

2022年度 卒業論文

MeVガンマ線観測用  
ガスアルゴン検出器の立ち上げ

広島大学 理学部 物理学科  
高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室

B192829 小林 丈起

主査：深澤 泰司  
副査：八野 哲

2023年2月8日

## 概要

MeV ガンマ線は、他のエネルギー帯域の電磁波と比べて光子と検出器物質との相互作用がコンプトン散乱優勢である。そのために入射光子のエネルギーや向き情報が落ちやすく、イメージングが難しい。また、ノイズも多く存在するために MeV ガンマ線検出器の宇宙観測感度は、X 線や GeV ガンマ線検出器より遅れを撮っている。そこで現在ではこの MeV ガンマ線検出器の感度を上げるべく、主に液体アルゴン検出器と半導体検出器の二つの開発が世界で進んでいる。

本研究では、液体アルゴン検出器を使った MeV ガンマ線観測プロジェクトである「GRAMS」において、アルゴン検出器への理解を深めるために気体のアルゴンを用いて検出器を構成し、MeV ガンマ線由来のシンチレーション光検出を検証すべく、検出器を立ち上げた。

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	MeV ガンマ線天文学	1
1.1.1	MeV ガンマ線天文学のこれまで	1
1.1.2	MeV ガンマ線観測の困難性	2
1.1.3	MeV ガンマ線で見える宇宙	2
1.2	研究の目的	3
<b>第 2 章</b>	<b>コンプトンカメラと液体アルゴン検出器</b>	<b>4</b>
2.1	光子と物質の相互作用	4
2.1.1	光電吸収	4
2.1.2	コンプトン散乱	5
2.1.3	電子陽電子対生成	5
2.2	コンプトンカメラ	5
2.3	COMPTEL 望遠鏡	6
2.4	液体アルゴン検出器の特徴	7
2.5	GRAMS	8
2.5.1	GRAMS が目指す感度	8
2.5.2	GRAMS の検出器構造	8
<b>第 3 章</b>	<b>ガスアルゴン検出器実験</b>	<b>10</b>
3.1	実験セットアップ	10
3.1.1	検出の流れ	10
3.1.2	MPPC	10
3.1.3	TPB	11
3.1.4	検出器の構成	12
3.1.5	アルゴンガスの反応レート	14
3.1.6	アルゴンガス流入手順	15
3.2	実験結果	16
3.2.1	動作チェック結果	16
3.2.2	ガスアルゴン実験結果	17
<b>第 4 章</b>	<b>考察・課題</b>	<b>18</b>
4.1	考察	18
4.2	課題	19

# 目次

1.1	Fermi/LAT の全天サーベイ	1
1.2	COMPTEL の全天サーベイ	1
1.3	光子とアルゴンとの相互作用による質量減衰係数	2
2.1	光電吸収イメージ図	4
2.2	コンプトン散乱イメージ図	5
2.3	電子陽電子対生成イメージ図	5
2.4	コンプトンカメラの原理	6
2.5	COMPTEL の構造	7
2.6	X 線、ガンマ線帯域の検出器感度	8
2.7	液体アルゴン TPC 検出器の構造	9
3.1	MPPC 外観	11
3.2	チェンバーに貼り付けた TPB	11
3.3	検出器全体	12
3.4	検出器全体を横から見たブロック図	12
3.5	検出器の配線	13
3.6	バルブ一覧	15
3.7	LED での電氣的動作チェック	16
3.8	実験で得られたスペクトル	17

# 表目次

2.1 COMPTEL の性能 . . . . .	6
---------------------------	---

# 第1章 序論

## 1.1 MeV ガンマ線天文学

MeV ガンマ線天文学とは、数百 keV 数十 MeV の帯域のガンマ線を観測することで宇宙の様々な事象を解明する学問である。ここでは、観測対象である MeV ガンマ線の観測の歴史、特徴、観測意義について述べる。

### 1.1.1 MeV ガンマ線天文学のこれまで

宇宙で起こる天体現象は様々な機構により起こるため、それに応じて発せられるシグナルにも様々なものが存在する。天文学では電波、可視光、X 線、ガンマ線といった様々な波長の電磁波を用いた観測をすることによってシグナルをキャッチし、天体現象の解明に努めてきた。X 線では NASA が 1999 年に打ち上げた Chandra が高い解像力を持ち [1]、ESA が 2000 年に打ち上げた XMM-Newton が高感度観測を可能にし、この二機がお互いを補完しあって現在でも X 線天文学をリードしている [2]。また GeV ガンマ線では、2008 年に NASA が打ち上げた Fermi 衛星搭載の Large Area Telescope(LAT) が 30MeV から 300GeV という広エネルギー範囲を、優れた視野、分解能で観測を続けている [3]。

しかし MeV ガンマ線では、1991 年に NASA が打ち上げた CGRO 衛星搭載の COMPTEL 望遠鏡 [4] がこれまでで最も性能の良い検出器であるが、X 線、GeV ガンマ線検出器ほどの宇宙観測能力はなく、この MeV ガンマ線領域は電磁波観測の「最後の窓」と呼ばれている。図 1.1 は LAT での 1 GeV 以上の全天マップ、図 1.2 は COMPTEL での 1–30MeV での全天マップであるが、前者は 3000 種類以上の天体を同定することができているのに対し、後者は定常的な天体は 32 天体、ガンマ線バーストなどの突発的な天体を含めても 63 天体しか同定できなかったという非常に少ない結果となっている [5]。このことから MeV ガンマ線天文学が遅れていることが分かる。

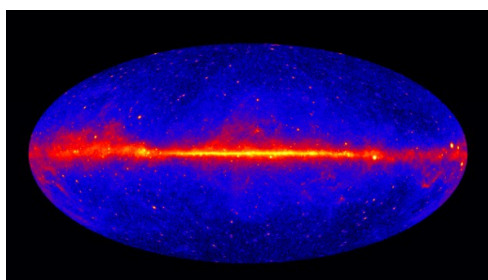


図 1.1: Fermi/LAT の全天サーベイ [6]

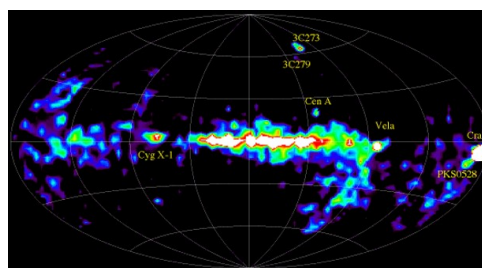


図 1.2: COMPTEL の全天サーベイ [7]

### 1.1.2 MeV ガンマ線観測の困難性

MeV ガンマ線が他のエネルギー帯域の電磁波より検出するのが困難である原因は主に3つある。

1. MeV 領域（数百 keV 数十 MeV）では、図 1.3 が示すように光子と検出器物質との相互作用がコンプトン散乱優勢となるため入射光子の到来方向とエネルギーの情報が落ちやすく、イメージングが困難であること。
2. ガンマ線は電磁波の中でも透過性が高く、集光が困難なため、集光系検出器は使用不可であること。
3. 検出器を構築する物質と宇宙線の相互作用から放射性同位体や励起原子核が生成されてできるガンマ線や、大気中性子といったガンマ線以外の粒子がノイズとなり、高い S/N 比観測が難しいこと。

