# 修士論文

# J-PARC T98 実験 Phase-2 に向けた LArTPC 電子信号読み出し基板の開発と性能評価

早稲田大学 先進理工学研究科 物理学及応用物理学専攻 寄田研究室

5322A041-7 清水 虎冴

2024年2月5日

概要

宇宙を構成する物質の内,我々の知る標準理論で説明される物質は約5%程 度であり、残りの 95%は未知の物質で占められている。暗黒物質は全体の約 25 %を占めており様々な観測によりその存在が示唆されているが,観測はされ ていないため様々な実験が探索を試みている。GRAMS 実験は MeV 領域のガ ンマ線観測と宇宙反粒子探索を目的とした気球実験である。本研究では特に宇 宙反粒子探索に着目し検出器開発を進めている。暗黒物質の対消滅により生成 される反重陽子は、一次宇宙線と星間物質の相互作用により生じる反重陽子よ りもリジディティが< 1GeV/n 以下の領域で 2 桁程度フラックスが多い可能性 が示唆されている。反重陽子が1つでも発見されれば暗黒物質の良い証拠とな りうる。GRAMS 検出器の粒子反粒子識別には原子核捕獲事象を用いる。負電 荷粒子は Ar 原子に捕獲されたのち原子核と対消滅して複数のハドロンを放出す る。この事象を捉えることで粒子識別を行う。GRAMS 検出器の粒子識別原理 は実機での検証が為されていないため,実証試験として J-PARC ハドロンホー ルの K1.8BR ビームラインにて T98 実験として計画・提案している。ここでは, 30GeV シンクロトロンにより加速された陽子を金標的に衝突させることで生じ る二次粒子のハドロンを用いた実験が可能である。T98 実験は二段階に分けて 実施されている。まず、Phase-1としてプラスチックシンチレータを用いて、反 粒子ビームのレート検証を行った。また、来年度予定される Phase-2 では実際 にビームライン上に ToF シンチレータと LArTPC を設置し反粒子ビームを照 射して原子核捕獲事象を観測する。T98 Phase-2 では, 30cm × 30cm × 30cm のLA r TPC で測定を行う。LArTPC 中では荷電粒子が通過すると、Ar 原子 が電離して電子が発生する。電子信号は数 fC/cm 程度と微小であるため、アン プによる信号増幅が必要である。Phase-2 に向けて,原子核捕獲事象により生成 される複数のハドロンの飛跡を再構成するために Anode パッドは 5mm ピッチ で設計される。現在早稲田で運用する TPC は 10mm ピッチで設計されており 荷電粒子の再構成がすでにされているが、ピッチ変更に伴い信号量も減少するこ とから良い S/N のアンプが求められる。本研究では基板に搭載するアンプとし て LTARS2018\_K06A を採用した。これは大型 LArTPC 用の ASIC として開発 されたものである。短期間での開発およびアンプの性質の観点から、アナログ 信号の増幅、デジタイズ、信号処理を行える一体型の基板(TIGArBoard)を設 計・開発しその性能評価を行った。TIGArBoard では,32ch 分の電荷信号を処 理することができる。テストパルスを入力して基礎性能評価を行った結果、ゲイ ンやダイナミックレンジ,ノイズレベルなどは飛跡再構成を行うに十分な性能で あることが確認された。さらに,実機での信号読み出しの検証のために,初期試 験としてガスアルゴン中のα線信号を観測した。TPCは TIGAr1 枚での試験が 可能かつ Anode ピッチを細かくする観点から 10 × 10 × 10 cm<sup>3</sup> サイズを 30ch で読み出し、期待通りの信号が見られた。

目次

# 目次

T		暗黒物質探索	8
	1.1	暗黒物質	
	1.1.	1.1 暗黒物質の存在の予測	
	1.1.	1.2 暗黒物質の探索手法	
	1.2	宇宙反粒子を用いた暗黒物質間接探索....	
	1.2.	2.1 一次起源 宇宙反重陽子	
	1.2.	2.2 二次起源 宇宙反重陽子	
	1.2.	2.3 宇宙反粒子探索実験	
2		GRAMS 実験	14
	2.1	物理目標	
	2.2	GRAMS 検出器	
	2.2.	2.1 液体アルゴン	
	2.2.	2.2 液体アルゴン TPC 検出器	
	2.3	粒子識別方法	
	2.3.	3.1 質量識別	
	2.3.	3.2 電荷識別	
	2.4	GRAMS40 検出器	
3		J-PARC T98 実験	23
-	3.1	J-PARC 概要	00
	-		
	3.1.	1.1 ハドロン実験施設	
	3.1. 3.1.	1.1 ハドロン実験施設	
	3.1. 3.1. 3.2	1.1 ハドロン実験施設	
	3.1. 3.1. 3.2 3.2.	1.1 ハドロン実験施設	
	3.1. 3.1. 3.2 3.2. 3.2.	1.1       ハドロン実験施設	
	3.1. 3.1. 3.2 3.2. 3.2. 3.3	1.1       ハドロン実験施設	
	3.1. 3.1. 3.2 3.2. 3.2. 3.3	1.1       ハドロン実験施設	
4	3.1. 3.1. 3.2 3.2. 3.2. 3.3	1.1 ハドロン実験施設	
4	3.1. 3.2 3.2. 3.2. 3.3 4.1	1.1       ハドロン実験施設	
4	3.1. 3.1. 3.2 3.2. 3.2. 3.3 4.1 4.1	1.1       ハドロン実験施設	
4	3.1. 3.2 3.2. 3.2. 3.3 4.1 4.1. 4.1.	1.1       ハドロン実験施設	
4	3.1. 3.2 3.2. 3.3 4.1 4.1. 4.1. 4.2	1.1 ハドロン実験施設	
4	3.1. 3.2 3.2. 3.3 4.1 4.1. 4.2 4.2.	1.1       ハドロン実験施設	
4	$3.1. \\ 3.1. \\ 3.2 \\ 3.2. \\ 3.3. \\ 4.1 \\ 4.1. \\ 4.2 \\ 4.2. \\ 4.2$	1.1 ハドロン実験施設	
4	$3.1. \\ 3.1. \\ 3.2 \\ 3.2. \\ 3.3 \\ 4.1 \\ 4.1. \\ 4.2 \\ 4.2. \\ 4.2. \\ 4.3 \\ $	1.1       ハドロン実験施設	$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$

	4.3.2 4.3.2	<ul> <li>DAC コントロール</li></ul>	48 49
5	5.1 5.1. 5.1.	検出器統合試験         GAr 試験セットアップ	53 53 53 54 56
6		考察	60
7 8		まとめと今後の展望 謝辞	61 62

# 図目次

1.1	宇宙の構成要素....................................	8
1.2	NGC6503 銀河の回転速度 [3]	9
1.3	暗黒物質探索手法ダイアグラム	10
1.4	反重陽子生成過程	10
1.5	二次生成の宇宙反重陽子のスペクトラム [5] ................................	12
1.6	AMS-02 検出器構成 [6]	12
1.7	BESS 検出器構成 [7]	13
1.8	GAPS 検出器概略図	13
1.9	GAPS 実験 検出コンセプト	13
2.1	宇宙反粒子のフラックスと GRAMS 物理目標	14
2.2	GRAMS 検出器概略図	15
2.3	アルゴン (Ar) の電離と発光過程 [11] ..................................	17
2.4	液体アルゴン検出器原理 概略図	17
2.5	液体アルゴン中の電場に対する電子のドリフト速度...............	18
2.6	液体アルゴン中の純度に対する電子寿命....................................	18
2.7	反粒子の LAr 中の距離と dE/dx	19
2.8	原子核捕獲事象 概念図	20
2.9	原子核捕獲事象による π 中間子の生成量 ....................................	20
2.10	GRAMS40 検出器	21
2.11	千鳥構造による読み出しの概略図	21
2.12	GRAMS40 検出器による μ 粒子停止事象の二次元飛跡再構成	22
3.1	J-PARC 加速器群	23
3.2	ハドロン実験施設	24
3.3	K1.8 ビームライン構造図	25
3.4	ビームライン検出器構成 概略図	26
3.5	Phase-1 反陽子レート測定	28
3.6	T98 実験 Phase-2 を想定したセットアップ概略図	28
3.7	10mm pitch での反陽子入射事象のシミュレーション......................	29
3.8	5mm pitch での反陽子入射事象のシミュレーション ..........................	29
3.9	3mm pitch での反陽子入射事象のシミュレーション ........................	29
4.1	LTARS2014 1ch 回路構成概略図	32
4.2	MT 回路構成図	34
4.3	TK 回路構成図	34
4.4	REBOLT 写真	35
4.5	DELTA 写真	35
4.6	TIGArBoard 写真	36
4.7	TIGArBoard 基板回路構成 概略図	37

4.8	68pin 入力コネクタの回路図....................................	37
4.9	ESD 対策のための 1ch 分の回路図	37
4.10	LTARS2018_k06A および周辺回路図	38
4.11	アナログ信号を直接確認可能なピンの回路図	39
4.12	基板上のピンにプローブを当てている様子...................................	39
4.13	差動バッファ回路図	39
4.14	ADC 周辺回路図	40
4.15	SFP-LAN 変換用メタルモジュール	41
4.16	NIM_IN 信号回路図	42
4.17	NIM_OUT 信号回路図	42
4.18	50MHz クロック発振器回路図....................................	43
4.19	+5.0V→+3.3V 用 レギュレータ回路図	44
4.20	+5.0V→-3.3V 用 レギュレータ回路図	44
4.21	ファームウェア構成 概略図 ...................................	45
4.22	基礎性能評価用セットアップ 写真	47
4.23	基礎性能評価用セットアップ 構成図....................................	47
4.24	テストパルス入力用基板 回路構成図..................................	47
4.25	オシロスコープによる入力ステップ信号とアナログ出力信号波形の確認の様子	48
4.26	DAC コントロール用信号 (STRI,CLKI,SDI) 入力の様子	49
4.27	左:高ゲイン (HG) の時定数 fast/slow それぞれの 1000Event の平均波形 右:低ゲイン	
	(LG) の時定数 fast/slow それぞれの 1000Event の平均波形	49
4.28	左:高ゲインのダイナミックレンジ測定の結果 右:低ゲインのダイナミックレンジ測定の結果	50
4.29	高ゲインの検出器容量に対する出力の大きさと ENC ...............	50
4.30	低ゲイン出力の検出器容量に対する出力の大きさと ENC ............	51
4.31	LTARS 内部テストパルスによる全チャンネル出力の 1000Event 平均波形	51
4.32	内部テストパルスによる各チャンネルに対する積分値に換算したゲイン	52
4.33	入力トリガーの周波数に対する DAQ 取得時間の変化	52
5.1	GAr 試験に使用した 10cm サイズ TPC の写真	54
5.2	10cm サイズ TPCCathode 側から見た内部の様子 ...................	55
5.3	ひし形構造 Anode パッドの概略図	55
5.4	GAr 試験セットアップ概略図 ....................................	55
5.5	変換基板を介した TIGArBoard と容器の接続の様子 .................	55
5.6	GAr 試験 (1atm) での 1000Event 平均波形による二次元再構成図 左:X-Z 平面 右:Y-Z	
	平面	56
5.7	GAr 試験 (0.5atm) での 1000Event 平均波形による二次元再構成図	57
5.8	GAr 試験での各チャンネルの 1000Event 平均波形 赤:LTARS 入力偶数チャンネル 青:	
	LTARS 入力奇数チャンネル	57
5.9	GAr 試験でのコモンノイズを差し引いた 1000Event の各チャンネルの平均波形	58
5.10	GAr 試験での TIGArBoard のノイズレベル (ADCCounts)  黒:Raw データからの算出	
		-

5.11	GAr(1atm) 中での典型的な 1Event の二次元再構成図	左:X-Z 平面	右:Y-Z 平面	59
5.12	GAr(1atm) 中での典型的な 1Event 波形 (ch44)		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	59

# 表目次

2.1	アルゴンの基本性質一覧表 [10]	16
3.1	GRAMS 実験ターゲット	25
3.2	T98 Phase-1 menu	26
3.3	T98 Phase-1 data	27
3.4	Slit Configuration	27
3.5	T98 Phase-2 proposal	29
3.6	Phase-2 に向けた信号読み出しエレクトロニクスへの要求	30
4.1	LTARS2014 基本仕様一覧	33
4.2	LTARS2018_k06A 基本仕様一覧	34
4.3	TIGArBoard 基本仕様一覧	36
4.4	供給する電源電圧のまとめ....................................	43
4.5	レジスターのアドレスと役割	46
4.6	LTARS DAC parameter の各ビット桁の役割	48
5.1	GAr 試験での電圧・電場・気圧	56

# 1 暗黒物質探索

# 1.1 暗黒物質

### 1.1.1 暗黒物質の存在の予測

宇宙を構成する物質のうち,標準模型により説明される粒子は全体の約5%程度である。残りの95% は我々がまだ知らない物質で構成されている。以下の図1.1にplanck衛星による宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)の観測結果から得られた宇宙全体の各構成要素が占める割合を示す[1]。未知の物質のうち26.8%は 暗黒物質,68.3%は暗黒エネルギーと呼ばれ,宇宙の理解にはこれら未知の物質の性質を知ることが重要で ある。



図 1.1 宇宙の構成要素

暗黒物質は 1933 年に F.Zwicky によるかみのけ座銀河団の観測から, Virial の定理によって導かれる力学 的質量が実際に観測可能な光学的質量よりも約 500 倍大きいことからその存在が示唆された [2]。

