

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18340065
 研究課題名（和文） 円形加速器を用いたミュオンイオン化冷却の基礎研究

研究課題名（英文） A Study on Muon Ionization Cooling in a Ring

研究代表者

佐藤 朗 (SATO AKIRA)
 大阪大学・大学院理学研究科・助教
 研究者番号：40362610

研究成果の概要：次世代の大型加速器計画であるニュートリノ・ファクトリーやミュオン・コライダーを実現するためには、ミュオン・ビームのイオン化冷却技術確立が重要である。本研究では、円形加速器を用いた効率の良いビーム冷却を目指し、現実的なビーム冷却リングの設計を検討した。このなかで、ビーム冷却やビームの入出射に必要な長いストレートセクションを持つレーストラック型 FFAG を新しく提案し、それをビーム冷却リングへ応用することを検討し、また、くさび型超流動ヘリウム減速材の開発を進めた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	5,700,000	0	5,700,000
2007年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2008年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
年度			
年度			
総計	15,000,000	2,790,000	17,790,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：加速器、ビーム冷却

1. 研究開始当初の背景

素粒子物理学の次世代加速器として、ニュートリノ・ファクトリーとミュオン・コライダー計画がある。ニュートリノ・ファクトリーは、数 10GeV に加速されたミュオンを蓄積リングに入れて、ミュオン崩壊から生じた大強度のニュートリノ・ビームを使う実験施設である。一方、ミュオン・コライダーは、加速された負電荷ミュオンと正電荷ミュオンを正面衝突させるエネルギー・フロンティアの衝突型加速器である。どちらも高エネルギーにミュオンを加速するという

共通点がある。一般に加速器には、ビームのサイズと角度（横方向の4次元位相空間）、そして、時間とエネルギー（縦方向の2次元位相空間）に対してビームを正しく加速できる許容範囲（アクセプタンス）がある。生成直後のミュオン・ビームは、このアクセプタンスには十分に入りきらないので、ミュオンを効率よく加速させるためには、加速する前に縦横6次元位相空間におけるミュオン・ビームの広がり（エミッタンス）を小さくしておく必要がある。このエミッタンスを小さくする手段をビーム冷却という。ミュ

ーオン・ビーム冷却手段の確立は、ミュオン加速器の開発研究において、最終的なニュートリノやミュオンの強度を決定する最も重要な要因である。

ミュオンは短寿命であるので短時間でビーム冷却を完了させる必要がある。ビーム冷却方法には放射冷却、確率冷却、電子冷却などがあるが、これら従来のビーム冷却法は、所用時間の観点からミュオン・ビームの冷却には適さない。唯一、イオン化冷却が有望な手段として検討されている。イオン化冷却では、ミュオンを物質中（減速材）に通過させることでイオン化損失によりエネルギーを失わせ、その後、高周波加速電場によって進行方向にのみ損失したエネルギーを回復させる。これを多段に繰り返して行い、ビーム・エミッタンスを小さくする。減速材中ではイオン化損失と同時に多重散乱によりビーム角度に広がりが生じるので、イオン化損失が大きかつ多重散乱の少ないもの、すなわち、液体水素など原子番号の小さい物質を減速材として使用する必要がある。

ビーム冷却システムを線形ビームラインとして構成する場合、ビーム1回の通過で冷却を完了させるために、横方向及び縦方向の冷却用にそれぞれ100m程度の長さの冷却ラインが必要となる。しかし、円形加速器内にビーム冷却システムを構築すれば、小数のRFや減速材を何回も再利用できるので、ビーム冷却システムの小型化、そして、建設・運転コストの低減が可能となる。このような円形加速器を用いたビーム冷却システムをビーム冷却リングと呼ぶ。

ニュートリノ・ファクトリの実現に向けてビーム冷却リングの検討が世界中で進められているが、現在2つの大きな課題がある。それは、(1) 入射や取り出しで検討された現実的なビーム冷却リングの設計が未だないこと、(2) 減速材容器の厚い窓材が冷却効果の低減を招くことである。

2. 研究の目的

本研究は、ニュートリノ・ファクトリ実現において重要なビーム加工技術の一つである「ミュオン・ビームのイオン化冷却技術」の基礎研究である。特に円形加速器を使用したビーム冷却リングの開発に的を絞って、その試験器建設に先駆けて、ビーム冷却リングが抱える上記2つの技術的問題点を解決することを目指した。

3. 研究の方法

本研究では、上述の問題点を解決するために、次の二つのアイデアの検討を中心に研究を進めた。(1) ストレートセクションを持つ、レーストラック形状の固定磁場収束 (FFAG) リングの検討、(2) くさび形超流

