

# 若い星への降着に関する 標準理論の再考

---

高棹 真介 (名古屋大学)

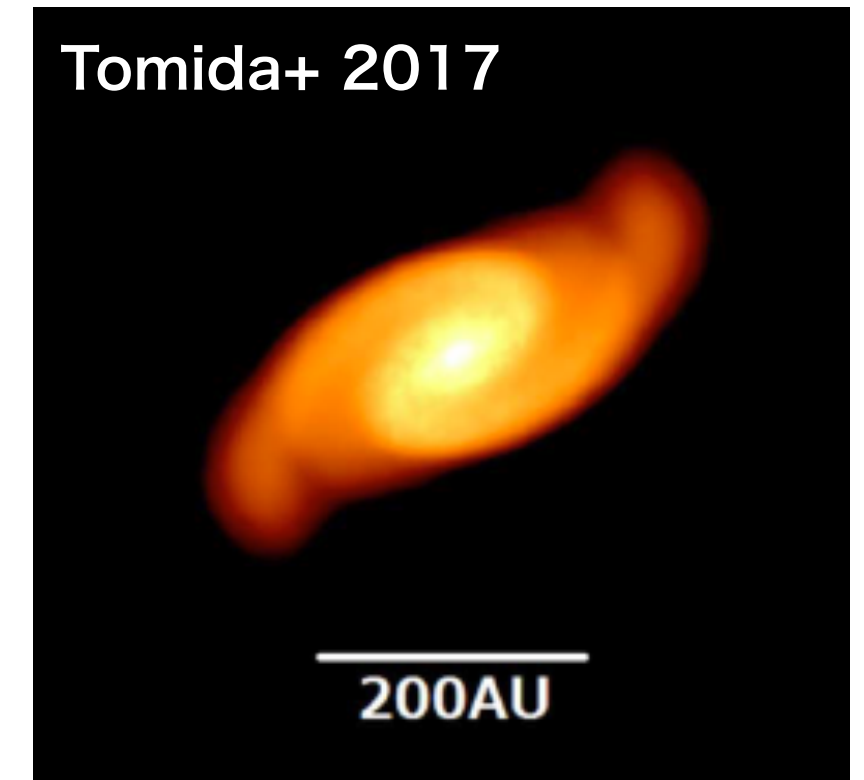
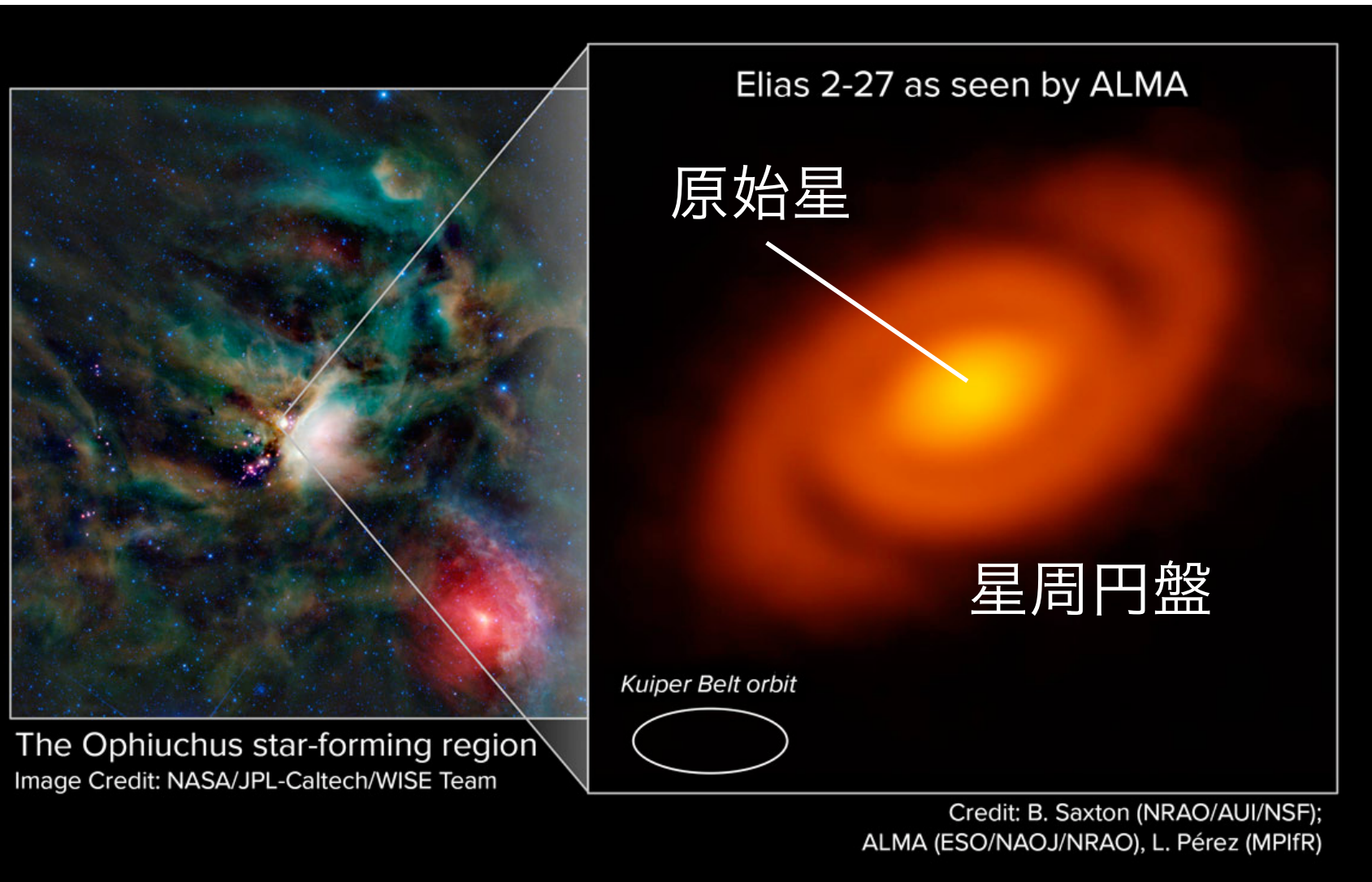
共同研究者：

鈴木 建 (東京大学)、  
富田 賢吾、岩崎 一成 (大阪大学)

# 原始星・前主系列星への降着

分子雲コア — 重力収縮 —> 原始星

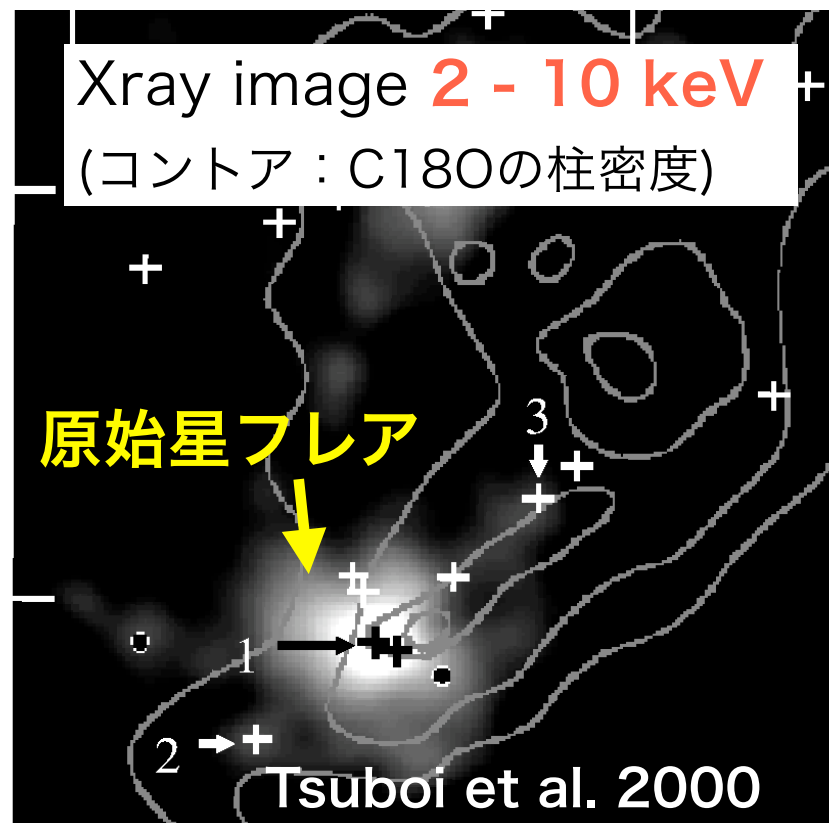
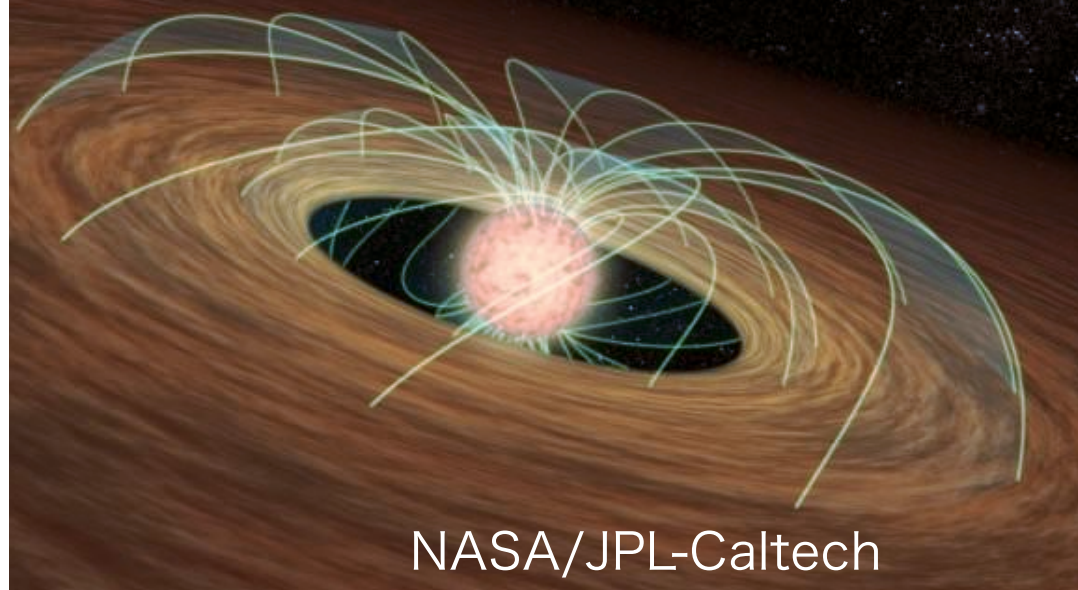
原始星誕生後 ~5万年まで  
追ったシミュレーション



原始星や前主系列星は星周円盤から質量・角運動量を受け取り成長  
—> 降着過程が若い星の進化を決める

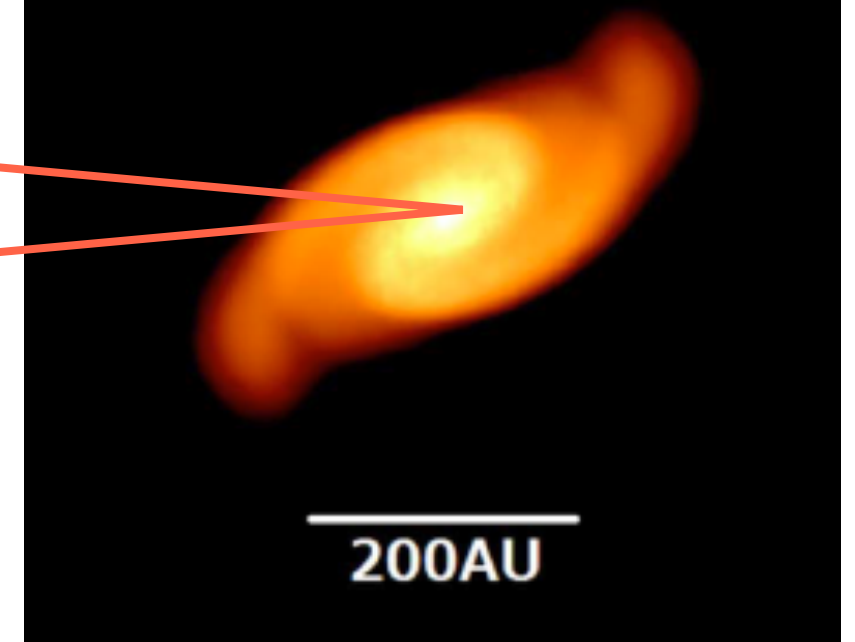
# 原始星・前主系列星への降着

強い星磁場が降着構造を決定？



太陽フレアに似てるが遥かに巨大

Tomida+ 2017



原始星 (秒~分)  $\ll$  システムの進化時間  
→ 星近傍は直接解かずに穴を開け、  
原始星近傍をモデルに置き換えて  
時間刻みを伸ばす (シンク)  
(e.g. Machida & Hosokawa 13)

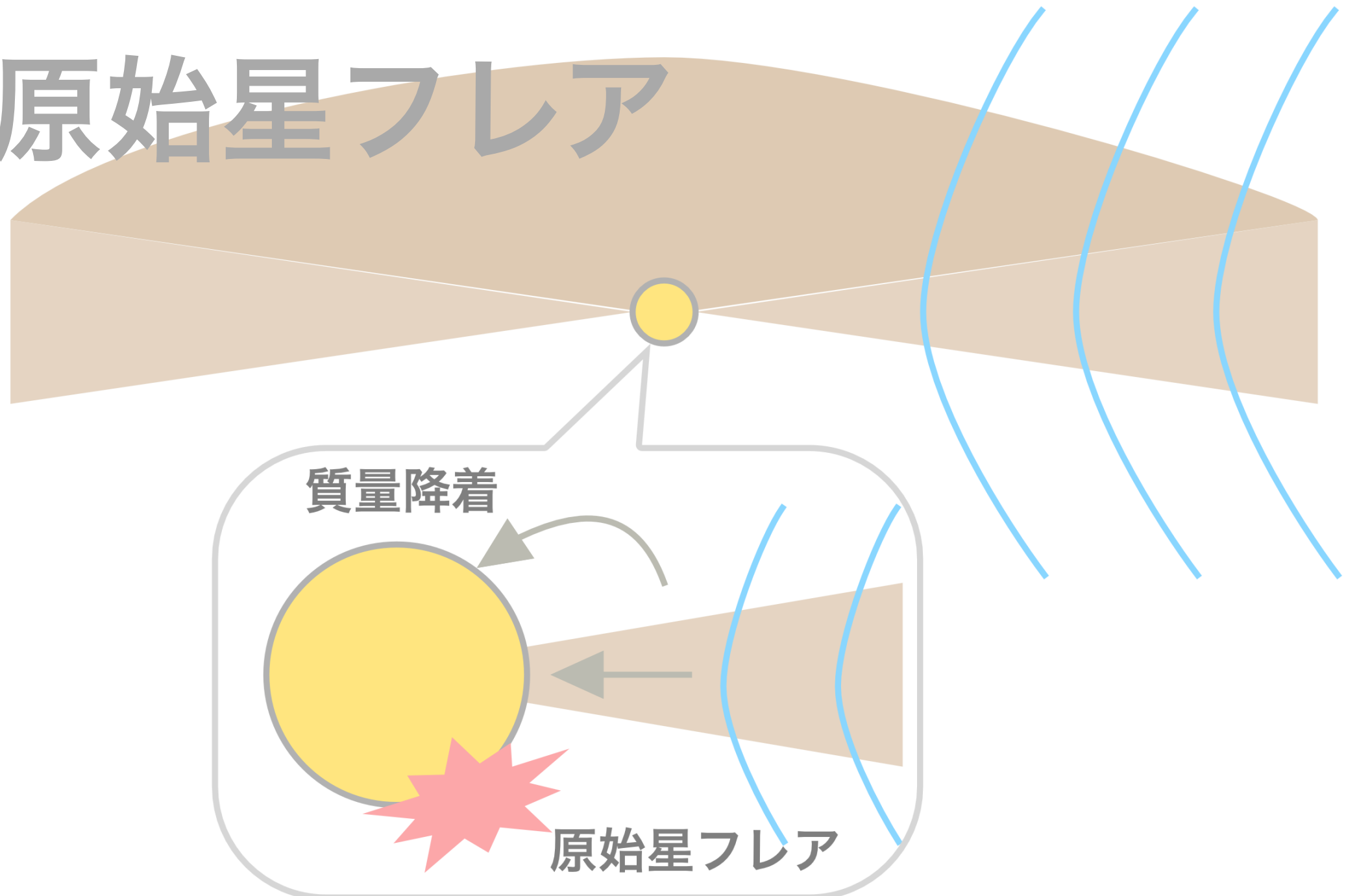
星周りの磁場が決める降着構造や  
ダイナミクスは星に持ち込む熱量や  
角運動量を変え、星の進化に影響を  
与える可能性

