

# CERN反陽子減速器における 反水素を用いたALPHA実験

石田 明

東京大学

平成28年3月2日

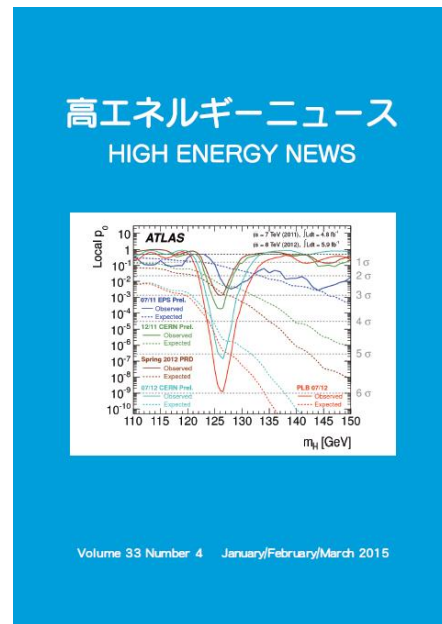
22<sup>nd</sup> ICEPPシンポジウム

# 目次

- 反物質(反水素)を用いた研究: CPTの検証
- 反陽子減速器(AD; Antiproton Decelerator)@CERN
- 陽電子蓄積装置
- ALPHA実験
- 反水素の生成と閉じ込め、検出
- ALPHA-2 実験の現状
- 反水素の電荷に対する新しい制限
- まとめ

258

■研究紹介



いよいよ始まる反水素分光実験

ALPHA 実験 (CERN) でのトラップした反水素による CPT の検証

興味のある方は、高エネルギー  
ニュース Vol. 33, No. 4, p. 258 も  
ご高覧願います。

東京大学大学院理学系研究科, CERN

石田 明

ishida@icepp.s.u-tokyo.ac.jp

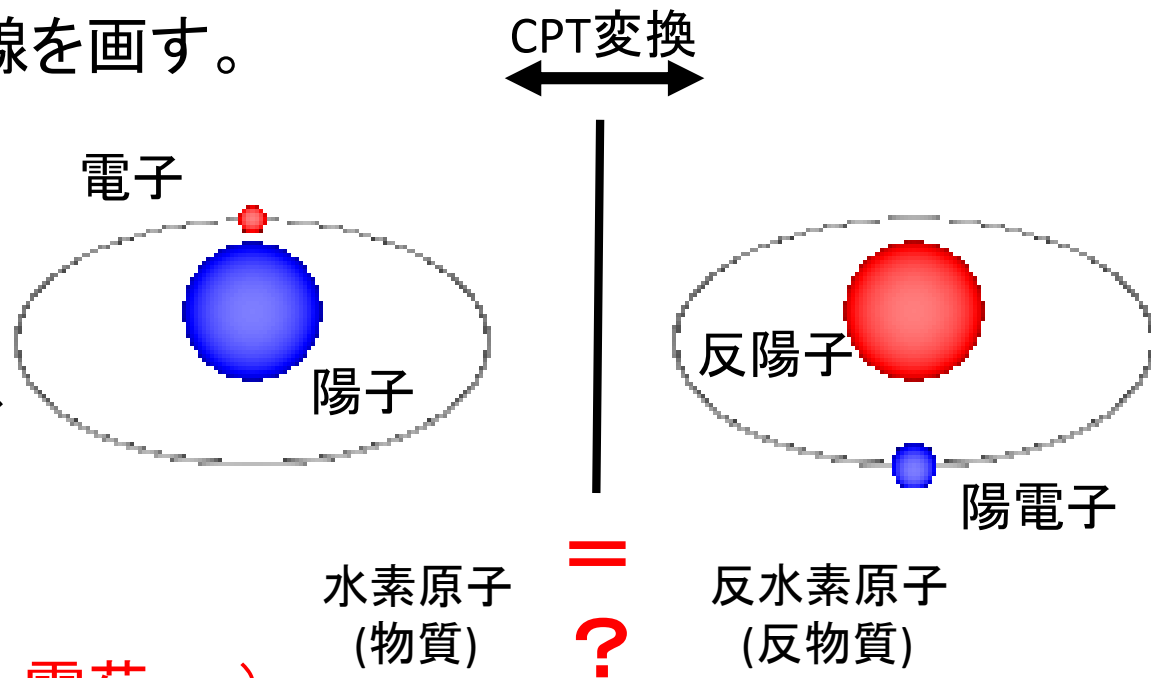
TRIUMF – Canada's National Laboratory for Particle and Nuclear Physics

藤原 真琴

Makoto.Fujiwara@triumf.ca

# 反物質(反水素)を用いた研究 CPT対称性の検証

- 物理法則のもっとも基本的な対称性の一つ:  
CPT (荷電共役・空間反転・時間反転) 対称性の検証
- 「局所場の理論」自体の検証であり、  
他の対称性検証とは一線を画す。
- 量子重力理論では、  
プランクスケールで CPT  
を破る可能性→プランク  
スケール物理のプローブ
- 反物質の重力

