

降着円盤における微小スケール乱流の特性解明

川面洋平 (東北大学 学際科学フロンティア研究所)

共同研究者:

Alexander Schekochihin (University of Oxford)

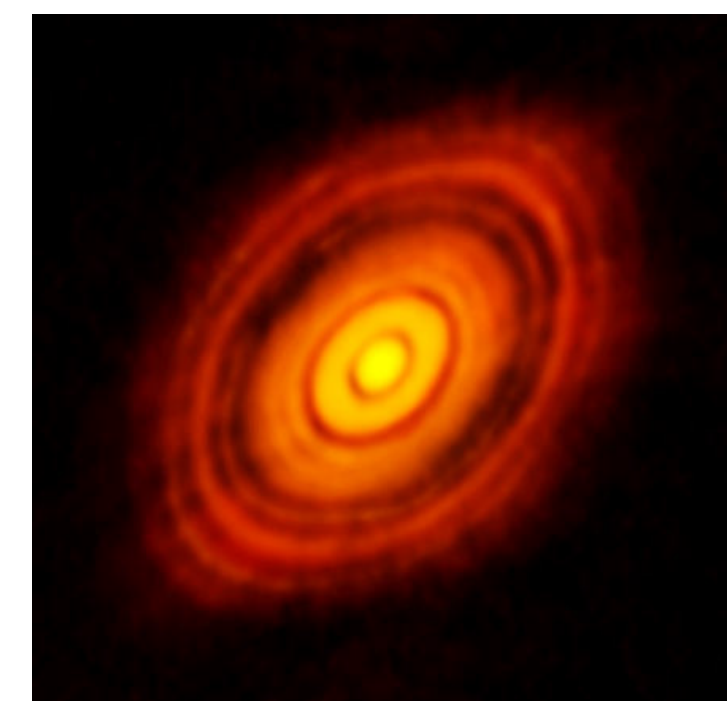
Michael Barnes (University of Oxford)

William Dorland (University of Maryland)

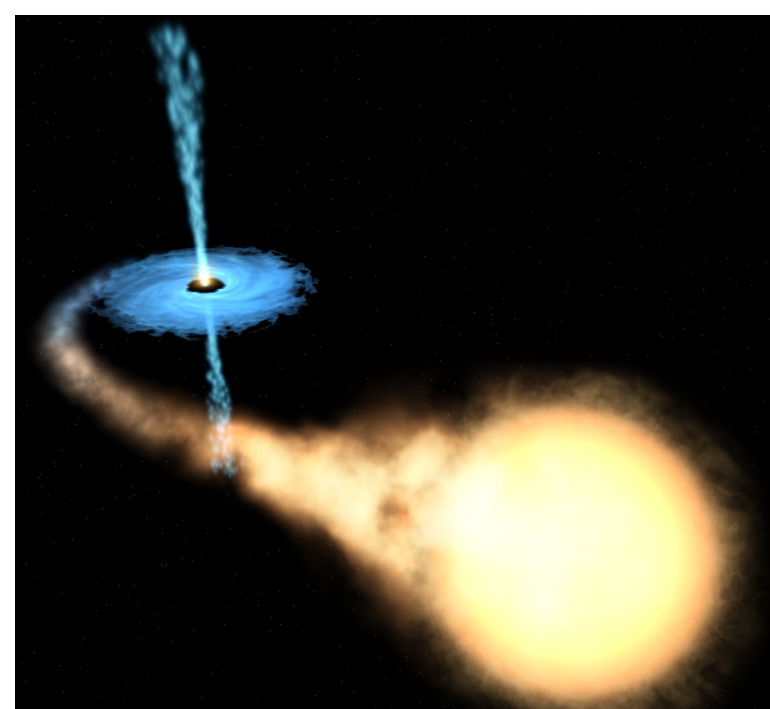
Steven Balbus (University of Oxford)

降着円盤 = 天体に落下する円盤状のプラズマ

電離したガス



原始惑星系円盤 (実際の観測画像)



X線連星 (想像図)