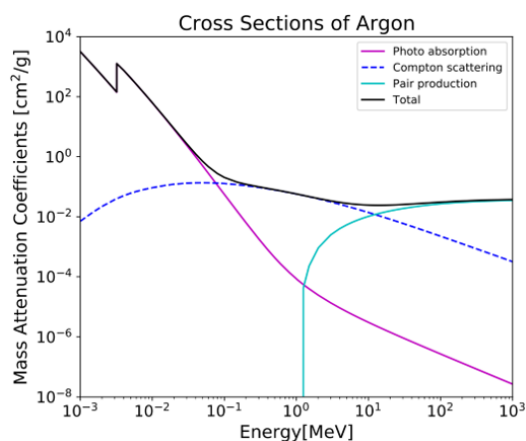


図 1.3: 光子とアルゴンとの相互作用による質量減衰係数 [8]

### 1.1.3 MeV ガンマ線で見える宇宙

MeV ガンマ線を観測することで、他の電磁波観測では見られない宇宙の姿をたくさん捉えることができる。その中から3つをここでは述べる。

鉄より重い元素は、大量の中性子が原子核に供給される r-process で生成されると考えられており、現在この r-process を起こす最有力候補と言われているのが中性子連星合体である。中性子連星合体で重元素が合成されていることを直接的に証明するためには MeV 帯域に分布する核ガンマ線分光を測定する必要がある [5]。

銀河の中でも、中心部の非常に狭い領域から銀河全体を凌駕するような強い電磁波を放射しているものを活動銀河核 (AGN) という。AGN からはジェットによって大量のガンマ線が放射されている。ジェットの放射機構はまだよく分かっておらず、ジェットからのガンマ線を観測することで解明できると言われている。特にジェットは MeV ガンマ線で最も明るく輝く遠方天体が多くあり、AGN の進化を探る上でも重要である。

ガンマ線バーストは、全天ではほぼ毎日起こる現象であり、数秒程度の間全天で最も明るくなる。その正体は、中性子星合体あるいは特殊な超新星がジェットを放出しているものだと考えられている。そうした

ジェットが発生機構を知るためには、ガンマ線偏光が重要である。ガンマ線バーストは MeV ガンマ線付近で最も明るく輝くため、MeV ガンマ線偏光観測が重要である。

他にも様々な観測意義が存在するので、MeV ガンマ線観測は天文学の発展にとって欠かせないものであることが分かる。

## 1.2 研究の目的

測定困難な MeV ガンマ線の宇宙観測感度を上げる試みの中に、「GRAMS 計画」というものがある (2.5 節で詳しく述べる)。本来 GRAMS では液体アルゴン TPC 検出器を用いることにより、高い感度を目指すものであり、開発が進みつつある。本研究ではまず比較的安価でアルゴン用の冷却器といった大掛かりな設備が必要ではないガスアルゴン検出器を構成し、MeV ガンマ線由来のシンチレーション光検出を検証することでアルゴン検出器への理解を深め、MeV ガンマ線天文学を推進することを目的としている。



## 第2章 コンプトンカメラと液体アルゴン検出器

天体からの光を捉え、画像を得るためには光子を検出器物質と反応させる必要がある。しかし、どのような反応でもいいわけではなく、光子のエネルギー帯や反応させる物質の種類によってそれぞれの反応確率が異なるため、検出原理に用いる反応は目的に応じて適切なものを選ぶ必要がある。よってここでは光子と物質の相互作用について述べ、MeV 帯域の観測で用いられたコンプトンカメラの仕組みを紹介する。また、本研究の着想元である液体アルゴン検出器とそれをを用いた GRAMS についても紹介する。

### 2.1 光子と物質の相互作用

#### 2.1.1 光電吸収

入射してきたガンマ線が内殻電子にエネルギーを全て渡し、その電子が原子核の束縛から解放される現象を光電吸収という。また、解放された電子は光電子と呼ばれる。入射ガンマ線のエネルギーを  $E_\gamma$ 、光電子のエネルギーを  $E_e$ 、電子の束縛エネルギーを  $I$  とすると光電吸収は式 (2.1) で表せる。

$$E_e = E_\gamma - I \quad (2.1)$$

光電吸収によって空になった軌道に、より外側の軌道の電子が落ちてくる。このとき、遷移差に相当するエネルギーは、蛍光 X 線として放出されるか別の外殻電子の放出に充てられる。ここで放出された電子はオージェ電子と呼ばれる。

光電吸収の反応断面積は、物質の原子番号  $Z$  の 4-5 乗に比例し、光子のエネルギーの  $-3$  乗に比例する。よってアルゴン ( $Z = 18$ ) のような原子番号の小さな物質で MeV ガンマ線を観測するとき光電吸収が起こる可能性は低い。

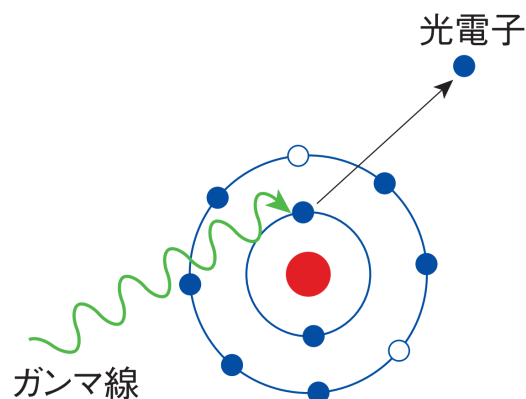


図 2.1: 光電吸収イメージ図 [9]

### 2.1.2 コンプトン散乱

光子が電子によって散乱される現象をコンプトン散乱という。静止している電子に光子がエネルギー  $E$  で衝突してコンプトン散乱され、エネルギーが  $E'$  となる状況を考える。散乱前後のエネルギー保存則と運動量保存則より、式 (2.2) のようになる。

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (2.2)$$

ここで、 $m_e$  は電子の静止質量、 $c$  は光速、 $\theta$  は図 2.2 のように光子の散乱角である。コンプトン散乱の反応断面積は原子番号  $Z$  に比例する。

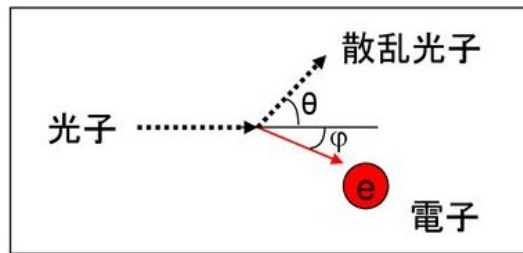


図 2.2: コンプトン散乱イメージ図 [10]

### 2.1.3 電子陽電子対生成

1.022MeV 以上のガンマ線が物質内に入るとそのクーロン場と相互作用して、ガンマ線が電子と陽電子となる現象を電子陽電子対生成という。反応断面積は原子番号  $Z$  の 2 乗に比例する。Fermi/LAT は 30MeV 以上のガンマ線を観測ターゲットとしているので、この反応を利用して観測を行っている。

