

磁場閉じ込め高温プラズマにおける巨視的な自発流

居田克巳

核融合科学研究所

第57回日本物理学会
仁科記念賞・受賞記念企画講演
関西学院
2012年3月24日

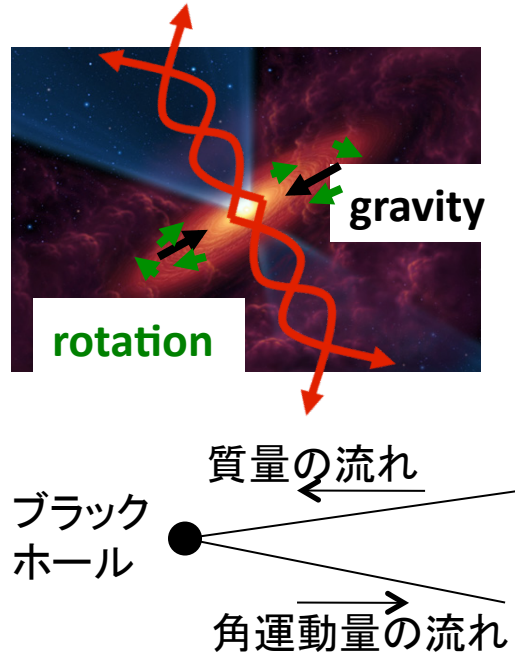
アウトライン

- 1 運動量輸送とトロイダルプラズマにおける巨視的な流れ
- 2 自発ポロイダル回転 $\sim B_{\perp}$
 - 2-1 ポロイダル回転シアと輸送改善
 - 2-2 ポロイダル回転の分岐
- 3 自発トロイダル回転 $\sim B_{\parallel}$
 - 3-1 自発トロイダル回転の観測
 - 3.2 トロイダル運動量輸送の非拡散項
 - 3.3 トロイダル回転の分岐
- 4 自発回転の理論
- 5 まとめ

