

領域略称名：フレーバー物理  
領域番号：466

平成24年度科学研究費補助金  
「特定領域研究」に係る研究成果等の報告書

「フレーバー物理の新展開」

(領域設定期間)  
平成18年度～平成23年度

平成24年6月

領域代表者 大阪大学・大学院理学研究科・教授・山中 卓



# 目次

1	研究領域の目的及び概要	1
2	研究領域の設定目的の達成度	1
3	研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況	3
4	主な研究成果	4
4.1	A01: $K_L \rightarrow \pi^0 l \bar{\nu}$ 崩壊から探るフレーバー混合と新しい物理	4
4.1.1	KEK PS-E391a 実験のデータ解析	4
4.1.2	J-PARC E14 KOTO 実験	5
4.2	A02: B ファクトリーにおける B とタウフレーバー物理の研究	6
4.2.1	B 中間子、タウ粒子による新物理の探索	6
4.2.2	粒子種識別用の検出器の開発	8
4.3	A03: 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	9
4.3.1	ボトム・フレーバーの物理	10
4.3.2	トップ・フレーバーの物理	11
4.4	A04: 大強度ニュートリノビームを使ったニュートリノフレーバー振動の研究	12
4.4.1	電子ニュートリノ出現探索の結果	13
4.4.2	ミューニュートリノ消失測定の結果	14
4.5	A05: タウニュートリノの直接検出によるニュートリノフレーバーの研究	14
4.6	A06: フレーバー混合における標準理論を超える物理の理論的研究	15
4.6.1	超対称理論	15
4.6.2	余剰次元理論, 強結合ダイナミクス, その他の新物理	16
4.6.3	初期宇宙論	17
4.7	X00: 総括班	18
5	研究成果の取りまとめの状況	18
6	研究成果の公表の状況	18
6.1	主な論文等一覧	18
6.2	ホームページ	21
6.3	公開発表	21
6.3.1	会議	21
6.3.2	招待講演	22
6.4	「国民との科学・技術対話」	24
7	研究組織と各研究項目の連携状況	25
7.1	研究組織	25
7.2	連携状況	28
8	研究費の使用状況	29
9	当該学問分野及び関連学問分野への貢献度	30

10 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況	31
11 総括班評価者による評価の状況	32

# 1 研究領域の目的及び概要

**研究領域名:** フレーバー物理の新展開

**研究期間:** 平成 18 年度 ~ 23 年度

**領域代表者:** 大阪大学・大学院理学研究科・教授・山中 卓

**補助金交付額:** (単位：千円)

年度	H18	H19	H20	H21	H22	H23	合計
交付額	255,800	405,900	348,100	240,400	135,300	98,400	1,483,900

20 世紀の素粒子物理学の最大の成果は、自然界の 3 つの基本相互作用である電磁力、強い力、弱い力をゲージ対称性に基づいて統一的に理解したことである。一方、万物の究極の構成粒子と考えられるクォークとレプトンに関する種類や質量などの理解は、未だ得られていない。

クォーク・レプトンの種類はフレーバーと呼ばれるが、同じ電荷を持つものが 3 種類ずつあり、これを世代という。弱い相互作用は他の相互作用と違って、異なる世代の間に働く場合があり、これをフレーバー混合と呼んでいる。例えばクォークの場合には、図 1 に示すように、クォークは弱い相互作用を媒介する  $W$  ボゾンと反応して異なる世代のクォークに変わることができる。その反応の起きやすさはクォーク間の混合の定数で決まる。また、中性のレプトンであるニュートリノは、弱い相互作用で決まるフレーバーを表す状態と、質量を定める状態が異なるため、時間が経つと別の種類のニュートリノに変わる。このニュートリノの変わり方も、ニュートリノの混合を決める  $3 \times 3$  の行列とニュートリノの質量の 2 乗の差から決まる。標準理論の基礎定数の大部分は、これらの、クォーク・レプトン質量、および混合の定数で占められている。このことは、ゲージ相互作用が 1 つのゲージ結合定数によりすべて規定されているのとは対照的に、湯川相互作用を支配する原理は知られていない、つまり、フレーバー構造の真の理解が未だに得られていないことを端的に示している。

これらのことを踏まえ、本特定領域研究は、クォークとレプトン両者のフレーバー混合の過程を世界最先端の加速器・測定技術を用いて精密測定するとともに、実験と理論の両面から総合的・有機的に研究することによって、標準理論を検証し、それを超える新たな物理を探索し、クォークとレプトンの統一的な描像を得る事を目指した。

本特定領域は、6 つの計画研究 (実験 5 + 理論 1) と公募研究とからなる。実験の計画研究 A1 は国内の K ファクトリー、A2 は B ファクトリー、A3 は米国のトップファクトリー、A4 は国内のニュートリノファクトリー、A5 はヨーロッパのニュートリノファクトリーを使って、「フレーバー物理の新展開」を推進した。理論研究 (A6) は実験データをもとに、どのような事象に注目すべきか、現在の測定値からどのような理論的考察ができるかなどについて、独創的研究を推進した。

## 2 研究領域の設定目的の達成度

クォークとレプトンの両面から標準理論のフレーバー混合を決めるパラメータを測定し、また標準理論を超える新しい物理を探るという目標に対し、本研究領域では、次の主な成

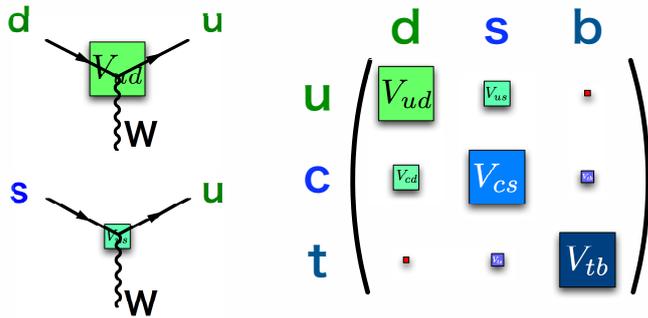


図 1: 左の図に示すように、弱い相互作用を媒介する  $W$  ボゾンと反応することにより、2世代目の  $s$  クォークが1世代目の  $u$  クォークにも変わることができる。それらの変わりやすさは、右の小林・益川行列で表される結合定数の大きさで決まる。

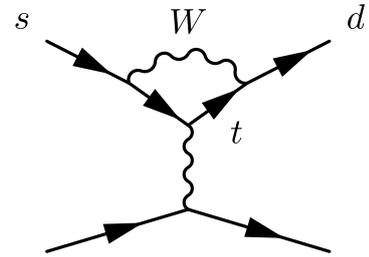


図 2: 標準理論では、 $s \rightarrow d$  のようにフレーバーの遷移で電荷の変わらない反応は、このような中間状態を介して起きる。

果を上げた。

- **クォークのフレーバー混合を表す小林・益川行列のパラメータの決定**

A03 は目標通りトップクォークの単一生成を初めて観測し、断面積測定により小林益川行列の  $V_{tb}$  成分を測定した。また、 $s$  と  $\bar{b}$  クォーク対からなる  $B_s$  中間子とその反粒子である  $\bar{B}_s$  との間をやり変わる振動現象も目標通り初めて観測し、小林益川混合行列の成分の比  $|V_{ts}/V_{td}|$  を高い精度で測定した。また、 $B_s$  の2つの質量固有状態の崩壊幅の差を測定した。

- **クォーク混合に入る標準理論を超える新しい物理の探索**

A02 は B ファクトリーを用いて  $B^-(b\bar{u})$  中間子が  $\tau^-\bar{\nu}$  に壊れる事象を初めて観測し、 $|V_{ub}|$  で決まるその崩壊分岐比を測定し、標準理論を超える新たな物理に制限を与えた。

$b \rightarrow s$  や  $s \rightarrow d$  などの遷移 (いずれもクォークの電荷は-1/3) は、標準理論では図2に示すような中間状態を含む過程を経て起きる。また、不確定性原理により、こうした中間状態に新しい物理の粒子が短時間介在すると、崩壊の分岐比が標準理論からずれる可能性がある。

A02 は B ファクトリーを用いて  $b \rightarrow s$  の遷移を  $B \rightarrow K_s \pi^0 \pi^0$  崩壊を用いて調べ、標準理論から約  $2\sigma$  ずれる結果を得た。A03 はトップファクトリーを用いて B 中間子を大量に生成し、 $b \rightarrow s$  遷移を  $B \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$ ,  $B_d^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ ,  $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 、初観測の  $B_s \rightarrow \phi \mu^+ \mu^-$  などの崩壊を用いて調べ、標準理論の予言と矛盾しない結果を得た。

A01 は  $s \rightarrow t \rightarrow d$  の遷移において  $CP$  対称性を破る新しい物理を探るため、J-PARC の K ファクトリーを用いた実験を建設した。

A06(理論研究) は、上の B ファクトリーにおける、フレーバーを変える中性カレントによる崩壊  $b \rightarrow s \gamma$  の上限、 $B \rightarrow \tau \nu$  の分岐比、レプトンの異常磁気モーメント

の測定値などのデータを用いて、これらと矛盾しない種々の超対称模型のパラメータ空間を決定し、理論に含まれる暗黒物質候補であるニュートラリーノの質量、原子核との散乱断面積について許される領域を求めた。

#### ● ニュートリノ (中性レプトン) のフレーバーの混合

A04はJ-PARCのニュートリノファクトリーを用いてミューオンニュートリノ ( $\nu_\mu$ ) をスーパーカミオカンデに飛ばす T2K 実験を行った。電子ニュートリノ ( $\nu_e$ ) 出現事象と一致する反応を6事象観測して99.3%の確率 ( $2.5\sigma$ ) で電子ニュートリノへの転換が起こっていることを発見し、世界で初めてニュートリノの混合を決めるパラメータ  $\theta_{13}$  を直接決定した。また、ミューオンニュートリノが消失する確率を測定し、混合角  $\sin^2 2\theta_{23}$  と質量2乗差  $|\Delta m_{32}^2|$  を高精度で決定した。

A05はヨーロッパのCERN研究所からイタリアにミューオンニュートリノを飛ばし、タウニュートリノ ( $\nu_\tau$ ) に転換して起きたと見られる反応を1事象発見した。

#### ● 荷電レプトンのフレーバー転換の探索

標準理論では、電荷を持つレプトン ( $e, \mu, \tau$ ) は別の種類の荷電レプトンに移り変わることはできない。A02はBファクトリーで $\tau$ レプトン対を大量に生成し、他の種類のレプトンに転換する46種類の崩壊を探索し、新しい物理に対して制限を与えた。

A06(理論)はこのBファクトリーを用いたレプトンフレーバー非保存過程  $\tau \rightarrow \mu\gamma$  などの探索結果と、上で述べたT2K実験等によるニュートリノ振動観測から決められた質量差、混合角のデータから、ニュートリノ質量生成機構を含めた超対称模型において、超対称粒子の質量の許容領域を導出した。さらに、これ以外にも超対称理論、余剰次元理論、宇宙論について幅広く多角的にクォークとレプトンのフレーバー物理に取り組んだ。

まとめると、どの実験グループも世界をリードする水準に立ち、従来知られていた知識を広範に拡げる結果を得た。クォーク混合に対しては、標準理論の小林・益川機構による記述が精密に検証され、予想以上に正確に成り立っていることが判明した。これを凌駕する新物理の存在を示唆する測定結果も得られてはいるが、その確立には今後のより精密な実験が必要である。レプトン混合では、基礎的な物理定数であるニュートリノ混合角のうち、従来測定されていなかった最後の角度を初めて測定し、クォーク混合の理解に追いつく大きな一歩を印した。他の角度の精密測定も行い、荷電レプトンのフレーバー非保存の探索も新たな段階に進めた。これらの結果を総合して理論的解析を行った。このように、多面的にフレーバー物理を推進し、分野の発展に大きく貢献した。

