

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24340044

研究課題名(和文) ミューオン原子を用いたレプトンフレーバーを破る実験の提案

研究課題名(英文) A proposal for experiment of charged lepton flavor violation with muonic atom

研究代表者

佐藤 丈 (SATO, Joe)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：60322294

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,000,000円

研究成果の概要(和文)：ミューオン原子内でレプトンフレーバーが破れている場合に起こりうる $\mu e \rightarrow e e$ 反応の反応率を求めた。その結果として、たとえばウランをターゲットにすれば 10^{17} 個のミューオンを用意できれば、現在の $\mu \rightarrow e e e$ 反応の制限と同等の制限を得られることがわかった。また、電子が二つ出てくるが、その方向とエネルギーの相関を見ると原理的には有効作用の種類も区別できることも示した。

研究成果の概要(英文)：We calculated the rate for $\mu e \rightarrow e e$ reaction in a muonic atom which can occur if the nature violates the lepton flavor. We got a result, for example, that if we prepare 10^{17} muons, we can give a similar constraint with $\mu \rightarrow 3 e$ experiment with a muonic uranium. Furthermore we can distinguish the difference among effective actions for lepton flavor violation by observing the correlation between energies and directions of emitted electrons.

研究分野：素粒子論

キーワード：ミューオン原子 レプトンフレーバーの破れ ミューオン

1. 研究開始当初の背景

荷電レプトンがフレーバー対称性を破るかどうかと言う問題は、ミュオンが発見以降ずっと続く素粒子論の大きな課題である。

素粒子標準模型はあらゆる加速器実験の結果を再現する非常によくできた模型であるが、一方でニュートリノ振動を説明できないなどのほころびも見えている。そのため、これを越える素粒子の理論があると考え多くの研究者がそのような理論の構築に取り組んでいる。そして一般にそのような模型ではニュートリノ振動がフレーバー対称性の破れを意味するため、荷電レプトンの現象においてもフレーバーの破れが観測されるはずであると考えられる。実際模型ごとにどの程度の破れが存在するか、詳しく計算されている。

このような動機のもと、研究開始時には、東大の研究者が中心となって、MEG という名前のミュオンフレーバーと電子フレーバーの破れを意味する $\mu \rightarrow e \gamma$ という現象が起こるのかを観測するための実験が行われていた。

また、計画としてミュオン電子転換と呼ばれる同様の現象を観測するための実験が COMET 実験など計画されていた。

さらに、このようなフレーバーの破れは LHC や Belle2 などの加速器実験でも観測されうるものと期待されていた。

2. 研究の目的

(1) 荷電レプトンのフレーバーの破れを記述する相互作用は数え方にもよるが 10 通りを超える。これらの相互作用の強さは標準模型を超える理論それぞれに応じて違う値を出す。したがってその相互作用の区別が重要になるが、3通りの観測方法しかない。そこで、4番目の方法が存在すればそれは大きな意味を持つ。そのような方法としてこの研究開始の直前に提案していた $\mu e \rightarrow ee$ モードの反応率を詳細に計算し、実際にそれらの相互作用の区別に役立つかどうかを見極めることが第一の目的である。

(2) 背後には標準理論を超える理論が存在するが、どのような模型が好ましいかについて、ほかの物理現象、特に宇宙論的な現象である元素合成や暗黒物質の存在を動機として分類し、その模型がレプトンフレーバーの破れをどのように予言するかを調べるのが副次的な目的である。

3. 研究の方法

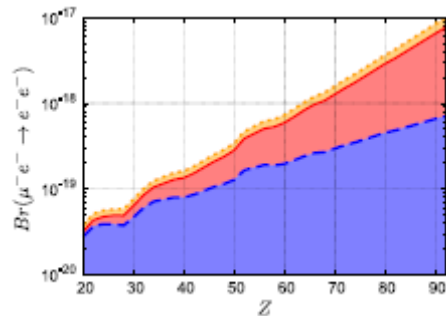
(1) 波動関数を部分波展開し、各部分波ごとに波動関数の動径方向の成分を、ディラック方程式を解くことによって求める。振幅およびその自乗も部分波ごとの和として求める解析式を導出し、動径方向については数値的に積分することで振幅の自乗を求める。これを元に、全反応率および部分的な反応率を計算する。動径方向の波動関数を求めるに当

たっては、原子核における電荷分布が影響するので、いくつかの模型でそれぞれの模型で波動関数を求め、その影響がどの程度あるのかを確かめる。また、どの相互作用がどのように効くのか、どのような相関があるのかについてもパラメタの値を変えて確かめる。

(2) レプトンフレーバーの破れを導く模型をいろいろと考える。純粹に有効作用として導入する模型もあれば、超対称性模型という枠組みで考えることもある。それらの模型で、レプトンフレーバーの破れを意味するパラメタがどの程度制限されているかを考える。またそれらがどのような物理を与えるかを調べる。さらに、レプトンフレーバーを破らないまでも、レプトンの普遍性を破るような模型も考え、それらについても同様の制限や現象への予言を考える。

