

<p>【領域番号】 2307</p>	<p>【領域略称名】 超低速ミュオン</p>
<p>【領域代表者（所属）】 鳥養映子（山梨大学・大学院医学工学総合研究部・教授）</p>	
<p>超低速ミュオン顕微鏡は、表面・界面が関与する物理、化学、生命の諸現象の解明から、ミュオン異常磁気能率測定といった基礎物理定数の精密測定まで、さまざまな分野において、従来の研究を飛躍的に発展させる突破口となる。対象となる広い分野の研究者との協力体制のもとにこれを用いた超低速ミュオン顕微法を確立し、様々な研究に適用することにより新たな融合領域を創生する。これを基盤にしてさらなる新分野の開拓をめざす。</p> <p>研究期間前半（平成23-25年度前半）は、A01班とA04班を中心に計画班全体が連携して、本領域の共通基盤装置である超低速ミュオン顕微鏡の開発を集中的に行った。この結果、平成24年度に超低速ミュオン顕微鏡の基幹部を構成する、熱ミュオニウム発生装置、高強度ライマンαレーザー装置、光学系の開発を一通り完了することができ、平成25年度中の超低速ミュオン発生と実験開始に目途がついた。超低速ミュオンは、加熱したタングステン標的にミュオンを打ち込むことで生成される。この際に用いる4MeVミュオンビームは、超伝導電磁石を用いたビームライン(Uライン)より取り出される。Uラインにおいては、平成24年11月に現有のDラインの強度を10倍以上（英国RALの80倍）上回るミュオン発生が確認された。この強度は、すでにUラインの最終目標値にほぼ達しており、加速器の陽子ビームパワーが目標の1MWになった際には、目標値の4倍という未踏の強度となることが見込まれる。また、ライマンαレーザーのための高利得レーザー媒質として、本領域の計画時には育成困難とされた新規セラミクス（特許出願準備中）が、産業界との共同開発により成功したことも著しい成果である。</p> <p>本領域は4つの計画研究と公募研究により研究を展開している。</p> <p>A01 超低速ミュオン顕微鏡：超低速ミュオンビーム源とμSR実験装置からなる超低速ミュオン顕微鏡の開発、製作、設置を先導して行い、ビームの最適化と高度化を図る。また微小領域を3次的にマッピングする顕微法を確立し、極微試料での研究を可能にする。さらにエネルギーが揃ったミュオンの干渉性を用いて、物質内部を探る「回折ミュオン顕微鏡」の基盤を創る。</p> <p>A02 界面のスピン伝導と反応：正ミュオンの物質中での電子の捕獲・放出を伴う素過程を利用することにより、磁性を持たない物質の性質を超高感度で探ることができる。スピントロニクス材料界面における伝導電子のスピン寿命、高分子膜・生体中の電子伝達や、2次電池の電極反応におけるイオン伝導の経路同定に焦点をあて、伝導現象の本質に迫る。さらに界面水素、細胞中の酸素、金属触媒や光触媒などが関わる表面・界面反応の機構を解明する。</p> <p>A03 表面-バルク境界領域のヘテロ電子相関：超低速ミュオン顕微法を用いて、表面近傍からバルクへの境界領域における、様々な長さスケール(1~10³nm)で生起する協同現象(界面の電子状態、空間的制限下での異方的超伝導の秩序変数と渦糸状態、金属表面を持つトポロジカル絶縁体の準表面電子状態等)を観察し、通常の電子相関(< nm)とこれらが絡み合う複合的(ヘテロ)電子相関の物理を明らかにする。</p> <p>A04 物質創成の原理を極める超冷却と尖鋭化：超低速ミュオン基幹技術として高強度ライマンαレーザーを開発する。さらに生成される超低速ミュオンのエネルギーを室温以下にまで冷却することにより、エミッタンスの良い偏極ミュオンビームを実現し、ミュオン異常磁気能率(g-2)測定実験など、標準理論を超える素粒子物理研究に貢献する。ここで実現されるビームの冷却と短パンチ化技術は、物性研究のさらなる拡大に不可欠な極限性能を実現するための基幹技術としても重要である。</p>	

