



Probing CP Violation via Top Quark Anomalous Interaction at High Energy Collider

Ohkuma, Kazumasa

(Degree)

博士 (理学)

(Date of Degree)

2001-03-31

(Date of Publication)

2013-06-17

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲2377

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1002377>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



【250】

氏名・(本籍) 大熊 一正 (香川県)

博士の専攻分野の名称 博士 (理学)

学位記番号 博い第167号

学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当

学位授与の日付 平成13年3月31日

【学位論文題目】

**Probing CP Violation via Top Quark Anomalous Interaction at
High Energy Collider**

(高エネルギー加速器実験におけるトップクォークの異常な
相互作用を通じて生じるCPの破れについて)

審査委員

主査 教授 森井 俊行

教授 武田 廣 教授 林 青司

教授 蛸名 邦禎

論文内容の要旨

神戸大学自然科学研究科
大熊 一正

素粒子物理学における標準模型に基づいてなされた予言は、これまでに行われてきた殆んど全ての実験結果を見事に再現してきた。しかし、標準模型には、質量や相互作用における結合定数など、標準模型自身では説明することの出来ないパラメータが多く存在し、重力相互作用には適用できないなどの理由により、標準模型を超える新しい物理が存在すると信じられている。それ故、新しい物理からのシグナルを探することは、非常に興味深くチャレンジングなテーマである。この学位論文においては、新しい物理を探るプロセスとして、トップクォーク対生成過程に注目し、この過程における、新しい物理に起因するトップクォーク異常結合を通じて引き起こされる CP の破れを調べることによって、標準模型を超える物理の可能性について研究した。

第1章において、本研究の動機、及び、導入について述べた。電磁相互作用、弱い相互作用を統一的に記述する電弱理論と強い相互作用を記述する量子色力学から構成される標準模型は素晴らしい成功を収めている。しかし、標準模型を TeV 以下の領域における有効理論として含むような、標準模型を拡張した理論の存在が信じられている。この標準模型を越えた理論においては標準模型では解決できなかったパラメータの問題や、重力相互作用の問題などが解決できると期待されている。それ故に、標準模型を越えた物理の証拠をいかに捕らえるかは、重要な問題であり、これまでも、多くの研究がなされてきた。近年、Super-Kamiokande の研究グループによって、ニュートリノに質量があることが報告された。これは、ニュートリノ質量をゼロとして扱っている標準模型を越えた物理の存在を強く示唆する初めての報告となった。しかしながら、加速器実験においては、標準模型を越えた物理の存在は依然確認されていない。よって、加速器実験において標準模型を越えた物理の存在を示すようなシグナルを探ることが重要な課題となっている。一方、1995年にフェルミ研究所の Tevatron で発見されたトップクォークは、質量が 180 GeV ほどあり、現在発見されている素粒子のなかでは際立って重い。このため、トップクォークをめぐる現象が新しい物理への手掛かりになりうると、大いに期待されている。トップクォークの性質は、次世代の加速器においてさらに精密に調べられるはずである。以上のことをふまえながら、ここでは本研究の目的として、次世代の加速器実験を想定したトップクォークの対生成過程における、新しい物理からのシグナルを研究すること、の重要性について述べた。

第2章では、本研究の基礎となる標準模型と CP 変換のレビューを行った。標準模型に関しては、 $SU(2)_L \times U(1)_Y$ ゲージ群からなる電弱理論の部分と $SU(3)_C$ カラー

対称群から構築される量子色力学の部分との2つに分けて解説を行った。次に、本研究の目的である CP の破れを説明するために、荷電共役変換 (C) とパリティ変換 (P) をそれぞれ紹介し、最後に CP 変換について説明した。さらに、相互作用ラグランジアンがどのようなときに P 変換もしくは、 CP 変換のもとで対称でなくなるか、についても解説した。

第3章において、本研究の議論に関係する次世代高エネルギー加速器について簡単に紹介した。まず、DESYにおける TESLA 計画、KEKにおける JLC計画、SLAC などアメリカの幾つかの研究所による NLC計画、CERNにおける CLIC計画などの電子-陽電子線形加速器の将来計画を紹介した。いずれの加速器も重心系のエネルギー (\sqrt{s}) は 500 GeV から開始される予定である。このエネルギーは、レプトン加速器における初のトップクォーク測定を可能にする。さらに、TESLA は 800 GeV 、JLC/NLC は、 1.5 TeV 、CLICにおいては、 5 TeV まで重心系のエネルギーが上げられ、新しい物理の現象や Higgs 粒子の探索、トップクォークの性質の精密測定などが行われる。電子-陽電子線形加速器において、トップクォークは電子-陽電子の対消滅によって生成される。このため、この加速器においては、トップクォークと光子、およびトップクォークと Z ボソンの結合定数の精密測定が可能になる。次に、陽子-反陽子衝突型加速器である、フェルミ研究所の Tevatron について紹介した。Tevatron は Run I ($\sqrt{s}=1.8 \text{ TeV}$) においてトップクォークを発見した。また、今年から稼働予定の、Run II ($\sqrt{s}=2.0 \text{ TeV}$) では、トップクォークの性質が更に詳しく調査されることになっている。この加速器において、トップクォークは主にクォークと反クォークの対消滅から、グルーオンを通じて生成されるため、トップクォークとグルーオンの結合定数を測定することが可能である。

