

令和 2 年 7 月 1 日現在

機関番号：35302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05426

研究課題名(和文)有効場の理論に基づくトップクォーク崩壊相互作用の拡張とその観測可能性

研究課題名(英文) Extensions of top-quark-decay interaction based on effective field theory and its observability

研究代表者

大熊 一正 (Ohkuma, Kazumasa)

岡山理科大学・工学部・准教授

研究者番号：80367507

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,500,000円

研究成果の概要(和文)：トップクォークと呼ばれる素粒子に注目し、素粒子物理学において標準とされる模型(標準模型)の拡張可能性を特定の模型に依存することなく、一般的に解析した。

本研究では、標準模型の枠組みでは、実験的に観測されないと予想されているトップクォークがアップクォーク又はチャームクォークに変化する中性カレント崩壊を解析し、それら崩壊過程を誘発するような相互作用の拡張制限を現在の実験結果から求めた。そして、その制限が将来実験で、どの程度改善される可能性があるかも調べた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

素粒子は、物質を構成する最小単位であるが、この粒子の振る舞いを理解することは、宇宙の成り立ちを理解することに関係している。この粒子の振る舞いは、素粒子物理学の標準模型によって、高い精度で説明できるが、この模型は、最終的なものではなく、宇宙の構造を理解するためには、拡張が必要である。本研究は、可能な限り一般的に標準模型の拡張性を検討したため、超対称模型等、具体的に標準模型を拡張する手法と相補的な関係にあり、新しい模型構築の礎となり得る。素粒子物理学の新しい模型構築が成功すれば、身の回りの物質や宇宙について、より深い知見が得られ、今日の当たり前を覆すような発見に繋がるかもしれない。

研究成果の概要(英文)：Focusing on an elementary particle called top quark, the possible extensions of a model called the standard model in elementary particle physics was generally studied without depending on specific extended models.

In this study, neutral current processes in which top quark decays into the up or charm quark were analyzed to give constraints non-standard couplings that induce those decays.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：トップクォークの物理 有効ラグランジアン FCNC

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2012年にLarge Hadron Collider (LHC) 実験において発見された新粒子が、素粒子物理学における標準模型で予言されていた Higgs 粒子であるらしいことが分かり、標準模型を構成する粒子が全て観測された。この結果、標準模型は一先ず完成に至ったと考えられる。しかしながら、実験的に質量がゼロでないと判明したニュートリノに質量を与える機構を含まない、宇宙の大部分を占めるとされる暗黒物質の候補粒子を含まない等、標準模型を拡張する必要性は、疑う余地がない。一方で、LHCは、Higgs 粒子の発見後、13TeVまで、陽子-陽子の衝突エネルギーを高めたにも関わらず、新しい粒子及び現象は観測されなかった。

このような状況の中、実験的には、LHC 実験では、衝突させる陽子ビームの高輝度化計画 (High Luminosity Large Hadron Collider : HL-LHC) が実施される予定であり、International Linear Collider (ILC) 実験による Higgs 粒子の精密測定も計画される等、新粒子の直接測定ではなく、精密測定により、標準模型の予言値からのズレを探索し、標準模型の枠組みを超える物理を捉えようとする風潮になった。一方で、理論的には、超対称模型や余次元模型等の特定の模型を想定した解析が多くなされてきたが、新粒子の発見が見込めない現状を踏まえ、新粒子の量子効果による相互作用を標準模型ラグランジアンに拡張として取り入れた有効ラグランジアンによる、特定の模型に依存しない解析も多くなってきていた。

