

修士論文

ANKOK 実験のための
地上環境中性子束の測定と評価

早稲田大学先進理工学研究科
物理学及応用物理学専攻 修士2年 寄田研究室

川村 将城

2015年2月7日

概要

暗黒物質探索における主な背景事象として、 e/γ と中性子が挙げられる。 e/γ については我々の検出器の強みでもある解析的な除去が可能だが、中性子は暗黒物質による信号事象との区別が難しい。そこで、実験における中性子由来の背景事象の見積もりのために、また、遮蔽などによる効率の良い中性子の低減のため、実験環境における環境中性子束の測定を行った。環境中性子束はその実験の周囲の環境に大きく依存し、多くの文献値を直接参考にはできない。そこで、我々の検出器による環境中性子束の測定と併せて、独立な液体シンチレータでの測定を比較することで、精度よく中性子束の決定を行った。今回は、研究開発を行っている早大構内での測定であったが、この手法を用いることで、実際に探索を行う環境下（地下など）での測定も可能である。

目次

| | | |
|-----|-----------------------|----|
| 1 | 序論 | 4 |
| 1.1 | 暗黒物質 | 4 |
| 2 | ANKOK 実験 | 5 |
| 2.1 | ANKOK 実験とは | 5 |
| 2.2 | Ar の特徴 | 6 |
| 2.3 | 気液 2 相型 Ar 光検出器 | 6 |
| 2.4 | プロトタイプ検出器テストスタンド | 8 |
| 3 | ANKO 実験における背景事象 | 15 |
| 3.1 | 電子反跳 | 15 |
| 3.2 | 原子核反跳 | 15 |
| 4 | 気液 2 相型検出器における環境中性子評価 | 18 |
| 4.1 | 各種線源データ | 18 |
| 4.2 | バックグラウンドラン | 19 |
| 5 | 液体シンチレータを用いた中性子束の測定 | 25 |
| 5.1 | 液体有機シンチレータ | 25 |
| 5.2 | 実験セットアップ | 27 |
| 5.3 | 線源を用いたエネルギー較正 | 30 |
| 5.4 | Geant4 シミュレーションの較正 | 34 |
| 5.5 | 環境中性子フラックスの評価 | 38 |
| 6 | まとめと今後の展望 | 41 |
| 7 | 謝辞 | 42 |

図目次

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | 渦巻き銀河 (NGC6503) の回転曲線 [1] | 4 |
| 2.1 | 暗黒物質探索の現状 [7] | 5 |
| 2.2 | 気液 2 相型検出器の概念図 | 6 |
| 2.3 | S1 信号波形の違い | 8 |
| 2.4 | S1・S2 光量の違い | 8 |
| 2.5 | 左：検出器イメージ図 右：検出器全体図 [8] | 9 |
| 2.6 | 配管模式図 | 10 |
| 2.7 | 酸化銅触媒 R3-11 | 11 |
| 2.8 | 脱水剤モレキュラーシーブ | 11 |
| 3.1 | 標的 χ と中性子の弾性散乱 | 16 |
| 3.2 | Ar と中性子の反応断面積 | 16 |
| 4.1 | 典型的な電子反跳事象 (^{60}Co) | 18 |
| 4.2 | 典型的な原子核反跳事象 (^{252}Cf) | 18 |
| 4.3 | ^{60}Co PID 分布 | 19 |
| 4.4 | ^{252}Cf PID 分布 | 19 |
| 4.5 | 容器外側へのシールド類の設置の様子 | 20 |
| 4.6 | 51-901 号室に設置した 2 枚のカウンター | 21 |
| 4.7 | バックグラウンドランの PID 分布 | 22 |
| 4.8 | S2 トリガーイベントのカットパラメータ分布 | 23 |
| 4.9 | 上下 PMT の S1 光量比 | 23 |
| 5.1 | 発光の波長分布 | 27 |
| 5.2 | ^1H 原子と中性子との反応断面積 | 28 |
| 5.3 | ^{12}C 原子と中性子との反応断面積 | 28 |
| 5.4 | BC501-A 外観 | 29 |
| 5.5 | BC501-A に PMT を取り付けた様子 | 29 |
| 5.6 | H1161 の Gain カーブ | 29 |
| 5.7 | veto counter の配置図 | 30 |
| 5.8 | 上:ツェナー回路 下:HV サプライ | 31 |
| 5.9 | データ取得のトリガーロジック | 31 |
| 5.10 | ゲートと 2 つの信号の生波形 | 31 |
| 5.11 | ^{137}Cs 線源データ | 32 |
| 5.12 | ^{60}Co 線源データ | 32 |
| 5.13 | ^{252}Cf 線源での PSD 分布 | 32 |
| 5.14 | ^{252}Cf 線源での PSD 分布 (補正後) | 33 |
| 5.15 | ^{252}Cf 線源、エネルギー領域ごとの PSD 分布 | 34 |
| 5.16 | ^{252}Cf 線源、ER 事象のエネルギー分布 | 34 |

| | | |
|------|--|----|
| 5.17 | Geant に実装された Geometry | 35 |
| 5.18 | γ 線を打った時の Event Display | 35 |
| 5.19 | Geant4 による ^{137}Cs のエネルギー分布 | 36 |
| 5.20 | Geant4 による ^{60}Co のエネルギー分布 | 36 |
| 5.21 | ^{137}Cs のデータとシミュレーション | 36 |
| 5.22 | ^{60}Co のデータとシミュレーション | 36 |
| 5.23 | ^{252}Cf 線源の中性子のエネルギースペクトル | 37 |
| 5.24 | Geant4 による ^{252}Cf のエネルギー分布 | 37 |
| 5.25 | ^{252}Cf 線源 n 事象のデータとシミュレーション | 37 |
| 5.26 | バックグラウンドランでの PSD 分布 | 38 |
| 5.27 | バックグラウンドラン、エネルギー領域ごとの PSD 分布 | 39 |
| 5.28 | バックグラウンドラン NR 事象のエネルギースペクトル | 39 |
| 5.29 | 環境中性子反跳エネルギーのシミュレーションとの比較 | 40 |

表目次

| | | |
|-------|---------------------------------|----|
| 2.4.1 | 2 相型検出器に用いた PMT | 9 |
| 2.4.2 | 所持しているフィルターの種類 | 11 |
| 2.4.3 | 真空ポンプの種類と用途 | 12 |
| 2.4.4 | データロガーで読み出すパラメータ | 13 |
| 3.2.1 | 運動エネルギーによる中性子の分類 [15] | 15 |
| 4.1.1 | データ取得情報 | 18 |
| 4.2.2 | データ取得情報 | 19 |
| 4.2.3 | カットに用いるパラメータ | 21 |
| 5.2.1 | BC-501A の性質 | 27 |
| 5.2.2 | H1161 仕様 | 29 |
| 5.2.3 | veto カウンター情報 | 30 |
| 5.5.4 | バックグラウンドラン情報 | 38 |

1 序論

1.1 暗黒物質

様々な測的事実により、暗黒物質の存在が示唆されている。

暗黒物質の存在は、フリッツ・ツヴィッキーにより 1933 年に初めて提唱された。かみのけ座銀河内の銀河の速度を測定し、観測されている銀河の重力だけで説明できないほどの大きな速度分散を持っているという結果から、見えない物質が質量を持っていることを予言した。銀河の回転速度は、ケプラーの法則より、

$$v^2 = \frac{M(r)G}{r} \quad (1.1.1)$$

と表される。G は万有引力定数、r は銀河中心からの距離、M(r) は半径 r 内に含まれる全質量である。距離 r と速度 v を観測により求めることで M(r) を推定できる。ここで、1960 年代に観測された NGC6503 渦巻き銀河の回転曲線を 1.1 に示す [1]

。

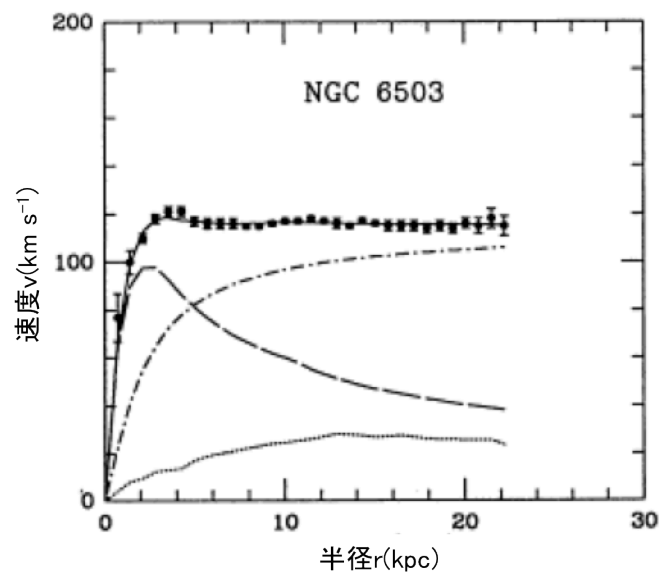


図 1.1 渦巻き銀河 (NGC6503) の回転曲線 [1]

破線と点線は銀河円盤とガスによる寄与を示している。破点線は観測されていないダークハロによる寄与である。明るい物質は銀河の中心より 5pc 以内に集中しているため、銀河が観測できる明るい物質だけで構成されているとすると、5pc の外側では回転曲線は距離 r の増加につれて減少するはずだが、観測では r が増加しても回転速度は平坦である。つまりこの観測結果が、銀河には光で観測できない物質、すなわち暗黒物質が存在することを示している。

また、天文衛星 Planck が 2013 年に公表した宇宙背景放射 (CMB) の測定結果 [2] では、暗黒物質が宇宙に占める質量の割合は 26.8% であることがわかっている。この数字は、我々のよく知る通常の物質バリオンの占める割合が 4.9% であることに比べると、5 倍と大きな数字である。

2 ANKOK 実験

ANKOK 実験は低質量領域の暗黒物質の直接探索を目的とした寄田研究室の実験の名称である。現在は早稲田大学西早稲田キャンパスで研究開発を進めている。

この章ではその実験目的とその概要について述べる。

2.1 ANKOK 実験とは

世界の暗黒物質探索実験の状況を図 2.1 に載せる。固体検出器や液体キセノン検出器を用いた暗黒物質直接探索実験の現状において、他の手法・媒質を用いた実験による相互検証が意味を持つ。そこで、我々は気液 2 相型のアルゴン (Ar) 検出器を用い、暗黒物質の直接探索を行っている。

Ar を用いたその他の実験としては WARF[3]、ArDM[4]、DarkSide[5] などが挙げられ、DARKSIDE-50[6] が最高感度の制限曲線を引いている。

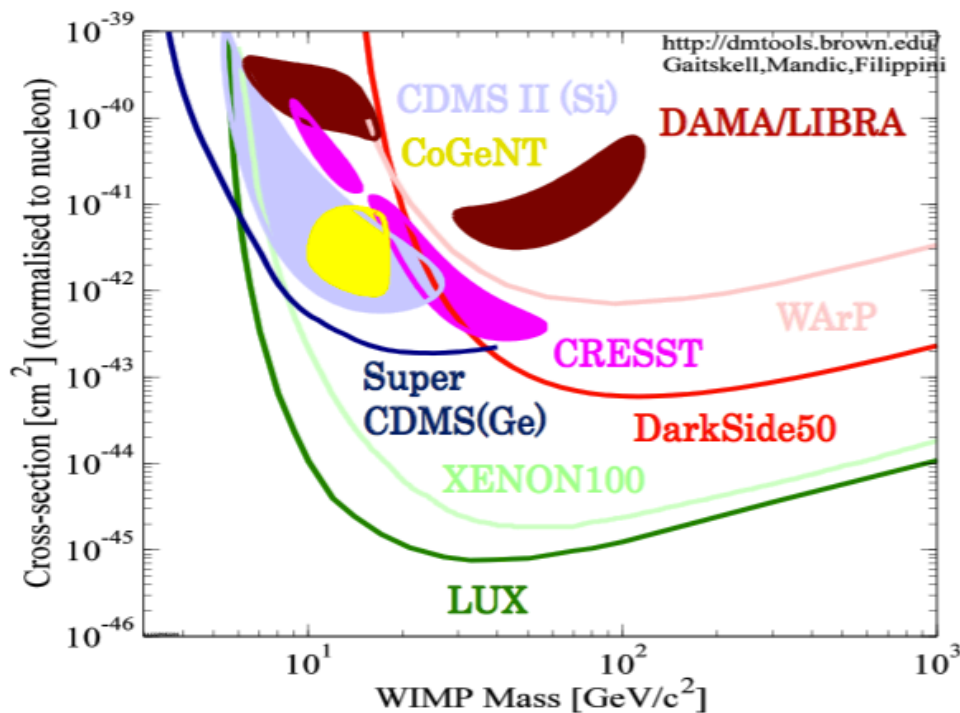


図 2.1 暗黒物質探索の現状 [7]

これに対し、ANKOK 実験は検出器の高光量化・低バックグラウンド化を実現することで、未だ Ar で探索の行われていない低質量領域の暗黒物質探索を行うことを目的とする。

2.2 Ar の特徴

Ar は原子番号 18 の希ガスで、元素記号は Ar である。LAr の密度は $1.39\text{g}/\text{cm}^3$ である。以下、Ar の特徴を挙げる。

- シンチレーション光、電離電子を放出する。
Ar は入射粒子に励起されると、基底状態に戻る際にシンチレーション光と電離電子を放出する。この光と電子を検出することで、粒子の識別や発生位置の特定が可能である。液体 Ar のシンチレーション光の波長は 128nm の真空紫外光である。
- 価格が安い
同じ希ガスであるキセノンと比較すると、約 100 分の 1 の価格で入手が可能である。
- 沸点が低い
1 気圧下での融点が 83.8K 、沸点が 87.3K である。液体 Ar は極低温かつ液体で存在できる温度の範囲が狭いため、扱いに注意が必要である。

