

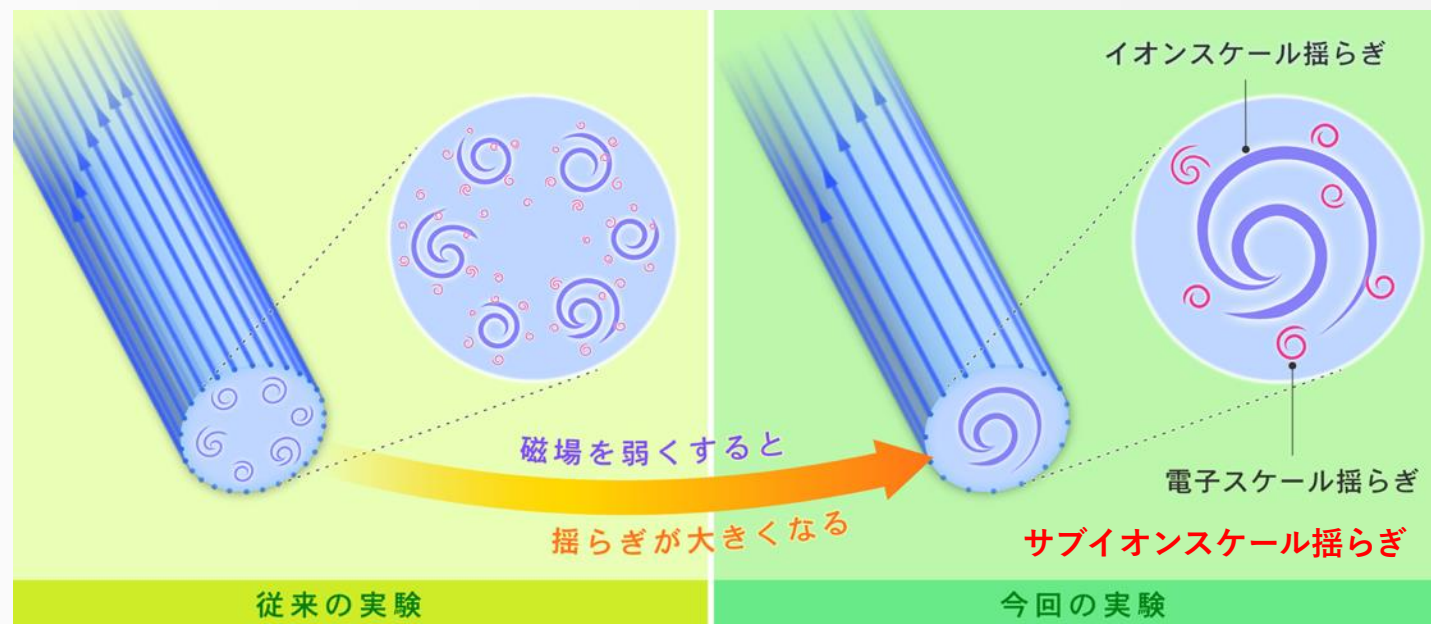
直線装置におけるサブイオンスケール乱流の観測

-基礎装置を用いた位相空間乱流基礎研究-

河内裕一

名古屋大学工学部,
位相空間乱流ユニット戦略会議所外メンバー

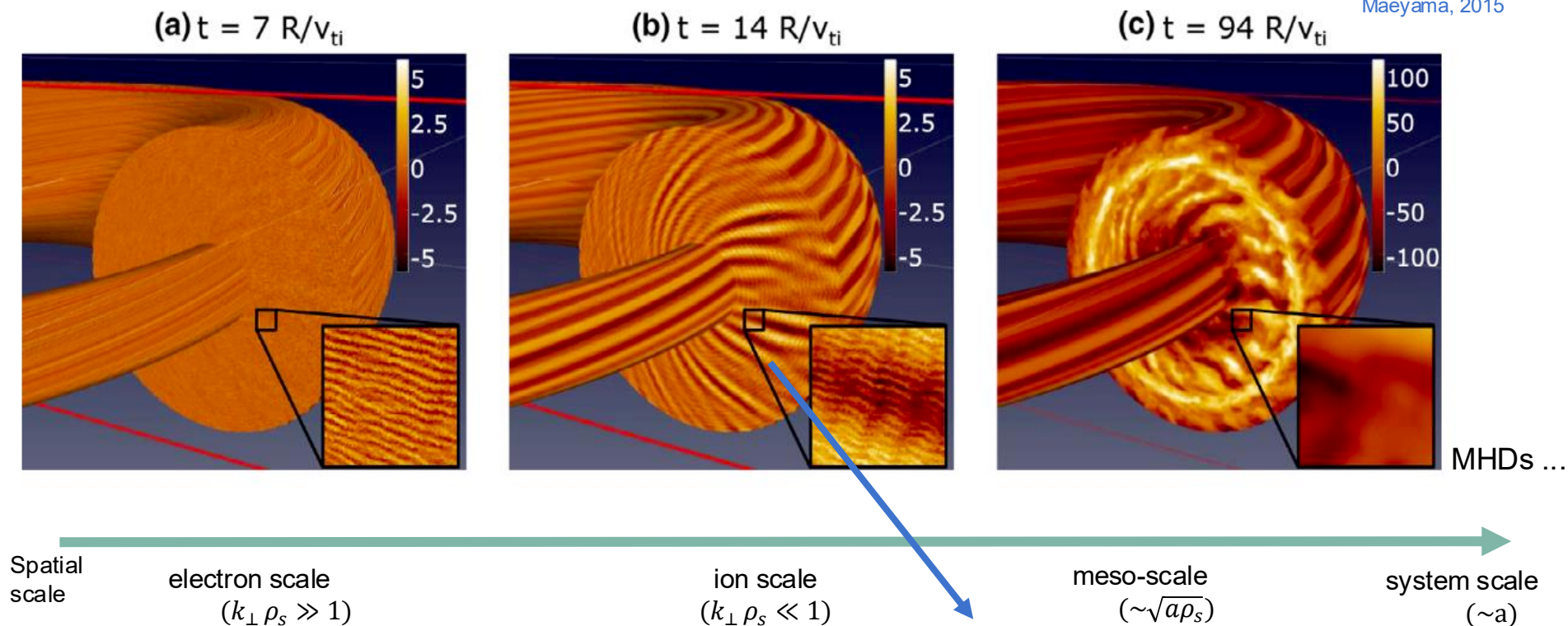
NIFSのHPより引用



プラズマ乱流と空間スケール

磁場中のプラズマでは多様なスケールで揺動が励起し乱流に発展

Maeyama, 2015



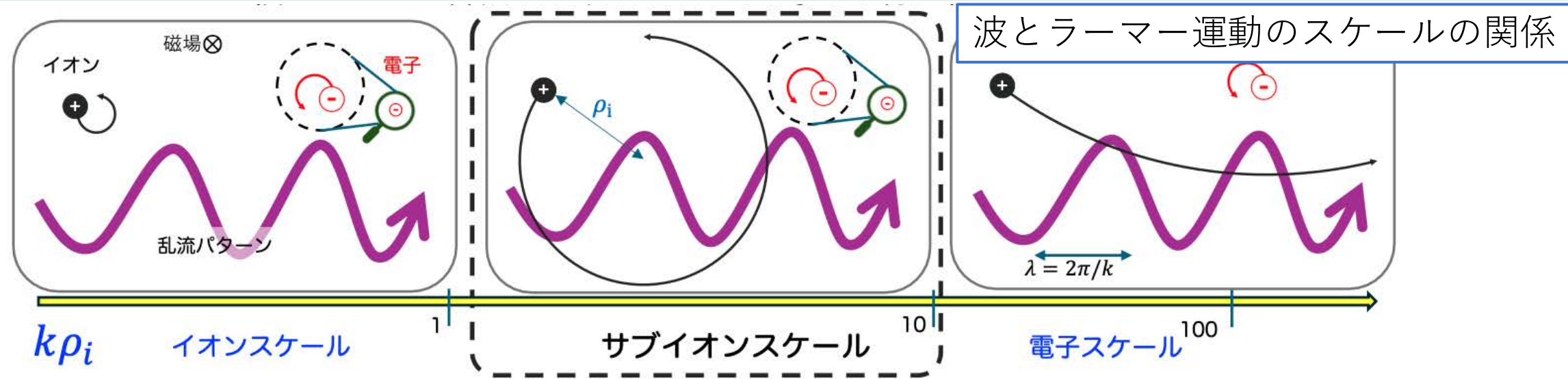
従来研究：ドリフト波研究はこれにあたる

- イオンスケール乱流と電子スケール乱流の相互作用の研究は近年発展

S. Maeyama Parallel Comput. 2015, T. Tokuzawa Comm.Phys. 2025

- 上記乱流の中間のスケールをもつ**サブイオンスケール乱流**に注目。

サブイオンスケール乱流の特徴



