



渡邊智彦教授

\*渡邊智彦 教授 Tomo-Hiko Watanabe, Prof.  
前山伸也 助教 Shinya Maeyama, Assist. Prof.  
西岡賢二 特任助教 Kenji Nishioka, Research Associate

プラズマ理論研究室では、宇宙空間や核融合実験などにおいて、粒子加速や乱流輸送、爆発的現象を引き起こすプラズマの振る舞いを理論的に研究しています。2014年2月に渡邊教授が着任して研究室は新たなスタートをきり、2015年3月には前山助教が、2016年4月には西岡特任助教が加わりました。まだ小規模なグループですが、意欲あるメンバーの参加を募っています。

### プラズマとは

気化した物質の温度をさらに上昇させ、それが数千度を超えるようになると、粒子または光子との衝突により原子から電子が叩き出されます。この電離過程が十分進行すると、正の電荷をもつイオンと自由電子が混在した状態となります。これがプラズマです。

プラズマは、いまでは家電製品や半導体プロセスなどに多く利用されていますが、身近な自然現象としては雷放電などに限られるでしょう。しかし、ひとたび宇宙空間に踏み出すと、そこは真空ではなく、プラズマに満たされた空間が広がっています。「宇宙の渚」と呼ばれる高度80kmから800kmにある電離層は、オーロラが乱舞するプラズマ現象の舞台です。もっと高度を上げると、ほぼ完全に電離したプラズマのみで構成される磁気圏に入ります。そこは、磁気嵐と呼ばれるプラズマの突発現象や様々な波動現象が支配する世界です。さらに惑星間空間に出ると、太陽フレアと呼ばれるプラズマの爆発現象により吹き出した超音速プラズマ流、すなわち太陽風が

吹き荒れ、電磁場と流れ場が絡み合った乱流が渦巻いています。プラズマの世界は、さらに星間空間にも広がり、超新星爆発でつくられた衝撃波による高エネルギー粒子加速や、天体における種々の構造形成に関わっています。

一方、1億度以上の高温プラズマを人工的に作り出し、強磁場で一定時間以上閉じ込めることで制御核融合反応を起し、そのエネルギーを発電に利用することを目指した研究が世界各国で精力的に進められています。また、物質に高強度レーザーを照射することで、相対論的なエネルギーをもつプラズマを発生させることも行われています。こうした核融合プラズマや高エネルギー密度プラズマは、プラズマ物理学の先端的研究対象となっています。

このようにプラズマの世界は、レーザー波長に対応する $\mu\text{m}$ の空間スケールおよびピコ秒の時間スケールから、天体現象の時空間スケールにまで広がっています。物理学としてみたプラズマの特徴は、無数の荷電粒子が電磁場を介して相互作用する集団現象、乱流や衝撃波に代表される強い非線形性、衝突が少ないために熱平衡から大きく外れた非平衡性、が挙げられるでしょう。その結果、プラズマには、多種多様な時空間スケールをもつ不安定性が混在し、それらが位相空間上において複雑な非線形現象を引き起こします。以下では、こうしたプラズマ非線形現象に関して、当研究室で取り組んでいる研究テーマの概略を紹介します。

### オーロラの発達機構

極夜を彩るオーロラは、古より多くの人を魅了して来ました。磁気圏から電離層に降り込むkeV程度のエネルギーをもつ電子が、電離層の中性原子を励起し、オーロラとして発光することはこれまでの人工衛星での観測からよく知られています。しかし、オーロラの特徴的な運動と時空間構造がいかにして作られるのか未だ解明されておらず、多くの謎が残されています。電離層と磁気圏という密度や温度、電離度の全く異なるプラズマが結合した系では、従来考えられて来た均一なプラズマでは起こりえない、結合系特有の不安定性が生じることが分かってきました。このオーロラ発達過程を扱う理論モデルを



前山伸也助教

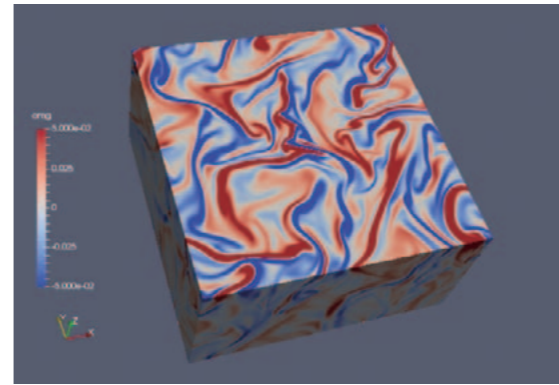


図1: 磁気圏-電離圏結合系におけるオーロラ発達過程の非線形シミュレーション例。図は磁気圏プラズマ領域での渦度分布を示し、青色と赤色で逆回りの渦を表現している。オーロラの発達にともなってプラズマの流れが複雑に入り乱れ、「オーロラ乱流」とも呼ばれる状態が発生することが明らかになってきた。

