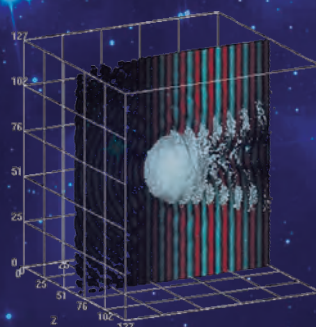
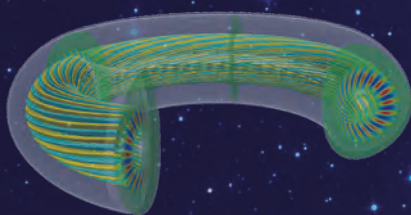


非線形・非平衡 プラズマ科学 研究ユニット

—分野を横断した次世代プラズマ科学の探求—

京都大学学際融合教育研究推進センター

Annual Report 2021



$$\frac{\partial N}{\partial t} = \gamma_L N - \gamma_{NL} N^2 - \alpha_1 U^2 N - \frac{\beta}{\beta'} \alpha_2 G^2 N - \frac{\beta \beta_2}{\beta' \beta'_2} \alpha_3 V^2 N$$
$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{1}{2} \gamma_{\text{damp}} U + \frac{1}{2} \alpha_1 U N - \beta G$$

CONTENTS

- ごあいさつ
- ユニットについて
 - 【コラム】ユニットのロゴについて
- プラズマ科学セミナー
 - 桐山 博光 グループリーダー（QST 関西光科学研究所）
 - 深見 一弘 准教授（京都大学 工学研究科）
 - 橋田 昌樹 特定准教授（京都大学 化学研究所）
 - 比村 治彦 教授（京都工芸繊維大学）
 - 田中 謙治 教授（核融合科学研究所）
 - 【コラム】「ゼロエミッションエネルギー」研究拠点とは？
 - James Koga 専門業務員（QST 関西光科学研究所）
 - 小林 進二 准教授（京都大学 エネルギー理工学研究所）
 - 三間 罔興 招聘教授、藤岡慎介 教授・副所長（大阪大学）
 - 棚橋 美治 教授（中部大学）
 - 本多 充 教授（京都大学 工学研究科附属工学基盤教育研究センター）
 - 松清 修一 准教授（九州大学）
 - 山崎 了 教授（青山学院大学）
- アクティビティカレンダー
- メンバー一覧

ごあいさつ — 2年目（令和3年度）を終えるにあたって —

第4の物質状態である複雑性と多様性に満ちた「プラズマ」の理解とそれを通じた新学術の創生・応用を、部局の枠や分野を超えて推進することを目的に令和2年（2020年）2月に発足した本非線形・非平衡プラズマ科学研究ユニットも2年目を終了し、令和3年度（2021年度）の報告書を出すことになりました。実質2年目となった本年度は、本学研究所・センターや他大学の方々にも新たなメンバーとして参加いただくとともに、多くの皆様のご支援をいただき、実りある交流の場となりましたこと、心よりお礼申し上げます。

核融合プラズマ領域では、昨年度、ITERに続く超電導の大型トカマク装置JT-60SAを用いた実験参加を念頭に、同計画を進めている量子科学技術研究開発機構（QST）那珂研究所と包括連携協力協定を締結し、本学のオンサイトラボラトリを設置しましたが、今年度は、アジア諸国の連携研究を目的に、中国を代表する核融合研究の拠点である西南物理研究所と連携協力協定を締結し、核融合実験装置HL2A/2Mを用いた研究参加の枠組みを作りました。

また、昨年度に続き計15回のプラズマ科学セミナーを行い、プラズマを基軸とした分野横断的な意見交換を行いました。本報告書には、セミナーの概要とともに、企画した研究者のコメントも掲載していますので、それらも参照いただき、興味ある研究についてはコンタクトをして交流を図っていただければ幸いです。

新型コロナも未だ不透明な状況が続きますが、次年度は、今年度までに作った枠組みを利用しながら分野・部局を横断した研究活動を展開していきたいと思いますので、引き続き、ご支援を賜りますよう、よろしくお願い申し上げます。

ユニット長 岸 本 泰 明

核融合プラズマ研究領域

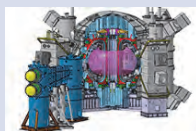
超電導トカマクJT-60SA（QST・日欧）の完成(2020)およびITER（国際熱核融合炉）の完成（2025）と核融合プラズマ実験研究の進展

臨界プラズマ実験装置
JT-60（1985–2008）



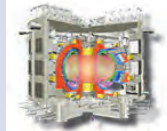
自己組織化による高性能プラズマの実現
（謝辞：那珂研究所）

超電導トカマク型実験装置
JT-60SA（2020完成）

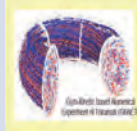


<https://www.qst.go.jp/site/jt60/5150.html>

国際熱核融合炉
ITER（2025完成予定）



数値トカマク核融合実験
GKNET（京都大学）



トカマク中の乱流構造

光量子・基礎プラズマ研究領域

超高強度レーザーによる極限状態の高エネルギー密度プラズマの生成と応用研究（実験室宇宙物理・医療応用などの展開）

J-KAREN（QST）



<https://www.qst.go.jp/site/kansai-dapr/>

ELI（EU）

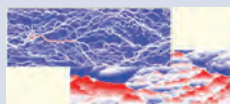


<https://eli-laser.eu/>

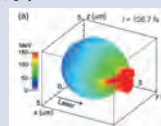


G. Mourou
D. Strickland
CPA 極短パルスレーザー
2018年ノーベル物理学賞

数値光量子プラズマ実験
EPIC（京都大学）



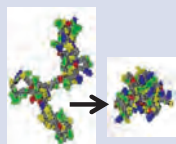
放電過程の自己組織化



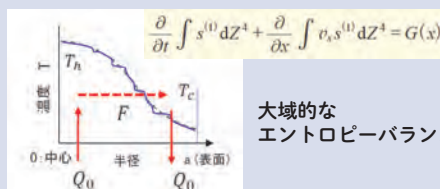
相対論領域のイオン生成

非線形・非平衡プラズマ数理研究領域

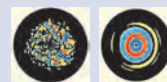
非線形・非平衡性が本質的役割を果たす物質科学・ナノ工学、生命・生物・バイオ科学、数理科学分野における理解の進展と異分野間連携



蛋白質の折り畳み（自己組織化）
謝辞：木下（京大）



大域的な
エントロピーバランス



プラズマ乱流の時間空間構造



惑星の大気・気象現象（NASA）

非線形・非平衡プラズマ科学研究ユニットについて

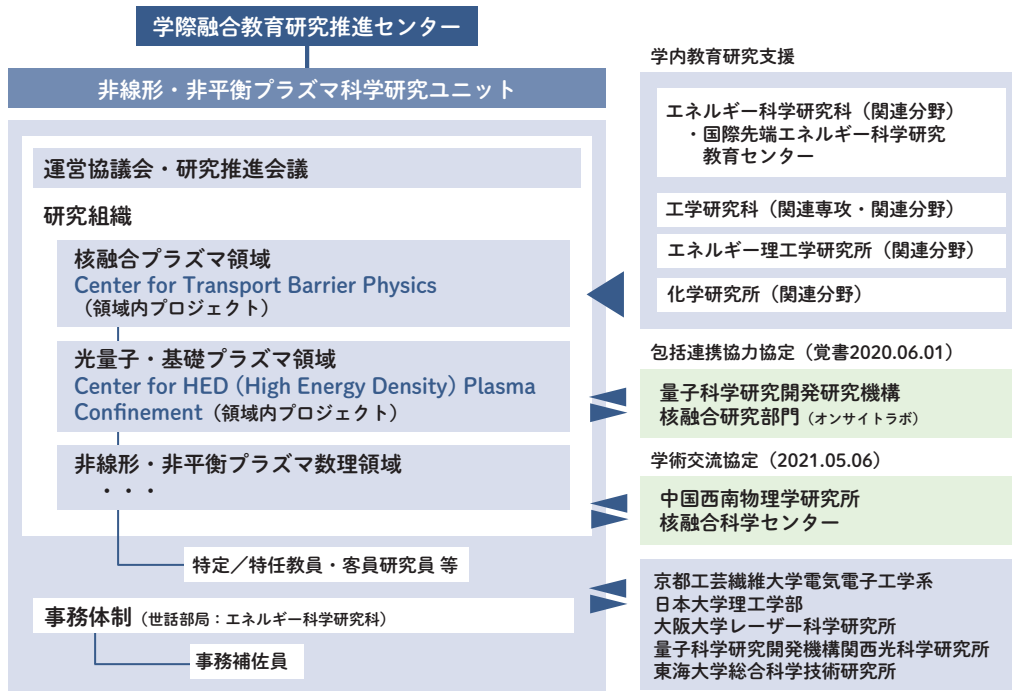
異分野の研究者との積極的な連携・協力を通して幅広い知識や知見を共有することにより、複雑性と多様性に満ちた「形のないものから形を創る」プラズマの学理と応用を分野横断的・俯瞰的に探究する研究活動を展開することを目的としています。また、これにより次世代を担う高性能・高機能なプラズマ創成の新しい研究のアプローチや方法論を開拓するとともに、それらを牽引する人材育成に貢献します。

3つの研究領域

本ユニットは、本学の長い歴史と実績を持つ幅広いプラズマ研究の中において、安全性の高い恒久的なエネルギー源を目指したエネルギー実現を動機とした「核融合プラズマ研究」、および、近年急速に発展している高強度レーザーを利用することで新領域の学術・応用研究の実現を動機とした「光量子プラズマ研究」に焦点を絞り、そこでの未解明で挑戦的な課題を、幅広い研究者の英知を結集するとともに、限られたグループや単独部局では利用が容易でない国内外の施設を利用することで解明するなど、連携・協力の枠組を最大限に利用した研究展開を目指しています。加えて、これら2つのプラズマは、パラメータは大きく異なりますが相互に強く関係し、非線形性や非平衡性が強く関わった自己組織化や構造形成の過程が重要な役割を果たすことから、それらの普遍的な理解を目指したプラズマ数理研究を3番目の領域に設定しています。

ユニットの組織構成

本ユニットは、学際融合センターのもと、エネルギー科学研究科を担当部局として、対象とする3領域研究の専門家や世話部局の部局長・事務長を含む運営協議会でユニットの方針を定めるとともに、研究領域を横断した緩やかな連携を図ることを目的とした研究推進会議を設置しています。各領域では、参加メンバーの動機に基づいて行う特定課題を“Center”として位置付けて研究活動を展開します。現在まで、核融合・光量子プラズマ領域のそれぞれで2つの“Center”を設けて、実験提案を含めた研究活動を行っています。また、これらの活動には、外部の大学・研究機関の研究者も参加するとともに、これまでに2つの研究所と協力協定を結びました。



2021 年度ユニット活動

プラズマ科学セミナー

本ユニットは、豊富で多様な知見を有する研究者が集い、分野横断的な連携・交流を行うことで、パラメータ領域の大きく異なる核融合プラズマや光量子プラズマの新たな可能性を追求・展望することを目的として開催しています。本セミナーは、プラズマに内包する物理過程を中心に、プラズマの分野に限らない多様な分野の最先端研究の動向や成果などを discussion seminar の形式で発表中にも自由な意見交換を行うことにより、より深い議論を進めています。詳細は次章となりますが、今年度は計15回の会合を実施しました。

