

修士論文

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

早稲田大学 物理学及応用物理学研究科 寄田研究室

中曽根 太地

2023年2月24日

---

## 概要

暗黒物質が宇宙の4分の1を占めていることは宇宙の天文学的観測から示唆されているが、いまだその観測をなされた実験はない。多くの暗黒物質の探索実験がある中で、一つに宇宙反粒子を用いた間接探索実験がある。宇宙反粒子の中でも暗黒物質の対消滅・崩壊由来の反重陽子は宇宙星間物質との相互作用による反重陽子生成量よりを低エネルギー側 ( $j$ 数 GeV/n) で優位であり、1事象でも観測することで新物理を示唆するため注目されている。GRAMS 実験は MeV ガンマ線の観測と宇宙反粒子観測による暗黒物質の間接探索を目的とした実験であり、早稲田大学も宇宙反粒子観測に着目して GRAMS 実験グループに参加している。GRAMS 実験は気球搭載型の液体アルゴン TPC と 2 層の ToF により、 $dE/dX$ , 粒子飛跡,  $\beta$  により粒子識別を行う。その中でも新しい技術は、液体アルゴンを気球に搭載する技術と、荷電反粒子を磁場を用いずに原子核捕獲事象によって識別を行う技術である。その技術検証のための第一歩目として 2022 年 10 月には早稲田地上における液体アルゴン TPC を用いた実験を行い、宇宙線  $\mu$  粒子の崩壊、捕獲事象を見ることで粒子・反粒子識別を行った。その結果を使用してシミュレーションによる波形再現を行った。さらに後半では反陽子・反重陽子を用いた粒子・反粒子識別を行うための加速器試験を行うための開発計画について議論し、早稲田地上で使用している  $\phi 500\text{mm}$  の液体アルゴン容器の大きさで GRAMS 実験の Rigidity である  $150\text{MeV}/n$  の反陽子・反重陽子の捕獲事象を観測することができることを Geant4Simulation により検証した。現在 2024 年度を目標に J-PARC で反陽子・(できれば) 反重陽子を用いたビーム試験を行う予定であり、2022 年度に J-PARC ヘプロポーザルを提出している。反陽子・反重陽子ビーム試験により世界で初めて液体アルゴン TPC での粒子・反粒子識別を原子核捕獲事象から実証を行う実験であり、本論文ではその試験に向けた開発計画を述べる。

## 目次

<b>1 暗黒物質</b>	<b>7</b>
1.1 暗黒物質の存在	7
1.2 暗黒物質の候補	8
1.3 暗黒物質探索手法	9
1.4 宇宙反粒子測定による暗黒物質間接探索	10
1.4.1 反粒子探索の現状	10
1.5 宇宙反重陽子	14
1.5.1 2次起源反重陽子	14
1.5.2 1次起源反重陽子	14
<b>2 GRAMS 実験</b>	<b>17</b>
2.1 物理目標	17
2.2 GRAMS 実験検出器	18
2.2.1 液体アルゴンの性質と利点	18
2.2.2 液体アルゴン TPC の原理	20
2.3 粒子識別手法	21
2.3.1 粒子(質量)識別	22
2.3.2 粒子・反粒子識別	23
2.4 液体アルゴン中での反陽子・反重陽子の反応確率	26
2.5 本研究の目的	27
<b>3 宇宙線 <math>\mu</math> 粒子を用いた地上試験</b>	<b>28</b>
3.1 序論	28
3.2 宇宙線 $\mu$ 粒子	28
3.3 試験セットアップ	28
3.4 電子信号読出しエレクトロニクス: LTARS2014	30
3.4.1 LTARS2014 信号波形	32
3.5 ノイズ対策	32
3.6 DAQ の構築	33
3.7 宇宙線信号事象	34
3.8 シミュレーションによる信号波形の再現	35
3.8.1 実際の信号との比較	38
<b>4 J-PARCK1.8BR ビームラインを用いた粒子・反粒子識別試験計画</b>	<b>40</b>
4.1 加速器ビーム試験の目的	40
4.2 国内で反陽子/反重陽子生成可能な加速器施設	40
4.3 J-PARC	41
4.3.1 ハドロン実験施設	41
4.3.2 K1.8BR ビームライン	42
4.3.3 K1.8BR ビームラインにおける反重陽子レート	45
4.4 ビーム試験セットアップの検討	46
4.4.1 液体アルゴン中での反陽子・反重陽子停止距離	46
4.4.2 現状のセットアップ案	47
4.5 Geant4 シミュレーション	48

---

4.5.1	シミュレーション条件 . . . . .	48
4.5.2	Event Display . . . . .	48
4.5.3	原子核捕獲事象のレート . . . . .	50
4.6	検出器アップグレードプラン . . . . .	51
4.6.1	読出しピッチサイズの細分化 . . . . .	51
4.6.2	EyeScan による対消滅後のハドロン数とシミュレーションとの比較 . . . . .	53
4.6.3	$\phi 1000mm$ 容器 . . . . .	54
<b>5</b>	<b>まとめと今後の展望</b> . . . . .	<b>58</b>
5.1	まとめ . . . . .	58
5.2	今後の展望 . . . . .	58
<b>6</b>	<b>謝辞</b> . . . . .	<b>60</b>

図目次

1.1 渦巻き銀河 NGC6503 の回転速度観測結果 [2] . . . . . 8

1.2 CMB 観測結果による宇宙の組成 [3] . . . . . 8

1.3 暗黒物質探索の手法 . . . . . 10

1.4 AMS 検出器 [6] . . . . . 11

1.5 左：陽電子のエネルギースペクトル 右：反陽子のエネルギースペクトル [6] . . . . . 11

1.6 BESS 検出器 [7] . . . . . 12

1.7 左：BESS 実験で観測された反陽子数 [7] 右：BESS 実験による反重陽子リミット [8] 12

1.8 GAPS 検出器 [10] . . . . . 13

1.9 GAPS 実験の予測感度 [10] . . . . . 13

1.10 二次起源宇宙反重陽子のスペクトラム [11] . . . . . 14

1.11 1 次起源反重陽子生成過程 . . . . . 15

1.12 Coalecence モデルによる反重陽子生成のパラメータ  $p_0$ [12] . . . . . 15

1.13 暗黒物質由来の反重陽子スペクトル [5] . . . . . 16

2.1 宇宙反粒子 Flux と GRAMS 実験ターゲット . . . . . 17

2.2 GRAMS 検出器 . . . . . 18

2.3 液体アルゴンの電離/発光プロセス [16] . . . . . 19

2.4 液体アルゴン TPC の概念図 . . . . . 21

2.5 左：液体アルゴン純度と電子寿命の関係 右：電場 (KV/cm) と電子ドリフト速度の  
関係 [15] . . . . . 21

2.6 T-32 実験における 800MeV/c の粒子飛跡 . . . . . 22

2.7 左：LAr における同じ  $\beta$  の時の  $dE/dx$  と距離の関係 . . . . . 23

2.8 原子核捕獲事象による粒子・反粒子識別 . . . . . 24

2.9 対消滅後の荷電  $\pi$  粒子数と原子核捕獲事象後の X 線スペクトル . . . . . 24

2.10 GAPS 実験における X 線の観測 [10] . . . . . 25

2.11 LArIAT 実験における反陽子捕獲事象 Like な事象 [17] . . . . . 26

2.12 液体アルゴンにおける運動量に対する各反応の割合 . . . . . 26

2.13 信号になりうる事象 (非弾性散乱からの捕獲事象) . . . . . 27

3.1 左図：TPC 各基盤ののサイズ 右図：200L 容器に設置された GRAMS40 概略図 . . . . . 29

3.2 Anode 基盤の構造 . . . . . 29

3.3 早稲田 LAr テストスタンド . . . . . 30

3.4 LTARS2014 . . . . . 31

3.5 左：LTARS2014 20fC 1Event 右：Conversion gain . . . . . 32

3.6 グラウンド対策 . . . . . 33

3.7 Run22.1 の DAQ セットアップ . . . . . 34

3.8 宇宙線信号 上段：通過 Event 中段：崩壊 Event 下段：捕獲 Event . . . . . 35

3.9 作成した Run22.1 のシミュレーションセットアップ . . . . . 36

3.10 通常の 2 次元読み出しと千鳥読み出しの波形の構造の違い . . . . . 37

3.11 再現したランダムノイズ . . . . . 38

3.12 宇宙線通過 1 事象 (実データ) . . . . . 38

3.13 宇宙線通過 1 事象 (Simulation) . . . . . 39

4.1 J-PARC 加速器施設俯瞰図 [20] . . . . . 41

4.2 ハドロン実験施設 . . . . . 42

4.3 K1.8BR ビーム上流レイアウト [24] . . . . . 43

4.4	K1.8BR 拡大図 [24]	44
4.5	K1.8BR 後段検出器 [21]	45
4.6	J-PARC K1.8BR で観測された反重陽子レート [22]	46
4.7	液体アルゴン中での反陽子・反重陽子停止距離	47
4.8	K1.8BR セットアップ案	47
4.9	Geant4 シミュレーションで構築したセットアップ図	48
4.10	上段：反陽子 600MeV/c 下段：反重陽子 1100MeV/c	49
4.11	左：放出される $\pi_{\pm}$ 粒子運動量 右：放出される $\pi_0$ 粒子運動量	49
4.12	左：反陽子捕獲確率 右：反陽子捕獲確率	50
4.13	10mm ピッチの反陽子 600MeV	51
4.14	5mm ピッチの反陽子 600MeV	52
4.15	3mm ピッチの反陽子 600MeV	52
4.16	10mm ピッチの反重陽子 1100MeV	52
4.17	5mm ピッチの反重陽子 1100MeV	53
4.18	3mm ピッチの反陽子 1100MeV	53
4.19	Eye Scan による $\pi^{\pm}$ と $\pi^0$ 飛跡の判別	54
4.20	ピッチサイズを変えた場合の荷電 $\pi$ 粒子数の EyeScan の結果	54
4.21	$\phi 1000mm$ 容器と $30cm \times 30cm \times 60cm$ TPC	55
4.22	$30cm \times 30cm \times 60cm$ TPC の場合の反陽子飛跡	56
4.23	$30cm \times 30cm \times 60cm$ TPC の場合の反重陽子飛跡	56

## 表目次

2.1	GRAMS のターゲットとなる反重陽子の $\beta$ , Rigidity, 運動量領域 . . . . .	18
2.2	液体アルゴンの基本性質 [14] . . . . .	19
3.1	LTARS2014 の基本性質 [19] . . . . .	31
3.2	ファームウェアの基本性質 [19] . . . . .	32
3.3	液体アルゴン応答 . . . . .	36
4.1	150MeV/n の反重陽子に対する背景事象数 . . . . .	40
4.2	日本国内の加速器施設 . . . . .	41
4.3	液体アルゴンにおける原子核事象の反応確率 . . . . .	50

# 1 暗黒物質

## 1.1 暗黒物質の存在

暗黒物質 (Dark Matter) の存在は 1933 年にかみのけ座銀河団の観測から、F.Twicky によってはじめて示唆された [1]。これは銀河団の力学的質量が光学的質量の 500 倍であることから得られた結果である。力学的質量とは式 (1.1) に示すように Virial の定理を用いて表される質量である。

$$M = \frac{\kappa R \sigma^2}{G} \quad (1.1)$$

ここで  $M$  はビリアル質量、 $R$  は銀河半径、 $\sigma^2$  は速度分散、 $\kappa$  は密度分布に依存する量であり通常 2 程度の値をとる。このようにして銀河半径と速度分布を観測することによって力学的質量が求まる。一方で光学的質量とは星雲の輝度/太陽の輝度の比に対して太陽質量をかけた値である。太陽の場合、輝度  $L$  と質量  $M$  には以下の関係式が成り立つ。

$$L = M^{3.5} \quad (1.2)$$

したがって、銀河の輝度を観測することができれば式 (1.2) の関係式を用いて質量を求めることができる。宇宙が標準模型粒子のみから構成されていると仮定すれば光学的質量と力学的質量は等しいはずであるが、このずれは未知の重力源が存在することを示唆し、その後以下のような観測結果から、暗黒物質の存在はさらに強く予言されることとなった。

### 渦巻銀河の回転曲線

銀河の構造は中央に星の集まりである球状のバルジ、その外側に円盤状に広がるディスク、それらを薄く包み込むハローから構成される。銀河を構成する星はバルジを中心としながら回転運動を行っている。ケプラーの法則とニュートン力学より回転する質点の運動方程式は式 (1.3) のように示される。

$$\begin{aligned} \frac{v(r)^2}{r} &= G \frac{M(r)}{r^2} \\ v(r) &= \sqrt{G \frac{M(r)}{r}} \end{aligned} \quad (1.3)$$

この結果より回転体の質点の速度は中心からの距離  $\sqrt{r}$  に反比例かつ質量  $\sqrt{M(r)}$  に比例する。よって、同じ質量であっても中心からの距離が遠くなるほど速度が遅くなることがわかる。1.1 には観測された NGC6503 銀河の回転曲線の結果 [2] を示す。

破線 (Luminous) は銀河円盤の回転速度であり、点線 (Gas) は中性水素原子によって放射される 21cm 線の観測によって得られるガスの回転曲線である。黒点が実際の観測結果であり、観測結果から Luminous と Gas を差し引いたのが一点鎖線 (Dark Matter) である。式 (1.3) に従うとすれば、銀河中心から離れるほど速度は減少すると考えられるが、実際の結果は 4kpc 程度から速度は一定となり、これにより光学的に観測することができない未知の質量が銀河中心に存在しており、暗黒物質の存在を示唆する証拠となっている。

### 重力レンズ効果

一般相対性理論より、宇宙空間上に天体などの質量源が存在すると時空が歪む。そのため、歪んだ時空に電磁波が入射すると電磁波の進行方向が曲げられるため、遠くにある天体の発する光が曲げ

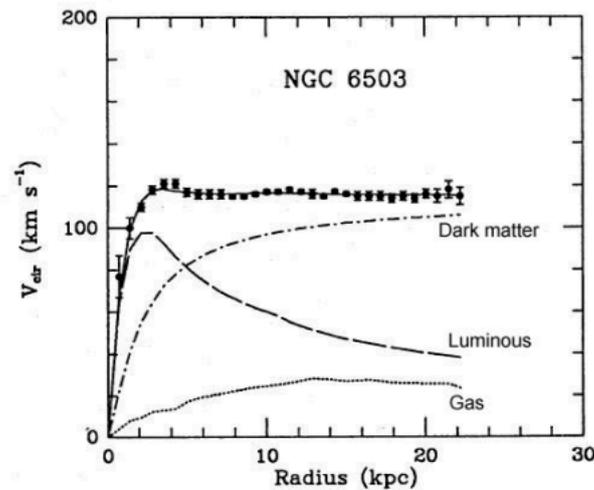


図 1.1: 渦巻き銀河 NGC6503 の回転速度観測結果 [2]

られて弓上に引き伸ばされて観測されることがある。この効果を重力レンズ効果といい暗黒物質等の未知の質量源が存在している証拠となっている。

このように、暗黒物質観測のため世界中で様々な光学的な観測や電磁気的な観測が行われているが、間接的な観測事実を過ぎず、実際に質量はどのエネルギースケールに存在するのか、スピンはいくらか等の性質は未知である。宇宙に占める暗黒物質の量は 2013 年に欧州宇宙機関 (ESA) の Planck 衛星による宇宙背景放射 (CMB) の観測結果 [3] から推定されており、26.8% を占めている事が分かっている。

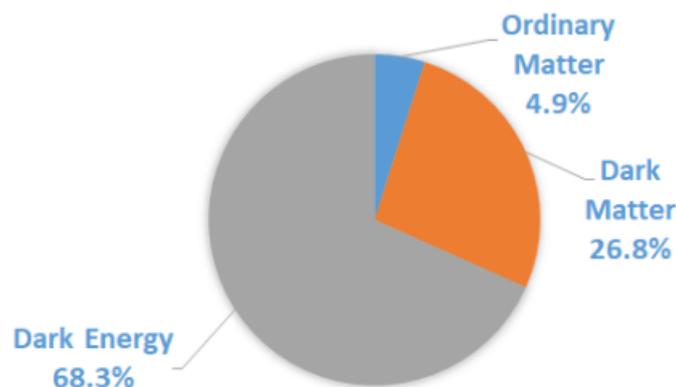


図 1.2: CMB 観測結果による宇宙の組成 [3]

この結果から我々が観測することのできている標準模型粒子は宇宙に存在する質量のわずか 5% に過ぎず、宇宙のわずか 1 部分であることがわかる。暗黒物質の発見はこの標準理論の枠組みを拡張することにつながり宇宙理解の進歩の為に非常に重要である。

## 1.2 暗黒物質の候補

暗黒物質の候補として観測事実から以下の性質をもつ物質であることが考えられる。

- 電荷を持たない
- カラーを持たない
- 質量を持つ
- 安定である

現状このような物質は標準理論の枠組みの素粒子では説明がつかず、未発見の素粒子が必要となる。現在暗黒物質の候補として以下の粒子が考えられている。

- アクシオン

アクシオンは冷たい暗黒物質の候補の一つであり、強い相互作用を記述する量子色力学における CP 対称性の問題を解決するために存在が予想された中性の軽い擬スカラーボゾン粒子である。アクシオンは強磁場中で 2 個の光子に崩壊するブリマコフ効果 [4] が起こるため光子を検出することで観測を行う。

- WIMP

WIMP(Weakly Interactive Massive Particle) は弱い相互作用程度に小さい相互作用を行う素粒子の総称である。WIMP を作ることのできる理論の代表的なものとして超対称性理論 (Supersymmetry theory:SUSY) がある。SUSY の枠組みの中でニュートラリーノは電気に中性かつ最も軽い粒子 (Lightest Supersymmetric Particle) であるため、宇宙に安定して残ることができ、暗黒物質の候補として最も期待されている粒子となっている。

### 1.3 暗黒物質探索手法

暗黒物質の探索手法には直接探索 (Direct search)、間接探索 (Indirect search)、加速器探索 (Collider search) がある。

- 直接探索

暗黒物質の直接探索は 1.3 に左から右の矢印に示すように WIMP と原子核との弾性散乱事象を観ることによって暗黒物質の観測を行う手法である。この探索方法による信号の観測は暗黒物質の決定的な証拠となるが、散乱断面積が小さい。そのため、低バックグラウンド環境下での実験を行う必要があり、有名な実験には希ガス液体シンチレータ検出器を用いた XENON1T、Darkside 実験等の地下実験が挙げられる。

- 間接探索

暗黒物質の間接探索は暗黒物質の対消滅により生成された標準模型粒子を観測することにより暗黒物質の存在を証明する探索手法である。間接探索では銀河中心に存在するニュートラリーノの対消滅により生じた  $\gamma$  線・ニュートリノ・反粒子を観測することで暗黒物質の存在の間接的な証拠を得る。次の節で説明するが有名な実験には AMS-02 実験、PAMERA 実験、BESS 実験、GAPS 実験等の衛星・気球実験等が挙げられる。

- 加速器探索

暗黒物質の加速器探索は標準模型粒子同士を衝突させることによって暗黒物質を直接生み出して観測する手法である。加速器により生み出された SUSY 粒子はただちに崩壊して LSP となる。LSP は電氣的に中性のため、検出されず損失エネルギーとなる。このような事象を捉えることで LSP の計数率、反応断面積等を測定がすることができるはずである。有名な実験施設

には世界最大規模の加速器施設である CERN の LHC や 2011 年に実験が終了したアメリカの Tevatron、日本の Super-KEKB がある。

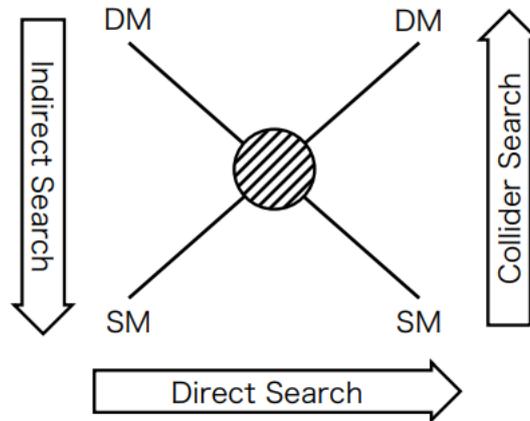


図 1.3: 暗黒物質探索の手法

## 1.4 宇宙反粒子測定による暗黒物質間接探索

間接探索によってターゲットとなる粒子の中に、陽電子、反陽子、反重陽子等の反粒子がある。反粒子は通常の粒子よりも存在量が少なく、宇宙初期からの現在に至るまでの粒子・反粒子の存在比の変化に対する疑問に対する答えとして宇宙の 26.8% を占める暗黒物質の存在証明は重要となる可能性がある。反粒子はその起源が宇宙空間物質と 1 次宇宙線の相互作用による 2 次起源のものと、暗黒物質の対消滅/崩壊による 1 次起源のものが存在すると考えられている。反粒子の中でも反陽子、陽電子はこれまでに多くの実験によって測定されてきているが、2 次起源の Flux が 1 次起源の Flux のよりも優位であり、説明することが難しい。しかし宇宙反重陽子に関しては、核子あたりのエネルギーが数 GeV/n 以下の低エネルギー側で暗黒物質由来の Flux が優位であると考えられており、1 事象でも観測できれば新物理を示唆すると考えられている。本節ではこれまでの実験についてと反重陽子の生成について説明する。

### 1.4.1 反粒子探索の現状

反陽子 Flux、陽電子 Flux、次に述べるような気球、衛星実験により精度良く測定されている。

- AMS-02 実験

AMS-02 実験は TRD, ToF, マグネット, シリコン検出器, RICH, ECAL からなる検出器であり、磁場による曲率、ToF による速度  $\beta$ 、チェレンコフ光の  $\theta$ 、カロリメーターによる  $dE/dX$  等の多くの入射粒子の物理情報を測定して完璧な粒子識別を実現する検出器である。

AMS 実験によって測定されたエネルギースペクトルを 1.5 に示す。左の陽電子のスペクトルは横軸エネルギー、縦軸 Flux であり、10 GeV 以上のエネルギー領域に未知の起源 (Source term) のエネルギー分布があることを示唆した図になっている。2016 年に発表され、新物理の兆候を示唆したものであったが、現在は様々な観測から棄却されている。

また、右図赤点は実際に観測された反陽子のエネルギー分布と、橙色の曲線は WIMP 質量を  $47 \text{ GeV}/c^2$  と仮定した場合の Flux 曲線である。低エネルギー側の超過が見られれば新物理を示

