

星間媒質中を高速移動するブラックホールが形成する星間コントレイルと 新たなブラックホール検出法の提案

きたじま かんた

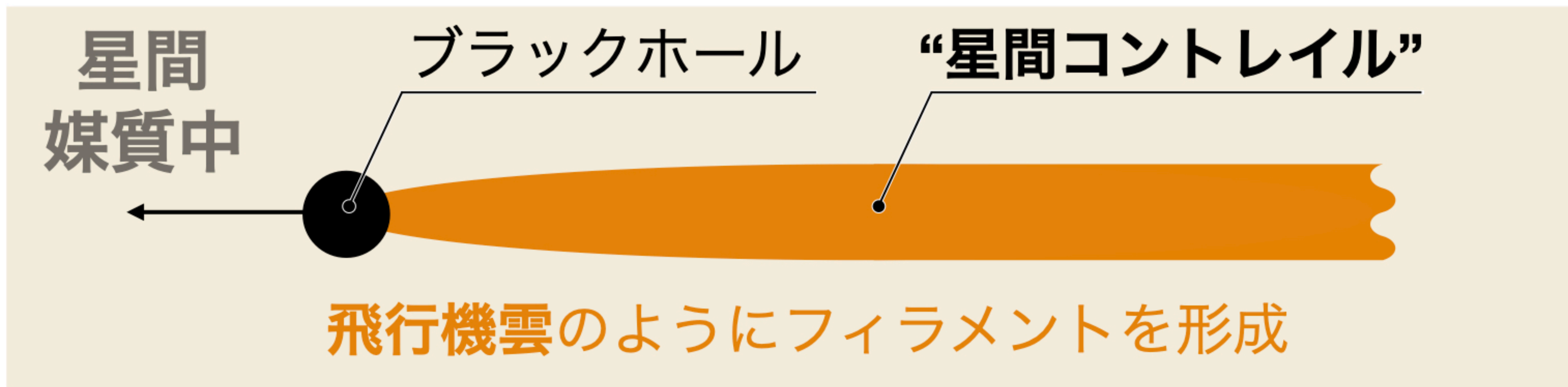
北島 歓大(名古屋大学, D2),

犬塚 修一郎, 北 郁奈(名古屋大学)



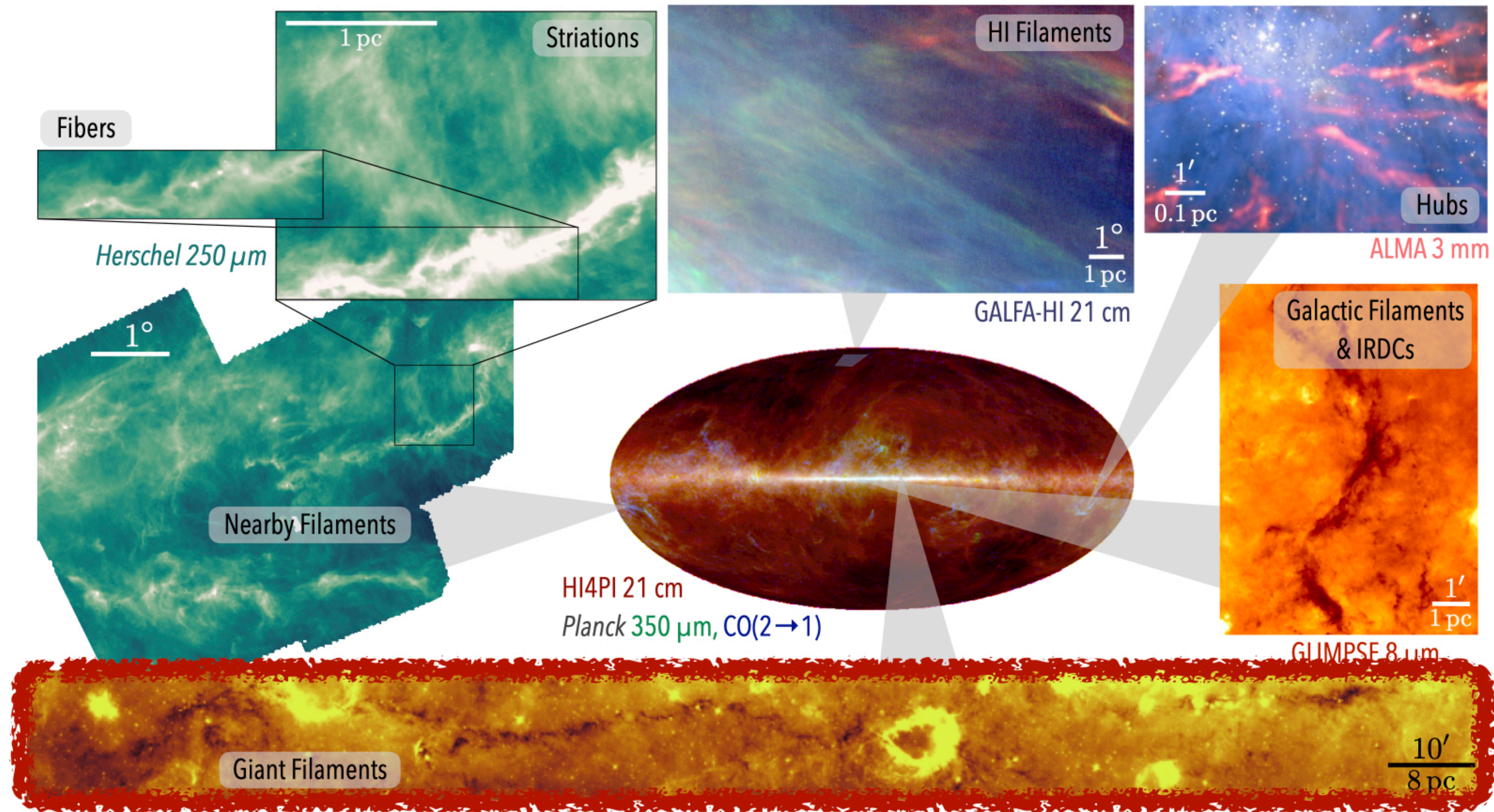
ApJ 945 39

星間コントレイルモデル



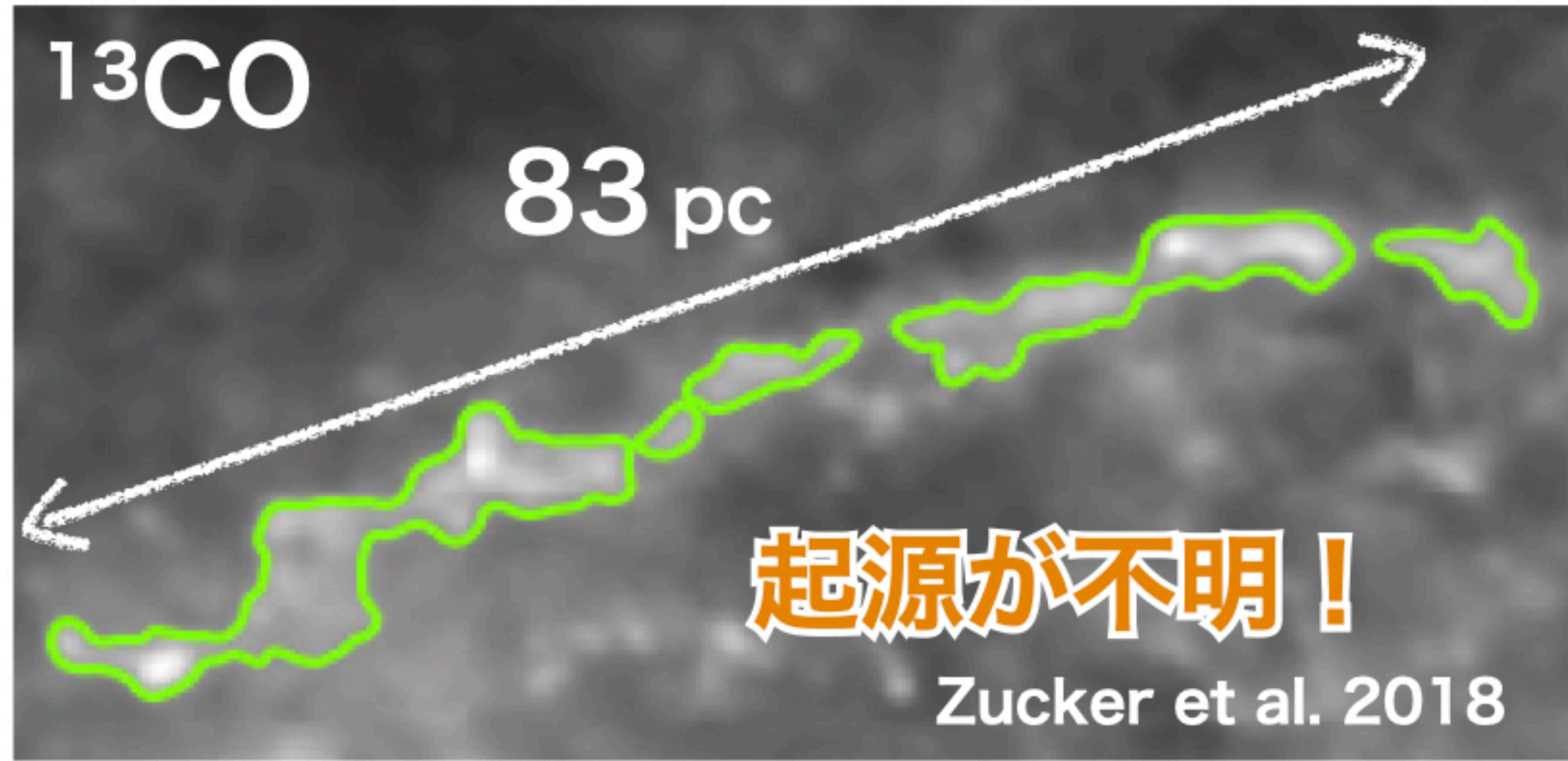
$10^4 M_{\odot}$ のブラックホールで **100 pc** の長さのフィラメントを形成可能！

種々のスケールを持つフィラメントの観測例



Hacar et al. (2022)