本研究：

降着構造や星近傍のダイナミクスを理解するために  
3次元磁気流体シミュレーションを実行

# 1. 前主系列星の降着構造

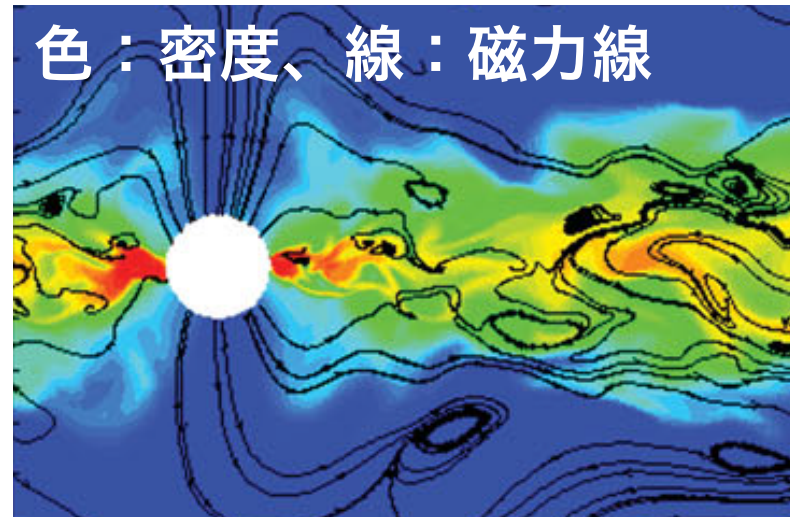
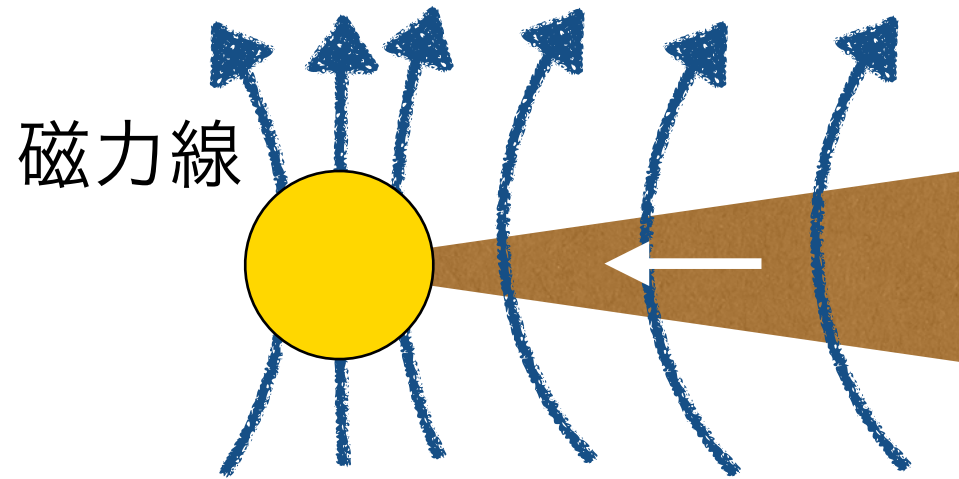
## 2. 原始星フレア





