

LArTPCによる宇宙線荷電反粒子 検出に向けた地上実験の現状

ICEPPシンポジウム

2023/2/19

谷口 日奈子

GRAMS (Gamma-Ray and AntiMatter survey)

気球搭載LArTPCを用いた宇宙線反粒子、MeV- γ 線の観測実験 @南極上空 40 km

反粒子

Anti-Proton/Deuteron/Helium観測

➡ 暗黒物質間接探索

MeV- γ 線

from SNR/BH/中性子星/銀河中心

➡ 重元素合成プロセスの解明
暗黒物質間接探索



Collaborator

Japan	USA
- Hiroshima University	- Barnard College
- Kanagawa University	- Columbia University
- Osaka University	- MIT
- RIKEN	- NASA GSFC
- Rikkyo University	- Northeastern University
- University of Tokyo	- Oak Ridge National Lab
- Waseda University	- UT Arlington
- Toyama University	- ELTE
	- University Texas Arlington

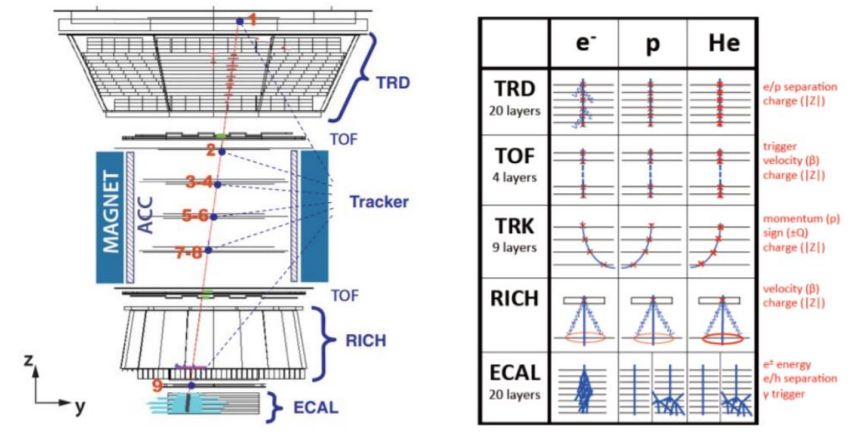
5th collaboration meeting, June 2022



宇宙線反粒子の観測

反粒子種	観測器
反陽子	AMS-02, PAMERA, BESS GAPS, GRAMS
反重陽子	AMS-02, BESS GAPS, GRAMS
反ヘリウム	AMS-02, BESS, (GAPS, GRAMS)
陽電子	AMS-02, PAMERA, DAMPE

AMS-02 (~完璧な粒子検出器 @ISS)



→ 運用中 (さらなる結果に期待)

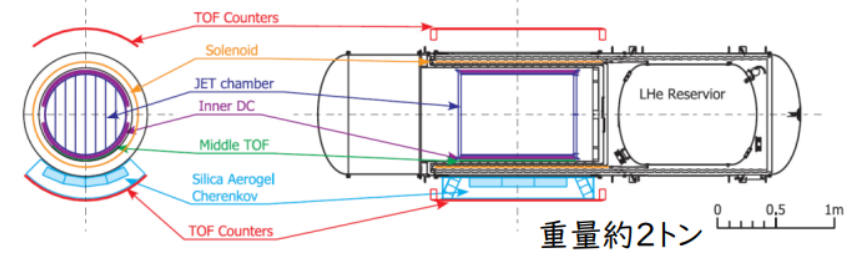
GAPS (積層型Si(Li)検出器 + ToF)

BESS-Polar (超伝導磁石搭載 気球実験)

- 合計30日以上南極フライト (2004/2007-08年)
- 反陽子 7886事象を観測
- 反重陽子、反ヘリウム(比)の上限値を算出

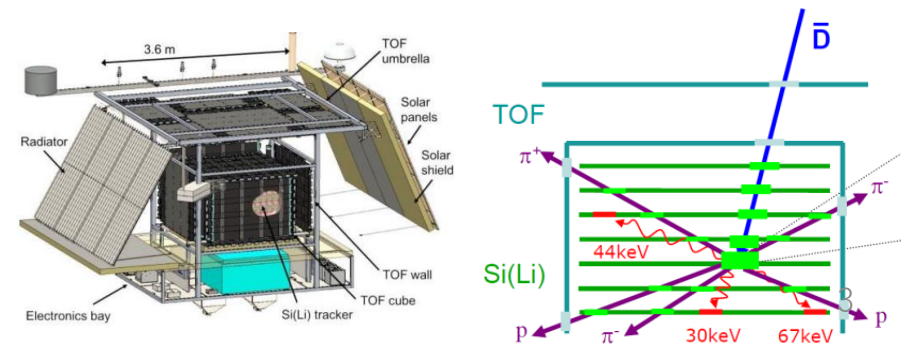


→ パイオニア的業績を残し終了



- ToF+飛跡長から粒子質量識別
- エキゾチック原子からのX線&ハドロン群の検出から粒子-反粒子識別

→ 近年南極フライト実施予定



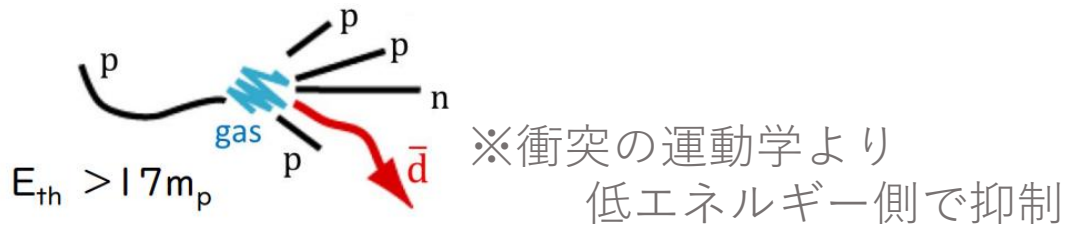
宇宙線反粒子フラックス

- 反陽子、陽電子は既に多くの気球・衛星実験で観測
→ 2次生成 (1次宇宙線+ISM)の宇宙線としてある程度理解

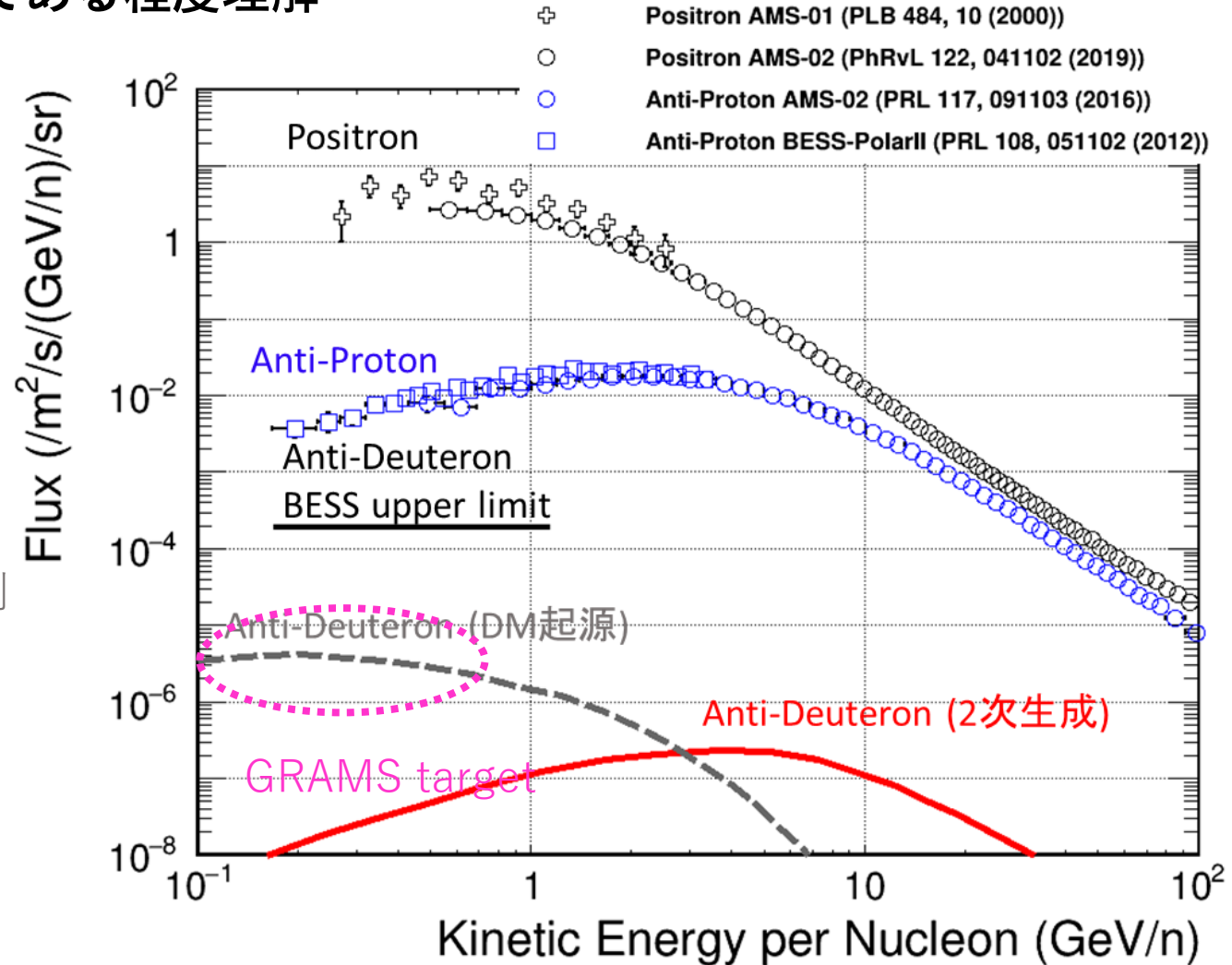
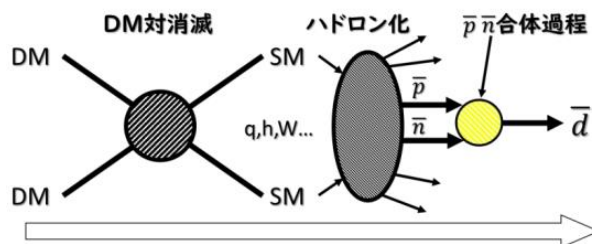
※統計的な制限、モデル不定性は残る

- 宇宙線中の反重陽子、反ヘリウムは未観測

- 既知の起源
= “2次生成”(+超新星爆発)



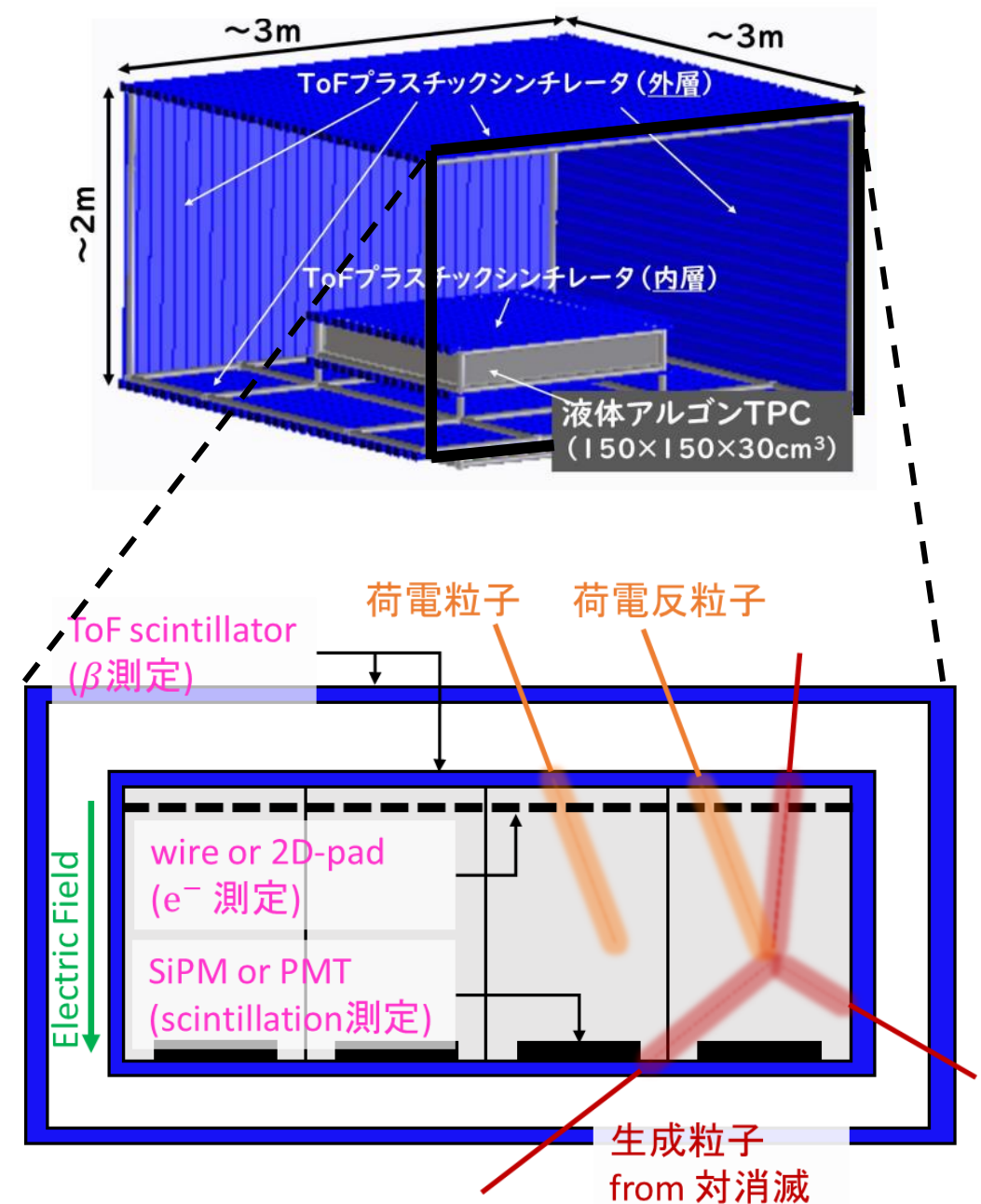
- DMの対消滅/崩壊 起源



GRAMS検出器

- 長期間気球フライト (NASA or JAXAに依頼)
- 検出器の概念はGAPS実験を踏襲
- 2層のToFプラスチックシンチレータ
荷電粒子が入射するとシンチレーション光が発生
 - ・ 光信号 ⇒ β 測定
- LArTPC = トラッキングカロリメータ
荷電粒子とArが反応して電子・光が発生
 - ・ 電子信号 ⇒ 二次元の位置情報
 - ・ 光信号 ⇒ ドリフト時間の取得