### 3 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況

2009年にイタリア中部地震があり、A05のOPERA実験の継続が危ぶまれたが、現地の人たちの協力を得て復旧し、2011年度までに実験提案書比で63%の量のニュートリノを照射した。

2011年3月に東日本大震災があり、東北大学では通常の活動が数ヶ月止まった。茨城県東海村のJ-PARC大強度陽子加速器施設も加速器、ビームライン、K中間子やニュートリノの測定器が一部損傷した。2011年度に全精力を傾けて復旧作業を行い、加速器は約10ヶ

月で復旧して2012年1月末からユーザーにビーム供給を始めた。K中間子実験(A01)は2月にテスト実験を行い、ニュートリノ実験(A04)も3月より震災前と同等の性能で実験を再開することに成功した。K中間子実験は実験開始が約1年遅れ、ニュートリノ実験も実験の到達感度の予定が約1年遅れたが、いずれも今後の実験の遂行に支障はない。

2009年に行われた中間評価で、「共同研究者を評価者にするのではなく、国内外から外部評価者を入れる必要がある」との指摘があったが、共同研究者を評価者にはしておらず、これは全くの誤解であることを田口真プログラムオフィサーに伝え、総括班の研究計画調書でもその点は説明した。

## 4 主な研究成果

### 4.1 A01: $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊から探るフレーバー混合と新しい物理

A01計画研究班の目的は、中性K中間子の  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊を用いて、CP対称性(粒子と反粒子の対称性)を破る、標準理論を超える新しい物理を探すことである。この崩壊は標準理論による“バックグラウンド”が小さく、かつよく理解されているため、新しい物理の粒子が  $s \rightarrow d$  クォークの遷移の中間状態に入ると、その効果が観測しやすいという特長を持つ。実験は、ガンマ線検出器で覆われた空間に大強度の中性K中間子のビームを入射し、 $\pi^0$ からのガンマ線2個のみがある事象を探す。

#### 4.1.1 KEK PS-E391a 実験のデータ解析

実験方法を確かめるために、KEKの12GeV陽子加速器を用いて以前に実験を行った。そのデータを解析して  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊の探索を行い、最終的にその分岐比に対し世界最高感度の  $BR(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) < 2.6 \times 10^{-8}$  (90%信頼区間)の上限値を与えた。

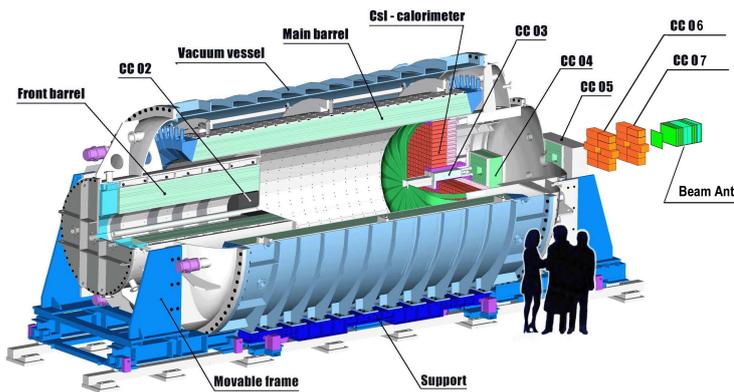


図 3: KEK E391a / J-PARC KOTO 実験装置



図 4: KOTO 実験の CsI 電磁カロリメータ

#### 4.1.2 J-PARC E14 KOTO 実験

標準理論の予測する分岐比に迫る感度で崩壊を探索するために、新しく建設された J-PARC 大強度陽子加速器を用いる実験を提案し、図 3 に示す測定器の建設を始めた。

- **ビームライン**

J-PARC で大強度の K 中間子ビームを作るためにコリメータを基本から見直して設計し、製作した。2009 年にはビームラインを建設して初めてビームを出し、専用の測定器で中性 K 中間子の生成量を測定した。その結果、K 中間子のレートが実験の提案書で仮定していた値より 2.3 倍高いことがわかった。

- **CsI 電磁カロリメータ**

崩壊でできるガンマ線を検出し、そのエネルギーと当たった位置を測定するために、CsI の結晶を 2716 本積み上げた直径 2m の電磁カロリメータを用いる。2008 年に結晶を米国 Fermilab から輸送し、2009-2010 年に性能試験を行い、2010 年 6 月から J-PARC で建設を始め、2011 年 2 月に図 4 に示すように全ての結晶を積み終えた。また、電磁カロリメータは真空中に置かれるため、発熱量が通常の 1/10 の、光電子増倍管用の高電圧電源を企業と開発し、その制御回路を独自に開発した。

2011 年 3 月に東日本大震災に遭い、結晶全体がそれを支える円筒から 1~6mm せり出したが、結晶そのものに被害はなかった。次に大きな地震が来た場合にさらに大きな被害が出ないように、動きを抑えるカバーやクッションを取り付けた。

2012 年 2 月には J-PARC の加速器が復旧してビームが出た。そこでカロリメータ上流に電磁石を置き、運動量を測定した  $K_L \rightarrow \pi^\pm e^\mp \nu$  崩壊からの電子と、本番実験でも用いる宇宙線と  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  崩壊 (図 5) を用いてカロリメータのエネルギー較正を行った。これらの較正結果を比較した結果、本番実験で用いる方法でも約 1.5% の精度で較正できることを確認した。

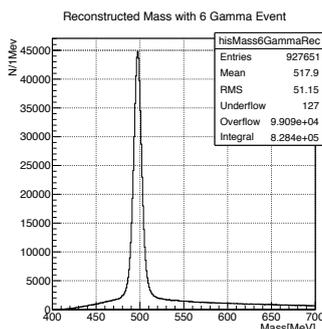


図 5: 2012 年 2 月のビームタイムに観測した  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  崩壊。

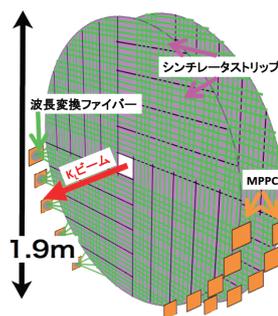


図 6: 電磁カロリメータのすぐ上流に置く荷電粒子検出器。

- **荷電粒子検出器**

電磁カロリメータのすぐ上流に置く、荷電粒子を検出するプラスチックシンチレータの検出器 (図 6) を開発した。バックグラウンドを抑えるためにシンチレータの厚さを 3mm まで薄くし、表面から約 0.5mm 以上通過すれば検出できるように、波長

変換ファイバーをシンチレータに埋め込み、ファイバーからの光を MPPC という半導体検出器で電気信号に変換するシステムを開発・製作した。

- **ガンマ線検出器**

$K_L$  の崩壊領域の上流部に置く、ガンマ線と中性子の検出器を新たに CsI 結晶を用いて作りなおす。このために、細分化した CsI 結晶からの光を波長変換ファイバーを用いて読み出す方法を開発した。

- **データ収集システム**

KOTO 実験では全ての検出器からの信号の波形をデジタルで記録し、デジタル化した情報を用いて、収集する事象を選択するトリガーを生成する。このシステムをシンガン大と共同開発して試験を行い、2012 年 2 月のビームタイムで正しく動くことを確認した。

- **今後の計画**

東日本大震災のために加速器が止まったことと地震などによる電磁カロリメータの検査と復旧作業のために、実験のスケジュールは約 1 年遅れた。2012 年 11 月までに全検出器を組み上げ、新しい物理を探索するためのデータ収集を始める。

## 4.2 A02: B ファクトリーにおける B とタウフレーバー物理の研究

### 4.2.1 B 中間子、タウ粒子による新物理の探索

本研究班の主要課題として第 3 世代の  $b$  と  $\tau$  フレーバの素粒子崩壊を通して、標準理論 (SM) を超えた深層の未知なる素粒子世界 (New Physics) を実験的に探索した。具体的には、わが国 B ファクトリー (KEKB/Belle) 国際共同実験において、世界最多の膨大なデータ量 (両粒子とも略 20 億個の崩壊事象) を収集して、前人未到の高い探索感度を実現し、New Physics 信号を探索した。未知の事象の検出には至らなかったが、New Physics の特性に関し重要ないくつかの知見を得る成果を挙げた。

### B 中間子崩壊の研究

(a)  $B \rightarrow \tau\nu, B \rightarrow D^*\tau\nu$  崩壊の分岐比測定

これらの B 中間子崩壊は tree diagram の仮想量子力学状態を経る。loop diagram に比べ分岐比 (Br) が高く、かつ CP 位相の物理に左右されない特徴をもち、New Physics 効果が分岐比という単純な形で現れる。

$$Br(B \rightarrow \tau\nu) = Br(B \rightarrow \tau\nu)_{SM} \times r_H, \quad r_H = \left(1 - \frac{m_B^2}{m_H^2} \tan^2 \beta\right)^2,$$

$m_H$  は荷電ヒッグス質量、 $\tan \beta$  は up/down の真空期待値の比であつて、 $r_H$  に New Physics の効果を集約する。

$B \rightarrow \tau\nu$  崩壊は 2006 年度に世界に先駆けて崩壊信号の発見に成功し、 $Br=(1.8 \pm 0.6) \times 10^{-4}$  と決定した。さらにタギング・モードをハドロン崩壊から準レプトン崩壊に移し、2010 年度には  $Br=(1.54 \pm 0.38/0.37 \pm 0.29/0.31) \times 10^{-4}$  を得る成果を挙げた。SM 理論値は  $Br=(0.78 \pm 0.09/0.13) \times 10^{-4}$  であり、New Physics 効果は  $r_H = 2.11 \pm 0.75$  である。

これらの結果は New Physics 粒子である荷電ヒッグスの質量領域に図 7 に示すような強い制限を与える重要なステップとなった。同様に、 $B \rightarrow D^* \tau \nu$  崩壊も全再構成手法を用いて分岐比  $\text{Br} = (2.02 \pm 0.40 / 0.37 \pm 0.37)\%$  を測定した。

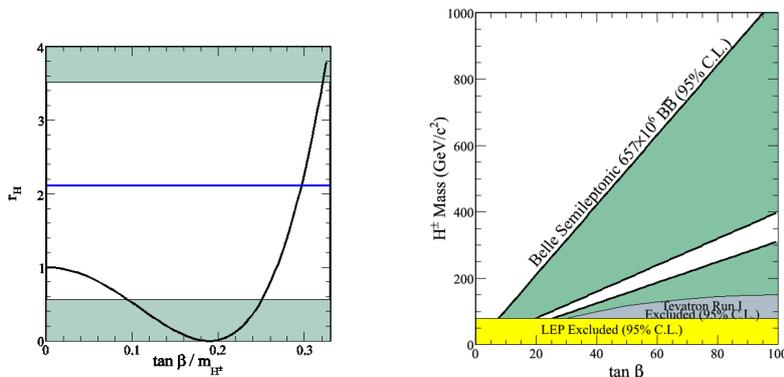


図 7:  $r_H, \tan \beta / m_H$  依存性 (左) と、実験で排除した  $m_H, \tan \beta$  空間 (右)。色塗りの部分が 95% の信頼度で排除された領域を示す。

