

GRAMS実験に向けたLArTPC の開発現状

第3回 地下宇宙若手研究会
2022/11/23-24

中曾根太地
早稲田大学 寄田研究室

GRAMS (Gamma-Ray and Anti-Matter Survey)

気球搭載液体アルゴンTPC(LAr-TPC)を用いた宇宙線反粒子、MeV- γ 線の観測実験 @南極上空

□ **反粒子** ← **Focus**

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

- Hiroshima University
- Kanagawa University
- Osaka University
- RIKEN
- Rikkyo University
- University of Tokyo
- Waseda University

USA

- Barnard College
- Columbia University
- MIT
- NASA GSFC
- Northeastern University
- Oak Ridge National Lab
- UT Arlington

5th collaboration meeting, June 2022

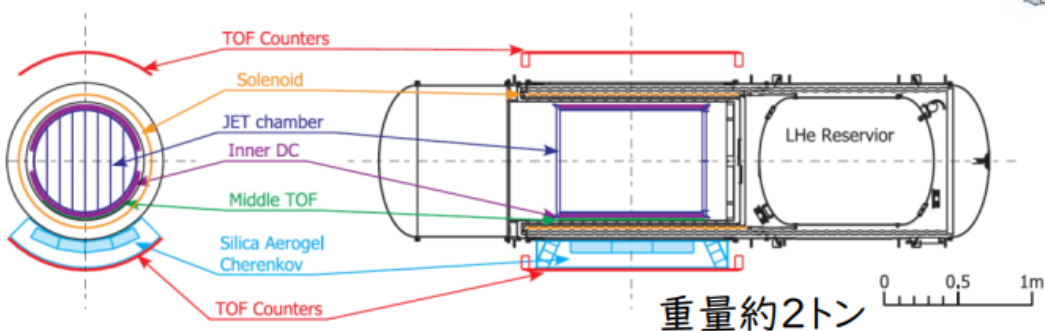


宇宙反粒子の観測

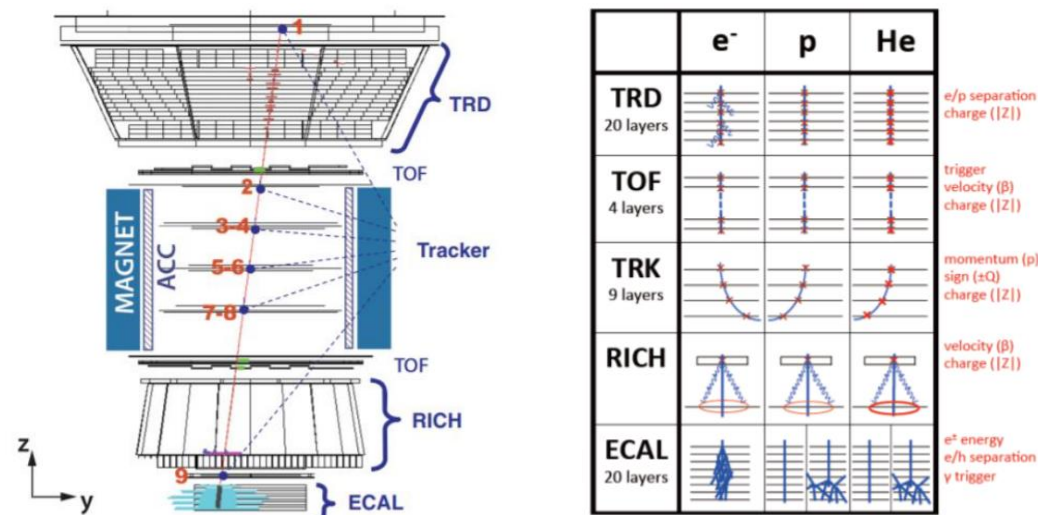
反粒子種	観測器
反陽子	AMS-02, PAMERA, BESS GAPS, GRAMS
反重陽子	AMS-02, BESS GAPS, GRAMS
反ヘリウム	AMS-02, BESS, (GAPS, GRAMS)
陽電子	AMS-02, PAMERA, DAMPE

◆ BESS-Polar (超伝導磁石搭載の気球実験)

- 合計30日以上 of 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**



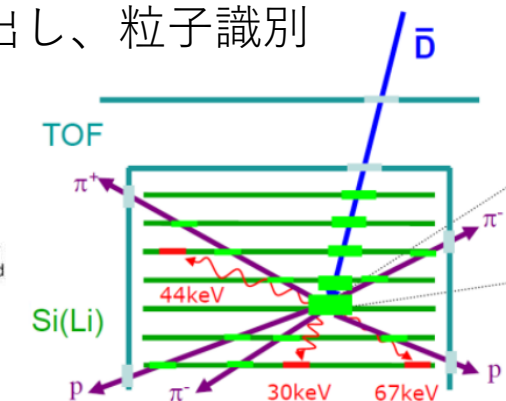
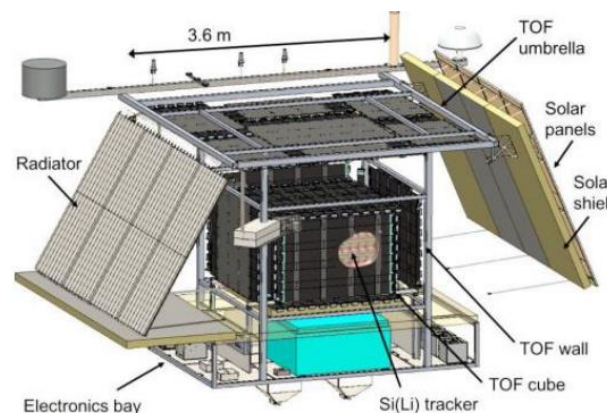
◆ AMS-02 (~完璧な粒子検出器をISSに搭載)



→ 運用中 (さらなる結果に期待)

◆ GAPS (積層型Si(Li)検出器+ToF)

- シンチレータ2層 + 半導体検出器により 励起エキゾチック原子からの特性X線、対消滅ハドロン群を検出し、粒子識別



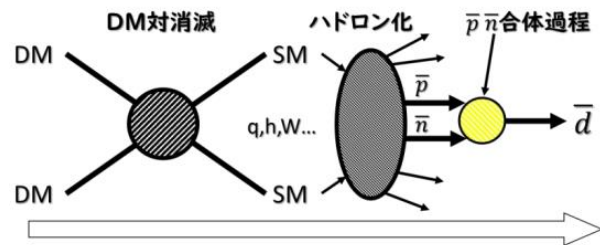
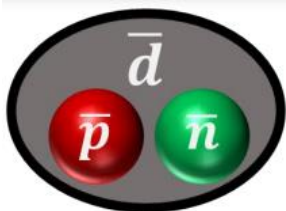
→ 2022年度末フライト予定

若手研

宇宙反粒子による暗黒物質間接探索

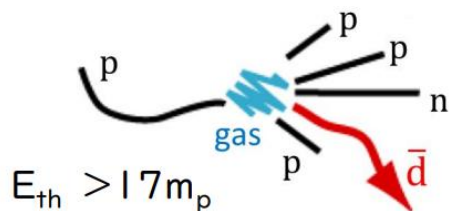
● 宇宙線中の反重陽子(\bar{d})は未観測

✓ DMの対消滅/崩壊・PBH・etc... 起源

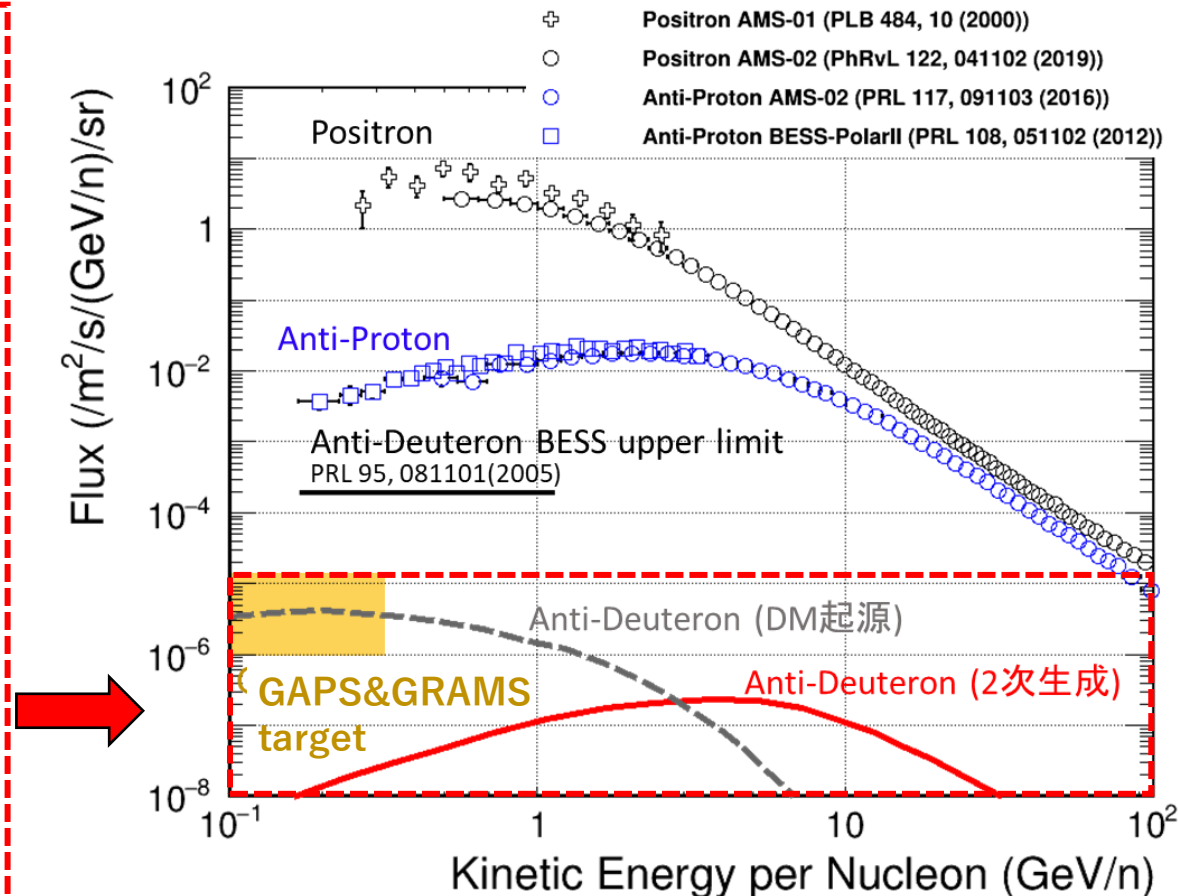


低エネルギー側で優位

✓ 既知の起源
= “2次生成” (+ 超新星爆発)