尚、本セミナーは、エネルギー理工学研究所ゼロエミッションエネルギー研究拠点課題「広帯域エネルギー融合科学の概念に基づく非線形・非平衡プラズマの物性・制御」(ZE2021D-01) 活動の一環として実施しており、同研究所のエネルギー複合機構研究センターのセンター談話会や大学院エネルギー科学研究科 国際先端エネルギー科学研究教育センターの後援・協力を頂いています。この場を借りて、お礼を申し上げます。

核融合プラズマ領域での研究展開

Kyoto-UNIST ワークショップの開催

本ユニットは、核融合科学研究所の主催する日韓核融合協力事業に参加し、韓国 Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST: 蔚山科学技術大学校) と「核融合プラズマにおける乱流輸送と MHD の物理検証と制御に関する研究会」を開催しています。韓国側は、プラズマの ECE 分光計測で著名な同 UNIST の Hyeon Park 教授をキーパーソンとして、2015年に第1回を開催し、2020年3月に第6回を開催しました。これまで日本と韓国の双方で現地開催として行っていましたが、第6回は新型コロナの影響で ONLINE での1日開催となりました。また、中国の西南物理研究所 (SWIP) の Jiquan Li 教授の協力を得て中国も枠組みに参加

したことから、参加者は79名に達しました。議論の焦点を、Edge dynamics, Energetic particle driven mode, Multi-scale interaction に絞り、日本、韓国、中国から3件のプレナリー講演を含め9件の発表と、活発な討議を行いました。2021年度は現地開催を目指していましたが、コロナ禍の継続のため2022年度に持ち越すことになりました。



SWIP 核融合科学センターとの MOU 締結

本ユニットと中国西南物理研究所 (SWIP) 核融合科学センターは、プラズマ物理学および核融合科学、核融合工学および技術、先端エネルギーシステム材料の研究分野において協力していくことに同意しました。同センター長 (M. Xu 教授) から、同研究所のトカマク型実験装置である HL2A や同様のトカマクで2020年度に完成した HL2M を用いた実験研究も歓迎するとのことでした。関係者におかれましては、本協定を有効に活用いただき、研究活動に役立てていただければ幸いです。

IAEA-FEC 報告会および意見交換会

2021年5月10-15日に IAEA 主催第18回核融合エネルギー会議: Fusion Energy Conference (FEC2020) がオンラインで開催され、前回2018年以降の核融合の進展を中心に議論されました。本会議での採択論文数は全693件で、日本からの投稿論文は104件 (全体の約15%) に当たります。フランスが主催国であったことから、欧州が222件 (約32%) と多く、続いて米国が139件 (約20%) で日本は3番目となりますが、中国が74件 (約11%) で前回2018年 FEC (インド) からは多少減ったものの、本ユニットと協定を結んでいる SWIP (西南物

理研究所)やASIPP(科学院等離子体物理研究所)を中心に核融合研究に力を入れている様子が伺えます。本会議においては、ユニットメンバーでもある研究者が実験・計測、理論・シミュレーションなどに関する成果を報告しました。今回、理論部門では、今寺賢志准教授と石澤明宏准教授が口頭発表に選出され、共に京都大学で開発した大域的な乱流輸送コードGKNETを用いた内部輸送障壁形成や高エネルギー粒子駆動のMHDモードと乱流の相互作用に関する研究について発表しました。また、本学の核融合実験装置である球状トラスLATE(エネルギー科学研究科)やヘリカル装置Heliotron-J(エネ

ルギー理工学研究所)の成果、AI/DLを取り入れたトカマク装置やヘリカル装置の放電を追跡・模擬する統合化シミュレーションコードに関する研究成果(工学研究科)が報告されました。Heliotron-J装置の電流駆動時に観測された磁気島の運動に関する研究は理論の関連発表でも注目されました。また、本会議の最終日(5月15日)に本会議のサマリーが行われ、岸本が理論部門を担当しました。

本ユニットの核融合プラズマ領域では、本FEC会議終了後、本会議で発表された実験、理論の各分野における最新の研究動向について検証する報告会を2回に渡って行いました。

IAEA-FEC 報告会および意見交換会

開催日	内容	参加人数
第1回 (5/25)	FEC2020(2021.05.10-15オンライン開催)の磁場核融合関連の進展について、情報共有と意見交換、理論・シミュレーション部門サマリーの報告(岸本)	ユニット12名 QST6名(計18名)
第2回 (5/28)	RMP・ELM関係(石澤)、同位体効果・乱流輸送関係(今寺)、統合実験・DT実験関係(本多)、WX7・ヘリカル関係(南)の報告	ユニット9名 QST5名(計14名)

光量子プラズマ領域での研究展開

高強度レーザーを物質(ターゲット)に照射することで生成する高エネルギー密度プラズマは、小型粒子線がん治療装置の開発や慣性核融合、高エネルギー宇宙線の起源の解明など、医療・産業・学術等の幅広い分野への応用が期待されています。光量子プラズマ領域では、課題「Center for HED(High Energy Density) Plasma Confinement」を設定し、レーザー科学・光物性科学・材料科学の専門家と連携して異分野融合型の研究を実施しています。

本課題は、プラズマを慣性時間を超えて保持する(閉じ込める)ことで、応用研究の枠組みを広げることができるという着想に基づいています。プラズマを閉じ込めるという概念は、磁場核融合分野で進展してきたもので、従来の光量子分野にはない斬新な考え方です。磁場核融合の専門家が多数参画している本ユニットの特性を生かした分野横断的な研究と位置付けられます。

本課題で使用するターゲット開発は、文部科学省「ナノテクノロジープラットフォーム事業」の微細加工実施機関である「京都大学ナノテクノロジーハブ拠点(ナノハブ拠点)」において実施しています。材料科学の専門家と連携しつつ、最先端の半導体技術を駆使することで、レーザーのターゲットとして

は世界に類を見ない、 μm 以下の微細構造を有する物質を精緻に作製することに成功しています。本ターゲットは、レーザー科学の専門家と連携して、理化学研究所のX線自由電子レーザー装置(XFEL)や、量子科学技術研究開発機構関西光科学研究所のJ-KARENレーザー、京都大学化学研究所のT6レーザーを用いた照射実験で使用されており、ユニットの特性を生かした研究を展開しています。



本ユニットメンバーの坂和准教授(大阪大学)、岸本、松井を中心に実施したナノハブ拠点で作製したターゲットを用いたSACLAレーザー照射実験(2021年5月)

非線形・非平衡プラズマ数理領域での研究展開

本ユニットでは、プラズマが内在的に有する非線形性や外部とエネルギーの授受を行う開放系と非平衡特性を制御・利用することで、これまでにない高性能で多様な機能を持ったプラズマの応用研究を展開しています。これは、核融合プラズマ、光量子プラズマの2領域に設置した2センターの中心課題でもあり、自己組織化や構造形成の背景にある素過程を理解するとともに、それを数理モデルとして記述することで普遍化・一般化されます。この視点に立って、本ユニットでは、同様の過程が重要な過程を果たす異なった分野の研究者の交流を行っています。

これまで、医学分野において多様で複雑な発症や形状変化を伴う蕁麻疹のダイナミクスに関するセミナー（第3回：広島大学医系科学研究科 秀道広

教授）、白金ナノ粒子の触媒効果によるシリコンのナノレベルの“らせん状”細孔形成に関するセミナー（第9回：京都大学工学研究科 深見一弘准教授）、生命・生物系における自己組織化のメカニズムに関するセミナー（第18回：エネルギー理工学研究所 木下正弘協力研究員）を開催しました。

これらは、分野は異なりますが、いずれも強い非線形性に支配される系として、核融合・光量子プラズマを支配する非線形性と多くの類似性があることが認識されました。一方、木下教授は、生物・生態系における自己組織化現象を、閉鎖系で熱平衡状態にある水分子（溶媒）の並進運動の変化に伴うエントロピーの変化によって説明する理論を展開し、これらの過程は必ずしも開放系・非平衡系である必要はないことを示されています。今後、本ユニットにおけるプラズマ分野と生物・生命分野の交流を通して、自己組織化現象における理解の深化と新たな展開が期待できます。

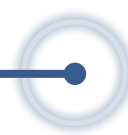
コラム

ユニットのロゴについて



2021年8月、ユニットのロゴを策定しました。デザインはプラズマを3色で表現し、粒子がその中を駆け巡っている様子やユニットの3領域（核融合、光量子、非線形・非平衡）が連携している様子をイメージしています。また、NPUはNon-linear/Non-Equilibrium Plasma Science Research UNITの略としています。

プラズマ科学セミナー



研究者間の積極的な交流・情報交換を通して異分野の知見を集約・吸収するとともに、各領域の重要課題の解決を図り、広帯域エネルギー融合科学の進展を目的として開催しています。本セミナーは、京都大学エネルギー理工学研究所ゼロエミッションエネルギー研究拠点課題「広帯域エネルギー融合科学の概念に基づく非線形・非平衡プラズマの物性・制御」の活動の一環で実施しています。

日程【領域】	講演者	タイトル
第8回(6/11) 【光量子】	桐山 博光 グループリーダー (QST関西光科学研究所)	「超高強度レーザーの進展」 Ultra-high Intense Lasers Today and Tomorrow
第9回(6/15) 【非線形数理】	深見 一弘 准教授 (京都大学大学院工学研究科)	「非線形ダイナミクスに基づく自己組織化ナノ材料加工」 Self-organized materials processing at the nanoscale based on nonlinear dynamics
第10回(6/25) 【光量子】	橋田 昌樹 特定准教授 (京都大学化学研究所)	「レーザーによる微細構造形成とオペランド計測技術」 Formation of laser induced periodic surface structure and its operando measurement
第11回(7/16) 【核融合】	比村 治彦 教授 (京都工芸繊維大学)	「2流体プラズマの開拓ー非中性プラズマからのアプローチー」 What's two-fluid plasma? -exploring with non-neutral plasmas-
第12回(7/20) 【核融合】	田中 謙治 教授 (核融合科学研究所)	「乱流駆動輸送の磁場配位効果」 Effects of magnetic configuration on turbulence driven transport
第13回(8/10) 【光量子】	James Koga 専門業務員 (QST関西光科学研究所)	「Role of plasma behind high intensity laser-matter interaction and future prospect」
第14回(8/26) 【核融合】	田中 謙治 教授 (核融合科学研究所)	「乱流駆動輸送の磁場配位効果(2)」 Effects of magnetic configuration on turbulence driven transport
第15回(10/1) 【核融合】	小林 進二 准教授 (京都大学エネルギー理工学研究所)	「ヘリオトロン型磁場配位を利用した統計加速の実験室シミュレーションの検討」 Investigation of experimental simulation for stochastic acceleration using Heliotron-type magnetically confined configuration
第16回(10/19) 【光量子】	三間 園興 招聘教授 藤岡 慎介 教授・副所長 (大阪大学レーザー科学研究所)	「高エネルギー密度プラズマ科学の最近の動向から」 Recent progresses in high energy density science 「レーザー核融合の爆縮の基本原理と進展」 Recent topics and progress of high-energy-density-plasma science
第17回(10/29) 【全領域】	棚橋 美治 教授 (中部大学)	「宇宙への打上げ技術の現状と課題」 Current status and issues of launch technology to space
第18回(12/21) 【非線形数理】	木下 正弘 名誉教授 (京都大学)	「非線形科学を通じたプラズマ物理と他分野(生物物理・電気化学・医学・物質科学など)の分野間の垣根を超えた融合」
第19回(1/21) 【核融合】	本多 充 教授 (京都大学工学研究科附属工学基盤教育研究センター)	「トカマクプラズマの輸送研究と統合コード開発、そして機械学習の応用」 Transport physics studies and the development of integrated models in tokamak plasmas, and the application of machine learning techniques to these issues
第20回(1/25) 【全領域】	松清 修一准教授 (九州大学)	「相対論的磁気流体波のパラメトリック不安定性と粒子加速」 Particle acceleration in parametric instabilities of relativistic MHD waves
第21回(2/2) 【核融合】	今澤良太主幹研究員 (QST那珂研究所)	「STにおけるドップラー分光計測とITERにおけるポロイダル偏光系による電流分布計測」
第22回(2/21) 【全領域】	山崎 了教授 (青山学院大学)	「天体衝撃波での粒子加速研究と高強度レーザーを用いた実験室宇宙物理学」 Studies of collisionless shocks in astrophysical objects and in laboratories

