

## Development of intense beam of ultracold antiprotons (大強度極低温反陽子ビームの開発)

市岡 利康

### 目的

本研究の目的は、大容量の反陽子蓄積トラップと、そこに溜めて冷却された反陽子のビームとしての引き出し法の開発である。

設計・製作したトラップは CERN にある世界で唯一の低速反陽子源 Antiproton Decelerator (AD) に繋ぎ、超低速でエネルギーの揃った反陽子ビームを引き出してエキゾチック原子生成と分光、反陽子による原子・分子の励起やイオン化など数々の実験を行なうことを計画している。特に、これまで可能でなかった一回散乱条件の下で反陽子の原子分子への捕獲初期過程を解明することは大きな目標のひとつである。この超低速反陽子の生成方式としては、AD からのエネルギー 5.3MeV の反陽子 (一分間に一発、 $1 \times 10^7$  個、時間幅 250ns のパルスとして供給される) を Radio Frequency Quadrupole 減速器 (RFQD) を用いて数 10keV に減速し、更に図 1 に示すように、強磁場中に置かれた荷電粒子トラップに捕獲して電子冷却によって超低エネルギーにし、その後磁場中から引き出してビームを得ることを考えている。

### 反陽子蓄積トラップの設計・製作

電子冷却に本質的な磁場の発生には超電導ソレノイドを用意した。最高磁場は 5T で、コイルに対して内部の真空容器の位置を  $\pm 2\text{mm}$ 、 $1\mu\text{m}$  の精度で合わせられるようになっている。トラップの設計に当っては、以下の二つを考慮した。

- $10^6 \sim 10^8$  個の反陽子の冷却と蓄積

AD は Low Energy Antiproton Ring (LEAR) の後継器であるが、LEAR での Penning トラップ (静磁場 + 調和ポテンシャル) を用いた実験によって比較的少数の反陽子 ( $1 \sim 10^5$  個) を電子冷却することが可能であることがわかっている。我々は反陽子をビームとして引き出すため、更に  $1 \sim 3$  桁多くの反陽子を溜める必要がある。