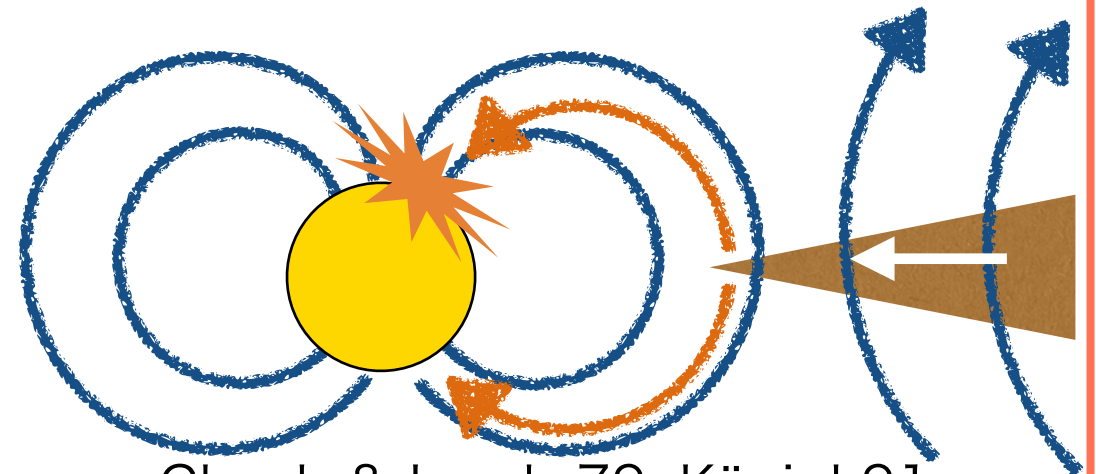
# これまでの降着構造の標準的理解

赤道面からの穏やかな降着

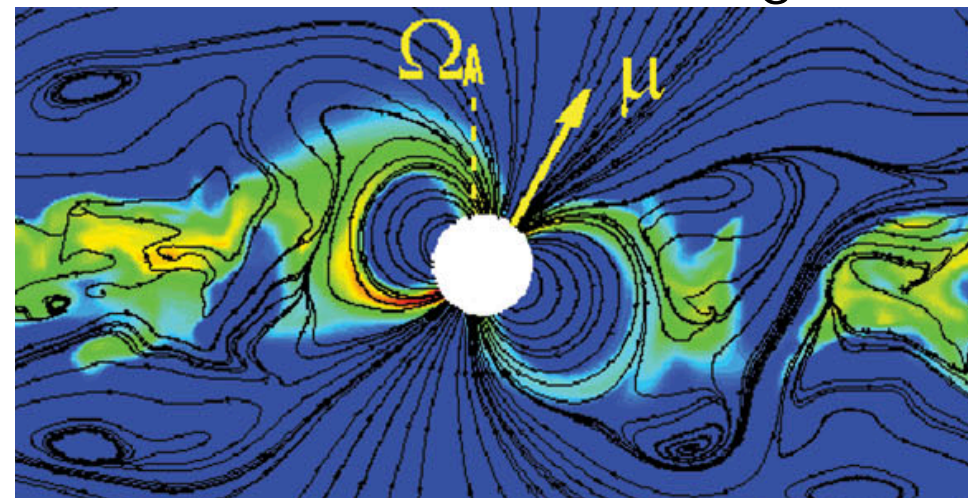


Romanova+12

降着衝撃波を伴う磁気圏降着



Ghosh & Lamb 79, Königl 91



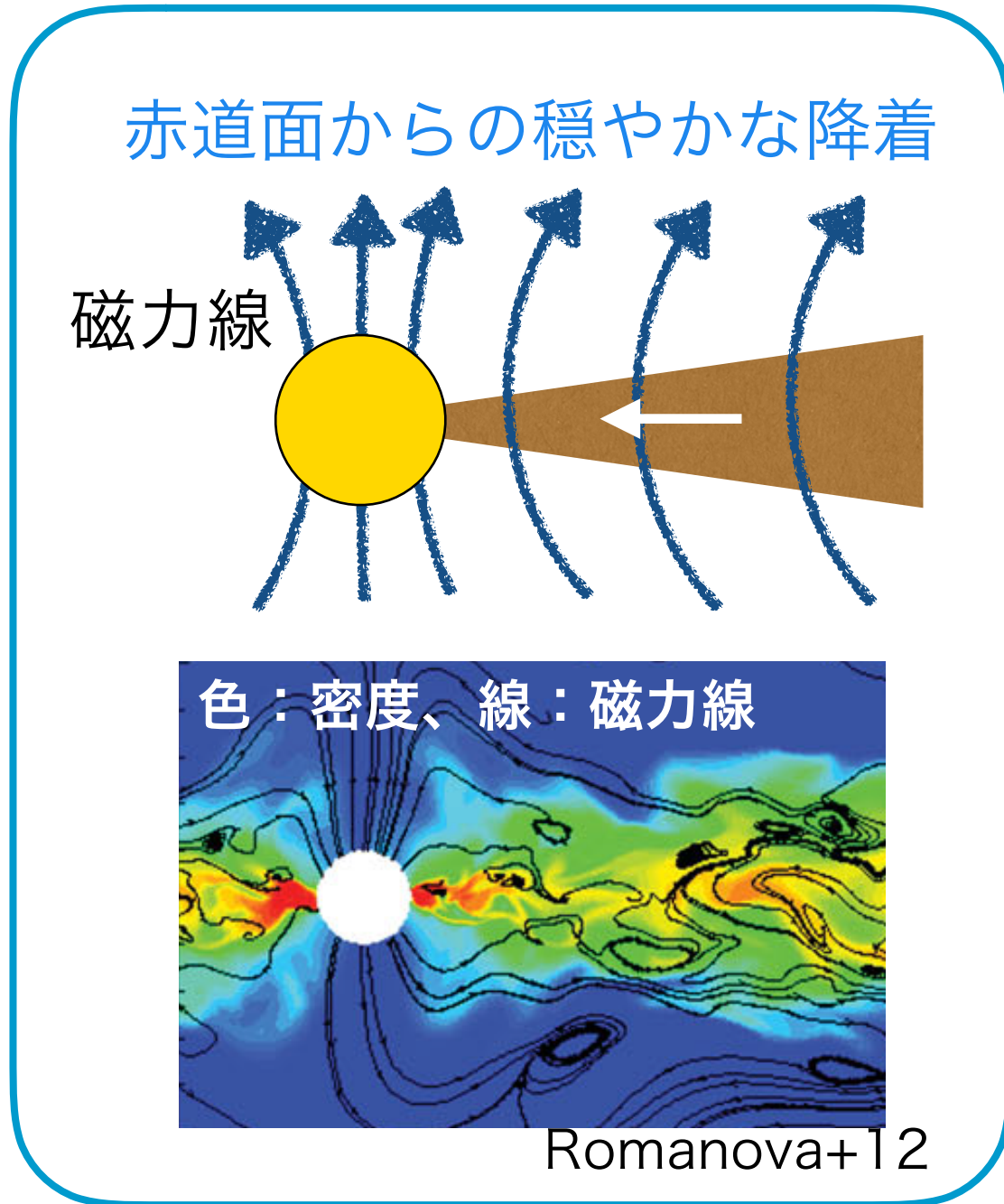
Romanova+12

通説：

観測から脱出速度程度的高速降着・降着衝撃波の兆候

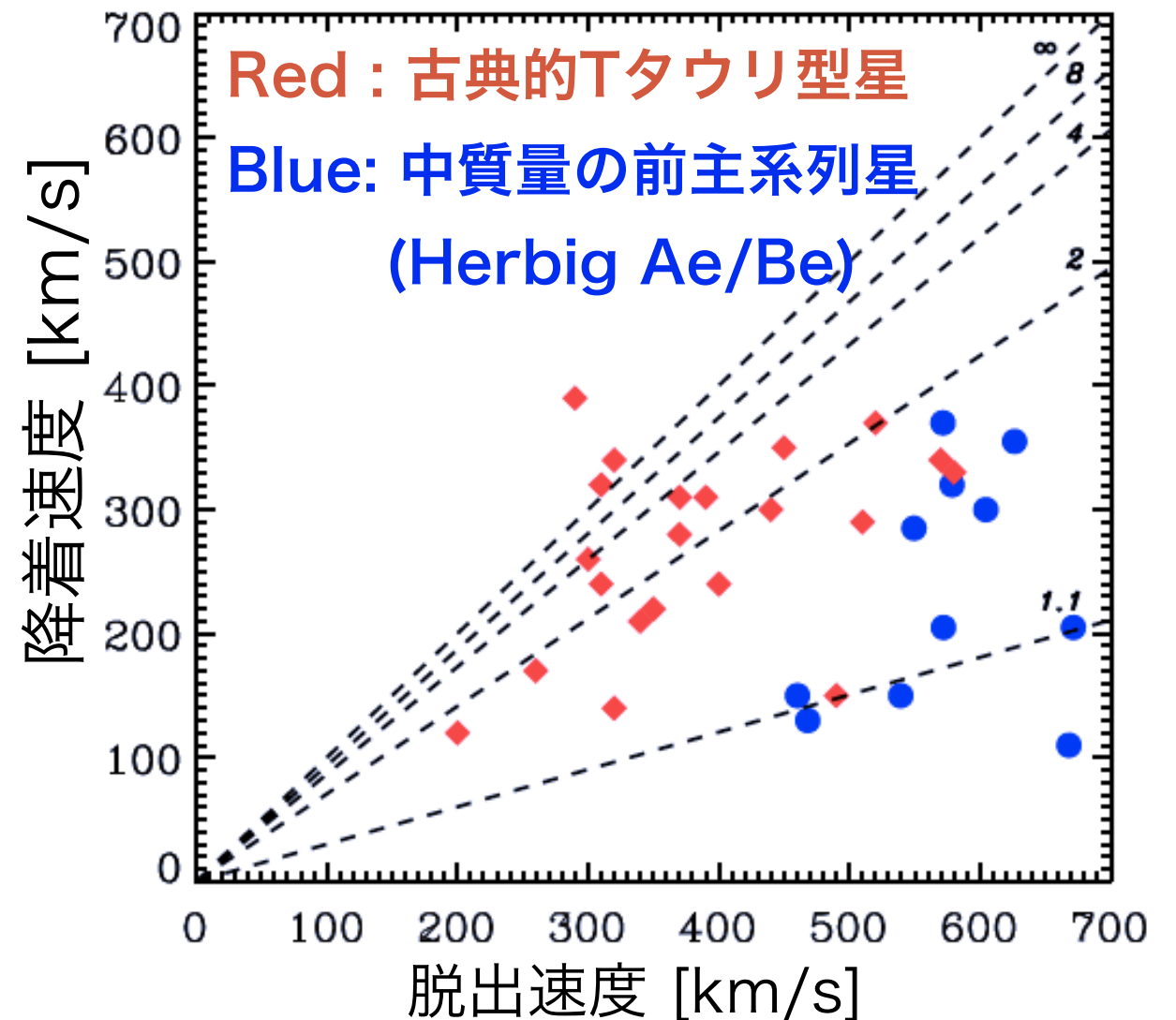
= 星は強い磁場をもっており**磁気圏降着**が実現しているはず

# 問題点：磁気圏がない時も高速降着



## 前主系列星に対する降着速度の観測

Cauley & Johns-Krull 2014

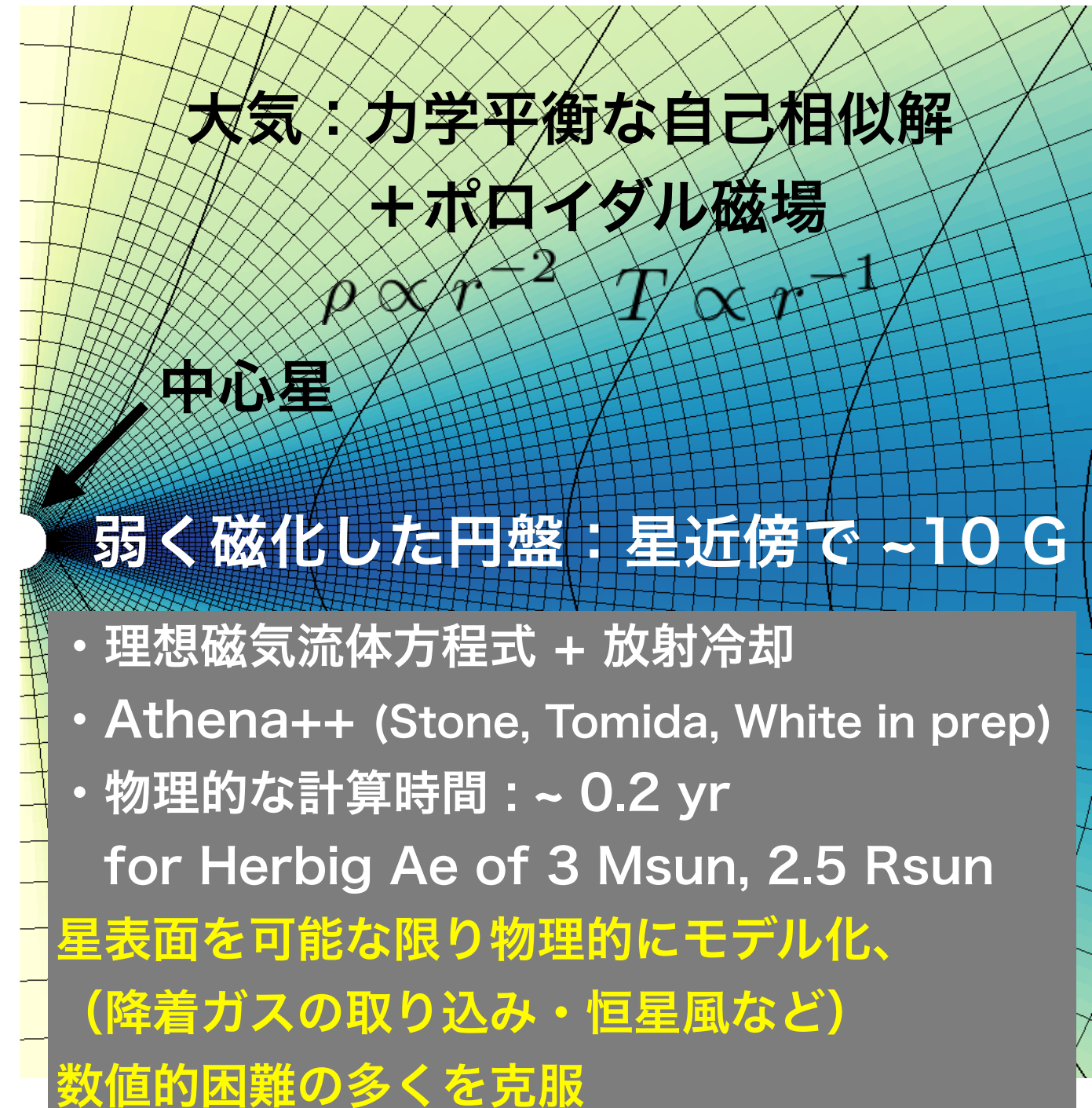
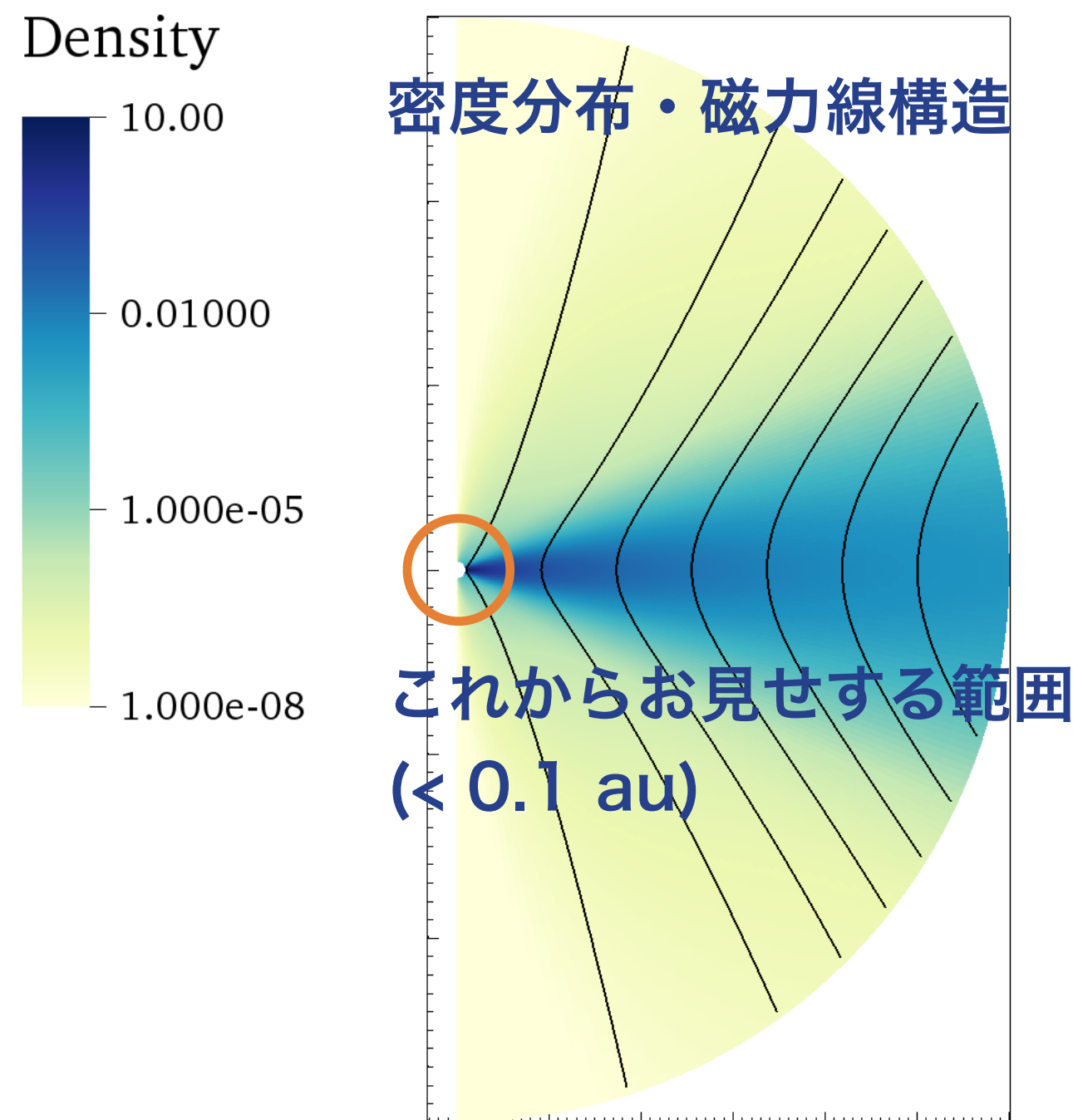


- 磁場が非常に弱く磁気圏がない星 (Herbig Ae/Be) でも高速降着がよく観測
- 過去の理論・シミュレーションでは説明できていない



# 磁気圏がない場合の降着を再検討

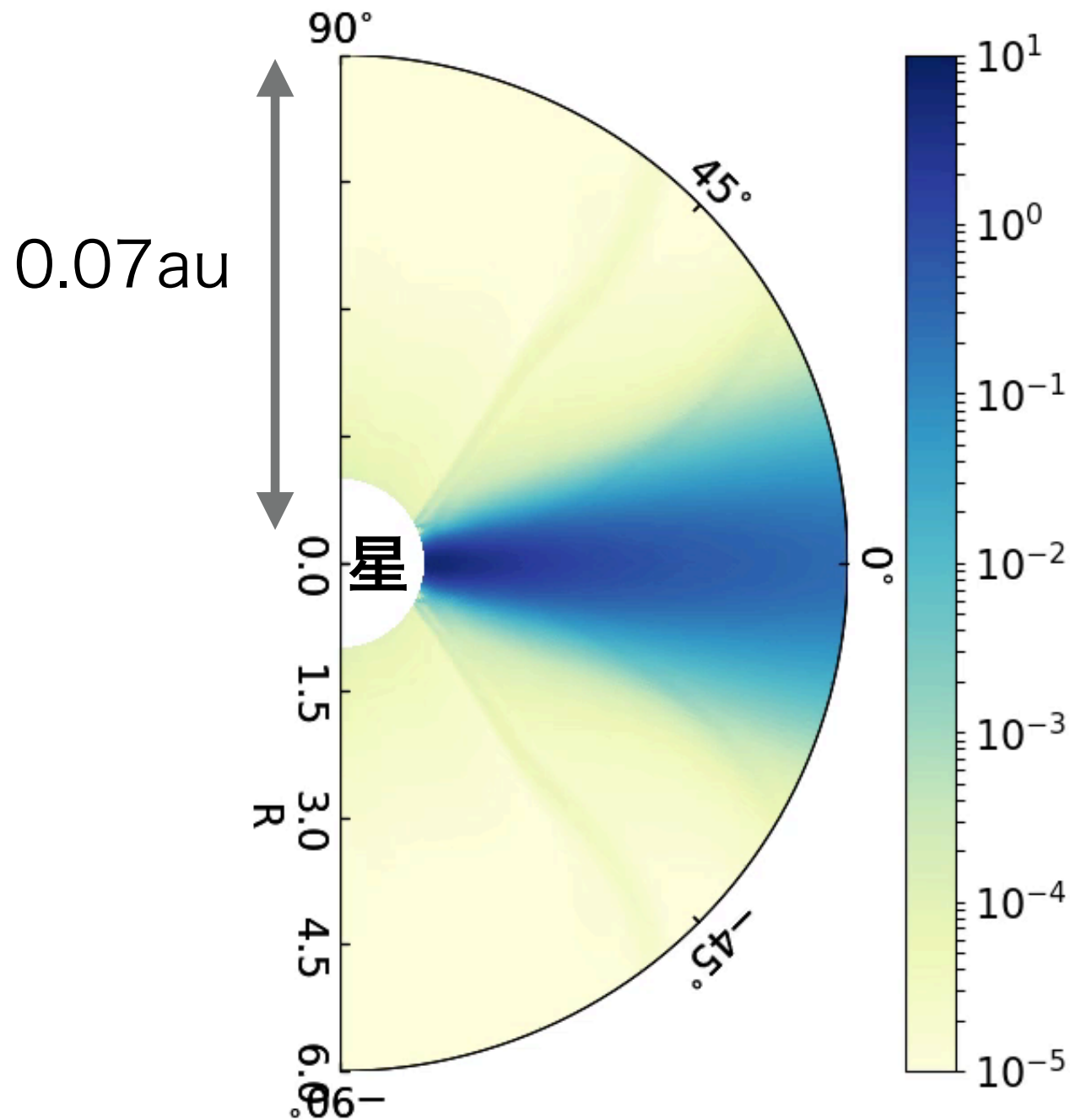
Herbig Ae/Be等のような弱い磁場しかなく磁気圏がない星近傍 (~0.7 au) を3次元磁気流体シミュレーションで考察



