

ユニットテーマ提案書

1. ユニットテーマ

ミュオンと核融合科学の融合 (Muon and fusion science collaboration)

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

素粒子「ミュオン」の持つ特異な性質：(1)量子的性質、(2)強い結合力、(3)高い透過力、を利用した多彩な学際領域研究を、NIFSの核融合科学との融合により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。その量子状態は、高分解能X線分光により探究可能で、物質科学に普遍的に潜在する原子分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。最近、この実現可能性を示し[[PRL\(2021\)](#) (NIFS 加藤太治氏との共同研究)]、分光学において「新しい周期表」をもたらす手法として、極めて広い分野へインパクトを与えることが分かってきた。 μCF (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(μCF)と呼ぶ。近年、その触媒効率を引き上げる新たな可能性($\text{IF}\mu\text{CF}$)が理論的に見いだされると共に、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核融合科学の社会的意義を高める役割にも注目が集まっている。核融合科学の先端技術(原子分子科学・プラズマ・水素同位体取扱技術・NBI・レーザー加速)との融合により、 $\text{IF}\mu\text{CF}$ 及びこれを高める反応場の研究を推進する。10年間の目標は、 $\text{IF}\mu\text{CF}$ 触媒効率の検証、 μCF 用ミュオン源・ミュオン標的の基盤構築、及び将来の加速器の小型化を目指したレーザー加速器開発である。

(3) 宇宙線ミュオン応用：宇宙線ミュオンを地上より全球観測することで、太陽活動に起因する惑星間空間磁場の変動を網羅的に監視し、その影響を予測する「宇宙天気観測・予報」を展開する。従来の科学衛星による観測とは異なり、地上では宇宙天気の変動の影響を直接受けにくい点、観測点を地上に多数配置することで全天を網羅的に観測できる点、太陽フレアなど人類社会に甚大な損害を与える可能性のある宇宙からの影響をいち早く(約半日前に)観測できるという点で独創的である。近年の研究[[PRL\(2016\)](#), [PRD\(2018\)](#)等]により、現在急速に発展している宇宙天気分野へ重要な貢献ができることが明らかになってきた。核融合科学の「複雑磁場中の荷電粒子運動研究」との

連携により、地上ミュオン観測から惑星間空間磁場構造の再構成能力を飛躍的に向上させる。10年間の目標は、本手法を導入することにより宇宙天気予報の分野に質的転換をもたらすことである。

4. 位置づけ

本ユニットは、国際的に極めて優位な位置にある「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・宇宙線ミュオン研究」(実験)、

「NBI・レーザー加速研究」(工学)を最大限に活かし、独創的で promising なテーマ(1)~(3)を掲げ、新規領域を開拓するところに特徴がある。以下、これらのシナジー効果について付言する。近年、飛躍的に発展した少数多体計算により、励起分子形成プロセスを活用した IF μ CF を含む新しい過程の可能性が拓かれ気運が高まってきているところ、具体的な μ CF 標的[特願 2020-503567]や先進ミュオン源[特願 2021-73711]の提案がなされ、 μ CF 研究は新たな局面を迎えている。(1)原子分子研究と(2) μ CF 研究を、NIFS ユニットにおいて同時に進めることでシナジー効果が得られ、新しい μ CF プロセスをはじめとする革新的な核融合研究を、世界に先駆けて飛躍的に発展させることができる。(3)は、宇宙天気予報の中で、世界的にもユニークで将来性のある課題である。地球惑星科学に加え、宇宙天気予報に関わる応用研究という裾野の広い分野に影響を与えうるテーマであり、核融合研究にて飛躍的に発達した複雑磁場研究成果を活用することで創発的に発展できる。これら(1)~(3)のテーマを、NIFS のユニットとして推進し、最先核融合科学を推進する関連ユニットと連携・協力関係のもとで行うことで、画期的成果が得られると期待される。

5. 研究の方法

(1)~(3)のテーマに取り組む為、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、NIFS 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、加速器施設、超伝導検出器、宇宙線ミュオン検出器を要する。既存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。NIFS 施設利用・技術職員のサポートを受け、所内外研究のシナジー効果により、ミュオン触媒核融合に特化した先進ミュオン源・ミュオン標的・小型加速器を目指したレーザー加速器に関する開発を進め、実現可能性を呈示する。

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)新しい周期表という物理化学の展開を示唆、(2)新しい核融合への挑戦、(3)宇宙天気予報の新手法という、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年後に学術界に輝くテーマに育つこと：いずれも学術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。