

荷電レプトンで探る新物理

Keyword: レプトンフレーバー数

1. はじめに

素粒子物理標準模型ではレプトンのフレーバー（世代）数という量子数が保存される。ただし、中性のレプトンであるニュートリノの振動現象について言うと、この現象は標準模型の枠外にありフレーバー数は保存されていない。電荷を持った荷電レプトンについては、過去の全ての探索において実験感度の範囲内でこの量子数が保存されていることが実証されている。

2. 素粒子物理標準模型

図1に素粒子標準模型に含まれる素粒子を示す。物質を構成するクォークとレプトンは第一世代から第三世代までに分類され、それぞれの世代に内部状態（弱アイソスピン）が異なる2種類の素粒子がある。CERNのLHC実験におけるヒッグス粒子発見の後は、ヒッグス粒子を精密に調べながら標準模型を超える新物理の解明へと素粒子研究の中心は移りつつある。これは標準模型にはダークマターの有力な候補が無かったり、ダークエネルギーを矛盾なく説明できなかつたりするため、模型自体が完全ではなくより大きな枠組の理論の一部であると考えられているからである。

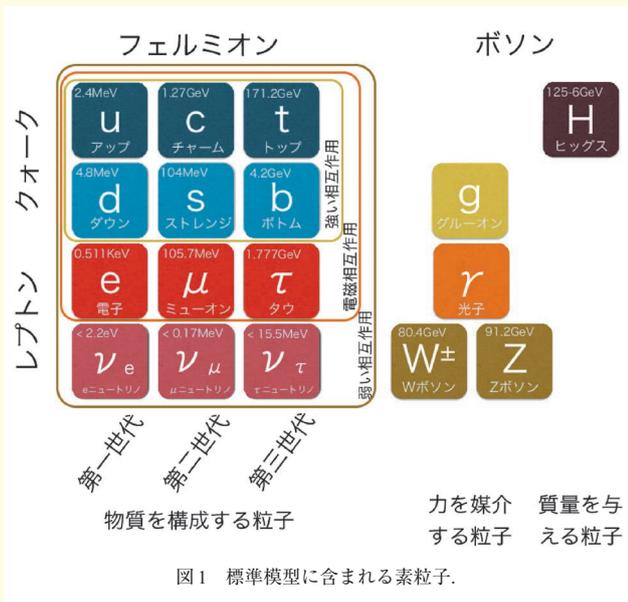
3. レプトンフレーバー数

レプトンには電荷を持つ電子（第一世代）、ミューオン（第二世代）、タウ（第三世代）と、それぞれに対応した中性のニュートリノがある。レプトンフレーバー数としては、この各世代のレプトンに+1を割り当てて電子数 (L_e)、

ミューオン数 (L_μ)、タウ数 (L_τ) を定義する（反粒子である反レプトンにはそれぞれ-1を割り当てる）。図2に負ミューオン、正パイ中間子の崩壊におけるこれらの変化を示す。Lは世代に関係なくレプトンには+1、反レプトンには-1を割り当てるレプトン数と呼ばれる数である。いずれの反応においてもその前後でレプトンフレーバー数に変化がない。このことを荷電レプトンにおけるレプトンフレーバー数の保存と呼ぶ。中性レプトンであるニュートリノの振動現象では、ある世代のニュートリノが別の世代のニュートリノに遷移するため前述のようにレプトンフレーバー数は保存されない。このためその起源であるニュートリノ混合を考慮に入れると、荷電レプトンにおいてもレプトンフレーバー数が保存されないような過程は存在する。ただし、その影響はニュートリノ質量がウィークボソンの質量に比して小さいために、事象が起こる確率としては 10^{-50} 以下と極めて小さくなり、実質的には荷電レプトンにおけるフレーバー数は十分厳密に保存されているとみなしてよい。

4. 標準模型を超える

現在のところ、最高エネルギー実験のLHC実験においても標準模型を超える新物理の兆候は見えていない。最高エネルギー実験は今後もより高いエネルギーでの未知の素粒子現象を探索し、標準模型を超える物理の探求を続けていくが、新物理の探索には別のアプローチも取るべきである。このようなアプローチの好例がニュートリノ研究である。ニュートリノ研究は標準模型では記述できない現象を探る研究として独自の進展を続け、日本の研究グループが大きな牽引力となっている。これに加えて標準模型では（ほぼ）完全に禁止されているような現象を探索することで、どの程度のエネルギースケールの新粒子がどのような新しい力で相互作用するのかを探る手法がある。これに適している



$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e, \quad \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$L: 1 = 1 + 1 - 1, \quad 0 = -1 + 1$$

$$L_e: 0 = 1 + 0 - 1, \quad 0 = 0 + 0$$

$$L_\mu: 1 = 0 + 1 + 0, \quad 0 = -1 + 1$$

負ミューオンの崩壊 正π中間子の崩壊

図2 負ミューオンの崩壊と正パイ中間子の崩壊におけるレプトン数 (L) とレプトンフレーバー数 (L_e, L_μ)。いずれの数も反応の前後で保存されている ($\Delta L = \Delta L_e = \Delta L_\mu = 0$)。

