

【基盤研究(S)】

理工系 (総合理工)



研究課題名 高輝度ミュオンマイクロビームによる透過型ミュオン顕微鏡イメージング

高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・教授 みやけ やすひろ
三宅 康博

研究課題番号： 17H06126 研究者番号：80209882

研究分野： 量子ビーム科学

キーワード： ミュオン、超低速ミュオン、レーザー、顕微鏡、量子可干渉性、波動性

【研究の背景・目的】

表面ミュオン(4 MeV)を、タンゲステン箔 (シリカエアロゲル) に入射すると、真空中に熱化したミュオニウム (正ミュオンと電子が結合した軽い水素状原子, Mu) を発生させるができる。このとき、4 MeV から 0.2 eV (0.03eV) までの 7-8 桁の冷却が行われるにも拘わらず、その収率が 4%(7%) と極めて高いことが重要である。真空中に漂い出てくる Mu をレーザー共鳴イオン化法 (1s-2p-unbound) により電子を剥ぎ取り、加速・収束することにより、波の性質を持つ超低速ミュオンが得られる。これまでミュオンは、スピンを持った粒子として、生成・崩壊時の空間反転非対称性を利用する研究に、その用途が限られてきた。本研究の本質は、超冷却・再加速により、時間・空間コヒーレンスに優れた高輝度ミュオンマイクロビームを創成しミュオンの粒子性と波動性の2面性を実証するとともに、これを駆使した新しい顕

微鏡をマイクロロンに改良し 10 MeV のミュオンマイクロビームを実現する。

- (B) 超伝導対物レンズ：電子より 200 倍重いミュオンを収束する超伝導対物レンズの開発。
- (C) 透過イメージング：常伝導収束・投影レンズ及びミュオン画像検出器の開発。

【期待される成果と意義】

- (1) 第2世代以降の粒子の量子可干渉性の直接証明
単結晶金薄膜試料を用い、ミュオン回折像を取得する。再加速したミュオンが波であることを示す実証実験である。金格子(408 pm)の回折角は、100,300 keV の加速で 0.66, 0.38 mrad である。1 m の距離で回折パターンを識別するために、真空対応の2次元イメージセンサ SOI 検出器 (分解能 14 μm) を用いる。これは標準模型の第2世代以降の粒子の量子可干渉性の初の直接証明となる歴史的成果となる。
- (2) 実用材料の顕微イメージング

再加速システムと顕微鏡レンズ系を接続し、透過型電子顕微鏡を組み上げる。透過型ミュオン顕微鏡の持つ高い試料透過能力と、高い電位分布検出感度を用いて、厚みのある試料を観察する。イメージングには、重金属染色などを用いて試料のミュオン吸収の分布を観察するミュオン吸収イメージング法と、カーボン薄膜で作成したミュオン用位相板を用いて試料内部の電磁場分布を可視化する (アハラノフ=ポーム効果) ミュオン位相差イメージング法の双方を用いる。解像度 256 x 256 ピクセルの像をダイナミックレンジ 8 bit で取得するのに必要なミュオン数は 256³ 個であり、U-Line において想定される1枚の像取得に必要な時間は数十分から数時間程度である。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・"Ultra Slow Muon Project at J-PARC MUSE", Y. Miyake et al., JPS Conf. Proc. 2, (2014)010101
- ・"Ultra Slow Muon Microscopy by Laser Resonant Ionization at J-PARC, MUSE", Y. Miyake, et al., Hyperfine Interactions 216 (2013) 79-83

【研究期間と研究経費】

平成 29 年度 - 33 年度 159,300 千円

【ホームページ等】

<http://slowmuon.kek.jp/MuonMicroscopy.html>

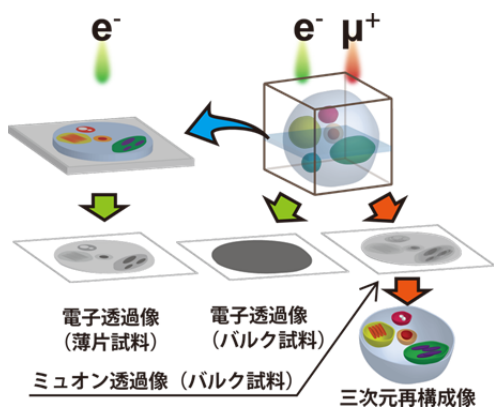


図 1. 透過型ミュオン顕微鏡が目指す、10 μm 厚試料の 3D イメージング vs. 電子顕微鏡。

微法を確立する事にある。

【研究の方法】

超低速ミュオンを 300 keV まで再加速して得られるパルスミュオンマイクロビーム更に 10 MeV まで再加速し、最終的に透過型ミュオン顕微鏡法を確立する。以下の 3 研究大項目を有機的に融合させることにより数 μm を越える厚みのある試料のイメージングを実現する。

- (A) ミュオン再加速：誘導加速により 300 keV まで加速し、ミュオンが波であることを実証し、更に、