



修士学位論文

気液2相型 Ar 検出器における  
2次蛍光の基礎研究  
～波形解析と Ar 発光の中性制動放射成分～

2020/2/28

早稲田大学 先進理工学研究科 物理学及応用物理学専攻  
寄田浩平研究室

5318A036-4 武田知将



## 概 要

本研究室では、気液 2 相型 Ar 検出器を用いた暗黒物質の直接探索実験 (ANKOK 実験) を行っている。この検出器は、Ar が充填されており入射粒子が液相で液体 Ar と相互作用して発生する 1 次蛍光 (S1 信号)、それと同時に発生する電離電子が気相に取り出されて気体 Ar と相互作用して発生する 2 次蛍光 (S2 信号) を信号として検出する。S2 信号は暗黒物質直接探索実験において様々な役割がある。例を挙げると、事象の発生位置を 3 次元的に再構成することができ、壁際で発生した背景事象の除去を可能にする。また、1 電離電子しか生成しない低エネルギー反跳事象の検出が可能となるなど、物理感度に直結する要素も持っている。さらに、近年になり S2 信号に新たな発光成分の存在が示唆されるなど、未知な部分も多い。本研究では、S2 信号の基礎研究として特に S2 信号の波形解析と Ar 発光の中性制動放射成分の特性測定を行った。

S2 信号は液相で発生した電離電子が気相に取り出されて発光するため、電離電子の空間分布情報が波形に保存されている。そのため、S2 波形を理解することで 1 事象ごとの反応素過程をより詳細に解析することが可能となると考えられる。そこで、本研究では S2 信号の発光過程のモデル・定式化を行った。そして、得られた S2 波形関数を実際に 1MeV の高エネルギー電子反跳事象に対して適応した結果、反跳粒子の反跳方向の情報を得ることができた。

一般に、S2 信号は発光成分として気体 Ar の蛍光、特に VUV(真空紫外光) 成分のみであると考えられてきた。一方で、最近の研究で、S2 信号に中性制動放射成分が存在することが示唆されている。ただし現状、直接この発光成分を検出したという報告はない。この中性制動放射は、可視光を含む連続波長スペクトルを持つとされており、希ガス検出器への応用が期待される。そこで、本研究では中性制動放射成分の直接検出を目的に、常温気体 Ar を用いた S2 詳細特性用の検出器を新たに作成し、波長フィルターと分光器の 2 つの方法で S2 信号の波長スペクトル測定を行った。その結果、波長フィルター測定では、ガスアルゴン蛍光や N<sub>2</sub> 不純物発光成分が存在しない可視光領域で中性制動放射と同じ電場依存性を持つこと発光成分の存在が確認された。さらに、得られた S2 波長スペクトルは中性制動放射、ガス Ar 蛍光、N<sub>2</sub> 不純物発光で構成され、500nm~600nm の領域は中性制動放射成分のみで説明できることがわかった。また、分光器測定では 450 ~ 600nm の領域で一様なスペクトルが確認された。このように 2 つの異なる測定で可視光領域に中性制動放射成分とみられる発光成分を観測し、その存在を強く示唆する結果が得られた。

## 目次

|          |                                 |           |
|----------|---------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>序論</b>                       | <b>8</b>  |
| 1.1      | 暗黒物質とは                          | 8         |
| 1.2      | 暗黒物質探索                          | 9         |
| 1.3      | WIMP 直接探索実験の現状                  | 10        |
| <b>2</b> | <b>ANKOK 実験</b>                 | <b>12</b> |
| 2.1      | Ar の基礎特性                        | 12        |
| 2.2      | 気液 2 相型 Ar 検出器                  | 13        |
| 2.2.1    | 検出原理                            | 13        |
| 2.2.2    | 粒子識別                            | 13        |
| <b>3</b> | <b>現状理解されている S2 信号特性</b>        | <b>15</b> |
| <b>4</b> | <b>S2 波形解析</b>                  | <b>17</b> |
| 4.1      | 背景                              | 17        |
| 4.2      | S2 波形のモデル化                      | 17        |
| 4.3      | 実験セットアップ                        | 20        |
| 4.4      | データ取得・事象選択                      | 22        |
| 4.4.1    | S2 波形に対する fit                   | 24        |
| 4.5      | 考察と今後の展望                        | 26        |
| <b>5</b> | <b>ガス Ar 発光の中性制動放射成分</b>        | <b>27</b> |
| 5.1      | 背景                              | 27        |
| 5.2      | ガス Ar 蛍光成分                      | 29        |
| 5.2.1    | Ar 混合ガス発光成分                     | 30        |
| 5.3      | 中性制動放射 (Neutral bremsstrahlung) | 33        |
| 5.4      | 波長フィルターによる S2 波長スペクトル測定         | 35        |
| 5.4.1    | 実験セットアップ                        | 35        |
| 5.4.2    | データ取得                           | 38        |
| 5.4.3    | 解析                              | 40        |
| 5.4.4    | S2 光量の電場依存性                     | 42        |
| 5.4.5    | S2 波長スペクトルの算出と理論計算との比較          | 43        |
| 5.5      | 分光器による S2 波長スペクトル測定             | 46        |
| 5.5.1    | 実験セットアップ                        | 46        |
| 5.5.2    | 解析                              | 47        |
| 5.5.3    | 測定結果                            | 49        |
| 5.6      | 考察                              | 51        |
| 5.7      | 今後の展望                           | 51        |
| <b>6</b> | <b>まとめ</b>                      | <b>54</b> |

|             |    |
|-------------|----|
| 目 次         | 4  |
| 7 謝辞        | 55 |
| 付録電離電子数の測定系 | 58 |

## 図 目 次

|    |                                                                                                                   |    |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1  | 宇宙の構成要素 . . . . .                                                                                                 | 8  |
| 2  | 渦巻銀河 NGC6503 の回転曲線 [4] . . . . .                                                                                  | 9  |
| 3  | 暗黒物質探索のアプローチ . . . . .                                                                                            | 10 |
| 4  | WIMP 直接探索実験の現状 . . . . .                                                                                          | 10 |
| 5  | 気液 2 相型光 TPB 検出器の概略図 . . . . .                                                                                    | 13 |
| 6  | S1 波形の違い . . . . .                                                                                                | 14 |
| 7  | S2/S1 光量比の違い . . . . .                                                                                            | 14 |
| 8  | Z 方向の位置分解能 [10] . . . . .                                                                                         | 15 |
| 9  | ER 事象の S2(S1) 光量の Drift 電場依存性 [11] . . . . .                                                                      | 16 |
| 10 | ER 事象の S2 光量の取り出し電場と圧力依存性 . . . . .                                                                               | 16 |
| 11 | ガス Ar 蛍光の波形 [12] . . . . .                                                                                        | 17 |
| 12 | S2 信号の波形 [13] . . . . .                                                                                           | 17 |
| 13 | geant4 で得られた levent の反跳電子の軌跡 左：電離電子空間分布の z 方向射影分布 真ん中：Y-Z 平面上での反跳電子の軌跡 右：Z-X 平面上での反跳電子の軌跡 . . . . .               | 18 |
| 14 | S2 発光過程のモデル図 . . . . .                                                                                            | 19 |
| 15 | 気液 2 相型検出器の実験セットアップ . . . . .                                                                                     | 21 |
| 16 | 容器内圧と液面の 5 日間の安定稼働 . . . . .                                                                                      | 21 |
| 17 | 検出器の写真 . . . . .                                                                                                  | 21 |
| 18 | 検出器の断面図 . . . . .                                                                                                 | 21 |
| 19 | 取り出し領域の詳細図 . . . . .                                                                                              | 22 |
| 20 | $^{60}\text{Co}$ による $\gamma$ 線源データの測定例 . . . . .                                                                 | 22 |
| 21 | 取得波形例 (赤：上 PMT、青：下 PMT) . . . . .                                                                                 | 22 |
| 22 | 線源を液面下 4.7cm に設置したときの DriftTime 分布 $[40\mu\text{s}, 70\mu\text{s}]$ に peak が表れている . . . . .                       | 23 |
| 23 | $^{60}\text{Co}$ の $\gamma$ 線源データの S1 光量分布 $[1500\text{p.e.}, 3000\text{p.e.}]$ 付近に Compton Edge が表れている . . . . . | 23 |
| 24 | S2 平均波形を S2 波形関数で fit した結果 . . . . .                                                                              | 24 |
| 25 | S2 波形を fit した結果 (線源位置：4.7cm) . . . . .                                                                            | 25 |
| 26 | S2 波形 fit の $\chi^2/NDF$ 分布 . . . . .                                                                             | 25 |
| 27 | $\tau_2$ の fit 結果 . . . . .                                                                                       | 25 |
| 28 | $T_{ini}$ の fit 結果 . . . . .                                                                                      | 26 |
| 29 | 先行研究の実験セットアップ [16] . . . . .                                                                                      | 27 |
| 30 | 先行研究で使用している PMT の QE と部材の波長透過率 [16] . . . . .                                                                     | 27 |
| 31 | S2 光量の実測値と中性制動放射の理論値の比較 [17] . . . . .                                                                            | 27 |
| 32 | 各 S2 発光成分の光量の電場依存性 [17] . . . . .                                                                                 | 27 |
| 33 | S2 平均波形の取り出し電場依存性 . . . . .                                                                                       | 28 |
| 34 | 希ガスの蛍光波長と PMT 窓材の波長透過率 [15] . . . . .                                                                             | 28 |
| 35 | TPB 未蒸着の PMT と TPB 蒸着の PMT の検出光量の比較 [17] . . . . .                                                                | 28 |
| 36 | ガス Ar 蛍光の UV 成分 [19] . . . . .                                                                                    | 30 |

|    |                                                                 |    |
|----|-----------------------------------------------------------------|----|
| 37 | Ar と N <sub>2</sub> の混合ガスの発光波長スペクトル [22]                        | 31 |
| 38 | Ar と N <sub>2</sub> 、Xe のエネルギー準位図 [21]                          | 32 |
| 39 | CO <sub>2</sub> による消光効果 [22]                                    | 33 |
| 40 | CH <sub>4</sub> による消光効果 [22]                                    | 33 |
| 41 | 中性制動放射の反応図 (弾性散乱過程)[16]                                         | 33 |
| 42 | 電子と Ar の反応断面積 [16]                                              | 34 |
| 43 | 中性制動放射の波長スペクトルの理論計算値 [16]                                       | 34 |
| 44 | 中性制動放射 (水色 : 理論計算値) と電子比例蛍光 (黒 : 理論計算値、赤 :<br>実測値) の電場依存性, [16] | 34 |
| 45 | 検出器の断面図                                                         | 35 |
| 46 | 検出器の写真                                                          | 35 |
| 47 | anode 面                                                         | 36 |
| 48 | 導電性テープ導入前の S2 光量の時間依存性                                          | 36 |
| 49 | 導電性テープ導入後の S2 光量の時間依存性                                          | 36 |
| 50 | 使用した PMT の QE                                                   | 37 |
| 51 | ロングパスフィルターの透過率                                                  | 37 |
| 52 | ロングパスフィルターの写真                                                   | 37 |
| 53 | ロングパスフィルターなし                                                    | 38 |
| 54 | ロングパスフィルターあり (cutoff 波長 : 600nm)                                | 38 |
| 55 | S2 光量と電子数の時間依存性 (白抜き点と色抜き点は別々に測定したもの)<br>(赤 : 電子数、青、緑 : VL PMT) | 40 |
| 56 | R6835 で取得した生波形 (灰色線) とクラスタリング波形 (赤線)                            | 40 |
| 57 | VL PMT の Fast vs PSD 分布                                         | 41 |
| 58 | VUV 成分                                                          | 43 |
| 59 | UV 成分                                                           | 43 |
| 60 | VL 成分                                                           | 43 |
| 61 | 各発光成分の波長スペクトル                                                   | 44 |
| 62 | 光子到達効率の波長依存性 (赤 : 屈折率と光減衰率を考慮した場合、黒 : 屈<br>折率と光減衰率を考慮しない場合)     | 45 |
| 63 | S2 波長スペクトルの測定値と中性制動放射の波長スペクトルの比較                                | 46 |
| 64 | 分光器測定の実験セットアップ                                                  | 46 |
| 65 | S2 波長スペクトル                                                      | 50 |
| 66 | S2 波長スペクトル                                                      | 50 |
| 67 | S2 光子放出方向測定の設定アップ                                               | 52 |
| 68 | S2 光量の上下比の電場依存性                                                 | 52 |
| 69 | 電子読み出しの設定アップ                                                    | 58 |
| 70 | shaper amp の出力積分値                                               | 58 |

## 表 目 次

|   |            |    |
|---|------------|----|
| 1 | Ar の特性 [7] | 12 |
|---|------------|----|

---

|    |                                  |    |
|----|----------------------------------|----|
| 2  | S2 波形関数の初期パラメータ値 . . . . .       | 24 |
| 3  | PMT のスペック値 . . . . .             | 36 |
| 4  | データ取得条件 . . . . .                | 39 |
| 5  | 各信号の積分領域 . . . . .               | 41 |
| 6  | cut 値のまとめ . . . . .              | 41 |
| 7  | 各信号の光量安定性 . . . . .              | 42 |
| 8  | スリット幅と波長分解能 . . . . .            | 47 |
| 9  | データ取得条件 . . . . .                | 47 |
| 10 | cut 値のまとめ . . . . .              | 48 |
| 11 | VL PMT の計算領域 . . . . .           | 48 |
| 12 | 遮光したときの各領域の event rate . . . . . | 49 |



## 1 序論

### 1.1 暗黒物質とは

我々人類が理解している物質は宇宙を構成している物質の内のおよそ 4% に過ぎず、残りの物質は未だ観測されていない未知の物質である。図 1 に宇宙の構成要素を示す [1]。これは宇宙マイクロ波背景放射の観測により得られたものであるが、図 1 によると、約 95% は未知の物質である。

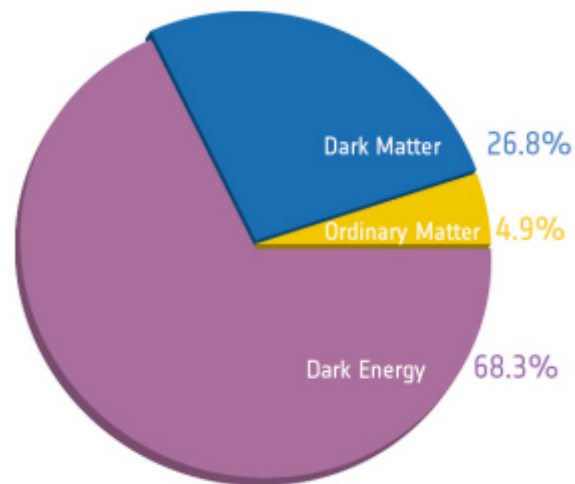


図 1: 宇宙の構成要素

その内の約 27% が暗黒物質 (Dark Matter) と呼ばれており、標準理論の枠組みでは説明できず、新粒子であると考えられている。

暗黒物質は 1937 年に F.Zwicky によりその存在が提唱されたとされている。Zwicky は髪の毛座銀河団内の銀河を観察し、銀河の力学的質量と光学的質量を測定した。力学的質量とは、ビリアル定理より銀河の速度から算出される質量であり、以下の式より求められる。

$$2\bar{K} + \bar{U} = 0 \quad (1)$$

$K$  :  $N$  質点系の全運動エネルギー

$U$  :  $N$  質点系の全重力ポテンシャル

一方、光学的質量とは太陽の絶対光度に対する銀河の光度より算出する質量である。その測定結果は銀河の力学的質量が約 500 倍光学的質量よりも大きいものであり [2]、光を発しない”暗黒物質”の存在を提案した。その後、宇宙観測により、暗黒物質の存在を支持する観測結果が多く得られた。

その一つに円盤銀河の回転曲線問題が挙げられる [3]。銀河の回転速度はケプラーの法

則により、以下の式で与えられる。

$$\frac{v(r)^2}{r} = \frac{GM(r)}{r^2} \quad (2)$$

$r$  : 銀河中心からの距離

$v(r)$  : 銀河の回転速度

$M(r)$  : 半径  $r$  内にある銀河の質量

円盤銀河は中心部が非常に明るいため、光学的に観測される物質のみで銀河の回転速度  $v(r)$  を決めると式 (2) より中心からの距離  $r$  の  $-1/r^2$  乗に比例することが予想される (式 3)。

$$v(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}} \quad (3)$$

しかし、観測結果によると回転速度は銀河中心からの距離  $r$  によらずほぼ一定値をとることが判明した。渦巻銀河 NGC6503 の回転速度の観測結果を図 2 に示した。黒点は星間ガス中の中性水素による 21cm 線のドップラーシフトにより測定された回転曲線で、破線が光学的に観測される物質のみ説明される成分である。このように、回転曲線は銀河中心からの距離が大きくなっても、一定であることがわかる。このことから、銀河の円盤部分にハロー状に光学的に観測されない物質 (暗黒物質) が分布していると考えられている。

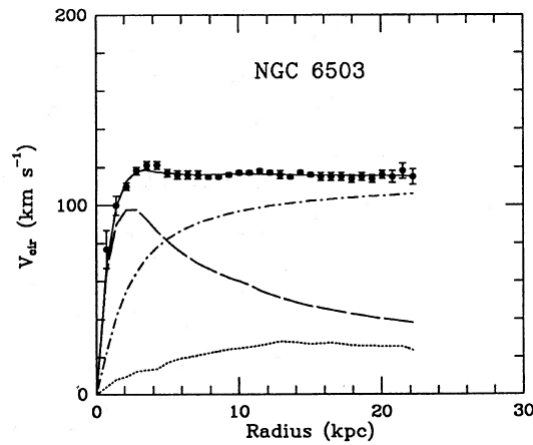


図 2: 渦巻銀河 NGC6503 の回転曲線 [4]

## 1.2 暗黒物質探索

暗黒物質の候補として有力視されているものの 1 つとして、WIMP (Weakly Interacting Massive Particle) が挙げられる。WIMP は質量をもち弱く相互作用する粒子の総称である。図 3 に暗黒物質と標準模型で記述される粒子の相互作用を表したダイアグラムを示した。このダイアグラムは暗黒物質探索実験は大きく分けて 3 種類の探索方法があるを示している。1 つ目は暗黒物質と標的原子核の相互作用を観測する直接探索である。直接探索

実験では、標的原子核が暗黒物質との弾性散乱で得た反跳エネルギーを光、熱、電離のどれかに変換して検出する。この探索方法では、直接暗黒物質の存在を検証することができる。2つ目は暗黒物質が対消滅、または崩壊する事象を観測する間接探索である。間接探索では、暗黒物質が対消滅や崩壊する際に放出する $\gamma$ 線や陽電子等を検出する。3つ目は標準模型粒子同士を高エネルギー状態で衝突させて暗黒物質を作る加速器実験である。