運動量輸送

降着円盤

降着円盤の中では物質がブラックホールに落下する。→径方向に角運動量が輸送されている。

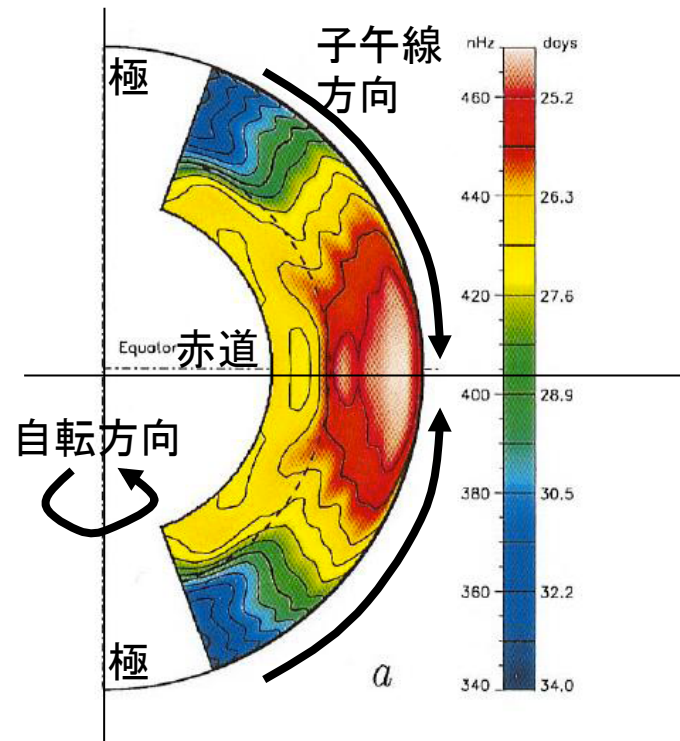


流れの方向
輸送方向
重要な力

円盤上の回転方向
径方向
重力+粘性力

太陽の差動回転

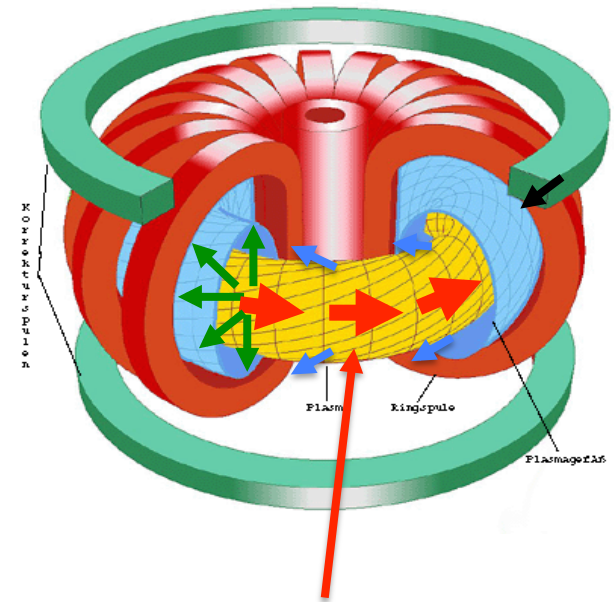
赤道付近の回転が極付近の回転より速い。→ 角運動量が赤道に輸送されている。



自転方向・子午線方向
子午線方向
コリオリ力+レイノルズ応力

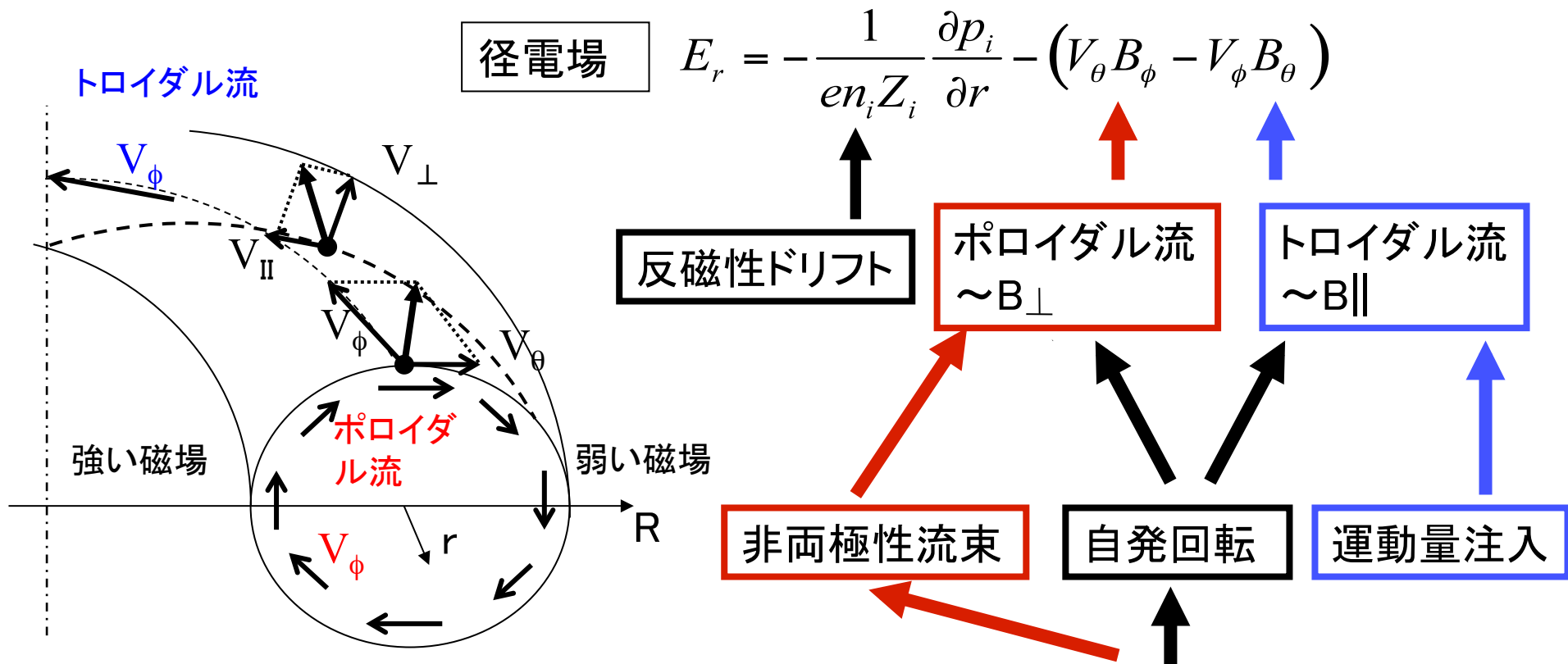
実験室プラズマ自発回転

外部からの駆動トルクがなくても自発的に回転する。
→角運動量を周辺部に輸送して閉じた磁気面の外に放出



トロイダル方向・ポロイダル方向
径方向
勾配駆動乱流によるレイノルズ応力

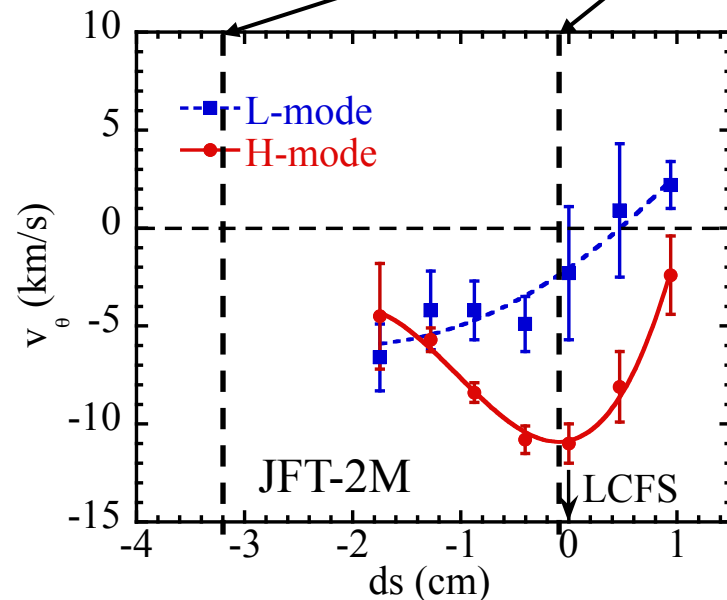
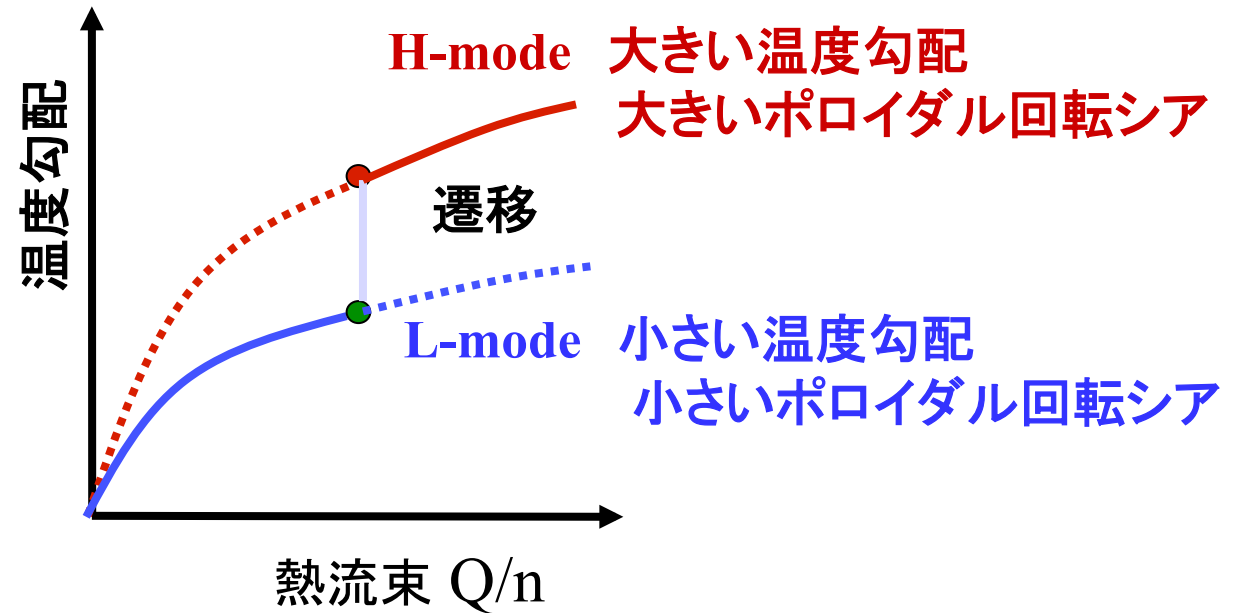
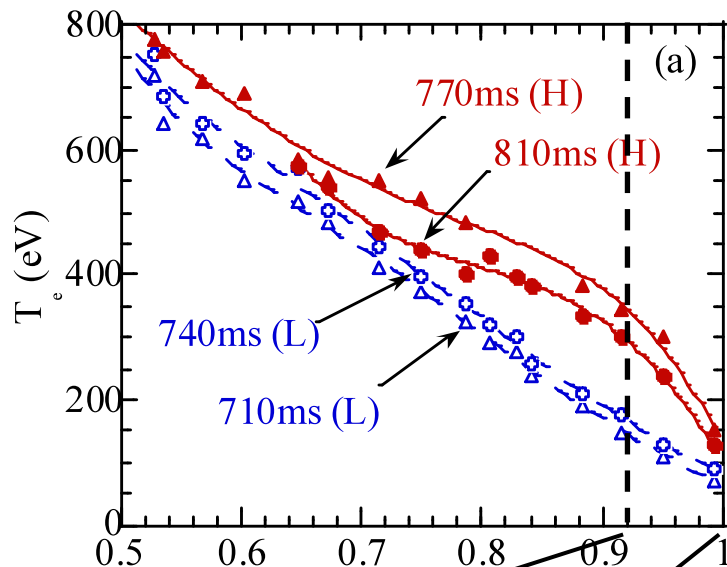
ポロイダル流・トロイダル流と径電場