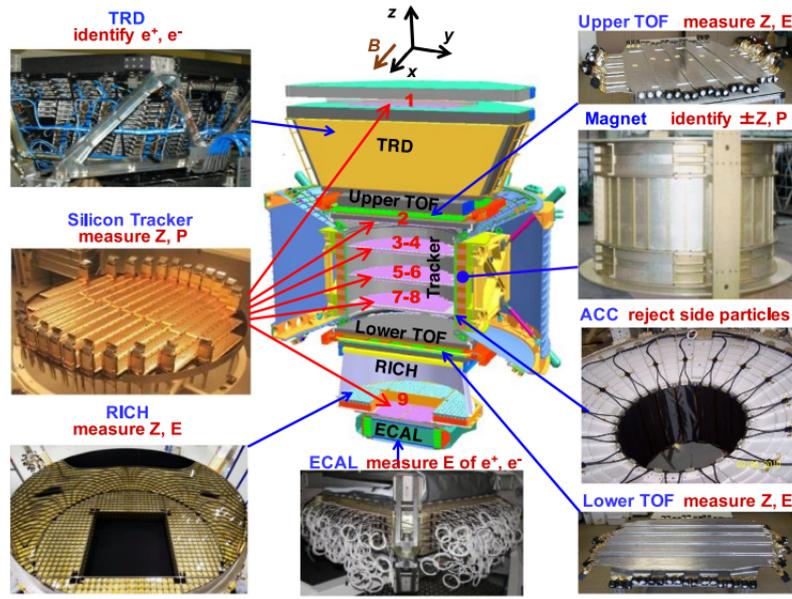


図 1.4: AMS 検出器 [6]

唆するが、その生成起源から二次起源の反陽子 Flux に埋もれてしまうため、非常に高精度かつ大統計の観測を必要とし、優れた結果を得ることが難しいことがわかる。

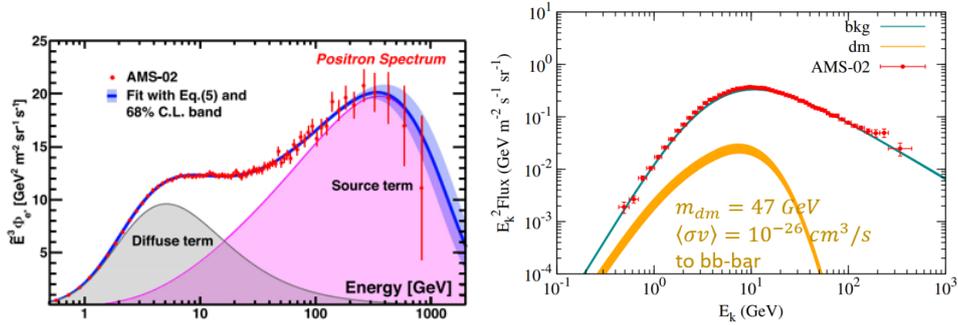


図 1.5: 左：陽電子のエネルギースペクトル 右：反陽子のエネルギースペクトル [6]

● BESS 実験

BESS 実験は南極周回軌道上にて低エネルギー宇宙線の精密なスペクトルを検出することを目的とした実験であり、BESS-Polar1(2004), BESS-Polar2(2007) の 2 回フライトを成功させた実験である [7]。BESS 実験検出器は 1.6 に示すように気球搭載型の上中下段に設置された ToF 検出器、下段にエアロゲル製のチェレンコフカウンター、気球実験用に開発された 1T の一様磁場をかけられる薄肉の超電導ソレノイド磁石、ソレノイド磁石に囲まれた JET 検出器で粒子飛跡、質量、エネルギーを再構成し、粒子識別を行う。BESS-Polar2 実験は南極周回軌道上で 30 日間安定運用を達成しており、気球実験におけるパイオニア的業績を残している。

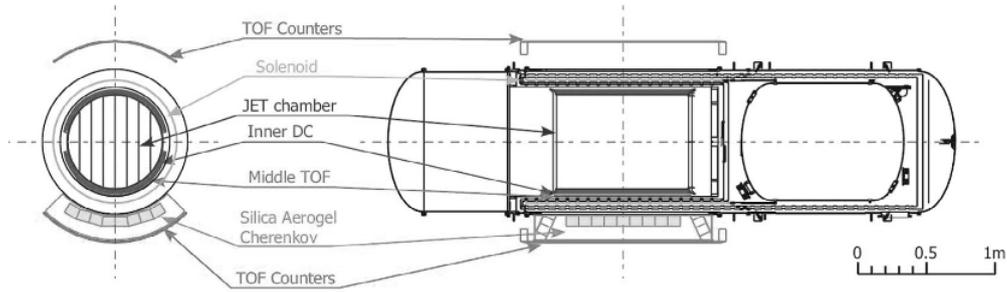


図 1.6: BESS 検出器 [7]

一様磁場の  $B(r)$  のかかった検出器を曲率半径  $r(m)$  で通過する時の電荷  $Z$  の粒子の運動量は

$$p = 0.3ZeBr \tag{1.4}$$

で表される。e は電気素量である。これにより以下の式によりエネルギー単位  $R=Rigidity$  が決まる。

$$R = \frac{pc}{Ze} = 0.3Br \tag{1.5}$$

これにより粒子質量は以下の式で決まる。

$$m^2 = R^2 e^2 Z^2 \left( \frac{1}{\beta^2} - 1 \right) \tag{1.6}$$

ここで  $m$  は粒子質量、 $\beta$  は光相対速度である。飛跡の湾曲方向によって同じ質量の粒子・反粒子を識別することができる。

BESS 実験は 30 日間の観測で反陽子を 7886event 程度取得し、図 1.7 に示すように低エネルギーの反陽子スペクトルを精度良く測定している。また反重陽子 Flux に唯一上限値を与えており、現在  $1.9 \times 10^{-4}$  である。ただし反重陽子 Flux である  $10^{-6}$  まで 2 桁以上の感度を要求されることがわかる。

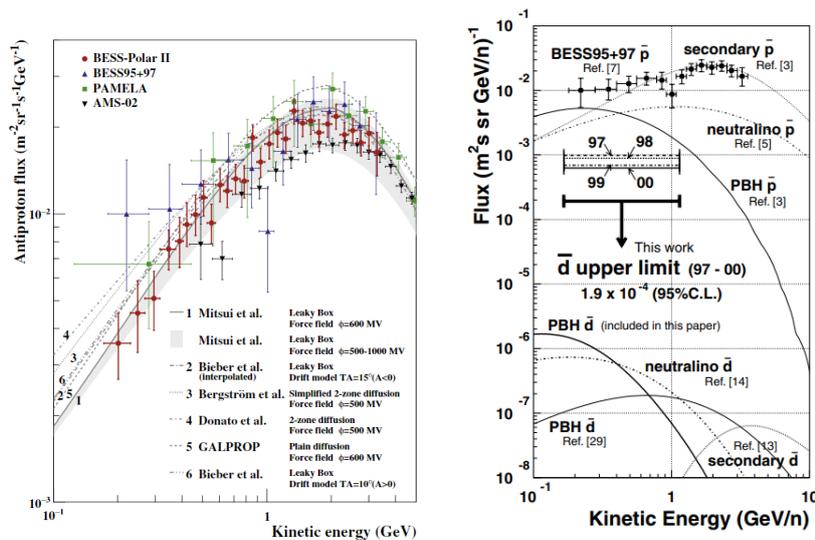


図 1.7: 左：BESS 実験で観測された反陽子数 [7] 右：BESS 実験による反重陽子リミット [8]

● GAPS 実験

GAPS 実験は積層型 Si(Li) 検出器と 2 層の ToF 検出器によって  $\beta$  と  $dE/dX$  から粒子質量識別, 原子核捕獲事象の脱励起過程で生じる特性 X 線と脱励起後の対消滅ハドロンを用いて粒子・反粒子識別を行う検出器である。優れたエネルギー分解能をもつ Si(Li) 半導体検出器を用いるため, 反陽子と反重陽子の X 線のエネルギーを分離することができる。GAPS 実験は 2022 年末フライト予定の反重陽子探索を目的とした実験であり, 我々早稲田大学も参加している液体アルゴン TPC と ToF を使用した GRAMS 実験の先行研究でもある。GAPS 実験は低エネルギーの反重陽子検出に特化しており, <数 GeV/n の反重陽子の Flux の検証を行う予定である。

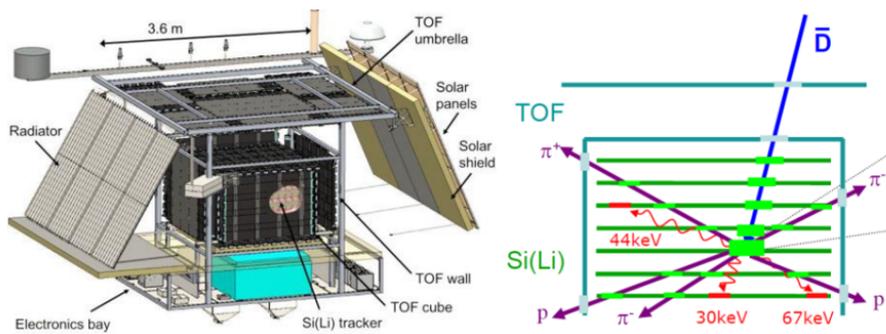


図 1.8: GAPS 検出器 [10]

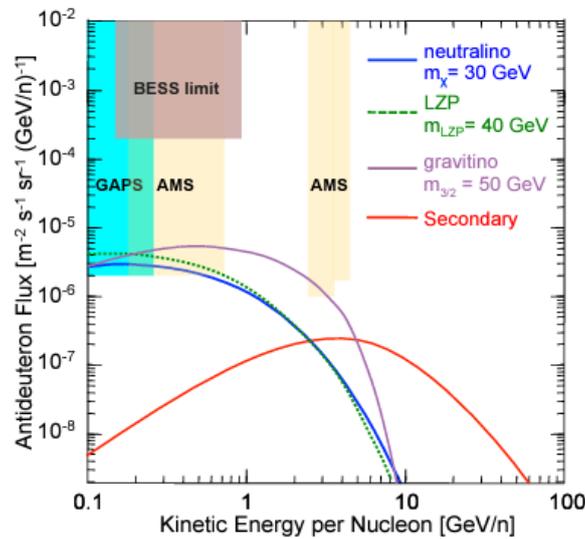


図 1.9: GAPS 実験の予測感度 [10]

## 1.5 宇宙反重陽子

### 1.5.1 2次起源反重陽子

宇宙反重陽子の起源は二つあると考えられており、1つは陽子等の1次宇宙線と星間物質(宇宙空間に漂う星間ガス)が相互作用して生成された反重陽子のことを指し、これを2次起源の反重陽子と呼ぶ。そのため2次起源反重陽子は標準理論の枠組みで生成される反重陽子であると言える。2次起源宇宙反重陽子の生成量は以下の式に従う。[11]

$$Q_N^{sec}(\vec{r}, T) = \sum_{i \in \{p, He, \bar{p}\}} \sum_{i \in \{H, He\}} 4\pi n_j(\vec{r}) \int_{T_{min}^{(i,j)}}^{\infty} dT_i \frac{d\sigma_{i,j}(T_i, T_d)}{dT_d} \Phi_i(\vec{r}, E_i) \quad (1.7)$$

$\vec{r}$  : 天の川銀河中心からの距離

$i$  : 入射宇宙線の各成分

$\Phi_i(\vec{r}, E_i)$  : 各宇宙線  $E_i$ ,  $\vec{r}$  における Flux

$j$  : 星間物質 (ISM) の各成分

$d\sigma_{i,j}(T_i, T_d)$  : 運動エネルギー  $T_d$  をもつ反重陽子の微分断面積

星間物質との反応で生成される2次起源反粒子の生成エネルギー閾値は衝突の力学より決定される。

反重陽子についてはバリオン数保存の観点から  $pp \rightarrow pppn\bar{p}\bar{n}$  反応を考えれば、 $\sqrt{s} = 6mc^2$  となり、結果的に  $E_{th} > 17mc^2$  を導くことができる。よって反重陽子生成については低エネルギー側の生成が強く抑制され図 1.10 に示すように  $p-p$ ,  $p-He$ ,  $He-p$ ,  $p-\bar{p}$ ,  $\bar{p}-He$  等のそれぞれの生成チャンネルで以下のようなスペクトルを描く。

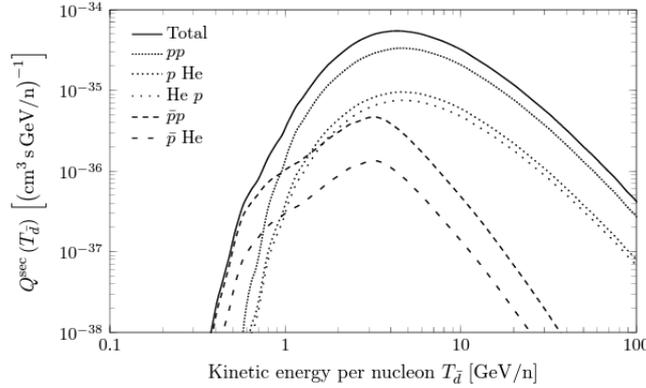


図 1.10: 2次起源宇宙反重陽子のスペクトラム [11]

これら生成のスペクトルは地上における加速器実験等で精度良く検証されており、信頼性の高い分布であると考えられる。

### 1.5.2 1次起源反重陽子

1次元の反重陽子は暗黒物質の対消滅/崩壊, PBH(Primordial Black Hole), 超新星爆発等の起源による反重陽子を示す。図 1.11 は暗黒物質が対消滅した時の反重陽子生成までの流れであり暗黒物

質の対消滅後，標準模型粒子がハドロン化によって  $\bar{p}$  と  $\bar{n}$  を構成，ある閾値エネルギー以上で  $\bar{p}$  と  $\bar{n}$  が合体し，反重陽子を作るという流れである。

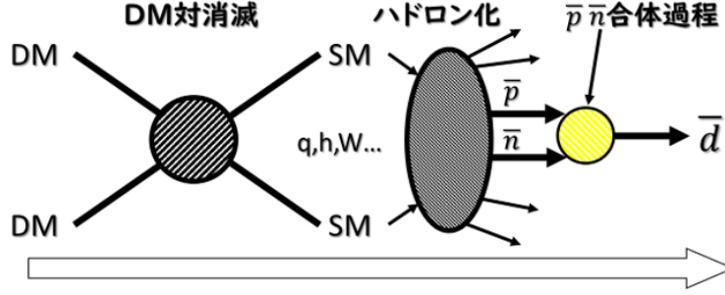


図 1.11: 1次起源反重陽子生成過程

暗黒物質の対消滅/崩壊の反重陽子生成量は以下の式で表される。

$$Q_N^{DM,ann}(\vec{r}, E) = \frac{1}{2} \left( \frac{\rho_{DM}(\vec{r})}{m_{DM}} \right)^2 \langle \sigma \mu \rangle \frac{dN_{\bar{d}}}{dE_{\bar{d}}} \quad (1.8)$$

$$Q_N^{DM,dec}(\vec{r}, E) = \frac{1}{\tau_{DM}} \frac{\rho_{DM}(\vec{r})}{m_{DM}} \frac{dN_{\bar{d}}}{dE_{\bar{d}}} \quad (1.9)$$

$m_{DM}$  は暗黒物質質量， $\rho_{DM}$  は暗黒物質密度である。反重陽子の合体のエネルギー閾値は Coalescence モデル [12] によるエネルギー閾値が有力である。Coalescence モデルによると反陽子の運動量ベクトル  $\vec{q}_p$  と反中性子の運動量ベクトル  $\vec{q}_n$  の総和が Coalescence 運動量  $p_0$  以下の場合に反重陽子が生成される。 $p_0$  は実験で決められる値であり，不定性が大きい図 1.12 に示すような実験で求められている。

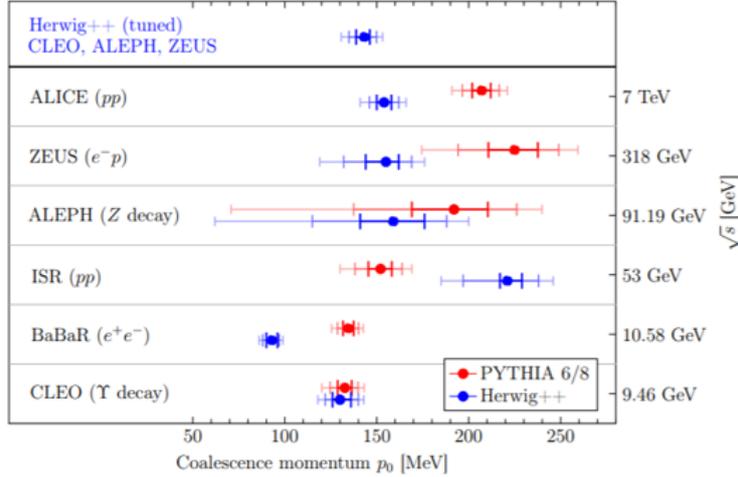


図 1.12: Coalescence モデルによる反重陽子生成のパラメータ  $p_0$ [12]

現状の Coalescence モデルによるエネルギー閾値は 50MeV-250MeV の間にあると考えられており，この値を使用して運動エネルギーあたりの反重陽子生成数は以下の式で表される。

$$\frac{dN_{\bar{d}}}{dT_{\bar{d}}} = \frac{p_0^3}{6} \frac{m_d}{m_{\bar{p}} m_{\bar{n}}} \frac{1}{\sqrt{T_{\bar{d}}^2 + 2m_{\bar{d}} T_{\bar{d}}}} \frac{dN_{\bar{n}}}{dT_{\bar{n}}} \frac{dN_{\bar{p}}}{dT_{\bar{p}}} \quad (1.10)$$

$dN_{\bar{d}}/dT_{\bar{d}}$  は反重陽子スペクトル,  $m_{\bar{p}}, m_{\bar{n}}$  は反陽子, 反中性子質量,  $T_{\bar{p}}, T_{\bar{n}}$  反陽子, 反中性子運動エネルギーである。反陽子, 反中性子の運動エネルギーが高いと反重陽子の生成は抑制されるため WIMP 質量が小さいほど低エネルギー側での反重陽子生成量が大きくなる。したがって低エネルギー側で観測することができれば, WIMP の質量領域を絞ることができるため期待が高まっている。

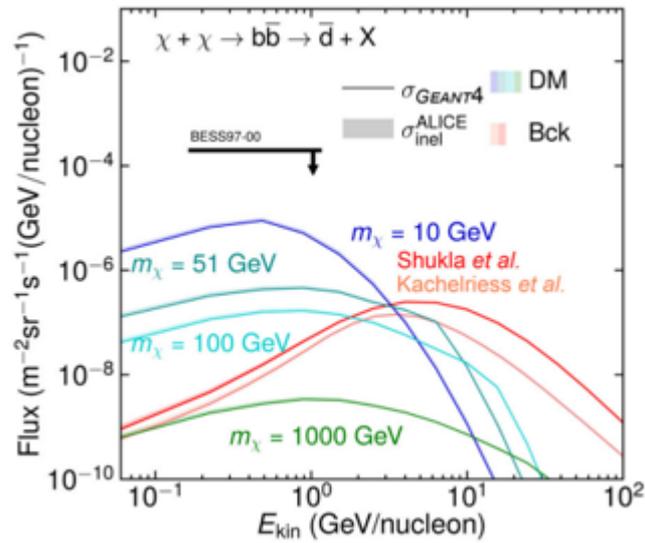


図 1.13: 暗黒物質由来の反重陽子スペクトル [5]

## 2 GRAMS 実験

### 2.1 物理目標

GRAMS 実験は液体アルゴン TPC を用いた宇宙 MeV ガンマ線と宇宙反粒子探索を目的とした日米協力の次世代の気球・衛星実験である。宇宙 MeV ガンマ線と宇宙反粒子探索 2 つの目標を同時に達成し、かつ地上においても正確な温度・気圧コントロールを必要とする液体アルゴンを、気球で南極の高度 30km に打ち上げるという今までにない挑戦的な実験であり、光検出技術、電子読み出し技術、気球での液体アルゴン安定運用等、どの分野においても最先端の技術を必要とする。宇宙 MeV ガンマ線の開発については日本においては東京大学が開発を行っており、早稲田大学では宇宙反粒子探索に焦点を当てて実験を行っている。そこで本論文では宇宙反粒子探索に向けた開発について述べる。

宇宙線の観測は前章でも述べたように、様々な気球・衛星実験によりその Flux の測定が行われ続けてきた。図 2.1 の横軸は 1 核子あたりの運動エネルギーを表し、縦軸は高度 30Km の上空で 1 平方メートルに単位立体角から 1 秒間に何個の粒子が降ってくるかという Flux を表す。2 種類の黒点はそれぞれ AMS と BESS-polar2 実験によって測定された陽子 Flux であり、青点は AMS と BESS-polar2 実験によって測定された反陽子 Flux を示す。 $10^{-4}$  にある黒線は BESS 実験が上限を引いている世界最高感度の反重陽子制限である。緑線が  $30\text{GeV}/c^2$  WIMP の対消滅による反重陽子の予想 Flux であり、赤線は 1 次宇宙線と星間物質 (ISM) の相互作用で生成された反重陽子 Flux である。赤線の反重陽子生成過程は加速器による反重陽子生成実験等の知見からかなり高い精度で一致していると考えられている。この 2 つの反重陽子 Flux を比較すると、低エネルギー側 (Kinetic Energy per Nucleon  $< 1\text{GeV}/n$ ) で  $30\text{GeV}$  (WIMP) 暗黒物質の対消滅由来の Flux が 2 次起源の Flux を 2 桁以上超過するため、ほぼゼロバックグラウンドでの検出が可能であり、低エネルギーの反重陽子の 1Event でも検出できれば暗黒物質の存在の有力な証拠となる。

