Hyperfine Structure of Positronium in Its Ground State

99 年度課題研究 P2
内田桐日 中山法子 松井信 溝内健太郎

2000 年 7 月 1 日

Abstract

Positronium は電子と陽電子の束縛状態であり、基底状態 (n=1) は para-positronium($^1S_0$),orthopositronium($^3S_1$) とに分られる。これらの状態は電子-陽電子間のスピン-スピン相互作用のため Hyperfine Structure と呼ばれる微小なエネルギーの分離を生じている。我々の目的はその QED によって予言されている２つの状態のエネルギー差 hyperfine structure $\delta\nu$:2.03427 $\times$ 10^5MHz(α^4-ry) を実験的に検証することである。

$\delta\nu$ はある大きさ H_0 の静磁場中の positronium の Zeeman splitting した M $=\pm1$ と M $=0$ の間のエネルギー差 ($\delta\nu_1$) と関連のある値である。したがって H_0 と $\delta\nu_1$ を決めれば $\delta\nu$ が求められる。

Zeeman splitting した positronium は一重項 (S $=0$) と三重項 (S $=1$) の M $=0$ の状態が交じりあう。S $=0$ は 2γ に、S $=1$ は 3γ に対消滅し、2γ への消滅 rate は $\lambda_p = 8.03\times10^9 sec^{-1}$ (理論値) であり、3γ への消滅 rate は $\lambda_o = 7.21\times10^6 sec^{-1}$ (理論値) であるので、positronium に共鳴周波数の microwave を照射して M $=\pm1$ を M $=0$ に遷移させると、M $=0$ に遷移した positronium はほぼ 2γ になる。そこで 2γ の増加を調べることで microwave の共鳴周波数つまり $\delta\nu_1$ を求めることができる。

本実験では、過去幾つかのレポートに倣い、microwave の周波数を一定 (1280MHz) に保ち、静磁場 (6000Gauss 弱) を変化させることにより共鳴曲線を求め、それにより $\delta\nu$ を求めることにした。

しかし、設備や装置の不備、技術的な難しさのため Hyperfine Structure の値を得るまでには至らなかった。

Contents

1 INTRODUCTION **3**

2 THEORY **5**
2.1 スピン固有状態 5
2.2 選択則 5
2.3 静磁場による遷移 6
2.4 Microwave による遷移 6
2.5 Resonance Line 7

3 APPARATUS **9**
3.1 Cavity 9
3.1.1 Cavity 9
3.1.2 Microwave Mode 9
3.1.3 Q 値 10
3.1.4 Cavity の中心の磁場 11
3.1.5 Coupling 11
3.2 Gas 13
3.3 Microwave System 13
3.4 Static Magnetic Field 14
3.4.1 Poisson による磁場解析 14
3.4.2 電磁石系のセットアップ 16
3.5 Detector System 17
3.5.1 鉛を用いたスリットの設計 17
3.5.2 HV データ 17
3.6 Coinsidence System 18

4 PRELIMINARY MEASUREMENT **20**
4.1 Microwave System 20
4.1.1 Band Pass Filter の性能の測定 20
4.1.2 出力 Power の時間的安定性の測定 22
4.1.3 共振周波数の時間的安定性の測定 22
4.2 Static Magnetic Field 23
4.2.1 磁場分布の測定 23
4.3 Detector System 25
4.3.1 各 PMT のカウントレートの測定 25
4.3.2 Background コインシデンスの測定 25
4.3.3 磁気シールドとＰＭＴのゲイン変化の測定 26

5 EXPERIMENTAL PROCEDURE **27**

6 ANALYSIS **28**

7 ACNOWLEGMENTS etc. **40**
7.1 ACKNOWLEGMENTS 40
7.2 感想 40

Chapter 1

INTRODUCTION

positronium(e^+e^-) は electron と positron のみで構成されているので QED をテストするのに非常に適した材料である。the bound-state twobody system については Bethe-Salpeter equation によって記述される。

parapositronium($^1S_0$ state) と orthopositronium($^3S_1$ state) の間の基底状態 $n = 1$ におけるわずかなエネルギー分裂を hyperfine structure separation と呼ぶ。この hyperfine structure separation の理論的な値は Bethe-Salpeter equation に基いて計算されている。

この hyperfine structure separation を求める実験は手元の資料によると 1950 年代に二つ、1970 年と 1976 年にそれぞれ一つづつレポートが出ている。1950 年代の 2 つの実験では 200ppm の精度で、1970 年の論文では 60ppm の精度で測定されている。1960 年代は positronium からの γ 線のエネルギースペクトルの、345 KeV to 390 KeV のカウント V と 485 KeV to 530 KeV のカウント P の比 V/P versus magnetic field により共鳴曲線を求めている (compton edge:340KeV) のに対して 1970 年の方は 2γ の coincidence をとっていることが二つの実験の大きな相違点である。そして 1976 年のレポートでは、magnet が大きく静磁場の一様性が高まり広い範囲で測定出来るようになったために counting rate が増加して、20ppm にまで精度が上げられていると述べているが、理論値との関係には逆にずれが生じている。以下に分っている範囲で過去の実験についての比較を表にまとめた。これらの実験はすべて microwave を magnetron で発振させている。前年に我々の先輩方も magnetron を用いて同じ実験を試みたが magnetron と導波管の扱いは困難で、本実験をするに至らなかった。

今年度は microwave の発振に SSG(standard signal generator) を使い、その出力 power を増幅して使用した。我々の選んだ microwave の周波数は 1280MHz である。この領域を選んだのは、特に本質的な利点があった訳ではなく、集めることのできた実験器具の制約に寄るものである。本実験は ABSTRACT で触れたように設備や装置の不備、技術的な難しさのため結果的には Hyperfine Structure の値を得るまでには至らなかった。詳しくは後程述べることになるが、学生実験の範囲における幾つかの改善策は考えられる。もし我々の後輩がこの実験に興味を持ち、同じ実験にチャレンジする時にこのレポートが参考になれば良いだろう。

year	microwave frequency[MHz]	center magnetic field[Gauss]
1959	2457.9	11
1970	2384	9.5 - 21.3
1976	2320	7.6 - 9.4

Table 1.1: 中心磁場はおよその値。

year	diameter[cm]	gap[cm]	magnetic field	homogeneity
1959	22.86	7.541	8000	500ppm
1970	30.48	7.30	7900	-
1976	-	10.6	7800	3ppm

Table 1.2: homogeneity は positron の飛程の範囲

year	hyperfine structure[MHz]	the theoretical value[MHz]
1959	2.0333 ± 0.0004	$2.0337 \times 10^5(\alpha^3\text{-ry})$
1970	2.03403 ± 0.00012	$2.03427 \times 10^5(\alpha^4\text{-ry})$
1976	2.03384 ± 0.00004	?

Table 1.3: hyperfin structure

Chapter 2

THEORY

ここで登場する式の導出、詳しい説明は P2 98 Report を参照して欲しい。

2.1 スピン固有状態

Positronium(以下 Ps と略す) は電子と陽電子の束縛状態であるから、その基底状態はスピンにより Singlet の ${}^1S_0$ と Triplet の ${}^3S_1$ の 2 種類にわけられる。この状態をそれぞれ

$$\mid S, m\rangle \qquad (S = 1, m = \pm 1, 0 \quad or \quad S = 0, m = 0) \tag{2.1}$$

と表すことにする。外場として何も加えないときはこれらの状態がエネルギー的にほとんど縮退しているが、電子-陽電子間にスピン-スピン相互作用が存在するためわずかに縮退がとけている。これを Hyperfine Structure という。そのエネルギー固有値 (W_s とする) の差 $\Delta W = W_1 - W_0$ は振動数を用いて次のように表せる。

$$\Delta\nu = \frac{\Delta W}{2\pi\hbar} = \frac{1}{4}\alpha^4 mc^2 \left[\frac{7}{3} - \frac{\alpha}{\pi}(\frac{32}{9} + 2\ln 2) + \mathcal{O}(\alpha^2)\right] \tag{2.2}$$

$$= 2.03381 \times 10^2 \quad GHz \tag{2.3}$$

2.2 選択則

C(charge conjugation) の固有値を考えると、光子 n 個の状態がもつ C 固有値は $C = (-1)^n$ であるのに対し、Ps に関しては角運動量固有状態 $\mid {}^{2S+1}L_J\rangle$ について $C = (-1)^{L+S}$ となっている。したがって、電磁相互作用は C 不変であることから、Ps の崩壊について以下の選択則が得られる。

$$\begin{array}{ccc} \text{states with even L+S} & \not\longrightarrow & \text{odd } \gamma \\ \text{states with odd L+S} & \not\longrightarrow & \text{even } \gamma \end{array}$$

これよりここで考えるべき主な崩壊モードは

$$\begin{array}{ccc} \text{Singlet Ps} & \longrightarrow & 2\ \gamma \\ \text{Triplet Ps} & \longrightarrow & 3\ \gamma \end{array}$$

とであることがわかる。

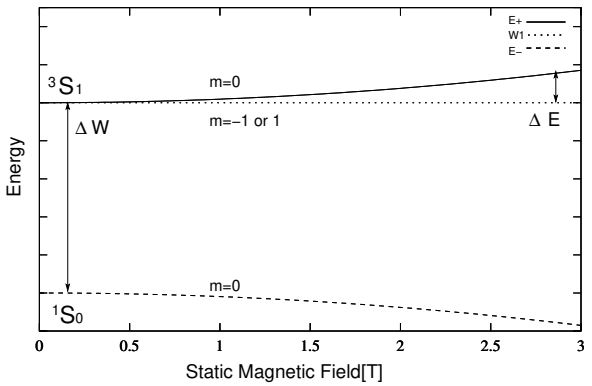


Figure 2.1: 静磁場によるエネルギー準位の分裂

2.3 静磁場による遷移

まず静磁場 B_0 のみを外場として導入した場合を考える。このときの Ps のエネルギー固有状態 $\mid \psi_{S,m}\rangle$ とその固有値は以下で与えられる。

$$\mid \psi_{1,\pm1}\rangle = \mid 1,\pm1\rangle, \quad E_{1,\pm1} = W_1 \tag{2.4}$$

$$\mid \psi_{1,0}\rangle = \frac{1}{\sqrt{1+y^2}}(\mid 0,0\rangle + y \mid 1,0\rangle), \quad E_{1,0} = \frac{1}{2}\{(W_1+W_0) + \Delta W\sqrt{1+x^2}\} \equiv E_+ \tag{2.5}$$

$$\mid \psi_{0,0}\rangle = \frac{1}{\sqrt{1+z^2}}(\mid 0,0\rangle - z \mid 1,0\rangle), \quad E_{0,0} = \frac{1}{2}\{(W_1+W_0) - \Delta W\sqrt{1+x^2}\} \equiv E_- \tag{2.6}$$