(b)  $b \rightarrow s$  クォーク遷移での CP 非保存

B 中間子のハドロニック崩壊では loop diagram に New Physics が関与し、その効果が CP 位相を介して CP 非対称性に現れる。本研究では  $B \rightarrow K_S \pi^0 \pi^0$  崩壊の測定し、CP 非対称度の崩壊時間依存性から混合非対称度  $-A = C_{CP}$  と直接的非対称度  $-S = \sin 2\phi_1^{\text{eff}}$  を測定した。結果は  $\sin 2\phi_1^{\text{eff}} = -0.43 \pm 0.49 \pm 0.09$ ,  $C_{CP} = 0.17 \pm 0.24 \pm 0.06$  であり、SM 理論値から  $2\sigma$  程度離れ、しかも逆符号の非対称度を示す (図 8(左))。  $B \rightarrow \phi K_S, \eta' K_S, \pi K_S, \omega K_S, K K K_S, 3 K_S$  崩壊が SM 理論値と一致する傾向にあることと比べ (図 8(右))、未だ大きな統計誤差の不定性を孕んでいるが、この結果は New Physics への期待を抱かせる。

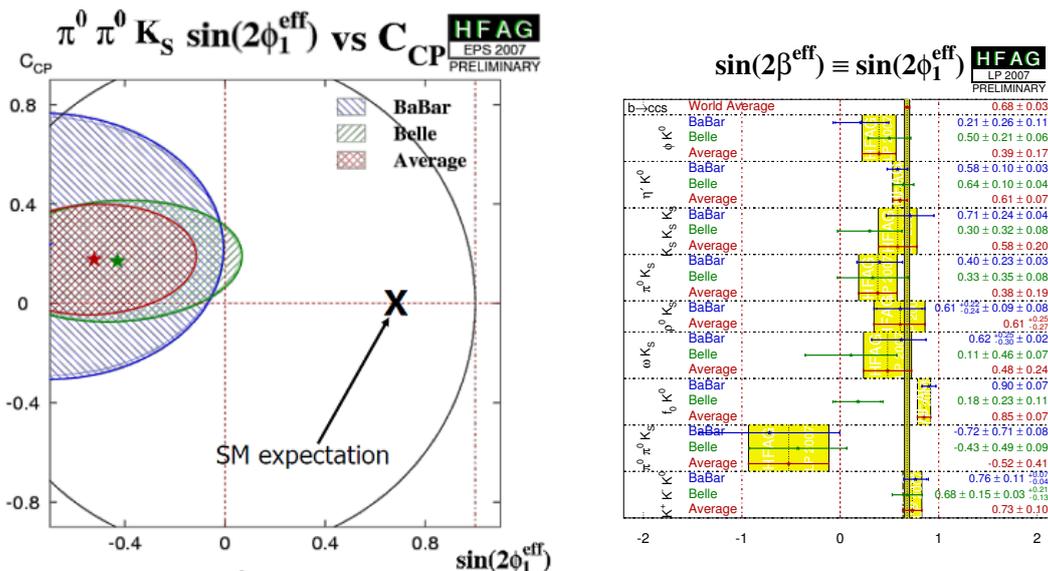


図 8:  $B \rightarrow K_S \pi^0 \pi^0$  測定結果 (左) と、 $b \rightarrow sq\bar{q}$  での測定結果のまとめ (右)。左で、楕円は、1 シグマの測定誤差領域を示す。バツ印は標準理論の予想を示す。

## タウ粒子崩壊の研究

タウ・レプトンの崩壊での New Physics 探索は、ニュートリノが伴わない exclusive な崩壊様式を探索対象とし、それは必然的にレプトン・フレーバ保存則を破る (Lepton Flavor Violation, LFV)。

世界最大のデータ量に依拠するとともに、信号事象の検出感度のさらなる向上を図るため年度毎に事象選別基準の開発、更新を継続した。その結果、46 の異なる LFV 崩壊様式を、世界最高感度で、総体的に探索するのに成功した。(図 9) 本研究当初からは 1 桁の感度的大幅更新であり、レプトン・フレーバ保存則が  $O(10^{-8})$  の大変高い精度で成り立っている。New Physics はこの分岐比感度で検出できる領域に存在しないことを確認したわけであって、提唱されている各種の New Physics モデルの妥当性に拘束を課す貴重な知見を提供する。

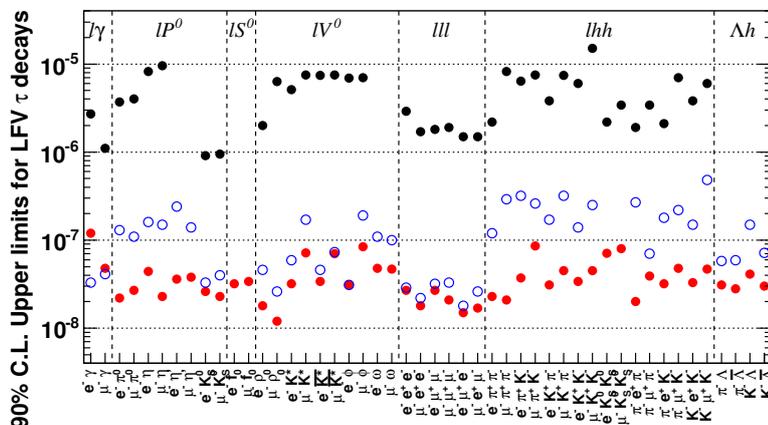


図 9: 本研究が到達した New Physics 探索感度を赤丸で示す。白丸は米国 B ファクトリーの結果、黒丸は以前の CLEO 実験の結果を示す。

### 4.2.2 粒子種識別用の検出器の開発

New Physics の実験的探索には粒子検出器の性能改善も必要不可欠である。本計画研究では Belle-II 実験のチェレンコフ・リングイメージ測定を原理とする  $K/\pi$  粒子識別装置の開発研究に取り組んだ。

**Time-Of-Propagation (TOP) 検出器:** 石英輻射体を通過する荷電粒子のよって放射されたチェレンコフ光を輻射体内で全反射させ、輻射体片端までの伝搬時間 (TOP) と位置の二次元情報を測定して、粒子種によるチェレンコフ放射角の違いを識別する。実機サイズ ( $45\text{cm}^W \times 100\text{cm}^L \times 2\text{cm}^t$ ) の石英輻射体と石英焦点鏡の作成 (図 10(左)) を行い、プロトタイプ器を作成し、ビームテストを実施するに至った。チェレンコフ光量や時間分解能などの基本特性を測定し、モンテカルロ・シミュレーションと比較検討を行い (図 10(右))、焦点鏡による識別能力の改善効果も確認し、次段の実機作成と Belle-II 測定器への組み込み構造の検討へ前進した。

TOP 検出器の光検出器であるマイクロチャンネルプレート・高電子増倍管 (MCP-PMT) は長期にわたる企業との共同開発により、ほぼ満足すべき性能の製品生産に成功したこと

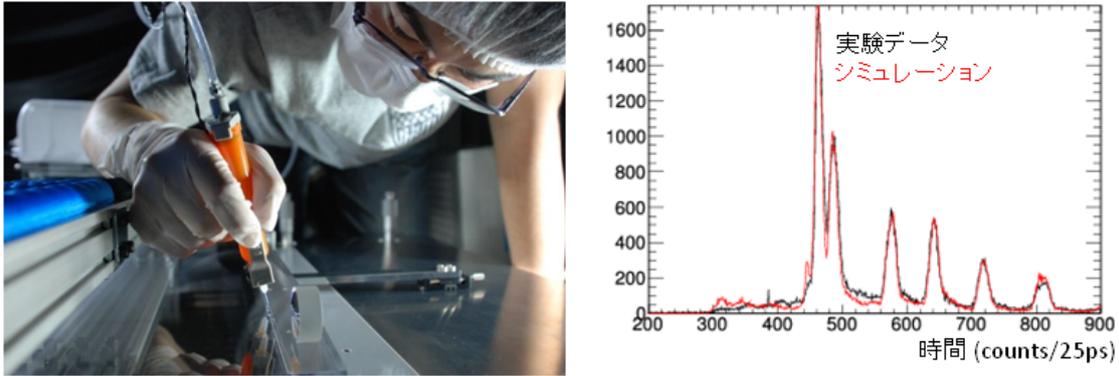


図 10: 石英輻射体と焦点鏡の接着の様子 (左)、及び 18ch の測定時間分布 (右)。黒が実測データ、赤がシミュレーション結果を示す。

は特筆に値する。特に、光電面の劣化による寿命短縮も PMT の内部構造を改造し、ほぼ 10 年の実験環境下 ( $1-2\text{C}/\text{cm}^2$ ) で使用できるものを実現した。

**エアロジェル RICH 検出器:** 光検出器 HAPD の実用化に向けた開発を進めた。特に、中性子と  $\gamma$  線耐性に焦点を当て、前者については照射量  $5 \times 10^{11} \text{ n}/\text{cm}^2$  の耐性を確認し、後者については APD 半導体部分の P 層を薄くすることによって損傷が減少しシグナル・ノイズ比が 7 倍向上することを確認した。

#### 4.3 A03: 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

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  $10.0\text{fb}^{-1}$  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  $8.5\text{fb}^{-1}$  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 PC 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成分の比  $|V_{ts}/V_{td}|$  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して、下記に示すような成果を挙げた。

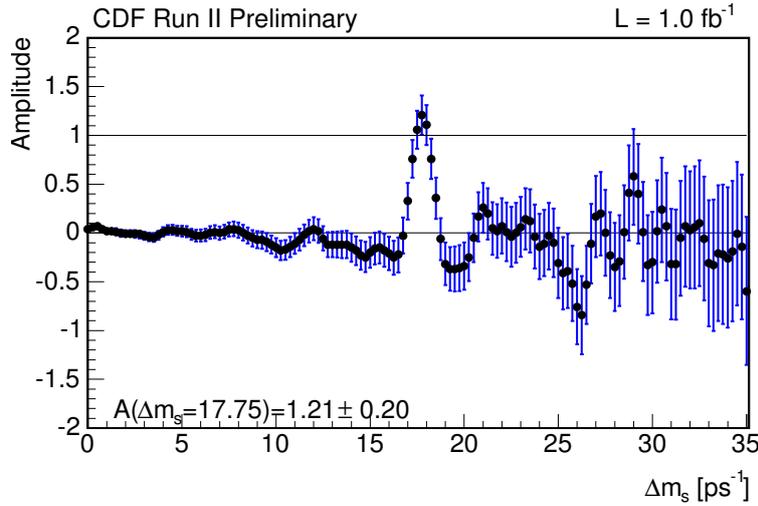


図 11:  $B_s$  中間子の粒子反粒子振動の振幅を角振動数に対して求めた曲線。振幅は振動があるときには 1 になり、振動がないときには 0 になるように規格化されている。この振幅が有意に 1 になる角振動数として  $\Delta m_s = 17.77 \pm 0.10$  (統計)  $\pm 0.07$ (系統)  $\text{ps}^{-1}$  が得られた。

#### 4.3.1 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  $1\text{fb}^{-1}$  のデータを解析して  $B_s \rightarrow \pi D_s (\rightarrow \phi\pi, K^*K \text{ or } \pi\pi\pi)$  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 11 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  $\Delta m_s$  の測定結果は  $\Delta m_s = 17.77 \pm 0.10$  (統計)  $\pm 0.07$ (系統)  $\text{ps}^{-1}$ 、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  $8 \times 10^{-8}$  である、言い換えると  $5.4\sigma$  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  $|V_{ts}/V_{td}| = 0.2060 \pm 0.0007(\text{exp}) + 0.0081/-0.0060$  (theory) 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。

