

ユニットテーマの軸
「素過程・相互作用」
公聴会 2022年1月24日

提案:

- ・CUT-9: プラズマ量子プロセス (UT-10の一部)
- ・CUT-6: ハイパワーレーザーにより創り出す連成するエネルギー変換の系(プラズマ量子プロセス)(UT-3)
- ・CUT-2: ミュオンと核融合科学の融合(UT-8)

核融合システム研究系 村上泉

「素過程・相互作用」ユニットテーマ軸

プラズマ量子プロセス

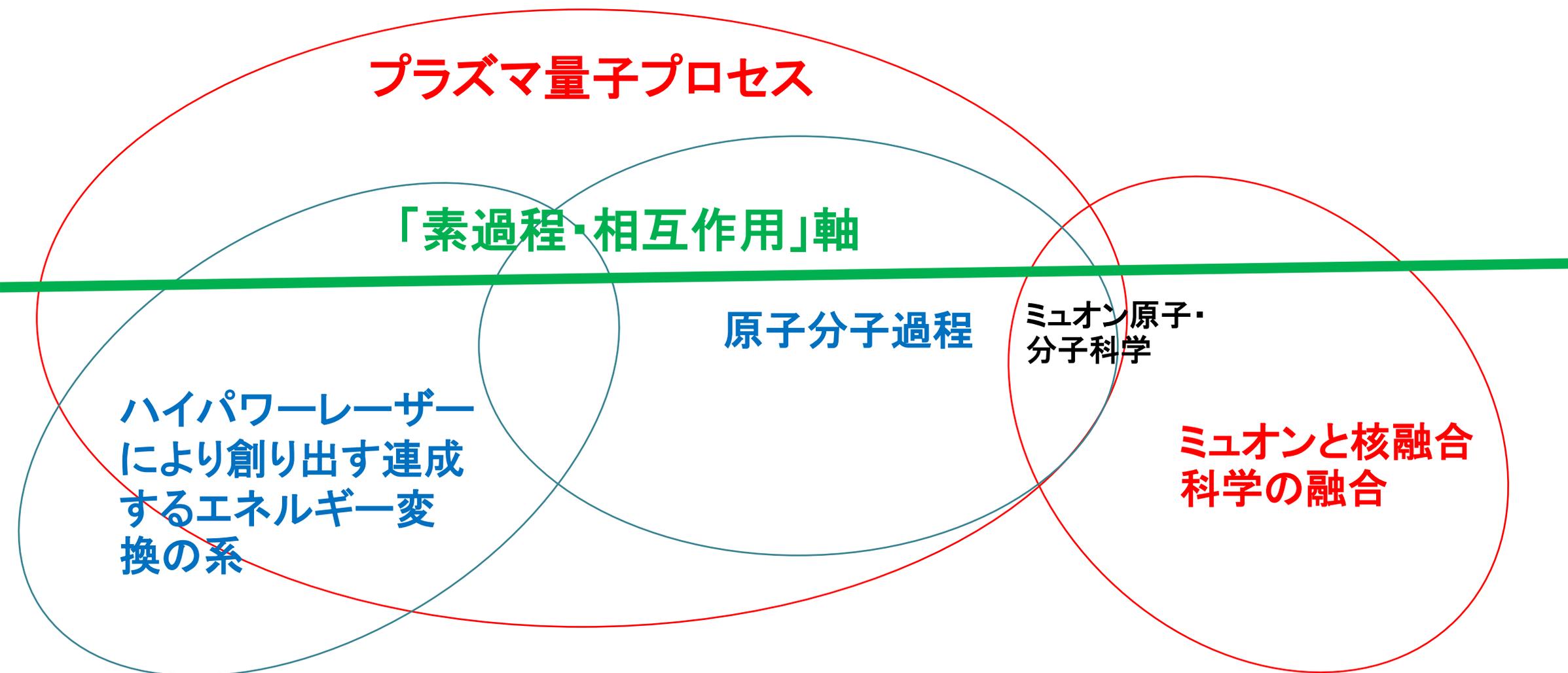
「素過程・相互作用」軸

原子分子過程

ミュオン原子・
分子科学

ミュオンと核融合
科学の融合

ハイパワーレーザー
により創り出す連成
するエネルギー変
換の系

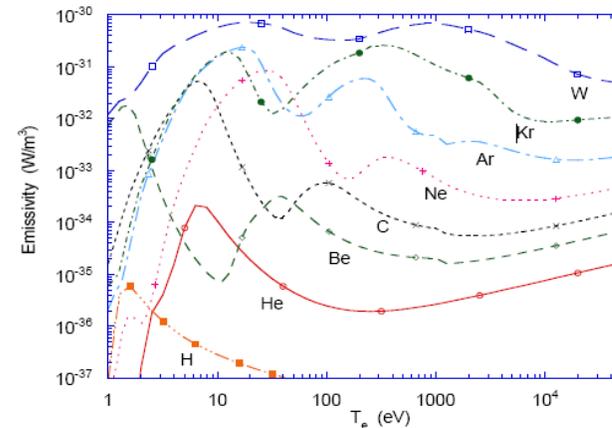


「プラズマ量子プロセス」

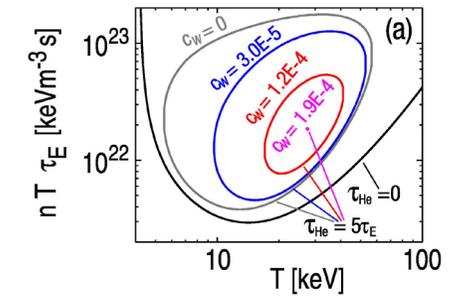
1. テーマ名「プラズマ量子プロセス」
2. 核融合としての課題
3. 学術的な特徴づけ
4. アプローチ
5. 学際的展開
6. 独自性、優位性

2. 核融合としての課題

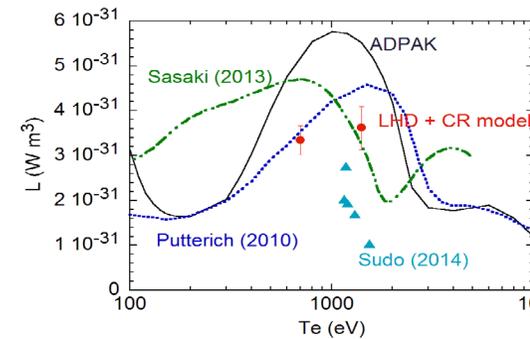