その後,宇宙観測による結果から暗黒物質の存在が示唆される証拠がみつかる。そのうちの一つが渦巻銀河の回転曲線の速度の観測である。銀河の中心から距離 r だけ離れたところではニュートン力学およびケプラーの法則から回転速度は,

$$\frac{v^2(r)}{r} = G \frac{M(r)}{r^2}$$
(1.1)

$$v(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}} \tag{1.2}$$

と表される。ここで r は銀河中心からの距離,v(r) は距離 r における回転速度,G は重力定数,M(r) は半径 r 内の質量である。したがって、回転速度は質量が等しければ中心から離れるほど遅くなることが理解できる。 以下の図に実際に観測された渦巻銀河 NGC6503 の中心距離と回転速度の関係を表す結果を示す。黒点が観 測された結果であり、破線が銀河円盤からの寄与、点線がガスからの寄与、一点鎖線が実測値から破線と点線 を引いたもの示す。実測点は明らかに中心から離れても速度を落とさず一定であることがわかり,光学的に観 測できない暗黒物質の存在を強く示唆する結果となった。



図 1.2 NGC6503 銀河の回転速度 [3]

#### 1.1.2 暗黒物質の探索手法

暗黒物質の探索は世界中で行われており,直接探索 (Direct search),間接探索 (Indirect search),加速器生成 (Collider)の三種類の探索手法が用いられている。以下に示すダイアグラム (1.3)は標準理論による既知の 粒子 (SM)と暗黒物質 (DM)の反応のダイアグラムである。三種類の探索手法はこの同じダイアグラムをど の方向でみるかによって区別される。

直接探索は宇宙より地球に飛来する暗黒物質が標的との弾性散乱を起こし、その原子核反跳によるエネル ギーからなる電離、発光、発熱を観測する手法である。標的には希ガスであるアルゴン (Ar) やキセノン (Xe) が使われる。直接探索は信号事象が稀であることから、宇宙線や環境ガンマ線の影響を減らす低バックグラウ ンド環境での実験となる。暗黒物質の幅広い質量に対して探索が有用である。

間接探索は宇宙での暗黒物質の対消滅や崩壊により生じる標準模型の粒子 (反粒子,ガンマ線など)を観測 する手法である。宇宙線と星間物質との相互作用により生じる粒子がバックグラウンドとなる。また大気や地 磁気による影響を避けるため気球や衛星に検出器を搭載してより高い高度での観測が行われる。検出する事象 は既知の粒子同士の相互作用であるため理解がしやすい。

加速器実験は LHC-ATLAS 実験に代表されるように,標準模型の粒子を高エネルギーまで加速し衝突させ ることで暗黒物質を生成して検出する手法である。加速器で到達できる重心エネルギーにより生成できる暗黒 物質の質量に制限がかかるが,検出できれば反応断面積や質量を精密に測定可能である。

## 1.2 宇宙反粒子を用いた暗黒物質間接探索

上で述べたような暗黒物質探索の内,ここでは宇宙反粒子を用いた間接探索について述べる。現在までにい くつかの気球・衛星実験により宇宙線中の反粒子の測定は実施されている。特に反陽子や陽電子のフラックス の測定はされているが,これらは暗黒物質の対消滅・崩壊による一次起源のフラックスに比べ,陽子やヘリウ



図 1.3 暗黒物質探索手法ダイアグラム

ムといった一次宇宙線が銀河内を伝搬する中で星間物質との相互作用により生じる二次起源のフラックスの方 が優位であるため、暗黒物質起因と説明することは難しい。一方で、反重陽子に関しては一次起源によるフ ラックスが二次起源によるフラックスより低エネルギー側では優位にあることが示唆されている。そのため低 エネルギー領域での反重陽子の測定を行えれば、暗黒物質起因であることの説明ができる。しかし、現在ま でに宇宙反重陽子が発見された例はない。唯一 BESS 実験が反重陽子のフラックスに上限値を与えるのみで ある。

## 1.2.1 一次起源 宇宙反重陽子

一次起源の宇宙反重陽子は暗黒物質の対消滅や崩壊,超新星爆発,原始ブラックホール (PBH) によるもの が考えられる。暗黒物質の対消滅により生じる反重陽子の生成過程を示したのが以下の図である。図 1.4 のと おり,対消滅後に生成される標準模型の粒子がハドロン化し,放出される反陽子 ( $\overline{p}$ ) と反中性子 ( $\overline{n}$ ) がある閾 値を超えて合体することで反重陽子 ( $\overline{d}$ ) が生成される。



暗黒物質の対消滅 (annihilation) と崩壊 (decay) による反重陽子の生成数 Q<sub>d</sub> は以下のように表される。

$$Q_{\overline{d}}(T,\vec{r}) = \frac{1}{2} \frac{\rho_{DM}^2(\vec{r})}{m_{DM}^2} \sum_f \langle \sigma_v \rangle_f \frac{dN_{\overline{d}}^f}{dT} \quad \text{(annihilation)}$$
(1.3)

$$Q_{\overline{d}}(T,\vec{r}) = \frac{\rho_{DM}(\vec{r})}{m_{DM}} \sum_{f} \Gamma_f \frac{dN_{\overline{d}}^f}{dT} \quad (\text{decay})$$
(1.4)

ここで、 $\rho_{DM}(\vec{r})$ は銀河中心からの位置  $\vec{r}$ における暗黒物質の密度、 $m_{DM}$ は暗黒物質の質量、fは対消滅および崩壊のチャンネル、 $dN_{\bar{d}}^{f}/dT$ はチャンネル fの対消滅・崩壊における生成される反重陽子のエネルギースペクトラム、 $\langle \sigma_{v} \rangle$ は対消滅の断面積、 $\Gamma$ は崩壊率を表す。

反重陽子の運動エネルギーあたりの生成数は以下のように表される。

$$\frac{dN_{\bar{d}}}{dT_{\bar{d}}} = \frac{p_0^3}{6} \frac{m_{\bar{d}}}{m_{\bar{p}} m_{\bar{n}}} \frac{1}{\sqrt{T_{\bar{d}}^2 + 2m_{\bar{d}} T_{\bar{d}}}} \frac{dN_{\bar{p}}}{dT_{\bar{p}}} \frac{dN_{\bar{n}}}{dT_{\bar{n}}}$$
(1.5)

反重陽子はハドロン化により出てきた反陽子と反中性子の運動エネルギーの和が閾値 p<sub>0</sub> より低いときに束 縛状態となって生成されるため,運動エネルギーが高くなると生成が抑制される。反重陽子のフラックスに関 しては,対消滅後の最終状態の粒子を仮定したうえでエネルギースペクトラムから予測される。

#### 1.2.2 二次起源 宇宙反重陽子

二次起源の宇宙反重陽子は,一次宇宙線中に含まれる陽子などが星間物質と相互作用することで生成される。銀河中心からの位置 r における核子当たりの運動エネルギー T<sub>d</sub> の反重陽子の生成数 Q<sup>sec</sup> は以下の式で表される。

$$Q_{\bar{d}}^{sec}(\vec{r}, T_{\bar{d}}) = \sum_{i \in (p, He, \bar{p})} \sum_{j \in (p, He)} 4\pi n_j(\vec{r}) \int_{T_{min}^{(i,j)}}^{\infty} dT_i \frac{d\sigma_{i,j}(T_i, T_{\bar{d}})}{dT_{\bar{d}}} \Phi_i(T_i, \vec{r})$$
(1.6)

 $i \geq j$ はそれぞれ一次宇宙線中,星間物質 (ISM) 中に含まれる各成分 (陽子,ヘリウム,反陽子) を示し,  $n_j(\vec{r})$ は星間物質の密度, $d\sigma_{i,j}(T_i, T_{\bar{d}})/dT_{\bar{d}}$ は核子当たりの運動エネルギー  $T_{\bar{d}}$ の反重陽子生成の微分断面積,  $\Phi_i$ は一次宇宙線のフラックスを意味する。

図 1.5 に五種類 (*pp*, *pHe*, *Hep*, *p̄p*, *p̄He*) の反重陽子生成チャンネルの各スペクトルとその合計を示す [5]。  $T_d > 1$ GeV/n では *pp* 衝突による  $\bar{d}$  生成が優位であり,  $T_d < 1$ GeV/n では *p̄p* 衝突による生成が優位であ る。*pp* 衝突の場合, *p̄* と *n̄* を作るには *pp* → *pppnp̄n̄* となり運動エネルギーの閾値が  $T_{thre} = 16m_p$  となる ため, 低エネルギー側での生成が抑制される。 $T_d < 1$ GeV/n では *p̄p* 衝突がわずかに優勢となる。これは  $\bar{p}p \rightarrow pn\bar{p}n$  でエネルギー閾値は  $T_{thre} = 6m_p$  と低いが,反陽子のフラックスが *p* に比べて小さいので同程度 のスペクトラムとなる。

どのような生成過程においても、 *d*生成に必要な運動エネルギーの閾値付近で抑制されることがわかる。

#### 1.2.3 宇宙反粒子探索実験

現在に至るまで,気球や衛星に検出器を搭載した宇宙反粒子の観測は行われており,いくつかの例をここで は示す。

• AMS-02

AMS-02 実験 (AMS:Alpha Magnetic Spectrometer) は、高度約 410km で運用されている ISS(国際宇宙 ステーション) に検出器を搭載した実験であり、宇宙反粒子の精密な測定を行っている。検出器構成は以下の 図 1.6 のようになっており、電子/陽電子を識別する TRD、入射粒子の速度を測る ToF、dE/dx、電荷、飛跡 を測るシリコン検出器、永久磁石、RICH、検出器の横から入射する粒子を識別する ACC、カロリメーター



図 1.5 二次生成の宇宙反重陽子のスペクトラム [5]

(ECAL)と複数の検出器を合わせて粒子識別が行える。特に磁場の曲率を用いた電荷の識別により反粒子探索が可能である。



図 1.6 AMS-02 検出器構成 [6]

・BESS-Polar 実験

BESS-Polar 実験 (BESS:Ballon-borne Experiment with Superconducting Spectrometer) は、宇宙線の 観測を目的とした気球実験であり、2004 年と 2007-08 年に南極上空の周回軌道で観測が行われた。検出器 の構成は以下の図 1.7 に示すとおりであり、入射粒子の速度測定およびトリガーに使用される ToF, 荷電 粒子の電荷や質量,飛跡を測定するための内部飛跡検出器 (超伝導磁石と冷却用の液体へリウム, JET チェ ンバー, IDC),背景事象となる電子やミューオンなどを識別するための ACC である。2007-08 年の実験 (BESS-PolarII) では 30 日間のフライトでの運用実績があり、精密な反陽子のフラックスを出している。一方 で、宇宙反重陽子の発見には至らず、上限値を算出するのみとなっている。

・GAPS 実験



図 1.7 BESS 検出器構成 [7]

GAPS 実験 (GAPS:General Anti-Particle Spectrometer) は、低エネルギーの宇宙反粒子の観測を目的と した気球実験であり、今後南極周回軌道でのフライトが予定されている。検出器は主に荷電粒子の速度を測る 2 層の ToF と 10 層の Si(Li) 型半導体検出器で構成されている。AMS や BESS とは異なり強力な粒子識別を 行う磁石を搭載せず、原子核捕獲事象を見ることで粒子識別を行うことが GAPS 検出器の特徴である。入射 してきた負電荷粒子は Si 原子核に捕獲されエキゾチック原子を形成する。負電荷粒子は特性 X 線を放出しな がら脱励起を起こし、最終的に原子核と対消滅してハドロンを発生する。これらの反応過程で生じる X 線の エネルギーやハドロンの数、dE/dx、飛程距離が異なるため粒子の識別が可能である。





図 1.9 GAPS 実験 検出コンセプト

# 2 GRAMS 実験

GRAMS 実験 (Gamma Ray and Anti-Matter Survey) は MeV 領域のガンマ線観測と宇宙反粒子探索の 二つの物理目標を持つ,液体アルゴン (LAr)TPC 検出器を用いた日米共同の気球実験である。これらの物理 目標を達成するために,GRAMS 実験は南極上空高度 30km で 30 日間程度の長期のフライトを目指す。現在 GRAMS 実験は検出器の開発段階にあり,液体アルゴン TPC の原理検証や上空での長期安定運用に向けた課 題に取り組んでいる。

### 2.1 物理目標

物理目標のひとつである MeV ガンマ線の観測は,暗黒物質探索や重元素合成プロセスの解明など宇宙天文 分野でも重要な物理である一方,光電吸収や対生成を起こす他のエネルギー領域と比較し観測の難しさが挙げ られる。MeV 領域のガンマ線はアルゴンと相互作用してコンプトン散乱を起こすが,飛跡再構成や到来方向 の特定など容易でないため,再構成のアルゴリズムも含め実機での検証を行っている。

GRAMS 実験の物理目標で早稲田大学が注力して取り組んでいるのが、宇宙反粒子探索に向けた検出器開発である。第一章でも述べたように宇宙反粒子探索は様々な気球・衛星実験で行われているが、その中でも宇宙反重陽子の発見には至っていない。



図 2.1 宇宙反粒子のフラックスと GRAMS 物理目標

図 2.1 に示すように陽電子や反陽子のフラックスは感度よく引けていることに対し,反重陽子は現在 BESS が上限値を引いているのみである。黒点で示されるフラックスが AMS-01 および AMS-02 で測定された陽 電子であり,青点で示されるのが AMS-02 および BESS で測定された反陽子である。一方,黒の点線は暗黒 物質の質量を 30GeV と仮定したうえで し チャンネルの最終状態を仮定したときに予測される反重陽子のフ ラックスである。また赤線は一次宇宙線と星間物質の相互作用により生じる二次起源の反重陽子のフラックス を示す。反重陽子の生成過程において,二次起源のフラックスは低エネルギー側 (<1GeV/c) では 10<sup>3</sup> 程度一 次起源のフラックスが上回ることから, バックグラウンドフリーな探索が行える。バックグラウンドフリーで あるため, この領域で反重陽子の信号が1事象でも見つかれば, 暗黒物質起因の重要な証拠となる。GRAMS 実験では BESS 実験よりも2桁程度良い感度を達成することで予測される一次起源の反重陽子フラックスに アプローチする。

