

# 学術創成研究「タウ・レプトン物理の新展開」 評価委員会報告

2010年4月

今里純、三田一郎、日笠健一、森俊則、山内正則

名古屋大学大学院理学研究科大島隆義教授を研究代表者とする学術創成研究「タウ・レプトン物理の新展開」の2009年度の進展を評価する第4回の評価委員会が、2010年3月11日に名古屋大学において開かれた。2009年3月に催された第3回評価委員会以降のタウ・レプトン物理の研究成果、LHC-ATLAS実験の進展、Belle-IIに向けた検出器開発の進捗状況が報告された他、本学術創成研究が重要な研究活動の一環を担っている「タウ・レプトン物理研究センター」(2008年度発足)からフレーバー物理の理論の報告もなされ、質疑応答を行った。最近出版された論文等の文献および委員会での報告に基づいて委員会は評価作業を行い、ここにコメントをまとめた。評価の対象となる分野は、1) レプトンフレーバーを破る(LFV)タウ崩壊事象の探索及びタウのハドロン崩壊の物理、2) ATLAS実験、3) フレーバー物理の理論、4) 高統計タウ・レプトン物理実験に向けた検出器開発の4分野からなる。

## (1) タウ・レプトンによるLFVの探索及びハドロン崩壊の物理

本研究グループはこれまでも学術創成研究「タウ・レプトンの新展開」の中心研究課題として、Bファクトリー実験で得られたデータを用いてタウの崩壊を多面的に解析し、ハドロン物理から新しい物理の探索まで幅広い成果を得てきた。特に今年度は一昨年に発足した「タウ・レプトン物理研究センター」を拠点として、これまでの研究をさらに発展させ新しい成果を上げている。今後Bファクトリーのアップグレードによってデータ量の飛躍的な増加が期待されており、タウ・レプトンの崩壊現象にLFVやCP非対称性などの新しい物理の効果が見られる可能性がある。このような将来的発展性を見越した上で、現存するタウの崩壊データから得られる知見を余すところなく明らかにしようとする現在の同センターの方針は妥当なものであると言える。特に現行のBファクトリ

一が目標とするデータ量を収集し終えてアップグレードのためにシャットダウンされるのを契機として、LFVに関する解析を優先し、網羅的に結果を出そうとする方針も妥当なものと言える。

本評価委員会は昨年行われたデータ解析の進展に関して特に以下の項目について報告を受けた。

### LFV の $\tau$ 崩壊の探索

今年度の新しい結果として  $\tau \rightarrow lK_S, lK_S K_S, lll$  の新しい上限値が示された。全部で 46 種類の過程を探索しており、近々これらすべてについて Belle の最終データを用いた結果が発表されるとの見通しである。 $\tau$  の LFV 崩壊がどのような最終状態に現れるかは一般的には予言できないので、このような網羅的な解析を行うことは適当である。一方において、CLEO 以来の解析をアップデートすることに加えて、大量のデータを用いて新しい解析を行うことも積極的に考えるべきであろう。一例として二つの  $\tau$  の崩壊によって発生する荷電粒子のエネルギー相関を見ることによって探索の感度が上がる可能性を指摘したい。

### $\tau$ のハドロン崩壊の研究

$\tau \rightarrow KK\pi\nu$  の崩壊過程で測定された質量スペクトル ( $M_{KK}, M_{KK}$ ) をベクトル・ドミナンスモデルに従って、形状因子として Breit-Wigner 型を仮定して評価した。カイラル対称性の量子異常を考慮すると、軸ベクトル的な寄与だけでなく、ベクトル的な寄与 (Wess-Zumino 量子異常) も必要であることがわかる。この量が小さな量なのか (ALEPH の示唆する結果)、軸ベクトルと同等の寄与を持つ大きな量なのか (CLEO の結果) を Belle 実験の世界最高統計量のデータを用いて明らかにした。結果として、両者の  $\tau \rightarrow KK\pi\nu$  の崩壊過程中的寄与は  $\Gamma_V / \Gamma_A = 1.13 \pm 0.07$  でほぼ同等であることがわかった。カイラル対称性が完全であれば、この比は 1 になると期待できるので、カイラル対称性の破れはこのモードにはあまり大きく寄与していないことが明らかになった。このようなデータを積み上げていくことでカイラル対称性の破れの構造、ひいては QCD の非摂動的な性質を明らかにできる点で重要な解析である。今後は大量のデータに基づいて、形状因子の関数形そのものを決定することまで考えてはどうか。また、モデルの取り上げ方などについて理論家との共同研究が有効なのではないか。

