

世界初、素粒子ミュオンの冷却・加速に成功

～ミュオン加速元年、ついにミュオン加速器の実現へ～

本研究成果のストーリー

● Question

素粒子ミュオンを加速器で加速できると、素粒子物理学や物質生命科学、地球科学など、さまざまな分野での活用が期待されます。ミュオンは、ミュオン g-2/EDM 実験と呼ばれる素粒子標準理論のほころびの超精密検証実験などに有用ですが、加速は技術的に難しく、成功例はありませんでした。

● Findings

加速器を用いて人工的に作ったミュオンは、向きや速さのばらつきが大きく上記のような実験に適しません。しかしプラスの電荷を持つミュオン（ミュオンの反粒子の正ミュオン）なら、ほぼ止まるまでいったん減速して向きや速さをそろえる（冷却する）ことができます。今回、正ミュオンを改めて光速の約4%まで加速することに世界で初めて成功しました。

● Meaning

研究グループではこれまで冷却・加速技術の開発を続けてきており、今回初めて、素粒子ミュオンそのものの冷却・加速ができることを示しました。標準理論の超精密検証実験を始めるための大きな一歩となります。加速ミュオンを用いた全く新しいイメージングによって、ミュオン顕微鏡、文理融合研究などさまざまな応用も検討されています。

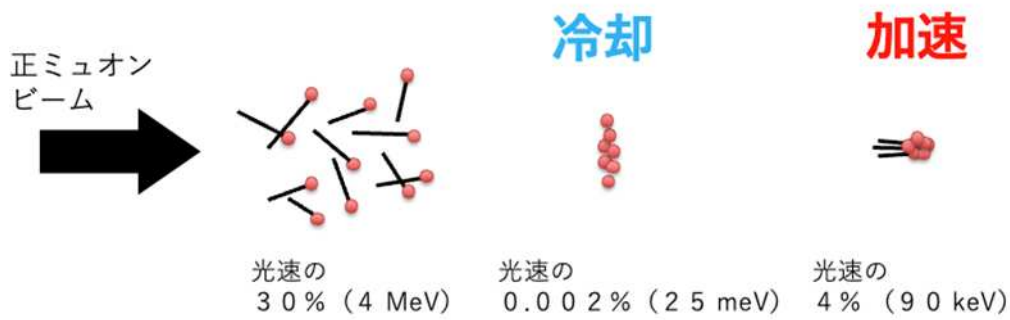


図1 向きや速さがそろっていない正ミュオンビームをいったん冷却し、改めて加速する模式図

120文字
サマリー

素粒子ミュオンを冷却し、光速の約4%まで加速することに成功しました。前人未至のミュオンの加速実現で、2024年は「ミュオン加速元年」となりました。標準理論のほころびの超精密検証、ミュオン顕微鏡、文理融合研究など新しい科学の地平が広がります。



写真1 J-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF) ミュオン実験施設で行われたミュオン冷却・加速の実験装置。正ミュオンビームが右側から入射し、写真右手前の装置で冷却され、その左側にある高周波加速空洞で加速される。加速空洞の左奥に加速されたビームの診断装置が設置されている。

概要

ミュオン（ミュー粒子、ミュオンともいいます）は電子に似た素粒子です。1936年、空から降り注ぐ宇宙線として初めて見つかりました。宇宙線由来の天然のミュオンを使ってピラミッド内部を透視することなどが行われていますが、現在では加速器で人工的・大量につくれるようになり、さまざまな活用が始まっています。

加速器でミュオンを作るにはまず、陽子加速器で陽子を光速近くまで加速します。そして加速された陽子を黒鉛などの標的にぶつけると、パイ中間子と呼ばれる粒子ができ、それが崩壊してミュオンができます。

茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 (J-PARC) (※1) では、1 秒間に 1 億個ぐらいのミュオンができますが、できたミュオンは、陽子、パイ中間子を経た「孫粒子」なので、向きや速さがかなりバラバラになっています。そのまま使える実験もありますが、ミュオン g-2/EDM 実験などには不向きです。