■ Giant Filaments

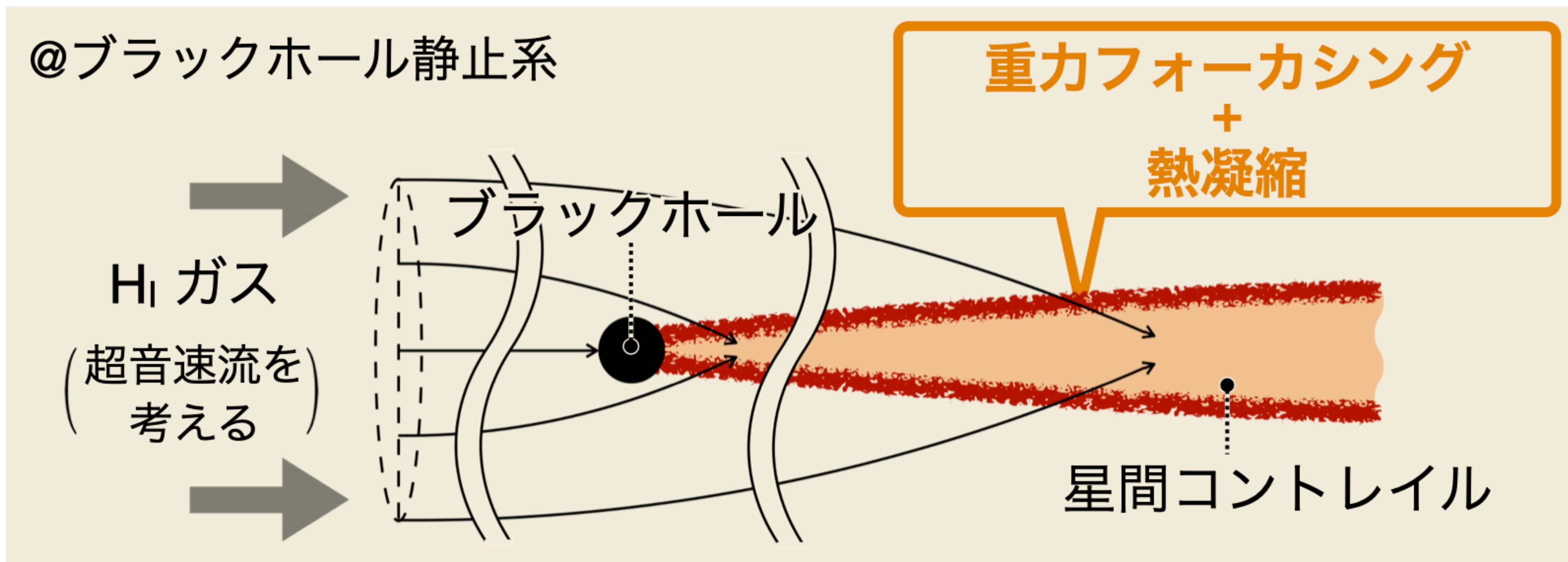


{ 観測数：~ 50
長さ：~ **100 pc**

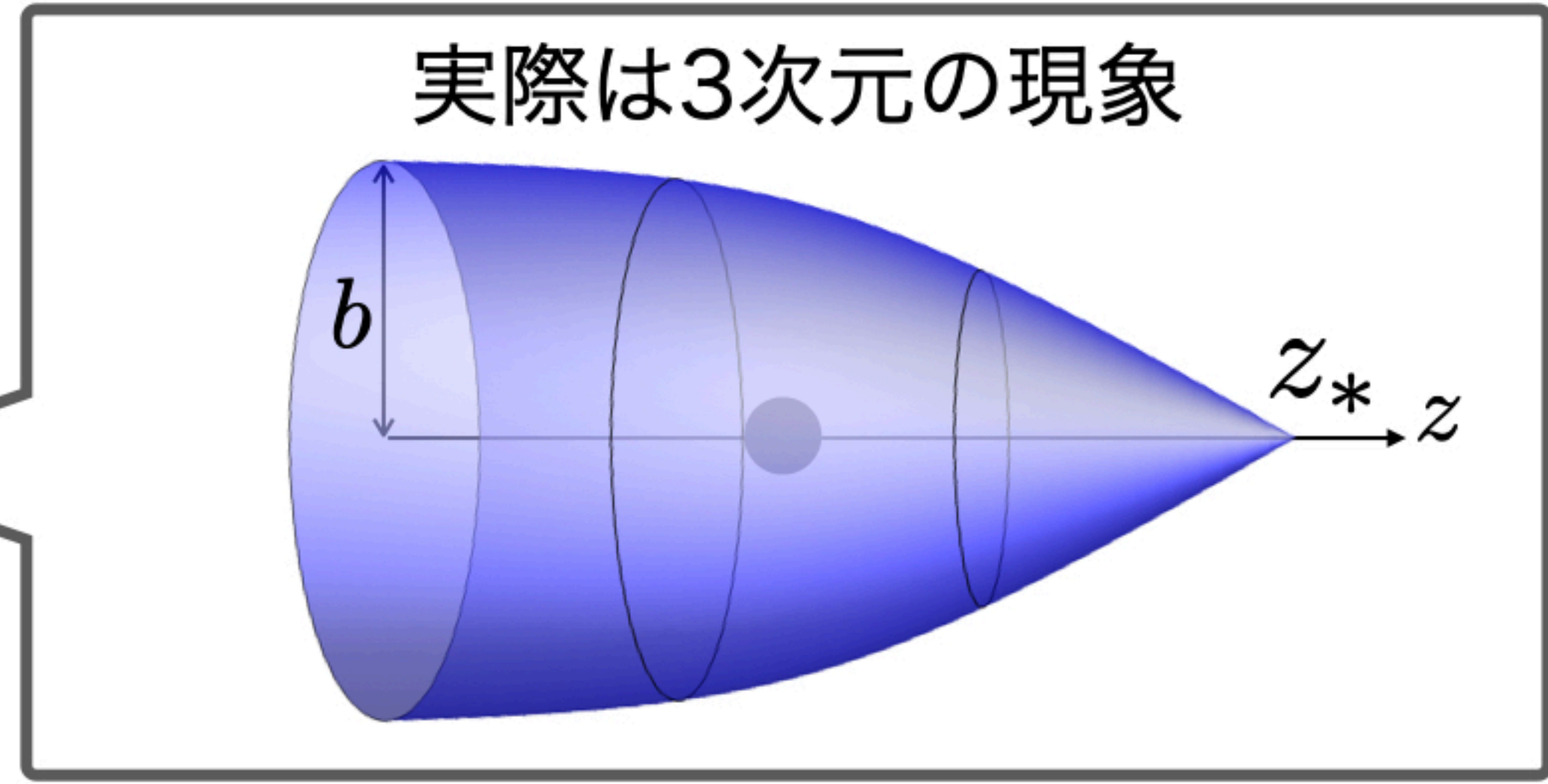
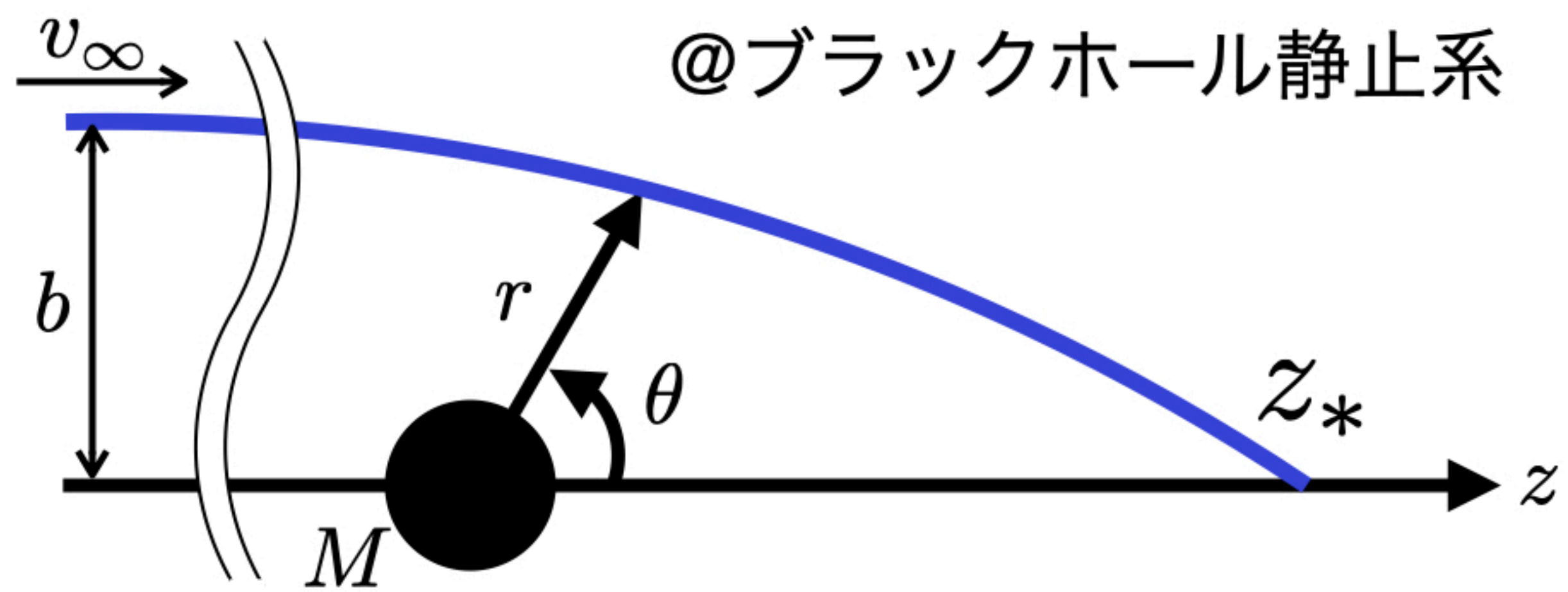
≧ 分子雲の典型的な
長さスケール ~ 10 pc

100 pcもの構造を形成するには、
星間媒質中の乱流で乱されるより早く形成する必要がある。

■ 星間コントレイルモデル [Kitajima & Inutsuka 2023]



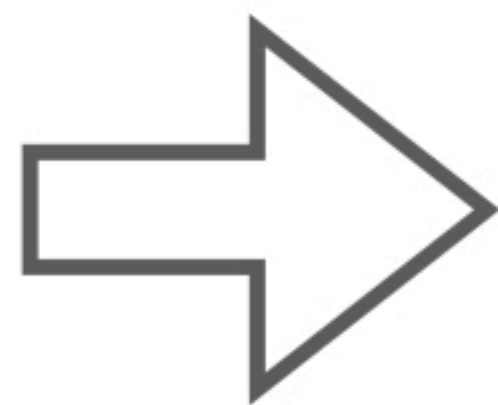
“ブラックホール” と “星間コントレイル” との関係は？



■ ガスの軌跡

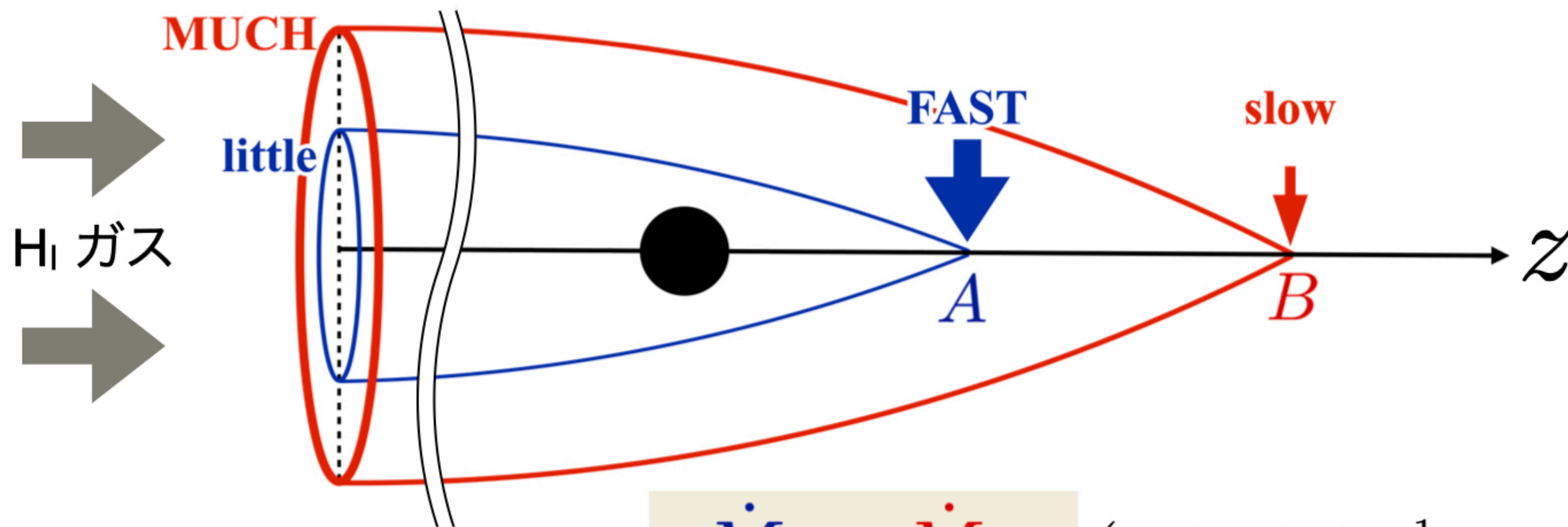
強重力下ではガス同士の相互作用を無視できると仮定 → **Kepler運動**

$$\begin{cases} r^2 \dot{\theta} = -bv_{\infty} \text{ (角運動量保存)} \\ \ddot{r} - r\dot{\theta}^2 = -\frac{GM}{r^2} \\ \lim_{\theta \rightarrow \pi} r \rightarrow \infty, \quad \lim_{\theta \rightarrow \pi} \dot{r} \rightarrow -v_{\infty} \end{cases}$$