第4章は、本研究の計算とその結果について議論した。本研究においては、トップクォークの性質：

1. 質量が 180 GeV 程度と、とても重いため、トップクォークは、ハドロン化による非摂動の効果を受けることなく、ほぼ 100% の割合で、 W ボソンと、ボトムクォークに崩壊する。このため、 W ボソンと、ボトムクォークを再構築することにより、生成されたトップクォークのスピン状態を容易に知ることができる。
2. 標準模型で予言されるトップクォーク生成における CP の破れは無視できるほど小さい。このため、トップクォーク生成において、 CP が大きく破れる現象を捕らえることができれば、新しい物理の存在の証拠となり得る。

を利用してトップクォーク対生成過程における CP の破れの大きさを計算した。トップクォークは、主にゲージボソンを通じて対生成されるが、トップクォークの質量が重いため、ヘリシティー保存則が破れ、生成されるトップクォーク-反トップクォークのヘリシティー状態として、 $(++)$ 、 $(--)$ が可能になる。この状態は、 CP 変換の下で、 $\hat{C}\hat{P}|++\rangle = |\pm\pm\rangle$ と変換される。よって、偏極イベント非対称 $N(--)-N(++)$

がゼロでなければ CP が破れていることになる。このイベント非対称を、第3章で紹介した加速器を想定して、以下の反応について分析した;

$$(i) \quad e^+ + e^- \rightarrow t(h_t) + \bar{t}(h_{\bar{t}})$$

$$(ii) \quad p + \bar{p} \rightarrow t(h_t) + \bar{t}(h_{\bar{t}}) + X$$

ここで、終状態のトップ (反トップ) クォークはヘリシティー状態 $h_t(h_{\bar{t}})$ にある。過程 (i) は次世代電子-陽電子線形加速器を用いた実験によって観測できるプロセスである。このプロセスの解析において、標準模型を越えるような相互作用の結合定数は具体的に決めることはできないので、トップクォークと光子/ Z ボソンの結合形式としてローレンツ共変性から導かれる最も一般的なものを用いて計算した。さらに、これまでになされてきた同様な計算においては、通常無視されてきた非標準的な結合定数同士の積の項も無視せずに計算した。結果として、標準模型の最低次の計算では存在しない擬スカラー結合が CP の破れを引き起こすこと、また通常無視されてきた項も加速器の重心系のエネルギーの二乗に比例して大きく寄与する可能性があることを示した。さらに、全ての非標準的な結合定数が 0.01 の場合と 0.1 の場合に対して、重心系のエネルギー (\sqrt{s}) が 500 GeV \sim 2.5 TeV の領域の CP の破れを数値的に計算し、通常の計算結果と我々の計算結果を比較した。全ての非標準的な結合定数を 0.01 とした場合も、0.1 とした場合のどちらの場合も、 $\sqrt{s}=500\text{GeV}$ 程度であれば、通常の計算結果と我々の計算結果の違いは、ほとんど見ることができないが、 $\sqrt{s}=1\text{TeV}$ を越えた領域からは、計算結果に大きな違いが生じることが確認できた。次に、Tevatron での実験を想定した過程 (ii) において、トップクォークとグルーオンの相互作用に chromoelectric 型 ($\tilde{\kappa}$) と chromomagnetic 型 (κ) の結合を仮定して偏極イベント非対称を計算した。標準模型においては、chromoelectric 型と chromomagnetic 型による結合定数はきわめて小さいため、加速器で測定することはできない。しかしながら、標準模型を越える新しい物理では、これらの結合定数が大きくなる可能性は十分であると期待される。この反応の分析においては、偏極イベント非対称は $\text{Im}(\tilde{\kappa})$ と $\text{Im}(\kappa^*\tilde{\kappa})$ にのみ依存すること、さらに、 $\text{Im}(\tilde{\kappa})$ と $\text{Im}(\kappa^*\tilde{\kappa})$ の大きさによっては、Tevatron においても十分に確認できることを明らかにした。例えば、もし、 $\text{Im}(\tilde{\kappa})=0$ だとしても、 $\text{Im}(\kappa^*\tilde{\kappa}) > |0.5|$ であれば、Tevatron においてトップクォークと反トップクォークの両方が最終的にレプトンへ崩壊するイベントを捕らえることにより 90% の信頼度で確認できる。つまり、この過程を測定することにより、新しい物理のシグナルを Tevatron においても捕らえることができる可能性があることを指摘した。

