



インフォメーション

■会議報告

59th Annual Meeting of the American Physical Society Division of Plasma Physics

二谷辰平 (Universitat Politècnica de Catalunya /
Barcelona Supercomputing Center)
森高外征雄 (核融合科学研究所)
藤岡慎介 (大阪大学レーザー科学研究所)

本会議は2017年10月23日(月)から10月27日(金)の間、ミルウォーキー市にあるウィスコンシンセンターにて開催された。レビュー講演が4件、招待講演が全分野含め93件(その内、本会議報告に関連する分野では、プラズマ基礎: 18件、磁場閉じ込め核融合: 35件、慣性閉じ込めプラズマ・高エネルギー密度科学: 25件であった)、そしてチュートリアルが4件あった。正式なアナウンスはなかったと思うが、参加者数は1000名近いと見積もられる。ミルウォーキーはシカゴからAMTRAKで1時間半のところにある、ウィスコンシン州の町である。「ミュンヘン・サッポロ・ミルウォーキー」というキャッチフレーズがあるほど、日本ではビールの産地として有名である。確かに、ビール醸造所がたくさんあり、ビール工場見学ツアーを企画している醸造所がたくさんあった。また、酪農も盛んであり、ウィスコンシンチーズを称するチーズがたくさん店に並べられているのが印象的であった。チーズフライを食べながら飲むミルウォーキービールは絶品であり、寒いミルウォーキーにおいて体温調節に励むには最適なもので、来られる方は是非お試し下さい。

1. プラズマ基礎

プラズマ基礎物理分野では、プラズマ乱流や波動、粒子加速や磁気リコネクションといった基礎過程に対応したセッションに加えて、タイムリーな2つのテーマに関するレビュー/チュートリアル講演とミニカンファレンスが開催された。

まず、チュートリアル講演“Classical and Quantum Approaches to Extreme Laser-Plasma Physics”(M. Marklund氏, チャルマース工科大学)では、近年建設が進んでいるペタワット級レーザーの高強度電磁場中で電子・陽電子対生成をはじめとした量子効果が卓越してくることが示され、古典物理を超えた極限プラズマの物理が今後のレーザープラズマ実験で開拓される可能性について議論された。実験に先立ち、UCLAとリスボン大学を中心に開発されているPICコード“OSIRIS”に高強度場中の量子過程の導入が進められていることが報告され(L. Silva氏, リスボン大学), Extreme Light Infrastructure (ELI)での実験を想定したシミュレーション研究などにも応用されていた。

もう一つは、宇宙プラズマ観測と地上プラズマ実験との連携に関するレビュー講演“Bringing Space Down to

Earth: Exploring the Physics of Space Plasmas in the Laboratory”(G. Howes氏, アイオワ大学)である。これら2つのテーマに関連したミニカンファレンスが午前・午後を通して開催され(“Mini-Conference on Laser-Matter Interactions: The Next Generation”および“Mini-Conference on Bridging the Divide Between Space and Laboratory Plasma Physics”), 話題の豊富さを物語っていた。観測ではNASAが主導するMagnetospheric Multi-Scale mission (MMS)に関する発表が目立っていた。MMSでは4機からなる観測衛星群を使った高解像度の磁気圏観測が可能になっており、これに関連して磁気リコネクションの電子散逸領域の構造やその近傍で観測された電子加熱とwhistler波を再現した実験・シミュレーション研究が、プリンストンプラズマ物理研究所(PPPL)の実験グループやロスアラモス国立研究所とウィスコンシン大学の理論グループから発表されていた。また、ウィスコンシン大学の“Terrestrial Reconnection Experiment (TREX)”では磁気圏界面を想定した非対称リコネクションの実験、PPPLの“Magnetic Reconnection Experiment (MRX)”では太陽彩層を想定した部分電離プラズマによる実験が報告されるなど、基礎的なリコネクション現象の再現を目指した実験から、具体的な宇宙プラズマ環境を想定した実験へと進んできている印象であった。

