

モデレーターによる  
ポジトロニウムの生成と  
3光子崩壊の寿命の測定

平成17年度 修士学位論文  
信州大学大学院工学系研究科  
物質基礎科学専攻

03SA210A

西山 雅樹

2005年3月

# 目次

<b>1</b>	<b>introduction</b>	<b>1</b>
1.1	対消滅と Positronium の寿命について . . . . .	1
1.2	Positronium の観測 . . . . .	4
1.2.1	moderation . . . . .	5
1.2.2	平均自由行程 . . . . .	6
1.2.3	空気中の電子密度 . . . . .	7
<b>2</b>	<b>ortho-Ps の生成、崩壊の測定実験</b>	<b>8</b>
2.1	エネルギー較正実験 . . . . .	9
2.1.1	$^{22}\text{Na}$ 線源 . . . . .	9
2.1.2	CsI 測定器 . . . . .	10
2.1.3	CAMAC Pulse-Height-ADC . . . . .	10
2.1.4	1つの CsI 測定器による測定 . . . . .	11
2.1.5	2つの CsI 測定器による同時測定 . . . . .	13
2.2	ortho-Ps の生成、崩壊の測定 . . . . .	20
2.2.1	測定装置と測定方法 . . . . .	21
2.2.2	測定結果 . . . . .	23
<b>3</b>	<b>ortho-Ps の平均寿命測定</b>	<b>32</b>
3.1	平均寿命の計算 . . . . .	32
3.2	TDC 測定 . . . . .	33
3.2.1	TDC 測定方法 . . . . .	34
3.2.2	カット条件 . . . . .	35
3.3	TDC 測定結果 . . . . .	36
<b>4</b>	<b>まとめ</b>	<b>38</b>
<b>A</b>	<b>phADC CAMAC プログラム</b>	<b>39</b>
<b>B</b>	<b>TDC CAMAC プログラム</b>	<b>42</b>

## 図目次

1	Ps のスピン . . . . .	2
2	Na22 の崩壊 . . . . .	4
3	moderation . . . . .	5
4	実験イメージ . . . . .	8
5	Na22 線源 . . . . .	9
6	回路図 . . . . .	11
7	PMT1 Na 2250V . . . . .	11
8	PMT1 Na 1950V 2000V 2050V 2100V . . . . .	12
9	同時測定回路図 . . . . .	13
10	PMT1 PMT2 Na22 co . . . . .	14
11	PMT1 PMT2 Na22 co energy . . . . .	15
12	PMT1 PMT2 Na22 co energy 2d-plot . . . . .	15
13	PMT1 PMT2 Na22 co allenergy . . . . .	17
14	PMT2 PMT3 Na22 co energy . . . . .	18
15	PMT2 PMT3 Na22 co energy 2d-plot . . . . .	18
16	回路図 . . . . .	21
17	配置図 . . . . .	22
18	アルミニウムパウダー . . . . .	23
19	3つの測定器の phADC の和 アルミニウムパウダー . . . . .	24
20	タングステンパウダー . . . . .	25
21	3つの測定器の phADC の和 タングステンパウダー . . . . .	26
22	Moderator 無し . . . . .	27
23	3つの測定器の phADC の和 Moderator 無し . . . . .	28
24	phADC 分布 Al W Moderator 無し . . . . .	29
25	phADC 分布 W-powder . . . . .	31
26	normalize W-powder . . . . .	31
27	TDC による時間 t の測定 . . . . .	33
28	TDC 測定イメージ . . . . .	33
29	TDC 回路図 . . . . .	34
30	タングステンパウダー 1250KeV 以下 . . . . .	36
31	タングステンパウダー 1250KeV 以上 . . . . .	37

# 1 introduction

## 1.1 対消滅と Positronium の寿命について

電子、陽電子の対消滅を考えるにあたって、運動量保存則を満たすためには、外力が働かない限り、少なくとも 2 光子以上を放出する必要がある。

まず、電子の古典半径を  $r_e$  とし、速度  $v$  で運動している陽電子が静止している電子との 2 光子消滅断面積  $\sigma_2$  は、ディラックによって示されたように

$$\sigma_2 = \frac{\pi r_e^2}{1 + \gamma} \left[ \frac{\gamma^2 + 4\gamma + 1}{\gamma^2 - 1} \ln(\gamma + \sqrt{\gamma^2 - 1}) - \frac{\gamma + 3}{\sqrt{\gamma^2 - 1}} \right] \quad (1)$$

と表すことができる。ここで

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}} \quad (2)$$

である。

(1) 式において陽電子の速度が光速に比べて十分小さいときは

$$\sigma_2 = \pi r_e^2 \frac{c}{v} \quad (3)$$

となる。

従って低速陽電子と静止電子の 2 光子消滅時の  $\lambda_2$  は電子密度を  $\rho$  とすると

$$\lambda_2 = \sigma_2 \rho v = \pi r_e^2 c \rho \quad (4)$$

と表すことができる。

また 3 光子消滅の場合の  $\lambda_3$  については、オーレーとパウエルによって示されたように

$$\lambda_3 = \sigma_3 \rho v = \frac{4}{3}(\pi^2 - 9)\alpha r_e c \rho \approx \frac{\lambda_2}{370} \quad (5)$$

と表せる。ここで  $\alpha$  は微細構造定数 (1/137) である。

(5) 式より 3 光子消滅の崩壊率は 2 光子消滅の時の 1/370 程度であることがわかる。多光子消滅の場合においても、発生する光子の数が 1 つ増えるごとに  $\lambda$  は微細構造定数のオーダーで 2 桁ずつ減少していく。ここまでは、陽電子が自由粒子として消滅する場合を考えてきたが、陽電子はこのような自由消滅以外に、電子密度の薄いところでは、ポジトロニウム (Ps) という束縛状態を経由して消滅する場合がある。

Ps とは、電子 ( $e^-$ ) とその反粒子である陽電子 ( $e^+$ ) が電磁相互作用によって束縛した準安定な系である。水素原子の陽子が陽電子に置き換わったものであり水素原子と似た性質を持っている。ある寿命の後に複数の光子 ( $\gamma$  線) に崩壊する。この崩壊過程を詳しく研究することは、量子電磁気学 (QED) を検証するうえできわめて重要である。Ps は、電子と陽電子の合成スピン  $S$  の違いにより、1 重項状態の para-Ps (パラポジトロニウム) と 3 重項状態の ortho-Ps (オルソポジトロニウム) の二つの状態に区別できる。

$S=1$  (3 重項) オルソポジトロニウム

$S=0$  (1 重項) パラポジトロニウム

パリティの保存則から para-Ps は 2 光子消滅をし、ortho-Ps は 3 光子消滅をする。

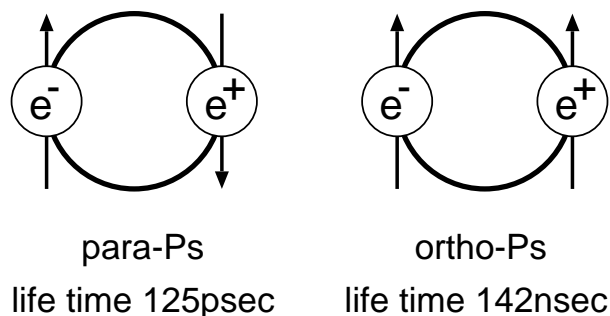


図 1: Ps のスピン

では、これらのことをもとに Ps の崩壊率と寿命について考える。Ps は水素原子の陽子が陽電子に置き換わったものと考えられるため、基底状態のときの半径はボーア半径  $a_B$  の 2 倍 (0.106nm)、束縛エネルギーは水素原子の束縛エネルギーの半分 (6.8eV) である。Ps が基底状態にあるとき、陽電子が存在する場所での電子密度は  $\rho_{Ps} = \frac{1}{8\pi a_B^3}$  であるから、 $p-Ps$  と  $o-Ps$  の崩壊率は次のようになる

$$\lambda_{p-Ps} = 4\sigma_2\rho_{Ps}v = \frac{\alpha^5 m_e c^2}{2\hbar} \approx 8 \times 10^9 s^{-1} \quad (6)$$

$$\lambda_{o-Ps} = \frac{4}{3}\sigma_3\rho_{Ps}v = \frac{2(\pi^2 - 9)\alpha^6 m_e c^2}{9\pi\hbar} \approx 7 \times 10^6 s^{-1} \quad (7)$$

寿命は崩壊率の逆数であるから、

$$\tau_{p-Ps} = \frac{1}{\lambda_{p-Ps}} \approx 125ps \quad (8)$$

$$\tau_{o-Ps} = \frac{1}{\lambda_{o-Ps}} \approx 142ns \quad (9)$$

真空中での para-Ps の寿命は約 125psec、ortho-Ps の寿命は約 142nsec である。

現在、QED 計算による ortho-Ps の寿命は、

$$\tau_{ortho-Ps} = 142.0459 \pm 0.0002nsec \text{ (QED 2002)}$$

寿命測定実験による実験結果では、

$$\tau_{ortho-Ps} = 142.053 \pm 0.032nsec \text{ (東大 2002)}$$

となっている。

## 1.2 Positronium の観測

今回の実験では陽電子線源 ( $^{22}\text{Na}$ ) を用いて ortho-Ps の生成、崩壊を観測する。本実験で用いる  $^{22}\text{Na}$  から放出される陽電子のエネルギーは、最大  $0.545\text{MeV}$  と大きく。Ps を形成する前に電子と対消滅をおこしてしまう。Ps を生成させるためには、エネルギーの低い陽電子が必要であるため、moderator をもちいて放出された陽電子を moderation(減速) させる。

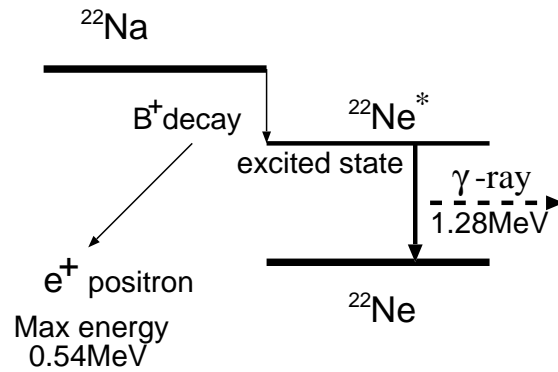


図 2: Na22 の崩壊

### 1.2.1 moderation

陽電子はいくつかの物質にたいして負の仕事関数を持つ。現在までの実験では、Al(-0.2eV)、Cr(-1.7eV)、Cu(-0.13 -0.40eV)、Ni(-1.1eV)、Si(-1.0eV)、W(-2.54eV) など負の値が得られている。これらの物質中に入った陽電子が拡散によって表面近傍に到達したとき、表面より外に出ようとする。(再放出) この再放出された陽電子は低エネルギーになっており、Psが生成される可能性があると考えられる。陽電子とPsを形成する電子は、物質表面上の電子や、空気中の気体分子(O<sub>2</sub>,N<sub>2</sub>)の電子を利用する。今回の実験では moderator として Al と W を用いた。表面積を稼ぐために直径 1 μ m 程度のパウダー状のものを使用した。

