

熱イオンの運動論的効果を考慮した 円形トカマクプラズマにおけるインファーマルモードの 運動論的MHDハイブリッドシミュレーション

佐藤雅彦¹, 藤堂泰¹, 相羽信行², 武智学²

¹核融合科学研究所,

²量子科学技術研究開発機構

M. Sato, Y. Todo, N. Aiba and M. Takechi,
“Kinetic-magnetohydrodynamic hybrid simulation of infernal modes
in circular tokamak plasmas with effects of kinetic thermal ions”,
Nuclear Fusion **64** 076021 (2024).

Outline

1. 背景、目的
2. 計算モデル
3. 理想インファーマルモードの線形安定性、非線形発展
4. 抵抗性インファーマルモードの線形安定性、非線形発展
5. まとめ

The logo for the Plasma Simulator, featuring the text "PLASMA SIMULATOR" in a stylized font. The text is white and set against a dark blue background with a glowing blue lightning bolt graphic. The logo is positioned in the top right corner of the slide, partially overlapping a blue header bar and a dark blue background image of server racks.

PLASMA
SIMULATOR

背景

A blue logo with the text "PLASMA SIMULATOR" and a stylized lightning bolt graphic.

- 非誘導電流であるブートストラップ電流の割合が増加する高ベータ放電は、トカマクプラズマの定常運転シナリオの一つ。
- ブートストラップ電流は磁気軸から離れた位置で最大値をとるため、平坦な q 分布、あるいは、負の磁気シア配位となり、コア領域の磁気シアが弱くなる。
- このような弱い磁気シア領域に大きな圧力勾配が存在すると、高 n バルーニングモードの安定ベータ限界よりも低いベータ値において、インファナルモードが発生する可能性が指摘されている[1]。
- 線形理想MHD解析[2,3]により、理想インファナルモードの安定限界の破れが、JT-60Uで観測されたポロイダルベータ崩壊の発生と一致すること示されている。

[1] J. Manickam et al, Nucl. Fusion 27 1461 (1987).

[2] T. Ozeki et al, Nucl. Fusion 33 1025 (1993).

[3] T. Ozeki et al, Nucl. Fusion 35 861 (1995).

線形理想MHDモデルによるインファーマルモード解析の問題点

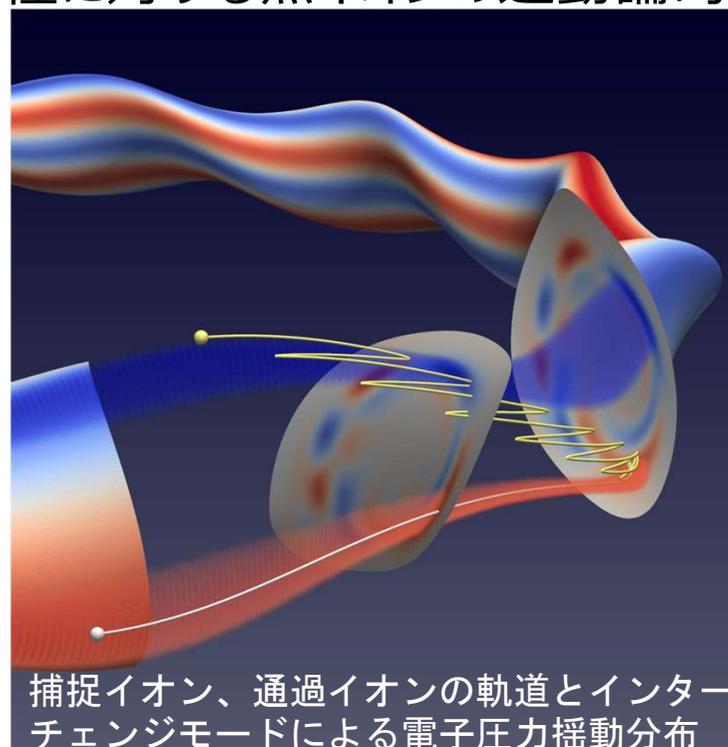
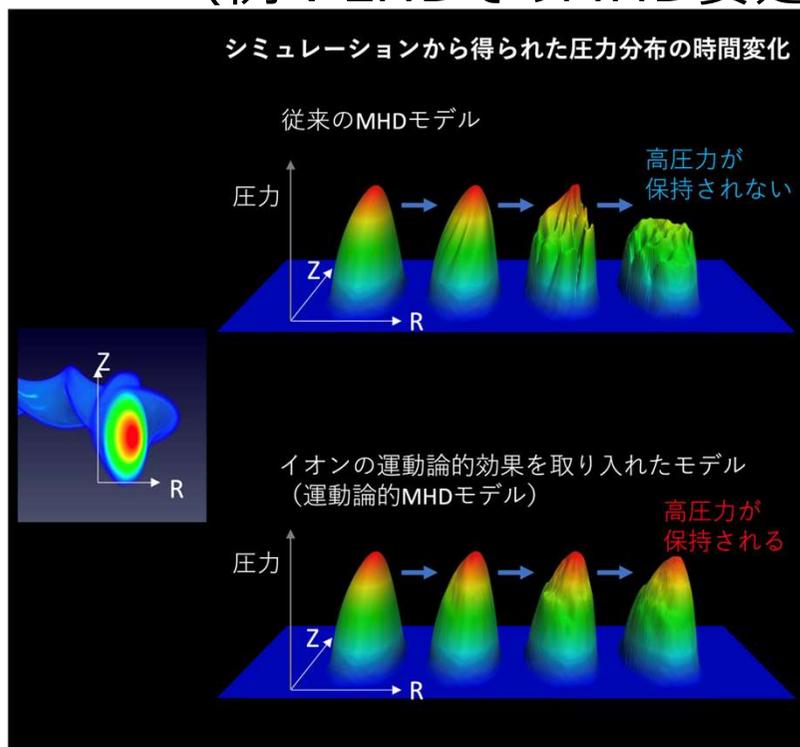
- 非線形飽和状態は？
 - 文献[2,3]は線形理想MHDモデルに基づいているため、不安定性の非線形飽和状態が閉じ込め性能に与える影響が明らかでない。
- 抵抗性モードの影響は？
 - 理想インファーマルモードが安定な低ベータ領域では、抵抗性インファーマルモードが不安定モードとして残る可能性があり、抵抗性モードの影響も調べる必要がある。