$$r = \frac{b^2 v_{\infty}^2}{GM(1 + \cos \theta) + bv_{\infty}^2 \sin \theta}$$

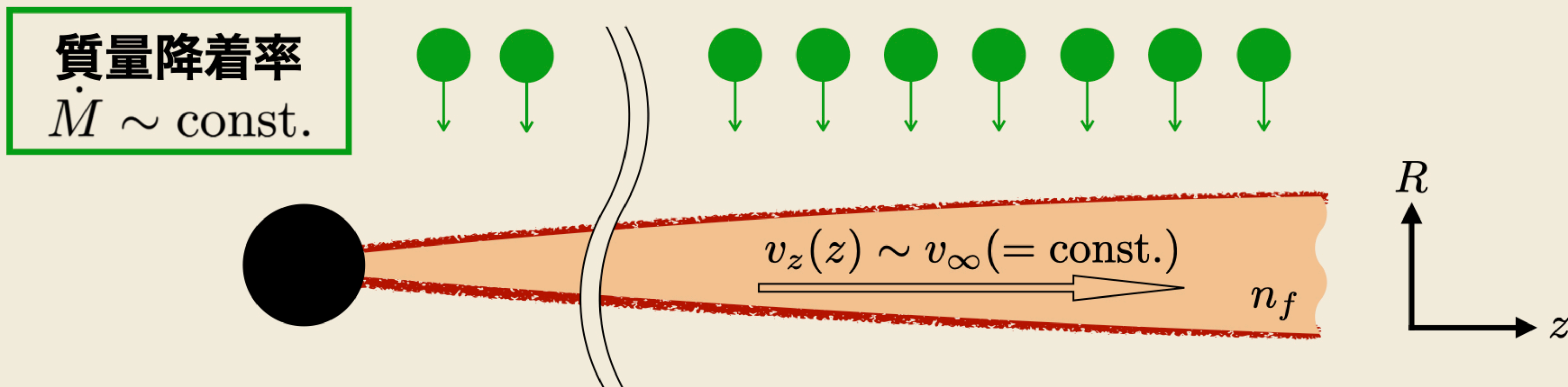
■ z軸上の1点への質量降着率



$$\dot{M}_A = \dot{M}_B \quad (= 2\pi GMv_\infty^{-1}n_\infty \cdot \mu m_p)$$

星間コントレイルモデルは長大な構造を形成し得る

フィラメント境界面の見積もり

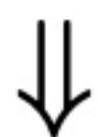


フィラメント内部の速度・線密度

十分遠方では重力源の影響をほとんど受けないので、

内部の速度は初期速度と同じと仮定。

$$v_z(z) \sim v_\infty (\text{const.}) \quad (\text{遠方において})$$



フィラメントの線密度 $m \propto z$

衝撃波面の位置

フィラメントの数密度 n_f が一定と仮定。



衝撃波面の位置 = フィラメントの境界面

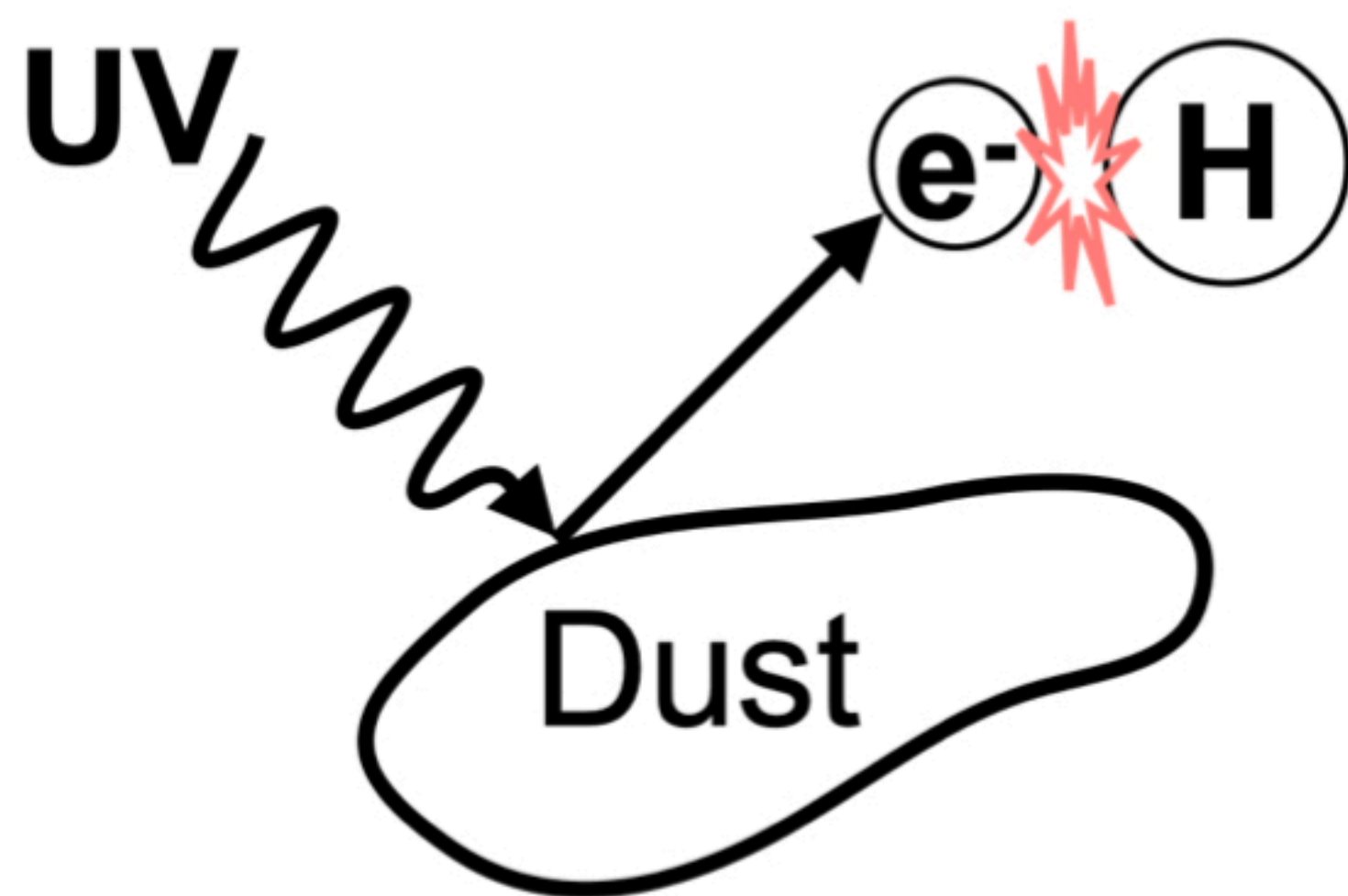
$$R \propto z^{1/2}$$

H_Iガスの主な加熱冷却機構

■ 加熱冷却機構

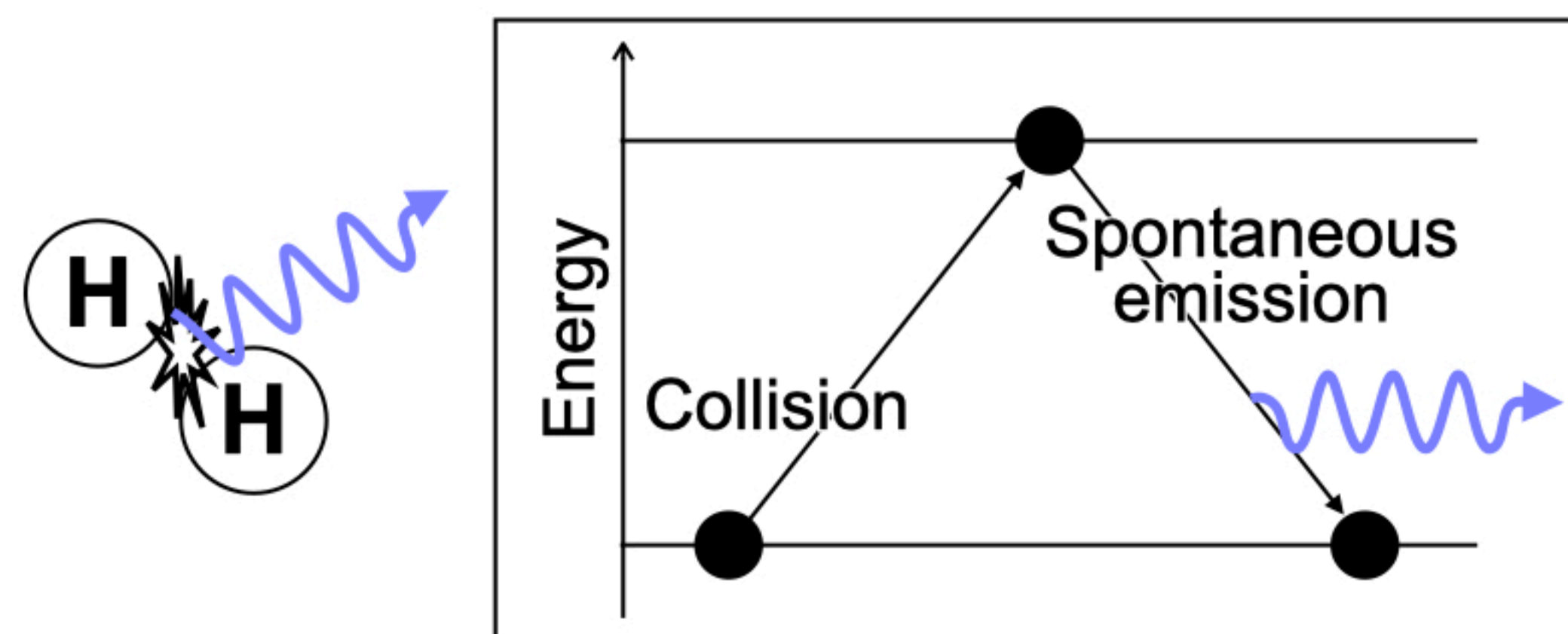
H_Iガスは以下のような**加熱**と**冷却**が釣り合って熱平衡状態にある。

