

平成 30 年度 卒業論文

チェレンコフカウンターによる
 γ 線の検出と波形データ処理

奈良女子大学 理学部
数物科学科 高エネルギー物理学研究室

近藤萌香

平成 31 年 3 月 31 日

概要

荷電粒子を検出する手段の一つとして、その速さが媒質中の光速を超える速度で走るときに生成されるチェレンコフ光を用いるチェレンコフカウンターがある。

本研究では、石英ガラスを輻射体とし、チェレンコフ光を光電子増倍管で読み出すチェレンコフカウンターを製作し、 β 線や γ 線の検出を行った結果について記す。

目次

第 1 章	物理現象	2
1.1	チェレンコフ光	2
1.2	シンチレーション光	3
1.3	光電効果	3
1.4	電子対生成	4
第 2 章	実験装置の概要	5
2.1	PMT の基本原理	5
2.2	使用した線源	6
第 3 章	^{90}Sr が発する β 線の検出	8
3.1	セットアップ	8
3.2	生データのフォーマット	9
3.3	データ解析	11
3.4	PMT への印加電圧	12
3.5	チェレンコフ光とシンチレーション光	14
第 4 章	^{137}Cs が発する γ 線の検出	16
4.1	波高分布	16
4.2	ノイズ	17
4.3	PMT を冷却しての測定	18
4.4	パルス選別	20
第 5 章	^{22}Na が発する 2 本の γ 線の同時検出	25
5.1	コインシデンス	25
5.2	セットアップ	25
5.3	パルスのタイミング	27
5.4	時間差の分布	28
5.5	考察	29
第 6 章	まとめ	30

付録 A	データ収集用プログラム	32
付録 B	データ解析プログラム	34
参考文献		36

目次

1.1	チェレンコフ光	2
1.2	シンチレーション光	3
1.3	光電効果	3
2.1	PMT の構造図	5
2.2	^{90}Sr の壊変図	6
2.3	^{137}Cs の壊変図	6
2.4	^{22}Na の壊変図	6
3.1	^{90}Sr 線源からの β 線、 ^{137}Cs 線源からの γ 線を用いる実験装置の概要	8
3.2	検出体	9
3.3	デジタルオシロスコープ	9
3.4	^{90}Sr 線源、石英ガラスを用いた際の波形スナップショット	11
3.5	^{90}Sr 線源、石英ガラスを用いた際の波高分布	12
3.6	印加電圧を 1700V にしたときの波高分布	13
3.7	印加電圧を 2000V にしたときの波高分布	13
3.8	チェレンコフ信号の波形スナップショット	14
3.9	シンチレーション信号の波形スナップショット	14
3.10	チェレンコフ信号の波高分布	15
3.11	シンチレーション信号の波高分布	15
4.1	^{137}Cs 線源、石英ガラスを用いた際の波高分布	16
4.2	チェレンコフ信号とノイズの波形スナップショット	17
4.3	積分範囲の違いによる積分値の違い	18
4.4	恒温槽	18
4.5	恒温槽内の様子	18
4.6	PMT を冷却した場合の波高分布	19
4.7	線源を置かないときに観測される単位時間あたりのパルスの数	20
4.8	チェレンコフ信号の後の部分へ条件を与えたときの波高分布	21
4.9	積分値が負の値をとるパルスの例	22

4.10	ゼロ点の分布	23
4.11	チェレンコフ信号の前の部分へ条件を与えたときの波高分布	24
5.1	コインシデンスの概要	26
5.2	^{22}Na 線源を用いる実験装置の概要	26
5.3	NIM モジュール	26
5.4	2つのパルスを同時検出できたときの波形スナップショット	26
5.5	threshold	27
5.6	10%-90% slope	28
5.7	時間差の分布	29

表目次

4.1	線源を置いたときと置いていないときの単位時間当たりのパルスの数 (室温)	20
-----	---	----

第 1 章

物理現象

1.1 チェレンコフ光

物質（屈折率 n ）中を通過する荷電粒子の速度 v が、物質中の光速 c/n を超える速さで走るとき、粒子の飛跡に沿って物質が発する弱い光のことをチェレンコフ光という。チェレンコフ光は可視光から紫外線領域の光で、粒子の進行方向に角度 θ をなして円錐状に放出される。

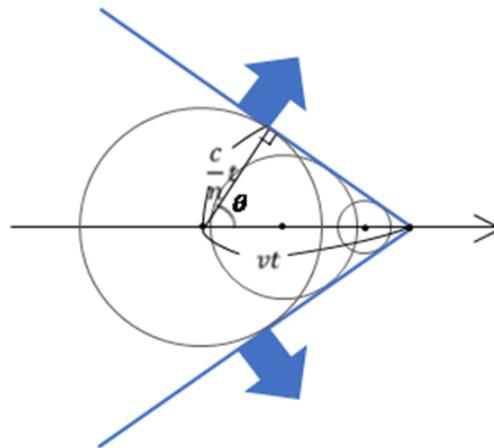


図 1.1 チェレンコフ光

発光の条件は、

$$\begin{aligned} vt &\geq \frac{c}{n}t \\ \beta &\geq \frac{1}{n} \end{aligned} \quad (1.1)$$

である ($\beta = v/c$)。また、

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta} \quad (1.2)$$

となり、発光する向きが決まっている。さらに、チェレンコフ光は、物質中を粒子が発生条件を満たす速度で走る間ずっと発光する。

1.2 シンチレーション光

粒子が物質中を通ると、原子または分子を励起して光を発生させる。これをシンチレーションといい、ある種の物質ではこの発光が著しい。

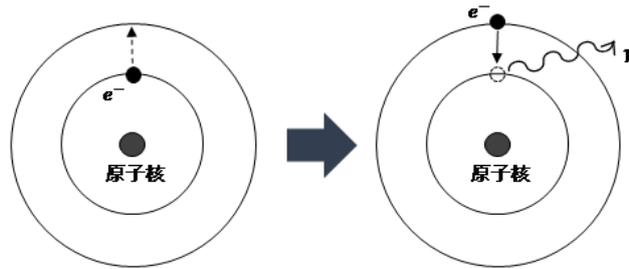


図 1.2 シンチレーション光

シンチレーション光はチェレンコフ光に比べて発光量（光子数）が多いが、原子や分子が励起して元に戻る機構により発光するので、その遷移にかかる時間が発光時間を制限し、光は等方的に発生する。

1.3 光電効果

光電効果とは、物質に入射した光子のエネルギーが物質中の電子にすべて与えられ、その電子（光電子）が放出される現象である。入射光子のエネルギーが E_γ であるとき、放出される光電子のもつエネルギーは電子の静止質量 m_e も含めて $(E_\gamma + m_e c^2)$ となる。

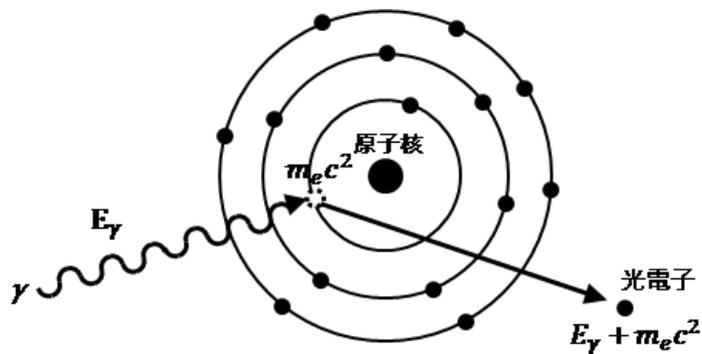


図 1.3 光電効果

1.4 電子対生成

光子が原子核の近傍においてクーロン場を受けた際に、光子が消滅して電子とその反粒子である陽子の対が生成する過程を電子対生成という。 γ 線のエネルギー $h\nu$ が電子と陽電子に与えられるため、 $2m_e c^2 = 1.022\text{MeV}$ 以上のエネルギーが必要である。この過程で作られた電子は、物質中進んでいく間に次第に運動エネルギーを失い、最終的には静止する。一方、陽電子は物質中の電子電子と結合して対消滅する。対消滅する際には、複数の γ 線が生成する。対消滅が起こる直前には、陽電子が電子と互いに相手の周りをまわる束縛状態を作る。このような系をポジトロニウムという。ポジトロニウムを形成した陽電子と電子が対消滅する際に支配的な反応は、2つの γ 線が同時に互いに反対向きに出るものである。ポジトロニウムの検出方法として、この2つの γ 線を同時計数することは基礎的な検出器技術である。

第 2 章

実験装置の概要

2.1 PMT の基本原理 [1]

光電子増倍管 (photomultiplier tube、PMT) とは、ガラス管に封じられた真空管からなる高感度光検出器で、入射窓、光電面 (陰極)、集束電極、電子増倍部 (ダイノード)、陽極により構成される。その構造を図 2.1 に示す。

