

2004年度 課題研究P2
Slow Positronを用いた
 β 崩壊における
parityの破れの検証

齊藤拓也
田口誠
山本裕明

平成17年8月24日

第1章 abstract

我々は、 β 崩壊における Parity の破れの検証実験を行なった。実験の概要は以下のようである。 ^{22}Na からの β 崩壊によって生じた positron を Tungsten moderator に通すことによって単色の energy を持つ slow positron を生成する。それを Wien filter を通すことによって spin の向きを 90 度回転させ、静電レンズによってビーム収束させつつ磁化させた target に当てる。target 中で静止した positron は target 中の electron と結びついて positronium を形成するが、positron の spin と electron の spin が parallel の時と antiparallel の時の para positronium からの 2γ の生成量を比較する。最終的に positron の偏極率を測定することにより Parity の破れを検証する。

目次

第 1 章	abstract	1
第 2 章	理論	4
2.1	V-A 理論による β 崩壊における Parity の破れ	4
2.2	positronium について	5
2.3	positron の偏極率測定 の原理	5
第 3 章	実験装置	6
3.1	装置の概要	6
3.1.1	absorber	6
3.1.2	Tungsten moderator	6
3.1.3	einzellenz	8
3.1.4	wien filter	8
3.1.5	CHA	9
3.2	実験の概略	9
第 4 章	熱電子を用いた輸送系の確認	11
4.1	熱電子について	11
4.2	ファラデーカップ	12
4.3	蛍光板	12
4.4	真空チェンバーについて	12
4.5	真空排気系について	12
4.6	熱電子飽和電流の測定	14
4.7	Einzel1 の効果の確認	14
4.8	CHA の効果の確認	17
4.9	Einzel2 の効果の確認	20
第 5 章	slow positron を用いた測定	22
5.1	energy calibration	22
5.2	threshold の決定	22
5.3	slow positron の energy spectrum	24
5.4	moderator なし のときの energy spectrum	27

第 6 章	解析と結論	29
6.1	slow positron の count rate	29
6.2	slow positron の energy	29
6.3	moderator の効率	30
第 7 章	改善点	32
7.1	アニール温度について	32
7.2	真空度について	33
7.3	reflection moderator の使用	33
第 8 章	結論	35
第 9 章	謝辞	36
第 10 章	感想	37

第2章 理論

2.1 V-A 理論による β 崩壊における Parity の破れ

V-A 理論によると β 崩壊において parity が破れていることが予想される。今回 source として用いた ^{22}Na においては以下のような proton の崩壊による β 崩壊が起きている

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e \quad (2.1)$$

この崩壊は V-A 型弱カレントに基づいて起っており、これは次の Lagrangian によって与えられる

$$L_\beta = -\frac{G_\beta}{\sqrt{2}} \bar{p}(x) \gamma^\lambda \left(1 - \frac{g_A}{g_V} \gamma_5\right) n(x) \bar{e}(x) \gamma_\lambda (1 - \gamma_5) \nu(x) + \text{h.c.} \quad (2.2)$$

ただし、 G_β はフェルミの結合定数、 g_A 、 g_V はそれぞれ軸性ベクトル、ベクトル結合定数であり、proton と neutron が uud と ddu の内部構造を持つことにより係数 g_A/g_V が現れる。

$$e_L = \frac{1}{2}(1 - \gamma_5)e, \quad e_R = \frac{1}{2}(1 + \gamma_5)e \quad (2.3)$$

$$\nu_L = \frac{1}{2}(1 - \gamma_5)\nu, \quad \nu_R = \frac{1}{2}(1 + \gamma_5)\nu \quad (2.4)$$

とすると

$$\gamma_\lambda (1 - \gamma_5) \nu_R = 0 \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} \bar{e}_R \gamma_\lambda (1 - \gamma_5) &= \bar{e} \frac{1}{2} (1 - \gamma_5) \gamma_\lambda (1 - \gamma_5) \\ &= \bar{e} \frac{1}{2} \gamma_\lambda (1 + \gamma_5) (1 - \gamma_5) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (2.6)$$

などにより、

$$\begin{aligned} \bar{e} \gamma_\lambda (1 - \gamma_5) \nu &= (\bar{e}_L + \bar{e}_R) \gamma_\lambda (1 - \gamma_5) (\nu_L + \nu_R) \\ &= \bar{e}_L \gamma_\lambda (1 - \gamma_5) \nu_L \end{aligned} \quad (2.7)$$

したがって、式 (2.2) は

$$L_\beta = -\frac{G_\beta}{\sqrt{2}} \bar{p}(x) \gamma^\lambda \left(1 - \frac{g_A}{g_V} \gamma_5\right) n(x) \bar{e}_L(x) \gamma_\lambda (1 - \gamma_5) \nu_L(x) + \text{h.c.} \quad (2.8)$$

と書き直すことができる。この Lagrangian において、 e_L (或いは \bar{e}_R) のみしか現れていないことが parity の破れを示している。

2.2 positronium について

positronium とは電子と陽電子の束縛状態で、水素原子と似た性質を持つ。positronium は金属中のように、電子密度の高い場合には形成されないが、気体や有機溶液、ポリマー、イオン結晶、分子性結晶などの中でかなりの割合で形成される。また、金属・半導体などの物質のボイド内や表面においても positronium が形成される場合がある。この positronium の束縛エネルギー（イオン化ポテンシャル）は、水素原子の半分の 6.8eV、陽電子-電子の相対運動の半径は水素原子のボーア半径の倍の 1.06Å である。positronium の基底状態は、1 重項状態 1S_0 (parapositronium) と 3 重項状態 3S_1 (orthopositronium) がある。 1S_0 状態と 3S_1 状態のエネルギー差は 8.4×10^{-4} eV であり、 1S_0 状態の方が低いが、positronium の形成は通常このエネルギー間隔が無視できるほど高いエネルギーで起こるので、生成確率は状態数 $2s+1$ に支配されることになり、parapositronium と orthopositronium の生成確率の比は 1:3 となる。また、Parity の保存則から、parapositronium は 2 光子消滅をし、orthopositronium は 3 光子消滅をする。真空中での parapositronium の寿命は 123ps、orthopositronium の寿命は、140ns である。

2.3 positron の偏極率測定の原理

target のと positron の spin が parallel の場合の 2γ 生成の count rate を N_p 、antiparallel の場合の 2γ 生成の count rate を N_a とし、positron の偏極率を \vec{P}_{e+} 、target の偏極率を \vec{P}_{e-} とすると、

$$\frac{N_a - N_p}{N_a + N_p} = \frac{\sigma_a - \sigma_p}{\sigma_a + \sigma_p} \times \vec{P}_{e+} \times \vec{P}_{e-} \quad (2.9)$$

の関係が成り立つ。C-Parity の保存則より、orthopositronium は 2γ には崩壊しないので、

$$\frac{\sigma_a - \sigma_p}{\sigma_a + \sigma_p} \cong 1 \quad (2.10)$$

である。よって N_a 、 N_p 、 \vec{P}_{e-} を測定することにより、式 (2.9) より \vec{P}_{e+} を求めることができる。

第3章 実験装置

3.1 装置の概要

図 3.1 に実験に用いた装置の概要を示す。source としては ^{22}Na を用いた。各装置についての説明をしていく。

3.1.1 absorber

source の上部に置くことにより、source から放出される高 energy の positron を減速させることができる。今回は、Be(2×2cm,0.1mm 厚) を absorber として使用した。positron の偏極率は $\beta(=v/c)$ と表せるため、absorber を置くことにより、高偏極の positron を slow positron に変換することが可能になる。

3.1.2 Tungsten moderator

moderator は今回の実験で鍵となる重要な要素である。moderator の概念図を 3.2 に示した。入射した positron は Tungsten 中で熱化の後、熱拡散に至る。Tungsten は positron に対して負の仕事関数を持つため、熱拡散によって Tungsten の表面付近にたどり着いた positron は仕事関数分のエネルギーを持って再放出される。再放出された positron を slow positron と呼ぶ。表面付近にたどり着かなかった positron は金属中で対消滅する。熱拡散に至らず、高エネルギーのまま moderator を通過する positron も存在する。moderator を absorber の上に配置することにより、数百 eV の fast positron を数 eV の slow positron に変換することができる。今回、moderator は直径 0.02mm の Tungsten の wire をメッシュ状にした 2cm×2cm のものを用いた。mesh の間隔は 1mm 程度である。mesh 状にした理由は positron に対する有効面積をできるだけ大きくするためである。また、slow positron への変換効率を上げるために moderator にアニール (真空中での焼きなまし) を施した。具体的なアニール方法としては、まず、Tungsten mesh をアセトンに 20 分程度浸して洗浄した後、蒸着装置を用いて真空中 1600 °C で 18 分間アニールを行い不純物を除去した。この後、室温まで戻す際に moderator がもろくなるのを抑えるために 5 分間かけて 1200 °C まで温度を下げ、15 分間 1200 °C を保った後、5 分間かけて室温まで戻した。