光電加熱



ダストからの電子によって加熱される

輝線冷却

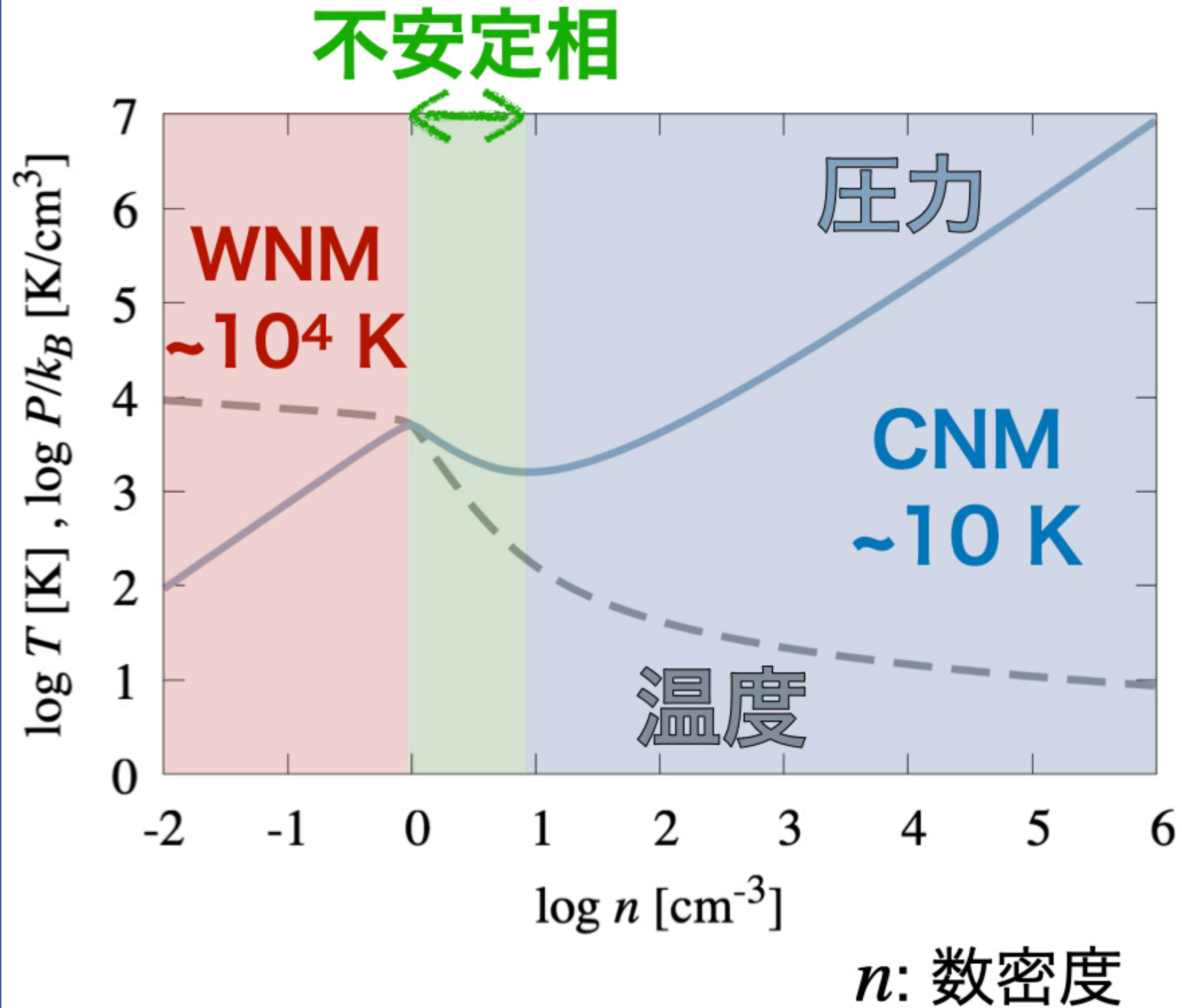


Ly- α やCIIの微細構造線が主に寄与する。

運動エネルギー \Rightarrow 光エネルギー

H_Iガスの多相構造

■ 熱平衡状態曲線



■ 不安定相

$$\frac{dP}{dn} < 0 \rightarrow \text{不安定!}$$

■ 安定相

Warm Neutral Medium (WNM)

- 銀河の大部分を占める

Cold Neutral Medium (CNM)

- 分子雲となる前段階
- 典型的なサイズは10 pc程度

安定相に存在するHIガスを進化させるには
大きな擾乱(衝撃波)が必要→“熱凝縮”

熱凝縮による観測可能性

■ 熱凝縮 [e.g., Koyama & Inutsuka 2000]

- ① 衝撃波によって圧縮
- ② 圧力ほぼ一定で平衡状態へと緩和する

■ 可観測性

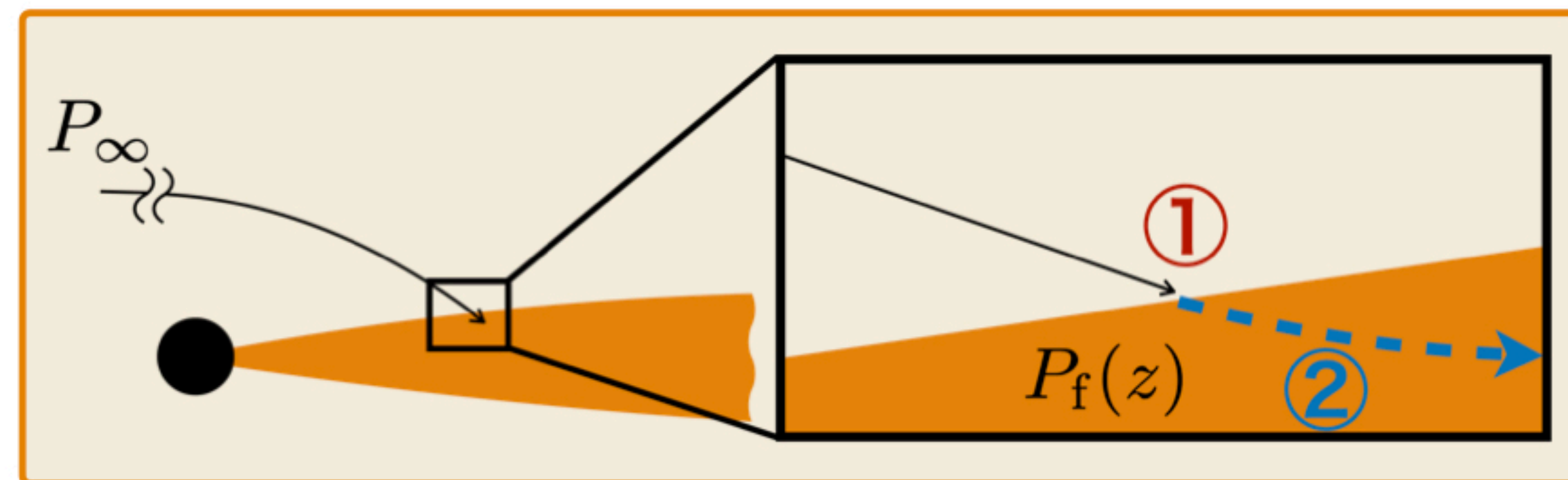
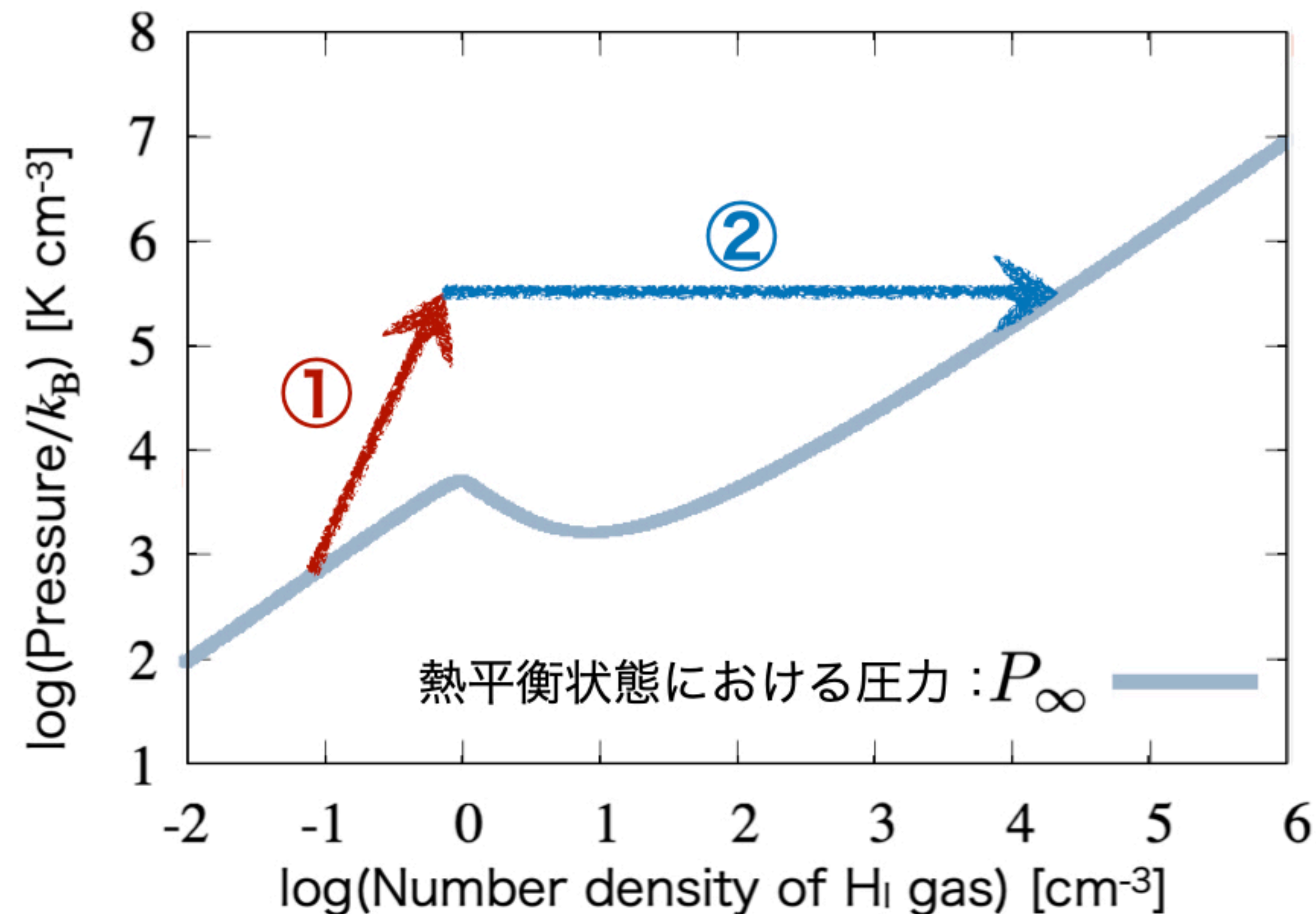
熱凝縮によって周りのガスより**10倍以上濃くなる**と観測されると仮定；

