

Thermal muonium emission from fine powders

1999 P1

April XX 2000

Abstract

真空中への熱ミュオニウムの放出を観測した。その結果、 SiO_2 でちょっと見えたのがあったが、あとはだめだった。

Contents

1	Introduction	4
1.1	Motivation	4
1.2	Review	4
1.3	Overview	4
2	粉末の選択	6
3	Apparatus	7
3.1	Beamline	7
3.1.1	概要	7
3.1.2	表面ミュオンビーム仕様	7
3.1.3	π 中間子生成標的	7
3.1.4	陽子ビーム	7
3.1.5	入射系電磁石	8
3.1.6	超伝導ソレノイドコイル	8
3.1.7	取出系電磁石	8
3.2	μ SR Spectrometer	9
3.2.1	μ SR スペクトロメーターの概略図	9
3.2.2	μ ポートの μ SR スペクトロメーターの仕様	9
3.3	Vacuum Chamber	9
3.4	ターゲット台	10
3.4.1	ターゲットホルダー	10
3.4.2	ターゲット台	10
3.5	ふるい	10
3.5.1	ふるい	10
3.5.2	ふるい台	12
3.5.3	網の選択	12
3.6	Sci-Fi Hodoscope	14
3.7	Atomic e^- Detector	14
3.8	DAQ	14
4	Experiment in Kyoto	16
4.1	Target	16
4.1.1	密度測定	16
4.1.2	事前のテスト	16
4.2	Vacuum Chamber	17
4.2.1	マイラはり	17

4.2.2	リークテスト	17
4.3	Energetic e^+	19
4.3.1	Sci-Fi 伝送効率の曲率依存性	19
4.3.2	MAPMT の特性 (Discriminator Threshold の決定)	20
4.4	Atomic e^-	22
4.4.1	CERATRON@化研	22
4.4.2	CHANNELTRON@化研	22
4.4.3	CHANNELTRON@タンデム	27
5	Experimental Procedure	40
5.1	粉ふりについて	40
5.1.1	MSL において	40
5.2	μ SR	42
5.3	ディグレーダーの調整	42
5.4	Energetic e^+	43
5.4.1	初期調整	43
5.4.2	signal 異常の発見と改善	44
5.4.3	測定を開始	46
5.5	Atomic e^-	47
6	Simulation	48
6.1	ミュオニウムの粉末中での振る舞い	48
6.2	高エネルギー陽電子	48
6.3	低速電子	48
7	解析	49
7.1	μ SR	49
7.1.1	ミュオニウム生成率の算出法	49
7.2	高エネルギー陽電子	49
7.3	低速電子	49
8	Discussion	50
9	Conclusions	51
10	Prospects	52
10.0.1	Powder	52
10.0.2	Degrader	52
	Acknowledgement	53
A	真空中への muonium の放出の過去の実験	54
A.0.3	金属フォイルを用いた muonium の真空への引き出し	54
A.0.4	powder を用いた muonium の真空への引き出し	54
A.1	我々の用いる target	55
A.1.1	AEROSIL の性質 [12]	55
A.1.2	diamond, Al_2O_3 powder の性質	57
A.2	Diffusion of Muonium inside Silica powder	59

A.2.1 Overview.	59
A.2.2 Motion of Muonium atoms in spherical silica particles.	59
A.2.3 Motion of Muonium atoms in fine powder layers.	62
B 電子、陽電子の物質中での散乱	64
Bibliography	65
List of Figures	67
List of Tables	68

Chapter 1

Introduction

1.1 Motivation

ミュオニウムとは μ^+ と e^- とが水素原子ライクな束縛状態になったものである。 μ^+ は陽子と違って複合粒子ではないので、水素原子よりも単純な系である。その構造の単純さから、様々な基礎物理の対象となった。過去には hyperfine structure や Lamb shift や 1S-2S 遷移の測定のような、QED の検証が行われてきた。また、真空中に熱的に放出されたミュオニウムをレーザー解離することにより、超低速ミュオンビームの生成も行われている。さらには、ミュオニウムから反ミュオニウム (μ^-e^-) への自発的転換事象の探索のような、レプトン数非保存という、標準模型を越える物理へと発展してきている。

われわれはとくに、このミュオニウム・反ミュオニウム転換に興味を持った。ミュオニウム・反ミュオニウム転換は物質中では起こらない。したがって、真空中にミュオニウムを引き出さなければならない。そこで、われわれはミュオニウムがたくさん放出されるターゲットを探す実験をすることとなった。

1.2 Review

1.3 Overview

我々は素粒子標準模型を越える物理へのきっかけになり得る実験として、ミュオニウム＝反ミュオニウム転換事象の探索に強い関心を持っている。転換が可能だとしても真空中でしか起こらないことが予想されており、ミュオニウムを多数真空中に生成することが極めて重要である。我々の目標は転換事象の探索に有効な標的の発見である。本研究では Al_2O_3 、グラファイト、ダイヤモンド、 SiO_2 の粉末標的を候補とし、入射正ミュオンに対して真空中に拡散してくるミュオニウムの割合を測定する。そのような放出率の高い標的は、高強度ミュオンビーム源の開発や他の多くの重要なミュオニウムを用いた研究にも貢献するはずである。

実験の概略図を図 1.1 に示す。 μ ポートの μSR スペクトロメータを利用させていただき、その中心に標的と真空槽を設置する。ビームを各種標的に当て、まずミュオンスピン回転によってミュオニウムの生成量を確認する。次に真空中に拡散してきたミュオニウムからの信号の数を測定する。真空中のミュオニウムを同定するために、次の 2 種類の方法を試みた。

- ミュオニウム中の正ミュオンが崩壊してできる数十 MeV の高エネルギー陽電子をホドスコープカウンタで検出する。

- 正ミュオンが崩壊して残された 10eV 程度の低エネルギー電子を静電場で加速し、電子増倍管で検出する。

残念ながら、低エネルギー電子の検出は、検出器に必要な高真空が得られず、本実験直前に断念せざるを得なかった。しかし事前の予備実験などについては本レポートで詳しく説明する。

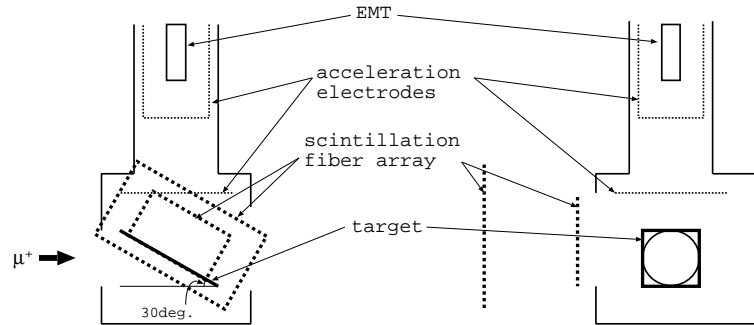


Figure 1.1: 実験の概略図

Chapter 2

粉末の選択

粉末は過去の実験を調べ、真空中にミュオニウムが拡散してくるよう、導体ではないもの、粒径が小さく表面積の大きいものを基準に探した。まず、過去の実験でよくターゲットとして選ばれている SiO_2 を過去の実験と比較するための標準ターゲットとして2種用意した。一つは Cab-o-sil の EH5 で、これは過去の実験によく用いられている。もう一つは AEROSIL の 300 で、これは試験的に使用した。粒径はともに 7nm である。詳しくは後の Appendix A で述べる。

また真空中ではないがパウダーからミュオニウムが拡散することの知られている Al_2O_3 もターゲットとして用いることにした。これは BaikaloX の CR125 を用意した。粒径は 30nm である。

さらに特に理由はないが、半導体だとどのような結果が出るか挑戦的な意味で調べてみたかったので、Diamond ターゲットを使うことにした。これは microdiamant の DP558 を用意した。粒径は 50nm である。

また、Background Estimation のために厚さ $50\mu\text{m}$ のアルミ箔を用いる。

Chapter 3

Apparatus

3.1 Beamline

我々はKEKのMSLで得られるパルス状のミュオンビームを利用させていただいた。

3.1.1 概要

100MeV/cまでの正負両方の電荷のミュオンを供給する。2次粒子生成標的に陽子ビームをあて、生成した π 中間子を入射系電磁石で集め、超伝導ソレノイドコイルを用いて効率よく輸送する。その間に π 中間子はほとんどミュオンに崩壊し、出てきた粒子を取出系電磁石で集めターゲットに照射される。

3.1.2 表面ミュオンビーム仕様

電荷	正のみ
粒子のエネルギー	2.3MeV
粒子の運動量	26MeV/c
運動量の広がり (FWHM)	3MeV/c
ビームの空間的広がり (FWHM)	60mm
ビームパルスの周波数	20Hz
ビームパルスの時間幅	50nsec
粒子の数 (内径 20mm のコリメーター使用時)	65/pulse
スピン偏極度	100%

3.1.3 π 中間子生成標的

直径 3cm 長さ 12cm のベリリウム。表面ミュウオンの生成を多くするために 4cm の切抜きがある。

3.1.4 陽子ビーム

陽子シンクロトロン加速器の特長は、図 3.1 に示すように、前段加速器→線形加速器→小形のシンクロトロン「ブースター」と大型のシンクロトロン「主リング」で段階的に陽子を加速することである。主リングはエネルギー 120 億電子ボルト、4 秒に 1 回加速を行い、毎秒約 1 兆個の陽子（電流に換算すると 0.2 マイクロアンペア）が加速される。

ブースターは、陽子ビームを毎秒20回、5億電子ボルトまで加速することができ、4秒あたり9パルスのビームが主リングに送られる。残りの9割近くのビームは「中性子中間子研究施設」に送られている。

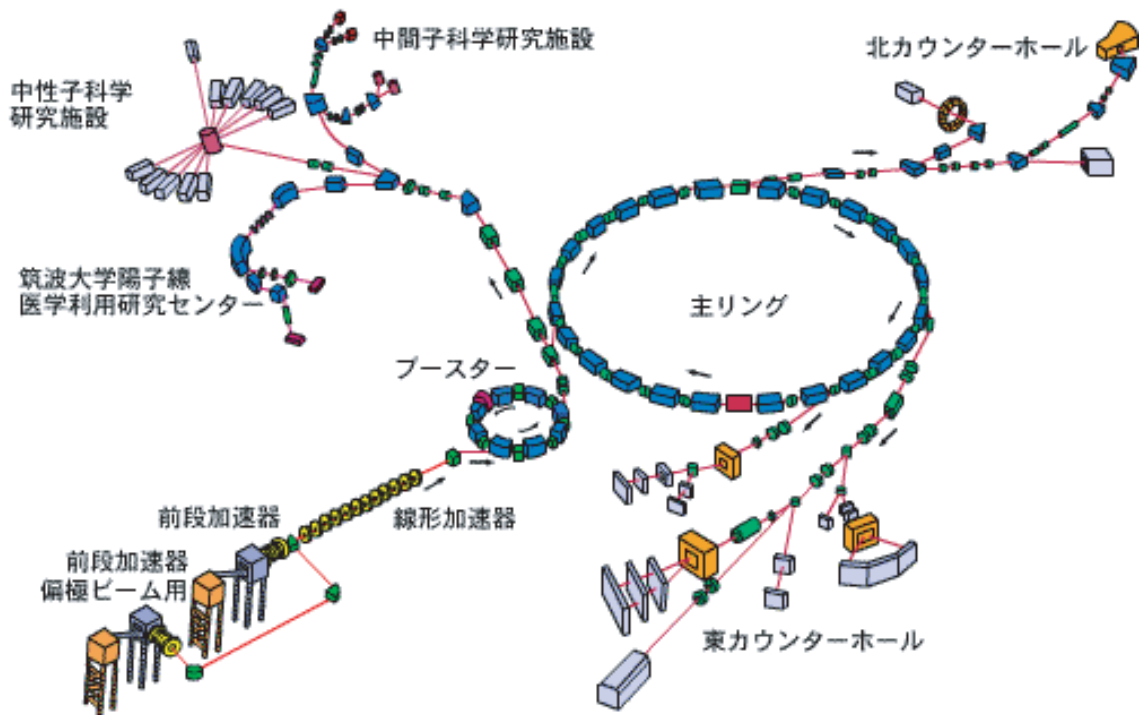


Figure 3.1: 陽子シンクロトロン加速器

3.1.5 入射系電磁石

ミュオン生成標的から超伝導ソレノイドコイルまでの4重極電磁石3台 ($\mu Q1$, $\mu Q2$, $\mu Q3$)と偏向磁石1台 ($\mu B1$)からなる。ミュオン生成標的で発生した π 中間子を集め収束し、特定の運動量を持つ粒子を超伝導ソレノイドコイルへ入射する。反応せずに通ってしまった500MeV陽子や高い運動量の2次粒子はビームダンプで止められる。

3.1.6 超伝導ソレノイドコイル

長さ6mのソレノイドコイル内には5teslaの強い磁場がかかり、入射してきた粒子を広げることなく輸送する。ここで多くの π 中間子はミュオンに崩壊する。

3.1.7 取出系電磁石

4重極電磁石2台 ($\mu Q4$, $\mu Q5$)のより超伝導ソレノイドコイルから出てきた粒子を集め、偏向磁石 ($\mu B2$)で粒子の運動量を選択する。その直後に置かれた静電セパレーターによりミュオンを電子・陽電子から分離し、4重極電磁石 ($\mu Q6$)をへて、さらに偏向磁石 ($\mu B3$)により、粒子の種類分離、運動量を選択を行う。最後の4重極電磁石2台 ($\mu Q7$, $\mu Q8$)により、ミュオンビームをターゲットへと収束させる。

3.2 μ SR Spectrometer

KEK、MSLの μ ポートの μ SRスペクトロメーターを利用させていただいた。超伝導ヘルムホルツコイル (SHC) を持ち、ビーム方向に強い磁場をかけれる。図 3.2 に示すように前方、後方 16 対のプラスチックシンチレーターがありミュオンスピン回転によってミュオニウムの生成が確認できる

3.2.1 μ SR スペクトロメーターの概略図

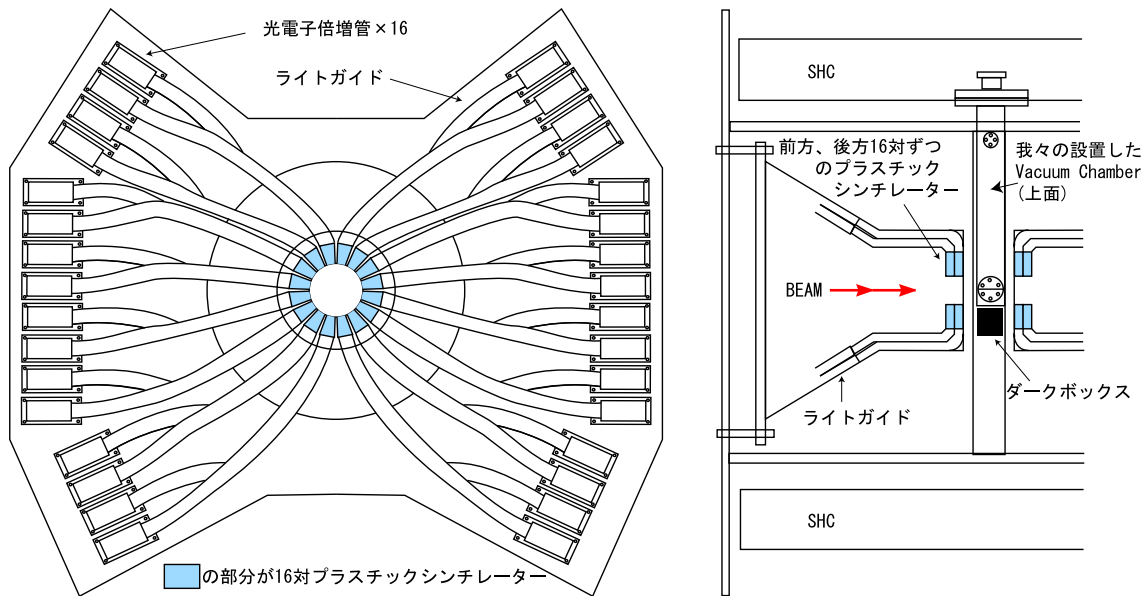


Figure 3.2: μ SR スペクトロメーター

3.2.2 μ ポートの μ SR スペクトロメーターの仕様

主コイル	SHC
縦磁場 (ビーム進行方向)	0gauss
横磁場 (ビームに垂直方向)	35gauss
自由空間 (ビーム方向)	98mm
自由空間 (ビームに垂直方向)	直径 96mm
検出器の種類	プラスチックシンチレーター
検出器の個数	前方 16 対、後方 16 対
検出器立体角	16 %
測定時間の範囲	0~32 μ sec
TDC 時間分解能	16nsec

3.3 Vacuum Chamber

上に Vacuum Chamber の概略図 3.3 を示した。材質は磁場を考えてアルミニウム。 μ SR スペクトロメーターの中央の隙間に合わせて設計した。窓にはマイラが貼り付けてある。

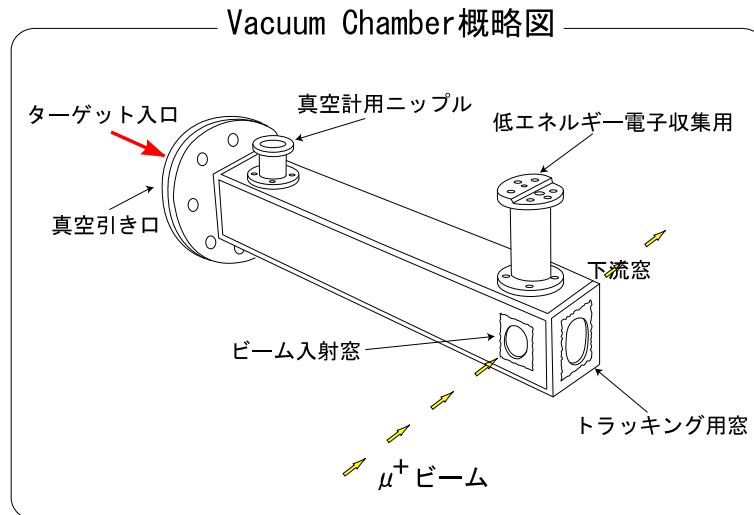


Figure 3.3:

詳細な設計図 3.4 を次に示す。

3.4 ターゲット台

3.4.1 ターゲットホルダー

ターゲットホルダーのサイズは、ビームの幅が $\phi 20\text{mm}$ で、ディグレーダーにおける散乱によってビームが 0.1rad 広がると考えて設計した。結局縦 69mm 横 54mm となり、枠は 2mm で作ることにした。できるだけホルダーを水平につくりたかったので、1枚の板からアクリルカッターで切り出すことにした。板は幅 2mm のアクリル板を用いた。

バックリングには厚さ $7.5\mu\text{m}$ のカプトン箔を用いてアラルダイトで貼り付けた。ターゲットホルダーは全部で5枚製作した。

3.4.2 ターゲット台

ターゲット台の設計は、ディグレーダーを通過したビームがターゲットホルダーの枠に当たらないこと、またトラッカー窓から見てターゲットホルダーの垂直 $3\sim 4\text{mm}$ 上が窓の円の中心にくることに注意した。その結果以下のような設計となった。すべてアクリル板を用いて製作し、帯のこ盤で切り出した。30という角度は支え棒の高さで作ることにした。(Figure 3.5,3.7 参照。)

3.5 ふるい

3.5.1 ふるい

ふるいの製作を行なうにあたって留意したことは、できるだけ粉を均一に盛ることができるようにする、ということである。そのため第一に考えたことはターゲットホルダーよりも広い面積をもつ網を取り付けることで、第二には高いところから粉をふるということだった。そこで以下のような設計をして製作に取り掛かった。粉をふるときに違う種類の