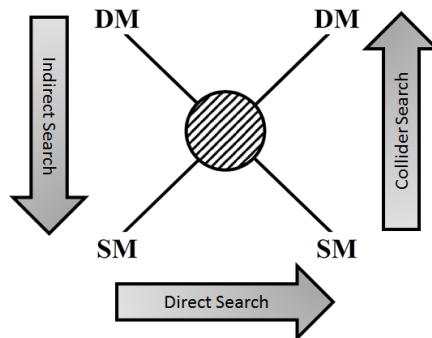


図 3: 暗黒物質探索のアプローチ

### 1.3 WIMP 直接探索実験の現状

暗黒物質直接探索実験では、暗黒物質により弾性散乱された標的原子核を検出することが目的であることは上で述べた。

図 4 に 2018 年現在の WIMP 直接探索実験の現状を示した。この図の横軸は WIMP の質量であり、縦軸が WIMP と核子の反応断面積である。線で示された右上の領域は暗黒物質の存在が棄却されており、色塗りされた領域は暗黒物質の存在が主張されている。WIMP 質量  $\sim 10\text{GeV}$ 、反応断面積  $\sim 10^{-40}\text{cm}^2$  付近の領域は暗黒物質の存在を主張する実験と存在を棄却する実験が混在しており、非常に興味深い領域となっている。

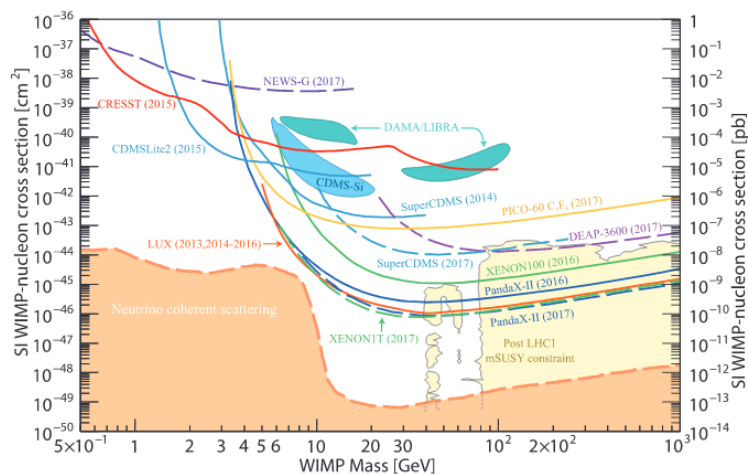


図 4: WIMP 直接探索実験の現状

直接探索の戦略により検出器に求められる要素が異なる。図4でより低質量のWIMPを探索する場合、標的原子核を反跳する反跳エネルギーが小さくなり、検出する信号も小さくなるため低エネルギー閾値化が必要である。一方、より小さい反応断面積を探索する場合は、事象の統計を稼ぐために検出器の大質量かが重要となる。そして両方について重要な要素としては背景事象の低減である。

暗黒物質の発見を主張するに当たり、その証拠となり得るものとして最も確実性があるのは”暗黒物質の風”を観測することである[6]。暗黒物質の風とは、太陽系が銀河内を公転していることより生じている事象で、地球上の静止系から見ると暗黒物質が白鳥座方向から多く飛来してくることを示している。加えて、地球は太陽の周りを公転している、また地球自身自転をしているため、暗黒物質の飛来数は季節変動、日変動していることが予想されている。DAMA-LIBRA実験は、このことに基づき、計数率の季節変動が暗黒物質の飛来数の季節変動に矛盾しないことから存在を主張している。ただし、計数率のみでは他の事象(宇宙線ミューオン、地下水等)の季節変動などが影響している可能性を捨てきれないため、背景事象を完全に理解しないと暗黒物質を検出したとはいえない。暗黒物質の風を検出する方法として計数率の季節変動を検出するほかに、入射粒子の到来方向がわかる検出器を使用することが挙げられる。到来方向がわかることで、白鳥座方向からくる暗黒物質による信号事象とランダムにくる背景事象を分離することができ、暗黒物質の検出につなげることが可能となる。

## 2 ANKOK 実験

早稲田大学寄田研究室では、質量 $\sim 10[\text{GeV}/c^2]$ 、反応断面積 $\sim 10^{-41}[\text{cm}^2]$ 領域のWIMP直接探索を目的とした暗黒物質直接探索実験、ANKOK 実験を行っている。現在、早稲田大学構内で気液 2 相型 Ar 検出器の R&D を進めている。

### 2.1 Ar の基礎特性

希ガスは暗黒物質直接探索実験の検出媒体と以下のような優れた性質を持っている。

- 密度が大きく暗黒物質との反応率が高い
- 閉殻しており電離電子を捕獲しにくい
- W 値が小さく蛍光量が多い

希ガスの中でも Xe や Ar が実験で利用されている。Ar の物理的、化学的性質を表 1 に示す。

表 1: Ar の特性 [7]

| 特性                          | 状態             | 値      |
|-----------------------------|----------------|--------|
| 原子番号                        | -              | 18     |
| 原子量 ( $\text{g mol}^{-1}$ ) | -              | 39.948 |
| 蛍光波長 (nm)                   | 液体             | 128    |
| 電離の W 値 (eV)                | 気体             | 26.4   |
| 電離の W 値 (eV)                | 液体             | 23.6   |
| 蛍光の W 値 (eV)                | 液体             | 19.5   |
| 沸点 (K)                      | 1atm           | 87.26  |
| 融点 (K)                      | 1atm           | 83.78  |
| 比重 ( $\text{kg m}^{-3}$ )   | 気体 (273K,1atm) | 1.7606 |
| 比重 ( $\text{kg m}^{-3}$ )   | 液体             | 1399   |
| 比誘電率                        | 気体             | 1      |
| 比誘電率                        | 液体             | 1.53   |

Ar の蛍光は主に 2 量体励起状態から発生する（詳しくは 5.2 節参照）。Ar の 2 量体励起状態には、1 重項と 3 重項がありそれぞれ発光時定数が異なる。液体 Ar の場合は $\sim 6\text{ns}$ 、 $\sim 1.5\mu\text{s}$ 、ガス Ar の場合は $\sim 11\text{ns}$ 、 $\sim 3.2\mu\text{s}$ の時定数を持つ。暗黒物質直接探索実験で利用される希ガスは Ar の他に Xe がある。Xe は Ar に比べて W 値が小さく発光が多いという利点がある。一方、Ar は原子量が小さく、低質量 WIMP 探索に向いている、比較的安価である、PSD による事象分離が強力といった利点がある。

## 2.2 気液 2 相型 Ar 検出器

図 5 に ANKOK 実験で使用している気液 2 相型 Ar 検出器の概略図を示す。図 5 のように、検出器内に液体 Ar とガス Ar が充填されている。また、液体 Ar 中と液体 Ar とガス Ar の境界に 2 つの電場が印加されている。液体 Ar 中に印加されている電場 (Drift 電場) は、液相で発生した電離電子を検出器上部に Drift するためのもので  $\sim 1kV/cm$  の電場を形成している。

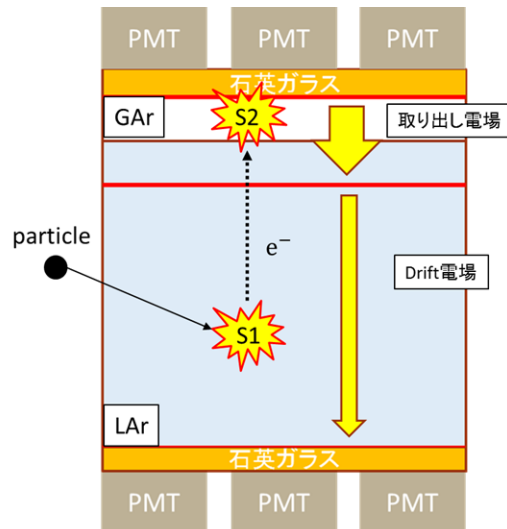


図 5: 気液 2 相型光 TPB 検出器の概略図

### 2.2.1 検出原理

この検出器は、2 つの Ar 蛍光を信号としている。1 つ目は、入射粒子が検出内の液体 Ar と相互作用を起こし発生する 1 次蛍光 (S1 信号) である。2 つ目は、S1 信号と同時に発生した電離電子が検出内に印加されている電場により気相に取り出され、ガス Ar と相互作用することで発生する 2 次蛍光 (S2 信号) である。これら 2 つの Ar 蛍光は検出器上下に取り付けられている光電子増倍管 (PMT) により検出される。ここで、Ar 蛍光の主成分である 128nm 光は PMT 窓面や検出器壁面に蒸着されている波長変換剤 (TPB 等) により波長変換されたうえで検出される。

### 2.2.2 粒子識別

この検出器の重要な特性として挙げられるのが、入射粒子の識別が可能であることである。この検出器では入射粒子は電子反跳事象 (ER 事象) と原子核背景事象 (NR 事象) に大別される。ER 事象は入射粒子が Ar 原子の軌道電子を反跳する事象であり、電磁相互作用を起こす  $\gamma$  線や  $\beta$  線により引き起こされる。NR 事象は入射粒子が Ar 原子核を反跳す

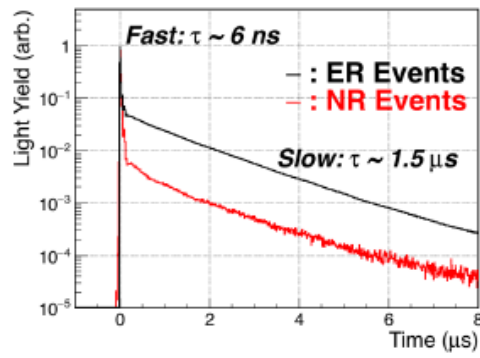


図 6: S1 波形の違い

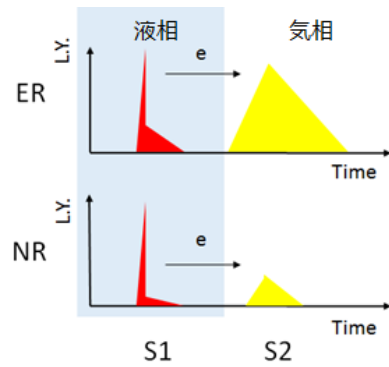


図 7: S2/S1 光量比の違い

る事象であり、電荷をもたない暗黒物質や中性子により引き起こされる。これらの事象は S1 波形 (図 6) や S2/S1 光量比 (図 7) により分離することができる。

### 3 現状理解されている S2 信号特性

S2 信号には上記で述べた粒子識別以外にも、暗黒物質直接探索実験にとって重要な特性がある。ここでは、気液 2 相型検出器における S2 信号の現在知られている特性についてまとめる。

まず、S2 信号の重要な特性として挙げられるのは、事象の発生位置情報を保存している点である。S1 信号が検出器の液相で入射粒子と Ar 原子の反応点で発光するのに対し、S2 信号はその反応点直上の気相で発光をする。そのため、S1 信号と比べて S2 信号は XY 平面上の事象位置分解能が優れている。実際に、他実験ではあるが DarkSide50 は S2 信号を利用した XY 平面の位置分解能は  $0.6\text{cm}(@20 \times 10^3 PE)$  となっている。[8][9]

また、S1 信号と S2 信号の検出時間差を取ることで、Z 方向の位置再構成が可能となる。実際に、ANKOK 実験では Z 方向の位置分解能は  $1\text{mm}$  程度である (図 8)[10]。これにより、検出器の有感領域の決定ができ、検出器壁面、側面で発生する背景事象 (検出器部材由来の放射性不純物による事象など) を除去することが可能となる。

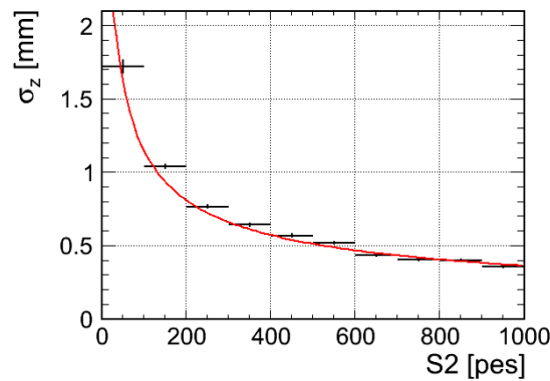


図 8: Z 方向の位置分解能 [10]

続いて、S2 信号の発光量に可変性がある点である。これについても、S2 発光過程が関係している。S1 信号の発光量は基本的に反跳粒子の反跳エネルギーで決まる。S2 信号の発光量は反跳粒子の反跳エネルギーはもちろん、Drift 電場 (電離電子数)、取り出し電場、気相の圧力、気相中の電離電子の Drift 距離等様々なパラメータで決まる。これらのパラメータは検出器設計、検出器内環境に関わる部分であるため、我々の手で比較的簡単に変更できる。図 9 に S2 光量の Drift 電場依存性、図 10 に S2 光量の取り出し電場と圧力依存性を示す。このように S2 光量は Order 1 の範囲でコントロールすることが可能である。

これは検出感度に関わる話で、例えば S1 信号では検出できないような低エネルギー反跳事象でも、1 電離電子さえ発生すれば S2 信号で検出することが可能となる。このように、S2 信号のみで解析することで Xenon1T や DarkSide50 は S1 信号では到達することのできない低質量領域の探索を可能としている。

続いて、S2 信号の波形の情報量の豊富さである。S1 信号は上述したが、PSD を使い粒



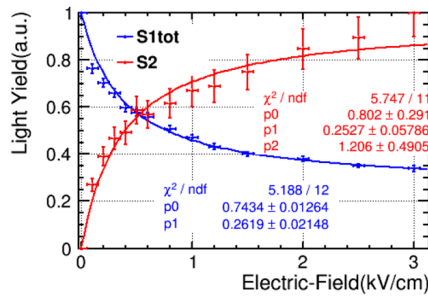


図 9: ER 事象の S2(S1) 光量の Drift 電場依存性 [11]

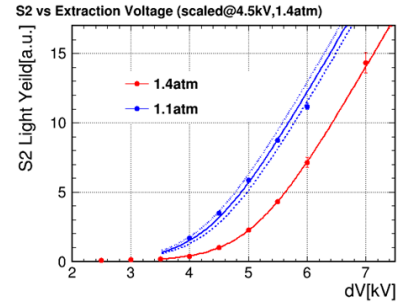


図 10: ER 事象の S2 光量の取り出し電場と圧力依存性

子識別ができるように信号波形に暗黒物質探索において非常に重要な情報が含まれている。同じように S2 信号波形は、電離信号であるため液相で発生した電離電子の空間分布に影響を受けていると考えられる。そのため、S2 信号波形を理解することで、各事象ごとの電離電子の情報を取り出すことが可能になる。実際に、DarkSide50 では S2 信号波形から電離電子の空間分布の拡散度合いを算出し、S2 信号のみで Z 位置再構成を行っている。このように、S2 波形の理解は各事象の情報量の底上げにつながり、重要なトピックスであると考えられる。

さらに近年になってこれまで考えられてきた S2 信号の発光成分である電子比例蛍光とは異なる性質を持つ新たな発光成分の存在が示唆されている。これは中性制動放射 (Neutral Bremsstrahlung) と呼ばれており、連続波長スペクトルを持つ、発光の電場閾値が低い、発光時定数が短い等の特性があると考えられている。ただし、S2 信号においてこの発光成分の存在はまだ確認されておらず、その詳細な特性は未知である。

このように S2 信号には暗黒物質直接探索実験にとって有益な性質を多く有しており、また今だ解明されていない性質も存在している。

本論文ではこれらのトピックスの中で、特に S2 波形解析 (第 4 章) と Ar 発光の中性制動放射成分 (第 5 章) についてまとめる。

## 4 S2 波形解析

### 4.1 背景

S2 信号は気相で発生するため、ガス Ar 発光の性質を有している。大気圧下、またはそれよりも高圧化にあるガス Ar の蛍光としては Ar2 量体の励起・脱励起による発光が主であることがわかっている<sup>1</sup>。図 11 にガス Ar 蛍光波形 [12]、図 12 に S2 波形 [13] を示した。これを見ると明らかなように、S2 波形はガス Ar 蛍光波形に比べてなまったような形をしている。これは S2 信号が電離電子の情報を保持しているためであり、event ごとに波形は異なる。

ここでは、S2 信号の生成を反応素過程からモデル・定式化を行った。そして、event by event に fitting することで、各 event の電離電子情報を引き出すことを行った。

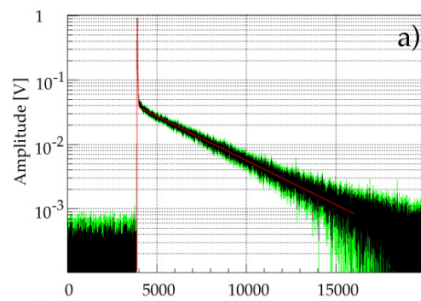


図 11: ガス Ar 蛍光の波形 [12]

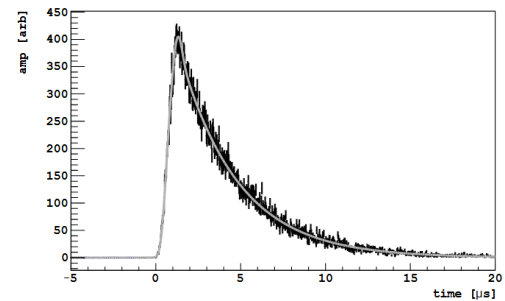


図 12: S2 信号の波形 [13]

### 4.2 S2 波形のモデル化

S2 波形のモデル化に伴い、以下の 4 つの過程を考える。ただし、ここでは  $^{60}\text{Co}$  による高エネルギー ER 事象の S2 波形について考察する。

#### 1. 電離電子生成過程

まず、fiducial 内に粒子が入射すると、Ar と相互作用を起こし、電子 (ER) または原子核 (NR) を反跳する。その反跳粒子が液体 Ar 中を進みながら Ar を電離するため、反跳粒子の軌跡に沿って電離電子が生成される。ここで、S2 波形に影響するのは、 $z$  方向の電離電子分布である。このことから、反跳粒子の反跳方向と反跳エネルギー、電離電子の  $z$  方向分布が S2 波形に影響を及ぼす。

電離電子の  $z$  方向分布を見積もるために、geant4 によるシミュレーションを行った。ここでは、1.5m 四方の world 内に直径 20cm、高さ 100cm の円柱型の液体 Ar を設置をし、円柱側面から  $^{60}\text{Co}$  の  $\gamma$  線 (1.1MeV、1.3MeV) を照射した。シミュレーションで得られた 1event 分の電離電子の  $z$  方向分布を図 13 に示す。横軸は反跳電子の  $z$  方向の飛程、縦軸は各 step での反跳電子のエネルギー損失を表している。電離電

<sup>1</sup>ただし、低電場下では中性制動放射成分 (NBrS) が主となる (第 5 章参照)

子分布は凹型をしていることがわかる。0mm 付近のピークは  $\gamma$  線が電子を反跳した直後、反跳電子が  $z=0$  方向に飛んでいるために見えており、3mm 付近のピークはブラッグピークによるものである。そして、この反跳電子の  $z$  方向の飛程長は O(mm) であることが見積もられた。

