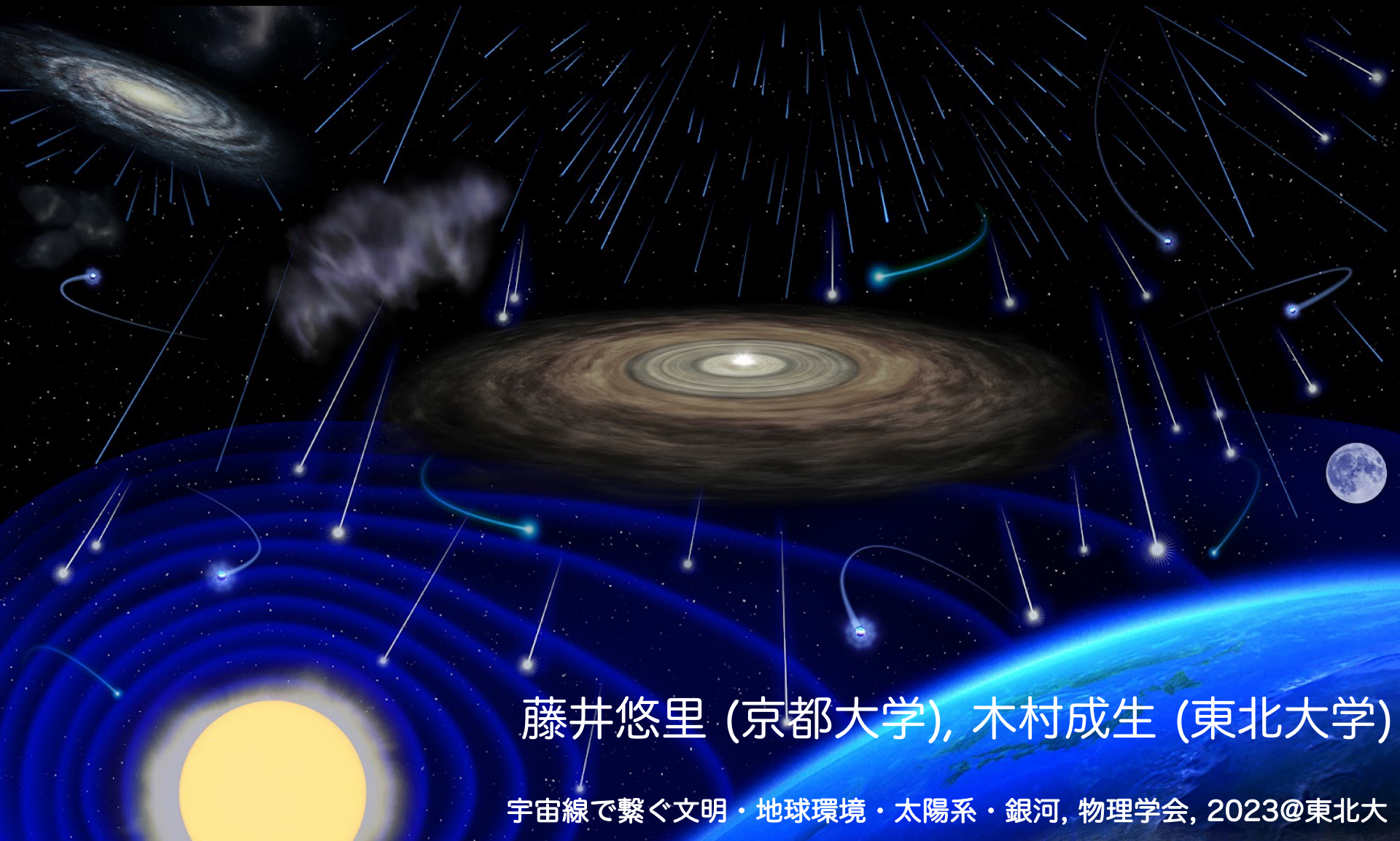


原始惑星系円盤における ガスの電離率と宇宙線



藤井悠里 (京都大学), 木村成生 (東北大学)

宇宙線で繋ぐ文明・地球環境・太陽系・銀河, 物理学会, 2023@東北大

原始惑星系円盤

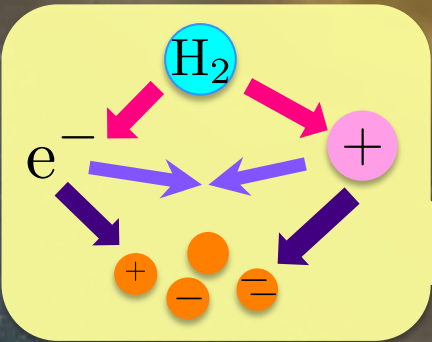
99%が水素・ヘリウムガス
1%の固体から惑星形成

宇宙線

原始星

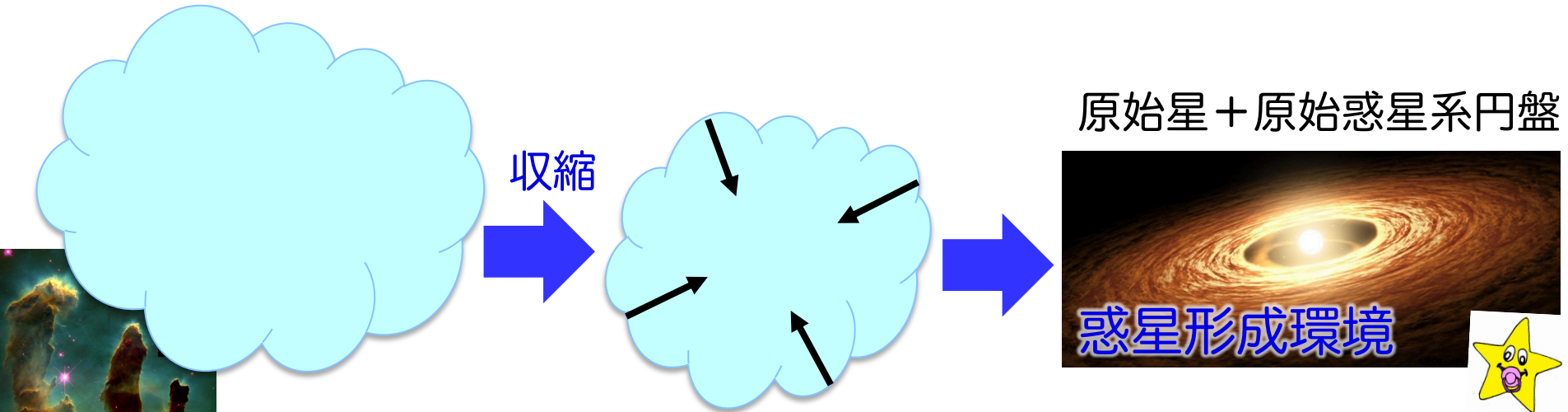
電離

- 化学反応の誘発
⇒ 円盤の化学的な進化
- 電離ガスと磁場の相互作用
⇒ 力学的な進化



星の誕生と一生

分子雲(ガスの塊)