衝突の運動学より
低エネルギー側で抑制
加速器実験等で検証済み

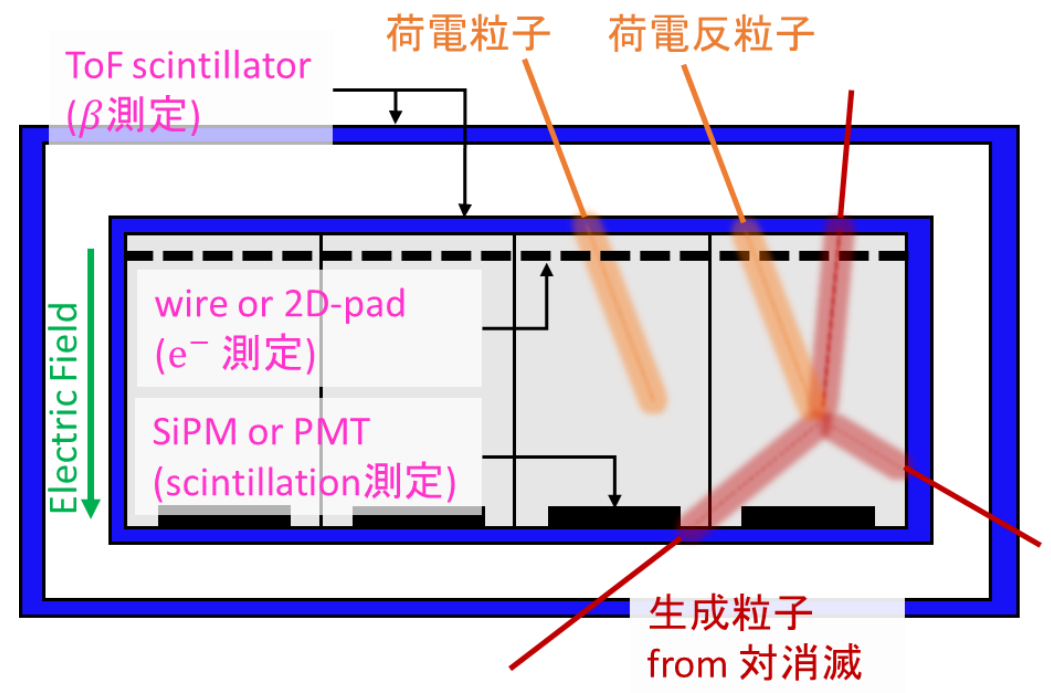
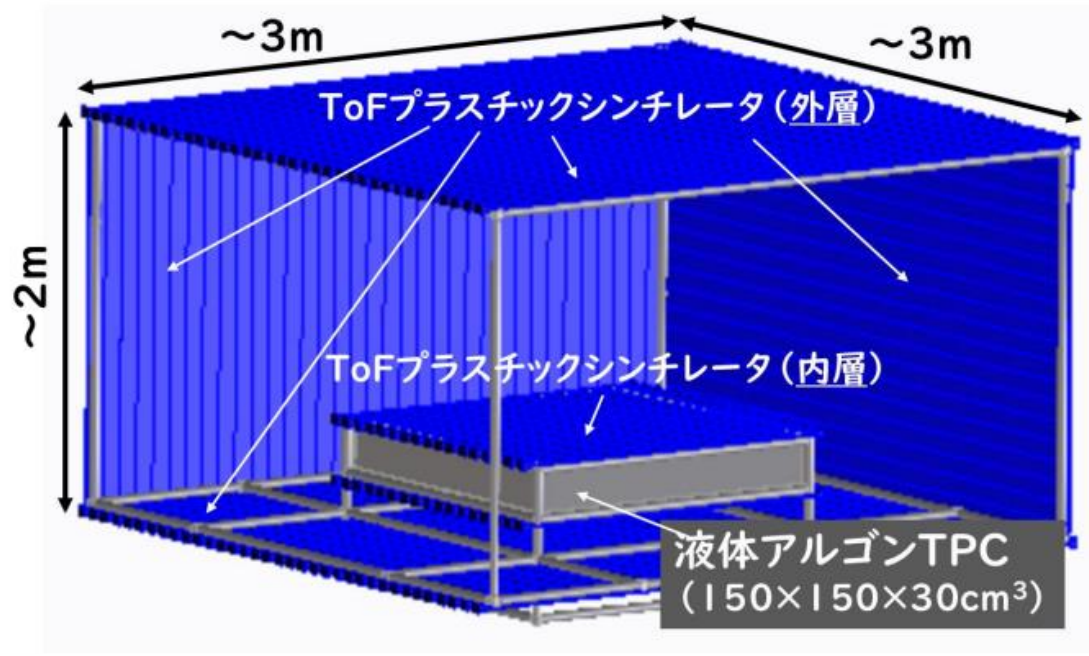


→ 未知の起源の反重陽子を0BGで測定可能

GRAMS実験検出器

- 30日間の長期気球実験
- 2層のToF plastic scintillator
- LArTPC = トラッキングカロリメータ
- 粒子・反粒子識別はGAPSの手法を採用

Proposal configuration



PID concept

mass ($\beta + \frac{dE}{dX}$)	対消滅 @停止点	なし	あり
	核子数=1	p	\bar{p}
	核子数=2	d	\bar{d}
	核子数=3	^3He	$\overline{^3\text{He}}$

