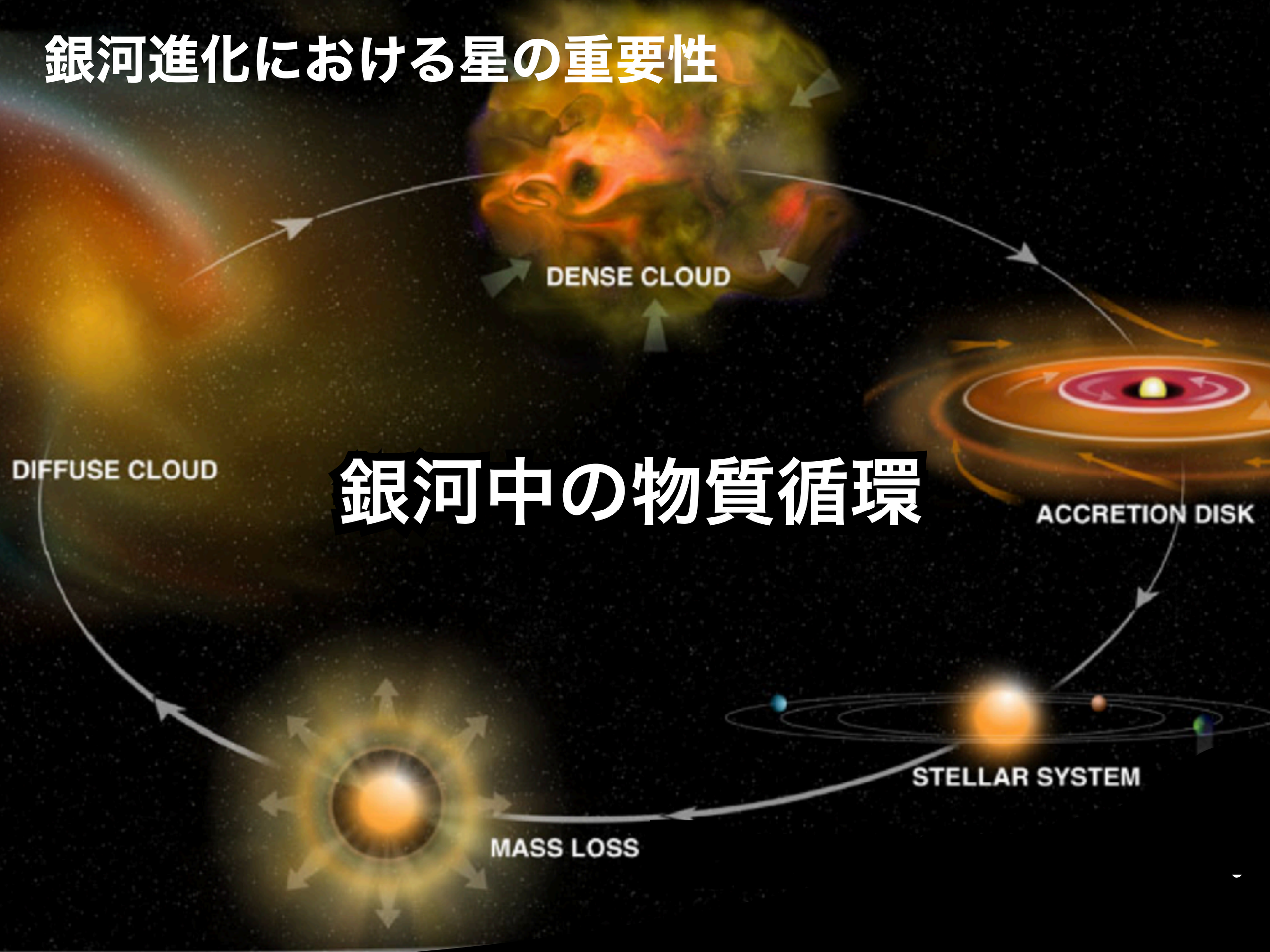
分子雲における
星形成フィラメントの形成と進化

あべ　だいせい
安部 大晟

青山学院大学

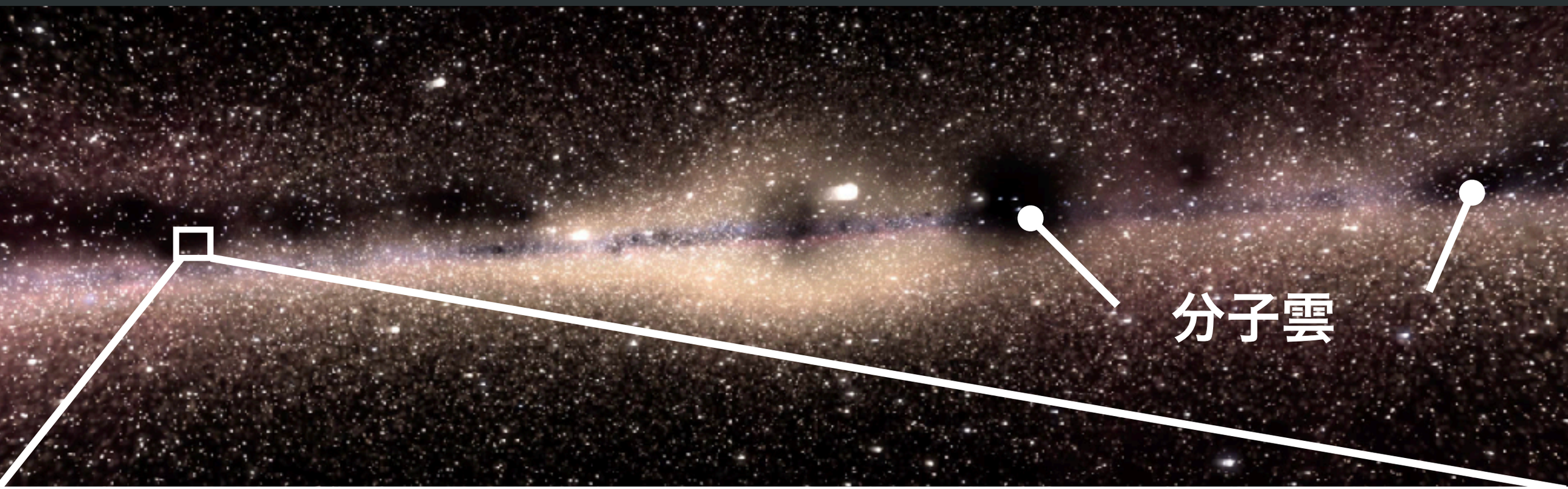
Image: NASA, ESA, CSA, STScI

銀河進化における星の重要性



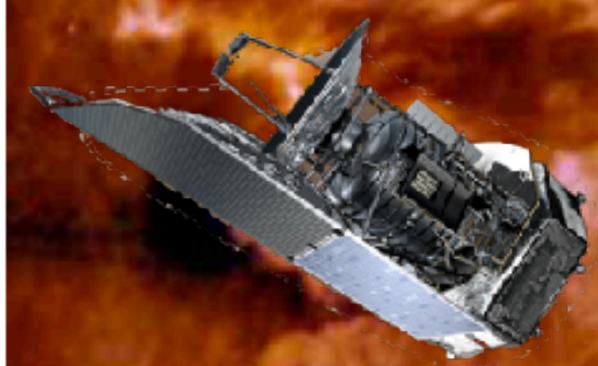
銀河中の物質循環

星形成の舞台: 分子雲



分子雲の観測

- 低温: T ~ 10 K
- 数密度: 10^2–10^6 cm^{-3}
- 質量: 10^3–10^6 M_{sun}
- 典型的な大きさ: ~10 pc
- 電離度: ~10^{-7}

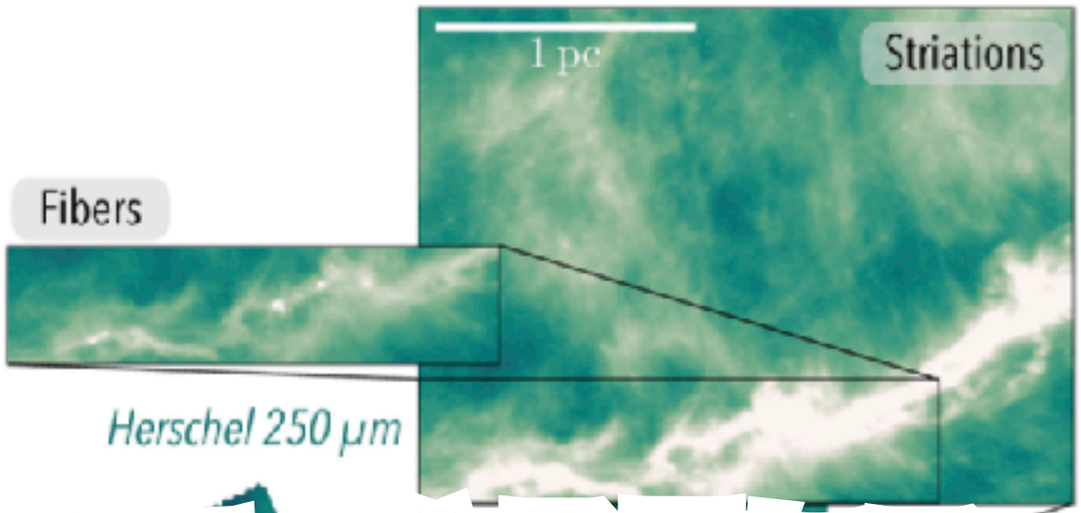


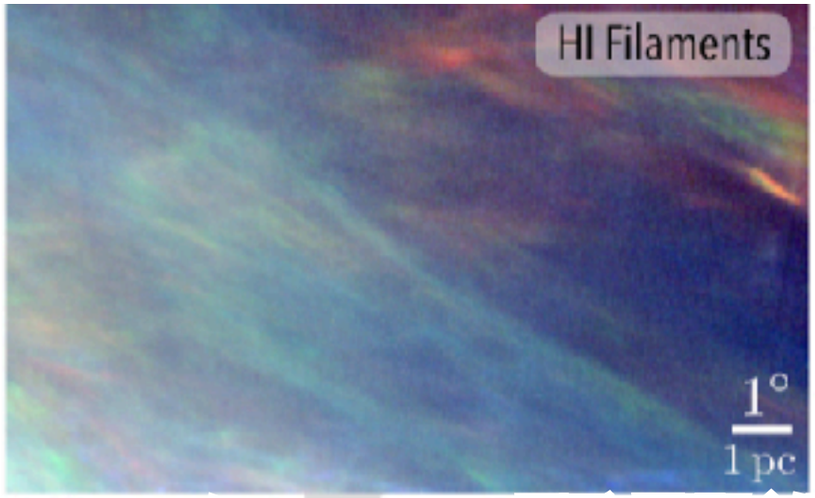
Herschel 宇宙望遠鏡

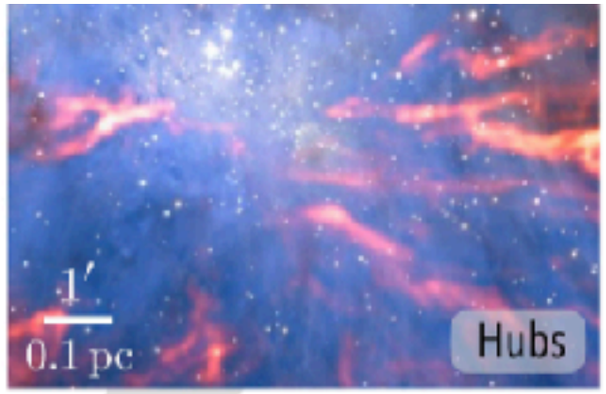
Band : 70 μm – 500 μm



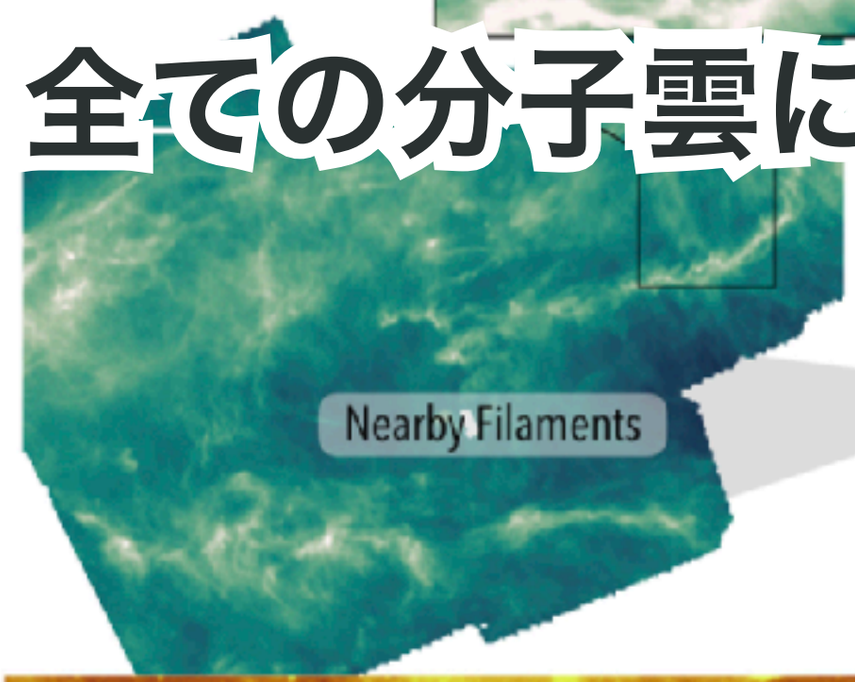
星形成シナリオ: フィラメント-パラダイム

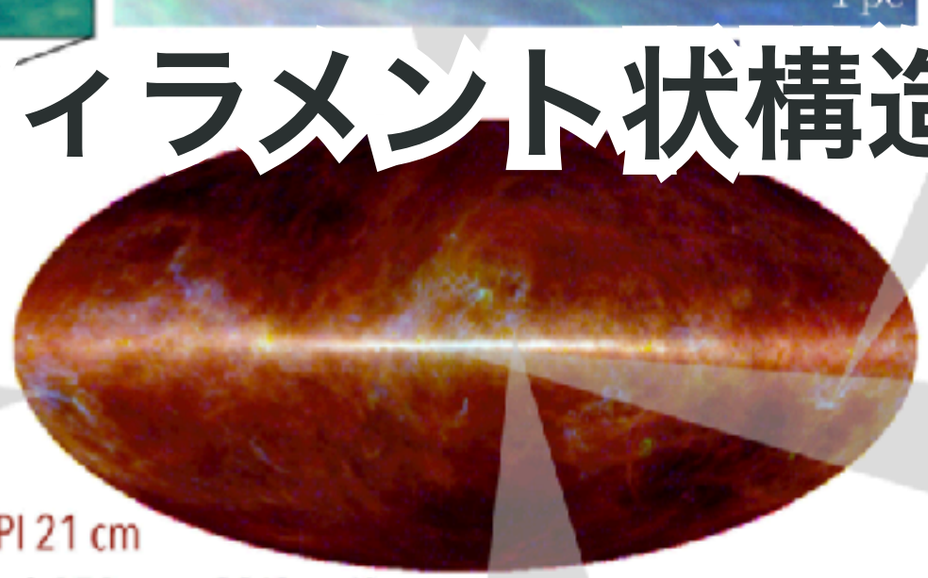


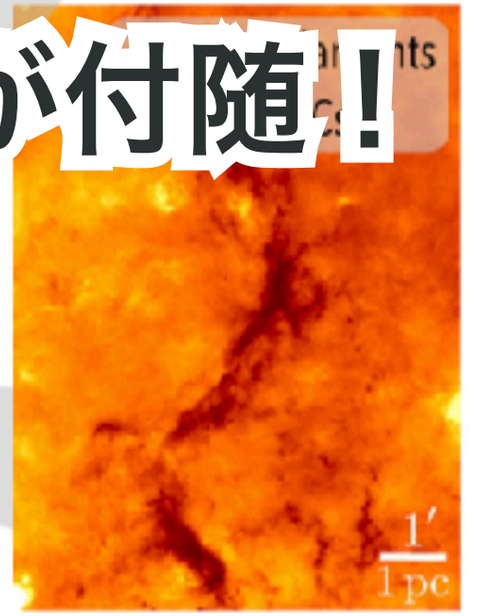


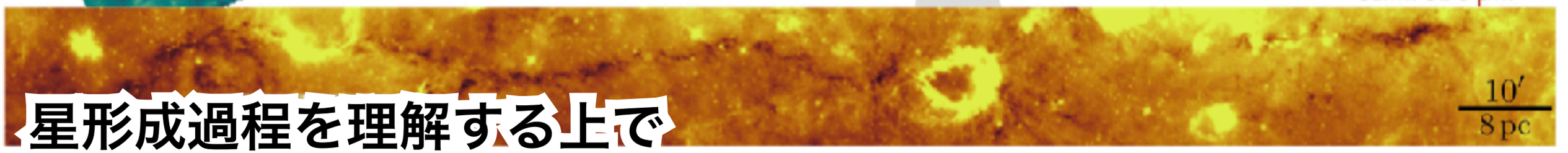


全ての分子雲にフィラメント状構造が付随!







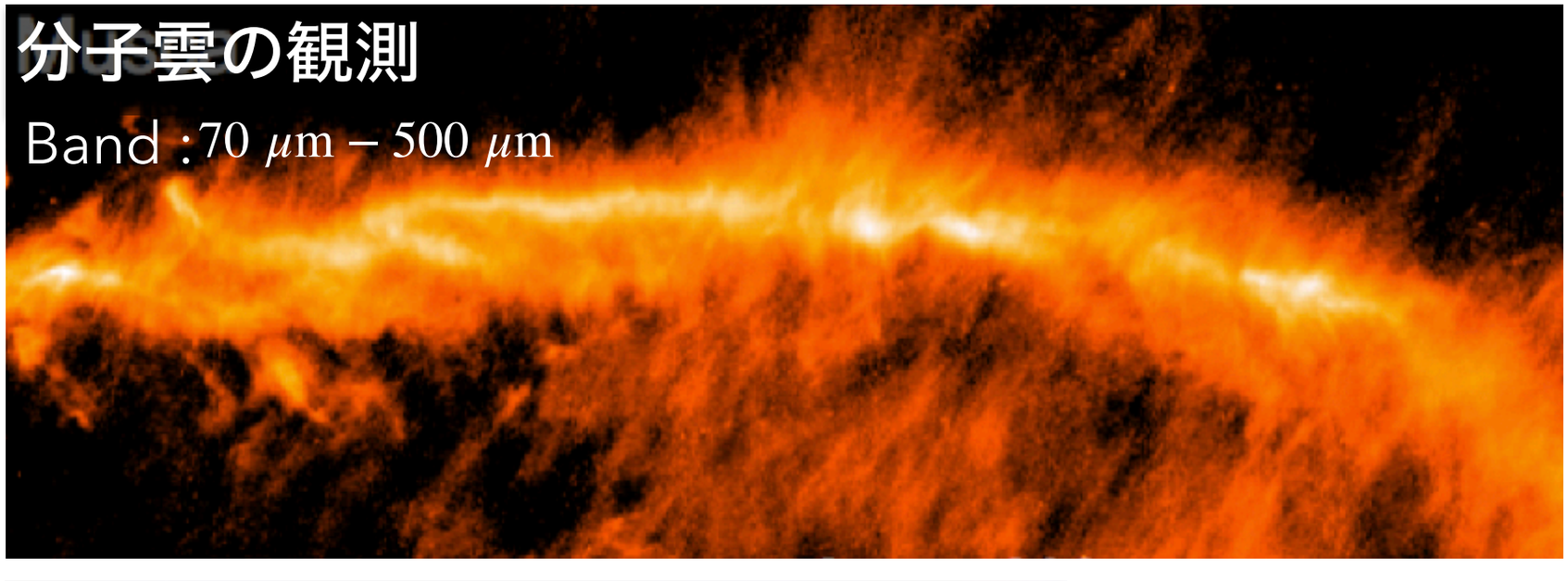


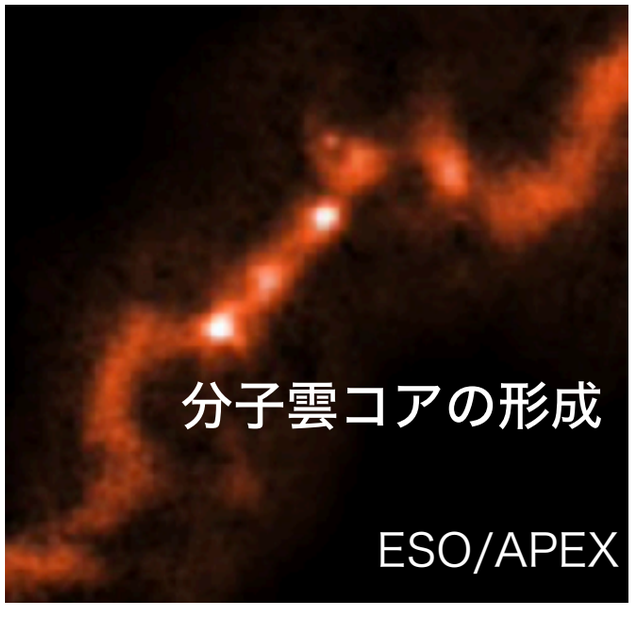
星形成過程を理解する上で

フィラメント構造の起源とその進化を明らかにすることが重要

(e.g., André et al. 2010).