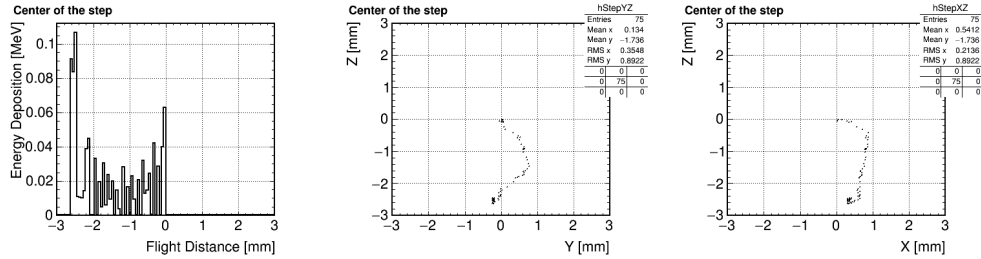


図 13: geant4 で得られた levent の反跳電子の軌跡

左：電離電子空間分布の  $z$  方向射影分布

真ん中：Y-Z 平面上での反跳電子の軌跡

右：Z-X 平面上での反跳電子の軌跡

## 2. Drift 過程

電離電子が生成された後、液相にかけられている Drift 電場により電離電子は気相へと Drift する。その過程で電子が Ar と相互作用し、3 次元的に拡散する。このときの拡散の  $z$  方向成分が S2 波形に影響を与えるため、電子が Drift する時間に依存する。電子が Ar 中を  $t_d$  進んだ時の、電場方向 ( $z$  方向) 拡散は以下の式で記述される [13]。

$$f(t; t_d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp(-t^2/2\sigma^2) \quad (4)$$

$$\sigma = 2D_L t_d / v_d^2 \quad (5)$$

$\sigma$  : 電子の拡散

$t_d$  : 電子の Drift 時間

$D_L$  : 液体 Ar の拡散定数

$v_d$  : 電子の Drift 速度

## 3. 取り出し過程

Drift 電場により grid まで Drift してきた電離電子は取り出し電場により、気相へと取り出される。その後、電離電子は気相の Ar と相互作用し、S2 光が発生する。このとき、電離電子が気相中を Drift する時間が波形に反映される。

## 4. 発光過程

取り出し電場により加速された電子と Ar が相互作用することで、式 9、9 の反応により、シンチレーション光が発生する。Ar 二量体による発光には励起状態が 1 重

項と3重項があり、S1の蛍光(液体Ar蛍光)と同じく、発光時定数が早い成分と遅い成分が存在する。ガスArの場合、発光時定数は11nsと3.2 $\mu$ sである。

上記の発光過程をまとめたものを図14に示す。図14の右側は、今回の測定条件を考慮したときの各過程の関数を示した。

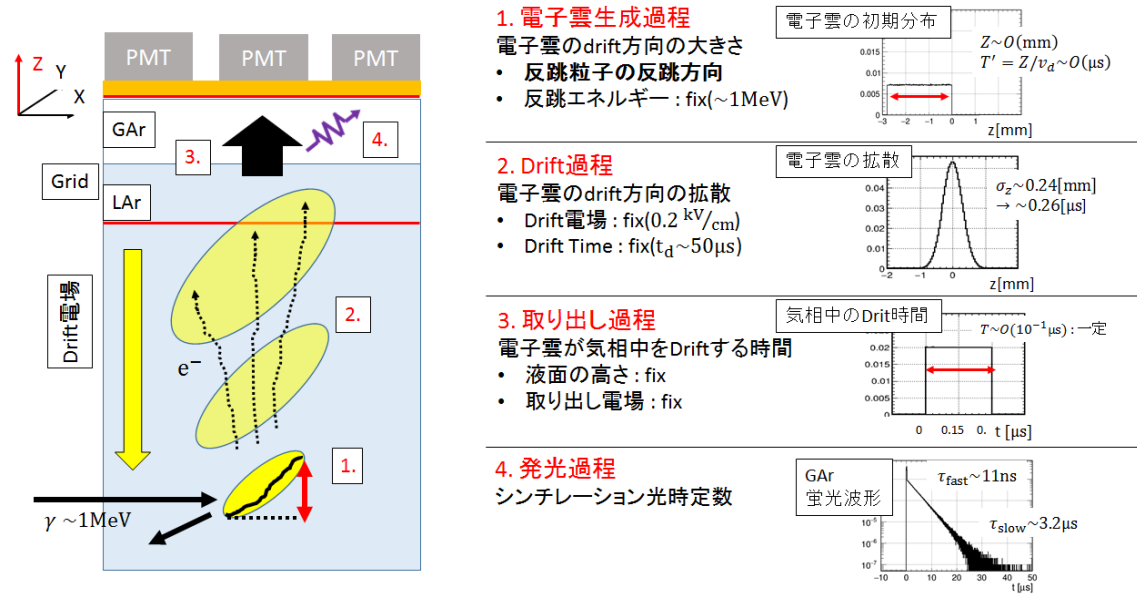


図 14: S2 発光過程のモデル図

このモデルから算出した S2 波形関数を以下に示す (式 9[13])。この関数を算出する際、簡単のため、取り出し過程を無視し、電離電子生成過程の電離電子分布を step 関数に近似した。

$$y(t; \tau_1, \tau_2, \sigma, T', A, t_0, y_0) = y_0 + A[py'(t - t_0; \tau_1, \sigma, T') + (1 - p)y'(t - t_0; \tau_2, \sigma, T')](6)$$

$$y'(t; \tau, \sigma, T') = \frac{1}{2T'}[y''(t; \tau, \sigma) - y''(t - T'; \tau, \sigma)] \quad (7)$$

$$y''(t; \tau, \sigma) = \text{eft}\left(\frac{t}{\sqrt{2}\sigma} - \exp\left(-\frac{t}{\tau} + \frac{\sigma^2}{2\tau^2}\right)\text{erfc}\left(\frac{\sigma^2 - t\tau}{\sqrt{2}\sigma\tau}\right)\right) \quad (8)$$

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} : \text{誤差関数}$$

$$\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x) : \text{相補誤差関数}$$

$\tau_1$  : Fast 成分の発光時定数

$\tau_2$  : Slow成分の発光時定数

$\sigma$  : 電子の拡散

$T'$  : 電離電子の  $z$  方向の初期サイズ

$p$  = Fast/(Fast + Slow)

$A$  : 波高

$t_0$  : S2 の立ち上がり時間

$y_0$  : baseline offset

### 4.3 実験セットアップ

次に、S2 波形解析に使用したデータについて説明する。実験に使用した気液 2 相型検出器のセットアップを図 15 に示す。セットアップは液体 Ar を断熱容器内に充填する充填系、Ar の純度を保つフィルターと液化器からなる循環系で成り立っており、TPC 検出器は断熱容器内につるされている。このセットアップの系（容器内圧、液面等）は、液化器を通る循環系の Ar 流量と液化器に装填されているヒーターを調節することにより安定に保っている。実際に、我々はこのセットアップで圧力については  $1.5 \pm 0.02\text{atm}$ 、液面は  $\pm 0.5\text{mm}$  の精度で約 5 日間安定稼働することに成功している（図 16）。

この測定で使用した検出器を以下に示す（17、18）。この検出器は上下に 7 本ずつの PMT が装填されており、有感領域 5.3kg、径 200mm、高さ 100mm となっている。PMT 窓面前にはライトガイド用の石英がある。この石英には、ITO 透明電極膜が形成されており、上の石英の 10mm 下にある Grid 電極と合わせて 3 つの電極がある。これらの電極はそれぞれ、下の ITO 電極 (Cathode) と Grid 電極で Drift 電場、Grid 電極と上の ITO 電極 (Anode) で取り出し電場を形成している。各電極には、コッククロフトウォルトン回路を用いて電圧を印加している。取り出し領域の詳細図を図 19 に示したが、Anode-Grid 間距離は 10mm で液面は Anode の下  $\sim 5.0\text{mm}$  の位置で保たれている。

使用している Grid は幅  $100\mu\text{m}$ 、ピッチ 4mm のステンレス製のものであり、開口率は 95%である。

観測された信号は FADC を用いて、波形として取得した。以下に、実際に取得した波形を図 21 に示す。上下 14channel すべてで S1 信号と S2 信号が観測できていることがわかる。S2 信号特性を評価するのデータは、 $^{60}\text{Co}$  の  $\gamma$  線源を使用した。 $^{60}\text{Co}$  は  $z$  方向にコ

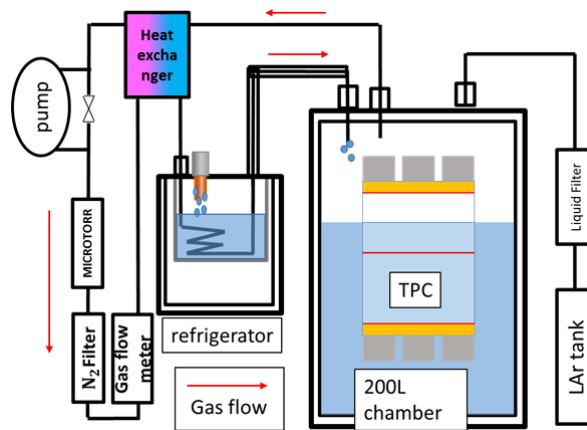
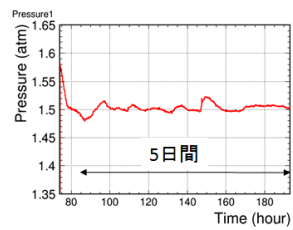
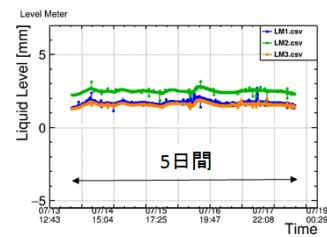


図 15: 気液 2 相型検出器の実験セットアップ



[1] 容器内圧



[2] 液面の高さ

図 16: 容器内圧と液面の 5 日間の安定稼働

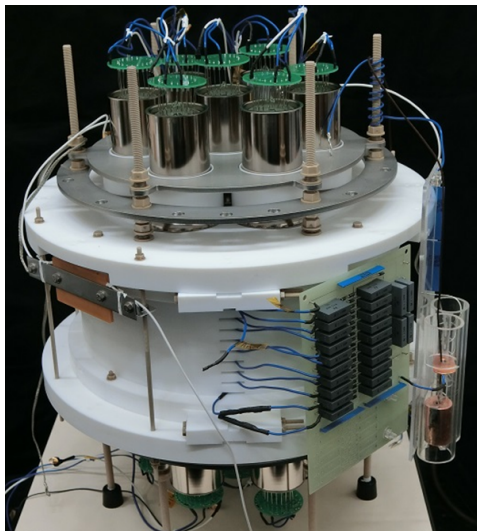


図 17: 検出器の写真

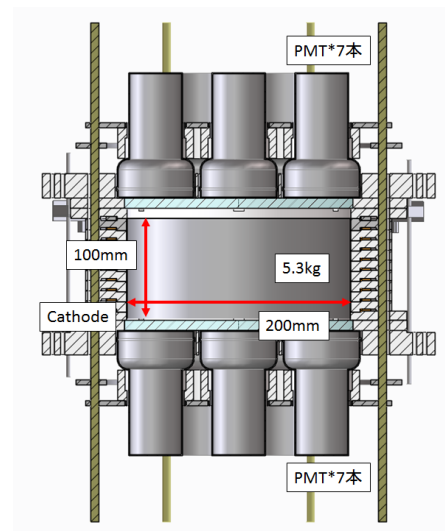


図 18: 検出器の断面図

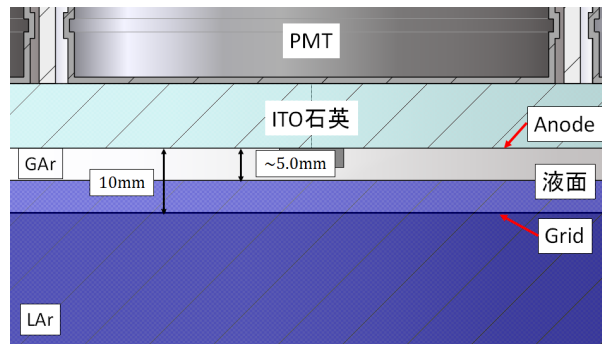


図 19: 取り出し領域の詳細図

リメントされており、容器外側に設置した (20)。 $\gamma$  線は TPC 検出器の Drift 領域に照射する形となっている。

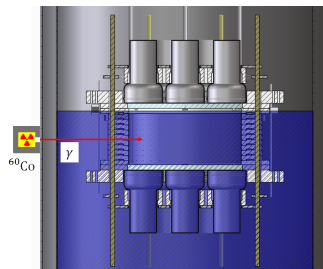
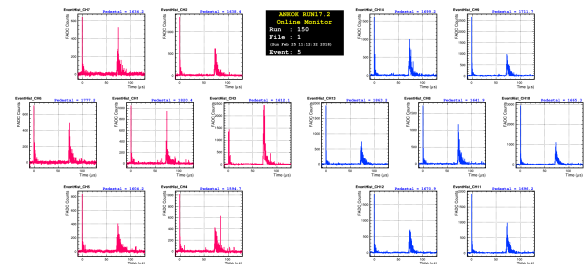
図 20:  $^{60}\text{Co}$  による $\gamma$ 線源データの測定例

図 21: 取得波形例 (赤：上PMT、青：下PMT)

#### 4.4 データ取得・事象選択

S2 波形関数を適応するデータについて説明する。上述のモデルでは、S2 波形に影響するパラメータが多数ある。ここでは電離電子の生成過程に着目し、その他のパラメータは固定されるようにデータを取得した。 $^{60}\text{Co}$  線源は液面下 4.7cm、0.7cm の 2 箇所設定し、それぞれの場合においてデータを取得した。

取得した波形に対しては Photocounting を行い、パラメータ化した。Photocounting の具体的な方法は [14] に示されているものを使用した。

事象選択は上述した cut に加えて、以下の cut を適用した。

- S2 Charge cut  
S2 の積分領域に信号が出ていない event を除く。これにより、accidental にトリガーされた event 等を除く。

- Pedestal RMS cut  
pedestal の計算領域の RMS が大きい event を除く。これにより、ノイズが多い event や S2 trigger event 等を除く。
- Negative Charge cut  
pedesta の計算領域に信号が出ている event を除く。これにより、S2trgger event 等を除く。
- Detected time cut  
PMT の trigger timing があっていない event を除く。これにより、accidental にトリガーされた event 等を除く。
- S2 RMS cut  
S2 の積分領域の RMS が大きい event を除く。これにより、multi scatter event や S2 波形が崩れている event を除く。
- DriftTime cut  
S2 の光量重心 (DriftTime) 分布において、ピークからずれている event を除く。このデータでは、Z 方向にコリメートした  $\gamma$  線を照射しているため、 $^{60}\text{Co}$  の  $\gamma$  線事象は DriftTime 分布で図 22 のようにピークを作る。この cut により、バックグラウンド event を除く。
- Energy cut  
S1 光量分布において、解析したいエネルギー領域を定義してその領域にある event を残す (図 23)。この解析では主に compton edge event を選んでいる。

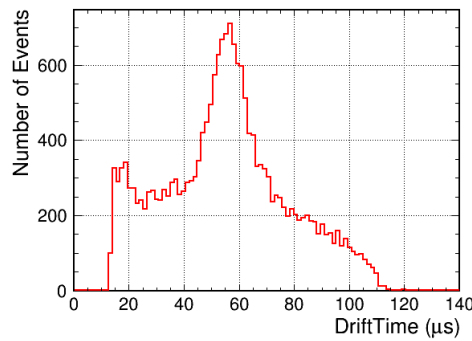


図 22: 線源を液面下 4.7cm に設置したときの DriftTime 分布  
[40 $\mu\text{s}$ , 70 $\mu\text{s}$ ] に peak が表れている

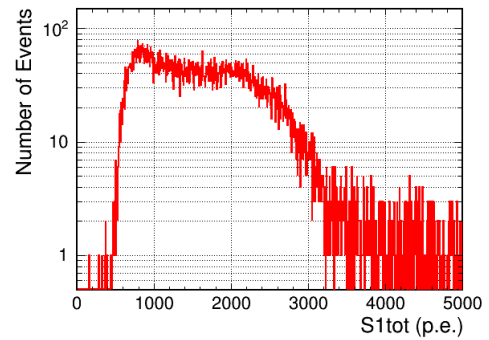


図 23:  $^{60}\text{Co}$  の  $\gamma$  線源データの S1 光量分布  
[1500p.e., 3000p.e.] 付近に Compton Edge が表れている

この cut を通った event に対して、S2 波形関数で likelihood fit を行った。fit の初期値を表 2 にまとめる。



fit は  $\tau_2, T', t_0, y_0$  を free parameter とした。  $\tau_1, \tau_2$  はガス Ar の発光時定数であり、一意に決定されると考えられる。一方で、取得できる波形のサンプリングが 250MHz であることと電離電子分布、拡散を考慮すると  $\tau_1 = 0.011\mu\text{s}$  の分解能はないため、ここでは固定している。  $\tau_2$  については、S2 波形の tail 部分を支配しているため、S2 波形の立ち上がり方を  $t = 0\mu\text{s}$  としたとき  $[9\mu\text{s}, 20\mu\text{s}]$  の領域を exponential 関数 ( $y = Ae^{-t/\tau_2}$ ) で pre-fit して得られた  $\tau_2$  の値を fit の初期値に設定している。  $y_0$  の初期値は  $[-5\mu\text{s}, -2\mu\text{s}]$  を pol0 で pre-fit して得られた値を用いた。

$\sigma$  は式 6) より、  $D_L = 4.8[\text{cm}^2/\text{s}]$ ,  $t_d = 50$ (線源位置 : 4.7cm),  $20$ (線源位置 : 0.7cm)[ $\mu\text{s}$ ]、  $v_d \sim 0.9[\text{mm}/\mu\text{s}]$  を代入して得られた値、  $\sigma = 0.30$ (線源位置 : 4.7cm),  $0.15$ (線源位置 : 0.7cm)[ $\mu\text{s}$ ] を固定値とした。  $p$  については S2 平均波形を S2 波形関数で fit して得られた値を使用している 24。 S2 光量に対応する  $A$  については event ごとに S2 光量をスケールした値を適用している。

表 2: S2 波形関数の初期パラメータ値

| パラメータ    | 初期値                                         | fit status |
|----------|---------------------------------------------|------------|
| $\tau_1$ | $0.011[\mu\text{s}]$                        | fix        |
| $\tau_2$ | $[9\mu\text{s}, 20\mu\text{s}]$ を pre - fit | free       |
| $\sigma$ | $0.15, 0.30[\mu\text{s}]$                   | fix        |
| $T'$     | $1.0$                                       | free       |
| $p$      | $0.23$                                      | fix        |
| $A$      | S2 光量*bin width( $4.0\text{e-}2$ )          | fix        |
| $t_0$    | $-1.0[\mu\text{s}]$                         | free       |
| $y_0$    | $[-5\mu\text{s}, -2\mu\text{s}]$ を pre-fit  | free       |

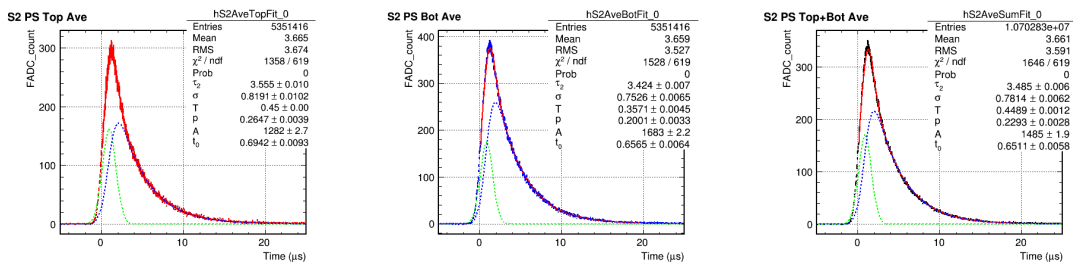


図 24: S2 平均波形を S2 波形関数で fit した結果

#### 4.4.1 S2 波形に対する fit

実データに fit した例を図 25 に示す。赤線が S2 波形関数を示しており、緑線が Fast 成分、青線が Slow 成分を表している。これを見ても、2つの波形の違いが電離電子の  $z$