## 2.2 GRAMS 検出器

GRAMS 検出器は二層の ToF プラスチックシンチレータと一つの液体アルゴン (LAr)TPC 検出器により 構成される (図 2.2)。サイズは 2m×3m×3mと 1.5m×1.5m×0.3mの大きさに並べた ToF プラスチック シンチレータの内側に, 1.5m×1.5m×0.3mの液体アルゴン (LAr)TPC 検出器が設置される。これにより, 入射してくる荷電粒子の速度とエネルギー損失が測定でき, 飛跡が再構成可能となる。検出器のコンセプトは 先行研究である GAPS 実験を踏襲した。1.2.3 でも述べたように GAPS 実験は半導体検出器で優れたエネル ギー分解能を持つが, 安価な液体アルゴンと比較して大容量化が難しい。

反粒子観測を実施した AMS 実験や BESS 実験と大きく異なるのは、マグネットを搭載せず、磁場による粒 子識別を行わない点である。磁場は強力な粒子識別能力を持つが観測できる入射荷電粒子の立体角に制限がか かる。GRAMS 検出器では四方を ToF で囲い LAr 中の反応を見るため、到来方向に関わらず粒子を検出でき る。GRAMS 実験は GAPS 実験に続く次世代の気球実験として有力である。



図 2.2 GRAMS 検出器概略図

#### 2.2.1 液体アルゴン

本検出器で最も重要な液体アルゴンの性質について述べる。表 2.1 にアルゴンの基礎特性をまとめた。

特性	值	
原子番号	18	
原子量	39.9	
沸点 (1 気圧)	$87.3~\mathrm{K}$	
融点 (1 気圧)	83.8 K	
密度 (液体)	$1.395 \ {\rm kg}/{cm^{-3}}$	
W 値 (電離-液体)	$23.6~{\rm eV}$	
W 値 (電離-気体)	$26.4~{\rm eV}$	
W 値 (蛍光)	$19.5~{\rm eV}$	
蛍光波長	128  nm	
放射長	14.0 cm	
dE/dX(MIP)	$2.12~{\rm MeV/cm}$	

表 2.1 アルゴンの基本性質一覧表 [10]

アルゴンを使用することの利点は,アルゴンは希ガスの一種であり最外殻が閉殻のため以下に説明する過程 で生じる電子を捕獲せず信号として取得可能であることや,暗黒物質直接探索でよく用いられる同じ希ガスの キセノン (Xe) と比較して安価で検出器の大型化や開発が行いやすい点などが挙げられる。

図 2.3 にアルゴンがエネルギーを受け取った際に起こる反応の模式図を示す。入射荷電粒子とアルゴンが反応すると電離や励起,発熱を起こす。電離過程は以下のような式で表される。

$$Ar + E_{recoil} \to Ar^+ + e^-$$
 (2.1)

生じた電離電子は電極で収集すれば電子信号として読み出せるが、一部の電子は電離の際に生じるアルゴン イオンと再結合を起こす。再結合の割合は以下の式で表すことができ、電場に依存することがわかる。ここ で、A = 0.8, k = 0.05は定数、Eは電場 (kV/cm)、dE/dxはエネルギー損失、 $\rho$ はアルゴンの密度を示す。 以下の数式より、液体アルゴン中での再結合の割合はおよそ 80 %となる。

$$R = \frac{Q_{rec}}{Q_0} = \frac{A}{1 + \frac{E}{k} \cdot \frac{dE}{dx} \cdot \frac{1}{\rho}}$$
(2.2)

エネルギーを受け取り励起された二量体アルゴンは脱励起する際に発光する。波長が 128nm の真空紫外光 であり光電子増倍管で取得することで光信号として読み出せる。励起したアルゴンが発光する過程を以下に 示す。

$$Ar + E_{recoil} \to Ar^*$$
 (2.3)

$$Ar^* + 2Ar \to Ar_2^*({}^1\Sigma_u^+ or^3\Sigma_u^+) + Ar \tag{2.4}$$

$$Ar_2^* \to 2Ar + h\nu(128nm) \tag{2.5}$$

アルゴンの励起状態には一重項励起状態と三重項励起状態が存在し、蛍光の時定数がそれぞれ 6ns と 1.5µs で異なる。



図 2.3 アルゴン (Ar) の電離と発光過程 [11]

### 2.2.2 液体アルゴン TPC 検出器

液体アルゴン TPC(Liquid Argon Time Projection Chamber) 検出器では,荷電粒子とアルゴンの相互作 用によって生じる電離電子とシンチレーション光をそれぞれ信号として取得することで,エネルギー損失の測 定や飛跡の再構成が可能である。検出原理の概略図を以下の図 2.4 に示す。



図 2.4 液体アルゴン検出器原理 概略図

シンチレーション光は検出器下部に示す PMT(または SiPM) 用いて読み出す。PMT の窓面に使われる石 英ガラスは, 128nm の波長で発光するシンチレーション光を通さないため波長変換材である TPB(1,1,4,4-Tetraphenyl-1,3-butadiene) を窓面および検出器内側に設置される反射材に真空蒸着することで可視光に変換 する必要がある。検出器は Anode, Grid, Cathode の 3 つの電極により構成されており,各電極に高電圧を 印加することで内部に電場を作る。電離電子は印加された電場に従い, Cathode から Anode 方向に向かいド

リフトする。ドリフト電子は Grid-Anode 間を通過するときに、電荷信号として電荷読出しシステムで取得さ れる。ドリフト電子の速度は内部に印加した電場に依存するが、数 100kV/cm の電場でおよそ 1mm/us であ る。以下の図 2.5 に ICARUS 実験で測定された電場とドリフト速度の関係を示す。また、図 2.6 は液体アル ゴンの純度と電子の寿命の関係を示し、電子数をQ、電子の寿命を $\tau[\mu s]$ 、純度を $\sigma$ とすると以下の式となる。

$$Q = Q_0 \times exp(-t/\tau) \tag{2.6}$$

$$\tau = \frac{300}{\sigma[ppb]} \tag{2.7}$$

つまり, 電子が 300µs かけて液体アルゴン中をドリフトすると, 純度が 1ppb の場合電子の数は 1/e に減 衰してしまう。そのため電子の減衰を抑えてデータ取得を行うには液体アルゴンの純度が重要なパラメータと なる。

液体アルゴン中での不純物は窒素,酸素,水が挙げられる。窒素は主に光を吸収,水や酸素は電子を吸収す る。そのため商業用のアルゴンタンクから実験容器に充填するさいには、フィルターを通して純化させること で高純度を達成する。

PMT で取得される光信号と Anode 電極に到達し取得される電離電子信号には時間差ができることからド リフト方向の位置を決定することができる。Anode 電極には X,Y 方向を細かく区切り 2 次元の構造を持たせ ることで、3次元での飛跡再構成が可能となる。Anode 電極の構造を細かくするほど精細な飛跡が引けるが、 ひとつのチャンネルに入る電子数も減少するので Anode 電極のピッチサイズは読み出しエレクトロニクスの 性能も含めて検討する必要がある。



ドリフト速度

図 2.6 液体アルゴン中の純度に対する電子寿命

# 2.3 粒子識別方法

GRAMS 実験で観測する宇宙線には信号事象としている反重陽子だけでなく, 陽子, 重陽子, 反陽子など異 なる粒子が含まれるため、これら背景事象との識別が重要である。粒子の質量と電荷の二点に着目した粒子識 別の手法について述べる。

#### 2.3.1 質量識別

(反) 陽子および (反) 重陽子は核子数の異なる粒子であるため質量が異なる。これらの識別は, ToF プラス チックシンチレータおよび液体アルゴン TPC の dE/dx と飛跡長を組み合わせて行う。液体アルゴン中で落 とす入射粒子のエネルギーはベーテブロッホの式により表され,電荷 z と速度  $\beta$  に依存することがわかる。 エネルギーは  $E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\beta^2}}$ の関係から,同じ速度のとき質量が大きいほうがエネルギーは高いため液体アルゴ ン中で停止するまでに距離を要する。そのため,飛跡長による粒子識別が可能となる。以下の図 2.7 は液体ア ルゴン中に Rigidity=150MeV/n ( $\beta$ =0.5) で (反) 陽子および (反) 重陽子を入射させたときの停止位置までの 距離と dE/dx の関係を Geant4 によりシミュレーションした結果である [13]。Rigidity は核子数当たりの運 動エネルギーのため,同じ Rigidity の陽子と重陽子は運動量が 2 倍異なる。



図 2.7 反粒子の LAr 中の距離と dE/dx

#### 2.3.2 電荷識別

(重) 陽子と反 (重) 陽子は電荷の符号が異なる粒子である。先述した通り従来の宇宙線観測で用いられてい る検出器はマグネットを搭載しており磁場により電荷を識別していた。GRAMS 実験では GAPS 実験の手法 を踏襲して,アルゴン原子による原子核捕獲事象を応用する。反陽子などの負電荷粒子はアルゴン中でエネル ギーを落とすと,アルゴン原子の最外殻に捕獲されエキゾチック原子を形成する。捕獲された負電荷粒子は特 性 X 線を放出しながら脱励起していく。最終的にはエネルギー準位を落とし原子核と対消滅を起こすことで 多数のハドロンを放出する。つまり,負電荷粒子の原子核捕獲事象は反応の過程で生じる特性 X 線やハドロ ンを検出することにより確認できる。また,放出されるハドロン (主に π 中間子) は反陽子と反重陽子でその 生成量がわずかに異なる (図 2.8)[13]。



図 2.8 原子核捕獲事象 概念図



図 2.9 原子核捕獲事象による π 中間子の生成量

液体アルゴン TPC では放出されるハドロンの飛跡も再構成できることから, TPC 内で停止した粒子の電荷を識別することが可能であると考えられる。しかしながら, アルゴン中での一連の反応は実機での検証はされていないため, 試験を行う必要がある。

液体アルゴン中での反粒子が起こす事象は上記の捕獲事象に加えて,非弾性散乱をしたり,検出器を通過す る事象も存在する。入射運動量が高い粒子ではエネルギーを落として停止するまでに長い距離を要するため, 検出器のサイズによっては通過事象が支配的となる。一方で入射運動量の低い粒子は非弾性散乱と捕獲事象が 優位となる。非弾性散乱と通過事象は反粒子だけではなく正電荷の粒子でも同様の事象が起こるため粒子反粒 子識別ができず,背景事象として扱われる。反粒子の検出効率は捕獲事象の割合に依存する。

入射する反粒子が必ず捕獲されるわけではないため,低エネルギー側での宇宙反重陽子探索に必要な感度を 達成するためには,高い粒子識別能力が要求される。

### 2.4 GRAMS40 検出器

早稲田大学では GRAMS 検出器における粒子反粒子識別の原理検証の第一段階として, 30 × 30 × 30cm<sup>3</sup> サイズの液体アルゴン TPC 検出器を製作して,動作検証を行った [14]。以下に現在早稲田大学で運用中の GRAMS40 検出器と動作検証として実施した宇宙線ミューオン観測試験の概要についてまとめる。 GRAMS40 検出器は体積が 30 × 30 × 30 cm<sup>3</sup> で標的質量がおよそ 40kg である。図 2.10 が実際に製作した検出器の写真である。検出器は電場を作り電子信号を読み出すための Cathode 電極, Grid 電極, Anode 電極と電場を一様に形成するための分割抵抗 100MΩ を取り付けた side plate で構成される。また内側には光信号を PMT で取得するために波長変換材を蒸着した反射材を張り付けている。

Anode 電極は 30cm × 30cm を X,Y 方向それぞれ 5mm ピッチで区切り, ジグザグの配線を施す (千鳥読み出し) ことで二次元の構造を持たせ, 飛跡の再構成が可能になっている。この読み出し方法では 10mm ピッチ分の信号を 1ch で読み出すことになるため X,Y それぞれ 30ch の計 60ch の電子読み出しとなる。



図 2.10 GRAMS40 検出器



宇宙線ミューオンは 10*cm*<sup>2</sup> の面積に 1Hz 程度で地球表面に到来しており、 $\mu^+$  と $\mu^-$  が存在する。液体ア ルゴン TPC に入射してきたミューオンは通過事象、捕獲事象、崩壊事象を起こす。崩壊事象は $\mu^+$  と $\mu^-$  の いずれの粒子も起こし、ニュートリノとミッシェルエレクトロンに以下のような反応過程で崩壊する。

$$\mu^- \to \nu_\mu + \overline{\nu_e} + Michele^- \tag{2.8}$$

$$\mu^+ \to \overline{\nu_{\mu}} + \nu_e + Michele^+ \tag{2.9}$$

捕獲事象は μ<sup>-</sup> のみ起こし、以下のような反応過程で示される。

$$\mu^- + p \to n + \nu_\mu \tag{2.10}$$

崩壊事象と捕獲事象は粒子の停止後にミッシェルエレクトロンを放出するか否かで識別が可能であり、この ミッシェルエレクトンの飛跡を再構成し観測することは GRAMS 検出器の原子核捕獲事象後の放出ハドロン の飛跡を観測することと同義であるため原理検証に有用である。

電子信号の読み出しにはアンプとして後述する LTARS2014 を搭載したアナログボードおよび ADC, FPGA を搭載したデジタルボードを使用し,光信号は PMT で読み出して FADC にてデジタイズした。観 測されたミューオンの崩壊事象と捕獲事象の実データ (PMT 光信号,電子信号による再構成図)を以下の図 2.12 に示す。入射したミューオンの飛跡および崩壊後のミッシェルエレクトンの飛跡をよく再構成しており, 本検出器の動作検証および宇宙線ミューオンの粒子識別が実証された。



図 2.12 GRAMS40 検出器による µ 粒子停止事象の二次元飛跡再構成

GRAMS 実験では,反重陽子1事象に対して背景事象となる反陽子が10<sup>4</sup>事象,陽子が10<sup>9</sup>事象想定される。GRAMS 検出器の原理における開発課題としては,アルゴン原子核が反粒子を捕獲する原子核捕獲事象を実機で検証することと,それによる反陽子などの背景事象を除去できるかという観点で行われる。これを実証するためには,反粒子ビームを液体アルゴンTPC に照射してデータ取得を行う必要がある。