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。ボトムクォークを含む基本的なバリオン  $\Sigma_b$  と  $\Xi_b$  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、 $9.6\text{fb}^{-1}$  のデータを用いた  $B_s \rightarrow J/\psi \phi$  の崩壊寿命測定によって、 $B_s$  中間子の 2 つの質量固有状態の崩壊幅の差  $\Delta\Gamma_s = 0.076 + 0.059 / -0.063(\text{stat.}) \pm 0.006(\text{syst.}) \text{ps}^{-1}$  と決定した。CP の破れの phase  $\beta_s$  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。 $\beta_s$  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。 $\beta_s$  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  $\Delta A_{CP}$  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  $2.7\sigma$  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。

#### 4.3.2 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  $3.2 \text{fb}^{-1}$  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 ( $5\sigma$ ) 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  $2.29 + 0.60 / -0.54 \text{pb}$  と合せると  $|V_{tb}| = 0.88 \pm 0.07$  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。 $5.3 \text{fb}^{-1}$  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  $0.06 \pm 0.01$  に対して、非対称度  $0.158 \pm 0.072$ (統計)  $\pm 0.017$ (系統) を得て、2レプトン・チャンネルでは非対称度  $0.42 \pm 0.15$ (統計)  $\pm 0.05$ (系統) を得た。これらの結果は、それぞれ理論予言値から  $1.2\sigma$  と  $2.3\sigma$  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。  $8.7 \text{ fb}^{-1}$  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  $0.162 \pm 0.047$  を得た。この結果は、理論予言値から  $2.0\sigma$  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  $0.296 \pm 0.067$  を得た。これは理論予言値  $0.100$  から  $2.9\sigma$  ずれている。

#### 4.4 A04: 大強度ニュートリノビームを使ったニュートリノフレーバー振動の研究

本研究の主目的は J-PARC での大強度加速器ニュートリノビームを使って、

1. 未発見のミューニュートリノからの電子ニュートリノへの転換(電子ニュートリノ出現)現象を探索することによって、未知である第三の混合角を探索測定
2. ミューニュートリノが他のニュートリノへ変化(振動)することにより減少するミューニュートリノ消失現象を精密に測定し、ミューとタウニュートリノの間の混合を精密測定

を T2K 実験で遂行することにある。また、T2K 実験からの物理結果がタイムリーに出るように、事前に米国フェルミ研で行われた SciBooNE 実験のデータを解析し、ニュートリノ反応断面積の不定性を押さえることも重要な副題であった。

研究期間における本研究の重要な成果は

1. 5年間の建設の後、計画通り 2008 年度中に J-PARC におけるニュートリノ生成施設、前置ニュートリノ測定器の建設を完了。
2. ビームを用いた装置の入念な調整の後、2010 年 1 月から本格的にニュートリノビームデータ収集を開始、2011 年 3 月 11 日震災で中断されるまで  $1.43 \times 10^{20}$  個の陽子を用いてニュートリノを生成しデータを収集。
3. 2011 年 6 月、震災までの全てのデータを用いて電子ニュートリノ出現を発見し、未知であった第三の混合角  $\theta_{13}$  を測定に世界で初めて成功。
4. 2011 年夏、同様にミューニュートリノ消失を測定し、世界最高レベルでニュートリノ振動パラメータの決定。
5. 震災復旧作業の後、2012 年 3 月には測定を再開。
6. SciBooNE 実験では、T2K 実験の結果に使える、ニュートリノ反応断面積の精密測定の成功。

である。本研究では、研究目的である T2K 実験における電子ニュートリノ出現探索、ミューニュートリノ消失測定双方において、最初の物理成果を上げることができた。特に電子ニュートリノ出現においては、世界で初めて変化した先のニュートリノの種類 (電子ニュートリノ) を同定することにより、高い確率で振動が起こっていることを世界に先駆けて示す、という大きな成果を得た。以下にそれぞれの成果について述べる。

#### 4.4.1 電子ニュートリノ出現探索の結果

2010 年 1 月から 2011 年 3 月 11 日までの全てのデータを解析、スーパーカミオカンデで検出された反応の内、電子ニュートリノによる反応の特徴と一致する反応が 6 事象捉えられた。検出された反応のニュートリノエネルギーは、電子ニュートリノ出現で期待されるエネルギー領域に一致することが分かった。バックグラウンドの予想反応数は  $1.5 \pm 0.3$  事象と見積もられた。電子ニュートリノ出現は実際には起こっていないにもかかわらず確率的な揺らぎにより、バックグラウンドが 6 事象現れる確率は 0.7% と見積もられた。言い換えれば 99.3% の確率で電子ニュートリノへの転換が起こっていることになる。電子ニュートリノ出現の確率は、未知の量である第三の混合角  $\theta_{13}$  と物質反物質の非対称性を表わす位相  $\delta_{CP}$  を使って計算できる。検出された電子ニュートリノ事象の数から、 $\theta_{13}$  と  $\delta_{CP}$  に与える制限を図 12 に示す。この結果は、世界で初めて  $\theta_{13}$  が 0 ではないことを強く示唆している。また実験結果を最もよく再現する  $\theta_{13}$  の最適値は、 $\delta_{CP} = 0$  を仮定すると、 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.11$  と得られた。この値は、過去の実験で得られていた上限値付近であり、ニュートリノ研究者

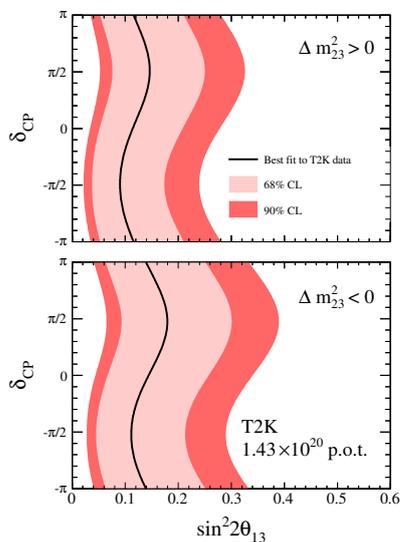


図 12: T2K 実験で測定された電子ニュートリノ出現事象数から制限される、ニュートリノ混合角  $\sin^2 2\theta_{13}$  と CP 位相  $\delta_{CP}$  の許容範囲。

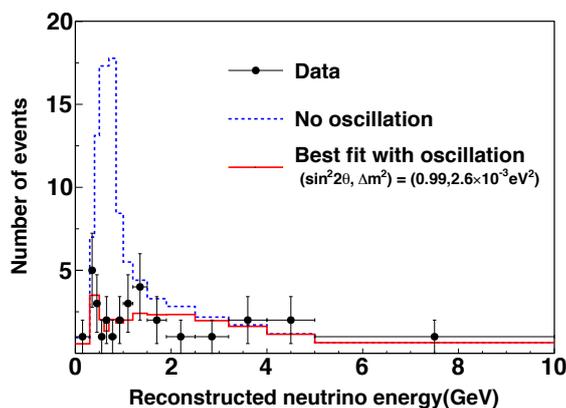


図 13: T2K 実験で観測されたスーパーカミオカンデにおけるミューオンニュートリノ事象に対するエネルギー分布。

この結果は、Physical Review Letters 紙に掲載され (6.1 章 論文 17)、2012 年 5 月現在

300 件以上引用されており、また英国物理学会 (IoP) により、2011 年の全ての物理分野のなかで Top 10 のブレークスルーの一つに選ばれた。

#### 4.4.2 ミューニュートリノ消失測定の結果

この測定においては、スーパーカミオカンデで検出された反応のうち、ミュー粒子が検出された反応を選ぶことでミューニュートリノ反応を抽出した。さらにミュー粒子以外の粒子が検出されていないことを課すことにより、精度よくニュートリノエネルギー算出が可能な反応を選別した。その結果、31 事象のミューオンニュートリノ反応が捉えられた。一方、ニュートリノ振動が起こっていない仮定したとき期待される測定値を見積もったところ、反応数は  $104 \pm 14$  事象で有意な減少とエネルギー分布の変形が認められた。スーパーカミオカンデにおけるミューオンニュートリノ事象に対するエネルギー分布を図 13 に示す。ニュートリノ振動により、ピークエネルギー (600 ~ 700 MeV) のところでミューオンニュートリノが大きく消失していることが分かる。さらにニュートリノ振動の存在を仮定した場合、測定結果を最もよく再現するようになり、ニュートリノ振動はデータをよく説明することが分かった。このデータを最もよく再現する振動のパラメータの許容値は、これまでの他の実験における測定とよく一致している。(6.1 章 論文 16) T2K 実験でのデータ量は、まだプロポーザルの 2 % であり、2012 年のデータで、世界最高感度を達成する予定である。

以上のように、T2K 実験からの初期成果を研究計画の予定とおりに達成し、ニュートリノ研究を飛躍的に進展させた。

#### 4.5 A05: タウニュートリノの直接検出によるニュートリノフレーバーの研究

OPERA は領域研究の期間中に、実験で使用する原子核乾板 930 万枚の生産、岐阜県土岐市にある日本原子力開発研究機構・東濃鉱山におけるフィルムのリフレッシュ処理、欧州への輸送、グランサッソ地下研究所における鉛板とサンドイッチさせた ECC 標的の製造、OPERA 検出器への組み込みを完了させ、2008 年より本格的なニュートリノ照射を開始した。この報告書を書いている 2012 年 5 月現在、2012 年度のニュートリノ照射を行っているところであり、その解析は 2014 年度まで継続の予定である。

ニュートリノ振動の解析に当たっては、総反応数の半数を欧州で残りの半数を日本で解析しており、日本では、超高速の原子核乾板自動飛跡読取装置 5 台を立ち上げ解析を推進している。これら装置を駆使するために、2 シフトの体制を組み、週 6 日の運用を年間を通じて行っている。

これまでに 2008 年度 2009 年度の解析を完了し、タウニュートリノ反応の最初の一例の検出に成功した。現在 2010 年度 2011 年度の解析を行っており、詳しい解析を必要とする反応を数例検出している。またタウニュートリノ反応のバックグラウンドとなるチャーム粒子をほぼ期待数検出するとともに、平行して 2 から 10 GeV の  $\pi$  ビームを用いてハドロンの二次反応由来のバックグラウンドの精査を行い、タウ反応のバックグラウンドの理解に努めてきた。

タウニュートリノへの振動以外では、ニュートリノ反応点から発生する粒子を精査できる高位置分解能を生かして、電子ニュートリノ反応の同定を進めており、電子ニュートリ

ノ反応を効率的に選び出す手法の開発をおこない、これまでに約 20 例の電子ニュートリノ反応を検出した。現在これら電子ニュートリノ反応のエネルギー推定のためのスタディを継続しており、OPERA のビームに含まれる Prompt 電子ニュートリノを、エネルギーを用いて分離し、ニュートリノ振動による成分を抽出する作業を行っている。

またニュートリノの直進性を利用して、飛行時間法によるニュートリノの速度の計測を行った。フランスグループと CERN が中心になって、これまで各国の標準時局間の時間あわせのために開発されてきた GPS を用いた時計合わせ、距離の精密計測の手法を活用し、これまでで最高精度 (10 ナノ秒) の測定を行った。光速より速いとの結果を得たが、その後の装置の精査で、地上の GPS 時計と地下の OPERA 局所時計をつなぐ光ファイバーケーブルのコネクターが正規の位置で固定されておらず、その結果地下へ時報が遅れて伝わっていることなどがわかり、これらの部分を改良、時間分解能を上げるための改良も行って 2012 年度の Run を行っているところである。