フィラメントでの星形成







臨界線質量

$$M_{\mathrm{line,crit}} = 2c_s^2/G \simeq 17\ \mathrm{M_{sun}pc^{-1}}.$$

観測から，臨界線質量を超えたフィラメントで星が形成されていることがわかっている (André+ 2010)

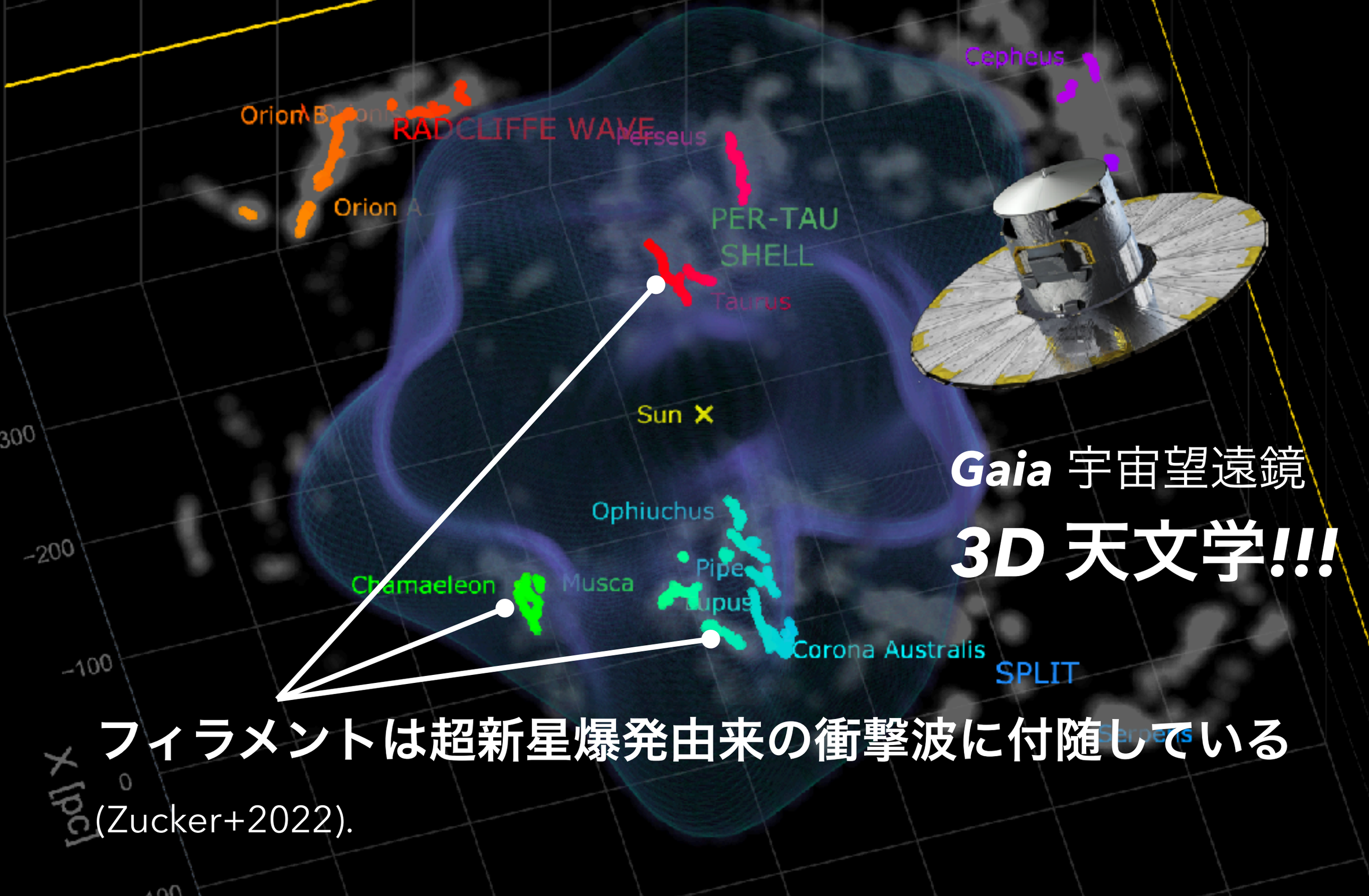
そもそもフィラメントはどうやってできる？

銀河はバブル由来の衝撃波で満たされている!

その衝撃波がフィラメント形成を誘発する

NGC628 ©JWST

衝撃波駆動フィラメント形成の観測的証拠



Gaia 宇宙望遠鏡

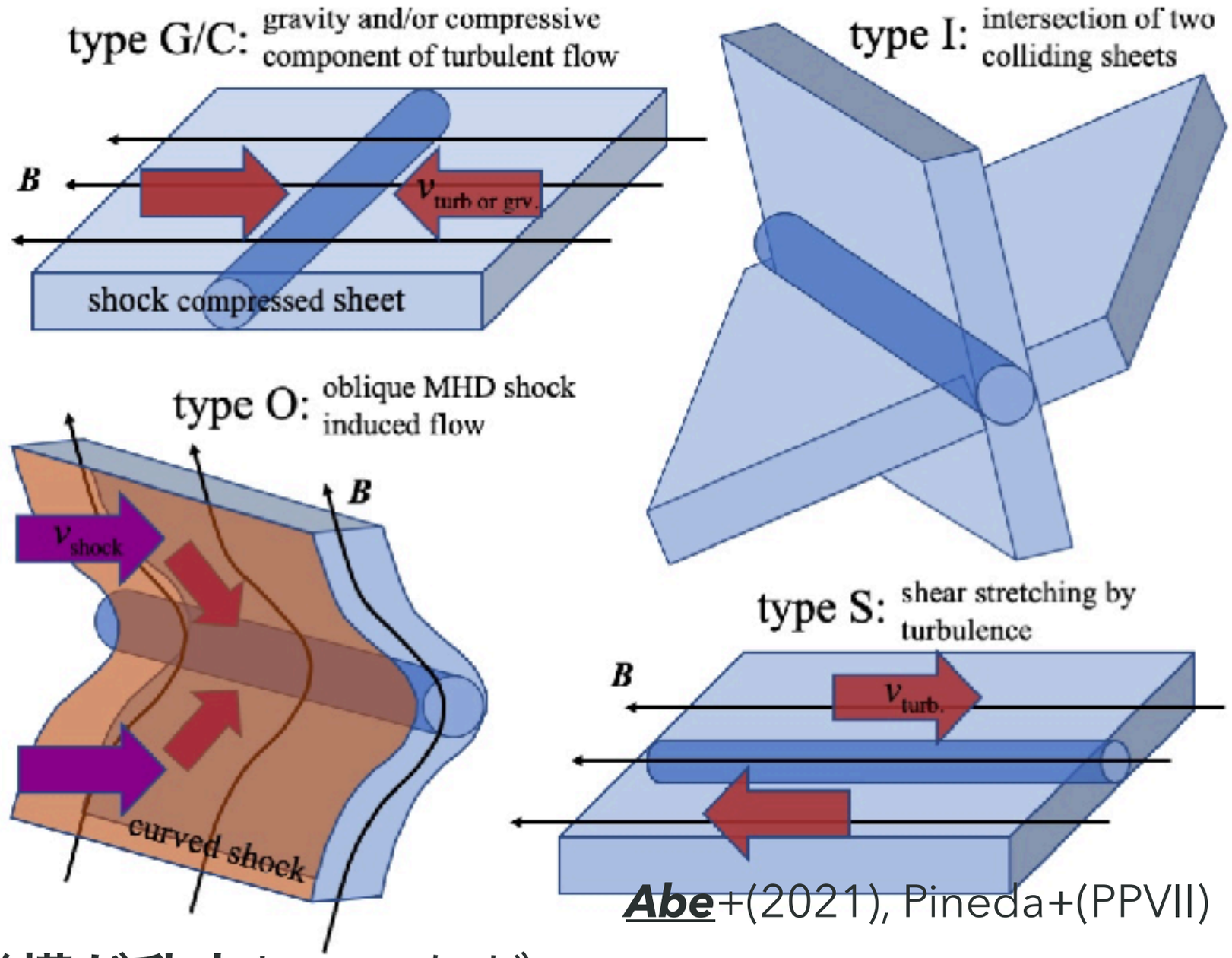
***3D* 天文学!!!**

フィラメントは超新星爆発由来の衝撃波に付随している

(Zucker+2022).

フィラメント形成機構

e.g., Tomisaka & Ikeuchi (1983); Kitsionas & Whitworth (2007); Balfour et al. (2015). Inoue & Fukui (2013); Vaidya et al. (2013); Inoue et al. (2018); Chen & Ostriker (2014); Padoan & Nordlund (1999), ***Abe***+(2021), Pineda et al. (PPVII 2023)



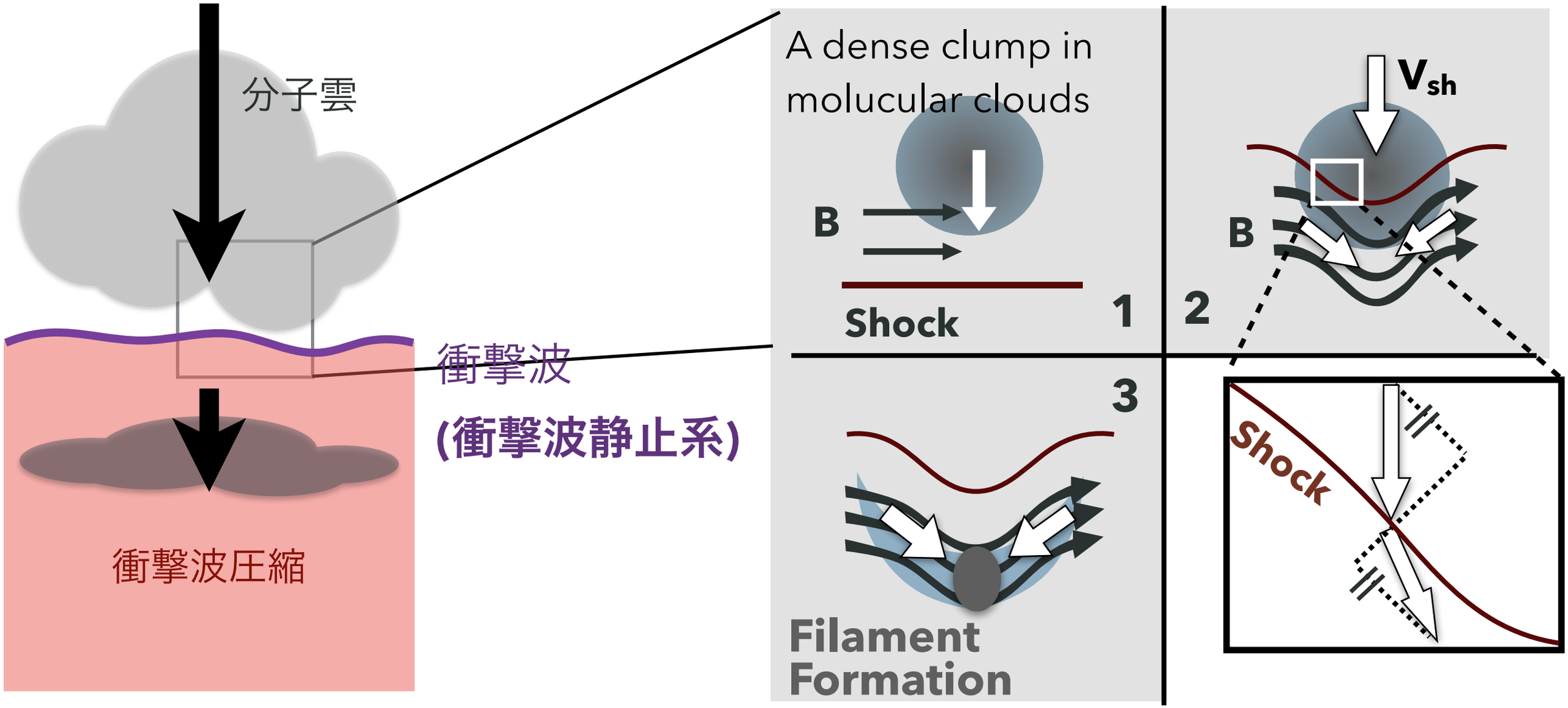
Abe+(2021), Pineda+(PPVII)

様々な形成機構が乱立していたが,

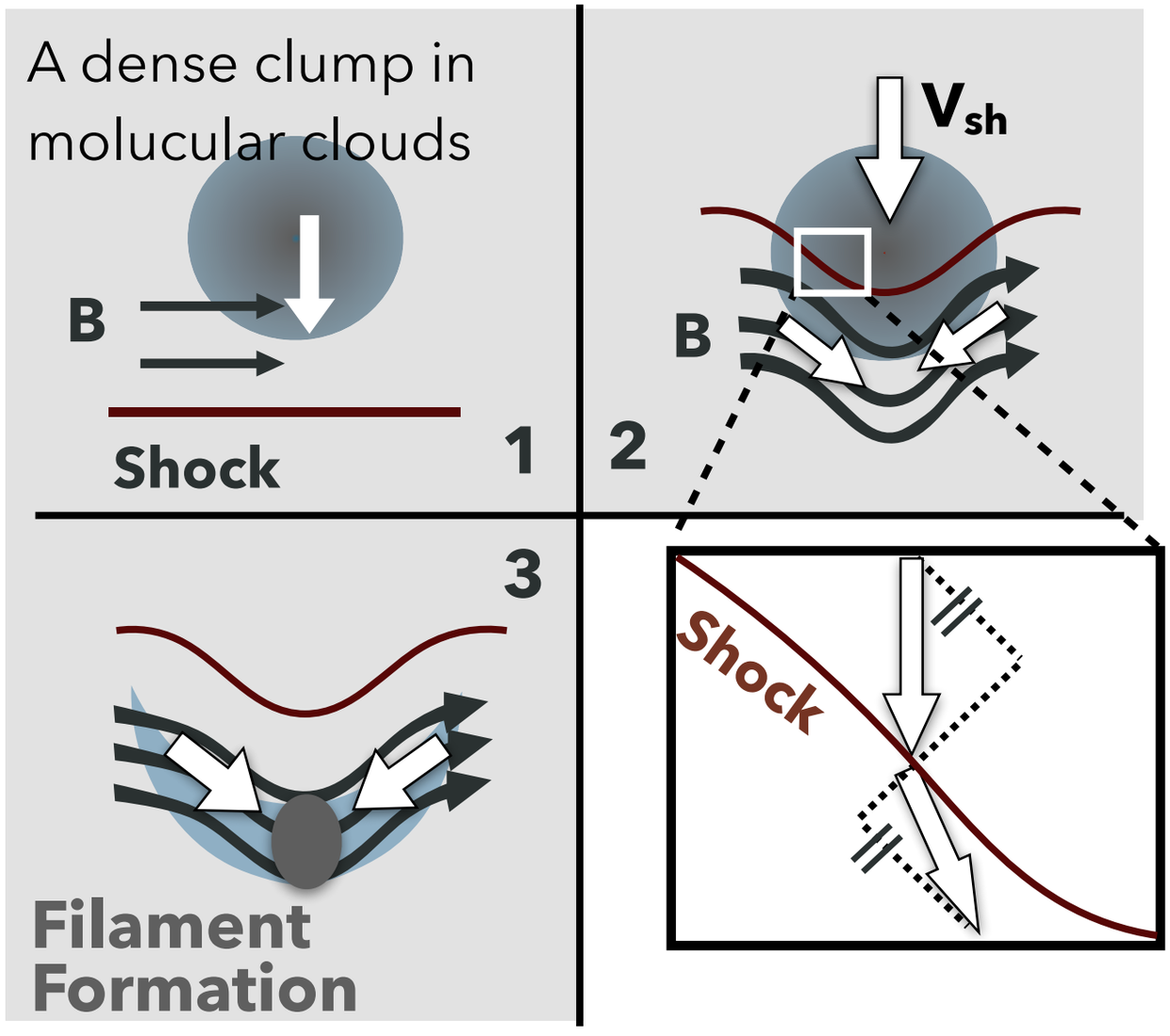
我々が理論を整理し**現実の星形成において重要な機構を特定**

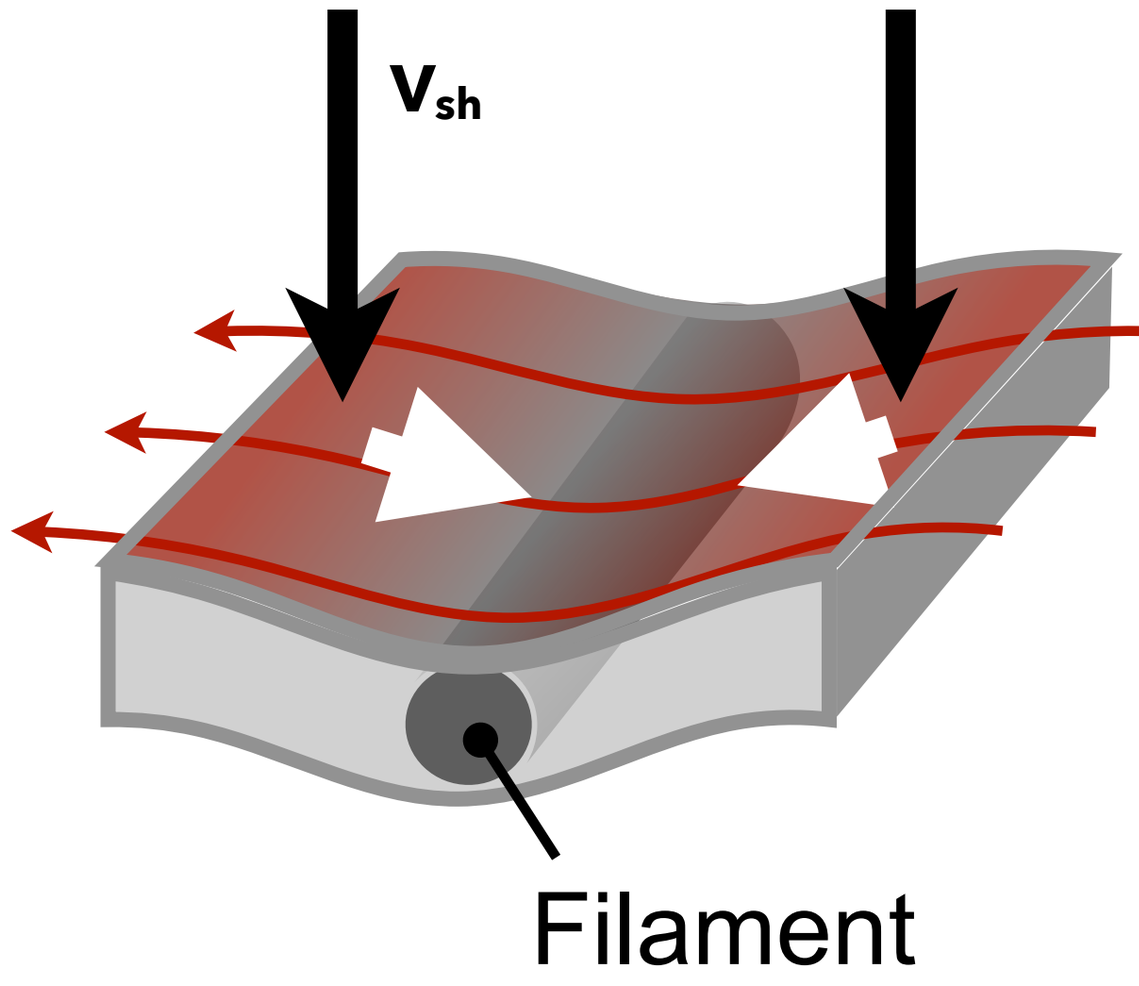
(Abe+2021, 今日のトークでは割愛)

