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

1	序論		7
	1.1	暗黒物質	7
	1.2	暗黒物質探索の現状	8
2	AN	IKOK 実験 1	.0
	2.1	実験概要	10
	2.2	信号と背景事象	1
3	中性	上制動放射 1	.3
	3.1	S2と中性制動放射 1	13
	3.2	ガスアルゴン蛍光1	15
	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	17
		3.4.1 波長フィルタを用いた測定	17
		3.4.2 分光器を用いた測定	20
	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	24
		3.5.2 データ取得	27
		3.5.3 解析	30
		3.5.4 測定結果	32
	3.6	純度悪化環境での測定	36
		3.6.1 結果	36
	3.7	考察	37
	3.8	今後の展望	38
4	まと	2め 4	0
5	Ap	pendix 1 4	3
6	Ap	pendix 2 5	51
	6.1	ITO 薄膜の透過率	51
	6.2	分光器性能試験	51
		6.2.1 セットアップ 5	51
		6.2.2 結果	52
	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

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	$\operatorname{PMT} \mathcal{O} \operatorname{QE} \dots \dots$	26
3.23	S2 推移	29
3.24	波形例	29
3.25	box cut 前	31
3.26	box cut 後	31
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 0L 時における S2 光量の時間依存性	36

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	14
5.4	出力電流波形	15
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] ミニー・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	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

3.1	$event selection cut \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots $	9
3.2	S2 event selection cut $\ldots \ldots $	22
3.3	PMT のスペック値 2	25
3.4	スリット幅と分解能2	26
3.5	データ取得条件	28
3.6	S2 selection cut \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 3	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。

10-36 100 SI DM-nucleon cross section [cm²] NEWS-G (2017) 10-38 10-2 [dd] DAMIC (2017) leoncross section 10-4 10^{-40} CDMSLite (2018) EDELWEISS-III (2016) DarkSide-50 (2018) 10-6 10^{-42} SuperCDMS (2017) XENON1T (2019 DEAP-3600 (2019) 10-44 10-8 - 10⁻¹⁰ PandaX-II (2017) LUX (2016) 10^{-46} XENON1T (2018) Neutrino coherent scattering 10-48 10⁻¹² 5 10³ 10⁻¹⁴ 10-50 100 101 102 m_{γ} (GeV)

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~10[GeV/c²]、 反応断面積~10⁻⁴¹[cm²]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 6*ns*、slow の減衰時間は 1.5µs 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。

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

$$e^- + A \to e^- + A^* + h\nu \tag{3.2}$$

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~5Td 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。





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 図(波長フィルタ測定)

(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²⁴¹Am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。

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	$N - Charge_{R11065} \ge 10 counts \cap N - Charge_{R11065} \ge 10 counts$

表 3.1: event selection cut

VUV(~200nm)、UV(200nm~400nm)、VL(500nm~600nm)の各範囲での 印加電場とS2 光量の関係を図 3.13~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 500nm を入れて測定した S2 光量と 600nm 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 (≥ 4.0*Td*) 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 ± 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。

Ī	$ \xi 3.2: S2 $ event selection cut
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	$mean - 2sigma \le S2 \le mean + 2sigma$

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 ~600nmの範囲でS2信号を観測することができた。しかし300nm~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 N2 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 100µm 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 ²⁴¹Am 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								
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
$500~\mu$ m	$3.5 \mathrm{nm}$
$1\mathrm{mm}$	6 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。

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

表 3.5: データ取得条件

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1.0×10⁻²Pa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1.00~1.05atm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。

