

Title	Charged Lepton Flavor Violation Process $\mu-e-\rightarrow e-e-$ in Muonic Atoms
Author(s)	上坂, 優一
Citation	大阪大学, 2018, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/69324
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

論文内容の要旨

氏 名 (上 坂 優 一)	
論文題名	Charged Lepton Flavor Violation Process $\mu^-e^- \rightarrow e^-e^-$ in Muonic Atoms (ミュオン原子中での荷電レプトンフレーバーを破る過程 $\mu^-e^- \rightarrow e^-e^-$)
論文内容の要旨	
<p>レプトンフレーバーは現在の素粒子標準模型におけるよい保存量である一方、標準模型を超える多くの模型ではレプトンフレーバー非保存 (LFV) 過程が自然と予言される。ニュートリノにおけるLFV過程としてニュートリノ振動の存在がすでに知られているが、荷電レプトンにおけるLFV (CLFV) は未だ見つかっていない。CLFVの探索は標準模型を超える物理に対する重要な探針のひとつとして注目されており、様々なCLFV過程について探索実験が行われている。</p> <p>CLFV探索の新たな有力候補として、ミュオン原子における $\mu^-e^- \rightarrow e^-e^-$ 過程が小池らによって2010年に提案された。終状態電子対のエネルギー和はおよそミュオン質量となることから非常に明解なシグナルが期待されること、接触型と光子型の2つの相互作用に感度があること、原子核クーロンポテンシャルによる遷移確率の増大があることなど、この過程の探索にはいくつか利点がある。</p> <p>本論文では、ミュオン原子における $\mu^-e^- \rightarrow e^-e^-$ 過程について、定量的な解析を行った。CLFV相互作用とレプトン波動関数の多重極展開を用いて、遷移確率を定式化した。さらに、有限の原子核電荷分布を考慮したクーロンポテンシャルを含むディラック方程式の解を用いることにより、先行研究でのミュオンや電子の波動関数の定量性を向上させた。結果として、特に重い原子における遷移確率の計算において、波動関数の定量的な取り扱いが非常に重要な役割を果たすことが判明した。その定性的な影響はCLFV相互作用の型に依存しており、接触型過程では遷移確率を増大させる一方、光子型過程では抑制することも示された。先行研究の結果と比べて、^{208}Pbにおいて接触型過程では一桁近く増大し、光子型過程では4分の1程度に抑制される結果が得られた。</p> <p>これらの解析の結果から、$\mu^-e^- \rightarrow e^-e^-$ 過程探索における観測量を用いたCLFV相互作用の決定についての議論も行った。その際、CLFV崩壊率の原子核依存性、および放出電子のエネルギー・角度分布が接触型と光子型相互作用を区別する際に有用となることを示した。加えて、偏極ミュオンを用いて放出電子の角度分布の非対称度を測定することにより、CLFV相互作用のカイラル構造を調べる可能性についても解析を行った。</p>	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (上坂 優一)			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教授	浅川正之
	副 査	教授	兼村晋哉
	副 査	教授	久野良孝
	副 査	教授	窪田高弘
	副 査	准教授	佐藤 透
論文審査の結果の要旨			
<p>素粒子の標準模型では電子数やミューオン数などの荷電レプトン数は保存される。一方、標準模型を超える模型では荷電レプトン数の破れが予測されている。レプトンフレーバー非保存過程 (CLFV) は標準模型を超える物理を探る有力な過程と考えられている。これまでミューオンの CLFV 崩壊などの探索実験が行われており、CLFV 崩壊分岐比の上限が更新されつつある。</p> <p>近年、CLFV 探索の有用な過程として、ミューオン原子において、ミューオンと電子が二個の電子に崩壊する $\mu^- e^- \rightarrow e^- e^-$ 過程が新たに提案された。ここでは、4レプトンの接触型 CLFV 有効相互作用とともに、光子交換を伴う長距離相互作用により反応が引き起こされると考えられ、崩壊率はミューオン原子の原子番号 Z の三乗 Z^3 に比例し、大きい Z のミューオン原子を用いることで CLFV 過程が有利に調べられることが示された。</p> <p>上坂君は CLFV 過程 $\mu^- e^- \rightarrow e^- e^-$ のこれまでの解析を改良した研究を行った。CLFV 相互作用とレプトン波動関数の広がり切り離して Factorize した従来の解析を改め、原子核のクーロン相互作用のレプトンに対する効果を精密に取り入れた解析を行った。これを実行するために、多重極展開を用い、新たな崩壊率の定式化を行った。この過程は2電子の散乱状態を含むため、得られた崩壊率公式は複雑な式となる。また電子、ミュー粒子の波動関数は、有限の原子核電荷分布を考慮したクーロンポテンシャルを用い、ディラック方程式を数値的に解いて得た。この際、MeV と eV のスケールが同居し、数値解析が難しい長距離光子交換過程も、精度の良い解析が工夫され行われた。</p> <p>この研究の結果、ミュー原子の崩壊率は接触型相互作用では従来の評価の原子番号 Z^3 よりも強い依存性を示し、大きな原子核による探索がさらに有利となることが示された。一方光子交換型相互作用では Z^3 より弱い依存性となることが判明した。このことから CLFV 崩壊率の原子番号依存性を用いることにより、いまだ未知の CLFV 相互作用の判別ができる可能性が示された。また崩壊電子のエネルギー・角度相関、偏極ミューオンからの崩壊電子パリティ非対称角度分布の解析も行ない、CLFV 相互作用のカイラル構造などを調べる可能性についても明らかにされた。</p> <p>上坂君の論文は、新たな定式化の開発と、これにより取り入れることが可能となったレプトン・クーロン波動関数を用いた数値解析の結果、崩壊率の理論精度を大幅に改善するとともに、CLFV 相互作用の機構解明の手立てを提案した。これらは CLFV 過程探索の研究において重要な研究成果である。</p> <p>よって、本論文は博士 (理学) の学位論文として十分価値あるものと認める。</p>			