



■会議報告

第54回アメリカ物理学会プラズマ分科会 (APS-DPP) 年会

核融合科学研究所 吉村信次, 佐竹真介
広島大学 城崎知至

2012年10月29日から11月2日の5日間、米国ロードアイランド州プロビデンスのロードアイランドコンベンションセンターにおいて、第54回アメリカ物理学会プラズマ分科会年会が開催された。プロビデンスは、米国北東部のニューイングランド地方にあるロードアイランド州（面積は滋賀県と同程度の全米50州の中で最も小さな州）の州都で、ボストンから南西へ車で1時間の位置にある。

本会議では、磁場閉じ込め核融合、レーザー核融合、基礎プラズマ、プラズマ応用、宇宙プラズマといった非常に広範囲なプラズマ関連のトピックスを扱う。今回の発表件数は約1750件であった。内訳は約100件の招待講演、約550件の口頭発表、約1100件のポスター発表となっている。これだけ多くの発表があるため、毎朝8時からのレビュー講演およびマクスウェル賞受賞講演を除くと、6～8セッションが常に同時進行することになる。したがって、毎朝のレビュー講演でプラズマ分野全体の動向を確認しつつ、各自の研究分野のオーラルセッションを聴き、関心のあるポスターを見つければ広いポスター会場に行き行って議論する、といったスタイルで参加することになる。ポスター会場を歩きながら目に留まった発表を見ることも楽しいのだが、あまり効率的ではない。APSから会議専用のスマートフォン用アプリが提供されており、目当ての発表を探すのに役立った。

今年度のレビュー講演は、発見から100年経った宇宙線のエネルギースペクトルと加速現象、磁場核融合炉における周辺プラズマと壁との相互作用の役割、米国国立点火施設 (NIF) におけるレーザー核融合研究の進展、磁場閉じ込めプラズマにおける乱流の4つであった。本会議では毎年、プラズマ物理分野に大きな貢献をした研究者に対してジェームズ・クラーク・マクスウェル賞が贈られるのだが、今年度は、運動論的アルヴェン波の発見に代表される多くのプラズマ理論への貢献に対して、カリフォルニア大学アーバイン校のLiu Chen教授が受賞し、「シアアルヴェン波の非線形物理について」と題した受賞記念講演を行った。

大型ハリケーンSandyの接近に伴う悪天候により講演者が出席できないケースもあったが、レビュー講演や招待講演についてはSkypeを用いるなど工夫した運営が行われた。会議前半は確かに風雨が強かったが、会議場周辺では大きな被害はなかったようだ。なお、PDF形式のアブストラクト集がAPSのウェブサイトで公開されている (http://flux.aps.org/meetings/YR12/DPP12/all_DPP12.pdf)。参加者以外も閲覧可能であるので、是非ご参照下さい。

以下、「磁場閉じ込め核融合」、「レーザー核融合」、「基礎プラズマ」、それぞれの視点からの会議報告に続く。

(吉村信次)

磁場閉じ込め核融合

磁場閉じ込め核融合の分野に関しては、例年のように主要な実験装置ごとにまとめられた口頭セッション及びポスターセッション (Alcator C-mod, DIII-D, NSTX, ITER) と様々な物理テーマごとのセッション (MHD, ELM, RMP 実験, ジャイロ運動論, 乱流と輸送, など), その他プラズマ-壁相互作用, 計測, ダイバータやコイル設計等のセッションが並列して行われるために発表すべてを網羅することはできないが、筆者が聴講したコアプラズマセッションを中心にいくつか今回の会議において目立った話題を以下にまとめる。

まず、コアプラズマ乱流の研究に関しては、初日にJ. Candyによるジャイロ運動論シミュレーションを用いた微視的乱流研究と実験との比較に関するチュートリアルが、また最終日にG.R. McKeeによる磁場閉じ込めプラズマ中の乱流現象全般に関してよくまとめられたレビューが行われた。これら2つの発表の中で強調されたことは、微視的乱流のシミュレーション研究がコア領域では実験観測とまずまずの一致を見せるまで進展してきていることと、その一方で周辺領域においてはシミュレーションは乱流を過小評価する傾向にあり現実を再現できていないことである。また、Candyの発表では今後の課題として高ベータプラズマにおける乱流輸送を評価するために電磁的乱流シミュレーションが重要となることが指摘された。