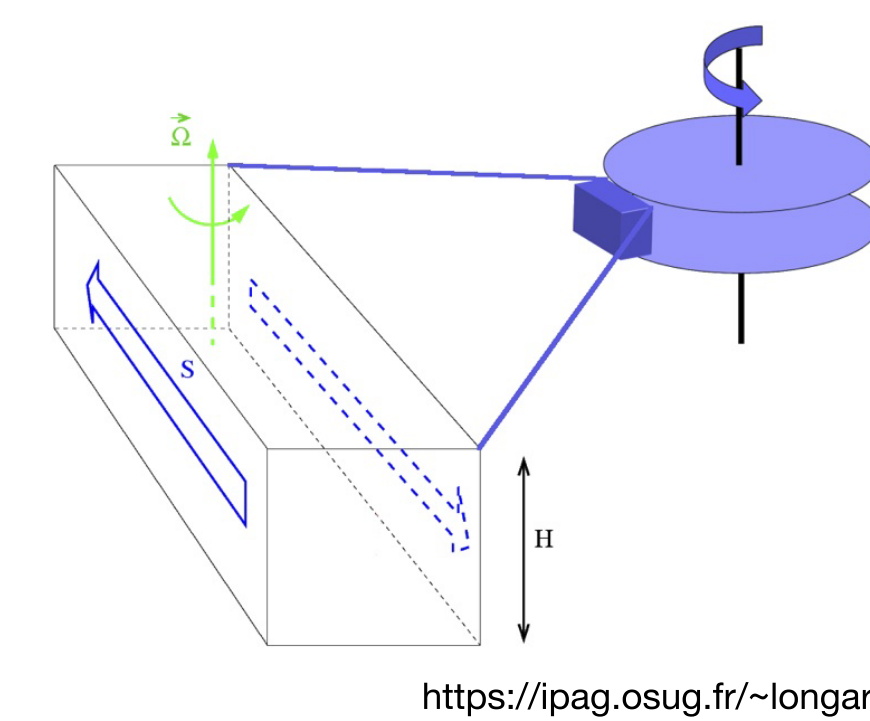


超大ブラックホール (実際の観測画像)

今回の対象

手法：二次元分割擬スペクトルコード

- ▶ 円盤と共回転する局所的なbox (shearing box) における乱流をシミュレーションする
- ▶ 周期境界条件を仮定できる
- ▶ 擬スペクトル法が使える

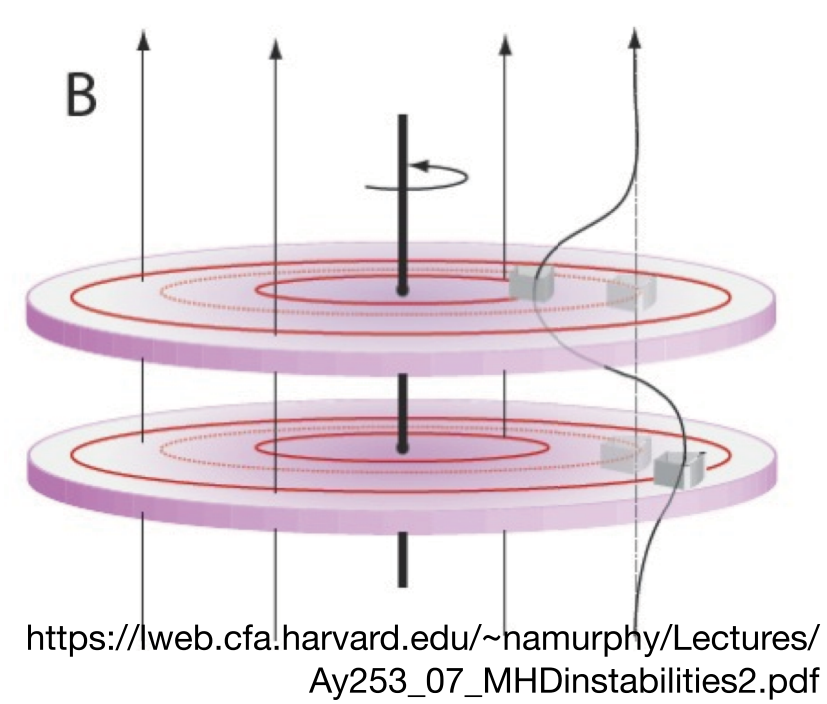


<https://pag.osug.fr/~longarep>

- フーリエ係数の時間発展を解く $\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \Rightarrow \frac{d\hat{u}_k}{dt} + \mathcal{F} \left[u \frac{\partial u}{\partial x} \right]_k = 0$
- 非線形項は実空間で計算してからフーリエ変換する
- 乱流シミュレーションに適した高精度なスキーム
- **毎ステップFFTと逆FFTをする必要がある**

