

6 一般物理実験

6.1 高瀬研究室

高瀬研究室では、核融合発電の実現を目標に磁場閉じこめ型トーラスプラズマの研究を行っている。柏キャンパスに設置された TST-2 装置を用いた球状トカマクプラズマの基礎研究を行うと共に、量子科学技術研究開発機構の JT-60SA 装置、核融合科学研究所の LHD 装置、京都大学の LATE 装置、九州大学の QUEST 装置を対象とした共同研究を進めており、海外との共同研究も実施している。

6.1.1 TST-2 実験の概要

TST-2 は球状トカマク (ST) 型の装置であり、プラズマの主半径、小半径はおよそ 0.36, 0.23 m、電磁誘導、高周波動を用いた最大プラズマ電流はそれぞれ 120, 27 kA である。ST は高い規格化圧力を安定に維持できる方式として魅力的である。一方、通常トカマクプラズマの電流駆動に用いられるセンターソレノイドのための空間がないため、プラズマ電流の立ち上げ維持は解決すべき課題である。TST-2 では、主として低域混成波 (Lower-Hybrid Wave, LHW) を用いて高速電子を生成し、それにより電流を駆動する研究を行っている。2020 年度は、LHW による電流駆動の高効率化と、駆動機構の解明をすすめ、パワーバランスを明らかにすることに成功した。LHW で誘起される代表的な不安定性であるパラメトリック崩壊不安定性の詳細測定の結果、どのような条件で、どのような場所で発生するかを明らかにした。また、プラズマの状態を詳細に把握するための、硬 X 線計測、干渉計計測、非等方電子温度計測の開発を行った。電磁誘導を用いた場合、高電流高温プラズマの生成が可能であるが、内部磁気リコネクション現象が発生し、プラズマの性能を劣化させる。詳細な解析の結果、現象発生時に、異なる温度速度をもつ 2 成分が現れることがわかった。

6.1.2 高周波実験

静電結合型進行波アンテナを用いて、200 MHz の LHW 入射によるプラズマ電流駆動実験を行った。プラズマの外側と上側に設置された 2 台のアンテナを用いることで、外側、上側及び下側模擬の 3 種類の入射方法による電流駆動実験を行い、これまでに従来法の誘導放電に比べて 1/4 程度 (27 kA) のプラズマ電流を達成している。

磁気プローブによる波動計測

プラズマ周辺部を伝搬する LH 波とパラメトリック崩壊不安定性による崩壊波の大域的な構造を調べるために、高周波磁気プローブを新たに 20 チャンネル、プラズマを取り囲むように設置した。LH 波の外側入射、上側入射による電流駆動実験を行い、励起波に対して低周波側のサイドバンド (崩壊波) の割合と波の偏光分布を調べた。外側入射では真空容器内側で崩壊波の割合が高く (>200%)、相対的に外側では小さい (<100%) という結果が得られた。対照的に上側入射では、励起波に対する崩壊波の割合が内側で小さく、下側から外側の領域で >300% と大きな割合で存在していることがわかった。一方、LH 波の偏光分布は外側入射では下側で揺動磁場のポロイダル成分 B_{pol} が強く、内側ではトロイダル成分 B_{tor} が強く観測された。上側入射では内側上部のアンテナ近傍のプローブで B_{pol} が強く、内側下部に行くに従い B_{tor} が支配的になった (図 6.1.1)。