と考えられているのが、素粒子の中で唯一フレーバー数が保存されている荷電レプトンである。特にミュオンは大強度陽子ビームにより大量に生成することが可能な上、同時に生成される他の素粒子に比べて長寿命であり実験室までの輸送に適しているため、極微の分岐比で生じるレプトン数非保存事象を探索し新物理の可能性を探る目的に適している。一方、第三世代の荷電レプトンであるタウ粒子では、新物理が予想するフレーバー数非保存事象の確率がミュオンのそれに比べて大きい、タウ粒子の生成エネルギー閾値が高く、さらには寿命が短く崩壊様式が複雑であるがために、実験の感度としてはミュオンに比べて劣ってしまう。将来、「タウ粒子工場」で大量のタウ粒子生成が可能になれば、タウ粒子によるレプトンフレーバー数非保存の研究も今以上に大きく進展するものと期待される。

5. ミュオンで探る新物理

現在、日本、欧州、米国の大強度陽子加速器でミュオンによるレプトンフレーバー数非保存事象の探索実験が準備・進行中である。ここでは新物理に関わる粒子を直接探索する代わりに、新粒子の影響がその質量と相互作用の大きさに依存して標準模型の素粒子の現象として現れる事象が探索されている。

これらの計画の中で先陣を切っているのがスイスポールシェラー研究所で行われているMEG実験である。この実験は2013年夏に第一期のデータ収集を終え、 $\mu^+ \rightarrow e^+ + \gamma$ 崩壊事象 ($\Delta L_\mu = 1, \Delta L_e = -1$) に対して取得したデータの約半分を用いて、崩壊分岐比の上限値として 5.7×10^{-13} を与えた。¹⁾ 現在、実験グループは残りのデータ解析を行いつつ、更に感度を一桁向上するための検出器アップグレード (MEG II) を準備している。MEG・MEG II 実験に続く将来計画としては別な2つの過程で探索が行われようとしている。²⁾ 一方は $\mu^+ \rightarrow e^+ + e^+ + e^-$ 崩壊 ($\Delta L_\mu = 1, \Delta L_e = -1$) の探索を試みる Mu3e 実験であり、ポールシェラー研究所での実現を目指して検出器の開発が進行中である。この実験では、新規開発されたピクセルセンサーを多用して現在の上限值 (1.0×10^{-12}) を上回る 10^{-16} の実験感度を目指している。もう一方はミュオン原子中のミュオンが、原子核中とコヒーレントに相互作用することで電子に転換するミュオン-電子転換事象 ($\mu^- + N \rightarrow e^- + N'$, $\Delta L_\mu = -1, \Delta L_e = 1$) である。この探索に関しては日米両国で実験が準備されつつあり、どちらも大強度のパルス陽子ビームで生成されたパイ中間子をソレノイド磁石により捕獲し、その崩壊で生じるミュオンを実験室まで輸送して探索を行う。日本ではJ-PARC実験施設にてCOMET実験の建設が進行中であり、米国ではフェルミ研究所のMu2e実験が準備を

進めている。いずれも最終的な実験感度として、現在の上限值である 7×10^{-13} を上回る 10^{-16} 以下の感度を目指しているが、COMET実験の方は段階的に実験を実施し、数年以内にまずは 10^{-14} 以下の感度の実現を目指している。両実験はミュオン原子の生成にアルミニウムを使用するが、より軽い原子核である炭素やシリコンを使用し、ミュオン輸送を行わずに 10^{-14} の感度で探索を試みる実験 (DeeMe 実験) も J-PARC で準備中である。

これらのミュオン過程は中途に標準模型にはない新粒子が加わることでしか生じないため、事象の発見は即新物理の証拠となる。また、これらのミュオン過程の事象頻度に加えて、その角分布を測定したり、ミュオン-電子転換事象頻度の原子核依存性を計測することができれば、新物理の力の性質を見極めることも可能になる。どの結果も (たとえ現象が未発見で上限値のみが得られたとしても) 最高エネルギー実験がもたらす新物理直接探索の結果と相補的で重要な知見となることは間違いない。

このような荷電レプトンのフレーバー数非保存現象に関して、今のところ最高エネルギー実験からの直接的な手がかりはないが、米国ブルックヘブン国立研究所で行われたミュオンの磁気双極子能率測定 (E821 実験) の結果が標準模型の予想値と有意にずれていることが解っている。³⁾ もしこの効果が新物理によるものならば、ミュオンのフレーバー数非保存が実験室で観測される可能性が高い。この標準模型からの「ずれ」を新たに検証するため、フェルミ研究所では同じ実験を再現する準備が進められており、J-PARCでも静止ミュオンを生成して加速した後、蓄積リングに溜めて磁気双極子能率を測定するという新しい試みが行われようとしている。⁴⁾

6. おわりに

荷電レプトンの研究は、その発見直後から常に素粒子物理の最先端の話題として注目を集め、その時々素粒子物理の描像を刷新し標準模型の確立に貢献してきた。そして今日、荷電レプトンは標準模型を超える新物理を探るプロブとして、長い素粒子物理の歴史の中でまたもや注目を集める存在となっている。

参考文献

- 1) MEG Collaboration: Phys. Rev. Lett. **110** (2013) 201801.
- 2) S. Mihara, *et al.*: Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. **63** (2013) 531.
- 3) Muon (g-2) Collaboration: Phys. Rev. D **73** (2006) 072003.
- 4) N. Saito: AIP Conf. Proc. **1467** (2012) 45.

三原 智 (高エネ研/J-PARCセンター)

(2014年5月28日原稿受付)