方向の初期サイズを表すパラメータ  $T'$  の違いにより説明できていることがわかる。この結果から、S2 波形には反跳電子の反跳方向に対して感度があることが示唆される。

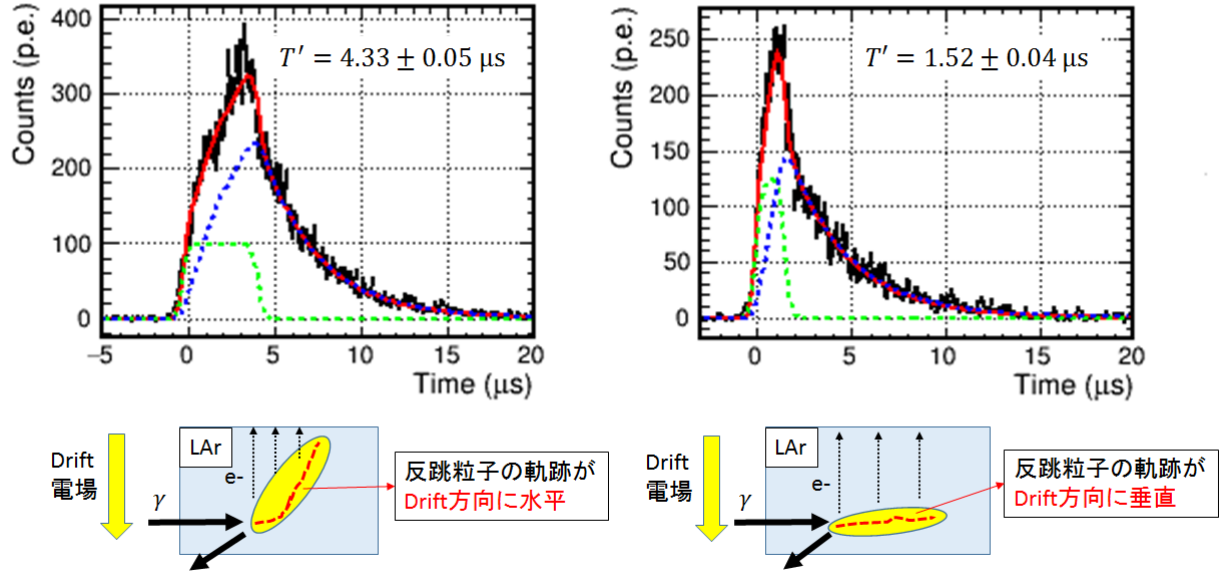


図 25: S2 波形を fit した結果 (線源位置 : 4.7cm)

続いて、fit した結果のパラメータ分布を以下に示す。ここでは、電離電子の拡散の影響が小さい、線源位置 0.7cm のデータを使用している。これらの分布は、fit がうまくいった event として  $\chi^2/NDF < 1.5$  を通った event のみを表している (図 26)。図 27 に  $\tau_2$  の fit 結果を示した。ピーク付近をガウス関数で fit したところ、 $\tau_2 = 3.151 \pm 0.006 [\mu s]$  という値が得られた。これは文献値 12 とよく一致している。

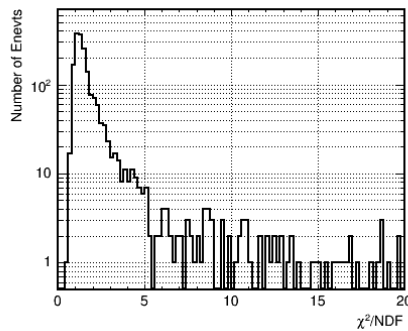


図 26: S2 波形 fit の  $\chi^2/NDF$  分布

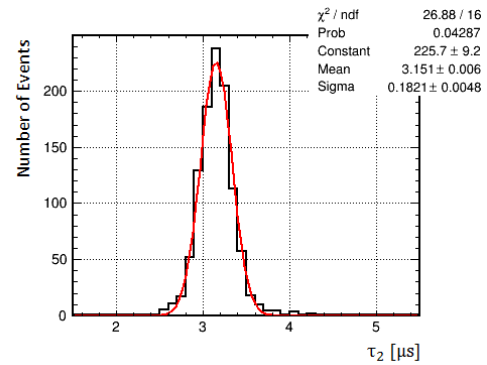


図 27:  $\tau_2$  の fit 結果

energy cut 以外の cut を通った event に対して S2 波形関数の fit を行った時の fit パラ

メータの分布を以下に示す (図 28)。反跳エネルギーが上がるにつれて  $T_{ini}$  の値が大きい event、反跳電子が Drift 電場方向に反跳される event が増加する傾向にあることがわかる。

$T_{ini}$  の分布として、 $T_{ini} \sim 1.0 \mu s$  から立ち上がっているが、これは電離電子が気相を Drift する時間 ( $T$ ) の値が  $1.0 \mu s$  であるからだと考えられる。

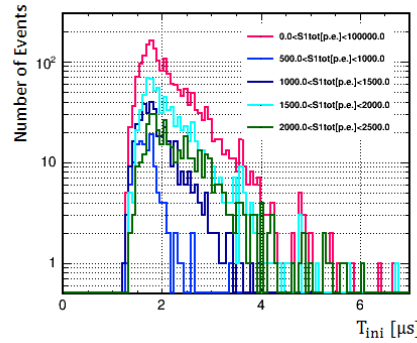


図 28:  $T_{ini}$  の fit 結果

#### 4.5 考察と今後の展望

上記のように、S2 波形に対して fit を行った結果、1MeV 付近の高エネルギー反跳事象については S2 波形から反跳電子の反跳方向が推定できることが示された。この結果は S2 波形解析を行うことで、入射粒子の到来方向 (天頂角) が予想できることを示唆している。これは、比較的高エネルギーな BG 事象の理解につながると考えられる。到来方向がわかれば例えば、BG 線源を特定することができる。一方で、反跳電子の truck が数 mm 程ないと波形に反映されないため、気液 2 相型検出器の場合、反跳粒子の飛跡が短い NR 事象や低エネルギー ER 事象については適応することは難しいと思われる。ガス TPC 検出器を使用すれば、媒質の密度が小さくなるため反跳粒子の飛跡が長くなり波形解析ができる可能性が出てくる。S2 波形が入射粒子の到来方向に感度を持つかのさらなる検証としては、線源の入射方向を天頂角を替えて取得した S2 波形に対して、同様な解析を行い、パラメータ  $T'$  分布に有意な差が表れるかを確かめることが挙げられる。

ここまでの議論では、S2 波形解析から反跳電子の反跳方向を予想することを行ってきたが、これに限らず他のパラメータについても波形解析から得ることができると考えている。例えば、表 2 のパラメータの内、波形の立ち上がり時間を表す  $t_0$  を free parameter にして fit を行うことで、DriftTime が得られる。また、光量を表す  $A$  について同様に fit を行うことにより、S2 光量が得られる。波形解析によりこれらのパラメータを得ることの利点としては、波形が崩れている event (アンダーシュート等) に対して S2 波形関数をテンプレートとして fit することで、光量などのパラメータを正確に算出することができると考えられる。今後、S2 波形解析を Photocount (光子計数法) に導入していくことが期待される。

## 5 ガス Ar 発光の中性制動放射成分

### 5.1 背景

第3章でも述べたように S2 信号の発光成分に中性制動放射成分が示唆されており、以下の特性を持つと考えられている。

- 真空紫外光 (VUV) から赤外光 (IR) まで的一様で連続スペクトルを持つ
- ガス Ar 蛍光の電場閾値よりも低い電場下でも発光する
- 発光時定数が短い

先行研究 [16][17] の実験セットアップを図 29、30 にそれぞれ示す。先行研究では気液 2 相型 Ar 検出器を使用し、S2 信号を波長変換剤である TPB を蒸着した PMT と未蒸着の PMT で S2 信号を検出している。測定結果を図 31、32 に示したが、TPB 未蒸着の PMT で S2 信号が観測され特にガス Ar 蛍光の電場閾値よりも低い電場下では中性制動放射の理論値と矛盾しない結果が得られている。

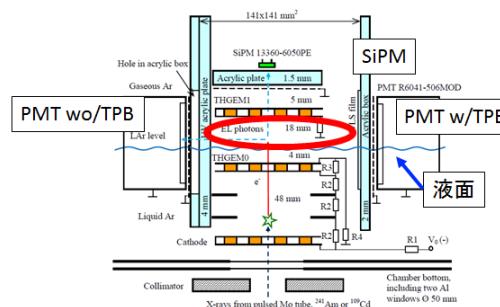


図 29: 先行研究の実験セットアップ [16]

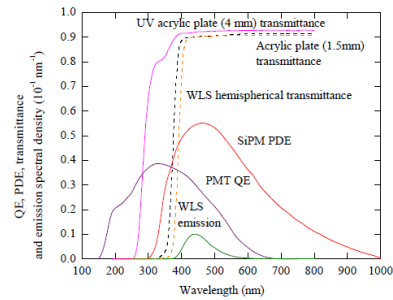


図 30: 先行研究で使用している PMT の QE と部材の波長透過率 [16]

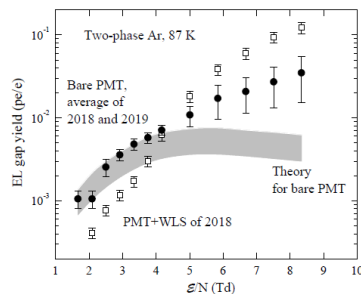


図 31: S2 光量の実測値と中性制動放射の理論値の比較 [17]

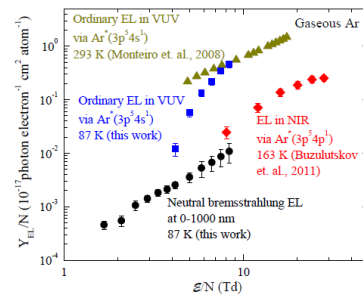


図 32: 各 S2 発光成分の光量の電場依存性 [17]

また、我々の実験セットアップでも中性制動放射の特性と無矛盾な現象が S2 波形で見えている。図 33 に S2 平均波形の取り出し電場依存性を示したが、取り出し電場を低くすると S2 信号の fast 成分が大きくなっていることがわかる。これは取り出し電場を低くすると発光時定数が短い中性制動放射成分がガス Ar 蛍光成分に比べて比として大きくなるためであると説明できる。このように中性制動放射成分の存在を支持する測定結果が多くあるが、直接 S2 波長スペクトルを測定した実験がなく、その存在の証明には至っておらず、詳細な発光特性は不明である。

この中性制動放射成分については、希ガスの放射光科学にとって非常に興味深いものであると同時に、その特性を希ガス検出器に応用できる可能性がある。図 34 に希ガス蛍光波長と PMT 窓材の波長透過率を示したが、希ガス検出器、特に Ar や He といった原子番号の小さい希ガスを使用する検出器は、希ガス蛍光の波長帯が PMT の窓材が透過する波長帯よりも短いため、直接 PMT で検出することができない。そのため、TPB 等の波長変換剤を検出器壁面や PMT 窓面に塗布する必要がある。一方で、中性制動放射成分は連続波長スペクトルをもち、可視光領域でも発光するため波長変換剤を用いず直接 PMT で信号の検出が可能となる。これにより、検出器構築の簡略化、波長変換剤の不定性 (蒸着量、一様性、波長変換効率等) がなくなるため光学シミュレーションの精度向上につながると考えられる。

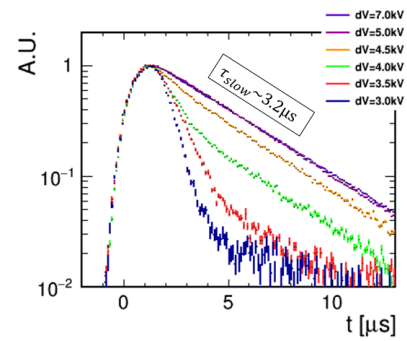


図 33: S2 平均波形の取り出し電場依存性

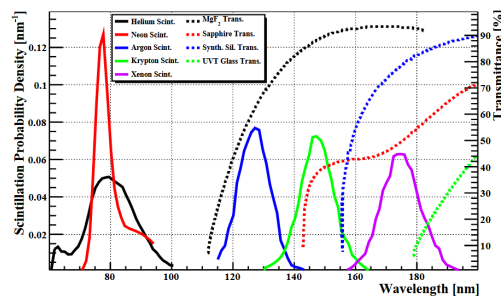


図 34: 希ガスの蛍光波長と PMT 窓材の波長透過率 [15]

中性制動放射成分の発光量についても、ある電場領域でガス Ar 蛍光よりも多く、先行研究では DarkSide50 の設定している電場下では発光量は同程度であるという報告もあり、有用であると思われる。(図 35) また、これは理論的にも実験的にも確かめられていないが、中性制動放射はその名の通り制動放射の性質を有しているので、荷電粒子の運動方向に光子が放出すると考えられる。これを利用することで、例えば上述した S2 信号を使った XY 平面の位置再

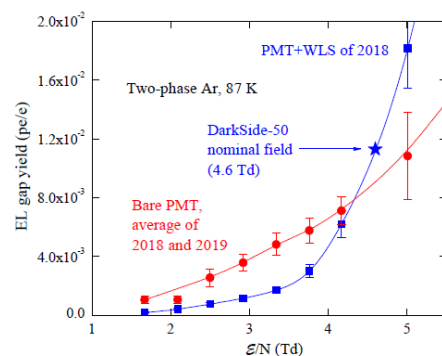


図 35: TPB 未蒸着の PMT と TPB 蒸着の PMT の検出光量の比較 [17]

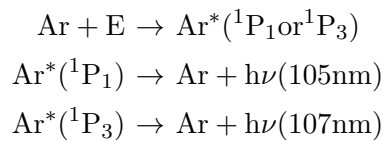
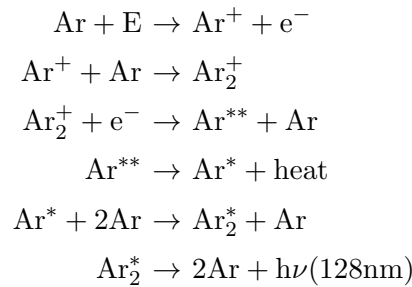
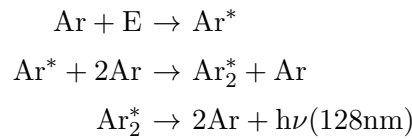
構成の位置分解能の向上が見込める。また、S2 信号だけでなく S1 信号でも中性制動放射成分が存在した場合、方向感度を持つ希ガス検出器ができる可能性を秘めている。

このように中性制動放射成分は、暗黒物質直接探索実験にとって利用価値の高い信号であると考えられる。そこで、ここでは、中性制動放射成分に関する測定の第一歩として、その存在を確かめるべく S2 波長スペクトル測定を 2 つの測定方法で行った。1 つ目は波長フィルターを用いた測定で、S2 波長スペクトルの実測値と中性制動放射、ガス Ar 蛍光、 $N_2$  不純物発光成分のスペクトルとの比較を行った。2 つ目は分光器を用いた測定で、より詳細な波長スペクトル形を測定を試みた。

## 5.2 ガス Ar 蛍光成分

ここでは、ガス Ar 蛍光成分についてまとめる。

大気圧下で最も主要な発光成分は、Ar 2 量体による真空紫外光 (VUV) である。以下に、Ar 2 量体による VUV 光の発光過程を示す。この過程が大気圧下で主要である理由は、励起状態 ( $3p^5 4s^1$ ) から基底状態に遷移する過程が禁止されていることや放射閉じ込め効果により、励起状態の寿命が気体原子の衝突頻度に比べて長いためである [18]。Ar2 量体は、励起状態 ( $3p^5 4s^1$ ) にある Ar 原子と基底状態にある 2 つの Ar 原子が 3 体衝突を起こすことで生成される。一方で、低圧力下では励起状態から基底状態に直接遷移する過程が見られる。



ガス Ar の発光には、UV 成分も存在している [19]。この発光は third continuum と呼ばれており、second continuum の  $\sim 1/10$  程度である。発光時定数は、5ns である。この蛍光は圧力、温度、電場に依存しない。

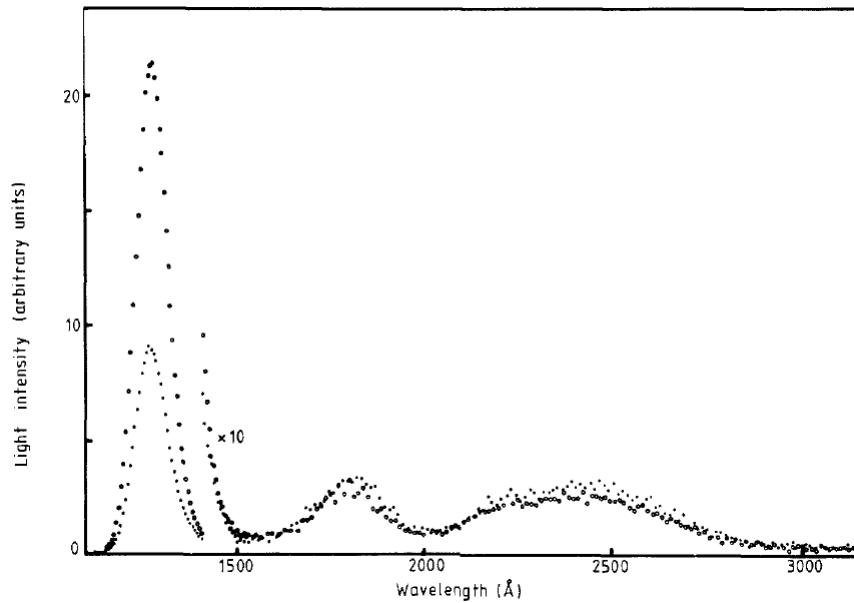
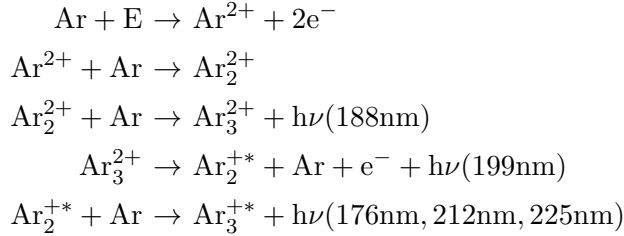


図 36: ガス Ar 蛍光の UV 成分 [19]

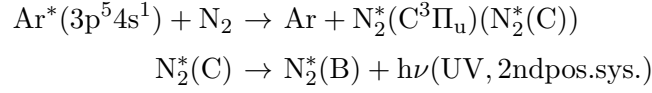
### 5.2.1 Ar 混合ガス発光成分

上述では、純粋な Ar の発光成分を見てきたが、他の種類のガスが混入すると消光や新たな発光成分が表れる。これは、Ar のエネルギー準位に加えて新たに他のガスの準位が増え、その分遷移の組み合わせが増加するためである。以下に、 $\text{N}_2$ 、Xe、 $\text{CO}_2$  が混入した場合の発光過程についてまとめる。

