

修士学位論文

カスプトラップ法を用いた
反水素原子分光の為の反水素検出器の開発

Development of an antihydrogen detector
for spectroscopy of antihydrogen atoms
synthesized in a cusp trap

2011 年度

広域科学専攻 相関基礎科学系

31-106906

大塚未来

指導教員：山崎泰規

2012/03/16

目次

第1章 本研究の動機と目的.....	2
1.1 反物質.....	2
1.2 CPT 対称性.....	2
1.3 物質と反物質の比較.....	3
1.4 反水素原子の合成反応.....	4
第2章 実験の概要.....	6
2.1 反水素原子の分光法.....	6
2.2 実験装置.....	8
2.2.1 反陽子の蓄積・輸送.....	9
2.2.2 陽電子源.....	11
2.2.3 反陽子・陽電子の混ぜ合わせ.....	13
第3章 反水素検出器.....	16
3.1.反水素原子の検出.....	16
3.2.検出器.....	18
3.2.1.マイクロチャンネルプレート(MCP).....	18
3.2.2 プラスチックシンチレータ.....	21
3.3 真空系.....	22
3.3.1 真空ポンプ.....	23
3.3.2 到達真空度（水素分圧）.....	24
第4章 Geant4 によるシミュレーション.....	25
4.1 Geant4 について.....	25
4.2 シミュレーションの条件.....	25
4.2.1 ジオメトリー.....	25
4.2.2 パラメータ.....	26
4.3 シミュレーションの結果.....	28
第5章 実験結果.....	35
5.1 反水素原子の合成確認.....	36
5.2 反水素検出器の応答.....	38
5.2.1 電子と高速粒子の波高.....	38
5.2.2 反水素検出器による反陽子の検出.....	41
5.2.3 反水素合成条件下での実際の反水素検出器の応答.....	50
第6章 結論・これからの展望.....	54
6.1 結論.....	54
6.2 課題・これからの展望.....	55
付録 FIT 有り無しでの MCP におけるカウントの違い.....	56
<参考文献>.....	58

第1章 本研究の動機と目的

本研究ではの基底状態の反水素原子を高分解能でマイクロ波分光し、超微細構造分裂を測定することをめざしている。

1.1 反物質

反粒子はその対となる粒子と質量や寿命は同じで、電荷や磁気モーメントなどの電磁的な物理量の符号は逆である粒子であり、反粒子から構成された物質を反物質という。

本研究対象である反水素原子は、陽子と対となる反陽子、電子と対となる陽電子からなる水素原子と対になる反物質である。図 1.1 にあるように負の電荷を持つ反陽子の周りを正の電荷を持つ陽電子が回っている構造である。反水素原子はすでに生成可能であり[1,2,3]、簡単な2体系であるので基本的な物理量の測定に適している。

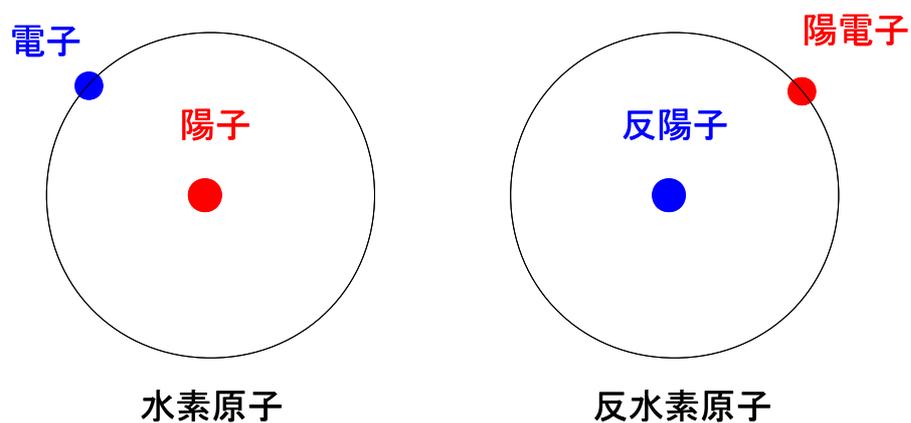


図 1.1 水素原子と反水素原子

1.2 CPT 対称性

CPT 対称性は最も基本的であると考えられている物理学の対称性であり、その対照性が成り立っていれば荷電変換 (C)、パリティ変換 (P)、時間反転 (T) を同時に行った (CPT 変換した) ときの物理法則は不変である。

また、CPT 対称性の帰結として反粒子粒子の物理量の絶対値は完全に同じになる。

そこで本研究では、反水素原子の基底状態の超微細構造を高分解能で測定し、水素原子と比較することで CPT 対称性が成り立っているかどうか実験的にテストすることを目指している。

1.3 物質と反物質の比較

現在のところ、電子と陽電子、陽子と反陽子について表 1.3 のようなことが実験的にわかっている。ここで m は質量、 q は電荷量、 μ は磁気モーメント、 g は g 因子である。

$(m_{e^+} - m_{e^-})/m_{\text{average}}$	$ q_{e^+} + q_{e^-} /e$		$(g_{e^+} - g_{e^-})/g_{\text{average}}$
$< 8 \times 10^{-9}$	$< 4 \times 10^{-8}$		$(-0.5 \pm 2.1) \times 10^{-12}$
$(m_{\bar{p}} - m_p)/m_p$	$ q_{\bar{p}} + q_p /e$	$(\mu_{\bar{p}} + \mu_p)/\mu_p$	
$< 2 \times 10^{-9}$	$< 1.0 \times 10^{-21}$	$(-0.1 \pm 2.1) \times 10^{-3}$	

表 1.3 実験的に知られている要旨と反陽子、電子と陽電子の物理量の関係

ここで、反陽子を点電荷であるとした場合、反水素原子の基底状態における長微細構造分裂の遷移周波数 (ν_{HF}) は

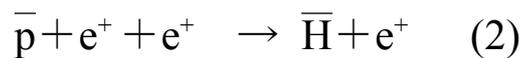
$$\nu_{HF} = \frac{8}{3} \left(\frac{m_{\bar{p}}}{(m_{\bar{p}} + m_{e^+})} \right)^3 \frac{m_{e^+} \mu_{e^+} \mu_{\bar{p}} m_{e^+} (\alpha^2 c)^2}{m_{\bar{p}} \mu_B \mu_N h}$$

のようにあらわされ、反陽子の磁気モーメントに比例する。(m:質量、 μ :磁気モーメント、添え字 e+:陽電子、p:反陽子、 μ_N :核磁子、 μ_B :ボーア磁子、 α :微細構造定数である。) つまり、超微細遷移を高分解能で測定することで反陽子の磁気モーメントを精度良く決定することができる。

本研究のカスプトラップ法では、反水素とマイクロ波との相互作用時間から $\Delta\nu/\nu_{HF} \sim 10^{-6}$ の精度で測定できると評価されており、この値は現在実験で知られている値よりも高い精度である。

1.4 反水素原子の合成反応

本研究では反陽子と陽電子を混ぜ合わせることで反水素原子の合成をおこなっている。反陽子と陽電子から反水素原子が合成される反応としては、主に以下の2つが考えられる。



(1)は放射性再結合反応、(2)は三体再結合反応と呼ばれ、反陽子と陽電子が結合した際にいらなくなったエネルギーを放射性再結合では光として放出し、三体再結合では周りの陽電子に受け渡す。

放射性結合の反応レートは $\propto \rho_{e^+} T_{e^+}^{-0.5}$ 、三体再結合の反応レートは $\propto \rho_{e^+}^2 T_{e^+}^{-4.5}$ となっている。 ρ_{e^+} は陽電子の密度、 T_{e^+} は陽電子の温度である。よって陽電子の高密度化低温化が反水素原子の大量合成には不可欠である。また、より低温高密度になるほど三体再結合が主な反水素合成過程となっていく。

第2章 実験の概要

2.1 反水素原子の分光法

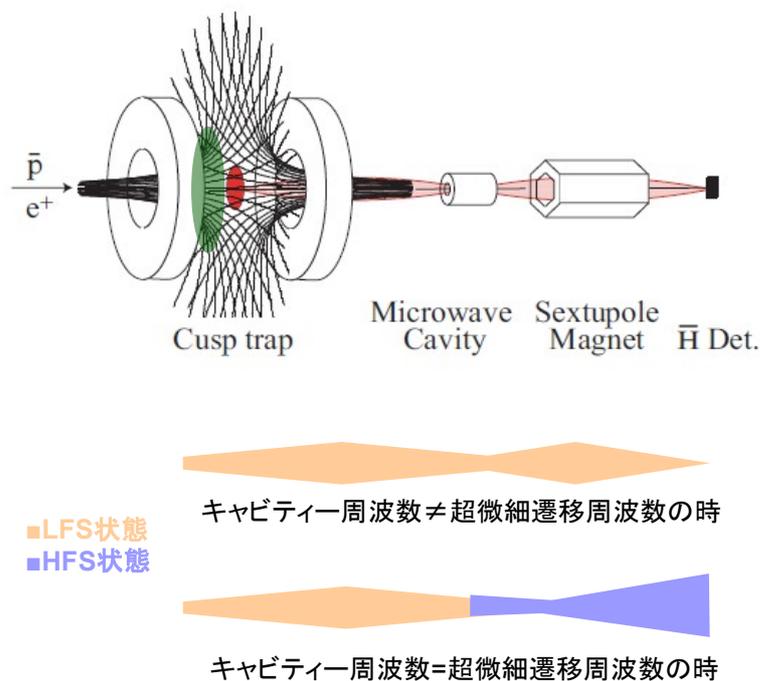


図 2.1-1 スピン偏極反水素原子ビームの分光

本研究ではカスプトラップと呼ばれる不均一磁場をもちいたトラップでスピン偏極反水素ビームを生成し、マイクロキャビティ・6重極磁石を用いて反水素原子の基底状態の超微細遷移を測定することを目指している。測定のご概念図を図 2.1-1 に示す。

カスプトラップの磁場は平行かつ同軸にならべた2つの超伝導コイルに互いに逆向きに電流を流すことで作りだしている(図 2.1-1 左上)。磁場強度はカスプ中心では0であり、どの方向に向かっても $|B|$ は大きくなっている。不均一磁場中では、磁気モーメントが磁場と逆向きになっているLFS(low field seeking)状態の原子は磁場の弱い方向へ力を受け、HFS(high field

seeking)状態の原子は磁場の強い方向へ力を受ける。よって、軸中心はは弱く、径方向に向かって強くなる磁場を通過した場合、LFS状態の原子のビームは収束しHFS状態の原子のビームは発散する。

このことを利用して、カスプ中心(図 2.1-1 上図赤色領域)よりも上流側(図 2.1-1 上図緑色領域)で冷たい反水素原子を合成することによりスピン偏極した反水素ビームを引き出すことができる。

まず、カスプトラップの上流側から反陽子・陽電子を入射し、混ぜ合わせることで反水素原子を合成する。

上流側でできた反水素原子のうちLFS状態のもののみが選択的に磁場のないカスプ中心へと力を受ける。そのとき、反水素原子が十分冷たければ、LFS状態の反水素原子は下流側に導かれ、磁場による収束作用を受け下流側にビームとして現れる。

このようにしてカスプトラップから引き出されたLFS状態の偏極反水素原子ビームはマイクロ波キャビティを通過する際、キャビティにかかっている周波数が反水素原子の超微細遷移周波数に一致すると、共鳴しHFS状態に遷移する。その後、6重極磁石に通過させると、共鳴遷移によってビームがHFS状態になった場合、ビームは発散する。LFS状態ビームに対する収束点に反水素検出器を設置すれば、共鳴周波数のときに検出数が極小値をとることから、超微細遷移周波数が決定できる。

カスプトラップ法は反水素原子をビームにすることで、磁場のない領域への引き出しが可能になり、キャビティ内での外部磁場によるゼーマン効果の影響を抑えた高分解能分光が可能になる。

2.2 実験装置

図 2.2-1 に実際の反水素原子分光実験装置のセットアップを示す。

図 2.2-1 の青い矢印の示す経路でカスプトラップへと輸送されてきた反陽子と、赤い矢印にそってカスプトラップへと輸送された陽電子を、混ぜ合せ、反水素原子の合成を行う。

そして前節で述べたような原理でカスプトラップから偏極反水素原子ビームとして引き出し(緑色矢印)、分光を行う。次項以降では反陽子・陽電子の蓄積・輸送法について、次いで反水素原子の合成方法について述べる。

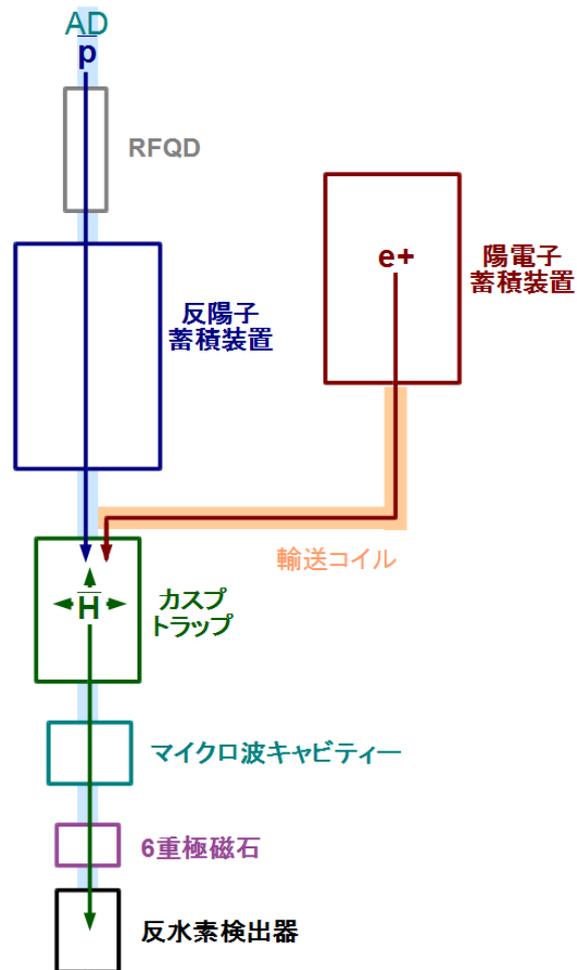
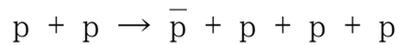


図 2.2-1 実際の反水素文庫実験装置のセットアップ

2.2.1 反陽子の蓄積・輸送

本研究ではAD(antiproton decelerator:反陽子減速器)で生成された反陽子を利用している。

ADでは、PS (Proton Synchrotron) でつくられた 26GeV/c の陽子をAD直前に設置されたイリジウム標的に衝突させることで、以下のような陽子-反陽子の対生成反応を起こさせる。



このようにして生じた反陽子はAD内で確率冷却・電子冷却を繰り返すことによりエネルギーのそろった反陽子パルスを作り出している。そして反陽子数 3×10^7 、パルス幅 150ns、エネルギー 5.3MeV の反陽子パルスを 100s 程度のサイクルで供給している。

供給された反陽子はRFQD (Radio Frequency Quadrupole Decelerator:高周波四重極減速器)を用いて反陽子を減速されるような位相の波に乗せることでさらに減速する。RFQDにおいてADから供給された反陽子の1/3程度が110keVまで減速され反陽子蓄積装置に輸送される。

反陽子蓄積装置は、図2.2.1-1(a)に見られるように、反陽子を捕捉・蓄積するための $\sim 10^{-13}$ Torrの極高真空容器の内部にはポテンシャル壁を作るためのMRE (Multiple Ring Electrodes:円筒分割電極)、反陽子を電子冷却するための電子銃、また、RFQDと真空容器の間にはPET薄膜があり、真空隔壁にすると同時にビームプロファイルモニターの働きをしている。真空容器は超伝導コイル、Gifford-McMahon (GM)型の冷凍機があり、真空容器内は4K、超伝導コイルは5K程度に冷却されている。

$180 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ のPET薄膜を通過することで反陽子は10keV程度まで減速され、軸方向の磁場とポテンシャルの壁によって捕捉される。捕捉された反陽子は電子銃から予め導入しておいた電子と混ぜ合わせることで、電子と多数の衝突をすることで冷却される。また、中心軸の周りに回転電場をかけることによって反陽子雲の動径方向圧縮を行っている(図2.2.1-1(b))。

このようにして反陽子蓄積装置にはRFQDから輸送された反陽子はADから供給される反陽子パルス1ショットにつき 1.5×10^6 個程度が捕捉・蓄積される。そして、蓄積された反陽子は $\sim 150\text{eV}$ のパルスビームとしてカスプトラップに引き出される。

反陽子の減速・冷却の模式図を図2.2.1-2に示す。

実験ではADから供給された反陽子パルス2~3ショット分を蓄積し、 3×10^5 個程度をカスプトラップへと輸送している。

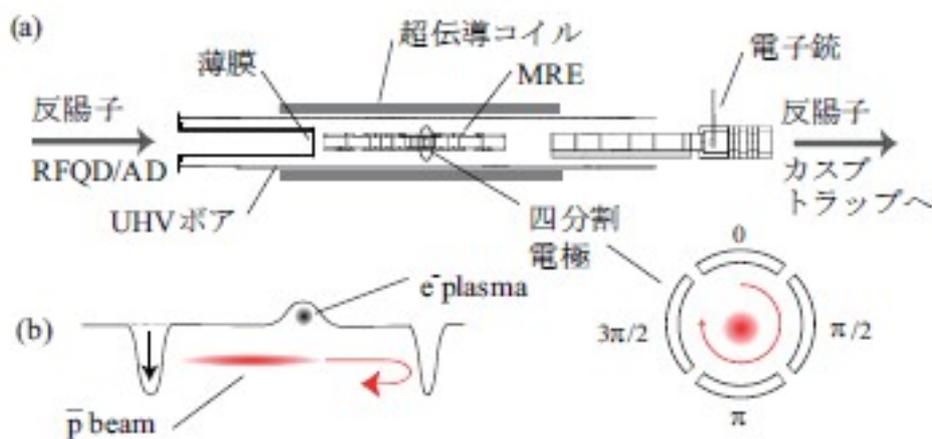


図2.2.1-1：(a)反陽子蓄積器の断面図(b)反陽子パルスビーム捕捉の模式図

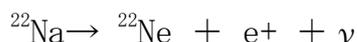


図2.2.1-2 反陽子の冷却・減速

2.2.2 陽電子源

本研究では陽電子源として ^{22}Na (1MBq) の ^{22}Na 線源を利用している。

^{22}Na は β^+ 崩壊



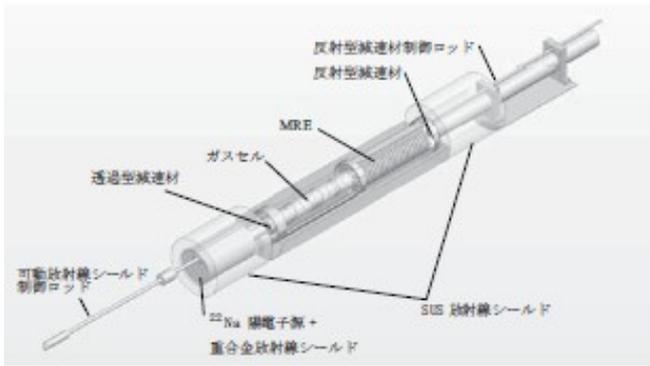
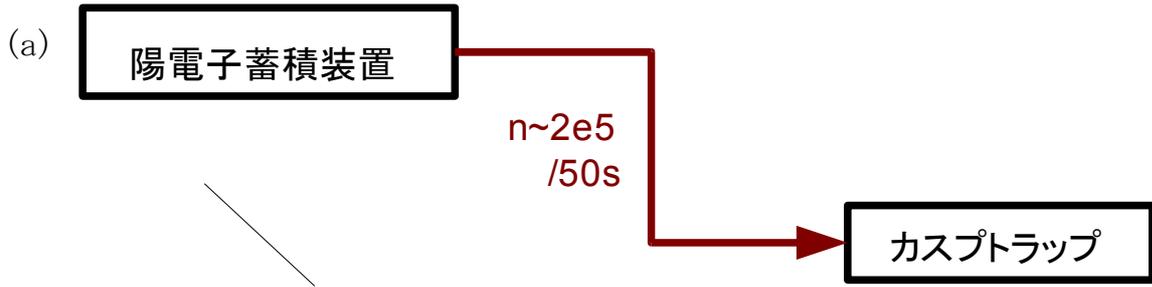
により ^{22}Ne となる。このとき放出される陽電子の最大エネルギーは 500keV である。