[2] T. Ozeki et al, Nucl. Fusion **33** 1025 (1993).

[3] T. Ozeki et al, Nucl. Fusion **35** 861 (1995).

線形理想MHDモデルによるインフアーナルモード解析の問題点

- 運動論的効果の影響は？
 - 理想モードの安定限界付近では不安定性が緩やかに成長するため、MHDモデルでは無視されている運動論効果が重要になる可能性がある。
(例：LHDでのMHD安定性に対する熱イオンの運動論的効果[4])



[4] M. Sato and Y. Todo, Nucl. Fusion **61** 116012 (2021).

目的

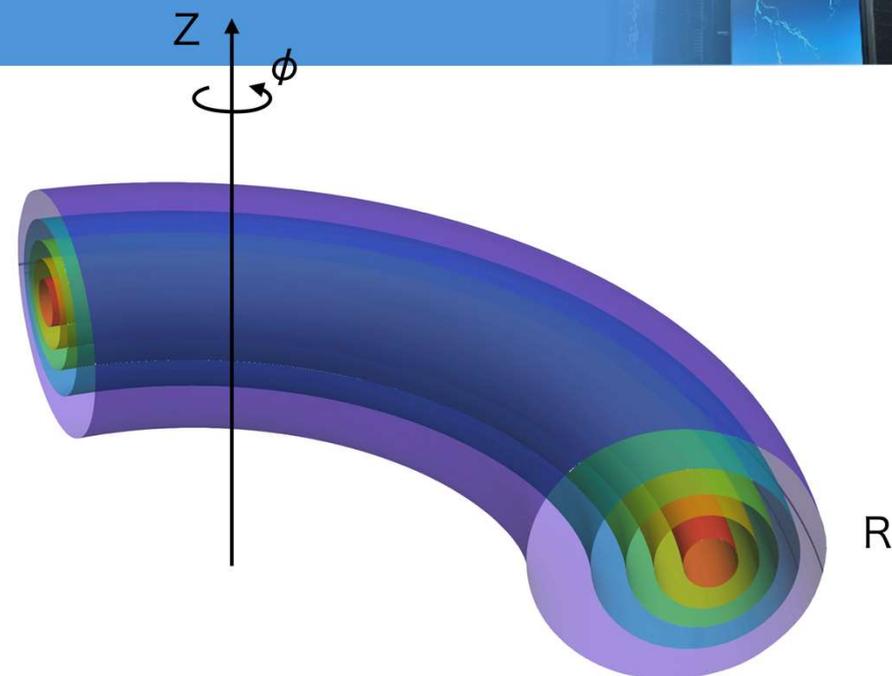
A logo for a plasma simulator, featuring the text "PLASMA SIMULATOR" in a blue, sans-serif font. The text is positioned above a stylized blue lightning bolt graphic that strikes downwards. The background of the logo is dark, possibly representing a computer monitor or a control panel.