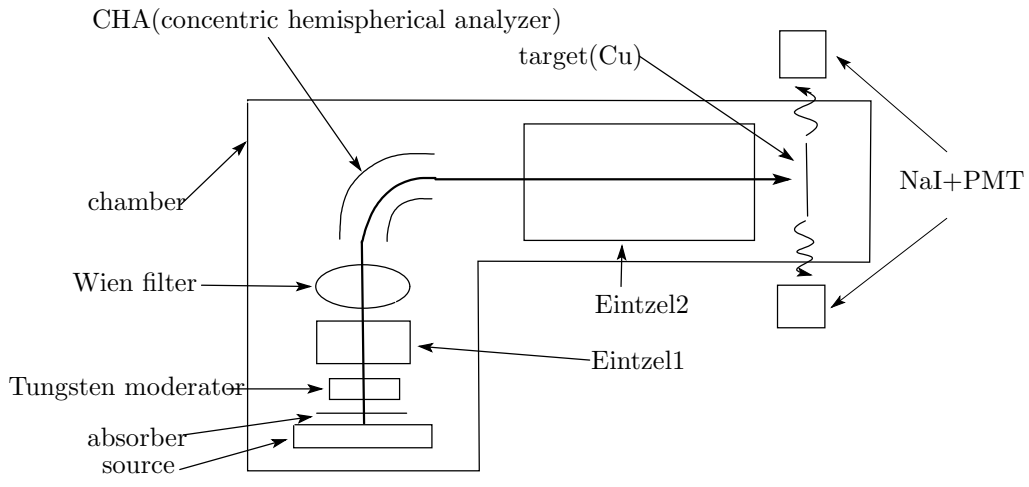


図 3.1: set up

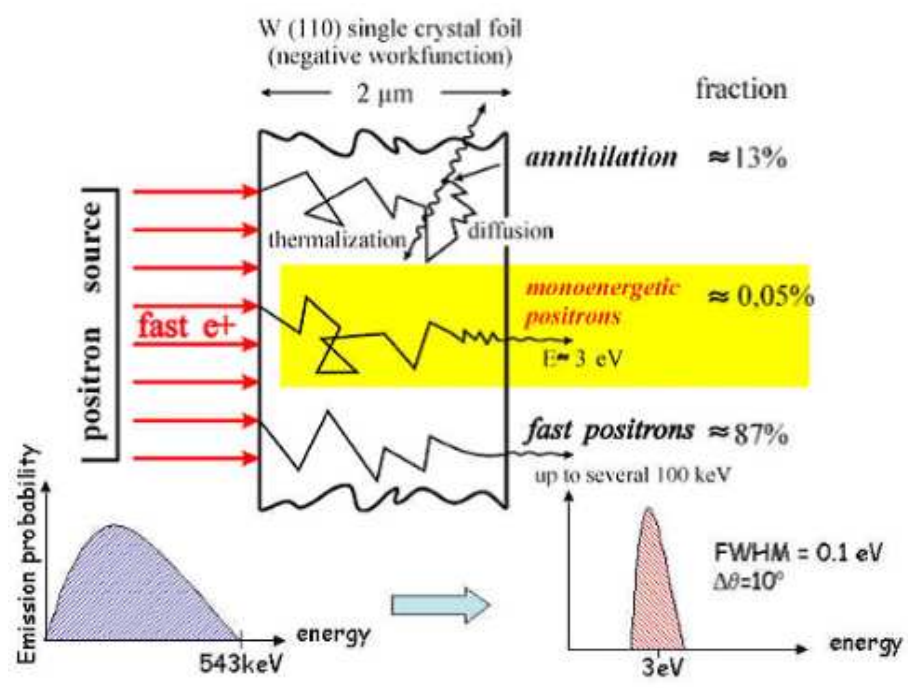


図 3.2: moderator の概念図

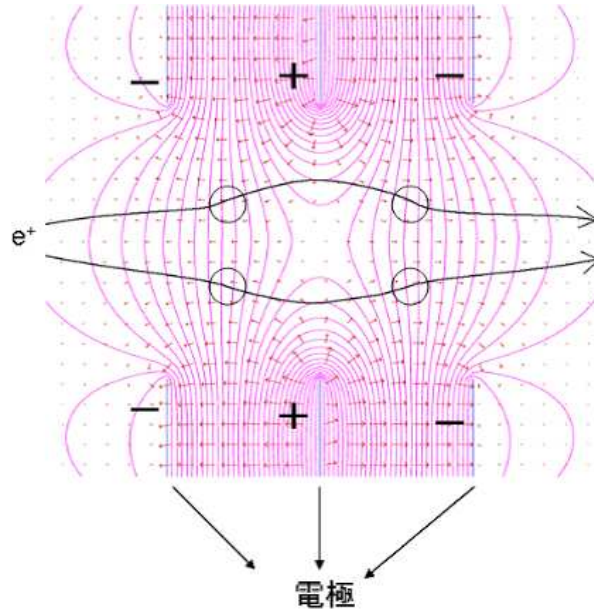


図 3.3: einzellens の電場分布

3.1.3 einzellenz

図 3.3 に einzellenz の電場分布を示す。einzellenz とは、電場を用いて荷電粒子のビームを収束させるための装置である。具体的には三枚の中心に穴のあいた電極に図 3.3 のような電圧をかけ、中心付近の斜め方向の電場を用いてビームを収束させる。図 3.3 のように中心の電極の電位が両端の電極の電位に比べて大きい場合、入射粒子 (電荷は負とする) は始め加速しつつ収束し、最後は減速しながら収束することになる。逆に中心の電極の電位の方が高い場合、始め減速しつつ収束し、最後加速しつつ収束することになるので、この場合の方が電圧としては小さくて済む。したがって我々は中心の電極の電位が両端より低くなるような einzellenz を用いる。また以下に述べるように電極の数は einztel1 では 3 つ、einztel2 では 4 つにした。これは einztel2 の方が長い距離を輸送しなければならないためである。

3.1.4 wien filter

wien filter とは電場 E と磁場 B を互いに垂直に掛ける装置である。wien filter の概念図を図 3.4 に示す。この装置は slow positron の spin の向きを変えることを目的としている。装置を通過する際に磁場の効果により positron のスピンの向きが変えられるが、特に、 $B = \pi v \gamma^2 / \mu_0 g L$ ($\gamma = 1/\sqrt{1+\beta^2}$, $\beta = v/c$) のとき positron のスピンの向きは磁場および速度方向に垂直な方向に 90° 変えられる。また、positron は速さ $v = E/B$ を満たす時装置を直進し、それ以外のときは方向を変えられてしまう。つまり、wien filter は速度選別器となっている。wien filter については今回全く手つかずで終わってしまった。ぜひとも来年度の P2 の方々にチャレンジしていただき

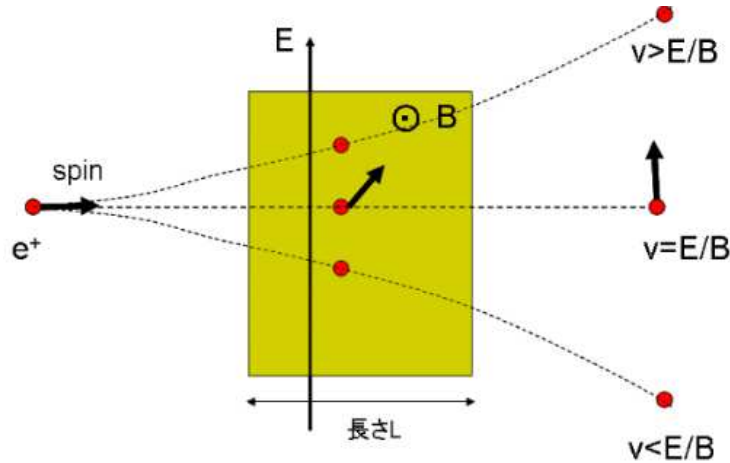


図 3.4: wien filter

たい。

3.1.5 CHA

CHA(concentric hemispherical analyzer)とは、同心円状の互いに半径の異なる2つの金属製8分の1球に互いに異なる電圧を掛け、電場によってその間を通過する特定のenergyのpositronの進行方向を90°変えると同時にビームを収束させる装置である。図3.5がCHAの概念図である。CHAの電極間隔を r とし、電極間に一様電場 E がかかっていたとするとCHAを通過して90°向きが変わる荷電粒子のenergyは、簡単な計算より $\frac{eEr}{2}$ となる。しかし、実際には電場のもれや電極間の電場の非一様性などがあるため、この値とは異なる。したがってCHAにかける最適な電圧は、理想的な値から適当にscanさせて決定するしかない。またset up図(図3.1)における紙面垂直方向にもビームを収束させることができる。

3.2 実験の概略

これから述べる実験の概略は、実験の最終段階までの至る理想的な展開であることをことわっておく。

source(^{22}Na)から β 崩壊によって生じる偏極したpositronをabsorber、Tungsten moderatorに通すことにより高偏極slow positronを生成する。moderatorによるslow positronの生成率は 10^{-4} 程度であり、残りのpositronはmoderator中で対消滅するものと高エネルギーのままmoderatorを通過するものがあることを注意しておく。source、absorber、moderatorを等電位にし、極板(einzellenz)に対して高い電位にしておくことにより、ただちにslow positronを加速させる。einzellenzによりpositron beamを収束させた後、wien filterによってpositronのスピンの向きを90°変える。wien filterは速度選別器の役割をするのだが、moderatorを高エネルギー

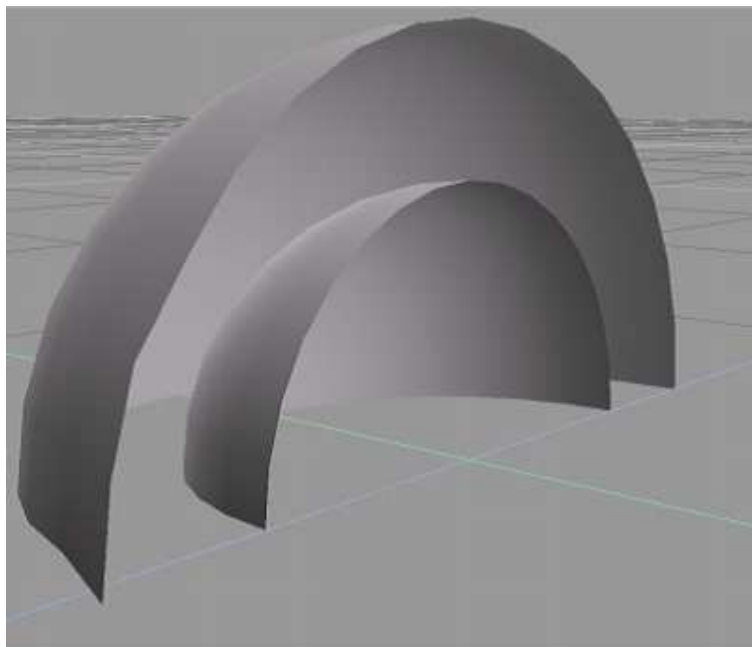


図 3.5: CHA(concentric hemispherical analyzer)

のまま通過してきた positron は wien filter によって速度選別しきれずに slow positron に混じってしまい、background の原因になる。これを避けるため、CHA によって slow positron のみが 90° 向きを変えるようにして高エネルギーの positron を取り除き、さらに、target(Cu) を source から十分離れた位置に置くことにより、noise をできる限り減らすようにした。

偏極した target に slow positron を当て、parapositronium の崩壊により生じる 2γ を back-to-back に配置した PMT により観測することにより、positron の偏極率を求めることを目標としている。

第4章 熱電子を用いた輸送系の確認

^{22}Na の source を使って実験を行なう前に、タングステンフィラメントからの熱電子を用いて Eintzell、CHA、Eintzell2 の順でビーム輸送系の確認を行なった。

