

欧州原子核研究機構における 反陽子減速器を用いた 反物質の研究

石田 明

欧州原子核研究機構(CERN), 東京大学

平成27年8月30日

フライブルク

目次

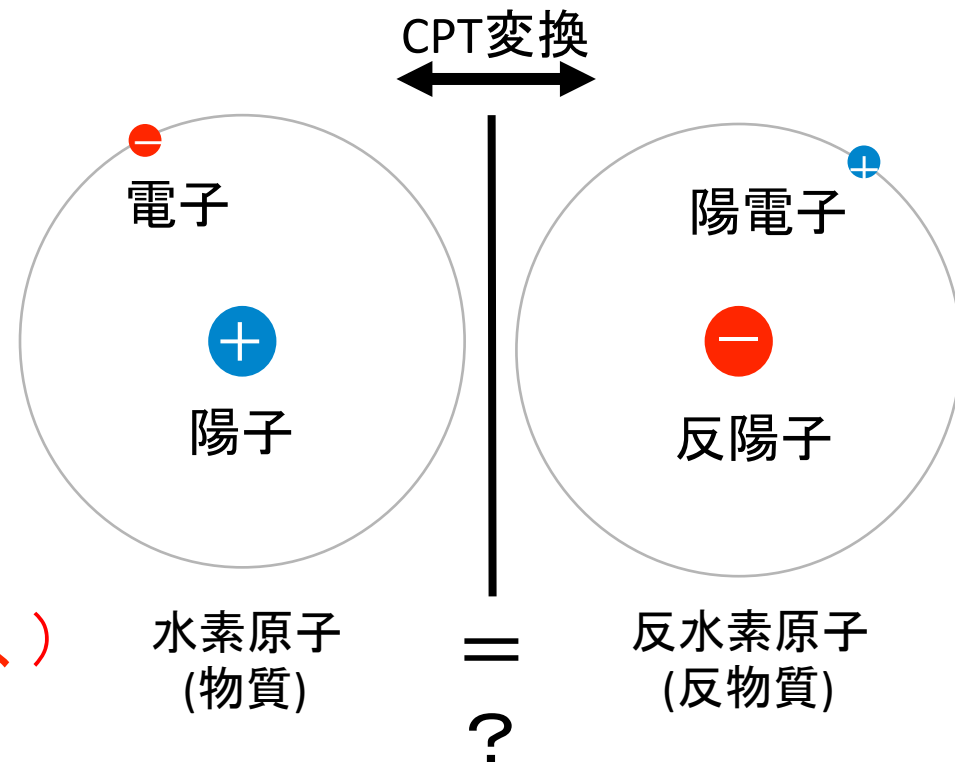
- 反物質(反水素)を用いた研究: CPTの検証
- 欧州原子核研究機構(CERN)
- 反陽子減速器(AD; Antiproton Decelerator)
- 陽電子蓄積装置
- ALPHA実験
- 反水素の生成と閉じ込め、検出
- ALPHA-2 実験の現状
- まとめ

