修士論文

純度制御されたガスアルゴンを用いた 中性制動放射成分の測定

2021年3月25日

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 5319A069-6 諸星博之

概要

本研究室では気液 2 相型アルゴン光検出器を用いた暗黒物質直接探索を行う ANKOK 実験と呼ぶ実験を行っている。この実験において検出器内へ粒子が入射すると、容器に充填された液体アルゴンとの相互作用により S1 と電離電子が発生する。発生した電離電子はその後ドリフトし、気体アルゴンと相互作用することで S2 が発生する。発生した S1 と S2 は内部に取り付けられた PMT 等の光読み出しデバイスにより読み出している。入射した粒子の判別は観測した S1 と S2 を用いて解析することにより行っている。従って信号である S1 と S2 について詳しく知ることは、検出器の理解や入射粒子の特定を深めることにつながる。本論文では特に S2 について、新たな発光機構として示唆されている中性制動放射 (Neutral Bremstlung) について述べる。

本研究室の先行研究では中性制動放射成分の測定を目的として、波長フィルタを用いて測定波長領域を数カ所に区切り、各領域での電場依存性の測定を行っている。またS2波長スペクトルの測定も行っており、どちらの測定でもその存在を示唆する結果を得ている。しかし特に波長スペクトルの測定結果は窒素の混入が原因と見られる発光成分も観測していた。そこで本論文ではアルゴンの純度を制御できる環境を構築した上でS2波長スペクトルの測定を行った。また印加する電場を変更しての測定も行い、中性制動放射成分を波長スペクトルと電場依存性の2つの側面から確認する測定を行った。その結果窒素由来の発光成分を大幅に抑えることができた。またスペクトルの測定と電場依存性の測定のどちらについても中性制動放射成分の存在と無矛盾な結果を得た。

目次

_	
\mathbf{H}	סעי
\mathbf{H}	. V.
_	// \

1	序誦	7
	1.1	暗黒物質
	1.2	暗黒物質探索の現状8
2	AN	KOK 実験 10
	2.1	実験概要
	2.2	信号と背景事象
3	中性	E制動放射 13
	3.1	S2 と中性制動放射 13
	3.2	ガスアルゴン蛍光
	3.3	アルゴンと窒素の混合ガスによる発光 16
	3.4	先行研究
		3.4.1 波長フィルタを用いた測定
		3.4.2 分光器を用いた測定
	3.5	アルゴン純度コントロール環境下での測定 23
		3.5.1 セットアップ
		3.5.2 データ取得 27
		3.5.3 解析
		3.5.4 測定結果
	3.6	純度悪化環境での測定
		3.6.1 結果
	3.7	考察
	3.8	今後の展望 38
4	まと	40
5	Ap	pendix 1 43
6	$\mathbf{A}\mathbf{p}$	pendix 2 51
	6.1	ITO 薄膜の透過率
	6.2	分光器性能試験51
		6.2.1 セットアップ
		6.2.2 結果
	6.3	高純度アルゴンガスによる測定55
	6.4	窒素混合ガスによる測定57

図目次

図目次

1.1	宇宙構成物質の割合 [1]	7
1.2	暗黒物質探索方法	8
1.3	WIMP 探索の現状 [2]	9
2.1	アルゴン蛍光スペクトル (黒:液体アルゴン、赤:気体アルゴン)[13]	10
2.2	実験装置概念図	11
2.3	NR 事象 (緑) と ER 事象 (赤) の発光波形	12
3.1	制動放射の反応概念図 [3]	13
3.2	偏極制動放射の反応概念図 [3]	13
3.3	中性制動放射の反応概念図 (弾性散乱過程)[3]	13
3.4	アルゴン原子と電子の散乱断面積	14
3.5	中性制動放射の理論波長スペクトル	14
3.6	中性制動放射と電子比例蛍光の電場依存性	14
3.7	先行研究のセットアップ概略図 [3]	15
3.8	先行研究の測定結果 [4]	15
3.9	アルゴン発光の UV 成分	16
3.10	アルゴンと窒素の混合ガスの発光スペクトル	17
3.11	先行研究のセットアップ概略図 (波長フィルタ測定)	18
3.12	先行研究のセットアップ写真 (波長フィルタ測定)	18
3.13	VUV 成分	19
3.14	UV 成分	19
3.15	VL 成分	19
3.16	波長フィルタでの測定結果	20
3.17	先行研究のセットアップ概略図 (分光器測定)	21
3.18	先行研究のセットアップ写真 (分光器測定)	21
3.19	分光器での測定結果	22
3.20	セットアップ概略図	24
3.21	セットアップ写真	24
3.22	PMT \mathcal{O} QE	26
3.23	S2 推移	29
3.24	波形例	29
3.25	box cut 前	31
	box cut 後	
3.27	測定した S2 の波長スペクトル	33
3.28	先行研究との比較	34
3.29	波長ごとの電場依存性	35
3 30	流量 OL 時における S2 光量の時間依存性	36

図目次

3.31	流量 0L 時における S2 信号 rate の時間依存性	37
5.1	セットアップ概略図	44
5.2	セットアップ写真	44
5.3	セットアップ概略図	44
5.4	出力電流波形	45
5.5	出力波形図	46
5.6	入力電荷量と積分値の関係・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	47
5.7	PMT とシェーパーアンプ信号の図	47
5.8	測定結果	48
5.9	電子数と S2 光量のドリフト電場依存性	49
5.10	電子数と S2 光量の蛍光電場依存性	49
6.1	ITO 薄膜の透過率 [16]	51
6.2	分光器試験セットアップ	52
6.3	セットアップ写真	52
6.4	分光器試験平均波形	53
6.5	分光器試験積分分布図	54
6.6	分光器試験結果1	54
6.7	分光器+5mm の結果	55
6.8	分光器-5mm の結果	55
6.9	G1Ar ガスのスペクトル	56
6.10	G1Ar ガスの電場依存性	57
6.11	窒素混合ガスのスペクトル測定結果	58
6.12	混合ガスの窒素濃度依存性	58
6.13	窒素 100ppm の詳細スペクトル	59

表目次表目次

表目次

3.1	event selection cut	19
3.2	S2 event selection cut	22
3.3	PMT のスペック値	25
3.4	スリット幅と分解能	26
3.5	データ取得条件	28
3.6	S2 selection cut	30
3.7	S2 領域とバックグラウンド領域	31
6.1	S2 cut	56

1 序論

1.1 暗黒物質

宇宙を構成している物質のうち人類が直接観測できているものは数%しかなく、ほとんどは未知の物質である。これら未知の物質は天文学的観測などからその存在が予言されている。図 1.1 に宇宙マイクロ波背景放射観測 (CMB) によって示された宇宙構成物質の構成要素を示す。

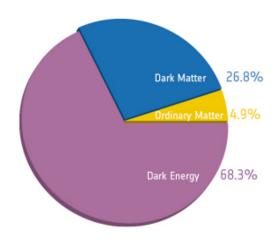


図 1.1: 宇宙構成物質の割合 [1]

図1.1から宇宙を構成している物質のおよそ1/4は暗黒物質であることがわかる。宇宙を理解するためにも暗黒物質に関する情報は欠かすことができない。暗黒物質として候補となるような条件は「他の物質と重力以外はほとんど相互作用しない」、「その寿命が十分長い」ということがあげられ、その候補には数種類存在する。候補の例として

- 1. 暗い天体
- 2. 熱い暗黒物質
- 3. 冷たい暗黒物質

1番はバリオンから構成された物質である。考えられているものの例としてはブラックホールが該当する。暗黒物質としてニュートリノは上記の条件を満たしているものの、その質量は存在が期待される暗黒物質に比べてとても小さい。また質量の軽い物質は光速に近い速度で運動するため、天文学的に存在が要求されるような大規模構造を形成することができない。このように質量の

軽い暗黒物質が2番の熱い暗黒物質である。逆に質量が大きく上記の条件を満たすものが3番の冷たい暗黒物質である。2番と3番は暗黒物質におけるその質量の違いから生じる速度分散の違いであり、分散が大きい方を熱い、小さい方を冷たいと呼んでいる。

現在暗黒物質として最も有力な候補は3番の冷たい暗黒物質で、Weakly Interacting Massive Particle(WIMP) と呼ばれているものである。この WIMP を探索を目的とする実験は多数存在する。

1.2 暗黒物質探索の現状

暗黒物質を探索する方法としては3つある。「直接探索」、「間接探索」、「加速器による探索」である。これは図1.2に示すように暗黒物質と標準模型で記述される物質の相互作用を表したダイヤグラムにおいてどの方向の反応を観測するのかで探索方法が異なる事を示している。

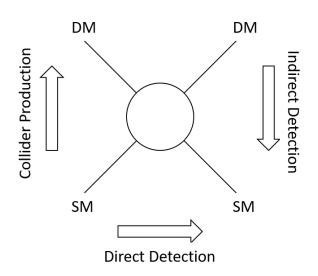


図 1.2: 暗黒物質探索方法

暗黒物質が標的物質と相互作用するとエネルギーを失う。このエネルギー損失により発生する電荷や光を検出することにより暗黒物質発見を目指すのが直接探索である。間接探索は暗黒物質同士が対消滅した時に発生する γ 線等を検出する方法である。これは銀河中心など暗黒物質が多く存在する領域で起こりやすいとされている。加速器による探索は、既知の粒子を LHC のような加速器を用いて加速し衝突させることで暗黒物質を生成する方法である。

WIMP の直接探索を試みる実験は世界各国で行われている。実験により標的物質も異なりその種類は様々である。直接探索実験の現状を図 1.3 に示す。

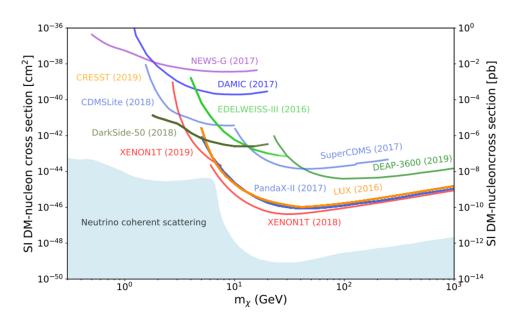


図 1.3: WIMP 探索の現状 [2]

暗黒物質発見を主張するような実験もあればその発見主張領域での存在を否定するような実験もある。

暗黒物質直接探索において Ar を用いることには次のような長所がある。

- 希ガスなので最外殻電子が閉殻となっているため、電離した電子を捕獲 しにくい
- Xe と比べて原子量が小さく WIMP との反応断面積が大きい
- 他の希ガスに比べて安価である
- シンチレーション光の時定数が長く波形分別が容易である

これらのことから Ar を探索実験の標的物質に使用することは暗黒物質の発見と棄却が混在する混沌とした領域の理解に重要である。

2 ANKOK 実験

2.1 実験概要

早稲田大学寄田研究室では気液 2 相型アルゴン光検出器を用いた暗黒物質直接探索実験である ANKOK 実験を行っている。この実験では質量 $\sim 10[GeV/c^2]$ 、反応断面積 $\sim 10^{-41}[cm^2]$ の領域にある WIMP を直接探索することを目的としており、現在早稲田大学構内において地上実験を行っている。

ANKOK実験で用いている標的物質はアルゴンである。アルゴンが励起されることで放出されるシンチレーション光のピークは128nm付近にある。図2.1にアルゴン蛍光のスペクトルを示す。