その他、印象に残った発表として“New Insights into Kinetic Plasma Turbulence via Model Comparisons”(F. Jenko氏, カルフォルニア大学)では、同一のOrszag-Tang vortexを初期条件としたシミュレーションモデル間比較を行っていた。同一条件下でのモデル間比較は、磁気リコネクションに関する“GEM challenge”(MHD, Hall MHD, Hybrid PIC (HK), Full PIC (FK)の比較)があるが、ここではHKとFKに加えてジャイロ運動論モデル(GK)が加わっている点に特徴がある。GKではHKとは異なる近似手法(ジャイロオーダリング)に基づいて電子とイオンのダイナミクスを扱っており、両者を比較することによって現象を支配する運動論効果をさらに限定することができる。時間発展の結果として得られる乱流スペクトルを比較すると、イオン慣性長以上の空間スケールではGKがFK/HKと異なり、またイオン慣性長以下のスケールではHKが他のモデルと異なるという結果が得られた。この違いは、それぞれ速い磁気音波がGKで記述されないこと、HKに電子ランダウ減衰が含まれない点に起因すると解釈された。また後者の空間スケールでは運動論的アルベン波が乱流を駆動するため、GKでもFKとほぼ同じ結果が得られるとしている。ジャイロ運動論シミュレーションは磁場閉じ込めプラズマ中の乱流輸送の研究に用いられることが多かったが、近年プラズマ基礎物理への応用も進んできており、今後の展開に期待したい。

(森高)

2. 磁場閉じ込め核融合

本会議は、ヨーロッパを拠点にしている二谷にとって、

初めての APS であった。筆者が定期的に参加している European Physical Society (EPS) とは違った雰囲気が印象的であったので、その点を少し触れてみたいと思う。当然のことながら、American Physical Society (APS) 会議にはアメリカからの参加者がとても多く、EPS よりもずっと大規模な会議である。そして、慣性核融合および低温プラズマ関連の研究発表がとても多く、さらに民間企業、例えば Tri Alpha Energy (TAE) など、からも多数参加があった。特に TAE については、Field Reversed Configuration (磁場反転配位) 閉じ込めプラズマを研究開発している企業であり、多くのポスター発表が行われた。核融合研究において、企業からの精力的な貢献はとても重要である。

会議初日、アメリカの会議らしく、午前中に DIII-D tokamak セッション、そして午後に Alcator C-Mod セッションが行われた。DIII-D tokamak セッションでは最初にローレンス・リバモア国立研究所の M. Fenstermacher 氏が最近の DIII-D 実験の研究の概要を紹介し、プラズマの形がどのように RMP ELM suppression に寄与するかを示した。次いで、テキサス大学オースティン校の M.E. Austin 氏が DIII-D における負三角比率形 (Negative triangularity shape) プラズマにおいて、規格化半径 0.7 の外側での周辺プラズマにおける乱流レベルが 20% 低減されたことを示した。本セッションにおいては、RMP ELM suppression 関係の発表が多かったのが印象的であった。

火曜日は General Atomics 社の P. Snyder 氏が、核融合プラズマにおけるペデスタル領域とよばれる、周辺プラズマ 0.4-5cm ほどの領域における物理研究の進展を紹介した。この領域は、ドリフト軌道、乱流、プラズマ平衡などが相互作用し、とても複雑な物理の理解を必要とする。本招待講演では Gyrokinetic, Neoclassical, MHD などのアプローチによるペデスタル領域の理解の進展、また EPED という、H-mode でのペデスタルの予測モデルの妥当性が示された。