### $\tau$ 崩壊における CP 非保存およびセカンドクラスカレントの探索

この解析に関して、今年度は以下の3つの結果について報告があった。1)  $\tau^- \rightarrow K_S \pi^- \nu$  崩壊における CP の破れの探索、2)  $\tau^- \rightarrow \omega \pi^- \nu$  崩壊でのセカンダリクラスレントの探索、3)  $\tau^- \rightarrow (3\pi)^- \nu$  崩壊の構造関数の測定。1) はレプトン系での直接的 CP 対称性の破れの探索実験であり、LFV の探索とともに標準理論を越える新しい物理の探索に最適な過程である。今後、背景事象の非対称性等の検討を進めて、今年の夏の国際会議に結果が発表される予定である。2) ではデータ量を  $78 \text{ fb}^{-1}$  から  $578 \text{ fb}^{-1}$  まで増加させて、論文発表が予定されている。3) 崩壊構造関数の解析は質量分布と角度分布を使って、3体のハドロン崩壊の構造関数を決定する試みである。今年度は、このために必要な解析手法の整備に重点がおかれている。今後の解析によって、Bファクトリーでのみ提供可能なハドロン構造関数の基礎データが得られると期待される。

CP 対称性の破れの探索方法として、2つの  $\tau$  の崩壊の相関を用いる可能性を昨年引き続き指摘したい。この相関は  $\tau$  の偏極と関係しており、 $\tau$  及び反  $\tau$  から放出される粒子のある種の相関は CP 不変性を破っている。 $\tau$  の偏極をデータ解析に使う重要性は去年の評価委員会でも指摘されたが、今回この点についての報告はなかった。どの時点で  $\tau$  の偏極が物理的に重要になってくるか定かではないが、次回には検討結果の報告が望まれる。

## (2) ATLAS 実験

LHCは2009年11月末より待望の陽子-陽子衝突が始まり、2010年1月には加速器の現状に合わせた新たな運転計画が定められ、現在その計画に沿って順調に加速器のコミッショニングおよび並行して物理データの収集が行われている。2006年度より本グループの若手が中心となって立ち上げてきたレベル-1 ミュー粒子トリガー用 Thin Gap Chamber (TGC) は、宇宙線を用いて印加電圧と閾値の調整を行い、場所依存性をほぼ無くして94%以上の検出効率を得ることに成功した。これにより必要な性能をすべて達成して、TGC のコミッショニングが終了したことになる。稼働率も99.4%を記録している。そこで現在取得中の陽子-陽子衝突データによるミュー粒子トリガーの性能実証が急務である。特に、今後ルミノシティが何桁も上がった場合でも期待通りのトリガー性能が得られるのか、確認が必要である。長期連続運転における性能安定性の検証も課題となる。

一方物理研究については、今回初めてその戦略と進捗状況の報告があり、大きな期待を持って聴いた。本グループはミュー粒子検出器を担当していることから、ミュー粒子の同定を利用し、トップクォーク対生成断面積の測定を物理研究の中心に据える。そこからトップクォーク対随伴ヒッグス生成過程 ( $t\bar{t}H$ ) の研究も狙う。またタウ粒子の同定を手掛かりとして超対称粒子の探索・研究も視野に入れている。ここで中心となるトップクォーク対生成の研究は、LHCで期待されている物理研究の一つであり、初期データで結果が得られることから、本グループが物理解析においてATLAS実験内部での認識度を素早く高めるためには適したテーマであろう。2人の博士課程学生の学位論文テーマとしても適当と考えられる。