Type O フィラメント形成



Type O フィラメント形成

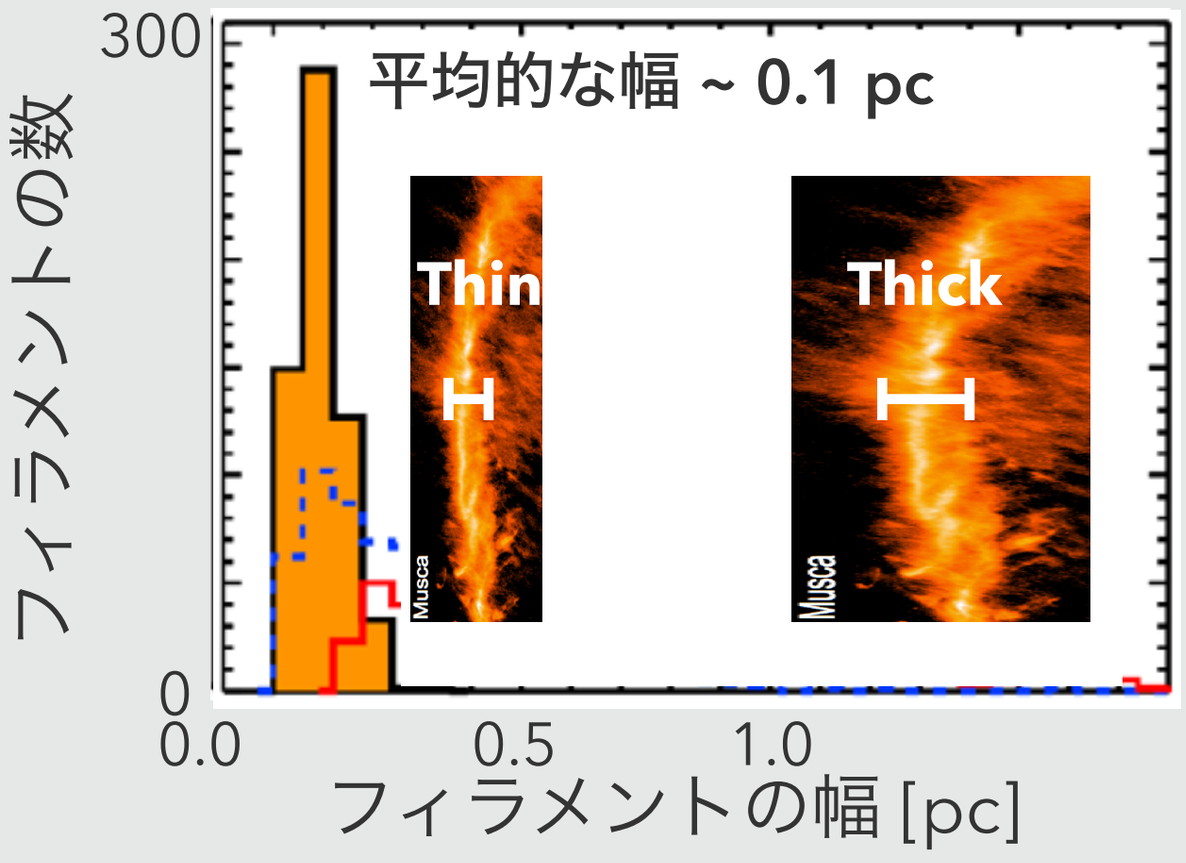


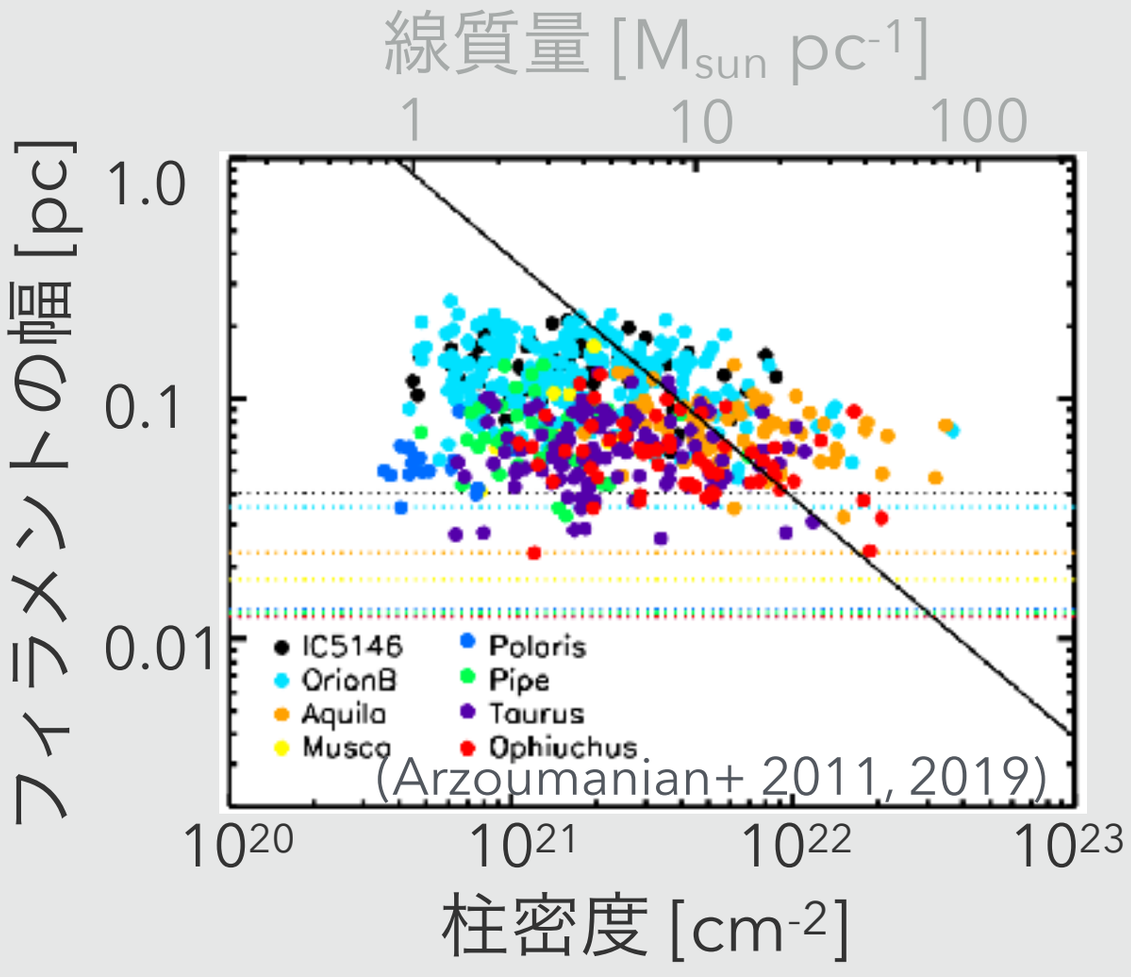


e.g., Inoue & Fukui (2013), Vaidya+(2013); Inoue+(2018)

Open Question

フィラメントの"幅"

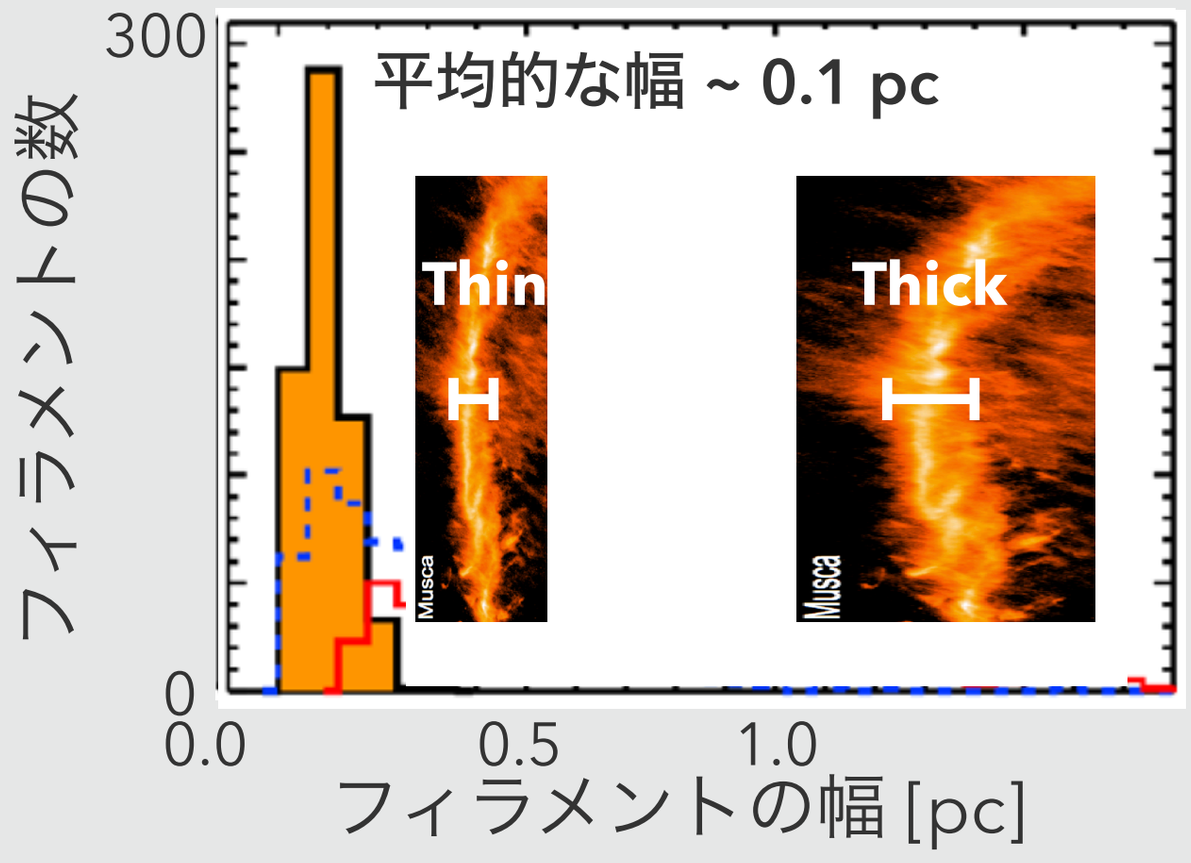


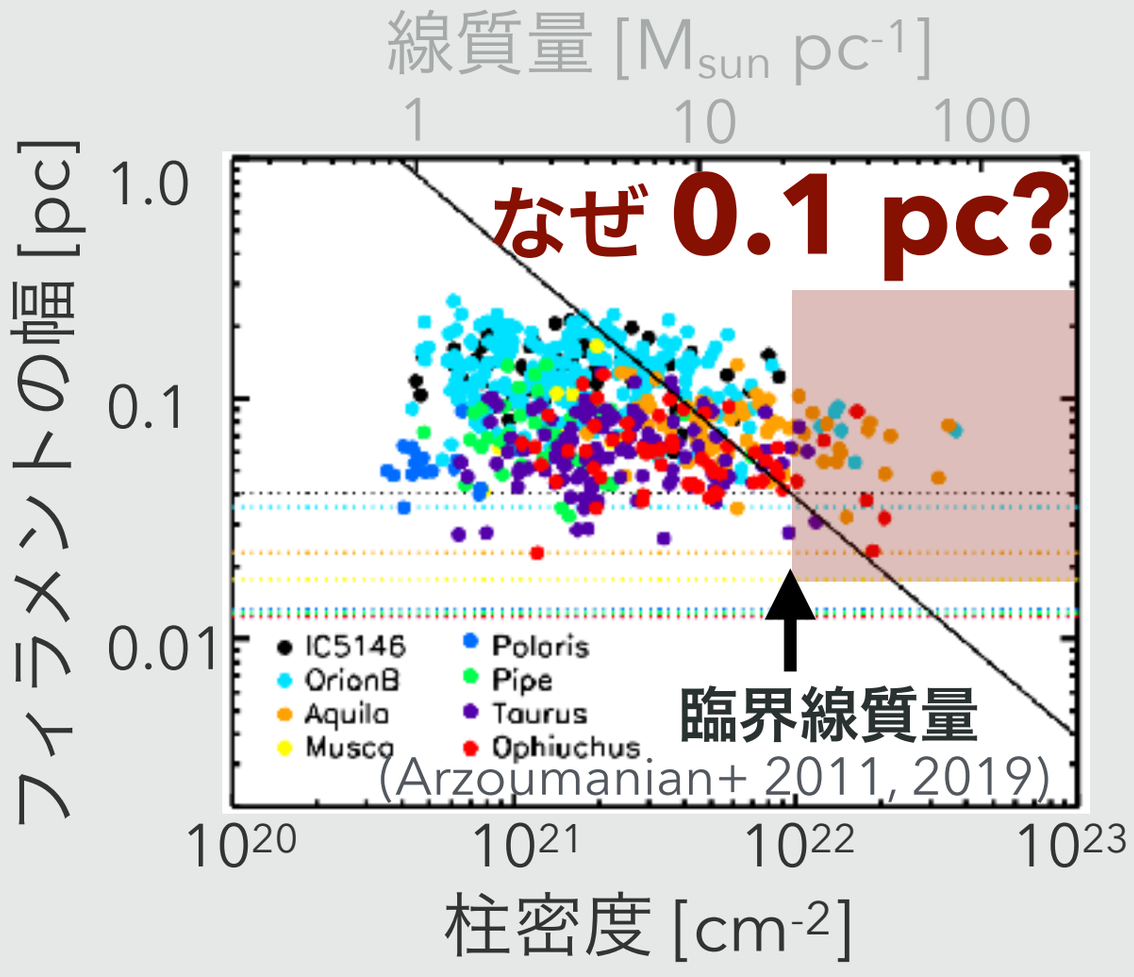


フィラメントの典型的な幅 ~ **0.1 pc**

Open Question

フィラメントの"幅"





フィラメントの典型的な幅 ~ **0.1 pc**

全ての理論・シミュレーションでは重いフィラメントは重力崩壊してしまう

–> **観測と理論の間に矛盾がある**

"We are from different churches." ~The 0.1 pc Filament Width Debate~

No characteristic scale!

(See also, Ossenkopf-Okada & Stepanov 2019, Panopoulou+2017, 2021, 2022, Hacar+2023)

The width depends on spatial resolution (Panopoulou+2021,2022, Hacar+2023)

The ISM is scale-free
(Panopoulou+2017, Miville-Deschenes+2010,2016)

A characteristic scale exists!

(See also Arzoumanian+2011, 2019, Juvela+ 2012, Koch & Rosolowsky 2015, Shimajiri+2023, Andre+ 2014, 2016, 2022, 2025, Orkisz+2019, Suri+2019)

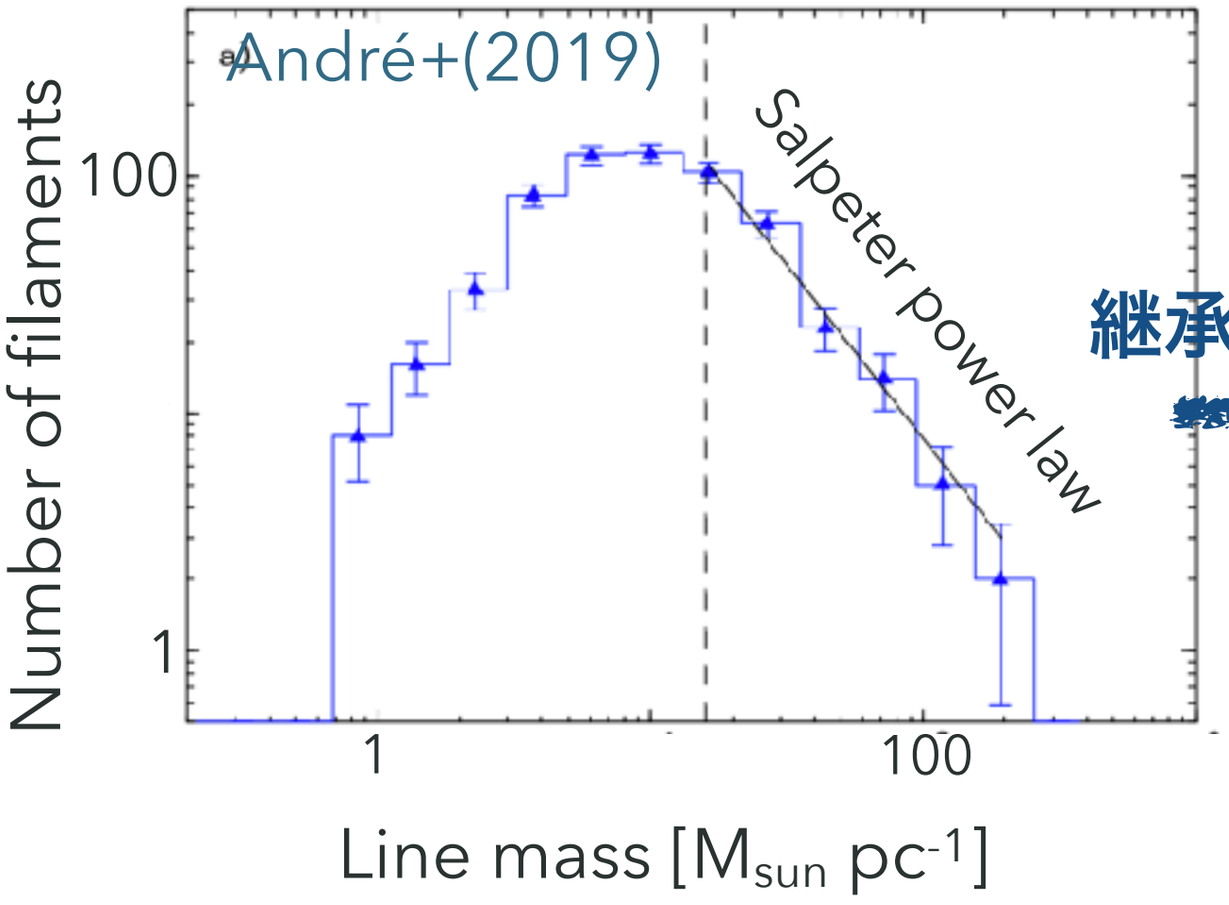
Yes, to some extent, but consistent with simple beam convolution effects
(Andre+2022)

No contradiction once the scale volume filling factor of filaments is taken into account.
(Roy+2019)