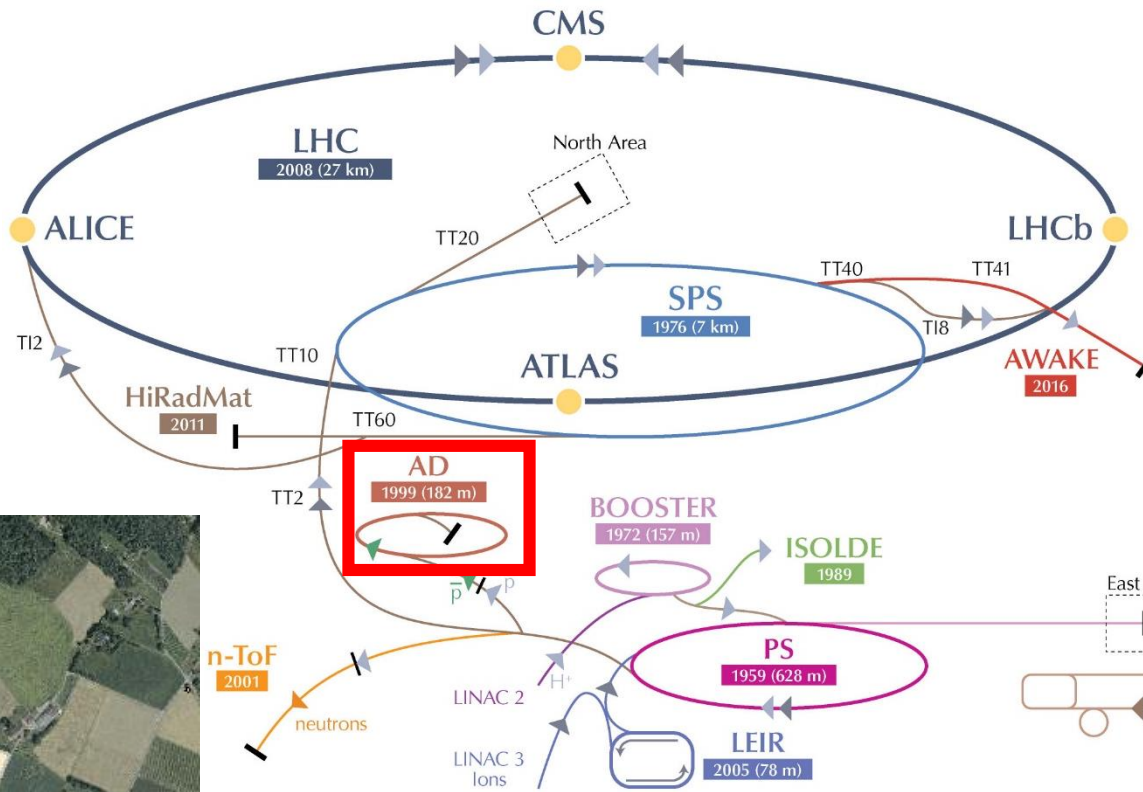


## 反水素の性質

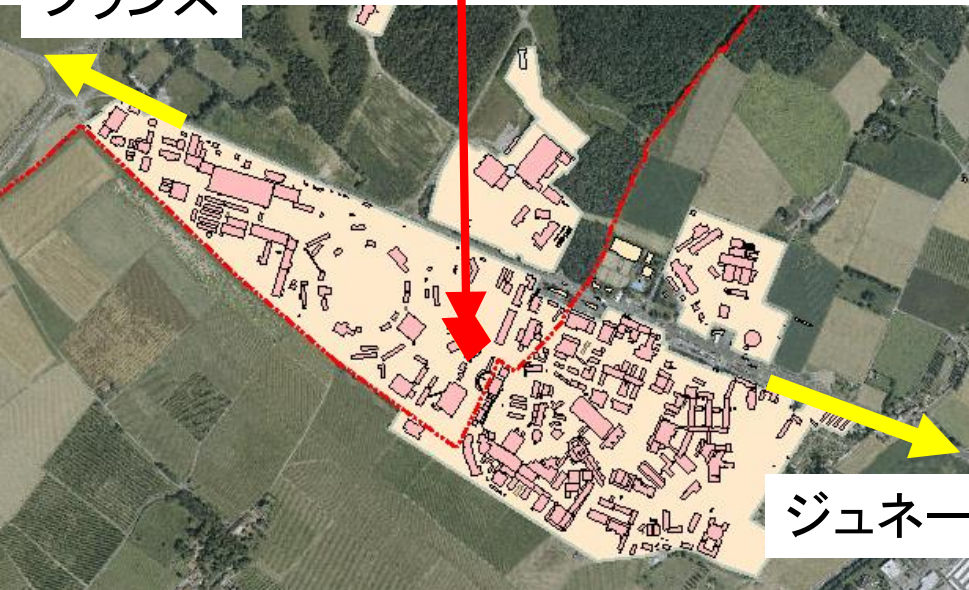
(質量、エネルギー準位、電荷、、)

を精密に測定し、水素と比較 (モデルに拠らない。K,  $\nu$  と相補的)