GRAMS実験検出器概略図



粒子質量識別・粒子反粒子識別

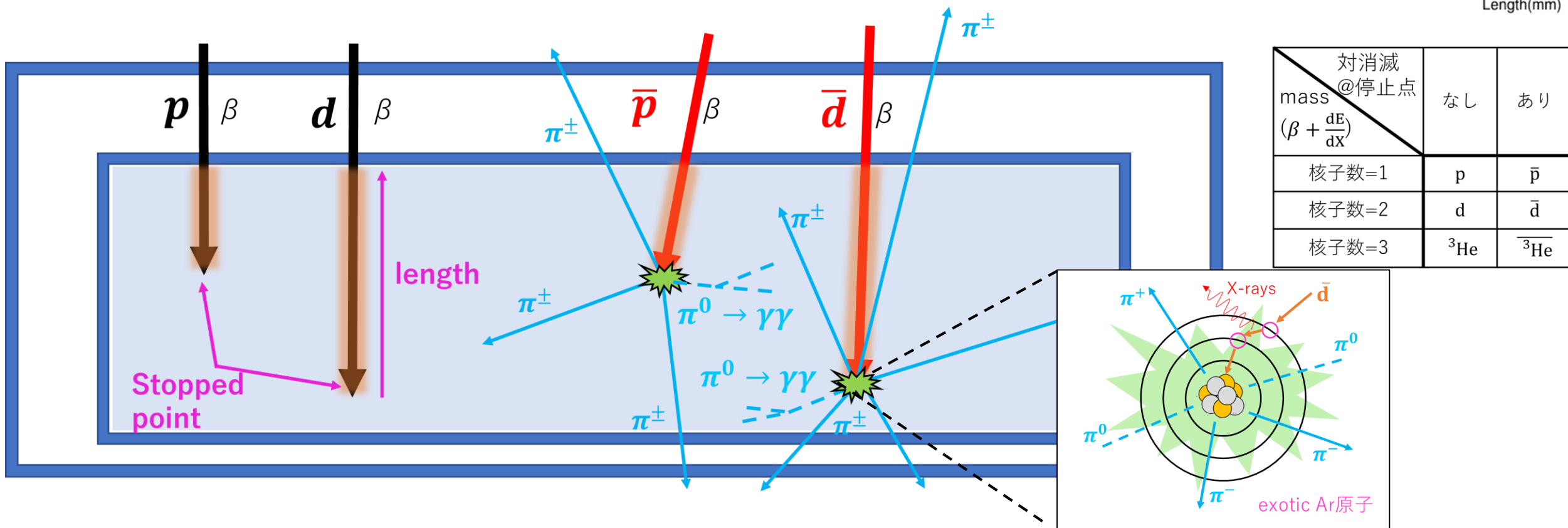
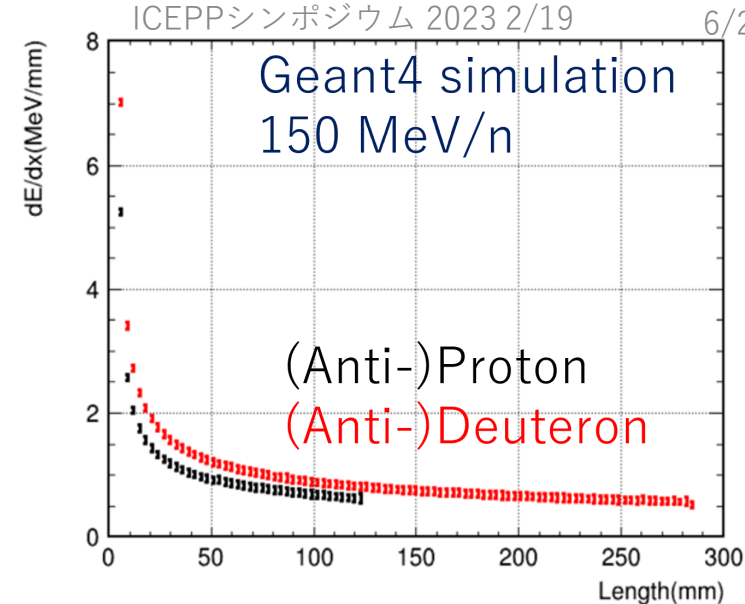
➤ 粒子(質量)識別

同じ速度 β の時、質量によって dE/dX かつ飛跡長が異なる

➤ 粒子・反粒子識別

反粒子はAr原子に捕獲され”exotic Ar原子”を形成

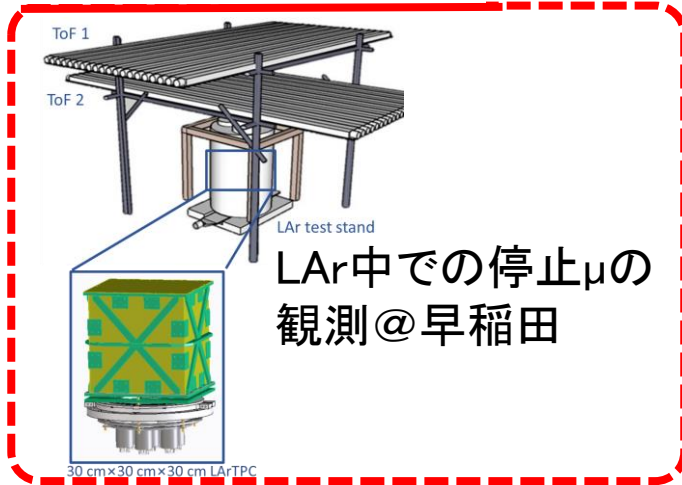
→ 脱励起後、核子と対消滅しハドロン(主に π)を放出



GRAMS開発スケジュール

- 反粒子探索に向けたマイルストーン
 - 粒子-反粒子識別の実機検証
 - 加速器ビームを用いた粒子識別の定量化
 - 気球高度での液体アルゴン安定運用技術の確立

宇宙線 μ 観測試験



Sep. 2022

30 x 30 x 30 cm³ LArTPC
Cosmic Muon test

ビームテスト @J-PARC

LAr中での反粒子捕獲事象の検証
→ K1.8BR (ハドロンホール)
@ J-PARC → 清水talk



Mar. 2023

J-PARC Phase 1
Beam test

気球工学試験

気球観測の経験 w/ 小型気球
(システム設計、通信) → Nakajima's talk
→ @JAXA 大樹町 2023.7~9



Sep. 2023

J-PARC Phase 2
Beam test

Mar. 2024

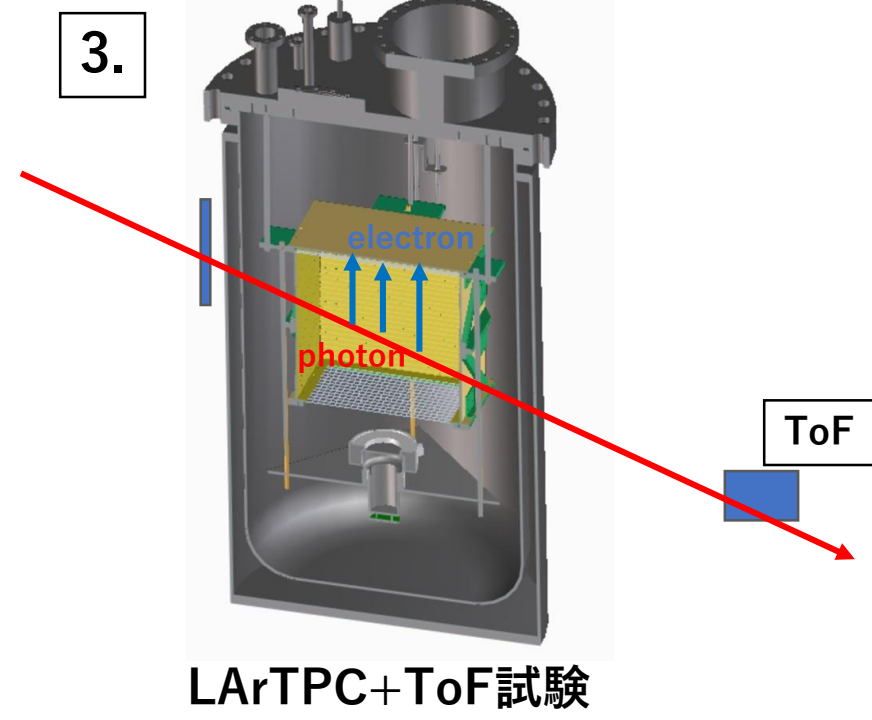
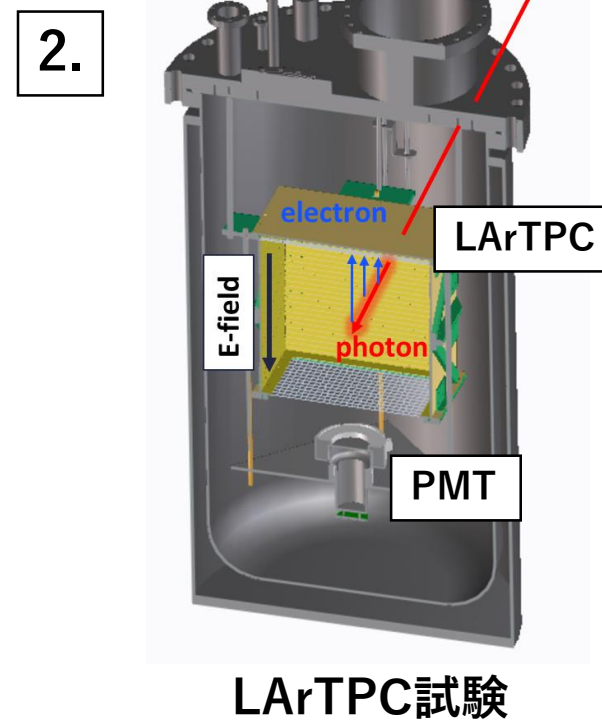
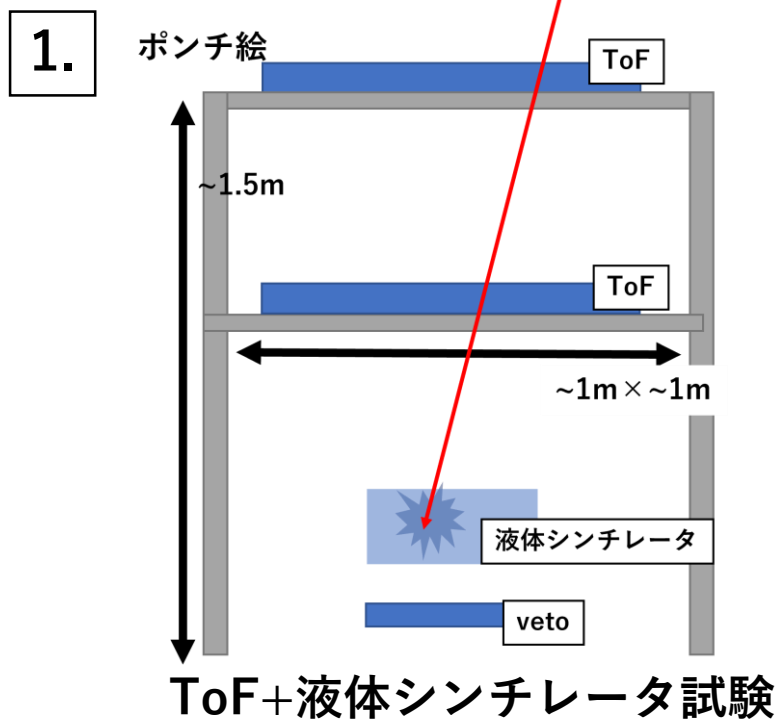
Engineering Balloon flight @ JAXA TARF

地上実験 - 宇宙線 μ 粒子停止事象の検出 -

➤ GRAMS実験の検出器構成要素：LArTPCと二層のToFシンチレータ

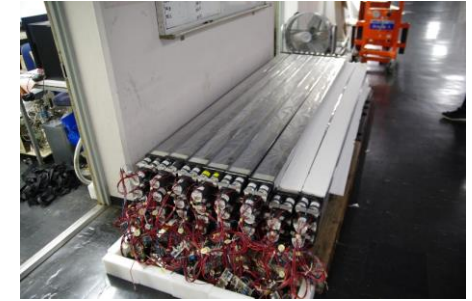
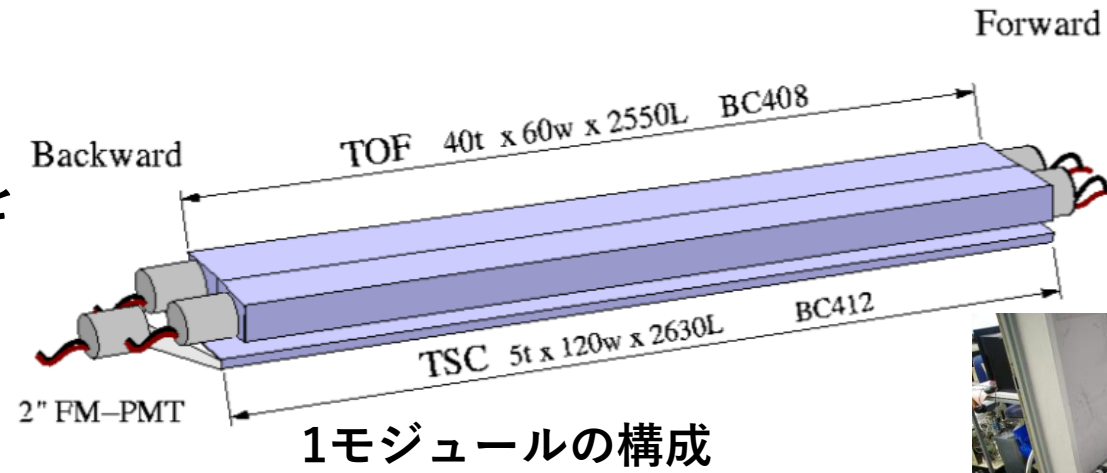
→ まずは地上での実機検証が必要