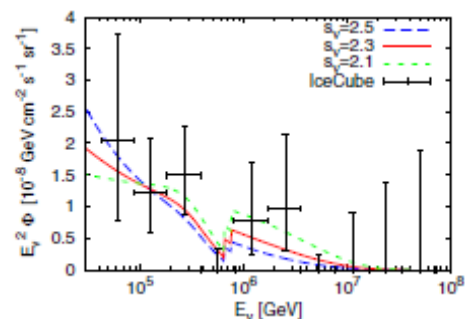
4. 研究成果

(1) 有効作用が 4 点相互作用で与えられる場合の反応率を求めることに成功した。予想していた以上に原子番号が増えると反応率が上がることを見いだした。4 点相互作用が荷電レプトンフレーバーの破れの主因だと仮定すると、なるべく原子番号の大きな原子核(できればウラン、最低でも鉛)を使う方が効率がよいことがわかった(下図参照)。単純な反応率としてはほかのモードより悪いが、近い将来稼働予定の COMET 実験でははかれる可能性があることもわかった。

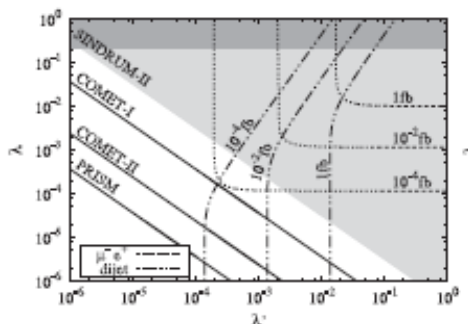


ほかにも、原理的には相互作用の種類を角度相関やエネルギー相関をはかることで区別できることを示した。(論文 1,3,7,8)

(2) $L\mu - L$ というレプトンフレーバー数をゲージ化する模型を考え、この模型においては μ 粒子の異常磁気能率と IceCube で観測されている宇宙ニュートリノのスペクトルが図のようによく説明できることを示した。(論文 2,5)



(3) COMET 実験が近々動くが、これは μ 電子転換を見る実験なので、必ずしも $\mu \rightarrow e$ を見る MEG 実験との相関はなくてよい。しかし、よく調べられているモデルでは強い相関を持つため、相関はあるはずだという先入観がある。その反例として、COMET で信号が見えて MEG で見えない場合を考え、そのような事象が起こりうるモデルとして R パリティを破った超対称模型を考え、LHC やニュートリノ振動実験などでの一般的な予言を与えた。図は、模型に出てくる結合定数と μ 電子転換の制限と LHC で計れるレプトンフレーバーの破れを媒介する粒子の生成断面積との相関を表している。(論文 4)



(4) 暗黒物質と質量が強く縮退するスカラーレプトンを考え、それが元素合成におけるリチウム問題を解決すると仮定した場合の制限および、そこから近い将来 LHC などで見えるはずの事象に対する予言を求めた。その結果として、少しだけレプトンフレーバーが破れている方がよいことも確認した。(論文 6, 11, 13)

(5) 曲率を持った普遍的な余剰次元の模型を考え、その模型によるカルツァークライン粒子の質量の補正を求めた。(論文 9)

(6) LHC で見つかった粒子がヒッグス粒子かどうかわからなかった頃、そうでないとした場合にどのような模型があり得るか、具体的に構築して見せた。(論文 12)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 13 件)

Yuichi Uesaka, Yoshitaka Kuno, Joe Sato, Toru Sato and Masato Yamanaka, 査読あり, Improved analyses for $\mu e \rightarrow ee$ in muonic atoms by contact interactions Phys. Rev.D93 (2016) 076006-1-8

Takeshi Araki, Humihiro Kaneko, Toshihiko Ota, Joe Sato, and Takashi Shimomura, 査読あり, MeV scale leptonic force for cosmic neutrino spectrum and muon anomalous magnetic moment, Phys. Rev.D93 (2016) 0137014-1-10, DOI: 10.1103/PhysRevD.93.013014

Joe Sato, 査読あり, Physics with Muon ~ Theoretical Aspects, JPS Conf.Proc.

8 (2015) 025002-1-6,

DOI: 10.7566/JPSCP.8.025002

Joe Sato and Masato Yamanaka, 査読あり, A way to crosscheck $\mu - e$ conversion in the case of no signals of $\mu \rightarrow e$ and $\mu \rightarrow 3e$, Phys. Rev.D91 (2015) 055018-1-17

DOI: 10.1103/PhysRevD.91.055018

Takeshi Araki, Humihiro Kaneko, Yasufumi Konishi, Toshihiko Ota, Joe Sato, and Takashi Shimomura, 査読あり, Cosmic neutrino spectrum and the muon anomalous magnetic moment in the gauged $L\mu - L$ model, Phys. Rev.D91 (2015) 037301-1-5

DOI: 10.1103/PhysRevD.91.037301

Kazunori Kohri, Masafumi Koike, Yasufumi Konishi, Shingo Ohta, Joe Sato, Takashi Shimomura, Kenichi Sugai, and Masato Yamanaka, 査読あり, Big-bang nucleosynthesis through bound-state effects with a long-lived slepton in the NMSSM, Phys. Rev.D90 (2014) 035003-1-20