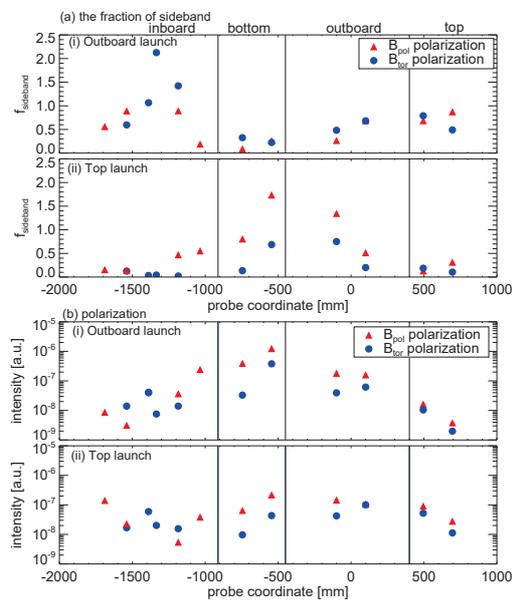


図 6.1.1: LH 波電流駆動実験における (i) 外側入射 (ii) 上側入射時の (a) 励起波に対する崩壊波の割合と (b) 励起波の偏光分布。

電子分布計測

TST-2 の LHW 電流駆動プラズマの電子密度は 10^{17} m^{-3} 台であり、トムソン散乱法による電子温度密度計測は容易ではない。そこで、積算回数を 20 まで増加させることで、周辺の低密度領域を精度よく計測することを試みた。その結果、同一磁気面上で電子温度に有意な差がある場合とない場合があることが観測された。これまでの既知の理論では、同一磁気面上での電子温度の差は説明できず、さらなる精

度の向上と測定誤差の吟味が今後の課題である。一方、周辺部の電子温度が中心部よりも高いことは明らかであり、これの原因について考察を進めた。典型的な温度は、周辺部：86 eV 程度、中心部：36 eV 程度であり、典型的な密度は $1.1 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ である。これまでの理論等から周辺部で LHW により高速電子が生成され、高速電子とバルク電子の衝突により、周辺部の電子が加熱されると考えられ、加熱パワーは 10 kW 程度（ただし、ファクター程度の不確かさがある）と予想されている。この加熱パワーが温度勾配と面積に比例して、周辺部の外側と内側、すなわち中心部側へ分配されるとすると、中心部加熱パワーは 2.8 kW となる。定常状態ではこれに等しい冷却パワーが存在しなければならない。中心部電子の冷却機構として (1) 中性粒子のイオン化 (2) 放射を考え、概算したところ、(1) のイオン化の寄与が大きく、パワーは 0.2 kW 程度であった。理論の精度や仮定を考慮するとイオン化で実験結果を説明できる可能性がある。

高周波誘起輸送モデル

プラズマ中の電子は、LHW の電場で加速減速を受けるが、これは、速度空間内の拡散と見なすことができる。拡散で生成された高速電子は、イオン、電子、中性粒子との衝突により減速される。高速電子の磁力線に平行方向の速度が支配的であり、垂直方向の速度は無視できるという近似では、上記の速度空間内の加速減速と実空間での輸送がほぼ一対一に対応付けられる。これは、高周波励起輸送と呼ばれる現象である。実空間内で輸送された高速電子はプラズマ形状を決めるリミターに衝突し、いわゆる Thick Target X-ray を生成する。さらに、この X 線が検出されるまでの過程をモデル化することで、観測と比較することが可能となった。図 6.1.2 は、このようにして予測された X 線のスペクトルと実測を二つのケースで比較したものであり、スペクトル形状が再現されていることがわかる。このことは、モデルが定性的に正しいことを示しており、高速電子の振る舞いの本質を理解できたことを意味する。解析の結果、LHW で維持されたプラズマ中の主なパワー損失は、加速された電子のリミターへの衝突であり、その過程で電流を駆動しつつ、バルク電子やイオンを加熱することがわかった。

6.1.3 OH 実験

内部磁気再結合現象

球状トカマクに特有の MHD 不安定性である内部磁気再結合 (Internal Reconnection Event, IRE) における、イオン温度、イオン流速をイオンドップラー分光法を用いて測定した。通常、イオンはマクスウェル分布を示し、ある発光線の分光スペクトルは、1 成分のマクスウェル分布で表され、フィットもよいが IRE 時にはフィッティングの残差 χ^2 乗が他の時間帯

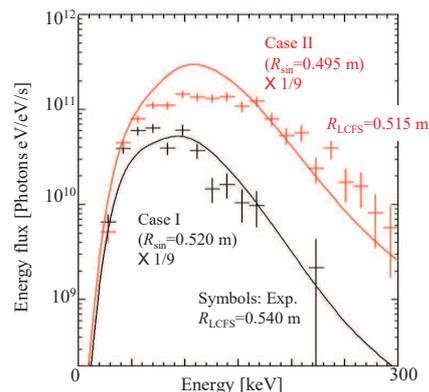


図 6.1.2: モデルで予測した X 線スペクトルと計測した X 線スペクトル。プラズマの大きさの異なる二つのケースについて示した。なお、モデルの予測値は絶対値を 1/9 倍して示してある。