# 3 J-PARC T98 実験

GRAMS 検出器の原理検証を行うために, J-PARC にて T98 実験として反粒子ビームを用いた試験を実施 している。本章では J-PARC および T98 実験の概要についてまとめる。

### 3.1 J-PARC 概要

J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex) は茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設で ある。J-PARC の加速器群は 400MeV 直線形加速器 (LINAC), 3GeV シンクロトロン (RCS), 30GeV シン クロトロン (Main Ring,MR) で構成されている (図 3.1)。

LINAC にて水素ガスから作り出される陽子 1 個と電子 2 個の負水素イオンを電場を用いて 400MeV まで加 速させる。LINAC から RCS に入射させるときに加速された負水素イオンが炭素膜を通過することで電子と 陽子が分離し陽子のみのビームとなる。電磁石により曲げられ加速空洞で 3GeV まで加速した陽子は MR に 入射する。MR では陽子はバンチ構造を持って加速されており 30GeV まで加速されたのち各実験施設へと送 られる。

J-PARC 内には物質・生命実験施設 (MLF),ニュートリノ実験施設,ハドロン実験施設が存在する。MLF は RCS で 3GeV まで加速された陽子を受け取る。MR からのビームは取り出し速度に応じて Fast extracted mode(FX) と Slow extracted mode(SX) の二種類のモードのビームを提供する。2.48 秒周期で一気に陽子を 取り出す FX は主にニュートリノ実験施設で用いられ,5.2 秒周期で 2 秒程度かけて陽子を取り出す SX はハ ドロン実験施設に送られる。



図 3.1 J-PARC 加速器群

#### 3.1.1 ハドロン実験施設

J-PARC のハドロン実験施設内には 3 つのビームライン (A ライン, B ライン, C ライン) が建設されてい る (図 3.2)。A ラインは一次陽子ビームを固定標的に衝突させて生成される K 中間子や反陽子を二次ビーム として取り出し, K1.8BR, K1.8, KL の 3 つのビームラインに供給する。A ラインの奥には大強度の陽子 ビームを吸収するための銅でできたビームダンプが設置されている。B ラインは高運動量の一次陽子ビームを 利用しており, C ラインでは COMET 実験のためのミューオンビームを生成する。



図 3.2 ハドロン実験施設

#### 3.1.2 K1.8BR ビームライン

図 3.3 に K1.8BR ビームラインの概略図を示す [15]。K1.8BR ビームラインでは T1 固定標的に金 (Au) を 設置し、一次陽子ビームの衝突により生成される K 中間子や π 中間子、反陽子をビームライン上の電磁石に より制御することで実験施設に送り込み実験を行う。D1 D5、Q1 Q8、S1 S3、O1 はビームの広がりを抑えて 輸送するために必要な電磁石である。D1 に流す電流によって二次粒子の電荷と運動量を決定している。ビー ムライン真ん中付近にある Correction Magnet(CM1, CM2) と Electric Separator(ES1) は電流値を変化さ せ磁場および電場を調整することで二次粒子の質量を選別している。IF slit, MS1, MOM のスリットはビー ムの位置や運動量による広がった粒子を制限するために調整される。また、ビームレートの調整のために絞 られる。CM や ES, Slit は実験中任意に調整可能であり、実際にデータを取得するときは欲しいビームに合 わせてこれらの設定を最適化する。ビームラインは固定標的 (T1) から最終的なビームの焦点 (FF) まで全長 31.3m あり、下流側に検出器等を設置するスペースが存在する。

K1.8BR ビームラインではこれまでの運用から K 中間子および反陽子が 10<sup>5</sup>Hz 程度のレートが来ることが 知られているが,反重陽子に関するレートは未検証である。供給できる二次粒子の最高運動量は 1.1GeV/c であり、これは GRAMS 実験が目標としている反粒子探索の観測領域に一致する運動量となっているため、 GRAMS 検出器の原理検証をここで行うことは最適であると考えられる。



図 3.3 K1.8 ビームライン構造図

表 3.1 GRAMS 実験ターゲット

粒子種	リジディティ (MeV/n)	運動量 (MeV/c)
反陽子	$100 \sim 300$	$450 \sim 800$
反重陽子	$100 \sim 300$	$900 \sim 1600$

## 3.2 T98 実験

GRAMS 検出器の粒子反粒子識別原理の検証のために,J-PARC ハドロン実験施設 K1.8BR ビームラインで T98 実験が実施されている。T98 実験は Phase-1 と Phase-2 の二段階に分かれている。Phase-1 では K1.8BR ビームラインの反重陽子と反陽子のレートの検証を主に ToF プラスチックシンチレータを使用して行い,Phase-2 で実際に液体アルゴン TPC をビームライン上に設置し反粒子との反応を測定する。T98 実験は 2022 年 12 月に最初のプロポーザルが提出され 2023 年 6 月に Phase-1 を実施, 2024 年度に Phase-2 の実施を予定している。各 Phase におけるセットアップ,ビームについて以下の章で述べていく。

#### 3.2.1 Phase-1 概要

T98 実験 Phase-1 では図 3.4 に示すようなセットアップで反粒子ビームの測定を行った。青枠で示すカウン ターはプラスチックシンチレータ,緑枠はビームラインチェンバー,黄枠はエアロジェルチェレンコフカウン ター (AC)である。エアロジェルチェレンコフカウンターでは速度の違いから π 中間子を識別する。BLC1,2 により粒子ごとに運動量が測定可能である。最下流に設置した T98 レンジカウンターは縦 12cm ×横 40cm ×厚さ 4cm のプラスチックシンチレータを 8 層並べた構成になっている。π 中間子や陽子は 8 層すべて突き 抜けるが、(反)重陽子は途中の層でエネルギーを落として停止するため観測が行える。

データ取得のためのトリガーは二種類組まれており、ひとつは T0 と T1 のどちらにもヒットがあることで 同期をとるビームトリガー、もうひとつは BHT と T1 の ToF による ToF トリガーである。ToF トリガーで は二つのシンチレータ間を通過する時間差で決められ、 $\pi$ 中間子の ToF を 0ns とすると、陽子は 10ns 程度、 重陽子は 30ns 程度となり粒子を仕分けることができる。



図 3.4 ビームライン検出器構成 概略図

Phase-1 の実験スケジュールとそのときの各値を以下の表 3.2, 3.3 にまとめる。二年ぶりの稼働であることから、ビームラインの電磁石の調整により  $K^-$  中間子が再現できているかどうかを確認した後、電磁石 (D) の極性を反転させることで正負ビームを切り替えた。正電荷のビームとして  $K^+$  中間子、陽子、重陽子を取得。極性を負に戻し反陽子の取得およびレート検証と反重陽子データ取得のチャレンジをした。各フェーズで静電セパレータの前後にある CM の電流値を徐々に変化させながら収量が最大になる値を決定して運用する。ただし、反重陽子に関しては確立されていないビームであるため  $K^-$  中間子と反陽子で決めた CM 値から算出し決定した。ビームタイムは合計で4時間ありそのうち2時間分で反重陽子用にトリガーを生成してイベント取得ができた。反重陽子用にビームラインを調整したときのビームトリガーにかかったイベントは1.5M/spill であるが、ほとんどは  $\pi$  中間子であると考えられる。ToF トリガー (Deuteron trigger) を加えてイベント数を見ると 8k/spill となり、およそ 10<sup>7</sup> イベントが反重陽子の候補となった。

表 3.2	T98	Phase-1	menu
-------	-----	---------	------

日付	ビームの状態	ビーム強度	目的
6/19	one shot	30kW	検出器校正, DAQ/トリガー確認
6/20	unstable	$49.8 \mathrm{kW}$	$K^-$ ビームの再現
6/21	stable	$49.8 \mathrm{kW}$	データ取得 (~4h)

	衣 3.3 198 Phase-1 data		
粒子種	ES 電場 [kV/cm]	CM 電流値 [A]	データ数
K⁻中間子	40	322	240k
陽子 $(p)$	40	398	720k
陽子 $(p)$	20	196	67k
重陽子 (d)	20	306	1.1M
反陽子 $(\bar{p})$	20	207	1.3M
反陽子 $(\overline{p})$	20	207	1.5M
反重陽子 $(\overline{d})$	20	316	11M

表 3.3 T98 Phase-1 data

反陽子のレートおよび S/N 検証のためにスリット幅を調整して行ったときのビームトリガーと ToF トリ ガーにかかったイベント数の遷移を図 3.5 に示す。液体アルゴン TPC では電子信号のドリフトが遅いために 一度に多くの粒子が入射するとパイルアップして読出しが困難になる。Phase-2 ではそれを防ぐためにビーム レートは取得したいイベント数とビームタイムを考慮し最適化する必要がある。レートを落とすためにはビー ムライン上のスリットの幅狭くすればよく,各スリットの幅を以下の表 3.4 に示す。ToF トリガーにかかる粒 子のほとんどは反陽子であると考えられるが,ビームトリガーにいかかる粒子は反陽子に加え π 中間子が多 くを占める。スリットの幅を狭くと、もともと 10<sup>5</sup>/spill 程度で供給されるビームが 10<sup>4</sup>/spill~10<sup>3</sup>/spill まで 落とせると同時に、ビーム中の全粒子の内、反陽子が占める割合 (S/N) が向上していることがわかる。パイ ルアップを防いで S/N 良く液体アルゴン TPC でデータ取得が可能である。

No.	IF-Y[mm,mm]	IF-X[mm,mm]	MS1[mm,mm]
1	[1.81, -2.18]	[-109.9, 109.8]	[2.35, -2.36]
2	[0.82, -1.18]	[-109.9, 109.8]	[1.17, -1.18]
3	[0.31, -0.69]	[-109.9, 109.8]	[0.59, -0/60]
4	[0.06, -0.46]	[-109.9, 109.8]	[0.50, -0.53]
5	[0.06, -0.46]	[-40.0,  40.5]	[0.50, -0.53]

表 3.4 Slit Configuration



図 3.5 Phase-1 反陽子レート測定

T98 実験 Phase-1 の結果に関して,解析の詳細をここでは述べないが得られた反重陽子の候補として ToF トリガーにかかったイベントの内, ToF やエネルギー損失でカットをかけると反重陽子 like なイベントが 1 つ見つかった。結論としては,これが真の反重陽子イベントだとしても 0.9 × 10<sup>-3</sup>/spill に相当するレート で,K1.8BR ビームラインでは反重陽子が供給されていることとなる。

### 3.2.2 Phase-2 に向けて

T98 実験 Phase-2 では,実際に K1.8BR ビームラインに液体アルゴン TPC 検出器を持ち込み,反粒子 ビームを照射し原子核捕獲事象の観測を行う。検出器セットアップとしては以下の図 3.6 に示すようにビーム ラインの最下流に粒子の ToF を測定するための二本のシンチレータとともに設置することを想定している。 Phase-2 で使用する液体アルゴン TPC は 2.4 章で述べた GRAMS40 検出器を用いる。



図 3.6 T98 実験 Phase-2 を想定したセットアップ概略図

ビームを要求するために考えるべきことは, GRAMS 実験が目標とする反粒子のリジディティに一致する 運動量を持つ粒子であること, バックグラウンドフリーな探索が可能であることを実証するための十分な統計 量 (> 10<sup>5</sup> イベント), 液体アルゴン TPC 検出器で取得可能なレートであることが挙げられる。

ビームレートに関しては、さらに二つポイントがある。ひとつは液体アルゴン中の電子のドリフト速度が遅

いことにより引き起こされるパイルアップである。30cm をドリフトするのにおよそ 300µs かかるため,ビー ムレートは 10kHz(=100µs) 程度以下に抑えなければならない。もうひとつは,DAQ の問題で,GRAMS40 検出器で使用される ASIC(LATRS) の処理能力が 100Hz 程度である。そのため ToF トリガーを使用して 100Hz 程度までレートを落とさなければならない。Phase-1 で反重陽子の測定を行った際のレートは 2 時間 のデータ取得でビームレートが 1.5M/spill,トリガーレートが 8k/spill のため phase-2 では 100 分の 1 程度 にスケールする必要がある。今回結果として得られた反重陽子レート (0.9×10<sup>-3</sup>/spill) でビームレートを落 として 1 イベント捉えるためにはおよそ 200 時間を要するため現実的ではない。したがって,Phase-2 では反 陽子ビームのみによる試験に注力することで提案を行った [16]。以下にプロポーザルとして提出した要求する ビームの粒子種と時間をまとめる。

粒子種	運動量 (MeV/c)	取得時間 (h)
陽子	1.0	2
重陽子	1.0	2
陽子	0.65,  0.7,  0.75	6
反陽子	-1.0	2
反陽子	-0.65, -0.7, -0.75	12
Total		24

表 3.5 T98 Phase-2 proposal

Phase-2 で GRAMS40 検出器を運用するにあたり,検出器のアップグレードを計画している。Phase-2 で 反陽子の原子核捕獲事象を観測するためには,反陽子が原子核と対消滅して生成される π 中間子などのハド ロンの飛跡を数をカウントするためにも,より精細に再構成する必要がある。以下に 600MeV/c の反陽子を 液体アルゴン TPC に入射し,LTARS の応答を加味してピッチサイズを変更して再構成を行ったシミュレー ション [13] を図 3.7~図 3.9 に示す。いずれも左から入射する反陽子と生成されたハドロンの飛跡が確認でき る。ピッチを細分化するほど飛跡がひとつずつ区別されるため細かいほうが良い一方で,一つのチャンネルで 得られる信号量が減少してしまうことからノイズに埋もれる可能性がある。これらの条件から GRAMS40 検 出器のアップグレードプランとして Anode ピッチを 10mm から 5mm に変更する。