2.3 気液 2 相型 Ar 光検出器

気液 2 相型 Ar 光検出器は、Ar を気相と液相の 2 相で用いることで、シンチレーション光と電離電子の両方検出する。ここではその機構や特性について述べる。

2.3.1 検出原理

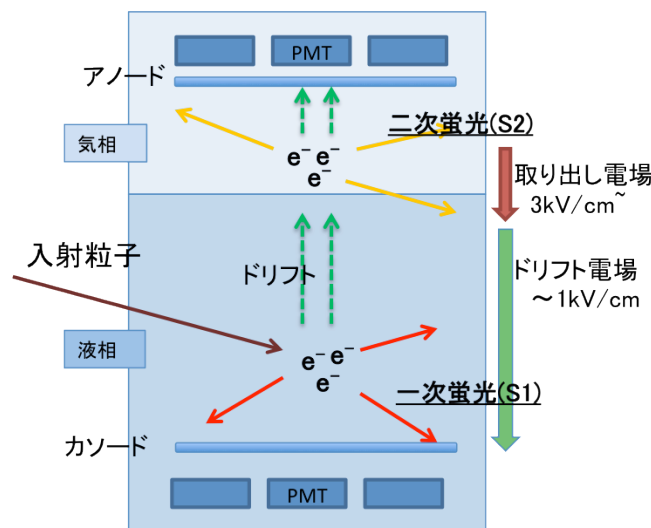


図 2.2 気液 2 相型検出器の概念図

検出の原理を示す模式図を図 2.2 に示す。

図では検出器下側が液体 Ar、上側が気体 Ar で満たされている。検出器には鉛直方向に電場が印加され、有感領域の電場をドリフト電場、液面境界付近の電場を取り出し電場と呼ぶ。電子を精度よ

く検出するためそれぞれ一様な電場に保たれている。上下から挟むように光検出器 (光電子増倍管) が設置される。

粒子が入射して液相の Ar と相互作用をすると、励起された Ar が 1 次シンチレーション光 (S1) と電離電子を発生する。その電離電子がドリフト電場 ($\sim 1\text{kV/cm}$) によって気相までドリフトし、取り出し電場 (\sim 数 kV/cm) によって気相へ取り出される。気相へ出た電離電子は電場によって加速され、気相 Ar を励起することで、2 次シンチレーション光 (S2) を発生する。S1 の発光時間は数 μ 秒で、S2 は電子のドリフト時間により数百 μ 秒ほど遅れて発光する。これら 2 種類の光を用いることで、入射粒子のエネルギーや反応位置の特定が可能である。

2.3.2 信号事象と背景事象

入射粒子と Ar 原子との相互作用は、Ar 原子核そのものを反跳する原子核反跳 (Nuclear Recoil : NR) と Ar 中の電子を反跳する電子反跳 (Electron Recoil : ER) に大別できる。

暗黒物質が検出器に入射した際、暗黒物質は NR をする。同様の反応をするのが中性子であり、検出された事象を暗黒物質と区別することは難しい。また、 e/γ は ER をし、こちらは Ar の強みである粒子識別により解析的に分離することができる。

2.3.3 Ar の発光機構

Ar 蛍光の発光機構は、大きく分けて励起と再結合に分けられる。

- 励起光の発光機構



- 再結合光の発光機構



上記の Ar 分子の励起状態 Ar_2^* には 2 つの分子励起状態 ${}_1\Sigma_u^*$ 、 ${}_3\Sigma_u^*$ が存在し、これらはスピンの 1 重項と 3 重項に対応する。両者の発生する量の比は、電子との衝突で励起状態が遷移する過程の頻度により決められる。この頻度は電子の密度に比例するため、ER と NR で成分の比が異なる。また、2 つの励起状態は異なる時定数を持ち、寿命の短い 1 重項による発光を Fast 成分、寿命の長い 3 重項による発光を Slow 成分と呼ぶ。

2.3.4 粒子識別

気液 2 相型アルゴン検出器では S1、S2 を以下のように組み合わせることにより精度の高い粒子識別を実現する。S1 と S2 の 2 種類の光を用いると解析的に粒子識別が可能である。

2.3.4.1 S1 PSD(Pulse Shape Discrimination)

先に述べたが、S1 には早い発光成分 (Fast Component:~6ns) と遅い発光成分 (Slow Component:~1.5 μ s) が存在する。これらは ER と NR でそれぞれの比が異なり、図 2.3 にその波形の違いを示す。ANKOK 実験では S1 全光量に占める Slow 成分の比 (\equiv Slow/Total) をとることで波形弁別 (PSD) を行う。

2.3.4.2 S2/S1 比

S2 は電離電子が気相中で加速する際に周囲の Ar を励起して発せられるので、その光量は電離電子数に比例する。つまり S1 と S2 の光量の比は S1 と電離電子の比に比例する。ER と NR とでは図 2.4 に示すような光量の違いが見られ、S2/S1 の比を用いることで両者の分離が可能となる。

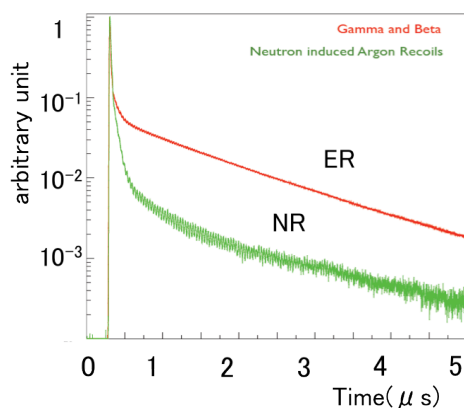


図 2.3 S1 信号波形の違い

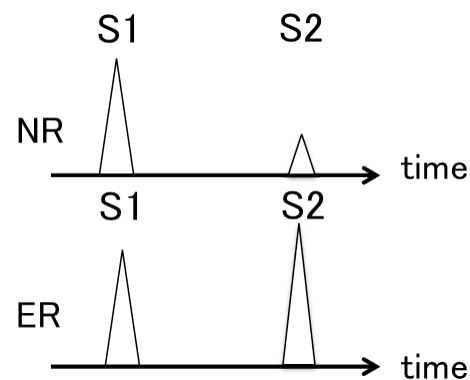


図 2.4 S1・S2 光量の違い

2.4 プロトタイプ検出器テストスタンド

早稲田大学西早稲田キャンパス 51-8F にて LAr テストスタンドを構築し、プロトタイプ検出器を用いた実験を行っている。

2.4.1 2 相型プロトタイプ検出器

2014 年 8 月の実験で用いた検出器の模式図を図 2.5 に示す。電場形成のためテフロン製のフレキシブル基板に電極を埋め込んだシェーパーがアクリル容器の周囲を覆っている。さらに、100 μ m 径の 2 次元グリッドを挟むことで一様電場に整形している。アクリル容器内壁には波長変換剤テトラフェニルプタジエン (TPB) を蒸着した反射材が巻かれており、集光効率を高めている。検出器外の液体 Ar 中に光電子増倍管 (PMT) を設置し、背景事象である宇宙線 μ 事象などを除去する。LAr の液面を測定するために 2 種類の液面計を使用している。一方は検出器の高さ方向全体をカバーするもので

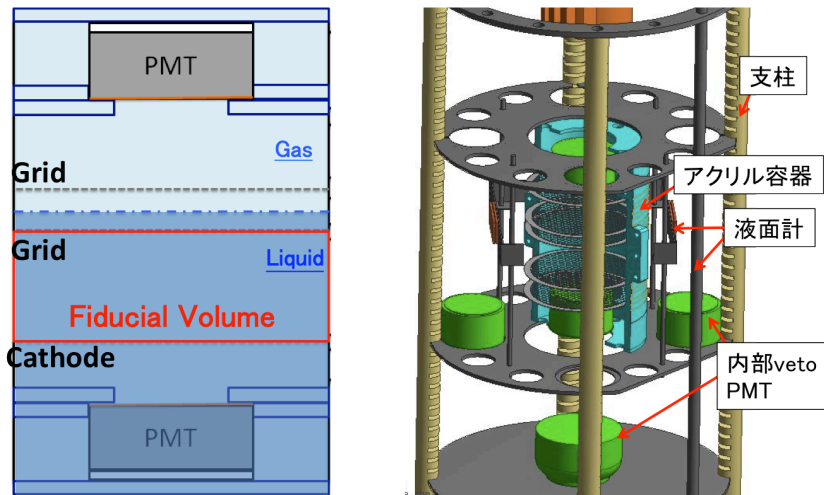


図 2.5 左：検出器イメージ図 右：検出器全体図 [8]

LAr の充填時に液面の動きを測定しており、一方は液面付近に 3 点設置され実験中の液面の安定性を監視している。

2.4.1.1 光電子増倍管 (PMT)

光検出器には PMT を使用するが、現在液体 Ar 温度で使用可能かつ、真空紫外光 (128nm) を直接検出できる PMT は未だ存在しない。そこで低温使用可能な PMT の窓面に TPB(テトラフェニルブタジエン) を塗布することで、128nm から 420nm へ波長変換を行い、検出する。ANKOK 実験は非常に効率のよい TPB の蒸着方法を確立することで、暗黒物質探索の鍵となる高光量化に成功している [9]。ANKOK 実験で使用している低温使用可能な PMT を表 2.4.1 に示す。

| 型番 | R11065 | R6041-506MOD ASSY |
|----------------------|----------------|-------------------|
| 有感波長域 (nm) | 200 - 650 | 160 - 650 |
| 窓面材質 | 石英ガラス | 石英ガラス |
| 光電面材質 | バイアルカリ | バイアルカリ |
| 光電面直径 (mm) | 64 | 45 |
| ダイノード構造 | ボックス&ラインフォーカス型 | メタルチャンネル型 |
| ダイノード段数 | 12 | 12 |
| 使用温度 ($^{\circ}C$) | -186 - +50 | -186 - +50 |
| 量子効率@420nm(%) | 30 | 25 |

表 2.4.1 2 相型検出器に用いた PMT

2.4.2 純化・循環システム

電離電子を S2 信号として取り出す際に、液体 Ar 中の不純物濃度 (水や酸素) によって電離電子のドリフトが吸収される。また、Ar 蛍光は真空紫外光なので窒素と衝突すると光が吸収される。ANKOK 実験は Ar 中の不純物に非常に敏感で、酸素・水は 1ppb 未満、窒素は ppm 未満の Ar 純度が要求される [10] [11]。この要求を満たすため、ANKOK 実験では図 2.6 のようなシステムを用いて、Ar の純化と純度維持を行っている。

実験開始前に、まず系内の不純物を取り除くため真空引きを行う ($\sim 10^{-4}$ Pa)。実験開始時には、液体 Ar タンクから液体フィルターを通して容器内に充填する。商用の液体 Ar は酸素や水が数 ppm 程度であり、酸化銅と脱水剤からなる純化フィルターを通すことで、ppb オーダーまで不純物を除去している。実験中は常に循環ポンプによって液体 Ar を気体として取り出し、フィルター (SAES 社製、MC1500) を通すことで純度の維持を行っている。

また、容器内上部に取り付けた GM 冷凍機 CH-110(住友重機製) を PID 温度コントローラーで制御することにより、実験開始から終了まで容器内を LAr 温度に保持している。

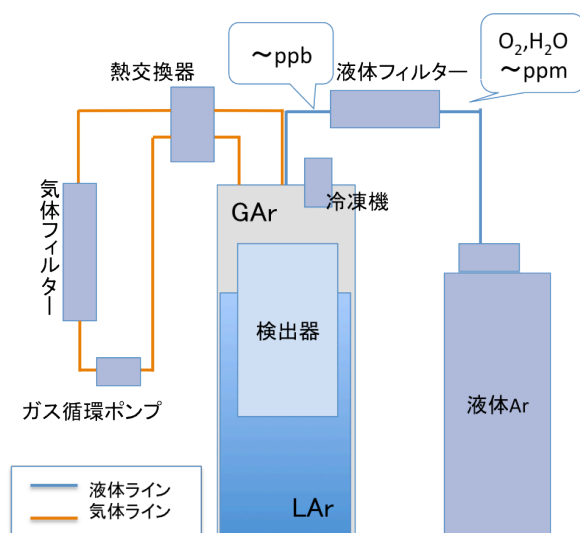


図 2.6 配管模式図

2.4.2.1 純化フィルター

現在所持しているフィルターを表 2.4.2 に載せる。

MC1500 は三酸化クロムの触媒 (902 媒体) を使用しており、酸素や水を 100ppt 未満まで低減させる純化能力を持つ。定格流量 40L/min であり、常温使用が可能である。

液体フィルターは自作したものである。長さ 60cm のステンレス製の容器にフィルター剤を詰めてフランジ継手 (ICF114 規格) で気密性を保持している。フィルター剤には脱水剤モレキュラーシーブ (図 2.7) と酸化銅触媒 (R3-11, BASF ジャパン製) (図 2.8) を使用しており密閉後に高温に熱して活性化を行った。

| | 製品 | 溶剤 |
|---------|----------------|---------------|
| 気体フィルター | MC1500(SAES) | 三酸化クロム |
| 液体フィルター | - | モレキュラーシーブ、酸化銅 |
| 窒素フィルター | GP-10(PURERON) | ゲッター |

表 2.4.2 所持しているフィルターの種類

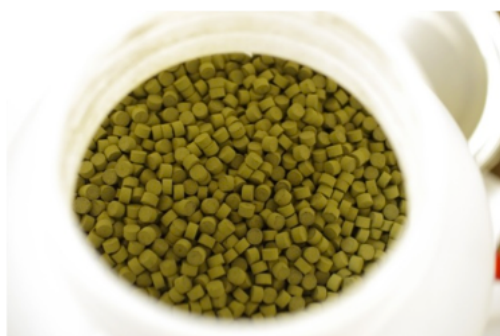
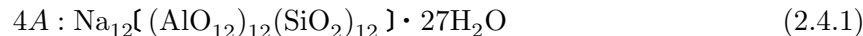


図 2.7 酸化銅触媒 R3-11



図 2.8 脱水剤モレキュラーシーブ

また、水や酸素を繰り返し再活性化を行うことが可能である。モレキュラーシーブは合成ゼオライトの商品名であり、吸着触媒として様々な分野で使用されている。化学式を式 2.4.1 に示す。