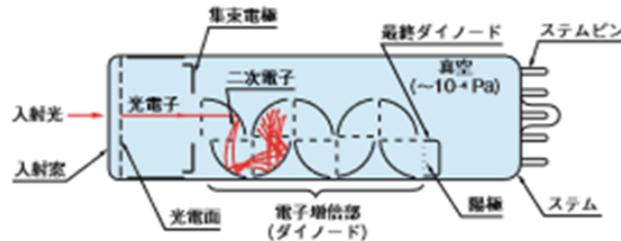


図 2.1 PMT の構造図

PMT に入射した光は、以下に示す過程を経て信号出力される。

1. ガラス窓を透過して、光電面内で光電効果を起こすと、真空中の管内に光電子を放出する。
2. 光電子は集束電極で加速・収束され、第 1 ダイノードに衝突し二次電子を放出することで電子増倍する。
3. 二次電子がそれ以降のダイノードに衝突し、二次電子放出を繰り返す。
4. 最終ダイノードにより放出された二次電子群は最終的に $10^6 \sim 10^7$ 倍になり、陽極 (アノード) より取り出される。

2.2 使用した線源

本研究では、 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 、 ^{22}Na の 3 種類の線源を使用した。それぞれの壊変図を図 2.2 から図 2.4 に示す。

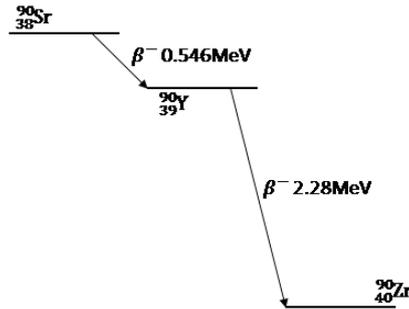


図 2.2 ^{90}Sr の壊変図

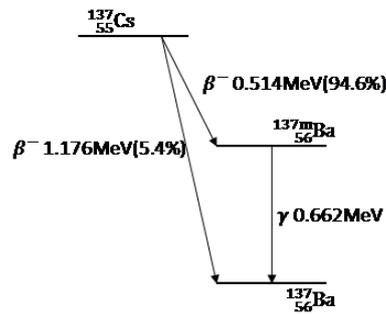


図 2.3 ^{137}Cs の壊変図

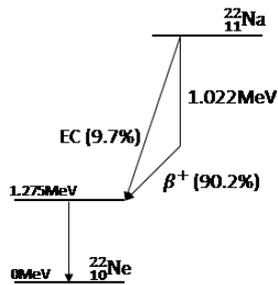


図 2.4 ^{22}Na の壊変図

^{90}Sr は半減期が 28.8 年であり、 β^- 崩壊により ^{90}Y に崩壊する。 ^{90}Y は 2.28MeV の β^- 線を放出し、 ^{90}Zr となる。

^{137}Cs は半減期が 30.2 年であり、 β^- 崩壊により、94.6% が励起状態の ^{137m}Ba に、残りの 5.4% が基底状態の同位体 ^{137}Ba へ変化する。 ^{137m}Ba は 0.662MeV の γ 線を放出し、 ^{137}Ba となる。

^{22}Na は半減期が 2.6 年であり、 β^+ 崩壊をして陽電子を放出する。この陽電子の運動エネルギーは最大で 500 keV 程度なので、周囲の物質中で容易に静止する。そこで原子中の電子とポジトロニウムという束縛状態をつくり対消滅すると、0.511MeV の 2 本の γ 線を同時に互いに 180° の向きに放射する。

第 3 章

^{90}Sr が発する β 線の検出

プラスチックシンチレーターや石英ガラスを PMT にとりつけた検出器により、 ^{90}Sr が発する最大エネルギー 2.28MeV の β 線を検出し、波高分布を得た。信号の数値化には、デジタルオシロスコープを用いて高速サンプル・アンド・ホールドした波形データを収集し、そこから信号電荷を計算する手法をとった。

3.1 セットアップ

図 3.1 に装置の概要、図 3.2 から図 3.3 に本実験で使用したハードウェアを示す。

- ビン電源：クリアパルス株式会社製 6 幅ミニビン電源 E6660 型
- 高圧電源：林栄精器株式会社（現ハヤシレピック株式会社）製 RPH-030 型 QUAD HIGH VOLTAGE POWER SUPPLY
- デジタルオシロスコープ：Tectronix 製 DPO 3034 Digital Phosphor Oscilloscope
- PC 環境：CPU:AMD Athlon(tm) II X2 220 processor OS:Linux

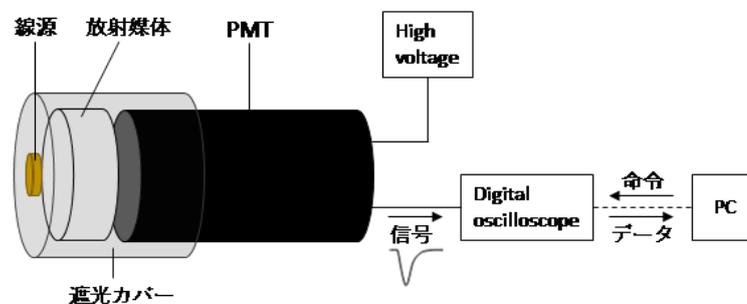


図 3.1 ^{90}Sr 線源からの β 線、 ^{137}Cs 線源からの γ 線を用いる実験装置の概要

デジタルオシロスコープは LAN インターフェイスを装備しており、これを介して PC



図 3.2 検出体。左はプラスチックシンチレーター（半径 25mm 厚さ 20mm）、右は石英ガラス（半径 25mm 厚さ 10mm 屈折率 1.5）である。



図 3.3 デジタルオシロスコープ

と命令やデータの送受信が可能である。LXI と呼ばれる通信プロトコルに基づいてコマンドやデータの授受を行うソフトウェアパッケージとして VX11 がある。VX11 がサポートする関数をコールするデータ収集用プログラムを作成、実行することで、デジタルオシロスコープより波形データを習得し、これをテキスト形式で書き出す。付録 A に、データ収集用プログラムのソースコードの例を示す。

3.2 生データのフォーマット

例として、 ^{90}Sr 線源を用いて、PMT に石英ガラスをとりつけ、1700V を印加した際の生データを以下に抜粋して示す。また、図 3.4 にデジタルオシロスコープのスクリーン上のスナップショットを示す。

```

4.000e-10
  0 1000 75 76 77 76 74 77 77 74 75 76 77 77 78 77 77 76 76 76 74 75 77 76 73 76 76 76
76 76 75 74 75 77 75 75 75 76 76 76 76 75 75 74 74 75 76 77 77 75 75 75 75 76 77 76 77 77
77 76 75 73 76 75 77 76 78 77 75 74 73 74 77 76 75 75 76 76 75 75 77 76 76 75 75 75 75 76 76
77 77 76 78 79 76 76 76 76 77 77 77 74 76 75 75 75 75 75 77 76 76 75 74 74 73 73 76 76 74 74
75 75 76 76 75 72 71 69 66 64 61 58 57 56 55 57 60 62 62 64 64 69 69 71 69 69 70 69 70 71 74
72 72 72 74 76 74 74 74 74 73 72 74 74 73 74 74 74 74 75 76 75 75 77 76 76 77 76 75 76 75 75
...
  1 1000 76 77 76 77 76 76 76 76 77 76 75 76 75 75 76 77 77 76 75 75 74 76 76 75 74 75
77 75 75 75 75 76 74 75 75 76 76 75 75 77 77 76 75 75 75 76 76 76 77 76 74 75 77 77 77 75
76 76 77 75 76 76 75 75 77 77 76 75 75 76 76 76 75 77 76 76 76 76 76 75 75 78 77 77 74 75
75 76 74 75 75 74 75 74 75 76 76 76 76 77 77 77 76 76 74 76 77 77 76 75 75 75 75 77 77 77 76
76 76 77 76 76 75 74 72 68 67 61 57 52 45 38 34 36 37 42 47 50 50 54 56 59 62 63 63 64 66 69
70 72 73 72 73 74 75 74 73 71 72 72 71 71 70 72 71 73 73 76 78 75 75 75 75 76 78 78 77 77 76
...
  2 1000 77 77 77 75 74 76 75 76 77 77 76 76 75 75 77 77 76 76 76 78 76 76 77 75 76 75
75 75 77 77 77 76 75 74 74 75 76 75 75 76 75 77 76 77 76 73 77 78 76 75 76 76 76 76 76 76 76
75 75 76 76 77 76 76 75 77 77 77 76 76 76 75 77 76 76 76 77 76 75 73 77 76 75 76 76 75 73
74 76 77 77 75 76 75 76 76 78 76 76 75 75 75 75 76 77 78 77 76 78 76 78 78 76 76 75 75 75
74 75 76 75 72 70 67 65 62 60 60 56 54 56 57 59 64 65 68 69 69 71 71 70 72 75 75 75 75 77 77
76 75 75 77 77 74 73 74 73 74 73 73 72 75 76 74 74 75 75 75 76 77 76 77 76 75 75 75 77 77 76
...
  3 1000 75 75 74 75 76 75 75 76 78 78 78 76 76 75 76 77 78 77 74 75 74 74 75 74 76 75
75 74 74 76 76 76 76 76 78 76 75 76 76 77 77 76 75 76 75 73 76 75 75 75 75 76 76 74 75 75 76
76 76 75 75 76 76 74 75 75 76 76 75 75 74 75 75 75 74 76 75 74 75 76 76 77 75 75 77 76 76
77 77 76 74 76 76 76 75 76 76 75 76 76 78 76 74 76 77 76 76 76 75 74 73 75 75 76 76 75 75
76 76 76 74 74 74 71 71 68 64 62 57 55 54 53 53 56 59 62 66 65 65 67 68 68 70 70 71 73 72 74
75 77 76 76 75 74 74 73 76 74 74 73 74 75 75 74 75 75 75 75 78 76 77 79 77 77 76 75 76 74 76
...