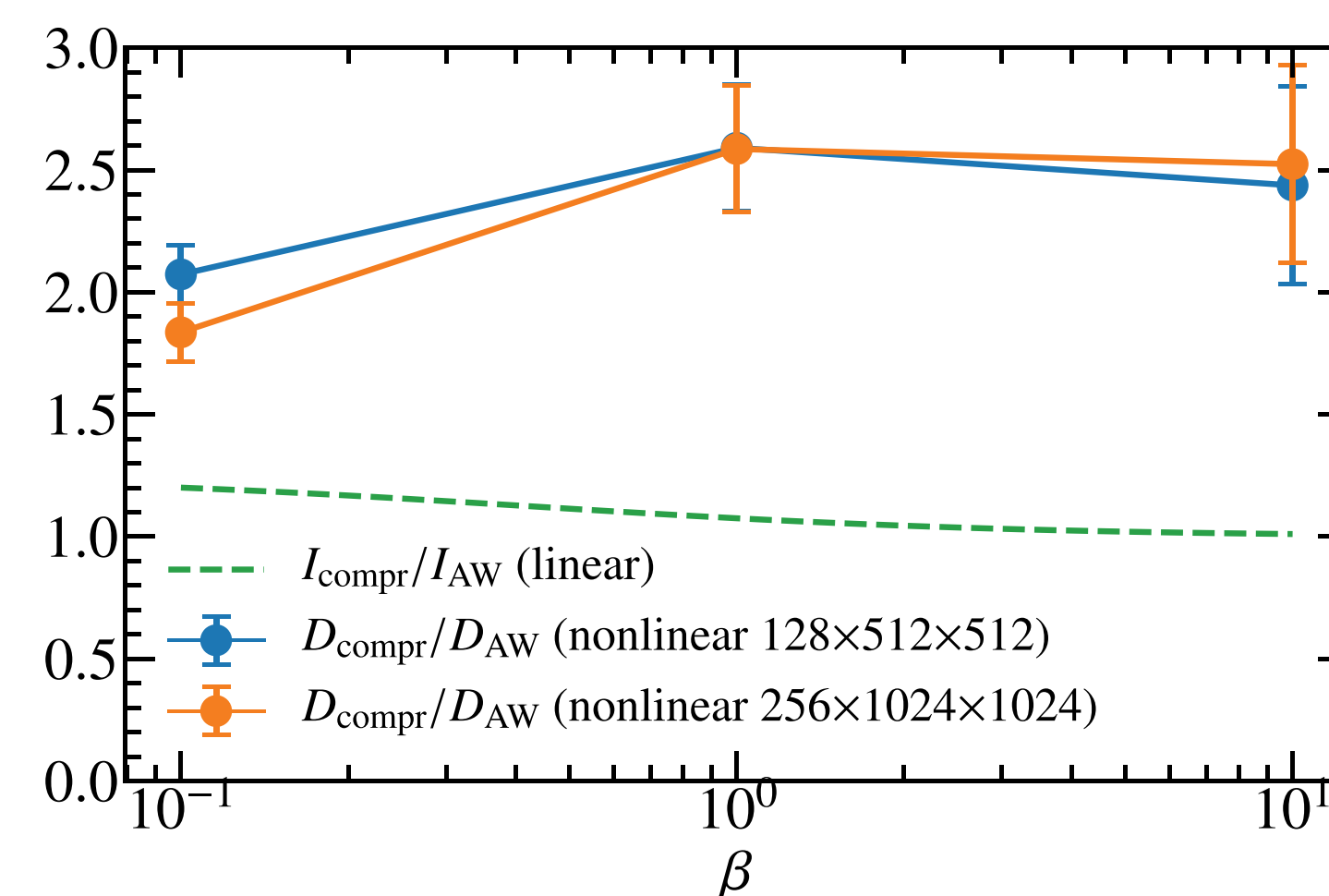
物質が降着(=中心に落下)するのは自明ではない

- ▶ 角運動量が保存すると降着出来ない
- ▶ 角運動量を失うために何らかの“摩擦”が必要
- ▶ プラズマは高温・希薄なので粒子同士がほとんど衝突しない → 摩擦がない!
- ▶ 乱流による“実効的粘性”によって角運動量が失われる
- ▶ **磁気回転不安定性(MRI)**
- ▶ 差動回転するプラズマに磁場が刺さっていると不安定になる → 乱流
- ▶ 乱流解析に数値シミュレーションは必須!