水曜日の午前は、ディスラプションと高エネルギー粒子セッションが行われた。CEA の C. Reux 氏が、プラズマのディスラプション時に起こる逃走電子についての最近の実験結果についての考察、そしてプラズマとディスラプション緩和 (Disruption mitigation) のための Massive gas 注入法の相互作用のモデルにより、プラズマパラメータとディスラプション緩和の効率性を比較した。個人的に、Disruption mitigation の研究発表が年々増えているという印象を受けた。水曜日の午後は ITER 関連研究のセッションが行われた。このセッションでも、まず口頭発表をしたのはオークリッジ国立研究所の J. L. Herfindal 氏、そして ITER 機構の R. Sweeney 氏が、ITER における Disruption mitigation 研究の成果を報告した。二谷は、この ITER セッションで、ITER プラズマにおけるペレット誘起 ELM に関する非線形 MHD シミュレーションの研究を報告した。二谷の用いる非線形 MHD コードは、JOREK という、G. Huijsmans 氏によってヨーロッパで開発されたコードである。今年の EPS 会議では JOREK による研究発表がたくさんあったが、アメリカでは、MHD シミュレ

ションは M3D-C1, NIMROD, BOUT++ などが主流となっているらしい。今回の APS 会議では、JOREK に関する研究発表は二谷一人だけであったので、若干、アウェーであった。しかし、アメリカの MHD コードの研究者たちが発表後に近づいてきて、有意義な議論ができたのは幸いであった。またペレット入射は、ELM Control だけでなく、プラズマの燃料供給や Shattered pellet での Disruption mitigation にも用いられるので、それらの分野の研究者たちからの注目も集めることができた。水曜日のポスターセッションにおいて、ローレンス・リバモア国立研究所の Y. M. Wang 氏と X. Q. Xu 氏が、EAST トカマクにおけるリチウムペレットによる ELM mitigation 研究を報告した。両氏は BOUT++ にペレットの中性ガス遮蔽モデルを導入し、その進展報告を行った。同じように、オークリッジ国立研究所の S. J. Diem 氏が M3D-C1 でのペレットモデルの初期段階として、密度揺動を加えてからの線形 MHD シミュレーション結果を報告した。同分野の研究の進展をみるのはうれしいことであると同時に、自分自身も精力的に研究に勤しむよう励まされる。ペレット関連以外の研究に関しても報告する。EPFL の O. Février 氏がダイバータ領域でのプラズマデタッチメント (Plasma detachment) とプラズマ圧力の低減の関係を TCV 実験より示した。この研究により、ITER などのプラズマ運転におけるダイバータ板への負荷の軽減が期待される。

最後に、学生時代を共にヨーロッパで過ごし、現在はアメリカでポストを持っている友人たちに会うことができた。それら友人たちと共にミルウォーキーグルメを堪能しながら、ヨーロッパとアメリカの研究の進め方の違い、そして苦労や楽しみなどに関してのヨーロッパとアメリカの生活や感覚の違いなどを話し合う機会が持てたことも、個人的には本会議での収穫の一つであった。

(二谷)

3. 慣性閉じ込めプラズマ・高エネルギー密度科学

アメリカでは慣性核融合及び高エネルギー密度科学研究の発表が半数近くを占めており、APS に参加しなければ、当該分野の最新動向には追いつけないという感がある。また、これらの研究の多くは、国立研究所やロチェスター大学 LLE など、大きな組織でプロジェクト的に行われているため、数年前は活発に発表されていたテーマ (例えば、polar direct drive や shock ignition) が、ある時を境に途端に発表されなくなるなど、アメリカンでダイナミックな変化を体感出来るのも楽しみの一つである。

アメリカにおける慣性核融合研究は3つに分類されている。つまり、レーザー間接照射型 (Laser Indirect Drive: LID)、レーザー直接照射型 (Laser Direct Drive: LDD)、そして最後が日本語に訳し難い磁化ライナー型 (Magnetized Liner Inertial Fusion: MagLIF) である。National Nuclear Security Administration (NNSA) は、ローレンス・リバモア研究所、ロスアラモス研究所、ロチェスター大学レーザーエネルギー学研究所、サンディア研究所が中心となり、3つの方式で、核融合点火への道筋を

明らかにすることを求めている。各研究所がそれぞれの方式で競いあうだけでなく、レーザープラズマ相互作用、計測技術のような共通課題については、大学も巻き込みながら、協力して研究を進めて行くことが求められているのが興味深い。