- 本研究では、熱イオンの運動論的效果を考慮した運動論的MHDシミュレーションにより、トカマクプラズマにおける理想インファーマルモード、および、抵抗性インファーマルモードの両方を解析し、インファーマルモードにより決定される最大ベータ値対する、熱イオンの運動論的效果の影響を調べた[5]。

[5] M. Sato, Y. Todo, N. Aiba and M. Takechi, Nucl. Fusion **64** 076021 (2024).

計算モデル

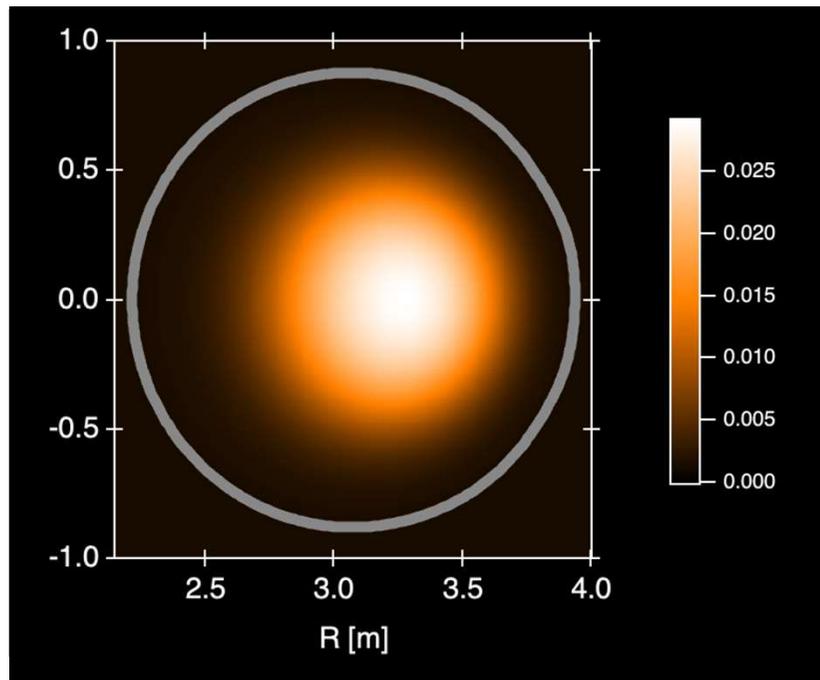
- MEGA code (運動論的MHDモデル)
 - 熱イオン：ドリフト運動論
 - 電子：断熱則
- MIPS code (MHDモデル)



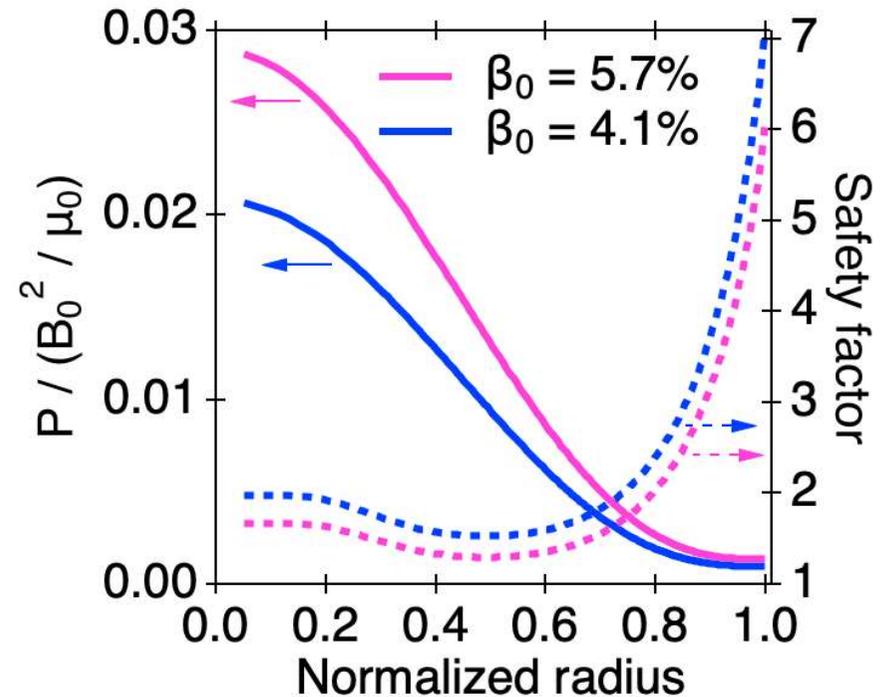
- 最も不安定なインファナルモードのトロイダルモード数は、 $n = 3$ 。
→ $\phi = 2\pi / 3$ で周期境界条件を課す。
(トロイダルモード数 (n) が、 $n = 0, 3, 6, 9, \dots$ 等のモードが含まれた計算。
- 格子点数：(256, 48, 256)、粒子数：32粒子/格子

