修士論文

# ハイパー核γ 線分光にのための PWOバックグラウンドサプレッサーの開発

東北大学大学院理学研究科

物理学専攻

江島光彦

平成16年

# 概要

ハイパー核の $\gamma$ 線分光では、中間子ビームを標的にあて励起状態のΛ ハイパー核を生成し、そこからの $\gamma$ 遷移を観測することでΛ ハイパー核の精密構造を明らかにしてきた。このような高精度のハイパー核エネルギー準位の測定を可能としてきたのが、2 keV(FWHM) の高分解能を持った大立体角γ 線分光用ゲルマニウム (Ge) 検出器群 (Hyperball) であるこれまでのハイパー核 $\gamma$ 線分光実験では、主に KEK と BNL で行われてきたが、今後は実験の舞台を現在建設中の J-PARC に移し、これまでの約 10 倍のビーム強度下 ( ~ 10 MHz) でハイパー核 $\gamma$ 線分光を行う計画である。バックグラウンドサプレッサーとして用いられてきた BGO 検出器は、崩壊定数が 300 ns と非常に長いため高計数率に弱い。そこで BGO に代わる、高計数率に強いバックグラウンドサプレッサーが求められている。本研究では、BGO 検出器に代わるバックグラウンドサプレッサーとして PWO($PbW0_4$) 検出器の可能性を調べた。

PWO の崩壊定数は 6 ns(BGO の 1/50) ほどで、高計数率に強い。Hyperball のバックグラウンドサプレッサーは、高エネルギー ( ~ 10 MeV) のバックグラウンドだけでなくコンプトン散乱による低エネルギー ( < 1 MeV) の $\gamma$ 線を検出できなくてはならない。しかし、PWO は発光量が NaI(Tl) の 1/100 と非常に少ないため、低エネルギー $\gamma$ 線検出器として実用化された例はない。ところが、サプレッサーとして使用する際は、ヒットがあった時の時間情報だけを必要とするため、「 光量/崩壊定数 」の値が重要な意味を持つ。PWO は結晶の発光量では BGO より少ないが、光量/崩壊定数の値は BGO を上回り、サプレッサーとしては実用化できる可能性がある。そこで本研究では、PWO シンチレーターのサプレッサーとしての性能を、高エネルギーバックグラウンドと 1 MeV 以下のコンプトン事象にわけてテストを行い、PWO サプレッサーの性能を評価した。

KEK-PS K6 ビームラインにおいて、$\pi^+$ ビームを用いた PWO サプレッサーの高エネルギーバックグラウンドに対するテスト (T536) を行った。その結果、PWO 検出器で BGO と同程度の高エネルギーバックグラウンドに対するサプレッション効果を得られることが確認できた。また、Ge 検出器でコンプトン散乱した事象に対してのサプレッションテストを、$^{60}Co$ 線源を用いて行った。この結果 PWO のコンプトンサプレッサーとしての性能は BGO には及ばないことがわかったが、PWO 結晶は冷却すると発光量が増加することが知られており、PWO 結晶を-20 ℃に冷却すると、BGO に近いサプレッション能力を持つことが確認できた。

このように PWO 結晶を冷却して使用することで、バックグラウンドサプレッサーとして十分な光量を得ることができ、BGO に代わる PWO サプレッサー実用化の可能性が高いことを実験により確認できた。

# Contents


概要 i

**1 序論 1**

1.1 ハイパー核γ 線分光実験概説 . . . 1
1.1.1 ハイパー核とその研究 . . . 1
1.1.2 ハイパー核実験の歴史的背景 . . . 1
1.1.3 大立体角γ 線分光装置 Hyperball . . . 3
1.1.4 Hyperball を用いたハイパー核γ 線分光実験 . . . 4
1.2 Hyperball の Upgrade . . . 5
1.2.1 Hyperball2 と Clover 型 Ge 検出器 . . . 5
1.2.2 J-PARC 実験に向けて . . . 8
1.3 本論文の構成 . . . 9

**2 バックグラウンドサプレッサーとしての PWO 11**

2.1 ハイパー核γ 線分光におけるバックグラウンド . . . 11
2.2 BGO に代わるサプレッサーの必要性 . . . 12
2.2.1 BGO バックグラウンドサプレッサー . . . 12
2.2.2 バックグラウンドサプレッションの原理 . . . 13
2.2.3 BGO バックグラウンドサプレッションの効果 . . . 15
2.2.4 BGO の限界 . . . 16
2.2.5 BGO に代わる高速サプレッサーの検討 . . . 16
2.3 PWO サプレッサーの可能性 . . . 17
2.3.1 バックグラウンドサプレッサーとしての可能性 . . . 17
2.3.2 本研究の概要 . . . 18
2.3.3 本研究に用いた PWO カウンター . . . 18

**3 高エネルギーバックグラウンドに対するサプレッション性能 23**

3.1 T536 実験の目的 . . . 23
3.2 セットアップ . . . 24
3.2.1 PWO、BGO サプレッサー . . . 24
3.2.2 測定条件と回路 . . . 25
3.3 解析 . . . 29
3.3.1 バックグラウンドサプレッションの方法 . . . 29

3.3.2 サプレッション能力の評価方法 . . . 32
3.4 解析結果 . . . 32
3.4.1 T536 実験の結果 . . . 32
3.4.2 高エネルギーのバックグラウンドに対するサプレッション能力の評価 . . . 34

**4 コンプトンサプレッションの性能 35**
4.1 コンプトンサプレッションテスト . . . 35
4.1.1 目的 . . . 35
4.1.2 PWO サプレッサー . . . 35
4.1.3 実験のセットアップ . . . 37
4.1.4 実験結果 . . . 39
4.1.5 考察 . . . 43
4.2 冷却による PWO の発光量変化 . . . 48
4.2.1 PWO 結晶の温度特性 . . . 48
4.2.2 PWO 検出器における光電子数の温度依存性 . . . 48
4.2.3 考察 . . . 50
4.3 冷却した PWO によるサプレッションテスト . . . 51
4.3.1 目的 . . . 51
4.3.2 セットアップ . . . 53
4.3.3 結果 . . . 54
4.3.4 BGO および PWO サプレッサーの TDC カットゲート依存性 . . . 57

**5 まとめと今後の課題 61**
5.1 PWO サプレッサーの性能評価 . . . 61
5.2 今後の課題 . . . 61

**APPENDIX 63**
5.2.1 結果 . . . 64

**謝辞 69**

# List of Figures


1.1 大立体角γ 線分光装置 Hyperball . . . . . 3
1.2 Hyperball による ${}^{7}_{\Lambda}$Li の分光 . . . . . 4
1.3 Clover 型 Ge 検出器の結晶と外形 . . . . . 6
1.4 Upgrade された Hyperball2 . . . . . 7
1.5 Clover 型用 BGO カウンター . . . . . 7
1.6 本格的な J-PARC 実験に向けた Hyperball-J . . . . . 8

2.1 Hyperball での Ge 結晶と BGO 結晶の大きさと位置関係 . . . . . 12
2.2 Ge 結晶中でコンプトン散乱して結晶外に逃げた場合 . . . . . 13
2.3 高エネルギーγ 線がカスケード崩壊を起こした場合 . . . . . 14
2.4 高エネルギー荷電粒子が Ge 検出器を突き抜けた場合 . . . . . 14
2.5 ハイパー核実験における BGO サプレッサーによるサプレッション効果 . . . . . 15
2.6 BGO および PWO 検出器の光電子増倍管出力と Discriminator . . . . . 18
2.7 本研究で使用した PWO 結晶の大きさ . . . . . 19
2.8 511 keV γ 線に対する PWO 検出器の発光量測定のセットアップ . . . . . 20
2.9 $^{22}$Na 511keV γ 線に対する、本研究で用いた PWO 検出器の発光量とポアソン分布によるフィッティング . . . . . 21

3.1 T536 で用いた PWO 検出器の断面図 . . . . . 24
3.2 T536 で用いた PWO および BGO 検出器の概略図 . . . . . 25
3.3 T536 のセットアップ (上面図)。ビームおよび標的から等距離に「Ge 検出器 + PWO サプレッサー」と「Ge 検出器 + BGO サプレッサー」を配置し、それぞれのサプレッション能力を測定した . . . . . 26
3.4 SKS スペクトロメータの概略図 . . . . . 27
3.5 T536 実験における回路図 . . . . . 28
3.6 BGO(上) および PWO(下) の TDC スペクトル。TDC スペクトルの色を付けた範囲は、サプレッションを行う際のカットゲートを表す . . . . . 30
3.7 T536 で得られた BGO と PWO の ADC・TDC 相関図 (左が BGO、右が PWO) . . . . . 31
3.8 上：T536 における BGO サプレッション前後の Ge 検出器のエネルギースペクトル 、下：T536 における PWO サプレッション前後の Ge 検出器のエネルギースペクトル . . . . . 33
3.9 T536 における BGO サプレッサーと PWO サプレッサーのサプレッションファクターの比較 34

4.1 実験に使用した PWO サプレッサー (光電子増倍管の数を PWO 結晶 2 個につき 1 個に減らした) . . . . . 36

4.2 PWO サプレッサーの各パーツ . . . 36
4.3 PWO 結晶の配置 . . . 36
4.4 当初コンプトンサプレッションテスト用に設計した PWO サプレッサー (APPENDIX 参照) 36
4.5 コンプトンサプレッションテスト セットアップ . . . 37
4.6 $^{60}$Co 壊変図 . . . 39
4.7 $BaF_2$ の ADC スペクトル . . . 40
4.8 コンプトンサプレッションテスト 回路図 . . . 40
4.9 コンプトンサプレッションテストにおける BGO サプレッション前後の Ge 検出器のエネルギースペクトル . . . 41
4.10 コンプトンサプレッションテストにおける PWO サプレッション前後の Ge 検出器のエネルギースペクトル . . . 41
4.11 BGO および PWO の TDC スペクトル . . . 42
4.12 低エネルギー領域におけるサプレッションファクター 青：BGO、緑：PWO . . . 42
4.13 $BaF_2$ カウンターの ADC スペクトルで $BaF_2$ に 1332 keV のγ 線が入射したイベントを選択する . . . 44
4.14 Ge 検出器に 1173 keV のγ 線が入射したイベントを選んだときの、BGO サプレッション前後の Ge 検出器の ADC スペクトル . . . 45
4.15 Ge 検出器に 1173 keV のγ 線が入射したときに、サプレッションされたイベント数をコンプトン散乱角を横軸として描いたグラフ (黄色く色を付けた領域はサプレッションファクターが最大になっている領域で、散乱角 90 ° 付近であることがわかる。 . . . 45
4.16 BGO サプレッションにおけるジオメトリーの影響 . . . 47
4.17 PWO サプレッションにおけるジオメトリーの影響 . . . 47
4.18 光電子数測定実験のセットップ . . . 49
4.19 PWO 検出器で検出された光電子数の冷却による増加 (511 keV γ 線に対しての測定値)。 . 49
4.20 511 keV γ 線に対する PWO 検出器の平均光電子数の温度依存性。 . . . 50
4.21 各温度に対して光電子数が 0 である確率 (各温度での平均光電子数はサプレッサーとして用いる場合の光電子増倍管の減少を考慮した値 (77 %) である) . . . 52
4.22 冷却した PWO によるコンプトンサプレッションテスト セットアップ . . . 53
4.23 低エネルギー領域におけるサプレッションファクター (青：BGO、赤：冷却した PWO(-20 ℃)、緑：PWO(室温 +20 ℃)) . . . 55
4.24 コンプトンサプレッションテストでの、結晶冷却による PWO 検出器の ADC スペクトルの変化 . . . 55
4.25 BGO によるサプレッション前後の Ge 検出器のエネルギースペクトル . . . 56
4.26 冷却した PWO によるサプレッション前後の Ge 検出器のエネルギースペクトル . . . 56
4.27 BGO サプレッサーの TDC 選択範囲によるサプレッションファクターの変化 (緑:100 ns、水色:150 ns、紫:200 ns) . . . 58
4.28 PWO サプレッサーの TDC 選択範囲によるサプレッションファクターの変化 (緑:50 ns、水色:100 ns、紫:200 ns) . . . 58
4.29 オーバーサプレッションの TDC ゲート幅依存性 . . . 59

5.1 T554 実験のセットアップ . . . 63

5.2 BSOによるπ・p弁別効果;Wide Gate(横軸) vs Narrow Gate(縦軸)。赤;π、青;p(thrugh)、水色;p(stop) . . . . . 64
5.3 PWOによるπ・p弁別効果;Wide Gate(横軸) vs Narrow Gate(縦軸) 赤;π、青;p(thrugh)、水色;p(stop) . . . . . 64
5.4 PWOによるπ・p弁別効果のビーム運動量依存性;Wide Gate(横軸) vs Narrow Gate(縦軸) 赤;π、青;p(thrugh)、水色;p(stop)、紫;d . . . . . 65

# List of Tables


1.1 Upgrade of Hyperball . . . . . 6

2.1 BGO と NaI の性能比較 (1 MeV のγ 線に対する吸収率は各結晶の厚さ 2 cm の時の値) . . . 12
2.2 各シンチレーターの性能比較 (γ 線吸収率は結晶の厚さ 2 cm で 1 MeV のγ 線に対する値) . 17
2.3 本研究に用いた PWO 結晶及び製作した PWO 検出器の仕様 . . . . . 19

3.1 T536 実験におけるビーム条件 . . . . . 26

4.1 1173 keV γ 線のコンプトン散乱角による PWO 検出器の応答。コンプトンγ 線のエネルギーを $E_c$、反跳電子の運動エネルギーを $T_e$、$E_c$ keV のγ 線に対する PWO の平均光電子数を $N_{ave}$、さらにその平均光電子数がポアソン分布に従うことから計算される光電子数が 0 になる確率を f(0)、$E_c$ keV γ 線に対する 2 cm の PWO でのγ 線吸収率を $\mu(E_c)$、$\mu(E_c)\cdot(1-f(0))$ の値を $\mathrm{P}(E_c)$ とする。 . . . . . 46
4.2 サプレッサーとして用いる際の 511 keV γ 線に対する平均光電子数の温度依存性 . . . . . 51
4.3 356 keV γ 線 (1173 MeV γ 線の散乱角 90 ° でのコンプトンγ 線) に対する PWO サプレッサー応答の温度依存性 . . . . . 52

# Chapter 1

# 序論

## 1.1 ハイパー核γ 線分光実験概説

### 1.1.1 ハイパー核とその研究

$\Lambda$ 粒子は質量 $1115.68$ MeV、スピン・パリティー $\frac{1}{2}^+$、アイソスピン $0$、クォークモデルの描像では $u,d,s$ からなる、ストレンジネス量子数 $-1$ のバリオンである。ハイパー核とは $\Lambda$ や $\Sigma$ のようなストレンジネス量子数をもつ粒子 (Y、ハイペロン) が原子核内に束縛されてできる原子核である。特に原子核内に入った粒子が $\Lambda$ の場合、$\Lambda$ ハイパー核という。

ストレンジネス量子数を持つハイペロンは、パウリ原理の効果を受けずに原子核の奥深くに束縛され得るので、ハイパー核のエネルギー準位や崩壊の様子を研究することで、原子核最深部の構造を調べる事ができる。また、ハイペロンと核子の相互作用の研究から、$\Lambda$ · 核子間核力の情報を得ることができ、一般的な核力についての理解に大きな手がかりを与えるものと期待される。

### 1.1.2 ハイパー核実験の歴史的背景

$\Lambda$ 粒子は、ハイペロンの中でもっとも軽いため生成されやすく、また弱い相互作用でしか崩壊しないので自由空間での寿命も $2.63\times10^{-10}$ s と比較的長い。そのため、$\Lambda$ ハイパー核に関する研究が数々行われてきた。

$\Lambda$ ハイパー核は、$1952$ 年に宇宙線による核反応生成物として原子核乾板の中で初めて発見された [9]。その後加速器を用いて人工的にハイパー核を生成して、原子核乾板や泡箱を用いて測定する実験により、A<15 の軽い $\Lambda$ ハイパー核の存在が確認され、基底状態の束縛エネルギーが測定された。これらの実験では、$\Lambda$ ハイパー核が $\pi^-$ 中間子弱崩壊したイベントを探し、$\pi^-$ 中間子のエネルギーを調べることで、ハイパー核の情報を引き出していたが、この実験的手法では $\Lambda$ ハイパー核の励起状態についての情報を得ることはほとんどできなかった。

$1970$ 年代になると、カウンター実験が始まり, 励起状態について調べられるだけでなく、統計精度を高めることができるようになった。カウンター実験は CERN や BNL で、$(K^-_{in-flight},\pi^-)$ 反応によって始められ、$1980$ 年代になると $(K^-_{stopped},\pi^-)$、$(\pi^+,K^+)$

反応によるハイパー核研究が行なわれるようになった。

$(K^-_{stopped}, \pi^-)$ による実験がまず CERN によって 1970 年代初頭に行なわれたが、その後、高エネルギー物理学研究所 ( 現在 高エネルギー加速器研究機構:KEK ) の陽子加速器 (KEK-PS) に舞台が移っていった。CERN 及び BNL では、in-flight の $(K^-, \pi^-)$ 反応を用いた実験によって、主に p-shell ハイパー核について調べられ、$\Lambda$· 核子間相互作用のうちスピン軌道結合力 (LS 力) が極めて小さいことが実験で示された [?]。これらのデータをもとに、$\Lambda$ と残りの核 (コア核) の間の結合が弱いとしてハイパー核構造を記述する、weak-coupling model[12] が誕生した。

1980 年代には、$(\pi^+, K^+)$ 反応を用いた $\Lambda$ ハイパー核分光法が BNL で開発され、その後 KEK-PS の超伝導 $K$ 中間子スペクトロメータ (SKS)[10] において盛んに行われてきた。SKS という、エネルギー分解能約 2 MeV(FWHM) のスペクトロメータでハイパー核実験を行う事により、$\Lambda$ 粒子は原子核内で一体ポテンシャル中を独立粒子運動しているという描像が確立した。

$(K^-, \pi^-)$ および $(\pi^+, K^+)$ 反応で生成するハイパー核の励起状態は、そのほとんどが spin-nonflip の励起状態である。最近では、spin-flip の励起状態生成が支配的になる反応である、$(e, e'K^+)$ 反応が今後の新しいハイパー核分光実験の手法として注目されている。米国 Thomas Jefferson National Accerator Facility(JLAB) の超伝導連続電子線加速器 (CEBAF) を使用した $(e, e'K^+)$ 反応実験は、精度の良い一次ビームを用いるため、二次ビームラインで中間子ビームを用いて行う $(K^-, \pi^-)$ および $(\pi^+, K^+)$ 反応に比べてより高い分解能が期待できる。

こうした高分解能でのハイパー核実験により、$\Lambda$· 核子間相互作用のスピンに依存する部分をはじめ、YN、YY 相互作用のさまざまな新しい情報が得られるようになった。ここで特に大きな役割を果たしてきたのが、最近開発された Hyperball(Ge 検出器群) によるΛ ハイパー核の精密γ 線分光法である。今後は、現在東海村に建設中の大強度陽子加速器において、Hyperball をはじめ様々なアプローチにより、より多くのハイパー核についての研究が計画されている。

### 1.1.3 大立体角γ 線分光装置 Hyperball

Hyperball はハイパー核のγ 線分光専用の大立体角ゲルマニウム (Ge) 検出器群である (Figure 1.1) 。14 組の大型 Ge 検出器が標的の周囲を囲み、約 15 %の立体角を覆っている。1 MeV での検出効率は約 2.5 %である。各 Ge 検出器は BGO($Bi_4Ge_3O_{12}$) シンチレーションカウンターで囲まれており、Ge との反同時計数をとることでコンプトン散乱事象やπ $^0$ からの高エネルギーγ 線のバックグラウンドを抑えることができる。Ge 検出器には特殊な高速回路系が接続されており、数 100 kHz の計数率と 1 TeV/sec のエネルギー付与率の元でも動作することが出来る。ハイパー核の実験に特有の極めて高いバックグラウンド環境でゲルマニウム検出器を使えるようにすることで、ハイパー核のエネルギー準位の測定精度を、磁気スペクトロメータのみを用いた $(K^-, \pi^-)$、$(\pi^+, K^+)$ などの従来の分光法の分解能 2 MeV (FWHM) から、ゲルマニウム検出器の分解能 2 keV (FWHM) へと 3 桁も向上させることができた。

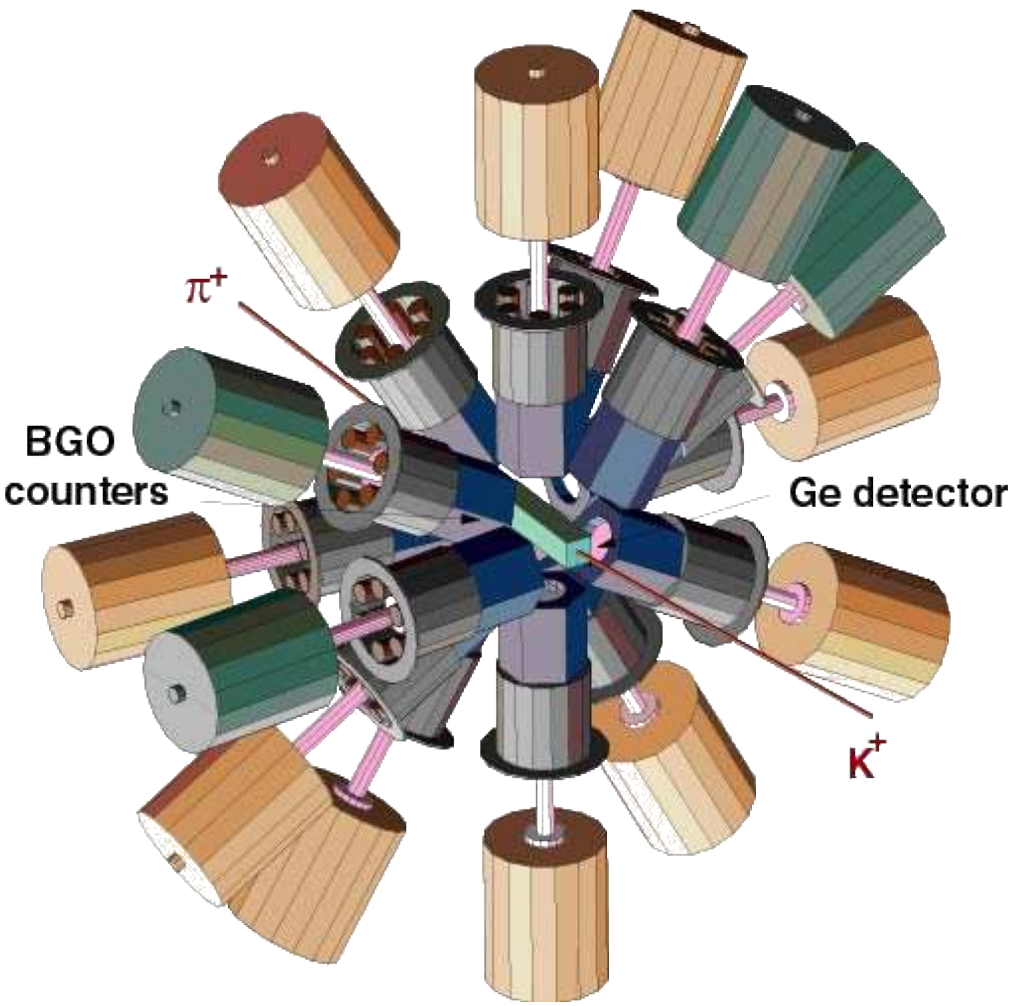


Figure 1.1: 大立体角γ 線分光装置 Hyperball

### 1.1.4 Hyperball を用いたハイパー核γ 線分光実験

Hyperball は 1998 年に完成し、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の陽子シンクロトロン (PS) において最初のハイパー核γ 線分光実験 (E419) に用いられた。E419 実験では、${}^{7}_{\Lambda}$Li の励起状態からの 4 つのγ 遷移を観測し、Figure 1.2 のように ${}^{7}_{\Lambda}$Li のエネルギー準位を決めることができた。そして数 692 keV の M1 遷移 ($3/2^{+} \longrightarrow 1/2^{+}$) を測定し、$\Lambda$· 核子間のスピン− スピン結合力の大きさについての情報を得て、さらにドップラーシフト減衰法 [11] を用いた解析によって、${}^{7}_{\Lambda}$Li の B(E2) 遷移確率が ${}^{6}$Li の B(E2) 遷移確率の約 1/3 になっていることが実証され、原子核に $\Lambda$ 粒子が入ることで原子核が縮む現象 (Shrinkage) が起こっていることがわかった。

hyperball はその後米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) に移動し、1998,2001 年に E930 実験に用いられ、2002 年には KEK で E518 実験に使われ、${}^{9}_{\Lambda}$Be、${}^{15}_{\Lambda}$N、${}^{16}_{\Lambda}$O、${}^{10}_{\Lambda}$B、${}^{11}_{\Lambda}$B からのγ 線を観測してきた。こうして得られたΛ ハイパー核の精密構造から、$\Lambda$· 核子間の LS 力、スピン-スピン力、テンソル力などのスピン依存力が定量的に明らかになってきた。例えば、$\Lambda$· 核子間の LS 力の大きさは極めて小さいことが判明した。こうして、Λ ハイパー核の構造が少しずつ明らかになっているが、今後もより多くのハイパー核に対して詳細な分光実験を行うことが重要である。