LHCはその後2010年3月30日より衝突エネルギー 7 TeVでの運転が開始され、加速器性能を向上させつつ順調に物理データが蓄積されているようである。このまま予定通り進行すれば、当然夏の国際会議には中間的な物理結果の発表が期待される。しかしLHCが設計強度に到達するのは当分先のことになる。このような状況でいち早く意味ある物理の結果を出すことは実験グループの存在感をアピールする機会でもある。「欧州最初のトップクォーク」を目指して多くの研究者が競う中、これまでのシミュレーションによる解析を超えて、実データにおいて如何に効率よく精度の高い結果を素早く出せるか、本グループの活躍に大いに期待するものである。ATLASのなかで遅れて参加したにもかかわらず、ミュー粒子検出器を担当したことはタウ・レプトン物理研究センターの戦略が実ったともいえる。是非この機会を逃さず、トップクォーク対生成断面積測定に成功してほしい。この実験には多くの競争相手がいる。競争相手の存在を自分たちの活動力として利用してこの競争に勝利してほしい。発見は定義として最初に見ることである。

### (3) フレーバー物理の理論

2008年度に発足したタウ・レプトン物理研究センターは理論グループとの連携が1つのポイントとなっている。理論部門は、最新の実験結果に基づくフレーバー物理の理解と究極な標準模型の構築を目的としている。理論部門では、LHCでの物理に深い関連のある電弱ゲージ対称性の破れの機構に関する研究、標準模型を超える物理のモデルの研究が活発に行われており、特に超対称模型におけるLFVの研究、余剰次元模型に端を発するヒッグスレス模型の研究は、

上の観点から興味深い。今回は、超対称模型において、破れを伝える粒子群が通常の仮定をみたまない場合、質量スペクトルに特徴的なパターンが現れうることが発表された。これは LHC において検証可能である。

理論グループの豊富な人材は、アトラス実験に対し有用な提案を行うとともに、 $\tau$ レプトンのハドロン崩壊についての理論的基礎を提供できる。2010 年度からは素粒子宇宙起源研究機構が発足し、充実した陣容と、実験グループとのより一層緊密な協力体制の構築が期待される。ただ今のところ残念なことに理論グループと実験グループの交流は必ずしも多いとは言えない。報告された研究結果も 1 件のみで、理論グループの寄与が不十分であるかのような印象を与えたのは残念であった。

#### (4) 高統計タウ・レプトン物理実験に向けた検出器開発

本学術創成研究の柱の一つは、将来の Belle-II 測定器用に向けての検出器の開発である。B 中間子崩壊で発生する粒子の識別が非常に重要となる。TOP カウンタ及びエアロゲル RICH カウンターの開発がこれまで進められてきた。前年までに各種の R&D が実施され、各段階の報告がされて来たが、今回は、主要な測定器要素の寿命や放射線耐性などのより実用に向けての懸案であった事柄の解決が報告され、高計数率の条件下で  $K/\pi$  識別が高い運動量領域まで確保された検出システムへの見通しが示された。

TOP 検出器は 4 GeV/c までの運動量領域で高い  $K/\pi$  分離得ることを目的とし、Belle-II においてその登用が有望視されている測定器要素である。板状の石英放射体中を伝播するチェレンコフ光の  $K/\pi$  による放射角度および末端の光検出器までの到達時間の違いの情報を最大限に利用しようとする検出器である。研究グループではこれまで、石英放射体の製作などの基本的な開発研究から始め、長期的な計画に基づいて、収束鏡などの光学系の開発・改良、光検出器の開発などの研究を着実に進めてきた。これらの R&D は全て実機のデザインに向けて非常に実り多いものであったと言える。そしてそれらの蓄積結果に立脚して昨年は短尺もの及び長尺もののプロトタイプが作られ基本動作の確認の他、収束鏡の機能確認や時間分解能の調査などが非常に良好な結果を持って実施された。唯一、光読み出しに用いられる予定の新たに開発された角形 MCP-PMT の寿命が短いことが問題として残っており、寿命を長くする改良された新型のもの

製作が進められていた。

今回、改良型角形 MCP-PMT の試験結果が報告された。短寿命の原因としてガス分子による光電面の劣化が疑われていた。改良型として真空管内で光電面へ中性ガスが回り込むのを防ぐタイプのものが作られた。量子効率 (QE)、ゲイン、そして時間分解能の基本性能が対策前のものから変化していないことの確認が行われたあと、寿命の測定が行われ、寿命は対策前の 10 倍となりこの問題のなかった丸形 MCP-PMT と同等であることが全てのチャンネルで実証された。これは Belle-II で 3 年以上の使用に耐えることを意味する。この問題が一応解決して、本測定器 TOP の Belle-II への投入の計画は大きく前進したと考えられる。技術的問題が概ねクリアされ、今後量産へ向けての検討に進める段階に達したと考えてよい。支持機構に関しては個々の石英放射体の支持・位置出しの開発は既に行われてきた。これからは早期に全体構造の検討に入ることが求められる。

