

大強度、高輝度超低速ミュオン源

池戸豊、三宅康博、下村浩一郎、パトリックストラッサー、河村成肇、西山樟生、
牧村俊介、藤森弘、幸田彰宏、足立泰平¹、荻津透¹、槇田康博²、中本建志¹、
山本明¹、安島泰雄³、髭本亘⁴、松田恭幸⁵
所属 KEK 物構研ミュオン、¹KEK 低温センター、²KEK 素核研、³KEK 工作センター、
⁴原子力機構先端科学研究所、⁵東京大学総合文化研究科

超低速ミュオン(μ^+)ビームは 0.05–30 keV のエネルギー範囲で可変という特徴をもつ μ^+ ビームである。エネルギー制御により、超低速 μ^+ ビームを物質に入射した際に μ^+ が止まる深さを調整することができ、表面近傍では数 nm の分解能で、また加速することにより数 100 nm の深さのバルク領域までの連続的な測定が可能となる。また超低速 μ^+ ビームの最大の特長の一つは、その時間幅が 8 ns と非常に短いことである。従来のパルス μ^+ ビームの時間幅は 100 ns 程度と幅広であるため、試料中の速いスピン緩和現象の観察を困難であった。しかし、レーザー共鳴イオン化法で生まれる超低速 μ^+ ビームの時間幅は、イオン化で用いるレーザーのパルス幅によって決まるので、シャープな時間分解能を達成することができ、GHzオーダーの μ^+ 回転信号を測定することができる。さらにもう一つの特長はビームのサイズが直径 3–4mm と、もともとのビームの大きさ(直径 50mm 程度)と比べて非常に小さくなっていることである。超低速 μ^+ ビームはもともと 0.2eV 程度の μ^+ を再加速しているため、ビームエミッタンスが小さく、理論的には 20kV の加速で、直径 0.5 mm 以下、10MV まで加速すると直径 1 μ m 以下のビームが得られる。これにより微量しか得ることのできない試料や微小単結晶試料への応用も可能となる。このように超低速 μ^+ ビームにより、従来の表面 μ^+ ビーム(4.1 MeV)では観測できなかった表面・界面の磁気的性質やプロトンの動的過程を調べることができるようになり、新しい知見が得られることが期待されている。

超低速 μ^+ ビーム生成過程は、真空中での熱エネルギーミュオニウム($\text{Mu}; (\mu^+e^-)$)生成から始まる。超高真空中で DC 電流を流すことによって 2000 K まで加熱された 50 μ m 厚のタングステン箔(99.9999%)に表面 μ^+ を入射すると、数%という高い効率で熱エネルギー Mu が真空中に放出される。この熱エネルギー Mu を入射パルス μ^+ ビームに同期したレーザー光により 1s–2p-unbound の遷移の共鳴イオン化法を用いて効率良くイオン化し、熱エネルギー μ^+ を得る。共鳴イオン化法によって生まれた熱エネルギー μ^+ は、静電レンズによって最大 30 kV まで加速され、ミュオンスピン回転緩和法(μ^+ SR)の実験装置に輸送される。熱エネルギー μ^+ は、質量分析磁石による質量分離並びに TOF(飛行時間)測定二次元測定によって分離されるので、殆どプロトンやポジトロン等のバックグラウンドのない測定が可能となる。

こうした手法を実証するために、KEK と理化学研究所は共同で J-PARC と同じくパルス表面 μ^+ が得られる理研 RAL 施設において、超低速 μ^+ 生成実験の R&D を推し進めてきた。理研 RAL 施設では 1 秒当たり 1×10^6 個の入射表面 μ^+ から 20 個の超低速 μ^+ を生成し、この超低速 μ^+ ビームを用いて、 SiO_2 表面に蒸着した Al 膜(厚さ 40 nm)の μ^+ SR 実験に成功している。現在、100 倍の強度のライマン α 光を生成する新しいレーザーシステムの開発を行っており、これにより超低速 μ^+ の生成効率は 10^{-2} オーダーまで増強することができる。

現在 J-PARC のミュオン施設(MUSE)においては、大強度軸集束 μ^+ ビームライン(スーパーオメガビームライン、強度は理研 RAL の 100 倍)の計画が進められている。スーパーオメガビームラインは、大立体角 μ^+ 捕獲ソレノイド、 μ^+ 輸送用湾曲超伝導ソレノイド及び軸集束超伝導ソレノイドと全てソレノイドにより構成される。捕獲ソレノイドは、従来の 100 倍の取り込み立体角を持ち、ミュオン標的で生成する表面 μ^+ を効率よく集めることができる。湾曲ソレノイドは 45° の湾曲部を二つ導入することで、ミュオン標的からの直接的な放射線を低減させるとともに、大強度 μ^+ ビームを高輸送効率(ほぼ 100%)で実験エリアまで輸送する。スーパーオメガビームラインが実現すれば、レーザー強度の増強と組み合わせることにより、1 秒当たり 1×10^6 個の大強度、高輝度超低速 μ^+ ビームを生成することが可能となる。これにより、新しい表面・界面の磁性プローブとして、また触媒科学等で重要なプロトンの表面・サブサーフェス領域での振舞いなど未知の実験研究領域の観測を行うことができると期待されている。

ここでは、スーパーオメガミュオンビームチャンネルの建設計画の詳細、ビーム輸送シミュレーション、及び大強度、高輝度の超低速 μ^+ マイクロビームの特性と期待される実験研究計画を中心として報告する。