$$P_f(z) \geq P_{\text{crit}}.$$

観測されるほどの熱凝縮が起こる

限界の距離 L_{pt} は次のように表される；

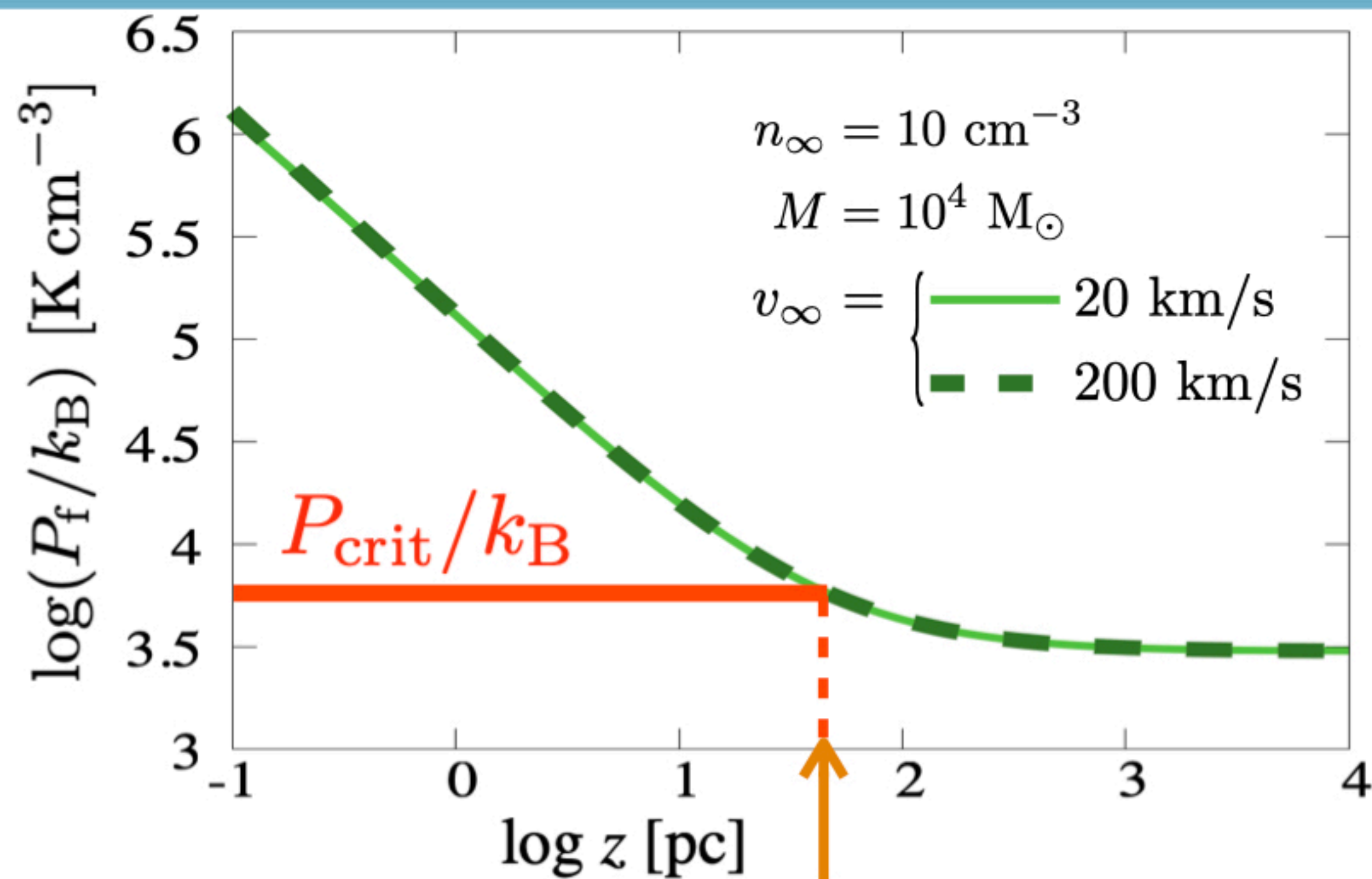
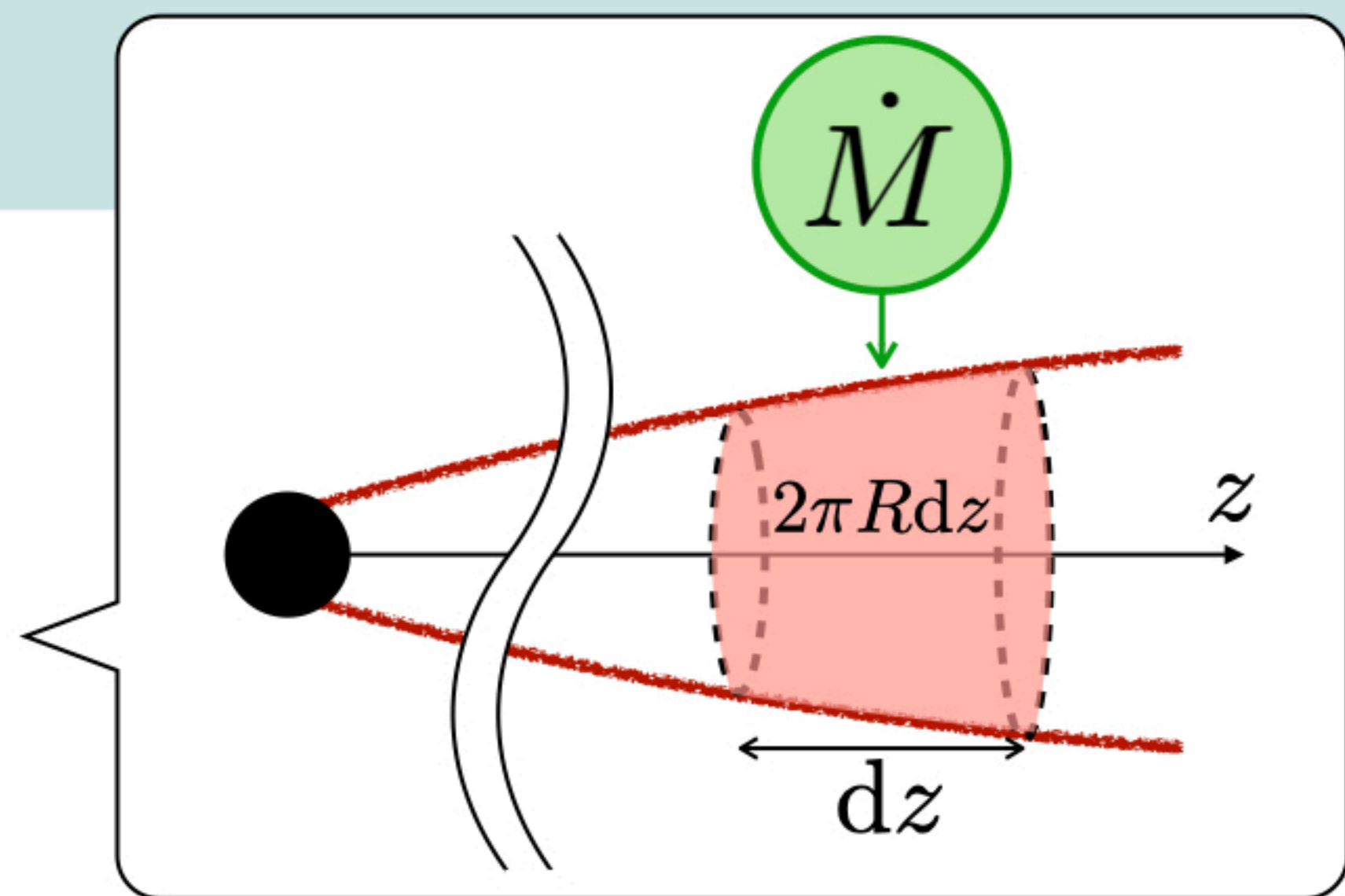
$$P_f(z = L_{\text{pt}}) \approx P_{\text{crit}}.$$



フィラメント内部の圧力

- 運動量保存則からフィラメント内部の圧力を見積もる

$$P_f \approx \dot{M} dz v_\theta \cdot \frac{1}{2\pi R dz} + \left(\text{衝撃波前面の圧力} \right)$$