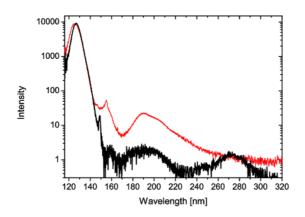


図 2.1: アルゴン蛍光スペクトル (黒:液体アルゴン、赤:気体アルゴン)[13]

ANKOK 実験で使用している気液 2 相型アルゴン実験装置の概略図を図 2.2 に示す。

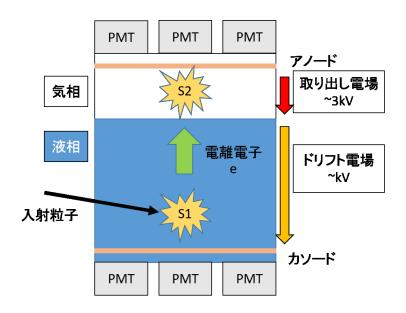


図 2.2: 実験装置概念図

TPC内にはアルゴンが液相と気相の2相で存在している。検出器の上下には各7本合計14本のPMTが取り付けられている。またTPC内はドリフト電場と取り出し電場がかけられている。

この実験装置において粒子が TPC 内に入射してから信号として読み出される過程を説明する。まず TPC 内の液相にある粒子が入射すると、粒子とアルゴン原子が相互作用して 1 次シンチレーション光 (S1) と電離電子を放出する。S1 光は直接もしくは検出器側面に反射して検出器上下に設置された PMT で検出される。電離電子は TPC 内にかけられた電場によって気相に向けてドリフトされる。気相までドリフトした電子は取り出し電場によって気相に取り出され、ガスアルゴンと相互作用する。これにより 2 次シンチレーション光 (S2)が発生する。S2 光も S1 光と同様に上下の PMT で読み出される。

2.2 信号と背景事象

ANKOK 実験において得られる信号は標的物質であるアルゴンと TPC 内に入射した粒子が相互作用することで発生する蛍光である。蛍光の仕方はアルゴンの反跳の仕方に依存し、入射する粒子によって異なる。反跳としてはアルゴン原子核と相互作用する原子核反跳事象 (NR 事象) とアルゴンの軌道殻電子と相互作用する電子反跳事象 (ER 事象) に分けられる。NR 事象を起こす入射粒子の例としては暗黒物質や中性子が上げられ、ER 事象を起こす入射粒子の例としては電子や γ 線などがあげられる。暗黒物質が NR 事象であることからER 事象は全て背景事象となる。このことからまず NR 事象と ER 事象の分離

が必要となる。分離する方法の1つはS1光とS2光の信号を用いる方法である。記述した通り蛍光の仕方はアルゴンの反跳の仕方に依存するため、NR事象とER事象ではS1とS2にそれぞれ違いが出る。NR事象とER事象の発光波形の違いを図2.3に示す。

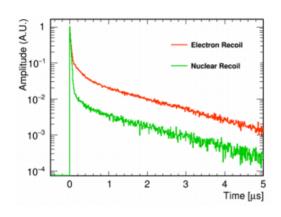


図 2.3: NR 事象 (緑) と ER 事象 (赤) の発光波形

NR 事象は ER 事象に比べて S2/S1 の光量比が小さい。さらにアルゴン蛍光である S1 光と S2 光のうち S1 光は時定数の短い fast と時定数の長い slow の 2 つの成分に分けることができる。fast の減衰時間は 6ns、slow の減衰時間は $1.5\mu s$ である。この fast 成分と slow 成分の比を用いても NR 事象と ER 事象を分離することができる。この方法を Pulse Shape Discrimination (PSD) と呼び、

$$PSD = \frac{slow}{fast + slow} \tag{2.1}$$

とする。NR 事象はER 事象と比較した場合に全光量に占める slow の割合が大きくなる。つまり PSD は 1 に近づく。逆に ER 事象は全光量に占める fast の割合が大きくなるので PSD は 0 に近づく。この PSD によっても ER 事象と NR 事象を分離することが可能である。このように ANKOK 実験では S1 を fast と slow に分ける PSD と S1, S2 の光量比による方法の 2 つにより入射粒子の事象を判別している。

入射粒子に関する情報を深く理解するには検出器から得られる信号の理解が重要である。そこで本論文ではS2信号に論点を絞って議論する。特にS2の発光機構に関して近年新たに存在が示唆されている中性制動放射に関して述べる。また電子とS2光量の関係について行った実験についてはAppendixに載せる。

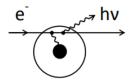
3 中性制動放射

3.1 S2と中性制動放射

前章でも記述した通り S2 は電子とガスアルゴンの相互作用によって発生する。一般的に S2 は電子比例蛍光であると考えられている。一方で近年新たな発光成分として中性制動放射成分の存在が示唆されている。これは電気的に中性の原子と低速電子が相互作用することによって発生し、以下のような特徴を持っていると考えられている。

- 真空紫外光(VUV)から赤外光(IR)にかけて連続なスペクトルを持つ
- ガスアルゴン蛍光の電場閾値に比べて低い電場下でも発光する
- 発光の時定数が短い

電子と光子の電磁相互作用としてよく一般的に知られているのは制動放射 (Ordinary Bremsstrahlung)である。これは電子などの荷電粒子が物質中を運動する際に物質の原子核と電磁相互作用をすることで発生する。この他に偏極制動放射と中性制動放射の2つの制動放射過程が存在する。それぞれの制動放射の反応概念図を図3.1~図3.3に載せる。



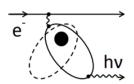


図 3.1: 制動放射の反応概念図 [3] 図 3.2: 偏極制動放射の反応概念図 [3]

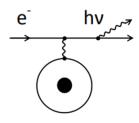


図 3.3: 中性制動放射の反応概念図 (弾性散乱過程)[3]

偏極制動放射は高速の電子が原子に散乱した際に原子が時間変動しながら偏極することにより発生する。1keVほどの電子が偏極制動放射によって放出す

る光子数は一般的な制動放射で放出する光子数と同程度であると予想される。 中性制動放射は低速の電子が中性の原子と(非)弾性散乱することで発生す る。以下に反応式を示す。

$$e^- + A \to e^- + A + h\nu \tag{3.1}$$

$$e^- + A \to e^- + A^* + h\nu$$
 (3.2)

図3.4にアルゴン原子と電子の散乱断面積を示す。

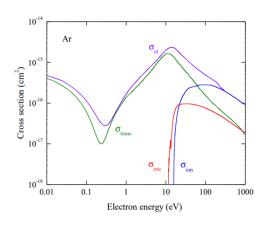
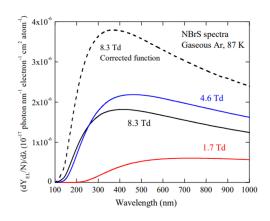


図 3.4: アルゴン原子と電子の散乱断面積

中性制動放射過程で放出される光子は1~10keV程度の電子が弾性散乱した時が最大となり、その波長は真空紫外光から赤外光の範囲に分布する。この電子のエネルギー領域では一般的な制動放射と偏極制動放射の影響は無視できる。図3.5 に中性制動放射の波長スペクトルの理論線を示す。また図3.6 に中性制動放射と電子比例蛍光の光量と電場強度の関係を示す。



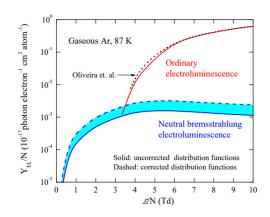
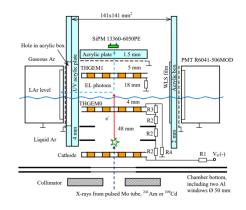


図 3.5: 中性制動放射の理論波長スペクトル

図 3.6: 中性制動放射と電子比例蛍光の 電場依存性

中性制動放射は紫外光から赤外光にかけて一様な波長スペクトルを持ち、電場が強くなるにつれ波長スペクトルの立ち上がりが短波長側にずれる。また中性制動放射は電子比例蛍光が発光する電場閾値に比べて低い電場で発光し、電場が上がるにつれて光量は増加するが $E/N\sim5Td$ 以上では飽和することが理論計算より予想されている。

中性制動放射成分の先行研究 [3][4] に関してその実験セットアップを図 3.7、その測定結果を図 3.8 に示す。



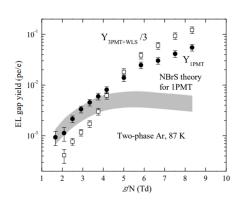


図 3.7: 先行研究のセットアップ概略図 [3]

図 3.8: 先行研究の測定結果 [4]

この先行研究では気液2相型のアルゴン検出器を用いて測定を行っており、 その結果は中性制動放射成分の理論値と無矛盾な結果となっている。

中性制動放射は希ガス検出器の分野ではあまり知られていないものの、高エネルギー宇宙線分野などの他分野では現象論の説明や信号に使われているものである。

3.2 ガスアルゴン蛍光

ここではガスアルゴン蛍光について簡単に触れる。特に UV 成分について記述する。大気圧下においてガスアルゴンの主要な発光成分はアルゴンの 2 量体による真空紫外光 (VUV) であるが、UV 成分も存在している [5]。この発光はthird continuum と呼ばれ、200nm~300nm にかけて存在しており、その強度は second continuum の~1/10 程度である。この発光は圧力が 10atm まで、温度が 100K~300K の範囲においてはそれぞれに依存性は無く、その発光時定数は 5ns ほどである。図 3.9 に UV 成分の波長スペクトルを載せる。

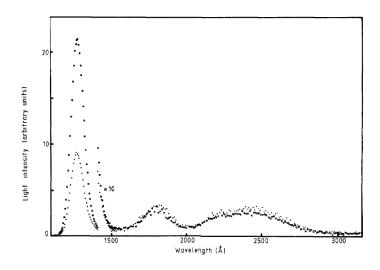


図 3.9: アルゴン発光の UV 成分

3.3 アルゴンと窒素の混合ガスによる発光

前節までは純粋なアルゴンにおける発光であったが、アルゴンに他の種類のガスが混入すると純粋なアルゴンの発光成分が減少したり新たな発光成分が現れることがある。これはアルゴン単体でのエネルギー準位に加えて混入したガスの準位が増え、これらの組み合わせが追加されることが理由にある。ここではアルゴンと窒素の混合ガスによる発光について述べる。窒素はアルゴンのVUV 光を UV 光に波長をシフトさせる媒質である。この発光過程の研究は進んでおり、アルゴンと窒素の混合ガスにおける発光波長スペクトルを図 3.10 に示す。

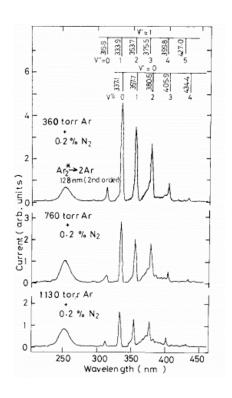


図 3.10: アルゴンと窒素の混合ガスの発光スペクトル

混合ガスの発光は300nm~450nm にかけて存在する。この範囲は今回の中性制動放射測定に含まれるため、測定時はアルゴンへの窒素混入をコントロールできる環境下で測定を行う必要がある。

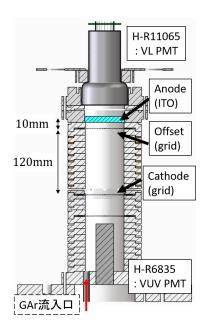
3.4 先行研究

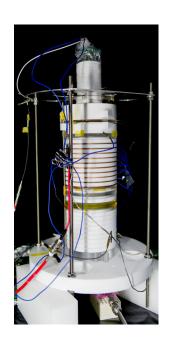
本論文の内容である中性制動放射測定については本研究室の先行研究として武田修論(2019年度)[6]がある。この節ではその測定に関して簡単に触れる。