サブイオンスケール乱流は波長とラーマー半径が同程度

=> ラーマー運動と強く相互作用する (e.g. 有限ラーマー半径効果、サイクロトロン共鳴)

サブイオンスケール乱流に特有の困難が多数あり、研究は少ない

- シミュレーション: ジャイロ運動論が使えない。計算コスト大
- 実験: 従来の乱流より高い分解能が必要。特に時間分解能はサイクロトロン周波数より十分高い必要がある。LHD等大型装置では数十MHzなので、GHzオーダーの分解能が必要

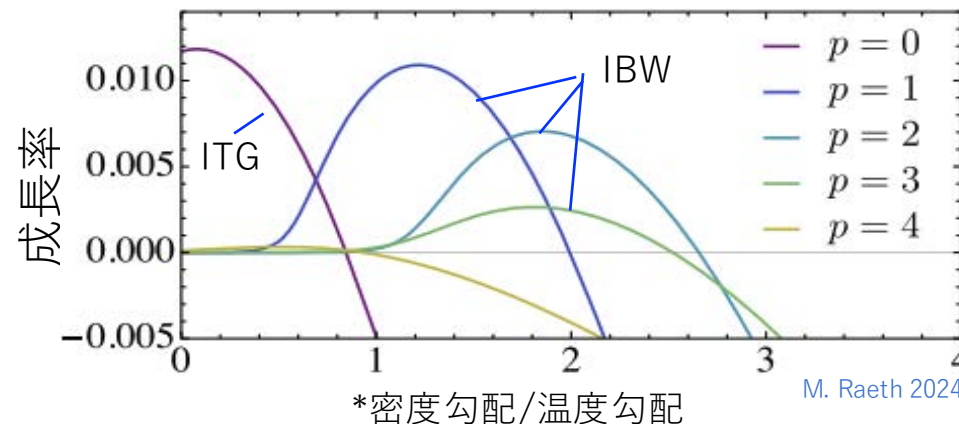
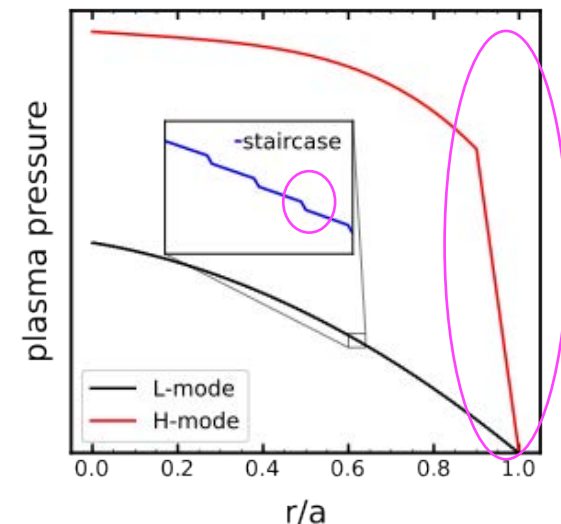
サブイオンスケール乱流の重要性

サブイオンスケール乱流は核融合炉の急峻勾配領域（ペデスタル領域）やICE、磁気圏、太陽風で重要になりうる

ITERや原型炉等の高性能プラズマのペデスタル領域や階段状分布では $\rho_i \sim L$ になりうる。ジャイロオーダリングが成立しない=>サブイオンスケール乱流が担う