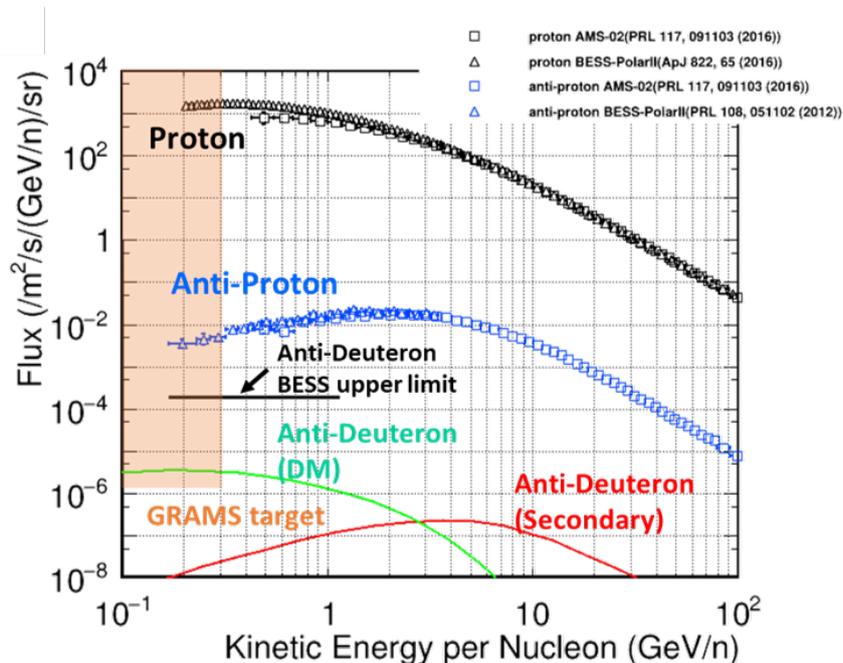


図 2.1: 宇宙反粒子 Flux と GRAMS 実験ターゲット

表 2.1: GRAMS のターゲットとなる反重陽子の  $\beta$ , Rigidity, 運動量領域

粒子種	相対速度 $\beta$	Rigidity	運動量	Flux
反重陽子	0.43-0.65	100-300 MeV/n	900-1600 MeV/c	$10^{-6} [/\text{m}^2/\text{s}/(\text{GeV}/n)/\text{sr}]$

表 2.1 は図 2.1 において橙のハッチで囲ったように、GRAMS がターゲットとしている反重陽子の Rigidity 領域は Rigidity=100-300MeV/n であるが、液体アルゴンで反陽子、反重陽子の識別を実証した実験は存在しない。よって GRAMS の気球実験の前に、まずは地上試験で実証試験を行う必要がある。

## 2.2 GRAMS 実験検出器

GRAMS 実験の検出器について説明する。GRAMS 実験検出器は現状プロポーザルの段階であり、図 2.2 に示すように  $300\text{cm} \times 300\text{cm} \times 200\text{cm}$  の外層 ToF と  $150\text{cm} \times 150\text{cm} \times 30\text{cm}$  の内層 ToF の 2 層の ToF(速度  $\beta$ ) によって粒子速度を測定する。現状 ToF の厚みは決定されていないが、先行研究である GAPS 実験では 5mm の ToF が設置されており GRAMS 実験においても 5mm 程度の ToF を用いる可能性は高い。一方、液体アルゴン TPC は内層 ToF に包まれる  $140\text{cm} \times 140\text{cm} \times 20\text{cm}$  サイズとなっており、宇宙 MeV ガンマ線観測との兼ね合いから薄型で大面積な検出器構造が考えられている。液体アルゴン TPC は入射粒子が液体アルゴンと相互作用して発生するシンチレーション光と電離電子を利用して、エネルギー or 質量の再構成と飛跡の再構成を行う検出器である、一方で磁場を用いない検出器であるため、粒子・反粒子といった電荷の識別には負電荷の粒子が原子核に捕獲される原子核捕獲事象を用いる。これらについては後に説明するが以上のようにして GRAMS 実験検出器は粒子質量と電荷の識別を行うことができる検出器の構造となっている。また、液体アルゴン TPC の中には MeV ガンマ線の観測との兼ね合いもあり、コンプトン散乱の再構成がしやすいように検出器内をセグメント化してその中に SiPM を設置し、光検出を行うコンセプトも現在考えられている。図 2.2 右はそれを示した図であり、これからコンプトン散乱のパイルアップ等を防ぎ、事象再構成を行いやすくする予定である。

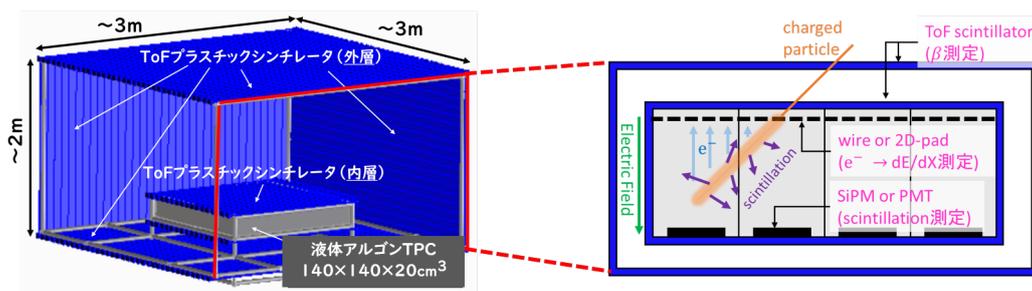


図 2.2: GRAMS 検出器

### 2.2.1 液体アルゴンの性質と利点

GRAMS 実験では液体アルゴン TPC を使用するが、液体アルゴン TPC は様々な加速器実験や地下実験等で使用されているカロリメータ検出器である。液体アルゴンの主な基本性質を表 2.2 に示す。

表 2.2: 液体アルゴンの基本性質 [14]

特性	パラメータ
原子番号	18
原子量	39.9
電離の W 値 (eV)	23.6
蛍光の W 値 (eV)	19.5
蛍光波長 (nm)	128
放射長 (cm)	14.0
最小 dE/dX(MeV/mm)	0.213
最小 dE/dX(fC/mm)	1.44
沸点 (K)	87.3
融点 (K)	83.8
比重 ( $\text{kg cm}^{-3}$ )	1.40

表 2.2 にあるように液体アルゴンは入射粒子からエネルギーを受け取ると図 2.3 のように excitation(励起) or ionization(電離) によってガンマ線 or 電子を放出する。ionization/excitation の比は 0.79[16] であり、全エネルギーの内約 8 割が電離に使用される。励起成分の 1 部は heat に使用されるがこれを測定した実験はなく存在しているのは光または電子を捉える検出器のみである。励起された Ar は二量体 ( $\text{Ar}_2^*$ ) を作り、 $\text{Ar}_2^*$  が脱励起する際に生じる光は 128nm の真空紫外光を放出する。

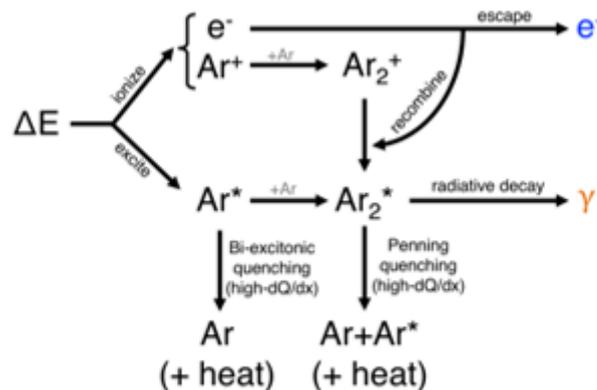


図 2.3: 液体アルゴンの電離/発光プロセス [16]

また図 2.3 にあるように電離によって生じた電離電子とアルゴンイオンの内、1 部のアルゴンイオンはアルゴン二量体を作り光を発生させる。これを再結合効果と言う。再結合定数 R は電場に依存しており以下の式で表される。

$$R = \frac{A}{1 + \frac{k}{E} \frac{dE}{dX} \frac{1}{\rho}} \quad (2.1)$$

$A$  : 定数

$k(kV/cm \cdot g/cm^2/MeV)$  : 定数

$E(kV/cm)$  : ドリフト電場

$dE/dX(MeV/cm)$  : エネルギー損失

$\rho(g/cm^3)$  : 液体アルゴンの密度

$A$  と  $k$  は実験的に決められる値であり、イタリアの ICARUS 実験で  $A=0.8$ ,  $k=0.05$  と求められている。式 (2.1) からわかる通り、電場が大きいほど再結合する確率は低くなる。また  $dE/dX$  の項や密度の逆数の項が入っているのは定性的に  $dE/dX$  や密度が大きいほど周囲の原子と出会う確率が上がるためであると考えられる。

こういった効果を踏まえてアルゴンが用いられている理由は、アルゴンは希ガスであり、閉殻しているため電離電子を捕獲しにくいという性質があるからである。TPC は荷電粒子が検出器を通過した際の電離電子を測定する検出器のため、電離電子が捕獲されにくいという性質はエネルギー情報を失わないために非常に重要な性質である。また、アルゴンは地球大気中に窒素、酸素に続く割合で存在する気体であり、比較的安価に手に入れることのできる媒質であるため、気球実験を行う際には液体の安定運用の R&D を行う際の予算面での損失が少なく、その取り回しの良さから見ても非常に良い媒質であると言える。

### 2.2.2 液体アルゴン TPC の原理

GRAMS 実験で用いる液体アルゴン TPC の基本的なコンセプトを図 2.4 に示す。まず液体アルゴン TPC 中で荷電粒子が通過するとアルゴン原子を励起・電離して生じるシンチレーション光と電離電子が生じる。

シンチレーション光は PMT や SiPM 等の光検出器で測定する。液体アルゴンのシンチレーション光は波長が 128nm の真空紫外光であるため通常の PMT や SiPM は感度がない。そのため、波長変換材を PMT 窓面や SiPM 表面に蒸着しておくことにより波長変換して測定する。シンチレーション光は電離電子に比べ非常に速い ( $\sim ns$ ) 信号であるため、荷電粒子が入射した時間 ( $t_0$ ) を決めるのに用いる。この情報がないと電離電子がアノードへ到達した時間を分けることができないため重要である。

電離電子は TPC 上部のアノードで測定する。TPC 内をアノードとカソードに分け、電場をかけておくことで電子がアノードへ移動する。アノードをピクセル状、あるいは X-Y のストリップ構造にしておくことで電離電子の X-Y 方向を決定できる。また、TPC 内を一定の電場にしておくことで電子の移動速度を一定にすることができる。これによってシンチレーション光との時間差から Z 方向の位置を決定することができる。このようにして入射粒子の 3 次元位置情報と、エネルギーを測定可能である。但し、電子の移動距離が長くなると信号時間が延びるため、アノード・カソードのみではパイルアップが起りやすくなる。このため、グリッドを設けてグリッド・アノード間を電子が移動している時だけ信号を読み取るようにしている。

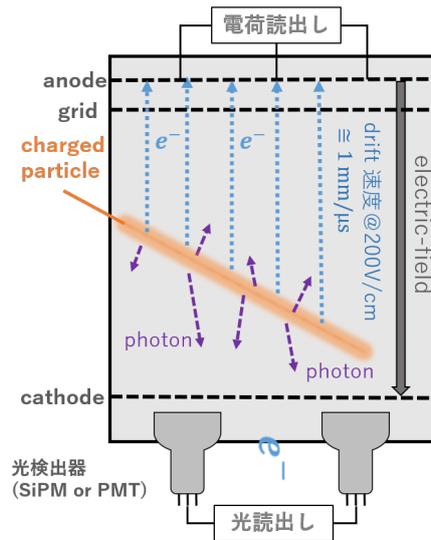


図 2.4: 液体アルゴン TPC の概念図

図 2.5 の左図に示すように、液体アルゴンの電離電子数は純度に応じて電離電子の時定数が変化する。表 2.2 にもあるように、液体アルゴン中では約  $1\text{fC}/\text{mm}$  と信号が非常に小さいため、S/N が非常に重要になるが、純度が低い場合には電子寿命が短くなるため、電離電子信号が小さくなってしまふ。一方で図 2.5 の右図に示すように電場を大きくすると、電子のドリフト速度が速くなるため、同じ寿命でもアノードで検出器できる信号量が増加する。これらのことにより、液体アルゴン TPC ではより多くの信号量を稼ぐために”高純度”+”高電場”な検出器であることが重要となる。

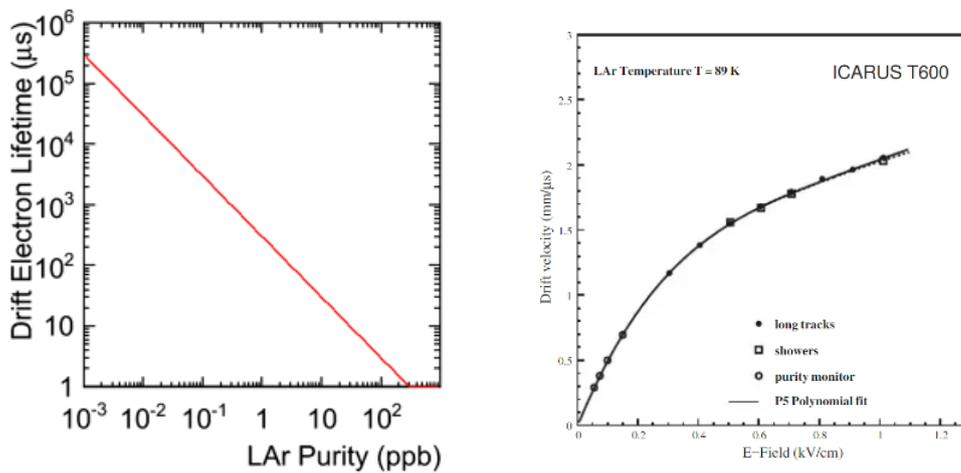


図 2.5: 左：液体アルゴン純度と電子寿命の関係 右：電場 (KV/cm) と電子ドリフト速度の関係 [15]

## 2.3 粒子識別手法

GRAMS 実験における反粒子探索は 2 層の ToF と液体アルゴン TPC のみで行う。粒子識別は質量の違う陽子、 $\pi$  中間子、K 中間子、重陽子等を識別する能力が求められる。粒子・反粒子識別には質量が同じで電荷の違う粒子を識別する能力が求められる。本節では GRAMS 実験における粒子・反粒子探索の識別手法について説明する。

## 2.3.1 粒子 (質量) 識別

GRAMS 実験の粒子識別には図 2.2 にも示した通り、2 層のプラスチックシンチレータによる ToF (Time of Flight) から求められる粒子速度  $\beta$  と液体アルゴン TPC による  $dE/dX$ 、飛跡長の情報を用いる。ToF と液体アルゴン TPC の  $dE/dX$  を組み合わせた粒子識別はこれまでも早稲田も参入した 2010 年に行われた J-PARC の T-32 実験 [18] や LArIAT 実験 [17] 等のビームテストでも行われており、その手法はすでに実証されているものである。図 2.6 は T-32 実験における陽子、 $\pi$  粒子、陽電子の粒子飛跡であり、800MeV/c の運動量で液体アルゴン中に打ち込まれている図である。1cm/1ch の 1 次元ストリップ読出しであり、陽子のような重い粒子は 800MeV/c だと 20cm ほど進んで止まることがわかる。逆に  $\pi$  粒子は MIP のため、検出器を通過する。このように各粒子によって同じ運動量でも  $dE/dX$  が異なっていることがわかる。

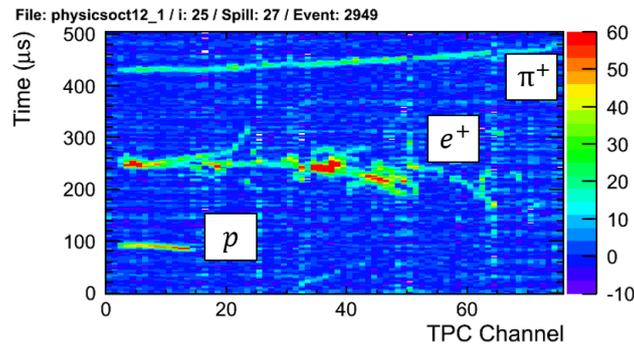


図 2.6: T-32 実験における 800MeV/c の粒子飛跡

このように同じ運動量での測定では飛跡長や  $dE/dX$  が異なるため、粒子識別が可能である。一方で GRAMS 実験での粒子識別は同じ Rigidity の粒子を分ける必要がある。物質中の  $dE/dX$  は Bethe-Bloch の関係式より以下の関係式で表せる。

$$-\frac{dE}{dX} = 2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[ \ln \left( \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{max}}{I^2} - \beta^2 \right) \right] \quad (2.2)$$

$N_a$  : Avogadro 定数 =  $6.022 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$

$r_e$  : 電子古典半径 =  $2.817 \times 10^{-13} \text{cm}$

$m_e$  : 電子質量 =  $0.511 \text{MeV}/c^2$

$Z$  : 物質の原子番号

$A$  : 物質の原子質量

$z$  : 入射粒子の電荷

$I$  : 物質の平均イオン化ポテンシャル

$W_{max}$  : 入射粒子が物質に与えることが出来る最大エネルギー

$\beta$  : 相対速度 ( $v/c$ )

$\gamma$  : Lorentz 因子 ( $1/\sqrt{1-\beta^2}$ )

Bethe-Bloch の関係式は、 $dE/dX$  が粒子種によらず標的の原子番号と電荷と速度のみで決まることを示している。そのように考えると同じ  $\beta$  で電荷が同じ反陽子・反重陽子は分離できないように思えるが、質量が異なれば同じ  $\beta$  でも運動量が異なるため液体アルゴン中を進む距離が変わる。図 2.7 はこのことを検証するために Geant4Simulation を用いて液体アルゴンに運動量を変えての (反) 陽子と (反) 重陽子を打ち込んだ時の  $dE/dX$  分布である。

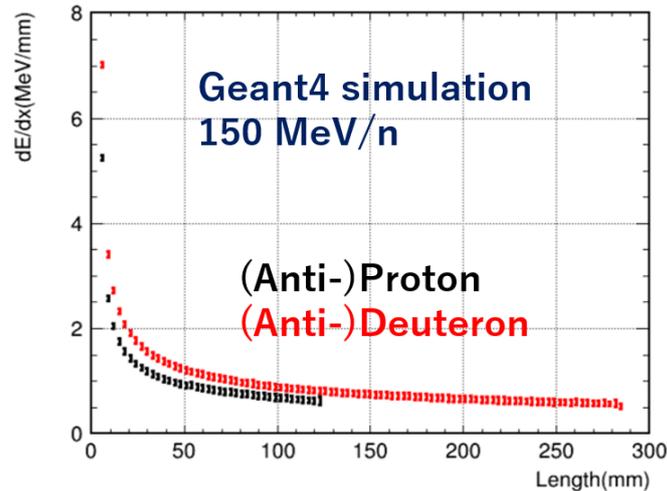


図 2.7: 左 : LAr における同じ  $\beta$  の時の  $dE/dX$  と距離の関係

同じ Rigidity =  $150\text{MeV}/n$  ( $\beta=0.5$ ) の反陽子, 反重陽子を比較すると  $dE/dX$  にわずかな差があり, 質量が 2 倍違うため, 停止までの距離が変わることを示している。このように同じ  $\beta$  の粒子質量識別についても  $dE/dX$ , 飛跡長から区別できると考えている。

最後に GRAMS 実験の ToF への要請を考える。図 2.2 のように, 現状の GRAMS 検出器の ToF 構造は外層  $300\text{cm} \times 300\text{cm} \times 200\text{cm}$  と内層  $150\text{cm} \times 150\text{cm} \times 30\text{cm}$  となっており, 上から粒子が入射した場合は  $150\text{cm}$  の距離, 横からの粒子の入射も測定することを考えた場合では最短距離が  $75\text{cm}$  となる。ToF への時間分解能の要求として, GRAMS 実験のターゲットである反重陽子  $300\text{MeV}/n$  以下の領域を測定できる時間分解能が必要となる。 $300\text{MeV}/n$  は  $\beta = 0.65$  であるので  $75\text{cm}$  の場合時間差は約  $4.9\text{ns}$  程度となる。よって  $4.9\text{ns}$  の時間差を測定できる ToF が用意できれば最低限良いということになる。

### 2.3.2 粒子・反粒子識別

GRAMS 実験では反粒子探索を行うため粒子と反粒子の識別を行う必要がある。従来の宇宙線観測実験では粒子と反粒子の識別には磁場を検出器内にかけておくことにより, 粒子と反粒子がローレンツ力により逆向きに曲がるためこれを使用して識別を行ってきた。しかし, GRAMS 実験では粒子・反粒子識別には磁場を用いずに負電荷の粒子のみがアルゴン原子核と相互作用して引き起こす原子核捕獲事象を用いる。

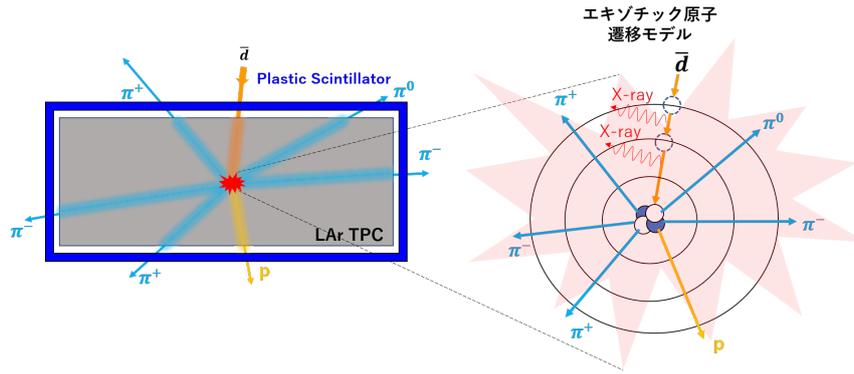


図 2.8: 原子核捕獲事象による粒子・反粒子識別

原子核捕獲事象による粒子・反粒子識別は GAPS 実験 [10] の手法を採用している。まず、標的原子の中に入射してきた粒子 or 反粒子が周囲の標的原子を弾性散乱・非弾性散乱・電離等することによってエネルギーを失い標的原子中で停止する。停止した反粒子は 1 標的原子核の最外核に捕獲され、その後脱励起しながら、電子や X 線を放出し、準位を落として原子核に近づく。最終的に標的原子核と対消滅し、複数のハドロンを放出する。この現象は負電荷の反粒子にしか起こらないため、これにより粒子・反粒子識別ができると考えている。特性 X 線のエネルギー以下の式で表される。

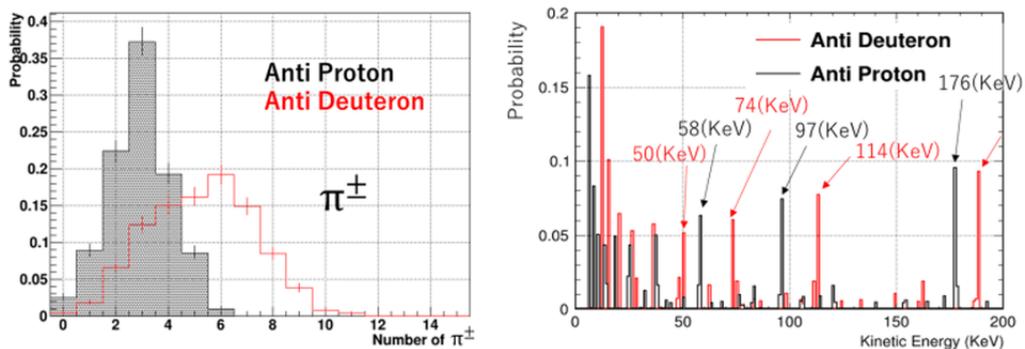
$$E_{\gamma} = (zZ)^2 \frac{M^*}{m_e^*} R_H \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (2.3)$$