- ITERや核融合炉における高Z不純物の蓄積量・放射パワー評価や挙動解明のための高Z原子多価イオンの原子物理的性質と発光スペクトルの解明
- 非等方非平衡プラズマ中の原子分子挙動とモデリング構築
- 低温ダイバータプラズマにおける原子・分子と輻射場やプラズマ対向壁との相互作用素過程や挙動研究
- レーザー核融合におけるハイパワーレーザーと物質との相互作用で生じるWarm Dense Matterの原子過程やエネルギー変換機構の解明
- 負イオン形成固体表面反応の理解



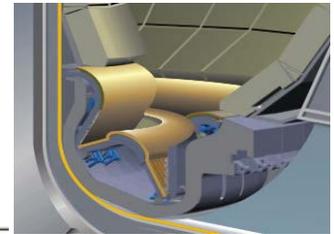
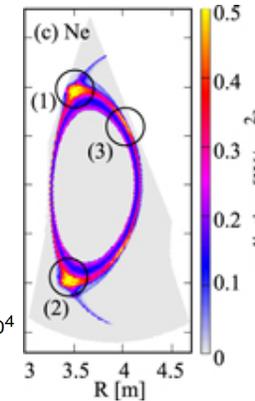
ITER Physics Expert Group on Divertor, Nucl. Fusion 39 (1999) 2391



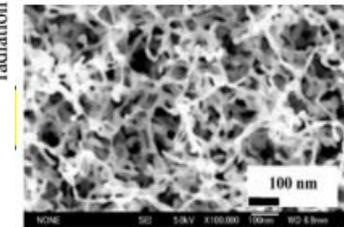
コアでのW蓄積量とIgnition条件 (Putterich et al. 2010)



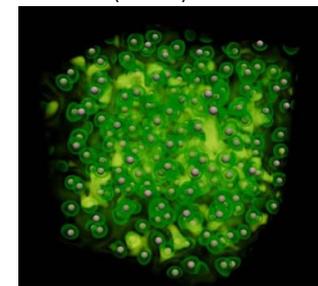
Radiation power of tungsten Murakami et al. (2015)



