

ユニット成果報告会

2024年5月8日

## プラズマ量子プロセス ユニット Plasma Quantum Processes Unit

---

加藤太治（ユニット長）、星 健夫、村上 泉、岩本晃史、境健太郎、坂上裕之、鈴木千尋、舟場久芳、武藤貞嗣、森高外征雄、山岸 統、加藤雅敏、Priti、Shivam Gupta

### プログラム

- 成果報告の概要説明（加藤太治）
- アカデミックプランの紹介

NIFS-EBITを用いた多価イオン研究  
～新型EBITの開発～（坂上裕之）

磁場・レーザー融合実験によるマルチスケール実験室宇宙物理の開拓（境健太郎）

- 質疑応答

## 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

- 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

**フージョンテクノロジー高度化研究基盤設備の活用など  
post-LHD計画と連動して推進**

- 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
- 量子電磁気学過程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
- クオ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、高エネルギー加速器実験の検出器等から核融合プラズマ実験の新たな計測のヒントを得る
- 核融合研究から生まれた低温工学技術を高エネルギー密度科学実験へ応用

# 現在の取り組みと今後の計画

## 高度化

- LHDと電子ビームイオントラップ（EBIT）を用いた、タングステンなどの重元素多価イオンの新規発光線の探索と多価イオン計測やプラズマ診断モデルへの応用研究。
- **フージョンテクノロジー高度化研究基盤設備として、放射光やレーザーと多価イオンの相互作用研究に適した新しいタイプの高温超伝導EBITを開発（アカデミックプラン紹介）。** NIFS研究会「新型EBITを用いた新しい多価イオン物理研究」（5/13-14）の開催、日本物理学会@北大（9/16-19）の合同シンポジウム「多価イオン物理研究の学際的展望」を提案。
- 量子論を運動論に含めることでプラズマ周辺の中性粒子と荷電粒子の衝突や輻射、また中心部での核融合反応など、標準的運動論の枠組みを超えた物理領域を探索できる。これに向けて散乱行列の計算などについて取り組んでいる。

# 現在の取り組みと今後の計画

- 太陽、中性子星合体などの天体プラズマ観測や、X線マイクロカロリメータを用いたミュオン多価イオン分光に関する学際的共同研究の推進。
- **直線型磁場装置とレーザー生成プラズマを組み合わせ、宇宙空間・天体プラズマの未解決課題の実験的解明に取り組む（アカデミックプラン紹介）。**
- 格子QCD計算をNIFSプラズマシミュレータにおいて実行する準備を進めている。**QCDの磁場のリコネクションや、クォークの再結合過程での光子の放射に関する共同研究を検討中。**
- レーザー駆動粒子加速実験用に固体水素・重水素薄膜ターゲット生成装置を開発し純粋重陽子の加速に成功他、低温工学技術による高エネルギー密度科学実験との連携を行っている。

# 現在の取り組みと今後の計画

- 先端計測むけデータ駆動科学ソフトウェアフレームワーク「2DMAT」を東大物性研と共同開発し、プラズマ科学・物質科学の双方に応用。
  - (1)研究会開催「物質科学シミュレーションと先端実験のデータ連携」，東大物性研/ハイブリッド開催，2024年2月19-20日，主催：東大物性研，共催：核融合研，<https://ccms.issp.u-tokyo.ac.jp/event/6295>.
  - (2)講習会実施「2DMAT講習会」，東大柏キャンパス/ハイブリッド開催，主催：東大物性研，共催：核融合研，2024年3月28日，<https://ccms.issp.u-tokyo.ac.jp/event/6432>.
  - (3) 2024年度東大物性研ソフトウェア開発・高度化プロジェクト「先端計測むけデータ解析フレームワークの汎用化」，代表：星健夫.
  - (4) 超高速データ駆動科学とLHDプラズマ計測の統合，2024年度NIFS共同研究（星健夫，小林達哉(位相空間乱流ユニット)ら，合計21名），
  - (5)日本物理学会年会でのシンポジウム「先端計測のフロンティア～見えないモノを見る挑戦」（領域2，9合同開催），企画：星健夫，おもな講演予定者の所属：NIFS(小林達哉)，阪大レーザー研，国立天文台，分子研，KEK物構研，NIMS，2024年9月（予定）