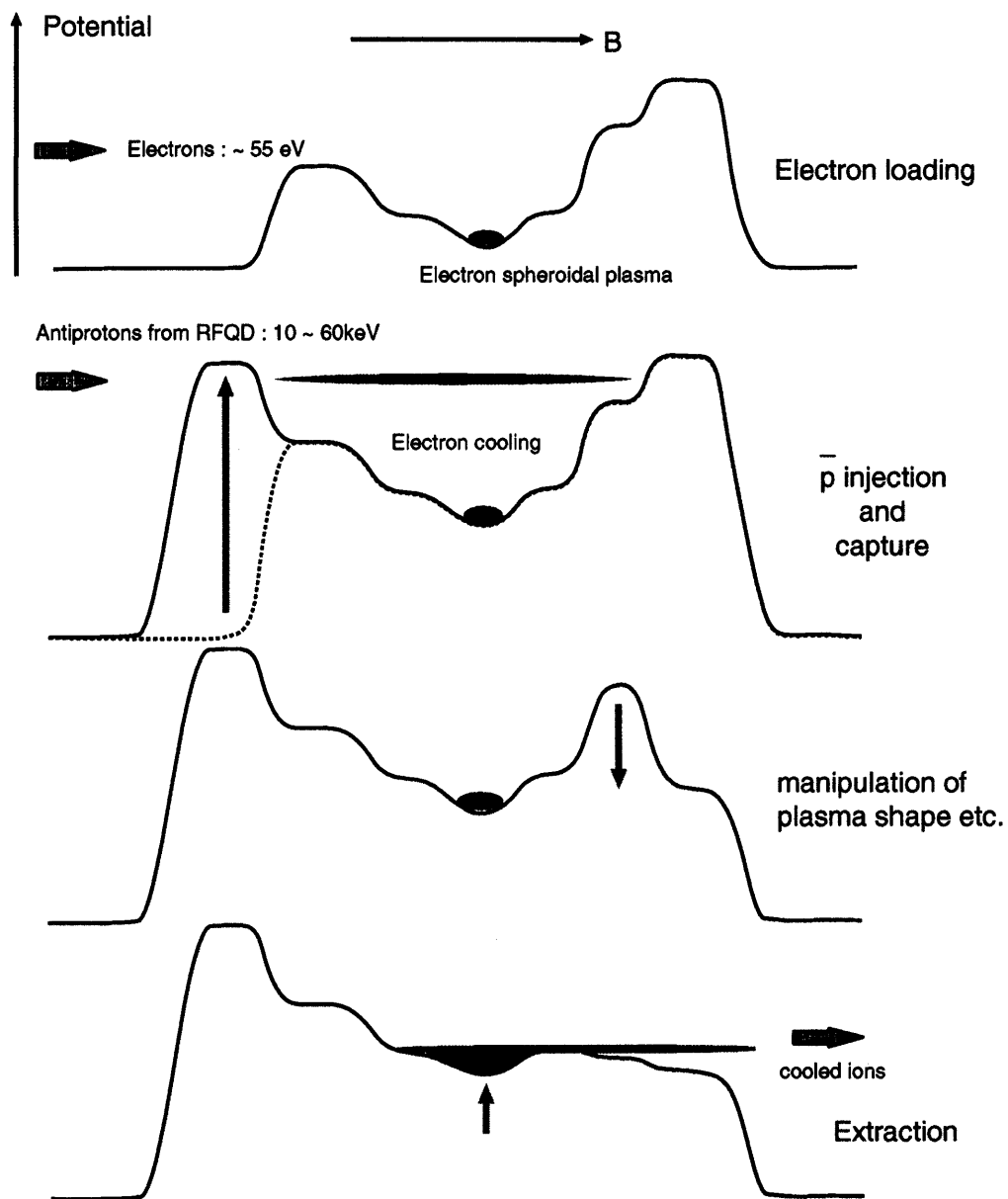


図 1: RFQD からの反陽子の閉じ込め。予め電子を閉じ込めて冷やしておいたところへ反陽子を入射して捕獲・電子冷却し、整形した後に引き出す。

他方、荷電粒子トラップ中に多量に閉じ込められた粒子は、低温(デバイ長  $\ll$  閉じ込め領域の大きさ)では非中性プラズマとして振舞う事が知られている。(我々の場合、密度  $10^8[\text{cm}^{-3}]$  の粒子を 10K まで冷やすとするとデバイ長は  $20\mu\text{m}$  程度となり、十分プラズマとして扱える。)

● 磁場中からの粒子の引き出し

このパルス間に電子冷却するためには数テスラの磁場が必要になる。この一方、一回散乱条件を満たすためには気体標的を用いるので標的容器内の圧力は高くなるが、トラップ中の圧力は、残留ガスとの消滅による反陽子のロスを防ぐためにもできる限り良くなければならない。現実的な見積りでは、標的周りで  $10^{-4}\text{Pa}$  程度、トラップ内で  $10^{-10}\text{Pa}$  以下とする必要があり、真空ポンプの排気速度を考慮して、この間の差動排気のために径数ミリの孔を数個設ける予定である。

即ち、冷却された反陽子はソレノイド出口付近の磁場勾配に逆らって、しかも狭い孔を通過させて輸送してやらなければならない。このためには反陽子をトラップ中心軸近くに集めることが必要で、修士在学時に行ったシミュレーションでは、最初の径が 1mm 以内の粒子はトランスポート出来得ることが予想されている。

