# ミューオンサイエンスと 次世代のミューオンビーム源の開発

久野良孝\*

Muon Science and Development of a Next-generation Muon Beam Source Key Words : muon, muon science PRISM, MUSIC

1. はじめに

技術解説

ミューオンはレプトンと呼ばれる素粒子の一種で ある。1937年、NeddermeyerとAndersonが宇宙 線中にミューオンを初めて発見した。それ以降、ミ ューオンは素粒子物理学を始めとする幅広い学際的 学問の発展において,常に重要な役割を担ってきた。 ミューオンの質量は105.6MeV/c<sup>2</sup>で,これは電 子の質量の200倍,水素原子核の質量の1/9倍であ る。ミューオンは電荷を持ち,正電荷と負電荷の2 種がある。したがって,物質中にミューオンを注入 すると,正電荷ミューオンは軽い水素のように,負 電荷ミューオンは重い電子のように振る舞う。また、 寿命は約2.2マイクロ秒の不安定なレプトンであり, 電子(または陽電子)とニュートリノ,反ニュート リノに崩壊する。スピンは1/2であり,高いスピン 偏極を持つミューオンビームの生成も可能である。 ミューオンが学際的な研究を進める恰好のプローブ である理由は、ミューオンが持つこれらの特徴的な 性質によるものである。



図1 ミューオンサイエンスの学際的広がり



1955年1月生 東京大学・理学部・物理学科(1984年) 現在、大阪大学 大学院理学研究科 物 理学専攻 久野研究室 教授 理学博士 素粒子物理学 TEL:06-6850-5565 FAX:06-6850-5561 E-mail:kuno@phys.sci.osaka-u.ac.jp

\* Yoshitaka KUNO

2.ミューオンサイエンス

図1にミューオンを使った学際的研究(ミューオ ンサイエンス)の広がりについて示してある。ミュ ーオンサイエンスの網羅する分野は,素粒子物理学, 物質科学,生物科学,化学,エネルギー問題(ミュ ーオン触媒核融合)やミューオンX線を用いた非 破壊元素分析などの応用に至るまで幅広い。 特に,ミューオンを使った素粒子物理学では,ミ ューオンが電子に変身する過程(ミューオン電子転 換過程)の探索が非常に関心を集めている。ある種 の素粒子が異種の素粒子に変身する過程を世代混合 という。ミューオンが電子に変身する過程は,荷電 レプトンの世代混合(または荷電レプトンフレーバ ー非保存)と呼ばれる。クォークの世代混合は小林 誠氏と益川敏英氏によって理論的に研究され,中性 電荷のレプトンであるニュートリノの世代混合につ いては戸塚洋二氏(故人)の研究がある。しかし, 電荷のあるレプトンについての世代混合現象は未発 見であり,最重要実験課題として世界から注目を浴 びている。

一般に、ミューオンサイエンスを展開するために は、多くのミューオンが必要である。特に、上記の ミューオン電子転換過程を探索するためには、大量 のミューオンが必要である。しかし、ミューオンは 自然界に安定して存在しないので、人工的に生成す る必要がある。我々大阪大学のグループは、大量の ミューオンを生成する次世代のミューオンビーム源 として PRISM (プリズム)計画を検討している。 これまで、要素開発を進めてきている。平成21年 度から大阪大学核物理研究センター(RCNP)にそ の試作となる MUSIC計画を建設している。本稿では、 PRISM 計画の概要、その要素開発、そして、 RCNP に建設中の MUSIC計画などを紹介する。

3. PRISM 計画

PRISM 計画とは、次世代のミューオンビーム源 を建設する計画である。ここで,ミューオンビーム 源は,自然界には安定して存在しないミューオンを 人工的にかつ大量に生成する装置である。この計画 は,大阪大学が中心となり日米英などの国際グルー プで推進しており,現在,様々な基幹要素の研究開 発を進めている。