陽電子蓄積装置は図 2.2.2-1 (b) にしめすように ^{22}Na 陽電子源、放射線シールド、再放出確率 $\sim 3 \times 10^{-3}$ のタングステン透過型・反射型減速材、ガスセル、MRE からなり、それらが 2.5T の超伝導ソレノイドコイル中に配置してある。また、陽電子蓄積装置全体は液体ヘリウムによって冷却されている。

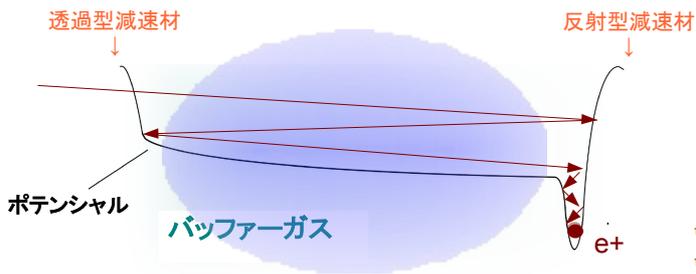
陽電子蓄積装置内の線源から放出された高速陽電子は磁力線に沿って移動し透過型減速材のタングステン薄膜に入射する。そこで一部は数 eV の低速陽電子となり、反射型減速材であるタングステン板に入射しさらに一部が減速される。さらに、陽電子は透過型減速材と反射型減速材の間にあるガスセル通過中に、窒素ガスによるバッファーガスとの衝突によって冷却され MRE のつくるポテンシャル井戸に閉じ込められる (図 2.2.2-1 (c)) 。

こうして捕捉された陽電子は輸送コイルにそって約 2×10^5 個が 50s ごとにカスプとラップへと輸送され、蓄積される (図 2.2.2-1 (a)) 。

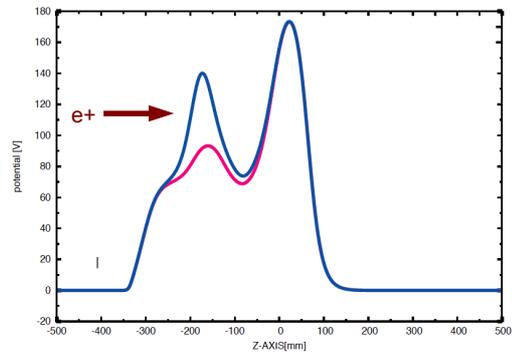
第 1 章で述べたように、合成される反水素原子の数は陽電子の密度に依存している。よって実験では図 (d) の示すようなポテンシャル変形を繰り返すことにより、輸送された陽電子の 30~40 回分を蓄積し、高密度化するため、カスプトラップ内 MRE による回転電場により動径方向に圧縮している。



(b) 陽電子蓄積装置の構造



(c) 陽電子の冷却



(d) カストラップ内での陽電子入射・蓄積ポテンシャル

図 2. 2. 2-1 陽電子の冷却・蓄積の様子

2.2.3. 反陽子・陽電子の混ぜ合わせ

カスプトラップでは磁場による偏極反水素原子ビームの引き出しだけでなく、入れ子型のポテンシャルを用いて反陽子と陽電子を混ぜ合わせ反水素原子の合成も行っている。

カスプトラップの断面を図 2.2.3-1 に示す。

カスプトラップには真空容器内の MRE、超伝導コイル、2 台の GM 型冷凍機が設置されており、真空容器内の温度は 6K、真空度 $10^{-9} \sim 10^{-10}$ Torr (常温部測定値)、カスプ内の最大磁場 2.5T となっている。

反陽子蓄積装置からカスプトラップへと輸送されてきた反陽子と、陽電子蓄積装置から輸送されカスプトラップで蓄積・圧縮された陽電子を、次ページのような過程で混ぜ合せ、反水素原子の合成を行う。

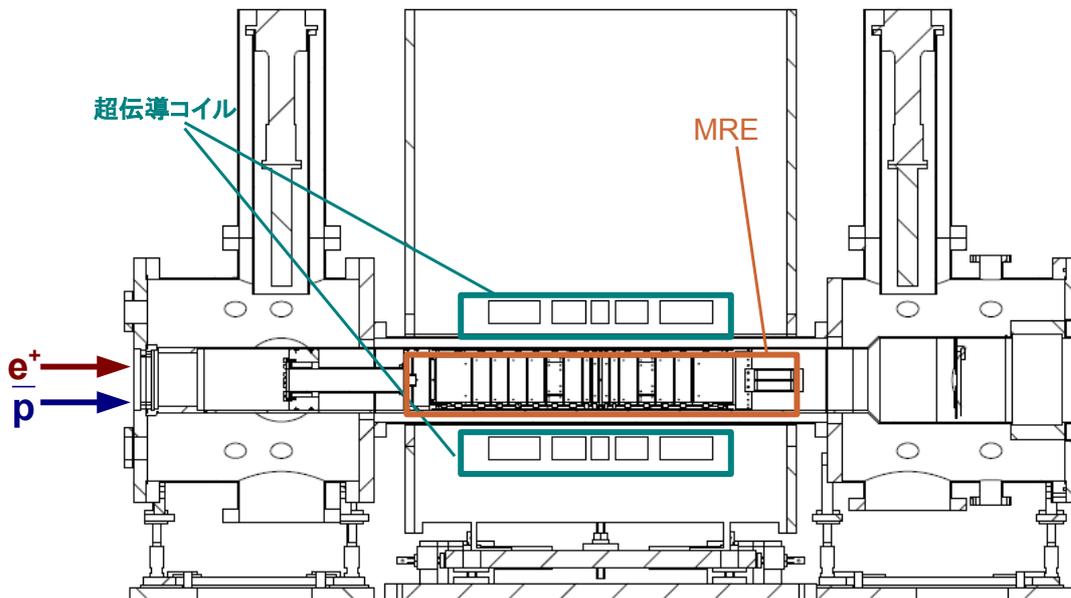


図 2.2.3-1 カスプトラップの断面

反陽子との混ぜ合わせのために入れ子型のポテンシャルへと変形
(図 2. 2. 3-2(a) i → ii → iii → iv)



反陽子入射 (図 2. 2. 3-2(b) 赤)



反陽子・陽電子混ぜ合わせ (図 2. 2. 3-2(c))

反陽子と陽電子を混ぜ合わせるために、カスプトラップ内で蓄積された陽電子を保持したまま、陽電子蓄積用ポテンシャル(a: i)から反水素原子を合成するための入れ子型のポテンシャル(a: iv)へと段階的にポテンシャルを変形反陽子をする。次に反陽子入射の際にポテンシャルを $\sim 2\mu\text{s}$ の間b:赤のように変形する。cのポテンシャルで反陽子と陽電子は混合される。入射した反陽子はポテンシャル内を行ったり来たりすることによって陽電子や残留ガスとのクーロン散乱によって冷却され、反陽子と陽電子が結合し反水素原子が合成される。

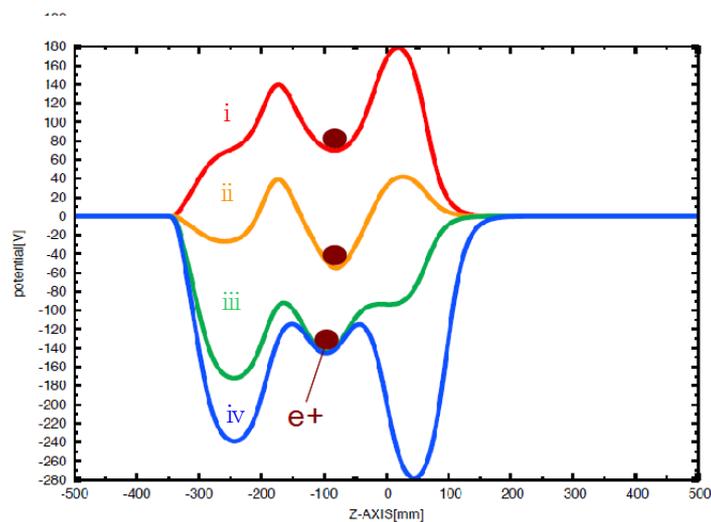


図 2. 2. 3-2(a) 陽電子蓄積ポテンシャル→反水素合成ポテンシャルへの変形

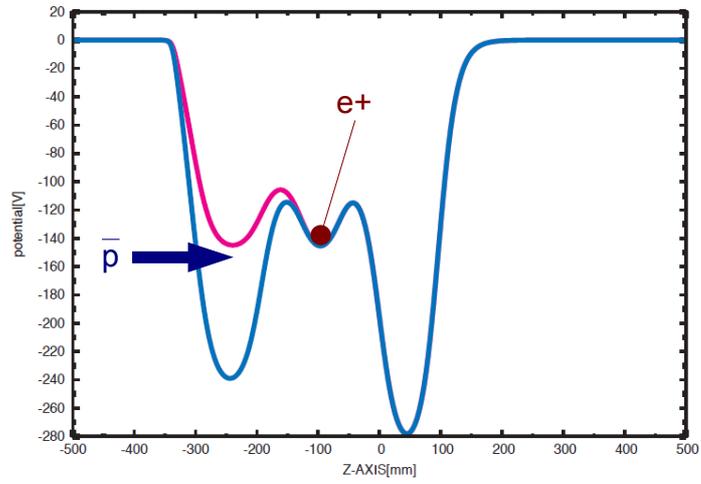


図 2. 2. 3-2 (b) 反陽子入射ポテンシャル

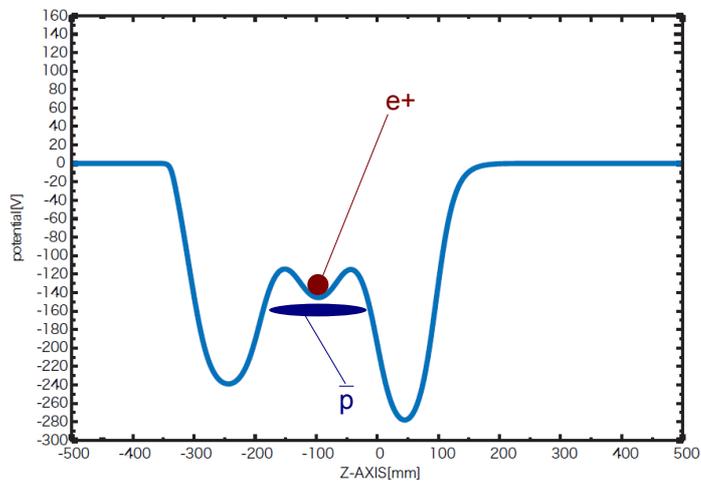


図 2. 2. 3-2 (c) 反水素原子合成ポテンシャル

第3章 反水素検出器

カスプトラップ法によって生成された反水素原子ビームをカスプトラップ下流で検出するための反水素検出器を製作した。

3.1. 反水素原子の検出

反水素検出器は真空チャンバー内に設置したMCP（マイクロチャンネルプレート）と、その周りを囲むようにプラスチックシンチレーターを配置したになっている。MCPから見込まれるプラスチックシンチレーターの立体角は45%である。

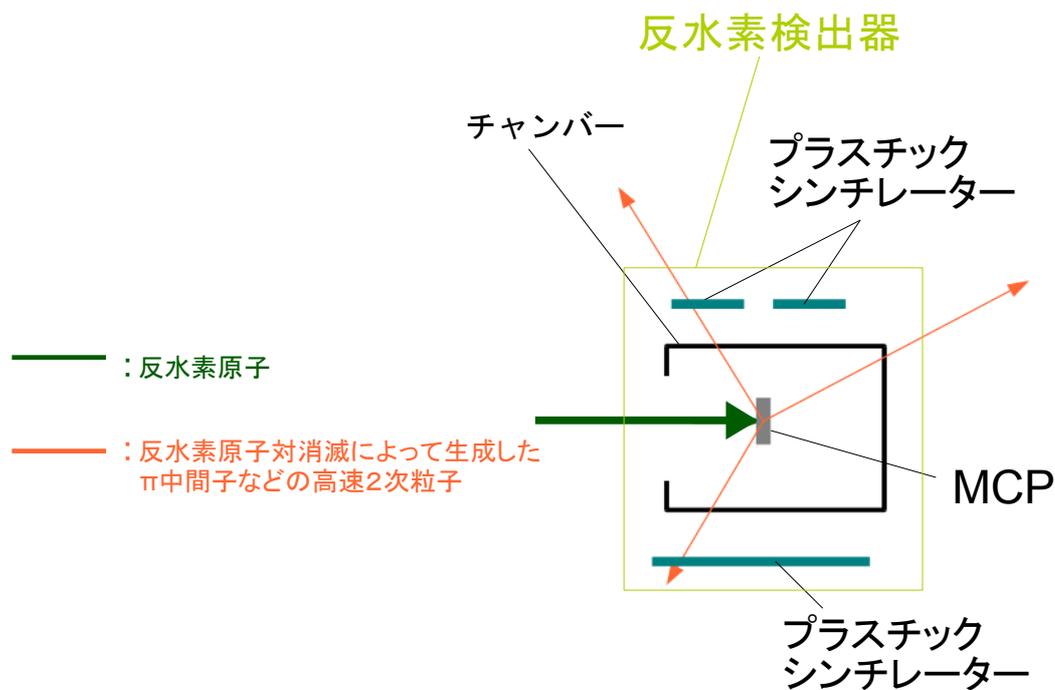


図 3.1-1 反水素原子の検出の模式図

図 3.1-1 の緑色の矢印のように、MCP に反水素原子が衝突すると、直ちに反陽子と MCP 表面の原子中の核子との対消滅反応がおこり、数 100MeV の複数の高速荷電 π 中間子を主とする二次粒子が放出される(橙色矢印)。そして放出された荷電 π 中間子の一部は MCP を囲むプラスチックシンチレーターにも衝突する。反水素原子以外に MCP に検出されるものとしては、

- ・反水素原子がカスプトラップ壁に衝突し消滅した際に放出される 2 次粒子
- ・カスプトラップ中での反陽子と残留ガスとの対消滅で生成する 2 次粒子

が考えられるが、これらの粒子は MCP に衝突した際に、チャンバー壁を通過するような高速 2 次粒子は生成されることはほとんどない。

このことから MCP の信号とプラスチックシンチレーターの信号の同時測定を行うことによりより確実に反水素原子の検出を行うことを試みた。

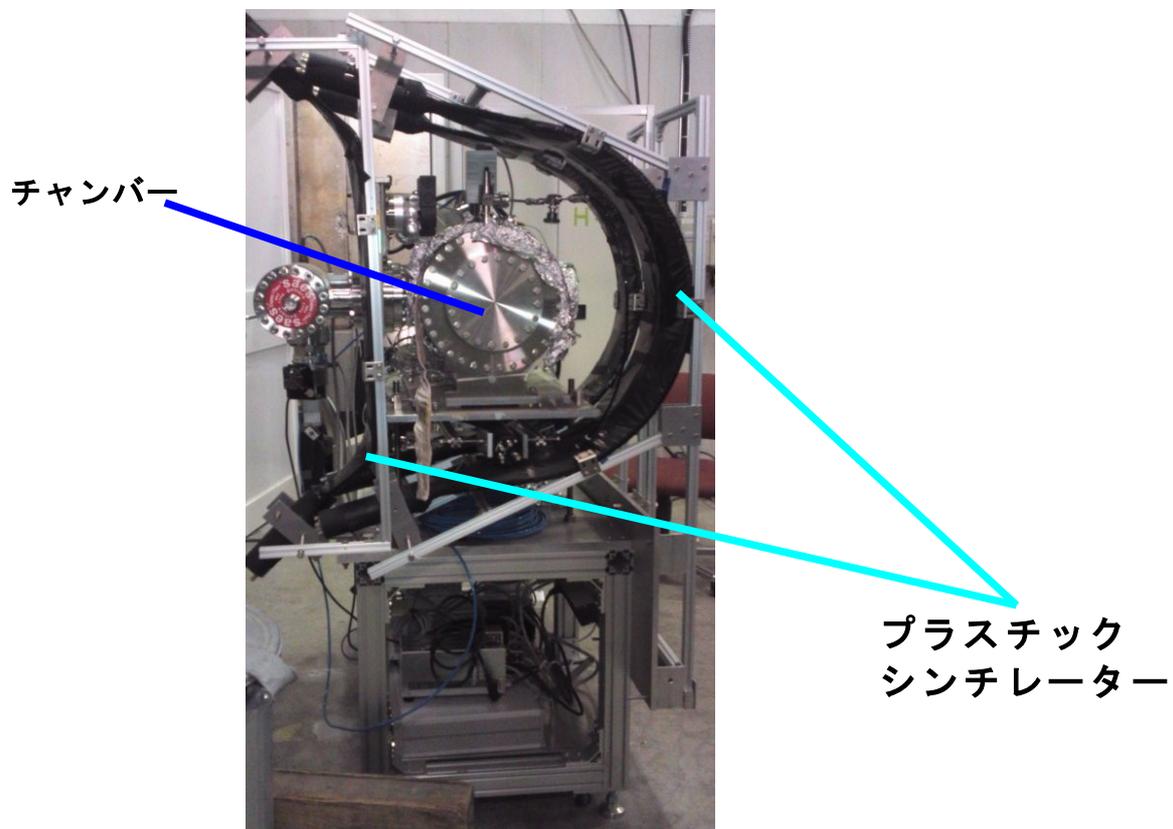


図 3.1-2 反水素検出器

3.2. 検出器

3.2.1. マイクロチャンネルプレート (MCP)