# 反陽子減速器(AD; Antiproton Decelerator) @CERN



フランス

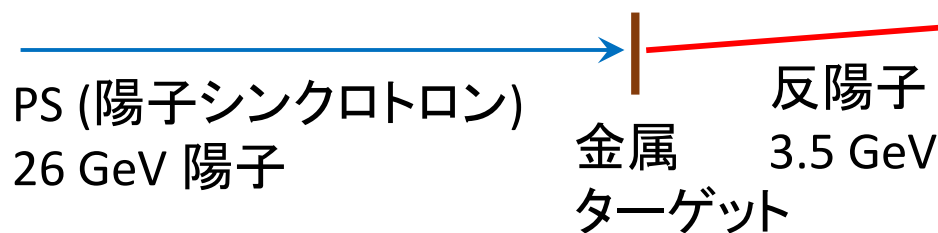


ジュネーブ

CERN Meyrin site

LINAC → BOOSTER → PS  
→ AD

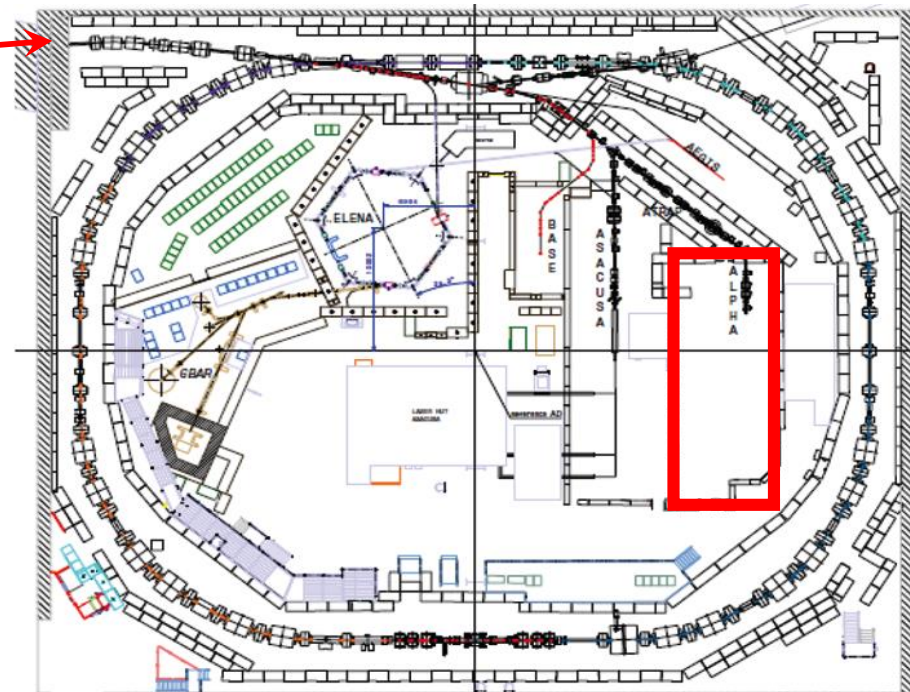
# 反陽子減速器 (AD; Antiproton Decelerator)



- 世界で唯一、反物質研究のための低エネルギー反陽子を作れる装置
- PS 加速器で 26 GeV 高エネルギー陽子を作って、金属に当てる  
→その反応で出てくる中に、ごく僅か

~ $10^{-6}$  だけ、高エネルギー (3.5 GeV) 反陽子  
→減速 (~1/1000エネルギー) 5.3 MeV →約 2分に1回、 $3 \times 10^7$  個のパルス

- 現在、ALPHAをはじめ、ASACUSA(東大、理研など)、ATRAP, AEgIS, BASE, ACE の6実験 (GBAR 実験も承認済み)。
- 将来、ELENA というアップグレード (建設中。2017年運転開始予定)によってより低エネルギー (100 keV) の反陽子ビームを作る予定。