構築するとともに、その非線形発展を計算機シミュレーションにより調べています(図1参照)。さらに、位相空間上の粒子分布関数を扱うジャイロ運動論(後述)を理論モデルに導入し、オーロラの発光をもたらす粒子がどのようにして加速されているかについても理論研究を進めています。

### プラズマ乱流輸送

核融合エネルギーの実用化を目指した実験では、発生させた高温プラズマを強磁場で有限な領域に閉じ込めるため、必然的に熱および粒子分布の非均一性が生まれ、これを駆動源として対流が発生します。十分強い対流運動は乱流へと遷移し、熱や粒子の輸送を引き起こします。これは異常輸送と呼ばれ、核融合の実現に大きな影響を及ぼしています。1億度を超える高温下では、粒子間衝突はほとんどなく、プラズマは熱平衡分布から外れた分布関数を持ち、電磁場を介した非線形相互作用により乱流渦を位相空間上に生み出します。こうした位相空間乱流における物理過程を解析するために、磁化プラズマの挙動を記述するジャイロ運動論に基づく理論・数値シミュレーション研究を進めています。ジャイロ運動論では、実空間3次元に速度空間2次元を加えた5次元位相空間上で分布関数の時間発展を追跡し、プラズマ乱流の力学過程を詳しく調べます。図2に示した計算では、プラズマを構成する電子・イオンのそれぞれの運動に特徴づけられる乱流渦構造が存在することが示されています。従来はスケール分離が成り立つと考えられ、個別に取り扱われていた異なる時空間スケールを持つ乱流渦が、互いに複雑な作用を及ぼすこと、その結果、プラズマ中の乱流輸送を変化させること、等がスーパー・コンピュータ「京」を駆使した最新の数値シミュレーション研究により分かってきました。



P研の学生と西岡特任助教

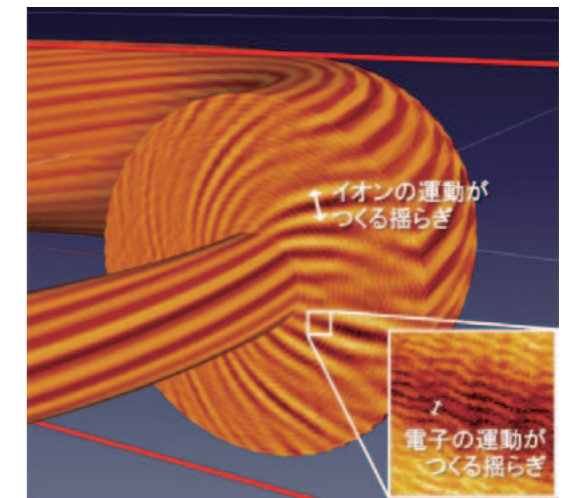


図2: トーラス型の核融合プラズマに発生する乱流のシミュレーション例。計算は5次元位相空間上で行われ、その結果得られたプラズマ中の電位揺動を3次元空間に射影している。イオンの作りだす大きなスケールの乱流揺動とともに、拡大しなければ見えないほど微細な電子の作る乱流揺動が存在することが見て取れる。

### プラズマの大規模数値シミュレーション

プラズマの理論研究においては、プラズマ運動の示す複雑性やその多次元性のため、スーパー・コンピュータを活用した大規模数値シミュレーションが積極的に行われています。近年のスーパー・コンピュータは、複数の計算機をネットワークで接続した分散型並列計算機であり、その性能を最大限に引き出すには、計算機の特性に合わせたプログラムの並列化や最適化が必要となります。そのため、理化学研究所のスーパー・コンピュータ「京」の後継機となるポスト「京」の活用に向けたプロジェクトにも参画し、新たなシミュレーション手法の開拓にも挑戦しています。

### 大学院での研究

大学院での研究においては、学生の自発性と積極性に大いに期待しています。研究テーマは上記の例に囚われる必要はなく、プラズマ物理学における新たな課題の開拓に、スタッフと共に積極的に取り組んで欲しいと考えています。また、大学院入学当初は計算機にあまりなじみがなくとも、日々の研究活動を通じてすぐに慣れていけることでしょう。

プラズマ物理学は、宇宙空間物理や、天体物理、核融合科学、などの様々な学術分野と深く関連しています。研究室では、宇宙地球環境研究所(名古屋大学)や核融合科学研究所、量子科学技術研究開発機構、プリンストン大学、ソウル国立大学、マックス・プランク研究所などと共同研究を行っており、大学院生であっても国際的に活躍できる場は広がっています。こうした複数の分野や学会に関連する研究活動を通じて、自身が取り組む研究課題についての知識だけでなく、より幅広い視座を獲得してもらいたいと願っています。

<http://p.phys.nagoya-u.ac.jp/>

\*連絡先 watanabe.tomohiko@nagoya-u.jp FAX 052-789-3934

教授: 1/ 准教授: 0/ 助教: 2/ PD: 0/ DC: 2/ MC: 5