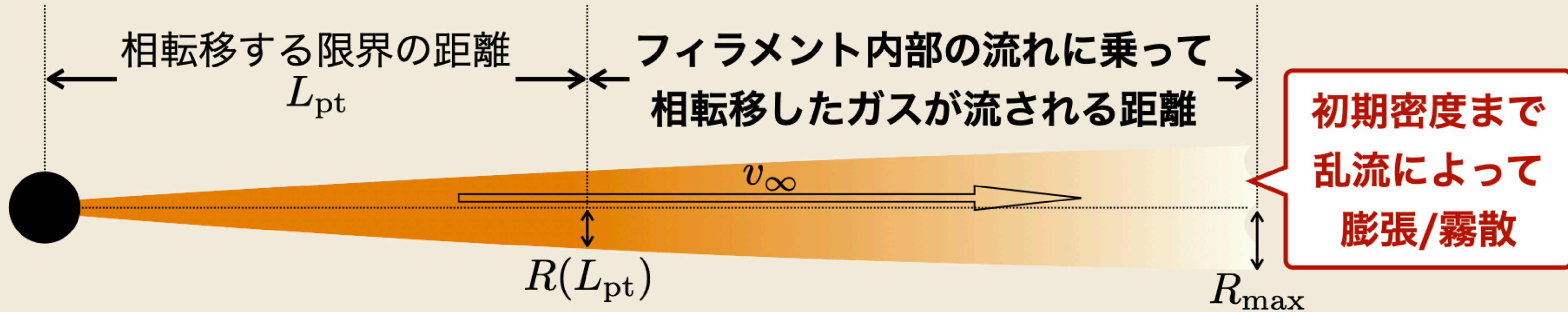
L_{pt} : 熱凝縮の限界

角運動量保存から、
運動量流速は v_∞ に依らない

P_f も v_∞ に依らない。

$P_f(z = L_{\text{pt}}) \approx P_{\text{crit}}$ より、
 L_{pt} も v_∞ に依らない。

フィラメントの長さ



■ 流されるタイムスケール

質量保存則

$$\pi R^2(L_{pt})n_f = \pi R_{max}^2 n_{\infty}$$

乱流の速度: $\sim c_s(n_f)$ n_f : L_{pt} における数密度

$$\Rightarrow \tau_d := \frac{R_{max} - R(L_{pt})}{c_s(n_f)}$$

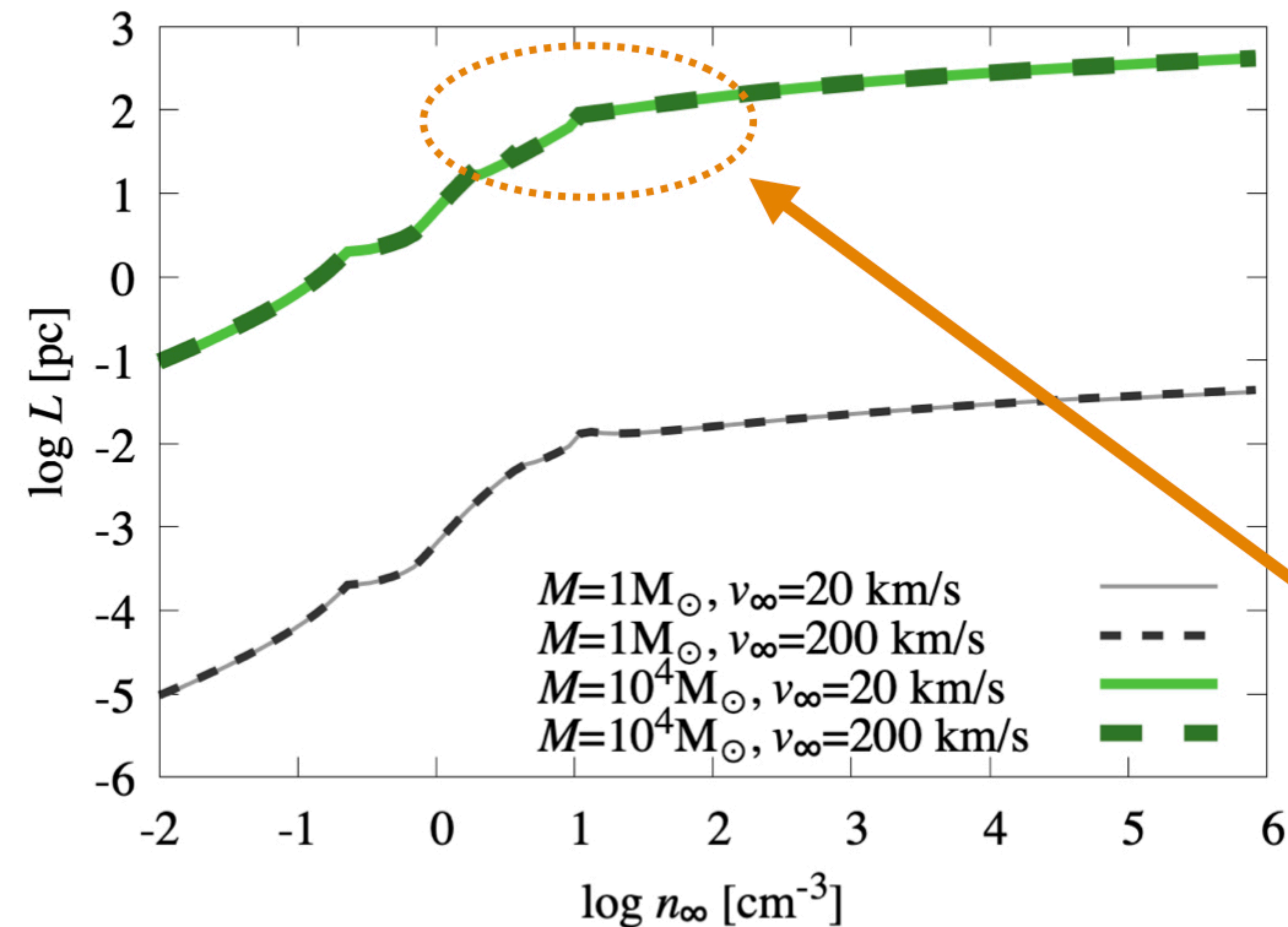
■ フィラメントの長さ

フィラメント内部の速度 $\sim v_{\infty}$

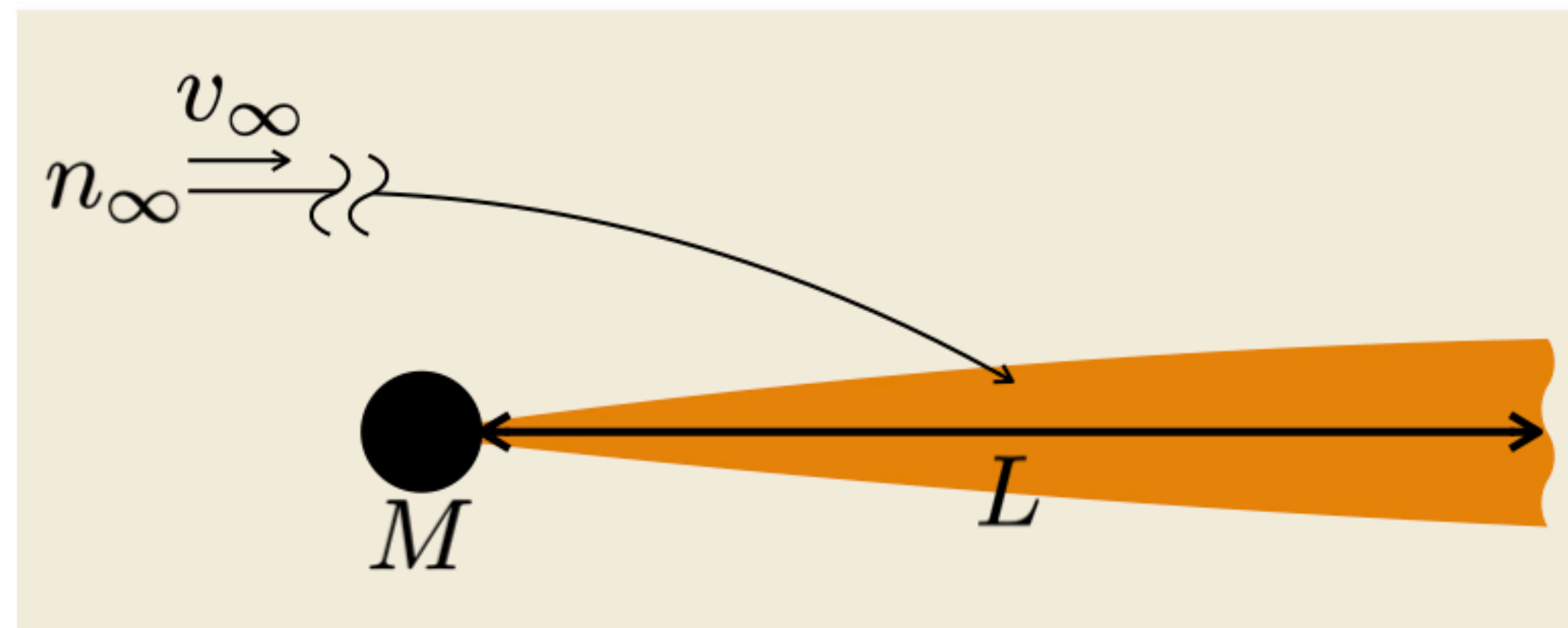
流れる距離 = $\tau_d v_{\infty}$

$$\Rightarrow L := L_{pt} + \tau_d v_{\infty}$$

結果 | フィラメントの長さ



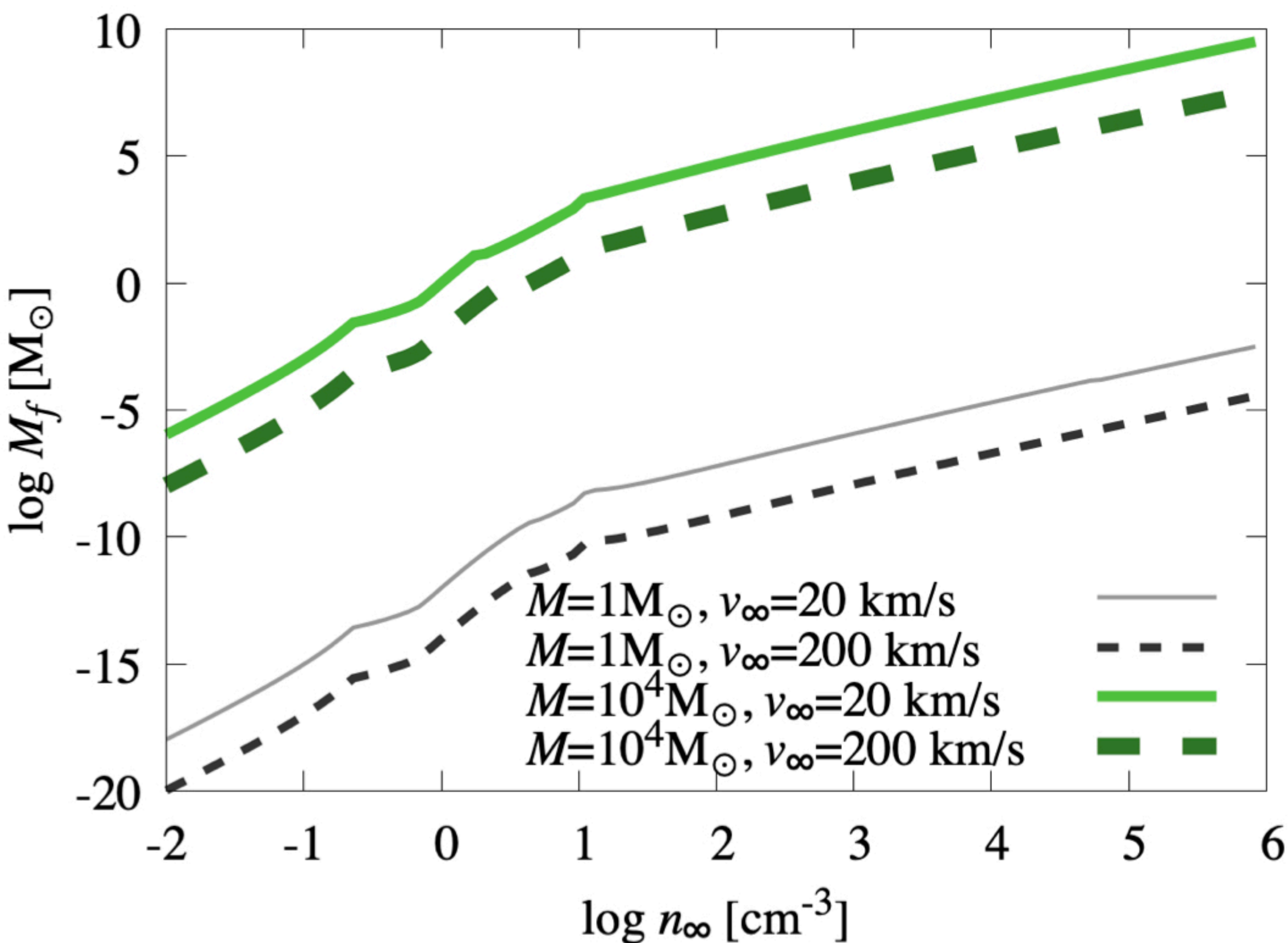
n_{∞} : HIガスの数密度



**Giant filament 程度の
フィラメントが形成される**

$$L \approx 78.3 \text{ pc} \left(\frac{M}{10^4 M_{\odot}} \right) \left(\frac{n_{\infty}}{20 \text{ cm}^{-3}} \right) \times \left(\frac{P_{\text{crit}}/k_{\text{B}}}{10^{3.82} \text{ K cm}^{-3}} \right)^{-1}$$

