

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 24 年 6 月 1 日現在

機関番号： 12102
研究種目： 特定領域研究
研究期間： 2006 ～ 2011
課題番号： 18071002
研究課題名(和文) 陽子反陽子衝突実験 CDF によるトップとボトム・フレーバーの物理

研究課題名(英文) Top and Bottom Flavor Physics at Proton Anti-proton Collider
Experiment CDF
研究代表者
金 信弘 (KIM SHIN-HONG)
筑波大学・数理物質系・教授
研究者番号： 50161609

研究成果の概要（和文）：当初の目的である B_s 中間子振動の観測とトップクォーク単一生成の観測に共に成功して、小林益川行列要素を高精度で決定した。これによって、小林益川理論を高精度で検証した。さらに、当初予定していなかった成果として、トップクォーク対生成の前後方非対称性を測定した結果、理論予言値から 2σ 以上のずれが観測された。

研究成果の概要（英文）：We succeeded in observing the B_s meson oscillation and the single top quark production, and determining the Kobayashi-Maskawa matrix elements very accurately. Thus we could test the Kobayashi-Maskawa theory with high precision. Further as an unexpected result, we found the forward-backward asymmetry of top quark pair production larger than theoretical prediction by more than 2σ .

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合 計
2006 年度	25,600,000	0	25,600,000
2007 年度	35,800,000	0	35,800,000
2008 年度	35,800,000	0	35,800,000
2009 年度	35,800,000	0	35,800,000
2010 年度	24,100,000	0	24,100,000
2011 年度	14,600,000	0	14,600,000
総 計	171,700,000	0	171,700,000

研究分野：素粒子物理学

科研費の分野・細目：物理学 ・ 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：トップクォーク、 B_s , B_c 中間子、陽子反陽子衝突実験 (CDF)、粒子・反粒子対称性の破れ、小林益川混合行列、超対称性理論、物質宇宙の起源、国際協力実験

1. 研究開始当初の背景

二十世紀後半の素粒子物理学の発展は「素粒子標準理論」として結実し、物質の究極の構成粒子であるクォーク・レプトンと、それらの間に働く力の基本的性質の解明が進んできた。クォー

ク・セクターとレプトン・セクターにはそれぞれ3世代で6種類のフレーバーが存在し、世代間の遷移は混合行列をとおして起こり、その混合行列が粒子反粒子対称性の破れ (CP 非保存) を生み出し、物質宇宙の起源となっている可能

性がある。今後さらに実験を進めて、クォーク・セクターとレプトン・セクターの混合行列を高精度で測定し、それらを総合的に理解することが「何故宇宙は物質でできているか」という問いに答えるための重要な鍵となる。この問題の解明は極めて重要であり、物質宇宙の起源を知るということは人類の自然認識の基本課題の一つである。本計画研究「陽子反陽子衝突実験 CDF によるトップとボトム・フレーバー物理の研究」では、この問題解決を目指して、米国国立フェルミ加速器研究所テバトロン加速器を用いた世界最高エネルギー陽子反陽子衝突実験 (CDF 実験) を強力に推進している。CDF 実験では、1995 年のトップクォークの発見以後、トップクォークの質量測定などで大きな成果をあげてきた。またボトム・フレーバーの物理については 1998 年に B_c 中間子の発見に成功しており、今後もトップとボトム・フレーバー物理の研究で大きな成果をあげることを目指している。

2. 研究の目的

米国国立フェルミ加速器研究所テバトロン加速器を用いた世界最高エネルギー陽子反陽子衝突実験 (CDF 実験) の衝突事象の解析によって、トップクォーク生成崩壊の精密測定、 B ハドロン生成崩壊の精密測定を行い、本研究の目的である弱い相互作用における CP 対称性の破れを記述する小林益川理論の高精度での検証と、標準理論を超える物理の探索を行なう。

