

ミュー粒子の稀な現象で探る新しい物理法則



研究室紹介

A Search for New Physics with a Rare Process of Muon

Key Words : Beyond the Standard Model of Particle Physics, Muon, Rare Process

青木 正治*

はじめに

ニュートンにより提案された力学三法則と万有引力の法則の革新性は、天体の運動と地上の運動を統合し、同じ物理法則で全てを記述したという点にある。地上か天体か、過去か未来か、に問わらず、全ての空間と時間で普遍的に成り立つ物理法則があると信じるのは近代物理学を支える重要な信念である。

さて、我々の体や夜空の星々を構成している物質は最小の構成要素である「素粒子」から成り立っている。素粒子の種類やそれらの間に働く相互作用を記述する普遍的な法則を見つけることにより、森羅万象すべてを理解しようとする研究分野が素粒子物理学（高エネルギー物理学）である。素粒子物理学が追い求める普遍的な法則は、現在観測できる物理現象を理解するために重要なだけではなく、138億年前の誕生直後の宇宙で何が起こっていたのかを理解するために必須の知識でもある。

今まで積み上げられてきた素粒子物理学の知見は、重力を除く既知の物理現象の「ほぼ全て」を記述する「素粒子の標準理論」に集約されている。標準理論で予言されていた最後の粒子であるヒッグス粒子が2012年に欧州CERN研究所のLHC実験で発見されたニュースを記憶されている方もいるのではないだろうか。素粒子物理学をこのように紹介してしまうと、もはや研究する余地がない終わった学

問のように捉えられてしまいがちだが、実情は全く異なる。素粒子の標準理論ではうまく説明できない現象が既に数多く発見されているのだ。たとえば、宇宙が誕生した直後には物質と反物質が同量存在したと考えられるにも関わらずなぜ現在の宇宙は物質だけで構成されているのか、という疑問がある。素粒子の標準理論に組み込まれている小林益川行列を使った説明では、現在の物質量の 10^{-16} しか説明できない。また、宇宙観測によって存在が確実となった「暗黒物質」の問題もある。暗黒物質は素粒子の標準理論に含まれていない未発見素粒子である可能性が高いが、詳細は全くわかっていない。電荷を持たない中性素粒子であるニュートリノに関しても、その質量が他の素粒子に比べて5~10桁も軽いことが極めて不自然だが、実証された説明は存在しない。

このようなことから、素粒子の標準理論は究極の普遍理論ではない、というのが我々素粒子研究者の一般的な考え方となっている。素粒子の標準理論はエネルギースケールでおよそ 1 TeV 以下の現象にしか適用できない低エネルギー近似法則であり、より普遍的でもっと高いエネルギーでも成立する新しい物理法則（標準理論を内包する）が必ず存在するはずである。その物理法則ならば、前述した数々の謎も矛盾なく説明できるはずである、と我々は考えている。

素粒子の標準理論を超える新しい物理法則の探索

ではどのようにして新しい物理法則を見つけることができるのだろうか。そのためにまずは、これまで観測されたことがない新しい物理現象を発見することが必要である。多様な新奇観測事実を積み上げることにより、それらを統一的に記述できる新しい理論の構築を促すのである。新しい物理現象を発見する方法としては、粒子加速器を大型化して粒子同



* Masaharu AOKI

1965年4月生まれ
東京大学大学院 理学系研究科 物理学
専攻博士課程 (1993年)
現在、大阪大学大学院 理学研究科
物理学専攻 教授 博士(理学)
TEL : 06-6850-5564
FAX : 06-6850-5561
E-mail : aokim@phys.sci.osaka-u.ac.jp