以上の考察から明らかなように、開発すべきは非中性のプラズマを安定に閉じ込められ、かつ中のプラズマを引き出しその他に便利なように制御できる装置であった。

電子冷却の利用できるトラップとしては主に質量分析他で使われる Penning トラップと、プラズマの閉じ込めに使われる Malmberg-Penning トラップがある。Penning トラップは精度の良い場によって内部の状態を精密にモニターする事が出来るが、トラップの領域は小さい。他方、本質的に多数の粒子を扱う非中性プラズマの分野に於いては、静磁場と箱型ポテンシャルを使う Malmberg-Penning トラップを用いてプラズマの閉じ込め時間・固有モード他の基本特性を調べる実験がなされて来たが、トラップの中心部には自己場以外の電場が存在しないため、外場等の擾乱に対してプラズマが不安定になりやすいと考えられる。これらに対し、我々のトラップはリング状の電極を多数配置する事により広い領域に渡って調和ポテンシャルの生成ができるのみならず、例えば電極表面に誘起される鏡像電荷の補正等も可能にした。この Penning トラップを大容量にした形のトラップは、1997年に京都大の毛利らによって開発されたものである。先の実験条件二点を考慮して製作したトラップの電極配置を図2に示す。トラップ中心には長さ 10cm の調和ポテンシャル領域が設けられており、HVF・HVB は RFQ からやってくる 10keV 程度のエネルギーの反陽子を捕獲するための高圧電極である。中心の隣にある電極の一つ (S) は方位角方向に四分割されており、この方向に回転する電場をかけられるようになっている。

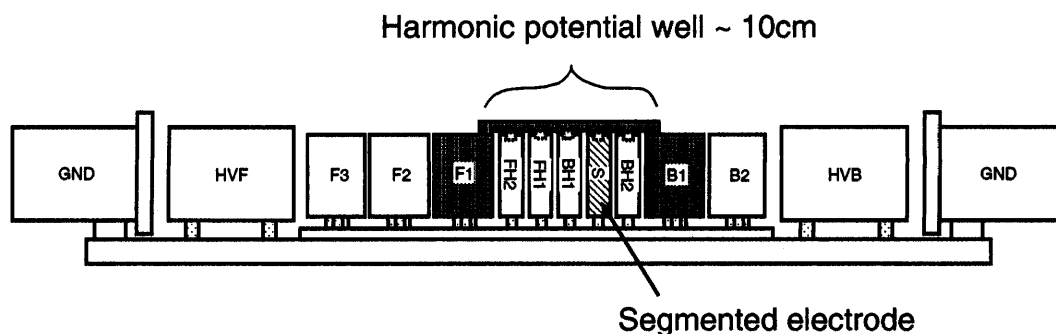


図 2: ASACUSA トラップの電極配置。電極の内径は 40mm である。

実験では、電子と陽子・H<sup>-</sup>イオンを用いて反陽子蓄積トラップの性能を確かめた。以下、順を追って説明する。

### 電子プラズマの閉じ込めと制御

まず、図3に閉じ込め時間に対する電子数の変化を示す。箱型ポテンシャルを形成した場合よりも調和ポテンシャルの方が倍程度よい特性を示している。また、以下に述べる回転電場をかけた場合には、閉じ込め時間も格段に長くなることが確認された。