3. 研究の方法

本計画研究「陽子反陽子衝突実験 CDF によるトップとボトム・フレーバーの物理」では、米国フェルミ国立加速器研究所の陽子反陽子衝突型加速器テバトロン衝突器を用いた世界最高エネルギー陽子反陽子衝突実験 (CDF 実験) のデータ収集と物理解析を強力に推進してきた。30 年近く続いたテバトロンの運転を平成 23 年 9 月末に終了し、積分輝度 10.0fb^{-1} に相当する衝突事象データを取得した。このデータ量は本研究計画当初に期待していた積分輝度 8.5fb^{-1} を大きく超えた。

データ収集と並行してデータの解析を進め、物理データは本研究費で購入した磁気ディスクに保存した。解析プログラム開発、シミュレーション、物理の検討は既存の計算機と本研究費で新たに購入した計算機を用いて行なった。この衝突事象の解析によって、トップクォーク生

成崩壊の精密測定、 B ハドロン生成崩壊の精密測定を行い、本研究の目的である弱い相互作用における CP 対称性の破れを記述する小林益川理論の高精度での検証と、標準理論を超える物理の探索を行なってきた。本計画研究を始めるにあたって、最終年度の 2011 年度までに達成すべき具体的な目標として、二つの大きい目標を設定した。一つは、 B_s 中間子の粒子・反粒子振動の初観測を行い、その振動数測定によって小林益川混合行列の $|V_{ts}/V_{td}|$ 成分を 5 % の精度で測定することであった。もう一つは単一トップクォーク生成の初観測を成功させ、断面積測定により小林益川混合行列の V_{tb} 成分を 6 % の精度で測定することであった。このように小林益川混合行列の高精度の決定をはじめとするフレーバー物理の研究を推進する。

4. 研究成果

(1) ボトム・フレーバーの物理

CDF 実験でのボトム・フレーバーの物理の目標のひとつは、ストレンジネスを持つ中性 B 中間子 B_s^0 の粒子・反粒子振動の観測にあった。2006 年度には B_s 中間子の粒子・反粒子振動の初観測に成功した。粒子・反粒子振動は、これまでに K 中間子と B 中間子のみで観測されており、 B_s 中間子では振動数が高く、観測が困難であることが小林益川理論で予言されていた。積分ルミノシティ 1fb^{-1} のデータを解析して $B_s \rightarrow \pi D_s (\rightarrow \phi\pi, K^*K \text{ or } \pi\pi\pi) \text{ or } 3\pi D_s$ のハドロニック崩壊モードの信号候補を 8,700 事象、 $B_s \rightarrow \ell\nu D_s$ のセミレプトニック崩壊モードの信号候補を 61,500 事象検出した。これらを用いて振動のフーリエ振幅解析を行なった結果を図 1 に示す。これより B_s 中間子の粒子・反粒子振動の角振動数 Δm_s の測定結果は $\Delta m_s = 17.77 \pm 0.10$ (統計) ± 0.07 (系統) ps^{-1} 、すなわち振動数は 2.8 兆ヘルツで、小林益川理論の予言値と矛盾せず、また予言精度よりもはるかに測定精度が高かった。この結果が振動がないときに観測に伴う統計的ゆらぎで得られる確率は 8×10^{-8} である、言い換えると 5.4σ で B_s 中間子振動を観測した。 B_s 中間子振動の振動数の測定は小林益川行列のトップクォークとストレンジクォークの結合を高精度で決定するのに重要な役割を果たすものであり、小林益川理論の検証には不可欠な測定である。この B_s 中間子振動の振動数測定によって、小林益川混合行列の $|V_{ts}/V_{td}|$ 成分を $|V_{ts}/V_{td}| = 0.2060 \pm$

0.0007(実験) + 0.0081/-0.0060 (理論) と 4 % の精度で決定した結果、非常に高い精度で小林益川理論が正しいことを検証することができた。この結果は 6 社 (朝日、毎日、日経、日刊工業、東京、常陽) の新聞で報道された。