MHD平衡

ポロイダル断面での圧力分布



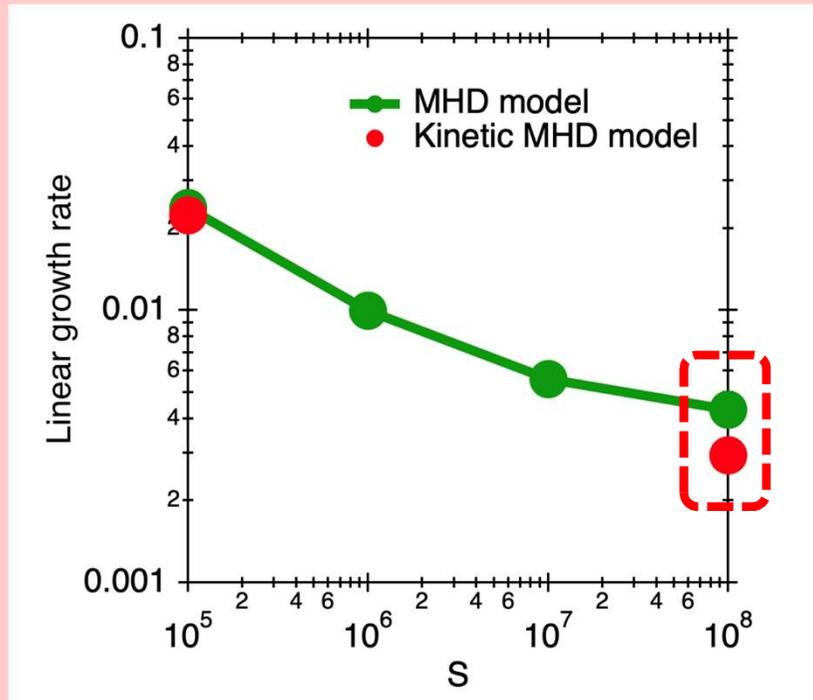
圧力と安全係数の径分布



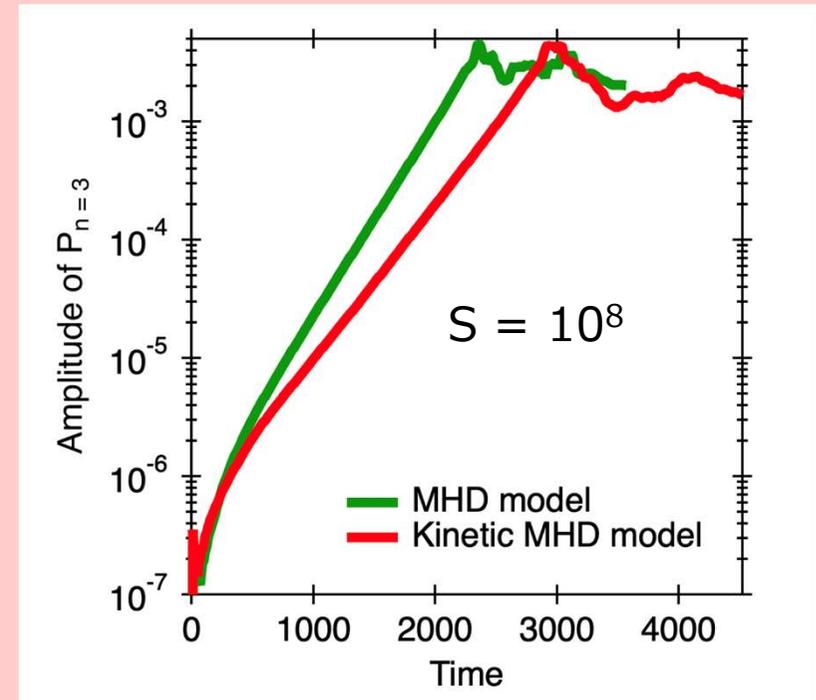
- β₀ = 5.7 % : n = 3 理想インファーマルモードが不安定。
- β₀ = 4.1 % : n = 3 理想インファーマルモードは安定だが、n = 3 の抵抗性インファーマルモードが不安定モードとして残る。

$\beta_0 = 5.7\%$ (理想インファーマルモード)