ポロイダル流は温度・密度勾配による非両極性流束で駆動され、磁場の変動により減衰
 トロイダル流は運動量注入で駆動され、流れのシア粘性で減衰

→ 簡単なメカニズムだけでは「流れ」が決まらない事がわかった。

ポロイダル回転シアと高温度勾配の維持



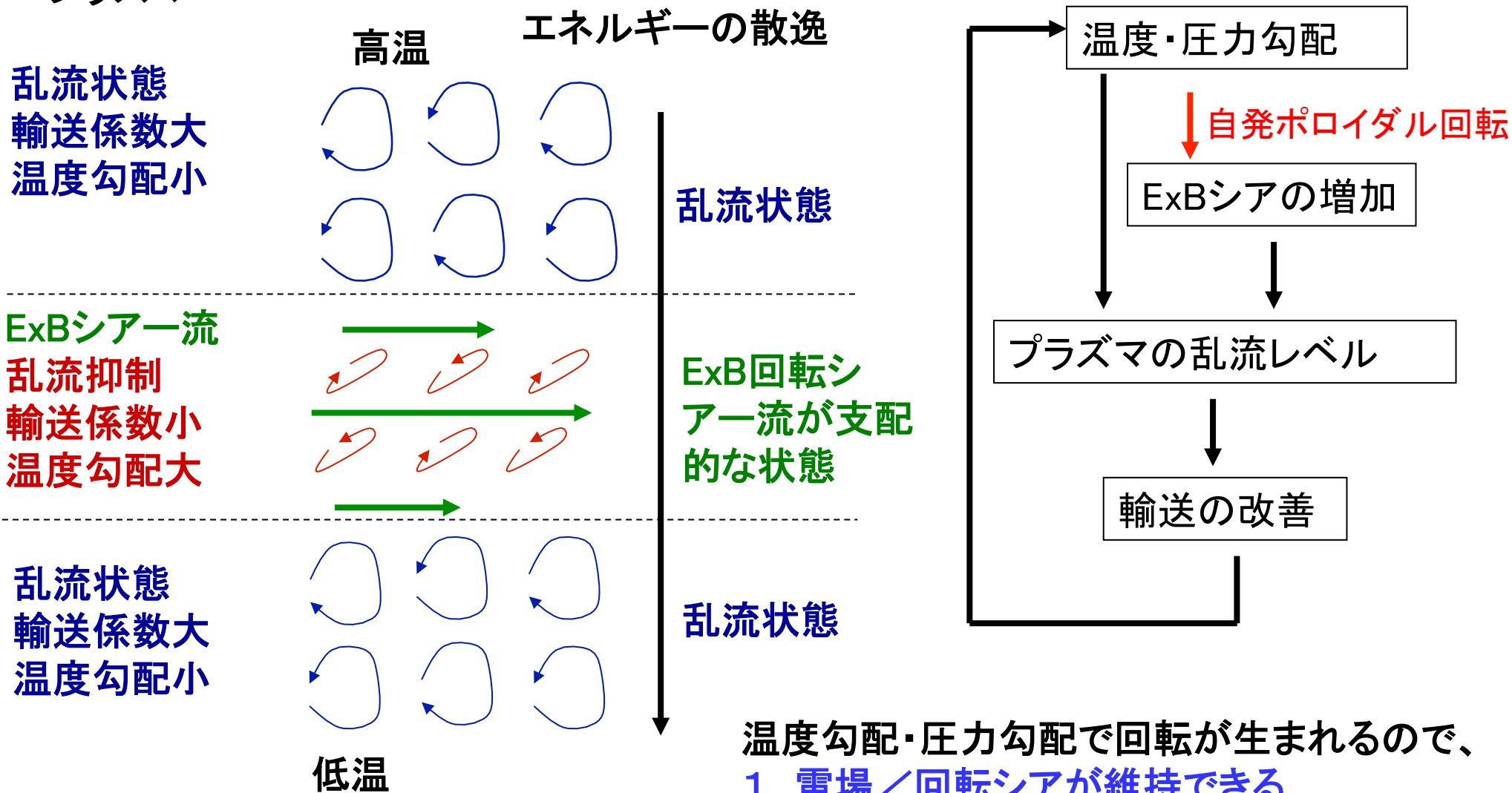
ポロイダル回転シア(ExB回転シア)により温度勾配が増加する事が観測され、回転シアによる乱流抑制が明らかになった。

→磁場閉じ込めプラズマの閉じ込め性能の向上に寄与
しかし、自発ポロイダル回転発生メカニズムについては未解決の問題が残った。

K.Ida, S.Hidekuma, Y.Miura, et al., Phys. Rev. Lett. 65 (1990) 1364.

ExB回転シアと温度分布の相互作用

プラズマ



シア一流が局所的に発生

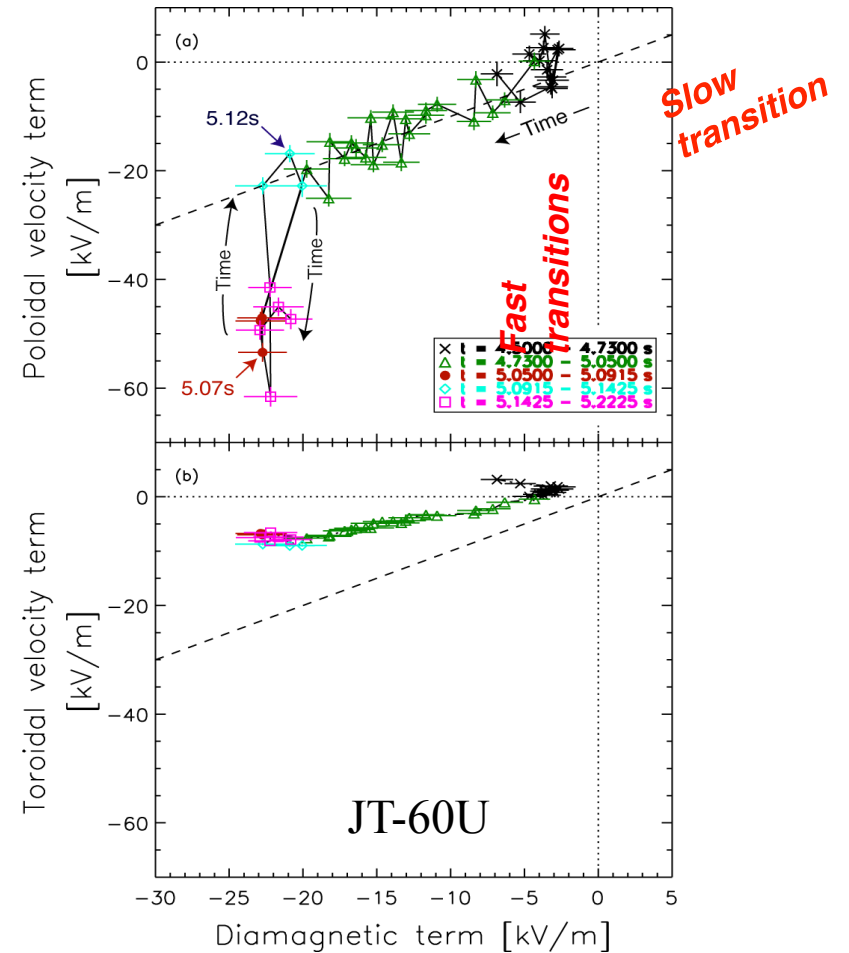
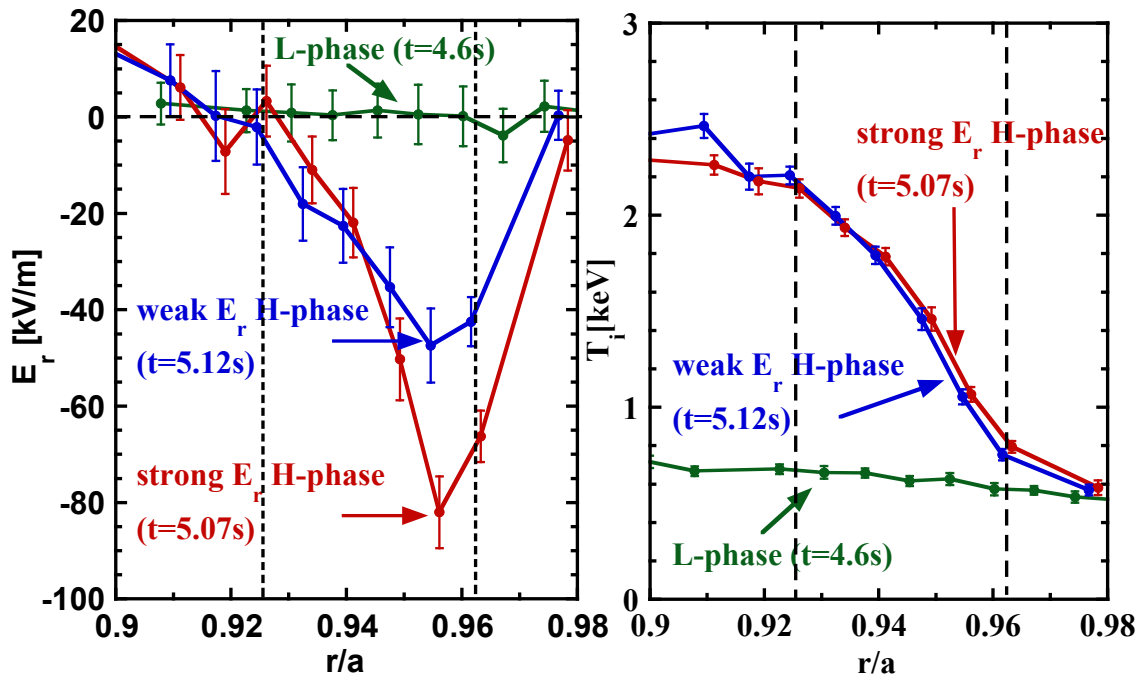
- 温度勾配・圧力勾配で回転が生まれるので、
- 1 電場／回転シアが維持できる
 - 2 輸送曲線にも非線形性が現れる