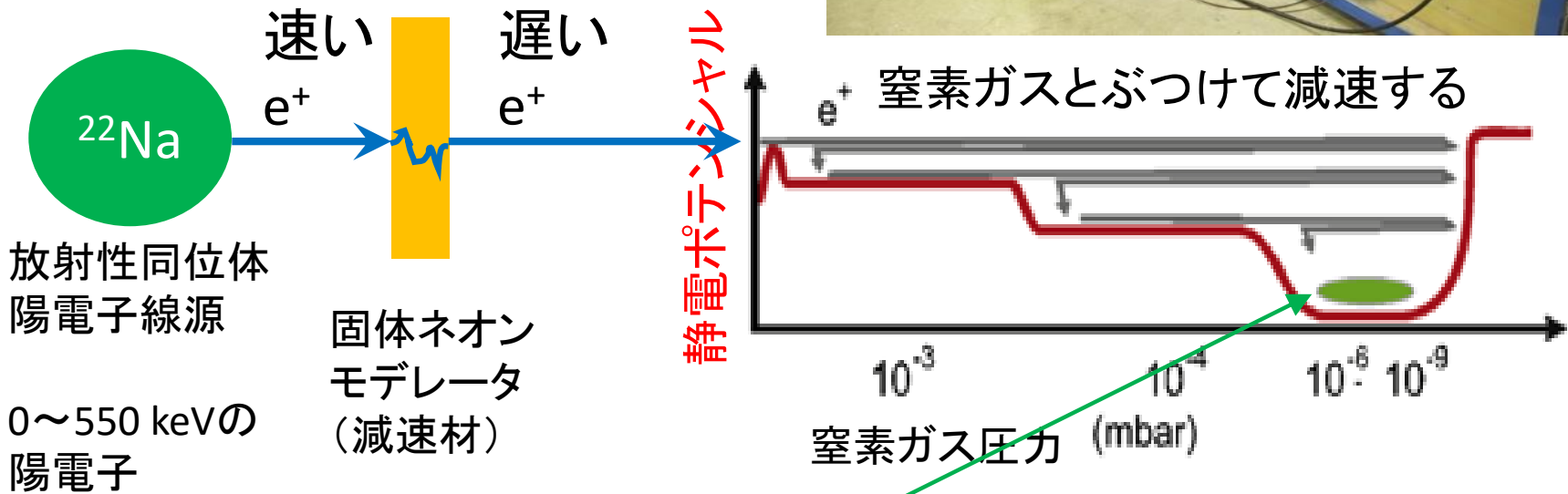


この中を回しながら減速

# 陽電子蓄積装置

(Positron accumulator)

- 反水素生成には、反陽子と陽電子が必要。
- 高密度・低温な陽電子を供給
- 200秒で $10^8$ 個の陽電子を蓄積



溜まった陽電子を、反水素閉じ込め装置に送り出し、反陽子と混ぜる

# ALPHA実験



- Antihydrogen Laser Physics Apparatus
- 現在、8ヶ国、16機関、約50人の国際共同実験 (2005年～)
- 前身のATHENA実験を引き継ぐ
- フェーズ1では、反水素を定常的に閉じ込めることが目的
- 石田は 2013.12 – 2015.11 の間、海外学振で参加

## 主な成果

- **世界初**の反水素の閉じ込め (2010年, Nature **468**, 673)

## LETTER

doi:10.1038/nature09610

## Trapped antihydrogen

G. B. Andresen<sup>1</sup>, M. D. Ashkezari<sup>2</sup>, M. Baquero-Ruiz<sup>3</sup>, W. Bertsche<sup>4</sup>, P. D. Bowe<sup>1</sup>, E. Butler<sup>4</sup>, C. L. Cesar<sup>5</sup>, S. Chapman<sup>3</sup>, M. Charlton<sup>4</sup>, A. Deller<sup>4</sup>, S. Eriksson<sup>4</sup>, J. Fajans<sup>3,6</sup>, T. Friesen<sup>7</sup>, M. C. Fujiwara<sup>8,7</sup>, D. R. Gill<sup>8</sup>, A. Gutierrez<sup>9</sup>, J. S. Hangst<sup>1</sup>, W. N. Hardy<sup>9</sup>, M. E. Hayden<sup>2</sup>, A. J. Humphries<sup>4</sup>, R. Hydomako<sup>7</sup>, M. J. Jenkins<sup>4</sup>, S. Jonsell<sup>10</sup>, L. V. Jørgensen<sup>4</sup>, L. Kurchaninov<sup>8</sup>, N. Madsen<sup>4</sup>, S. Menary<sup>11</sup>, P. Nolan<sup>12</sup>, K. Olchanski<sup>8</sup>, A. Olin<sup>8</sup>, A. Povilus<sup>3</sup>, P. Pusa<sup>12</sup>, F. Robicheaux<sup>13</sup>, E. Sarid<sup>14</sup>, S. Seif el Nasr<sup>9</sup>, D. M. Silveira<sup>15</sup>, C. So<sup>3</sup>, J. W. Storey<sup>8†</sup>, R. I. Thompson<sup>7</sup>, D. P. van der Werf<sup>4</sup>, J. S. Wurtele<sup>3,6</sup> & Y. Yamazaki<sup>15,16</sup>

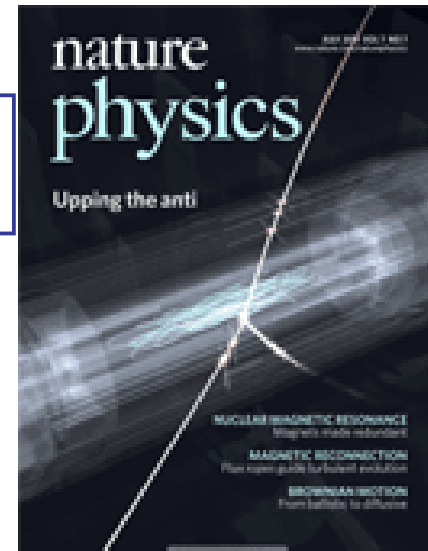
# ALPHA実験



- Antihydrogen Laser Physics Apparatus
- 現在、8ヶ国、16機関、約50人の国際共同実験 (2005年～)
- 前身のATHENA実験を引き継ぐ
- フェーズ1では、反水素を定常的に閉じ込めることが目的
- 石田は2013年より海外学振で参加