2. 研究の目的

特定の模型において予見されている新粒子を念頭に置くことなく、標準模型のラグランジアンを可能限り一般的に拡張した有効ラグランジアンを用いて、トップクォークが中性カレントを介して Z 粒子とアップクォーク又はチャームクォークへ崩壊する稀過程を解析し、標準模型の拡張可能性を探る。この過程は、標準模型の枠組みでは、将来行われる精密実験であったとしても、観測できないほど小さい確率でしか発生しないと予言されている。つまり、もしこの過程が観測された場合には、直ちに標準模型を超えた物理の証拠となる。このため同様の過程を解析した先行研究も多く存在する。しかしながら、先行研究では、標準模型の拡張として導入する非標準相互作用が1つだけ存在すると仮定したり、一般的には、複素数になり得る非標準相互作用の結合定数を実数と仮定したりして解析している。そこで本研究では、先行研究の解析をより一般化し、特定の非標準相互作用だけを仮定することなく、拡張として許される全ての相互作用を同時に考慮し、それらの結合定数も一般的な複素数であるとして解析し、

- (a) 現在得られている実験結果を用いて、対象とする過程を記述する有効ラグランジアンに含まれる相互作用の結合定数に制限を与える。
- (b) 将来、HL-LHC 実験で得られると予想される観測量の予測値を利用して、(a)で得られる制限がどの程度改善できるかを予測する。

3. 研究の方法

LHC 実験において、重心系のエネルギーが 14TeV まで増強されたとしても、標準模型の枠組みに含まれない素粒子が、直接発見される見込みは低い。この現状を鑑み、本研究では、有効ラグランジアンを構築する際には、標準模型に含まれる粒子だけで構成され、標準模型と同じ SU(3) × SU(2) × U(1) のゲージ対称性を持つ質量次元が 6 の有効演算子を標準模型の拡張として導入し、その結合定数に対して、実験結果から制限を与える。

今回は、トップクォークが中性カレントを介して Z 粒子とアップクォークもしくはチャームクォークへ崩壊する過程 ( $t \rightarrow qZ$ , ここで、 $q = u, c$ ) に着目する。この過程を誘発する有効演算子は、5種類あり、それらの組み合わせにより、ベクトル型、擬ベクトル型、テンソル型、擬テンソル型の新しい相互作用が標準模型の拡張として加わる。これら相互作用の結合定数は一般的には複素数になり得るので、制限対象となる結合定数は、8個である。よって、本研究では、この8個の結合定数を独立変数とみなし、同時に変化させながら、実験から得られている制限を再現する結合定数の範囲を探す。この際、単純ではあるが、膨大な計算量が必要となるので、実際の計算には Graphics Processing Unit (GPU) 計算機を利用する。

図1は、本研究で行った解析手順の概略図である。この図において、 $f_{1/2}^{t/R}$  が非標準相互作用の結合定数である。また、 $q$  は、アップクォークもしくは、チャームクォークを示しており、 $\Gamma_{t \rightarrow qZ}$  は、トップクォークが下添え字で書かれた過程で崩壊する部分崩壊幅である。この  $\Gamma_{t \rightarrow qZ}$  は、理論的に有効ラグランジアンを用いて計算でき、実験的には、分岐比  $\text{Br}(t \rightarrow qZ)$  と全崩壊幅  $\Gamma_{\text{total}}$  の両観測値の積によって求めることができる。そして、理論値に含まれる非標準結合定数を変化させながら、実験値と比較することによって、それぞれの非標準結合定数の制限を求める。

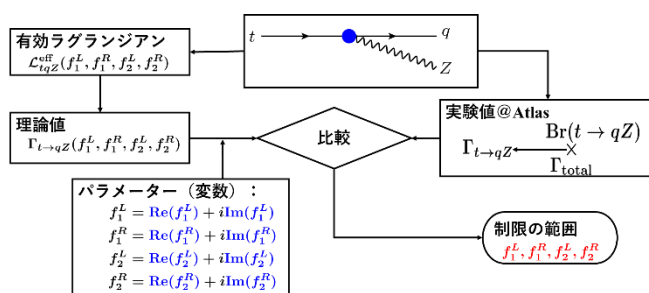


図1

#### 4. 研究成果

トップクォークが中性カレントを通じて、 $Z$ 粒子とアップクォーク又はチャームクォークに崩壊する過程を記述する有効ラグランジアンに含まれる非標準結合定数の現在の実験結果及び将来 HL-LHC において得られると予想される実験結果から得られた制限を見積もった結果の一例を表 1 に示す。