「超高強度レーザーの進展」

Ultra-high Intense Lasers Today and Tomorrow

桐山 博光 グループリーダー

(QST量子ビーム科学部門関西光科学研究所 光量子科学研究部)



30兆分の1秒 (=30フェムト秒=30 fs) の極めて短い時間に100万kW級火力発電設備100万基分に相当する1千兆W (=1ペタワット=1 PW) の超高強度出力発振するレーザー (J-KAREN) 開発とそのレーザー光の高度化技術開発を行っている。超高強度レーザーを集光して物質に照射すれば、既存の手法では到達できない高温高压状態や強力な電場・磁場を生成できる。このような極限状態 (高エネルギー密度状態) を研究する「高エネルギー密度科学」が世界で精力的に研究されている。

ここでは、J-KARENレーザー装置を中心に、超高強度レーザーとは何か、その増幅技術、時間・空間制御技術について述べるとともに、超高強度レーザー生成プラズマによる荷電粒子加速などの応用例や世界の超高強度レーザーの開発の現状や今後の展開についても紹介する。

- [1] H. Kiriyama, A. S. Pirozhkov, M. Nishiuchi, Y. Fukuda, A. Sagisaka et al., "Petawatt Femtosecond Laser Pulses from Titanium-Doped Sapphire Crystal," *Crystals*, **10**, 783 (2020).
- [2] H. Kiriyama, A. S. Pirozhkov, M. Nishiuchi, Y. Fukuda, K. Ogura et al., "High-contrast, high-intensity repetitive petawatt laser," *Optics Letters*, **43**, 2595-2598 (2018).
- [3] H. Kiriyama, M. Mori, A. S. Pirozhkov, K. Ogura, A. Sagisaka et al., "High-Contrast, High-Intensity Petawatt-Class Laser and Applications," *Invited Paper IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **21**, 1601118 (2015).



図： 開発したJ-KAREN (Japan-Kansai Advanced Relativistic Engineering=関西研の先端的相対論工学研究に用いる) レーザー

Comment

量子科学技術研究開発機構関西光科学研究所（KPSI-QST）が有するJ-KARENレーザーは、世界最大クラスの集光強度領域（ 10^{22} W/cm²）を達成している。講演では、チタン・サファイア結晶によるレーザー発振の原理から、レーザーの高出力化のトリガーとなったCPA法までを丁寧に解説していただいた。また、フィードバックにより成型可能なdeformable mirrorを用いることで、レーザー波面の位相を描いて綺麗なビームパターンを得る最新技術も紹介された。高強度レーザーを物質に照射する際には、メインパルスに先行するプレパルス成分の制御が大きな課題となっている。J-KARENレーザーでは、メインパルスのみを反射可能なプラズマミラーを用いることでプレパルス成分の除去を実現しており、粒子線がん治療装置への利用を目指した高エネルギーイオン生成等の様々な実験を精度よく実施できることが期待される。今後の展望として、従来よりも大きな結晶を用いたOPCPA技術により、 10^{23} W/cm²を上回る次世代レーザーの実現に向けた取り組みがなされている点が興味深かった。この強度領域が実現すれば、量子メスやトンネル検査をはじめとした医療・産業応用に留まらず、新エネルギー領域のプラズマ物理を開拓することが期待される。（松井）

第9回 2021年6月15日

「非線形ダイナミクスに基づく自己組織化ナノ材料加工」

Self-organized materials processing at the nanoscale based on nonlinear dynamics

深見 一弘 准教授

(京都大学大学院工学研究科 材料工学専攻)



材料科学や化学における自己組織化は、熱力学平衡で発現する自己集合（Self-assembly）と非平衡状態における時空間パターン形成（Spatiotemporal pattern formation）に大別される。前者は分子間力といった平衡状態で支配的な因子によって引き起こされるのに対し、後者はポジティブフィードバック（自己触媒反応）のような非線形な効果が顕著となる非平衡状態で発現する。我々は電気化学（酸化還元）反応における時空間パターン形成の体系的な理解と、それに立脚したナノ材料加工に取り組んでいる。

本講演では、時空間パターンのナノ閉じ込めによる高規則性らせん状ナノ構造形成について紹介する。Siは酸化剤とHFを含む液に浸漬すると酸化還元反応によりSiが腐食（溶解）する。Si表面にPtナノ粒子を担持するとそれが触媒となり、Pt/Si界面で腐食が加速され、Pt粒子がSi内部へと貫入し、ナノポアが形成する。このとき、条件によってはPt触媒上での反応（酸化剤の分解反応）が時空間パターンを発現する。Ptナノ粒子の表面積は極めて小さく、時空間パターンの伝播が抑制されるため（ナノスケールへの時空間パターンの閉じ込め）、境界条件を満たそうと粒子が回転し、その結果らせん状ナノポアがエッチングにより形成する^[1]。酸化剤の分解反応をモデル化し、シミュレーションによってらせん状構造の回転方向（キラリティ）制御について検討したところ、Pt表面と並行な対流を導入した場合、極めて弱い対流下で自己組織的にキラリティの偏りが生じることを見出した^[2]。

このように本研究は、キラリティと時空間パターン形成の境界にあたる新領域を開拓する端緒になるものと期待される。

[1] T. Yasuda, Y. Maeda, K. Matsuzaki, Y. Okazaki, R. Oda, A. Kitada, K. Murase, K. Fukami, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 11, 48604-48611 (2019).

[2] T. Yasuda, M. Nakata, M. Miyamoto, A. Kitada, K. Murase, K. Fukami, *J. Phys. Chem. C* 125, 7240-7250 (2021).

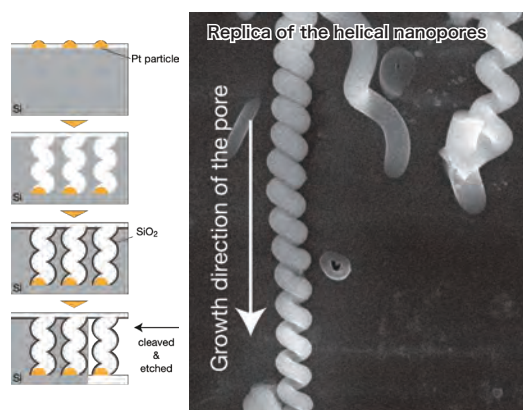


図 1

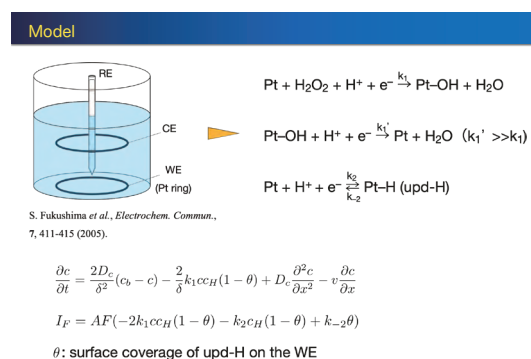


図 2

Comment

本セミナーでは、深見先生のグループで見出した白金ナノ粒子の触媒効果によるシリコンのナノレベルの“らせん状”細孔形成に関する話題を自己組織化をキーワードに紹介いただきました。

核融合プラズマは、エネルギーが高温で流入し、それが系内の波動を含む様々の過程で輸送され、低温で流出する開放系であることから、地球環境と同様、系内でエントロピー生成が駆動され、それに対称性の破れが加わることで多様な構造が形成されます。近年では、これを積極的に利用することで閉じ込め性能の向上を図るアプローチがとられています。従って、開放系における構造形成を広く理解するとともに、それらのモデル化が懸案事項であることから興味深く拝聴しました。中でも興味深かったのが、触媒効果による腐食過程に泳動項を持つ連立微積分方程式を導入することで、現象を非線形波動と捉え、多様な解の分類・分岐を探索するとともに、そこに左右の対称性の破れをモデル化することで一方向のヘリカル回転を導いている点です。一見散逸の強い固体の腐食現象において、マルチスケールの波動過程として現象を捉えるアプローチに興味を持ちました。

閉じ込め状態にある核融合プラズマにおいても、自発的に発生する揺らぎ（波動）が異なったトポロジ間の結合を通して系に対称性の破れをもたらし、それが系に方向性を持ったダイナミクスとそれに伴う構造を創出することから、今後、プラズマ核融合と物質科学の研究者の相互交流を通じた現象の普遍化に向けた取り組みが望まれます。

同様の数理モデルに基づく研究報告が、第3回セミナー（令和2年度）において、秀道広先生（前広島大学教授・現広島市民病院院長）が慢性蕁麻疹の発症と形状変化のダイナミクスに関して、18回セミナー（令和3年度）で木下正弘先生（京都大学名誉教授）が生命・生物系における自己組織化のメカニズムに関して報告されていますので、併せて参照下さい。（岸本）

自己組織化による構造形成過程は、結晶構造をはじめとした熱平衡下での静的な秩序形成と、シマウマの白黒模様などの非平衡下での動的な時空間パターンの形成の2つに分類される。特に、後者のパターン形成は強い非線形性に支配されており、未解明の部分が多い。本講演では、材料科学における構造形成を例にとり、白金の微粒子によるシリコンの腐食反応において、白金粒子の自律的な回転運動（静的な秩序）により、図1に示すように高コヒーレントな螺旋状構造（動的な時空間パターン）が形成されることが紹介された。また、本現象をモデル化した非線形方程式（図2）を数値的に解くことで、メカニズムが定量的に示された。本研究により、これまで深く議論されてこなかった、2つの自己組織化過程の関係性、および、本質的な差異の理解が進むことが期待される。（松井）