Raeth PRL 2024, 前山 輸送研究会2025

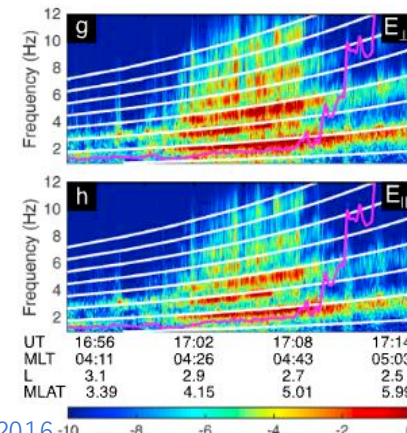
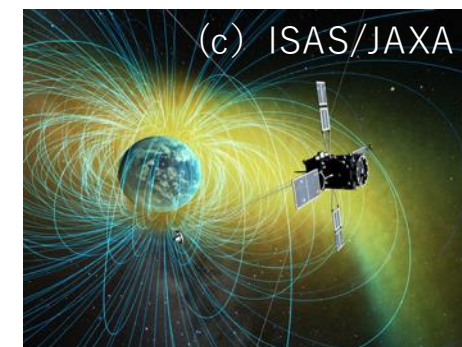
イオンについてジャイロ平均しないシミュレーション
イオンスケール乱流(ITG)とサブイオンスケール乱流(IBW)の成長率



M. Raeth 2024

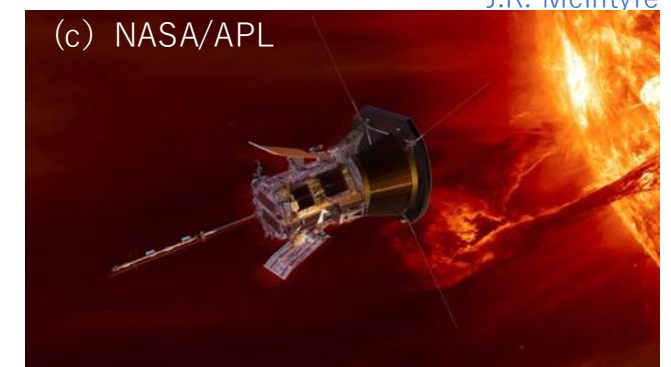
サブイオンスケール乱流としてイオンバーンスタイン波が励起し、大きい輸送を引き起こすことが示された

磁気圏でのイオンエネルギー分布形成等で重要



Usanova GRL 2016

太陽風乱流/コロナ加熱でのヘリシティバリア仮説
J.R. McIntyre PRX 2025



サブイオンスケール乱流の基礎研究

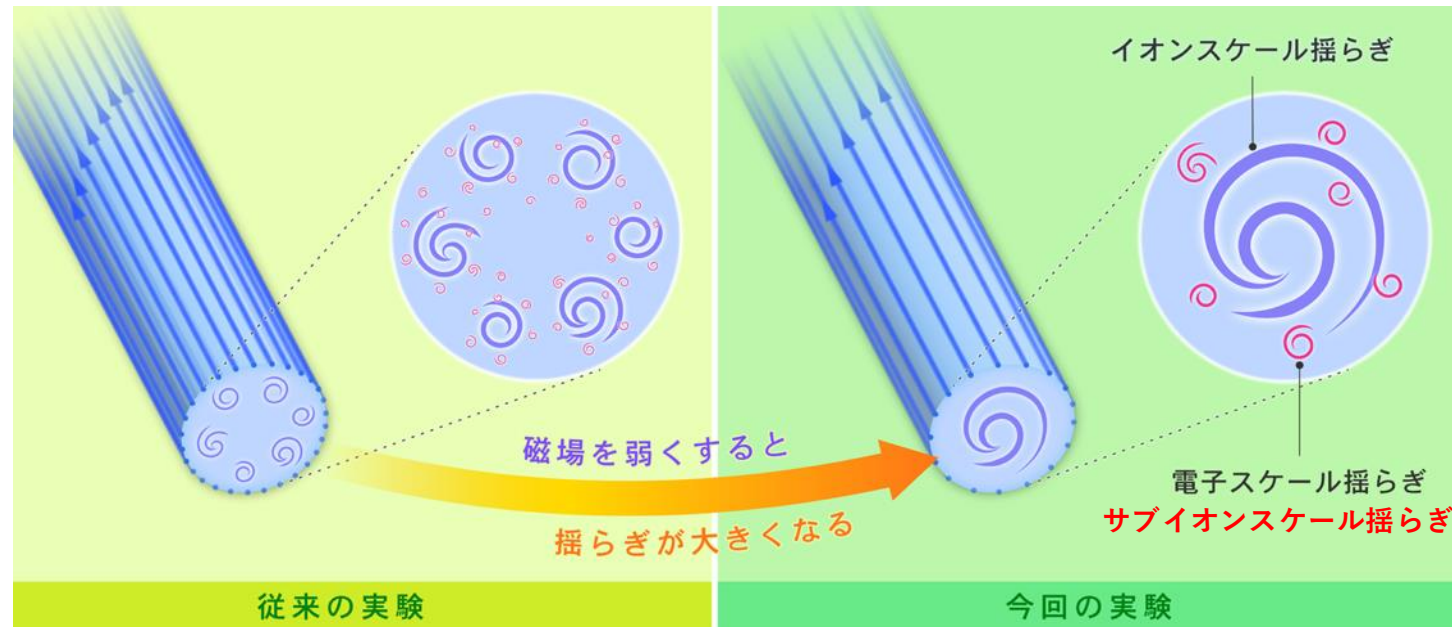
基礎実験にてサブイオンスケール乱流の観測を行い、
ITER/原型炉級のペデスタル領域の乱流物理のモデル化に貢献したい