1. ToF二層と液体シンチレータを用いた宇宙線 μ 粒子停止(崩壊)事象の観測試験
2. LArTPCによる宇宙線 μ 粒子停止事象を用いた粒子反粒子識別試験
3. LArTPC+ToF first step試験



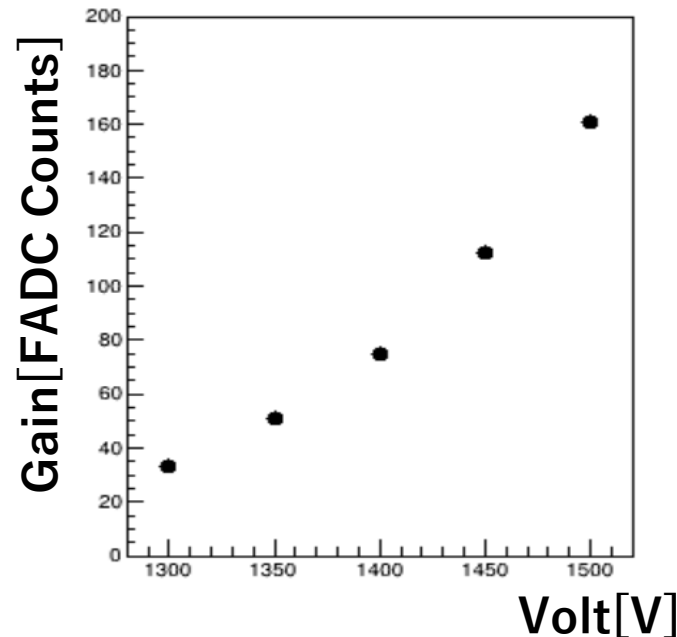
1. ToFシンチレータ

- ▶ Belle実験で使用したToFシンチレータを30モジュール譲渡して頂きました。
- ▶ Belle実験当時時間分解能：100ps

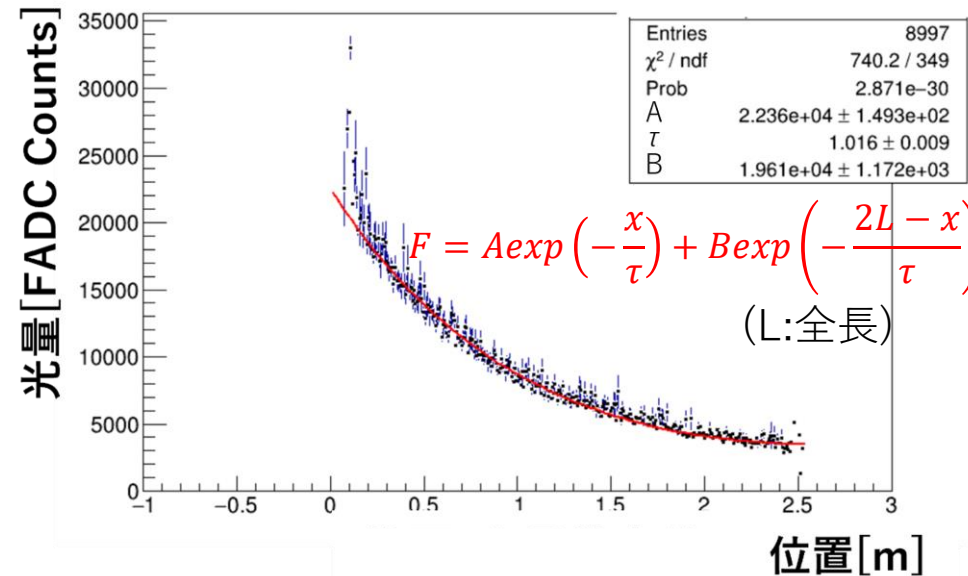


基礎特性試験結果

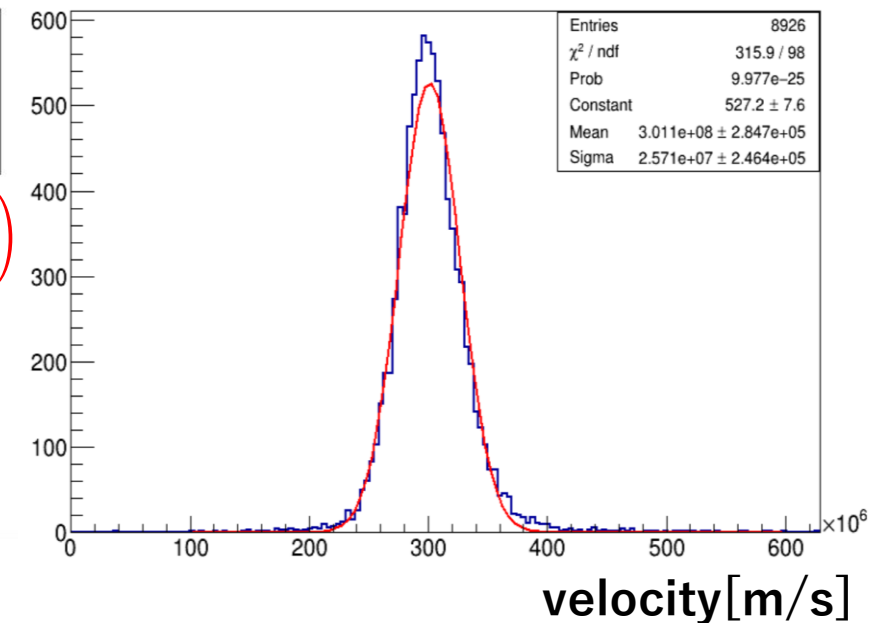
Gain



光量-位置依存性

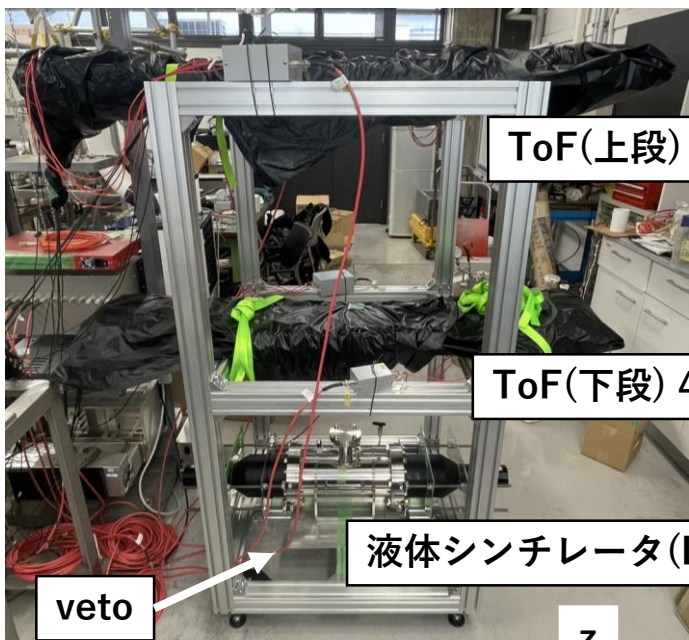


宇宙線荷電粒子速度測定

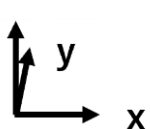


ToF二層のfirst step試験

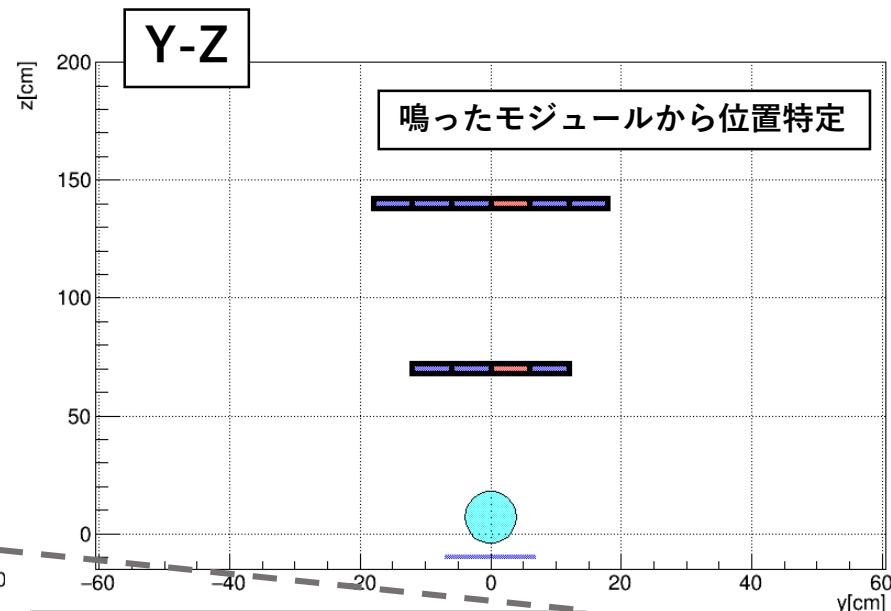
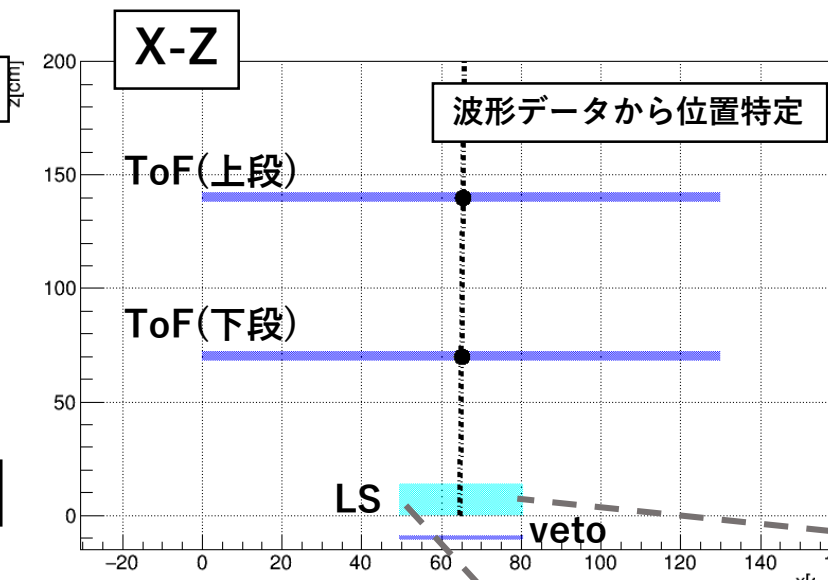
➤ ToF二層のfirst step (w/ 液体シンチレータ)



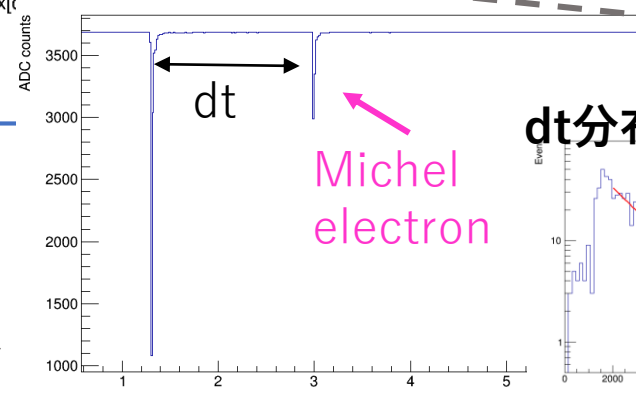
フレームサイズ:
0.7m × 0.7m × 1.4m



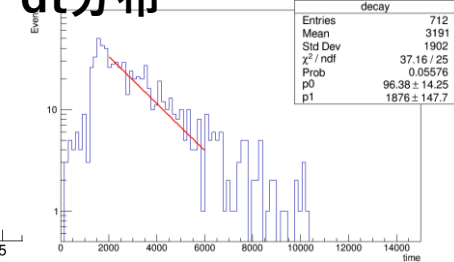
Event Display from ToF+veto data



Decay Event
in 液体シンチレータ



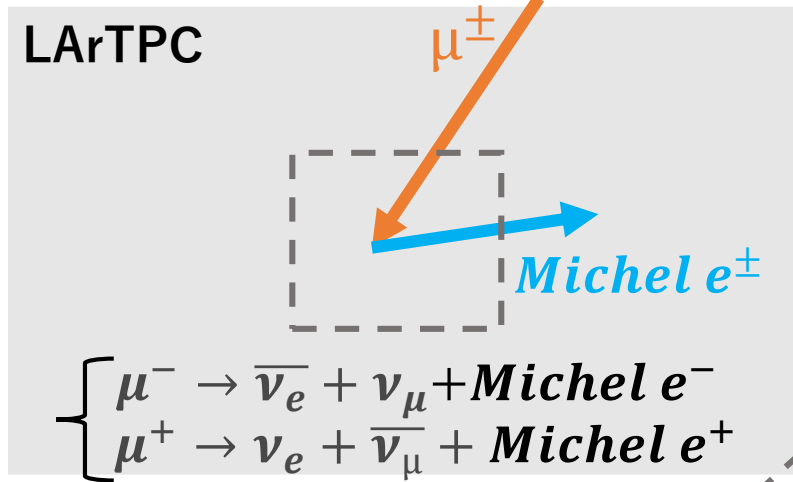
dt分布



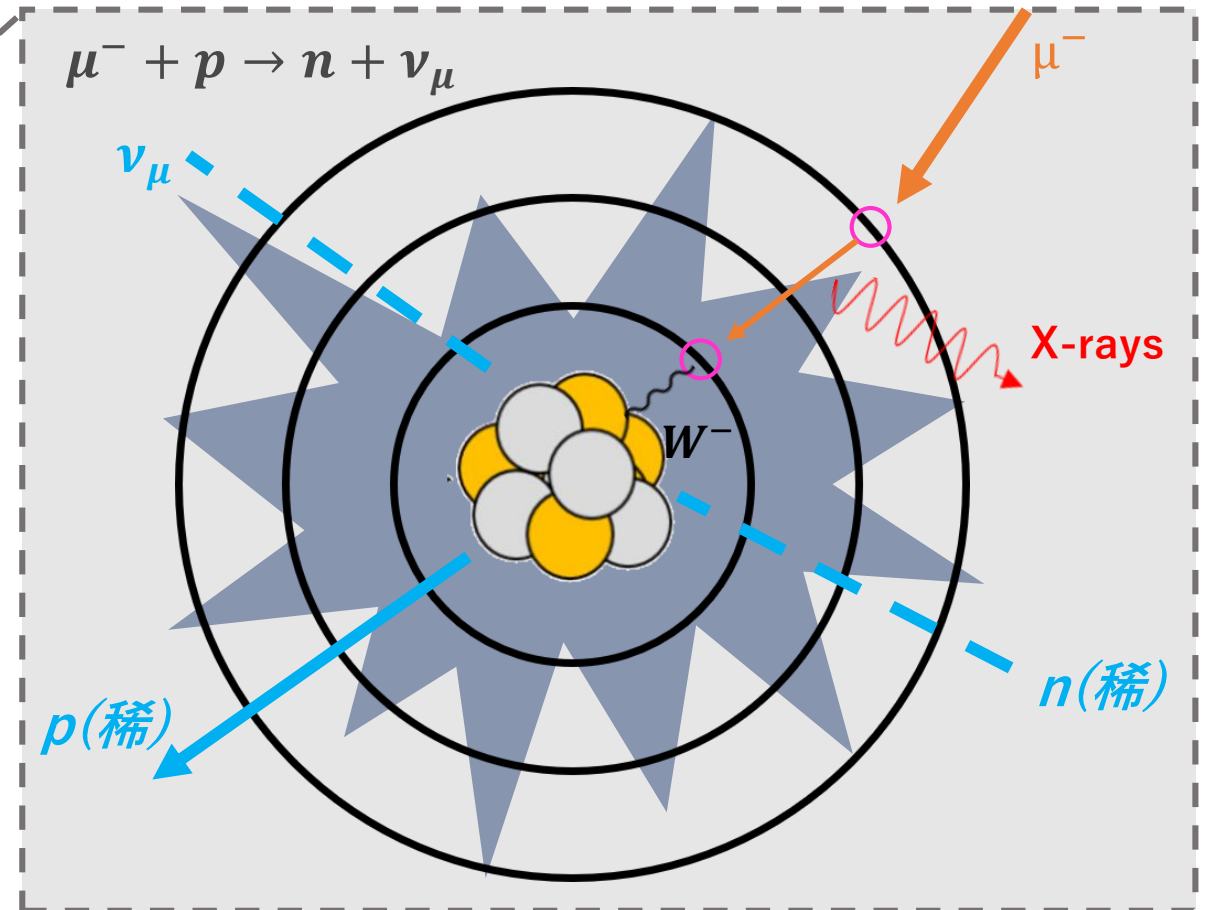
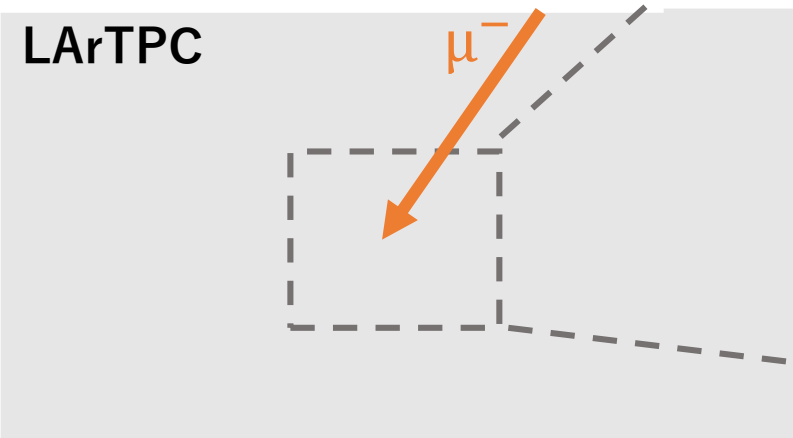
→ 液体シンチレータの光信号とToFによるトラッキングで
宇宙線μ粒子停止(崩壊)事象を観測