図 3.7 10mm pitch での反陽 子入射事象のシミュレーション

図 3.8 5mm pitch での反陽子 入射事象のシミュレーション

図 3.9 3mm pitch での反陽子 入射事象のシミュレーション

Anode ピッチの変更に伴い,信号読み出しのためのエレクトロニクスを改良する。Phase-2 で要求される 読み出しエレクトロニクスの性能に関して以下の表にまとめる。重要なことは,読み出すチャンネル数が従来 の 2 倍に増えるため 120ch 分の信号取得が可能なエレクトロニクスを用意する必要があることと,ノイズを 抑えて良い S/N で電荷信号の増幅が可能なアンプを搭載したものにしなければならない点にある。

ノイズレベルについて具体的にどの程度要求されるかを最小電離損失 (MIP) により 1ch あたり得られる 信号量から考える。MIP が液体アルゴン中に入射すると 2.12MeV/cm のエネルギーを落とす。落とした エネルギーによりアルゴンは電離と励起をする。励起される  $Ar(N_{exc})$  と電離される  $Ar(N_{ion})$  の割合は,  $N_{exc}/N_{ion}=0.21$  であることが知られている。つまりおよそ 80 %が電離に影響する。よって, MIP の通過に より生じる 1cm あたりの電子の数 Q は電離の W 値から,

$$Q = \frac{dE/dx[MeV/cm]}{W\ \mbox{in}\ [eV/e^-]} \times N_{ion}$$
  
=  $\frac{2.12 \times 10^6}{23.6} \times 0.8$   
 $\approx 72,000e^{-}/cm$  (3.1)

となることがわかる。ただし,発生する電離電子は複数の要因により減少して Anode パッドまで届く。2 章でも述べたように電離した電離が Ar と再結合を起こしたり,純度と電場の大きさにより不純物に吸収され てしまう。宇宙線 µ 粒子観測試験を行ったときの GRAMS40 検出器では,電場 400kV/cm で純度が 0.5ppb 程度であったことを考慮すると,再結合の割合および純度による減衰の割合はそれぞれ 0.68, 0.7 である。最 終的に Anode パッドに到達する電子数 Q' は

$$Q' = Q \times ($$
再結合の割合 $) \times ($ 純度による減衰 $)$   
= 72,000 $e^{-}/cm \times 0.68 \times 0.7$  (3.2)  
 $\approx 35,000e^{-}/cm$ 

程度であると考えられる。つまり, 5mm ピッチでの信号読み出しではこの半分の 17,500e<sup>--</sup> の電子信号を 読むこととなり良い S/N(≈10) で読むためにはアンプのノイズレベルが 2000e<sup>--</sup> 以下であることが望まれる。

表 3.6 Phase-2 に向けた信号読み出しエレクトロニクスへの要求

項目	数值
読出しチャンネル数	120ch (X:60ch, Y:60ch)
ゲイン	$\sim 10 \mathrm{mV/fC}$
ダイナミックレンジ	$O(1)fC \sim O(10)fC$
$\operatorname{ENC}$	$\leq 2000e^{-}$

# 3.3 本研究の目的

GRAMS 検出器の重要な原理である液体アルゴンによる反粒子の原子核捕獲事象を実証する T98 実験 Phase-2 にて使用予定の GRAMS40 検出器では現状からアップグレードする必要がある。特に信号の読み出 しに関しては多チャンネルの信号を低ノイズで読み出す必要がある。そのため本研究では電子信号読み出し基 板の設計・開発に取り組んだ。以降の章で開発の経緯と性能評価の詳細について述べていく。

# 4 電子読み出し基板の開発

# 4.1 LTARS

T98 実験 Phase-2 での使用を想定した読み出し基板に搭載する ASIC には LTARS(Low Temperature Analog Readout System)chip を採用する。LTARS は KEK ニュートリノグループを中心に大型液体アルゴン TPC 用に多チャンネル,低ノイズ,高ゲイン,低コスト,低温耐性をベースに開発がされている。性能の向上や ASIC の多目的化により現在まで改良が続けられている。本章では開発されてきた LTARS の背景と性能についてまとめたうえで,新たな基板の開発について述べる。

### 4.1.1 LTARS2014

LTARS2014 は大型液体アルゴン TPC 用に KEK と岩手大により開発された [17]。回路の構成図と仕様を 以下の表にまとめる。コンバージョンゲインはアンプから出力される電圧信号の波高値を入力した電荷信号の 大きさで割った値 (mV/fC) である。ENC(Equivalent Noise Charge) は等価雑音電荷比のことで、ノイズレ ベルが電子数換算してどれほどに相当するかを示す指標である。波形のペデスタルの RMS をコンバージョン ゲインと電子の電荷で割ることで算出される。

コンバージョンゲイン, ENC ともに検出器容量に依存することが知られており, 用いる検出器の規模と見た い信号量に合わせる必要がある。表 4.1 中のコンバージョンゲインは検出器容量が 0pF, ENC は 300pF を想 定したときの実測値である。

$$ConversionGain = \frac{OutputVoltage[mV]}{InputCharge[fC]}$$
(4.1)

$$ENC = \frac{\sigma_{pedestal}[mV]}{ConvesionGain[mV/fC] \times 1.6 \times 10^{-4}[fC/e^{-}]}$$
(4.2)



図 4.1 LTARS2014 1ch 回路構成概略図

X 4.1 DIAID201	王 至平 江 称 見
項目	数值
ダイナミックレンジ	90fC
コンバージョンゲイン	$9.7 \mathrm{mV/fC}$
ENC	< 14,000 electron
ピーキングタイム	$3\mathrm{us}$
チャンネル数	32 ch
電源電圧	$\pm 0.9 V$
チップサイズ	$5\mathrm{mm} \times 5\mathrm{mm}$

表 4.1 LTARS2014 基本仕様一覧

LTARS2014 は 2 章で述べた GRAMS40 検出器の宇宙線ミューオン観測試験に使われた ASIC である。実際にゲインやダイナミックレンジは十分確保されつつ, ENC が 4000e<sup>-</sup> 程度で運用された。GRAMS40 検出器の検出器容量が 100pF であることを踏まえるとこれは設計値に一致する値であるが, チャンネル当たりの 信号量が減少することを考えるとより ENC が抑えられる ASIC の使用が望まれる。

#### 4.1.2 LTARS2018\_K06A

LTARS2014 は LTARS2016 を経て, LTARS2018\_K06A と LTARS2018\_K06B として改良された。 LTASR2014から大きく変わった点としては, アルゴンだけでなく陰イオンガス TPC 検出器での使用を想定 したことにある。アルゴン中では入射する荷電粒子が落としたエネルギーに比例して電子が生成されるが, 陰 イオンガス TPC では反跳電子により電離する電子が電気陰性度の高い分子陰イオンガスに捕獲されることで 陰イオンをつくる。ドリフト中の拡散が小さいために位置と角度の分解能の良さが期待されるが液体アルゴン 中の電子のドリフト速度 (~1mm/us) に比べて~0.01mm/us 程度と遅く, また, ガスとして SF<sub>6</sub>を用いると メインチャージとマイノリティチャージの二種類の大きさが 30 倍程度異なる信号が得られる特徴がある [18]。 多チャンネル, 低ノイズ, 高ゲインを実現する LTARS をこのような検出器で使用するためには幅の広い信号 を読むためにもさらにシェーピングタイムを伸ばす必要があることと, 一つの固定されたゲインではなく入力 される信号の大きさに対応できるようなゲインの切り替えが必要である。

LTARS2016 は LTARS2014 をベースにゲインの部分に改良を加えた MT 回路と TK 回路の二種類の回路 を搭載した形で開発された [18]。以下にそれぞれの回路構成の概略図 (図 4.2, 図 4.3) を示す。

MT 回路は一つの入力信号に対して内部で二つのアンプ (Low Gain, High Gain) を通して二つの信号を出 力する。TK 回路では一つの入力信号に対してコンパレータを通してある閾値を基準に自動でゲインの切り替 えを行い,一つの出力信号にする。このような二つの回路を持ち合わせる LTARS2016 から,MT 回路のみを 搭載して改良されたのが LTARS2018\_k06A である。LTARS2018\_k06A の基礎性能について以下の表 4.2 に まとめた。



図 4.3 TK 回路構成図

表 4.2 LTARS2018_k06A 基本仕様一覧				
項目	数値			
ダイナミックレンジ	120fC			
コンバージョンゲイン (HG)	$10 \mathrm{mV/fC}$			
コンバージョンゲイン (LG)	$0.5 \mathrm{mV/fC}$			
$\operatorname{ENC}$	<4,000electron			
ピーキングタイム	fast:3us(slow:7us)			
チャンネル数	$16 \mathrm{ch}$			
電源電圧	$\pm 0.9 V$			
チップサイズ	$2.5\mathrm{mm} \times 5\mathrm{mm}$			

LTARS2014 と比較すると、ゲインの種類が増え出力信号が二倍になってしまうことから 1chip で処理可 能なチャンネル数が 16ch と減少しているが、遅い信号に対応可能なようにピーキングタイムも内部で調整で きるようになっている。最も注目すべきはノイズ耐性であり、検出器容量 300pF を想定した場合の ENC は LTARS2014 に比べて 1/3 以下に抑えられていることがわかる。ノイズレベルが大きく改善されたこの ASIC を用いれば T98 実験 Phase-2 においてもよい結果が得られると考えられる。したがって、新規に開発する電 子読み出し基板にはこの LTARS2018\_K06A を搭載することとした。

# 4.2 TIGArBoard

## 4.2.1 開発のコンセプト

LTARS2018\_K06A を搭載した TIGAr(TPC electronics for Ionized signal in Gas and liquid Argon)Board を設計・開発した。この基板は T98 実験 Phase-2 を行う早稲田大学のみならず, Open-it プロジェクトとし て KEK と神戸大学との共同開発のため, 異なる目的・手法を持つ複数の実験グループで使える汎用性を担保 したうえでの開発となる。はじめにプロトタイプ版を製作してから基礎性能を確認し,必要枚数分の量産体制 に入る。

ASIC の性能については上記で述べたとおりだが,問題となるのが低温耐性である。通常,液体アルゴン TPC で使用される ASIC は,極低温な液体アルゴン温度 (-186 ℃) で動作しなければならない。これはケーブル

にのる浮遊容量からくるノイズであったり、外部から侵入する電磁波によるノイズを防ぐために Anode パッドにより近い位置で運用するためである。LTARS は開発当初から低温耐性を持つものとして設計されたが、 LTARS2018のバージョンでは低温環境下でトランジスタの閾値電圧が上昇することでバイアス電流が十分供給されず、出力波形が崩れることが報告されている。そのため、この ASIC を液体アルゴンのある容器内に入れて TPC のすぐそばで運用することはできないので使用方法について考える必要がある。

本プロジェクトは 2022 年度に立ち上げられたが,開発にあたり TIGArBoard の構成決定から回路の設計や チップの実装,試作品のテストまで時間がかかる。2024 年度夏までにすべての工程を終え動作保証のある基 板とするには短期間での開発といえる。

以上の二点から,すでに動作保証のある LTARS2018\_K06A が搭載されたアナログボードと LTARS 信号を デジタイズし処理するデジタルボードをベースに,これらの基板の統合型として設計することとした。以下に 参考にした二つの基板 (REBOLT(図 4.4), DELTA(図 4.5))の写真を示す。REBOLT では LTARS チップを 二枚搭載し一枚の基板で 32ch 入力信号の処理が可能であり,信号増幅・波形整形を経て出力される 64ch 分の 信号は差動バッファに入力され,フラットケーブを介してデジタルボードへ伝送される。DELTA は LTARS チップ搭載のアナログボードから信号を受け取り ADC でデジタイズした信号を FPGA を通してデータ取得 用の PC に送信するシステムを持つデジタルボードである。



図 4.4 REBOLT 写真



図 4.5 DELTA 写真

#### 4.2.2 基板の構成

プロトタイプ版として完成された TIGArBoard の写真 (図 4.6) とスペックの一覧表 (表 4.3) を以下に示 す。基板の設計にあたり全体のレイアウトから考えた。すでに動作実績のある基板をベースにしているため本 基板の製作においては,実験時にいかに使用し易いかを考慮しサイズの決定やコネクタの選定を行った。多 チャンネル読み出しが要求される検出器で使用することを想定しているため,複数枚の基板が同時に起用され る。そのためできるだけ基板サイズは小さくする方が良い。ADC が横に並ぶようなサイズとして REBOLT の 136mm の横幅を踏襲した。また,容器のフィードスルーに直接挿したときにフィードスルーのボルト等に 干渉することを避けるため検出器側コネクタのある方の角を 20mm × 20mm 分削った。長さ方向に制限は設 けていないが,配線が煩雑にならないためにも片側に I/O コネクタを揃える。



図 4.6 TIGArBoard 写真

項目	型番/数値
サイズ	幅:136mm × 長さ:215mm
ASIC	LTARS2018_K06A
ADC	AD9637BCPZ-40
FPGA	Xillinx Artix-7 XC7A200T-2FFG1156C
電源	+5.0V (単電源)
チャンネル数	$32 \mathrm{ch/board}$
サンプリングレート	$2.5 \mathrm{MHz}$
分解能	0-2V, 12bit
DAQ	$\sim 100 \mathrm{Hz}$

表 4.3 TIGArBoard 基本仕様一覧

TIGArBoard の回路の概略図を示す (図 4.7)。回路設計は Cadence の CAD ソフトである OrCAD を使用 した。以下に検出器信号の入力部分から出力までの回路および電源,その他コネクタ周りについて説明してい く。



図 4.7 TIGArBoard 基板回路構成 概略図

・入力部

検出器からの信号は容器のフィードスルーを介して容器外の本基板に HIROSE FX2-68S-1.27DS のコネク タにより接続される (図 4.8)。図 4.9 に入力コネクタの直後に実装した 1ch 分の静電気放電 (ESD, Electro Static Discharge) 対策用の回路を示す。外部から信号が送られる際に ESD が起こると多くの電流が IC に流 れてしまい,故障の原因となる。そのような事故を防ぐためにダイオードを入れることで,ESD で発生する 高電圧のパルスをグラウンドに流して IC チップを保護する。