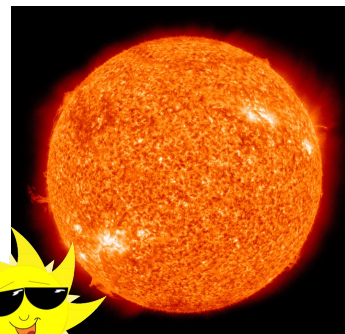
超新星残骸



惑星状星雲



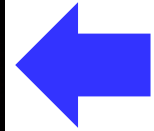
主系列星



円盤散逸

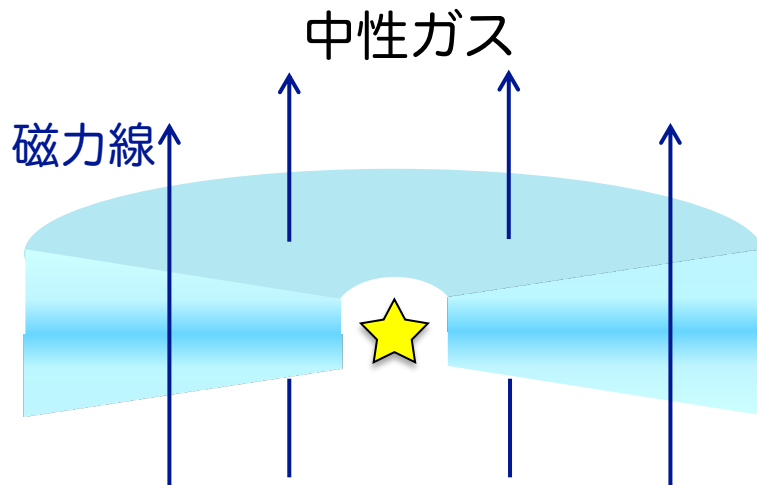
ガスが角運動量を失い
中心の星に落下(降着)

↑
宇宙線が重要

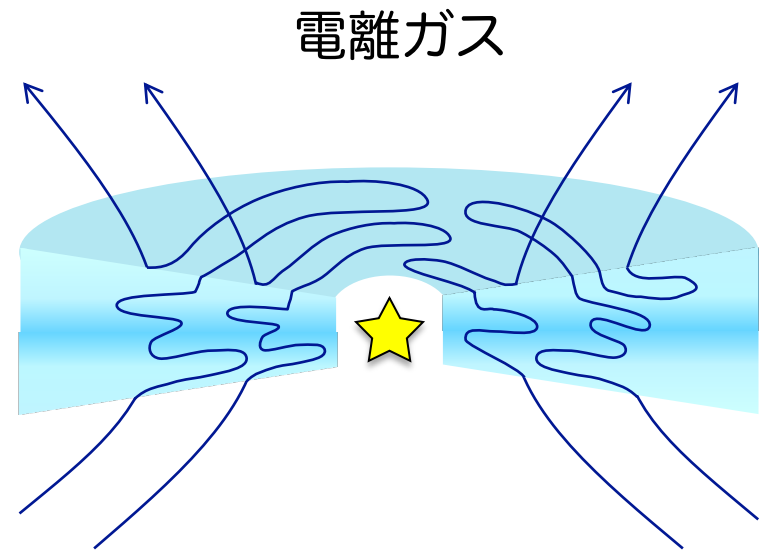


宇宙線×惑星形成

●原始惑星系円盤電離度と磁気流体力学的進化



円盤と磁場の相互作用なし

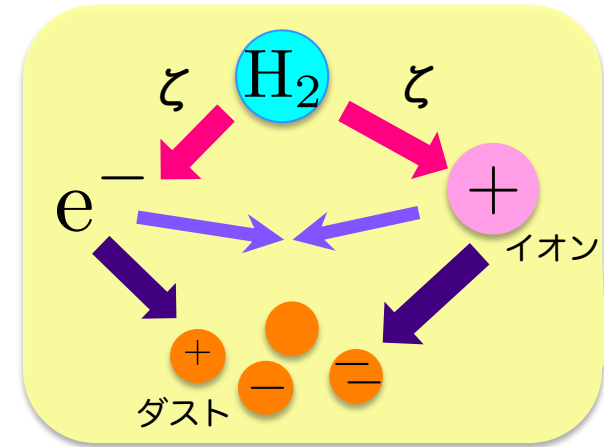
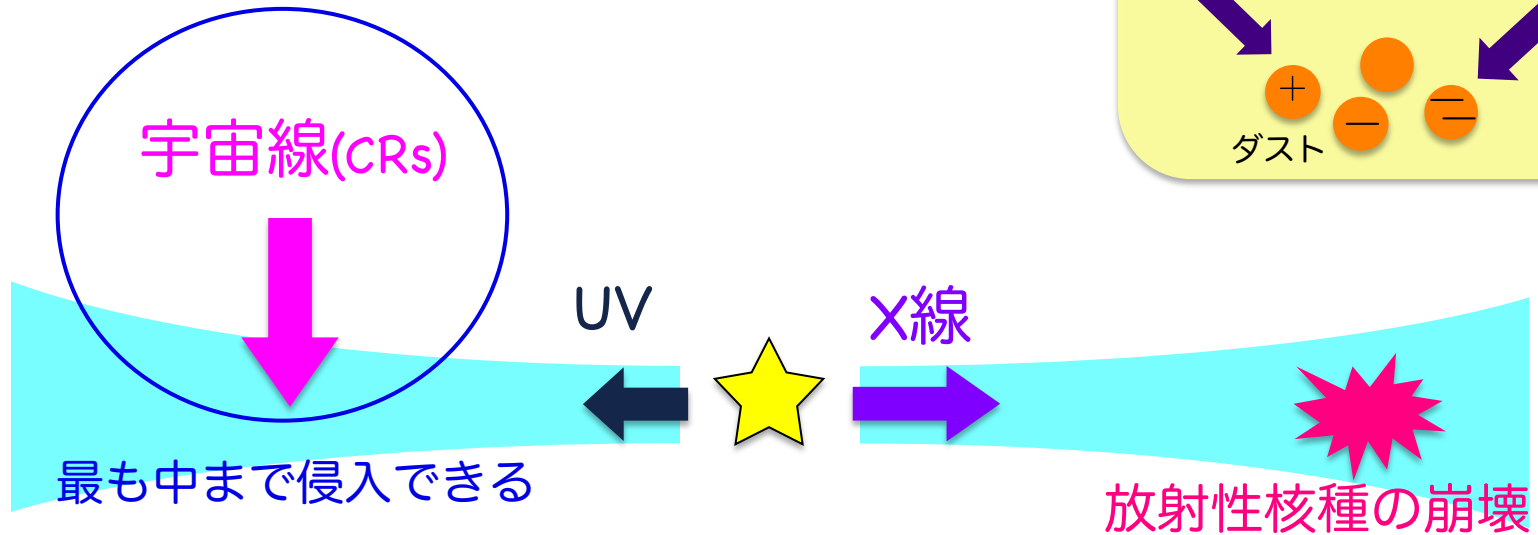