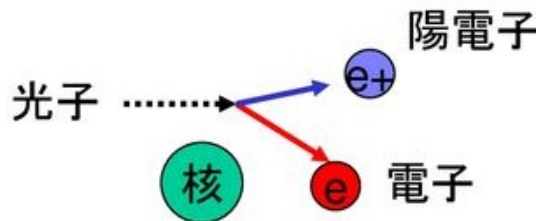


図 2.3: 電子陽電子対生成イメージ図 [10]

## 2.2 コンプトンカメラ

1.1.2 節で述べたように、MeV ガンマ線は物質とコンプトン散乱を起こしやすいのでコンプトンカメラというイメージング手法を用いることができる。図 2.4 のように、散乱体に入射したガンマ線がコンプトンされてエネルギーを  $E_1$  だけ落とし、吸収体でエネルギーを  $E_2$  落としたとすると、散乱角  $\theta$  は式 (2.3) で求められる。

$$\cos \theta = 1 - m_e c^2 \left( \frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1 + E_2} \right) \quad (2.3)$$

よって、線源の位置をコンプトンコーンと呼ばれる円錐の底面に制限できる。これを複数回の入射ガンマ線に対して行うことにより、コンプトンコーンの交点から線源の位置を特定することができる。

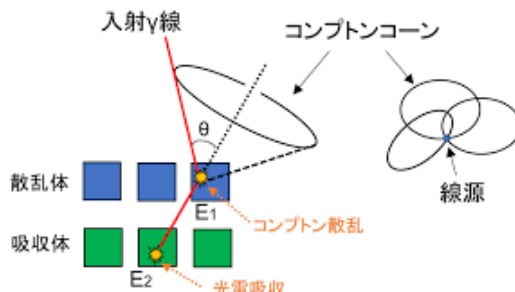


図 2.4: コンプトンカメラの原理 [11]

## 2.3 COMPTEL 望遠鏡

実際に宇宙で MeV ガンマ線観測のためのコンプトンカメラとして使われていたものがある。それが、1991年に NASA が打ち上げた Compton Gamma Ray Observatory (CGRO) 衛星搭載の COMPTEL (Imaging Compton Telescope) である。COMPTEL は、0.75–30 MeV のガンマ線に対して感度のあるコンプトンカメラである。構造は図 2.5 のようになっており、ガンマ線は上段の有機液体シンチレータでコンプトン散乱し、下段の NaI 結晶で光電吸収される。アルミニウム 26 からの 1.809 MeV、中性子捕獲からの 2.223 MeV などのラインガンマ線の検出に成功した [4]。しかし、表 2.1 が示すように検出器全体の大きさに対して有効面積が小さく、統計を稼ぐことができなかつたので感度が低くなってしまった。

エネルギー帯域	有効面積 [cm <sup>2</sup> ]	エネルギー分解能 [FWHM]
0.75–30 MeV	25.8(1.27 MeV)	8.8%(1.27 MeV)
	29.3(2.75 MeV)	6.5%(2.75 MeV)
	29.4(4.43 MeV)	29.4%(4.43 MeV)

表 2.1: COMPTEL の性能 [12]

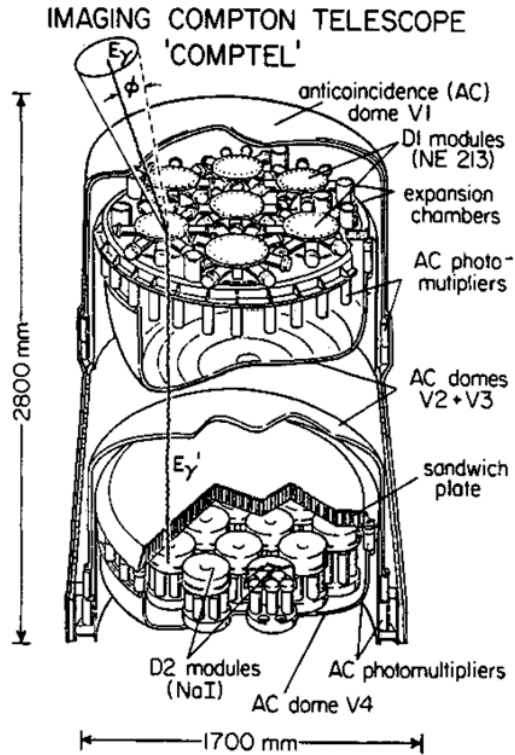


図 2.5: COMPTTEL の構造 [13]

## 2.4 液体アルゴン検出器の特徴

MeV ガンマ線の検出に使われる物質には、主に液体アルゴンと半導体がある。ここでは液体アルゴンを使うにあたってのメリットとデメリットを述べる。

### メリット

1. アルゴン自体が安価なので検出器自体を大きくでき、有効面積を大きくできる。
2. 固体の半導体に対して検出器全体を隙間なく満たすことができるので、検出漏れが少なく、半導体よりも感度を高くできる可能性がある。

### デメリット

1. 液体の大きい検出器を宇宙で使った実績がない。
2. アルゴンの沸点は 87.5K であり、ここまで下げることができ、かつ強力な冷却器が必要であるが、これも簡単ではない。

## 2.5 GRAMS

Gamma Ray and AntiMatter Survey (GRAMS) とは、これまでの MeV ガンマ線検出器の有効面積が小さく、感度が低いという課題を解決すべく、コンプトンカメラの散乱体として大型化しやすい液体アルゴンを使用した time projection chamber (TPC) で MeV ガンマ線を観測しようというプロジェクトである。同時に宇宙線を用いた暗黒物質探査も行う。2020 年代後半の気球観測実験、そして 2030 年代の宇宙空間観測を目指している [14]。

### 2.5.1 GRAMS が目指す感度

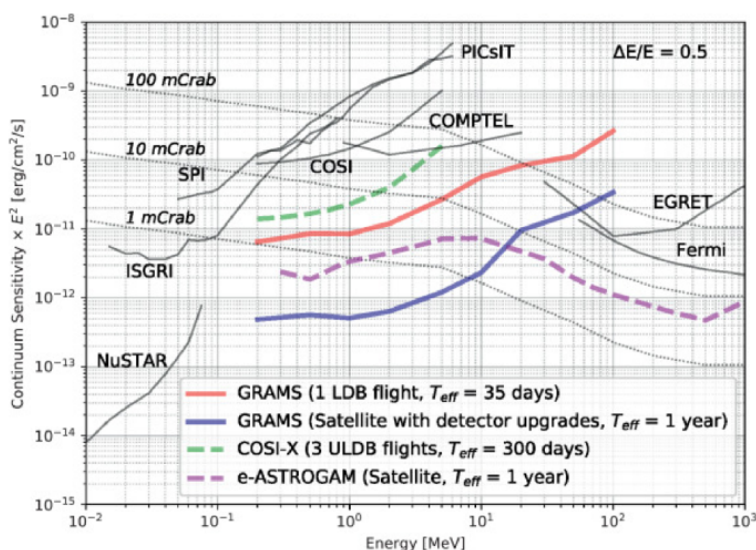


図 2.6: X 線、ガンマ線帯域の検出器感度 [15]。下に行くほど感度が良い。赤のラインが気球実験、青のラインが人工衛星での GRAMS 検出器感度の予測値である。