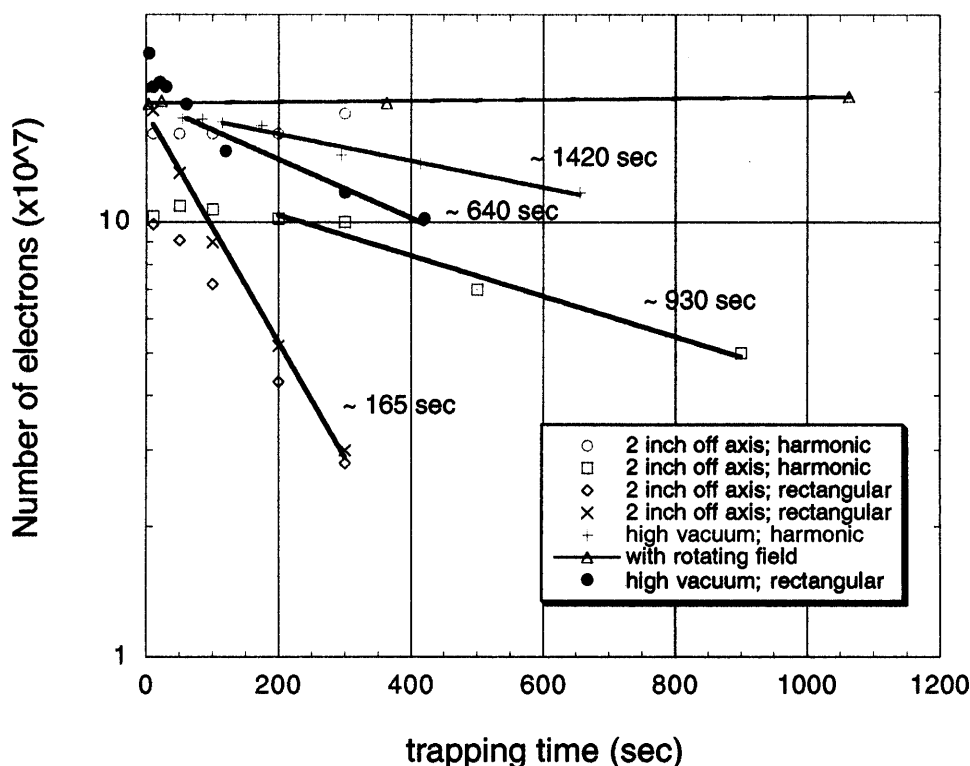


図3: Confinement time of electron plasmas

近年 NIST、UCSD らのグループの研究により、方位角方向に分割された電極をもちいて回転電場を掛けることにより、プラズマの形状を制御できることがわかっている。我々も同様の手段により電子プラズマの制御に成功した。図4に、ZnO スクリーンと CCD カメラを用いてプラズマの磁場軸に垂直な方向のイメージを観測した一例を挙げる。電子数は  $1.1 \times 10^8$  個、回転電場の周波数は 500kHz から 3MHz までを 15 秒間で掃引し、その途中 (2.7MHz あたり) で引き出したものである。