人工的にミューオンを生成するためには、まず陽 子加速器で高エネルギーに加速された陽子ビームを グラファイトなどの標的に照射する。すると,パイ オン中間子が発生し,この発生したパイオンを集め る。パイオンは、その飛行中に時間と共に崩壊して ミューオンに変わっていく。そのパイオン崩壊から 発生したミューオンを集めて、実験に供する。 PRISMでは、世界最高の高強度・高輝度・高純 度のミューオンビームを目指している。強度とは単 位時間あたりのミューオン総数,輝度とはある運動 エネルギー幅内でのミューオン総数,純度とはミュ ーオン以外の粒子の混入量がすくないことである。 PRISM 計画では,高強度化は高いソレノイド磁場 による大立体角でのパイオン捕獲を用いて、高輝度 化は位相空間回転法を用いて,さらに高純度化はミ ューオン蓄積リングを用いて達成する。特に,目標 とするミューオンビーム強度は,現在の世界最高 ビーム強度(10<sup>8</sup>個/秒)を10,000倍ほど上回る。 また,位相空間回転法(phase rotation method)に よりビーム高輝度化を実現することから、"Phase Rotated Intense Slow Muon source"の頭文字をと って"PRISM"と名付けられた。

PRISM のレイアウトについて図に示す。PRISM 装置は,東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC に設置することを検討している。また, PRISM の目標とするミューオンビームの性能を表 1にまとめた。以下の節で詳細について説明する。

表1: PRISM ミューオンビームの諸元の目標値

項目	諸元
ビーム強度	10 <sup>12</sup> 個 / 秒
ビームのパルス繰り返し	100 - 1000 Hz
中心運動量	68 MeV/c
運動量の広がり	(2-3)%
ミューオン以外の粒子混入度(特にパイオン)	10 <sup>-20</sup> 以下

#### 3.1 パイオン捕獲システム

PRISM 計画で高強度ミューオンビームを生成す るためには,ミューオンを生成する元となるパイオ ン中間子を大量に生成し捕獲することが重要となる。 そのために,陽子ビームの標的を高磁場の超伝導ソ レノイド電磁石の中心軸上に配置し,大立体角でパ イオンを捕獲できるようにする。生成されたパイオ ンは磁場によって効率良く収集される。捕獲される パイオンの運動量は,磁場の大きさと超伝導ソレノ イド内の空間の半径によって決定される。PRISM

π中間子生成・捕獲部



図 2 PRISM のレイアウト

計画では,約100MeV/c以下の運動量を持つパイ オンが収集される。また,特に陽子ビームの進行方 向と逆向きに出たパイオンを捕獲する。

3.2 ミューオン輸送システム

図1にあるように,捕獲されたパイオンは湾曲ソ レノイド・チャンネルにより、実験標的へと輸送さ れる。チャンネルの全長は約20mであり、輸送中 にほとんどのパイオンは崩壊してミューオンに変わ る。湾曲ソレノイド・チャンネルにおいて、トロイ ダル磁場中を輸送される荷電粒子が描く螺旋軌道の 中心はその湾曲面の法線方向にドリフトすることが 知られている。更に,これに湾曲面に垂直方向に双 極磁場をかけることにより,ドリフト量にオフセッ トをかけることができる。また,このドリフト距離 は、運動量に比例している。この量から目的の電荷・ 運動量の粒子のドリフトを打ち消す外部偏向磁場を 印加することで、電荷および運動量を選択すること ができる。

3.3 ミューオン蓄積リング

ミューオン輸送システムを通じて運ばれたミュー オンは,蓄積リングに入射される。この蓄積リング では,

(1) ミューオンビーム中のパイオンが崩壊するま で蓄積リング内を周回させて,ビーム純度を向上さ せる。さらに,

(2) ミューオンビームのエネルギー広がりを位相 空間回転法を使って狭くして,ビーム輝度を上げる。

まず,前者の高純度化についてである。実験上で 一番問題となる不純物粒子はパイオンであり,この 除去が最も重要である。さて,PRISM - FFAGリン グ内でミューオンは約6周する。この時の全周回距 離は約240mとなる。したがって、パイオンが生存 する確率は10<sup>-20</sup>以下となり,パイオンの存在しない高純度のミューオンビームを作ることができる。