ここで、 $z$  は電子電荷、 $Z$  は原子核電荷、 $M^*$  は捕獲粒子と原子核の換算質量、 $m_e^*$  は軌道電子と原子核の換算質量、 $R_H$  はリュードベリ定数 (13.6 eV)、 $n_f, n_i$  は準位数である。このように、特性 X 線のエネルギーは標的の原子番号のみに依存することがわかる。また対消滅後の  $\pi^{pm} + \pi^0$  の期待値に関しては重心系エネルギー  $\sqrt{s}$  を用いて以下の式で表される [13]。

$$\langle M_{\pi^{\pm,0}}^p \rangle = 2.65 + \ln \sqrt{s} \quad (2.4)$$

荷電  $\pi^{\pm}$  粒子に関しては期待値は反陽子の場合 5.1, 反陽子の場合 3.1 個である。

特性 X 線のエネルギーと対消滅後のハドロン数を Geant4 シミュレーションにより計算した結果を図 2.9 に示す。特性 X 線の計算には Geant4 の G4EmCaptureCascade という物理モデルを用い、対消滅ハドロンの計算は Fritiof(FTF) モデルを用いている。

図 2.9: 対消滅後の荷電  $\pi$  粒子数と原子核捕獲事象後の X 線スペクトル

特性 X 線はバックグラウンド等の観点から観測が難しい可能性があるが、対消滅後のハドロンに

については十分に検出できる可能性がある。よって粒子・反粒子識別は対消滅後のハドロンの有無によって行うことを検討している。

### 過去の原子核捕獲事象観測結果例

#### 1. GAPS 実験

GAPS 実験はシリコン検出器により原子核捕獲事象後の特性 X 線を捉える。GAPS 実験はこの検証を KEK のビーム試験 [10] において Al ターゲットに反陽子を捕獲させた場合の X 線を NaI 検出器測定することで行っている [10]。図 2.10 は 2005 年に KEK の 12GeV 陽子シンクロトロンで測定された結果であり、黒線は実測値、緑線はフィット結果、青線は KEK の環境放射等からのバックグラウンド、赤線はバックグラウンドから超過した X 線のエネルギースペクトルを示す。Al は原子番号 13 であり、式 (2.3) に代入すると反陽子-Al の間で X 線のエネルギーは 92KeV, 50KeV, 30KeV であり、図 2.10 の赤線に示すように一致したスペクトルを実際に観測できていることを示している。

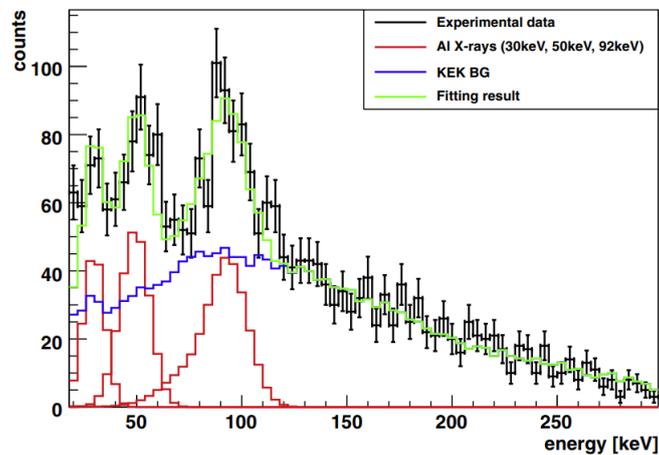


図 2.10: GAPS 実験における X 線の観測 [10]

#### 2. LArIAT 実験

原子核捕獲事象後の対消滅によるハドロンの検出の観測例もあり、LArIAT 実験によって [17] 反陽子の原子核捕獲事象のようなイベントが確認されている。左から長い直線を引き、停止点でブラッグピークを描いているのが反陽子だと考えられる。停止点から対消滅後の荷電  $\pi$  粒子や  $\pi_0 \rightarrow 2\gamma \rightarrow e^+ + e^-$  の飛跡が見えていることが確認できる。

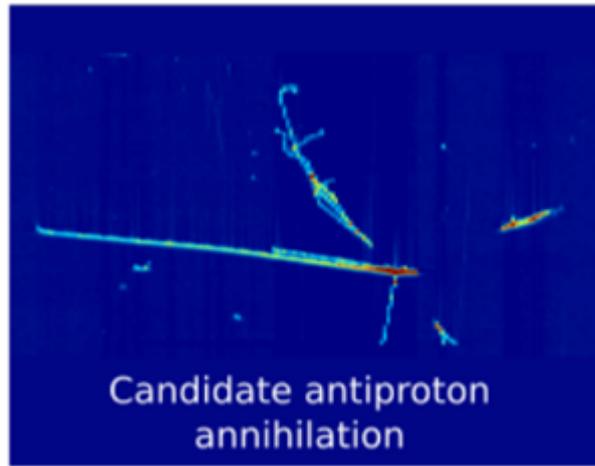


図 2.11: LArIAT 実験における反陽子捕獲事象 Like な事象 [17]

このように過去の実験により、反陽子を用いた原子核捕獲事象の観測は行われている。但し原子核捕獲事象を用いて液体アルゴンでの粒子・反粒子識別手法の実証はされていない。そのためまずは地上試験での実証が必要となる。

### 2.4 液体アルゴン中での反陽子・反重陽子の反応確率

液体アルゴンと反粒子の反応では、捕獲、非弾性散乱、通過の3種類がある。GRAMS のターゲットである反重陽子識別では捕獲事象を用いる。図 2.12 は Geant4Simulation による  $30 \times 30 \times 60\text{cm}$  の液体アルゴンに反陽子を打ち込んだ場合の入射運動量に対する3つの反応の割合を示す。

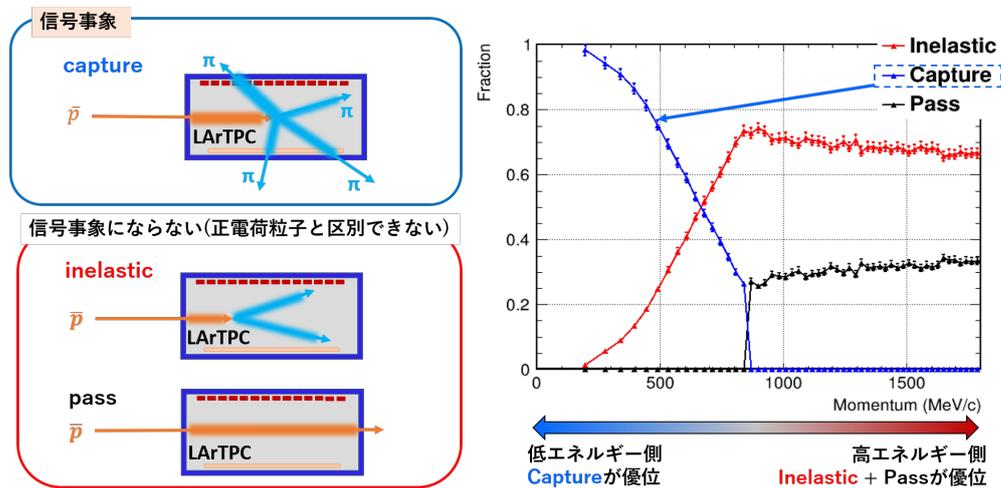


図 2.12: 液体アルゴンにおける運動量に対する各反応の割合

図 2.12 より、運動量が低い領域では捕獲される割合が高く運動量が高い領域では捕獲の割合が減り、非弾性散乱が増える。捕獲は運動量を完全に失ってから起こるため、運動量がさらに高い領域では  $60\text{cm}$  の液体アルゴン中ではエネルギーを落とすことができず、捕獲される前に検出器外へ出るため、通過が優勢になる。捕獲事象であれば、 $\beta$  によって粒子種ごとに飛跡距離が決まっておりと  $dE/dX$  から質量を再構成でき、対消滅後のハドロンの有無で粒子か反粒子かの判別が行いやす

い。Inelastic は途中までの  $dE/dX$  から質量の識別はおおむねできるが、反陽子の Inelastic と陽子の Inelastic の後の 2 次粒子が  $\pi$  粒子のみの場合は区別がつかないため識別が難しい。但し、反粒子の Inelastic の中でも 2 次粒子で反陽子を放出し、反陽子捕獲事象を捉えることができれば、粒子か反粒子の区別ができる。これは陽子から反陽子が出てくることは低エネルギー領域ではないため、このような区別が行えることを利用したものである。

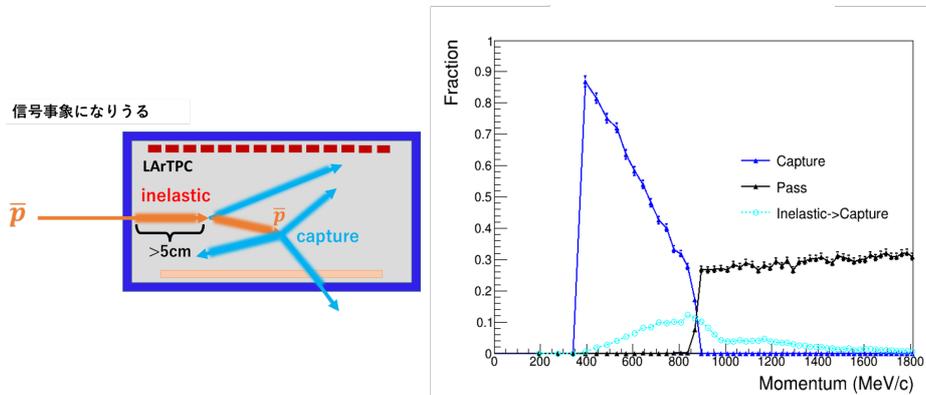


図 2.13: 信号になりうる事象 (非弾性散乱からの捕獲事象)

以上のことから磁場を使わない捕獲事象による粒子・反粒子識別を行う GRAMS 実験では低エネルギーハドロンの捕獲確率が高いという事実があるため非常に理にかなった実験であると言える。また、Inelastic 後の反陽子を用いれば高いエネルギーの反陽子・反重陽子信号まで捉えることが期待でき、こちらも検証する必要がある。但し、液体アルゴンでの原子核捕獲事象を用いた粒子反粒子識別の手法は実機で確立されていないのでこれを実証する必要がある

## 2.5 本研究の目的

前節で述べたように液体アルゴン TPC を用いた原子核捕獲事象による粒子・反粒子識別の実証はなされていない。これを検証する為には地上において反陽子・反重陽子ビームを用いてその試験を行う必要がある。

早稲田大学では、国内で最大の陽子加速器である J-PARC にてその検証を行おうと考えている。その検証の為にまず早稲田大学にて小型の液体アルゴン TPC を用いて液体アルゴン TPC の性能評価と  $\mu^+$ ,  $\mu^-$  の識別を行い、その後加速器試験に向かうスケジュールとなっている。本研究では、2022 年 10 月初頭に行われた液体アルゴン試験の結果とシミュレーションによる波形の再現、さらにその液体アルゴン TPC のシミュレーション結果を用いて加速器試験に向けた検出器の開発方針を議論した結果について取り扱う。

### 3 宇宙線 $\mu$ 粒子を用いた地上試験

#### 3.1 序論

早稲田大学では GRAMS 実験の目標の一つである宇宙反粒子探索を焦点にしている。気球実験上での液体アルゴン TPC の運用は未だ未開拓の開発要素であり、まずは地上での安定運用・TPC の性能評価試験が重要となる。早稲田大学で 2022 年度の 10 月初めにまず GRAMS 実験に向けた液体アルゴン TPC 開発の第 1 歩目として地上での液体アルゴン TPC を使用した宇宙線  $\mu$  粒子を用いた  $\mu^+/\mu^-$  の識別試験を行った。詳しくは同年櫻井修論にまとめられてあるが、本章では次章で説明する加速器試験へ向けた液体アルゴン TPC の理解のつなぎとしてその試験のセットアップとシミュレーションによる波形の理解を行った内容について説明する。

#### 3.2 宇宙線 $\mu$ 粒子

宇宙線  $\mu$  粒子の自然界の存在比は  $N_{\mu^+}/N_{\mu^-} = 1.25 \sim 1.35$  であり、正電荷の  $\mu$  粒子の方がわずかに多い。 $\mu$  粒子の崩壊寿命は  $2.2 \times 10^{-6}$  秒であり、地上には手の平サイズ ( $10\text{cm}^2$ ) に 1Hz 程度の割合で降り注いでいる。物質中で停止した宇宙線  $\mu^+/\mu^-$  粒子は以下の反応を起こす。

宇宙線  $\mu^+$  粒子は検出器中でエネルギーを失い停止すると、寿命を迎えて電子ニュートリノ、反  $\mu$  ニュートリノとミッセル電子を放出して崩壊する。

$$\mu^+ \rightarrow \nu_e + \bar{\nu}_\mu + \text{Michel } e^+ \quad (3.1)$$

宇宙線  $\mu^+$  粒子場合の崩壊は  $2.2 \times 10^{-6}$  秒である。

一方で宇宙線  $\mu^-$  粒子は検出器中でエネルギーを失う場合、寿命を迎えて崩壊する場合と原子軌道に捕獲されて原子核と弱い相互作用をして逆  $\beta$  崩壊をする場合の 2 パターンがある。

$$\mu^- \rightarrow \bar{\nu}_e + \nu_\mu + \text{Michel } e^- \quad (3.2)$$

$$\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu \quad (3.3)$$

宇宙線  $\mu^-$  粒子場合は  $2.2 \times 10^{-6}$  秒の自然崩壊と 80ns 程度の捕獲の寿命が混在するため寿命は早くなる。寿命は物質の原子量の大きさと相関があり、原子量が多くなるほど早くなる。液体アルゴンの場合  $0.6 \times 10^{-6}$  秒程度である。

これにより、液体アルゴン TPC 中では停止点から電子が出てくる場合と、逆ベータ崩壊によりミッセル電子が出てこない場合と分けられる。これにより  $\mu^+/\mu^-$  を識別するのが本実験の目的である。

#### 3.3 試験セットアップ

##### TPC の設計

今回の 2022 年 10 月初めに行われた試験を以降 Run22.1 と称する。Run22.1 で使用した TPC はこれまでの ANKOK 実験で使用してきた  $\Phi$  500mm の 200L 容器に収まる大きさに設計され、図 3.1 左図に示すように、サイドプレートには 300mm  $\times$  300mm  $\times$  1.6mm 厚の PCB(Printed Circuit Board) 基板を使用して 4 面を囲っており、上部には 326mm  $\times$  326mm のアノード、アノードグリッド、下部にはカソードがされており Fiducial は約 300mm  $\times$  300mm  $\times$  300mm のサイズとなる。TPC の側

面には液体アルゴンの蛍光波長 128nm を PMT で観測可能な可視光波長に変換するための TPB が塗布されている ESR が貼られている。この TPC 領域に液体アルゴンを満たすと 40kg となるため、この TPC は GRAMS40 と名付けられている。作成した TPC は ANKOK 実験でも使用されていたステンレス製の  $\phi 500\text{mm}$  真空断熱容器 (200L 容器) に収まるサイズで作成され、これを図 3.1 右図に示すようにトップフランジにつるす形で設置している。

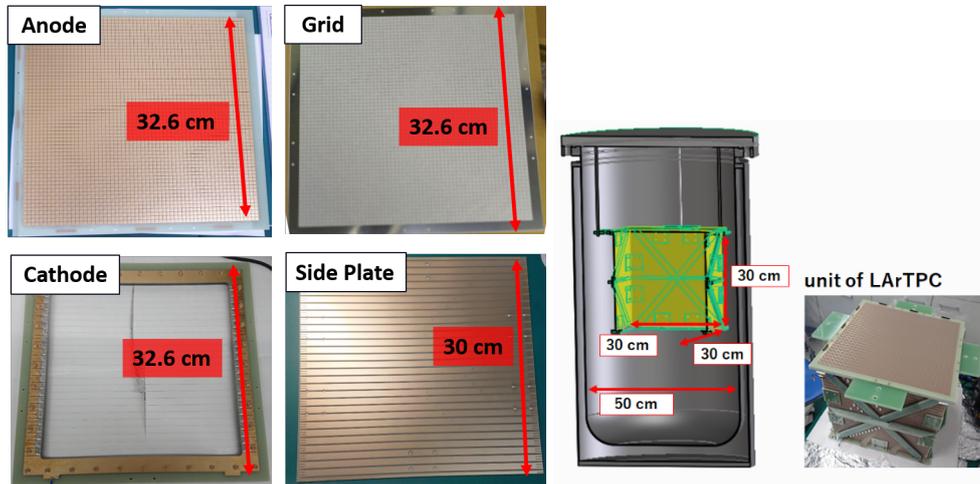


図 3.1: 左図：TPC 各基盤ののサイズ 右図：200L 容器に設置された GRAMS40 概略図

### Anode の構造

信号読出しのアノードには  $5\text{mm} \times 5\text{mm}$  でパッドが配置されており、表と裏にジグザグに配線されている。これによって  $1\text{cm} \times 30\text{ch}$  の 2D ストリップを構築し、図 3.2 に示すように千鳥読みと呼ばれる読み出し構造を作成している。この配線の長所としては 1つのパッドに 1つのチャンネルの配線のみのため、開発が非常にシンプルであることが挙げられる。逆に短所は、1つのパッドに 1つのチャンネルの配線しかなされていないため、2次元読み出しの際には  $x$  と  $y$  の信号比が崩れる場合があることである。そのため、 $x$  に信号があるが  $y$  に信号がないといった現象が起き、解析が少々複雑になる点がある。今回は地上試験へ向けたテスト開発のため、千鳥読み出しの構造を採用した。

## Anode構造(千鳥)

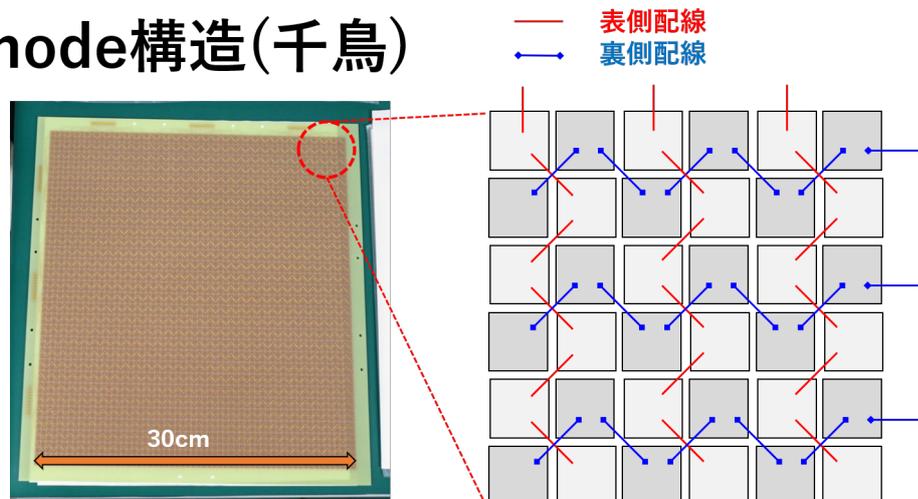


図 3.2: Anode 基盤の構造

### 早稲田液体アルゴンテストスタンド

図 3.3 は早稲田液体アルゴンテストスタンド全体の概略図である。まず、エルフタンクから 200L 容器充填された液体アルゴンは容器への熱流入や底ヒータにより蒸発しガスアルゴンになる。ガスアルゴンはガス循環系へ送られ、ガス循環系で電子信号を減衰させる酸素や水といった不純物を取り除くためのフィルターや光信号の Slow 成分を減衰させる窒素を取り除くためのフィルターを設置しており、そこを通過したガスアルゴンは液化機へ送られる。液化機ではガスアルゴンを液化して液体アルゴンを生成し、200L 容器へ送り返している。このようにアルゴンを閉鎖系でサイクルさせながらガス循環系により純度を、液化機により温度をコントロールしている。

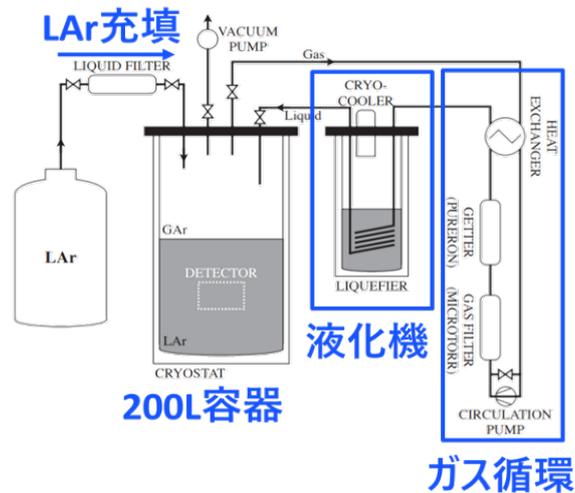


図 3.3: 早稲田 LAr テストスタンド

### 3.4 電子信号読出しエレクトロニクス：LTARS2014

信号の測定の為に使用するエレクトロニクスには KEK のニュートリノグループと Open-it の枠組みで開発され、液体アルゴン温度での電子読み出しの実現を目標としている LTARS (Low Temperature Analog Readout System) という ASIC を使用した。LTARS2014 は読みだした電荷信号を整形・増幅する役割を持つ。LTARS は 2014 版のみならず LTARS2018 とその後も開発は続いているが、本実験で使用した LTARS2014 は黒森修論 [19] に詳述しており、表 3.1 に示す特性を持つ。Cdet は検出器容量のことであり、2つの電極間に生じるいわゆるコンデンサーの容量と同義である。

表 3.1: LTARS2014 の基本性質 [19]

項目	パラメータ
最小入力電荷 (絶対値)	1fC
最大入力電荷 (絶対値)	90fC
コンバージョンゲイン	9.7mV/fC @ (input 50fC, Cdet 0pF)
ENC	<2000electron @ (Cdet 300pF)
ピーキングタイム	3 $\mu$ s
チャンネル数	32ch
電源電圧	$\pm 0.9$ V
消費電力	<50mW
チップサイズ	5mm $\times$ 5mm