ミュオンはマイナスの電荷を持つものとプラスの電荷を持つものがあり、お互いに粒子・反粒子の関係にあります。プラスの電荷を持つミュオンを正ミュオンといますが、これはほぼ止まるまで減速して向きと速さをそろえる (冷却) することができます。いったんほぼ止まったあと電場で加速すれば、向きと速さのそろった指向性の高いミュオンのビームとなります。

向きや速さがそろっていないミュオンは加速が難しいのです。加速に使う加速空洞は真空の筒のようなものですが、向きがバラバラだと筒に効率よく入れることができません。また速さが不ぞろいだら加速の効率が悪くなります。

J-PARC では、陽子加速器でできた光速の 30% 程度の速さを持つ正ミュオンをシリカエアロゲルと呼ばれる材料に打ち込みます。正ミュオンはシリカエアロゲル中の電子と結びついてミュオニウムという中性原子になります。そしてレーザーを照射して電子をはぎ取って正ミュオンに戻すことにより、いったん光速の 0.002% という「ほぼ停止状態」まで冷却された正ミュオンを得ます。

その後、高周波電場をかけて改めて正ミュオンを加速します。ほぼ止まっていた正ミュオンなので、加速すればするほど向きがそろった飛躍的に指向性の高いミュオンビームが実現し、さまざまな実験に使えます。

今回、KEK、岡山大学、名古屋大学、九州大学、茨城大学、日本原子力研究開発機構、新潟大学の共同研究グループは、J-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF) のミュオン実験施設において、ミュオンの冷却技術、高周波加速技術を組み合わせることで、正ミュオンを光速の約 4% まで加速する技術の実証に成功しました。世界初の成果になります。

ミュオンの寿命は 2 マイクロ秒 (100 万分の 2 秒) ほどしかなく、素早く加速しないと崩壊してしまいます。また電子より 200 倍重いので段階的に加速する必要もありますが、技術開発を進め、最終的には光速の 94% まで加速する予定です。

ミュオンの加速技術にめどがついたことで、世界で初めての「ミュオン加速器」の実現が視野に入り、2024 年は「ミュオン加速元年」とでも呼ぶべき年になりました。加速されたミュオンを使ったさまざまな研究が進むことが期待されます。

※1. 大強度陽子加速器施設 (J-PARC)

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と日本原子力研究開発機構が茨城県東海村で共同運営している大型研究施設で、素粒子物理学、原子核物理学、物性物理学、化学、材料科学、生物学などの学術的な研究から産業分野への応用研究まで、広範囲の分野での世界最先端の研究が行われています。JPARC 内の物質・生命科学実験施設 (MLF) では、世界最高強度のミュオン及び中性子ビームを用いた研究が行われており、世界中から研究者が集まっています。

研究グループ

J-PARC センター 素粒子原子核ディビジョン、物質生命科学ディビジョン

KEK 素粒子原子核研究所 ミューオン・中性子グループ

KEK 物質構造科学研究所 ミューオン科学研究系

KEK 加速器研究施設

岡山大学 異分野基礎科学研究所 量子宇宙研究コア

名古屋大学 大学院理学研究科 理学専攻 高エネルギー素粒子物理学研究室

名古屋大学 素粒子宇宙起源研究所

九州大学 理学研究院 物理学部門 素粒子実験研究室

九州大学 先端素粒子物理研究センター

茨城大学 理工学研究科 量子線科学専攻、素粒子実験研究室

日本原子力研究開発機構

新潟大学 理学部 高エネルギー物理学研究室

新潟大学 研究統括機構 量子研究センター

なぜこの研究を始めたのですか

電子は電気（電荷）を帯びた粒子であり、磁場をかけると磁場に巻き付くような円運動をします。これをサイクロトロン運動といいます。

電子はまた小さな磁石でもあり、磁場の中に置くと「スピン」と呼ばれる自転運動の軸が首振り運動をします。これを歳差運動といい、粒子の磁石の強さ（磁気能率）が大きいほど速くなることがわかっています。