速度シアで磁場が引き延ばされる

円盤乱流強度⇒惑星の成長/破壊率, 円盤温度
円盤寿命⇒大気捕獲, 形成時期

●原始惑星系円盤の物質進化 (化学進化を誘発)

電離源



電離率が分かると

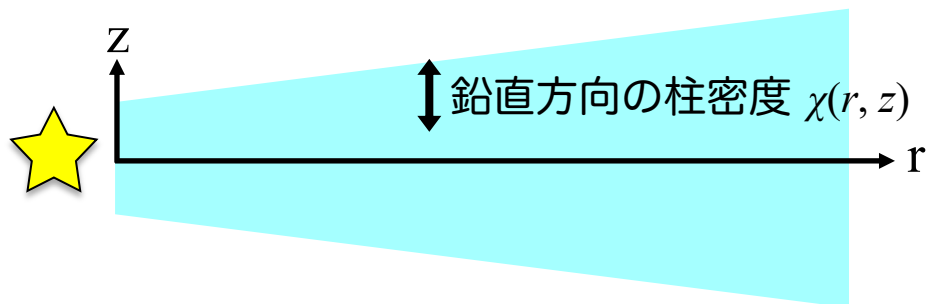
- 電離度を計算できる → 磁気流体力学的効果の評価可
- 化学反応ネットワークを計算できる

従来の電離率との見積り方

宇宙線電離率 Umebayashi & Nakano (1981)

$$\zeta(r, z) = \zeta_{\text{ISM}} \exp \left[-\frac{\chi(r, z)}{96 \text{ g cm}^{-2}} \right]$$

減衰長



ISM: interstellar medium (星間媒質)

$\zeta_{\text{ISM}} = 1 \times 10^{-17} \text{ s}^{-1}$: 円盤モデルに広く用いられる値



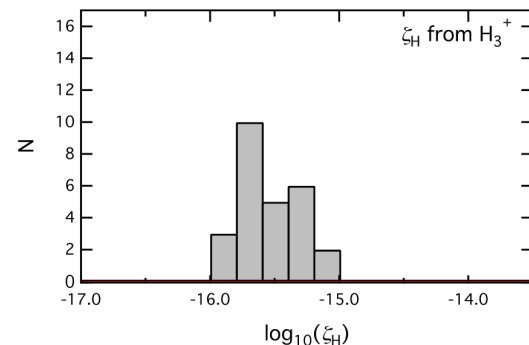
$\zeta_{\text{ISM}} \sim 3 \times 10^{-16} \text{ s}^{-1}$: 近年の観測から示唆される値

Indriolo+ (2015)