粒子識別手法

● 粒子(質量)識別

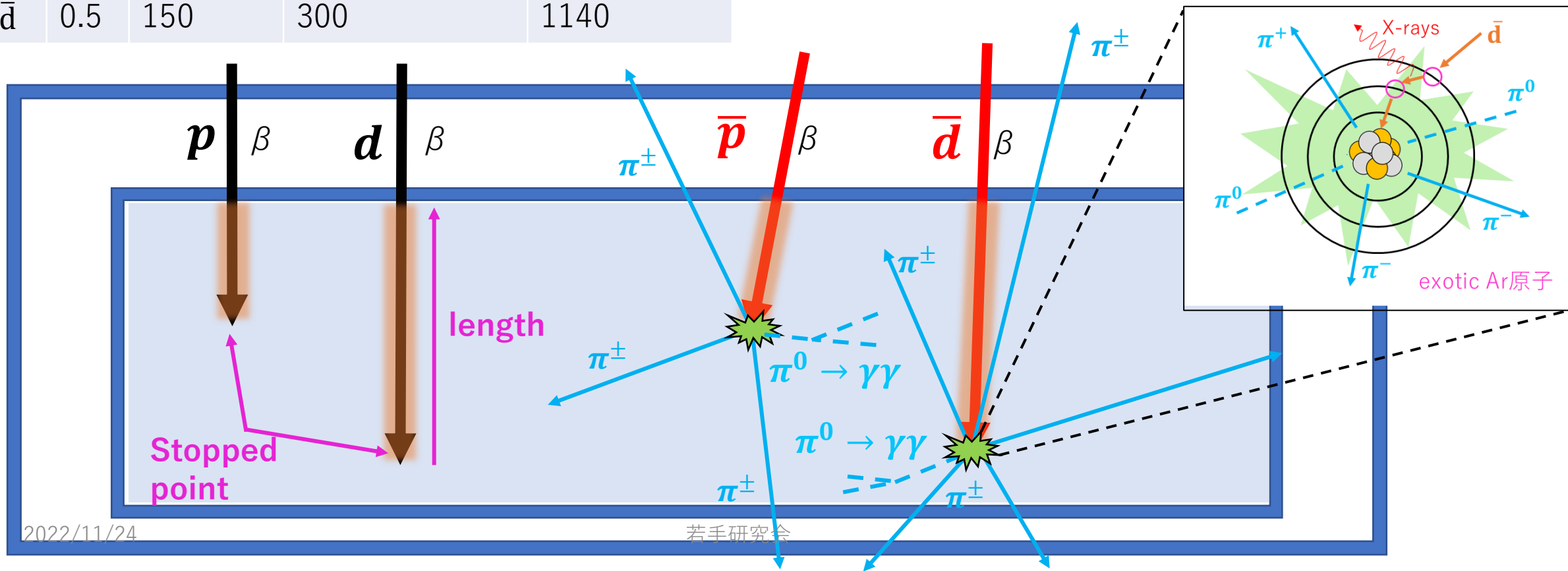
・ 同じ速度 β の時、質量によって dE/dX かつ飛跡長が異なる

粒子	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

● 粒子・反粒子識別

負電荷のハドロンは検出器内で停止したのち Ar原子核に捕獲される

→最終的に原子核と対消滅し複数のハドロン(主に π 粒子)を放出

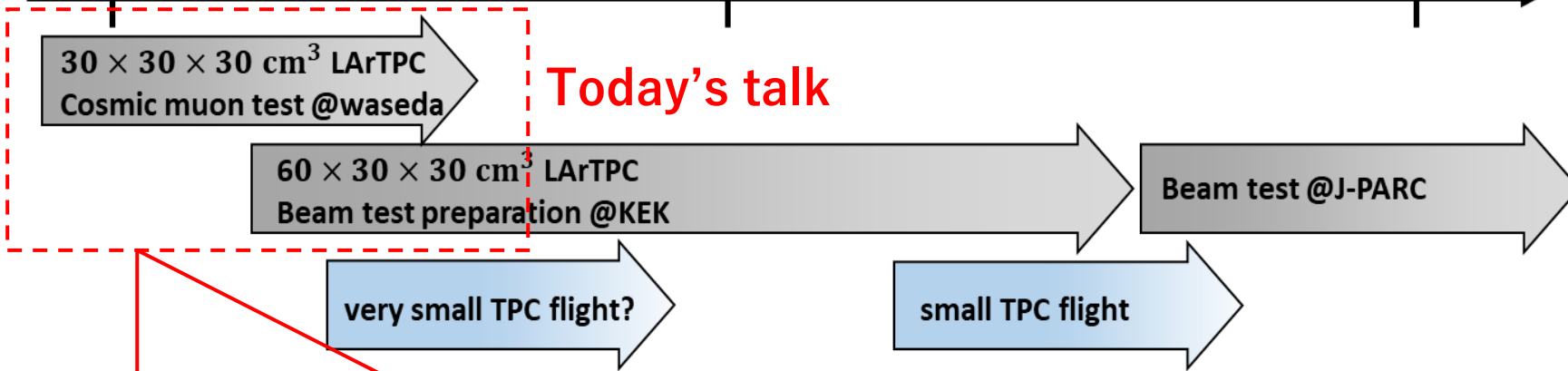


GRAMS実験に向けた粒子・反粒子識別試験

Sep. 2022

Sep. 2023

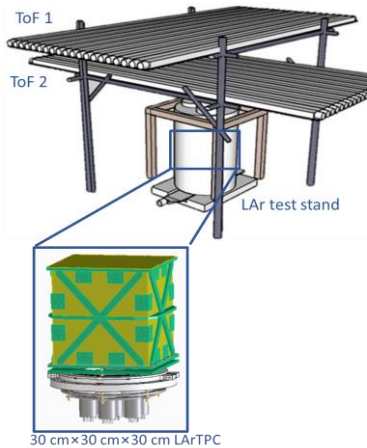
Sep. 2024



Today's talk

Cosmic muon test

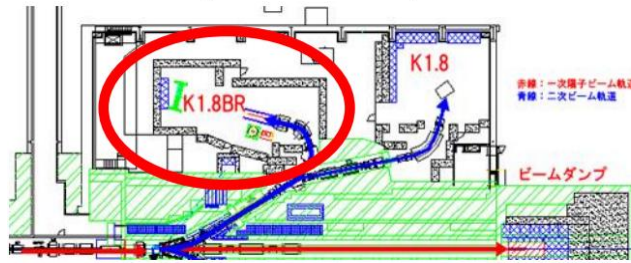
LArTPCの運用・原理検証



2022/11/24

Beam test @J-PARC

反粒子+LAr反応の検証
→ K1.8BR (Hadron Hall)を
検討中



若手研究会

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)
工学試験@JAXA大樹町を予定



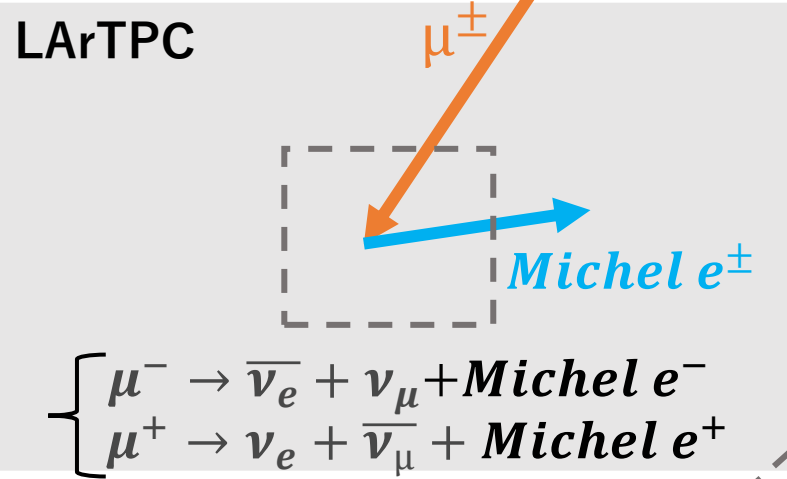
連携協力拠点
大樹航空宇宙実験場



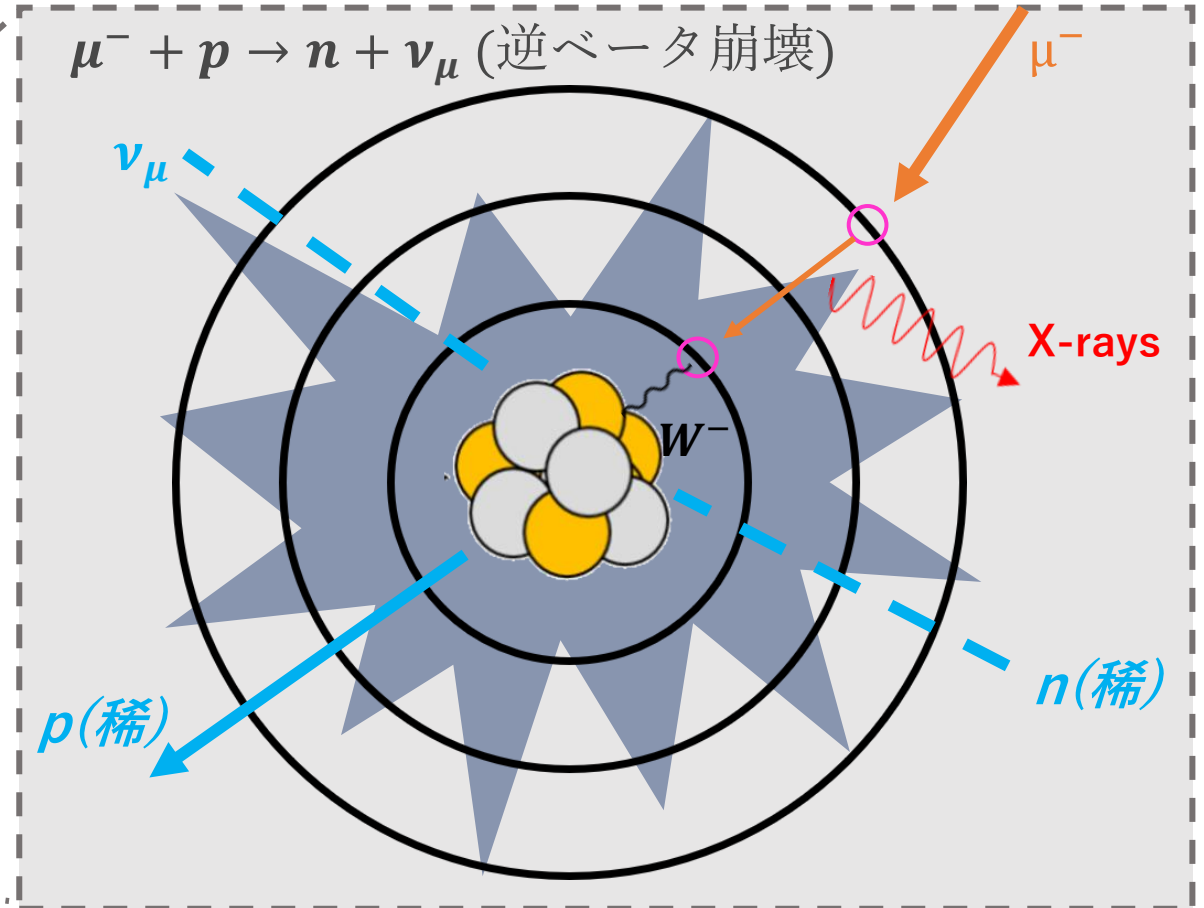
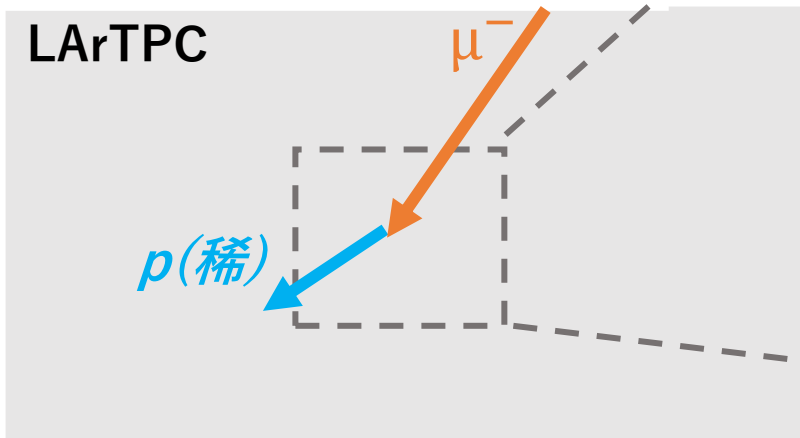
宇宙科学研究所
相模原キャンパス

宇宙線 μ^\pm decay/ μ^- capture 識別試験

■ ミューオン崩壊



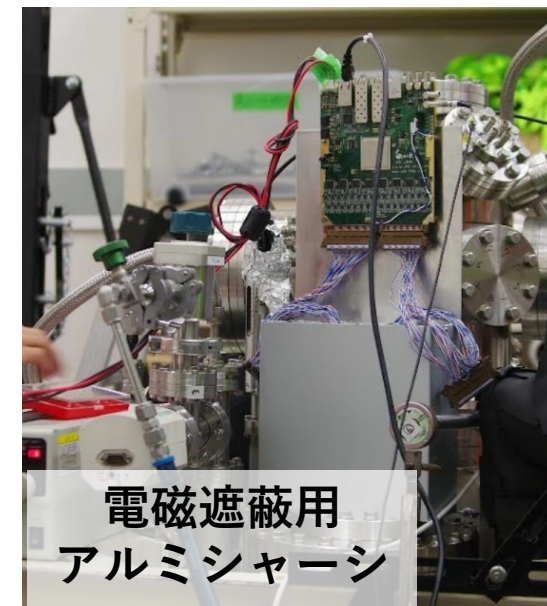
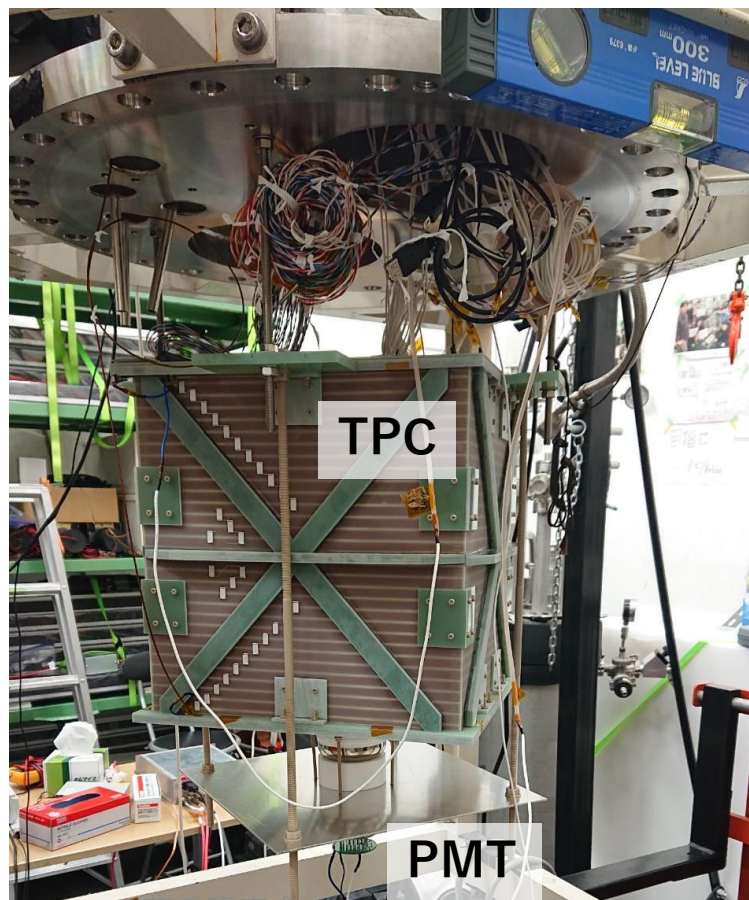
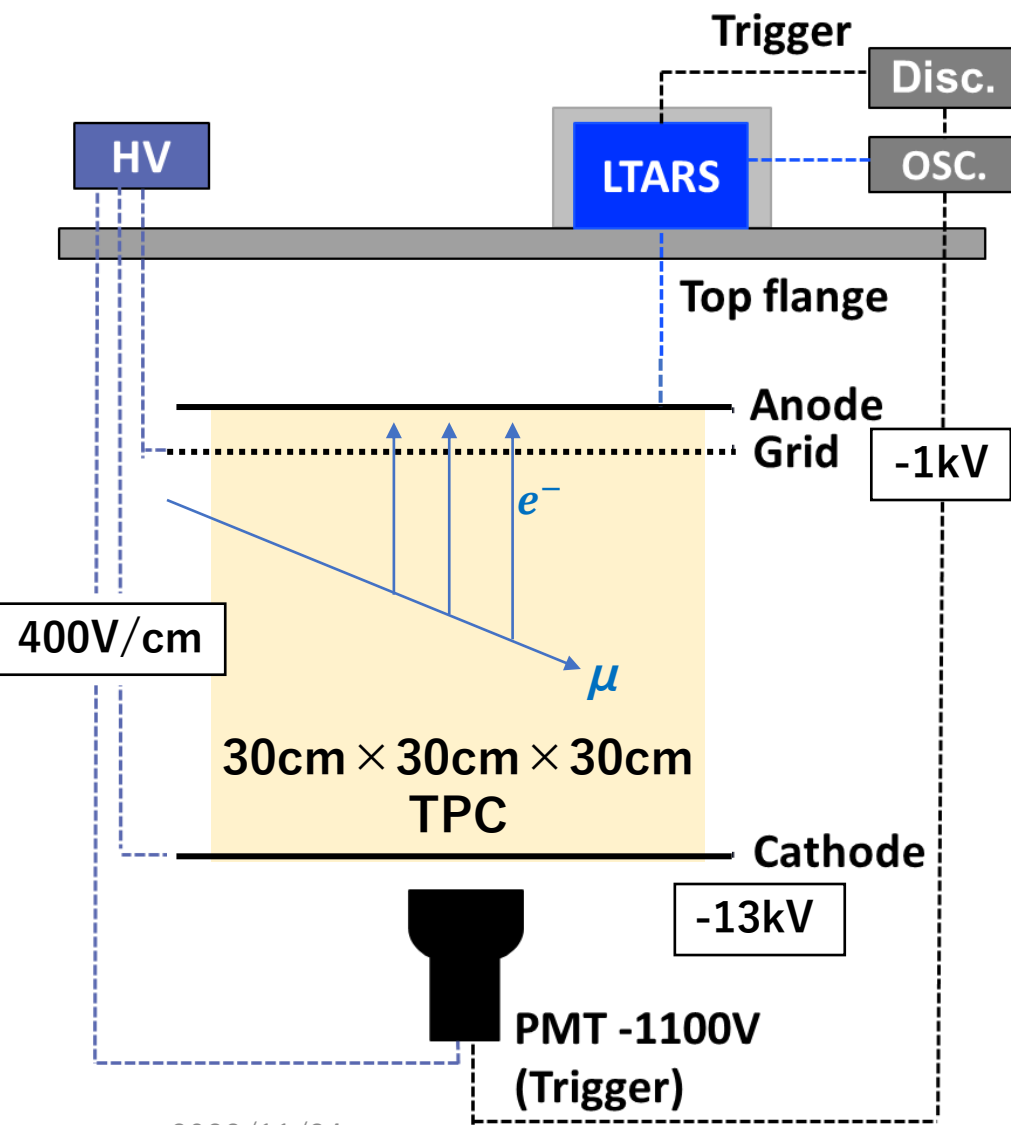
■ Ar原子捕獲 + 核子との反応