- $\text{N}_2$

$\text{N}_2$  と Xe については、Ar の VUV 光を UV 光に波長シフトさせる媒質であるため、その発光過程の研究が進んでいる。図 38 にガス Ar と  $\text{N}_2$ 、Xe のエネルギー準位図を

示す。。N<sub>2</sub> がガス Ar に混入した場合、以下の反応が起こる。この反応により、UV 光が発生する。実際に Ar ガスと N<sub>2</sub> の混合ガスの発光波長スペクトルを図 37 に示す。



また、この反応は常温 (300K) よりも低温下 (87K) の方で多くみられる [21]。理由としては、105K 以下の低温下で ArN<sub>2</sub>(van der Waals molecule)(ポテンシャル障壁 9.6meV~87K の熱エネルギー) の基底状態が存在し、Ar + N<sub>2</sub> の反応断面積が大きくなるためである。

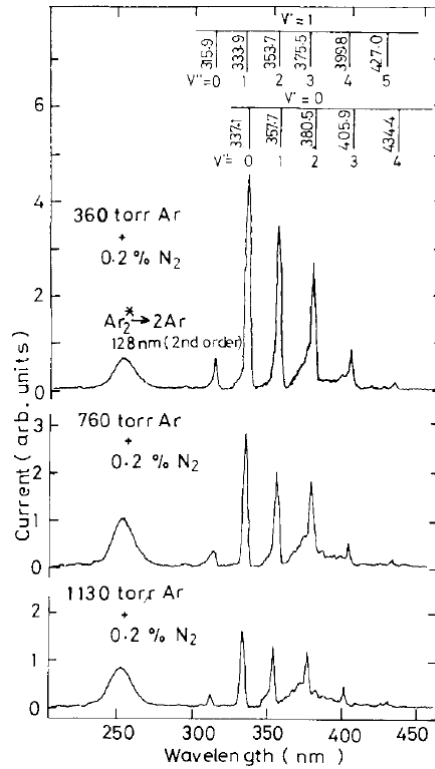
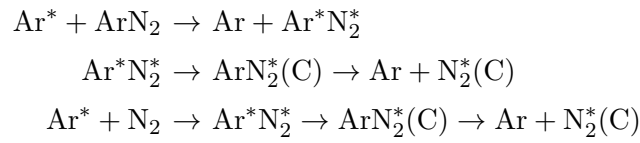
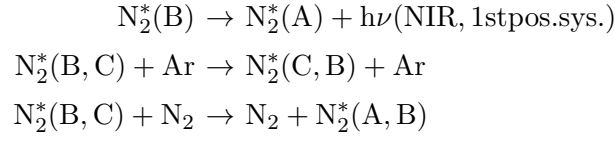


図 37: Ar と N<sub>2</sub> の混合ガスの発光波長スペクトル [22]

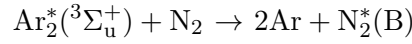
上記の反応以外にも、以下のような反応が起こる。ただし、NIR 成分の発光は以下の消光反応と Ar の 1st Position System と同じ理由により、大気圧、高圧力下で



はこの反応は抑えられ、低圧力で現れる。



上記の発光の他に、以下の消光過程も存在する。ただし、ガス Ar 中では崩壊寿命が長いのであまり影響はしない。



- Xe

Xe がガス Ar に混入すると、以下の励起状態の遷移が起こる [21]。ただし、ガス Ar に混入することは極めて低く、混入したとしてもその量は少ないと考えられる。そのため、以下の遷移はほぼ無視できる。

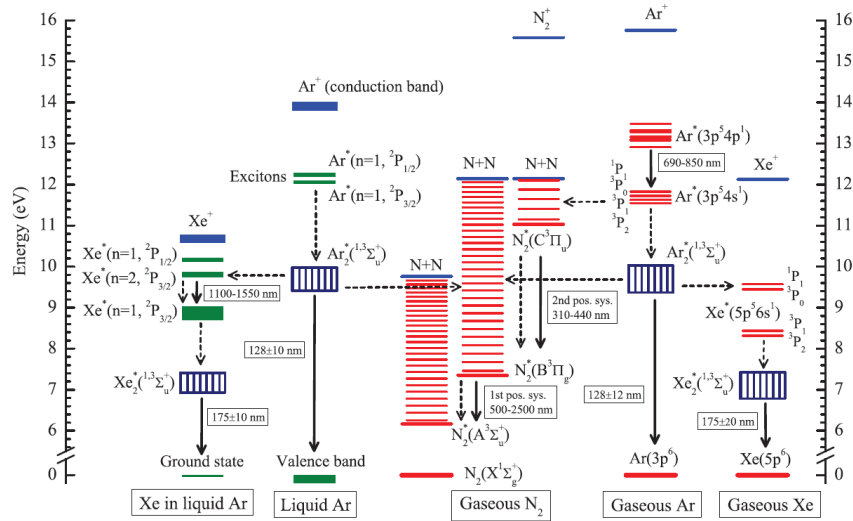
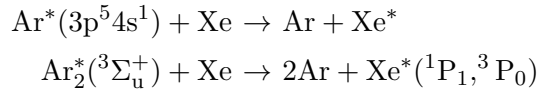


図 38: Ar と N<sub>2</sub>、Xe のエネルギー準位図 [21]

- CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>

CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> が混入しても以下の遷移により、Ar 二量体が壊され消光する。図 39, 40

に Ar に  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  がそれぞれ混入したときの VUV 光 (128nm) の消光の様子を示す [22]。

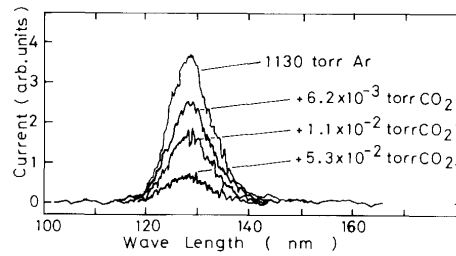
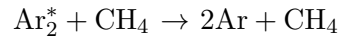
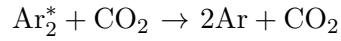


図 39:  $\text{CO}_2$  による消光効果 [22]

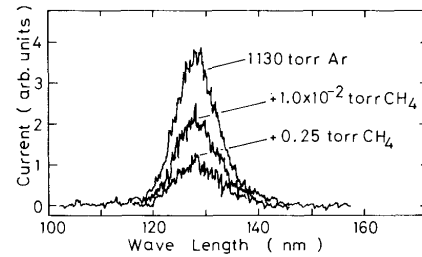


図 40:  $\text{CH}_4$  による消光効果 [22]

### 5.3 中性制動放射 (Neutral bremsstrahlung)

電子と光子の電磁相互作用の一つに制動放射 (Ordinary Bremsstrahlung) がある。一般的に知られている制動放射は、荷電粒子が物質内を透過する際に物質の原子核と電磁相互作用することにより発生する。この他に偏極制動放射 (Polarization Bremsstrahlung) と中性制動放射、2つの電子の制動放射過程が存在している。

偏極制動放射は高速な電子が原子に散乱された際に引き起こされる原子の時間変動する偏極により発生する。このときの電子のエネルギーは 1keV 程で放出光子数は制動放射と同程度であると予想されている。

中性制動放射は低速電子が中性原子と (非) 弾性散乱することにより発生する (図 41)。以下に、中性制動放射の反応式を示す。

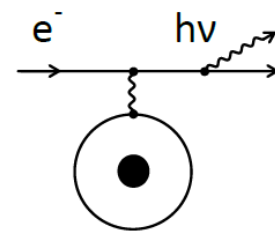


図 41: 中性制動放射の反応図 (弾性散乱過程)[16]

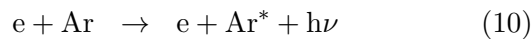
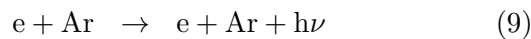


図 42 に Ar 中の電子の散乱断面積を示したが、Ar 中では電子のエネルギーが 1 ~ 10eV のときに多く発生する。このエネルギースケールでは、上記の制動放射<sup>1</sup>と偏極制動放射の影響は無視できるほど小さい。

<sup>1</sup>原子核のクーロン場によるスクリーニング効果

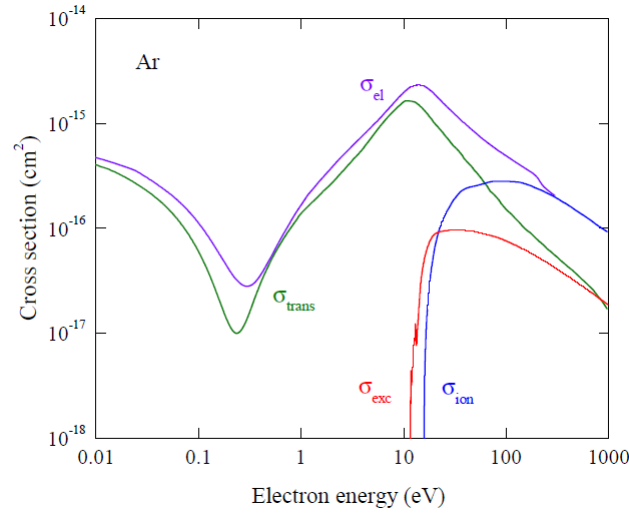


図 42: 電子と Ar の反応断面積 [16]

図 43 に中性制動放射の波長スペクトルの理論計算値を示す。このように、中性制動放射は UV 光から金赤外光にかけて一様な波長スペクトルを持つとされている。また、電場が上がると波長スペクトルの立ち上がりが短波長側にずれていく傾向にあると予想される。

図 44 に中性制動放射と電子比例蛍光 (VUV 成分) の光量を示したが、上記のように中性制動放射は電子比例蛍光の電場閾値よりも低い電場下での発光をする。そして、電場が  $E/N \sim 5 \text{ Td}$  以上になると光量が飽和することが理論計算から予測されている。

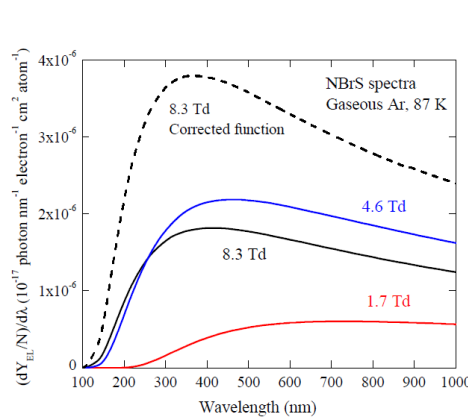


図 43: 中性制動放射の波長スペクトルの理論計算値 [16]

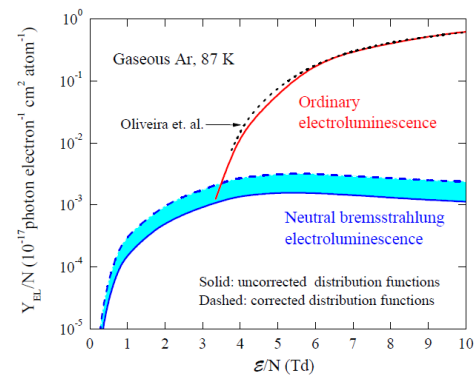


図 44: 中性制動放射 (水色 : 理論計算値) と電子比例蛍光 (黒 : 理論計算値、赤 : 実測値) の電場依存性, [16]

現在、特に希ガス検出器の分野において中性制動放射はあまり知られていないが、他分野では現象論の説明に使用されることがある。例えば、中性制動放射は弱プラズマ状態

の連続スペクトルの説明に使われている。また、極高エネルギー宇宙線分野でも、宇宙線による電磁シャワーが大気中に残す低エネルギー電離電子によって放出される中性制動放射成分を信号に使用されている。

希ガス検出器においても、1970年代ではXeの電子比例蛍光の発光機構としてに中性制動放射が提唱されたことがある。この実験では中性制動放射の光子放出レートの理論計算値とXeの電子比例蛍光の光子放出レートとおおむね一致していたことから提唱された。ただし、その後には出版された論文によりその存在は否定された。

#### 5.4 波長フィルターによるS2波長スペクトル測定

S2の発光成分を調べるため、S2の波長スペクトル測定を行った。以下では、この測定の実験セットアップ、データ取得並びに解析手法について述べる。そして、得られた波長スペクトルとNBrSの理論波長スペクトルの比較結果を行う。

##### 5.4.1 実験セットアップ

今回S2の波長スペクトルを測定するに当たり、常温ガスArを使用したS2測定用のガスTPC検出器を作成した。作成したガスTPC検出器について説明する。図45に検出器の断面図、図46に検出器の写真を示す。この検出器はPTFE製の部品とアクリル製の部品から構成されている。内径は66mm、高さは600mmとなっている。ガスボンベからのガスArは検出器下から流入し、検出器上のガス抜き穴から流出する。ガスArの発光波長スペクトル算出が目的であるため、検出器壁面、並びにITO透明電極面にはTPB等の波長変換剤は使用していない。

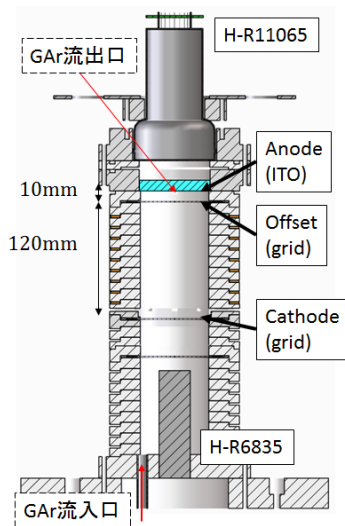


図 45: 検出器の断面図

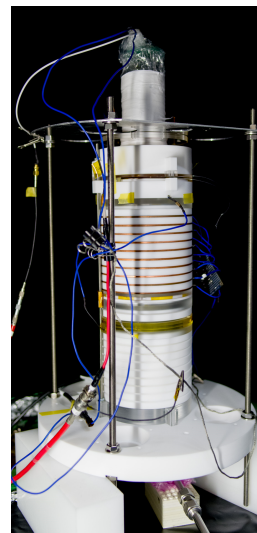


図 46: 検出器の写真

検出器内には電場形成のための電極として、上のPMTの前に石英ガラス上に塗布されたITO透明電極膜(anode電極)、その下1cmと下13cmに4mm格子、100 $\mu$ mのステ

ンレス製の grid(offset 電極、cathode 電極) が組み込まれている。offset 電極を ground にしているため、anode 電極に正電圧をかけることで、anode-grid 間で S2 発光領域である蛍光電場 ( $O(kV/cm)$ )、cathode 電極に負電圧をかけることで、offset-cathode 間で Drift 電場 ( $O(100V/cm)$ ) を形成する。Drift 電場については、検出器側面に 1 cm 間隔で設置されている銅製フィールドシェーパーに電圧をかけることで一様電場に成形している。各シェーパーへの電圧供給には抵抗分割回路を使用している。anode 電極の ITO 透明電極膜の詳細については [10] にまとめられている。anode 電極の電圧供給にはステンレス製のシムリングを電極表面に接触させて行っているが、その接触が悪いと蛍光電場が安定して形成されず図 48 のように S2 光量が安定しない。そこで、ITO 透明電極膜面とシムリングを導電性テープ（接触抵抗： $0.01\Omega$ ）で固定することで、接触をよくしている。実際には、anode-シムリング間の接触抵抗は  $O(1k\Omega)$  で安定した状態で測定した (ITO のシート抵抗： $200\sim300\Omega/sq$ )。



図 47: anode 面

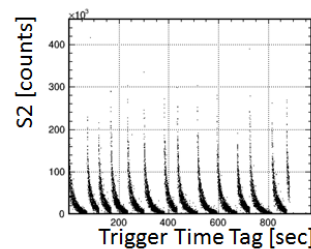


図 48: 導電性テープ導入前の S2 光量の時間依存性

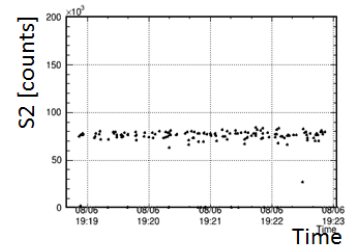


図 49: 導電性テープ導入後の S2 光量の時間依存性

この測定では、2 種類の PMT を使用した。検出器の上側には浜松ホトニクス製の R11065 を、下側には同じく浜松ホトニクス製の R6835 を設置した。表 3 に使用した PMT のスペック値をまとめた。これらの PMT は波長感度帯が異なる。図 50 に PMT の QE を示したが、R11065 PMT は紫外光～可視光に感度を持ち、R6835 PMT は真空紫外光のみに感度を持つ。こうすることで、ガス Ar 蛍光の VUV 光と UV、VIS 光を独立に S2 光量を評価することができる。R6835 PMT 窓面の前には保護 grid を設置している。データ取得の観点では、R6935 PMT は event trigger 用、R11065 PMT は S2 波長スペクトル測定用とした。R11065 PMT 窓面の前には後述する光学フィルター挿入用のスリット口が開いており、R11065 は光学フィルターを通過した光子を検出することになる。このスリット口は U 字型になっており、検出器を解体することなく、光学フィルターを出し入れできるようになっている。

表 3: PMT のスペック値

| 名前             | 窓材               | 内径         |
|----------------|------------------|------------|
| R11065(VL PMT) | 石英窓              | 3 inch     |
| R6835(VUV PMT) | MgF <sub>2</sub> | 1-1/8 inch |

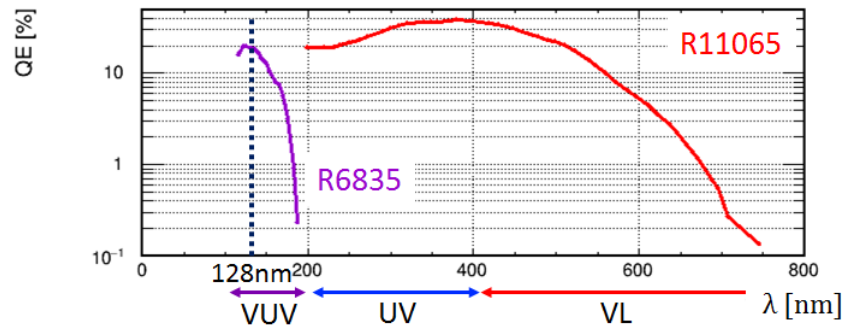


図 50: 使用した PMT の QE

次に、この測定で使用した光学フィルターについて説明する。この測定では、富士フイルム製のロングパスフィルター [20] を使用した。図 51 にロングパスフィルターの波長透過率を示したが、ある cut 波長以上の波長をもつ光のみを透過する特性がある。寸法は  $75\text{mm} \times 75\text{mm}$ 、厚さは  $90\mu\text{m} \pm 10\mu\text{m}$  であるため、R11065 PMT の窓面すべてを覆うことができる。

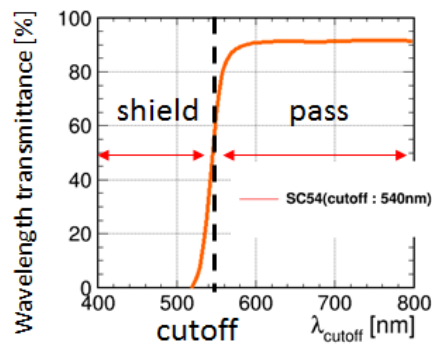


図 51: ロングパスフィルターの透過率

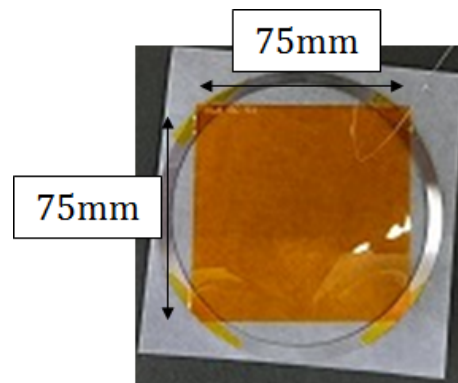


図 52: ロングパスフィルターの写真

$\alpha$  線源として  $^{241}\text{Am}$  を anode 面から 50mm 下の検出器壁面に固定した。 $^{241}\text{Am}$  は  $\alpha$  線がガス Ar 中でエネルギーを落とし切るようにコリメータをつけた。