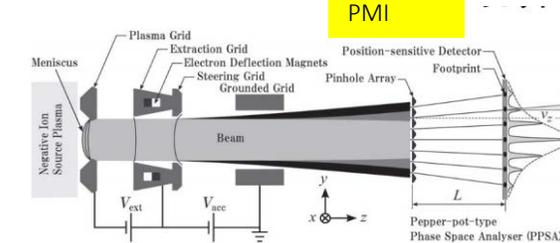
ダイバータ



PMI

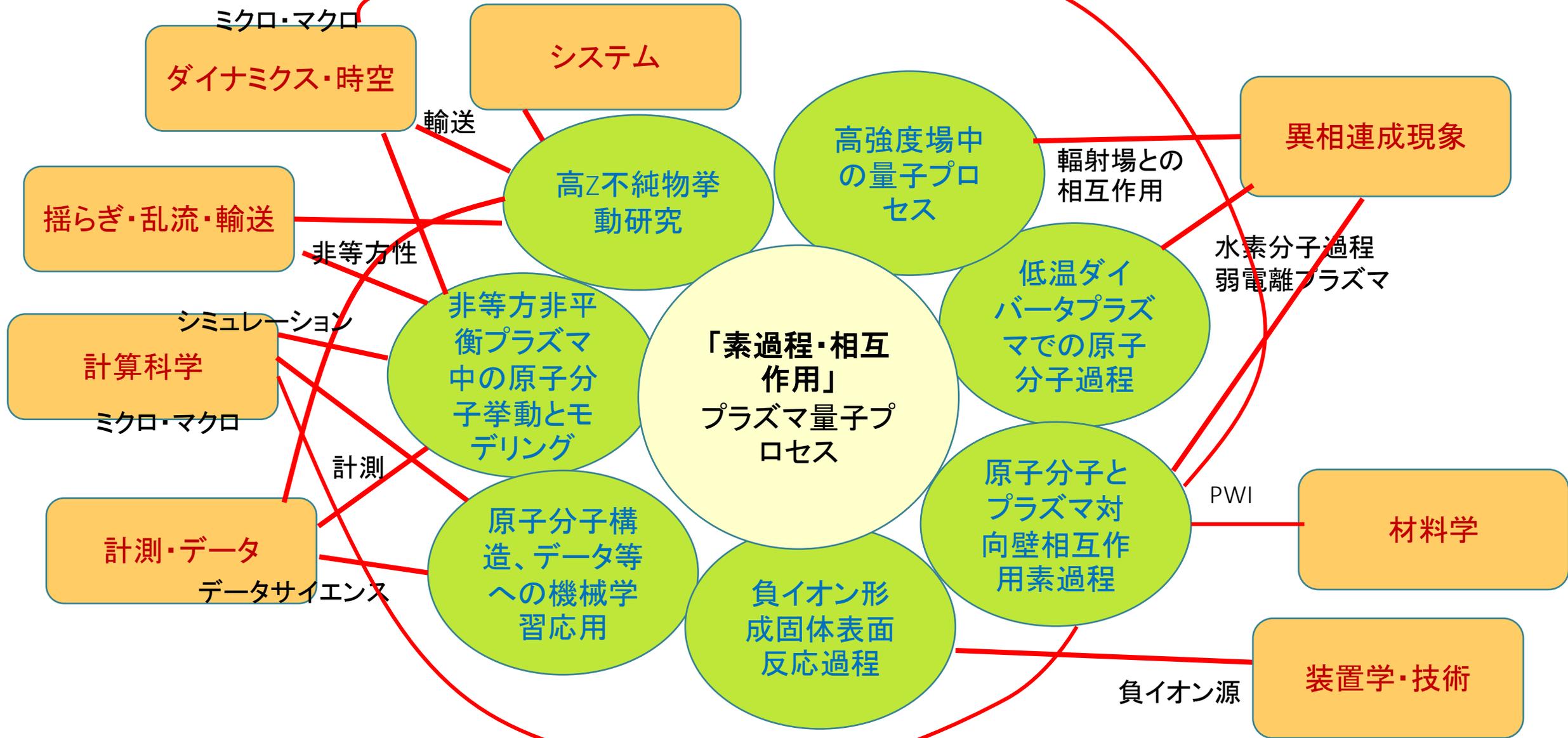


Warm Dense Matter



負イオンNBI

他のユニットテーマ軸との連携

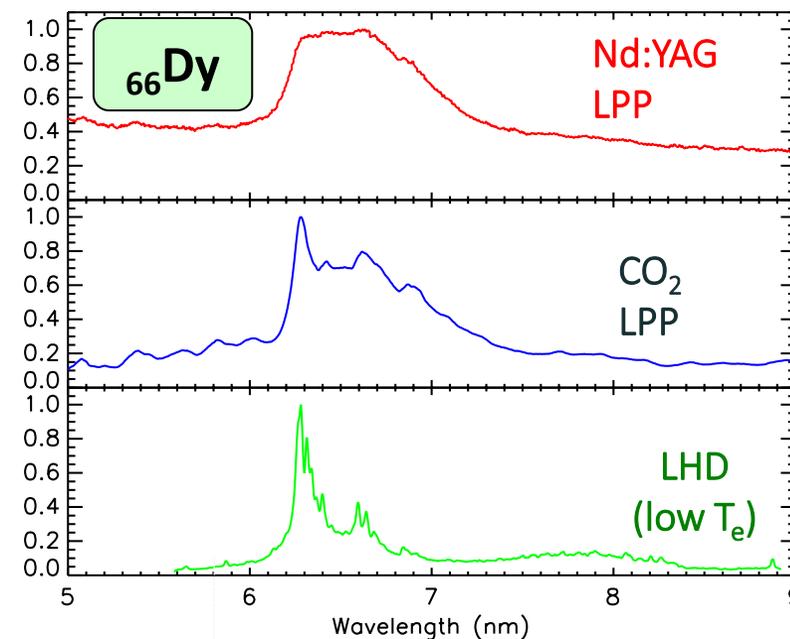
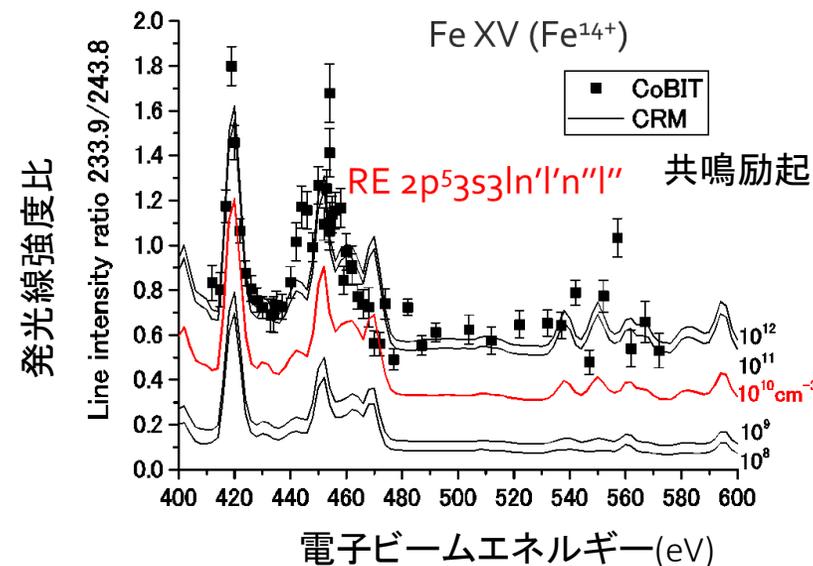


3. 学術的な特徴づけ

プラズマでのミクロな量子プロセス

- 内部構造を持つ原子・分子の量子遷移とそれに伴う光子・電子・（負）イオンの発生と消滅過程
