

磁気圏型プラズマ閉じ込め装置で見られる内向き拡散と自己組織化現象

東京大学・新領域創成科学研究科 吉田善章, 西浦正樹, 川面洋平, 斎藤晴彦,
矢野善久, 佐藤直木, 山崎美由梨, 虫明敏生,
Ankur Kashyap

1. 磁気圏における内向き拡散と自己組織化

天体の磁気圏では高密度の内側へ向かって粒子が逆拡散して「自発的な閉じ込め」が起こる(図1). これはプラズマの粒子が感じる空間がダイポール磁場の強い局所性のために歪んでいるためだと考えることができる. 磁化した粒子の運動に関して妥当な位相空間(Liouvilleの定理が成り立つ空間)で拡散が起こるとき, これを普通の位相空間(座量のEuclid空間とそれに共役な運動量のEuclid空間の直積空間)で観察すると, 密度勾配を上ってゆくような拡散に見える.

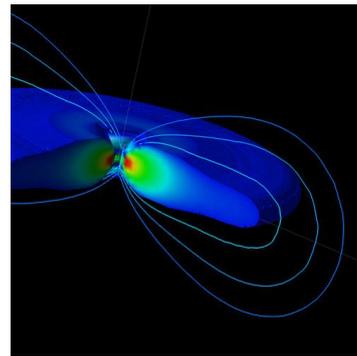


図1 木星磁気圏プラズマの理論モデル.

2. 内向き拡散の理論

拡散を記述するために妥当な位相空間は, 磁化した粒子のハミルトン力学に基づいて決定しなくてはならない. ダイポール磁場中で荷電粒子の運動は, サイクロトロン運動, バウンス運動という周期運動によって時空間で階層化(スケール分離)され, ミクロスケールを平均化したマクロな運動(たとえばサイクロン運動より十分大きな時空間スケールの運動)は周期運動の断熱不変量(たとえば磁気モーメント)が一定となるように拘束されて運動する. 運動できる範囲は位相空間内の部分多様体(Casimir leaf)に束縛されるのである(いまの場合, Casimir 不変量は断熱不変量のことである). このような状況を位相空間の葉層化(foliation)という. しばしば直感的に「マクロ階層」と呼ばれているものは, 理論的にいうと, 断熱不変量によって束縛された位相空間内のCasimir leafのことである(図2) [1]. 粒子衝突などの散逸効果で周期運動が乱されない限り, 磁化による位相空間の束縛がプラズマの運動や構造を支配する. 熱平衡への緩和過程である拡散は, Casimir leaf 上の不変測度に関して計算されるエントロピーを増大さ

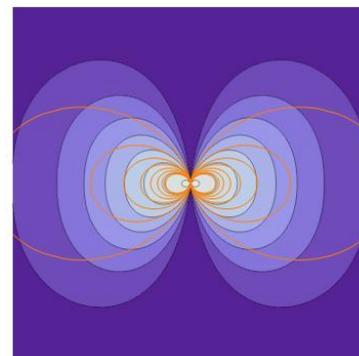


図2 葉層上の熱平衡によって説明される磁気圏プラズマの構造 [1].

せるプロセスでなくてはならない [2]. それは, 中性粒子の拡散とは全く異なった様相を呈するのである (図 3).

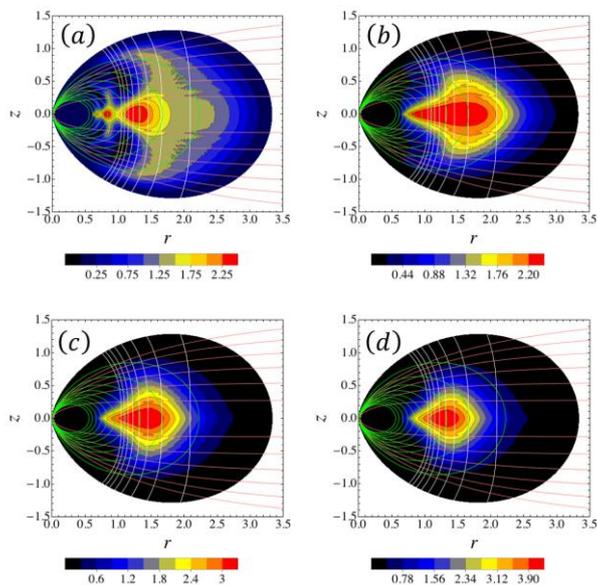


図 3 内向き拡散の理論に基づく磁気圏プラズマ形成のシミュレーション [2].