図 4.8 68pin 入力コネクタの回路図

#### · LTARS2018\_K06A

LTARS チップとその周辺の回路図を以下の図 4.10 に示す。LTARS2018\_k06A チップは QFP144 にパッ ケージされたものがすでに量産されており,今回の短期開発にあたり導入のしやすさも利点の一つとして挙げ られる。検出器からの 16ch 分の入力に対して波形の増幅整形を行い,各チャンネルごとに HG/LG の二種類 の計 32ch の出力を行うチップが二枚搭載されている。また,直接 LTARS にテストパルスを入れるための信 号線 (TP\_IN) と LTARS 自身のパラメータを変更するために必要な信号線 (SDI, STRI, CLKI) が FPGA か ら接続されている。



図 4.10 LTARS2018\_k06A および周辺回路図

・アナログ信号用ピン

LTARS から出力されるアナログ信号の波形を直接確認できるように,直後に 64ch 分のピンを実装した (図 4.11)。これによりプローブを当てるだけで容易にオシロスコープで信号波形の様子を確認できる (図 4.12)。

・差動バッファ

差動バッファとして ADA4940-2ACPZ を 32 個搭載した。LTARS の出力信号を差動信号へと変換して ADC に伝送する役割を果たす (図 4.13)。

差動信号は基準電圧を設けることで,入力された信号の電圧と同じ大きさで極性が反転した信号を作り,この 二つの信号 (差動信号, P/N) を伝送する方式である。差動信号では伝送中に外部からのノイズの影響を受け

(PIN)	S2	Q	1	LTARS_HG_OUT0
(PIN)	S4	Q	1	LTARS_HG_OUT1
(PIN)	<b>S</b> 6	Q	1	LTARS_HG_OUT2
(PIN)	S10	Q	1	LTARS_HG_OUT3
(PIN)	S14	Q	1	LTARS_HG_OUT4
(PIN)	S18	Q	1	LTARS_HG_OUT5
(PIN)	S22	Q	1	LTARS_HG_OUT6
(PIN)	S26	Q	1	LTARS_HG_OUT7
(PIN)	S30	Q	1	LTARS_HG_OUT8
(PIN)	S34	Q	1	LTARS_HG_OUT9
(PIN)	S38	Q	1	LTARS_HG_OUT10
(PIN)	S42	Q	1	LTARS_HG_OUT11
(PIN)	S46	Q	1	LTARS_HG_OUT12
(PIN)	S50	Q	1	LTARS_HG_OUT13
(PIN)	S54	Q	1	LTARS_HG_OUT14
(PIN)	S58	Q	1	LTARS_HG_OUT15



図 4.11 アナログ信号を直接確認可能なピンの回路図

図 4.12 基板上のピンにプローブを当てている様子

たとしても、二つの信号自身の極性は反転しているため、最終的に二つの信号を差し引くことでノイズのみを 除去することができることからノイズ耐性のある伝送となる。また、高速性や安定性にも優れている。差動信 号の基準電圧は図中の VOCM の値により決定される。今回は ADC 側で基準電圧として +0.9V を要求する ため、VCM から +0.9V を供給して動作させる。



図 4.13 差動バッファ回路図

 $\boldsymbol{\cdot} \operatorname{ADC}$ 

ADC には、AD9637BCPZ-40 を搭載する (図 4.14)。ADC(Analog to Digital Converter) は名前の通りアナ ログ信号をデジタル信号に変換する。本基板では計 64ch 分の出力信号波形を 12bit, 2.5MHz サンプリング (= $0.4\mu$ s) でデジタイズしてあげる。この ADC のサンプリングレートは 10MHz ~40MHz なので、20MHz で 動作させたうえで 8 分の 1 に間引くことでファームウェアのサンプリング周波数に合わせた 2.5MHz 動作を 実現する。

ADC は 1chip で 8ch 分の信号処理が可能であるため,8個の ADC を基板に搭載した。



図 4.14 ADC 周辺回路図

• FPGA(Field Programable Gate Array)

FPGA には Xillinx 社の Artix-7 XC200T 2FFG1156C を搭載した。検出器信号の読み出しは多くの複雑な 処理が必要になる。ASIC や ADC の DAC コントロール,トリガー信号との同期,データフォーマットの整 理,データ通信などを同時に多数のチャンネルでこなさなければならず,また実験の目的により要求される事 柄が変わる。FPGA はユーザーが書き換え可能なデジタル回路であるために基板の製造後でも設計し直すこ とができる。FPGA の内部には扱える信号の規格 (電圧) や通信速度の異なる BANK があり,用途により使 い分けられる。

FPGA を構成するデジタル回路はファームウェアと呼ばれ,ハードウェア記述言語 (HDL) で記述してい く。記述したファームウェアは J-TAG を経由して FPGA に実装される。FPGA は電源を立ちあげるたびに ファームウェアをダウンロードしなければならないので,EEPROM(MT25QL128ABA1ESE-0SIT) にあら かじめ書き込んでおくことで自動的にそこからファームウェアをダウンロードしている。

・SFP コネクタ

デジタル処理を行ったデータは TCP 通信により PC へ伝送される。一方で ADC や ASIC 用にレジスタの値 を PC から送るときは UDP 通信が使われる。TCP 通信は通信が行えたか確認をするため通信速度は低速で あるが信頼性の高い通信が可能であり, UDP 通信は通信速度は高速であるが信頼性の低い通信規格である。 TIGArBoard には通信用のコネクタとして SFP コネクタひとつを搭載している。SFP コネクタは規格に合 わせてトランシーバーを差し込めば光ファイバーや LAN ケーブルなど複数種類の規格に対応できる。従来版 の DELTA では LAN ケーブル用に RJ45 コネクタと SFP コネクタの二種類を搭載していたが,基板上のスペース確保のためより汎用性の高い SFP コネクタのみを採用した。

LAN ケーブルを使用して Ethernet で TIGArBoard と PC を通信する場合は,変換モジュールを差し込む。一例として以下に Agilestar のメタルモジュールを挙げる (図 4.15)。注意点として,メタルモジュールを使用する際は,モジュール側に Auto negotiation 機能がついているものを選ぶ必要がある。この機能は SFP 通信を行う際にモジュールのチップと FPGA を自動的に接続してくれる。通常, Auto negotiation 機能がない場合は FPGA 側で信号を送ることで接続が可能となるが TIGArBoard ではそのような配線は行っていないため使用不可となる。



図 4.15 SFP-LAN 変換用メタルモジュール

・NIM コネクタ

NIM 信号は PMT 光信号やビームライン上の ToF カウンターなどをトリガー信号として液体アルゴン TPC でデータ取得するさいに基板に入力されたり, 読み出し基板同士の同期をとる, あるいは外部から FPGA を駆 動するためのクロック信号を入力するために必要になる。NIM 信号を入力するためのコネクタを 4 つ, NIM 信号を出力するためのコネクタを 2 つ搭載している。NIM 信号にどの役割を与えるかはファームウェアを書 き換えて自由にアサイン可能。以下に NIM\_IN と NIM\_OUT の回路図 (図 4.16, 図 4.17) を示す。NIM\_IN は FPGA では NIM 規格の信号は扱えないため LVTTL 信号に変化しており, NIM\_OUT は出力のときに差 動信号で伝送している。



図 4.16 NIM\_IN 信号回路図





・50MHz クロック発振器

FPGA 内の同期回路を動作させるために,発振器により 50MHz のクロックをつくり FPGA に入力している。 以下に回路図を示す (図 4.18)。(プロトタイプ版ではクロックの電源 (Vcc) と出力 (OUT) を入れ違いに配線 してしまったために,製作された基板の抵抗 (R68) を取り外し,空中配線して接続し直すことで対処してい る。動作は問題なく行えていることと,量産に向けた基板製作では回路図は以下の通り修正を施してある。)



図 4.18 50MHz クロック発振器回路図

・LED & DIP スイッチ

直接信号の処理は関わらないが,ファームウェアを書き換えた際に簡易的にテスト,確認できるように 4 つの LED と 4 つの DIP スイッチが搭載されている。

・電源供給用レギュレータ

上記で説明してきた IC チップや ASIC はそれぞれ異なる電源の大きさで駆動する。内部で使用している電源 の値について以下の表 4.4 にまとめた。DELTA では, +3.3V, -3.3V の両電源で供給していたが, 負側に多 く電流が流れる問題が報告されていた。そのため,本基板では +5.0V の単電源を供給して内部でレギュレー タを介して必要電圧を作ることで解決とした。以下の図 4.19,4.20 に +5.0V から +3.3V および-3.3V をつく るレギュレータの回路図をのせる。レギュレータ内 SS につながるコンデンサーの値を変更することで電源が 立ち上がる RiseTime が調整できるので,RiseTime をずらして立ち上がるようにした。また基板全体での消 費電力は設計時には 10W 程度と見積もられた。実際には +5.0V の電源入力に対して 2.3A 程度の電流が流れ た状態で駆動するため 11.5W 程度であった。

供給電圧	降圧後	EE後 信号名 使用 IC		RiseTime
+5.0V	+3.3V	-	EEPROM,FPGA,SFP,Buffer	10ms
+5.0V	-3.3V	-	NIM_OUT	$20\mathrm{ms}$
+3.3V	+0.9V	-	LTARS	-
-3.3V	-0.9V	-	LTARS	-
+5.0V	+2.5V	$V_{\rm CCO}$	FPGA	$4\mathrm{ms}$
+5.0V	+1.8V	V <sub>CCAUX</sub>	ADC,FPGA	$8\mathrm{ms}$
+5.0V	+1.0V	$V_{\rm CCINT}, V_{\rm CCBRAM}$	FPGA	$9\mathrm{ms}$
+2.5V	+1.2V	MGTAVCC	FPGA	$13 \mathrm{ms}$
$+2.5\mathrm{V}$	+1.0V	MGTAVTT	FPGA	$0.5\mathrm{ms}$

表 4.4 供給する電源電圧のまとめ



図 4.19 +5.0V→+3.3V 用 レギュレータ回路図



図 4.20 +5.0V→-3.3V 用 レギュレータ回路図

・ファームウェア構造 [17]

ファームウェアは Xillinx 社の Vivado2023 で Verilog HDL で記述される。ファームウェアは論理合成を行 い.bit ファイルとして FPGA の中に書き込む必要がある。また,先述した EEPROM には.mcs ファイルとし てダウンロードしてあげる。 TIGArBoard に記述するファームウェアは DELTA 開発時に作られたものをベースに一部書き換えて使用している。構造の概要と通信コネクタ部分について述べる。

ファームウェアは Top module の下に役割毎に異なる module が設けられている (図 4.21)。ADC によりデ ジタイズされた信号は Ring Buffer に保持される。データは NIM\_IN から入力される外部トリガー信号を受 け取ると同時に Data Formatter に入力されヘッダー情報とデータ情報を組み合わせたものに変換される。 Trriger module にトリガー信号が入力されると内部のトリガー信号となる。変換後のデータは SiTCP 技術 を用いた TCP 通信/UDP 通信を行い,新たに追加した GTX モジュールを経て Gigabit Ethernet 通信で PC へ伝送される。Register module では、レジスタのアドレスと値を指定してあげることでそれに応じた LTARS や ADC のパラメータを変更することができる。レジスタのアドレスと役割を以下の表 4.5 に示す。 レジスタに書き込む値は 2bit16 進数である。

サンプリング数は最大 4000sample(=1600µs) であるが, 30cm ドリフトする電子は 300µs 程度であるため, 1000sample(=400µs) 程度で動作させるのが良い。



図 4.21 ファームウェア構成 概略図

・SiTCP 通信

SiTCP は KEK 内田智久氏により開発されたハードウェアによる TCP/IP 通信技術 [21] であり, FPGA を Ethernet に接続する。高エネルギー物理実験におけるデータ量は大型かつ精細な検出器では膨大になる。 CPU で処理すると装置も大型化され高速化も困難であるが, ハードウェア上で並列に処理することで通信の 高速化,小さな回路規模を実現している。FPGA とは物理層 PHY チップを通して Ethernet 通信を行うか, FPGA 内の GTX トランシーバーに接続して SFP モジュールを介して通信が可能である。

SiTCP 通信の Default の IP は 192.168.10.16 で設定されており,環境に応じて IP アドレスを変更する必要がある。IP アドレスは SiTCP Utility から書き換えられる。EEPROM にアクセスした状態で IP アドレスを書き換えるとファームウェア起動時に EEPROM から呼び込む IP アドレスを自由に設定できる。IP は基板上の DIP スイッチを ON にすると DEFAULT の IP に切り替わり, OFF にした状態で立ち上げるとEEPROM に直接書き込んだ IP が呼び出される。

アドレス	役割
x06,07	Window size(sample 数)
x08.09	Delay(トリガーの前のデータ数)
x0A,0B,0C	Header ID
x0D	Thinning ADC data
x1B	LTARS DAC parameter
x1C	LTARS DAC ch
x1D	LTARS DAC Write enable
x1E	test pulse input

表 4.5 レジスターのアドレスと役割

### 4.3 基礎性能評価

プロトタイプ版として完成した基板の動作確認をする。まず初めに,+5.0Vの主電源から各レギュレータ により必要な電圧が作り出されているか,端子にテスターを当て問題なく供給されていることが確認できた。

### 4.3.1 テストパルス入力セットアップ

実際の検出器の信号でテストする前に、ファンクションジェネレータを用いてテストパルスを入力して ASIC の出力波形をみた。以下の図 4.22, 4.23 にセットアップの写真とブロック図を示す。ファンクション ジェネレータからの電圧信号をテストパルス入力用基板に入力する (図 4.24)。ここで 1pF のコンデンサー を通すため電荷信号に変換することで全 32ch 分のテストが可能となる。入力する電圧が 100mV のときは、 100mV × 1pF となり、100fC の入力に相当する。テストパルス入力用基板には電荷信号に変換するためのコ ンデンサーと GND の間に別のコンデンサーを差し込むことにより検出器容量を再現する。