3.4.1 波長フィルタを用いた測定

S2 の波長スペクトル測定を行うために波長フィルタを用いた実験である。 セットアップの概略図及び実物の写真を図 3.11 と図 3.12 に示す。

3 中性制動放射 3.4 先行研究





図(波長フィルタ測定)

図 3.11: 先行研究のセットアップ概略 図 3.12: 先行研究のセットアップ写真 (波長フィルタ測定)

この測定では検出器内に常温のガスアルゴンを検出器に流し、検出器内部に 設置された ^{241}Am から放出される α 線がガスアルゴンと相互作用することで S1と電離電子が発生する。検出器内には電場が設定されているので発生した 電子はドリフトし、その後蛍光領域でガスアルゴンと相互作用することでS2 光が発生する。発生した光は検出器上下に取り付けられた PMT で観測してい る。上下2つのPMTはそれぞれ波長感度帯が異なり、上側は紫外光~可視光 に感度を持つ浜松ホトニクス社のR11065、下側は真空紫外光のみに感度を持 つ浜松ホトニクス社製の R6835 である。データ取得時は下側の R6835 により 検出器内部で発生した S1 光をトリガーし、上側の R11065 で S2 波長スペクト ルを測定している。またS2を観測している上側のR11065 PMTの窓面の前に は光学フィルタを設置し、このフィルタを交換することで観測したい波長帯を 選択している。使用しているフィルタは富士フイルム製のロングパスフィルタ で、あるcut 波長以上の波長光のみを透過するフィルタである。

測定では5種類のフィルタを用い、それぞれのフィルタに対して蛍光電場を 0.415~2.03kVの範囲で変化させてデータ取得を行っている。取得した波形は クラスタリング波形を作成し、作成した波形を積分することで各光量を算出す る。信号事象の選択には表 3.1 の cut を用いている。

表 3.1: event selection cut

呼称	cut paraeter
Drift Time cut	$10\mu s \le DriftTime \le 20\mu s$
S2 Quality cut	$S2_{R11065} \ge 100[FADCCounts]$
N-Charge cut	$N - Charge_{R11065} \ge 10 counts \cap N - Charge_{R11065} \ge 10 counts$

 $VUV(\sim 200 nm)$ 、 $UV(200 nm \sim 400 nm)$ 、 $VL(500 nm \sim 600 nm)$ の各範囲での印加電場と S2 光量の関係を図 $3.13 \sim$ 図 3.15 に示す。なお各測定波長域の光量は設置した波長フィルタでの光量の差分を取ることで計算している。例として VL 領域は cutoff 波長 500 nm を入れて測定した S2 光量と 600 nm を入れて測定した S2 光量の差分である。

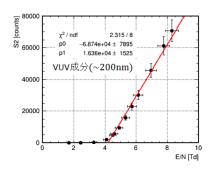


図 3.13: VUV 成分

図 3.14: UV 成分

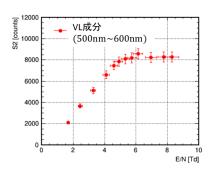


図 3.15: VL 成分

この結果からまず電子比例蛍光が支配的とされる VUV 成分について、低電場領域では S2 信号は無いのに対して高電場領域 ($\geq 4.0Td$) では S2 光量が電場

に比例して増加している。この特徴は電子比例蛍光と一致する。一方でVL領域はVUV領域とは異なり電子比例蛍光の電場閾値よりも低い電場においてもS2信号が見られる。そして電場が増加するとS2信号も増加するが、5Td付近で飽和している。この特徴は中性制動放射成分の特徴と定性的に一致しており、中性制動放射成分の存在を強く示唆する結果となった。UV成分については、低電場領域でもS2信号が見られ、その光量は高電場領域で飽和することなく電場に比例して増加しており、VUVとVLの両方の特徴を併せ持つ結果となった。これらの結果を横軸波長、縦軸をS2光量としてまとめたものを図3.16に示す。

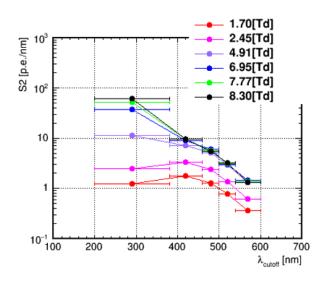


図 3.16: 波長フィルタでの測定結果

3.4.2 分光器を用いた測定

波長フィルタを用いた測定は中性制動放射成分の存在を示唆する結果であった。そこで S2 波長スペクトルをより高い分解能で測定するために行ったのが分光器を用いた実験である。実験のセットアップは図 3.17 に、実際の写真を図 3.18 に示す。基本的構造は波長フィルタを用いた測定時と同じであるが、S2観測用 PMT の窓面前にフィルタを設置するのではなく分光器を設置し、分光された光を検出する。分光器のスリットは 1mm に設定している。検出器本体や分光器等に関しては本論文の実験と同じであることから詳細は後述する。

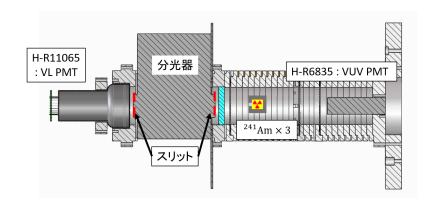


図 3.17: 先行研究のセットアップ概略図 (分光器測定)

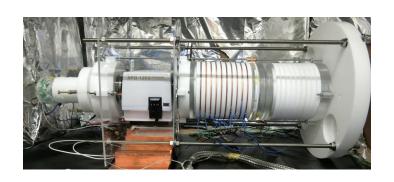


図 3.18: 先行研究のセットアップ写真 (分光器測定)

波長フィルタ測定では VL PMT の S2 光量分布を比較することで event selection を行っていたが、分光器を通して分光した S2 信号は非常に小さくこの手法が使えない。そこで VL PMT の信号において、S2 領域内に 1p.e. 以上の信号が観測される event の rate を比較することで波長スペクトルの算出を行っている。まずデータ取得はトリガー用 PMT でイベントをトリガーし、S2 領域を積分する。その積分値を histogram に詰めた分布を gaus 分布で fit する。この fit から、mean \pm 2Sigma の event を S2 発生イベントとして選択する。S2 イベントの selection cut について表 3.2 にまとめる。

表 3.2: S2 event selection cut

	>. 0.2. 82 0.0110 8010001011 000		
呼称	cut paraeter		
Drift Time cut	$10.5[\mu s] \le DriftTime$		
S2 Quality cut	$S2 \geq 4.0 \times 10^4 [FADCCounts]$		
S2 gaus fit cut	$mean - 2sigma \leq S2 \leq mean + 2sigma$		

選択した event に関して S2 観測用 PMT の波形において閾値が 30FADC counts を超える bin を有する event の数を測定時間で割ることで rate を算出する。rate の算出方法に関しては本論文と同じ手法であることから詳細は後述する。この測定によって得た結果を図 3.19 に示す。

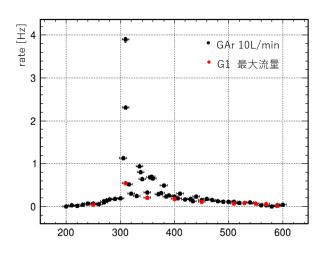


図 3.19: 分光器での測定結果

黒は工業用圧縮アルゴンを使用した結果でガス流量は $10L/\min$ である。赤は純度が 99.9999%の G1 アルゴンガスをバルブ全開にして取得したデータである。どちらも蛍光電場は 2.03kV である。測定の結果、可視光を含む $250nm \sim 600nm$ の範囲で S2 信号を観測することができた。しかし $300nm \sim 450nm$ の範囲にピークが確認できる。この範囲での発光として N_2 不純物による発光が考えられる。この測定では検出器を空気中に設置し、検出器内にガスを流し続けることでガス純度を上げる Gas Flow Setup で行っている。測定は S2 光量が十分飽和するまでガスを(約 2 時間)流し続けてから開始しているものの、検出器内部に窒素を含む空気が残留していたり、検出器周囲の空気中に存在する窒素が検出器内部に入り込んでいる可能性が十分考えられる。図 3.19 の黒と赤を比べた場合、このピークはより純度の高いアルゴンガスを大量に流入した赤のデータ点の方が小さくなっていることからも検出器内部の純度が十分で

はないことが示唆される。検出器内部の純度が十分でない可能性も考えられる が、450nm~600nmの範囲には窒素不純物による発光成分や電子比例蛍光の発 光成分は考えられないことから中性制動放射成分の存在と無矛盾な結果となっ ている。

アルゴン純度コントロール環境下での測定 3.5

前節で記述した通り本研究室の測定結果は中性制動放射成分と無矛盾な結果 得ていた。しかし測定したスペクトルには窒素不純物が混入したことが原因と みられるピークも観測された。そこで本論文では中性制動放射の存在をより強 く主張するために、不純物の影響を減らせるようにアルゴンの純度コントロー ルが可能な環境を構築し、不純物の無いアルゴンの発光スペクトルを測定する ことを目指す。また純度制御ができる環境下であれば、あえて窒素等の不純物 をアルゴンに添加した混合ガスを使用することで不純物による発光成分につい ても理解を進めることができる。まず先行研究において窒素が混入してしまう 理由としてはセットアップを空気中に設置し、検出器内にガスを流し続ける環 境でアルゴンの発光スペクトルを測定していたことが考えられる。窒素等の不 純物を混入させず、アルゴンの純度を高水準で保つためには検出器を容器に入 れ、十分真空引きを行ったうえでガスアルゴンを充填する必要がある。加えて 容器壁面や検出器の部材からアウトガスが放出されるため充填したアルゴンの 純度は時間と共に悪化する。このため検出器中のアルゴンの純度を安定的に長 時間保つためには検出器の入った容器に対して絶えず高純度のアルゴンを流入 させて不純物を含むアルゴンを放出し続ける、またはアルゴンの純化システム を組み込み不純物を除去する環境を構築することが求められる。アルゴンを循 環させる方法であれば残量を気にすることなく非常に長い期間データを取得す ることができる。本研究室でも気液2相型アルゴン光検出器を用いた実験を行 う場合などにはアルゴンをフィルタを通して循環させることで高純度を長期に わたって維持している。しかしこの方法はフィルタや循環システムの構築をし なければならず、セットアップの大型化、複雑化につながってしまう。一方で ガスを流し続ける方法はガス残量に制限があるため数日にわたる測定は難しい ものの、セットアップの構築は比較的容易である。また使用するガスをアルゴ ン以外に変更するのも、セットアップに組み込むガスボンベを交換するだけで 済むという利点がある。今回のスペクトル測定は数時間で行うことができる。 また純アルゴン以外のガスを用いた測定も考えられる。そこで本論文ではガス を流し続ける方法のセットアップを構築し、測定を行った。

3.5.1 セットアップ

実験のセットアップについて、概略図及び実際の写真を図3.20と図3.21に それぞれ示す。

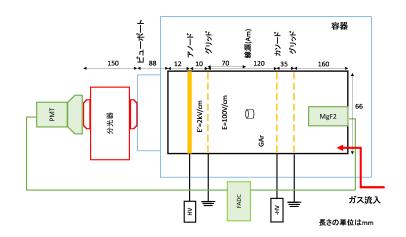


図 3.20: セットアップ概略図



図 3.21: セットアップ写真

基本的な検出器の構造は先行研究の分光器測定時と同じである。検出器本体 はPTFE製の部品とアクリル製の部品から構成されている。ガスボンベからの ガスアルゴンは容器に付けられたフィードスルーを通じ中へ導入され、検出器 下部から流入している。最終的にガスは容器上部の排気管から容器外へ排気さ れる。なおこのセットアップではガスアルゴンの発光波長スペクトルの測定が 目的であることから PMT の窓面や検出器壁面には TPB 等の波長変換剤は使