自発ポロイダル回転の遷移

$$E_r = \frac{\nabla p_z}{Z n_z} - v_{\theta,z} \times B_\phi + v_{\phi,z} \times B_\theta$$

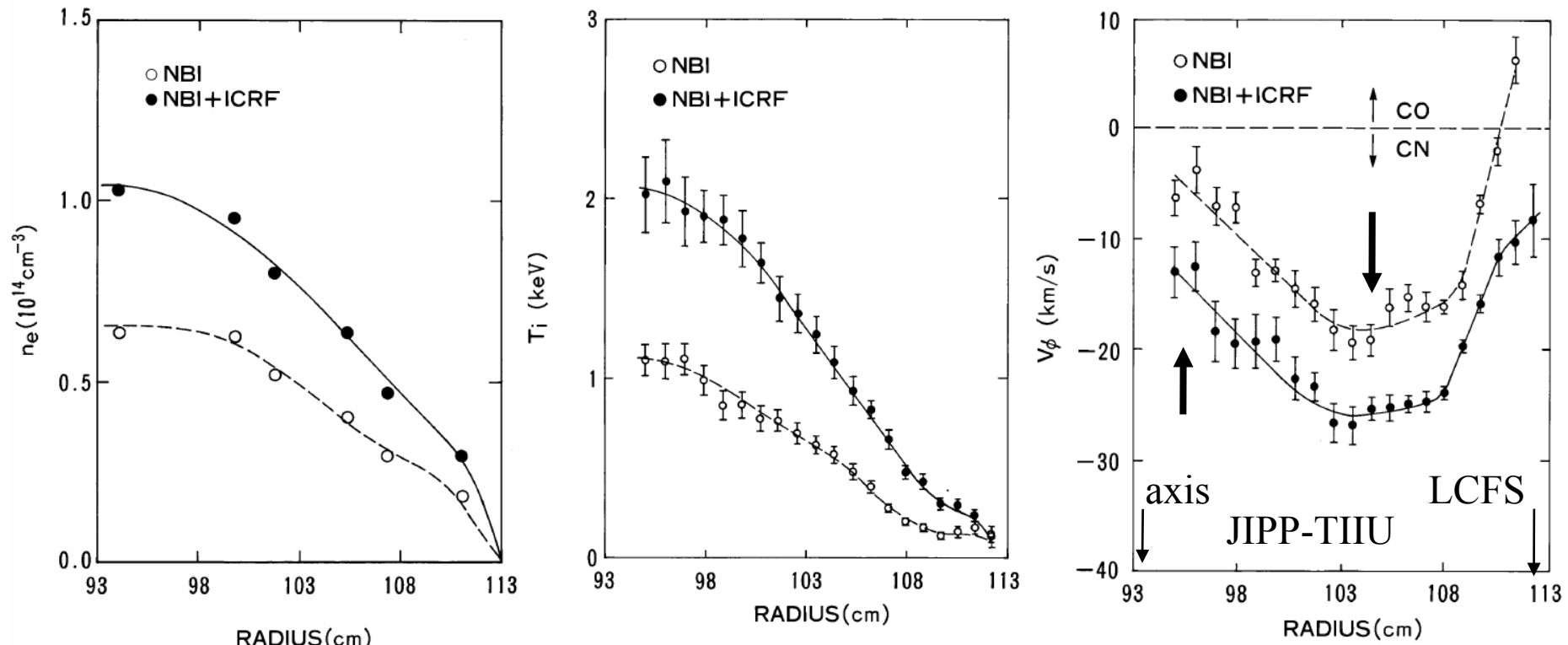
反磁性項 ポロイダル回転項 トロイダル回転項

弱電場Hモード → ポロイダル回転項 ~ 反磁性項
 強電場Hモード → ポロイダル回転項 >> 反磁性項



ポロイダル回転の遷移現象を説明するには、非線ポロイダル回転駆動機構(乱流駆動自発回転)が必要

自発トロイダル回転の観測

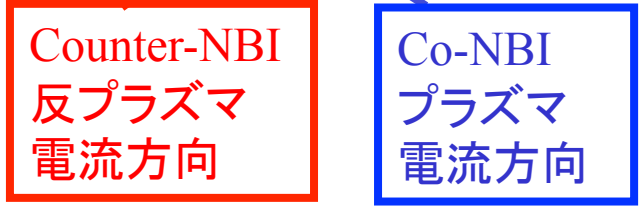
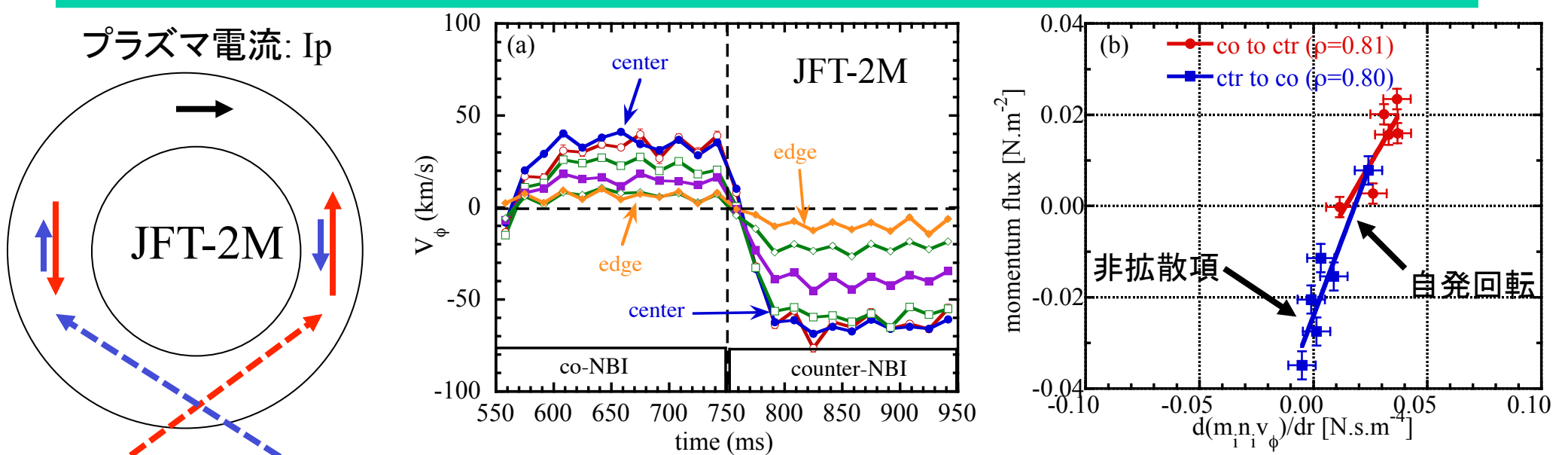