線形成長率の磁気レイノルズ数(S)依存性



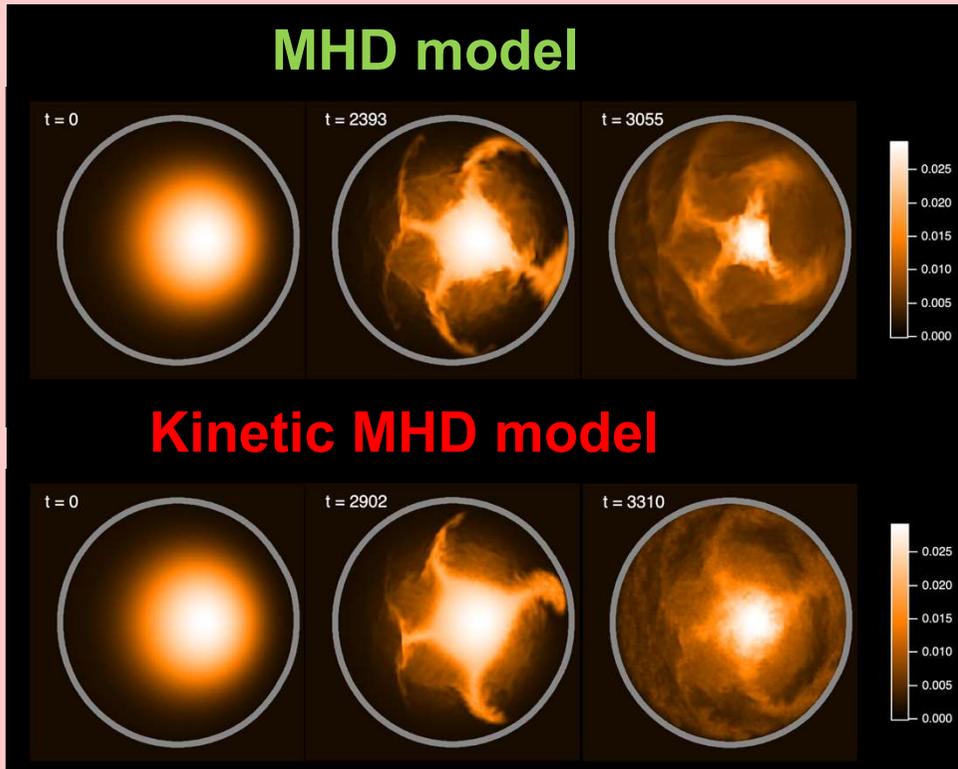
n=3モードの揺動圧力振幅の時間発展



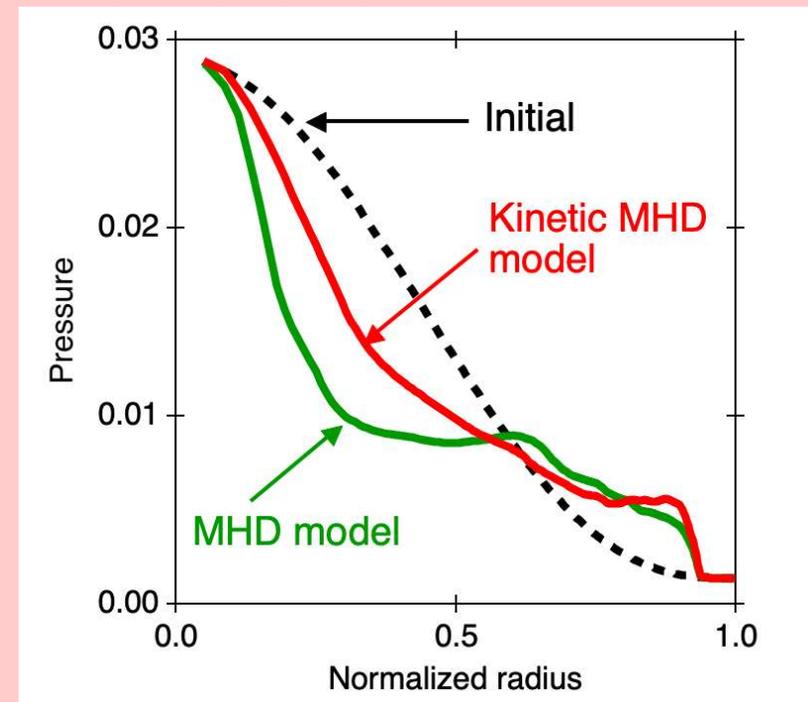
S=10⁸では、熱イオンの運動論的効果を考慮すると、線形成長率の低下は見られるが、飽和レベルの低下は見られない。

$\beta_0 = 5.7\%$ (理想インファーマルモード)