```

- 1行目はラン開始レコード (begin run record) にあたり、デジタルオシロスコープが 2.50GSample/s、すなわち時間間隔が

$$\frac{1\text{s}}{2.50\text{GSample/s}} = 0.4\text{ns} \quad (3.1)$$

で収集されたデータであることを示す。

- 2行目は最初のイベントレコード (event record) で、イベント番号、サンプリング数を表し、符号付き 8bit のデータがその後 1000 個分続く。
- その後、イベントレコードがファイルの末尾まで繰り返される。

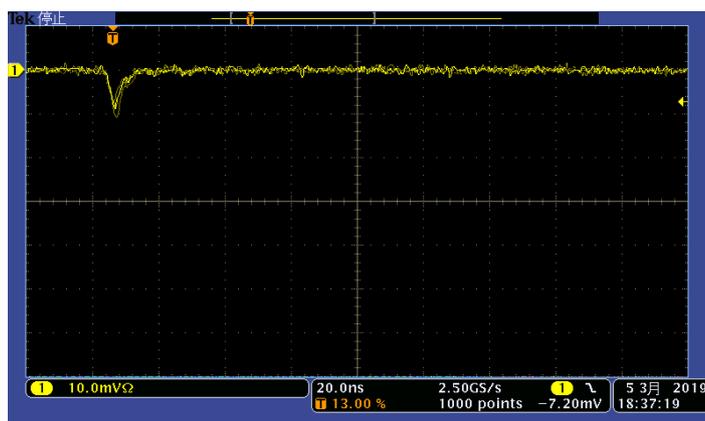


図 3.4 ^{90}Sr 線源、石英ガラスを用いた際の波形スナップショット。20.0ns/div としているので、画面に表示されているのは 65 番目～564 番目までの 500points である

3.3 データ解析

3.3.1 信号電荷への変換

3.2 で得た生データを、付録 B のデータ解析プログラムで処理したデータを以下に示す。

```

0 75.810000 1.273900 20.810000 307.690000
1 75.700000 0.790000 41.700000 528.300000
2 75.890000 0.997900 21.890000 246.610000
3 75.540000 1.028400 22.540000 287.460000
4 75.830000 1.161100 33.830000 356.670000
5 75.960000 1.058400 17.960000 214.040000
6 75.710000 0.765900 16.710000 197.790000
7 76.030000 1.289100 38.030000 509.470000
8 75.780000 0.891600 29.780000 385.220000
9 75.830000 0.821100 21.830000 262.670000
...

```

- 1 列目は、イベント番号を示す。
- 2 列目は、ゼロ点の値を示す。ここで、ゼロ点は trigger position を左から 13%、つまり 130 番目に設定しているため、0～99 番目の平均と定義する。

$$\text{ゼロ点} = \frac{\sum_{i=0}^{99} x_i}{100} \quad (3.2)$$

ここで、 i はサンプリングの番号、 x_i は i 番目のデータである。

- 3 列目は、ゼロ点の計算に用いたデータの分散を表す。

$$\text{分散} = \frac{\sum_{i=0}^{99} (\text{ゼロ点} - x_i)^2}{100} \quad (3.3)$$

ここで、 i はサンプリングの番号、 x_i は i 番目のデータである。

- 4 列目は、ゼロ点からピークまでのパルスの高さの最大値を示す。
- 5 列目は、信号パルスの積分値（信号電荷）を示す。積分値は信号パルスが検出されたと思われる 110 番目から 159 番目のデータを、ゼロ点からそれぞれ引いたものを積算する。

$$\text{積分値} = \sum_{i=110}^{159} (\text{ゼロ点} - x_i) \quad (3.4)$$

これは信号電荷を arbitrary unit で表したものとなる。

3.3.2 信号電荷の分布

第 3.3.1 項で得たデータのうち、信号パルスの成分値（信号電荷）における分布を図 3.5 に示す。

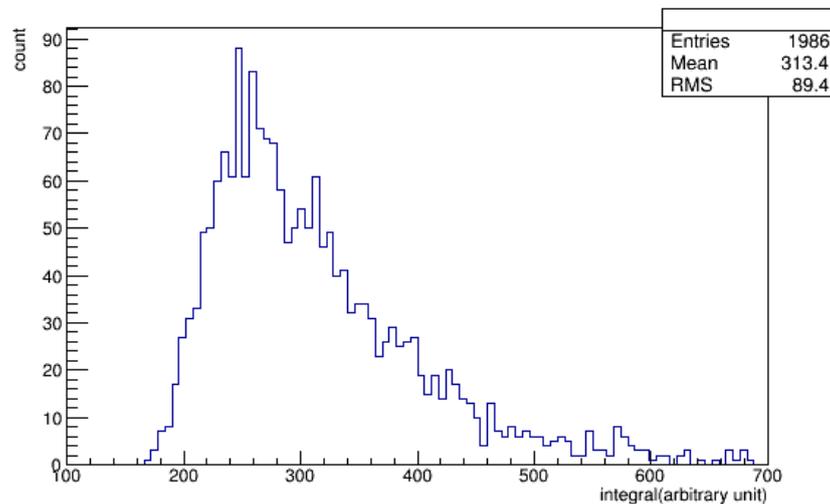


図 3.5 ^{90}Sr 線源、石英ガラスを用いた際の波高分布

3.4 PMT への印加電圧

本実験で使用している PMT に印加できる電圧の最大値は 2700V である。線源に ^{90}Sr を、放射体に石英ガラスを用いて、PMT への印加電圧を 1700V から 2000V まで 50V ずつ増やしていき、波高分布を描いた。なお、積分電荷には 1 division あたりの時間と電圧

をかけ、単位が $s \cdot V$ になるようにした。例として、印加電圧が 1700V と 2000V のときの波高分布を図 3.6 と図 3.7 に示す。取り扱いやすい大きさの信号を得られる 2000V に印加電圧を固定して、以後の測定を進めることにした。

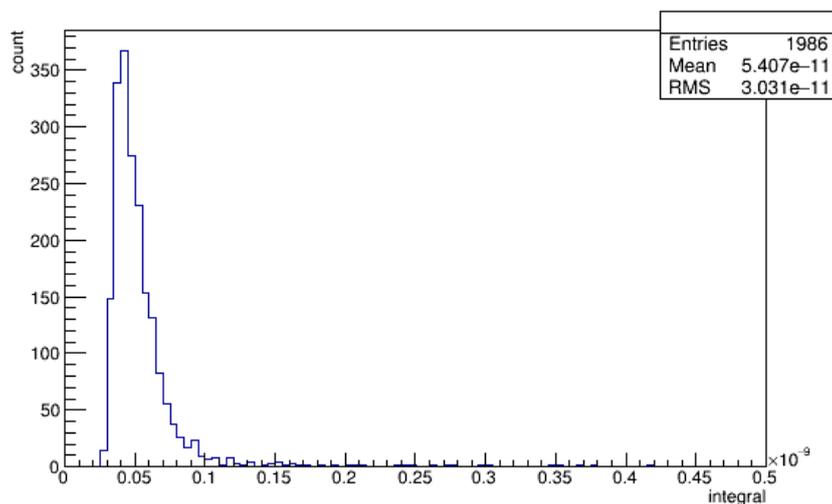


図 3.6 印加電圧を 1700V にしたときの波高分布

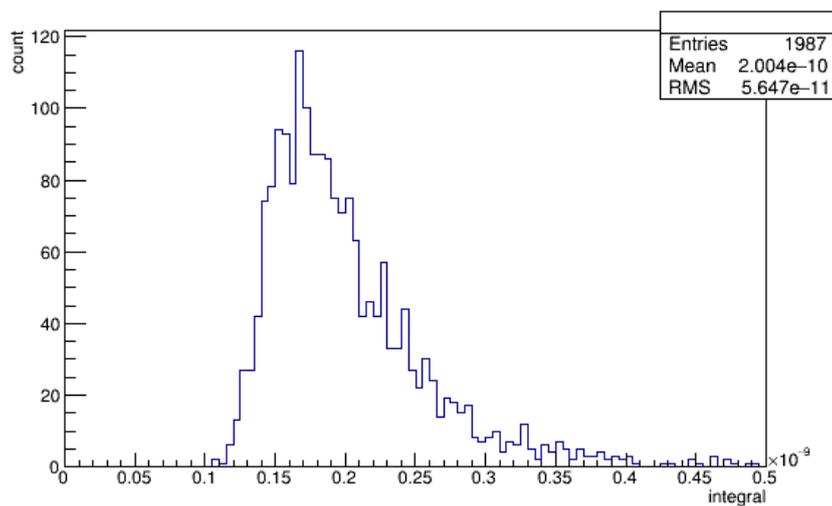


図 3.7 印加電圧を 2000V にしたときの波高分布

3.5 チェレンコフ光とシンチレーション光

PMT への印加電圧を 2000V にしたうえで、 ^{90}Sr 線源が発する β 線の検出を、チェレンコフカウンターとシンチレーションカウンターにより行った。それぞれの波形スナップショットを図 3.8 と図 3.9 に示す。チェレンコフ光の場合、信号の開始から終了までが 10ns 程度であるのに対し、シンチレーション光では約 20ns かかっており、前者の方が発光時間が短いことが確かめられた。さらに、積分電荷を $\text{s}\cdot\text{V}$ の単位で表した波高分布を図 3.10 と図 3.11 に示す。シンチレーションカウンター信号継続時間を考慮し、0~99 番目のデータによりゼロ点を、110~209 番目のデータにより積分電荷を算出した。チェレンコフカウンターと比べシンチレーションカウンターは積分電荷が約 10 倍大きいことが分かった。

