

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 25 日現在

機関番号：12102
 研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2010～2011
 課題番号：22740139
 研究課題名(和文) 二体ミュオン粒子及び二体荷電粒子トリガーを用いた b クォーク電弱希崩壊の精密測定
 研究課題名(英文) Precise measurements of b quark's electro-magnetic rare decays using dimuon and two charged track triggers
 研究代表者
 三宅 秀樹 (MIYAKE HIDEKI)
 筑波大学・数理物質系・研究員
 研究者番号：20403115

研究成果の概要 (和文)：

b クォークの電弱希崩壊 $b \rightarrow s \mu \mu$ の排他的終状態 $B \rightarrow K^{(*)} \mu \mu$ 、 $B_s^0 \rightarrow \phi(1020) \mu \mu$ 、及び $\Lambda_b \rightarrow \Lambda \mu \mu$ 崩壊の研究を行った。 $\Lambda_b \rightarrow \Lambda \mu \mu$ 崩壊を世界で初めて観測し、この崩壊を含め世界最高精度で全崩壊分岐比及びレプトン対質量の二乗(q^2)に依存した部分崩壊分岐比の測定を行った。 $B \rightarrow K^{(*)} \mu \mu$ の崩壊角度分布より q^2 に依存したレプトン前後方非対称度(A_{FB})、 K^* 縦偏極度(F_L)を出版された結果として世界最高精度で測定した他、縦偏極非対称度($A_T^{(2)}$)及び時間反転非対称荷電・パリティ非対称度(A_{im})の測定を世界で初めて行なった。結果はいずれも素粒子標準模型に矛盾しないものであった。

研究成果の概要 (英文)：

We study the decays $B \rightarrow K^{(*)} \mu \mu$, $B_s^0 \rightarrow \phi(1020) \mu \mu$, and $\Lambda_b \rightarrow \Lambda \mu \mu$, which are proceeded via $b \rightarrow s \mu \mu$ electro-magnetic rare decays. In addition to the first observation of $\Lambda_b \rightarrow \Lambda \mu \mu$ decays, we perform the measurement of total and differential branching ratios of the decays as a function of squared dimuon mass. The transverse polarization asymmetry $A_T^{(2)}$ and the time-reversal-odd charge-and-parity asymmetry A_{im} are measured for the first time, together with the K^* longitudinal polarization fraction F_L and the muon forward-backward asymmetry A_{FB} . All of the results are consistent with the standard model.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：素粒子実験物理学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：B 中間子

1. 研究開始当初の背景

素粒子標準模型(SM)はその提唱以来多くの

実験的事実の積み重ねによって支持されてきたが、階層性の起源やパラメータの多さなどの問題点も多く、自然を記述する究極の理

論ではないと予測されている。これを解消すべく現在までに SM を拡張した新しい物理 (BSM) 理論群が多く提唱されているが、未だ実験的証拠は無い。無数の BSM 理論群を包括的に検証する為に最も有望な手法の一つとみられていたのが、クォークの遷移過程にループ構造を含む、いわゆるペンギン崩壊の精密測定である。

2008 年から 2009 年にかけて、Belle 及び BaBar 両 B ファクトリー実験はペンギン崩壊の一種である B 中間子の K^*11 崩壊事象におけるレプトン崩壊角度の前後方非対称度 (A_{FB}) が、統計誤差が大きいものの全運動量領域において SM 予想値より大きく観測されるという結果を公表し、関心と呼んだ。

CDF 実験においては 2009 年末に本研究代表者によって、 $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu \mu$ 崩壊を用いた、ハドロン衝突実験における最初の A_{FB} 観測結果を公表した。これは B ファクトリー実験と同様の傾向を示唆しており、更に関心が深まっていた。

しかしながら BaBar 実験は既に運転を停止し、Belle 実験もアップグレード用運転停止が迫っており、より高い統計量による新しい観測結果に期待が持たれていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、b クォークの電弱希崩壊 $b \rightarrow s \mu \mu$ における崩壊分岐比及び崩壊振幅の質量・角度依存性測定を通して SM の精密検証、及び BSM を探索する事にある。