レーザー間接照射においては、燃料爆縮における低次モードの非一様性が問題になっている。爆縮後の燃料の形状が、パンケーキ型又はラグビーボール型になるのが、低次モードの非一様性である。この非一様性は、燃料表面に照射されるX線の輝度分布に起因する。レーザー間接照射では、ホーラムと呼ばれる金製の円筒の中に核融合燃料シェルを設置し、円筒の内面にレーザーを照射し、発生したX線で「間接的に」燃料表面を加熱し、燃料シェルを爆縮する。ホーラムからのプラズマの膨脹を抑えるために、低密度なガスがホーラム内に封入されているが、低密度なガスがプラズマとなり、低密度で長スケールのプラズマ中をレーザー光が伝播することによって引き起こされるレーザープラズマ不安定性がレーザーエネルギーの損失や高速電子の発生を引き起こす。一方、ガス密度を下げると、ホーラム内で金プラズマが大きく膨脹し、膨脹したプラズマがレーザー光の一部を遮光することで、ホーラムの中央部に届くレーザーエネルギーが減ることが観測されており、ホーラムサイズとガス密度の最適化が行われている。

重水素-三重水素で構成された核融合燃料を取り囲み、X線によって直接の加熱を受けるアブレター材料の依存性について、プラスチック、高密度炭素、ベリリウムが様々な観点でテストされている。興味を引いたのは、各種アブレターを通過後の衝撃波面の均一性を二次元の速度干渉計(2D-VISAR)で計測した結果である。プラスチックでは非常に均一な衝撃波面が形成されているのに対して、高密度炭素やベリリウムでは、それぞれの粒塊のサイズに起因すると考えられるナノからミクロの擾乱が生じている。アブレター選択において極めて示唆に富む結果である。核融合燃料を支えかつ、アブレターの内側に核融合燃料を導入するためのマイクロ・チューブが不安定性の種になることは以前から知られて

いたが、更にマイクロ・チューブのX線による影が不安定性の種になっていることも報告された。

レーザー直接照射においては、1次元様の爆縮実験結果と1次元の流体シミュレーションの結果の組み合わせによる、実験条件の最適化に関する講演が興味深かった。1次元様の爆縮とは、シェルを強い衝撃波で予備加熱することにより、流体力学的不安定性の成長を抑えた、均一性の高い爆縮のことである。長年精力的に開発されてきているシミュレーションであるが、含まれていない又は正確にモデル化出来ていない物理現象はまだ多く、実験結果を完全に再現・予測することは出来ない。しかしながら、詳細な関連要素物理を含む1次元シミュレーションの入力(レーザー強度、シェルサイズ等)及び出力(温度、密度、圧力、速度、核融合中性子数等)と1次元様爆縮の実験結果(温度、密度、圧力、速度、核融合中性子数等)の間には、何らかの相関があるという予測は成り立つ。その相関を見つけ出し、最適な実験条件を明らかにしたという研究成果である。例えば実験で得られた密度とシミュレーションの密度の絶対値は一致しないし、比例関係にも無いが、そこにシミュレーションの入出力パラメーターを組み合わせることで、広い範囲で比例関係を見つけ出した。その上で、密度が最大になる条件を予測し実験で確認することに成功している。限られたショット数で最適値に辿り付くための手法として興味深い。

高エネルギー密度科学に関しては、アメリカの大学から多数の発表があった。超高圧力下における物質の硬さが流体力学的不安定性に与える影響を定量的調べた結果、外部磁場を印加したフォーム中での電離波面の伝播に関する実験、ナノ構造ターゲットに高強度レーザーを照射することで、今日までで最も効率良く中性子を発生出来たという実験結果など、巨大レーザーから小型レーザーまでを活用した幅広い新しい研究が紹介された。日本からは外部磁場を用いた高速点火核融合実験とシミュレーションの成果が招待講演として発表され評価されたことを最後に付け加えたい。

(藤岡)

(原稿受付：2017年11月16日)



あいにく雨天続きで、風も強く、寒かったミルウォーキーの町並み。