GRAMS が目指す感度は図 2.6 が示すものである。人工衛星搭載時にはどのエネルギー領域においても COMPTEL からほぼ 2 桁感度が上昇し、MeV ガンマ線で捉えられる天体が増えることが期待されていると分かる。

### 2.5.2 GRAMS の検出器構造

GRAMS に使われる液体アルゴン TPC 検出器の構造を図 2.7 に示す。この検出器の最大の特徴は、コンプトンカメラでありながら吸収体を持たないため構造がシンプルで大容量の液体アルゴンを充填できることである。

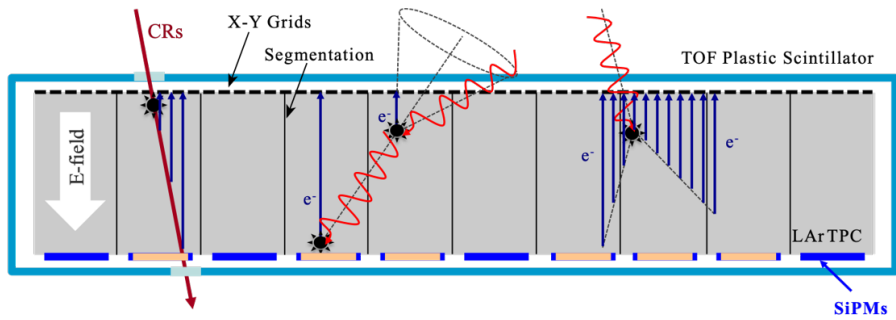


図 2.7: 液体アルゴン TPC 検出器の構造 [16]

ガンマ線はアルゴンとコンプトン散乱すると、アルゴンを励起または電離させる。この時アルゴンはどちらの場合でも 128nm のシンチレーション光を出す。この光を波長変換材で可視光に変換し、Silicon Photomultipliers(SiPMs) と呼ばれるデバイスの一つである MPPC で検出する。MPPC については 3 章で詳しく紹介する。コンプトン散乱で生じた電離電子の一部は、再結合の前にアノード・カソード間にかけられている電場によってドリフトしてアノードワイヤーで検出される。これらで検出される光の量および電離電子の数から入射ガンマ線のエネルギー損失が分かる [5]。

## 第3章 ガスアルゴン検出器実験

アルゴンがガンマ線とコンプトン散乱してシンチレーション光を出すのは液体アルゴンだけの現象ではない。よって、ガスアルゴンを用いた検出器であっても同様のシンチレーション光が検出できることが期待される。アルゴンは常温で気体であり、ガスアルゴン検出器であればアルゴン用の冷却器を用意する必要がないため比較的安価で簡単に検出器を構成することができる。そこで本研究では実際にガスアルゴン検出器を構成し、MeV ガンマ線の検出を行う。

### 3.1 実験セットアップ

#### 3.1.1 検出の流れ

まず、空気をアルゴンと置換するために真空ポンプで検出器全体を真空にした後ガスアルゴンを注入する。そこに放射性同位体である Cs137 から 662keV のガンマ線を出して検出器内のガスアルゴンとコンプトン散乱させ、アルゴンから出た 128nm のシンチレーション光を波長変換材 TPB で可視光に変換し、光検出器の MPPC で検出する。ここで検出されるのは微弱光なので、MPPC の信号が弱く、このままだとシンチレーション光のスペクトルがよく見えない。そこで、MPPC からの信号をプリアンプ（前置増幅器）に通して増幅させる。プリアンプに通すと信号は確かに増幅され、さらにシェイパーアンプ（波形成形増幅器）に通して、半径を AD 変換しやすいガウシアンにする。最後に、この信号をパソコンで読み取れるようにアナログデジタルコンバータ (ADC) でデジタル信号に変換する。

#### 3.1.2 MPPC

GRAMS 計画でも液体アルゴンからのシンチレーション光検出に使われる予定であり、本研究でも使用する Multi-Pixel Photon Counter(MPPC) について紹介する。これは浜松ホトニクス社製のフォトンカウンティングデバイスで、マルチピクセル化したガイガーモード APD で光を検出する [17]。アバランシェフォトダイオード (APD) とは、逆電圧がかかったダイオードの PN 接合に光子が入射すると、次々と電子・ホール対が雪崩 (Avalanche) のように生成されて両端の電極に移動し、電流が流れることで光を検出するものである。さらに APD に降伏電圧以上の逆電圧をかけることで、光入射時にガイガー放電という素子固有の飽和出力が光量の大小に関係なく生じる。これがガイガーモード APD の光検出原理である。MPPC は、低電圧で動作し、高い増倍率と検出効率、高速応答、優れた時間分解能、広い感度波長領域という、フォトンカウンティングにおいて重要な性能を高い性能で実現している [17]。用いた MPPC の型番は S1360-6050CS であり、受光面の大きさは 1cm × 1cm である。本実験ではこれを 1 つだけ用いたが、将来的には多数アレイにする予定である。

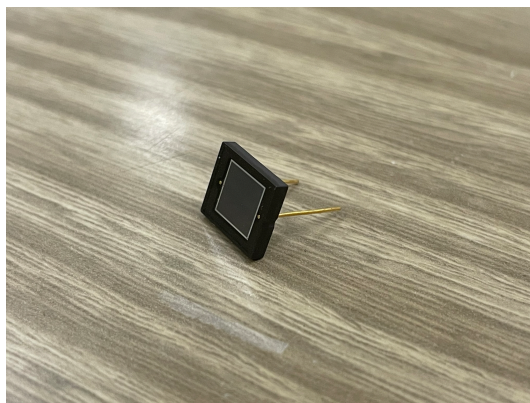


図 3.1: MPPC 外観

### 3.1.3 TPB

MPPC の波長感度は 300–900nm であり、128nm のアルゴンのシンチレーション光を直接読み取ることは難しい。そこで、シンチレーション光を波長変換材 1,1,4,4-tetraphenyl-1,3-butadiene(TPB) で可視光に変換する。TPB は 400nm 以下の光を吸収し、およそ 420nm のピークを持つように発光する [18]。今回用いた TPB は早稲田大学寄田研田中氏からいただいたもので、反射材 ESR の片面に蒸着されたものである。

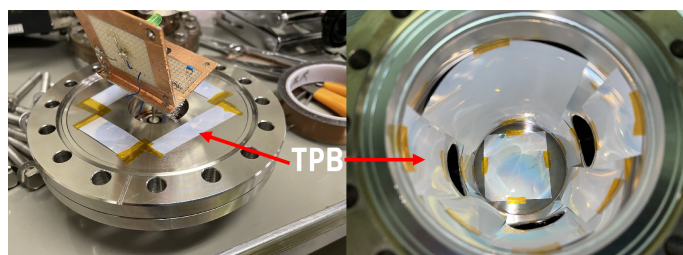
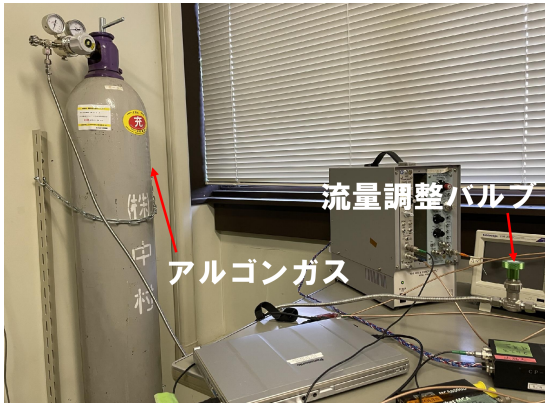