英国の物理学者ディラックの理論によれば、電子の磁気能率はサイクロトロン運動の周期と歳差運動の周期が完全に一致するように決まります。

ディラックの考え方では電子の磁気能率は厳密に 2 になります。磁気能率を「g 因子」という記号で書き、この場合は「 $g=2$ 」です。

しかし実験をすると、g の値は 2 よりわずかに大きいことがわかりました。実は首振り運動が理論予想より速かったのです。これは電子の周囲の真空が実は空っぽではなく、電磁気力を担う光子（光の粒子）をごく短い時間なら一時的に生み出したり消したりできる「量子効果」が原因で、「異常磁気能率」（※2）といいます。

異常磁気能率は、素粒子の標準理論に基づき、極めて精密に計算することができます。電子の

場合は実験と 10 桁以上の精度で一致しています。

このように標準理論は数学的整合性とこれまでの実験データに立脚して構築された堅牢な理論で、電子の異常磁気能率の理論と実験の高精度一致はその表れの一つです。

しかし近年、標準理論では説明できない現象が報告され、理論は拡張を迫られています。重力を含んでいないことや、暗黒物質や暗黒エネルギーを説明できないことなどがその限界と考えられています。

標準理論がどのように拡張されるべきか、ミュオンを用いた測定がその指針を与えると考え、研究を始めました。標準理論を超える未知の粒子や力が存在すれば、その効果がミュオンに顕著に現れ、観測しやすいと考えられているからです。ミュオンの異常磁気能率 (g-2) や電気双極子能率 (EDM) (※3) の超精密測定により、素粒子標準理論に含まれない未知の素粒子や物理法則の存在を明らかにしたいと考えました。

米国で行われた実験ではミュオン g-2 の測定値が標準理論の予想値よりも大きい可能性が示唆されており、日本では大きさが 20 分の 1 のコンパクトな実験装置を用いた全く異なる方法でこれを検証します。それにはミュオンを冷却・加速することにより、指向性が高いビームを作ることが必要ですが、技術的に難しく、実現していませんでした。

※2. 異常磁気能率 (g-2)

磁気能率は素粒子の持つ固有の性質の一つで、ボーア磁子と呼ばれる物理量と g 因子と呼ばれる量の積で表されます。量子力学的な効果が g 因子の 2 からの差分として現れます。これを「異常磁気能率」(g-2) と呼びます。標準理論で極めて高精度に計算することができます。

※3. 電気双極子能率 (EDM)

電気双極子能率 (EDM) は、大きさが等しい正負の電荷が空間的に離れて存在することによって生じる電荷分布の偏りを表す物理量です。EDM は空間反転及び時間反転対称性を破ります。素粒子の EDM は標準理論で極めて小さい値が予想されており、現在までに有限の値は測定されていません。

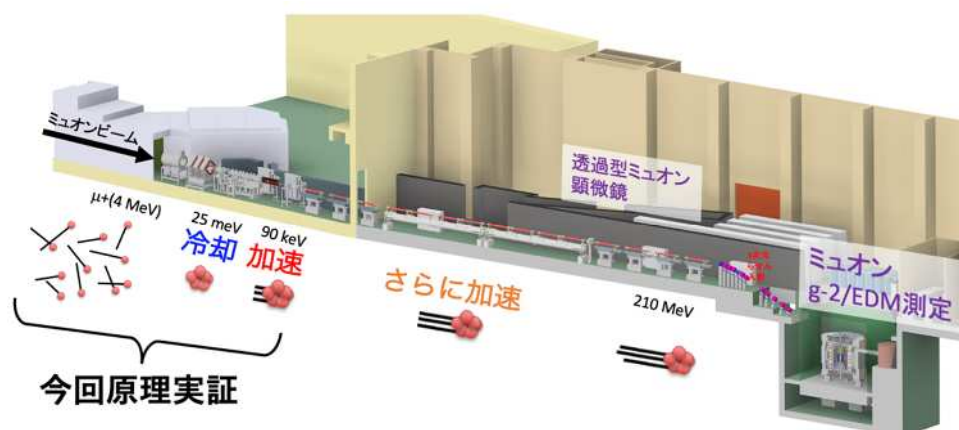


図 2 J-PARC で計画している世界初のミュオン加速器およびそれを用いた新しい実験の概要

ひらめいたところはどこですか

ミュオンの加速が難しいのは、加速器施設で作る通常のミュオンビームの向きや速さがそろっておらず（指向性が悪く）、電場で粒子を加速する高周波加速空洞に効率よく入れて加速するこ