「レーザーによる微細構造形成とオペランド計測技術」

Formation of laser induced periodic surface structure and its operando measurement

橋田 昌樹 特定准教授

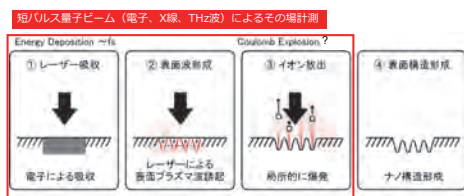
(京都大学化学研究所 複合基盤化学研究系)



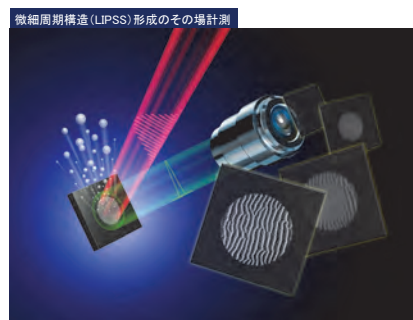
本研究では、フェムト秒レーザー照射材料表面に形成される微細周期構造物 (LIPSS)^[1]を先端ビーム (電子ビーム、X線、レーザー) により時空間分解計測し形成機構を解明することを目指しています。微細構造物の大きさはレーザー波長の $\lambda/13$ ^[2]~ $\lambda/25$ ^[3]と非常に小さくレーザー照射後数100ピコ秒程度までの表面プラズマ状態が構造形成に関わっていると言われており動的過程を計測するためには高い時空間分解能を有する先端ビーム (電子ビーム^[4]、X線、複合レーザービーム^[5]) が必要とされます。ここではレーザーアブレーションにより微細構造が何故形成されるのか？そのサイズはどこまで小さくできるのか？そしてその形状はどのように制御できるのか？という疑問を解決すべく先端ビームによるオペランド計測を実施することで微細構造の大きさや密度を決定するレーザーと物質との相互作用に関する物理機構を解明し新しい表面機能性付与のためのレーザー加工基盤を構築することを目指しています。講演ではレーザー誘起される微細周期構造物の現状と今後取り組もうとしている計測手法を紹介します^[6]。

- [1] 橋田昌樹他, レーザー学会43巻11号 (2014) 745-751.
- [2] M. Hashida et al, *J. Laser Micro/Nano Eng.*, 9 (2014) 234-237.
- [3] A. Irizawa et al *Appl. Phys. Lett.* 111 (2017) 251602.
- [4] S. Inoue et. al., *Sci. Rep* 10 (2020) 20387.
- [5] Y. Furukawa et. al., *Appl. Surf. Sci.* 515 (2020) 146047.
- [6] 橋田昌樹, レーザ加工学会誌 28巻 1 号 (2021) 39-42.

超短パルスレーザーによる非熱加工の学理解明に向けたこれまでの取り組み (レーザーによる微細構造形成とオペランド計測技術)



Q-LEAP解像基盤研究「微細構造形成学理解明のためのその場計測」P2(H30-R9)



Comment

集光強度が 10^{13-14} W/cm²領域の高強度レーザーを物質に照射すると、物質表面にはレーザースポット径の領域 (直径20-30 μm) にレーザー波長の1/10-1/20程度の大きさの微細構造が規則的に配置された構造 (微細周期構造物) が形成される。このような構造が制御できれば、物質の比表面積 (体積に対する表面積の割合) を増大させることが可能となり、撥水性を有する素材の開発や太陽電池等への幅広い利用が期待されるが、パターン形成のメカニズムは詳細には解明されていない。本講演では、構造物のパターンがレーザーの偏光の種類 (直線偏光/円偏光) やパルス幅 (100 fs-2 ps) に応じて変化することを示す実験結果とともに、構造形成のメカニズムとして、レーザー照射された物質表面に表面プラズマ波が誘起され、プラズマ電子密度の揺らぎが構造形成に主要な役割を果たしていることを示す粒子シミュレーション結果が紹介された。通常、レーザーと物質との相互作用においては、マイクロスケールの構造形成と崩壊はレーザーのパルス時間程度の時定数で起きるため、フェムト秒オーダーのパルスレーザー照射により物質表面に周期構造が自律的に形成され、かつその構造が定常的に保持されることには衝撃を受けた。また、フェムト秒オーダーの短パルス電子ビームによってパターン形成過程を直接観測する画期的な試みも紹介された。本手法は、フェムト秒からサブピコ秒オーダーのレーザー・プラズマ相互作用を観測できる点で、イオン加速メカニズムの解明や電磁場構造の理解など、非常に幅広い分野での活用が期待できると感じた。(松井)

「2 流体プラズマの開拓 —非中性プラズマからのアプローチ—」

What's two-fluid plasma? -exploring with non-neutral plasmas-

比村 治彦 教授

(京都工芸繊維大学 電気電子工学系)



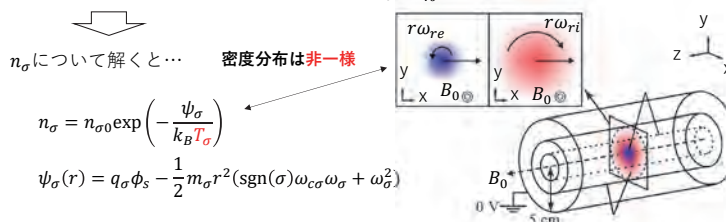
電磁流体力学 (MHD) ではプラズマは全体として電荷をもたない電流を流す電離気体と考えられている一方、先進プラズマ物理学ではイオン群と電子群はそれぞれ独立にイオンプラズマと電子プラズマを構成し、それらイオンプラズマと電子プラズマの2つの電磁流体によってプラズマが構成されていると考えられている。2流体プラズマ状態の可否を実証するために、我々はイオンだけからなる純イオンプラズマと電子からだけからなる純電子プラズマ、つまり、2つの非中性プラズマを用いて、2流体プラズマ状態の存在可否条件、閉じ込め特性、輸送を調べている。本セミナーでは、この研究の背景から最新の結果までを解説する。

[1] H. Goedbloed and S. Poedts, *Principles of Magnetohydrodynamics* (Cambridge)

有限温度の場合の2流体プラズマの反差動剛体回転平衡解の導出

回転している電子流体とイオン流体のr方向の平衡式:

$$-m_\sigma n_\sigma \omega_{r\sigma}^2 = -k_B T_\sigma \nabla_r (n_\sigma) + q_\sigma n_\sigma (-\nabla_r \phi_s + r \omega_{r\sigma} B_0), \quad \sigma = i, e$$

 $\omega_{r\sigma} \neq \omega_{r\sigma}^{\pm}$ に注意Poisson方程式を ϕ_s について解くことで、密度分布を求める。

$$\text{Poisson方程式: } \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d}{dr} \phi_s \right) = -\frac{e}{\epsilon_0} \left(n_{i0} \exp \left(-\frac{\psi_i}{k_B T_i} \right) - n_{e0} \exp \left(-\frac{\psi_e}{k_B T_e} \right) \right)$$

非線形微分方程式なので数値的に解く。

Y. Nakajima, H. Himura et al., *Journal of Plasma Physics* **87**(4), 905870415 (2021).

Comment

円柱状の直線装置BX-Uは直線磁場および装置の両端における電場によって、非中性プラズマを閉じ込める。本発表では、リチウムの非中性プラズマを閉じ込めた実験結果が紹介された。閉じ込められた非中性プラズマは剛体的に中心軸周りに回る。この回転による遠心力と非中性によるクーロン力の膨張力により、この非中性プラズマ閉じ込めの密度限界が規定されることなどの実験結果が紹介された。そして、BX-Uにおける最新実験結果として、非中性プラズマの閉じ込め時間のイオンと電子の密度比 n_i/n_e 依存性が紹介された。

$n_i/n_e=0.01$ では $50 \mu s$ 以下で閉じ込めが消失したが、 $n_i/n_e=0.1$ ではイオンは $1ms$ 、電子は $5ms$ 以上閉じ込められ、さらにイオンと電子密度比を大きくし、 $n_i/n_e=0.4$ の非中性プラズマではイオン・電子共に $1ms$ 以上閉じ込めることができた。これらのイオンと電子の密度比増大により閉じ込め時間が長くなる実験結果を説明するために、実験に対応した数値シミュレーション結果との比較がなされた。特に、ExBドリフトによるプラズマの剛体回転や二流体効果である反磁性ドリフト効果に着目して解析を行った結果が紹介された。(石澤)

第12回 2021年7月20日、第14回 2021年8月26日

「乱流駆動輸送の磁場配位効果」

Effects of magnetic configuration on turbulence driven transport

田中 謙治 教授

(核融合科学研究所 高温プラズマ物理研究系)



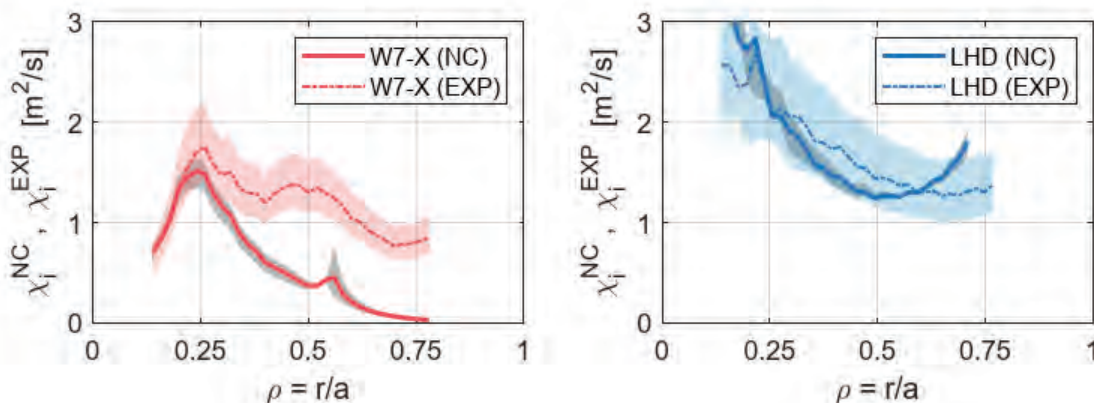
次世代のヘリカル装置設計の方針として新古典輸送の低減だけでなく乱流駆動輸送を低減する磁場配位効果についての理論的検討が進められている。輸送を低減するための方針を決定するためには、理論計算だけでなく既存の異なる磁場配位における輸送を定量的に比較することにより明確な指針を得ることが期待できる。現在稼働中の最も大きいヘリカル/ステラレータ装置であるLHDとW7-Xにおいて加熱条件および運転密度をそろえた比較実験を行った^[1,2]。電子サイクロトロン共鳴の中心加熱を用いた比較実験によると、同程度の線平均電子密度でLHDは凹型の密度分布を形成することに対して、W7-Xでは凸型の密度分布を形成することが分かった。中心付近の電子温度はW7-Xが高いが、規格化位置 $\rho > 0.5$ ではLHDの方が高く、イオン温度はLHDの方が全空間領域でわずかに高いという結果が得られた。

実験における乱流駆動によるイオンエネルギー輸送をパワーバランスから求めたイオン熱伝導係数 $\chi_{i,exp}$ から新古典イオン熱伝導係数 $\chi_{i,neo}$ を差し引いて $\chi_{i,exp} - \chi_{i,neo}$ として評価した。その結果、 $\chi_{i,exp} - \chi_{i,neo}$ はLHDがW7-Xの1/6程度であることが分かった。この結果は、非線形ジャイロ運動量シミュレーションの結果と定性的に一致している。W7-XよりのLHDのほうがZonal flowが強く生成されることによりLHDにおいてイオンの異常輸送が低減されていることを示唆している。W7-XはLHDより一桁程度新古典輸送が低いが、これらの結果は新古典輸送の低減と乱流駆動輸送の低減が一致しないことを示している。磁場配位最適化においては新古典輸送と乱流駆動輸送の双方の同時低減が困難である可能性がある。

講演ではLHD、W7-Xにおける電子温度加熱下におけるイオン温度上昇の制限や、LHDの同位体効果の研究成果についても報告する。

[1] F. Wamer, K. Tanaka, P. Xanthopoulos, M. Nunami *et al.*, submitted Phys. Rev. Lett.