基礎実験装置はサブイオンスケール乱流研究に最適な環境

- パラメータの柔軟制御=>”風洞実験”が可能
- 直線磁場でシンプルな系（ただし閉じ込め性能は悪い、部分電離等課題もあり）

サブイオンスケール乱流研究へのアプローチ
⇒ 低磁場による乱流の空間スケールの拡大

- ✓ 必要な空間分解能が小さくなる
- ✓ サイクロトロン周波数が小さくなるため、必要な時間分解能も小さくなる
- ✓ イオンスケール乱流が抑制される



本実験系により、
サブイオンスケール乱流の基盤が初めて構築された

サブイオンスケール乱流観測の実験方法

直線装置PANTAにて実験を実施

RF: 7MHz, 3kW
ガス圧: 0.1-1Pa
プラズマ半径: 50mm
真空容器半径: 225mm

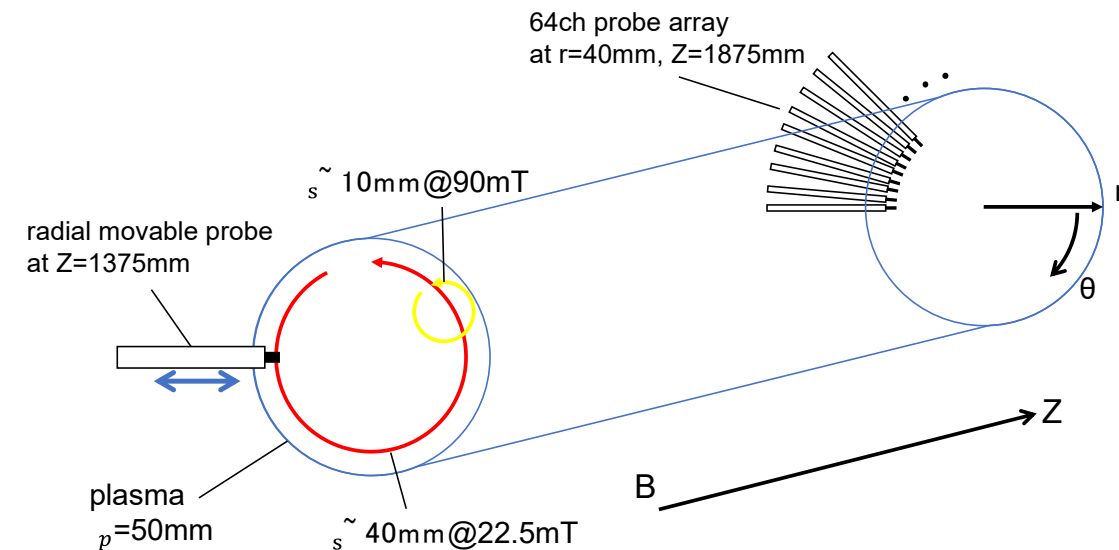
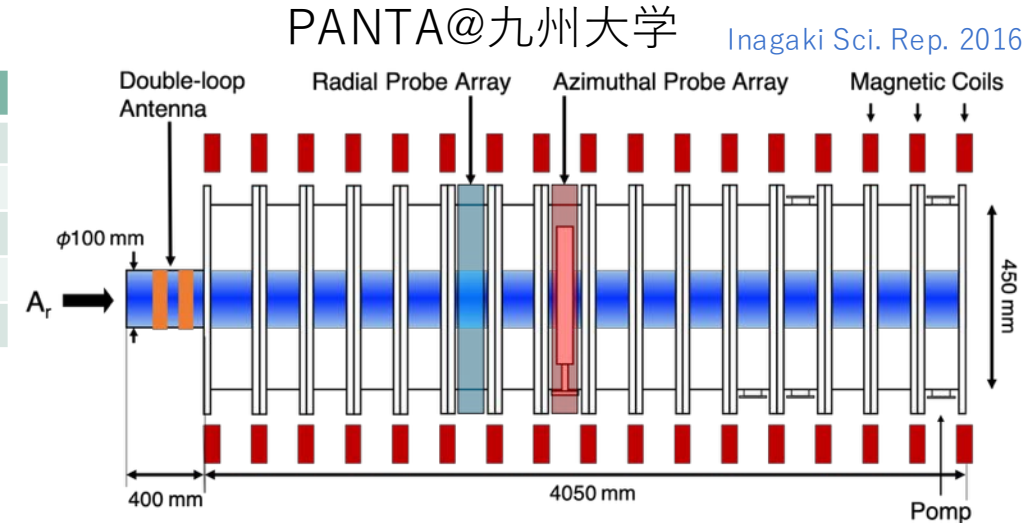
特徴的な時間・空間スケール		
磁場	1300G(通常)	225G(本実験)
f_{ci}	50 kHz	8.6kHz
f_{ce}	3.6 GHz	0.6GHz
ρ_s	7mm	40 mm
ρ_i	3mm	9 mm
ρ_e	0.03mm	0.15 mm

