

プラズマ量子プロセスユニット

PLASMA QUANTUM PROCESSES UNIT

令和7年度ユニット成果報告会
2026年6月16日

村上泉(ユニット長)、加藤太治、星健夫、木村直樹、鈴木千尋、瀬戸慧大(7/1~)、境健太郎、坂上裕之、舟場久芳、武藤貞嗣、森高外征雄、高橋花林(クロアポ)、田中のぞみ(クロアポ、2/1~)、山口弘悦(客員)、ENDRE TAKACS(客員、4/1~5/30)、GHANSHYAM PUROHIT(客員、5/12~6/27)、小西優祐(特任研究員)、BYUNGJUN KANG(特任研究員)、CHENXU WANG(特任研究員 10/1~12/31)、加藤雅敏

プログラム

- ・令和7年度研究成果概要(村上)
- ・特筆される成果
 - ・Endre Takacs, “Optical and EUV Measurements: NIFS CoBIT and Tokyo EBIT”
 - ・境健太郎, “100-joule lser as a probe of Thomson scattering in the Compact Helical Device”

令和7年度研究成果概要

- ユニットの研究目的、研究目標
- アカデミックプラン
- 令和7年度の特筆すべき成果
- 令和7年度に発表された成果

プラズマ量子プロセスユニット

研究 目的

- 量子プロセスの内在するプラズマ現象の解明と理論モデルの構築
- 核融合科学における課題の解決

研究 目標

- 量子プロセスを基盤としたプラズマ研究の高度化/学際化/国際連携

高度化

- 多価イオン分光/量子過程を基盤とした**プラズマ計測**の高度化
- プラズマ運動論への量子物理の包含、多価イオンを含む**運動論的輸送計算**の高精度化
- 原子分子過程とプラズマ・壁相互作用を含む**核融合炉周辺プラズマモデリング**
- 核融合炉材料ミクロ組織形成の**多階層連結モデリング**

相乗効果

学際的な研究テーマの課題から、新たな技術や理論の開発動機が生まれる。また、技術や理論の高度化の追求が、学際的に重要な発見につながる（セレンディピティ）。

学際化

- 原子分子データを用いた他分野との共同研究/**オープンデータ化**（データベース）による応用の促進
- **QEDを含む超相対論的プラズマダイナミクス**の研究、ならびにレーザーを用いた**実験室宇宙物理学の開拓**
- 先端計測むけデータ駆動科学や材料インフォマティクスの視点から、他ユニットとの連携や核融合以外の物理学分野との学際化を推進
- クォーク・グルーオンプラズマ研究を通じた**素粒子分野との学際化**

国際連携

令和7年度の特筆される成果

高度化

- CHDにおける電子速度分布関数計測のためのトムソン散乱計測の概念設計を行い、100Jレーザーを使用して約100倍の速度分解能が可能となることを示した（**境**ほか）

高度化・学際化

- 核融合プラズマ計測、X線天文学、先進光源開発など多様な応用分野で需要の高い多価イオン分光装置EBITを用いた精密な分光計測により、原子核半径を評価し、偶奇交互配置の崩れはないことを示した。（**Takacs, 木村**ほか）。

学際化

- LHDペレットアブレーションによるEr II発光の測定と遷移確率評価 (Priti ほか) ⇒キロノバのオパシティに用いられている理論データの精度評価

速度分布関数測定用トムソン散乱計測の概念設計

境 健太郎

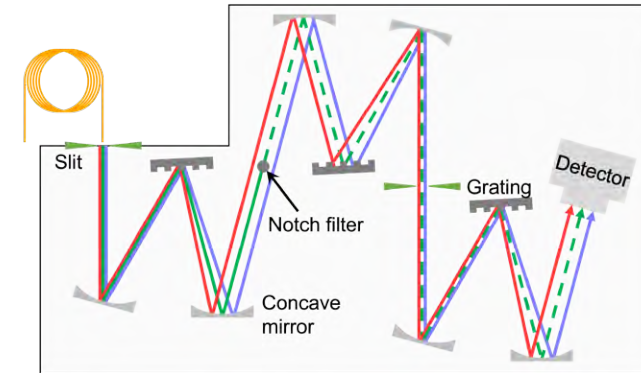
[1] K. Sakai et al., PPCF (2026), [2] K. Sakai et al., JINST (2026)