表 1:  $tuZ$ 相互作用の結合定数に対する現在の制限: 最小, 最大の行内にある破線の上側と下側の違いは, トップクォークの全崩壊幅の観測に伴う誤差による違いである。

	$f_1^L$		$f_1^R$		$f_2^L$		$f_2^R$	
	$\text{Re}(f_1^L)$	$\text{Im}(f_1^L)$	$\text{Re}(f_1^R)$	$\text{Im}(f_1^R)$	$\text{Re}(f_2^L)$	$\text{Im}(f_2^L)$	$\text{Re}(f_2^R)$	$\text{Im}(f_2^R)$
最小	$-5.5 \times 10^{-3}$	$-4.7 \times 10^{-2}$	$-5.5 \times 10^{-3}$	$-4.7 \times 10^{-2}$	$-4.6 \times 10^{-3}$	$-3.9 \times 10^{-2}$	$-4.6 \times 10^{-3}$	$-3.9 \times 10^{-2}$
最大	$5.5 \times 10^{-3}$	$4.7 \times 10^{-2}$	$5.5 \times 10^{-3}$	$4.7 \times 10^{-2}$	$4.6 \times 10^{-3}$	$3.9 \times 10^{-2}$	$4.6 \times 10^{-3}$	$3.9 \times 10^{-2}$

表 1 から分かることは,

- $f_1^L$ と $f_1^R$ は, 実数部及び虚数部共に制限範囲は等しい。
- $f_2^L$ と $f_2^R$ も, 実数部及び虚数部共に制限範囲は等しいが,  $f_1^{L/R}$ よりも制限が厳しい。

であり, この傾向は,  $tcZ$ 相互作用の結合定数に対しても同様である. そこで, 図 2 に  $tuZ$  及び  $tcZ$ 相互作用の結合定数の現在の実験結果からの制限と将来的な制限のまとめを示す. 図 2 において, 実線が, 現在の実験結果を再現できる非標準結合定数の範囲であり, 破線が将来実験である HL-LHC において制限される非標準結合定数の予想範囲である. また, 各結合定数の制限には, 外側と内側の範囲がそれぞれ示されているが, これは, 表 1 における最小・最大の行内にある破線の上部の制限と下部の制限の範囲を示している.

図 2 からは, 以下のことが分かる.

- 現在の実験結果から得られる  $tuZ$ 相互作用及び  $tcZ$ 相互作用を引き起こす結合定数 $f_{1/2}^{L/R}$ の許される範囲は, およそ  $f_{1/2}^{L/R} < |0(10^{-3}) \sim 0(10^{-2})|$  程度である.
- 現状として,  $tuZ$ 相互作用を引き起こす結合定数のほうが,  $tcZ$ 相互作用を引き起こす結合定数より制限が厳しい。
- 将来, HL-LHC において現在の制限は, 30%ほど強化できる可能性がある。

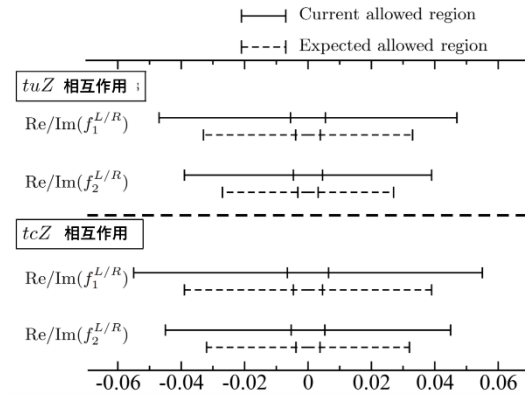


図 2

また, 同様の過程を扱った多くの先行研究では, 標準模型の拡張として生じる非標準相互作用の結合定数が 1 つだけ存在すると仮定していることが多かったが, 本研究では, 許され得る 8 個全ての結合定数が同時に存在する可能性も含めて一般的に解析したため,