に比べて悪化することが確認された。そのため、IRE 時の測定結果に対し、複数成分のマクスウェル分布によりフィットを行った。その結果 χ^2 乗が改善することがわかり、また交差検証により、2 成分マクスウェル分布のモデルのほうがより妥当であるという結果を得た。フィットの結果はプラズマ中に低温 (<100 eV) と高温 (~200 eV) の異なるフロー速度の成分が同時刻に存在することを示し、IRE 以前から存在した低温成分と IRE によって新たに生成された高温成分が見えていると解釈できる。

6.1.4 計測器の開発

トムソン散乱計測

電子温度の異方性を観測するため、ダブルパストムソン散乱計測系の開発を行なった。図 6.1.3 は光学系の模式図である。終端鏡 (Endmost mirror) の傾きが系全体のアラインメントにとって重要であることがわかった。光路は計測精度を最大化すると同時に、反射光による YAG レーザー損傷のリスクを最小化するように最適化した。最適化されたパラメータにおける光路に沿ったビーム系の計算値と計測値を図 6.1.4 に示す。

硬 X 線計測

LH プラズマからの制動放射硬 X 線計測において、信号処理回路の改良を行うことにより硬 X 線のパルス幅を一桁減少させ、1 ms オーダーの時間分解能での測定が可能となった。一方観測されている硬 X 線が壁に当たった電子からのものが支配的であるという予測があり、壁を見込まない視線での測定および

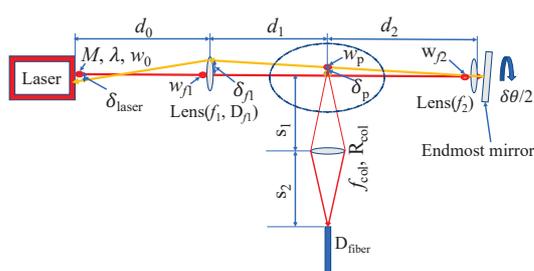


図 6.1.3: ダブルパストムソン散乱計測系の模式図。

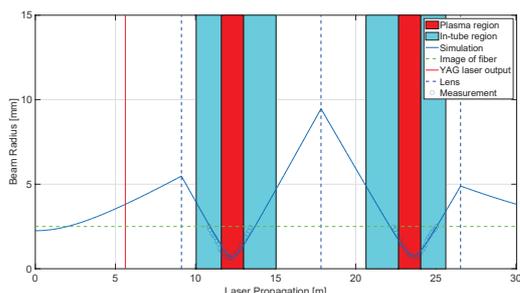


図 6.1.4: 最適化したビーム系の計算値と計測値。

ターゲット板の挿入実験により、予測を検証する準備を進めている。

干渉計による電子密度計測

複数視線で同時に電子密度測定を行うために垂直視線 50 GHz マイクロ波干渉計を、既存設備の老朽化のため径方向 104 GHz マイクロ波干渉計を新たに制作している。50 GHz 干渉計はヘテロダイン構成のマイクロ波回路と位相検出のための IQ 回路が組み上がり、導波管を配管すれば完成する状況にある。104 GHz 干渉計については、センタースタック (CS) に反射させて得られるマイクロ波のパワーが入射パワーよりも非常に小さくなるという既存の干渉計の問題点を解消するため、光学系を新たに設計している。プラズマの外側赤道面付近にホーンアンテナとミラーを一体化したホグホーンアンテナを設置して CS で集光し、CS にも平らなミラーを設置することで入射パワーの大部分を受信できるようにすることを目指す。

6.1.5 共同研究

QUEST におけるトムソン散乱計測

当研究室では、九州大学 QUEST グループとの共同研究で先進的トムソン散乱システムの開発を行っている。これまで、トムソン散乱システムの運用は我々だけで行ってきたが、2020 年度からは、先方の