以下に各班の進展を述べる。

A01 班: J-PARC 物質生命科学実験施設のミュオンエリア U ラインにおいて超低速ミュオン顕微鏡の建設を進めた。超低速ミュオン顕微鏡の基幹部である熱ミュオニウム発生装置および超低速ミュオンビーム光学系は、(1)ミュオニウム生成チェンバ、(2)タングステン標的、(3)大強度表面ミュオンビームライン、(4)レーザーシステム、(5)レーザー導入系、(6)ビーム輸送系及び(7) μ SR 実験用分光器、から構成され (番号は図 3-1 に対応)、これらの開発と製作を平成 24 年度までに完了した。先に述べた通り、U ラインでは平成 24 年 11 月に(陽子ビーム強度 200kW 運転時)パルス当たり 250 万個の表面ミュオン発生が確認された。陽子ビームのパワーが計画の 1MW に達する平成 27 年には、U ラインではパルス当たり 1200 万個という当初の目標値を大きく超えた強度となり、それを元に作られる超低速ミュオンも目標を上回る数が期待できる。またタングステン標的に関しては、ミュオニウム発生効率を目的値まで上げるため、新たな高純度化の手法を確立するとともに、標的材料の最適化を進めた。

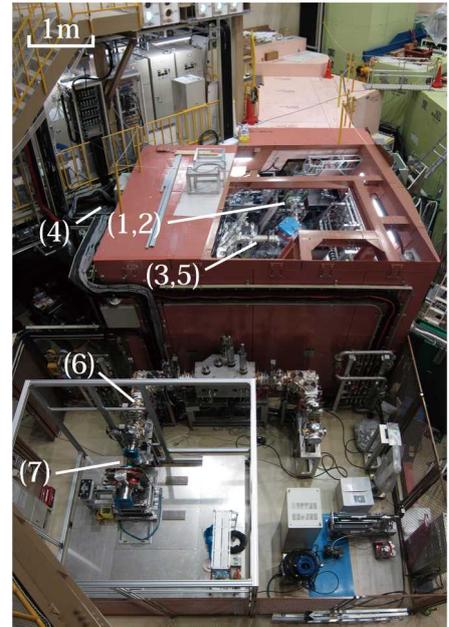


図3-1 Uラインに設置された超低速ミュオン顕微鏡の基幹部

A04 班: 平成 25 年 2 月に、理化学研究所で開発中の全固体高強度パルスレーザー光発生装置において、初のライマン α 光発生を確認した(図 3-2)。また高利得レーザー媒質として、Nd:YAG セラミックスの産業界との共同開発に成功した(特許出願準備中)。今後この媒質を導入することにより、平成 25 年度中に、212.556 nm、820.649 nm の各波長において 50 mJ を実現し、目標の 1 パルス当たり 100 μ J のライマン α 共鳴放射を達成できる見通しを得た。さらにミュオンビームのエミッタンスを向上させるため、常温ミュオニウム生成標的については、エアロジェル他の候補で生成試験を進めている。シミュレーションに基づいた表面形状の加工により、生成効率を 5 倍程度上げることを目指している。

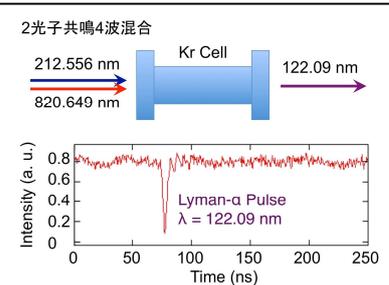


図 3-2 全固体レーザー装置によるライマン α 光発生を示す信号

一方、A02 班、A03 班は、これまでミュオンの応用が進んでいなかった分野、特に触媒化学、生命科学分野との共同研究を積極的に進めている。

A02班: 次の4つのモデルシステムについて、超低速ミュオンを応用するための準備研究が計画通り進んでいる。さらに、触媒化学、生命科学、スピントロニクス研究会により、隣接分野からの関心も高まった。

1. 界面近傍におけるスピン伝導：伝導電子のミュオンによる散乱がスピンに依存することを原理的に実証したGaAsの円偏光光励起実験では、負ミュオニウムの荷電揺動に基づくスピン依存散乱の理論を前川らが解明、半導体中のスピン伝導測定の理論的根拠を確立した。実用材料開発では、(Ga,Mn)As超薄膜の磁性及び磁気輸送特性の強い膜厚依存性を発見、その機構と電子構造を解明、注入用電極としての高性能化に成功した。
2. 触媒化学反応：光触媒の量子効率を左右する格子欠陥、特に酸素欠陥の構造とその動的性質をミ