マイクロチャンネルプレート (MCP) は径が数 $10\ \mu\text{m}$ ほどの非常に細い高抵抗のガラスキャピラリを数 100 本～数 1000 本束ねた薄い板状の検出器である。

ひとつひとつのキャピラリが 2 次電子増倍管となっている。入射した粒子がキャピラリ壁に衝突し 2 次電子を放出すると、その 2 次電子は MCP 両端にかかっている電場にしがたって加速され、再び壁に当たり 2 次電子を生成する。これが繰り返されることで指数関数的に増幅された電子が出力側から放出される。

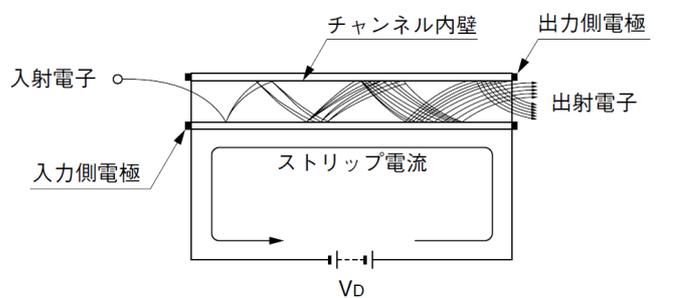


図 3.2.1-1 MCP の信号増幅の原理
([3]より引用)

MCP 検出器は、反陽子が MCP に当たった際に、ほかの粒子と比べ波高分布が大きくなることが知られている[4,5]。

MCP 検出器は前述のように放出される 2 次電子を増幅することで信号を作り出している。反陽子が MCP 表面に衝突し、表面の核子と対消滅する際には GeV オーダーのエネルギーが発生する。するとあ MCP 表面では核反応をはじめとした多種の反応が同時に起こる。すると同時に多数の 2 次電子が放出されることになり、それが MCP 検出器で高波高の信号を生成すると考えられる。

今回、図 3.2.1-2 にあるように、MCP の後ろに位置有感型の検出器である Roentdek 社のディレイライン検出器を取り付けることにより、ビームの形状・広がりも測定できるようにした。

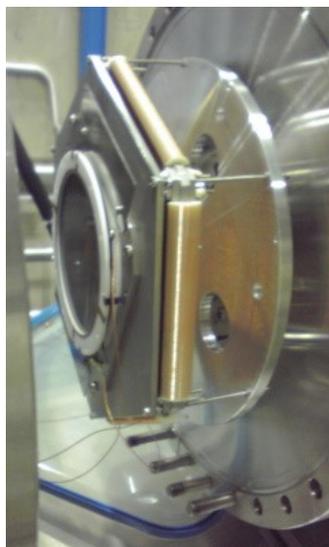


図 3.2.1-2 MCP とディレイラインを組み合われた検出器



図 3.2.1-3 ディレイラインの構造

ディレイライン検出器は図 3. 2. 1-3 のように導線がまきついた構造をしており、さらにそれが層状に重なっている構造をしている。

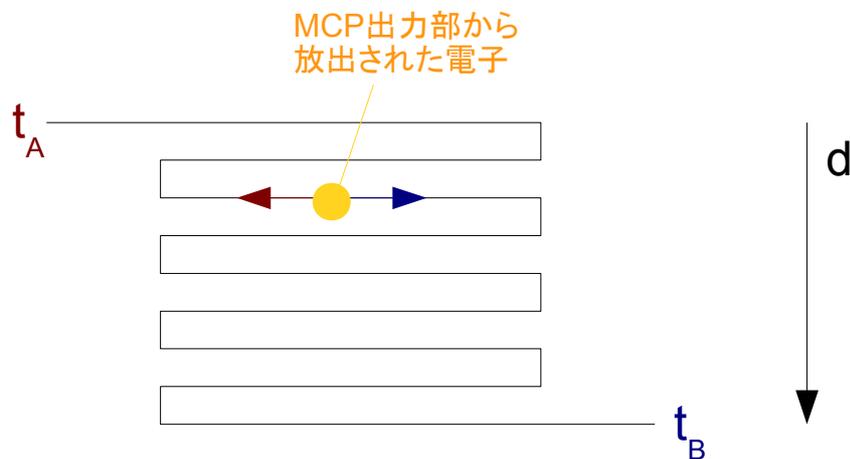


図 3. 2. 1-4 ディレイライン検出器の位置検出の原理

図 3. 2. 1-4 にディレイライン検出器の位置検出の原理をしめす。MCP 出力部から放出された電子がディレイラインに衝突すると、電子パルスは導線の両端にむかう。両端で検出される信号の時間差($t_B - t_A$)を測定することで d 方向の位置を知ることができる。[6]

ディレイライン検出器ではこの層を 2 層以上重ねることで 2 方向の位置を知ることができ、二次元的な粒子の位置が検出できる。今回複数の粒子が同時にディレイラインに衝突した場合で位置を一意に決定することができるよう、今回、3 ディレイラインを 3 層重ねた六角形型のものを使用した。

3.2.2 プラスチックシンチレーター

MCP 上での対消滅反応により生成した π 中間子の検出として、プラスチックシンチレーターを使用した。

プラスチックシンチレーターは加工しやすいため、チャンバーを囲うような複雑な形状を作ることが可能であり、信号の応答時間が \sim ns と早いために（表参照）MCP との信号のコインシデンスをとるにも都合がよい。

また、シンチレーターから得られる蛍光を図 3.2.2-1 のようにライトガイドを通じて、同じく応答時間の早い光電子増倍管（PMT）で電気信号に変換している。

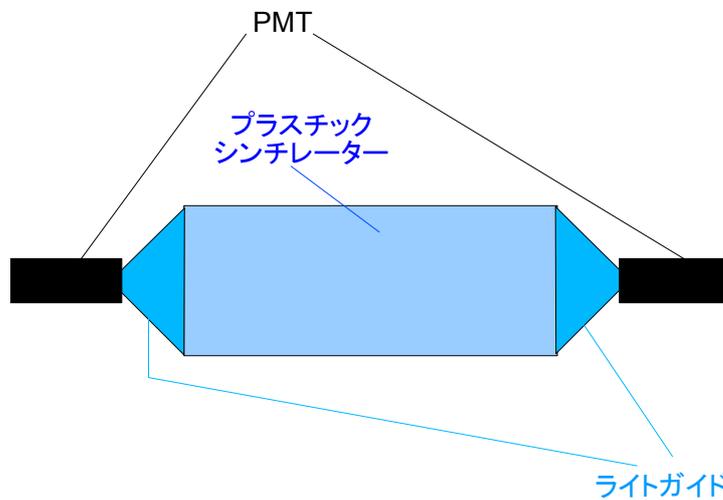


図 3.2.2-1 プラスチックシンチレーター、ライトガイド、PMT の組み立て図

3.3 真空系

反水素原子の分光の際には、反水素検出器はマイクロ波キャビティー、6重極磁石を経てカスプトラップとつながることになる。

カスプトラップは数Kと低温であるが、実験に必要な極高真空内での主な残留ガスである水素原子は、反水素検出器の真空度はカスプトラップと同程度にする必要がある。

下図のようなセットアップで真空引きを行い、真空度の測定にはイオンゲージ、4重極型質量分析器を用いた。

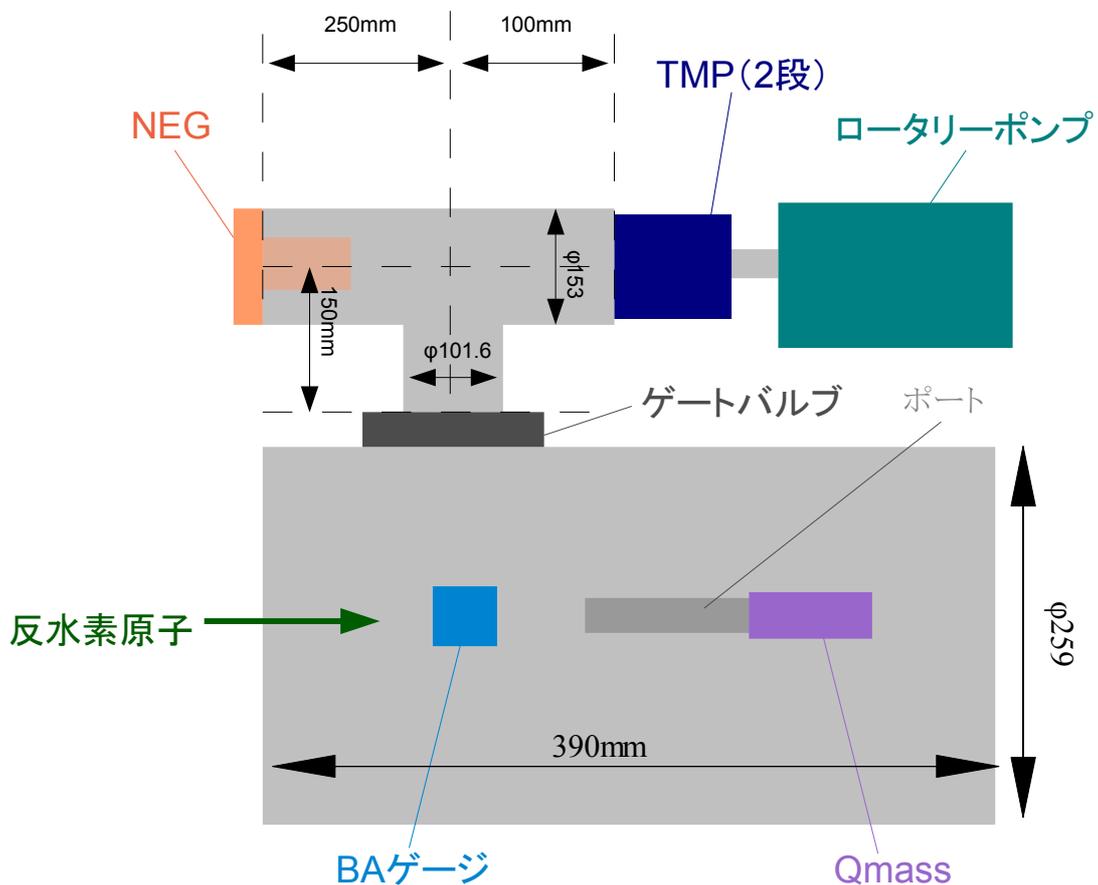


図 3.3-1 反水素検出器の真空系

3.3.1 真空ポンプ

真空系はロータリーポンプ、ターボ分子ポンプ(TMP)2段、非蒸発型ゲッターポンプ(NEG)からなる。

・ロータリーポンプ: あら引きポンプとして使用

・ターボ分子ポンプ(TMP)

: 分子量の大きなガスに大して有効であるが、主な残留ガスである水素原子に対する

排気量は小さい。主ポンプとして大阪真空製の圧縮比400のTMPを使用しているが、これは $\sim 10^{-10}$ Torrの到達には不十分であるためもう一段varian製のTMPを設置している。

・非蒸発型ゲッターポンプ(NEG)

: 金属の物理吸着によるガスの吸着を利用した真空ポンプ(今回はZr-Y-Fe合金)。500°C程度の高温状態では H_2 、 H_2O 、 CO 、 CO_2 、 CH_4 などの吸着したガスは再放出されるので、これらのガスは温度操作を行うことで繰り返し排気を行うことができる[8]。

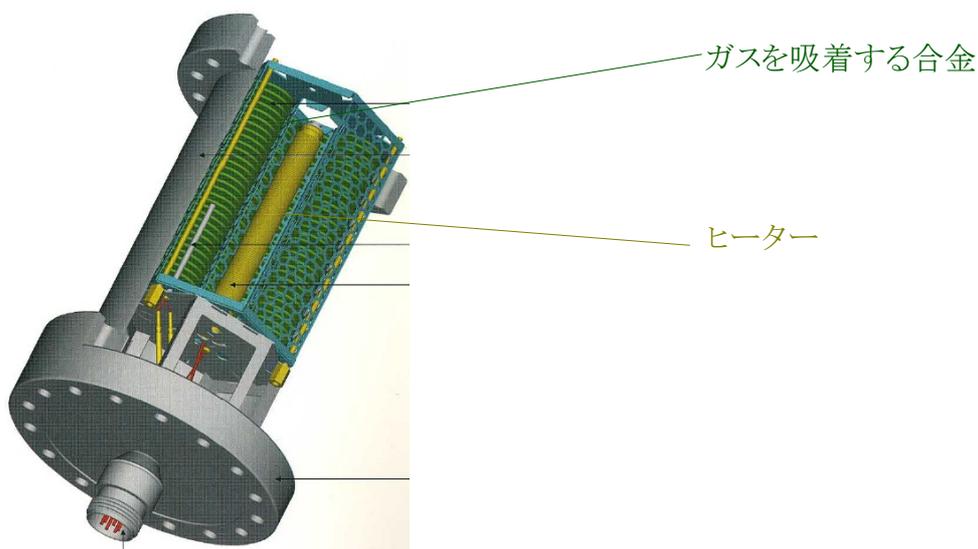


図 3.3.1-1 NEG の構造

3.3.2 到達真空度(水素分圧)

水素分子の排気は主に以下2つの真空ポンプによると考えられる。

- 大阪真空 TMP の水素排気速度 : 100L/s

配管のコンダクタンス

$$: 55^3 / (400 + 8 \times 55 / 3) = 304$$

$$304 \times ((28/2)^{0.5}) = 1140 \text{ m}^3/\text{s}$$

実効排気速度

$$: 1 / (1/100 + 1/1137) = 91.9 \text{ L/s}$$

- NEG の水素排気量 1300L/s

配管のコンダクタンス

$$: 55^3 / (75 + 8 \times 55 / 3) = 750$$

$$750 * ((28/2)^{0.5}) = 2800 \text{ m}^3/\text{s}$$

実効排気速度

$$: 96.6 + 1 / (1/1300 + 1/2800) = 888 \text{ L/s}$$

よって水素分子に対する総排気速度は

$$91.9 + 888 = 980 \text{ L/s}$$

となる。

また、前年の実験よりこの真空系内の脱ガス量は

$$3.57 \times 10^{-7} \text{ Torr} \cdot \text{L/s}$$

と見積もることができるので、

到達真空度は

$$3.57 \times 10^{-7} / 980 \sim 3.6 \times 10^{-10} \text{ Torr}$$

程度になると予想される。

これはカスプトラップ内の真空度と同程度である。

([9]参照)

第4章 Geant4によるシミュレーション

反水素原子が反水素検出器においてどの程度のS/N比で検出可能かについてGeant4[10]を用いてシミュレーションを行った。

4.1 Geant4について

Geant(GEometry ANd Tracking)4はモンテカルロ法によって素粒子の反応と物質中での振る舞いをシミュレーションするためのソフトウェアキットである。

4.2 シミュレーションの条件

4.2.1 ジオメトリー

実際の反水素検出器に即し下図のようなセットアップでシミュレーションをおこなった。

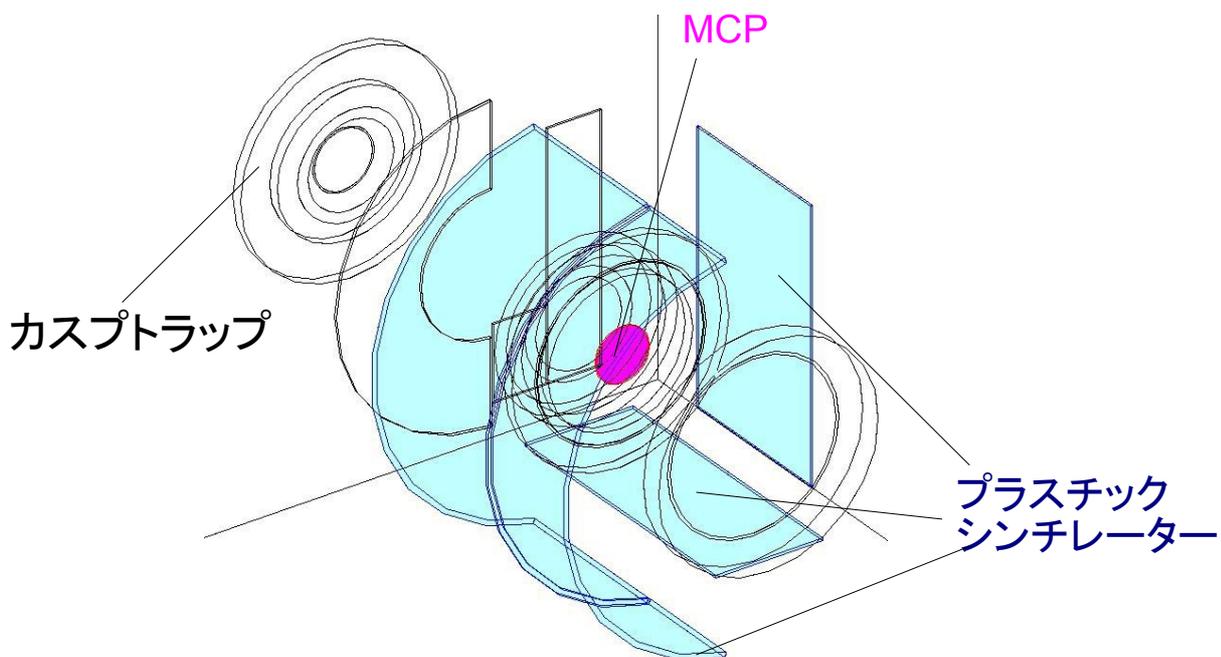


図 4.2.1-1 シミュレーションでのセットアップ

また、MCPは厚さ1.5mmの鉛ガラスの円盤とした。

4.2.2 パラメータ

2010年の実験の結果を基に

反陽子数 : 3×10^5 個、
反陽子寿命 : ~ 1000 s、
反水素原子合成効率 : 2.3%、
反陽子・陽電子混ぜ合わせ時間 : 100s
とした[11]。

