

審査の結果の要旨

論文提出者氏名： 樋口 嵩

現代の物理学が抱える最大の謎の一つに、なぜ宇宙には反粒子からなる反物質がほとんど存在しないのか、というものがある。素粒子物理学の基本的な対称性である CPT 対称性によれば粒子と反粒子はまったく同等であり、同じ性質を持つ。にも関わらず、ビッグバンから現在までの宇宙の進化の過程で如何にして反粒子がほとんど存在しない宇宙に至ったのか、未だに結論は出ていない。論文提出者の樋口くんが修士課程在籍時から参加してきた BASE 共同実験では CPT 対称性を高い精度で検証する、つまり、粒子と反粒子の性質は本当に同等であるのかを確かめるために、世界最高精度で反陽子と陽子の質量電荷比ならびに磁気モーメントの大きさの比較を行ってきたが、現時点までに違いを明らかにとはなっておらず、さらなる精度の向上が期待されている。本研究において樋口くんは、これまでの測定における不確かさの原因を分析し、その原因を突き止めるとともにこれを小さくするための実験装置の設計・改良を行い、実際に同等の時間内におよそ三分の一の不確かさでの測定を行うことができることを示し、論文にまとめた。

本論文は6部構成になっており、第1部において序論として研究の背景が記述され、第2部では測定に用いられる荷電粒子トラップの原理と、これを用いた質量電荷比ならびに磁気モーメントの測定原理が記述されている。第3部では実際に測定に用いられる実験装置の説明が、第4部ではこの装置を用いて2014年から16年に行われた質量電荷比と磁気モーメントの測定結果が記述され、その物理的意義が説明されている。第5部では2014年から16年にかけて行われた測定における不確かさの原因についての考察と、この不確かさを小さくするための装置改良が記述され、第6部においてこれらの改良の末に行われた2017年の実験の経緯とその不確かさが記述され、まとめられている。

論文審査では、まず第2部に記述された荷電粒子トラップの原理と質量電荷比ならびに磁気モーメントの測定原理についての説明が行われたあと、第4部に記述された2014年から2016年にかけて行われた測定結果とその不確かさに対する考察が行われた。質量電荷比においては 10^{-11} の精度で、磁気モーメントの値においては 10^{-9} の精度で陽子の値と反陽子の値に差がないことが示され、世界最高の精度でハドロン系における CPT 対称性の検証に成功したことは高く評価される。また、数千回にもわたって繰り返して測定された周波数の測定値とその比のアラン分散を用いた分析により、ランダムに測定値を変動させるホワイトノイズ的な成分が統計的不確かさの主要な要因であることが示され、この主な原因として外部磁場の変動が考えられることが示された。

続いて第5部においては、先に指摘された統計的不確かさの原因となっている外部磁場の変動を抑制するためのセルフシールドリングコイルの原理が説明され、新たに制作導入されたコイルによって外部磁場の変動によるトラップ内の磁場の変動をほぼ100分の1に抑える

ことができたことが報告された。このコイルのアイデア自体は新しいものではないが、先行研究で数値的に求められていた最適条件と厳密解との比較を通して、数値計算を行う上で注意しなくてはならない点を注意深く考慮し、実際の条件の下で最適となるコイルの条件を見出し、コイルを制作し、所定の性能を引き出したことが評価された。また、2014 年から 16 年の測定において系統的な不確かさの原因となっていた、反陽子と陽子の代わりに用いられた水素負イオンの質量差を補正するためのトラップ電場の違いをなくするために新たに導入された共鳴周波数が可変となる共振回路のふるまいを考察し、この新しい共振回路による系統的な不確かさは目指す測定精度と比較して十分に小さいことが示された。

最後に 2017 年 12 月から 2018 年 1 月にかけて取得した質量電荷比の比較実験のデータについての考察がなされ、周波数比の変動が過去の実験と比較してほぼ 2.4 倍狭くなっていることが示された。現在もデータ収集が続けられており、最終的な値を報告するに至らなかったことは残念であるが、陽子と反陽子の質量電荷比の比較測定において自らが持つ世界記録をさらに更新することが可能であることを明らかに示したことは高く評価される。

もとより本研究は 10 数名の共同研究者を含む共同研究であるが、論文提出者はその中心メンバーとして、本論文に記述された実験データが含む不確かさの評価、環境磁場の変動を抑えるための実験装置の改良に向けての制作とその性能評価、現在進行中の質量電荷比の比較測定に主導的な役割を果たしたと認められる。

したがって、本審査委員会は博士（学術）の学位を授与するにふさわしいと認定する。