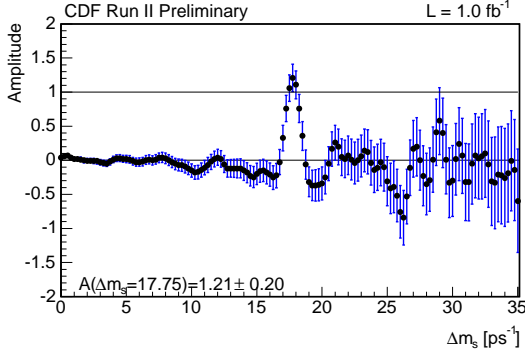


図 1: B_s 中間子の粒子反粒子振動の振幅を角振動数に対して求めた曲線。振幅は振動があるときには 1 になり、振動がないときには 0 になるように規格化されている。この振幅が有意に 1 になる角振動数として $\Delta m_s = 17.77 \pm 0.10$ (統計) ± 0.07 (系統) ps^{-1} が得られた。

2007 年度には、 B_s 中間子の稀崩壊モード $B_s \rightarrow K^+K^-$, $B_s \rightarrow K\pi$, $B_s \rightarrow D_s K$ を初めて観測し、分岐比を測定した。またボトムクォークを含む基本的なバリオン Σ_b と Ξ_b を初めて観測した。

中性カレントによる稀崩壊 $b \rightarrow s \ell^+ \ell^-$ は、いわゆる flavor-changing neutral current による崩壊であり、Belle 実験が標準理論を超える新物理の兆候を観測するなど、注目を集めている。CDF 実験では 2009 年度に、この崩壊の測定結果を得た。 $B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$, $B_d^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$, および $B_s^0 \rightarrow \phi \mu^+ \mu^-$ の解析を行った結果、 $B_s \rightarrow \phi \mu^+ \mu^-$ の崩壊モードの初観測に成功して、崩壊分岐比 $\text{BR}(B_s \rightarrow \phi \mu^+ \mu^-) = (1.44 \pm 0.33(\text{統計}) \pm 0.46(\text{系統})) \times 10^{-6}$ を得た。これは標準理論予言と矛盾しない値であった。崩壊 $B_d^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ は、偏極度およびレプトン角分布の前後方非対称度が新物理の探索に感度を持つ。その測定結果は Belle 実験と同程度の精度が得られており、結果は標準理論および新物理とともに矛盾しない。

2011 年度に、 9.6fb^{-1} のデータを用いた $B_s \rightarrow J/\Psi \phi$ の崩壊測定によって、 B_s 中間子の 2 つの質量固有状態の崩壊幅の差 $\Delta\Gamma_s$ を $B_s \rightarrow J/\Psi \phi$ の寿命測定によって $\Delta\Gamma_s = 0.076$

+0.059/-0.063(統計) ± 0.006 (系統) ps^{-1} と決定した。CP の破れの phase β_s を 0 と仮定して $\Delta\Gamma_s$ を決定して、 $\Delta\Gamma_s = 0.068 \pm 0.026(\text{統計}) \pm 0.007(\text{系統}) \text{ps}^{-1}$ を得た。 β_s と $\Delta\Gamma_s$ を同時に測定した結果、68 % 信頼度で $-0.06 < \beta_s < 0.30$ あるいは $1.26 < \beta_s < 1.55$ を得た。 β_s と $\Delta\Gamma_s$ の測定結果は誤差の範囲内で標準理論予言と一致している。

また $D \rightarrow KK, \pi\pi$ 崩壊における CP 非対称性パラメータ ΔA_{CP} を測定した結果、 $\Delta A_{CP} = -0.62 \pm 0.21(\text{統計}) \pm 0.010(\text{系統}) \%$ となり、チャーム・フレーバーにおいて 2.7σ で CP の破れが見えた。これは LHCb 実験の結果を確認するものである。

$B_s, B_d \rightarrow \mu^+ \mu^-$ の崩壊はいわゆる flavor-changing neutral current による崩壊であり、標準理論を超える新物理の兆候を観測するのに最適な稀崩壊と考えられており、多くの実験で探索が行なわれている。この稀崩壊探索を行い、それぞれ崩壊分岐比の上限値 (95 % 信頼度) として $\text{BR}(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-) < 4.4 \times 10^{-8}$, $\text{BR}(B_d \rightarrow \mu^+ \mu^-) < 6.0 \times 10^{-9}$ を得た。 $\text{BR}(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ については、下限値 (95 % 信頼度) も得られて $\text{BR}(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-) > 2.8 \times 10^{-9}$ となり標準理論予言値の $(3.2 \pm 0.2) \times 10^{-9}$ と矛盾しない。