[2] K. Tanaka, F. Wamer, K. Tanaka, P. Xanthopoulos, M. Nunami *et al.*, FEC2020.



図：W7-X（左）とLHD（右）において加熱条件および運転密度を揃えた比較実験で得られたイオン熱輸送係数とイオン新古典熱輸送係数

Comment

本講演では、LHDとW7-Xにおける比較実験から得られた乱流輸送現象の差異や、電子加熱下におけるイオン温度の制限に関する詳細な報告があった。LHDにおいて乱流輸送が低い実験結果は、LHDにおいて帯状流の剪断率が高いシミュレーション結果と符合しており、実験とシミュレーションの相補的な解析が有効に機能した結果であるとの印象を持った。今後は運動論的電子効果や、新古典輸送と乱流輸送の相互作用を解析することで、より包括的な新古典輸送と乱流駆動輸送の最適化研究が進展するものと期待される。

また本講演は議論が活発であったことから1日で終わらず、2日目にはLHDにおける輸送の同位体効果や、高速イオンと乱流揺動の相互作用についてご紹介頂き、低密度（LOC領域）において同位体効果はほとんど見られない一方、高密度（SOC領域）では重水素を用いることで軽水素よりも閉じ込め時間が伸長するとの報告があった。この特性は、イオン-電子衝突を介した捕捉電子モードに対する同位体効果[Nakata *et al.*, PRL-2019]と定性的に一致しており、今後は新古典輸送や二流体効果の解析を行うことで同位体効果に関する更なる知見が深まるものと期待される。（今寺）

W7-Xの新古典輸送が低い値を示したことは当初の目的に沿った設計趣旨に合致した喜ばしい結果であるものの、乱流輸送はLHDを上回って大きな値を示したことはいささか衝撃的であった。新古典輸送の観点から最適化をすれば乱流輸送に対しても有利な傾向を示すのではないかと相乗効果を個人的には期待したからである。今回の結果は、新古典輸送と乱流輸送が独立に作用するとの結果であるが、今後のヘリカル系の方針にも関係することから、探索するパラメータ空間を広げて、トカマクの知見も取り入れながら、両者の関係を詳細に検討する必要があるとの印象を受けた。（岸本）

コラム

「ゼロエミッションエネルギー」研究拠点とは？

本ユニットの参加部局の一つである京都大学エネルギー理工学研究所は、「ゼロエミッションエネルギー」研究拠点として文部科学省が進める共同利用・共同研究拠点プログラムに認定され、10年に渡って全国の関連研究者と連携・協力して研究活動を行っています。

「ゼロエミッションエネルギー」とは、エネルギーの在り方や生成・変換・利用の方法を自然の摂理や基本原理まで立ち返って深く探究し、それらを通してエネルギーの負荷や損失、二酸化炭素等の有害物質の生成や排出を最小限に抑えた次世代を担う新しいエネルギーを意味します。皆様も積極的にご参加下さい。

http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/zero_emission

「Role of plasma behind high intensity laser-matter interaction and future prospect」

James Koga 専門業務員
(QST 関西光科学研究所)



Ultrahigh intensity lasers have been made possible through the invention of chirped pulse amplification (CPA) for which the Nobel Prize in physics was partially awarded to Donna Strickland and Gérard Mourou^[1] (see^[2] for a brief description of CPA). Since ultrahigh intensity lasers immediately ionize any material with which they interact, plasma dynamics plays an essential role. In this talk I will present the role of plasma in high intensity laser-matter interactions. In particular I will focus on plasma physics in laser wakefield acceleration^[3], relativistic flying mirrors^[4], and microbubble implosions to achieve electrostatic fields strong enough to probe vacuum polarization^[5] and to create electron-positron pairs from the vacuum^[6].

- [1] <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2018/summary/>
- [2] <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2018/popular-information/>
- [3] E. Esarey, C. B. Schroeder, and W. P. Leemans, Rev. Mod. Phys. 81, 1229 (2009)
- [4] M. Kando, et al., Quantum Beam Sci. 2018, 2, 9 (2018)
- [5] J. K. Koga et al., Matter and Radiation at Extremes 4, 034401 (2019)
- [6] J. K. Koga et al., Physics Letters A 384, 126854 (2020)

Role of plasma behind
high intensity laser-
matter interaction and
future prospect

James K. Koga
High-Intensity Laser Science Group
Kansai Photon Science Institute
National Institutes for Quantum and
Radiological Science and Technology
(QST)



Collaborators: Sergei V. Bulanov, Timur Zh. Esirkepov, Alexander S. Pirozhkov, Masaki Kando, Stepan S. Bulanov, Masakatsu Murakami, Alexey V. Arefiev, Yoshihide Nakamiya

Conclusions

- Nearly 100 years since Sauter's prediction
- Ultrahigh intensity lasers have reached 10^{23} W/cm²
- Currently 6 orders of magnitude smaller than 10^{29} W/cm²
- Plasma physics is essential in getting there
- High energy electrons and photons
 - Laser wakefield acceleration of electrons
- Higher Electric fields
 - Relativistic Flying Mirrors
 - Microbubble Implosions
- Nearly there!

Comment

Due to the development of laser technology, represented by chirped pulse amplification (CPA), a high-intensity laser exceeding the peak intensity $I \sim 10^{22-23}$ W/cm² can be obtained in the near future. In this talk, Dr. J. K. Koga introduced the petawatt laser system J-KAREN-P at KPSI-QST. J-KAREN-P is one of the most intense lasers in the world and has the record peak laser intensity of $I \sim 10^{22}$ W/cm². Dr. J. K. Koga referred to the possibility of causing the vacuum polarization and also the production of electron-positron pairs from the vacuum by using currently possible laser intensities of $I \sim 10^{23}$ W/cm². This had the greatest impression on me, because these phenomena are expected to take place at the peak intensity of $I \sim 10^{29}$ W/cm², which corresponds to the electric field of 10^{18} V/m. To attain such an intense electric field, Dr. J. K. Koga mentioned the theoretical scheme using relativistic flying mirrors and also a new target, referred to as a “micro-bubble”, and showed a series of two- and three-dimensional particle-in-cell simulations. This interesting viewpoint will open a new area not only into laser-plasma interaction research but also into a wide range of plasma physics. (R. Matsui)

「ヘリオトロン型磁場配位を利用した統計加速の実験室シミュレーションの検討」

Investigation of experimental simulation for stochastic acceleration using Heliotron-type magnetically confined configuration

小林 進二 准教授

(京都大学エネルギー理工学研究所 エネルギー生成研究部門)

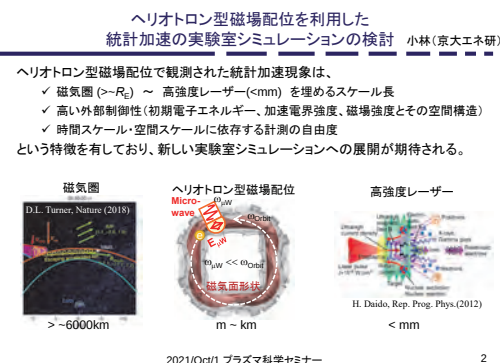
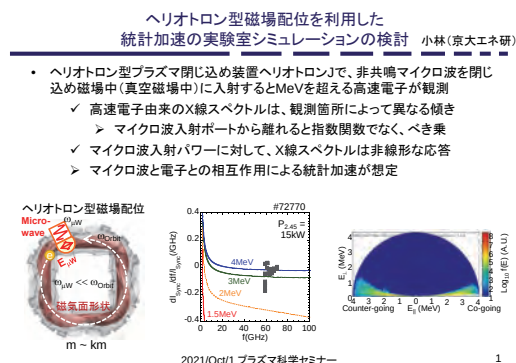


統計加速現象は宇宙・天体で発生する高エネルギー粒子の加速機構として考えられており、高強度レーザーを利用した高エネルギー粒子生成が地上の実験室で行われている。ヘリオトロン型プラズマ閉じ込め装置 Heliotron J において、非共鳴マイクロ波を真空磁場中に入射すると MeV を超える高エネルギー電子が生成されることが、シンクロトロン放射計測、X線スペクトル計測より確認された^[1]。真空磁場中にマイクロ波の共鳴層がないこと、高エネルギー電子生成はマイクロ波パワーに対して非線形な特性を持つことから、マイクロ波と電子との確率的な相互作用による統計加速が起きていると想定される^[2]。

今回ヘリオトロンJで観測された現象は真空で閉じ込め配位が形成されるヘリオトロン型磁場配位の特徴が生かされており、外部境界条件の制御性・計測機器設置の自由度が高いこと、m ~ km オーダーの空間スケールをもつ磁力線構造を広範囲に変えられること等を活用することで、統計加速の諸問題に取り組む、新しい実験室シミュレーションへの展開が期待される。

[1] S. Kobayashi, et al., Plasma Phys. Control. Fusion, 62 (2020) 065009.

[2] H. Laqua, et al, Plasma Phys. Control. Fusion, 56 (2014) 075022.



