

# ミュオン粒子稀崩壊現象の探索で迫る素粒子標準理論の先の世界

大谷 航 (東京大学素粒子物理国際研究センター wataru@icepp.s.u-tokyo.ac.jp)

素粒子物理学の大きな目標は、時空と物質を统一的に記述する究極の物理法則を解明することである。その目標への取り組みは道半ばであるが、これまでに我々が手に入れた**素粒子の標準理論**は、実験事実のほぼすべてを矛盾なく説明するなど大きな成功を収めてきた。しかしながら、宇宙の暗黒物質の正体・消えた反物質の謎・宇宙創生期の素粒子と力の大一統の理解などさまざまな根源的な未解決課題が残されており、残念ながら標準理論はその答えを我々に与えてくれない。超高エネルギーで成立するより普遍的な究極理論が存在し、標準理論は低エネルギーでの近似理論に過ぎないと考えられている所以である。

現在の素粒子物理研究のほぼすべてが、この標準理論を超える究極理論を求める取り組みであると言ってよい。たとえば、最高エネルギー加速器LHCでは、**標準理論を超える新物理**で予言される粒子を直接生成して発見することをめざして研究が進められているが、今のところ新粒子生成の兆候は得られていない。宇宙の暗黒物質が未発見の新物理粒子であるという仮定のもと、それを探索する実験が世界各地で実施されているが、そちらでもまだ何の手掛かりも得られていない。未だ新物理の兆候が見つからないこの状況は、新物理粒子が予想以上に重い可能性を示唆している。そんな中、重い新物理粒子の媒介で引き起こされる稀な現象の探索を通して超高エネルギーの新物理に迫る実験に注目が集まっている。

物質を構成する素粒子であるクォークとレプトンには3つの世代(フレーバー)がある。電荷をもつレプトン(電子・ミュオン粒子・タウ粒子)のフレーバーを保存しない現象は、標準理論では厳しく制限されている一方で、新物理ではほんのわずかではあるが観測可能な確率で起こることが予測されており、新物理を検証する強力なブ

ローブとなり得る。

MEG実験はミュオン粒子が電子とガンマ線に崩壊するレプトンフレーバーを保存しない現象 $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊を世界最高感度で探索する実験である。これまでの実験を大きく上回るMEG実験の $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索感度は、スイス・ポールシェラー研究所(PSI)の世界最大強度のミュオン粒子ビームと、独自に開発した革新的な測定器により可能となった。MEG実験は、既に新物理が予測する $\mu \rightarrow e\gamma$ の頻度を検証することが可能な感度をもっており、現象の発見に大きな期待が寄せられている。

第一期実験では、2009年から2013年の間にデータ取得を行い、2016年には全データを用いた $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索結果を報告している。探索感度は以前の実験に比べて大幅に改善したが、残念ながら $\mu \rightarrow e\gamma$ 現象の発見には至らなかった。その一方で、**超対称大一統理論**など有望な新物理理論に対して厳しい制限を課すことになった。

現在、さらに探索感度を改善したアップグレード実験MEG IIの準備が進められている。倍増するミュオン粒子ビーム強度と、大幅に性能を改善した測定器によりMEG実験に比べ約10倍の探索感度を達成できる見込みである。現在すべての測定器の建設が終了し、実験開始に向け急ピッチで準備が進められている。実験開始後およそ4、5年で目標感度に到達することをめざしているが、順調に行けば最初の数か月でMEG実験の感度を凌駕することになる。それ以降は前人未踏の領域であり、すぐにも $\mu \rightarrow e\gamma$ 現象が発見される可能性がある。 $\mu + N \rightarrow e + N$ ( $N$ は原子核)、 $\mu \rightarrow 3e$ など、 $\mu \rightarrow e\gamma$ 以外のレプトンフレーバーを破る稀な現象を探索する他の実験も数年の内に開始される見込みであり、それらも合わせて総合的に標準理論を超える新物理の正体に迫っていく。

## 用語解説

### 素粒子の標準理論:

現在の素粒子物理学の理論的枠組み。物質を構成する粒子であるクォークとレプトン、力を媒介するゲージ粒子、最近発見されたヒッグス粒子で構成される。これまでの実験事実のほとんどを矛盾なく説明する一方、宇宙の暗黒物質の正体・消えた反物質の謎など標準理論では未解明の重要課題が多く残されている。

### 標準理論を超える新物理:

超高エネルギーで成立するより普遍的な究極理論が存在し、標準理論はその低エネルギーにおける近似理論に過ぎないと考えられている。この標準理論を超える究極理論を新物理、その新物理で存在が予言される粒子を新物理粒子と呼んでいる。超対称大一統理論などさまざまな新物理理論の候補が検討されている。

### 大一統理論:

宇宙創成時の超高エネルギー状態では素粒子の間に働く3種類の基本的な力(電磁気力、強い力、弱い力)が同じであったとする理論。特に標準理論を超える新物理の有力な候補である。超対称性を導入した超対称大一統理論が注目されている。

### $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊:

ミュオン粒子が電子とガンマ線に崩壊する過程。レプトンの世代数(フレーバー)が保存されないため、素粒子の標準理論では禁止されている。一方、多くの有望な新物理理論が観測可能な頻度で起こることを予測している。レプトンフレーバーを破る類似の現象として、物質中の原子核 $N$ に捕獲された負電荷ミュオン粒子が電子に転換する現象 $\mu + N \rightarrow e + N$ や、正電荷ミュオン粒子が陽電子2つと電子1つに崩壊する現象 $\mu^+ \rightarrow e^+ e^- e^+$ ( $\mu \rightarrow 3e$ と略記)などがある。