・MCPに到達する反水素原子（シグナル）

反水素合成効率：2.3%、反陽子数： 3×10^5 であることから、
カスプトラップ内で合成される反水素原子は $3 \times 10^5 \times 0.023 \sim 7 \times 10^3$ 個である。
また、カスプトラップから見込まれるMCPの立体角は $4\pi \times 1.5 \times 10^{-4}$ であるので、
 $7000 \times 1.5 \times 10^{-4} \sim 1.1$ 個の反水素原子がMCPに到達すると考えられる。

・反水素原子以外にMCPに検出されるもの（ノイズ）

反水素原子以外にMCPに検出されるものとしては、主に

(i)反水素原子がカスプトラップ壁に衝突し消滅した際に放出された2次粒子
(ii)カスプトラップ内で反陽子と残留ガスとの対消滅で生成した2次粒子
が考えられる。

(i)反水素原子がカスプトラップ壁に衝突し消滅した数は、合成される反水素
原子が $\sim 7 \times 10^3$ 個、そのうちMCPにたどり着くものは ~ 1.1 個であるので、
 $7 \times 10^3 - 1.1 \sim 7 \times 10^3$ 個である。

(ii)カスプトラップ内で反陽子と残留ガスとの対消滅で生成した2次粒子の数
は、反陽子寿命 ~ 1000 s、反陽子数： 3×10^5 であることから、反陽子・陽電子混
ぜあわせ中の反陽子消滅数は、 $3 \times 10^5(1 - \exp(-100/1000)) \sim 2.9 \times 10^4$ 個である。
これらを表にまとめたものを表5.2-1に示す。

	シグナル	ノイズ	
粒子	到達反水素原子	消滅反水素原子	消滅反陽子
数	1.1	7×10^3	2.9×10^4

表 4.2.2-1 シミュレーションした粒子とその数

・MCPの検出効率

MCPの粒子の種類ごとの検出効率は下表[3,12]であるとしてシミュレーションを行った。

particle	e+,e- 100keV	ion 200keV	γ -ray	neutron ~MeV	π, μ, K ~GeV
efficiency	0.1	0.04	0.01	0.005	0.4

表 4.2.2-2 粒子の検出効率

4.3 シミュレーションの結果

4.2 で述べたようなパラメータを用いてシミュレーションを行った。

7×10^3 個の反水素原子がカスプトラップに衝突し消滅した際に放出された 2 次粒子の中で MCP に衝突する粒子のシミュレーション結果を図 4.3-1 に 2.9×10^3 個の反陽子がカスプトラップ内で残留ガスと対消滅した際に生成した 2 次粒子のなかで、MCP に衝突する粒子のシミュレーション結果を図 4.3-2 に、示す。

どちらも上の段は MCP に衝突した粒子の種類ごとのカウントで、下の段は検出効率を考慮し、MCP に検出されるカウント数になおしたものである。

衝突する粒子としてはガンマ線が多いが、検出される粒子としては π 中間子の信号が主であることが予想される。

下表 4.3-1 に粒子数の合計を示す。

上段は MCP に到達する反水素原子の数、中段は消滅した反水素原子由来の 2 次粒子、下段は消滅した反陽子由来の 2 次粒子である。

MCP に到達した反水素原子は MCP 衝突時に対消滅反応によって非常に大きいエネルギーを放出するので検出効率は 100%としている。

粒子数		MCP に衝突する 粒子	検出効率を考慮し た値
シグナル	到達反水素原子	1.1	1.1
ノイズ	消滅反水素原子	98.4	4.83
	消滅反陽子	312	22.6
ノイズ合計		410	27.4

表 4.3-1 シミュレーションによる粒子数

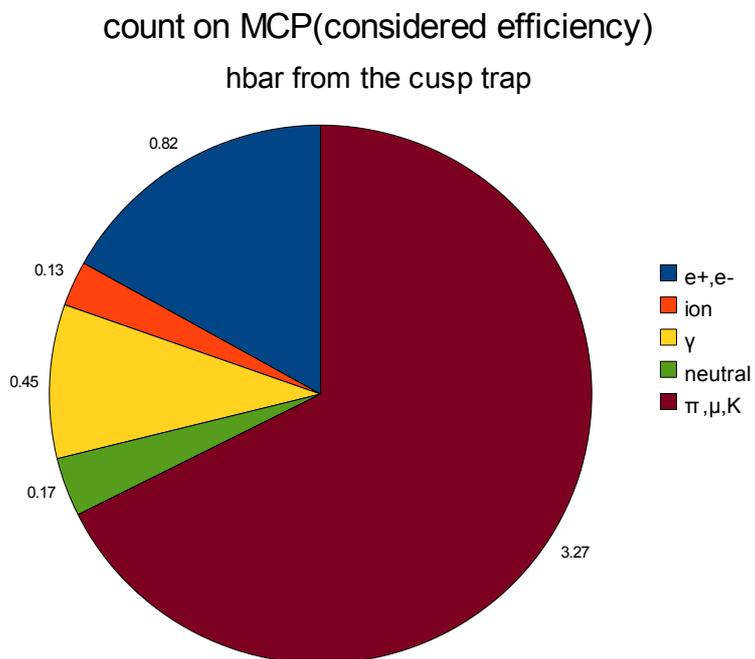
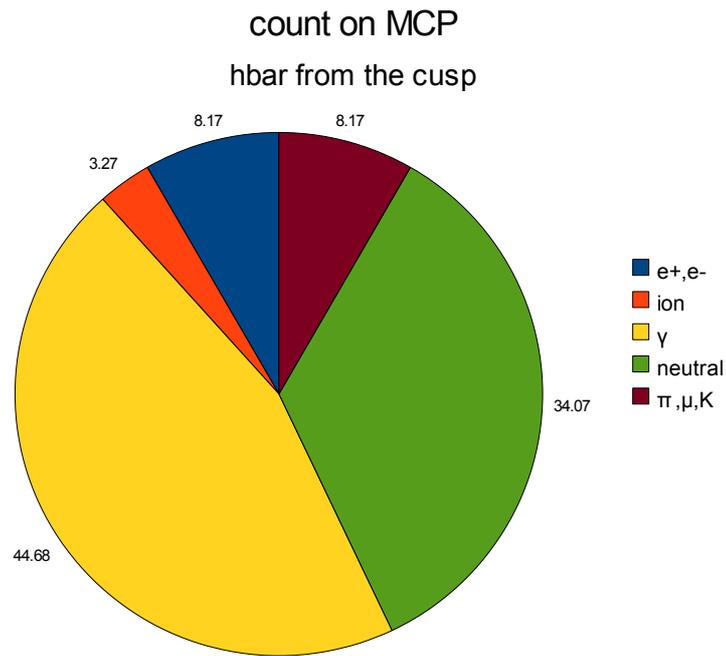


図 4.3-1 反水素原子がカスプトラップに衝突し消滅した際に
MCP に衝突する 2 次粒子のシミュレーション結果
(上 : MCP に衝突した粒子のカウント、下 : 検出効率を考慮したカウント)

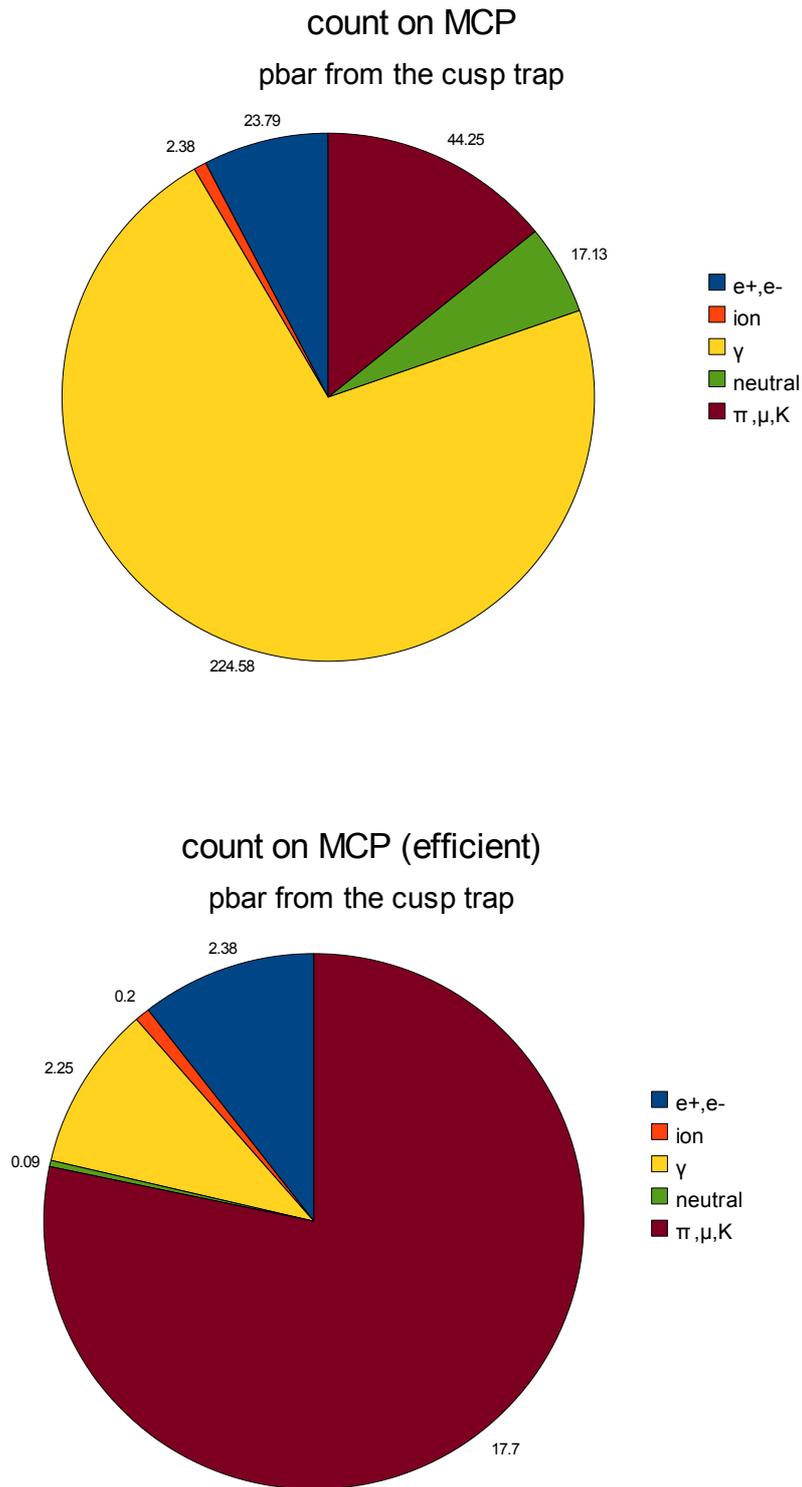


図 4.3-2 カスプトラップ内で反陽子と残留ガスとの対消滅した際に MCP に衝突する 2 次粒子のシミュレーション結果
(上：MCP に衝突した粒子のカウント、下：検出効率を考慮したカウント)

ここから粒子数の s/n 比は 0.0026、検出効率を考慮しても 0.04 であり、MCP のカウントだけでは反水素原子の検出は難しいと思われる。そこで次に、MCP に粒子が衝突し、かつ同時に、周りにあるプラスチックシンチレーターに粒子がエネルギーを落とした条件(コインシデンス条件)をかけた場合のシミュレーション結果を示す。

今回、MCP に粒子が衝突してから 10ns までにプラスチックシンチレーターに粒子が衝突し、かつそこで 1MeV 以上のエネルギーを落とした場合をコインシデンス条件としてシミュレーションをした。

7×10^3 個の反水素原子がカスプトラップに衝突し消滅した際に放出された 2 次粒子の中で MCP に衝突し、コインシデンス条件を満たす粒子のシミュレーション結果を図 4.3-3 に、 2.9×10^3 個の反陽子がカスプトラップ内で残留ガスと対消滅した際に生成した 2 次粒子のなかで、MCP に衝突し、かつコインシデンス条件を満たす粒子のシミュレーション結果を図 4.3-4 に示す。図 4.3-1, 2 と同様に上の段は MCP に衝突した粒子の種類ごとのカウントで、下の段は検出効率を考慮し、MCP に検出されるカウント数になおしたものである。コインシデンス条件をかけることで e^\pm のカウントの割合が大きくなっている。ここから、2 次粒子がチャンバ壁などに衝突した際にカスケードシャワーが生成されることで同時に多数の e^\pm が放出され MCP とプラスチックシンチレーターを同時に鳴らすことが主なノイズ源となることが予想される。また、表 4.3-2 にコインシデンスを条件を満たす MCP に衝突する粒子数の合計を示す。粒子数の s/n 比は 0.0179、検出効率を考慮した場合は 0.72 と、コインシデンス条件を書けることで s/n 比は 1 桁改善されるが、これも反水素原子を同定するには十分な値ではない。

そこでさらに、3.2.1 節で述べたように、反陽子が MCP に当たった際には、ほかの粒子と比べ波高分布が大きくなることが知られているので、高波高の成分だけカットしてみることで、s/n 比の上昇が期待される。

粒子数 (コインシデンス)		MCP に衝突する 粒子	検出効率を考慮し た値
シグナル	到達反水素原 子	0.452	0.452
ノイズ	消滅反水素原 子	6.18	0.184
	消滅反陽子	19.0	0.440
ノイズ合計		25.2	0.624

表 4.3-2 シュミレーションによる粒子数 (コインシデンス)

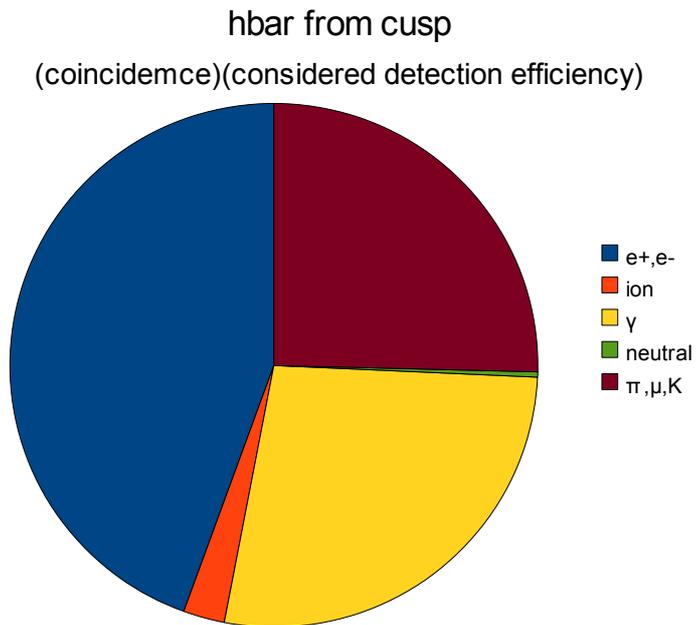
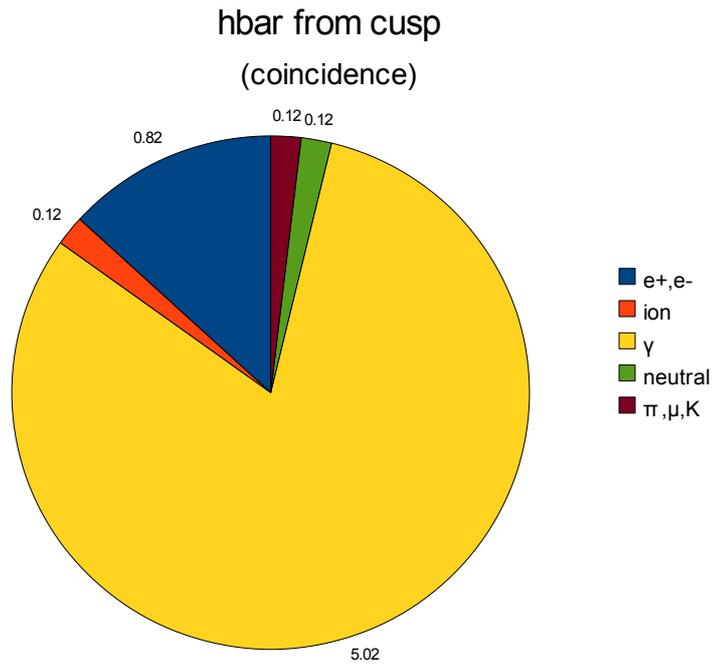


図 4.3-3 反水素原子がカスプトラップに衝突し消滅した際に MCP に衝突し、かつプラスチックシンチレーターとコインシデンスした 2 次粒子のシミュレーション結果 (上 : MCP に衝突した粒子のカウント、下 : 検出効率を考慮したカウント)

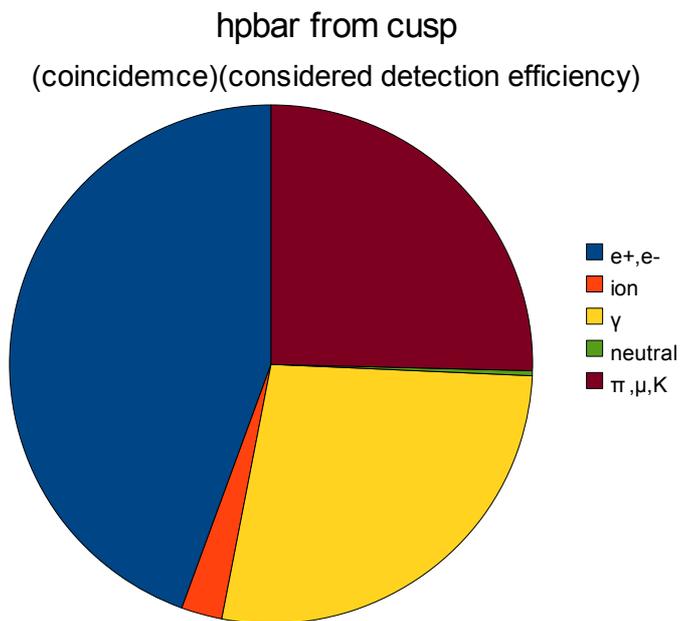
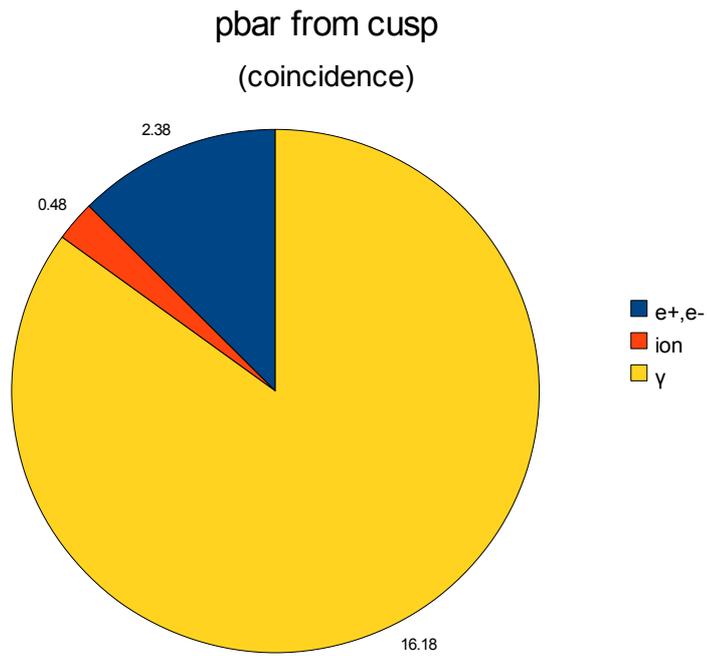