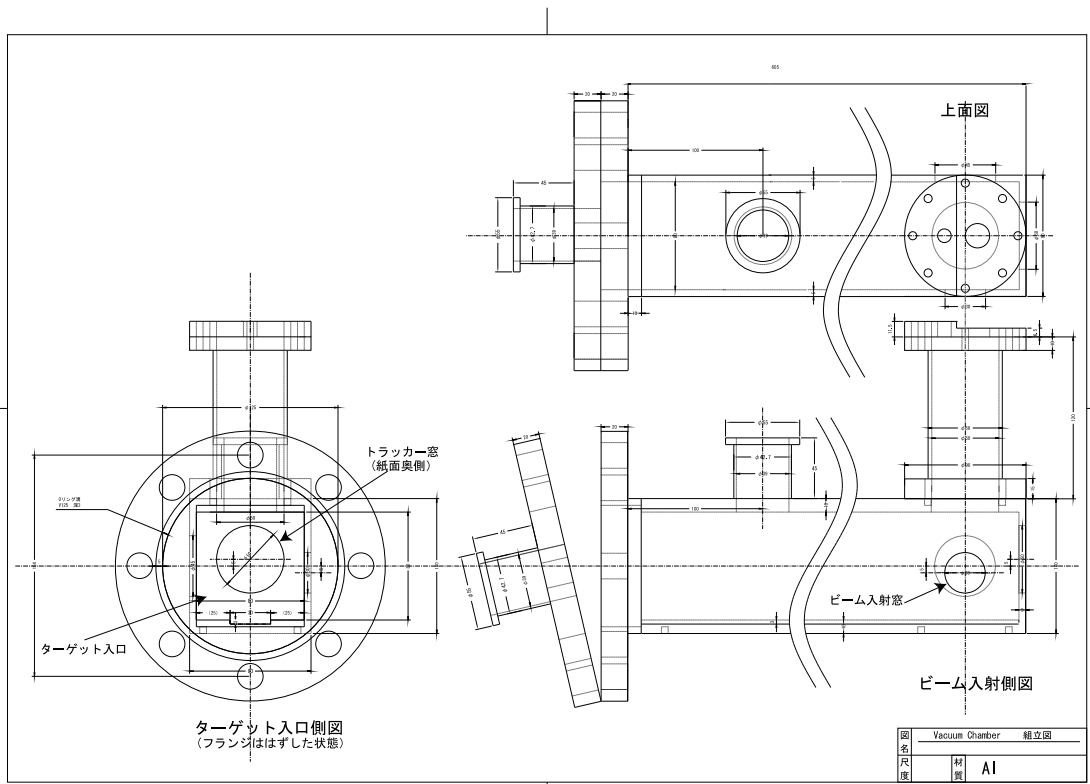


Figure 3.4: Vacuum Chamber 設計図 Preview



Figure 3.5: ターゲット台

粉が混じらないようふるいは3種製作した。ダイヤモンドパウダーは手に入った量が18gと少ないこともあり、網の面積は小さくした。粉は静電気の影響を受けやすいので、材質はアルミニウムを用いた。

3.5.2 ふるい台

粉は小さく風の影響を受けやすいので覆いをつけることにした。覆いは中を見ることができるよう acrylic 板で製作した。また、粉を実際にふってみた感じによると、ふるいの高さは20cm以上高くしても意味が無いと思われたので、台の高さは20cmにすることにした。(Figure 3.6,3.7 参照。)

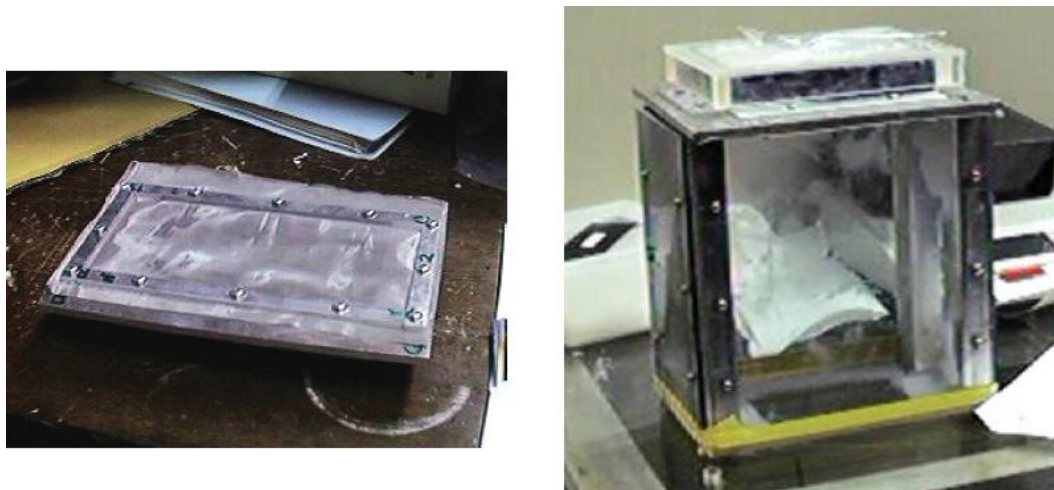


Figure 3.6: ふるいとふるい台

3.5.3 網の選択

手軽に手に入った5種類の網(60,100,150,250,400 Mesh/inch)を用いて簡易な小さなふるいを製作し、それで実際に粉をふってみた。試験的にふってみた粉は、 $\text{SiO}_2\text{-EH5}(0.03\text{g}/\text{cm}^3)$ 、 $\text{SiO}_2\text{-AEROSIL300}(0.06\text{g}/\text{cm}^3)$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-BAIKALOX}(0.06\text{g}/\text{cm}^3)$ 、 $\text{Cu}(2\text{g}/\text{cm}^3)$ である。 $\text{Diamond-DP558}(0.5\text{g}/\text{cm}^3)$ は手に入った量が少ないので推測から網を選択した。

実際に粉をふってみて分かったことは、密度の小さい粉は粒径が小さくても落ちにくいことである。また SiO_2 の場合、細かい編目の網でふると、網の裏側で静電気によって塊を形成し、結局大きな塊として落ちることがあった。

よってそれぞれの粉をそれぞれの網でふってみた結果、約30分で目標の重さ(500mg)をふるることができる網は、 $\text{SiO}_2(\text{EH5, AEROSIL})$ が60Mesh/inch、 Al_2O_3 が100Mesh/inch、Diamondが250Mesh/inchであった。

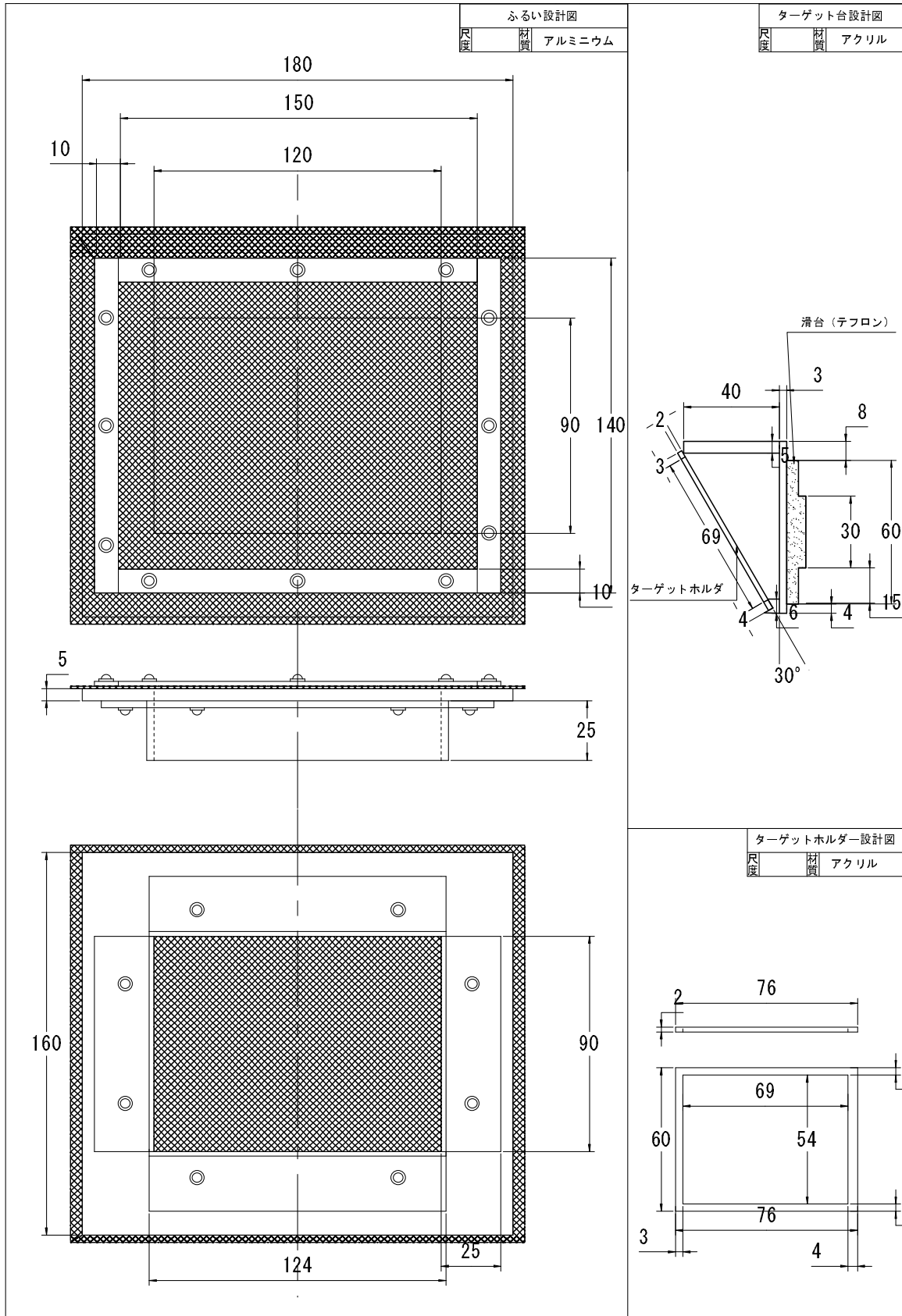


Figure 3.7: ふるい、ターゲットホルダー、ターゲット台設計図

3.6 Sci-Fi Hodoscope

3.7 Atomic e^- Detector

ミュオニウムの μ^+ が崩壊すると、 μ^+ の周りを回っていた e^- が取り残される。そのエネルギーは Fig. のようになっている。その e^- を静電系で加速・収束し、2次電子増倍管で検出する。2次電子増倍管には最初 CERATRON (.....) を使う予定であったが、テストがうまくいかなかったため CHANNELTRON (4869) を使用した。

概略図を Fig. 3.8 に示す。CAGE には $-100V$ をかける。LENS と CHANNELTRON の TOP には $+1000V$ をかける。CAGE は直径 $120\mu\text{m}$ の BeCu 線を用いた。LENS は円筒形の電極になっており、ターゲットに近い方の底面は CAGE と同じ BeCu 線で網目をつくった。この LENS については Section 6.3 で議論する。また、CAGE の働きは2つあって、1つめは e^- を加速・収束させる働き、2つめは μ^+ が崩壊してできる e^+ がターゲットや壁に当たると2次電子をたたき出すので、それを跳ね返す働きである。その2次電子のエネルギーは Fig. のようになっている [2]。

3.8 DAQ

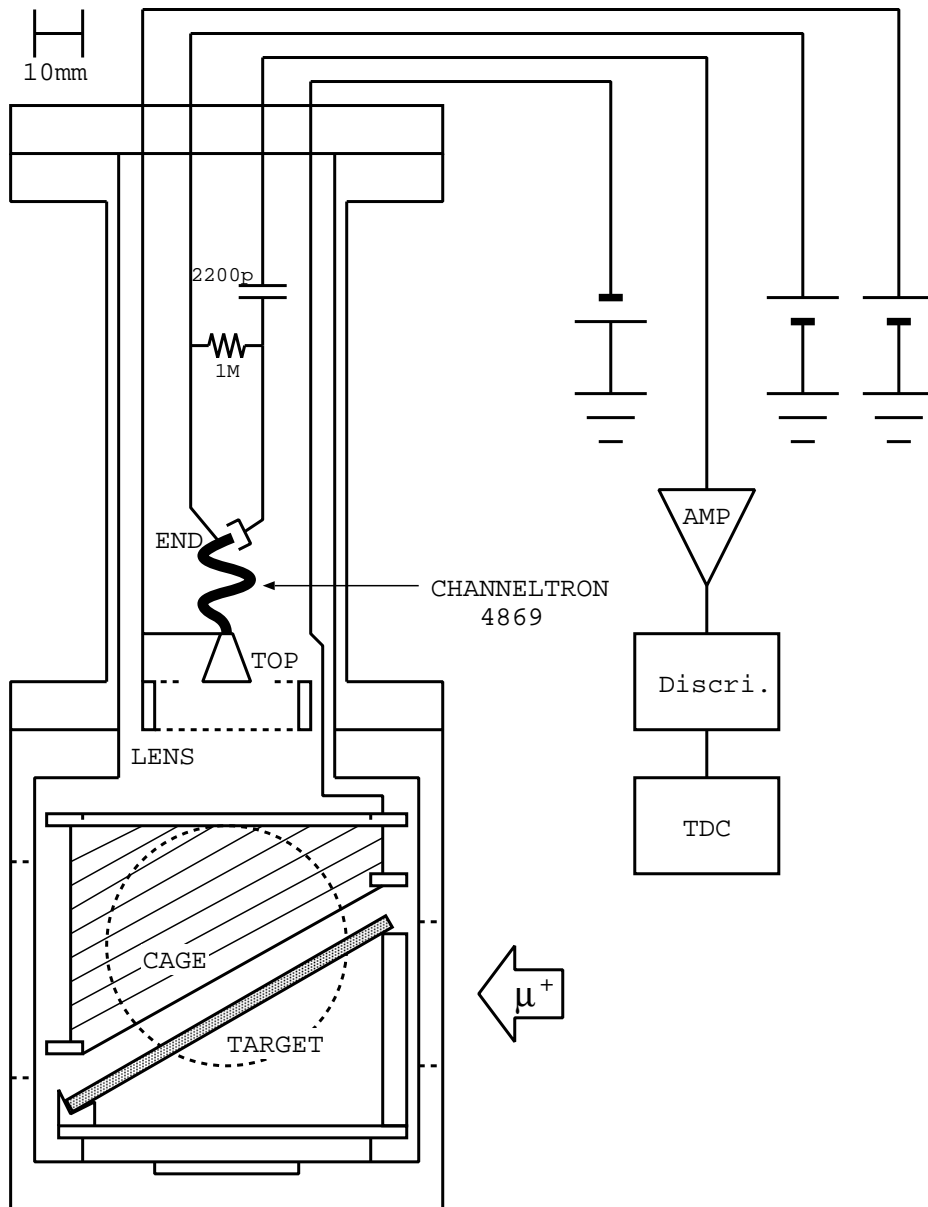


Figure 3.8: 低速電子の検出器

Chapter 4

Experiment in Kyoto

4.1 Target

4.1.1 密度測定

SiO₂(EH5, AEROSIL300), Al₂O₃, Diamond、各々の粉について実験に使用する網を用いて密度を測定した。EH5, AEROSIL, Al₂O₃においては、カメラのフィルムケースを使い、Diamondについてはアルミ板で小さい容器を製作して、それいっばいに粉を盛ることによって密度を測定した。

powder		diameter (nm)	purity (%)	density (g/cm ³)	used mesh (mesh/inch)
SiO ₂	AEROSIL 300	7	99.9	4.2×10^{-2}	60
	CABOT EH5	7	99.8	3.3×10^{-2}	60
Al ₂ O ₃	BAIKOWSKI Baikadox CR125	30	99.98	6.2×10^{-2}	100
Diamond	microdiamant DP558	50		4.5×10^{-1}	250

Table 4.1: Powder properties

4.1.2 事前のテスト

あらかじめ小さく簡易なふるいを作り、それを用いて粉ふりのテストをした。各々の粉でふるいからの落ち方が違い、SiO₂やAl₂O₃は密度が小さく軽いため落ちにくいので、強い振動をふるいに与え、Diamondは密度が大きく落ちやすいので弱い振動をふるいに与えることにした。

また、ターゲットホルダーに盛った粉の強度もテストしてみた。軽い振動を与えたり、軽く息を吹きかけたりしてみたが、それによると慎重に扱えば粉は崩れないように思われた。またロータリーポンプで軽く真空引きも行なったが問題ないように思われた。

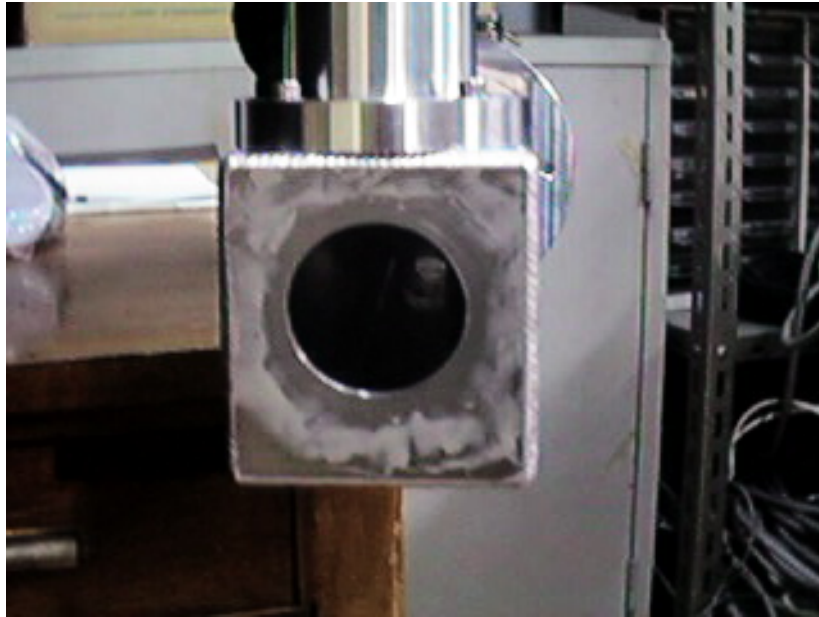


Figure 4.1: 真空槽のマイラ窓 (トラッカー側)

4.2 Vacuum Chamber

4.2.1 マイラはり

注文していた真空槽が到着すると、まず、マイラ窓の膜はりを行った。Fig. ??? のように、真空槽には3つのマイラ窓があるが、そこに、 $50\ \mu\text{m}$ 厚のマイラをアルルダイト・スタンダードではりつけた (Fig. 4.1)。

マイラは窓より2 cm くらいのマージンをとっておいた。そして、ドライヤーで真空槽とアルルダイトを熱してからはりつけた。また、アルルダイトが窓の縁につくとそこに不均一な力がかかるため、窓の縁までのびないように気をつけた。

4.2.2 リークテスト

アルルダイトが乾いたら今度はリークテストである。タンデムのヘリウムリークディテクターをお借りして行った。

真空槽を組み立てて (Fig. 4.2)、リークディテクターと接続した。真空計のところには cold cathode のゲージをつけた。ポンプで引いてみたところ、ロータリーではうまく引けていたように見えたが、ターボ分子ポンプに切り替えると、いきなり止まってしまった。どこかで大きなリークがある。

そこで、CHANNELTRON 用のコネクタのフランジをはずして、ガイスラー管 (Fig. 4.3) をのせて再び引いてみた。すると、ターボもうまく動き、ヘリウムでリークを探してみた。膜にかけると良く鳴るが、ほかのところではリークはなかった。どうやら、コネクタ辺りが犯人のようである。

そこで、コネクタのフランジを戻し、真空計の接続部にガイスラー管をつけて引いてみた。すると、1 Torr くらいまでしか引けない。まず、コネクタの O リングのところにエタノールをかけてみても異常なし。つぎに、コネクタにプロパンガスをかけてみるとガイスラー管が反応した。2つのコネクタのうち小さい方のみにかけると異常はないが、大

