

機関番号：14401

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2008～2010

課題番号：20244029

研究課題名（和文） ミューオン・ビームのイオン化冷却実証実験の国際的展開

研究課題名（英文） New International Initiative on Muon Ionization Cooling

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

研究者番号：30170020

研究成果の概要（和文）：

本研究の目的は、ミューオンのイオン化ビーム冷却法を世界で初めて実証し確立することである。イオン化ビーム冷却とは、物質中にミューオンを通過させて運動量成分を減少させ、その後、高周波電場でビーム軸に平行な成分だけ加速する。この過程を繰り返し、ビーム冷却を行う。この原理を実証するために、英国ラザフォード研究所において日米欧英の国際共同のMICE実験が準備していて、ビーム冷却効果を高精度で測定し、基幹技術の確立を目指す。

研究成果の概要（英文）：

The purpose of this research is to demonstrate the muon ionization cooling method for the first time and to establish the basic techniques. In the muon ionization cooling, muons pass through energy-absorbing material and then are accelerated parallel to the beam axis. By repeating this process several times, a muon beam becomes more parallel to the beam axis, and it is cooled. For experimental demonstration, an international research collaboration called MICE was formed and is carrying out its experiment at Rutherford Appleton Laboratory in the UK. The goal is to measure an ionization cooling effect and obtain required knowledge.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	18,400,000	5,520,000	23,920,000
2009年度	10,000,000	3,000,000	13,000,000
2010年度	9,400,000	2,820,000	12,220,000
年度			
年度			
総計	37,800,000	11,340,000	49,140,000

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・イオン化冷却・MICE・ミューオンコライダー・ニュートリノファクトリ・ミューオン飛跡検出器・液体水素減速材・シンチレーティングフレイバー

## 1. 研究開始当初の背景

粒子ビームの冷却技術は、これまで、素粒子原子核研究や加速器科学研究において重要な役割を果たしてきた。たとえば、1984年、CERN 研究所の陽子反陽子衝突実験において、

Carlo Rubbia 氏が、W ボソンを発見してノーベル賞を受賞したが、これは反陽子ビームの冷却技術が確立されていなければ達成できなかった。現に、Simon van der Meer 氏も反陽子ビーム冷却技術により Carlo Rubbia 氏

と共にノーベル賞を受賞している。このように、新しいビーム冷却の先端技術を開発することにより新しい研究の扉を開くことが可能となるのである。

さて、ビーム冷却とは、ビームのエミッタンス（ビームの広がりや傾きの積）を小さくする技術である。最近強い関心を集めている新しいビーム冷却技術は、「イオン化冷却法」である。これは、短寿命で三次粒子であるミュオン・ビームを冷却する新しい手法である。注目されている理由は、このイオン化ビーム冷却法が、将来の「ニュートリノ・ファクトリ計画」や「ミュオン・コライダー計画」を実現可能とする必須の基幹技術であるからである。

ニュートリノ・ファクトリとは、ミュオン崩壊を使って大量のニュートリノを発生する将来の加速器コンプレックスである。ミュオンを高いエネルギーに加速して蓄積リングに入射し、リング直線部でのミュオン崩壊からのニュートリノを使って大強度ニュートリノ・ビームを作り出す。従来のパイオン崩壊からのニュートリノ・ビームに比べ、数 10GeV のエネルギー領域で約 100 倍以上の強度が得られ、ビーム・バックグラウンドも  $10^{-3}$  以下と非常に少ない。これにより、全人未踏の実験感度でニュートリノの振動パラメータを精査することが可能である。また、ニュートリノ混合のユニタリ混合行列の研究、ニュートリノの CP 非保存など、素粒子物理学の根幹と関わる重要な研究課題を行うことが出来る。特に、ニュートリノ混合角のひとつ、 $\theta_{13}$  が非常に小さい場合、パイオン崩壊を基盤としたニュートリノ・ビームでは、CP 非保存の探索はできず、ニュートリノ・ファクトリが唯一の可能性となる。さらに、シンクロトロン放射がないという利点を活かしたマルチ TeV エネルギー領域のミュオン・コライダーも米国フェルミ研究所に再検討され始め、再び新たな関心を集めている。

