

反水素原子の合成と分光

反水素原子の分光

反水素原子は、反陽子に陽電子が束縛されたもので、水素原子と対をなします。本研究室では、CPT 対称性という基本的な物理学の命題を実験的に検証する為に、反水素原子の基底状態の超微細構造について調べようとしています。超微細構造は、(陽)電子の磁気モーメントによって(反)陽子の位置に生じる磁場と陽子自身の磁気モーメントの相互作用で生じます。図 1 は、水素原子のエネルギーレベルを表して、基底状態の超微細遷移周波数は、1.42 GHz 程度になります。

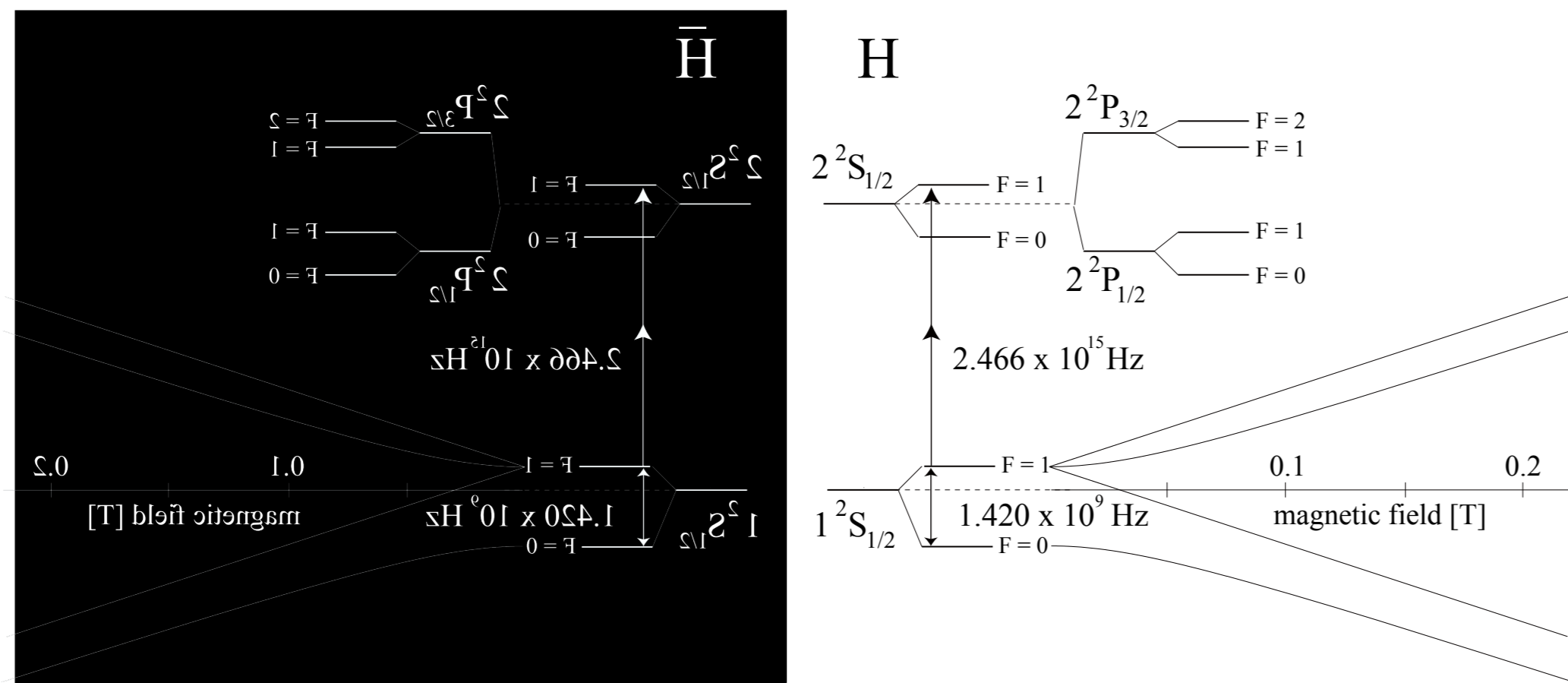


Figure 1: (反)水素原子のエネルギーレベルダイアグラム

CUSP トラップ法

図 1 で示したように、外部磁場を加えると、超微細準位は 4 つに分裂します。磁場が弱くなる方向に力を受けるものと強くなる方向に力を受けるものに分類でき、それぞれ、low field seeking (LFS) 状態、high field seeking (HFS) 状態と呼びます。本研究室で開発している CUSP トラップ法(図 2)では、これらの状態を使って分光します。CUSP トラップは、図 2 に示しているようにアンチヘルムホルツコイルを使って軸対称な四重極磁場を発生するものです。合成された反水素原子の内、HFS は軸から離れてさらに強い磁場の領域に向いますが、LFS は $B = 0$ に向う力を受けることになり、選択的に引き出されます。これを六重極磁石で集束させて検出しますが、途中のマイクロ波共振器でスピンを反転させると HFS に変わってしまい集束できなくなります。この反転する周波数を調べることで超微細遷移周波数を精度よく決定できます。