図 4.23 基礎性能評価用セットアップ 構成図

図 4.22 基礎性能評価用セットアップ 写真



図 4.24 テストパルス入力用基板 回路構成図

入力する信号は 1Hz の矩形波とした。入力する電圧は二種類のゲイン (HG,LG) を搭載しているためそれ ぞれのダイナミックレンジに見合った大きさで入力した。以下の図 4.25 に, LTARS から出力されるアナログ 信号をプローブを直接当ててオシロスコープで見た様子を示す。黄がファンクションジェネレータからの矩形 波であり,緑が LTARS の HG(ch4) の出力波形であり,ゲイン (波高値:10mV/fC) とピーキングタイムの時 定数 (fast:3us) が設計値に違わないことがわかる。



図 4.25 オシロスコープによる入力ステップ信号とアナログ出力信号波形の確認の様子

#### 4.3.2 DAC コントロール

LTARS2018A\_K06 には書き換え可能なパラメータが存在する。表 4.5 にあるレジスタの x1B,x1C,x1D が それに対応する。これらの値を書き換えるためには FPGA から LTARS に接続している SDI 信号, STRI1 信号, STRI2 信号, CLKI 信号の 4 つのパルス信号を扱う。LTARS の 1ch 毎に 8bit の情報を送る必要が あり, 全 32ch のため 256bit 分の情報を送る。256bit 分の情報を送る信号が SDI 信号である。CLKI 信号は 1 $\mu$ s 幅のクロックが 256 カウント (512 $\mu$ s) 続く。1 カウントは SDI 信号の 1bit 情報に対応しており, CLK が 上がったタイミングの SDI 信号の情報 (0or1) が実際に LTARS に反映される。実際にレジスタ値を書き込む ためには RBCPshell で x1B に 8bit の情報, x1C に x1B で指定したパラメータを送りたい ch, x1D==1 で 書き込みの合図とする。SDI 信号の 1ch 分, 8bit の各桁がそれぞれ何を表しているかを以下の表 4.6 にまと めた。パラメータはすべて 0 にしておくのが default である。

bit の桁	役割	0	1
0	$V_{\mathrm{offset1}}$	×	0
1	$V_{\mathrm{offset2}}$	×	$\bigcirc$
2	$V_{\rm offset3}$	×	$\bigcirc$
3	$V_{offset}$ 極性	正側にシフト	負側にシフト
4	-	-	-
5	テストパルス	×	$\bigcirc$
6	ゲインブースト	$\bigcirc$	×
7	ピーキング時定数	$fast(3\mu s)$	$slow(7\mu s)$

表 4.6 LTARS DAC parameter の各ビット桁の役割

STRI 信号はこれらの信号の入力の合図となるパルス信号で、その立ち上がりに合わせて書き込みが開始される。STRI 信号は1と2がそれぞれ別の基板上のチップに送信されるようになっており、二枚のチップを独立に操作可能なようにした。

図 4.26 の内緑が STRI2 信号,黄が CLKI 信号,ピンクが SDI 信号である。SDI 信号と CLKI 信号は 2 枚の チップ分の信号をひとつで担っているため,前半が LTARS の一枚目 (ch0~ch15) で後半が LTARS の二枚目 (ch16~ch31)を扱っている。



図 4.26 DAC コントロール用信号 (STRI,CLKI,SDI) 入力の様子

### 4.3.3 入出力特性

HG, LG, fast, slow で取得した際の 1000Event 分の平均波形 (図 4.27) を示す。



図 4.27 左:高ゲイン (HG) の時定数 fast/slow それぞれの 1000Event の平均波形 右:低ゲイン (LG) の時定数 fast/slow それぞれの 1000Event の平均波形

最も重要である HG の fast な時定数で整形する状態でテストを行った。入力電荷の大きさを変えた時の出 力信号の 1000Events 分の平均波形を図 4.28 に示す。負電荷の入力のとは異なり,正電荷の入力に対しては ダイナミックレンジが狭い。そのためオフセットを+側にシフトさせることで正電荷の入力信号のダイナミッ クレンジを確保している。

HG の出力 ch2 と LG の出力 ch3 の入力電荷信号に対する出力信号の積分値をプロットした。実際の液体アルゴン TPC 検出器信号はファンクションジェネレータの矩形波による信号と比べると長い幅を持って



LTARS に入力される。電荷信号がどれほど増加したかはその積分値をみることで確認できる。この結果より, HG では 120fC まで, LG では 1600fC までのダイナミックレンジがあることがわかる。

図 4.28 左:高ゲインのダイナミックレンジ測定の結果 右:低ゲインのダイナミックレンジ測定の結果

検出器容量用のコンデンサーを追加したときの ENC の変化を見ていく。ENC の算出には信号のピーク値 に対してペデスタルがどの程度の分散で広がっているかで評価した。以下の図 4.29, 4.30 に検出器容量の大 きさを変えた時のゲイン fC/mV と ENC e<sup>-</sup> を示す。ゲインはわずかに下がり, ENC が増加している傾向が みてとれるが, 300pF のとき 4000e<sup>-</sup> 程度であり, LTARS2018\_k06A のスペック値が十分得られている。ま た, GRAMS40 検出器の容量と同程度の 100pF では 2000e<sup>-</sup> を下回るような結果が得られた。これが正しい 結果だとすれば GRAMS40 検出器でのデータ取得においてはわずか信号量のみを落とすような荷電粒子の飛 跡も良い S/N で再構成できることが期待される。



図 4.29 高ゲインの検出器容量に対する出力の大きさと ENC



図 4.30 低ゲイン出力の検出器容量に対する出力の大きさと ENC

LTARS 内部で生成可能なテストパルスを用いて全チャンネルの出力波形を取得し,信号部分の積分値によ るゲインをみる (図 4.31, 4.32)。LTARS 内部にはテストパルスを出力するためのコンデンサー (0.1pF) が取 り付けられており,FPGA からテストパルス機能を ON にすることで 0.5V の電圧がかかり,50fC の入力電 荷を再現できる。全チャンネルが問題なく読めていることが確認できるが,ch30 のゲインがわずかに高い. 外部テストパルスによるゲインの測定ではこのような傾向は見られなかったため,内部のコンデンサーの値の ばらつきに影響を受けて入力電荷が異なっている可能性がある。



図 4.31 LTARS 内部テストパルスによる全チャンネル出力の 1000Event 平均波形



図 4.32 内部テストパルスによる各チャンネルに対する積分値に換算したゲイン

DAQ レート耐性について,ファンクションジェネレータからの信号の周波数を徐々に上げていき,10,000Event 取得するまでの時間を測ることで確認した。取得するデータ数は実験を想定して1,000sample(=400µs)とした。入力周波数に対する取得時間のプロットを以下の図 4.33 示す。黒点が実測値であり,赤線が入力トリガーと DAQ レートが 1:1 になる直線を表している。この結果からは最大で 200Hz 程度まではほとんどロスすることなく取得できているといえる。



図 4.33 入力トリガーの周波数に対する DAQ 取得時間の変化

# 5 検出器統合試験

T98 実験 Phase-2 に向けた GRAMS40 検出器のアップグレードは,二つの観点により行われる。ひとつ は精細な飛跡を再構成するための Anode 電極のピッチおよび構造,もうひとつは第4章でも述べたように Anode 電極改良に伴う信号読み出しエレクトロニクスの改良である。これらの要素を同時に進めていくため にも,R&D のし易さの観点から,10cm×10cm×10cmのサイズの TPC を製作し,その TPC 信号を TIGArBoard 一枚で読み出すことから始めた。また,簡易的に行える試験として,まず初めにガスアルゴン (GAr) 中でのα線信号を読み出した。

## 5.1 GAr 試験セットアップ

### 5.1.1 TPC の構造

TIGArBoard 一枚で読み出しが可能であり、GRAMS40 検出器よりも精細なピッチにして信号を読み出すために、電極部分 (9cm × 9cm) を X-Y それぞれの方向で 6mm ピッチにして、全 30ch(X:15ch/Y:15ch) での電子信号読み出しをする。実際に使用した TPC の写真を以下に示す。

TPC は Anode 基板, Grid 電極, Cathode 電極, サイドプレートとそれを支える補強パーツでできている。 四面あるサイドプレートの内, 図 5.1.1 からもわかるように一面にのみ抵抗が取り付けられている。Anode 電 極, Grid 電極, Cathode 電極には内部に電子をドリフトさせるための電場を形成するためにそれぞれ電圧を 与える必要があるが, 今回は Cathode 電極に高電圧 (HV) を印加し取り付けた抵抗により分圧して, Anode 電極を GND に落としている。0.5cm の Cathode-Grid 間には 100MΩ の抵抗を 1cm 間隔で 10 個 (合計で 1GΩ) 設置し, 電場を一様にするためにも等間隔に分圧させる。さらに Grid-Anode 間に 250MΩ の抵抗を入 れている。



図 5.1 GAr 試験に使用した 10cm サイズ TPC の写真

図 5.1.1 に TPC 内部を Cathode 側からみた様子を示す。手前に見えるのが Cathode 電極であり,奥に見 える金の基板が Anode 電極である。TPC の内側には TPB を蒸着した反射材 (ESR) を張り付けており,ア ルゴン中で発生する光信号を高効率で取得することを目的としている。第2章でも述べたようにアルゴンが発 生させる光の波長は 128nm の真空紫外光であり,PMT で読み出すためには波長変換が必要である。ESR は サイドプレートと上下の補強パーツを止めるためのネジが内側まで貫通するためそれを通して固定している。

千鳥読み出しとは異なる構造を持つ Anode 電極として,以下の図 5.3 ようにひし形の構造の Anode を GAr 試験では採用した。6mm ピッチに区切ったパッドを TPC に対して 45 度傾けたデザインになっており,ジグ ザグ配線を施した千鳥構造とは違い,配線は直線であるため比較的単純な構造である。

#### 5.1.2 セットアップ全体概要

GAr 試験用の全体セットアップの概略図を以下の図 5.4 に示す。HV フィードスルーより Cathode と PMT に HV を供給して動作させる。PMT の表面にはグリッドを一枚つけることで放電対策とした。PMT 信号は ディスクリミネーターに入力された後パルス信号を出力して電子信号読み出しのトリガーとして使用されるた め, TIGArBoard の NIM\_IN に入力している。TPC を入れた容器のフィードスルーに直接 TIGArBoard は 接続できないため,変換基板を用意して取り付ける必要がある。容器側は 50 ピン D-sub コネクタが二つ付い たフィードスルー (規格は CF152) であることと, CF152 のボルトに変換基板自身が干渉してしまわないよう に配線を最適化して, D-sub コネクタと HIROSE コネクタを二つずつ搭載する, 102mm × 56mm の大きさ の変換基板を作成した。以下の図 5.5 にフィードスルーに接続した様子を示す。

GAr 試験では信号としてアメリシウム (<sup>241</sup>Am) が放出する α線を Cathode に上向きに取り付けて使用した。 α線源は 1atm の GAr 中では約 5.4MeV のエネルギーを 5cm 程度飛んで落としていくため,電荷量に換



図 5.2 10cm サイズ TPCCathode 側から見た 内部の様子



図 5.4 GAr 試験セットアップ概略図



図 5.3 ひし形構造 Anode パッドの概略図



図 5.5 変換基板を介した TIGArBoard と容器 の接続の様子

算すると、~6fC/cm の信号量となる。また、<sup>241</sup>Am からのα線は 40Hz 程度で放出される。

以下の表 5.1 に今回のセットアップでの各パラメータをまとめた。GAr の気圧は 1atm と 0.5atm の 2 パ ターンでデータを取得した。気圧が低ければ, α線の飛程は長くなるが, 1cm あたりに落とすエネルギーも小 さくなる。

項目	值
Anode	0V(GND)
Cathode	-200V
PMT	-800V
Anode 電場	80V/cm
Drift 電場	16 V/cm
気圧	1 atm / 0.5 atm

表 5.1 GAr 試験での電圧・電場・気圧

# 5.2 GAr 試験 結果

GAr 中で取得したデータについて述べていく。以下に 10000Event 分のデータの平均波形を XZ 平面およ び YZ 平面で再構成した図を示す。データの取得をトリガーがかかってから 50us 分ずらして行っているため, t=50mus が Anode 面に一致する。図 5.2 が 1atm のガス中での取得データ,図 5.2 が 0.5atm のガス中での 取得データである。これらを比較すると、1atm 中でのα線の方が飛跡が短いことと、1cm あたりに落とすエ ネルギーが高いことがわかる。



図 5.6 GAr 試験 (1atm) での 1000Event 平均波形による二次元再構成図 左: X-Z 平面 右: Y-Z 平面



図 5.7 GAr 試験 (0.5atm) での 1000Event 平均波形による二次元再構成図

10000Event 分の各チャンネルの平均波形を重ね書きしたものを以下の図 5.2 に示す。左図が X 軸方向を 読み出している 16ch 分の波形で,右図が Y 軸方向を読み出している 16ch 分の波形である。また,赤が入力 チャンネルの内偶数番目の ch,青が入力チャンネルの内奇数番目の ch を示している。全チャンネルにコモン モードノイズがのってしまっているが,赤と青 (ch の偶/奇) でノイズの増幅率が異なる。



図 5.8 GAr 試験での各チャンネルの 1000Event 平均波形 赤:LTARS 入力偶数チャンネル 青: LTARS 入力奇数チャンネル

コモンモードのノイズに関しては,検出器の端を読み出しているチャンネル (ch2,4,14,15,32,34,58,60)のそ れぞれ 2ch 分の平均をα線信号が見えている ch から差し引くことによって除去した。つまり ch48 にのるノ イズは, ch32 と ch60 の平均を差し引くことでコモンノイズの影響をなくす。以下の図 5.2 にコモンモードノ イズを差し引いたときの全チャンネルの平均波形を示す。