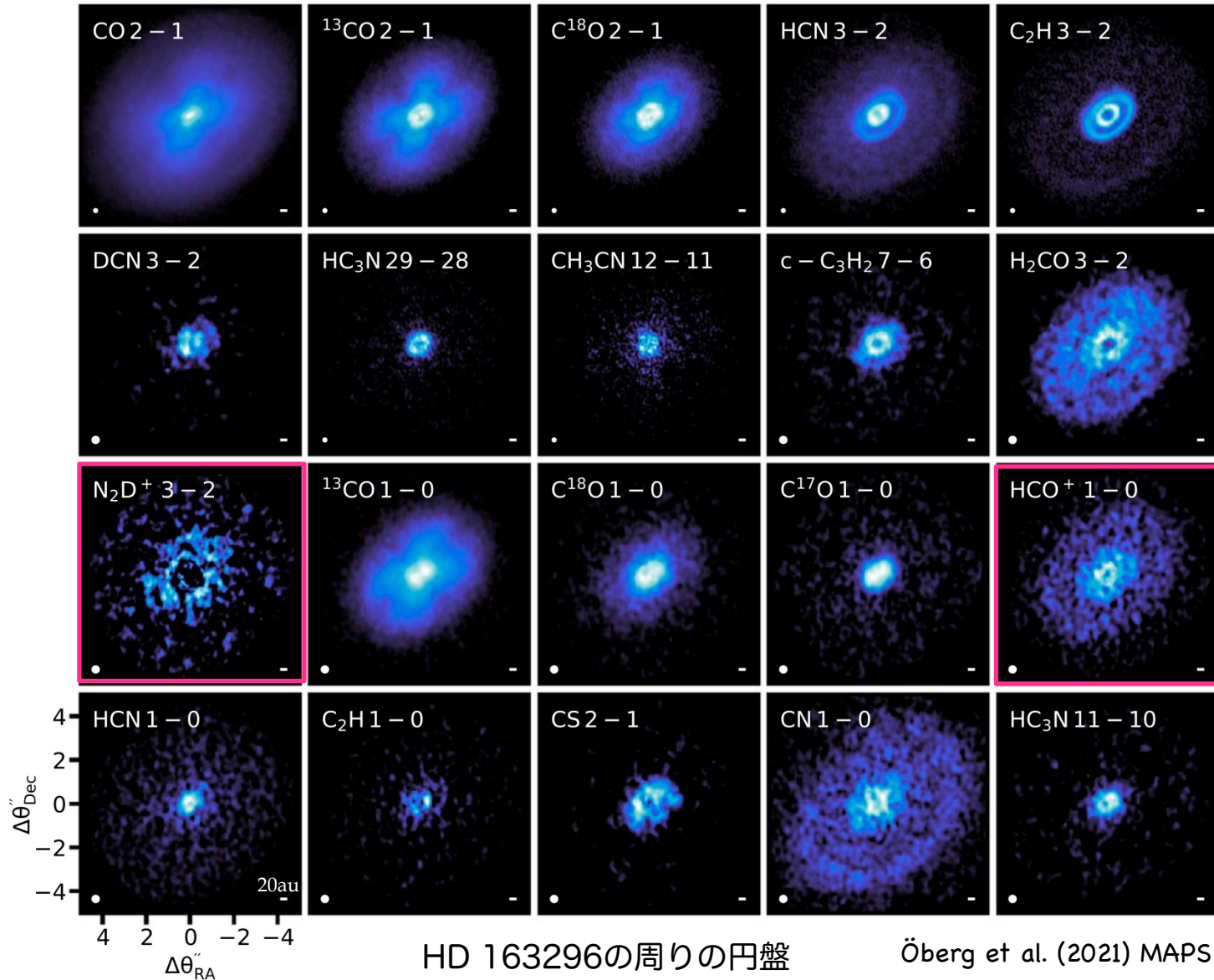


観測値を原始惑星系円盤に適用すると赤道面の電離度が高くなり過ぎてしまう

星間空間の観測



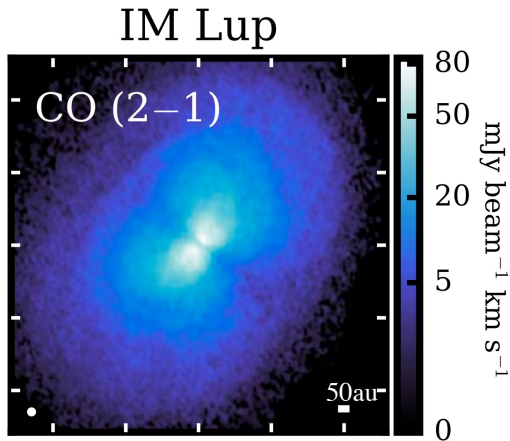
ALMAによる多様な分子の観測



HD 163296の周りの円盤

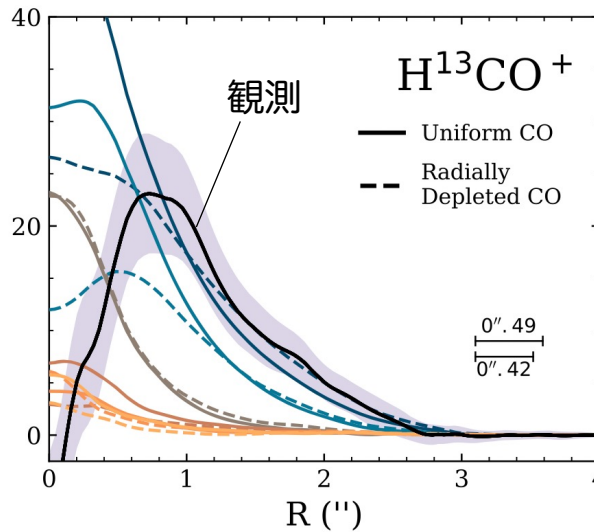
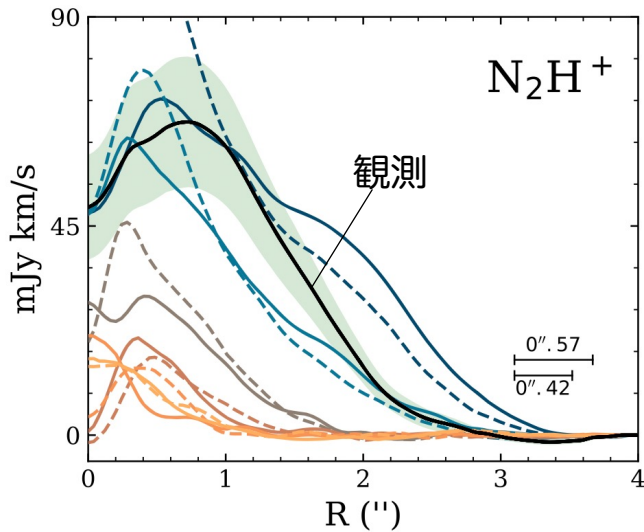
Öberg et al. (2021) MAPS I

IM Lup円盤の赤道面電離率分布



Zhang+ (2021) MAPS V

Model	ID	ζ_{CR} (s ⁻¹)	
Moskalenko et al. (2002)	M02	6.8×10^{-16}	} High
Webber (1998)	W98	2.0×10^{-17}	
Solar System Min	SSM	1.1×10^{-18}	} Low
Solar System Max	SSX	1.6×10^{-19}	
T Tauri Min	TTM	7.0×10^{-21}	
T Tauri Max	TTX	1.0×10^{-21}	

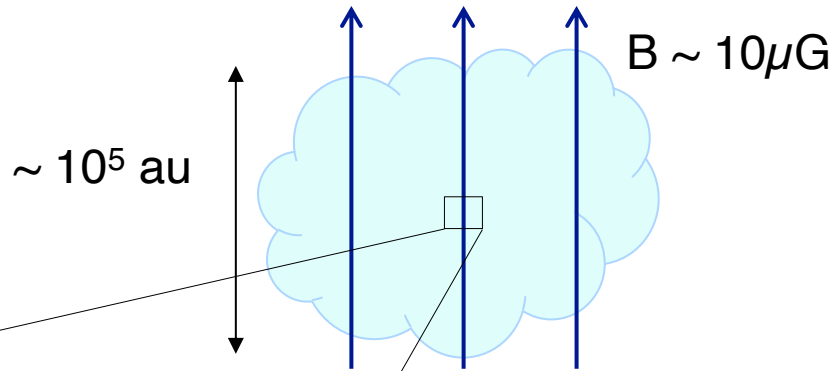


TTX }
TTM } Low ionization rate
SSX }
SSM }
W98 } High ionization rate
M02 }

円盤外側で高め、内側で低めの電離率が示唆される

Seifert+ (2021)

円盤への宇宙線の飛来

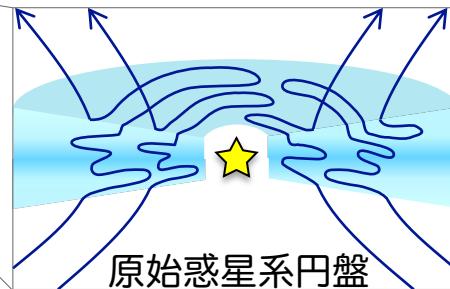
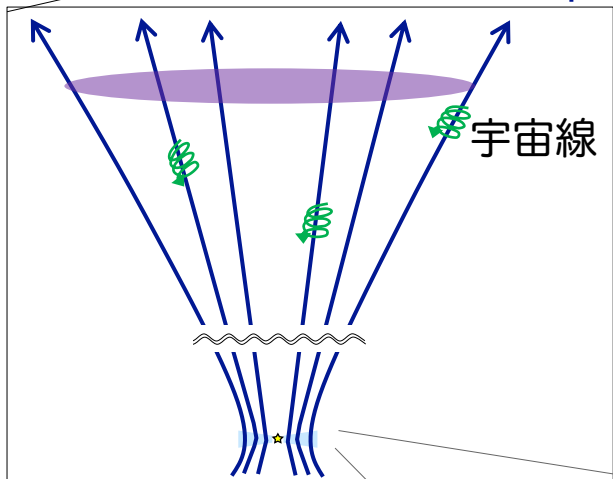