# 降着構造

密度

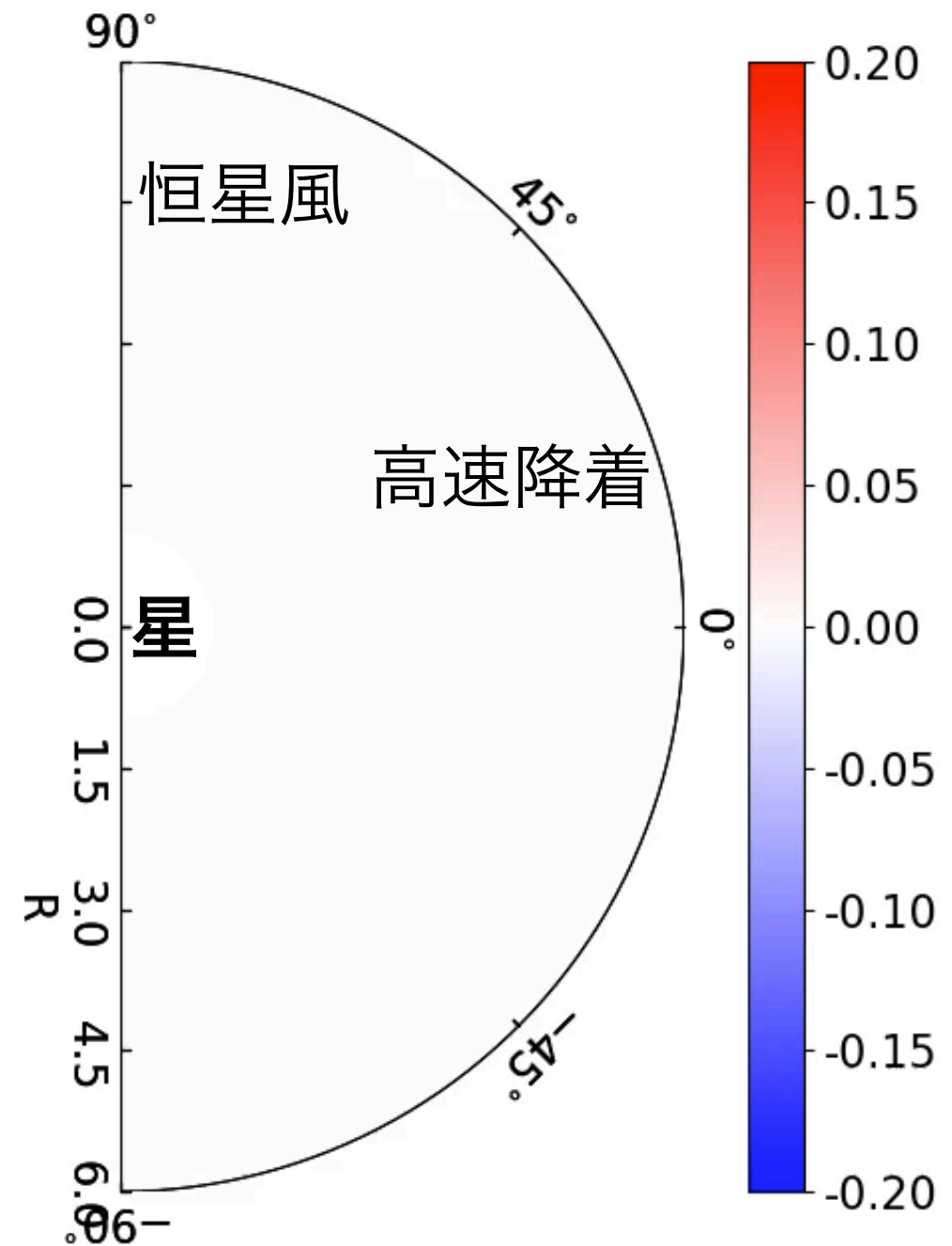
Time = 1 Kepler rot. at R = 1



速度の動径方向成分

Time = 0 Kepler rot. at R = 1  $v_K = 480 \text{ km/s}$

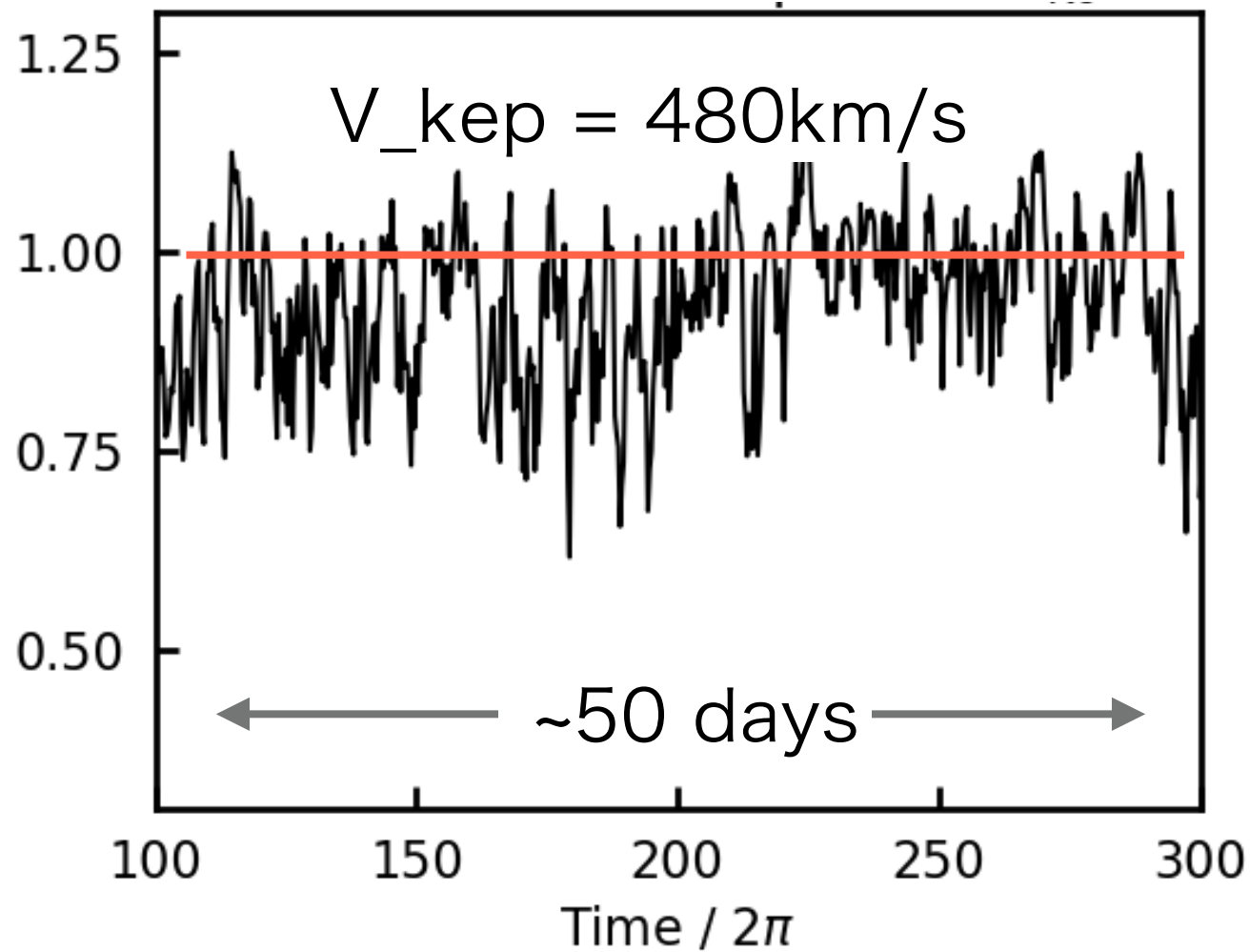
速度の単位





# 降着構造

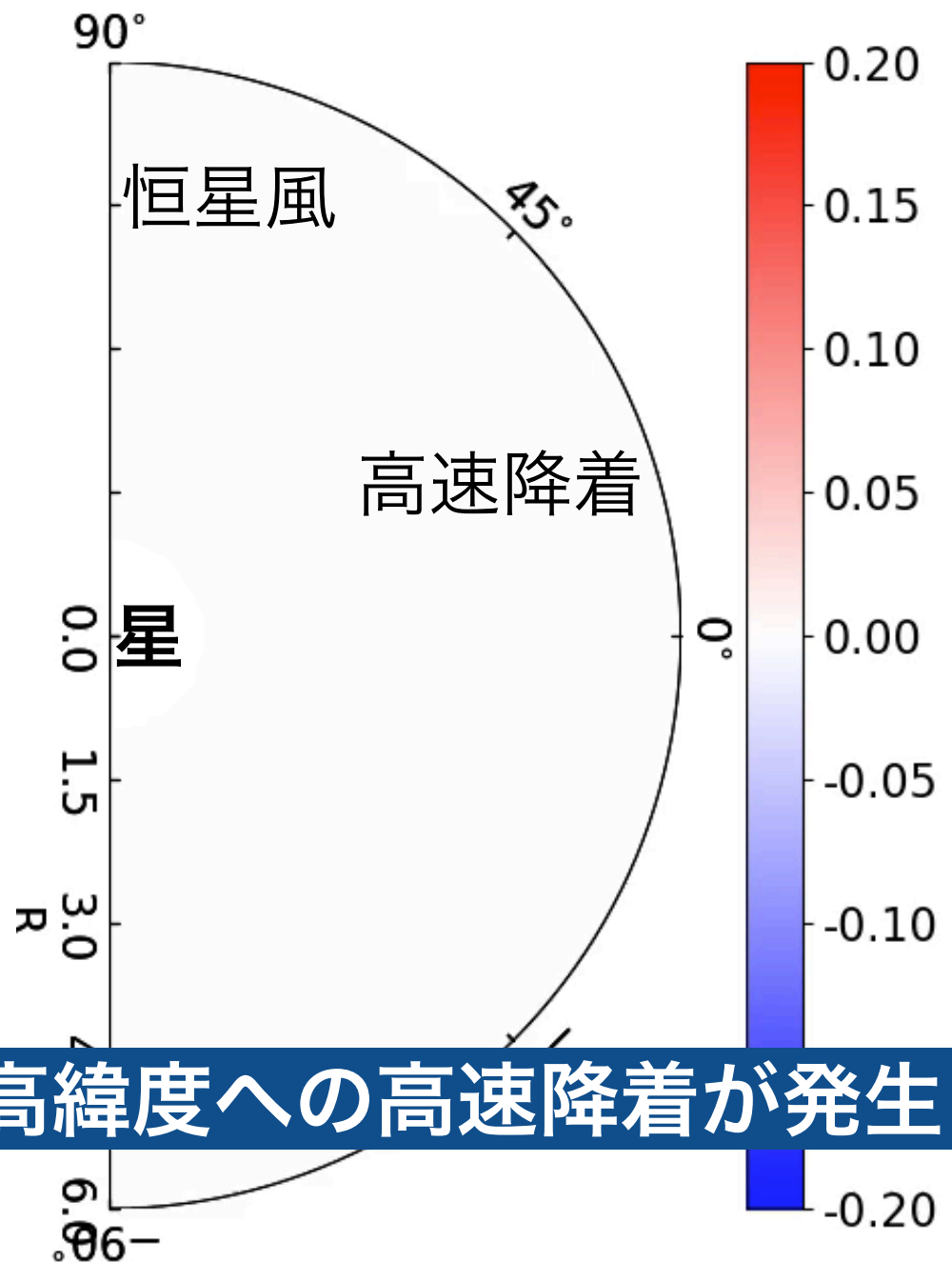
星表面で測った降着速度



速度の動径方向成分

Time = 0 Kepler rot. at  $R = 1$   $v_K = 480 \text{ km/s}$

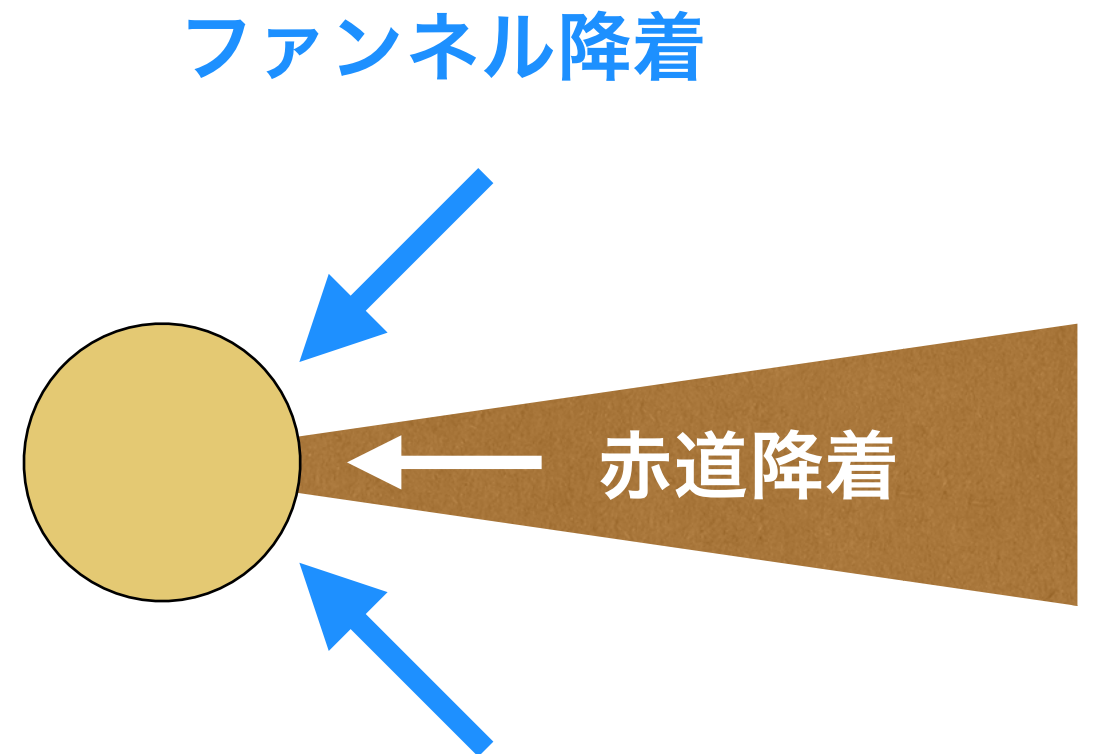
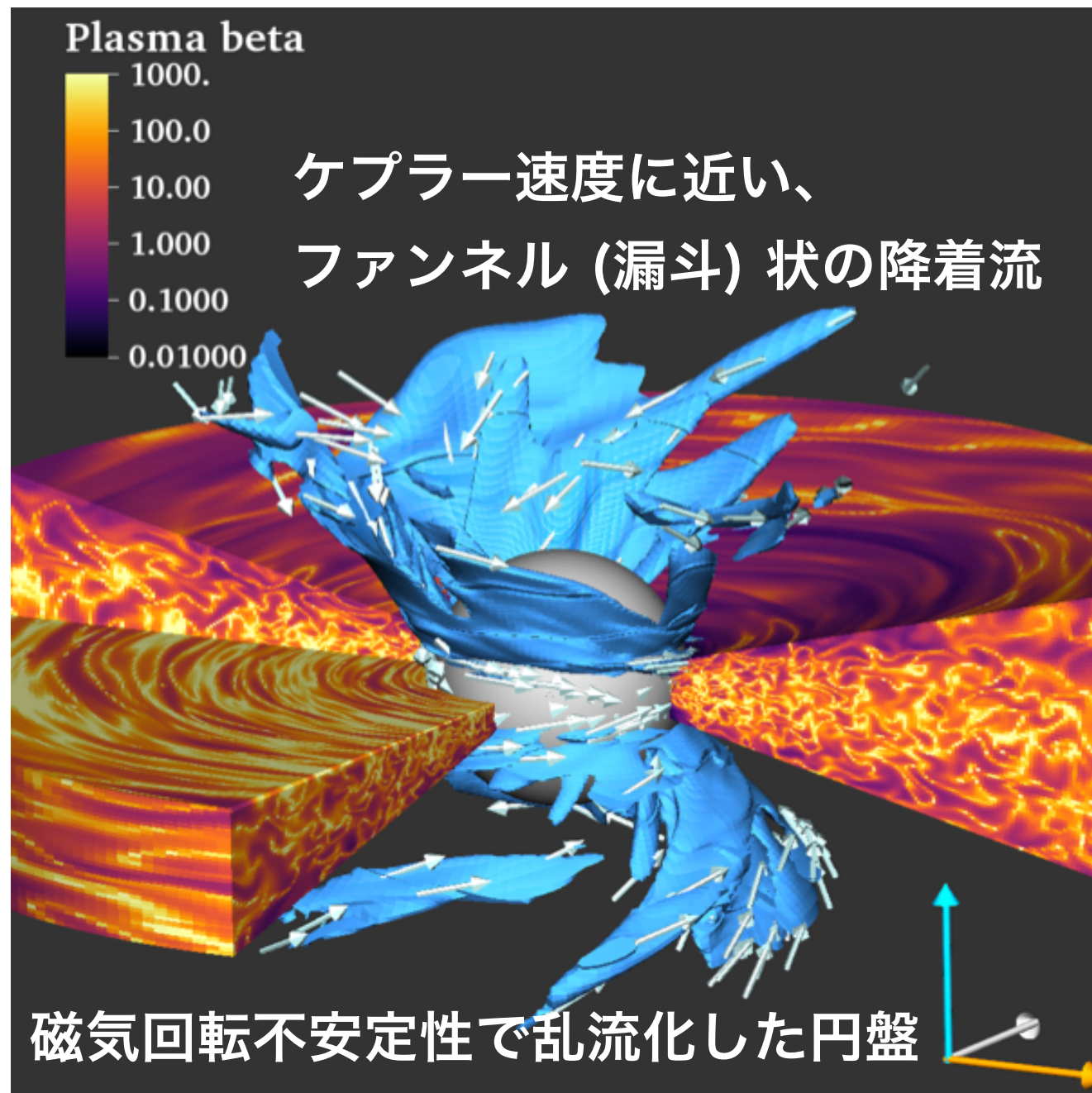
速度の単位