ICRF加熱による温度勾配の増加に伴い、counter方向の自発的トロイダル回転が観測された。(磁気軸付近のco方向のトロイダル回転はNBI駆動のトルクによるもの。)

From K.Itoh, et. al. "Transport and structural formation in plasmas" page 13 IOP publishing 1999

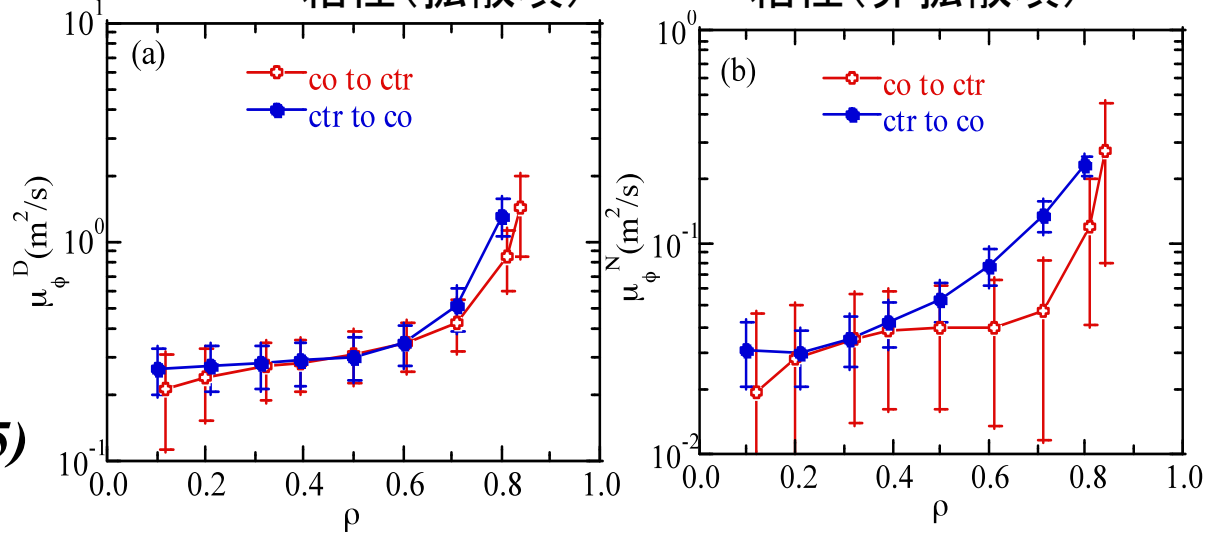
K.Ida et al., Nucl. Fusion 31 (1991) 943

運動量輸送の非拡散項の発見



$$\Gamma_M = m_i n_i [-\mu^D \nabla v_\phi + \mu^N (v_{th}/T_i) \nabla T_i]$$

粘性(拡散項) 粘性(非拡散項)