また、適当な一定の周波数によってもプラズマの形状が制御できることを見付けた。

### H<sup>-</sup>イオンの捕獲と電子冷却

次に、電子冷却の実験であるが、反陽子の代わりに H<sup>-</sup>イオンを用いた。図5に装置の概略を示す。ト

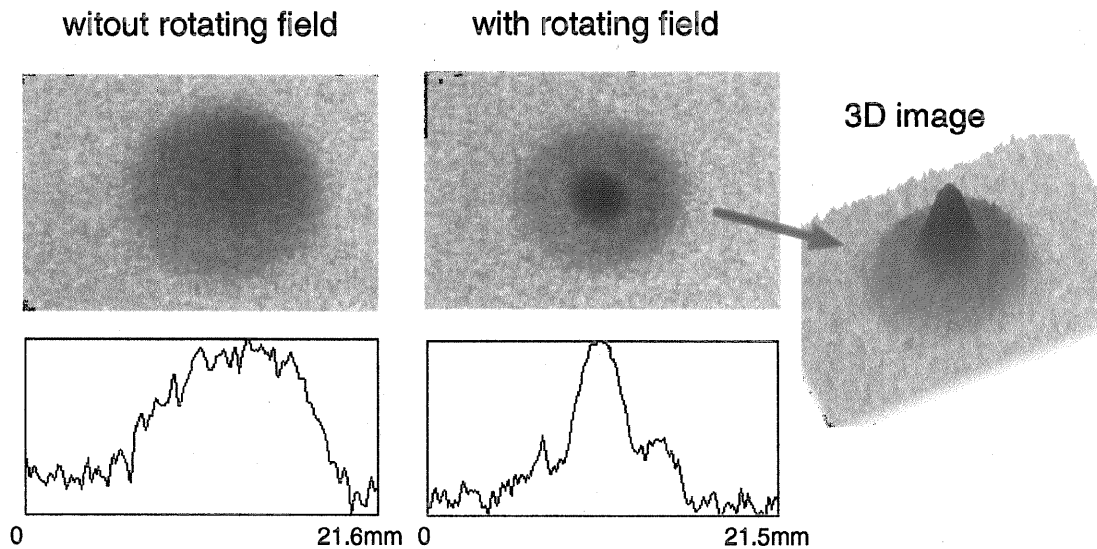


図 4: 回転電場による電子プラズマの制御。電子数  $1.1 \times 10^8$  個、回転電場の周波数は 500kHz-3MHz。図では白黒を反転してある。

ラップは図中 Superconducting solenoid の中に置かれていて、デュオプラズマイオン源で発生させた  $H^-$  イオンを、双極子磁場で曲げてトラップに打ち込んでいる。

図?? にその結果を示す。横軸の時間は、下流側のポテンシャルの壁を下げていくことに対応しており、遅く出て来た粒子程エネルギーが低いことを示している。イオンのみの閉じ込めと書かれているもの以外は、 $1.5 \times 10^8$  個の電子をイオンの入射の 70 秒前にトラップ中に溜めておいた。打ち込んだイオン数は  $2 \times 10^6$  個である。イオン打ち込みの際の電子プラズマの径は約 12mm、イオンビームの径は約 5mm で、ビームが電子プラズマの中心を貫く形になっていた。図中閉じ込め時間 2.9sec のイオンのみと電子が存在する場合とを較べると、予め電子が打ち込まれた場合に低いエネルギーの  $H^-$  イオンが生成されていることがわかる。また、閉じ込め時間が長くなるにしたがって分布が低エネルギー側にずれて行く様子が観察された。更に回転電場によって電子を中心軸付近に集めておいてやると、冷却時間が速くなることも確認された。尚、 $H^-$  イオンのみを閉じ込めた時に粒子数が  $\frac{1}{e}$  になる時間は 20 秒程であり、その間、引き出されたイオンのエネルギー分布には大きな変化は見られなかった。