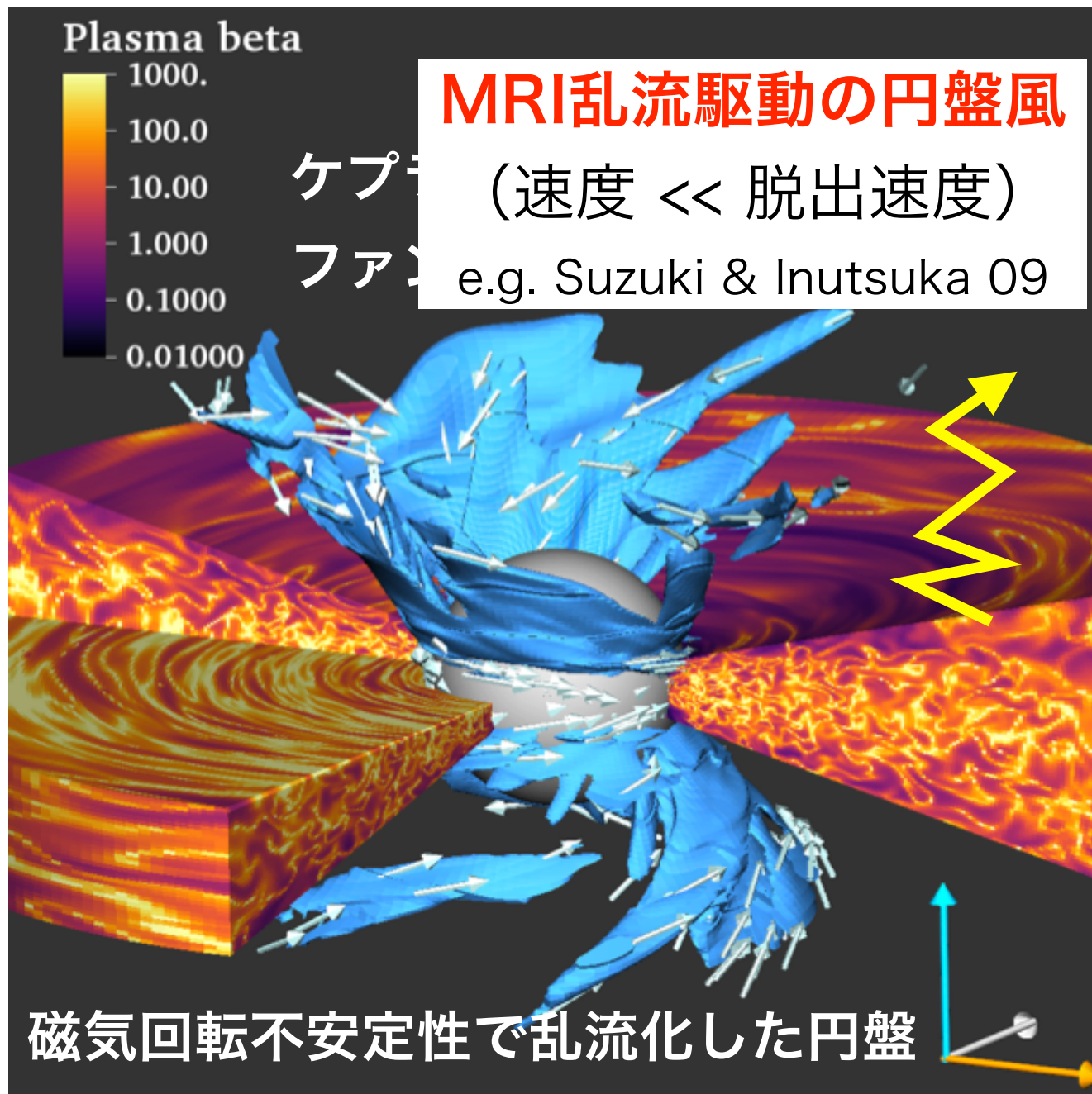
磁気圏がないにも関わらず、高緯度への高速降着が発生

# ファンネル降着 + 赤道降着という新しいモード

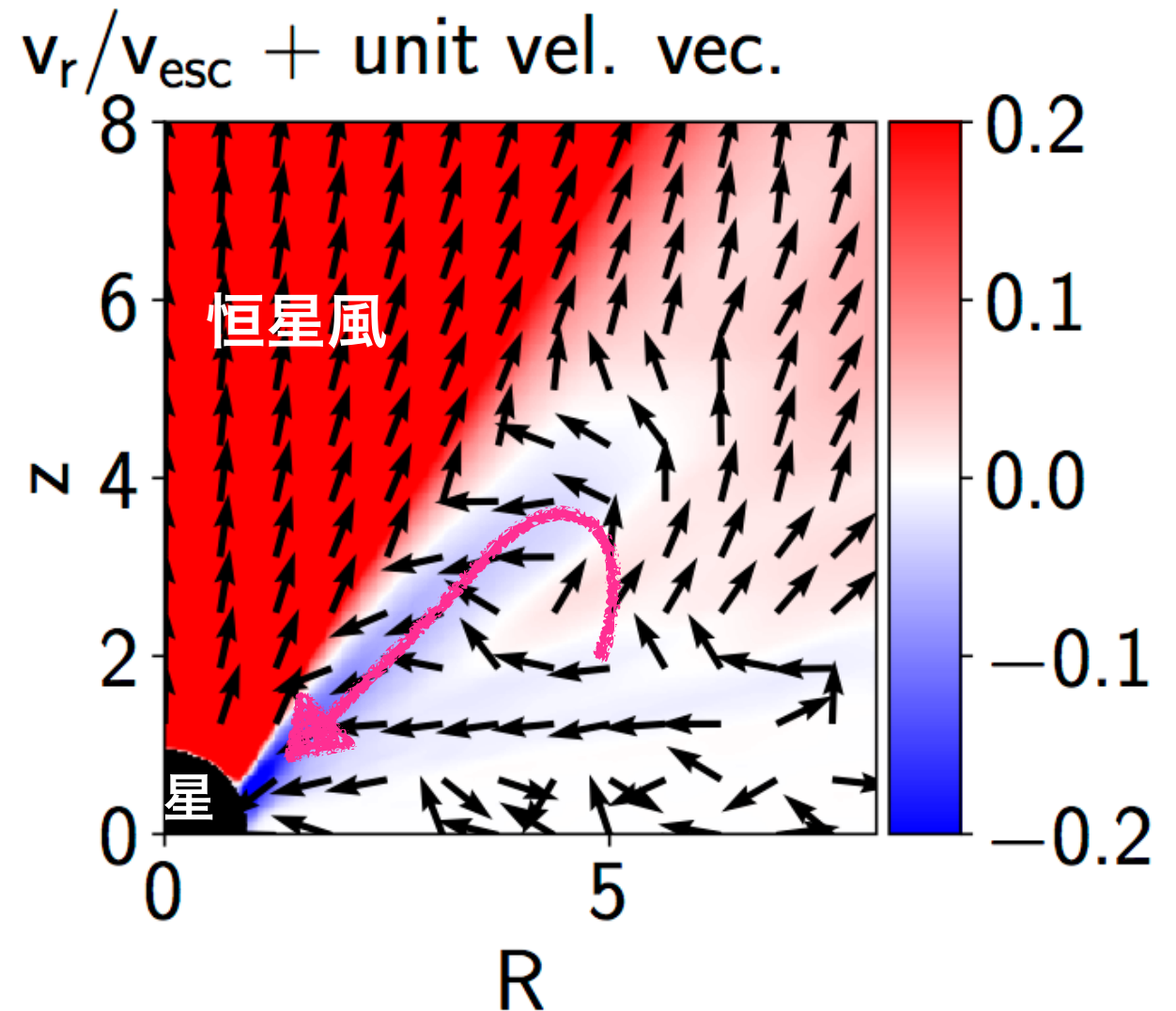
Takasao, Tomida, Iwasaki & Suzuki 18



# ファンネル降着はどこから来たか？



色 : 脱出速度で規格化した  $V_{\text{rad}}$   
矢印 : 速度の向き



円盤外側 : 外向きの円盤風

円盤内側 : 円盤風が外側への脱出に失敗し、星に落下

ファンネル降着 = 脱出に失敗した、円盤内側からの円盤風



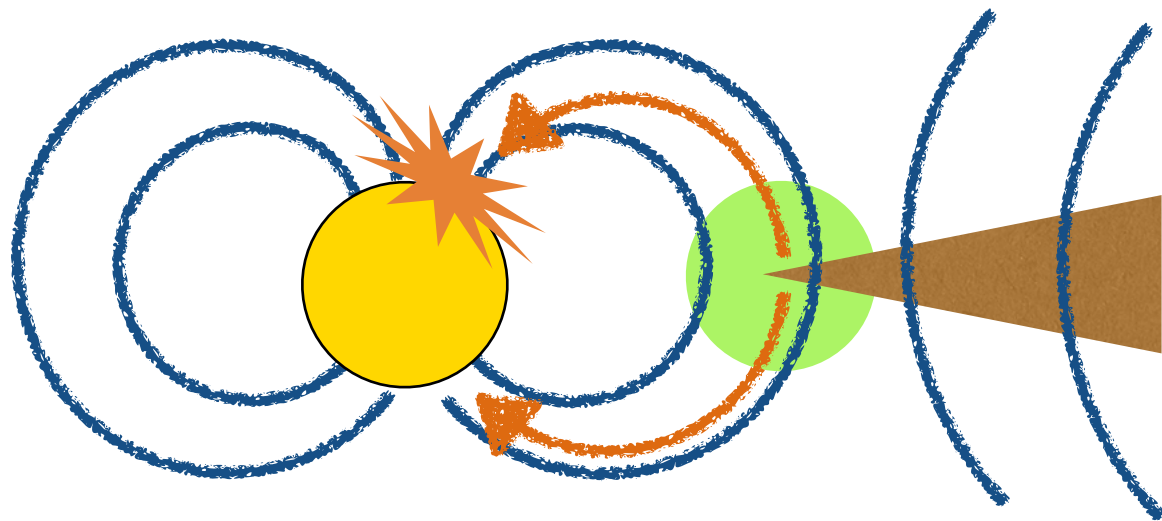
# なぜ星磁場が弱くても高速降着が可能か？

大雑把な答え

$$v_{\text{acc}} \approx \frac{B^2/8\pi}{\rho v_K^2/2} v_K$$

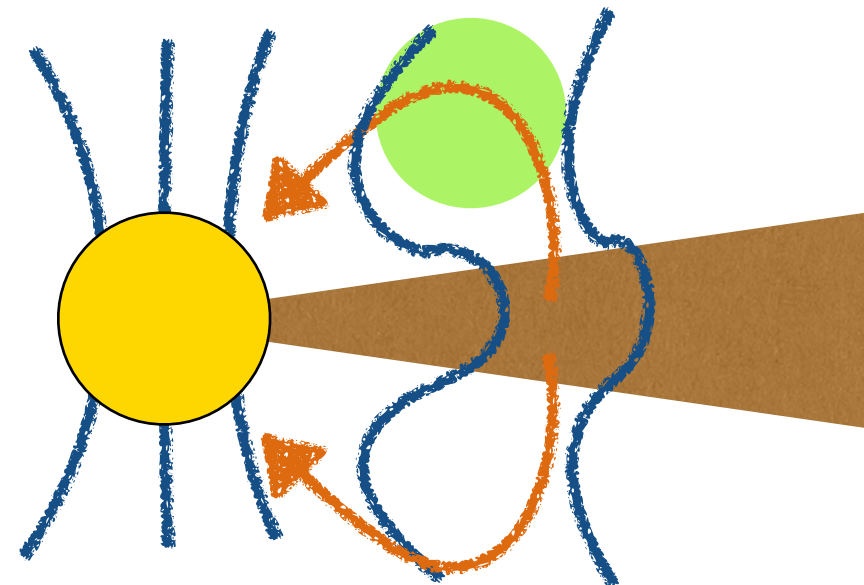
この比が  $O(1)$  のとき  
ケプラー速度程度の降着が実現。  
**分母はガス密度に依存**

## 磁気圏降着



赤道面の高密度ガスが減速  
→ 強い星磁場が必要

## ファンネル降着



円盤風の供給する  
低密度ガスが減速  
→ 円盤磁場で十分減速が可能

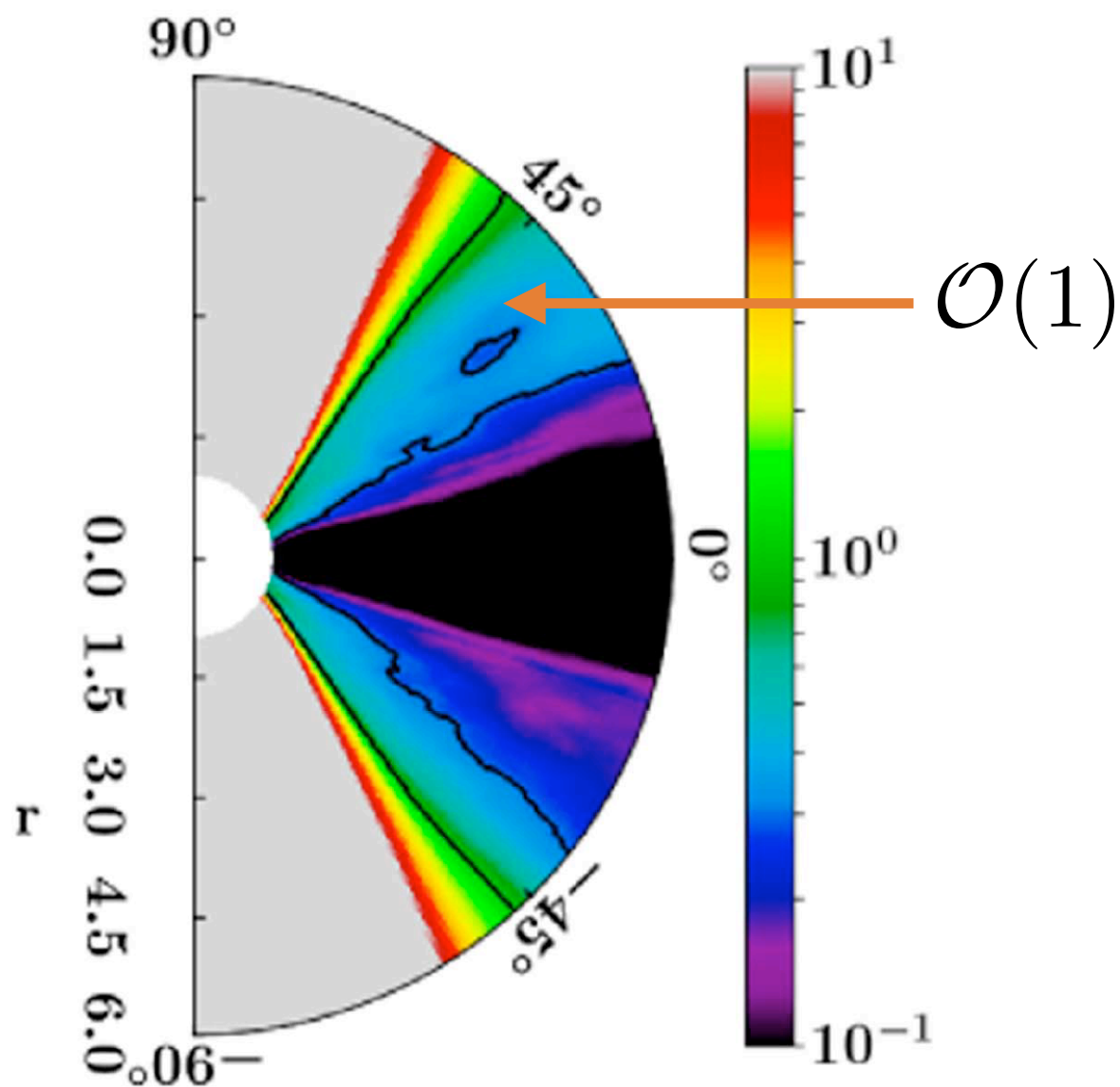


# なぜ星磁場が弱くても高速降着が可能か？

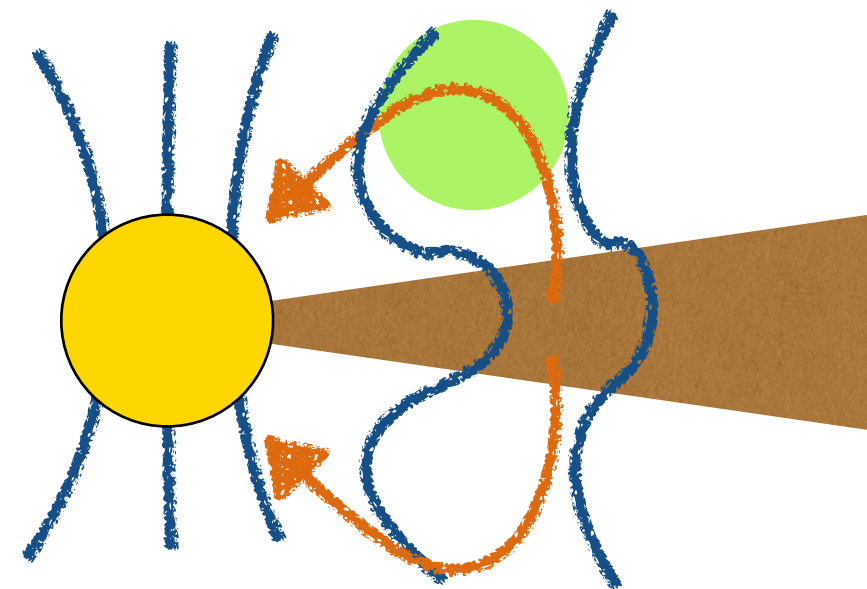
大雑把な答え

$$v_{\text{acc}} \approx \frac{B^2/8\pi}{\rho v_K^2/2} v_K$$

この比が  $O(1)$  のとき  
ケプラー速度程度の降着が実現。  
**分母はガス密度に依存**



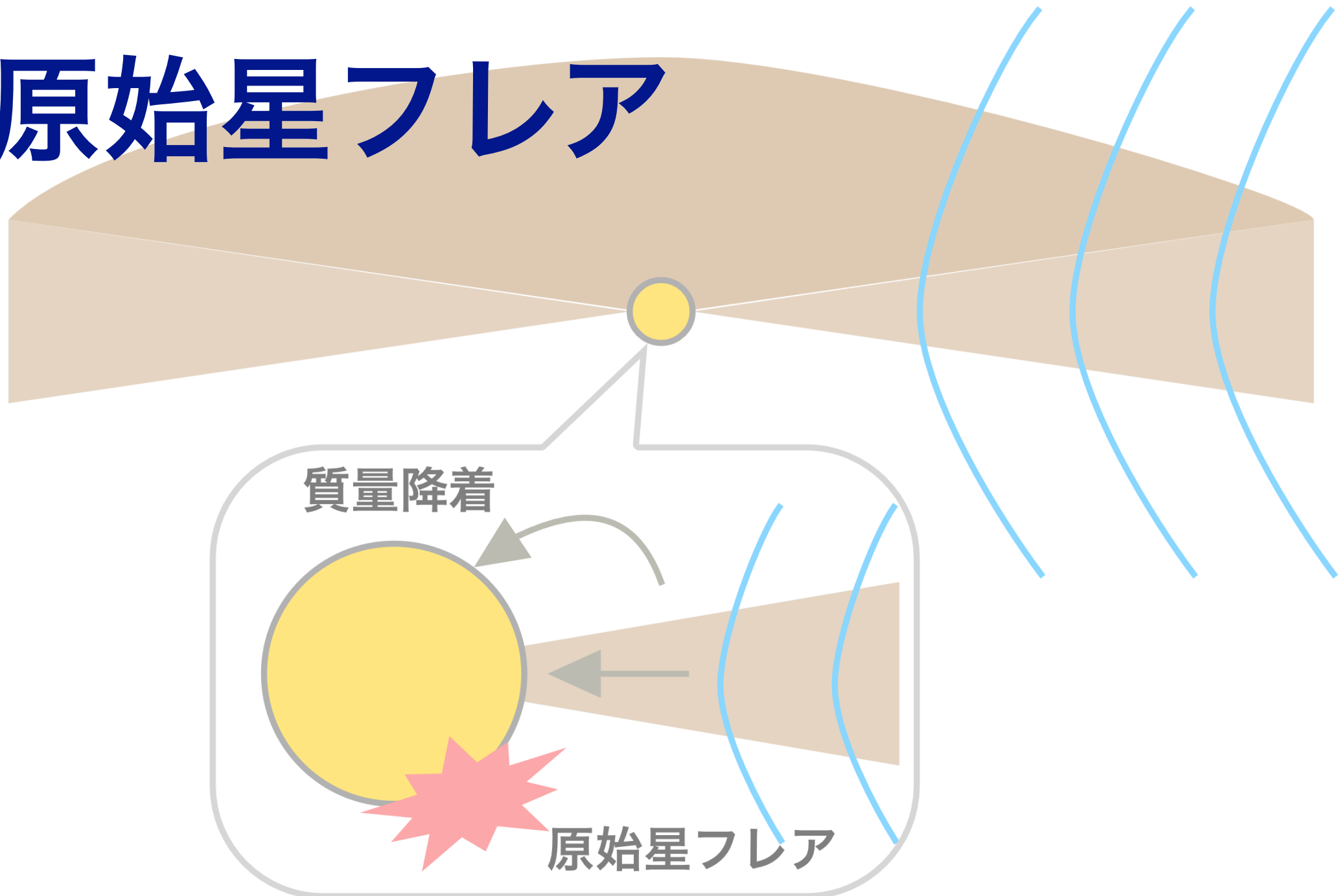
## ファンネル降着



円盤風の供給する  
低密度ガスが減速  
→ 円盤磁場で十分減速が可能

# 1. 前主系列星の降着構造

## 2. 原始星フレア



# Chandra X-ray movie of Orion

殆どの原始星は強い変動 X 線源

(Imanishi+01, Getman+07, Prisinzano+08, Pillitteri+10)



# Chandra X-ray movie of Orion

## 殆どの原始星は強い変動 X 線源

(Imanishi+01, Getman+07, Prisinzano+08, Pillitteri+10)

原始星フレア:  $10^{34} - 10^{37}$  erg (in X-ray)

太陽フレアの 100-10,000 倍以上!