結晶水を加熱除去することで活性な吸着剤として使用出来るようになる。真空中または乾燥 Ar ガス気流で、300-350 に加熱することで乾燥を行う。

R3-11 の活性化は酸化銅を還元して銅にすることで行う。R3-11 を水素の入った Ar に H₂ を 2% 混合した乾燥ガス気流で 250 に加熱すると、容易に酸化還元反応が起こり還元銅が生成される。



2.4.2.2 真空装置

真空引きは、内槽と外槽に分けて行っている。内槽とは容器内や循環ライン・充填ラインの真空引きを指し、実験前に系内の不純物を取り除くために真空引きを行う。外槽は実験容器の真空断熱槽を指し、実験中に容器の断熱を保ち液体 Ar を保持するために真空引きを行う。真空引きを行うポンプを表 2.4.3 にまとめる。

また、配管に使用する継手にも気密性の高い部品を使用している。

- VCR

ナットとナットの間にはガスケットを挟むことで気密性を保持している。ガスケットを交換することで、何度でも締め直すことが可能。汎用性が低く、新たに VCR 継手を取り付ける際には配管への溶接が必要。

| 真空ポンプ名 | メーカー | 種類 | 内/外 |
|-----------|-------------|-----------------|-----|
| ISP-250C | アネスト岩田 | スクロールポンプ | 内 |
| HiPace300 | ファイファーバキューム | ターボ分子ポンプ | 内 |
| YTP-50M | ULVAC | 油回転ポンプ・ロータリーポンプ | 外 |

表 2.4.3 真空ポンプの種類と用途

- SwageLok

ナットを締めることでフェルールが SUS 管に食い込み、気密性を保持する。SUS 管とナット・フェルールがあれば継手を作れるので、汎用性が高い。一度使用した箇所は増し締めをすることで、複数回使用することが可能。

2.4.3 スローコントロールシステム

極低温の液体 Ar を用いた実験において、容器内の圧力や温度を適切な値に保つことは実験の安定・安全運用において最も重要なことのひとつである。スローコントロールシステムは、このような実験の運用に必要な様々なパラメータを監視するシステムである。

2.4.3.1 PID 制御

冷凍機の温度管理として、PID(Proportional Integral Derivative) 制御機能を持った温度調節器 E5CN-CT(OMRON 製) を使用している。容器内の冷凍機ヘッドに熱接触させた白金抵抗 (Pt100) を PID コントローラに接続し、その温度変化に応じて冷凍機の出力を調節している。

2.4.3.2 データロガー

種々モジュールからの出力データの一括管理に、データロガー GL820(グラフテック製) を使用している。モジュールのアナログ出力 (電圧値) や熱電対や測温抵抗体の読み出しが可能で、各値をまとめて一つの CSV ファイルとして出力している。

GL820 は電流の読み出しに対応していないため、適切な抵抗を挿入しその電圧値を読みだすようにしている。

GL820 には Windows 環境で動作する専用のソフトウェアがあり、それを使用することで PC と GL820 を接続でき、データ取得やアラーム設定が可能である。以下、各項目について詳細を述べていく。

- 容器内圧

実験の安全運用において重要な項目である。内圧の過上昇 (2 気圧 ~) は容器の爆発の恐れがあり、逆に大気圧を下回った場合 Ar の固化やリークによる純度の悪化のおそれがある。

用いるデジタル圧力計は、大気との差圧から $-0.1 \sim 0.5 \text{MPa}$ (真空 ~4 気圧) までの測定範囲

| 装置名 (型番) | メーカー | 内容 | 出力 |
|--------------------|------------------|---------|-----|
| 圧力計 (GC61) | 長野計器 | 容器内圧 | 電流 |
| 液面計 (Model186) | AmericaMagnetics | Ar 液面 | 電圧 |
| 酸素濃度計 (JKO-25WD3) | ジコー | 酸素濃度 | 電圧 |
| PID(E5CN-CT) | OMRON | 冷凍機温度 | 電流 |
| 真空計 (M-360CP) | キャノンアネルバ | 内/外槽真空度 | 電圧 |
| 流量計 (CMS0200/0050) | azbil | 循環流量 | 電圧 |
| 白金抵抗 | KOA | 各種温度 | 抵抗 |
| 熱電対 | 八光電機 | 各種温度 | 起電圧 |

表 2.4.4 データロガーで読み出すパラメータ

を持ち、アナログ出力は $4 \sim 20mA$ に対応する。定格電圧は $15 \sim 24VDC$ である。

- 温度

実験中の容器内の低温維持の際、各点での温度を参照することで中の様子を把握できる。特に冷凍機ヘッドに熱接触した温度計が温度コントロールに関わるので重要である。容器内部には白金抵抗を設置し、容器外ではポンプ温度や室温の測定に熱電対を設置している。白金抵抗や熱電対は、GL820 ので読み出しを行う。

- 酸素濃度

Ar 等高压ガスを使用する際に注意すべきことの 1 つに窒息が挙げられる。酸素濃度が 18% を下回ると人の活動に支障が出る。JKO はアナログ出力付きで $0 \sim 100\%$ を $0 \sim 1V$ として出力できる。また、センサーと表示器が離れているため柔軟に測定ができ、単 3 乾電池でも動くので、停電時なども使用可能。

- 液面

2 相型検出器は、液面の多少の変化により S2 光量が変わるため、液面の安定性を維持することが必要である。液面の測定には数種類方法があるが、使用しているものは全てセンサー部のキャパシタンスを読み出している。センサー部の空洞 (極板対の間、あるいは円の真ん中) を満たす液体と気体の誘電率の違いを利用する。Model186 は液体窒素で較正を行った後、誘電率の違いをスケールしている。Model186 には電圧のアナログ出力 ($0 \sim 10V_{DC}$) をオプションとして使用できる。また、液面付近に 3 点取り付けられた液面計は自作のもので、LCR メーターで容量を測定して液面に変換する。LCR メーター専用のソフトウェアを利用し、RS323C 通信を利用してデータを読み出す。

- 真空度

LAr の保持は、冷凍機と容器の真空断熱による熱流入の抑制により実現される。実験中は外槽を真空引きし続けるので、その間の真空度のモニターは内圧と併せて重要である。CP-360 はコールドカソードゲージとピラニゲージを組み合わせたコンビネーションゲージで、大気圧 $\sim 5 \times 10^{-7}$ の測定範囲を持つ。RS232C 通信を用いてデータを読み出すことができ、かつ圧力の対数に比例したアナログ出力 ($0 \sim 10V$) も持つ。実験中は RS232C と同時にデータロ

ガーでのデータ取得を行っている。

- 流量

Ar 純度保持のためガス循環を行う。安定した純度維持を確保するために流量の監視が重要である。CMS はマスフローメータで、センサーを通過した気体の質量を測定している。測定ガス種の設定が可能で、電圧のアナログ出力 (1 ~ 5V) を持つ。

3 ANKO 実験における背景事象

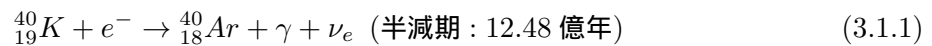
ANKOK 実験における背景事象について、Ar との相互作用によって 2 種類に大別できる。本章では、背景事象と Ar の反応や、背景事象の発生源について述べる。

3.1 電子反跳

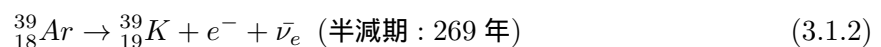
3.1.1 e/γ

γ 線は、Ar 原子中の電子を反跳する (コンプトン散乱)。反跳された電子が周囲の Ar にエネルギーを落とすことで励起・電離が生じる。電子は Ar 中で発生したものについてのみ、コンプトン散乱によって発生した電子と同様の挙動を示す。

主な電子の発生源として、Ar 中に含まれる放射性同位元素 ^{39}Ar による β^- 崩壊がある。Ar の安定同位体には ^{36}Ar ・ ^{38}Ar ・ ^{40}Ar があり、中でも ^{40}Ar が最も多く天然存在比は 99.60% である。地球大気中の ^{40}Ar は主にカリウムの放射性同位体 ^{40}K の電子捕獲によって生成される (式 3.1.1)。



^{39}Ar は、宇宙線的作用により ^{40}Ar とともに大気中で生成され、ごくわずかに Ar 中に含まれる。 ^{39}Ar は式 3.1.2 に示す崩壊により電子を放出し安定核である ^{39}K になる。



その割合は $1.01 \pm 0.08 \text{ Bq/kg}$ であることがわかっている [13] ので、実験中に ^{39}Ar が放出する電子の量は、使用する Ar の重さと実験の時間から見積もることができる。

γ 線の発生源は、物質中に存在する放射性核種である。これは、検出器部材に含まれるものに関しては部材の選定により低減することができ、実験環境で周囲の物質からくるものに関しては鉛や銅をシールド材として用いることで低減することができる。

3.2 原子核反跳

3.2.1 中性子

中性子は、主に高エネルギー宇宙線 μ による原子核破碎により生じ、宇宙線の 1 つとして環境中を飛び交っている。中性子は運動エネルギーの大きさによって熱中性子と熱外中性子の 2 種類に大別できる。熱外中性子の中でも大きなエネルギーを持つ中性子を高速中性子と呼ぶ (表 3.2.1)。熱外中性子は標的の原子核を弾性散乱により反跳し、エネルギーを失い熱中性子となる。

| | |
|-------|--|
| 熱中性子 | $E_n \leq 0.5\text{eV}$ |
| 熱外中性子 | $0.5\text{eV} \leq E_n \leq 500\text{keV}$ |
| 高速中性子 | $E_n \geq 500\text{keV}$ |

表 3.2.1 運動エネルギーによる中性子の分類 [15]

質量 M の標的粒子 χ が、中性子との弾性散乱で得るエネルギー E_χ を式 3.2.1 に示す (図 3.1)。中性子のエネルギー、質量を E_n 、 m_n 、原子核の散乱角を θ とする。

$$E_\chi = \frac{4m_\chi m_n E_n \cos^2 \theta}{(m_\chi + m_n)^2} \quad (3.2.1)$$

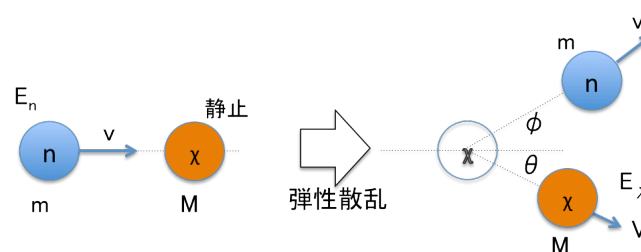


図 3.1 標的 χ と中性子の弾性散乱

式 3.2.1 が示す通り、中性子は標的粒子の質量が小さいほど弾性散乱で失うエネルギーが大きいため、中性子の減速材としては H 原子を多く含む水やグラファイト、ポリエチレンなどが有効である。

中性子のエネルギーと Ar との反応断面積の関係を図 3.2 に示す [14]。黒が全反応断面積、赤が弾性散乱の断面積、青が非弾性散乱の断面積を表す。～数 MeV 程度のエネルギーを持った中性子と Ar の反応は主に弾性散乱である。弾性散乱により反跳された Ar^+ が周囲の Ar にエネルギーを落とすことで励起・電離が生じる。

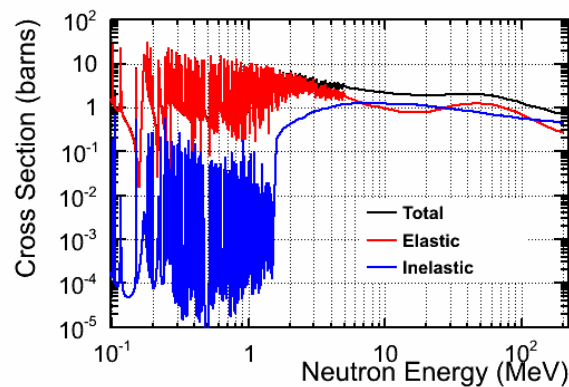


図 3.2 Ar と中性子の反応断面積

3.2.2 α 粒子

α 粒子はヘリウムの原子核であり、2 価の陽イオンである。 α 粒子自身が Ar 中でエネルギーを落とすことで励起・電離が生じる。

主な α 粒子の発生源として、部材に含まれるウラン系列、トリウム系列の放射線同位体の α 崩壊がある。また、系列中のラドン (Rn) が希ガス気体であるために、空気中に漂う Rn がチリや埃として検出器部材に付着して混入することもある。

一般に α 崩壊で発生する *alpha* 粒子は ~ 数 MeV の高いエネルギーを持つため識別できるが、部材中で発生して部材にエネルギーを落とした後 Ar に入射すると低エネルギーの α 粒子として区別の難しい背景事象となりうる [16]。

4 気液 2 相型検出器における環境中性子評価

2014 年 8 月に行った Ar 実験で取得したバックグラウンドラン (線源のないラン) における中性子事象の評価を行う。中性子事象の選別のためには、背景事象となる電子反跳事象を除かなければならないので、線源データにより、NR 事象の選別を確立したのち、バックグラウンドランを評価していく。

4.1 各種線源データ

4.1.1 粒子識別

線源で取得したデータを用いて、ER 事象と NR 事象の分離を行う。使用するデータは ER 事象については ^{60}Co 、NR 事象については ^{252}Cf を使用して、表 4.1.1 のような設定の下で取得した。

| | |
|-------------|-----------------|
| ドリフト電場 | 500V/cm |
| 取り出し電場 | 3.8kV/cm |
| PMT HV | 5×10^6 |
| トリガー閾値 (mV) | 5 |

表 4.1.1 データ取得情報

図 4.1、4.2 にそれぞれの典型的な波形を載せる。

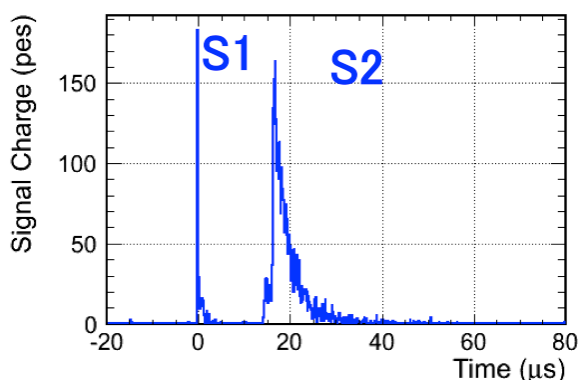


図 4.1 典型的な電子反跳事象 (^{60}Co)