反物質(反水素)を用いた研究 CPT対称性の検証

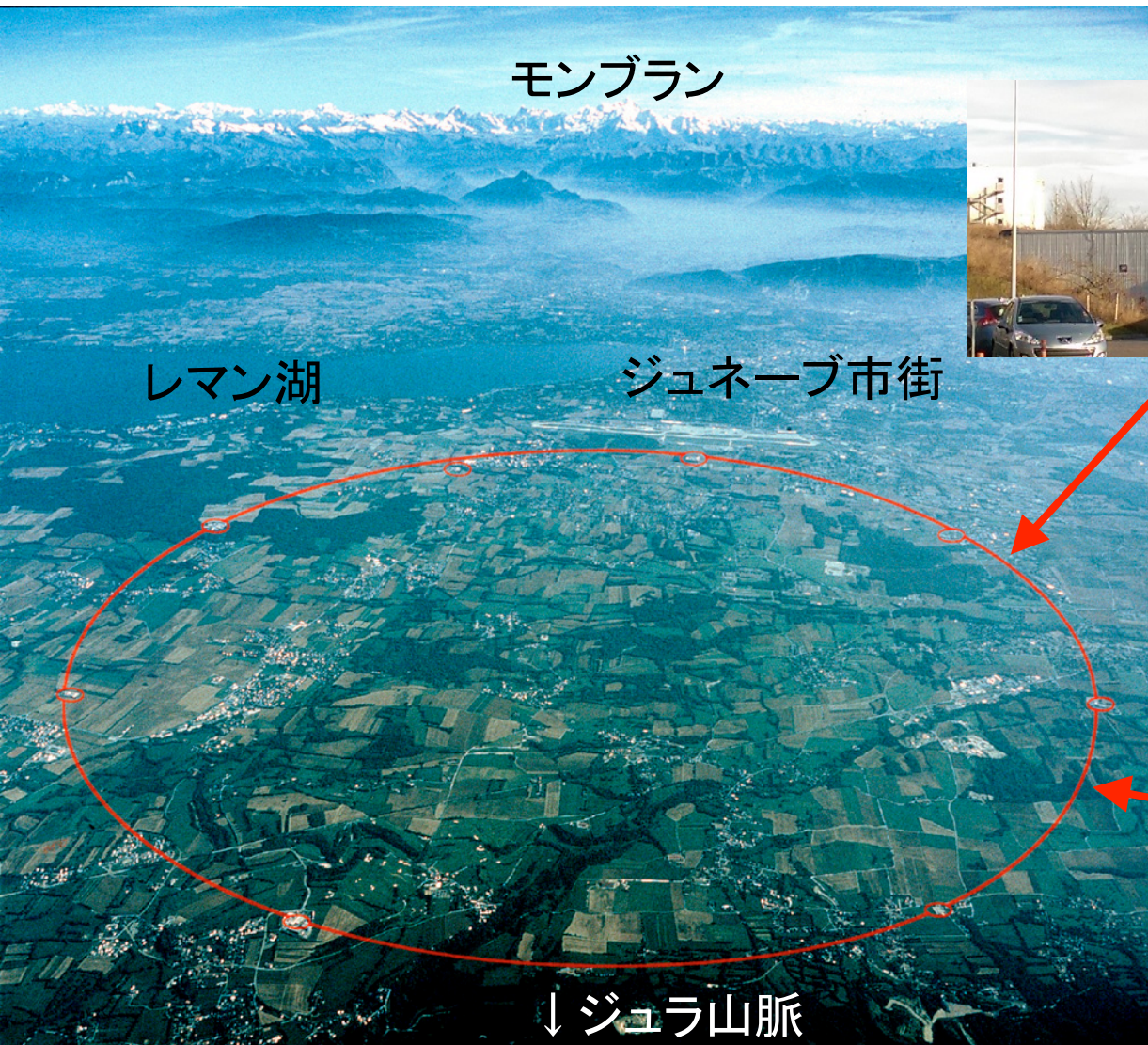
- 物理法則のもっとも基本的な対称性の一つ:
CPT (荷電共役・空間反転・時間反転) 対称性の検証
- 宇宙ができたわけ(物質でできたわれわれが存在する理由)の解明
←物質と反物質はぶつかると「消えて」しまう
- (CPTの他に) 反物質の重力

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



欧州原子核研究機構(CERN)



反陽子減速器 (AD)



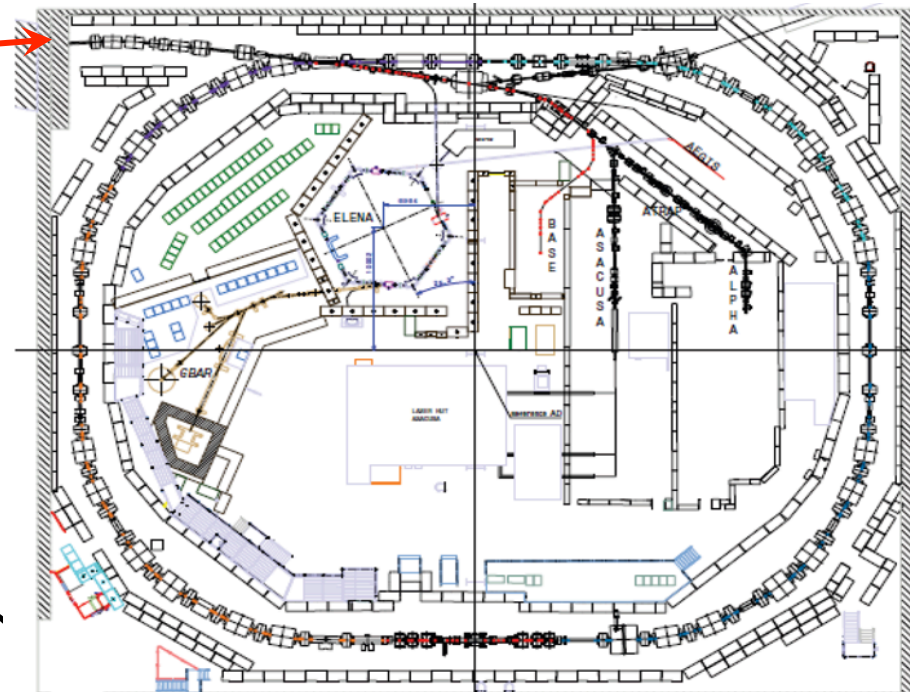
LHC加速器トンネル

反陽子減速器 (AD; Antiproton Decelerator)