5-10 keV のX線を放つ → 磁場起源

$$E \approx \frac{B^2}{8\pi} L^3 \approx 10^{37} \text{ erg} \left( \frac{B}{100 \text{ G}} \right)^2 \left( \frac{L}{5R_{\odot}} \right)^3$$

原始星の

半径 ~  $2R_{\text{sun}}$



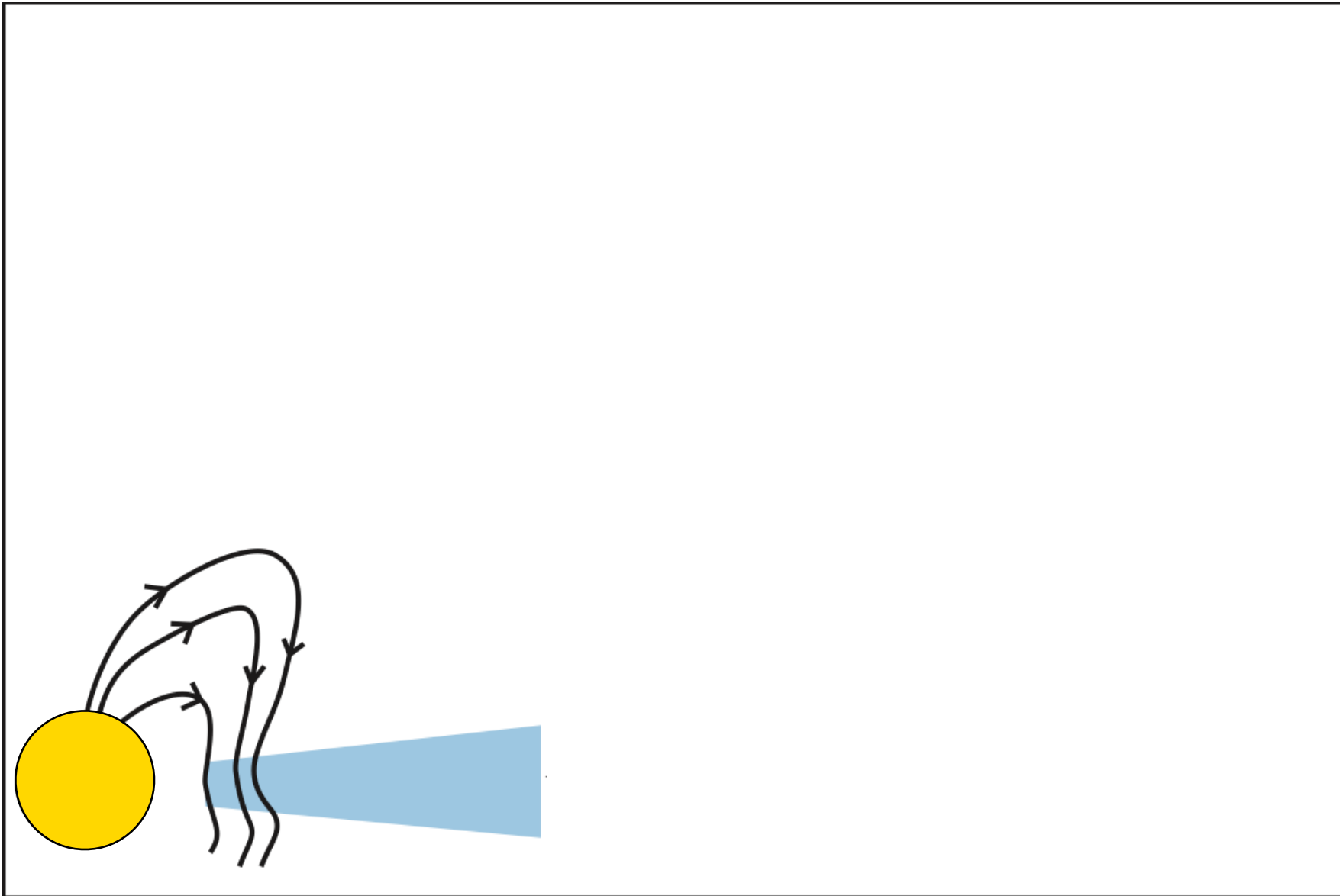
フレアは原始星より大きい

→ 大スケールにどうやって

エネルギーを蓄え、解放するのか?



# 原始星フレアの標準モデル：磁気圏モデル



Hayashi, Shibata, Matsumoto 96 (see also Hirose+97, Goodson+99, Montmerle+00)

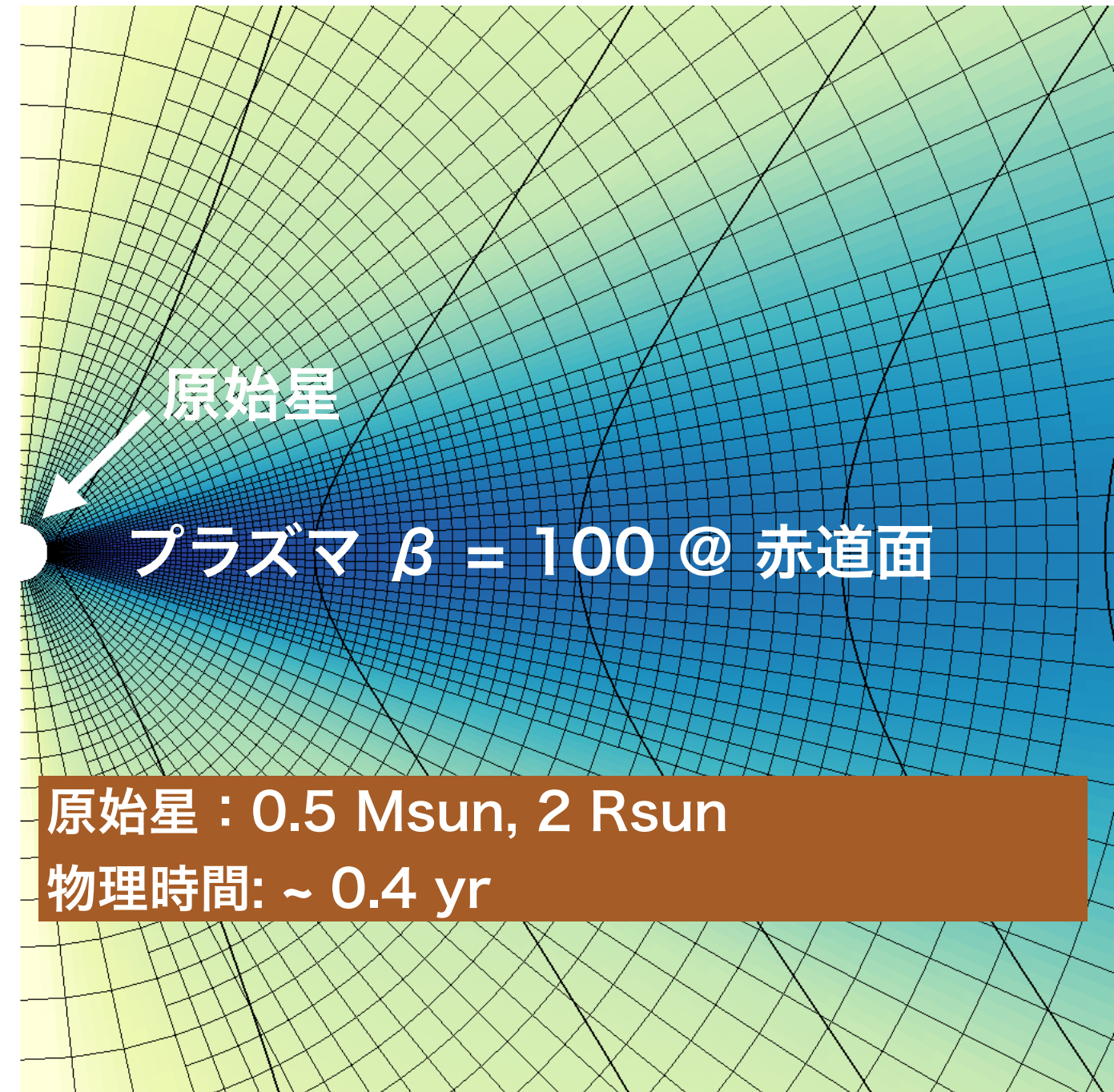
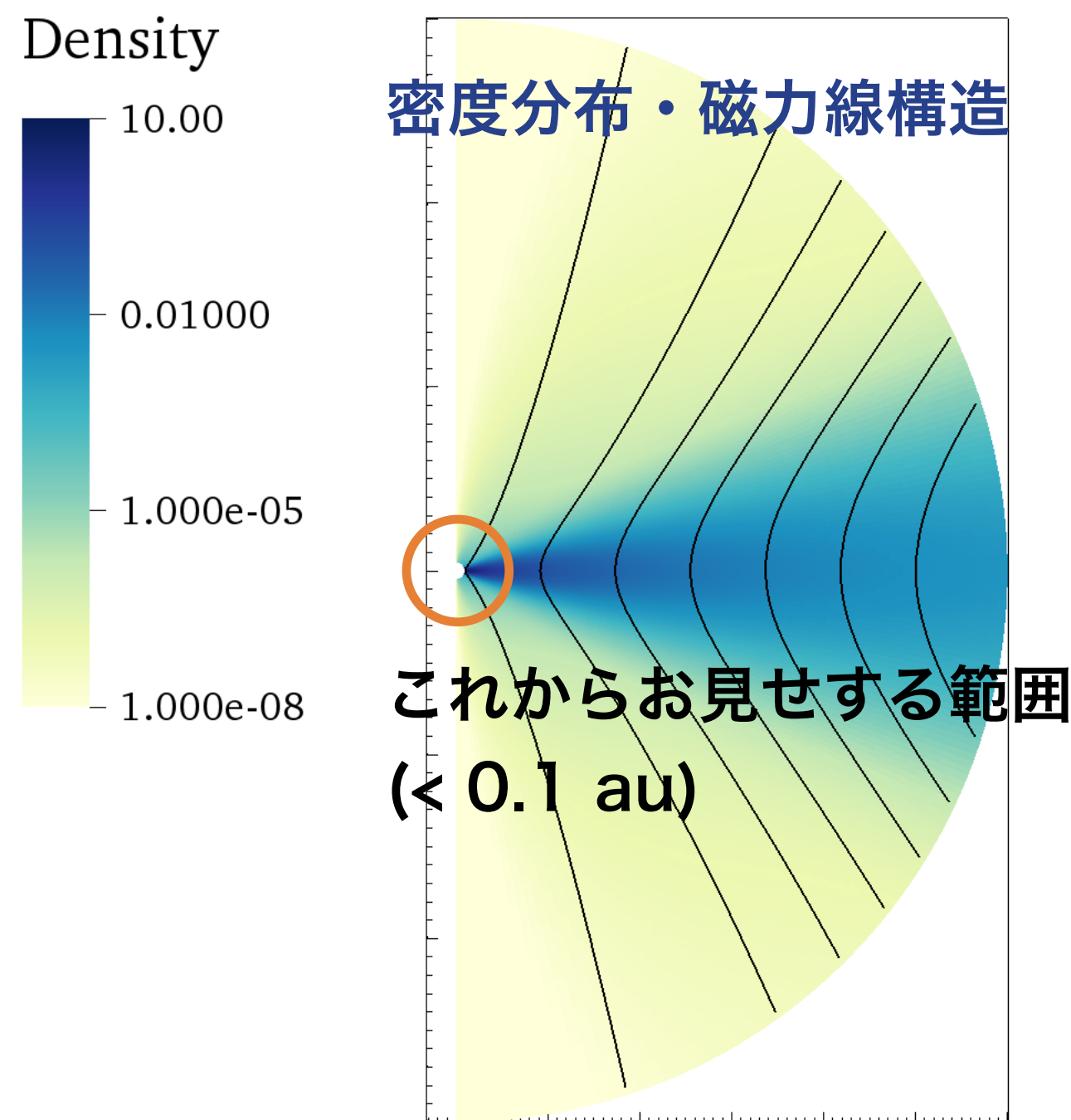
**しかし、原始星は降着率が高いせいで磁気圏は潰れてしまっている可能性が高い**

(磁気圏を作るには古典的Tタウリ型星の環境くらい円盤密度を2桁以上下げる必要)