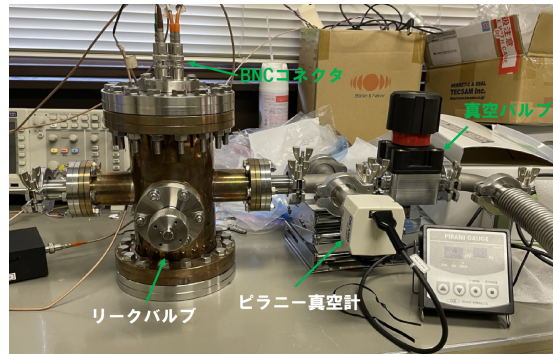
図 3.2: チェンバーに貼り付けた TPB



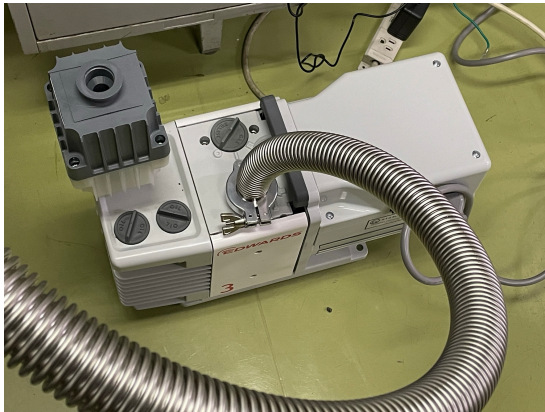
### 3.1.4 検出器の構成



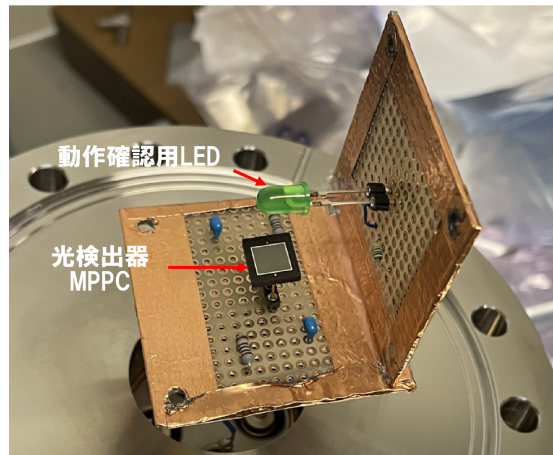
(a) アルゴンガスライン



(b) チェンバーと真空引きライン



(c) 真空ポンプ



(d) チェンバー内に入れた MPPC と LED

図 3.3: 検出器全体

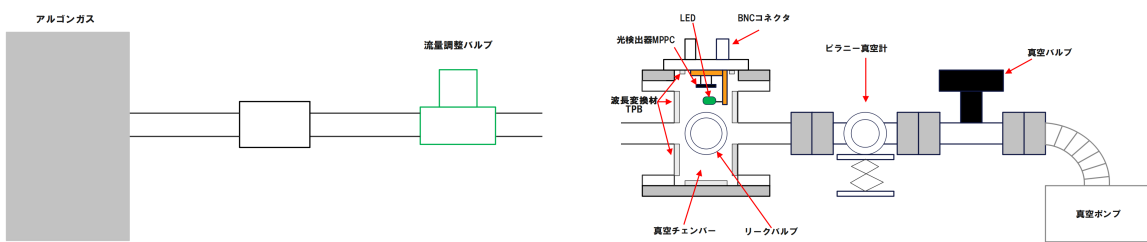
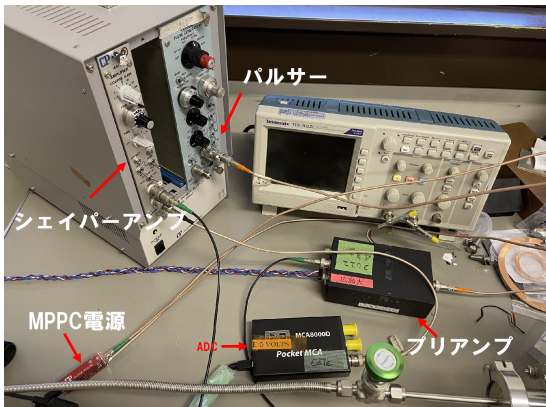
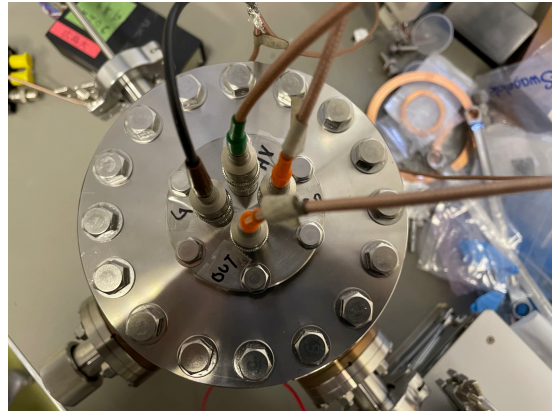