## 2. 研究の目的

ミュオン・イオン化冷却の原理}について説明する。ミュオンは不安定短寿命の素粒子であるので、通常のビーム冷却方式は使うことができず、イオン化ビーム冷却が唯一のビーム冷却方法である。イオン化ビーム冷却では、まずミュオンを減速物質 (absorber) 中に通過させてビーム軸方向に平行な運動量成分と垂直な運動量成分を両方とも減少させる。その後、高周波加速電場 (RF) でビーム軸に平行な成分だけ加速して回復させる。この過程を繰り返すことにより、ビーム冷却が行われる。これまでにイオン化ビーム冷却の実現を目指して必要な技術開発が精力的に行われてきたが、未だに実験的に検証されておらず、実証実験が待ち望まれてきた。

ミュオン・イオン化ビーム冷却の原理を実証するために、日米欧英の国際共同実験として、MICE (Muon Ionization Cooling Experiment) 実験が準備されている。これは、3 段のイオン化冷却の部分を製作して、ミュオン・ビーム冷却を高精度で測定しようという実験である。この実験は、国際協力のもとに英国の Rutherford-Appleton 研究所 (RAL) で行われる。将来のイオン化ビーム冷却に必要な基礎データを取ると共に、基幹技術を確認することにある。この MICE 実験では、3 段のイオン化ビーム冷却部によりビーム冷却効果を高精度で測定し、将来のイオン化ビーム冷却に必要な基礎データを取ると共に、基幹技術を確認することを目的とする。MICE 実験は、総勢 100 名に及ぶ国際協力の下に英国の Rutherford-Appleton (RAL) 研究所で行われ、平成 20 年より実験を段階的に開始した。

また、MICE 実験では、低温、加速器、超伝導磁石、素粒子検出器の分野において最先端の技術を駆使して、ミュオンという不安定素粒子の冷却を世界で初めて実現することを目指している。また、イオン化冷却の効果が確認できれば、ミュオン・ビームの加速への大きなブレークスルーとなる。将来のニュートリノ・ファクトリ計画やミュオン・コライダー計画に与える貢献は計り知れない。さらに応用面でも、ミュオン・イオン化ビーム冷却により高輝度なミュオン・ビームが得られることになり、物性物理、物質工学、生命科学等への幅広い応用が期待でき、その波及効果は計り知れない。

国内外で、イオン化ビーム冷却や位相空間回転法などの新しいビーム技術を使った高輝度ミュオン源を実現しようと活発な研究開発が行われている。国内では、大阪大学を中心に位相空間回転技術によるミュオン・ビームの高輝度化技術の開発が行われており、また国際的にもイオン化冷却技術、標的技術、加速器技術などの、広範な分野で R&D が行われている。その中でも、イオン化冷却技術は最も重要なものとして、精力的な研究開発が続けられており、日本でもこれまで日米科学協力事業を通じて、いろいろな要素技術を開発してきた。もし本研究が採択されれば、これまでの経験、ノウハウを存分に生かして、我々日本グループが MICE 実験においてリーダー的役割を果たすことができると確信している。将来にわたってトップレベルを維持していくためには、世界的にも注目されている MICE 実験において主要な貢献をし中心的な役割を果たすことは、非常に重要である。

## 3. 研究の方法

MICE 実験は、ミュオン・イオン化ビーム冷

却の実証とその技術確立を目指す実験である。これは、英国の Rutherford-Appleton Laboratory (RAL 研究所)で行われ、日米欧英の国際共同実験で総勢 100 名の大型実験である。日本グループは、2004 年の実験提案の初期から参加し、主導的な役割を担っている。

まず、MICE 実験装置について概略を説明する。実験装置は、大別して、ミュオン運動量と位置を測定するミュオン飛跡検出器とイオン化ビーム冷却部から構成される。このイオン化ビーム冷却部は、ミュオンを減速する液体水素減速材とミュオンを進行方向に加速する高周波加速空洞が交互に置かれた構造となっている。イオン化ビーム冷却は次の式で与えられる。

