

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号 : 82401
研究種目 : 特別推進研究
研究期間 : 2012~2016
課題番号 : 24000008
研究課題名 (和文) 反水素の超微細遷移と反陽子の磁気モーメント
研究課題名 (英文) Hyperfine splitting of antihydrogen and
Magnetic moment of antiproton
研究代表者
山崎 泰規 (YAMAZAKI, Yasunori)
国立研究開発法人理科学研究所・Ulmer 基本的対称性研究室・研究員
研究者番号 : 30114903
交付決定額 (研究期間全体) (直接経費) : 278,500,000 円

研究成果の概要 (和文) :

この宇宙から消えてしまった反物質のなぞを、反物質の代表格である反水素と反陽子を用いて研究した。反水素ビームを生成し、また、その主量子数分布を測定した。反陽子と陽子の質量電荷比を測定し、1000 億分の 1 の精度でも一致していることを明らかにした。反陽子の磁気モーメントを測定し、本研究が始まる前の値を 2000 倍上回る精度で決定した。これは、自然界に存在しない反陽子の物理的性質を、宇宙に遍在する陽子より高精度で決定したものである。その後、陽子の磁気モーメントをさらに高精度で決定した。以上の結果から、陽子と反陽子の磁気モーメントに関わる CPT 対称性は、これまでに知られていたより 3000 倍高い精度で保存していることが明らかになった。反陽子を 405 日間連続的に捕捉し、反陽子寿命下限がこれまでの 7 倍、10.2 年であることを示した。

研究成果の概要 (英文) :

The fundamental properties of antimatter have been experimentally studied employing antihydrogen atoms and antiprotons to search for the mystery why antimatter does not exist in our universe although the same amount of antimatter and matter should have been created at the time of the big bang. We have succeeded to make an antihydrogen beam and to measure its principal quantum number distribution. The mass to charge ratios of antiproton and proton was measured and found to be the same even with the precision of $\sim 10^{-11}$. The magnetic moment of antiproton was determined with a precision 2000 times better than the foregoing study. This is an epoch-making achievement in the sense that the property of antiproton which does not exist in our universe is known better than that of proton which is most abundant and omnipresent. Later, we determined the magnetic moment of proton with higher precision than that of antiproton. By combining these world-best achievements, the CPT symmetry with respect to the magnetic moment of proton and antiproton was found to be conserved with 3000 times better precision than before. Antiprotons were continuously trapped for 405 days, which corresponds to the lower limit of antiproton lifetime of 10.2 years.

研究分野 : 物理学

キーワード : 反物質、反水素、反陽子、CPT 対称性、磁気モーメント、陽電子

1. 研究開始当初の背景

基礎物理学分野における最も基本的な離散対称性である CPT 対称性は、これまで多く高エネルギー物理学の分野で研究されてきた。近年、CPT 対称性を“担保”している標準模型では説明できない物理現象が発見されており、CPT 対称性のテスト実験もますますその重要性を増している。最も厳密な CPT 対称性研究の例は、 K^0 中間子と反 K^0 中間子の質量比較で、 $|m(K^0)-m(\bar{K}^0)|/m(K)<6\times 10^{-19}$ という相対精度が報告されている。ここで $m(K^0)$ は K^0 中間子の質量である。絶対精度に換算すると、 $|m(K^0)-m(\bar{K}^0)|c^2 < 4.0\times 10^{-19}\text{GeV}$ となる。これは確かに非常に小さな量であるが、例えば K^0 の CP 対称性の破れでも $\text{Im}(m_{12})\sim 1.1\times 10^{-17}\text{GeV}$ 程度しかないことを考えると、CPT 対称性は CP 対称性の破れの高々数%程度の精度でしか確認されていないことがわかる。より高精度の CPT 対称性テストが必要なことはほぼ明らかである。