ここで

$$y = \frac{1}{x}(\sqrt{1+x^2}+1), z = \frac{1}{x}(\sqrt{1+x^2}-1) \tag{2.7}$$

$$x = 2g'\mu_B B_0/\Delta W \tag{2.8}$$

である。このときのエネルギー準位の分裂は図 2.1 のようになる。

このとき状態については $S=1, m=0$ の状態と $S=0, m=0$ の状態で混合が起こる。また、静磁場の強さを十分大きくすることでこの混合部分の崩壊をほとんど $2\,\gamma$ にすることができる。一方、$S=1, M=\pm1$ の状態は依然として変化を受けず $3\,\gamma$ 崩壊を起こしている。

2.4 Microwave による遷移

さらに Microwave を導入する。先の場合は $m=0$ 状態同士の遷移であったが、今度は Microwave によって $S=1, m=\pm1$ を $S=1, m=0$ に遷移させることがで

きる。この 2 つの外場によってそれぞれの状態が 2 γ に崩壊する確率 $P_{S,m}$ を理論計算すると次のようになる。

$$P_{0,0} = \frac{\lambda_{00,2}}{\lambda_{0,0}} \tag{2.9}$$

$$P_{1,0} = \frac{\lambda_{10,2}}{\mid \delta_1 - \delta_2 \mid^2} \left[\frac{\mid \delta_1 \mid^2}{\delta_1 + \delta_1^* + \lambda_o} - \frac{\delta_1^* \delta_2}{\delta_1 + \delta_2^* + \lambda_o} + (interchange 1 \leftrightarrow 2) \right] \tag{2.10}$$

$$P_{1,1} = \lambda_{10,2} \left| \frac{\hbar}{2V} \right|^2 \left| \frac{\delta_1 \delta_2}{\delta_1 - \delta_2} \right|^2 \left[\frac{1}{\delta_1 + \delta_1^* + \lambda_o} - \frac{1}{\delta_1 + \delta_2^* + \lambda_o} + (interchange 1 \leftrightarrow 2) \right] \tag{2.11}$$

$$P_{1,-1} = P_{1,1} \tag{2.12}$$

ただし、ここで現れる記号の意味は以下の通りである。
外場がない場合について

λ_p : Singlet Ps から 2 γ への崩壊確率
λ_o : Triplet Ps から 3 γ への崩壊確率

静磁場がかかっている場合について

$\lambda_{S,m}$: $\mid \psi_{S,m} \rangle$ の崩壊確率
$\lambda_{Sm,n}$: $\mid \psi_{S,m} \rangle$ から n γ への崩壊確率

δ_1,δ_2,V については Appendix で与える。

2.5 Resonance Line

先に与えた確率から、Microwave なしの場合とありの場合で 2 γ 崩壊を起こす Ps の個数変化を求めることができる。Ps 生成時に各状態に $N_{S,m}$ 個存在していたとすると、Ps 生成時の全体数で規格化した個数変化率 P_T は次のように与えられる。

$$P_T = \frac{P_{1,1}N_{1,1} + P_{1,-1}N_{1,-1} + (P_{1,0} - \frac{\lambda_{10,2}}{\lambda_{1,0}})N_{1,0}}{N_{0,0} + N_{1,0} + N_{1,1} + N_{1,-1}} \tag{2.13}$$

これを崩壊の Resonance Line と呼ぶ。この式は近似を行うと次のように変形される。

$$P_T = A \frac{{B_1}^2}{(B_0 - B_{0r})^2 + \frac{1}{4}\Gamma^2} \tag{2.14}$$

ただし B_1 は Microwave による磁場であり、

$$A = \frac{x^2}{256h^2} \frac{(g' \mu_B B_{0r})^2}{{f_{01}}^2} \frac{\lambda_{10,2}}{\lambda_o} \tag{2.15}$$

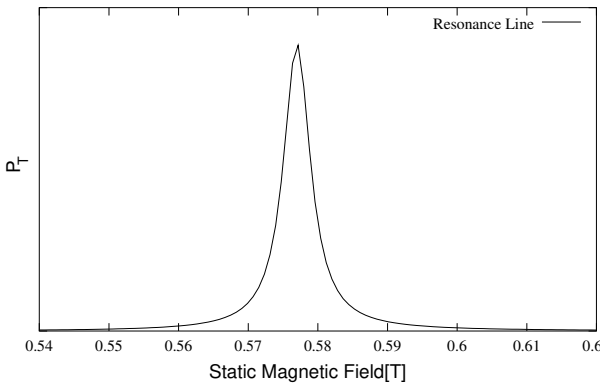


Figure 2.2: Resonance Line Shape

$$\Gamma = \frac{B_{0r}}{4\pi f_{01}} \left[\left(2 - \frac{x^2}{4 - x^2} \lambda_o \right) + \frac{x^2}{4 - x^2} \lambda_p \right] \tag{2.16}$$

$$B_{0r} = \frac{h}{g' \mu_B} \sqrt{\Delta\nu f_{01}} \tag{2.17}$$

$$f_{01} = \frac{\Delta E}{h} \tag{2.18}$$

とおいた。

今回の実験では 1.28GHz の Microwave を用いる。この場合，静磁場が 5770 Gauss 程度のとき個数変化率がピークになることが予想される。また、このときの Resonance Line の概略は図 2.2 のようになる。この理論曲線と実験によって得られる Microwave ありとなしの場合での 2 γ 崩壊の Event 数の差を比べることで Hyperfine Structure を求めることができる。

Chapter 3

APPARATUS

3.1 Cavity

3.1.1 Cavity

用いた Cavity はアルミの銅メッキで出来ており、蓋と本体から成っている。形は円筒形である。本体と蓋の電気的な接触は蓋にとりつけられた銅のフィンガーによる。本体の底中央にはソースフォルダがついており、底の外側にソースを出し入れできる小さな蓋がついている。Cavity の内側のサイズは直径 R が 142.8mm, 高さ d が 42mm である。側面の厚みは 10mm で、銅メッキの厚さは $5\mu m$ である。当初 Cavity の中を真空にして何らかのガスを投入する計画があったため Cavity は、ある程度の真空に耐えられるように設計されており O リングや、側面にはガスの出入口もついている。cupling は側面から差し込まれており、その反対側にはフィードバックの為のピックアップがついている。そのそばにはチューナーが差し込まれている。cupling は銅の同軸の二つの筒の先に銅のループを付けたものであり、磁場 cupling している。cupling は軸にそって回すことができ、ループを貫く磁束をかえることができる。ピックアップは導線を電場にそって曲げてあり電場 cupling している。しかし、本実験では、フィードバックのシステムが完成しなかったのでピックアップはターミネーターにつながっている。

- 511KeV の γ の absorption length Al: 4.409 cm, Pb: 0.546 cm
- skin depth : $1.8\mu m$

3.1.2 Microwave Mode

Cavity 中の Microwave は TM_{110} の mode を用いた。この mode は磁場が Cavity の軸方向 z(静磁場) に対して垂直に偏極しており変位 z に依存しない。以下に Cavity 内の Microwave の電場と磁場を記す。

$$\vec{E} = \hat{z} E_0 J_1(\gamma_{11}\rho)\cos\phi\cos\omega t \tag{3.1}$$

$$\vec{H} = \frac{E_0}{\mu\omega}\left(\hat{\rho}\frac{J_1(\gamma_{11}\rho)}{\rho}\sin\phi + \hat{\phi}\gamma_{11}J_1'(\gamma_{11}\rho)\cos\phi\right)\sin\omega t \tag{3.2}$$

$$\gamma_{11} = \frac{x_{11}}{R} \tag{3.3}$$

$$J_1(x_{11}) = 0 \tag{3.4}$$

3.1.3 Q 値

Cavity 内部にたまった microwave の power を W 、角周波 ω、壁によって消費される power を P_u とすると unloaded $Q_u = \frac{\omega W}{P_u}$ と外部からの coupling による損失 power を P_c とすると、 coupling $Q_c = \frac{\omega W}{P_c}$ という値があり、Q_u は、理論によって求めることができる。これにたいし、測定で得られる Q は、

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_u} + \frac{1}{Q_c} \tag{3.5}$$

により定義される Q である。

まず、unloaded Q_u は次の式で与えられる。

$$Q_u = \frac{1}{1 + \frac{d}{R}} \frac{d}{\delta} \tag{3.6}$$

ただし δ は、 skin depth であり、 microwave が壁にしみこむ深さのことである。microwave 1280 MHz における銅の skin depth δ は

$$\delta = \left(\frac{2}{\mu_c \omega \sigma} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{3.7}$$

で与えられ、 1.847×10^{-6}m である。

そしてこの Cavity の unloaded Q_u の理論値は 1.9×10^4 となる。

また、 Q は Cavity に microwave を投入してその反射電力を見ることで測定した。Cavity の共振周波数 ω_0 と異なる周波数 ω をもった microwave に対する振幅反射率 r は

$$r = \frac{\frac{\omega_0}{Q_c}}{(\omega - \omega_0) - i(\frac{\omega_0}{2Q})} - i \tag{3.8}$$

で与えられる。

$$\Delta\omega = \omega - \omega_0 \tag{3.9}$$

とすると power としての反射率 $R = |r|^2 = r^* r$ は、

$$R = \frac{(\frac{\Delta\omega}{\omega_0})^2 + [\frac{1}{2Q} - \frac{1}{Q_c}]^2}{(\frac{\Delta\omega}{\omega_0})^2 + (\frac{1}{2Q})^2} \tag{3.10}$$

すなわち

$$R = \frac{(\frac{2\Delta\omega}{\omega_0})^2 + [(\frac{1}{2Q})^2 - (\frac{1}{Q_c})^2]}{(\frac{2\Delta\omega}{\omega_0})^2 + (\frac{1}{Q_u} + \frac{1}{Q_c})^2} \tag{3.11}$$