→ Michel electronの有無でミューオン崩壊(Decay)/Ar原子捕獲+核子と反応事象(Capture)を識別

LArTPCセットアップ

- 検出器構成：TPC + PMT 1本
- 信号：宇宙線 μ 粒子
- ノイズ対策
 - エレキ(LTARS2014)を電磁的に遮蔽
 - HV源は一つにまとめる
 - HV源,エレキ,容器のGNDを一致



信号の確認

10/4-10/7で行われた早稲田地上テストにおける最新の結果

FFT等を用いて解析的にノイズを除去
Pedestal RMS=10ADC Count
→MIP信号(～40ADC Count/cm)
をS/N=4で観測

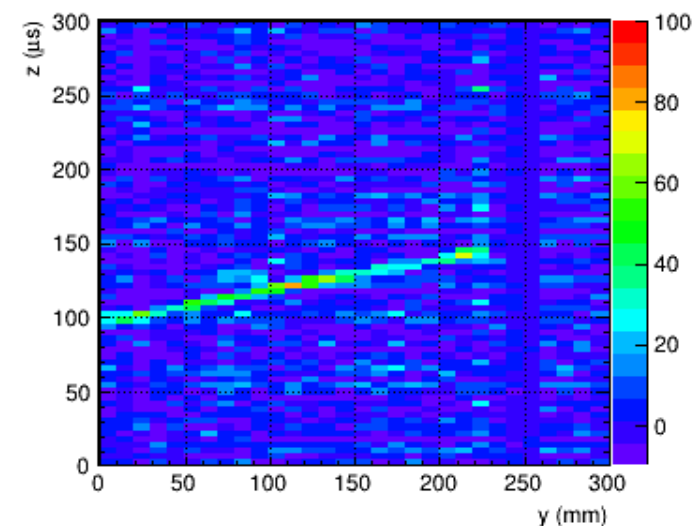
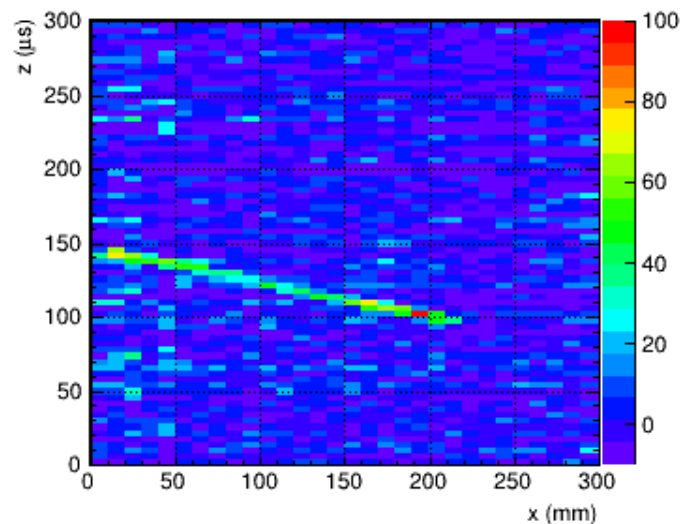
宇宙線突き抜け事象&崩壊事象について
完璧に飛跡再構成可能

解析の課題

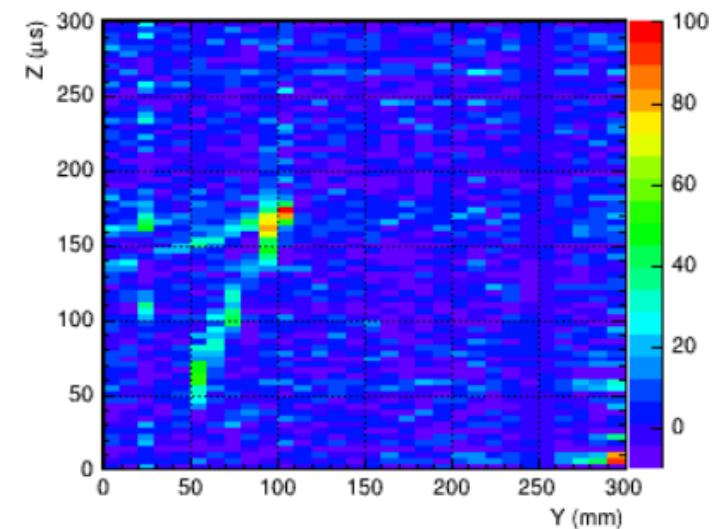
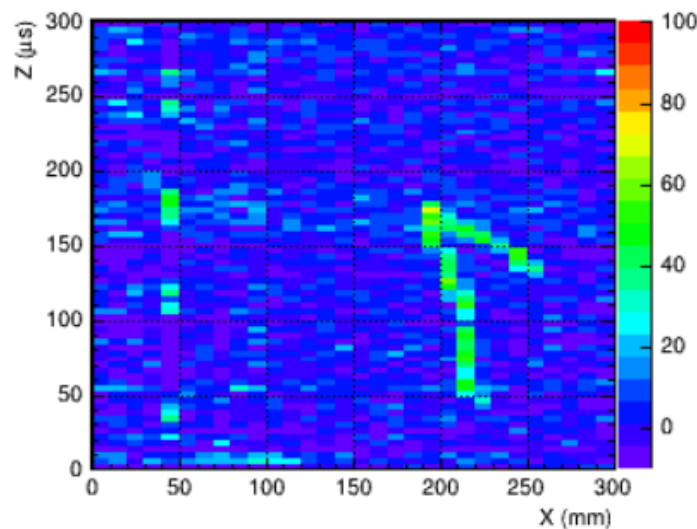
- ・純度算出
- ・崩壊パターンの識別アルゴリズム

→今後解析

◆ 宇宙線 μ 粒子通過Event(400V/cm)