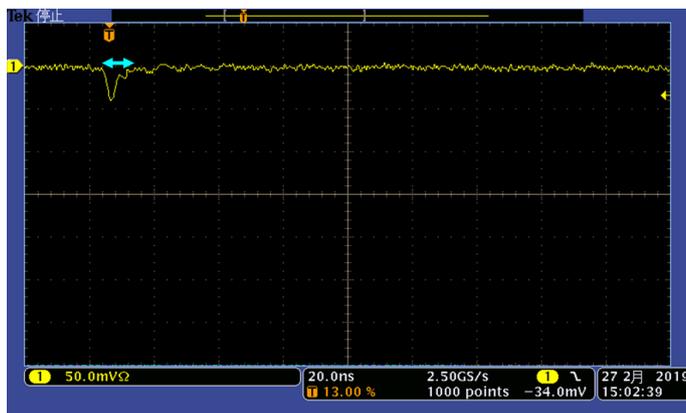


図 3.8 チェレンコフ信号の波形スナップショット

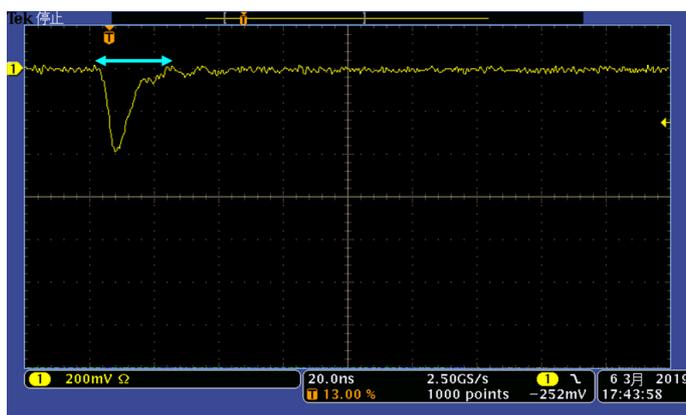


図 3.9 シンチレーション信号の波形スナップショット

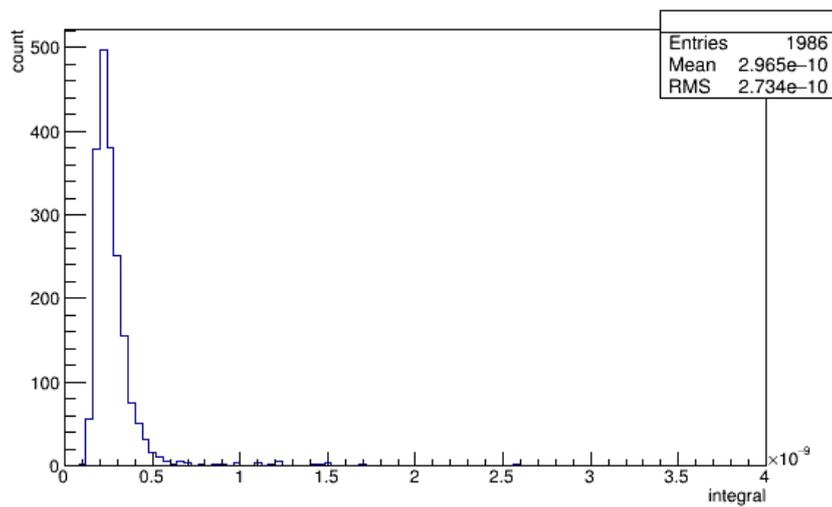


図 3.10 チェレンコフ信号の波高分布

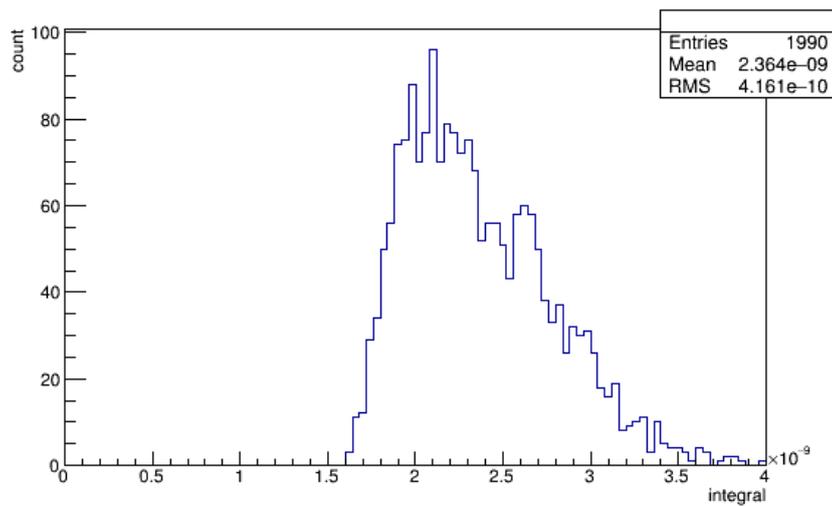


図 3.11 シンチレーション信号の波高分布

第 4 章

^{137}Cs が発する γ 線の検出

石英ガラスを PMT にとりつけたチェレンコフカウンターで、 ^{137}Cs が発する 662 keV の γ 線を検出する実験を行った。

4.1 波高分布

^{137}Cs が発する 662 keV の γ 線が石英ガラス内で光電効果を起こし、その電子が放出するチェレンコフ光を観測する。セットアップは図 3.1 の通りである。観測されたチェレンコフ信号の波高分布を図 4.1 に示す。チェレンコフカウンターでも γ 線の検出が可能であることが確かめられた。

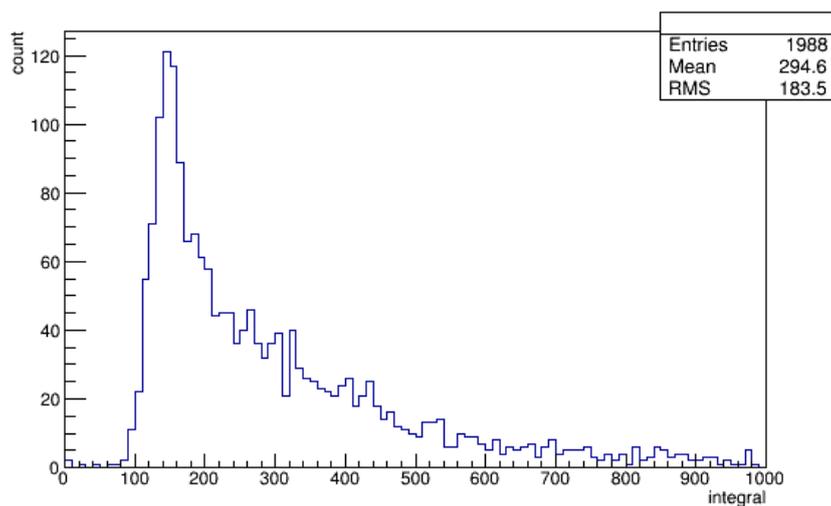


図 4.1 ^{137}Cs 線源、石英ガラスを用いた際の波高分布

4.2 ノイズ

図 4.2 をみると、チェレンコフ信号と思われるパルスは 10ns 程度であるが、それ以外に非常に長く継続する大きなパルスがあることがわかる。これは PMT が発するノイズであると考えられるため、発生頻度の減少や、データ解析の工夫で除去することが望ましい。そのための方法として次の 2 点を試した。

- PMT を冷却して測定を行う。*1
- チェレンコフ信号と思われるデータに当てはまる特徴を探し、ノイズを除去する。

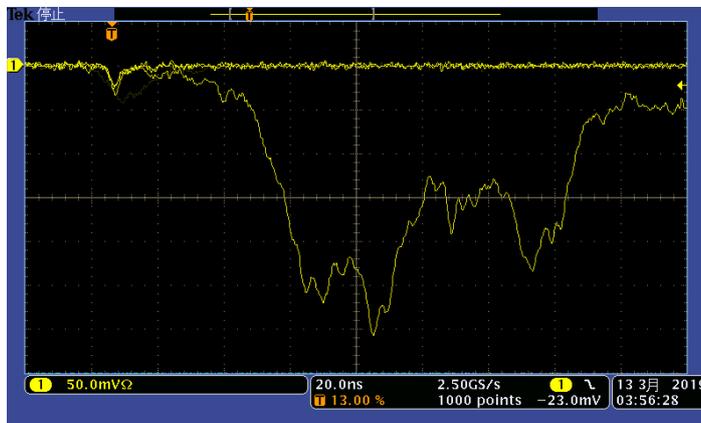


図 4.2 チェレンコフ信号とノイズの波形スナップショット

特に後者については、信号電荷を計算する際の積分範囲を 110~999 とすることにより、図 4.3 に示すように、チェレンコフ信号の範囲のみの積分値は濃い水色で囲まれた薄い水色部分であるのに対し、積分範囲を 999 番目までに広げたときの積分値は薄い水色部分全体となり、チェレンコフ信号の積分値との差別化を図るのに役立つ。