となる。$\Delta\omega = 0$ の時電力反射率を R_0 とすると

$$R_0 = \left\{ \frac{(\frac{1}{Q_u}) - (\frac{1}{Q_c})}{(\frac{1}{Q_u}) + (\frac{1}{Q_c})} \right\}^2 \tag{3.12}$$

となる。$Q_u = Q_c$ の時の coupling を臨界結合とよび、この時反射がなくなる。また、$\frac{2\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{1}{Q}$ の時の反射 R は完全反射 $R = 1$ と $\omega = \omega_0$ の時の反射 R_0 との半分の $\frac{1+R_0}{2}$ となるので、周波数を振って反射波の power が $\frac{1+R_0}{2}$ の時の $\Delta\omega$ を調べれば Q 値が求まる。このようにして求めた Q 値 はおよそ 6000 を越える程度である。

3.1.4 Cavity の中心の磁場

臨界結合している Cavity が平衡状態に達すると壁による損失 P_u は入射 power と等しくなり、本実験において $P_c = P_u = 50W$ となる。これと測定した Q=6000 より Cavity 内にたまっている microwave の power は 1.24×10^{-5} W となり、Cavity 内の microwave の power を積分すると中心磁場 $|\vec{B}| = 4.62 \times 10^{-4}T$ となる。

3.1.5 Coupling

側面近くの coupling 周辺の磁場は 3.7×10^{-4}gauss 程度であり、Microwave の入力 50W に対してループの磁場に垂直な面へ投影した面積は $0.23cm^2$ 程度と見積ることができる。

Figure 3.1: Cavity 本体

Figure 3.2: Cavity 蓋

Figure 3.3: coupling

3.2 Gas

当初は Cavity 内部に Ar または N_2 を入れて positronium を生成しようとした。しかし、その準備が間に合わなかったので空気でのみ実験をした。

3.3 Microwave System

ここではマイクロ波出力系に関するセットアップの組み方と、用いた各機材の説明をする。

セットアップの組み方は下の通りである。

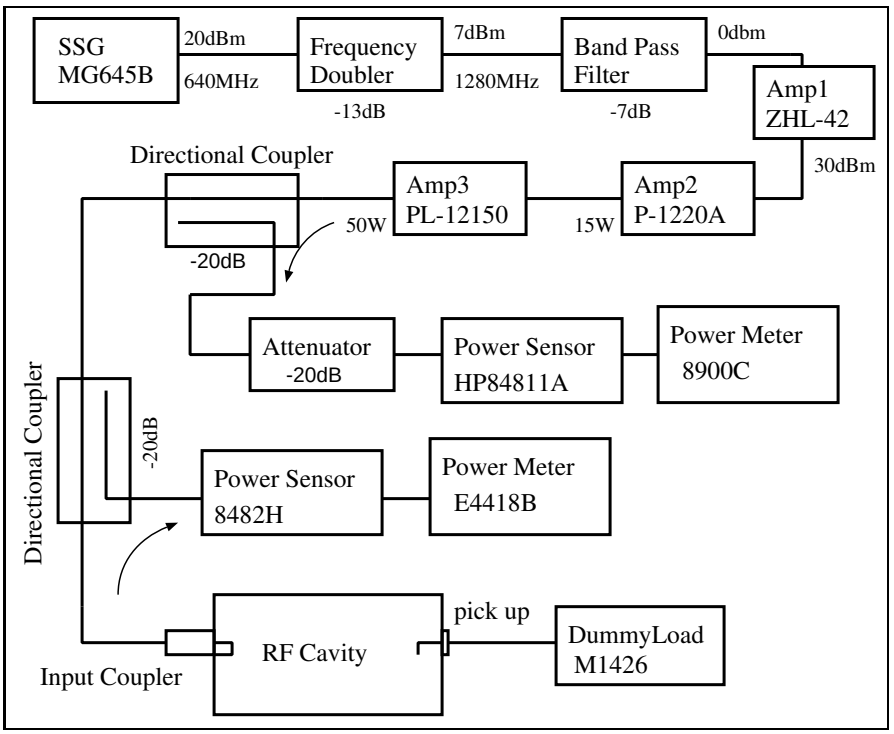


Figure 3.4: Setup （マイクロウエーブ系）

各部の説明を下に記す。

SSG (Standard Signal Generator) 標準マイクロ波発振器。発信周波数の調整はコースチューニング、ファインチューニングの 2 つが可能であり、ファインチューニングだと 1kHz 弱の単位で調整可能。最大発振周波数は 1040 MHz である。フロントに周波数カウンターがついており、発振している周波数は 1kHz まで測定可能である。

Frequency Doubler 入力電磁波の周波数を 2 倍にして出力する装置。SSG の最大発振周波数が 1280 MHz に届かないために使用する。

Band Pass Filter Frequency Doubler が作る 3 倍波や 4 倍波等、及び そのまま出て来てしまう基本波をカットする。これは、自作品であるので、スッペクはあとで報告する。

Amp1 リニアアンプである。 ゲインは 30db 得られる。

Amp2 入力電力 1-2 W、 出力電力 15W-20W のアンプである。アマチュア無線用。

Amp3 入力電力 15 W、出力電力は high mode で 120-150W、low mode で 50W のアンプである。

Directional Coupler 方向性結合器。結合度が 20 ± 0.5 db で、方向性が 15db 以上 であることが保証されている。ここでは、入力電力の一部を取り出して、どれぐらいの電力が行っているのかをモニターしたり、キャビティーからの反射を取り出して、反射率をモニターするのに用いた。

Attenuator 20db のアテネーション効果がある。直接パワーメータに大きな電磁波をいれると壊してしまう恐れがあるので、減衰させるために用いた。

Digital Powermeter E4418B キャビティーからの反射をモニターするために用いたパワーメータである。反射はアンプ等の機器に悪影響をもたらすため、出来るだけ細かくモニターしたい。そのために、デジタルメータを採用した。

Analog Powermeter 8900c 入力電力をモニターするパワーメータである。入力電力が時間的に安定かどうか? とか、望むだけのパワーが出ているかどうか? のチェックを行う。

Dummyload 終端抵抗。
今回は、ピックアップからの出力を用いなかったので、とりあえずターミネートするのに用いた。

3.4 Static Magnetic Field

同様にマグネットのセットアップを下に記すのだが、その前になぜこのようなセットアップになったのかという背景を述べる。

今回の実験では電磁石による静磁場は 6000 gauss 程度必要とされている。我々の使用できる電磁石はそのまま使用すると、手元にある 35V-50A の電源で 4970 gauss しか出せない。そこで、何らかの方法で、6000 gauss を得る必要がある。その方法を以下で考察した。

（ 参考 ） 現状では、電源を MAX 状態で使うと、27.5V、51.9A かける事ができ、電流不足でリミットがかかる。電磁石のコイル自体は 70A MAX であり、流すことの出来るカレントには余裕がある。" 電源から電磁石へのケーブル " と " 電磁石内のコイル " との合成抵抗は、$R = 0.53\Omega$ である。またギャップサイズは 10cm である。

3.4.1 Poisson による磁場解析

ここでは、磁場解析ソフト Poisson を使いシュミレーションをすることで 6 k gauss を得る方法を考察する。

電源を変えてカレントを **70A** 流す

カレント 70A を流すために必要な電圧は、$V = 70 \times 0.53 = 37.1$[V]。もしこのスペックを満たすような電源が見つかったとして、シュミレーションすると

$$\textbf{Poission} > 6459 \text{ gauss}$$

(このデータは、ギャップ中心での磁場の値である。)
この方法だと十分な磁場が得られるが、実現するためには 70A を出せるだけの電源を用意する必要がある。これは我々の実験では非常に難しい。そこで、出来るだけ用意する物が簡単になるような指針をとる。

電源の並列化を行うことで **35V(Max)** となるまで電流を流す

電圧を 35V までかけられるとすると、66A のカレントを流すことが出来る。そこであと、35V-16A 以上の電源が手に入るとして、これを並列化することでいくらまで磁場を得ることが出来るか見積もってみる。

$$\textbf{Poission} > \quad 6090 \text{ gauss}$$

シムをつけてギャップ間を縮める

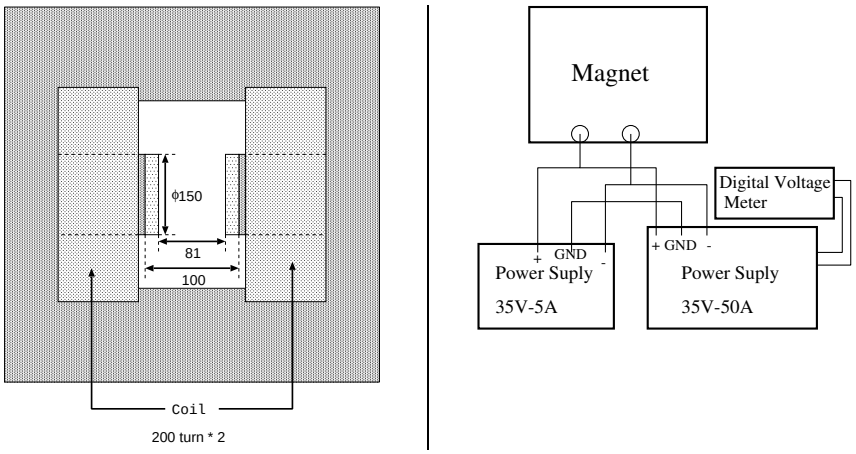
カレントは変えずに、pole にそれぞれ厚さ 1cm のシムをつけることでギャップを 8cm とする。

$$\textbf{Poission} > \quad 6147 \text{ gauss}$$

3.4.2　電磁石系のセットアップ

以上の考察をもとに実際の実験で用いる電磁石系のセットアップを決定した。まず Poisson でシュミレートした候補の内、カレントを大きく増やす前 2 つの方法は、発熱を伴い危険性を大きく増す上に、適当な電源が見つからないため見送り、今回の実験では最後のシムをつける方法で行うことにした。また実験中の静磁場測定として、常時モニターを行うことにしたため、ＮＭＲプルーブを指しこむための関係で、一方のシムを 9mm 厚とした。他方は 1cm 厚のままである。

