

【学位論文審査の要旨】

1 研究の目的

素粒子の標準模型におけるクォークセクタの CP 対称性の破れは、小林・益川理論によって説明される。小林・益川理論は、高エネルギー加速器研究機構で行われた Belle 実験および米国のスタンフォード線形加速器センターで行われた BaBar 実験によって実験的に証明された。これら 2 つの実験は B ファクトリー実験と呼ばれ、電子陽電子衝突型加速器を用いて、6 種類のクォークの中で 2 番目に重いボトムクォークを含む B 中間子の対を大量に生成し、その崩壊を精密に調べることによって、小林・益川理論を検証した。

素粒子の標準模型は、小林・益川理論の証明に続く 2012 年のヒッグス粒子の発見によって完成した。しかしながら、ニュートリノが小さな有限の質量を持つことや、宇宙観測におけるダークマターの存在などから、素粒子の標準模型を超える新しい物理の枠組みが存在することが示唆されている。素粒子の標準模型は、あらゆる素粒子実験の結果を矛盾なく説明する非常に強力な理論であるが、それ故に標準模型を超える新しい物理の枠組みを実験的に探るのは極めて難しく、その枠組みについての実験的な知見はまだ得られていない。

B 中間子の稀崩壊は、小林・益川行列要素による抑制などから非常に小さな遷移振幅をもつ。そのため、新物理の寄与が相対的に無視できず、干渉効果として観測にかかる可能性がある。新世代の B ファクトリー実験であるスーパー B ファクトリー実験では、大量の B 中間子崩壊を非常に精密に測定することにより、標準模型を超える新物理を探索する。スーパー B ファクトリー実験として、Belle 実験の後継実験である Belle II 実験が計画され、現在建設段階にある。世界では、イタリアで計画されていた実験は計画段階で中止されたが、LHC 実験のひとつである LHCb 実験が陽子-陽子衝突によって生じる大量のボトムクォークの崩壊を用いて新しい物理の探索を行っている。

Belle II 実験では、電子陽電子衝突型加速器のルミノシティ（電子と陽電子の衝突頻度を表す加速器の性能）を Belle 実験の 40 倍に向上させることで、標準模型を超える新物理の発見を目指す。しかしながら、実験的に観測される新物理の寄与はとても小さいことが予想され、かつ B 中間子のどのような崩壊モードが観測にかかるのか分からない。これまでの B ファクトリー実験に比べ、より多くの B 中間子の崩壊モード（とくに稀崩壊モード）をより正確に測定することが、新物理発見に向けた鍵となる。そのため、加速器だけでなく、B 中間子崩壊を測定するための検出器の性能強化も重要な課題である。B 中間子崩壊におけるごく稀な事象を大量な背景事象の中から正確に拾い上げるためには、崩壊によって飛散する粒子の種類を正確に識別する必要がある。本研究は、Belle II 実験において新物理の探索を行うために、新型の粒子識別装置の開発を行い、エンドキャップ部（ビーム軸に対して浅い角度領域）に飛来する荷電粒子の識別性能の強化をめざすものである。

2 研究の方法と結果

荷電粒子が媒質中を通過する際、その速度が媒質中の光の速度を超えると、チェレンコフ光と呼ばれる光を放出する。媒質の屈折率をチェレンコフ光放出の閾値付近になるように適切に調整すると、チェレンコフ光放出の有無により粒子の識別が可能である。Belle 実験ではそのような閾値型チェレンコフカウンタを粒子識別装置として用いたが、粒子識別が可能な運動量領域が限られ、Belle 実験では B 中間子の香りの同定に必要な運動量領域 ($0.8 \text{ GeV}/c < p < 2.5 \text{ GeV}/c$) での \square 中間子と K 中間子の識別のために最適化された。その結果、より高い運動量領域 ($p > 2.5 \text{ GeV}/c$) では両者の識別はほぼ不可能であった。Belle II 実験では、B 中間子の様々な崩壊を精密に調べることで標準模型を超える新しい物理の探索を行う。そのためには、たとえば $B \rightarrow \square^+ \square^-$ 崩壊のような B 中間子の稀崩壊事象を高い精度で選別する必要がある。この崩壊による \square 中間子の運動量は約 $3.5 \text{ GeV}/c$ に達する。B 中間子の香りの同定に必要な K 中間子の識別に加え、このような高運動量の \square 中間子を識別するためには、広い運動量領域をカバーする粒子識別装置が必要である。そのため、新型粒子識別装置として Aerogel RICH 検出器の開発を行い、広範囲な運動量領域において高い \square /K 識別能力を目指した。