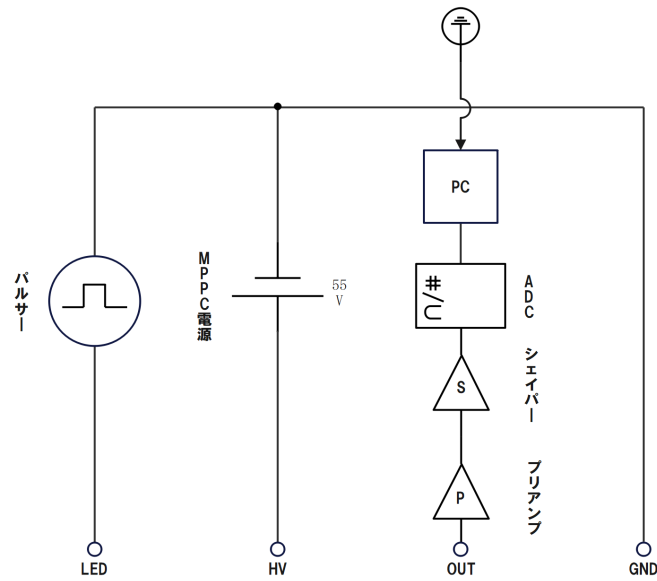
図 3.4: 検出器全体を横から見たブロック図



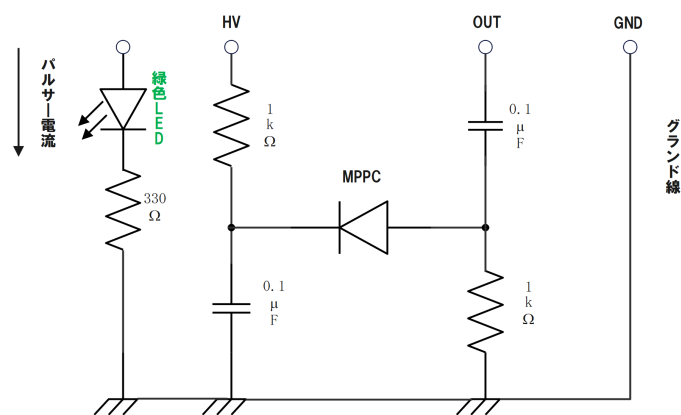
(a) 各種機器



(b) 4つの BNC コネクタ。左から時計回りでグランド線、MPPC 電源、LED のパルサー電源、MPPC からの信号となっている。



(c) チェンバー外の回路図



(d) チェンバー内の回路図

図 3.5: 検出器の配線

本実験を行うにあたって実際に構成した検出器は図 3.3、3.4 の通りである。図 3.3b 左の大きい管が真空チェンバーであり、内径は 5cm、内部の高さは 20cm である。この真空チェンバーは、放射光科学センターの島田先生よりお借りしたものである。また真空計は、真空ポンプ（油回転ポンプ）で  $10^{-1} \sim 10^0 \text{Pa}$  台まで下げて真空バルブを締めて真空を維持した状態で流量調整バルブを開き、アルゴンガスのレギュレーターを使って 1 気圧ほどのアルゴンガスを流し込むという構造になっている。各真空機器の接続は ICF 規格の部品を用いて行っており、チェンバーと各真空機器との接続には銅のガスケット、それ以外の接続にはゴムのガスケットを使用している。真空度はピラニー真空計で測定する。アルゴンは使用し続けるとわずかに残っている空気と混じりあい、シンチレーション光を出しづらくなってしまふ。シンチレーション光の検出レートが低下して劣化したアルゴンが増えたと判断したらリークバルブから排出し、再び真空引きからやりなおす。

次に、検出器の電気系、信号処理回路について述べる。アルゴンのシンチレーション光が TPB で可視光になり、それが MPPC に入るとパルス信号が出て、OUT、プリアンプ、シェイパーアンプ、ADC を通り、パソコンに記録される。MPPC は、動作電圧を上げることで増倍率、検出効率、時間分解能が向上するが、上げすぎるとノイズが増えてしまう特性を持つので、本実験では S/N 比が良い 55V で MPPC を使用する。また、電源側の  $1\text{k}\Omega$  抵抗、 $0.1\mu\text{F}$  コンデンサは、電源の高周波ノイズを取り除くためのローパスフィルタを構成する [17]。MPPC の N 側に正のバイアス電圧をかけるが、MPPC の P 側はコンデンサを介してプリアンプに接続される。MPPC の受光面に対して水平に取り付けた LED は、チェンバーを閉じたあとも MPPC が正常に機能するかを確かめるためのものである。LED は、図 3.5a のパルサー電源を使って光らせる。

### 3.1.5 アルゴンガスの反応レート

アルゴンガスがチェンバーに入射してきた 662keV のガンマ線と 1 秒間に何回コンプトン散乱するのかを求め。まずはアルゴンガスの密度  $\rho_{Ar}$  を求める。状態方程式

$$PM = \rho_{Ar}RT \quad (3.1)$$

より、 $\rho_{Ar} = 1.6 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ 。ここで、 $P$  はアルゴンガスの圧力で  $1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、 $M$  はアルゴンの分子量で  $40 \text{ g/mol}$ 、 $R$  は気体定数、 $T$  は温度で  $20^\circ\text{C}$  としている。

次に、ガンマ線のチェンバーに対する透過率を求める。このチェンバーは主にアルミニウムできているアルミニウムの密度  $\rho_{Al}$  は  $2.7 \text{ g/cm}^3$ 、662keV のガンマ線に対するコンプトン散乱の質量吸収係数  $\kappa_{Al}$  は  $3.3 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{g}$ [8]、チェンバーの側面の厚さ  $d_{Al}$  は、入射ガンマ線の角度の平均を  $45^\circ$  として、 $d_{Al} = 1.0 \div \cos 45^\circ = 1.4 \text{ cm}$  なので、透過率  $T_{Al}$  は以下となる。

$$T_{Al} = \exp(-\rho_{Al}\kappa_{Al}d_{Al}) = 0.998 \quad (3.2)$$

アルゴンガスがコンプトン散乱する確率もほとんど同様に求めることができる。662keV のガンマ線に対するコンプトン散乱の質量吸収係数  $\kappa_{Ar}$  は  $5.3 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{g}$ [8]、チェンバーの中をガンマ線が通る距離  $d_{Ar}$  は、チェンバー（半径 5cm）の中心で平均的に反応し、入射ガンマ線の角度の平均を  $45^\circ$  として、 $d_{Ar} = 5.0 \div \cos 45^\circ = 7.1 \text{ cm}$  なので、散乱確率  $R_{Ar}$  は以下となる。

$$R_{Ar} = 1 - \exp(-\rho_{Ar}\kappa_{Ar}d_{Ar}) = 6.0 \times 10^{-6} \quad (3.3)$$

本研究で使用する線源 Cs137 の初期の放射能は 18.5 MBq であり、崩壊するごとに 662keV のガンマ線を出す確率は 85.1% である。この線源の半減期は 30.17 年であり、使用開始から 36 年経過している。よって、線源のレートは以下となる。

$$Rate = 1.85 \times 10^7 \times \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{36}{30.17}} \times 0.851 = 6.88 \times 10^6 [1/s] \quad (3.4)$$

線源から出たガンマ線はすべてがチェンバーに向かっていくわけではない。線源をチェンバー側面の真ん中の高さに貼り付けたとすると、線源から出るガンマ線の内、チェンバーに向かっていくのは全立体角の 1/5 程度である。

以上より、1 秒間に 662keV のガンマ線がチェンバー内のアルゴンガスとコンプトン散乱する回数は、

$$T_{Al} R_{Al} Rate \times 0.2 = 8.3 [1/s] \quad (3.5)$$

と見積もれる。したがって、液体アルゴンほどの密度を持っていないガスアルゴン検出器でも MeV ガンマ線を検出できる可能性が十分にあることが分かる。

### 3.1.6 アルゴンガス流入手順

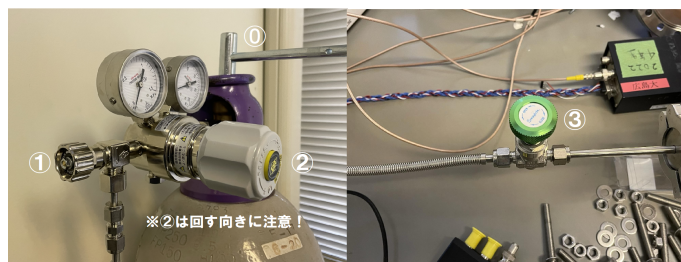


図 3.6: バルブ一覧

#### 準備

1. ガスの元栓①と①～③が締まっていることを確認し、真空ポンプで真空を作る。(②はハンドルを左に回して緩くなった時が締まった状態となる。)
2. 元栓①を開ける。レギュレータの右側のメータがボンベ内のガス圧を示すはず。
3. ①を閉じたまま、②のハンドルを少しずつ右回りに回し、左側のメータがわずかに上昇し出したら(～0.02MPaになったら)ハンドルからいったん手を放す。
4. ①を開けてガスを管に流し、メータが下がることを確認。
5. ③を開通させてガスをチェンバーに送る。
6. 以降は 1 分かけて②を回しながら少しずつ圧力を上げては送りを繰り返し、1atm(0.1MPa) まで上げる。当面は 0.1MPa 以上は上げない。