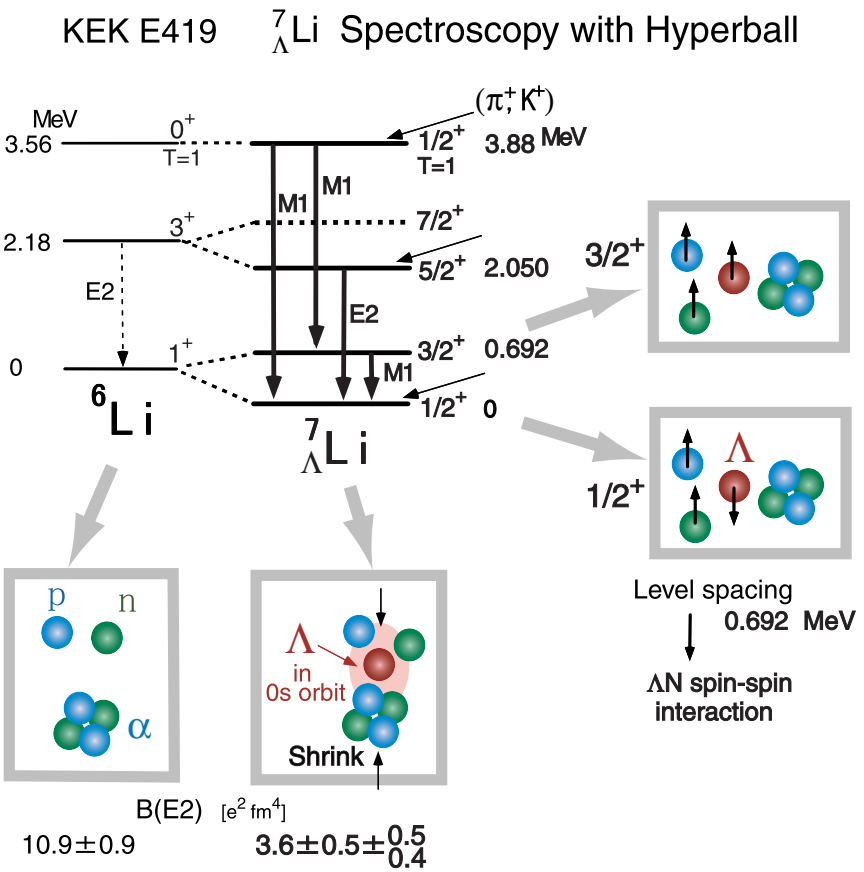


Figure 1.2: Hyperball による ${}^{7}_{\Lambda}$Li の分光

## 1.2 Hyperball の Upgrade

### 1.2.1 Hyperball2 と Clover 型 Ge 検出器

われわれは 2005 年現在、今までの Hyperball に、新たに Clover 型 Ge 検出器 6 台を加えた計 20 台の Ge 検出器からなる Hyperball2 (Figure 1.4) を建設中である。液体窒素のデュワーを緑色で表した 14 台が従来型の Ge 検出器、紫色で示した 6 台が新たに導入した Clover 型 Ge 検出器である。

Hyperball2 建設の目的は、より大きな立体角を実現し、より大きなγ 線 yield を得ることである。Ge 検出器群として、より大きな立体角を実現するには、 より大きなサイズの Ge 結晶を用いれば良いと思えるが、大型の Ge 結晶を作るのは技術的に難しく、コストも上がってしまう。

そこで、Figure 1.3 のように、1 台の検出器ごとに 4 個の Ge 結晶が配置され、各結晶にプリアンプ、読み出し回路が取り付けられた Clover 型 Ge 検出器を 6 台加えることとした。Clover 型 Ge 検出器の各結晶のサイズは従来型の Ge 検出器の結晶 (70 mm $\phi$ ×70 mm) よりも小さくなっている。

相対検出効率 $E_{rel}$ を、$^{60}$Co の 1.33 MeV$\gamma$ 線を、25cm 離して置いた 3 インチ $\phi$× 3 インチの円筒形 NaI(Tl) で検出した時の absolute efficiency($E_{NaI}$=1.2 × $10^{-3}$) と、それと同じ条件で測った Ge 検出器の absolute efficiency $E_{Ge}$ の比

$$E_{rel} = \frac{E_{Ge}}{E_{NaI}} \tag{1.1}$$

として定義すると、従来型の Ge 検出器一台当たりの相対検出効率は約 60 %である。一方、Clover 型 Ge 検出器では、各 Ge 結晶あたりの検出効率は約 20 %であるが、γ 線がどれか 1 個の Ge 結晶でコンプトン散乱し、他の 3 個の Ge 結晶のいずれかで吸収されたイベントはオフライン解析でエネルギーの足しあわせ (add-back) を行うことで、検出器としての相対検出効率は 1 MeV において約 125 %に達する。

このように、Clover 型 Ge 検出器を導入することで分解能を悪化を招くことなく、Ge 検出器群全体としての検出効率を 2 倍にし、2 倍のγ yield と 4 倍のγ γ coinsidence yield を実現できる (Table 1.1)。

また、Clover 型 Ge 検出器用に開発した BGO カウンターの概観を Figure 1.5 に示す。従来型の各 Ge 検出器は、6 個の BGO 結晶で Figure 2.1 のように Ge 結晶の周りを取り囲んでいたが、Clover 型 Ge 検出器ではひとまわりサイズが大きくなってるので、12 個の BGO 結晶で取り囲んでいる。さらに、BGO 結晶の先端をカットし全体として検出器の先が細くなるように設計されており、Hyperball2 として組み上げる際の各検出器同士の干渉を防ぎ、より密に標的の周りを取り囲むことができる。

Table 1.1: Upgrade of Hyperball

| | Efficiency at 1 MeV | γ yield | γ γ coinsidence yield |
|---|---|---|---|
| Hyperball | 2.5 % | 1 | 1 |
| Hyperball2 | 5 % | 2 | 4 |

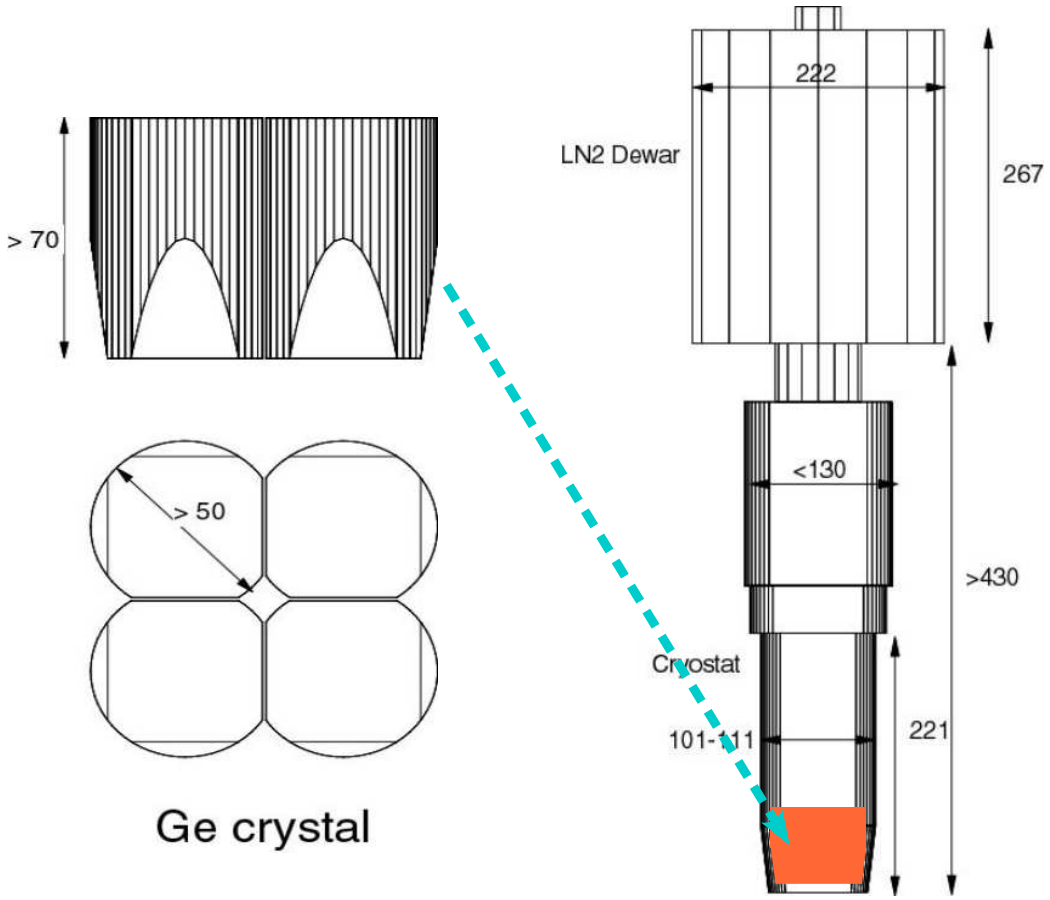


Figure 1.3: Clover 型 Ge 検出器の結晶と外形

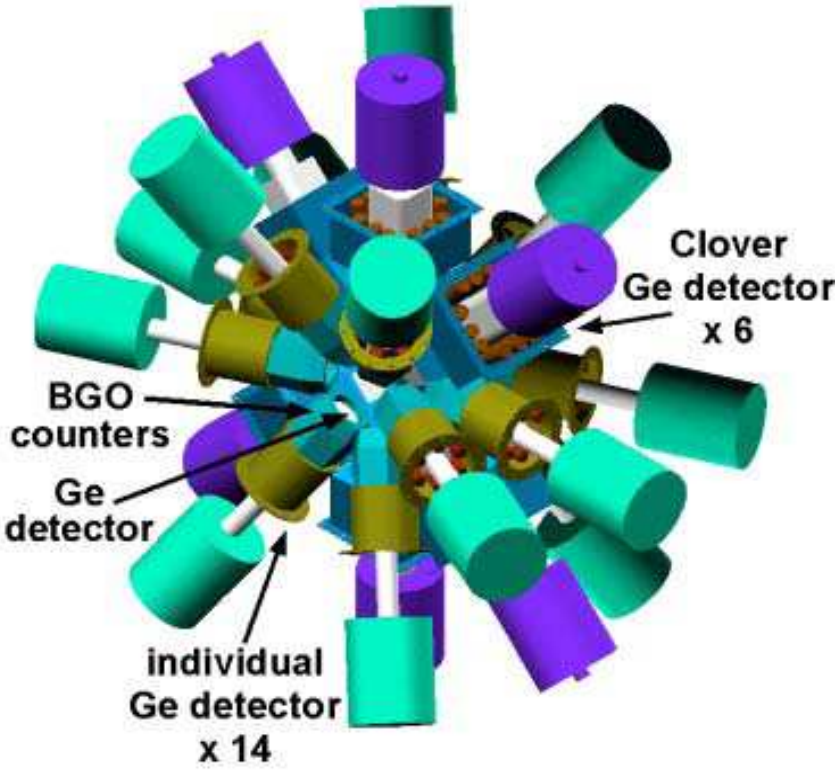


Figure 1.4: Upgrade された Hyperball2

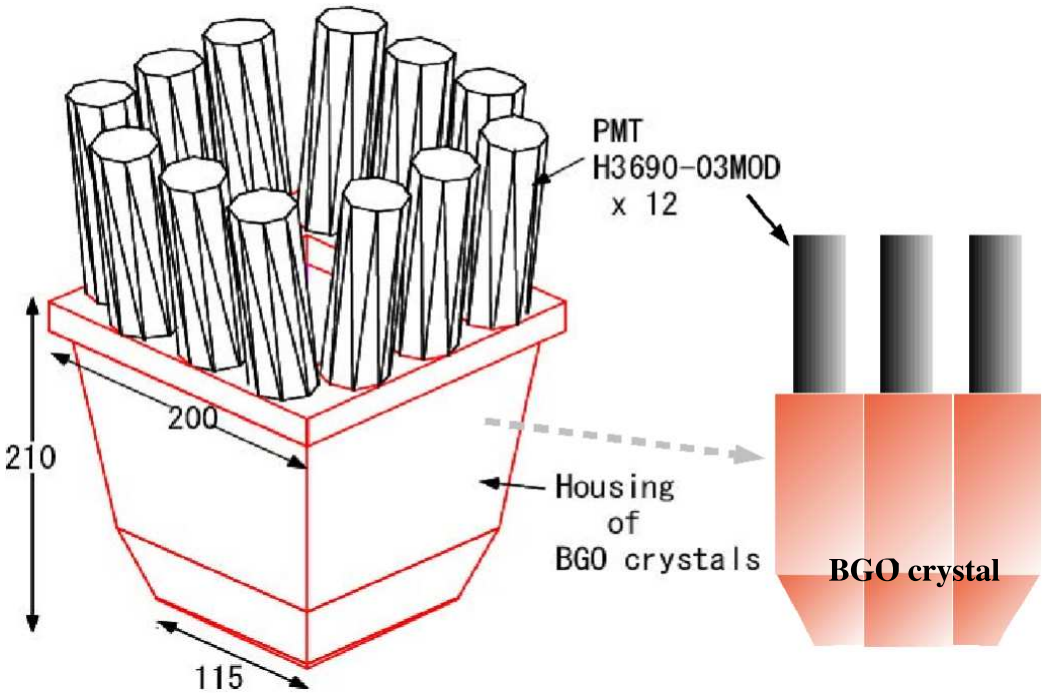


Figure 1.5: Clover 型用 BGO カウンター

### 1.2.2 J-PARC 実験に向けて

現在東海村に建設中の J-PARC では、将来的にこれまでの BNL-AGS の 10 ~ 数 10 倍にあたる 10 MHz の $K^-$ ビームでハイパー核の実験が可能になり、これまでより短時間で多くの統計を得ることができ、数多くのハイパー核についての情報から新しい物理が展開されていくと考えられている。しかし、ビーム強度が向上しても 10 MHz の高計数率環境下で Hyperball2 を動かすことはできない。そこでわれわれは、Hyperball2 をさらに改良し、高計数率に強くかつ Hyperball2 を上回る検出効率をもつ Hyperball-J (Figure 1.6) の建設を予定している。

Hyperball2 で用いている Clover 型 Ge 検出器は、Ge 検出器 1 台あたりの Ge 結晶が大きいので従来型の Ge 検出器よりも大きな立体角を覆うことができ、また各検出器の Ge 結晶は 4 つの小さい結晶に分かれているため高計数率耐性も強化されている。

したがって、Figure 1.6 のように 14 台の Clover 型 Ge 検出器を組み上げ、さらに Ge 検出器の信号を高精度 Waveform digitizer 読み出しにし、pile up した信号をオフライン解析で分解して、dead time を減らすなどの改良を重ねていき、検出効率 ~ 10 % で 10 MHz のビームのもとでも動作する検出器群を建設したいと考えている。

しかし、10 MHz の高計数率環境下では BGO カウンターが pile up してしまい使えない。そこで、BGO にかわる高計数率に強いバックグラウンドサプレッサーの開発が求められている。

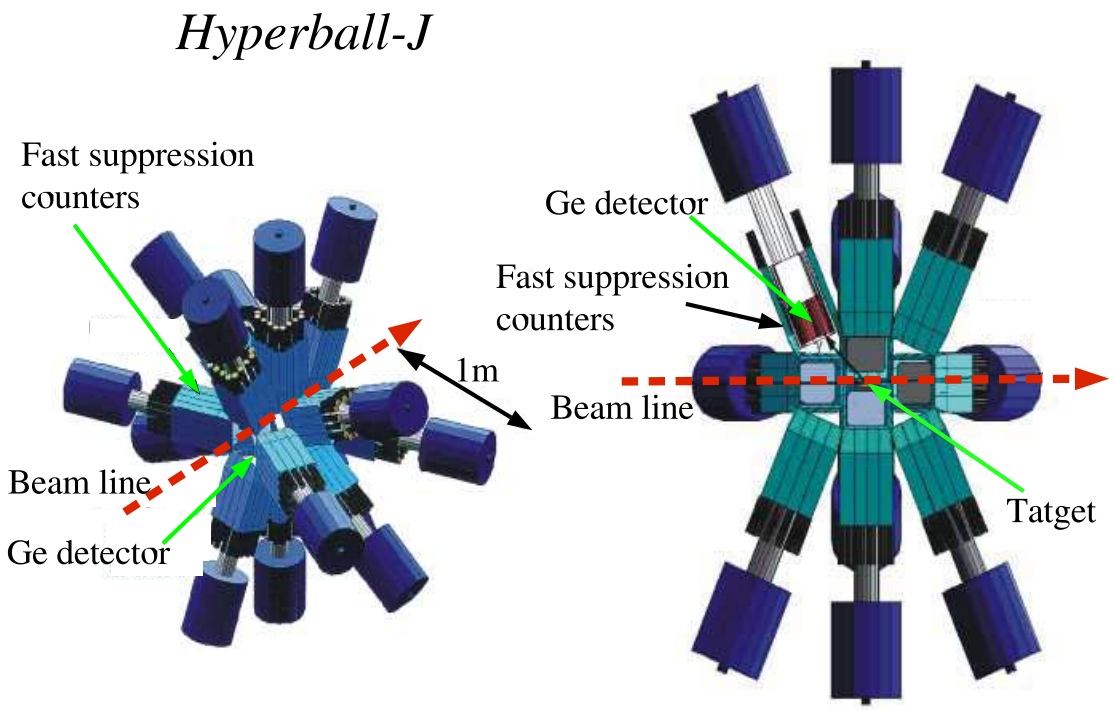


Figure 1.6: 本格的な J-PARC 実験に向けた Hyperball-J

## 1.3 本論文の構成

これまで述べてきたように、J-PARC でのハイパー核γ 線分光に向けて Hyperball の Upgrade 計画が進んでいる。そして、Ge 検出器や読み出しシステムの改良だけではなく、BGO に代わるより速い減衰時間をもつバックグラウンドサプレッサーが求められている。その中で様々なシンチレーター (PWO、BSO、GSO、LSO...) が候補に挙がり、結晶の特性とコストの両面から検討を重ね、本研究では PWO について、BGO に代わるバックグラウンドサプレッサーとしての性能を調べた。本論文の構成は、以下のようになっている。

- PWO と BGO や他のシンチレータの特性を比較し、バックグラウンドサプレッサーとしての PWO シンチレータの可能性について考察する。(Chapter 2)
- PWO について高エネルギー領域 ($> 1$ MeV) と低エネルギー領域 (コンプトン散乱事象) に分けて、バックグラウンドサプレッサーとしての性能を調べる実験を行った。その実験の内容と解析結果を示し、BGO との比較を行い、また PWO 結晶を冷却することによるサプレッション能力の変化について調べた。(Chapter 3,4)
- 実験の結果から PWO サプレッサーの性能を評価し、実用化の可能性と今後の課題について述べる。(Chapter 5)

# Chapter 2

# バックグラウンドサプレッサーとしてのPWO

## 2.1 ハイパー核γ 線分光におけるバックグラウンド

Hyperballを用いたハイパー核γ 線分光実験の主なバックグラウンドは、次の3つである。

1. コンプトン散乱イベント
2. $\pi^0 \rightarrow \gamma\ \gamma$ 崩壊による高エネルギーγ 線
3. $\pi^{\pm}$ 等の高エネルギー荷電粒子の突き抜け

まず、コンプトン散乱イベントについて説明する。Hyperballは14台のGe検出器で構成されているが、ゲルマニウムの結晶は他のシンチレータ($NaI$,$BaF_2$等)と比較して、小型であり、原子番号が小さいために光電ピークの検出効率、光電ピーク/コンプトン比が小さい。したがって、ハイパー核から放出されたγ 線等がGe結晶中でコンプトン散乱して検出器の外に逃げたイベントが、Ge検出器のエネルギースペクトルに大量のコンプトン連続部分のバックグラウンドを形成する。

次に挙げられるのが、ターゲットで生成されたΛ 粒子の弱崩壊($\Lambda \rightarrow n + \pi^0$)によって発生する$\pi^0$が崩壊(寿命$0.84 \times 10^{-16}$ sec)したときに放出されるふたつの高エネルギーγ 線である。これらのγ 線は数10 MeVのエネルギーをもつが、物質中でカスケードシャワーを起こしハイパー核のγ 線領域($< 10$ MeV)にバックグラウンドとして観測される。

また、二次ビームである中間子ビームは、ビームライン上のスリットや磁石などによる散乱でできたビームハローと、ビーム粒子自身の崩壊によるビームハローが存在する。これらビームハローや、標的で散乱されたビーム粒子からなる高エネルギー荷電粒子が、Ge検出器を突き抜けると、エネルギースペクトルの高エネルギー領域にバックグラウンドを形成する。ただし、これらの荷電粒子が結晶に付与するエネルギーは非常に高いので($\sim 50$ MeV)、Ge結晶の一部をかすめるようにして突き抜けたとき、$< 10$ MeVの領域にバックグラウンドとしてあらわれる。

さらにΛ 粒子の中間子弱崩壊、$\Lambda \rightarrow p + \pi^-$や非中間子崩壊$\Lambda\ p \rightarrow np$で生じる$\pi^-$やpもバックグラウンドの一部を構成していると考えられる。

## 2.2 BGO に代わるサプレッサーの必要性

### 2.2.1 BGO バックグラウンド サプレッサー

Hyperball には、Section 2.1 で述べたバックグラウンドを、Ge 検出器のエネルギースペクトルから除去するための VETO カウンターとして、BGO($Bi_4Ge_3O_{12}$) シンチレーションカウンターが用いられてきた。Hyperball 設計当時、バックグラウンド サプレッサーに要求された性能は、主にコンプトンサプレッサーとして、Ge 検出器群中の限られた空間 (厚さ 20 mm 以内) でγ 線を検出できる高いγ 線吸収率であった。BGO は NaI などと比べて、蛍光出力が小さいためエネルギー分解能が悪いという欠点はあるものの、高密度で放射長が短くγ 線吸収率が高いため、低エネルギーのγ 線核分光実験において、最適なコンプトンサプレッサーとして広く用いられてきた。Table 2.1 に BGO と NaI の諸性能の比較を示す [1]。

BGO サプレッサーは、6 個の BGO 結晶で Ge 結晶の周囲を取り囲み、各 BGO に取り付けた光電子増倍管で信号を読み出す。Hyperball における、BGO および Ge 結晶の大きさと配置を Figure 2.1 に示す。

Table 2.1: BGO と NaI の性能比較 (1 MeV のγ 線に対する吸収率は各結晶の厚さ 2 cm の時の値)

| | $Bi_4Ge_3O_{12}$ | NaI(Tl) |
|---|---|---|
| 有効原子番号 | 75 | 51 |
| 比重 ($g/cm^3$) | 7.31 | 3.67 |
| 1 MeV のγ 線に対する吸収率 (%) | 62 | 35 |
| 放射長 (cm) | 1.12 | 2.59 |
| 蛍光出力 (NaI=100) | 7 | 100 |

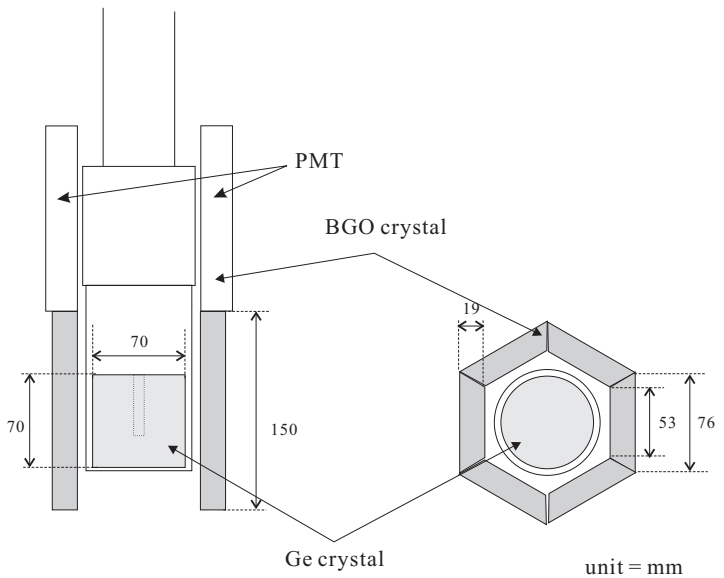


Figure 2.1: Hyperball での Ge 結晶と BGO 結晶の大きさと位置関係

### 2.2.2 バックグラウンドサプレッションの原理

Hyperball においては、BGO サプレッサーにヒットがあったときのイベントをオフライン解析により排除することで、Section 2.1 で述べた 3 種類の主要なバックグラウンドの多くをサプレッション可能にしている。それぞれの場合について、サプレッションの原理を説明する。

#### コンプトン散乱イベント

Hyperball 実験では、標的で生成したハイパー核が励起状態から遷移するとき放出されるγ 線の検出を目的としている。しかし、Section 2.1 で述べたように、このγ 線の多くは Ge 検出器でコンプトン散乱を起こし、光電ピークとして検出できずに Ge 結晶の外部に逃げてしまう。このようなイベントを Figure 2.2 に模式的に示す。赤矢印で表したコンプトンγ 線を BGO で検出することで、コンプトン散乱イベントとして選択排除が可能である。

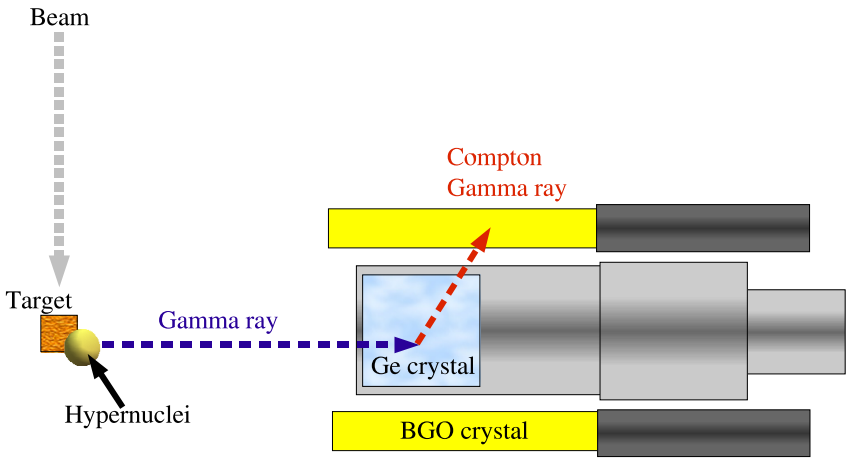


Figure 2.2: Ge 結晶中でコンプトン散乱して結晶外に逃げた場合

#### $\pi^0$ の崩壊による高エネルギーγ 線

標的でΛ ハイパー核が生成した際、Λ 粒子の中間子弱崩壊 $\Lambda \rightarrow n + \pi^0$ が起こる。さらにこの $\pi^0$ がγ γ 崩壊し、その高エネルギーのγ 線は物質との相互作用でカスケードシャワーを引き起こす。Figure 2.3 は、Ge 結晶中でのカスケード崩壊によるγ 線を BGO で検出する様子を模式的に描いたもので、赤色のγ 線を BGO が捕えることでこのようなイベントをサプレッションの対象として選び出せる。これまでになされたシミュレーションおよび実験の結果から、この $\pi^0$ 由来のバックグラウンドは、BGO サプレッサーによりそのほとんどを抑制できていることが実証されている [1]。