カレントの調整についてだが、手元にある 35V-50A 電源では、いくらがんばっても 10 gauss 程度の微調整は望めない。と言うのも、磁場で 10 gauss の調整は、カレントでは 0.08A 程度の調整に相当するからである。(半値幅は 20gauss 程度である。ピーク付近を見たいと思うとおよそ 1 gauss 単位での微調整が要求される。) そこで 35V-5A の電源と並列化運転し、この小さい方の電源を微調整用に用いることで、要求する磁場からの差を 1∼3 gauss 以内に押さえることが可能になった。



3.5 Detector System

Detector は下に示すように 縦が 2 インチ、 横も 2 インチ、奥行きが 8 インチの NaI シンチレータとそれに最初から付属されていた PMT を用いた。NaI シンチレータ、PMT ともに BICRON 製である。

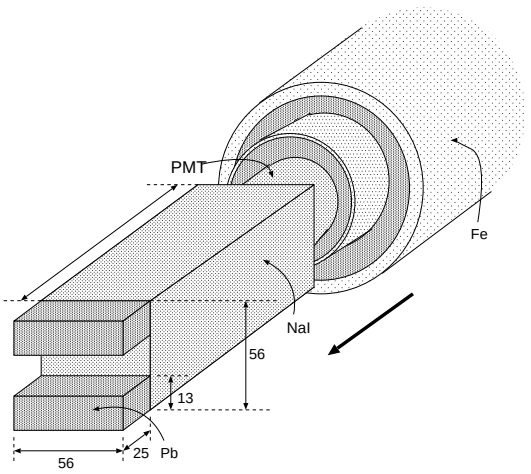


Figure 3.5: PMT

3.5.1 鉛を用いたスリットの設計

我々の測定する γ 線は、RF 磁場にさらされた Ps から来るものでなければならない。そのため Positron が、RF 磁場の無い Cavity の表面で electron を捕まえて、対消滅することによって出てくる γ 線は遮断されなければならない。Cavity 内部は十分強い静磁場にさらされているため、Positron はラーマ運動をし、Cavity 側面にたどり着くことはない。そのため Cavity の天井付近と、床付近が NaI から見えなくなれば良い。そこで NaI シンチレータの上下に鉛を貼り付けた。鉛の Attenuation Length は 500 KeV の γ 線で 0.54cm。鉛スリットの厚さは 2.5cm であるから

$$e^{-2.5/0.54} = 9.76 \times 10^{-3} \sim \frac{1}{100}$$

ゆえに、天井・床から来る γ 線は 2 桁落ちとなる。

3.5.2 HV データ

各 PMT にかけた high voltage の値はそれぞれ

PMT name	Voltage [V]	PMT name	Voltage [V]
PMT1	1150	PMT5	1180
PMT2	1180	PMT6	1090
PMT3	1135	PMT7	1190
PMT4	1200	PMT8	1145

であり、この値は以下の実験でも常に同じで、変わることがない。

3.6 Coinsidence System

positronium の 2γannihilation による 2γ の検出は、Cavity の軸に対して対称に二つ一組の NaI$2inch \times 2inchi \times 8inch$ を四組並べて行った。NaI には PMT が取付けられており、PMT からの信号がある threshold を超た時に coinsidence をとって $1\mu sec$ の gate を開き、それぞれの信号を ADC に取り込んだ。PMT の信号は 511KeV が ADC の 800channel になるように設定しようとしていたが、全体に少し低い channel になってしまった。threshold は 511KeV の光電ピークとコンプトン端が見える程度に設定したが、3γ が沢山見えてしまっているようで得られたデータのコンプトン端を確認することは出来なかった。

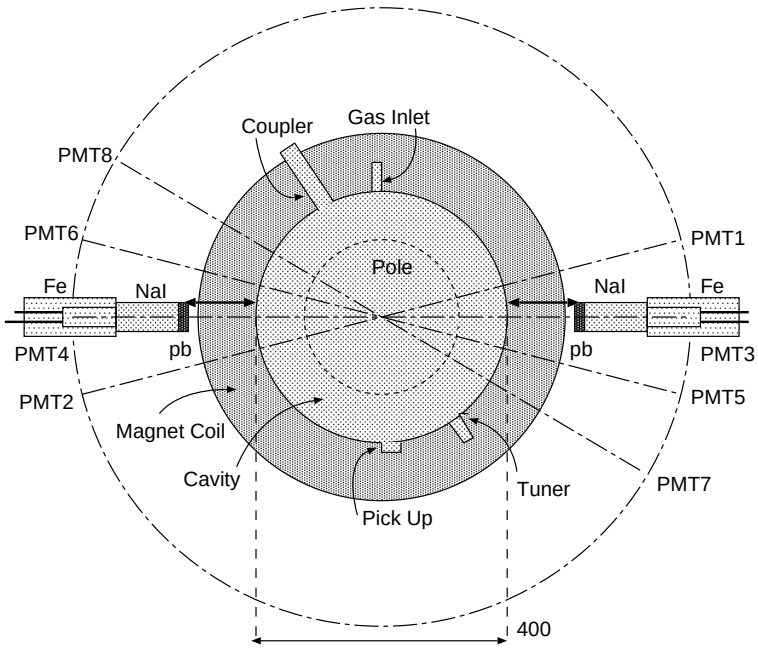
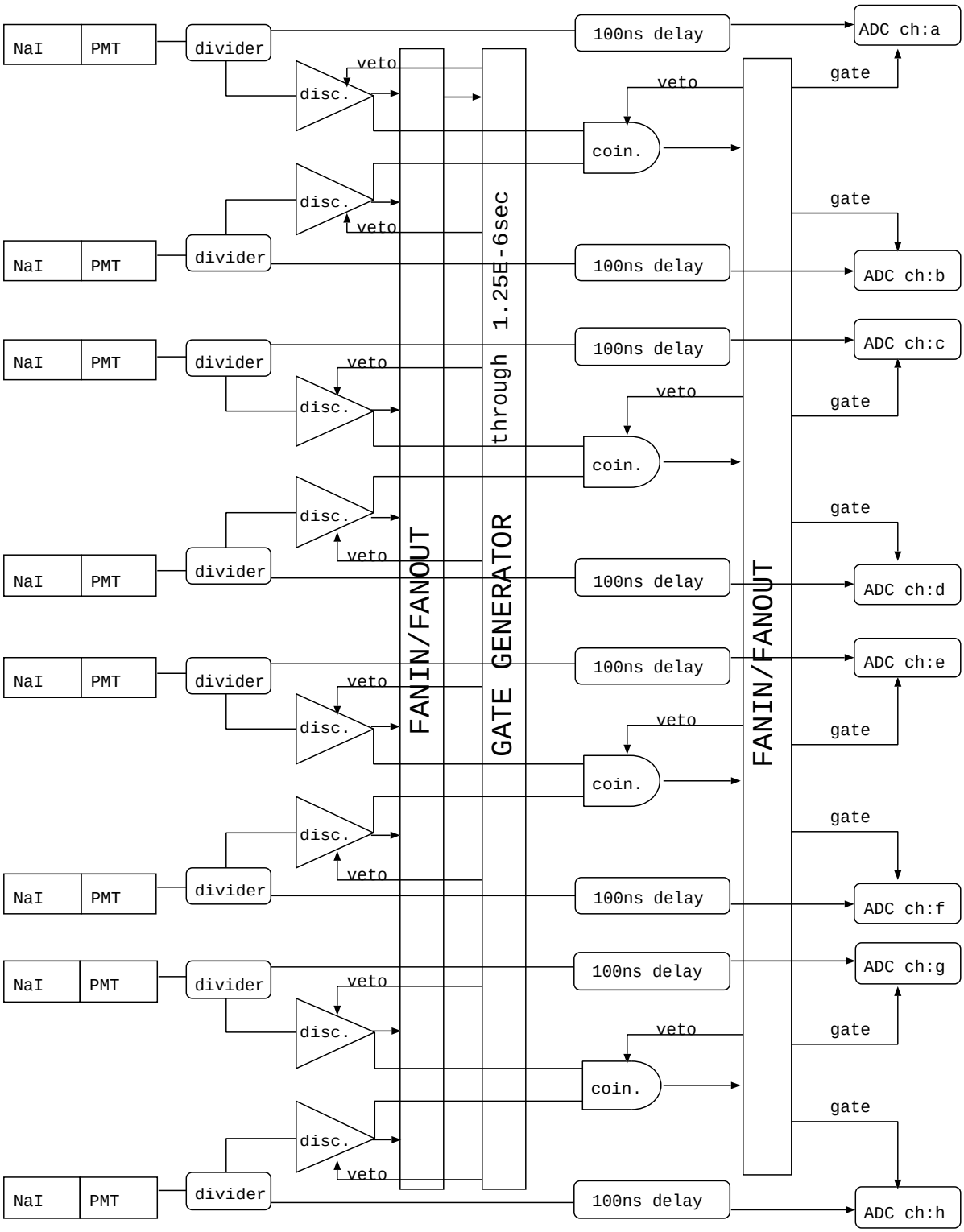


Figure 3.6: PMT の配置図



discriminator: 7mV 50nsec

Chapter 4

PRELIMINARY MEASUREMENT

ここでは本実験を行うに当たり、前もって測定しておかなければならない幾つかの予備実験について報告する。

4.1 Microwave System

4.1.1 Band Pass Filter の性能の測定

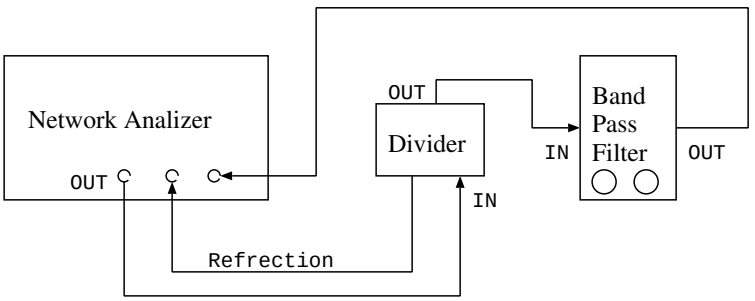
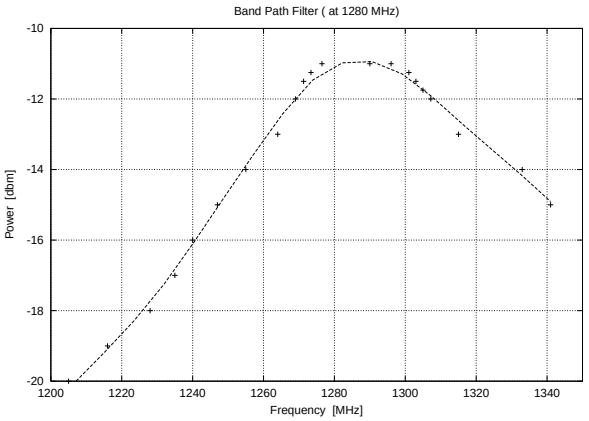
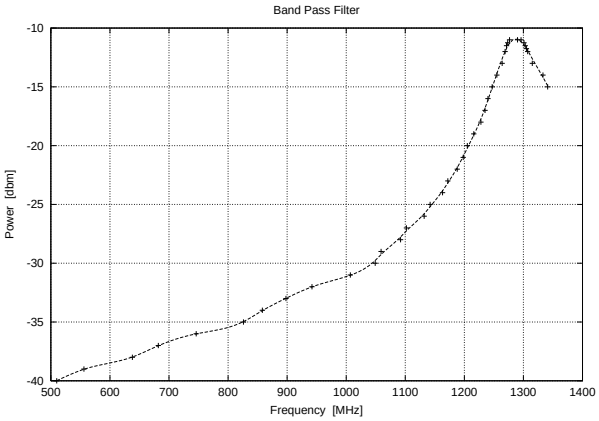