そこで、我々はより高精度測定が期待できる原子物理学的な分光法に注目した。例えば、水素原子の $1S-2S$ 遷移エネルギーは、相対精度 $\Delta E/E < 4.2\times 10^{-15}$ 、絶対精度 $\Delta E < 4.5\times 10^{-23}\text{GeV}$ で測定されている。原子物理的手法はこのように高いポテンシャルを持っている。

反水素 ($\bar{p}e^+$) の高精度分光は、いくつかの研究グループが進めているが、我々は特にこれまで 10^{-3} 程度の精度でしか知られていなかった反陽子の磁気モーメントに注目し、反水素超微細遷移の測定と単一反陽子の磁気モーメント直接測定と言う二つのテーマを設定した。超微細遷移については、強い磁場勾配がある磁気瓶の中では測定精度の向上が望めないことから、反水素原子をビームとして引き出せる新しい反水素合成法(カスプトラップ法)を考案して研究を進めてきた。本研究開始時点で我々は他グループより一桁以上高い効率で反陽子の捕捉・冷却を実現し、反水素原子の大量合成にも成功していた。

2. 研究の目的

反水素と水素の超微細遷移、及び、反陽子と陽子の磁気モーメントを高精度で測定し、CPT 対称性をテストする。さらに、両者を比較することで、反陽子と陽子の内部の磁化分布についての情報を得ることができる。反陽子の磁気モーメントは、研究開始時点では 10^{-3} 程度の精度でしか知られておらず、恰好の研究対象であった。さらに、磁気モーメントは CPT 対称性の破れに敏感な物理量であるとの理論的考察もあり (A. Kostelecky, et al.)、その意味でも本研究テーマの重要性が増すことになった。

反水素の超微細遷移についてはこれまで進めてきたカスプトラップ法をさらに発展させ反水素をビームとして引き出すことで、コントロールされた一様磁場下での測定を実現することで高精度化を目指した。反陽子の磁気モーメント研究については、専用ビームラインを建設し、高精度ペニングトラップを新たに設計した。研究分担者の S. Ulmer は、2011 年に陽子の磁気モーメント直接測定を世界で初めて実現している。

以上の布陣で、反陽子の磁気モーメントを 10^{-6} より良い相対精度で決定し、さらに (反)陽子内部の磁化分布に関する情報も得て、これまでに無い高精度の CPT 対称性テストを実現することを目的とした。

3. 研究の方法

世界で唯一低エネルギー反陽子を供給している CERN の反陽子減速リング (AD: Anti-proton Decelerator) から 5.3MeV ($100\text{MeV}/c$) のパルス状反陽子ビームを用いる。反水素実験の場合は、この 5.3MeV の反陽子ビームを高周波四重極減速装置 (RFQD: Radio Frequency Quadrupole Decelerator) により数 10keV まで減速した後、効率よく多重電極トラップに捕捉する。AD からの 1 パルスあたり 10^6 個程度の反陽子が捕捉できる。これは他の研究グループより $10-100$ 倍高い捕捉効率で、本研究グループの強みとなっている。反陽子実験については、減速薄膜を通過させた後、そのままペニングトラップに反陽子を捕捉する。 10^3 個程度の反陽子が捕捉される。

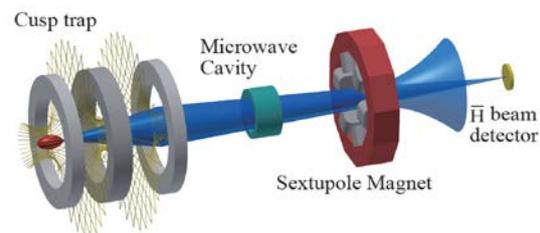


図1 反水素合成装置主要部分の模式図。二重カスプ磁場内で生成された LFS (Low Field Seeking) 状態にある反水素は、二重カスプ磁場で軸方向に集束されて反水素ビームとなり、マイクロ波キャビティを通過した後、さらに 6 重極磁場を通過する。反水素が LFS 状態のままであれば再度集束されて反水素ビーム検出器に高い確率で検出される。一方、マイクロ波が超微細遷移エネルギーと一致すると、反水素は HFS (High Field Seeking) 状態に遷移し、6 重極磁石で広げられて反水素ビーム検出器では検出されなくなる。この原理を用い、遷移エネルギーを高精度で決定