シミュレーション計算によると、この MICE のイオン化ビーム冷却部において 10%の冷却効果が期待されており、これを 1%の相対精度で測定することが、MICE 実験の目標である。ミュオン飛跡検出器はビーム冷却前後のミュオン・ビームのエミッタンスを 0.1%の絶対精度で測定できる必要がある。

まず、ミュオン・ビームは、RAL 研究所の ISIS 陽子加速器に置かれた内部標的に陽子ビームを照射することによって生成する。これを超伝導ソレノイドからなるビームチャンネルを通して MICE 実験ホールに導く。約 200 MeV/c のミュオン・ビームは、TOF 測定器や Cherenkov 測定器を通過した後、ミュオン飛跡検出器を通過し、冷却前のミュオン・ビームのエミッタンスを測定する。その後、ミュオンは、交互に置かれた液体水素減速材と高周波加速空洞から構成されるイオン化ビーム冷却部において冷却される。特に、液体水素減速材が置かれている部分には、そこでミュオン・ビームを収束するために、超伝導ソレノイド磁石が置かれている。それに続くミュオン飛跡検出器において冷却後のミュオンの運動量と位置を再度測定することにより、イオン化ビーム冷却の効果を調べる。そして、最下流には TOF 測定器、Cherenkov 測定器とカロリメータを使って、ミュオンが崩壊せずに最後までミュオンであることを確認する。

日本グループ (大阪大学と高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所) は計画当初より、液体水素減速材、ミュオン飛跡検出器という MICE 実験にとって主要な装置の開発において貢献してきた。本研究においては、(1) 液体水素減速材 (日本単独の担当)、(2) ミュオン飛跡検出器 (日米英で担当)、(3) 第 2 検出器ソレノイドの製作 (日米で担当)、(4) ミュオン・ビーム・モニター (日米で担当) などを分担して製作していく。

日本の担当部分: 日本グループ (大阪大学と高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核

研究所) は、MICE 実験計画当初より、液体水素減速材、ミュオン飛跡検出器という MICE 実験にとって主要な装置の開発に主導的に従事してきた。それを基盤にして、本研究計画においては、(1) 液体水素減速材 (日本単独の担当)、(2) ミュオン飛跡検出器 (日米英で担当)、(3) ミュオン・ビーム・モニター (日米で担当) などを分担して製作していく。

(1) イオン化ビーム冷却部においてミュオンの運動エネルギーを減速するために、減速材 (absorber) を置く。多重散乱によるビームの広がりを抑えるために、減速材としては、輻射長 (radiation length) の長い液体水素を使用する。液体水素減速材は、通過するビームや高周波加速空洞からの熱流入に対して十分な冷却能力が必要である。これまで、大阪大学と高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所は、イオン化ビーム冷却に必要な液体水素減速材のプロトタイプの研究開発を行ってきた。このプロトタイプの試験から、容器の下部にビーターを設置することにより、液体水素内の対流を恣意的に増加することによって、容器内の温度勾配が小さくかつ十分な冷却能力 (約 80 W) を得られることが判った。これらの試作器の試験により、実機的设计と製作を開始できる段階に入った。