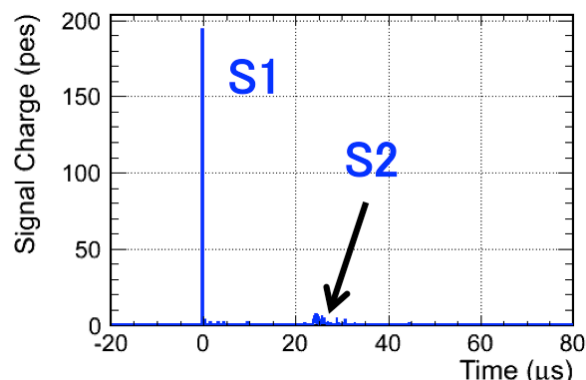
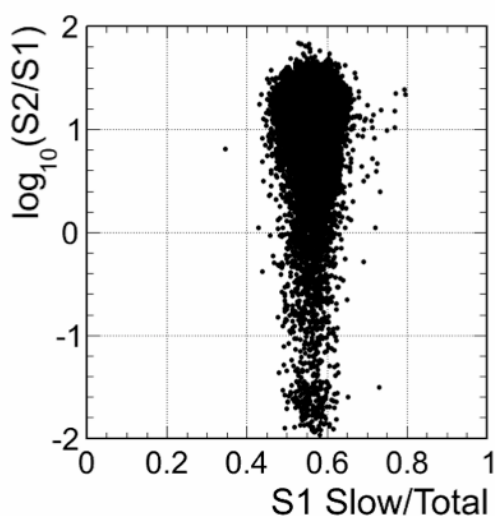
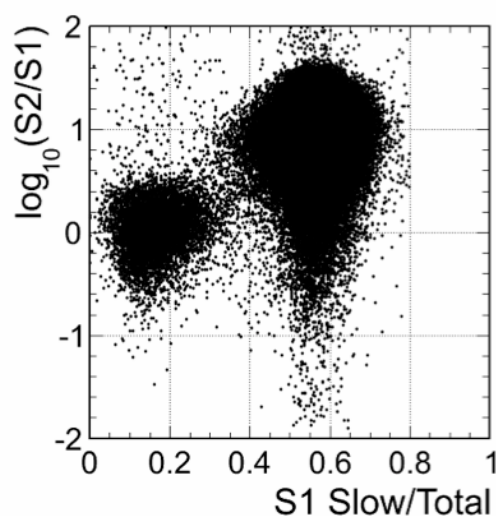


図 4.2 典型的な原子核反跳事象 (^{252}Cf)

2 つの波形について、Fast のピーク値は同じ程度だが ER 事象の方が Slow の量が多く、また S2 の量も多い。前に述べたが、Slow/Total と S2/S1 の 2 つのパラメータを使用して粒子識別を行う。ここで、両線源データに対し、横軸に Slow/Total、縦軸に $\log_{10}(S2/S1)$ をとった分布を図 4.3、図 4.4 に示す。ここでは、例として $20 \text{ pes} \leq S1 \text{ Fast} \leq 300 \text{ pes}$ の領域の事象のみをプロットしている。

^{60}Co 線源からは γ 線のみが放出されるため、図 4.3 で Slow/Total \sim 0.6 付近の縦のクラスター

図 4.3 ^{60}Co PID 分布図 4.4 ^{252}Cf PID 分布

は ER 事象である。また、 ^{252}Cf 線源からは自発的核分裂により γ 線と中性子が放出されるため、ER 事象と NR 事象の両方が検出されることが予想される。そこで、図 4.4 で、 $\text{Slow}/\text{Total} \sim 0.2$ 、 $\log_{10}(S2/S1) \sim 0$ 付近のクラスターが NR 事象であることがわかる。

ここで、NR 領域を以下のように定義し、バックグラウンドランに適用していく。

- $0 \leq \text{Slow}/\text{Total} \leq 0.3$
- $-1.15 \leq \log_{10}(S2/S1) \leq 0.35$

4.2 バックグラウンドラン

バックグラウンドランとして、1.72 日間のデータ取得を行った (LiveTime:0.41kg·day)。データ取得時の各種設定を表 4.2 に示す。取得時の閾値は、ノイズを拾わない程度に低くし (5mV)、上下の PMT のコインシデンス信号をトリガーとした。背景事象低減のため、容器外側にシールドを置いた。トリガーレートはシールド設置前が 91Hz、シールド設置後が 45Hz で、シールドによりレートを約半分に低減した。

| | |
|-------------|-----------------|
| ドリフト電場 | 500V/cm |
| 取り出し電場 | 3.8kV/cm |
| PMT HV | 5×10^6 |
| トリガー閾値 (mV) | 5 |
| Rate(Hz) | 45 |
| Live Time | 0.41kg·day |

表 4.2.2 データ取得情報

シールド設置のようすを (図 4.5) に載せる。図において、左上 (1) が最初の状態である。右上 (2) が、宇宙線 μ 事象の除去のため、実験容器の側面に 80cm のプラスチックシンチレータを設置した状態。左下 (3) が、環境 γ 事象の低減のため厚さ 6mm の鉛の板を設置した状態。右下 (4) が、中性子事象の低減のため、最も外側に厚さ 30cm の水シールドを設置した状態である。また、宇宙線 μ 事象除去のため、1m 四方のプラスチックシンチレータを実験室真上の 901 号室に設置している (図 4.6)。1m 四方のシンチレータ 2 枚をオーバーラップして設置することで、 μ 事象への反応率を大きくしている (95% 以上)。

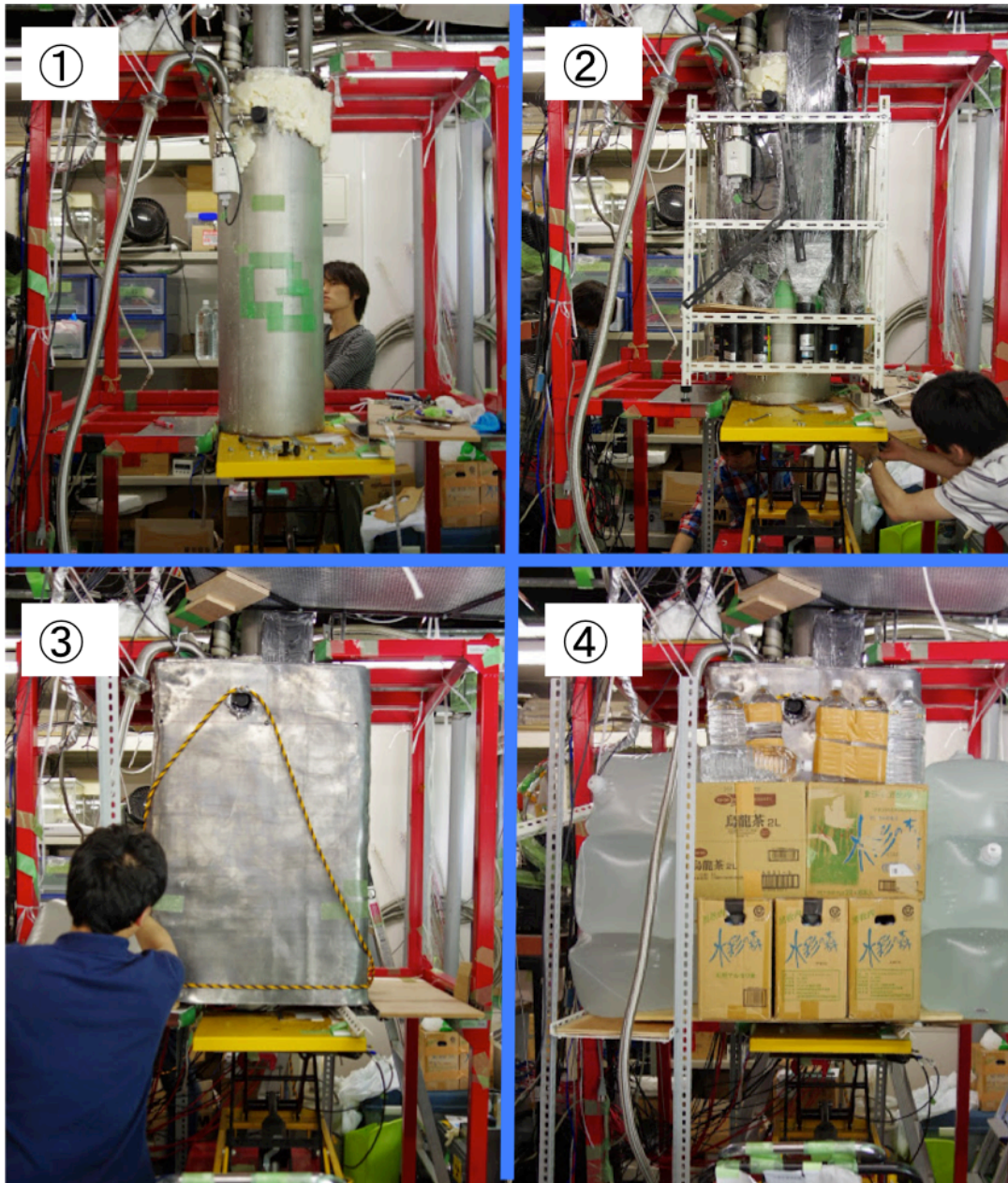


図 4.5 容器外側へのシールド類の設置の様子



図 4.6 51-901 号室に設置した 2 枚のカウンター

4.2.1 イベントセレクション

バックグラウンドランの全事象の PID 分布を 4.7 に示す。ER、NR の領域の他にも構造があり、これらに対し適切なカットを用いたイベントセレクションを行うことでノイズ事象を除去する。そこで、FADC で取得した波形情報において表 4.2.1 に示すパラメータを定義しカットに用いる。FADC での取得したデータの時間幅は $[-200\mu\text{s}, 200\mu\text{s}]$ とし、トリガー位置が $t=0$ である。

| | |
|-----------------------------|---|
| S1 Total 光量 (pes) | $[-0.3\mu\text{s}, 5\mu\text{s}]$ の積分値 |
| S1 Fast 光量 (pes) | $[-0.3\mu\text{s}, 0.1\mu\text{s}]$ の積分値 |
| S1 Slow 光量 (pes) | $[0.1\mu\text{s}, 5\mu\text{s}]$ の積分値 |
| S1 重心 (μs) | $[0.1\mu\text{s}, 5\mu\text{s}]$ の重心 |
| S1 時間幅 (μs) | $[0.1\mu\text{s}, 5\mu\text{s}]$ の RMS |
| トリガー前電荷 (pes) | $[-0.3\mu\text{s}, -0.1\mu\text{s}]$ の積分値 |
| S2 光量 (pes) | $(5\mu\text{s}, 200\mu\text{s}]$ の積分値 |
| S2 ドリフト時間 (μs) | $(5\mu\text{s}, 200\mu\text{s}]$ の重心 |
| S2 時間幅 (μs) | $(5\mu\text{s}, 200\mu\text{s}]$ の RMS |
| 上下 PMT の光量比 R_{TB} | $S1\ Fast_{Top} / (S1\ Fast_{Top} + S1\ Fast_{Bottom})$ |

表 4.2.3 カットに用いるパラメータ

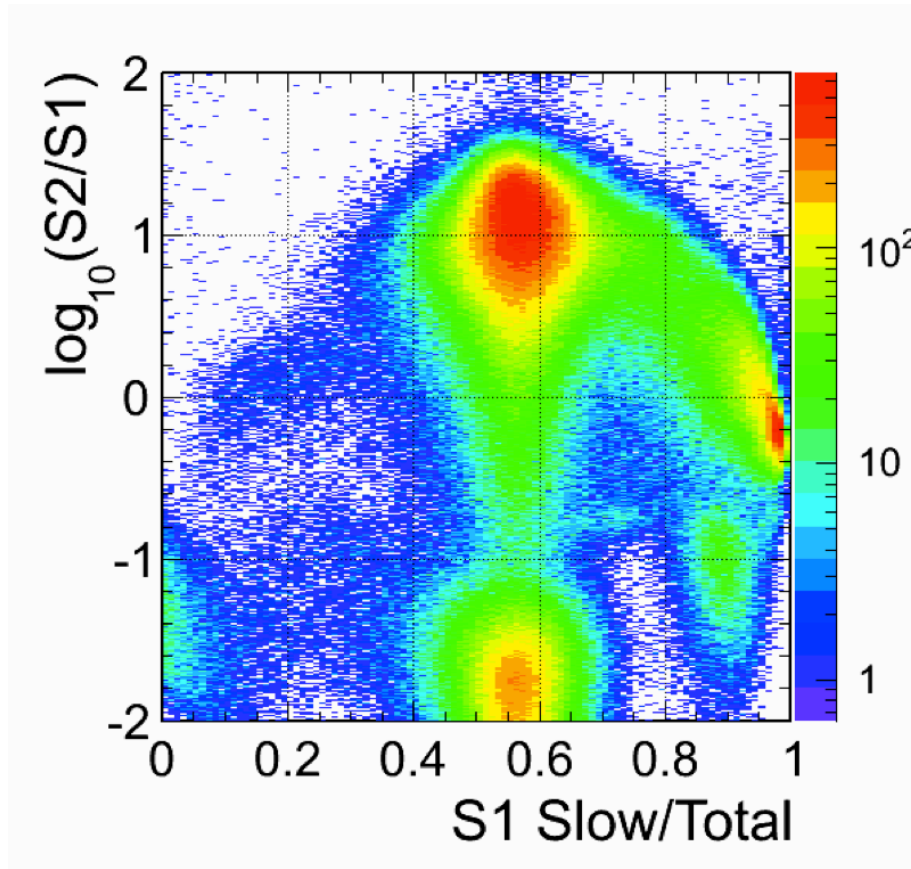


図 4.7 バックグラウンドランの PID 分布

4.2.1.1 S2 でトリガーされた事象のカット

FADC のトリガーに上下の PMT のコインシデンスを用いているが、S1 でトリガーできずに S2 でトリガーされる事象がある。その場合、トリガー前のグラウンドレベルが大きく揺れていたり、あるいは本来 $1.5\mu\text{s}$ の時定数を持つ S1 よりも幅が広がるために S1 の時間幅が広がる。そこで、横軸を S1 時間幅、縦軸をトリガー前電荷にとった分布を図 4.8 に示す。この 2 つのパラメータのカットを以下のように定める。