LTARS2014ASIC は図 3.4 に示すようにアナログボードに 2 つ搭載されており下側の保護回路 (図 3.4 中の surge voltage protection circuit) から来た 64ch 分の電荷信号を増幅・整形して後段のデジタルボード側を送る役割を持つ。LTARS2014ASIC から出力された信号はケーブル間にノイズが乗るのを防ぐために差動バッファを経てデジタルボード中の 8 個の ADC によって電荷信号から電圧信号に変換される。ADC 一個当たり 8ch 分の処理が可能のため 64ch 分の信号を処理可能である。この信号を FPGA(Field Programmable Gate Array)Artix-7 によって制御し LAN ケーブルを介して PC へ送る。

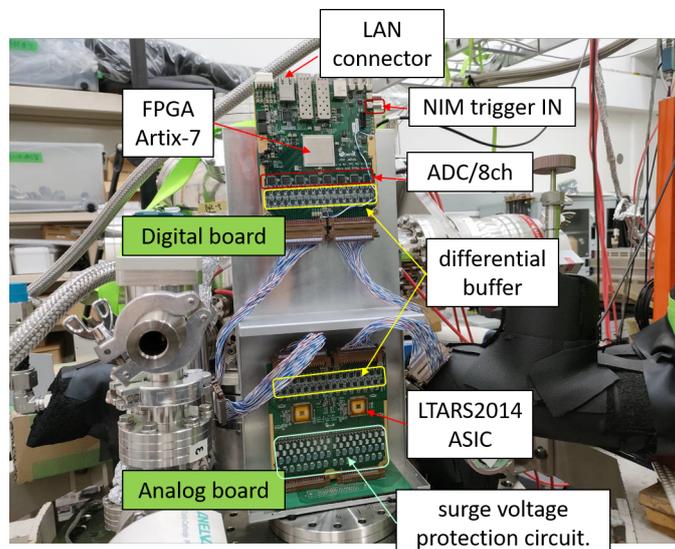


図 3.4: LTARS2014

デジタルボードに搭載されている FPGA にはファームウェアが搭載されており、信号情報はデフォルトで以下の表 3.2 に示すパッケージで PC へ送られる。

表 3.2: ファームウェアの基本性質 [19]

項目	パラメータ
サンプリング周波数	2.5MHz(400ns/bin)
サンプル数	4000 (1.6ms)
トリガータイミング	1000 (400us)
電圧範囲	$\pm 2V$
bit 数	12bit
デジタイズ	0.488mV/ADCCount

FPGA はユーザーが任意に論理回路をプログラムすることができる集積回路のため、表 3.2 に示す項目もファームウェアを書き換えることで変更することができる。Run22.1 ではデータ取得の際に 1Event あたりの容量を少なくするため、サンプル数を 2000Sample、トリガータイミングを 400Sample 目としてデータ取得を行った。

### 3.4.1 LTARS2014 信号波形

入力電荷 20fC を LTARS2014 に入力した際に送られる Ch1 の電圧信号波形を図 3.5 左図に示す。コンバージョンゲイン約 10mV/fC、デジタイズが 0.488mV/ADCCount のため、400ADC 付近に波高値のピークを持つことが計算によって導き出されるが実際の結果もその通りになっていることがわかる。右図は入力電荷を変えていった場合の出力 ADCCount の値の関係となっており、100mV=100fC あたりから頭打ちになっていることがわかる。ダイナミックレンジが 90fC であることから正しい応答であり、黒森修論と相違ない結果である。

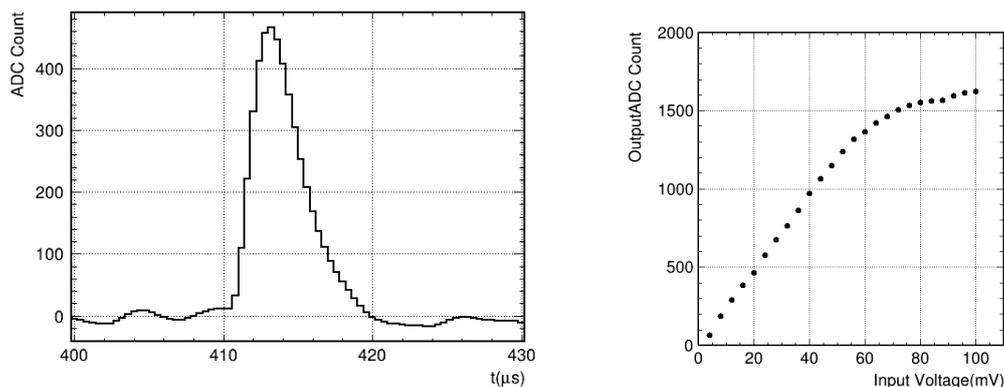


図 3.5: 左：LTARS2014 20fC 1Event 右：Conversion gain

## 3.5 ノイズ対策

電子読み出しを行う際に非常に重要となるのは S/N 比である。S/N 比とは S が信号の大きさ、N がノイズの大きさを示し、信号に対するノイズの大きさのことである。ノイズが大きいと小さい信号がノイズに埋もれてしまうため、ノイズの軽減は非常に重要である。図 3.6 は行ったノイズ対策の基

本的な概念である。ノイズの種類には内的ノイズと外的ノイズの2種類が挙げられる。

### 内的ノイズ

内的ノイズは内部回路のキャパシタンスの大きさに依存する  $1/f$  ノイズや、抵抗や温度によって回路を流れる電子の揺らぎが変化することによる thermal ノイズ、キャリアが、junction や真空などの障壁を越えるときに発生する shot ノイズ等がある。これらは検出器の開発や、読出しエレクトロニクスの回路を工夫することによって下げることのできるノイズである。

### 外的ノイズ

外的ノイズは電源から侵入するノイズや、グラウンドを統一しないことによって発生するグラウンドループ、外部の電磁波などからケーブルを振動させることによって侵入するノイズ等がある。図 3.6 は Run22.1 試験で行った外的ノイズ対策の基本的な方法であり、信号ケーブルや電源ケーブルを短くすることでケーブルのキャパシタンスやケーブルに侵入するノイズの絶対数を減らし、LTARS の ASIC に入る電磁波ノイズを減らすために、周りをアルミやステンレス製のシールドで囲み、それぞれ GND が統一されていないものを一つの電源に集約する形でグラウンドループを防いだ。このようにすることでノイズをかなり抑えることができるため、ノイズの理解は非常に重要である。

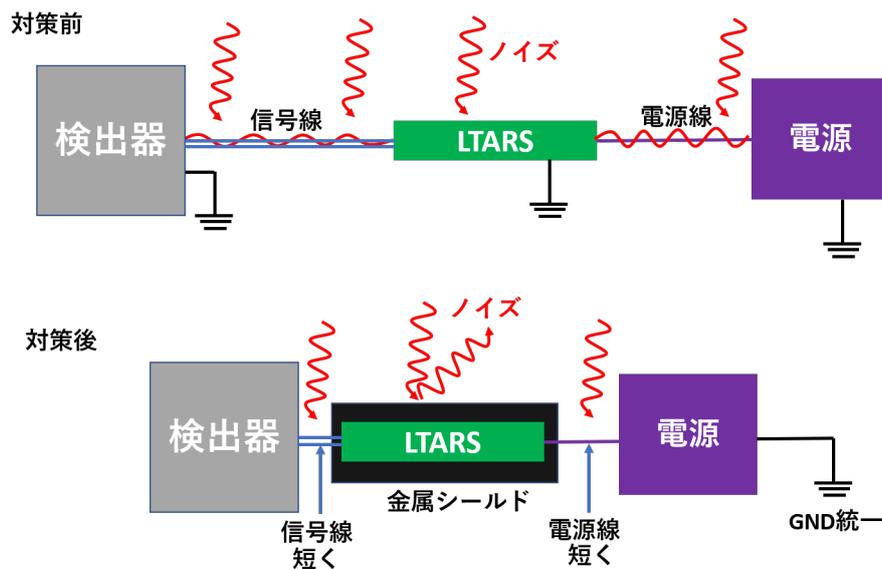


図 3.6: グラウンド対策

## 3.6 DAQ の構築

Run22.1 で構築した DAQ について図 3.7 にて説明する。宇宙線  $\mu$  粒子が液体アルゴン中に入射すると、シンチレーション光と電離電子が生じる。光信号は非常に速いため PMT で測定され、SIS 社製の FADC へ送られる。SIS の FADC は 250MHz サンプリング、14bit でデジタル化可能な NIM モジュールであり、4ns/bin で測定可能である。電子信号は LTARS で測定されるが、光信号の測定モジュールと電子信号の測定モジュールが異なるため、Event を同期する必要がある。そこで LTARS のデジタルボードに備え付きの NIMOUT から Event 番号を 32bit の信号として出力するようにファー

ソフトウェアを書き換えた。SIS に信号を入力する。このようにして取得した信号の内、LTARS からの電子信号を PC1 へ光信号を PC2 で取得し、最終的に PC2 でデータを Merge している。

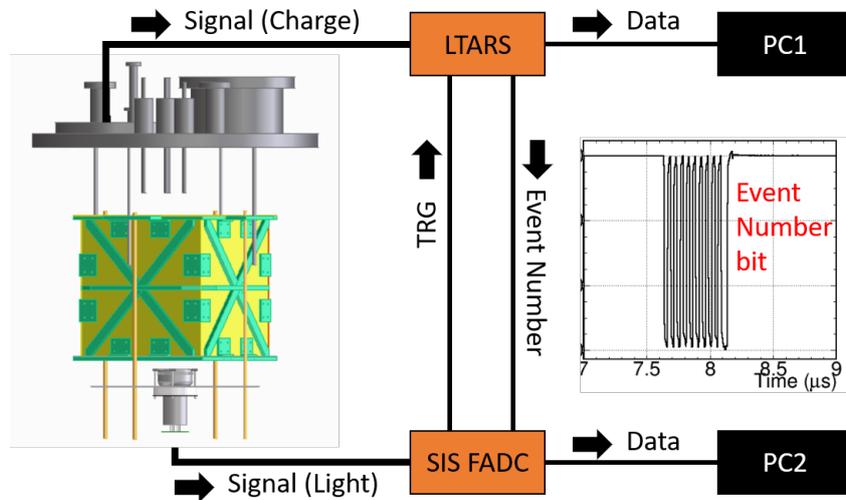


図 3.7: Run22.1 の DAQ セットアップ

### 3.7 宇宙線信号事象

このようにして DAQ, TPC, 読出しエレクトロニクスを整え、液体アルゴン TPC による信号取得を行った。宇宙線信号事象の結果を図 3.8 に示す。信号は図中上から TPC 通過した Event, TPC 中で崩壊した Event, 捕獲された Event を表す。それぞれの段のプロットの内一番左の波形は横軸時間, 縦軸 FADCCount の光信号であり、例えば崩壊事象は最初のミュオンによる光信号の後, 崩壊して Michel 電子の光信号が見えていることがわかる。このように崩壊 Event は 2 つの光信号で区別することができる。各段真ん中 2 つの青い 2D プロットは電子読み出しによる粒子飛跡を示す。それぞれ X 軸に  $X_{ch}, Y_{ch}$ , Y 軸に時間を表す。Z 軸は ADCCount で重みづけしており  $dE/dX$  を表し, 暖色になっている場所が粒子が通過した点であることを示す。一番上段の通過 Event は緑色の飛跡が描かれており, MIP 以上の  $\beta$  で高エネルギーの  $\mu$  粒子が通過したと考えられる。decay と Capture は停止点付近で赤色の Z 軸を示し, ブラッグピークが見えていることが確認できる。

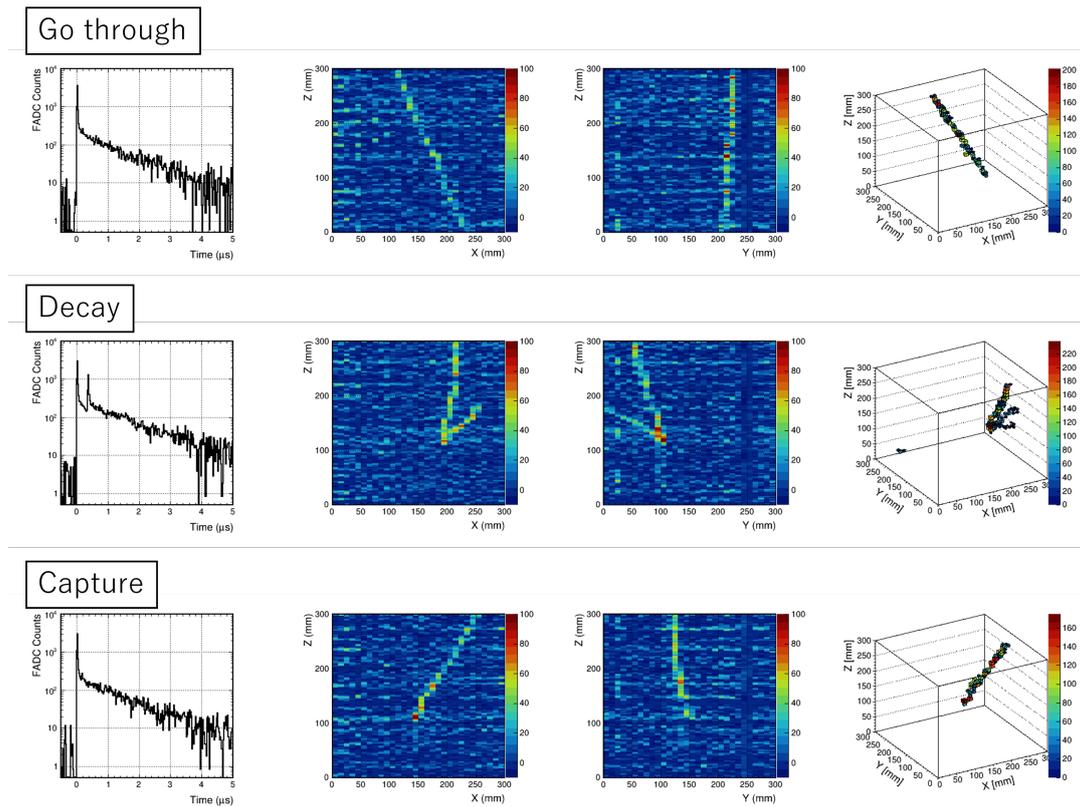


図 3.8: 宇宙線信号 上段：通過 Event 中段：崩壊 Event 下段：捕獲 Event

### 3.8 シミュレーションによる信号波形の再現

液体アルゴンでの宇宙線  $\mu$  粒子の信号を理解するために、シミュレーションによる信号波形の再現を行った。これにより加速器試験等の実際の信号波形に生かすことができると考えている。具体的には以下の手順で Simulation データを作成した。

#### Geant4 による粒子飛跡の構成

1. Geant4(ver.4.10.07) で早稲田 LAr テストスタンドを作成
  - ・ トップフランジ： $\phi 550\text{mm}$ ，厚さ：60mm
  - ・ 容器： $\phi 500\text{mm}$ ，高さ 1000mm，厚さ：内層 3mm，外層 2mm
  - ・ ガスアルゴン： $\phi 500\text{mm}$  厚さ：300mm
  - ・ 液体アルゴン： $\phi 500\text{mm}$  厚さ：700mm
  - ・ 液体アルゴン TPC：300mm  $\times$  300mm  $\times$  300mm

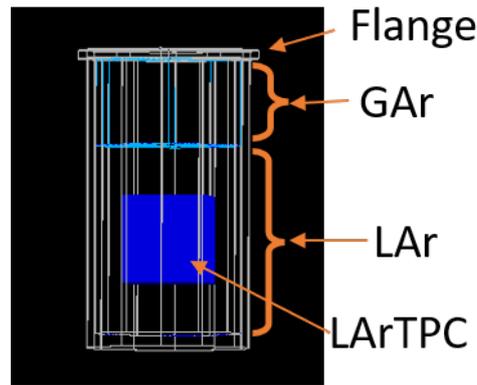


図 3.9: 作成した Run22.1 のシミュレーションセットアップ

2. Geant4 上の LArTPC に向けてミューオンを入射
3. LArTPC 中の 4 つの粒子飛跡のパラメータ ( $x, y, z, dE/dX$ ) を 0.1mm 単位で Ntuple につめ, root ファイルとして保存
4. root ファイルを千鳥読出しの波形作成用シミュレーションコードで読みこみ, 波形を作成

#### 液体アルゴン応答

Geant4 で出力されたエネルギー損失  $dE/dX$  の結果は, 荷電粒子が液体アルゴン中で落とした全  $dE/dX$  であるため, 実際には 2 章 2 節 1 項で説明したように, 電離/蛍光比をシミュレーション結果に対して考慮する必要がある。また, 電子のドリフト速度や, 再結合定数, 電子の拡散効果, 純度, LTARS の波形を考慮することで, 実際の信号波形を再現することができるので, シミュレーション波形作成に際しては液体アルゴン応答として次のパラメータを考慮した。

項目	パラメータ
電子拡散効果	1mm の球殻
電場 $E$ (kV/cm)	0.1~0.4
電子ドリフト速度 $V$ (mm/ $\mu s$ )	$2\sqrt{E}$
蛍光/電離比	0.21
再結合定数 $R$	0.8
電子寿命 (純度効果)	$\tau = 0.1\sim 300$
ピーキングタイム	3us
Time Window (bin 数)	800us (2000bin)

このようにすることで, 矩形波を LTARS の信号の波形と同様に再現可能である。

#### 千鳥波形の再現

波形再現には同時に千鳥読出しのアノード構造をコード上で再現する必要がある。作成する際は以下のようなアルゴリズムで行った。

1. 5mm  $\times$  5mm のパッドを  $x$  に 60 個,  $y$  に 60 個作成し 300mm  $\times$  300mm の 2 次元平面を作成

2. 端から偶数列目の奇数番目, 奇数列目の偶数番目を順番に選び 1ch を構成し, X30 チャンネルを生成
3. 端から偶数行目の偶数番目, 奇数行目の奇数番目を順番に選び 1ch を構成し, Y30 チャンネルを生成
4. ある 5mm  $\times$  5mm のパッドに Geant4 の飛跡が通ったらそのパッドが属するチャンネルの信号として出力

千鳥読みは前項で示したように, アノードの構造がジグザグの構造を持っているため図 3.10 に示すように横軸ドリフト時間, 縦軸エネルギーの時, 同じエネルギー損失の荷電粒子が通過した場合でも通常の 2 次元の線ストリップの構造と違って波形が複雑になることがわかる。

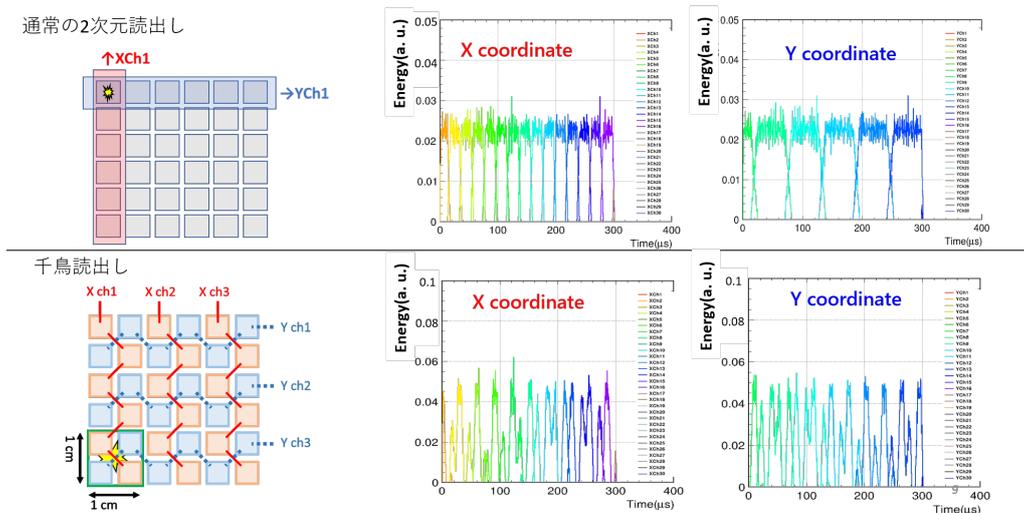


図 3.10: 通常の 2 次元読み出しと千鳥読み出しの波形の構造の違い

### ノイズの再現

ノイズは Run22.1 で取得した信号の内, 信号がない Event を使用して再現した。周波数関数は以下の式のようにフーリエ級数展開で表される。

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1} a_k \cos(kx) + b_k \sin(kx) \quad (3.4)$$

ここで  $a_0/2$  は定数項であり,  $a_k, b_k$  はそれぞれ正弦と余弦の係数である。また周波数分布における強度は以下の式で表される

$$amplitude = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad (3.5)$$

この式を用いて, 実データに対して周波数解析を行い, 正弦と余弦の係数分布を作成する。周波数分布からランダムに周波数を抽出し, 抽出した周波数に対する係数を係数分布からランダムに抽出してノイズを再現する。このようにして作成されたノイズの分布は以下の図 3.11 ようになる。

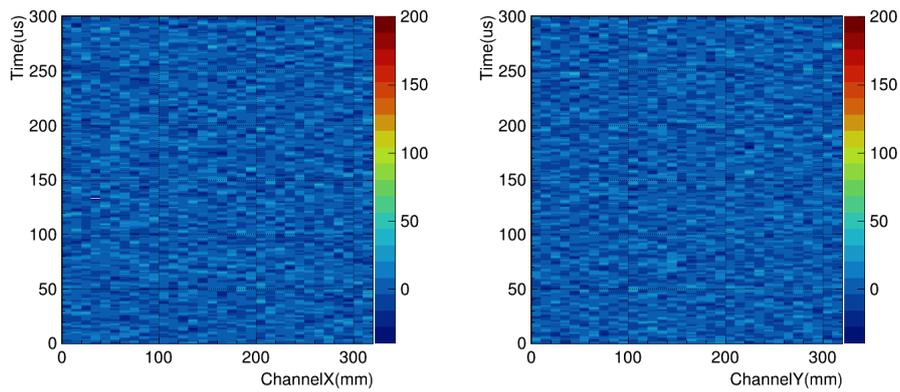


図 3.11: 再現したランダムノイズ

### 3.8.1 実際の信号との比較

これにより実際に観測された宇宙線事象との比較を行った。図 3.12 は 400V/cm の電場の時の TPC 中で捕獲・崩壊した実データである。

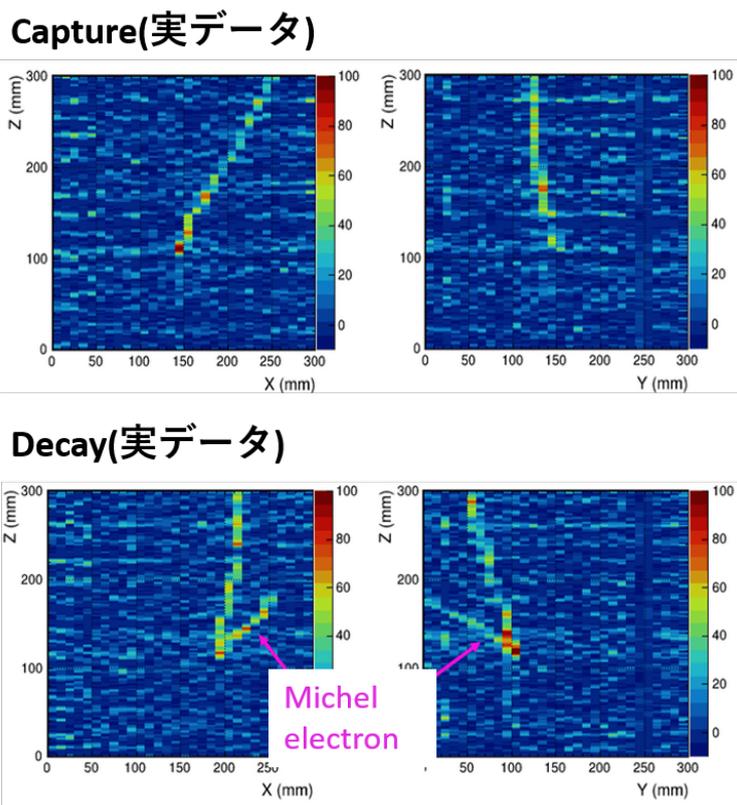


図 3.12: 宇宙線通過 1 事象 (実データ)