ポロイダル断面での圧力分布の時間変化



飽和状態における圧力の
(m,n)=(0,0)成分の径分布



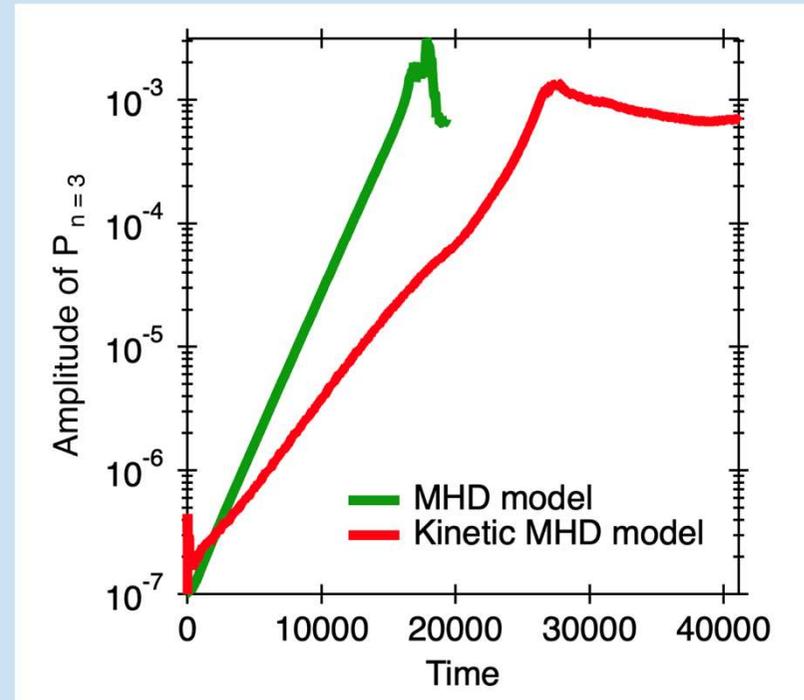
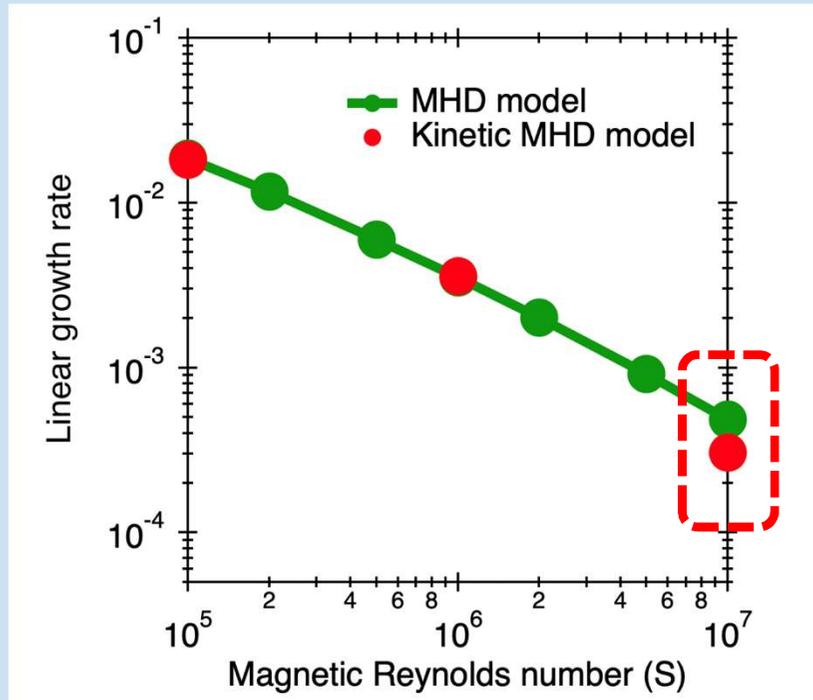
どちらのモデルも、飽和状態においては圧力分布は著しく変形し、初期圧力分布を維持できない。

$\beta_0 = 4.1\%$ (抵抗性インファーマルモード)