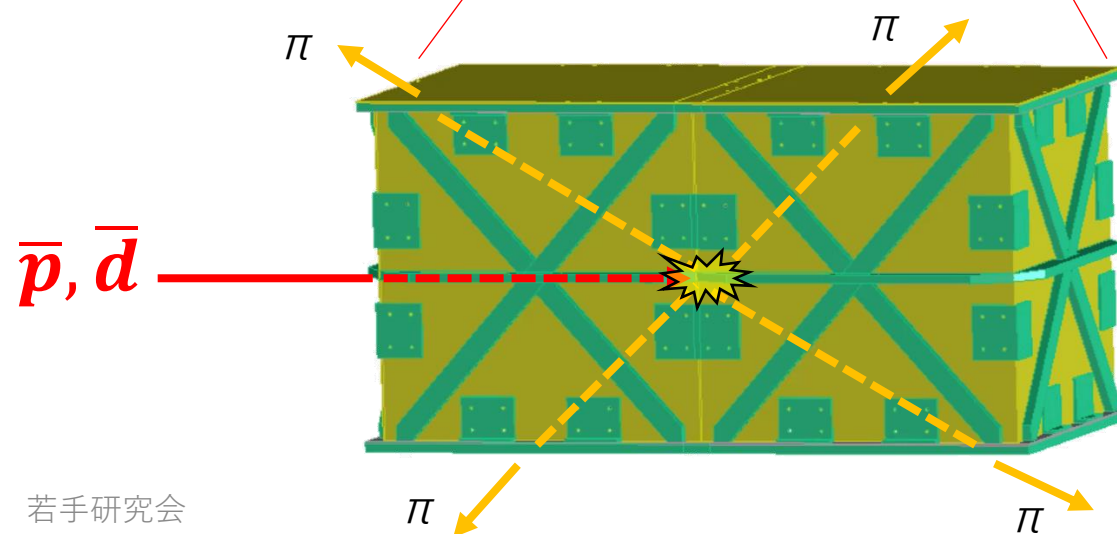
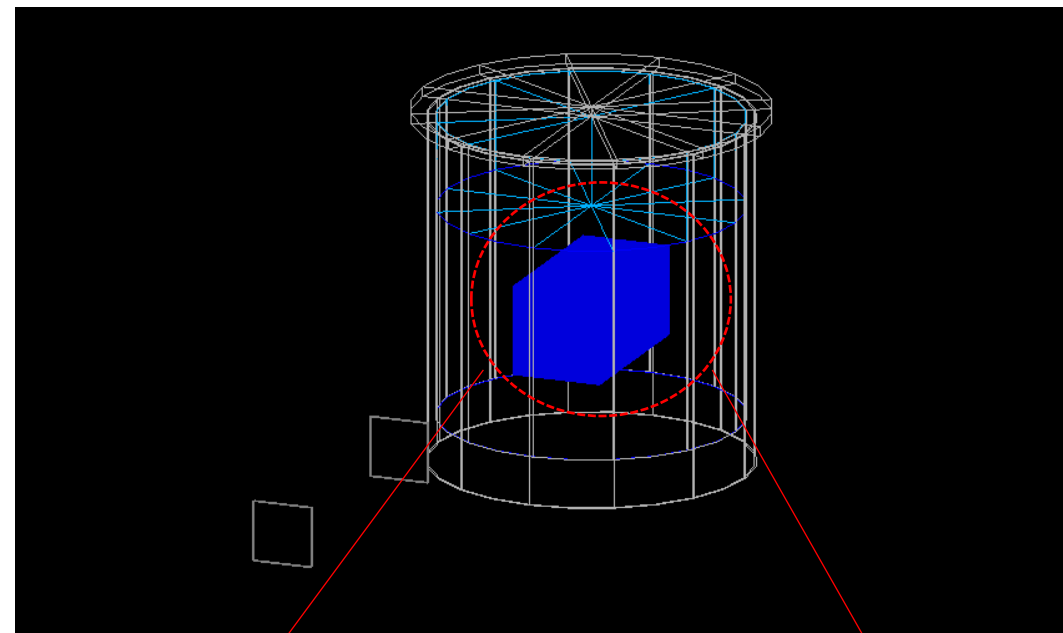


◆ 宇宙線 μ 粒子崩壊Event(400V/cm)



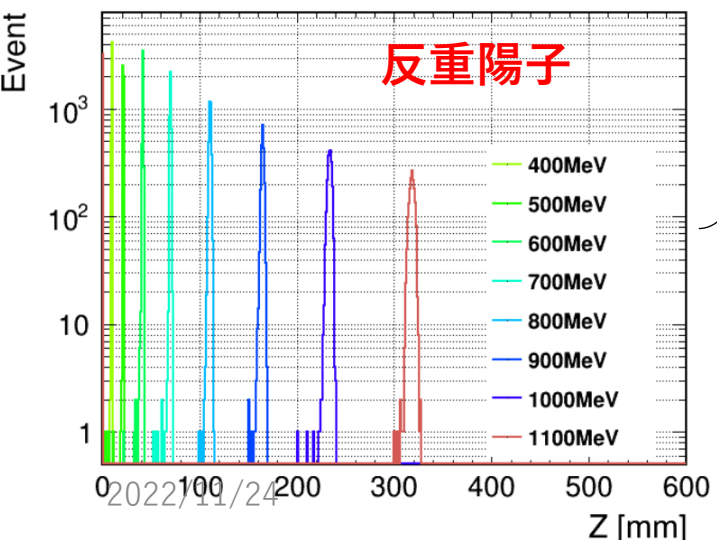
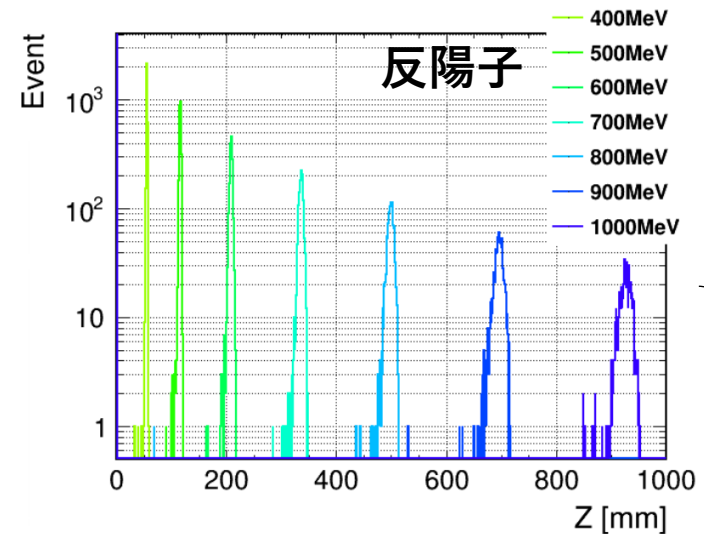
加速器試験へ向けたシミュレーション

- ◆ 将来的には反(重)陽子ビームを用いて粒子・反粒子識別の検証を行う@J-PARC
(現在1月のJ-PARCのPACに向けてLoIを執筆中)
- ◆ 加速器試験での最適な使用ビーム運動量のシミュレーションを行った
- ◆ シミュレーション条件
 - ・シミュレーションキット：Geant4 Ver.4.10.07.p01
 - ・TPCサイズ：30cm×30cm×60cm
(早稲田地上試験用TPC2個分を想定)
 - ・容器サイズ：Φ100cm, 高さ100cm
 - ・液体アルゴンVolume：Φ100cm, 高さ70cm
 - ・使用ビーム：反重陽子・反陽子
(200MeV/c～1100MeV/cの運動量を使用)



入射運動量と停止点までの距離の関係

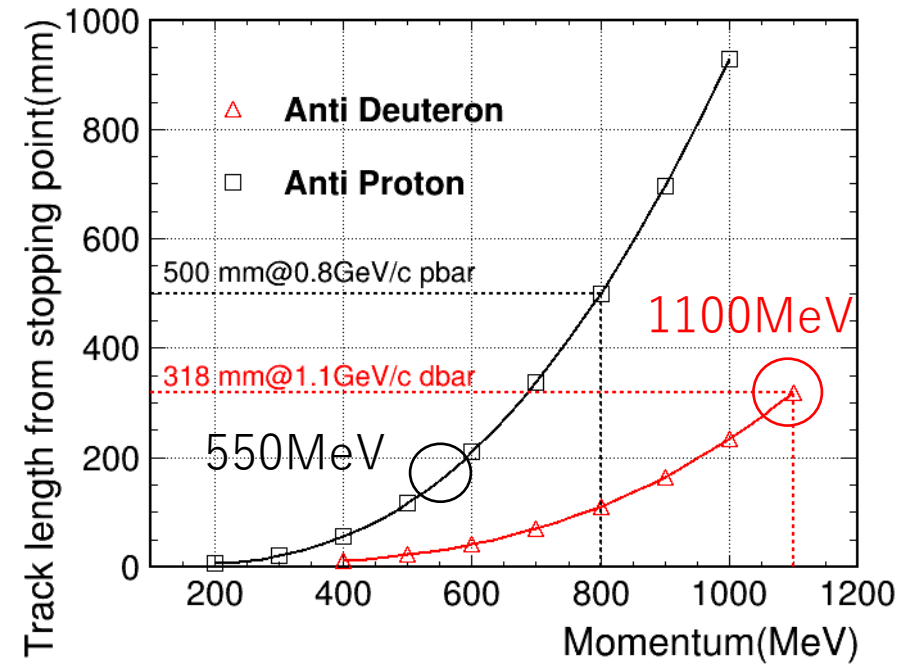
横軸：反(重)陽子が原子核捕獲されるまでの距離
 縦軸：捕獲事象Event数



高運動量側で
 飛跡距離：増
 捕獲事象数：減

粒子	β	Rigidity (MeV/n)	Momentum (MeV/c)
p, \bar{p}	0.5	150	550
d, \bar{d}	0.5	150	1100

同じ β でも
 停止までの
 距離が変わる



同じRigidity(β が同じ)の点 + 30cm × 30cm × 60cmのTPC
 サイズで複数の反陽子の運動量の点も含めてデータ取得

まとめと今後の展望

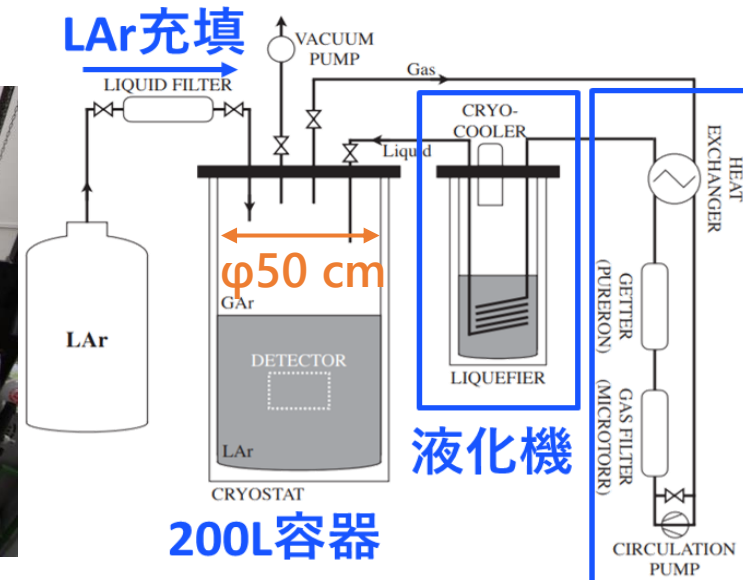
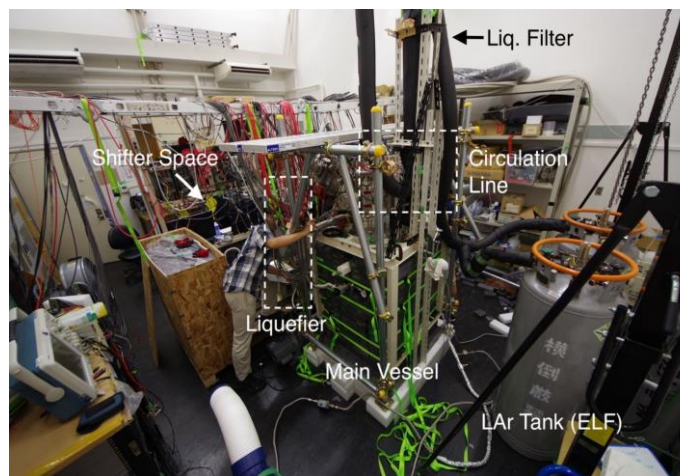
- GRAMS実験は宇宙反粒子探索による暗黒物質間接探索と宇宙MeVガンマ線探索を目的とした次世代気球実験である
- 中でも宇宙線**反重陽子**の観測は0BGでの測定が可能な未知の起源の良いプローブ
- 10月に行われた早稲田地上試験により信号を確認
→MIP信号を液体アルゴンTPCで実際に検出
- 加速器試験へ向けて現在プロポーザルを執筆中
→反陽子ビームを用いた原子核捕獲事象による粒子反粒子識別の実証を目指す