DOI: 10.1103/PhysRevD.90.035003

佐藤文, レプトンフレーバーの破れを見るための新しいアイデア, 査読なし, めそん 2014 年秋号 No40 P37-40

Joe Sato, A new idea to search for charged lepton flavor violation using a muonic atom, 査読なし, J. Phys. Conf. Ser. 485 (2014) 012036-1-6

DOI: 10.1088/1742-6596/485/1/012036

Nobuhito Maru, Takaaki Nomura, Joe Sato, 査読あり, One-loop radiative correction to Kaluza-Klein masses in S2/Z2 universal extra - dimensional model, PTEP 2014 (2014) 8,083B04-1-48

DOI: 10.1093/ptep/ptu113

Yasufumi Konishi, Shingo Ohta, Joe Sato, Takashi Shimomura, Kenichi Sugai, Masato Yamanaka, 査読あり, A first evidence of the CMSSM is appearing soon, Phys. Rev.D89 (2014) 075006-1-26

DOI: 10.1103/PhysRevD.89.075006

Toshifumi Jittoh, Kazunori Kohri, Masafumi Koike, Joe Sato, Kenichi Sugai, Masato Yamanaka, Koichi Yazaki, 査読なし, Big-bang nucleosynthesis with a long-lived CHAMP including He4 spallation process, J. Phys. Conf. Ser. 485 (2014) 012020-1-6

DOI: 10.1088/1742-6596/485/1/012020

Tomohiro Abe, Ryuichiro Kitano, Yasufumi Konishi, Kin-ya Oda, Joe Sato, Shohei Sugiyama, 査読あり, Minimal Dilaton Model, Phys. Rev.D86 (2012) 115016-1-12

DOI: 10.1103/PhysRevD.86.115016

Kazunori Kohri, Shingo Ohta, Joe Sato,

Takashi Shimomura, Masato Yamanaka,
査読あり, Allowed slepton
intergenerational mixing in light of
light element abundances, Phys. Rev.
D86 095024-1-10
DOI: 10.1103/PhysRevD.86.095024

[学会発表](計 12 件)

Joe Sato, MeV Scale leptonic force for
cosmic neutrino spectrum and muon
anomalous magnetic moment, DSU2015,
Kyoto Dec 14th -18th 2015

Joe Sato, A proposal of new cLFV
experiment $\mu e \rightarrow ee$, Workshop for
Unification and Development of the
Neutrino Science Frontier (2015),
Yugawara, Dec, 1st-3rd 2015.

Joe Sato, MeV scale leptonic force for
cosmic neutrino spectrum and muon
anomalous magnetic moment, Particle
Cosmology and beyond 2015, Nov 16-19,
2015, Kanazawa, Japan

Joe Sato, A way to crosscheck $\mu - e$
conversion in the case of no signals of
 μe and $\mu 3e$, SUSY 2015 Aug. 23rd
-29th, 2015, Lake Tahoe, California USA

Joe Sato, A new idea to search for
charged lepton flavor violation using
a muonic atom, 3rd Workshop on Muon g-2,
EDM and Flavour, 9-12 December 2014,
Paris, France

Joe Sato, Mass spectrum of
supersymmetric standard model with
big-bang nucleosynthesis, Linear
Collider Workshop 2014, Belgrade
Serbia Oct 6th-10th 2014

Joe Sato, Physics with muon -
Theoretical Aspects, The 2nd
International Symposium on Science at
J-PARC, July 12-15, 2014 in Tokai,
Japan

Joe Sato, Lepton Flavor Violation in a
R parity breaking scenario ~ a good
(best?) theory for COMET, Basis of the
Universe with Revolutionary Ideas 2014,
Toyama, Feb 13rd-14th 2014

Joe Sato, A first evidence of the CMSSM
is appearing soon, High Energy Physics
in the LHC Era, Valparaiso Chile, Dec
16th-20th 2013

Joe Sato, A first evidence of the CMSSM
is appearing soon, PASCOS2013, Taipei
Taiwan, Nov 20th-26th 2013

Joe Sato, New Process for Charged
Lepton Flavor Violation Searches: μ
 $-e - e-e-$ in a Muonic Atom,
Japanese-German Symposium, Kanazawa
Oct 1st-3rd 2012

Joe Sato, A new idea to search for
charged lepton flavor violation using

a muonic atom, PASCOS2012, Merida
Mexico June 3rd-8th 2012

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

ホームページ等

<http://krishna.th.phy.saitama-u.ac.jp/joe/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤文 (SATO, Joe)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号: 6 0 3 2 2 9 4

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

久野良孝 (KUNO, Yoshitaka)

大阪大学・理学研究科・教授

研究者番号: 3 0 1 7 0 0 2 0

佐藤 透 (SATO, Toru)

大阪大学・理学研究科・准教授

研究者番号: 1 0 1 3 5 6 5 0