線形成長率の磁気レイノルズ数(S)依存性

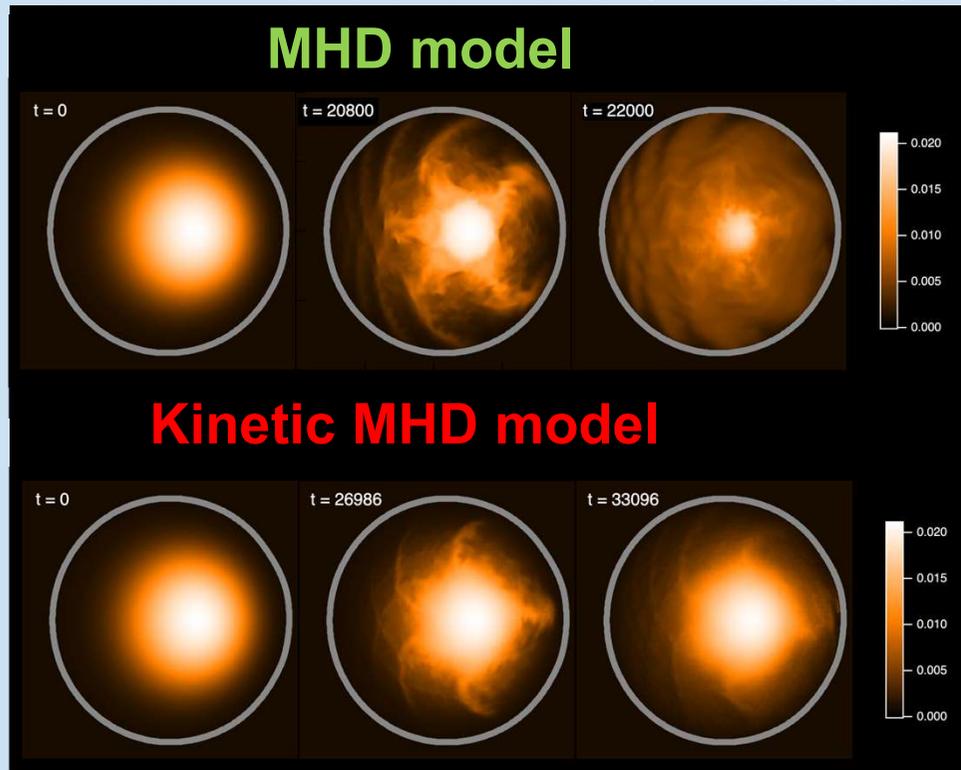
n=3モードの揺動圧力振幅の時間発展



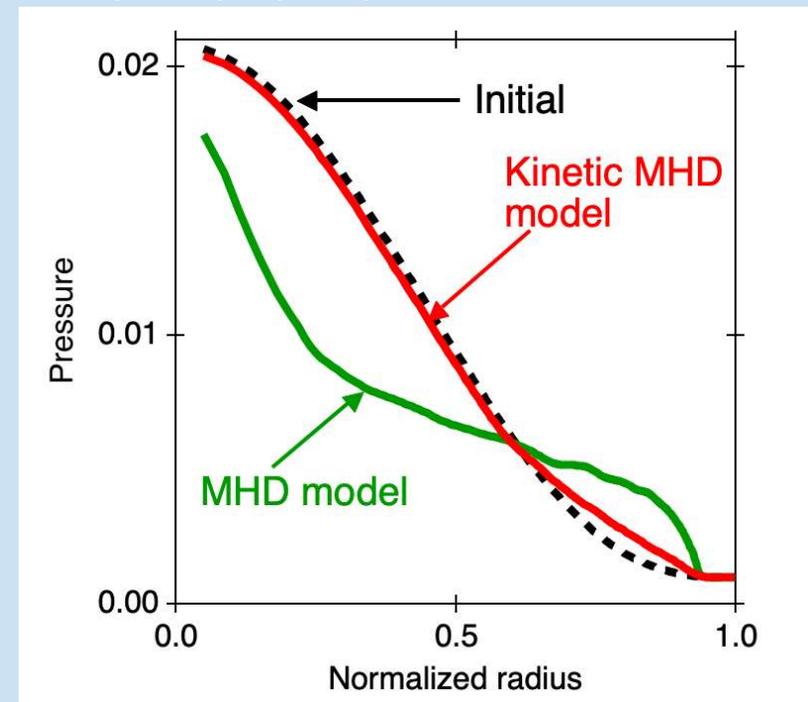
S=10⁷では、熱イオンの運動論的効果を考慮すると、線形成長率、飽和レベルともに低下する。

$\beta_0 = 4.1\%$ (抵抗性インフアーナルモード)