4.1 熱電子について

金属や半導体を加熱すると、その表面から電子が放出される。放出された電子のことを熱電子という。金属の温度が上昇すると、自由電子の運動エネルギーが増加し、金属表面の仕事関数を越えると、相当数の電子が数 meV から数百 meV のエネルギーを持って表面から飛び出す。熱電子飽和電流の式は以下のリチャードソン-ダッシュマンの式で与えられる。

$$J = AT^2 \exp\left\{-\frac{\phi}{kT}\right\} \quad (4.1)$$

ここで、A:constant T:温度 ϕ :仕事関数である。

熱電子放出が可能な電極を陰極とし、もう一方の電極を陽極として、両電極間に電圧を印加した場合を考える。低電圧の領域では熱電子飽和電流密度が空間電荷制限電流密度を上まわっているため印加電圧に対して $3/2$ 乗に比例する電流が流れる。電圧が上がると、空間電荷制限電流密度が熱電子飽和電流密度を上まわり、熱電子飽和電流密度によって制限された電流しか流れない。前者の領域を空間電荷制限領域、後者を温度制限領域と言う

表 4.1 は主な純金属の融点、蒸気圧が $1.3 \times 10^{-3} \text{Pa}$ になるときの温度 T_p 、仕事関数、よさの指数 ϕ/T_p を表したものである。一般に、金属の蒸発量は熱陰極の寿命に直接関係するため、飽和蒸気圧が $\times 10^{-3} \text{Pa}$ 以上になる温度で使用するのは好ましくない。したがって仕事関数 ϕ と蒸気圧が $\times 10^{-3} \text{Pa}$ となる温度 T_p の比 ϕ/T_p をよさの指数とした。この値が小さいほど熱陰極材料に適していると言える。今回の実験では比較的手に入りやすく、よさの指数も小さいタングステンフィラメントを熱陰極材料に用いることにした。タングステンフィラメントは、市販の豆電球

元素	融点 (K)	T_p (K)	仕事関数 ϕ (eV)	よさの指数 ϕ/T_p (eV/K)
C	4130	2270	4.6	2.03×10^{-3}
W	3650	2840	4.52	1.59×10^{-3}
Re	3453	2650	4.96	1.87×10^{-3}

表 4.1: 純金属の融点、蒸気圧、仕事関数、およびよさの指数

の中に入っているものを用いた。中のフィラメントを切らないように、ペンチで豆電球のガラスを割り、ソケットにさし込んだ。フィラメントにかける電池の電圧は 2.5V 程度にした。

4.2 ファラデーカップ

熱電子電流を定量的にモニターするのに、ファラデーカップを用いた。これは銅板からの一端子を電流計 (IWATSU Multimeter, range mA) につなぎ、銅板に当たった熱電子を電流として電流計で検出するものである。電流計からのもう一方の端子は ground につないでおく。

4.3 蛍光板

ファラデーカップ以外に、熱電子電流をモニターするのに蛍光板を用いた。5cm×5cm のアクリル板の上にアルルダイドを塗り、ZnS(硫化亜鉛)の粉末を上からまぶす。ZnSの結晶に数百 eV から数 KeV の電子線が入射すると、黄緑色に発光するので、これを用いて熱電子ビームの半径やビームの中心位置を肉眼で確認することができる。ただし、蛍光板からの光は弱いので Einzel1 の効果の確認においてはフィラメントからの光が邪魔で蛍光板の光は見えなくなってしまう。したがって、蛍光板でのモニターは CHA、Einzel2 の効果の確認のみに用いた。

4.4 真空チェンバーについて

今回使用した真空チェンバーを図 4.1 に示した。L 字型のフランジの先の部分は取り外し可能になっている。チェンバーの蓋の部分と L 字型の先の部分に真空コネクタがついており、ここから電圧を導入できるようになっている。またチェンバーの蓋の部分の模式図を図 4.2 に示す。

Einzellens や CHA 等の構造物は図の長ねじ (実際は 4 本ついている) を円形の銅板電極の四隅の穴に通し、蓋の部分から吊り下げる形で固定した。しかし、これだと構造物をチェンバーの下側のフランジから取りださねばならず、大変不便であった。これは我々の実験意欲を低下させた一つの要因である。

4.5 真空排気系について

低 energy の positron を用いて実験するにあたり、高真空は不可欠な条件である。今回、真空排気装置としてターボ分子ポンプを用いた。この写真を図 4.3 に示した。ターボ分子ポンプには補助ポンプとしてロータリーポンプがついており、大気圧から 15Pa まではロータリーポンプで排気し、その後ターボ分子ポンプを起動させる仕組みになっている。ターボ分子ポンプの最大到達圧力は 1.0×10^{-7} Pa である。しかし、実際に我々が到達した最大圧力は 1.0×10^{-5} Pa 程度であった。また、真空計は大気圧から 1.0×10^{-1} Pa まではピラニ真空計を用い、 1.0×10^{-1} Pa から 1.0×10^{-6} Pa まではコールドカソード真空計を用いて、真空度をモニターした。

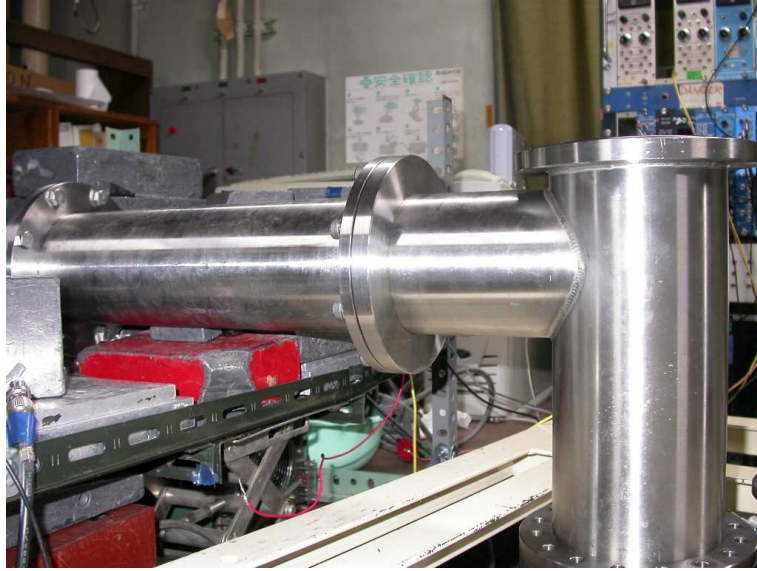


図 4.1: 真空チェンバー

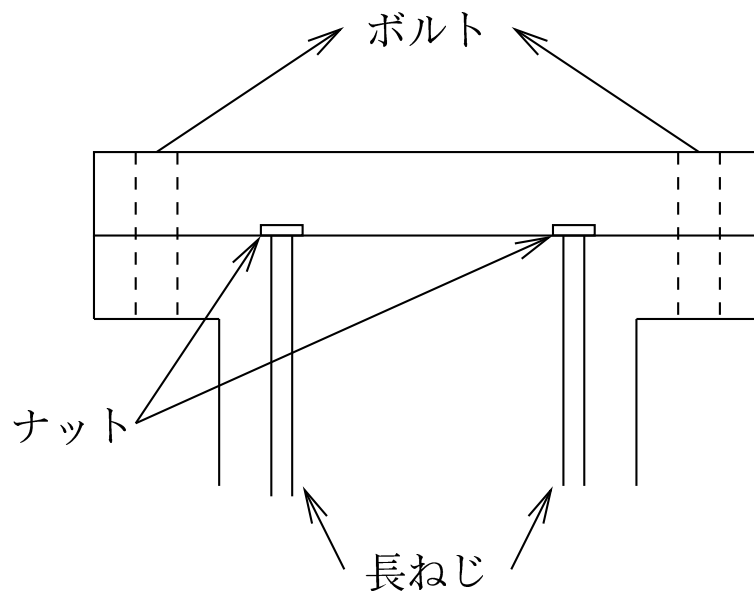


図 4.2: チェンバーの蓋の部分の模式図



図 4.3: ターボ分子ポンプ

4.6 熱電子飽和電流の測定

まず図 4.4 の様な set up で熱電子飽和電流の測定を行なった。直径 9cm の銅板の中心に直径 2cm の穴を空け、その穴に豆電球のソケットをさしこみ、ソケットからの片方の端子を穴とソケットの間ではさみこむ。そして、ソケットからのもう片方からの端子と銅板から出た端子との間で電池をつなぎ、同時にフィラメントと銅板が等電位になるように-の電圧をかけた。この時電池にも電圧がかかっているので触らないように注意が必要である。

この測定の結果を図 4.5 に示す。A1 は HV 電源の電流モニターの値で、A2 はファラデーカップでの電流モニターの値である。

図 4.5 より、A1、A2 とも HV=-200V 付近で熱電子電流が飽和することがわかった。

4.7 Einzel1 の効果の確認

次に Einzel1 の効果の確認を行なった。図 4.6 のように、電極はそれぞれ直径 9cm で中央に直径 2cm の円形の穴を空けたものを用いた。一番下の電極はフィラメントに電圧をかけるためのもので、下から二番目と三番目の電極は加速用である。その上の三つの電極は Einzel レンズになっており、両端は ground にして真ん中の電極の電圧だけを変えるようにした。一番上はファラデーカップの電極になっている。

フィラメントからの電流 A1 は $600 \mu\text{A}$ 程度であった。V2 の値を scan させていったときのファラデーカップでの電流の値 (A1 の値で規格化したもの) を図 4.7 に示した。