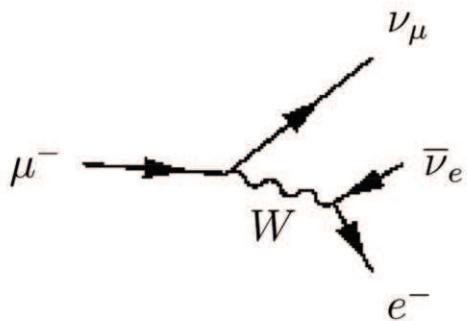
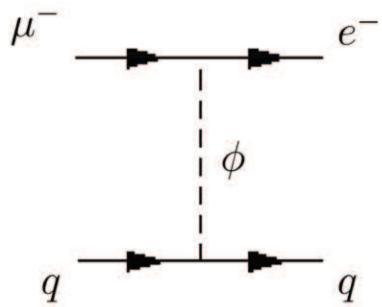


図1 ミュー粒子崩壊を表現するファインマン図

士の衝突反応に投入されるエネルギーを増加させる実験手法がよく知られている。この手法では、これまで到達したことがない高いエネルギーで起こる新奇反応の観測や新粒子の生成と発見が可能となる。欧州CERNで稼働中のLHCにおけるヒッグス粒子の発見¹⁾は、この実験手法の典型的な成功事例である。これに加えてもう一つ、非常に低い確率で発生する現象（稀現象）を探索するという研究方法がある。

素粒子の反応では、一時的に存在する中間状態を経由して反応が進行する。その反応の様子を視覚的に表現した「ファインマン図」の一例を図1に示す。ファインマン図は、量子電磁力学の発展に大きく寄与したことによりシュウィンガーと朝永振一郎とともにノーベル賞を受賞したファインマンが発明した手法で、図さえ描ければあとは機械的に反応行列要素を立式できるという特長を持っている。図1では、左から右へ時間が流れしており、始状態のミュー粒子(μ^-)がWボソン(W)を放出してミュー粒子型ニュートリノ(ν_μ)に変化し、Wボソンは一瞬の存在の後で電子(e^-)と反電子ニュートリノ($\bar{\nu}_e$)に結合する反応、つまりミュー粒子の $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ 崩壊を表している。中間状態で一時的に存在するWボソンはミュー粒子の800倍の質量を持つが、ハイゼンベルクの不確定性原理によって一瞬であれば存在できることからこの反応が可能となる。ただし、反応率（寿命の逆数）はWボソン質量の4乗に反比例するため、ミュー粒子の寿命は不安定な素粒子の寿命としては異様に長い $2.2\,\mu s$ もある。

もしもここにWボソンよりもずっと重い未発見の粒子 ϕ が存在して、図2に示すような反応($\mu^- + q \rightarrow e^- + q$ 、ただし q はクォークを表す)を媒介す

図2 新粒子 ϕ による新奇ミュー粒子反応。
 q はクォークを表す。

るとしたらどうなるだろうか²⁾。この反応の反応率も新粒子 ϕ の質量の4乗に反比例する。この反応は素粒子の標準理論では禁止されているが、もしもWボソンを経由した通常のミュー粒子崩壊1万回当たり新反応が1回観測されたとすると、それはWボソンの10倍の質量を持っている新粒子 ϕ の存在を示唆する。ミュー粒子 10^{17} 当たり1回という非常に稀な頻度でこの反応を観測できた場合には、1 PeVの質量を持った新粒子 ϕ あるいは同程度のエネルギースケールで顕現する新しい物理法則を発見したことになる。

阪大におけるミュー粒子稀反応研究

阪大には、1980年代から江尻宏泰教授のグループで行われていた二重ベータ崩壊探索研究や、1990年代から山中卓教授が取り組んでいるK中間子の稀反応研究など、ユニークな稀反応研究の歴史がある。2000年度に久野良孝教授が着任すると、到達可能なエネルギースケールでLHCによる直接探索を大きく超える可能性を持った³⁾ミュー粒子の稀反応研究を開始し、阪大が中心となってJ-PARCにおけるミュー粒子・電子転換過程の探索実験に取り組んできた。2020年度からは、私が研究グループを主催してミュー粒子・電子転換過程の探索実験の実現と物理成果の創出を目指して邁進している。

ミュー粒子・電子転換過程

負電荷のミュー粒子(μ^-)を物質中に入射すると、電子を弾き出す反応によって減速してゆき、いずれは物質中に静止する。静止した μ^- は原子核のクーロン場に捕獲され、電子とは異なる粒子であるため