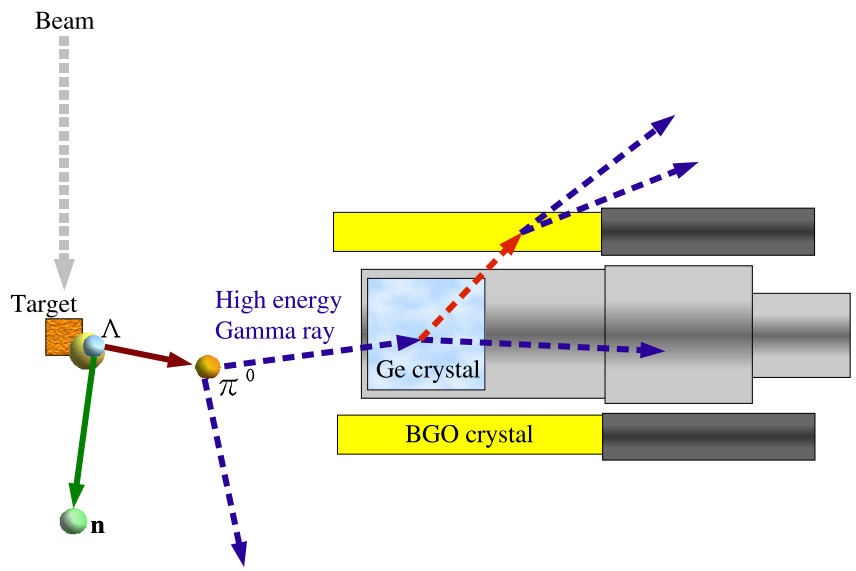


Figure 2.3: 高エネルギーγ 線がカスケード崩壊を起こした場合

高エネルギー荷電粒子の突き抜け

Figure 2.4 のように、標的で散乱されたビーム粒子のπ + が Ge 検出器を突き抜けた場合 (水色) や、π + がビームハローとなって Ge 検出器を直接通り抜けた場合も、BGO がヒットしたイベントを排除することでこのようなバックグラウンドを抑制可能である。

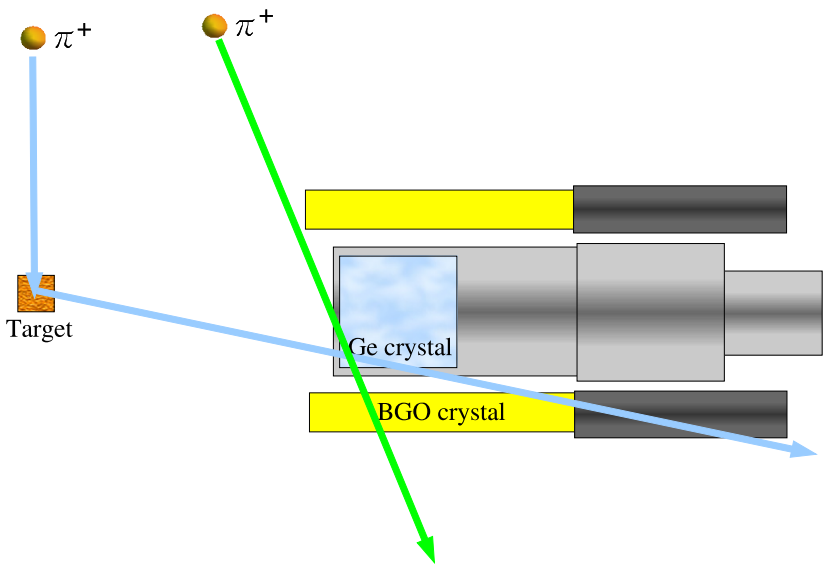


Figure 2.4: 高エネルギー荷電粒子が Ge 検出器を突き抜けた場合

### 2.2.3 BGO バックグラウンド サプレッションの効果

Figure 2.5 は、BNL で行われた E930 実験で測定された、BGO サプレッション前後の Ge 検出器のエネルギースペクトルである。赤がサプレッション前、青がサプレッション後の Ge 検出器のエネルギースペクトルを表しており、スペクトルの全域に渡りバックグラウンド サプレッションが効いているのがわかる。下の図は 6 MeV 付近を拡大したもので、BGO サプレッションの結果、$^{16}\mathrm{O}(3^- \to 0^+)$ からの 6129 keV のγ 線ピークの S/N 比が向上している様子がわかる。

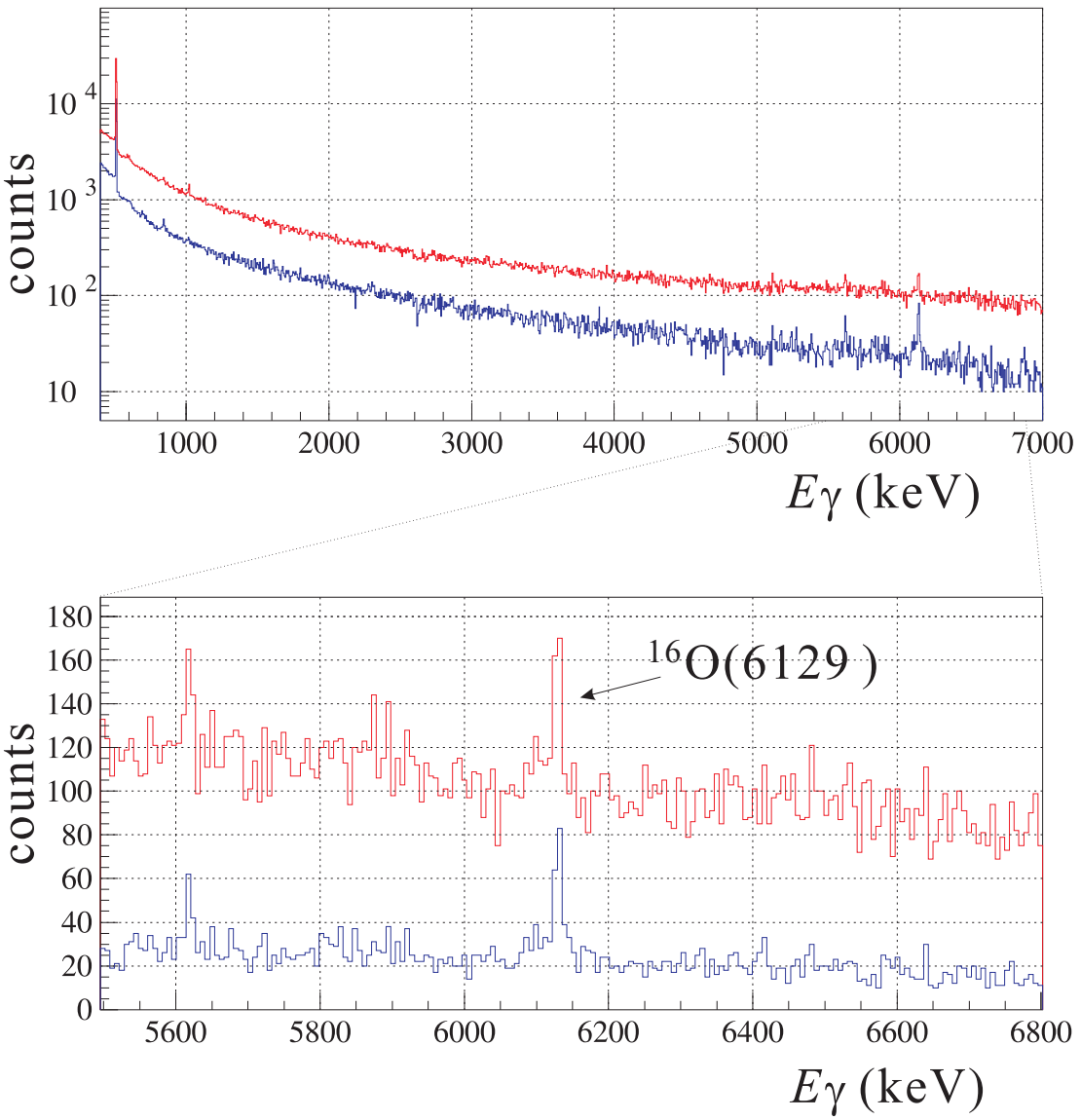


Figure 2.5: ハイパー核実験における BGO サプレッサーによるサプレッション効果

### 2.2.4 BGO の限界

Hyperball に組み込まれた BGO は、バックグラウンドサプレッサーとして、コンプトンサプレッションはもちろん、高エネルギーのバックグラウンドサプレッションにも高い能力を発揮してきた。BGO はコンプトンサプレッサーとして数 100 keV の低エネルギーのγ 線を検出するために、discriminator の threshold を 1 photo-electron 信号を検出できるまで低くする必要がある。そのため Figure 2.6 のように、1 つのイベントに対して ~ 1 $\mu$s にわたり複数の discriminator 出力を得てしまい、2 つ目以降の信号がアクシデンタルに Ge 検出器のエネルギースペクトルをサプレッションしてしまうこと (以下オーバーサプレッションと呼ぶ) が起こっていた。このことは、真のイベント数を減らしてしまい、統計量の少ないγ 線ピークの判別を困難にする。これまで KEK の K6 ビームラインで行われてきた実験では、~ $3 \times 10^6$ Hz のπ ビームを用いており、このビーム強度のもとでのオーバーサプレッションは全イベントに対して 5 ~ 10 %であった。

今後、J-PARC でのハイパー核γ 線分光実験が計画されているが、ビーム強度はおよそ 1 桁上がって、K ビームで ~ $10^7$ Hz になり統計量は格段に増えると期待されているが、同時にバックグラウンドの計数率もおよそ 1 桁上がると考えられている。仮に、J-PARC でのバックグラウンドの計数率が現在の 10 倍になり、BGO の single counting rate も 10 倍になったとすると、BGO は完全に pile up してしまいサプレッサーとしての機能を失ってしまう。

### 2.2.5 BGO に代わる高速サプレッサーの検討

このような経緯で、J-PARC でのハイパー核実験に向けて、高計数率に弱い BGO に代わる新しいバックグラウンドサプレッサーの探索をしてきた。Table 2.2.5 に、BGO および新しいバックグラウンドサプレッサーの候補として挙げられた各シンチレーター (PWO、LSO、BSO、GSO) と比較のため $BaF_2$ と NaI(Tl) の諸性能をまとめた。コストについては、一般的に市販されている結晶の価格を示した。

BGO が、Hyperball におけるバックグラウンドサプレッサーとして要求された高いγ 線吸収率は、高密度で放射長が短いことに由来するものである。また、耐高計数率性能の問題は、BGO の崩壊定数が 300 ns と大きい為、蛍光減衰時間が ~ 1 $\mu$s にも及ぶことが原因である。したがって、BGO に代わる高計数率に強いバックグラウンドサプレッサーに求められる性能は次の 2 点である。

- 高いγ 線吸収率 (高密度で放射長が短い)
- 崩壊定数が十分小さい

PWO、LSO、BSO、GSO はいずれも BGO より小さな崩壊定数をもつが、BSO、GSO のγ 線吸収率は BGO より低いため、耐高計数率性能の向上は見込めるがサプレッション能力の低下は確実である。

LSO は BGO と同程度のγ 線吸収率を持ち発光量も十分であるが、非常に高価な結晶のためコストの面で実現困難である。Hyperball で使用されている BGO 結晶の総量は、$1.5 \times 10^4$ cm$^3$ であり、Hyperball-J では Ge 検出器の大型化によってさらに増える。BGO もかなり高価な結晶であるが、LSO はさらに BGO のおよそ 3 倍のコストがかかっ

てしまう。

PWO については、BGO を上回るγ 線吸収率をもち、崩壊定数は ~ 6 ns と非常に短いうえにコストも BGO の約 1/5 である。しかし、唯一の難点は蛍光発光量が NaI の 1/100 程しかなく、低エネルギーのγ 線に対する検出効率は BGO より低いと予想されることである。実際、PWO は高エネルギー実験 (GeV 領域) では電磁カロリーメータなどとして数々の実績があるが、発光量が少ないためにこれまで ~ 1 MeV 程度の低エネルギー領域で実用化された例はない。

Table 2.2: 各シンチレーターの性能比較 (γ 線吸収率は結晶の厚さ 2 cm で 1 MeV のγ 線に対する値)

| 結晶 | BGO ($Bi_4Ge_3O_{12}$) | PWO ($PbWO_4$) | LSO ($Lu_2SiO_5$) | BSO ($Bi_4Si_3O_{12}$) | GSO ($Gd_2SiO_5$) | $BaF_2$ | NaI(Tl) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 密度 [$g/cm^3$] | 7.23 | 8.28 | 7.4 | 6.80 | 6.71 | 4.89 | 3.67 |
| 放射長 [cm] | 1.12 | 0.89 | 1.14 | 1.15 | 1.38 | 2.03 | 2.59 |
| 崩壊定数 [ns] | 300 | ~ 6 | 40 | 99 | 30 ~ 60 | 0.6/620 | 250 |
| 光量 [NaI(Tl)=100] | 15 | 1 | 75 | 3 | 20 | 5/16 | 100 |
| 光量/崩壊定数 | ~ 0.05 | ~ 0.2 | 1.9 | 0.03 | ~ 0.4 | | |
| γ 線吸収率 [%] | 61.7 | 66.7 | 60.3 | 60.4 | | | |
| コスト [$ /$cm^3$] | 18 | 3.5 | 50 | | | | |

## 2.3 PWO サプレッサーの可能性

### 2.3.1 バックグラウンドサプレッサーとしての可能性

発光量が少ないため、低エネルギー領域での実用化例がない PWO ではあるが、われわれの目的に対しては低エネルギー領域でも実用化できる可能性がある。なぜなら、われわれがサプレッサーとして使用する際は、Discriminator の閾値を 1 photo-electron 以下としサプレッサーにヒットがあった時間情報だけを要求する。そのため、発光量の総量ではなく、「光量/崩壊定数」の値が重要な意味を持つ。「光量/崩壊定数」の値は信号立ち下がりの高さを近似的に表しており、光量/崩壊定数の値で比較すると、PWO ~ 0.2、BGO ~ 0.05 であり PWO の方が BGO より大きい。Figure 2.6 は、0.3 MeV のγ 線に対する BGO と PWO 検出器の光電子増倍管の出力と、Discriminator の Threshold を 1 photo-electron の信号を拾うよう設定したときの Discriminator 出力を模式的に表したものである。Figure 2.6 からわかるように、Discriminator の Threshold を 1 photo-electron 以下に設定したとき、あるイベントに対する出力が BGO の場合 ~ 1 $\mu$s にわたって続くのに対して、PWO では全発光量は少ないながらも、光電子増倍管の出力が 20 ns という短時間に集中している。このことは PWO が、バックグラウンドサプレッサーとしてわれわれの求める高い時間分解能を持ち、なおかつ唯一の問題点である発光量の少なさも光量/崩壊定数の値が大きいことで克服できる可能性を示唆している。

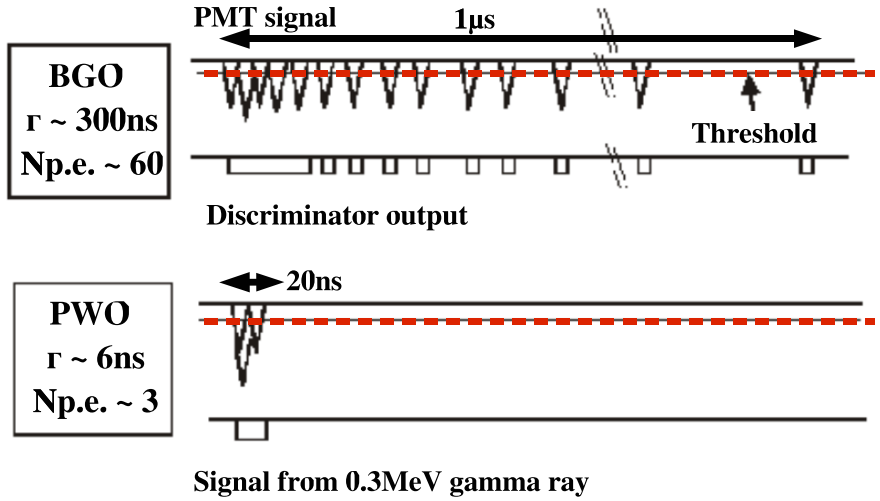


Figure 2.6: BGO および PWO 検出器の光電子増倍管出力と Discriminator

### 2.3.2 本研究の概要

本研究では、PWO による Ge 検出器のバックグラウンドサプレッションテストを、高エネルギー領域と低エネルギー領域にわけておこなった。その結果に対する考察から、PWO サプレッサーの性能を評価していくが、サプレッション能力を示す値として用いるサプレッションファクター (Section 3.3) は、測定条件の変化に対して非常に敏感な値であって、PWO のサプレッション能力を定量的に求めることは困難であり、またそれは、BGO の過去のデータと比較対象にはなりえない。したがって、次章以降では、PWO サプレッサーとこれまで用いられてきた BGO サプレッサーについて、同じ条件でサプレッション能力をテストし、得られたサプレッションファクターを比較することで PWO サプレッサーの性能を評価していく。

本研究の最終目的は、高エネルギー領域と低エネルギー領域において、PWO と BGO のサプレッションファクターを測定し、BGO にかわるバックグラウンドサプレッサーとしての PWO の実用化が可能であるか否か、評価することである。

### 2.3.3 本研究に用いた PWO カウンター

本研究に用いた PWO 結晶の特性と製作した PWO 検出器について、Table 2.3 にまとめた。PWO 結晶のなかには、結晶にイットリウムやモリブデンをドープし発光量を増やすよう改良を加えたものが存在するが、本研究で使用したのは何もドープされていない PWO である。結晶のサイズは Figure 2.7 に示すように、$20 \times 20 \times 200 mm^3$ であり、サプレッサーとして Ge 検出器を取り囲むために使用した本数は同じ種類の結晶 20 本であった。

光電子増倍管は PWO 結晶の $20 \times 20$ mm$^2$ の面全体を覆うことのできる、光電面の大きな H3690(HAMAMATSU 33.0 mm$\phi \times$ 140 mm) を用いた。

PWO 結晶表面と光電子増倍管のガラス面の接着にはオプティカルグリース (シリコ

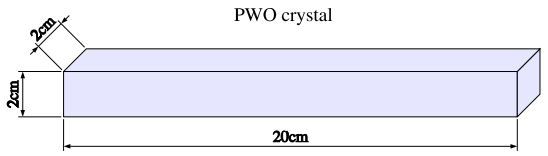


Figure 2.7: 本研究で使用した PWO 結晶の大きさ

ン) を使用した。PWO の結晶はそれ自体非常にもろく、角に力が加わると簡単に欠けてしまうため、完全に固定してしまうような接着剤ではなく、硬化性のないグリースを用いた。

PWO の各結晶は、発光量が少なく屈折率が大きいので、検出効率を下げないために、反射率の高いフルオロトランスシートとテフロンテープで光電子増倍管接着面以外を覆い、つぎにアルミ泊、最後に遮光テープを巻いた。

Table 2.3: 本研究に用いた PWO 結晶及び製作した PWO 検出器の仕様

| | |
|---|---|
| 組成 | $PbWO_4$ |
| Manufactory | ロシア製 |
| ドープの有無 | 無 |
| サイズ | $20 \times 20 \times 200(mm^3)$ |
| 光電子増倍管 | H3690(HAMAMATSU 33.0 mm$\phi$ × 140 mm) |
| PMT· 結晶接着 | オプティカルグリース |
| 結晶表面 | フルオロトランス (高反射率の白紙) + アルミ箔 + 遮光テープ |
| 本数 | 20 本 |
| 511 keV γ 線に対する平均光電子数 | ~ 2.53 photo-electron |

このようにして作成した PWO 検出器の 511 keV のγ 線に対する平均光電子数を $^{22}$Na 線源を用いて測定した。そのときのセットアップを Figure 2.8 に示す。$^{22}$Na 線源から 180 度の角度相関をもって放出される 2 本の 511 keV γ 線のうち、片方を $BaF_2$ で検出したときもう一方のγ 線がほぼ確実に PWO に入射するように、$BaF_2$ と $^{22}$Na の間を 20 cm 離し、PWO 結晶と $^{22}$Na は密着させた。

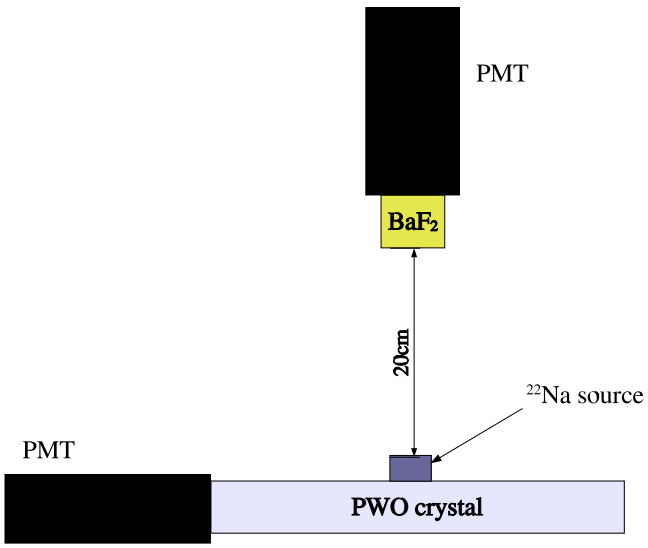


Figure 2.8: 511 keV γ 線に対する PWO 検出器の発光量測定のセットアップ

この結果得られた PWO の ADC スペクトルは Figure 2.9 であり、横軸は光電子数にしてある。この光電子数の分布はポアソン分布に従うので、このスペクトルをポアソン分布の形でフィッティングを行い、511 keV のγ 線に対する平均の光電子数を見積もった。ただし、この ADC スペクトルには 511 keV のγ 線だけでなく、$^{22}$Na から放射される 1270 keV のγ 線が PWO に入射したイベント、および 511 keV と 1270 keV のγ 線が同時に入射したイベント、さらにそれらのコンプトン散乱事象が含まれている。そのため、Figure 2.9 のスペクトル全体をポアソン分布でフィットせず、約 5 photo-electron 以上の領域は 1270 keV のγ 線が関与したイベントであるとして、5 photo-electron までの領域で、一定のコンプトン散乱バックグラウンドを仮定してフィッティングを行った。フィッティングに用いた関数 $f(x)$ は、

$$f(x) = C_1 \cdot \frac{(N_{ave})^x \cdot exp(-N_{ave})}{x!} + C_2 \tag{2.1}$$

であり、パラメータは $N_{ave}$(平均光電子数) と $C_1$、$C_2$(ともに定数) の 3 つである。

Figure 2.9 の下図は、Figure 2.9 上図のスペクトルを 1 photo-electron/1bin になおし、0 ~ 4 photo-electron の範囲でポアソン分布によるフィッティングを行った結果である。その結果、本研究で使用した PWO 検出器の 511 keV γ 線に対する平均光電子数は ~ 2.53 photo-electron であることがわかった。

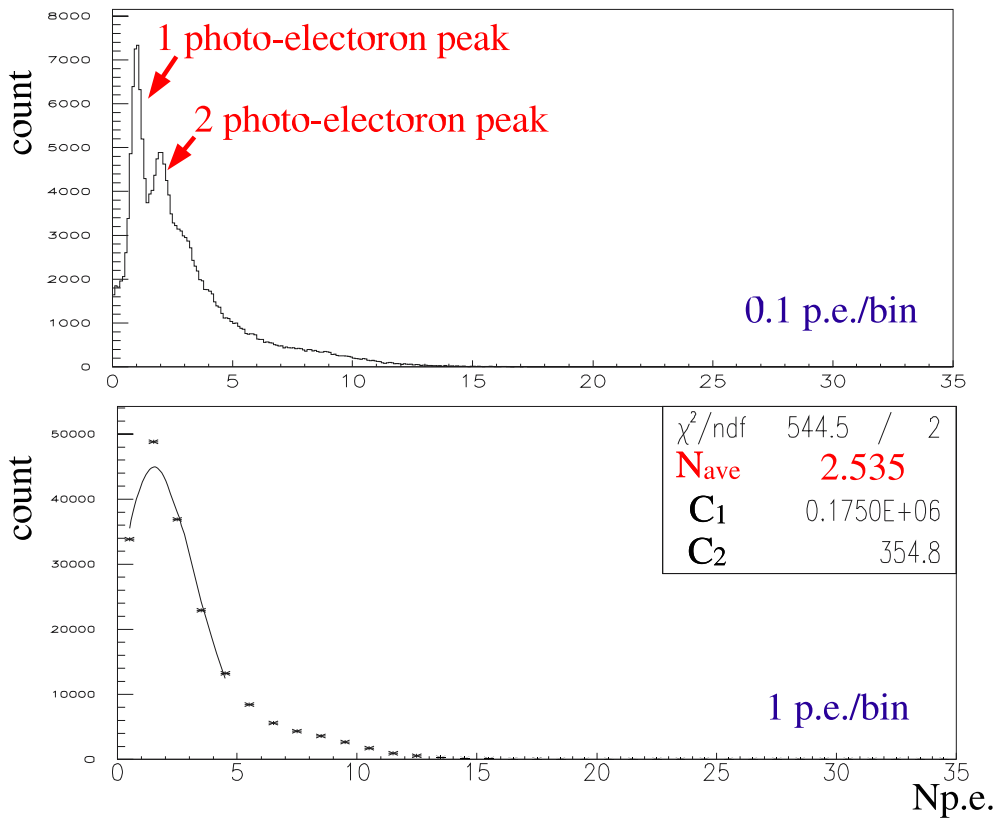


Figure 2.9: $^{22}$Na 511keV γ 線に対する、本研究で用いた PWO 検出器の発光量とポアソン分布によるフィッティング

# Chapter 3

# 高エネルギーバックグラウンドに対するサプレッション性能

## 3.1 T536 実験の目的

わずかではあるが、BGO より大きなγ 線吸収率をもつ PWO は、高エネルギーのバックグラウンドに対し十分なサプレッション能力をもつと考えらる。しかし、Hyperball のバックグラウンドサプレッサーとしては、高エネルギーといっても 10 MeV 以下の領域であり、PWO の光量の少なさがどのように影響をおよぼすか調べる必要がある。