図 4.7 より、V2 = -600V 付近で収束の効果が確認できた。次にこの時の熱電子の軌道 simulation

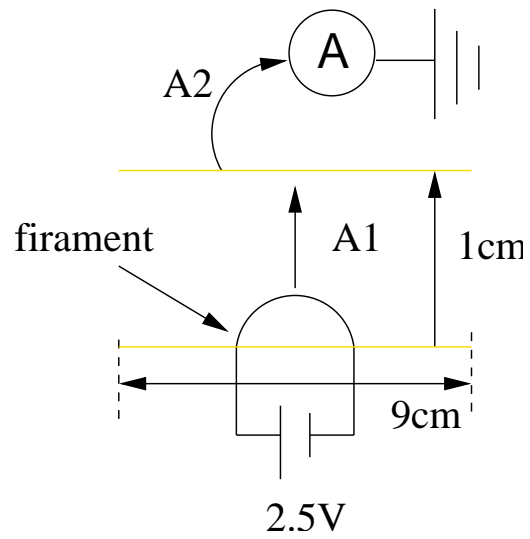


図 4.4: 熱電子飽和電流測定の設定アップ

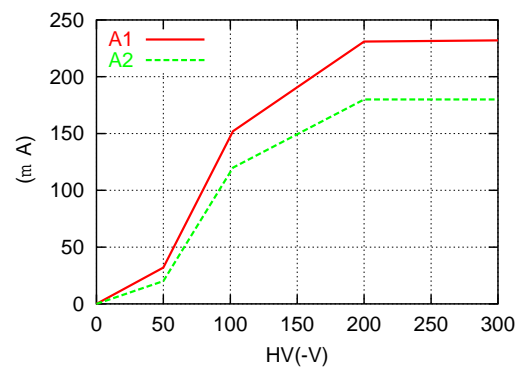


図 4.5: 熱電子飽和電流の測定

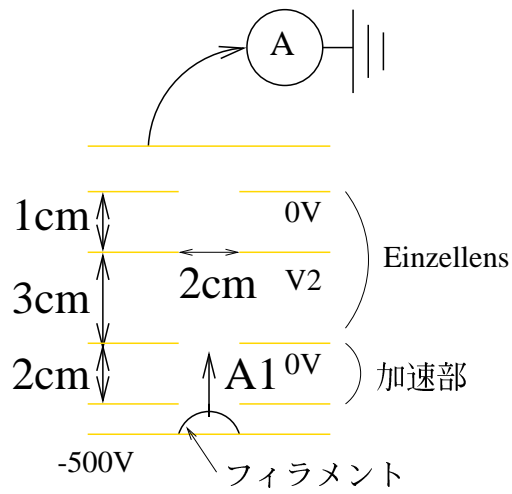


図 4.6: einzel の効果の確認のための set up

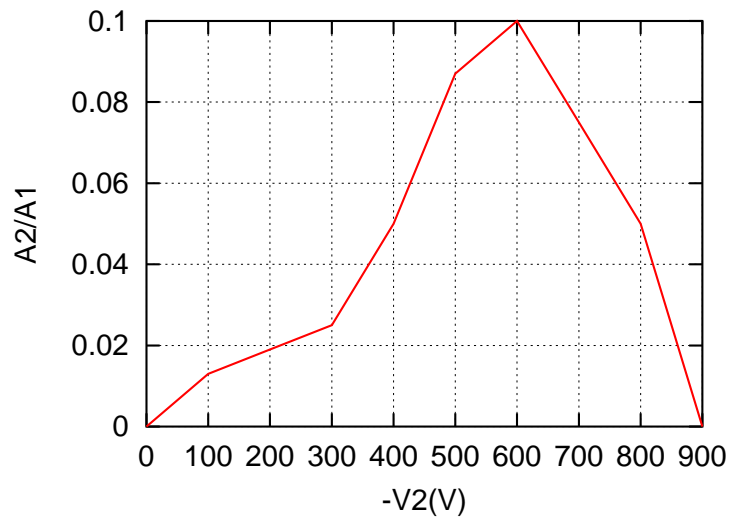


図 4.7: einzel のデータ

の様子を図 4.8 に示す。

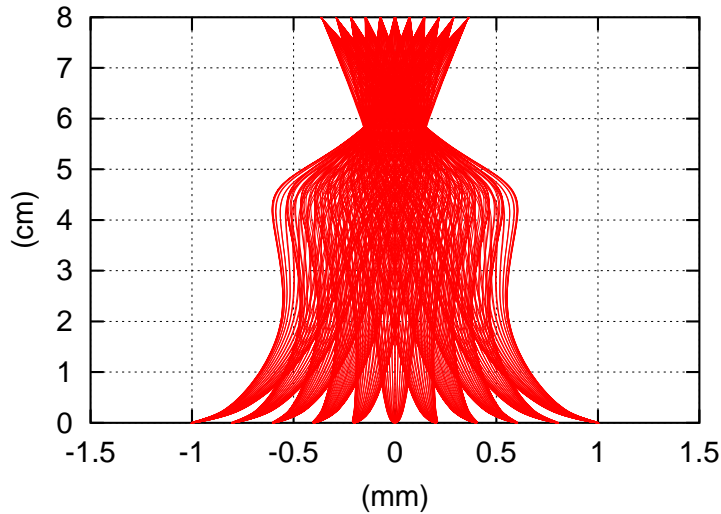


図 4.8: Einzel1 での軌道 simulation の様子

入射熱電子のエネルギーは 100meV、入射位置の幅はフィラメントの大きさを考えて 2mm、入射角度は y 軸に対して $\pm 90^\circ$ とした。y = 5cm ぐらいのところで収束の効果を確認できる。しかし、この simulation によると入射熱電子はすべてファラデーカップに集められるということになり、ファラデーカップと反対側に出た熱電子は捕えられないとすると、熱電子の収集効率は 0.5 程度になる。真空中での散乱等の影響を考えたとしても、これは測定の値とかなり異なる。よって、A1 の値は熱電子の絶対量を表しているわけではないと考えられる。しかし A1 の値を規格化のファクターとして用いることで相対的な熱電子の量の比較は可能であるとした。

4.8 CHA の効果の確認

次に、CHA の効果の確認を行なった。このセットアップを図 4.9 に示す。

Eintzell の次に接地した電極を置き、その上に CHA を取り付けた。(接触部分はアクリル板を用いて絶縁した。)そして、CHA の後ろにファラデーカップ用の電極を置き、熱電子の量をモニターした。V2,V3,V4 の値を変化させた時の A2/A1 の値を図 4.10 に示す。

左上は V2=-543V,V4=200V にして V3 を scan したときのデータである。V3=-200V の時、最大効率 0.0015 となった。右上は V2=-543V,V3=-200V にして V4 を scan させたときのデータである。V4=220V の時、最大効率 0.012 となった。左下は V2=-543V,V4=0V にして V3 を scan させたときのデータである。V3=-327V で最大効率 0.032 となった。右下は V3=-330V,V4=0V にして V2 を scan させたときのデータである。V2=-570V の時最大効率 0.026 となった。

これらのデータから、

1. V3 に-,V4 に+の電圧をかけた時、最大効率となる時の CHA の電極間の電位差は 400V 程

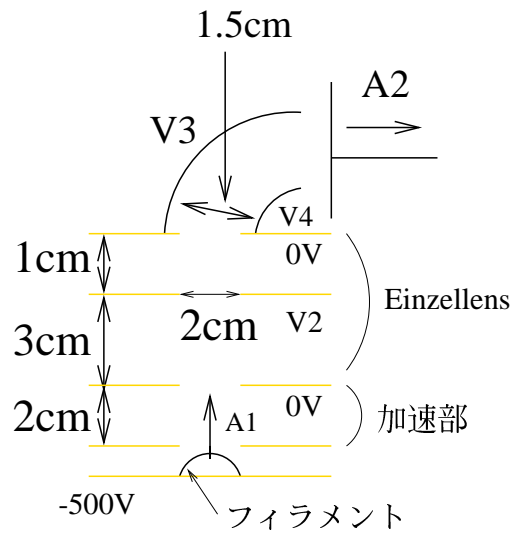


図 4.9: CHA の効果の確認の set up

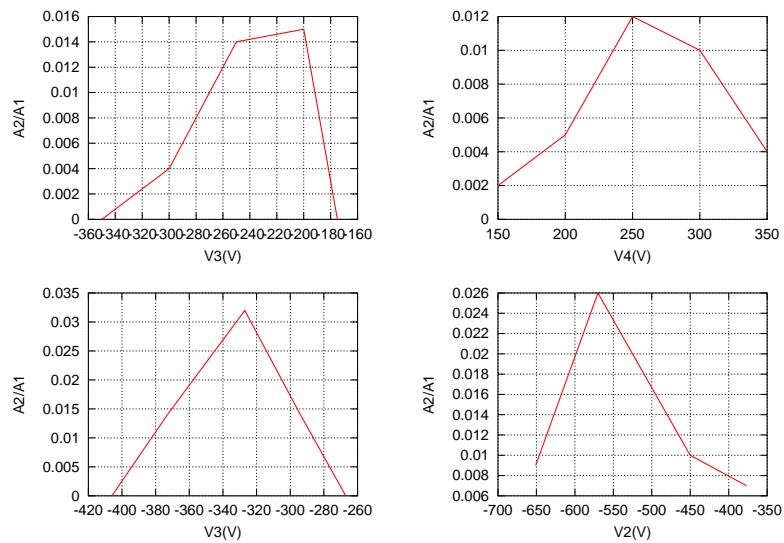


図 4.10: 左上: $V2=-543V, V4=200V$ にして $V3$ を scan したもの。右上: $V2=-543V, V3=-200V$ にして $V4$ を scan したもの。左下: $V2=-543V, V4=0V$ にして $V3$ を scan したもの。右下: $V3=-330V, V4=0V$ にして $V2$ を scan したもの

度であるが、V4を0Vにした時の電位差は300V程度である。

2. V4を0Vにした時の方がV4に+の電圧をかけた時より効率がよい。

ということがわかった。

これらは定性的には以下のように説明される。V3に-,V4に+の電圧をかけた時は電極の中央の部分の電位はほぼ0Vで一定であり、この部分を通る粒子に対しては収束の効果は働かない。しかし、V4を0Vにすると、電極の中央の入口付近と出口付近の電位はほぼ0Vであるが、真ん中付近では+の電位になるため、この部分を通る粒子に対して収束の効果は働くものと考えられる。このことを図4.11に示した。

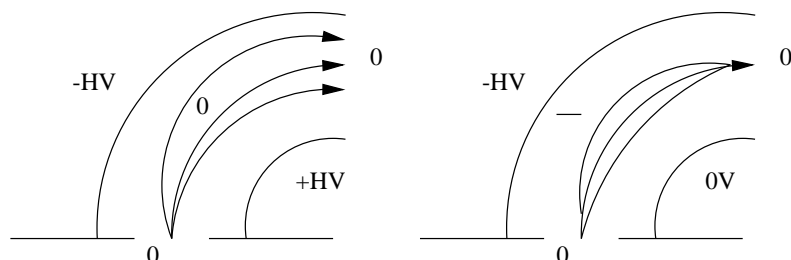


図 4.11: 左の図は V3 に-, V4 に+の HV をかけた時の CHA での電子の軌道を表す。右の図は V3 に-の HV をかけ、V4 を 0V にしたときの CHA での電子の軌道を表す。左右の図とも真ん中の数字は電位の符号を示している。

次に V3=-320V, V4=0V とした時の CHA での熱電子の軌道 simulation の様子を図 4.12 に示す。熱電子の入射 energy は 500eV、入射位置の幅は 1cm、入射角度は垂直方向に対して $\pm 10^\circ$ とした。

