

放射線工学部会セッション「ミュオン工学の可能性」

(1) ミュオン、J-PARC ミュオン施設(MUSE)

(1) A Muon. J-PARC Muon Facility (MUSE)

*三宅 康博¹¹KEK 物構研ミュオン, ²J-PARC MLF ミュオン

1. 序

湯川秀樹博士が中間子の存在を予言され、ノーベル物理学賞を受賞されたことは有名です。この湯川中間子（パイオン）は実際に発見され、今では大型加速器によって人工的に、パイオンや、パイオンが崩壊して生まれる正・負ミュオン (μ^\pm) を、ビームとして容易に作り出す事ができます。ミュオンはニュートリノと共に生まれるパイオンの子にあたるレプトンです。紆余曲折はしましたが、2000年12月、国内外の多くの研究者達のここ十数年来の夢であった J-PARC プロジェクトの建設が開始されました。今では、3GeV 陽子ビームを用いた J-PARC ミュオン科学実験施設 (MUSE) では、数本のパルスミュオンビームラインが既に完成しました。性能としては、2009年12月に、KEK-MSL の 400 倍、理研 RAL の強度を越える世界最高強度のパルス状ミュオンが、共同利用実験に供されています。日本原子力学会のシンポジウムでは、J-PARC MUSE 施設の現状と、次世代の科学研究を飛躍的に展開する為に練られている将来計画について報告します。

2. J-PARC

J-PARC は、JAEA 東海研究所の南敷地に位置しています。400 MeV リニアック (LINIAC), 3 GeV シンクロトロン (RCS), 50 GeV シンクロトロン (MR) 等の加速器群と、物質生命科学実験施設 (MLF), π , K 中間子や、ミュオン実験を行うハドロン実験施設、ニュートリノ実験施設から構成されている複合加速器研究コンプレックスです。特に、MLF へは、RCS の 85% 程度の 3 GeV 陽子ビームが送り出され、大強度パルス中性子、パルスミュオンをプローブとするバラエティに富んだ研究が展開されています。

3. ミュオンビーム

カナダ TRIUMF, スイス PSI 研究所の DC ミュオン施設、英国 ISIS/RAL, J-PARC MUSE パルスミュオン施設などのミュオン施設では、大強度のミュオンビームがえられることもあって、ミュオン工場 (Meson Factory) とよばれています。これらのミュオン工場では、陽子を光速近くまで加速し、黒鉛 (グラファイト) 製のミュオン標的にぶつけることによって、陽子と標的原子核の原子核反応によってパイオン (π^\pm) が造り出されます。その生成断面積は、10-40~mbarn 程度です。パイオン生成の陽子ビームの閾エネルギーは、300 MeV 程度なので、ミュオン工場では、500 MeV 以上の陽子加速器が用いられています。

π^\pm は、ニュートリノ (ν_μ , 反- ν_μ) と μ^\pm に二体崩壊 (平均寿命は 26~ns) します。

π^+ の場合、 ν_μ が進行方向と逆向きにスピン偏極している (負のヘリシティ) ので、 μ^+ も生まれながらにして進行方向と逆向きにスピン偏極した素粒子として得られます。一方、 μ^- は、進行方向と同じ向きにスピン偏極して得られます。

$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ 崩壊

$\pi^- \rightarrow \mu^- +$ 反- ν_μ 崩壊

従って、 μ^+ は、"原子スケールの方位磁石"のようなマイクロなプローブ、言い換えると、スピンの向きが揃った陽子 (p^+) の軽い同位体と考えることができます。一方、 μ^- は、原子に捕獲された際、最終的に脱励起を繰り返した後、 e^- の 1/200 も原子核に近づいた軌道を周回します。従って、 μ^- は、スピンの向きを揃えた

重い電子 (e^-) と考えると分かりやすいかもしれません。

ミュオン工場では、低速 (表面) ミュオンと高速 (崩壊) ミュオンという 2 種類のミュオンビームが得られます。前者は、陽子ビームライン上に設置された生成標的に一旦止まった正パイオン (π^+) から生まれます。静止した π^+ から生まれるので、 π^+ の運動エネルギーを背負うことなく、最大 4-MeV 程度の低速正ミュオン μ^+ が得られます。この μ^+ は、打ち込み深さ (飛程) が 0.1-1-mm 程度と短く、実験をおこなう際に、少量の試料を用意するだけで良いというメリットがあります。ユーザーフレンドリーなミュオンビームとして、これまでも様々な物質科学研究に使われてきました。一方、生成標的に一旦止まってしまった π^+ は、直ぐに原子核に捕獲されるので、残念ながら、負の表面 (低速) μ^- は、取り出すことができません。

4. J-PARC MUSE ビームライン

4.1 D ライン (汎用ミュオンビームライン)

D ラインでは、世界最高強度を誇るパルスミュオン (4MeV 表面 (低速) μ^+ , 0.1-55MeV 高速 (崩壊) μ^\pm) ビームを用いて、磁性・超伝導物質を対象としたミュオンスピン探針研究や、水素の同位体として水素の電子状態を解明する物性材料研究、素粒子、原子核物理学、原子分子物理学、化学、生物学、医学への応用、負ミュオンによる非破壊分析と幅広い学際領域にわたる科学研究が展開されています。

4.2 U ライン (超低速ミュオン (0.05-30 keV) ビームライン)

U ラインでは、世界最高強度となる 1 パルスあたりのミュオン強度 800,000 個 (212kW) を達成している。この大強度表面ミュオンビームとパルスレーザーを組み合わせることによって、打ち込み深さが非常に浅く (1-300 nm)、パルス幅 (1-2 ns) も短く、低いエミッタンス (ビームの拡がり小さい) で、単色性に優れているという数々の特徴を持った超低速 μ^+ ビーム (0.05-30 keV) がえられます。これらのユニークな特徴を生かして、表面・界面におけるスピンプローブとして、表面近傍の孤立水素原子のプローブとして或いは、微量試料のプローブとして期待されています。

4.3 S ライン (低速 (表面) ミュオンビームライン)

物質科学の研究者から要望の多い、低速 (表面) μ^+ 専用ビームラインで、26 年度中夏季には、4 つあるビーム実験エリアの内、S1 エリアまでの設置が完了し、表面ミュオン実験が開始されています。静電キッカー装置、ビームスライサーにより $10^{6-7} \mu^+$ /秒の強度のビームを 4 つの実験エリアへ同時に供給されます。

4.4 H ライン (高速 ミュオンビームライン)

ミュオニウム (μ^+e^-) の超微細構造の精密測定や第 2 世代のレプトンであるミュオンから第 1 世代のレプトンへの変換現象を精密に測定する実験、更には、300MeV/c まで加速して、ミュオン異常磁気能率の精密測定 ($g-2$) や EDM 等の比較的長期間にわたる素粒子物理に関わる基礎物理実験等が計画されています。

5. おわりに

J-PARC ミュオン施設 (MUSE) では、日本国内外での、バルク内部のみならず表面、薄膜・多層膜、スピントロニクス等のナノサイエンスを含む物質科学研究分野にとどまらず、化学、生物学、素粒子原子核物理、非破壊検査の研究において新しい展開を期待できます。私自身も学生の頃、原子力学会に参加しておりました。原子力の研究者の皆様にも是非、ミュオンを使ってご研究を進めて頂くことができればこんな嬉しいことはありません。可能性を検討してみようかとお考えの方は、ご一報いただければと思います。

*Yasuhiro Miyake

¹KEK IMSS Muon Science Laboratory, ²J-PARC MLF Muon