2. LArTPC内宇宙線 μ 粒子停止事象を用いた 粒子反粒子識別

■ ミューオン崩壊

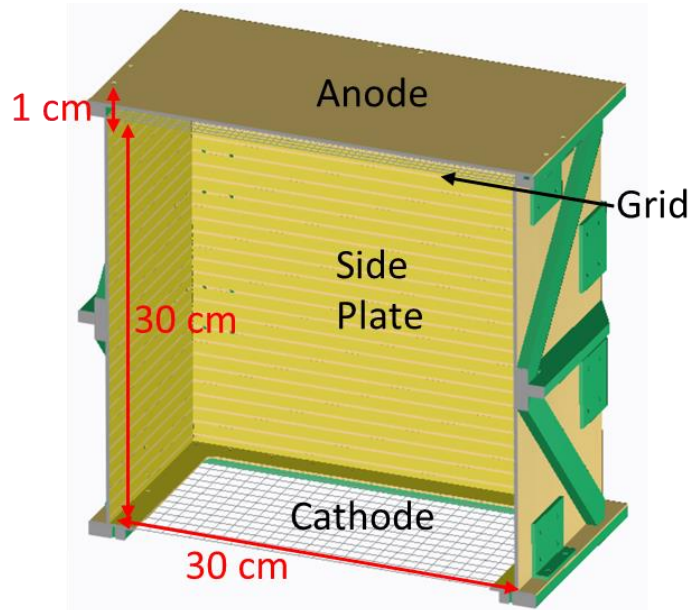


■ Ar原子捕獲 + 核子との反応



→ *Michel electron*の有無でミューオン崩壊(Decay)/Ar原子捕獲事象(Capture) 識別

LArTPCの設計・作成



設計開始：2021年12月

電場形成

Grid

ステンレス, 線 ϕ 100 μ m, 5mmピッチ

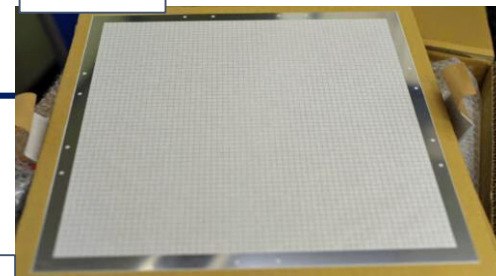
Side Plate

- 1cm間隔で8mm幅の電極
- 1枚に抵抗チップをはんだ付け
→100M Ω \times 30個で抵抗分割

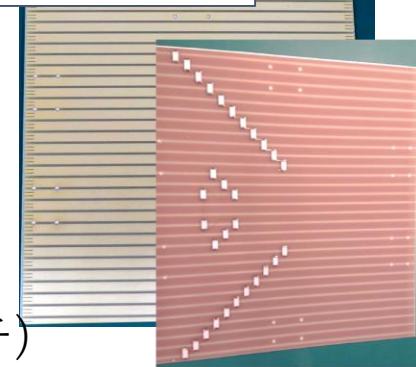
Cathode

PCB Plateにステンレスワイヤーをはんだ付け(線 ϕ 100 μ m, 1cmピッチ)

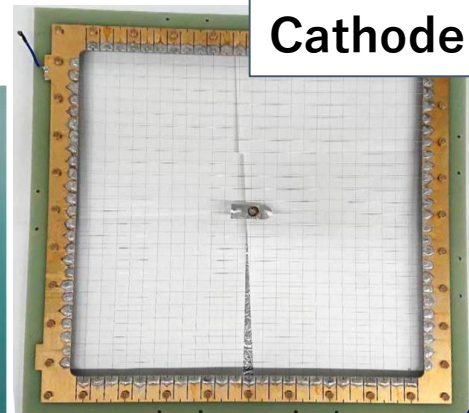
Grid



Side Plate



Cathode

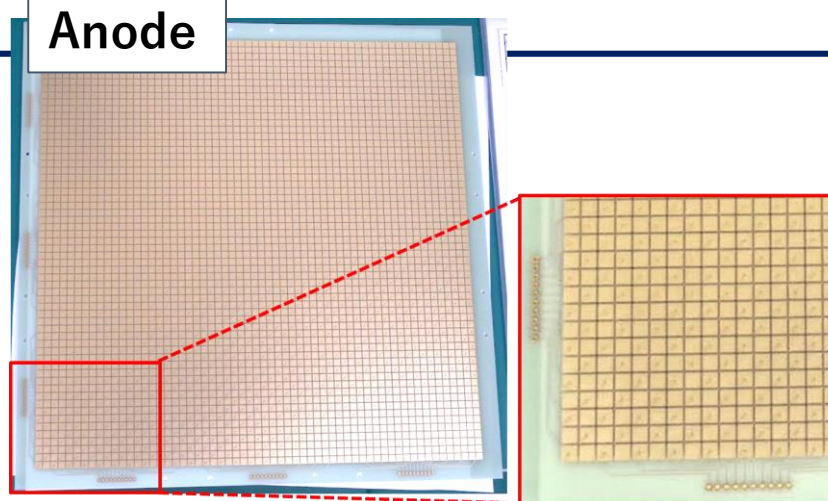


信号読み出し構造

Anode

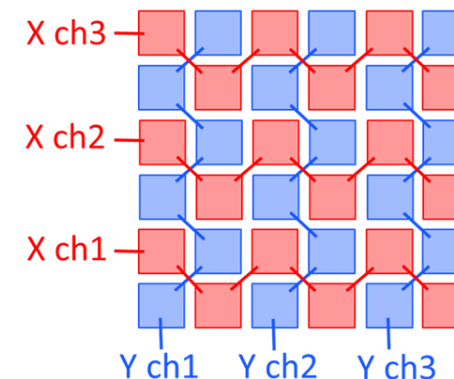
- 5 mm角のpadを配置
- 裏表でジグザグに配線(千鳥読み出し)
→1 cmピッチの2次元読み出し
- X : 30 ch, Y : 30 chの計60 ch

Anode



— 表面の配線

— 裏面の配線



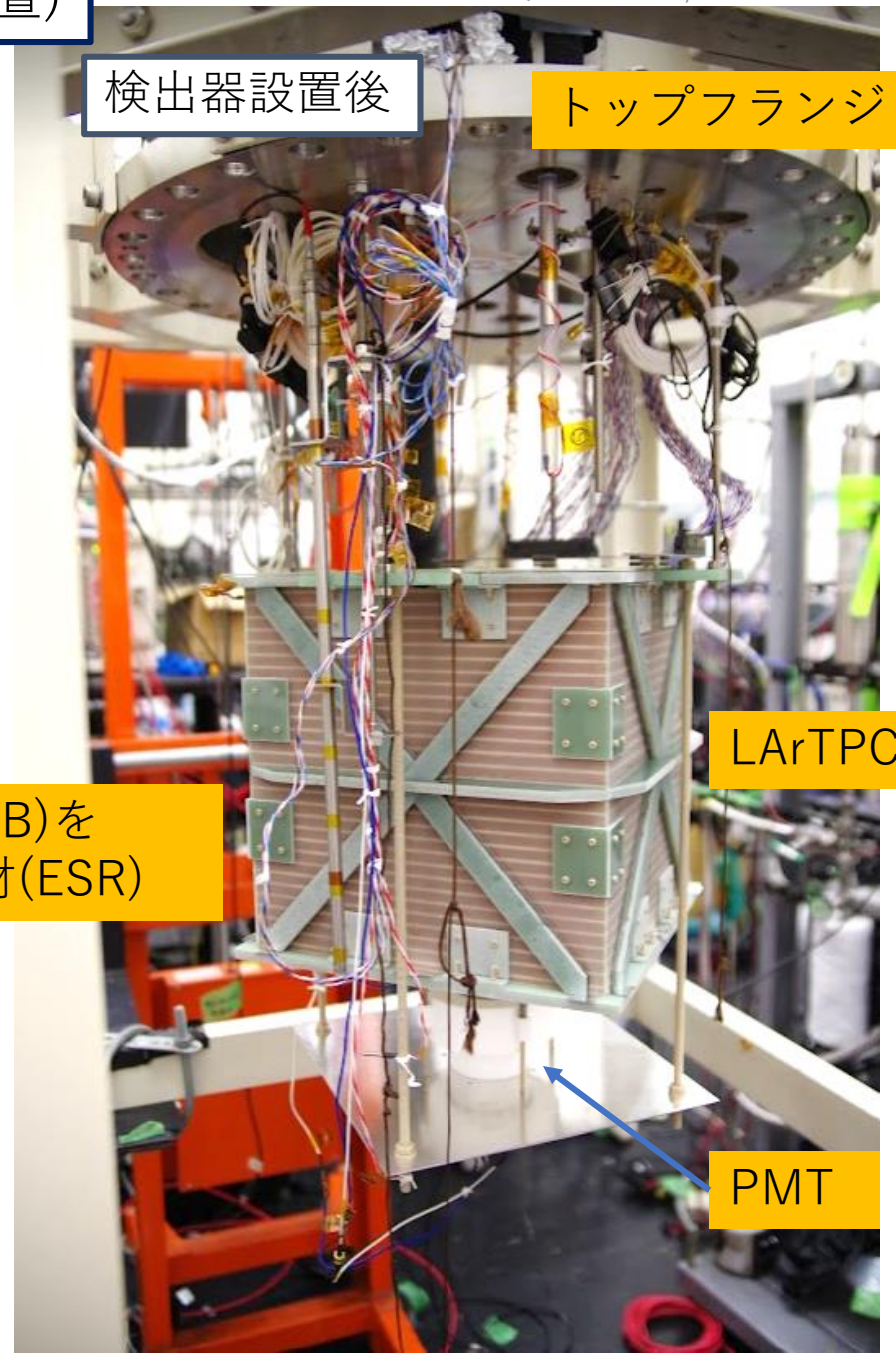
検出器の製作

製作期間：2022年2月 - 8月

製作開始時(クリーンルームの設置)



検出器設置後



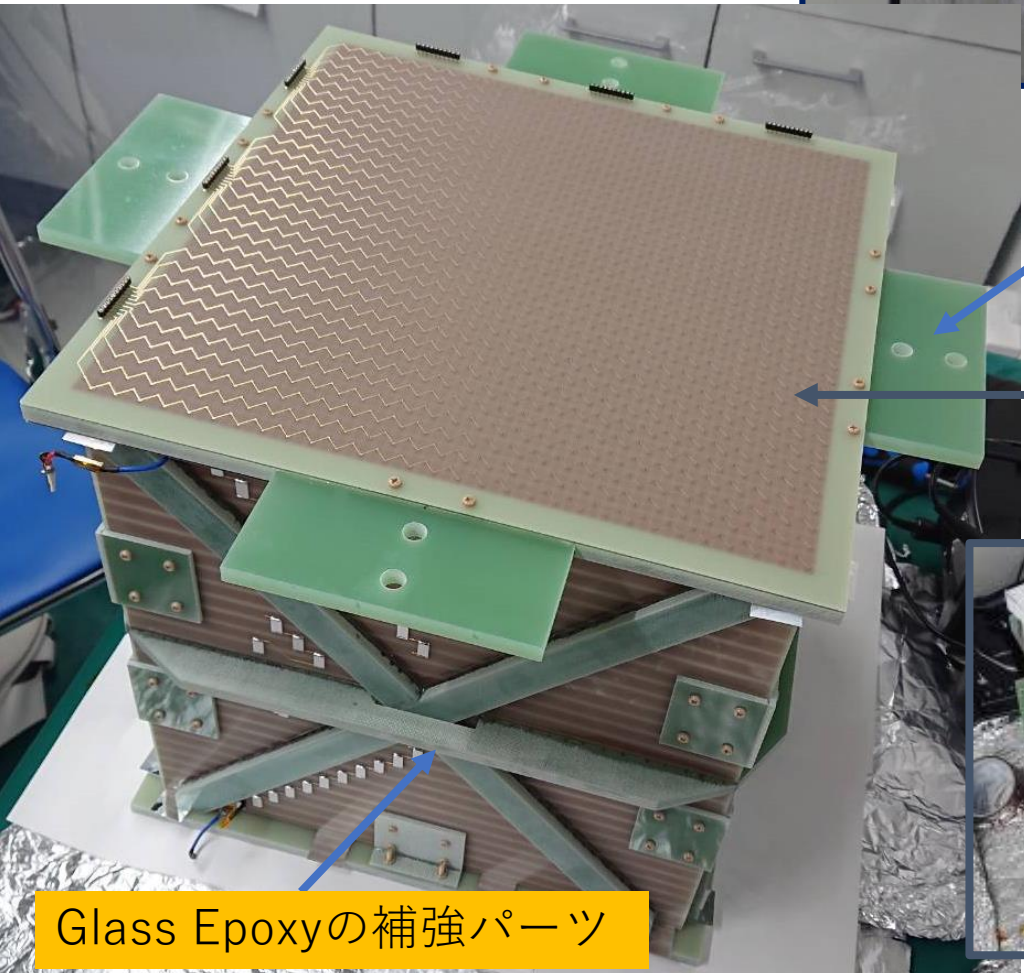
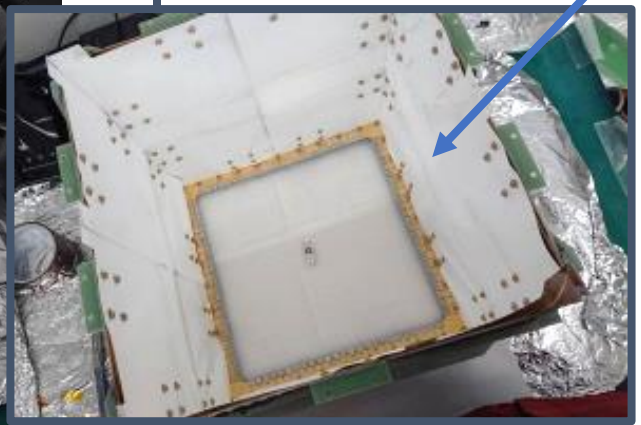
トップフランジ

LArTPC

PMT

検出器設置用パーツ

波長変換材(TPB)を塗布した反射材(ESR)



Glass Epoxyの補強パーツ

LArTPC試験

宇宙線 μ 粒子のCapture, Decayを用いた飛跡による粒子反粒子識別の検証

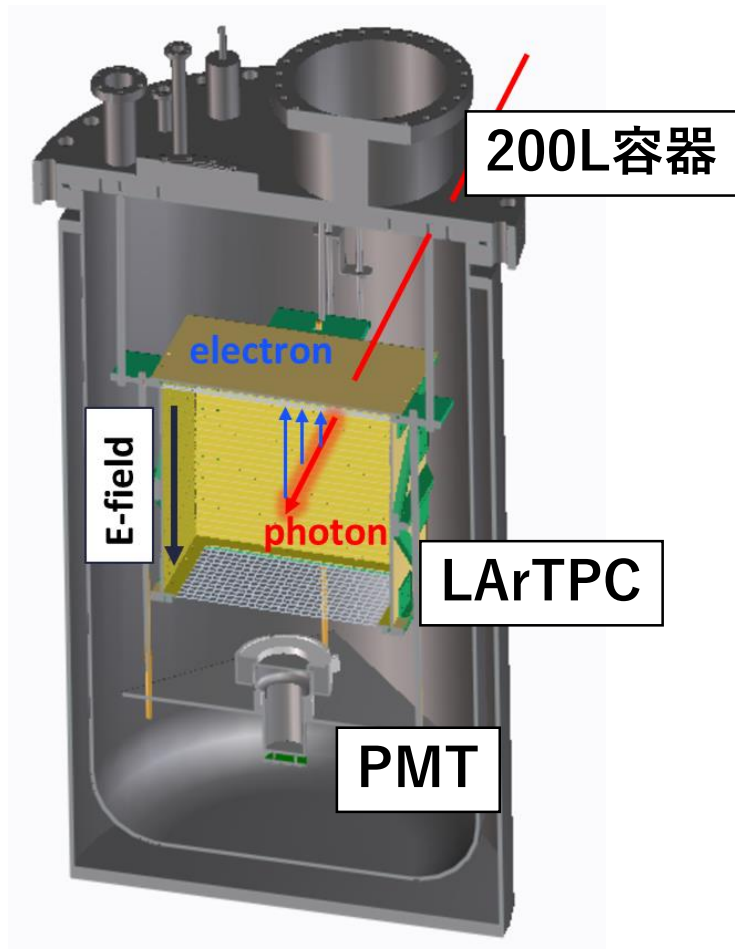
実験期間

- 2022年10月4日 – 8日の5日間
- 電場を変えながらデータを取得(100V/cm ~ 400V/cm)