さらに、付録 A のデータ収集用プログラムに以下の内容を加えた。まず、データ収集プログラムが走っている間、オシロスコープに新たなトリガがないのに、データのブロック転送を要求するコマンドを発行すると、直前のイベントで取得されたデータが再び送られてくる。これを防ぐため、オシロスコープから PC に送られてきたデータをファイルに書き込む際に、連続するイベントでデータが重複していないことを確かめてから書き込むよう改変した。また、測定開始から終了までにかかった時間を最後に書き込むよう改変した。

*1 ノイズの原因の一つに、光電面やダイノードからの熱電子放出 *2 が考えられる。これは、実験機器を冷却して測定することで減少させることができる。

*2 固体が熱せられると、固体を形成している原子の振動が激しくなり、電子は原子振動からエネルギーを得て固体外に飛び出すようになる。



図 4.3 積分範囲の違いによる積分値の違い

4.3 PMT を冷却しての測定

4.3.1 セットアップ

PMT を恒温槽に入れ冷却して測定を行う。図 4.4 から図 4.5 に使用した恒温槽と、実験の様子を示す。

- 恒温槽：エスペック株式会社製 LU-113 型



図 4.4 恒温槽



図 4.5 恒温槽内の様子

4.3.2 PMT を冷却した場合の波高分布

室温で測定した場合の波高分布、および PMT を恒温槽に入れ -10°C と -15°C に冷却した場合の波高分布を図 4.6 に示す。低温時の方が、チェレンコフ光を検出した場合とは異なる大きな積分値のイベントが減少しており、PMT の冷却はノイズ削減に効果的であることが確かめられた。

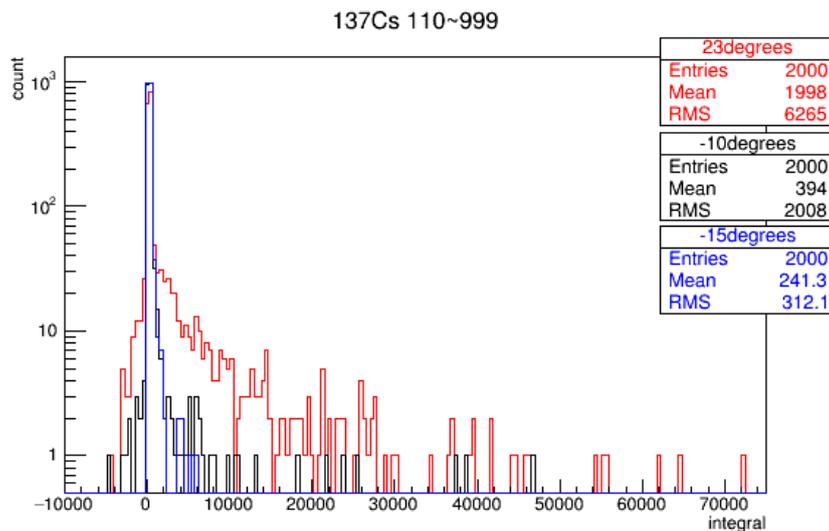


図 4.6 PMT を冷却した場合の波高分布。赤色は室温、黒色は -10°C 、青色は -15°C のときのものである。

4.3.3 線源を置かない状態での測定

線源を置いてないときに観測されるパルスの単位時間当たりの個数を図 4.7 に示す。PMT を冷却すると、線源を置いてないときに観測されるパルスを減少させることができた。しかし、 23°C での約 5Hz という値は、正確でない可能性がある。なぜならば、1000 個のデータをオシロスコープから PC に送り、それをファイルに書き出すまでにかかる時間を考慮すると、データ収集レートの限界が 5Hz 程度である可能性があるからである。実際、線源を置いた場合、オシロスコープの画面を見てみると、線源を置かないときよりも多くのパルスが目視にて確認できるが、表 4.1 に示すように、ファイルに書き出された単位時間あたりのパルスの個数に大きな違いは見られなかった。

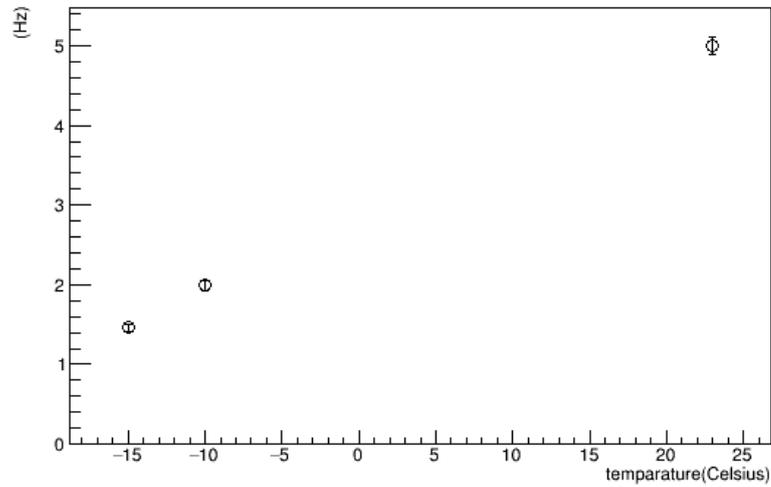


図 4.7 線源を置かないときに観測される単位時間あたりのパルスの数

	線源あり	線源なし
測定時間 (s)	387.3	400.6
イベント数	2000	2000
単位時間あたりのパルス数	5.16	5.00

表 4.1 線源を置いたときと置いていないときの単位時間当たりのパルス数 (室温)

4.4 パルス選別

4.4.1 チェレンコフ信号の後の部分への条件

チェレンコフ信号であれば、パルスが始まってから 10ns 程度で終了する。よって、チェレンコフ信号が十分に終わっている範囲である 200~999 番目の各点がゼロ点 $\pm 3\sigma$ の範囲にあるイベントだけ抜き出すことが有効である。その条件下で得た波高分布を図 4.8 に示す。ここで σ とは、ゼロ点を求める際に算出した標準偏差を示す。どの温度に関しても、積分値が異常に大きいイベントを排除できている。

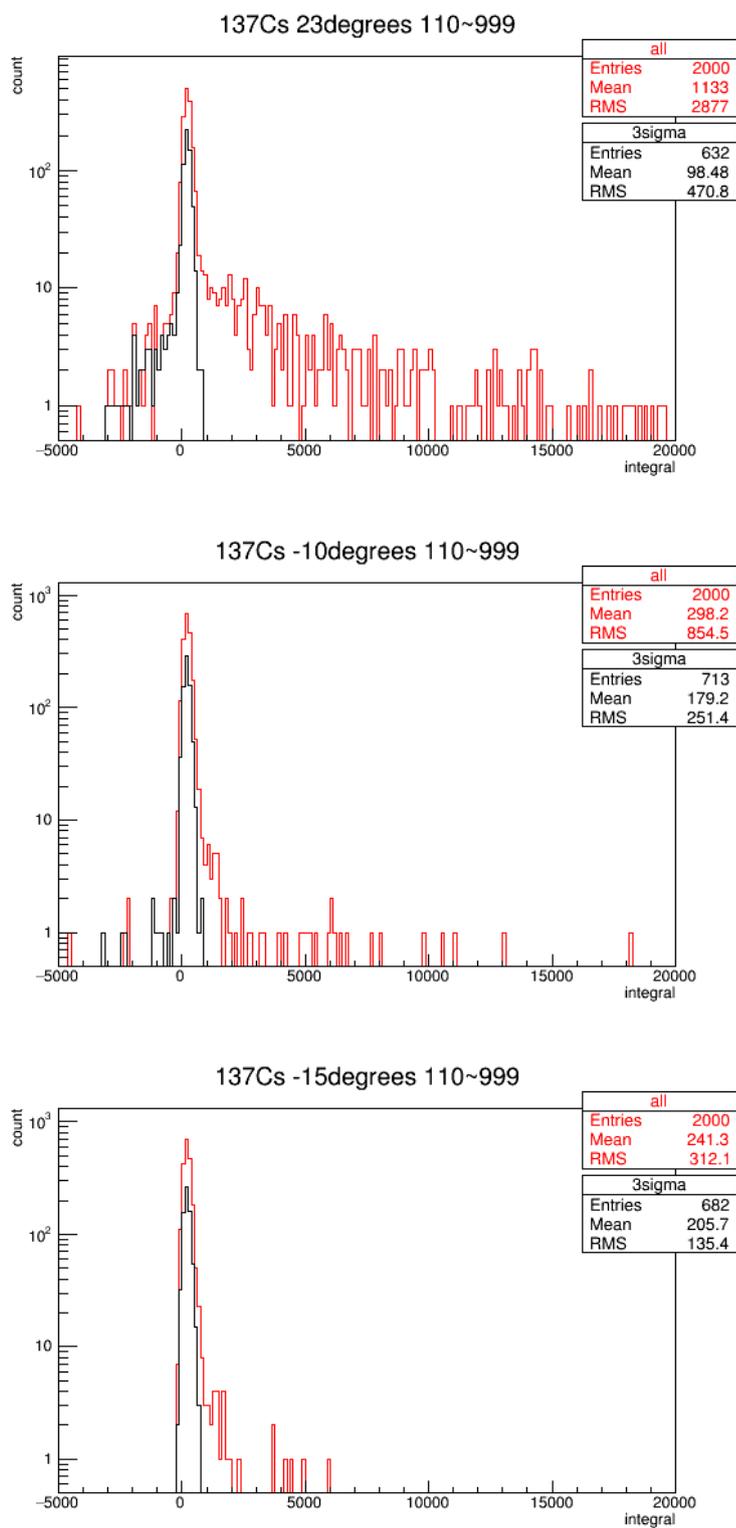


図 4.8 チェレンコフ信号の後の部分へ条件を与えたときの波高分布。上から室温、 -10°C 、 -15°C のときのものである。赤色は全イベント、黒色は信号が 10ns 程度のイベントのみを抜き出したものである。