https://web.cfa.harvard.edu/~hamurphy/Lectures/Ay253_07_MHDinstabilities2.pdf

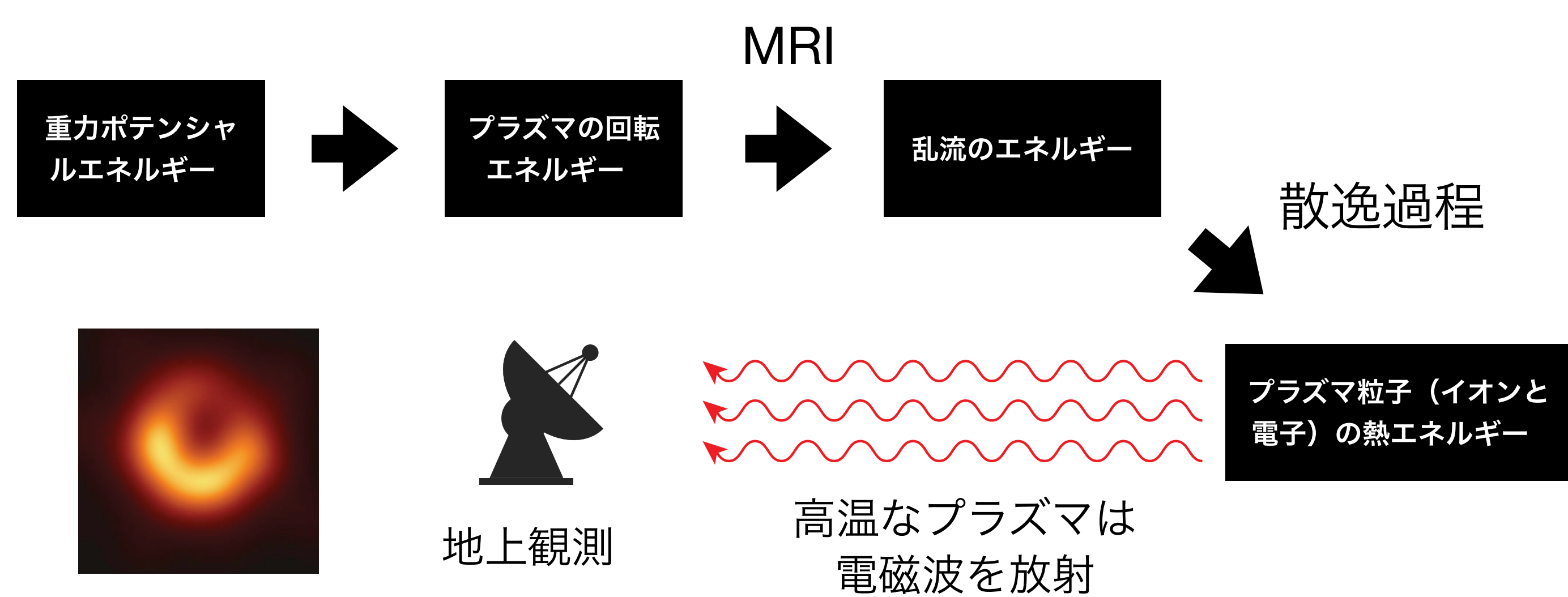
計算結果：縦波と横波の比



128x512x512, 256x1024x1024グリッドをそれぞれ3ケース
256x1024x1024で~180,000 CPUh

縦波が横波の約2倍 → 降着円盤ではイオンが強く加熱される