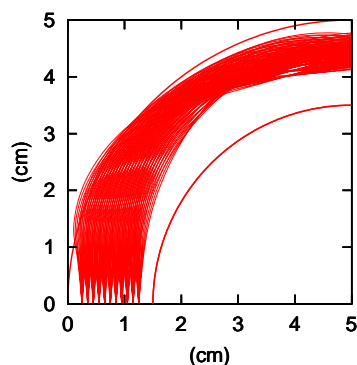


図 4.12: CHA での軌道 simulation の様子。電極の位置も示してある。

軌道が収束しつつ 90° 曲がっている様子がわかる。

V1(V)	V2(V)	V3(V)	V5(V)	V6(V)	A2/A1
-500	-594	-305	-402	-375	0.014
-1000	-1275	-572	-795	-790	0.047
-1500	-1774	-825	-1195	-1100	0.09
-2000	-2316	-1015	-1440	-1400	0.11
-2500	-2840	-1275	-1816	-1700	0.13

表 4.2: Eitzel2 の効果の確認

4.9 Einzel2 の効果の確認

次に、Eintzel2 の効果の確認を行なった。この時の set up を図 4.13 に示した。CHA の次に計

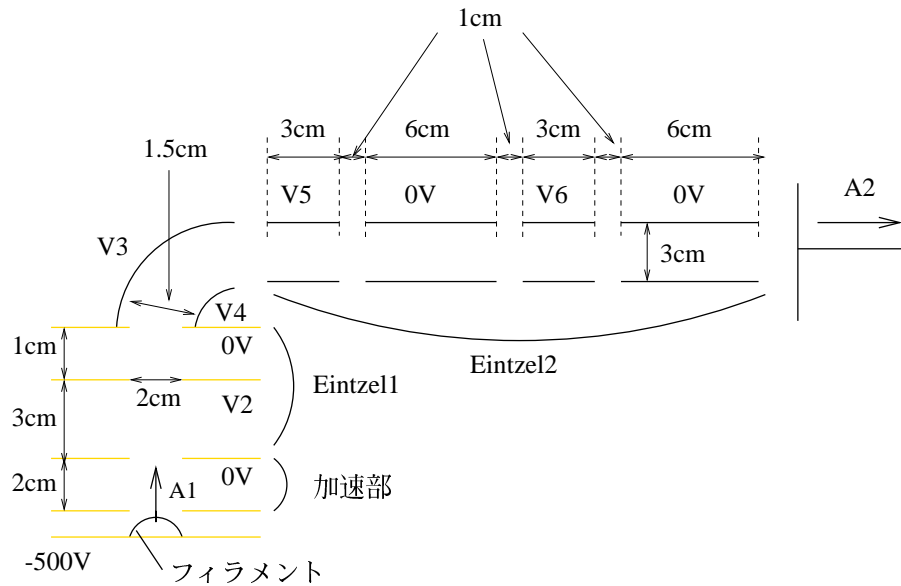


図 4.13: Einzel2 の効果の確認の set up

4つの円筒状電極を取り付け、二番目と四番目の電極は接地して、四段の Einzellens を作り、最後にファラデーカップ用の電極を置き、熱電子の量をモニターした。V4=0V としたほうが効率がよくなることがわかったので、V4=0V に固定し、V1 の値を-500V,-1000V,-1500V,-2000V,-2500V と変化させていき、A2/A1 の値が最大となった時の V2,V3,V4,V5,V6 の値とそのときの A2/A1 の値を表 4.2 に示す。

また、V1 の値に対して効率が最大となった時の A2/A1 の値を plot したものを図 4.14 に示す。

図 4.14 にはデータを直線で fit したものを示している。これより、加速電圧の値 V1 と熱電子輸送の相対効率の値 A2/A1 はほぼ比例することがわかる。V1 の値が大きくなると A2/A1 の値も大きくなるのは、加速電圧の値が大きくなると熱電子のエネルギーが大きくなり、熱電子自身の電荷

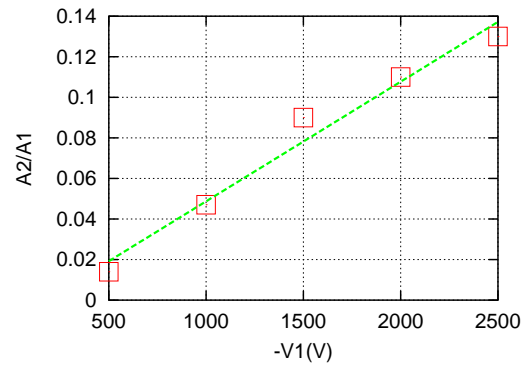


図 4.14: V_1 の値に対する A_1/A_2 の値と fit した直線

による反発が小さくなってビームの散逸が小さくなるためと考えられる。また、 $V_5=-1816V, V_6=-1700V$ のときの Einzel2 での熱電子の軌道シミュレーションの様子を図 4.15 に示す。入射熱電子の energy は $2500eV$ 、入射位置の幅は $1cm$ 、入射角度はビーム軸に対して $\pm 10^\circ$ した。

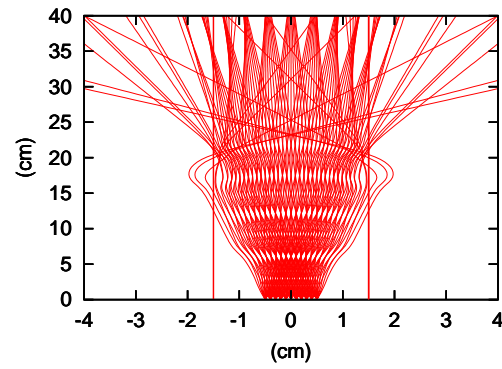


図 4.15: Einzel2 での熱電子の軌道 simulation の様子。電極の位置も示してある。

第5章 slow positronを用いた測定

5.1 energy calibration

slow positron を用いて実験する前に、ターゲットの位置に ^{22}Na の source を置き、511KeV の γ 線の光電ピークを用いて energy calibration を行なった。この時の set up を図 5.1 に、daq の回路図を図 5.2 に示した。

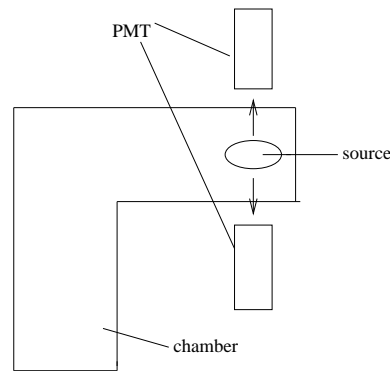


図 5.1: energy calibration の set up

threshold を 13mV と 46mV にした時の energy spectrum を図 5.3 に示した。上下の図はそれぞれ 2つの PMT からの signal である。th = 13mV, 46mV 共に ADC カウント = 1300, 1400 の所で 511keV の光電ピークが観測された。

5.2 threshold の決定

threshold を決定するために、まず図 4.13 と同様のセットアップでフィラメントの部分 ^{22}Na をの source に変え、その上に tungsten moderator を置き、二枚の電極ではさんで source と moderator を固定した。(図 5.4)

そして、熱電子の時の各極板の電圧の値を参考に、 $V_1=2500\text{V}, V_2=2840\text{V}, V_3=V_4=0\text{V}, V_5=1816\text{V}, V_6=1700\text{V}$ に設定して、threshold の値を 13mV と 46mV の二通りで 511keV 2γ の count rate と energy spectrum を測定した。CHA の電圧が 0V であるので、このときの signal は slow positron とは無関係のものである。(この signal を background と呼ぶことにする。) 図 5.5 はその時のデータである。それぞれの図において赤の点線は 511keV の energy に対応し、左側が

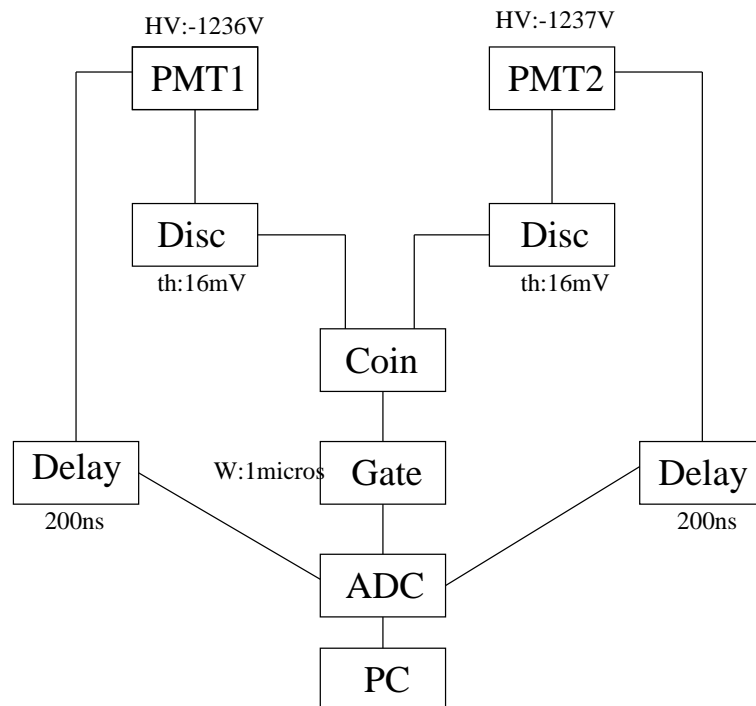


図 5.2: energy calibration の回路図

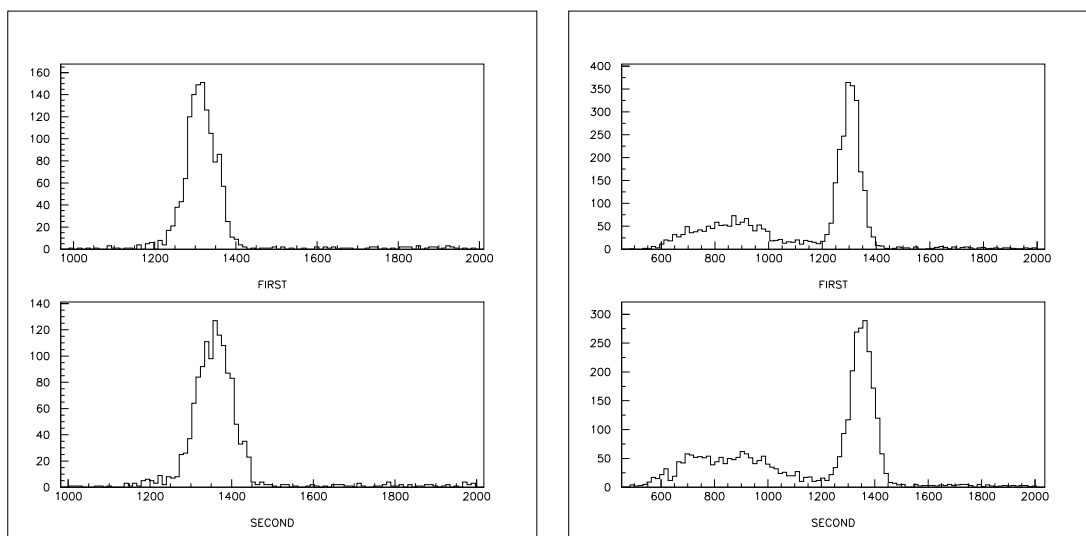


図 5.3: 左 : $\text{th}=13\text{mV}$, 右 : $\text{th}=46\text{mV}$ の時の $511\text{keV}2\gamma$ の energy spectrum.