前述したように $b \rightarrow s \mu \mu$ 崩壊はその崩壊ダイアグラムにループ構造を含み、ここに超対称性 (SUSY) 粒子など BSM で予言される粒子が寄与した場合、SM と異なる崩壊振幅が観測され得る。更にユニークな特徴として、終状態が 3 体崩壊である事から、終状態粒子の角度分布には崩壊分岐比の観測だけでは得られない、BSM に関するより多くの情報が含まれる。それらの中で実験及び理論誤差の小ささや感度のある物理モデルの多さなどの点から、最も有望視される観測量が A_{FB} である。本研究における最も重要な目標は、より多くのデータ量と解析手法の改良によって高統計量で A_{FB} を精密測定する事であるが、より包括的に BSM パラメータに制約を与えるため、これまで未観測であった右巻きカレントに感度のある新しい観測量の観測も目指した。更にこれまで未発見であった、b バリオンにおける $b \rightarrow s \mu \mu$ 崩壊の一つである $\Lambda_b \rightarrow \Lambda \mu \mu$ 崩壊の発見及び崩壊分岐比の確定も目標とした。

3. 研究の方法

(1) 概要

本研究は米国イリノイ州バタビア市にあるフェルミ国立加速器研究所で行われている CDF 実験に参加し、ここで取得された大量の b ハドロン生成データを用いる事で行われた。主として b ハドロンは、重心エネルギー 1.96 TeV の陽子反陽子衝突で生じる大量の b クォーク対のハドロン化によって生成され、これを汎用検出器である CDF 検出器を用いて取得、解析を行う。

解析手法としては横運動量 1.5 GeV/c 以上のミュオン粒子対を用いてトリガーをかけ、飛跡検出器によって再構築された荷電粒子の不変質量を足し上げていき、各中間状態の不変質量を再現しながら最終的に b ハドロン質量を求め、これが世界平均値から、検出器の分解能によって定められる一定の幅の中に納まっている事を要求する。

SM においては、 $b \rightarrow s \mu \mu$ 崩壊は強く抑制されており、その崩壊分岐比のオーダーは 10^{-6} と極めて小さい。2009 年に行われた積分ルミノシティ 4.4 fb^{-1} を用いた解析においては、およそ 101 個の $B^0 \rightarrow K^{*0} (\rightarrow K \pi^+) \mu \mu$ 崩壊事象を観測した。本研究においては先行解析の 1.5 倍に相当する積分ルミノシティ 6.8 fb^{-1} の陽子反陽子衝突データを用いたが、より高精度な観測量を得る為に様々な手法を用いて統計量の改善を試みた。

(2) トリガー改良

ハドロン衝突実験においては、b クォーク生成断面積の $100 \sim 1000$ 倍にも及ぶ膨大な軽いクォーク生成事象 (QCD 背景事象) の影響を低減する為に厳しいトリガー条件が課せられる。これによるデータ損失の影響を回復する為、トリガーの改良を試みた。

研究当初予定していたのは b ハドロンが長い寿命を持つという性質を生かし、荷電粒子対の生成点が陽子反陽子の一次衝突点から十分離れている事を要求する二体荷電粒子トリガー (TT トリガー) の採用であったが、シグナルモンテカルロ事象による検証により、このトリガーは二体ミュオン粒子質量分布を歪め、前後方非対称度分布測定に影響を与える事が判明した。このような歪みを与えないトリガーを探した結果、これまで用いられてきたものとは異なるミュオン粒子検出器を用いるトリガー (CMUP トリガー) を用いて同等の検出効率を実現し得る事を見出し、コントロールサンプルの統計量向上で実証した。

(3) 新しい崩壊モードの導入

統計量を向上させる為、これまで用いられて来なかった中性短寿命 K 中間子 $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ を含む崩壊モードを導入し、その事象選択を最適化した。検出器内で崩壊する K_S^0 中間子に対し、崩壊点に応じたエネルギー補償を行う事で再構成される親粒子の質量分布に歪