チェレンコフ光は、媒質を通過する荷電粒子の速度に応じて放出される角度（チェレンコフ角）が異なる。Aerogel RICH 検出器はこの性質を利用した粒子識別装置であり、 \square 中間子と K 中間子がともにチェレンコフ光を放出する高運動量領域においても、その放出角の違いを用いることで高い \square /K 識別能力が期待される。Aerogel RICH 検出器は、チェレンコフ光を発生させるためのエアロゲル輻射体、およびチェレンコフ光を検出しその位置からチェレンコフ角を測定するための光検出器で構成される。

約 $3.5 \text{ GeV}/c$ の高い運動量を持つ一つの荷電粒子がエアロゲルを通過した際、30 個程度の光子が生成される。光子は光検出器の表面において半径 6 cm 程度のリング状にばらまかれ、 \square 中間子と K 中間子とがつくるリングの半径差は 5 mm 程度である。そのため、光検出器には一光子を弁別可能な感度と、5 mm の位置の違いを分離可能な位置分解能が要求される。この要求をみたす新型光検出器として Hybrid Avalanche Photo Detector (HAPD) を浜松ホトニクスと共同で開発した。開発した HAPD は、 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ のピクセル型のアノードを持つため、光子の入射位置を二次元的に検出することが可能である。HAPD は二段階の信号増幅機能を持つが、初段の増幅率が 10^3 程度と非常に高いため、一光子に対する増幅率のばらつきが小さい。独自に開発した信号読み出し用集積回路と併せ、一光子信号の S/N 比として 23 を達成した。HAPD は、放射線に対する耐性が課題であったが、中性子および \square 線の照射試験と HAPD の改良を重ねた結果、Belle II 実験期間全体で予測される積算線量を上回る線量まで放射線耐性を持つことを最終的に確認した。

各構成要素の開発が完了したのち、小型の Aerogel RICH 検出器システムを構築し、ドイツ電子シンクロトロン (DESY) の 5 GeV 電子ビームを用いて、Aerogel RICH 検出器の性能評価を行った。その結果、一つの 5 GeV 入射電子に対する光電子数（光子数に量子効率をかけたもの）は予測値 10.8 個に対して 10.5 個、チェレンコフ角は予測値 0.2998 rad に

対して 0.2892 rad の値を得、Aerogel RICH 検出器が期待通りに動作することを確認した。

さらに、得られたビームテストの結果をもとに Belle II 実験における π 中間子と K 中間子の分離能力の見積もりを行った。イベント毎に得られる光子数およびチェレンコフ角の情報を用いて分離能力を評価した結果、3.5 GeV/c の運動量をもつ π 中間子を 97.4 % の効率で識別した場合、K 中間子を π 中間子と誤識別する確率を 4.9 % に抑えることができることが分かった。より低い運動量領域ではさらに高い π /K 識別能力を持つことを示し、Aerogel RICH 検出器は、Belle II 実験における B 中間子崩壊の測定に必要な全運動量領域において十分な π /K 識別能力を持つことを示した。

3 審査の結果

本研究では、スーパーB ファクトリー実験(Belle II 実験)で用いる新しい粒子識別装置の開発およびその性能評価を行ったものである。先代の Belle 実験で用いていたエンドキャップ部粒子識別装置は、粒子識別できる運動量領域が狭く、 $p > 2.5 \text{ GeV}/c$ の高運動量領域の粒子識別は諦められていた。Belle II 実験では、そのような高運動量領域の粒子識別が B 中間子の稀崩壊の精密測定において重要になるため、新しい原理に基づく粒子識別装置の開発にチャレンジした。限られたスペースの中で性能を発揮するために各所に工夫がなされた。著者はその中でも新しい光検出器の開発に大きく貢献した。とくに HAPD は放射線耐性がないことが課題であったが、著者は放射線照射試験を繰り返すことにより、その原因の究明および改善に大きく貢献した。最終的に行われたビームテストにおいても、その計画および実施は著者が中心となって行った。そのデータの解析においては、Aerogel RICH 検出器が期待通りに動作することを示した。さらにビームテストの実データを基に、シミュレーションに頼らない独自の解析手法を用いて、Belle II 実験で必要とされる運動量領域において高い精度で π 中間子と K 中間子が分離可能であることを示した。よって、著者は、素粒子実験における検出器の開発およびデータ解析について十分に理解しており、今後、新しい実験を自ら遂行する能力があることが認められる。

以上の結果より、本論文は博士(理学)の学位に値するものと判定した。

4 最終試験の結果

本学の学位規定にしたがって、最終試験を行った。公開の席上で論文内容の発表を行い、物理学専攻教員による質疑応答を行った。また、論文審査委員による本論文および関連分野の試問を行った。これらの結果を総合的に審査した結果、合格と判定した。