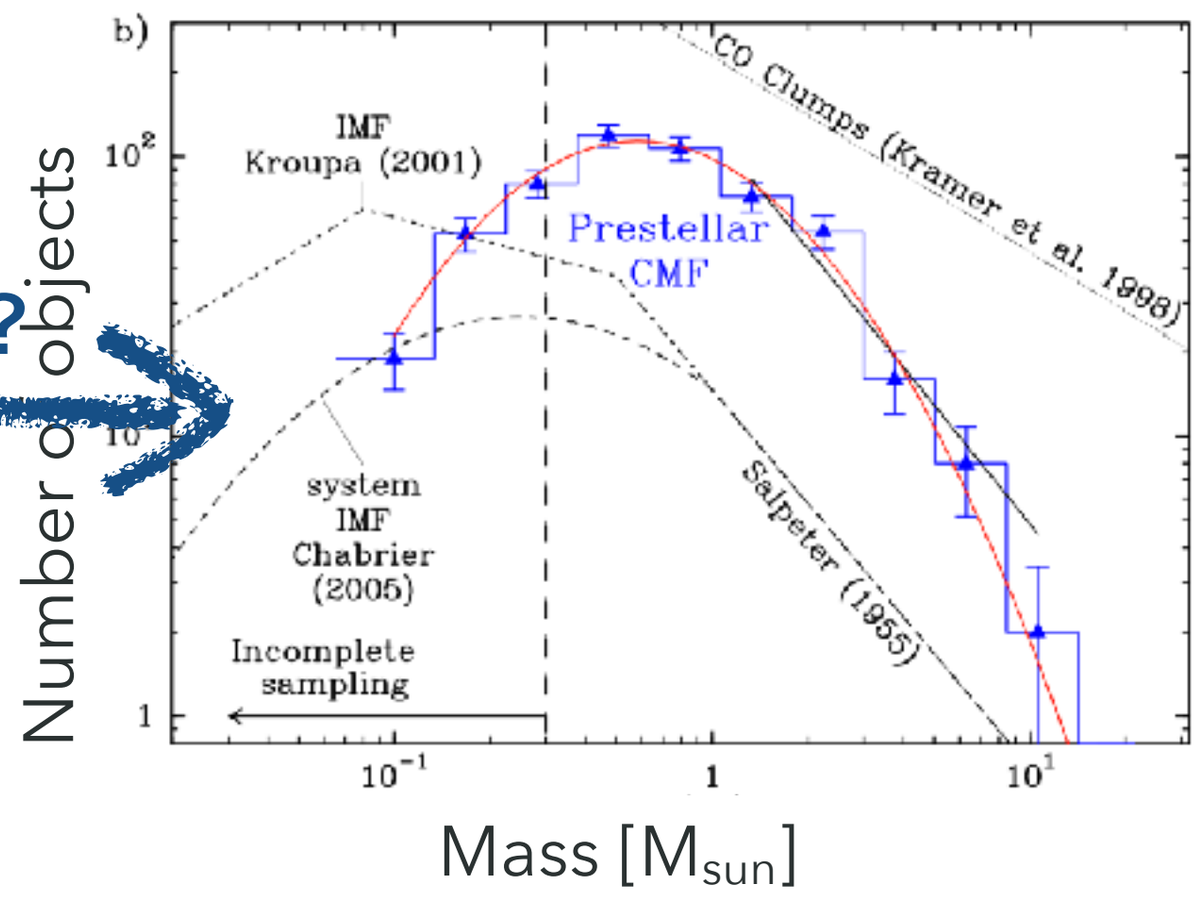
フィラメントの幅の重要性

フィラメントは基本的に**幅スケールで自己重力分裂**を起こす

Line mass function



Core Mass & IMF

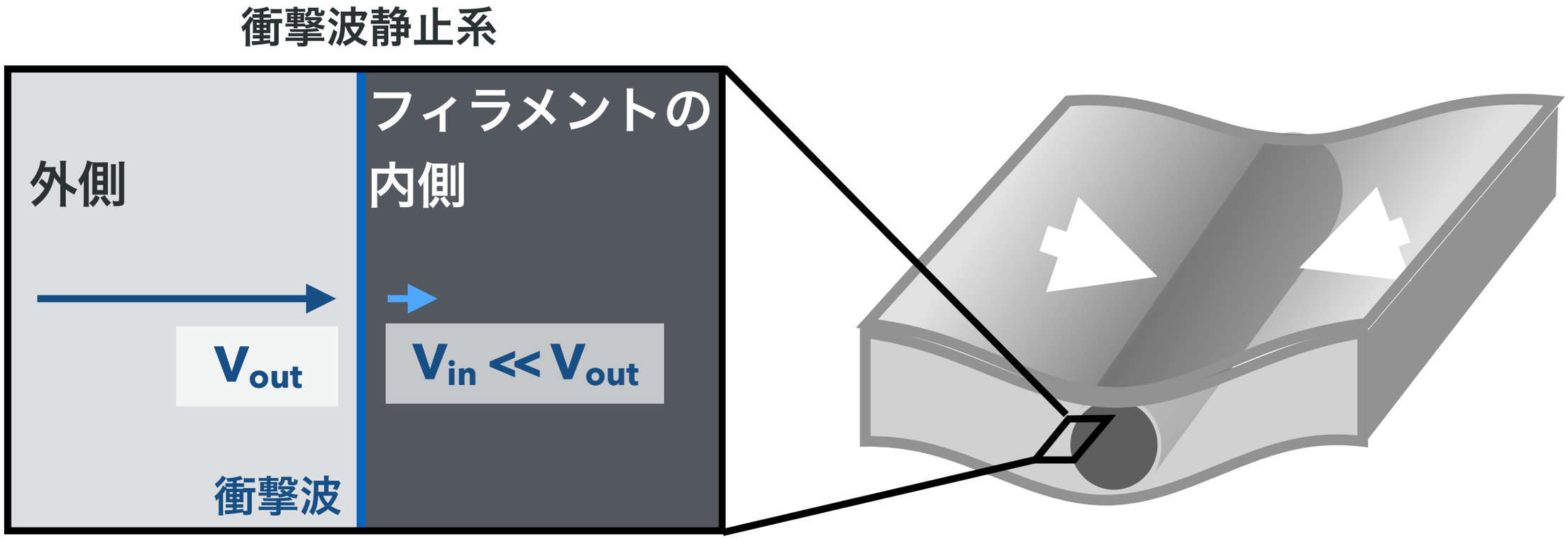


継承？

もし幅が普遍的に *0.1 pc* なら, FLMFはIMFに継承される

–> IMFの起源に迫る上でも幅は重要な物理量

0.1 pc 問題の困難さ



上流の運動エネルギー –> **熱エネルギーへ**

分子雲はキンキンに冷えていて，熱エネルギーが逃げる

残った**熱エネルギーで**フィラメントを**支えられるか？**–> **No!**

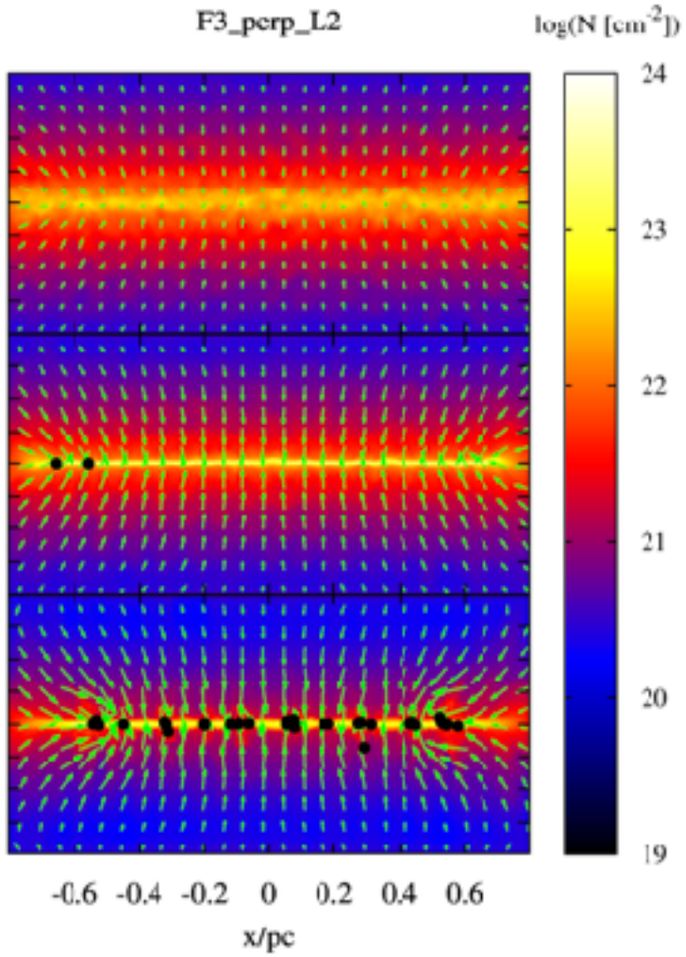
0.1 pc 問題を解決するには，

フィラメントを支える**別のエネルギーが必要**

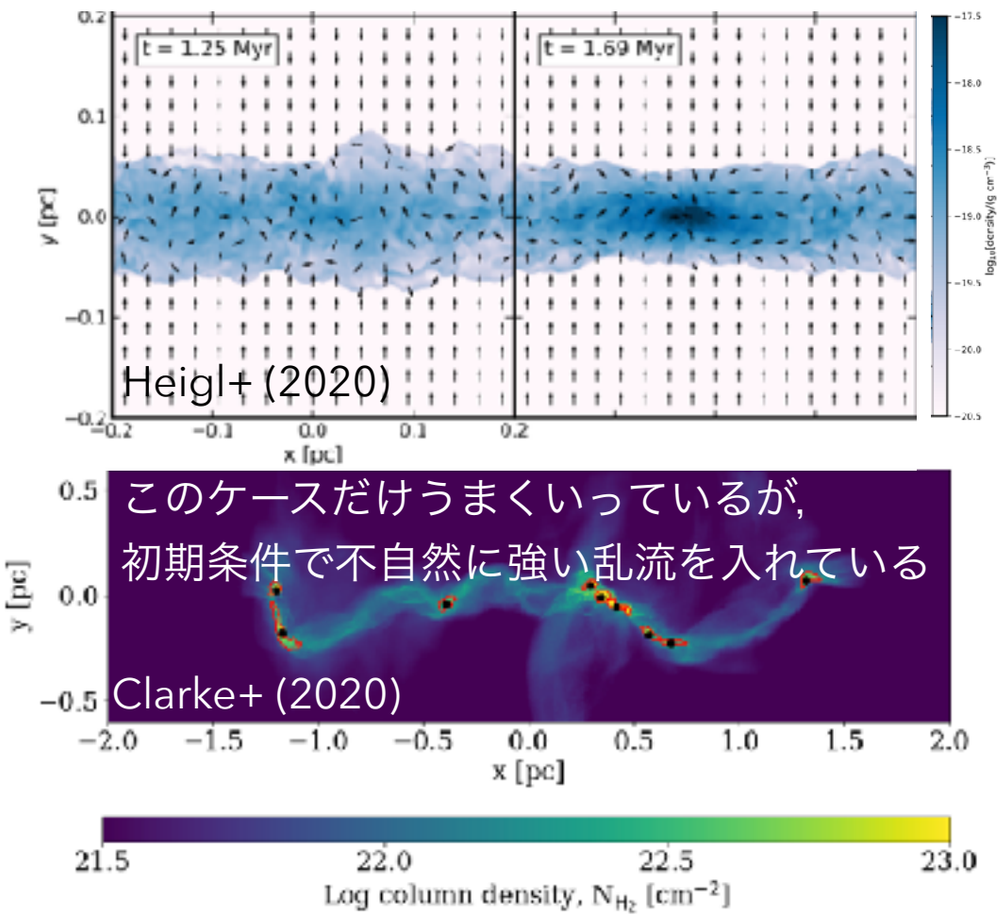
0.1 pc 問題に挑んだ先行研究

Fischera & Martin (2012), Hennebelle & Andre (2013), Heitsch (2013a), Smith+(2014b), Seifried & Walch (2015), Federrath (2016), Auddy+ (2016), Clarke+ (2020), Priestley & Whitworth (2022), Heigl+ (2020), Gutiérrez-Vera (2023)

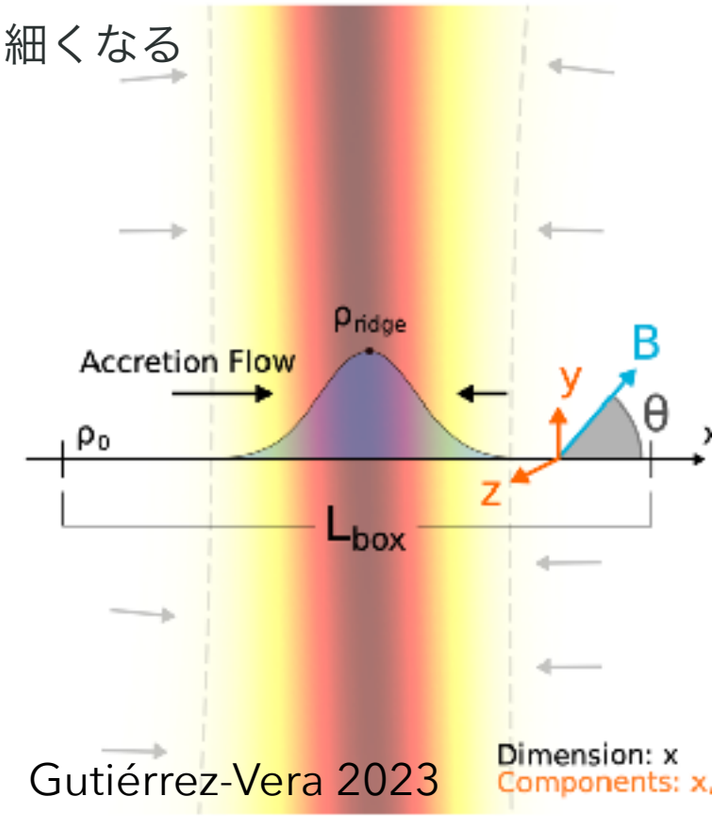
磁場だけだと不十分



ガス流入が駆動する**乱流**だけだと厳しい



宇宙線圧力を考慮しても不十分
磁気拡散があるとフィラメントは細くなる



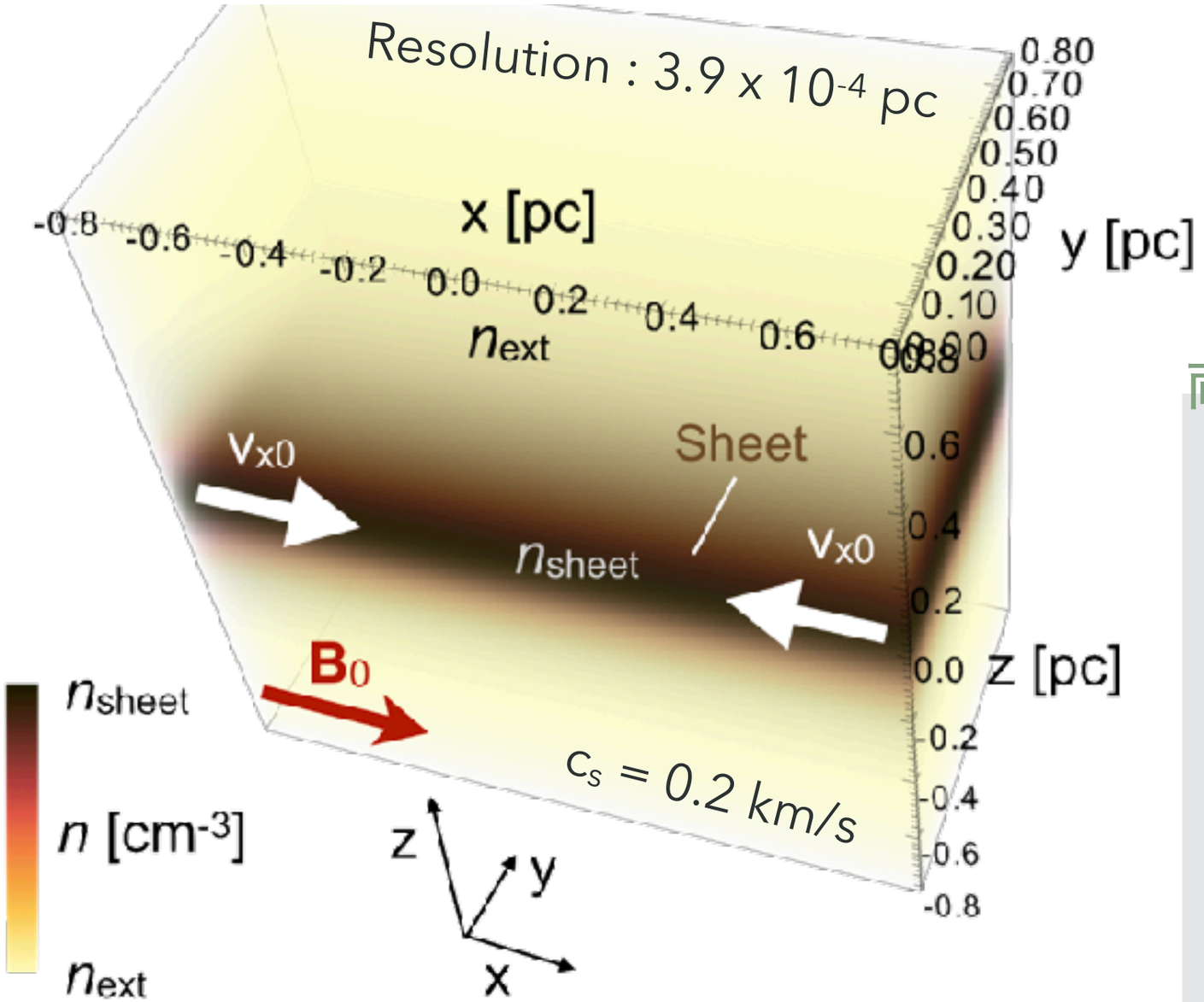
多くの理論研究が 0.1 pc 問題を解こうとしたが, 誰もそれっぽい答えを出せないでいた

三次元の**高空間分解能**の**非理想MHD**シミュレーションにより我々もこの謎に挑戦

シミュレーションの初期条件

Athena++ コード (Stone+ 2020, Tomida & Stone 2023) を使ったシミュレーション

磁場に沿ったガス流入 –> フィラメント形成



境界条件

- x –> ガスが流入し続ける
- y,z–> 周期境界条件

両極性拡散入りMHD

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{v}) = 0$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \boldsymbol{v}\boldsymbol{v} - \boldsymbol{B}\boldsymbol{B} + P + B^2/2\right) = -\rho \nabla \Phi$$

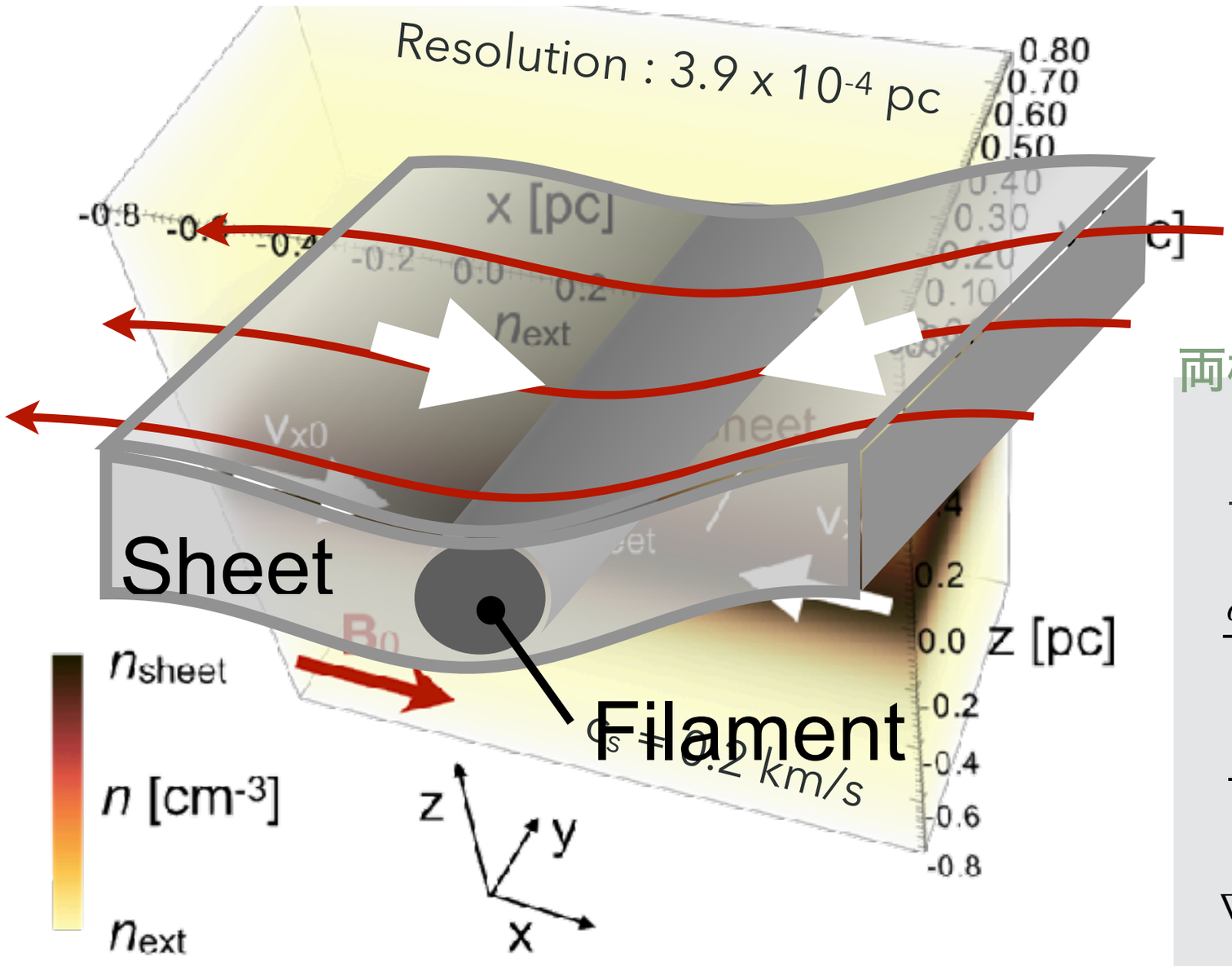
$$\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} - \nabla \times \left[(\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}) - \frac{\eta_{\mathrm{AD}}}{|\boldsymbol{B}|^2}\boldsymbol{B} \times ((\nabla \times \boldsymbol{B}) \times \boldsymbol{B})\right] = 0$$

$$\nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho \qquad P = \rho c_s^2 \qquad \eta_{\mathrm{AD}} = \frac{B^2}{4\pi \gamma_{\mathrm{in}} \rho_{\mathrm{n}} \rho_{\mathrm{i}}}$$