人的協力を得て、共同運用体制の構築、稼働率向上を目指した。具体的には、先方の人材の教育、当研究室メンバーの遠隔実験参加の試験、省力化のための自動データ収集システムの作成を行った。また、省力化と精度向上のためにビームモニターの試験を行った。図 6.1.5 は、白黒アナログカメラによるビームモニター画像を示したもので、ミラーでのレーザーの散乱光が綺麗に観測されることがわかる。これにより十分な精度でビームの位置がモニターできることが確認された。



図 6.1.5: 白黒アナログカメラで撮影したレーザーモニター画面。中央の楕円が YAG レーザースポットを表す散乱光、左端の半月状の構造はミラーホルダー上の散乱光を表す。

JT-60SA における EC 補助オーミック立ち上げ

近年世界的に実験が開始されている、JT-60SA をはじめとする超伝導センターソレノイド (CS) を持つ装置では、生成できる周回電場が限られるため、プラズマの立ち上げが従来の常伝導 CS 装置よりも難しい。CS による立ち上げにおいて、ブレークダウンを開始するためにはポロイダル磁場を十分に広い領域で、長い時間にわたって 0 に近づける必要がある (ヌル磁場配位)。周回電場が低いほど精度の良いヌル磁場を長時間維持する必要があるが、電子サイクロトロン (EC) 波を立ち上げ時に補助的に照射することで、簡単にブレークダウンを開始できることが知られている。一方、EC 波による補助を用いる場合、垂直磁場をかけた方が立ち上げには適している可能性が近年実験的に示唆されている。2020 年度は無衝突と多衝突の 2 つの極限での近似モデルを新たに開発し、立ち上げの EC 電力と垂直磁場依存性を定性的に説明することができた。

EXL-50 における低域混成波入射系開発

中国 ENN 社の EXL-50 球状トカマク装置における LHW 電流駆動系の開発を行なった。従来とは異なるパラメータ領域で電流駆動が可能な波を励起す

るため、コルゲート表面を用いたアンテナを新たに設計・制作し、TST-2で試験した。200 MHzのLHWで駆動されるプラズマに、2.45 GHzのLHWを新型アンテナにより励起した。その結果、2.45 GHz入射時にX線放射強度が顕著に増加し、期待された電子加速が実際に起こっていることが確認できた。

<報文>

(原著論文)