# ユニット間連携、国内外協力組織体制

## プラズマ原子分子・多価イオン・ミュオン

- メタ階層ダイナミクス、プラズマ装置学、電通大、都立大、理研、東北大、東大、QST、阪大、広島大、国立天文台、JAXA、中部大、同志社大、NIST（米国）、ビリニュス大（リトアニア）、NWNNU（中国）、ベオグラード大（セルビア）他

## 周辺輸送モデリング、量子論的プラズマ運動論

- プラズマ・複相間輸送、九大、JAEA、プリンストン大（米国）

## レーザープラズマ相互作用、非線形QED

- 可知化センシング、プラズマ・複相間輸送、阪大、広島大、JAEA、プリンストン大（米国）他

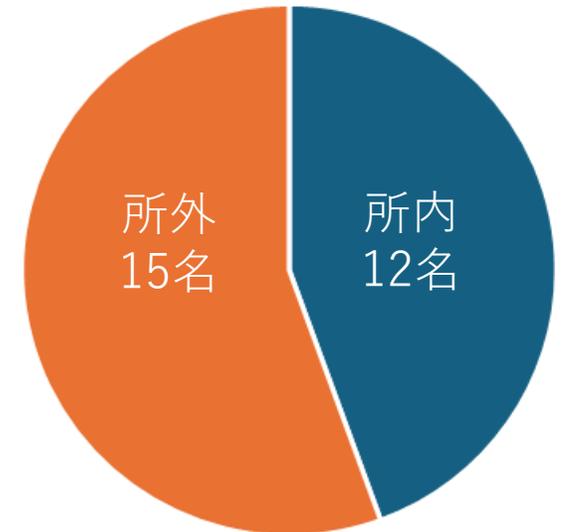
## データ駆動先端計測、材料モデリング

- メタ階層ダイナミクス、位相空間乱流、超高流束協奏材料、KEK、東大物性研、QST、鹿児島大、南カリフォルニア大（米国）、AMU（フランス）他

## QEDプラズマ、格子QCD・QGP

- 複合大域シミュレーション、長総大、（広島大）

研究戦略会議メンバー



国際共同研究の相手国：

アメリカ、中国、インド、韓国、フランス、リトアニア、スウェーデン、セルビア、IAEAなど

2023年度の研究成果  
論文29件、学会発表41件、受賞5件

高度化

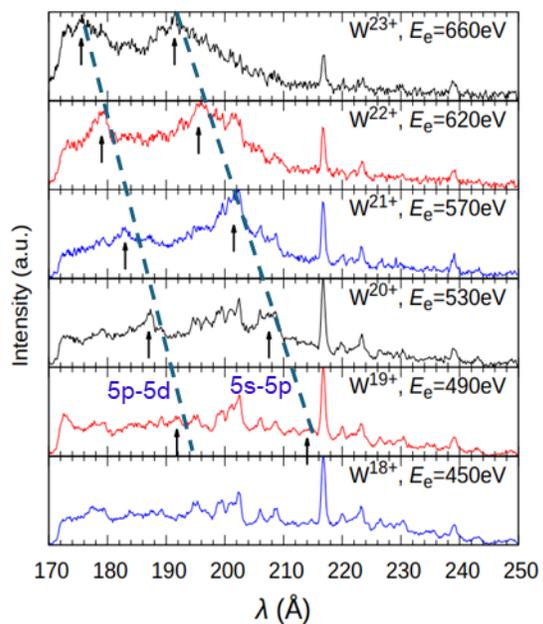
- 重元素多価イオン計測の精密化、衝突・輻射モデル
- 多価イオン準安定励起状態のレーザー分光への応用
- 高繰り返しレーザーを用いたトムソン散乱計測
- 機械学習による炉材料シミュレーション予測性の向上

学際化

- レーザー（+  $\alpha$ ）を使った宇宙物理実験
- 磁場閉じ込めプラズマ装置を用いた原子物理研究
- 中性子星合体による重元素プラズマの原子過程データ

