

インフォメーション

■会議報告

第 61 回アメリカ物理学会プラズマ物理分科会 (APS-DPP) 年会

宇佐見俊介 (核融合科学研究所)

藤田隆明 (名古屋大学)

2019年10月21日(月)ー25日(金)の日程で、米国フロリダ州フォートローダーデールにて、第61回アメリカ物理学会プラズマ物理分科会年会が開催された。フォートローダーデールは、マイアミの北約40kmに位置する海に面した都市である。日本で言えば沖縄ぐらいの緯度であるため、10月末でも日中の気温は30℃にまで達し、冬支度の始まった日本から来た身としては、かなり厳しいと感じる暑さであった(その一方で、毎回のことだが、会場内は冷房が効きすぎているため非常に寒い)。また、フォートローダーデールは「アメリカのヴェネチア」と呼ばれており、街中に運河が張り巡らされている。ホテル、主な観光地が運河に面しており、移動手段としてウォータータクシー(水上バス)が大きな役割を果たしている(図1)。

会場となった Greater Fort Lauderdale / Broward County Convention Center では、朝から活発な発表・議論が行われた。今回の年会では約1900件の講演が組まれており、その内訳はレビュー講演5件、チュートリアル講演4件、招待講演100件、一般口頭発表約650件、ポスター発表約1100件となる。プログラムは例年通りのスタイルであり、毎日、最初に1時間のレビュー講演が1件行われ(図2)、その後は招待講演セッション、チュートリアル講演セッション、一般講演セッション、ミニカンファレンス、ポスターセッション(図3)が合計8つほど並列して進行された。先頭を切った初日のレビュー講演では、A. M. Garofalo 氏 (General Atomics, 以下 GA と記す) が、ITER においてエネルギー増倍率 $Q=10$ の運用をめざすにはコア周辺部の安定性が重要であり、そのためには共鳴摂動磁場(RMP)などにより周辺局在化モード(ELM)を抑制・制御することが求められると力強く語った。詳細については磁場閉じ込め核融合関係の報告を参照されたい。また4日目にはMaxwell 賞受賞者のレビュー講演があり、受賞した W. Matthaeus 氏(デラウェア大学)が“Who needs turbulence?”という印象的なタイトルで、乱流と太陽風の関係性について解説した。「乱流を研究することで太陽風が理解できる。太陽風を研究することでプラズマ乱流がわかる」というこちらも印象深い結論を提示した。



図2 A. M. Garofalo氏のレビュー講演(初日)の様子。

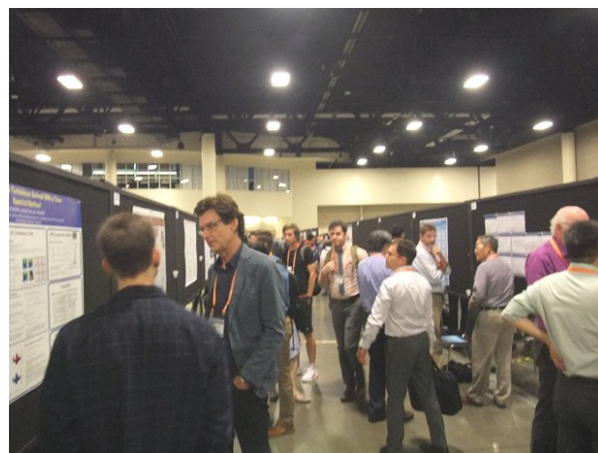


図3 ポスターセッション(3日目)の様子。

次回は、2020年11月9日ー13日の日程にてテネシー州メンフィスで開かれる予定である。

以下では、基礎プラズマ物理、磁場閉じ込め核融合の2つの分野について、詳細を報告していきたい。

基礎プラズマ物理

今回の会議で、基礎プラズマ物理の範囲に属すると考えられるセッション(ミニカンファレンスを含む)には、磁気リコネクション・衝撃波、プラズマ理論・計算、乱流と輸送、宇宙・天体プラズマ、波動・不安定性などが含まれている。これらのセッションの中から、筆者が特に興味を持った話題について紹介する。

最終日のレビュー講演では、J. C. Kasper 氏(ミシガン



図1 運河を行くウォータータクシー(水上バス)。規定額で1日何度でも乗り降りできる。

大学) が、太陽観測衛星 Parker Solar Probe のプロジェクトを紹介し、大きな注目を集めた。Parker Solar Probe は 2018 年 8 月に打ち上げられた人工衛星で、その大きな目的は、コロナの加熱機構、太陽風の加速機構を解明することである。太陽表面から 10 太陽半径以内にまで近づいて観測を行うことが大きな特色であろう。講演で見せる最新の結果について、講演者 J. C. Kasper 氏は写真撮影、SNS 投稿の禁止を繰り返しお願いしていた。この最新結果については、2019 年のアメリカ地球物理学連合 (AGU) 年会の「Parker Solar Probe セッション」で多くの発表があり、2020 年 1 月には *Astrophysical Journal* の Special Issue で 50 本以上の論文が掲載されるなど、順次公表されていく予定だそうなので、それらを楽しみに待ちたいところである。