- CHDにおける電子速度分布関数計測のための、

1. トムソン散乱システムの概念設計
2. 非Maxwell型速度分布関数に対応した計測シミュレーションの開発

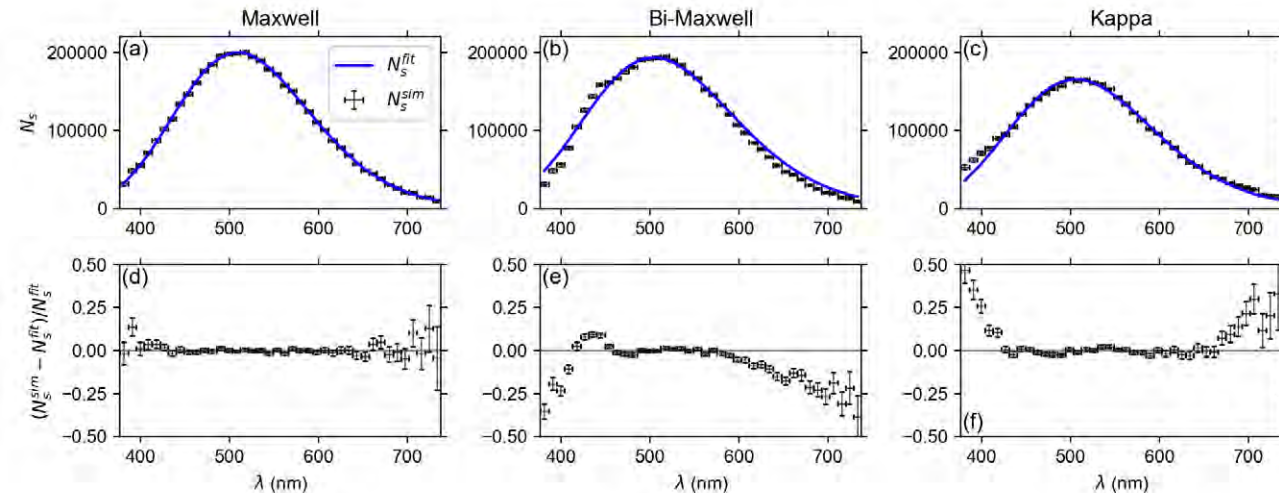
を行った。

- 100Jレーザーを使用することで、従来のトムソン散乱システムの精度を保ったまま、約100倍の速度分解能が可能になった。
- 100Jレーザーが導入されたので、実際に実験を行って電子速度分布関数の微細構造を計測していく。



100Jレーザー

× イメージング分光器



Real-time Thomson scattering diagnostics and data processing for plasma control on LHD

H. Funaba, I. Yamada, R. Yasuhara, Y. Morishita, N. Kenmochi, S. Murakami,
H. Nakanishi, J.H. Lee, M. Akimitsu, M. Yokoyama and M. Osakabe

Funaba et al., J. Instrum. 21 (2026) C04042

- 目的 : ASTI (Assimilation System for Toroidal plasma Integrated simulation) による LHD プラズマの制御のために、トムソン散乱による実時間の T_e, n_e の空間分布計測を行い、データ処理の遅れ時間を評価する。
- レーザパルス直後に 350チャンネル分のトムソン散乱信号が読み出される。これには LABCOM のデータストリーミングシステム RTRetrieve を用いる。1タイミング分のデータ処理と T_e, n_e 計算を行い、結果をASTIが動作するプラズマシミュレータへ送信する。
- 10Hz の繰り返しで実時間トムソン散乱計測が実施され、ASTI が読み込めるデータを送信した。図 1に示すように T_e, n_e 分布の精度はプラズマ放電後の解析と同等であった。図 2に示すヒストグラムから、 T_e, n_e の計算時間は約 23ms、レーザーパルスからの時間遅れは 100ms 以内であった。ASTI の動作は 300ms ごとなので、この遅れは許容範囲内である
- CHD でも実時間計測を行う。

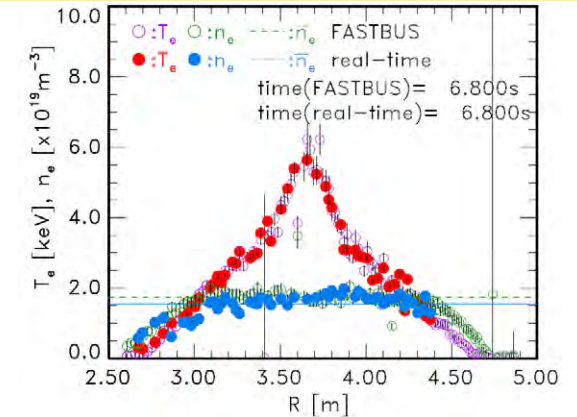


図 1. 実時間計測による T_e, n_e の空間分布。

FASTBUSはプラズマ放電後の解析による結果、real-time は 実時間計測による結果である。

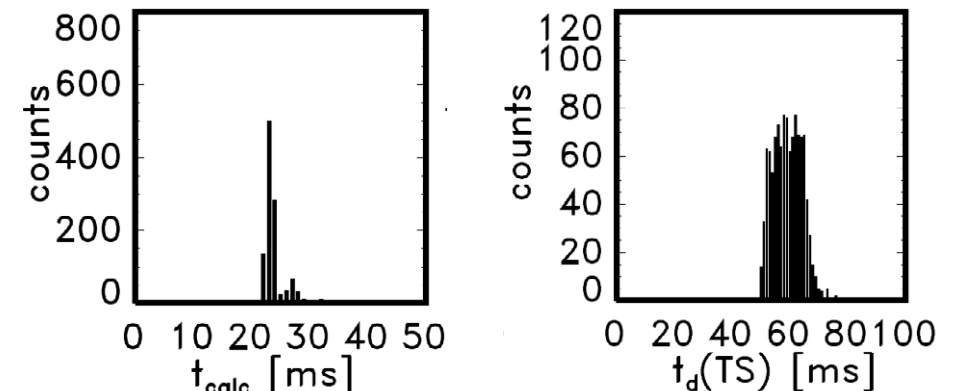


図 2. 処理に要する時間のヒストグラム。 t_{calc} は T_e, n_e の計算時間、 $t_d(\text{TS})$ はデータ読み出し、 T_e, n_e の計算、送信の合計時間。

CoBITを用いた電子八重極子遷移($E3$)の観測

坂上、木村、Endre Takacs (客員)、大橋(富山大)、中村(電通大)、加藤(太)、村上
Sakaue et al., Phys. Rev. A 111 (2025) 052801



Compact EBIT (CoBIT)

• 目的

不純物多価イオンの分光学的研究により、禁制遷移によるプラズマ計測の新しい手法の開発を目的とする。

• 手法

多価イオン源(CoBIT)を用い、高温高密度プラズマ中に存在する多価イオンを作り出し、分光計測により多価イオンの多様な衝突過程の研究を行う。

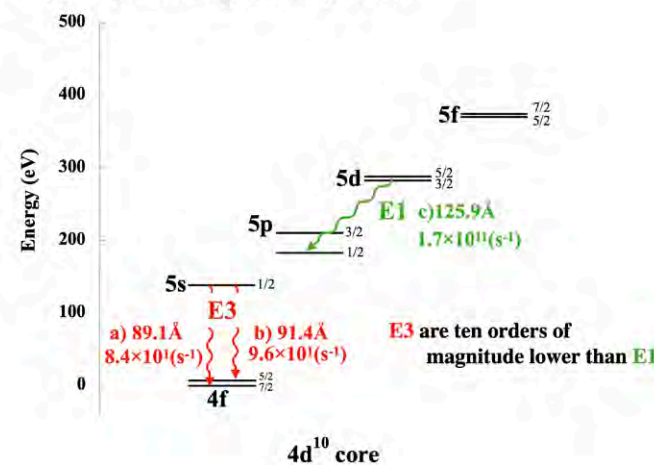
• 成果

W^{27+} の電気八重極子遷移($E3$) $4f-5s$ の自然放射を世界で初めて観測し、その後この $E3$ 遷移の Z 依存性から、強い禁制遷移のメカニズムの解明に成功した。

