

## 論文内容の要旨

論文題目 Development of large acceptance axial focusing muon channel,  
and the generation of low energy muonium.

(大立体角軸収束ミュオンチャネルの開発と低エネルギーミュオニウム生成実験)

氏名 宮寺 晴夫

本研究では、高エネルギー加速器研究機構ミュオン科学研究施設にて大立体角軸収束超伝導表面ミュオンチャネル『Dai Omega』の開発を行い、世界最高のミュオン瞬時強度を達成した。また Dai Omega の大強度ミュオンビームを用いて高温タングステンを用いた低エネルギーミュオニウム ( $\text{Mu}:\mu^+e^-$ ) 生成実験を行い、TOF 測定によるそのエネルギー分布観測を行った。

表面ミュオンとは、陽子衝突で発生したパイオンが生成標的の表面近傍で崩壊してできるエネルギー4MeV の正ミュオンのことであり、飛程が短く、高輝度で 100%スピン偏極している等の特徴があるため、素粒子実験や $\mu\text{SR}$  物性測定等に幅広く応用されている。表面ミュオンを収集し輸送するのがミュオンチャネルの役割であり、従来は四重極電磁石や偏向電磁石を組み合わせたミュオンチャネルが用いられてきたが、ミュオンの収集効率が立体角で $\sim 50\text{msr}$  と限界があった。

そこで本研究で開発を行った表面ミュオンチャネル Dai Omega では、4 基の大口径 (直径 80cm) 超伝導コイルを用いて、従来のミュオンチャネルの 20 倍を超える大立体角 (1300msr) でミュオンを収集することが可能となった。また Dai Omega では軸対称なコイル磁場を有

効に活用し、軸収束輸送という全く新しいビーム輸送方式を採用し、焦点でのミュオンビームの収束性を著しく改善している。ミュオンビームの収集効率と収束性の大幅な改善によって、Dai Omega では KEK-NML の僅か  $5\mu\text{A}$  の陽子ビームから、瞬時強度で世界最高のミュオンビーム ( $\sim 10^6\mu^+/s$ ) の発生に成功しており、コイル磁場を用いたミュオンチャネルの優位性を実証することができた。コイル磁場を用いた大立体角ミュオンチャネルは、その後 PSI (スイス) の  $\mu\text{E4}$  ビームラインが建設され、BNL (米) の MECO 実験や RAL (英) の Super-Super ミュオンチャネル、J-PARC (東海村) の Super Omega ミュオンチャネルが計画されている。