図 53、54 に典型的な event 波形を載せた。この event は蛍光電場が  $1.125\text{kV/cm}$ 、Drift 電場が  $0.1\text{kV/cm}$  で得られたもので、それぞれ上図が R6853 PMT、下図が R11065 PMT で取得した波形である。図 53 はロングパスフィルターを挿入していない時の event であるが、 $0\mu\text{s}$  付近に S1 信号、 $10\mu\text{s}$  付近に S2 信号が観測されていることがわかる (S1, S2 の積分領域は後述)。上図の波形は波高値が正に振れているが、これは R6835 PMT の信号を増大するためにつないでいる NIM amp によるものである。一方で、図 54 は cutoff 波長が  $600\text{nm}$  のロングパスフィルターを挿入したときの event である。図 53 の波形と比較すると、R6835 PMT で取得された波形 (上図) には変化が見られないが、R11065 PMT で



の波形 (下図) は S1 信号がなくなり S2 信号は小さくなっていることがわかる。これより、ロングパスフィルターが機能していることが定性的に確認できる。

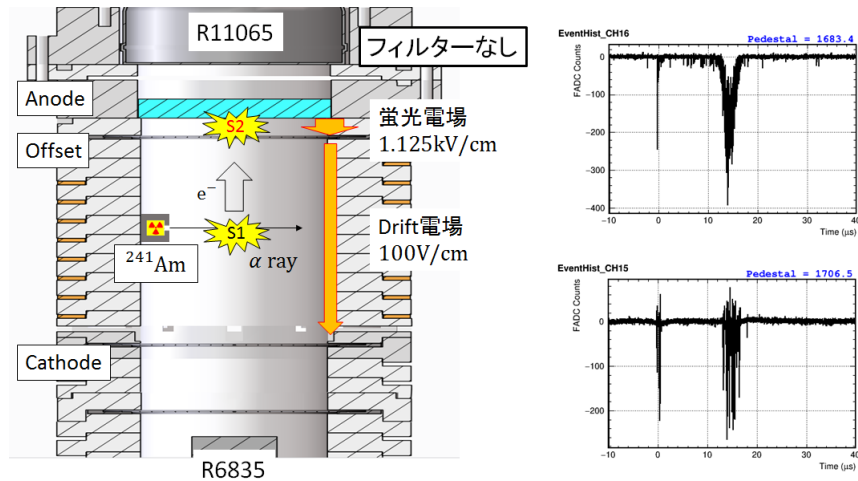


図 53: ロングパスフィルターなし

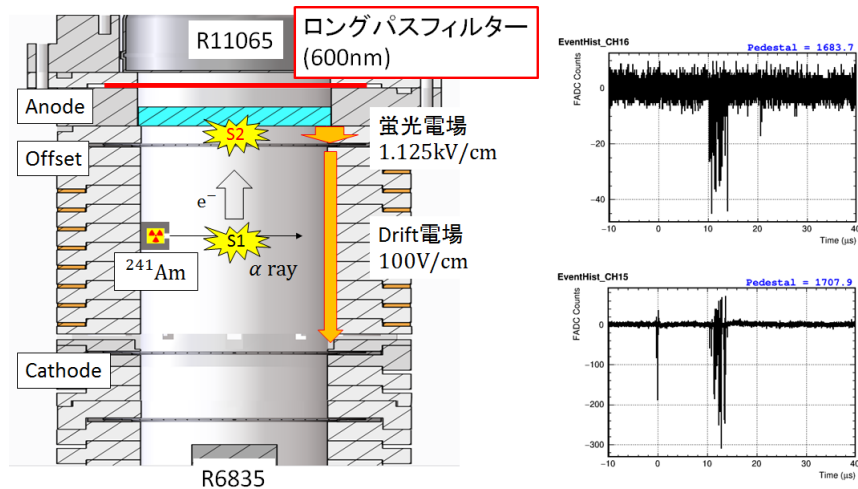


図 54: ロングパスフィルターあり (cutoff 波長 : 600nm)

#### 5.4.2 データ取得

データ取得条件を表 4 に示す。この測定では cutoff 波長の異なる 5 種類のロングパスフィルターを用いた。そしてそれぞれのロングパスフィルターに対して、蛍光電場 (anode-offset 電圧) を 0.415 ~ 2.03kV の範囲で変えてデータ取得を行った。表 4 で、電場を表す単位として換算電界 ( $E/N[\text{Td}]$ ) を用いているが、これは印加電場を媒質の気体密度で割ったものとなっている。電場から換算電界への換算式を以下に示す (式 11)。

$$\begin{aligned}
E/N &= E/(1/k_B \times p \times 1.01325 \times 10^5/T) \times 10^{26} \\
E/N[\text{Td}] &: \text{換算電界} \\
E[\text{kV/cm}] &: \text{電界強度} \\
k_B &= 1.3806504 \times 10^{-23}[\text{J/K}] : \text{ボルツマン定数} \\
p[\text{atm}] &: \text{気体圧力} \\
T[\text{K}] &: \text{気体温度}
\end{aligned} \tag{11}$$

換算電界は気体の圧力と温度もパラメータとして含んでいるため、異なる気体状態下でのガス特性の電場依存性の比較ができる。今回設定した蛍光電場は、先行研究 ([16][17]) の換算電界と等しくなるように決定をしている。

今回使用しているような Gas Flow setup では、検出器内にガスを流し続けることによりガス純度を上げる。そのため、ガス流入開始直後では検出器内のガス純度は不安定である。図 55 に Ar ガス流入中の S2 光量と電子数<sup>1</sup>の時間依存性を示したが、ガス流入後約 2 時間は S2 光量が上昇し続けている<sup>2</sup>。我々は安定した S2 光量評価のため、S2 光量が十分に飽和するまで (約 2 時間) Ar ガスを流しつづけ、その後 S2 スペクトル測定を開始した。また、測定中も一定流量で Ar ガスを流しつづけ、ロングパスフィルター差し替えも流したまま行った。

表 4: データ取得条件

|                  |                                                                      |
|------------------|----------------------------------------------------------------------|
| PMT HV           | 1500V(R11065) 2030V(R6835)                                           |
| trigger          | R6835 self trigger                                                   |
| threshold        | 20                                                                   |
| time window      | $[-50\mu\text{s}, 150\mu\text{s}]$                                   |
| 蛍光電場 [kV/cm]     | 0.415, 0.6, 0.8, 1.0, 1.1, 1.125, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.7, 1.9, 2.03 |
| 蛍光電場 [Td]        | 1.8, 0.6, 0.8, 1.0, 1.1, 4.6, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.7, 1.9, 8.3      |
| Drift 電場 [kV/cm] | 1.2                                                                  |
| cutoff [nm]      | no-filter, 380, 460, 500, 540, 600                                   |

<sup>1</sup>電子数測定の設定アップは付録 A に記述している。

<sup>2</sup>このデータは、上下の PMT はともに VL PMT で行った



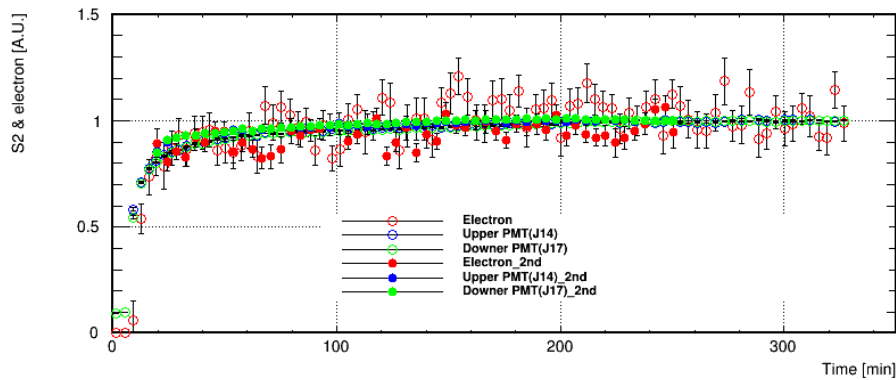


図 55: S2 光量と電子数の時間依存性 (白抜き点と色抜き点は別々に測定したもの)  
(赤：電子数、青、緑：VL PMT)

### 5.4.3 解析

上でも述べたが、R6835 で取得した波形 (図 53、図 54 の下図) の波高値が正に振れている。このまま、波形を積分すると R6835 で取得した光量を正しく算出できないため、クラスタリング波形を作成しその波形を積分して各光量を算出した。図 56 に R6835 で取得した生波形とクラスタリング波形を示す。この解析では、FADC 値が 12counts 以上の bin のみをクラスタリング波形に反映している。

各信号の積分領域は表 5 のように定義した。ここで、trigger time は  $t = 0\mu\text{s}$  としている。S1 と同時に発生した電離電子が蛍光領域に到達し S2 を発するまでの時間 (Drift Time) は、クラスタリング波形で S2 積分領域の光量重心と定義した。

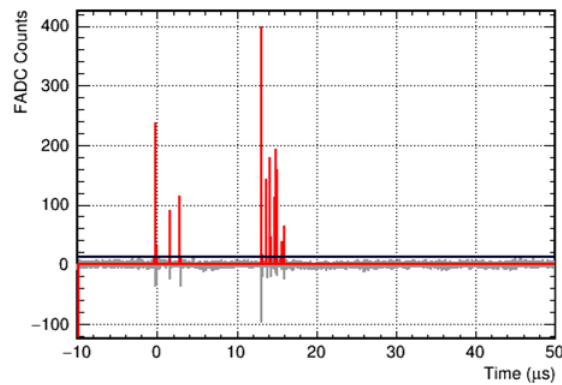


図 56: R6835 で取得した生波形 (灰色線) とクラスタリング波形 (赤線)

表 5: 各信号の積分領域

| 呼称                             | 積分領域                      |
|--------------------------------|---------------------------|
| Negative Time Charge(N-Charge) | $[-50\mu s, -0.04\mu s]$  |
| S1 fast                        | $[-0.04\mu s, 0.12\mu s]$ |
| S1 slow                        | $[0.12\mu s, 5.0\mu s]$   |
| S2                             | $[5\mu s, 150\mu s]$      |

次に事象選択について説明する。この測定では、 $^{241}\text{Am}$  の  $\alpha$  線事象が信号事象である。 $\alpha$  線事象選択には PSD が有効である。図 57 に R11065 の Fast vs PSD 分布を示す。 $\alpha$  線事象が  $1000 \sim \text{Fast}[\text{counts}] \sim 2500$ 、 $0.3 \sim \text{Slow}/\text{Total} \sim 0.6$  に分布している。ただし、R11065 の窓正面にはロングパスフィルターを差し込むため、PSD 以外で事象選択する必要がある。この解析で採用した cut を表 6 にまとめる。そして、表 6 の cut 後の Fast vs PSD 分布を図 57 の右に載せている。これより、表 6 の cut で  $\alpha$  線事象を選択できている。

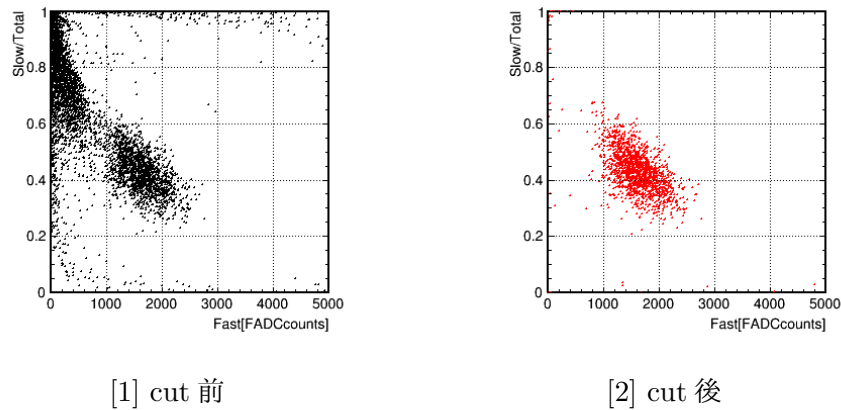


図 57: VL PMT の Fast vs PSD 分布

表 6: cut 値のまとめ

| 呼称             | cut parameter                                                                                     |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| S2 Quality cut | $S2_{R11065} \geq 100\text{counts}$                                                               |
| N-Charge cut   | $N\text{-Charge}_{R11065} \geq 10\text{counts} \cap N\text{-Charge}_{R6835} \geq 10\text{counts}$ |
| Drift Time cut | $10\mu s \leq \text{DriftTime} \leq 20\mu s$                                                      |

次に、S2 光量の安定性を確かめる。データは測定開始時と測定終了時に 2 点ずつ蛍光電場は  $1.0\text{kV}/\text{cm}$  で取得した。S2 光量の安定性は光量の RMS/光量で評価を行った。表 7 に S2 光量の安定性を示す。ここから、VUV PMT での S2 光量は 9.4%、VL PMT の S2 光量は 5.0%の誤差をつけた。

表 7: 各信号の光量安定性

| 信号            | PMT    | RMS/Mean [%] |
|---------------|--------|--------------|
| S2            | R6835  | 9.4          |
| S2(no Filter) | R11065 | 1.66         |
| S2(SC38)      | R11065 | 2.90         |
| S2(SC46)      | R11065 | 2.21         |
| S2(SC50)      | R11065 | 4.42         |
| S2(SC54)      | R11065 | 1.86         |
| S2(SC60)      | R11065 | 4.74         |

#### 5.4.4 S2 光量の電場依存性

図 58、59、60 に各波長帯における蛍光電場依存性を示す。VUV 成分は VUV PMT で取得した S2 信号を、UV、VL 成分は VL PMT で取得した S2 信号を上記の光量評価法で得た。ここで、VL 成分は cutoff 波長 500nm と 600nm を入れたときの S2 光量の差分を、UV 成分はロングパスフィルターなしのときの S2 光量と cutoff 波長 400nm のロングパスフィルターを入れたときの S2 光量の差分を計算している。

VUV 成分 (左図) は高電場領域 ( $\geq 4.0\text{Td}$ ) で線形に光量が増加しており、電子比例蛍光が十分に発生していることがわかる。また、低電場領域 ( $\leq 4.0\text{Td}$ ) では S2 信号は出ていない。これは、 $4.0\text{Td}$  以下の電場では Ar 原子を励起できるくらい電子を加速できないためであると考えられる。この電子比例蛍光の電場の閾値は先行研究と誤差の範囲内で一致している。

続いて、VL 成分 (右図) は VUV 成分と異なり、電場が高くなっても光量は線形に増加せず  $\sim 5\text{Td}$  で飽和している。また、電子比例蛍光 (VUV 成分) の電場閾値よりも低い電場下でも S2 信号が出ていることが確認できる。この VL 成分の電場依存性は、中性制動放射の電場依存性と定性的に一致している。

UV 成分 (中央図) については、高電場領域で線形に S2 光量が増加する VUV 成分の特徴と電子比例蛍光の電場閾値以下の低電場領域でも S2 信号が出ている VL 成分の特徴が表れている。

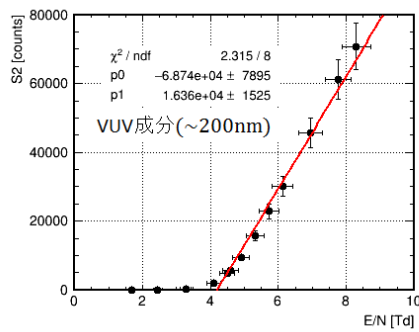


図 58: VUV 成分

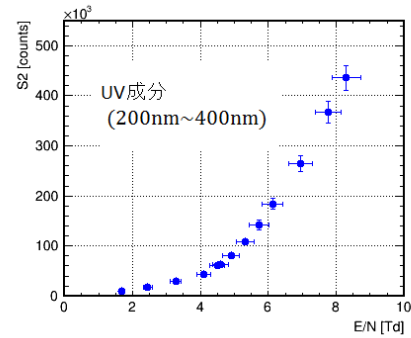


図 59: UV 成分

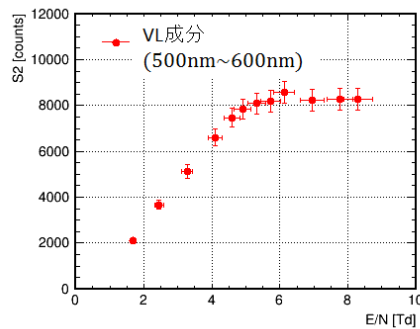


図 60: VL 成分

#### 5.4.5 S2 波長スペクトルの算出と理論計算との比較

S2 波長スペクトルは各 cutoff 波長のロングパスフィルターで得られた S2 光量の差分を取り、各波長帯の S2 光量を算出することで求めた。ここで、gain 値は 40counts/p.e. である。

続いて、得られた測定データをガス Ar 発光成分で説明できるかを確かめる。ここで考えられる発光成分としては、Ar の UV 発光成分と N<sub>2</sub> 不純物による発光成分、中性制動放射成分である。ここでは、これら 3 成分で構成される S2 発光スペクトル関数を定義し、測定データに対して fit した。まず、fit 関数について説明する。定義した fit 関数を以下に示す。

$$S2LY = \int S(\lambda; dV) QE(\lambda) F_i(\lambda) \epsilon(\lambda) d\lambda \quad (12)$$

$$S(\lambda; dV) = \alpha_{\text{NBrS}} S_{\text{NBrS}} + \alpha_{\text{ArUV}} S_{\text{ArUV}} + \alpha_{\text{ArN}_2} S_{\text{ArN}_2} \quad (13)$$

$S2LY$  : 期待検出光子数

$S_{\text{NBrS}}(\lambda)$  : 中性制動放射の波長スペクトル

$S_{\text{ArUV}}(\lambda)$  : ガス Ar 蛍光の UV 成分の波長スペクトル

$S_{\text{ArN}_2}(\lambda)$  :  $\text{N}_2$  不純物の波長スペクトル

$\alpha_{\text{NBrS}}, \alpha_{\text{ArUV}}, \alpha_{\text{ArN}_2}$  : 各発光成分の光量比 (14)

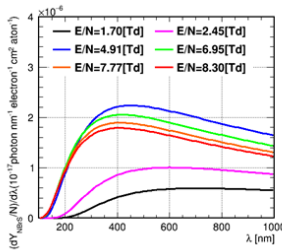
$QE(\lambda)$  : VLPMT の量子効率

$F_i(\lambda)$  : ロングパスフィルターの波長透過率 ( $i = 0, 1, \dots, 4$ )