そのため 2003 年 6 月、KEK-PS K6 ビームラインにおいて、高エネルギーのバックグラウンドに対する PWO カウンターによるサプレッション効果を調べる実験 (T536) を行った。20 × 20 × 200 $mm^3$ の PWO 結晶 20 個で、Figure 3.1 のように 1 台の Ge 検出器の Ge 結晶の周囲をできるだけ隙間のないように囲み PWO サプレッサーとした。

T536 実験では Clover 型 Ge 検出器のビームライン上での動作確認という、他の目的もあったため、PWO サプレッサーのテストでは十分な統計を得られなかった。また、われわれ占有のビームタイムではなかったため、本来ならばハイパー核実験と同じ ($\pi^+, K^+$) トリガーでテストを行うべきであったのだが、それはできなかった。したがって、この実験におけるバックグラウンドの構成要素は、ハイパー核実験時のときと全く同じではない。今回の実験は ($\pi^-$,p) トリガーで行った。したがって、Section 2.1 で述べたバックグラウンドのうち、ハイパー核生成に起因するバックグラウンドは減り、標的で散乱されたビーム粒子やビームハローに含まれる荷電粒子の突き抜けによるバックグラウンドが支配的になると考えられる。

しかし、比較対象として従来型の Ge 検出器 + BGO カウンターによるサプレッション効果を同時に調べることで、高エネルギーのγ 線や高エネルギーの荷電粒子に対する PWO のサプレッション能力を BGO サプレッサーと比較評価することが可能である。

## 3.2 セットアップ

### 3.2.1 PWO、BGO サプレッサー

T536 実験では、Figure 3.1 のように、20 個の PWO 検出器を Ge 結晶を中心に同心円状二層に配置した PWO サプレッサーを使用した。

この配置では、Ge 検出器を隙間無く覆うことはできていない。しかし、このテストの段階では PWO の発光量の少なさがどの程度サプレッションに影響するのかわかっておらず、ジオメトリ- の問題よりも検出効率を優先し、PWO 結晶の面 $(20 \times\ 20mm^2)$ を光電子増倍管の光電面で完全に覆うようにした。その結果 PWO 結晶より太い光電子増倍管を各結晶に取り付けることとなり、光電子増倍管の干渉によりこのような配置となった。また Figure 3.1 の磁気シールド (鉄製) は、電子増倍管を SKS 超電導磁石 (K6 ビームライン) の磁場から保護する目的と、PWO 検出器を支える支持体の役割りを果たした。

BGO は、これまで Hyperball で用いられてきた形のものをそのまま用いた (Figure 2.1)。Figure 3.2 に T536 実験で使用した PWO サプレッサーと BGO サプレッサーの概略図を示す。PWO サプレッサーの磁気シールドは省略してある。

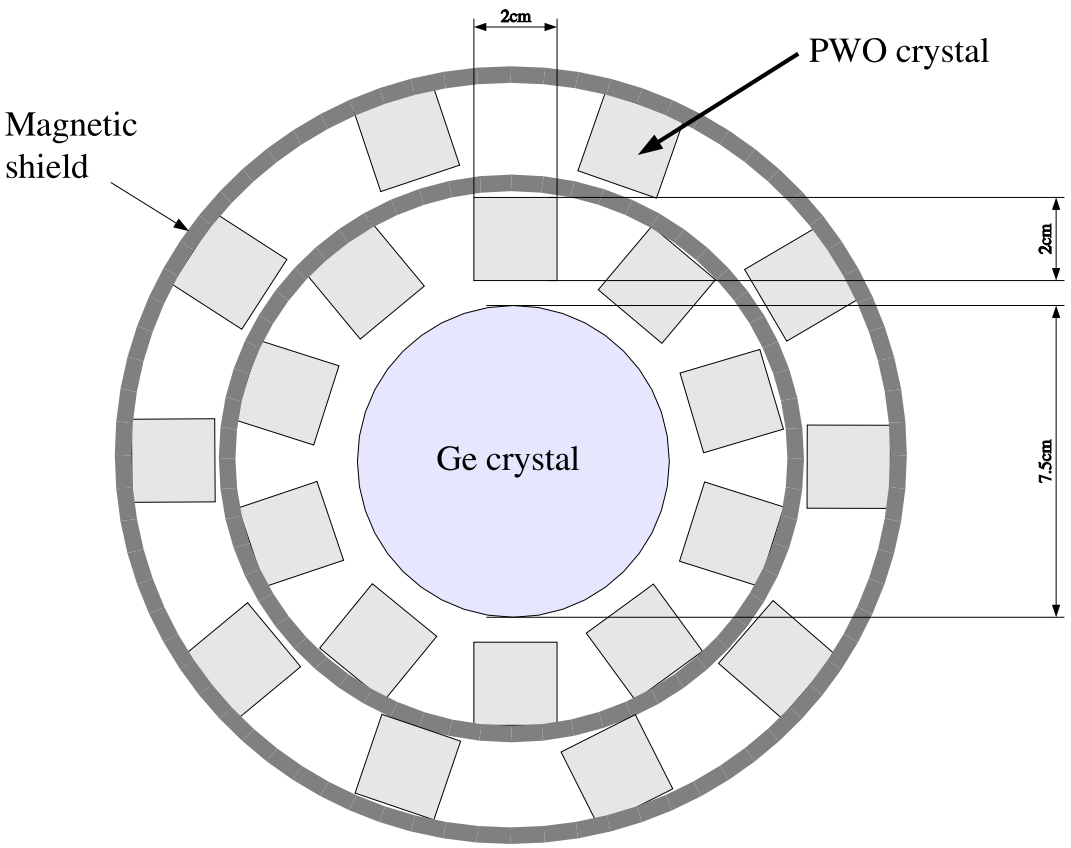


Figure 3.1: T536 で用いた PWO 検出器の断面図

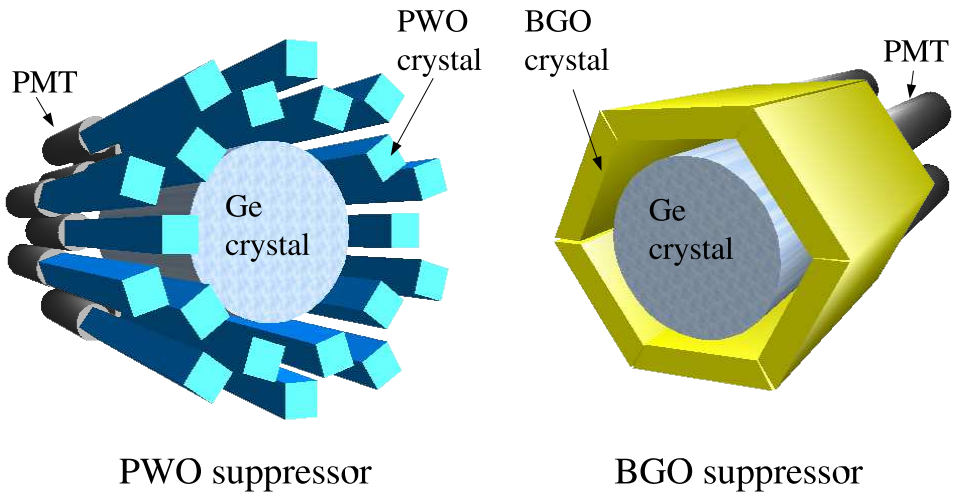


Figure 3.2: T536 で用いた PWO および BGO 検出器の概略図

### 3.2.2 測定条件と回路

「Ge 検出器 + PWO サプレッサー」と「Ge 検出器 + BGO サプレッサー」のふたつの検出器セットを Figure 3.3 のようにビームラインと同じ高さに、ターゲットをはさむように配置した。各 Ge 検出器とターゲットの距離は 15cm とし、これは Hyperball における Ge 検出器とターゲット間の距離と同じである。ビームは 1.2 GeV の$\pi^+$ビーム ($3.5\times\ 10^6$ Hz)、ターゲットは厚さ 2cm の $^{11}$B を用いた。ビーム強度はこれまでのハイパー核実験と同程度である。

しかしながら、トリガーは Section3.1 で述べたように、実際のハイパー核実験とは異なる ($\pi$ ,p) トリガーで行った。ハイパー核の実験では、SKS スペクトロメータのカウンターおよびドリフトチェンバーの情報から ($\pi$ ,K) イベントを選択するが、十分な統計を得る為に今回は、ドリフトチェンバーを用いず ($\pi$ ,p) トリガーで測定を行った。SKS スペクトロメータの概略図を Figure 3.4 に、T536 実験の回路図を Figure 3.5 に示す。

今回のテスト実験では、ビームがきたときハイパー核生成の有無にかかわらず、Ge 検出器にヒットが有ればデータをとることになる。そのため、ハイパー核の生成に関連したバックグラウンドよりも、主にビーム粒子およびビームハローに起因するバックグラウンドをに対するサプレッションを測定することになる。したがって、過去のハイパー核実験での BGO サプレッション効果と比較して、PWO サプレッサーの性能を評価することはできない。

そこで、これらの高エネルギーバックグラウンドに対する PWO サプレッサーのサプレッション能力を、Figure 3.3 のように同じ環境下で BGO サプレッサーによるサプレッション効果も同時に測定し、PWO サプレッサーと比較した。

なお、PWO、BGO ともに Discriminator の threshold は 1 photo-electron 信号を拾うように設定した。

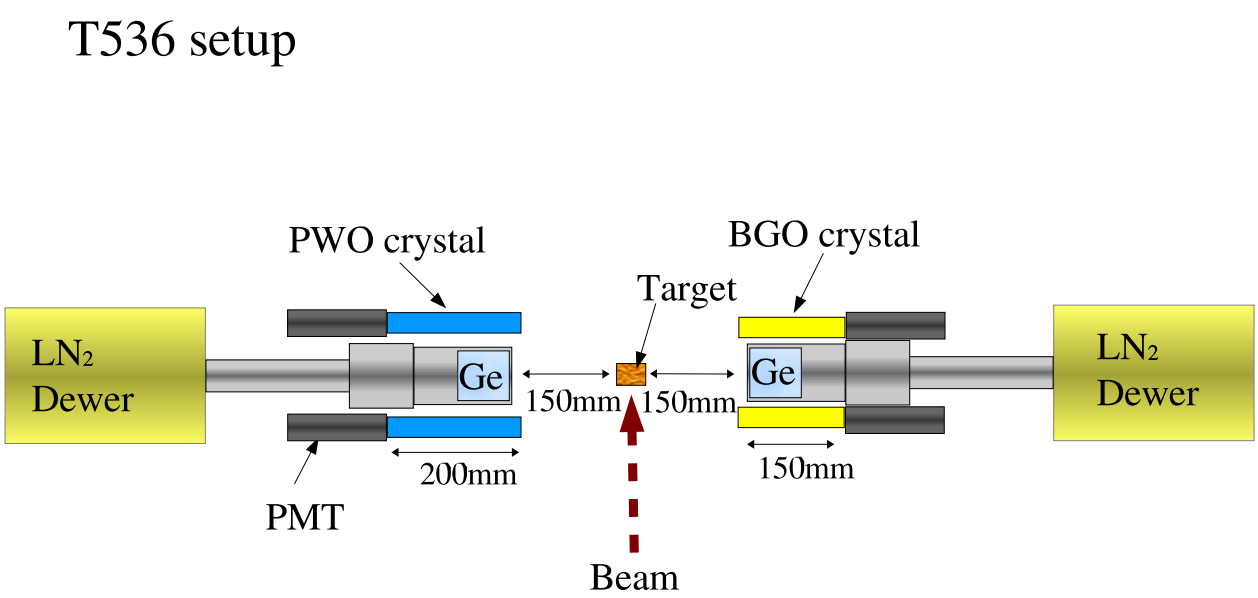


Figure 3.3: T536 のセットアップ (上面図)。ビームおよび標的から等距離に「Ge 検出器 + PWO サプレッサー」と「Ge 検出器 + BGO サプレッサー」を配置し、それぞれのサプレッション能力を測定した

Table 3.1: T536 実験におけるビーム条件

| | | |
|---|---|---|
| ビーム条件 | $\pi^+$ | 1.2 GeV/c |
| | 強度 | $3.5 \times 10^6$ Hz |
| | データ収集時間 | 110 min |
| | ビーム総量 | 338570 spill (1 spill = 1.6 s) |

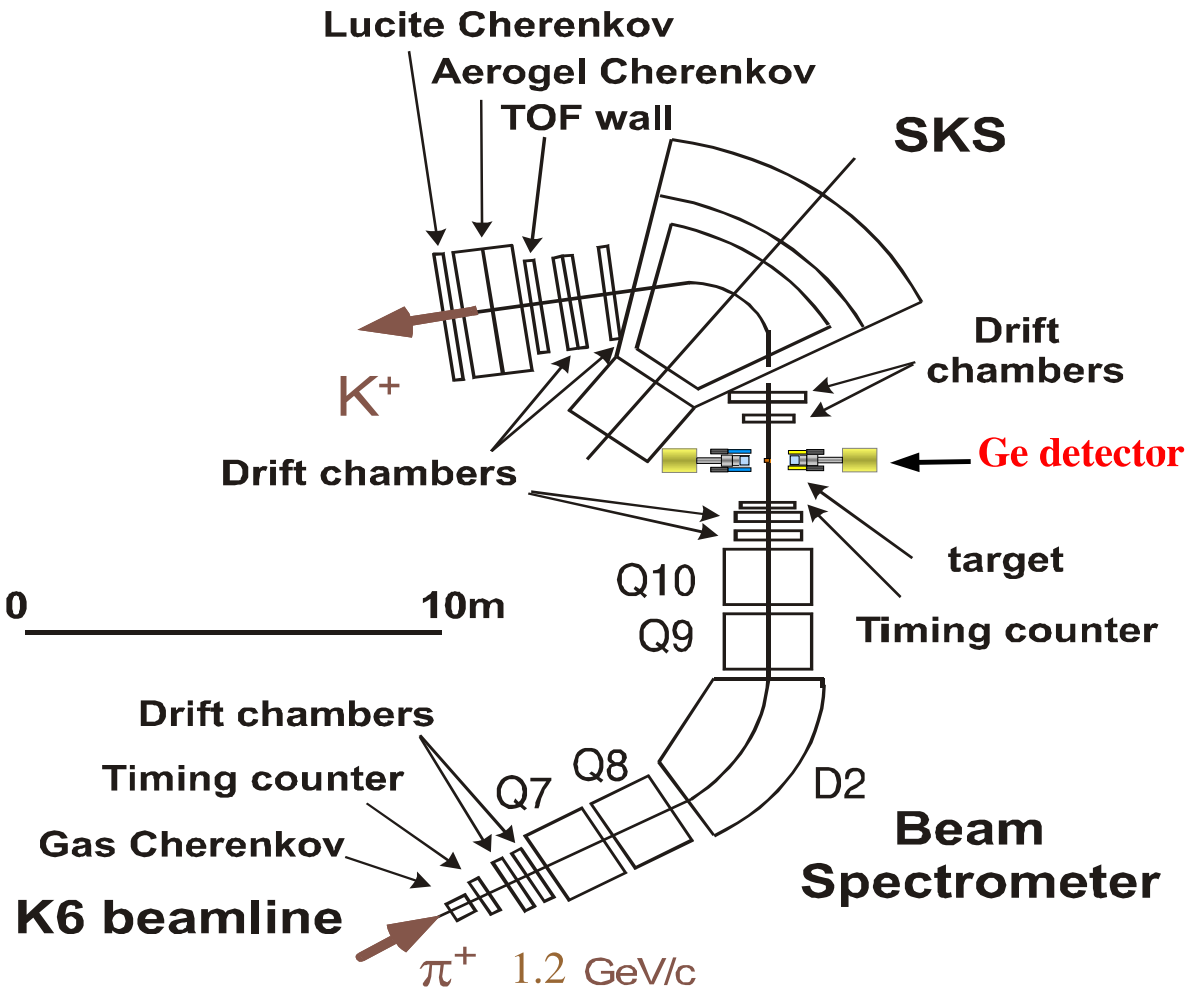


Figure 3.4: SKS スペクトロメータの概略図

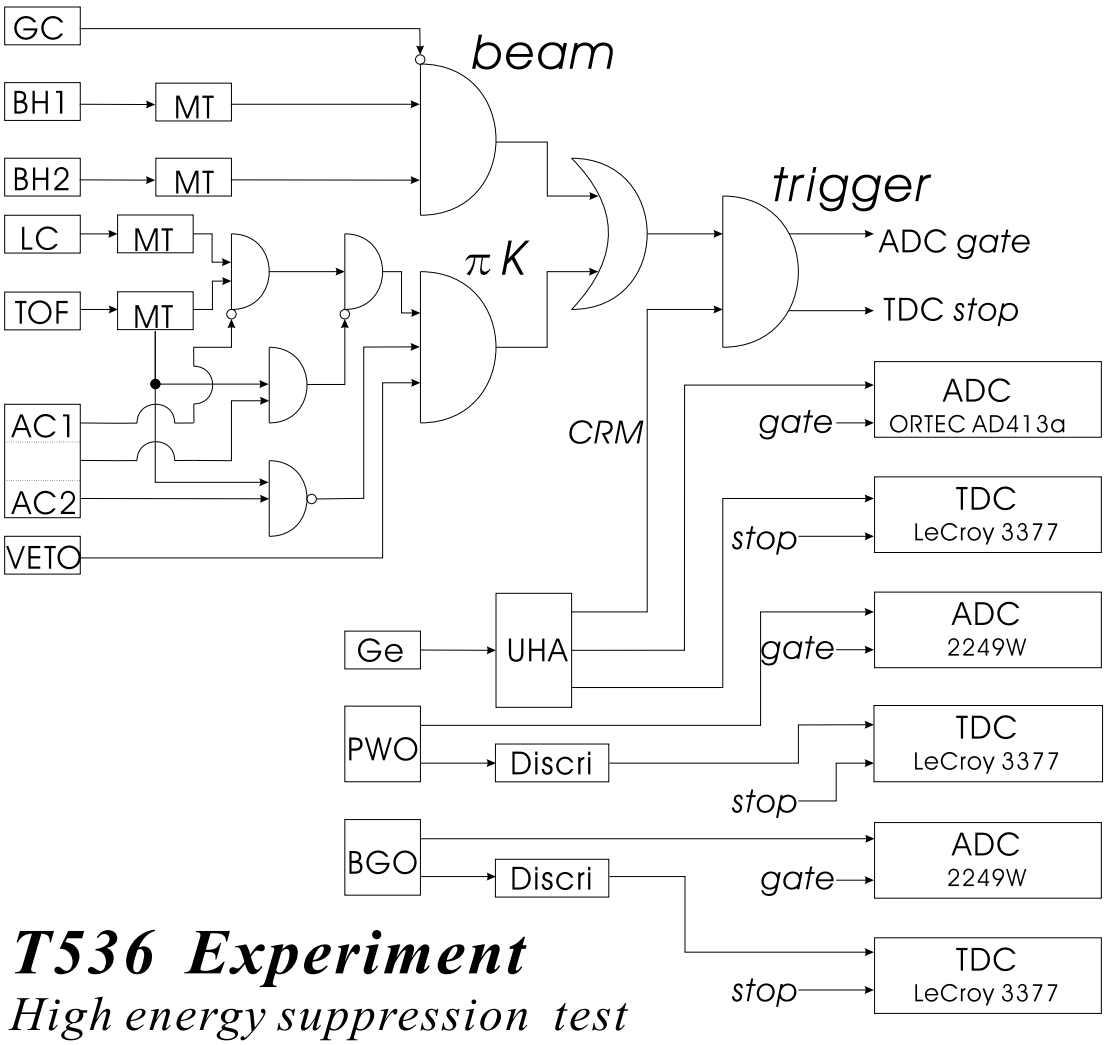


Figure 3.5: T536 実験における回路図

## 3.3 解析

### 3.3.1 バックグラウンドサプレッションの方法

Figure 3.6 に T536 実験で得られた PWO および BGO の TDC スペクトルを示す。また、ADC と TDC の相関は Figure 3.7 のようになった。

TDC データは、マルチヒット TDC(Le Croy 3377) により common stop で測定し、true timing から見たファーストヒットを選んだものであり、Ge 検出器の TDC データより正しいタイミングのイベントを選択している。

色を付けた範囲は PWO、BGO それぞれ 50ns、100ns であり、この範囲にヒットがあったときは Ge 検出器のエネルギースペクトルにカットをかけるという方法でバックグラウンドサプレッションを行った。

TDC 選択範囲は、Figure 3.7 の ADC と TDC の相関の強くなっている領域を選んだ。BGO は低エネルギーのイベントに対して TDC の分布が広がりを持つ ( ~ 200 ns) が、今回は高エネルギーバックグラウンドのサプレッション能力を比較したいので 100 ns の幅を選択した。PWO ではそのような広がりはなく true timing から 50 ns を選択した。サプレッション効果と TDC カットゲートの幅については Section ?? で詳しく述べる。

Figure 3.6 では、true timing から見たファーストヒットを選択しているために、BGO の TDC 分布は崩壊定数 300 ns の幅より狭くなっている。一方、PWO では崩壊定数 6 ns の幅より広くなっているが、この主な原因はふたつ考えられる。ひとつは光電子増倍管のゆらぎ (TTS、Transition Time Spread)、もうひとつは発光量不足による低エネルギー$\gamma$ 線の検出効率の低さである。前者の影響は少なからずあるが 1 ns 以内の大きさである。後者については、Figure 2.6 からわかるように PWO では最初の光子を検出できず数 10 ns 後の光子によってファーストヒットが得られる可能性がある。

そのため BGO と PWO の TDC カットゲートの幅は 2 倍しか違わない事になるが、この幅が耐高計数率性能を決めているのではない。BGO 100 ns、PWO 50 ns とした幅は、サプレッションするべきイベントに対する最初の discriminator 出力の時間幅でしかない。BGO はこのファーストヒットの後、数$\mu$ s にわたり discriminator 出力が続く (崩壊定数 300 ns の幅) ため、その間に次の TDC ゲートが開くとオーバーサプレッションを引き起こす。PWO は崩壊定数 6 ns でありこのような事象は起こらない。

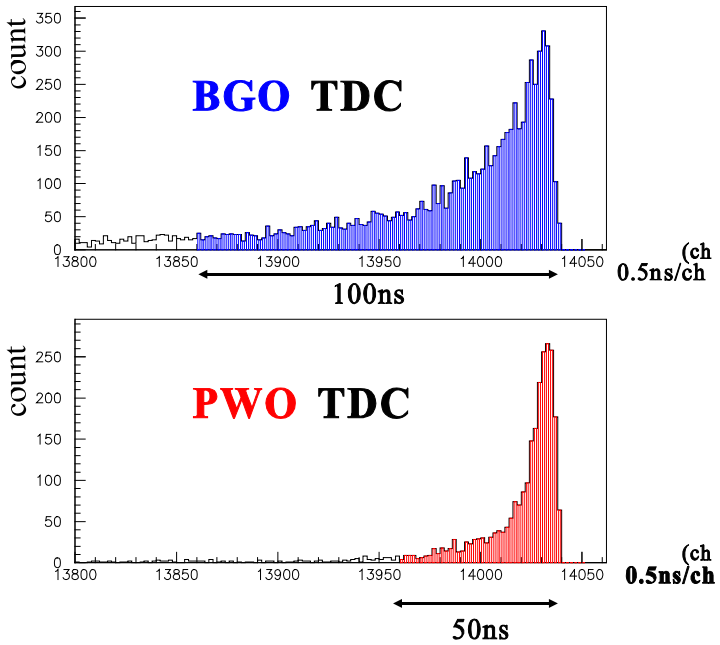


Figure 3.6: BGO(上) および PWO(下) の TDC スペクトル。TDC スペクトルの色を付けた範囲は、サプレッションを行う際のカットゲートを表す

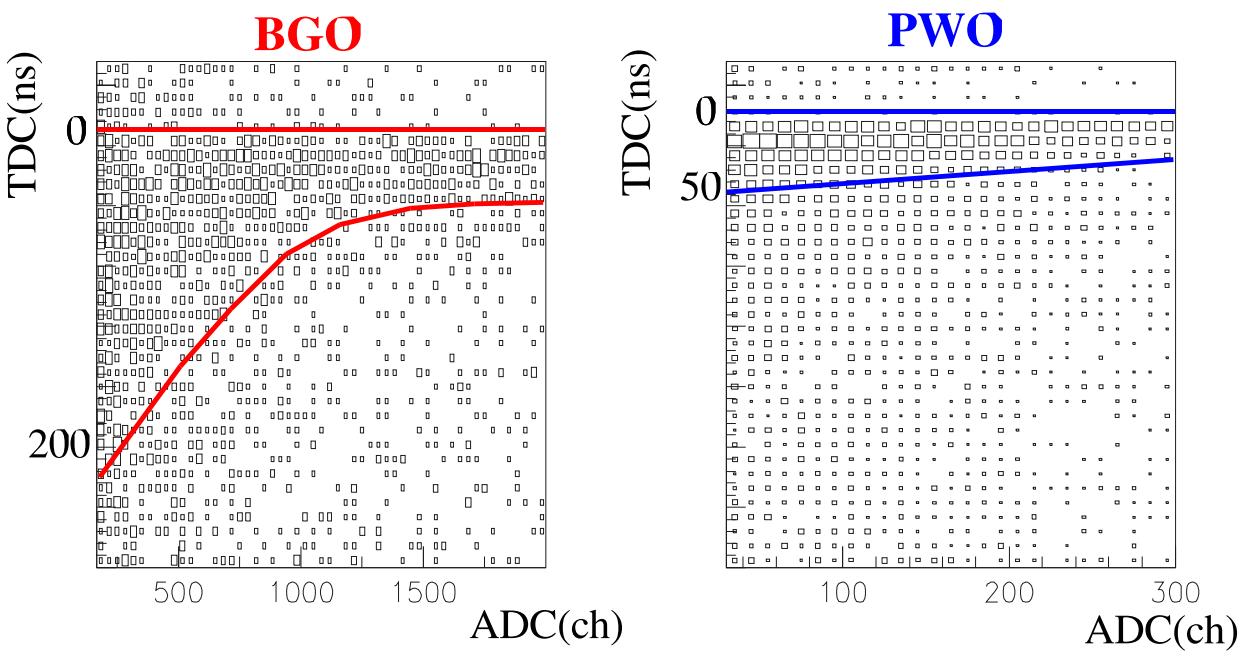


Figure 3.7: T536 で得られた BGO と PWO の ADC・TDC 相関図 (左が BGO、右が PWO)