この事象を千鳥読出しのシミュレーションによって再現する。作成したデータが以下である。

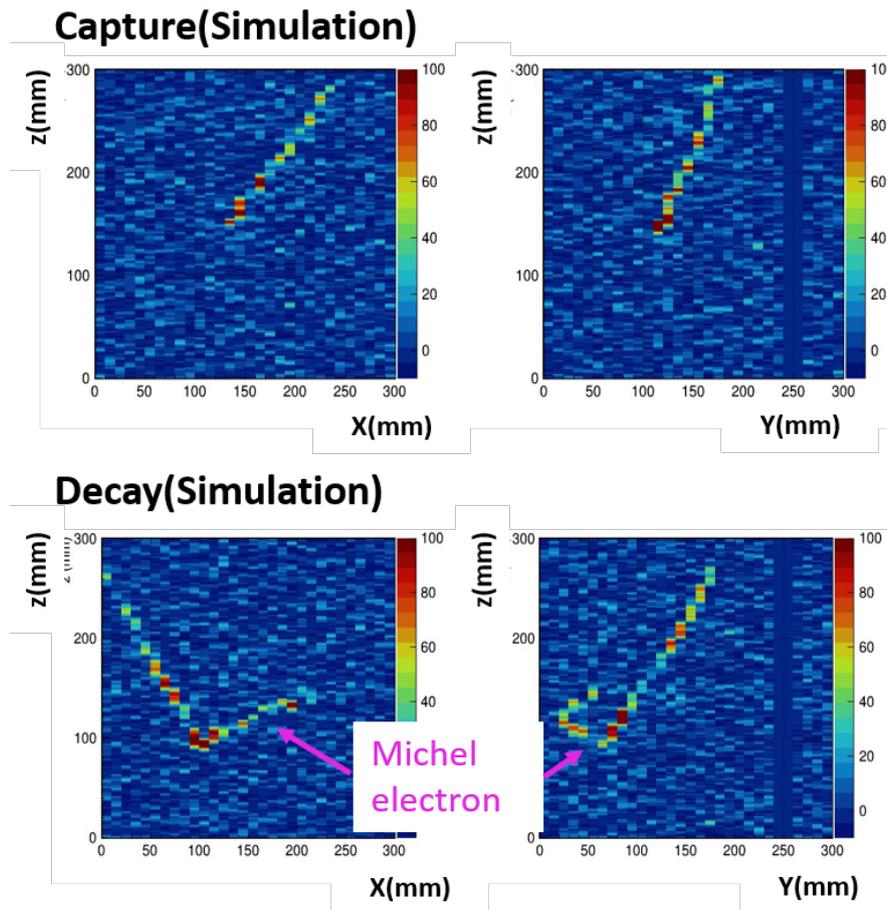


図 3.13: 宇宙線通過 1 事象 (Simulation)

このように目で見える限り、液体アルゴン TPC の応答パラメータの考慮と千鳥読出しの考慮により、実データと同様の S/N の飛跡をシミュレーションで再現することができた。但し、実データの周期的なノイズはまだ考慮できていないため、エネルギーの定量的な評価等含めて今後検証していく必要がある。

## 4 J-PARCK1.8BR ビームラインを用いた粒子・反粒子識別試験計画

### 4.1 加速器ビーム試験の目的

前章までで GRAMS 実験へ向けた最初の開発としてまず早稲田地上において液体アルゴン TPC を用いた実験を行ったことを説明した。その結果実際の信号を用いて信号を再現するシミュレーションを構築し再現することに成功した。本章では次の地上試験のステップとして加速器ビーム試験に向けた開発課題を議論する。GRAMS 実験へ向けた開発課題としては

- LArTPC+ToF の組み合わせによる背景事象除去能力の実証
- LArTPC による原子核捕獲事象を用いた粒子・反粒子の識別手法の実証

が挙げられる。

背景事象除去能力の実証に関しては 2 章図 2.1 にもあるように 150MeV/n の宇宙反重陽子 1 事象を観測する為には陽子は  $10^9$ 、反陽子  $10^4$  だけ背景事象が存在すると言える。陽子と重陽子は質量が 2 倍程度違う同じ  $\beta$  であっても  $dE/dX$  が近く反応の種類も捕獲・非弾性散乱があり、検出器の精度によっては信号を間違える可能性がある。そのため反粒子に対しては  $1/10^4$  を区別することができる能力、粒子に対しては  $10^9$  を識別できる能力が必要であると考えている。

表 4.1: 150MeV/n の反重陽子に対する背景事象数

粒子	Flux $m^2/s/(GeV/n)/sr$	背景事象数
陽子	$10^3$	$10^9$
反陽子	$10^{-2}$	$10^4$
反重陽子	$10^{-6}$	1

そのため、ビーム試験においては反陽子捕獲事象と反重陽子捕獲事象がしっかりと区別できるのか、反重陽子捕獲事象と反陽子非弾性散乱事象を間違えずに区別できるのか、多チャンネル化による液体アルゴン TPC のデータ取得レート耐性をどこまで上げられるのか等の開発課題を解決する為に実施する予定である。本章では国内の J-PARC ハドロンホール K1.8BR での反(重)陽子ビーム試験の実施計画について議論する。

### 4.2 国内で反陽子/反重陽子生成可能な加速器施設

国内にある加速器施設は日本加速器学会のホームページ [23] にまとめられている。反陽子の生成には陽子・陽子衝突型の加速器の場合 7GeV 以上、反重陽子の場合は 17GeV 以上の運動エネルギーが必要になる。電子・陽電子衝突型加速器の場合、反陽子生成に必要な重心系エネルギーはバリオン数保存の観点から約 1.8GeV 以上、反重陽子はその 2 倍の 3.6GeV となるであろう。国内でそのような実験ができる施設は以下のとおりである。

表 4.2: 日本国内の加速器施設

施設名	加速粒子	エネルギー
J-PARC(MR)	陽子	30GeV
Super-KEKB	電子・陽電子	電子 7GeV 陽電子 4GeV

但し KEK の Super-KEKB は電子・陽電子の衝突後の 2 次粒子を他の実験が使うことができるような実験スペースはなく国内で反重陽子まで含めた検証が行えるのは J-PARC のみであると考えられる。そのような観点から J-PARC での実施を検討しており、J-PARC の詳細についていこう論ずる。

### 4.3 J-PARC

J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex) は茨城県那珂郡東海村にある国内最大級の陽子加速器施設であり、図 4.1 に示すように 400MeV 線形加速器 (LINAC)、3GeV 陽子シンクロトロン (RCS) および直径 500m の 30GeV 陽子シンクロトロン (MR) から構成される。



図 4.1: J-PARC 加速器施設俯瞰図 [20]

LINAC で陽子 1 個と電子 2 個からなる負水素イオンを 400MeV まで加速させ RCS で薄い炭素膜に負水素イオンを通すと電子がはぎとられ陽子のみのビームになる。RCS によって磁石と加速空洞によって 3GeV まで加速された後、大部分は物質・生命実験施設に送られ、1 部分は MR で磁石と加速空洞によってリング内を周回しながら徐々に 30GeV まで加速される。

#### 4.3.1 ハドロン実験施設

MR で加速された 30GeV 陽子は図 4.1 中の右下にあるハドロン実験施設へ供給される。図 4.2 は J-PARC ハドロンホール内の俯瞰図になっており、現状 K1.8BR, K1.8, KL, high-p, COMET の 5 つの Beam ラインが設置されている。30GeV シンクロトロンから 30GeV に加速された陽子を T1 で金製の固定標的ターゲットに衝突させ、2 次粒子を各ビームラインに供給している。K1.8BR や K1.8 の K は Kaon の略であり、主に K 中間子を用いた実験が行われている。

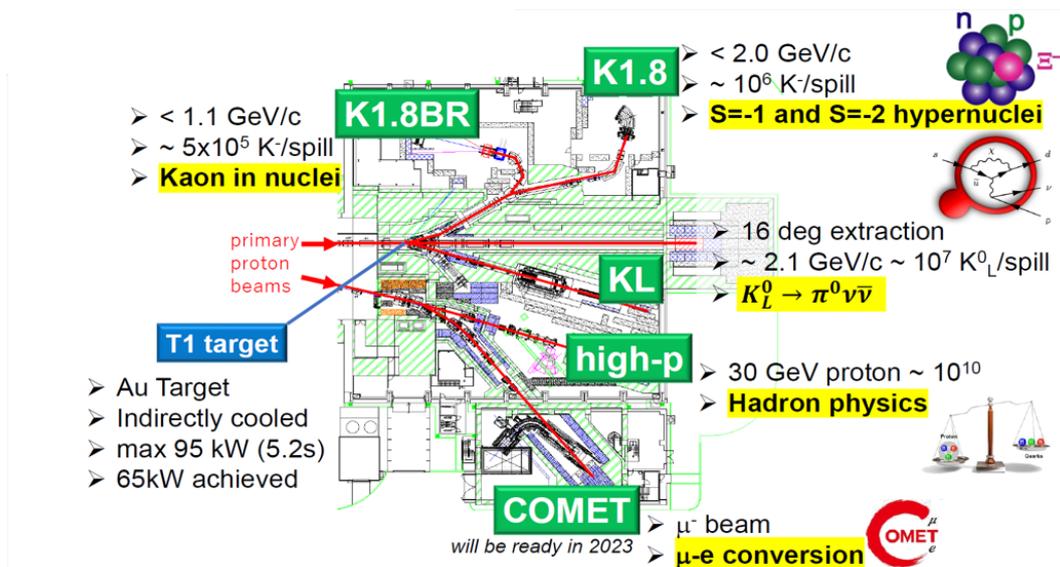


図 4.2: ハドロン実験施設

早稲田大学が参入した10年前の液体アルゴンTPCを用いたT-32実験[18]ではCOMETとhigh-pの分岐点あたりにK1.1BRビームラインが存在していた。現在はすでにK1.1BRビームラインはなくなっており、テストビームラインは存在していない現状にある。但し将来的にはより高運動量のビーム供給やテストビームライン専用のスペースを確保するためビーム下流に拡張工事が行われる予定である。

#### 4.3.2 K1.8BR ビームライン

K1.8BRは負電荷の二次粒子が供給されており最高運動量は1.1GeV/cである。図4.2中にもある通り $10^5$ Hzオーダーで $K^-$ 中間子が供給されており、反陽子も同様のレートで供給されている現状にある。反重陽子については要検証でありハドロンホールのビーム試験が必要である。

K1.8BRは図4.3に示すように、固定標的(T1)生成された2次粒子のビーム方向を調整するマグネット(D1-D5,Q1-Q8,O1)や、質量を選別する静電セプタム(ES1)、レートを調節するスリット(MS)等が設置されている。

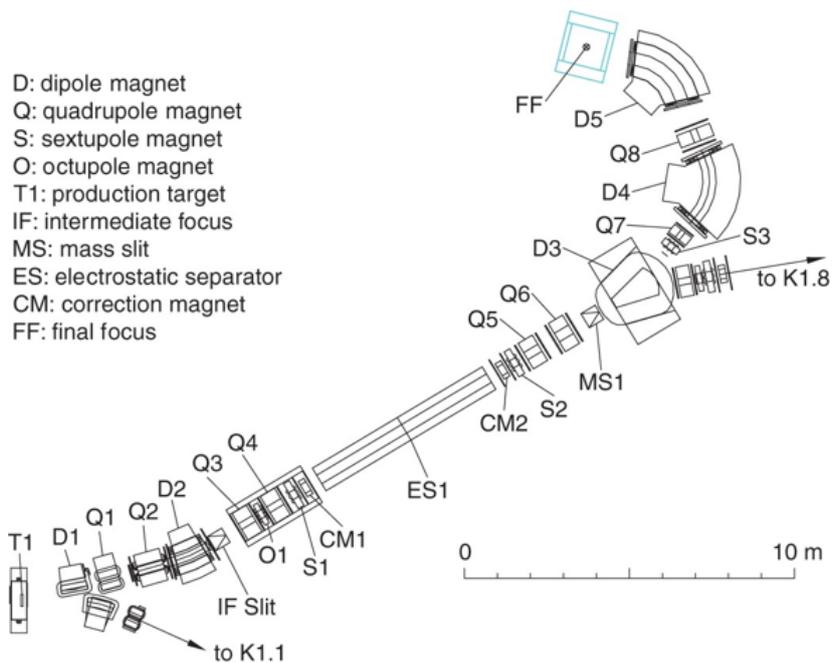


図 4.3: K1.8BR ビーム上流レイアウト [24]

また、図 4.4 に示すように、D3 と D4 のマグネットの間に BHD と呼ばれるプラスチックシンチレータがあり、D5 と FF の間に T0 と呼ばれるプラスチックシンチレータがある。この 2 つの ToF 間の距離は 7.7m であり、これにより異なる粒子の ToF を求めることができる。D5 と D4 の間に置かれている PDC と D5 と FF の間に置かれている BDC という二つのドリフトチャンバーによってビームの曲率を求め運動量を測っている。これらにより、30GeV 陽子を衝突させた後に大量に生成される二次粒子の中で本実験に必要とする反陽子・反重陽子の選別が効率よく実施可能であると考えられる。

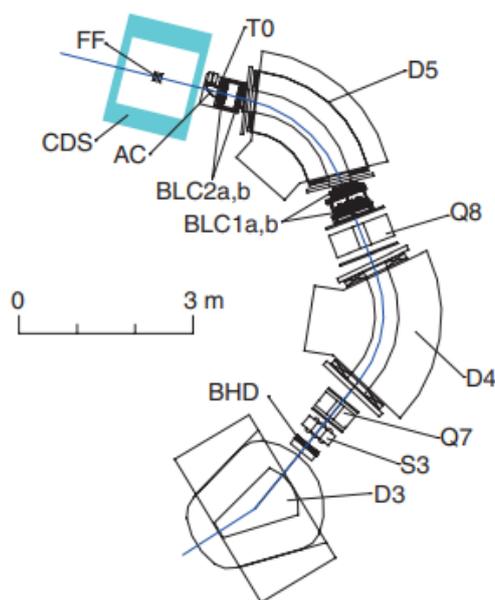


図 4.4: K1.8BR 拡大図 [24]

過去の測定により、実際には K1.8BR ビームラインには  $10^5$  Hz オーダーの  $K^-$  粒子と反陽子が来ていることが実測としてわかっており、液体アルゴン中で観測するにはパイルアップを防ぐために K1.8BR ビームライン後方の Mass Slit 等でビーム軸を絞ってビームレートを削減する必要がある。ビーム試験においてパイルアップは液体アルゴンの電子ドリフト時間に依存する。例えばドリフト速度が  $1\text{mm}/\mu\text{s}$  の場合、早稲田容器の  $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 30\text{cm}$  TPC に打ち込んだと考えると、電子のドリフト時間は全体で  $300\mu\text{s}$  であるため、その時間はデッドタイムとなる。よってビームレート耐性は  $1/300 \times 10^{-6} = \text{約 } 3300\text{Hz}$  となり、このレートまで K1.8BR の前置検出器側でビームスリットを絞って液体アルゴン TPC へ供給する必要がある。

図 4.4 中、緑で示された final focus という部分は現状 CDS (Cylindrical detector system) というソレノイド磁石に囲まれた検出器が設置されており、特に CDS 中のセグメント化されたプラスチックシンチレータである BPD (backward proton detectors) と細かいメッシュ状のドリフトチャンバーである BPC (backward proton chamber) と呼ばれる検出器によってビームプロファイルを検証することができるシステムとなっている。例として 2012 年に J-PARC の PAC ヘブローポザルが提出された E-31 実験の様子を以下の図 4.5 に示す。

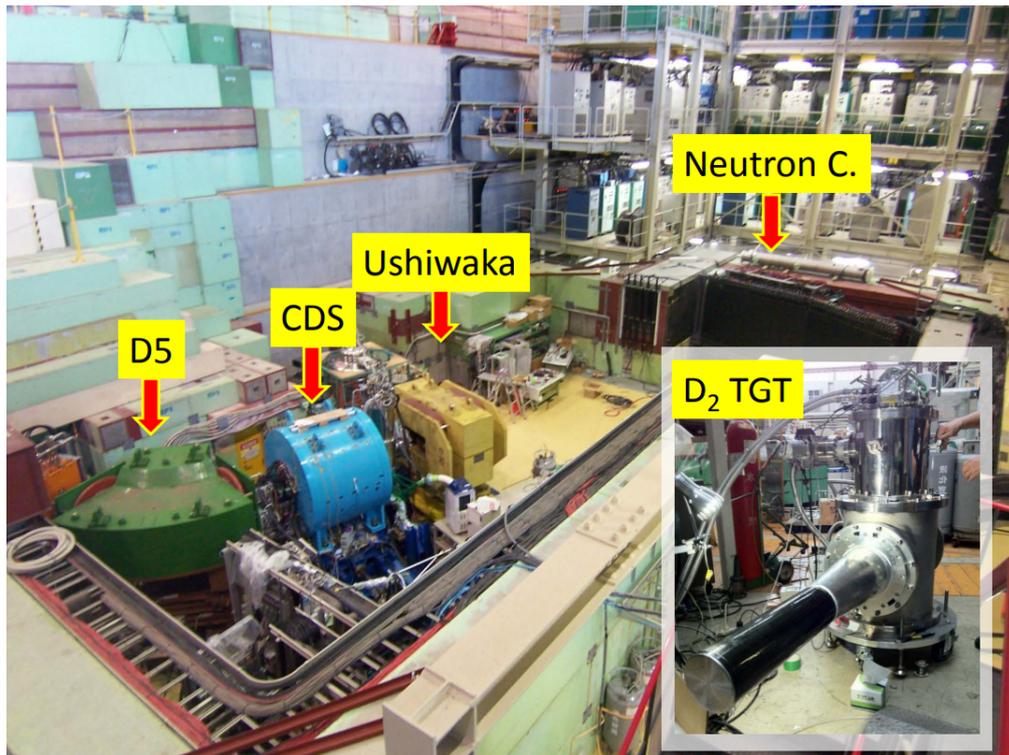


図 4.5: K1.8BR 後段検出器 [21]

現在は図 4.3 の ushiwaka と  $D_2$ TGT は設置されていないため、BPD と BPC、さらに図 4.3 中にある ToF カウンター等を駆使して液体アルゴンを使用した加速器試験の前に反陽子・反重陽子レートの詳細な検証が必要である。

#### 4.3.3 K1.8BR ビームラインにおける反重陽子レート

K1.8BR における反重陽子レートは過去に J-PARC の LoI[22] で報告されており、図 4.6 の赤いハイライトで示されている部分となっているが実際には 29ns あたりに平均値を持つ小さいピークであると考えられているが S/N が悪く優位な結果であるとは言えない。報告によれば、K1.8BR の反重陽子のレートはおよそ 1Event/spill(6sec) であるとされ、2013 年の結果を踏まえれば、現在はビーム強度が上がっているため当時より高レートで信号の観測可能であると考えられる。但し反重陽子のレートは十分な検証がなされていないため、液体アルゴン試験を行う前に ToF 等の測定によってレートの検証を行う必要がある。

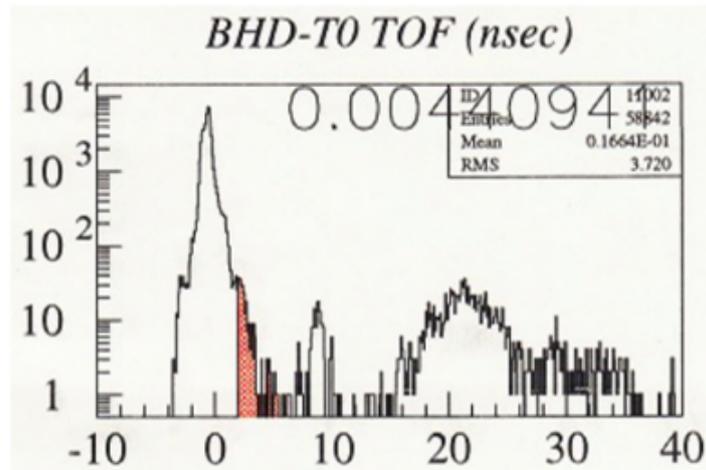


図 4.6: J-PARC K1.8BR で観測された反重陽子レート [22]

#### 4.4 ビーム試験セットアップの検討

J-PARC K1.8BR は高レートでの反陽子供給の実績があり、反重陽子に対しても LoI の報告などが挙げられるように、GRAMS 実験における信号事象と背景事象の検証が十分にできる可能性があることを前節で示した。本章では実際にビーム試験を行うにあたっての実験セットアップを検討した結果について論ずる。

##### 4.4.1 液体アルゴン中での反陽子・反重陽子停止距離

K1.8BR は 2 次粒子の最高運動量  $1.1\text{GeV}/c$  ビームラインであることを踏まえ、図 4.7 には横軸に  $1.1\text{GeV}/c$  までの運動量、縦軸にその運動量における液体アルゴン中での原子核捕獲事象が起こるまでの侵入距離を示す。これは Geant4 シミュレーションにより  $\Phi$  1000mm、高さ 700mm の円筒型液体アルゴンを簡単に作成し、そこに対してビームを打ち込むことにより簡単に検証した。黒線が反陽子、赤線が反重陽子であり、同じ  $\beta=0.5$  の反陽子  $600\text{MeV}/c$  と反重陽子  $1.1\text{GeV}/c$  の点を点線で示している。