シミュレーションの初期条件

Athena++ コード (Stone+ 2020, Tomida & Stone 2023) を使ったシミュレーション

磁場に沿ったガス流入 –> フィラメント形成



境界条件

- x –> ガスが流入し続ける
- y,z–> 周期境界条件

両極性拡散入りMHD

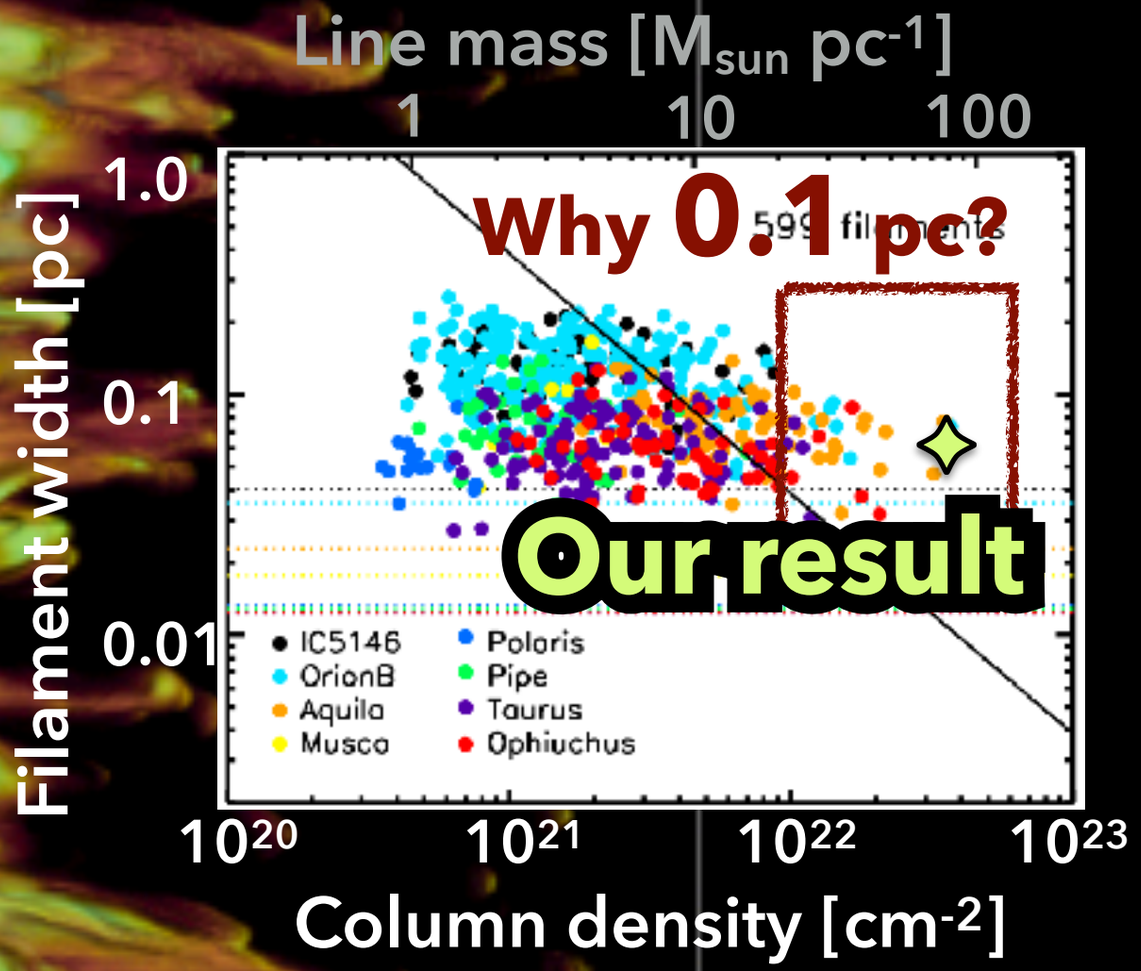
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{v}) = 0$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \boldsymbol{v}\boldsymbol{v} - \boldsymbol{B}\boldsymbol{B} + P + B^2/2\right) = -\rho \nabla \Phi$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} - \nabla \times \left[(\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}) - \frac{\eta_{\mathrm{AD}}}{|\boldsymbol{B}|^2}\boldsymbol{B} \times ((\nabla \times \boldsymbol{B}) \times \boldsymbol{B})\right] = 0$$

$$\nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho \qquad P = \rho c_s^2 \qquad \eta_{\mathrm{AD}} = \frac{B^2}{4\pi \gamma_{\mathrm{in}} \rho_{\mathrm{n}} \rho_{\mathrm{i}}}$$

シミュレーション結果



乱流が駆動され,

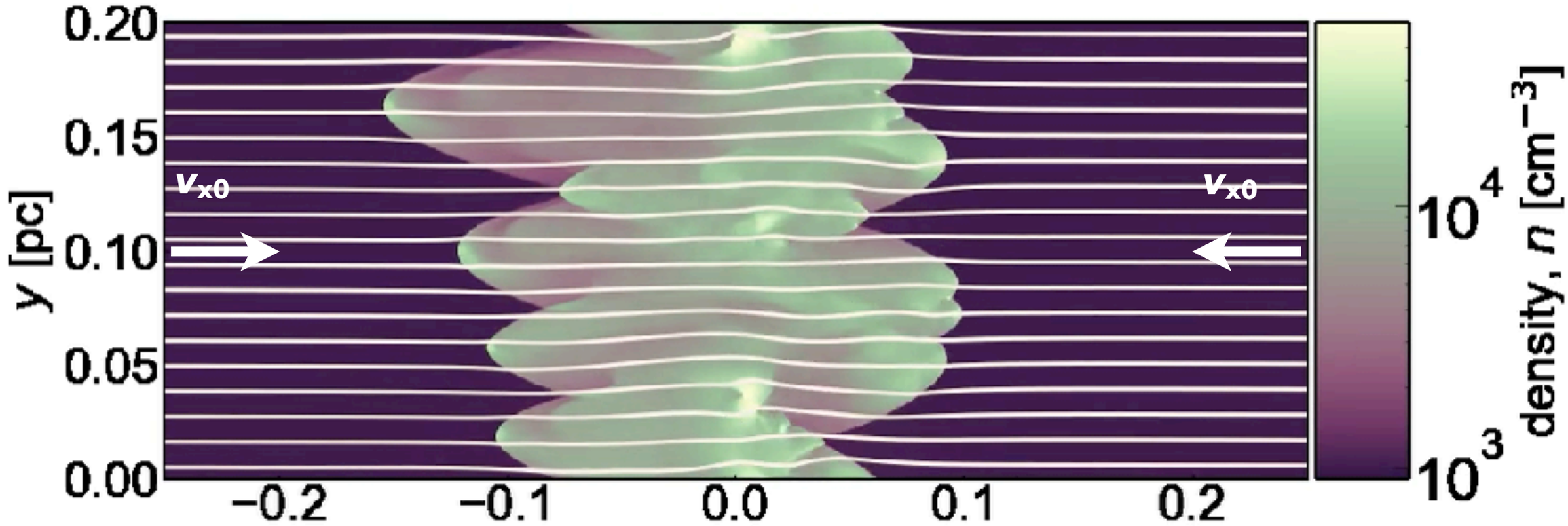
その運動エネルギーによってフィラメントが支えられている

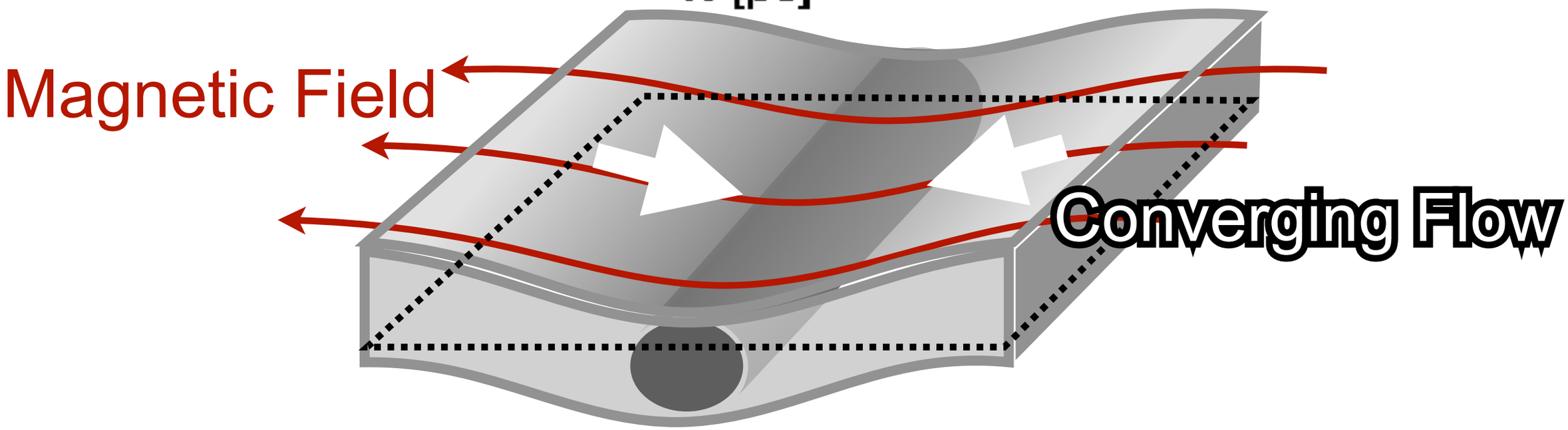
ことを発見

STORM機構と呼ぶことにする

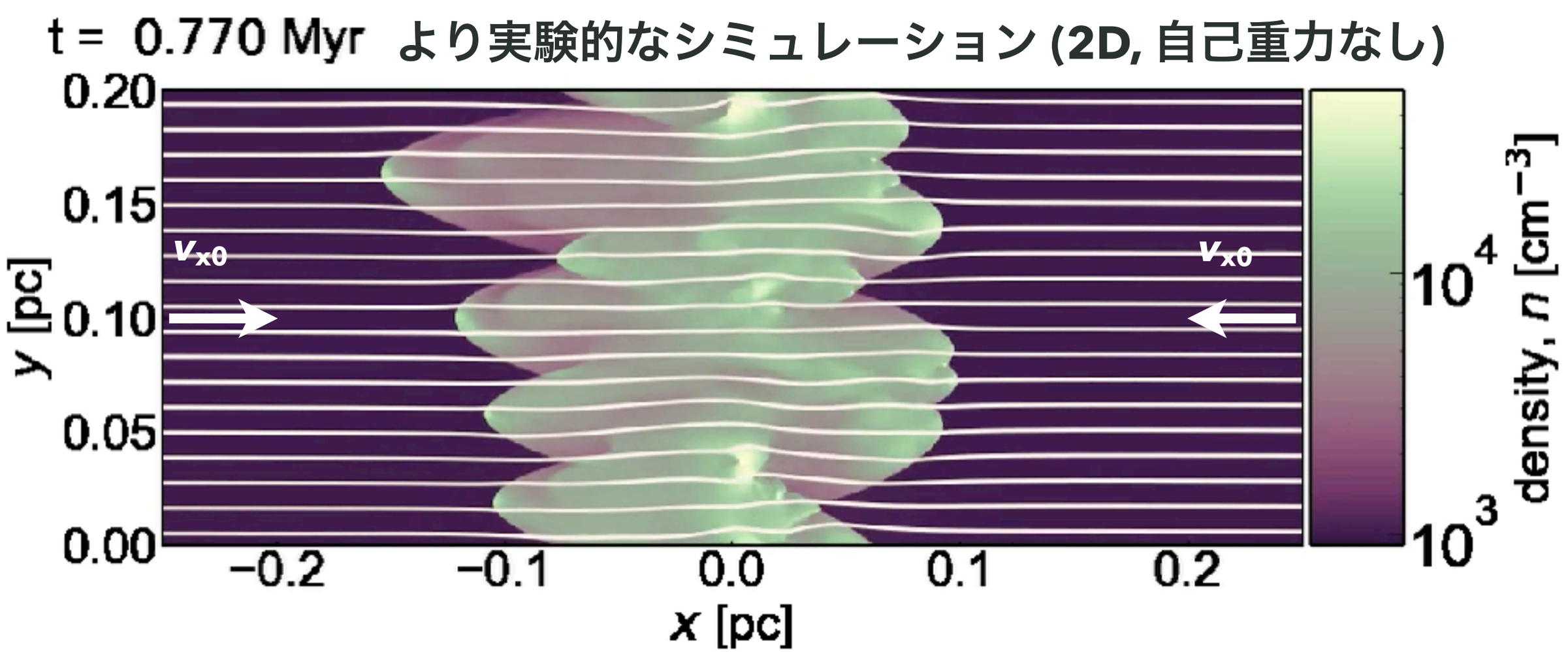
STORM機構とは

t = 0.770 Myr より実験的なシミュレーション (2D, 自己重力なし)





STORM機構とは

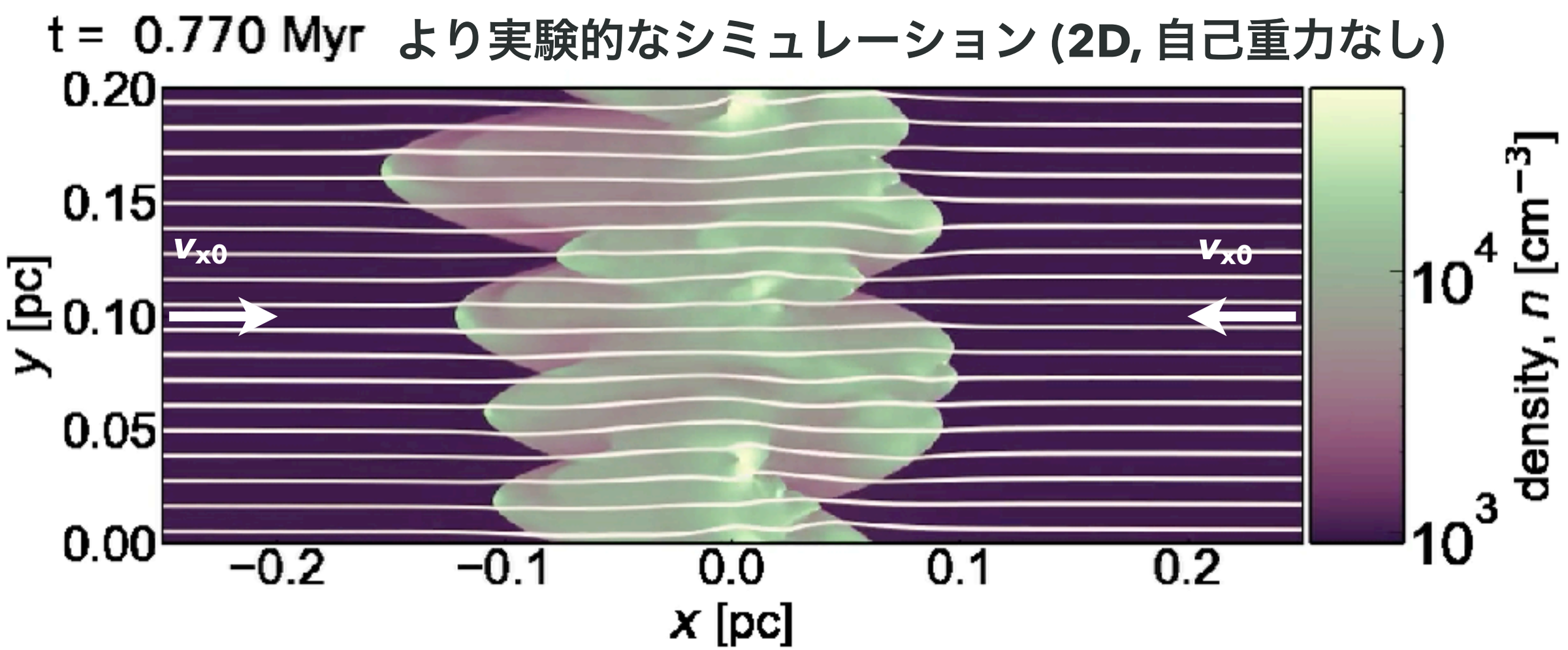


✔ 波打不安定性

衝撃波面揺らぎが成長する.

(磁場が重要)

STORM機構とは



✔ 波打不安定性

衝撃波面揺らぎが成長する.

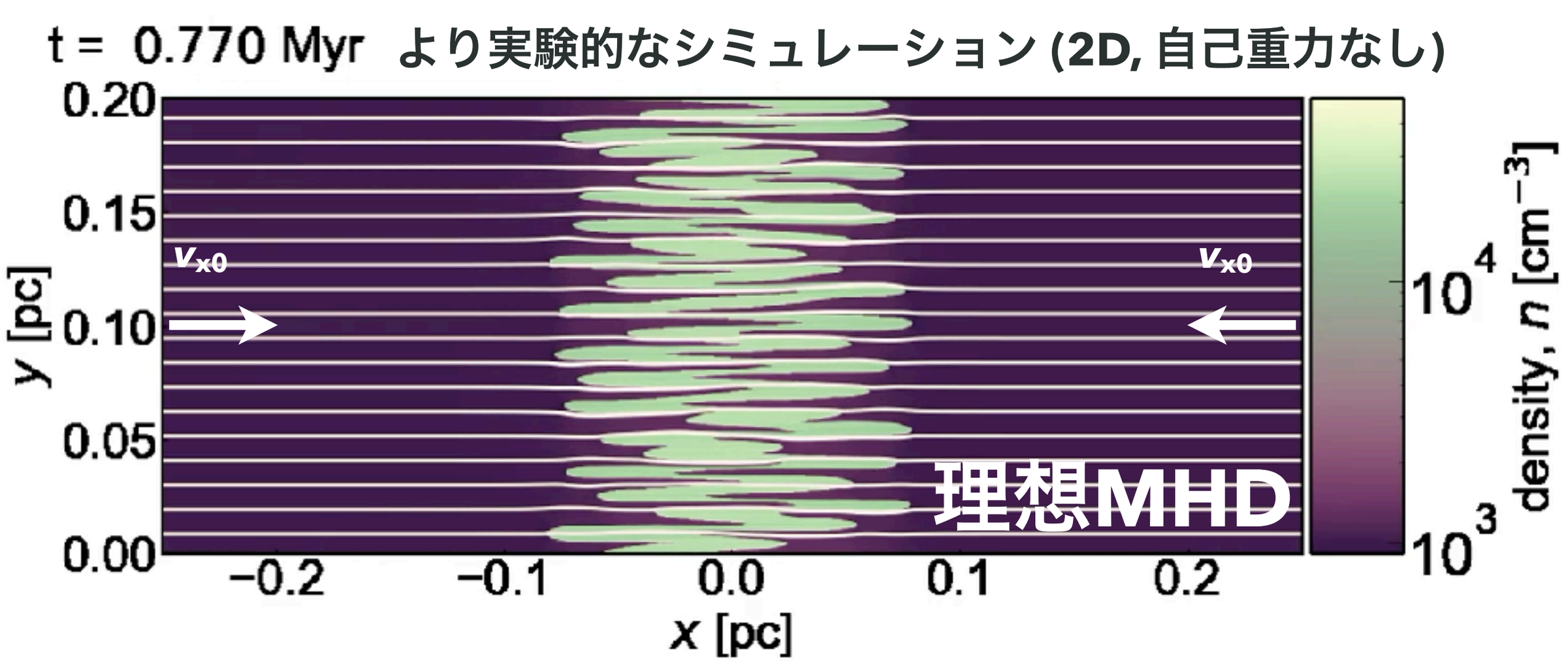
(磁場が重要)

✔ 両極性拡散

二流体間の摩擦

磁場の影響を受けるプラズマと中性分子ガス

STORM機構とは



より実験的なシミュレーション (2D, 自己重力なし)

✔ 波打不安定性

衝撃波面揺らぎが成長する.