## 主な成果

- 世界初の反水素の閉じ込め (2010年, Nature **468**, 673)
- 1000秒間の閉じ込め (2011年, Nat. Phys. **7**, 558)



## ARTICLES

PUBLISHED ONLINE: 5 JUNE 2011 | DOI: 10.1038/NPHYS2025

nature  
physics

## Confinement of antihydrogen for 1,000 seconds

The ALPHA Collaboration\*



# ALPHA実験



- Antihydrogen Laser Physics Apparatus
- 現在、8ヶ国、16機関、約50人の国際共同実験 (2005年～)
- 前身のATHENA実験を引き継ぐ
- フェーズ1では、反水素を定常的に閉じ込めることが目的
- 石田は2013年より海外学振で参加

## 主な成果

- 世界初の反水素の閉じ込め (2010年, Nature **468**, 673)
- 1000秒間の閉じ込め (2011年, Nat. Phys. **7**, 558)
- マイクロ波による反水素スピン反転 (2012年, Nature **483**, 439)

## LETTER

doi:10.1038/nature10942

## Resonant quantum transitions in trapped antihydrogen atoms

C. Amole<sup>1</sup>, M. D. Ashkezari<sup>2</sup>, M. Baquero-Ruiz<sup>3</sup>, W. Bertsche<sup>4,5,6</sup>, P. D. Bowe<sup>7</sup>, E. Butler<sup>8</sup>, A. Capra<sup>1</sup>, C. L. Cesar<sup>9</sup>, M. Charlton<sup>4</sup>, A. Deller<sup>4</sup>, P. H. Donnan<sup>10</sup>, S. Eriksson<sup>4</sup>, J. Fajans<sup>3,11</sup>, T. Friesen<sup>12</sup>, M. C. Fujiwara<sup>12,13</sup>, D. R. Gill<sup>13</sup>, A. Gutierrez<sup>14</sup>, J. S. Hangst<sup>7</sup>, W. N. Hardy<sup>14,15</sup>, M. E. Hayden<sup>2</sup>, A. J. Humphries<sup>4</sup>, C. A. Isaac<sup>4</sup>, S. Jonsell<sup>16</sup>, L. Kurchaninov<sup>13</sup>, A. Little<sup>3</sup>, N. Madsen<sup>4</sup>, J. T. K. McKenna<sup>17</sup>, S. Menary<sup>1</sup>, S. C. Napoli<sup>4</sup>, P. Nolan<sup>17</sup>, K. Olchanski<sup>13</sup>, A. Olin<sup>13,18</sup>, P. Pusa<sup>17</sup>, C. Ø. Rasmussen<sup>7</sup>, F. Robicheaux<sup>10</sup>, E. Sarid<sup>19</sup>, C. R. Shields<sup>4</sup>, D. M. Silveira<sup>20†</sup>, S. Stracka<sup>13</sup>, C. So<sup>3</sup>, R. I. Thompson<sup>12</sup>, D. P. van der Werf<sup>4</sup> & J. S. Wurtele<sup>3,11</sup>

# ALPHA実験



- Antihydrogen Laser Physics Apparatus
- 現在、8ヶ国、16機関、約50人の国際共同実験 (2005年～)
- 前身のATHENA実験を引き継ぐ
- フェーズ1では、反水素を定常的に閉じ込めることが目的
- 石田は2013年より海外学振で参加

## 主な成果

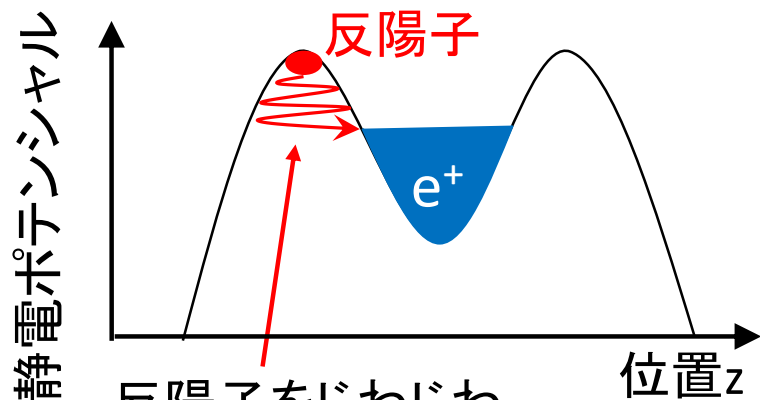
- 世界初の反水素の閉じ込め (2010年, Nature **468**, 673)
- 1000秒間の閉じ込め (2011年, Nat. Phys. **7**, 558)
- マイクロ波による反水素スピン反転 (2012年, Nature **483**, 439)
- 反水素の電荷に対する実験的制限  
(2014年, Nat. Commun. **5**, 4955)