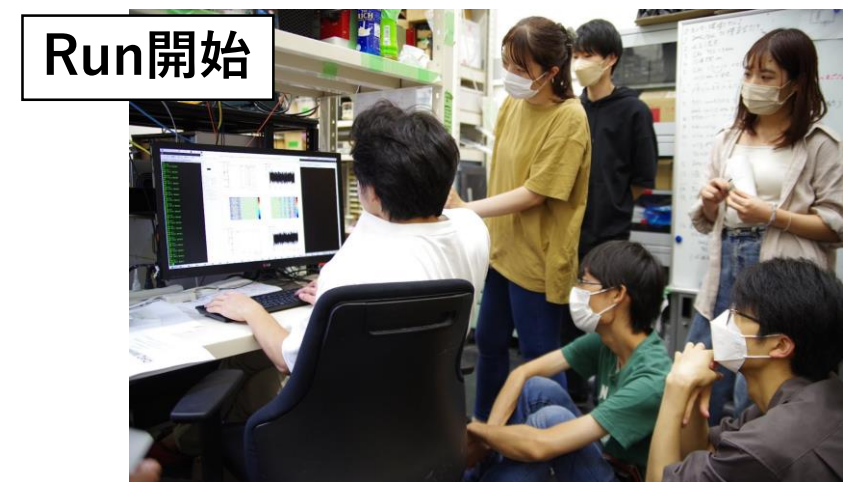
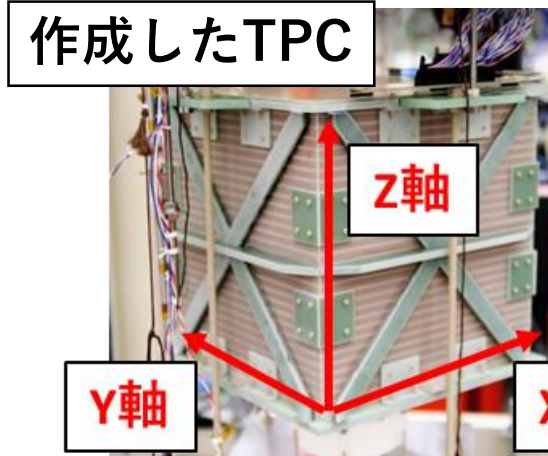
信号読み出しエレクトロニクス

- 光読み出し：FADC (SIS3316, 250 MS/s)
- 電子読み出し：KEKから借りた液体アルゴン用ASIC

(LTARS2014, 64 ch) → 詳細は次の発表

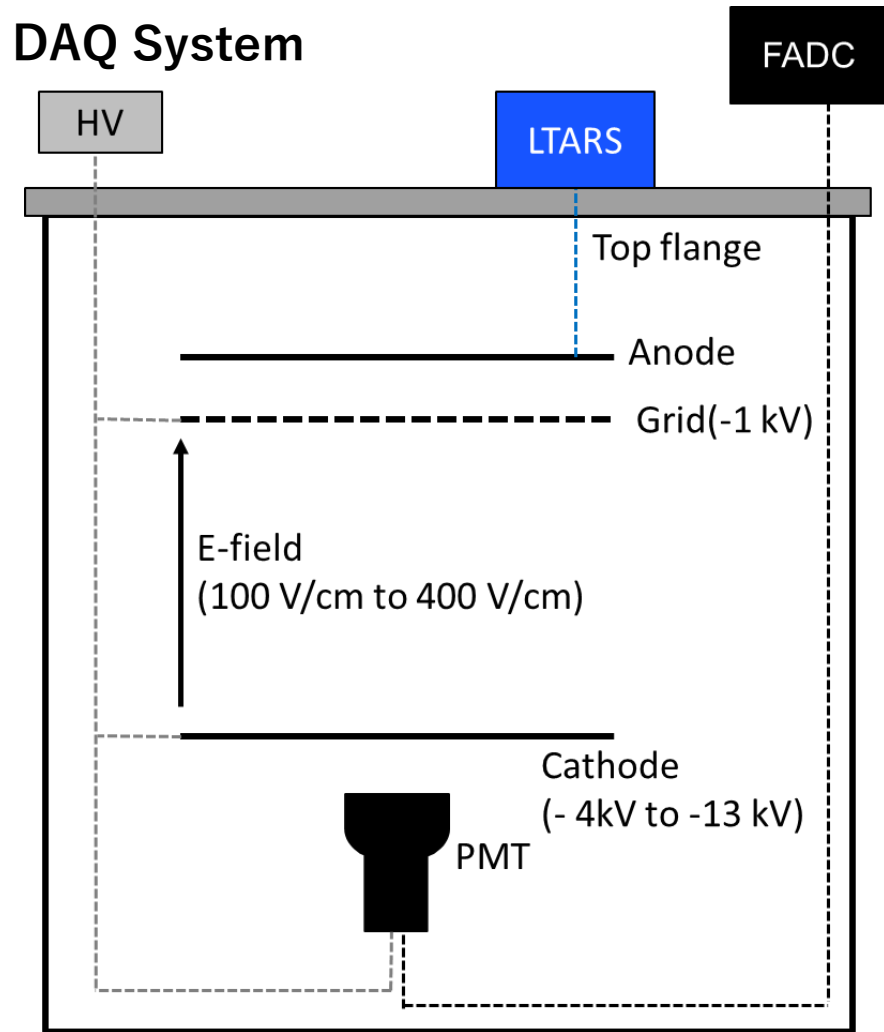


検出器概略図



DAQ System, データ

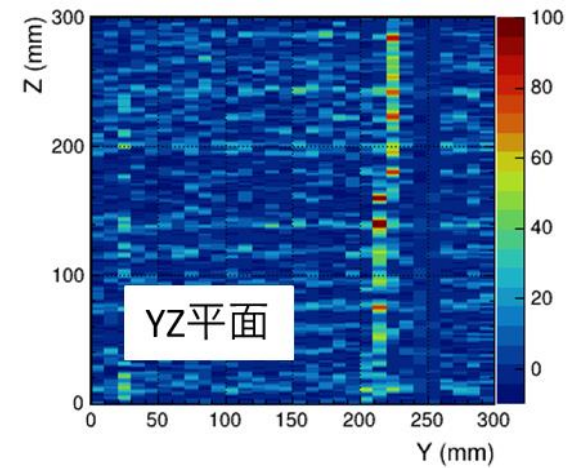
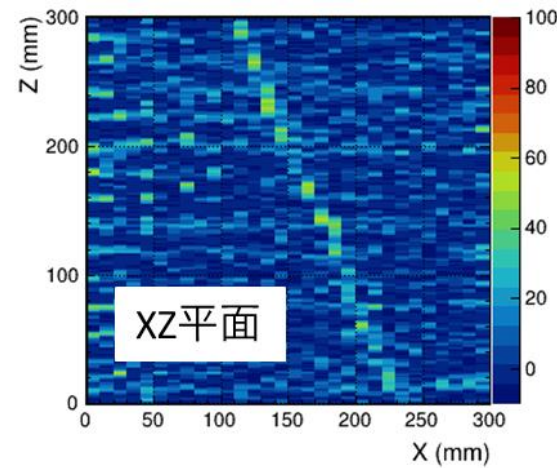
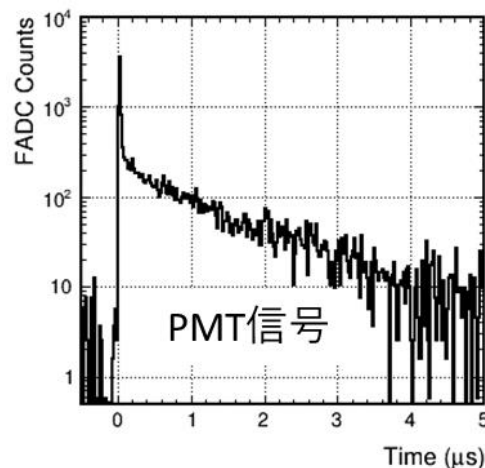
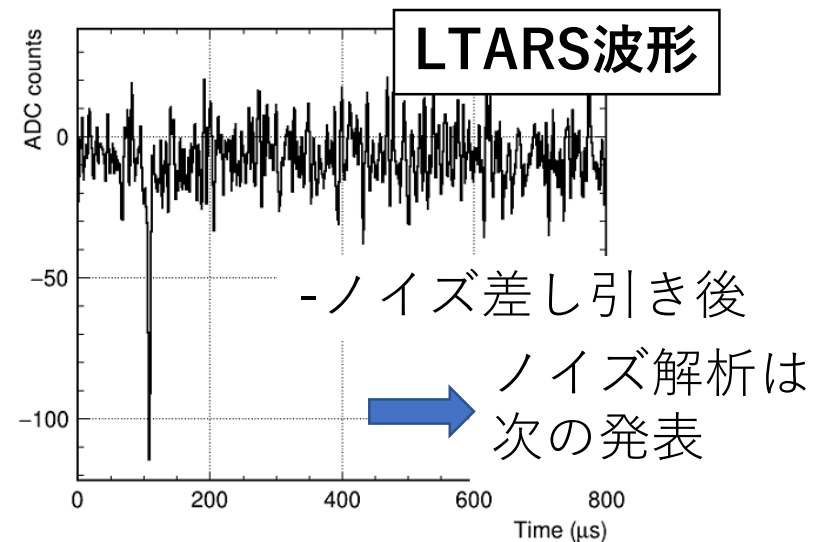
- 約170万 eventの宇宙線 μ 粒子のデータを取得 (μ Rate: 10Hz程度)



- チャンネル数
LTARS: 60ch
FADC: 1ch(PMT)

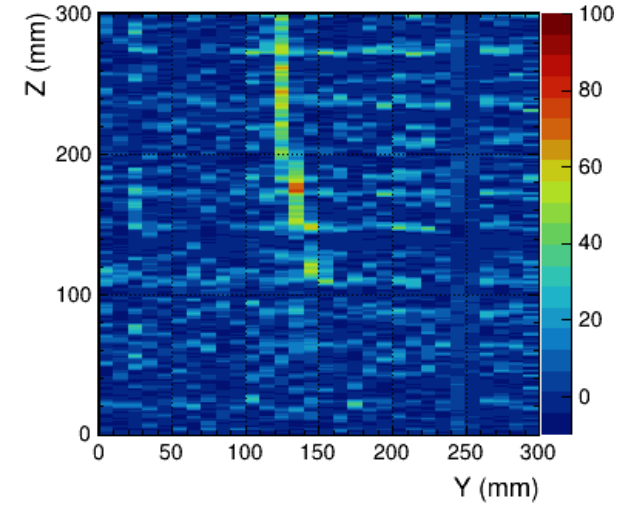
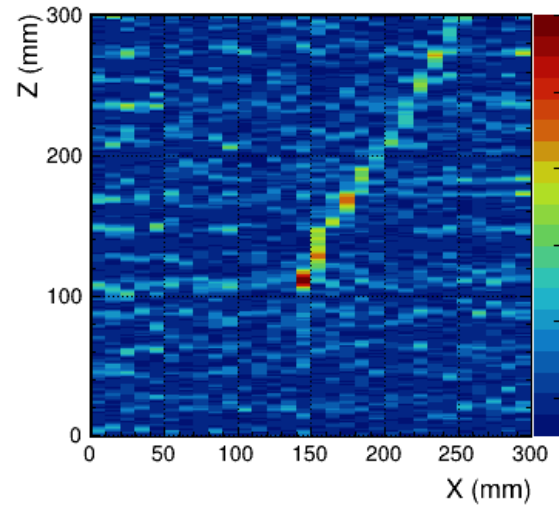
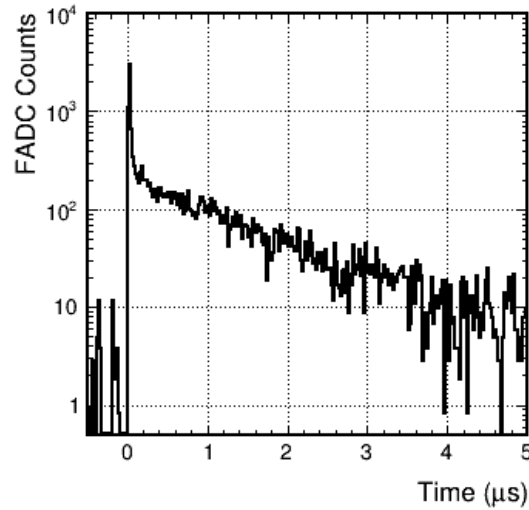
- トリガー: PMT信号
- LTARSからEvent NumberパルスをFADCに送り同期

- 観測した μ 粒子1イベント(400V/cm)

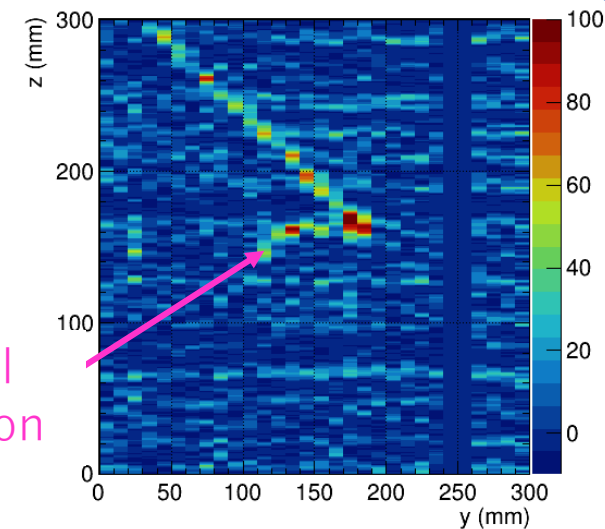
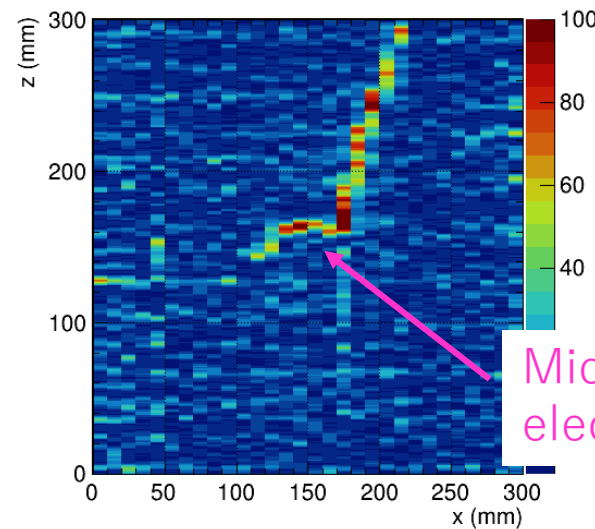
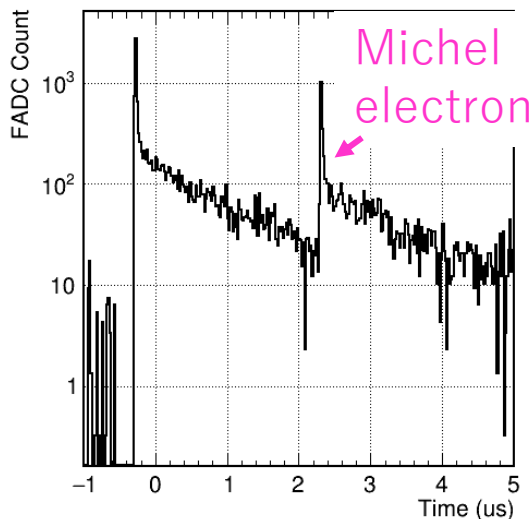


観測したLArTPC中で停止する μ 粒子

Capture



Decay



→ LArTPCの電子信号とPMTの光信号で宇宙線 μ 粒子Capture, Decayを観測

Decay, Capture 識別能力の検証

今回使用したTPCにおけるDecay, Capture 識別能力の検証を行う

- ・ 光信号解析でDecay/Capture イベント比を算出

μ^- 粒子	$\frac{dN^-}{dt} = -(\lambda_{dec} + \lambda_{cap})N^-(t)$ $\left(\lambda_- = \frac{1}{\tau_-} = \frac{1}{\tau_{dec}} + \frac{1}{\tau_{cap}} \right)$	μ^+ 粒子	$\frac{dN^+}{dt} = -\lambda_+ N^+(t)$ $\left(\lambda_+ = \frac{1}{\tau_+} = \frac{1}{\tau_{dec}} \right)$
------------	--	------------	--