PS (陽子シンクロトロン)
26 GeV 陽子

金属
ターゲット

反陽子
3.5 GeV

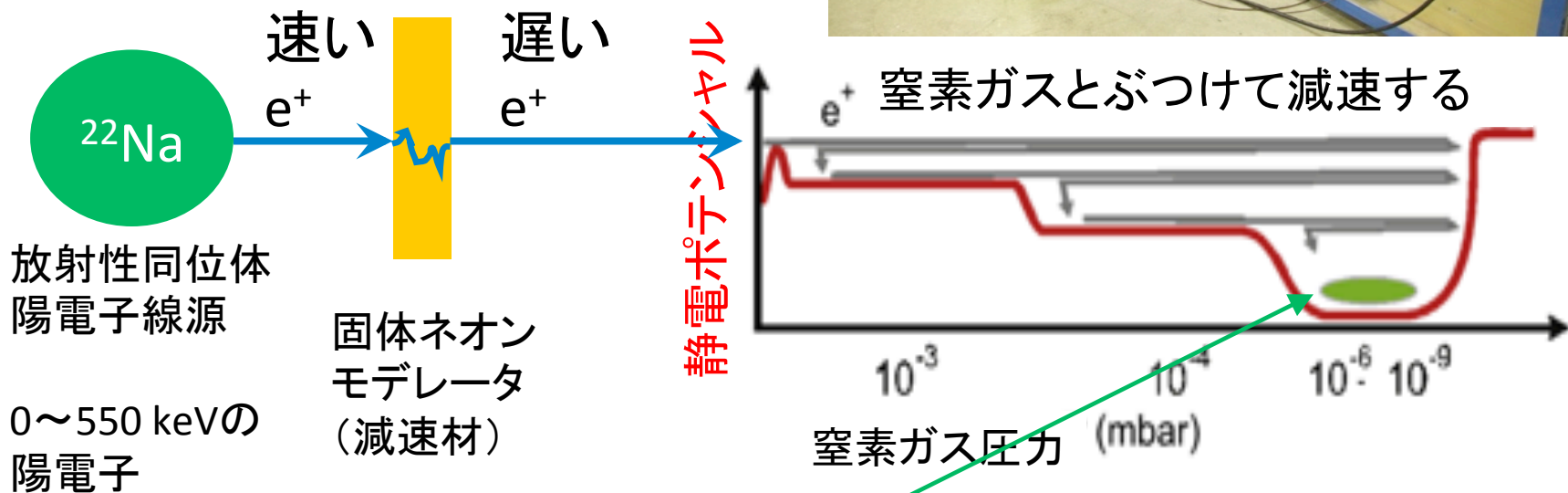
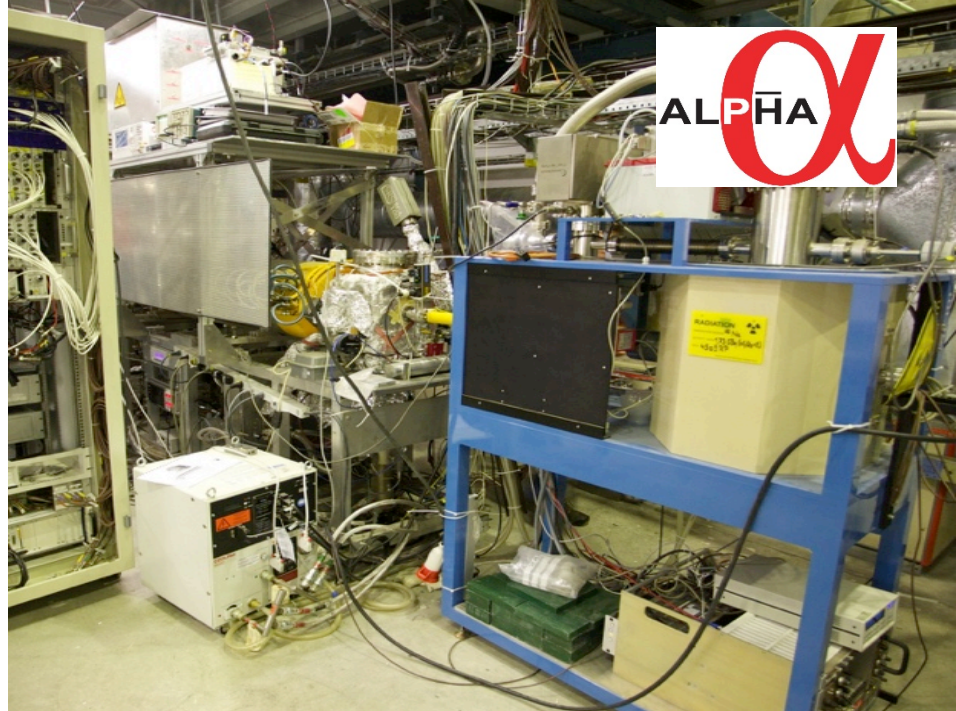