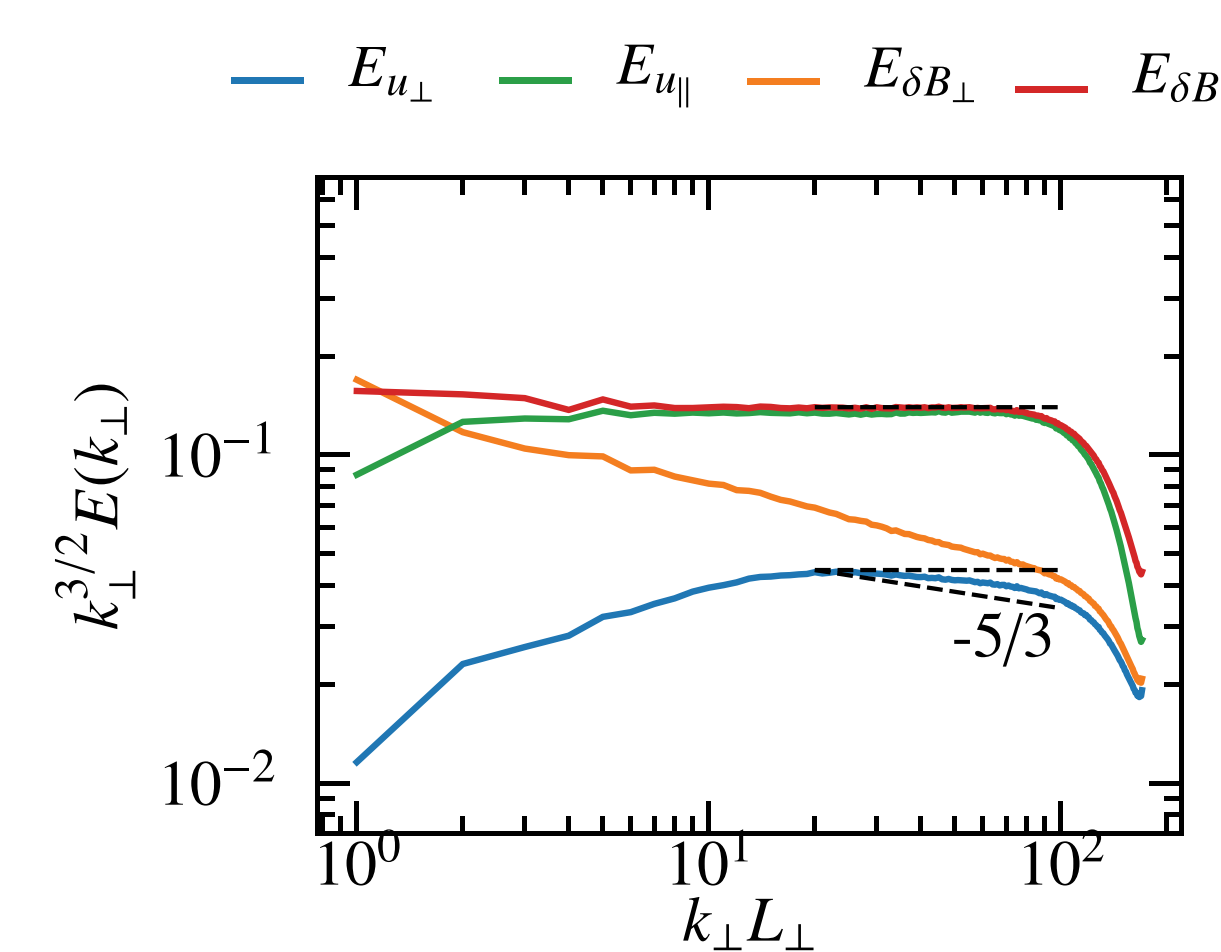
乱流の粘性によってプラズマが加熱される



降着円盤乱流の散逸過程はよく分かっていない
しかし観測結果の解釈のために重要な情報

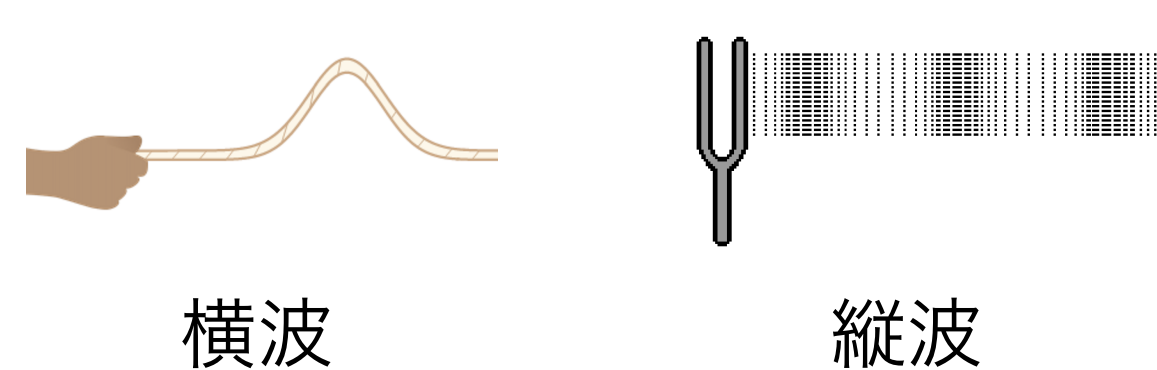
計算結果：乱流スペクトル

- ▶ 縦波成分は微小スケールで $k^{-3/2}$ のスペクトル
- ▶ 横波成分はまだこの解像度ではよくわからない
- ▶ MRIシミュレーションでconvergeした乱流スペクトルが得られたのは初