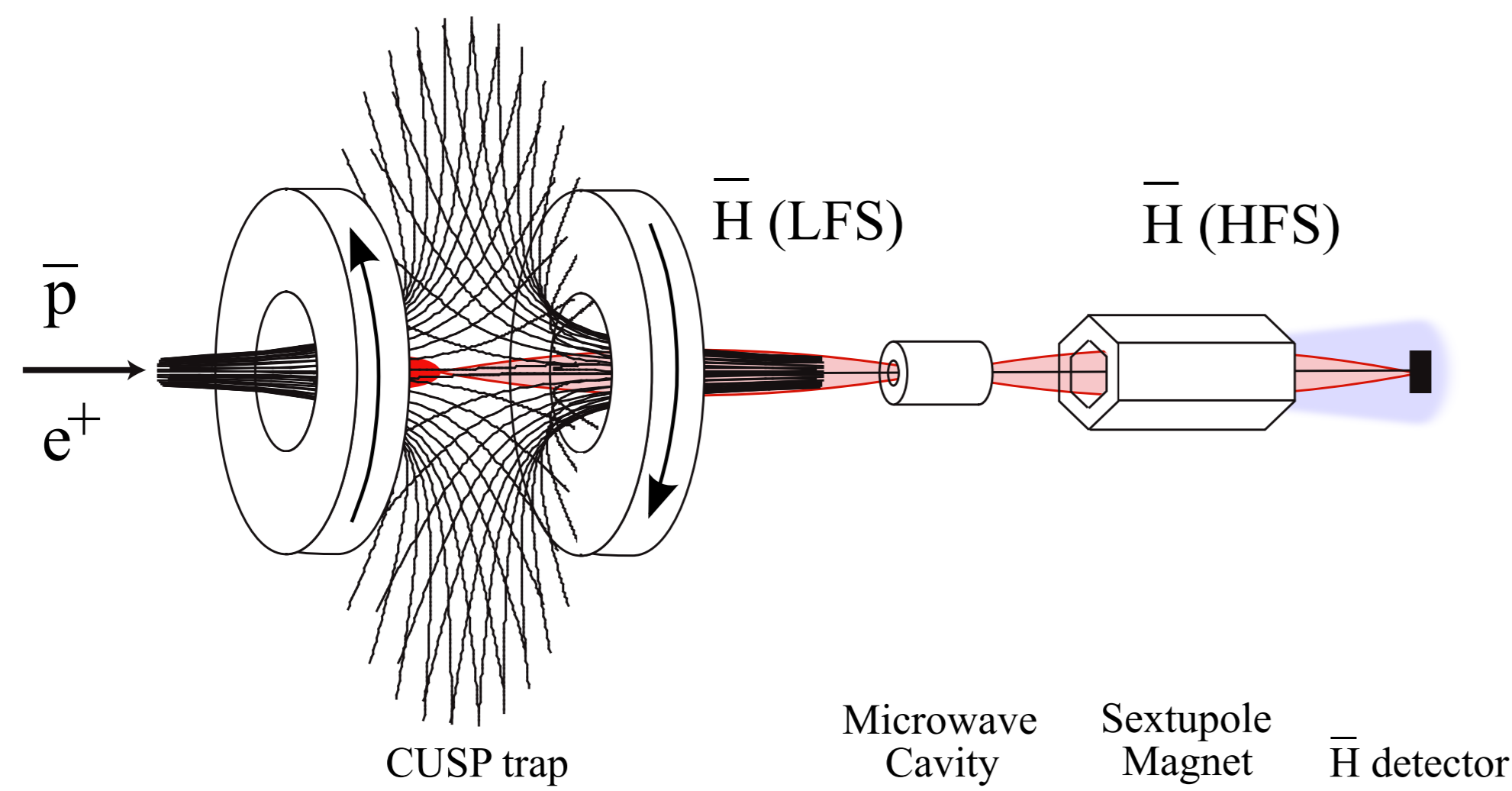


Figure 2: CUSP トラップを用いたマイクロ波分光の概念図

装置

図 3 に示しているのが、本研究室で開発した CUSP トラップ装置の概観です。反水素原子を合成し、反水素ビームとして引き出す CUSP トラップ本体の他に、陽電子蓄積装置、反陽子トラップ (MUSASHI) も示しています。陽電子蓄積装置は、 ^{22}Na からの陽電子を多重リング電極と超伝導ソレノイドの組合せによるトラップ (MRT) に蓄積し、CUSP トラップに随時輸送しています。MUSASHI は、CERN の AD からの反陽子をやはり蓄積、冷却し、CUSP トラップに輸送しています。