みが生じる影響を抑える事に成功した。これにより K_S^0 を含む崩壊モードの分岐比測定が可能になったのみならず、荷電 K 中間子を含む崩壊モードとの比較による新しい物理量（崩壊分岐比の荷電スピン対称性）の測定が可能となった。この値は標準理論を超える物理現象に敏感であり、レプトン前後方非対称度分布測定同様に重要である。

更にこの解析手法は同様の崩壊トポロジーを持つ Λ バリオンにも適用でき、 $\Lambda_b \rightarrow \Lambda \mu \mu$ 崩壊の観測を可能とすると共に、これらの終状態に対する理解を深めることで運動学的パラメータを用いて互いが互いの終状態に混入しないよう工夫した事象選択を行う事が可能となり、系統誤差の低減に寄与した。

(4) 事象選択最適化

また、従来より学習効率の良いベイジアン人工ニューラルネットワークの導入による多変量解析の事象最適化や用いる運動学的変数の整理・最適化により、QCD 背景事象を 99% 以上排除しながら同じデータ量で 20% の検出効率向上を達成した。

(5) 事象数測定

各崩壊モードの全事象数に加え、レプトン対質量に依存する事象数分布の測定は本測定の要の一つである。少数統計に対し系統誤差の少ない測定が可能で、ビン非分割最尤法を b ハドロン質量分布に適用し、測定を行った。

(6) 崩壊分岐比測定

ハドロン衝突実験においては、 b ハドロン生成数の絶対値を知る事が困難である為、崩壊分岐比のよく知られたコントロールサンプルに対する事象数の相対比を用いて、崩壊分岐比を測定する。終状態粒子の運動量分布の近いコントロールサンプルを選択する事により系統誤差をキャンセルし、より精度の高い測定を可能にする。本測定においては終状態が同じながらミュオン対が J/ψ 中間子を生成し、検出数も 100 倍多いコントロールサンプル群を用いた。これらのコントロールサンプルは崩壊分岐比や偏極度分布などがよく知られている為、解析が正しく行われているかを確認する為にも重要な役割を果たす。生成粒子の運動量や角度分布による検出効率の違いはモンテカルロ事象を用いて評価し、補正を行った。

(7) 角度解析

$B \rightarrow K^* \mu \mu$ 崩壊の崩壊振幅は 3 つの崩壊角及びミュオン対質量の二乗 (q^2) という 4 つの変数を用いる事で完全に記述される。これらの角度分布は様々な BSM モデルに対し特徴的なパターンを示す。崩壊振幅は 22 個の観測可

エネルギーを持ち、小統計量での観測が非常に困難であるが、それぞれ独立な崩壊角ごとに次元の角度分布に射影する事で、パラメータの数を著しく減らす事ができる。これらの中でミュオン対角度分布より得られるレプトン前後方非対称性 (A_{FB}) 及び K 中間子の角度分布より得られる K^* 中間子縦偏極度 (F_L) はこれまでに B ファクトリー実験及び CDF 実験において観測されていた。これらの観測量は次元に射影された確率密度関数に対してミュオン対及び K 中間子の角度分布をビン非分割最尤法でフィットする事で得られる。

これに加え、ミュオン対崩壊平面及び $K^* \rightarrow K \pi$ 崩壊平面間の角度 ϕ の分布は、SM では強く抑制されているが、様々な BSM モデルによって存在が予測される右巻きカレントの存在に鋭敏である。二種類の同時観測可能量、縦偏極非対称度 $A_T^{(2)}$ 及び時間反転非対称荷電・パリティ非対称度 A_m が提案されていたが、高い統計量が必要であった事からこれまでに観測例は無かった。本解析においては大量の観測事象により、これらの測定が可能とした。

終状態粒子検出効率の角度依存性についてはモンテカルロ事象を用いて評価し、補正を加えた。この評価の妥当性については、同様の手法を用いたコントロールサンプルによる偏極度測定が世界平均値と一致する事により確認した。