(磁場が重要)

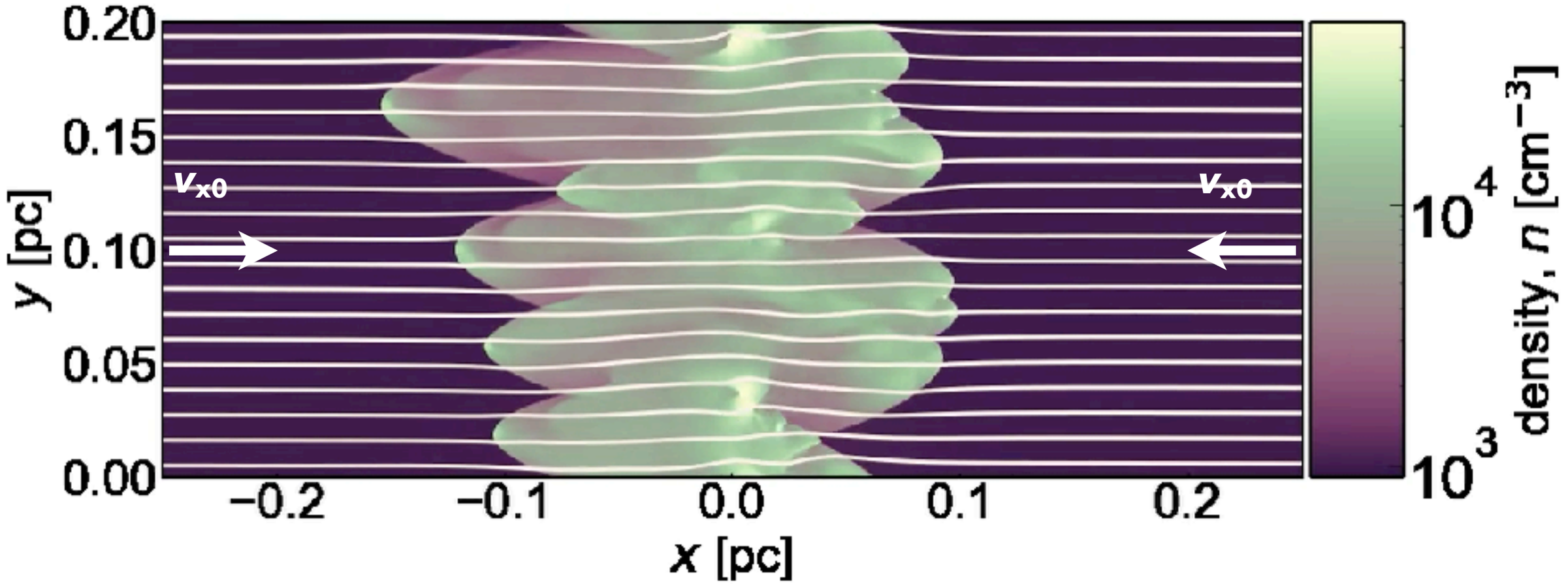
✔ 両極性拡散

二流体間の摩擦

磁場の影響を受けるプラズマと中性分子ガス

STORM機構とは

t = 0.770 Myr より実験的なシミュレーション (2D, 自己重力なし)



✔ 波打不安定性

衝撃波面揺らぎが成長する.

(磁場が重要)

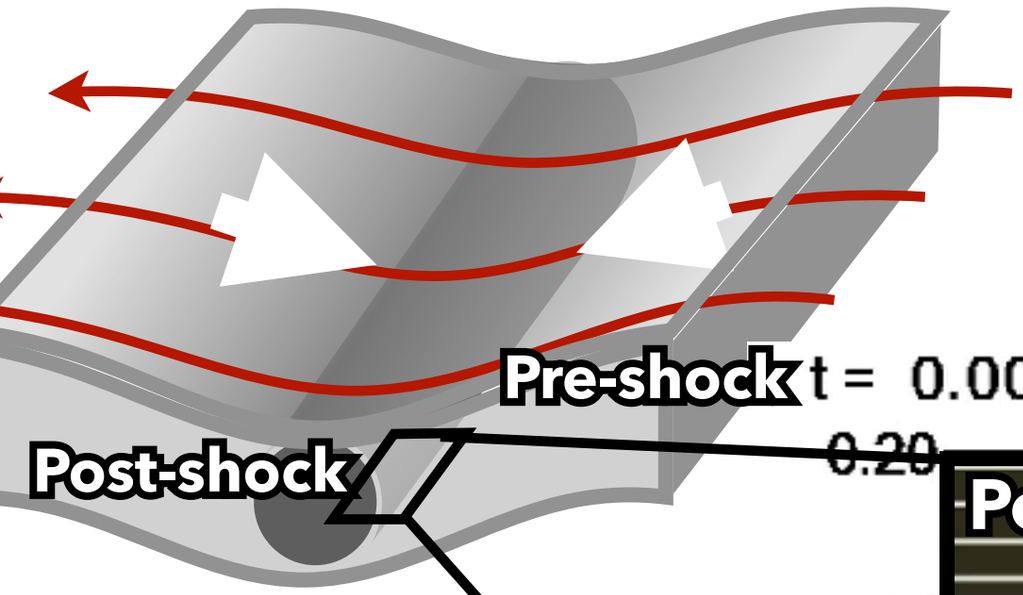
✔ 両極性拡散

二流体間の摩擦

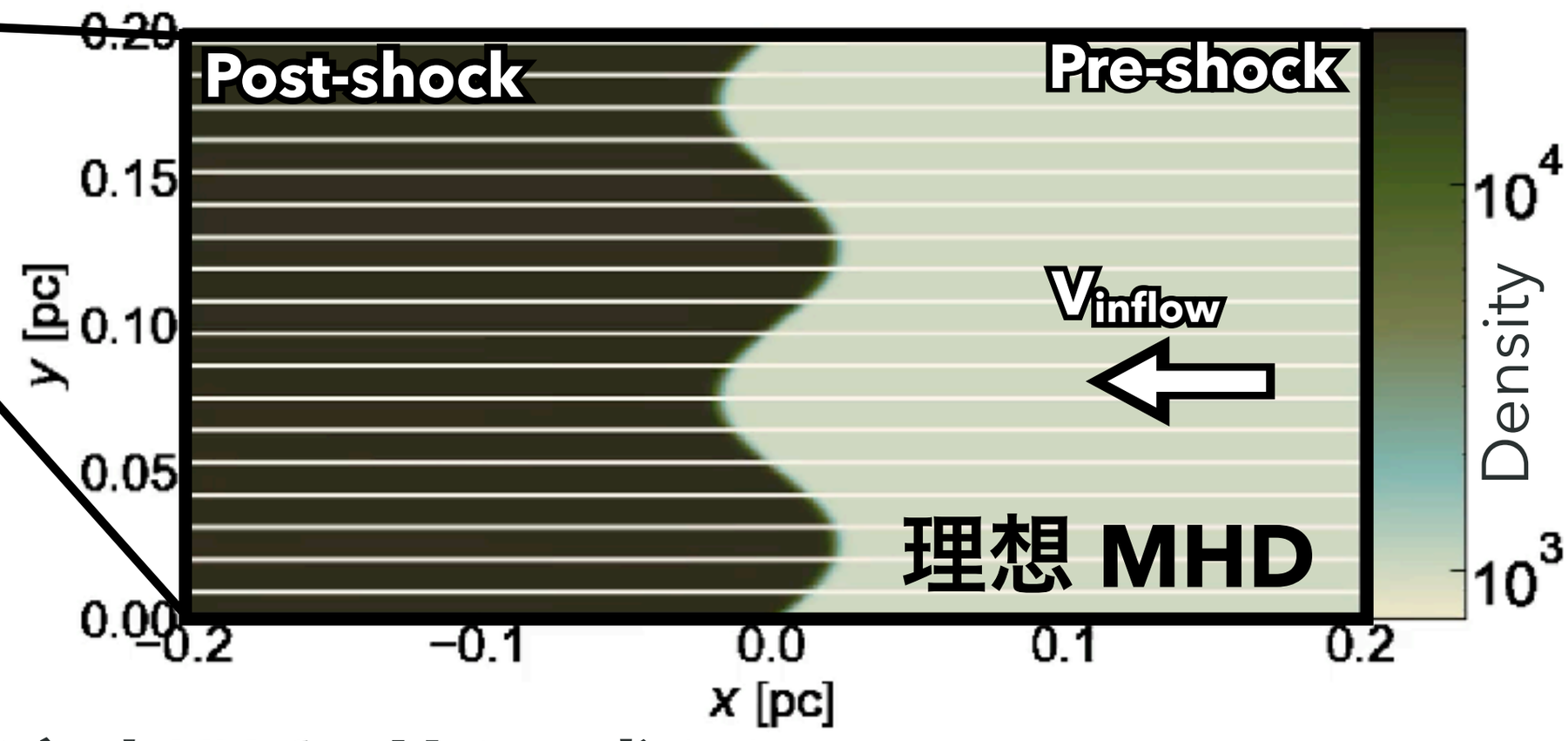
磁場の影響を受けるプラズマと中性分子ガス

"**STORM** (**S**low-shock-mediated **T**urbulent fl**O**w **R**einforced by **M**agnetic diffusion)"

波打不安定性 (Slow-shock不安定性, Corrugation不安定性)



条件: Supersonic & Sub-Alfvénic

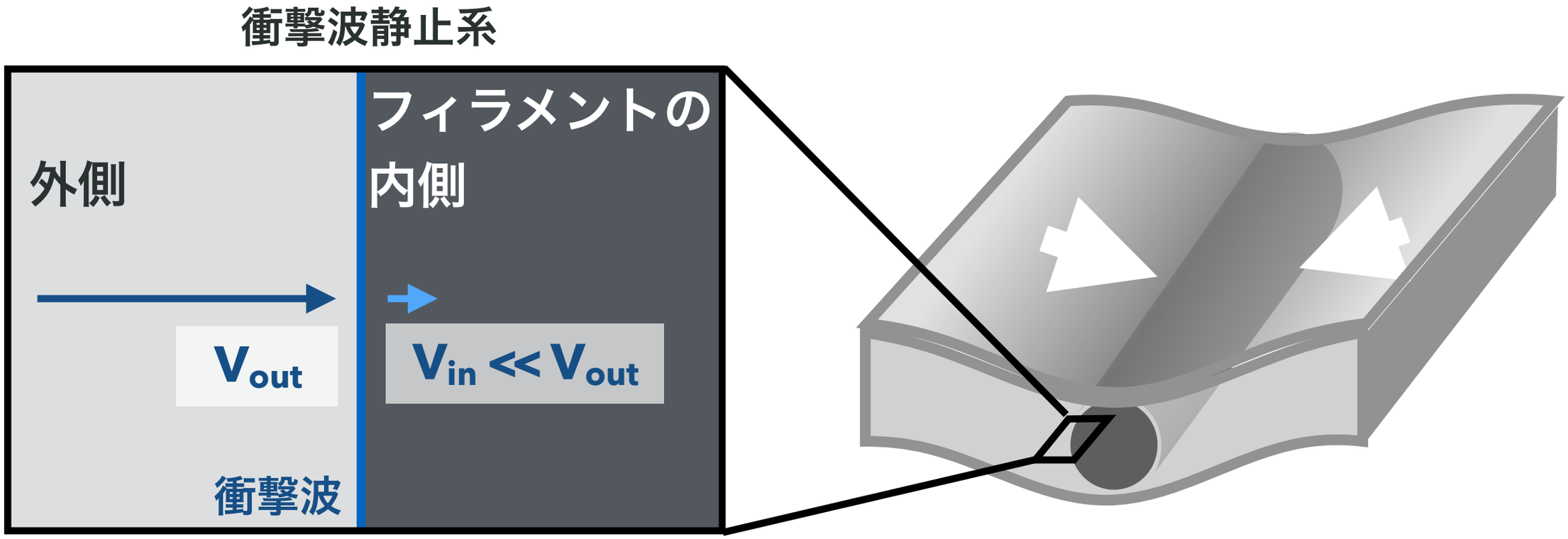


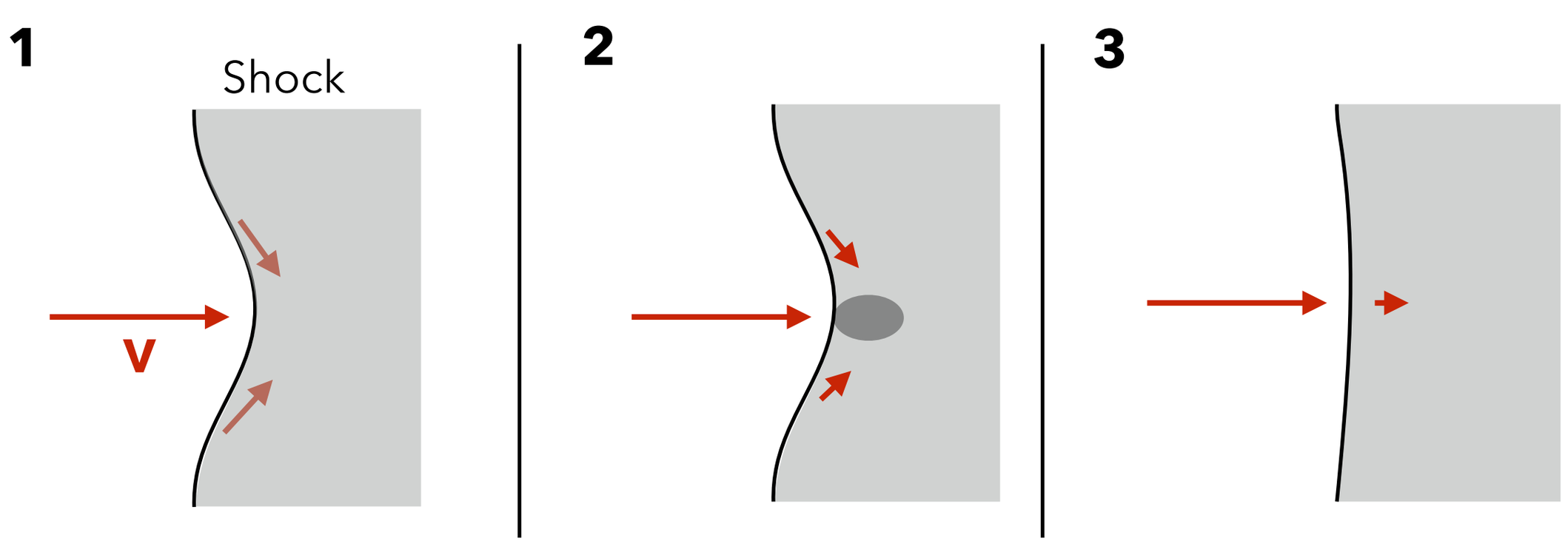
波面の摂動が時間と共に成長

乱流の源となりうる (see also Crocco's theorem)

(実は燃焼波面やHIガスの相境界，HII領域にも似た不安定性がある)