3. 磁気圏プラズマの実験研究

東京大学の RT-1 実験プロジェクトでは, 超伝導マグネットがつくる磁場で天体磁気圏の渦構造を再現する研究が進められている (図 4) [3]. 上記の「内向き拡散」が起こることが実験的に示されている [4]. この「内向き拡散」によって自己組織化されるプラズマは, プラズマ粒子を自然に閉じ込めることから, きわめて長い閉じ込め時間 (~ 0.5 sec) と高い β 値 (~ 1) が得られている (図 5). このメカニズムを先進的な核融合へ応用することが考えられている. また, 反粒子プラズマの長時間閉じ込めに応用する研究も進められている.

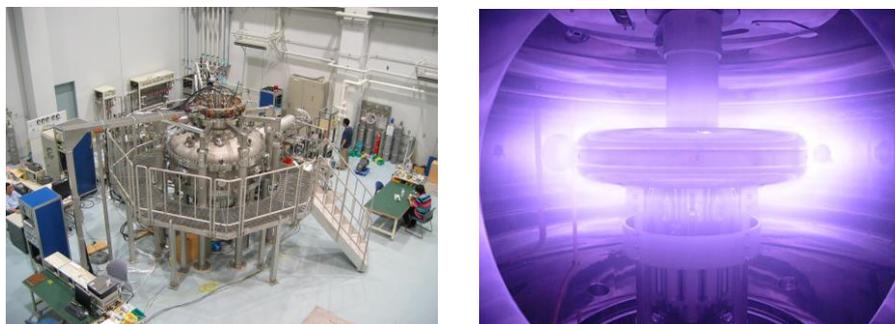


図 4 RT-1 実験装置 (左) で閉じ込めた磁気圏型プラズマ (右).

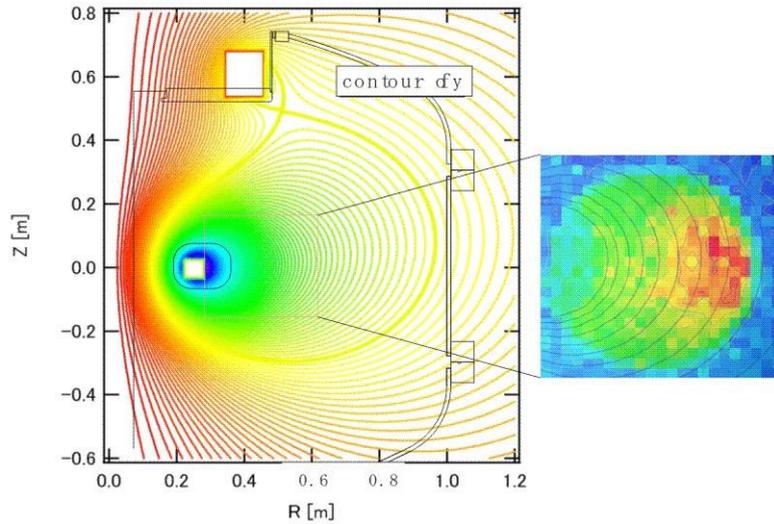


図5 RT-1 実験装置で生成した超高温プラズマ（左：磁気計測による平衡磁場，右：X線カメラによる超高温プラズマのイメージング）。

参考文献

- 1) Z. Yoshida and S.M. Mahajan, *Self-organization in foliated phase space: construction of a scale hierarchy by adiabatic invariants of magnetized particles*, Prog. Theor. Exp. Phys. **2014** (2014), 073J01.
- 2) N. Sato and Z. Yoshida, *A stochastic model of inward diffusion in magnetospheric plasma*, J. Phys. A: Math. Theor. **48** (2015), 205501.
- 3) Z. Yoshida *et al.*, *Self-organized confinement by magnetic dipole: recent results from RT-1 and theoretical modeling*, Plasma Phys. Control. Fusion **55** (2013), 014018
- 4) Z. Yoshida, H. Saitoh, J. Morikawa, Y. Yano, S. Watanabe and Y. Ogawa, *Magnetospheric vortex formation: self-organized confinement of charged particles*, Phys. Rev. Lett. **104** (2010), 235004.