

科学研究費補助金（学術創成研究費）公表用資料  
〔事後評価用〕

平成15年度採択分

平成21年 3月31日現在

研究課題名（和文） ミューオン物理学の新展開を狙う  
スーパー・ミュオン・ビームの研究  
研究課題名（英文） A Study of A Super Muon Beam  
for New Initiative on Muon Physics  
研究代表者  
久野 良孝 (KUNO YOSHITAKA)  
大阪大学・大学院理学研究科・教授



研究の概要：

位相空間回転法によるミュオン・ビームの高輝度化に必要な、超高電場勾配高周波加速システム及び大口径固定磁場強収束型ミュオン蓄積リングの開発に成功した。さらに、これらを組み合わせた位相空間回転試験用リングを建設し、位相空間回転の原理実証実験を行った。これにより位相空間回転法によるミュオン・ビーム高輝度化に必要な基礎技術の開発が完了し、建設したリングでの試験により設計通りに荷電粒子が位相空間回転されることを実証した。

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：ミュオン、ビーム冷却、位相空間回転、電磁石、高周波加速

### 1. 研究開始当初の背景

現在利用できるミュオン・ビームの強度や性質はともに不十分であり、実験条件に厳しい制約を課しているのが現状である。そこで、我々はミュオンを使った科学を飛躍的に発展させるために、ミュオン・ビームの強度を従来の約1万倍程度に増加し、さらに元々広いエネルギー分布を持つミュオン・ビームに対して位相空間回転法による高輝度化手法を施すことでビーム・エネルギーの揃った、いわゆる「スーパー・ミュオン・ビーム」を実現することを目指している。特に、大阪大学グループは、ミュオンを用いた素粒子物理学の研究を推進している。本研究で開発されるスーパー・ミュオン・ビームを使って、荷電レプトンのレプトンフレーバー保存の破れを、現在を $10^6$ 倍ほど上回る実験精度で探索するPRISM/PRIME実験などを計画している。

### 2. 研究の目的

本学術創成研究は、位相空間回転法による新しい高輝度化手法に必要な要素技術開発と同手法の原理検証を目的とするものである。

### 3. 研究の方法

位相空間回転法とは、高周波電場を使って、遅いミュオンを加速し、速いミュオンを減速させ、ミュオンの運動エネルギーを揃える方法である。エネルギーと時間の位相空間においてビームの占める分布を90度回転

することに対応している。さて、ミュオンのような不安定二次粒子に対してその平均寿命内で位相空間回転を完了させるためには、多数の高電場の高周波空洞が必要となる。そこで我々は、大口径の位相空間回転用のミュオン蓄積リング内に超高加速勾配高周波加速システムを配した位相空間回転リングを開発する。得に、我々は、固定磁場強収束型(FFAG)リングを使うという革新的なアイデアを考案した。FFAGリングでは、固定磁場であるので速い加速が可能であるし、大アクセプタンス（口径）であるので三次粒子であるミュオン・ビームのエミッタンスを十分に取り込むことができる。しかし、これまでミュオン用のFFAGリングの開発例は皆無であるために、新たに設計および技術開発から取り組む必要があった。位相空間回転は通常の加速器システムでは行われているが、短寿命の不安定二次粒子ビームラインに対して行う試みとしては、本研究が世界で最初である。ミュオン・ビームはビーム縦方向に長く分布しており、高周波加速システムの周波数は数MHzである。この周波数領域での高加速勾配の高周波加速空洞の開発は、世界最高値が必要となる。

### 4. 研究の主な成果

(1) 超高加速勾配高周波加速システムの開発：高出力真空管を用いた高周波アンプ、電源、また、ナノ結晶軟磁性体合金の大口径コアを使用した加速空洞を製作した。これらの

試験結果、当初目標とした約 5MHz で 加速勾配 150-200kV/m (周波数 5 MHz) を達成することができた。この加速勾配は、従来の加速空洞システムにくらべて約 5 倍以上の値であり、この周波数領域で世界最高値を記録した。周波数 2.1MHz においても加速勾配 100kV/m という世界記録を樹立した。さらに、基本波に加えて、3 倍波までの高調波成分を印加することで高輝度化に適したノコギリ波状の電場を発生することに成功した。