用していない。検出器内部には電場を印加しており、電場形成のための電極と して、分光器近くの石英ガラスに ITO 透明電極膜が塗布されている。この膜が anode 電極となっている。ITO 電極については [6] にその詳細がまとめられて いる。また ankode 電極から 10mm と 130mm 離れたところには 4mm 格子で太 さ $100\mu m$ のステンレス製 grid が設置してある。ankode 電極から 10mm 離れた grid は Offset 電極、130mm 離れた grid は cathode 電極となっている。 Offset 電極は ground に接続してあり、anode 電極に正電圧を印加することで、S2 発 光領域である anode-offset 間の蛍光電場 (O(kv/cm)) を形成し、cathode 電極 に負電圧を印加することで offset-cathode 間のドリフト電場 (O(100V/cm)) を 形成している。またドリフト電場に関しては、検出器側面に 1cm 間隔で設置さ れた銅製のフィールドシェーパーに電圧を印加することで一様電場に整形して いる。各シェーパーへは抵抗分割回路により電圧を供給している。offset grid から cathode 側へ 70mm の検出器中心には ^{241}Am をコリメータを取り付けず 蛍光領域方向に向けて設置されている。Am から放出される α 線がガスアルゴ ンと相互作用することで S1 と電離電子が発生する。発生した電子はドリフト 電場により蛍光領域へとドリフトし、蛍光領域でガスアルゴンと相互作用する ことでS2光が発生する。発生した光は検出器に取り付けられたPMTと、容 器外の分光器後ろの PMT の 2 箇所で観測する。使用した 2 つの PMT はそれ ぞれ波長感度帯が異なっており、検出器内部に設置されている PMT は浜松ホ トニクス社製の R6836 で 115nm~320nm の波長帯に感度を有している。分光 器後に設置されている PMT は浜松ホトニクス社製の R11065 で、200~650nm の波長帯に感度がある。それぞれのPMTのスペックは表3.3にまとめた。ま た QE は図 3.22 に示す。

表 3.3: PMT のスペック値

	2C 0.0. 1 1111	• / /	/ IE
名称	受光面サイズ	窓材	光電面種類
R6836	$\phi 64mm$	MgF_2	Cs-Te
R11065	$\phi 23mm$	石英	バイアルカリ

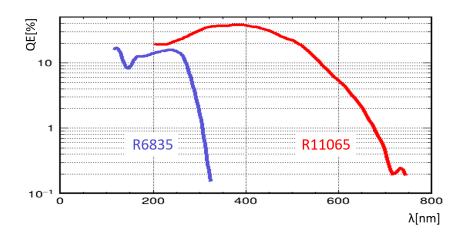


図 3.22: PMT の QE

次にこの測定で使用した分光器について記述する。使用した分光器は島津製作所の SPG-120S である。この分光器は凹面回折格子・定偏角モノクロメータで、200nm~900nm の波長範囲で分光が可能である。波長設定は手動¹で行い、装置前面に配置された波長ダイヤルを回し、3 桁のデジタルダイヤルを直接確認することで波長の設定ができる。また分光器の入射口と射出口にそれぞれスリットを設置することができ、設置したスリットの幅によって分解能(半値幅)と出力強度が決まる。入出射ポートには同じ幅のスリットを使用することが基本で、異なるスリット幅の入出射スリットを選択した場合の分解能はスリット幅の大きい値とほぼ同じになる。なお入出射スリットの幅を 1/2 にすると出力強度はほぼ 1/4 になる。表 3.4 にスリット幅と波長分解能のカタログ値を示す。今回の測定では分光器の入射出ポートにそれぞれ幅 2mm のスリットを入れて測定を行った。

表 3.4: スリット幅と	分解能
スリット幅	分解能
$500~\mu~\mathrm{m}$	3.5nm
$1 \mathrm{mm}$	$6\mathrm{nm}$
$2\mathrm{mm}$	$12\mathrm{nm}$
スリットなし (5mm)	$30\mathrm{nm}$

分光器を真空引きすることはメーカーの保証外であることに加え、波長設定は手動であるため容器外に分光器及び S2 観測用の R11065PMT を設置した。

¹島津製作所製の波長駆動装置を別途組み込むことで PC から波長設定もできる

検出器内部で発生した光は容器付属の石英のビューポートを通じて外に導いて いる。なお検出器で発生した光をビューポートおよび分光器入射口へ集光する ことはしておらず、反射材なども使用していない。

検出器が収まっている真空容器は内径 450mm、高さ 600mm で円柱のような 形状をした容器で、下部にあるポートより真空引きおよびガス供給を行い、容 器上部に設けた管より排気している。また容器にはピラニー真空計およびペニ ング真空計の2つにより容器の真空度をモニターできる。また排気管近くには 連成計を設置しており、測定中に容器内の圧力が大幅に上昇していないか確認 できるようにしてある。流したガスは常温で、ボンベに設置した減圧弁に付属 の流量計によりその流量をモニターした。

3.5.2 データ取得

データ取得時の条件についてまとめたものを表 3.5 に示す。今回の測定で は常温で測定を行っているが、異なる気体状態下のガスの電場依存性と比較 することができるように印加している電場を換算電界へ変換する。換算電界 (E/N[Td]) は印加電場を媒質の気体密度で割ったものである。換算電界は気体 の圧力と温度をパラメータとして含んでいるため異なる電場、圧力、温度の 測定環境でも比較することができる。電場から換算電界への変換式を以下に 示す。

$$E/N = E(1/k_B \times p \times 1.01325 \times 10^5/T) \times 10^{26}$$
 (3.3)

E/N[Td] : 換算電界 E[kV/cm] : 電場強度

 k_B : ボルツマン定数

p[atm] : 気体圧力 T[K] : 気体温度

今回設定した蛍光電場強度は先行研究 [3][4] の換算電界と比較しやすいよう に決定している。

表 3.5: データ取得条件

我 5.5. 了一 文取付未件	
項目	条件
PMT(R6836) HV[V]	1250
PMT(R11065) HV[V]	1700
trigger	R6836 self trigger
threshold	12
time window	$[-30\mu s, 80\mu s]$
蛍光電場 [kV/cm]	0.415,0.8,1.125,1.5,2.03
蛍光電場 [Td]	1.7, 3.3, 4.6, 6.1, 8.3
ドリフト電場 [V/cm]	100
分光器スリット幅 [mm]	2
ガス流量 [L/min]	10

データを取得する際はあらかじめ真空引きを行っている。測定直前の真空度としては $1.0 \times 10^{-2} Pa$ 程度である。今回構築したセットアップは本研究室の先行研究のような Gas Flow セットアップではないものの容器を真空引きした後ガスアルゴンを充填したのみで Gas Flow させないと内部部材からのアウトガスにより充填したアルゴンの純度が悪化してしまう。よって検出器に対して絶えずアルゴンを流し続ける必要がある。流入させるガスは容器のガス導入ポートを通じて検出器内部に直接流入させている。流入させたガスは検出器の隙間などから検出器外へ漏れ出し、最終的に容器上部に取り付けた排気管から排気される。ガスの流量はボンベに取り付けた減圧弁に付随するアナログの流量計によりモニターしており、今回の測定では基本的に $10L/\min$ でデータ取得を行い、容器内部の圧力は $1.00 \sim 1.05$ atm の範囲であった。

ガスアルゴンを充填し、ガス流入開始後30分程度予備データを取得し、R6836のS2光量が十分安定していることを確認してから本データの取得を開始している。本データ取得前のS2光量の推移を図3.23に示す。

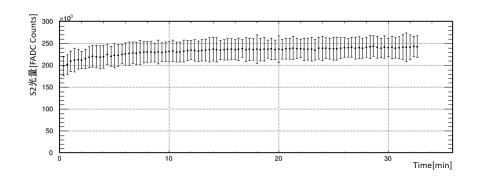
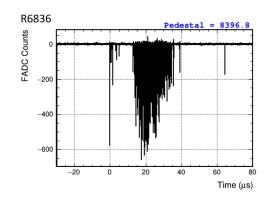


図 3.23: S2 推移

先行研究では S2 光量が比較的安定し、データ取得開始まで 2 時間を要していたのに対し、本セットアップでは Gas flow 開始から 15min ほどで S2 光量は飽和して安定した状態となっており、測定時間中の変動もほとんど無い。

データ取得は検出器内部に設置した R6836 で観測した S1 信号をトリガーにしている。トリガー閾値は PMT のノイズをトリガーしない程度で、S1 を十分取得できるような値に設定した。取得した波形データは FADC により PC に取り込み解析を行った。図 3.24 に取得した典型的な信号 event の波形を載せる。左の波形が R6836、右が分光器後ろに設置した R11065 である。



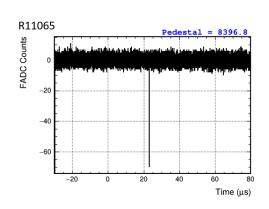


図 3.24: 波形例

R6836 の波形より、 $0\mu s$ のところに S1 の信号があり、S2 信号が $20\mu s$ 付近を中心に観測されていることが確認できる。また R11065 の波形では S2 に同期したタイミングで信号が観測されたことがわかる。

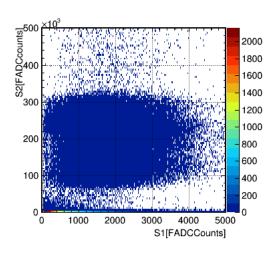
3.5.3 解析

S2 波長スペクトル算出までの手順を示す。前項で示したような各イベントの波形に対してまず R6836 の波形を用いて S2 発生イベントを選ぶ。その後 R11065 の波形を用いて信号事象を観測した回数と測定時間から信号 rate を算出する。これを分光器で設定した各波長に対して行うことで S2 スペクトルを作成している。

まず S2 発生イベントのセレクションについて述べる。S2 selection cut は最初 R6836 の波形において $10.5\mu s \leq D$ rift Time $\leq 30.0\mu s$ のイベントを選択する。ここで Drift Time は $5\mu s \sim 80\mu s$ の区間における光量重心の時間である。次に Drift Time cut したイベントを横軸 S1、縦軸 S2 とする 2 次元平面上で S2 発生イベントがクラスターしている領域に対して box cut を行う。なお S1 は $0\mu s \sim 5\mu s$ の積分値であり、S2 は $5\mu s \sim 80\mu s$ の積分値である。cut は $5.0 \times 10^2 FADCCounts \leq S1 \leq 3.5 \times 10^3 FADCCounts$ と蛍光電場が 8.3Tdでは $6.0 \times 10^4 FADCCounts \leq S2 \leq 3.5 \times 10^5 FADCCounts$ である。蛍光電場の強さによって S2 の大きさが異なるため、この S2 cut は電場ごとに cut の値を決めた。S2 selection cut については表 3.6 にまとめる。また box cut 前後の様子については蛍光電場が 8.3Td のものを図 3.25 と図 3.26 に示す。この S2 selection cut により残るイベント数はおよそ 1/3 である。

