

令和 7 年 6 月 2 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2024

課題番号：20K03947

研究課題名（和文）フレーバー物理におけるアノマリーから探る新物理の理論研究

研究課題名（英文）Theoretical study for new physics motivated by flavor physics anomalies

研究代表者

戸部 和弘（Tobe, Kazuhiro）

名古屋大学・理学研究科・准教授

研究者番号：20451510

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：近年、Bファクトリー実験やLHCb実験で $B \rightarrow D$ 、 $B \rightarrow K$ 、 $B \rightarrow K\mu\mu$ などのB中間子崩壊現象で、素粒子標準理論の予言との食い違いが報告されている。もしこれが標準理論を超える新物理による効果だとしたら、これは新物理の重要なヒントになり得る。よって本研究では、上で挙げた食い違いのあるB中間子崩壊過程の全てに寄与し得るR2レプトクォークについて特に調べた。 $b \rightarrow s$ 遷移をともなう $B \rightarrow K$ などの現象は同時にB中間子混合も引き起こすために制限が強く、得られる食い違いは限定的であることがわかった。 $B \rightarrow K\mu\mu$ も同様な制限があるが、量子効果による増大が見込まれるので、現在詳細を解析中である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

報告されている食い違いを説明できるか、できないかを明らかにするだけでなく、他の現象と相関があるのか、無いのか、他の理論の予言とどのような違いがあるのか、がわかることで、将来的に、さまざまな実験から、現在報告されている食い違いから動機づけされたさまざまな理論を検証できる可能性がある。あわよくば、この食い違いが本当に標準理論を超える新しい理論によるものだとすれば、新しい理論の発見につながる可能性がある、さまざまな理論を詳しく研究することは非常に意義があることだと思う。

研究成果の概要（英文）：Recently, B-factory and LHCb experiments have reported discrepancies between their results and the Standard Model (SM) predictions in $B \rightarrow D$, $B \rightarrow K$, and $B \rightarrow K\mu\mu$ processes.

If these are due to the effects from new physics, they could be important hints of a theory beyond the SM. In this research, we have analyzed mainly R2 leptoquark which can affect all of the processes listed above. Especially the process through $b \rightarrow s$ transition such as $B \rightarrow K$ also generates neutral B meson mixing, and hence the constraint is very severe and therefore, we found that the deviation from the SM is limited. It is also expected that the constraint from B mixing also limits the contribution to $B \rightarrow K\mu\mu$, however there is an enhancement from quantum effect in $B \rightarrow K\mu\mu$ and we are analyzing the effect in detail.

研究分野：素粒子理論

キーワード：フレーバーアノマリー レプトクォーク B中間子崩壊

1. 研究開始当初の背景

本研究開始当初は、 μ 粒子異常磁気能率や B 中間子のセミレプトニック崩壊現象の $B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$ や $B \rightarrow K^{(*)} l^+ l^-$ など幾つかの過程の実験値が素粒子標準理論の予言値と少し食い違っているという報告があり、これが標準理論を超える理論によるものだとしたらどのような可能性があるのかを明らかにすることを目標に研究を開始した。

その後、 μ 粒子異常磁気能率に関しては、2021 年に Fermilab の muon g-2 collaboration が新しい精密測定結果を出し、今まで報告されていた結果と同じ傾向を示し実験値としてはより精密な値が明らかになってきた。一方で、標準理論の予言値としては、格子理論計算が今までの結果と比較できるほどに発展し、その結果が今までの食い違いを説明する傾向であることが報告された。そのため、この格子理論計算と今までの計算に矛盾があるように見え、新たな問題に発展している。今までの計算で利用していた実験値の間にも食い違いが見られたり、格子計算に関しては複数のグループが検証するなど、今後の発展に注目していきたい。