4. 研究成果

(1) 崩壊分岐比測定結果

積分ルミノシティ 6.8 fb^{-1} のデータを用いる事で 164 個の $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu \mu$ 事象を得ると共に、ハドロン衝突実験で初となる 20 個の $B^+ \rightarrow K^{*+} \mu \mu$ 事象及び 28 個の $B^0 \rightarrow K_S^0 \mu \mu$ 事象を得た。また 234 個の $B^+ \rightarrow K^+ \mu \mu$ 及び 49 個の $B_S^0 \rightarrow \phi \mu \mu$ 事象も世界最高の統計数で観測した。更に 24 個の $\Lambda_b \rightarrow \Lambda \mu \mu$ 事象を統計有意度 6σ で観測し、世界で初めて b バリオンのペンギン崩壊観測に成功した。

この結果を用いて全崩壊分岐比及び q^2 に依存する部分崩壊分岐比を、いずれも世界最高もしくはほぼ同等の精度で得た。特に $B_S^0 \rightarrow \phi \mu \mu$ 事象及び $\Lambda_b \rightarrow \Lambda \mu \mu$ 事象の部分崩壊分岐比は世界で初めて荷電/中性 B 中間子以外の b ハドロンより得られたものであり、特に理論計算にインパクトを与えた。更に得られた崩壊分岐比から荷電/中性 B 中間子における荷電対称性を考慮した崩壊分岐比の非対称度を計算し、従来得られていた傾向とは異なり SM を支持する結果を得た。

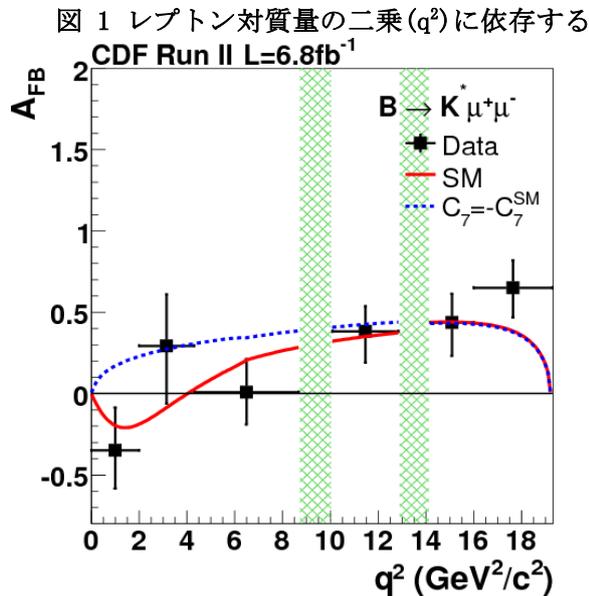
(2) 角度解析結果

得られた $B \rightarrow K^* \mu \mu$ 崩壊事象候補を用い、本解析の主目的であるレプトン前後方非対称

度(A_{FB})の測定を行った(図1)。 $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu \mu$ を用いた解析に加え、 $B^+ \rightarrow K^{*+} \mu \mu$ 崩壊と同時測定を行う事で統計及び系統誤差の改善を図った。先行解析に対し最大50%の感度向上を達成し、出版された結果として世界最高精度の測定を行うことで、従来の測定結果に比べSMを支持する結果を見た。同様の手法で K^* 偏極度(F_L)も出版された結果として世界最高精度で観測した。

また縦偏極非対称度($A_T^{(2)}$)及び時間反転非対称CP非対称度(A_{im})の測定を世界で初めて行なった。統計誤差がまだ大きなものの、SMと矛盾しない結果を得、BSMパラメータ領域に独自の制限を与えた。

同様の解析手法を $B \rightarrow K^* \mu \mu$ とは異なるBSMモデルに感度のある $B^+ \rightarrow K^+ \mu \mu$ 事象に対しても適用し、世界最高精度で A_{FB} を決定し、SMと矛盾しない結果を得た。



A_{FB} 観測結果

ヒストグラムは $B \rightarrow K^* \mu \mu$ 崩壊観測データ、横軸は q^2 、縦軸は A_{FB} を表し、実線及び点線はそれぞれSMおよび特定のBSMモデルによる予測値