第5章では結果と結論を述べ、また、今後の課題にも言及し本研究の総括を行った。

論文審査の結果の要旨

氏名	大熊一正		
論文題目	Probing CP Violation via Top Quark Anomalous Interaction at High Energy Collider (高エネルギー加速器実験におけるトップクォークの異常な相互作用を通じて生じるCPの破れについて)		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	森井俊行
	副査	教授	武田 廣
	副査	教授	林 青司
	副査	教授	蛸名 邦禮
要 旨			
<p>素粒子の標準模型は、これまで行われてきた殆んど全ての実験結果を再現し、大きな成功を納めてきたが、模型の枠内では決められない多くのパラメータを含み、また、重力を取扱えないなど、最終理論とは言えず標準模型を超える新しい理論が存在すると信じられている。従って、標準模型を超える新しい物理からのシグナルを探すことは、現在の極めて重要な課題になっている。本論文は、標準模型を超える新しい物理の可能性を探るために、トップクォーク対生成過程に注目し、この過程における、新しい物理に起因するトップクォーク異常結合を通じて引き起こされるCPの破れを調べること</p>			

によって、標準模型を超える物理の可能性について研究した。

第1章では本研究の動機と研究の概要が述べられている。

第2章では、本研究の基礎となる標準模型の簡単なレビューを行うと共にCP変換の性質についての解説を行っている。

第3章において、本研究の議論に関係する次世代高エネルギー加速器についての紹介を行っている。

第4章が本研究の中心となるものである。本研究では標準模型を超える新しい物理の可能性を探るために、第3章で紹介した加速器による実験を想定して、以下の反応を取り上げている;

$$(i) e^+ + e^- \rightarrow t(h_t) + \bar{t}(h_{\bar{t}})$$

$$(ii) p + \bar{p} \rightarrow t(h_t) + \bar{t}(h_{\bar{t}}) + X$$

ここで、終状態のトップ(反トップ)クォークはヘリシティー状態 $h_t(h_{\bar{t}})$ にある。過程(i)は次世代電子-陽電子線形加速器を用いた実験によって観測できるプロセスであり、過程(ii)はTevatronでの実験を想定したものである。トップクォークは、主にゲージボソンを通じて対生成されるが、トップクォークの質量が重い場合、ヘリシティー保存則が破れ、生成されるトップクォーク-反トップクォークのヘリシティー状態として、 $(++)$ 、 $(--)$ が可能になる。この状態は、CP変換の下で $C\hat{P}|++\rangle = |\pm\pm\rangle$ と変換される。従って、偏極イベント非対称 $N(--)-N(++)$ がゼロでなければCPが破れていることになる。

まず、(i)の過程の具体的な解析において、標準模型を超える相互作用の結合定数は具体的に決めることはできないので、トップクォークと光子/Zボソンの結合形式としてローレンツ

共変性から導かれる最も一般的なものを用い、また、これまでになされてきた同様な計算においては、通常無視されてきた非標準的な結合定数同士の積の項も無視せずに計算を行った。結果として、標準模型の最低次の計算では存在しない擬スカラー結合が CP の破れを引き起こすこと、また、通常無視されてきた項も加速器の重心系のエネルギーの二乗に比例して大きく寄与する可能性があることを示した。全ての非標準的な結合定数を 0.01 及び 0.1 とした場合について数値計算を行い、いずれの場合においても $\sqrt{s}=500\text{GeV}$ 程度であれば、通常の計算結果と本計算結果の違いは、ほとんど見ることができないが、 $\sqrt{s}=1\text{TeV}$ を越えた領域からは、計算結果に大きな違いが生じることを確認している。次に、Tevatron での実験を想定した過程 (ii) において、トップクォークとグルーオンの相互作用に chromoelectric 型 ($\bar{\kappa}$) と chromomagnetic 型 (κ) の結合を仮定して偏極イベント非対称を計算した。標準模型では、chromoelectric 型と chromomagnetic 型による結合定数はきわめて小さく、加速器では測定にかからないが、標準模型を越える新しい物理では、これらの結合定数が大きくなる可能性は十分にあると期待される。この反応の分析においては、偏極イベント非対称は $\text{Im}(\bar{\kappa})$ と $\text{Im}(\kappa^*\bar{\kappa})$ にのみ依存すること、さらに、 $\text{Im}(\bar{\kappa})$ と $\text{Im}(\kappa^*\bar{\kappa})$ の大きさによっては、Tevatron においても十分に確認できることを明らかにした。例えば、もし、 $\text{Im}(\bar{\kappa})=0$ だとしても、 $\text{Im}(\kappa^*\bar{\kappa}) > |0.5|$ であれば、Tevatron においてトップクォークと反トップクォークの両方が最終的にレプトンへ崩壊するイベントを捕らえることにより 90% の信頼度で確認できることを示した。

第 5 章では結果と結論を述べ、また、今後の課題にも言及

し本研究の総括を行っている。

以上のように、本研究は標準模型を越えるトップクォークの異常な相互作用による CP の破れについて、その e^+e^- 及び $p\bar{p}$ 反応におけるトップクォーク対生成過程での偏極イベント非対称を研究したものであり、将来の実験に対する予言を行なうと共に、標準模型を越える物理の可能性について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。

よって、学位申請者の大熊一正は、博士(理学)の学位を得る資格があると認める。