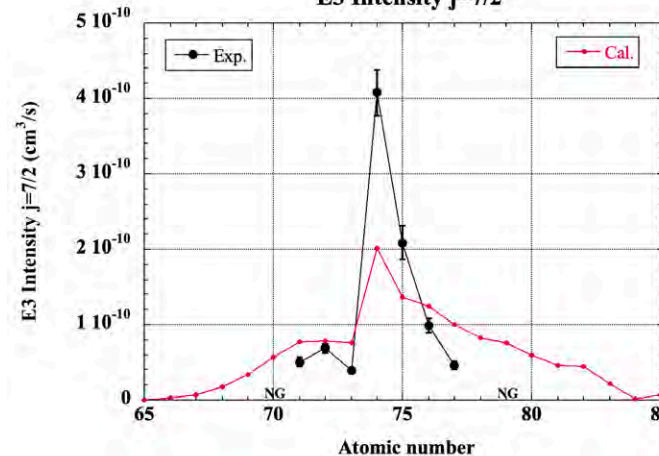
• 今後の展開

NISTとの国際共同研究により今後 $E3$ 遷移の電子密度依存性の計測を進め、禁制遷移のメカニズムの理解を深めていく。

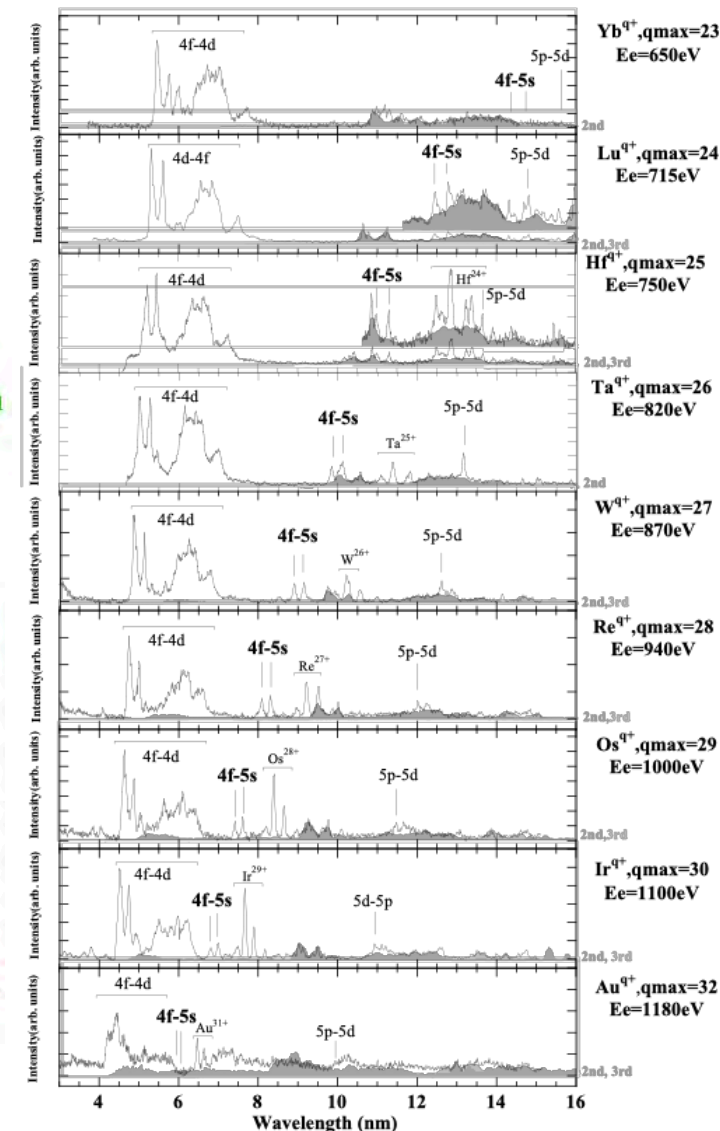
Energy diagram of Ag-like tungsten ion



E3 Intensity $j=7/2$



E3の Z 依存性

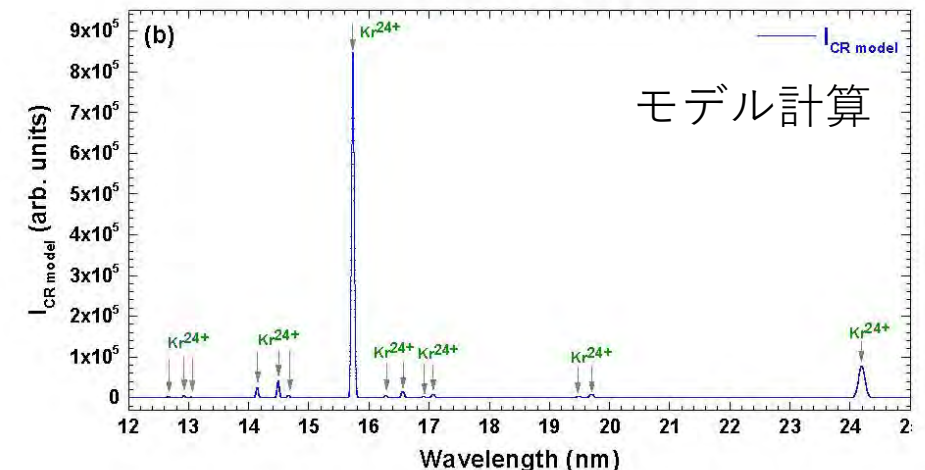
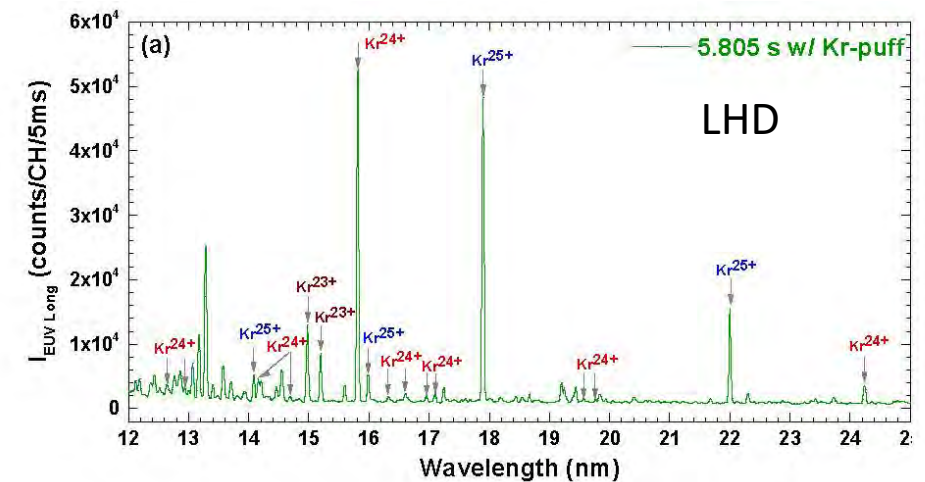


EUV Spectroscopic Analysis of Highly Charged Kr^{24+} Ion for Impurity Seeding Studies in Fusion Plasmas via Electron-Impact Excitation and Collisional-Radiative Modeling

Shivam Gupta, Tetsutarou Oishi, Motoshi Goto, Tomoko Kawate, Yasuko Kawamoto, Yao-Li Liu, Izumi Murakami

Journal of Fusion Energy 45 (2026) 17

- 目的 入射不純物ガスKrの24価イオンのEUV分光診断のための原子データ整備及び衝突輻射モデルの構築
- 手法 GRASP及びFAC原子コードによる電子データの計算、衝突輻射モデルの構築、LHDで計測したEUVスペクトルとの比較
- 成果 LHDのスペクトルを再現できるモデルが構築できた