サブイオンスケール乱流観測のためのアプローチ:低磁場化

従来の磁場: 900-1300G
本実験磁場: 220G

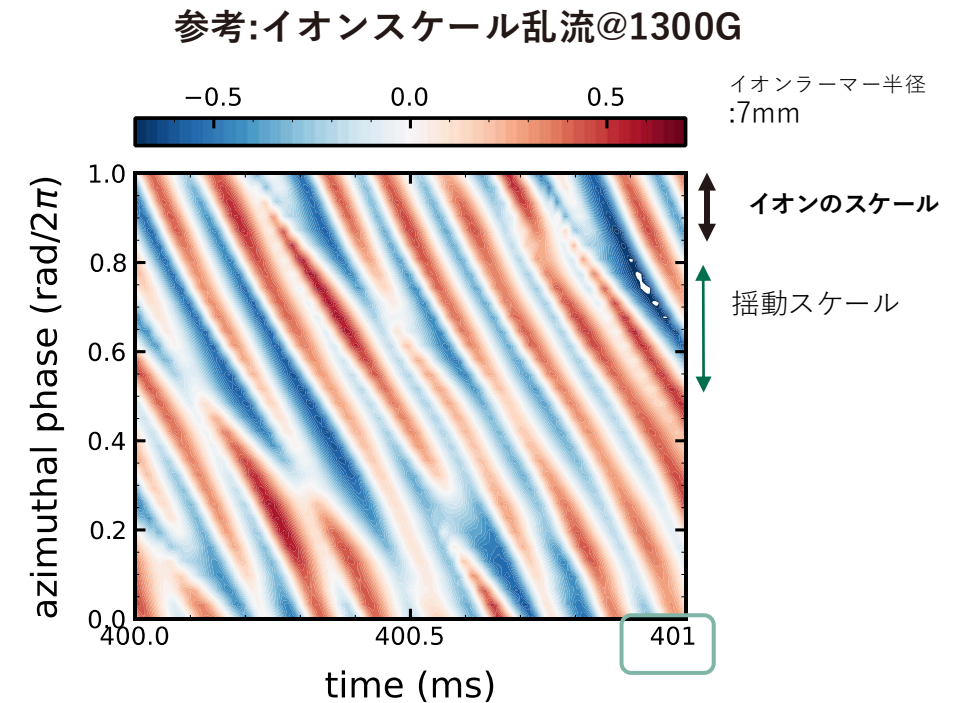
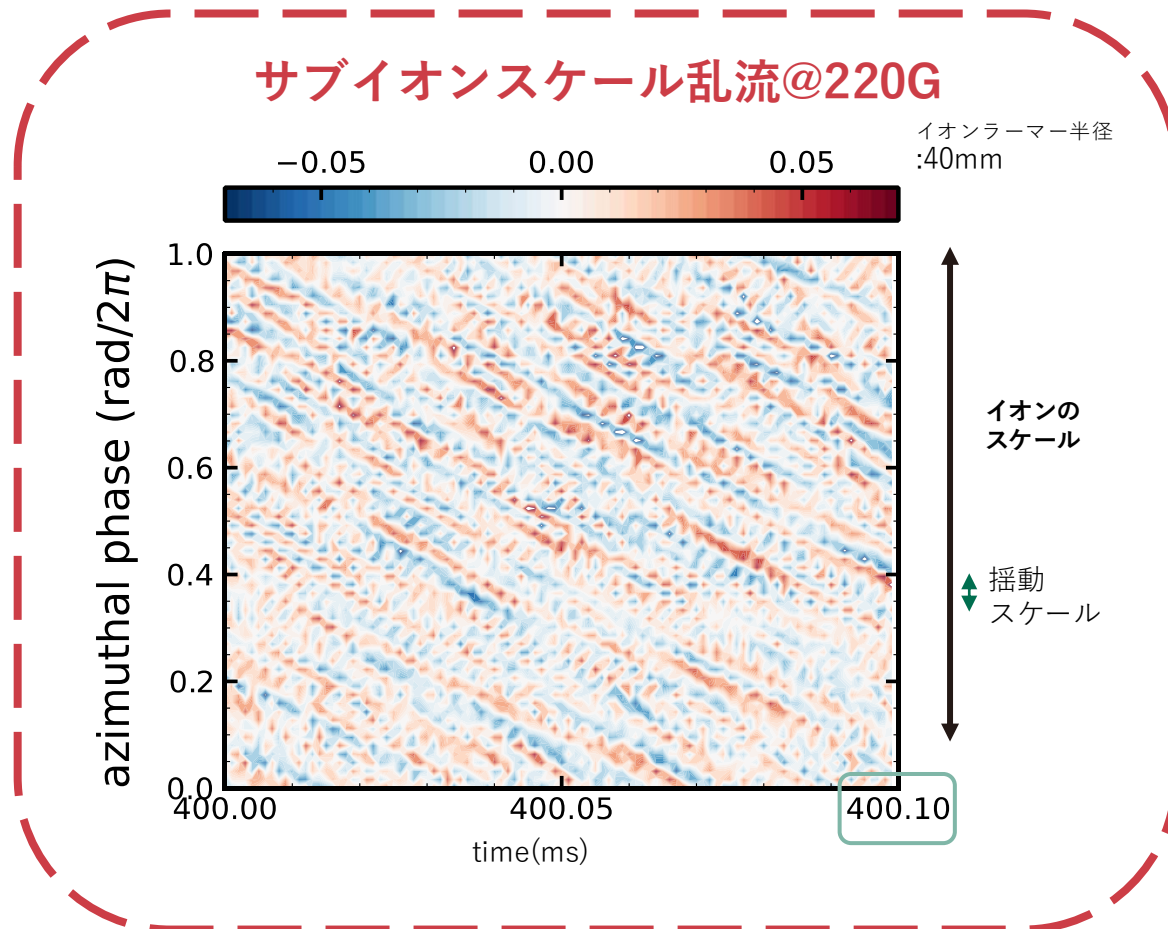
この時、ラーマー半径 ρ_s と勾配長 L_n およびプラズマ半径 r_p は同程度になる: $\rho_s \sim L_n \sim r_p$

- ✓ イオンスケール乱流は周期境界条件満たさない=>抑制
- ✓ ラーマー半径拡大に伴い、揺動のスケールが既存の計測で観測可能なスケールに拡大される(かつ低周波数化)