続いて、宇宙・天体プラズマに関わる発表のうち、磁気リコネクションが絡む話題が非常に多くあった (Magnetic Reconnection & Shocks のセッションが 3 つもあるくらいである) ので、そこからいくつか挙げたい。

磁気リコネクションが起こる環境としては、これまでほとんどの場合、完全電離プラズマが想定されてきたが、多くの天体は低電離プラズマである。J. Jara-Almonte 氏 (プリンストンプラズマ物理研究所, 以下 PPPL と記す) は、そのような低電離プラズマにおける磁気リコネクションについて実験、シミュレーションの両面から調べた。実験では、PPPL の Magnetic Reconnection eXperiment (MRX) 装置を使うことで、シミュレーションでは、粒子コードに Coulomb 衝突、イオン・中性粒子衝突、中性粒子同士の衝突効果を入れた計算を実施することで、研究を進めた。その結果、リコネクション率は電離度に依存するが、一方で電離度が 0.1-0.2 程度以下になると、リコネクション率は電離度にはあまり依存しなくなり、システムサイズで決まるようになる、ということを実証した。

F. Guo 氏 (ロスアラモス国立研究所) は、粒子シミュレーションを行って、粒子エネルギースペクトルが冪乗則になるための要素として磁気リコネクションの 3 次元性を強調した。その理由として、2 次元の場合、磁力線を横切る粒子運動が制限され、磁気島内に高エネルギー粒子が強くトラップされるのに対して、3 次元の場合は、ストカスティックな磁力線の効果、波・粒子散乱の効果により粒子運動は制限されず、より高エネルギーに加速されるためであると説明があった。

M. Lyutikov 氏 (パデュー大学) は、かに星雲という具体的な天体をターゲットとして、粒子加速のモデル化を試みた。そのモデルによると、かに星雲からの放射エネルギースペクトルは 2 つの成分に分けられる。1 つはスペクトル指数 2.2 を示す成分で、これは乱流リコネクションによって加速された粒子のシンクロトロン放射によるものであり、もう 1 つのスペクトル指数は 1.6 であり、こちらは衝撃波加速を受けた粒子のシンクロトロン放射によるものである、と主張した。

今回、宇宙・天体プラズマの発表 (磁気リコネクションが関係する発表という言い方もできる) には、これま

での伝統的、典型的なシミュレーションモデルにいろいろな追加効果を取り込んだ、という成果が多く見られた。上述した J. Jara-Almonte 氏の低電離プラズマに関する話題では、荷電粒子のみを扱う通常の粒子シミュレーションモデルに中性粒子を加えたわけである。他にも、F. Cruz 氏 (Instituto Superior Tecnico) は、粒子シミュレーションに、対生成などの量子電磁気学 (QED) の効果を取り込み、J. Maddox 氏 (ウィスコンシン大学 マディソン校) は MHD シミュレーションに、乱流の効果を表す hyper-resistivity の項を加えた、などが挙げられる。シミュレーション研究にとって、手法の進歩、発展という喜ばしい面である一方、それぞれの手法が高度に専門化されて、お互いに共通する点が少なくなっていくというマイナスの面もあると感じた部分であった。

(宇佐見)

磁場閉じ込め核融合

初日のレビュー講演が磁場閉じ込め核融合関係であったことに加え、招待講演 18 セッション (100 件) のうち磁場閉じ込め核融合関係は最多の 7 セッション (38 件) を占めた。その内、共鳴摂動磁場 (RMP) 関係の講演だけで 1 つのセッション (6 件) が構成され、RMP への関心の高さが窺えた。レビュー講演・招待講演の中から、筆者が興味を持った講演について紹介する。

A. M. Garofalo 氏 (GA) のレビュー講演では、“Understanding the MHD challenges for ITER Q=10 operation at reactor relevant conditions” と題して、ITER の所謂ベースラインシナリオ (プラズマ電流 ~15 MA)、ハイブリッドシナリオ (プラズマ電流 ~12 MA)、高ボロイダルベータシナリオ (プラズマ電流 ~9 MA) について議論された。ベースラインシナリオでは ELM の抑制が最大の課題であり、RMP による ELM 抑制と ELM の発生しない QH モードの 2 つの手法が比較された。DIII-D においては、前者ではプラズマ電流方向のトルク、後者では反プラズマ電流方向のトルクが必要であり、ITER に相当するゼロトルクの条件での ELM 抑制は実現されていない。実際に ELM 抑制に影響するのは、摂動磁場の遮蔽に関係する境界輸送障壁 (ペデスタル) 内のプラズマ回転分布であり、その微妙な制御の重要性が指摘された。一方、ハイブリッドシナリオでは高密度領域での閉じ込め性能の劣化、高ボロイダルベータシナリオでは高い規格化ベータ値・H ファクターが必要となることが課題である。