する。

反水素実験：水素原子の超微細遷移測定は確立された実験手法であり、反水素にも同様に適用できる。従って、本研究の実質的メインテーマは、運動エネルギーが低く、基底状態にある反水素原子を大量、且つ、安定に生成する方法の開発になる。

反陽子実験：ペニングトラップ中の反陽子群から、反陽子 1 個を分離し、磁気モーメントを連続 Stern-Gerlach 法により、直接観測する。磁気モーメント測定にはペニングトラップ中の磁束密度を高精度で測定する必要がある。ここでは、反陽子のサイクロトロン周波数を磁束密度のモニターとした。これが超高精度で実現できることを利用し、反陽子、及び、H の質量電荷比をこれまでにない精度で決定する。以上の荷電粒子操作と測定は定性的にはよく知られたものであるが、実際には（反）陽子の磁気モーメントが非常に小さい（電子の磁気モーメントの数百分の 1）ことから、大変困難な実験となっている。

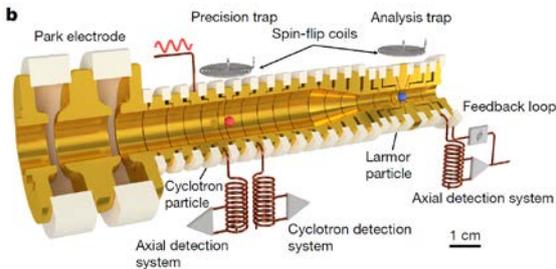


図 2：反陽子の磁気モーメント測定のためのペニングトラップ模式図。スピンフリップは磁場の安定性と一様性が優れている Precision trap で誘起し、スピンの向きは、局所的に強い不均一磁場をもつ Analysis trap を用い、軸方向振動数のわずかな違いから判別する。

4. 研究成果

反水素ビームの生成と超微細遷移分光については、先ず、 ^{22}Na の β 崩壊で放出される陽電子を減速・蓄積する手法を改善し、蓄積効率をこれまでより一桁上げること成功した。次いで、反陽子蓄積装置から反水素合成装置への反陽子の断熱的な輸送を成功させ、実際、1.5eV というこれまでに無い超低エネルギービームを得た。その結果、反水素原子を合成し、これを反水素ビームとして引き出すことに初めて成功した（Nature Comm., 2014）。続いて、反水素ビームの主量子数分布を測定した。反水素ビーム強度増強のため、新たな反陽子と陽電子の混合法を開発した。なお、混合条件の最適化を進めている。

反陽子、及び、水素イオン(H)のサイクロトロン周波数を測定し、反陽子、及び、陽子の

質量電荷比をこれまでにない精度で決定した。これから、質量電荷比に関しての CPT 対称性が、 $(|q|/m)_{\bar{p}}/(q/m)_{p-1} = 1(69) \times 10^{-12}$ の精度で成立していることを明らかにした（Nature, 2015）。次に、反陽子の磁気モーメントを測定し、本研究期間中に世界最高精度を二度更新し（一度目：Nature Comm., 2017、二度目：Nature, 2017）、 $\mu_{\bar{p}} = 2.792847350(9) \mu_N$ と 1.5×10^{-9} の精度で決定した。これはそれまでの精度を 2000 倍向上させたもので、本研究の当初目標を 3 桁上回る超高精度となっている。大きな成果だと考えている。この研究は、自然界に存在しない反陽子の磁気モーメントを、自然界に最も豊富に存在する陽子の磁気モーメントより高い精度で決定したもので、その意味でも画期的であると考えている。ほぼ一ヶ月後、陽子の磁気モーメント測定の精度を 0.3ppb とさらに高くすることに成功した（Science, 2017）。これにより、陽子の精度が反陽子の精度を再度上回ることとなった。以上の 2 つの高精度測定を組み合わせることで、陽子と反陽子の磁気モーメントに関わる CPT 対称性を評価した。本研究開始前のほぼ 3000 倍高い精度で反陽子と陽子の磁気モーメント、 $|\mu_{\bar{p}}|$ と $|\mu_p|$ が一致していることを明らかにした。さらに、複数個の反陽子を 405 日間ペニングトラップ中に維持し、反陽子の寿命下限を 10.2 年と、これまでより 7 倍長いことを示した（New J. Phys. 2017）。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 35 件）