- 量子プロセスに対するプラズマの電磁場・輻射場、レーザーや原子核の高強度場が与える影響
- 磁場閉じ込めプラズマ、レーザー生成プラズマ、低温（弱電離）プラズマ、高密度（あるいは縮退）プラズマ、およびプラズマ物質相互作用など、多様なプラズマにおいて、どのように観測され、どのようなプラズマ現象として発現しうるか

を研究する。



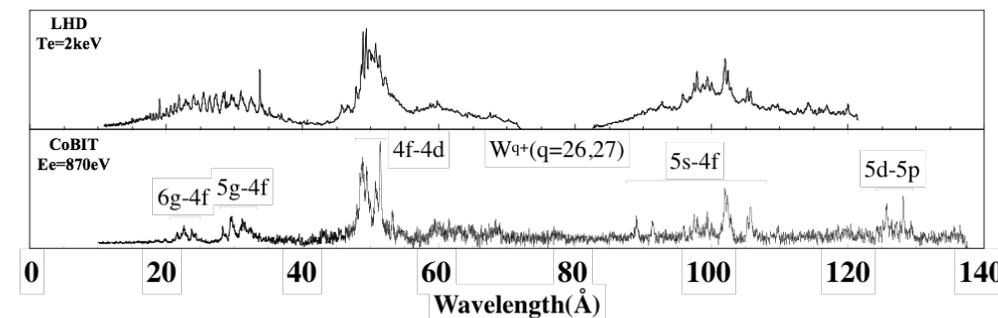
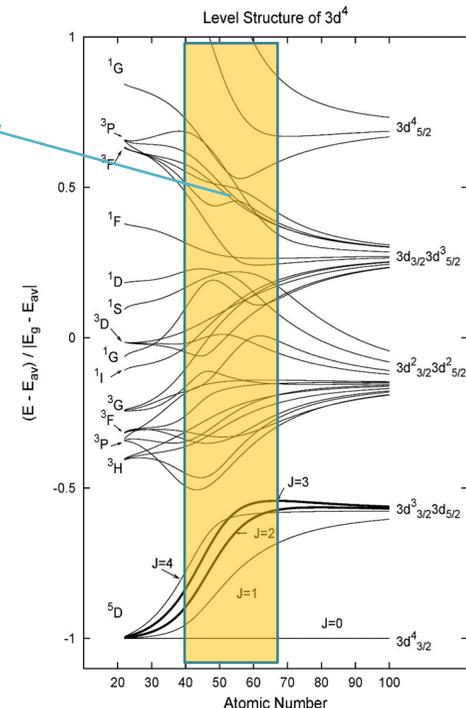
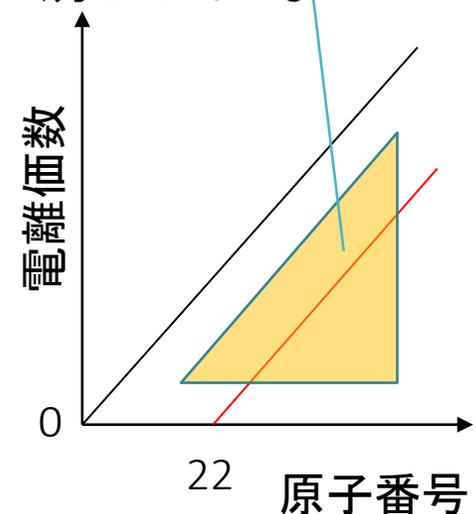
Opacityの影響のあるレーザー生成プラズマと影響のないLHDでのDyスペクトル