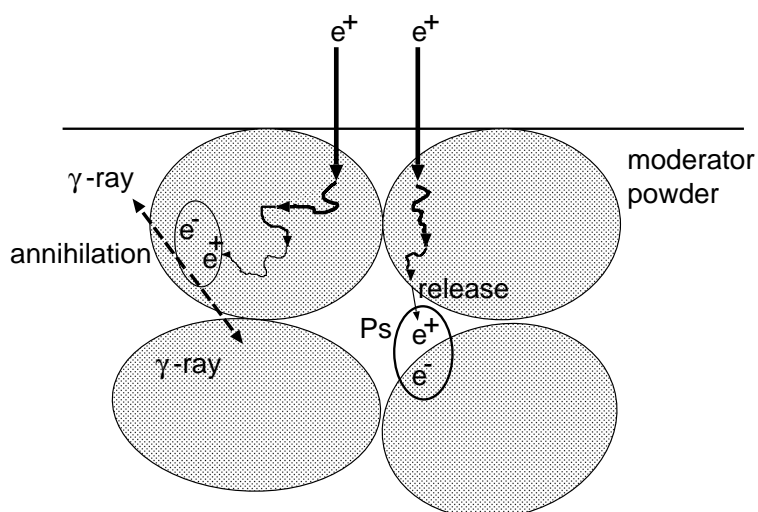


図 3: moderation



## 1.2.2 平均自由行程

線源から出た陽電子が空気中の電子と対消滅をおこすまでの平均自由行程  $\lambda$  を求める。空気の電子密度を  $Ne$ 、対消滅の断面積を  $\sigma$  とすると。

$$\lambda = \frac{1}{\sigma Ne} \quad (10)$$

とあらわされる。また断面積  $\sigma$  は

$$\sigma = \frac{\pi r_0^2}{1 + \gamma} \left[ \frac{\gamma^2 + 4\gamma + 1}{\gamma^2 - 1} \ln(\gamma + \sqrt{\gamma^2 - 1}) - \frac{\gamma + 3}{\sqrt{\gamma^2 - 1}} \right] \quad (11)$$

ここで

$$r_0 = \frac{\hbar\alpha}{m_e c^2} \quad \gamma = \frac{E_+}{m_e c^2}$$

$E_+$  は陽電子の全エネルギー、 $\hbar$  はプランク定数、 $\alpha$  は微細構造定数、 $m_e$  は電子 (陽電子) の質量、 $c$  は光速である。

実験で用いる  $^{22}\text{Na}$  線源から放出される陽電子の最大運動エネルギーは約  $0.545\text{MeV}$  なので、陽電子の運動エネルギー  $pc$  を  $0.5\text{MeV}$  として  $\sigma$  を計算する。陽電子の静止エネルギー  $m_e c^2 \approx 0.511\text{MeV}$  より

$$E_+ = \sqrt{m_e c^2 + p^2 c^2} = \frac{\sqrt{2}}{2} \text{MeV} \quad (12)$$

また

$$\alpha \approx \frac{1}{137} \quad c = 2.998 \times 10^8 \text{m/s}$$

$$\hbar = 6.582 \times 10^{-22} \text{MeV} \cdot c$$

より、これらを (11) に代入すると

$$\sigma = 3.47 \times 10^{-29} \text{m}^2 \quad (13)$$

である。空気中の電子密度  $Ne$  (次節より) は

$$Ne = 3.88 \times 10^{26} / \text{m}^3$$

となるので、式 (10) より

$$\lambda = 74.30 \text{m} \quad (14)$$

となり、 $0.5\text{MeV}$  の陽電子は空気中でかなりの距離を移動することができる。

### 1.2.3 空気中の電子密度

空気中の電子密度を計算する。空気の組成比は  $N_2$ (窒素) 対  $O_2$ (酸素)=7:3 であり、密度  $d$  は

$$d = 1.29 \text{mg/cm}^3$$

である。また、 $N$  と  $O$  の原子量と 1 原子あたりの電子数は

$$N \quad \text{原子量 } 14.01 \text{g/mol} \quad \text{電子数 } 7$$

$$O \quad \text{原子量 } 16.00 \text{g/mol} \quad \text{電子数 } 8$$

空気 1mol あたりの質量は

$$14.01 \text{g/mol} \times \frac{7}{10} \text{mol} + 16.00 \text{g/mol} \times \frac{3}{10} \text{mol} = 14.607 \text{g/mol} \quad (15)$$

空気 1 mol あたりの電子数は

$$Na \times \left( 7 \times \frac{7}{10} \text{mol} + 8 \times \frac{3}{10} \text{mol} \right) = 4.40 \times 10^{24} / \text{mol} \quad (16)$$

$$Na(\text{アボガドロ数}) = 6.022 \times 10^{23} / \text{mol}$$

これにより空気の電子密度  $N_e$  は

$$N_e = \frac{1.29 \text{mg/cm}^3}{14.607 \times 10^3 \text{mg/mol}} \times 4.40 \times 10^{24} / \text{mol} = 3.88 \times 10^{26} / \text{m}^3 \quad (17)$$

となり、これを陽電子の平均自由行程の計算に用いる。

## 2 ortho-Psの生成、崩壊の測定実験

$^{22}\text{Na}$ から得た  $e^+$  を moderation し、ortho-Ps を形成させ、3 光子崩壊の  $3\gamma$  を CsI シンチレーターで測定する。

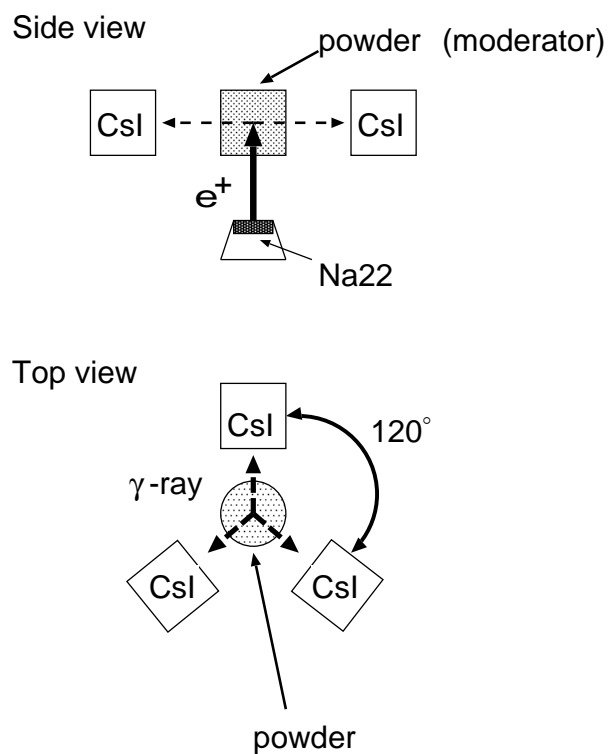


図 4: 実験イメージ

## 2.1 エネルギー較正実験

実際に3光子崩壊の測定を行う前に、エネルギー較正実験を行う。

### 2.1.1 $^{22}\text{Na}$ 線源

実験では陽電子線源に  $^{22}\text{Na}$  を用いる。 $^{22}\text{Na}$  は半減期 2.6 年で  $^{22}\text{Ne}^*$  に  $\beta^+$  崩壊し、最大運動エネルギーが 0.545 MeV の陽電子を放出する。その 0.3 psec 後、 $^{22}\text{Ne}^*$  は 1.274 MeV の  $\gamma$  線を放出して基底状態の  $^{22}\text{Ne}$  に落ちる。放出された陽電子は線源物質の厚さが十分に薄い場合以外は物質原子との相互作用によりエネルギーを急速に失っていき、線源物質内で低エネルギーとなり電子と対消滅をする。その結果、0.511 MeV の  $\gamma$  線が 2 本放出される。これらは運動量保存則よりたがいに逆向きの運動量を持っている。線源物質からは、0.511 MeV の  $\gamma$  線が 2 本と  $\beta^+$  崩壊による 1.274 MeV の  $\gamma$  線の計 3 本が、同時に等方的に放出される。エネルギー較正実験では線源物質の厚い  $^{22}\text{Na}$  を  $\gamma$  線線源として使用する。Ps の生成実験では陽電子が必要となるため線源物質の厚さが十分に薄い  $^{22}\text{Na}$  図 5 を使用する。

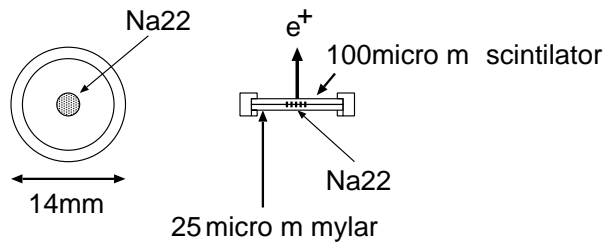


図 5: Na22 線源

### 2.1.2 CsI測定器

実験では光電子増倍管に CsI シンチレーターを付けた CsI 測定器を使用する。CsIシンチレーターは光量が多く、低いエネルギー領域でも良いエネルギー分解能を持ち  $\gamma$  線の検出効率が高い。また減衰時間が長いといった特徴がある。

### 2.1.3 CAMAC Pulse-Height-ADC

ピーク検出型 ADC(peak-hold Analog-to-Digital Converter)、この ADC は CsI シンチレーターに捕捉された  $\gamma$  線のエネルギーを測定する。前面パネルにアナログ入力および共通のゲート、リセットの NIM 入力などがある。ゲートに正論理信号が入力されている間の、アナログ入力の最大値(ピーク値)をホールドし、その電圧に比例した 12ビットのデジタル値を CAMAC データとして出力する。

## 2.1.4 1つのCsI測定器による測定

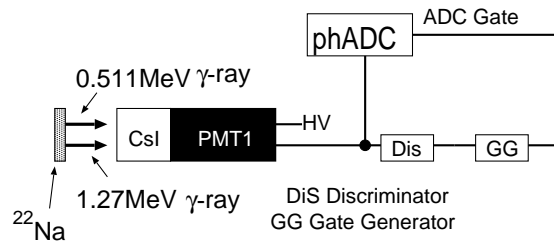


図 6: 回路図

光電子増倍管にCsIシンチレーター(4cm×4cm×3cm)を付けたCsI測定器をひとつ用意し、 $^{22}\text{Na}$ を用いて光電子増倍管のADC分布を測定する。結果は図7の通りである。CsI測定器にかけた電圧は2.25kVである。横軸はADCのchで縦軸はカウント数である。

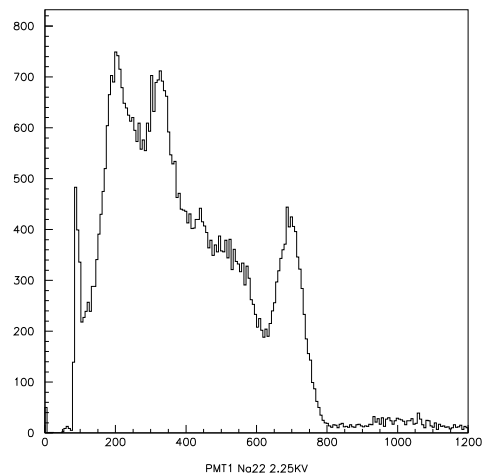


図 7: PMT1 Na 2250V

電圧が2.25kVのとき、ch70付近のピークはペDESTALである。そしてch320付近の山は0.5MeVの $\gamma$ 線の光電効果によるものと考えられ、その前にある山は0.5MeVのコンプトンエッジと Discriminator のしきい値のカットによるものと考えられる。ch700付近のピークは、 $\beta_+$ 崩壊の際に放出される1.27MeVの $\gamma$ 線によるものである。0.5MeVと1.27MeVのピークの間にあるなだらかな部分は1.27MeVの $\gamma$ 線のコンプトン散乱と考えられる。