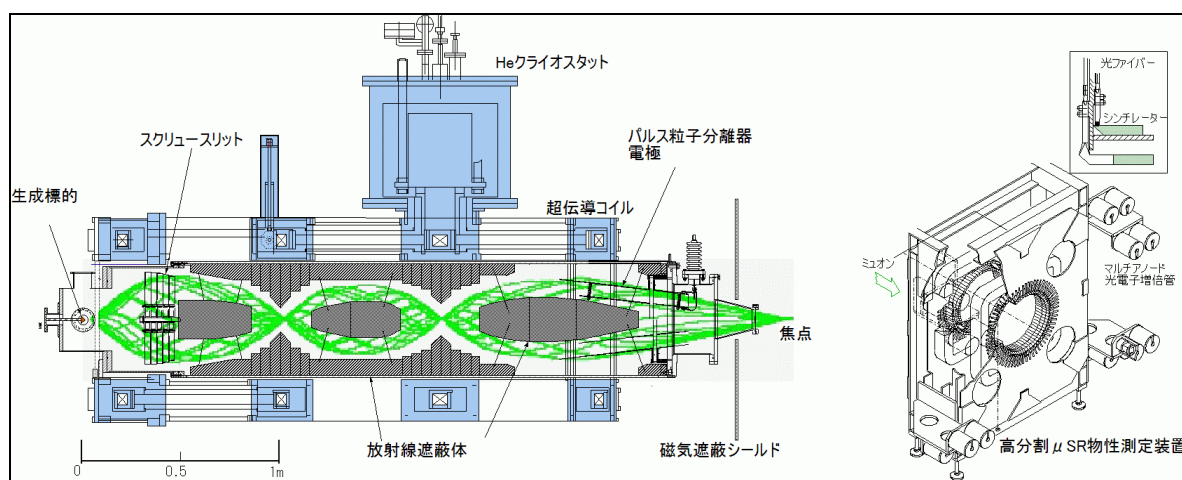


図 1 : Dai Omega のセットアップ及びミュオンビーム軌道(左)、 $\mu\text{SR}$  物性測定用の検出装置(右)。

Dai Omega ミュオンチャネルの開発にあたり、著者が中心となって行った開発研究は以下の 3 点である：(i) Dai Omega の設計、(ii) 粒子分離器の開発、及び(iii)  $\mu\text{SR}$  物性測定検出システムの開発。また、ビームラインの建設や He 冷凍機系の構築にも主体的に関わり、ビームスタディ実験においても著者が中心的な役割を果たした。

(i) Dai Omega の設計の際に表面ミュオン生成評価、磁場計算、強度設計、ビーム軌道計算、放射線計算を行った。特に、独自のコードを開発して行ったミュオン軌道シミュレーションで、コイルの配置と電流値を最適化すればコイルの動径方向磁場  $B_r$  を利用してミュオンの初期角度に起因する位相差を完全に打ち消せるため、初期角度に関係なく多くのミュオンを収束させることが出来ることが分かった。この原理を利用したのがビームの軸収束輸送であり、Dai Omega ではミュオンを大立体角にわたって点光源から点焦点へビーム輸送している。

(ii) Dai Omega のミュオンビーム中には電子・陽電子などが混入しており、実験の際にノイズの原因となっていた。従来のミュオンチャネルでは、磁場と電場を直交させたウィーンフィルターを用いて電子・陽電子の除去を行っていたが、Dai Omega ではミュオン軌道の特異性のためウィーンフィルターを利用することができなかった。そこで本研究では、

同軸円筒状の電極間に高電場をかけミュオンと他の粒子間に角度差を付ける電場粒子分離器の開発を行った。Dai Omega 内に設置した同軸円筒電極には、パルス状ミュオンと同期させ±60kVの高電圧を100nsで立ち上げている。電場の高速な立ち上げにはファイナメントの磁気スイッチングを利用しており、高磁場と高電場が直交した放電の極めて起こりやすい環境下で安定的に電場をかける手法として確立することができた。

(iii) 表面ミュオンビームはμSR物性測定としての需要が大きく、Dai Omegaの大強度パルス状ミュオンビームは、従来のビーム強度では困難であった生体物質(タンパク質・DNA)への応用が提案されている。しかしDai Omegaのパルスあたり $5 \times 10^4$ 個という大強度のミュオンビームに対応するには検出器を高分割化する必要があり、それには検出器の小型化と実装密度の向上が不可欠であった。そこで私はCalifornia大学Riverside校の田中宏幸博士と共同で、マルチアノード光電子増倍管を用いた高分割μSR検出システムの開発を行い、Dai Omegaに導入した。このシステムは高いミュオン強度によるパイルアップを防ぐため128組の検出器群から構成されており、今後J-PARCの大強度ミュオン施設に導入するμSR物性測定装置の基礎となるものである。なお、光電子増倍管に代わる次世代のμSR検出器として、アバランシェフォトダイオードを用いた新しいμSR検出器の開発を東北大学の中村哲助教授と共同で行った。このμSR検出器は小型で発熱量も低く、半導体内の雪崩増幅を利用するため縦磁場μSR物性測定で用いられる~2Tの高磁場下でも極めて良好なシグナルが得られている。今後、量産化できれば、光電子増倍管に代わる将来のμSR検出器として最適である。

本論文の後半部分では、Dai Omegaの大強度表面ビームを利用した低エネルギーミュオニウム生成実験について記述してある。低エネルギーミュオニウム生成法として本研究では高温タングステンからのミュオニウム脱離について詳細な測定を行った。これは、ミュオンを高温のタングステン中に止めると、金属内で熱拡散して表面に到達したミュオンが、熱エネルギー程度のミュオニウムとなって超高真空中へ蒸発して出て来る現象であり、Millsらによって開発された手法である。