Figure 4.1: Band Pass Filter の性能の測定

Frequency Doubler は、我々の必要とする 2 倍波の他に、基本波や 3 倍、4 倍波等も出してしまう。 そこで、band pass filter を用いることで、これらの成分をカットする必要がある。ここで用いる band pass filter は比較的簡単に製作出来るため、自作することにした。以下に自作した band pass filter の性能を示す。

測定結果





最も通過しやすい所の周波数は 1280 MHz で、およそ 7db 落ちである。また、そこからさらに 3db 落ちる所での周波数は、それぞれ 1255MHz, 1333MHz である。基本波 (640MHz) では、およそ 34db 落ちとなり十分カットできている。

4.1.2　出力 Power の時間的安定性の測定

この実験で用いたアンプ (入力 15W：出力 50W) は、アマチュア無線用のリニアアンプであり、数分間の連続使用しか想定されていない。本実験では、冷却を十分に行うことで、2 時間程度の連続使用をするつもりである。そこで、このアンプを含めたマイクロ波の発信・増幅系の出力パワーが、どの程度の時間が経てば定常状態になるのか、また安定に何時間程度まで連続運転できるのかを測定した。結果として、２０分程度で安定し、その後 2 時間程度は十分安定なまま連続

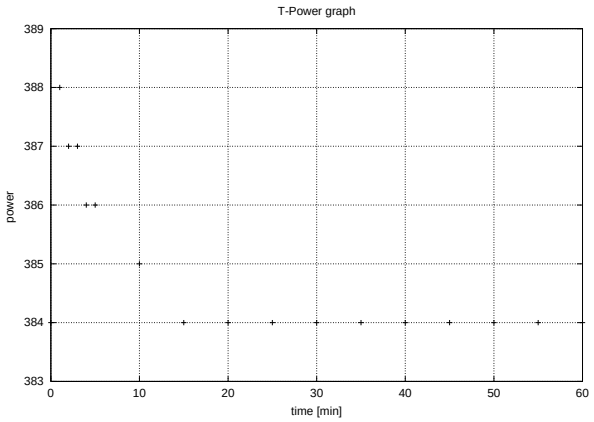


Figure 4.2: Power の時間的安定性

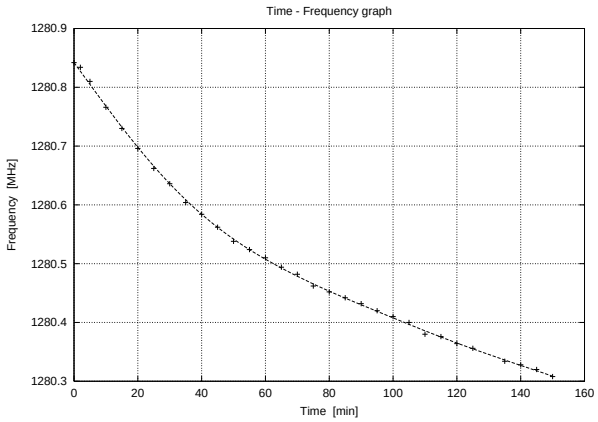
運転できることが分かった。グラフの縦軸に単位が入っていないが、これはキャリブレーションされていないアテネータを途中で用いたためであり、パワーの絶対値は分からないが変動は見ることが出来る。

4.1.3　共振周波数の時間的安定性の測定

今回の実験では、磁場の精度として 4 桁程度必要としている。(共鳴曲線の半値幅を考えるとよい。) そのためキャビティーの共振周波数も 4 桁程度は安定であることが要求される。

そこで、この共振周波数が時間的にどの程度変化するのかを測定する。

(参考) アルミニウムの線膨張率は室温 (293 K) で $23.1 \times 10^{-6}[\mathrm{K}^{-1}]$ である。50W ~ 150W のマイクロ波を入れるから、簡単な空冷を行うつもりではあるが、温度上昇は否めない。そこで、数十度の温度上昇を想定してみる。また気温の変化としても最大 10 度程度の変化を見積もった方がいいかもしれない。こう考えると、共振周波数は、オーダーで $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 程度変化することが考えられる。そこで実際に 50W の電力を入れてみてその共振周波数の変化を観測した。



上記のグラフは一切冷却を行わなかったもので、最悪の状況で測定したものである。実際には本番では、ファンによる空冷をおこなった。その結果として、実験最中に共振周波数の上から 5 桁目が変わることはなかった。本測定中の共振周波数の時間的安定度は十分であることが確認できている。

4.2 Static Magnetic Field

4.2.1 磁場分布の測定

我々の用いた電磁石は比較的小さいものであり、そのまま用いたのではあまり高い一様性は望めない。そこで、ここではこの電磁石がどの程度一様な磁場分布をしているのかを測定した。マグネットのギャップ間のどの部分を測定領域に用いているのかというのを後に示すギャップ間断面図と比較しながら見てもたい。

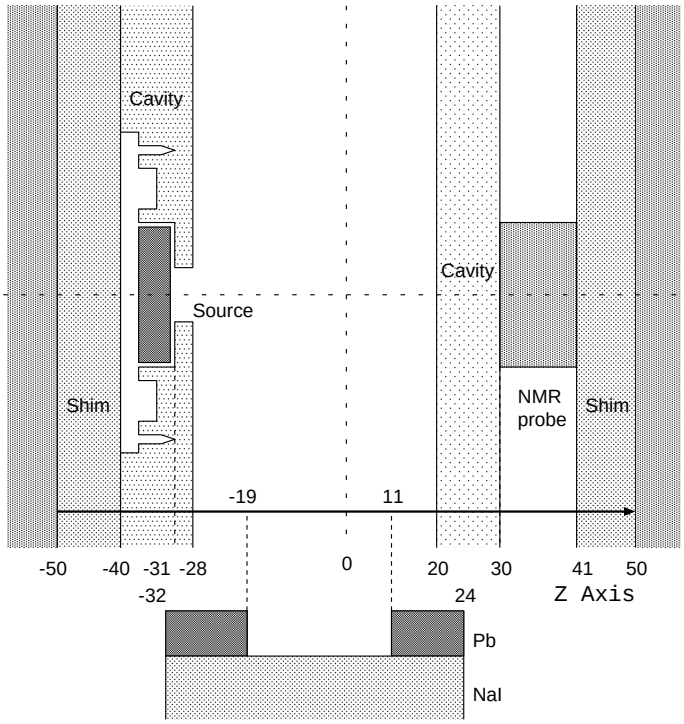


Figure 4.3: ギャップ間の断面図

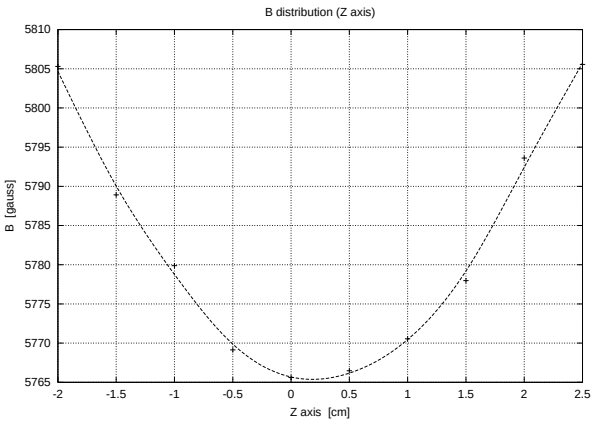


Figure 4.4: ギャップ間の磁場分布

4.3 Detector System

4.3.1 各 PMT のカウントレートの測定

アクシデンタルなコインシデンスの数を見積もるためそれぞれの PMT のカウントレートを測定した。

測定方法

測定は、実際のセットアップと同じ状況で行い、静磁場は 5773 gauss とした。また、マイクロウエーブは入れていない。測定時間は 1 分間とし、その間のイベント数をカウントした。

測定結果

PMT name	count	PMT name	count
PMT1	6540	PMT5	5789
PMT2	5679	PMT6	5500
PMT3	5241	PMT7	5495
PMT4	5314	PMT8	5600

この測定の結果から、カウントレートはどの PMT もおよそ 100Hz である。今、2 つの PMT に無相関に 100Hz でイベントが起こっているとすると、1 秒間に偶然コインシデンスを取る回数は、(Disc. はすべて width が 50ns に設定されており、これをもとにコインシデンスを取る。)

$$50 \times 10^{-9} \times 2 \times 100 \times 100 = 10^{-3}\text{回/sec}$$

本実験では 2 時間測定を行うため、この間に偶然コインシデンスをる回数は、28.8 ± 5.4 回と見積もることが出来る。実際には、解析時にソフトウェアカットを施すため、利用するイベントレートはこんなに多くはなく (恐らく半分以下になるであろう。) アクシデンタルなコインシデンスは無視できる。

4.3.2 Background コインシデンスの測定

Background イベント (宇宙線、ルームバックグラウンド等) の中には、対向する 2 つの NaI の両方を通過し、その結果として、コインシデンスイベントを残すものがある。そこでこのバックグラウンドコインシデンスの数を測定した。