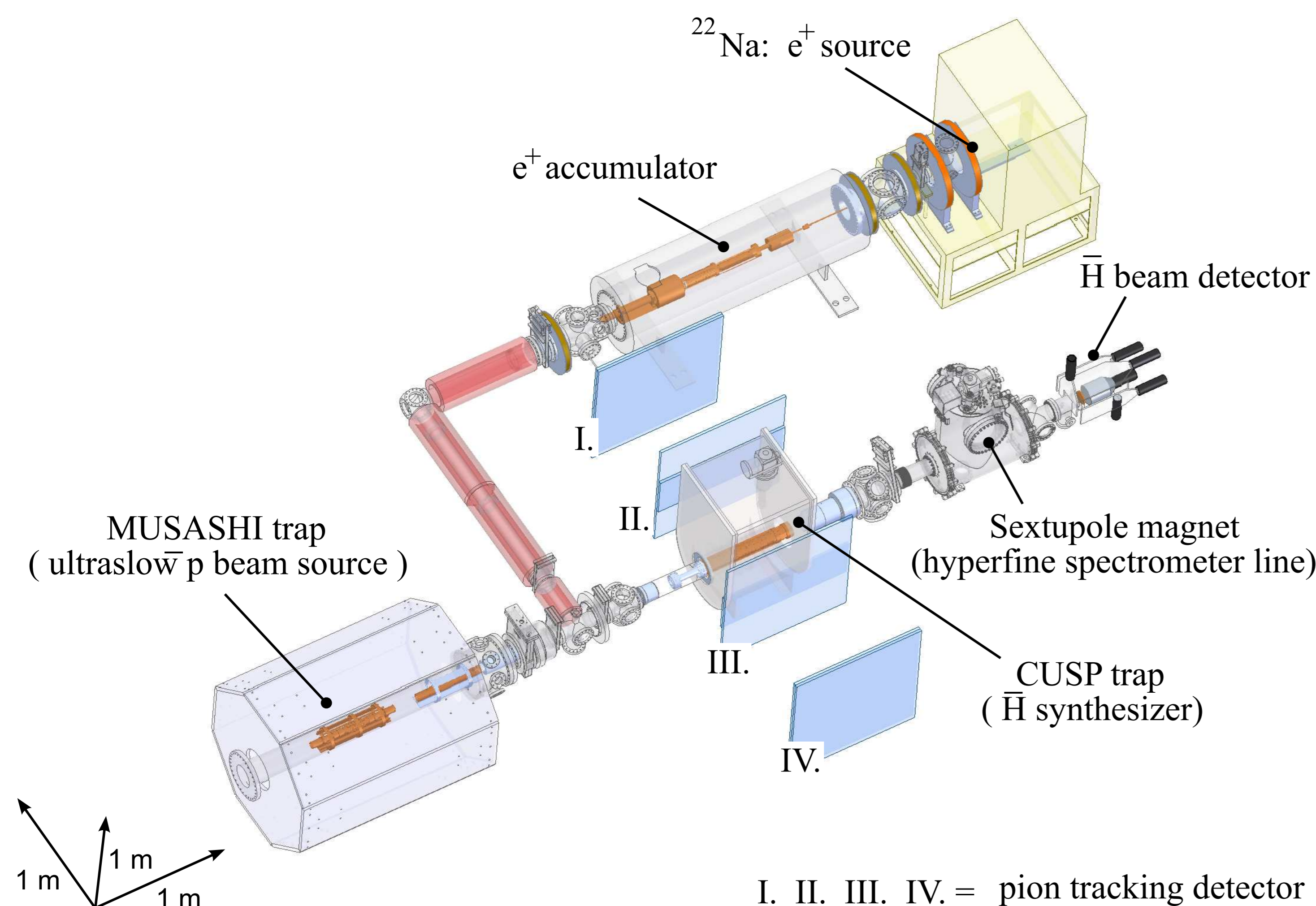


Figure 3: 装置概観

反水素原子の合成

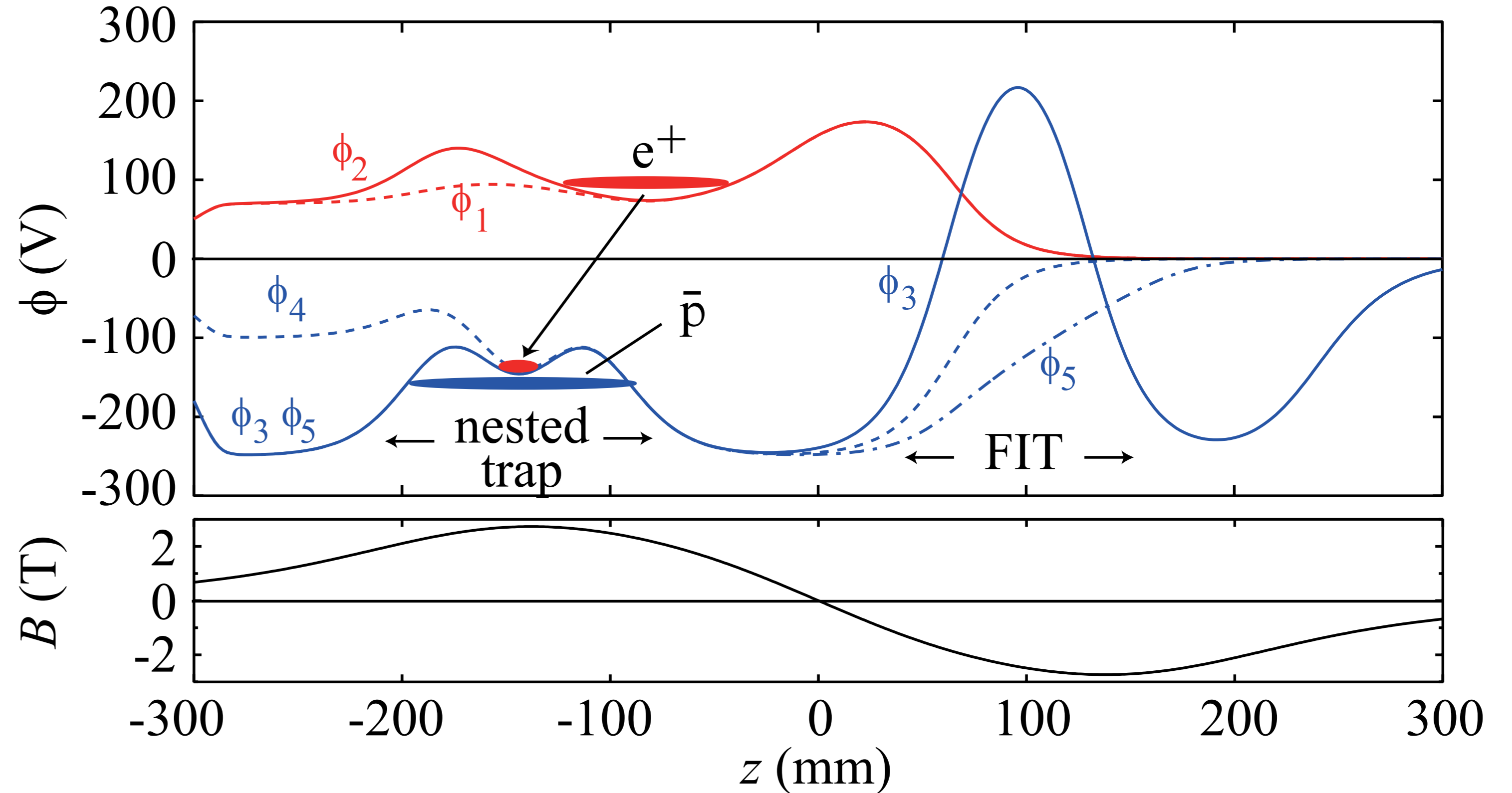


Figure 4: 反水素合成手順

図 4 は、CUSP トラップにおける反水素原子合成の手順です。
(i) まず、陽電子を CUSP トラップに輸送し、 10^6 個程を蓄積します。輸送時には ϕ_1 のようにポテンシャルを下げ、直ちに ϕ_2 に戻して陽電子のパルスを捕捉します。