(3) 研究成果のまとめ

先行解析で培われた解析技術をさらに洗練し、背景事象の膨大なハドロン衝突実験においてもBファクトリー実験と同等、もしくはそれを上回る精度で希崩壊の精密測定が行える事を示した。多数のユニークな特徴を持つ観測量を得たが、いずれもSMに矛盾しなかった。また幾つかの観測量は従来より強くSMを示唆する結果を示した。

またこれまで未発見であったbバリオン系における希崩壊モード、 $\Lambda_b \rightarrow \Lambda \mu \mu$ 事象を世界で初めて発見し、その崩壊分岐比及び部分崩壊分岐比を決定した。これによりbバリオン系

における希崩壊測定という分野を開拓し、今後の多様な解析への展望を開いた。

これらの成果により $b \rightarrow s \mu \mu$ クォーク遷移の理解の深化、及び可能なBSMモデルを絞り込む上で重要となる、多くの知見を得た。

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3件)

1. Hideki Miyake, Observation of $\Lambda_b \rightarrow \Lambda \mu^+ \mu^-$ Decay and Updated Search for Non-SM Physics in $B \rightarrow K^{(*)} \mu^+ \mu^-$ Decays at CDF, 査読無, Proceedings of Science (EPS-HEP2011), 171巻, 2012, 1-4
DOI: なし

2. T. Aaltonen, H. Miyake, *et al.* (CDF collaboration), Measurements of the Angular Distributions in the Decays $B \rightarrow K^{(*)} \mu^+ \mu^-$ at CDF, 査読有, Physical Review Letter, 108巻, 2012, 081807-081815
DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.081807

3. T. Aaltonen, H. Miyake, *et al.* (CDF collaboration), Observation of the Baryonic Flavor-Changing Neutral Current Decay $\Lambda_b \rightarrow \Lambda \mu^+ \mu^-$, 査読有, Physical Review Letter, 107巻, 2011, 201802-201810
DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.201802

[学会発表] (計6件)

1. H. Miyake, "Recent B-physics results at CDF", KEK physics seminar (招待講演), 2012年1月12日, 茨城県 つくば市 高エネルギー加速器研究機構

2. H. Miyake, on behalf of CDF collaboration, "Updated search for non-SM physics in $B \rightarrow K^{(*)} \mu^+ \mu^-$ Decays at CDF", Supersymmetry 2011, 2011年8月30日, Fermilab, Batavia, USA

3. H. Miyake, on behalf of the CDF collaboration, "Observation of the Baryonic FCNC Decay $\Lambda_b \rightarrow \Lambda \mu^+ \mu^-$ and the Angular Analysis in $B \rightarrow K^{(*)} \mu^+ \mu^-$ Decays at CDF", Joint Experimental-Theoretical

Seminar (招待講演), 2011年8月19日,
Fermilab, Batavia, USA

4. H. Miyake, on behalf of CDF collaboration,
“Observation of $\Lambda_b \rightarrow \Lambda \mu^+ \mu^-$ Decay and
updated search for non-SM physics in
 $B \rightarrow K^{(*)} \mu^+ \mu^-$ Decays at CDF”, EPS-HEP 2011,
2011年7月22日, Grenoble, France

5. 三宅 秀樹, ”CDFでのボトム・フレーバー
の物理”, 特定領域研究「フレーバー物理の
新展開」研究会, 2011年7月3日, 三重県菰野
町鹿の湯ホテル

6. H. Miyake, on behalf of CDF collaboration,
“Improved measurements of decays mediated
by the $b \rightarrow s \mu^+ \mu^-$ transition at CDF”, APS
April Meeting, 2011年5月2日, Anaheim, USA

[その他]
ホームページ等
http://www-cdf.fnal.gov/physics/new/bottom/110702.blessed-b2smumu_68/index.html

6. 研究組織
(1) 研究代表者
三宅 秀樹 (MIYAKE HIDEKI)
筑波大学・数理物質系・研究員
研究者番号: 20403115