4.4.2 チェレンコフ信号の前の部分への条件

図 4.8 を見ると、積分値が負の値をとるパルスがある。そのようなパルスの例を図 4.9 に示す。トリガー以前に電圧の時間変動があり、見積もったゼロ点の値が真の無信号時の電圧に対応する値とは異なるものとなった結果、ゼロ点との差を 999 番のデータまで積分すると、積分値が負の値をとってしまうのである。チェレンコフ信号の後ろの部分で第 4.4.1 項の条件を満たしているパルスのゼロ点の値は図 4.10 の値をとる。積分値が正の値をとるパルスのゼロ点はデジタルオシロスコープの縦方向描画位置の設定によって決まり、74 以上の値に集中していることがわかる。したがって、第 4.4.1 項の条件を満たすイベントのうち、ゼロ点が 74 以上のイベントのみを抜き出した波高分布を図 4.11 に示す。いずれの温度の分布に関してもほぼ同じ範囲に分布している。ゆえに、図 4.11 はチェレンコフ信号のみを抜き出している波高分布と考えられる。

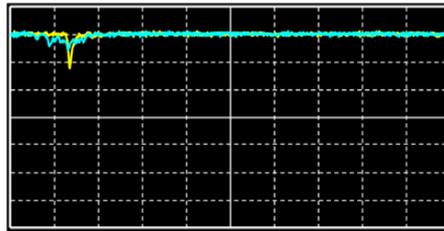


図 4.9 積分値が負の値をとるパルスの例。黄色のパルスは積分値が正の値を、青色のパルスは積分値が負の値をとる。

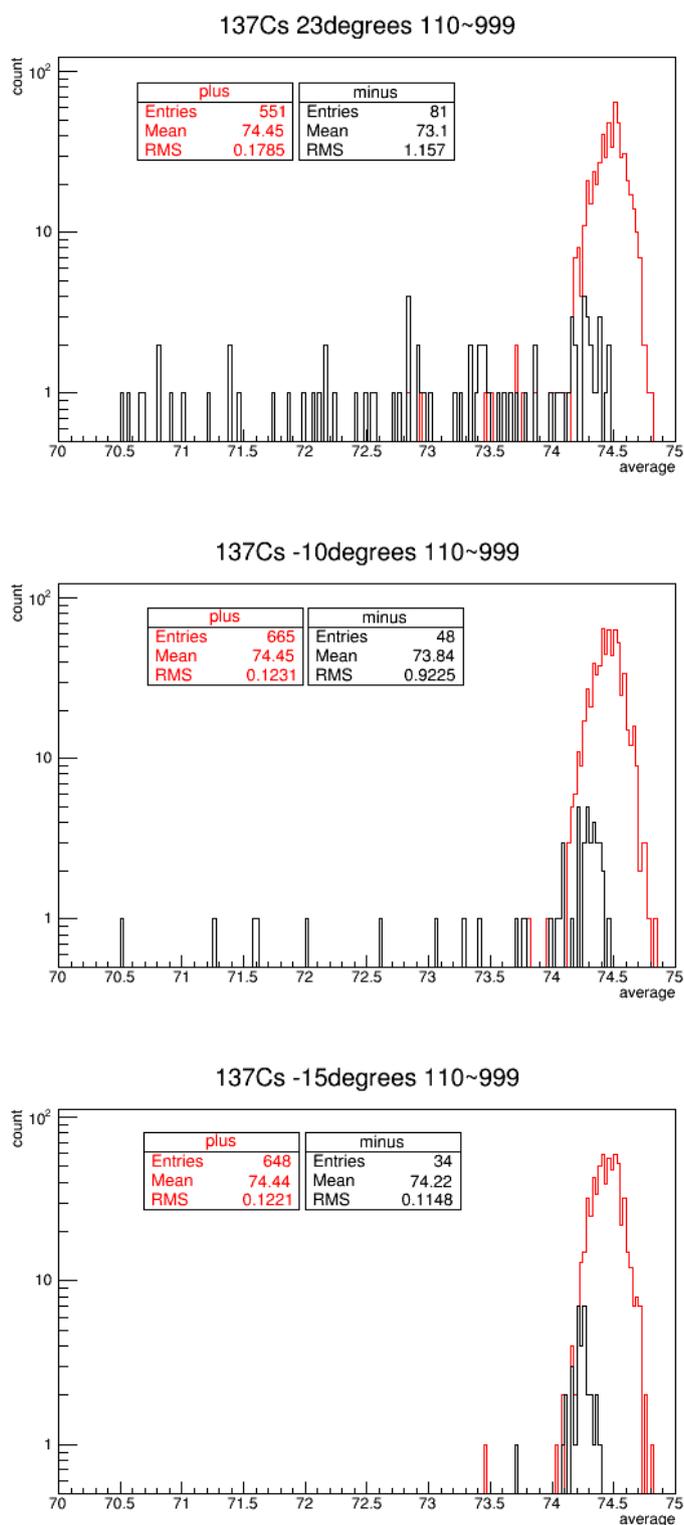


図 4.10 ゼロ点の分布。信号が 10ns 程度のイベントのうち、積分値が正の値になるパルスのゼロ点の分布を赤色で、負の値になるパルスのゼロ点を黒色で示している。

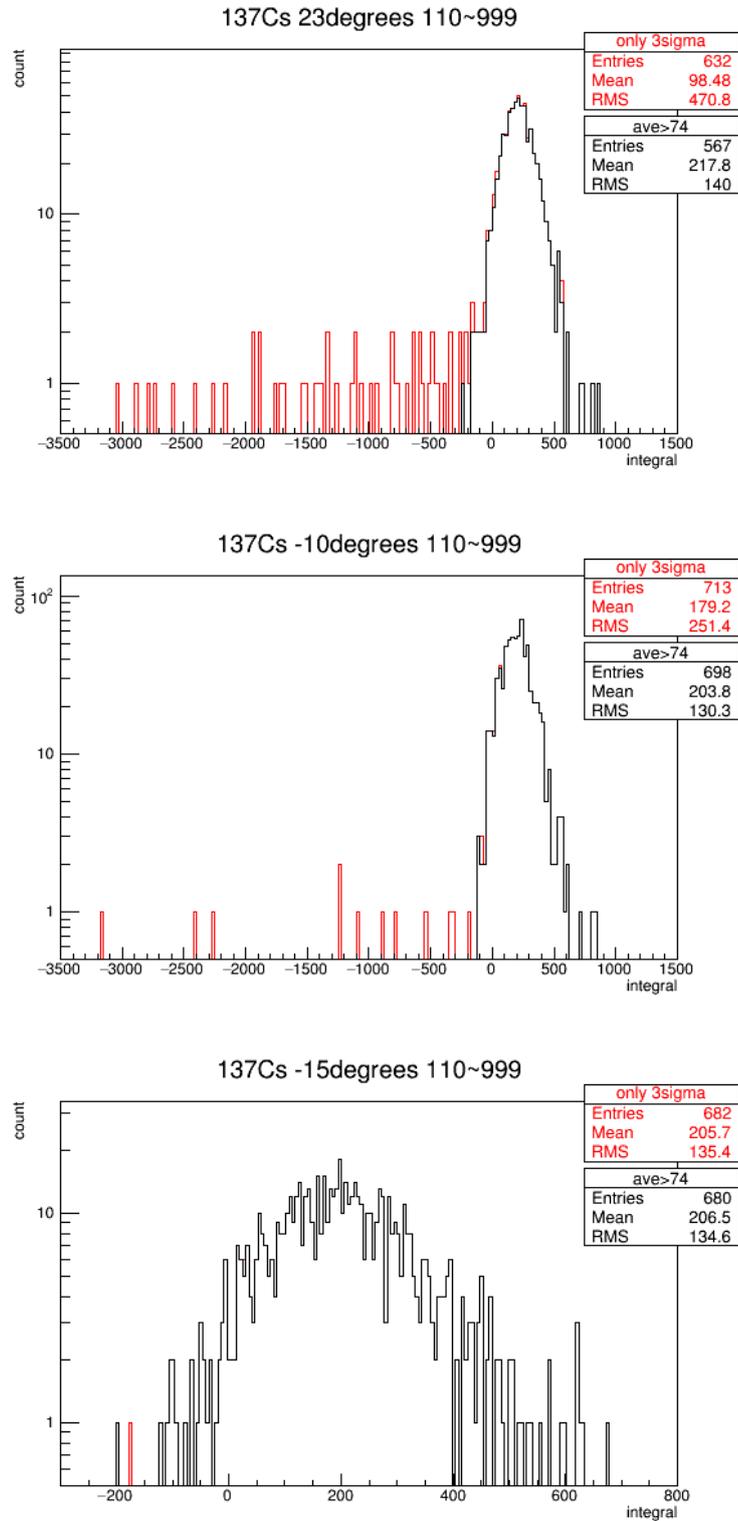


図 4.11 チェレンコフ信号の前の部分へ条件を与えたときの波高分布。上から室温、 -10°C 、 -15°C のときのものである。第 4.4.1 項の条件を満たすパルスの波高分布を赤色で、その内ゼロ点が 74 以上のパルスの波高分布を黒色で示す。