- ① C. Smorra (1 番目), S. Sellner (2 番目), Y. Matsuda (12 番目), Y. Yamazaki (16 番目), S. Ulmer, (17 番目) (全 17 名), A parts-per-billion measurement of the antiproton magnetic moment, Nature 550 (2017), p. 371-p. 374, 査読有 doi: 10.1038/nature24048
- ② G. Schneider (1 番目), A. Mooser (2 番目), Y. Matsuda (11 番目), M. J. Walz (13 番目), S. Ulmer (14 番目) (全 14 名), Double-trap measurement of the proton magnetic moment at 0.3 parts per billion precision, Science 358 (2017), p. 1081-p. 1084, 査読有 DOI:10.1126/science.aan0207
- ③ S. Sellner (1 番目), M. Besirli (2 番目), Y. Matsuda (13 番目), Y. Yamazaki (17 番目), S. Ulmer (18 番目) (全 18 名), Improved limit on the directly measured antiproton lifetime, New J. Phys. 19 (2017) 083023 (p. 1-p. 6), 査読有 doi.org/10.1088/1367-2630/aa7e73

- ④ C. Malbrunot(1 番目), H. Breuker(2 番目), H. Higaki(7 番目), Y. Kanai(8 番目), N. Kuroda(11 番目), Y. Matsuda(16 番目), Y. Nagata(17 番目), S. Ulmer(21 番目), E. Widmann(23 番目), Y. Yamazaki(25 番目) (全 26 名), The ASACUSA antihydrogen and hydrogen program: results and prospects, Philosophical Transactions of the Royal Society of London A 376 (2017) 2116-2126, 査読有 DOI:10.1098/rsta.2017.0273
- ⑤ V. Maeckel(1 番目), B. Radics(2 番目), H. Higaki(4 番目), Y. Kanai(5 番目), N. Kuroda(6 番目), Y. Matsuda(7 番目), Y. Nagata(8 番目), E. Widmann(10 番目), Y. Yamazaki(11 番目) (全 11 名), Imaging antimatter with a Micromegas detector, Nucl. Instrum. Methods in Physics Research B 422 (2017), p.1-p.4, 査読有 doi.org/10.1016/j.nimb.2018.02.026
- ⑥ H. Nagahama(1 番目), C. Smorra(2 番目), Y. Matsuda(14 番目), Y. Yamazaki(16 番目) S. Ulmer(17 番目) (全 17 名), Sixfold improved single particle measurement of the magnetic moment of the antiproton, Nature Comm. 14084 (2017), p.1-p.7, 査読有 DOI: 10.1038/ncomms14084
- ⑦ B. Radics and Y. Yamazaki, Anti-hydrogen level population evolution: impact of positron plasma length, J. Phys. B 49 (2016) 064007, p.1-p.4, 査読有 doi:10.1088/0953-4075/49/6/064007
- ⑧ Y. Nagata(1 番目), N. Kuroda(2 番目), H. Torii(8 番目), Y. Matsuda(10 番目), Y. Yamazaki(12 番目) (全 12 名), Direct detection of anti-hydrogen atoms using a BGO crystal, Nucl. Instrum. Methods A 840 (2016) p.153-p.159, 査読有 doi.org/10.1016/j.nima.2016.10.019
- ⑨ C. Smorra(1 番目), K. Blaum(2 番目), Y. Matsuda(15 番目), Y. Yamazaki(19 番目), S. Ulmer(20 番目) (全 20 名), BASE - The Baryon Antibaryon Symmetry Experiment, The European Physical J. 224 (2015) p.3055-p.3108, 査読有 DOI:10.1140/epjst/e2015-02607-4
