



渡邊智彦教授

\*渡邊智彦 教授 Tomo-Hiko Watanabe, Prof.  
白戸高志 助教 Takashi Shiroto, Assistant Prof.

プラズマとは、簡単に言えば、無数の荷電粒子の集合体ですが、そこには無限自由度と非線形性に起因した豊富な物理が含まれています。物理学としてみたプラズマの特徴は、場と粒子の非線形相互作用にあると言えます。電磁場と無数の荷電粒子からなるプラズマは「自己電磁力系」を形成し、電磁場を介した集団現象、複数の時空間スケールにおける不安定性、乱流、衝撃波、自己組織化現象などが自発的に発生します。

自然界におけるプラズマは、地上では雷放電などに限られますが、ひとたび宇宙に踏み出すと、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、オーロラが躍動するプラズマ現象の舞台です。さらに高度を上げると、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。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び、地球磁場との相互作用により衝撃波が形成されます。プラズマは、さらに星間空間にも広がり、超新星爆発で作られた無衝突衝撃波による宇宙線加速や、星形成に関連した降着円盤の運動、銀河スケールでの磁場生成（ダイナモ）にも関わっています。宇宙最大のプラズマは銀河団を取り巻くスケールで広がり、星々の生涯を見届けています。

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

\*連絡先 watanabe.tomohiko@nagoya-u.jp

教授：1/准教授：0/助教：1/PD：1/DC：1/MC：7

一方、科学の発展に伴い人類は実験室でプラズマを生成する術を獲得し、研究開発が精力的に進められています。持続可能なエネルギー源としての制御核融合を実証すべく、フランスに国際協力のもと建設中のITERや、米国の国立点火施設において大規模プロジェクトが進行中であるとともに、昨今では民間資本の投入により、国際協力から国際競争へと変革を迎えつつあります。また、このような実験装置は工学的応用のみならず、高エネルギー密度科学や実験室宇宙物理学といった基礎研究にも活用され、宇宙物理現象を地上に再現することも試みられています。

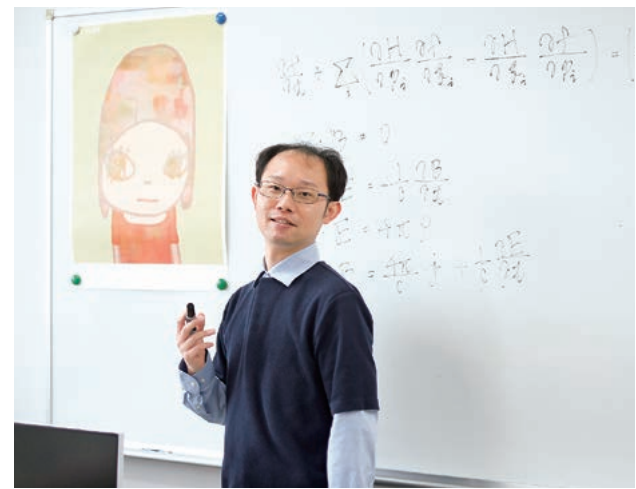
このようにプラズマ物理は、原子構造のような微視的スケールから宇宙スケールに及ぶ、高度に多階層な現象です。P研では、こうしたプラズマ非線形現象の解明に理論物理学の視点から取り組んでいます。最近の研究テーマの例を以下で紹介します。

### 実験室プラズマの非線形現象

プラズマはその強い非線形性により、乱流や衝撃波といった特徴的な構造を生じさせます。特に乱流は決定論的な支配方程式を解いた結果として得られるにも関わらず、カオス性のためにその性質は統計的にしか論ずることができず、乱流は古典物理学で最後の難問と言っても過言ではありません。

図1に示すのは、トカマク型核融合プラズマでしばしば観測される雪崩的輸送現象を、ジャイロ運動論コードGKVにより解析した結果です。このような乱流現象は往々にしてプラズマの閉じ込めを悪化させるため、そのメカニズムの解明が望まれています。P研での最近の研究から、雪崩現象は、乱流自身が作り出すメソスケールの帯状流と呼ばれる流れ構造が空間の対称性を破った結果、乱流中で発達した渦対によって駆動されることが明らかになりました。

図2は固体ターゲットに高強度レーザーを照射した際の、放射流体シミュレーションにより得られた爆縮ダイナミクスを表します。ターゲット表面の物質がプラズマ



白戸高志助教

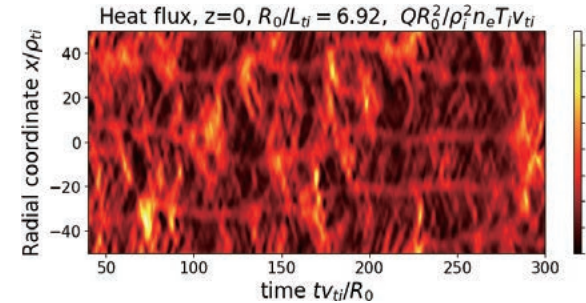


図1：磁場閉じ込め核融合プラズマの乱流シミュレーションにより得られた、雪崩的輸送現象の一例。乱流に伴う熱流束の強い位置が時間とともに移動する現象のことを雪崩現象と呼称する。(図提供：杉山)