**どうやってフレアは起きるのか？ → 3次元シミュレーション**

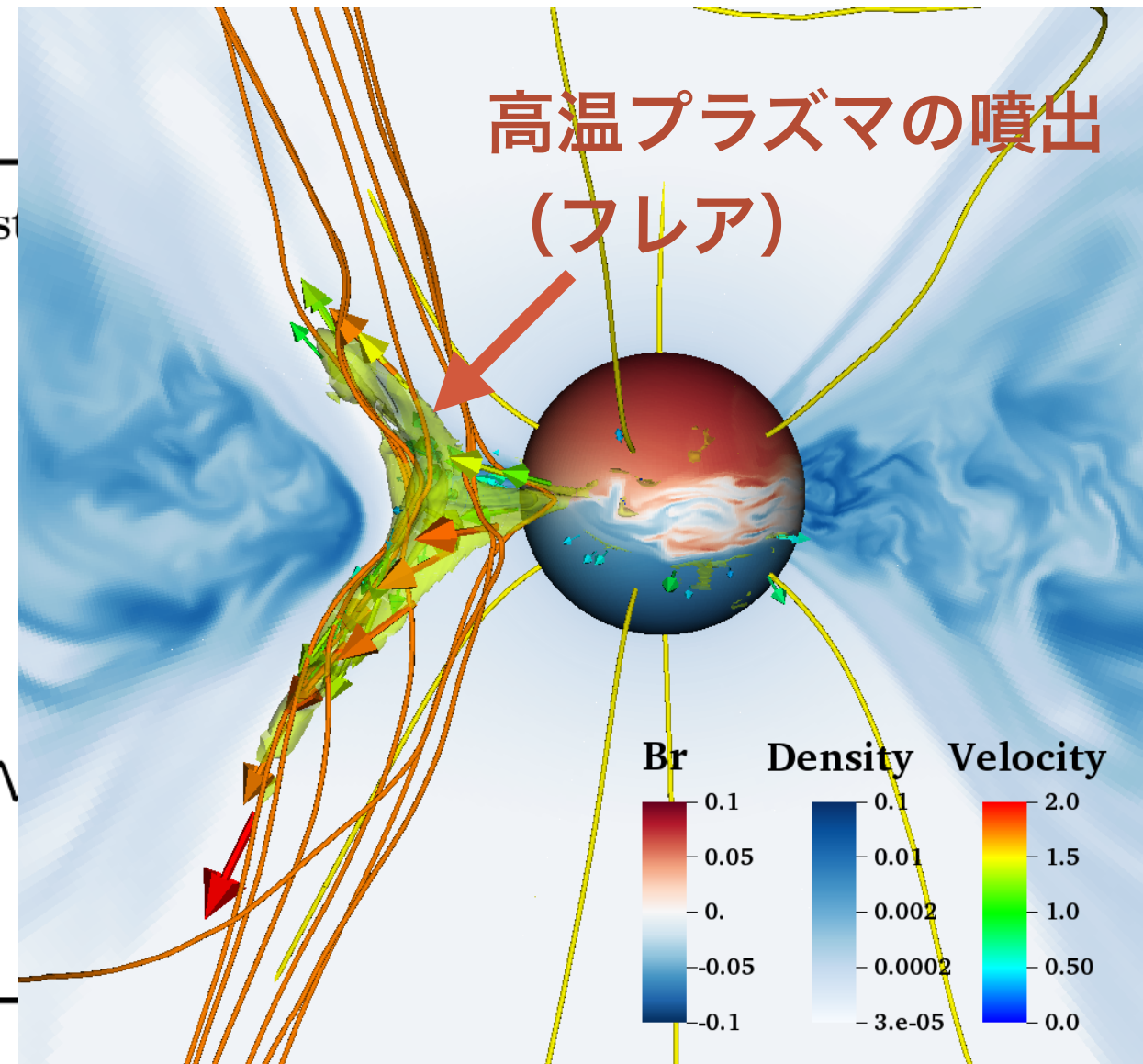
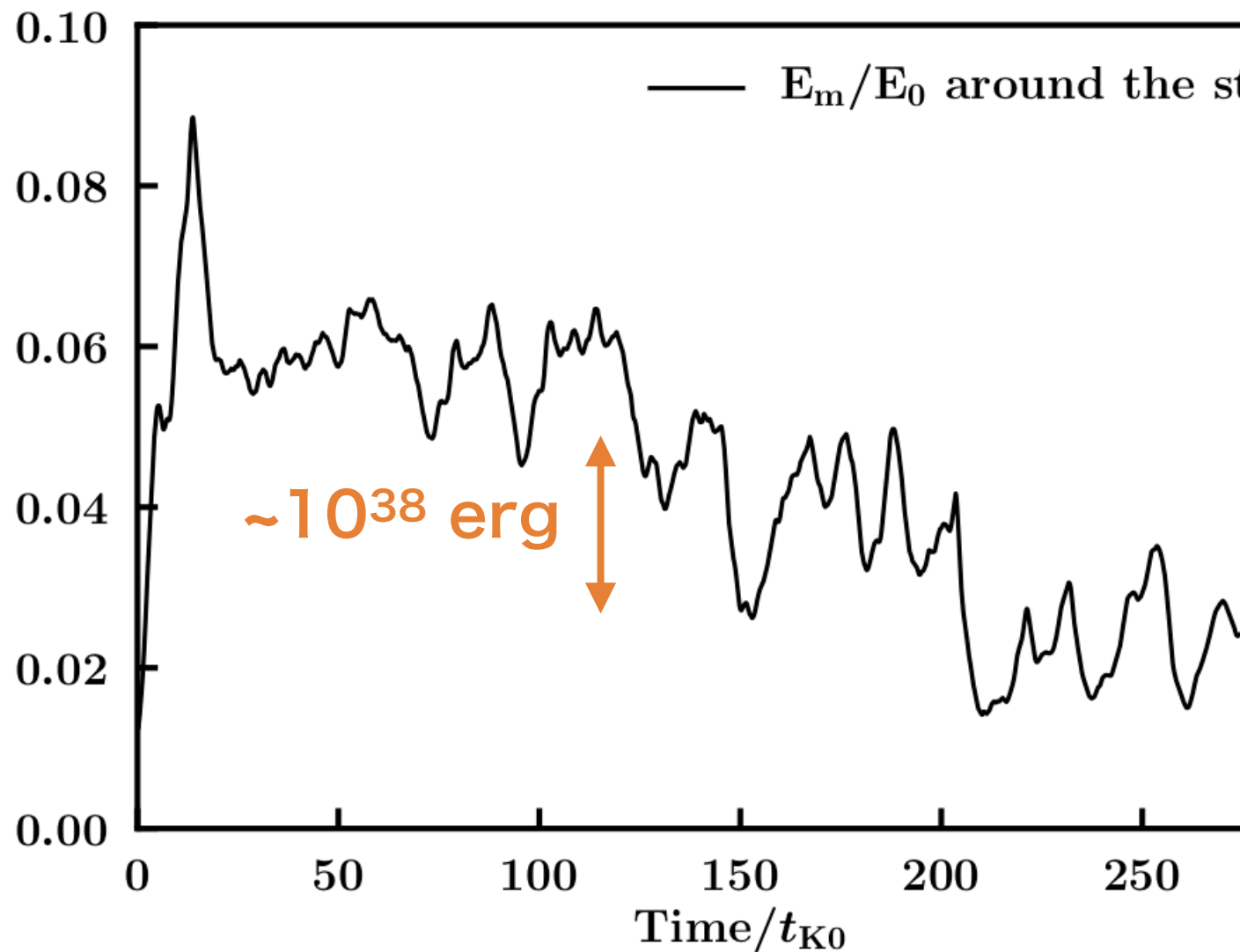
# 3次元シミュレーションの設定

前主系列段階のケースよりも強い磁場をもつ円盤を想定。  
先ほどと同様に、星の磁気圏は仮定しない。



# 激しい磁気エネルギー解放を伴う降着

星近傍の磁気エネルギーの総量  
( $r < 5 R_{\text{star}}$ )



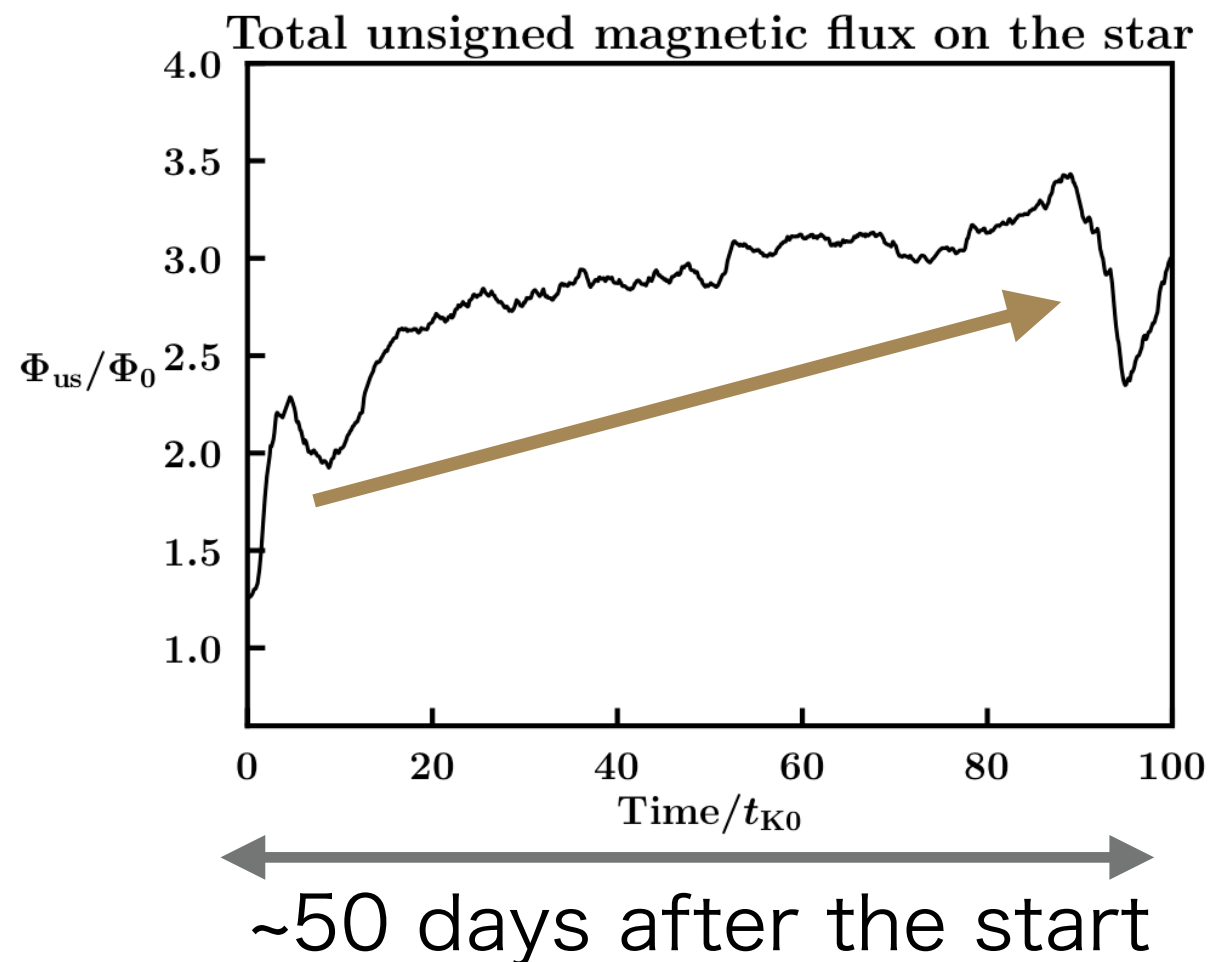
← ~150 days →

十分なエネルギーを持つ爆発が繰り返し発生

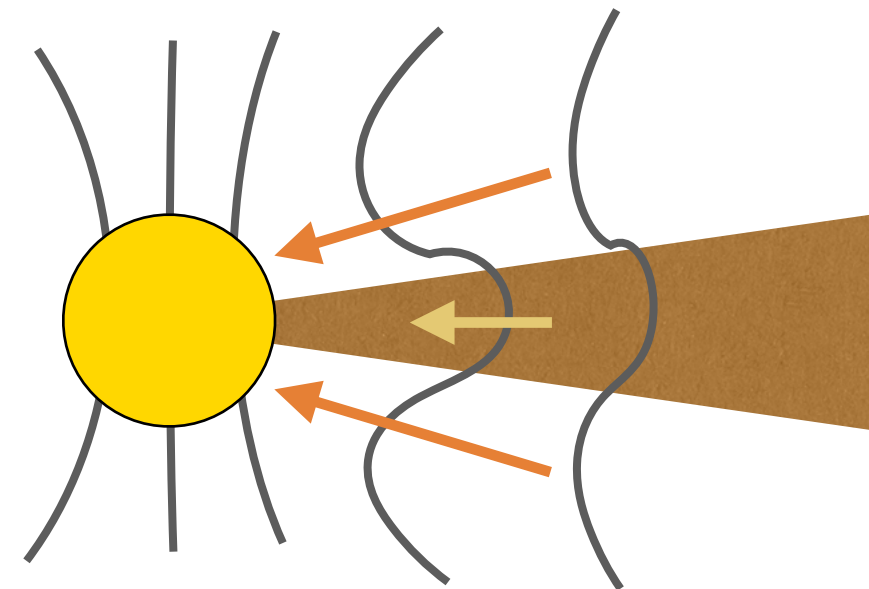
# 降着流による磁場の引き込み

エネルギー蓄積は、降着による星への磁場の溜め込み

星の持つ磁束量  
(平均磁場強度 ~ 1 kG)



降着流による中心天体への磁束輸送  
(BH disk のシミュレーションでよく見られているプロセス)