(ii) 次に陽電子プラズマの動径方向分布を制御して高密度化し、 ϕ_3 の状態に変化させます。
(iii) 反陽子ビームを入射します。陽電子の場合と同じく入口を一瞬だけ開けて (ϕ_4 にして) 捕捉します。
(iv) 反陽子は、陽電子とクーロン散乱を繰り返します。陽電子はそれによって加熱されますが、強磁場中にある為にシンクロトロン放射で受けたエネルギーを次々に捨てていきます。この過程で反陽子は冷却され、陽電子を捕獲し反水素原子を形成します。
(v) できた反水素原子は電気的に中性なので、図 4 に示した静電ポテンシャルの井戸では閉じ込められなくなり、飛び出します。そのうち高励起状態にある反水素原子だけは、強い電場勾配を持つ領域 (FIT) でイオン化され、反陽子と陽電子は再びばらばらになります。この高励起反水素原子由来の反陽子だけが、この FIT の井戸に溜ります。

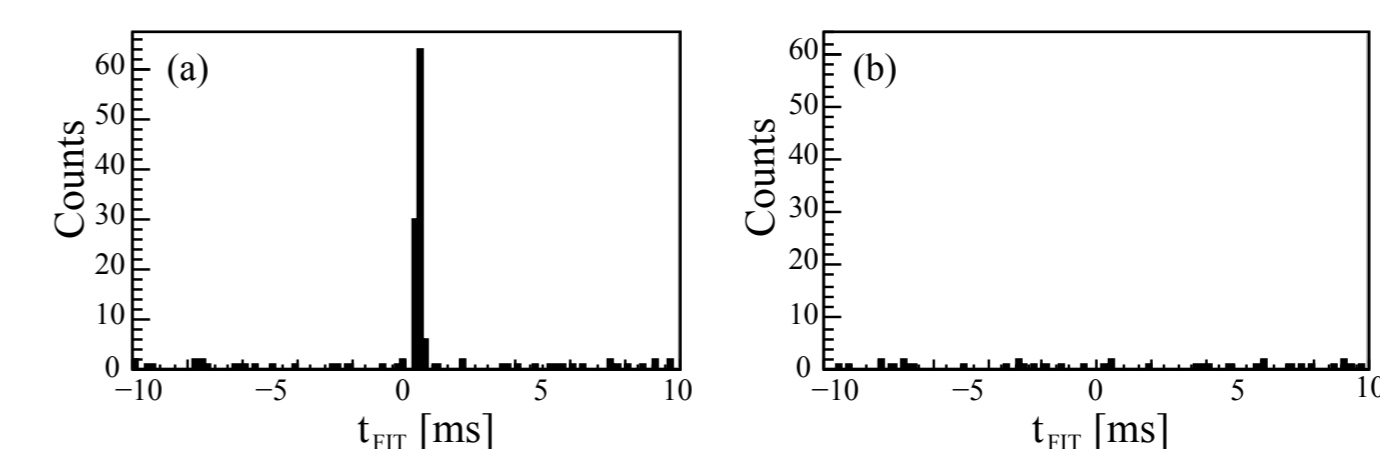


Figure 5: 「反水素原子」検出

こうした溜った反水素原子由来の反陽子を、あとで数えたものが図 5 の (a) です。比較の為に、陽電子無しで上と同じ操作をした時の結果が図 5 (b) で反水素由来の信号が見えないのが確認できます。