とができないためです。そこで研究グループは、ミュオンをいったんほぼ静止させてから、高周波加速空洞で加速することによって、向きや速度や向きのばらつきを飛躍的に減らすことができますと考えました。こうした指向性が高いミュオンビームを用いれば、高周波加速空洞で効率よく加速することができます。今回、その技術の実証に成功しました。

努力したところはどこですか

研究グループは、ミュオンの加速を実現するために今回の実験に先立って、ミュオンを効率よく冷却（※4）する方法の開発と試験やミュオニウム負イオンを用いた高周波加速空洞の試験（※5）を重ねてきました。

ミュオン g-2/EDM 実験では、ミュオニウムから電子をはぎとった素粒子としてのミュオンの加速が必要です。そこでミュオニウムから電子をはぎ取るため、発振周波数を精密制御した超高安定レーザーを開発し（※6）、長時間安定に冷却されたミュオンを生成することに成功しました。これらの準備に基づき、世界最大強度のパルスミュオンビームを供給する J-PARC で実験を行ったことで、今回、ミュオンの冷却・加速に成功しました（※7）。

光速の 30%（エネルギーの単位では 4MeV）の速度を持つ正ミュオンビームをいったん光速の 0.002%（25meV）まで減速（冷却）し、改めて光速の 4%（90keV）まで加速できました。

※4. ミュオンの冷却

ミュオン冷却とはミュオンの向きや速さをそろえることです。ミュオンのエネルギーとその広がりを小さくするために、ミュオンビームをシリカエアロゲルに打ち込んでミュオニウム（正ミュオンと電子で構成される粒子）を生成させ、ほとんど静止した状態にした後、レーザーを使って電子をはぎ取り正ミュオンだけの状態にします。シリカエアロゲルにレーザー加工を施して収量を大幅に増大させる方法を開発しました。（参考：KEK プレスリリース「室温ミュオニウムの大量生成に成功—ミュオン異常磁気能率・電気双極子能率の超精密測定による『標準理論の綻び』検証に近づく、2014年9月」）

※5. ミュオニウム負イオンを用いた高周波加速

質量がほぼ等しいミュオニウム負イオン（正ミュオン 1 個、電子 2 個で構成されるイオン）を用いて、今回用いた高周波加速空洞による加速と加速後のビーム診断装置の確認を行い、ミュオニウム負イオンの高周波加速を確認しました。（参考：素核研ニュース「[高周波リニアックによるミュオンの加速実験に成功](#) ミュオン研究グループ」 2017年12月）

※6. 超高安定レーザーの開発

正ミュオンと電子から構成される中性原子のミュオニウムから電子をはぎ取って正ミュオンにするために、レーザー共鳴イオン化と呼ばれる方法を用います。これはレーザーの発振周波数をミュオニウムの内部状態に共鳴させることで、電子をはぎ取る効率を何桁も向上させる方法です。発振周波数がわずかでもずれると電子をはぎ取ることが全くできないため、レーザー周波数の精密制御は実験の鍵を握る技術の一つです。研究グループではレーザー周波数を 11 桁という非常に高い精度で制御し、24 時間連続運転で 1 ヶ月に渡って制御し続けることが可能な技術を開発しました。

※7. ミュオン加速技術とは（レーザー光に例えた説明）

ミュオン加速器におけるミュオンビームと加速器の関係は、光通信におけるレーザー光と光ファイバーの関係と似ています。光ファイバーは直径 10 ミクロン（髪の毛の太さの約 10 分の 1, 光の波長の 7 倍）という細いガラス中に光を伝播させるデバイスです。このような細い光ファイバーに光を入射するためには、レーザー光のような向きのそろった（指向性の高い）光が必要です。これは、蛍光灯や太陽光など自然光は向きがバラバラのため光ファイバーに効率良く入射して伝播させることが困難なためです。