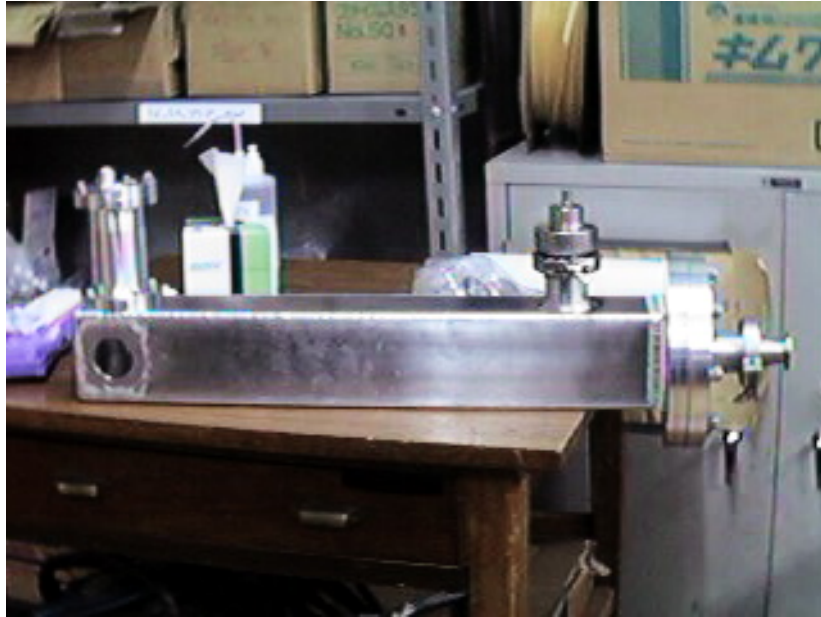


Figure 4.2: 組み上がった真空槽

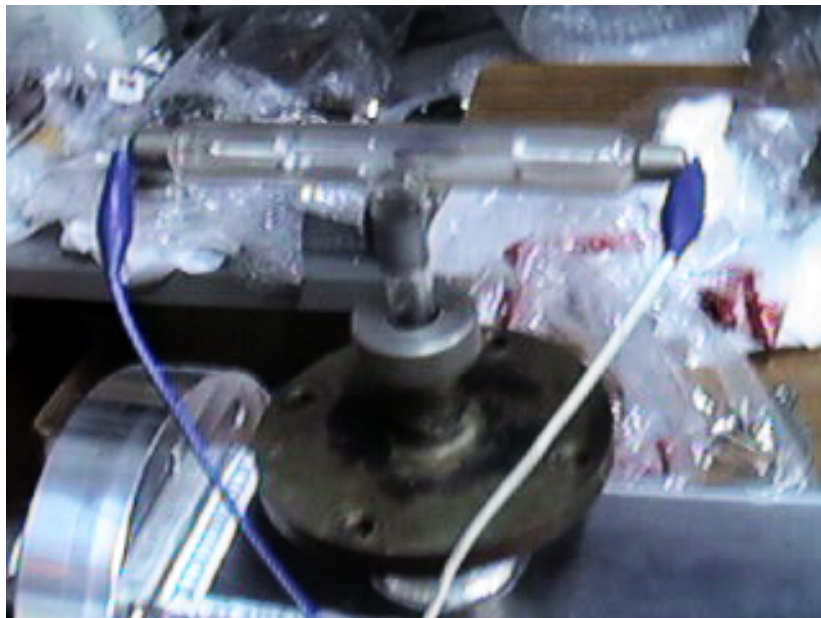


Figure 4.3: ガイスラー管



Figure 4.4: コネクタのフランジ。大きい方のコネクタをはずして別のものでふたをしてある。

きい方のみにかけると大きく反応した。

そこで、大きい方のコネクタをはずして別のものでふたをして (Fig. 4.4) 。引いてみるとうまく引けた。これで、大きい方のコネクタが悪いと断定した。

大きい方のコネクタには高電圧端子が 5 つついていたが、フランジを作り直して SHV にかえたため、高電圧端子は 2 個になってしまった。

新しいコネクタにかえてもう一度リークテストをしてみると、異常はなくなった。

これで、真空槽のテストは終了した。

4.3 Energetic e^+

4.3.1 Sci-Fi 伝送効率の曲率依存性

我々の実験では Sci-Fi を曲げ、幅 9cm の暗箱に入れて用いる必要がある。伝送効率を保ったままどの程度まで Sci-Fi を曲げられるか知るための予備実験を行なった。本来は ADC を用いて、fiber の先に届く光量の変化を調べるのが望ましいが、ここでは簡単のため source(^{90}Sr) と scaler を用いて、伝送効率の曲率依存性をテストした。実験図を fig.4.3.1 に示す。

Figure 4.5: Sci-Fi 伝送効率の曲率依存性のテスト

我々がこのテスト、本実験で用いた Sci-Fi はクラレ製、scsf-78M である。Sci-Fi シートは、fiber が二層になっており、各層に 12 本の fiber が並んでいる。ただし、テストの途中で 3 本が折れてしまった。真っ直ぐに fiber を伸ばしたときの attenuation は数 meter のオーダーで起こることが知られている。discriminator の threshold は 50mV に固定し、

Table 4.2: Sci-Fi 伝送効率の曲率依存性テスト。単位が inch になっているのは、ユニバーサル基盤を用いたため。

時間 [sec]	曲率半径 [inches]	Counts
30	2.5	2,913,575
30	∞	2,992,572
30	2.0	2,643,271
30	1.5	2,878,330
30	1.0	1,895,183(3本折れた)
30	1.5	1,842,420(3本折れた)
30	1.5	2,325(光漏れ、sourceなし)
30	1.5	2,073,860(3本折れた)
30	∞	2,164,995(3本折れた)
30	0.5	1,216,658(3本折れた)
30	∞	1,6 ^{**} , ^{***}

output pulse の width は 50nsec とした。PMT にかけた HV の大きさは記録が残っていない。

Sci-Fi のシートを曲げ、その角度を 90 度に保ったまま、曲げている部分の曲率半径を変化させた。Sci-Fi の一方を PMT に接着し、残る一方を source にはりつけた。

結果を表 4.2 に示す。曲率半径が 1 inch までは、伝送効率に曲げおよび影響が見られない。一方、いったん曲率半径を 0.5 inch にすると fiber が損傷を受けて伝送効率が回復しないことも分かる。本実験では、もっとも曲率半径の小さい部分で 1 inch 以上になるように Sci-Fi を配置した。

4.3.2 MAPMT の特性 (Discriminator Threshold の決定)

本実験では Sci-Fi からの光を MAPMT (Multi-Anode PMT) で受け、discriminator を通して TDC に入力する。そこで、discriminator の threshold を設定する必要があり、そのためには Sci-Fi からの信号の性質を知らなくてはならない。

Fig.4.6 に Sci-Fi からの光を MAPMT で受けたときの信号の大きさの分布を示す。横軸は ADC の channel であり、pulse height と直線関係にある (ここで用いたのは charge sensitive な ADC だが、信号の波形が charge によらないと仮定すれば、pulse height とみなせる)。

このヒストグラムでは、左端に鋭いピークがある。つまり、小さなパルスがたくさん来ている。このピークの正体については、幾つかの仮説がある。一つは、cross talk 説で、fiber からの光が正面の anode ではなく周囲の anode に入った時の信号がピークを作るといふ説である。ほかに、電子が fiber の中心から離れたところを通過したときの信号が正体、という説もある。解析の章で述べられる通り、本実験のデータの解析は cross talk 説を支持している。

横軸は ADC の channel なので pulse height との正確な関係は分からない。本実験での discriminator の threshold は、oscilloscope で見た波形をもとに決定した。oscilloscope で信号を見ると、ピークに対応すると思われる濃い波形が現れる。その濃い波形の高さはおおよそ -70mV 程度であり、threshold はこの値を基準にして調節した。これについては本実験の解説でより詳しく説明する。

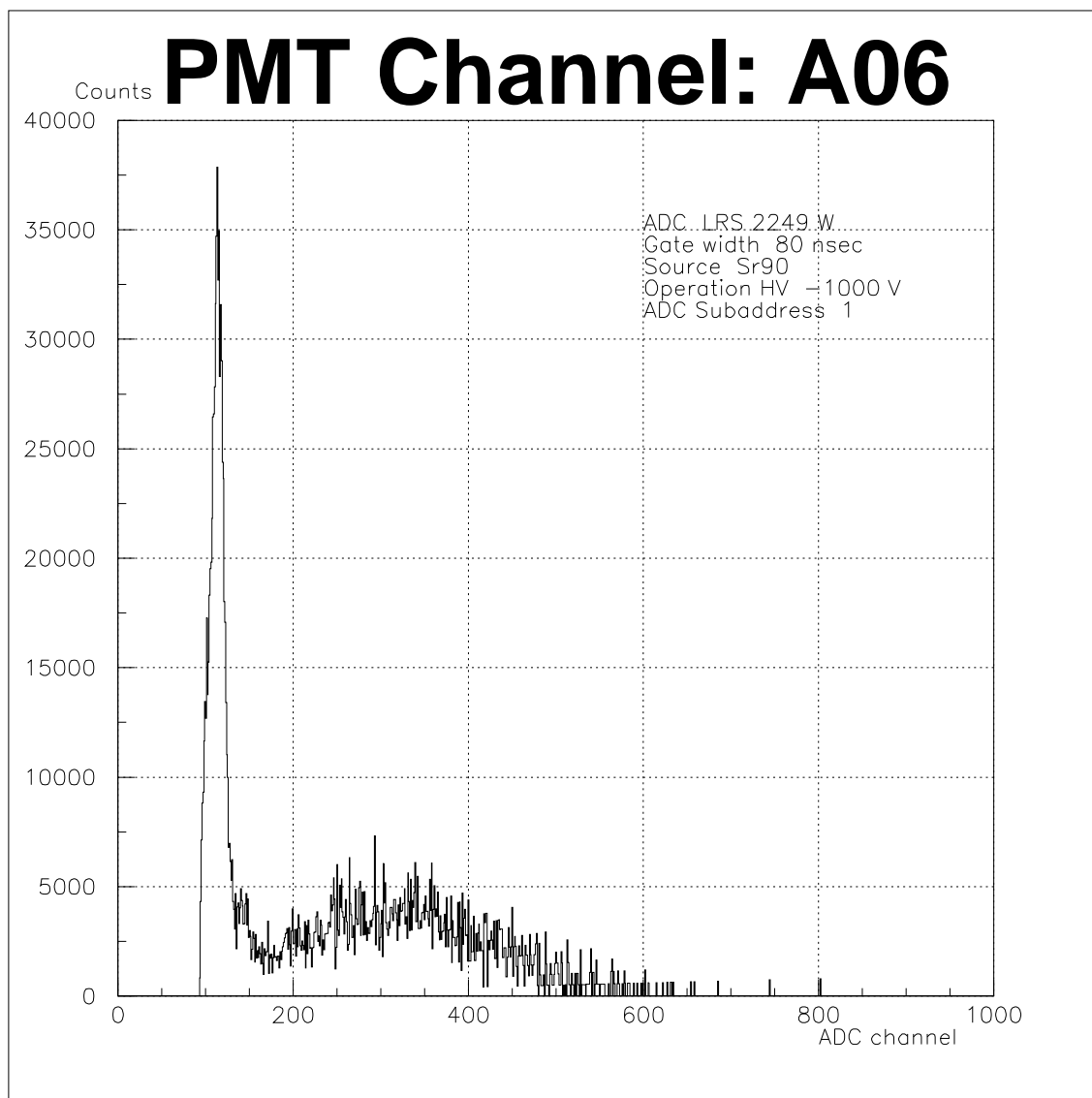


Figure 4.6: MAPMT の信号

V_{TOP} [V]	V_{END} [V]	$V_{COL.}$ [V]	I_W [A]	
0	3000	3100	0	
500	3500	3600	0.3	
500	3500	3600	0.4	ツェナーダイオードをはずした。

Table 4.3: CERATRON のテスト (1日目)。 I_W はタングステンの電流。

V_{TOP} [V]	V_{END} [V]	$V_{COL.}$ [V]	I_W [A]	
400	3000	3100	0.4	
500	3000	3100	0.4	END と電源の間に 100 k Ω の抵抗を入れた。
500	3500	3600	0.6	

Table 4.4: CERATRON のテスト (2日目)。 I_W はタングステンの電流。

4.4 Atomic e⁻

4.4.1 CERATRON@化研

Section 3.7 では、CHANNELTRON を使ったと書いたが、もともとは CERATRON を使う予定であった。ここでは、そのテストについて述べる。

実験は化学研究所原子核研究施設の CARRACK グループのテストチェンバーをお借りして2日間行なった。概略図を Fig. 4.7 に示す。

このようにタングステン線に電流を流して加熱し、熱電子を放出させて、CERATRON で検出しようというわけである。このときの CAGE の電位は 0V である。

また、CAGE を -100V にしてシグナルがなくなるのを見る。(しかし、今回はこの実験を行なっていない。)

1日目は Table 4.3 のように電圧をかけてみたが、何もシグナルは見えなかった。また、CERATRON にはほとんど電流が流れなかった ($\approx 1 \mu\text{A}$)。真空度は終始 1.0×10^{-5} Torr 程度であった。

2日目は1日目とは違う CERATRON を使ってみた。だが、取り替えるときに1日目の CERATRON を割ってしまった。Table 4.4 のように電圧をかけてみたが、またもやシグナルは見えず、CERATRON には電流が流れなかった。真空度は終始 1.0×10^{-5} Torr 程度であった。

このときわれわれは今回の失敗の原因として、

- 静電系が悪く、電子が CERATRON に入らなかった。
- CERATRON が死んでいた。

のどちらかだろうと思い込んでいた。

4.4.2 CHANNELTRON@化研

今度は同様のセットアップで CERATRON を CHANNELTRON にとりかえて行った。概略図を Fig. 4.9 に示す。しかし、HV 電源やプリアンプは化研のものをお借りして行った。ここでは LENS もつけていない。

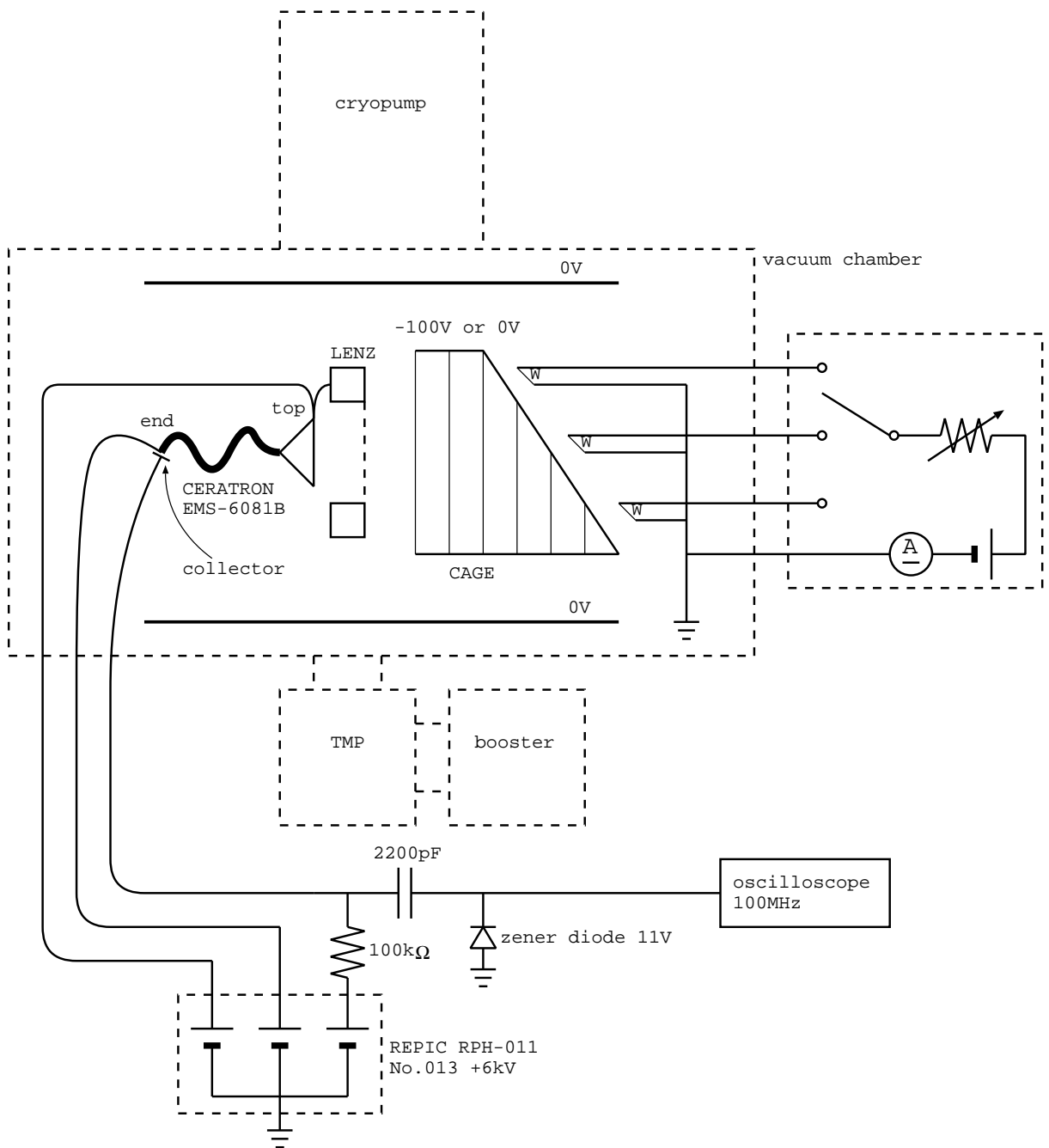


Figure 4.7: CERATRON のテスト

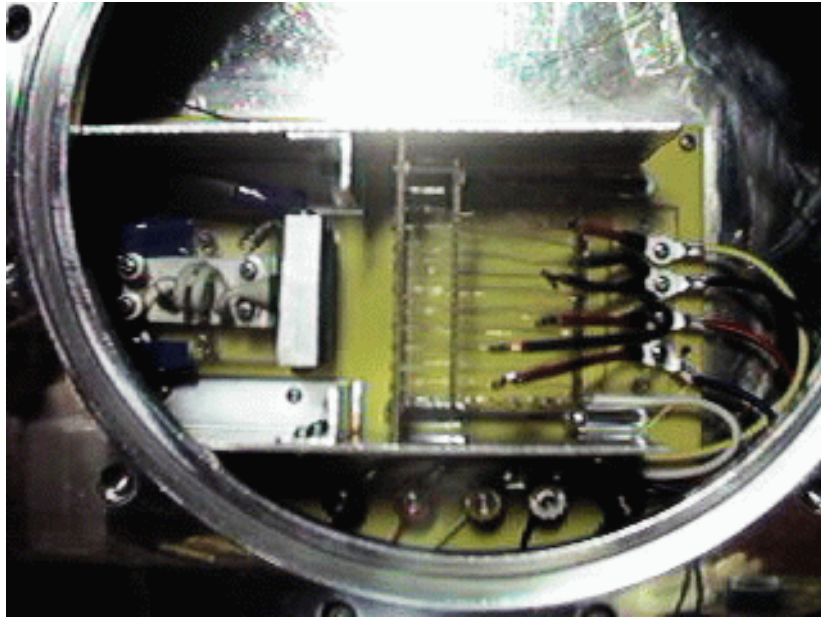


Figure 4.8: CERATRON のテストの写真

真空度が 2.0×10^{-5} Torr 程度になったところで CHANNELTRON に電圧をかけた。

$$V_{top} \simeq 150[\text{V}]$$

$$V_{end} \simeq 2500[\text{V}]$$

CAGE は 0 V。CHANNELTRON には約 $22\mu\text{A}$ の電流が流れていた。

まずは中央のタングステンに 0.3 A くらい流して raw signal をみてみたが、何も見えない。そこで、プリアンプを通してみたが何も見えない。さらにタングステンの電流をあげていくと、0.7 A くらいでシグナルが見えた (Fig. 4.10)。raw signal でも見えた (Fig. 4.11)。

つぎに、CAGE に電圧をかけた。このときの中央のタングステンの電流は 0.675 A であった。CAGE の電圧を徐々に上げていくとシグナルは減っていき、

$$V_{CAGE} = -2.0[\text{V}]$$

のときには 90 % くらい減った。しかし、気になることに、CAGE の電圧を上げていくとすぐシグナルは減るのに、電圧を落とすと、シグナルが回復するのに数秒かかる。

ここで、定量的な測定に移る。Single Channel Analyzer (以下 SCA) と、Scaler を使う。SCA の Lower Level は Scaler のレートが爆発する寸前の、200 mV にセットした。これはオシロスコープで見ても妥当な値であった。

まず、ダークカレントのレートを Table 4.5 に示す。このように、電圧をかけておくと徐々にダークカレントが減ることが分かる。

つぎに、CAGE のテストを Table 4.6 に示す。中央のタングステンに約 0.69 A の電流を流した。しかし、電源に乾電池を使っているため、電流値は安定しなかった。この結果から、CAGE の電圧を上げていくとカウントレートは下がっていくが、ダークカレントよりは少し多いことが分かる。これは、回り込んでくる電子がいるためだと思われる。

