

世界最高強度のミュオン発生成功 & 世界初の超低速ミュオン顕微鏡計画

SATテクノロジー・ショーケース2014

■はじめに

ミュオンは、平均寿命が2.2 μ sで崩壊するレプトンの一種です。その質量は、およそ陽子の1/9、電子の200倍であり、生まれながらにして100%スピン偏極しているという特徴があります。このため、物質内部に打ち込むと原子スケールの方位磁石の様に振舞うことから、マイクロ動的磁気プローブとして広く使われています。また、水素原子の軽い同位体とみなせることから、水素の拡散や、反応性、電子状態を調べることに利用されてきました。観測時間領域として、 μ sオーダーの知見が得られ、中性子、NMR、ESR等の相補的な時間領域のユニークな磁性プローブと考えることができます。これまでの実験研究には、“低速(表面)ミュオン μ^+ (4MeV)”が主に使用されてきましたが、最近、ミュオンビームの冷却技術に大きな進展がありました。J-PARCミュオン施設(MUSE)で得られる世界最高強度のパルス低速ミュオンと真空紫外パルスレーザー光を組み合わすことにより生み出されるエネルギー可変(0.05-60keV)の超低速 μ^+ ビームです。

■活動内容

1. 世界最高強度のミュオン発生成功

Uラインは、ミュオン標的から飛び出してくる低速 μ^+ を、大口径ソレノイド磁石系によって捕獲し、効率よく実験室に輸送する新しい概念の軸収束ミュオンビームラインです。取り込み立体角は、400 mSrにも及び、従来の四重極電磁石による取り込みに比べると、ほぼ10倍以上のミュオン収量の増強が見込めます⁽¹⁾。平成22年度補正予算で予算化され、J-PARCには2012年8月-9月に設置されました。2012年10月から行われたビームコミッショニングでは、 6.4×10^7 /s(陽子ビーム強度212kW時)もの大強度パルス低速 μ^+ が引き出せることを確認しました。このミュオン強度は、これまで、世界最高強度のパルス μ^+ 強度を誇っていたDラインを20倍、英国RAL施設を80倍凌駕するものとして、世界記録を更新しプレス発表を行いました。図1参照[1]。

2. 世界初の超低速ミュオン顕微鏡計画

超低速 μ^+ ビームを得る為には、Uラインで得られる大強度低速 μ^+ を、高温のタングステン箔に打ち込みます。タングステン表面からは真空中に熱エネルギーのミュオニウム(Mu: μ^+e^-)が蒸発してきます。このMuに、パルス状レーザー(1s-2p-非束縛状態)を照射して電子をはぎとることにより、高輝度の超低速 μ^+ が得られます。既に、高温のタング

ステン箔を格納するMuチャンバー、レーザー照射により生成された超低速 μ^+ を30keVに加速し、実験試料まで輸送する超低速ミュオン輸送系の設置が完了しています。

J-PARC運転再開後、2014年1月から本格的な稼働を予定しています。図2は超低速ミュオン顕微鏡の概念図です[2]。これまで英国、理研RALでおこなってきた開発研究では、毎秒 1×10^6 個の低速 μ^+ から毎秒20個の超低速 μ^+ を生み出す事に成功しています⁽²⁾。レーザーの繰り返し周波数(25Hz)と陽子ビームの繰り返し周波数(理研RAL 50Hz, J-PARC 25Hz)の同期、並びに、パルス低速 μ^+ 強度増強、更に、レーザーの改良、並びに低速ミュオンの収束などの技術開発により、毎秒 1×10^6 個もの世界最高性能の世界最高強度超低速 μ^+ ビームが生み出されます。

3. 超低速ミュオン顕微鏡で広がるサイエンス

Uラインでは、パルス幅0.5-1ns、サイズ $\phi 2$ mmの微小ビームが実現され、これまで不可能とされた高時間分解能で、微小な単結晶・薄膜試料をも対象とするナノm- μ SR法が可能となります。図3にナノm- μ SR法原理図を示す[3]。

3.1 表面・界面におけるスピンプローブ

超低速 μ^+ は、深さ1nmの極々、表面近傍から深さ200-300nmに至る物質内部(バルク)まで、任意の深さに打ち込むことができます。表面近傍から固体内部まで連続的に電子状態を調べるスピンプローブとして、表面近傍の磁性や、超伝導体の磁場侵入長を直接観測することができます。しかも、スピンの向きをスピントロニクスで任意の向きに揃わせる事ができるので、スピントロニクス研究にも多大な貢献が期待されます⁽³⁾。

3.2 表面近傍の孤立水素原子のプローブ

超低速 μ^+ の第2の特徴は、表面近傍に於ける孤立水素原子だけでなく、深さ方向に存在する水素の電子状態を模擬できる事です。水素が関係する触媒反応や水素貯蔵メカニズムを解明する為には、表面近傍の挙動、電子状態だけでなく、表面近傍からバルクまで連続的に調べることが重要です。超低速 μ^+ は、電子と結びついて、水素の同位体であるMuを形成します。水素原子の電子状態、ならびに化学反応による電子状態の変化、所謂、ダイナミクスを調べるプローブとして期待されています。