表 3.6: S2 selection cut

2 5.0. DZ selection cut		
呼称	cut paraeter	
Drift Time cut	$10.5\mu s \le DriftTime \le 30.0\mu s$	
S1 cut	$5.0 \times 10^2 FADCCounts \le S1 \le 3.5 \times 10^3 FADCCounts$	
S2 cut (8.3Td)	$6.0 \times 10^4 FADCCounts \le S2 \le 3.5 \times 10^5 FADCCounts$	
S2 cut (6.1Td)	$1.5\times 10^4 FADCCounts \leq S2 \leq 1.2\times 10^5 FADCCounts$	
S2 cut (4.6Td)	$3.0\times10^3 FADCCounts \leq S2 \leq 1.7\times10^4 FADCCounts$	
S2 cut (3.3Td)	$1.0 \times 10^2 FADCCounts \le S2 \le 2.0 \times 10^3 FADCCounts$	
S2 cut (1.7Td)	$1.5 \times 10^{1} FADCCounts \le S2 \le 1.0 \times 10^{3} FADCCounts$	



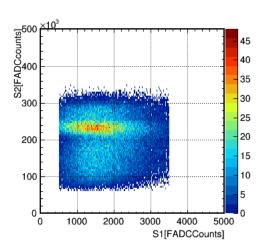


図 3.25: box cut 前

図 3.26: box cut 後

S2イベントを選択した次は波長スペクトルの算出である。スペクトルの算出には R11065 の波形を用いる。信号領域内に 1p.e. 以上の信号が観測されたイベント数を時間で割ることで signal の rate を算出する。ここで R11065 の dark rate が 1kHz ほどであることからバックグラウンド領域を 3 箇所設定し、信号領域に accidental に dark event が入ってしまう rate を算出した。表 3.7 に設定した信号領域とバックグラウンド領域を示す。

表 3.7: S2 領域とバックグラウンド領域

呼称	設定領域
Signal (S2)	$\boxed{[5\mu s, 30\mu s]}$
BackGround1 (BG1)	$[-30\mu s, -15\mu s]$
BackGround2 (BG2)	$[0\mu s, 5\mu s]$
BackGround3 (BG3)	$[35\mu s, 80\mu s]$

R11065の波形に対し上記で示した各領域において 30FADC Counts 以上の bin を 1 つ以上有するイベントの数を数え、測定時間で割ることにより各領域の rate を出す。補正した S2 の rate は式 3.4 を用いて算出する。

$$S2Cor_{rate} = S2_{rate} - \frac{1}{3} \left(BG1_{rate} \frac{W_{S2}}{W_{BG1}} + BG2_{rate} \frac{W_{S2}}{W_{BG2}} + BG3_{rate} \frac{W_{S2}}{W_{BG3}} \right) (3.4)$$

 $S2Cor_{rate}[Hz]$: accidental 補正後の S2 領域の event rate

 $S2_{rate}[Hz]$: 補正前の S2 領域の event rate $BGi_{rate}[Hz]$: $BG(i=1\sim3)$ 領域の event rate

 $W_{S2}[\mu s]$: S2領域の時間幅

 $W_{BGi}[\mu s]$: BG(i=1~3) 領域の時間幅

各領域の時間幅が異なるため、式 3.4 では BG 領域の時間幅を S2 領域の時間幅に規格化している。そして 3 つの BG 領域の平均を accidental rate とし、信号領域の event rate から差し引くことで信号の rate を算出している。

この信号 rate 算出方法は信号事象数を測定時間で割ることにより算出している。しかし信号事象数は S2 イベント数に依存するため、S2 selection cut の選び方により変化してしまう。同じ測定時間であっても S2 selection cut が厳しく、信号事象数が少なければ rate は低く見積もられてしまう。また蛍光電場を変化させた場合 S2 の大きさも変化するので上で記述した通り、電場ごとに S2 cut の値を設定している。電場ごとに S2 cut の度合いが変化してしまう恐れがある。さらに本論文は先行研究とは異なる S2 イベントの選択を行っていることから算出した rate を先行研究などと比較することができない。そこで各波長の rate を R6836 の S1 信号において横軸を S1 の積分値の FADC 値、縦軸をイベント数とした histogram を積分した値で割って規格化した。これにより S2 cut が他よりも緩くなっていた場合、その分 S1 信号のイベント数が増加し、積分値が大きくなるので最終的なスペクトルに対する S2 cut の影響を抑えることができる。

3.5.4 測定結果

今回の測定によって得られたS2波長スペクトルを図3.27に示す。

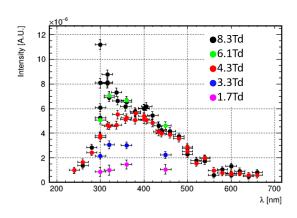
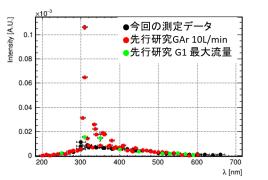


図 3.27: 測定した S2 の波長スペクトル

測定した 250nm~650nm の範囲で S2 の信号が確認できる。どの電場領域でも今回測定した範囲に先行研究のような大きなピークは存在せず、比較的連続的なスペクトルとなっている。特に印加電場が~4Td の範囲では図 3.6 から予想されるように中性制動放射成分の発光が支配的と考えられており、その範囲でも信号を観測できている。一方で電子比例蛍光の成分が多くなる蛍光電場の大きい 8.3Td の結果から、300nm~400nm の範囲に未だ複数のピークが存在していることが確認できる。このことから今回の測定では窒素の影響を完全に排除できたとは言えない。300nm~450nm の範囲では蛍光電場が大きくなるにつれて S2 信号も増加しており、電子比例蛍光と類似した電場依存性を持つことが確認できる。これはアルゴンの UV 成分や窒素混入成分等の電場依存性と定性的に一致している。また 450nm~650nm の範囲でも S2 信号を観測することができている。この範囲ではアルゴン発光の UV 成分や窒素成分は考えられ無いことから中性制動放射成分を示唆する結果である。さらに蛍光電場が 4.6Td 以上の点では S2 信号の大きさがほぼ同程度となっている。これは中性制動放射成分の大きさが高電場領域において飽和することと定性的に一致している。

蛍光電場が 8.3Td について、先行研究と比較したものを図 3.28 に示す。なお解析手法は本論文で記述した方法を先行研究のデータに対しても適用してある。また本論文と先行研究ではセットアップが異なる。特に蛍光領域からR11065 までの距離が 157mm から 255mm に増加している。一方で分光器のスリットは先行研究では 1mm 幅であったのに対し本論文では 2mm 幅を使用している。同じ入射光量の場合、スリット幅が 2 倍になると分光器の出力強度は4 倍になる。この 2 つのことから波長スペクトルを比較するにあたり、先行研究の S2 信号の大きさを $(157/255)^2 \times 4 \approx 1.516$ 倍してある。



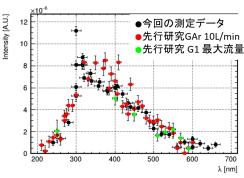


図 3.28: 先行研究との比較

右図は左図の縦軸を拡大したものである。窒素などによる影響のない 450nm ~600nm の範囲において今回の測定は先行研究の結果と一致している。一方で窒素不純物による影響がある 300nm~400nm の範囲では、先行研究の結果に大きなピークが存在したが、今回はそれを大幅に抑えることができている。

次に波長 300nm, 320nm 360nm, 450nm において横軸を電場、縦軸を S2 信号量にしたものを図 3.29 に載せる。なおこの図 3.29 は各波長の QE を図 3.22 を用いて 450nm における QE を基準に規格化してある。またそれぞれの波長に対して取得したデータ点に加えて予想される中性制動放射成分の理論線と中性制動放射成分を差し引いた点を重ね描いている。理論線についてはまず中性制動放射成分の各波長、各電場での強度をそれぞれ図 3.5 から読み取った。その後中性制動放射以外の影響が最も少ない波長 450nm において中性制動放射成分の予想線をデータと合うようにスケールして描画した。これにより中性制動放射成分のスケールファクターを決定した。このスケールファクターを 450nm 以外の波長点にも適用して描画してある。

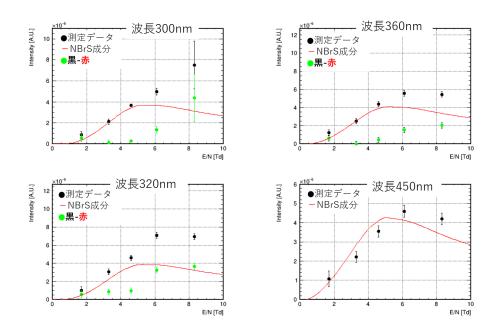


図 3.29: 波長ごとの電場依存性

グラフにおいて黒点がデータであり、赤線は中性制動放射成分の理論線、緑点はデータ(黒点)から中性制動放射成分(赤線)を差し引いた点ある。

まずデータについて短波長の300nm は蛍光電場が増加するにつれてS2信号も増加しており、高電場側では電子比例蛍光とその特徴が一致している。それと同時に低電場でも信号が観測できており、電子比例蛍光以外の成分である中性制動放射の存在が示唆される。一方で長波長側の450nm では高電場にしてもS2光量の増加は鈍くなっており、中性制動放射成分の特徴と定性的に一致している。

次に予想値との比較に関して、中性制動放射成分が支配的で、UV や窒素などの成分が考えられない 450nm において中性制動放射の理論線をデータにスケールした。このスケールファクターを他の波長点に適用した場合をみる。まず波長の短い 300nm の波長点において、低電場領域ではデータと中性制動放射の予想値がほぼ一致しており、その差分とした電子比例蛍光成分はほぼ0に近いことから、この領域の信号は中性制動放射成分のより説明できることが分かる。そしてデータと中性制動放射の差分である緑点は~4Td 付近まではその大きさがはほぼ0であり、4Td~ではその成分の大きさが電場に比例するような形で大きくなっているのが確認できる。これは電子比例蛍光の電場依存性と一致しており、先行研究の結果である図 3.13 の結果とも定性的に一致している。このことから緑の点は電子比例蛍光成分とできる。つまりデータを中性制動放射成分と電子比例蛍光成分の2成分で説明できる。電子比例蛍光成分は窒

素由来の成分と UV 成分の少なくとも 2 成分で構成されていると考えられる。 この他の波長 320nm と 360nm においても同様な結果となった。これらの結果 から中性制動放射成分が存在することが示唆される。

3.6 純度悪化環境での測定

上記ではアルゴンの純度を高い状態で測定を行ったが、ここでは逆にアルゴンの純度が悪化した状態でデータ取得したことについて述べる。最終的な目標としてはアルゴンと不純物を混ぜた混合ガスを用い、純度コントロールした環境でS2スペクトルを測定することだが、今回は先行研究の様に300nm付近のS2波長スペクトルが不純物の影響によりピークがつくられ得るのかを確認程度で簡易的に測定を行った。方法としてはガス流入を止め、アウトガスによってアルゴンの純度が悪化していく環境で測定した。セットアップは上記の通りである。また測定方法はガスを流さないことと分光器の波長設定を300nmに固定したこと以外は基本的に同じである。