ここで、タングステンの電源を安定化電源に取り替えた。そして、タングステンの電源の極性を反転して、シグナルがどう変わるかを見る。タングステンはそのすぐそばでグ

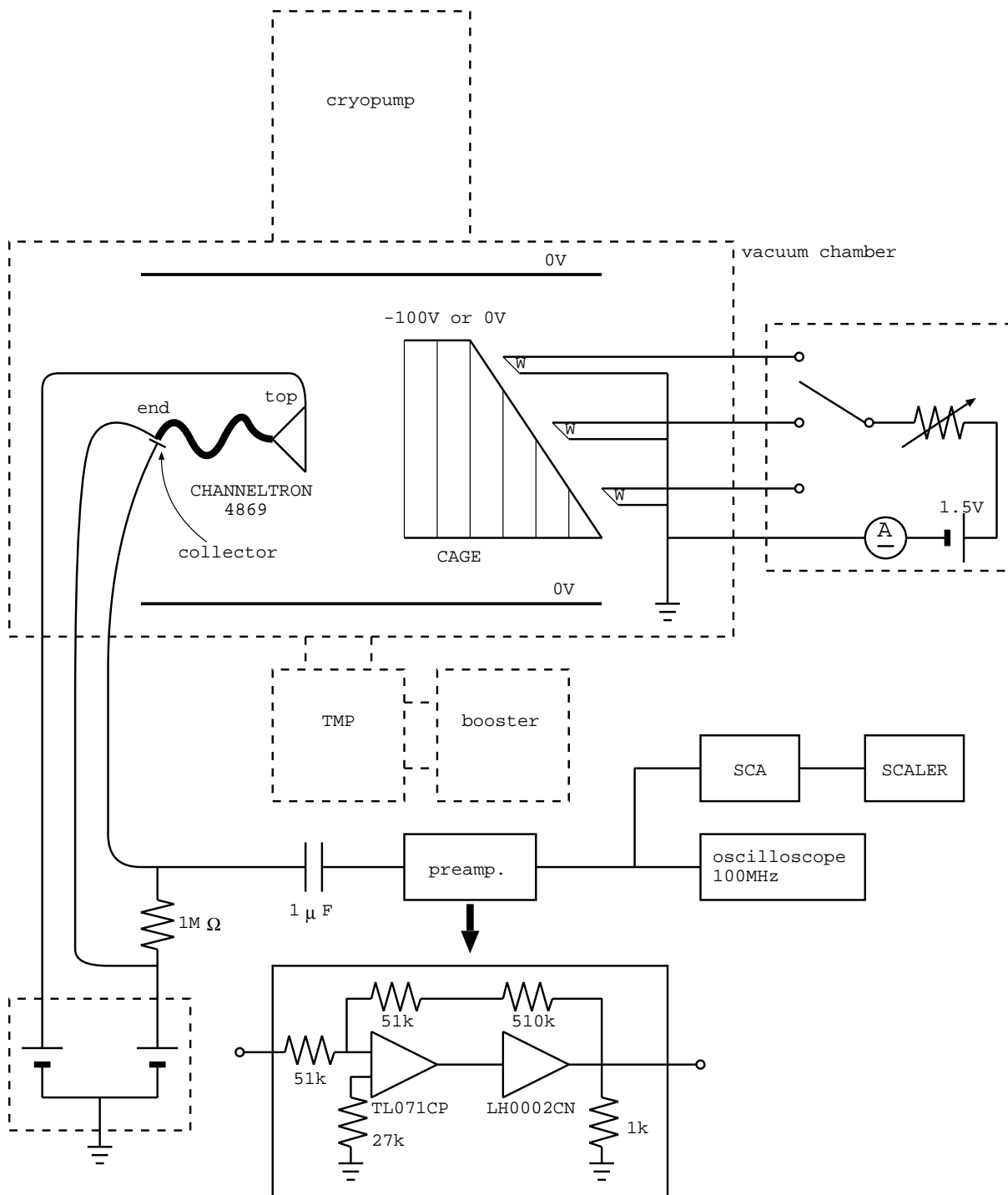


Figure 4.9: CHANNELTRON のテスト

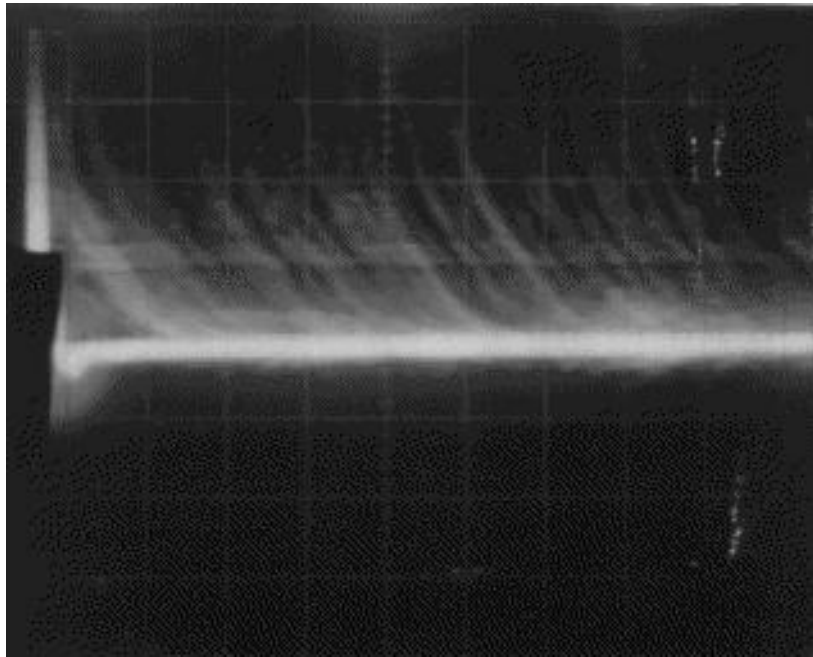


Figure 4.10: CHANNELTRON のシグナル (プリアンプアウト)。カップリングは 50Ω 。横軸は $10 \mu\text{s} / \text{div.}$ 、縦軸は $0.2 \text{ V} / \text{div.}$ 。

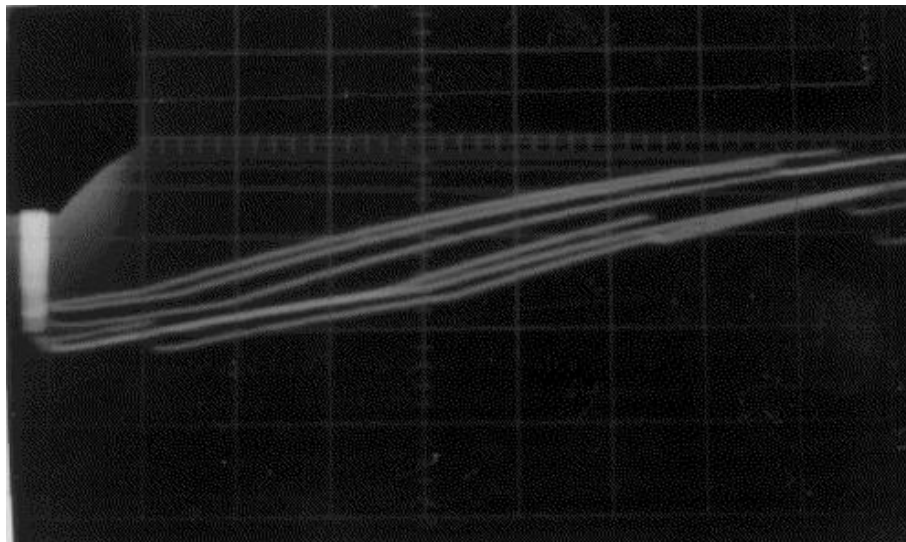


Figure 4.11: CHANNELTRON の生のシグナル。カップリングは $1 \text{ M}\Omega$ 。横軸は $50 \mu\text{s} / \text{div.}$ 、縦軸は $20 \text{ mV} / \text{div.}$ 。

電圧をかけてからの時間 [hours]	レート [/ 100 sec]	真空度 [$\times 10^{-5}$ Torr]
1.6	255	1.0
1.6	247	1.0
3.1	63	1.0
3.1	58	1.0
3.6	52	1.0

Table 4.5: CHANNELTRON のダークカレント

V_{CAGE} [V]	レート [/ 10 sec]
0.0	40.0 k
0.0	8.2 k
0.0	10.5 k
- 2.0	577
- 2.0	1457
- 3.0	454
- 3.0	154
- 3.0	173
- 5.0	105
- 5.0	14

Table 4.6: CAGE のテスト

ランドに落としているが、タングステンの抵抗でその電位が若干変わることが予想されるためである。Table 4.7 は、その結果を示す。タングステンがうまく熱平衡しないためか、カウントレートは全く安定しない。しかし、電源の極性を変えても大きな影響がないことは分かる。

以上で化研での実験は終了した。

4.4.3 CHANNELTRON@タンデム

化研でのテストも終わり、真空槽のコネクタでのリークが解決すると、いよいよ本番のセットアップでのテストである。概略図を Fig. 4.12 に、CHANNELTRON と LENS の写真を Fig. 4.13 に示す。

真空槽のテストと同じようにタンデムのリークディテクターのターボ分子ポンプをつかってみた。しかし、 1.7×10^{-4} Torr (cold cathode) までしか引けない。中村さんに相談すると、めくらのタップがあると奥の空間にある空気がにじみ出てくるとのことなので、おねじの方を削って再び引いてみた。それでも、 1.0×10^{-4} Torr (cold cathode) までしか行かない。そこで、中村さんのご厚意により、大きなターボ分子ポンプを使わせて頂けることになった。

でっかいポンプで引くとみるみるうちに引けて、 2.0×10^{-5} Torr (cold cathode) になったところで CHANNELTRON に電圧をかけた。

$$V_{top} = 300[V]$$

$$V_{end} = 2500[V]$$

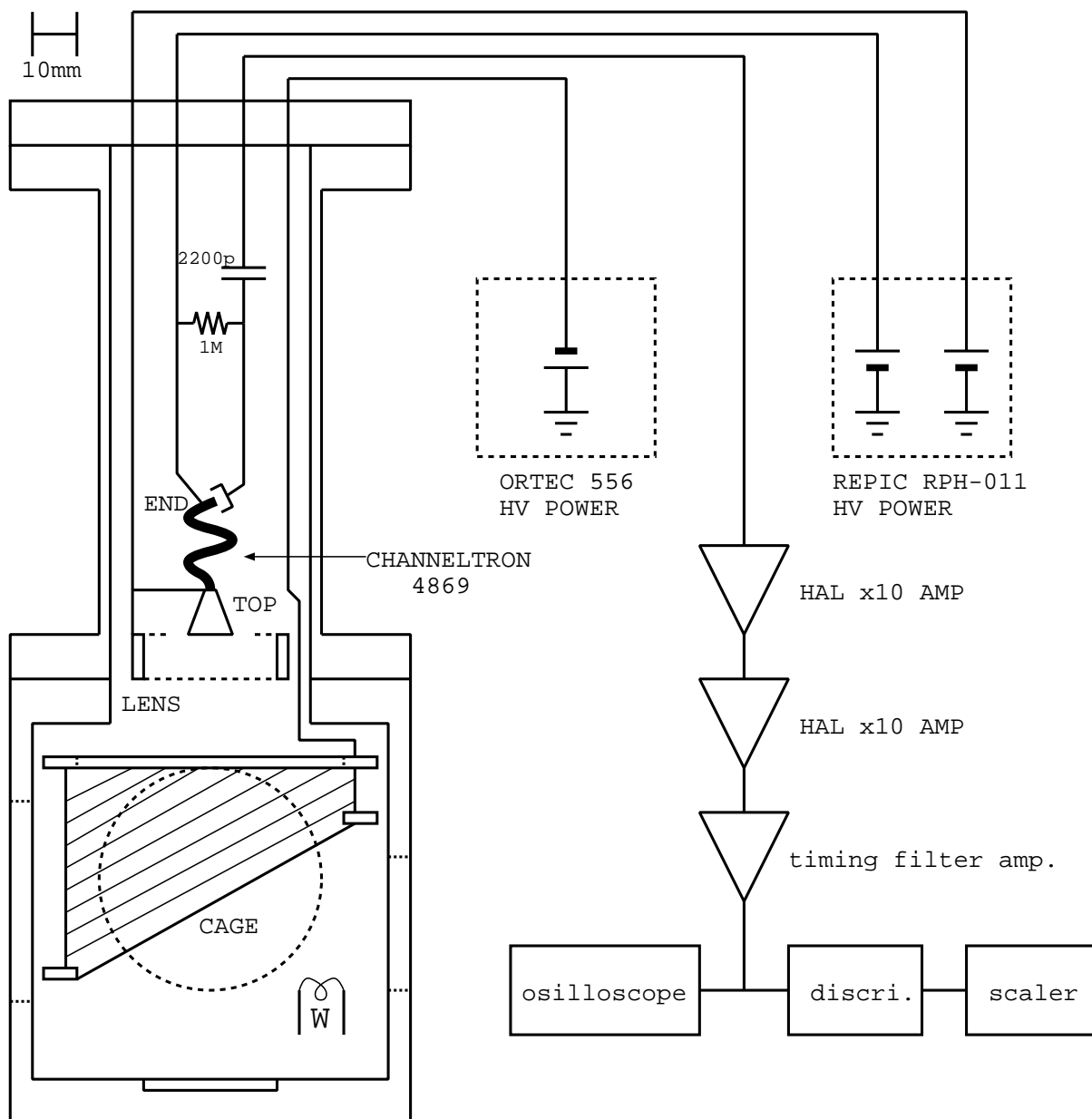


Figure 4.12: タンデムでの CHANNELTRON のテスト

電源の極性	タングステンの電流 [A]	カウントレート [/10sec]
+	0.699	30.5k
-	0.698	41.7k
-	0.698	62.0k
-	0.698	134k
-	0.698	191k
+	0.698	161k
+	0.698	161k
+	0.698	163k
-	0.698	103k
-	0.698	96k
-	0.698	85.6k
-	0.698	71.7k

Table 4.7: タングステンの電源の極性反転テスト。電源の極性は、Fig. 4.9 と同じのとき +、逆のとき - である。

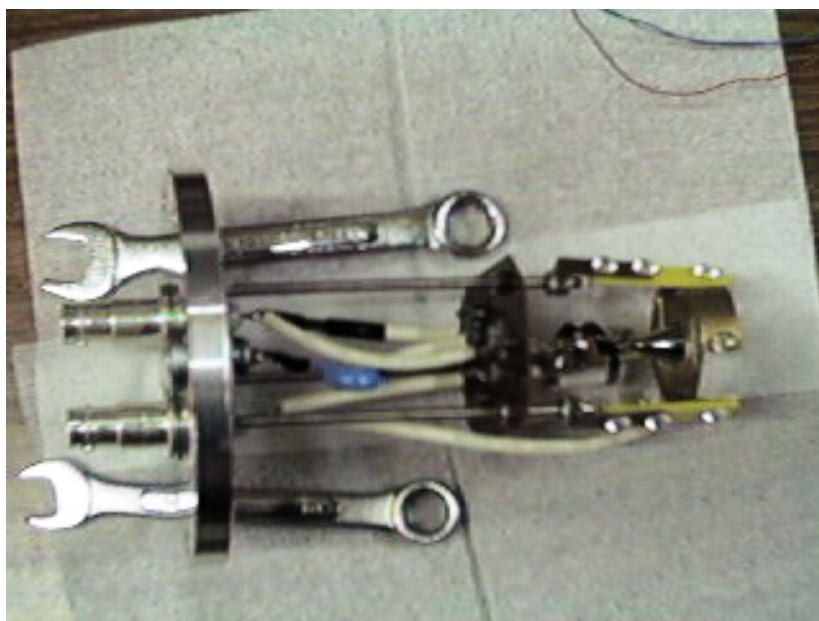


Figure 4.13: CHANNELTRON と LENS

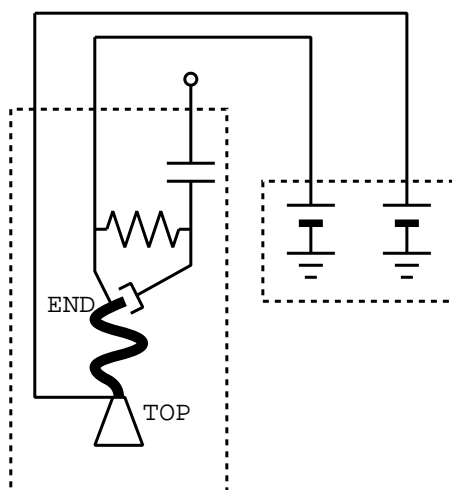


Figure 4.14: 最初の回路

しかし、CHANNELTRON に電流が流れない ($< 0\mu\text{A}$)。タンゲステンに約 0.7 A の電流を流してみたが、全くシグナルが見えない。

そこに延興さんが現れた。そして、次のようにのたまわれた。

電源は電流を吐くことができても吸うことはできない。

そこで、最初、Fig. 4.14 のようになっていた回路の、TOP とグラウンドの間に $30\text{ M}\Omega$ の抵抗を入れた (Fig. 4.15)。抵抗の値は、化研での実験で CHANNELTRON の抵抗は約 $100\text{ M}\Omega$ と分かっており、

$$V_{top} = 1000[\text{V}]$$

$$V_{end} = 3000[\text{V}]$$

という、本番で予想される電圧をかけてたときにうまくいくようにきめた。

さっそく、CHANNELTRON に電圧をかけてみた。

$$V_{top} = 700[\text{V}]$$

$$V_{end} = 2800[\text{V}]$$

すると、CHANNELTRON には約 $22\mu\text{A}$ の電流が流れた。タンゲステンに約 0.6 A の電流を流すとフォトマルのようなシグナルが見えた (Fig. 4.17)。ふりかえてみると、CERATRON が動かなかったのはこれが原因だったのである。

つぎに、

$$V_{TOP} = 1000[\text{V}]$$

$$V_{END} = 2800[\text{V}]$$

とすると、ダークカレントのレートは Table 4.8 のようになった。ダークカレントはかなり多いことが分かる。真空度が悪いためなのかも知れない。

さらに、

$$V_{TOP} = 1000[\text{V}]$$

$$V_{END} = 3000[\text{V}]$$

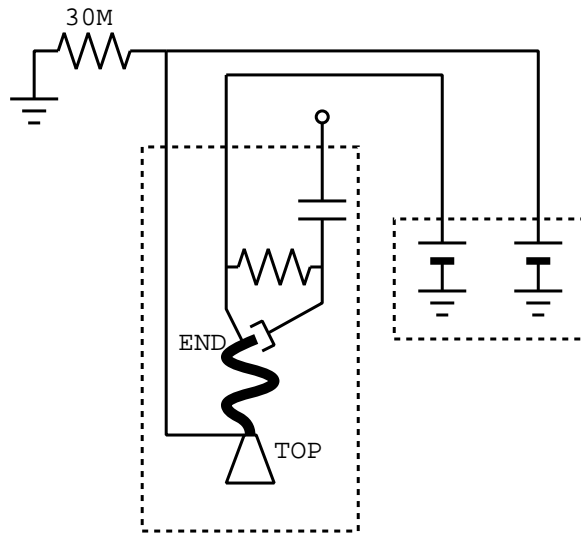


Figure 4.15: 30 MΩ の抵抗を入れた回路

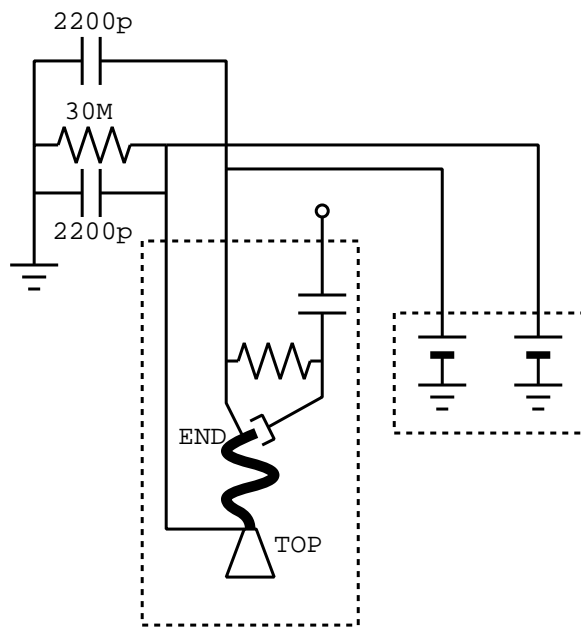


Figure 4.16: TOP と END をコンデンサでグラウンドに落とす

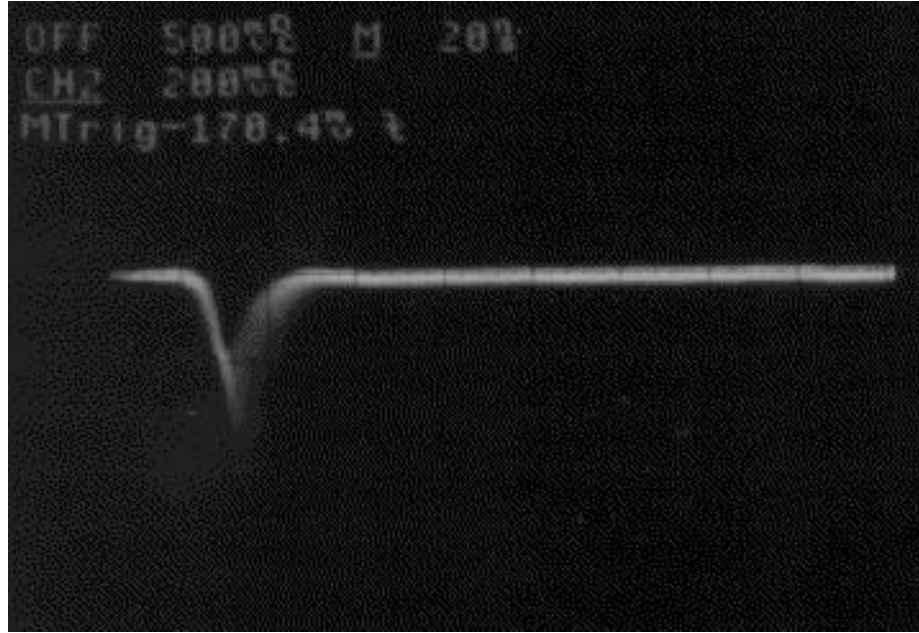


Figure 4.17: CHANNELTRON のシグナル ($V_{END} = 3000 \text{ V}$, $V_{TOP} = 1000 \text{ V}$, $I_W = 0 \text{ A}$)。アンプは HAL x10 AMP 2 段。横軸は 20 ns / div. 、縦軸は 200 mV / div. 。