反水素を、精密分光に必要な時間閉じ込め続けることに成功  
→2012年より、フェーズ2 (ALPHA-2) 実験を開始

レーザーやマイクロ波を用いた精密分光実験へ

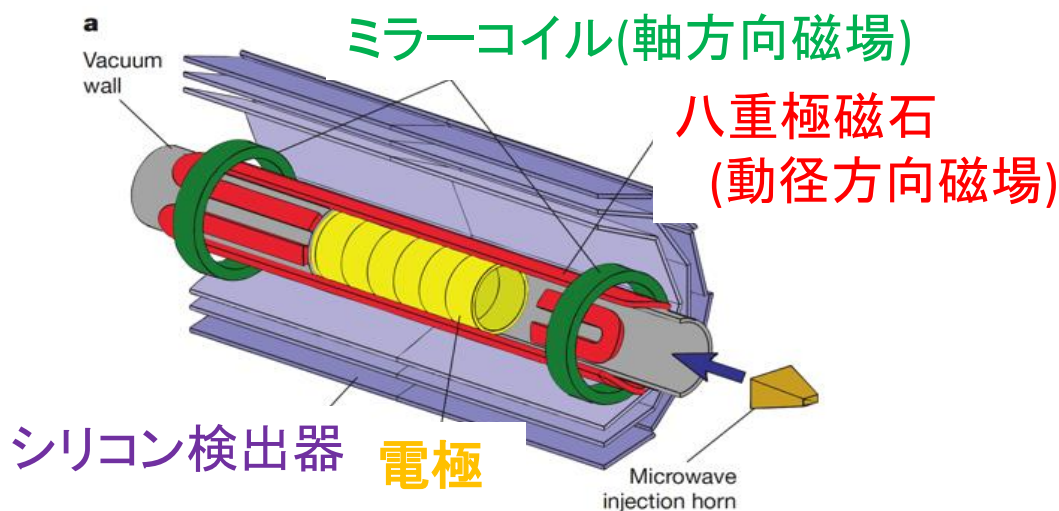
# 反水素の生成と閉じ込め

- 低温・高密度な反陽子と陽電子を、電場を使って混ぜる
- できた反水素は中性  $\rightarrow$  磁場で閉じ込め  $-\mu \cdot B$  (0.7 Kelvin/Tesla)
- 反水素は物質にぶつかると消滅  $\rightarrow$  超高真空

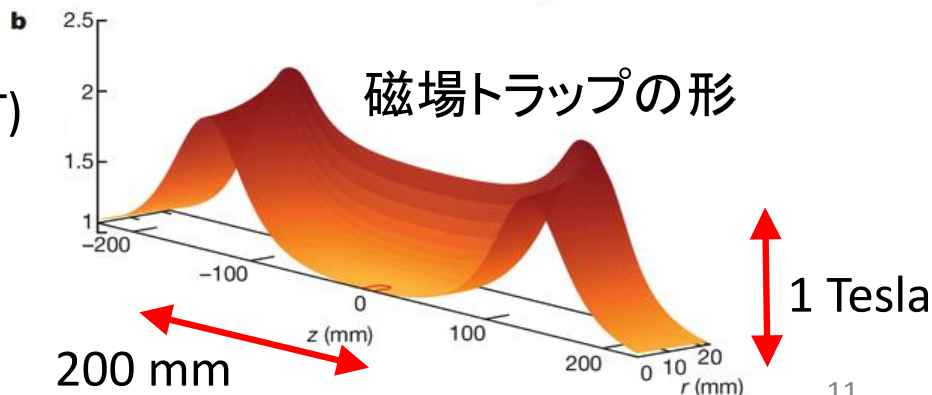


反陽子をじわじわ加熱して、必要最小限のエネルギーで陽電子と混ぜる

混ぜたら、大きな電場で荷電粒子(反陽子・陽電子)を取り除いた後、電場はゼロに  $\rightarrow$  中性粒子のみが磁場トラップに残る

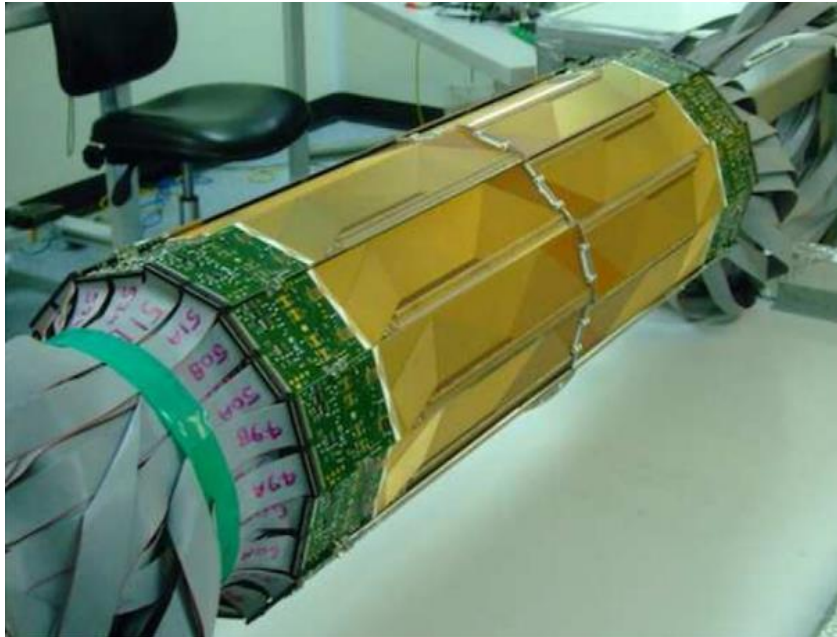


磁場(T)