円盤磁場は分子雲磁場と
接続したままの状況を想定
(T-Tauriosphereとは異なる設定)
(Cleeves+ 2013)

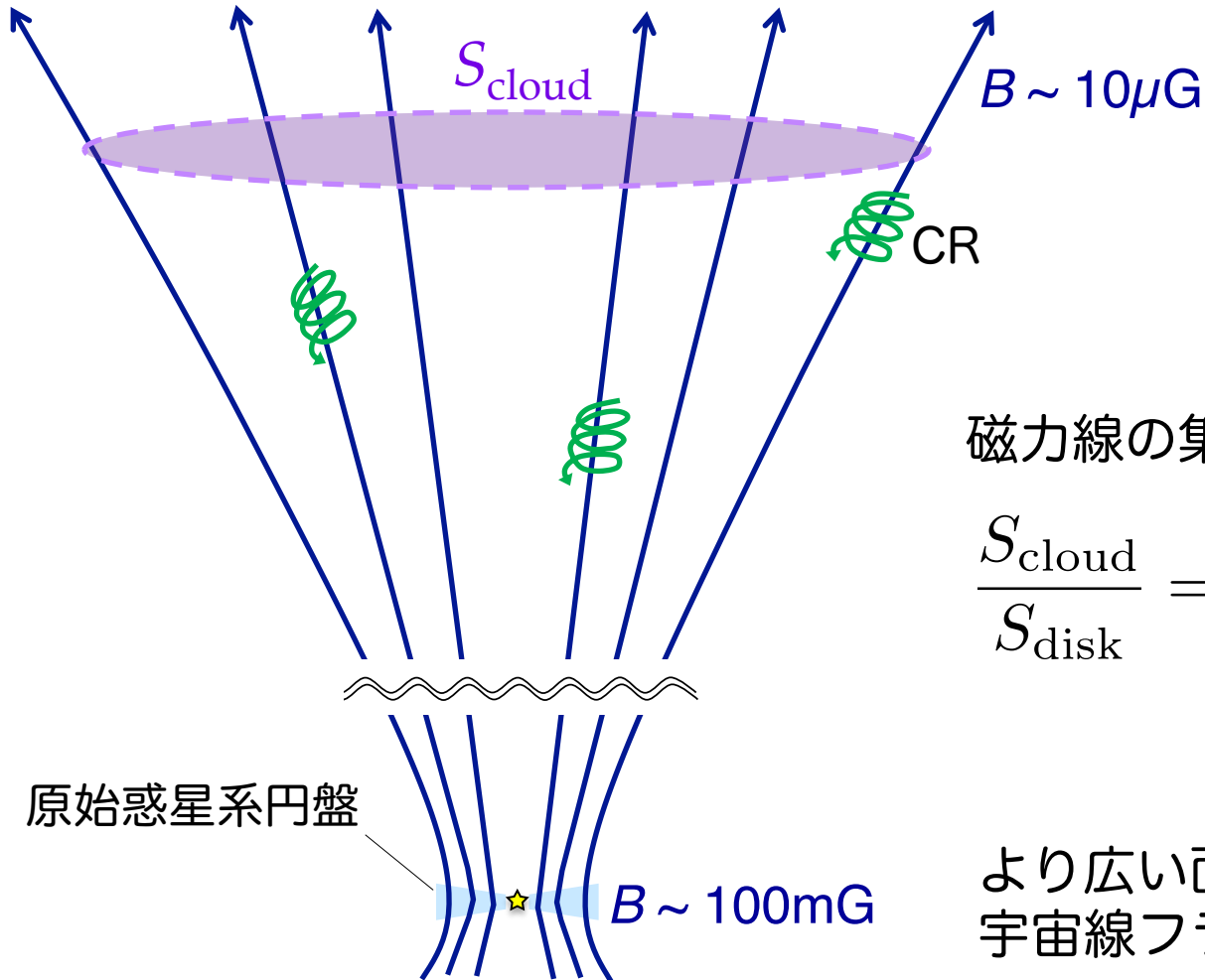
宇宙線のジャイロ半径

$$r_G(E=100\text{GeV}) \sim 1\text{au} \ll 10^5\text{au}$$

➔ 高エネルギーの宇宙線でも
磁力線に巻きつきながら
原始惑星系円盤にやってくる



宇宙線の集中



磁力線の集結によるフラックス増加

$$\frac{S_{\text{cloud}}}{S_{\text{disk}}} = \frac{B_{\text{disk}}}{B_{\text{cloud}}} \sim \frac{100 \text{ mG}}{10 \mu\text{G}} = 10^4$$

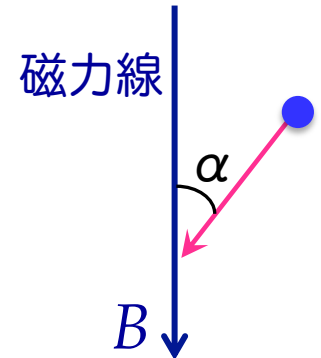
より広い面積から集めるため
宇宙線フラックスは 10^4 倍に増える

宇宙線の反射

磁気モーメントの保存より

$$\frac{\sin^2 \alpha_{\text{disk}}}{\sin^2 \alpha_{\text{cloud}}} = \frac{B_{\text{disk}}}{B_{\text{cloud}}} = 10^4$$