(2) トップ・フレーバーの物理

これまでにトップクォークは、グルオンを媒介とする強い相互作用でトップクォークと反トップクォークが対生成される事象で、観測されてきた。それに対して、単一トップクォーク生成では、W ボソンを媒介とする弱い相互作用でトップクォークが反ボトムクォークとともに生成される。このとき、小林益川行列要素の V_{tb} が単一トップクォーク生成のバーテックスに現れ、単一トップクォーク生成断面積は $|V_{tb}|^2$ に比例するので、断面積を測定することによって $|V_{tb}|$ を決定することができる。単一トップクォーク生成には s チャンネル生成と t チャンネル生成の 2 つの過程があり、それぞれの生成断面積の予言値は 0.9pb, 2.0pb で、足し合わせても、トップクォーク対生成断面積 6.7pb の 40 % 程度である。2009 年度に 3.2fb^{-1} のデータを解析して単一トップクォーク生成の探索を行った結果、99.99997 % の信頼度 (5σ) で生成の観測に成功し、生成断面積 $2.3 + 0.6/-0.5\text{pb}$

を得た。これは理論予言値と誤差の範囲で一致している。この生成断面積から小林益川混合行列の V_{tb} 成分を $|V_{tb}| = 0.91 \pm 0.13$ と 14 % の精度で決定した。さらに D ゼロ実験の測定した生成断面積 $2.29 + 0.60/-0.54$ pb と合せて、 $|V_{tb}| = 0.88 \pm 0.07$ と 8 % の精度で V_{tb} 成分を決定した。

2010 年度には、トップクォーク対生成の前後方非対称性を測定した。5.3 fb⁻¹ のデータを解析して前後方非対称性を測定した結果、レプトン+ジェット・チャンネルでは理論予言値 0.06 ± 0.01 に対して、非対称度 0.158 ± 0.072 (統計) ± 0.017 (系統) を得て、2 レプトン・チャンネルでは非対称度 0.42 ± 0.15 (統計) ± 0.05 (系統) を得た。これらの結果は、それぞれ理論予言値から 1.2σ と 2.3σ ずれている。

2011 年度には、さらに統計をあげてトップクォーク対生成の前後方非対称性を測定した。8.7 fb⁻¹ のデータをレプトン+ジェット・チャンネルで解析して前後方非対称性を測定した結果、理論予言値 0.066 に対して、非対称度 0.162 ± 0.047 を得た。この結果は、理論予言値から 2.0σ ずれている。この前後方非対称性のトップ対不変質量 M への依存性を測定すると、 $M > 450 \text{ GeV}/c^2$ では非対称度 0.296 ± 0.067 を得た。これは理論予言値 0.100 から 2.9σ ずれている。

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 271 件)