- [1] J.H.P. Rice, N. Tsujii, Y. Takase, A. Ejiri, O. Watanabe, H. Yamazaki, Y. Peng, K. Iwasaki, Y. Aoi, Y. Ko, K. Matsuzaki and Y. Osawa: “Langmuir Probe Measurements of Scrape-Off Layer Conditions in RF-Driven Plasmas in TST-2,” *Plasma and Fusion Res.* **15**, 2402009 (2020).
 - [2] N. Tsujii, Y. Yoshida, Y. Takase, A. Ejiri, O. Watanabe, H. Yamazaki, Y. Peng, K. Iwasaki, Y. Aoi, Y. Ko, K. Matsuzaki, J.H.P. Rice and Y. Osawa: “Studies of a Lower-Hybrid Wave Driven Plasma Equilibrium with a Hybrid-MHD Model on the TST-2 Spherical Tokamak,” *Plasma Fusion Res.* **15**, 2402010 (2020).
 - [3] A. Ejiri, Y. Aoi, H. Yamazaki, N. Tsujii, Y. Takase, O. Watanabe, Y. Ko, J.H.P. Rice, Y. Peng, K. Iwasaki, K. Matsuzaki, Y. Osawa and Y. Yoshimura: “Development of a Compact Hard X-Ray Camera on the TST-2 Spherical Tokamak,” *Plasma Fusion Res.* **15**, 1202023 (2020).
 - [4] Y. Nagayama, A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, H. Nakanishi, M. Ohsuna, H. Tsuchiya and S. Yamaguchi: “Measurement of Electron Density Fluctuations Using O-Mode Microwave Imaging Reflectometry in a TST-2 Spherical Tokamak,” *Plasma Fusion Res.* **15**, 2402060 (2020).
 - [5] S. Mori, T. Shikama, K. Hanada, N. Yoneda, A.A. Kuzmin, M. Hasuo, H. Idei, T. Onchi, A. Ejiri, Y. Osawa, Y. Peng, K. Matsuzaki, S. Kado, K. Sawada, T. Ido, K. Nakamura, R. Ikezoe, Y. Nagashima, M. Hasegawa, K. Kuroda, A. Higashijima, T. Nagata and S. Shimabukuro: “Spectroscopic Measurement of Hydrogen Atom Density in a Plasma Produced with 28 GHz ECH in QUEST,” *Atoms* **8**, 44 (2020).
 - [6] T. Onchi, H. Idei, M. Fukuyama, D. Ogata, R. Ashida, T. Kariya, A. Ejiri, K. Matsuzaki, Y. Osawa, Y. Peng, S. Kojima, O. Watanabe, M. Hasegawa, K. Nakamura, K. Kuroda, R. Ikezoe, T. Ido, K. Hanada, N. Bertelli, M. Ono and A. Fukuyama: “Non-inductive plasma current ramp-up through oblique injection of harmonic electron cyclotron waves on the QUEST spherical tokamak,” *Phys. Plasmas* **28**, 022505 (2021).
 - [7] N. Yoneda, T. Shikama, K. Hanada, S. Mori, T. Onchi, K. Kuroda, M. Hasuo, A. Ejiri, K. Matsuzaki, Y. Osawa, Y. Peng, Y. Kawamata, S. Sakamoto, H. Ideib, T. Ido, K. Nakamura, Y. Nagashima, R. Ikezoe, M. Hasegawa, A. Higashijima, T. Nagata, S. Shimabukuro: “Toroidal flow measurements of impurity ions in QUEST plasmas using multiple viewing chords emission spectroscopy,” *Nuclear Materials and Energy* **26**, 100905 (2021).
 - [8] Y. Peng, A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, O. Watanabe, K. Iwasaki, Y. Ko, J.H.P. Rice, Y. Osawa, G. Yatomi, I. Yamada, T. Ido, Y. Nagashima and K. Kono: “Investigation on Double-Pass Configurations for Thomson Scattering Measurements,” *Plasma Fusion Res.* **16**, 1402027 (2021).
- (国内雑誌)
- [9] 高瀬雄一: 「TST-2におけるMHz帯電磁波による波動加熱実験」*J. Plasma Fusion Research* **96**, 655–659 (2020).
 - [10] 關良輔、辻井直人: 「TASK-WMやAORSAを用いた波動加熱シミュレーション」*J. Plasma Fusion Research* **96**, 669–673 (2020).
- (学位論文)
- [11] 大澤佑規: 「TST-2球状トカマク装置における周辺部電子温度密度計測」
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [12] A. Ejiri, H. Yamazaki, Y. Takase, N. Tsujii, K. Shinohara, O. Watanabe, Y. Yoshimura: “A Model for Lower Hybrid Wave Induced Transport on the TST-2 Spherical Tokamak,” 29th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research, Toki, Gifu, Japan (online), Oct. 27–30, 2020.
 - [13] Y. Peng, A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, O. Watanabe, K. Iwasaki, Y. Ko, J.H.P. Rice, Y. Osawa, G. Yatomi, I. Yamada, T. Ido, Y. Nagashima and K. Kono: “Theoretical Investigation on Double-Pass Configurations for the Thomson Scattering Measurements,” 29th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research, Toki, Gifu, Japan (online), Oct. 27–30, 2020.
 - [14] Y. Nagashima, K. Hanada, S. Kojima, H.O. ELSerafy, H. Zushi, K. Nakamura, M. Hasegawa, H. Idei, A. Fujisawa, A. Ejiri, Y. Takase, T. Ido, K. Kuroda, T. Onchi, R. Ikezoe, S. Kawasaki, T. Nagata and A. Higashijima: “Development of an electrode system for edge/scrape-off layer measurements during steady state tokamak operations in QUEST,” 29th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research, Toki, Gifu, Japan (online), Oct. 27–30, 2020.
 - [15] Y. Takase: “Survey of RF research on TST-2,” 9th Workshop on Plasma start-up and sustainment in spherical tokamak configuration by RF, online, Jan. 25–27, 2021.