μ^-/μ^+ のDecay イベント
について時定数関数Fit
→ Decay/Capture 比を算出

$N^-(N^+)$: μ^- (μ^+)の粒子数
 τ_{dec} , τ_{cap} : 時定数

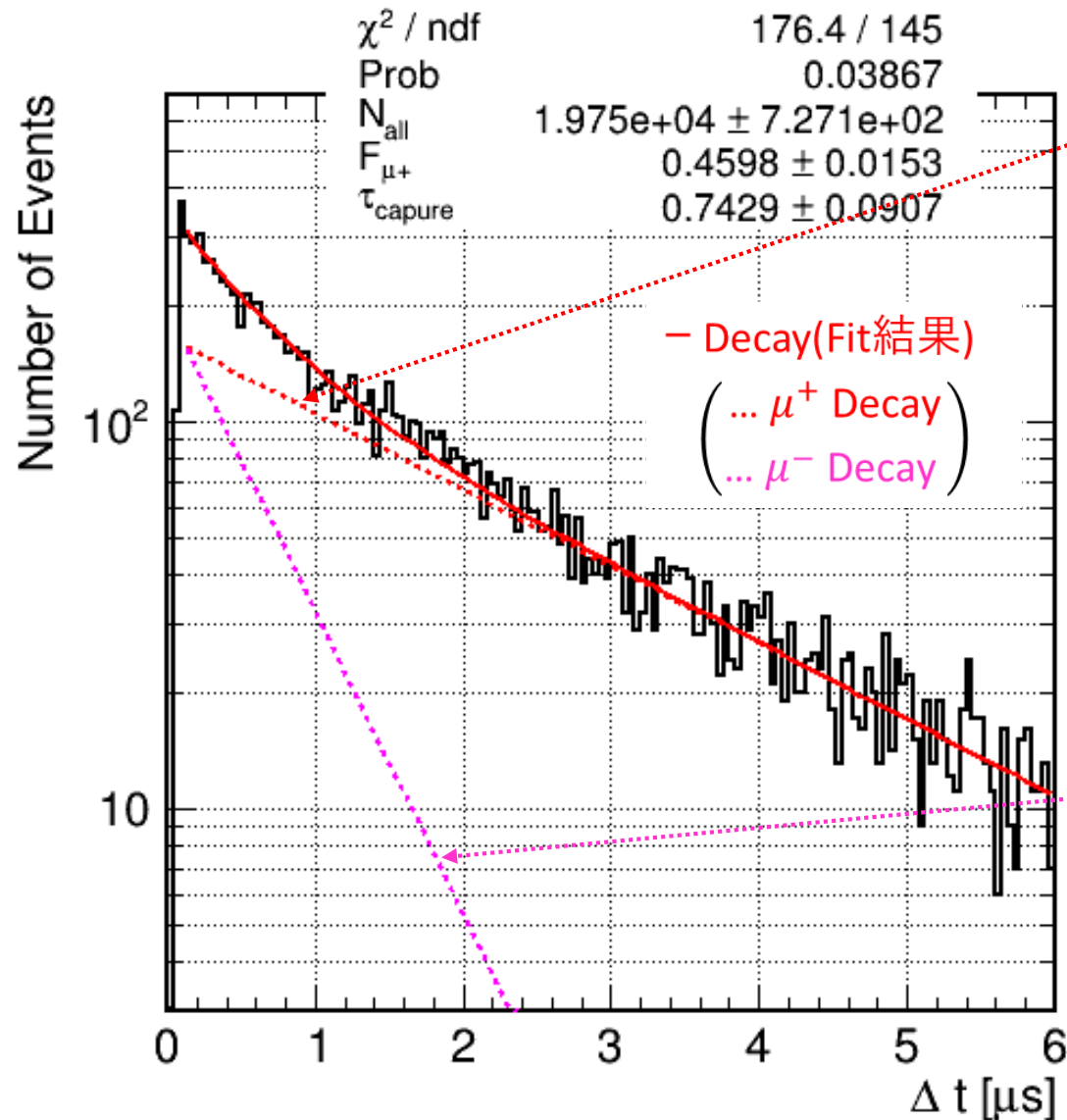
- ・ 飛跡によるイベント識別

Event DisplayをEye Scanし、Decay/Capture イベント比を算出



光解析によるイベント比と飛跡によるイベント比の比較

光信号解析によるDecay/Captureイベント比の算出



μ^+ 粒子 → 100% Decayイベント

$$N^+(t) = N_0^+ e^{-\lambda_+ t} \quad \left(\lambda_+ = \frac{1}{\tau_+} = \frac{1}{\tau_{\text{dec}}} \right)$$

μ^- 粒子 → DecayイベントとCaptureイベントがある

$$N^-(t) = N_0^- e^{-\lambda_{\text{dec}} t} + N_0^- e^{-\lambda_{\text{cap}} t}$$

$$= N_0^- e^{-(\lambda_{\text{dec}} + \lambda_{\text{cap}}) t}$$

$$\left(\begin{array}{l} N_0^- = N_{\text{dec}}^- + N_{\text{cap}}^- \quad \left(N_{\text{dec}}^- : N_{\text{cap}}^- = \frac{1}{\tau_{\text{dec}}} : \frac{1}{\tau_{\text{cap}}} \right) \\ \lambda_- = \lambda_{\text{dec}} + \lambda_{\text{cap}} \quad \left(\lambda_- = \frac{1}{\tau_-} = \frac{1}{\tau_{\text{dec}}} + \frac{1}{\tau_{\text{cap}}} \right) \end{array} \right)$$

$$= N_{\text{dec}}^- e^{-\lambda_- t} + N_{\text{cap}}^- e^{-\lambda_- t}$$

Fit結果 ($\tau_{\text{cap}} = 742.9 \pm 90.7 \text{ ns}$)は

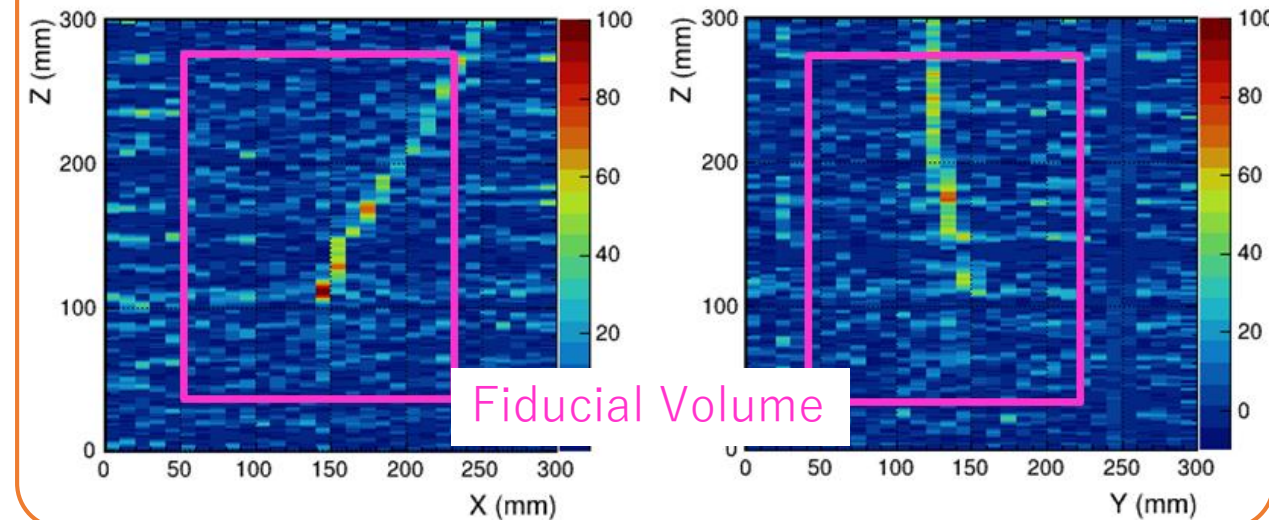
理論値 ($883 \pm 56 \text{ ns}$ (PhysRevC.35.2212))と誤差の範囲内で一致

→ Decay/Captureイベント比

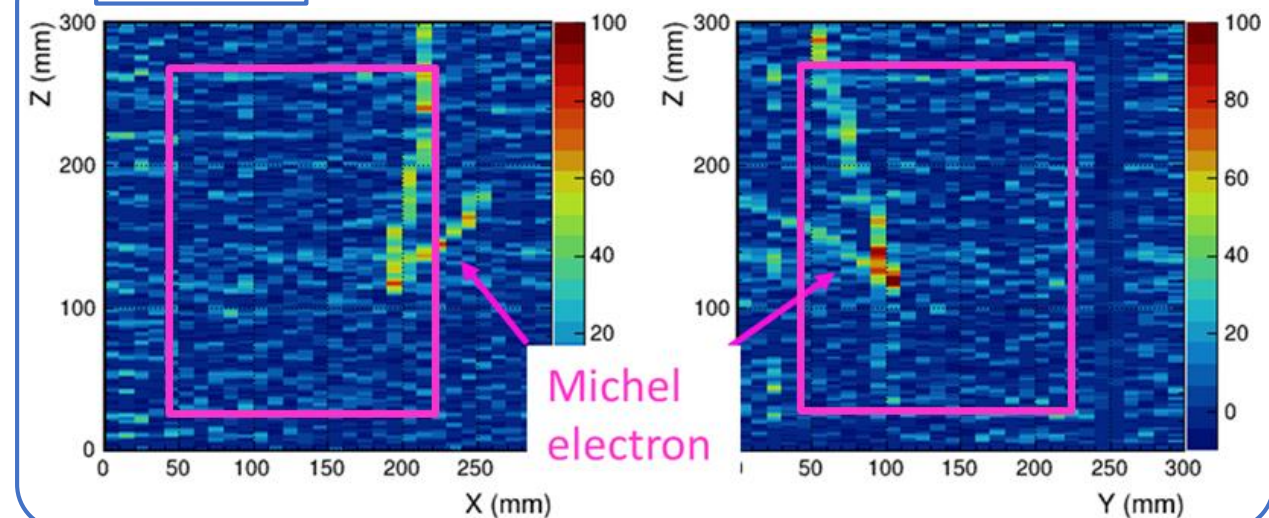
$$N_{\text{dec}} : N_{\text{cap}}^- = 1 : 0.68 \pm 0.05$$

飛跡によるDecay/Captureイベント比の算出 と光解析との比較結果

Capture



Decay



➤ 飛跡を用いたイベント識別方法

- 70,207 event分をeye scan
- Fiducial Volume(17 cm × 17 cm × 24 cm)内で止まるもの
- Decay・Captureとそれ以外で識別

➤ イベント数の結果

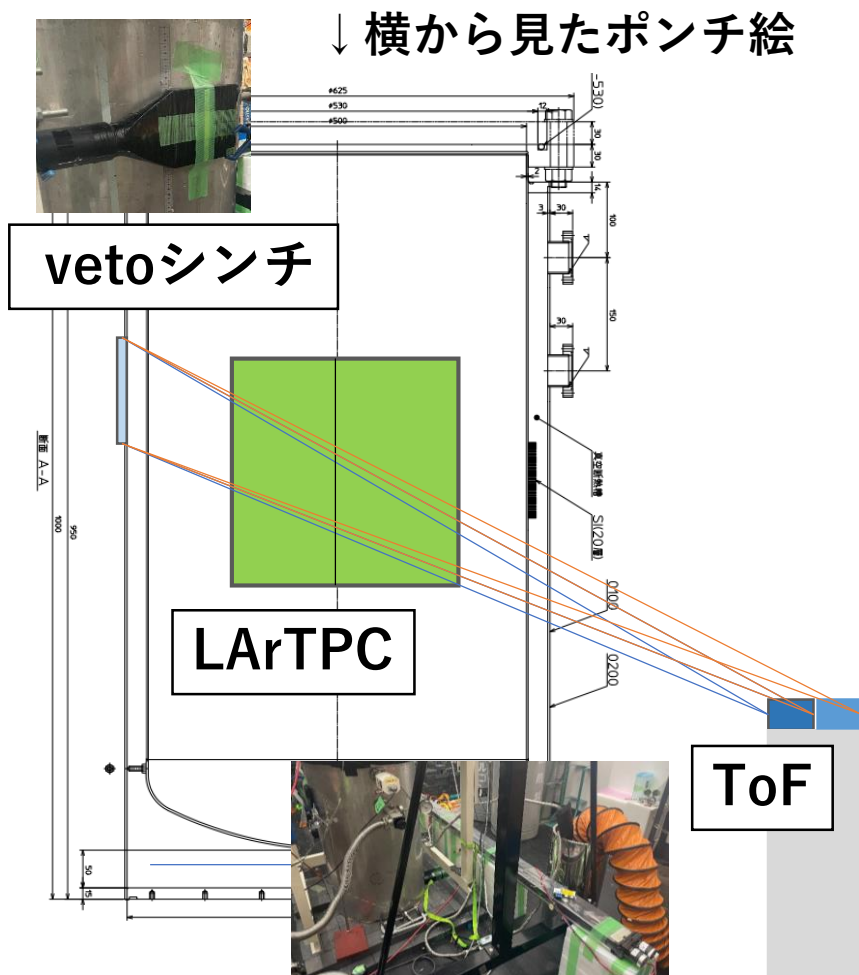
	Decay N_{dec}	Capture N_{cap}^-	$N_{dec} : N_{cap}^-$
Eye scan	243 event	169 event	1 : 0.69 ± 0.07

(光解析結果 1 : 0.68 ± 0.05)

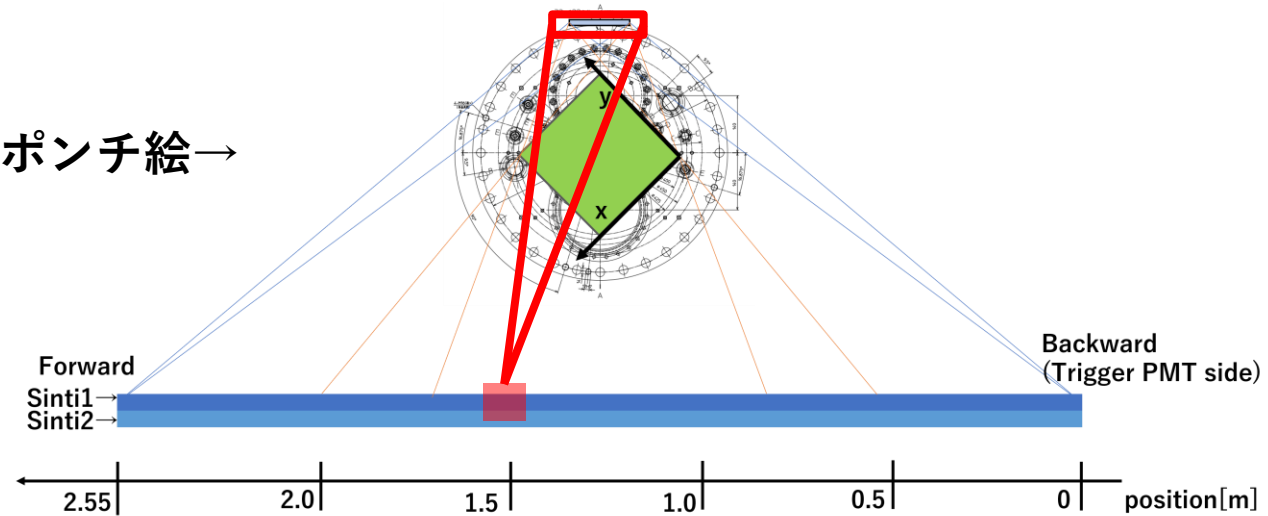
→ Decay/Captureのイベント比は
誤差の範囲内で一致

3. LArTPC + ToF試験

- ToFシンチレータをLArTPCの外側に設置しLArTPC dataとToFトラッキングを比較
- 読み出し: FADC



上から見たポンチ絵→

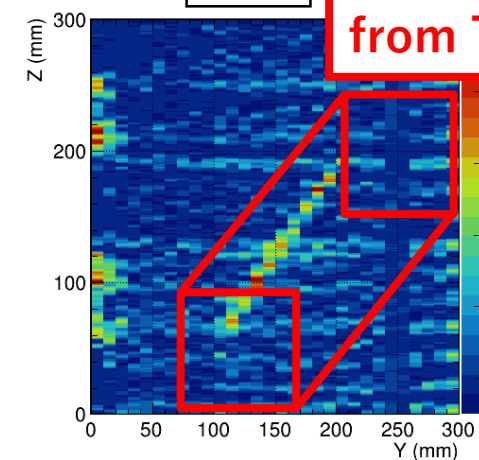
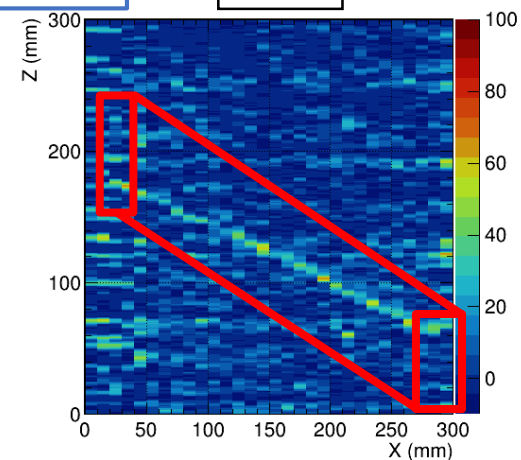


