



# 超低速反陽子ビームの生成

東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻基礎科学系 / 物理 / 山崎・松田研究室

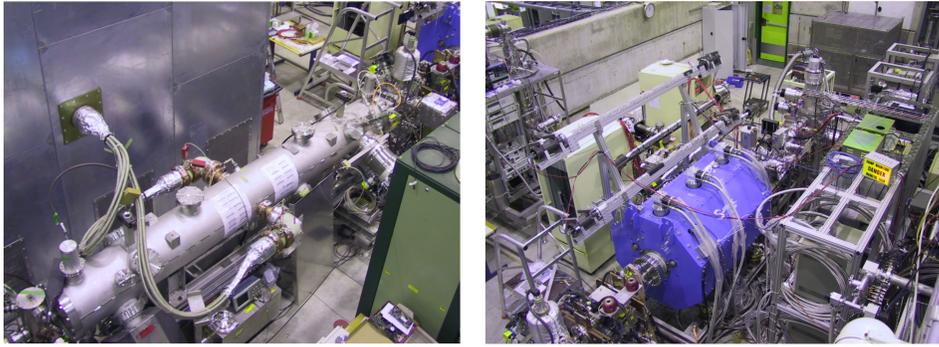
ASACUSA Collaboration



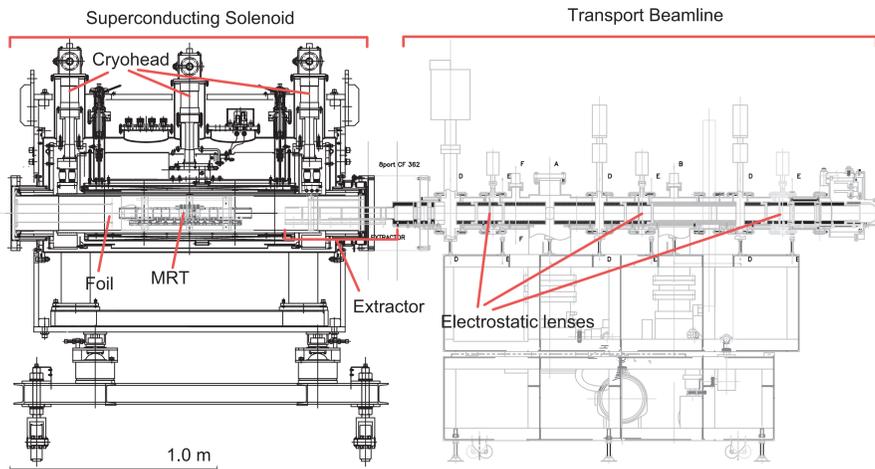
反陽子原子や反水素原子を合成する為に CERN の AD から供給されている反陽子を 沢山蓄積し、冷やす必要があります。以下にその為に我々の開発した装置(MUSASHI)を説明します。我々は電磁トラップに反陽子を蓄積し、電子を「冷媒」として反陽子を冷却するという方法を採用しています。

## RFQD

CERN の AD から供給されている「低速」反陽子は光速の 10% 程の速度を持っています。このままだ「速い」反陽子を効率良くトラップに捕捉する為に、通常加速器として使われる装置を「あべこべ」に減速器として使えるようにした高周波四重極減速器(RFQD, Radio Frequency Quadrupole Decelerator)を用いています。この装置によって、5.3 MeV の反陽子は 110 keV (速度に換算して光速の 1.5% 程度)に減速されます。

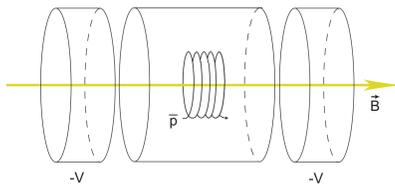


## MUSASHI

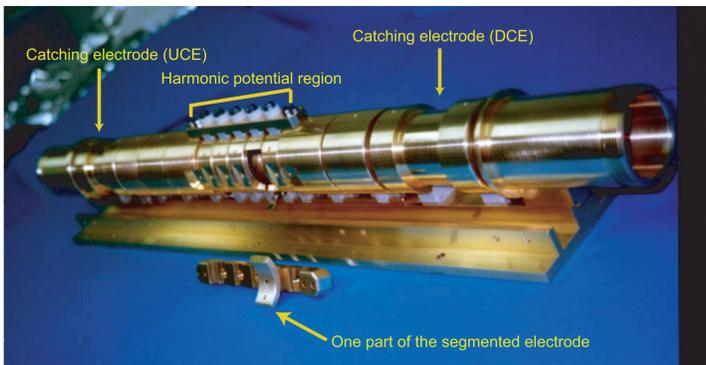


RFQD で 110 keV に減速された反陽子を一旦トラップして冷却し、再加速して 10-1000 eV の超低速反陽子ビームとする装置が、我々の MUSASHI (Monoenergetic Ultra-Slow Antiproton Source for High-precision Investigation) で、反陽子トラップと超低速ビーム輸送ラインで構成されます。

ここで使われている荷電粒子トラップの仕組みは、簡単には次のように説明できます。二枚の板に荷電粒子と反対の荷電符号で十分な大きさの電位を与えて荷電粒子を跳ね返し、二枚の板の間で板に垂直な方向の運動を制限します。しかし、このままでは板の面に平行な方向には逃げることができます。そこで、板に垂直な方向に磁場を印加し、荷電粒子を磁力線に巻きつかせます。こうすることで荷電粒子を三次元的に或る領域に閉じ込めておくことができます。この原理でトラップするものをペニング(Penning)トラップと呼びます。