- ⑩ B. Radics(1 番目), Y. Nagata(2 番目), Y. Yamazaki(3 番目), N. Kuroda(5 番目), Y. Matsuda(6 番目) (全 18 名), The ASACUSA Miromegas Tracker: A cylindrical, bulk micromegas detector for antimatter research, Rev. Sci. Instrum. 86 (2015) 083304, p.1-p.8, 査読有 doi:10.1063/1.4927685
- ⑪ C. Smorra(1 番目), A. Mooser(2 番目), Y. Matsuda(9 番目), Y. Yamazaki(12 番目), S. Ulmer(13 番目) (全 13 名), A reservoir trap for antiprotons, Int. J. Mass Spectroscopy 389 (2015) p.10-p.13, 査読有 <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijms.2015.08.007>
- ⑫ S. Ulmer(1 番目), C. Smorra(2 番目), Y. Matsuda(10 番目), Y. Yamazaki(13 番目) (全 13 名), High-precision comparison of the antiproton-to-proton charge-to-mass ratio, Nature 524 (2015) p.196-p.199, 査読有 doi: 10.1038/nature14861
- ⑬ Y. Nagata and Y. Yamazaki, A novel property of anti-Helmholz coils for in-coil syntheses of antihydrogen atoms: formation of a focused spin-polarized beam, New J. Physics 16 (2014) 083026, p.1-p.10, 査読有 doi:10.1088/1367-2630/16/8
- ⑭ A. Mooser, S. Ulmer, K. Blaum, K. Franke, H. Kracke, C.C. Rodegheri, W. Quint, C. Smorra, J. Walz, Direct high-precision measurement of the magnetic moment of the proton, Nature 509 (2014) p.596-p.599, 査読有 doi: 10.1038/nature13388
- ⑮ B. Radics, D.J. Murtagh, Y. Yamazaki, and F. Robicheaux, Scaling behaviour of the ground-state antihydrogen yield from CTMC simulation as a function of positron density and temperature, Phys. Rev. A 90 (2014) 032704, p.1-p.9, 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevA.90.032704
- ⑯ N. Kuroda(1 番目), S. Ulmer(2 番目), H. Torii(22 番目), H. Higaki(27 番目), Y. Kanai(28 番目), Y. Nagashima(30 番目), Y. Matsuda(31 番目), E. Widmann(32 番目), Y. Yamazaki(33 番目) (全 33 名), A source of antihydrogen for in-flight hyper-fine Spectroscopy, Nature Comm. 4089 (2014), p.1-p.6, 査読有 Doi/10.1038/ncomms4089
- ⑰ C. Smorra(1 番目), K. Blaum(2 番目), Y. Matsuda(4 番目), Y. Yamazaki(12 番目), S. Ulmer(13 番目) (全 13 名), Towards a high-precision measurement of the antiproton magnetic moment, Hyperfine Interaction 225 (2013), p.41-p.47, 査読有 DOI 10.1007/s10751-014-1018-7
- ⑱ A. Mooser(1 番目), S. Braeuninger(2 番目), Y. Matsuda(11 番目), Y. Yamazaki(14 番目), S. Ulmer(15 番目) (全 15 名), Demonstration of the double Penning Trap technique with a single proton, Phys. Lett. B 723 (2013) p.78-p.81, 査読有 Doi.org/10.1016/j.physletb.2013.05.012
- ⑲ Y. Yamazaki and S. Ulmer, CPT symmetry tests with cold antiproton and

antihydrogen, *Ann. Der Physik* 525 (2013) 493-504, 査読有 DOI 10.1002/andp. 201300060