3.6.1 結果

まず R6836 データから S2 光量の時間依存性についてを図 3.30 に示す。

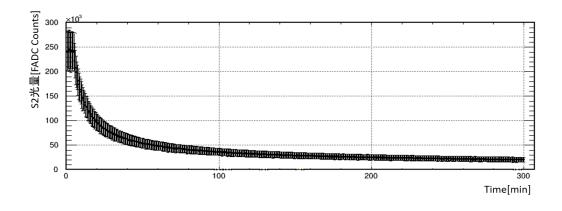


図 3.30: 流量 0L 時における S2 光量の時間依存性

S2 光量はガスを止めた時間から指数関数的に落ち、 5.0×10^2 付近に落ち着いている。光量が落ちているのは容器壁面や検出器部材などから放出されるアウトガスが原因と考えられる。分光器の波長を 300nm に設定して取得した S2の rate の 1 時間ごとの推移を図 3.31 に示す。

3.7 考察 3.7 考察 3 中性制動放射

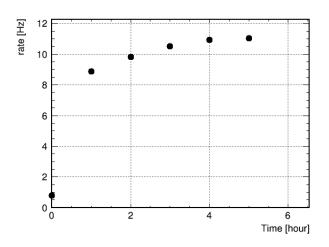


図 3.31: 流量 0L 時における S2 信号 rate の時間依存性

図 3.30 から時間が経過するごとに S2 光量は減少していたのに対し、図 3.31 から観測される信号の rate は逆に増加していた。つまり S2 光量全体としては減少しているにも関わらず測定した 300nm 付近の成分については増加したことを示している。

3.7 考察

分光器を用いて 250nm~650nm の範囲を測定し、なだらかで連続的な S2 波長スペクトルを得た。まず電場強度から予想される信号に占める中性制動放射成分が大きい 4.6Td の波長スペクトルの結果は中性制動放射成分を示唆する結果である。また電場の強い 8.3Td においては 450nm~600nm の可視光領域では電子比例蛍光成分や窒素不純物の発光成分などのガスアルゴン蛍光の発光成分は無く、中性制動放射成分のみが観測されうる。この範囲で信号を観測できたことや、その信号強度についても先行研究と同程度の大きさであり、よく一致する結果を得た。これについても中性制動放射成分を示唆する結果である。さらに今回の測定では先行研究のような 300nm~400nm 付近に分布していたピークの大きさを小さくすることができ、窒素不純物による影響も大きく抑えることができたと考える。それぞれのピークの最大値同士で比較すると 10%以下になっている。

次に電場を変化させて取得したデータから各波長における電場依存性を調べた。その結果長波長側の電場依存性は電場を強くしても信号があまり大きくならず、中性制動放射成分の電場依存性と定性的に一致する結果となった。一方で短波長側は電場が強くなるにしたがって信号も大きくなる結果であった。

3.8 今後の展望 3 中性制動放射

またどの波長帯においても低電場領域でS2信号が観測された。この電場依存性の結果に対して予想される中性制動放射成分の理論線と比較した。まずUVや窒素の影響の無い450nmの波長点において中性制動放射の理論線をデータにスケールし、このスケールファクターをその他の波長点にも適用した。その結果低電場側のデータと理論線は概ね一致した。またデータから理論線を差し引いた点の電場依存性は電子比例蛍光と定性的に一致していた。このことからデータを中性制動放射成分と電子比例蛍光成分の2成分で説明することを示した。

最後に純度悪化の簡易測定からは不純物によって 300nm 付近にピークを作り得ることがうかがえた。これについては先行研究と定性的に無矛盾な結果である。つまり先行研究の測定環境ではアルゴンに不純物が混入しており、それらの影響により 300nm 付近のピークが現れていたと考えられる。今回セットアップを先行研究から変更したことで、窒素発光成分が存在する 300nm~450nm にかけてのピーク信号の大きさが 10% 以下に減少した。これはアルゴンの純度が向上したことが由来と考えられる。一方で中性制動放射以外による影響がない 450nm~600nm にかけての信号の大きさは変化していない。つまりアルゴンの純度に依存していないことが考えられる。これらのことは先行研究で示唆されていたことと無矛盾である。

今回測定したアルゴンの S2 波長スペクトルについて、その信号の波長帯や電場依存性などからも中性制動放射成分の特徴と定性的に一致することが確認できた。これらのことから今回の測定では中性制動放射成分の存在と無矛盾な結果を得たと考える。

3.8 今後の展望

今回使用したアルゴンガスはグレードの無い通常純度のものでアルゴンの純度は99.99%である。つまり10ppbオーダーの窒素が混入している恐れがある。これが観測した窒素ピークの原因であることが考えられる。このガスをより高純度のグレードであるG1ガスを用いて測定することを予定している。これにより300nm~450nmに存在するピークを更に小さなものにできると考える。さらには検出器部材の見直しなどによりアウトガスによる純度悪化を低減することでより高純度環境を構築することも考えられる。また本論文の純度悪化測定はガス流を止め、分光器の波長設定を300nmに固定した状態でのデータ取得しかできなかった。今後は意図的に不純物が添加してある混合ガスを用い、それを様々な濃度にて波長スペクトルを測定することで不純物によるアルゴン蛍光の特性を調べることを予定している。特に今回はデータを中性制動放射と電子比例蛍光成分の2成分で説明したが、電子比例蛍光成分のうち窒素に

3.8 今後の展望 3 中性制動放射

よる影響の見積もりに役立てることができると考えている。

今回は分光器の幅 2mm のスリットを用いて測定を行った。スリット幅の狭いものを使用して分解能を向上させることでより詳細なスペクトル測定が期待できる。また電場を変更してのデータ取得はスペクトル全体を 2 電場に於いて行ったが、さらに細かい電場については 4 波長点のそれぞれ 5 電場点でしかデータを取ることができていない。これについてもより多数の波長点及び電場点で測定することでより詳細な電場依存性を調べることができる。さらには容器内部の圧力を変化させることアルゴン蛍光や中性制動放射成分の圧力依存性についても調査することが可能であると考えている。

以上のことを踏まえ、中性制動放射成分の存在をより確実なものにしたいと 考えている。

4 まとめ

本論文ではガスアルゴンにおける S2 信号の基礎特性の研究として中性制動 放射成分に関する測定を行った。

先行研究の結果は中性制動放射成分の存在を示唆するものであったが、その波長スペクトルには窒素不純物が由来と考えられるピークが含まれていた。そこで本論文では不純物成分による影響をできる限り抑えるべくアルゴン純度をコントロールできる環境を構築した。先行研究では検出器を空気中に設置していたことが不純物混入の主たる原因と考え、検出器を容器中に設置した。波長スペクトルの測定前に一度容器を検出器ごと真空引きすることで内部に存在する窒素を含んだ空気を除去し、その後アルゴンを充填してから測定を行った。測定中は容器内部の部材から放出されるアウトガスによりガスの純度が悪化することから、検出器に対してガスアルゴンを絶えず流し続けてデータを取得した。これにより測定開始までにかかる時間を大幅に削減でき、測定中の純度変化が少ない環境を構築することができた。

今回の結果、測定した 250nm~650nm の範囲についてなだらかなスペクトルを得ることができた。特に発光成分中に占める中性制動放射成分が大きい電場である 4.6Td のスペクトル結果は中性制動放射を示唆するものである。また電場強度が強く、信号に占める電子比例蛍光成分が大きくなる 8.3Td については先行研究では窒素由来と考えられる大きなピークが 300nm~450nm にかけて存在していたが今回の結果ではそれを大きく低減させることができた。一方でアルゴン発光の UV 成分や窒素成分が存在していない 450nm~650nm の範囲についても今回の測定では S2 信号を確認することができた。またその信号強度は先行研究と一致しており、今回の結果も中性制動放射成分の存在を強く示唆するものである。

さらにアルゴン蛍光の電場依存性については、短波長側は電場強度が増加するにしたがって信号の大きさも大きくなっていた。一方で長波長側は電場強度が増加しても信号の大きさは飽和しており、波長により信号の電場依存性が異なる事を確認できた。そしてどの波長点においても低電場で信号を観測できており、これらの結果は中性制動放射成分の存在を示唆するものであった。さらに測定した4波長点における電場依存性について、予想される中性制動放射成分とデータを比較した。まず窒素等の影響が無い450nmのデータを用いて中性制動放射理論線のスケールファクターを決定し、このファクターを他の波長点にも適用した。その結果どの波長においても低電場の信号は中性制動放射成分とおおよそ一致することが確認できた。またデータから予想理論値を引いた点の結果は、~4Tdまでは0に近く、4Td~は電場に比例するような形であった。この差分の点の電場依存性は電子比例蛍光と定性的に一致していることからデータ点を中性制動放射成分と電子比例蛍光成分の2成分を用いて説明でき

ることを示した。このことも中性制動放射成分の存在と無矛盾な結果である。 ガスアルゴンの流入を止めてセットアップの純度が悪化する環境で測定を 行った。この結果では、純度悪化に伴い S2 信号自体は減少していたのにも関 わらず波長が 300nm の信号に関しては逆に rate が増加していた。つまり S2 信 号に含まれる 300nm 成分の割合が増えていることを示している。先行研究で は検出器内のアルゴン純度が十分では無かった可能性があり、今回の純度悪化 による 300nm 付近の信号増加は先行研究の結果と定性的に一致している。

今回測定して得たスペクトルでは 300nm~450nm にかけて依然としてピークが見られる。これは今回の測定で工業用の圧縮アルゴンを用いていることが原因とも考えられる。今後はより純度の高い G1 ガスを用いた測定を予定している。また今回の純度悪化測定では、ガス流入を止めた状態で、分光器の設定波長を固定した状態であった。これをアルゴン窒素混合ガスを使用することで窒素混入度合いをコントロールした環境で波長スペクトル測定を行うことも予定している。これによりさらにガスアルゴン発光の窒素混入による影響を詳しく調べることが可能である。

中性制動放射成分の存在をより確実なものとし、暗黒物質探索など他の物理実験に活かしていきたいと考えている。

謝辞

本研究を行うにあたり研究の機会を与えてくださった寄田浩平教授には深く感謝しております。研究に対する姿勢ができておらず、人としても未熟であった自分に対し多くのことを教えていただきました。また田中雅士准教授には研究を進めるにあたりその方針や方法など様々なことに対してアドバイスしていただきました。お二人には研究を進めるための心構えなどを一から教えていただきました。この論文もお二人の指導があったからこそ書くことができました。本当にありがとうございました。秘書の坂本敦子さんには物品の購入や出張に関する手続きなどで大変お世話になりました。ANKOKの先輩である木村さん、青山さん、武田さんには実験装置の使い方や解析方法など自分のわからないことを優しく丁寧に教えていただきました。特に武田さんは中性制動放射の測定について様々教えていただきました。同期の伊藤君、岩沢君、小津君とは研究の話だけでなく雑談などもして楽しい時間を過ごすことができました。ANKOK実験の後輩である櫻井さん、中曽根君には実験の手伝いなど様々な場面で支えてもらいました。最後に生活面、精神面で常に自分を支えてくれた家族に深く感謝します。

5 Appendix 1

S2と電離電子

2章でも述べたように S2 は粒子が液体アルゴンと相互作用したときに発生した電離電子が検出器内部に印加された電場により気相までドリフトしていく。その後電子は取り出し電場により気相へ取り出され、ガスアルゴンと相互作用することで S2 が発生する。ANKOK 実験では PMT 等の光読み出しデバイスにより信号を読み出しているが、電子の情報を直接知ることはできない。S2 をより深く理解するうえで電子の情報を知ることは重要である。そこで本実験では電子数と S2 光量の測定に特化したガスアルゴン1 相のセットアップを用いて実験を行った。

電子読み出し測定

今回は実際にセットアップを組みデータを取ったものと、測定機器に対してファンクションジェネレータから疑似信号をエミュレートしたものを比較することで、検出した電子数を見積もった。