測定方法

セットアップは、本実験と同じ。ただし ^{22}Na ソースをはずす。測定時間は 1 時間とし、その間のコインシデンス数を数えた。

測定結果

PMT pair	count
PMT1 - PMT2	8
PMT3 - PMT4	7
PMT5 - PMT6	8
PMT7 - PMT8	5

本実験での測定は 2 時間であるから、その間起こりうる Background コインシデンスのイベント数は、56 ± 7.5 個と見積もれる。

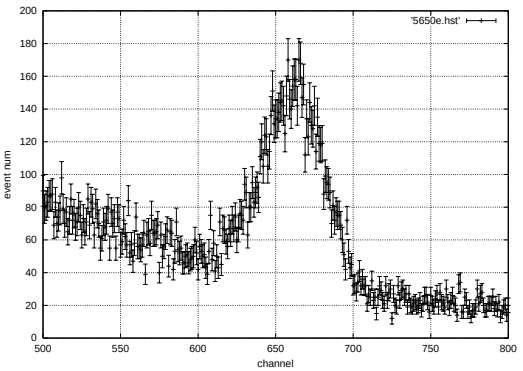
4.3.3　磁気シールドとＰＭＴのゲイン変化の測定

本実験では、磁場をスキャンして共鳴曲線を得ることを目的としている。そのため、磁場を変えるごとにＰＭＴのゲインが変わったのでは、測定にならない。そこで、磁気シールドをつける事で、ゲインの変化を押さえることにした。ここではその予備実験の結果を示す。

測定方法

セットアップは本実験とおなじ。(ただしコインシデンスはとらない。) 本実験でスキャンする範囲より広く磁場を変化させて、その時の ADC スペクトルを測定する。

測定結果



スペクトルはおおよそ上のようになる。そこで 600 チャンネルから 700 チャンネルを取りだし、そのスペクトルの平均値と分散を求めた。

Magnetic Field [gauss]	mean	sigma
5650	653.9	24.5
5652	653.8	24.4
5749	654.1	24.2
5751	653.8	24.6
5851	653.6	24.3
5850	653.4	24.2

ゲインの変化がおさえられ、スペクトルシェイプはほとんど変わらなくなった。

Chapter 5

EXPERIMENTAL PROCEDURE

本実験は静磁場 H_0 をスキャンして 2γ の数を測定し、直接共鳴曲線を求めたかった。しかし、^{22}Na から出てくる positron の数が少なく測定に時間がかかり日をまたいで測定せねばならなかった。最初は Microwave を常に Cavity に入れて 2γ の数の測定を行ったが、望む共鳴曲線が得られなかった。そこで Microwave を Cavity に入れずに特定の静磁場 H_0 をかけて日をかえて 2γ の数を測定すると、5%近くの振らつきが見られた。我々の見積りによると共鳴曲線のピークは 2%程度しか無い。これは 1977 年の実験結果より推定した。2γ の数が不安定な原因を考えてみたが Microwave の周波数と静磁場の安定性は問題無く、したがって室温の変化も問題無いと思われる。ditector のセットアップが 1mm ずれたとしても最大で 4 結局、一日に一点の静磁場で Microwave を Cavity に入れたデータと Microwave を Cavity に入れないデータをとり、その差をとることにした。まず Magnet の電源を入れて 1 時間ほどしてから Microwave を Cavity に入れずに 120 分 Coinsidense system によるデータをとる。次に SSG と Amplifier の電源を入れて 1 時間ほどしてから、同じ静磁場で Microwave を Cavity に入れて 120 分データをとった。

	1977 年の実験	我々の実験
ピークの幅	36 Gauss	数 10 Gauss(理論計算による)
中心磁場	8 Gauss	4.62 Gauss

Table 5.1: 1977 年の実験と我々の実験のピークの比較

Chapter 6

ANALYSIS

6.1、6.2 は NaI でとらえた coinsidence のスペクトルである。このスペクトルの中には、

- positronium からの back-to-back の 2γ
- positronium からの 3γ の内 2 つが近い立体角でやってきたものとその反対側へ出る 1 つの γ 線の coinsidence および ^{22}Na が β 崩壊した後 γ 崩壊で出てくる 1275KeVγ 線と positronium からの γ 線との coinsidence
- ^{22}Na に関係のない acsidental な background

が含まれている。6.1 のスペクトルを見ると、511KeV の光電ピークの下はテールが延びていて compton 端 (340KeV) が見られない。このテールは 3γ によるものと思われる。3γ のテールためデータの 2γ の 511KeV の光電ピークは左右非対称となっており、gaussian のフィットが難しい。それに統計誤差を 1 光電ピークのみを採ると 1 点の静磁場 H_0 につき、8000 程度のイベントしか得られない。そこで、compton のイベントも採用することにして、ADC のチャンネルの bin を 3bin にして 511KeV の光電ピークおよびその半値全幅を目測し、その半値全幅の 8 倍のイベントの増加を調べることにした。6.3 は ADC のチャンネルの bin を 3bin にした histogram。

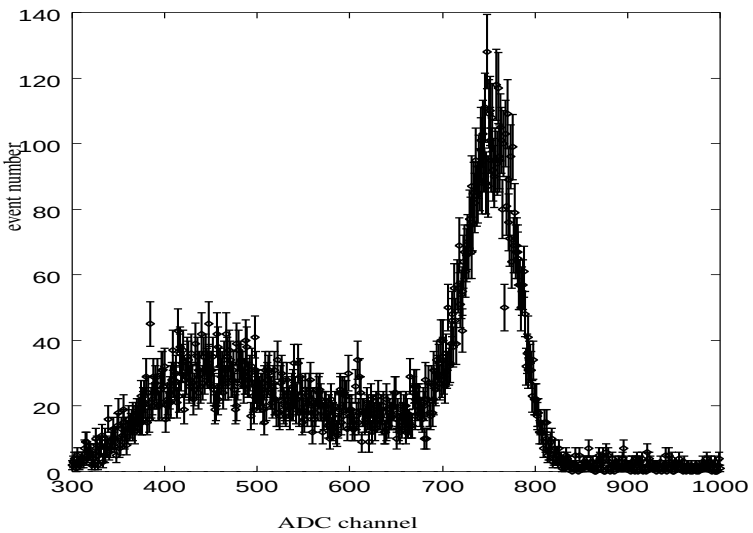


Figure 6.1: 8 本の NaI の内の 1 本の信号の ADCspectrum(bin 1) 511 KeV 周辺

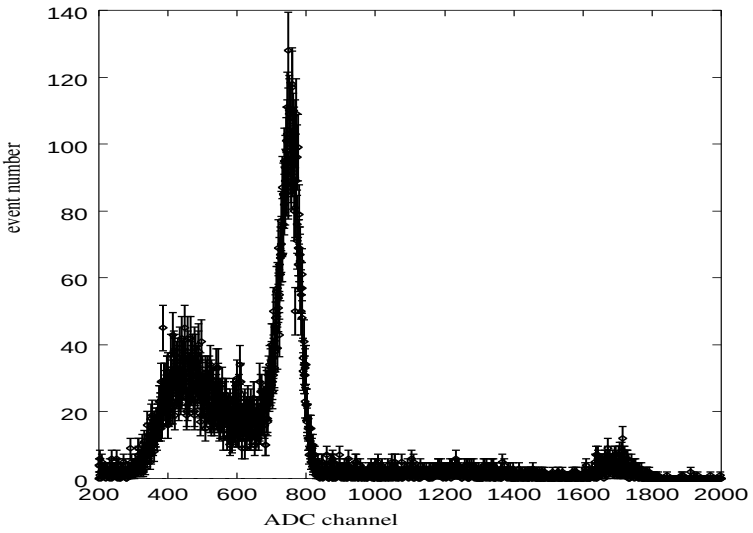


Figure 6.2: 8 本の NaI の内の 1 本の信号の ADCspectrum(bin 1) 1275KeV のピークが見られる

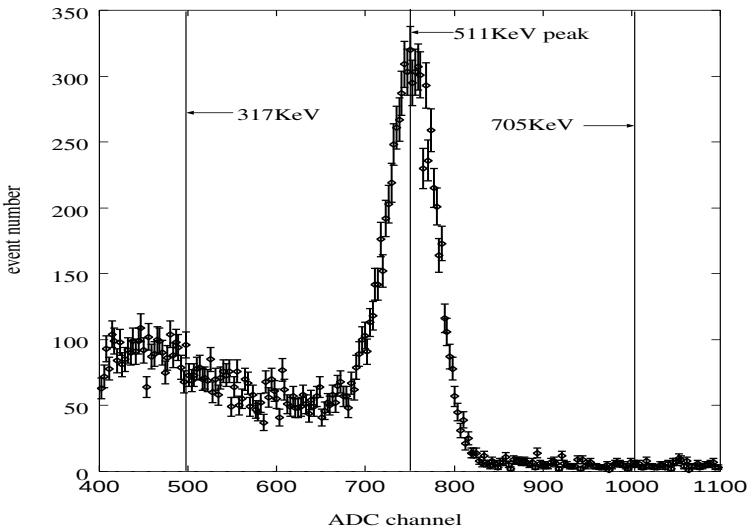


Figure 6.3: 8 本の NaI の内の 1 本の信号の ADCspectrum(bin 3)

6.4 は、４つの coinsidence のそれぞれの半値全幅の 8 倍のイベント数を足し合わせたものと静磁場 H_0 に対するグラフ。6.4 に見られるように、microwave を入れなかった場合のイベント数が大きく変化している。microwave を入れなかった場合のイベント数の静磁場 H_0 に対する依存性は今回理論的に求めることができなかったが、1977 年の実験においては共鳴点の回り $\delta H_0 = 400$Gauss で 3%ほど単調増加する傾向にある。しかし、我々の実験結果はそのような傾向は見られない。その無傾向な原因は、測定に時間がかかったため装置が動いてしまったのかと推測したが、NaI が Cavity の半径方向に 1mm ずれると coinsidence の取れる面積が 1%変化し、正面の NaI が Cavity の軸方向に 1mm ずれると面積は 4%変化する。それ以上大きく geometry が変ることは考えにくいので何か他に原因を求めたがつきとめることが出来なかった。

