

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 / Plasma Quantum Processes

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における原子分子挙動のモデリング、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、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を解決する。また、レーザー核融合では、核融合燃焼の制御と出力利用法に対し、複合かつ連続した非平衡開放系において連成するエネルギー変換現象のモデル化と連成する物理現象のコントロールに取り組む。さらに、ミュオン触媒核融合実現に向けたミュオン原子の性質、反応系の解明に取り組む。

3. 学術的な特徴づけ（なんの研究だといえるか）

プラズマでのマイ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、また量子プロセスとプラズマの電磁場・輻射場との相互作用、レーザーや原子核の高強度場中の量子プロセスについて研究する。これらが低温から高温、低密度から高密度（縮退も含め）に至る多様なプラズマにおいて、いかにプラズマ物性を規定し、どのようなプラズマ現象として発現し観測されるか、多様な方式（磁場閉じ込め、レーザー、ミュオン触媒等）での核融合科学の課題を解決できる、原子分子素過程の総合的研究を展開する。

4. アプローチ（定式化）

原子分子素過程の切り口で多様なプラズマの物性やダイナミクスを記述し、多様な方式での核融合科学の課題を解決するとともに、多様な分野へ展開する。これを実現するために、原子物理学、プラズマ科学、レーザー核融合・応用、ミュオン科学、情報科学等の国内外の専門家との共同研究ネットワークを構築し、世界的にも類を見ない原子分子素過程の総合的研究を展開する。

具体的な未解決課題として、高 Z 多価原子イオンやラジカル、ミュオン原子などのエキゾチックな原子・分子の量子状態と発光・光吸収スペクトル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。また、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・分子の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、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、固体表面における負イオン形成などの原子・分子過程、強結合プラズマや Warm Dense Matter などの高密度プラズマなどにおける量子プロセス、及びプラズマ中の原子・分子の集団現象の研究を、原子・分子素過程を取り込んだ化学反応過程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、密度汎関数法などの理論的・数値的手法と、粒子ビームやレーザー等用いた実験、プラズマ実験での分光等様々な計測と非等方非平衡プラズマ分光モデル等を適用した挙動解析により、集団挙動に素過程がどのように関係し、プラズマ物性を決めていくのか、その理解と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。

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。

原子・分子・光過程研究から得られる原子分子データに、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や、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行い、新たな原子物理研究の展開と、推算データによる新たな原子衝突実験等への指標や、大気圧プラズマ応用で必要な衝突断面積データセットが提供できるようになる。

ハイパワーレーザーが創り出す連成するエネルギー変換の系として個別の物理現象を理解し、コントロールすることで達成する系全体の効率化や、非平衡開放系の現象として、エネルギー変換過程の複合や連鎖を実験により創り出し研究を遂行する。

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原子データ、さらに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、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であり、これらの課題解決に取り組むことができる。また、高分解能ミュオン原子分子分光法による少数量子時空構造研究から普遍的な原子分子過程研究への展開を目指す。

気相・液相や固体との相互作用における原子・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により、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、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できる。

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もつながることが期待される。ハイパワーレーザーで生成する極小プラズマを用いて、多様な規模の連成するエネルギー変換の模擬実験を展開し、レーザー宇宙物理学、超高压物性科学、レーザー量子ビーム科学、量子真空物理学、新材料、放射線科学、同位体科学、医療や中性子リソグラフィ等の幅広い分野に貢献することができる。

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、キロノバ、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。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。

大阪大学レーザー科学研究所と連携した研究を実施し、強力な場から自然環境までを模擬した系を構築することが可能であり、高エネルギー粒子が拓く新たな物理学への発展や、核融合燃焼の物理的理解から制御する工学研究までの一貫した学術体系の構築に貢献できる。

中部大学におけるミュオン触媒核融合研究グループとの共同研究により、革新的な核融合研究と原子分子過程研究の深化を目指すことができる。