セットアップ

まず今回実際に行った電子読み出しのセットアップの概略図及び写真を図 5.1 と図 5.2 にそれぞれ示す。

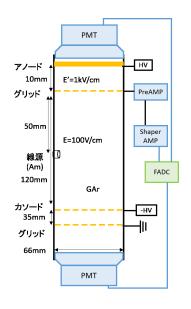




図 5.1: セットアップ概略図

図 5.2: セットアップ写真

検出器内部にガスアルゴンを流入させることで内部をガスアルゴンで満たす。検出器内部には α 線源として Am が設置してあり、検出器内のガスアルゴン原子と相互作用することで S1 と電離電子を発生させる。発生した電離電子は検出器内部に印加したドリフト電場によりドリフトして行く。グリッドに到達すると、今度は蛍光電場が印加されている蛍光領域に入り、ガスアルゴンと相互作用することで S2 が発生する。なお今回の測定では GEM などは使用せず、電子を増幅させない。S1 と S2 は検出器上下に設置した PMT で観測する。電子についてはグリッドからプリアンプ、シェーパーアンプを通じて読み出す。トリガーは PMT の S1 信号を用いた。本測定で使用したプリアンプは Amptek社の A250 を使用した。また運用には専用の基板 PC250 を使用し、1pC \rightarrow 1V、時定数 300μ s を出力した。シェーパーアンプは時定数 0.15μ s、ゲイン 10 に設定した。上下の PMT、シェーパーアンプの信号は FADC により波形を PC に取り込み解析した。

次にエミュレーション時のセットアップ概略図を図5.3に示す。



図 5.3: セットアップ概略図

ある電子数に相当する電荷がアノードまでドリフトした際にグリッドで計測される電流波形をファンクションジェネレータから出力し、コンデンサ (2pF) を通じてプリアンプに入力した。その後は電子数測定と同様にプリアンプ、シェーパーアンプを通じて FADC で波形を取得した。ファンクションジェネレータ、プリアンプ、シェーパーアンプの信号はそれぞれオシロスコープでモニターした。

信号発生過程

作成したセットアップにおいて、電子が発生し、その電子がドリフトして最終的にアノードに吸収されるまでにグリッドから出力される電流波形がどのような波形となるのかを説明する。簡単のために電子は拡がりや大きさを持たないものとする。グリッドから出力される電流波形を図5.4に示す。

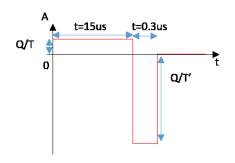


図 5.4: 出力電流波形

まず α 線により電荷Qの電離電子が発生する。発生した電子はグリッド方向ヘドリフトしていく。この時グリッドでは電荷が移動することにより誘導電流が発生する。平均した電子のドリフト速度は一定とみなすことができるので出力される誘導電流も一定値となり、ドリフトにかかる時間 t の間流れる。次に電子がグリッドを通過すると先ほどまでとは逆方方向の誘導電流が電子の移動時間 t の間出力される。そして電子がアノードで吸収されると誘導電流は止まる。流れる電流の大きさは、発生した電荷QをTとT'で割ったものになる。なおTとT'はそれぞれドリフト領域と蛍光領域を端から端まで移動するのにかかる時間である。蛍光電場はドリフト電場に比べてより強い電場が印加されていることから、この領域をドリフトする電子のドリフト速度は速くなり、その領域を移動している時間は短くなる。結果出力される誘導電流の絶対値はドリフト電場移動時に比べて大きくなる。使用した Am 線源の Am のエネルギーは 5.4 MeV であり、ガスアルゴンの W 値は 26.4 eV であることから、発生する電子数は

$$N_e = \frac{5.4 \times 10^6}{26.4} = 2.0 \times 10^5 \tag{5.1}$$

となる。この時の発生電荷量は電子数に素電荷を掛けて

$$Q = N_e \times e = 3.3 \times 10^{-14} \tag{5.2}$$

となる。

エミュレーション

前節の信号発生過程を踏まえ、作成したセットアップで予想されるグリッドからの出力をファンクションジェネレータを用いて疑似的に作り、電子読み出し測定の計測系に対して入力する。グリッドからの出力は電流であるのに対し、ファンクションジェネレータは電圧を出力するため、コンデンサ(2pF)を通じて入力し、ファンクションジェネレータからは予想される電流波形を積分した形の電圧波形を出力した。実際にファンクションジェネレータから出力した波形、プリアンプ、シェーパーアンプそれぞれから出力したときの様子を図5.5に示す。



図 5.5: 出力波形図

取得したシェーパーアンプの波形について、そのピークの ± $2\mu s$ の範囲を積分した。入力した電荷量と積分値の関係を図 5.6 に示す。

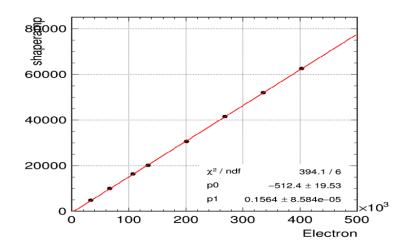


図 5.6: 入力電荷量と積分値の関係

この結果を直線で fit した結果として

$$N_e = 6.394 N_{counts} + 3276 (5.3)$$

を得た。

ガスアルゴン検出器での測定

実際に検出器にガスアルゴンを流入させてデータを取得した。ガスアルゴンは 10L/min で流した。PMT とシェーパーアンプの信号を図 5.7 に示す。

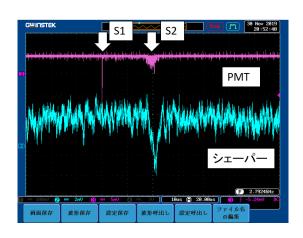


図 5.7: PMT とシェーパーアンプ信号の図

取得した信号はエミュレーション時と同様に、シェーパーアンプ波形のピークの ± $2\mu s$ の範囲を積分した。積分した結果を図 5.8 に示す。

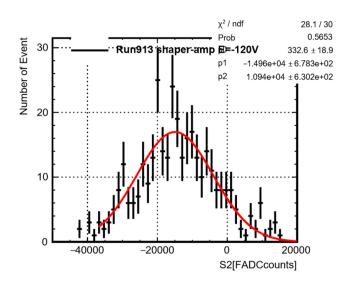


図 5.8: 測定結果

横軸は積分した FADC 値、縦軸は event 数である。これをガウス分布で fit した結果として

$$N_{counts} = 1.5 \times 10^4 \tag{5.4}$$

を得た。

結果

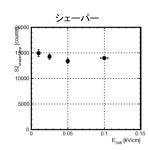
エミュレーション結果である式 (5.1) と実験により求めた値 (5.2) から測定された電子数は

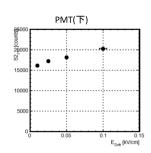
$$N_{counts} \approx 1.0 \times 10^5 \tag{5.5}$$

となった。理論値は式 (5.3) にある通り 2.0×10^5 であり、今回の測定は理論値とオーダーで一致することが確認できた。

電場変更での測定と結果

上記のガス流入での実験セットアップにおいてドリフト電場と蛍光電場を変更してデータを取得した。シェーパーからの信号の積分値を fit した結果と検出器上下に設置した PMT のそれぞれの S2 光量を比較し、電子数と S2 光量の電場依存性について確認した。横軸は印加電圧、縦軸はそれぞれの積分値のFADC 値である。ドリフト電場を変更させた時の結果を図 5.9 に示す。





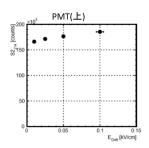
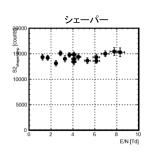
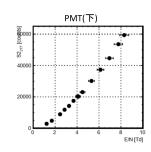


図 5.9: 電子数と S2 光量のドリフト電場依存性

ドリフト電場を変化させても電子数と S2 光量には大きな変化はない。 次に蛍光電場を変化させた時の結果を図 5.10 に示す。横軸は電場の換算電 界、縦軸はそれぞれの積分値の FADC 値である。





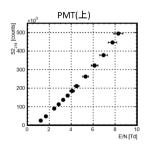


図 5.10: 電子数と S2 光量の蛍光電場依存性

蛍光電場を変更させた場合、電子数には大きな変化がないが、S2光量は電場強度が強くなるにつれて線形的に増加していることがわかる。

電場変更測定の考察

得られた結果に関して、電子数は α 線がアルゴンと相互作用することで発生しており、電場には依存していない。よってドリフト電場の強度を変化させてもその数は大きく変わることはない 2 。基本的にはドリフト電場を強くすると電子の移動速度が早くなるだけである。電子数が変化しないので S2 光量も変化しない。一方蛍光電場を変化させた場合、蛍光領域に入る電子数が変化しないのは、電子発生やドリフトに蛍光電場が関与しないからである。一方 S2 は電子が蛍光電場で加速され、アルゴンと相互作用することで発生する。蛍光電場が強ければ電子の加速がより強化され、電子の持つエネルギーも増加する。このため発生する S2 光量も増加する。

²電場強度により電離電子の再結合確率が変化するので、実際には電場依存性がある

電場を変更して測定を行うことで電子数と S2 光量の電場依存性について確認することができた。

6 Appendix 2

この章は2021年2月、3月に取得したデータについてまとめている

6.1 ITO 薄膜の透過率

今回のガス検出器ではアノードに ITO 薄膜を使用している。この膜の透過率を図 6.1 に示す。

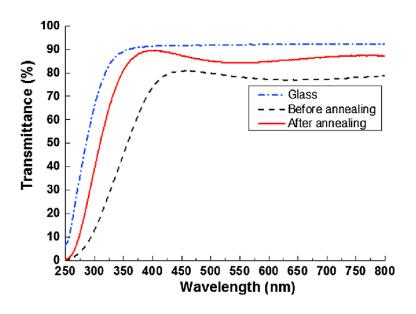


図 6.1: ITO 薄膜の透過率 [16]

本論文でも記載している S2 スペクトルが 300nm 付近で大きく変化している ことについて、原因は ITO 薄膜によるものと考えられる。

6.2 分光器性能試験

今回のS2スペクトル測定において使用した島津製作所のSPG-120Sについてレーザーを用いた波長分解能と光軸がずれていた場合の応答を確認する測定を行った。なお分光器については3章に記した通りである。

6.2.1 セットアップ

セットアップは図6.2に示す。

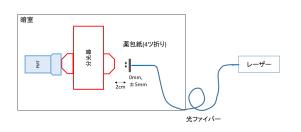




図 6.2: 分光器試験セットアップ

図 6.3: セットアップ写真

レーザーは Thorlabs の NPL45Bで、それぞれ波長は 450nm である。レーザーの照射はファンクションジェネレーターにより制御し発振は 500Hz に設定した。データ取得時はファンクションジェネレータの信号を FADC に入力することでレーザーに同期させた。レーザーから照射される光はファイバーを用いて暗室内に導入し分光器に入射している。なおファイバーの出口には4つ折りにした薬包紙を設置してあり、光を拡散させて分光器に入射している。このほかに ND フィルター等の減光材は使用していない。ファイバーの出口と分光器入射口は約2cm離れている。また光軸がずれた場合の測定では、分光器本体は動かすことなくファイバーの向きはそのままにして平行に±5mm動かすことで斜めからの入射を確認した。