図 4.3-4 カスプトラップ内で反陽子と残留ガスとの対消滅した際に MCP に衝突し、かつプラスチックシンチレーターとコインシデンスした 2 次粒子のシミュレーション結果
(上 : MCP に衝突した粒子のカウント、下 : 検出効率を考慮したカウント)

第5章 実験結果

実験では、図 5.1 のように反水素検出器をカスプトラップに直接つなげたセットアップで実験を行った。また、カスプトラップの両側にプラスチックシンチレーター（下図:青緑色検出器）を設置した。

まず、カスプトラップ内での反水素原子の合成の確認を行うために、field ionization trap を用いて反水素原子の消滅信号をカスプトラップの両側のプラスチックシンチレーターで観測した。その結果について 5.1 で述べる。

次に、反水素検出器の応答について調べ、反水素原子の検出を試みた。その結果を 5.2 で述べる。

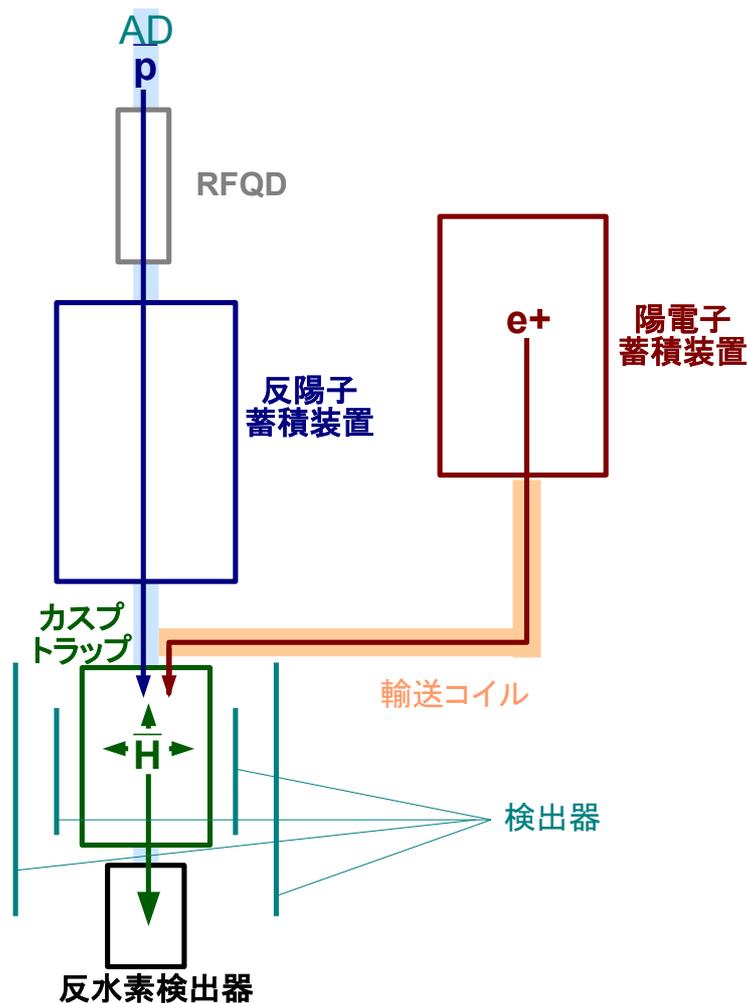


図 5-1 反水素原子合成確認用の装置のセットアップ

5.1 反水素原子の合成確認

図 5.1-1a に示す FIT(:field ionization trap 反水素電離トラップ)をもちいて反水素原子の合成確認を用いた。

入れ子型ポテンシャル(nested trap)内で合成され FIT に到達した反水素原子のうち、主量子数の大きいリュードベリ状態のものは、FIT のつくる電場によって電離され、反陽子となって FIT に捕捉される。一方陽電子と結合していない反陽子は入れ子型のポテンシャルを越えることはできない。よって FIT を開放した際(図 5.1-1b)には、反水素原子由来の反陽子のみが下流に引き出され、壁に当たって消滅する。

つまり、FIT を開放した際にだけみられる π 中間子を観測することで、カusp内における反水素原子の合成を確認できる。図 5.1-2(a)に反陽子・陽電子混ぜ合わせ時(反水素原子合成条件下)の FIT を開放した際の信号、(b)に陽電子なしで同じ操作をしたときの信号を示す。

その結果、反陽子数 3×10^5 、陽電子数 4×10^6 の混ぜ合わせによって 100 秒間で 5000 個の反水素原子の合成が確認された。

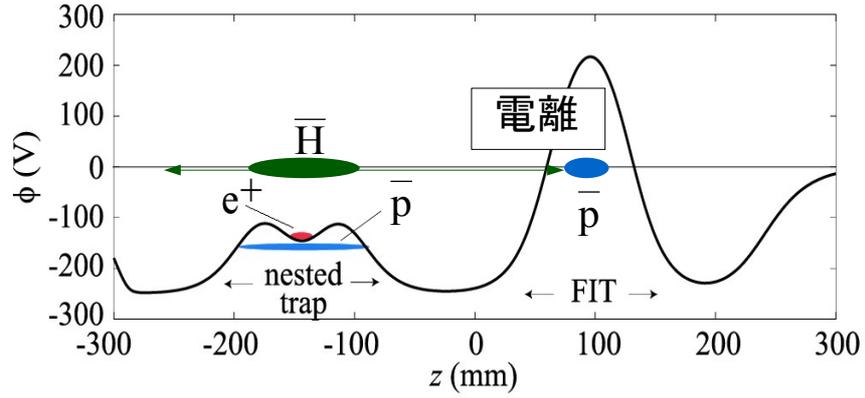


図 5.1-1(a) FIT

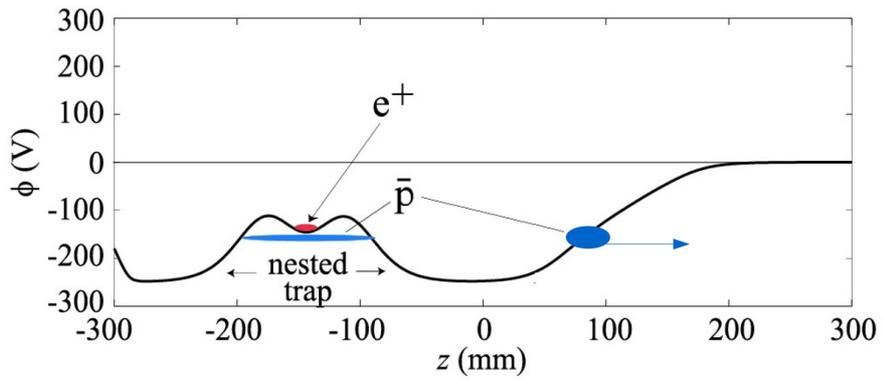


図 5.1-1(b) FIT 開放

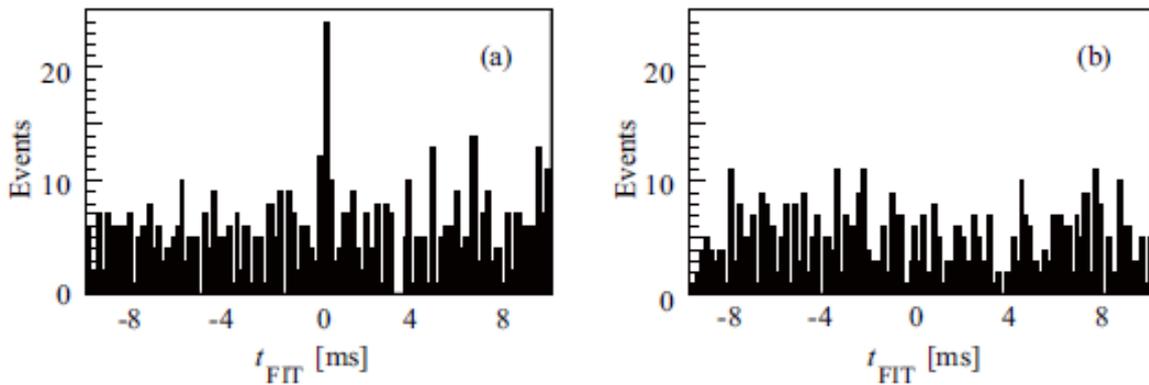


図 5.1-2 FIT を開放したタイミング($t_{FIT}=0$)での消滅信号([11]より引用)

(a):反陽子+陽電子 (b):反陽子のみ

5.2 反水素検出器の応答

ここではおもに反水検出器における各々の粒子に対する応答の性質について述べていく。

5.2.1 電子と高速粒子の波高

電子やイオンなどの粒子は、反陽子の対消滅反応でできた π 中間子をはじめとする高速2次粒子に比べると十分に低速であり阻止能はずっと大きい。電子やイオンなどの粒子は鉛ガラスでできている MCP の表面付近でエネルギーを失うため、MCP の表面付近でしか2次電子を放出することはなく、MCP で生成される信号はほぼ単一の波高であるはずである。一方、最小電離粒子は MCP 中の複数のチャンネルを通過することできるために、2次電子が放出される数も、表面からの深さもまちまちである。よって π 中間子が MCP に生成する信号の波高分布は、電子やイオンのつくる信号の波高分布に比べて broad であることが予想される。

図 5.2.1-1 にカスプトラップ内から電子銃を当てた時の MCP の波高分布、図 5.2.1-2 にカスプトラップと反水素検出器の間にあるゲートバルブを閉じた状態で反陽子をゲートバルブに向かって入射することにより、反陽子由来の高速2次粒子のみが MCP に到達するような条件での波高分布を示す。

図 5.2.1-2 にみられるように、電子の信号の波高は 0.045V 付近に急激なピークをもち、最大でも 0.1V である。それに対し高速2次粒子は同じく 0.045V 付近にピークを持つものの、 $\sim 0.2V$ にわたって続く成分が存在し、波高が 0.38V に達するものもある。

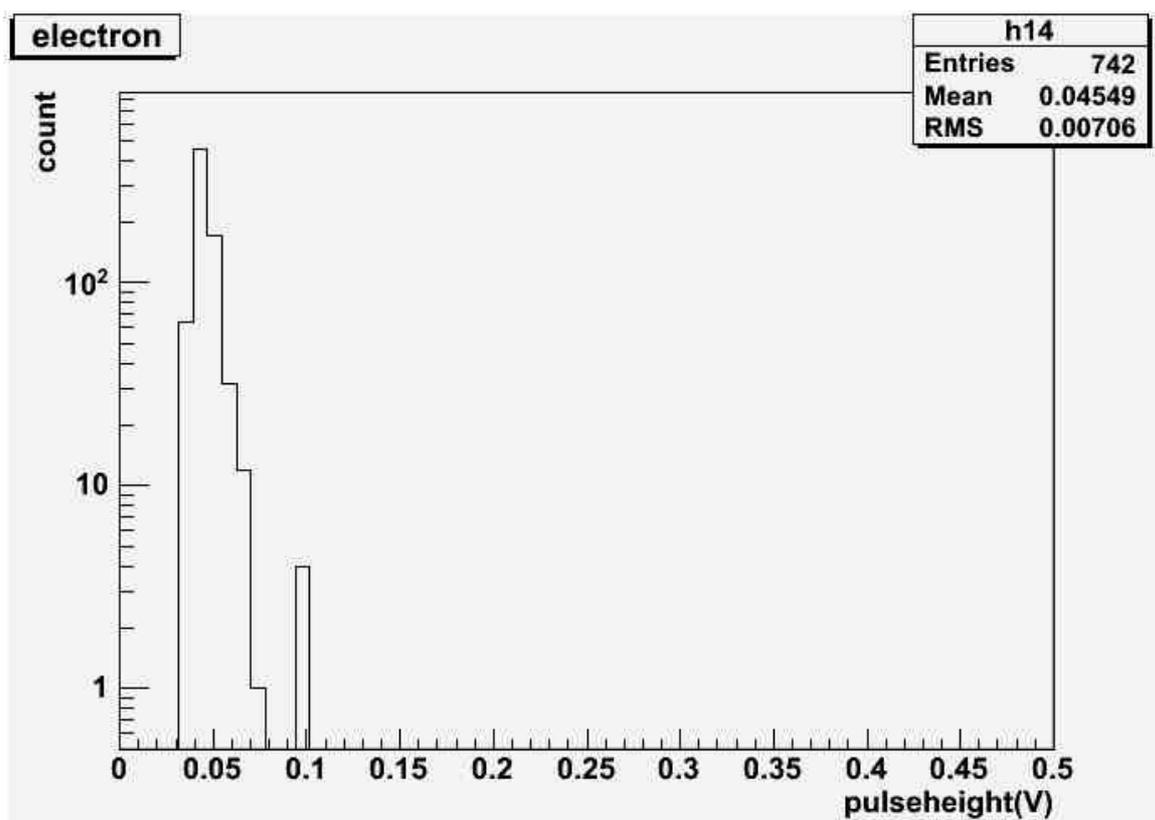
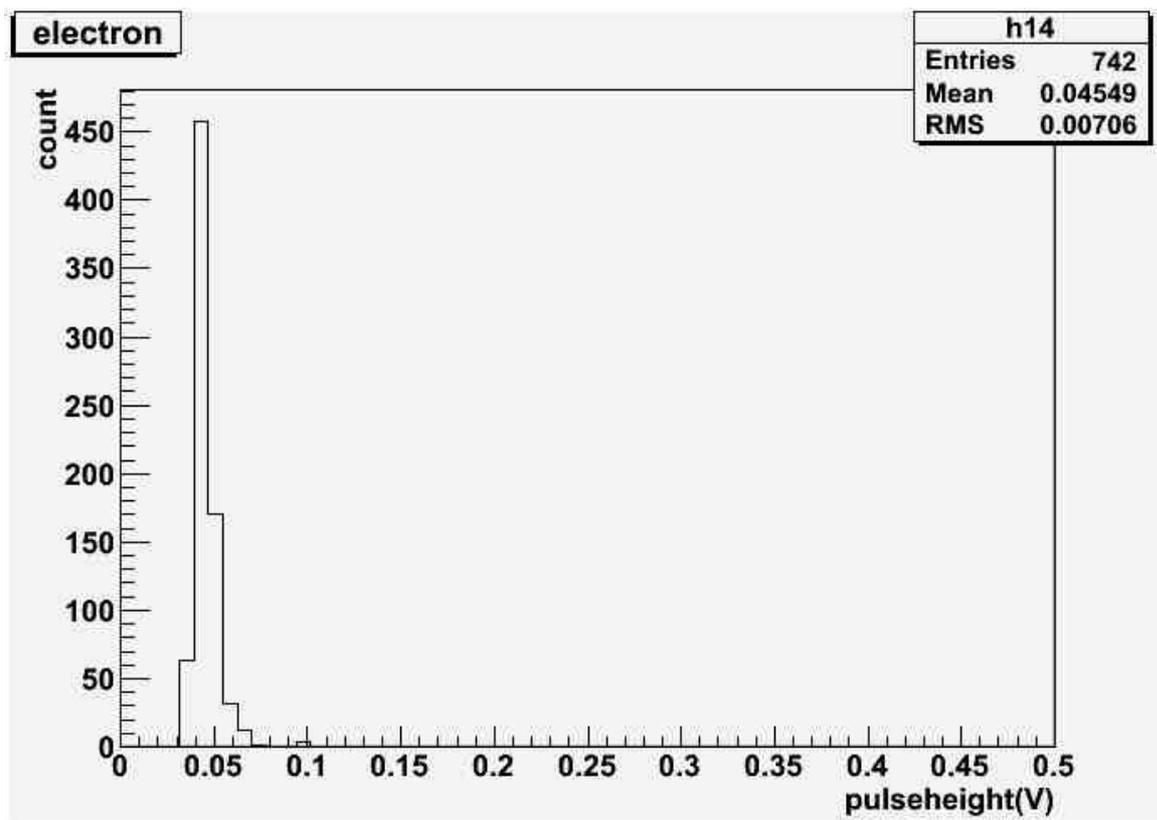


図 5.2.1-1 カスプトラップ内の電子銃を on にした条件での MCP の波高分布
(上:縦軸 linear、下:縦軸 log)