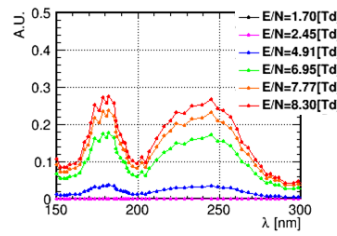
$\epsilon(\lambda)$  : 光子到達効率

$\lambda$  : 波長

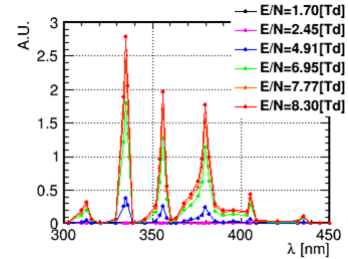
各発光成分の波長スペクトルは、図 61 に示したあるものを使用した。中性制動放射成分の波長スペクトルは理論計算値を、ガス Ar 蛍光の UV 成分と  $\text{N}_2$  不純物発光成分については先行研究の測定結果 ([19], [22]) である。ただし、ガス Ar 蛍光の UV 成分と  $\text{N}_2$  不純物発光成分の電場依存性については、電子比例蛍光 (図 58[1]) と同じ依存性を持つと仮定した。



[1] 中性制動放射成分



[2] ガス Ar 蛍光の UV 成分



[3]  $\text{N}_2$  不純物発光成分

図 61: 各発光成分の波長スペクトル

ここで、光子到達効率  $\epsilon(\lambda)$  は検出器に使われている、ITO、石英などには屈折率と光減衰率の波長依存性があるため、波長ごとに VL PMT に到達する光子数が異なる。この光子到達効率の波長依存性を toy MC によって以下のように見積もった (図 62)。ITO、石英の屈折率、光減衰率は FILMETRICS 社のデータベースを使用した [23]。

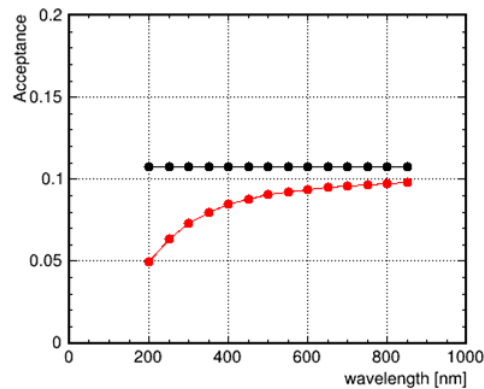


図 62: 光子到達効率の波長依存性 (赤：屈折率と光減衰率を考慮した場合、黒：屈折率と光減衰率を考慮しない場合)

測定データに対して S2 波長スペクトル関数 (式 (15)) で fit した結果を図 63 示す。黒点が波長フィルターで測定した各波長帯での S2 光量で、fit 関数は線で示している。赤線が中性制動放射成分、青線がガス Ar 蛍光の UV 成分、緑線が  $N_2$  不純物発光成分である。ここで fit の方法を説明すると、すべての電場点に対して式 (15) で同時 fit した。fit parameter は式 (15) における発光成分の光量比  $\alpha$  であり、すべての電場点で同じ値となるように決定した。

図 63 より、すべての電場点において、特に長波長成分 (500nm~600nm) は中性制動放射成分の理論計算とよく一致していることがわかる。この結果から、S2 信号に中性制動放射成分が存在することが示唆される。

また、200nm~380nm の成分は電子比例蛍光と同じ電場依存性を持つことが確認できる。ここで、低電場領域の 200nm~450nm の領域では、fit 結果に比べて測定データが高く出ている。これは中性制動放射成分の理論計算の不定性によるものであると考えられる。実際に、理論計算の不定性は最大で 200%あることが先行研究によりわかっている [16]。

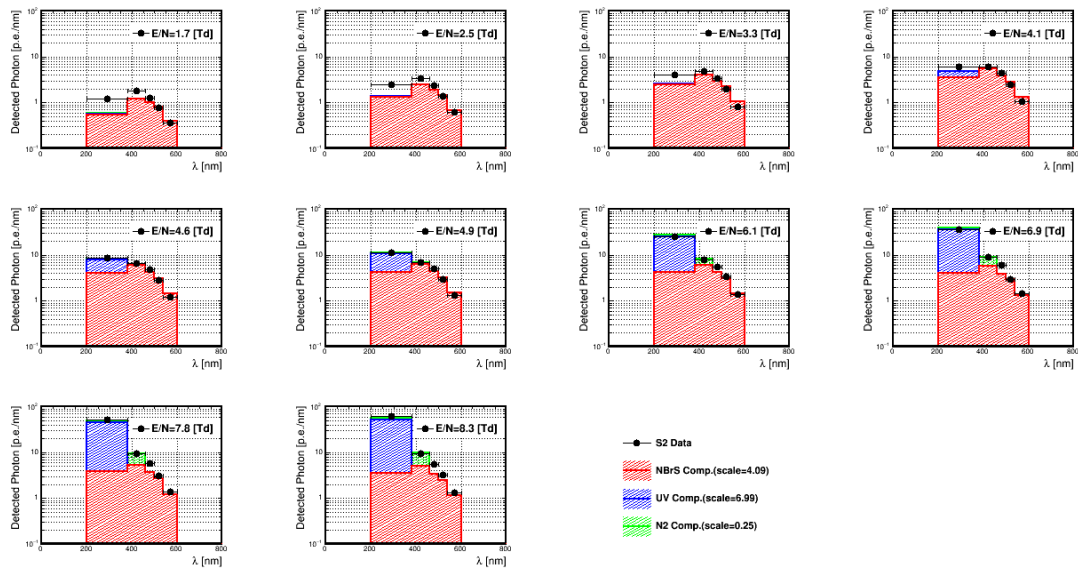


図 63: S2 波長スペクトルの測定値と中性制動放射の波長スペクトルの比較

## 5.5 分光器による S2 波長スペクトル測定

上記の波長フィルターによる S2 波長スペクトル測定により、中性制動放射成分の存在が示唆された。ここでは、分光器を用いて S2 波長スペクトルをより良い分解能で測定することを目的に、2020 年 2 月にデータ取得を行った。

### 5.5.1 実験セットアップ

この測定の実験セットアップを図 64 に示す。波長フィルターで使用した検出器をこの測定でも用いており、anode 面のある ITO 石英の前に分光器を設置している。分光器により分光された光は、VL PMT で検出する。この測定においては、 $^{241}\text{Am}$  をコリメータをつけずに計 3 つ設置している。設置場所は、offset grid の下 7cm に  $\alpha$  線が蛍光領域方向に飛ぶように検出器中心に置いている。

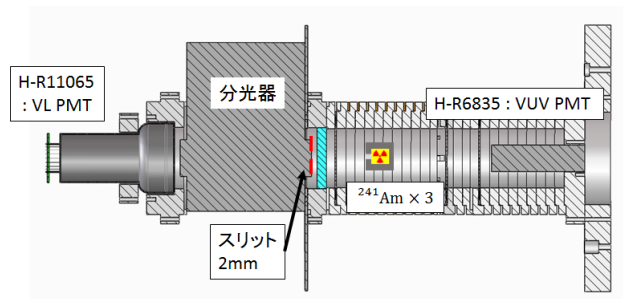


図 64: 分光器測定の実験セットアップ

この測定で使用した分光器は島津製作所の SPG-120S である。これは回折格子型の分光器であり、200nm~900nm の波長帯を測定可能である。また、光の入射口と出射口にスリット (2mm, 1mm, 500 $\mu$ m) を入れることにより、分光器に入射する信号の光量と波長分解能を調節することができる。表 8 にスリット幅とその波長分解能 (カタログ値) を示した。今回の測定では、分光器の光入射側にスリット幅 2mm を、光出射側はスリットを取り付けずに行った。

表 8: スリット幅と波長分解能

| スリット幅        | 波長分解能 (@400nm) |
|--------------|----------------|
| 500 $\mu$ m  | 3.3nm          |
| 1mm          | 6.2nm          |
| 2mm          | 12.0nm         |
| スリットなし (5mm) | ~30nm          |

表 9 にデータ取得条件を示した。このセットアップも波長フィルター測定と同じく、Gas Flow Setup となっている。そのため、ガス Ar を 3 時間流しつづけその後測定を開始した。データ取得中はガス Ar は流し続けており、分光器の波長設定の間も流していた。蛍光電場は 1125V と 2030V に設定をした。また、今回使用した分光器は回折格子型であるため、高次回折光の影響を考慮する必要がある。そこで、蛍光電場が 2030V のときに分光器の光出射側に波長フィルター (cutoff 波長: 390nm) を設置したデータも測定をした。これにより、400nm 以上で影響する 390nm 以下の高次回折光 (特に 2 次回折光) をなくすることができる。

表 9: データ取得条件

|                  |                            |       |
|------------------|----------------------------|-------|
| PMT HV           | 1700V(R11065) 2030V(R6835) |       |
| trigger          | R6835 self trigger         |       |
| threshold        | 20                         |       |
| time window      | [-30 $\mu$ s, 80 $\mu$ s]  |       |
| Drift 電場 [kV/cm] | 0.1                        |       |
| 蛍光電場 [kV/cm]     | 2.03                       | 1.125 |
| 蛍光電場 [Td]        | 8.3                        | 4.6   |

### 5.5.2 解析

VUV PMT の各光量の積分範囲は、波長フィルター測定のとおりと同じもの (4) で解析を行った。ここで、この解析では、クラスタリング波形の threshold として VUV PMT は FADC 値が 12counts、VL PMT は 30counts に設定している。事象選択について説明する。この解析で使用した cut 値を表 10 にまとめる。基本的に VUV PMT で S2 信号が十分観測された事象を選んでいる。



表 10: cut 値のまとめ

| 呼称              | cut parameter                                                                                                                      |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Drift Time cut  | $\text{Drift Time} \geq 10.5[\mu\text{s}]$                                                                                         |
| S2 Quality cut  | $S2_{\text{VUVPMT}} \geq 4.0 \times 10^4 \text{counts}(2030\text{V})$<br>$S2_{\text{VUVPMT}} \geq 500 \text{counts}(1125\text{V})$ |
| S2 gaus fit cut | $\text{mean} - 2\text{sigma} \leq S2_{\text{VUVPMT}} \leq \text{mean} + 2\text{sigma}$                                             |
| S2 region cut   | $S2_{\text{VLPM}} \geq 0$                                                                                                          |

次に、波長スペクトルの算出法について示す。分光された後の S2 信号は非常に小さく、波長フィルター測定の際のように VL PMT では S2 光量分布を比較する方法は使えない。そこで、ここでは VL PMT において S2 領域内に 1p.e. 以上の信号が観測される event rate を比較することで波長スペクトルの算出を行った。また、VL PMT の dark rate が 1kHz であるため、バックグラウンド領域を 3 箇所用意し、accidentanl に S2 領域に VL PMT の dark event が入ってくる rate を算出した。以下に、VL PMT の信号領域とバックグラウンド領域を示す (表 11)。

表 11: VL PMT の計算領域

| 呼称               | 計算領域                               |
|------------------|------------------------------------|
| Signal(S2)       | $[5\mu\text{s}, 30\mu\text{s}]$    |
| BackGround1(BG1) | $[-30\mu\text{s}, -15\mu\text{s}]$ |
| BackGround2(BG2) | $[0\mu\text{s}, 5\mu\text{s}]$     |
| BackGrount3(BG3) | $[35\mu\text{s}, 80\mu\text{s}]$   |

波長スペクトルは式 (16) により、各波長ごとに accidental 補正を行った。この式では表 11 で定義した S2 領域に accidental に入ってくる 1p.e. event rate を 3 つの BG 領域 (BG1, BG2, BG3) で見積もっている。この際、各 BG 領域の time window が異なるため、S2 領域の time window にスケールしてその平均を accidental rate として S2 領域の event rate から差し引くことで、補正を行っている。

$$S2\text{Cor}_{\text{rate}} = S2_{\text{rate}} - \frac{1}{3}(BG1_{\text{rate}} \frac{W_{S2}}{W_{BG1}} + BG2_{\text{rate}} \frac{W_{S2}}{W_{BG2}} + BG3_{\text{rate}} \frac{W_{S2}}{W_{BG3}}) \quad (15)$$

$$S2\text{Cor}_{\text{rate}}[\text{Hz}] : \text{accidenatal 補正後の S2 領域の event rate} \quad (16)$$

$$S2_{\text{rate}}[\text{Hz}] : \text{S2 領域の event rate}$$

$$BGi_{\text{rate}}[\text{Hz}] : \text{BG}(i = 1 \sim 3) \text{ 領域の event rate}$$

$$W_{S2}[\mu\text{s}] : \text{S2 領域の time window}$$

$$W_{BGi}[\mu\text{s}] : \text{BG}(i = 1 \sim 3) \text{ 領域の time window}$$

ここで、式 (16) により accidental な event を除去できているか確認するため、分光器の光出射口を遮光（黒ビニルテープ）したときの各領域の event rate を算出した（表 12）。

表 12: 遮光したときの各領域の event rate

| 領域  | event rate[Hz]    | スケール後の event rate[Hz] |
|-----|-------------------|-----------------------|
| S2  | $0.175 \pm 0.011$ | $0.175 \pm 0.011$     |
| BG1 | $0.105 \pm 0.009$ | $0.175 \pm 0.014$     |
| BG2 | $0.032 \pm 0.005$ | $0.160 \pm 0.024$     |
| BG3 | $0.316 \pm 0.015$ | $0.170 \pm 0.008$     |

表 12 と式 (16) より、accidental 補正後の event rate は  $S2Cor_{rate} = 0.003 \pm 0.015\text{Hz}$  と 0 consistent な値が得られた。これにより、式 (16) で accidental を差し引けることが確認された。

### 5.5.3 測定結果

図 65、66 にこの測定で得られた S2 波長スペクトルを示す。まず、図 65 は蛍光電場  $E/N = 8.3[\text{Td}]$  で波長フィルターあり（赤線）となし（青線）の波長スペクトルを比較している。青線より、300 ~ 400nm と 600 ~ 650nm にピークが確認できる。300 ~ 400nm の領域での発光としては  $N_2$  不純物発光があり、スペクトル形としておおむね一致しているため、このセットアップでは  $N_2$  不純物が混入していることが予想される。600 ~ 650nm のピークについては後述する。続いて、赤線は cutoff 波長 390nm の波長フィルターを導入したときのスペクトルであるが、~ 400nm 以下で rate が 0 consistent であり、400nm 以下の光を遮光できていることが確認される。また、青線で確認された 600 ~ 650nm のピークが赤線では確認できない。このことから、赤線の 600 ~ 650nm のピークは、300 ~ 400nm の 2 次回折光によるものであると考えられる。さらに、青線、赤線ともに 450 ~ 600nm の領域で様なスペクトルが観測されており、このスペクトルは高次回折光の影響によるものではない。

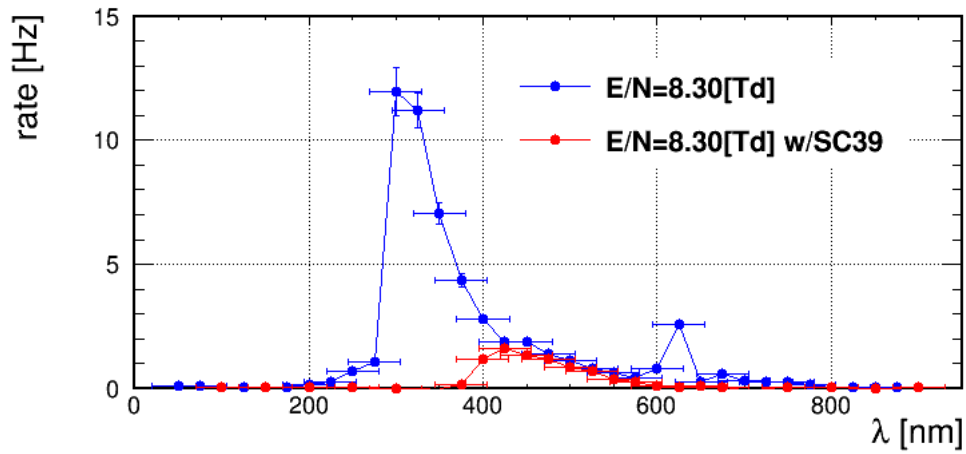


図 65: S2 波長スペクトル

続いて、図 66 は蛍光電場  $E/N = 8.3[\text{Td}]$  (青線) と  $E/N = 4.6[\text{Td}]$  (黒線) の比較を示している。ここで、青線は図 65 で示した 2 つのスペクトルを合わせたものであり、500nm より短いところは波長フィルターなし、500nm 以上は波長フィルターありのスペクトルとしている。図 66 より、青線の 300 ~ 400nm のピークが黒線では確認できないが、これは青線よりも黒線の方が蛍光電場が低く、 $N_2$  不純物による発光量が少なくなっているためであると考えられる。また、黒線でも 450 ~ 600nm の領域で一般的なスペクトルが観測され、光強度も  $E/N = 8.3\text{Td}$  と変わらないことが確認された。

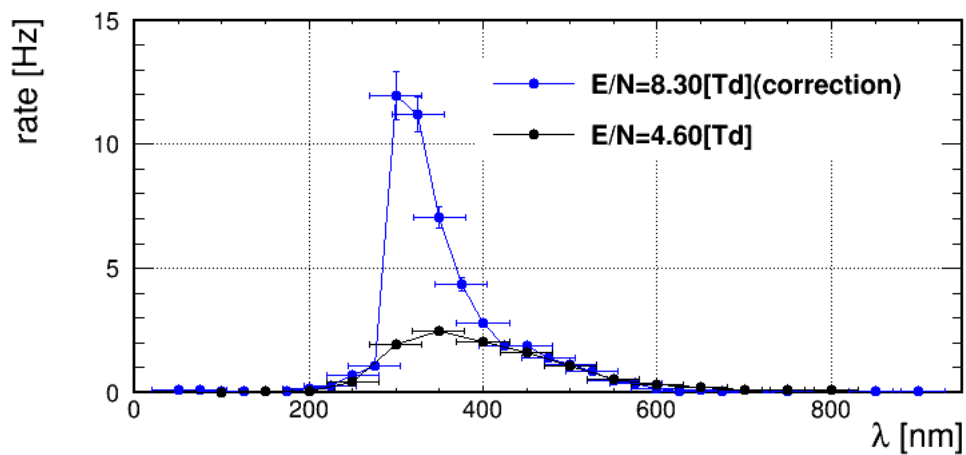


図 66: S2 波長スペクトル

## 5.6 考察

波長フィルター測定の結果、すべての電場点において測定データと中性制動放射成分とガス Ar 蛍光の UV 成分、 $N_2$  不純物発光成分で説明できることを確認した。また、500nm~600nm の領域で測定結果と中性制動放射成分の理論計算値が一致しており、中性制動放射成分の存在を強く示唆している。ただし、200nm~460nm の領域は測定データが fit 結果よりも大きな値となっている。これは、上述したが、中性制動放射の理論計算の不定性 (最大 200%) により吸収されてしまう。この中性制動放射の理論計算の不定性は、低電場下における電子のエネルギー分布による [16]。ここでは、電子のエネルギー分布はボルツマン方程式の数値計算ソフト (Magboltz) で電子の平均エネルギー分布を計算したものを使用している。この計算は理想的なものを仮定しており、先行研究によると電子が Ar 原子に衝突する直前のエネルギー分布を計算した場合、光量は約 2 倍になると言及している [16]。このように、中性制動放射成分の理論計算は不定性が大きいので、今回の測定結果では中性制動放射成分の存在を示唆するにとどまる。