α : ピッチ角



$\Rightarrow \sin \alpha_{\text{cloud}} < 0.01$ でなければ磁気ミラーで反射されてしまう

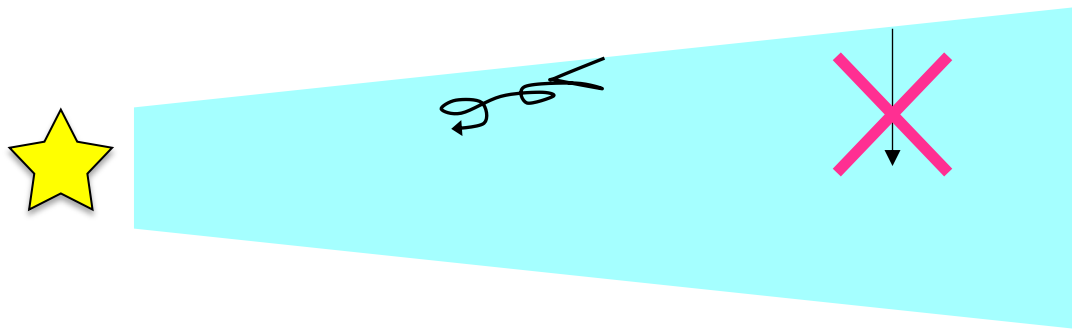
ほぼ磁力線に沿って運動する宇宙線粒子しか円盤に侵入できない

宇宙線のフラックスは $\alpha^2/4 = 2.5 \times 10^{-5}$ 倍になる

磁場による集中と反射の結果、飛来する
宇宙線フラックスは母天体分子雲中の 1/4 に減少

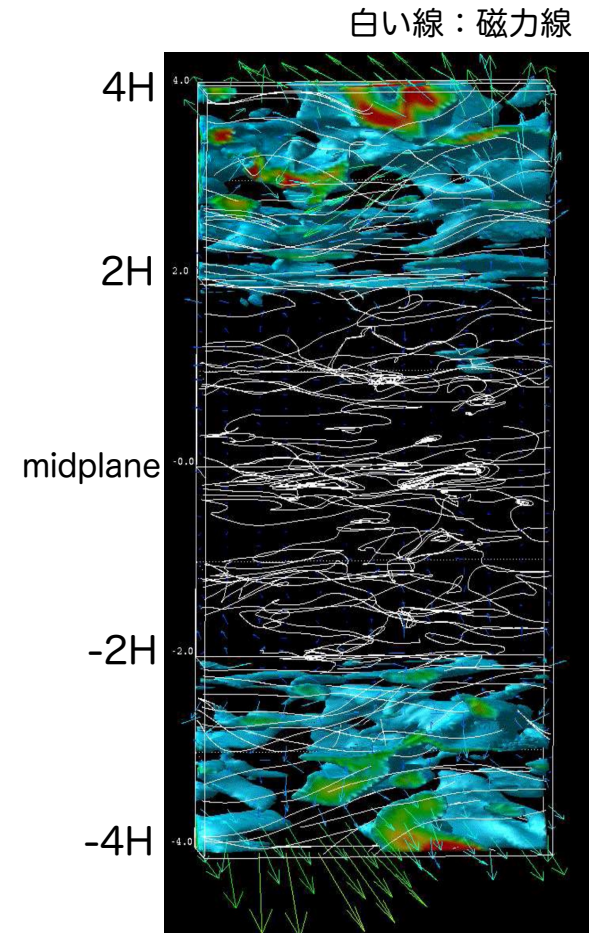
原始惑星系円盤の磁場構造

速度シアで引き延ばされるため
トロイダル成分が卓越する



宇宙線は磁場に沿って伝搬する

⇒ 実効的な柱密度が大きくなる



Suzuki & Inutsuka (2009)

磁場に沿った宇宙線の遠回り

磁気流体力学シミュレーションで
引き延ばされた磁場構造を再現

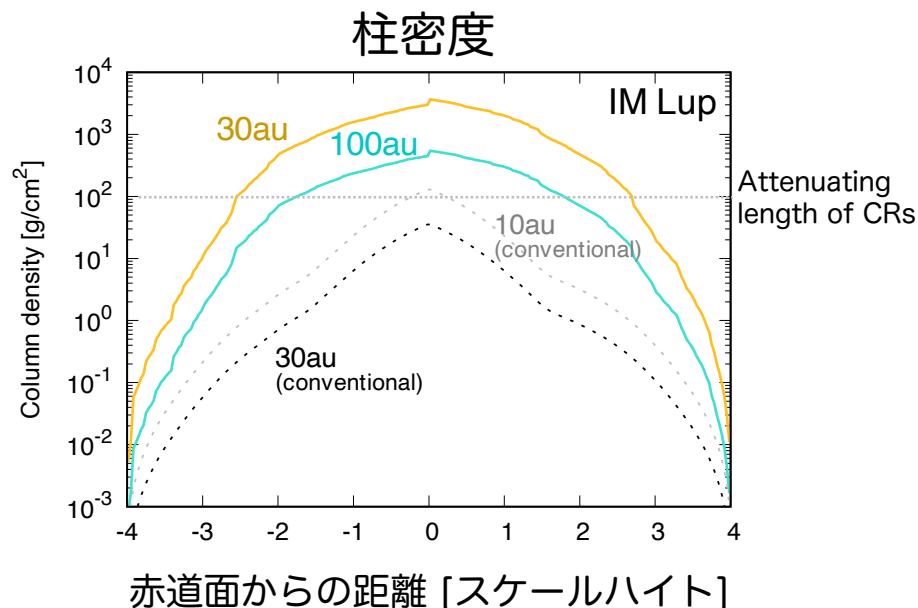
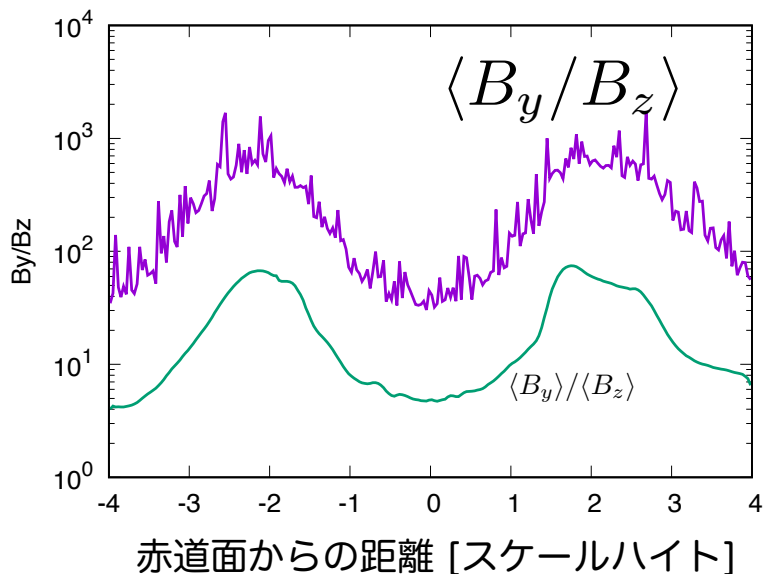
方位角成分の磁場が増強される
⇒ 宇宙線は $\sim B_y/B_z$ だけ遠回りする

Simulation settings

Local ideal MHD (Athena)