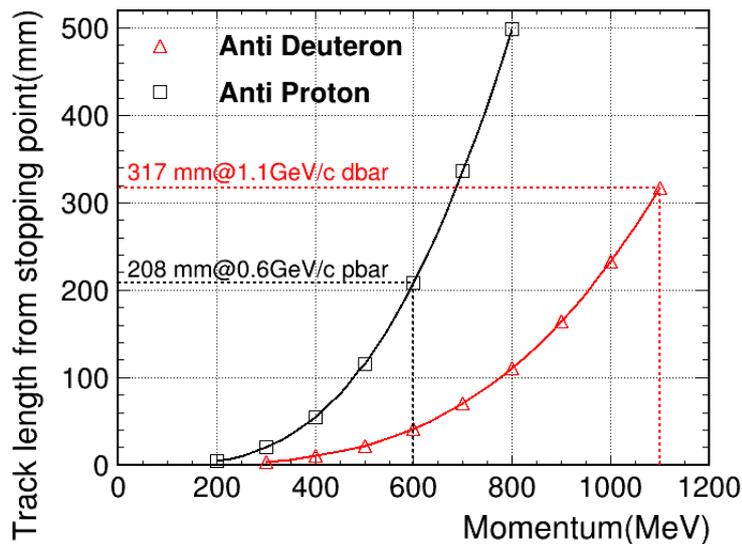


図 4.7: 液体アルゴン中での反陽子・反重陽子停止距離

この結果より液体アルゴンを減速材として使うことによって、600MeV/c の反陽子を液体アルゴン中の約 20cm, 1.1GeV/c の反重陽子を液体アルゴン中の約 30cm の点で止めることができることがわかる。よって 1.1GeV までの反陽子・反重陽子であれば液体アルゴンの前に減速材を別途用意する必要がなく、液体アルゴンのみで GRAMS の信号領域である 150MeV/n の反陽子・反重陽子捕獲事象を検証することができることが分かった。

#### 4.4.2 現状のセットアップ案

図 4.7 の結果を受けて、K1.8BR での試験のセットアップ案を図 4.8 に示す。4.4.1 の結果より、150MeV/n の反陽子、反重陽子の原子核捕獲事象が起こるまでの距離はそれぞれ 20cm, 30cm 程度であるため、早稲田の  $\phi 500mm$  の真空断熱容器と GRAMS40 検出器で十分な大きさであると結論付けられる。現状 K1.8BR は図 4.8 の左図にあるように、10m ほどの実験スペースがある。そのため、GRAMS 実験を想定した 1.5mToF 間隔の 2 層のプラスチックシンチレータと、早稲田液体アルゴンテストスタンドを図 4.8 の右側のように設置し、左図の赤枠の範囲内で 4m  $\times$  4m ほどのスペースを使用して実験を行う予定である。

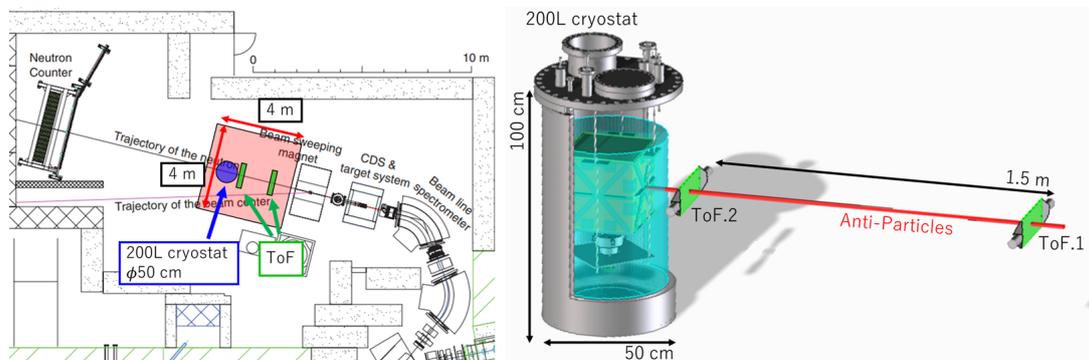


図 4.8: K1.8BR セットアップ案

## 4.5 Geant4 シミュレーション

### 4.5.1 シミュレーション条件

このセットアップを Geant4 ver.4.0.07 で構築し、反陽子・反重陽子を検出器に入射させた時の EventDisplay と捕獲確率について示す。図 4.8 のセットアップを再現した図を図 4.9 に示す。容器や TPC のサイズはは 3 章 7 節で示した図 3.9 と同様の物を設置し、1.5m 間隔の面積 100mm × 100mm の 5mm 厚のプラスチックシンチレータ 2 層をビーム上流側に設置した。

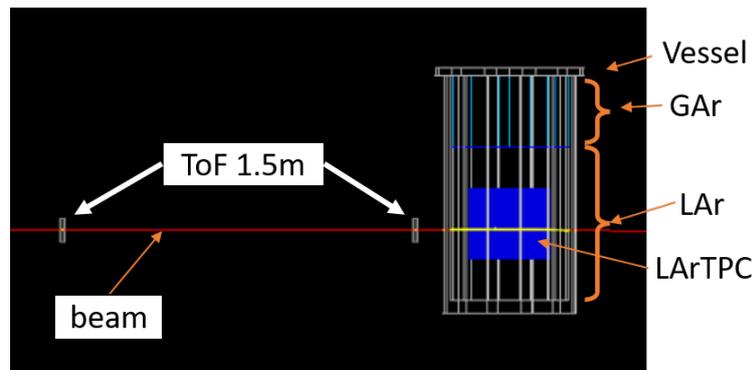


図 4.9: Geant4 シミュレーションで構築したセットアップ図

### 4.5.2 Event Display

この検出器に同じ Rigidity=150MeV/n の反陽子、反重陽子を打ち込んだときの典型的な 1Event を図 4.10 に示す。横軸はビーム方向の距離であり、縦軸はそれぞれ 4 分割されたうちの左側 2 図が X, 右側が Y となっており、左側が  $\Phi$  500mm 容器を上から見た図, 右側が  $\Phi$  500mm 容器を横から見た図となっている。桃色は反陽子飛跡を示し、赤色は反重陽子飛跡を示す。緑色は対消滅後のパイ粒子飛跡、青色は  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$  からの電子対生成の飛跡である。同じ dE/dX であっても停止点からこのような飛跡を実際に観測することができれば粒子・反粒子識別を行うことができる。図 4.11 は放出される  $\pi$  粒子の運動量であり、ピークがおおよそ MIP であるため長い飛跡を残す。

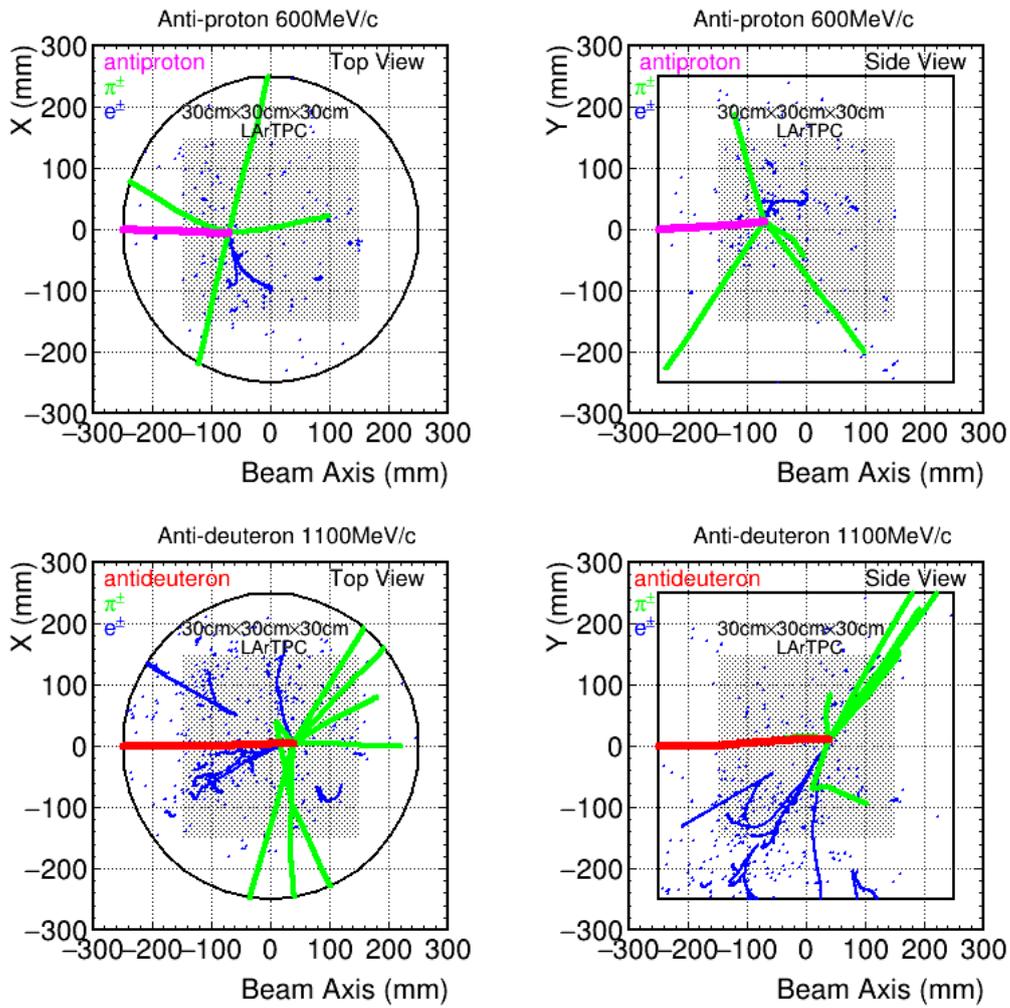


図 4.10: 上段：反陽子 600MeV/c 下段：反重陽子 1100MeV/c

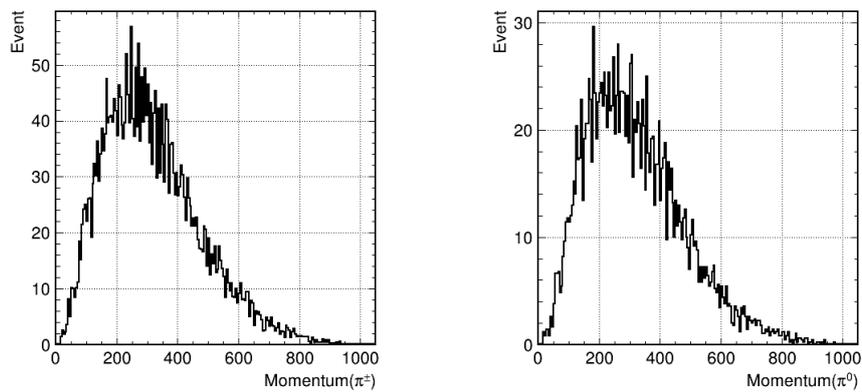


図 4.11: 左：放出される  $\pi_\pm$  粒子運動量 右：放出される  $\pi_0$  粒子運動量

## 4.5.3 原子核捕獲事象のレート

図 4.12 は各運動量に対して横軸:原子核捕獲事象が起こるまでの距離, 縦軸:捕獲事象の確率の図となっており, 運動量が大きいくほど捕獲事象の確率は減り, 捕獲事象が起こるまでの距離が増加することがわかる。図中灰色のハッチは TPC の領域となっており, 反陽子は 600MeV/c, 700MeV/c が 300mm × 300mm × 300mm の TPC 内で観測できることを示している。一方で反重陽子は 1000MeV/c, 1100MeV/c が TPC 内で観測可能であることを示している。同じ Rigidity である反陽子 600MeV/c と反重陽子 1100MeV/c の点や, 同じ停止点の 700MeV/c 反陽子と 1100MeV/c 反重陽子の点も含め, 反陽子・反重陽子の PID が可能かどうかの検証が十分に行えるとみられる。

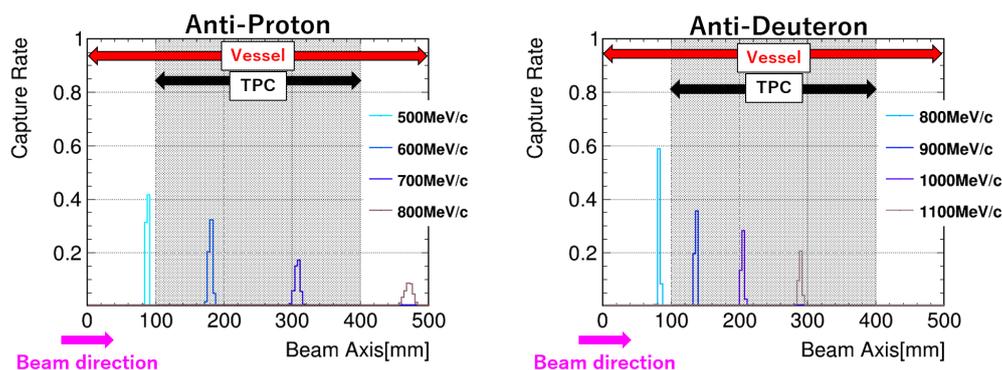


図 4.12: 左:反陽子捕獲確率 右:反陽子捕獲確率

TPC 内で検出可能な運動量を持つ反陽子・反重陽子の液体アルゴンでの捕獲事象の確率を表 4.1 に示す。粒子種によって反応の確率が変わり, 高運動量のものほど捕獲確率が減少する。反陽子背景事象の削減のテストという本来の目的と直接関係はないが, 反陽子・反重陽子の捕獲確率の測定は GRAMS 検出器の反重陽子に対する感度曲線の精度を上げる上でも重要な検証であると考えている。

表 4.3: 液体アルゴンにおける原子核事象の反応確率

粒子	運動量 (MeV/c)	捕獲確率 (%)
反陽子	600	58.4
反陽子	700	44.1
反重陽子	1000	44.2
反重陽子	1100	35.0

このように, 現行の検出器で加速器試験は実施可能であり, この検出器の使用をベースとして 2024 年実施にむけ 2022 年 12 月に実験プロポーザルを J-PARC に提出した。

## 4.6 検出器アップグレードプラン

ここまでの話では、現行の検出器ですでにビーム試験が検証可能であることを示してきた。現行のアノードの1cmピッチサイズでビームの $dE/dX$ 、ToFによる $\beta$ で粒子識別の検証が可能であると考えている。しかし、その検証はGRAMS実験に向けた最低限の検証であるため、さらに、ピッチサイズを細かくして対消滅後のハドロン数の測定や、容器をさらに大きくしてより高運動量の反陽子と液体アルゴンの反応の検証等の追加の検証オプションも検討しておくことは重要である。本章では将来の開発方針として30cm×30cm×60cmのTPCを使用したビーム試験の検討やアノードのピッチサイズを細かくした場合の結果について論ずる。

### 4.6.1 読出しピッチサイズの細分化

地上試験における信号の再現のシミュレーションにより、LTARSを用いた液体アルゴン応答を確認することができた。ここではその応答シミュレーションを用いてGeant4で作成した反陽子・反重陽子飛跡を用いて千鳥読出しにおけるピッチサイズを10mm, 5mm, 3mmにかえた場合のEvent Displayを図4.13, 図4.17, 図4.18, 図4.16, 図4.17, 図4.18に再現した。10mmピッチのプロットは現行の千鳥読出しのアノードを用いた場合であり、目で見ても位置分解能が悪いことが確認できるが、それぞれのピッチサイズを比較してみると対消滅後のハドロン数や、InelasticかCaptureかの停止点の精度への要求として5mm, できれば3mmピッチで測定することが目標となると考えられる。

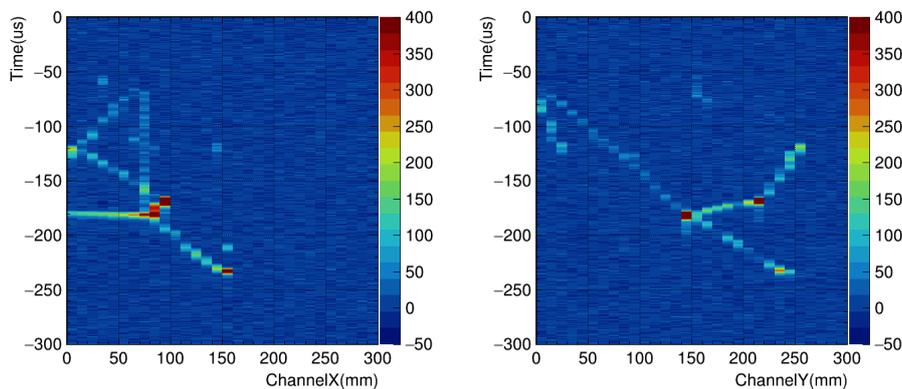


図 4.13: 10mm ピッチの反陽子 600MeV

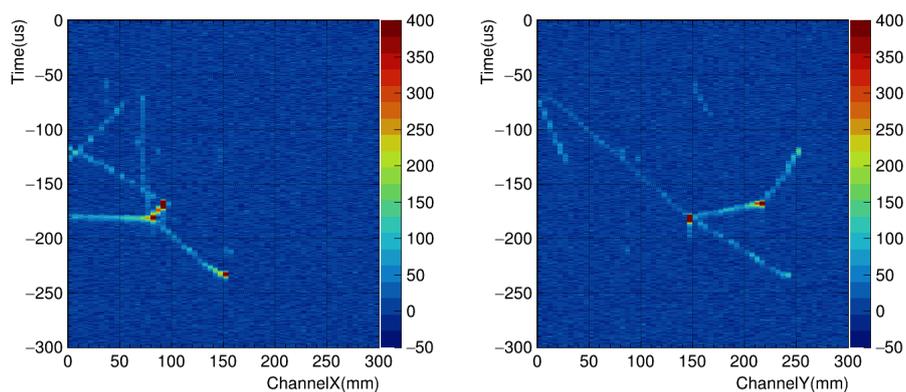


図 4.14: 5mm ピッチの反陽子 600MeV

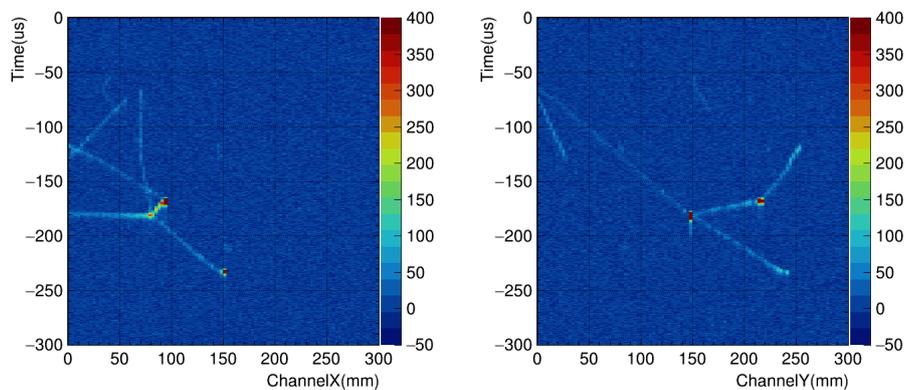


図 4.15: 3mm ピッチの反陽子 600MeV

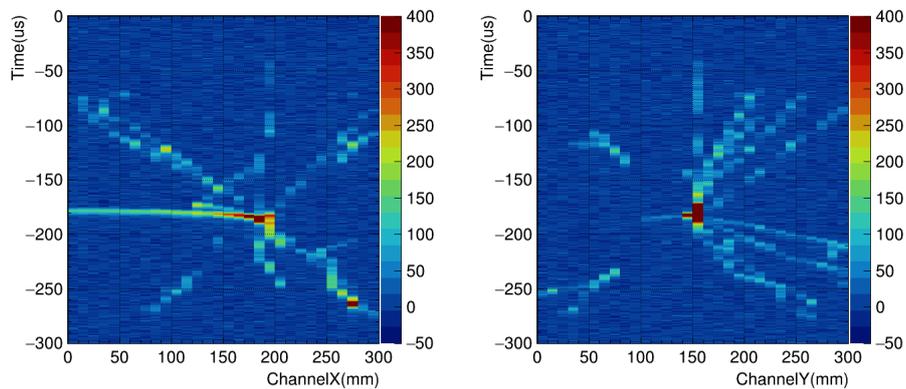


図 4.16: 10mm ピッチの反重陽子 1100MeV

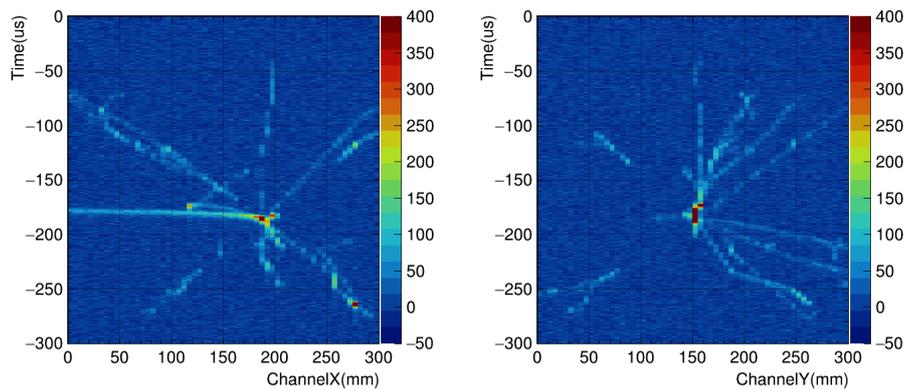


図 4.17: 5mm ピッチの反重陽子 1100MeV

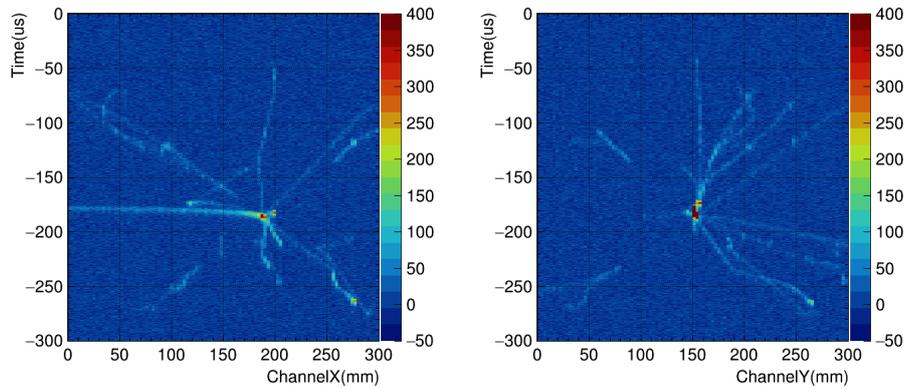
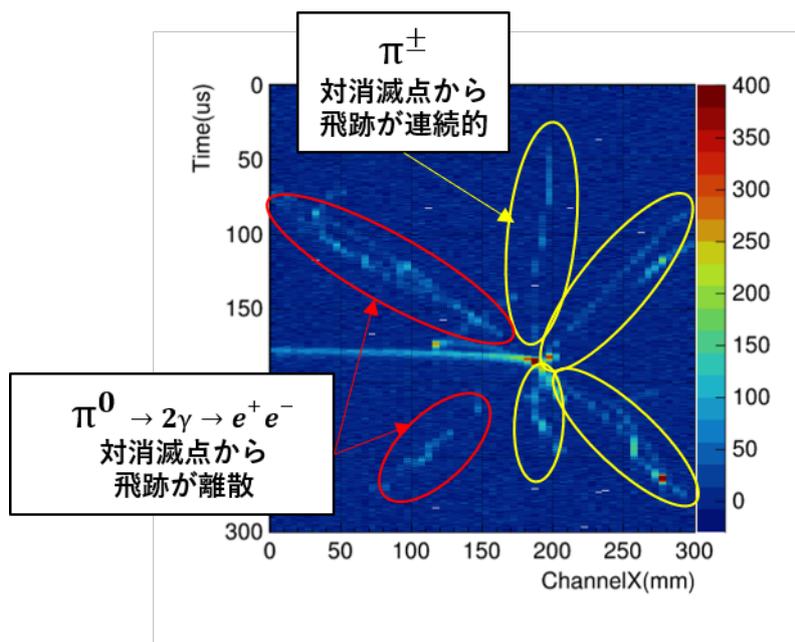