- 今後の展開 ほかの価数イオンへモデル構築を拡大



Global Gyrokinetic Simulations of Isotope Effects under Ambipolar Electric Fields and Advances Toward Whole-Volume Modeling

T. Moritaka, R. Hager, H. Sugama, *et al.*, Journal of Fusion Energy Vol. 44, pp. 63 (2025).

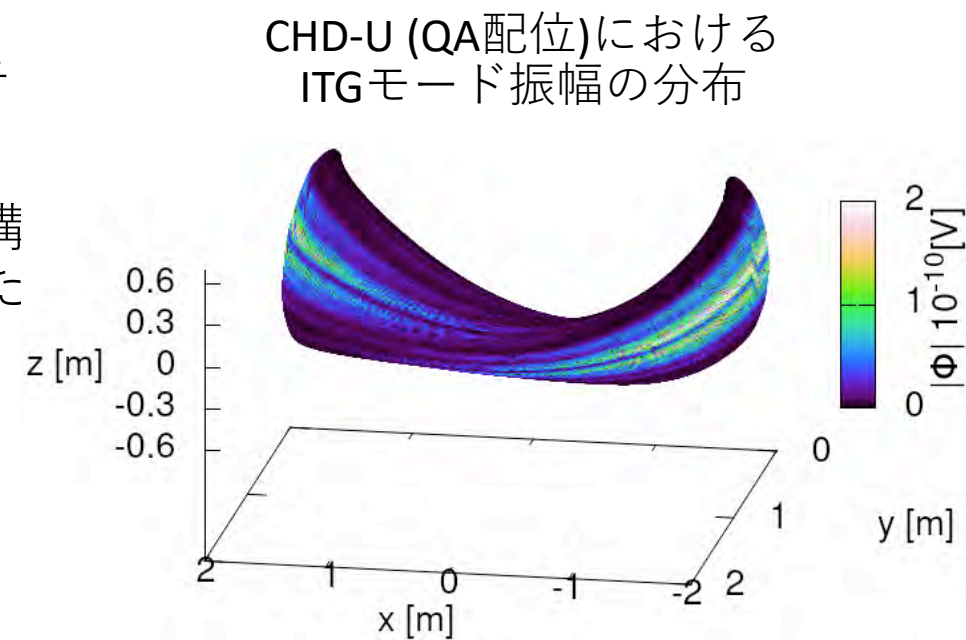
大域的な径電場の生成や軽水素-重水素の混合が、LHDにおける良好な同位体効果をもたらすことを示した。また、ジャイロ運動論モデルをヘリカルダイバータ近傍に応用するための計算手法を開発した。

成果

- LHDで生成する大域的な両極性電場によって、乱流輸送に対する良好な水素質量依存性が実現され得ることを示した
- ヘリカルダイバータ近傍の磁場構造に適合した曲面上の非構造格子を生成し、それに対するポアソンソルバーを開発した

今後の展開

- 開発した計算コードXGC-SはCHD-Uにも応用されている



Effect of Magnetic Islands on Neoclassical Heat Diffusivity in a Global Tokamak Simulation

Joseph Li, T. Moritaka, R. Kanno, G. Kawamura, *et al.*,
Contributions to Plasma Physics, e70143, 10.1002/ctpp (2026)