ミュオンで直接観測できることを、欠陥を制御したアナトース粉末結晶におけるミュオン緩和率の粒径(表面積/体積比)依存性及びルチル単結晶の還元処理効果の実験によって検証した。

3. 電気化学を担うイオン伝導：液体溶媒に迫る固体溶媒中のイオン伝導の測定に成功した。各種電池材料(正極・電解質・負極)について、 μ SR法によりLi及びNaの拡散挙動と係数を求め、他の手段と比較してキャリア濃度と電極の反応面積を導く手法を示した(図3-3)。また磁石材料の内部磁気構造、水素貯蔵材料の水素脱離挙動の解明に μ SR法を適用する道を拓いた。
4. 生命反応を司る電子伝達：電子伝達系を担う蛋白質の1つであるシトクロムcについて、水和水による分子間電子伝達の促進効果を見出した。また、アルブミン蛋白質を含む緩衝溶液において、ミュオニウムのスピン緩和が純水中と同様に酸素の混入により敏感に変化することを示し、血液中の酸素濃度の解析への道を拓いた。

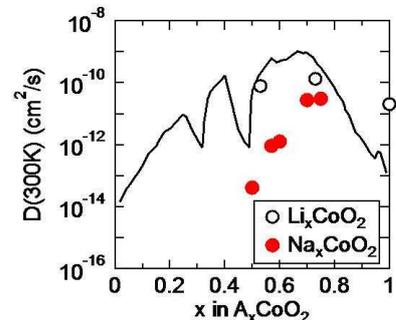


図3-3 μ SR法により求めた電池材料のイオン拡散係数

A03班：表面-バルク境界領域のヘテロ電子相関の解明を目的とし、超低速ビームを用いて初めて観測可能となる薄膜およびその表面研究に携わる研究者を連携研究者として加えることで、超低速ビーム実験に向けた研究を展開している。

1. 薄膜・表面研究者との研究連携による進展

電子ドーピング系銅酸化物 T'相 La214 薄膜の超伝導の研究では、超低速ビーム利用への準備としてポール・シェラー研究所(スイス)の低エネルギーミュオンビームを用いた μ SR(深さ分解能 ~ 20 nm)測定を行い、非ドーピング母物質薄膜の超伝導について重要な知見が得られつつある。界面に現れる磁性の研究では、電子デバイス応用を目指した工学分野の研究者との連携により、遷移金属酸化物複合構造の成膜条件等の最適化が進展した。

2. 他のプローブとの連携による超伝導と磁性の空間的に不均一な描像の理解

ホールドーピング系銅酸化物(La214系、Bi2201系、Bi2212系、Y123系)や鉄系超伝導体($\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$)の研究が進展し、とくにSTM/STS測定により超伝導エネルギーギャップの実空間での不均一さについての理解が進んだ。またSTS測定によって磁束格子のダイナミクスを調べる新手法を開発した。

3. カイラル磁性体におけるカイラルソリトン格子の研究

カイラル磁性体 $\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2$ 単結晶について、ローレンツ電子顕微鏡を用いてカイラルソリトン格子発生を観測に成功した。この新奇な磁気状態の解明にむけて、新たな不斉合成手法の開発とともに、さまざまなカイラル磁性体におけるカイラルソリトン格子の研究が進んだ。

平成25年2月までに超低速ミュオン顕微鏡の主要装置がUラインに設置された。3月22日にはレーザー装置をJ-PARCに搬入し、平成25年前半における超低速ミュオン発生を目標に着々と準備を進めてきた。レーザーの安全検査に合格し、5月27日には法定の放射線に関する施設検査が予定されていた。しかし5月23日に、J-PARCハドロン実験施設における放射能汚染事故が発生し、J-PARCは事故原因究明と安全対策の見直しのために現在完全停止となっている。本来のスケジュールでは、7月まで超低速ミュオンビームのコミッションングと性能実証実験を行う予定であった。その後8月から翌年1月まではJ-PARCの加速器性能改良のための停止期間であり、その間にレーザー増強を図る計画であった。しかしながら超低速ミュオン発生実験は来年1月以降に持ち越さざるを得なくなった。超低速ミュオン発生のための基幹装置の準備は完了しており、J-PARCが再開され次第、基礎データを蓄積して本領域研究の後半の実験計画に反映させる。