LArTPC Data

X-Z

Y-Z

Tracking from ToF & veto



→ ToFによるトラッキング領域にLArTPC飛跡があることを確認

まとめと今後の展望

まとめ

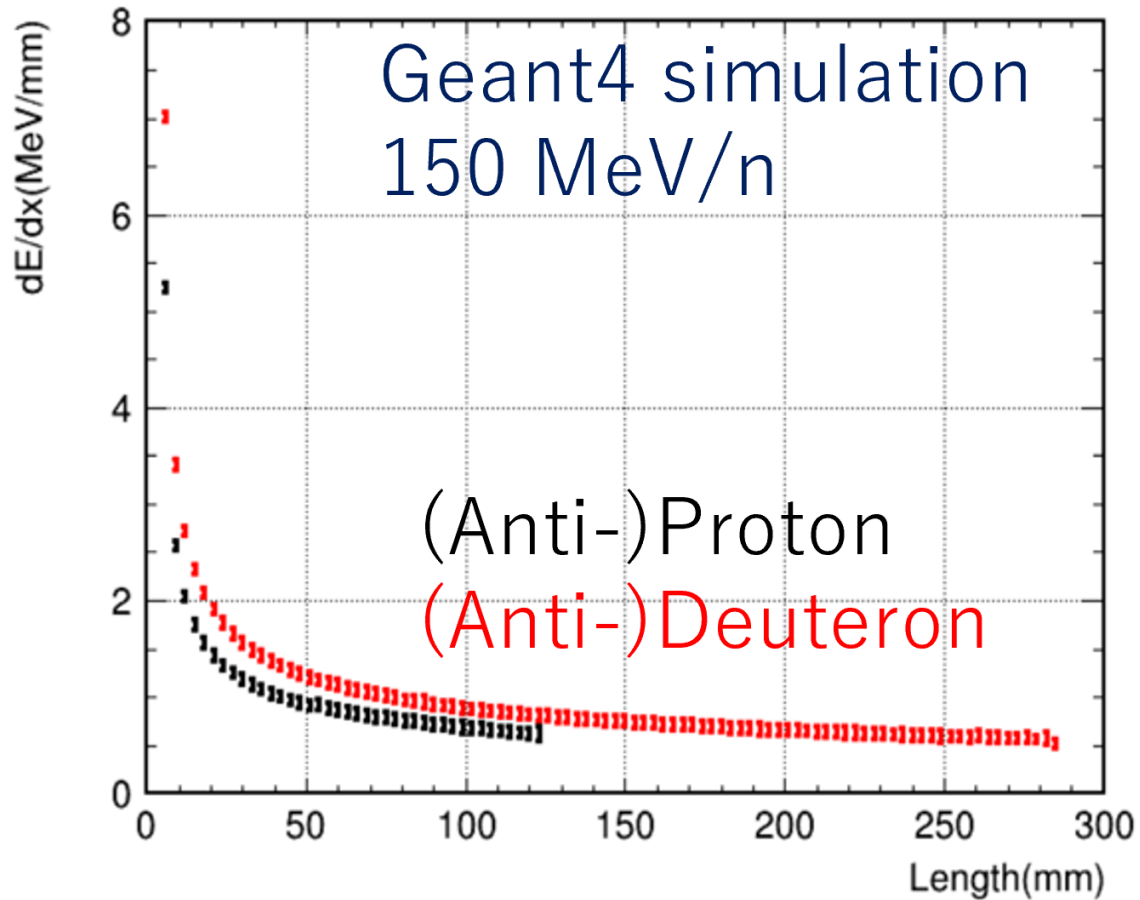
- GRAMS実験は宇宙線荷電反粒子の検出による暗黒物質探索と MeV 領域 γ 線の観測を目指した国際共同開発 気球・衛星実験である。
- 早稲田大学(地上)で以下の実機検証を行った。
 1. ToFによる液体シンチレータを用いた宇宙線 μ 粒子停止(崩壊)事象の観測試験
 2. LArTPCによる宇宙線 μ 粒子停止事象を用いた粒子反粒子識別試験
 3. LArTPC+ToF first step試験

今後の展望

- ToF二層のトラッキング、 β 測定時技術の確立
- LArTPCによる宇宙線 μ 粒子を用いた粒子反粒子識別試験を踏まえて、J-PARCビームテストで反陽子ビームを用いた粒子反粒子識別に挑む
- 小型気球を用いて液体アルゴン安定運用技術の確立試験に挑む

バックアップ

粒子質量識別

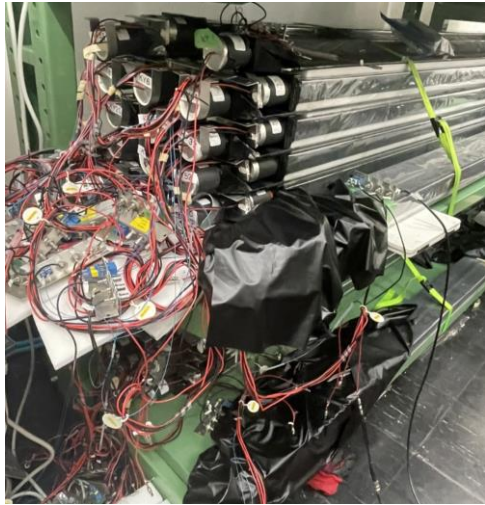


粒子	β	Rigidity (MeV/n)	Kinetic Energy (MeV)	Momentum (MeV/c)
p, \bar{p}	0.5	150	150	570
d, \bar{d}	0.5	150	300	1140

ToFシンチレータの加工

- 取り回しをよくするため、シンチレータを半分に切断し研磨し短化検証
- 手順：のこぎりで切断→紙やすり、ピカールで磨く

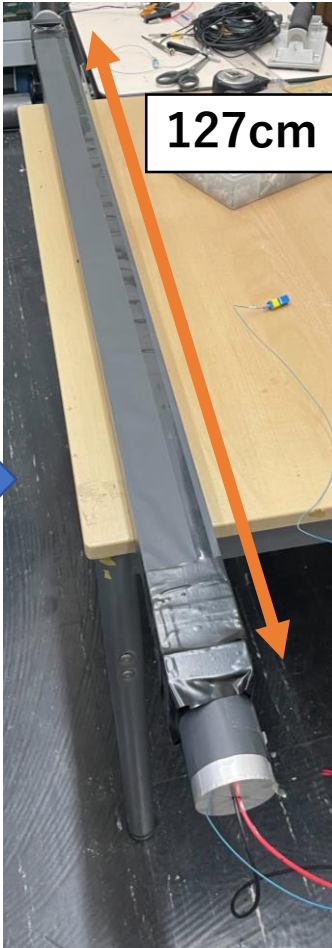
ToF(30モジュール)



ToF加工前



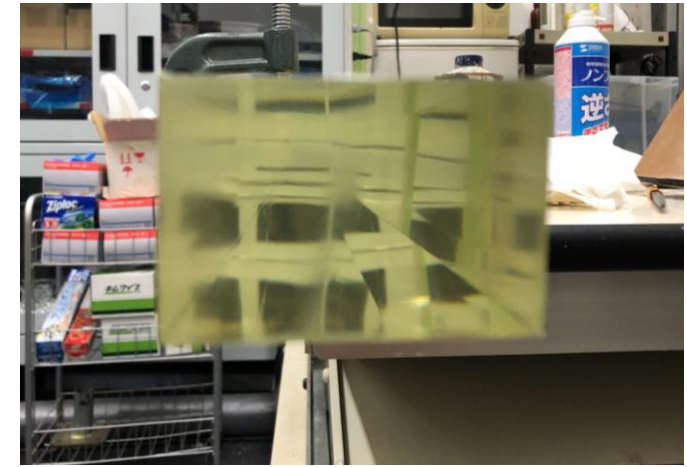
ToF加工後



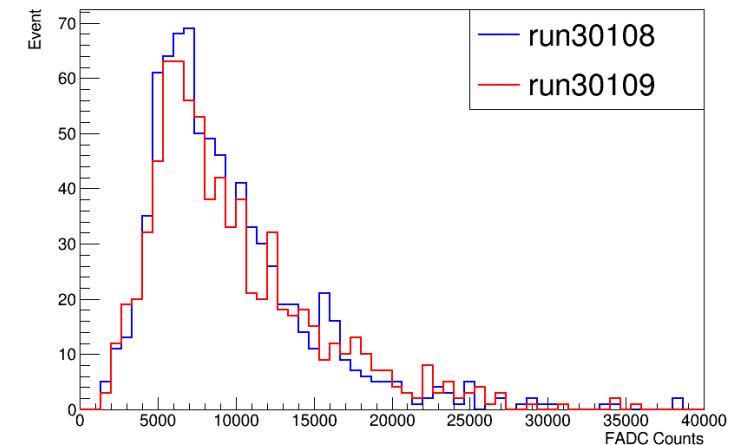
幅: 6cm、厚さ: 4cm

構成要素：
プラスチックシンチレータ
PMT(両端)

研磨したシンチレータの断面



切断側と切断していない側を
同じPMTで読んだ結果の光量分布



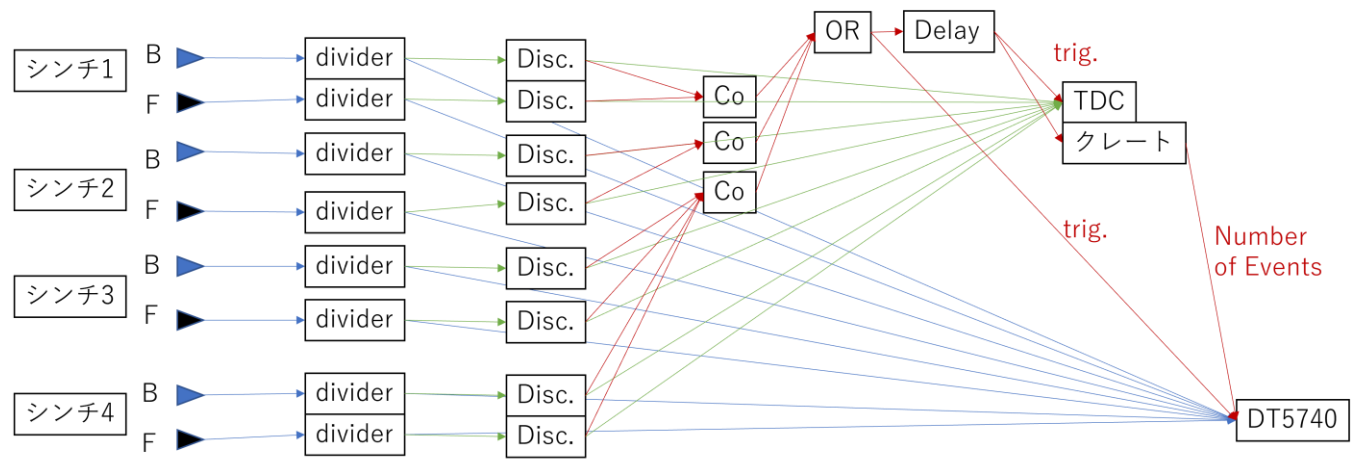
切断したシンチレータの側面に
大きな影響は見られなかった
→使用可能と判断!

キャリブレーション試験

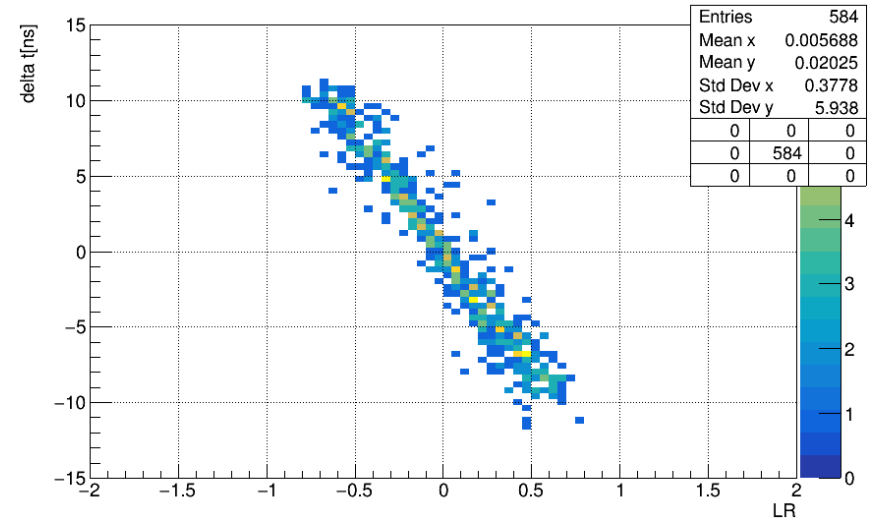
- 試験では波形データのみ取得するため、ToFの位置-光量依存性を用いてキャリブレーション試験 = ToF Position Scan
- 時間読み出し：TDC(時間分解能: 25ps)
- 波形読み出し：DT5740
(時間分解能: 16ns, 1ADC Count: 0.488mV)

論理回路

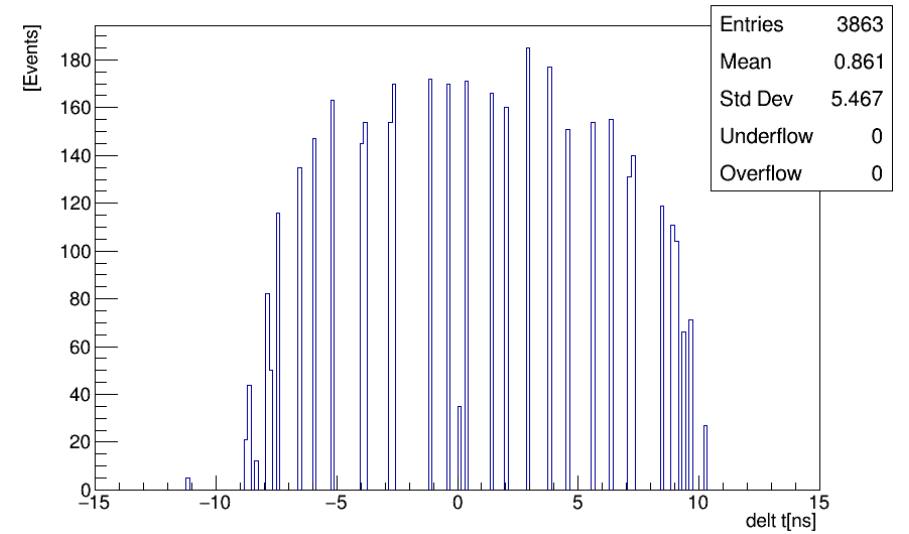
(4本のシンチレータを同時にキャリブレーション)