4. アプローチ(1)

非可積分な量子多体系のダイナミクスを理論・実験の両面から研究する。

- 高Z多価原子イオンやラジカルなどのエキゾチックな原子・分子の内部構造や発光・光吸収過程における電子相関効果、および相対論効果や量子電磁力学 (QED) 効果、また衝突や固体表面など開放系との相互作用で形成される励起状態の配向や分極、離散状態と連続状態の干渉効果や非エルミート性などについて理論原子物理学に基づいた理論研究、
- 衝突実験やプラズマ実験での分光計測などによる素過程の実験研究
- 素過程を用いた非平衡非等方プラズマ分光モデルの構築と実験によるモデル検証を行い、核融合・天体プラズマ診断の高精度化を実現する。

相対論的電子配置が高次に絡み合った領域では、原子構造がよく分かっていない

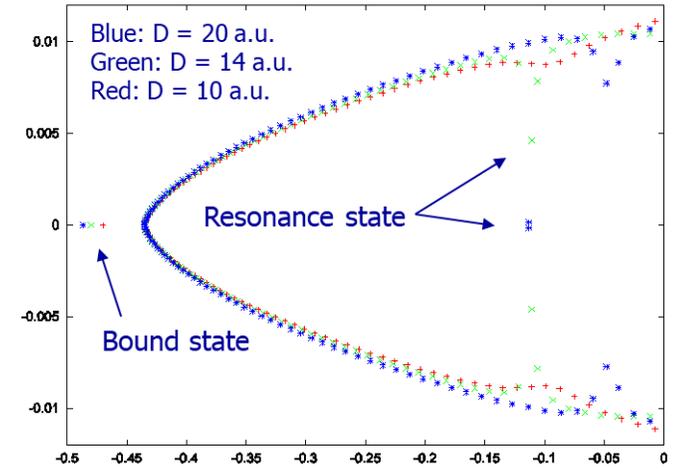


4. アプローチ(2)

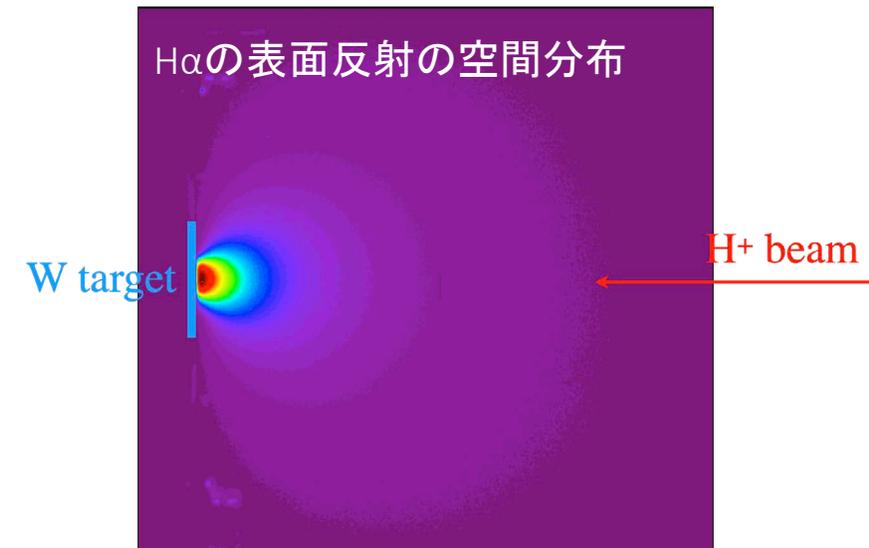
原子・分子と物質や場との相互作用研究では、

- 電子・イオンビームやレーザーを用いた固体との相互作用における量子プロセス
- 電磁場や輻射場など高強度場やトポロジジーを持った光と原子・分子の相互作用における量子プロセス、
- 固体表面における負イオン形成などの原子・分子過程、
- 強結合プラズマなど高密度プラズマ物性の理解、
- Warm Dense Matterの形成や性質における量子プロセスの役割の理解の深化