See also Matsumoto +96,  
Beckwith+09, Zhu & Stone 18

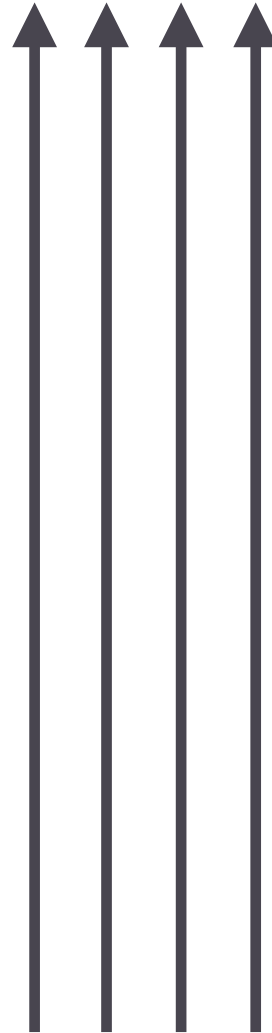
エネルギー解放は？



# 磁場の気持ちを考えてみる

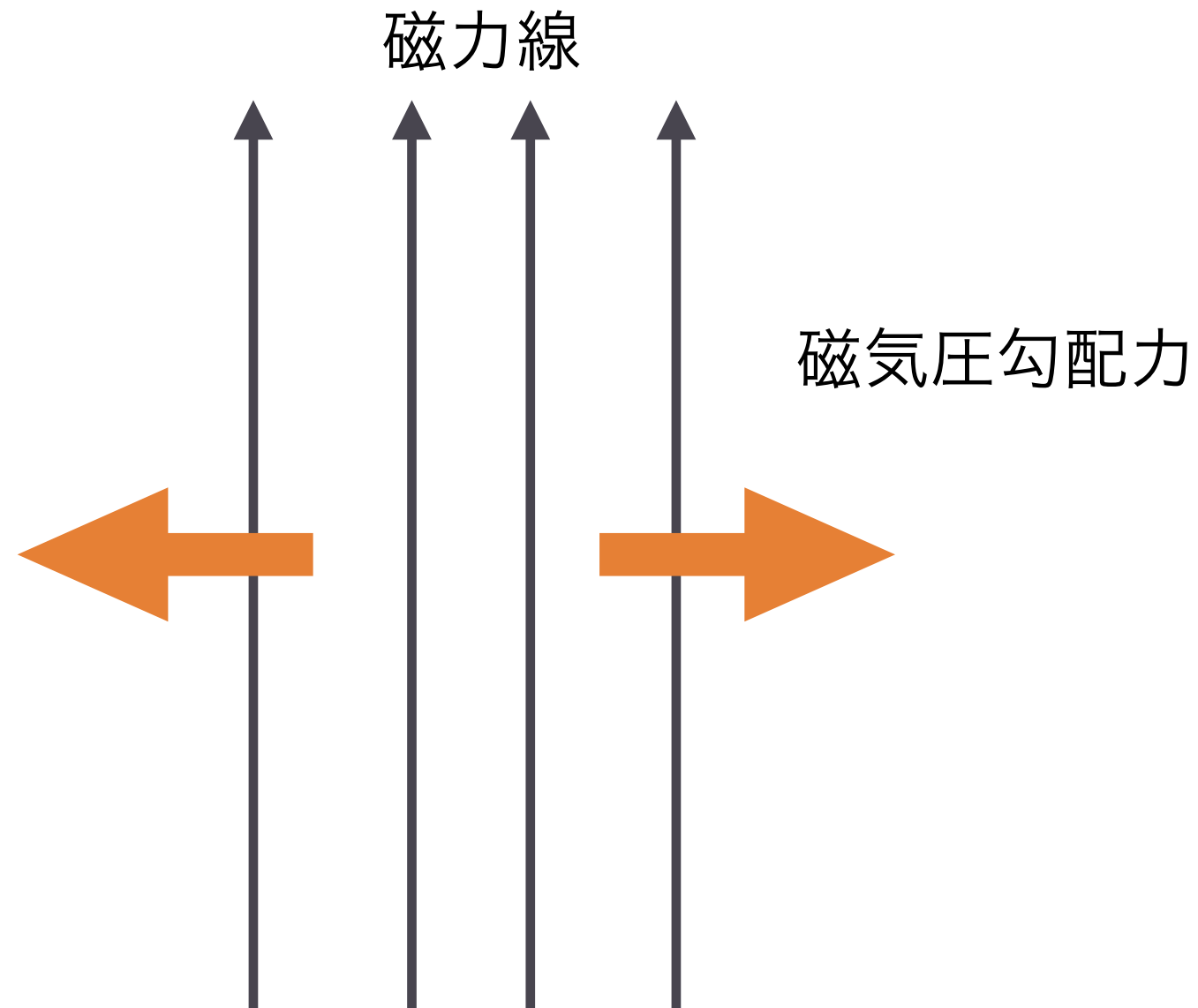
---

磁力線



# 磁場の気持ちを考えてみる

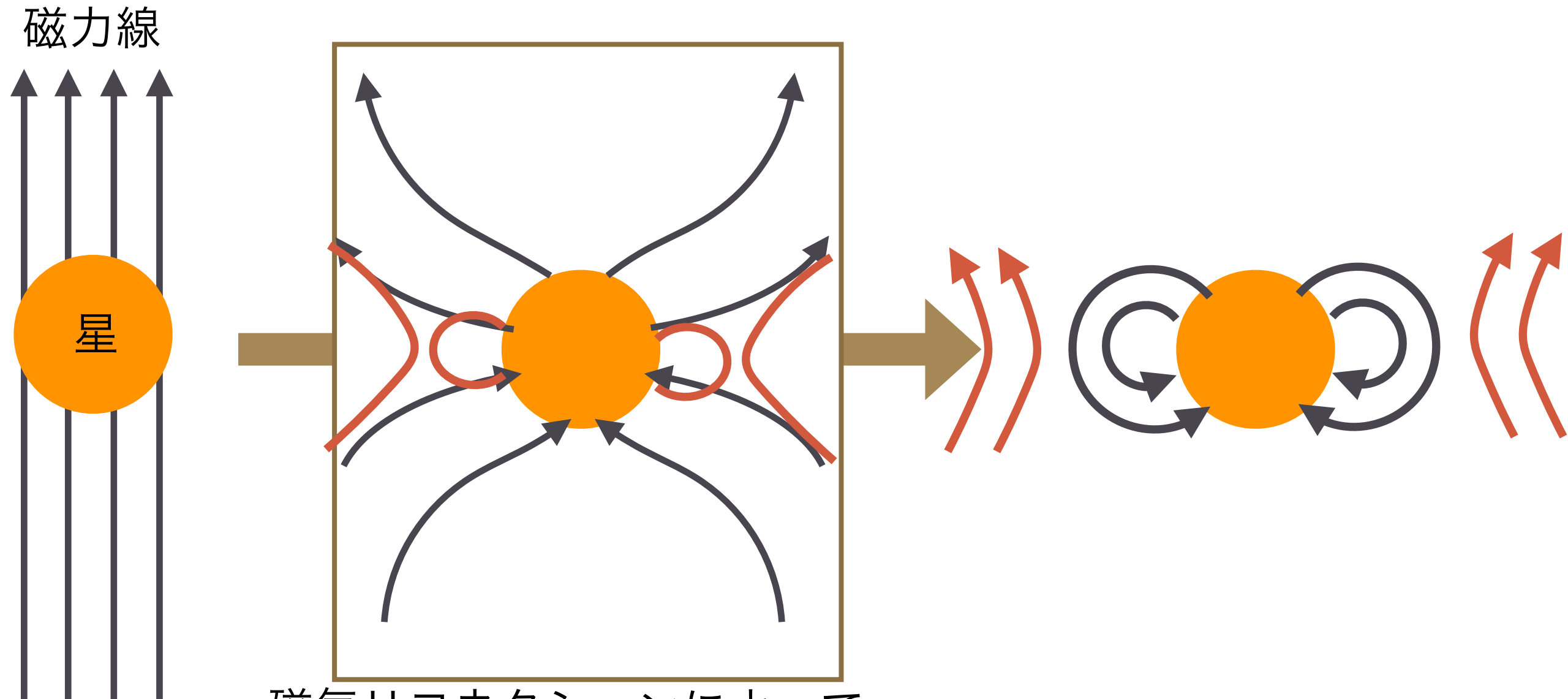
---



エネルギーを下げるために膨張

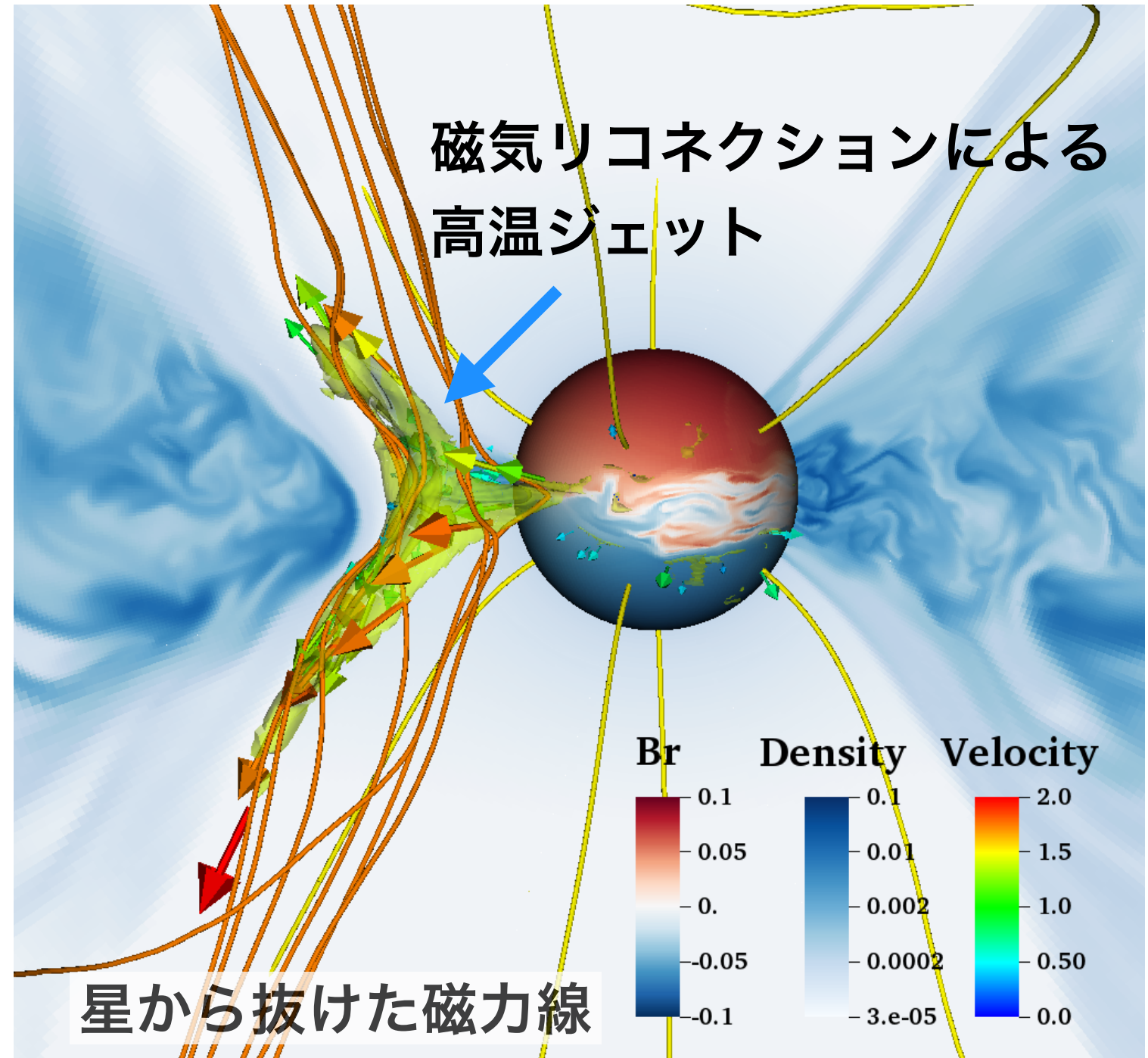
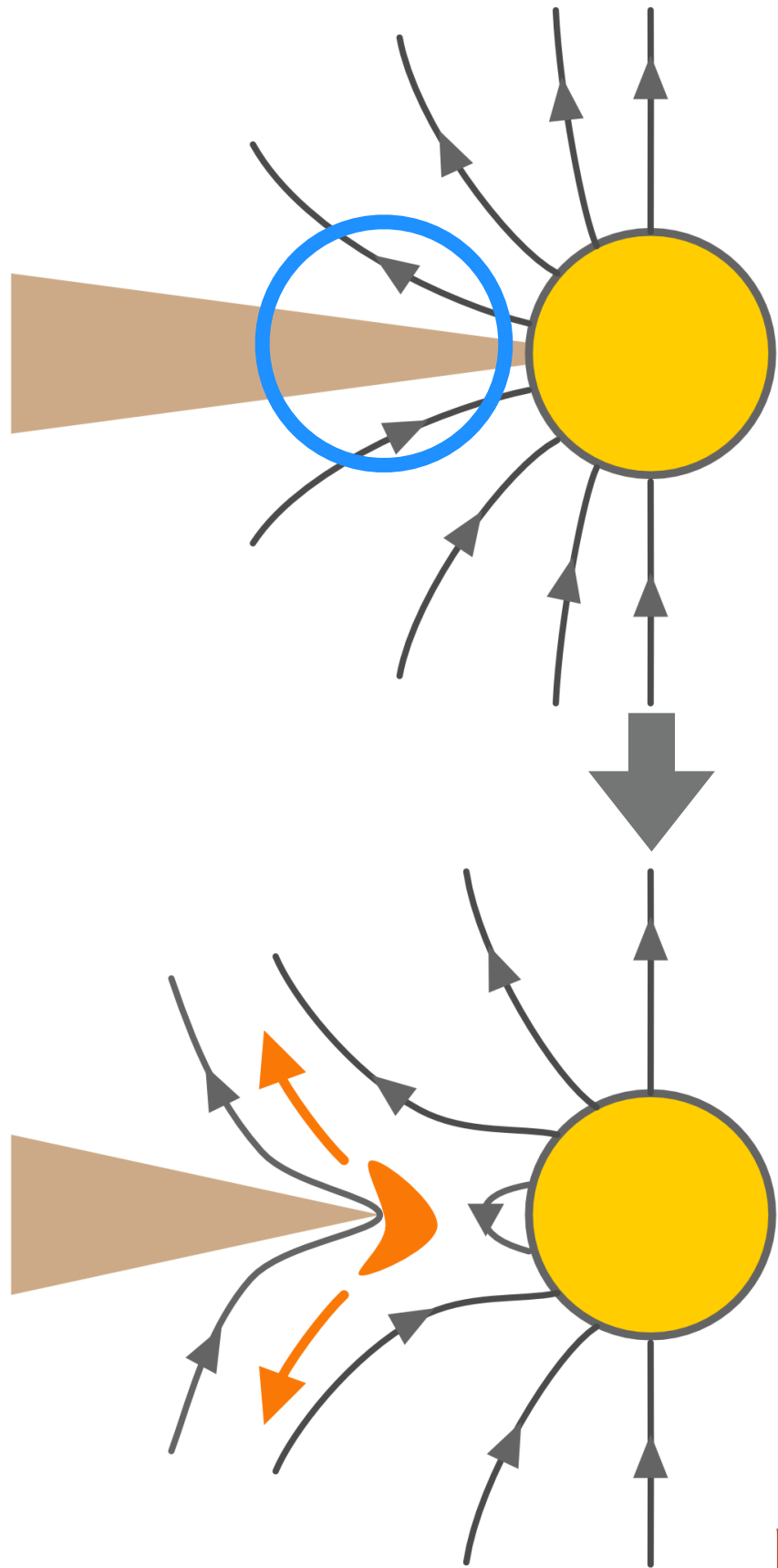
# 磁場の気持ちを考えてみる

磁力線が星にアンカーされていて、足元が動けない場合を考える。  
磁場の行きつきたい構造はエネルギーの低いダイポール磁場



磁気リコネクションによって  
磁場は外に逃げ、さらにループも作る

# フレアの発生



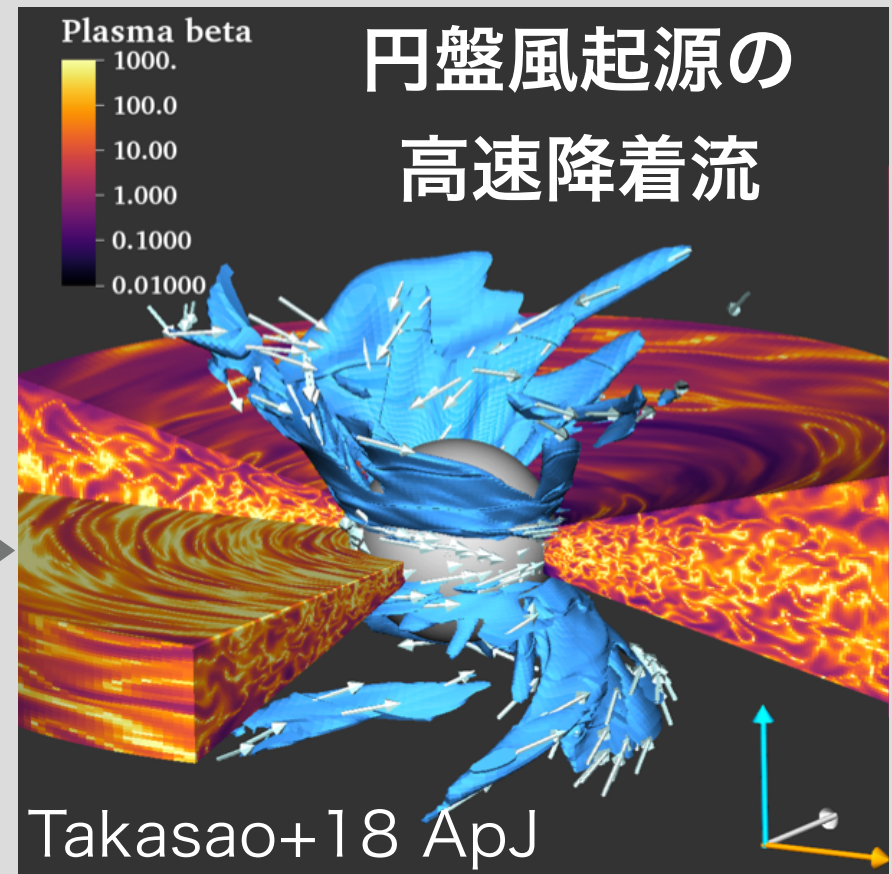
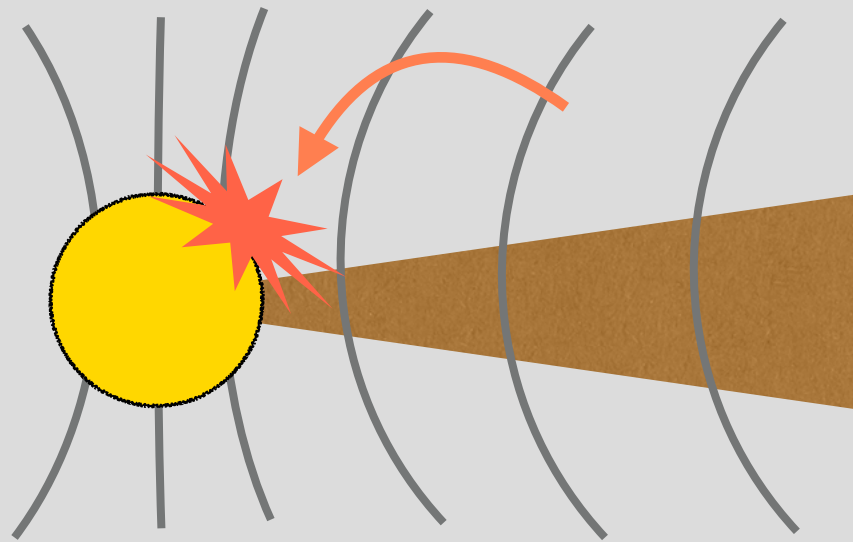
BH disk でも似た過程 : Komissarov 05, McKinney+12

磁束の抜き取り → 磁気リコネクション → 巨大フレア



# まとめ

標準的理解では  
磁気圏がないと高速な降着はないはず。  
←→ 観測と矛盾。なぜか？



原始星フレアの標準モデルは  
磁気圏を必要とする。  
しかし磁気圏はないかも・・・  
どうやってフレアを起こす？