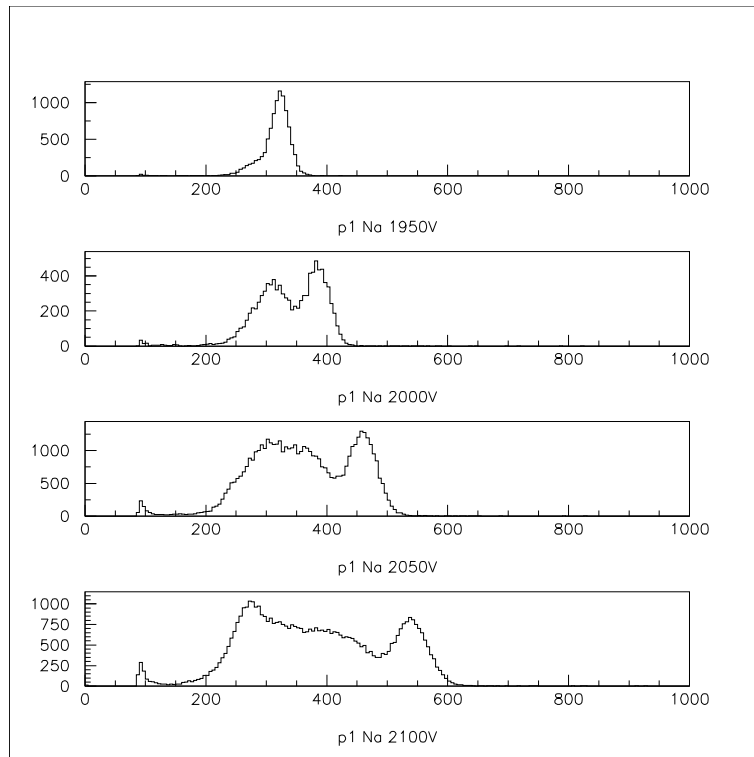


図 8: PMT1 Na 1950V 2000V 2050V 2100V

図8は上から電圧が1.95kV、2.00kV、2.05kV、2.10kVのヒストグラムである。電圧が上がるにしたがって、1.28MeVの $\gamma$ 線の光電効果のPeak位置が右にシフトしていくのがわかる。

### 2.1.5 2つのCsI測定器による同時測定

CsI測定器を2つ用意する。図9のように2つのCsI測定器を向かい合わせに置き、中心に $^{22}\text{Na}$ を置く。光電子増倍管に高電圧をかけ、2つのCsI測定器のANDをトリガーとし、対消滅による $\gamma$ 線(0.511MeV)の片側の光電子増倍管のADC分布を測定する。実験に用いるCsI測定器3つを、PMT1とPMT2、PMT1とPMT3について同時測定をおこなった。

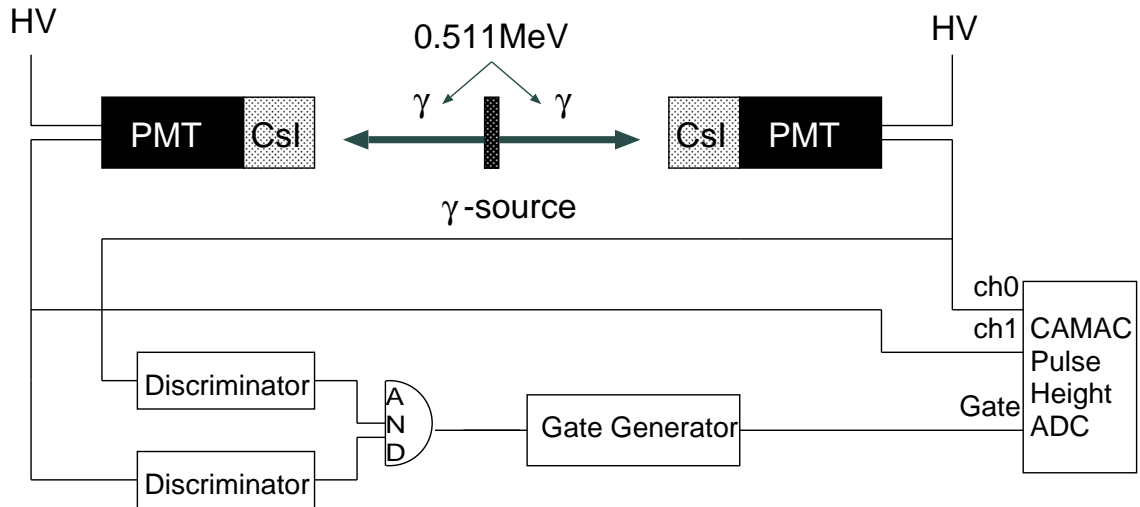


図 9: 同時測定回路図



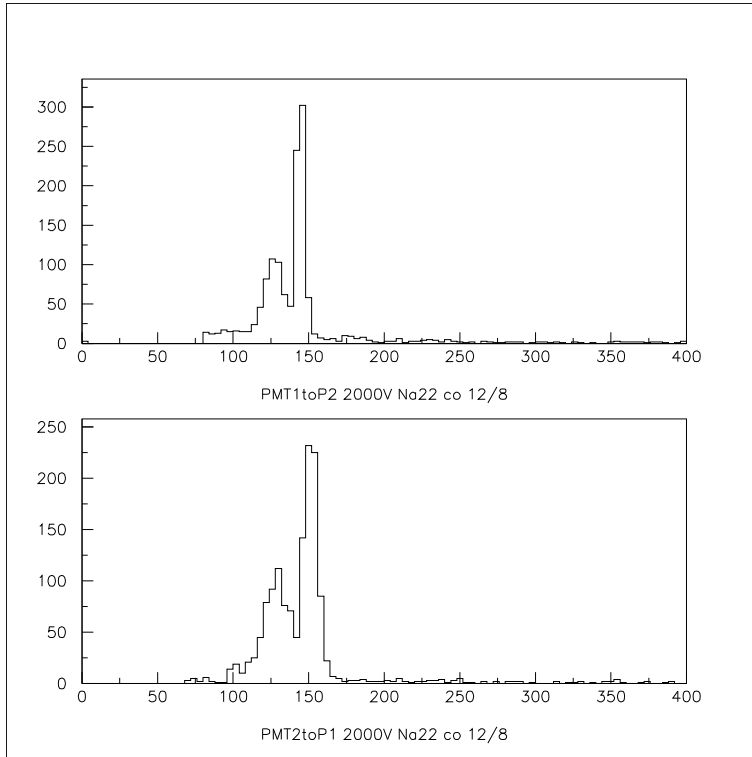
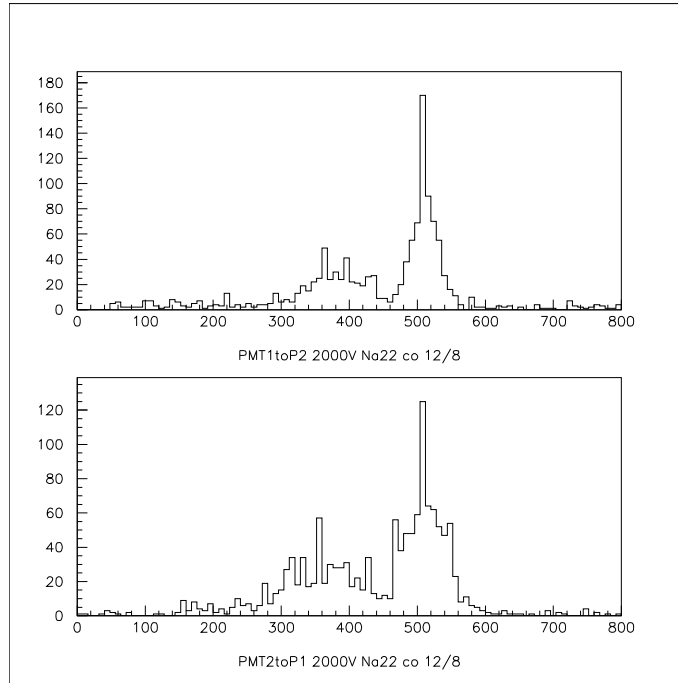
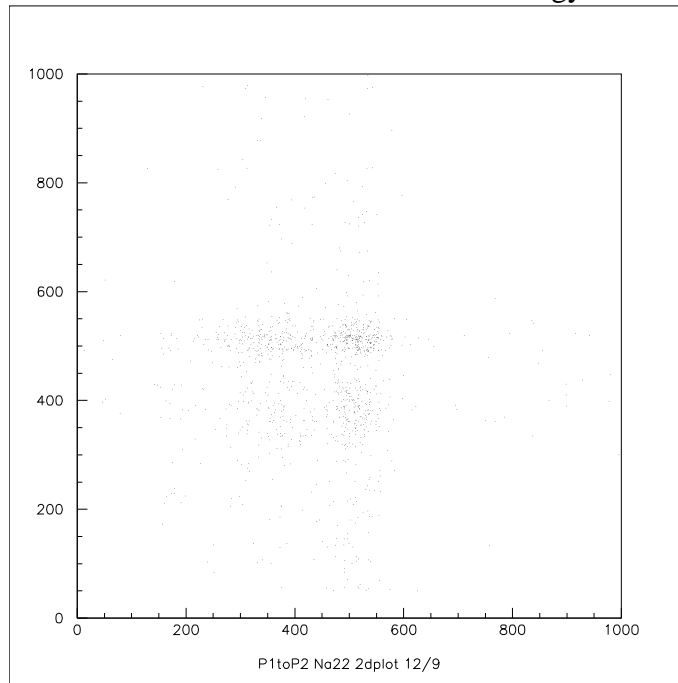


図 10: PMT1 PMT2 Na22 co

図 10は横軸が phADC の ch、縦軸がイベント数である。上が PMT1 で下が PMT2 である。電圧の値はそれぞれ、2.0kV である。ここで収集されているデータは、直線上に對に置かれた測定器に、同時に飛びこんで来た粒子のみであり、つまり電子と陽電子の対消滅による 0.511MeV の光子である。PMT1 についてグラフを見ると、Peak 位置は約 145ch 付近で、このときペDESTALは 70ch なので実質の Peak 位置は  $145-70=75$  となる。この phADC では 0.511MeV の実質の Peak 位置は、電圧 2.0kV の場合 75ch 付近にくることがわかる。これを基準に phADC の値をエネルギーに換算することが出来る。



☒ 11: PMT1 PMT2 Na22 co energy



☒ 12: PMT1 PMT2 Na22 co energy 2d-plot

図 11 は横軸がエネルギー (keV) の値、縦軸がイベント数である。上が PMT1 で下が PMT2 である。グラフから、511keV のところにピークが見えるが 350keV 付近にも山のようなものが見える。これは 511keV の光子のコンプトン散乱によるものと考えられる。図 12 は、縦軸を PMT1 のデータ、横軸を PMT2 のデータにとって 2次元プロットしたものである。511keV 付近に塊がみられ、縦軸 511keV と横軸 350keV、縦軸 350keV と横軸 511keV、縦軸 350keV と横軸 350keV 付近にも塊がみられる。これは 511keV の光子とコンプトン散乱した光子が同時計測されたイベントである。

