

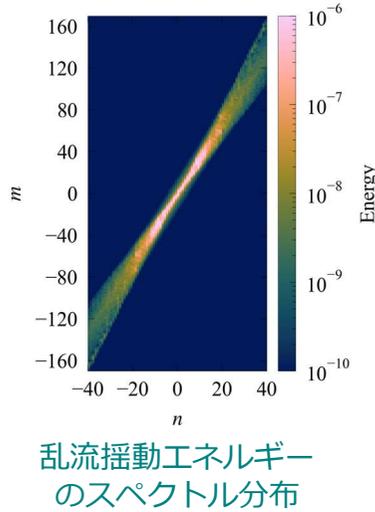
沿磁力線座標を導入したバルーニングモード乱流の簡約化MHDシミュレーション

Reduced MHD simulation of ballooning mode turbulence with field-aligned coordinates

高野歩海、渡邊智彦
名大理

研究目的

- 高解像度なバルーニングモード乱流のシミュレーションを行い、乱流遷移やエネルギーカスケードなどを解析する。
- ✓ 乱流は磁力線に沿って伸びた構造をもつ。
- 従来の円柱スペクトルコード [Takano+(2024)PFR] に沿磁力線座標を導入することで効率化し、高解像度な乱流シミュレーションを行った。



沿磁力線座標の導入

- 沿磁力線座標 : $\rho = r, \alpha = q\theta - \zeta, z = \theta$
- スペクトル表現 :

$$f(\rho, \alpha, z, t) = f_0(\rho) + \sum_n \tilde{f}_n(\rho, z, t) \exp(in\alpha)$$

◎ 波数シフトを考慮し、ポロイダル方向にも周期性を成立させる手法を新たに考案

$$\Delta_{\text{shift}}^n \equiv nq - \text{floor}(nq)$$

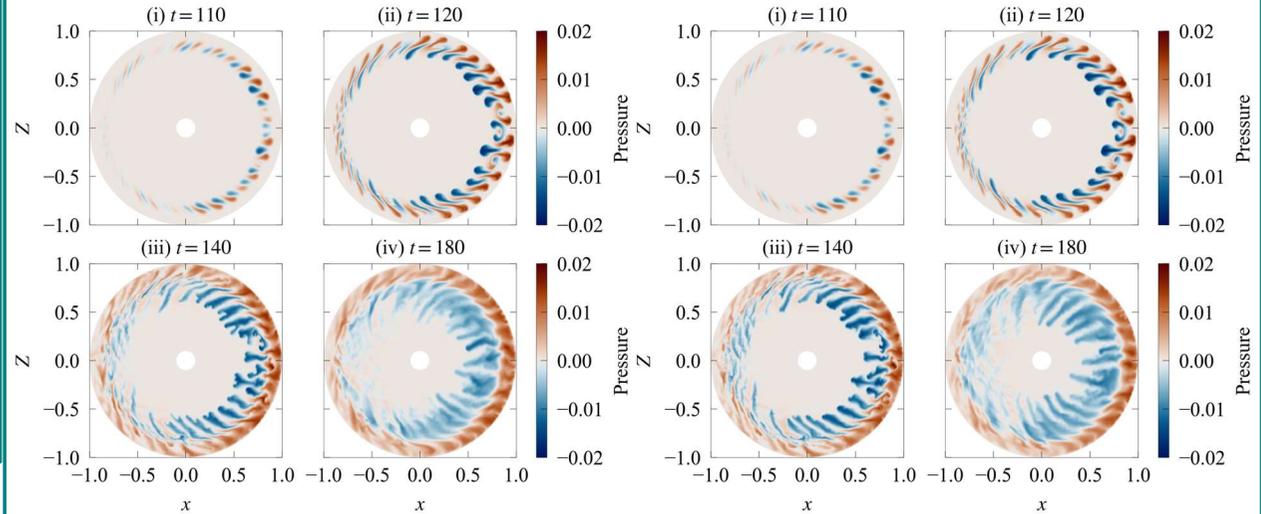
$$\hat{f}_n \equiv \tilde{f}_n \exp(i\Delta_{\text{shift}}^n z)$$

$$f(\rho, \alpha, z, t) = f_0(\rho) + \sum_{n,l} \hat{f}_{n,l}(\rho, t) \exp\{i[(l - \Delta_{\text{shift}}^n)z + n\alpha]\}$$

- ✓ z 方向の微分をスペクトル法で計算でき精度が担保
- ✓ 従来のコードを一部改良することで実装が可能

シミュレーション結果

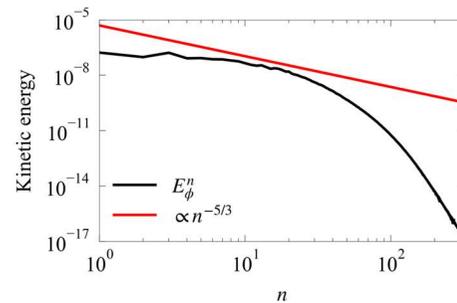
円柱座標とのベンチマーク ($\Delta\rho = 0.9/256, -40 \leq n \leq 40$)



圧力揺動のポロイダル断面図 (左 : 沿磁力線座標、右 : 円柱座標)

- ✓ バルーニングモードから乱流状態へ遷移する様子を同様に再現
- ✓ 解いているモードの数 : $O(N^2) \rightarrow O(N)$ \Rightarrow より高い n を扱う場合はさらに高効率

高解像度な乱流シミュレーション ($\Delta\rho = 0.9/1024, -320 \leq n \leq 320$)



運動エネルギーのスペクトル分布

- ✓ 解いている (ポロイダル方向の) モードの数を円柱座標の1/129倍まで削減
- ✓ 低波数側で注入されたエネルギーが高波数側へとカスケード
- ✓ 乱流の特徴である自己相似的なスペクトル分布が形成

高効率なMHDシミュレーションコードの開発に成功