共同研究の運営に関しては、副スポークスマン、副スキャンニングコーディネーター、副フィジックスコーディネーターの要職を日本グループで担当している。毎年 2 月から 3 月に、年 4 回開催される OPERA の共同研究者会議の内の 1 回を名古屋で開催しており、毎年欧州から 40 名を越える共同研究者を迎えて、共同研究の推進に貢献している。OPERA 以外では、2008 年度に 3rd International Workshop on Nuclear Emulsion Techniques (国際エマルジョンワークショップ)<sup>1</sup> を開催し、原子核素粒子物理、放射線計測、写真工学など幅広い分野を横断し、原子核乾板 (Nuclear Emulsion) の最新技術とその展望について議論した (参加者は国内より約 40 名、国外より約 40 名)。その発表の中から日本写真学会誌で 2 号にわたり特集記事を組みその成果の広報活動を行った。また 2012 年度に同様のワークショップを主催する事になっている。

#### 4.6 A06: フレーバー混合における標準理論を超える物理の理論的研究

超対称理論, 余剰次元理論, 関連する初期宇宙論に関して多くの新しい知見を得た。以下主要な成果を述べる。

##### 4.6.1 超対称理論

1. 超対称理論において、トップクォークのフレーバーを変える中性カレントによって引き起こされるさまざまな崩壊過程および LHC コライダーにおける生成過程の計算を系統的に行った。全部で 11 のチャンネルを評価し、それに対し現存の種々の実験からくる超対称理論のパラメータに対する制限を適用した。このうちチャームクォークとグルオンからトップクォークが生成される過程, およびトップクォークがチャームクォークとヒッグスボソンに崩壊する過程が LHC における実験で観測できる可能性があることを示した。
2. ボトムクォークがストレンジクォークとニュートリノ対に崩壊する過程を超対称標準理論において、真空期待値の比である  $\tan\beta$  が大きい場合について調べた。標準理論の予想と比較して、既知のチャージノのループによる寄与以外に、グレイノお

<sup>1</sup><http://flab.phys.nagoya-u.ac.jp/workshop/2008/>

よび荷電ヒッグスボソンのループの寄与が大きくなる可能性があることが示された。しかし、ボトムクォークがストレンジクォークと光子に崩壊する過程の実験値によって、可能な寄与の大きさが制限されることを見出した。また、 $B_s$  メソンの  $\mu$  粒子対への崩壊分岐比からくる制限を吟味した。

3. 超対称 SU(5) 大統一理論におけるフレーバーの破れに関して、スフェルミオン質量の混合に対する制限を調べた。スフェルミオン質量全体が小さい場合は、 $\mu \rightarrow e\gamma$  崩壊が右巻きダウンスクォーク混合について強い制限を与えるが、大きい場合には B メソン混合やハドロンの電気双極子が重要であることを見出した。  
また、テバトロンにおける  $B_s$  混合の測定結果を用いると、レプトンフレーバーを破る  $\mu$  や  $\tau$  の崩壊が測定可能な範囲内で起こりうることが分かった。
4. 超対称理論において誘起されるレプトンフレーバー非保存崩壊率を評価し、B ファクトリーにおける  $\tau$  レプトン崩壊の実験探索上限値を用いて理論のパラメータ空間に対する制限を導いた。
5. レプトンフレーバーを破る  $\mu \rightarrow e$  過程の実験結果からモデルの判別がどこまで可能であるかを調べた。ハドロン行列要素の不定性が問題となるが、格子ゲージ理論の結果を用いることにより、誤差を小さくすることが可能であることを明らかにした。
6. 階層性問題の解としての超対称性が存在し、かつメッセンジャーのスケールが低くヒッグス質量への補正が比較的小さいとすれば、軽い超対称粒子としてスカラートップクォーク、ヒッグスおよびグラビティーノが想定される。この場合 LHC コライダー実験においてどのような兆候が見えるか、そのカバーする領域、質量測定法を調べた。
7. 弱 SU(2)<sub>L</sub> 多重項の重い粒子はほとんど質量が縮退しているが、高次補正により有限の質量差が生じる。重いフェルミオンに対する 2 ループの補正を実際に評価し、MeV 程度の差が現れることを見出した。

#### 4.6.2 余剰次元理論、強結合ダイナミクス、その他の新物理

1. 余剰次元理論のエッセンスを抽出した 3 サイトのヒッグスレス模型において、電弱精密測定 of 物理量である  $S, T$  パラメータに対する 1 ループのカイラル対数補正の計算を行った。このモデルに特有の  $\rho$  中間子的なベクトル粒子を含めた寄与を標準理論的な部分と高エネルギーの部分に分割できることが示され、ダイナミカルな電弱対称性の破れの機構に対する一つの理解が得られた。

また、これらのパラメータに関する 1 ループのくりこみ群方程式をリストアップし、実験結果と矛盾しないためにこの模型に含まれるカルザ・クライン・フェルミオンとゲージボソンの質量がみたすべき条件を導出した。

さらに、この模型において、崩壊  $Z \rightarrow b\bar{b}$  の幅に対する、フレーバーに依存するカイラル対数補正を計算した。実験からの制限は比較的ゆるく、模型中の重いディラックフェルミオンの質量が 1 TeV 以上であれば矛盾がないことを示した。

2. 無ヒッグスモデルにおける南部ゴールドストーンボソンの弾性散乱を調べ、総和則や部分波に対するユニタリ性上限を導いた。
3.  $T$  パリティ不変なリトレスト・ヒッグス模型に存在するトップクォークのパートナーを LHC において検出するための方法を検討した。検出したい事象を既知の粒子からのバックグラウンドから区別する方法があり、パートナーの質量などの物理量もよい精度で決定できることが分かった。
4. 超対称 QCD の強結合ダイナミクスにより電弱対称性の破れが起こる可能性を調べた。大きなトップクォークの質量もダイナミカルに生成し、複合状態としてヒッグス場が現れるのと同時にフレーバーを変える中性カレントの効果を抑制することができる。双対性を用いた解析により、強い相互作用のダイナミクスを摂動論の適用可能な理論にマップできるが、フレーバー数が多い場合にはカイラル対称性を破る真空が安定に存在できることがわかった。
5. トップクォークの対生成の測定において、標準理論の予測をはるかに超える値の前後方非対称性が、Tevatron の実験において観測されている。この原因として、新しい荷電ゲージボソン  $W'$  や、ダイクォークの存在を仮定する模型が提案されている。これらの模型において、LHC でのトップクォーク生成におけるトップの偏極や荷電非対称性を予測した。初期 LHC 実験の結果はすでに  $W'$  の模型に厳しい制限を与えることが見いだされた。
6. ミューオンの異常磁気モーメントの理論計算におけるハドロン真空偏極の効果を、最新の電子陽電子衝突の実験データを用いてアップデートした。その結果と実験による測定値とのずれは標準偏差の 3.3 倍という大きな値となっており、比較的軽い超対称粒子などの存在を示唆している。また、同じデータを用いて  $Z$  ボソンのスケールにおける微細構造定数の値を求めた。

#### 4.6.3 初期宇宙論

1. スカラーニュートリノが 2 番目に軽い超対称粒子で、グラヴィティーノと通常粒子に崩壊する場合を考えると、宇宙初期におけるスカラーニュートリノの崩壊が、原初元素合成に影響しないためには、スカラーニュートリノの原初量に対して制限が与えられる。グラヴィティーノの質量が 1 から 100 GeV の範囲にある場合、4 体崩壊が最も重要であることが見出された。
2. 宇宙暗黒物質の候補としての右巻きスカラーニュートリノは、超対称パートナーであるニュートリノがディラック質量を持っている時に生じうる。宇宙初期において必要な量の右巻きスカラーニュートリノを生成する条件、および原初元素合成による制限について考察を行った。
3. 宇宙初期においてニュートリノに崩壊する長寿命の粒子が存在したとして、その粒子存在量に対する原初元素合成、宇宙背景輻射などによる制限を導いた。これは粒子の寿命およびそのハドロン終状態、電磁的終状態への崩壊分岐比によって大きく変化する。

4. 超対称性を持つ標準模型に属するモデルである MSSM やそれを拡張した NMSSM について、ニュートラリーノ暗黒物質の宇宙物質密度を調べた。CDMS-II や XENON100 などの最近の直接探索の結果および種々の現象論的な条件をみたまパラメータ領域のスキャンを行った。モデルにより許される領域が大きく異なり、それぞれに特徴的な粒子のスペクトルが出現することを見いだした。

特に NMSSM においては、直接探索の一部の実験で示唆されているような軽い暗黒物質は許されることがわかったが、同時にヒッグス粒子が暗黒物質に崩壊する分岐比が非常に大きくなることを見いだされ、この模型の可否は LHC 実験の結果に大きく左右されることがわかった。

以上のように、幅広く多角的にクォークとレプトンのフレーバー物理に取り組み、分野の発展に貢献した。

#### 4.7 X00: 総括班

総括班は、研究計画間の連携を深め、フレーバー物理の分野を発展させ、幅広く成果や知識を還元させるために 6.3.1 章に示す 7 つの会議を共催し、7.2 章に示す特定領域の研究会を毎年開催した。

## 5 研究成果の取りまとめの状況

領域の研究成果を取りまとめた「研究成果報告書」(476 ページ)を 2012 年 5 月末に文科省に提出した。

## 6 研究成果の公表の状況

### 6.1 主な論文等一覧

研究領域全体の発表論文総数：401

1. “Measurement of  $K_L^0$  flux at the J-PARC Neutral-Kaon Beam Line”, K. Shiomi, T.K. Komatsubara, H. Nanjo, \*T. Nomura, Y. Tajima, T. Yamanaka *et al.*, Nucl Inst. Meth. A **664**, 264-271 (2012). (引用数 0)  
<http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.nima.2011.11.010>
2. “Experimental Study of the Decay  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ ”, J.K. Ahn, T.K. Komatsubara, H. Nanjo, S. Suzuki, Y. Tajima, T. Yamanaka, \*H. Morii *et al.*, Phys. Rev. D **81**, 072004 1-23 (2010). (引用数 6)  
<http://dx.doi.org/doi:10.1103/PhysRevD.81.072004>
3. “Study of the  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \nu \bar{\nu}$  decay”, R. Ogata, \*S. Suzuki, T.K. Komatsubara, T. Matsumura, H. Nanjo, Y. Tajima, T. Yamanaka *et al.*, Phys. Rev. D **84**, 052009 1-7 (2011). (引用数 0)  
<http://dx.doi.org/doi:10.1103/PhysRevD.84.052009>