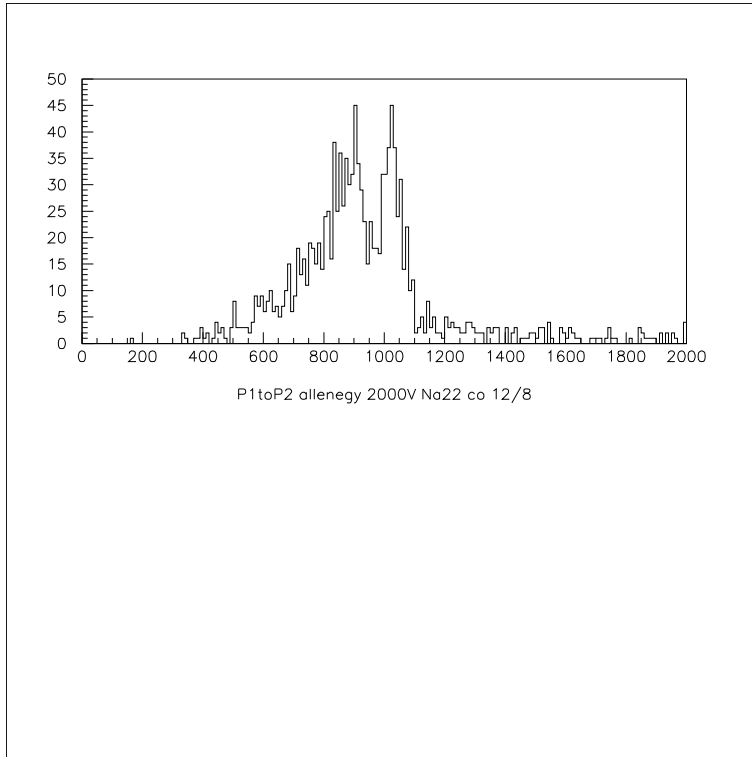
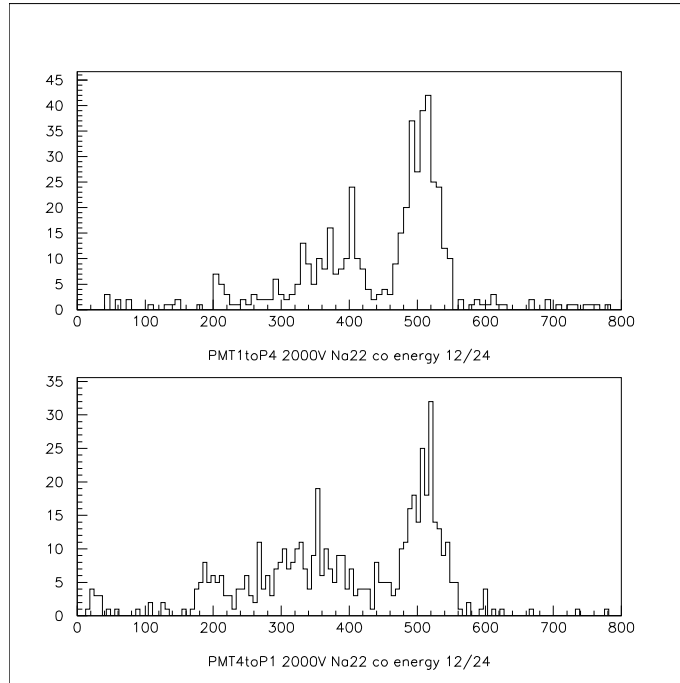
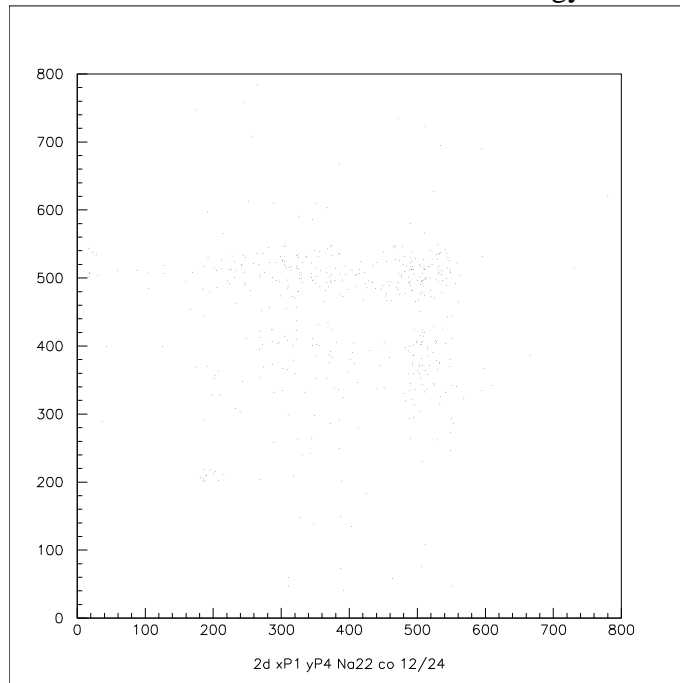


図 13: PMT1 PMT2 Na22 co allenergy

図 13 は 2 つの CsI 測定器で同時測定したエネルギーの総和を横軸に、イベント数を縦軸にとったものである。1000keV 付近のピークは対消滅の  $\gamma$  線の全エネルギーである。その前に見える山は、511keV の光子と、コンプトン散乱した粒子のエネルギーの和であると考えられる。



☒ 14: PMT2 PMT3 Na22 co energy



☒ 15: PMT2 PMT3 Na22 co energy 2d-plot

図 14 は PMT2 と PMT3 について同時測定を行ったものである。横軸がエネルギーの値、縦軸がイベント数をとったものである。上が PMT2、下が PMT3 のヒストグラムである。図 15 は、縦軸を PMT2 のデータ、横軸を PMT3 のデータにとって 2 次元プロットしたものである。

## 2.2 ortho-Ps の生成、崩壊の測定

Moderation されて、低エネルギーになった陽電子と静止している電子から形成される Ps の運動量はほぼゼロと考えられる。よって3つの測定器で測定したエネルギーの和は電子(陽電子)の静止エネルギー  $0.511\text{MeV}$  の2倍以下になると予想される。

### 2.2.1 測定装置と測定方法

CsI 測定器を 3 つ用意し、図 16 のように同一平面内に 120 度間隔に置く。中心に線源  $^{22}\text{Na}$  をつけた光電子増倍管を置く。Moderator として Al と W の粉末をそれぞれ線源から 10cm 離れたところに置く。

それぞれの光電子増倍管には 2.0kV の電圧をかける。3 つの CsI 測定器の AND をトリガーとし Gate 幅 14  $\mu\text{sec}$  で測定器ごとに phADC を測定する。Moderator に Al、W を用いたときと、Moderator を置かなかった場合の測定を行う。配置は図 17 の通りである。