後者の高輝度化については,位相空間回転の原理 を使用する。以下に,位相空間回転の原理を説明す る。

#### 3.3.1 位相空間回転の原理

位相空間回転法とは、高周波電場により,速い粒 子を減速すると同時に遅い粒子を加速することで、 ミューオンビームのエネルギー幅を小さくするビー ム高輝度化の手法である。これは、図3のようなエ ネルギーと時間(位相)の二次元位相空間でみると、 ビームの分布を90度回転させることに対応する。 ビームの時間的な広がりとエネルギーの広がりが変 換されるので、達成されるエネルギー幅は最初のビ ームの時間的な広がりによって決定される。したが って、位相空間回転法によるビームの高輝度化には、 パルス幅の狭い陽子ビームを使用することが重要と なる。



- 図3 位相空間回転の原理。高周波電場により高エネルギー 粒子を減速、低エネルギー粒子を加速する。これによ リビームのエネルギー広がりを時間広がりに変換し、 高輝度ビームを実現する。図で縦軸はミューオンのエ ネルギー値を,横軸は時間を意味する。左図は位相空 間回転以前で,右図は位相空間回転後である。
- 3.3.2 ミューオン蓄積リングとしての固定 磁場強収束リング(FFAG)

PRISM のミューオン蓄積リングが備えるべき重要な特徴として、以下の3条件がある。

- 大強度を達成するに十分大きな横方向アクセプタンス(粒子の受入量)を持つこと
- ビームエネルギーアクセプタンスも十分に大きいこと

 ミューオンの寿命より充分に短い時間内に位 相空間回転により高輝度化が達成されること である

PRISM では、近年その開発が著しい FFAG (Fixed Field Alternating Gradient; 固定磁場強収束)加速器 を蓄積リングとして採用した。

リング加速器では周回ターン毎に高周波電場によ り位相回転するので、線形システムに比べ高周波系 は簡略化されるというメリットがある。また、数 kHzの繰り返し運転でも、位相回転に必要な時間は 数マイクロ秒であるので、全体の高周波系のduty は数%と少ない。よって、高周波空胴の冷却、高周 波電源消費電力の点からも運転が容易となる。

リング加速器としては、サイクロトロンやシンク ロトロンなどもあるが、上記の三つの要求を同時に 満たすのはFFAGだけである。サイクロトロンに おいては、エネルギーアクセプタンスは大きいが、 等時性が成り立つのでシンクロトロン振動がない。 また、シンクロトロンについては、エネルギーが変 わっても閉軌道は一定であるので、分散で決まる水 平方向のエネルギーに対するアクセプタンス dE/E は1%程度と非常に小さい。一方、FFAG は、

- ・強収束なので、横方向アクセプタンスが大きい
- ・軌道がエネルギーとともに変わるので、エネ ルギーアクセプタンスが大きい
- ・シンクロトロン振動する
- ・磁場が一定なので、短時間での加減速が可能

など、ミューオンの蓄積リングとして非常に適した 特徴を兼ね備えている。

PRISM で使用するミューオン蓄積 FFAG リング を PRISM-FFAG と呼ぶことにする。リングは10個 の DFD triplet 電磁石から成り、その外径は約15m、 平均軌道半径は6.4m である。1セルのストレート セクションの長さは約1.7m であり、その8カ所に 高周波加速空胴が配置され、残りの2カ所には入射 取り出し用のキッカー電磁石が配置される。

### 3.4 PRISM-FFAGの研究開発

前章で述べた PRISM 計画の構成要素の内、ミュ ーオン蓄積リングの研究開発(R&D)が平成15年 度から学術創成科研費により5カ年計画で開始され 既に、10台のうち6台の大口径FFAG 電磁石が完成、 超高電場勾配高周波加速空胴システムの開発にも成 功している。