磁気島周辺の新古典輸送を運動論モデルによって解析し、磁気ドリフトの効果によって生じる電子エネルギーフラックスの構造を明らかにした。

本研究は総研大大学院生の博士課程研究として実施された。

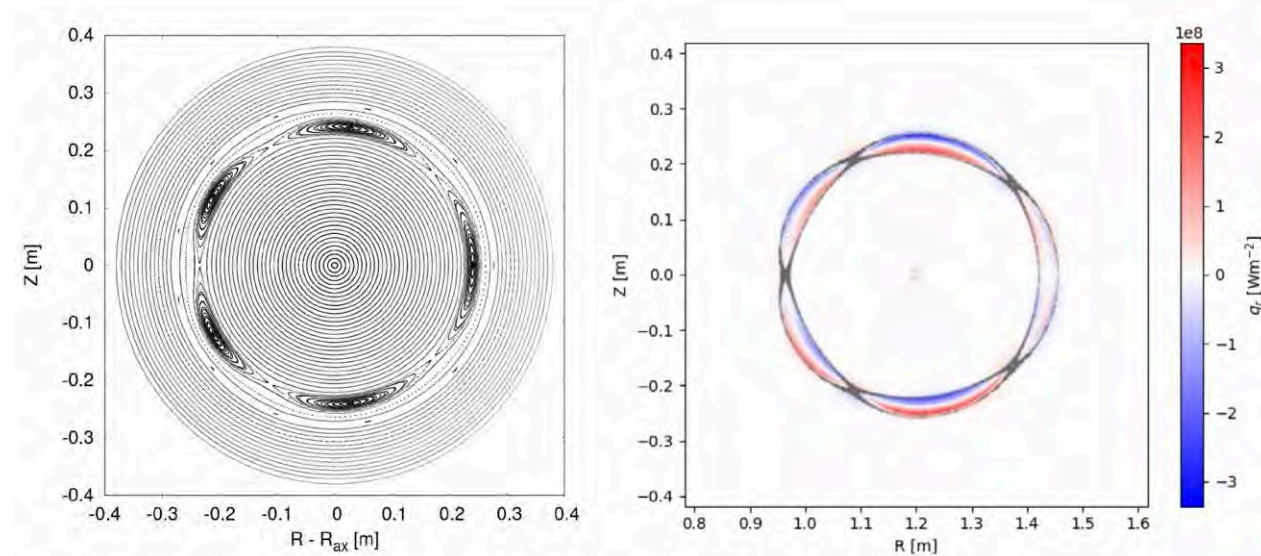
成果

- 摂動磁場を印加した円形トカマクに対して新古典輸送解析を行った
- 磁気島に沿って増幅される電子エネルギーフラックスの空間構造が見出された
- この構造の電荷に対する依存性から、上下非対称性は磁気ドリフトによるものと考えられる

今後の展開

- 大域的な電子輸送との関係や、径電場の影響について研究を進めている

磁気島を含む円形トカマク配位と
電子エネルギーフラックスの構造



Ne¹⁰⁺-H電荷交換断面積の高精度計算とCXRS診断への応用

五十嵐明則（宮崎大）、大石鉄太郎（東北大）、西澤敬之（九大応力研）、村上 泉、加藤太治（NIFS）

A Igarashi et al 2025 Plasma Phys. Control. Fusion 67 105028

- 目的

Ne¹⁰⁺-H電荷交換における状態選択的捕獲断面積を計算し、CXRS診断の基盤データを整備する。

- 手法

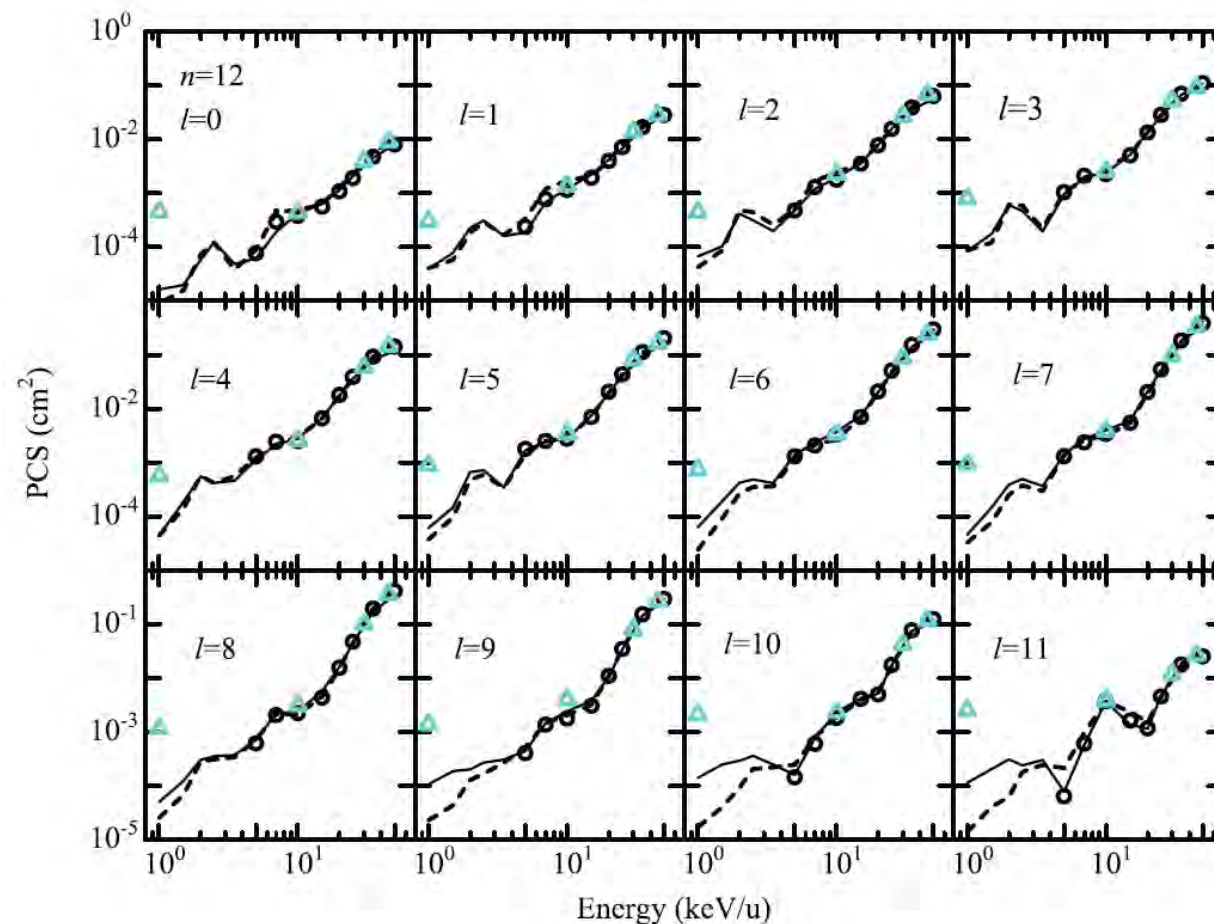
AOCC法によりNe¹⁰⁺-H(1s,2s)衝突を計算し、 $n-l$ 分解断面積を求めた。