分光器測定では、蛍光電場  $E/N = 8.3, 4.6 \text{ Td}$  共に 450 ~ 600nm の可視光領域で一様な波長スペクトルが観測された。ここで強調したいのが、450 ~ 600nm の領域には  $N_2$  不純物発光成分を含め、ガス Ar 蛍光の発光成分はなく、中性制動放射成分のみが観測されうることである。そのため、今回の分光器測定の結果は、中性制動放射成分の存在を示すに値するものであると考えられる。光量の電場依存性の観点から見ても、中性制動放射成分は  $E/N \leq 4 \text{ Td}$  で光量は変化しないという理論予想と定性的に一致する。上述したが、中性制動放射成分の理論計算値は大きな不定性がある。分光器測定で得られた波長スペクトルによる解析からモデルを決定することも可能となることが考えられる。一方で、波長フィルター測定の結果と比較をすると一部一致しない点があるもの事実である。200 ~ 400nm の領域で、波長フィルター測定の結果ではガス Ar 蛍光の UV 成分が主な成分であることを示しているが、分光器測定では  $N_2$  不純物成分が主成分であることを示している。この原因としては、波長フィルター測定で使用している波長スペクトルのテンプレートが、本実験環境下では適用できない可能性が挙げられる。そのため波長スペクトルの理解の観点から、200 ~ 400nm の発光成分の理解にも今後は重点を置くことが重要である。ただし、本研究結果の結論としては、波長フィルター測定、分光器測定の両方で 450 ~ 600nm の領域に中性制動放射成分とみられるスペクトルが観測された事実は変わらない。

## 5.7 今後の展望

今後は、測定値の精度の向上と中性制動放射成分の詳細特性の理解をしていく必要がある。

まず第一に、より高分解能での波長スペクトル測定である。今回の測定では、波長フィルター測定では ~ 50nm、分光器測定でも ~ 30nm の波長分解能で行った。この分解能では、線スペクトルを測定することは難しい。また、今回得られた 450 ~ 600nm の一様なスペクトルも線スペクトルの集合である可能性は捨てきれない。波長スペクトル (特に 200 ~ 400nm) の詳細理解のためには、数 nm 程度の波長分解能での測定が不可欠となる。

続いて第二に、今回の測定で確認された、 $N_2$  不純物による発光の影響の理解である。 $N_2$  不純物がない場合、中性制動放射成分のみが発光する波長領域が広がるため、今後は

このようなガス不純物がない状態で測定することが望まれる。ガス Ar の純度を上げる方法としては主に2つ考えられる。1つ目は、ガス Ar に混入しているガス不純物を低減しガス Ar 発光のみを測定することである。今回使用した Gas Flow Setup ではどうしてもガス Ar の純度向上に限界がある。安定的にガス Ar の純度を高水準で保つには、真空容器に検出器を入れしっかりと真空引きを行ったうえでガス Ar をパージする必要があると思われる。また、ガス Ar の純化システムを使用して不純物除去できるセットアップにすることで、純度を安定的に維持できると思われる。2つ目は、積極的に  $N_2$  不純物の発光成分の理解することである。方法としては、意図的にガス Ar に  $N_2$  を一定量混ぜて測定を行うことで理解することができる。また、スペクトル形の電場依存性について測定することで、今回の測定データの 200~500nm の理解につながると考えられる。これに対しても Gas Flow Setup ではなく真空系統が整ったセットアップで行う必要がある。

第三に、S2 信号の光子放出方向分布の測定である。中性制動放射成分の発光特性の一つに光子放出方向に偏りがあることを上で述べた。この発光特性は、S2 信号による XY 平面の位置分解能の向上や入射粒子の到来方向の算出につながると考えられ、暗黒物質直接探索実験において非常に重要な情報を与えてくれる可能性がある。ただし、中性制動放射成分が制動放射の1種であることから予想されるものであり、理論が確立されていない。そのため、実験により実際に光子放出方向に偏りがあるのか、どのくらいの角度分解能で放出されているのかを測定する必要がある。図 67 に本実験で行った光子放出方向測定の実験セットアップを、図 68 に S2 光量の上下比の電場依存性を示した。中性制動放射の光子が電子の Drift 方向に放出されるならば、中性制動放射成分が主な低電場領域では S2 光量の上下比が高く、電子比例蛍光が主な高電場領域では S2 光量の上下比が低くなると考えられる。測定の結果、S2 光量の上下比は電場が高くなると  $E/N \sim 2 \text{ Td}$  をピークに下がり始め、最終的には  $\sim 20\%$  減少することがわかっている。このように、中性制動放射成分に光子放出方向に偏りがあることを支持する結果が得られている。ただし、検出器の光学特性によりこのような振る舞いが見えている可能性もあり、まだ検証するべきことが残っている。

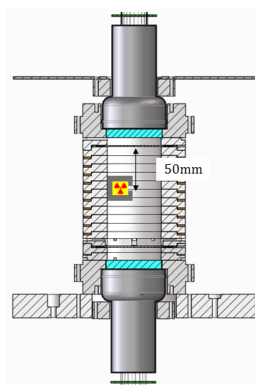


図 67: S2 光子放出方向測定の実験セットアップ

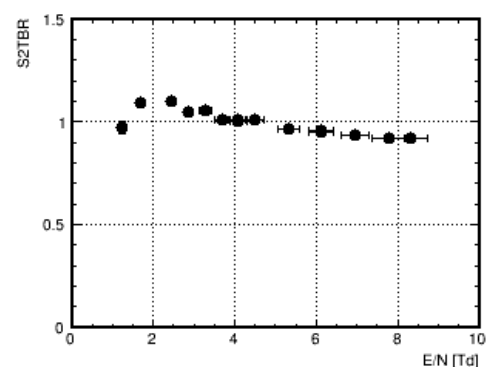


図 68: S2 光量の上下比の電場依存性

中性制動放射成分の光子放出方向の偏りについては、XY 位置分解能を持つ光デバイス

や  $4\pi$  を光デバイスで覆った検出器を使用した測定と光学シミュレーションの構築が今後必要になると考えられる。

以上を踏まえて、中性制動放射成分の存在を確実なものにし、暗黒物質直接探索実験などの物理実験に中性制動放射成分の性質を活かしたいと考えている。

## 6 まとめ

本研究では、S2 信号の特性基礎研究として S2 信号の波形解析とガス Ar 発光の中性制動放射成分に関する測定を行った。

S2 波形解析では S2 発光過程をモデル化しそれを元に S2 波形関数を算出した。得られた S2 波形関数を気液 2 相型検出器で取得した S2 波形に対して fitting を行った。その結果、1MeV 近くの高エネルギー ER 事象の場合、反跳電子の反跳方向を示すパラメータで event by event の波形の違いを説明できることが示された。これは、入射粒子の到来方向が S2 波形から予測可能であることを示唆している。今後は、さらなる検証とし線源の入射方向を天頂角 scan を行い、S2 波形解析で再現できるかを確かめる必要がある。また、粒子の到来方向の他にも、波形解析により得られるパラメータは多くあるため、Photocount 等の各種パラメータ算出に S2 波形解析が導入されることが期待される。

ガス Ar 発光の中性制動放射成分に関する測定では、常温ガス Ar セットアップを作成し、S2 波長スペクトルを波長フィルターと分光器の 2 つの方法で測定した。波長フィルター測定では、各波長帯ごとの S2 光量の電場依存性を測定し、可視光成分は中性制動放射と定性的に同じ振る舞いをすることを確認した。また、中性制動放射成分、ガス Ar 蛍光の UV 成分、 $N_2$  不純物発光成分の 3 成分で S2 波長スペクトルを説明できることを確認した。分光器測定では、450 ~ 600nm の領域で中性制動放射成分とみられる一様なスペクトルを観測した。

以上から、2 つの異なる測定から S2 信号に中性制動放射成分が存在することを示唆する結果が得られた。一方、分光器を用いた測定では、300nm~500nm に  $N_2$  不純物とみられるピークが観測され、今回測定した検出器内に一定量の  $N_2$  不純物が存在することが確認された。今後は、中性制動放射成分の存在有無を明確にするため、純粋ガス Ar の S2 波長スペクトルの測定、または  $N_2$  不純物による発光特性の理解が必要となると考えられる。そして、中性制動放射成分の光子放出角度測定も今後行っていく必要がある。

## 7 謝辞

本研究を行うに当たり研究指導をしていただいた寄田浩平教授に感謝申し上げます。寄田先生には研究をする場だけではなく、研究を発表する場も多々用意していただき非常に濃密な3年間を過ごすことができました。この研究室で学んだことは私の人生において大きな糧となると確信しております。ありがとうございます。

3年間通じて研究方針等の指導をしていただいた田中雅士准教授に感謝申し上げます。研究を進めていく中で何度も壁にぶつかってきましたが、その都度相談に乗って的確なアドバイスを下さり、結果を出すことができました。ありがとうございます。

招聘研究員の蛭名幸二氏は居室にいるときに気さくに話しかけてくださり、楽しく過ごすことができました。

秘書の坂本敦子さんには物品購入や学会等の旅費手続きなどのサポートをしていただきました。Run中の健康に気を使った差し入れはとてもありがたかったです。

助手の三谷貴司さんには発表スライドを見ていただき、長時間相談に乗っていただきました。

ANKOKの先輩方である木村真人さんには研究に関すること、特にDAQの相談に真摯に乗っていただきアドバイスをいただきました。国立天文台の鷲見貴生さんには、広い目線で研究を見てくださり研究の視野を広げることができました。

同期である青山一天君、植原靖裕君、鶴田亮君とは共に切磋琢磨して3年間研究を進めてきました。くだらないことばかり話していた気がします、それが支えになっていたと思います。同じ研究室で日々を過ごせたことを大変うれしく思います。

ANKOK実験の後輩である小津隆吉君、本田侑己君、諸星博之君には、実験の手伝いを夜遅くまで手伝ってくれたことが多々あり、とても助けられました。

最後に、経済面、生活面、精神面すべてにおいて支えてくれた両親、家族に感謝を述べ、締めさせていただきます。



## 参考文献

- [1] ESA Plunck Project, "Simple but challenging: the Universe according to Planck", <http://sci.esa.int/planck/51551-simple-but-challenging-the-universe-according-to-planck/>, 2013.
- [2] 須藤靖, "パリティ物理学コース ダークマターと銀河宇宙", 1993.
- [3] 高原文郎, "宇宙物理学", 1999.
- [4] K. G. Bengeman et al., "Extended rotation curves of spiral galaxies: dark haloes and modified dynamics", *Mon. Not. R. astr. Soc.*, 1991.
- [5] M. Tanabashi et al. (Particle Data Group), "Review of Particle Physics", *Phys. Rev. D*, 98, 030001, (2018).
- [6] 中村輝石, "到来方向に感度を持つ暗黒物質の直接探索実験 NEWAGE における感度上昇のためのバックグラウンド低減及びエネルギー閾値低下の研究", (2011).
- [7] Elena Aprile et al., "Noble Gas Detectors", 2006.
- [8] Agnes, P. et al. "DarkSide-50 532-Day Dark Matter Search with Low-Radioactivity Argon." *Physical Review D* 98.10 (2018).
- [9] Elena Aprile et al., "Noble Gas Detectors", 2006. J. P. Brodsky, " $xy$  Position Reconstruction in DarkSide-50," doi:10.2172/1212164
- [10] 鷲見貴生, "ANKOK 実験に置ける大光量 2 相型プロトタイプ検出器の開発と性能評価", 早稲田大学修士論文, (2014).
- [11] 菊地崇矩, "ANKOK 実験における高電場形成と消光因子測定", 早稲田大学修士論文, (2017).
- [12] Amsler, C et al. "Luminescence Quenching of the Triplet Excimer State by Air Traces in Gaseous Argon." *Journal of Instrumentation* 3.02 (2008).
- [13] Agnes, P. et al. "Electroluminescence Pulse Shape and Electron Diffusion in Liquid Argon Measured in a Dual-Phase TPC." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 904 (2018).
- [14] 木村真人, "暗黒物質直接探索実験 ANKOK における液体 Ar 応答と電子反跳背景事象の理解", 早稲田大学修士論文, (2016).
- [15] Gehman, V.M. et al. "Fluorescence Efficiency and Visible Re-Emission Spectrum of Tetraphenyl Butadiene Films at Extreme Ultraviolet Wavelengths." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 654.1 (2011).

- 
- [16] Buzulutskov, A. et al. “Revealing Neutral Bremsstrahlung in Two-Phase Argon Electroluminescence.” *Astroparticle Physics* 103 (2018): 29-40. Crossref. Web.
- [17] Bondar, A. et al. “Neutral Bremsstrahlung in Two-Phase Argon Electroluminescence: Further Studies and Possible Applications.” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* (2019): 162432. Crossref. Web.
- [18] Oliveira, C., et al. (2013). Simulation of gaseous Ar and Xe electroluminescence in the near infra-red range. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 722. 1-4. 10.1016/j.nima.2013.04.061.
- [19] G Klein and M J Carvalho 1981 *J. Phys. B: At. Mol. Phys.* 14 1283.
- [20] 富士フイルム光学フィルター, [https://asset.fujifilm.com/www/jp/files/2019-12/10825b6d1310354377e8edc803f309f2/films\\_sheetfilter\\_handbook\\_01.pdf](https://asset.fujifilm.com/www/jp/files/2019-12/10825b6d1310354377e8edc803f309f2/films_sheetfilter_handbook_01.pdf), (2020/1/21 閲覧).
- [21] Buzulutskov, A. “Photon Emission and Atomic Collision Processes in Two-Phase Argon Doped with Xenon and Nitrogen.” *EPL (Europhysics Letters)* 117.3 (2017): 39002. Crossref. Web.
- [22] TAKAHASHI, T, et. al, “EMISSION SPECTRA FROM AR-XE, AR-KR, AR-N<sub>2</sub>, AR-CH<sub>4</sub>, AR-CO<sub>2</sub> AND XE-N<sub>2</sub> GAS SCINTILLATION PROPORTIONAL COUNTERS.”, *NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS IN PHYSICS RESEARCH*; ISSN 0167-5087; NLD; DA. 1983; VOL. 205; NO 3; PP. 591-596; BIBL. 32 REF., 1983.
- [23] FILMETRICS 社, <https://www.filmetricsinc.jp/refractive-index-database/>, (2020/1/22 閲覧).

## 付録 A 電離電子数の測定系

電子数の測定は図 69 に示したセットアップで行った。offset grid に pre amp(A250) と shaper amp(時定数： $1.5\mu\text{s}$ 、gain：10) を通して FADC で波形取得することで電子数を読み出している。得られた波形の  $peak \pm 2.0\mu\text{s}$  を積分領域と定義して、電子数の見積もりを行った。

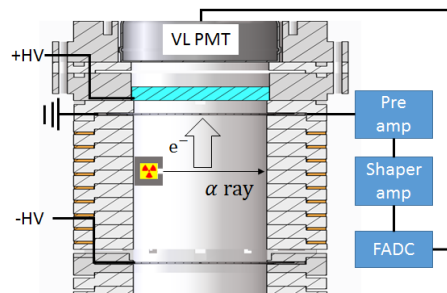


図 69: 電子読み出しのセットアップ

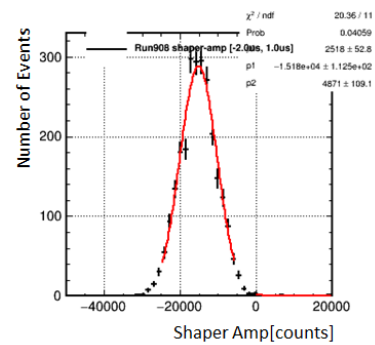


図 70: shaper amp の出力積分値

## 研究活動の不正行為 定義確認書

2020 年 / 月 24日

早稲田大学大学院先進理工学研究科長 殿

早稲田大学大学院先進理工学研究科

物理学及応用物理学 専攻 2 年本人氏名 武田 知将

(自署)

私は、裏面に記載のある研究活動の不正行為に関する定義を理解し、修士論文提出において、不正行為または不正行為と疑われる行為を一切行っていないことを誓約します。

なお、当該行為を行なうと、厳重な処分（無期停学・当該学期成績無効・修士論文不合格等）を受けること、学位取得後であっても学位取消となることを十分に認識した上で、論文を執筆しました。

## 研究倫理教育受講確認書

2020 年 / 月 24日

本人氏名 武田 知将 

私は、修士論文の執筆にあたり、以下の研究倫理教育を受講しました。

|          |                                                         |
|----------|---------------------------------------------------------|
| <u>9</u> | GEC 設置科目「研究倫理概論」の受講                                     |
|          | 専攻設置科目の受講 科目名 ( )                                       |
|          | その他 ( )<br>※受講前に指導教員を通じて専攻主任の承認を受けること。<br>※受講証明を添付すること。 |

## 研究活動の不正行為（捏造、改ざん、盗用、剽窃）について

修士論文を作成するに当たっては、以下の点に十分留意してください。

- ◆既存の文書・資料や自ら取得したデータ等に関し、「捏造・改ざん」は絶対に行ってははいけません。これらの行為は、社会人はもちろん、学生であっても当然守らなくてはならないルールです。

※捏造：事実でないことを事実のように仕立て上げること。でっちあげること。

※改ざん：文書やデータ等の全部あるいは一部を、故意に本来のものでない内容・形式・時期等に変更すること。悪意の有無は問わない。

- ◆学問の体系に新たな知見を加えるとき、その信頼性は命です。学術研究でも、そのための対応が求められます。そこでは上記に加え、資料・データ等の適切な利用と管理、情報取得に当たってのインフォームドコンセントの適用、取得した個人情報の保護等に配慮しなければなりません。

他人の著作物（書籍や論文などに加え、講演での発言やインターネットに掲載された文章・図表・データ等も含む）を活用する場合には、「盗用・剽窃」に十分配慮してください。

盗用・剽窃は、著作権法で禁止された行為です。社会人はもちろん、学生であっても当然守らなくてはならないルールです。

※盗用・剽窃：引用元を適切に記載せずに、他人の文章、結果、意見、アイデア、理論、学説などを自分のものとして発表すること。

- ◆学問の発展は独創性・独自性が基盤です。初めにそれを公表した人のオリジナリティを尊重し、敬意を払うことは学問の府に身を置く者の当然の責務です。学術論文においても、自分の考えと他人の意見を明確に区別し、表現しなければなりません。

このためには、適切な「引用」が重要です。学術論文では、他人の意見・アイデア・理論などを参照・参考にした箇所ごとに番号を付け、巻末や脚注で、その出所を明らかにすることが一般的です。学会等によって、その記載順序が若干異なりますが、以下を標準にします。

- ・論文・総説：著者、題名、掲載誌名、巻号、ページ、発表年（月）等

- ・国際会議・シンポジウム・口頭発表：著者、題目、シンポジウム等の名称、場所、年月、巻号、ページ、出版元、出版年等

- ・著書：題目、著者、ページ、出版元、出版年等

インターネットのからの引用では、以下の通りとします。

- ・著者、タイトル、URL、検索日

- ◆プレゼンテーション用のパワーポイントでは、上記の引用方法を簡略化して用いることを認めます。簡略化の原則は確認・参照の容易性です。例えば、論文からの引用では、著者、掲載誌名、発表年月のみの記載を認めます。著書や論文、インターネットなどの文章をそのまま記載する場合は、「」を付け、その文章を誰が公表しているかを明示するのが一般的です。