図 4.18: 3mm ピッチの反陽子 1100MeV

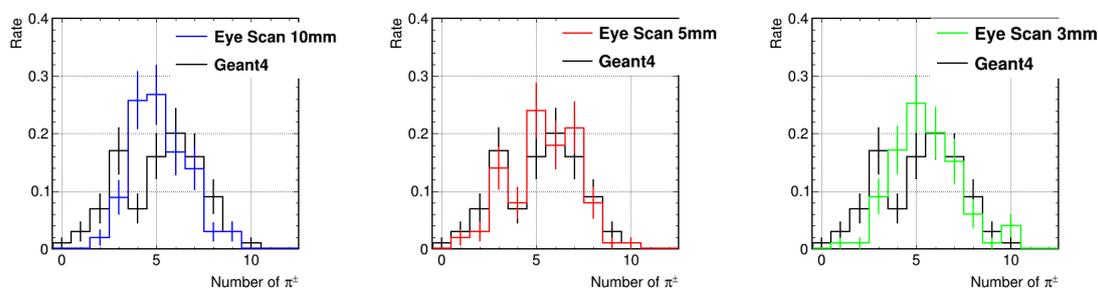
液体アルゴンは MIP 信号が約 1mm/fC の信号のため、5mm ピッチのアノードでは 5fC の信号を S/N 良く測定する必要がある。現状の早稲田地上試験において信号を LTARS2014 で測定した場合の ENC は 3000 程度であり、MIP の 10fC/cm の信号を S/N=4 程度で測定できている。現状の ENC をさらに 1/2 程度に下げ測定できるかが今後のカギとなると考えられる。

#### 4.6.2 EyeScan による対消滅後のハドロン数とシミュレーションとの比較

再構成された飛跡に対して、EyeScan を行うことにより、原子核捕獲事象後の対消滅ハドロン数を検証し、Geant4 シミュレーションの真の数と比べる。EyeScan はプログラムのアルゴリズムではなく人がイベントの波形を目で見て信号か否かを決定する手法である。以下の図 4.19 に 3mm ピッチで反重陽子 1100MeV/c の捕獲事象を見た場合の典型的な 1Event を示す。

図 4.19: Eye Scan による  $\pi^\pm$  と  $\pi^0$  飛跡の判別

このように反重陽子捕獲点から少し離れて 2 又の粒子飛跡を残すイベントが二つ観測されれば  $\pi^0$  事象とみなす。逆に反重陽子捕獲点から連続して飛跡が伸びている場合は荷電  $\pi$  粒子の飛跡とする。このようにして自分で 100Event の EyeScan をピッチサイズを変えながら実施した結果を図 4.20 に示す。

図 4.20: ピッチサイズを変えた場合の荷電  $\pi$  粒子数の EyeScan の結果

ピッチサイズを変えた場合は 5mm ピッチの正答率が一番高いことがわかる。これは MIP の  $\pi$  粒子飛跡は S/N の観点から 3mm ピッチであると数えあげることができないことからこのようになったと考えられる。したがって S/N やチャンネル数の観点などからも 5mm ピッチが現状最適であると現状考えている。

#### 4.6.3 $\phi 1000\text{mm}$ 容器

検出器のアップグレードプランとして最後に、容器サイズを大きくして高エネルギーの反陽子まで含めた検証を行うことを考えている。容器は図 4.21 のように KEK にある  $\phi 1000\text{mm}$  サイズの容器を検討しており、その中に早稲田地上試験における TPC2 個分を想定した TPC を設置する。

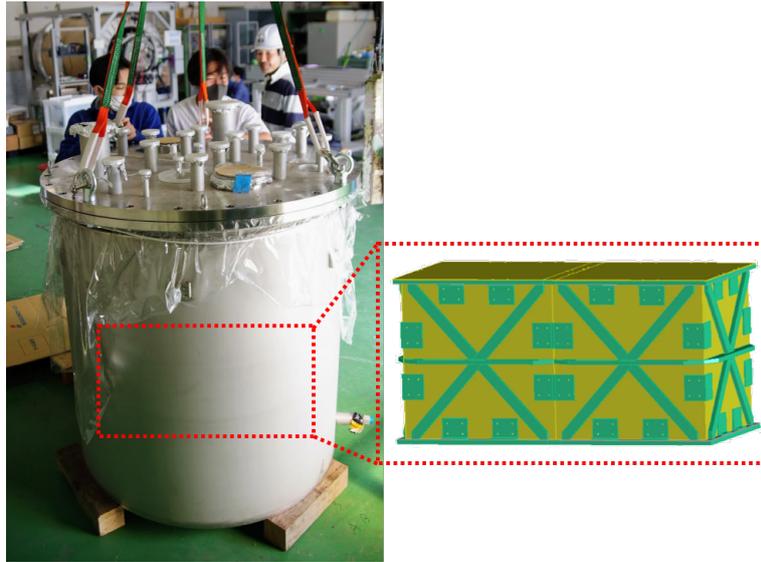


図 4.21:  $\phi 1000\text{mm}$  容器と  $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 60\text{cm}$  TPC

この容器にアップグレードした場合には図 4.22 に示す通り、反陽子に関しては  $\phi 500\text{mm}$  容器では  $600\text{MeV}/c$  と  $700\text{MeV}/c$  の 2 点だったところ、 $600\text{MeV}/c$  から  $900\text{MeV}/c$  の 4 点の運動量が測定可能となる。反重陽子に関してはもともと最高運動量である  $1.1\text{GeV}/c$  の場合でも  $30\text{cm}$  程度しか飛跡を残さないため、図 4.23 のような形で測定できると考えられる。

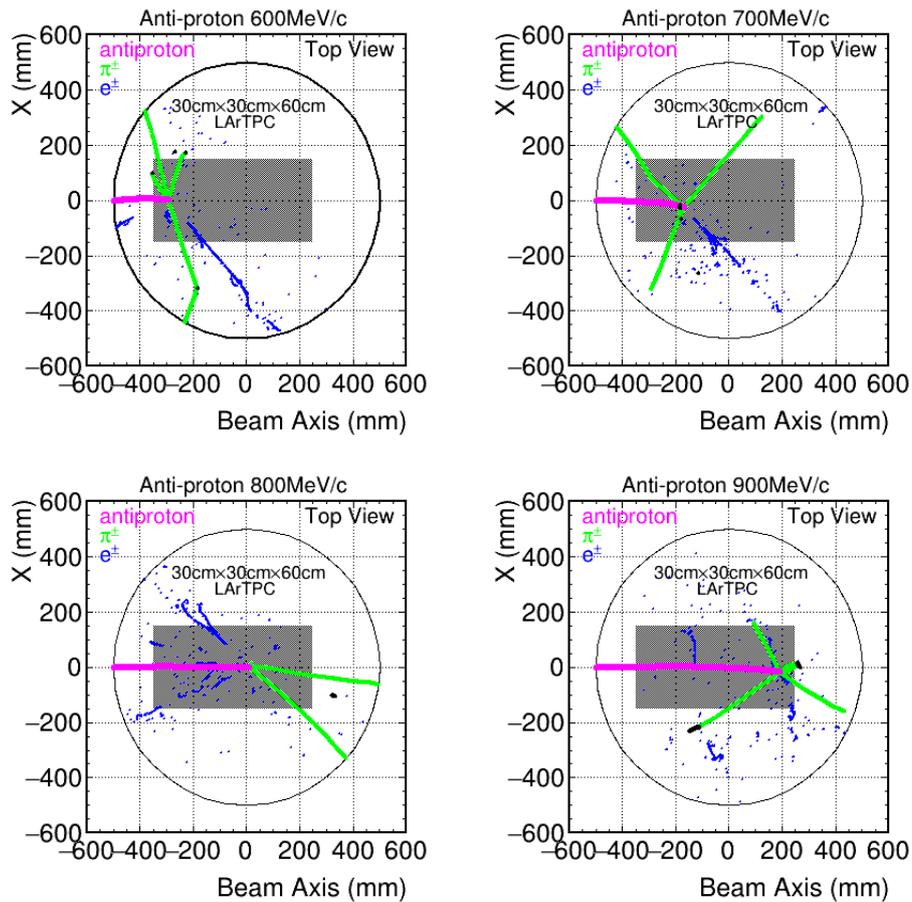


図 4.22: 30cm × 30cm × 60cmTPC の場合の反陽子飛跡

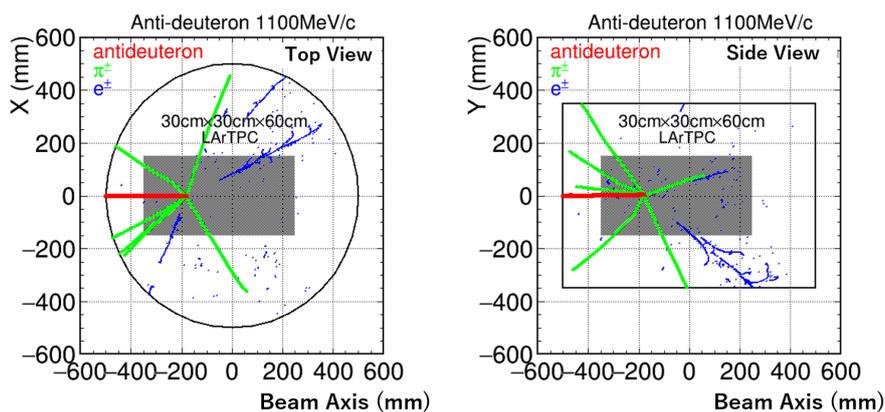


図 4.23: 30cm × 30cm × 60cmTPC の場合の反重陽子飛跡

このように検出器サイズを大きくすることで反陽子測定の特長を高運動量まで伸ばすことができ、より広範囲な反陽子背景事象の検証が行えると考えている。30cm × 30cm × 60cm の容器にした場合のチャンネル数は千鳥読みの場合 5mm ピッチで 240 チャンネル 3mm ピッチで 400 チャンネルである。多チャンネル化における DAQ の最適化等開発における課題はまだ残されているが S/N

#### 4.6 検出器アップグレードプラン-PARCK1.8BR ビームラインを用いた粒子・反粒子識別試験計画

---

やDAQの議論も含め今後検討し決めていく必要がある。

## 5 まとめと今後の展望

### 5.1 まとめ

GRAMS 実験は宇宙反粒子探索と宇宙 MeV ガンマ線の探索を目的とした気球実験である。宇宙反粒子の中でも特に宇宙反重陽子は地球に到達する暗黒物質由来の反重陽子の Flux が宇宙星間物質と 1 次宇宙線の反応により生成された反重陽子 Flux よりも低エネルギー側で優位になり、1 事象でも観測できれば新物理となる。そこで現在早稲田大学においては暗黒物質の間接探索に着目して荷電反粒子の検出に焦点を当てて検出器開発を行っている。GRAMS 実験における宇宙反重陽子探索に向けた開発課題として、LArTPC+ToF の組み合わせによる背景事象除去能力の実証と LArTPC による原子核捕獲事象を用いた粒子・反粒子の識別手法の実証を行う必要があり、そのための最初の試験として、早稲田大学地上において、宇宙線  $\mu$  粒子の崩壊と捕獲事象を用いて粒子・反粒子識別の第一歩目となる試験を行った。宇宙線信号の液体アルゴン応答を考慮し、千鳥読出しにおける信号の再現をシミュレーションで行い、液体アルゴンの最小電離電子数や、再結合効果、電離/蛍光比等を考慮し、実データを再現した。

また、5 章では加速器試験に向けたセットアップの検討とビーム試験に向けたシミュレーションを行った。その結果 GRAMS のターゲットである同じ Rigidity(150MeV/n) の反陽子と反重陽子は液体アルゴン中をそれぞれ 20cm, 30cm で停止するため、早稲田大学所有の  $\Phi$  500 容器の中に 300mm  $\times$  300mm  $\times$  300mm TPC を設置する地上試験のセットアップで加速器試験がすでに行えることが分かった。現状、 $\Phi$  500 容器と 300mm  $\times$  300mm  $\times$  300mm TPC でも十分な試験を行えるが、最後の章では 2024 年のビームテスト実施に向けた将来の検出器開発のアップグレードプランとして、読出しピッチの細分化、容器の大サイズ化を検討した。Run22.1 の千鳥読出しのシミュレーションを使用して読出しピッチを変えながら信号の比較を行った結果、飛跡の分解能等を考慮し、最低でも 5mm ピッチでの検証を行う方針である。また、より高運動量の反陽子捕獲事象の信号まで検出器で捉えることを目的として 300mm  $\times$  300mm  $\times$  600mm の TPC と KEK のニュートリノグループ協力のもと  $\phi$ 1000mm 容器の使用も検討している。この容器であれば反陽子に関しては  $\Phi$  500 容器と比べ 200MeV/c 運動量が高い 600MeV/c から 900MeV/c まで観測可能である。

### 5.2 今後の展望

本論文では加速器試験に向けたセットアップの最適化について述べた。2024 年度の反陽子・反重陽子ビーム試験へ向けてアノード構造、エレクトロニクスの多チャンネル化に向けてさらに検出器の開発を進めていく必要がある。エレクトロニクスは現在大きくとも 5mm ピッチのアノードの 2 次元読出しを考えており、液体アルゴンで MIP=1fC/mm の信号に対し、十分な S/N が出せるピッチサイズのアノード+エレクトロニクスの開発を行っていく必要である。エレクトロニクスは現在、LTARS2018 の ASIC をベースとしてボードの開発を行っている段階であり、KEK の Open-it の枠組みで、LTARS2018 のアナログボードとデジタルボード一体型のボードとしてノイズの少ないボードを開発している。またエレクトロニクスの開発に加え、南極高度 30Km では KHz オーダーの背景事象があるため、それらを分離し反重陽子を見つけることができるかの検証をビーム試験で行う必要がある。そのためにはレート耐性や、解析手法の検討を今後行っていく必要がある。レート耐性の試験では日本の大樹町での気球工学試験が、2023 年度実施予定であり、気球上の Raspberry pi をベースとして DAQ レート耐性を伸ばす開発を進めている段階にある。これらの知見も交えながら、ビーム試験でのレート耐性を向上させる DAQ を今後構築していく予定である。また J-PARC の K1.8BR における反重陽子 Rate は 2013 年の LoI の段階で 1 事象/spill であったが、現在十分に検証されていないため、ハドロンホールのビームスタディを行い、液体アルゴンでのデータ取得の前に反重陽子

レートを算出しておくことが必要である。これら地上試験での開発を進め、ビーム試験を行い、今後5年程度をかけて GRAMS 検出器を南極上空に飛ばすことが今後の目的である。

## 6 謝辞

修士2年間の研究生生活を送るにあたり、研究指導をして頂いた寄田浩平教授に深く感謝致します。研究をする面白さ、先生自身のものの考え方、人生観まで多くのことを共有させていただき、これほどまでに熱く会話してくれる方はいなかったなと思わされ、非常に刺激的な環境で研究させていただきました。また、田中雅士准教授にも、研究の方向性や考え方、解析の手法など、細密な部分まで指導していただきました。B4のころから何度もご迷惑をおかけしましたが、自分を何度も教育していただき、時には厳しい言葉も頂きながら過ごせたことは非常に自分にとっての財産になりました。ビームテストについての会話や将来の話をして頂く時間は非常に楽しく、物理の面白さを何度も教えて頂きました。お二人には重ねて感謝いたします。また、秘書の坂本さんには、出張の手続きや、事務手続きを行っていただき、快適な研究生生活を支えて頂きました。学生とスタッフの部屋が分かれている中事務の話に付随して良く話しかけていただき、研究生生活を送るうえで心の支えになりました。ありがとうございます。また、研究室の先輩である青山一天さん、岩澤さんとは共に食事を食べに行ったり、研究の相談を夜遅くまで乗ってくださいました。特に青山さんには実験の手伝いや、システム系の先輩としてわからないことを多く教えていただき大変助かりました。また、同期の山口君、南さん、櫻井さんとはこの2年間、研究をともに進める仲間として苦しいことも、楽しいことも共有しながら楽しく過ごせました。櫻井さんとは同じGRAMSのグループとしてお互いに切磋琢磨しながら、お互いに刺激し合いながら過ごせました。櫻井さんはJ.J. 櫻井から取ったJというあだ名で全員から呼ばれており、自分も苗字から総理というあだ名がつきJと総理というはたから見たら何事かと思うあだ名で親しまれていたのは非常にいい思い出です。最後に、金銭面、生活面で応援して下さった家族に心から感謝いたしまして、謝辞とさせていただきます。

## 参考文献

- [1] F.Zwicky, *Helv. Phys. Acta*, 6 (1933) 110
- [2] K. G. Begeman, A. H. Broeils, and R. H. Sanders. Extended rotation curves of spiral galaxies: Dark haloes and modified dynamics. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 249, No. 3, pp. 523–537, 1991.
- [3] First Planck results: the Universe is still weird and interesting
- [4] P. Sikivie et al. *Phys. Rev. Lett.* 51 (1983) 1415
- [5] Laura Šerkšnytė et al. "Reevaluation of the cosmic antideuteron flux from cosmic-ray interactions and from exotic sources" *Rev. D* 105, 083021 – Published 27 April 2022
- [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. " The results from BESS-Polar experiment " *Advances in Space Research* 60 (2017) 806–814
- [8] H.Fuke et al. *PhysRevLett*.95.081101 (2005)
- [9] T.Aramaki et al., Dual MeV gamma-ray and dark matter observatory - GRAMS Project, *Astroparticle Physics*, 114, (2020), Pages 107-114
- [10] T.Aramaki, Per Ola HanssonAdrian, G.Karagiorgi, H.Odaka, Dual MeV gamma-ray and dark matter observatory - GRAMS Project, *Astroparticle Physics*, 114, (2020), Pages 107-114
- [11] A. Ibarra, S. Wild, "Determination of the cosmic antideuteron flux in a monte carlo approach " ,*Physical Review D* 88 (2013)
- [12] T. Aramaki et al. " Review of the theoretical and experimental status of dark matter identification with cosmic-ray antideuterons " . In: *Phys. Rept.* 618 (2016)
- [13] T. Aramaki et al., "Antideuteron sensitivity for the GAPS experiment", *Astroparticle Physics* Volume 74, 1 February 2016, Pages 6-13
- [14] Elena Aprile et al., " Noble Gas Detectors " ,2006.
- [15] S Amoruso et al. , " Analysis of the liquid argon purity in the ICARUS T600TPC " , *NIMA*516, 1, (2004)
- [16] W. Foreman et al."Calorimetry for low-energy electrons using charge and light in liquid argon", *arXiv:1909.07920v1* (2019)
- [17] R.Acciarri et al. "The Liquid Argon In A Testbeam (LArIAT) Experiment", *arXiv:1911.10379v2* (2020)
- [18] O. Araoka et al. "A tagged low-momentum kaon test-beam exposure with a 250L LAr TPC (J-PARC T32)" *arXiv:1105.5818v1* (2011)
- [19] [http://openit.kek.jp/project/lar\\_elec64/public/dw8wzc-1/](http://openit.kek.jp/project/lar_elec64/public/dw8wzc-1/) (Dec 2022)
- [20] <https://j-parc.jp/c/press-release/2020/08/11000577.html> (Dec 2022)

- 
- [21] <https://nuclpart.kek.jp/pac/1301/pdf/e31-130110v2.pdf>
- [22] Y. Ma, F. Sakuma, "Letter of Intent for J-PARC:Study of antideuteron physics at K1.8BR beam line" J-PARC LoI (2017)
- [23] <https://www.pasj.jp/facilities.html> 2023/01/22
- [24] Keizo Agari et al. "The K1.8BR spectrometer system at J-PARC" PTEP Volume 2012, Issue 1, 2012, 02B011

学籍番号: 5321A049-9

## 研究活動の不正行為 定義確認書

2023年 2月 4日

早稲田大学大学院先進理工学研究科長 殿

早稲田大学大学院先進理工学研究科

物理学及应用物理学 専攻 2年

本人氏名 中曾根 太地

(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

2023年 2月 4日

本人氏名 中曾根 太地



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。

<input checked="" type="checkbox"/>	GEC 設置科目「研究倫理概論」の受講
<input type="checkbox"/>	専攻設置科目の受講 科目名 ( )
<input type="checkbox"/>	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」は絶対に行ってははいけません。これらの行為は、社会人はもちろん、学生であっても当然守らなくてはならないルールです。

※捏造：事実でないことを事実のように仕立て上げること。でっちあげること。

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

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

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

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

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

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

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

- ・論文・総説：著者、題名、掲載誌名、巻号、ページ、発表年（月）等
- ・国際会議・シンポジウム・口頭発表：著者、題目、シンポジウム等の名称、場所、年月、巻号、ページ、出版元、出版年等
- ・著書：題目、著者、ページ、出版元、出版年等

インターネットのからの引用では、以下の通りとします。

- ・著者、タイトル、URL、検索日

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