にパウリの排他律で遮られることなくたちまち $1s$ 軌道に落ち込む。ミュー粒子の質量は電子の 200 倍あるため軌道半径は電子の 200 分の 1 となり、ミュー粒子の波動関数は原子核にめり込むことになる。この状態をミュー粒子原子と呼ぶ。ミュー粒子原子では、ミュー粒子が原子核中のクォークと直接触れ合う状態になっており、 ϕ のような高いエネルギーで顕現する新しい物理現象を経由して電子に転換する可能性がある。

素粒子の標準理論では説明できない新しい反応の候補は他にもたくさん提案されているが、この反応が特に注目される理由は 3 点ある。一つは、この反応がミュー粒子と原子核中のクォークが触れ合うことによって起こることにある。電気と磁気がマックスウェルによって統合されて電磁気となり、電磁気とベータ崩壊の理論がグラショウ・ワインバーグ・サラムによって統合されて電弱統一論（標準理論の根幹をなす基本理論）となったように、電弱相互作用と強い相互作用を統一した大統一論の存在が期待されている。電弱統一では、ニュートリノと電子をペアにまとめて統合したが、同じように大統一論では電子やミュー粒子とクォークが統合されると期待され、その結果ミュー粒子とクォークが触れ合うところで未発見の新奇現象が発生する可能性が期待されている⁴⁾。図 2 に示した反応はその一例に過ぎず、これ以外にもさまざまな可能性が提案されている。

二つ目は、近年大量のミュー粒子を生成する技術革新がなされたことにある。ミュー粒子は、加速された陽子を標的に当てて発生させたパイ中間子の崩壊によって生成する。パイ中間子を生成するために必要な陽子ビームのエネルギーが比較的低いこともあり、カナダ TRIUMF やスイス PSI などの中間子工場ではミュー粒子が大量に生成されて実験に供されてきた。本邦でも、2007 年から稼働している大強度陽子加速器施設 (J-PARC) においてミュー粒子を大量に生成できるようになった。これに加えてさらに、陽子標的を超伝導ソレノイドの内部に設置することによってミュー粒子生成効率を 1 万倍改善する技術が開発され⁵⁾、年間 10^{17} 個のミュー粒子を利用することが可能となった。ちなみに、鳥取砂丘の砂粒の数を概算すると 10^{16} 個なので、実にその 10 倍の数のミュー粒子を用いた実験を実現できるようになったことになる。

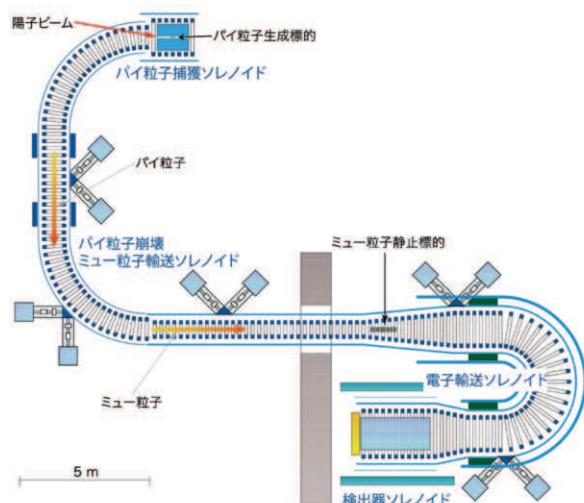


図 3 COMET 実験のレイアウト

三点目は、ミュー粒子の寿命の長さにある。ミュー粒子の寿命は $2.2 \mu s$ もある。原子核軌道に捕獲された負電荷ミュー粒子の寿命は若干短くなるものの、それでも μs オーダーの寿命を持つ。そのため、時間情報を用いて実験の障害となる背景事象を取り除くことが容易であり、ミュー粒子は稀反応を探索する実験に最適な素粒子なのである。