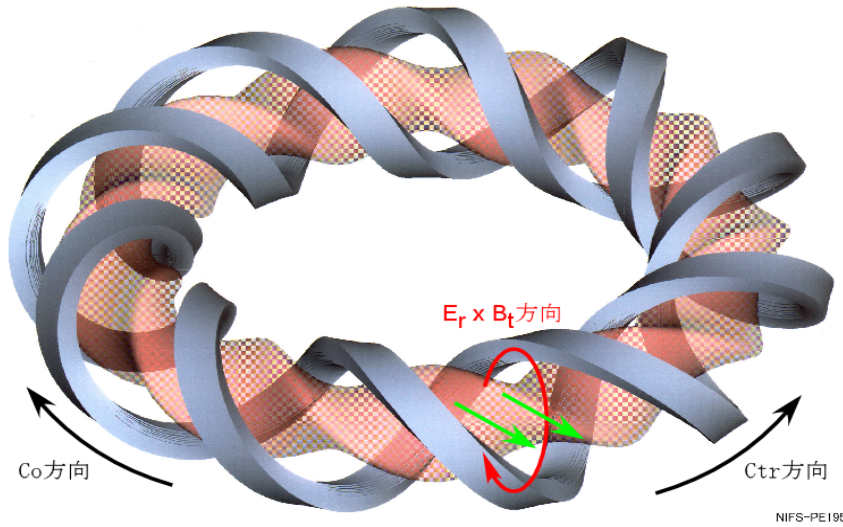


ゼロ運動量流束における自発回転
勾配とゼロ回転勾配における運動
量流束が実験で検証された。

運動量モジュレーション実験の草分け

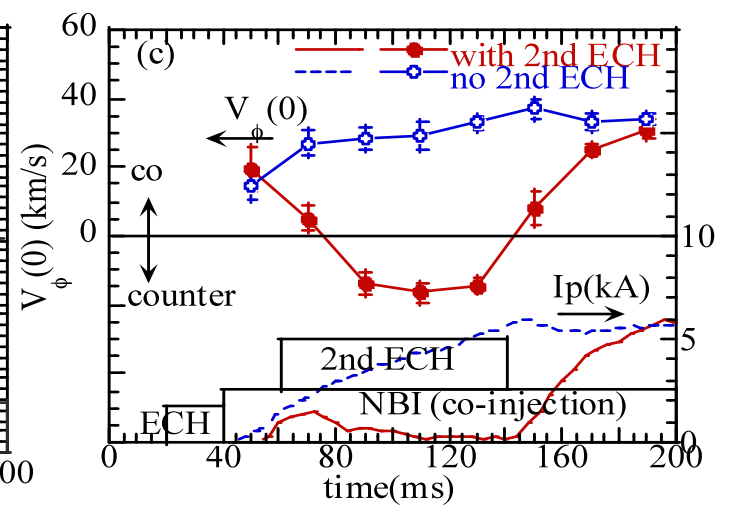
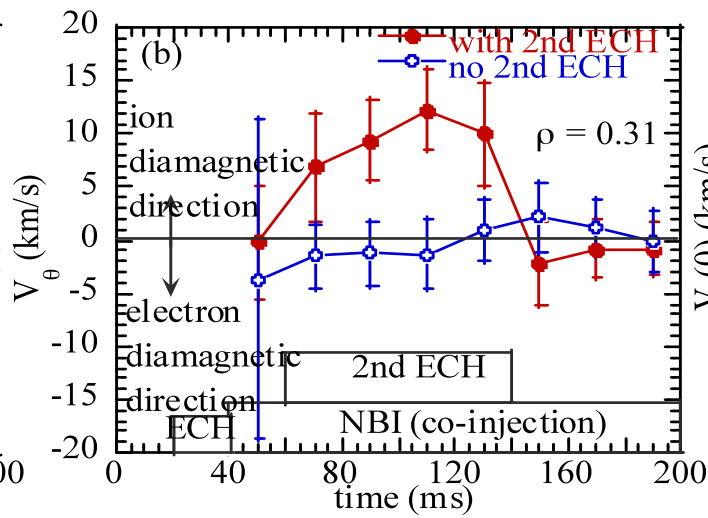
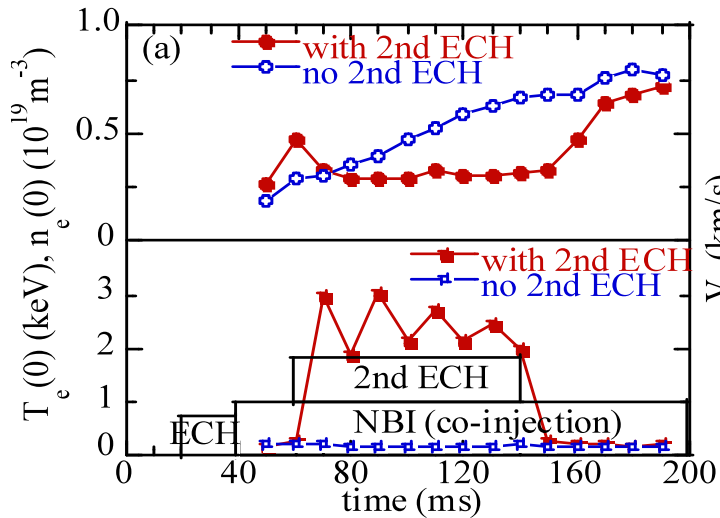
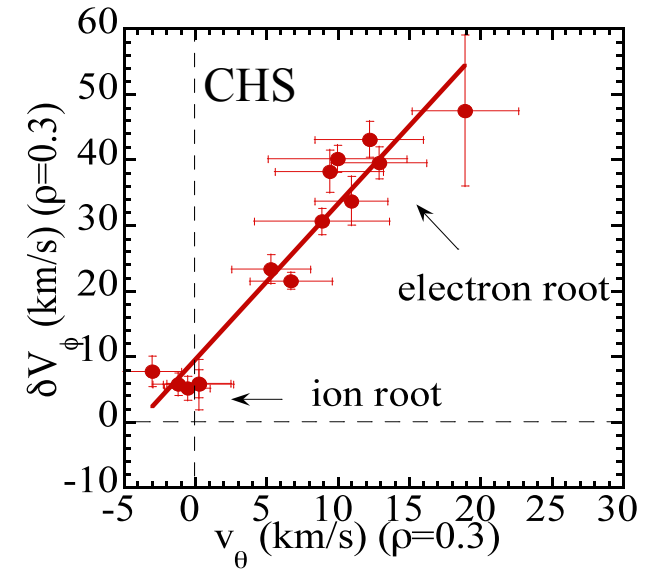
K. Ida et al., Phys. Rev. Lett. 74 (1995)
1990

トロイダル流とポロイダル流の関連



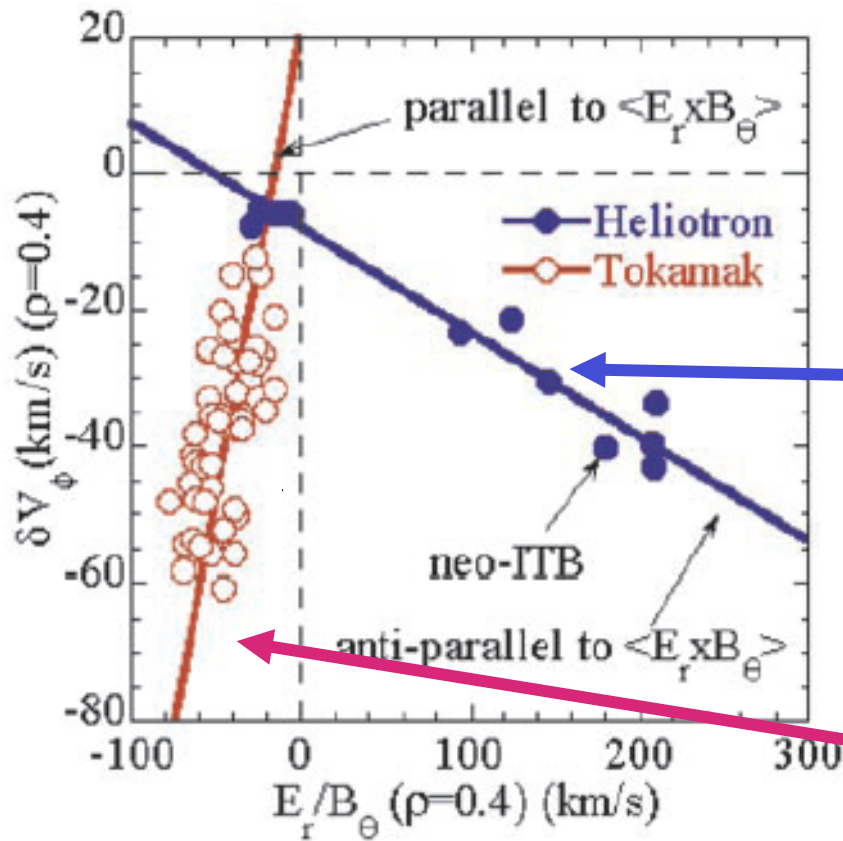
ECHによる電子加熱で、自発ポロイダル流と自発トロイダル流を観測した。

2つの流れの関連が明らかになった

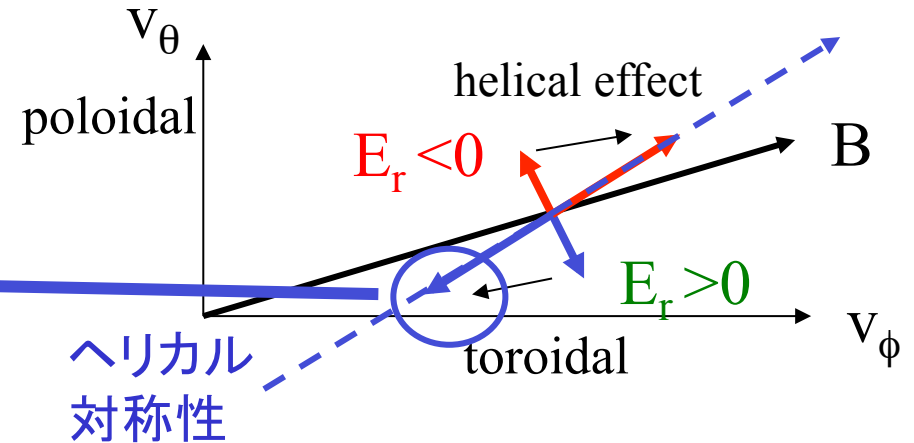


K.Ida et al., Phys. Rev. Lett. 86 (2001) 3040

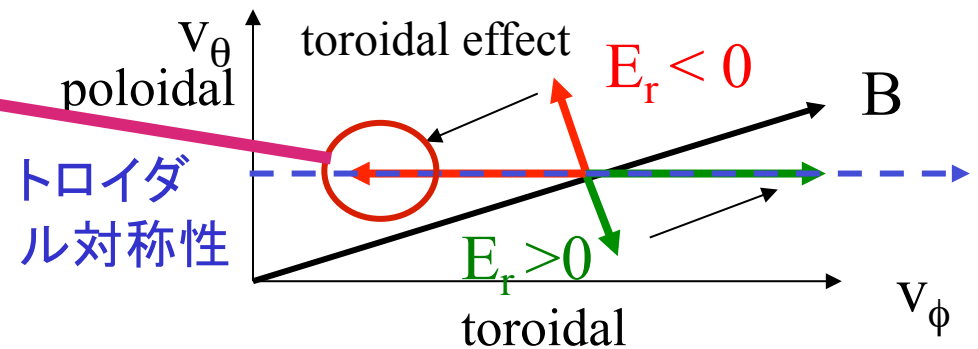
トロイダル回転とポロイダル回転の関係



●ヘリカル(外部電流システム)