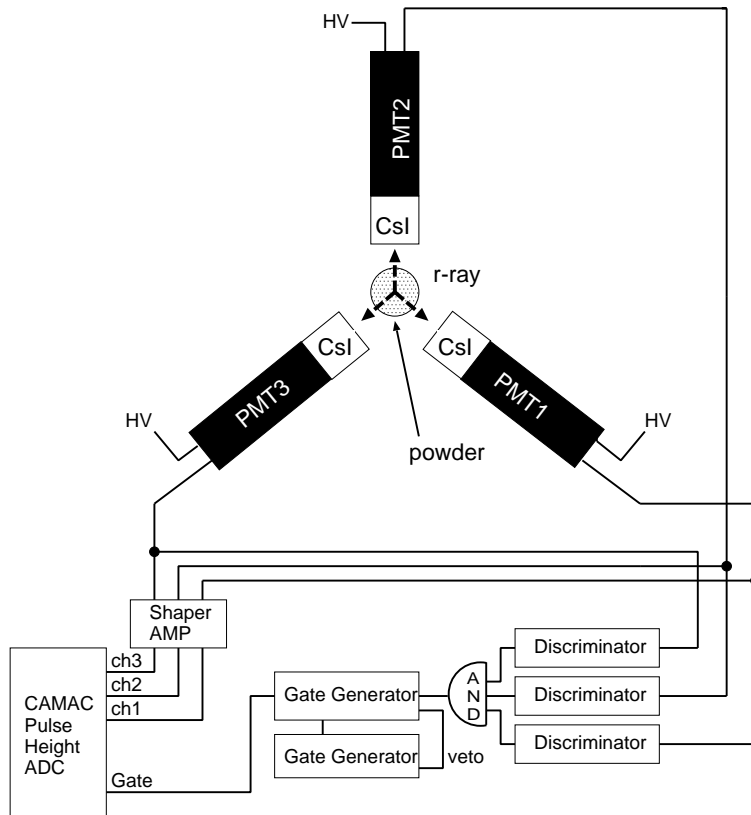


図 16: 回路図



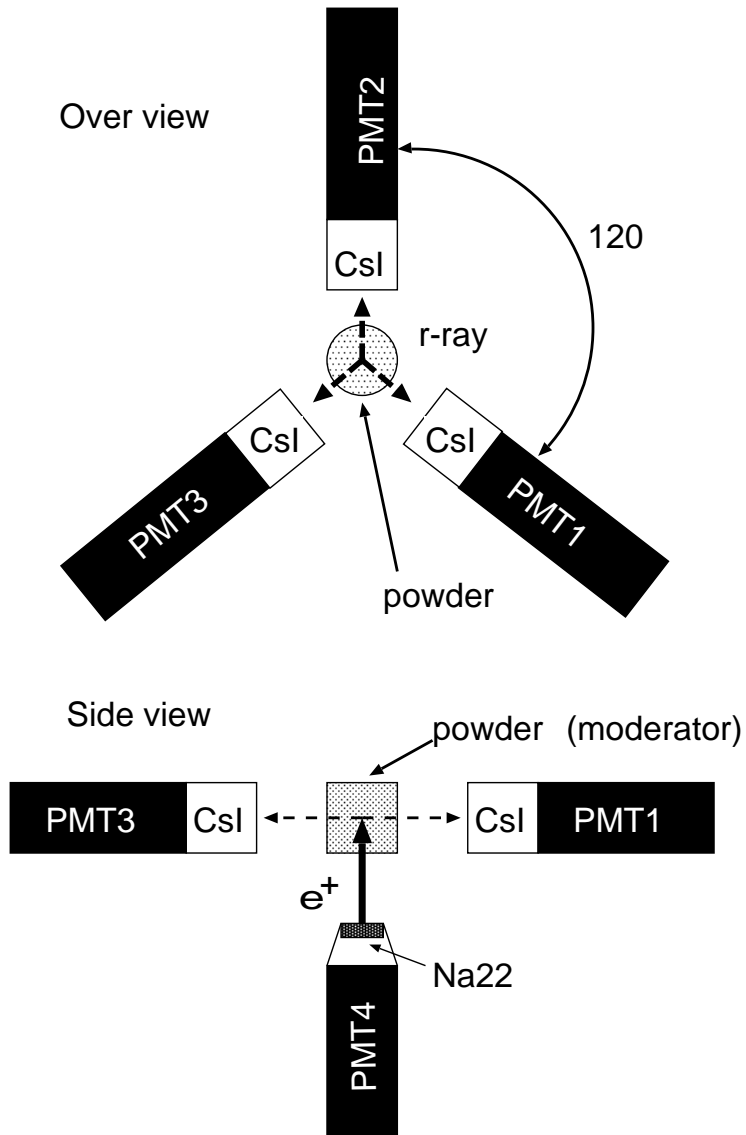


图 17: 配置图

## 2.2.2 測定結果

ModeratorにAlのパウダーを使用したときの測定結果である。

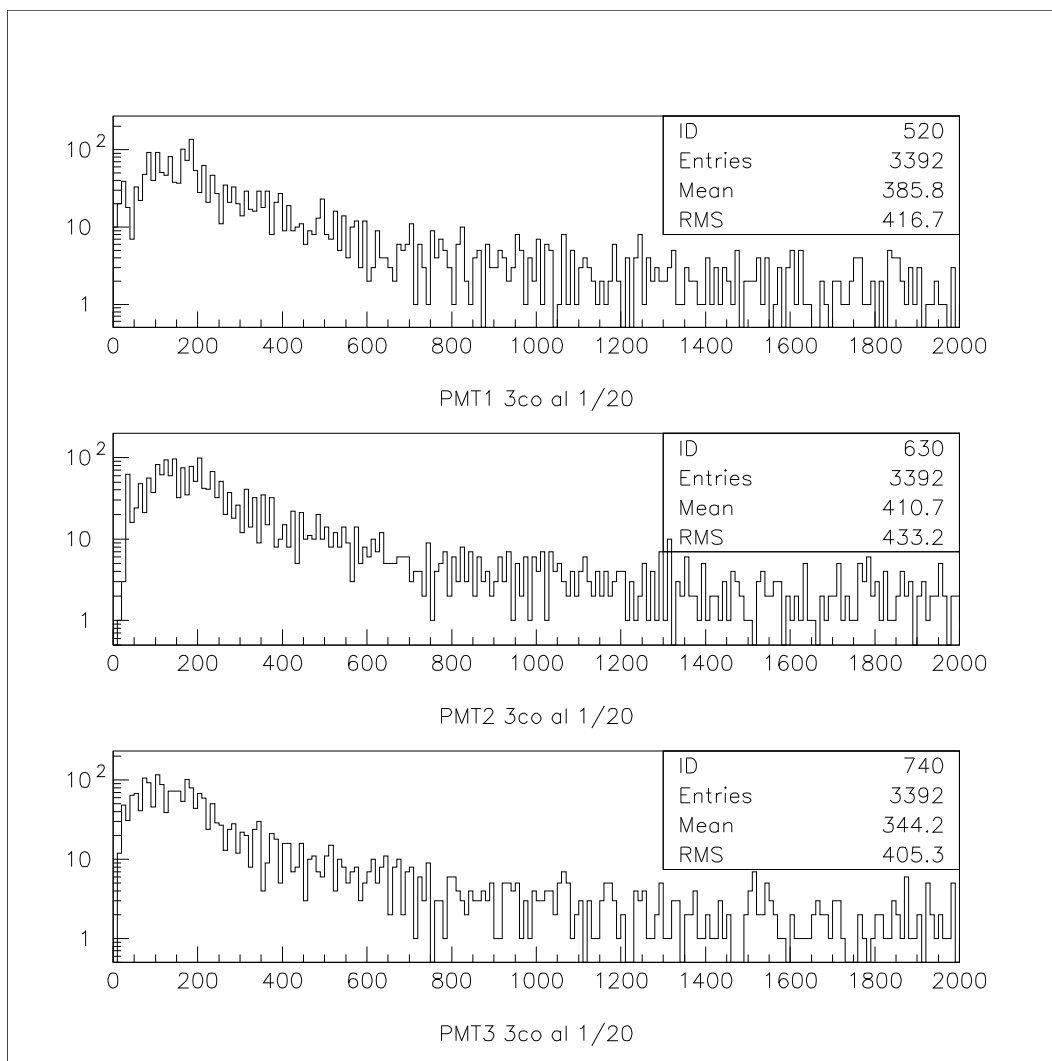


図 18: アルミニウムパウダー

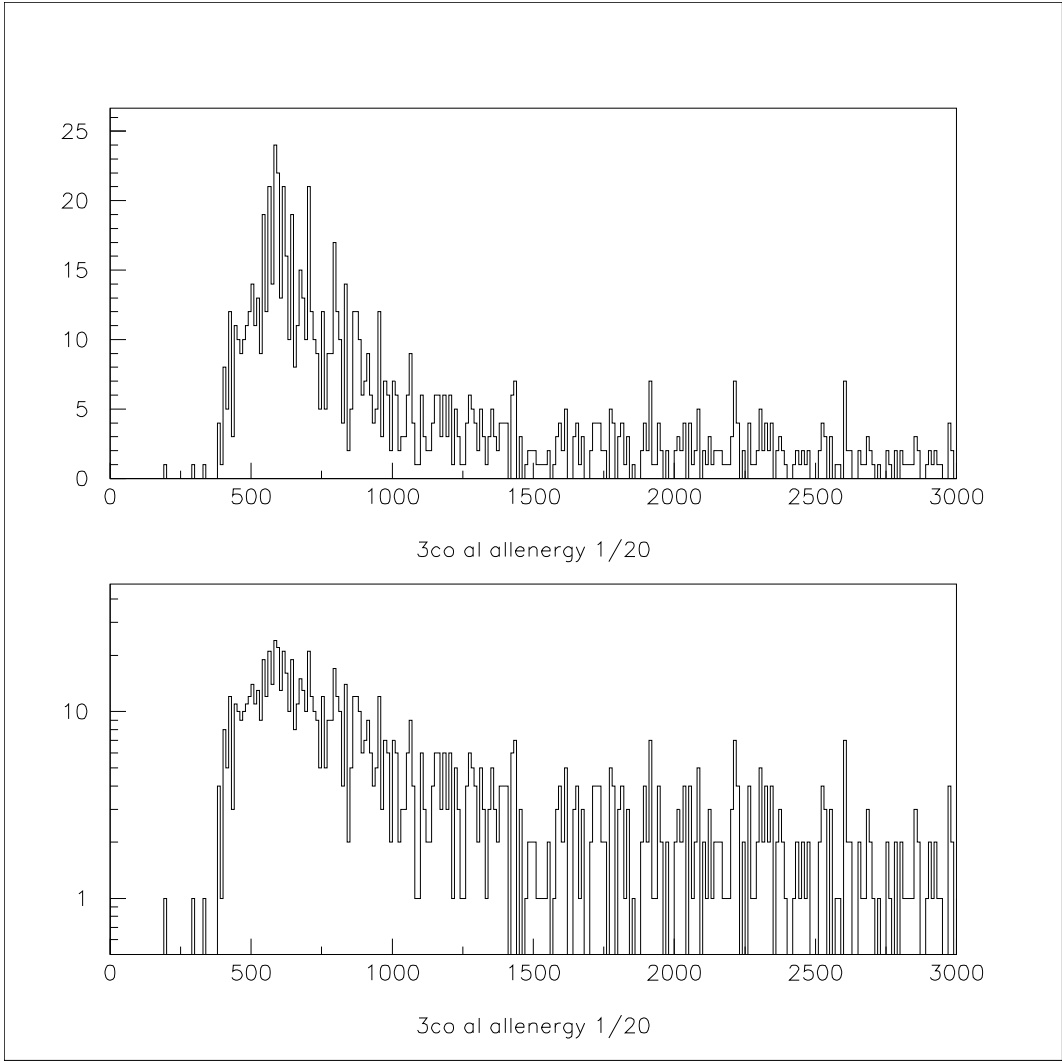


図 19: 3つの測定器の phADC の和 アルミニウムパウダー

Moderatorにタングステンのパウダーを使用したときの測定結果である。

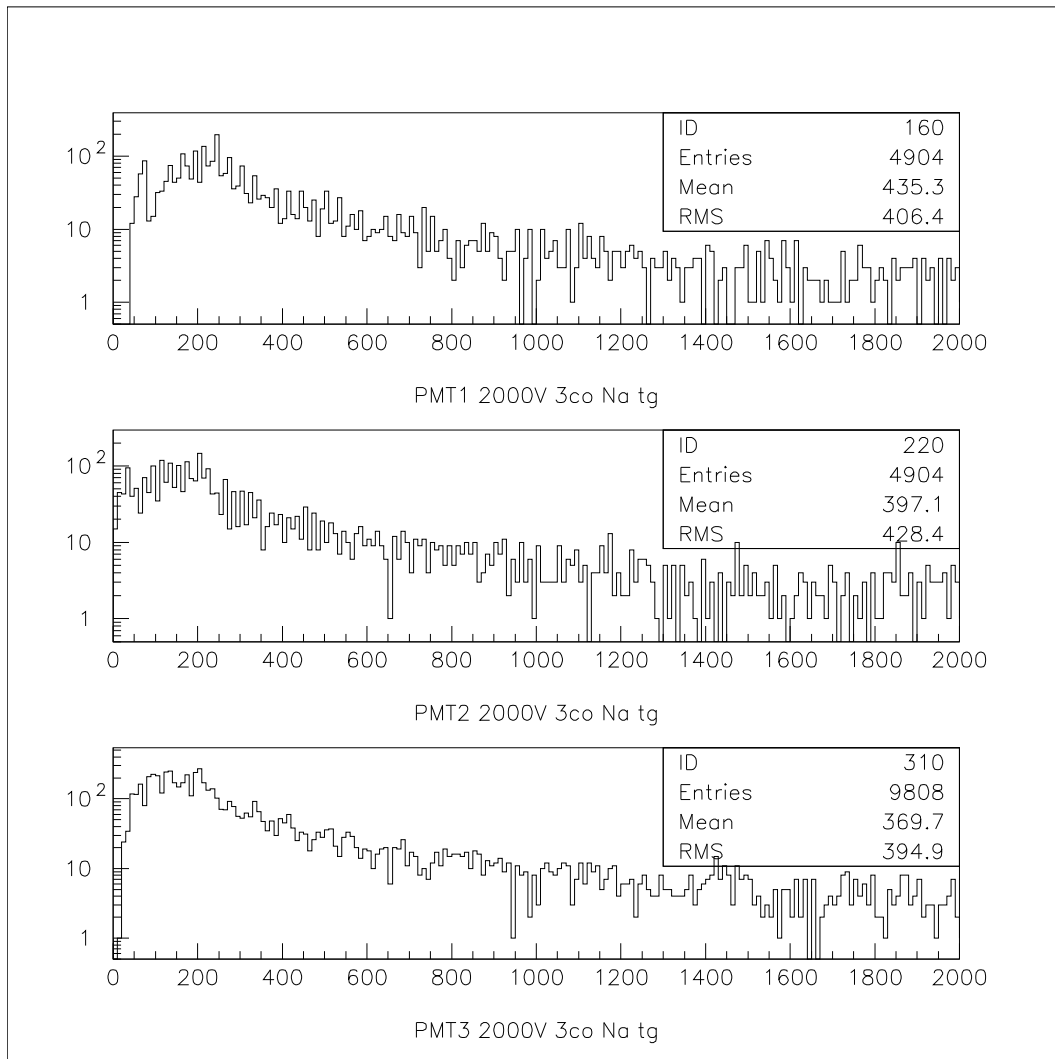


図 20: タングステンパウダー

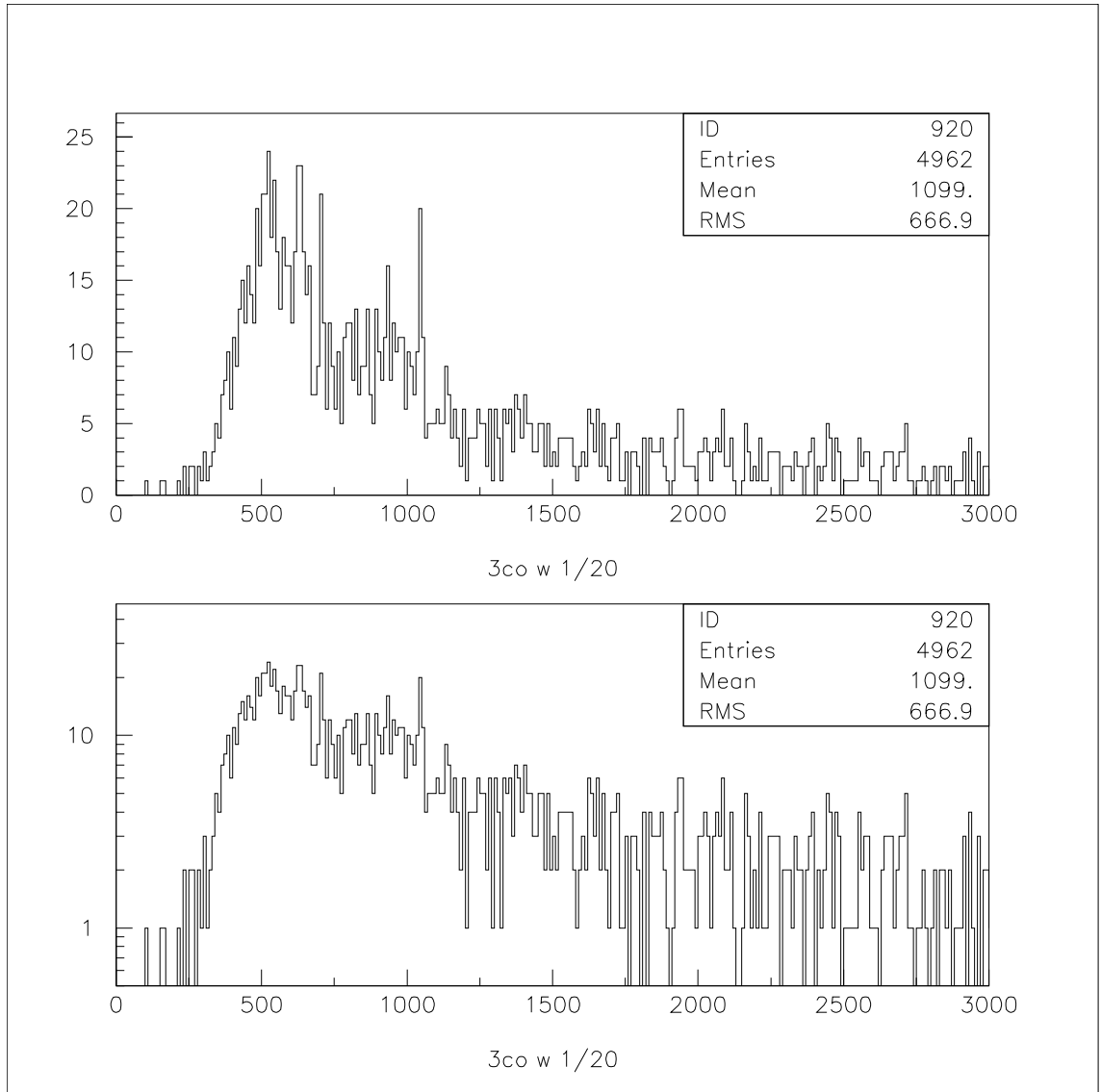


図 21: 3つの測定器の phADC の和 タングステンパウダー

Moderator 無しの場合。

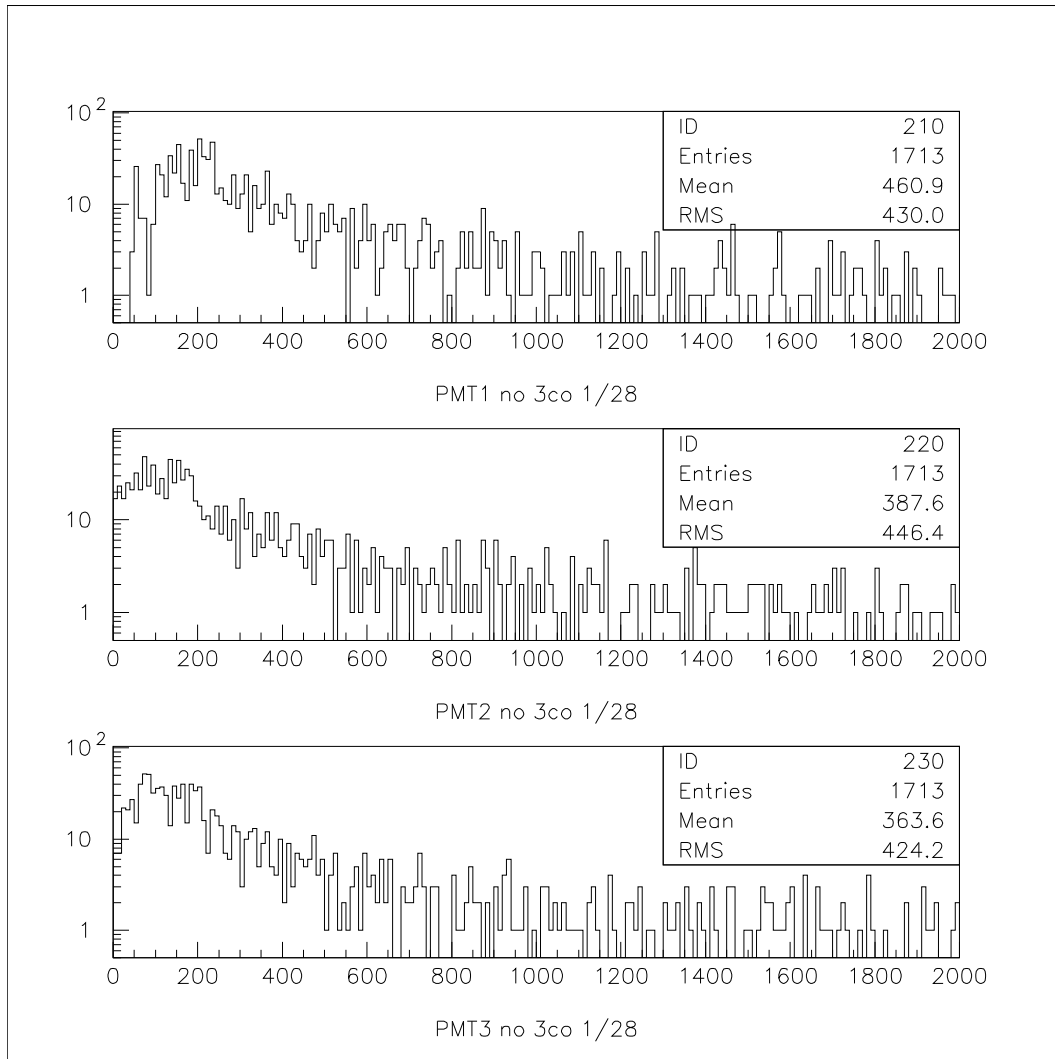


図 22: Moderator 無し

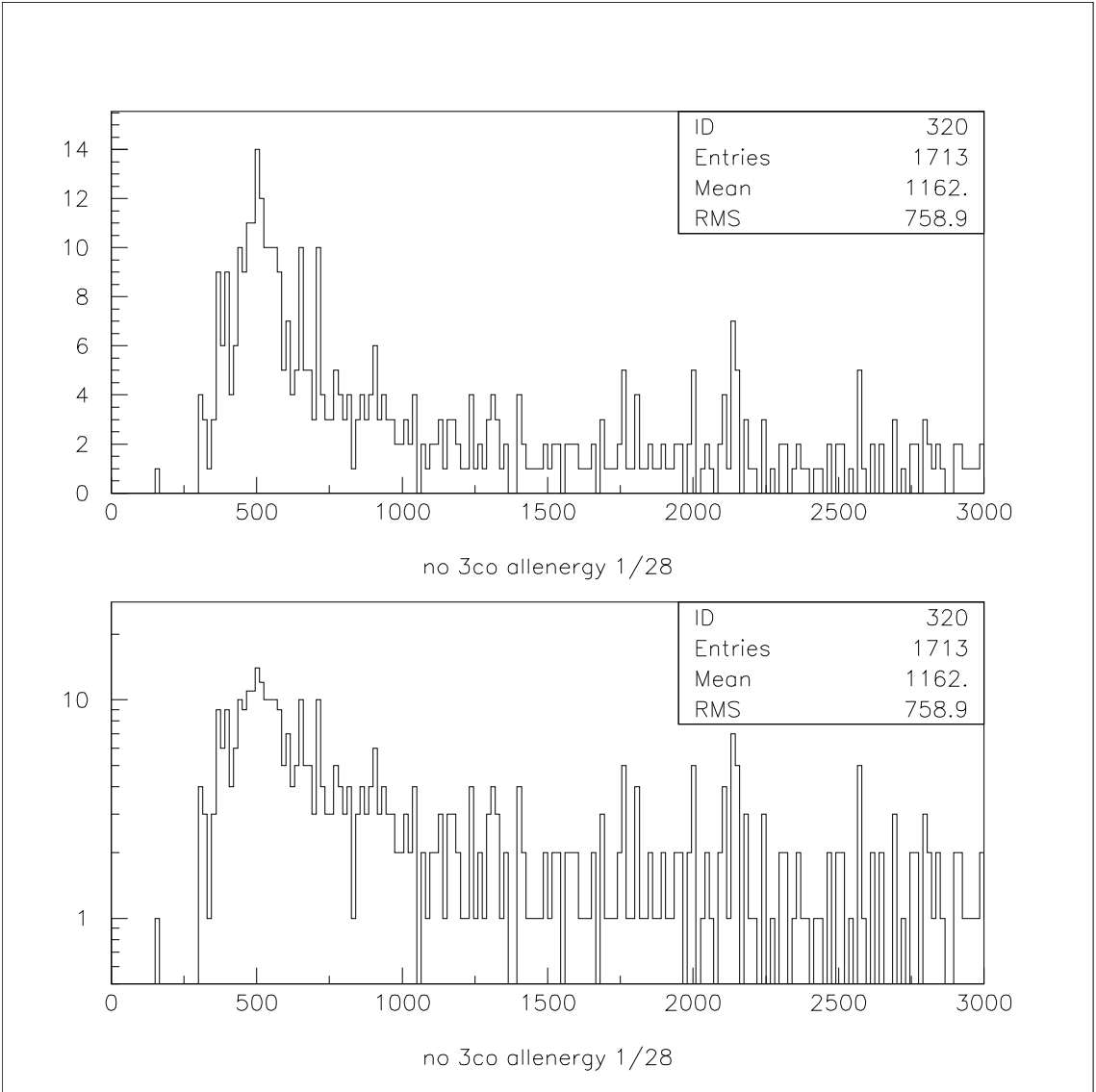


図 23: 3つの測定器の phADC の和 Moderator 無し

上から Al-powder、W-powder、Moderator 無しの分布

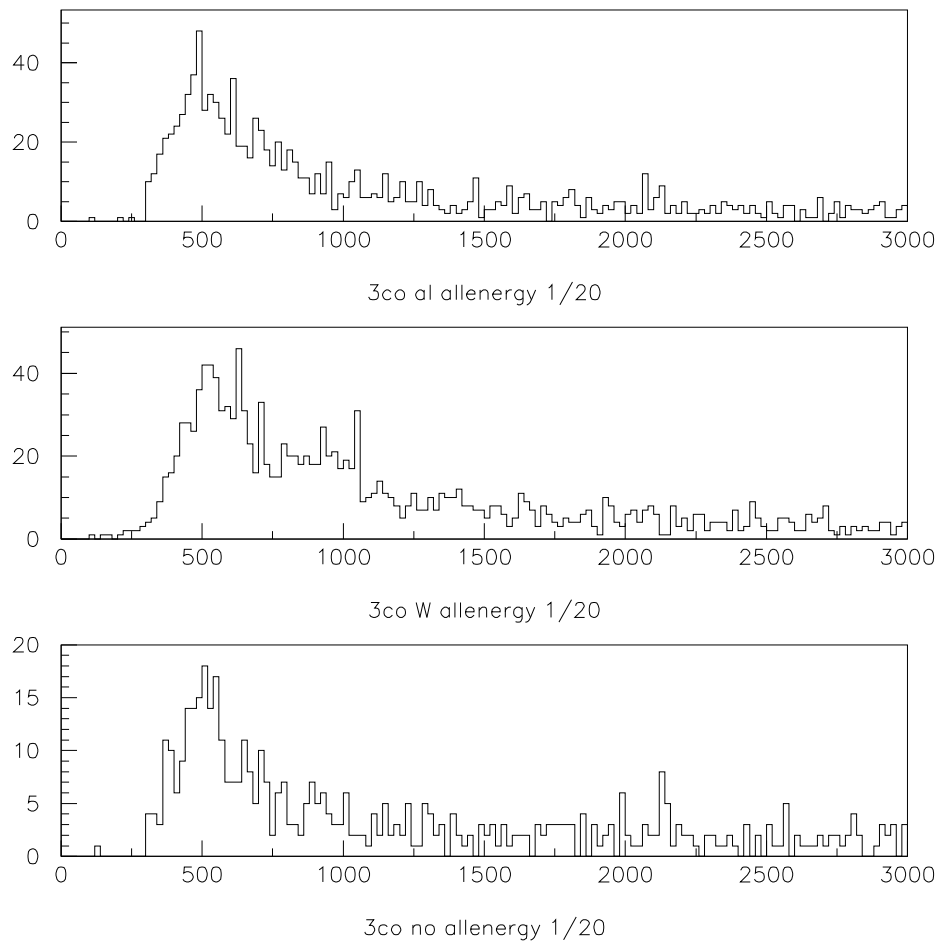


図 24: phADC 分布 Al W Moderator 無し



測定結果を見ると、図(24)の W-powder の phADC 分布の 1MeV 付近に Peak が見えており、Ps の生成・崩壊が起こっている可能性を見ることができた。

	測定時間	counts	counts/h	moderator 無しとの効率
<i>Al-powder</i>	104h	3390	33	1.18
<i>W-powder</i>	94h	4950	53	1.91
<i>no-moderator</i>	61h	1710	28	1

表は moderator に Al と W を用いたものと、moderator 無しの場合のデータを比較したものである。測定にかけた時間と、count 数、1 時間当たりの count 数と、moderator 無しを 1 としたときの効率である。Al-powder は moderator 無しと比較して 1.18 倍程度の効率だったが、W-powder において moderator 無しと比較して 1.91 倍の効率を得た。