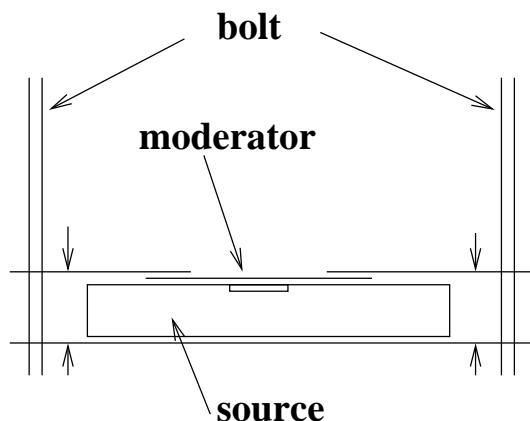


図 5.4: moderator の固定方法

V3	1300V	1250V	1200V	1150V	1100V	0V
count 数/50000s	1368	1309	1604	1409	1445	1023

表 5.1: V3 の値を変えた時の count 数/50000s の変化

th=13mV, 右側が th=46mV の時のものである。

また、count rate は th=13mV の時 0.22counts/s, th=46mV の時 0.02counts/s であった。th=13mV の時の spectrum は 511keV 以下の低 energy 領域に偏っていることがわかる。これはほとんど orthopositronium からの 3γ のうちの 2γ と考えられる。一方 th=46mV の時の spectrum では 511keV の光電ピークが見える。この原因はわかっていないが、threshold 46mV の時の count rate は 13mV の時の 1/10 になっている。もちろん threshold を上げると slow positron の signal の一部を cut してしまうことになるが、background を減らすことを第一に考えて今回は threshold の値を 46mV に設定した。

5.3 slow positron の energy spectrum

次に、V1=2500V, V2=2840V, V4=0V, V5=1816V, V6=1700V に設定し (熱電子の時の値と同じ) V3 の値を 1300V, 1250V, 1200V, 1150V, 1100V と変化させた時の energy spectrum を図 5.6 から 5.10 に示した。緑のハッチで示されている histogram は background (V3=0V) のものであり、それぞれの図の上と下はそれぞれ 2 つの PMT からの signal である。また、赤の点線の位置は 511keV の energy に対応する。したがって赤の点線の位置にピークがあれば 511keV の 2γ であるといえる。いずれの図でも、histogram のピークの位置は統計誤差の範囲で赤線の位置と一致した。表 5.1 は V3 の値を変えた時の count 数の変化を表している。全体的に background に対する signal の excess がうかがえる。V3 の値に対して count 数 (V3=1200V)/count 数 (V3=0V) の値 (=R) を plot したものを図 5.11 に示す。

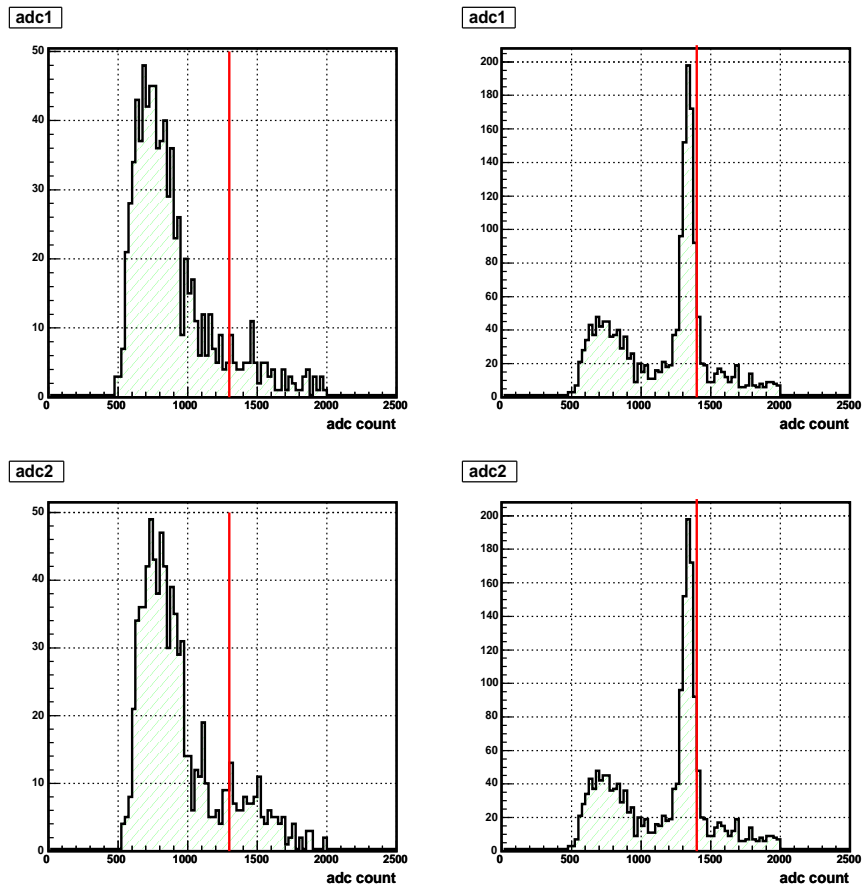


図 5.5: 左 : $th=13\text{mV}$ 、右 : $th=46\text{mV}$ の時の background の energy spectrum

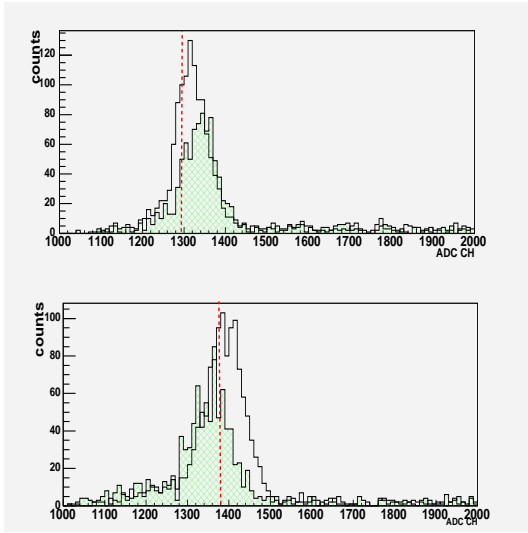


図 5.6: $V_3=1300V$ の時の energy spectrum.

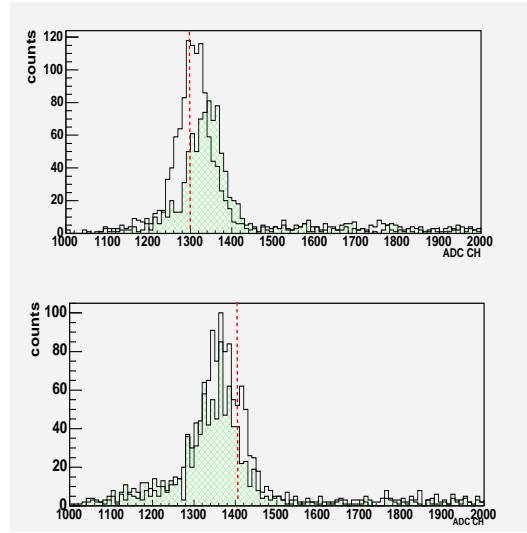


図 5.7: $V_3=1250V$ の時の energy spectrum.

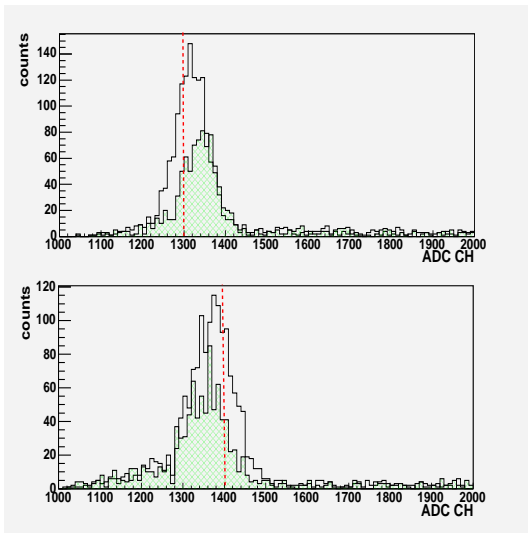


図 5.8: $V_3=1200V$ の時の energy spectrum.

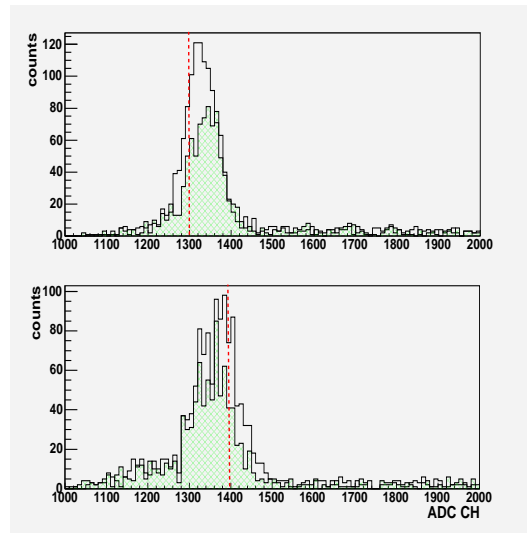


図 5.9: $V_3=1150V$ の時の energy spectrum.

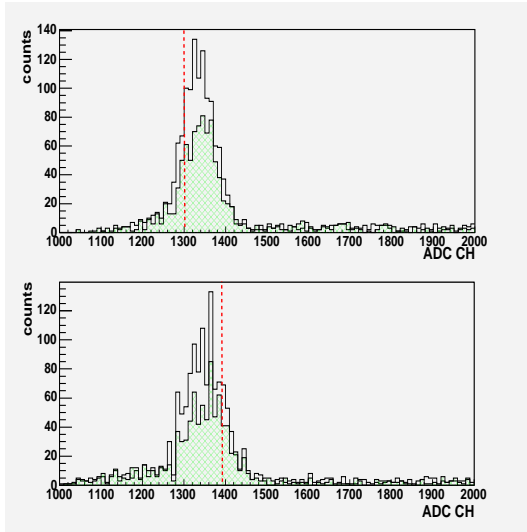


図 5.10: $V_3=1100\text{V}$ の時の energy spectrum.