- ⑳ Y. Yamazaki, Antimatter Matters: Progress in Cold Antihydrogen Research, *J. Phys. Conf. Ser.* 388 (2012) 012002, p.1-p.12, 査読有 doi:10.1088/1742-6596/388/1/012002
- ㉑ N. Kuroda(1番目), H. A. Torii(2番目), Y. Kanai(7番目), H. Higaki(10番目), Y. Nagashima(16番目), Y. Matsuda(17番目), Y. Yamazaki(19番目)(全19名), Development of a monoenergetic ultra-slow antiproton beam source for high-precision investigation, *Phys. Rev. Special Topics - Acc. and Beams* 15 (2012) 024702, p.1-p.10, 査読有
- ㉒ M. D. Ashkezari(1番目), G. B. Andresen(2番目), Y. Yamazaki(41番目)(全41名), Progress towards microwave spectroscopy of trapped antihydrogen, *Hyperfine Interaction* 212 (2012) p. 81- p.90, 査読有 DOI10.1007/s10751-011-0449-7

[学会発表] (計 85 件)

- ① S. Ulmer, Challenging the Standard Model by High-Precision Comparisons of the Fundamental Properties of the Antiproton and the Proton, 48th Annual Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics (2017)
- ② K. Kuroda, Synthesis of antihydrogen with adiabatically transported cold anti- protons, 30th ICPEAC (2017)
- ③ B. Kolbinger, Measuring the ground state hyperfine splitting of antihydrogen, INPC (2016)
- ④ N. Kuroda, Development of a double cusp trap for ground-state hyperfine spectroscopy of antihydrogen atoms, *Physics of fundamental symmetries and interactions* (2016)
- ⑤ S. Ulmer, Challenging the Standard Model by High Precision Comparisons of the Fundamental Properties of Protons and Antiprotons, 9th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (2016)
- ⑥ Y. Nagata, The development of the antihydrogen beam detector and the detection of the antihydrogen atoms for in-flight hyperfine spectroscopy, 24th International conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions (2015)
- ⑦ N. Kuroda, A beam of antihydrogen atoms for hyperfine spectroscopy, 24th International conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions

(2015)

- ⑧ S. Ulmer, Search for beyond Standard Model Physics using Single Trapped Antiprotons, International conference on precision physics and fundamental constants (2015)
- ⑨ Y. Yamazaki, Recent Progresses of cold antihydrogen/antiproton research at AD, CERN, 8th Fundamental Physics Using Atoms (2015)
- ⑩ K. Kuroda, Antihydrogen beam production from a CUSP trap, Topical Workshop of the FLAIR Collaboration (2014)
- ⑪ E. Widmann, Progress towards in-flight hyperfine spectroscopy of antihydrogen, International Conference on Precision Physics of Simple Atomic Systems (2014)
- ⑫ D. Murtagh, Positron storage for the production of an antihydrogen beam, 24th International Conference on Atomic Physics (2014)
- ⑬ B. Radics, Production of a cold antihydrogen beam with a cusp trap, 24th International Conference on Atomic Physics (2014)
- ⑭ S. Van Gorp, Production of a cold antihydrogen beam with a cusp trap, International Conference on Trapped Ions 2014 (2014)
- ⑮ Y. Yamazaki, What (anti-)matters with antimatter?, Trapped Charged Particles (2014)
- ⑯ Y. Yamazaki, Atomic physics and atomic collision physics from Z=-1 to 92, 28th ICPEAC (2013)
- ⑰ S. Van Gorp, Towards the production of an antihydrogen beam, POSMOL 2013 (2013)

[図書] (計 1 件)

Y. Yamazaki, M. Doser, P. Perez, Antihydrogen Beams, *physicsworld Discovery*, IOP Publishing (eBook), DOI10.1088/978-0-7503-2021-4