# CoBITによるVUV分光測定とUTAスペクトルの衝突・放射モデルによるタングステン多価イオン計測の精密化

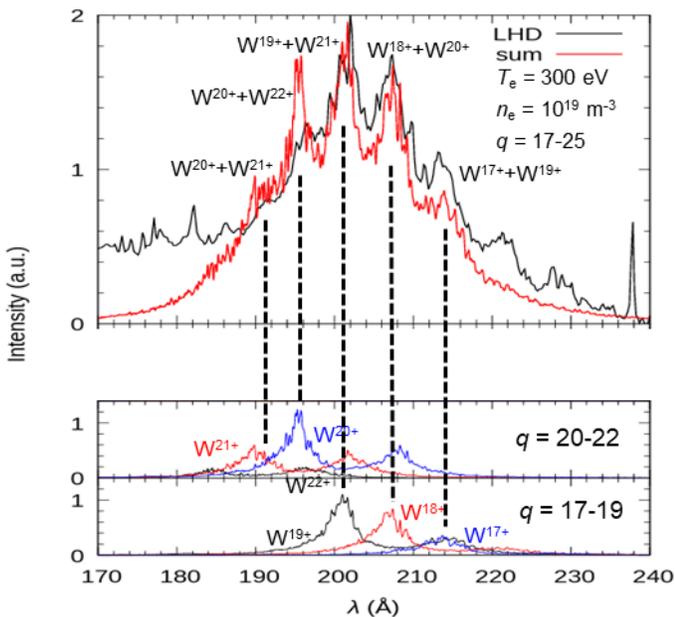
西村涼汰（東北大院）、大石鉄太郎（東北大）  
坂上裕之、村上 泉



CoBITで同定されたW<sup>18+</sup>~W<sup>23+</sup>の発光スペクトル。波長の電子ビームエネルギー依存性の特徴から、各価数の5s-5p、5p-5d遷移による発光線であることが明らかになった。

受賞

- AAPPs-DPP2023 ポスター賞



上図：LHD（タングステンペレット入射）での多数の価数の多価イオンからの複雑なUTAスペクトルを、下図：詳細な原子過程を考慮した衝突・放射モデル計算のスペクトルと照合することで、各ピークの価数同定が可能となった。

# Kr<sup>25+</sup>イオンの電子衝突励起断面積理論計算と衝突放射モデル構築による分光スペクトル再現

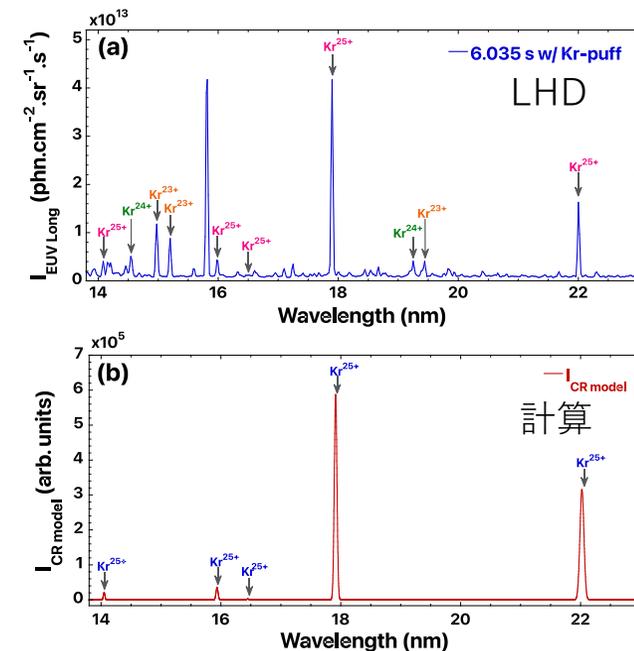
Shivam Gupta (COE)、大石鉄太郎（東北大）、村上 泉

- 非接触ダイバータ形成などを目的とした不純物ガスパフに用いられるクリプトンの挙動研究を支える分光診断のための基礎データ整備と分光モデル構築を進めている (IAEA CRPに参加)。

- Kr<sup>25+</sup>イオンの原子データの理論計算とそれを用いた衝突放射モデルを構築し、LHDでのクリプトンガスパフ実験で計測されたスペクトルの再現を行った。