我々の反陽子トラップは、板の代わりに 14 個の無酸素銅の円筒電極を数珠繋ぎにしたもので、多重電極トラップ(MRT, Multi-Ring electrode Trap)と呼んでおり、軸方向からの荷電粒子の導入が容易に、また多数の荷電粒子を安定に閉じ込められるようになっています。これらの円筒電極に或る適切なポテンシャルを与えることで、中心付近に電気的な井戸(深さ 50 V)を形成します。この静電場と、トラップの周囲を取り巻いている超伝導ソレノイドによって生じる静磁場(2.5 T)との組合せで反陽子や電子などの荷電粒子を閉じ込めています。

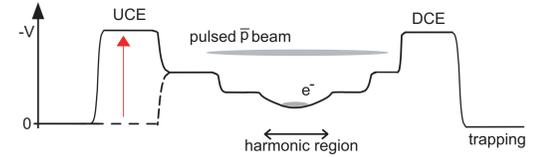


この MUSASHI で使われているトラップでは世界最高の一千万個( $10^7$ 個)の反陽子の蓄積、冷却に成功しています。

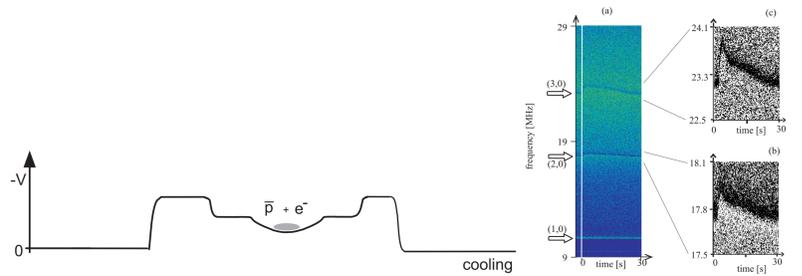
## 反陽子のトラップから引出しまで

超低速反陽子ビーム生成の手順を示します。

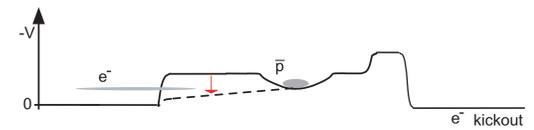
1. 捕捉: トラップ入口の減速箔で反陽子の運動エネルギーを 10 keV 程度にした後、トラップの電極(DCE)に印加された -13 kV の静電ポテンシャルによって跳ね返す。跳ね返った反陽子がトラップ内から逃げ出す前(350 ns 以内)にトラップの入口側(UCE)に -13 kV を印加し反陽子を捕まえる。



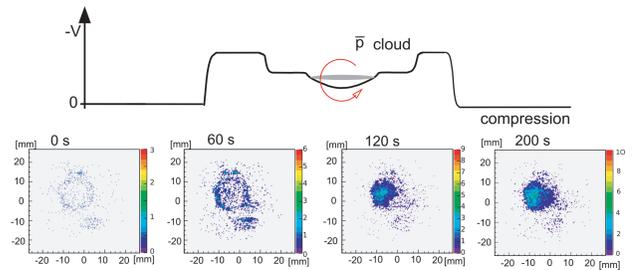
2. 冷却: 捕まった反陽子は予めトラップされていた電子と衝突を繰り返す。超伝導ソレノイドによる強磁場中にある為、電子は反陽子から得たエネルギーをシンクロトロン放射で放出し続ける。つまり、反陽子は電子にエネルギーを「奪われて」冷却される。



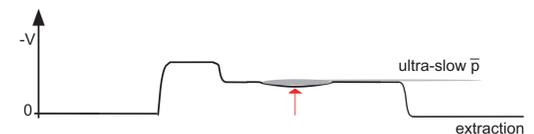
3.  $e^-$  放出: 冷却後、実験に使わない電子だけをトラップ領域から排出。



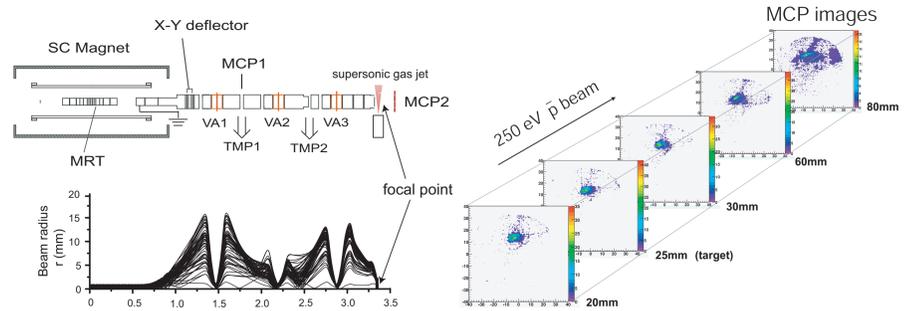
4. 反陽子雲の径方向圧縮: 強磁場中から引出す前に、引出し時に磁力線に沿って拡散してしまうのを防ぐ為に、反陽子雲に外部からトルクを与えて径方向に圧縮する。



5. 引出し: トラップポテンシャルを変化させることで、超低速反陽子ビームとして引出す。2 μs 程度のパルスビームや 30 秒続く DC 的ビームとして引出すことができる。



トラップから引出された超低速反陽子はビームラインによって実験槽まで輸送されます。



## 超低速反陽子ビーム

このように、生成時には非常に高いエネルギーを持ち光速に近い速さで走っていた反陽子は、AD や RFQD、そして我々の MUSASHI によって、一か所に留めておけるくらいまでになります。エネルギーでみると9桁以上も下がっていることになります。我々は、この装置によって反陽子原子( $\bar{p}A^+$ )や反水素原子( $\bar{H} = \bar{p}e^+$ )の大量生成に繋げ、それらの生成過程の研究や精密測定を行おうとしています。