- トリガー前ノイズ電荷 $\leq 4\text{pes}$
- S1 時間幅 $\leq 1.5\mu\text{s}$

4.2.1.2 S2 のない事象のカット

検出器の構造上、カソード下とグリッドの間で入射粒子が反応する際、S1 は検出されるが電子が液相まで到達しないために S2 が発生しない。また、アノード上の気相で入射粒子が反応した際も、

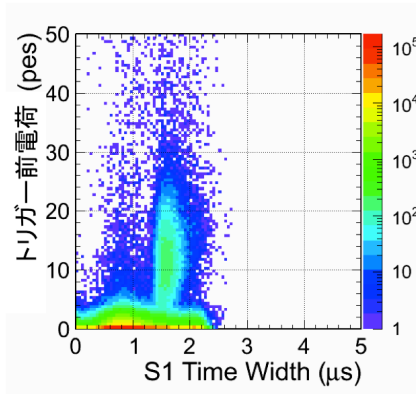


図 4.8 S2 トリガーイベントのカットパラメータ分布

GAr の蛍光が発生するのみで S2 が発生しない。

これら有感領域外で発生した事象を除くため、S2 光量と上下の PMT の S1 の光量比 R_{TB} を用いる。S2 光量については、NR 事象の S2 が小さいことを考慮し、0 ではないことを要求する。 R_{TB} の分布を 4.9 に示す。この 2 つのパラメータのカットを以下のように定める。

- S2 光量 ≥ 0
- $0.2 \leq R_{TB} \leq 0.6$

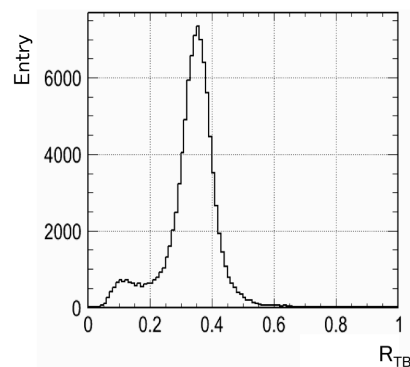


図 4.9 上下 PMT の S1 光量比

4.2.1.3 多重散乱事象のカット

入射粒子が有感領域内で複数回散乱した際、S1 は同時に検出されるが S2 はその散乱点の z 方向位置に依存するため、複数の S2 ピークが検出される。ただし、複数回散乱のうちカソードより下あるいはアノードより上で散乱が起きた時は S2 が検出されずに通常の事象との区別は難しい。複数の S2 ピークが検出されるとピークが 1 つの事象に比べて S2 時間幅が大きくなる。図??に S2 時間幅の分布を示す。

4.2.2 環境中性子フラックスの評価

5 液体シンチレータを用いた中性子束の測定

Ar を用いた環境中性子フラックスの評価を前章にて行った。この章では、Ar とは独立な手法を用いて環境中性子フラックスを評価し、Ar の結果と比較する。

今回は波形弁別能力をもつ手軽な液体シンチレータ BC-501A を用いて測定を行った。今回確立した測定手法を用いることで、早大構内の実験室のみでなく、暗黒物質探索予定の地下施設内でも測定が可能である。

5.1 液体有機シンチレータ

液体有機シンチレータの性質について述べる。[17] 有機シンチレータの主成分は有機溶媒と溶質(蛍光体)である。選択する物質の種類や量によりその特性が決まる。以下に、その例と理想とされる条件を示す。

- 有機溶剤：キシレン、トルエン、ブソイドクメンなど
 - ・エネルギー伝達効率が良い
 - ・溶質の吸収スペクトル領域に、溶媒の吸収スペクトル領域が存在しない
 - ・高純度である
- 第一溶質 (シンチレータ):PPO, butyl-PBD, BBOT など
 - ・蛍光量子収率が良い
 - ・蛍光の減衰時間が短い
 - ・溶解度が高い
- 第二溶質 (波長変換剤):POPOP, DMPOPOP, bis-MSB など
 - ・変換光の波長領域が検出可能である

ここで、蛍光量子収率とは以下のように定義される。

$$\text{蛍光量子収率} = \frac{\text{蛍光放出の分子数}}{\text{励起状態の分子数}} \quad (5.1.1)$$

5.1.1 発光過程

有機シンチレータは、入射した荷電粒子のエネルギーを光に変換して検出を行う。ここではその蛍光の発光機構について述べる。

有機シンチレータに荷電粒子が入射した際、以下の過程で発光が生じる。

1. 入射荷電粒子による溶媒分子の励起
2. 溶媒分子間のエネルギー移行
3. 励起溶媒分子から溶質分子へのエネルギー移行
4. 溶質分子の発光

5.1.2 シンチレーション効率

シンチレータのシンチレーション効率は、入射粒子の落としたエネルギーに対する、シンチレータが放射する蛍光のエネルギーで定義される。一般には単位長当たりの入射粒子のエネルギー損失 dE/dx が大きいほど放出される蛍光量 dL/dx が大きくなるという関係がある。

しかし、励起された分子が発光をせずに、熱や格子振動によってエネルギーを失う過程があり、消光(クエンチング)と呼ばれる。消光は入射粒子の dE/dx に依存することがわかっており、消光を考慮した蛍光量とエネルギー損失の関係式は Birks によって式 5.1.2 のように表される (Birks' Law)。
[18]

$$\frac{dL}{dx} = \frac{S \frac{dE}{dx}}{1 + k_B \frac{dE}{dx}} \quad (5.1.2)$$

k_B はシンチレータによって決まる定数だと考えられている。ここで、電子は dE/dx が十分小さいため、Birks' Law は式 5.1.3 のように近似ができる。

$$\begin{aligned} \left. \frac{dL}{dx} \right|_e &= S \frac{dE}{dx} \\ \frac{dL}{dE} &= S \end{aligned} \quad (5.1.3)$$

また、 α 粒子の場合は、 dE/dx が非常に大きいいため、Birks' Law は式 5.1.4 のように近似ができる。

$$\left. \frac{dL}{dx} \right|_\alpha = \frac{S}{k_B} \quad (5.1.4)$$

式 5.1.3 と式 5.1.4 より、定数 k_B は式??のように実験的に求めることができる。

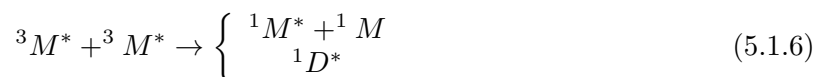
$$k_B = \frac{\left. \frac{dL}{dE} \right|_e}{\left. \frac{dL}{dx} \right|_\alpha} \quad (5.1.5)$$

5.1.3 波形弁別

有機液体シンチレータの蛍光には、速い成分と遅い成分がある。

速い成分は、高い励起一重項の溶媒分子 $^1M^{**}$ やエクサイマ D に起因し、減衰時間は数 n 秒である。これは有機蛍光体の寿命に等しい。

また、遅い成分は励起三重項の溶媒分子 $^1M^*$ の形成によって発生する。三重項は一重項よりも長寿命なので、三重項-三重項の溶媒分子による次の過程が生ずると数 100n 秒の長寿命の蛍光が現れる。



遅い成分の寿命は液体シンチレータの温度や年生に依存する拡散速度に依存し、室温の芳香族有機化合物中では約 200~300ns である。

遅い成分の蛍光量は、生成した励起三重項の溶媒分子数が多いほど多くなり、この分子数は荷電粒子の $\frac{dE}{dx}$ に依存する。

ただし、液体シンチレータ中に溶存酸素など不純物がある場合には、比較的長寿命の遅い成分が影響を受け、減少する。

5.2 実験セットアップ

5.2.1 液体シンチレータ BC501-A

有機液体シンチレータ BC-501A(BICRON 社製) を用いて環境中性子フラックスの測定を行う。BC501-A は波形弁別による高い粒子識別納涼を持つため、様々な実験で使用されている。

溶媒にキシレン、第一溶質に発光剤、第二溶質の波長変換剤に POPOP(bis-MSB) から成り、遅い成分の増幅剤としてナフタレンが混合されている。BC-501A の性質を表 5.2.1 にまとめる。

| | |
|---------------------------|-----------------|
| 最大発光波長 (nm) | 425 |
| 密度 (g/cm^3) | 0.874 |
| 蛍光時定数 (ns) | 3.16, 32.3, 270 |
| 融点 ($^{\circ}C$) | 24 |
| 原子構成 | |
| H 原子数 (10^{22} 個/cc) | 4.82 |
| C 原子数 (10^{22} 個/cc) | 3.98 |
| e^- 数 (10^{23} 個/cc) | 2.87 |

表 5.2.1 BC-501A の性質

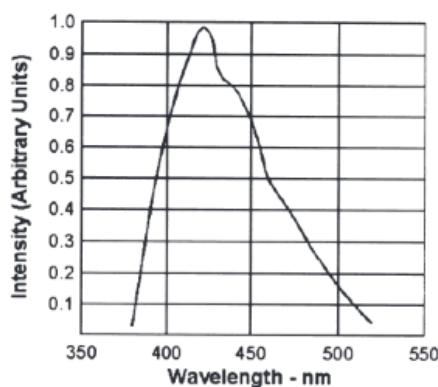


図 5.1 発光の波長分布

5.2.2 BC-501A と入射粒子との反応

5.2.2.1 γ 線

γ 線が BC-501A に入射すると、含まれる原子中の電子とコンプトン散乱し、電子が反跳され γ 線は散乱する。ここで γ の散乱角を θ 、散乱前の γ 線のエネルギーを $h\nu$ とすると、散乱後の γ 線のエネルギー $h\nu'$ は式 5.2.1 の形であらわせる。

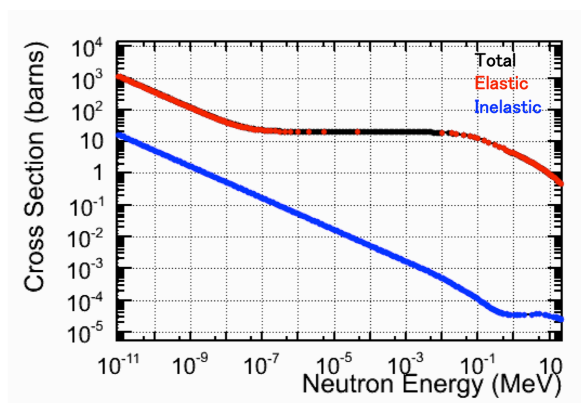
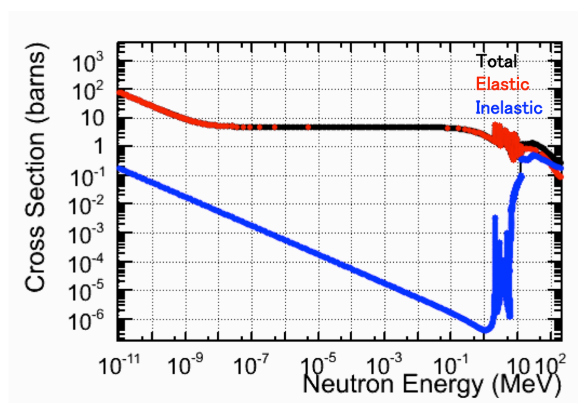
$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + (h\nu/m_e c^2)(1 - \cos \theta)} \quad (5.2.1)$$

$m_e c^2$ は電子の静止質量である。散乱で電子が得たエネルギーは以下である。

$$E_e = h\nu - h\nu' = h\nu \left(\frac{(h\nu/m_e c^2)(1 - \cos \theta)}{1 + (h\nu/m_e c^2)(1 - \cos \theta)} \right) \quad (5.2.2)$$

5.2.2.2 中性子

中性子が BC-501A に入射すると、含まれる原子核を反跳する。BC-501A は水素原子と炭素原子を多く含んでおり、これらの中性子との反応断面積は図 5.2、5.3 である。[14]

図 5.2 ^1H 原子と中性子との反応断面積図 5.3 ^{12}C 原子と中性子との反応断面積

Elastic が弾性散乱、Inelastic が非弾性散乱を表す。～数 MeV のエネルギーの中性子は、主に弾性散乱をしていることがわかる。

5.2.3 PMT の取り付け

BC-501A は直径 2 インチ、高さ 2 インチの円柱形アルミ容器に充填されている (図 5.4)。容器の 1 面がパイレックス製のガラスとなっており、そこに光電子増倍管を取り付ける (図 5.5)。また、BC501-A の容器内側には反射材が塗布してされ、光の収集効率を高めている。

BC501-A には 2 インチの窓面を持つ PMT(H1161, 表 5.2.2) を取り付けた。PMT 窓面と容器窓面の間には光学グリス EJ-550(ELJEN Technology) を塗り空気の層ができないようにしている。



図 5.4 BC501-A 外観



図 5.5 BC501-A に PMT を取り付けた様子

| | |
|------------|-----------|
| 有感波長域 (nm) | 300 - 650 |
| 窓面材質 | 硼珪酸ガラス |
| 光電面材質 | バイアルカリ |
| ダイノード構造 | ライン型 |
| ダイノード段数 | 12 |