動ヘリウム減速材の開発。

冷却効率の高いイオン化冷却リングを実現するには、強い横方向収束力、角度方向に大きなアクセプタンス、大きな運動量アクセプタンスが要求されるまた、ミュオンが崩壊する前に冷却を完了できる速い加速能力も必要である。FFAGは、強収束、横方向の大きなアクセプタンス、大きな運動量アクセプタンス、そして、磁場が時間によらず一定であるので速い加速が可能と、イオン化冷却リングに要求される条件を全て兼ね備えている。本ビーム冷却リング研究のポイントである入射取り出し方法の確立は、レーストラック型FFAGラティスにより実現する。図1に本研究で設計を目指すビーム冷却リングの模式図を示す。リングはFFAG電磁石、くさび形減速材、入射取り出し用キッカー及びセプタム電磁石から構成される。直線部を長く取ることで、キッカー・セプタム電磁石への性能要求が現実的なものとなる。レーストラック型FFAGは今まで全く検討されていない新しいタイプの加速器となる。

超流動ヘリウム減速材も本研究で初めて研究されるものである。ヘリウムは水素の次に優れたイオン化冷却効率を持つ減速材物質である。さらに、超流動状態の特徴を利用することにより超薄膜窓の減速材容器が実現可能となる。また、超流動ヘリウムは熱伝達率が極端に大きいので、イオン化損失による発熱を効率よく除去できるメリットがある。MICE実験で検討されている液体水素減速材は爆発性があるので、取り扱いや電気系統の設計に細心の注意を要する。ヘリウムの安定性も大きなメリットの一つである。

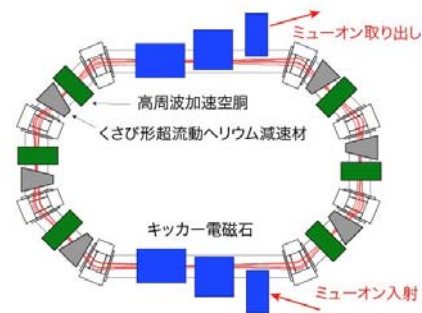


図1: レーストラック型FFAG ビーム冷却リングの概念図

4. 研究成果

(1) レーストラック型FFAG ビーム冷却リングの検討については、以下の研究成果を得た。

まず、PRISM-FFAGのラティスデザインをベースにしたビーム冷却リングを検討した。PRISM-FFAGとは、ミュオン電子転換過程探索実験のために設計されたFFAGリングであ

り、ビーム冷却リングに要求される2つの要素：冷却前の広がったビームを許容できる大きなアクセプタンス、高周波加速空洞及び減速材、そして、入射取り出しシステムを挿入するための十分なストレートセクション、を兼ね備えている。ミュオンイオン化冷却には、300MeV 付近のエネルギーが適している。PRISM-FFAG のオリジナルラティスについて、300MeV ミュオンが周回するように磁場を高め、高周波空洞とくさび形減速材を配した円形リングによるビーム冷却の場合は、ラティスの角度方向のアクセプタンスが充分でないこととベータファンクション大きすぎることにより、ビーム冷却には適さないことがシミュレーション計算により判明した。

また、PRISM-FFAG を改良し、さらに進んだミュオン電子転換過程探索実験の検討を進めると共に、PRISM-FFAG を発展させた新しいラティスと加速器技術を検討するために、PRISM タスクフォースを設立した。これは、研究代表者である佐藤と英国インペリアルカレッジ・ロンドンの J. Pasternak 氏が中心となり、日本と英国・米国・欧州の素粒子・加速器研究者を集めた、国際協力研究グループである。

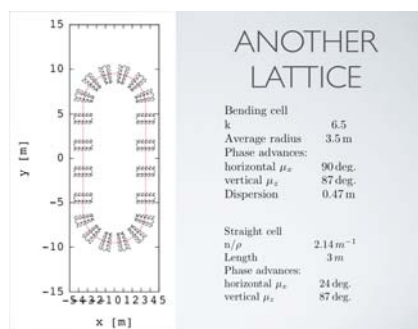


図2：レーストラック型FFAGラティスの一例

このタスクフォースの中で、森教授らは、スケーリングFFAG電磁石によるストレートセクションを挿入したレーストラック型のFFAGリングの研究を進め、大アクセプタンスを有するレーストラック型のFFAGリングの設計に成功した。ストレートセクションでは、ビームの分散関数を調節することも可能であり、円形ビーム冷却リングへとしても期待が持てる新しい可能性が提案された。

また、入射取り出し用のキッカーについては、ニュートリノ・ファクトリーで検討されているキッカー電磁石システムの応用について検討した。

(2) くさび形超流動ヘリウム減速材の開発については、次のような成果があった。

我々が開発しているシステムは原子核実験KEK-PS-E549で使用した超流動ヘリウム標的システムの設計をベースに改良を加えたものである。ミュオンビームの通過による

超流動ヘリウム減速材への入熱除去が重要となるが、本システムは150L/時のヘリウム液化機を利用することで100Wの冷却能力を有する設計である。本年度は本システムのうち1K容器と冷却試験用アブソーバー容器を設計・製造し、超流動ヘリウム減速システムへ組み込んだ。