図 6 は、FIT を一定時間毎に開けて中に溜った反陽子の数を数えることで、反水素合成の時間変化を追ったものです。反応は 100 秒程度で終わることがわかります。

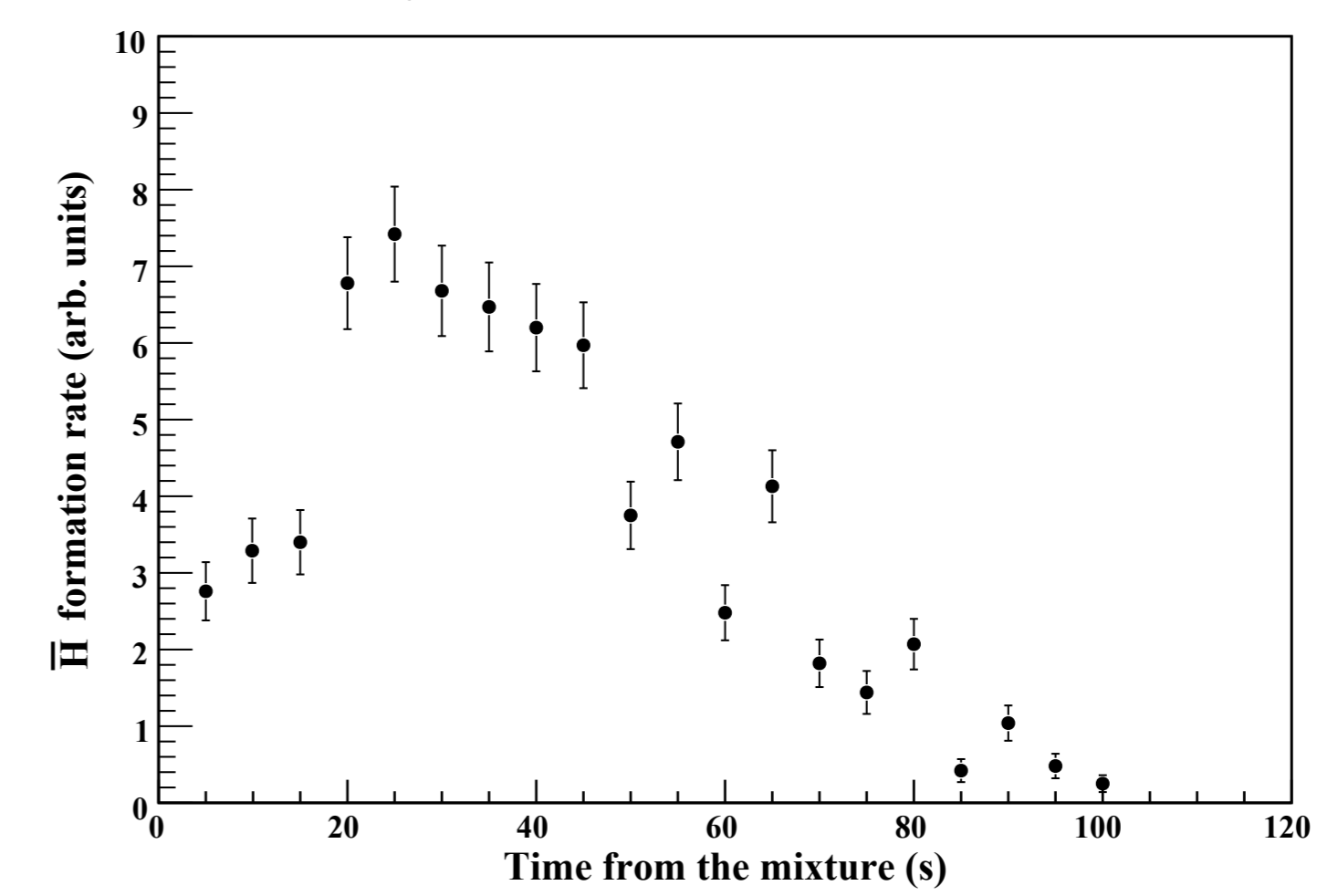


Figure 6: 反水素合成レートの時間変化

反水素ビーム

現在、合成された反水素原子を当初の計画通りビームとして引き出しマイクロ波分光を行なおうとしています。