28



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、0µsのところにS1の信号があり、S2信号が20µs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 10.5µs ≤Drift Time≤ 30.0µs のイベントを選択 する。ここで Drift Time は 5µs~80µs 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 0µs~5µs の積分値であり、S2 は 5µs~80µs の積分値である。cut は $5.0 \times 10^2 FADCCounts < S1 < 3.5 \times 10^3 FADCCounts$ と蛍光電場が 8.3Td では $6.0 \times 10^4 FADCCounts < S2 < 3.5 \times 10^5 FADCCounts$ 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							
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 $(8.3Td)$	$6.0\times 10^4 FADCCounts \leq S2 \leq 3.5\times 10^5 FADCCounts$						
S2 cut (6.1Td)	$1.5\times 10^4 FADCCounts \leq S2 \leq 1.2\times 10^5 FADCCounts$						
S2 cut (4.6Td)	$3.0 \times 10^3 FADCCounts \le S2 \le 1.7 \times 10^4 FADCCounts$						
S2 cut $(3.3Td)$	$1.0 \times 10^2 FADCCounts \le S2 \le 2.0 \times 10^3 FADCCounts$						
S2 cut (1.7Td)	$1.5\times 10^1 FADCCounts \leq S2 \leq 1.0\times 10^3 FADCCounts$						



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	ツ	ク	グ	ラ	ウ	ン	ド	領垣	戉

呼称	設定領域
Signal $(S2)$	$[5\mu s, 30\mu s]$
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=1~3) 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 × 10² 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。



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。 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 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ベくアルゴン純度を 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→1V、 時定数 300µs を出力した。シェーパーアンプは時定数 0.15µs、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5.4MeVであり、ガスアルゴンのW値は26.4eV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± 2µs 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

$$N_e = 6.394 N_{counts} + 3276 \tag{5.3}$$

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。

	GWINSTEK		S 1	<u> </u>	, 💶 🖪	itop 🔳	30 Nov 2019 20:52:40
						PM	
	No a Mili a	Mah			Marina da da		
	NAT Y		ad brid	i M			
						シェー	パー -
0	188nV (2	<u>≕ 2nV (3)</u>			8us 🗎 28.88u	F IS <mark>8</mark> f	2.79246Hz 5.24mU DC
	画面保存	波形保存	設定保存	波形呼出し	設定呼出し	ファイル名 の編集	

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 ± 2µs 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 ft 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 × 10⁵ 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 430nm~470nm まで 1nm 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 1~8Td 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。

呼称	cut paraeter
S2 cut $(1Td)$	$1.5 \times 10^{1} FADCCounts \leq S2 \leq 8.0 \times 10^{2} FADCCounts$
S2 cut $(2Td)$	$2.0 \times 10^{1} FADCCounts \leq S2 \leq 1.2 \times 10^{3} FADCCounts$
S2 cut $(3Td)$	$8.0 \times 10^{1} FADCCounts \leq S2 \leq 1.6 \times 10^{3} FADCCounts$
S2 cut $(4Td)$	$1.0 \times 10^3 FADCCounts \le S2 \le 5.6 \times 10^3 FADCCounts$
S2 cut $(5Td)$	$8.0\times 10^3 FADCCounts \leq S2 \leq 3.4\times 10^4 FADCCounts$
S2 cut $(6Td)$	$2.5 \times 10^4 FADCCounts \le S2 \le 1.0 \times 10^5 FADCCounts$
S2 cut $(7Td)$	$5.5 \times 10^4 FADCCounts \le S2 \le 1.95 \times 10^5 FADCCounts$
S2 cut (8 Td)	$3.0 \times 10^4 FADCCounts < S2 < 3.2 \times 10^5 FADCCounts$

表 6.1: S2 cut



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

- [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 Electroluminescnce." Astroparticle Physics 103 (2018): 29-40. Crossref. Web.
- [4] Bondar, A. et al. "Neutral Bremsstrahlung in Two-Phase Argon Electroluminescnce: 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-indexdatabase/, (2021/1/21 閲覧).

- [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22日

早稻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

物理家府用物理学____ 専攻 _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 本人氏名 <u>諸星博</u> 之	/月22 E 之		
	文の執筆にあたり、以下の研究倫理教育を受講しました。 GEC 設置科目「研究倫理概論」の受講			
)		
	守ر 政 直 村 日 の 文 講 - 村 日 石 (

※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。