

## ユニットテーマ提案書

### 1. ユニットテーマ

ミュオン科学と核融合科学の融合

### 2. 提案者（氏名・所属）

岡田信二・佐藤元泰・大嶋晃敏（中部大）、木野康志・山下琢磨（東北大）、有川安信（阪大）

### 3. テーマと研究内容の概要

NIFSの「核融合科学」と「ミュオン科学」の融合により、多彩な学際領域研究を展開する研究ユニットを提案する。本テーマは、以下の3つの柱から構成され、(1)・(2)は粒子加速器による人工生成ミュオンを、(3)は高エネルギー宇宙線起因の地上まで透過してくるミュオンを利用する。

**(1) ミュオン原子・分子科学**：ミュオン原子・分子とは、原子・分子中の電子をミュオンで置き換えたクーロン束縛系である。ミュオンが原子核に接近することで通常の原子・分子系では小さな量子効果が大きく現れる。ミュオンが原子・分子に導入されることで発現する疎な量子状態は、高分解能X線検出器によって探究可能であり、物質科学に普遍的に潜在する原子過程を浮き彫りにすることができる。核融合科学が育んだ原子分子研究とミュオン科学を融合し、世界最先端X線検出器を駆使することで、今まで見えなかった少数量子系の時空構造を解明する。 $\mu\text{CF}$ (後述)に代表されるようなミュオン原子・分子反応系は、多様な電荷移行反応の宝庫である。10年間の目標は、精密な実験と理論によってこれらの反応過程を直接検証し、新しい化学反応機構を開拓することである。

**(2) ミュオン触媒核融合**：重陽子と三重陽子に負ミュオンを加えて分子をつくと、分子内で核融合が起こる。核融合後に再放出されたミュオンが再び分子を作り次々と核融合反応を繰り返す現象をミュオン触媒核融合( $\mu\text{CF}$ )と呼ぶ。核融合科学の先端技術(プラズマ・原子分子科学・核融合炉・レーザー加速・水素同位体取扱技術)との融合により、 $\mu\text{CF}$ 研究の理論・技術的な側面において飛躍的進展をもたらす。10年間の目標は、 $\mu\text{CF}$ 炉のプロトタイプによる基礎研究・炉工学研究、先進ミュオン源の原理実証である。加速器の小型化を目指しレーザー加速器開発を平行して行う。

**(3) 宇宙線ミュオン応用**：宇宙線起因のミュオンの観測により「地球全体の宇宙天気予報」「雷雲電場・大規模構造物の透視」を展開する。宇宙天気予報とは、太陽活動(コロナ質量放出等)により宇宙空間プラズマ中に引き起こされる電磁環境の変動を、宇宙線ミュオンの観測により捉えることで、科学衛星より早く予報することが可能な注目を集めている。一方、高い透過力をもった宇宙線ミュオンは、雷雲や大規模構造物を透視できる。火山・地層内部の観測(噴火・地震予知)への応用だけでなく、核融合炉や原子炉内部等の透視にも応用できる。本テーマでは、核融合科学のプラズマ科学・原子分子科学・イメージングなど先端科学技術との融合により研究を加速させる。10年間の目標は、新たな宇宙天気予測研究・密度構造透視イメージング技術の確立である。

### 4. 位置づけ

「ミュオン触媒核融合」は、将来のエネルギー源として期待されていたが、得られるエネルギーがミュオン生成の実効的エネルギーの半分程度で頭打ちとなると予想され、2000年代以降は研究が停滞していた。ところが、ごく最近の研究により、この頭打ちという予想が乗り越えられるだろうと

の見通しが、木野らによって得られている。近年の飛躍的に発展した少数多体計算により、分子形成プロセスを省略した「飛行中  $\mu$ CF」を含む新しいプロセスの可能性が拓かれた。工学的には、具体的な $\mu$ CF 炉（特願 2020-503567）や、先進ミュオン源（特願 2021-73711）の提案がなされ、 $\mu$ CF 研究は新たな局面を迎えている。さらに、エネルギー源としてだけでなく、核融合中性子を用いた長寿命核分裂生成物の低減・資源化への応用技術としての価値を見いだされて以来、核融合科学の社会的意義を高める役割にも注目されている。本提案(1)(2)は、新 $\mu$ CF プロセスとそれを高める反応場に関する革新的研究を世界に先駆けて推進するものであり、画期的成果が期待される。

本ユニットは、理学（理論研究・実験研究）と工学を協奏的に推進するところに特徴がある。特に、少数多体量子理論・原子分子データベース（理論）、高分解能超伝導 X 線検出器を用いたビーム実験研究・宇宙線研究（実験）、核融合炉工学・レーザー加速研究（工学）に於いては、国際的に極めて優位な位置におり、独創的で promising なテーマ(1)~(3)を掲げ、新規領域を開拓する。

ここで、本テーマが核融合科学研究所にて推進するにふさわしいことを喚起したい。本提案は3つの柱からなるが、(1)新たな核融合の可能性とその基盤的データベース構築、(2)核融合科学から生み出された複雑な磁場中の荷電粒子の運動の理解や可視化という多体物理学は生命系にさえ繋がる次世代物理領域等、社会貢献の評価軸から考え、NIFS にて推進するにふさわしいテーマである。

## 5. 研究の方法

(1)~(3)のテーマを取り組む為、理論研究については、所外のグループを中心にした少数多体量子計算と、核融合科学研究所で蓄積された原子・分子物理学研究および非平衡系の理論研究を統合することで加速的に研究を進める。実験研究には、粒子加速器施設、超伝導検出器、放射線測定器群、宇宙線ミュオン検出器を要する。最近、最先端 X 線検出器を駆使したミュオン原子分光実験にて、フェムト秒スケールの原子生成過程の全貌を捉えることに成功しテーマ(1)の実現可能性を示した([PRL127\(2021\)053001](#), NIFS 加藤太治氏との共同研究)。研究所内外の既存の施設の共同利用からスタートし、データの蓄積と実験研究の進展に伴い、逐次、新規設備の投入をめざす。工学面については、所内外研究のシナジー効果により、革新的ラムジェット型 $\mu$ CF 炉や、先進ミュオン源・レーザー粒子加速器等の概念設計を進め、Alternative な核融合炉の現実性を呈示する。

本ユニットテーマに取り組むため、(1)~(3)のテーマおよび理論・実験・設計アプローチ、各々について、少額・中型予算（初期）、大型予算（中長期）の競争的資金を段階的に獲得していく。

## 6. 自己評価

**1) 未来志向であること：**(1)革新的検出器による原子分子素過程の解明、(2)新しい核融合への挑戦、(3)新たな防災計測学の展開という新規の研究領域を開拓しており未来応用も見据えたテーマ。

**2) 目標を具体的に示していること：**10年後のマイルストーンを具体的な目標と共に上述。

**3) 10年後に学术界に輝くテーマに育つこと：**いずれも学术界にて今後大きく発展しうるテーマ。

**4) 多様な「個人のテーマ」を包摂できること：**素粒子・原子核・原子分子・プラズマ・宇宙・天文・地球惑星科学・量子ビーム・エネルギー工学・防災計測学など多彩な領域を含んだ学際的なテーマで、理論・実験・シミュレーション・工学の協働によって成立する。多様な個人のテーマを包含し、その協働によってますます成果が上がる提案になっている。