Comment

トカマクと異なった3次元の磁場配置を持つヘリカル系装置であるヘリオトロンJにおいて、磁場と非共鳴状態にある低周波のマイクロ波を入射したときの着火ダイナミクスとその時に生成・観測される MeV を超える相対論的な高エネルギー電子生成についての研究報告を頂きました。エネルギー分布がべき乗則を示す銀河宇宙線の発生メカニズムと同様の統計加速が実験室で起きている可能性が指摘され、活発な議論がなされました。ヘリカル系はトカマクと違ってプラズマ生成前から閉じ込め磁場が存在することから、少数の高エネルギー電子が閉じ込められた状態で、空間的に局在した電場領域を何周も周回できることから、統計加速が起こっても不思議でないと思いました。特に、周波数チャージング現象が観測されていることが興味深く、生成された高エネルギー粒子が単一粒子の運動の域を超えて集団運動としての波動を励起していることを示しています。

統計加速は slow process であることから、電子がべき乗則分布を形成するまで散逸することなく長時間閉じ込められていることや電磁波と粒子の位相関係が確率的になる要因があること、エネルギーの低い電子が高エネルギーの位相に乗ることなど、多くの素過程が相乗的に連動することが求められますが、ヘリオトロンJは宇宙探求の実験室として最適な研究プラットフォームであるとともに、核融合研究の新しい展開を感じました。(岸本)

第16回 2021年10月19日

「高エネルギー密度プラズマ科学の最近の動向から」

Recent progresses in high energy density science

三間 罔興 招聘教授

(大阪大学レーザー科学研究所)



これまで、高出力レーザー技術、レーザー核融合、レーザー粒子加速、高エネルギー密度の物質科学、地球惑星科学と宇宙デブリ除去への応用、真空破壊などの超高強度場の物理、並びにレーザー加工などのパワーレーザーの産業利用分野の研究開発において、大阪大学、量子科学技術研究開発機構、京都大学、東京大学や理化学研究所等の我が国の取組が世界をリードしてきた^[1]。

一方、大型パワーレーザー施設の整備が海外で急速に進み、この分野の学術と産業利用が急速に進展している。米国のNIF、フランスのLMJに続き、中国が開発しつつあるナノ秒メガジュールレーザーや欧州ELIや韓国、中国、ロシアなどが開発しているフェムト秒10PWから200PWを目指す超高強度のパワーレーザーなど、様々なパルス幅、出力エネルギー、ピークパワーの高出力レーザーが整備され、実に様々な研究が急速に展開している^{[2][3]}。

本講演では、我が国と欧米の取り組みの状況をレーザーイオン加速の最近の話題^[4]も含めて紹介する。

[1] 日本学術会議提言「パワーレーザー技術と高エネルギー密度科学の量子的飛躍と産業創成」2020.06.

Pdf URL : <http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-24-t291-2.pdf>

[2] Plasma Science: Enabling Technology, Sustainability, Security, and Exploration. The National Academies Press, Chap 3 and Chap.4 (2020) : Pdf is available at <http://nap.edu/25802>

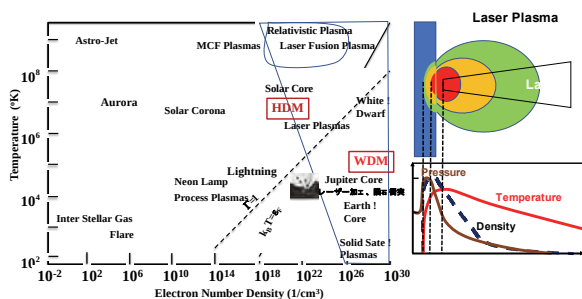
[3] Opportunities in Intense Ultrafast Lasers, The National Academies Press (2018):

Pdf is available at <http://nap.edu/24939>

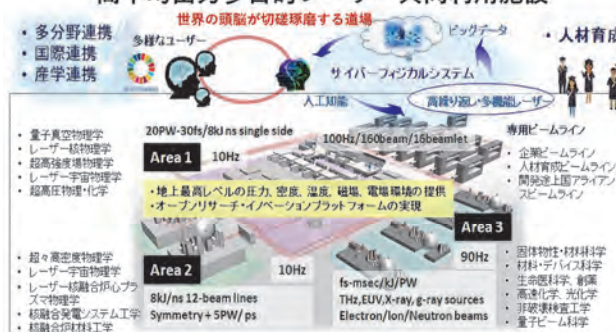
[4] N.Iwata, A.Kemp, S.Wilks, K.Mima, and Y. Sentoku, et al., "Lateral confinement of fast electron and its impact on laser ion acceleration", Phys. Rev. Express,(2021)

Pdf URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevResearch.3.023193>

High Energy Density Science and Laser Produced Plasmas



高平均出力多目的レーザー共同利用施設



「レーザー核融合の爆縮の基本原理と進展」

Recent topics and progress of high-energy-density-plasma science

藤岡 慎介 副所長・教授
(大阪大学レーザー科学研究所)

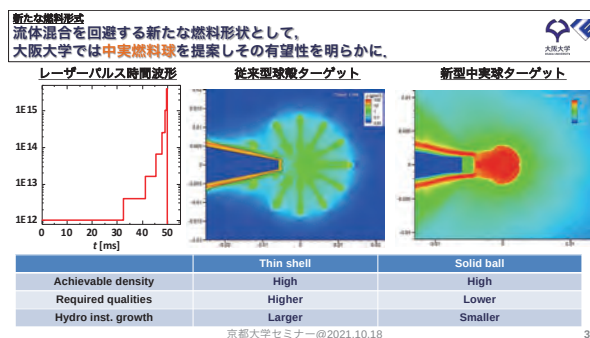
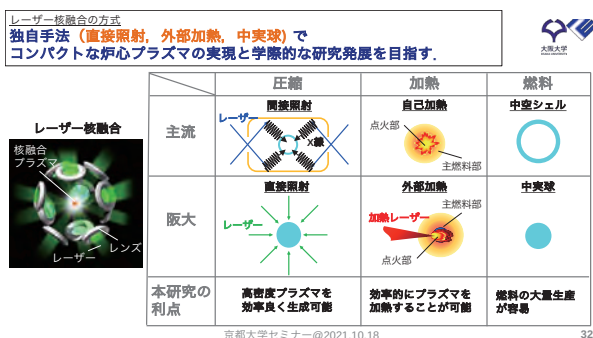


爆発は、急激に発生した圧力によって物体が外向きに散らばる現象であるのに対し、爆縮とはその圧力によって、物体がある一点に向かって収縮する現象である。爆縮に伴って、物体の密度が上昇すると同時に、断熱加熱によって中心部の温度も上昇する。中心点火と呼ばれる一般的なレーザー核融合方式では、爆縮によって高温・高密度の核融合プラズマを形成する。パワーレーザーで駆動される爆縮では、密度の低いプラズマが、密度の高いプラズマを押すという状況であり、流体力学的に不安定である（これは、プラズマと一緒に動く系から見ると、密度の小さいプラズマが密度の大きいプラズマを支えるという状況になっている）。時間に対して擾乱振幅が指数関数的に成長するレイリー・テイラー不安定性を代表とする流体力学不安定性によって、爆縮途上にある核融合燃料が大きく変形、破断し、その結果として、低温なプラズマと高温なプラズマが混じりあい、高温の点火部の形成が阻害されるというのが、レーザー核融合において点火・燃焼に至らない最大の要因であった。幸いな事に、アブレーティブ安定化と呼ばれている流体力学的不安定性の抑制効果がレーザー核融合には存在する。擾乱の山頂がパワーレーザーによって選択的に削られる（アブレーションされる）現象である。アブレーティブ不安定性の効果を大きくするには、核融合プラズマの密度が低い必要があり、レーザー核融合点火のための高密度プラズマの生成と、流体の安定化の為に低密度プラズマの生成という一見矛盾する目標を実現するために、空間的にプラズマ密度を制御するという方法が取られてきた。この為に、レーザー核融合においてはレーザーパルス波形整形が重要な役割を果たす。

本講演では、この流体力学的不安定性を抑制するための長年の取組と、それが最近発表された、核融合出力1.3 MJ（エネルギー利得0.68）との関係について講演する。

[1] The Physics of Inertial Fusion, S. Atzeni & J Meyer-Ter-Vehn, Oxford press.

[2] Review of the National Ignition Campaign 2009-2012, J. D. Lindl et al., Phys. Plasmas 21 (2014).



Comment

本セミナーでは、レーザープラズマ相互作用を学術基盤として日本のレーザー核融合研究を黎明期からけん引されてきた三間先生と現在当該分野の第一線で活躍されている藤岡先生にセミナーを行っていただきました。

三間先生は、学術会議メンバーとして2020年に取りまとめられた提言を中心に、パワーレーザー技術と応用の世界的な進展状況を、エネルギー、ピーク強度、平均出力の三つの要素に分け、各々が内包するポテンシャルと目指す課題、それらがもたらす科学の進展を「量子的飛躍」と表現されて、未踏の領域の魅力を語っていただきました。量子的飛躍とは何か・・・との質問が出され議論になりましたが、Mouro/StricklandによるCPA法が量子的飛躍をもたらしたと同様のことが今後期待されます。一方、日本は世界に後れをとりつつある中で、平均出力を基軸とした多目的の共同利用施設（EPoCH）の計画が紹介され、大きな期待が寄せられました。これらは磁場プラズマ研究者に新鮮であり、幅広い光量子研究イメージが伝わったと思います。

藤岡先生は、レーザー核融合の進展について大阪大学の目指す高速点火のアプローチを紹介いただくとともに、最近の米国NIFで点火・燃焼状態を実現した背景物理について詳しくお話いただきました。レイリーテラ（RT）不安定性に代表される爆縮時の乱流現象は磁場研究との接点が多く、相互に交流することでイメージできる世界が一層広がる印象を持ちました。特に、燃料の混合（mixing）などの非線形発展の内容は興味深く、初期擾乱も、ターゲットの不均一性やボイドなどのミクロな構造とレーザー照射の不均一性の双方の要因があり、両者の相互作用を通してはじめてそのスペクトルが決まることがよく分かりました。また、RTに関わる揺らぎの2次元性・3次元性やエネルギーのカスケードに関する質問や議論がありましたが、磁場核融合の大きな関心事です。トカマク表面でも、blob-holeと呼ばれるRT駆動の渦がmixingを起こす現象がありますが、類似性があると思いました。

本ユニットでも高強度レーザーで生成される高エネルギー密度プラズマの学理を深めていきたいと思っています。（岸本）

第17回 2021年10月29日

「宇宙への打上げ技術の現状と課題」

Current status and issues of launch technology to space

棚橋 美治 教授

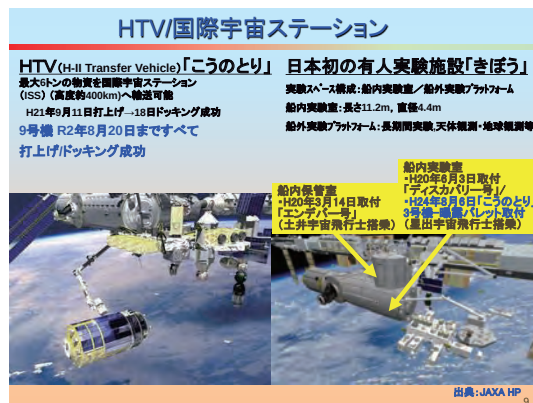
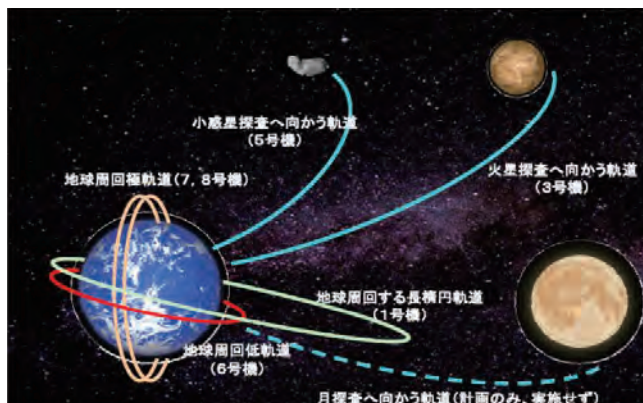
（中部大学工学部 宇宙航空理工学科）



