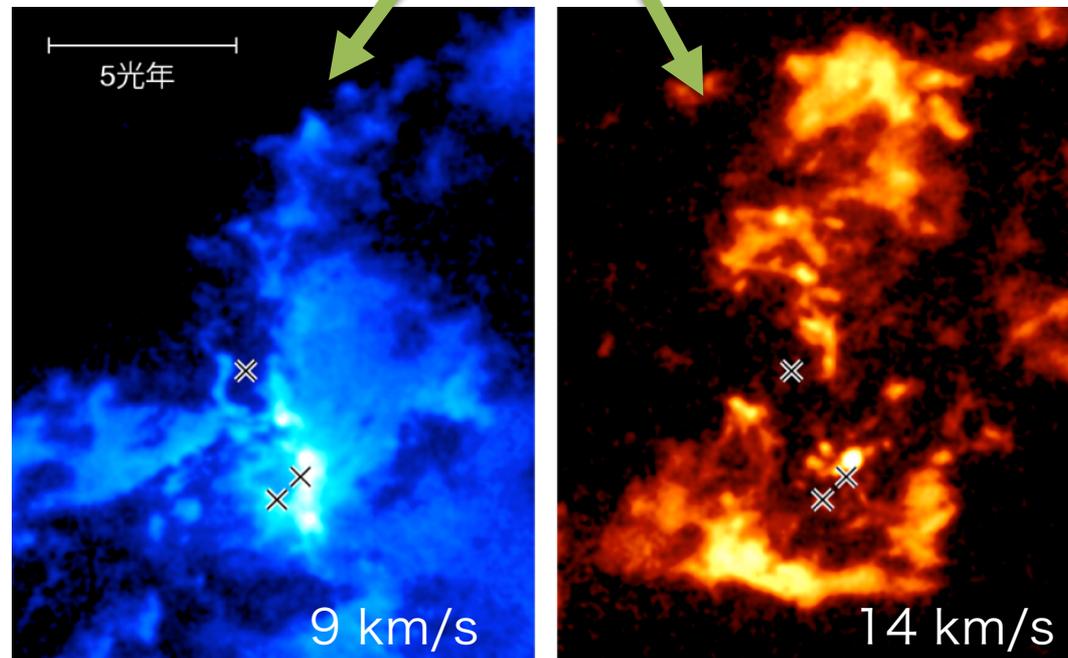
Fukushima+ 2020
doi:10.1093/mnras/staa2062



衝突があると星形成が活発に



分子雲の衝突で星団形成



速度の異なる分子雲が
相補的な空間分布

➡衝突の証拠

Fukui+ 2020
doi:10.3847/1538-4357/aac217

この分野で残された話題

- 連星形成シナリオ
 - 乱流分裂 vs 円盤分裂。二項対立なのか？現状は理論研究が主導。
 - 観測的には円盤分裂が多い。
- 連星形成の高い頻度
 - 磁場によって円盤分裂が抑制されてしまう
- 連星パラメータの起源
 - 質量比、連星間距離、軌道離心率…
 - 多様性の起源
 - ブラックホール連星、重力波イベントと関連
- 連星における惑星形成・連星円盤におけるダスト進化
- 分子雲の衝突による星団形成
 - 黎明期だが有力。銀河円盤スケールの理解。
- 星団形成における星形成フィードバック
 - 銀河形成と関連。金属量依存性