### 3.3.2 サプレッション能力の評価方法

サプレッションファクター

バックグラウンドサプレッサーとしての能力を表す指標として、われわれはサプレッションファクターを用いる。サプレッションファクター $S_{factor}$ は次のように定義する。

$$S_{factor} = \frac{N_{before}}{N_{after}} \tag{3.1}$$

$N_{before}$：サプレッション前の計数、$N_{after}$：サプレッション後の計数

サプレッションファクターが大きいほどサプレッション効果が高いことを表し、また、オーバーサプレッションがまったくなければ、真のγ 線に対するサプレッションファクターは 1 になる。以下、PWO と BGO のサプレッションファクターの大小を比較することで、サプレッション能力を評価していく。

サプレッションファクターの統計誤差

測定値 $N_{before}$、$N_{after}$ を $N_1$、$N_2$ とし、その統計誤差を $\pm\Delta N_1$、 $\pm\Delta N_2$ とするとサプレッションファクター S は、

$$S = \frac{N_1}{N_2} \tag{3.2}$$

とかけて、$N_1$、$N_2$ は独立事象ではないため、

$$\Delta N_2 = \sqrt{\left(\frac{1}{S}\right)^2 \Delta N_1^2 + \left(-\frac{N_1}{S^2}\right)^2 \Delta S^2} \tag{3.3}$$

ここで、$\Delta N_1 = \sqrt{N_1}$、$\Delta N_2 = \sqrt{N_2}$ としてよいので、サプレッションファクターの誤差 ΔS は、

$$\Delta S = \sqrt{\frac{S\,(S-1)}{N_2}} \tag{3.4}$$

となる。

## 3.4 解析結果

### 3.4.1 T536 実験の結果

T536 実験で得られた、BGO および PWO サプレッション前後の Ge 検出器のエネルギースペクトルが Figure 3.8 である。黒い線で描いたスペクトルは、それぞれの Ge 検出器について TDC 情報から正しいタイミングのイベントを選んだもので、これらのイベントに対して BGO および PWO のカットをかけたのが、青 (BGO) と赤 (PWO) のスペクトルである。

また、サプレッション前後の計数比 (サプレッションファクター) をプロットすると Figure 3.9 のようになった。サプレッションファクターの誤差は、(3.4) 式から計算した統計誤差のみをエラーバーで表示した。

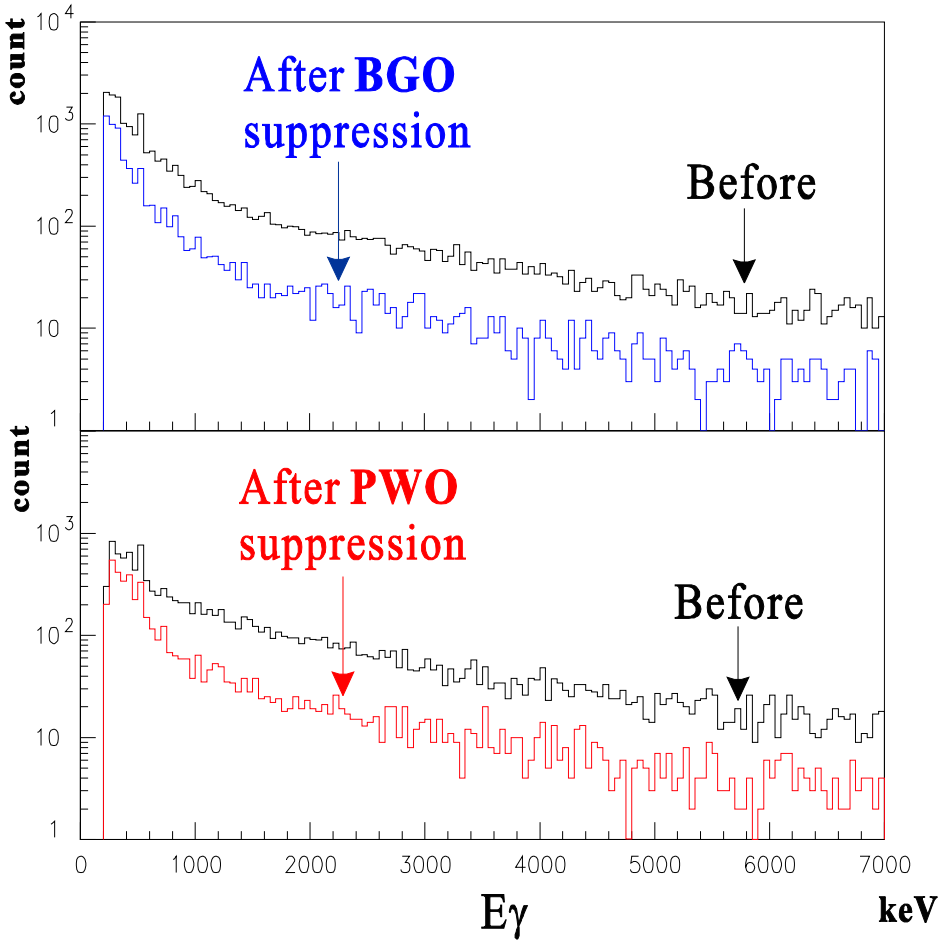


Figure 3.8: 上 : T536 における BGO サプレッション前後の Ge 検出器のエネルギースペクトル 、下 : T536 における PWO サプレッション前後の Ge 検出器のエネルギースペクトル

### 3.4.2 高エネルギーのバックグラウンドに対するサプレッション能力の評価

T536 実験の目的は、PWO サプレッサーの高エネルギーバックグラウンドに対するサプレッション能力であったので (Section 3.1)、ここでは 1 MeV 以上の領域について考察する。

まず Figure 3.8 から、今回テストした PWO サプレッサーは高エネルギーのバックグラウンドを BGO と同程度サプレッションできており、十分なサプレッション能力をもつことを確認できる。Figure 3.9 からも、1 ~ 7 MeV のエネルギー領域にわたって $S_{factor}$ ~ 4 の値をとっており BGO と同程度のサプレッションができていることがわかる。

BGO に比べて PWO の各結晶が Ge 結晶を取り囲むジオメトリ- は最適化されておらず、隙間も存在していたことを考慮すると、今回テストした PWO サプレッサーの性能は十分 BGO の代わりとなりうるといえる。

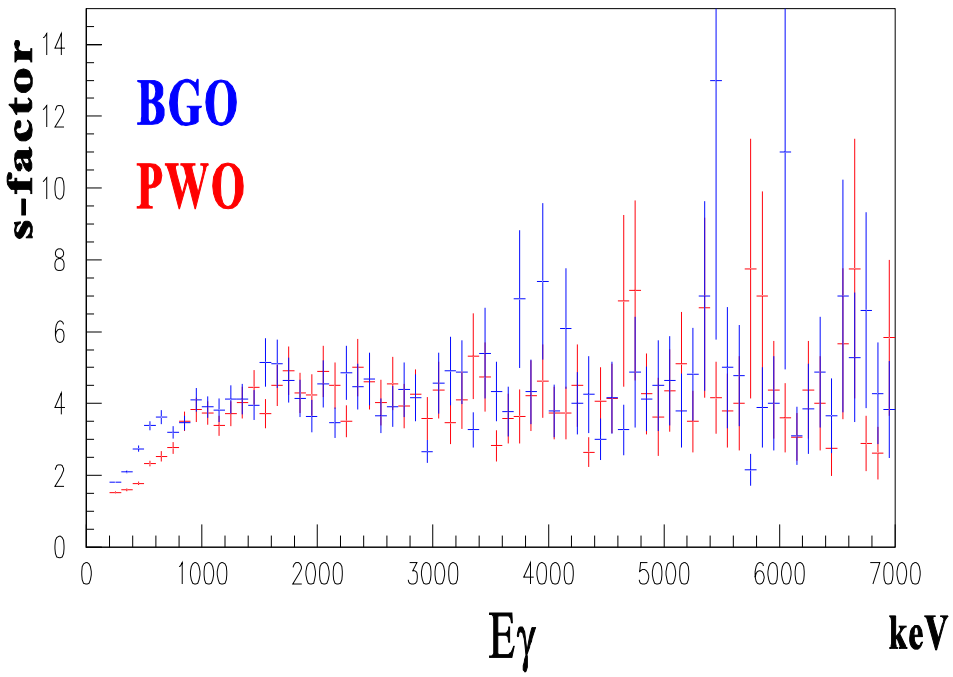


Figure 3.9: T536 における BGO サプレッサーと PWO サプレッサーのサプレッションファクターの比較

# Chapter 4

# コンプトンサプレッションの性能

## 4.1 コンプトンサプレッションテスト

### 4.1.1 目的

T536 実験では高エネルギー領域での PWO のサプレッション能力は BGO と同程度であることが確認できた。この結果はある程度予想できていたが、実用化に向けての問題は低エネルギーγ 線に対してのサプレッションがいったいどのくらい効くのかである。このことを調べるために、新たに Figure 4.1 のような PWO サプレッサーを設計し、γ 線源を用いて低エネルギーγ 線 (コンプトンγ 線) に対するサプレッションテストを行った。

### 4.1.2 PWO サプレッサー

コンプトンサプレッションテストを行うにあたり、Figure 4.1 のように PWO の結晶の配置を変えて光電子増倍管の数を結晶 2 個につき 1 個とし、PWO サプレッサーを製作した。PWO 結晶の再配置を行った理由は、Hyperball 実験における空間的な要請を満たしたかたちでサプレッションテストを行うためである。そのためには、PWO 結晶 20 個を Figure 4.3 のように再配置する必要がある。

そこで当初、T536 実験で使用した PWO サプレッサーを構成する PWO 各検出器を Figure 4.4 のように、光電子増倍管が互い違いになるようにしてテストを行った。しかし、線源側の光電子増倍管でコンプトン散乱したγ 線により、サプレッション不可能なバックグラウンドが形成され、適切なサプレッション能力の評価ができなかった。

このような理由から、Figure 4.1 のように光電子増倍管の数を結晶 2 個につき 1 個にした PWO サプレッサーを用いてテストを行った。光電子増倍管の数を減らすことによって、光電面が覆う PWO 結晶の面積はもとの 77 %に減少し光電子数の減少はさけられないが、Hyperball 実験において実用化の可能性を確かめることを目的としているため、Figure 4.4 のタイプで十分な性能が確かめられたとしても、最終的には Figure 4.1 のようなサプレッサーの性能を調べる必要が生じる。

この PWO サプレッサーは Figure 4.2 に示すように、結晶 6 個または 4 個を 1 セットにして遮光テープを巻き (セット内部の各結晶は遮光テープで区切られていない)、できる限

り隙間を少なくした。それでも各結晶の間には、フルオロトランスシート (Section 2.3.3 参照) とアルミ泊の厚みで ~ 2 mm 程度の隙間は存在していた。

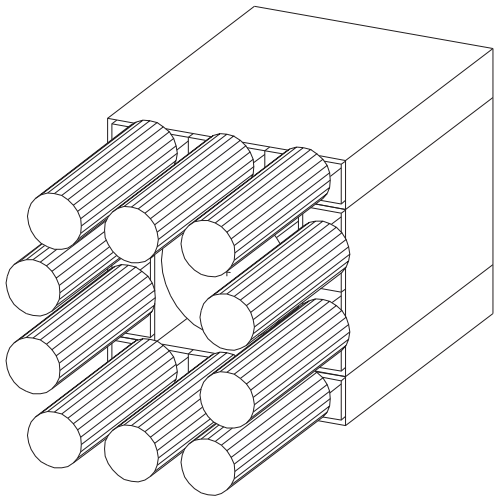

Figure 4.1: 実験に使用した PWO サプレッサー (光電子増倍管の数を PWO 結晶 2 個につき 1 個に減らした)

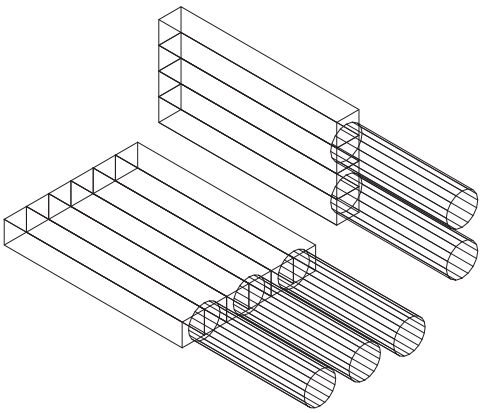

Figure 4.2: PWO サプレッサーの各パーツ

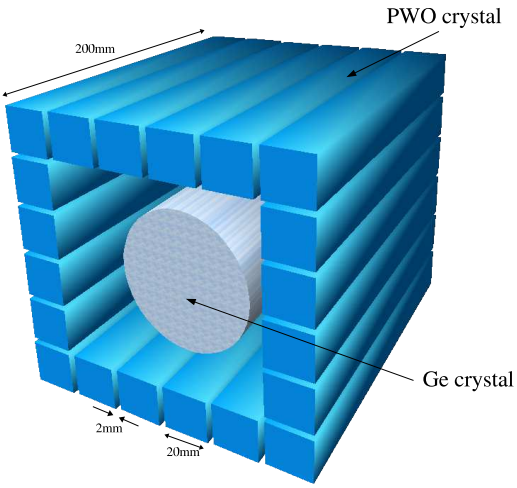


Figure 4.3: PWO 結晶の配置

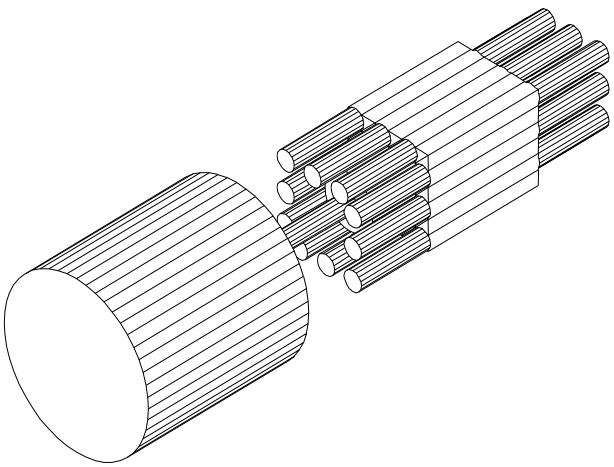

Figure 4.4: 当初コンプトンサプレッションテスト用に設計した PWO サプレッサー (APPENDIX 参照)

### 4.1.3 実験のセットアップ

セットアップ

テストに使用した線源は $^{60}$Co(307 kBq) で、線源と Ge 検出器 + PWO サプレッサー (Figure 4.1) を Figure 4.5 のように配置した。$^{60}$Co 線源の位置は、実際の Hyperball 実験での Ge 検出器とターゲットの距離と同じく 150mm とした。

トリガーカウンターとして $BaF_2$ を用いているが、トリガーについては次のセクションで詳しく説明する。また、$^{60}$Co 線源から放出されたγ 線が $BaF_2$ でコンプトン散乱して Ge に入るイベントを排除するため鉛ブロックで遮蔽した。鉛ブロックでコンプトン散乱したγ 線が Ge 検出器に入らぬよう、三角柱体の鉛ブロックを Figure 4.5 のように配置した。

今回の実験では、$^{60}$Co からのγ 線についてγ γ コインシデンスをとったため、トリガー計数率が低かった ( ~ 20 Hz)。そこで $BaF_2$ と線源の距離を、$BaF_2$ カウンターが pile up しない範囲でできるだけ近づけて 50 mm 離とした。

また、サプレッションファクターの比較評価のために、Figure 4.5 における PWO サプレッサーのかわりに BGO サプレッサーをおいて、PWO と同じ条件での測定を行った。

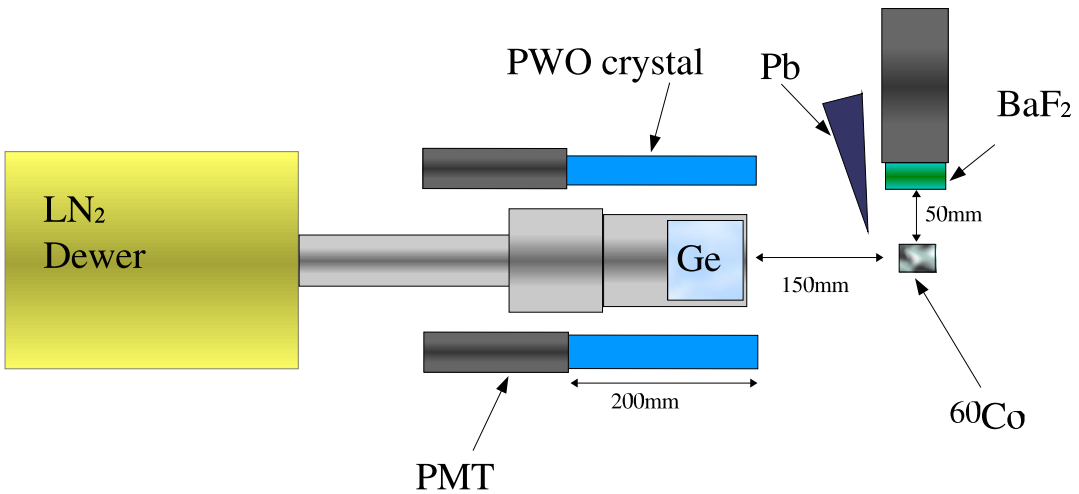


Figure 4.5: コンプトンサプレッションテスト セットアップ

トリガーおよびデータ収集系

今回のコンプトンサプレッションテストでは、トリガーカウンターとして $BaF_2$ シンチレーションカウンターを用いた。$BaF_2$ シンチレーションカウンターを選んだ理由は、PWO の時間分解能が良いので、トリガーカウンターにも十分な時間分解能が必要だからである。$BaF_2$ カウンターの時間分解能は 400 ps である。

$^{60}$Co 線源は、放射線崩壊するとき 1.173 MeV と 1.332 MeV のγ 線をほぼ同時に放射する (Figure 4.6)。そこで、Figure 4.5 のように $BaF_2$ シンチレーションカウンターを配置して、$BaF_2$ と Ge 検出器に両方ヒットがあったイベントを選択することで、Ge 検出器に 1.173MeV または 1.332MeV のγ 線が入射したイベントを選んだ。

今回の実験で得られた $BaF_2$ のエネルギースペクトルが Figure 4.7 である。2 つのピークは 1.173 MeV と 1.332 MeV に対応している。$BaF_2$ の Discriminator の threshold は 1500 ch あたりであるが、$BaF_2$ のシンチレーション光には、減衰時間の非常に短い成分と長い成分が混在している (Table 2.2.5 参照) ためにパルスの波高が正確なエネルギー情報をもっておらず、Discriminator によるカットが斜めにあらわれている。$BaF_2$ のエネルギースペクトルのこの斜めの裾の部分には、1.173 MeV と 1.332 MeV のγ 線が $BaF_2$ カウンターでコンプトン散乱したイベントが含まれているが、コンプトンγ 線は Figure 4.5 の鉛により遮蔽される。したがって、$BaF_2$ カウンターの ADC スペクトルで 1000 ch 以上のイベントを選択することで、Ge 検出器に 1.173 MeV または 1.332 MeV のγ 線が入射したイベントを選ぶことができる。

実験の論理回路を Figure 4.8 に示す。トリガー計数率は非常に低いことは述べたが、$BaF_2$ でトリガーがかかっても Ge 検出器にヒットがなかったイベントに対しては、CAMAC をクリアーしデータをとらないこととした。それにより、このようなイベントによる dead time を 300 $\mu$s から 60 $\mu$s にし、データ収集効率を上げた。それでもトリガーの計数率は、前にも述べたように数 10Hz のオーダーであった。また、BGO および PWO のシングルレートはそれぞれ、124 kHz、2.6 kHz であった。

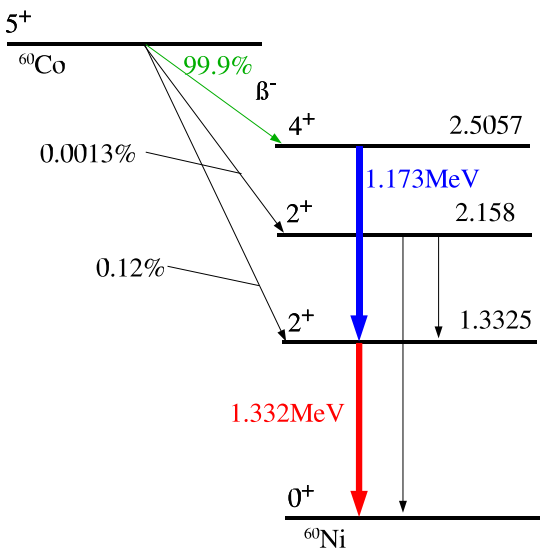


Figure 4.6: $^{60}$Co 壊変図

### 4.1.4 実験結果

今回のサプレッションテストの結果得られた、BGO および PWO サプレッサーによるサプレッション前後の Ge 検出器のエネルギースペクトルを Figure 4.9 に、また BGO、PWO それぞれの TDC スペクトルを Figure 4.11 に示す。

TDC はシングルヒット TDC の common start($BaF_2$) で測定した。Ge 検出器のエネルギースペクトルの黒で描いたスペクトルと、BGO、PWO の TDC スペクトルはともに、Ge 検出器の TDC で正しいタイミングのイベントを選択し、さらに $BaF_2$ の ADC で 1000 ch 以上 (Figure 4.7) を選んだときのものである。

Figure 4.11 の BGO、PWO の TDC スペクトルにおいて、BGO 100 ns、PWO 50 ns の間にヒットがあったイベントを排除したのが、Figure 4.9 の青および Figure 4.10 の緑で描いたスペクトルである。BGO および PWO サプレッションにより、Ge 検出器のエネルギースペクトル中のコンプトン連続部分のバックグラウンドが抑制されていることがわかる。

このサプレッション効果を比較するため、T536 と同様に Figure 4.9 のサプレッション前後の計数比 (サプレッションファクター) をプロットしたのが、Figure 4.12 である。青が BGO、緑が PWO のサプレッションファクターを表し、1 bin を 40 keV とし、エラーバーは (3.4) 式から求めた統計誤差のみを含む。1173 keV および 1132 keV の付近で $S_{factor} \sim 1.0$ となっているのは、γ 線が光電ピークを形成するイベントに対してのサプレッション (オーバーサプレッション) の割合が少ないことを意味するが、これについては Section ?? で詳しく述べる。

PWO のサプレッションファクターを BGO と比較すると、コンプトン連続部分において BGO より小さな値であり、今回使用した PWO サプレッサーはコンプトンサプ