- 世界で唯一、反物質研究のための低エネルギー反陽子を作れる装置
- 反陽子は「自然に」存在しない
→ 加速器で高エネルギー陽子を作って、金属に当てる
→ その反応で出てくる中に、ごく僅かだけ、高エネルギー (3.5 GeV) 反陽子
→ 減速 (~1/1000エネルギー) 5.3 MeV → 約 2分に1回、 3×10^7 個のパルス
- 現在、ALPHAをはじめ、ASACUSA(東大、理研など)、ATRAP, AEGIS, BASE, ACE の6実験 (GBAR 実験も承認済み)。
- 将来、ELENA というアップグレード (建設中。2017年運転開始予定)によってより低エネルギー (100 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

- 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 年より海外学振で参加

主な成果

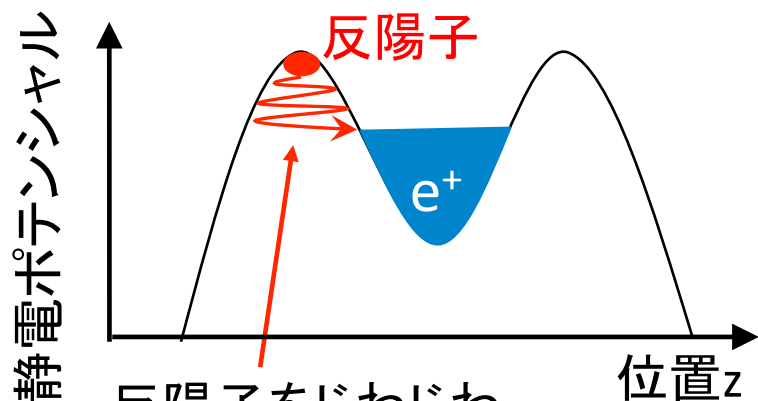
- 世界初の反水素の閉じ込め (2010年, Nature **468**, 673)
- 1000秒間の閉じ込め (2011年, Nat. Phys. **7**, 558)
- マイクロ波による反水素スピン反転 (2012年, Nature **483**, 439)
- 反水素の電荷に対する実験的制限
(2014年, Nat. Commun. **5**, 4955)