Atoms 2023, 11, 142から引用

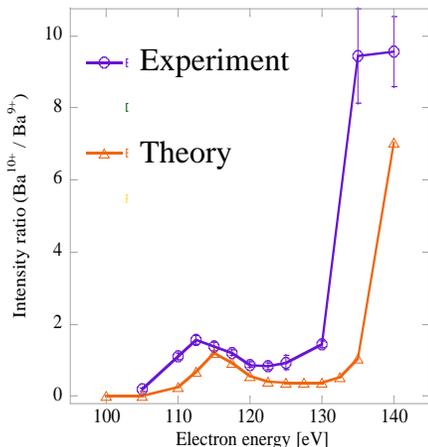
Atoms 11巻11号のカバーページに採用



# 長寿命準安定状態を持つ多価イオンのプラズマ中状態分布計算の精緻化と、レーザー分光への応用

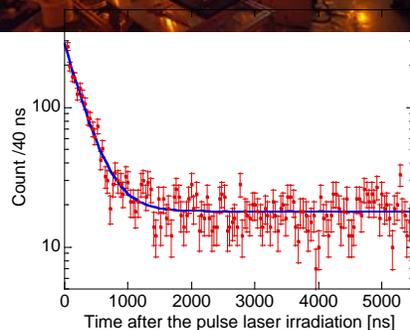
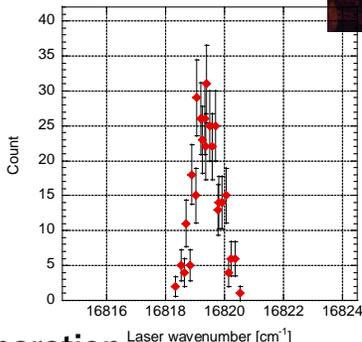
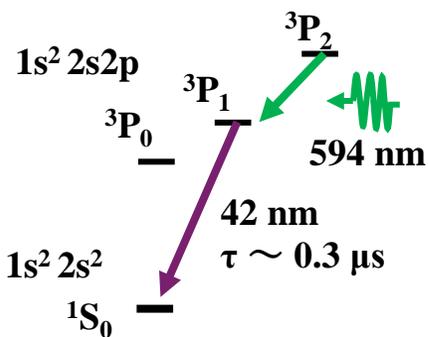
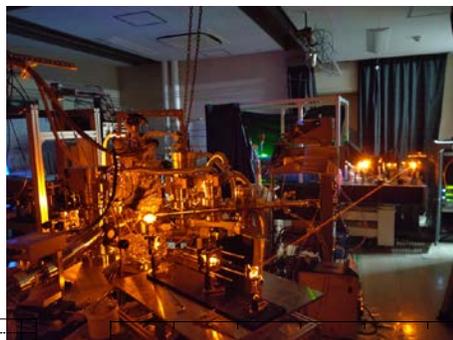
Priti (COE)、木村直樹 (理研)、中村信行 (電通大)

- 準安定状態からの電離・再結合も考慮した衝突輻射モデル計算を構築した。EBITで観測されていたBa多価イオンの発光線強度比の奇妙なエネルギー依存性を再現することに成功し、その定性的な理解に貢献した。



Kimura\*, Priti\*, et al., PRA 108, 032818 (2023)

- 多価イオン (Ar<sup>14+</sup>) の準安定状態間のレーザー分光実験に成功し、コロナ温度診断に有用な<sup>1</sup>S<sub>0</sub>-<sup>3</sup>P<sub>1</sub>遷移の遷移確率測定も実証した (世界初)。

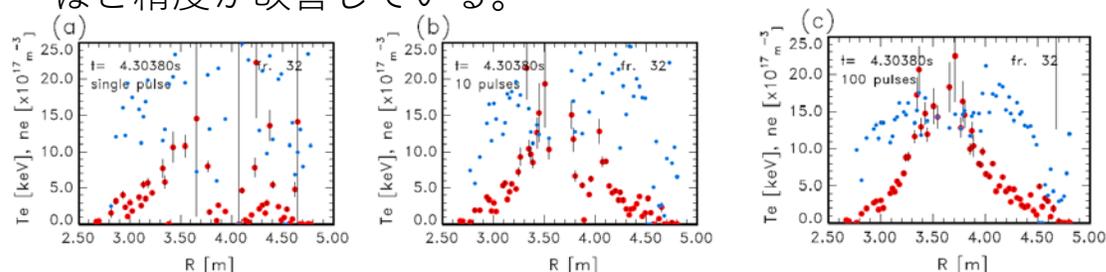


Kimura\*, Priti, et al., in preparation

# 5ms 以内に照射される 100 のレーザー・パルスを用いたトムソン散乱による電子温度・密度の精度の改善

舟場久芳、安原 亮 (可知化センシング)

