

日本原子力学会「2016年春の年会」

核データ部会企画セッション

「ミューオンの物質内輸送とその学際的応用」

2016年3月28日(月) 13:00~14:30 東北大学 川内キャンパス

(1) 趣旨説明

九州大学 大学院総合理工学研究院

エネルギー理工学部門

渡辺 幸信

watanabe@aec.kyushu-u.ac.jp

本企画セッションでは、レプトン族に属する素粒子の1つであるミューオン（ミュオンやミュ粒子とも表記）を取り上げました。ミューオンは、1936年にアンダーソンとネッダーマイヤーによって宇宙線の中で発見されました。数百 GeV 以上の一次宇宙線（主に陽子）が地球大気に入射すると、空気構成原子と衝突して二次的な粒子（二次宇宙線）をカスケード的に発生します。ミューオンは二次宇宙線粒子の1つで、発生した π^\pm 、 K^\pm 中間子が弱い相互作用を介して崩壊することによって生成されます。 π^\pm 、 K^\pm の電荷を引き継ぐことで、ミューオンにはプラスの電荷を持つものとマイナスの電荷を持つものが存在します。さらに、発生したミューオンは大気を電離しながら進み、弱い相互作用による崩壊過程（平均寿命：約 2.2 μ sec）で電子と二つのニュートリノに崩壊して、最終的には消滅します。ミューオンは光速に近い速度で飛んでいるため崩壊するまでに約 660m、さらに相対論的に寿命を延ばして他の宇宙線と比べて遠くまで飛ぶことができます。そのため地上に到達する二次宇宙線荷電粒子のうちミューオンは約 3/4 を占め（ちなみに残りの 1/4 は電子）、1 分間・1cm²あたりに約 1 個の割合で地上に降り注いでいます。その質量は電子の 207 倍になり、「重い電子」と見なすことができます。

高エネルギー宇宙線ミューオンは高い物質透過性を有しており、それを利用して、これ

までに巨大物体の「レントゲン写真」を撮影する技術（近年では、ミュオグラフィと呼ばれる）が開発されてきました。最近では、福島 1F 原子炉内部の燃料デブリの透視等に実際に適用され、原子力分野でも注目されています。ミュオグラフィの適用対象としては、エジプトのピラミッドや火山内マグマ等が有名です。ちなみに、日本原子力学会 2016 年春の年会の放射線工学部会主催企画セッション「ミュオン工学の可能性」の中で、ミュオグラフィ関連の話題が 3 件報告されています。

巨大構造物の透視調査には、地上に降り注ぐ宇宙線ミュオンを利用しますが、高エネルギー加速器施設で人工的にミュオンビームを発生させることもできます。量子ビームの 1 つとしてミュオンビームを利用できるようになり、ミュオン学際応用分野が様々な広がりを見せています。国内には、J-PARC 物質生命科学実験室に MUSE と呼ばれるミュオン専用ビームラインが利用可能で、さらに阪大・核物理研究センターでも MuSIC と呼ばれるミュオン装置が稼働し始めたところです。いずれも、高エネルギー陽子ビームを炭素標的に照射して、 π 中間子を生成し、その崩壊によりミュオンビームを発生させています。

こうした背景の下、本企画セッションでは、「ミュオンの物質内輸送とその学際応用」というテーマで、三名の講師の方々に、今後の原子力や放射線応用関連分野へのミュオン利用の可能性も含め、それぞれのご研究の最前線を紹介して頂きました。

1) 原子力分野へのミュオン応用：核変換と触媒核融合 （理研・松崎禎市郎氏）

核分裂・核融合エネルギー開発の観点から、長寿命放射性廃棄物の核変換とミュオン触媒核融合に関する最近の研究動向と展望についてご講演頂きました。前者は負ミュオンによる原子核捕獲現象を利用した核変換です。その物理現象の解説から始まり、国内ミュオン施設を利用した負ミュオン原子核捕獲反応実験（予定）の概要について紹介されました。後者は、水素に負ミュオンを打ち込むことで、ミュオン水素原子が形成され、その大きさが水素原子の $1/207$ と小さくなるという特徴を生かしたアイデアです。重水素とトリチウムからなる系に負ミュオンを入射することで、三体系の $d\mu$ 分子が共鳴的に生成され、 $d\mu$ 分子のサイズは小さいのでその中で自発的に $d+t \rightarrow \alpha+n$ 核融合反応が起こるというシナリオです。松崎氏等の理研チームが、これまで理研 RAL ミュオン施設（英国）で推進して来られた研究の成果を紹介して頂きました。

2) 負ミュオンを用いた非破壊元素分析 （阪大・二宮和彦氏）

負ミュオンは「重い電子」と見なせます。ある物質に負ミュオンを打ち込みますと原子核の周りに負ミュオンが軌道を作り、ミュオン原子と呼ばれる原子系を形成します。形成されたミュオン原子は電子起因の特性 X 線の約 200 倍のエネルギーを持ったミュオン特性 X 線を放出します。この特性 X 線を測定することで物質の非破壊元素

分析が可能になります。負ミューオンビームを用いた考古学試料（江戸時代に製造された天保小判）や小惑星探査試料等の元素分析に関する最新の研究成果を例に、本分析法の特徴や将来展望について分かりやすくご講演頂きました。

3) ミューオン輸送の PHITS シミュレーション（原子力機構・安部晋一郎氏）

ミューオン学際応用分野を展開していく上で、物質内でのミューオン輸送を精度よく記述できるシミュレーションが必要となります。国産粒子輸送計算コード PHITS のミューオン輸送計算の高度化が精力的に進められ、ミューオンと物質との相互作用（制動放射、電子・陽電子対生成、ミューオン光核反応、負ミューオン捕獲反応）の計算モデルが実装されました。本講演では各モデルの概要とそのベンチマーク結果が示された後で、応用分野 2 例に対するシミュレーション結果を紹介して頂きました。その 1 つは、松崎氏のご講演に関連した負ミューオン捕獲反応による長寿命放射性核種の核変換です。もう 1 つは、情報通信技術（ICT）分野の信頼性工学に関連した半導体デバイスの宇宙線ミューオン起因ソフトウェア（一過性の誤動作現象のこと）です。宇宙線中性子起因ソフトウェアについてはこれまで多くの研究がなされてきましたが、先端デバイスの微細化と省電力化に伴い、宇宙線ミューオンの影響も危惧される状況になっています。安部氏のシミュレーションでは、低速負ミューオンによる原子核捕獲反応がソフトウェアに影響を与える可能性が示唆され、負ミューオン応用関連の新しい扉がまた 1 つ増えることとなります。

各ご講演の詳しい内容は後続の記事をご覧ください。なお、松崎禎市郎氏のご講演については、次号で紹介する予定です。本企画セッションが契機となり、原子力関連分野にもミューオン応用の裾野がさらに広がっていくことを期待しています。特に、負ミューオンの原子核捕獲に対するデータは、入射粒子が負ミューオンである核データです。今後、EXFOR にもそれらの「ミューオン核データ (μND)」（松崎氏等が新しく測定予定のデータ含む）が格納され、様々な応用分野に広く利用されていくことを望んでいます。