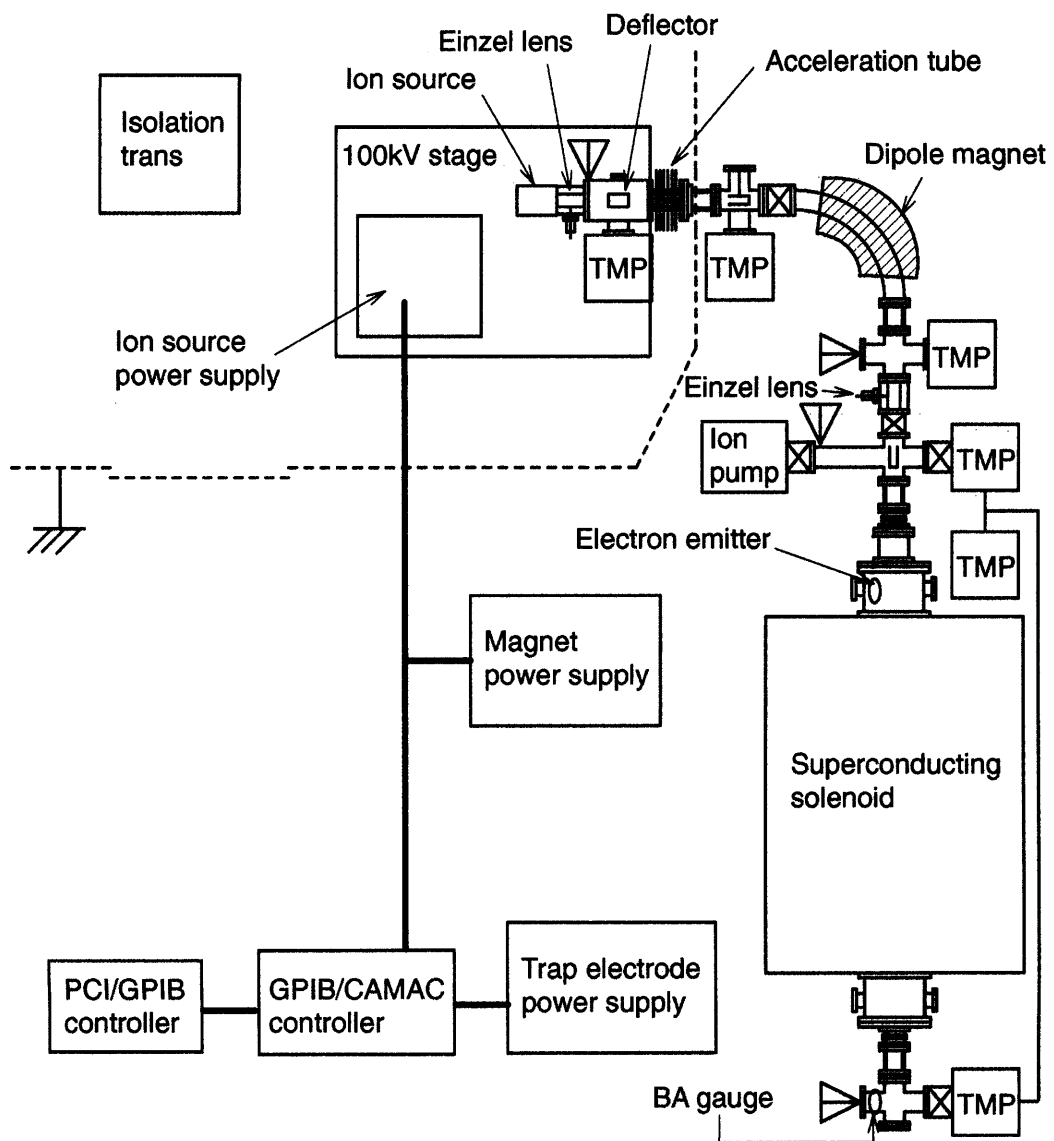
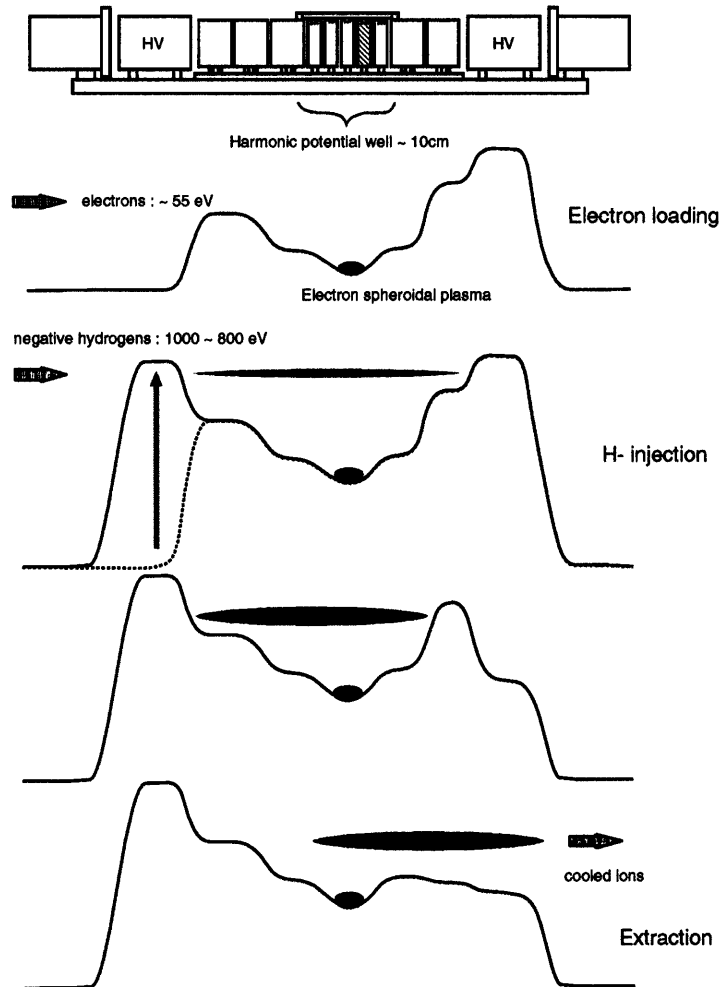