- [16] A. Ejiri: “Electron temperature and density profile measurements by Thomson scattering systems on TST-2 and QUEST,” 9th Workshop on Plasma start-up and sustainment in spherical tokamak configuration by RF, online, Jan. 25–27, 2021.
- [17] N. Tsujii: “Electron cyclotron heating assisted Ohmic start-up in the trapped particle configuration on spherical tokamaks,” 9th Workshop on Plasma start-up and sustainment in spherical tokamak configuration by RF, online, Jan. 25–27, 2021.
- [18] A. Ejiri, H. Yamazaki, Y. Takase, N. Tsujii, K. Shinohara, O. Watanabe, Y. Yoshimura: “RF induced transport model for lower hybrid wave sustained TST-2 plasmas,” Korea-Japan Workshop on Physics and Technology of Heating and Current Drive, Feb. 25–26, 2021.
- [19] N. Tsujii, Y. Ko, Y. Takase, A. Ejiri, K. Shinohara, O. Watanabe, Y. Peng, K. Iwasaki, Y. Osawa, G. Yatomi and I. Yamada: “Electron cyclotron wave assisted Ohmic start-up in the trapped particle configuration in spherical tokamaks,” Feb. 25–26, 2021.
- [20] Y. Ko: “Polarization and PDI measurement using RF magnetic probes in TST-2 LH-driven plasma,” Feb. 25–26, 2021.
- (国内会議)
一般講演
- [21] 江尻晶: 「大学等における高温プラズマの研究」 Fusion2030 研究会 週イチ Zoom 研究会 (第4回), オンライン, 2020年6月24日.
- [22] 江尻晶, 菊池崇志, 三瓶明希夫, 浅井朋彦, 稲垣滋, 江原真司, 近藤創介, 片山一成, 森芳孝: 「大学等のアクティビティの現状」 Fusion2030 研究会第一回全体会議, オンライン, 2020年7月1日.
- [23] 江尻晶, TST-2 チーム: 「TST-2 球状トカマクこれまでの成果、今後の展望」 Fusion2030 研究会 週イチ Zoom 研究会 (第7回), オンライン, 2020年7月22日.
- [24] 辻井直人, 高瀬雄一, 江尻晶, 渡邊理, 山崎響, 彭翊, 岩崎光太郎, 高竜太, RICE James, 大澤佑規: 「TST-2 の最近の研究」 研究会「先進トカマク開発のための実験研究」, オンライン, 2020年9月29–30日.
- [25] 大澤佑規, 江尻晶, 彭翊, 弥富豪, 辻井直人, 高瀬雄一, 渡邊理, 岩崎光太郎, 高竜太, James Rice, 山田巖: 「TST-2 におけるトムソン散乱計測法を用いた低域混成波電流駆動プラズマの電子温度計測」 研究会「先進トカマク開発のための実験研究」, オンライン, 2020年9月29–30日.