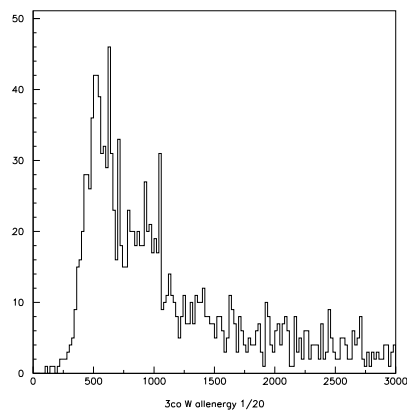


図 25: phADC 分布 W-powder

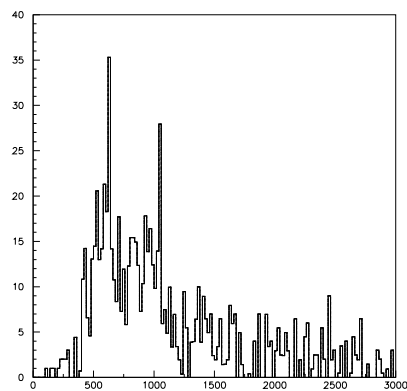


図 26: normalize W-powder

図(26)は W-powder の分布から normalize した moderator 無しの分布をひいたグラフである。1MeV 付近に peak があるのがわかる。

次章では Ps の平均寿命をはかるため、時間差分布の測定を行う。

### 3 ortho-Ps の平均寿命測定

ortho-Ps の平均寿命の測定を行う。対消滅は時間差 0、para-Ps の寿命は約 123psec と非常に短い。対して ortho-Ps の寿命は約 142nsec と長いいため、前の 2 つの事象とは別のものとして測定が可能である。2 つの信号の間の時間差を測定する TDC モジュールを用い、得られたデータより、寿命を計算する。

#### 3.1 平均寿命の計算

「単位時間に崩壊する確率は一定である」という物理法則が、ポジトロニウムの崩壊を支配する。すなわち、ある時刻  $t$  にポジトロニウムが  $N(t)$  個存在すれば

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t) \quad (18)$$

なる関係を満たす。

ただし  $\lambda$  は単位時間に崩壊する確率で崩壊率 (崩壊定数) とよばれる。(18) 式を積分すればポジトロニウムの個数として

$$N(t) = N(0)e^{-\lambda t} \quad (19)$$

を得る。

寿命  $t+dt$  の間で崩壊する粒子数が  $-dN$  だから、寿命の平均値  $\tau$  は平均値の定義より

$$\tau = \frac{\int_{N(0)}^0 t dN}{\int dN} = \int_0^{\infty} \lambda t e^{-\lambda t} = \frac{1}{\lambda} \quad (20)$$

となる。

つまり平均寿命  $\tau$  は  $\frac{1}{\lambda}$  に等しい。今回の実験では TDC の値が  $t$  にあたる。