7. ガスの交換をする際は、③を締め、リークバルブを開けて1分ほど漏れさせたあと、ポンプを使って真空化する。

## 片付け

1. ガスの元栓④を締めたあと、リークバルブを開けて1分ほど漏れさせる。メータが2つとも0になったことを確認する。
2. ②、①、③の順に締める。(②は左に回すことに注意。) 2つのメータが0のままなら、これで終了。

左のメータのみが0でない時は、以下「おまけ1」の手順に従う。右のメータのみが0でないときは、以下「おまけ2」の手順に従う。両方のメータとも0でないときは、「おまけ1」を済ませた後に「おまけ2」を実施すること。

**おまけ1.** ①、③の順に開けた後、リークバルブを開け、再度①、③を締める。左のメータが0になったことを確認すること。

**おまけ2.** ガスの元栓④が締まっていることを確認したあと、②をわずかに開け(左のメータが0.02MPaになるまでゆっくりハンドルを右回し)、さらに「おまけ1」と同一の手順を実施し、右のメータも0になったことを確認したら、②を締める(ハンドルが緩むまで左回しする)。

## 3.2 実験結果

### 3.2.1 動作チェック結果

ガスアルゴン実験を行う前に、まず本当にMPPCが動作することを確認する必要がある。検出器を組み立て、LEDを使ってMPPCの電氣的試験をした結果は図3.7の通りである。パルス波が見えているため、LEDがパルサー電源でしっかり光っていることが分かる。

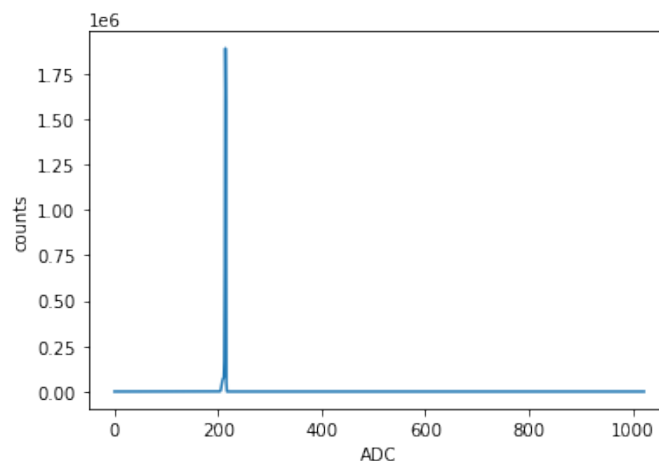


図 3.7: LED での電氣的動作チェック

### 3.2.2 ガスアルゴン実験結果

アルゴン気圧:0.07MPa で1時間測定を行った結果が図3.8である。図3.8aは線源 Cs137 を置いた状態のスペクトルであり、図3.8bはバックグラウンドのスペクトルである。横軸はADCチャンネルであり、MPPCに入った光子のエネルギーに対応した0-1023のチャンネルに振り分けられたものである。縦軸はあるチャンネルに振り分けられた光子数である。左側に見える大きなピークはノイズであり、アルゴンからのシンチレーション光と思われる信号は図3.8cの150-270nmの範囲のものである。この範囲のカウント数は152回なので、カウントレートは $152/3600 = 0.042 /s$ であった。

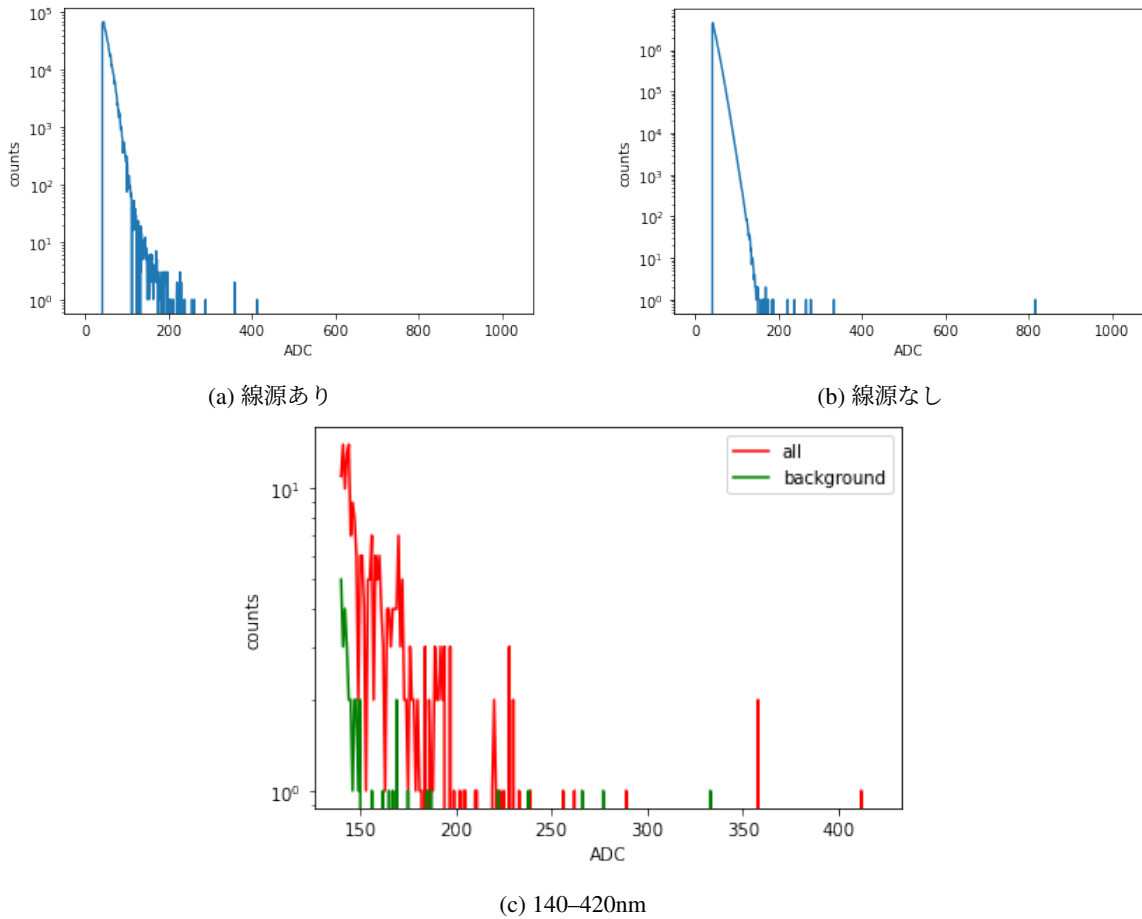


図3.8: 実験で得られたスペクトル

## 第4章 考察・課題

実験をした結果、得られたカウントレートは0.042/sと、予測値8.3/sの約1/200という非常に小さい値となった。ここでは、このような結果となった要因について考察し、今後の課題についても述べる。