表 5.2.2 H1161 仕様

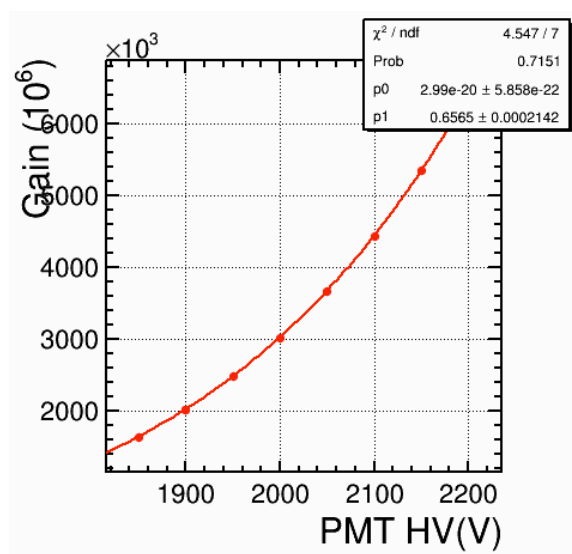


図 5.6 H1161 の Gain カーブ

PMT のゲインを LED を用いて測定した。PMT ゲインはダイノードの段数と電圧 HV を用いて式 5.2.3 のように表せる。

$$Gain = p_0 \cdot HV^{12 \cdot p_1} \quad (5.2.3)$$

この関数形を用いてフィットした、PMT ゲインの測定結果を図 5.6 に載せる。

5.2.4 veto counter の設置

宇宙線ミュオンや環境ガンマ線を veto するために、プラスチックシンチレータで図のように囲った (表 5.7)。

用いたプラスチックシンチレータの HV・閾値設定やサイズを表 5.2.3 にまとめる。これら 5 本の PMT への HV 印加は MHV 用ツェナー回路と HV サプライ (Fluke 製) を使用した (図 5.8)。veto 信号はディスクリミネータを通し、5 本の NIM 信号として ADC で読み出す。

5.2.5 DAQ 系

BC-501A のデータ取得の模式図を図 5.9 に示す。

ADC を用いて、信号電荷の積分を行う。ADC には CAEN の V965 を用いており、

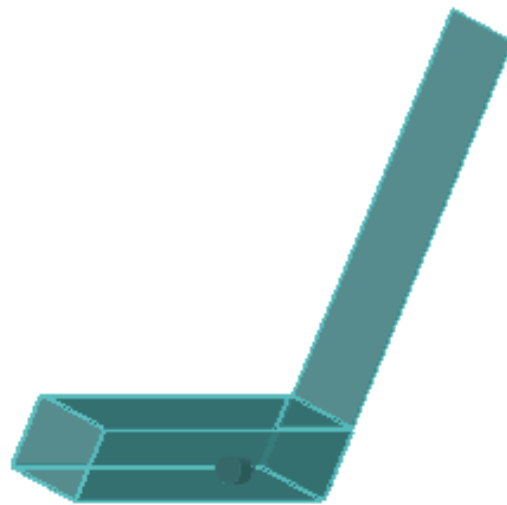


図 5.7 veto counter の配置図

| 型名 | シリアル No. | 位置 | 長辺 × 短辺 × 厚さ (mm) | HV(V) | 閾値 (mV) |
|-------|----------|------|-------------------|-------|---------|
| H7195 | RD1494 | 上 | 860×150×6 | 1560 | 20 |
| H7195 | RD1502 | 下 | 650×150×6 | 1600 | 25 |
| H1161 | RC5237 | 側面手前 | 860×150×6 | 1700 | 20 |
| H1161 | RC3104 | 側面壁側 | 860×150×6 | 1600 | 15 |
| H1161 | RC5143 | 縦 | 2000×150×6 | 1480 | 30 |

表 5.2.3 veto カウンター情報

12bit(4096count,200fC/count) の分解能を持つ。PSD を行うために信号線をアンプで 2 つに分け、片方の信号をゲートに対してずらすことで、遅い成分のみを得られるようにしている。ゲートに対して 50ns 早く入る信号を Slow、ゲートに本来のタイミングで入る信号を Total と定義する。図 5.10 は信号およびトリガーのオシロスコープ波形で、黄色がゲート、青が Slow、赤が Total として読みだす信号である。また、ペDESTAL測定のためにファンクションジェネレータをコインシデンスのスイッチの切替によりゲートに入れている。

5.3 線源を用いたエネルギー較正

5.3.1 γ 線源

まずは γ 源を使用したデータ取得を行った。 γ 線源として、 $^{137}\text{Cs}(662\text{MeV})$ と $^{60}\text{Co}(1.17\text{MeV}, 1.33\text{MeV})$ を使用した (図 5.11,5.12)。横軸に Fast(\equiv Total-Slow) をとっている。両データとも全吸収ピークは見えていないがコンプトンエッジは確認できる。 ^{60}Co 線源のデータについては、二つのエネルギーのコンプトンエッジがわずかに分かれて見えている。

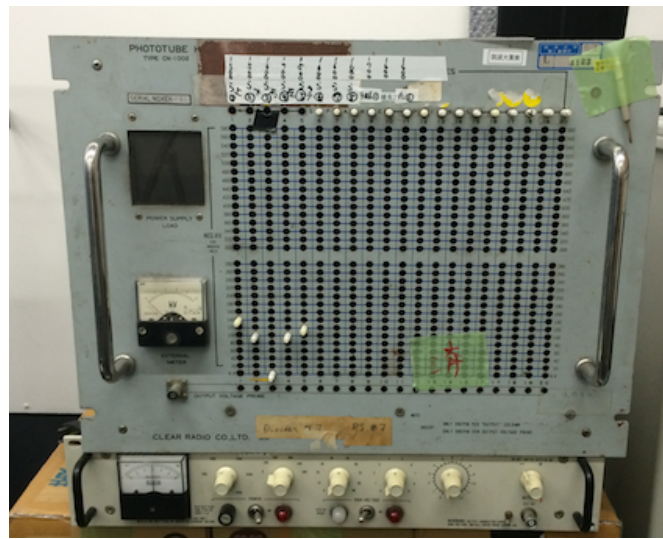


図 5.8 上:ツェナー回路 下:HV サプライ

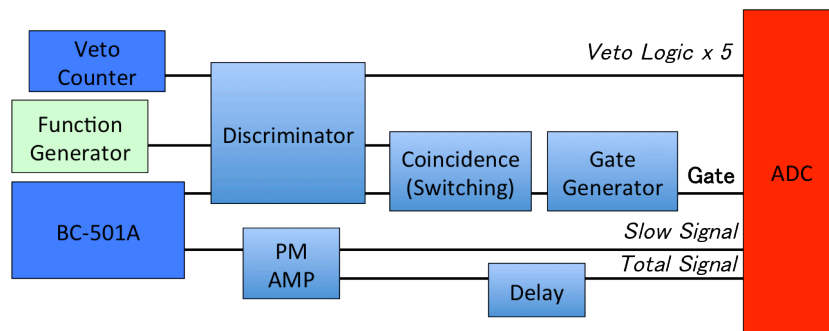


図 5.9 データ取得のトリガーロジック

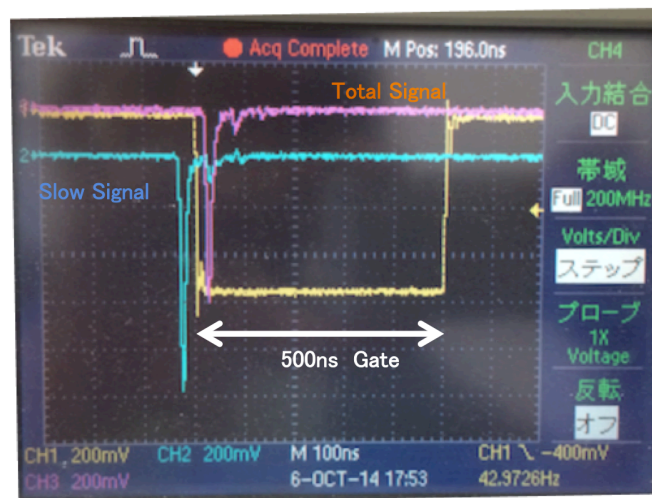
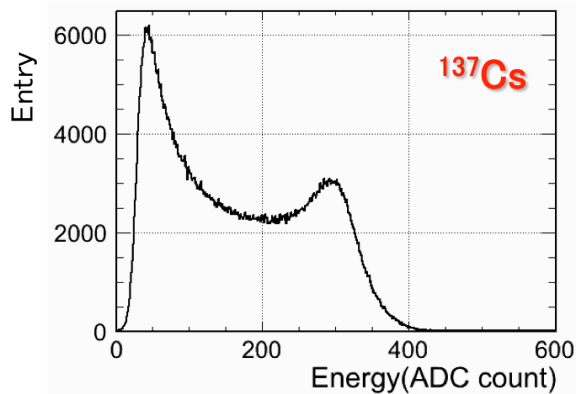
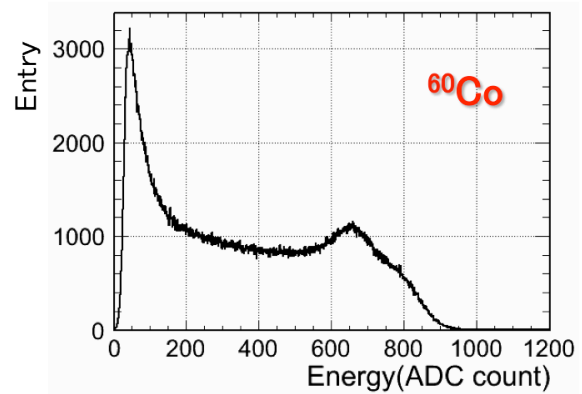
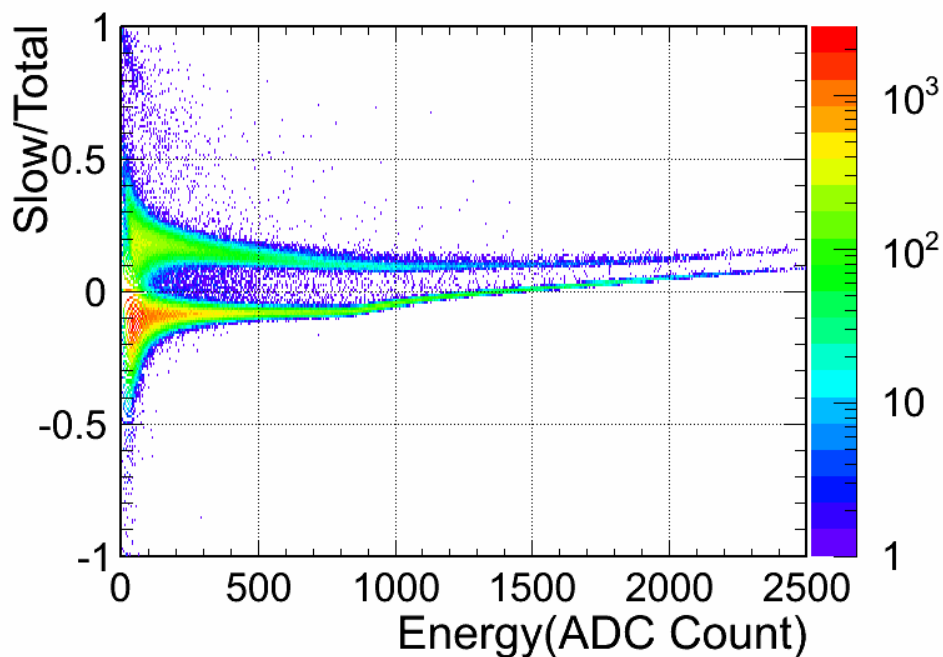


図 5.10 ゲートと2つの信号の生波形

図 5.11 ^{137}Cs 線源データ図 5.12 ^{60}Co 線源データ

5.3.2 中性子線源

中性子線源として ^{252}Cf を使用した。 ^{252}Cf は自発的核分裂により中性子と同時に γ 線も放出する。これらは液体シンチレータの波形弁別を用いることで両者を分離する。横軸に Fast をとり、縦軸に Slow/Total をとったものが、図 5.13 である (PSD 分布)。

図 5.13 ^{252}Cf 線源での PSD 分布

ER 事象である γ 線の信号には Slow がなく、NR 事象である中性子の信号には Slow があることがわかっているので、図 5.13 で見える 2 本のバンドのうち、下側が ER 事象で、上側が NR 事象であると考えられる。アンダーシュートの影響を受けて全体として Slow/Total が低くなってしまってい

る。そこで、ER 事象の Slow/Total が 0 となるように Slow の値に式 5.3.1 のような補正を行った。

$$\begin{aligned} Slow' &= -1.64 - 0.079 \cdot Fast (Fast \leq 750) \\ Slow' &= 2.62 - 1.25Fast + 4.93 \times 10^{-5}Fast^2 (Fast > 750) \end{aligned} \quad (5.3.1)$$

こうして補正した後の PSD 分布を図 5.14 に示す。補正後の分布では ER 事象は Slow/Total \sim 0 を中心に分布し、NR 事象は Slow/Total \sim 0.2 付近に分布していることがわかる。

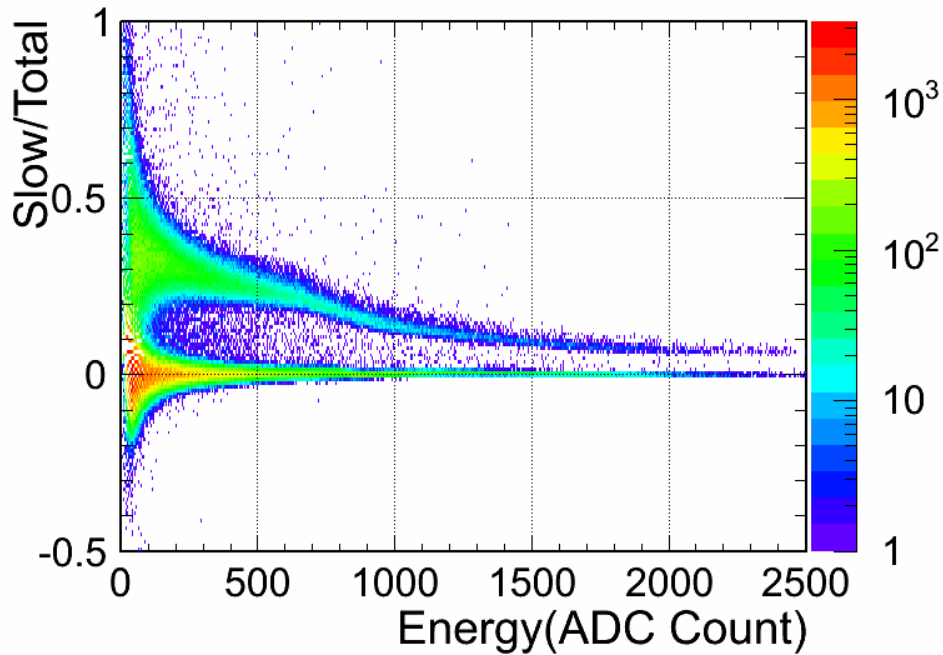


図 5.14 ^{252}Cf 線源での PSD 分布 (補正後)