### 3.2 TDC 測定

TDC モジュールは 1 つの共通スタート入力と複数チャンネルのストップ入力、および 1 つのクリア入力をもつ。すべての入力は NIM 信号である。TDC の動作原理を説明する。まず各チャンネル毎に用意されたコンデンサの両端に、ある初期値の電圧をかけておく。スタート信号が入力されるとコンデンサから定電流を流しだし始める。その後ストップ信号が入力されるとコンデンサへの放電が中止される。このとき各チャンネルのコンデンサの両端にでている電圧と初期値の電圧の差はスタート信号とストップ信号の時間間隔に比例している。この電圧を 12 ビット逐次比較型 ADC でデジタル化し、CAMAC データとして読み出す。クリア入力が入るとコンデンサの両端の電圧が初期値に戻され、CAMAC データはクリアされる。TDC の値  $1 = 5\text{nsec}$  に設定する。

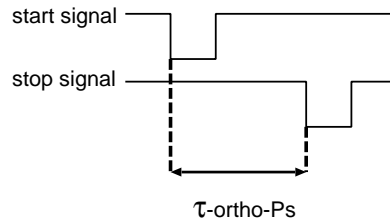


図 27: TDC による時間  $t$  の測定

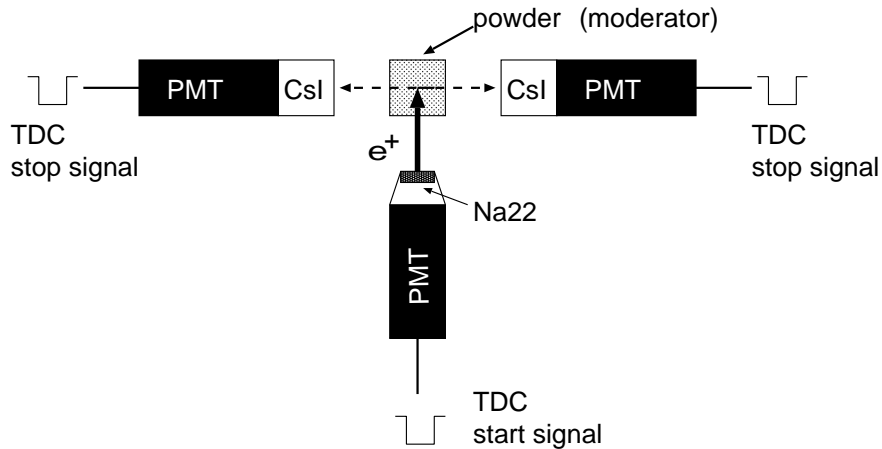


図 28: TDC 測定イメージ

### 3.2.1 TDC 測定方法

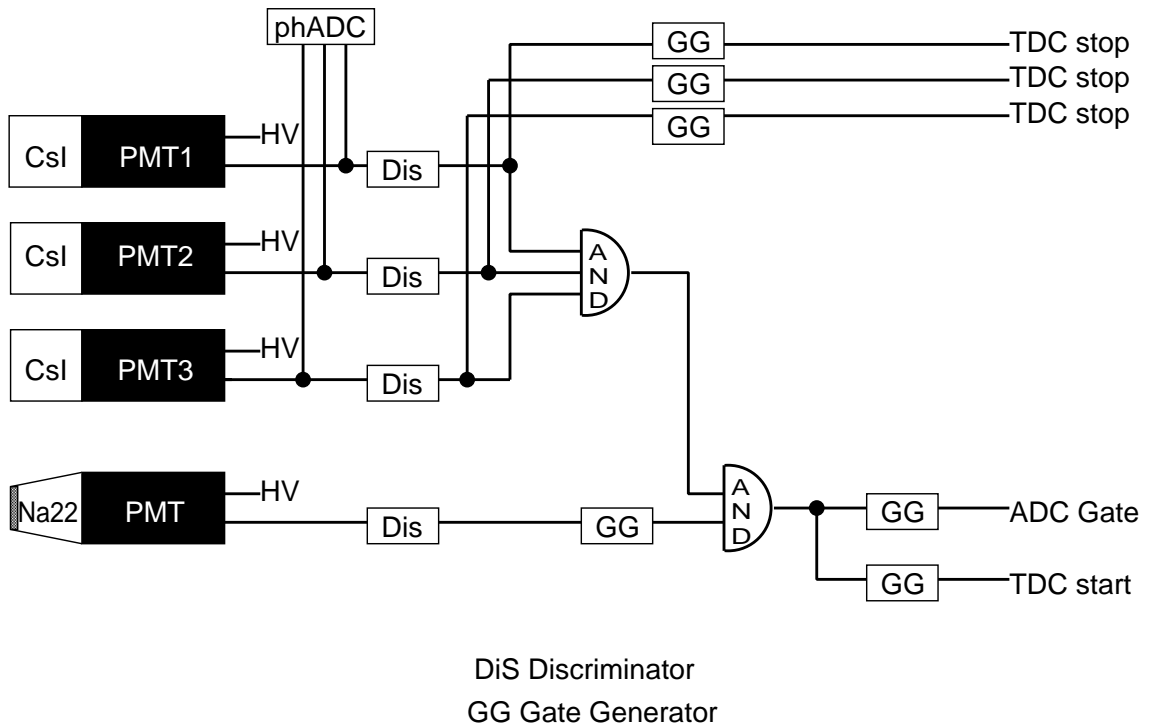


図 29: TDC 回路図

図 29 に TDC 測定回路図を示す。それぞれの光電子増倍管にかかる電圧は、PMT1:2.0KV、PMT2:2.0KV、PMT3:2.0KV、Na22PMT:2.4KVである。

線源の Na22 には 100  $\mu$  m のシンチレータがついており、線源から放出された陽電子によってシンチレーション光が出る。これを光電子増倍管で測定し、start 信号とする。3つの CsI 測定器からの同時測定信号と Na22 の信号を AND にとり、start のタイミングを決める。

それぞれの CsI 測定器からの信号を stop 信号とする。phADC の値も解析の際カットをかけるために TDC と同時に測定する。

### 3.2.2 カット条件

TDCと同時に測定した phADC から、条件にあったイベントを選びヒストグラムにする。o-Ps が生成され崩壊するときにかかる 3 光子消滅は 3 つの CsI 測定器によるエネルギーの和が 1.2MeV 以下で起こっていることが確認されているので、これをカット条件とする。