原子物理学、分子動力学シミュレーション、輻射流体シミュレーション、密度汎関数法などの理論的・数値的手法及びビームやレーザー等を用いた実験の両面から取り組む。



金属固体表面上での水素原子の複素エネルギー固有値の分布。



4. アプローチ(3)

プラズマ中の原子・分子挙動にかかわる集団現象は、

- 原子・分子素過程を取り込んだ化学反応変化や運動論的プラズマダイナミクスの数値シミュレーション、輻射流体力学計算、分子動力学シミュレーションなど数値理論的研究

- プラズマ実験での分光等様々な計測に非等方非平衡プラズマ分光モデル等を適用した挙動研究

を行うことにより、素過程が集団挙動にどのように関係し規定していくのか、プラズマ物性の理解や不純物挙動の制御法などへの展開も含めた問題解決を目指す。

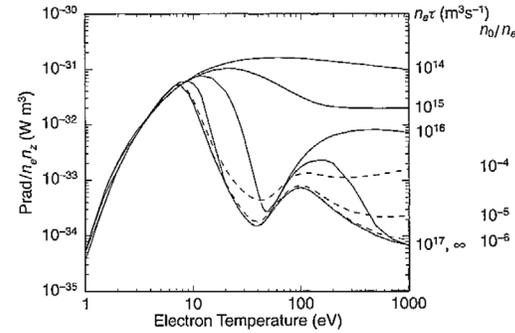
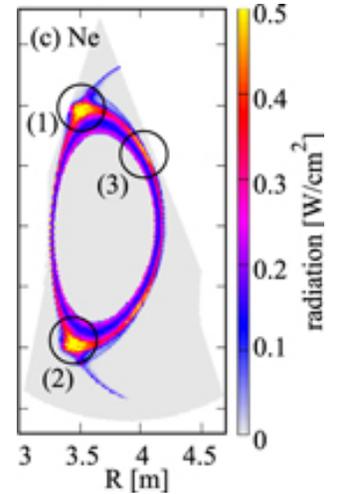
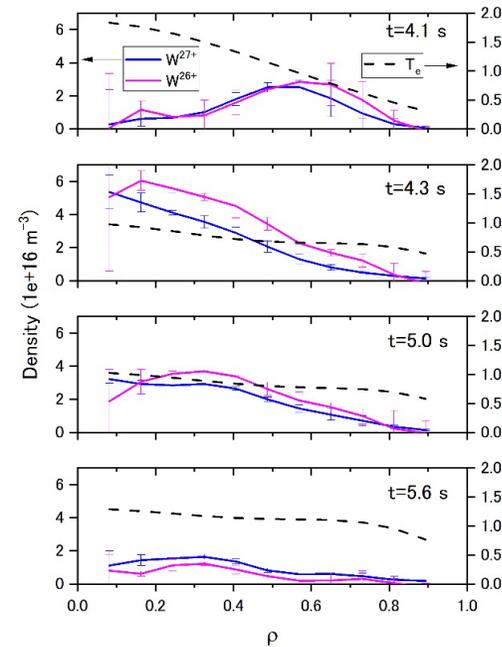


Figure 3.20. The carbon radiation power functions, $P_{\text{rad}}/(n_e n_C)$, at various values of $n_e \tau$ (solid lines), i.e. for transport-influenced equilibrium ('non-coronal equilibrium') and the equilibrium functions with neutral hydrogen present (broken lines) [3.46]. Compare with figure 3.17, the equilibrium ('coronal') case ($n_e \tau = \infty$).

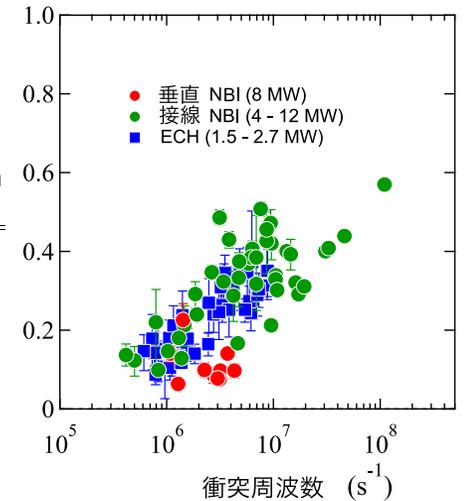


Neガスパフによる放射パワー

輸送の効果による放射パワーの違い(炭素)