図 5.9 GAr 試験でのコモンノイズを差し引いた 1000Event の各チャンネルの平均波形

GAr テストの結果から得られるノイズレベルをみる。ノイズレベルは 1 イベントごとに信号のいない領域 である 200mus~300mus の間のペデスタルの RMS を 1000 イベントで算出し平均を求める。また、明らかな 外部からのコモンノイズがのっていることを考慮して端の ch(28,30,58,60) を差し引いて同様にペデスタルの RMS を求める。以下に各チャンネルのペデスタルの RMS(ADCCounts) を示す。32ch に対して Anode 読 み出しが 30ch のため ch0,62 は GND に落ちている。隔チャンネル毎に 1.5 倍程度の差がみられる。ノイズ差 し引き後の chip によると考えられるノイズレベルは 10 20ADCCounts 程度。チャンネルのゲインが図 4.29 より 11.0mV/fC(@100pF) だと思うと、電子数に換算するとおよそ 2700e<sup>--</sup> 程度となる。



図 5.10 GAr 試験での TIGArBoard のノイズレベル (ADCCounts) 黒:Raw データからの算出 赤: ノイズ差し引き後からの算出

以上のノイズの差し引きを行った後の典型的な 1Event の 2 次元再構成の図 (図 5.2) と ch44 の波形 (図 5.2) を示す。z=0mm が Cathode 面の位置 (宣言が取り付けられている位置), z=100mm が Anode 面の位置を示 す。宣言を置いた位置から斜め上方向に飛んでいることがはっきりとわかる。ch44 の波形はピーク値がおよ そ 50ADCCounts(=25mV) でありゲイン 10mV/fC で割ると, 2.5fC(=15,000e-) 相当の入力があったことが わかる。今回用いた 6mm ピッチ・9cm 角ひし形構造の Anode では a 線源は 1ch あたり 2.8fC 程度の信号量 が期待されるが, 観測された信号量はこれにほぼ一致する。また, ペデスタルのノイズレベルと信号波形の ピーク値から, S/N~5 の結果が得られた。



図 5.11 GAr(1atm) 中での典型的な 1Event の二次元再構成図 左: X-Z 平面 右: Y-Z 平面



図 5.12 GAr(1atm) 中での典型的な 1Event 波形 (ch44)

# 6 考察

本研究にて設計・開発を行った TIGArBoard は液体アルゴン用に開発された ASIC LTARS2018\_k06A を 搭載した電荷信号増幅・整形とデジタイズ,信号処理を同一基板上で行える読み出しエレクトロニクスである。 基礎性能評価の試験から,液体アルゴン TPC 中で発生する O(1)fC~O(10)fC 微小電荷信号に対し,HG の チャンネルにおいて十分なゲインと負電荷側のダイナミックレンジが確保されていることが検証された。一方 で,正電荷側のダイナミックレンジに関しては負電荷側のダイナミックレンジのおよそ半分程度までしか確保 できていない。これに関しては,同時に両極性の電荷信号を取得する機会が少ないと考えると,オフセットを 上げる変更により対応できる。

また,ノイズレベルに関しては TPC 信号を従来の LTARS2014 を搭載したアナログボードよりも,検出器容 量を考慮しても S/N 良く取得できることが期待される。LTARSchip のノイズ耐性は 2014 から 2018\_K06A で大型検出器を想定した容量ではおよそ 1/3 程度の向上が見られるものであり,GRAMS40 検出器 (@100pF) でも,ENC 換算で 2500e<sup>-</sup> であった。これは入力電荷 0.4fC 相当であると言える。5mm ピッチの電極では MIP 信号に対して,純度の影響を考慮しないと 1ch あたり~5fC 程度が予想されるため,10mm ピッチと比 較しても同程度以上の S/N が期待できる。

また,実際に検出器を接続して GAr 中でのα線信号を用いた試験では Event 毎に信号の飛跡が識別でき, TIGArBoard の検出器信号の読み出しが実証された。観測された信号量に関しても,想定される信号量にほ ぼ一致する結果であった。GAr 中でのα線による信号と LAr 中での MIP による信号はどちらも 5fC/cm 程 度であることから,今後液体アルゴン中での信号を読み出す際にも同程度のノイズレベルで MIP 信号が観測 できることが期待される。

一方で今回の測定では TIGArBoard が外部から影響を受けたと思われる 10kHz 程度のノイズをセット アップ時に落としきれていないため,アナログ信号処理部分とデジタル信号処理部分を統合したとはいえ, TIGArBoard を囲う最低限のシールドは必須である。

TIGArBoard のノイズの ch 依存性に関しては,各チャンネルのゲインに同様の傾向が見られなかったこと からアンプの問題ではなく,基板上の配線の問題の可能性がある。TIGArBoard は多数のパーツでできてい るため,配線が複雑である。そのため,16層の基板として構成しているが,検出器信号の入力コネクタから LTARSchip までの間で ch 交互に異なる層に配線が為されており,原因の一つと考えられる。

T98 実験 Phase-2 では、反陽子ビーム照射の時間が異なる運動量も合わせて 12 時間ある。TPC が 10kHz を超えるとパイルアップしてしまうことから、ビームレートは制限される。一方でビームレート 10kHz で 来る反陽子は DAQ レートによりデータ取得が制限され、トリガーレートはさらに下がる。LTARS では 100Hz の DAQ レートが期待されていたが、今回の結果から 200Hz で問題なく DAQ が動作すれば、最大で 720k[Event/h] の反陽子イベントの取得が期待される。

# 7 まとめと今後の展望

GRAMS 実験は MeV ガンマ線と宇宙反粒子探索の二つの物理目標を持つ,液体アルゴン TPC 検出器を使 用した気球実験であり,南極での長期フライトによる観測を目指す。GRAMS 検出器は原理検証を含め様々 な開発課題が存在する。特にアルゴン原子核による反粒子の捕獲事象を応用した粒子識別法は検証されたこと がない。そのため,動作実績のある GRAMS40 検出器を用いて反粒子ビームを照射できる J-PARC K1.8BR ビームラインにて液体アルゴン照射試験として T98 実験を実施する。2023 年度に Phase-1 としてビームライ ンの反重陽子,反陽子のレート検証を行い,2024 年度に Phase-2 として液体アルゴンにビームを照射する。 Phase-1 の結果から反重陽子のレートは不十分であることが理解されたため Phase-2 で反陽子ビーム照射試 験を行うことを提案する。

本研究では、T98 実験 Phase-2 で使用する電子信号読み出しエレクトロニクスの設計開発を行った。ASIC に液体アルゴン用の LTARS を搭載しており、従来の LTARS 搭載基板とは異なり、ADC、FPGA も同一基 板上に搭載して一体型のボードとした。開発された基板は ASIC の性能を十分引き出しており T98 実験での データ取得が行える。基板の性能評価として、まずテストパルスの入力に対する応答の確認をした。さらに、 Phase-2 ではピッチをより細かく読み出す必要があり最初期の検出器改善を施した試験として 10cm サイズ、 6mm ピッチの TPC で α線信号を TIGArBoard で読み出した。

今後は、Phase-2 を想定した信号の読み出しが可能か検証するために、液体アルゴン試験を予定している。段 階を踏んで試験を行うために、GAr 試験でも使用した 10cm サイズの TPC で試験したのち、GRAMS40 検 出器での 120ch 読み出しを実現させる。早稲田大学のテストスタンドで一連の検出器システムが完成された のち、K1.8BR ビームライン上のカウンターとも統合し DAQ 構築をする必要がある。TIGArBoard の DAQ レートが 100Hz 程度であることからトリガーシステムは LAr 中での光信号だけでなく前段の ToF により処 理する必要がある。

今回開発された TIGArBoard により T98 実験 Phase-2 の反陽子データを取得し, GRAMS 検出器の原理で あるアルゴン原子核による原子核捕獲事象の観測および反粒子識別を確立させることが GRAMS 実験として の直近の課題である。

GRAMS 検出器の開発要素としては原理検証だけでなく,気球上での液体アルゴン TPC の長期運用や,低温 耐性のある信号読み出し基板など挙げられる。特に気球上での液体アルゴン検出器の運用手法の確立は必須で あり,2023 年度の JAXA 大樹町での eGRAMS から 2025 年度~2026 年度に予定する pGRAMS を経て,南 極でのフライトを目指していく。

61

# 8 謝辞

本論文は多くの方に支えられて,進めることができました。支えて頂いたすべての方に感謝致します。まず 本研究を行う機会を与えて頂いた寄田浩平教授に感謝いたします。研究そのものの話だけでなく,研究に取り 組む姿勢から考え方まで一から教えて頂きました。研究活動の中では行き詰まる場面も多々ありましたがその 度にご指導していただきました。田中雅士主席研究員には、実験行う上での技術的な基礎基本を教えて頂きま した。研究の進め方について自分自身の理解が及ばないことが多く,何度もご迷惑をおかけしましたがその都 度指導していただきました。ありがとうございます。秘書の坂本さんには出張や物品の購入の度に事務手続き の面でお世話になりました。また研究室でお会いするたびに声をかけてくださりお話しできて楽しかったで す。基板の製作にあたり、Open-it プロジェクトとして KEK 坂下氏、岸本氏、庄子氏、神戸大身内氏、東野氏 には設計のご相談から技術的なサポートまでしていただき大変お世話になりました。特に庄子氏、東野氏とは 基板の試作品の試験で何度もお伺いして、動作させるに至りました。ありがとうございます。同じ GRAMS 実験グループの先輩である青山さん、岩澤さん、櫻井さん、中曽根さんには研究に対して親身になってお話を 聞いてくださり、多くの助言をいただきました。同期の谷口さん、後藤君、中島君とは研究室内での他愛無い 会話が息抜きとなり、楽しい生活を送ることができました。GRAMS 実験の後輩たちとも実験で多くの時間 を過ごし、様々な場面で助けてもらいました。最後に、何不自由なく生活面で支え続けてくれた家族に深く感 謝いたします。

# 参考文献

- [1] ESA Planck Collaboration, "Simple but challenging : the Universe according to Planck", 2013
- $\left[2\right]$  F.Zwicky, Helv. Phys. Acta, 6 ,1933 110
- [3] K. G. Begeman et al., "Extended rotation curves of spiral galaxies: dark haloes and modified dynamics, MNRAS, 249, 523 (1991)
- [4] T. Aramaki et al. "Review of the theoretical and experimental status of dark matter identification with cosmic-ray antideuterons". In: Phys. Rept. 618 (2016)
- [5] A. Ibarra, S. Wild, "Determination of the cosmic antideuteron flux in a monte carlo approach", Physical Review D 88 (2013)
- [6] M. Aguilar et al., The Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) on the international space station: Part II — Results from the first seven years, Physics Reports 894 (2021) 1–116
- [7] K. Abe et al, Measurements of cosmic-ray proton and helium spectra from the BESS-Polar longduration balloon flights over Antarctica ,2016 ApJ 822 6
- [8] T. Aramaki, C. Hailey, S. Boggs, P. von Doetinchem, H. Fuke, S. Mognet, R. Ong, K. Perez, J. Zweerink, Antideuteron sensitivity for the gaps experiment, Astroparticle Physics 74 (2016)6–13
- [9] T. Aramaki, et al. "Dual MeV gamma-ray and dark matter observatory- GRAMS Project", Astroparticle Physics, Vol. 114, pp. 107–114, January 2020.
- [10] Elena Aprile, Aleksey E. Bolotnikov, Alexander L. Bolozdynya, and Tadayoshi Doke., "Noble Gas Detectors", Wiley, 2008.
- [11] W. Foreman et al."Calorimetry for low-energy electrons using charge and light in liquid argon", arXiv:1909.07920v1, 2019
- [12] S. Amoruso et al., "Analysis of the liquid argon purity in the ICARUS T600 TPC", Nucl. Instrum. Meth. A 516, 68–79, 2004.
- [13] 中曽根太地, "GRAMS 実験のための加速器ビームを用いた粒子・反粒子識別実証計画", 修士論文 2022 年度, 早稲田大学
- [14] 櫻井真由, "GRAMS 実験のための地上プロトタイプ液体 ArTPC の製作と宇宙線粒子反粒子識別能力の 検証",修士論文 2022 年度,早稲田大学
- [15] Keizo Agari et al. "The K1.8BR spectrometer system at J-PARC", arXiv:1206.0077, 2012
- [16] k. Yorita et al."Report on T98 (Measurement of Anti-Matter Reaction in LArTPC) and Phase-2 Request", 2023
- [17] 黒森雄介, "大型液体アルゴン TPC 測定器用信号読み出しシステムの開発", 修士論文 2016 年度, 岩手 大学
- [18] 中澤美季, "到来方向に感度を持つ暗黒物質直接探索実験における陰イオン3次元飛跡検出器用読み出し 回路の開発",修士論文 2018年,神戸大学
- [19] 中村拓馬"NEWAGE 実験における陰イオン3次元飛跡検出器のための多チャンネル読み出し用集積回路の開発",修士論文 2020年,神戸大学
- [20] C. Martoff, D. Snowden-Ifft, T. Ohnuki, N. Spooner, and M. Lehner, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated

Equipment 440, 355 (2000).

[21] Bee Beans Technology, https://www.bbtech.co.jp/en/products/sitcp-library/

学籍番号: 5322A041-7 定義確認書 研究活動の不正行為 2024年2月 6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 物理学及应用物理学事政 2年 本人氏名 清水底圩 (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

2024年2月5日 本人氏名<u></u>一个人氏子 (章)

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。

$\checkmark$	GEC 設置科目「学術・研究公正概論(生命・理工系)」	
	GEC 設置科目「研究倫理概論」	
	専攻設置科目 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。