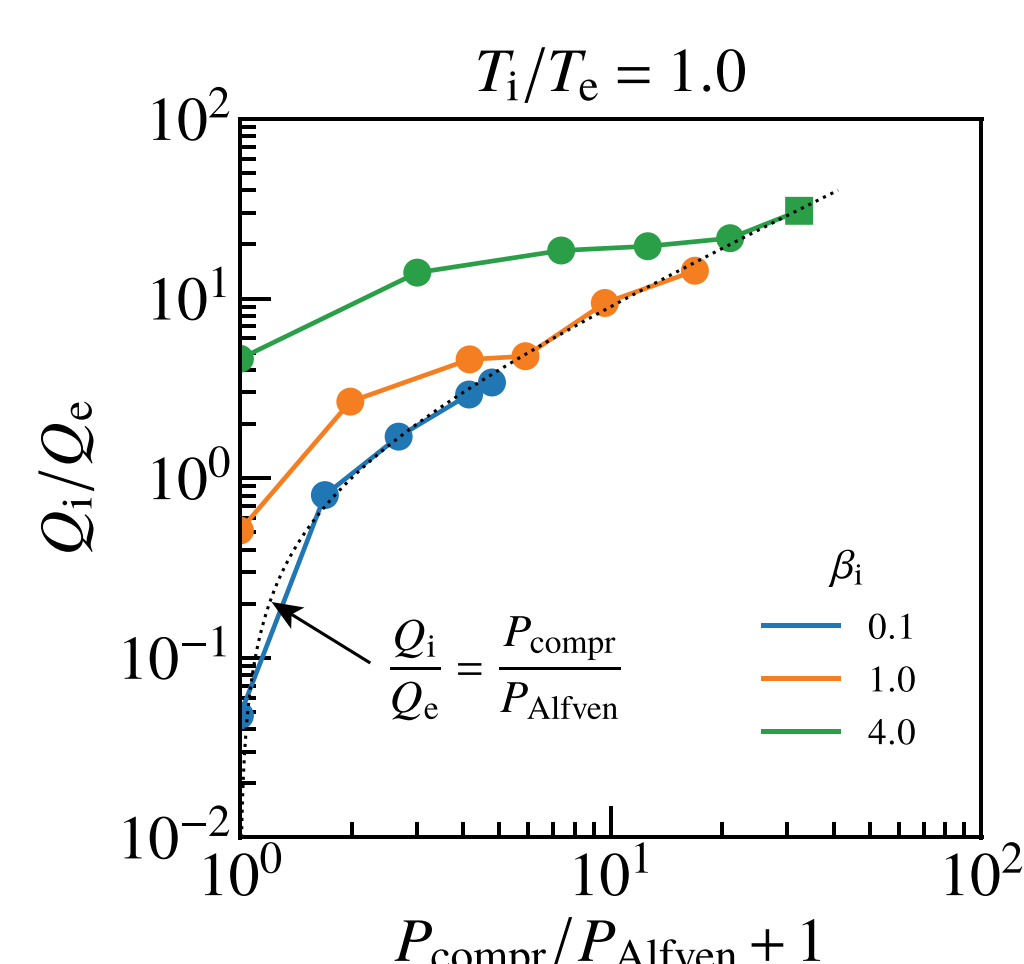


圧縮的な揺動はイオンをより選択的に加熱する

- ▶ プラズマには二種類の揺動が存在する



- ▶ 縦波的揺動が強いとイオンがより強く加熱される [Kawazura et al., Phys. Rev. X 2020]
- ▶ 電子が強く加熱されるほど降着円盤は明るく見える



降着円盤の横波的揺動と縦波的揺動の比はいくらか?

まとめ

- ▶ 降着円盤はプラズマ乱流
- ▶ 乱流の散逸が観測結果を解釈するために必要
- ▶ 縦波と横波の比が重要
- ▶ 二次元分割型擬スペクトル法コードを開発し、降着円盤の局所的なプラズマのシミュレーションを行った。
- ▶ 縦波と横波は2:1 → 降着円盤ではイオンがより強く加熱される

現在、磁場が円盤と水平でない状況を計算中