

## ユニットテーマ提案書

### 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

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、非等方非平衡プラズマ中の原子分子挙動とモデリング、低温ダイバート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、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、負イオン形成固体表面反応などの課題解決を目指す。

### 3. 学術的な特徴づけ（なんの研究だといえるか）

プラズマでのミクロな量子プロセス、すなわち、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、また量子プロセスに対してプラズマの電磁場・輻射場、レーザーや原子核の高強度場が与える影響、そしてこれらが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、多様なプラズマでそれぞれ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。

### 4. アプローチ（定式化）

プラズマ中の量子プロセスに関わる課題解決のために、**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。具体的には、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を行う。それら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。

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を、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。

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

2ページ以内で記述し、10.5pt・行間1行を使用してください。青字の注意書きは削除してください。

ユレーションなど数値理論的手法や、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。

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。これら原子・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。

## 5. 学際的展開

重元素多価イオンの重い原子核による高強度場中の多電子系の相対論的ダイナミクスと電磁波との相互作用はまだ十分解明されていない。一方で、核融合プラズマにおけるタングステン多価イオンの放射冷却効果と輸送、リソグラフィ用次世代極端紫外光源開発、軟X線顕微鏡用光源開発などへの高精度のデータ整備が期待されており、国際的にも活発に研究が推進されている。精度の高い多価イオン原子データとプラズマ分光診断モデリングは、間もなく打ち上げられる高分散X線分光器を搭載した人工衛星XRISMを用いたX線天体学による超新星残骸等研究や、中性子星合体のキロノバ観測による宇宙の重元素起源解明においても喫緊の課題となっており、これらの課題解決に取り組むことができる。エキゾチック原子の性質・物性等の理解が進めば、ミュオン核融合への展開も期待できる。

気相・液相や固体との相互作用における分子の化学プロセスの理解が進み、機械学習を応用した多様な分子種のデータ推算が可能になれば、地球大気・惑星大気における原子分子過程やオーロラ発光を利用した地球・惑星磁気圏の構造研究への応用、低温星間物質中の化学進化やダスト表面における分子形成過程の解明、プラズマエッチングや薄膜生成など工業プラズマにおける素過程の解明と効率評価、プラズマ医療・バイオプラズマにおけるプラズマ効果の解明と実証など、様々なプラズマに対する応用が期待される。

レーザー生成プラズマで形成される Warm Dense Matter における量子プロセスの理解、高強度場と原子の相互作用に対する総理解や、これらを応用した光源開発への発展、ガンマ線バースト（ファイヤーボール）など相対論プラズマと輻射・対生成が結びついた高エネルギー天体現象の解明につながることを期待される。

## 6. 独自性、優位性など

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、ならびにプラズマ中の原子・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と、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。