得られたデータに対しカットをかけ、指数関数で fitting し、平均寿命を計算する。

### 3.3 TDC 測定結果

Moderator に、タングステンパウダーをもちいて測定した結果である。  
横軸は TDC の値、縦軸は粒子数で対数表示である。

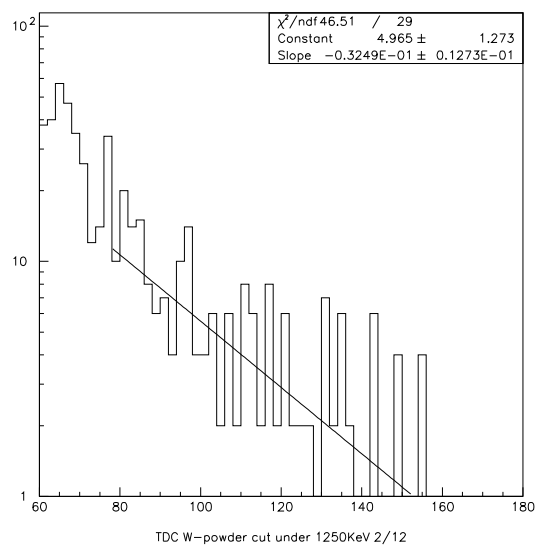


図 30: タングステンパウダー 1250KeV 以下

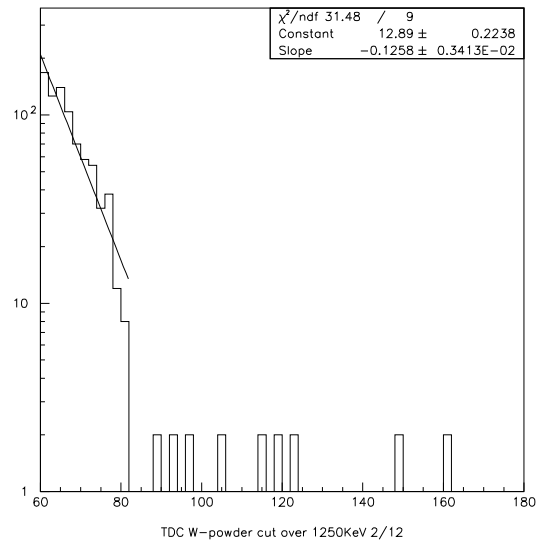


図 31: タングステンパウダー 1250KeV 以上

図 30 はエネルギー 1250KeV 以下のイベントのプロット、図 31 はエネルギー 1250KeV 以上のイベントのプロットである。この実験では時間 0 に当たるのは TDC = 60ch なので、TDCch60 付近の Peak は消滅速度の速い 2 光子消滅や対消滅によるものだと考えられる。エネルギー 1250KeV 以下で ortho-Ps の崩壊が起こっていることが分かる。

Fitting の結果から moderator にタングステンパウダーを用いたときの平均寿命  $\tau_{ortho-Ps}$  は

$$\tau_w = 123 \pm 62nsec \quad (21)$$

ortho-Ps の寿命の理論値に近い値を得られたが (142nsec)、data が少ないため誤差が非常に大きい。



## 4 まとめ

ortho-Ps の生成・崩壊実験から ortho-Ps の生成・崩壊が起こっている可能性を得ることができ、TDC 測定による平均寿命の測定から理論値に近い値を得ることが出来た。しかし統計が不足しているため誤差が大きくなってしまった。低エネルギーの陽電子を生成するために、負の仕事関数をもつ Al と W を用い、表面積を稼ぐために  $1\ \mu$  程度のパウダーで moderation を行ったが、期待したほどの効率を得ることは出来なかった。線源自体も最初に比べて 3 年半が経過し、年数を経て (半減期 2.6 年) rate も落ちて来ているものと思われる。測定方法にもまだ不十分な点が多く、これらを改善し、精度を上げることができればさらに良い結果が得られるものと期待される。

## A phADC CAMAC プログラム

```
#include <stdio.h>
#include<sys/types.h>

#include <sys/errno.h>
#include "camlib.h"

#define read_adc 0
#define test_lam_adc 8
#define clear_adc 9
#define clear_lam_adc 10

static int data1,data2,data3, q1,q2,q3, x1,x2,x3;
FILE *f1;
main(argc, argv)
int argc;
char **argv;
{
    int i, j,a,status, nevts, stn, channel1, channel2, channel3;
    char fname[20];
    if (argc == 1 || strcmp(argv[1], "help") == 0 ||
        strcmp(argv[1], "-h") == 0) {
        printf("Usage : testadc (station # of the module) (# of channel1) (# of ch
        exit(0);
    }
    sscanf(argv[1], "%d", &stn);
    sscanf(argv[2], "%d", &channel1);
    sscanf(argv[3], "%d", &channel2);
    sscanf(argv[4], "%d", &channel3);
    sscanf(argv[5], "%d", &nevts);
    sscanf(argv[6], "%s", &fname);

    if (CAMOPN()){
```

```

    printf("CAMAC open error\n");
    exit(1);
}

CSETCR(1);
CGENZ();
CGENC();
CREMI();

/* clear */
CAMAC(NAF(stn, channel1, clear_adc), &data1, &q1, &x1);
CAMAC(NAF(stn, channel2, clear_adc), &data2, &q2, &x2);
CAMAC(NAF(stn, channel3, clear_adc), &data3, &q3, &x3);
//    printf("data:%d q:%d x:%d \n",data,q,x);
CAMAC(NAF(stn, channel1, clear_lam_adc), &data1, &q1, &x1);
//    printf("data:%d q:%d x:%d \n",data,q,x);

data1 = 1;
data2 = 1;
data3 = 1;

/* CAMAC */
for( i = 0; i < nevts; i++) {

    while(1) {
        status = CAMAC(NAF(stn, channel1, test_lam_adc), &data1, &q1, &x1);
//            printf("status:%d data:%d q:%d x:%d \n",status,data,q,x);
        if (q1 != 0) break;
    }

    CAMAC(NAF(stn, channel1, read_adc), &data1, &q1, &x1);
    CAMAC(NAF(stn, channel2, read_adc), &data2, &q2, &x2);
    CAMAC(NAF(stn, channel3, read_adc), &data3, &q3, &x3);
}

```

```

        //      printf("[%d:%d:%d]\n",data,q,x);
f1=fopen(fname,"a");
        fprintf(f1,"%d %d %d\n",data1,data2,data3);
printf("%s %d %d %d %d\n",fname,data1,data2,data3,i);
        fclose(f1);

        data1=255;
        data2=255;
        data3=255;

        /* clear */
        CAMAC(NAF(stn, channel1, clear_adc), &data1, &q1, &x1);
        CAMAC(NAF(stn, channel2, clear_adc), &data2, &q2, &x2);
        CAMAC(NAF(stn, channel1, clear_lam_adc), &data1, &q1, &x1);
        CAMAC(NAF(stn, channel3, clear_adc), &data3, &q3, &x3);
    }

    /* close CAMAC */
    CAM_Close();
}

```

## B TDC CAMAC プログラム

```
#include <stdio.h>
#include<stdlib.h>
#include<sys/types.h>
#include<time.h>
#include <sys/errno.h>
#include "camlib.h"
#define LOOP 10
#define ADC 10
#define ADCCH 0
#define MAX 4000
static int read_adc, write_adc, clear_adc, test_lam_adc, clear_lam_adc,
          test_module_adc, disable_lam_adc, enable_lam_adc,
          dummy, q, x;
FILE *f1;
main(argc, argv)
int argc;
char **argv;
{
    int i, j,a,status, nevts;
    char fname[20];
    int jikan;
    int mon,day,hou,min;
    time_t ltime;
    struct tm*today;
    ltime=time(NULL);
    today=localtime(&ltime);
    mon=today->tm_mon+1;
    day=today->tm_mday;
    hou=today->tm_hour;
    min=today->tm_min;
    jikan=mon*1000000+day*10000+hou*100+min;
    sprintf(fname,"otdc%d.dat",jikan);

    if (argc == 1 || strcmp(argv[1], "help") == 0 ||
```

```

        strcmp(argv[1], "-h") == 0) {
    printf("Usage : adc (# of events)\n");
    exit(0);
}

sscanf(argv[1], "%d", &nevt);
read_adc      = NAF(ADC, ADCCH, 0);
test_lam_adc  = NAF(ADC, ADCCH, 8);
clear_adc     = NAF(ADC, ADCCH, 9);
clear_lam_adc = NAF(ADC, ADCCH, 10);
disable_lam_adc = NAF(ADC, ADCCH, 24);
test_module_adc = NAF(ADC, ADCCH, 25);
enable_lam_adc = NAF(ADC, ADCCH, 26);

if (CAMOPN()){
    printf("CAMAC open error\n");
    exit(1);
}

CSETCR(1);
CGENZ();
CGENC();
CREMI();

/* clear */
CAMAC(clear_adc, &dumy, &q, &x);
//    printf("dumy:%d q:%d x:%d \n", dumy, q, x);
CAMAC(clear_lam_adc, &dumy, &q, &x);
//    printf("dumy:%d q:%d x:%d \n", dumy, q, x);

dumy = 1;

/* CAMAC */
for( i = 0; i < nevt; i++) {
//    sleep(3);

```

```

        while(1) {
status = CAMAC(test_lam_adc, &dumy, &q, &x);
// status = CAMAC(read_adc, &dumy, &q, &x);
//      printf("status:%d dumy:%d q:%d x:%d \n",status,dumy,q,x);
//      dumy += dumy*2;
//      for (j=0;j<10000;j++) {
//          CAMAC(NAF(12,0,16),&dumy,&q,&x);
//      }
if (q != 0) break;
    }

```

```

        CAMAC(read_adc, &dumy, &q, &x);
// printf("%s",fname);
f1=fopen(fname,"a");
// if(dumy<MAX){
//      printf("[%d:%d:%d]\n",dumy,q,x);
//      fprintf(f1,"%d\n",dumy);
printf("%d\n",i);
// } else{
if(dumy>MAX){
i=i-1;
}
fclose(f1);
// }

```

```

        /*
        while(1){
status = CAMAC(NAF(ADC,0,0), &dumy, &q, &x);
if (status & 0x01 !=0) break;
    }
        */

```

```

dumy=255;

```

```
    /* clear */
    CAMAC(clear_adc, &dumy, &q, &x);
    CAMAC(clear_lam_adc, &dumy, &q, &x);
}
/* close CAMAC */
CAM_Close();
//    fclose(f1);
}
```



## 謝辞

この研究を進めるにあたり、興味深いテーマを与えてくださり、ご指導頂いた指導教官である竹下徹教授に深く感謝いたします。また実験方法や解析などに数々の助言を頂いた長谷川庸司助手にも心より感謝いたします。論文作成にあたり多大なるアドバイスと励ましをいただいた、高エネルギー研究室の方々、学生合同研究室のメンバーにも大変お世話になりました。本当にありがとうございました。心から感謝いたします。

## 参考文献

- [1] ニコラス ツルファニディス著 阪井 英次訳『放射線計測の理論と演習』  
現代工学社
- [2] 中村 美和子 修士論文『オルソポジトロニウムの生成と崩壊過程の  
研究』
- [3] 奥村 晴彦著 『 $\text{\LaTeX}2\text{e}$  美文書作成入門』 技術評論社
- [4] KNOLL 『放射線計測ハンドブック』 日刊工業新聞社
- [5] 山崎 文男責任編集 実験物理学講座 26 『放射線』 共立出版
- [6] 中野 董夫著 物理入門コース 『相対性理論』 岩波書店