Threshold [mV]	Rate [/sec]	
100	1 k	
50	20 k	
100	0	タングステンをたいた直後
50	1 k	タングステンをたいた直後
50	4 k	しばらくたったあと
100	0.3 k	しばらくたったあと

Table 4.8: $V_{TOP} = 1000 \text{ V}$, $V_{END} = 2800 \text{ V}$ のときのダークカレント。真空度は $1.4 \times 10^{-5} \text{ Torr}$ (cold cathode)。ディスクリの width は 20 ns 。アンプは HAL x10 AMP を 2 段にただけ。

Threshold [mV]	Rate [/sec]	
200	100 k	
200	3 k	タングステンをたいた直後
200	10 k	しばらくたったあと
300	3 k	しばらくたったあと

Table 4.9: $V_{TOP} = 1000 \text{ V}$, $V_{END} = 3000 \text{ V}$ のときのダークカレント。真空度は $1.4 \times 10^{-5} \text{ Torr}$ (cold cathode)。ディスクリの width は 20 ns 。アンプは HAL x10 AMP を 2 段にただけ。

Threshold [mV]	I_W [A]	Rate [/sec]	Vacuum [$\times 10^{-5}$ Torr]	
200	0	0.5 k	1.6	
100	0.561	200 k	1.8	
200	0.561	200 k	1.8	
50	0.561	500 k	1.8	
50	0	0.5 k	1.8	
100	0	0.4 k	1.8	
200	0	0.2 k	1.8	
200	0	5	1.7	しばらくたったあと
100	0	50	1.7	
50	0	150	1.7	
50	> 0	500 k	1.7	
50	> 0	0.1 k	1.7	$V_{CAGE} = -10$ V
50	0	20	1.8	$V_{CAGE} = -100$ V
50	0	20	1.8	$V_{CAGE} = -10$ V
50	0	150	1.8	$V_{CAGE} = 0$ V

Table 4.10: 真空計をかえたあとのデータ ($V_{TOP} = 1000$ V, $V_{END} = 3000$ V)。ディスクリの width は 20 ns。アンプは HAL x10 AMP を 2 段にただけ。

とすると、ダークカレントのレートは Table 4.9 のようになった。

また、タングステンをたいたとき、電流をあげていくとレートが途中で減りはじめるので、Fig. 4.16 のように、TOP と END をコンデンサでグラウンドに落としてみた。しかし、変化は見られなかった。

さて、ダークカレントの方であるが、光が悪いかも知れないので、暗幕をかけてみたが全く変化はなかった。

そこで、真空度を疑い、中のものを少し拭いて、真空計を hot cathode にかえた。

$$V_{TOP} = 1000[V]$$

$$V_{END} = 3000[V]$$

としたときのデータを Table 4.10 に示す。真空度が上がったためか、ダークカレントが減った。また、タングステンをたいていなくても、CAGE のオン/オフでダークカレントが変わる。これは真空計の電子なのか？

つぎに、

$$V_{TOP} = 1000[V]$$

$$V_{END} = 3500[V]$$

とした。このときにタングステンをたくと非常にアフターパルスが多いことがオシロスコープを見ることで分かった (Fig. 4.18)。このときのダークカレントを Table 4.11 に示す。

そして、timing filter amp を通して、500 ns 積分してやると、ダークカレントは 0.5 k / sec、積分をやめると 5 k / sec となった。

つぎに、LeCroy 3001 qVt という、マルチチャンネルアナライザを使ってみた。その結果を Fig. 4.19 から Fig. 4.27 に示す。これは、横軸がチャージ量を、縦軸がカウント数を表している。このときの真空度は 1.5×10^{-5} Torr であった。

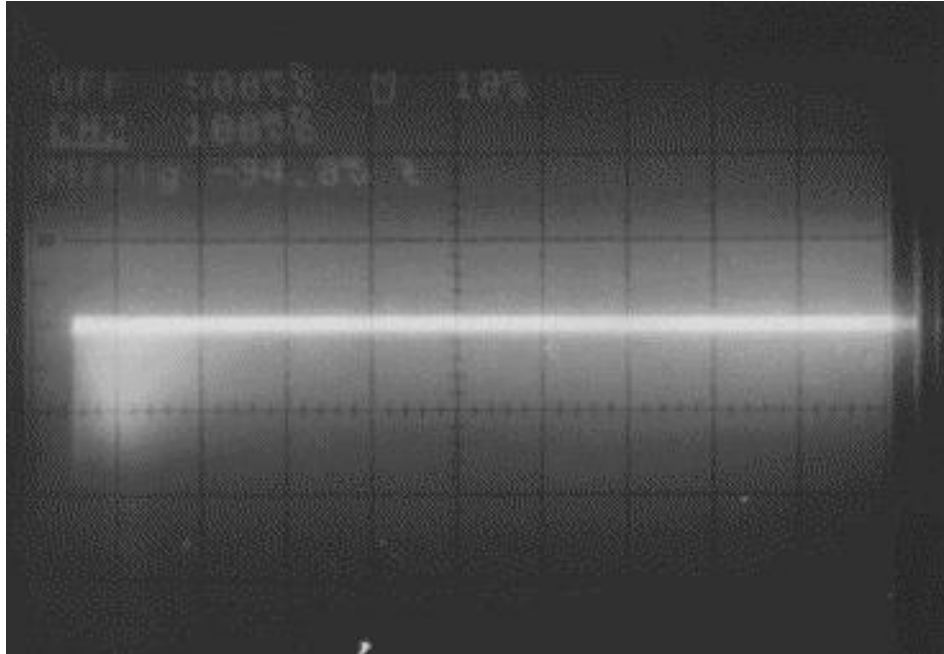


Figure 4.18: アフターパルス ($V_{END} = 3500 \text{ V}$, $V_{TOP} = 1000 \text{ V}$, $I_W = 0.56 \text{ A}$)。アンプは HAL x10 AMP 1 段。縦軸は 100 mV / div. 、横軸は $10 \mu \text{ s / div.}$ 。20 $\mu \text{ sec}$ くらいアフターパルスが続いている。

Threshold [mV]	Width [ns]	Rate [/sec]	Vacuum [$\times 10^{-5} \text{ Torr}$]
200	200	0.5 k	1.7
150	200	3 k	1.7
100	200	5 k	1.7
50	200	5 k	1.7
50	20	50 k	1.7
100	20	30 k	1.7
150	20	10 k	1.7
200	20	1.5 k	1.7

Table 4.11: $V_{TOP} = 1000 \text{ V}$, $V_{END} = 3500 \text{ V}$ のときのダークカレント。アンプは HAL x10 AMP 1 段のみ。

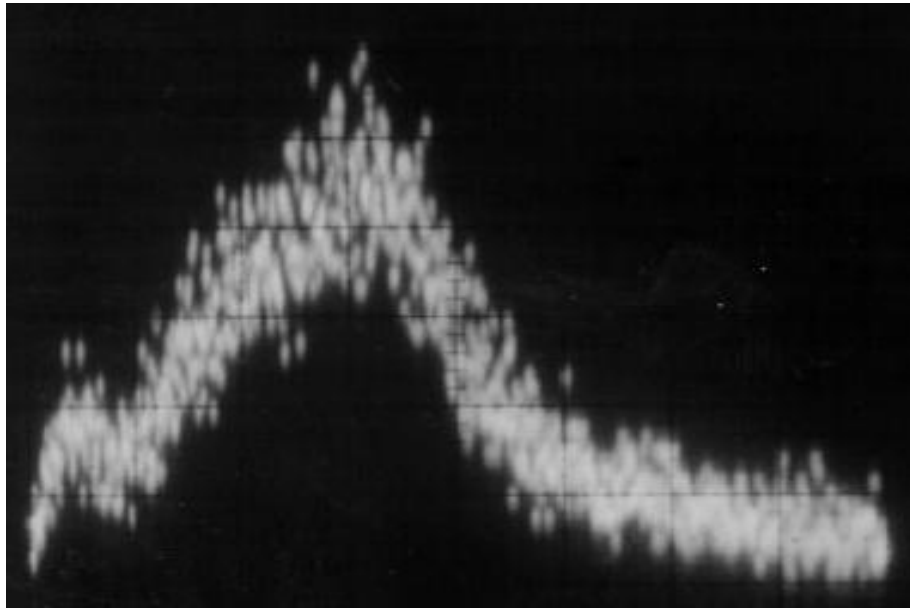


Figure 4.19: qVt スペクトラム ($V_{END} = 3000 \text{ V}$, $V_{TOP} = 1000 \text{ V}$, $I_W = 0 \text{ A}$)。真空計から来る電子を見ている。threshold は 200 mV 、gate 幅は 100 ns 。アンプで 400 倍にしたもの。左端にはペDESTALが見えている。

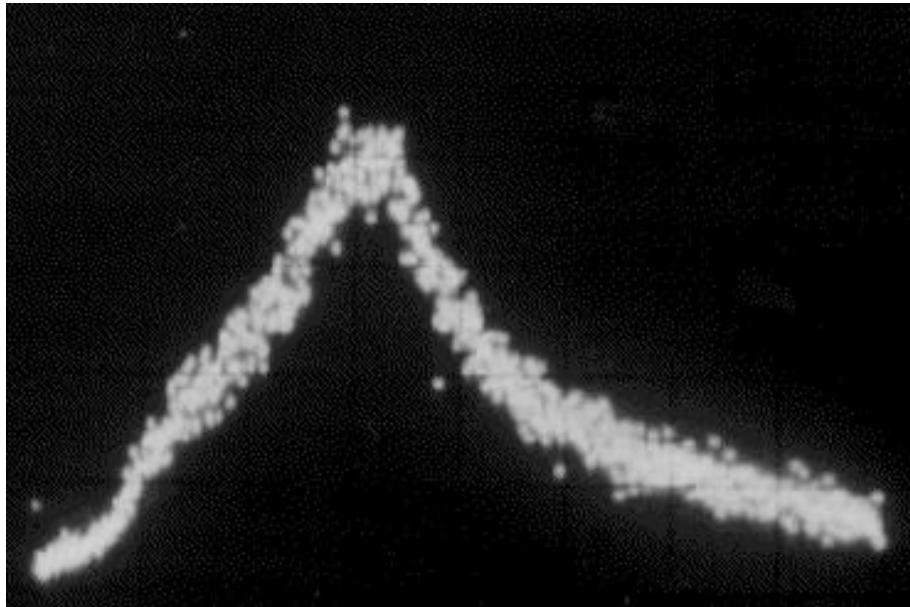


Figure 4.20: qVt スペクトラム ($V_{END} = 3100 \text{ V}$, $V_{TOP} = 1000 \text{ V}$, $I_W = 0 \text{ A}$)。真空計から来る電子を見ている。threshold は 200 mV 、gate 幅は 100 ns 。アンプで 200 倍にしたもの。ペDESTALは threshold によって切られている。

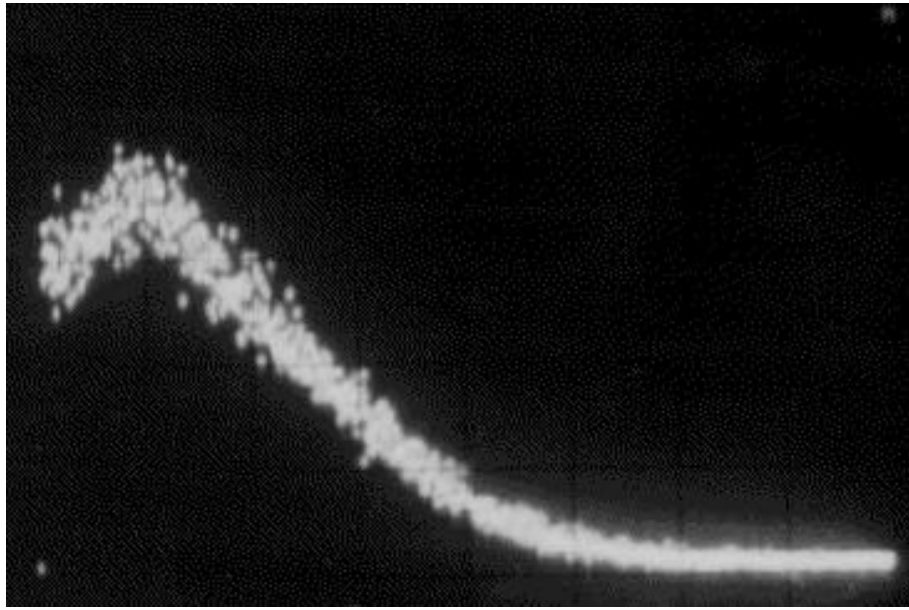


Figure 4.21: qVt スペクトラム ($V_{END} = 3200 \text{ V}$, $V_{TOP} = 1000 \text{ V}$, $I_W = 0 \text{ A}$)。真空計から来る電子を見ている。threshold は 100 mV 、gate 幅は 100 ns 。アンプで 100 倍にしたもの。真のシグナルも切られてしまっている。

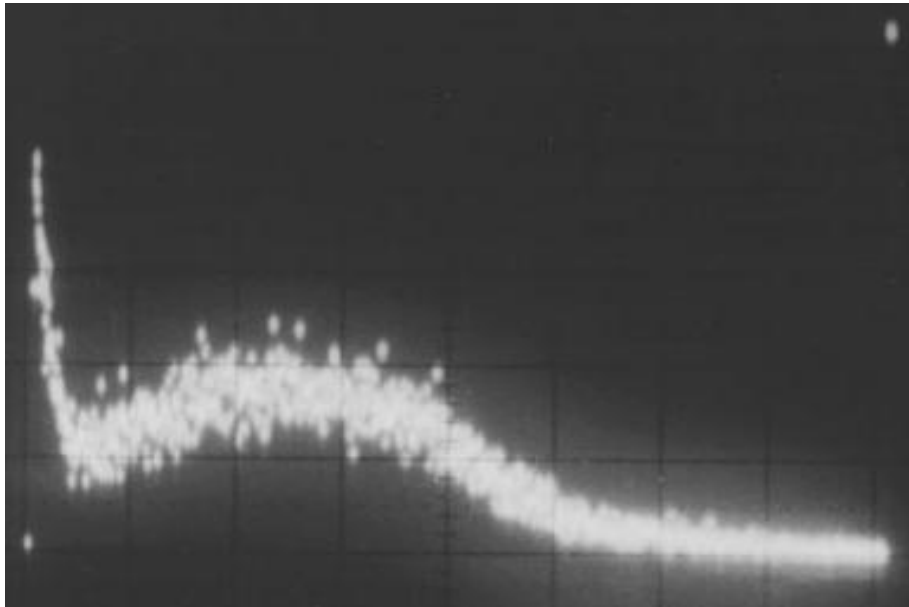


Figure 4.22: qVt スペクトラム ($V_{END} = 3000 \text{ V}$, $V_{TOP} = 1000 \text{ V}$, $I_W = 0 \text{ A}$, 2 回目) 。真空計から来る電子を見ている。threshold は 200 mV 、gate 幅は 100 ns 。アンプで 400 倍にしたもの。左端にはペDESTALが見えている。

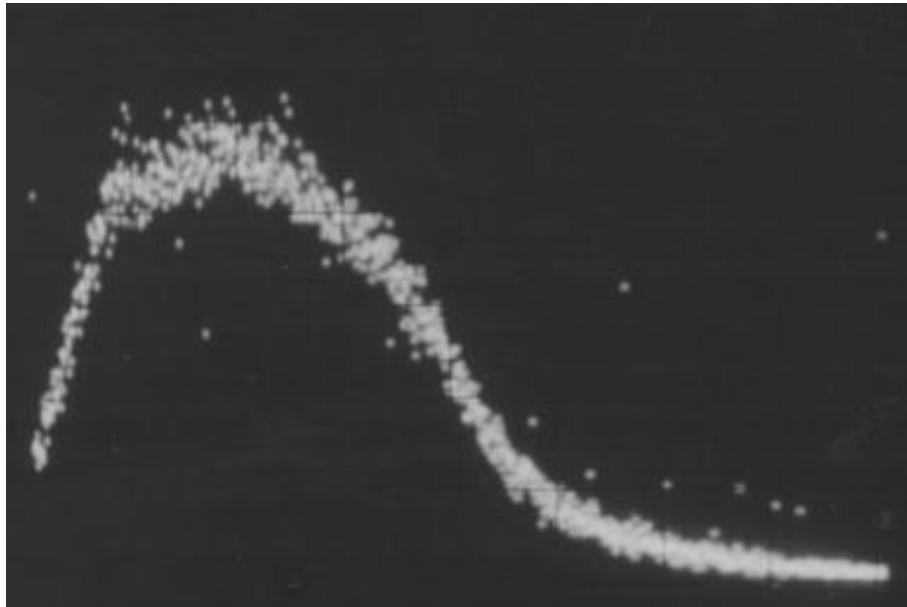


Figure 4.23: qVt スペクトラム ($V_{END} = 3000 \text{ V}$, $V_{TOP} = 1000 \text{ V}$, $I_W = 0.56 \text{ A}$) 。 threshold は 200 mV 、 gate 幅は 100 ns 。アンプで 400 倍にしたもの。ペDESTAL は見えるほど大きくない。

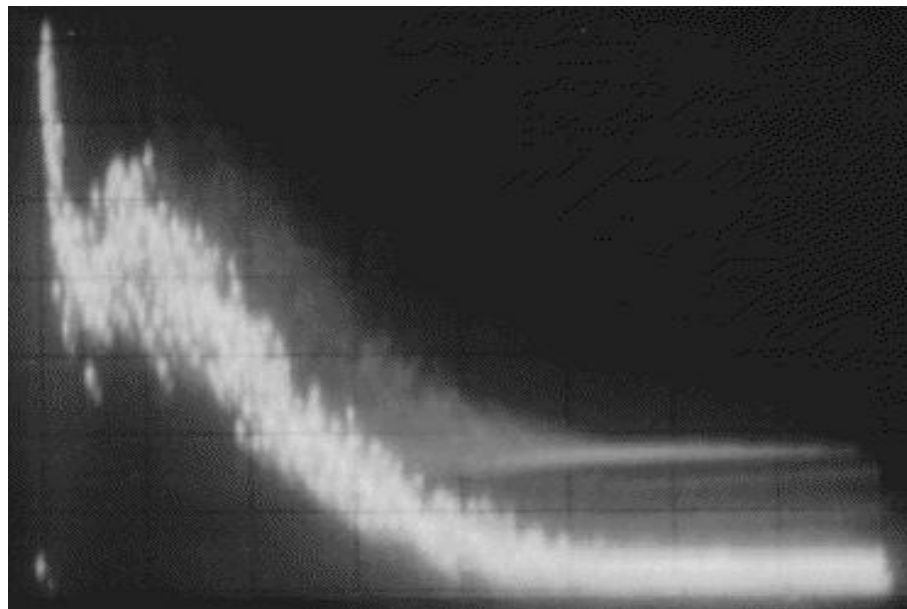


Figure 4.24: qVt スペクトラム ($V_{END} = 2900 \text{ V}$, $V_{TOP} = 1000 \text{ V}$, $I_W = 0 \text{ A}$) 。真空計から来る電子を見ている。threshold は 190 mV 、 gate 幅は 100 ns 。アンプで 400 倍にしたもの。真のシグナルがペDESTAL と重なりはじめる。