第 5 章

^{22}Na が発する 2 本の γ 線の同時検出

石英ガラスを PMT にとりつけたチェレンコフカウンターを 2 つ製作し、 ^{22}Na が発する 511 keV の 2 本の γ 線の同時検出を行った。また、2 つのパルスの時間差の分布を描き、時間分解能を求めた。

5.1 コインシデンス

2 つの γ 線とともに検出した場合にデータをとるために、2 つの PMT からの信号に対してコインシデンスをとる。コインシデンスの概要を図 5.1 に示す。

- discriminator : PMT からの信号が、設定したしきい値を超えると、規格パルス（方形波）を出す。
- coincidence : 入力に 2 つの方形波が同時に来たときに方形波を出す。
- digital oscilloscope : coincidence から出た方形波でトリガーして、波形データを数値化する。

5.2 セットアップ

図 5.2 に装置の概要を、図 5.3 に本実験で使用したハードウェアを示す。また、2 つのパルスを同時検出したときのスナップショットを図 5.4 に示す。この実験ではコインシデンスをとるので、室温での実験でも十分ノイズの影響は小さい。

- coincidence : 株式会社海津製作所製 241 型 QUAD DISCRIMNATOR
- discriminator : 株式会社海津製作所製 471 型 TRIPLE 4-FOLD 1-VETO COINCIDENCE

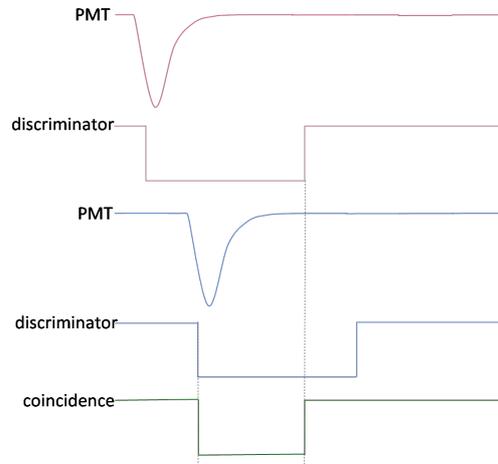


図 5.1 コインシデンスの概要

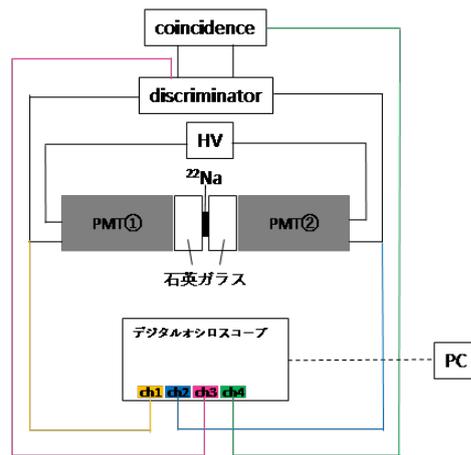


図 5.2 ^{22}Na 線源を用いる実験装置の概要



図 5.3 NIM モジュール。左から、高圧電源、discriminator、clock generator、coincidence である。

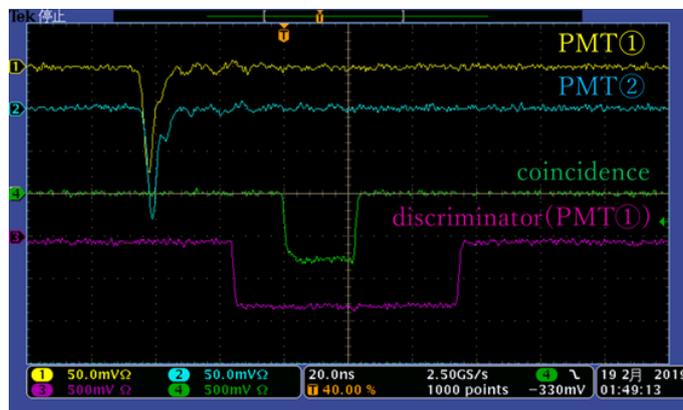


図 5.4 2 つのパルスを同時検出できたときの波形スナップショット

5.3 パルスのタイミング

2つのパルスの時間差を求めるにあたり、パルスのタイミングの算出に異なる5種類の方法を用いた。

5.3.1 threshold

スレッショルドをゼロ点からデジタルオシロスコープの数值化データで4~5カウント離れた値(ch1:70、ch2:45)とし、それに達した時刻。

1. 初めてスレッショルドを下回った点を i 番目の点とする。
2. i 番目と $i-1$ 番目の点を、直線で補間する。
3. 補間した直線とゼロ点の交点となる時刻を threshold というタイミングとする。

$$\text{time} = \frac{Y - x_i}{x_i - x_{i-1}} + i \quad (5.1)$$

ここで、 Y はスレッショルド、 x_i は i 番目のデータである。

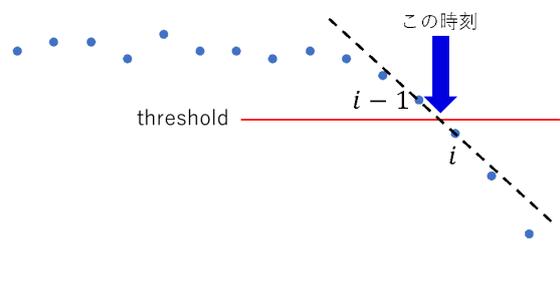


図 5.5 threshold

5.3.2 peak

パルスのピークに達した時刻。

5.3.3 3sigma

電位がゼロ点から 3σ 変わった時刻。

1. 0~249 番目のデータから、ゼロ点 y_0 と標準偏差 σ を求める。
2. 250 番目以降のデータから、 $y_0 - 3\sigma$ となる時刻を前後の2点を補間して求め、3sigma というタイミングとする。

5.3.4 10%-90% slope

パルスピークの 10%、90% の電位となる 2 点を直線で結び、その直線とゼロ点が変わる時刻。

$$\text{time} = \frac{(y_0 - y_1)(x_2 - x_1)}{y_2 - y_1} + x_1 \quad (5.2)$$

ここで、 y_0 はゼロ点、 y_1 、 y_2 はそれぞれ 10%、90% の電位、 x_1 、 x_2 はその電位になる時刻である。

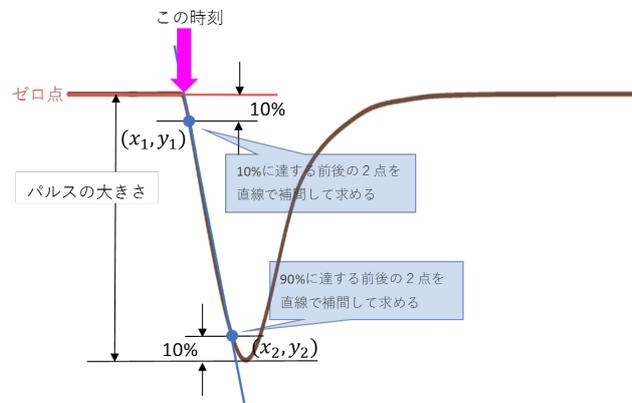


図 5.6 10%-90% slope

5.3.5 max/2

パルスピークの 50% の電位となる時刻。

5.4 時間差の分布

上記 5 つの方法を用いて得た時間差の分布を図 5.7 に示す。ここで、波高が 300mV 以上と大きすぎるパルスは、チェレンコフ信号と考えにくいため除外した。第 3.2 節より、0.4ns ごとにデータを収集しているの、ch1 と ch2 のタイミングの差に 0.4ns を乗じたものが時間差となる。今回、RMS の値を本実験のセットアップの時間分解能とみなす。どの方法も 0.6~0.7ns 程度の RMS を示している。

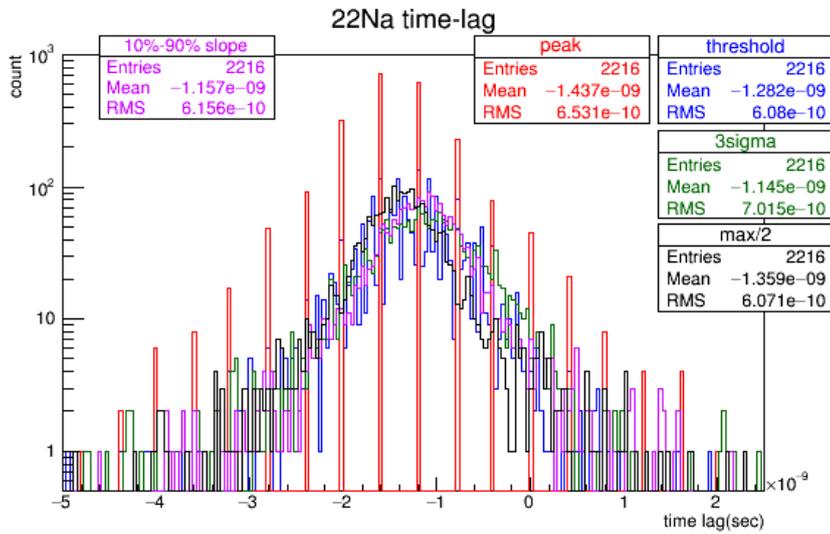


図 5.7 時間差の分布。青色が threshold、赤色が peak、緑色が 3sigma、紫色が 10%-90% slope、黒色が max/2 のタイミングで時間差を求めたときの分布である。