- 成果

実験困難な nl 分解捕獲断面積を算出し、低エネルギー領域で既存理論との差異を明らかにした。

- 今後の展開

より高電荷の不純物イオンへ展開し、CXRSによる輸送解析精度向上へ応用する。



LHDペレットアブレーションによるEr II発光の測定と遷移確率評価

Priti (マガド大、インド)、加藤太治、後藤基志、坂上裕之、村上泉 (NIFS)、田中雅臣、大石鉄太郎 (東北大)、中村信行 (電通大)、田沼肇 (都立大) Priti et al. J. Fusion Energy 44 (2025) 65

- 目的

キロノバ不透明度に重要なEr IIの遷移確率を、LHD実験で実験的に評価する。

- 手法

Er含有炭素ペレットをLHDへ入射し、385–400 nm発光を高分解分光測定した。

- 成果

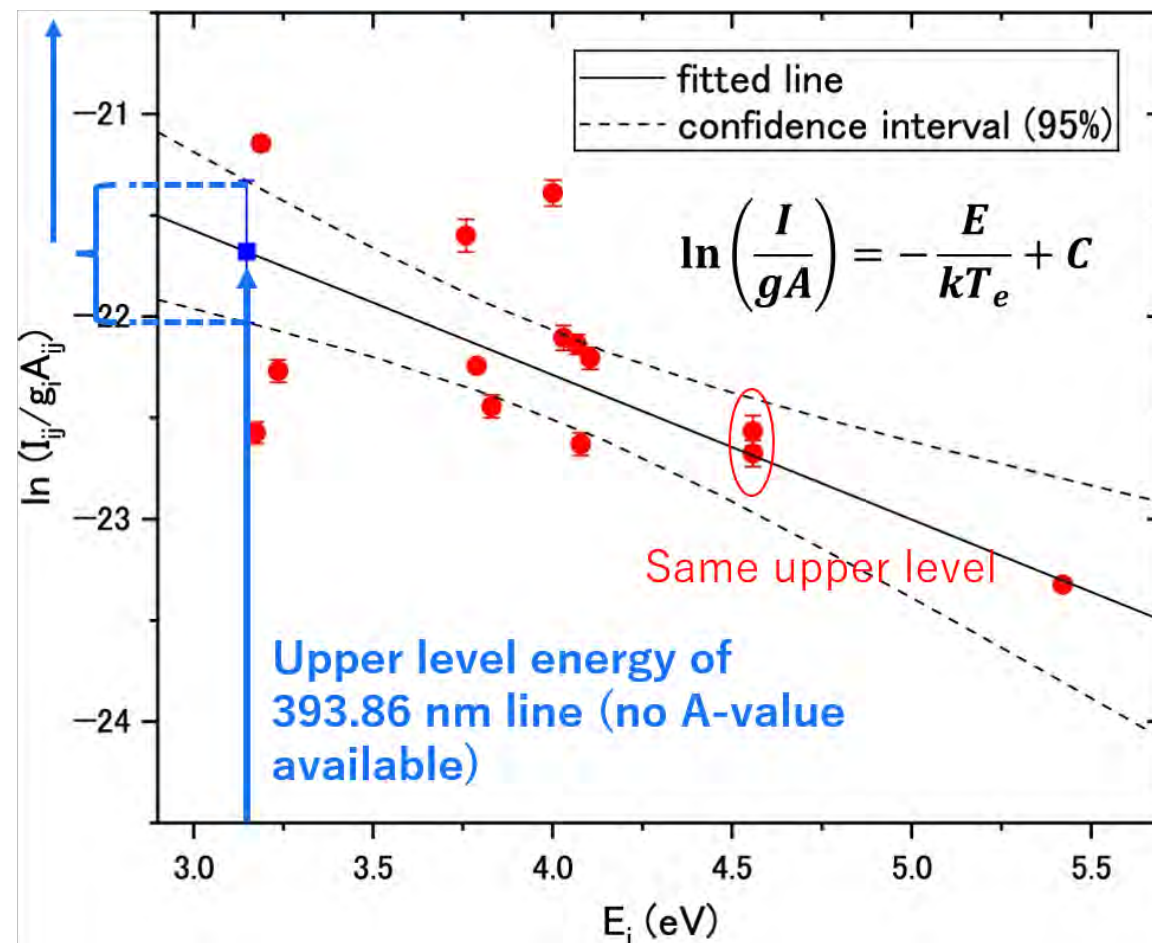
C II Stark幅から電子密度を評価し、Boltzmann plotでEr II遷移確率を決定した。