COMET 実験

1990 年代後半にロバシェフが提案した MELC 実験では、陽子標的から電子スペクトロメータまでをひと続きのソレノイド磁場で繋ぐという斬新な実験手法によるミュー粒子・電子転換過程の探索実験が提案されていた。MELC は実現しなかったが、このアイデアは米国 MECO 実験に引き継がれ、阪大のメンバーも参加をして実験開始直前まで検討が進んだ。ところが、2005 年に MECO 実験は中止されてしまった。米国グループは MECO 実験の実施場所をブルックヘブン研究所からフェルミ国立加速器研究所に移して Mu2e 実験として再出発することになったが、日本グループは予てから検討していた独自のアイデアを盛り込んだ COMET 実験を J-PARC に提案した⁶⁾。

COMET 実験のレイアウトを図 3 に示す。米国 Mu2e 実験にはない COMET 実験の特徴は、C 字型に曲げられたパイ粒子崩壊・ミュー粒子輸送ソレノイドと、逆方向の C 字型に曲げられた電子輸送ソレノイドにある。どちらの C 字型部分にもトーラス

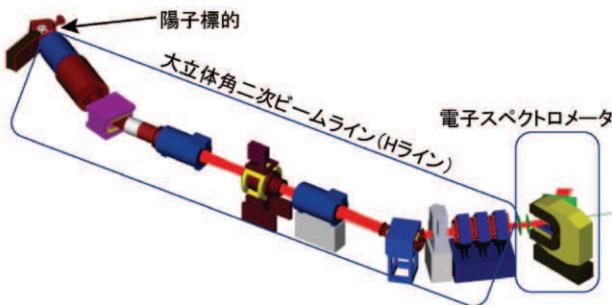


図4 DeeMe実験

磁場に加えて縦方向の磁場をかけられるようになっていて、特定の電荷と運動量をもった粒子だけを輸送することができる。これにより、Mu2e実験よりも高いミュー粒子純度と、低い電子検出器計数率を達成している。1年間の測定で、ミュー粒子・電子転換過程を 3×10^{-17} の分岐比まで探索できる感度を持っており、単位時間あたりの探索感度としてはMu2eの3倍もある。COMET実験のデザインは、総合的にはMu2eよりも優れていると我々は自負している。

さて、このようにして優れたデザインを持つCOMETであるが、上流から下流まで30m以上の長さの超伝導ソレノイドが必要であり、建設コストは80億円超級となった。この金額規模のプロジェクトになると実現は容易ではなく、2010年前後の段階で我々は進退極まっていた。

そこで我々は、段階的にミュー粒子・電子転換過程を実現することとした。まず、COMET実験とは干渉をしないように他の実験施設を活用して、全く異なるアイデアに基づくミュー粒子・電子転換過程の探索実験、DeeMe、を提案した。さらにCOMETは、全計画を2段階に分割して第1段階目のPhase-Iを提案した。このようにしてミュー粒子・電子転換過程の研究を活発化させ、段階的に物理測定感度の向上を図りながらCOMET(Phase-II)の実現を目指そうという目論みである。

DeeMe実験

DeeMe実験(図4)は、陽子が照射される陽子標的中に大量のミュー粒子原子が発生している可能性に思い至って提案された全く新しい実験方法に基づくミュー粒子・電子転換過程の探索実験である⁷⁾。

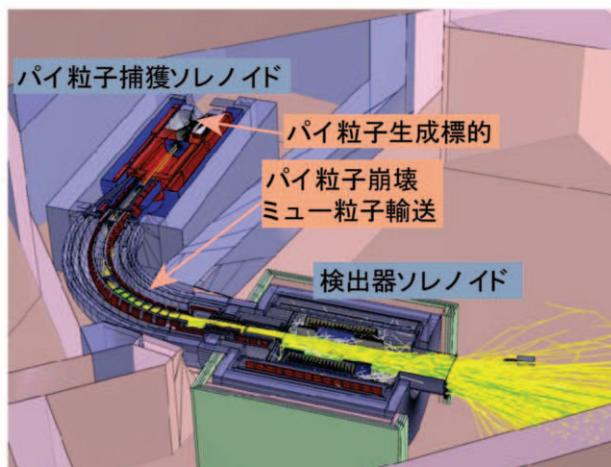


図5 COMET Phase-I

実験場所はJ-PARC MLFの大立体角二次ビームライン(Hライン)である。一般的なビームラインであるHラインの出口に電子スペクトロメータを設置するだけのシンプルな構成となっており、SINDRUM II実験によって与えられている現在の分岐比上限値を1桁以上改善することを目指している。実験装置の開発は基本的に完了しており、2022年夏には測定を開始する計画である。