ポロイダル断面での圧力分布の時間変化



飽和状態における圧力の
(m,n)=(0,0)成分の径分布

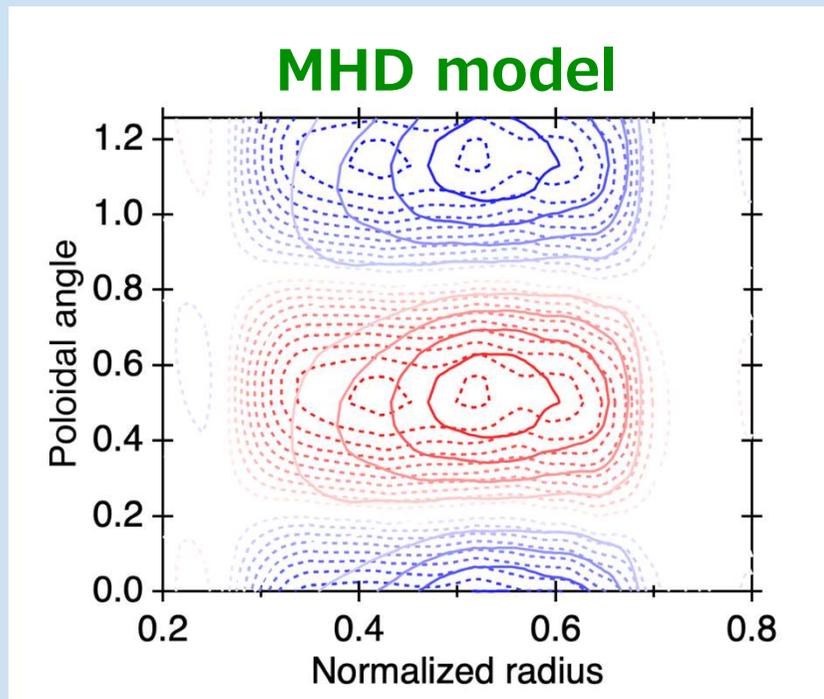


MHDモデルでは圧力分布の著しい平坦化が起こるが、熱イオンの運動論的効果を考慮すると、不安定性の影響は周辺部に限定され、初期圧力分布がほぼ維持される。

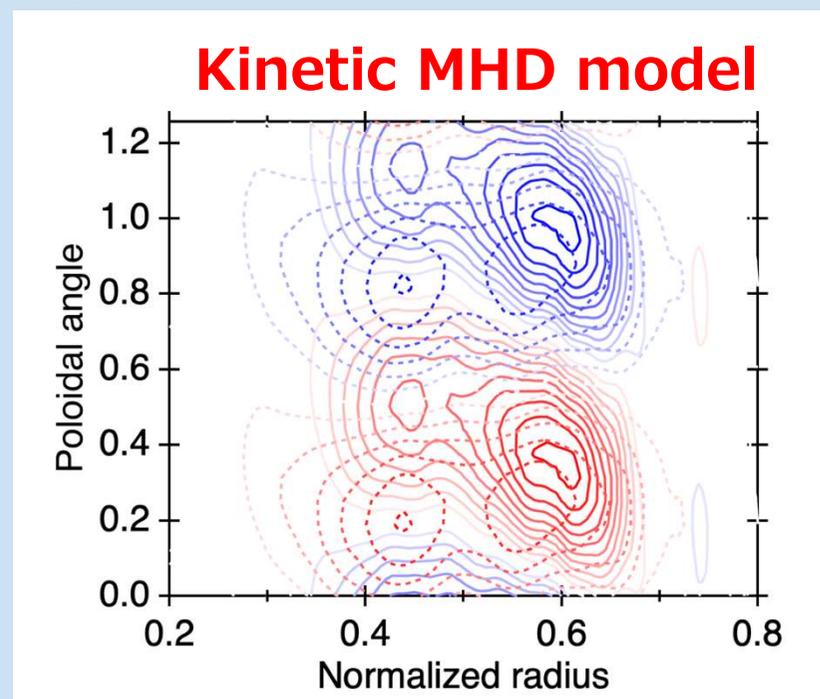
$(m,n)=(0,0)$ 成分の非線形生成の抑制 ($\beta_0 = 4.1\%$)



径速度（実線）と圧力揺動（破線）の $(m,n)=(5,3)$ モードの構造



径速度と圧力揺動の位相が一致
→強い相互作用



径速度と圧力揺動の間に位相差
→相互作用が弱くなり $(m,n)=(0,0)$ 成分
の非線形生成が抑制される。

まとめ

- MHDシミュレーションと、熱イオンの運動論的効果を考慮した運動論的MHDシミュレーションを用いて、理想インファナルモードと抵抗性インファナルモードに対する熱イオンの運動論的効果の影響を調べた。
- **MHDモデル**では、 $\beta_0 = 5.7\%$ （理想モード）及び $\beta_0 = 4.1\%$ （抵抗性モード）の両平衡においてベータ崩壊が発生。よって、インファナルモードにより決定される最大ベータ値（ β_{infern} ）は、 **$\beta_{\text{infern}} < 4.1\%$** 。
- **熱イオンの運動論的効果を考慮した運動論的MHDモデル**では、 $\beta_0 = 5.7\%$ （理想モード）ではベータ崩壊が発生するが、 $\beta_0 = 4.1\%$ （抵抗性モード）ではベータ崩壊は発生しない。よって、 **$4.1\% < \beta_{\text{infern}} < 5.7\%$** となり、MHDモデルで予測される最大ベータ値よりも高い。
- 熱イオンの運動論的効果は、ゆっくりと成長する抵抗性MHD不安定性による圧力分布の平坦化を抑制する上で重要な役割をし、インファナルモードにより決定される最大ベータ値の予測において考慮する必要がある。