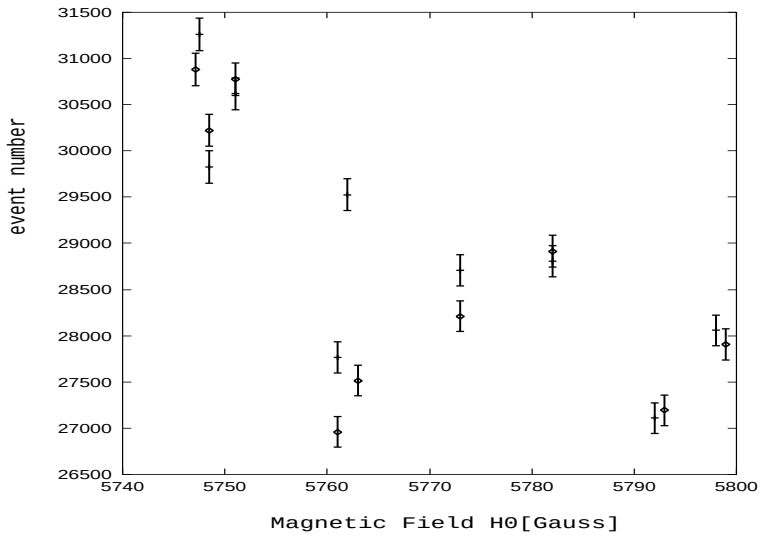


Figure 6.4: total event number in range 8 times FWHM of 511 KeV

結局共鳴点を見付けることが出来なかったが、1 回の測定 120 分は実験装置系は安定であるとして microwave を入れなかった測定と microwave を入れた測定との PMT 信号の ADCchannel が 1000 以上のイベント数を比べてみることにした。前述のように 1275KeV のデータは ^{22}Na の β 崩壊に由来する γ 線であり、coinsidence の相手は positronium からの γ 線である。もし、共鳴点が統計誤差で見えていないのであれば microwave を入れなかった測定と microwave を入れた測定との 1275KeV のデータ数は変化なしと考えられる。共鳴点があるところでは positronium の 2γ 崩壊と 3γ 崩壊の割合いが変るから何とも言えないがとりあえず、共鳴点を無視して ADCchannel が 1000 以上のイベント数を調査してみた。6.5 はそのグラフである。良く見てみると両端の磁場 H では microwave を入れなかった測定と microwave を入れた測定との 1275KeV のデータ数は変化しないで中程で何かがおこっているように見えるが、共鳴が起ったのではないかと思われるような傾向が見られない。グラフには測定日も表示してあるが、強いて言えば後半になるにつれて良くわからないデータになっている。また、この頃 2、3 回地震があったが測定中には起っていない。

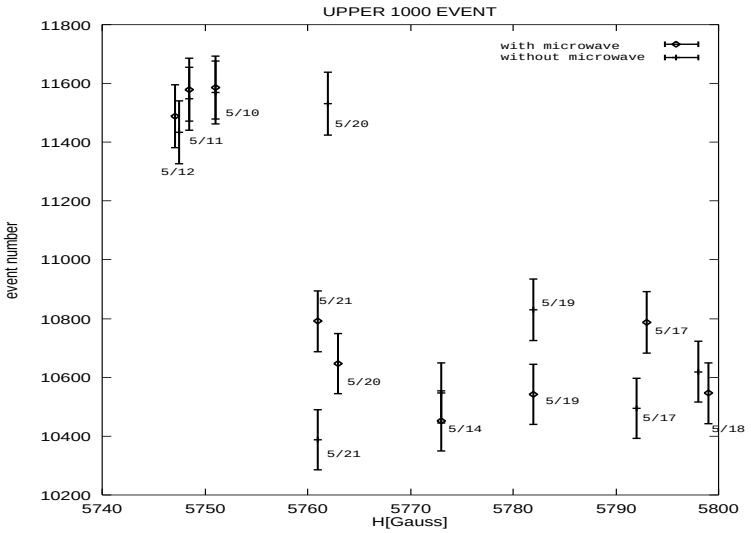
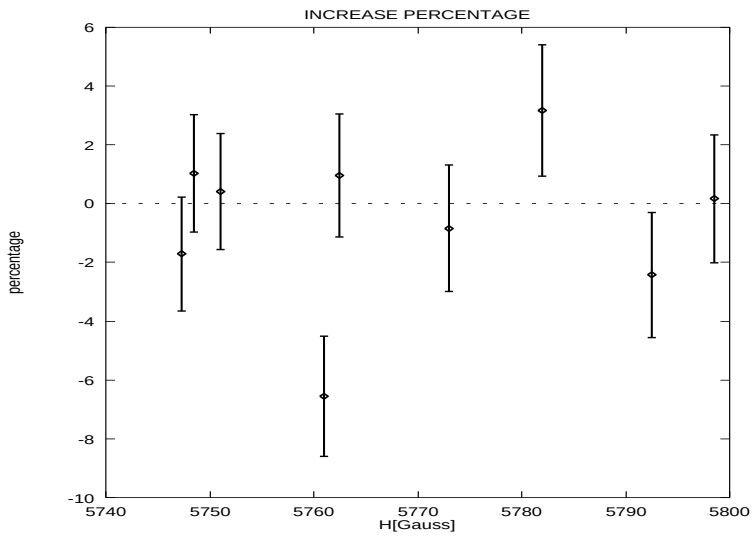


Figure 6.5: coinsidence の 1 つの ADCchannel が 1000 を越えるイベント

次に、共鳴点が見えなかったと仮定してさらに原因は分らないが microwave を入れなかった測定と microwave を入れた測定との間に実験装置系が geometric に変化したとする。そして coinsidence の 1 つの ADCchannel が 1000 を越えるイベントでデータ量を調整して microwave を入れなかったときの 511KeV のイベントに対する microwave を入れた時の 511KeV のイベントの増減を percentage で求めた。以下にその式と結果を 6 に示す。

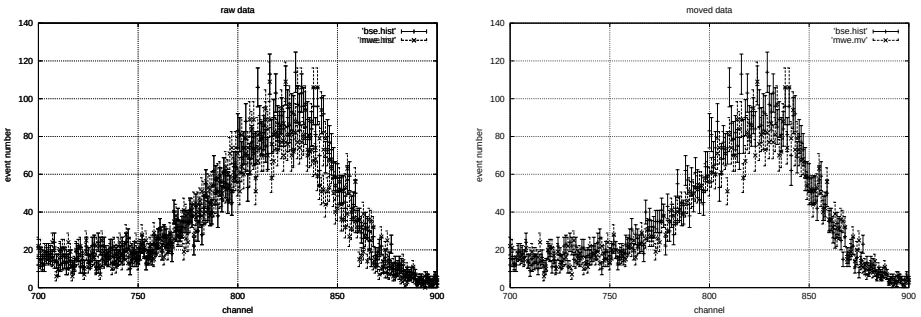
$$percentage = \frac{\frac{mw}{\frac{mwu1000}{bsu1000}} - bs}{bs} \times 100$$

- bsu1000： microwave を入れない時の 1000channel 以上のイベント数
- mwu1000： microwave を入れた時の 1000channel 以上のイベント数
- bs： microwave を入れない時の 511KeV に相当する部分のイベント数
- mw： microwave を入れた時の 511KeV に相当する部分のイベント数

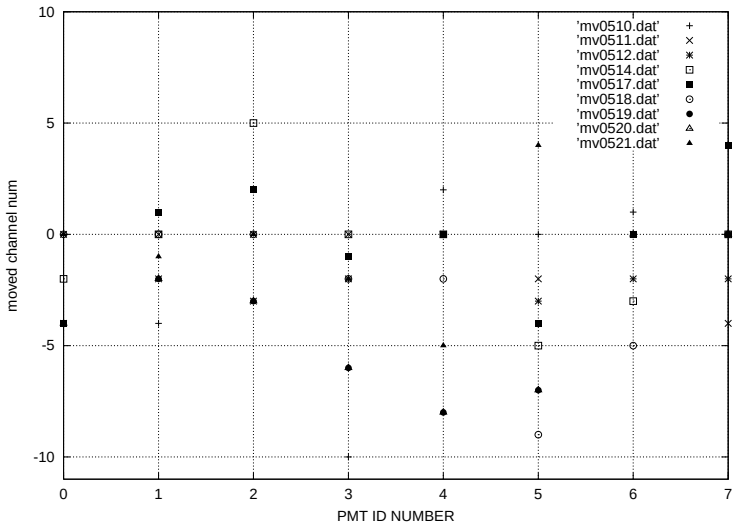

INCREASE PERCENTAGE
percentage
H[Gauss]
6
4
2
0
-2
-4
-6
-8
-10
5740
5750
5760
5770
5780
5790
5800

解析方法の考察

ヒストグラムの平行移動



ヒストグラムの中にはベースとマイクロウエーブのものの間で、ゲインが違っていて、ソフトウェアカット時に補正が必要なものがある。ゲイン補正には近似的に平行移動が利用できる。上の図の左が並行移動前の 2 つのスペクトルで、右が並行移動して重なるようにしたものである。



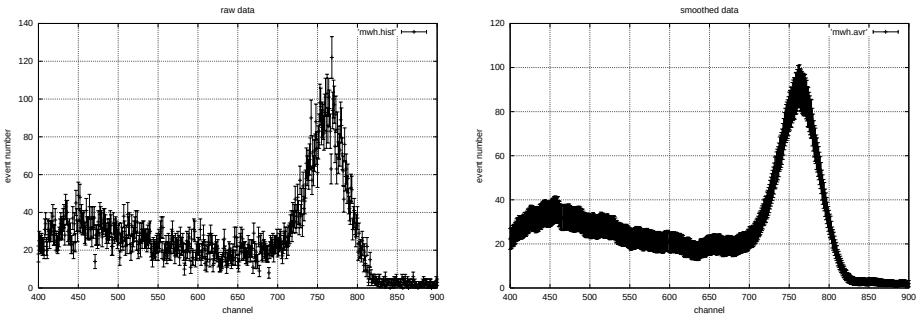
ではなぜこの様なことがおきるのか考察してみる。ゲインの変化が一方向性でなく、また再現性が無いことから Microwave を入れるからある方向に動くと言うことは考えにくい。
これが HV の微小な変動によっておこったと考えてみる。ピークとなるチャンネルはおよそ 700 ぐらい。ペデスタルは 100 チャンネル程度で、HV は 1,000V 程度であるから 1 チャンネルずれるとすると HV の変動は 1.7V 程度。HV の変動もこの程度だと考えられなくも無いが、中には 8 チャンネルもずれるものもあり、こうなると説明に困る。