Remarks: 衝撃波面の安定性



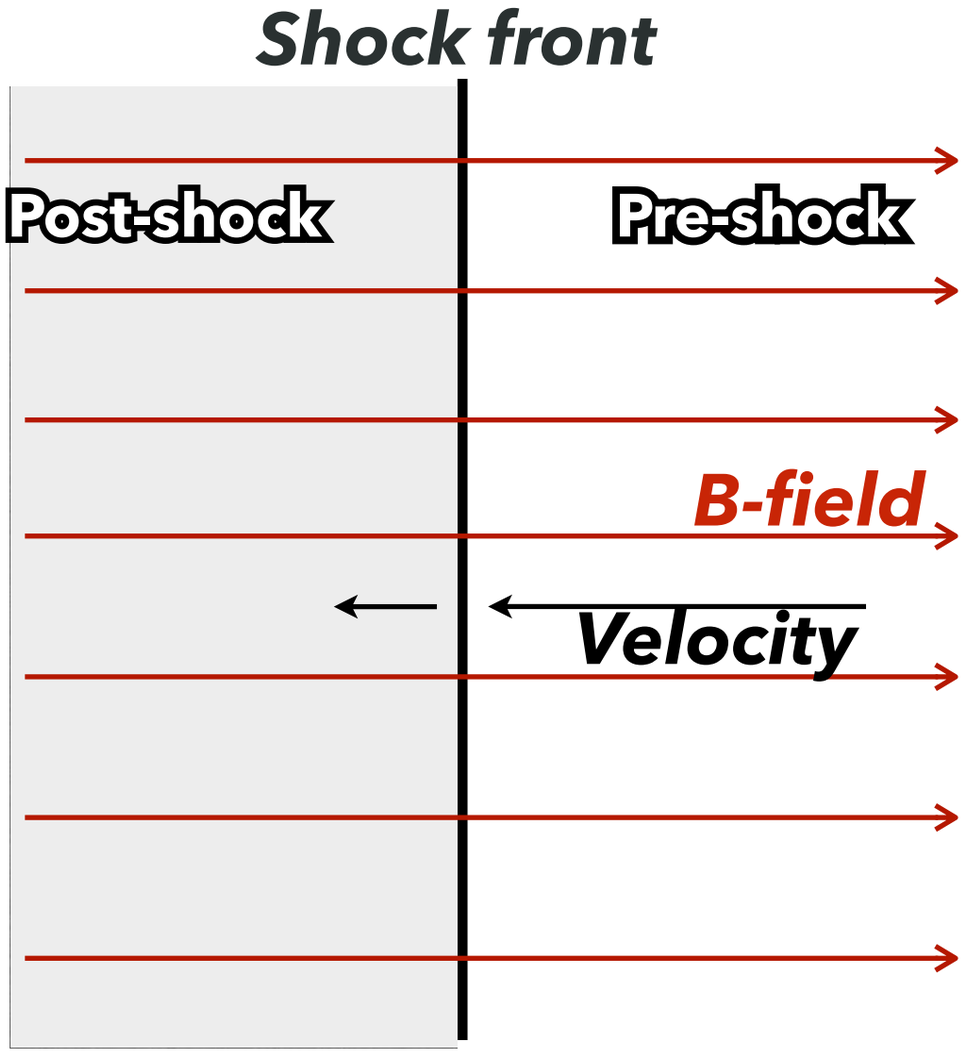


(普通の) 衝撃波は波面揺らぎに対して安定. しかし, slow-shockは違う

Slow-shock 不安定性の線形成長

Slow-shock = *Slow mode*の衝撃波

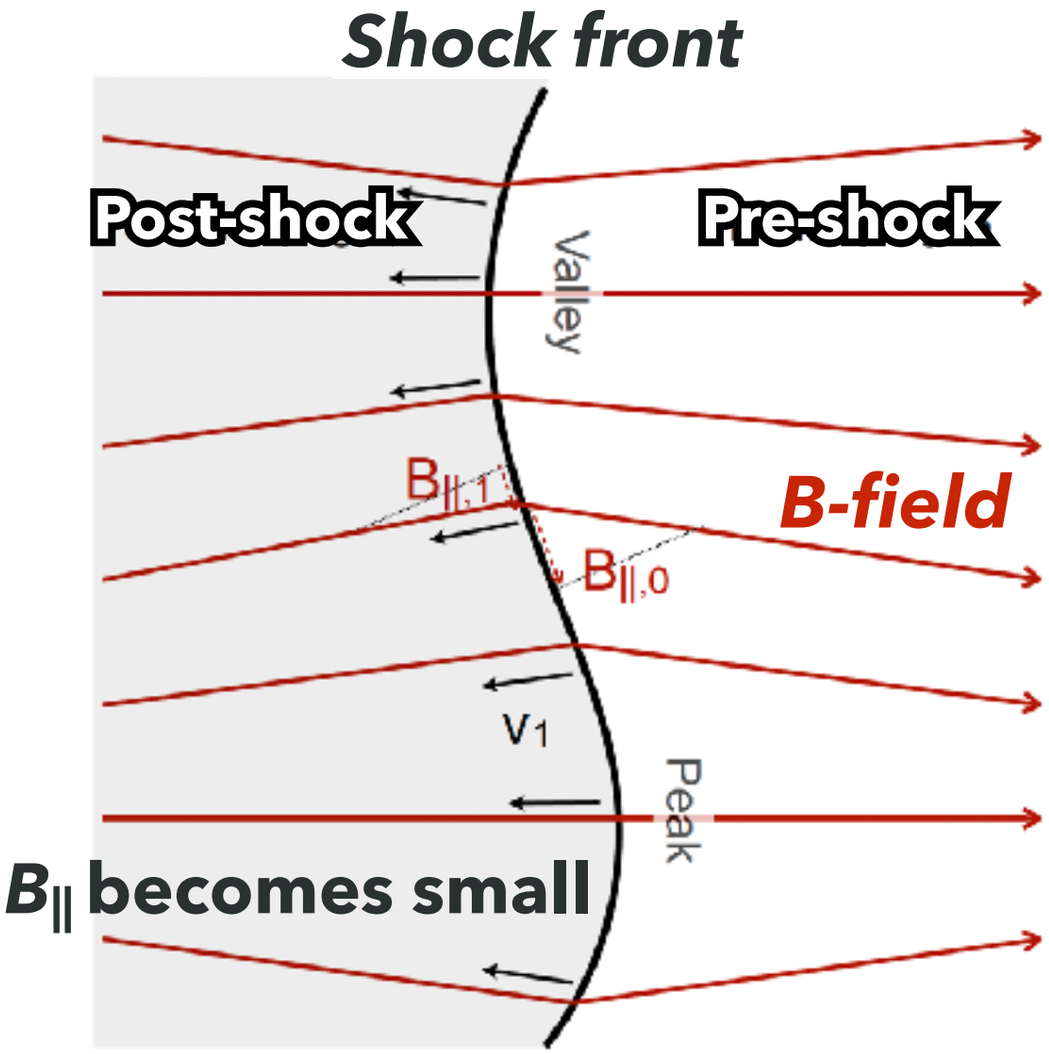
Slow mode: ガス圧と磁気圧が逆位相の圧縮性波動



Slow-shock 不安定性の線形成長

Slow-shock = *Slow mode*の衝撃波

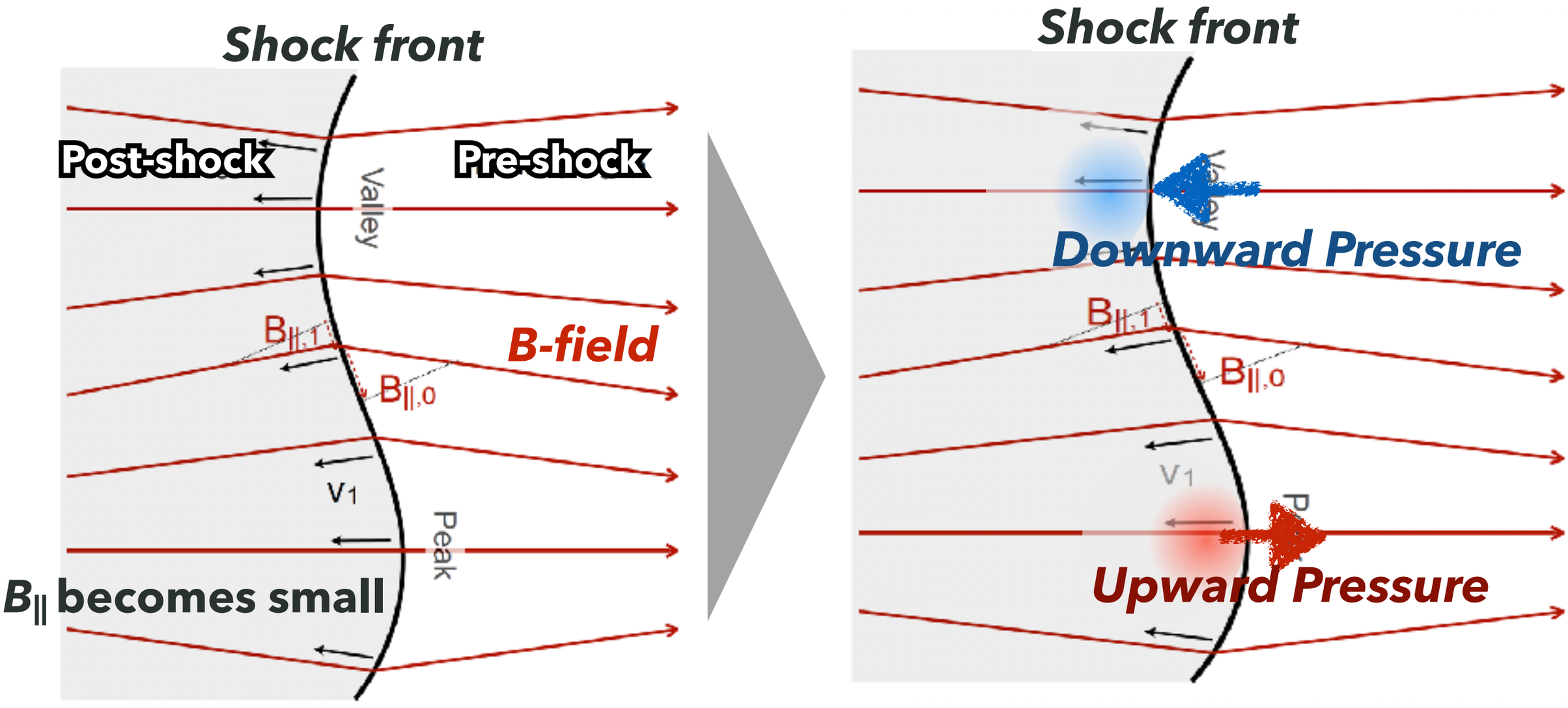
Slow mode: ガス圧と磁気圧が逆位相の圧縮性波動



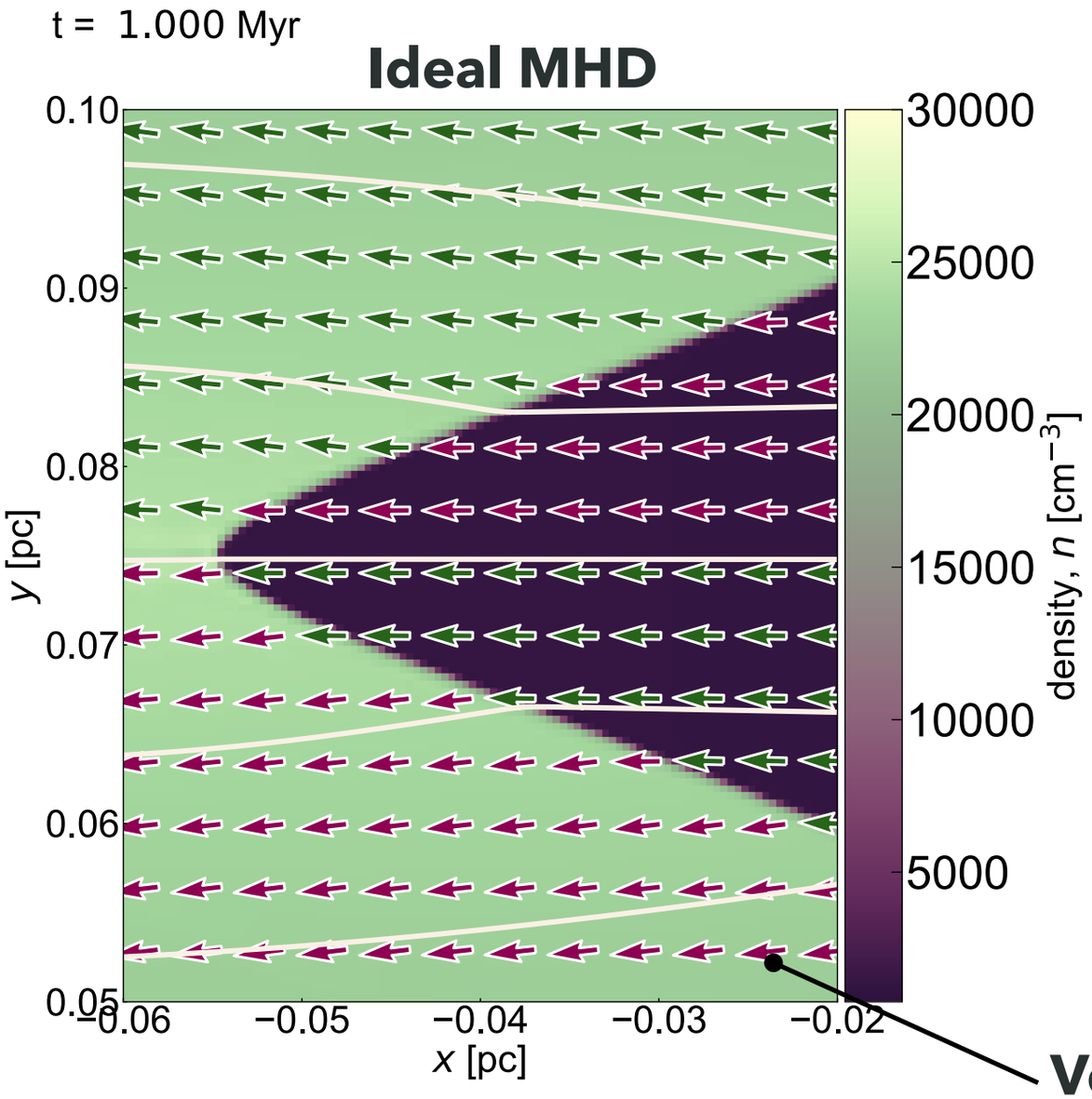
Slow-shock 不安定性の線形成長

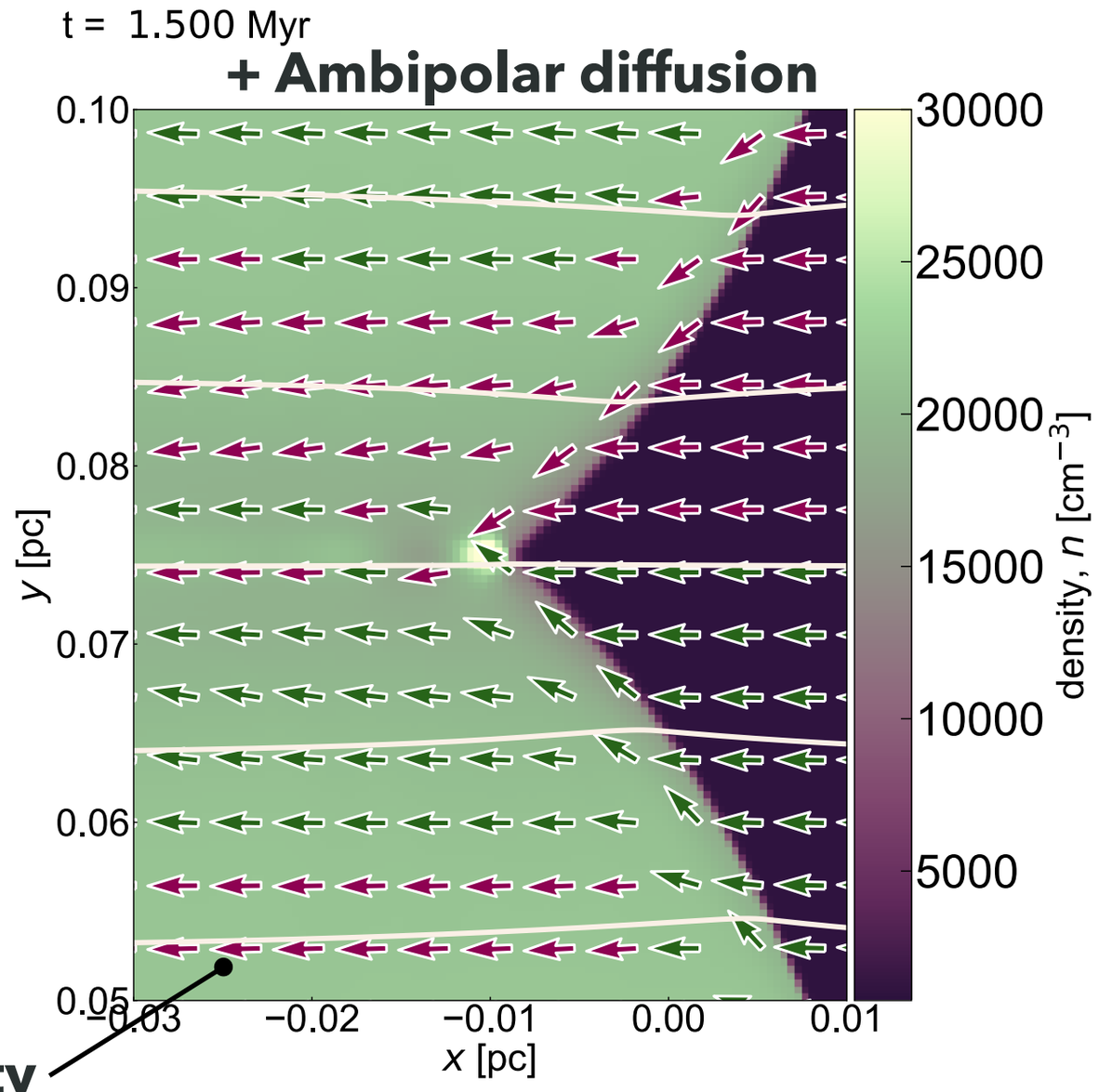
Slow-shock = *Slow mode*の衝撃波

Slow mode: ガス圧と磁気圧が逆位相の圧縮性波動



両極性拡散の効果



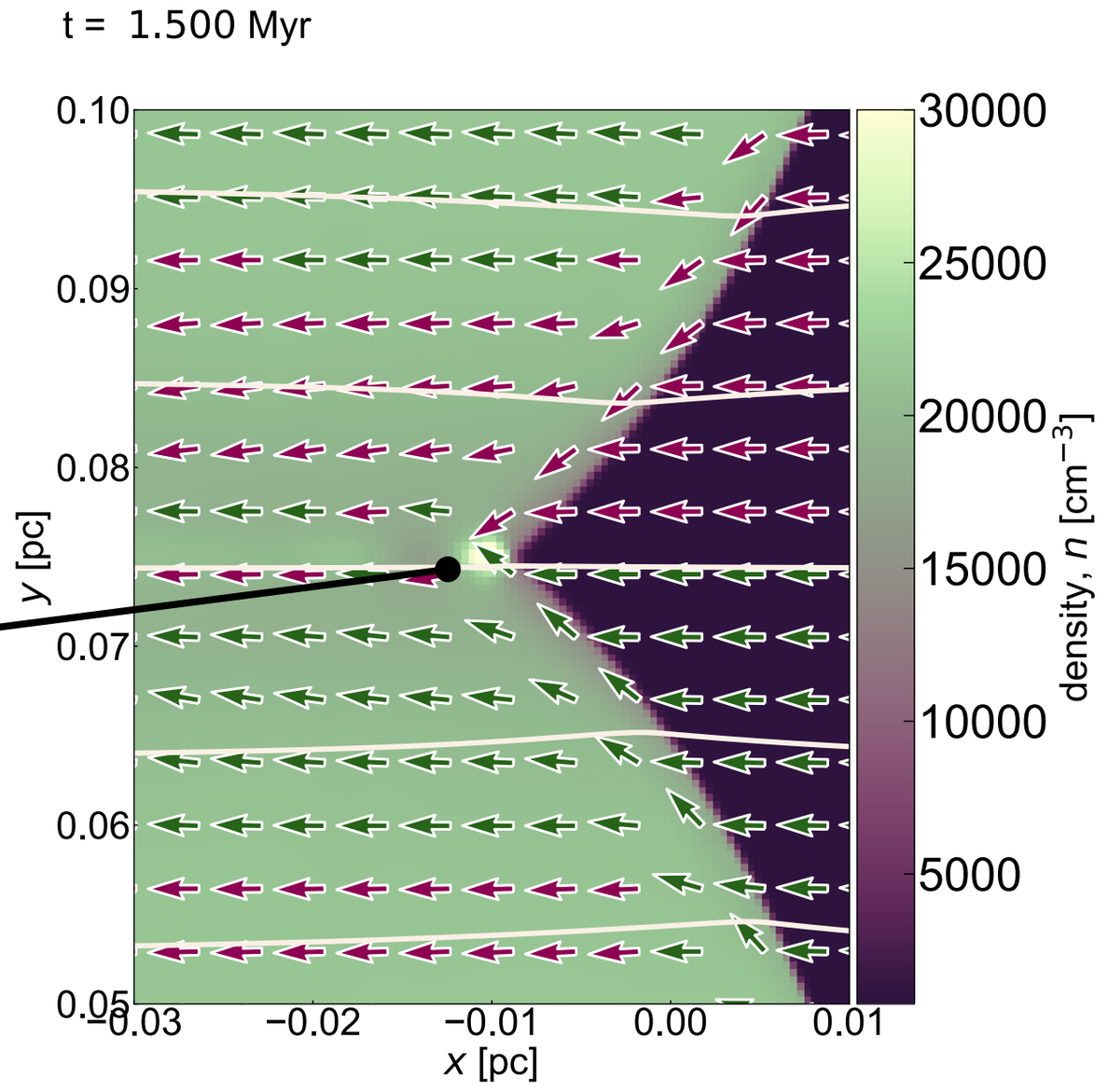


Velocity

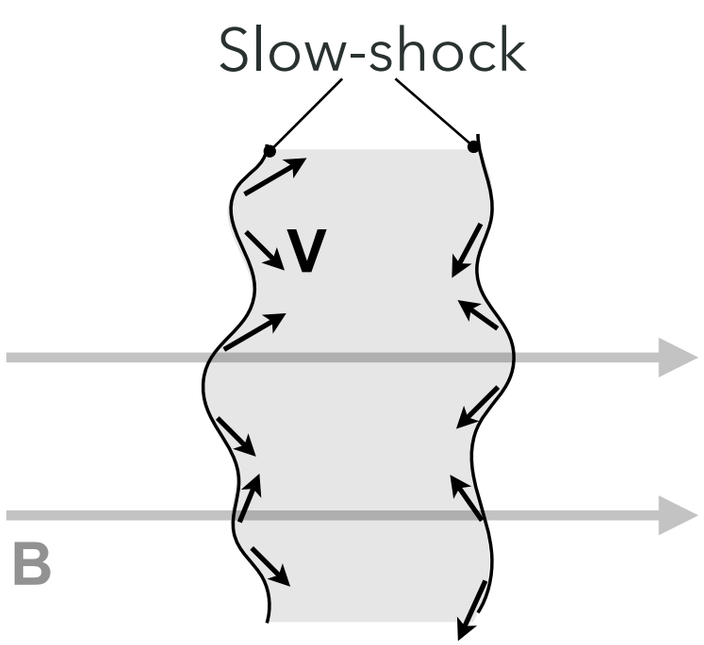
両極性拡散の効果

- 理想MHDの場合に比べて**低い成長率**
- 衝撃波面の凹部に向かう磁場を横切る流れが**高密度ガス塊**を作る

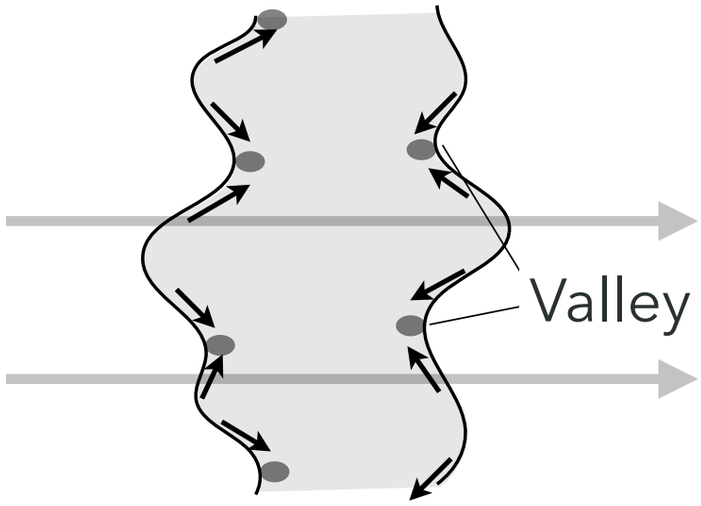
(see also Snow & Hillier 2022)