- [26] 高竜太, 辻井直人, 高瀬雄一, 江尻晶, 渡邊理, 山崎響, James H.P. Rice, Peng Yi, 大澤佑規: 「TST-2 における EC アシスト低周回電場 OH プラズマ立ち上げの最適化」 研究会「先進トカマク開発のための実験研究」, オンライン, 2020年9月29–30日.
- [27] 高竜太, 辻井直人, 高瀬雄一, 江尻晶, 渡邊理, 山崎響, 岩崎光太郎, James H.P. Rice, Peng Yi, 大澤佑規, 若月琢馬, 吉田麻衣子, 浦野創: 「TST-2 球状トカマクにおける EC 波アシスト低誘導電場プラズマ立ち上げの最適化」 第37回プラズマ・核融合学会年会, オンライン, 2020年12月1–4日.
- [28] 辻井直人, 高瀬雄一, 江尻晶, 渡邊理, 彭翊, 岩崎光太郎, 高竜太, James Rice, 大澤佑規, 弥富豪, 山田巖: 「TST-2 における低域混成波駆動プラズマの電流分布計測のためのマイクロ波偏光計開発」 第37回プラズマ・核融合学会年会, オンライン, 2020年12月1–4日.
- [29] 弥富豪, 江尻晶, 高瀬雄一, 辻井直人, 渡邊理, 彭翊, 岩崎光太郎, 高竜太, James Rice, 大澤佑規, 山田巖: 「TST-2 における硬 X 線カメラ計測システムの信号処理回路の改良」 第37回プラズマ・核融合学会年会, オンライン, 2020年12月1–4日.
- [30] 大澤佑規, 江尻晶, Peng Yi, 弥富豪, 高瀬雄一, 辻井直人, 渡邊理, 山崎響, 岩崎光太郎, 高竜太, James H. P. Rice, 山田巖: 「TST-2 におけるトムソン散乱計測法を用いた低域混成波電流駆動プラズマの電子温度計測」, 第37回プラズマ・核融合学会年会, オンライン, 2020年12月1–4日.
- [31] 山田巖, 辻井直, 江尻晶, 高瀬雄一, 渡邊理, 岩崎光太郎, 彭翊, 高竜太, James Rice, 大澤佑規, 弥富豪: 「TST-2 における低域混成波駆動プラズマの電子密度計測」 第37回プラズマ・核融合学会年会, オンライン, 2020年12月1–4日.
- [32] 江尻晶, 山崎響, 高瀬雄一, 辻井直人, 篠原孝司, 渡邊理, 吉村泰夫: 「TST-2 球状トカマクにおける低域混成波誘起輸送モデル」 第37回プラズマ・核融合学会年会, オンライン, 2020年12月1–4日.
- [33] A. Ejiri, M. Hirata, S. Ichimura, R. Ikezoe, S. Kamio, M. Yoshikawa: “Fast visible light measurements for the study of RF waves in plasma,” 核融合エネルギーフォーラムプラズマ物理クラスター計測サブクラスター令和2年度第1回会合、核融合科学研究所 (オンライン) 2021年2月10日.
- [34] 江尻晶, 高瀬雄一, 辻井直人, 渡邊理, 篠原孝司: 「外部ソースを考慮した誘導予備電離の理論研究」 日本物理学会第76回年次大会, オンライン開催 2021年3月12–15日.
- [35] 辻井直人, 高瀬雄一, 江尻晶, 渡邊理, 篠原孝司, 彭翊, 岩崎光太郎, 高竜太, RICE James, 大澤佑規, 弥富豪, 山田巖: 「TST-2 球状トカマク装置の低域混成波駆動トカマクプラズマにおける高速電子のダイナミクス」 日本物理学会第76回年次大会, オンライン開催 2021年3月12–15日.
- [36] 弥富豪, 江尻晶, 高瀬雄一, 辻井直人, 篠原孝司, 渡邊理, 彭翊, 岩崎光太郎, 高竜太, 大澤佑規, 山田巖: 「TST-2 における硬 X 線測定とプラズマ電流の減衰時定数についての研究」 第23回 若手科学者によるプラズマ研究会, オンライン開催 2021年3月16–17日.
- [37] 山田巖, 辻井直人, 江尻晶, 高瀬雄一, 篠原孝司, 渡邊理, 岩崎光太郎, 彭翊, 高竜太, James Rice, 大澤佑規, 弥富豪: 「TST-2 における低域混成波駆動プラズマの