Back up

液体アルゴンテストスタンド@早稲田

- 液体アルゴン運用システム

- 温度：沸点 $-186\text{ }^{\circ}\text{C}$
→ 冷凍機を使用
- 純度：酸素や水が電離電子を吸収
→ 液体フィルター + ガスフィルターを使用



- 光読み出し

- 波長変換材(TPB)蒸着技術を最適化
- 世界最高検出光量 $12.8[\text{p.e./keVee}]$ 達成

- 電子読み出し

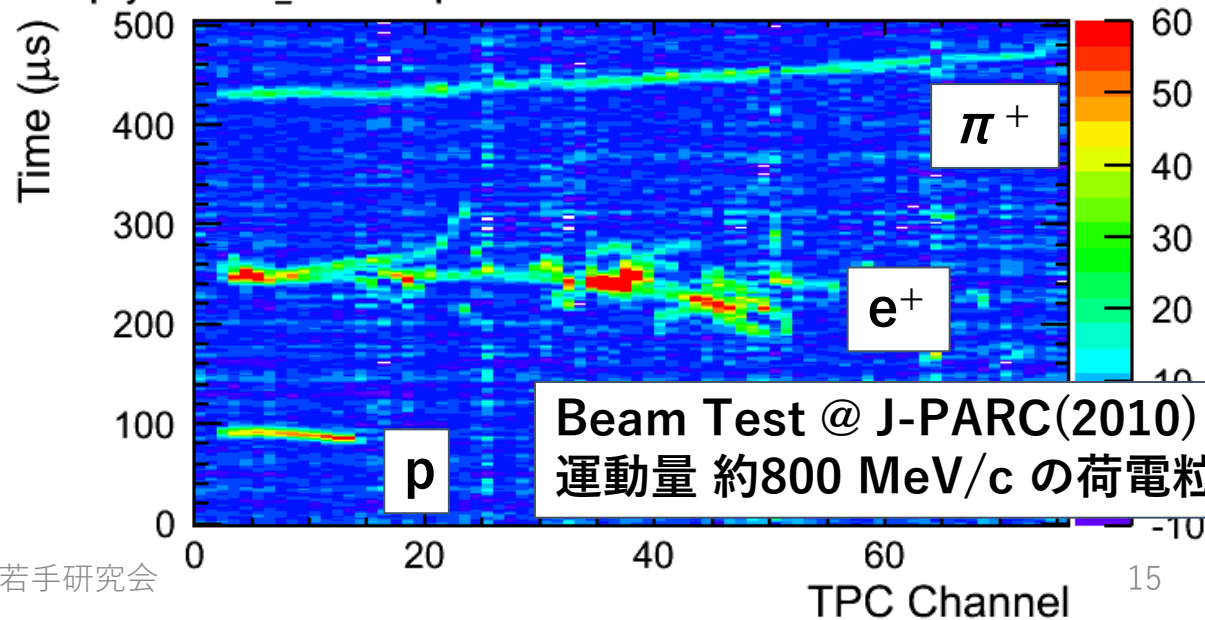
- 2010年にJ-PARC Beam Testで飛跡検出
- その後の早稲田の液体アルゴン実験では
LAr中で電離電子の読み出しは行っていない

30 × 30 × 30 cm TPCを作成

- ✓ μ 粒子がLAr中で止まるイベントの観測
- ✓ 電子読み出しのR&Dを行う

2022/11/24

File: physicsoct12_1 / i: 25 / Spill: 27 / Event: 2949



Beam Test @ J-PARC(2010)
運動量 約 $800\text{ MeV}/c$ の荷電粒子

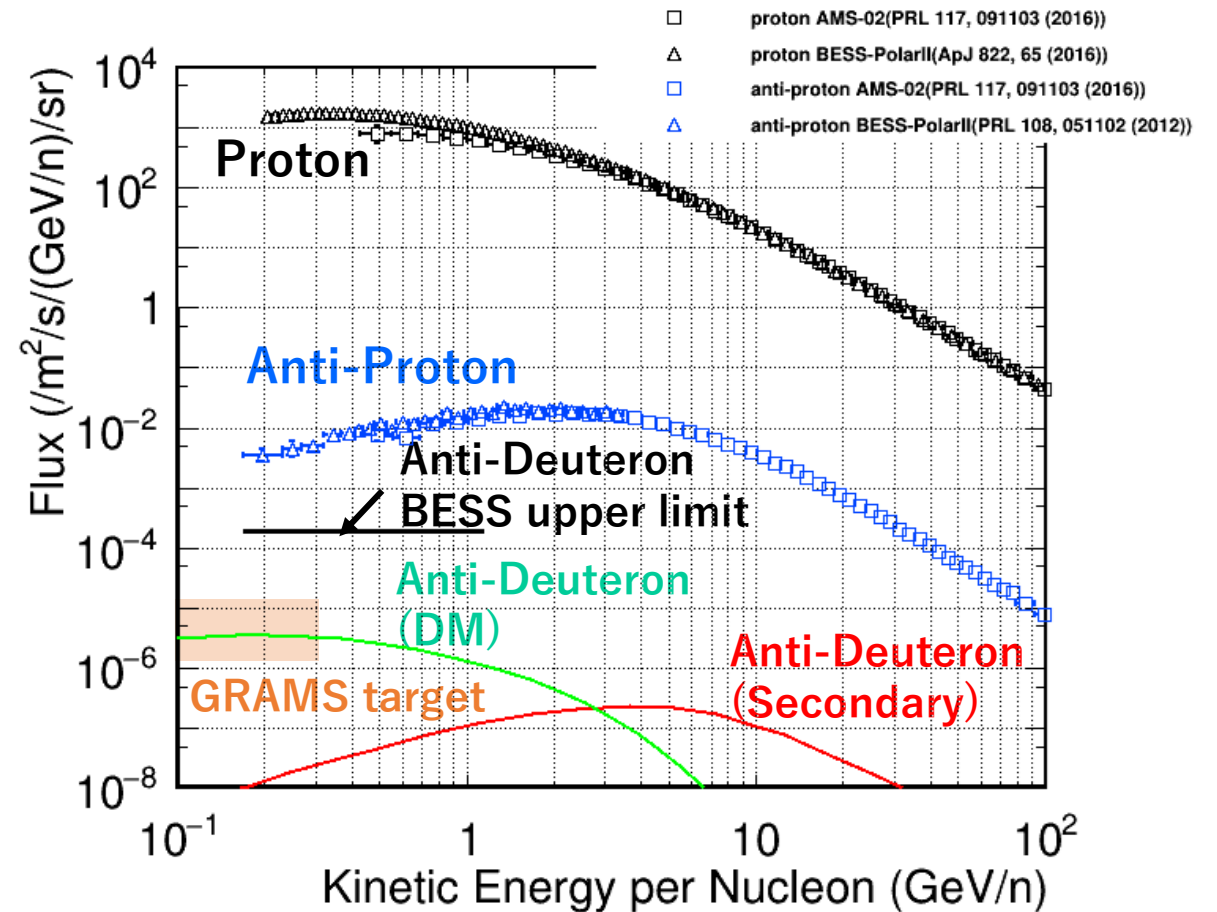
若手研究会

ガス循環

宇宙反粒子(反重陽子)観測に向けた開発課題

粒子	フラックス ($\text{m}^2\text{sr/s}/(\text{GeV}/n)^{-1}$)	BG reduction
陽子/重陽子 (一次宇宙線)	10^3	10^9
反陽子 (BESS/AMS-02)	10^{-2}	10^4
反重陽子 (GRAMS目標)	10^{-6}	1

- ◆ 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・反粒子の識別法の実証
- 早稲田地上でのLArTPCによる宇宙線 μ^+/μ^- 識別試験
→反(重)陽子ビームを用いた試験



液体アルゴンTPC(LAr-TPC)

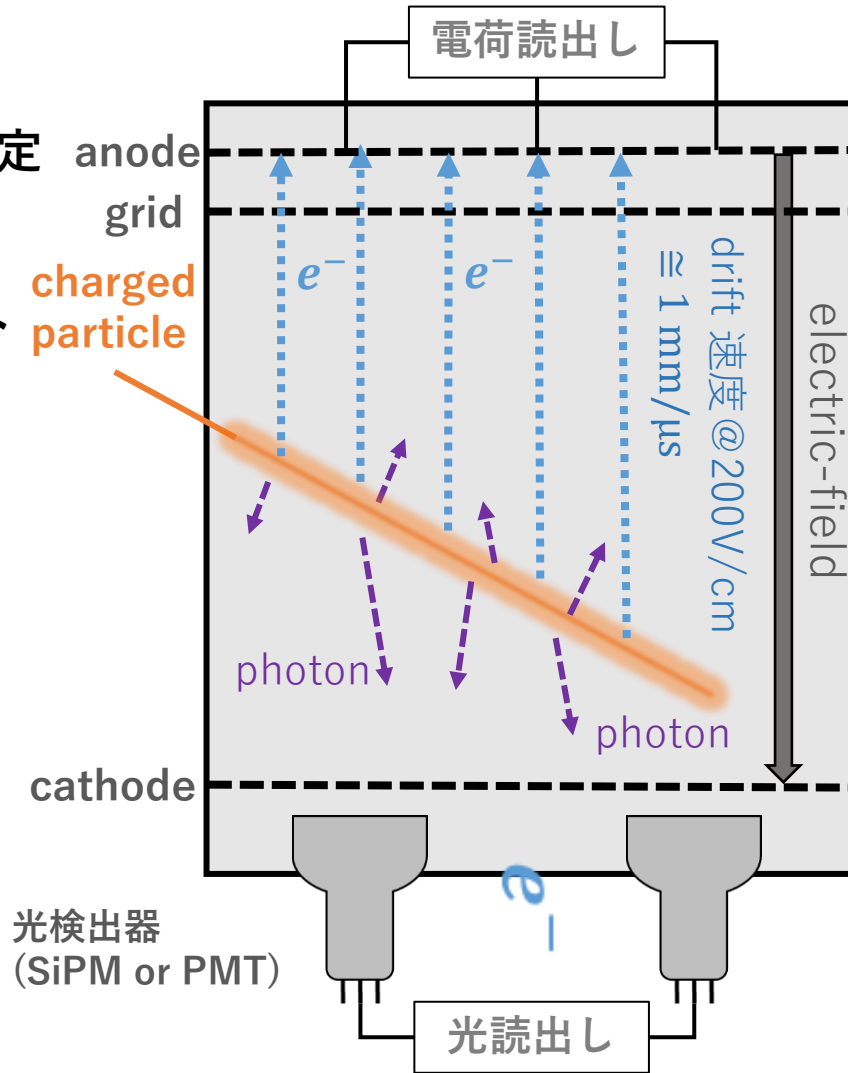
□ LAr-TPCの原理

- 荷電粒子の通過による電離電子を測定 (MIPによる信号量は、約1fC/mm)
- 電場[E]形成により、電子をドリフト (電子速度[mm/us] = $2\sqrt{E[kV/cm]}$)
- 3次元飛跡の構成が可能