4. “Evidence for  $B^- \rightarrow \tau^- \bar{\nu}_\tau$  with a semileptonic tagging method”, \*K. Hara, T. Iijima, K. Inami, T. Ohshima, *et al.*, Phys. Rev. D **82**, 071101(R) 1–7 (2010). (引用数 8)  
<http://dx.doi.org/doi:10.1103/PhysRevD.82.071101>
5. “Search for lepton-flavor-violating  $\tau$  decays into three leptons with 719 million produced  $\tau^+\tau^-$  pairs”, \*K. Hayasaka, K. Inami, T. Iijima, T. Ohshima *et al.*, Phys. Lett.B **687**, 139-143 (2010). (引用数 17)  
<http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.physletb.2010.03.037>
6. “New search for  $\tau \rightarrow \mu\gamma$  and  $\tau \rightarrow e\gamma$  decays at Belle”, \*K. Hayasaka, T. Iijima, K. Inami, T. Ohshima *et al.*, Phys. Lett.B **666**, 16-22 (2008). (引用数 44)  
<http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.physletb.2008.06.056>
7. “Lifetime-extended MCP-PMT”, T. Jinno, T. Mori, T. Ohshima, Y. Arita, \*K. Inami *et al.*, Nucl. Inst. Meth. A **629**, 111-117 (2011). (引用数 4)  
<http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.nima.2010.10.145>
8. “Measurements of the Angular Distributions in the Decays  $B \rightarrow K^{(*)}\mu^+\mu^-$  at CDF”, T. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, \*H. Miyake, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 081807 1-8 (2012). (引用数 0)  
<http://dx.doi.org/doi:10.1103/PhysRevLett.108.081807>
9. “Measurement of the  $CP$ -violating phase  $\beta_s^{J/\psi\phi}$  in  $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$  decays with the CDF II detector”, T. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, \*G. Punzi, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. D **85**, 072002 1-32 (2012). (引用数 0)  
<http://dx.doi.org/doi:10.1103/PhysRevD.85.072002>
10. “Measurement of Polarization and Search for  $CP$  Violation in  $B_s^0 \rightarrow \phi\phi$  Decays”, T. Aaltonen, \*M. Dorigo, K. Hara, S.H. Kim, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **107**, 261802 1–8 (2011). (引用数 0)  
<http://dx.doi.org/doi:10.1103/PhysRevLett.107.261802>
11. “Evidence for a mass dependent forward-backward asymmetry in top quark pair production”, T. Aaltonen, \*D. Amidei, K. Hara, S.H. Kim, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. D **83**, 112003 1-23 (2011). (引用数 63)  
<http://dx.doi.org/doi:10.1103/PhysRevD.83.112003>
12. “Observation of single top quark production and measurement of  $|V_{tb}|$  with CDF”, T. Aaltonen, K. Hara, \*T. Junk, S.H. Kim, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. D **82**, 112005 1-59 (2010). (引用数 21)  
<http://dx.doi.org/doi:10.1103/PhysRevD.82.112005>
13. “Observation of Heavy Baryons  $\Sigma_b$  and  $\Sigma_b^*$ ”, T. Aaltonen, \*C. Calancha, K. Hara, S.H. Kim, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **99**, 202001 1-7 (2007). (引用数 44)  
<http://dx.doi.org/doi:10.1103/PhysRevLett.99.202001>

14. “Observation of  $B_s^0 - \bar{B}_s^0$  Oscillations”, A. Abulencia, K. Hara, S.H. Kim, \*J. Kroll, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **97**, 242003 1-8 (2006). (引用数 151)  
<http://dx.doi.org/doi:10.1103/PhysRevLett.97.242003>
15. “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  $\bar{p}p$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV”, A. Abulencia, \*S. Donati, K. Hara, S.H. Kim, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **97**, 211802 1-7 (2006). (引用数 27)  
<http://dx.doi.org/doi:10.1103/PhysRevLett.97.211802>
16. “First muon-neutrino disappearance study with an off-axis beam”, K. Abe, T. Kobayashi, T. Nakaya, K. Nishikawa, \*M. Zito *et al.*, Phys. Rev. D **85**, 031103(R) 1-8 (2012). (引用数 0)  
<http://dx.doi.org/doi:10.1103/PhysRevD.85.031103>
17. “Indication of Electron Neutrino Appearance from an Accelerator-Produced Off-Axis Muon Neutrino Beam”, K. Abe, T. Kobayashi, T. Nakaya, K. Nishikawa, \*A. Rubbia *et al.*, Phys. Rev. Lett. **107**, 041801 1-8 (2011). (引用数 106)  
<http://dx.doi.org/doi:10.1103/PhysRevLett.107.041801>
18. “Search for charged current coherent pion production on carbon in a few-GeV neutrino beam”, \*K. Hiraide, T. Nakaya *et al.*, Phys. Rev. D **78**, 112004 1-19 (2008). (引用数 20)  
<http://dx.doi.org/doi:10.1103/PhysRevD.78.112004>
19. “Observation of a first  $\nu_\tau$  candidate event in the OPERA experiment in the CNGS beam”, N. Agafonova, K.Niwa, M.Nakamura, \*H.Pessard *et al.*, Phys. Lett.B **691**, 138-145 (2010). (引用数 35)  
<http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.physletb.2010.06.022>
20. “Testing new physics models by top charge asymmetry and polarization at the LHC”, J. Cao, K. Hikasa, L. Wang, \*L. Wu, and J.M. Yang, Phys. Rev. D **85**, 014025 1-9 (2012). (引用数 0)  
<http://dx.doi.org/doi:10.1103/PhysRevD.85.014025>
21. “Flavor structure of the three-site Higgsless model”, T. Abe, \*R.S. Chivukula, E.H. Simmons, and M. Tanabashi, Phys. Rev. D **85**, 030515 1-18 (2012). (引用数 0)  
<http://dx.doi.org/doi:10.1103/PhysRevD.85.030515>
22. “Dark matter direct detection constraints on the minimal supersymmetric standard model and implications for LHC Higgs boson searches”, J. Cao, K. Hikasa, W. Wang, \*J.M. Yang, and L.-X. Yu, Phys. Rev. D **82**, 051701(R) 1-5 (2010). (引用数 7)  
<http://dx.doi.org/doi:10.1103/PhysRevD.82.051701>

23. “Right-handed sneutrino dark matter and big-bang nucleosynthesis”, \*K. Ishiwata, M. Kawasaki, K. Kohri, and T. Moroi, Phys. Lett.B **689**, 163-168 (2010). (引用数 2)  
<http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.physletb.2010.04.054>
24. “Model discriminating power of  $\mu \rightarrow e$  conversion in nuclei”, \*V. Cirigliano, R. Kitano, Y. Okada, and P. Tuzon, Phys. Rev. D **80**, 013002 1-13 (2009). (引用数 6)  
<http://dx.doi.org/doi:10.1103/PhysRevD.80.013002>
25. “Bs mixing phase and lepton flavor violation in supersymmetric SU(5)”, \*J.-h. Park and M. Yamaguchi, Phys. Lett.B **670**, 356-362 (2009). (引用数 9)  
<http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.physletb.2008.11.023>
26. “Testing the littlest Higgs model with  $T$ -parity at the CERN Large Hadron Collider”, S. Matsumoto, T. Moroi, and \*K. Tobe, Phys. Rev. D **78**, 055018 1-13 (2008). (引用数 9)  
<http://dx.doi.org/doi:10.1103/PhysRevD.78.055018>
27. “ $b \rightarrow s\nu\bar{\nu}$  decay in the MSSM: Implication of  $b \rightarrow s\gamma$  at large  $\tan\beta$ ”, \*Y. Yamada, Phys. Rev. D **77**, 014025 1-8 (2008). (引用数 8)  
<http://dx.doi.org/doi:10.1103/PhysRevD.77.014025>
28. “Supersymmetry-induced flavor-changing neutral current top-quark processes at the CERN Large Hadron Collider”, J.J. Cao, G. Eilam, M. Frank, K. Hikasa, G.L. Liu, I. Turan, and \*J.M. Yang, Phys. Rev. D **75**, 075021 1-22 (2007). (引用数 29)  
<http://dx.doi.org/doi:10.1103/PhysRevD.75.075021>
29. “Parity-Odd Asymmetries in  $W$ -jet Events at the Fermilab Tevatron”, K. Hagiwara, K. Hikasa, and \*H. Yokoya, Phys. Rev. Lett. **97**, 221802 1-4 (2006). (引用数 3)  
<http://dx.doi.org/doi:10.1103/PhysRevLett.97.221802>

## 6.2 ホームページ

本特定領域の意義や成果を研究者や国民に広く知ってもらうために、研究項目の説明、状況報告、講演会や研究会などを <http://osksn2.hep.sci.osaka-u.ac.jp/~flavor/> にまとめてある。アクセス数などの統計は取っていない。

## 6.3 公開発表

### 6.3.1 会議

フレーバー物理の領域を発展させるために次の会議を共催した。

1. CKM2006 – The 4th Workshop on the CKM Unitarity Triangle, 2006 年 12 月 12–16 日, 名古屋大学。  
<http://ckm2006.hepl.phys.nagoya-u.ac.jp/> (参加者数 200 名)
2. PD07 – International Workshop on New Photon-Detectors, 2007 年 6 月 27–29 日, 神戸大学。  
<http://www-conf.kek.jp/PD07/> (参加者数 100 余名)
3. 研究会「SuperKEKB が拓く物理」, 2007 年 11 月 12 日, 秋葉原ダイビル。  
<http://superb.kek.jp/skekb-ja/> (参加者数 104 名)
4. 3rd International Workshop on Nuclear Emulsion Techniques, 2008 年 1 月 24–25 日, 名古屋大学。  
<http://flab.phys.nagoya-u.ac.jp/workshop/2008/> (参加者数 約 80 名)
5. KAON09 – 2009 Kaon International Conference, 2009 年 6 月 9–12 日, つくば国際会議場。  
<http://kaon09.kek.jp/> (参加者数 69 名)
6. PD09 – International Workshop on New Photon-Detectors, 2009 年 6 月 24–26 日, 信州大学。  
<http://www-conf.kek.jp/PD09/> (参加者数 56 名)
7. CPV from B Factories to Tevatron and LHCb, 2010 年 9 月 1–2 日, 東北大学。  
<http://www.tuhep.phys.tohoku.ac.jp/bmix2010/> (参加者数 35 名)

### 6.3.2 招待講演

1. 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
  - 蛭名 幸二, “CDF 実験のヒッグス粒子探索の最新結果”
  - 金 信弘, “CDF 実験の 30 年”
  - 関口哲郎, “T2K 実験の現状 (大震災から現在に至るまで)”
2. 10th ICFA Seminar on Future Perspectives in High-Energy Physics 2011, 2011/10/3, CERN, Geneva, Switzerland
  - T. Iijima, “Future Opportunities for Heavy Flavor Physics Experiments”
3. 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 16 日, 弘前大学
  - 角野秀一, “T2K 実験の最新結果”
  - 野村大輔, “Effects of top-quark compositeness on Higgs boson production at the LHC”
4. 23rd Rencontres de Blois, Particle Physics and Cosmology, 2011/5/29-6/3, Blois, France

- T. Iijima, “Beyond the Standard Model Physics at future B Factories and LHCb”
5. 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010 年 9 月 11 日–14 日, 九州工業大学
    - 木村 直樹, “CDF 実験のトップクォークの物理とヒッグス粒子探索の結果”
    - 市川温子, “T2K 実験の最新結果”
  6. Strings at the LHC and in the Early Universe, 2010 年 3 月 16 日, KITP, Santa Barbara, California, USA
    - 北野龍一郎, “Thoughts on supersymmetry and electroweak symmetry breaking”
  7. WIN’09 - Weak Interactions and Neutrinos, Sep 14-19, 2009, Perugia, Italy
    - Taku Yamanaka, “Status of the J-PARC E14 Experiment for the  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ ”
  8. 日本物理学会 2009 年秋季大会, 2009 年 9 月 10 日–13 日, 甲南大学
    - 戸村 友宣, “CDF 実験のトップクォークの物理と新粒子探索の結果”
    - 柴田政宏, “いよいよ始まった T2K 実験”
  9. Lepton Photon 2009 - XXIV International Symposium on Lepton Photon Interactions at High Energies, Aug 17-22, 2009, Hamburg, Germany
    - Takeshi Komatsubara, “Kaons - Recent Results and Future Plans”
  10. 日本物理学会 第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 27 日–30 日, 立教大学
    - 武内 勇司, “CDF 実験の最新結果”
  11. 日本物理学会 第 63 回年次大会, 2008 年 3 月 22-26 日, 近畿大学
    - 小林隆, “Accelerator based Neutrino Experiments in Japan”
  12. Beyond the Standard Model at the Dawn of the LHC Era, 2007 年 5 月 27 日, Budapest, Hungary
    - 諸井健夫, “Testing the anomaly-mediated SUSY model at the LHC”
  13. 日本物理学会 2007 年春季大会, 2007 年 3 月 25-28 日, 首都大学
    - 関口哲郎, “T2K 長基線ニュートリノ振動実験”
  14. CKM2006 - 4th International Workshop on CKM Unitarity Triangle, Dec 12-16, 2006, Nagoya, Japan
    - Taku Yamanaka, “Flavor Physics at J-Parc”, (Plenary talk)”