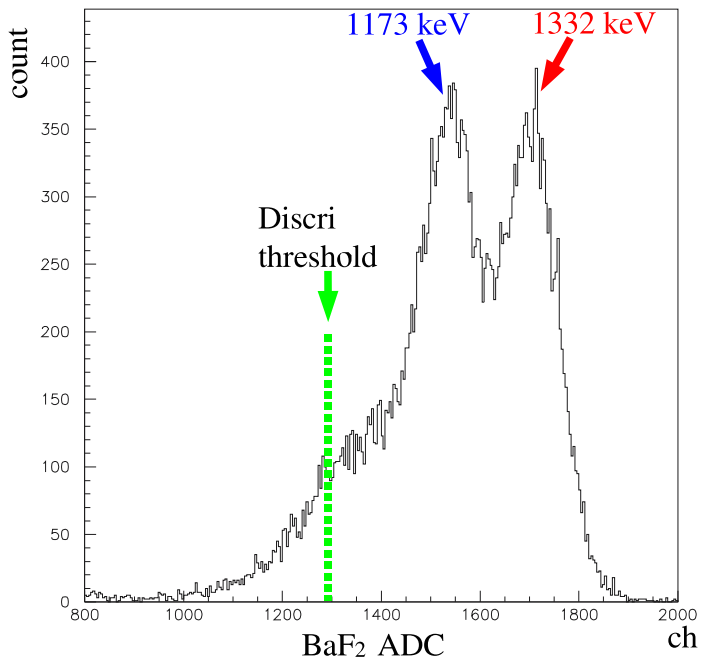


Figure 4.7: $BaF_2$ の ADC スペクトル

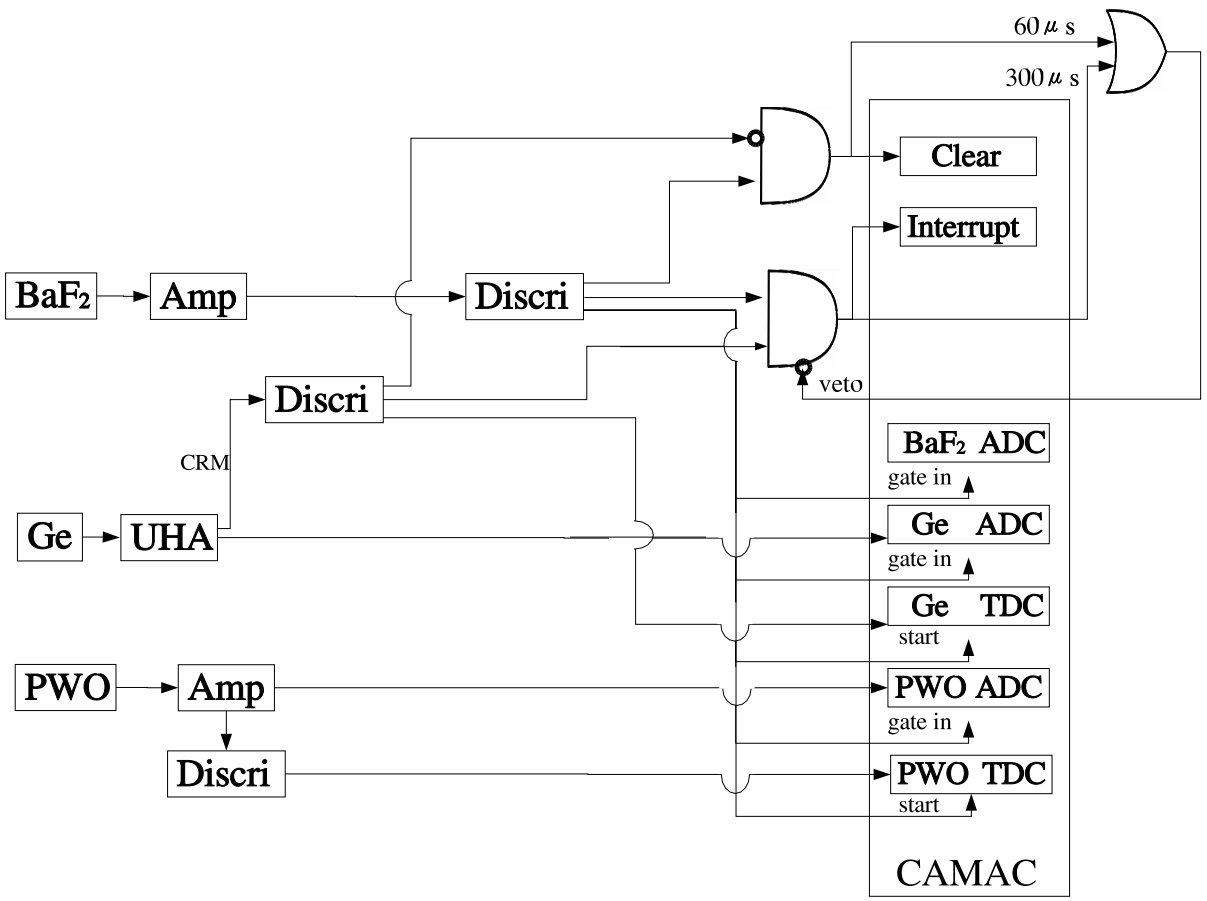


Figure 4.8: コンプトンサプレッションテスト 回路図

レッサーとして BGO に及ばないということがわかった。

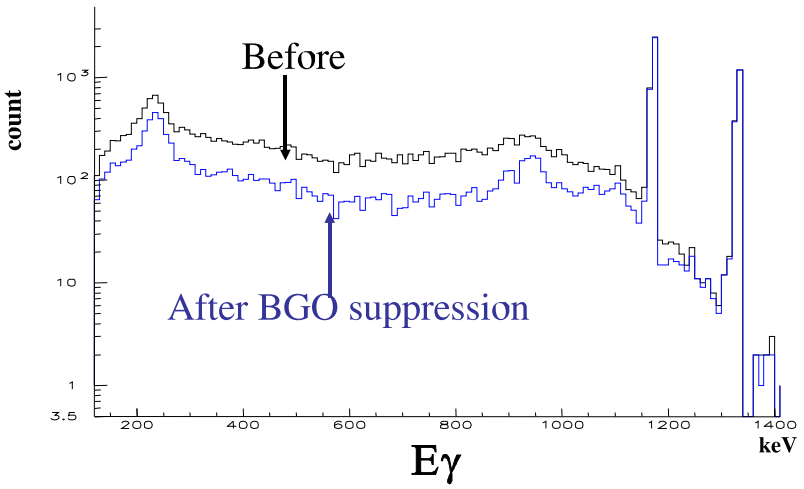


Figure 4.9: コンプトンサプレッションテストにおける BGO サプレッション前後の Ge 検出器のエネルギースペクトル

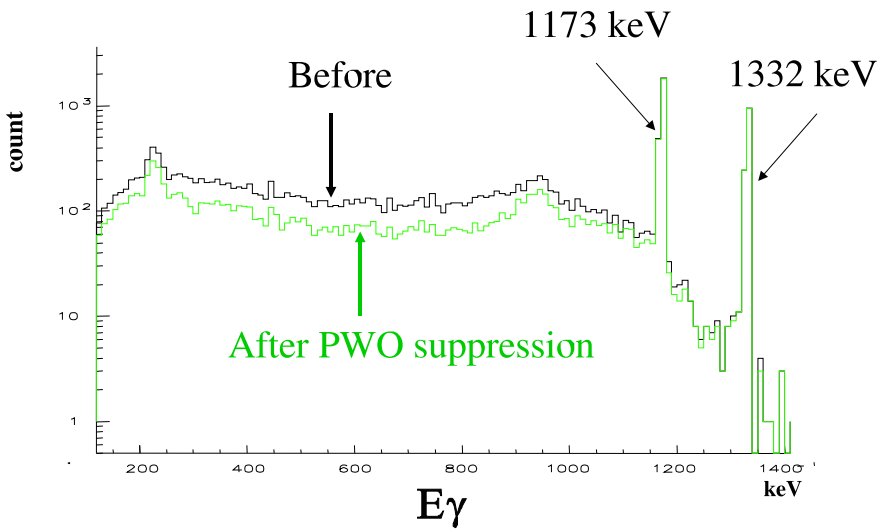


Figure 4.10: コンプトンサプレッションテストにおける PWO サプレッション前後の Ge 検出器のエネルギースペクトル

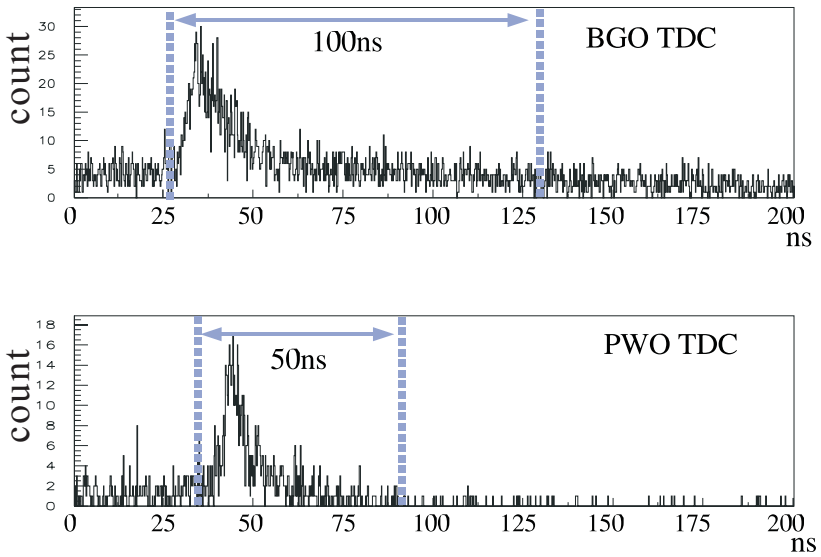


Figure 4.11: BGO および PWO の TDC スペクトル

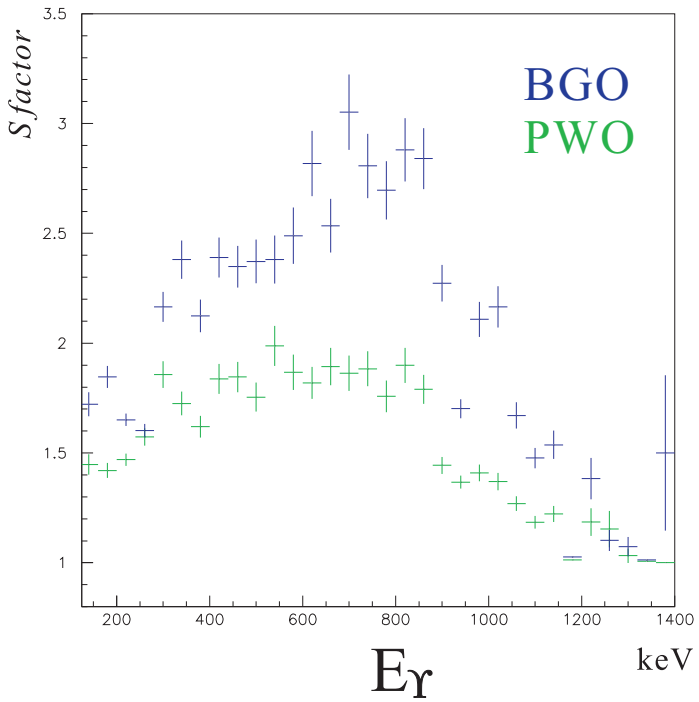


Figure 4.12: 低エネルギー領域におけるサプレッションファクター 青：BGO、緑：PWO

### 4.1.5 考察

今回のテストで、PWO サプレッサーのコンプトンサプレッサーとしての性能が、BGO におよばないというという結果になった。このことは、Ge 検出器の各エネルギー領域に対するサプレッションファクターを表した Figure 4.12 から明らかである。さらにコンプトン連続部分に対する、サプレッションファクターの分布の様子に違いがあることがわかる。BGO のサプレッションファクター (以下 $S_{BGO}$) は Figure 4.12 において、$E_\gamma$ とともにおよそ 2.4 から 2.9 まで増加しているが、PWO のサプレッションファクター (以下 $S_{PWO}$) についてはほぼ一定で ~ 1.6 の値になっている。このようなサプレッションファクターの分布の違いから、$S_{PWO} < S_{BGO}$ となっている原因について考察する。

コンプトン散乱における、反跳電子の運動エネルギー $T_e$(Ge 検出器で検出されるエネルギー) は、入射光子のエネルギー $k$ と散乱光子の散乱角 $\theta$ を用いて

$$T_e = \frac{k^2(1 - cos\theta)}{m_e c^2 + k(1 - cos\theta)} \tag{4.1}$$

とあらわすことができ、

$$cos\theta = 1 - \frac{T_e m_e c^2}{k(k - T_e)} \tag{4.2}$$

となる。そこで、これらの関係式を用いて、$S_{BGO}$ が最大になっている 600 ~ 800 keV のエネルギー領域に対応するコンプトン散乱角を調べた。

Figure 4.13 のように $BaF_2$ の ADC スペクトルで 1332 keV のγ 線を選ぶことで、1173 keV のγ 線が Ge 検出器に入射したイベントを選ぶことができる。$BaF_2$ の ADC スペクトルで 1332 keV のγ 線を選ぶ際に、ピーク全体を選択しなかったのは、このピークには 1173 keV のピークの裾が浸みだしており、できるだけ $BaF_2$ に 1173 keV γ 線がヒットしたイベントを選ばないようにするためである。Figure 4.14 は、Ge 検出器に 1173 keV のγ 線が入射したイベントを選んだときの、BGO サプレッション前後の Ge 検出器の ADC スペクトルである。

1173 keV のγ 線を選んだとき、BGO サプレッションされたイベントについて (4.2) 式からコンプトン散乱角を計算し、横軸を散乱角 $\theta$、縦軸をイベント数としてグラフにしたのが Figure 4.15 である。色を付けて示したイベントは、サプレッションファクターが最大になっている 600 ~ 800 keV のイベントに対応しており、サプレッションファクターが最大になっているのは、コンプトン散乱角 70 ~ 100 ° のイベントであることがわかる。

コンプトン散乱角が 70 ~ 100 ° のときに良いサプレッション効果を得ることは、BGO サプレッサーが Ge 結晶を取り囲むジオメトリー (Figure 4.16) と、コンプトンγ 線のエネルギーに関係している。γ 線が前方および後方に散乱された場合 BGO に当たらない確率が高いが、90 ° に近い角度で散乱されれば BGO で検出できる確率は高まる。またコンプトンγ 線のエネルギー $E_c$ は、

$$E_c = k - T_e \tag{4.3}$$

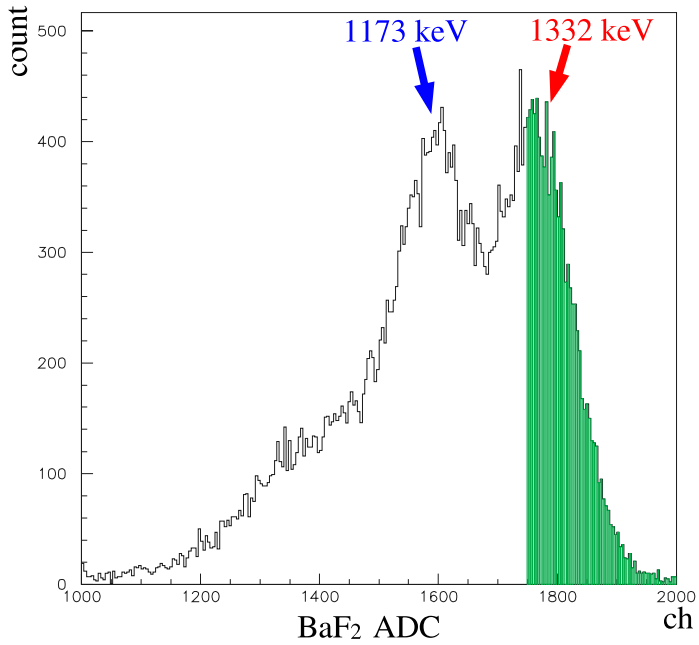


Figure 4.13: $BaF_2$ カウンターの ADC スペクトルで $BaF_2$ に 1332 keV のγ 線が入射したイベントを選択する

であり、$T_e$ は散乱角 $\theta$ に対して単調増加であるから、$E_c$ はは散乱角 $\theta$ が大きくなると減少していく。γ 線のエネルギーが低くなれば、γ 線吸収率も高くなり高いサプレッション効果を得られる。

PWO サプレッサーも BGO サプレッサーと同様に、前方および後方に散乱されたγ線を検出する確率が低い (Figure 4.17) ため、90 ° に近い角度で散乱されたコンプトン事象に対するサプレッションファクターは他のコンプトン事象より大きくなっているはずである。しかし、Figure 4.12 において、このようなサプレッションファクターの差が PWO ではみられない。

このことから、$S_{PWO}$ がほぼ一定の値になっているのは、PWO 検出器の発光量が少ないため低エネルギーのγ 線を検出できず、90 ° に近い角度で散乱されたコンプトン事象に対するサプレッション効果が低くなっているためと考えられる。

Table 4.1 は、1173 keV のγ 線が Ge 検出器で散乱角 30 °、64.2 °、90.0 ° にコンプトン散乱したとき、PWO 検出器がどのような応答の違いを見せるかまとめたものである。64.2 ° を選んだ理由は、このときのコンプトンγ 線のエネルギーが 511 keV であり、Section 2.3.3 で本研究に用いた PWO 検出器の 511 keV γ 線に対する平均光電子数を測定していたからである。

Table 4.1 の平均の光電子数は、Section 2.3.3 で得た 2.53 photo-electron / 511 keV に、光電面減少の効果 (77 %、Section 4.1.2 参照) と、γ 線のエネルギーによる効果 (平

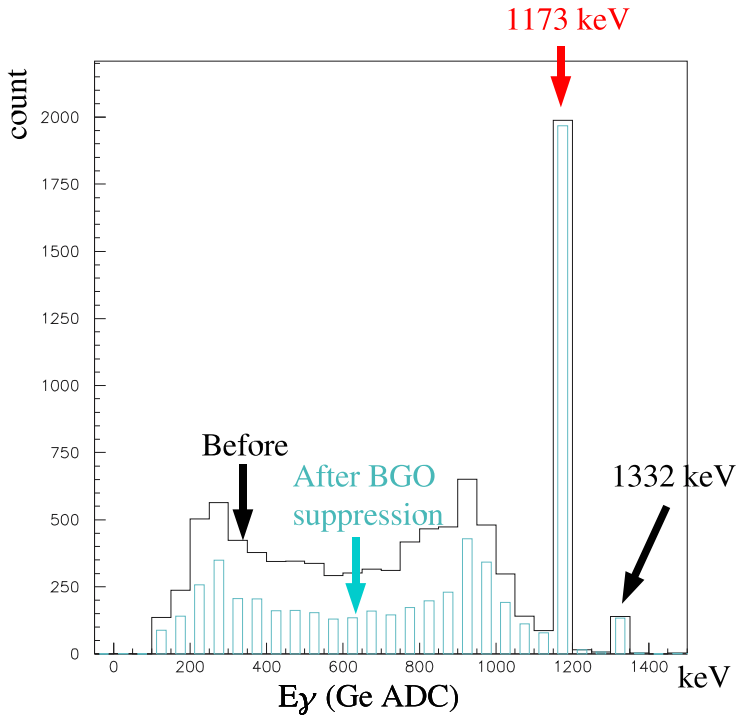


Figure 4.14: Ge 検出器に 1173 keV のγ 線が入射したイベントを選んだときの、BGO サプレッション前後の Ge 検出器の ADC スペクトル

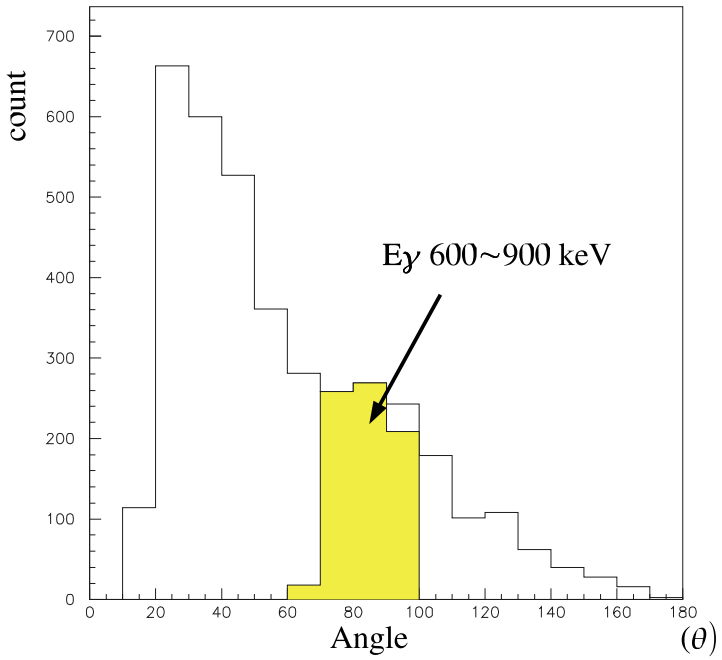


Figure 4.15: Ge 検出器に 1173 keV のγ 線が入射したときに、サプレッションされたイベント数をコンプトン散乱角を横軸として描いたグラフ (黄色く色を付けた領域はサプレッションファクターが最大になっている領域で、散乱角 90 ° 付近であることがわかる。

均光電子数はγ 線のエネルギーに対して、線形性をもつので、356 keV の場合 356 / 511、897 keV の場合 897 / 511 をかけた) から計算した値である。

光電子数がポアソン分布に従うとすると、平均光電子数が $N_{ave}$ のとき光電子数が $x$ である確率は

$$f(x) = \frac{(N_{ave})^x \cdot exp(-N_{ave})}{x!} \tag{4.4}$$

とあらわせて、光電子数が 0 になる確率 (PWO 結晶自体は発光しているが光電子増倍管で光電効果を起こさない確率)f(0) は、

$$f(0) = exp(-N_{ave}) \tag{4.5}$$

となる。Table 4.1 の 1 - f(0) は、このようにしてもとめた値であり、PWO 結晶が発光したとき PWO 検出器で信号を検出できる確率を表している。ここで、GEANT4 によるシミュレーションにより、$E_c$ (keV) のγ 線に対する PWO 結晶 (厚さ 2 cm) のγ 線吸収率 $\mu(E_c)$ を計算し、これと *1 - f(0)* の積を、

$$P(E_c) = \mu(E_c) \cdot (1 - f(0)) \tag{4.6}$$

と定義する。ただし、Ge 検出器のエネルギースペクトルに現れる $E_\gamma$ と区別するため、コンプトン散乱したγ 線を $E_c$ と表すこととする。

いくつかの散乱角について $P(E_c)$ を計算すると、Table 4.1 のようになる。

表のように $\mu(E_c)\cdot$ (1 - f(0)) の値が、散乱角 $\theta$ が大きくなるに従い小さくなるという現象が起こっている。すなわち、PWO 検出器に入射するγ 線のエネルギーが低くなると、γ 線吸収率の増加を打ち消してしまうだけ発光量の減少が起こり、検出効率が低くなっているのである。今回の実験では、PWO サプレッサー実用化のためには、やはりこの発光量の少なさを克服するための改良が必要であることが露呈したといえる。

Table 4.1: 1173 keV γ 線のコンプトン散乱角による PWO 検出器の応答。コンプトンγ 線のエネルギーを $E_c$、反跳電子の運動エネルギーを $T_e$、$E_c$ keV のγ 線に対する PWO の平均光電子数を $N_{ave}$、さらにその平均光電子数がポアソン分布に従うことから計算される光電子数が 0 になる確率を f(0)、$E_c$ keV γ 線に対する 2 cm の PWO でのγ 線吸収率を $\mu(E_c)$、$\mu(E_c) \cdot (1 - f(0))$ の値を P($E_c$) とする。

| 散乱角 $\theta$ | $E_c$ [keV] | $T_e$ [keV] | $N_{ave}$ | *1 - f(0)* | $\mu(E_c)$ | *P($E_c$)* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $\theta = 30.0$ | 897 | 279 | 3.42 | 0.97 | 0.80 | 0.77 |
| $\theta = 64.2$ | 511 | 662 | 1.95 | 0.86 | 0.88 | 0.75 |
| $\theta = 90.0$ | 356 | 817 | 1.36 | 0.74 | 0.97 | 0.72 |

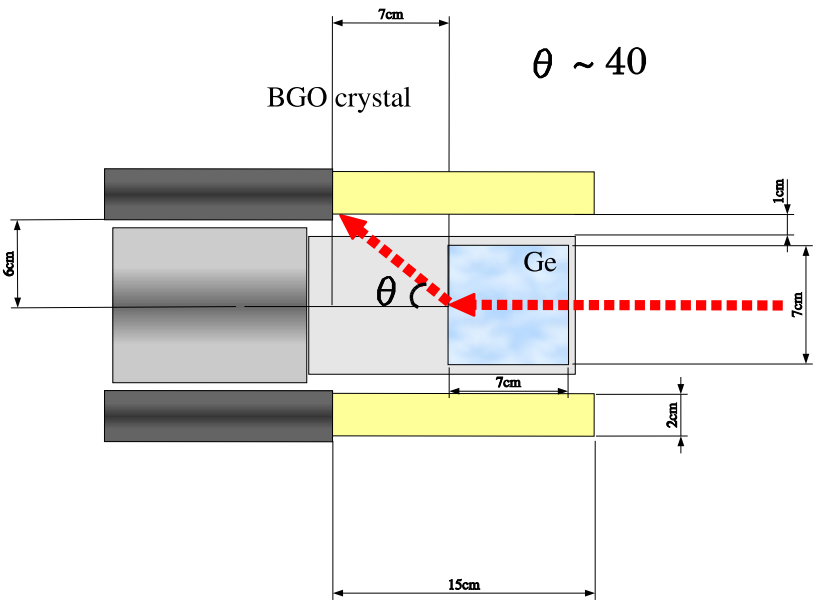


Figure 4.16: BGO サプレッションにおけるジオメトリーの影響

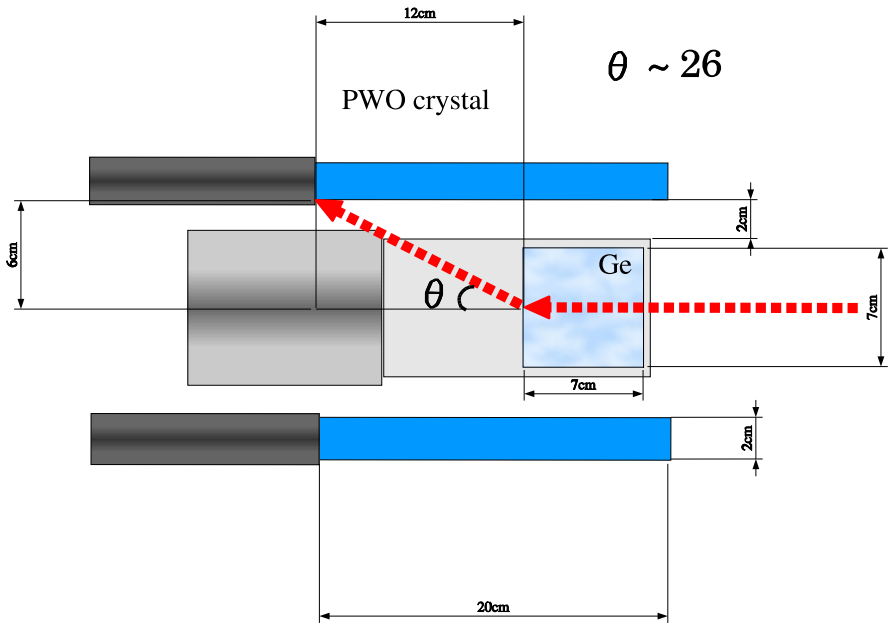


Figure 4.17: PWO サプレッションにおけるジオメトリーの影響

## 4.2 冷却による PWO の発光量変化

### 4.2.1 PWO 結晶の温度特性

PWO の発光量を増やす努力は、様々な方面で行われている。特に、PWO の結晶自体にイットリウム・モリブデン・カドミウム・アンチモンなどをドープすることで、結晶の発光量を増やす研究がなされており、一定の成果を挙げている [7][3][4][5][6]。しかし、 1 MeV 以下の領域でのγ 線検出器として実用化される程の劇的な改良までは至っておらず、また、このようにドーピングを施した PWO 結晶を Hyperball のバックグラウンドサプレッサーとして用いると、PWO のコスト面での有利性 (Section 2.2.5 参照) を失ってしまう可能性がある。

無機シンチレータの一般的な性質として、冷却すると蛍光発光量が増加することが知られている [14]。PWO を冷却することによる、発光量および崩壊定数への影響についても調べられており [15]、発光量の増加と崩壊定数が大きくなる現象について研究されている。そこで、実際に PWO の結晶を冷却し、温度と蛍光発光量の関係を調べた。

### 4.2.2 PWO 検出器における光電子数の温度依存性

#### 発光量測定のセットアップ

PWO 結晶を冷却することによる発光量の変化を調べるために、Figure 4.18 のように冷凍庫または冷蔵庫のなかに PWO 検出器 1 個を入れてテストを行った。PWO 検出器は、Section 2.3.3 で発光量測定を行ったときと同じもの (光電子増倍管の光電面が PWO 結晶面を完全に覆った状態のもの) を用いた。実験のセットアップは Figure 2.8 の PWO 検出器を冷凍庫または冷蔵庫のなかに入れた形になっている。冷凍庫 (冷蔵庫) の温度を変えて発光量変化に伴う PWO 検出器の光電子数の変化を調べた。

測定には $^{22}$Na 線源を使用し、180 ° の角度相関をもって放出される 2 本の 511 keV γ 線のうち、片方が $BaF_2$ に入り、もう一方が PWO に入ったイベントを選んで PWO 検出器の ADC スペクトルを測定した。PWO 結晶の表面に温度計を張り付け、冷凍庫 (冷蔵庫) の運転強度を調整して、10 ℃ (冷蔵庫)、0 ℃ (冷凍庫)、-20 ℃ (冷凍庫) について測定を行い、室温 (+20 ℃) との比較を行った。