XY軸	電子読出し位置
Z軸	光時間-電子時間差

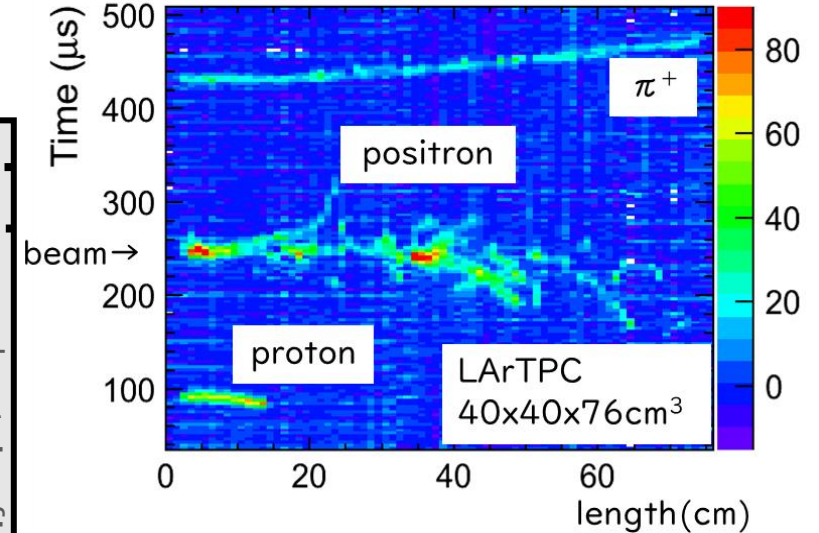
□ LAr-TPCの難点

- 不純物(O_2, N_2)がLAr信号を減衰
- 液体状態の温度範囲が狭い (沸点-186°C, 融点-189°C)
- LAr蛍光波長が短い(128 nm)
→ 波長変換が必要

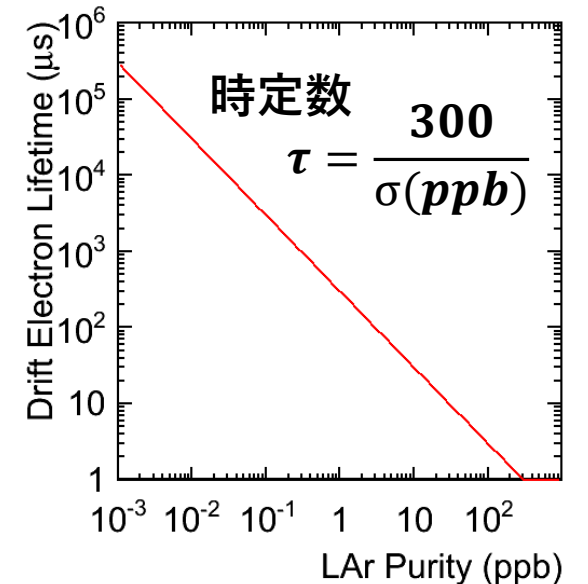


□ dE/dXによるtracking

beam experiment @JPARC(2010)



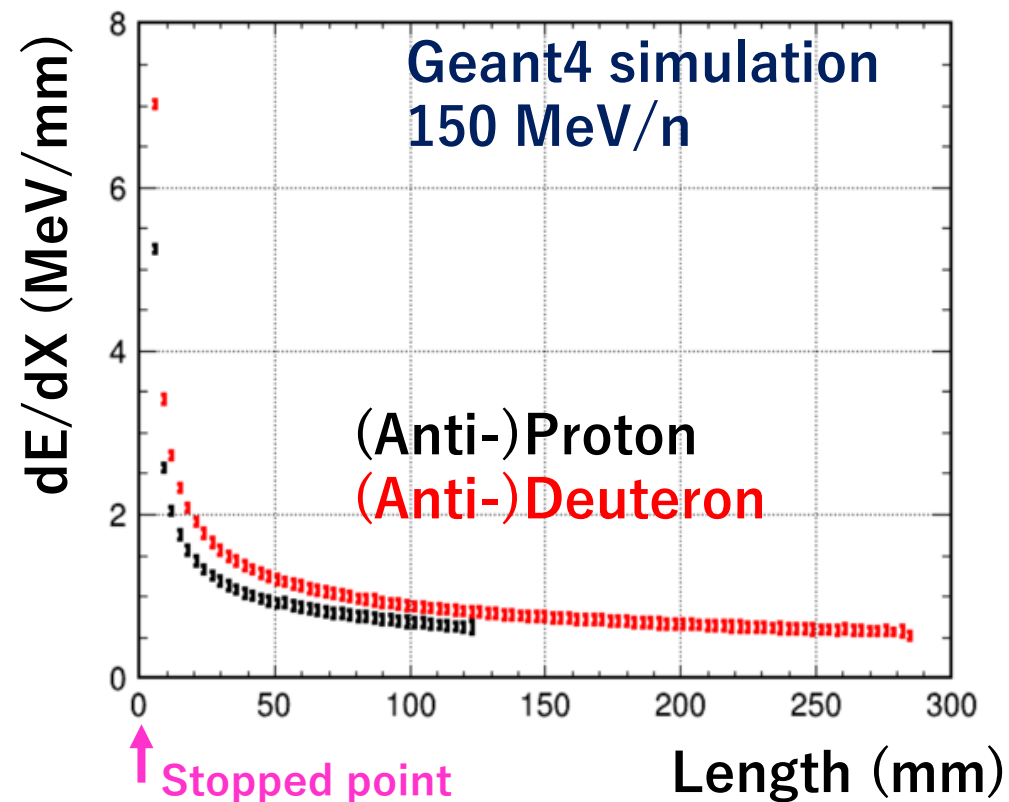
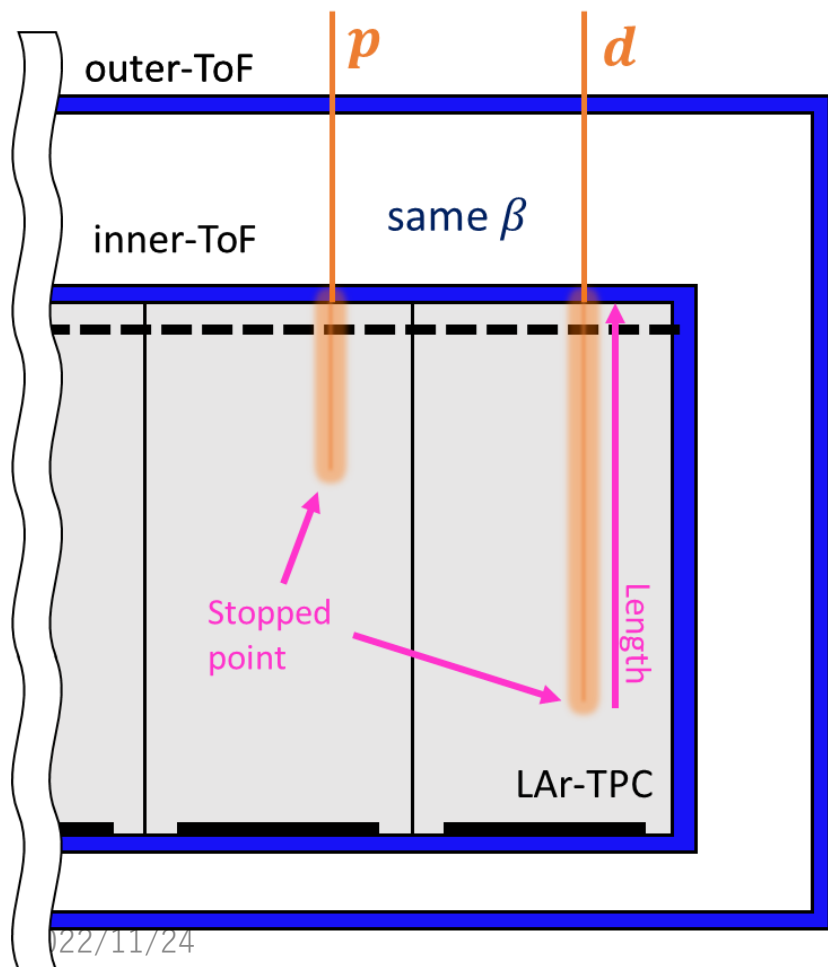
□ LAr純度と電子寿命の関係