## 6.4 「国民との科学・技術対話」

一般の人々に広くフレーバー物理を知ってもらうために、特定領域の研究者が以下の講演会や講座などで講演を行った。

1. 日笠健一「LHCが拓く究極の物理」  
財団法人高エネルギー加速器科学研究奨励会第24回特別講演会  
2008年10月10日(金), 東京都千代田区アルカディア市ヶ谷  
<http://www.heas.jp/lecture/koen.html>  
参加者約15名
2. 棚橋誠治「小林・益川理論の解説小林益川理論と実験的証明」  
ノーベル賞受賞記念特別講演会「小林・益川の理論とは？」  
2008年10月10日(金), 名古屋大学野依記念学術交流館カンファレンスホール  
[http://www.hepl.phys.nagoya-u.ac.jp/tau\\_center/KM\\_seminar.html](http://www.hepl.phys.nagoya-u.ac.jp/tau_center/KM_seminar.html)  
参加者350名以上。うち、1/3が20代。アンケートの結果、難しかったが楽しく興味を持ったという意見が多かった。詳しくは[http://www.hepl.phys.nagoya-u.ac.jp/tau\\_center/fig/questionnaire\\_KM.pdf](http://www.hepl.phys.nagoya-u.ac.jp/tau_center/fig/questionnaire_KM.pdf)を参照のこと。
3. 金信弘「質量起源のヒッグス粒子を探して」  
平成20年度KEK公開講座加速器科学の新展開  
2008年10月25日(土), 筑波大学春日キャンパス  
<http://www.kek.jp/koukaikouza/2008/>  
参加者約100名
4. 日笠健一「素粒子と対称性」  
GCOE市民講座「ノーベル賞がわかるー小林・益川と南部の理論」  
2008年12月13日(土), 仙台市 仙台国際センター  
<http://www.scienceweb.tohoku.ac.jp/publicj/?p=300>  
参加者106名
5. 棚橋誠治「小林・益川の理論とは？」  
愛知県図書館企画講演  
2008年12月14日(日), 愛知県図書館5階大会議室  
<http://www.aichi-pref-library.jp/tenji1.html>  
参加者164名
6. 日笠健一「極微のシンメトリーー素粒子の世界：ノーベル賞と残された謎」  
東北大学サイエンスカフェ第46回  
2009年4月24日(金), 仙台市 せんだいメディアテーク  
<http://cafe.tohoku.ac.jp/event/no46/index.html>  
参加者約150名
7. 棚橋誠治「素粒子における対称性と新たな次元」  
第8回三省堂サイエンスカフェin名古屋  
2009年2月14日(土), 三省堂書店名古屋テルミナ店

<http://www.books-sanseido.co.jp/event/sc/history/8in.html>

参加者約 20 名

8. 棚橋誠治「余剰次元への扉を開く」  
第 17 回名古屋大学理学懇話会  
2009 年 6 月 13 日 (土), 名古屋大学野依記念学術交流館カンファレンスホール  
<http://www.sci.nagoya-u.ac.jp/kouhou/16/ura.html>  
参加者約 200 名
9. 金信弘「ビッグバン宇宙の極初期を高エネルギー粒子加速器で探る－質量起源のヒッグス粒子を探して－」  
科学講演  
2009 年 11 月 07 日 (土), 静岡県立沼津東高等学校  
参加者高校生約 70 名
10. 日笠健一「極微の宇宙のシンメトリー」  
東北大学祭 2010 研究公開講演  
2010 年 10 月 31 日 (日), 仙台市 東北大学川内キャンパス  
<http://www.festa-tohoku.org/kenkyu.html>  
参加者約 20 名
11. 小林隆「謎の素粒子ニュートリノ日本縦断 300km － T2K 実験－」  
KEK 公開講座「J-PARC で探るニュートリノの世界」  
2011 年 12 月 3 日 (土), 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 小林ホール  
<http://kouza.kek.jp/index.html>  
参加者中学生以上対象、約 170 名

## 7 研究組織と各研究項目の連携状況

### 7.1 研究組織

領域代表者：山中 卓 (大阪大学・理学研究科・教授)

#### A01: $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊から探るフレーバー混合と新しい物理

##### 【計画研究】

研究代表者	山中 卓	(大阪大学・理学研究科・教授)
研究分担者	小松原 健	(KEK・素粒子原子核研究所・教授)
	稲垣 隆雄	(KEK・素粒子原子核研究所・教授; H20 年度まで)
	GeiYoub Lim	(KEK・素粒子原子核研究所・准教授; H19 年度まで)
	渡辺 丈晃	(KEK・素粒子原子核研究所・助教; H19 年度まで)
	笹尾登	(京都大学・理学研究科・教授; H20 年度まで)
	南篠 創	(京都大学・理学研究科・助教)
	山鹿 光裕	(大阪大学・理学研究科・特任助教; H19 年度まで)

田島 靖久 (山形大学学術情報基盤センター・准教授)  
鈴木 史郎 (佐賀大学理工学部・教授)  
松村 徹 (防衛大学校・応用科学群・助教)

#### 【公募研究】

研究代表者 野村 正 (KEK・素粒子原子核研究所・准教授)

### A02: B ファクトリーにおける B とタウフレーバー物理の研究

#### 【計画研究】

研究代表者 大島 隆義 (名古屋大学・理学研究科・特任教授)  
研究分担者 居波 賢二 (名古屋大学・理学研究科・准教授)  
飯嶋 徹 (名古屋大学・理学研究科・准教授; H19 年度まで)

#### 【公募研究】

研究代表者 羽澄 昌史 (KEK・素粒子原子核研究所・教授)  
石野 宏和 (東京工業大学・理工学研究科・助教)  
宮林 謙吉 (奈良女子大学・理学部・准教授)  
田島 治 (KEK・素粒子原子核研究所・助教)  
樋口 岳雄 (KEK・素粒子原子核研究所・助教)  
田内 一弥 (KEK・素粒子原子核研究所・技師)

### A03: 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

#### 【計画研究】

研究代表者 金 信弘 (筑波大学・数理物質科学研究科・教授)  
研究分担者 受川史彦 (筑波大学・数理物質科学研究科・教授)  
原 和彦 (筑波大学・数理物質科学研究科・准教授)  
丸山和純 (筑波大学・数理物質科学研究科・講師; H20 年度まで)  
武内 勇司 (筑波大学・数理物質科学研究科・講師)

#### 【公募研究】

研究代表者 山本 和弘 (大阪市立大学・理学系・准教授)  
寄田 浩平 (早稲田大学・理工学術院・准教授)

## A04: 大強度ニュートリノビームを使ったニュートリノフレーバー振動の研究

### 【計画研究】

研究代表者 西川 公一郎 (KEK・素粒子原子核研究所)・教授)  
研究分担者 中家 剛 (京都大学・理学研究科・教授)  
小林 隆 (KEK・素粒子原子核研究所・教授)

### 【公募研究】

研究代表者 市川 温子 (京都大学・理学研究科・准教授)  
坂下 健 (KEK・素粒子原子核研究所・助教)  
山本 和弘 (大阪市立大学・理学系・准教授)  
中平 武 (KEK・素粒子原子核研究所・助教)  
福田 善之 (宮城教育大学・教育学部・教授)  
関谷 洋之 (東京大学・宇宙線研究所・助教)

## A05: タウニュートリノの直接検出によるニュートリノフレーバーの研究

### 【計画研究】

研究代表者 中村 光廣 (名古屋大学・素粒子宇宙起源研究機構・准教授)  
丹羽 公雄 (名古屋大学・理学研究科・教授; H21 年度まで代表者)  
研究分担者 中野敏行 (名古屋大学・理学研究科・助教)

### 【公募研究】

研究代表者 中平 武 (KEK・素粒子原子核研究所・助教)

## A06: フレーバー混合における標準理論を超える物理の理論的研究

### 【計画研究】

研究代表者 日笠 健一 (東北大学・理学研究科・教授)  
研究分担者 山口 昌弘 (東北大学・理学研究科・教授; H22 年度まで)  
山田 洋一 (東北大学・理学研究科・助教)  
諸井 健夫 (東京大学・理学系研究科・教授)  
棚橋 誠治 (名古屋大学・理学研究科・教授)  
北野龍一郎 (東北大学・理学研究科・准教授; H21 年度より)  
戸部和弘 (名古屋大学・理学研究科・准教授; H20 年度より)  
奥村健一 (九州大学・理学研究院・助教; H21 年度より)

### 【公募研究】

研究代表者 久野 純治 (東京大学・宇宙線研究所・教授)

谷本 盛光	(新潟大学・自然科学系・教授)
久保 治輔	(金沢大学・自然科学系・教授)
前川 展祐	(名古屋大学・理学系・准教授)
窪田 高弘	(大阪大学・理学研究科・准教授)
細谷 裕	(大阪大学・理学研究科・教授)
両角 卓也	(広島大学・理学系・准教授)
佐藤 丈	(埼玉大学・理工学研究科・准教授)
菊川 芳夫	(東京大学・総合文化研究科・准教授)
大野木 哲也	(京都大学・基礎物研・准教授)
波場 直之	(大阪大学・理学研究科・准教授)
荻原 薫	(KEK・素粒子原子核研究所・教授)
末松 大二郎	(金沢大学・数物科学系・教授)
進藤 哲央	(工学院大学・工学部・講師)
清 裕一郎	(順天堂大学・医学部・准教授)

## X00: 総括班

研究代表者	山中 卓	(大阪大学・理学研究科・教授)
研究分担者	大島 隆義	(名古屋大学・理学研究科・特任教授)
	金 信弘	(筑波大学・数理解物科学研究所・教授)
	西川 公一郎	(KEK・素粒子原子核研究所・教授)
	中村 光廣	(名古屋大学・素粒子宇宙起源研究機構・准教授)
	日笠 健一	(東北大学・理学研究科・教授)
	中家 剛	(京都大学・理学研究科・教授)

## 7.2 連携状況

各計画研究の間の情報交換と連携を深め、フレーバー物理の成果を公開するために、以下の特定領域「フレーバー物理の新展開」研究会を毎年開催した。

1. 研究会 2007: 2007年3月16, 17日, 京都市左京区。参加者約48名、発表件数21件。
2. 研究会 2008: 2008年2月21, 22日, 宮城県仙台市作並。参加者約50名、発表件数22件。
3. 研究会 2009: 2009年3月9, 10日, 愛知県額田郡幸田町。参加者約60名、発表件数22件。
4. 研究会 2010: 2010年2月22-24日, 茨城県東茨城郡大洗町。参加者約80名、発表件数39件。
5. 研究会 2011: 2011年7月1-3日, 三重県三重郡菰野町。参加者約65名、発表件数35件。

参加者、発表者ともに学部生から教授までと幅広く、自由に質問や議論を行った。2010年からは、大学院生が座長を務めて大学生だけが発表を行う若手セッションを開いた。若手セッションでの発表件数は2010年が17件、2011年が16件であった。また、2009年には米国 Fermilab から本研究とは関係のない2名の研究者を招聘し、Fermilab でのニュートリノプログラムや研究所の将来計画について発表してもらうとともに、本研究全体の外部評価をしてもらった。2012年は総括班の予算を繰越し、7月6-8日に奈良県吉野で最後の研究会を開催する。