- 20 kHz の高繰り返しレーザーを用いたトムソン散乱計測では、50 us という時間分解能で電子温度、電子密度 の時間変化を観測できる。
- 一方、高 T<sub>e</sub> および低 n<sub>e</sub> のプラズマでは、散乱光強度および S/N 比が小さく、従来はそのような場合には、同じ条件と考えられる複数のプラズマや、空間や時間点の近いデータを平均して S/N 比を改善していた。
- 20 kHz の高繰り返しレーザーを用いると、プラズマが変化しないと考えられる 5ms の間に 100 パルスのレーザーを照射することが可能である。それらによる散乱光を平均することでノイズの影響を低減し、精度の良い T<sub>e</sub>, n<sub>e</sub> 分布を求めることができた。下図は (a) 1パルス、(b) 10パルス、(c) 100パルスのデータから求めた T<sub>e</sub>, n<sub>e</sub> 分布であり、平均する数が多いほど精度が改善している。

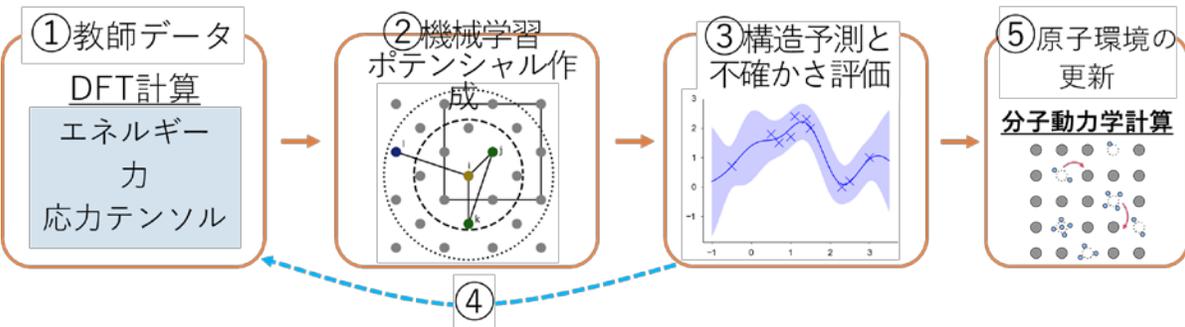


H. Funaba, et al. "Improvement of electron temperature and density accuracy in Thomson scattering diagnostics by an accumulation of 100 laser pulses within 5 milliseconds", JINST 18, C11015 (2023) より引用

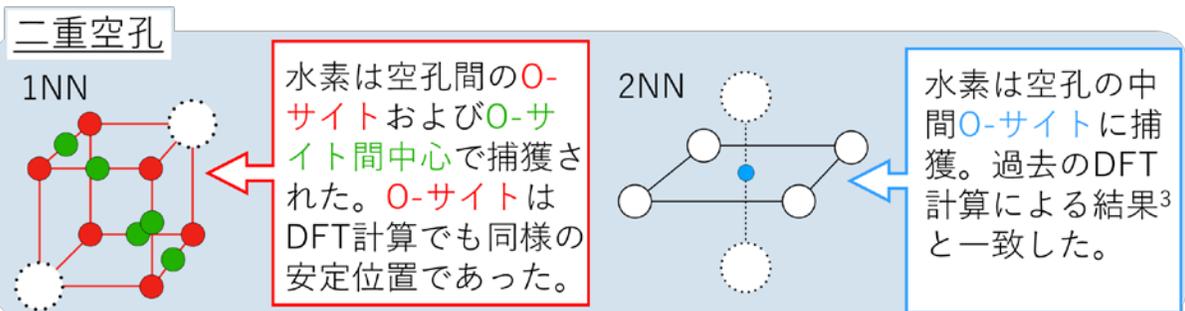
# 中性子照射材料のミクロ組織挙動予測に向けた機械学習力場の構築

野口湧喜 (九大院)、加藤太治

- 多様な構造に適用できる局所周辺環境の記述子、ベイズ推定による不定性の定量化と効果的教師データのサンプリング (on-the-fly機械学習)