B 中間子崩壊実験に関しても、その後さまざまな進展があった。特に、当初 B 中間子崩壊過程の $B \rightarrow K^{(*)} l^+ l^-$ の終状態のレプトン l が電子の時と μ 粒子の時の崩壊率の比 $R(K^{(*)})$ が標準理論の予言値と食い違っていることが報告されていたが、2022 年の LHCb 実験結果で食い違いはないことが精度良く示された。ただ終状態の μ 粒子と電子の間の崩壊率の比に食い違いはないが $B \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-$ の崩壊率の角度依存性に標準理論との食い違いがあることなどから、当初とは違った形ではあるが依然として新物理の寄与に関する研究は重要である状況である。また 2023 年になると Belle II 実験が $B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊の測定結果を報告し、まだこの崩壊率も発見とは行かない段階であるがその値が標準理論より大きめな結果を示していることから、この崩壊過程の新物理による寄与の研究も重要かもしれない状況となっている。

2. 研究の目的

本研究では、上で述べた状況で、実験値と素粒子標準理論の予言値の食い違いが、標準理論を超えた新理論によるものであるとしたら、どのような可能性があるのかを理論的に明らかにしようとした。特に、標準理論には含まれないレプトクォークと呼ばれる、レプトンとクォークと同時に相互作用する新粒子の理論を考えて研究を行なった。野心的な思いとしては、このようなレプトクォークの存在は大統一理論のような統一理論が起源の可能性もあり、背後にある統一理論の存在も示唆出来ればとの期待もある。このようなレプトクォークが、食い違いを示しているそれぞれの現象を説明できる領域はあるのか、複数同時に説明できるのか、説明できるものがある時にはそこから他の現象に予言はあるのか、などを明らかにすることで、他のモデルの予言との違い、将来の実験での検証法などを調べることが目的である。

3. 研究の方法

まずレプトクォークモデルで μ 粒子異常磁気能率に大きな寄与を与え得るのは、右巻き、左巻きトップクォークと μ 粒子が相互作用を持つものであることから、まずは S_1 および R_2 スカラーレプトクォークと呼ばれるタイプのモデルを調べることとし、これが μ 粒子異常磁気能率と B 中間子の崩壊現象で見られる食い違いを同時に説明し得るかを調べた。またそれが難しい時には、B 中間子の崩壊現象にどのくらい影響しうるかを調べた。また、毎年新しい実験結果が発表されるので、それに応じて考える理論や理論のパラメータ領域も臨機応変に変えて対応した。特に 2022 年の LHCb 実験で $R(K^{(*)})$ の食い違いがなくなった時は、考える理論のタイプをだいたい変える必要があったが、いままで考えていた R_2 スカラーレプトクォークが面白い可能性の一つだとわかったので、それを調べることで引き続き同じモデルでの研究を継続した。さらに 2023 年には、新しく $B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}$ の崩壊現象でも標準理論の予言値からの食い違いがある可能性が報告されたので、この過程に関しても詳しく調べてみることを考えた。

4. 研究成果

研究開始時は、 μ 粒子異常磁気能率に大きな寄与を与え得るレプトクォークのうち S_1 スカラーレプトクォークモデルを考えた。このモデルでは、 μ 粒子異常磁気能率に寄与する相互作用と $B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$ に寄与する相互作用は、異なっていることから他の現象からの制限を考慮して同時にどれくらいの食い違いを出すことが可能なかを調べた。特に面白いのは、 μ 粒子異常磁気能率と $B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$ に寄与があると、 $B \rightarrow K^{(*)} \mu^+ \mu^-$ へも新たな寄与を与えることがわかったので、これがどのくらい大きい寄与であり得るのかを調べた。 $B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$ への寄与には、 $b \rightarrow s \nu \bar{\nu}$ や中性 B 中間子混合から強い制限があり、許されるパラメータ領域はかなり制限されることがわかった。また、 μ 粒子異常磁気能率と $B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$ に同時に寄与がある時は、 $\tau \rightarrow \mu \gamma$ 過程にも寄与を与え、強い制限があることがわかった。このような制限を考慮しても、比較的大きな湯川相互作用があれば $B \rightarrow K^{(*)} \mu^+ \mu^-$ に無視できない影響を与え得ることがわかった。このような可能性はさまざまな現象が関係しあっているので、関連する現象の精密測定および探索が重要であることがわかった。この研究後、 $R(K^{(*)})$ の食い違いがなくなったので、現在では $B \rightarrow K^{(*)} \mu^+ \mu^-$ の崩壊過程への

