ミュー粒子は電子へ移り変われるのか
――素粒子の世代から宇宙の起源を探る

森　俊則　〈東京大学素粒子物理国際研究センター　mori@icepp.s.u-tokyo.ac.jp〉

湯川秀樹が核力を媒介する素粒子を予言した2年後，ほぼ予言通りの質量を持つ粒子が宇宙線中に発見された．しかしこの粒子は物質を容易に透過したため，湯川粒子ではないと考えられた．ミュー粒子（ミューオン）の発見である．

こうして予想外に発見されたミュー粒子は，電子と同じ量子数を持ち電子より約200倍重い．そのような素粒子は一体何のために存在するのだろう．

ミュー粒子は電子と質量が違うだけなので，ガンマ線を放出して電子へ移り変わるのが自然である．これを$\mu \to e\gamma$（ミューイーガンマ）崩壊と呼ぶ．ところがそのような崩壊はいくら探しても見つからなかった．実際，発見から約90年経った現在も見つかっていない．

$\mu \to e\gamma$崩壊が起こらないのは，電子とミュー粒子を区別する量子数があるからだろう．その量子数はフレーバー（風味）と名付けられた．同じようだけど風味が違う，という訳だ．ミュー粒子は「第2世代」の電子とも呼ばれる．現在ではもっと重い第3世代のタウ粒子も見つかっており，すべての世代でフレーバー量子数は保存されている．電子・ミュー・タウの3粒子は合わせて荷電レプトンと呼ばれる．

その後クォークでも，何の役に立つのか分からない重いクォークが発見された．ただしクォークでは$\mu \to e\gamma$崩壊のような世代をまたぐ移り変わりが，**小林－益川理論**に従って小さな確率で起こっている．ここではフレーバーは近似的に保存する量子数ということになる．

1998年に発見された**ニュートリノ振動**は，こうしたフレーバー描像を完全に打ち壊した．ニュートリノでは3世代がほぼ自由に混ざり合っていたのである．フレーバーは，近似的にすら保存しない量子数だった．ニュートリノは荷電レプトンと弱い相互作用を通して結び付いており，$\mu \to e\gamma$崩壊が起こらないのは，ニュートリノが軽すぎることによる偶然だということが分かった．

ならばニュートリノの代わりになるもっと重い素粒子が存在すれば，$\mu \to e\gamma$崩壊が起こるはずだ．標準模型では理解できないダークマターなどの現象を説明できる理論モデルの多くには，そのような重い素粒子が存在する．この場合$\mu \to e\gamma$崩壊が測定可能な確率で起こってもおかしくない．つまり$\mu \to e\gamma$崩壊を探索・測定することで，理論モデルの成否を検証できる．

中でも超対称**大統一理論**は，宇宙創成時にクォークとニュートリノ，荷電レプトンが統一されていたとする理論である．素粒子の世代間の移り変わりも大統一によって結び付いているため（右図），そこから$\mu \to e\gamma$崩壊が数兆～数十兆回に1回程度起こることが予想される．これは巧みな実験を設計すれば測定可能だろう．

そこで$\mu \to e\gamma$崩壊を測定するため，液体キセノン測定器など新しい技術を開発してスイスのポールシェラー研究所（PSI）で始めたのが，MEG（Mu-E-Gamma）実験だ．さらにアップグレードしたMEG II実験は2021年から始まり，MEG以前の実験を約200倍上回る測定感度を持つ．$\mu \to e\gamma$崩壊の測定によって大統一理論を検証し，宇宙の起源を探るのが目的だ．

最近MEG II実験の最初のデータセット（2021–2022年取得）の解析が終了した．$\mu \to e\gamma$崩壊は未だ見つからず，その確率は1.5×10^{-13}より小さいことがわかった．これは大統一理論をはじめとする様々な理論モデルに厳しい制限を課すものである．

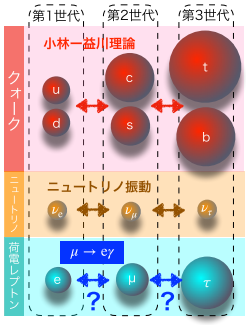
データ取得は2026年中に終了し，最終結果を目指して現在大量のデータを解析中である．発見後には角度分布も含めた詳細な測定が必要であり，さらに感度を上げた次期実験の準備を進めている．

――用語解説――

小林－益川理論：
粒子と反粒子の間の対称性（CP対称性）の破れを説明するために小林誠と益川敏英が1973年に提案した理論．3種類のクォークしか知られていなかった時代に6種類（3世代）のクォークの存在を正しく予言した．

ニュートリノ振動：
3世代のニュートリノが互いに移り変わる現象．1998年にスーパーカミオカンデ実験によって発見された．これによりニュートリノが極めて小さな質量（電子の1千万分の1程度）を持つことが分かった．

大統一理論：
重力以外の3つの基本相互作用（電磁気・弱い相互作用・強い相互作用）を統一する理論．これにより素粒子（クォーク・ニュートリノ・荷電レプトン）も統一される．宇宙創成時に成り立っていたと考えられる．



3世代の素粒子．世代間の移り変わりはクォークとニュートリノで観測されているが，荷電レプトンでは見つかっていない．超対称大統一理論は各世代の素粒子を統一し，$\mu \to e\gamma$崩壊が実験で測定可能な確率で起こることを予想する．

©2026 日本物理学会