- 構築した機械学習力場によって、まだ学習していないタングステン二重空孔による水素原子の捕獲位置を正確に予測



## 受賞

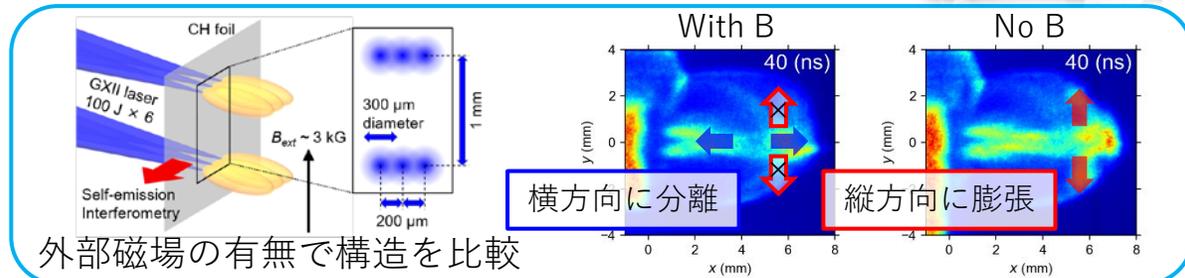
- プラズマ・核融合学会第40回年会 若手学会発表賞

# レーザー(+α)を使った宇宙物理実験

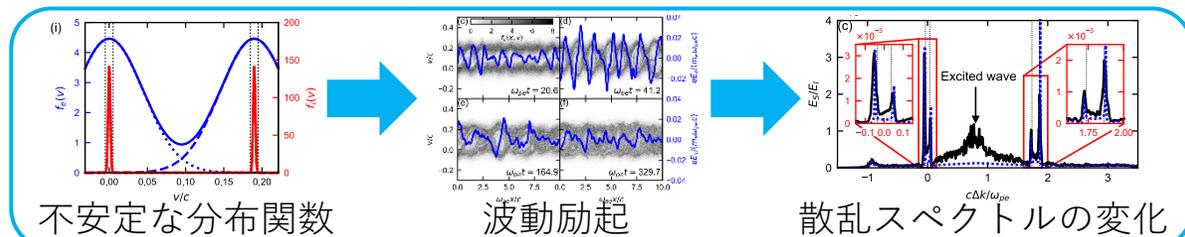
境健太郎、蔵満康浩 (阪大)



- 外部磁場と自己生成磁場が共存する系での磁気リコネクションによる構造形成
  - K. Sakai et al., submitted.



- 衝撃波や磁気リコネクションに関連した運動論的不安定性による励起波動をトムソン散乱を用いて検出する手法の検討
  - K. Sakai et al., PoP (2023), 今年度原理検証実験 @ ILE



- マルチスケール観測のための磁場+レーザー共創プラットフォーム → トピックス講演で紹介

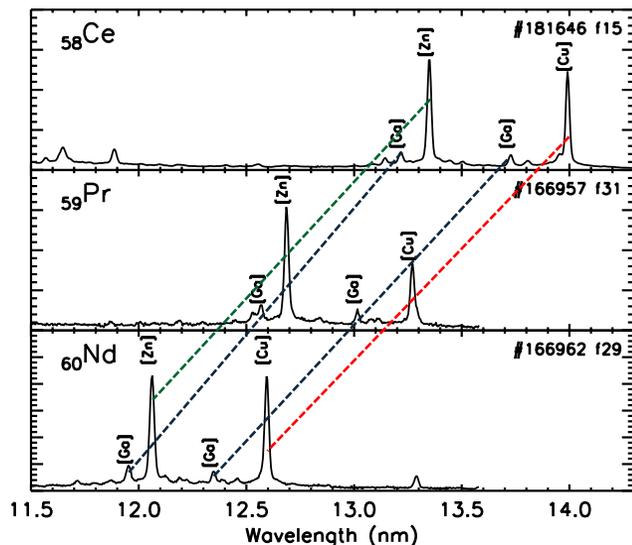
## 受賞

- Chiyoee Yamanaka Award, IFSA2023, 2023年9月
- 若手学会発表賞, プラズマ核融合学会, 2023年11月
- 菅田-Cohen賞, 大阪大学工学研究科, 2024年3月