ToF+dE/dXによる粒子(質量)識別

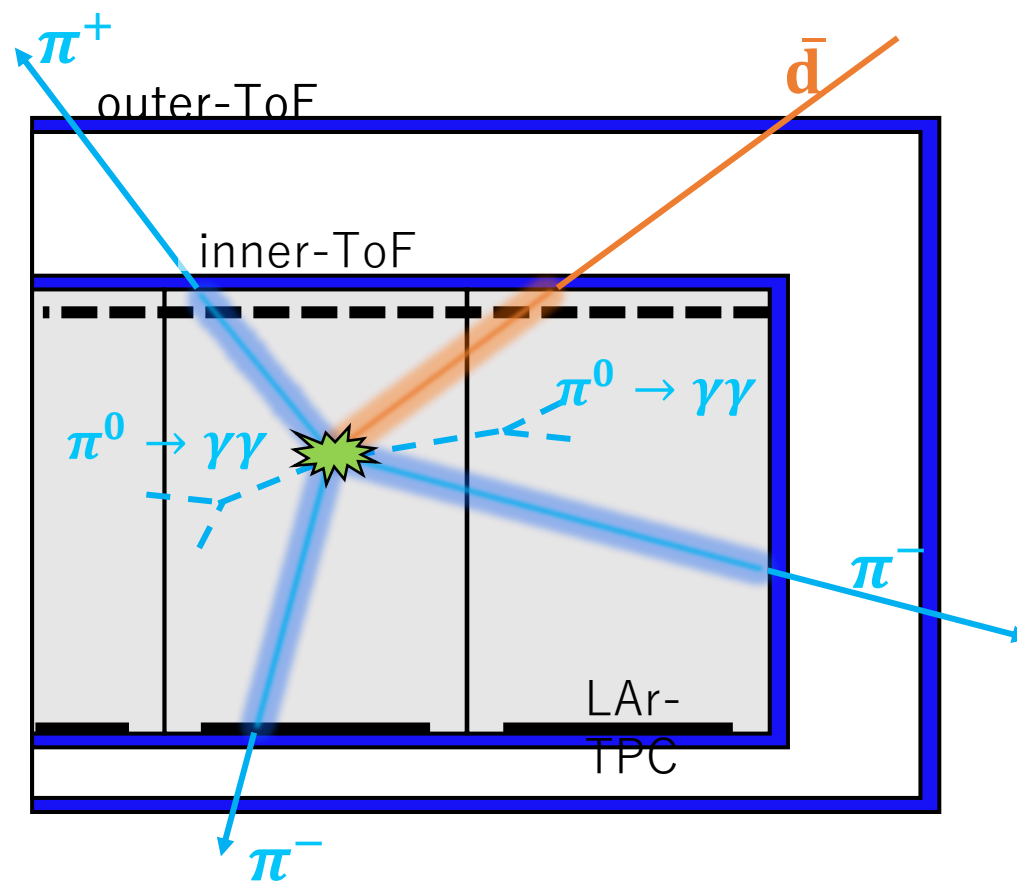
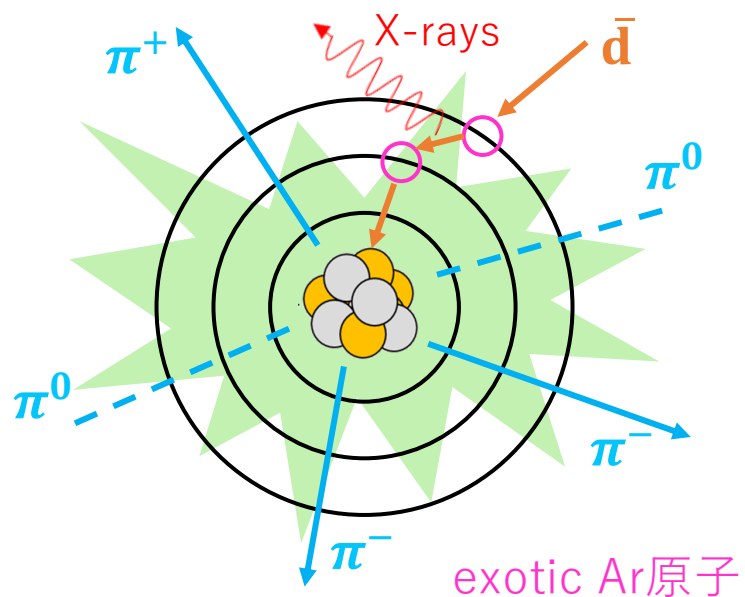
- 同じ速度 β の時、入射粒子の質量によって dE/dXかつ飛跡長が異なる
→ 入射粒子の質量を識別可能

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

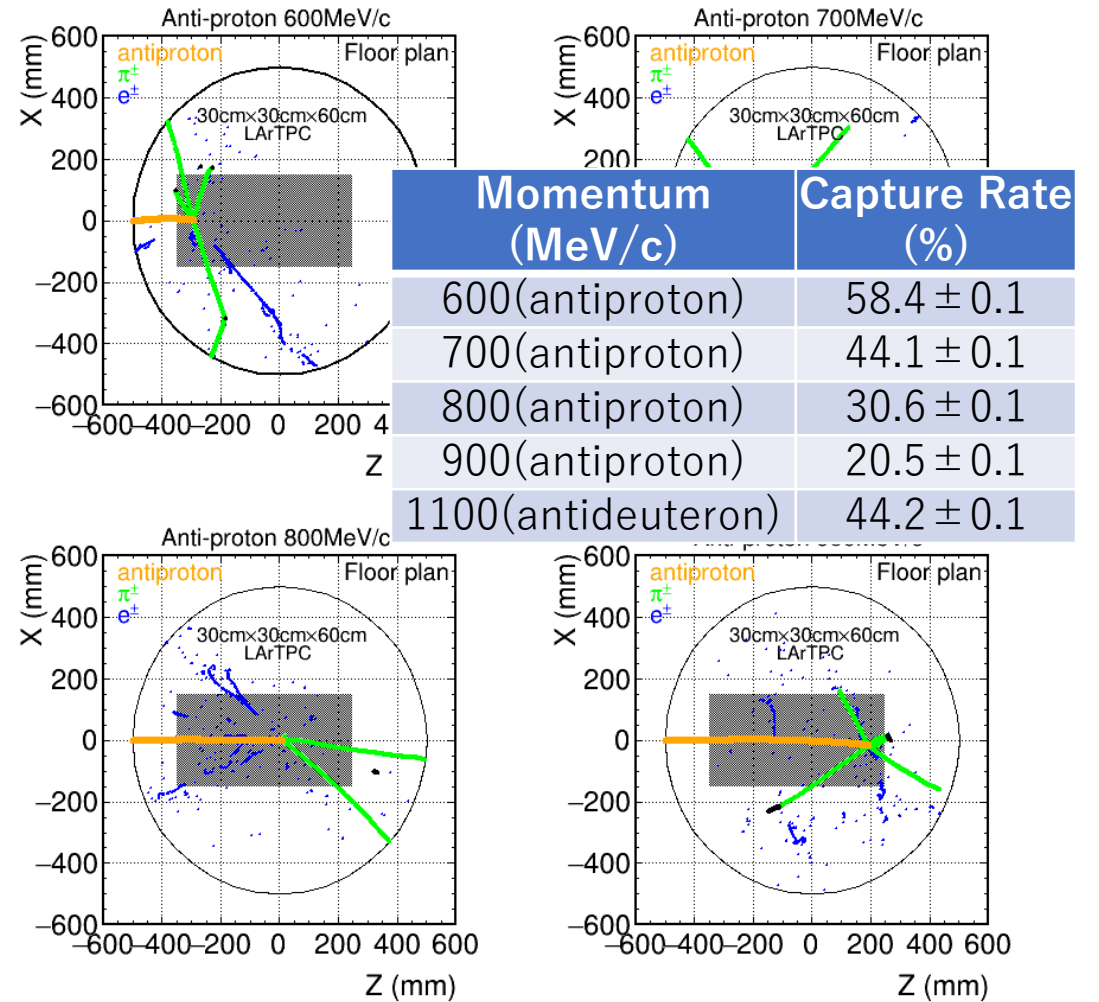
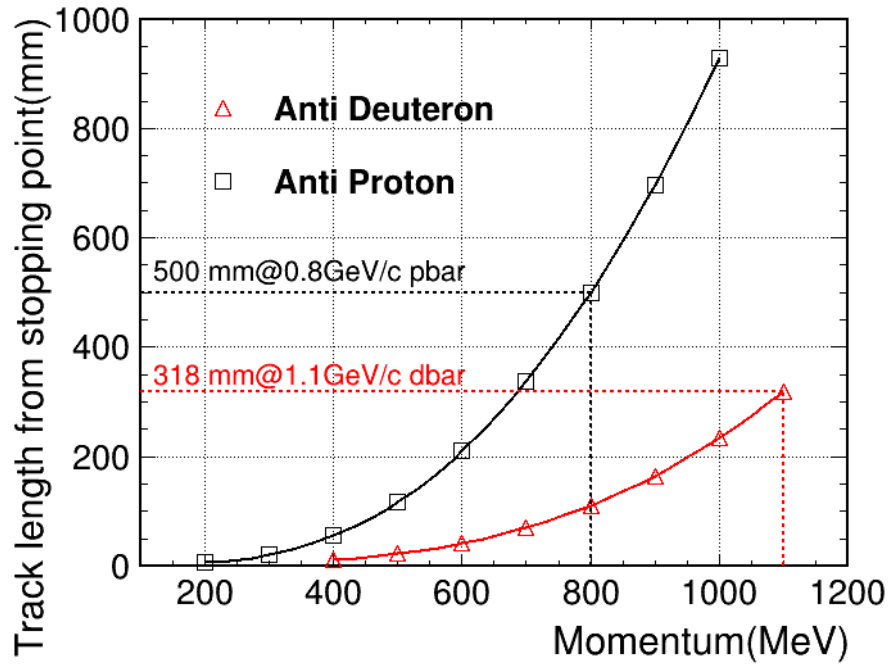


粒子識別手法

1. ToF scintillator
 - β 測定
2. ionization/excitation of LAr
 - tracking \rightarrow dE/dX
3. Ar原子に捕獲
 - \rightarrow 脱励起 w/特性X線
4. Ar核子と対消滅 \rightarrow ハドロン生成



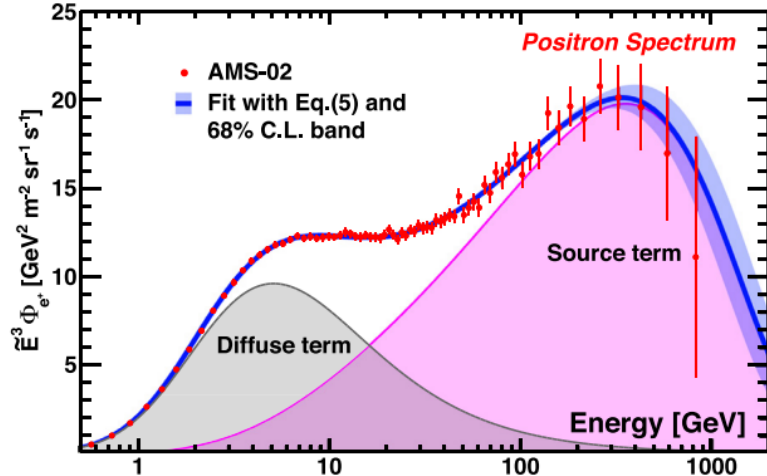
反陽子・反重陽子ビーム試験に向けたシミュレーション



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

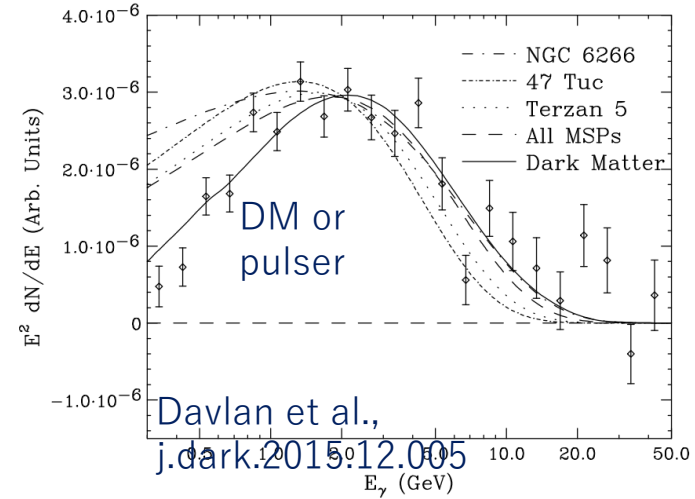
30cm × 30cm × 60cmのTPCサイズで反陽子の複数の運動量の点も含めてデータ取得し、Capture & Inelasticのレートを実測予定

Positron (AMS-02, 7 years) → DM 1 TeV



M.Aguilar et al., j.physrep.2020.09.003.

γ-ray (Fermi) → DM 数10 GeV



Anti-Proton (AMS-02, 5 years) → DM 50-