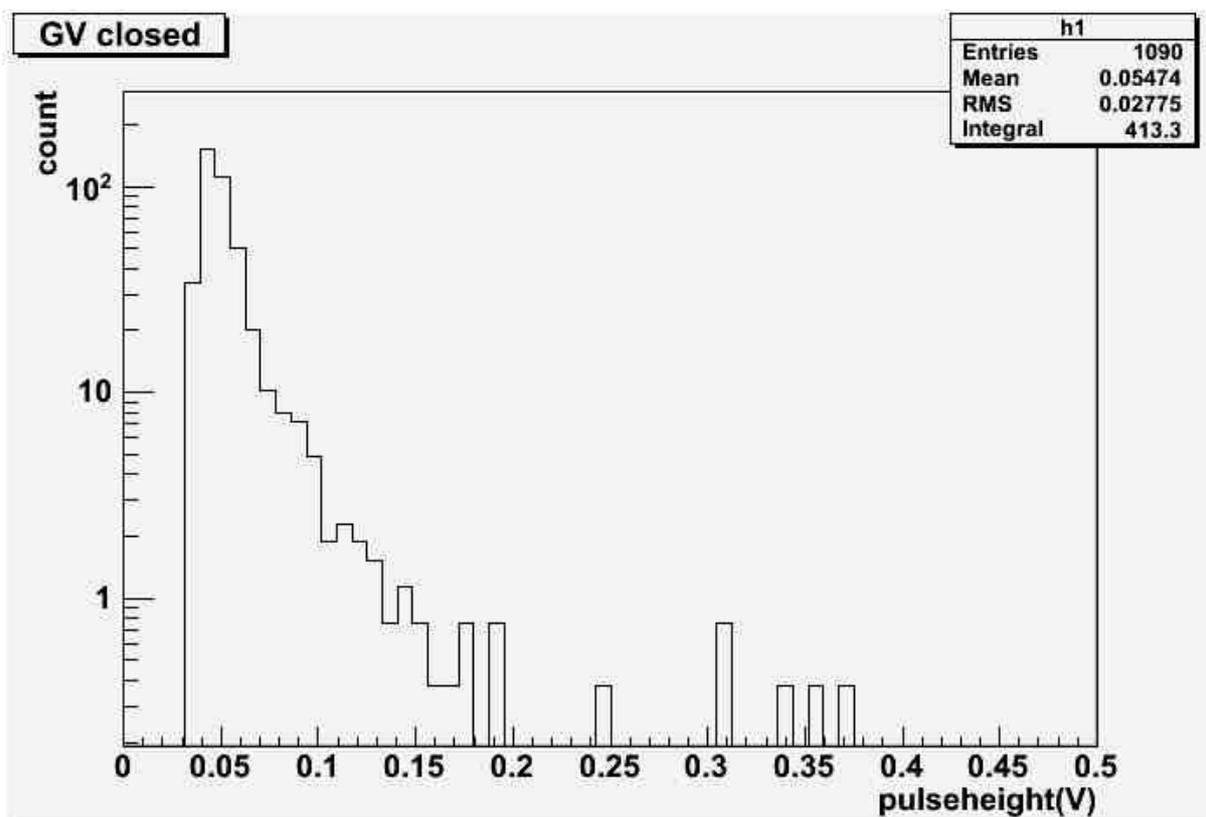
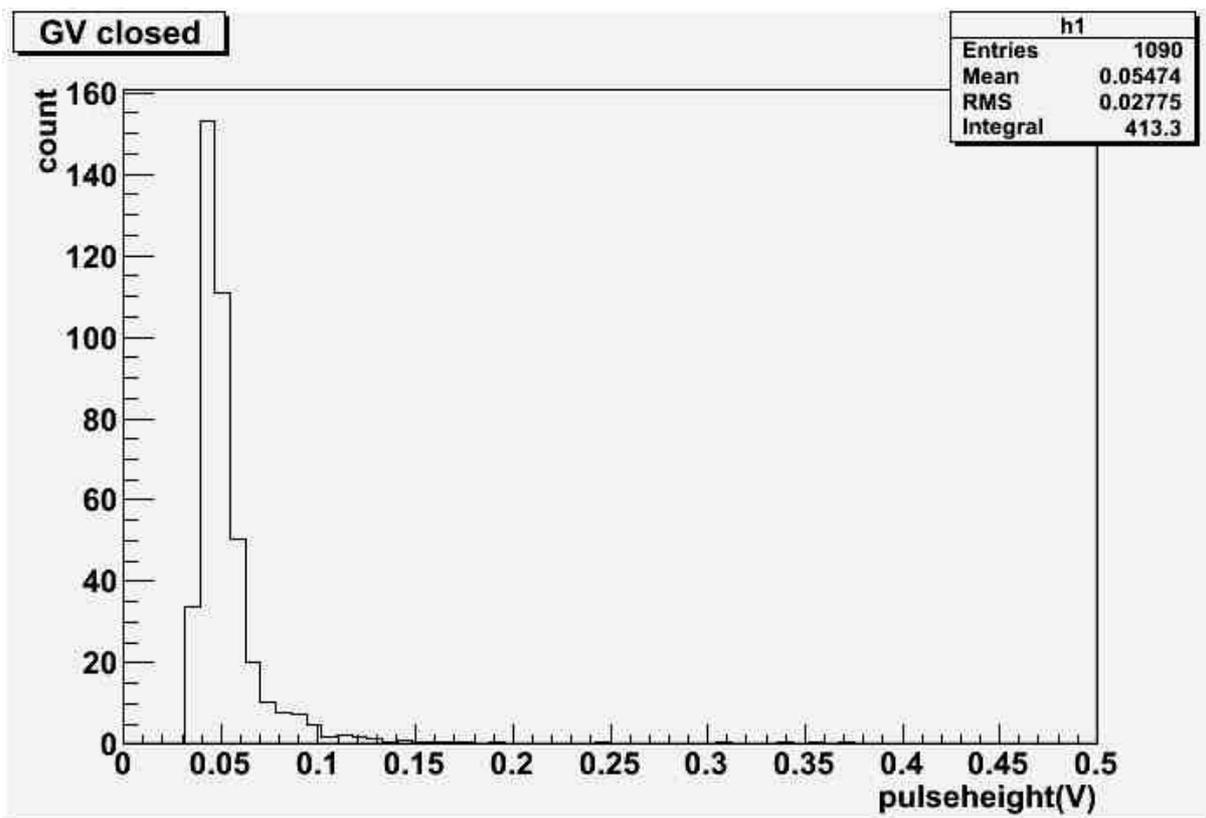


図 5.2.1-2 カスプトラップと反水素検出器の間のゲートバルブを閉じた条件での MCP の波高分布 (上:縦軸 linear、下:縦軸 log)

5.2.2 反水素検出器による反陽子の検出

反水素原子が MCP に衝突した際、反水素原子中の反陽子と MCP 上の核子が対消滅反応を起こすことから、反水素原子と反陽子の MCP の信号は同じような性質を持つと考えられる。

反水素原子の信号を検出する前段階として、反水素検出器における反陽子の信号の検出を試みた。

そこで、反水素原子の波高特性を調べるために 150eV の反陽子を反陽子蓄積装置から MCP に直接入射したときの信号をしらべた。

波高分布を図 5.2.2-1,2,3 に示す。

図 5.2.2-1 と図 5.2.2-3(a)は MCP 前面の電位を 0V とし反陽子を衝突させた場合である。図 5.2.2-3(b)は前面電位を-100V とし遅い反陽子を跳ね返したとき、図 5.2.2-1,図 5.2.2-3(c)は前面電位を-300V としすべての反陽子を跳ね返した条件である。ただし MCP 内にかかっている電場の大きさ(=ゲインの大きさ)は同じになるようにしている。

MCP 図 5.2.2-3(c)にみられるように、反陽子跳ね返しの条件(c)では 0.3V 以上の波高を持つものはほとんど見られないが、MCP に衝突する反陽子の数が増える条件になるのにしたがって((b)→(a))波高の大きい成分が増えていくことから、波高の大きい信号は MCP に反陽子が衝突した際に生じると考えられる。

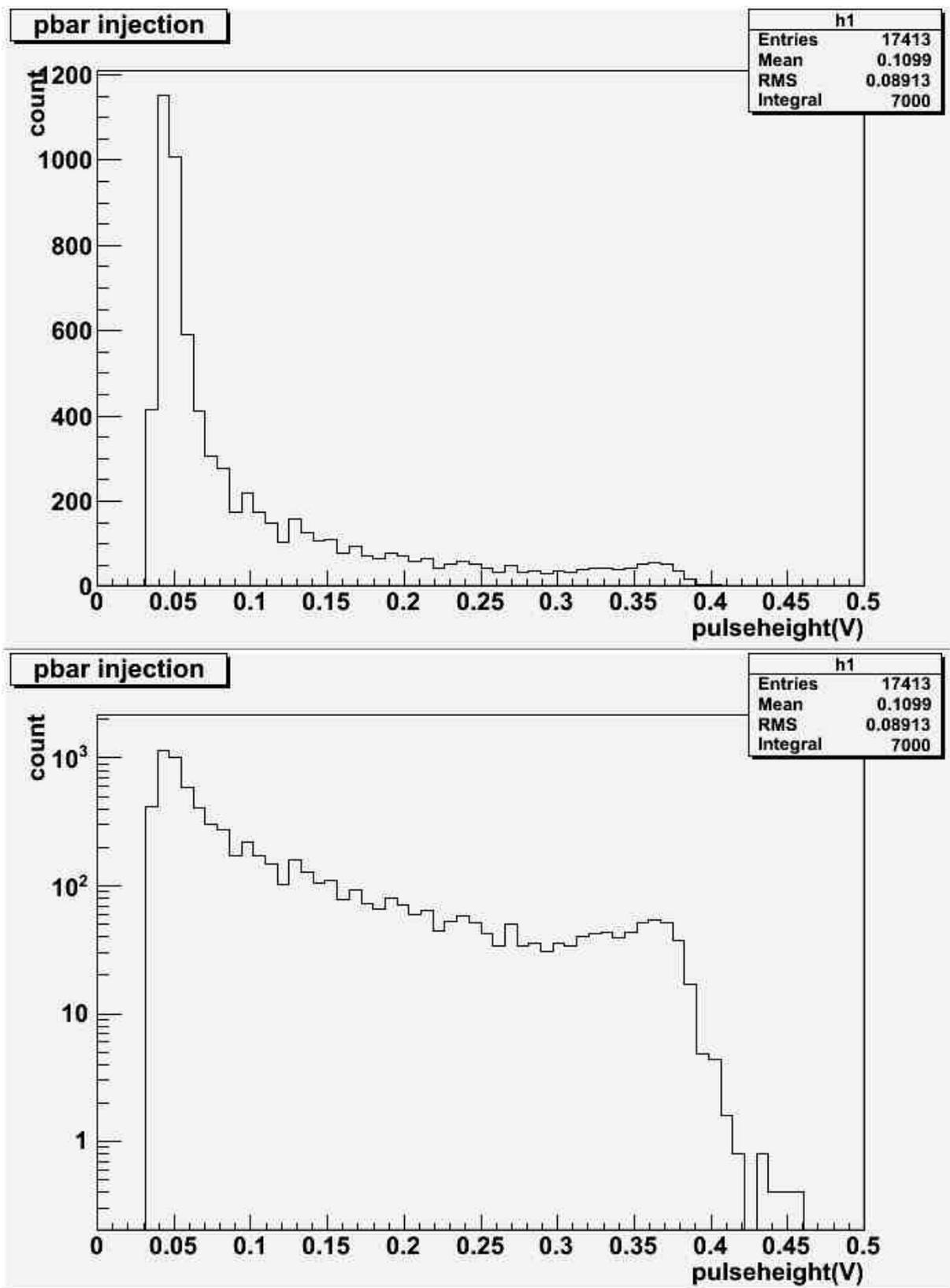


図 5.2.2-1 反陽子衝突条件下での MCP の波高分布 (前面電位 0V)

(上:縦軸 linear、下:縦軸 log)

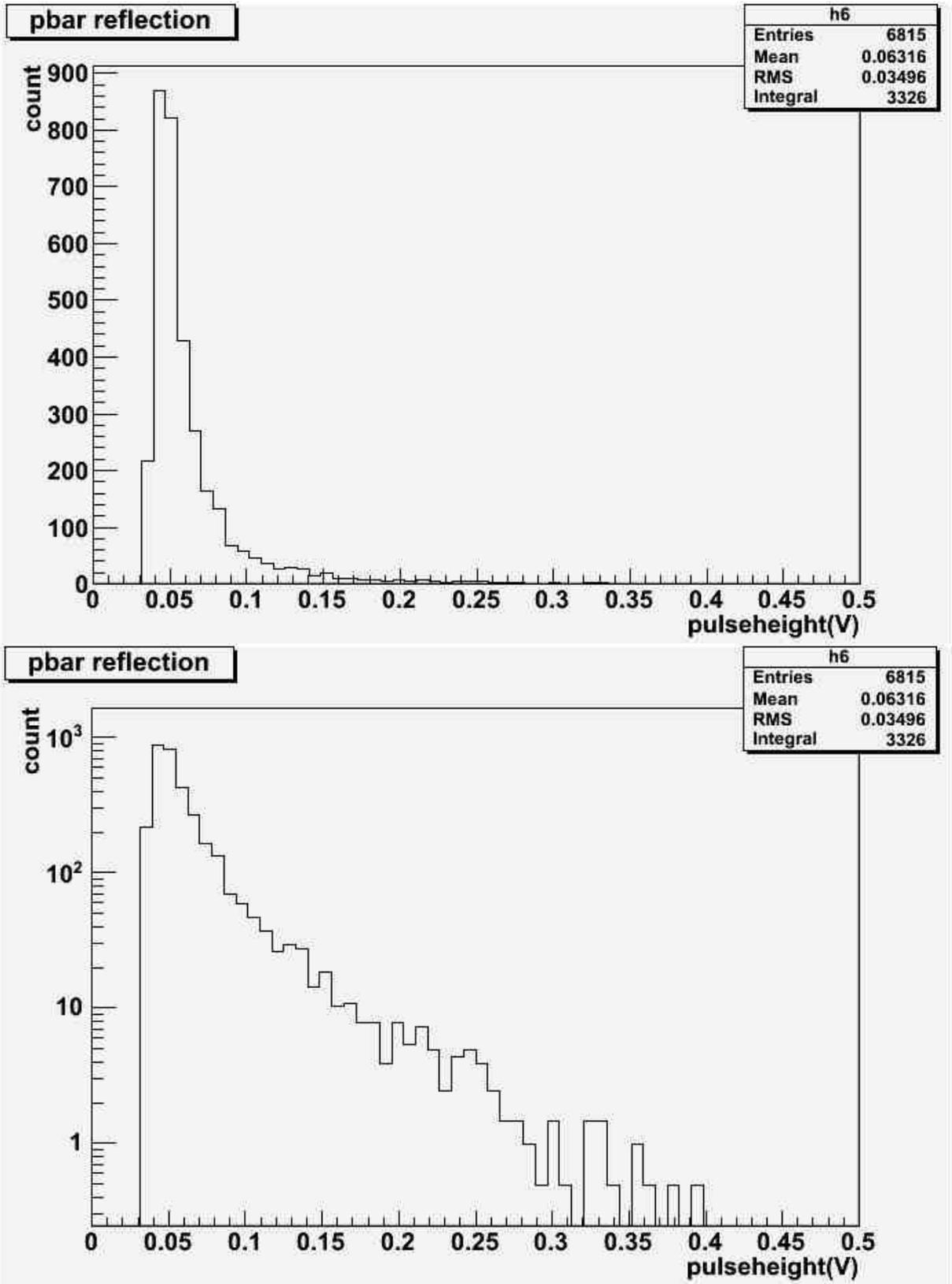


図 5.2.2-2 反陽子はねかえし条件下での MCP の波高分布(前面電-300V)
 (上:縦軸 linear、下:縦軸 log)

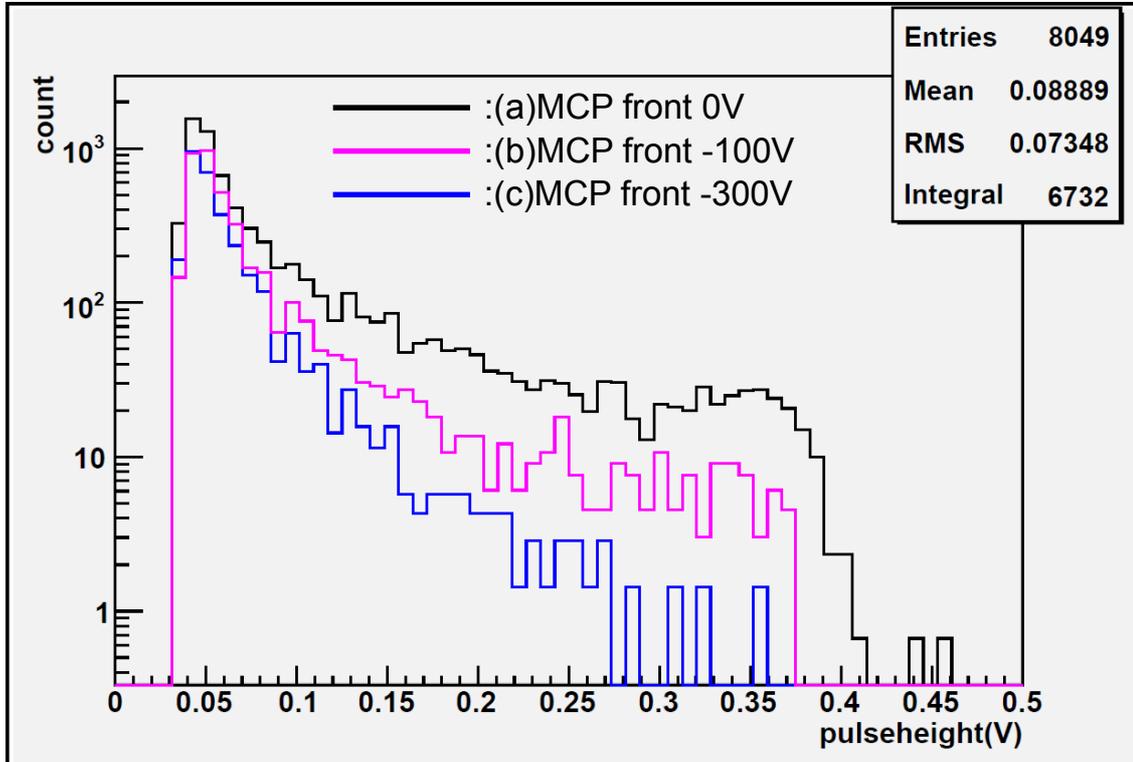


図 5.2.2-3 MCP 表面の電位による波高分布の違い (V)

次に、波高分布の違いをみるためにカットする波高の閾値をかえたものを図 5.2.2-4 に示す。count とあるのは閾値を変えたときのカウント数の変移、rate とあるのは全体を分母としたときのカウント数の割合である。