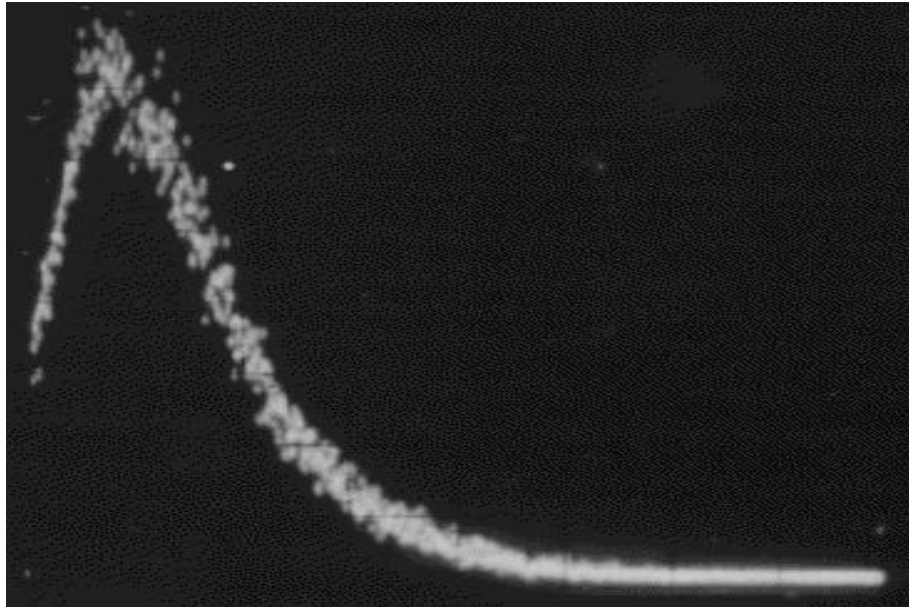


Figure 4.25: qVt スペクトラム ($V_{END} = 2900 \text{ V}$, $V_{TOP} = 1000 \text{ V}$, $I_W = 0.54 \text{ A}$)。threshold は 190 mV 、gate 幅は 100 ns 。アンプで 400 倍にしたもの。タングステンをたくとペデスタルは見えなくなる。

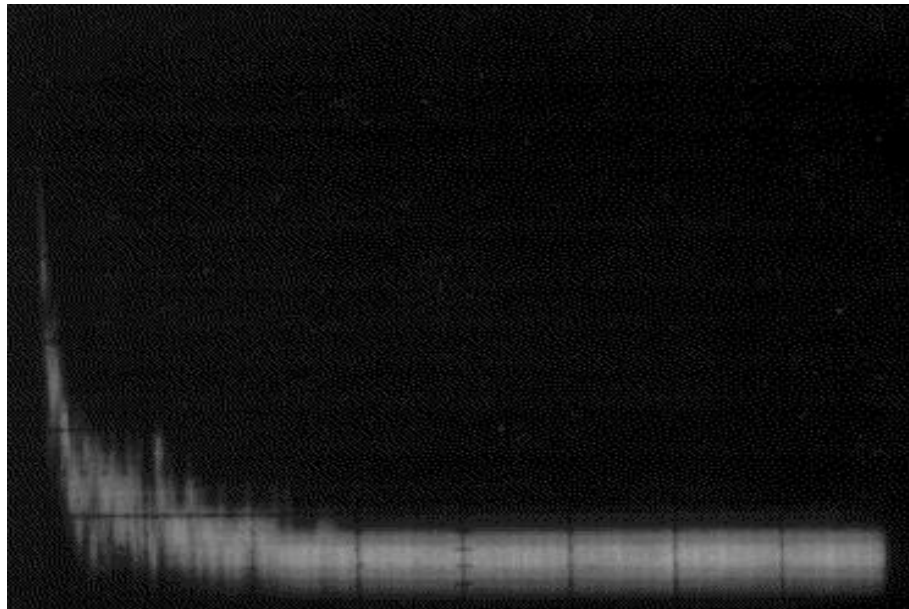


Figure 4.26: qVt スペクトラム ($V_{END} = 2800 \text{ V}$, $V_{TOP} = 1000 \text{ V}$, $I_W = 0 \text{ A}$)。真空計から来る電子を見ている。threshold は 200 mV 、gate 幅は 100 ns 。アンプで 400 倍にしたもの。かなり損している感じ。

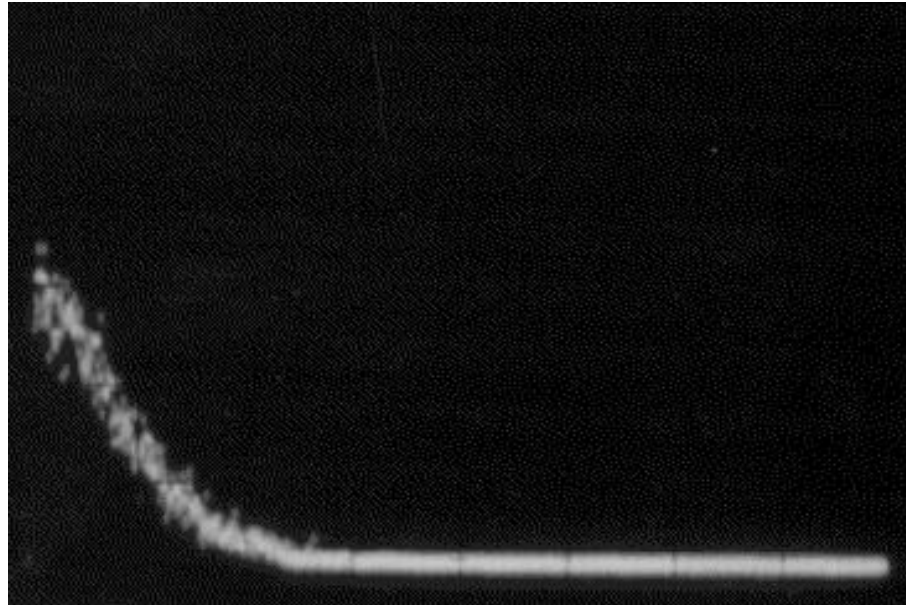


Figure 4.27: qVt スペクトラム ($V_{END} = 2800 \text{ V}$, $V_{TOP} = 1000 \text{ V}$, $I_W = 0.58 \text{ A}$)。真空計から来る電子を見ている。threshold は 200 mV、gate 幅は 100 ns。アンプで 400 倍にしたもの。タングステンをたいても損していることが分かる。

V_{END} [V]	V_{TOP} [V]	Threshold [mV]	ゲート幅 [μs]	Rate [/sec]	HAL x10 AMP
3000	1000	30	20	0.3 k	2 段
3100	1000	30	10	0.3 k	2 段
3200	1000	30	10	0.3 k	2 段
3300	1000	30	10	0.3 k	1 段
3400	1000	30	10	0.5 k	1 段
3500	1000	30	10	1 k	1 段

Table 4.12: ゲートジェネレータに入れたときのダークカレント

この結果から、この真空度では CHANNELTRON の TOP , END 間の電圧は 1900 V 以上にすべきであることが分かる。

さいごに、ディスクリのアウトをゲートジェネレータに突っ込んで、アフターパルスを数えないようにしてみた。そのときのダークカレントを Table 4.12 に示す。これより、電圧を上げていくことによって増えていたダークカレントは、実はアフターパルスが増えていただけであることが分かる。また、 V_{END} が 3400 V くらいから、アフターパルスが 10 μs を越えるようになっていることも分かる。

Chapter 5

Experimental Procedure

5.1 粉ふりについて

5.1.1 MSLにおいて

Background Estimationのための標準ターゲットである厚さ $50\mu\text{m}$ のアルミ箔に合わせて、粉は重さ 500mg ふることにした。ターゲットホルダーの面積は 37.3cm^2 である。

実際の実験現場であるMSLの μ ポートは、広い部屋で風が強く、またどこからか漏電していたためか静電気の影響が非常に大きかった。そのため粉ふりは非常に難しいものとなった。また、うまく盛ることのできたターゲットを真空槽に挿入した後に真空引きを始めると、ターボポンプの振動によって粉が崩れたり、真空引きの過程で粉末の中から空気や水蒸気が抜け出て沸騰したような状態になり、粉を崩してしまうことがあった。



Figure 5.1: 粉をふっている姿

SiO₂ - AEROSIL

まず初めにふった粉末は、SiO₂のAEROSILである。しかし、静電気の影響が強くバックキングのカプトン箔に模様ができたり、カプトン箔が $7.5\mu\text{m}$ と薄かったためか粉ふりの振動がバックキングに伝わり粉末に割れ目ができたりして失敗した。そこで接地したアルミ箔をターゲットホルダーに触れさせたり、ターゲットホルダーの下にキムワイプを敷いたりして工夫を凝らした結果うまく粉を盛れるようになった。

しかし真空引きの過程でターボポンプの振動が真空層に伝わり粉が崩れた。

そこでバックングに粗い紙やすりで凹凸をつけ滑ベリどめとした。さらにターボポンプを手で押え振動を抑えたところうまく真空を引くことができるようになった。(Figure 5.2 参照。)

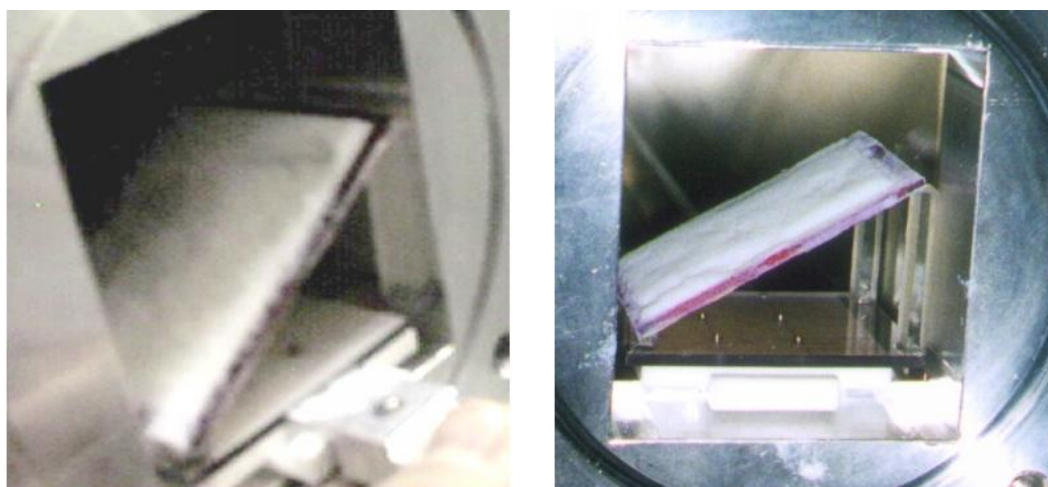


Figure 5.2: 成功した AEROSIL と崩れた AEROSIL

Diamond

次に Diamond 粉末をふるこになった。Diamond は AEROSIL に比べ、密度が大きい分盛る高さが低くさらさらして崩れやすかった。しかし SiO₂ をふった経験もありうまく盛ることができた。真空引きで一度粉が崩れたが、再度挑戦するとうまくいった。(Figure 5.3 参照。)

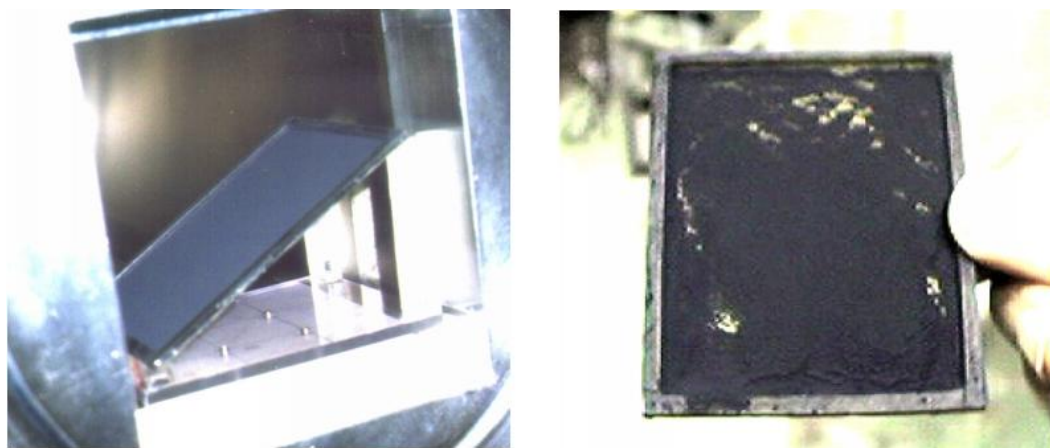


Figure 5.3: 成功したダイヤモンドと崩れたダイヤモンド

SiO₂ - EH5

SiO₂ の EH5 は特に密度が小さく 500mg 盛ると低速電子収集用のケージに当たってしまうために 400mg 程度盛ることにした。しかしそれでも特別ふわふわしていて非常に崩れや

すかった。なんとか粉を盛ることはできたが、真空引きの際、約 1torr あたりで粉末中から空気や水蒸気などが抜け出て、見ためにも粉末の表面がぶくぶくと沸騰したような状態となり粉は崩れてしまった。慎重にゆっくりと真空引きをするなど再三挑戦したがいずれもうまくいかず、時間の都合上崩れたままのターゲットでビームを当てることにした。ただビームが当たる部分全体のターゲットの重さはあまり変化がないと思われる。(Figure 5.4 参照。)



Figure 5.4: 実際にビームを当てた EH 5

また時間の都合上 Al_2O_3 をふる機会は得られなかった。

5.2 μSR

5.3 ディグレーダーの調整

ディグレーダーにはアルミ板を用いることにした。

KEKの現場の人に初めビームのレンジについて次のような話を聞いた。経験則であるが、ビームのレンジは運動量の3.5乗に比例し、過去に $29\text{Mev}/c$ で $200\text{mg}/\text{cm}^2$ だったらしい。そこでレンジを R 、運動量を p 、比例係数を A とすると、 $R = Ap^{3.5}$ で、 $A=0.00152$ であり、今回用いるビームの運動量が $26\text{Mev}/c$ なので、レンジは $136\text{mg}/\text{cm}^2$ となると思われた。

そこで厚さ $220\mu\text{m}$ ($59.4\text{mg}/\text{cm}^2$)、 $440\mu\text{m}$ ($119\text{mg}/\text{cm}^2$)、 $660\mu\text{m}$ ($178\text{mg}/\text{cm}^2$)、 1mm ($270\text{mg}/\text{cm}^2$) の4枚のアルミ板を用意し、ターゲットを入れずにディグレーダーにビームを当て、それを μSR で見ることで、ディグレーダーの調整を行った。

我々の実験ではターゲットの表面近くでビームが最も多く止まるようにディグレーダーを調節したく、ビームのレンジの分布のピークがターゲットであるようなディグレーダーを求めているので、 $220\mu\text{m}$ のアルミ板がディグレーダーとして最適だと思われた。

そこで一度 μSR でミュオニウムが見えるかどうか、 SiO_2 606mg をターゲットとし、磁場を 3G 、ビームを $\phi 60$ でコリメートした条件で長時間測定してみた。しかし、思うような結果が得られず、再びビームを $\phi 20$ にコリメートしてディグレーダーの調整を始める。以下、常にビームは $\phi 20$ にコリメートすることにした。その結果 $220\mu\text{m}$ のアルミ板では、 μSR のカウンティングレートが低く、ビームがあまりターゲットに止まっていなかったため、 $440\mu\text{m}$ のアルミ板をディグレーダーとして用いることになった。トラッカー

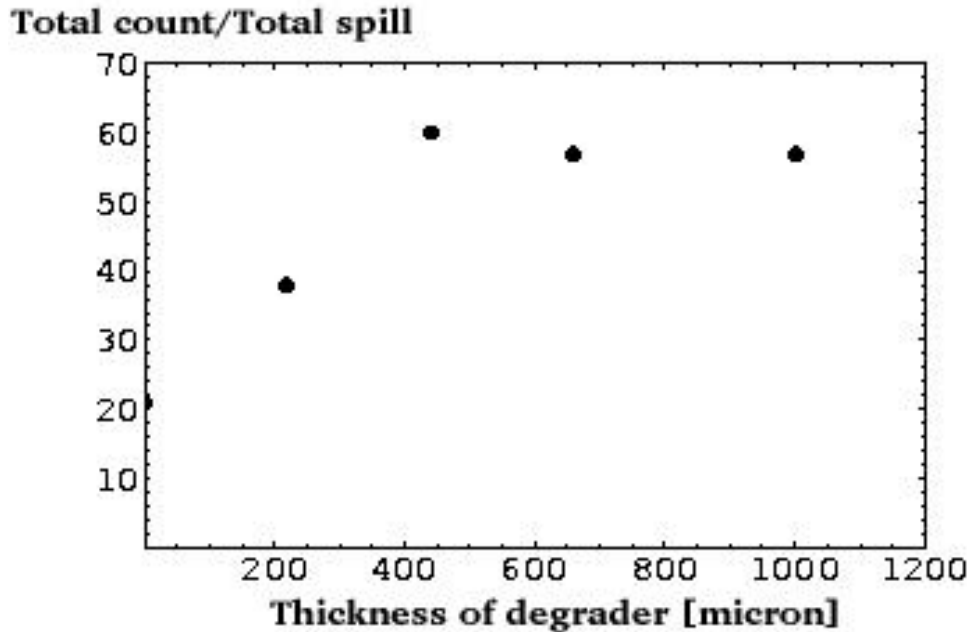


Figure 5.5: μ SRによるカウントレートの変化

の ScatterPlot においてもターゲットイベントがはっきりと見えるようになったので、うまくいっているように思われた。

しかし、その後も真空中へのミュオニウムの拡散を確認することができず、ディグレーダーでビームを止め過ぎていたために、ターゲットからミュオニウムが拡散してこないのではという疑いが起こる。ビームのレンジの分布が非常に鋭いのでは、という推定のもと、厚さ $250\mu\text{m}$ 、 $300\mu\text{m}$ 、 $350\mu\text{m}$ 、 $440\mu\text{m}$ の 4 枚のアルミ板を用いてディグレーダーの調整を再び行なった。ターゲットは 427mg の EH5 で磁場は 3G 、ターゲットを入れ替えずにディグレーダーのみを入れ替え、その変化を μ SR と我々のトラックの両面から見ることにした。Figure 5.6 は μ SR によるアシンメトリーの中心値をプロットしたものである。またトラックからディグレーダーを入れ替えることによってターゲットがどのように見えるかを、Figure 5.7 はターゲットの位置のずれから、また Figure 5.8 は Spill 数で normalize したターゲットピークの高さのから表したものである。各々のディグレーダーにおいて 30 分ビームを流して統計をとった。

以下の 3 つグラフにより、 μ SR、トラック両方の面よりターゲットでビームを半分止めるのディグレーダーはアルミ板 $300\mu\text{m}$ ($81\text{mg}/\text{cm}^2$) に決定する。

5.4 Energetic e^+

5.4.1 初期調整

Scifi のチェック

本隊到着後、まずは Scifi が無事であることを確認するために、ソースをお借りしてチェックした。ケーブルを接続したのちソースをつけはずしして、オシロスコープによってシグナルの変化を見た。

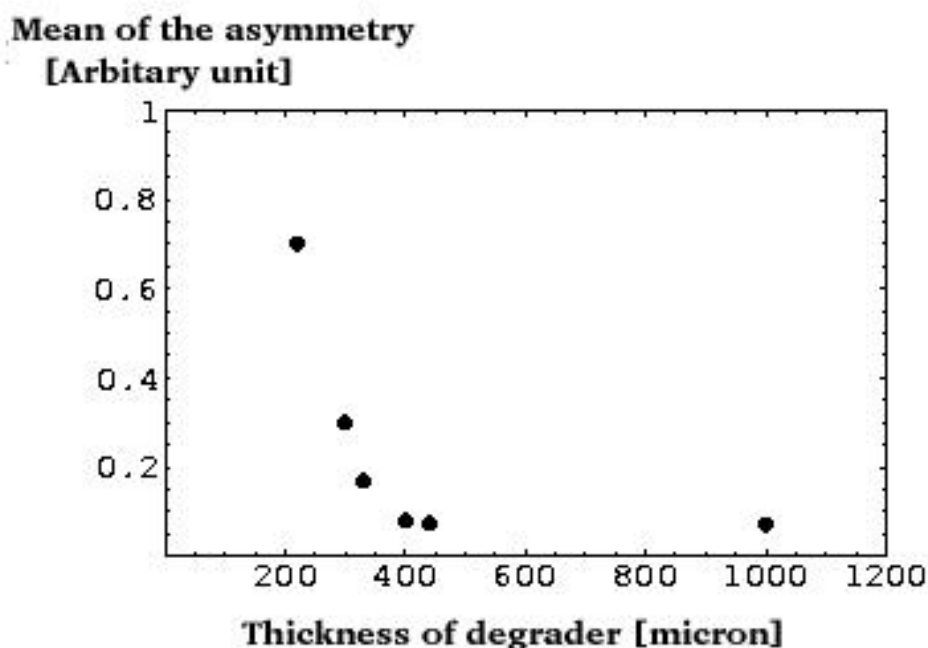


Figure 5.6: μ SRのアシンメトリーの中心値のずれ

小さい濃いパルスはソースをはずしても見えたままで、これは、光漏れ、もしくは熱電子の影響と見られる。その下の薄くぼやけたものが、ソースによる変化である。A16のScifiは他に比べて変化が少なかったが、そのほかについては、特に異常は見られず、Scifiは無事機能していることを確認できた。

