

# 超低速ミュオンビームによる表面・界面・ナノ物質研究への展開

三宅康博<sup>1</sup>、西田信彦<sup>2</sup>、福谷克之<sup>3</sup>、髭本亘<sup>4</sup>、杉山純<sup>5</sup>、吉野淳二<sup>2</sup>、永嶺謙忠<sup>6</sup>、  
松田恭幸<sup>7</sup>、鳥養映子、下村浩一郎<sup>1</sup>、池戸豊<sup>1</sup>、西山樟夫<sup>1</sup>、門野良典<sup>1</sup>、  
<sup>1</sup>KEK 物質構造科学研究所、<sup>2</sup>東京工業大学理学部、<sup>3</sup>東京大学生産技術研究所、  
<sup>4</sup>原子力機構先端科学研究所、<sup>5</sup>豊田中央研究所、<sup>6</sup>University of California Riverside、  
<sup>7</sup>東京大学総合文化研究科、<sup>8</sup>山梨大学工学部

ミュオンは、寿命が 2.2  $\mu\text{s}$  で、1/2 のスピンを持ち、質量がおおよそ陽子の 1/9、電子の 200 倍である粒子である。加速器から得られるミュオンは特別な偏極装置を用いることなく、最初から高いスピン偏極率を持っており、これを物質中に打ち込みそのスピンの回転・緩和・共鳴を容易に観測することができる。また、ミュオン自身は物質中で水素(H)の軽い同位体としてふるまうため、それ自身の拡散や、反応性自体がおもしろい研究の対象となり得るという特徴をも兼ね備えている。これらの特徴を生かして、中性子散乱、NMR、ESR と並んで、これまで幅広く物性を調べるプローブとして、特に、表面ミュオン(4 MeV)ビームが重宝されてきた。表面ミュオンは、表面という言葉に冠していることで誤解を与えるかもしれないが、物質中での飛程は大きく  $\sim 1$  mm 程度(幅 0.1 mm 程度)にも達する。むしろバルク用のプローブであるといつて良い。従って、残念なことに、最近注目を浴びている表面・界面の研究、精密な原子物理の研究、触媒表面等水素のダイナミクスを調べる研究にも大いに貢献でき得る潜在能力を持っていながらも、これまではプローブとしては使えなかった。

最近、表面ミュオンを冷却するビーム技術に大きな進展があった。所謂、低速 $\mu^+$ ビームの誕生である。ここでは、新しい表面・界面、薄膜のプローブとして期待される超低速ミュオンを紹介する。特に、昨年からは本格的に稼働した J-PARC ミュオン施設(MUSE)では、従来にはない高輝度超低速 $\mu^+$ 源の設置を計画している。計画が成就した暁には、強度  $10^6$  個/秒、パルス幅 0.5-1 ns、サイズ $\phi$  0.5 - 1mm の高輝度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・薄膜試料をも対象にする事ができるようになる。日本国内で磁性薄膜やナノ物性研究ひいてはスピントロニクスなどの産業応用に、 $\mu\text{SR}$  法の幅広い分野での本格的な展開が大いに期待される。

J-PARC 大強度パルスミュオンビームと大強度パルス VUV レーザー光を融合して初めて実現される次世代のミュオンビーム、大強度超低速ミュオンを用いて以下のような研究の展開が期待される。

## ①スピンプローブとして

超低速 $\mu^+$ は、深さ 1nm の表面近傍から深さ 200-300nm のバルクまで任意の位置に打ち込むことができる。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等を調べる事ができる。しかも、スピンの向きをスピンローテータ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の貢献が期待される。

## ②孤立水素原子のプローブとして

超低速 $\mu^+$ の第2の特徴は、表面近傍に於ける孤立水素原子の電子状態だけでなく、深さ方向に存在する水素をシミュレートできる事だ。水素が関係する触媒反応や水素貯蔵メカニズムを調べるためには、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事が重要である。超低速 $\mu^+$ は、電子と結びついて、水素の同位体であるミュオニウム(Mu)を形成する。水素原子の電子状態、ならびに化学反応などで電子状態が変化していく、所謂、ダイナミクスを調べるプローブとして期待される。

## ③微量試料のプローブとして

超低速 $\mu^+$ は、元々、0.2 eV で生まれるので、エミッタンスに優れたビームである。それ故に、ビームサイズも原理上、20kV の加速で、0.5 mm $\phi$ 、10MV の加速で、1  $\mu\text{m}\phi$  くらいまでは絞ることができる。従って、これまで、ミュオンでは調べえなかった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る。

## ④高時間分解能・パルス同期可能性を利用して

J-PARC ミュオン施設で通常得られるミュオンビームの時間分解は、100-150 ns である。一方、超低速 $\mu^+$ のビームの時間分解能はレーザーのパルス幅で決定され、サブナノ秒の分解能が実現される。パルスミュオン施設において、これまでなし得なかった、速い緩和のある系での $\mu\text{SR}$ 法が適用可能となる意義は極めて大きい。更に、パルスという特徴を生かして、極端条件であるパルスレーザーや、パルス高周波をミュオンビームのパルスと同期させ、サブナノ秒から数十マイクロ秒の過渡現象を探る為の研究手段としても期待される。