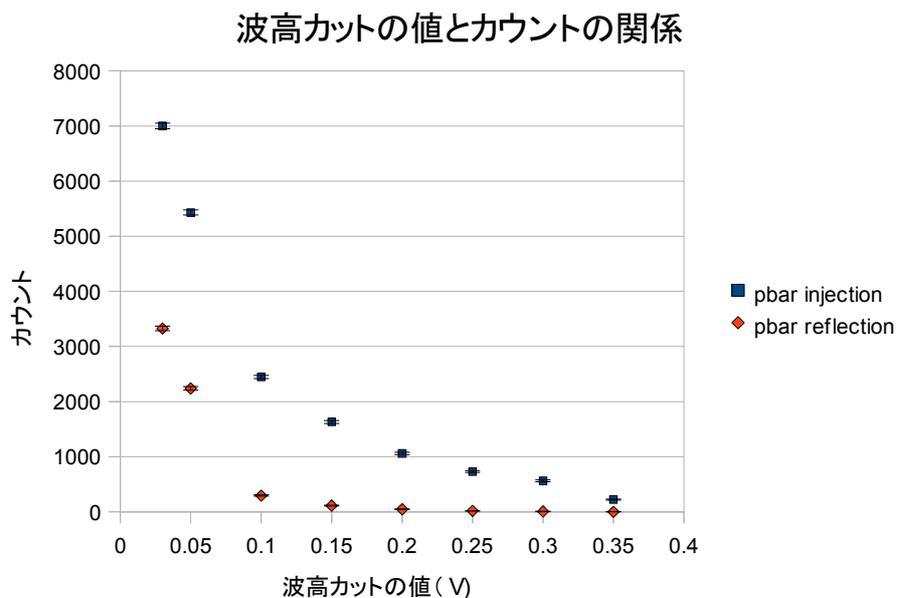


図 5.2.2-4 波高カットとカウント数、カットされずに残るカウントの割合

たとえば、反陽子が MCP に衝突する場合は 0.25V のカットの閾値で数が 1 桁落ちるが、はね返しの時には 0.1V の閾値ですでに 1 桁以上数が減っている。

このように MCP 衝突の場合に比べて、はね返しの場合はカットによって急激に数が減ることがわかる。次にはね返しの場合のイベント数を 1 としたときの、MCP 衝突の場合でのカウントの比と波高カットの閾値の関係を図 5.2.2-5 に示す。

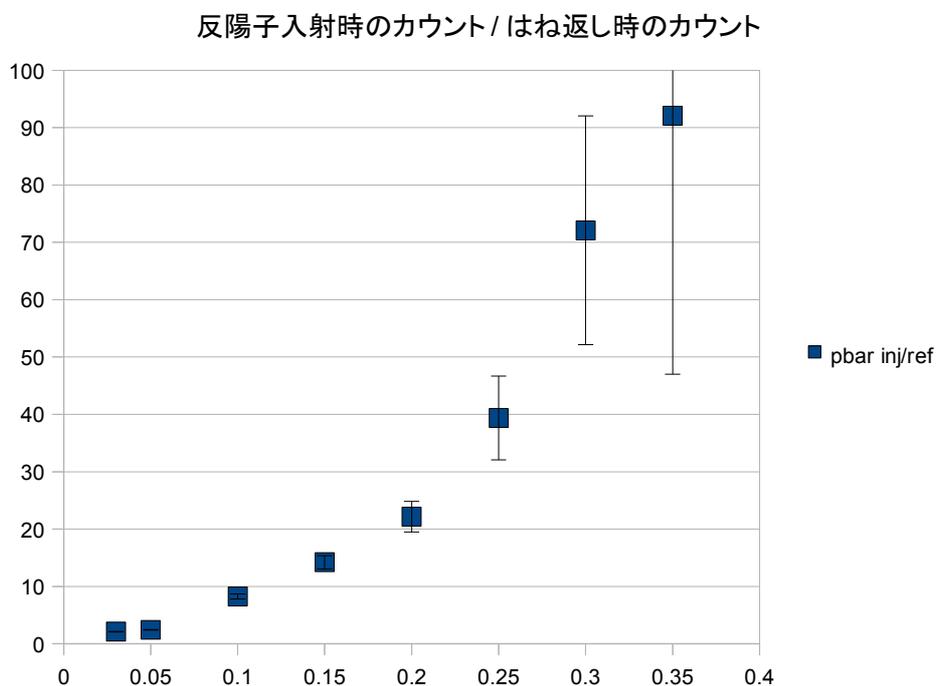


図 5.2.2-5 カットの閾値と MCP 衝突時のカウント/はね返し時のカウント

4.3 節のシミュレーションの結果とあわせると、カットの閾値を 0.3V 程度以上のところに設定することで、反水素原子の信号がみえはじめるのではないかとと思われる。

次に MCP とプラスチックシンチレーターとの信号のコインシデンスについて考える。

MCP 上で消滅した反陽子がシンチレーターとコインシデンス信号を発生するためには、放出された 2 次粒子のどれかがシンチレーターを鳴らせばよい。一方、カスプトラップと反水素検出器の間の真空壁で消滅した反陽子によって MCP とプラスチックシンチレーターが同時に信号を検出するためには、ある 2 次粒子が MCP に到達し、さらにほかの 2 次粒子がシンチレーターを鳴らさなければならない。

よって、反水素衝突時の方が MCP とシンチレーターのコインシデンスする確

率が高いことが予想される。

図 5. 2. 2-6 に反陽子衝突、図 5. 2. 2-7 に反陽子はね返しのときのプラスチックシンチレーターとのコインシデンスがあったものの波高分布を示す。反陽子衝突の場合もはねかえしの場合もプラスチックシンチレーターとのコインシデンスをとることによる波高分布の形の大きな変化は見られなかった。また、反陽子衝突でのコインシデンス確率は対消滅時に放出される π 中間子の数 \sim 3 個と MCP から見込まれるプラスチックシンチレーターの立体角 45% から考えるとコインシデンスレートは 0.83 程度であることが考えられるが、実験結果は 0.23 であった。

これは、反陽子や対消滅によって生じる 2 次粒子が反水素検出器のチャンバ壁に衝突するなどした際に大量の電子が生成され、MCP に多くのノイズ信号を生じさせたことが原因のひとつであると考えられる。

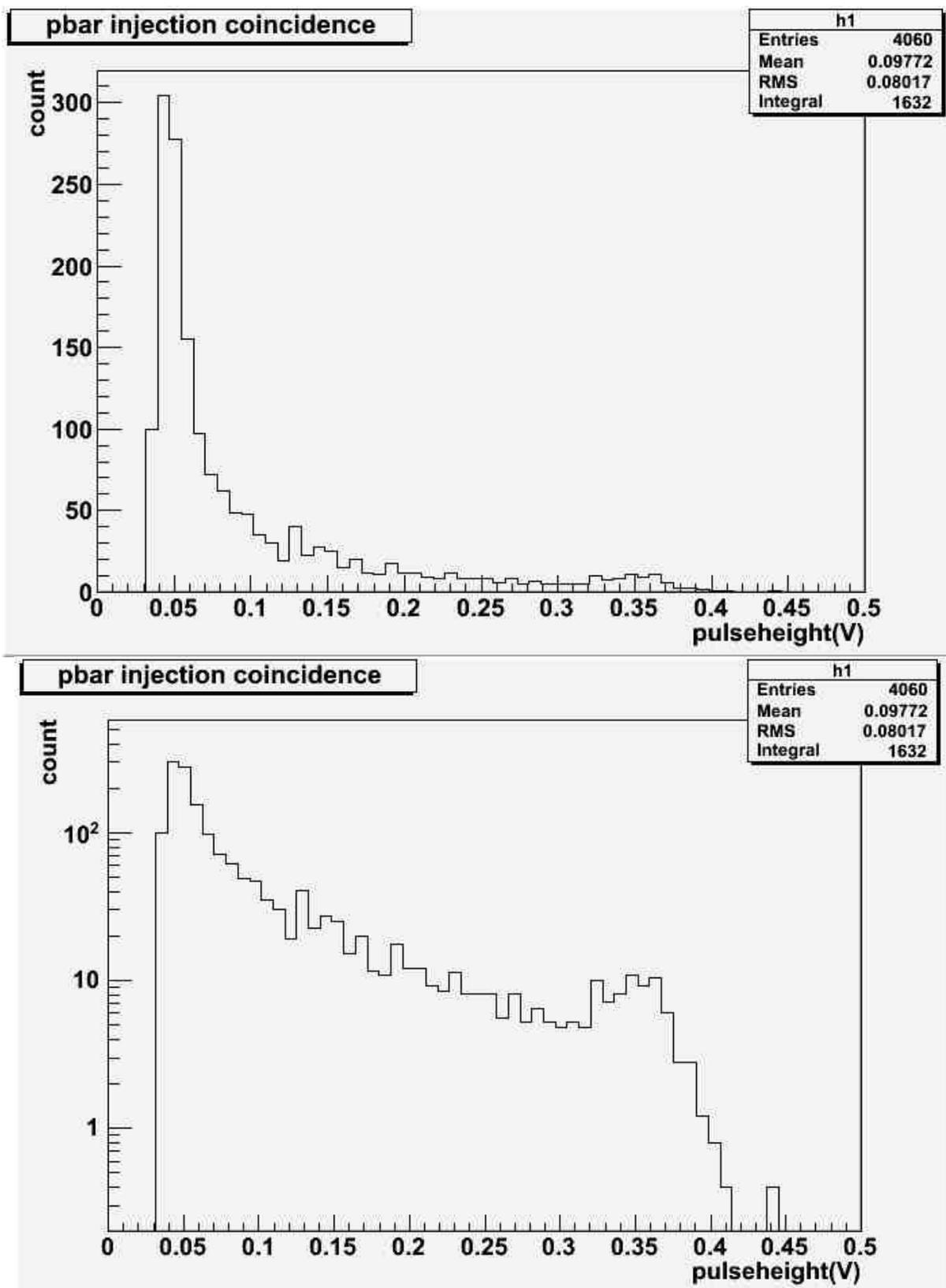


図 5.2.2-6 反陽子衝突条件でのシンチレータとコインシデンスした信号の MCP の波高分布（前面電位 0V）（上:縦軸 linear、下:縦軸 log）

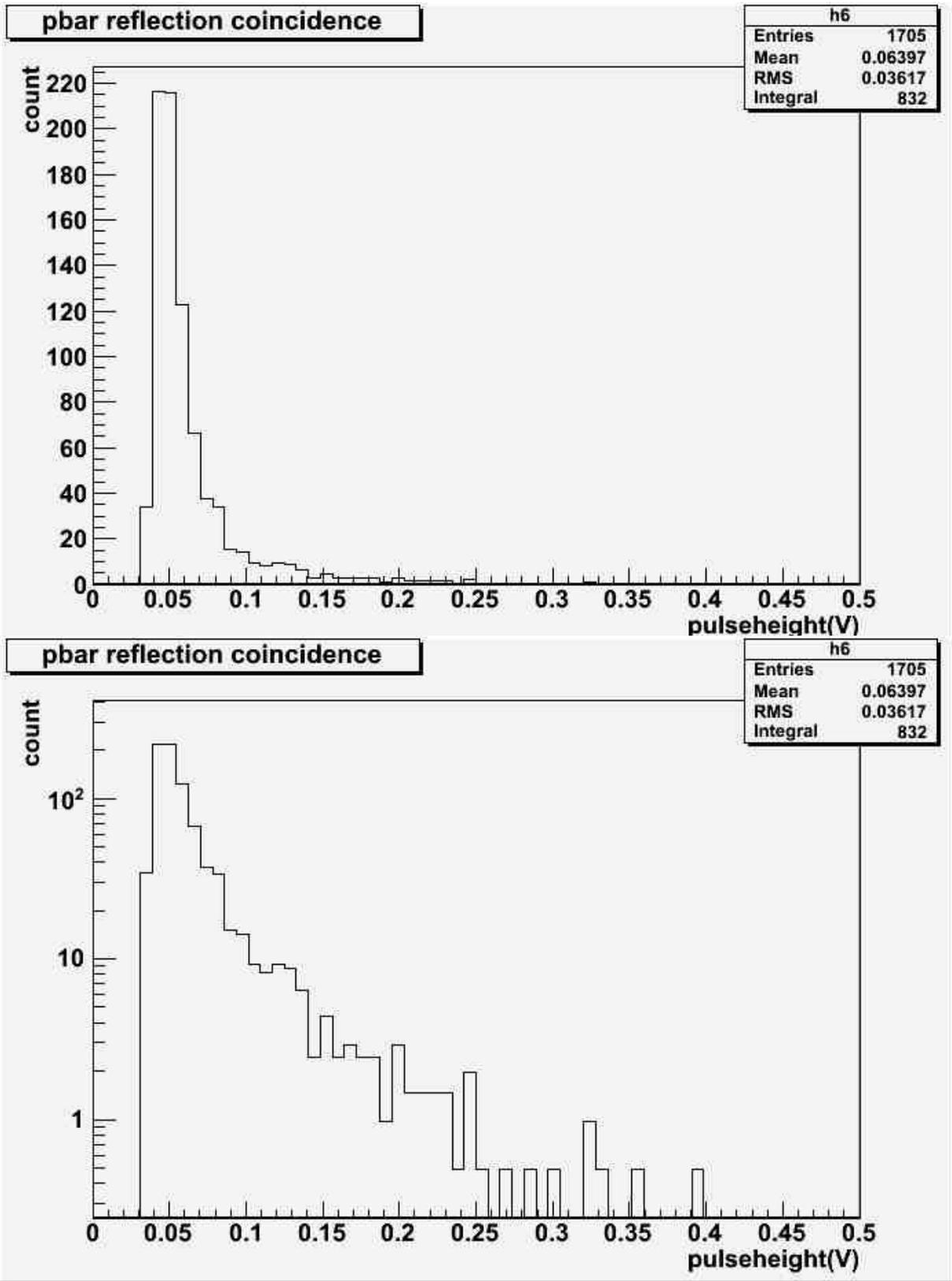


図 5.2.2-7 反陽子はねかえし条件でのシンチレータとコインシデンスした信号の MCP の波高分布(前面電-300V) (上:縦軸 linear、下:縦軸 log)

5.2.3 反水素合成条件下での実際の反水素検出器の応答

図 5.2.3-1 に実際の反陽子陽電子混ぜ合わせ(反水素合成条件)時の波高分布、図 5.2.3-2 に反陽子のみで同じ操作をした時の波高分布を示す。

両者を比較すると反水素原子合成条件のときにだけ 0.35V 付近のカウントが多くなっている。

これは前節での予想と一致しており、この部分の信号は反水素原子である可能性が高いと思われる。

また、図 5.2.3-3 に反陽子陽電子混ぜ合わせ時と反陽子のみの時での波高のカットの値によるカウント数の変化、図 5.2.3-4 に反陽子・陽電子混ぜ合わせ時と反陽子のみの時のカウントの比を波高カットの値をかえて見たものである。これらの図から反陽子・陽電子混ぜ合わせの時と反陽子のみの時では、0.3V よりも大きい波高成分で違いが明らかになってくることがわかる。