サブイオンスケール乱流の時空間構造の観測

先ほどのように $\rho_s \sim L_n \sim a$ に磁場を調整して実験し、サブイオンスケール乱流を観測

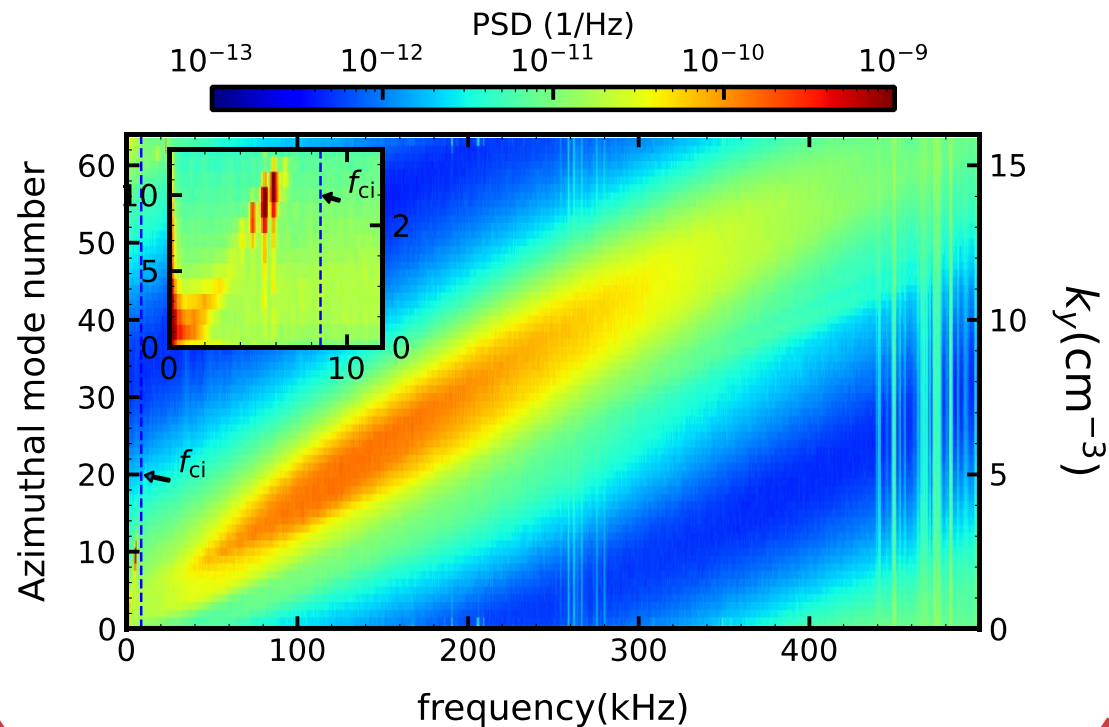


実空間から見てもイオンスケール乱流より小さいスケールの乱流揺動を観測

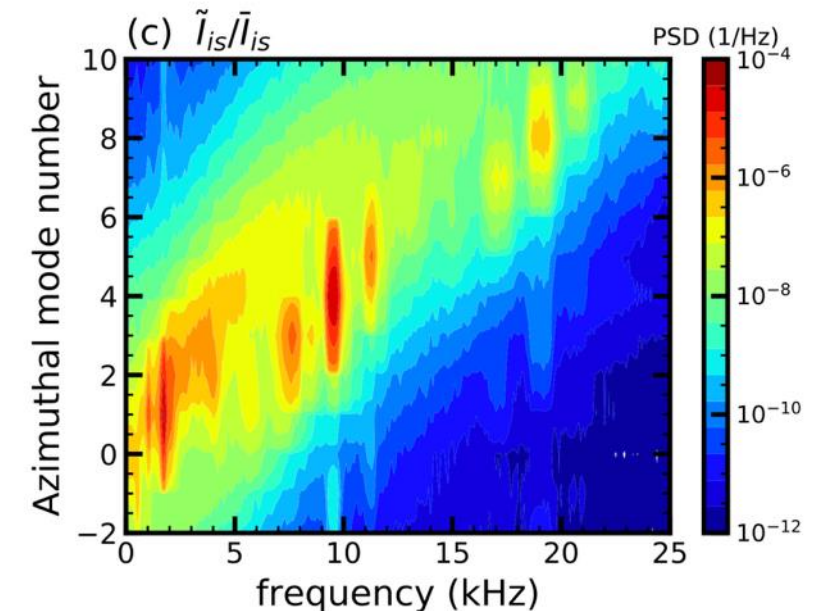
サブイオンスケール乱流の時空間構造の観測

先ほどのように $\rho_s \sim L_n \sim a$ に磁場を調整して実験し、サブイオンスケール乱流を観測

サブイオンスケール乱流@220G



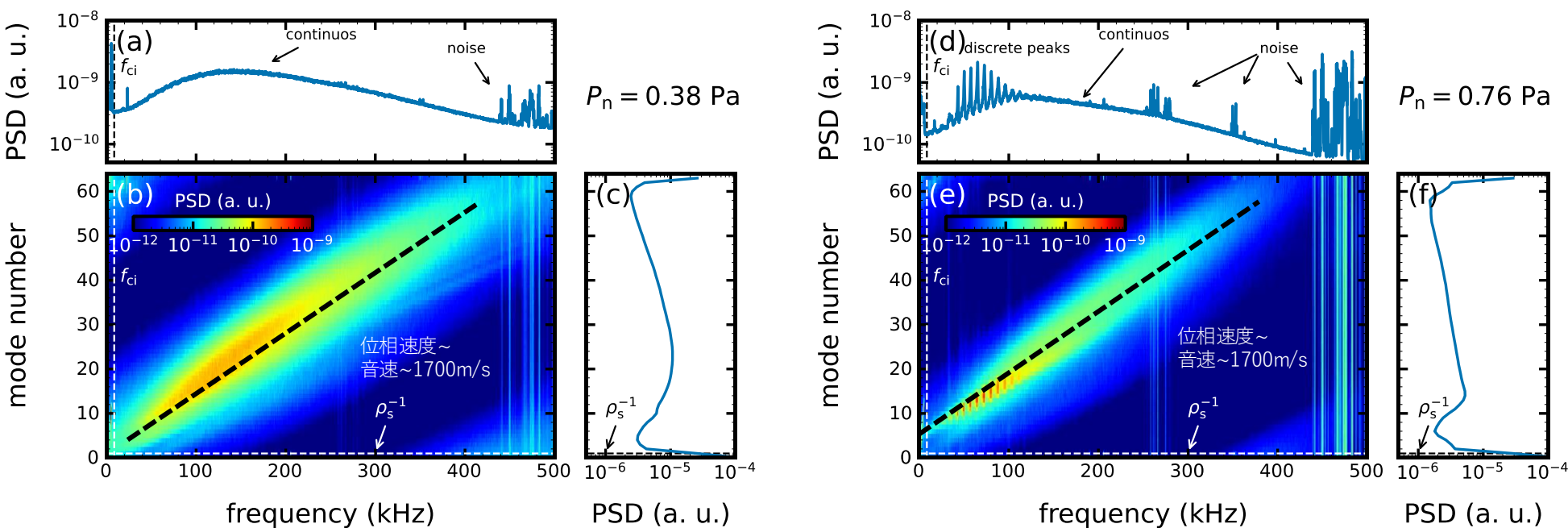
参考:イオンスケール乱流@1300G



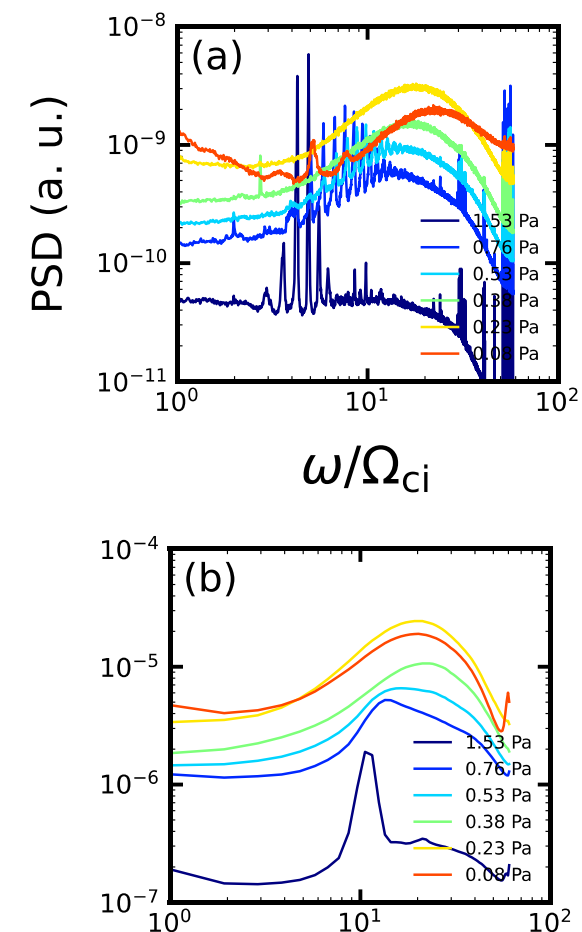
実空間から見てもラーマー運動スケールと比較しても従来より小さいスケールの乱流揺動を観測