5.5 考察

本実験で使用した PMT [2] の T.T.S. ^{*1}(at 25 °C) は 1.1ns である。加えて、図 4.11 の -15 °C の黒色のヒストグラムの Mean と RMS より、光電子数は $(206.5/134.6)^2 \cong 2.6$ と求められる ^{*3}。よって、1 回のチェレンコフ信号を生み出す光電子数全体の T.T.S. は小さく見積もって $1.1 \times (1/\sqrt{3}) \cong 0.64\text{ns}$ である。以上から、波形データ処理によって得た 0.6~0.7ns という時間分解能は、PMT の性能が制限していると考えて矛盾しない。

^{*1} transit time spread。入射光子 1 個あたりの、electron transit time ^{*2} のばらつき。

^{*2} 光子が PMT に入射してから、増倍した電子が陽極に到達するまでの時間。

^{*3} ¹³⁷Cs 線源からは 0.662keV の γ 線が、²²Na 線源からは 0.511keV の γ 線が放出されるので、図 4.11 から光電子数を求めることは有効である。

第 6 章

まとめ

本研究では、石英ガラスと PMT で構成されるチェレンコフカウンターを製作し、 β 線または γ 線の入射によるチェレンコフ光の観測、および波形データ処理を行うことができた。また、PMT の冷却や波形データの処理により、ノイズを削減または排除できた。さらに、 ^{22}Na 線源が発する 2 本の γ 線の同時検出から、本研究で使用したチェレンコフカウンターの時間分解能が $0.6\sim 0.7\text{ns}$ と求められた。

謝辞

本研究を行なうに当たり、お世話になりました方々に紙面を借りてお礼申し上げます。

はじめに、このような素晴らしい実験に携わる機会を与えて下さった、高エネルギー物理学研究室の林井先生、宮林先生、下村先生、蜂谷先生に感謝致します。直接ご指導いただきました宮林先生は、解析手法だけでなく、物理や解析の楽しさも教えて頂きました。また、研究における疑問や質問についても丁寧に教えて下さいました。本当にありがとうございました。

そして日々の疑問や質問にいつも丁寧に答えていただき、励まして下さった先輩方、共に研究を進めた同回生にも大変お世話になりました。ありがとうございました。

最後に、何もわからなかった私がこのような研究に携わり、高エネルギー物理学の面白さを肌で感じつつ充実した日々をおくることができたのは、私を支えて下さった皆様のおかげです。私の研究生生活を支えてくださったすべての方々に感謝致します。

付録 A

データ収集用プログラム

```

#include <unistd.h>
#include <stdio.h>
#include "vxii1_user.h"

int main(int argc , char *argv[]){

    FILE *fp;
    fp=fopen("20190305ch1_01.txt", "w");
    int nevt = 2000; //event number
    CLINK *clink;
    clink = new CLINK;
    static char* serverIP = "10.0.1.108";

    //-- open scope
    if (vxii1_open_device(serverIP , clink) != 0){
        printf ("Couldn 't open scope.\n");
        exit(1);
    }

    //-- buffer to receive data block.
    static char wf[10000];

    int ret;
    ret = vxii1_send(clink, "HOR:SCA 20E-09"); //Horizontal 20.0 ns/div
    ret = vxii1_send(clink, "CH1:SCA 10E-03"); //ch=1 vertical 10.0mV/div

    ret = vxii1_send(clink, "TRIG:A:EDGE:SOU CH1"); //triger type = edge.ch=1
    ret = vxii1_send(clink, "TRIG:A:EDGE:SLO FALL"); //slope control=fall
    ret = vxii1_send(clink, "TRIG:A:LEV:CH1 -7.2E-03"); //triger level = -7.2mV
    ret = vxii1_send(clink, "TRIG:A:MODE NORM"); //trigered data get

    ret = vxii1_send(clink, "CH1:POS 3.0"); //vertical position
    ret = vxii1_send(clink, "HOR:DEL:MOD OFF"); //delay mode off
    ret = vxii1_send(clink, "HOR:POS 13"); //trig pos 13% from left
    ret = vxii1_send(clink, "HOR:RECO 1000"); //record length
    ret = vxii1_send(clink, "ACQ:MOD SAM"); //acquisition mode = 8bit

    double xinc = vxii1_obtain_double_value(clink, "WFMO:XIN?");
    printf("%10.3e\n",xinc);
    fprintf(fp,"%10.3e\n",xinc);

    ret = vxii1_send(clink, "DAT:ENC FAS"); // fastest encoding
    ret = vxii1_send(clink, "WFMO:BYT_N 1"); //reng = -128~127
    ret = vxii1_send(clink, "DAT:STAR 1");
    ret = vxii1_send(clink, "DAT:STOP 1000");

    for (int iev=0; iev<nevt; iev++){
        ret = vxii1_send(clink, "DAT:SOU CH1");//Digitize signal.
        ret = vxii1_send(clink, "CURV?");//get data
        long bytes_returned1 = vxii1_receive_data_block(clink, wf, 10000, 1000);

        printf("%5d %5d ", iev, bytes_returned1);
        fprintf(fp, "%5d %5d ", iev, bytes_returned1);
    }
}

```

```
for (int i=0; i <1000; i++){
    fprintf(fp, "%d ", (char)wf[i]);
}
printf("\n");
fprintf(fp, "\n");
}

printf("ending... \n");
vxi11_close_device(serverIP, clink);
}
```

付録 B

データ解析プログラム

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>

int main()
{
    int i;
    float xdiv; //horizontal sampling interval
    int iev, nsample; //event number, number of vertical points
    int siny[10000];
    FILE *fp;
    FILE *fpout;

    fp = fopen("20190305ch1_01.txt", "r"); //file open for read
    if(fp == NULL){
        printf("can't open file\n");
        return 0;
    }
    fpout = fopen("20190305ch1_01charge.txt", "w"); //file open for write

    /* Top line is horizontal sampling interval. */
    fscanf(fp, "%f\n", &xdiv);

    /* Read event number or time unless EOF. */
    while(fscanf(fp, "%d", &iev)!=EOF){

        /* Check number of samplings. */
        fscanf(fp, "%d", &nsample);

        /* Read sample and hold data. */
        const int nstot = 1000; //taking 1000 points is normal
        for(i=0; i<nstot; i++){
            fscanf(fp, "%d", &(siny[i])); //get data
        }

        if(nsample == nstot){
            /* Do needed instructions for the read data. */
            double sum = 0.0;
            double sum2 = 0.0;
            double sum3 = 0.0;
            double dev = 0.0;
            double ave = 0.0;
            double delta = 0.0;
            double max = 0.0;
            const int nped = 100;

            /*sum*/
            for(i=0; i<nped; i++){
                sum = sum + (double)siny[i];
            }
            /*average*/
            ave = sum /((double)nped);

            /*deviation*/
```

```
for(i=0; i<nped; i++){
    sum2 = sum2 + (ave - (double)siny[i])*(ave - (double)siny[i]);
}
dev = sum2 /((double)nped);

/*delta*/
for(i=110; i<159; i++){
    delta = ave -(double)siny[i];

    /*pulse hight*/
    if(max < delta){
        max = delta;
    }
    /*integral*/
    sum3 = sum3 +delta;
}

/*select data*/
printf("%d %f %f %f %f\n", iev, ave, dev, max, sum3);
fprintf(fpout, "%f\n", sum3);
}

fclose(fp);
fclose(fpout);
printf("ending... \n");
}
```

参考文献

- [1] 浜松ホトニクス 『光電子増倍管ハンドブック』（光電子増倍管 その基礎と応用 第4版）
<https://s386319996.t.en25.com/e/er?s=386319996&lid=436&elqTrackId=94de737d16304062b9c1c3f0e13bc5ca&elq=00000000000000000000000000000000&elqaid=188&elqat=2>
- [2] 浜松ホトニクス 光電子増倍管 R329-02 型
https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/R329-02_TPMH1254E.pdf
- [3] 玉木智子、平井珠生 卒業論文 「石英ガラスで発生するチェレンコフ光を用いた荷電粒子の検出」 奈良女子大学（2006 年度）
http://webhepl.cc.nara-wu.ac.jp/thesis/4kaisei/tamaki-hirai2006/tamaki_hirai2006.pdf
- [4] 愛知七恵、岩下友子 卒業論文 「チェレンコフ光による荷電粒子の測定」 奈良女子大学（2007 年度）
http://webhepl.cc.nara-wu.ac.jp/thesis/4kaisei/aichi-iwashita2007/aichi_iwashita2007.pdf
- [5] 浅野七瀬、加納美佳 卒業論文 「シンチレーションカウンターのデジタルオシロスコープを用いた高速波形読み出しによる γ 線検出」 奈良女子大学（2016 年度）
http://webhepl.cc.nara-wu.ac.jp/thesis/4kaisei/2016/2016Kano_Asano.pdf
- [6] 釜野楓、藤井美保 卒業論文 「MPPC 読み出しシンチレーションカウンターの時間分解能測定」 奈良女子大学（2017 年度）
<http://webhepl.cc.nara-wu.ac.jp/thesis/4kaisei/2017/2017-Kamano-Fujii.pdf>