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

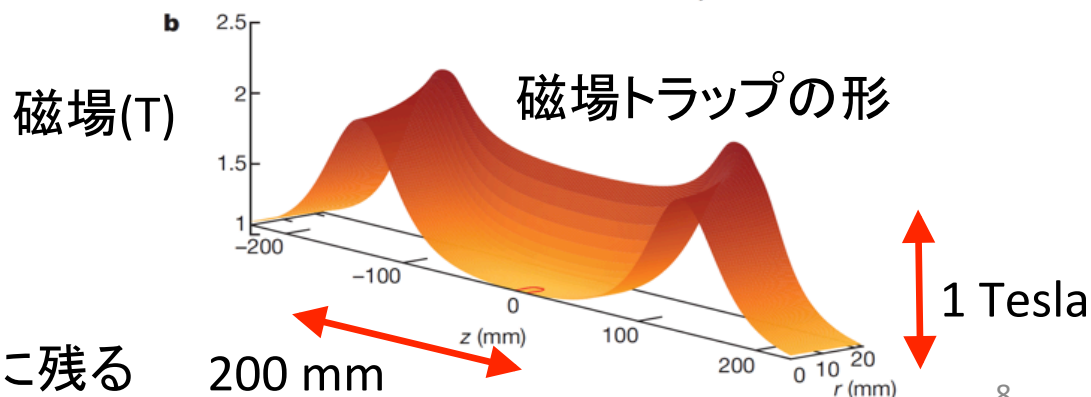
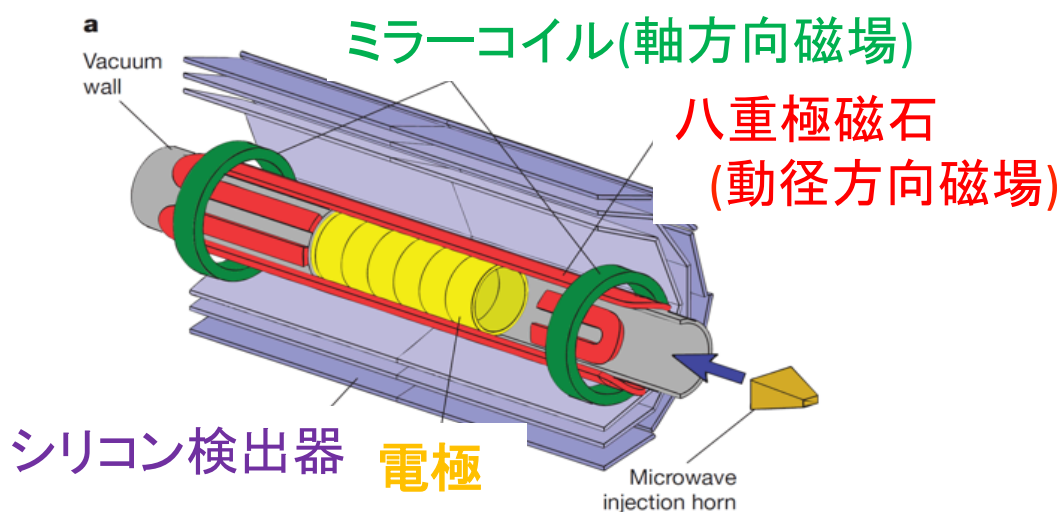
反水素の生成と閉じ込め

- 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 → 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 → 超高真空