また、研究会では研究計画の代表者と事務局で集まり、研究の進展や予算の状況、運営の方針などについて情報交換と議論を行い、研究計画間の連携を強めた。

A01のKOTO実験とA04のT2K実験は、J-PARCの加速器を異なるビームの取り出し方で用いるため同時に実験を行うことはできない。J-PARCではこれらの実験を実施するにあたり、必要なビームタイムの提示を求めた上で、両者の研究が効率的に進められるようスケジュール調整に配慮がなされている。

A02「BファクトリーにおけるBとタウフレーバー物理の研究」では、国際協力実験 Belle 組織で共同研究体制が確立しているため、すでに連携体制はできていた。

A03「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、CDF日本グループ研究会で毎年年末に公募研究と計画研究の物理成果について議論した。

A04「大強度ニュートリノビームを使ったニュートリノフレーバー振動の研究」では、種々の新しいビーム強度測定機の開発、大面積光検出器の開発など、次世代の大強度ニュートリノビーム、大型ニュートリノ測定器のための基礎開発を公募研究で行った。

A06「フレーバー混合における標準理論を超える物理の理論的研究」では、公募研究の研究代表者・協力研究者を東北大学に招いてセミナーおよびディスカッションにより研究情報の交換を行った。また、公募研究の代表者が在籍する研究機関に向いて議論を交わした。

## 8 研究費の使用状況

A01「 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊から探るフレーバー混合と新しい物理」では研究費を用いて J-PARC KOTO 実験のビームラインと測定器を建設した。実験設備の建設のための予算が KEK から出る前の時点からビームラインのコリメータなどを本予算を用いて製作し、実験承認後に速やかに準備が進むようにした。また、要となる電磁カロリメータの建設、新たな荷電粒子検出器やガンマ線検出器の開発と製作を行った。研究費で雇った研究員は、実験現場で電磁カロリメータ建設を主導した。シカゴ大学の連携研究者が設計を進めていたデータ収集システムの波形記録装置の開発費用の一部を出して装置の設計と実証を行った。この成果もあり、シカゴ大学とミシガン大学は KOTO 実験のためにアメリカのエネルギー省 (DOE) の予算を獲得した。このように本研究費で実験準備の成果を示す事によって、KEK や DOE から予算を獲得することができた。

A02「BファクトリーにおけるBとタウフレーバー物理の研究」では、研究費は主に光検出器の開発に使用した。ある程度高額の開発費を短期間に投入できたことにより、効率よく開発サイクルを進め、成果を挙げることができた。また、研究員を採用でき、物理解析

ならびに計算機施設の運用に従事させ、強力な研究推進に大いに役立った。さらに、研究費を用いて国際ワークショップを開催し、研究成果発信のための不可欠な役割を果たした。

A03「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、CDF 実験の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。また本研究費を用いて、加速器改良によるルミノシティ増大に対応するためのデータ収集システムの改良を行った。研究費によって雇用した研究員4名はトップとボトム・フレーバーの物理の物理解析で重要な成果をあげた。

A04「大強度ニュートリノビームを使ったニュートリノフレーバー振動の研究」では研究費は、ニュートリノビームをモニターする各種実験装置の製作に大半が当てられた。T2K 実験を遂行する上で、大強度ビームを安定して実験に供給することが必須で、このための一次陽子ビームラインのビームモニター、2次ビームラインのミュオンモニター、そして前置ニュートリノ測定器の一部（ニュートリノモニター INGRID 測定器）を製作した。また INGRID と FGD に使用する新型光子検出器 MPPC の開発と購入に当てられている。これらの、実験装置は、10年以上にわたり定期的に T2K 実験に利用される予定で、本特定領域研究が終了した後も長期間にわたり有効に活用できる。また、本研究では、フェルミ研 SciBooNE 実験の解析用に購入した計算機を、T2K 実験でも活用する等、研究装置を効率的に利用している。最後に、積極的に国際会議に参加し、T2K 実験で得た世界最高水準の結果を広く世界中に発信している。

A05「タウニュートリノの直接検出によるニュートリノフレーバーの研究」では、計画前半ではその大半を原子核乾板の購入、実験装置への組み込みに投入した。2008年のニュートリノ照射開始後は、現地へのシフトの派遣、原子核乾板読み出し装置の運用などに用いてきた。

A06「フレーバー混合における標準理論を超える物理の理論的研究」では、最も大きい用途としては、若手研究者を助教として雇用し、計画研究の推進に大きく寄与した。平成19年4月から戸部和弘（現名古屋大准教授）、20年4月から奥村健一（現九州大助教）を採用したが、両名は現在研究分担者として研究に参加している。その後21年7月から22年3月まで郡和範（現 KEK 助教）、22年4月より野村大輔を雇用した。

## 9 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度

A02「B ファクトリーにおける B とタウフレーバー物理の研究」で得られた  $B \rightarrow \tau \nu$  測定結果は CP 位相とは独立な貴重な情報を提供し、New Physics への制限を課す重要なデータである。ちなみに、論文の引用数は合計100件に挙がる。また、タウ LFV 測定の解析法ならびにその成果は、将来の B ファクトリー (Belle-II, SuperB プロジェクト) でのさらなる探索のための技術的、物理的なインパクトある基幹的知見を提供している。さらに、MCP-PMT の長寿命化の達成は、高計数下での PMT 稼働を可能とし、PANDA 実験など他実験グループでの光検出器選定に大きなインパクトを与えている。

A03「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2006年度に  $B_s$  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が、これに成功した。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成分の比  $|V_{ts}/V_{td}|$  を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。

A04「大強度ニュートリノビームを使ったニュートリノフレーバー振動の研究」の研究で発見した電子ニュートリノ出現事象は、素粒子物理学の分野でレプトンにおける粒子反粒子対称性の測定を可能とする非常に重要な発見である。このため、結果はPhysical Review Letters紙に掲載され、2012年5月時点で300件以上の引用がある。また、英国物理学会(IoP)により、2011年の全ての物理分野のなかでTop 10のブレイクスルーの一つに選ばれた。

A05「タウニュートリノの直接検出によるニュートリノフレーバーの研究」では2010年に最初のタウニュートリノの出現事象を捕らえ、ニュートリノ振動現象の最終検証に貢献した。またOPERAのために開発した技術を用いて、大型建造物の宇宙線による透視などの応用分野を開拓した。

A06「フレーバー混合における標準理論を超える物理の理論的研究」では超対称理論、余剰次元理論、宇宙論などの面から幅広く多角的にクォークとレプトンのフレーバー物理に取り組み、実験結果を元に新たな物理に制限を与えるなど、分野の発展に貢献した。

## 10 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況

- 助教、助手 から (10名中) :
  - － 准教授: 7名、就職先: 山形大、名古屋大2、京大、東大、首都大、KEK
  - － 助教: 3名、就職先: 九大、KEK、東北大
- 特任助教 から (3名中) :
  - － 准教授: 1名、就職先: 名古屋大
  - － 助教: 1名、就職先: KEK
  - － 研究員: 1名、就職先: 理研
- 研究員 から (9名中) :
  - － 助教: 5名、就職先: KEK 3、東大、京大
  - － 研究員: 4名、就職先: 早稲田大、フランスCPPM、KEK、コロンビア大
  - － 企業: 1名
- 博士後期課程学生 から (34名中) :
  - － 助教: 4名、就職先: KEK 2、東大、名大
  - － 研究員: 23名、就職先: 阪大2、KEK、CERN、放医研、佐賀大、東大、オックスフォード大、早稲田大、九大、フランスCPPM、LBL、名大3、東北大、Bern大2、東邦大、Caltech、中国清華大、学振PD2
  - － 教育機関: 1名、就職先: 高校

- 企業: 6名
- 修士課程学生 から (58名中):
  - 博士課程: 28名
  - 教育機関: 1名、就職先: 中学
  - 企業: 29名

## 11 総括班評価者による評価の状況

総括班評価者より、次の評価を得た。

評価者：首都大学東京 大学院理工学研究科  
教授 住吉 孝行  
2012年6月12日

フレーバー物理の研究は現在の素粒子物理学に於いて、高エネルギーフロンティア実験(LHC実験など)による新粒子・新現象の探索と共に、最重要の研究に位置づけられている。クォークはそれぞれ2種類の3世代から構成され、6種類のフレーバーからなる。それらのフレーバー間の混合はユニタリ行列であらわされ、そこに含まれる虚数パラメータがCP対称性の破れをもたらす(小林・益川モデル)。一方レプトンにも3種類のフレーバーがあり、本特定領域研究も含めたニュートリノ振動実験でそれらの混合が明らかになってきたが、クォークとレプトンでその混合状態が大きく異なるなど興味深い結果が得られている。このようにフレーバー物理はCP対称性の破れなど素粒子の持つ重要な性質を探索する研究であり、その詳細な研究から現在の素粒子標準モデルを超える物理探索への道が拓かれると期待されている。そのような観点からも本特定領域研究は現在の素粒子物理学の最重要課題に迫るものであり、大きな成果が期待されている。

本特定領域研究の研究課題は、K中間子の稀崩壊実験、Bファクトリー実験、トップクォーク物理、長期線ニュートリノ振動実験などフレーバー物理における最前線の研究が含まれている。それぞれの研究成果に関しては以下に記述するように、期待通り、或いはそれ以上の成果が得られていると言える。

1. A01班：KEK-PSのE391a実験からJ-PARCのKOTO実験へ着実なステップを踏んで計画が進められている。KEKの実験では $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ を世界最高の感度で探索しており、J-PARCでは新たなビームラインや測定器の改良で今後益々感度の向上が期待されるなど、高い成果が得られている。
2. A02班：KEKのBファクトリーを用いた実験で、 $B \rightarrow \tau \nu$ の稀崩壊事象の観測を始め、 $\tau$ 粒子のレプトン数非保存の崩壊事象の探索など、これまでの観測を大幅に更新する高精度の結果を得ており、期待を超える成果を輩出している。
3. A03班：米国フェルミ研究所のTevatronを用いた実験に参加し、トップクォークに関する物理及びB中間子の稀崩壊事象の観測で大きな成果が得られた。 $B_s - \bar{B}_s$ 振動の初観測などが特筆される。2011年に30年に及ぶ衝突実験は終了したが、測定

器の改良などもあり、トップ物理、B 中間子物理、Higgs 探索などで期待を超える成果が得られている。

4. A04 班：J-PARC の大強度ニュートリノビームを用いた長基線ニュートリノ振動実験 T2K は、陽子加速器の強度が予定通りに増加せず、また、東日本大震災などで実験の中断を余儀なくされたこともあったが、計画通りに  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  振動の観測から振動パラメータ  $\theta_{13}$  の測定を世界に先駆けて成功させたことは高く評価される。原子炉ニュートリノ実験の結果等からも  $\theta_{13}$  の値が比較的大きかったことから、今後は CP 位相  $\delta$  の測定が期待され、ニュートリノ物理は新たな局面を迎えることになった。
5. A05 班：CERN のニュートリノ振動実験 OPERA では名古屋大学のエマルジョン技術を用いて世界で初めて  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  振動の観測に成功した。超光速ニュートリノが話題となったが、本来の実験では期待通りの成果が得られている。
6. A06 班：超対称性理論や余剰次元などの標準モデルを超える物理が、フレーバー物理実験で如何に観測されるかなど、実験研究者との連携も素晴らしいものが有った。

以上のように全ての計画研究に於いて新展開が見られたことは、事後評価として○優を与えるべきであると思う。

1 点気になった点を挙げるとすれば、フレーバー物理を材題に既にいくつかの国際会議が開催されてはいるが、B ファクトリー実験やニュートリノ振動実験は本特定領域研究に含まれ、かつ本研究グループが世界をリードしている研究であることから、本特定領域研究主催のトピカルなテーマに的を絞った国際会議が開催されても良かったように感じる。

---