COMET Phase-I実験

図5にCOMET Phase-I実験²⁾を示す。図3に示しているフルサイズCOMET(COMET Phase-II)に対して、ミュー粒子輸送ソレノイドの半分までを建設してその出口に検出器ソレノイドを設置する計画である。2013年から本格的な装置開発やJ-PARCハドロンホールへのビームライン建設を開始して、およそ10年弱にわたって実験準備を進めてきた。パイ粒子生成標的までの陽子ビームラインが2021年度に完成し、2022年度にはミュー粒子輸送ソレノイドの総合試験を実施する計画である。パイ粒子捕獲超伝導ソレノイドの製造も完了しており、2023年度には大強度ミュー粒子ビームラインが完成する。さらに阪大が中心となって大型の科学研究費補助金を獲得し、検出器ソレノイドや検出器の開発製造を進めている。2024年から物理測定を開始して、SINDRUM-IIの実験感度を2桁改善することを目指している。米国Mu2eが実験を始める前にミュー粒子・電子転換過程を発見できる可能性がある。

COMET Phase-I を成功させたら遅滞なく COMET Phase-II を実現して、SINDRUM-II の実験感度を 4 枠以上改善する究極感度でのミュー粒子・電子転換過程研究を展開したい。

おわりに

我々は、素粒子宇宙分野の未解決問題を説明できる普遍的な物理法則（素粒子の標準理論を超えた新しい物理法則）の研究を目的として、ミュー粒子・電子転換過程の探索を行う先進的な実験装置の開発をおこなってきた。あと 1-2 年のうちにこれらの装置を用いた物理測定を開始できる段階まで来ている。この研究によって、世界で最初の発見を成し遂げることができれば素晴らしいことであるし、発見できなかったとしてもそれはそれでかなりきつい理論的な制限を与えることになってやはり素晴らしい成果となる。我々はこのようにして、2020 年代の素粒子物理学を牽引する成果を阪大から創出してゆきたいと考えている。

参考文献

- 1) ATLAS Collaboration: Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC, Phys Lett. B, Vol. 716, No. 1, pp.1-29 (2012); CMS Collaboration: Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC, Phys Lett. B, Vol. 716, No. 1, pp.30-61 (2012)
- 2) The COMET Collaboration: COMET Phase-I technical design report, Prog. Theor. and Exp. Phys. 2020, No. 3, 033C01 (2020)
- 3) R. K. Ellis, B. Heinemann, J. de Blas *et al.*; Physics Briefing Book (Input for the European Strategy for Particle Physics Update 2020), CERN-ESU-004 (2020)
- 4) W. Altmannshofer, A. J. Buras, S. Gori *et al.*: Anatomy and phenomenology of FCNC and CPV effects in SUSY theories, Nucl. Phys. B, Vol. 830, pp.17-94 (2010)
- 5) S. Cook, R. D'Arcy, A. Edmonds *et al.*: Delivering the world's most intense muon beam, Phys. Rev. Accel. Beams Vol. 20, No. 3 pp.030101 (2017)
- 6) The COMET Collaboration: Conceptual Design Report for Experimental Search for Lepton Flavor Violating $\mu^- - e^-$ Conversion at Sensitivity of 10^{-16} with a Slow-Extracted Bunched Proton Beam (COMET), submitted to J-PARC PAC (2009)
- 7) N. Teshima: Status of the DeeMe Experiment, an Experimental Search for $\mu - e$ Conversion at J-PARC MLF, PoS NuFact2019, pp.082 (2020)