周辺におけるプラズマ閉じ込めに関しては、ELMの実験およびシミュレーション研究、またRMPを用いたELM制御に関する話題が多くあり、その中でBOUT++という流体コードをベースにした研究発表が特に目を引いた。BOUT++が流体計算の枠組みを与え、ユーザが1流体、2流体、drift-MHD等の流体モデルをその中に組み込んで物理現象の説明を試みるというスタイルが多くの研究機関で進められている。ELMのシミュレーション研究に関してもジャイロ運動論と同様、実験観測との比較を通じた検証が進められており、単なるモデル計算から定量的評価へとこの数年で大きく動いている印象を受けた。ただしELMとその抑制に関する研究は百家争鳴の感があり、統一見解的な理解には未だ至っていない印象であった。ステラレータなど非軸対称配位に関する研究発表は本会議では少数派ではあったが、最近のトカマクにおけるRMP実験の隆盛を反映して3次元磁場平衡計算やプラズマ周辺からの磁気計測を用いた3次元平衡再構築に関する研究、また

摂動磁場がプラズマ回転や閉じ込めに与える影響に関する発表が多くみられた。

非軸対称プラズマに関する優れた研究発表として、A. Briesemeister による HSX における詳細なフロー計測と新古典輸送計算との比較研究を取り上げる。磁気面上でのフローは最も新古典粘性の小さくなる方向に流れることが理論的に示唆されているが、準ヘリカル対称性を持つ HSX において、粘性が最小となる準対称性の方向へモーメントム入力なしに大きなフローが生じること、またその観測値が新古典計算とよく一致することが示された。その際、新古典輸送計算におけるモーメントム保存則を正しく取り扱うことが実験観測を再現するために重要であることが示された。

ダイバータ熱負荷やスパッタリング、リサイクリング率の低減に関する発表も ITER や DEMO を見据えた重要なテーマの一つとして多くみられたが、特に NSTX と LTX 装置における Li コーティングダイバータに関する研究発表が目立った。Li コーティング実験で ELM も抑制されることや、Li のコアへの蓄積がほとんどないことなど数々の良好な結果が示されたが、一方でカーボン不純物のコアへの蓄積が増える懸念が輸送シミュレーションによって指摘されていた。

(佐竹真介)

レーザー核融合

レーザー核融合関連での最大の関心は、米国リバモア研の国立点火施設 (NIF) で進められていた点火キャンペーン実験の結果と現状、今後の展開であった。会議前に目標であった点火実証を達成することなくキャンペーン期限 (9月30日) を迎え、直前の IAEA 核融合エネルギー会議でもその概要の報告があったとのことであるが、物理学学会と言うことで、より詳細な内容の報告が期待された。現状としては、DT 燃料での実験で核融合出力 2.5 kJ (中性子数で $\sim 10^{15}$)、燃料面密度 $\rho R \sim 1.3 \text{ g/cm}^2$ が達成された。一方で、点火部の密度並びに圧力は目標値の $1/2 \sim 1/3$ で、点火の指標である ITFX 値 (=1 で点火) は 0.1 に留まっている。これは、シミュレーションに比べ爆縮におけるフォーラム内の輻射エネルギーが 15% 程度小さいこと、また、低次 (長波長; モード数 1~4 → 点火部形状の異方性) ならびに高次モード (短波長; モード数 ~ 百以上 → アプレータ層の高 Z 物質と DT 燃料の混合) の流体不安定性の成長が見積よりも大きいことが要因とのことである。今後、ターゲット表面の微小欠陥を取り除き、低次モードの計測、原因追及 (レーザープラズマ相互作用、原子過程等々) を行い、且つレーザー照射パターンやフォーラムの形状改良等を進め、パフォーマンスの向上を図っていくとのことである。一方で、点火の兆しも見え始めており、DT 反応から生成するアルファ粒子によるプラズマ自己加熱の寄与による中性子生成数の増大が観測されているとのことであった。点火キャンペーンは 9月30日をもって終了したが、今後は「点火をいつまでに」と期限を切ることなく、爆縮や点火等の物理研究に重点を置き、マシンタイムの占有率を下げつつ