観測された W^{27+} と W^{26+} イオンの近紫外域M1発光線強度から得られたLHDコアプラズマでのW多価イオン密度の時間変化 (#121534)。タングステンは4.03 sにコアプラズマに入射された。(Kato et al. 2021)



$Ly\alpha$ 偏光分光で得られた非等方的電子温度の衝突周波数依存性 (Goto and Ramaiya 2021))

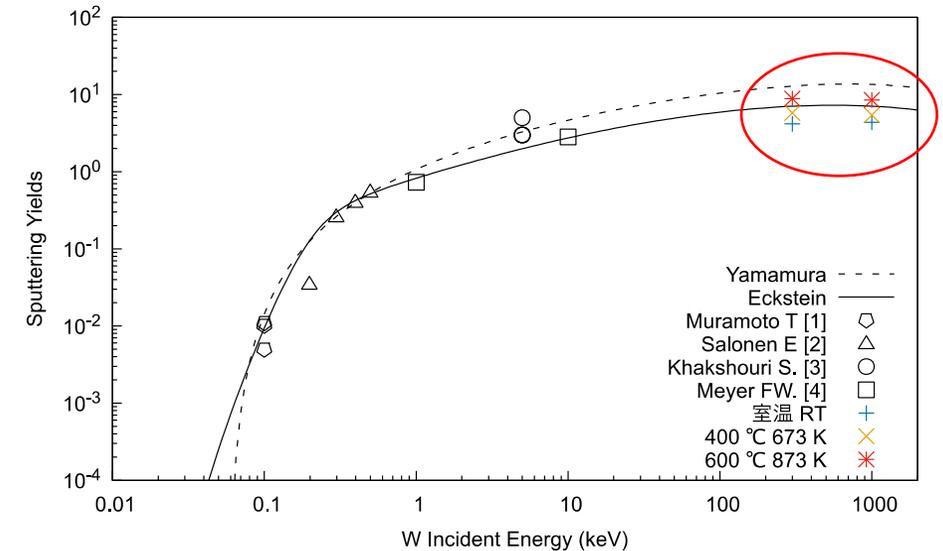
4. アプローチ(4)

原子・分子・光素過程研究から得られる原子分子データは、原子分子データベースとして多様なプラズマ研究への応用が期待できる。

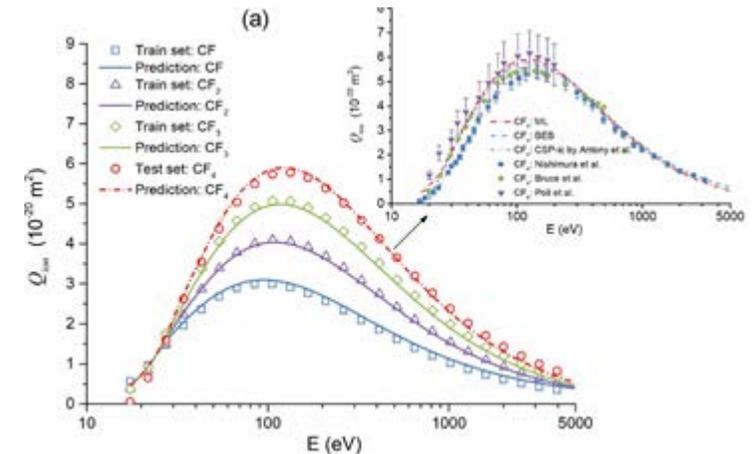
共同研究を通じた様々な原子物理実験・理論計算による原子・分子データの導出を行う。

原子・分子データに対し、統計的手法や機械学習の方法を適用し、スパースモデリングによる新たな物理的解釈、転移学習による多体複雑系原子・分子データの推算方法の導出等を試みる。

理論計算や測定値がない原子・分子データの推算が可能になれば、新たな原子衝突実験等の指標にもなり、また、低温大気圧プラズマで必要な衝突断面積データセットの整備にもつながり、応用範囲が広がることが期待される。