他に考えられる事としては、PMT を 8 本使っているため、ADC には 8 本のライ

ンが入っている。ところがこのそれぞれのラインの GND には電位差があり、きちんと GND が取れていない。(∼10mV 程度。) この電位差はＮＩＭビンからレモケーブルのグランドを通じて来ていると思われる。以前はこのケーブルどうしのグランド端子の接触によって、ADC の値がころころと変わっていたが、ラインどうしの絶縁を確保することで、値を安定化させたことがある。 2 つのヒストグラム間でペデスタル自体の移動は無いため、一方的に GND が動いたとは言いがたいが、エレキ系自体が不安定に動いていたと言うことはできそうだ。長時間の測定を行ったために、このモジュール自体の不安定さが測定中にリニアリティーを崩してしまったと言うのも考えられる。

PMT の安定化のため、HV は測定 1 時間以上前からかけ続けてある。そのためＰＭＴ自体が何か変化しているとは考えにくい。

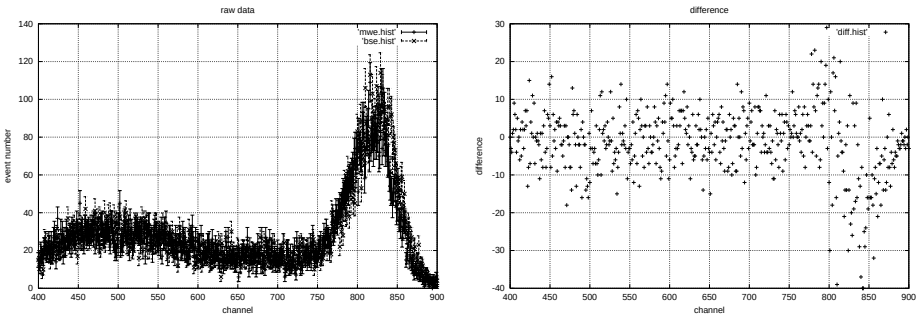
ヒストグラムの平滑化とピークサーチ



ソフトウェアカット時には、正確なピークサーチとスペクトルの把握が必要となる。そのためにはフィッティンッグや、ビンサイズを大きくする等考えられるが、ここでは平滑化を行うことでスペクトルシェイプを見出した。これによるピークサーチは、解析に使うスペクトルが正確な gaussian ではないため、ガウスフィットよりも精度が望める。これを使って半値幅やピーク位置をもとめ、カットに使うリージョンを決定した。

ヒストグラムの比較

2 つのヒストグラムを比べるのにもいくつか方法があるが、ここでは最も簡単なビンどうしの差を取る方法を使った。



もともとは Microwave を入れることで、3γ が減り 2γ が増えるという現象がスペクトル上にどう見えるかを比較するために使用するつもりだった。今では Microwave を入れると逆に減ってしまうという意図しない結果が起こったときにどのリージョンでその変化が大きいのかを調べるいったことに利用している。

考察

^{22}Na ソースの強度について

30μCi　(1993 年) , 半減期　2.6 年　$\longrightarrow 2\mu$Ci (2000 年)

過去の実験でのソース強度

Theriot　(1969 年):　10mCi
Carlson　(1976 年):　2.5mCi

遷移率の理論計算から我々の実験では、統計上 1% (もちろんいくつかの仮定が入っているため見積もりにしか過ぎない) のカウント数の増加を予測していた。カットの仕方にもよるが、今のソースだと 1 時間で 10,000 個弱のイベントが取れる。10,000 個に対する統計誤差は、100 であり、これはちょうどその 1%に相当する。これには測定時間を延ばすことで対処するが、systematic な誤差等付け加えると、このソースのスペックを見るだけで有意な値が出るか出ないかのぎりぎりの境界であることが分かる。
→ 1,000 倍とは言わないまでも、もう少し強度のあるソースがほしい。

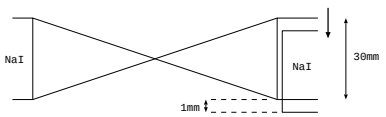
PMT の配置

実験器具の配置は、最も質量のあるものを優先してそれにあわせる形でセットする必要がある。今回の場合、それにあたるのはマグネットである。そこでマグネットの回りに枠を組みそれにＰＭＴを固定した。

マグネットのヨークなどの関係から、利用できる立体角が限定される。(この実験では利用できる立体角のほぼすべてを利用した。) → ＰＭＴを 8 本使う。

枠組みはもちろんハンド メイド であるのでミリ精度での設置及び固定は期待できない。

測定中、あるいはその前後でのＰＭＴの微小な移動が一番怖い。仮に図のようにＰＭＴが 1mm ずれた場合を考えてみる。



$$\frac{1}{30} = 0.0333\cdots \sim 3\%$$

これにより 3%の変化が生じる。このため、日付の違うデータ同士の直接の比較は、もとより期待していない。そこでこのリスクを避けるため、同一の日付に、ベースとマイクロ波を入れたものの二つのデータを取ることで対処した。
→ ベースとの比較・規格化。
また明らかにこのことは、長時間にわたる測定を困難にする。

→ 精度の高いしっかりした PMT 固定台がほしい。

Microwave の Power

最終段アンプの出力は 120∼150W 出せるだけのポテンシャルがある。ところが、この実験では 50W の low mode でしか使えていない。(実際は 40W 強。)

遷移率は Power に比例するため、もし high mode で使えたら 3 倍程度の遷移率が望めた。

high mode での連続使用は公式には 1 ~ 3 分程度。

冷却用ファンをフィンの上に敷き詰め十分な冷却を行うと 2 時間程度の連続使用になら耐えるらしい。

ファン (12 in.) 1 個 3,000 円で 4∼6 枚必要。→ しかし予算不足。

いかんともしがたいのが、電源不足。hight power で動かすに足るだけの電源がどうあがいても手に入らなかった。→ カレントが 43A 出せる電源が必要。

磁場の一様性

我々の使用したマグネット

ポール直径： 15cm ギャップ： 10cm

$$\text{比} \quad \frac{\text{ポール径}}{\text{ギャップサイズ}} = 1.5$$

過去の実験でのマグネット

Marder (1957 年)	ポール直径：	22.9cm	ギャップ：	7.5cm	比： 3.03
Theriot (1969 年)	ポール直径：	30.5cm	ギャップ：	7.3cm	比： 4.17
Carlson (1976 年)	ポール直径：	38.1cm	ギャップ：	10.6cm	比： 3.59

比較するまでも無く、マグネットが小さすぎる。これでは十分な一様性は望めない。
磁場でスキャンしたときの共鳴曲線の半値幅は 20gauss 程度である。我々が見えるであろうと期待していたのは、このピークの先端のまさに十分狭い領域であり、半値幅ずれたところで有意に変化が見えるとは期待していない。つまりこの 20gauss と比べても、十分な一様性を望みたいのである。

大きいマグネットを手に入れる。→ 不可能

シムを付けることは、ギャップを縮めると言う意味でも、また pole 面の一様性を高めると言う意味でも、磁場の一様性を良くすることになり成功であった。
→ ただ、もう少しシムの形状にこだわれば一様性を向上させることが出来たはず。

Microwaveを入れると逆にカウント数が減る事への考察

Microwave を入れると逆にカウント数が減ることがある。これはなぜだろうか。強力な Microwave を発生させるには、多くの電力を消費する。これによる他の装置への影響はど うだろうか？具体的に、Microwave を入れるにあたり必要になる機器を考えてみる。
SSG　Amp1(15V-0.88A)　Amp2(13.8V-5.5A)
Amp3(13.8V-42A low mode では 20A∼30A)
Powermeter×2　扇風機 ×3
　問題になりそうなのは、SSG、Amp2、Amp3 であろう。

Geometry に変化があるのか？
Microwave を入れているときと入れていないときとの大きな違いは、Cavity の温度である。Cavity は温度上昇とともに膨張する。正確な膨張具合は分からないが、ある程度は共振周波数の変化から推測できる。1280.85[MHz] → 1280.30 [MHz] と Cavity の半径が 14cm 程度であることから、半径方向に膨張した長さは 1.2×10^{-1}mm となる。これ自身が 1%程度のカウント数の変化を引き起こすとは考えにくいが、むしろ Cavity との接触部にこの膨張による力がかかり、機材 (PMT 等) を動かしてしまう初動を引き起こしたと言うことの方が考えやすい。

Chapter 7

ACNOWLEGMENTS etc.

7.1 ACKNOWLEGMENTS

京都大学化学研究所原子核科学の加速器研究グループ岩下芳久さんおよび白井敏之さんには、Microwave に関してほとんど知識のない我々に Cavity の設計など技術的な事を手とり足とり御指導頂いたうえ、物資の乏しい我々に様々な実験装置を貸してくださいました。この場を借りて深く御礼申し上げます。

実験担当教官である笹尾登さん、野村正さん、TA の加藤一成さんにはゼミ、予備実験、本実験を通じて 1 年間 (1 年以上？) お世話になりっぱなしでした。感謝の意を表します。

理論担当教官の畑浩之さんには、理論ゼミにおいて毎週大変丁寧できめ細かい御指導を頂きました。ありがとうございました。

7.2 感想

- もう 1 年 P2 やりたい。
- 感想を述べる余裕がない。
- 早く Bird を復旧させよ。
- 詳しい感想は後ほど生でお話しします。

文責 中山

Bibliography

[1] V.W.Hughes,S.Marder,C.S.Wu:Phys.Rev. **98**, *1840*(1955)

[2] E.D.Theriot,Jr.,R.H.Beers,V.W.Hughes,K.O.Zieck: Phys.Rev. **A2**, *707*(1970)

[3] E.R.Carlson,V.W.Hughes,I.Lincgren:Phys.Rev. **A15**, *241*(1977)

[4] T.D.Lee: *Particle Physics and Introduction to Field Theory*, Comtemporary Concepts in Physics **Vol.1**, Harwood Academic Publishers(1981)

[5] J.D.Jackson:「ジャクソン電磁気学」, 吉岡書店 (1994)

[6] 阿部 英太郎:「マイクロ波技術」, 物理工学実験 **11**, 東京大学出版会 (1979)

[7] P2 97 Poritronium 斑:「Positronium 寿命の測定」

[8] P2 98 電子レンジ斑:「Hyperfine Structure of Positronium in Its Ground State」