図 5: 陽子または  $H^-$  入射のための装置。

### Confinement of negative hydrogen ions



エネルギー 1keV の  $H^-$  イオンは図6にあるような方式で閉じ込めた。

冷却の効果を確認する際には、装置の都合上、冷え切った  $H^-$  イオンと電子との区別が付けられなかったため、イオンのみ引き出してそのエネルギー分布の変化を見ることにした。

図6:  $H^-$  イオンの閉じ込め。予め電子を閉じ込めて冷やしておいたところへイオンを入射し、引き出した。

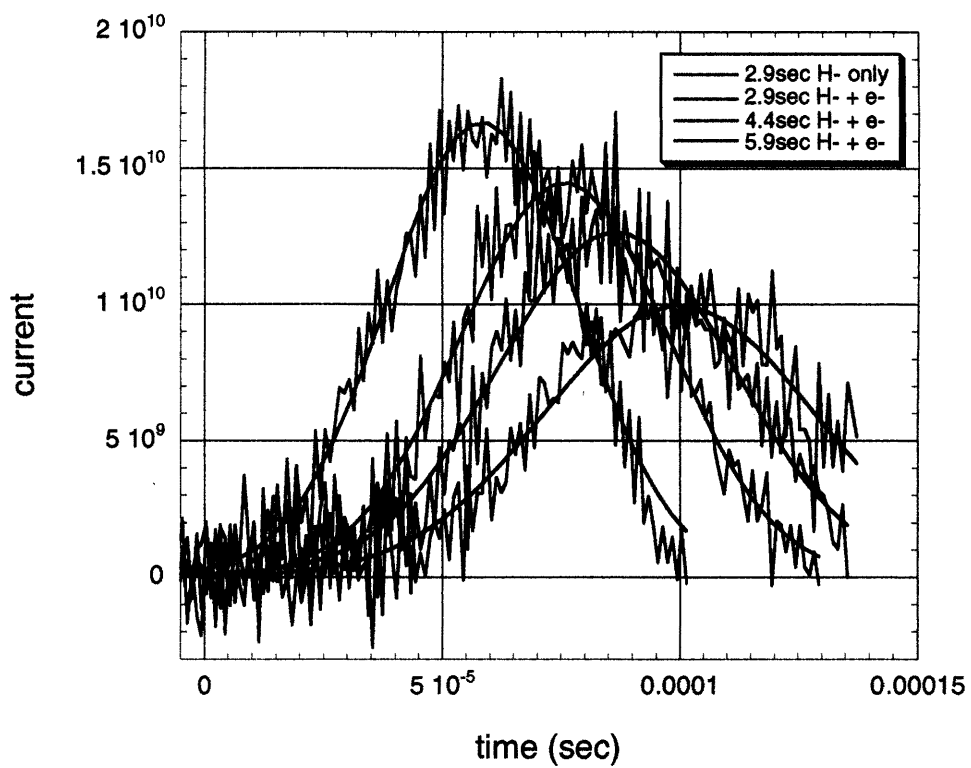


図 7:  $H^-$  の電子冷却。「2.9sec  $H^-$  only」は  $2 \times 10^6$  個のイオンを 2.9sec の間閉じ込めて引き出したもので、他はそれぞれの閉じ込め時間電子と共存させたものである。