#### 光電子数の温度依存性

測定の結果得られた PWO 検出器の ADC スペクトルを、横軸を光電子数としてプロットし、(2.1) 式を用いてフィットした結果を Figure 4.19 に示す。さらにフィッティングの結果えられた、511 keV のγ 線に対する平均の光電子数を温度の関数として、Figure 4.20 に示す。

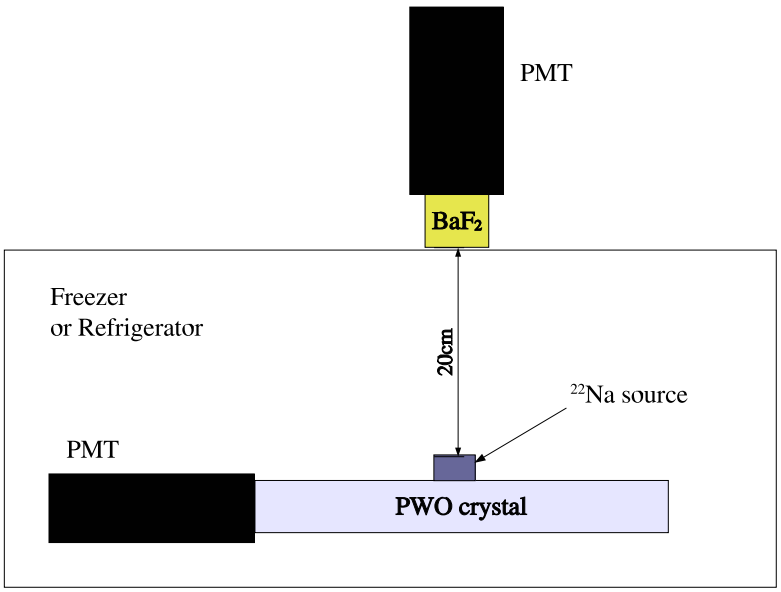


Figure 4.18: 光電子数測定実験のセットップ

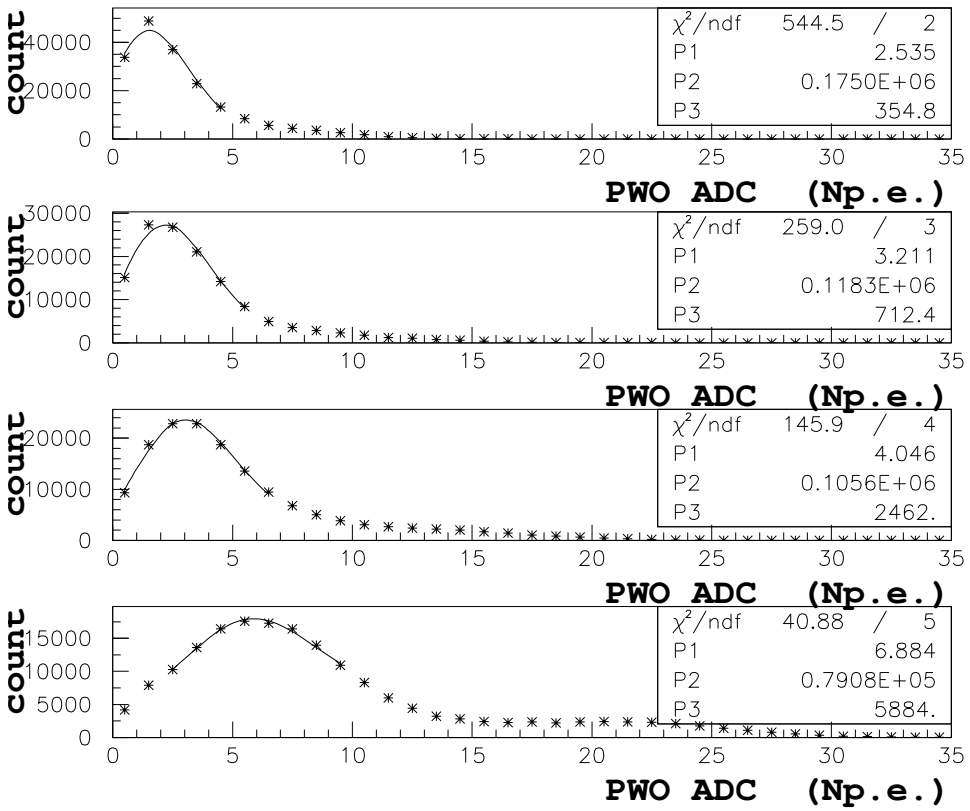


Figure 4.19: PWO 検出器で検出された光電子数の冷却による増加 (511 keV γ 線に対しての測定値)。

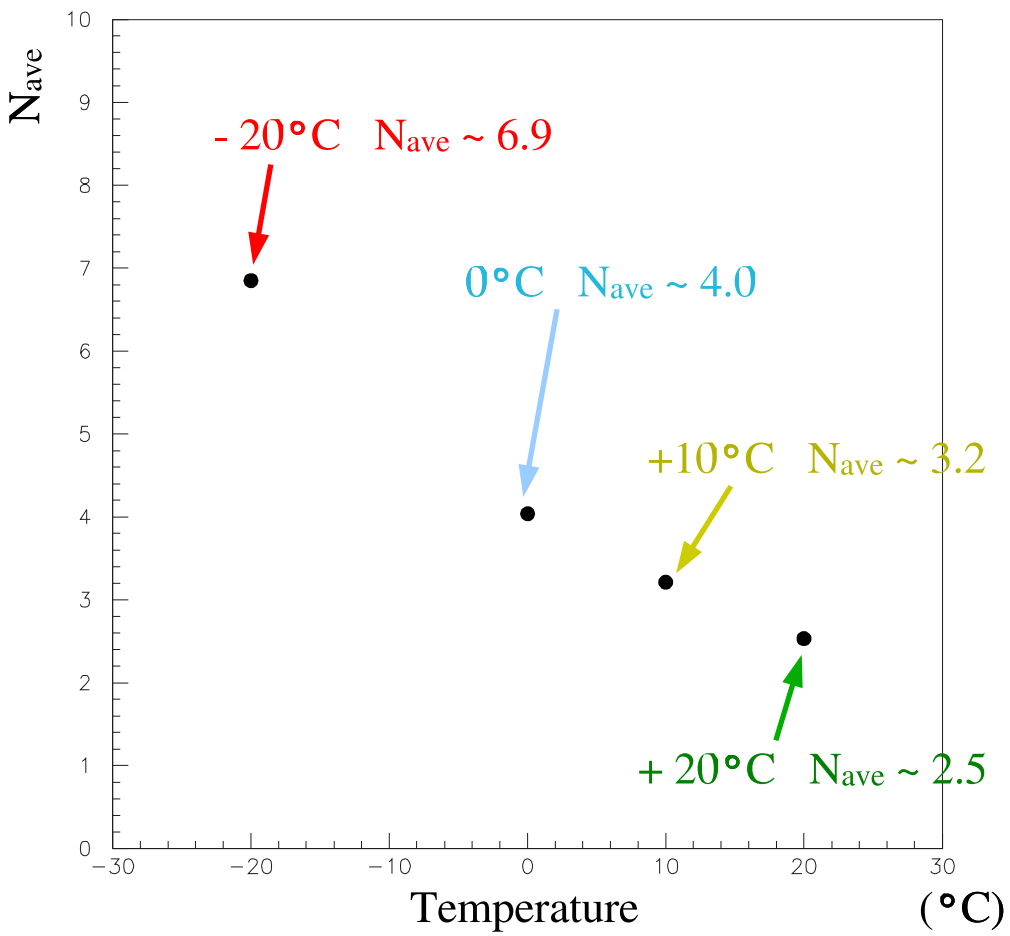


Figure 4.20: 511 keV γ 線に対する PWO 検出器の平均光電子数の温度依存性。

### 4.2.3 考察

実際に PWO 結晶を冷却することで、発光量を増加させられることが確認できた。そこでこの測定結果をもとに、どのくらい冷却して発光量を増やすせば、低エネルギー γ 線に対するサプレッションファクター向上につながるのかを考察する。

まず、測定で得られた 511 keV γ 線に対する平均光電子数から、実際にサプレッサーとして用いる際に光電子増倍管の数を半減させることで、光電面が PWO 結晶を覆う面積が約 77 %になることを考慮した各温度における平均光電子数を求め、Table 4.2 に示す。

ここで、横軸を平均光電子数とし (4.5) 式をプロットすると Figure 4.21 のようになる。グラフ中の点は光電子増倍管を減らしたときの各平均光電子数に対する f(0) の値である。PWO サプレッサーとしてγ 線を検出する際は、γ 線のエネルギーによって平

均光電子数とγ 線吸収率が変化する (Table 4.1 参照)。しかし PWO のγ 線検出効率にとってより重大な寄与を及ぼすのは、$exp(-N_{ave})$ で変化する『光電子数が 0 である確率』f(0) である。サプレッサーとして機能するためには、この『光電子数が 0 である確率』をできるだけ 0 に近づけることで、発光量が少ないという欠点を補うことができる。そういった観点で、Figure 4.21 を見れば、-20 ℃まで冷却した PWO 検出器はただ発光量が増加しているだけでなく、511 keV のγ 線に対する『光電子数が 0 である確率』が 1 %まで抑えられている。

Table 4.1 では、PWO サプレッサーが異なる強度のγ 線に対してどのような応答を示すかをまとめた。そこで Table 4.3 には、1173 MeV γ 線が散乱角 90 ° でコンプトン散乱したときの 356 keV γ 線について、PWO サプレッサーの応答を各温度についてまとめた。散乱角 90 ° でコンプトン散乱したイベントは、サプレッサーをならす確率が最も高いので、Section 4.3.4 でサプレッションファクターの値を概算するのに用いた。

この表からも、0 ℃では f(0) がまだ 10 %程度あるが、-20 ℃まで冷却することにより 2 %まで抑えられることがわかる。光電子数が 0 でない確率に 356 keV γ 線に対する吸収率をかけた値も、-20 ℃冷却で 72 %から 95 %まで向上している。

この値はγ 線が PWO 結晶になんらかの形でエネルギー損失を残たときに、その結果生じた蛍光発光を光電子増倍管で 1 photo-electron 以上の信号として検出できる確率を表している。したがって、この値が 95 %まで向上しているということから、PWO 結晶を冷却することでコンプトンサプレッサーとして機能する可能性が高いといえる。

なお、一般的な PWO 結晶について、− 20 ℃まで冷却すると崩壊定数は 10 ~ 15 ns に変化することが調べられているが、このことがサプレッサーとしての耐高計数率性能に与える影響は十分小さいと考えられる。

Table 4.2: サプレッサーとして用いる際の 511 keV γ 線に対する平均光電子数の温度依存性

| 温度 | 平均光電子数 | 光電子増倍管を減らしたときの平均光電子数 |
|---|---|---|
| 20 ℃ | 2.53 | 1.95 |
| 10 ℃ | 3.21 | 2.47 |
| 0 ℃ | 4.04 | 3.11 |
| -20 ℃ | 6.88 | 5.3 |

## 4.3 冷却した PWO によるサプレッションテスト

### 4.3.1 目的

ここまで、PWO 結晶を-20 ℃まで冷却して用いることでサプレッサーとして機能しうる可能性を議論してきた。そこで、実際に PWO サプレッサーの結晶を冷却してサプレッションファクターの測定を行い、冷却による発光量の増加がサプレッションファクターにどのような変化をもたらすか調べた。

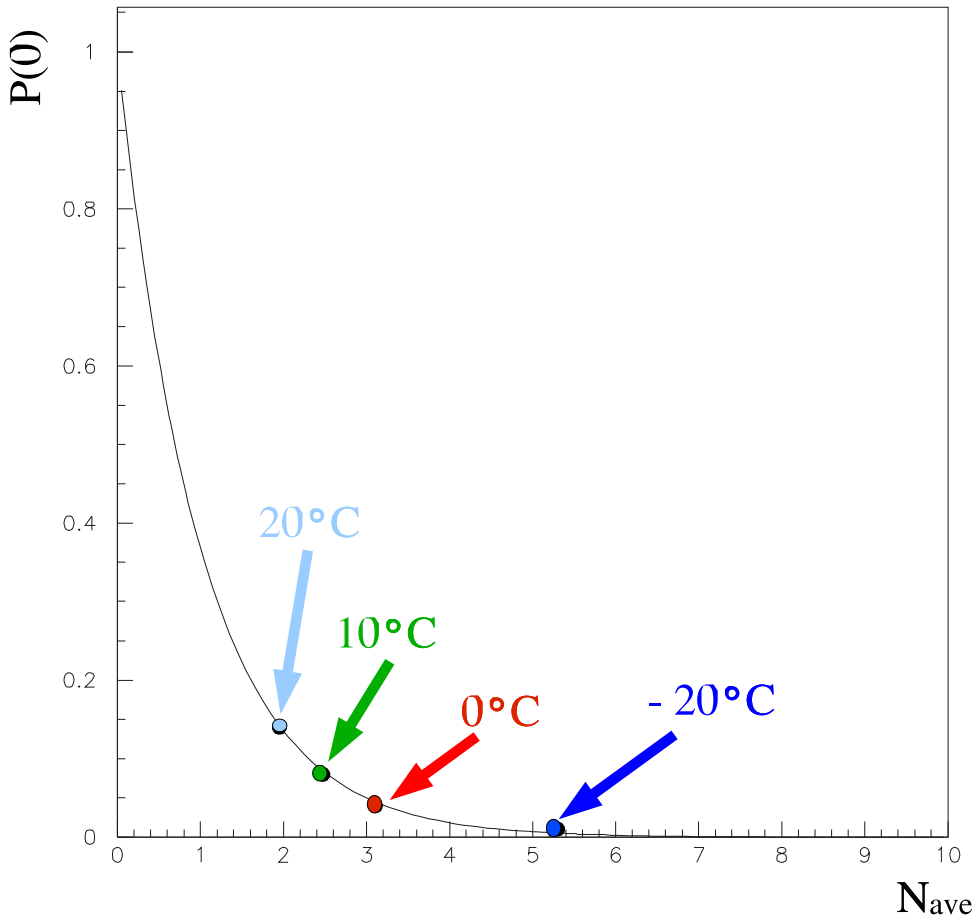


Figure 4.21: 各温度に対して光電子数が 0 である確率 (各温度での平均光電子数はサプレッサーとして用いる場合の光電子増倍管の減少を考慮した値 (77 %) である)

Table 4.3: 356 keV γ 線 (1173 MeV γ 線の散乱角 90 ° でのコンプトンγ 線) に対する PWO サプレッサー応答の温度依存性

| 温度 | 平均光電子数 | f(0) | 1 - f(0) | $(1-f(0))\cdot\gamma$ 線吸収率 (0.97) |
|---|---|---|---|---|
| 20 ℃ | 1.36 | 0.26 | 0.74 | 0.72 |
| 10 ℃ | 1.72 | 0.18 | 0.82 | 0.8 |
| 0 ℃ | 2.17 | 0.11 | 0.89 | 0.86 |
| -20 ℃ | 3.69 | 0.02 | 0.98 | 0.95 |

### 4.3.2 セットアップ

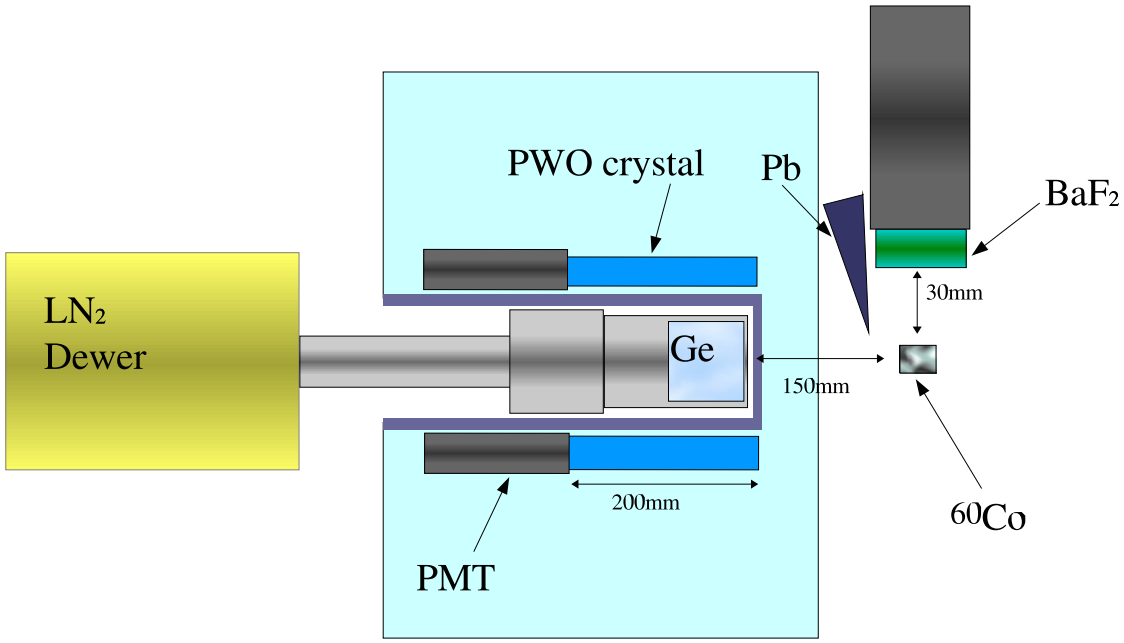


Figure 4.22: 冷却した PWO によるコンプトンサプレッションテスト セットアップ

実験のセットアップは、PWO 結晶を冷却するための保冷箱の設置以外は、前のコンプトンサプレッションテストと同じである (Section 4.1.3 参照)。Figure 4.21 に今回の実験のセットアップを示す。図中の水色で表した部分が保冷箱の内部にあたり、 -20 ℃に保った領域である。保冷箱として、厚さ 30mm のスタイロフォーム (住宅断熱材として用いられる発砲スチロール) を用いて 500 × 750 × 500mm の直方体状の箱を製作した。材質を選ぶ際は、十分な断熱効果とできるだけ物質量を抑える (バックグラウンドを作る原因になるため) という要請からスタイロフォームに決定した。そしてさらに、Ge 検出器のまわりを薄いスタイロフォーム (2 ~ 3mm) で仕切り、Ge 検出器を保冷箱の外になるようにし、Ge 検出器を冷却しないようにした。

冷却方法としては、液体窒素を張った金属容器を保冷箱の内部に置き、気化した窒素ガスの冷気で保冷庫内を冷却する方法をとった。冷却に液体窒素を用いた主な理由はふたつある。ひとつは、製作した保冷箱中に液体窒素を張った金属容器をおくことで、内部の温度が-20 ℃前後に保たれることが確認できたことである。もうひとつは、実際の Hyperball 実験では、Ge 検出器が多量の液体窒素を必要とするため、専用の液体窒素供給装置があり、比較的簡単に流用可能だからである。

結晶の温度は PWO 結晶表面に取り付けた熱電対でモニターした。液体窒素を張った金属容器を保冷箱内に置いてから約 5 時間後に、-20 ℃まで温度が下がったが、それまでは温度が上昇しだしたら保冷箱の蓋 (上部) をあけて液体窒素を足していった。保冷箱内部が-20 ℃まで冷却されると、測定中 (約 4 時間) は液体窒素の補給なしで約-20 ℃を保つことができた。

このようにして、PWO の結晶を冷却した状態でサプレッションファクターの測定を行った。

### 4.3.3 結果

Figure 4.24 は、上が室温 (+20 ℃)、下が冷却 (-20 ℃) したときのコンプトンサプレッションテストにおける PWO 検出器の ADC スペクトルである。PWO 結晶を冷却した以外に測定条件の違いは無く、同じ組成のγ 線イベントに対して PWO 検出器の光電子数が増加していることが確認できる。

BGO サプレッションおよび冷却した PWO によるサプレッション前後の Ge 検出器のエネルギースペクトルを Figure 4.25、Figure 4.26 に示す。冷却による崩壊定数の変化が PWO の TDC スペクトルに与える影響はほとんど無く、TDC カットゲートはこれまでと同じ 50 ns とした。

冷却した PWO サプレッサーによるサプレッションファクターを 40 keV ごとに求め、グラフにすると Figure 4.23 の赤で示すようになった。青および緑で表したのは、Figure 4.12 と同じで、それぞれ BGO、PWO(室温) でのサプレッションファクターである。なお、サプレッションを行う際のサプレッサーの TDC 選択範囲は、冷却しない時と同様に 50 ns とした。

− 20 ℃まで PWO 結晶を冷却することで、サプレッションファクターの値が大幅に向上し、BGO と同様にサプレッション効果の $E\gamma$ 依存性が見られ、PWO サプレッサーは BGO と同程度のコンプトンサプレッション能力をもつことがわかった。

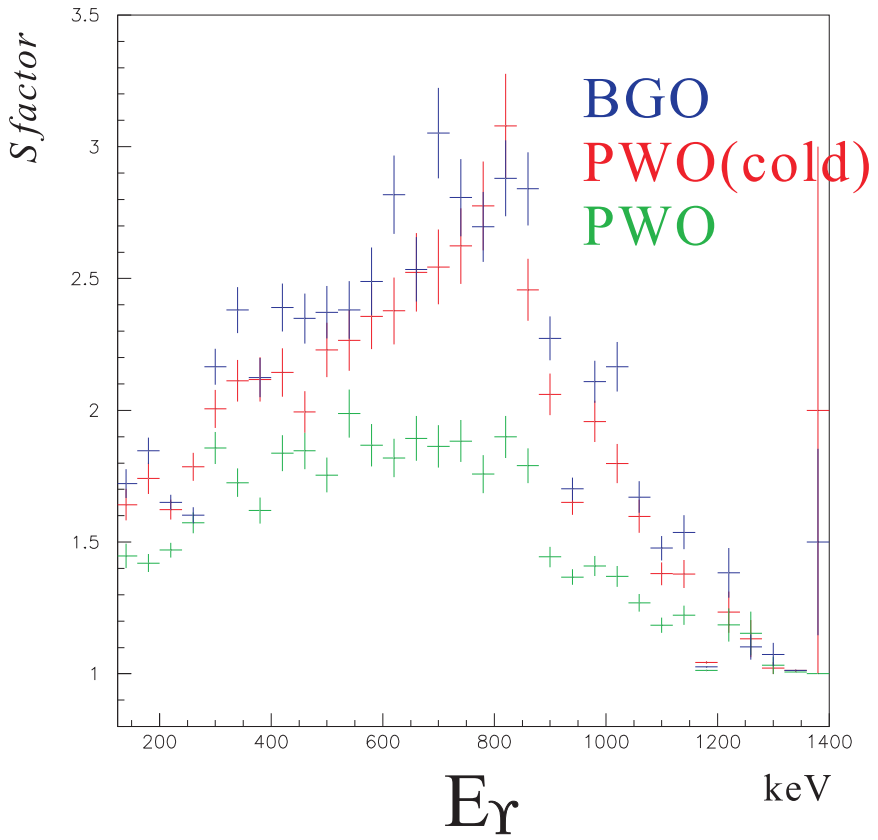


Figure 4.23: 低エネルギー領域におけるサプレッションファクター (青 : BGO、赤 : 冷却した PWO(-20 ℃)、緑 : PWO(室温 +20 ℃))

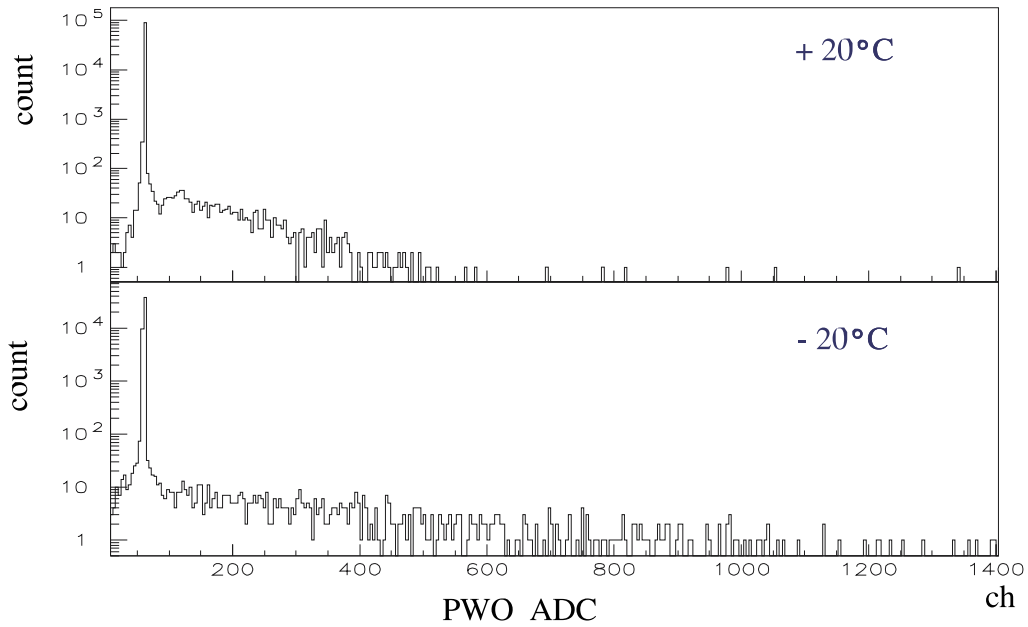


Figure 4.24: コンプトンサプレッションテストでの、結晶冷却による PWO 検出器の ADC スペクトルの変化

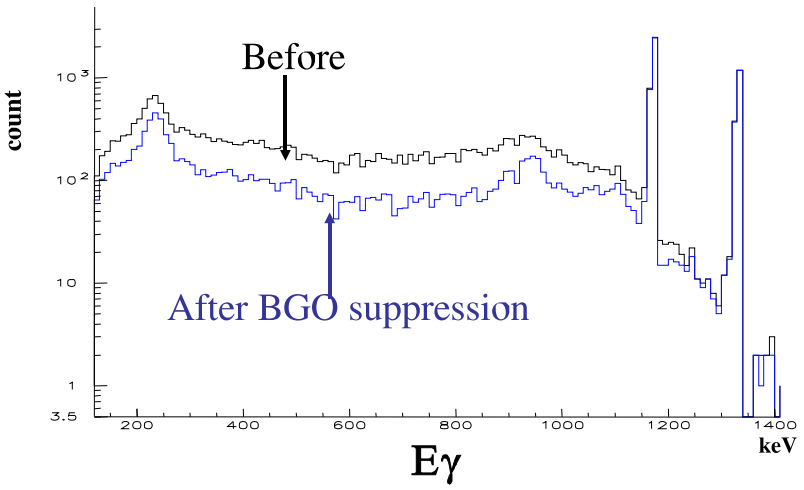


Figure 4.25: BGO によるサプレッション前後の Ge 検出器のエネルギースペクトル

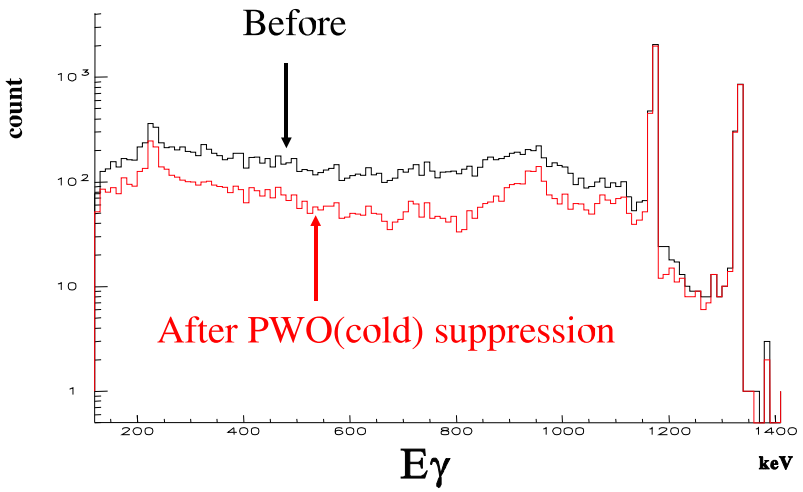


Figure 4.26: 冷却した PWO によるサプレッション前後の Ge 検出器のエネルギースペクトル

### 4.3.4 BGO および PWO サプレッサーの TDC カットゲート依存性

BGO および PWO(cold) について、TDC カットゲート幅を変えたときのサプレッションファクターの変化を Figure 4.27、Figure 4.28 に示す。また、それぞれの場合について 1332 keV のピークに対するオーバーサプレッションの割合を Figure 4.29 に示す。これらのデータからは PWO については、TDC カットゲートを 50 ns 以上とってもサプレッションファクターの大きな向上はなく、オーバーサプレッションの割合だけが増加することがわかる。BGO では TDC カットゲートを広げることでサプレッションファクターは PWO 以上に向上しているが、それに伴いオーバーサプレッションが劇的に増加しているわけではない。