も核融合研究は継続していくとのことである。

点火を目前として、これまでの爆縮中心の研究に加え、減速相から点火に至る過程に対する物理過程の詳細な解析結果の報告もあった。燃料シェルを抜け、中心部へと伝播する球心衝撃波の先端で電子が先行し、これによって電場が立ち、ジュール加熱が起きてエントロピーが増大すること、この電場により燃料の重水素と三重水素の伝播速度に差が出て (重水素の方が早い)、結果として衝撃波収束時の点火部温度を低下させることや、点火部サイズが小さい場合に点火部のイオンの分布関数の高温テイル部が周辺の低温主燃料部に輸送される結果、分布関数が Knudsen 分布となり、反応率が低下し、点火条件が厳しくなる可能性などが報告された。

また、米国にある複数の爆縮コード間のベンチマークや、新しい物理モデルの導入 (多次元コードへの非局所電子熱輸送やレーザービーム間のエネルギー輸送等) が行われ、実験計測のみならず、シミュレーション精度の向上が急速に進められている印象を受けた。

高速点火方式や衝撃波点火方式、衝撃点火方式等の中心点火以外の代替方式については、シミュレーションならびに実験について各 1 セッションが設けられた。

高速点火については、数年前に比べると若干勢いが欠けてきている感じがした。中心点火と異なり、高速点火は爆縮コアに超高強度パルス照射することで極短時間に点火部を形成し核融合燃焼を実現する方式であり、爆縮に対する一様性の要求緩和と少ないドライバーエネルギーで燃焼が実現できることから中心点火の代替方式として期待されてきた。しかし、研究の進展に伴い、コア加熱を担う高速電子ビームが、発生時に非常に大きな発散角を有するため、加熱効率が低くなり、結果として加熱に要するドライバーエネルギーが大きくなり (MJ クラスになるとの報告もある)、高速点火の利点が危うくなっている。高速点火を実現するには、コア加熱の高効率化が不可欠であり、これには大きな発散角を有する電子ビームをコアまでガイドすることが不可欠となる。会議では、この方法として、自発磁場や外部磁場を用いる方法、並びにターゲット設計、基礎実験等が報告された。コーン付きシェルの爆縮特性については、ロチェスター大では OMEGA レーザーによる爆縮コアを、EP パルス用いた Cu K α バックライト法により計測し、面密度 $\rho R > 0.3 \text{ g/cm}^2$ が達成されていること、また 2 次元輻射流体コード DRACO によるシミュレーション結果とのよい一致が示された。一方、阪大ならびにロチェスター大における統合実験では、高速電子による明確なコア加熱を示す報告はなかったが、爆縮コア内の高速電子伝播特性評価を目的とした Cu ドープ燃料を用いた統合実験 (OMEGA-EP) の報告は、興味深いものであった。高速電子流による K α 線発光画像より、コア周辺部からの発光が見られるものの肝心の燃料中心付近では発光強度が弱くなっていた。いくつかの解釈 (高速電子がその領域を伝播していないのか、加熱が進んだ結果としてラインシフトが起きて観測に掛からなかったのか) が考えられるが、結論にはいたらず、今後の解析・追加実験が待たれる。また、

同実験条件下で、阪大レーザー研 LFEX レーザー並びにロチェスター大 OMEGA-EP レーザーを用いて行われた電子・陽電子対生成実験では、計測された電子・陽電子スペクトルの差異は、LFEX レーザーのプレパルスレベルの大きさを示唆するものであった。高効率加熱実験のためにはプレパルスレベルの大幅な改善が望まれる。