下の図のように LFS の反水素原子は、CUSP 磁場によって発散せずに外に出て来ると期待され、その確認が第一目標となります。反水素ビーム検出器の開発を進めています。その後はいかにして基底状態の反水素原子をたくさん作れるかが鍵になってくるでしょう。

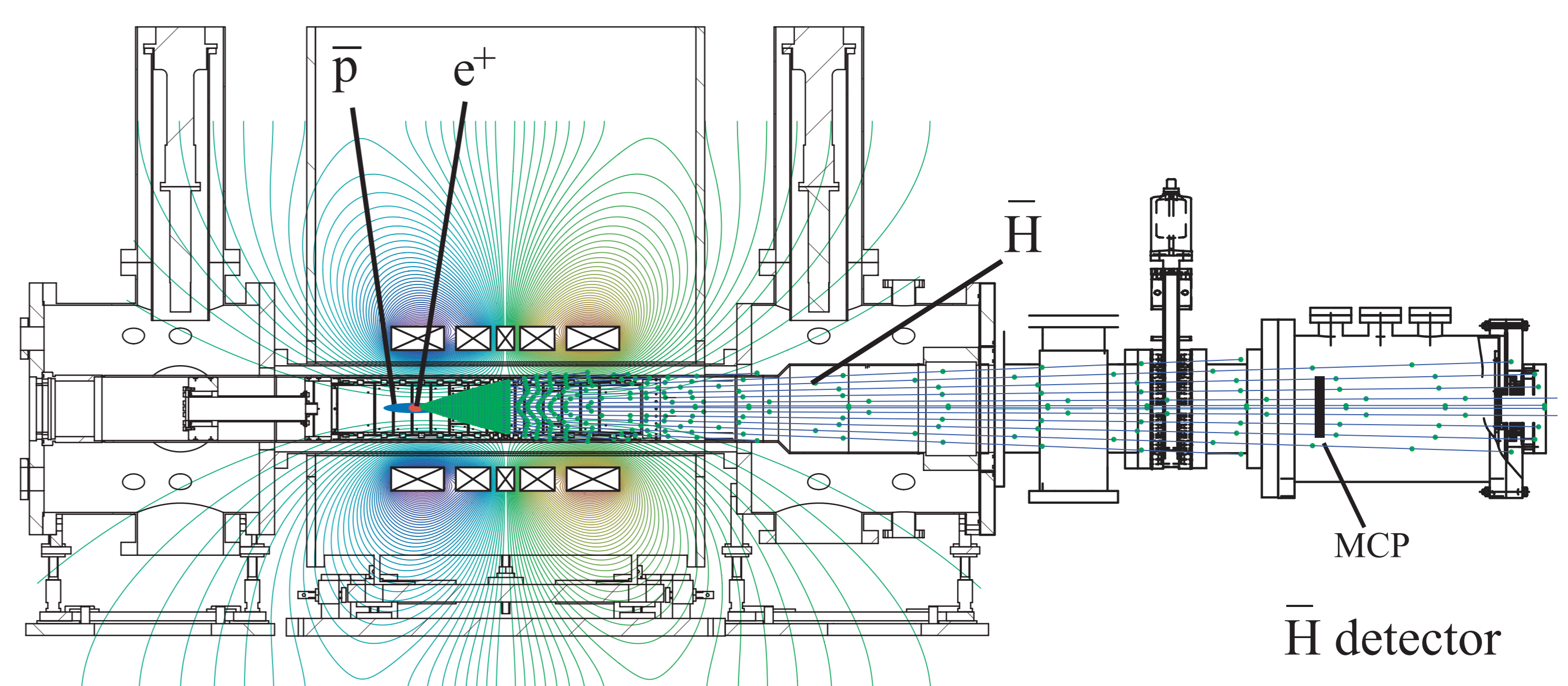


Figure 7: 反水素ビーム引き出し