今回のコンプトンサプレッションテストのデータから、実際のハイパー核実験におけるオーバーサプレッションを直接議論する事は難しいが、PWO ではサプレッションを行う際の TDC カットゲートによる影響が少ないことがわかった。

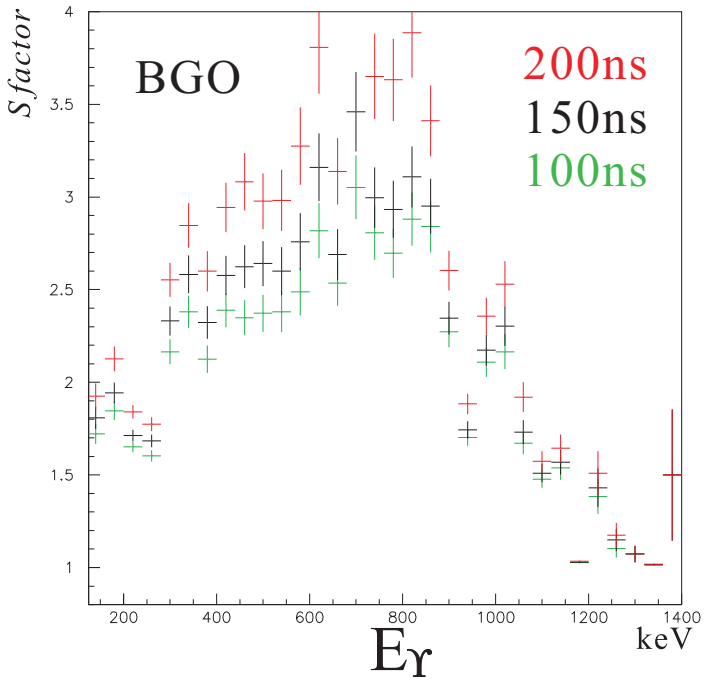


Figure 4.27: BGO サプレッサーの TDC 選択範囲によるサプレッションファクターの変化 (緑:100 ns、水色:150 ns、紫:200 ns)

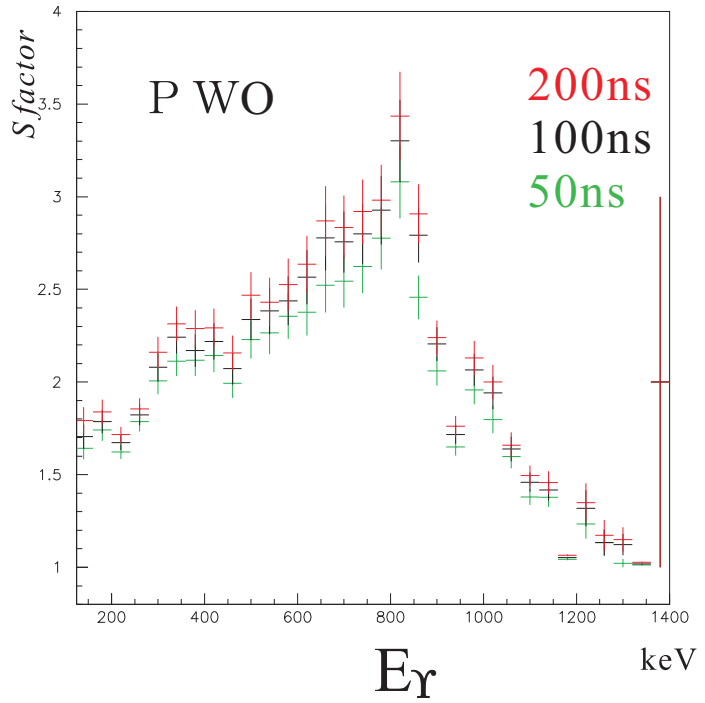


Figure 4.28: PWO サプレッサーの TDC 選択範囲によるサプレッションファクターの変化 (緑:50 ns、水色:100 ns、紫:200 ns)

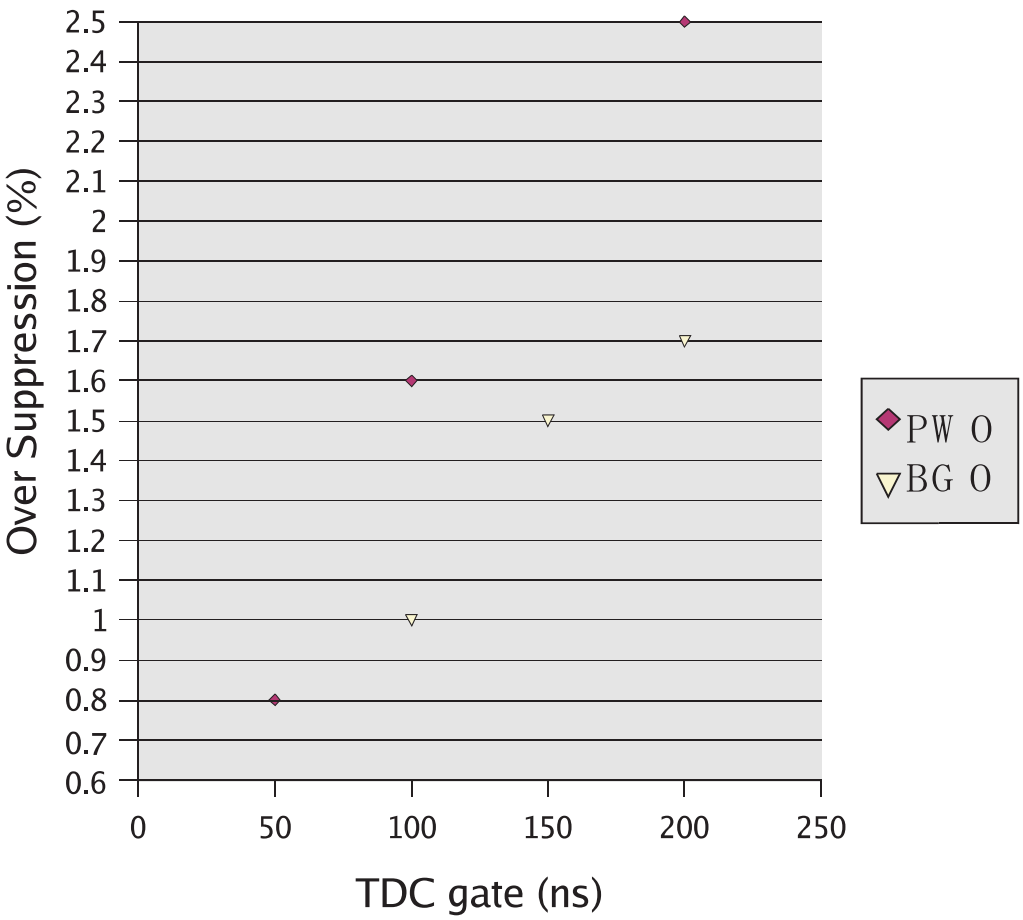


Figure 4.29: オーバーサプレッションの TDC ゲート幅依存性

# Chapter 5

# まとめと今後の課題

## 5.1 PWO サプレッサーの性能評価

高エネルギーのバックグラウンドに対するサプレッションテスト (T536) の結果、高エネルギーのバックグラウンドサプレッサーとして十分なサプレッションこうかを得られることが確認できた。テストした PWO サプレッサーでは、発光量が少ないことによる影響を考慮し、各結晶に 1 個の光電子増倍管を取り付けたが、このまま Hyperball に組み込むことは空間的な要請により不可能である。しかし、その後の研究 (Chapter 4) で、結晶を冷却することで PWO 結晶の発光量は ~ 1 MeV の領域においても克服できることが明らかになった。それにより結晶 2 個につき光電子増倍管を 1 個に減らすことができ、光電子増倍管の干渉という問題をクリアし、PWO 結晶を Figure 3.1 のような隙間の多い配置にする必要性がなくなった。

コンプトンサプレッサーとしての性能は、そのままの状態では低エネルギーのγ 線に対しての検出効率が低いため、サプレッション能力は低かった。しかし、PWO 結晶を− 20 ℃まで冷却することで発光量を増やし、低エネルギーγ 線に対する検出効率をあげることができ、サプレッサーとして BGO と同程度のサプレッション効果を得られることがわかった。

## 5.2 今後の課題

本研究を通じて、BGO に代わるサプレッサーとして PWO にその可能性が十分あるということがわかった。今後、さらに実用化に向けて取り組むべき事柄について述べる。

発光量を増やすための方法として結晶を冷却することで、サプレッサーとして機能できるだけの検出効率を得られたわけだが、補助的に検出効率を上げるための改良点がいくつかある。今回のコンプトンサプレッションテストでは Figure 4.2 のように 4 つまたは 6 つの PWO 結晶を 1 セットとして遮光した。しかし、各 PWO 結晶ごとにフルオロトランスシート (反射材) およびアルミ箔を巻いたうえで 4 つまたは 6 つの結晶をひとまとめにしたため、各結晶間の隙間が 2 ~ 3 mm 程度あったと考えられる。この隙間はできるだけ小さくするべきであるが、反射材を個々に巻くべきかそれとも数個ま

とめて巻くべきかということを、光量と隙間の両面から調べてみる必要がある。また、今回光電子増倍管と結晶の接着のため用いた、オプティカルグリースは接着面の不安定さとグリース成分の劣化という問題があるため、PWO の高い屈折率 (n=2.2) を考慮した新たな接着法、あるいはライトガイドの設計、テストが求められる。

また、冷却以外に低エネルギーγ 線検出効率を向上させる手段として、量子効率が約 80 %という高さをもつアバランシェフォトダイオード (APD) を光電子増倍管のかわりに用いるということも検討の余地がある。さらに、PWO の結晶自体にイットリウム・モリブデン・カドミウム・アンチモンなどを混合することで、結晶の発光量を増やす研究がなされており、ドーピングを施した結晶を手に入れ、その結晶のサプレッサーとしての性能をテストすることも考えられる。

Hyperball において、PWO 結晶を冷却して使用するためには、冷却システムの構築が必要である。その際は、Ge 検出器を冷却しないように、断熱しなければならない。PWO サプレッサーの冷却テストは当初、Ge 検出器のプリアンプ等の結露によるショートに対する懸念から、セットアップ全体 (Ge 検出器を含む) を冷却していたが、結露ではなく冷却による O リング等の縮みによる真空の悪化が原因と考えられる Ge 検出器のトラブルが発生した。そこで、Figure 4.22 のように、Ge 検出器の表面を断熱材で覆って、できるだけ Ge 検出器のプリアンプ付近を冷却してしまわぬよう配慮した。プリアンプ付近に温度計をつけて温度変化をモニターしたが、保冷箱内部を-20 ℃に保ったとき、Ge 検出器の表面は-5 ℃程度でありトラブルは起こらなかった。しかし、Ge 検出器の低温耐性を考慮し、PWO を冷却しかつ Ge 検出器を冷やさないような冷却システムを設計しなければならない。

冷却方法としては、本件究で行ったように液体窒素を使用することが現実的である。Hyperball 実験では、Ge 検出器が大量の液体窒素を必要とするため、液体窒素供給装置をそなえているからである。そこで、現在の BGO サプレッサーのハウジングを中空構造にし内部を液体窒素を満たし、さらにハウジングの外壁には断熱効果の高い物質を用いることで Ge 結晶を冷却することなく、PWO を冷却しサプレッサーとして実用化することができると考えられる。

# APPENDIX

## PWO シンチレータ、BSO シンチレータによるπ ・p 弁別効果

### T554 実験の目的

2004 年に KEK T1 ビームラインにおいて行われた T554 実験で、PWO シンチレータのサプレッサーとしての性能テストとは別の目的でテスト実験を行った。BSO シンチレータなどは、複数の発光機構を持つ事から粒子識別が可能であることが知られているが、T554 実験では PWO シンチレータでπ ・p の弁別が可能であるか否かを調べた。

### T554 実験のセットアップ

Figure 5.1 に T554 実験のセットアップを示す。PWO および BSO はビームの下流に配置した。ビームは運動量 0.6 GeV ~ 1.35 GeV の数点で測定を行い、π ・p の弁別性能を調べた。

π ・p の弁別性能を調べるために、BSO および PWO の ADC ゲートをそれぞれ、信号の高さが立ち下がりの約 8 割になるまでの狭いゲートと、全信号幅の広いゲートの 2 種類用意した。また、粒子識別は Figure 5.1 のプラスチックシンチレータの TOF で行った。

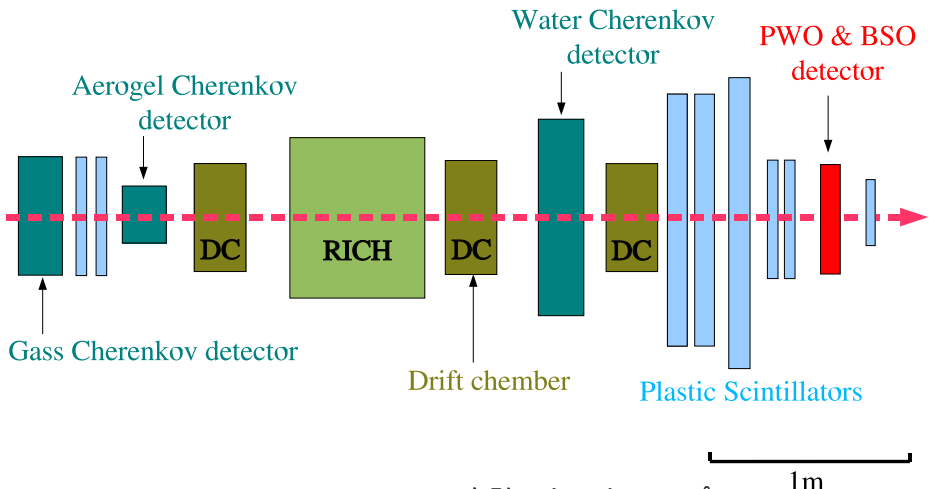


Figure 5.1: T554 実験のセットアップ

### 5.2.1 結果

Figure 5.2、Figure 5.3 は、T554 実験で得られた Wide Gate(横軸) と Narrow Gate(縦軸) の相関である。赤がπ 、青と水色はそれぞれ結晶を通り抜けた p、結晶で止まった p である。

BSO ではπ と p がはっきり分離できていることが確認できる。さらに PWO でも、運動量が低いビームに対しては、p のエネルギー損失が大きくなるためπ と p が分かれているのがわかった。

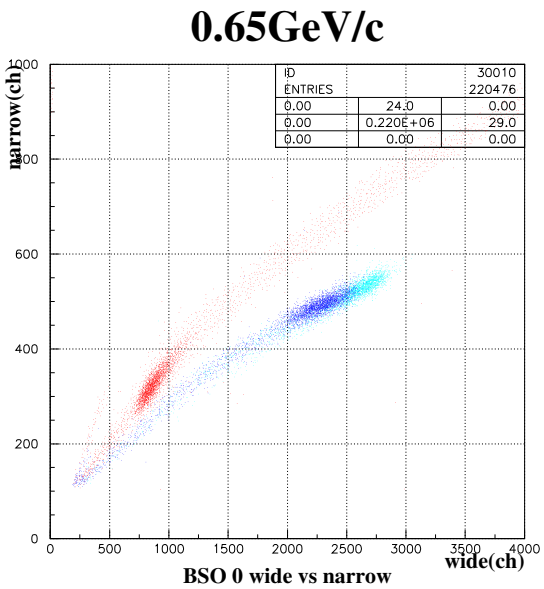


Figure 5.2: BSO によるπ ・p 弁別効果 ; Wide Gate(横軸) vs Narrow Gate(縦軸)。赤 ; π 、 青 ; p(thrugh)、水色 ; p(stop)

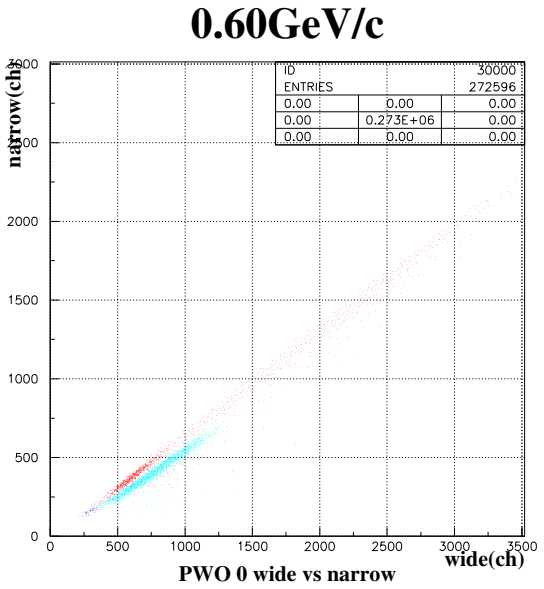


Figure 5.3: PWO によるπ ・p 弁別効果 ; Wide Gate(横軸) vs Narrow Gate(縦軸) 赤 ; π 、 青 ; p(thrugh)、水色 ; p(stop)

Figure 5.4 は、PWO によるπ ・p 弁別効果のビーム運動量による変化であり、紫は重陽子である。

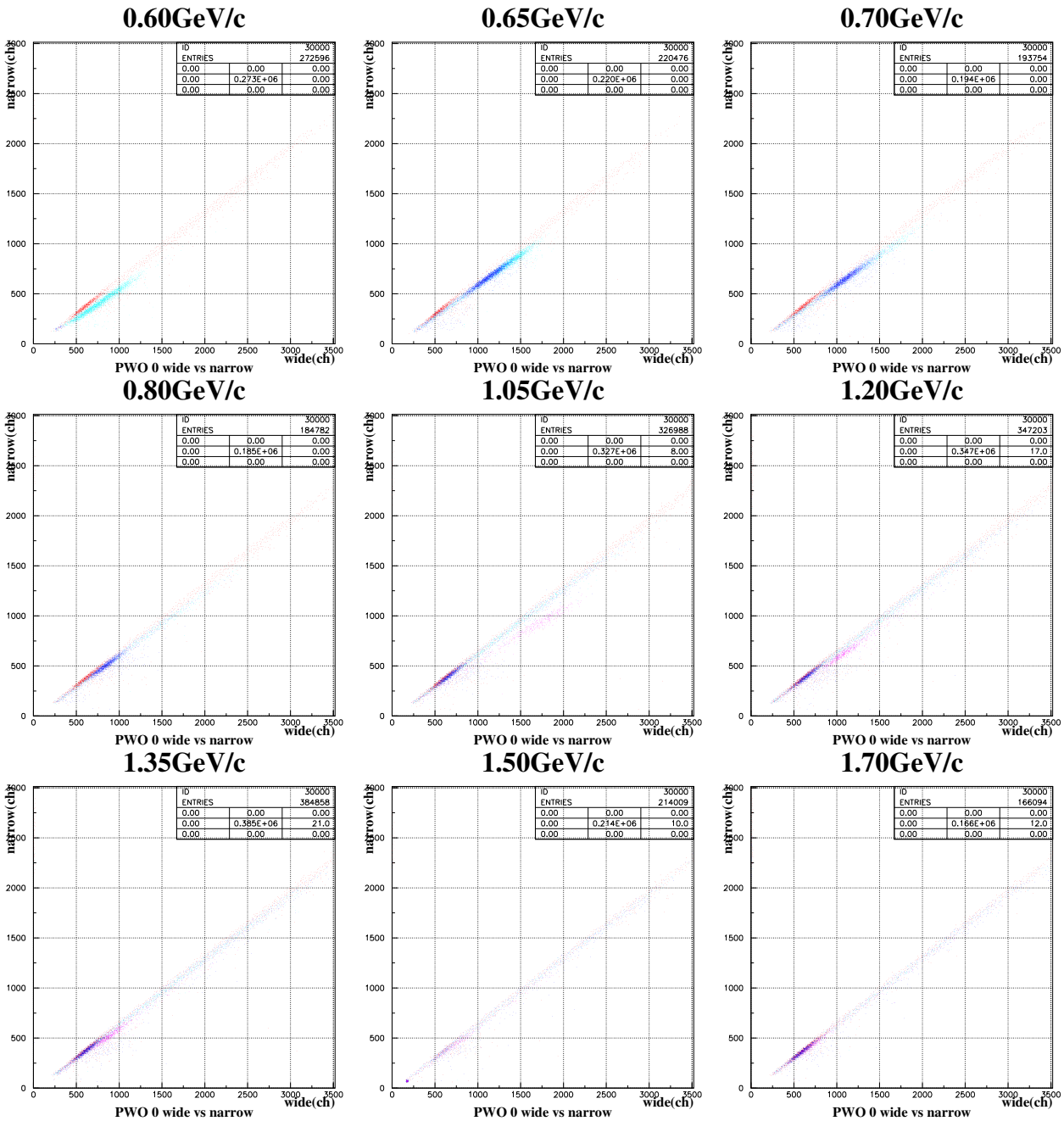


Figure 5.4: PWO によるπ ・p 弁別効果のビーム運動量依存性；Wide Gate(横軸) vs Narrow Gate(縦軸) 赤；π 、 青；p(thrugh)、水色；p(stop)、紫；d

# Reference


[1] ハイパー核γ 線分光のための BGO コンプトンサプレッサーの研究
平成 10 年 佐藤 創

[2] http://www.aplcompany.com/synthscintcrystalspec_e.htm

[3] "Influence of Y-codoping on the $PbWO_4$:Mo luminescence and scintillator characteristics"
Nucl. Instr. Meth. A486, 453-457 M. Nikl et.al.

[4] "Doping $PbWO_4$ with different ions to increase the light yield"
Nucl. Instr. Meth. A486, 170-175 M. Kobayashi, Y. Usuki, M. Ishii and M. Nikl

[5] "Significant improvement of $PbWO_4$ scintillating crystals by doping with trivalent ions"
Nucl. Instr. Meth. A434, 412-423 M. Kobayashi et.al.

[6] "Significant increase in fast scintillation component from $PbWO_4$ by annealing"
KEK-PREPRINT-2003-100, Jan 2004. 14pp. M. Kobayashi, Y. Usuki, M. Ishii and M. Itoh

[7] "Response of a $PbWO_4$ Scintillator Array to Electrons in the Energy Regime Below 1 GeV"
R.Novotny et.al.,IEEE Trans. On Nucl. Sc. 44 (1997) 477-483

[8] "Development of BSO ($Bi_4Si_3O_{12}$) crystal for radiation detector"
Optical Materials, Volume 19, Issue 1, February-March 2002, 201-212
M. Ishii et.al.

[9] M.Danysz et.al.,Phil.Mag.44(1953),348.

[10] T.Hasegawa et.al.,Phys. Rev. Lett. 74(1995),224.

[11] "Study of Spin-Dependent Λ N Interactions by Gamma-Ray Spectroscopy of p-Shell-Hypernucelei"
M.Ukai et. al.

[12] D.J.Millener et.al.,Phys.Rev. C31(1985),499

[13] W.Brückner et.al.,Phys.Rev. 79B(1978),157

[14] "Thermoluminescence of solids"
S.W.S. McKeever

[15] http://www.hepl.hiroshima-u.ac.jp/hadron/pwo/measurement_scintipro.html

# 謝辞

本論文の作成および研究にあたっては、本当にたくさんの方々に御世話になりました。特に指導教官の田村裕和教授には、私に研究の場と数多くの助言を与えて下さったことに大変感謝しております。三浦勇介氏には、研究や実験について常日頃から指導と協力をしてくださったことに深く感謝致申し上げます。他にも原子核物理研究室の皆様に協力して頂きましたが、特に Hyperball グループの小池武志博士、鵜養美冬博士、木下沙理氏の御協力なしでは本研究をまとめる事ができなかったと思います。最後に、KEK の T536、T554 実験において、共同で実験を行った三輪浩司氏、芝田健男氏をはじめ多くの皆様に深く感謝致します。