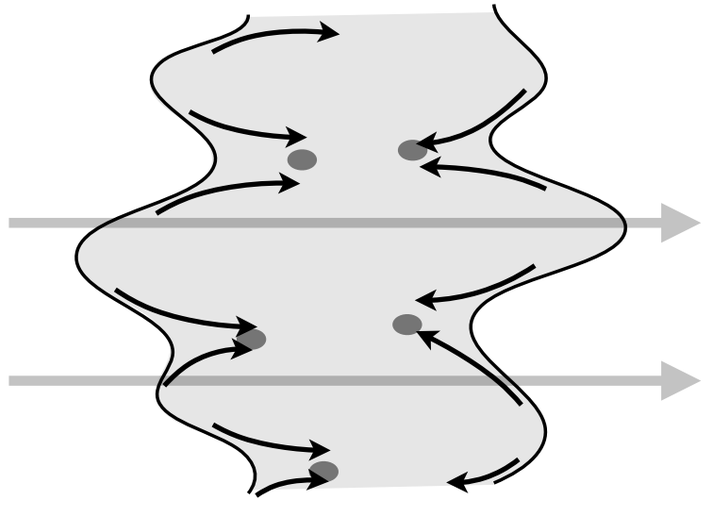
"STORM" *(**S**low-shock-mediated **T**urbulent fl**O**w **R**einforced by **M**agnetic diffusion)*



1. **両極性拡散**によって，衝撃波近傍で磁場を跨いだ運動が許される



2. 衝撃波の凹部にガスが溜まる



3. ガス塊がフィラメント内をかき混ぜる (非等方乱流)

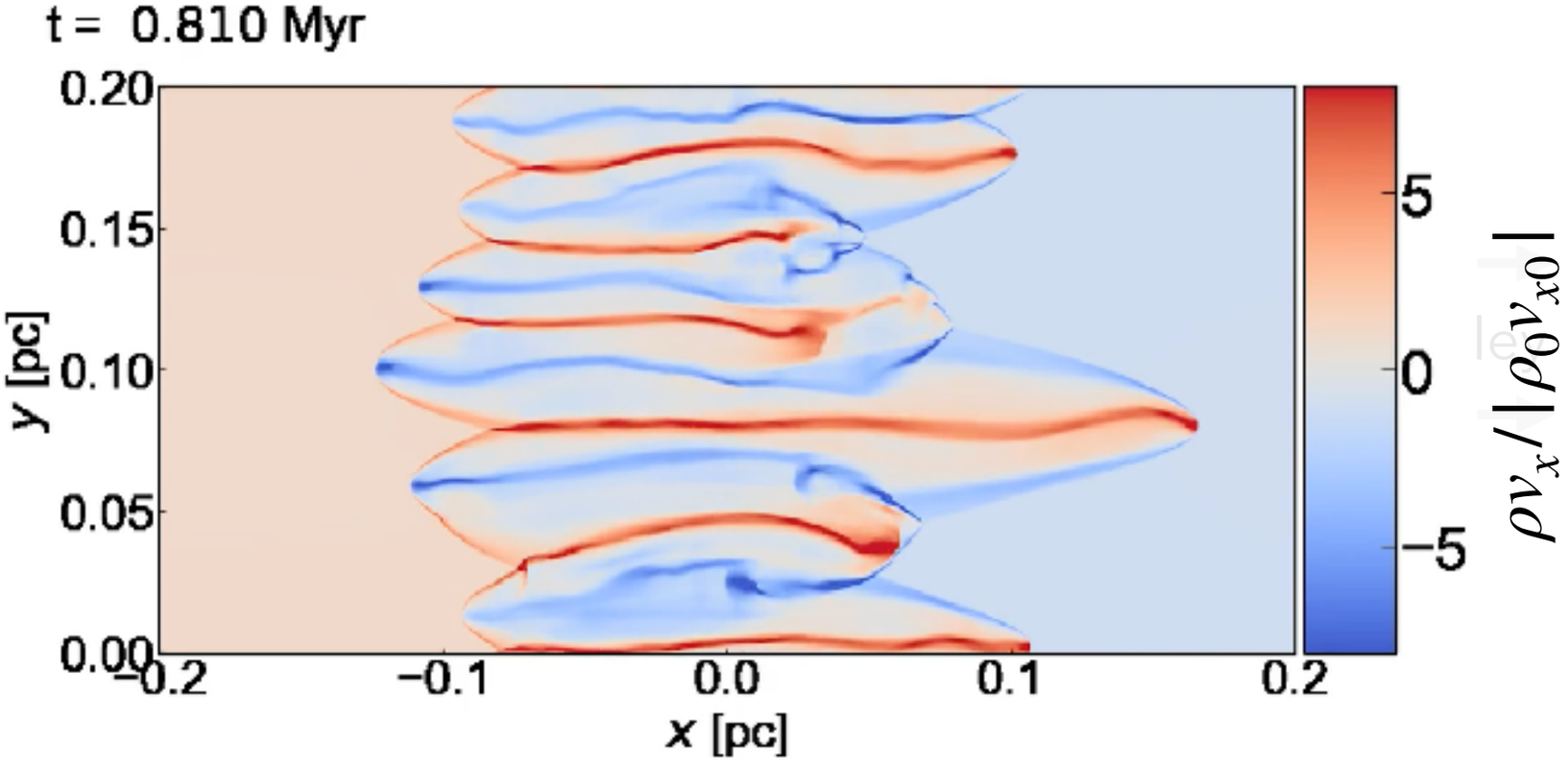
衝撃波面の揺らぎが成長し続ける(**波打不安定性**)

おかげで乱流駆動の効率が良い

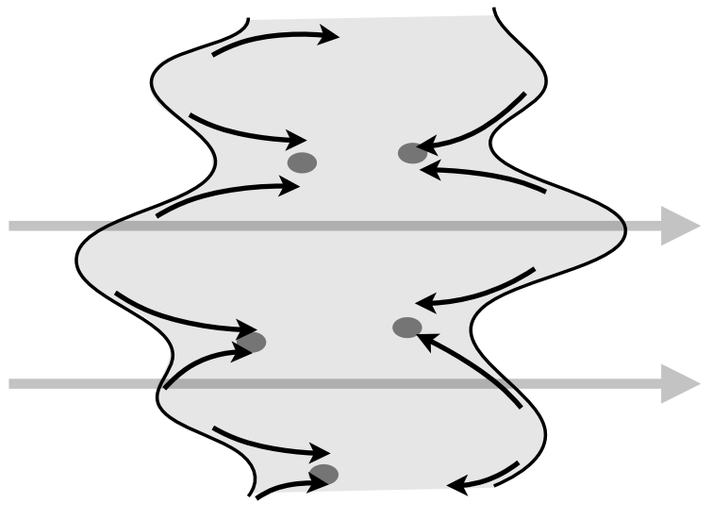
新しい乱流駆動のメカニズムを発見！(Abe et al. 2025)

``STORM" *(**S**low-shock-mediated **T**urbulent fl**O**w **R**einforced by **M**agnetic diffusion)*

Slow-shock



が許される



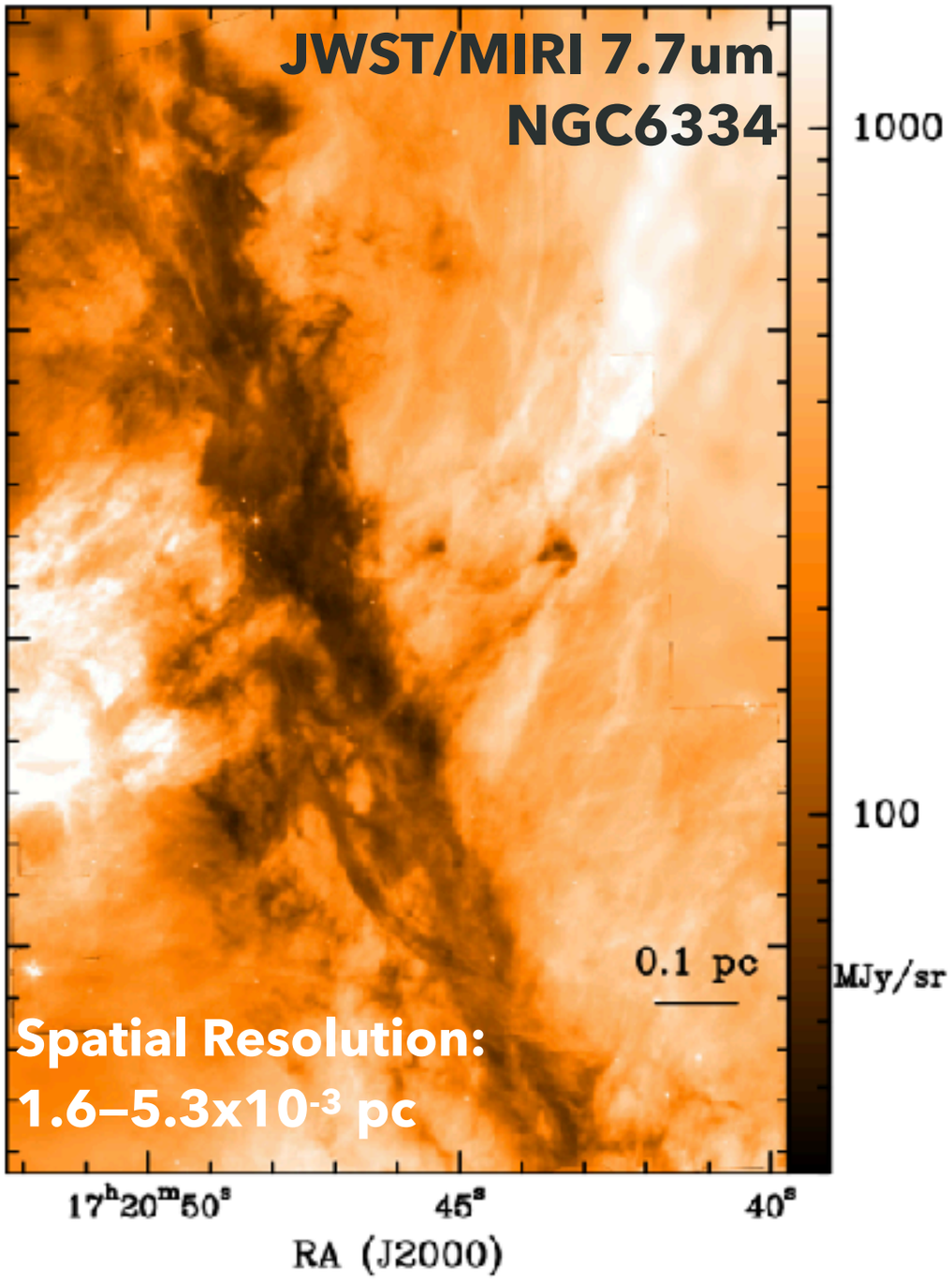
3. ガス塊がフィラメント内をかき混ぜる (非等方乱流)

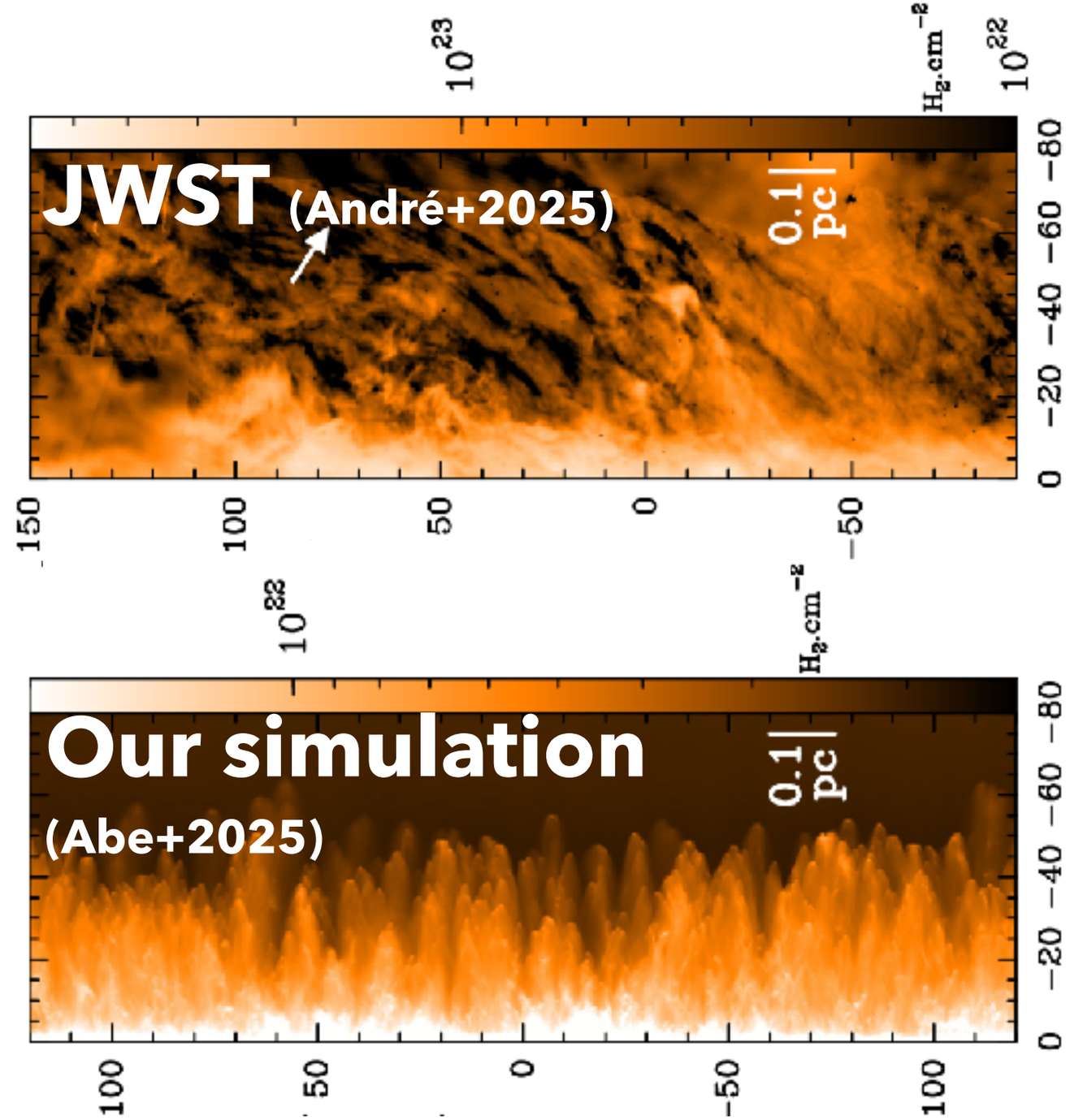
衝撃波面の揺らぎが成長し続ける(**波打不安定性**)

おかげで乱流駆動の効率が良い

新しい乱流駆動のメカニズムを発見！(Abe et al. 2025)

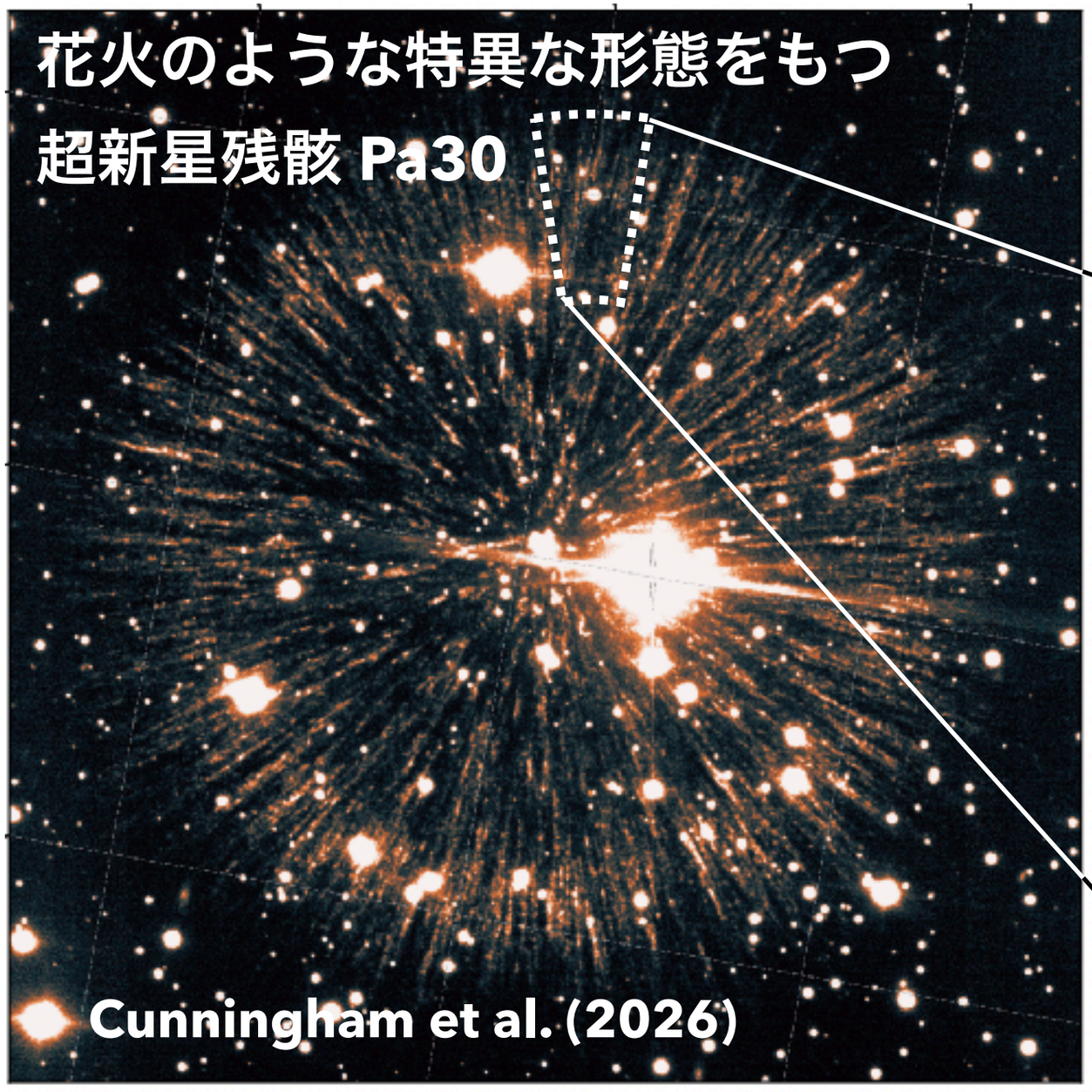
最新の観測との比較





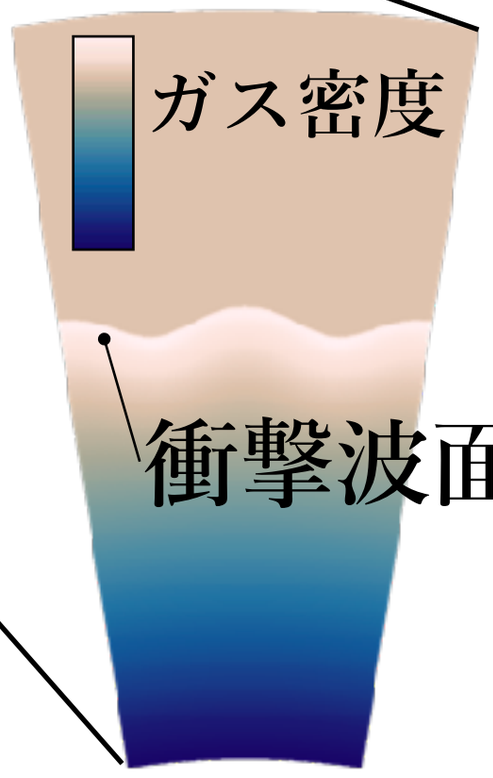
JWSTによるさまざまな観測的特徴と整合的

おまけ：僕も高エネルギーやりたい



超新星残骸の多様な進化の解明

樫山さんとの共同研究



RT不安定性？

Vishniac不安定性？

LD不安定性？

衝撃波が駆動する多様な天体現象の解明を目指して,

(星形成に限らず) 様々な研究テーマに挑戦したい

まとめ

STORM

*S*low-shock-mediated *T*urbulent fl*O*w *R*einforced by *M*agnetic diffusion

This may provide a solution to the “0.1 pc problem”

Discussion: Line mass v.s. FWHM (Theoretical Model)

Thermally supported filament w/ external gas pressure
Fischera & Martin (2012)