1955年糸川英夫博士による長さ23センチのペンシルロケットが発射実験に成功して以来、ロケットによる衛星打上げ事業は、液体燃料ロケットと固体燃料ロケットの2大方式により、幾多の困難を乗り越え、成功率においては世界トップレベルに達している。我が国が独自の輸送システムを保持する意義は、安全保障を含めた宇宙開発利用の我が国の自立性や科学技術創造立国を目指した優れた宇宙技術の確保等にある。ロケット打上げ技術は、ユーザーの衛星をいかに効率的に地球周回軌道近くまで送り届けるかに掛かっている。我が国は最も赤道に近い射場でも種子島の中緯度にあり、仏アリアンロケットは赤道直下の仏領ギアナから打上げられるため、消費燃料の点で有利である。

近年、受注確保のため低コスト且つユーザー負担の小さいロケットを目指し、極力軌道に近いところまで打上げられるようエネルギー効率向上のための様々な工夫がなされている。打上げ費用は従来の半分のレベルとなりつつあるが、米スペースXのように再使用型ロケットが登場し、コスト競争は益々厳しくなっている。企業での低コスト化の技術革新が求められるが、諸外国に比べ政府による予算支援が少ない我が国では、上述の国家戦略推進のため、更なる予算投入が必要である。セミナーでは、これら

- [1] <https://www.rocket.jaxa.jp/rocket/h3/>
- [2] <https://www.rocket.jaxa.jp/rocket/epsilon/>
- [3] <https://vdata.nikkei.com/datadiscovery/10space/>
- [4] 山崎勲: 国産ロケット H-2A への挑戦 日本的主力ロケット開発の軌跡, 武久出版, ISBN : 9784894541399



本セミナーでは、実験流体力学や航空宇宙工学がご専門の中部大学の棚橋先生にロケットの打ち上げ技術に関する課題や現状についてご報告いただきました。宇宙は国際的に協力と競争の両面を持った大型プロジェクトの観点から核融合研究開発に通じるところが多くあり、また、地球磁気圏を含む宇宙空間はプラズマの宝庫であることから、本ユニットと深く関係します。大学院生も興味を持つ内容であることから、エネルギー科学研究科やエネルギー理工学研究所の協力・後援をいただきました。

日本のロケット技術は55年のペンシルロケットから大きく進展し、燃焼中断制御ができない固体燃料では「はやぶさ」を打ち上げたM-Vロケットの高い性能や、液体燃料では、H-IIなど、打ち上げ地点が赤道上でない不利な条件（大きな静止化増速量が必要）を補う遠地点での増速技術の獲得など、日本の優れた技術開発の現状を紹介いただきました。さらに、故障時にも溶損や爆発に至らない本質安全の考えに基づく次世代ロケットの開発など、究極の安全を目指した研究の状況が紹介されました。

また、技術面とともに、激化する国際競争の中において、宇宙基本計画を中心とした日本の宇宙政策についても紹介され、欧米・中国に比べて厳しい予算状況の中で、計画に優先度を付けながら宇宙利用を加速する取り組みや将来展望が紹介されました。その中で、外国から多くの受注を得るには、信頼の得られる深い人格が求められることや、日本は「成功例を多く示すことで信頼を得ようとする」のに対して、欧米は「過去の失敗をどのように生かして信頼性を高めてきたかを強調する」といった文化の違いのお話が印象的でした。

前述のように、宇宙はプラズマの宝庫であり、棚橋先生もプラズマに強い関心を持っておられます。本ユニットセミナーでは、核融合研究とともに、高強度レーザーで生成する光量子プラズマを通して宇宙の極限現象を探る研究をスコープに入れ、宇宙における粒子加速（九州大学・松清先生）や磁気乱流（青山学院大学・山崎先生）に関する関連セミナーを行っていますので、宇宙とプラズマとの接点の観点から参照下さい。（岸本）

第 19 回 2022 年 1 月 21 日

「トカマクプラズマの輸送研究と統合コード開発、そして機械学習の応用」

Transport physics studies and the development of integrated models in tokamak plasmas, and the application of machine learning techniques to these issues

本多 充 教授

(京都大学大学院工学研究科 附属工学基盤教育研究センター)



トラスプラズマの巨視的なプラズマ物理量の定常状態ないし発展を予測する場合、従来型の移流拡散型輸送方程式群を解く輸送コードを核に、様々な物理モジュールを組み合わせた統合型輸送モデルを用いることが多い。講演者はこれまで3種類の統合モデルの開発と実行に係わってきており、特に近年開発してきた定常型輸送コードGOTRESSを核とする統合モデルGOTRESS+^[1]の開発の現状と、今後の展開について述べる。

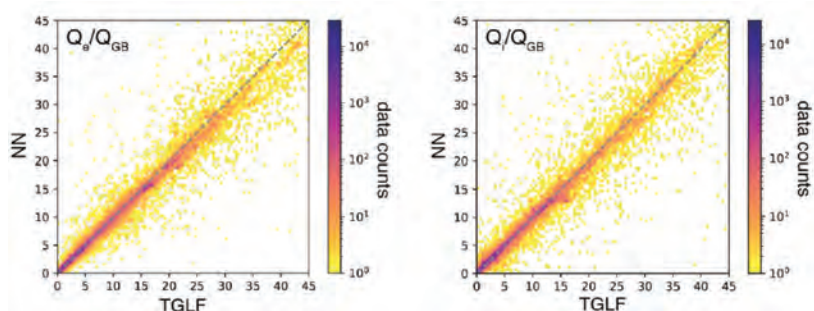
従来型拡散型輸送コードは扱いやすい一方で、支配方程式はほぼ純粋な拡散方程式であることからプラズマ固有の現象は全て係数やソース項などのモデルに押し込まれている。プラズマの大きな特徴は流体と電磁場の相互作用による自己無撞着性にあるため、統合モデルでは扱いが難しいところである。1次元の方程式群でありながらも、物理量間で自己無撞着性を保った流体型輸送コードTASK/TX^[2]を開発しており、その特徴を活かして電荷の破れと流体運動の関連を中心とした物理課題への取り組みなどを紹介する。

近年の深層学習を中心とした機械学習の興隆は科学分野にも大きな影響を与えている。ニューラルネットワークモデルを用いた輸送モデルの代理モデル開発により、数オーダーの高速化を実現している^[3]。また、画像認識や時系列解析のモデルを用いることで、長時間のシミュレーションを要していた第一原理シミュレーションを早期に終了させる取り組みも進められており、その現在位置を紹介する。

[1] M. Honda et al., Nucl. Fusion 61 (2021) 116029.

[2] M. Honda and A. Fukuyama, Comput. Phys. Commun. 208 (2016) 117-134.

[3] M. Honda and E. Narita, Phys. Plasmas 26 (2019) 102307.



Comment

TASK/TXは磁気面平均された1次元の流体型輸送コードであるものの、新古典輸送を内部で完結して計算可能であるなど優れた特性を有しており、近年の不純物の導入はその適正を活かした方向性であるとの印象を持った。様々な電離状態やその時間発展まで考慮した不純物の解析を今後展開することで、より正確な不純物輸送の見積もりに貢献することが大いに期待できる。

また反復型定常輸送ソルバーGOTRESSを活用した代理輸送モデルの開発や、画像診断法を活用した大規模計算の効率化に関する研究では、近年プラズマ科学の分野でも積極的に導入されている深層学習の方法論を利用しており、「データ生成者」としてシミュレーションを、「モデル開発者」としてデータ駆動的アプローチを用いることで、輸送計算の高速化、高精度化を実現していた。このようにシミュレーションとデータ駆動科学が融合した研究は、大型計算機の進展と連動して今後も重要になるものと予想される。(今寺)

「相対論的磁気流体波のパラメトリック不安定性と粒子加速」

Particle acceleration in parametric instabilities of relativistic MHD waves

松清 修一 准教授

(九州大学大学院総合理工学研究院 流体環境理工学部門)



大振幅の磁気流体波動は宇宙のいたるところで励起され、粒子加速に寄与すると考えられている。太陽風中では背景磁場と同程度の磁場揺らぎが常時観測されているし、超新星残骸等に付随する無衝突衝撃波近傍では磁場が星間空間に比べてはるかに強く増幅される。またFast Radio Burstなど、高輝度放射を発する未知の天体も報告されており、いずれも高エネルギー粒子の生成に寄与している可能性がある。緩和時間の長い宇宙では発展途上乱流がしばしば観測され、コヒーレントな波動とともによく加速された荷電粒子が見られる。

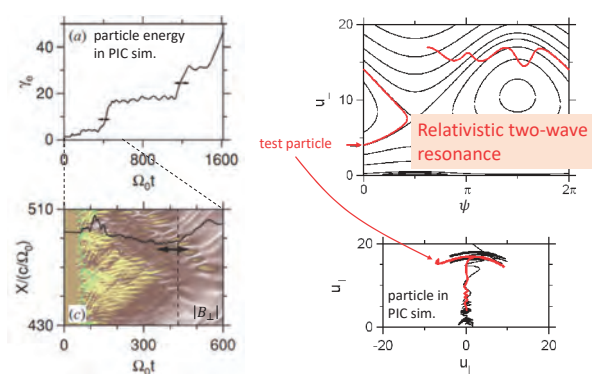
本セミナーでは、フル粒子計算によって再現された相対論的磁気流体波のパラメトリック不安定性^[1]の長時間発展において、時空間に局所的に励起されるコヒーレントな波動が粒子加速に本質的な役割を果たすようすを議論する^[2]。加速過程の少数自由度系モデルを構築して、波動の振幅がある臨界値を超えると荷電粒子の振る舞いにある種の相転移が起こること、またこのときすべての荷電粒子が短時間のうちに相対論的エネルギーにまで加速され得ることを示し、レーザー実験での将来的な検証可能性についても議論する^[3]。

[1] Sagdeev and Galeev, Nonlinear Plasma Theory, W. A. Benjamin, 1969.

[2] Matsukiyo and Hada, ApJ, 692, 1004, 2009.

[3] Isayama, Takahashi, Matsukiyo, and Sano, submitted.