ここで、Slow/Total のエネルギーに依存性を考慮し、エネルギー領域ごとの Slow/Total 分布を作成し、ER 事象と NR 事象のつくるピークを 2 つのガウス分布でフィット (式 5.3.2) する。

$$\begin{aligned} N_{ER}(x) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{N_{all}(1 - F_{NR})}{\sigma_{ER}} \exp\left(-\frac{0.5(x - Mean_{ER})^2}{\sigma_{ER}^2}\right) \\ N_{NR}(x) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{N_{all} \cdot F_{NR}}{\sigma_{NR}} \exp\left(-\frac{0.5(x - Mean_{NR})^2}{\sigma_{NR}^2}\right) \\ y &= (N_{ER}(x) + N_{NR}(x)) \end{aligned} \quad (5.3.2)$$

N_{all} はそのエネルギー領域でのデータのエン트리数 (定数) である。フィット変数として、 F_{NR} は N_{all} 中の NR 事象の割合、 $Mean_{NR} \cdot \sigma_{NR}$ は NR 事象のピークがガウス分布の形を持つとした時の中心値と広がりを表す。このようにしてフィットした結果を図 5.15 に示す。

そのフィット結果から、その領域ごとの NR 事象の量は $N_{all} \times F_{NR}$ から推測することができ、図 5.16 となる。

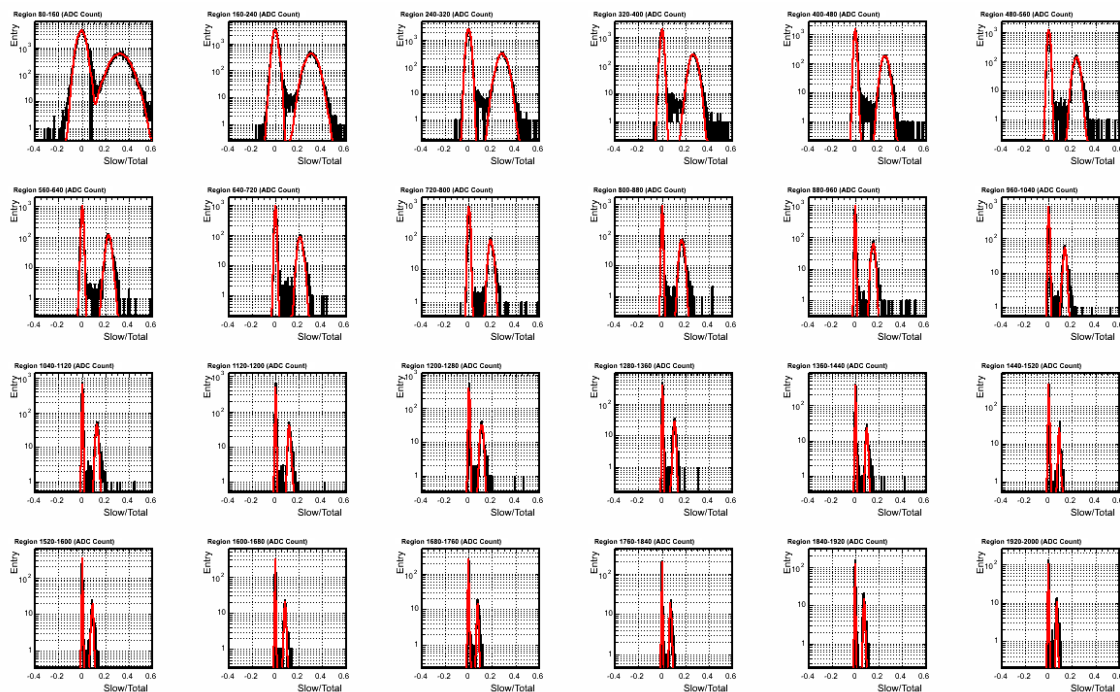


図 5.15 ^{252}Cf 線源、エネルギー領域ごとの PSD 分布

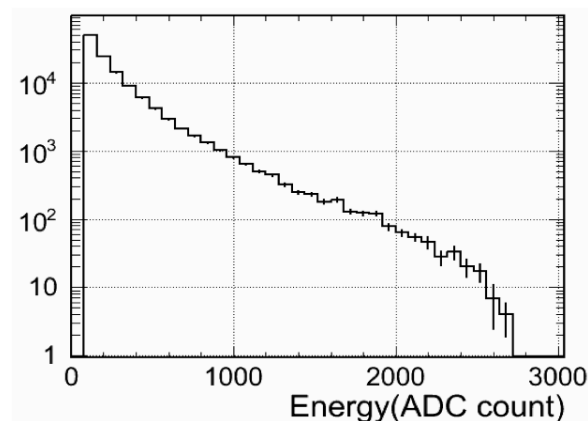


図 5.16 ^{252}Cf 線源、ER 事象のエネルギー分布

$ADCCount \sim 2200$ の領域でカットオフが見えているために、次節以降でのシミュレーションとの比較には $ADCCount \leq 2000$ の領域のみを用いることとする。

5.4 Geant4 シミュレーションの較正

各種線源データを用いて、検出器の振る舞いを再現するようシミュレーションを調整する。シミュレータには Geant4(GEometry ANd Tracking4)[20] を使用した。Geant4 は物質中を通過する粒子の振る舞いをシミュレートする大規模ソフトウェアである。

ジオメトリとして、BC501-A とそのアルミ容器、veto カウンター 5 枚とコンクリート壁 (床と 1

側面) を実装した (図 5.17)。662keV の γ 線を液体シンチレータに対して打ち込んだ時のイベントディスプレイを図 5.18 に載せる。液体シンチレータに入射した γ 線が電子を散乱して、飛跡が曲がっている様子が見える。

このようなジオメトリのもとで γ 線と中性子を生成して、検出器内で落としたエネルギーを求める。それらに対し、線源で取得したデータを再現するようなスケールを決定することでシミュレーションの較正を行ってゆく。

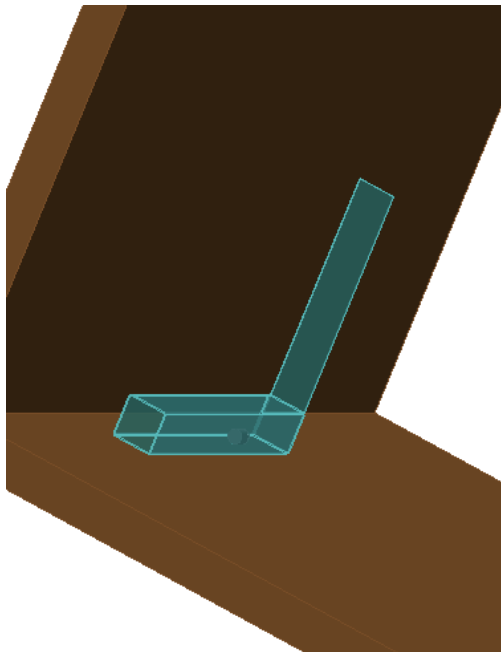


図 5.17 Geant に実装された Geometry

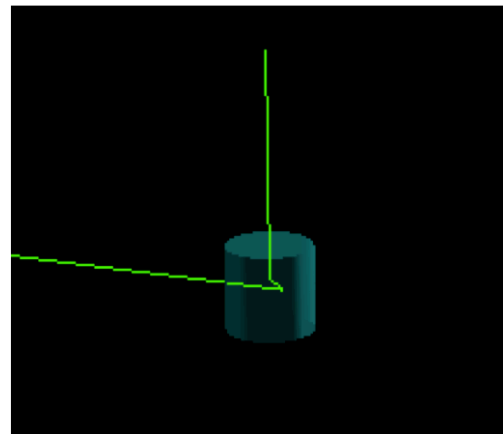


図 5.18 γ 線を打った時の Event Display

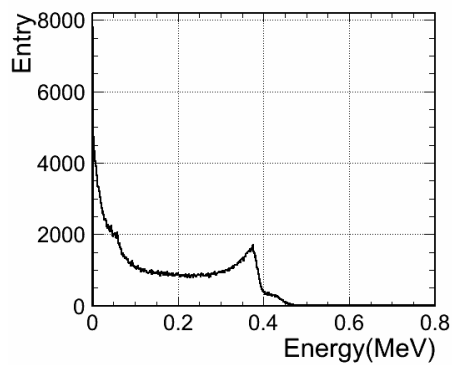
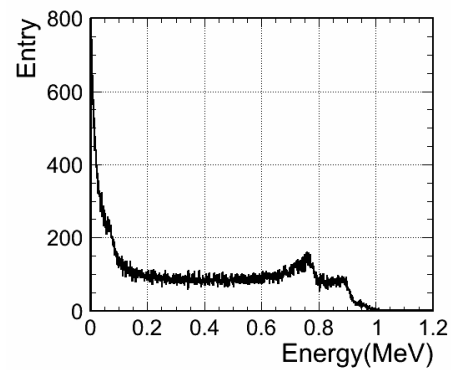
有機シンチレータの消光効果を考慮すべく、シミュレーション中のステップごとの損失エネルギーの計算時に Birks の公式 (5.1.2) を導入した。一回の生成時に液体シンチレータ内で落としたエネルギー E' は、式 5.4.1 のように書ける。

$$E' = \sum_{step} E'_{step} = \sum_{step} \frac{E_{step}}{1 + k_B \cdot dE_{step}/dx} \quad (5.4.1)$$

E_{step} がステップ毎に粒子が落としたエネルギーである。今回は $k_B=0.1$ とした。[19] 消光を考慮した Birks の公式により、シミュレーション上で落としたエネルギーから光量に相当する量を求めることができる。

5.4.1 γ 線

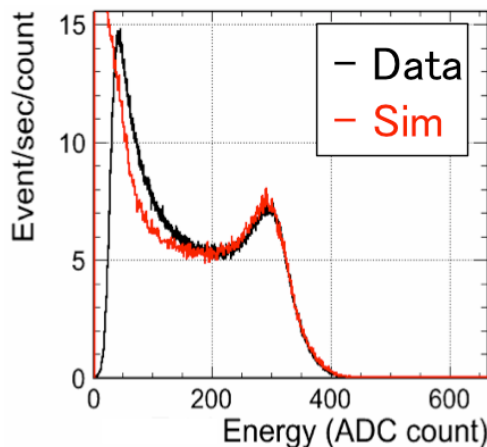
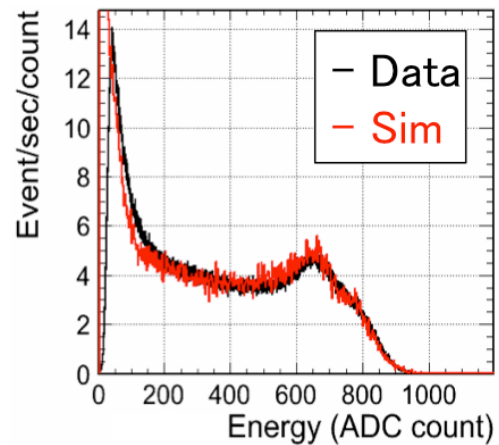
まずは、*gamma* 線について、Cs137:622keV、Co60:1.17MeV・1.33MeV を発生させた時の分布を図 5.19・図 5.20 に示す。

図 5.19 Geant4 による ^{137}Cs のエネルギー分布図 5.20 Geant4 による ^{60}Co のエネルギー分布

ここで得られた消光を考慮したエネルギー分布に対し、データを再現するようなスケールと、検出器の分解能を以下に定義する式で導入する。

$$Q_\gamma = \text{Gaus}(E_\gamma \cdot \alpha, \sigma \sqrt{E'_\gamma}) \quad (5.4.2)$$

ここで、 Q_γ は検出された電荷量 (ADCCount)、 E_γ はシミュレーションのエネルギー、 α 、 σ はここで求めるべきスケールと検出器分解能である。求められたスケールを用いてデータとシミュレーションを重ね描くと、図 5.21、図 5.22 となる。

図 5.21 ^{137}Cs のデータとシミュレーション図 5.22 ^{60}Co のデータとシミュレーション

どちらも、コンプトンエッジ付近は良くあっている。低エネルギーの領域については、液体シンチレータ以外の物質がシミュレーションに入っていないために再現が難しいものと考えられる。

5.4.2 中性子

次に、中性子についてシミュレーションの較正を行う。データ取得には ^{252}Cf を使用しており、シミュレーションに用いる生成時のエネルギースペクトルは式 5.4.3 の様に表され、図 5.23 の分布であ

る。[21]

$$N_{Neutron} = \exp(-0.88 \cdot E \cdot \sinh(\sqrt{2.0 \cdot E})) \quad (5.4.3)$$