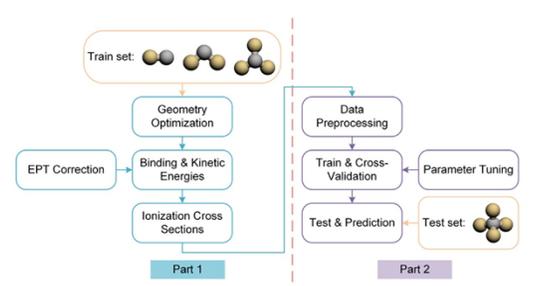
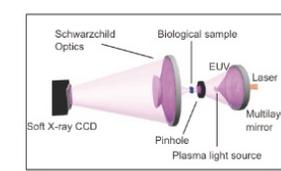
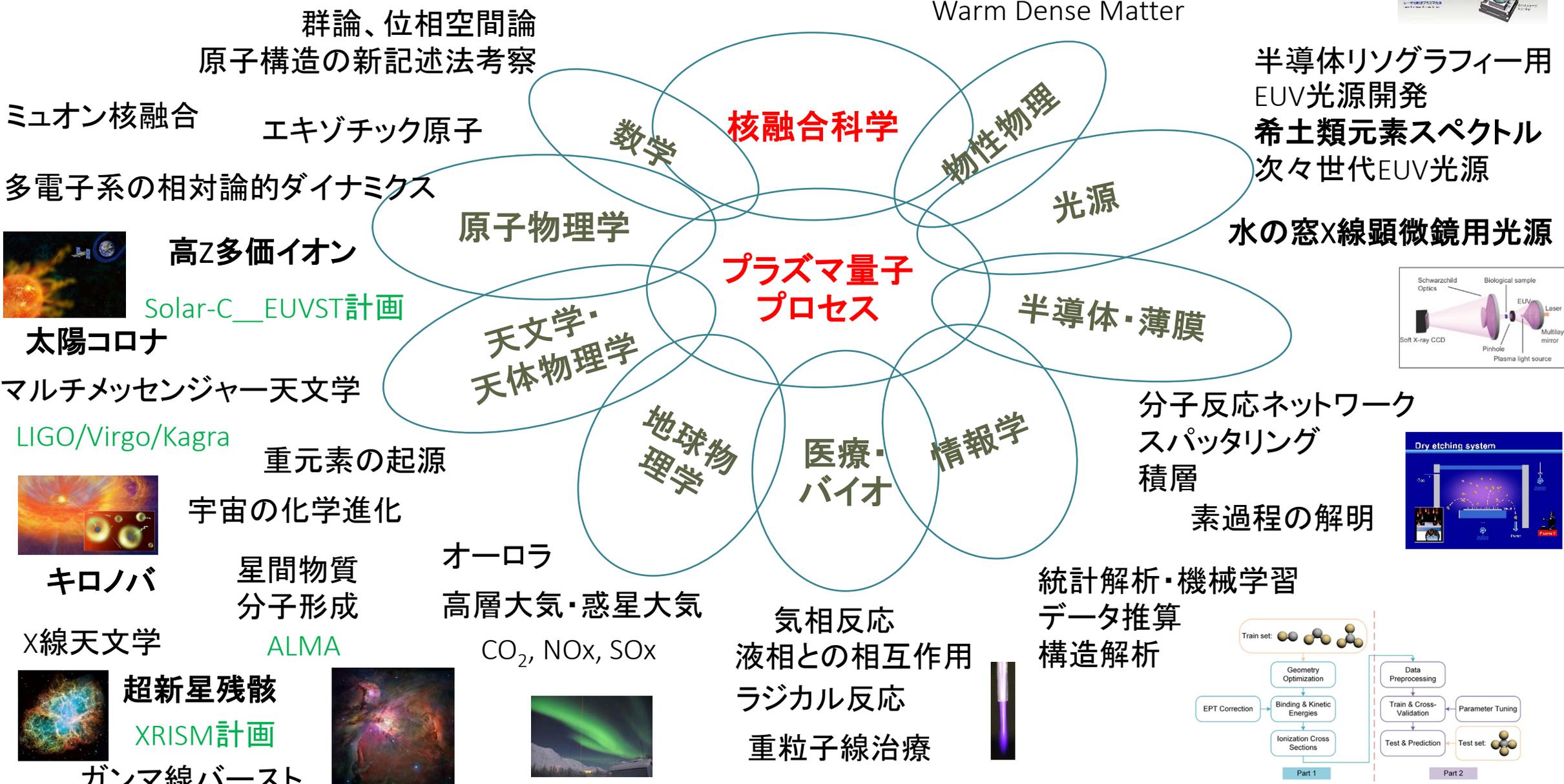


タングステンのself-sputtering yield
京都大学による最新の実験(Tsuchida et al.)



CF_x分子に対し、原子物理計算と経験則を組み合わせた電離断面積計算を教師データとして、CFから順に原子数を増やした分子の電離断面積を推定 (Zhong 2019)

5. 学際的展開



6. 独自性・優位性

名大旧プラズマ研の時代から核融合研では、

- 独自の多価イオン実験装置を用いた多価イオン物理研究、
- プラズマ中の原子・分子衝突断面積の数値データベース活動において国際的リーダーシップをとってきた実績
- 原子物理分野に加え、太陽プラズマ研究、キロノバ研究、X線天文学グループ等天文学分野やレーザー生成プラズマ研究分野との共同研究の実績

があり、これらの研究に優位性をもって取り組むことができる。

多様なプラズマ研究分野との交流実績から原子・分子・光過程研究を応用した新たな共同研究の発展も期待できる。