- 今後の展開

ランタノイド原子データの精密検証を進め、キロノバ不透明度計算の高精度化へ展開する。

Reasonable estimates under the quasi-LTE assumption

Priti+25



キロノバ不透明度のためのランタノイドIIの統計解析

加藤太治（NIFS）、田中雅臣（東北大）、G. Gaigalas、L. Kitovienė、P. Rynkun（ビリニュス大、リトアニア）
D. Kato et al., Phys. Lett. A 558 (205) 130884

• 目的

ランタノイドIIの複雑スペクトルを統計的に記述し、キロノバ不透明度計算を効率化する。

• 手法

GRASP2K・HULLAC計算結果から、準位分布と実効線強度分布を統計解析した。

• 成果

準位分布は高次Gram-Charlier展開、実効線強度はlog-logistic分布で良く表現できた。

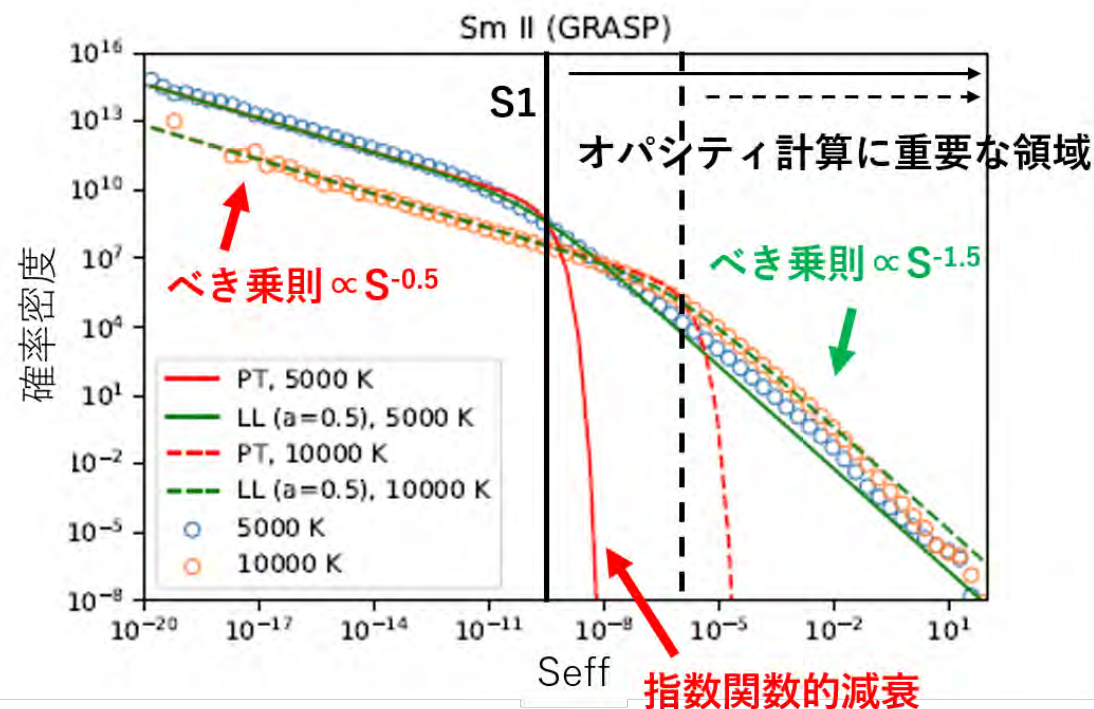
• 今後の展開

統計分布を利用し、キロノバ輻射輸送計算の高速化と大規模化を目指す。

実効線強度 $S_{\text{eff}} = S_{u,l}(\lambda_l) \exp(-E_l/kT),$

対数ロジスティック分布 $\rho_{\text{LL}}(S) = \frac{(a/S_1)(S/S_1)^{a-1}}{(1+(S/S_1)^a)^2},$

Porter-Thomas分布（自由度1のカイ二乗分布） $\rho_{\text{PT}}(S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi S S_0}} \exp\left(-\frac{S}{2S_0}\right),$