乱流スペクトルと遷移の観測

64chプローブアレイで乱流の周方向波数-周波数スペクトルを評価
中性粒子ガス圧スキャンを実施、スペクトル構造が遷移



Ω_{ci} : イオンサイクロトロン周波数



乱流は電子反磁性方向に音速~反磁性ドリフト速度で伝搬(* $L_n \sim \rho_s$ の時 $C_s \sim V_*$)

中性粒子ガス圧に依存した揺動スペクトルの遷移を観測
ガス圧が低いとブロードガス圧が高いと離散的なスペクトル

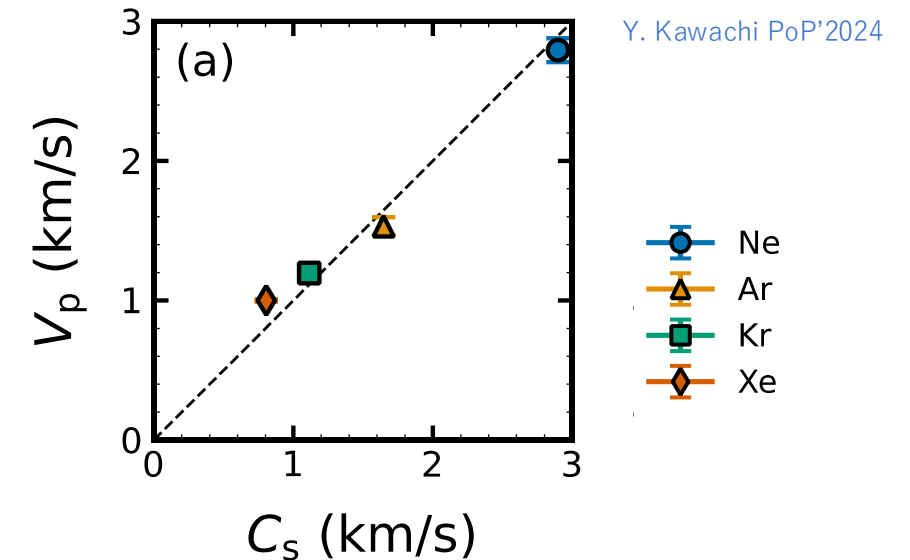
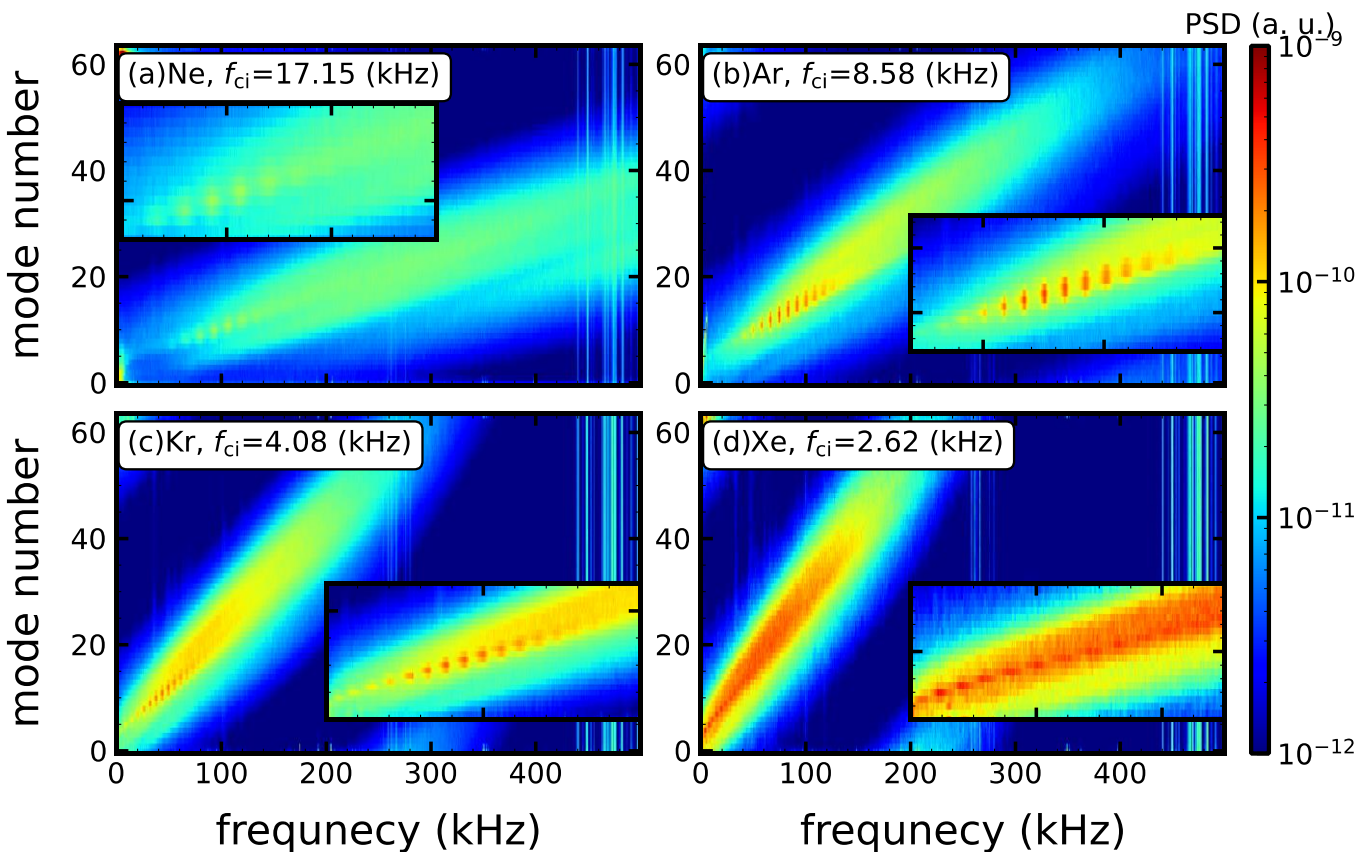
中性粒子ガス圧は揺動の減衰に効く。 ガス圧小で減衰小=>乱流に発展?