Box size : Hx2Hx8H

Resolution : 30x60x240



B_y/B_z は磁場強度に依らず同様の分布

上空で宇宙線が減衰してしまう

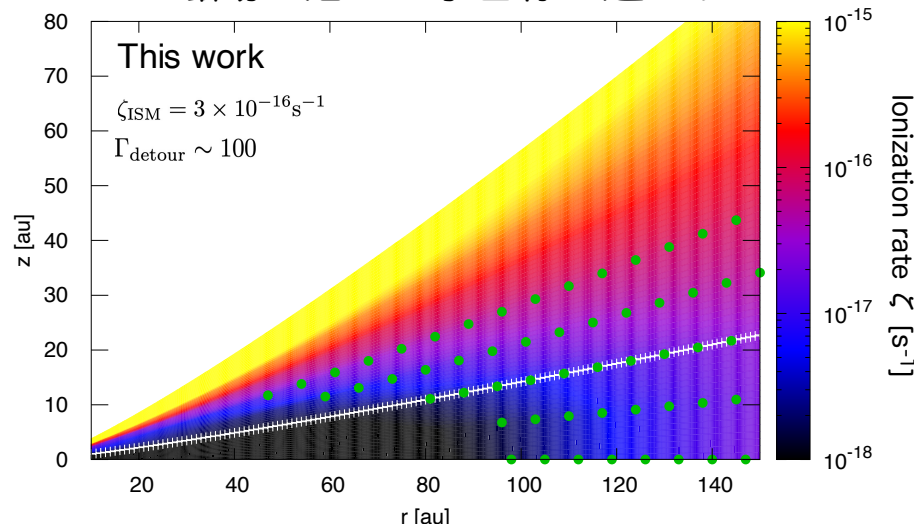
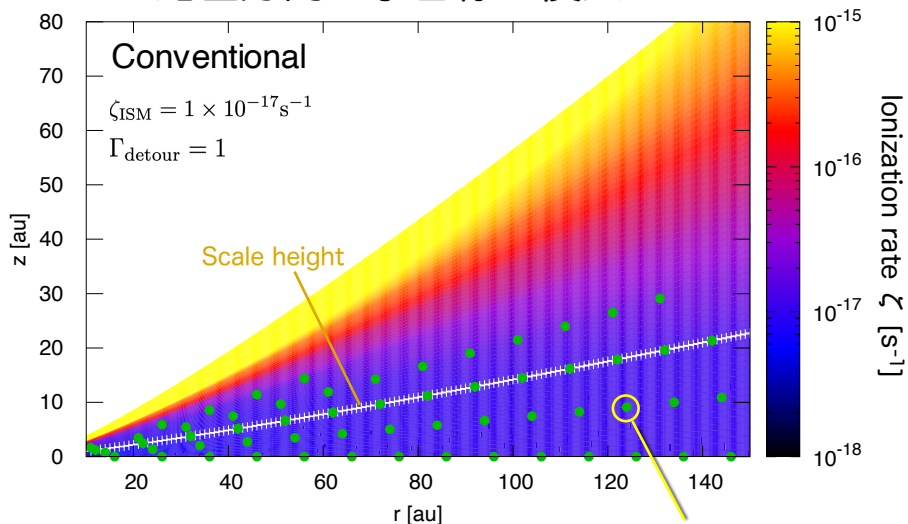
円盤内の電離率の分布

$$\chi(r, z) = \int_z^\infty \rho(r, z) dz$$

$$\xi_{\text{detour}} \chi_{\text{eff}}$$

鉛直方向に宇宙線が侵入

磁場に沿って宇宙線が遠回り



Dominated by CR

Conventional: $\zeta_{\text{CR}} = \zeta_{\text{ISM}} \exp\left[-\frac{\chi(r, z)}{\chi_{\text{CR}}}\right]$

This work: $\zeta_{\text{CR}} = \Gamma_{\text{dim}} \zeta_{\text{ISM}} [\exp(-\Gamma_{\text{detour}} \chi_{\text{eff}} / \chi_{\text{CR}})]$

Fujii & Kimura (2022)

Disk model (IM Lup)

$$\Sigma = 28.4 \left(\frac{r}{100\text{au}}\right)^{-1} \exp\left(-\frac{r}{100\text{au}}\right)$$

$$H = 10.0 \left(\frac{r}{100\text{au}}\right)^{1.17}$$

$$M_* = 1.1 M_\odot$$

(Zhang+ 2021, Lynden-Bell & Pringle 1974, Andrews+ 2011)

Ionization rate

$$\zeta = \zeta_{\text{CR}} + \zeta_{\text{X}} + \zeta_{\text{RN}}$$

$$\chi_{\text{CR}} = 96 \text{ g cm}^{-2}$$

X-rays:

Igea & Glassgold(1999),

Bai & Goodman (2009)

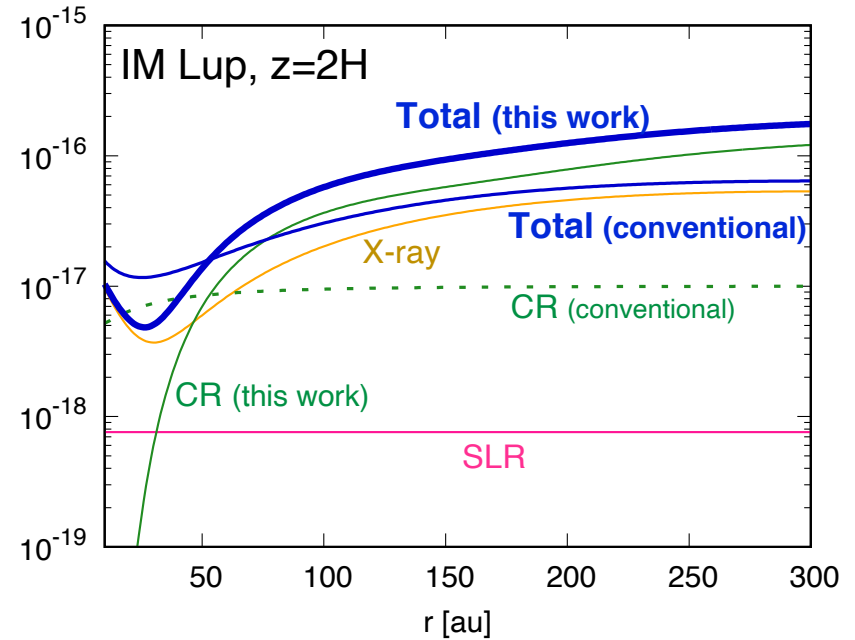
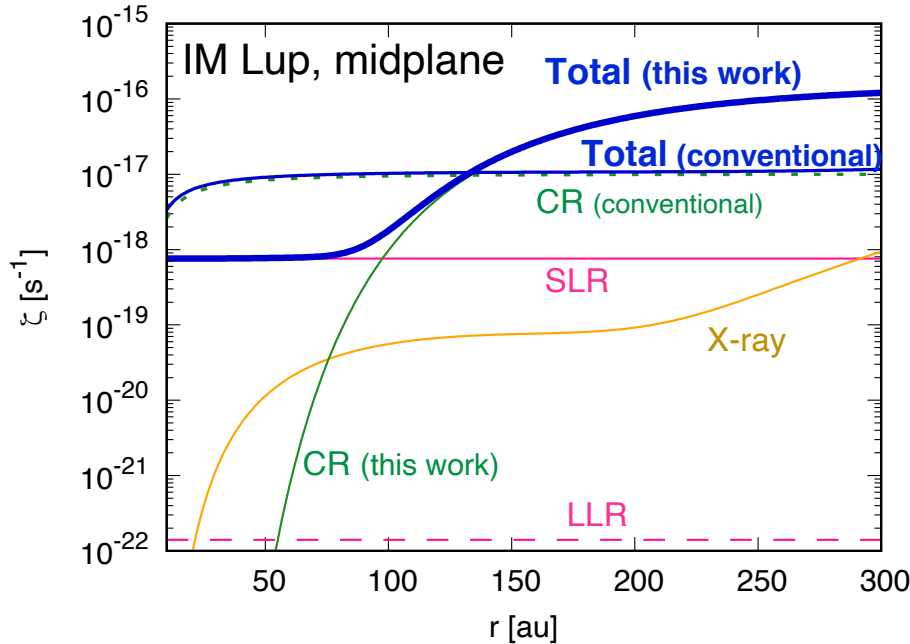
$L_X = 10^{30} \text{ erg/s}$, $T_X = 3 \text{ keV}$