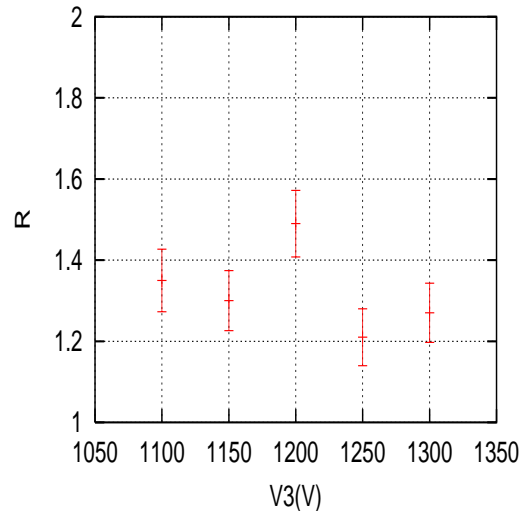


図 5.11: V_3 の値に対する R の値の plot

図 5.11 において誤差は統計誤差のみを考慮している。いずれの電圧の値に対しても、 R は 1 より大きくなり、 $V_3=1200\text{V}$ のとき $R=1.49\pm 0.082$ で最大となった。この signal の excess は slow positron によるものだと考えられる。

5.4 moderator なしのときの energy spectrum

次に、5.3 節で示した signal の excess が moderator によるものであることを確かめるために、moderator を取り外し、5.3 節において R の値が最も大きかった電圧の値 $V_1=2500\text{V}$, $V_2=2840\text{V}$,

$V_3=1200\text{V}$, $V_4=0\text{V}$, $V_5=1816\text{V}$, $V_6=1700\text{V}$ に設定して $511\text{keV}2\gamma$ の energy spectrum と count 数を測定した。また V_1, V_2, V_4, V_5, V_6 の値はそのまま $V_3=0\text{V}$ ににして background の測定も行った。その時の energy spectrum を図 5.12 に示す。赤の点線は 511keV の energy に対応する。

緑のハッチは background のものである。また、 $V_3=1200\text{V}$ の時の count 数は $829\text{counts}/50000\text{s}$ 、background の count 数は $843\text{counts}/50000\text{s}$ であった。count 数は 5.3 節の時より全体的に減少しているが、これは moderator を取り出すために chamber の周りの鉛の配置を変えたためと考えられる。しかし signal と background との比を用いて議論することで、count 数の全体的な減少は問題にならないと考えた。moderator なしのときの R の値は 1.02 ± 0.06 となり、統計誤差の範囲で 1 になった。これより、5.3 節で示した signal の excess は moderator に起因するものであることがわかる。

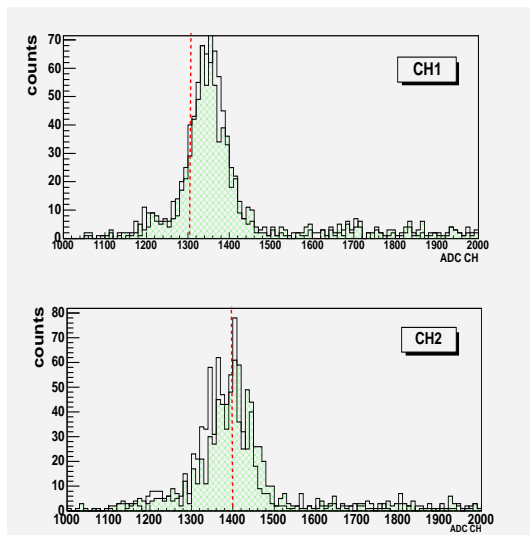


図 5.12: moderator なしの時の $V_3=1200V$ の時の energy spectrum。赤の点線は 511keV の energy に相当する。

第6章 解析と結論

6.1 slow positron の count rate

前章の結果を用いて定量的な議論を行なう。まず、表 5.1 より、 $V_3=1200V$ の時の count 数から background の count 数を差し引いて slow positron の count 数は $581 \pm 51 \text{ counts}/50000s$ となった。(誤差は統計誤差のみを考慮)これが統計的揺らぎによる確率は 10^{-44} 程度となり、きわめて小さい。

6.2 slow positron の energy

次に slow positron の energy を estimate する。 $V_3=1200V$ の時に最も slow positron の yield が大きくなったので slow positron の energy は CHA において $V_3=1200V, V_4=0V$ としたときの輸送効率が最も大きくなるような energy であるはずだ。この energy を simulation によって決定する。

図 6.1 のように、CHA の電圧を $V_3=1200V, V_4=0V$ に設定し、電極の中心から positron を入射させて ($x = 4.25$ での y 座標)- 4.25 の値 ($\equiv \Delta y$) によって CHA での輸送効率を評価する。図 6.2 は positron の入射 energy を $2000eV$ から $2600eV$ まで $50eV$ ずつ変化させ、それぞれの Δy の値を plot したものである。

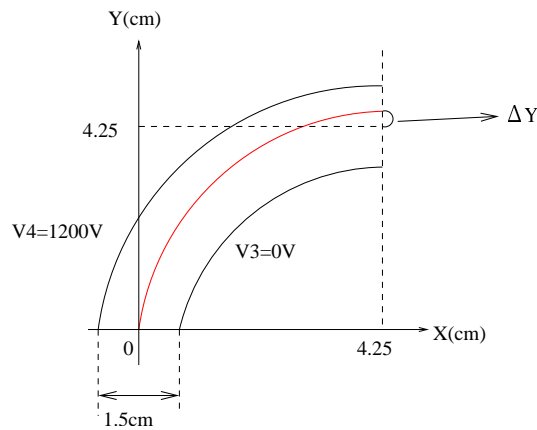


図 6.1: simulation による slow positron の energy estimate. 赤の線は positron の軌道を表している。

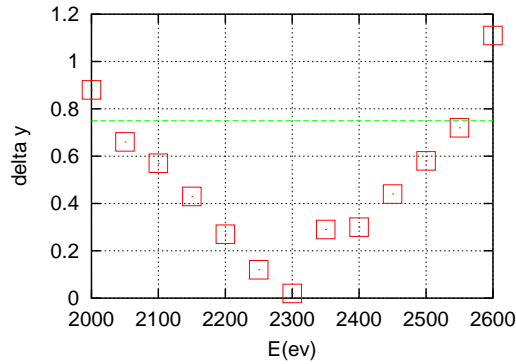


図 6.2: positron の入射 energy に対する Δy の値の plot。緑の線は CHA の電極の位置を表している。

図 6.2 より、 $E=2300\text{eV}$ の時最も Δy が小さくなることがわかる。また図 6.2 において緑の線は $\Delta y=0.75$ 、つまり CHA の電極の位置を表しており、 $E=2000\text{eV}$ 、 2600eV の時は CHA の電極に当たってしまうことがわかる。実際には CHA の出口に到達する前に CHA の電極に当たってしまうものもあるので、 $V_3=1200\text{V}$ 、 $V_4=0\text{V}$ の時、CHA によって曲げられる positron の最大の energy を $E=2500\text{eV}$ と estimate する。CHA の入口での電位は simulation によると 200V 程度で、moderator にかかる電圧は 2500V だったので、CHA の入口において positron は 2300eV 程度加速されていることになる。これより、moderator から出た slow positron の energy は最大でも 200eV 程度であり、 $E=2300\text{eV}$ の positron が最も CHA に対して sensitive であったことを考えると、slow positron の energy は参考論文の値である 2eV と consistent であると言える。

6.3 moderator の効率

次に、moderator の効率 (E_{mod}) を評価する。ここで moderator の効率とは moderator に入射する positron に対する slow positron の割合として定義される。E の値は次式から求めることができる。

$$\begin{aligned}
 (\text{slowpositronrate}) &= (\text{source 強度}) \times E_{mod} \times (\text{slowpositron の輸送効率}) \\
 &\quad \times (\text{parapositronium の fraction}) \times (\text{detector の acceptance})
 \end{aligned}$$

以下、各項について説明する。

- slow positron rate は 6.1 で求めたように、 $581 \pm 51 \text{ counts}/50000\text{s}$ とする。
- source 強度は、半減期を考慮して、 $100 \mu\text{Ci}/2$ とする。
- slow positron の輸送効率は 4.2 における $V_1=2500\text{V}$ での値を用いる。この値は熱電子輸送

の絶対効率そのものを表しているわけではないが、オーダーはこの値と変わらないと思われる。したがって E_{mod} の評価はオーダー評価にとどめる。

- parapositronium の fraction とは無偏極の electron と positron が positronium を作る時に parapositronium を作る確率で、spin のみを考慮したとき、合成 spin 状態の状態数は parapositronium : orthopositronium = 1:3 なので、この確率は $\frac{1}{4}$ である。
- detector の acceptance は、target の中心から 2γ が放出されるとすると、 $1/6$ と計算される。しかし、今回 slow positron が target に当たったことは要求していないため、この値は厳密ではない。よって E_{mod} のオーダー評価と言う意味でこの値を用いる。

以上の値を代入すると、 $E_{mod} = 1.2 \times 10^{-6}$ となった。参考論文の値 10^{-4} と比べてかなり小さいと言える。moderator の効率を上げる方法について次章で議論する。

第7章 改善点

この章では、moderator の効率に関して

1. アニール温度
2. 真空度
3. reflection moderator の使用

の3つについて考察する。

表 7.1 に我々が行なったアニールの条件をまとめた。

ただし、温度は場所によってばらつきがあったため、表 7.1 には mesh の中心部分の温度を示した。

7.1 アニール温度について

まず、アニール温度に対する slow positron の yield の指標となる量の関係を示したグラフが、図 7.1 である。

ここで、R -parameter とは slow positron の放出割合を示すもので、Ps fraction とは slow positron の moderator 表面への拡散の度合いを示すものであり、いずれの量も moderator の効率のよさを表すものである。図よりアニール温度が上がるほど moderator の効率も大きくなることがわかる。実際アニール温度としては 2000 度ぐらいが最適の値とされている。また、アニール温度が 1000 度以下の時、parameter の値はどちらもほぼ 0 であるので、slow positron 生成のためにはアニールは不可欠であると言える。我々の行なったアニールでは、電源側の電圧リミットのためにタングステンメッシュに十分な電流を流すことができず、アニール温度も制限された。mesh のサイズを小さくすれば、抵抗が小さくなって、アニール温度を上げることができる可能性がある。