M. Knolker 氏 (Oak Ridge Associated Universities) は DIII-D における通常の H モードよりもペデスタル圧力の高い Super H モードについて報告した。ペデスタル圧力の制御により、規格化圧力勾配と規格化電流密度を軸とする安定線図中の狭い安定領域に到達しているとの説明があった。A. M. Garofalo 氏のペデスタル内での回転分布の話とともに、内部輸送障壁と異なり本来細かい制御を必要としないはずの H モードでも最近ではそれが重要となっていることが印象的であった。

J. Chen 氏 (カリフォルニア大学ロサンゼルス校) は、

ファラデー偏光計により DIII-D の H モードプラズマの境界輸送障壁における磁場揺動を計測し、そのポロイダル波数、周波数範囲、伝播方向、振幅の衝突度依存性などからマイクロアリングモード (MTM) と同定した。境界輸送障壁内の電子熱輸送に寄与していると考えられる。

T. Odstreil 氏 (マサチューセッツ工科大学) は、DIII-D の H モードプラズマにおける不純物イオン (Al イオンおよび W イオン) の輸送について報告した。荷電交換分光と軟 X 線計測からベイズ推定に基づいて不純物イオンの拡散係数とピンチ速度を評価した。NBI 加熱に中心 EC 加熱を重量したとき、不純物イオンの拡散係数が 10 倍以上大きくなり、電子熱拡散係数は 1.5 倍、イオン熱拡散係数は 2 倍となった。イオン温度勾配 (ITG) モードが支配的な状態から ITG モードと捕捉電子モード (TEM) が混在する状態への遷移に対応すると考えられ、CGYRO コードによる局所非線形ジャイロ運動論シミュレーションはこれらの結果をよく再現した。

L. Casali 氏 (GA) は、DIII-D の Small Angle Slot (SAS) ダイバータ配位における H モードプラズマへの不純物ガス (N_2 および Ne) 入射実験を報告した。SAS ダイバータは、外側ストライク点の周りを狭い溝状の構造とした所謂クローズドダイバータの一種である。Ne 入射の場合、非接触ダイバータにおいてペデスタル圧力勾配をむしろ増大させ、ELM 周波数を低減することができた。ただし、Ne のペデスタルおよびコア部への侵入が見られた。

X. Chen 氏 (GA) は、DIII-D におけるトーラス上部からの EC 波の入射 (top launch) による ECCD 実験を報告した。EC 波のレイは EC 共鳴半径にほぼ平行で、かつ大きなトロイダル角を有する。局所性は悪いが、加速電子を捕捉されにくくし、かつ大きなドップラーシフトで高エネルギーの電子に共鳴することで高い電流駆動効率が期待される。最適な条件では、弱磁場側からの入射 (outside launch) の 2 倍以上の電流駆動効率を達成した。

R. Hager 氏 (PPPL) は、DIII-D における RMP 印加時

の H モードの境界輸送障壁について XGC コードを用いた中性粒子を含むジャイロ運動論 total-f シミュレーションを行い、TEM による静電乱流により、実験で観測されている電子熱輸送の増大を伴わない粒子輸送の増大が再現されることを示した。

境界層プラズマにおける乱流のシミュレーションについて、A. Hakim 氏 (PPPL) から full-f ジャイロ運動論コード (Gkeyll)、C. Beadle 氏 (スイスプラズマセンター) から流体コード (GBS) の結果の報告があった。乱流シミュレーションが境界層プラズマへも適用されるようになってきたとの印象を受けた。

ステラレータについての発表は 1 つのセッションにまとめられて行われた。

居田克巳氏 (核融合科学研究所) は LHD における荷電交換分光計測から、低密度プラズマでは軽水素イオン密度と重水素イオン密度の径方向分布が異なり、高密度プラズマでは両者が一致することを示し、それらのプラズマにおける支配的な不安定性 (ITG モードあるいは TEM) との関係を議論した。

S. Bozhentkov 氏 (マックスプランクプラズマ物理研究所) は、Wendelstein 7-X におけるイオン熱輸送について報告した。同装置は新古典輸送を小さくするように最適化されているが、イオン温度は概ね stiff でありペレット入射直後の密度勾配が大きいときのみに密度揺動の低減とともに 3 keV を超える高いイオン温度が達成されることから、異常輸送が支配的でありそれを抑制することが重要と強調した。

全体を通して、Alcator C-MOD が 2016 年にシャットダウンし、NSTX-U も 2017 年から運転していないということもあり、実験関係では DIII-D の比重が従来にも増して大きくなっている印象を受けた。また、GA には中堅以上の研究者が多いという印象を持っていたが、米国の国内会議ということもあって今回の会議では GA 所属の若手の研究者の発表が多く認識を新たにした。

(藤田)

(原稿受付：2019 年 12 月 5 日)