

論文の内容の要旨

論文題目 High-Precision Measurements of the Fundamental Properties
of the Antiproton

(反陽子の基礎物理量の高精度測定)

氏名 長濱 弘季

CPT 対称性は標準理論における最も根源的な対称性の一つであり、CPT 対称性が成り立つならば物質と反物質の基礎物理量は等しいことが予言される。しかるに、我々の宇宙においては物質が反物質よりもわずかに多く存在することが知られており、この理由は現代の物理学が抱える最大の謎の一つとされている。私は博士課程の間、**Baryon Antibaryon Symmetry Experiment (BASE)** 国際共同実験の一員として陽子と反陽子の基礎物理量をこれまでにない高精度で測定し、比較することによって、CPT 対称性を検証することを目指した。本博士論文は、以下に挙げた研究成果について述べる。

- (1) 反陽子の寿命を直接的に測定し、従来値を更新した[1]。
- (2) 反陽子と陽子の質量電荷比をおよそ一千億分の七の精度で比較し、従来値を更新した。CPT 不変性が保存していることを確認した[2]。
- (3) 反陽子の g 因子をおよそ百万分の一の精度で測定し、従来値を更新した。CPT 不変性が保存していることを確認した[3]。

これらの測定実験は全て、スイスのジュネーヴ郊外にある CERN 研究所の反陽子減速器施設 (AD) において行われた。AD は世界で唯一、低エネルギー (5.3 MeV) の反陽子ビームを供給している研究施設であり、我々はこの低エネルギーの反陽子を均一磁場 \vec{B} と四重極静電場 \vec{E} から成るペニングトラップ中に捕獲し、測定実験に用いている。ペニングトラップ中の荷電粒子は、軸方向振動運動 v_z 、トラップサイクロトロン運動 v_+ 、マグネトロン運

動 v_{\perp} という三つの固有振動運動をし、安定な状態を保っている。また、荷電粒子のサイクロトロン周波数 ν_c と、これら三つの振動運動の周波数との間には、以下のような関係がある[4]。

$$\nu_c = \sqrt{\nu_+^2 + \nu_z^2 + \nu_-^2} \quad (1)$$

BASEは、陽子と反陽子の基礎物理量を高精度で測定するために、別々の役割を担う四つのペニングトラップから構成される装置を開発した。この装置は十分に真空引きされた後に、封じ切れ、超伝導磁石のボアに入れられて液体ヘリウム温度にまで冷却される。これによって、極低温下で 10^{-18} mbar以下という超高真空状態が実現する。ADから供給される反陽子ビームはBASEの装置内にあるディグレーダによりさらに減速され、反陽子の蓄積を担うReservoir trap (RT)において効率よく捕獲・蓄積される。捕らえた反陽子の数は、私が博士課程の間に開発した検出器によって非破壊的に数えることが可能である[5]。我々は、RTに閉じ込めた反陽子の数を一定期間観測し続け、他の荷電粒子との対消滅や崩壊が一切見られなかったことから、反陽子の寿命を1.08年以上と導いた[1]。これは反陽子の寿命の直接測定として、世界記録である。

さらに、電位ポテンシャルを操ることにより、荷電粒子一つずつRTから引き出し、他のペニングトラップへと輸送する手法を開発した[1]。この手法を用いることで、一個の反陽子と一個の水素負イオン H^- を別々に用意し、それぞれのサイクロトロン周波数 ν_c を同磁場中で測定することで、反陽子と陽子の質量電荷比を高精度で比較することを目指した

($q/m = (2\pi\nu_c)/|\vec{B}|$)。この際、粒子の固有振動運動がトラップ電極に誘起する微弱な鏡像電流を上述した検出器で測定し、得られた固有周波数をそれぞれ式(1)に代入することで、サイクロトロン周波数 ν_c を非破壊的に求めた。 H^- イオンは、ADから入射された反陽子ビームがディグレーダと衝突した際に作り出される。反陽子と H^- イオンの軸方向運動周波数は同条件下のペニングトラップ中において異なるので、その違いを開発した検出器によって判別することが可能である。結果的に、反陽子と陽子の質量電荷比をおよそ一千億分の七の精度で比較し、従来値を更新することに成功した。また、CPT不変性が保存していることを確認した[2]。