Thresholdの調整、暗箱の設置、Delayの調整

Thresholdの調整のために、うへのScifiのチェックと同時に pulseheight も計っていった。小さいパルスは平均して、-70mv程度の pulseheight であった。これによる signalは除きたいので、thresholdを-100mvに調整した。また、trigger-scintillatorについては、-70mvに設定した。

その後、暗箱を設置し、Cableによる signalの遅れを取り除くために、Delayを調整して、Beamをスタートさせた。

5.4.2 signal異常の発見と改善

signal dataの不連続

Targetをアルミ箔としてデータをとってみると、本来ならば、各Scifiのsignalは連続的に変化しなければならないが、17,18,21,27番のsignalが不連続であることが分かった。また、17番については、非常に顕著であった。

原因として考えられることは、MAPMTの異常、Cableのつけ間違い、破損、Thresholdの調整不十分、Moduleの故障などが考えられる。MAPMTについては、オシロによる確

The target peak position [mm]

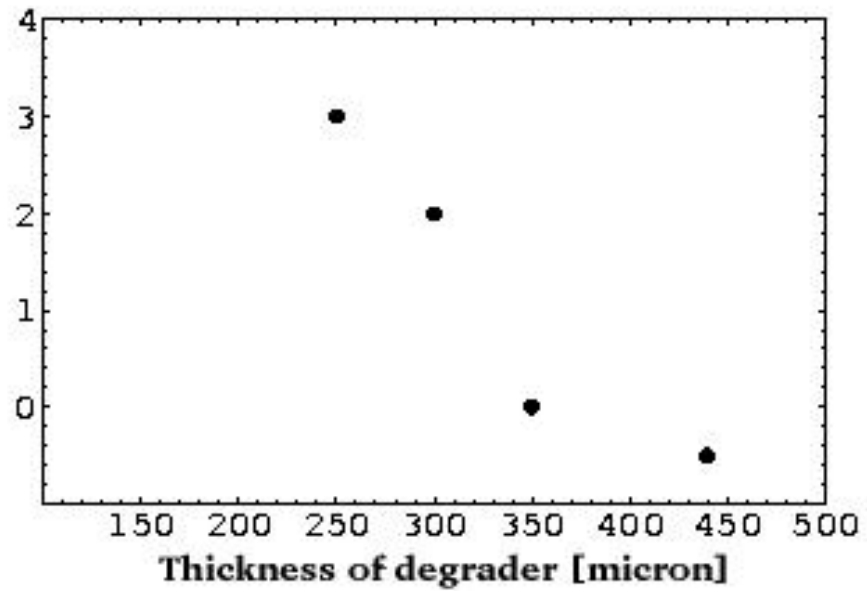


Figure 5.7: ターゲットピーク的位置

**The height of the target peak
[count / spill]**

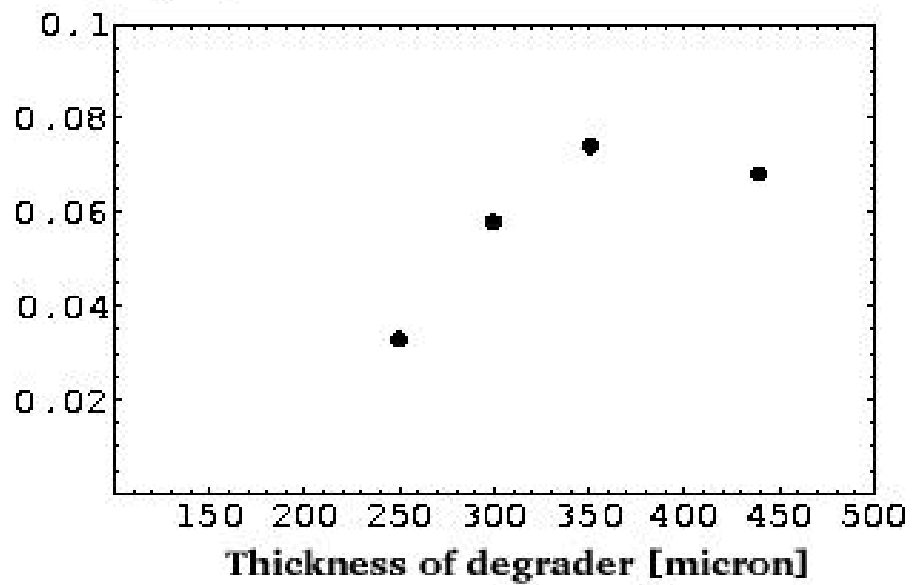


Figure 5.8: Spill 数で normalize したターゲットのピークの高さ

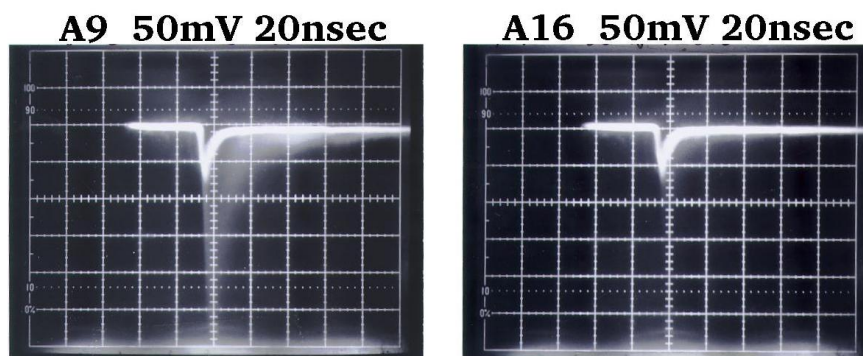


Figure 5.9: Oscilloscope-A1

認済で、この異常はないと考えられる。また、Cableのつけ間違いがないことも確認した。したがってそれ以下の異常によるものと考えて、改善を進めることにした。

Cableの確認

まずは、Cableの接触が悪のではないかと考え、もう一度つなぎ直したところ、21、27番のCableについてはやや回復した。しかし17、18番についてはまだ回復はしなかった。そこで、次にCable自体に異常があるのではと考え、まともなCableと交換することでシグナルが交換されるかを見た。

交換したCableは、17と24、18と25で、MAPMTからcounter hallへ延びるBNC Cableである。18と25のシグナルについては交換されているので、18番の異常は、thresholdの設定によるものであろう。17と24については交換されず、24のsignalが少なくなってしまう。つまり、BNCよりも、counter hall側に異常があることが分かった。

その後、NIM-ECL,LEMO,Flatcableなどの接続の確認などを行ったが、いっこうに改善される様子はなかったが、最後に、Discriminatorを変えてみたところ、signalの量が増えた。

Threshold,widthの再調整

18番や、ほかのCableのsignalで気になる場所はもあったので、こちらは、Thresholdの調整をして、連続的に変化するようにした。この時には、Gate generatorの発振によるパルスを用い、それぞれのDiscriminatorからのsignalのcount rateが平均化されるように調整した。調整したものは、4、12、16、18、23、27番のものである。

また、Widthについては、はじめ20nsecにあわせていたが、テールが十分に長いので、double countをふせぐという事も考えて、100nsecに調整し直した。

5.4.3 測定の開始

これで、測定機器の調整がすべて終わったので、実際にターゲットをふり、真空槽も設置し、真空引きをはじめてsignalをとりはじめた。online解析については、DAQの節を参考にされたい。

5.5 Atomic e^-

Chapter 6

Simulation

6.1 ミュオニウムの粉末中での振る舞い

6.2 高エネルギー陽電子

6.3 低速電子

Chapter 7

解析

7.1 μ SR

7.1.1 ミューオニウム生成率の算出法

まず以下のような定義をおく。

M : ミューオニウム生成率

U : ビーム上流のシンチレーターのカウント数。

D : ビーム下流のシンチレーターのカウント数。

Ω_U :

7.2 高エネルギー陽電子

7.3 低速電子

Chapter 8

Discussion

Chapter 9

Conclusions

Chapter 10

Prospects

10.0.1 Powder

今回の実験で用いたパウダーは SiO_2 は AEROSIL300 と Cab-o-sil の EH5、Diamond は microdiamant の DP558 であった。時間の関係上 Al_2O_3 をふるることができなかったのは非常に残念であった。

SiO_2 はどちらも粒径 7nm とその小ささ、表面積の大きさは問題なかったが、粉を盛った後で崩れないように保つのが難しく、ターゲットホルダーにワイヤーを張るなどもっと工夫があるべきだった。また標準ターゲットの厚みを減らし、ターゲットの粉を盛った高さを低くするのも一つの手である。ただ真空引きの途中で粉の表面が沸騰したようにぶくぶくと振動することを防ぐにはどうしていいかわからない。

Diamond は粒径 50nm ととても粉が大きかったのでミュオニウムが拡散してこなかったと思われる。microdiamant 社の製品で粒径 25nm の diamond もあり、こちらにすればまだ可能性はあると言える。しかし同製品は非常に高価なため手に入れることができなかった。粉をふる際、ふるいから均一に落ちないなど困難な面もあるが、興味を持つことのできる粉ではある。

また Al_2O_3 は粒径 30nm と期待できる大きさではある。また空気中には拡散することが確認されているので、真空中でも期待は持てるであろう。また粉も手に入れやすく、粉もふりやすい。ビームを当てる機会が得られなかったことは非常に残念である。

その他の種類の粉で何が有望かはよく分からないが、どの物質も粒径が nm 単位の小さなものは手に入りやすく、さらに導体でないものとなると我々はこれ以上探すことができなかった。もっとよく探せば他の種類の粉も手に入ったかもしれない。

10.0.2 Degradation

我々は 8 日間のビームタイムで 6 日を、アルミ板 $440\mu\text{m}$ をディグレーダーとして用いていた。そのため使うことのできないデータをたくさん集めてしまった。もっと早くもっと綿密にディグレーダースタディを行うべきであった。

Acknowledgement

Appendix A

真空中への muonium の放出の過去の実験

Muonium の最初の観測は Ar ガスで行われ、 $85 \pm 9\%$ の生成率があった [1]。

真空中に muonium 引き出すために金属フォイルを使った方法と powder を使った方法が開発された。

A.0.3 金属フォイルを用いた muonium の真空への引き出し

Muonium を最初に真空に出す実験は金属フォイルを用いて行われた。Be や Au、Al などのターゲットで 0.03% (per incident μ^+) 程度の放出率が得られた [2]。このとき得られた muonium は 20keV 以下のエネルギーを持っていた。

Thermal muonium の初期の観測は例えば熱した W で行われ、 $4 \pm 2\%$ の放出率 (per stopped μ^+) があった [3]。しかし放出率は金属の状態に敏感であり再現するのは難しい。より金属フォイルの状態を良くした実験では W で $8(1)\%$ [4]、Pt で $4.7(6)\%$ [5] (共に per stopped μ^+) の放出率が得られている。しかし金属で高い muonium の真空放出率を得るためには高純度、高温、汚染の少ない金属表面とそのための高真空が必要となるため扱いが難しい。

また室温においては金属フォイルから muonium が真空中に出てくることはないため back ground の測定に利用することができる。

A.0.4 powder を用いた muonium の真空への引き出し

Powder では SiO_2 (Cab-o-sil EH5、密度 $0.032\text{g}/\text{cm}^3$ 、表面積 $400\text{m}^2/\text{g}$ 、粒径 7nm) が最も良く調べられていて、最高で入射 μ^+ の 10% 程度の放出率が得られている [6]。

SiO_2 powder (EH5) 内での muonium 生成機構は次のとおりである。

1. μ^+ が powder の粒の中で止まる。粒の中での muonium 生成率は bulk の SiO_2 の時と同じで $61 \pm 3\%$ である [7]。
2. 粒の表面まで拡散して粒の間の真空に出てくる。生成された muonium の内 $0.97 \pm 0.01\%$ が出てくる [8]。
3. ランダムウォークをして粉の領域から出て真空中に放出される。真空中に出てきた muonium はまだ大部分偏極している [9]。

Muonium の放出において powder 中での拡散が重要となってくる。 SiO_2 (EH5) powder の拡散係数は $525 \pm 100\text{cm}^2/\text{s}$ である [10]。しかし拡散係数はシミュレーションモデルの

パラメーターに敏感で、beamのstopping distributionやtargetの不均一さが重要になってくる。拡散係数の値はpowderのミクロな構造によっている。

ふっただけのpowderの厚みには20~30%のゆらぎがある[10]。しかしふりかたや同じふりかたでも1つ1つのtargetによって厚みの不均一さは違うので正確に測るのは難しい。同じものを作るのも難しい。これがpowderを用いる時の困難である。

Stopping distributionはtargetの厚さやbeamの運動量の広がりによっても変わり放出率に影響する。運動量の広がり狭いほうが放出率は高い[10]。

SiO₂ではEH5以外にもDegussaのAEROSIL 300(粒径14nm)[9]でも行われておりEH5と同程度の放出率が確認されている。Merck Opti-Pur(密度は0.51g/cm³、表面積は600m²/gとEH5とは性質がだいぶ違う)やCab-o-sil M5(密度0.04g/cm³、表面積は200m²/g、粒径14nm)などでもEH5とあまり変わらない放出率が得られていて密度や表面積だけではmuonium生成率はわからない[9, 10]。

Al₂O₃についても室温でtargetに止まったμ⁺の内35 ± 14%がmuoniumを生成し大部分が粒から粒間の領域に出ることが確認されている[7]。しかし真空中へ放出した研究は十分なされていない。

diamond中ではmuoniumはnormal muoniumとanomalous muoniumの2つの状態を取る。Anomalous muoniumはdiamond結晶の方向に対し軸対称な状態にある。文献[11]によると室温でのmuoniumはanomalous muoniumのみ観測されて入射μ⁺の14.5 ± 1.3%の生成率があるが、normal muoniumが観測されないのはrelaxation rateが室温で大きくなるからである。この実験ではdiamondの粒径は数μmであり、我々の用いる50nmの粒径のdiamondではnormal muoniumも偏極がなくなる前に粒の中から出てきて測定できるかもしれない。diamondについても真空中への引出しはあまりなされていない。

A.1 我々の用いるtarget

我々はtargetとしてSiO₂powder(Cabot社Cab-o-sil EH5、日本アエロジル社AEROSIL 300)、diamond powder(microdiamant社DP558)、Al₂O₃powder(BAIKOWSKY社Baikalox CR125)、および標準targetとしてAlフォイルを用いる。

足りない。

EH5はAEROSIL 300と同じ製法で作られていて粒径も比表面積も同じ程度の製品なので基本的な性質は変わらないと思われる。

A.1.1 AEROSILの性質[12]

我々の用いるAEROSIL 300は比表面積300 ± 30m²/g、一次粒子径7nm、純度99.9%以上である。

AEROSILは火炎加水分解法により製造されていて、SiCl₄ + 2H₂ + O₂ → SiO₂ + 4HClという反応でできている。SiO₂以外は蒸発しやすいもののため高純度のSiO₂ができる。図A.1.1はAEROSIL 380の透過型電子顕微鏡写真である。比表面積がAEROSIL 380(380 ± 30m²/g)とAEROSIL 300で少し違うがそれ以外はほぼ同じ特性を持っている。

この写真からわかるとおり一次粒子はほぼ球形であり、鎖状につながり網目構造を作っている。

粒子同士は凝集して10 ~ 30μmと100μm前後の凝集粒子を形成している。

図A.1.1は一次粒子粒度分布曲線である。AEROSIL 300では分布の幅は狭く、ほとんどの粒子が同じ大きさになっている。

AEROSILの表面においてはシラノール基とシロキサン基(図A.1.1)が重要である。

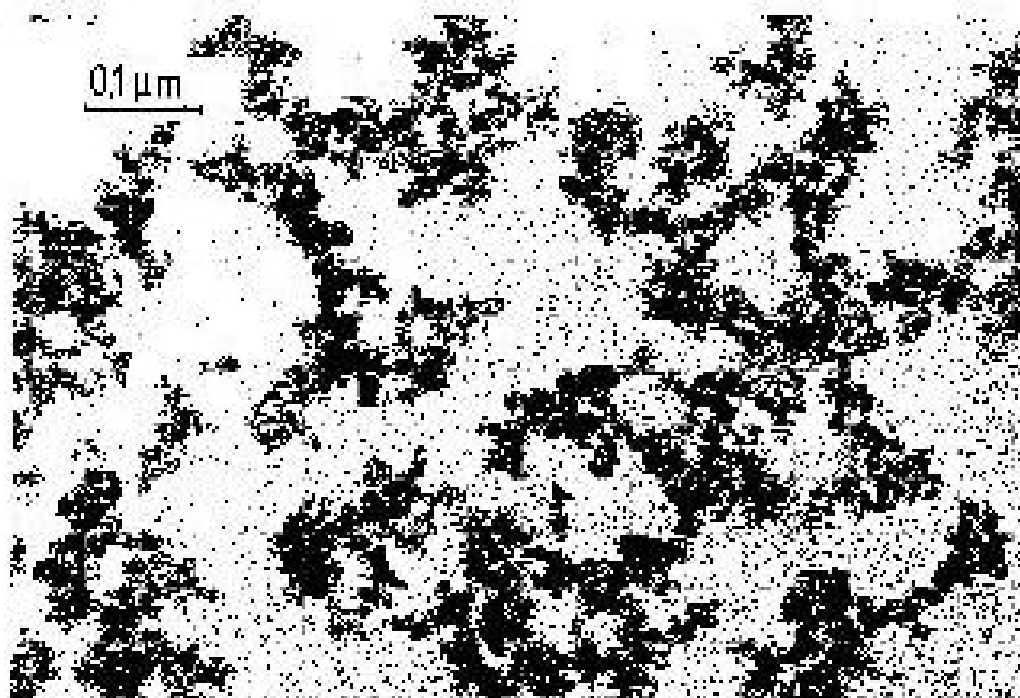


図20：AEROSIL 380の透過型電子顕微鏡写真

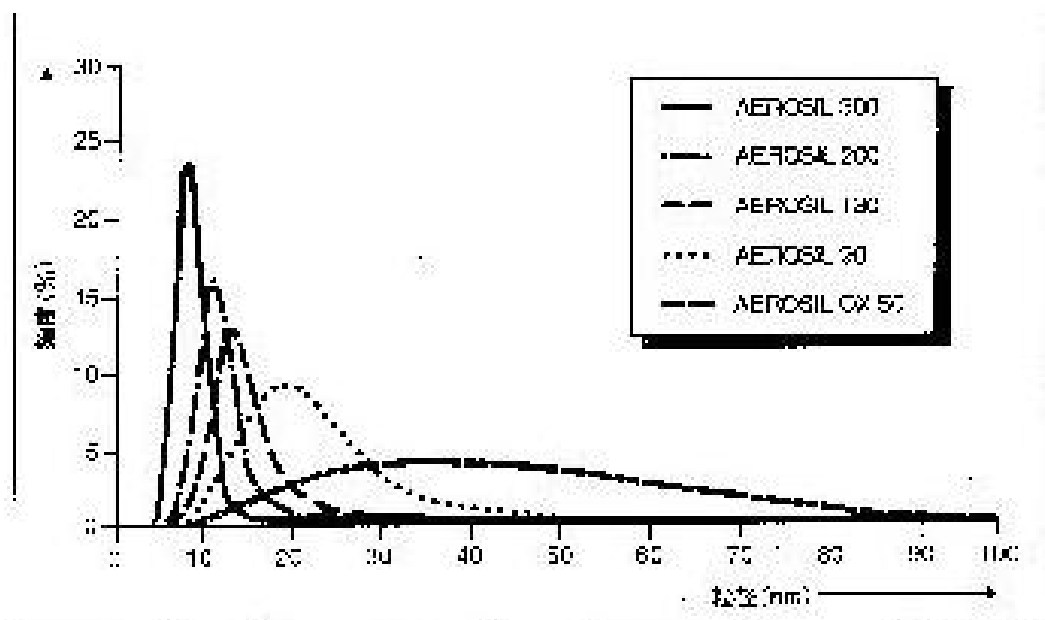


図21：様々なAEROSILグレードの一次粒子径分布曲線；ここでは濃度が等級毎に依存することに注意；AEROSIL 380とAEROSIL 300の分布曲線はほぼ同一