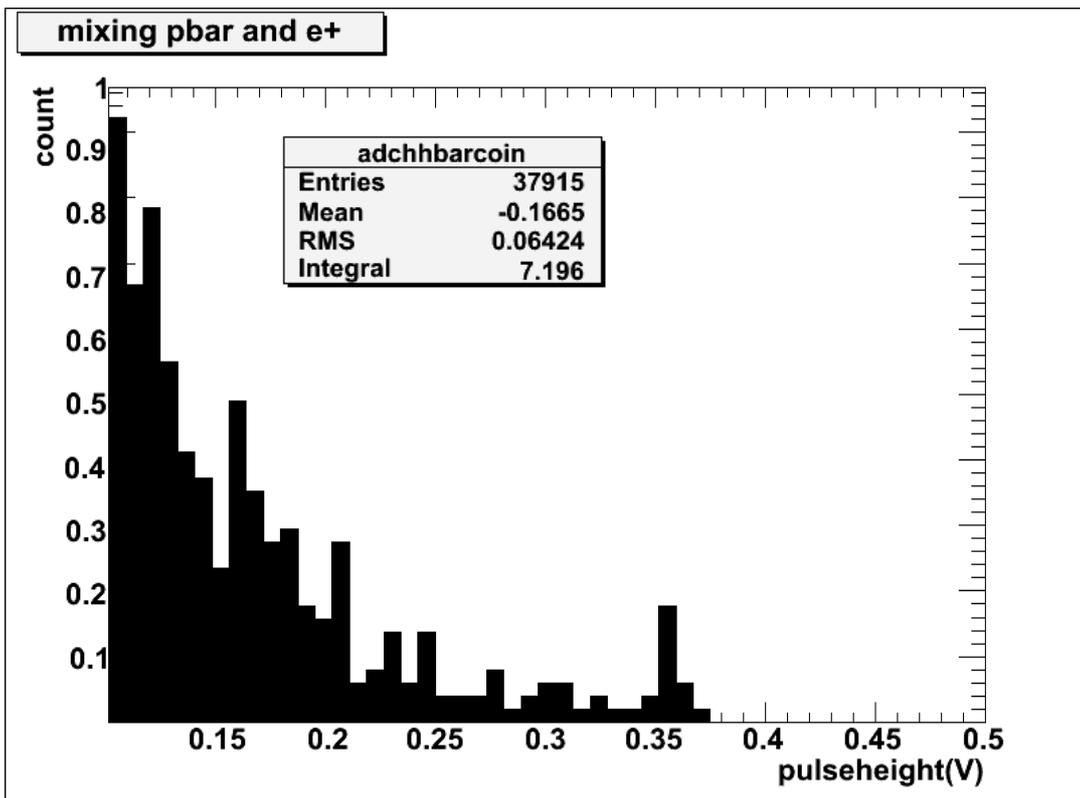


図 5.2.3-1 反陽子陽電子混ぜ合わせ(反水素合成条件)時での実際の波高分布

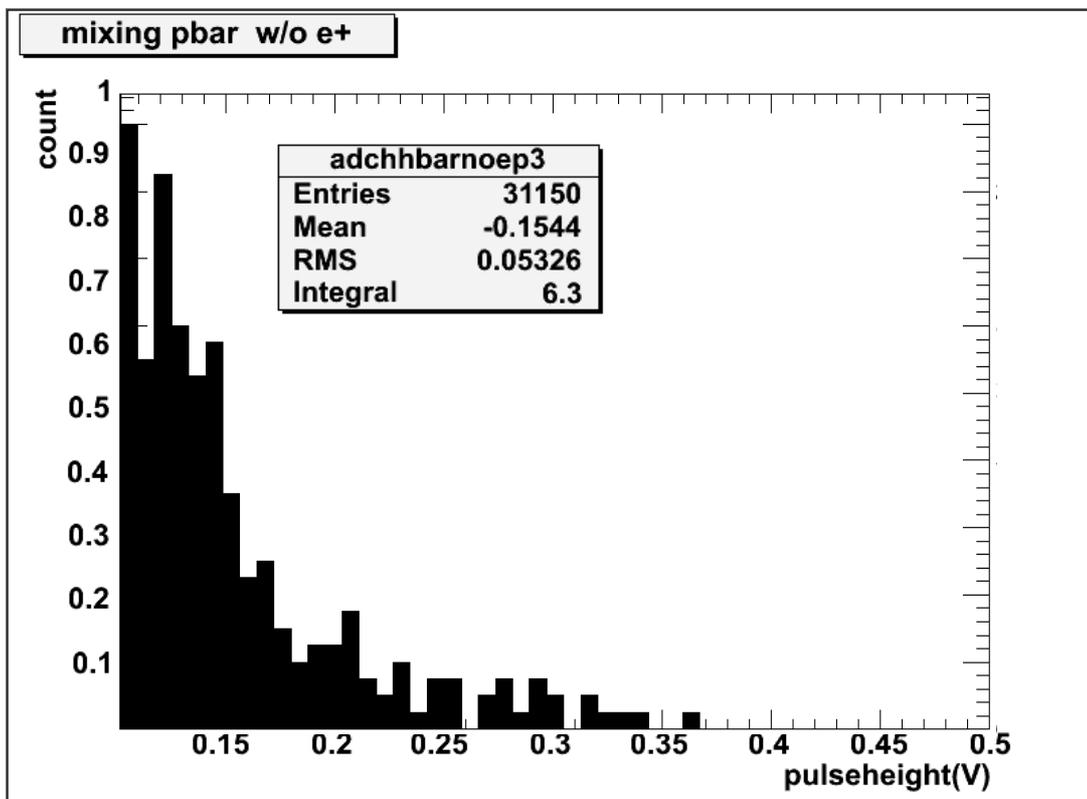


図 5.2.3-2 陽電子なしのときの波高分布

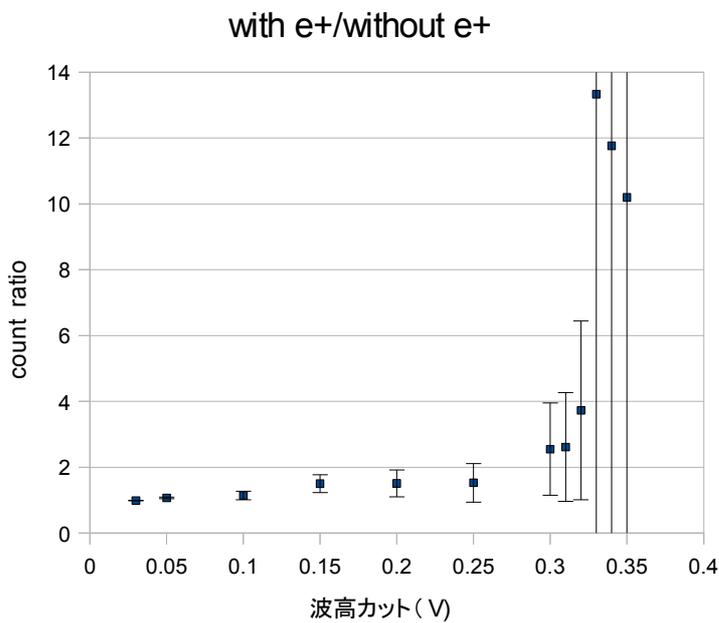
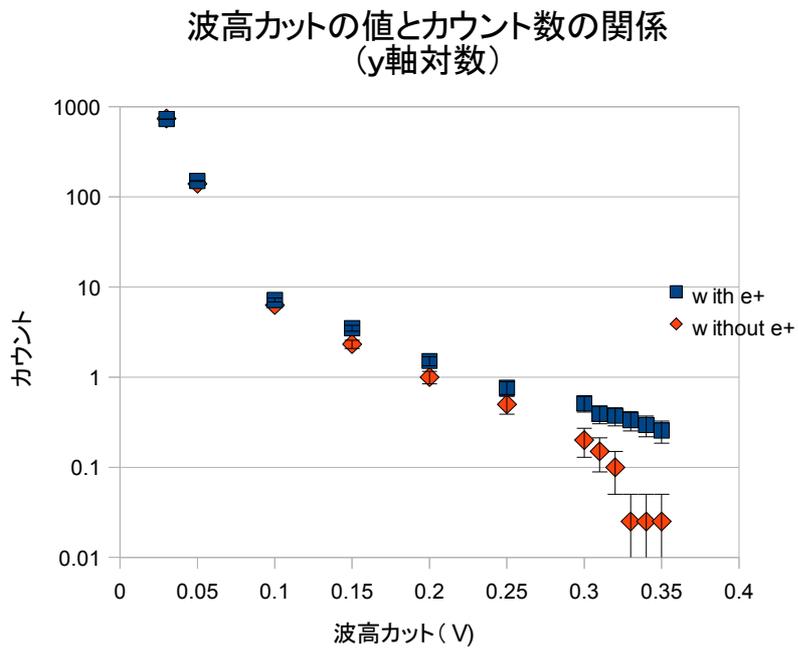


図 5.2.3-3 波高カットの値とカウント数の関係 図 5.2.3-4 反陽子・陽電子混ぜ合わせ時のカウント/反陽子のみ時のカウント

に反陽子陽電子混ぜ合わせ(反水素合成条件)時と反陽子のみで同じ操作をした時のカウントの差と波高カットの値との関係を示す。

5.2.2 節の結果から 0.3V 以上の波高のカウントは反水素原子の可能性が高いということがわかっているが、

図 5.2.3-5 からその値は $(0.51 \pm 0.1) - (0.21 \pm 0.07) = 0.30$ 個となる。

よって反水素検出器では 1 回の混ぜ合わせにつき 0.30 ± 0.12 個の反水素原子の引き出しを確認することができたといえる。

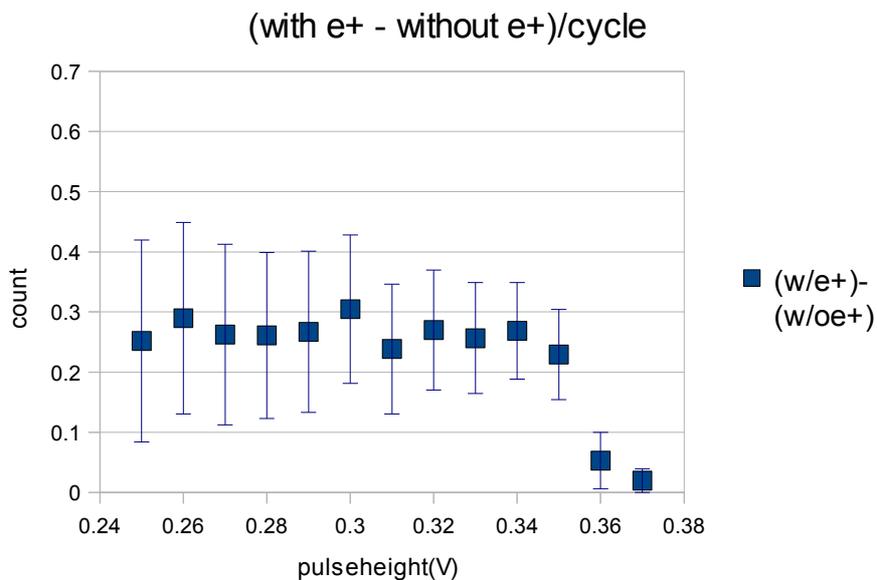


図 5.2.3-5 陽電子有り無しでのカウントの差と波高カットの値との関係

第6章 結論・これからの展望

6.1 結論

2010年に引き続き、 3×10^5 個の反陽子と、 4×10^6 個の陽電子を100 s間混ぜ合わせることで、5000個の反水素原子がカスプトラップ内で合成されたことがFIT(Field Ionization Potential)を用いた方法によって確認された。

カスプトラップから見込まれるMCPの立体角は $4\pi \times 1.5 \times 10^{-4}$ であることから、反水素原子は等方的に拡散すると考えられるので、MCPには $5000 \times 1.5 \times 10^{-4} \sim 0.75$ 個の反水素原子がMCPに衝突することが期待される。

また、衝突条件と跳ね返し条件でのMCP(Micro Channel Plate)の応答を比較することで波高が0.3V以上のカウントに関してはs/n比が70程度で反陽子の消滅信号であると考えられることがわかった。

そして、カスプトラップ外部にある反水素検出器内のMCP検出器での、混ぜ合わせと陽電子無しとの波高が0.3V以上のカウントの差は 0.30 ± 0.12 個であった。

つまり、1回の混ぜ合わせあたり 0.30 ± 0.12 個の反水素原子である可能性の非常に高い粒子がカスプトラップから引き出されていることを確認した。

この値0.3は、すべての反水素原子が高い波高を示すとは限らないことを考慮すると、期待された反水素原子数0.75と比べて妥当な値であると思われる。

6.2 課題・これからの展望

現状では MCP にたどり着くと予想される反水素原子の数は1回の反陽子・陽電子混ぜ合わせで1.1個程度であると見積もられている。一方、1回の混ぜ合わせで観測されているカウント数は700~800程度であり、s/n比自体の向上が必要である。

s/n比を向上させるためには

- ・合成される反水素原子の数を増大させる
- ・ノイズの影響を小さくする
- ・検出器の性能を上げる

といったことがあげられる。

現在、反陽子雲の運動をポテンシャルに沿った調和振動とみなし、それにコインシデンスするような周波数の電位をかけることで反陽子を励起し陽電子と混ぜ合わせる *autoresonance* 法を試みており、これによって合成される反水素原子の数の増加が期待される。

また、文献[13,14]では *autoresonance* 法による反水素合成時間は10ms程度であるとあり、この値は現在の80~100sに比べて大幅に短くなっているため、反水素合成中の反陽子の残留ガスとの消滅ノイズによる影響も小さくなると考えられる。

また、反水素検出器のプラスチックシンチレーターの応答について、MCPとのコインシデンスをとる際のパラメーターの最適化を行うことでさらに反水素原子の検出性能が上がることを期待される。

付録 FIT 有り無しでの MCP におけるカウントの違い

図Aに1回の混ぜ合わせにおけるMCPカウント(□:すべての反水素原子合成条件でのカウントの平均、◇:FITありでの混ぜ合わせ、△:FIT無しでの混ぜ合わせ、▽:陽電子無し)と波高カットの値の関係を、図Bに陽電子無しの操作とのMCPカウントの差(□:すべての反水素合成条件－陽電子無し、◇:FIT有り－陽電子無し、▽:FIT無し－陽電子無し)と波高カットの値の関係を示す。

ここから、共に反水素原子合成条件である中でもFIT有りの場合とFIT無しの場合でもカウントに差が現れ、FIT無しの場合のカウントのほうが大きいことがわかる。

これはFITがある場合はリュードベリ状態の反水素原子はトラップされてしまいMCPには到達できないことと一貫性を持つことから、高波高成分は反水素原子であるといえる。また、FIT有りの場合のカウントと陽電子無しの場合のカウントの差は、FIT無しの場合のカウントと陽電子無しの場合のカウントの差と比べてかなり小さくなっていることから、合成された反水素原子はリュードベリ状態状態のもの割合が大きいと考えられる。

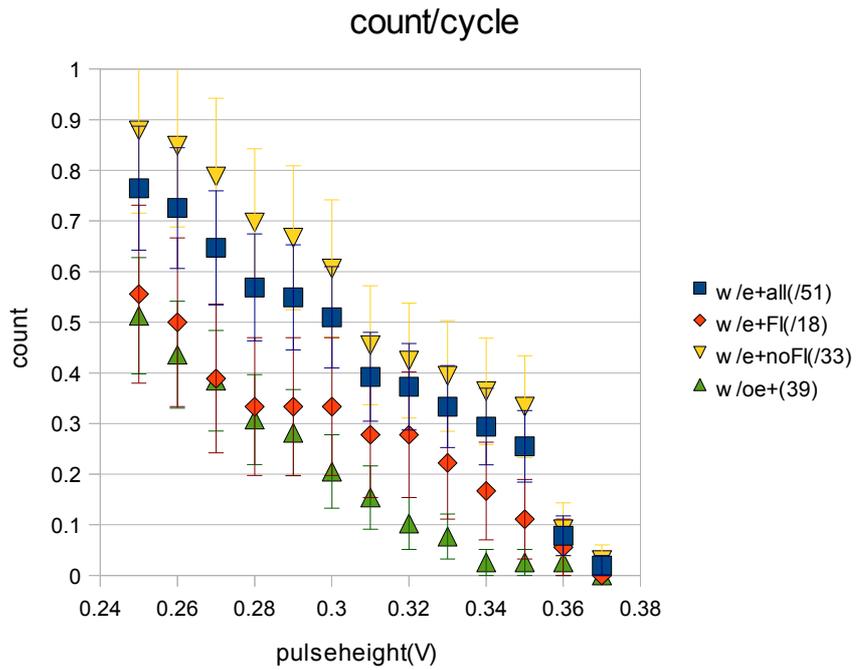


図 A: MCP カウントと波高カットの値の関係

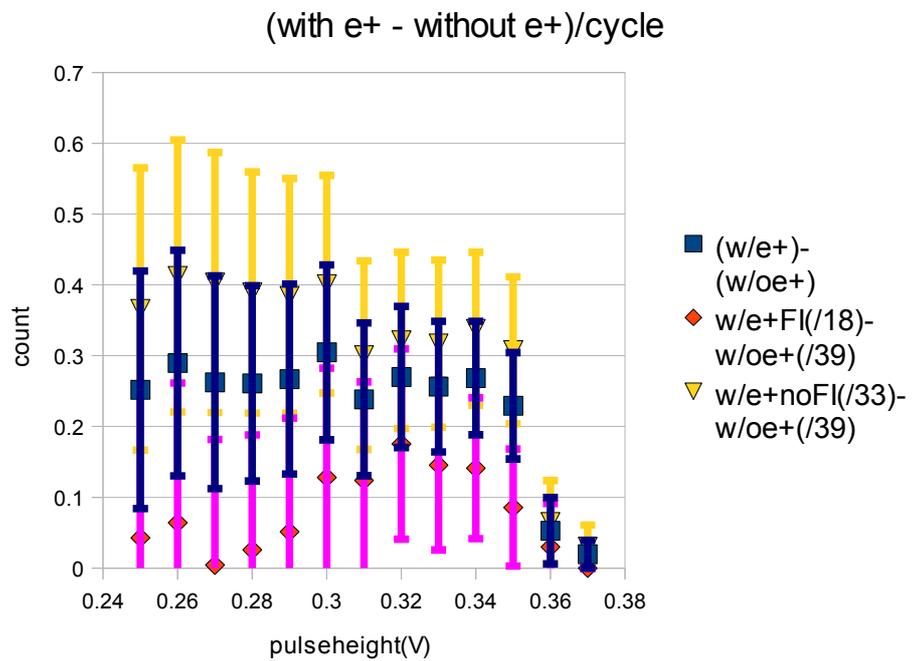


図 B: 陽電子有り無しでの MCP カウントとの差と波高カットの値の関係

<参考文献>

- [1]黒田直史 榎垣浩之 山崎泰規
折り返し点を通じた冷反水素研究：カスプトラップによる反水素の生成と磁気瓶への閉じ込め日本物理学会誌, 66(8), 594-602(2011)
- [2]Y.Enomoto
Antihydrogen production in cusp trap
Doctoral thesis ,U.Tokyo(2011)
- [3]浜松ホトニクス MCP アッセンブリ技術資料
- [4]G. B. Andresen, W. Bertsche, P. D. Bowel, C. C. Bray et al
Antiproton, positron, and electron imaging with a microchannel plate/phosphor detector
ev. Sci. Instrum. 80, 123701 (2009)
- [5]H. Imao, H. A. Torii, Y. Nagata, H. Toyoda, T. Shimoyama, Y. Enomoto, H. Higaki, Y. Kanai, A. Mohri, and Y. Yamazaki
Observation of Ultra - Slow Antiprotons using Micro - channel Plate
AIP Conf. Proc. 1037, pp. 311-317; doi:10.1063/1.2977850
- [6]Roentdek MCP Delay Line Detector Manual
- [7]原子核・放射線の基礎 真田順平 共立全書 1968
- [8]saes Capacitor Pumps MK5 Series manual
- [9]<http://www.nucleng.kyoto-u.ac.jp/people/ikuji/edu/vac/>
- [10]<http://geant4.cern.ch/>
- [11]Y.Enomoto, N.kuroda et al
Synthesis of Cold Antihydrogen in a Cusp Trap
Phys. Rev. Lett. 105, 243401 (2010)
- [12]K. Oba and P. Rehak
STUDIES OF HIGH-GAIN MICRO-CHANNEL PLATE PHOTOMULTIPLIERS
IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-28, No. 1, February 1981
- [13]Phys. Rev. Lett. 106, 025002 (2011)
Autoresonant Excitation of Antiproton Plasmas
G. B. Andresen et al. (ALPHA Collaboration)
- [14]Eoin Butler
Antihydrogen formation, dynamics and trapping
PhD Thesis, Department of Physics, Swansea University, Swansea,
United Kingdom and ALPHA Collaboration, CERN, Geneva, Switzerland (2011)

謝辞

指導教官の山崎泰規特任教授にはいつも熱心にご指導していただき、また、反水素研究という貴重な実験に参加する機会をあたえてくださったことに深く感謝いたします。先生がお忙しい中時間を割いて丁寧にご指導してくださったからこそこの修士論文を書くことができました。松田恭幸准教授には実験の準備から日常面までさまざまなことに関してご指導、ご支援いただき本当にお世話になりました。この修士論文を書くにあたってもたくさんの助言をいただきました。鳥居寛之助教には、複雑な計測系をわかりやすく説明していただき、配線についてもアドバイスしていただきました。黒田直史助教には、シミュレーションやデータ解析の際に初歩的な事柄から教えていただき、助けていただきました。

反水素検出器のシンチレーターの設計を行われた永田祐吾博士には、MCPの用法や、制御回路のつくり方などいつも丁寧にわかるまで説明していただきました。金井保之博士には真空系や実験機器の操作などを詳しく教えていただきました。檜垣浩之准教授にはバックグラウンド測定などを手伝っていただくなど大変お世話になりました。満汐孝治氏にはほかの仕事の合間を縫って解析などを手伝っていただきありがとうございます。S.Ulmer博士、D. J. Murtagh博士、藤居甲基氏、田中香津生氏、高木聡氏、櫻井翔太氏にも協力をしていただきました。また今は他の研究でご活躍なさっている今尾浩士博士、榎本嘉範博士、金燦鉉氏にも感謝いたします。

また、ASACUSAグループとして共同で研究を行ったUniv. di BresciaのDr. M.Corradini, Dr. M.Leali, Prof. E.Lodi-Rizzini, Dr. V.Mascagna, Dr. L.Venturelli, Dr. N.Zurlo、SMIのDr. B.Juhász, Mr. O.Massiczek, Prof. E.Widmann, Ms. S.Federmannの各氏にも協力していただきました。

皆様本当にありがとうございました。