最後に述べる反陽子の g 因子測定は、私が博士課程在学中において大きな目標として掲げていた実験である。 g 因子は、磁気モーメント $\vec{\mu}$ とスピン \vec{S} を繋ぐ無次元量であり、以下の式で表される。

$$\vec{\mu} = g \frac{q}{2m} \vec{S} \quad (2)$$

q は電荷、 m は質量である。したがって、トラップ磁場 \vec{B} と磁気モーメント $\vec{\mu}$ による磁気双極子エネルギー $E_s = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$ はスピンの方向に依存する。また、スピン遷移に共鳴な周波数

はラーモア歳差運動周波数 ω_L と呼び、 $\omega_L = E_s/\hbar$ を満たす。一方、サイクロトロン周波数が $\omega_c = (q/m)|\vec{B}|$ と表されることに注目し、 ω_L と ω_c の比を取ると、

$$\frac{\omega_L}{\omega_c} = \frac{g}{2} \quad (3)$$

という単純な式に到達する。よって、 g 因子を測定するためにはラーモア歳差運動周波数 ω_L とサイクロトロン周波数 ω_c を同じ磁場中で測定し、比を取ることによって直接得られることがわかる。サイクロトロン周波数は前述した通り、粒子の固有振動運動が電極に誘起して発生する鏡像電流を測定することで直接求めることができるが、スピンはトラップ電極と直接相互作用しないことから、ラーモア歳差運動周波数の測定には新たな測定手法の開発が必要である。そこで我々BASEは、強い非均一磁場中にある analysis trap (AT) を新たに導入することで、スピンの軸方向周波数に大きく依存するような状態を作り出した。AT中においても反陽子は軸方向に振動運動しているが、ここでラーモア歳差運動周波数と同じ周波数を持つRFドライブを反陽子に照射してスピン遷移を起こすと、それに伴い軸方向周波数が僅かながら変化する (BASEの場合、675 kHz 中約 180 mHz の変化)。スピン遷移確率をRFドライブの周波数の関数として測定することで、ラーモア歳差運動周波数 ω_L を決定することが可能である。これは、H.G. Dehmelt と P. Ekström が考案した

「Continuous Stern-Gerlach effect」という手法である[6]。この手法を用い、我々は反陽子の g 因子を測定し、95%の信頼度で以下の値を得た。

$$\left(\frac{g}{2}\right)_p = 2.792\,846\,5(23) \quad (4)$$

これは、従来[7]より約6倍精度が高く、現時点において最も精密な値である。また、BASEと共同研究を行っている Mainz 大学が2014年に発表した陽子の g 因子の値[8]

$$\left(\frac{g}{2}\right)_p = 2.792\,847\,350(9) \quad (5)$$

とエラーバーの範囲内で一致し、CPT不変性が保たれていることを確認した[3]。

以上のように、本博士論文は反陽子の基礎物理量の高精度測定のために開発した装置、実験手法、データの解析手法、そして測定結果をまとめたものである。反陽子の寿命、反陽子(と陽子)の質量電荷比、反陽子の g 因子という三つの独立した基礎物理量について、これまでの世界記録を上回る精度で測定を行い、CPT不変性の破れの上限值を大きく更新することに成功した。

参考文献

- [1] C. Smorra *et al.* A reservoir trap for antiprotons. *Int. J. Mass Spectrom* **389** (10) 2015.
- [2] S. Ulmer *et al.* High-precision comparison of the antiproton-to-proton charge-to-mass ratio. *Nature* **524** (196) 2015.
- [3] H. Nagahama *et al.* Six-fold Improved Single Particle Measurement of the Magnetic Moment of the Antiproton. *Nat. Commun.* Accepted.
- [4] L.S. Brown and G. Gabrielse. Precision spectroscopy of a charged particle in an imperfect Penning trap. *Phys. Rev. A* **25** (2423) 1982
- [5] H. Nagahama *et al.* Highly sensitive superconducting circuit at ~700 kHz with tunable quality factors for image-current detection of single trapped antiprotons. *Rev. Sci. Instrum.* **87** (113305) 2016.
- [6] H.G. Dehmelt and P. Ekström. Continuous Stern-Gerlach effect: Principle and idealized apparatus. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **83** (2291) 1986.
- [7] J. DiSciaccia *et al.* One-particle measurement of the antiproton magnetic moment. *Phys. Rev. Lett.* **110** (130801) 2013.
- [8] A. Mooser *et al.* Direct high-precision measurement of the magnetic moment of the proton. *Nature* **509** (596) 2014.