Radionuclides: $\zeta_{\text{RN}} = 7.6 \times 10^{-19} \text{ s}^{-1}$

Umebayashi & Nakano (2009)

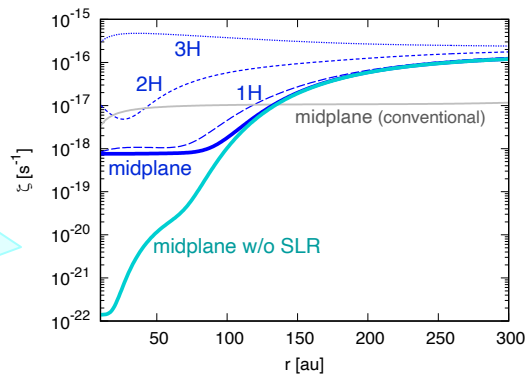
各電離源の寄与

Fujii & Kimura (2022)



$r \gtrsim 130\text{au}$: Higher ionization rate due to higher input
 $r \lesssim 130\text{au}$: Lower value despite of high input rate

CR contribution can be larger than that of X-ray



単寿命放射性核種が
残っていない場合

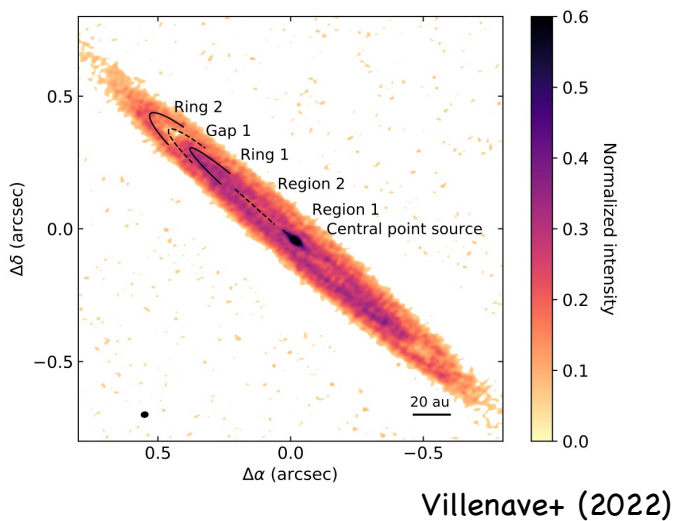
☆ IM Lup円盤の観測結果

Low ζ_{CR} in inner disk and high ζ_{CR} in outer disk
with the transition at $\sim 80\text{-}100\text{au}$ Seifert+ (2021)

我々のモデルと整合的

惑星形成の環境は乱流か？

- Oph 163131周りの薄い円盤

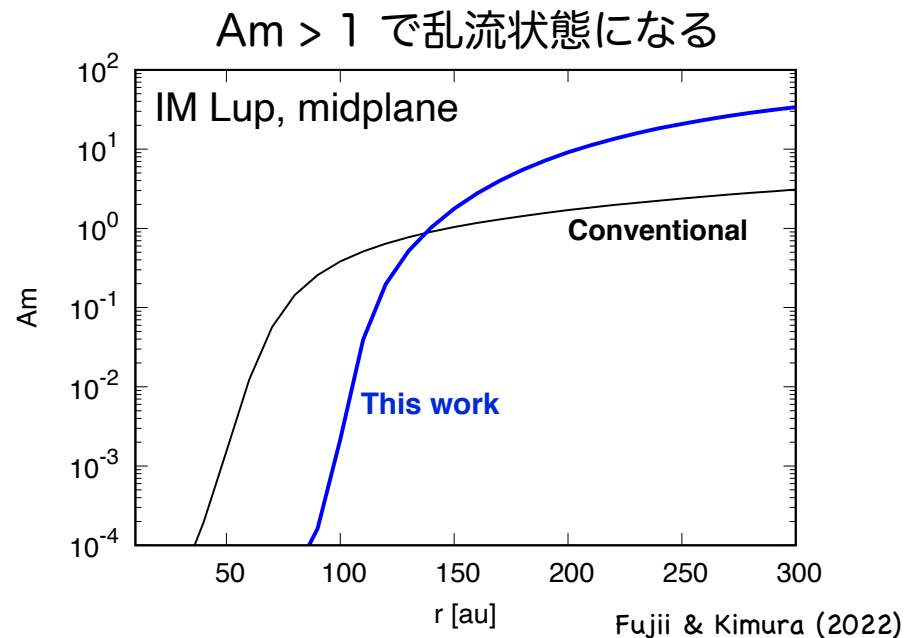


~100au 辺りで層流を示唆

- 両極性拡散による乱流安定化

半径が大きいくところでは磁気回転不安定性による乱流が抑制される

Bai & Stone (2013), Bai (2013), Simon+ (2015)



> 150auで乱流が駆動される

Conclusion & Discussion

- ζ_{ISM} が大きくても円盤赤道面の電離度はとても低い
 - 星間空間の電離率の観測と円盤内の分子の観測の両方と整合的
 - 円盤内側で低く、外側で高い電離率分布を再現できる
- 円盤上空が乱流状態だった場合
 - 磁力線が分子雲コアに接続されていないかもしれないので、低エネルギー宇宙線が侵入できない
 - 宇宙線が拡散的に伝搬するため、さらに上空で宇宙線が減衰する (そうなると乱流自体も減衰する)
 - 非理想磁気流体力学シミュレーションが必要
- (素通りすると思っていた)高エネルギー宇宙線は惑星形成に重要