タングステンから放出されるミュオニウムのエネルギーについては、従来はタングステン表面温度を反映したMaxwell分布であるとされてきた。しかしComsaらによる金属表面から脱離する水素分子の角度・エネルギー分布を測定した実験では、金属表面よりも高い亜熱エネルギー水素分子の放出が観測されている。タングステン表面から脱離する水素原子についても、Davisらが放出角度のKnudsenの法則( $\cos\theta$ 分布)からのずれが報告されており、亜熱エネルギー水素分子が放出されている可能性が指摘されている。ミュオニウムは水素原子の軽い同位体であり同様の現象を期待でき、金属中へのミュオンの入射が容易である点や崩壊陽電子を用いてTOF測定が行える等の利点がある。

本研究では全方位でミュオニウムを効率的に検出できる観測装置の開発を行い、ミュオニウムのエネルギーの測定を行った。測定の結果、タングステン温度よりもエネルギーの

高い亜熱エネルギーミュオニウムの存在を発見することができた。亜熱エネルギーミュオニウムのエネルギー・生成効率については、亜熱エネルギー水素分子の実験・理論から類推される複数のモデルでシミュレーションを行い、検証を行った。

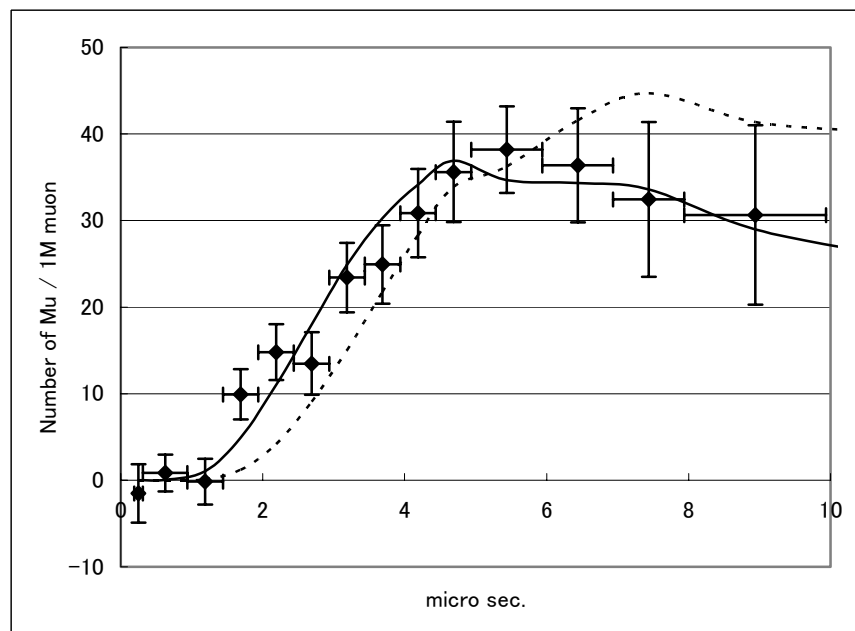


図 2：タングステン表面から放出されたミュオニウムの時間スペクトラム。

点線：金属表面温度を中心とする Maxwell 分布によるシミュレーション。実線：亜熱エネルギーミュオニウムを想定したシミュレーション

続いて、金属表面からのミュオニウムの脱離効率を上げるため、金属を多孔質化した場合についてミュオニウム発生実験を行った。多孔質タングステンではタングステンと比べて 3~5 倍の効率でミュオニウムを発生させることができ、エネルギー分布についてもタングステン表面温度 (~2100K) よりも温度の低い Maxwell 分布であることを発見した。この現象は亜熱エネルギーのミュオニウムが観測された先のタングステンの場合と一見矛盾するが、多孔質タングステンではまず亜熱エネルギーミュオニウムが放出され、続いて空隙内での散乱で熱エネルギー程度まで冷却されたものであると理解できる。

本研究で多孔質タングステンが熱ミュオニウム生成に有効であることを実証できたため、今後、熱ミュオニウムの Lamb シフト精密測定実験や、熱ミュオニウムの低温水素プラズマを用いた効率的なイオン化を行うことで、超低速ミュオンビームの開発へ応用することが出来る。