代表発表者 **三宅 康博(みやけ やすひろ)**
 所属 **高エネルギー加速器研究機構
 物質構造科学研究所 ミュオン科学研究所
 J-PARC センター物質生命科学ディビジョン
 ミュオンセクション**
 問合せ先 **〒319-1106 茨城県那珂郡東海村大字白方 203 番地 1
 TEL: 029-284-4624 FAX: 029-284-4899
 yasuhiko.miyake@kek.jp**

■キーワード: (1)ミュオン
 (2)パルスミュオン
 (3)J-PARC
 (4)陽子加速器
 (5)スピン
 (6)磁性

3.3 微少試料のプロープ

超低速 μ^+ は、エミッタンスが極めて小さいという特徴を持っています。それ故に、ビームサイズも原理上、20kVの加速で、 ϕ 0.5mm、10MVの加速で、直径数 μ m くらいまでは絞ることができます。従って、これまでは、ミュオンでは調べなかつたマイクログラム程度の微小単結晶試料を研究対象とすることが可能となるだけでなく、試料をピンポイントで調べる顕微鏡的な使い方も期待されます。

4. まとめ

J-PARC MUSEでは光科学と加速器科学の究極的な融合により誕生した新しいナノ磁性プローブ、超低速ミュオン顕微鏡が誕生します。

- (1) K. Nakahara et al. NIM A 600(2009) 132-134.
- (2) P. Bakule et al. NIM B 266 (2008) 335-346.
- (3) Y. Miyake et al. Hyperf Intera.216(1-3): (2013) 79-83.

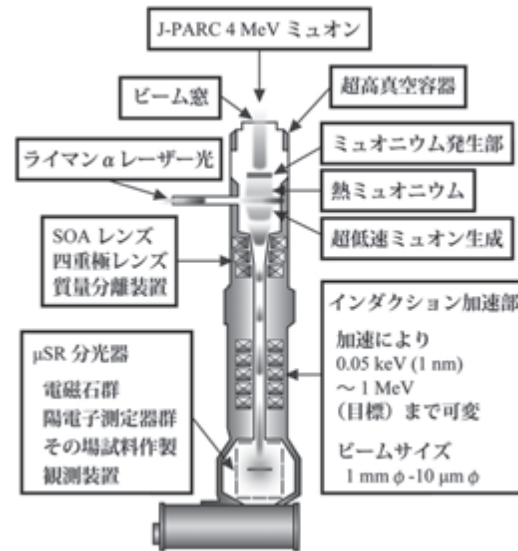


図2 超低速ミュオン顕微鏡の概念図

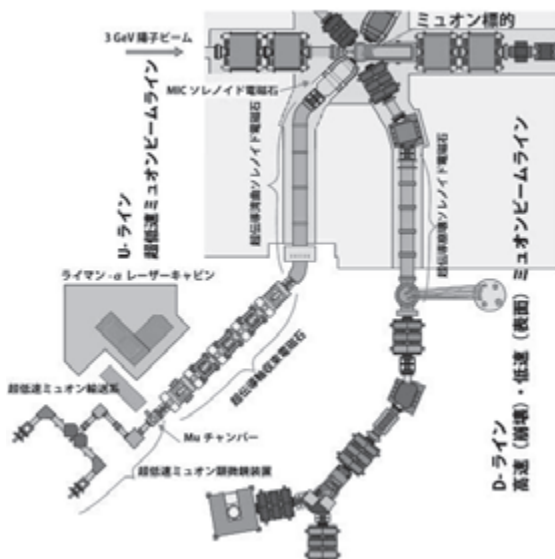


図1 超低速ミュオン顕微鏡専用大強度ミュオンビームライン(Uライン)がDラインに隣接して建設された。これまで世界最高強度であったJ-PARCのDラインを20倍、英国RAL施設を80倍凌駕し、世界記録を更新した。

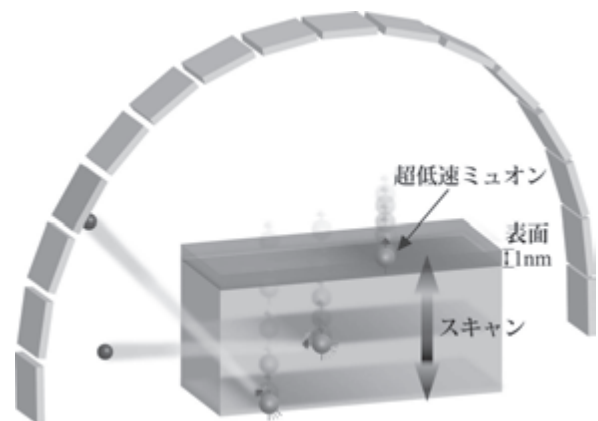


図3. 超低速ミュオンを用いたナノm- μ SR法によって表面近傍や、多層膜の界面の研究が展開される。