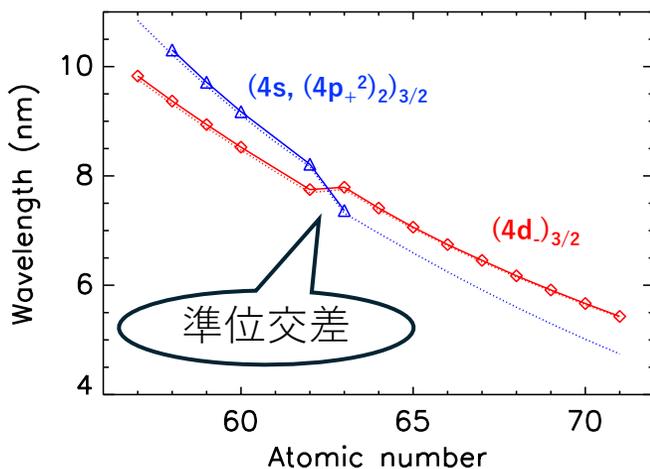
# 磁場閉じ込めプラズマ装置を光源とした多価イオン原子物理研究～発光線の特異な原子番号依存性～

鈴木千尋、小池文博（上智大）、中村信行（電通大）、村上 泉

- LHDで系統的に得られた一連の重元素多価イオンスペクトルについて、類似の構造が原子番号の増加とともに短波長側に移動する性質をふまえ、特定遷移の原子番号依存性を整理



- 非経験的原子構造計算や電子ビームイオントラップ (EBIT) 実験データとも比較することにより、新しいスペクトル線を同定
- 励起状態の強い配置間相互作用に起因した準位交差にもなる現象も観測



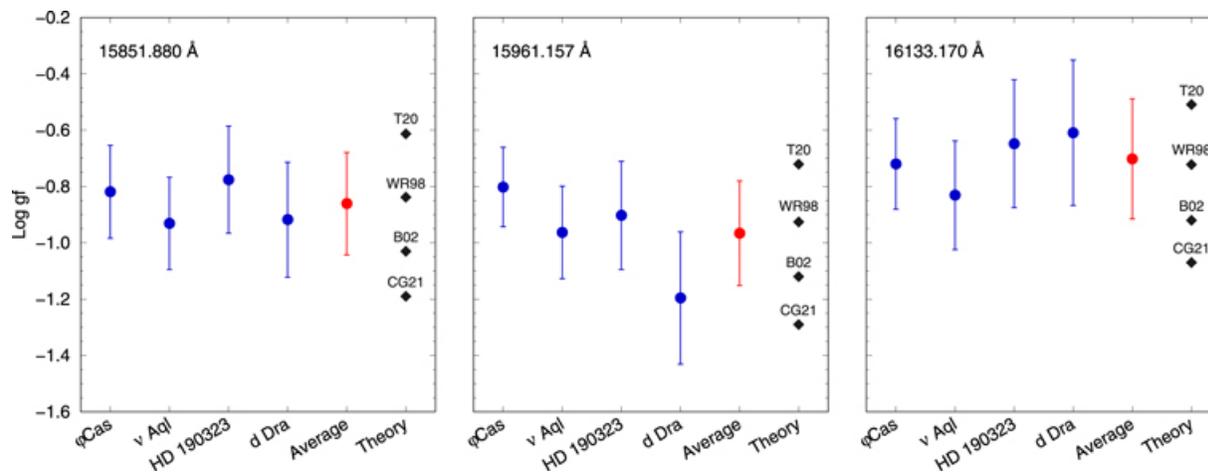
# 星の大気の観測データを用いて裏付けられたキロノバGW170817/AT2017gfoでのCe IIIの吸収線

土本菜々恵（東北大院）、田中雅臣（東北大）、  
仏坂健太（東大）、加藤太治

中性子星合体で合成された重元素を、合体に伴うキロノバの電磁波放射スペクトルの観測結果から同定するための共同研究。以前、キロノバのスペクトルで同定されたセリウムの2価イオン (Ce III) の吸収線について、他の星の大気で観測された同吸収線スペクトルを解析し、キロノバでの同定が裏付けられた。



星の大気吸収スペクトルから得られたCe IIIの振動子強度と、キロノバのスペクトル解析に用いられた理論値の比較



N. Domoto et al. ApJ 956 (2023) 113

# ユニット運営における課題

- ユニットとして取り組むべき共通の研究テーマの具体化が進みにくい。ユニットメンバーの研究連携がこれまで共同研究を行ってきた知り合い、あるいは研究テーマが近い限られたグループ内にとどまっている。
- ユニット内のコミュニケーションと共通テーマの掘り起こしには時間がかかる。これまで知らなかったメンバーとの新たな研究連携はまだ敷居が高い。
- ユニットセミナーや勉強会などで、他のメンバーの研究シーズやニーズを共有し、研究連携の敷居を下げるための努力をする。