●トカマク(内部電流システム)



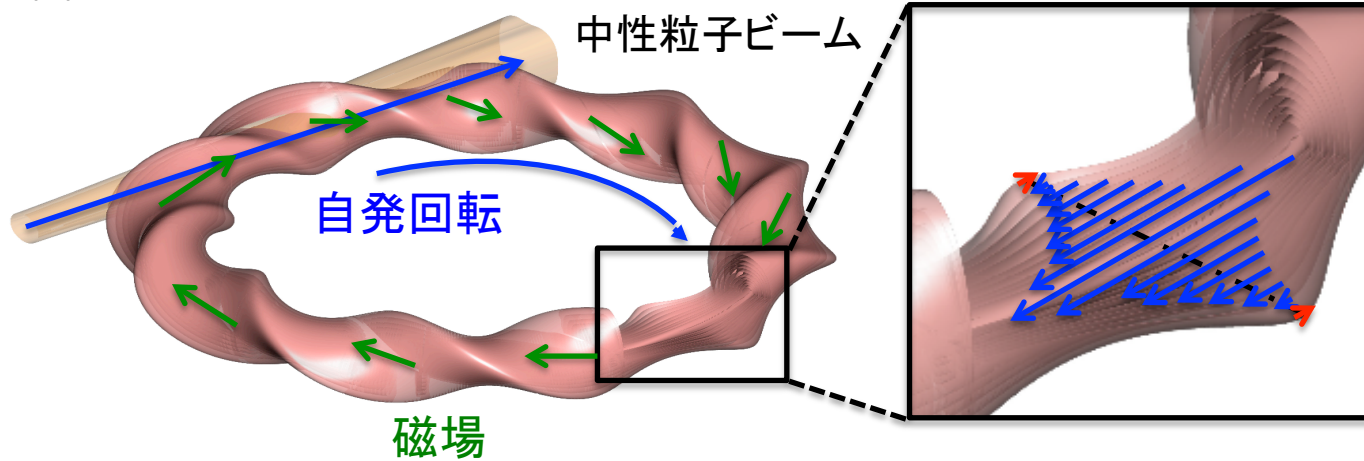
トカマク: 大きな自発回転 $V=1.3E_r/B_\theta$

ヘリカル: 小さな自発回転 $V=0.16E_r/B_\theta$

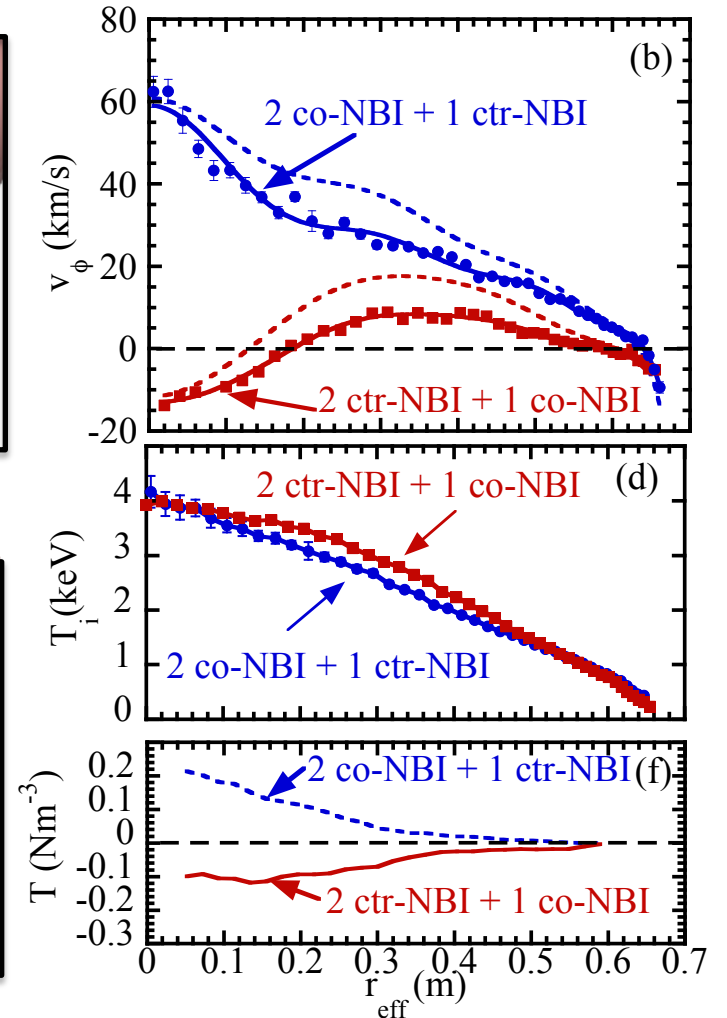
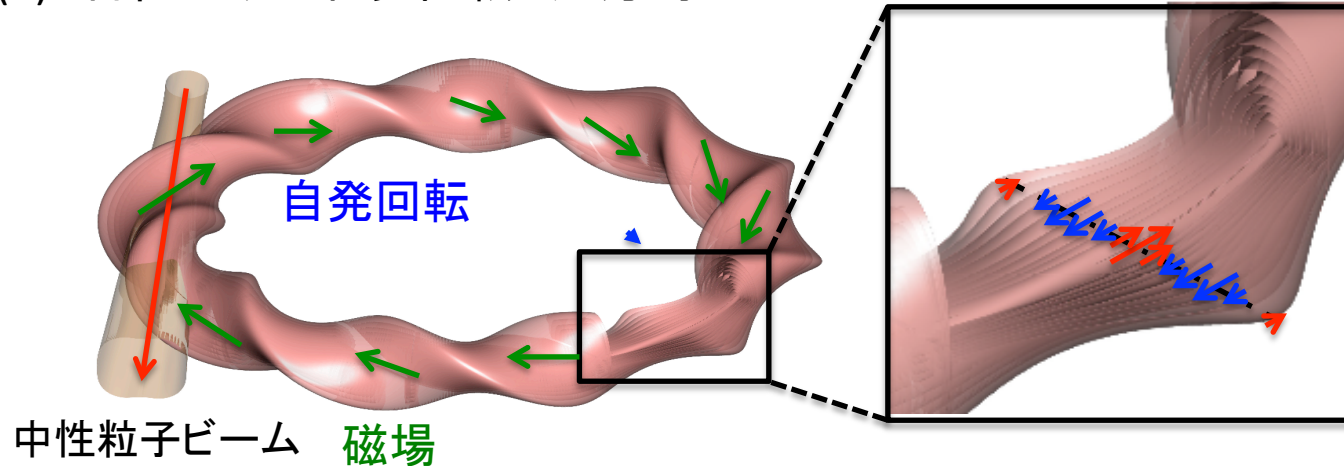
K.Ida et. al., Plasma Phy, Control. Fusion 44 (2002) 361