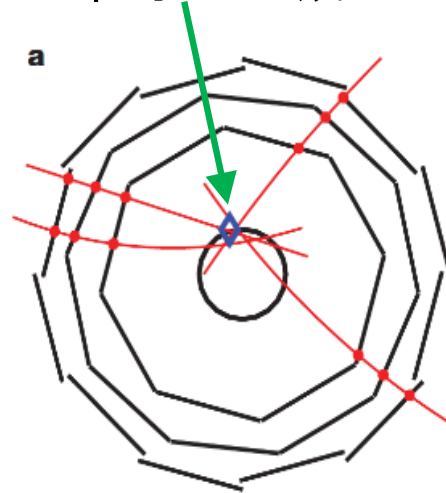
# 反水素の検出

- 磁場トラップを瞬時に ( $\sim 10$  ms) ゼロにする。
- 反水素は、(物質でできた)壁に衝突  $\rightarrow$  対消滅
- 対消滅で出てくる粒子(主に荷電パイ中間子)の飛跡を、シリコン検出器で検出



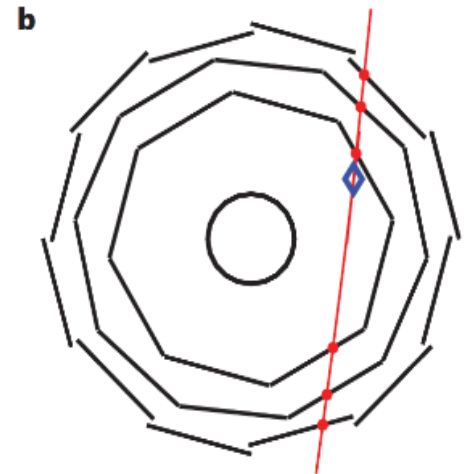
分解能: 動径及び方位角方向  $65 \mu\text{m}$   
軸方向  $253 \mu\text{m}$   
全60モジュール、計 30720 ストリップ

壁で消滅し、多数の  
粒子が生成



反水素消滅事象

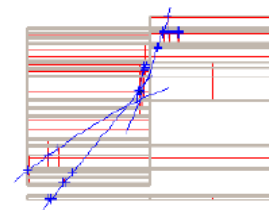
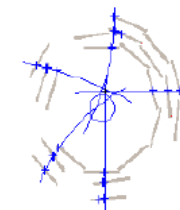
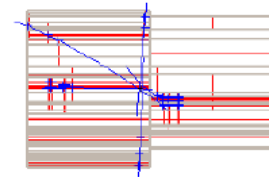
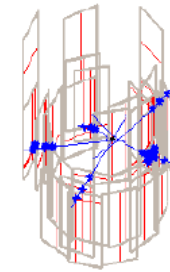
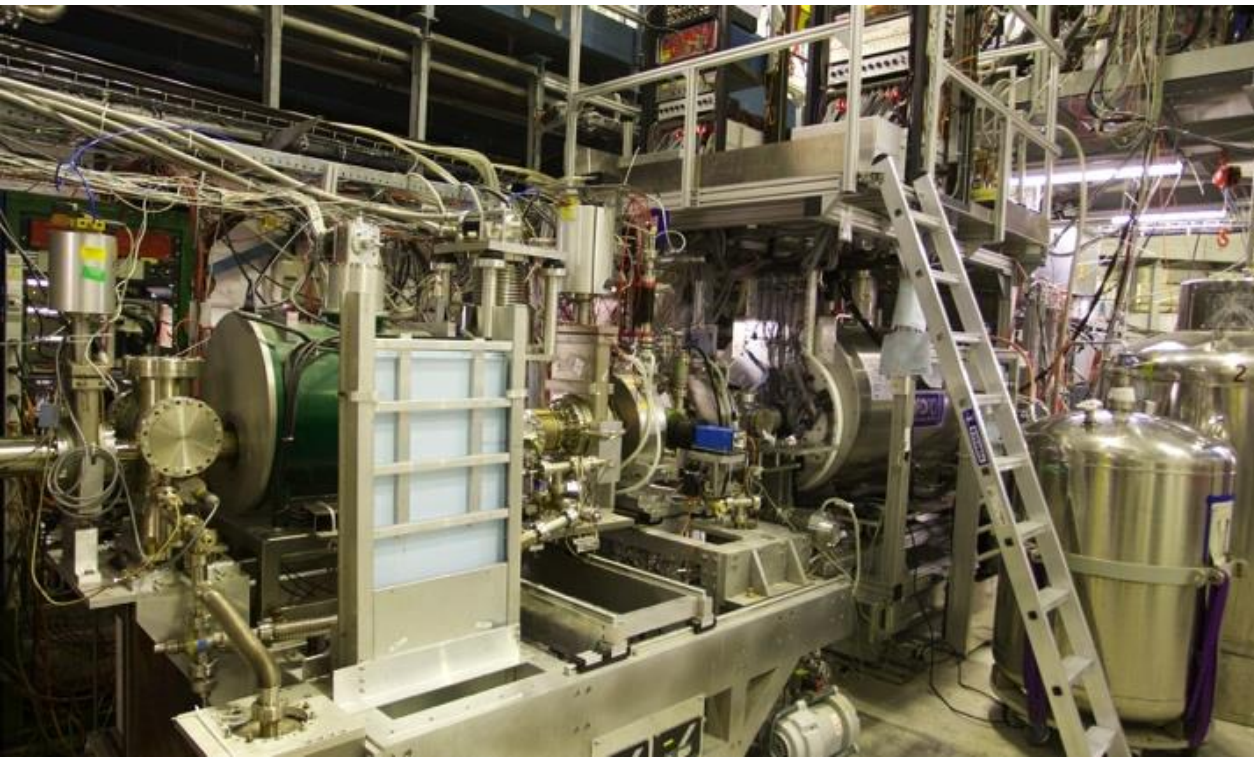
壁から離れた  
一つだけの飛跡