Particle acceleration in parametric instabilities



Comment

宇宙の大部分はプラズマ（荷電粒子）で構成されており、 10^{15-20} eV 領域の超高エネルギー粒子が生成するなど、宇宙空間は様々な粒子加速機構が存在する“天然の粒子加速器”と捉えることができる。講演では、太陽系内において、背景磁場が太陽の活動によって生じる様々なスケールの揺らぎにより増幅され（パラメトリック不安定性）、これが粒子加速に寄与しているという視点のもと、粒子シミュレーションにより、増幅された大振幅の磁場エネルギーが散逸する過程で相対論領域の高エネルギー粒子が得ら

れることが示された。宇宙における相対論的粒子の生成機構としては、超新星爆発に伴う無衝突衝撃波による加速が有名であるが、背景磁場の揺らぎによる磁場増幅に伴い、磁場のくびれ（定在波の節）に存在する粒子を選択的に加速することで非熱的分布を形成する機構、および、それが相対論効果により現出する点が非常に興味深かった。

また、ボイジャーによって観測された磁場の振幅（揺らぎのスケール）が、太陽系と星間空間との“界面”を境に質的に変化している点が驚きであった。すなわち、太陽系内ではパラメトリック不安定性により磁場の揺らぎが非常に大きく、乱流状態となっているが、太陽系外では磁場はコヒーレントな状態となっており、一様外部磁場によって太陽系内のプラズマが閉じ込め状態にあると考えることができる。この現象はミラー磁場配位におけるプラズマの閉じ込めと類似しており、粒子加速と同様、宇宙には我々が研究対象としているプラズマ現象が豊富に存在することを改めて実感した。また、磁場増幅による粒子加速機構は、宇宙物理学における未解決問題である「注入問題」の解明に向けた大きな手掛かりとなることから、今後のさらなる展開が期待される。（松井）

第 22 回 2022 年 2 月 21 日

「天体衝撃波での粒子加速研究と高強度レーザーを用いた実験室宇宙物理学」

Studies of collisionless shocks in astrophysical objects and in laboratories

山崎 了 教授

（青山学院大学 理工学部物理科学科）



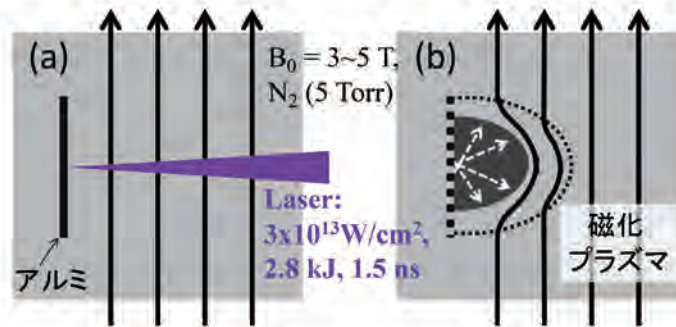
ガンマ線バースト等の天体現象や、超新星残骸、銀河団等の天体には普遍的に衝撃波が存在する。このような宇宙の低密度媒質中の衝撃波では、媒質プラズマ粒子間のクーロン衝突の平均自由行程が遷移層の厚みに比べて桁違いに長い無衝突衝撃波である。そのため衝撃波面の周辺で速度の大きな非熱的粒子の存在が可能である。すなわち一部の粒子たちは電磁波動による散乱を受ける等して、エネルギーを獲得する（粒子加速）。しかし、その過程の詳細は未解明である。これに起因し、高エネルギー粒子の総量が決まらず、満足に理解できない天体現象が多数あるのが現状である。

本発表では、まず、上述の天体・天体現象の説明と、それらに存在する無衝突衝撃波に関する観測および理論研究の現状、および天体物理学的な研究動機・問題点を紹介する。続いて、現在、我々の進めている、高強度レーザーを用いた無衝突衝撃波生成実験について紹介する。高強度レーザーを用いた実験室宇宙物理学を、従来の天体観測、理論・シミュレーションに続く衝撃波の第3の研究基盤ツールとすべく挑戦している現状を紹介させていただきたい。

- [1] プラズマ・核融合学会誌小特集「宇宙と実験室の無衝突衝撃波—粒子加速と磁場生成・増幅—」（第92巻・第2号、2016年2月）。

URL: http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2016_02/jspf2016_02-jp.pdf

Our Experimental setup (RY+ 22)



- (a) 雰囲気ガス中に外部磁場(黒矢印)をかけた状態でHIPERレーザーを照射する。
- (b) ショット後、アルミ薄膜由来のプラズマ(白矢印の様に膨張)とアルミからの輻射で電離して生成された磁化プラズマの相互作用によってmagnetized shock (黒点線)ができる。

Comment

宇宙には様々な粒子加速機構が存在する。特に、 10^{15} eVまでの非熱的な高エネルギー宇宙線は銀河系内で生成され则认为られている。宇宙空間で超新星爆発が生じると、背景星間ガスが圧縮を受けること無衝突衝撃波が形成され、この無衝突衝撃波近傍が高エネルギー宇宙線生成現場であることが有力視されている。この視点のもと、本講演では、現在主な高エネルギー宇宙線生成機構と位置付けられている、無衝突衝撃波によるフェルミ加速機構について解説していただくとともに、「実験室宇宙物理学」の観点から、最近米国NIFで実施された大型レーザーを用いた実験と粒子シミュレーションによる解析結果が紹介された。超新星爆発により形成される衝撃波近傍では、X線観測から高エネルギープラズマが生成していることが分かっており、プラズマ境界層と位置付けることができる。私自身、高強度レーザーを物質に照射することで生成するプラズマ境界層近傍での多彩な非線形現象（イオン加速・準定常非線形波の生成等）を研究対象としているため、宇宙空間と時定数は異なるものの類似点が多く、大変興味深く拝聴した。また、NIFで実施された実験結果、および関連する粒子シミュレーション結果として、(1)対向するプラズマ流の境界層近傍で衝撃波が形成される点、(2)衝撃波形成にワイベル型の乱流磁場が関与している点が紹介された。これらの結果は、フェルミ加速機構を主張する上で大きな障害となっていた「注入問題」を解決する糸口となり得るとのことで、大変衝撃を受けた。講演を通じて、高強度レーザーと物質との相互作用により、直接観測が困難な宇宙現象を地上で模擬可能であることを実感し、改めて実験室宇宙物理学の可能性を感じた。(松井)

2021 年度 アクティビティカレンダー

2021

- 5月 西南物理研究所核融合科学センターとの学術協力・交流に関する覚書を締結
第1回 IAEA報告会および意見交換会
第2回 IAEA報告会および意見交換会

- 6月 第8回 プラズマ科学セミナー／桐山 博光 グループリーダー（QST 関西光科学研究所）
第9回 プラズマ科学セミナー／深見 一弘 准教授（京都大学工学研究科）
第10回 プラズマ科学セミナー／橋田 昌樹 特定准教授（京都大学化学研究所）

- 7月 第11回 プラズマ科学セミナー／比村 治彦 教授（京都工芸繊維大学）
第12回 プラズマ科学セミナー／田中 謙治 教授（核融合科学研究所）

- 8月 ユニットロゴの策定
第13回 プラズマ科学セミナー／James Koga 専門業務員（QST 関西光科学研究所）
第14回 プラズマ科学セミナー／田中 謙治 教授（核融合科学研究所）

- 9月 2021年度第1回非線形・非平衡プラズマ科学研究ユニット運営協議会

- 10月 第15回 プラズマ科学セミナー／小林 進二 准教授（京都大学エネルギー理工学研究所）
ユニット内オンサイトラボ共同研究意見交換会
第16回 プラズマ科学セミナー／三間 罔興 招聘教授、藤岡慎介副所長・教授（大阪大学レーザー科学研究所）
ITER&原型炉に向けた統合モデリング活動に関する意見交換
第17回 プラズマ科学セミナー／棚橋 美治 教授（中部大学）

- 12月 2021年度第2回非線形・非平衡プラズマ科学研究ユニット運営協議会
第18回 プラズマ科学セミナー／木下 正弘 協力研究員・名誉教授（京都大学エネルギー理工学研究所）

2022

- 1月 第19回 プラズマ科学セミナー／本多 充 教授（京都大学工学基盤教育研究センター）
第20回 プラズマ科学セミナー／松清 修一 准教授（九州大学）

- 2月 第21回 プラズマ科学セミナー／今澤 良太 主幹研究員（QST 那珂研究所）
第22回 プラズマ科学セミナー／山崎 了 教授（青山学院大学）

- 3月 2021 年度第3回非線形・非平衡プラズマ科学研究ユニット運営協議会

ユニットメンバー

岸 本 泰 明	教授、ユニット長	大学院エネルギー科学研究科	エネルギー基礎科学専攻
今 寺 賢 志	准教授	大学院エネルギー科学研究科	エネルギー基礎科学専攻
松 井 隆太郎	助教	大学院エネルギー科学研究科	エネルギー基礎科学専攻
中 村 祐 司	教授、副ユニット長	大学院エネルギー科学研究科	エネルギー基礎科学専攻
石 澤 明 宏	准教授	大学院エネルギー科学研究科	エネルギー基礎科学専攻
田 中 仁	教授	大学院エネルギー科学研究科	エネルギー基礎科学専攻
打 田 正 樹	准教授	大学院エネルギー科学研究科	エネルギー基礎科学専攻
村 上 定 義	教授	大学院工学研究科	原子核工学専攻
本 多 充	教授	大学院工学研究科	附属工学基盤教育研究センター
蓮 尾 昌 裕	教授	大学院工学研究科	機械理工学専攻
四 竈 泰 一	准教授	大学院工学研究科	機械理工学専攻
深 見 一 弘	准教授	大学院工学研究科	材料工学専攻
大 垣 英 明	教授	エネルギー理工学研究所	エネルギー生成研究部門
小 西 哲 之	教授	エネルギー理工学研究所	エネルギー生成研究部門
長 崎 百 伸	教授	エネルギー理工学研究所	エネルギー生成研究部門
南 貴 司	准教授	エネルギー理工学研究所	エネルギー生成研究部門
小 林 進 二	准教授	エネルギー理工学研究所	エネルギー生成研究部門
松 田 一 成	教授	エネルギー理工学研究所	エネルギー機能変換研究部門
中 嶋 隆	准教授	エネルギー理工学研究所	エネルギー機能変換研究部門
宮 内 雄 平	教授	エネルギー理工学研究所	エネルギー機能変換研究部門
野 平 俊 之	教授	エネルギー理工学研究所	エネルギー利用過程研究部門
森 井 孝	教授	エネルギー理工学研究所	エネルギー利用過程研究部門
片 平 正 人	教授	エネルギー理工学研究所	エネルギー利用過程研究部門
坂 口 浩 司	教授	エネルギー理工学研究所	エネルギー利用過程研究部門
木 下 正 弘	協力研究員、名誉教授	エネルギー理工学研究所	
橋 田 昌 樹	特定准教授	化学研究所 複合基盤化学研究系 (2021年9月迄)	
	特任教授	東海大学 総合科学技術研究所 (2021年10月～)	
井 上 峻 介	助教	化学研究所 附属先端ビームナノ科学センター (2021年9月迄)	
比 村 治 彦	教授	京都工芸繊維大学 電気電子工学系	
三 瓶 明希夫	准教授	京都工芸繊維大学 電気電子工学系	
浅 井 朋 彦	教授	日本大学 理工学部	
桐 山 博 光	グループリーダー	量子科学技術研究開発機構	量子ビーム科学部門関西光科学研究所
福 田 祐 仁	上席研究員	量子科学技術研究開発機構	量子ビーム科学部門関西光科学研究所
森 林 健 悟	上席研究員	量子科学技術研究開発機構	量子生命・医学部門量子生命科学研究所
坂 和 洋 一	准教授	大阪大学 レーザー科学研究所	

非線形・非平衡プラズマ科学研究ユニット事務局

〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄 京都大学宇治キャンパス北4号棟320号室

TEL : 0774-38-4430・4434 HP : <http://plasma-fusion.energy.kyoto-u.ac.jp/UNIT>



非線形・非平衡プラズマ科学研究ユニット
Non-linear/Non-Equilibrium Plasma Science Research UNIT