* $k_y \rho_i \approx k_y \rho_s / 4$
 $k_y \rho_i \sim 1 - 10$ に分布

サブイオンスケール乱流のガス種(質量)依存性

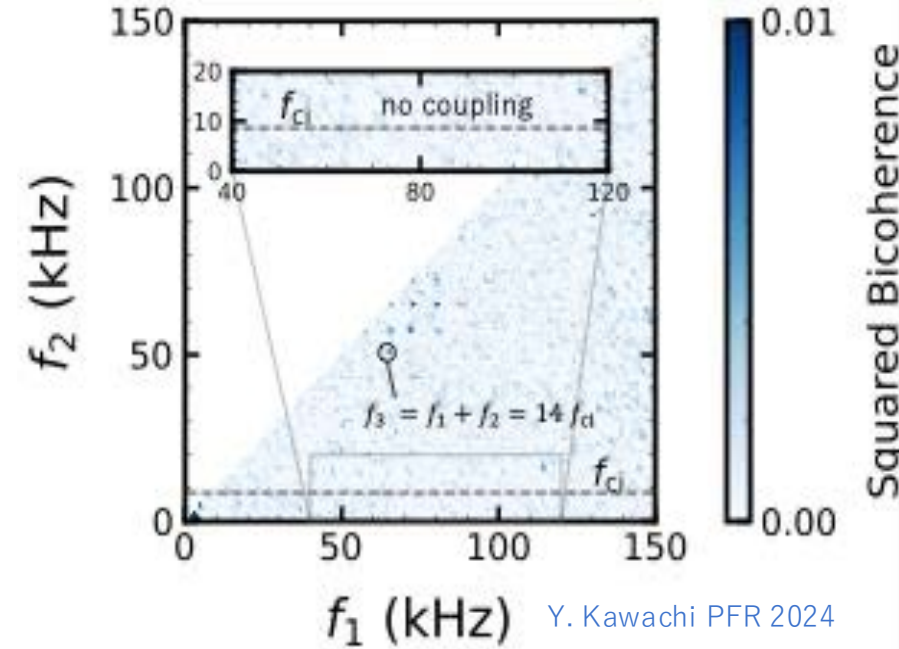
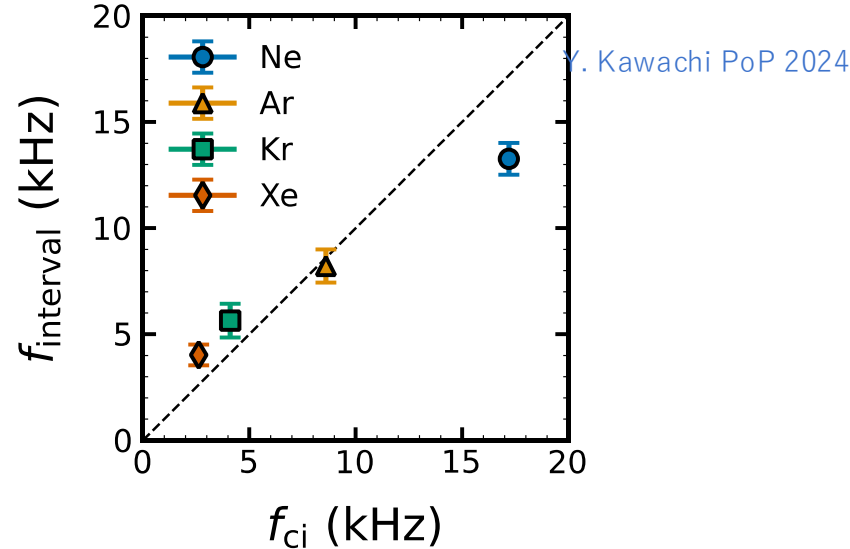
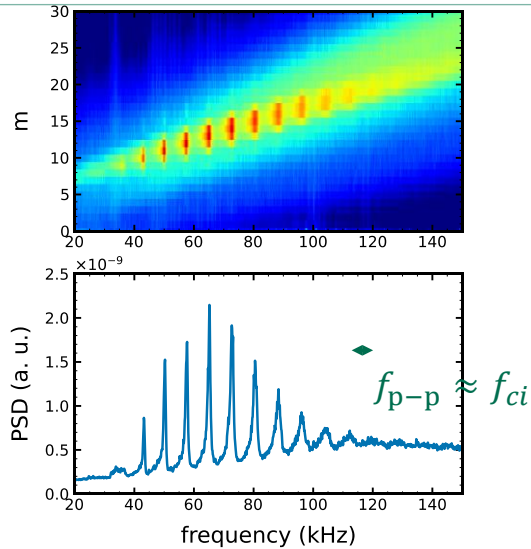
乱流揺動の分散関係のガス種依存性を調査した。

期待されること: 質量が変わり、ラーマー運動の時空間スケールや音速等が変わる



- ガス主によらず離散・連続ピークが存在
- 質量によらず音速及び反磁性ドリフト速度で伝搬

イオンバーンスタイン様乱流の発見



- ✓ 離散ピークの差周波数は Ω_{ci} 程度(質量依存性も確認)
- ✓ 空間スケールはイオンラーマー半径 $\rho_i = v_{thi}/\Omega_{ci}$
=>イオンバーンスタイン波の分散と類似
- ✓ 離散ピークとイオンサイクロトロン基本波周波数との非線形結合がない
=>離散ピークは線形不安定によるもの

観測された離散ピークはイオンバーンスタイン波であることを示唆
ブロードなスペクトルはイオンバーンスタイン波乱流か

実験的な観測は初

先行研究の核融合炉ペデスタルでの乱流シミュレーションのように
 $\rho_s \sim L_n$ の条件でイオンバーンスタイン波乱流が励起することを実験的に示した

まとめ

- 核融合炉ペデスタルのような $\rho_s \sim L_n$ の条件で、重要になりうるサブイオンスケール乱流に関する研究を基礎装置にて開拓
- ペデスタルを模擬するために $\rho_s \sim L_n$ の条件を実験的に作り出し、サブイオンスケール乱流を観測
- 先行研究のシミュレーションで観測されたイオンバーンスタイン波揺動が実験装置でも観測された。

今年度から科研費Bをいただき始動

今後の展望

- 揺動駆動輸送やマルチスケール相互作用の観測を通じて、サブイオンスケール乱流の非線形過程を解明
- サブイオンスケール乱流に特化した基礎装置を新たに開発中