結果 | フィラメントの総質量



v_∞ が大きいほど形成の
タイムスケールが短くなる。

ガスの降ってくる時間が短いので
小質量なフィラメントができる。

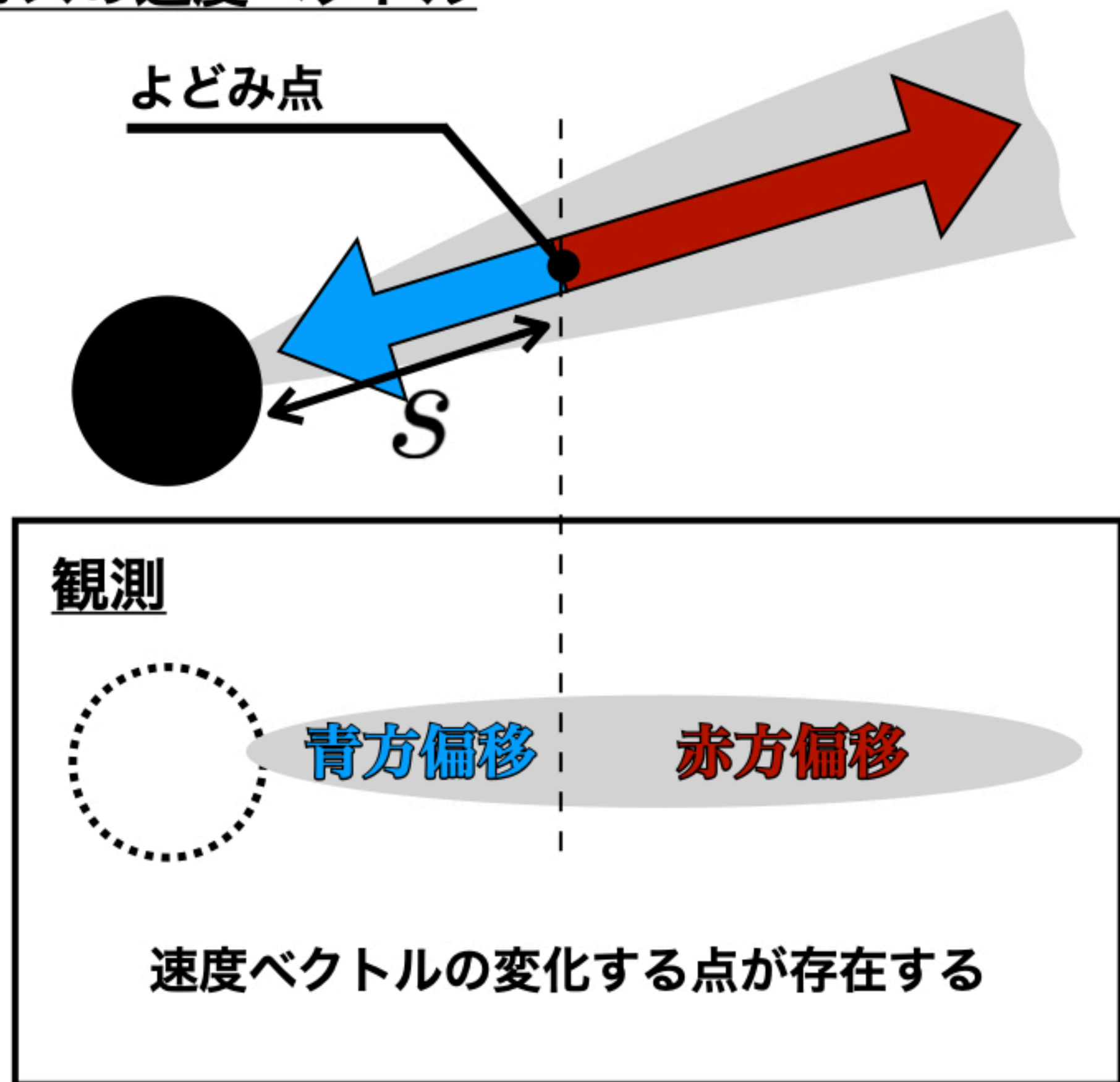
長さは v_∞ に依らないので
細長いフィラメントができる!

$$M_f \approx 2.55 \times 10^3 M_\odot \left(\frac{M}{10^4 M_\odot} \right)^3 \left(\frac{v_\infty}{20 \text{ km s}^{-1}} \right)^{-2} \left(\frac{n_\infty}{20 \text{ cm}^{-3}} \right)^3 \left(\frac{P_{\text{crit}}/k_B}{10^{3.82} \text{ K cm}^{-3}} \right)^{-2}$$

どのように星間コントレイルを識別するのか？

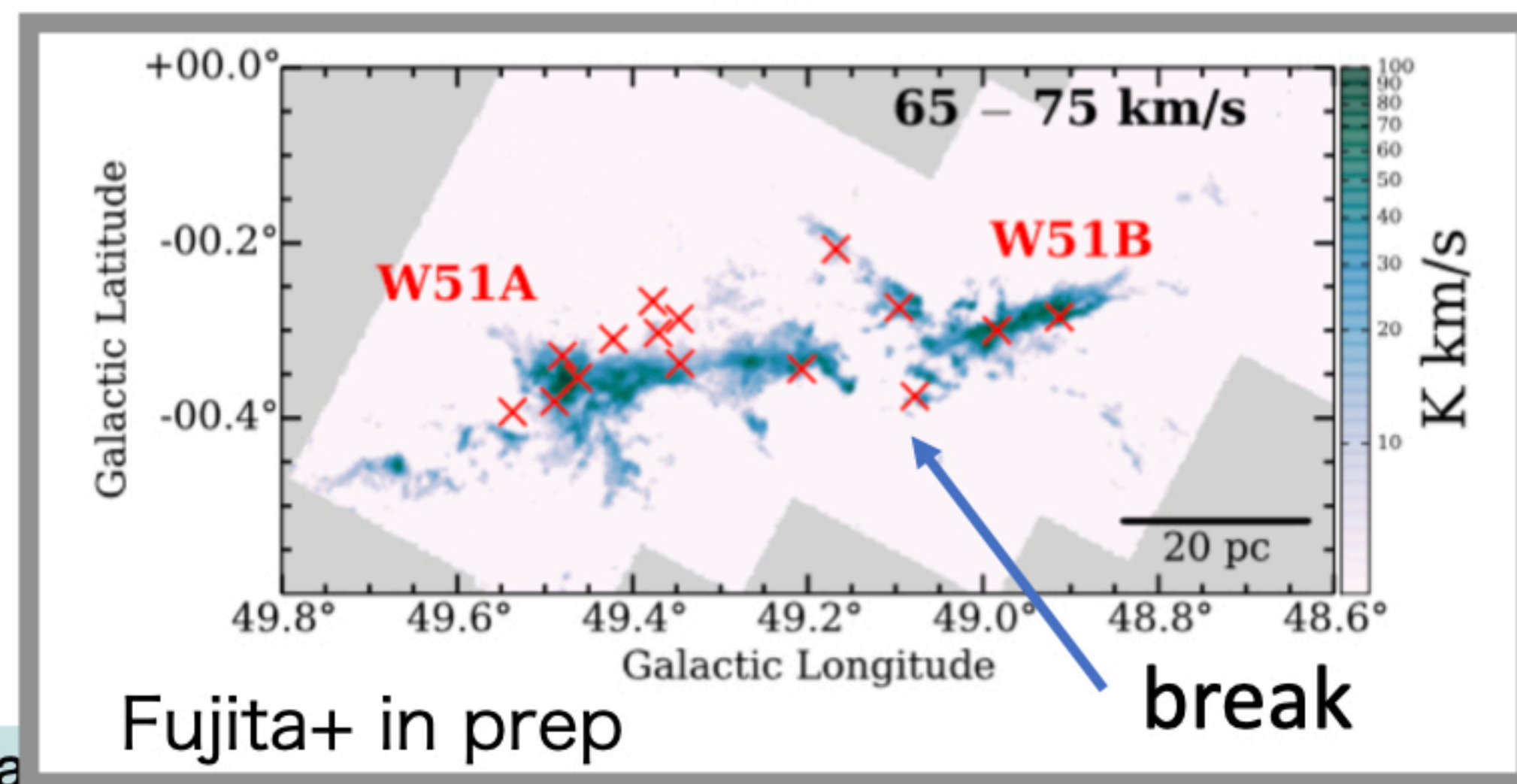
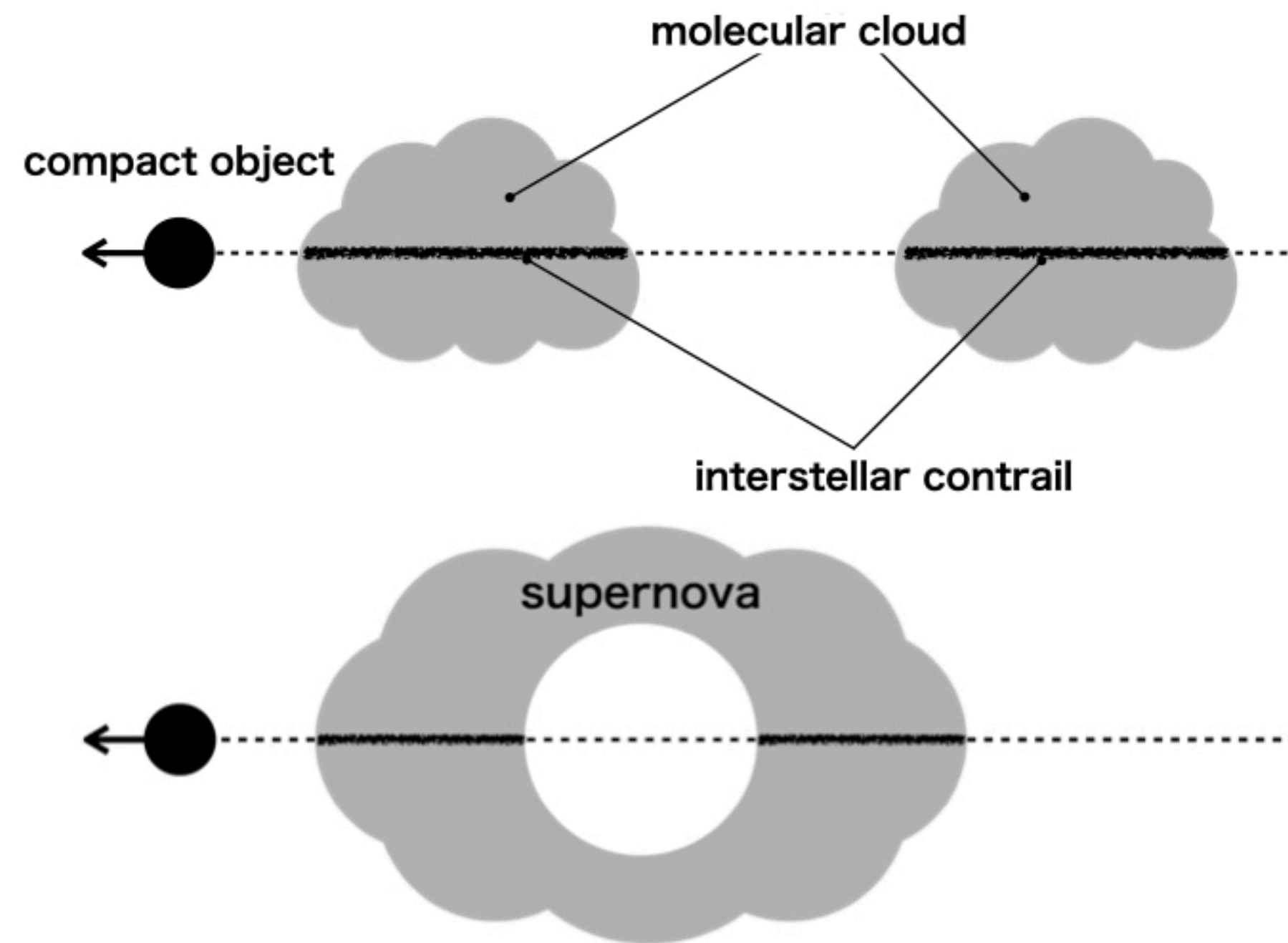
■ よどみ点