(2) 大きなアクセプタンス (口径) をもつ位相空間回転リングの開発：ビーム光学設計と電磁石開発：空間的・エネルギー的に広がったミュオン・ビームを効率よく輸送するための大口径 FFAG リングを開発した。強い非線形磁場成分をもつ FFAG 電磁石のビーム力学を短時間に精度良く評価する手法を確立した。当初の設計をはるかに超える大アクセプタンスを持つ FFAG リングのラティス設計に成功した。この設計に基づき、世界で初めて縦方向 30cm、横方向 100cm におよぶ大口径の FFAG リング磁石を設計し、合計 6 台製作した。3 次元磁場測定の結果、非線形磁場を非常に高精度で再現できることを確認した。また、 $\alpha$  線を使ってビーム光学特性を実測するという全く新しい手法を考案・実践した。製作した電磁石を組み合わせることでよりミュオン高輝度化に必要な横方向及び運動量アクセプタンスを持つ位相空間回転リングが形成できるということを、上記の 2 種類の方法により示した。上記の実際に製作された、高電場勾配高周波加速システムと大アクセプタンス FFAG リングの性能を計算機コードに入力し、シミュレーションによる詳細な位相空間回転の最適化を行った。この結果によると、リングを 6 周する間にビーム運動量の広がりには 10 分の 1 に減少し、このときミュオン生存率は 60% となる。これは当初の目標を十分満足する性能であり、我々が考案した位相空間回転法によるミュオン・ビームの高輝度化が技術的に実現可能であることを実証した。

(3)  $\alpha$  線を使った位相空間回転リングの試験：本研究で製作した高周波加速システムと FFAG 電磁石 6 台からなる位相空間回転試験用リングを建設し、 $\alpha$  線を用いたビーム光学試験と位相空間回転実証試験を行った。まず  $^{241}\text{Am}$  から放出される  $\alpha$  線がリング中を周回する様子をシリコンやシンチレータなどの粒子検出器技術で測定するという新しい試験方法を考案し、この手法により平衡軌道や水平方向のベータatron 振動チューンを測定することで、非線形成分の強い FFAG リングのビーム光学がシミュレーション計算と精度よく再現できることを確認した。さらに、高周波加速システムをオンにし、高周波加速空洞を通過した  $\alpha$  線の到達時間とエ

ネルギーを測定することにより、計算どおりに位相空間回転がなされることを確認し、ミュオンへの位相空間回転の原理検証と実用化への技術克服を果たした。

以上述べたように、本研究により位相空間回転法によるミュオン・ビーム高輝度化に必要な基礎技術の開発が完了し、建設した FFAG リングにより設計通りに荷電粒子が位相空間回転されることを実証した。

#### 5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

円形加速器リング内のミュオンを蓄積しその周回中にミュオン・ビームを高輝度化する手法は、1997 年に本研究代表者らにより提案された全く独創的な方法であり、世界の研究者より高く評価された。本手法が技術的に確立し、その原理が実証されたことで、「スーパー・ミュオン・ビーム」による次世代ミュオン科学の計画が大きく推進した。また、新しく考案した  $\alpha$  線によるビーム光学評価手法も、加速器性能を簡便に正確に調べる新しい手法として高い評価を得た。これらの研究開発は、ミュオン科学の発展のみならず、将来の加速器計画 (たとえば、ニュートリノ・ファクトリ計画やミュオン・コライダ計画など) への波及効果も大きく、多大な技術的貢献をなすものであり、本研究計画の成功は広く賞賛されている。

#### 6. 主な発表論文

(研究代表者は太字、研究分担者は二重下線、連携研究者は一重下線)

- [1] Y. Arimoto, T. Oki, I. Hossain, Y. Takubo, M. Aoki, Y. Kuriyama, T. Itahashi, A. Sato, M. Yoshida, N. Miyamoto, **Y. Kuno**, "Magnetic Field Measurement of Radial Sector FFAG Magnet for High-Brightness Muon Ring", *IEEE Trans. Applied Supercond.*, Vol. 18, No. 2, pp. 330-333, 2008.
- [2] A. Sato, M. Aoki, S. Araki, Y. Arimoto, Y. Eguchi, K. Hirota, T. Itahashi, **Y. Kuno**, Y. Nakanishi, M. Yoshida, C. Ohmori, Y. Kuriyama, Y. Mori, Y. Iwashita, and A. Kurup, "Six-sector FFAG Ring to Demonstrate Bunch Rotation for PRISM ", *Proceedings of EPAC 2008*, pages 3389-3391, 2008.
- [3] C. Ohmori, M. Aoki, Y. Arimoto, I. Itahashi, **Y. Kuno**, Y. Kuriyama, A. Sato, M. Yoshida, Y. Iwashita, Y. Mori, "High Field Gradient RF System for Bunch Rotation in PRISM-FFAG", *Proceedings EPAC 08*, pp796-798, 2008
- [4] **Y. Kuno**, "High intensity muon beam facilities with FFAG", *Proceedings of PAC 05*, pp 29-33, 2005
- [5] "Lattice Design of Large Acceptance FFAGs for the PRISM Project ", A. Sato and S. Machida, *Proceedings of EPAC 2004*, pp 1345-1347, 2004

#### ホームページ：

<http://www-kuno.phys.sci.osaka-u.ac.jp/~supermuons/index.html>