[時間差dt from TDC vs 光量比LR from DT4740]



[光量比LRから算出した時間差dt分布]

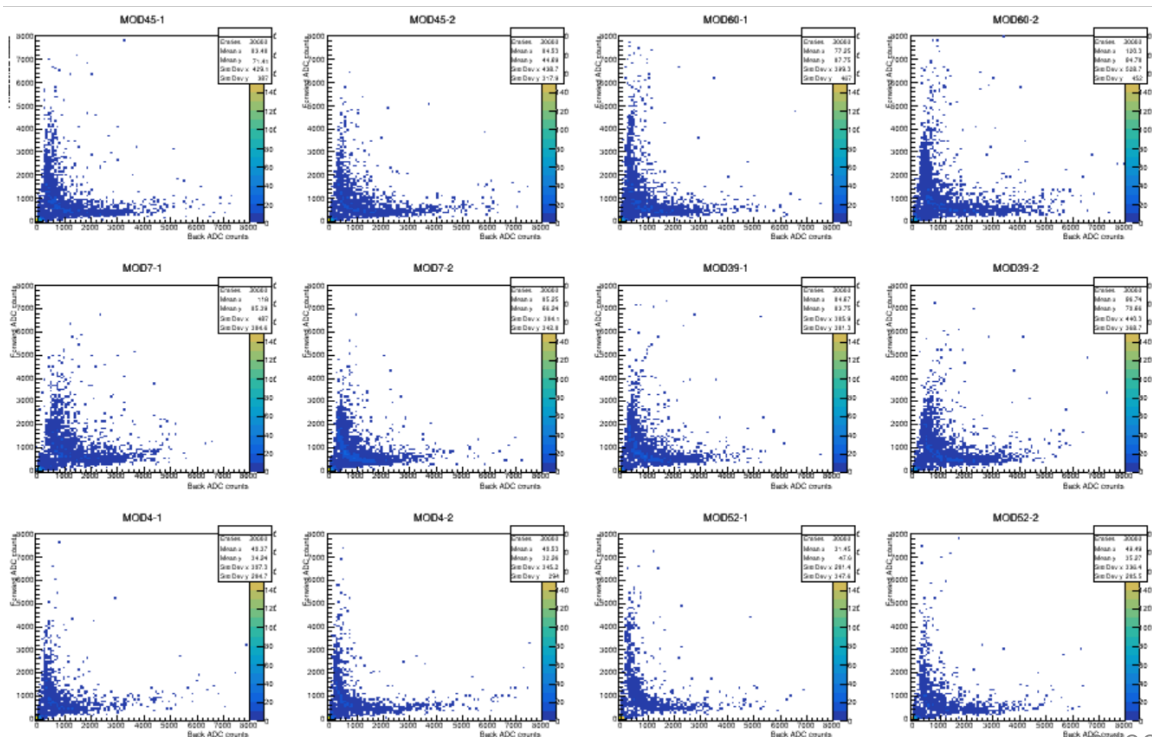


→ 両端PMTの光量比LRを用いて、波形データから位置の特定ができるようにした
(今回の解析では位置分解能：10[cm]程度)

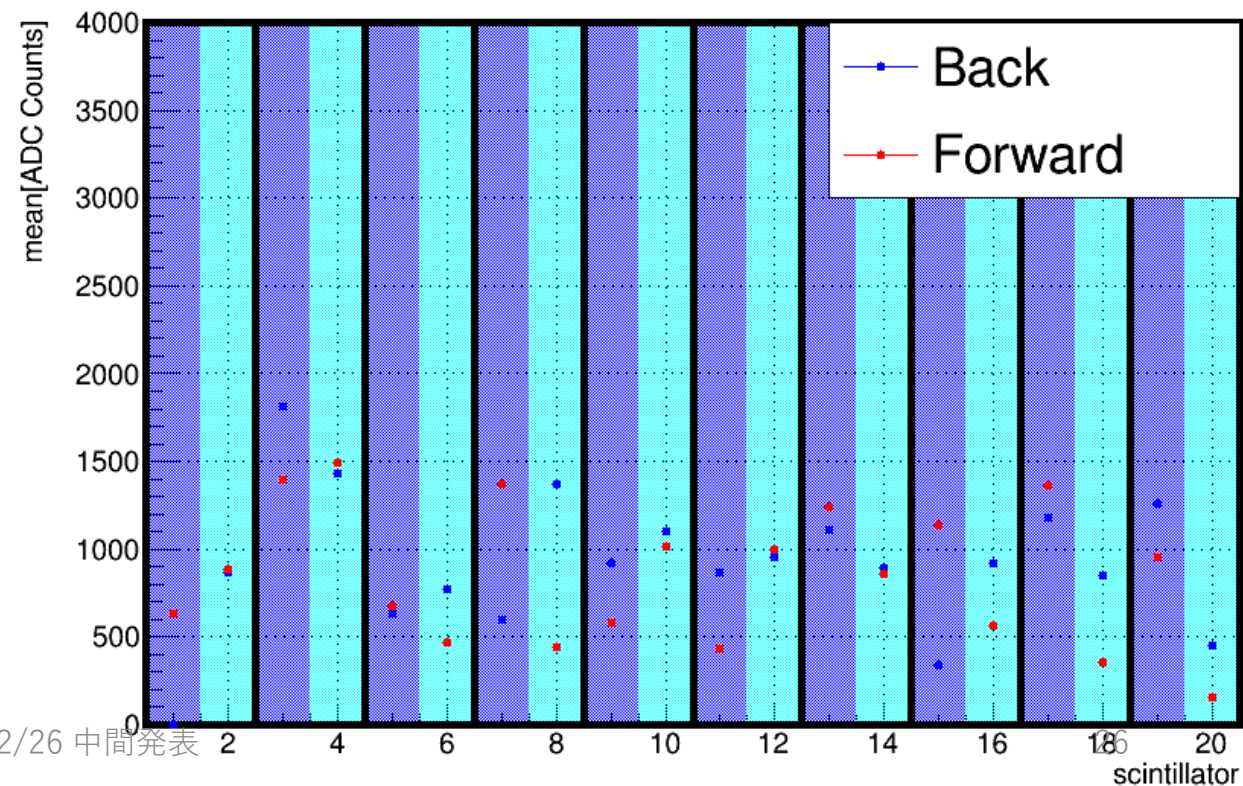
読み出し結果

- 読めなかったPMTは2個
- 光量分布の平均値はゲインキャリブレーションの値と相関があるため参考になりそう

各シンチレータの光量分布



各PMTの光量分布の平均値



光信号解析Fit関数

μ^- 粒子	$\frac{dN^-}{dt} = -(\lambda_{dec} + \lambda_{cap})N^-(t)$ $\left(\lambda_- = \frac{1}{\tau_-} = \frac{1}{\tau_{dec}} + \frac{1}{\tau_{cap}}\right)$	μ^+ 粒子	$\frac{dN^+}{dt} = -\lambda_+ N^+(t)$ $\left(\lambda_+ = \frac{1}{\tau_+} = \frac{1}{\tau_{dec}}\right)$
------------	--	------------	--

$N^-(N^+)$: μ^- (μ^+)の粒子数
 $\tau_{dec}(cap)$: decay(cap)時定数

Decay event dt分布におけるFit関数

$f(t) = \frac{N^+}{\tau_+} \exp\left(-\frac{t}{\tau_+}\right) + \frac{N_{dec}^-}{\tau_-} \exp\left(-\frac{t}{\tau_-}\right)$

N_{dec}^- : μ^- の崩壊する粒子数
 N_{all} : 停止する全イベント数
 f_+ : 停止するイベントのうち μ^+ の割合

$$f(t) = \frac{N_{all} \times f_+}{\tau_+} \exp\left(-\frac{t}{\tau_+}\right) + \frac{N_{all} \times (1 - f_+) \times f_{dec}}{\tau_-} \exp\left(-\frac{t}{\tau_-}\right)$$

μ^- の時定数

$$\frac{1}{\tau_-} = \frac{1}{\tau_{dec}} + \frac{1}{\tau_{cap}}$$

μ^- 粒子のうち崩壊事象の割合

$$f_{dec} = \frac{\frac{1}{\tau_{dec}}}{\frac{1}{\tau_{dec}} + \frac{1}{\tau_{cap}}}$$

パラメータ：
 N_{all} , f_+ , τ_{cap}
 $(\tau_{decay}=2.197\mu s$
 に固定)

光信号解析Fit関数

N_{dec}

$$\begin{aligned} N_{all} &\times f_+ + N_{all} \times (1 - f_+) \times f_{dec} \\ &= N_{all} \times f_+ + N_{all} \times (1 - f_+) \times \left(\frac{\frac{1}{\tau_{dec}}}{\frac{1}{\tau_{dec}} + \frac{1}{\tau_{cap}}} \right) \\ &= (9081.1 \pm 450.6) + (2701.1 \pm 276.4) \\ &= 11782.1 \pm 528.7 \end{aligned}$$

N_{cap}^-

$$\begin{aligned} N_{all} &\times (1 - f_+) \times (1 - f_{dec}) \\ &= N_{all} \times (1 - f_+) \times \left(1 - \frac{\frac{1}{\tau_{dec}}}{\frac{1}{\tau_{dec}} + \frac{1}{\tau_{cap}}} \right) \\ &= 7987.9 \pm 444.8 \end{aligned}$$

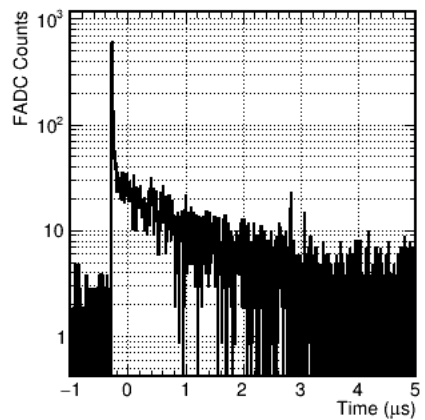
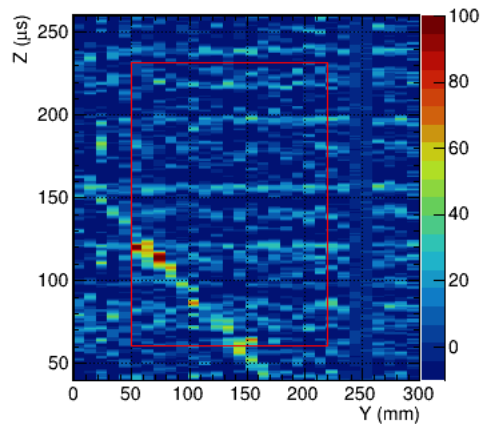
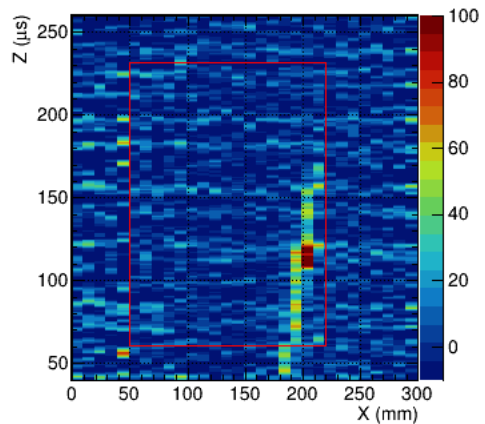
N_{all} : 停止する全イベント数

f_+ : 停止するイベントのうち μ^+ の割合

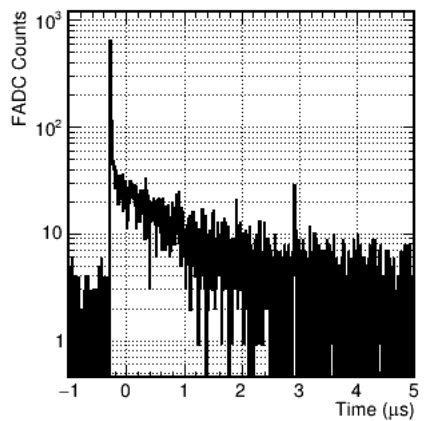
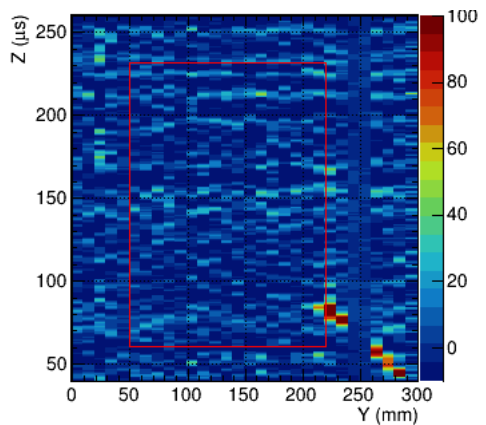
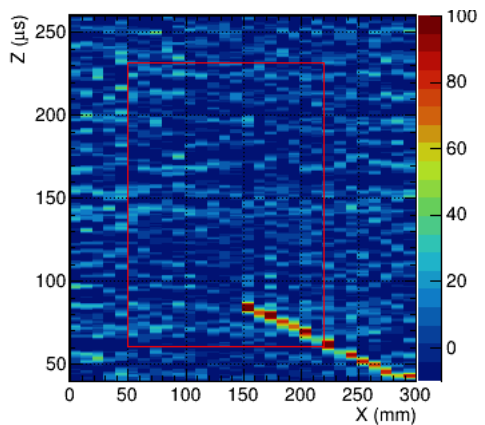
$f_{dec} = \frac{\frac{1}{\tau_{dec}}}{\frac{1}{\tau_{dec}} + \frac{1}{\tau_{cap}}}$: μ^- 粒子のうち崩壊事象の割合

→ Decay/Captureイベント比

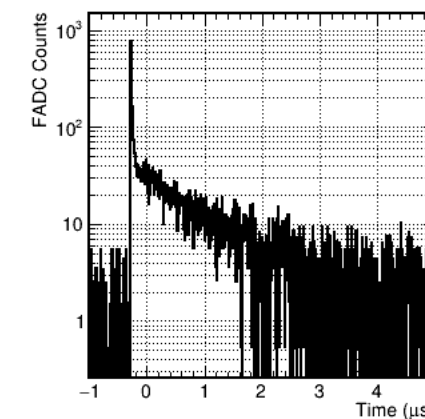
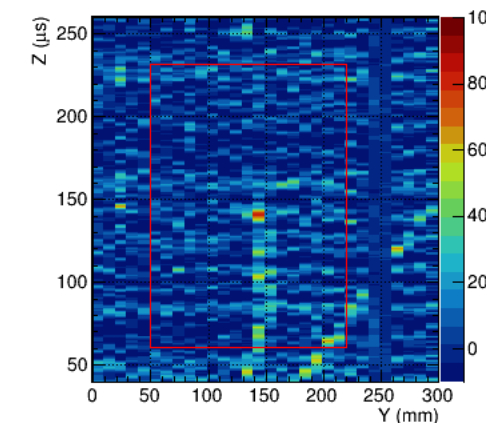
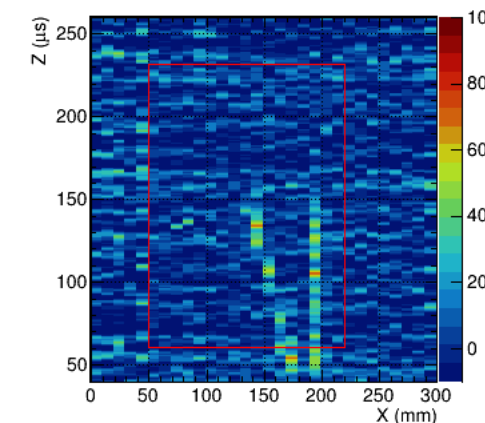
$$N_{dec} : N_{cap}^- = 1 : 0.68 \pm 0.05$$



多分 δ ray な気がするが, Decay?



多分 Capture に見えるが dE/dx が大きいので proton?



対生成…?