(2) ミュオン飛跡検出器では、通過ミュオンの位置と運動量を一個づつ 6 次元で測定し、それらを足し合わせてエミッタンスを決め、その冷却前後の変化を求めるという方法を用いる。ミュオンの多重散乱効果を減少させるために、物質量の少ない飛跡検出器を製作する必要がある。そのために、350 $\mu$ m 径の極薄のシンチレーション・ファイバー (SciFi) の粒子飛跡検出器の開発を、日本・英国・米国の共同研究で行った。ミュオン飛跡検出器は 5 セットの SciFi 測定器から構成される。それぞれのセットは、120 度づつ角度をずらした 3 面の SciFi から構成される。このそれぞれの面は、俵積みを組み上げた 2 層の SciFi から成る。350 $\mu$ m 径の SciFi からのシンチレーション光は弱いので、米国フェルミ加速器研究所で開発された VLPC という 80%の量子効率をもつ測定器で読み出される。この VLPC は、ノイズを削減するために、9K の低温に冷却する必要がある。これまで SciFi 測定器のプロトタイプが製作され、宇宙線テストなどでその性能を確認した。また、製作段階での品質コントロール (QA) の方法も確立した。光量 (10 photoelectrons 以上) や測定効率 (99%以上) など実験に必要な条件を満たしていることがわかり、実機的设计と製作を開始できる段階に入った。

(3) MICE 実験のスケジュールを説明する。MICE 実験は、STEP1 から STEP6 までの 6 段階

にわけて順次、実験装置を追加することによって推進する。これによって実験装置とその結果をそれぞれの段階で理解しながら進めることができるという利点がある。まず、STEP1 は平成 20 年始めからスタートして、STEP6 までを平成 22 年までに完了する予定である。イオン化ビーム冷却の試験では、ミュオン運動量や減速材の材質などを変更して様々な条件化でテストする。全期間は 3 年間となっている。

#### 4. 研究成果

平成 20 年度には、日本において大型液体水素減速材を 1 台製作した。また、SciFi 飛跡検出器については日米英の共同で製作した。2 台の必要台数のうち、1 台については宇宙線を使ってその性能評価を行った。製作した SiFi 飛跡検出器が期待どおりの成果を持つことがわかった。この結果は、大阪大学大学院博士後期課程の大学院生の博士論文となった。

平成 21 年度には、英国 RAL 研究所において MICE 実験グループはミュオン・ビームを使った実験の調整を開始し、RAL でのミュオン・ビームの性質を正確に測定することに成功した。同時に、日本では、1 台目の大型液体水素減速材を製作した。

平成 22 年度には、英国 RAL 研究所において、ミュオン飛跡検出器用の超伝導ソレノイド磁石にトラブルがあり、修理のために、実験に遅延が生じた。しかし、これを解決した後、ミュオン・ビームを使った実験が本格的に開始した。まず、2 台の SiFi 飛跡検出器と大型液体水素減速材を使ってビームのエミッタンス測定実験が始まった。これにより、MICE 実験の Step1 実験がほぼ完了したことになる。現在データ解析を行っており、論文にする予定である。

#### 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)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① T. L. Hart, et al.、MICE : The International Muon Ionization Cooling Experiment: Phase Space Cooling Measurement、AIP Conf. Proc.、査読無、1 2 2 2 巻、(2 0 1 0)、4 5 9-4 6 2

[学会発表] (計 1 件)

- ① H. Sakamoto、The MICE spectrometers for the measurement of muon beam emittance、Technology and Instrument for Particle

Physics (TIPP09)、2009. 3. 13、つくばエポカル

[図書] (計 3 件)

- ① Yoshitaka Kuno、CRC Co.、"Superbeam, Beta Beam, and Neutrino Factory" in Neutrinos in Particle Physics, Astrophysics and Cosmology (Scottish Graduate Series)、(2 0 0 8)、4 0 0 ページ

- ② Yoshitaka Kuno and others、World Scientific、Advanced Series on Directions in High Energy Physics-Lepton Dipole Moments、(2 0 0 9)、7 2 2 ページ

- ③ Yoshitaka Kuno and others、Springer、Lecture Notes in Physics-Particle and Nuclear at J-PARC、(2 0 0 9)、2 6 5 ページ

#### 6. 研究組織

##### (1) 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  
研究者番号：30170020

##### (2) 研究分担者

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

吉田 誠 (YOSHIDA MAKOTO)

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：70379303  
平成 20 年度、平成 21 年度は研究分担者、平成 22 年度は連携研究者

有本 靖 (ARIMOTO YASUSHI)

高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・特任助教  
研究者番号：90379280  
平成 20 年度は研究分担者

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：