図4が,完成した6台のPRISM-FFAG電磁石に より組み上がった6セルPRISM-FFAGリングの写 真である。輸送ソレノイドからのミューオンビーム を効率よく取り込むため、水平100cmで,垂直 30cmの大口径電磁石となっている。電磁石はDFD のtriplet構成で、電磁石の外側からの入射取り出し ができるようにC型電磁石を採用している。また、 高周波空胴コアへの漏れ磁場を抑える目的で、両端 にはフィールドクランプを有する。TOSCA磁場を 用いたトラッキングシミュレーションによると、 PRISM-FFAGのアクセプタンスは水平方向で 40,000 mm・mrad、垂直方向で6,500 mm・mrad である。

大口径 FFAG と並んで、ミューオンの位相空間 回転成功の鍵となるのが、高周波加速システムであ る。ミューオンの寿命に対して、十分に短い時間内 で位相空間回転を終えるには4-5MHzの高周波周 波数で170kV/mという超高電場勾配を有する高周 波加速システムの開発が必要である。われわれは magnetic alloy コアを組み込んだ極薄の高周波加速 空胴と四極真空管を用いた高出力アンプから成る高 電場勾配高周波加速システムの開発に成功している。

開発した電磁石と高周波加速空胴システムとを蓄 積リングへと組み合わせ、位相空間回転法によるビ ーム高輝度化の実証実験を平成20年度に実施した。 本実証実験ではミューオンの代わりにアルファ粒子 を用いて実験を行い,予想通りの実験結果が得られ た。これにより,位相空間回転法により,ビームの 高輝度化が達成することが検証できた。

## 4 . 大阪大学での MUSIC 計画

PRISM ミューオンビーム源は元々東海村のJ-PARC に設置する予定で検討していたが,その試作 として,大阪大学核物理研究センター(RCNP)に ミューオンビーム源を製作する計画を進めている。 この計画を MUSIC (MUon Science Intense Channel)計画と名付けている。総ミューオン収量は陽 子ビーム強度に比例する。J-PARC での陽子ビーム パワー(ビームエネルギーとビーム電流の積)は約 500 kW であり,RCNP の陽子サイクロトロンの陽 子ビーム強度は約0.4 kW と大きな差がある。それ でも,MUSIC計画でのミューオンのビーム強度は 約10<sup>9</sup>個/秒となり,現在の世界最高ビーム強度と ほぼ比肩する。MUSIC 施設は RCNP の西実験室に 設置される。図5 に実験装置のレイアウトを示す。



図4 大阪大学核物理研究センターのM実験室での6セルPRISM-FFAGリング。 手前に見える白い装置は高周波加速空胴とその増幅器と電源。ミューオンの 代わりにアルファ粒子を使って位相空間回転の実証試験を行った。



図 5 大阪大学核物理研究センターで MUSIC 計画のレイアウト

平成20年度に,MUSIC計画のうち,前段のパイ オン捕獲システムの予算が認められた。これは PRISM計画のパイオン捕獲システムと同様なもの であるが,陽子ビームパワーが0.4 kWであるので, 放射線耐性などの仕様は厳しくない。現在の世界最 高ビーム強度は,スイスのPaul Sheller Institute (PSI)の1500 kWの陽子サイクロトロンにあるミ ューオンビーム源であるが,新しいアイデアである パイオン捕獲システムを使うことにより,RCNPの 陽子ビーム強度でもPSI研究所に匹敵するミュー オンビーム強度を期待することができる。平成22 年度夏にはビーム試験を開始する予定である。 5.まとめ

ミューオンサイエンスは幅広い学際分野を網羅し 将来が期待できる分野である。しかし,これまで十 分な量のミューオンを研究に使うことができず分野 の発展の障害になっていた。今回新しいアイデアに 基づく次世代のミューオンビーム源の研究開発を進 めている。特に,大阪大学では,核物理研究センタ ーでの MUSIC 計画,それに J-PARC 施設に設置す る予定の PRISM 計画などを推進している。これら の新しいミューオンビーム源により,将来一層ミュ ーオンサイエンスが発展することが期待される。