

## 連続ミュオンビーム施設 MuSIC による新学術の展開

佐藤 朗、友野 大、川島 祥孝

基礎理学プロジェクト研究センター・サブアトムック科学研究拠点

大阪大学では、世界最高のミュオン生成効率を誇る新方式のミュオンビーム源“MuSIC”の開発に成功しました。MuSIC 装置は核物理研究センター（RCNP）に建設され、現在はミュオンビームを使った基礎科学研究や応用研究を展開しています。この RCNP-MuSIC は連続時間構造を持つミュオンビームを提供する日本で唯一のミュオン施設です。連続ミュオンビームを用いることで、高い精度の様々な新しい研究が可能となりました。

ミュオンは、電子と同じレプトンと呼ばれる素粒子の一種です。ミュオンの質量は 106 メガ電子ボルトで、これは電子の 200 倍、水素の 1/9 倍の質量に相当します。従って、ミュオンが物質内に入ると、負電荷のミュオンは重い電子のように振舞い、正電荷のミュオンは軽い水素のように振舞います。

例えば、負電荷ミュオンは、電子と同様に正電荷を持つ原子核を中心に周回します。しかし、このとき周回するミュオンの軌道半径は電子に比べて質量比の分だけ、つまり、約 1/200 小さくなります。よって、内側の軌道へと遷移する際に放出される特性 X 線のエネルギーも電子特性 X 線に比べて約 200 倍高いエネルギーとなります。この高エネルギーのミュオン特性 X 線を測定することにより、物質の内部 1cm 程度までの元素組成や同位体比情報を完全に非破壊で調べることが出来ます。実際に、古代青銅器や隕石などの破壊できない貴重資料の分析が MuSIC のミュオンビームを使って進められています。また、負電荷ミュオンが原子核の原子番号を 1 つだけ小さくするという性質もあります。例えば、水銀に負電荷ミュオンを照射すると金に変換できるのです。これを応用して、原発使用済み燃料中に含まれる 600 万年以上も放射線を出し続ける元素をミュオンにより無害化する研究（ミュオン核変換）も進められています。

一方、ミュオンによる高温超伝導素材の研究も始まりました。正電荷ミュオンの崩壊で発生した陽電子はスピン方向に出やすいという性質があります。この特徴を利用すると、陽電子放出方向の時間変化の測定により、物質が内部に持つ局所磁場の情報を得ることが出来ます。連続ミュオンビームは高い磁場にも感度があるため、超伝導など磁性体の研究を進めることが可能です。

RCNP-MuSIC は 2016 年度より全国共同利用施設として世界の研究者にミュオンビームの提供を開始しました。すでに 16 実験課題が実施されています。その内容は、原子核研究だけでなく、惑星科学、放射化学、考古学、文化財科学、エネルギー問題、半導体ソフトエラーなど幅広く、新しい応用分野がさらに広がりつつあります。今後、さらに最新の測定技術を駆使して、ミュオンを使った科学技術の新しい時代を推進して行く計画です。

参考文献：<http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/RCNPHome/music/>

## CANDLES 検出器を用いた二重ベータ崩壊の研究

核物理研究センター 梅原さおり、他 CANDLES グループ

連携研究部門サブアトム科学研究所 (二重ベータ崩壊測定 CANDLES グループ)

「ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊(以下、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊)」は、基礎物理学において極めて重要な研究である。それは、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊の研究が、素粒子ニュートリノの本質に迫り、物質の起源解明に関わるからである。我々が開発する CANDLES 検出器は、 $^{48}\text{Ca}$  同位体を用いた二重ベータ崩壊測定装置である。

この  $0\nu\beta\beta$  崩壊は、半減期が  $10^{26}$  年以上と非常に極稀な事象であるため、ごく低バックグラウンド検出器を構築する必要がある。我々は、宇宙線起源バックグラウンドの少ない岐阜県神岡地下実験室において、300kg の  $\text{CaF}_2$  結晶を用いたプロトタイプ CANDLESIII 検出器で二重ベータ崩壊測定を行っている。この CANDLES 検出器は、 $^{48}\text{Ca}$  の二重ベータ崩壊半減期測定に対して世界最高感度を更新している。

一方、低バックグラウンド対策の結果、CANDLES 検出器を用いた測定の主なバックグラウンド候補は、結晶内部の放射性不純物と分かった。したがって、放射性不純物の少ない  $\text{CaF}_2$  結晶が必要である。また、更なる高感度化測定の際にバックグラウンドとなることが予想されるニュートリノを放出する二重ベータ崩壊事象に対する対処も必要である。これは、高エネルギー分解能測定装置によって低減する。それぞれ開発を開始しており、その結果を次に示す。図 1 は、結晶内部の放射性不純物の測定結果を示している。 $\alpha$  線計測によって放射性不純物量を測定することで高純度結晶の選定ができることを示した。また、図 2 は、高エネルギー分解能が得られる  $\text{CaF}_2$  蛍光熱量検出器から得られたエネルギースペクトルを示している。得られたエネルギー分解能は 1.8%で、現在の CANDLES 検出器よりよいエネルギー分解能が得られた。今後、さらにこれら次世代検出器の開発も進めていく。

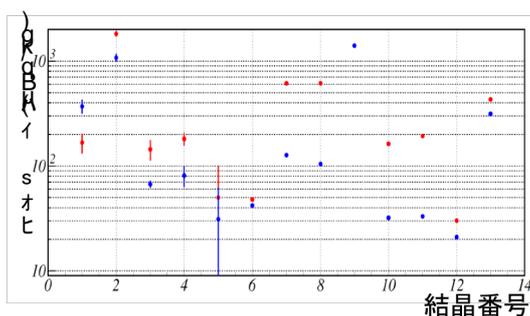


図 1 : 高純度結晶開発。  $\text{CaF}_2$  結晶の放射性不純物量の分布。  $\alpha$  線測定を行うことで結晶内部に含まれる放射性不純物濃度を測定する。放射性不純物量に大きなばらつきがあることがわかる。

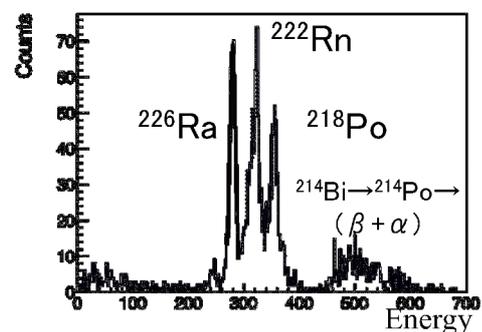


図 2 :  $\text{CaF}_2$  蛍光熱量検出器から得られたエネルギースペクトル。得られたエネルギー分解能は、4.9MeV で 1.8%であった。

## 研究業績リスト

### I 査読論文

該当なし

### II 国際会議等における発表

該当なし

### III 国内会議等における発表

該当なし

### IV 著書

該当なし

### V 受賞と知的財産

該当なし

### VI その他研究業績、発表文献

該当なし