### 4.1 考察

まず初めに考えられるのは、アルゴン気圧が低いためにアルゴンの密度が小さく、あまりガンマ線とコンプトン散乱を起こさなかったことである。今回は検出器の安全上を考慮した結果、0.07MPaより上のガス圧では実験を行えなかった。式(3.1)よりガス密度はガス圧に比例するので0.07MPaの時のアルゴン気圧 $\rho'_{Ar}$ は0.1MPa(1気圧)の時のアルゴンガス密度 $\rho_{Ar}$ を用いて、

$$\rho'_{Ar} = 0.7\rho_{Ar} = 1.1 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3 \quad (4.1)$$

と求められる。また、式(3.3)より散乱確率も求めなおすと以下のようになる。

$$R'_{Ar} = 1 - \exp(-\rho'_{Ar} \kappa_{Ar} d_{Ar}) = 4.1 \times 10^{-6} \quad (4.2)$$

よって、アルゴン気圧が0.07MPaの時の予測値は次のようになる。

$$T_{Al} R'_{Ar} \text{Rate} \times 0.2 = 5.7 /s \quad (4.3)$$

これでもまだ約1/140の値であり、カウントレートを下げた要因が他にもあることが分かる。

他にも考えられる要因としては、単に上の予測値はあくまでもアルゴンガスがガンマ線とコンプトン散乱するレートであり、シンチレーション光を出し、それが実際にMPPCに入るレートではないということである。そこまでの計算は難しいので今回は省略したが、実際には光った位置によってはシンチレーション光が上手くTPBに当たらなかつたり、可視光になってもMPPCにたどり着けず検出器を抜けてしまうものもあるので予測値から大きく下がることは十分ありうる。また、検出器に入ってくると考えた立体角が大きすぎた可能性もある。

以上のような要因によって、得られたカウントレートは予測値を大幅に下回ったけれども今回の値は妥当なものであったと考えられる。

## 4.2 課題

今後の課題としては三つ挙げられる。

一つ目はアルゴン気圧を上げられるようにすることである。今回構成した検出器のピラニー真空計の接続部だけが他の接続部よりかなり弱く、0.05MPa 付近までガス圧を上げた時に検出器の内圧に耐えきれず吹き飛んでしまうということが起こった。そこで、本実験は安全を考慮してガス圧を上げる速度を下げ、0.07MPa で圧力を上げるのをやめて行った。このピラニー真空計の接続部を設計し直して強度を上げ、より高い圧力で実験を行えるようになれば今回の結果より高いカウントレートが得られるようになると考えられる。カウント数が増えればシンチレーション光のスペクトルがよりはっきり見えるようになるのでシンチレーション光の性質についても調べることができるようになる。

二つ目はシンチレーション光が見えても光量の算出ができないことである。これは、まだ MPPC のエネルギー較正ができていないためである。較正はアルゴンガスの代わりに CsI シンチレータを使えば可能である。

三つ目は有効面積が小さいことである。今回は MPPC を一つだけ用いたが、1 つあたり受光面が  $1\text{cm}^2$  しかなく、これでは光の取りこぼしが起こりやすいのでやはり多数アレイにする必要がある。

以上を踏まえることにより、今後ガスアルゴン検出器でのさらなるカウントレート上昇が期待できる。



# 謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方にお世話になりました。まず指導教員の深澤先生。本研究の大まかな計画を立て、初歩的なことからご指導してくださりありがとうございました。また、検出器の設計、部品の取り寄せ、各パーツの取り扱い方のご指導をしてくださった有限会社 NGS の名越さん。とても分かりやすい説明と親切な対応にいつも助けられました。ありがとうございました。急なお願いにも迅速に TPB の提供をしてくださった早稲田大学寄田研の田中雅士准教授にもこの場を借りて感謝申し上げたいと思います。そして、研究室の先輩方や同級生の皆さん。相談から日常の他愛もない話まで付き合ってくださいありがとうございました。とても居心地がよく、集中しやすかったです。

新型コロナウイルスに感染してしまったり、実験のセットアップの段階で想定外のことがたくさん起こり、決してスムーズとは言えない進行速度ではありましたが、この1年で積み重ねてきたたくさんの苦労は春からの新天地でも必ず役に立っていくと確信しています。簡単ではありますが、これを謝辞とさせていただきます。

## 参考文献

- [1] チャンドラ衛星 | 天文学辞典  
<https://astro-dic.jp/chandra-x-ray-observatory/>
- [2] XMM、初観測 (続報)(ESA)  
<https://www.astroarts.co.jp/news/2000/02/22xmm-f1/index-j.shtml>
- [3] フェルミ衛星 | 天文学辞典  
<https://astro-dic.jp/fermi-gamma-ray-space-telescope/>
- [4] コンプトンガンマ線衛星 | 天文学辞典  
<https://astro-dic.jp/compton-gamma-ray-observatory/>
- [5] 高嶋聡 東京大学 2021  
「大有効面積 MeV ガンマ線観測を目指した液体アルゴンによるコンプトン望遠鏡概念の実験的検討」
- [6] Fermi ' s five-year view of the gamma-ray sky  
<https://svs.gsfc.nasa.gov/11342>
- [7] Comptel gamma-ray source catalog  
<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/epo/news/catalog.html>
- [8] Xcom: Photon cross sections database  
<https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>
- [9] ガンマ線の作用  
<https://rcwww.kek.jp/kurasi/page-29.pdf>
- [10] 光子モンテカルロシミュレーション 波戸、平山 (KEK), A.F.Bielajew (UM)  
<https://slidesplayer.net/slide/15025113/>

[11] 最近の放射線計測技術とその応用

<http://petoyama.net/wp-content/uploads/2019/03/5a977fbf4e4c0885d66e68872c6be2fb.pdf>

[12] Summary of compton gro detecotr characteristics

<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/cgro/>

[13] J. W. den Herder, et al. COMPTEL: instrument description and performance. In NASA Conference Publication, Vol. 3137 of NASA Conference Publication, February 1992

[14] GRAMS

[http://www2.nao.ac.jp/~scjastphys/mp2023/loi/LOI2023\\_Form\\_GRAMS.pdf](http://www2.nao.ac.jp/~scjastphys/mp2023/loi/LOI2023_Form_GRAMS.pdf)

[15] ] T. Aramaki, et al. Dual MeV gamma-ray and dark matter observatory - GRAMS Project. Astroparticle Physics, Vol. 114, January 2020

[16] 多重散乱コンプトンカメラの実現による宇宙MeVガンマ線感度の向上と医療への展開

[https://member.ipmu.jp/SpaceTech\\_to\\_QuantumBeam/publicly-offered-research/2019-c01-1/index.html](https://member.ipmu.jp/SpaceTech_to_QuantumBeam/publicly-offered-research/2019-c01-1/index.html)

[17] MPPC とは

[https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/what\\_is\\_mppc.html](https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/what_is_mppc.html)

[18] 青山一天 早稲田大学 2019

「液体 Ar 検出器の高感度化～TPB 蒸着技術の最適化と TSV-MPPC Array の実装～」