もう一つの  $K/\pi$  分離の柱であるエアロゲル RICH 検出器の関係でも、光検出器 HAPD の研究開発が進められた。前年までに既にピクセルサイズ 5 mm 角で  $12 \times 12$  チャンネルのもの開発が行われていた。電場歪みによる位置シフトや分解能劣化が、実機で実際に存在する強度の磁場で抑制されることが確かめられ、更に HAPD を用いた RICH カウンターのプロトタイプが 2 GeV の電子ビームで試験され、良好な  $K/\pi$  識別能力が示されていた。ただ、中性子による放射線損傷による性能劣化の可能性が懸案事項として残っていた。

これに対する回答として今回、中性子照射実験の結果が報告された。原子炉で照射の後、量子効率 (QE)、リーク電流、そして 1 光子に対する応答が調べられた。リーク電流は増加するものの QE には変化がないことが確認され、また、1 光子応答も S/N 比を実際的に問題のないレベルまで抑えることの出来ることが示された。実際、RICH プロトタイプ検出器としての性能試験が実施され、光子数等に顕著な変化の認められないことが示された。この中性子照射試験で HAPD が Belle-II の 5 年間の使用に耐えるであろうことが示されたことの意味は大きい。また、別の原子炉中性子照射試験で APD 単体の調査が行われ、P 層の厚さを薄くすることでリーク電流を減らせる可能性が示された。重要な意味があり、今後の更なる R&D を期待したい。

## (6) まとめと提言

前年に引き続き、評価委員会では本研究グループが達成した最近の成果が報告され、また発表論文等が紹介された。評価委員会はこれらの成果は高いレベルのものであり、高い学問的評価に値するものと判断する。タウ・レプトン崩壊の研究では新しい解析が進められた。特に本研究から出されているLFVのチャンネルの分岐比の上限は既存の結果を更新させており、新しい物理の理論が満たすべき条件を豊富に提供している。このような意味で本研究が得た上限は人類の財産と言っても過言ではない。ATLAS実験も始まった。今後タウ・レプトン物理研究センターにおいては、LHCにおける物理研究課題について、理論グループとの更に緊密な連携を期待したい。測定器開発に関しては、長年の開発研究が実ってTOPカウンターが Belle-II 実験で採用される計画であることは大変好ましい。MCP-PMT光電面の長寿命化にも成功した。ただ実現化には様々な改善事項が残っているようだ。更なる努力を期待したい。今年度は大きな区切りの時期（Belle 最終結果のまとめ、LHCの初期物理結果、Belle-IIの測定器決定）であり、来年の委員会での報告がとても楽しみである。「今後タウでは良い上限値を出す解析を目指す」というのは後ろ向きである。LHCが始まり、今後Belle-IIも始まろうとしているのだから、そういう新たな物理研究にこそ力を注いで益々優秀な若手を育てて行くべきであろう。

一つ本委員会から提言したい。本研究グループはタウ崩壊等の分野で多くのデータを発表して来た。Particle Data Group (PDG) の組織の中で結果の更新に具体的に加わることはPDGにとっても本グループにとっても、物理学コミュニティにとっても好ましいことである。理論グループにはすでにPDGメンバーがおり貢献しているが、タウ・レプトンの物理に関しても積極的にPDGに加わる努力をしてみたらどうか。

最後に、この学術創成研究「タウ・レプトン物理の新展開」のリーダーであり、当初十分に評価されていなかったタウ・レプトン物理研究やTOPカウンター開発を頑張って大きな実りを上げた大島隆義教授が定年退職されるのにあたり、本評価委員会としても彼の指導力、業績に敬意を表し、将来に亘りこれまでも増して本分野、更には高エネルギー物理全体を力強く率いて行かれんことをお願いしたい。