宇宙線  
バックグラウンド

# ALPHA-2実験の現状

- 2012年より、レーザー分光に向けて閉じ込め装置を刷新
- 2014年、暫定的に1試行あたり平均最大2.4個の反水素を閉じ込め  
(フェーズ1に比べて3倍以上の向上)
- レーザー分光用のレーザー・キャビティーのテストを完了  
→ 実際に閉じ込めた反水素に照射した(原理実証実験)
- 今年中にも初精密分光予定



# 反水素の電荷に対する制限



- 2014年の Run の結果を解析→2016年1月、発表した。
- Stochastic acceleration という技術を用いて、従来の制限より20倍 厳しい制限を得た。

LETTER

Nature **529**, 373 (2016).

OPEN

doi:10.1038/nature16491

## An improved limit on the charge of antihydrogen from stochastic acceleration

M. Ahmadi<sup>1</sup>, M. Baquero-Ruiz<sup>2,3</sup>, W. Bertsche<sup>4,5</sup>, E. Butler<sup>6,7</sup>, A. Capra<sup>8</sup>, C. Carruth<sup>2</sup>, C. L. Cesar<sup>9</sup>, M. Charlton<sup>10</sup>, A. E. Charman<sup>2</sup>, S. Eriksson<sup>10</sup>, L. T. Evans<sup>2</sup>, N. Evetts<sup>11</sup>, J. Fajans<sup>2</sup>, T. Friesen<sup>12</sup>, M. C. Fujiwara<sup>13</sup>, D. R. Gill<sup>13</sup>, A. Gutierrez<sup>11</sup>, J. S. Hangst<sup>12</sup>, W. N. Hardy<sup>11</sup>, M. E. Hayden<sup>14</sup>, C. A. Isaac<sup>10</sup>, A. Ishida<sup>7</sup>, S. A. Jones<sup>10</sup>, S. Jonsell<sup>15</sup>, L. Kurchaninov<sup>13</sup>, N. Madsen<sup>10</sup>, D. Maxwell<sup>10</sup>, J. T. K. McKenna<sup>13</sup>, S. Menary<sup>8</sup>, J. M. Michan<sup>13</sup>, T. Momose<sup>16</sup>, J. J. Munich<sup>14</sup>, P. Nolan<sup>1</sup>, K. Olchanski<sup>13</sup>, A. Olin<sup>13,17</sup>, A. Povilus<sup>2</sup>, P. Pusa<sup>1</sup>, C. Ø. Rasmussen<sup>12</sup>, F. Robicheaux<sup>18</sup>, R. L. Sacramento<sup>9</sup>, M. Sameed<sup>10</sup>, E. Sarid<sup>19</sup>, D. M. Silveira<sup>9</sup>, C. So<sup>2</sup>, T. D. Tharp<sup>12</sup>, R. I. Thompson<sup>20</sup>, D. P. van der Werf<sup>10</sup>, J. S. Wurtele<sup>2,21</sup> & A. I. Zhmoginov<sup>2</sup>

# まとめ

- 反物質(反水素)を用いた研究は、物理法則の最も基本的な対称性の一つである、CPT対称性の検証を目的にしている。
- 欧州原子核研究機構(CERN)の反陽子減速器(AD)は、世界で唯一、反物質研究に使える反陽子を供給している。
- ALPHA実験は、世界初の反水素閉じ込めをはじめ、数々の世界初の結果を連発してきた。
- レーザーによる精密分光に向けたALPHA-2実験が進んでおり、2014年の Run により、反水素の電荷に対し、20 倍厳しい制限が得られた。
- 今年中にもレーザー分光を達成する予定。