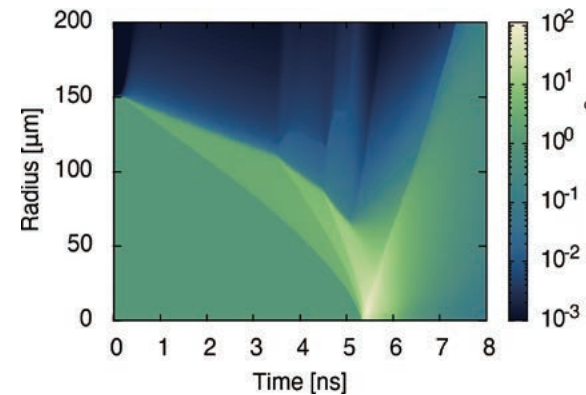


図2：慣性核融合プラズマの爆縮シミュレーションの一例。固体ターゲットに対してレーザーを照射することで強力な衝撃波が発生して、ターゲットを圧縮していることが確認できる。(図提供：白戸)

化して噴出し、その反作用により衝撃波が発生して、固体密度の100倍近くまで圧縮される様子が確認できます。このようなレーザー生成プラズマは、エネルギー開発を目的とした制御核融合実験に用いられるのみならず、超新星残骸で観測されるような無衝突衝撃波を人工的に再現したり、惑星内部の超高密度コアの性質を調べるための実験にも活用されています。

### 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。地球周辺の磁気圏と呼ばれる宇宙空間から電離層へと降り込むkeVを超えるエネルギーを持つ電子が、電離層の中性原子を励起しオーロラを発光させることは、これまでの人工衛星や極地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、従来考えられてき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

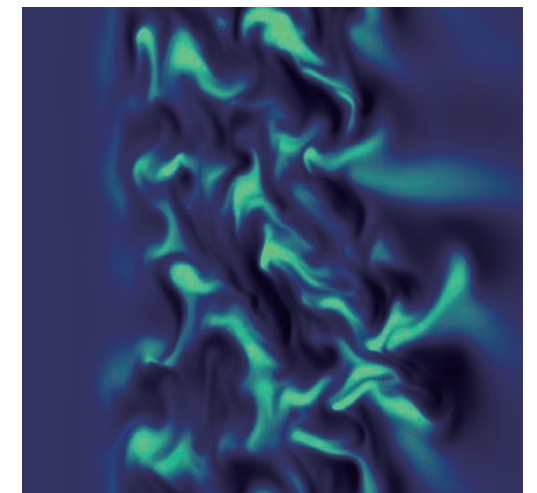


図3：磁気圏-電離層結合シミュレーションにより得られた、電離層における電子密度分布。自然界のオーロラでも観測される渦構造がシミュレーションにより確認できる。(図提供：榎)

非エルミート作用素の問題として扱う理論モデルを構築し、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3は、磁気圏-電離層結合系の非線形シミュレーションの結果を示しており、低緯度側に伝搬しながら成長するオーロラと、渦の発達による微細構造生成といった、複雑なオーロラ現象の物理が明らかになりつつあります。さらに、核融合研究に起源を持つ理論解析手法を用いたオーロラ粒子加速の研究も始まっています。

### シミュレーション手法開発

プラズマ物理学は微分方程式を用いて記述されるにも関わらず、衝撃波のように微分不可能な解(弱解)を内包します。このように微分方程式が破綻する特異点においても、エネルギーなどの不生不滅は必ず成立することから、保存則を厳密に満たすシミュレーション手法を用いることで、衝撃波すらも正しく解けることが知られています。P研では、非線形現象を精緻に取り扱うことのできる先進的数値アルゴリズムそれ自体の学術もまた探求しており、プラズマ物理学の更なる理解に貢献することを目指しています。

### 研究室を志望する学生の皆さんへ

大学院の研究では、学生の自主性と積極性を大いに期待しています。研究テーマは上記の例にとらわれる必要はなく、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思います。複数の分野や学会に関連する研究活動を通じ、自身の研究課題に閉じこもらず、幅広い視野を身につけて下さい。

プラズマ物理学は、宇宙空間物理や、天体物理、核融合科学、など様々な学術分野と深く関連しています。国内では、太陽地球環境研究所(名古屋大学)や核融合科学研究所、日本原子力研究開発機構、量子科学技術研究開発機構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。