ヘリカルプラズマのトロイダル自発回転

(a) 外部トルクが自発回転と同方向



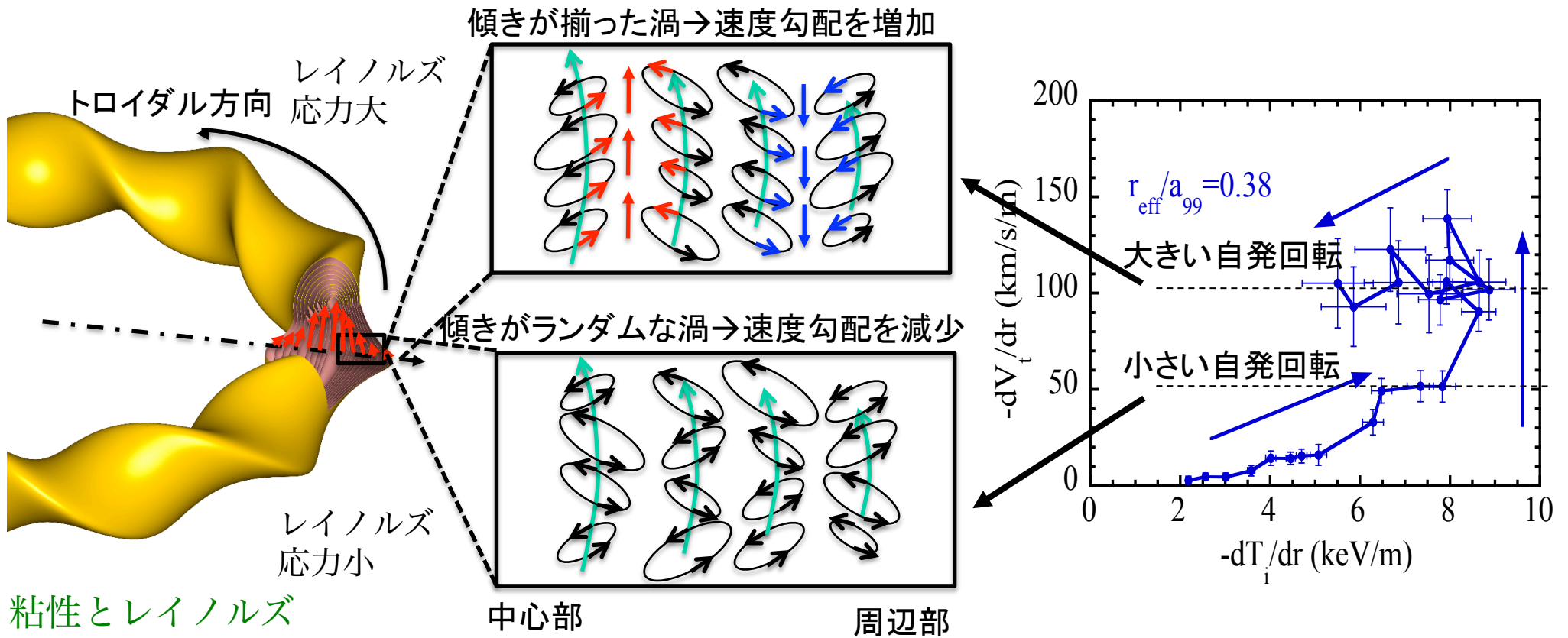
(b) 外部トルクが自発回転と逆方向



ヘリカルにおいては自発トロイダル回転は小さいが、NBI駆動回転を打ち消す事ができる。

自発回転を利用したプラズマの回転を制御が可能→磁場閉じ込めプラズマの安定性の向上に寄与

自発トロイダル回転の遷移



自発的トロイダル回転も、自発的ポロイダル回転と同様に遷移現象が観測された。

トロイダル対称性を破る原因となる乱流の非対称性の観測が重要
 →同じ波数の乱流でも、対称性成分が大きい非対称成分が大きいかで自発回転の大きさが決まる。

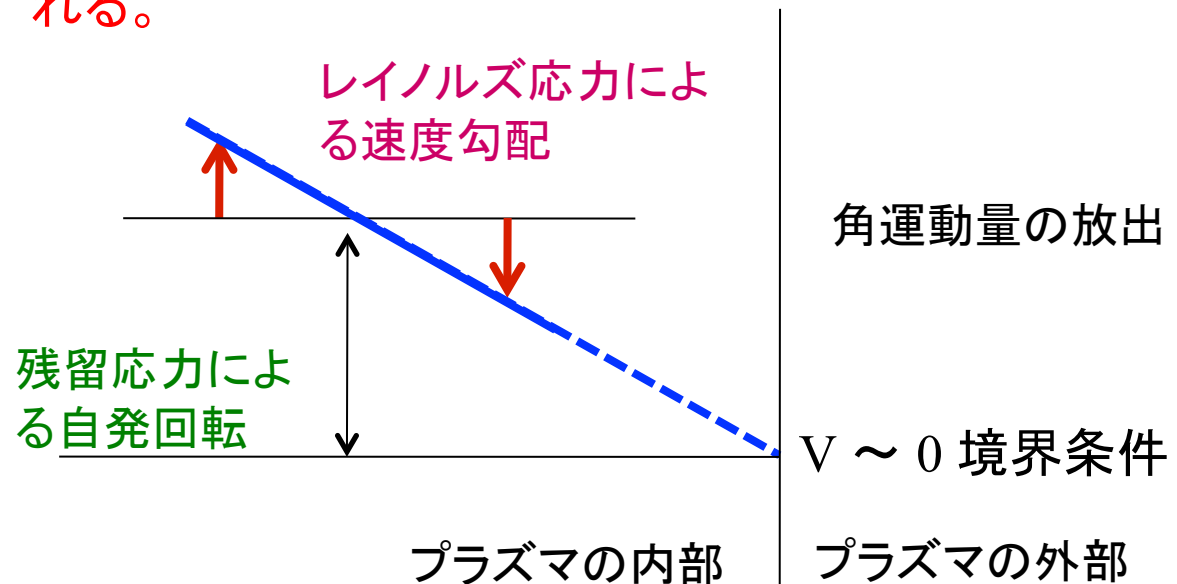
自発回転の理論



電場シアと乱流のトロイダル対称性が破れが(co方向とcounter方向の乱流の波数に差)がプラズマ中に存在すると、レイノルズ応力によって速度勾配が生じる。

角運動量の保存から、応力だけでは回転速度勾配を生み出すだけで、正味の回転は作れない。

プラズマの外側に角運動量を放出する事で、プラズマの境界での回転がほぼゼロとなり、正味の回転が生まれる。



O.D.Gurcan Phys. Plasmas 14
(2007) 042306

レイノルズ応力
+
ゼロ速度境界条件
↓
残留応力

まとめ

磁場閉じ込め高温プラズマにおける巨視的な自発流(ポロイダル流、トロイダル流)は20年以上前(1990,1991)に観測された。

ポロイダル流シアが乱流(対称成分)を抑制して輸送障壁の形成に重要な役割を示している事がHモードプラズマの電場計測で明らかになった。

自発トロイダル流の駆動機構として、運動量輸送の非拡散項(温度勾配非対角項)が重要な役割を示している事がNBI入射方向切り替え実験で明らかになった。

その後、ドリフト波駆動の帯状流(ポロイダル流)の発見を経て、巨視的な自発流における乱流の非対称成分によるレイノルズ応力・残留応力の重要性が認識されるようになった。