このエネルギースペクトルから生成した消光を考慮したエネルギー分布を図 5.24 に示す。

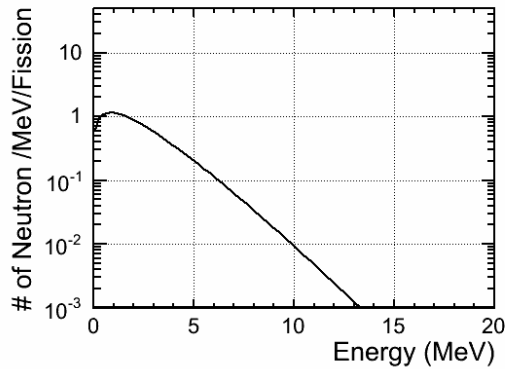


図 5.23 ^{252}Cf 線源の中性子のエネルギースペクトル

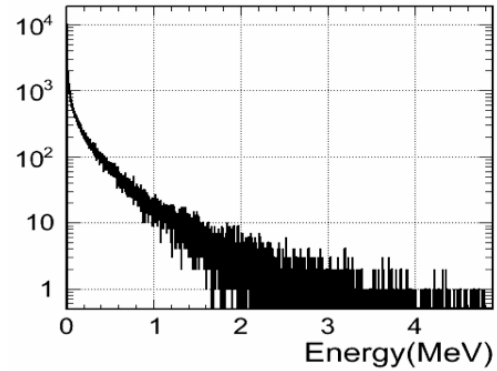


図 5.24 Geant4 による ^{252}Cf のエネルギー分布

ここで得られた消光を考慮したエネルギー分布に対し、エネルギースケールと検出器の分解能については γ 線で決めた値を使用し、さらに核的消光因子 Q_{fac} を導入する。

$$Q_{\gamma} = \text{Gaus}(E_n \cdot \alpha \cdot Q_{fac}, \sigma \cdot \sqrt{E_n \cdot Q_{fac}}) \quad (5.4.4)$$

スケール後のシミュレーションとデータを重ね描いたものが図 5.25 である。

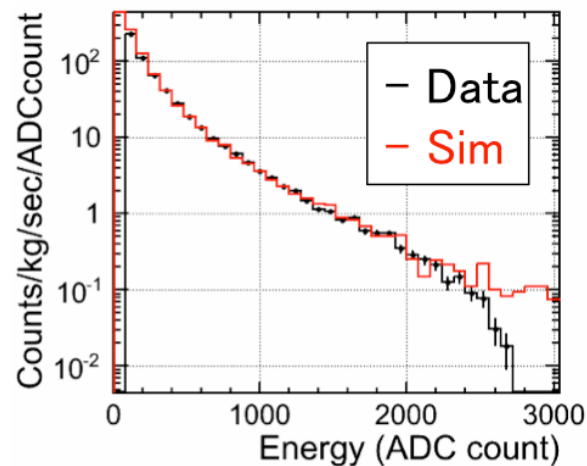


図 5.25 ^{252}Cf 線源 n 事象のデータとシミュレーション

シミュレーションとデータがよく一致しているように見える。ここではエントリー数のスケールも絶対値で一致している。

5.5 環境中性子フラックスの評価

バックグラウンドランでの中性子のエネルギースペクトルと、前節にて較正を行ったシミュレーションによる環境中性子のエネルギーのスペクトルを比較し、環境中性子フラックスの値を算出する。

バックグラウンドランとして約8日間のデータ取得を行った。この一連のデータについての情報を表5.5.4に載せる。

| | |
|--------------|--------------------|
| 取得期間 (秒) | 691200 |
| 全検出事象数 | 1.69×10^7 |
| veto される事象数 | 1.4×10^5 |
| PMT HV(V) | 1374 |
| トリガー閾値 (mV) | 5 |
| トリガーレート (Hz) | 28.4 |

表 5.5.4 バックグラウンドラン情報

バックグラウンドランでの PSD 分布を図 5.26 に載せる。ER 事象のバンドの上の、Slow/Total \sim 0.2 付近に NR 事象のバンドが見えており、これが環境中性子によるものだと考えられる。

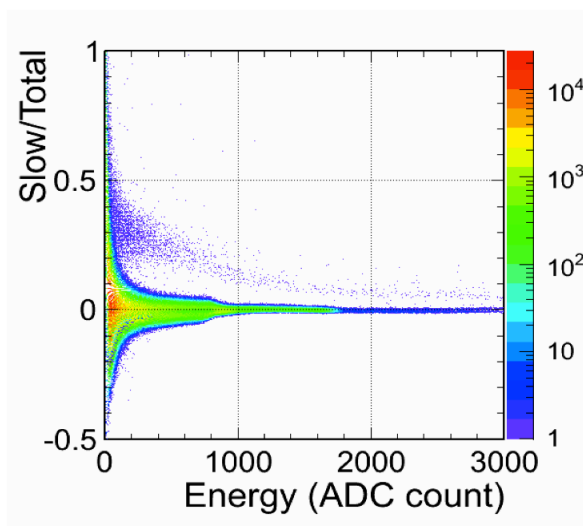


図 5.26 バックグラウンドランでの PSD 分布

このデータに対し、 ^{252}Cf データと同様にエネルギー領域ごとの Slow/Total 分布を作成し、それらを2つのガウス分布でフィットしたものを図 5.27 に示す。赤い線がフィットした ER 事象、青い点線がフィットした NR 事象を表す。

フィット結果より、NR 事象のイベント数を数え上げたスペクトルを図 5.28 に示す。

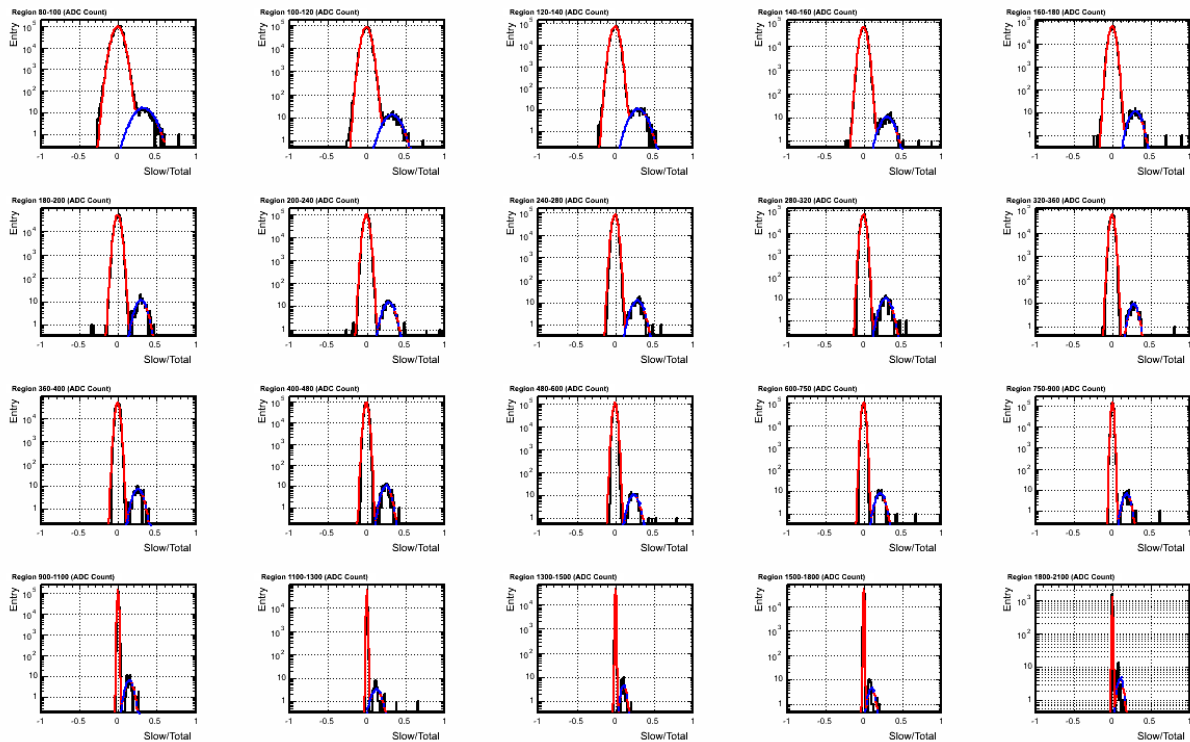


図 5.27 バックグラウンドラン、エネルギー領域ごとの PSD 分布

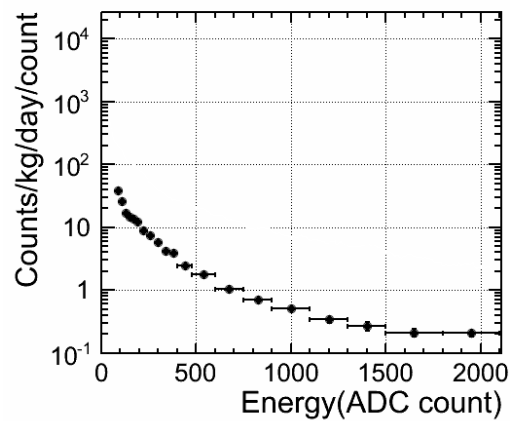


図 5.28 バックグラウンドラン NR 事象のエネルギースペクトル

データに対して、Ar 実験と同様に A/E 則と EXPACS から生成したシミュレーションによるスペクトルを重ね描いたものが図 5.29 である。

Ar での実験の結果では、データが取得したスペクトルがシミュレーションのバンドの上部にあったが、液体シンチレータの測定結果は、データがシミュレーションのバンドのさらに下側に位置している。

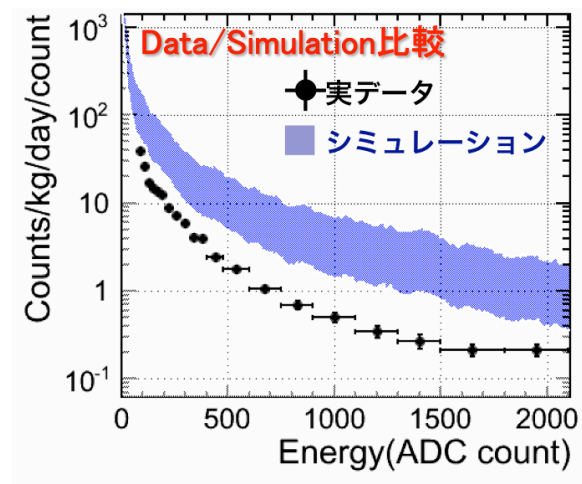


図 5.29 環境中性子反跳エネルギーのシミュレーションとの比較

6 まとめと今後の展望

中性子フラックスには周囲の環境に大きく依存し、実験を行う場所での測定が必要である。本研究では、LAr と液体シンチレータという独立な方法で環境中性子フラックスを評価した。

7 謝辞

本研究を行うきっかけを与えてくださり、物理学の面白さを教えてくださった寄田浩平准教授にはほんとうに感謝しております。この研究室で過ごした3年は私にとって非常に密度の濃く、新鮮な時間でした。また研究グループをまとめる田中雅士次席研究員には、何も知らない私に実験の初歩的なことからたくさんのごことを、懇切丁寧に、そして時に厳しく指導いただきました。招聘研究員の蛭名幸二氏にはシステムのことを教えて頂きました。秘書の坂本さんには、事務的な面で非常にお世話になりました。KEKの丸山和純氏とはゼミ合宿や授業などでご指導いただき、KEKへの訪問も快く受け入れてくださり大変お世話になりました。

また、研究室の博士の先輩方には研究を進めるに当たり様々な指導をいただきました。特に同じグループである藤崎氏にはどんな些細な質問にも丁寧に答えていただきました。

同期である、加地、鷲見、白神、仲松、昌子とは大変なときも楽しいときもたくさんのご時間を共有し、互いに磨きあうことができました。同期だからこそ、喧嘩もでき笑い合うこともでき良い関係を築くことができました。

皆様のおかげでこの3年なんとかやってこられました。改めて感謝しています。最後に、学業を続けさせてくれ、いつだって応援をしてくれた家族に心から感謝致します。

参考文献

- [1] K.G. Begeman, A.H. Broeils and R.H. Standers, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 249 (1991) 523.
- [2] Planck Collaboration:P.A.R.Ade, et al., "Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters", arXiv:1303.5076.
- [3] P.Benetti, et al., "First results from a Dark Matter search with liquid Argon at 87 K in the Gran Sasso Underground Laboratory", arXiv:astro-ph/0701286v2.
- [4] A.Badertscher, et al., "ArDM: first results from underground commissioning", arXiv:1309.3992.
- [5] Alex Wright, for the DarkSide Collaboration," The DarkSide Program at LNGS", arXiv:1109.2979.
- [6] P.Agnes, et al., "First Results from the DarkSide-50 Dark Matter Experiment at Laboratori Nazionali del Gran Sasso", arXiv:1410.0653.
- [7] DMTOOLS DARK MATTER LIMIT PLOT GENERATOR, (URL:<http://dmttools.brown.edu>).
- [8] 電磁場解析—磁場解析—熱伝導解析ソフト Femtet, (URL:<http://www.muratasoftware.com/products/>).
- [9] T.Washimi, "ANKOK 実験における大光量 2 相型プロトタイプ検出器の開発と性能評価", 早稲田大学物理学及応用物理学研究科修士論文 (2015).
- [10] R.Acciarri, et al., "Oxygen contamination in liquid Argon: combined effects on ionization electron charge and scintillation light", arXiv:0804.1222.
- [11] R.Acciarri, et al., "Effects of Nitrogen contamination in liquid Argon", arXiv:0804.1217.
- [12] C.Rubbia, et al., "Underground operation of the ICARUS T600 LAr-TPC: first results", arXiv:1106.0975.
- [13] P.Benetti, et al., "Measurement of the specific activity of ^{39}Ar in natural argon", *Nucl. Inst. Meth. A* 574 (2007) 83.
- [14] Evaluated Nuclear Data File(ENDF),(URL:<https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm>).
- [15] 物理学辞典編集委員会編, 物理学辞典 改訂版, 培風館, 1992.
- [16] JKevin S. Olsen, et al., "Analysis of alpha backgrounds in the DEAP-1 detector", arXiv:0906.0348
- [17] 石河寛昭, "液体シンチレーション測定法", 南山堂, 1981.
- [18] J.B.Birks, "The Theory and Practice of Scintillation Counting", Pergamon Press, Oxford, 1964.
- [19] M.Harada, et al., "Status Report: A Search for Sterile Neutrino at J-PARC MLF", (URL:http://research.kek.jp/group/mlfnu/status_report_141118.pdf).
- [20] Geant4: A toolkit for the simulation of the passage of particles through the matter, (URL:<http://geant4.cern.ch/>).

-
- [21] A.B.Smith, et al, "Spontaneous Fission Neutron Spectrum of ^{252}Cf ", Phys. Rev., 108 (1957)
2.