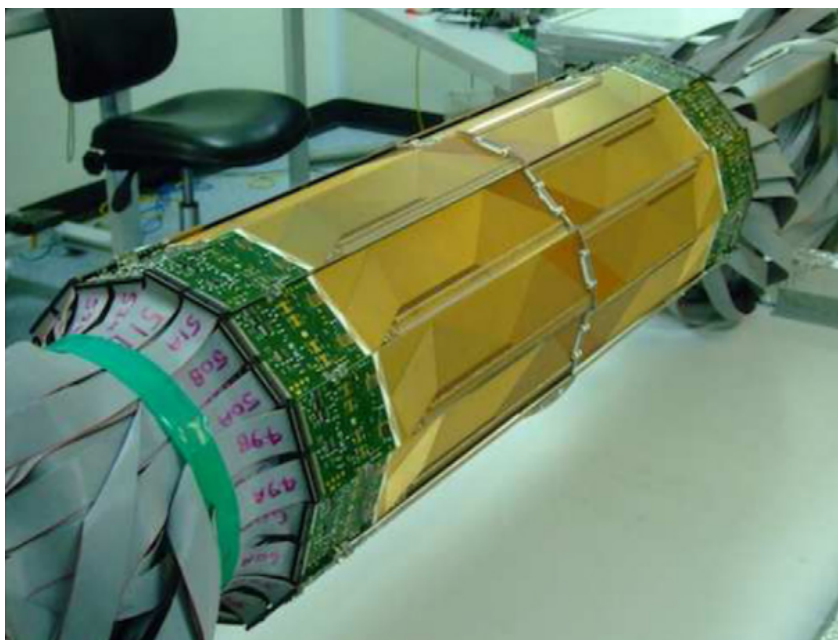
反陽子をじわじわ加熱して、必要最小限のエネルギーで陽電子と混ぜる

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 → 中性粒子のみが磁場トラップに残る



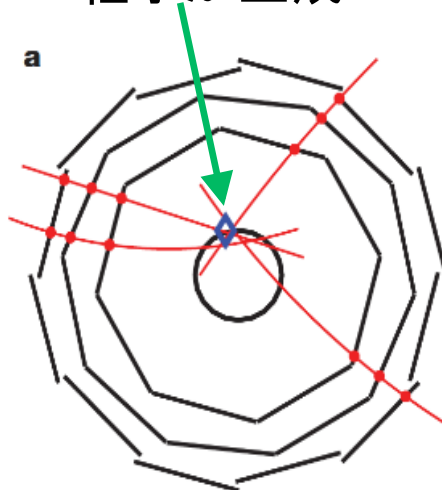
反水素の検出

- 磁場トラップを瞬時に (~ 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



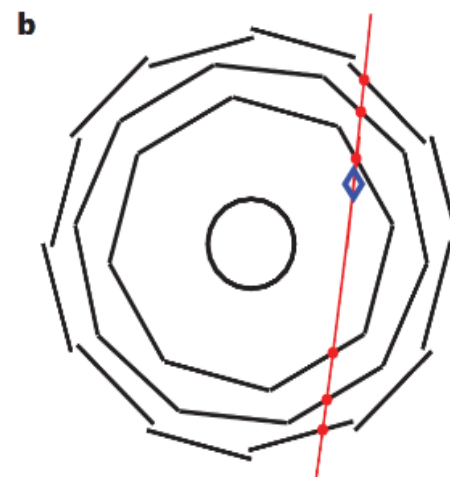
分解能: 動径及び方位角方向 $65 \mu\text{m}$
軸方向 $253 \mu\text{m}$
全60モジュール、計 30720 ストリップ

壁で消滅し、多数の
粒子が生成



反水素消滅事象

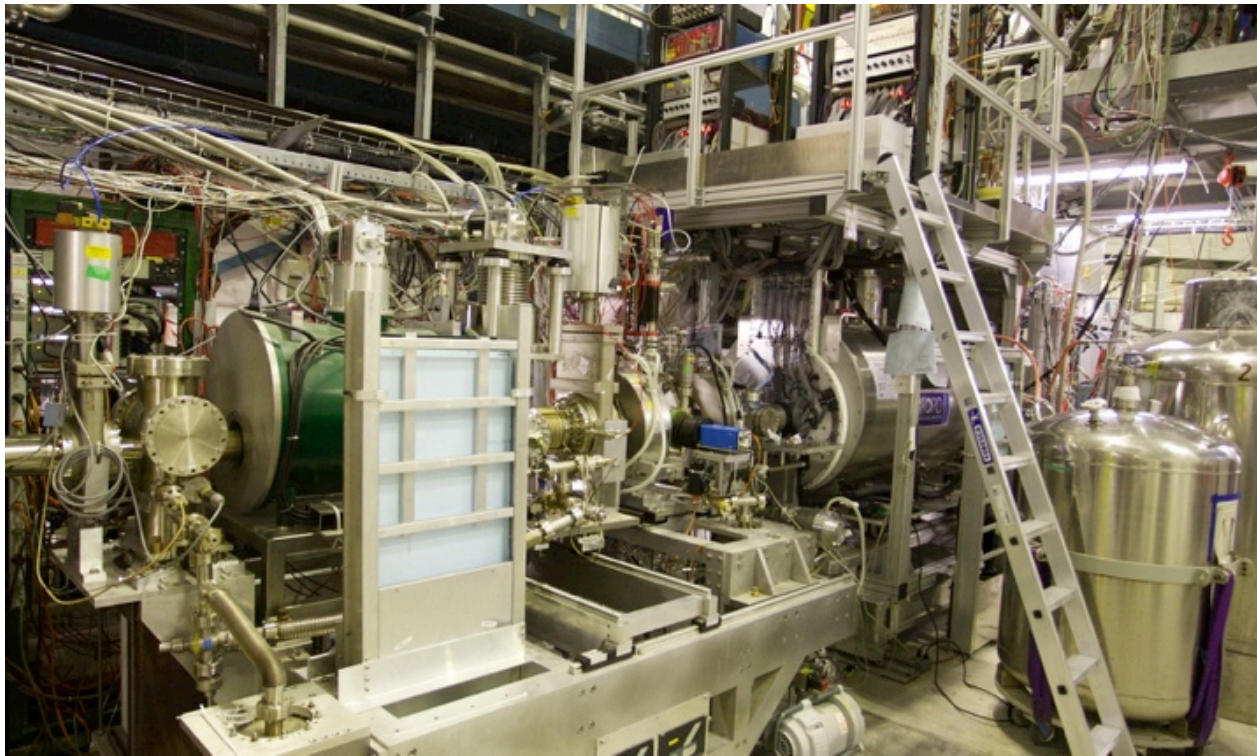
壁から離れた
一つだけの飛跡



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



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、今年中にも分光を開始する予定。