温度 (度)	真空度 (Pa)	アニール時間 (分)	冷却時間 (分)
1500	1.5×10^{-3}	20	60

表 7.1: アニール条件

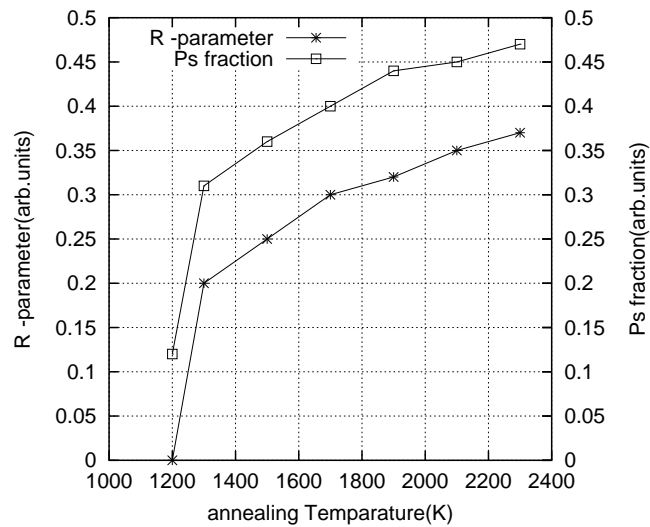


図 7.1: アニール温度に対する slow positron の yield を示したグラフ。

7.2 真空度について

参考論文の真空度の値は $10^{-6} Pa$ という超高真空であった。実際われわれのアニール装置ではこの値は不可能である。2つのサンプルに別々の電流を流すことができるアニール装置の場合、タンゲステンより酸化しやすい物質であるジルコニウムを片方のサンプルポートに置き、タンゲステンアニールの前にジルコニウムの方を 1000 度ぐらいでアニールすることにより、chamber 内に残っている酸素を吸着させることができる。しかしこの方法でどれくらい真空度が上がるかはわからない。

7.3 reflection moderator の使用

我々は reflection moderator でも実験を行なうことを考え、リボン状のタンゲステンでアニールを行なった。リボン状のタンゲステンは mesh 状のものより抵抗が小さいので、アニール温度を 2000 度付近まで上げる事ができた。しかし、冷却時間が短かったためか、取り出した時にポロポロになってしまい、使用することができなかった。冷却時間を長くしてゆっくり室温に戻すようにすればこの点は多少改善できると思われる。また、固定の方法は、図 7.2 のようにバネのすき間にリボンを挟むような方法を考えていたが、これだとリボンに負化がかかり、リボンが破損する恐れがある。そこで、図 7.3 のように金属の枠にリボンの幅より少し大きめの溝を入れ、溝にリボンをさし込んで枠の部分に電導性の塗料 (銀ペーストなど) を塗ってリボンを固定する方法などが推奨される。

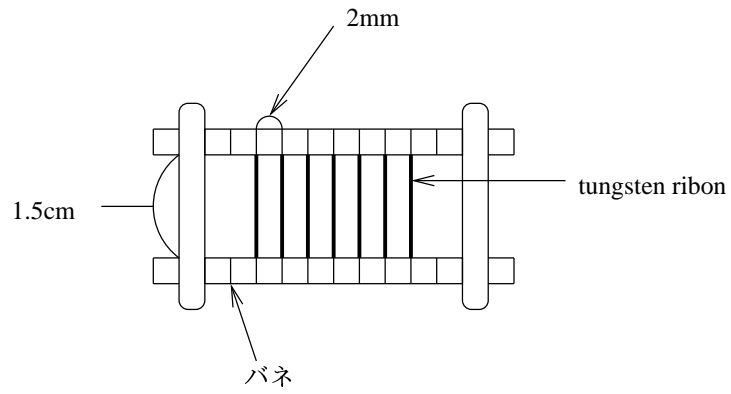


図 7.2: moderator の固定方法 (失敗)

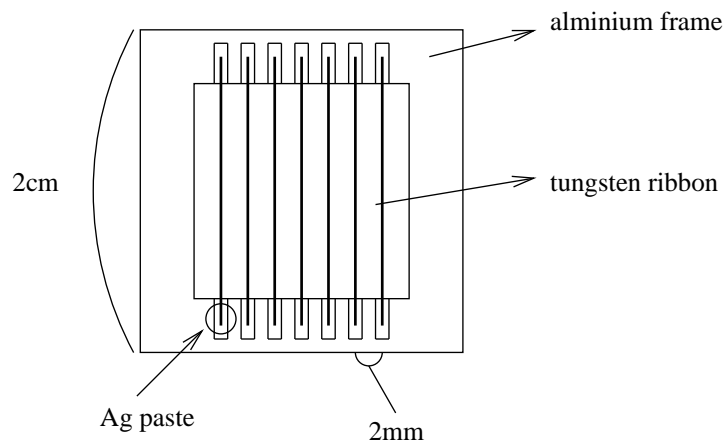


図 7.3: moderator の固定方法 (推奨)

第8章 結論

我々は slow positron を用いて Parity の破れの検証の実験を行なった。まず、タングステンフィラメントからの熱電子を用いて、ビーム輸送系の確認を行ない、最も熱電子ビーム輸送効率がよくなる時の各電極の電圧の値を調べた。次に、アニールしたタングステンメッシュを用いて、CHA の電圧の値を変えながら、slow positron の検出を行なった。その結果、CHA の内側の電極の電圧を 0V、外側の電極の電圧を 1200V にした時、slow positron の signal が最も多く観測され、この時の signal と background との比は $R=1.49\pm 0.082$ となった。また、moderator なしの時、CHA の電圧の値を変えても slow positron の signal は観測されなかった。これより、slow positron の signal は moderator によるものであることがわかる。観測された slow positron の count rate を用いて、moderator の効率を概算したところ、 $E_{mod} = 1.2 \times 10^{-6}$ 程度となった。これは参考論文の値より 2 桁ほど小さい。アニール方法の改善や、reflection moderator の使用により、moderator の効率を上げることができると考えられる。

第9章 謝辞

この実験を行なうにあたり、さまざまな方にお世話になりました。まず、担当教官である笹尾先生、野村先生には実験の計画段階からいろいろな助言をいただき、こうして一つの成果を上げることができました。特に野村先生には、僕らの不注意で電源を壊してしまった時も嫌な顔一つせず(?)適切な対応をしていただきました。本当にありがとうございます。また、TAの横山さんや前P2の中島さん、栗本さんにもたびたびアドバイスをいただきました。また、理論ゼミでは、畑先生に素粒子理論を基礎からみっちり教えて頂き、大変ためになるゼミであったと思います。ありがとうございました。その他にも他の研究室の先生方にもいろいろとお世話になることができました。まず、宇治のビーム物理学研究室の岩下先生には実験の事に関して、たびたびメールで質問させていただき、そのつど適切な回答をいただきました。また、固体量子物性研究室の前野先生、矢口先生には、アニール装置を快く使わせていただき、おかげで slow positron の検出に成功することができました。4月に入ってからは、原子核ハドロン研究室のアニール装置を使わせていただくことになり、同研究室の村上先生にお世話になりました。また蛍光板の事に関しては同研究室の坂口先生にいろいろと質問させていただきました。あらためてここで皆様に感謝の意を表します。

第10章 感想

- ビームを輸送するのって大変なんだと実感できた。はじめのうちはノイズしか出なくてどうなることかと思ったけど、最終的には結果が出たんでよかった。(山本)
- 実験の難しさを痛感させられた約半年間だった。自然を知るには自然と闘わなければならないことを思い知らされた。(田口)
- 楽しく実験することができました。(齋藤)

目次

3.1	set up	7
3.2	moderator の概念図	7
3.3	eintzellens の電場分析	8
3.4	wien filter	9
3.5	CHA(concentric hemispherical analyzer)	10
4.1	真空チェンバー	13
4.2	チェンバーの蓋の部分の模式図	13
4.3	ターボ分子ポンプ	14
4.4	熱電子飽和電流測定の設定アップ	15
4.5	熱電子飽和電流の測定	15
4.6	einzell の効果の確認のための set up	16
4.7	einzell のデータ	16
4.8	Einzell での軌道 simulation の様子	17
4.9	CHA の効果の確認の set up	18
4.10	左上: $V_2=-543V, V_4=200V$ にして V_3 を scan したもの。右上: $V_2=-543V, V_3=-200V$ にして V_4 を scan したもの。左下: $V_2=-543V, V_4=0V$ にして V_3 を scan したもの。右下: $V_3=-330V, V_4=0V$ にして V_2 を scan したもの	18
4.11	左の図は V_3 に-, V_4 に+の HV をかけた時の CHA での電子の軌道を表す。右の図は V_3 に-の HV をかけ、 V_4 を $0V$ にしたときの CHA での電子の軌道を表す。左右の図とも真ん中の数字は電位の符号を示している。	19
4.12	CHA での軌道 simulation の様子。電極の位置も示してある。	19
4.13	Einzeltel2 の効果の確認の set up	20
4.14	V_1 の値に対する A_1/A_2 の値と fit した直線	21
4.15	einzeltel2 での熱電子の軌道 simulation の様子。電極の位置も示してある。	21
5.1	energy calibration の set up	22
5.2	energy calibration の回路図	23
5.3	左: $th=13mV$, 右: $th=46mV$ の時の $511keV2\gamma$ の energy spectrum。	23
5.4	moderator の固定方法	24
5.5	左: $th=13mV$, 右: $th=46mV$ の時の background の energy spectrum	25
5.6	$V_3=1300V$ の時の energy spectrum。	26
5.7	$V_3=1250V$ の時の energy spectrum。	26

5.8	V3=1200V の時の energy specrum.	26
5.9	V3=1150V の時の energy specrum.	26
5.10	V3=1100V の時の energy specrum.	27
5.11	V3 の値に対する R の値の plot	27
5.12	moderator なしの時の V3=1200V の時の energy spectrum. 赤の点線は 511keV の energy に相当する。	28
6.1	simulation による slow positron の energy estimate. 赤の線は positron の軌道を表している。	29
6.2	positron の入射 energy に対する Δy の値の plot. 緑の線は CHA の電極の位置を表している。	30
7.1	アニール温度に対する slow positron の yield を示したグラフ。	33
7.2	moderator の固定方法 (失敗)	34
7.3	moderator の固定方法 (推奨)	34