強磁場中水素原子の断熱状態とKepler運動-ジャイロ運動遷移

山田和善（九大院連携）、加藤太治（NIFS）

K. Yamada and D. Kato, PFR 21 (2026) 2401011

※NIFS共同研究「多価イオンとエキゾチック原子を包括する量子少数系ダイナミクス理論研究」（代表：山下琢磨・東北大）

- 目的 **Joint APiP&1st NIFS Conf, Best Student Poster受賞**

強磁場中水素原子の断熱状態を解析し、Coulomb運動とLandau運動の接続を解明する。

- 手法

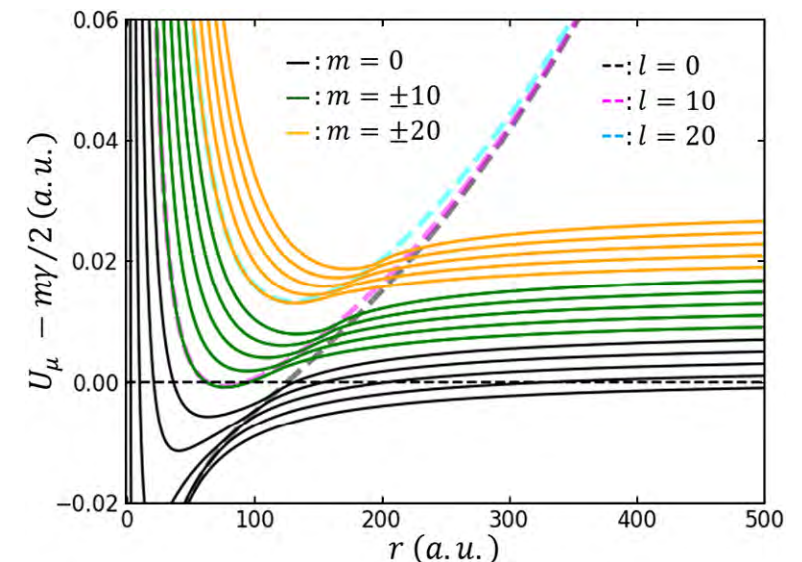
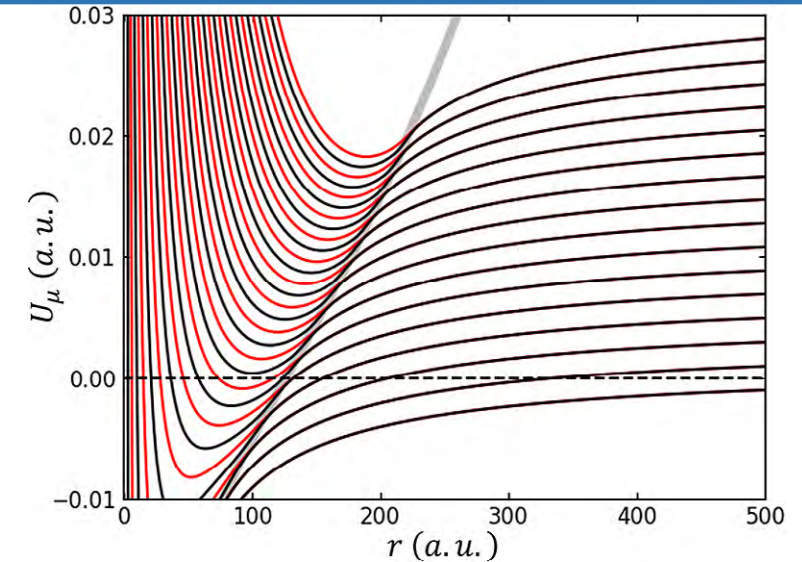
球座標動径を断熱パラメータとする断熱基底展開法で断熱ポテンシャルを数値計算した。

- 成果

断熱ポテンシャルに回避交差列が現れ、Kepler運動からジャイロ運動への遷移を示した。

- 今後の展開

非断熱結合を含む高精度光電離・再結合計算へ展開し、中性子星大気モデルへ応用する。



原子番号依存性に基づく重元素多価イオンの軟X線・EUVスペクトルの研究

鈴木千尋、小池文博（上智大）、田村直樹（IPP）、大石鉄太郎（東北大）、中村信行（電通大）、加藤太治、村上泉

共同研究

- 目的：電子配置が比較的単純な重元素多価イオンについて、スペクトルの原子番号依存性を整理し、離散スペクトル線を新たに同定する。
- 手法：LHD実験やTokyo EBIT実験で得られた重元素のスペクトルデータを、理論計算と比較した。
- 成果：主要な共鳴線波長の原子番号依存性を整理することで、多数の離散スペクトル線が同定され、合わせて配置混合に起因する準位交差の理解が進展した。
- 今後の展開：EBIT実験データの拡充とともに、他の遷移や価数イオンについても原子番号依存性の解析を進展させる。

Z=57–74における銅様イオンの4s-4p共鳴線波長のZ依存性（点線は理論値）

ゲルマニウム様イオンの三準位交差に関する原子状態ベクトルの回転による解釈

C. Suzuki, et al., Eur. Phys. J. D 79 (2025) 69.

F. Koike, et al., Phys. Lett. A 555 (2025) 130795.

Water-window軟X線を放射するBi・Pb多価イオンの準安定状態ダイナミクス

宋 定宝（九大院連携）、大橋隼人（富山大）、加藤太治、坂上裕之、木村直樹（NIFS）、中村信行（電通大）
D. Song et al., J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 347 (2025) 109621
D. Song et al., PFR 20 (2025) 1401057

• 目的

EBIT中のBi・Pb多価イオンにおける準安定状態形成と軟X線発光機構を解明する。

• 手法

CoBIT軟X線分光とHULLAC-CRM計算を組み合わせ、水窓領域発光を解析した。

• 成果

準安定状態経由の電離が高電荷状態生成とwater-window発光を強く支配することを示した。

• 今後の展開

同電子系列へ展開し、準安定状態制御による高輝度軟X線源最適化へ応用する。

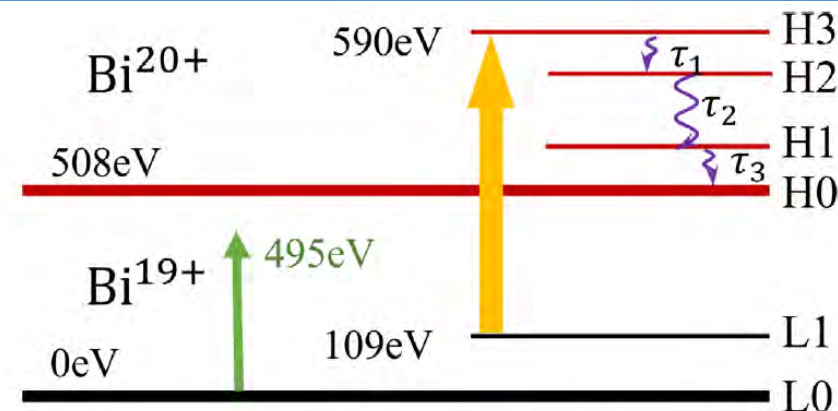


Fig. 3. Schematic ionization processes for electron energy of 495 eV. L0 is $[4f^{14}5p_{1/2}^2]_{0,}$ L1 is $[4f_{7/2}^{-1}5p_{1/2}^25p_{3/2}]_{5,}$ H0 is $[4f^{14}5p_{1/2}1_{1/2,}$ H1 is $[4f^{14}5p_{3/2}1_{3/2,}$ H2 is $[4f^{14}5s5p_{1/2}5p_{3/2}]_{5/2,}$ H3 is $[4f_{7/2}^{-1}5p_{1/2}^2]_{7/2,}$