- [1] A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, Y. Takeuchi, F. Ukegawa, *et al.*, The CDF Collaboration, “Measurements of the Angular Distributions in the Decays $B \rightarrow K^{(*)}\mu^+\mu^-$ at CDF”, Phys. Rev. Lett., 査読有, **108**, 081807 (2012). DOI:10.1103/PhysRevLett.108.081807
- [2] A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, Y. Takeuchi, F. Ukegawa, *et al.*, The CDF Collaboration, “Measurement of CP Violating Phase β_s in $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ Decays”, Phys. Rev. D, 査読有, **85**, 072002 (2012). DOI:10.1103/PhysRevD.85.072002
- [3] A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, Y. Takeuchi, F. Ukegawa, *et al.*, The CDF Collaboration, “Evidence for a Mass Dependent Forward-Backward Asymmetry in Top Quark Pair Production”, Phys. Rev. D, 査読有, **83**, 112003 (2011). DOI:10.1103/PhysRevD.83.112003
- [4] A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, Y. Takeuchi, F. Ukegawa, *et al.*, The CDF Collaboration, “Measurement of Polarization and Search for CP-Violation in $B_s^0 \rightarrow \phi\phi$ Decays”, Phys. Rev. Lett., 査読有, **107**, 261802 (2011). DOI:10.1103/PhysRevLett.107.261802
- [5] A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, Y. Takeuchi, F. Ukegawa, *et al.*, The CDF Collaboration, “Observation of Single Top Quark Production and Measurement of $|V_{tb}|$ with CDF”, Phys. Rev., 査読有, **D82**, 112005 (2010). DOI:10.1103/PhysRevD.82.112005
- [6] 受川史彦, 魚住 聖, 金 信弘, “ B_s^0 中間子の粒子・反粒子振動の観測”, 日本物理学会誌, 査読有, **62**, 249 (2007). <http://ci.nii.ac.jp/naid/110006242013>
- [7] A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, Y. Takeuchi, F. Ukegawa, *et al.*, The CDF Collaboration, “First Observation of Heavy Baryons Σ_b and Σ_b^* ”, Phys. Rev. Lett., 査読有, **99**, 202001 (2007). DOI:10.1103/PhysRevLett.99.202001
- [8] A. Abulencia, K. Hara, S.H. Kim, Y. Takeuchi, F. Ukegawa, *et al.*, The CDF Collaboration, “Observation of $B_s^0 - \bar{B}_s^0$ oscillations”, Phys. Rev. Lett., 査読有, **97**, 242003 (2006). DOI:10.1103/PhysRevLett.97.242003
- [9] A. Abulencia, K. Hara, S.H. Kim, Y. Takeuchi, F. Ukegawa, *et al.*, The CDF Collaboration, “Observation of $B_s^0 \rightarrow K^+K^-$ and measurements of branching fractions of charmless two-body decays of B^0 and B_s^0 mesons in

$p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96\text{-TeV}$, Phys. Rev. Lett., 査読有, **97**, 211802 (2006). DOI:10.1103/PhysRevLett.97.211802

〔学会発表〕（計 105 件）

- [1] 金 信弘, “CDF 実験の 30 年 (招待講演)”, 日本物理学会 第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 24 日-27 日, 関西学院大学.
- [2] Yuji Takeuchi, “Top Quark Properties”, XXV International Symposium on Lepton Photon Interactions at High Energies, August 22 – 27, 2011, Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai, India.
- [3] Yoshikazu Nagai, *et al.*, “Standard Model Low mass Higgs search at CDF”, 35th International Conference on High Energy Physics (ICHEP), July 22–28, 2010, Paris, France.
- [4] Hideki Miyake, *et al.*, “Results on B Physics at CDF”, CERN Joint EP/PP Seminars, April 27, 2010, Geneva, Switzerland.
- [5] Yuji Takeuchi, “Recent Results from Tevatron”, 16th YKIS Conference on Progress in Particle Physics 2008, February 16–19, 2009, Kyoto University, Kyoto, Japan.
- [6] Koji Nakamura, *et al.*, “Measurement of the Single Top Production Cross Section at CDF”, PHENO 2008 Symposium, April 28–30, 2008, University of Wisconsin-Madison, Wisconsin, USA.
- [7] Tatsuya Masubuchi, *et al.*, “Search for Higgs Boson Production in Association with a W Boson at CDF”, American Physical Society April Meeting, April 14 – 17, 2007, Jacksonville, Florida, USA..
- [8] F. Ukegawa, “ B_s oscillations”, KEK Physics Seminar, April 24, 2006, KEK, Tsukuba.

〔その他〕

ホームページ: <http://hep.px.tsukuba.ac.jp/cdfj/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金 信弘 (KIM SHIN-HONG)
筑波大学・数理物質系・教授
研究者番号: 50161609

(2) 研究分担者

受川 史彦 (UKEGAWA FUMIHIKO)
筑波大学・数理物質系・教授
研究者番号: 10312795

原 和彦 (HARA KAZUHIKO)
筑波大学・数理物質系・准教授
研究者番号: 20218613

武内 勇司 (TAKEUCHI YUJI)
筑波大学・数理物質系・講師
研究者番号: 00375403

丸山 和純 (MARUYAMA TAKA-SUMI)
筑波大学・数理物質系・講師
研究者番号: 80375401
(H18 – H20)