6.2.2 結果

分光器にレーザー光を入れた際の取得した波形の平均波形例を図6.4に示す。

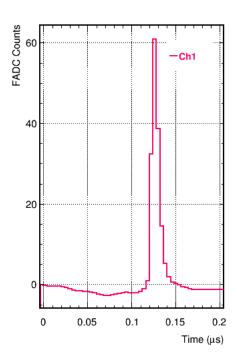


図 6.4: 分光器試験平均波形

取得した波形に対して 0.122us~0.156us の区間を積分した。各波長における積分分布のプロットにおいて、0以下にピークを持つペデスタル部分をガウス分布で fit して得た mean 値をペデスタル値とし、積分分布の平均値からこのペデスタル値を引いた値をその波長における信号強度とした。積分分布とそのfit の様子は図 6.5 に示す。

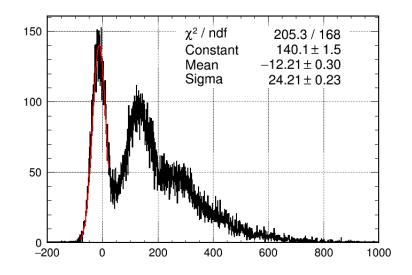


図 6.5: 分光器試験積分分布図

これを $430 \text{nm} \sim 470 \text{nm}$ まで 1 nm 刻みで測定した。これにより得たレーザー 光のスペクトル結果を図 6.6 に示す。

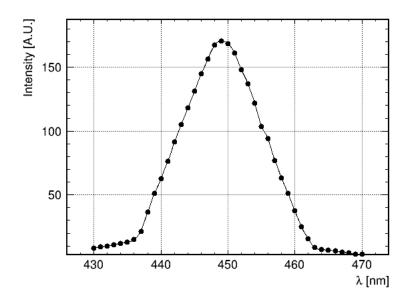
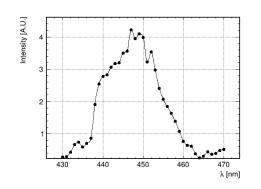


図 6.6: 分光器試験結果1

レーザー光の波長の付近にピークが存在するのが分かる。

次に平行に± 5mm ずれした場合の結果を図6.7と図6.8に示す。



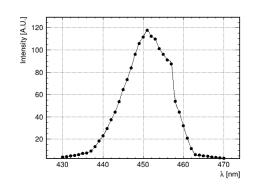


図 6.7: 分光器+5mm の結果

図 6.8: 分光器-5mm の結果

± 5nm が対照的ではないのは、今回のセットアップの初期状態としてレーザーと分光器が完全にまっすぐではなくやや-5mm 側に斜めの状態になっていた恐れがある。いずれにせよ分光器から斜めに入射した場合、その角度がずれるほど観測光量は減り、分光するうえでの波長のずれは数 nm 程度であり、今回の分光器のスリット幅 2mm による分解能である 12nm よりも小さいことが予想される結果となった。

6.3 高純度アルゴンガスによる測定

最高純度のG1アルゴンガスを用いてS2スペクトル測定を行った。測定方法や解析方法は3章に記述した通りである。

スペクトル測定結果については図6.9に示す。

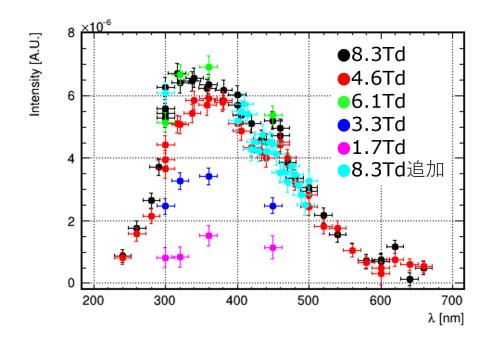


図 6.9: G1Ar ガスのスペクトル

次に G1 アルゴンガスを用いた電場依存性については図 6.10 に示す。3 章と同じ 450nm における中性制動放射のスケールファクターをここでも適応してある。また各波長の中性制動放射の理論線はその波長における PMT の QE を 450nm での値で規格化したものを掛け算した値を plot している。また測定電場は $1\sim8$ Td を 1Td 刻みで測定した。使用した S2 cut パラメタを表??に示す。この他の cut は先述の通りである。

表 6.1: S2 cut

cut paraeter			
$1.5 \times 10^{1} FADCCounts \leq S2 \leq 8.0 \times 10^{2} FADCCounts$			
$2.0\times 10^{1} FADCCounts \leq S2 \leq 1.2\times 10^{3} FADCCounts$			
$8.0 \times 10^{1} FADCCounts \le S2 \le 1.6 \times 10^{3} FADCCounts$			
$1.0 \times 10^3 FADCCounts \le S2 \le 5.6 \times 10^3 FADCCounts$			
$8.0 \times 10^3 FADCCounts \le S2 \le 3.4 \times 10^4 FADCCounts$			
$2.5\times 10^4 FADCCounts \leq S2 \leq 1.0\times 10^5 FADCCounts$			
$5.5 \times 10^4 FADCCounts \le S2 \le 1.95 \times 10^5 FADCCounts$			
$3.0\times10^4 FADCCounts \leq S2 \leq 3.2\times10^5 FADCCounts$			

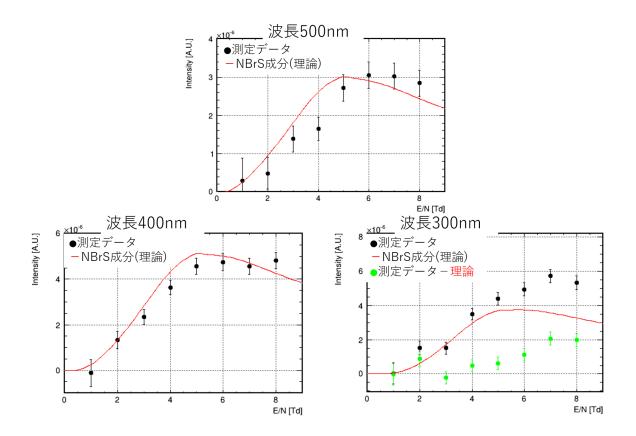


図 6.10: G1Ar ガスの電場依存性

波長400nmと500nmはおおよそ理論線と一致した結果となった。波長300nmについては中性制動放射成分と電子比例蛍光成分の2成分でデータを説明できそうである。しかしITO薄膜の透過率の影響も考えられ、今後の課題である。

6.4 窒素混合ガスによる測定

アルゴンに窒素を混合させたガスを用いて S2 スペクトル測定を行った。測定方法や解析方法は3章に記述した通りである。使用した混合ガスの窒素濃度は10ppm と100ppm である。

スペクトル測定結果については図 6.11 に示す。黒が G1、青が 10ppm、緑が 100ppm である。

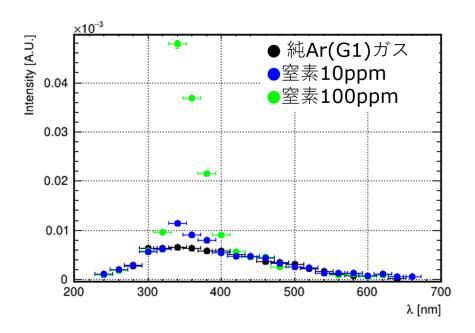


図 6.11: 窒素混合ガスのスペクトル測定結果

窒素の影響がある 300nm~400nm の範囲は G1 と大きく異なり、その信号の大きさは窒素の濃度により異なる事がわかる。一方で 450nm 以上の波長領域では窒素に依存していないことも確認できる。

次に 10ppm と 100ppm の混合ガス plot からそれぞれ G1 の値を引き、その後濃度で割った plot を図 6.12 に示す。

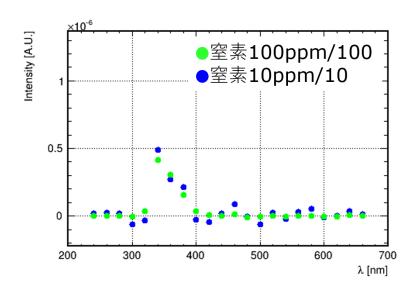


図 6.12: 混合ガスの窒素濃度依存性

窒素の影響がある 300nm~400nm の範囲も含め測定した範囲で 10ppm と 100ppm の plot が概ね一致していることから、窒素によるピークはおおよそ窒素濃度に比例していることが分かる。

さらに窒素 100ppm についてそのスペクトルを細かく測定した。測定結果を図 6.13 に示す。plot において横軸の誤差棒がついていないが、エラーの大きさは前と同じである。

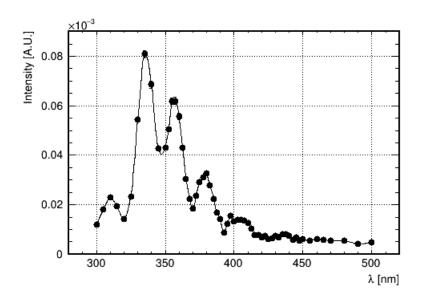


図 6.13: 窒素 100ppm の詳細スペクトル

窒素の発光と考えられる波長(337nm, 357nm, 380nm)付近にピークが観測できている。

参考文献 参考文献

参考文献

[1] ESA Planck Mission, "PLANCK'S NEW COSMIC RECIPE", http://sci.esa.int/planck/51557-planck-new-cosmic-recipe/, 2015.

- [2] P.A. Zyla et al. (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020)
- [3] Buzulutskov, A. et al. "Neutral Bremsstrahlung in Two-Phase Argon Electroluminescnee." Astroparticle Physics 103 (2018): 29-40. Crossref. Web.
- [4] Bondar, A. et al. "Neutral Bremsstrahlung in Two-Phase Argon Electroluminescrice: Further Studies and Possible Applications." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment (2019): 162432. Crosserf. Web.
- [5] G Klein and M J Carvalho 1981 J. Phys. B: At. Mol. Phys. 14 1283.
- [6] 武田知将, "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~"早稲田大学修士論文, (2019)
- [7] Oliveria, 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
- [8] 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).
- [9] 島津製作所製分光器, https://www.shimadzu.co.jp/products/opt/products/mono02-03-01.html, (2021/1/21 閲覧).
- [10] 大陽日酸高純度ガスカタログ, http://www.tn-specialtygases.jp/catalog/pure/, (2021/1/21 閲覧).
- [11] R. W. B. Pearse and A. G. Gaydon, The Identification Of Molecular Spectra (第4版再版), Chapman and Hall Ltd, 1984.
- [12] FILMETRICS 社, https://www.filmetricsinc.jp/refractive-index-database/, (2021/1/21 閲覧).

参考文献 参考文献

[13] T. Heindl, T. Dandl, M. Hofmann, R. Kruchen, L. Oberauer, W.Potzel, J. Wieser and A. Ulrich, "The scintillation of liquid argon", [DOI: 10.1209/0295-5075/91/62002]

- [14] 三谷貴志, "エネルギー損失 dE/dx による粒子識別能力に関する包括的研究 ~アルゴン検出器とシリコン検出器の双方の視点から~", 早稲田大学修士論文, (2011).
- [15] Amptek 社, https://www.amptek.com/internal-products/a250-charge-sensitive-preamplifier, (2021/1/22 閲覧).
- [16] Ping-Han Wu, et al. "Real time monitoring of fs laser annealing on indium tin oxide", Optics and Laser Technology. Volume 111, April 2019, Pages 380-386.

学籍番号: 5319 A069-6

研究活動の不正行為 定義確認書

2021年 1月27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

物理影於用物理学 專攻 2年

本人氏名 諸星 博之

(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

2021年 / 月22 日 本人氏名 諸星 博之

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。

0	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()
	※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。	
	※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・ロ頭発表: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。