衝撃波点火については要求される高圧 (300 Gbar) を実証するために、シミュレーション並びに実験が進められており、特に問題となる高エネルギー電子の発生量 (10~15%)・エネルギー (30~50 keV) 等が評価され、米国ロチェスター大の OMEGA クラスの爆縮 ($\rho R \sim 0.3 \text{ g/cm}^2$) 程度では先行加熱による爆縮特性低下につながるが、点火クラス ($\rho R \sim 1.5 \text{ g/cm}^2$) では、コアサイズに比べ高速電子の飛程は十分に短く、衝撃波駆動を強めるプラスの効果も期待されることが報告された。また、2倍、3倍高調波を用いた場合の点火・燃焼特性評価も行われていた。衝撃点火では、NRL によるプラズマ高速加速実験の結果が報告され、これまでで最高の 1180 km/sec, 1 Gbar の加速実現が報告された。衝撃点火実証には、インパクトの更なる加速と高密度化が要求される。

レーザー核融合炉とは直接関係ないが、核融合技術の産業応用として、中性子画像計測に関連した発表もあった。これは、極薄のターゲットに超高強度レーザーを照射し、BOA (laser Break-Out Afterburner) 加速によりプロトン並びに重水素を 100 MeV 以上に加速してターゲット (Li や Be, Cu 等) に照射し、核反応により発生する中性子を用いた画像計測法である。実際にロスアラモス国立研究所の Trident レーザーを用いて前方方向に $>10^{10}$ 個/str の中性子を発生させ、実際に画像計測に適用した例が報告された。

(城崎知至)

基礎プラズマ

基礎プラズマ (Fundamental Plasma Physics) という名のセッションは、火曜日と木曜日の2回、計12件の招待講演から構成されていたが、その内容はビーム分光を使った電場計測、ダストプラズマ、電離層での電子加速、プラズマ波動の量子物理、直線装置におけるフロー制御と閉じ込めの関連、乱流・不安定性、磁気リコネクション等と非常に多岐に渡るものであった。もちろん、それぞれのテーマ単独のセッションや、スラスタ、大気圧放電、プラズマ医療などのプラズマ応用のセッションの他、地球磁気圏プ

ラズマにおける非線形効果、フラックスロープと3次元効果に関する2つのミニコンファレンスも行われた。これら全てを基礎プラズマ分野と考え、そのすべてを網羅することは不可能であるため、以下はごく一部の紹介となる。

基礎プラズマ分野では、PPPLのH.Jiによる「Laboratory Study of Fundamental Plasma Processes in Astrophysics: Progress and Opportunities」と題したチュートリアル講演が行われた。これは、基礎プラズマ実験から宇宙プラズマ物理へどういった貢献が可能かを考察したもので、その中でも特に(1)磁気リコネクション、(2)流れの安定性、(3)衝撃波の3つに関して、最近の進展が報告された。本講演は、「Workshop on Opportunities in Plasma Astrophysics」というコミュニティベースの研究会での議論に基づいている。そこではダイナモ、角運動量輸送、ダストプラズマ等を含めたより詳細な検討が行われており、プラズマ宇宙物理における10の主要な問題が提示されている。ご興味のある方はウェブサイト <http://w3.pppl.gov/conferences/2010/WOPA/index.html> をご参照下さい。ここから、132ページに及ぶ報告書のPDF版を入手することもできる。(APSのアブストラクトに掲載されているURLは現在では404エラーが出るようなので、上記URLからお探し下さい。)

ポスターセッションでは、UCSDの非中性プラズマグループの発表が目に残った。UCSDのグループといえば純電子プラズマのイメージを持っていたのだが、純イオンプラズマに関する研究も進展しているようであった。F. Andereggらによる「Electron Acoustic Waves in Pure Ion Plasmas」では、Penning-Malmbergトラップで閉じ込めたマグネシウムの純イオンプラズマ中のイオン分布関数をレーザー誘起蛍光法で計測しているのだが、静電波の位相速度付近での分布関数の平坦化がクリアに示されており、感銘を受けた。

他にも、R. Stenzel (所属は「Retired and Recalled」となっていた) や F.F. Chen といったベテランの研究者が、ただ発表するだけでなく、ポスターセッションでは学生・若手と活発に議論しているのが印象的であった。アンテナを広く張る必要のある基礎プラズマ研究者として、APS-DPP は非常に魅力的な会議であるといえる。さらに多くの基礎プラズマ研究者の参加が望まれる。

(吉村信次)

(原稿受付: 2012年12月3日)