また、マイラーシートを窓材に使用したくさび型超流動ヘリウム容器を製作した。これらのシステム開発を通して、くさび型超流動ヘリウム減速材製作の問題点を洗い出した。



図3：超流動ヘリウム予冷システム

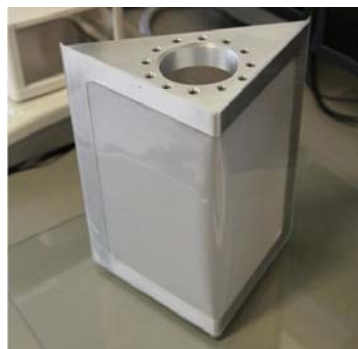


図4：くさび型超流動ヘリウム容器

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計11件)

(1) A. Sato, "Study for a Racetrack FFAG based Muon Ring Cooler", Proceedings of IPAC10, (2010), WEPE043, (the First International Particle Accelerator

Conference, IPAC' 10、2010年5月23-28日、京都)

(2) A. Sato, T. Itahashi, Y. Kuno, Y. Mori, M. Yoshida, *et. al.*, " Demonstration of Phase Rotation using Alpha Particles in the Six-sector PRISM-FFAG", Proceedings of IPAC10, (2010), WEPE044, (the First International Particle Accelerator Conference, IPAC' 10、2010年5月23-28日、京都)

(3) J. Pasternak, A. Sato, Y. Kuno, Y. Mori, *et. al.*, " Accelerator and Particle Physics Research for the Next Generation Muon to Electron Conversion Experiment - the PRISM Task Force", Proceedings of IPAC10, (2010), WEPE056, (the First International Particle Accelerator Conference, IPAC' 10、2010年5月23-28日、京都)

(4) J. Pasternak, A. Sato, Y. Kuno, Y. Mori, *et. al.*, " Injection and Broadband Matching for the PRISM Muon FFAG", Proceedings of IPAC10, (2010), WEPE057, the First International Particle Accelerator Conference, IPAC' 10、2010年5月23-28日、京都)

(5) J. -B. Lagrange, Y. Ishi, Y. Kuriyama, Y. Mori, *et. al.*, " Applications for Advanced FFAG Accelerator", Proceedings of IPAC10, (2010), THPD092, (the First International Particle Accelerator Conference, IPAC' 10、2010年5月23-28日、京都)

(6) Y. Mori, "Advancement of Scaling FFAG Accelerators", International Conference on FFAGs:FFAG09, 2009年9月21-25日、Chicago, USA

(7) A. Sato, "PRISM R&D", International Conference on FFAGs:FFAG09, 2009年9月21-25日、Chicago, USA

(8) J. Pasternak, "New Initiatives for PRISM", International Conference on FFAGs:FFAG09, 2009年9月21-25日、Chicago, USA

(9) J. -B. Lagrange, "PRISM with Straight Section", International Conference on FFAGs:FFAG09, 2009年9月21-25日、Chicago, USA

(10) A. Sato and S. Ishimoto, " MUON COOLING IN A RACETRACK FFAG USING SUPERFLUID HELIUM WEDGE ABSORBERS", Proceedings of COOL09, (2009), THMCP008, (The workshop on beam cooling and related topics, COOL' 09、2009年9月3日、Lanzhou, China)

(11) Y. Mori, J. -B. Lagrange, "Straight Section in Scaling FFAG Accelerator", Proceedings of PAC09, (2009), FR5PFP002, The 23rd Particle Accelerator

Conference、2009年5月4-8日、Vancouver, Canada)

[その他]

PRISM Task Force:

<http://www.hep.ph.ic.ac.uk/muec/meetings/20090701/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 朗 (SATO AKIRA)

大阪大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：40362610

(2) 研究分担者

石元 茂 (ISHIMOTO SHIGERU)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・講師

研究者番号：50141974

鈴木 祥二 (SUZUKI SHOUJI)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・技師

研究者番号：00391722

久野 良孝 (KUNO YOSHITAKA)

大阪大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：30170020

森 義治 (MORI YOSHIHARU)

京都大学・原子炉実験所・教授

研究者番号：30124176

吉村 浩司 (YOSHIMURA KOJI)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教

研究者番号：50272464

平成18年度と19年度は研究分担者。

平成20年度は連携研究者。

板橋 隆久 (ITAHASHI TAKAHISA)

大阪大学・大学院理学研究科・特任研究員

研究者番号：20112071

吉田 誠 (YOSHIDA MAKOTO)

大阪大学・大学院理学研究科・特任研究員

研究者番号：70379303

大木 俊征 (OKI TOSHIYUKI)

大阪大学・大学院理学研究科・特任研究員

研究者番号：60415049

平成18年度と19年度は研究分担者。

平成20年度は連携研究者。