加速器施設で作る通常のミュオンビームは指向性が悪く、自然光と似た特性を持っています。そして電場で粒子を加速する高周波加速空洞は光ファイバーと似た装置で、指向性の高い荷電粒子しか効率良く運ぶことができません。そのため、ミュオンビームの指向性を高くすることが研究の鍵を握っています。

何がわかったのですか

J-PARC 物質・生命科学実験施設ミュオン実験施設において、供給されるミュオンビームをほぼ止まった状態まで冷却・減速し、高周波加速空洞に入射することにより、ミュオンを光速の約 4%まで加速することに成功しました。図 3 は電子をはぎとるレーザーをミュオンに照射したとき、高周波加速空洞の出口で、想定された速さ（光速の 4%、エネルギーの単位では 90keV）の正ミュオンが検出されたことを示します。この方法によって正ミュオンの加速が可能であることがわかりました。さらに加速することで、指向性が極めて高いミュオンビームを得ることができます。

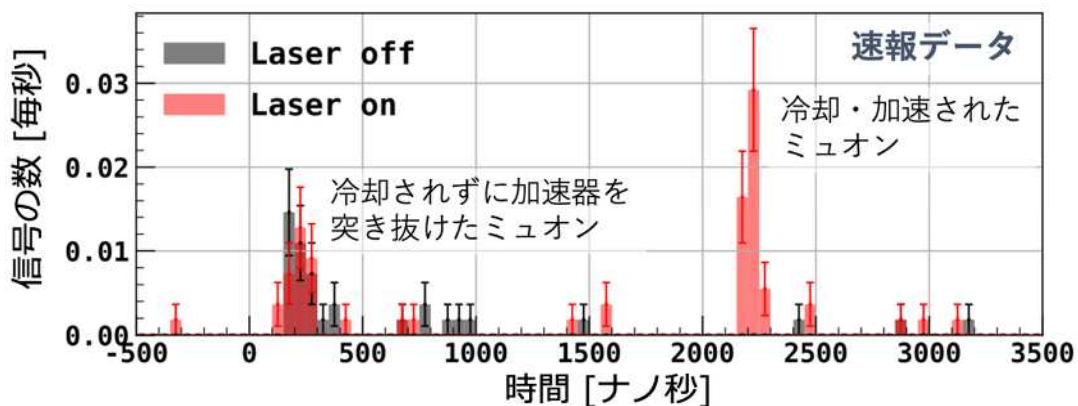


図 3 加速空洞出口で測定した粒子の時間分布と冷却・加速されたミュオンの信号。あらかじめ加速後に想定されるエネルギー（90 keV）と運動量を持つ粒子だけを選択し、測定している。

それで世界はどう変わりますか

世界には多数の加速器施設がありますが、ミュオンの加速器は存在しません。今回実現したミュオンの冷却・加速技術によって、世界で初めてのミュオン加速器を実現します。これを用いて素粒子標準理論のほころびの超精密検証や時間反転対称性の検証実験(ミュオン g-2/EDM 実験)、ミュオン顕微鏡など、さまざまな活用が可能です。さらに将来には、TeV を超えるエネルギーのミュオンを用いた衝突型加速器（コライダー）にこの技術を利用するアイデアもあり、夢が広がります。



謝辞

本研究は JSPS 科研費（18H05226, 19H05606, 20H05625, 21K13944, 21J01132, 22KJ1594, 22K21350, 22H00141, 24H00023, 24K03211）、文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）JPMXS0118069021、JST 未来社会創造事業 JPMJMI17A1 の助成を受けたものです。実験は J-PARC MLF の実験課題（2011MS06）として実施されました。

お問い合わせ先

<研究内容に関すること>

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構
素粒子原子核研究所 教授 三部 勉

<報道担当>

J-PARC センター広報セクション

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 広報室

国立大学法人 岡山大学 総務・企画部広報課

国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学広報課

国立大学法人 九州大学

国立大学法人 茨城大学 広報・アウトリーチ支援室

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 総務部報道課

国立大学法人 新潟大学 広報事務室

Tel : 025-262-7000

E-mail : pr-office@adm.niigata-u.ac.jp