電子密度の振る舞い」第 23 回 若手科学者によるプラズマ研究会、オンライン開催 2021 年 3 月 16-17 日。

6.2 山本研究室

6.2.1 はじめに

【星・惑星系形成】

恒星および惑星系の形成は、宇宙における最も基本的な構造形成過程の 1 つであるとともに、我々の太陽系の起源、生命の起源に直結するテーマでもある。そのため、観測・理論両面から活発な研究が行われている。本研究室では、特に太陽系近傍における星・惑星系形成とそこでの物質進化を、電波観測によって研究している。

新しい星は、星間ガスが自己重力で収縮して形成される。星間ガスの集まり（星間雲）の中で最も密度が高いものが星間分子雲で、新しい恒星と惑星系が形成される現場である。星間分子雲の主成分は水素分子であるが、様々な原子・分子も僅かに存在している。これまでの研究で、それらの組成は星間分子雲の物理進化の歴史を克明に記憶していることがわかってきた。即ち、微量分子の組成から、現在の物理状態だけでなく、「過去」を辿ることができる。本研究室では、このような物質的視点を軸に、星・惑星系形成過程を多面的に研究している。

【なぜ電波か】

星間分子雲の温度はおよそ 10 K 程度である。この「宇宙の中でも最も低温の天体」は、最もエネルギーの低い電磁波である「電波」を主に放射する。しかも、電波は光などに比べて星間物質による吸収散乱を受けにくく、透過力が高い。そのため、星間分子雲の奥深くで起こる星形成の核心部分を見通すことができる。また、電波領域には原子・分子のスペクトル線が多数存在し、それらの観測で星間分子雲の運動や分子組成がわかる。

【ALMA (アルマ) による観測】

ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) は、日本、北米、欧州の共同で、チリの標高 5000 m のアタカマ高原に建設された、12 m アンテナ 54 台と 7 m アンテナ 12 台からなる巨大電波干渉計である。我々のグループはこれを積極的に活用し研究を進めている。ALMA はこれまでの観測装置よりも 2 桁高い感度と解像度を実現し、星・惑星系形成の理解を大いに進展させつつある。

6.2.2 星・惑星系形成

原始星円盤から原始惑星系円盤への物質進化の理解は、近年急速に進みつつある。その重要な結果の一つは、低質量星近傍の分子組成が天体ごとに顕著に違うことがわかった点である。その一つの典型は、

HCOOCH_3 などの大型飽和有機分子が原始星近傍の 100 AU 程度の領域に豊富に見られる天体で、ホットコリノ天体と呼ばれる（へびつかい座の IRAS16293-2422 など）。もう一つの典型は、炭素鎖分子などの不飽和有機分子が異常に豊富な天体（おうし座の L1527、おおかみ座の IRAS15398-3359）で、WCCC (Warm Carbon-Chain Chemistry) 天体と呼ばれる。このような分子組成の違いの原因は、母体となる分子雲の収縮時間の違いによると考えられ、星形成研究においても注目され始めている。

さらに重要なことは、このような分子組成の違いがどのように惑星系へ伝播されるかである。この点についても、ALMA を用いた本研究室の研究により理解が大きく進みつつある。角運動量を保ちつつ回転落下するガスは、遠心力バリア（近日点）より内側には入り込めないため、その近傍で後から落下するガスと衝突して弱い降着衝撃波が発生する。その様子が実際に ALMA で捉えられつつある。さらに遠心力バリア近傍を境として、ガスの分子組成が劇的に変化することが明らかになってきている。このことを利用すると、分子組成を特定の物理状態をハイライトする「マーカー」として利用できる。これらの成果は、原始惑星系円盤への物質進化を理解する上で非常に重要な一歩であり、これらの点を中心に、星・惑星系形成に関する幅広い研究を展開している。

星間分子雲から惑星系への物質進化

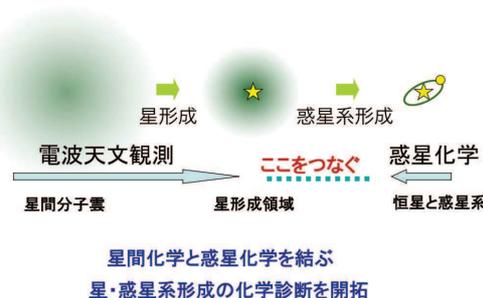


図 6.2.1: A schematic illustration of our goal

特に、2018 年に、本研究グループが中心（山本が PI）となり、仏、伊、独、米などの研究者と共同して提案していた、FAUST (Fifty AU Study of the chemistry in the disk/envelope system of Solar-like protostars) という ALMA 大型観測プログラムが採択され、観測が進行中である。FAUST は 13 個の太陽型原始星に対して、同一の感度、同一の実空間分解能 (50 au)、および同一の分子輝線で観測することにより、それらの物理構造と化学組成の特徴の全貌を明らかにしようとするものである。系統的に観測を遂行することにより、星・惑星系形成における物理・化学進化の全容を明らかにできると期待される。

ALMA による観測では、膨大な分子スペクトル線データが得られるが、これまではその中から適切な