大きな寄与は大きく制限されることになったが、 μ 粒子異常磁気能率と $B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$ を同時に大きな寄与を与え得る可能性はあるので、今後も興味深い可能性である。これら S_1 スカラーレプトクォークの研究に関しては、名古屋大学の天津嶋斗氏と共同研究をし、その一部の結果は天津氏の修士論文にまとめられている。また 2022 年の日本物理学会年次大会で “Phenomenology of leptoquarks motivated by muon g-2 anomaly” というタイトルで発表を行った。

LHCb の $R(K^{(*)})$ の新しい結果のあと、 $B \rightarrow K^{(*)} l^+ l^-$ への新物理の寄与は l が電子の時も、 μ 粒子の時も統一であることが要請されるので、その要請を満たす可能性がある模型として R_2 スカラーレプトクォークを解析した。 R_2 スカラーレプトクォークは、もともと μ 粒子異常磁気能率に大きな寄与を生成する可能性のある模型として解析していたが、さまざまな B 中間子崩壊現象への寄与に関しては、あまり解析した研究がなかったので、詳しく調べることにした。 μ 粒子異常磁気能率の食い違いと、B 中間子崩壊での食い違いを同時に説明できる可能性は、他の現象からの制限が厳しいので、 μ 粒子異常磁気能率の食い違いを説明できることは考慮せずに B 中間子崩壊現象のみに影響を与えるケースに限って解析した。まず $B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$ への寄与に関しては、比較的大きな寄与が可能なのは先行研究でも知られていたもので、これに加えて $B^+ \rightarrow K^+ \nu \nu$ への寄与はどのくらい可能なのか、を調べた。 $B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$ への寄与は $B_c \rightarrow \tau \nu$ 崩壊過程から厳しい制限を受け、 $B^+ \rightarrow K^+ \nu \nu$ への寄与は、中性 B 中間子混合からの制限を受けるので、これらの制限を考慮してどのくらいの大きさの食い違いを出せるのかを調べた。中性 B 中間子混合の制限が厳しいため、 $B^+ \rightarrow K^+ \nu \nu$ などの $b \rightarrow s \nu \nu$ 過程への影響はたかだか数%ほどしか許されないことがわかった。 $B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$ の食い違いと関係する理論のパラメータ領域の解析は、名古屋大学の太田駿太氏との共同研究によって行われ、その結果は太田氏の修士論文にまとめられている。また、より一般的な理論のパラメータ領域での解析は、名古屋大学の内山健氏との共同研究によって行われ、その結果は内山氏の修士論文にまとめられている。内山氏との共同研究で、 $B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$ と $b \rightarrow s \nu \nu$ 過程の間の寄与には特に強い相関は必ずしもないことも分かった。

またこの R_2 スカラーレプトクォークで $B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$ と $b \rightarrow s \nu \nu$ 過程に大きな寄与がある時には、量子効果として $B \rightarrow K^{(*)} l^+ l^-$ 過程にも無視できない効果があることがわかる。 $B \rightarrow K^{(*)} l^+ l^-$ 過程は標準理論でも 1 ループで生成される稀な現象であり、現在この過程で標準理論の予言値からのズレが指摘されているので、標準理論で行われている解析を理解しつつ、 R_2 スカラーレプトクォークの寄与がどのくらいになり得るかを解析中である。標準理論での低エネルギー有効理論を利用した解析の理解に少し時間がかかり、研究期間中に全ての解析を終了することができなかったが、結果が分かり次第、論文にまとめて発表する予定である。

μ 粒子異常磁気能率や B 中間子崩壊現象での標準理論の予言値と実験値の食い違いは、いずれもまだ解決されていない問題であり、標準理論の計算のさらなる見直し、精密化を含めて多角的な面から検証していく必要がある。その中で、この食い違いが本当に新物理によるものであるとすれば、この検証結果を待つ以前に他の現象に影響を与え、それを通して検証できる可能性もある。その意味で我々の研究のアプローチは今後も引き続き重要であろう。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 内山健
2. 発表標題 Scalar Leptoquark Phenomenology Motivated by B Meson Anomalies
3. 学会等名 The 6th KMI International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2025年

1. 発表者名 戸部和弘
2. 発表標題 Phenomenology of leptoquarks motivated by muon g-2 anomaly
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------