- 非標準結合定数が 1 つだけ存在すると仮定した解析 (1 パラメータ解析) と許され得る非標準結合定数が全て同時に存在すると仮定した解析 (8 パラメータ解析) では, 2 倍程度許される範囲が大きくなり得ることが分かった。

例)  $tuZ$ 相互作用の結合定数への制限比較

1 パラメータ解析	8 パラメータ解析
$-3.0 \times 10^{-3} < \text{Re}(f_1^L) < 3.0 \times 10^{-3}$	$-5.5 \times 10^{-3} < \text{Re}(f_1^L) < 5.5 \times 10^{-3}$
$-2.5 \times 10^{-3} < \text{Re}(f_2^L) < 2.5 \times 10^{-3}$	$-4.6 \times 10^{-3} < \text{Re}(f_2^L) < 4.6 \times 10^{-3}$

- 非標準結合定数の許される範囲が大きくなる理由としては, 複数の相互作用の相殺によることは直ぐに理解できる. しかしながら, より詳しく調べてみると, 非標準結合定数が 2 つだけ存在する場合は, 許容範囲を最も大きくできるとことが分かり, それらの組み合わせは,  $\pm \text{Re}/\text{Im}(f_1^{L/R}) \propto \mp \text{Re}/\text{Im}(f_2^{R/L})$  の関係であることを導いた。

以上の解析結果は, 特定の模型を想定した解析ではなく, 一般性を保った標準模型の拡張による解析の結果であるため, 具体的な模型を構築する際の有用な情報となり得る。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Zenro Hioki, Kazumasa Ohkuma, Akira Uejima	4. 巻 129
2. 論文標題 Correlations in flavor-changing tqZ couplings constrained via experimental data	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 EPL (Europhysics Letters)	6. 最初と最後の頁 61002-1 ~ 61002-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1209/0295-5075/129/61002">https://doi.org/10.1209/0295-5075/129/61002</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Zenro Hioki, Kazumasa Ohkuma, Akira Uejima	4. 巻 LeptonPhoton2019
2. 論文標題 Effective Lagrangian Approach to Top Decay via Flavor Changing Neutral Current	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 169-0 ~ 169-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.22323/1.367.0169">https://doi.org/10.22323/1.367.0169</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Zenro Hioki, Kazumasa Ohkuma, Akira Uejima	4. 巻 34
2. 論文標題 Studying flavor-changing neutral tqZ couplings: Current constraints and future prospects	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Modern Physics Letters A	6. 最初と最後の頁 1950278 ~ 1950278
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1142/S021773231950278X">https://doi.org/10.1142/S021773231950278X</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 大熊 一正, 上嶋 明, 日置 善郎
2. 発表標題 非標準tqZ結合を介したトップクォーク稀崩壊の有効ラグランジアンに基づく解析
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazumasa Ohkuma, Zenro Hioki, Akira Uejima
2. 発表標題 Effective Lagrangian Approach to Top Decay via Flavor Changing Neutral Current
3. 学会等名 XXIX International Symposium on Lepton Photon Interactions at High Energies (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大熊一正, 上嶋明, 日置善郎
2. 発表標題 Constraints on tqZ Couplings Based on Effective Lagrangian and its Observability
3. 学会等名 2018年度 瀬戸内サマーインスティテュート(SSI)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大熊一正, 上嶋明, 日置善郎
2. 発表標題 有効ラグランジアンを用いた tqZ結合の制限とその観測可能性
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大熊一正, 上嶋明, 日置善郎
2. 発表標題 有効ラグランジアンに基づく tqZ 結合の解析
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	日置 善郎  (Hioki Zenro)  (90173129)	徳島大学・名誉教授   (16101)	
研究協力者	上嶋 明  (Uejima Akira)  (30311781)	岡山理科大学・工学部・准教授   (35302)	