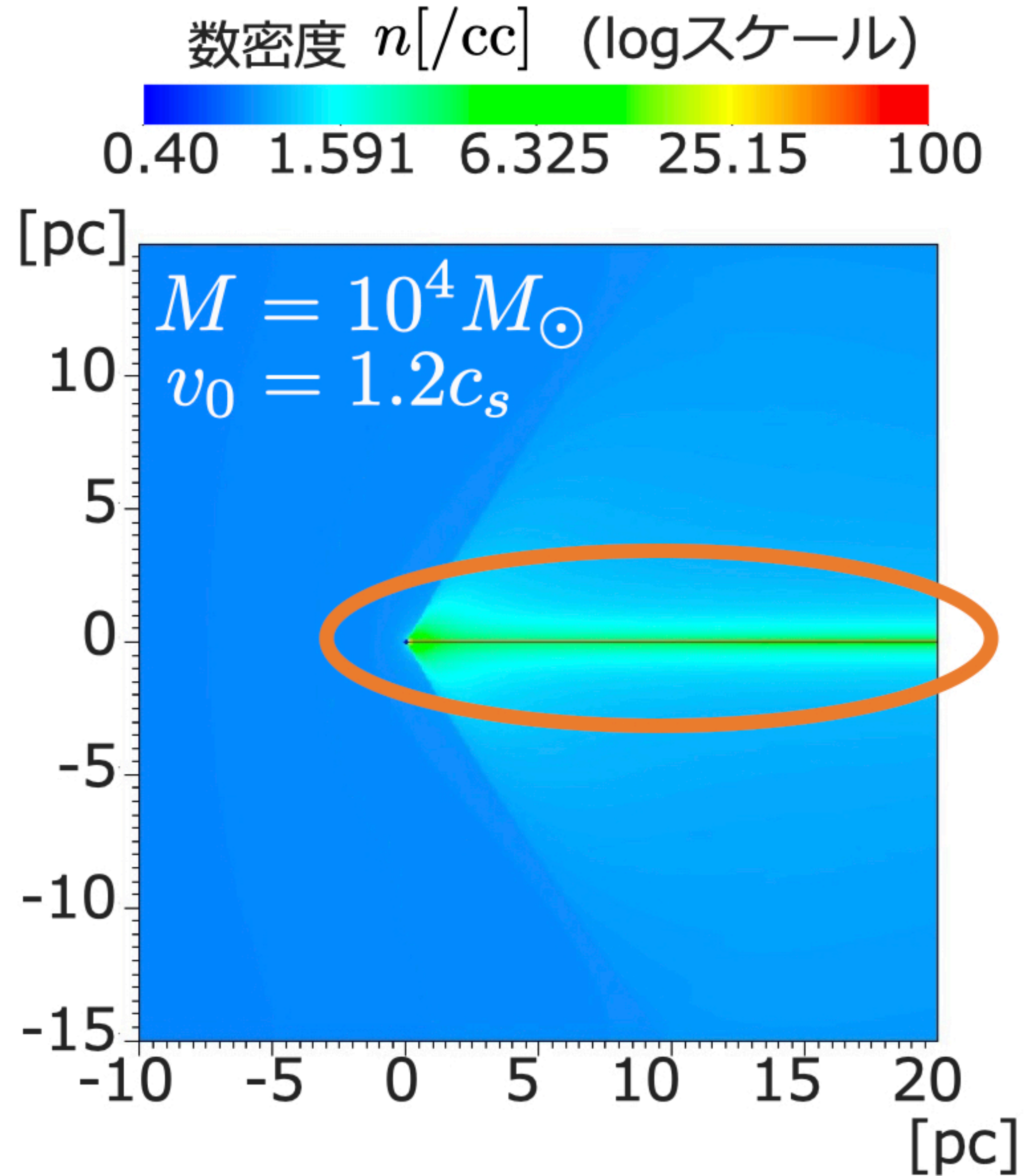
ガスの速度ベクトル



$$s \sim \frac{2GM}{v_\infty^2} = 4.43 \text{ au} \left(\frac{M}{1 M_\odot} \right) \left(\frac{v_\infty}{200 \text{ km/s}} \right)^{-2}$$

■ 途切れたフィラメント





$$M = 10^4 M_{\odot}$$
$$v_{\infty} \sim 10 \text{ km/s}$$
$$n_{\infty} = 0.8 \text{ cm}^{-3}$$

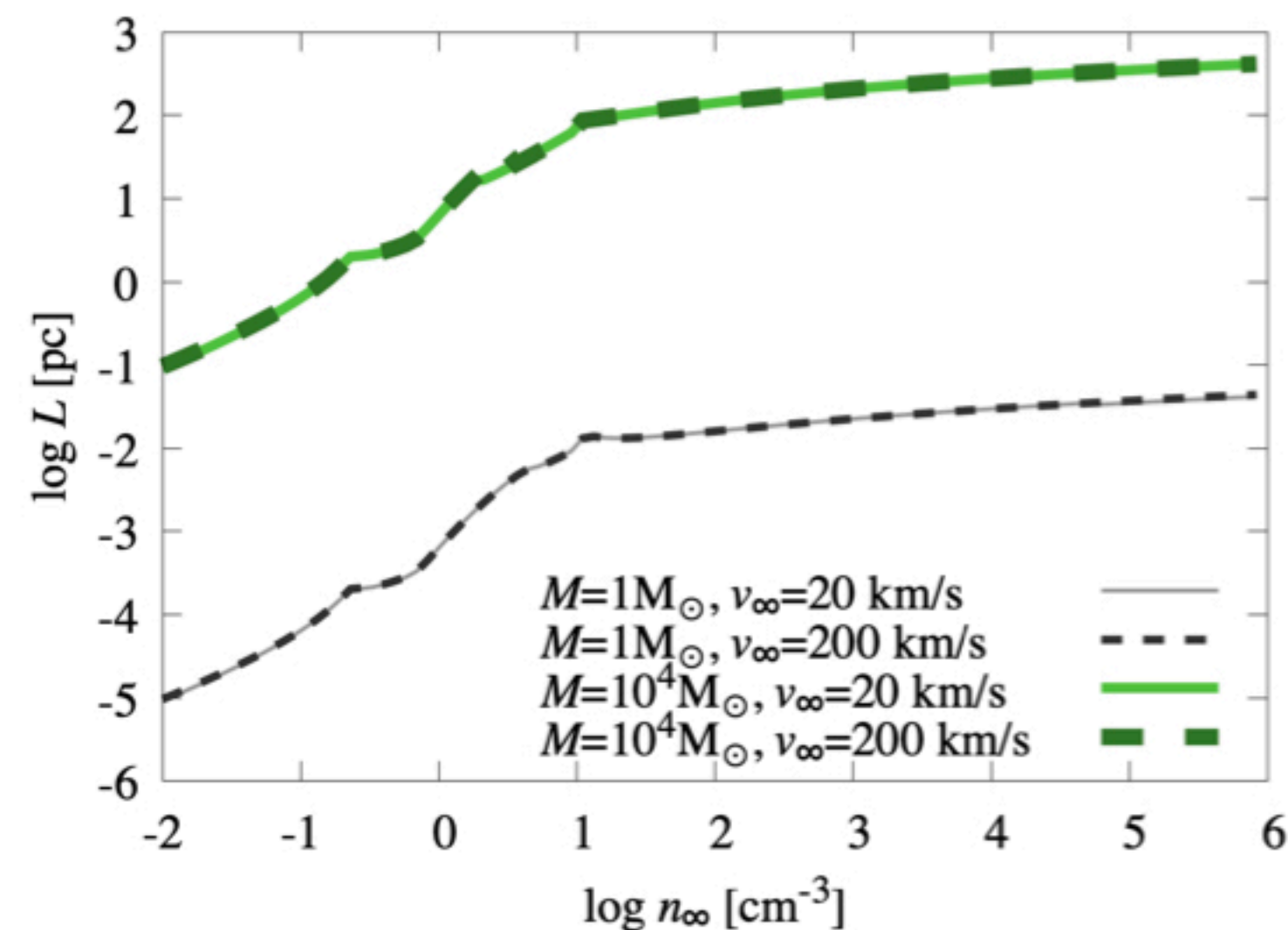
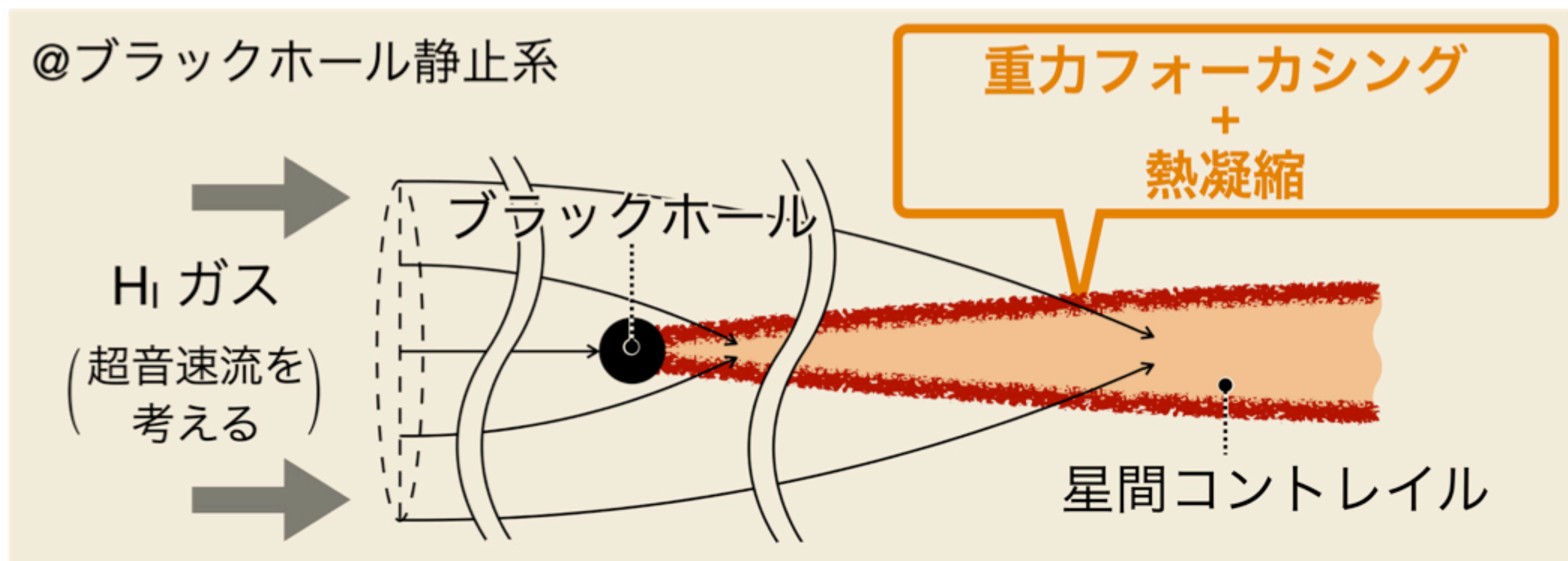
新たなブラックホール検出法の提案

	起源不明なフィラメント	観測数	光源	星間コントレイルと仮定した場合の ブラックホールの質量
	<p>~1 pc</p> <p>HI4PI Collaboration 2016</p>	~ 3000	H _I	恒星質量ブラックホール $\lesssim 10^2 M_{\odot}$
	<p>83 pc</p> <p>Zucker+ 2018</p>	~ 150	CO	中間質量ブラックホール $10^{3-5} M_{\odot}$
	<p>64 kpc</p> <p>Van Dokkum+ 2023</p>	1 (系外)	星	超大質量ブラックホール $\gtrsim 10^6 M_{\odot}$

星間コントレイルの観測からブラックホールの情報が間接的に得られる！

まとめ

- 新たなフィラメント形成メカニズムである星間コントレイルモデルを提唱した.
- 中間質量ブラックホールによって100 pc程度のフィラメントが形成されることを見積もった.
- 星間コントレイルと識別されると、間接的にブラックホールの情報も得られる.



ApJ 945 39