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

[その他]

☆ホームページ

<http://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp/asacusa/wiki/>

<http://ulmerfsl.riken.jp/>

<http://www.riken.jp/ap/>

☆報道関係、一般向け科学雑誌等

2018年5月：ドイツのテレビ局 3sat が反陽子の CPT 対称性に関わって、研究分担者をインタビューした番組を放映した (<http://www.3sat.de/mediathek/?mode=play&obj=73500>)

2016年12月：BS フジ “ガリレオ X” 消えた反物質の謎～私達はなぜ存在しているのか “

2015年10月8日：NHK コズミックフロント” 消えた反物質の謎 “

2015年8月：論文番号⑫の反陽子と陽子の質量電荷比の最高精度測定は、日本、ドイツ他各国で報道されたほか、科学雑誌ニュートン (2015/11) で “陽子と反陽子の超精密な体重測定 “として取り上げられた。

2014年11月：理研ニュース “物理学の大前提は盤石か？ 世界初の反水素の精密測定が始まる”

2014年3月28日：読売新聞 “反物質の謎 突き止める”

2014年1月：論文番号⑭の反水素ビーム生成成功は、日本、ドイツ、フランス、スイス、スペイン、チリ、インド、韓国、中国、等々世界各国の 20 程度のメディアで取り上げられた。さらに、“ASACUSA produces first beam of antihydrogen atoms for hyperfine study”、また、“Anti-beam-me-up, Scotty” として CERN Courier, “First beam of anti-hydrogen atoms produced at CERN” として Symmetry magazine、また、Nature の News & Comments の Seven Days で詳しく紹介されたほか、フランスの科学雑誌 La Recherche(2014/4)に” Le premier faisceau d’ anti- hydrogene” として取り上げられた。

2012年9月：physicsworld の Special Report Japan, Challenges for a global leader in physics の中で、“Getting a grip on antimatter” として本特別推進研究の中心課題が紹介された。

2012年2月：ドイッチェマガジン (ドイツ外務省の和文広報誌) “反物質の謎を探る”

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山崎 泰規 (YAMAZAKI, Yasunori)
国立研究開発法人理化学研究所・Ulmer 基本的対称性研究室・研究員
研究者番号：30114903

(2) 研究分担者

ウルマー シュテファン (ULMER, Stefan)
国立研究開発法人理化学研究所・Ulmer 基本的対称性研究室・主任研究員

研究者番号：50624813

松田 恭幸 (MATZUDA, Yasuyuki)
東京大学・総合文化研究科・准教授
研究者番号：70321817

永田 祐吾 (NAGATA, Yugo)
東京農工大学・工学研究科・特任助教
研究者番号：30574115

(3) 連携研究者

黒田 直史 (KURODA, Naofumi)
東京大学・総合文化研究科・助教
研究者番号：10391947

檜垣 浩之 (HIGAKI, Hiroyuki)
広島大学・先端物質科学研究科・准教授
研究者番号：10334046

長嶋 泰之 (NAGASHIMA, Yasuyuki)
東京理科大学・理学部・教授
研究者番号：60198322

金井 保之 (KANAI, Yasuyuki)
国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器センター・研究員
研究者番号：00177487

鳥居 寛之 (TORII, Hiroyuki)
東京大学・理学部・准教授
研究者番号：20302838

(4) 研究協力者

ウィドマン エヴァハルト (WIDMANN, Everhard)・ステファンマイア-研究所 (Stefan Meier Institut)・所長、オーストリア

クラウス ブラウム (BLAUM, Klaus)
マックスプランク研究所 (Max Planck Institut)・ディレクター、ドイツ

ヴェンチュリー ルカ (VENTURELLI, Luca)
ブレシア大学 (Brescia Univ.)・教授、イタリア

ブロイカー ホルスト (BREUKER, Horst)
CERN・研究員、スイス