シラノール基の方がシロキサン基よりも muonium と反応するのでシラノール基が多いほうが muonium は拡散しやすい。

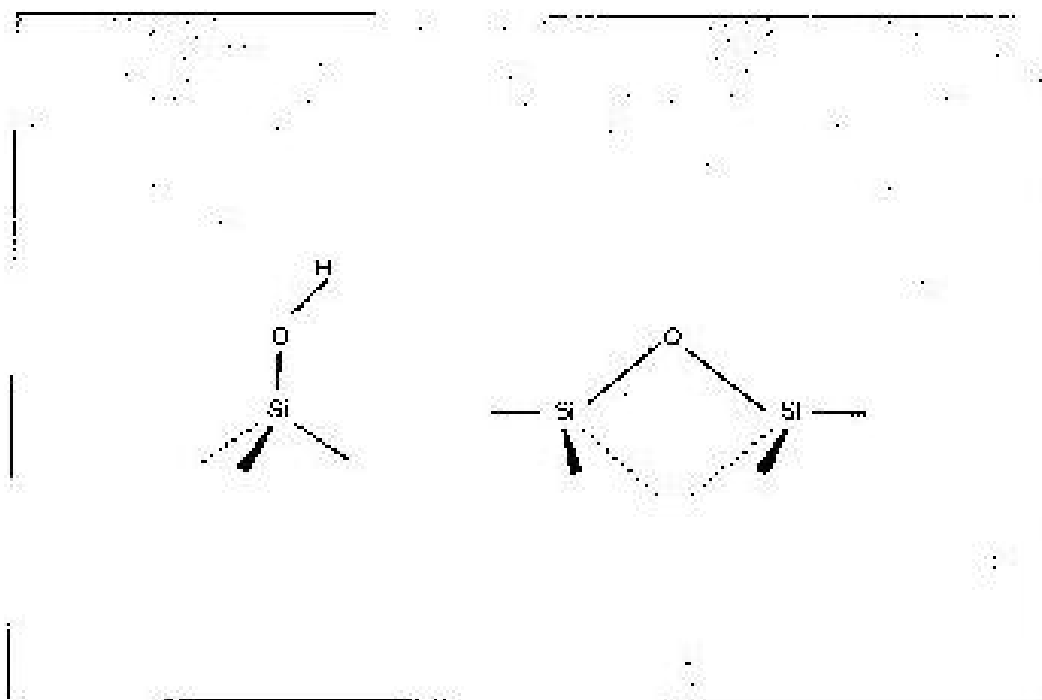
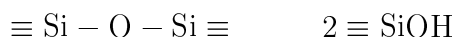


図58 AEROSIL表面のシラノール基(左)とシロキサン基(右)

一次粒子の凝集はシラノール基の水素結合による。シラノール基密度は比表面積と無関係で $2.5 \times 10^3 \text{ SiOH/nm}^2$ である。シラノール基濃度 (mmol/g) は比表面積とほぼ比例関係にある。また大気中からの水分の吸着は空気中の湿度に依存し可逆的である (湿度 82% では吸着し 55% では放出する)。

シロキサン結合は結合角にばらつきがあり、歪みのあるシロキサン結合は水と反応しシラノール基となる。



この反応により貯蔵期間中にシラノール基濃度が高くなる。AEROSIL 200(製品袋中) なら製造後 3 日で $1.8 \times 10^3 \text{ SiOH/nm}^2$ 、1 年貯蔵後で $2.65 \times 10^3 \text{ SiOH/nm}^2$ である。

A.1.2 diamond、 Al_2O_3 powder の性質

Diamond powder は粒径 50nm である。粒径分布は図 A.1.2 の通りである。99% は 100nm 以下の粒径を持っている。その他の性質はわかっていない。

Al_2O_3 powder は粒径 30nm、純度 99.98%、比表面積 $125 \text{ m}^2/\text{g}$ である。

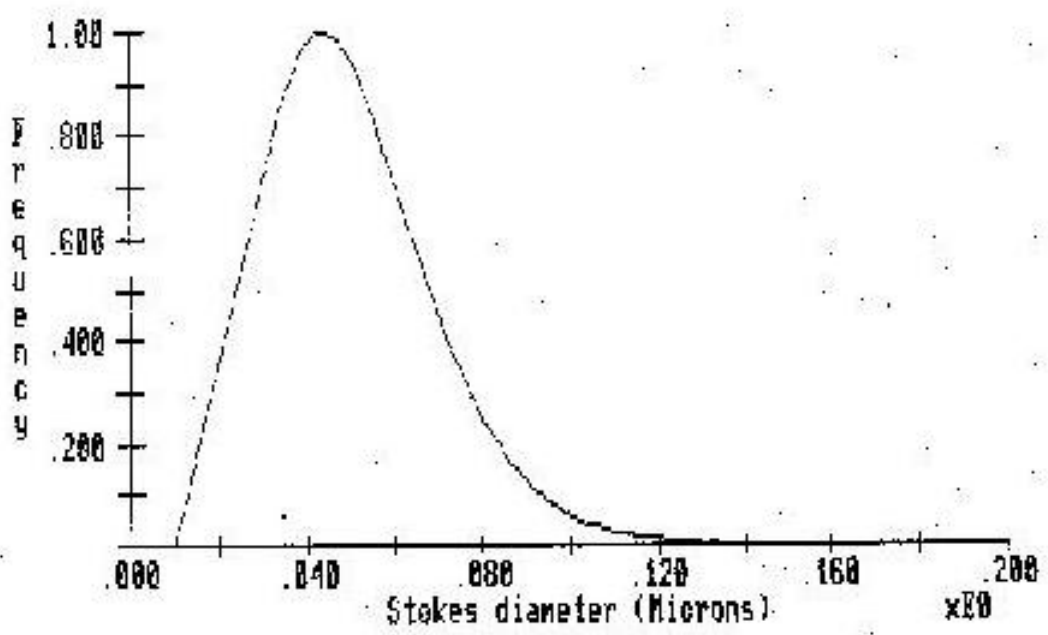


Figure A.1: diamond powder の粒径分布

Bibliography

- [1] V.W.Hughes *et al.*, Phys. Rev. A **5** ,63(1960)
- [2] P.R.Bolton *et al.*, Phys. Rev. Lett. **47** ,1441(1981)
- [3] A.P.Mills,Jr. *et al.* ,Phys. Rev. Lett. **56** ,1463(1986)
- [4] A.Matsushita,K.Nagamine ,Chem. Phys. Lett. **253** ,407(1996)
- [5] A.Matsushita,K.Nagamine ,Phys. Lett. A **244** ,174(1998)
- [6] G.A.Beer *et al.* , Phys. Rev. Lett. **57** ,671(1986)
- [7] R.F.Kiefl *et al.* , Phys. Rev. B **26** ,2432(1982)
- [8] G.M.Marshall *et al.* , Phys. Lett. **65A** ,351(1978)
- [9] K.A.Woodle *et al.* ,Z. Phys. D **9** ,59(1988)
- [10] A.C.Janissen *et al.*, Phys. Rev. A **42** ,161(1990)
- [11] E.Holzschuh *et al.* ,Phys. Rev. A **25** ,1272(1982)
- [12] 日本エアロジル株式会社,AEROSILの基本特性 No.17(1999)

A.2 Diffusion of Muonium inside Silica powder

A.2.1 Overview.

In this section we derive an expression for the rate at which an ensemble of muonium atoms, formed in fine silica powder, can escape the powder particles and move in an interstitial vacuum.

In the following section we estimate the rate at which an ensemble of thermal muonium atoms may escape a thin powder layer.

A.2.2 Motion of Muonium atoms in spherical silica particles.

The starting point for the following calculations is an expression for the rate at which particles appear at an absorbing interface per unit area, per unit time,

$$R(t) = -D(\hat{n} \cdot \nabla W) \tag{A.1}$$

where \hat{n} is a unit vector normal to the surface and

$$W(\vec{r})d\vec{r} = (4\pi Dt)^{-\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{|\vec{r}|^2}{4Dt}\right) d\vec{r} \quad (\text{A.2})$$

is the probability per unit area of finding a particle between \vec{r} and $\vec{r} + d\vec{r}$ after movement by random walk from $\vec{r} = 0$ at $t = 0$. The boundary condition $W = 0$ applies to equation 1 at an absorbing interface. The diffusion coefficient is defined here as

$$D = \frac{n \langle y^2 \rangle}{6} \quad (\text{A.3})$$

for a particle undergoing n independent displacements of mean square distance $\langle y^2 \rangle$ per unit time. An equivalent definition in terms of the mean speed c and the mean free path s is

$$D = \frac{cs}{3}. \quad (\text{A.4})$$

Consider now a sphere of radius a , whose surface is the absorbing interface, and find $R(t, \vec{x})$ for a particle starting its random motion at \vec{x} at $t = 0$. Then $W = 0$ when $\vec{r} = \vec{a} - \vec{x}$, and

$$R(t, \vec{x}) = \frac{(\pi Dt)^{-\frac{3}{2}}}{16t} \int ds(\vec{a}) \hat{n}(\vec{a}) \cdot (\vec{a} - \vec{x}) \cdot \exp\left(-\frac{|\vec{a} - \vec{x}|^2}{4Dt}\right). \quad (\text{A.5})$$

The surface integration can be performed by noting that

$$\begin{aligned} ds(\vec{a}) &= a^2 \sin \theta d\theta d\phi, \\ |\vec{a} - \vec{x}|^2 &= a^2 + x^2 - 2ax \cos \theta, \text{ and} \\ \hat{n}(\vec{a}) \cdot (\vec{a} - \vec{x}) &= |\vec{a} - \vec{x}| \cos \alpha = a - x \cos \theta. \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

Carrying out the surface integration yields

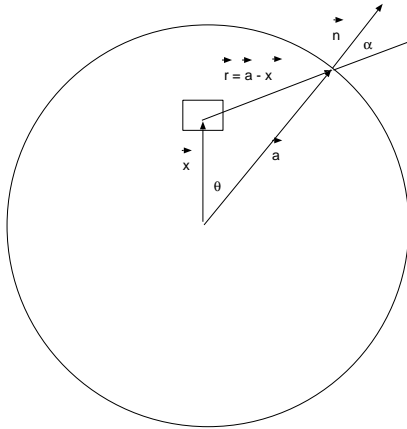


Figure A.2: Geometry of muonium emission from a sphere.

$$R(t, \vec{x}) = \frac{\pi}{2} a^2 D (\pi Dt)^{-\frac{3}{2}} \exp\left(\frac{-(a^2 + x^2)}{4Dt}\right) \cdot \left[x^{-1} \left(1 + \frac{2Dt}{a^2}\right) \sinh\left(\frac{ax}{2Dt}\right) - a^{-1} \cosh\left(\frac{ax}{2Dt}\right) \right] \quad (\text{A.7})$$

Now assume that the particle ensemble is initially distributed uniformly through the sphere with a constant density of $\frac{1}{V} = \frac{3}{4\pi a^3}$, in order to preserve the probabilistic normalization of equation 2. Then, integrating over the volume of the sphere,

$$R(t) = 3a^{-3} \int_0^a dx x^2 R(t, \vec{x}), \quad (\text{A.8})$$

which is the rate at which particles appear at the surface of the sphere, given a uniform distribution at $t = 0$. This may be evaluated using the exponential form for the hyperbolic functions, although the procedure is quite tedious. The result obtained is

$$R(t) = \pi^{-\frac{1}{2}} \frac{3}{2t} \left(\frac{Dt}{a^2} \right)^{\frac{1}{2}} \left[1 - 2 \left(\frac{Dt}{a^2} \right) + \left(1 + 2 \left(\frac{Dt}{a^2} \right) \right) \exp \left(-\frac{a^2}{Dt} \right) \right]. \quad (\text{A.9})$$

As time approaches zero, $R(t)$ grows as $t^{-\frac{1}{2}}$, which is a result of the non-zero particle density at the surface of the sphere at $t = 0$ and the assumption of a perfectly absorbing interface. As t grows without limit, $R(t)$ behaves as $t^{-\frac{3}{2}}$. It is now possible to calculate the probability that a particle has passed through the surface by time t (assuming it will not decay). Evaluating

$$P(t) = \int_0^t dt' R(t') \quad (\text{A.10})$$

gives the desired result:

$$P(t) = 1 - \text{erf} \left[\left(\frac{Dt}{a^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \right] + \pi^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{Dt}{a^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left[3 - \frac{2Dt}{a^2} - \left(1 - \frac{2Dt}{a^2} \right) \exp \left(-\left(\frac{Dt}{a^2} \right)^{-1} \right) \right] \quad (\text{A.11})$$

The error function $\text{erf}(x)$ has the usual definition:

$$\text{erf}(x) = 2\pi^{-\frac{1}{2}} \int_0^x dt \exp(-t^2) \quad (\text{A.12})$$

Another useful result includes the decay of particle of mean lifetime λ^{-1} , so that the probability of it passing through the surface before decaying is

$$\begin{aligned} P &= \int_0^\infty dt R(t) \exp(-\lambda t) \\ &= \frac{3}{2}\beta \left[1 - \beta^2 + (1 + \beta)^2 \exp \left(-\frac{2}{\beta} \right) \right], \end{aligned} \quad (\text{A.13})$$

where $\beta = \left(\frac{D}{\lambda a^2} \right)^{-\frac{1}{2}}$. Assuming that the relaxation process is controlled by the rate at which the muonium atoms could get to the voids between particles, the time dependence of the muonium polarization has the form

$$A(t) = A(0)(1 - P(t)). \quad (\text{A.14})$$

The diffusion parameter obtained for muonium in the silica powder particles, assuming the validity of the foregoing model, was

$$D = \text{tobecomputedlater}. \quad (\text{A.15})$$

It must be stressed that this may not be applicable to silica in general, nor even to powders with differing particle sizes.

A.2.3 Motion of Muonium atoms in fine powder layers.

The procedure is essentially identical to that of the previous section, with only the geometry and the parameter D requiring modification. Equations 1 and 2 apply, and the expression for $R(t, \vec{x})$ becomes, after integration over the surfaces (assumed infinite in area),

$$R(t, \vec{x}) = (2t)^{-1}(4\pi Dt)^{-\frac{1}{2}} \left[x \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) + (d-x) \cdot \exp\left(-\frac{(d-x)^2}{4Dt}\right) \right]. \quad (\text{A.16})$$

For an incident particle distribution of $\frac{1}{d}$ per unit thickness at $t = 0$, the rate of emission can be integrated over x to give the effective rate from the entire volume:

$$R(t) = \int dx \frac{1}{d} R(t, \vec{x}) \quad (\text{A.17})$$

$$= (4\pi Dt)^{-\frac{1}{2}} d^{-1} D \left[1 - \exp\left(-\frac{d^2}{4Dt}\right) \right]. \quad (\text{A.18})$$

The probability that a particle, decaying at a rate of $\lambda \text{ s}^{-1}$, will reach one particular

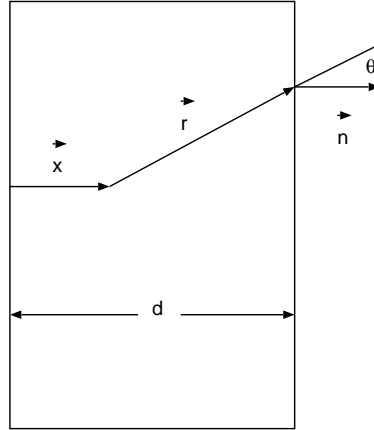


Figure A.3: Geometry of muonium emission from a layer.

surface of the layer is then

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2} \int_0^\infty dt \exp(-\lambda t) R(t) \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda d^2}{D} \right)^{-\frac{1}{2}} \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{\lambda d^2}{D}\right)^{\frac{1}{2}}\right) \right], \end{aligned} \quad (\text{A.19})$$

where $\frac{1}{2}$ comes from the neglect of the second surface.

In order to estimate this value numerically, some reasonable assumptions must be made for the value of D .

Using a formula for the mean free path s of a point particle (a muonium atom) moving freely in a uniform random collection of n/cm^3 stationary spheres (silica particles) of radius r ,

$$s = (\pi r^2 n)^{-1} \quad (\text{A.20})$$

it is found that

$$D = c(\pi r^2 n)^{-1} \quad (\text{A.21})$$

The average number density n can be written in terms of the density of silicon dioxide, ρ , and the density of the silica powder used in the layer, ρ' , as

$$n = \frac{3\rho'}{4\pi r^3 \rho} \quad (\text{A.22})$$

so that

$$D = \left(\frac{4cf}{9}\right) \frac{\rho}{\rho'} \quad (\text{A.23})$$

The mean thermal velocity c is $7.37 \times 10^5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ for muonium at room temperature. The density of silica powder used in the experiment was $\rho' = 0.04 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, whereas for bulk silica it is $\rho = 2.2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. A particle radius of $3.5 \times 10^{-7} \text{ cm}$ then leads to an estimate of

$$D = 7.9 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \quad (\text{A.24})$$

Appendix B

電子、陽電子の物質中での散乱

Bibliography

- [1] TEST
- [2] 電子・イオンビーム工学 電気学会 2.1.2

List of Figures

1.1	実験の概略図	5
3.1	陽子シンクロトロン加速器	8
3.2	μ SR スペクトロメーター	9
3.3		10
3.4	Vacuum Chamber 設計図 Preview	11
3.5	ターゲット台	11
3.6	ふるいとふるい台	12
3.7	ふるい、ターゲットホルダー、ターゲット台設計図	13
3.8	低速電子の検出器	15
4.1	真空槽のマイラ窓 (トラッカー側)	17
4.2	組み上がった真空槽	18
4.3	ガイスラー管	18
4.4	コネクタのフランジ	19
4.5	Sci-Fi 伝送効率の曲率依存性のテスト	19
4.6	MAPMT の信号	21
4.7	CERATRON のテスト	23
4.8	CERATRON のテストの写真	24
4.9	CHANNELTRON のテスト	25
4.10	CHANNELTRON のシグナル (プリアンプアウト)	26
4.11	CHANNELTRON の生のシグナル	26
4.12	タンデムでの CHANNELTRON のテスト	28
4.13	CHANNELTRON と LENS	29
4.14	最初の回路	30
4.15	30 M Ω の抵抗を入れた回路	31
4.16	TOP と END をコンデンサでグラウンドに落とす	31
4.17	CHANNELTRON のシグナル	32
4.18	アフターパルス ($V_{END} = 3500$ V, $V_{TOP} = 1000$ V, $I_W = 0.56$ A)	34
4.19	qVt スペクトラム ($V_{END} = 3000$ V, $V_{TOP} = 1000$ V, $I_W = 0$ A)	35
4.20	qVt スペクトラム ($V_{END} = 3100$ V, $V_{TOP} = 1000$ V, $I_W = 0$ A)	35
4.21	qVt スペクトラム ($V_{END} = 3200$ V, $V_{TOP} = 1000$ V, $I_W = 0$ A)	36
4.22	qVt スペクトラム ($V_{END} = 3000$ V, $V_{TOP} = 1000$ V, $I_W = 0$ A)	36
4.23	qVt スペクトラム ($V_{END} = 3000$ V, $V_{TOP} = 1000$ V, $I_W = 0.56$ A)	37
4.24	qVt スペクトラム ($V_{END} = 2900$ V, $V_{TOP} = 1000$ V, $I_W = 0$ A)	37
4.25	qVt スペクトラム ($V_{END} = 2900$ V, $V_{TOP} = 1000$ V, $I_W = 0.54$ A)	38
4.26	qVt スペクトラム ($V_{END} = 2800$ V, $V_{TOP} = 1000$ V, $I_W = 0$ A)	38
4.27	qVt スペクトラム ($V_{END} = 2800$ V, $V_{TOP} = 1000$ V, $I_W = 0.58$ A)	39

5.1	粉をふっている姿	40
5.2	成功した AEROSIL と崩れた AEROSIL	41
5.3	成功したダイヤモンドと崩れたダイヤモンド	41
5.4	実際にビームを当てた EH 5	42
5.5	μ SR によるカウントレートの変化	43
5.6	μ SR のアシンメトリーの中心値のずれ	44
5.7	ターゲットピーク的位置	45
5.8	Spill 数で normalize したターゲットのピークの高さ	45
5.9	Oscilloscope-A1	46
A.1	diamond powder の粒径分布	58
A.2	Geometry of muonium emission from a sphere.	60
A.3	Geometry of muonium emission from a layer.	62

List of Tables

4.1	Powder properties	16
4.2	Sci-Fi 伝送効率の曲率依存性テスト。単位が inch になっているのは、ユニバーサル基盤を用いたため。	20
4.3	CERATRON のテスト (1 日目)	22
4.4	CERATRON のテスト (2 日目)	22
4.5	CHANNELTRON のダークカレント	27
4.6	CAGE のテスト	27
4.7	タングステンの電源の極性反転テスト	29
4.8	ダークカレント ($V_{TOP} = 1000 \text{ V}$, $V_{END} = 2800 \text{ V}$)	32
4.9	ダークカレント ($V_{TOP} = 1000 \text{ V}$, $V_{END} = 3000 \text{ V}$)	32
4.10	真空計をかえたあとのデータ ($V_{TOP} = 1000 \text{ V}$, $V_{END} = 3000 \text{ V}$)	33
4.11	ダークカレント ($V_{TOP} = 1000 \text{ V}$, $V_{END} = 3500 \text{ V}$)	34
4.12	ゲートジェネレータに入れたときのダークカレント	39