

GRAMS実験に向けたLArTPCによる 反粒子同定手法の検証

ICEPP シンポジウム

早稲田大学 修士1年

2022/2/21

中曾根太地

Introduction

- GRAMS(Gamma Ray and Anti Matter Survey)実験

- MeVガンマ線観測 (重元素合成解明のための核ガンマ線観測等)
- 宇宙反粒子探索 (暗黒物質の間接探索)

- 検出器

- ToF : 粒子速度
- LArTPC : エネルギーと飛跡を測定
- 磁場 : なし

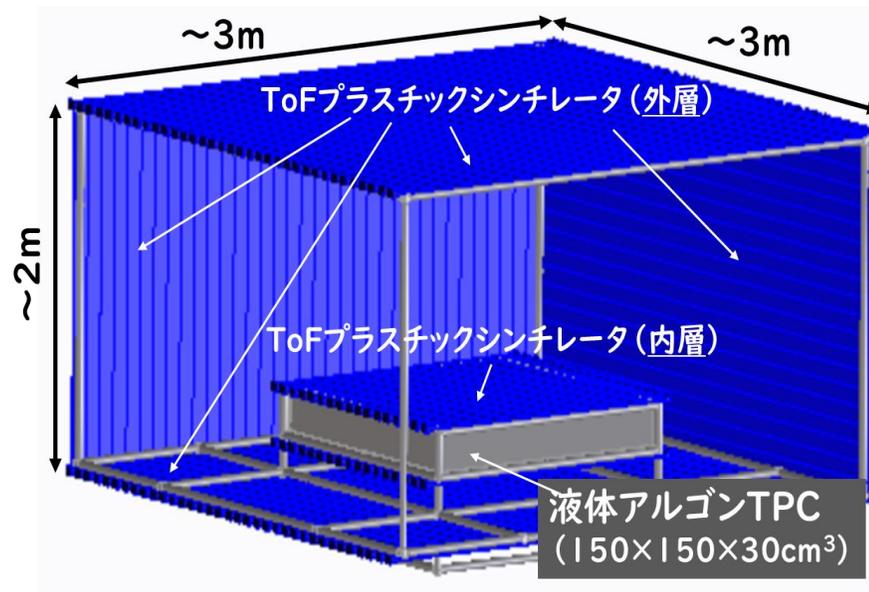
- 将来的に南極周回軌道で30日程度の気球実験→衛星実験

- 今後数年での早稲田大学での動向

- 気球工学試験 (気球上でのLArTPC安全運用)
- J-PARCでのビーム試験 (反粒子捕獲事象の検証)

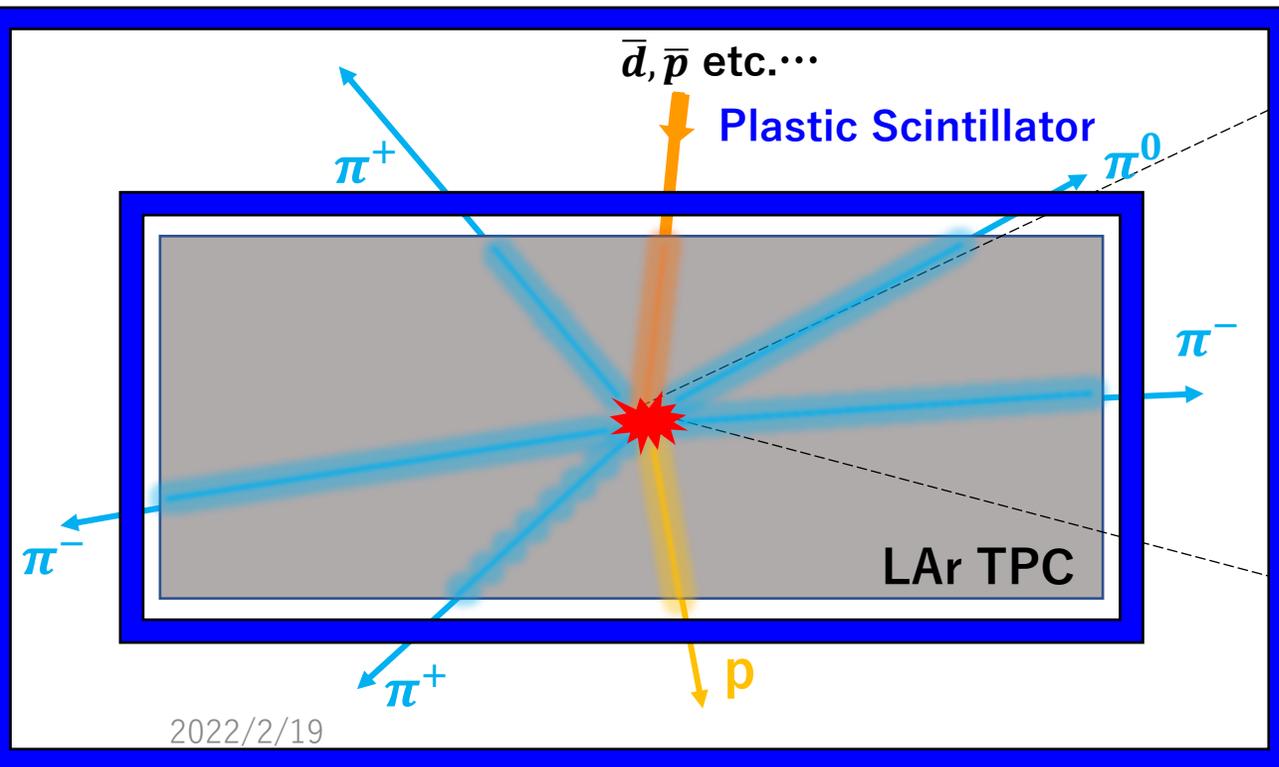
- 本講演

反陽子(反重陽子)ビーム試験に向けたSimulationによる検出器サイズ&ビームエネルギーの最適化



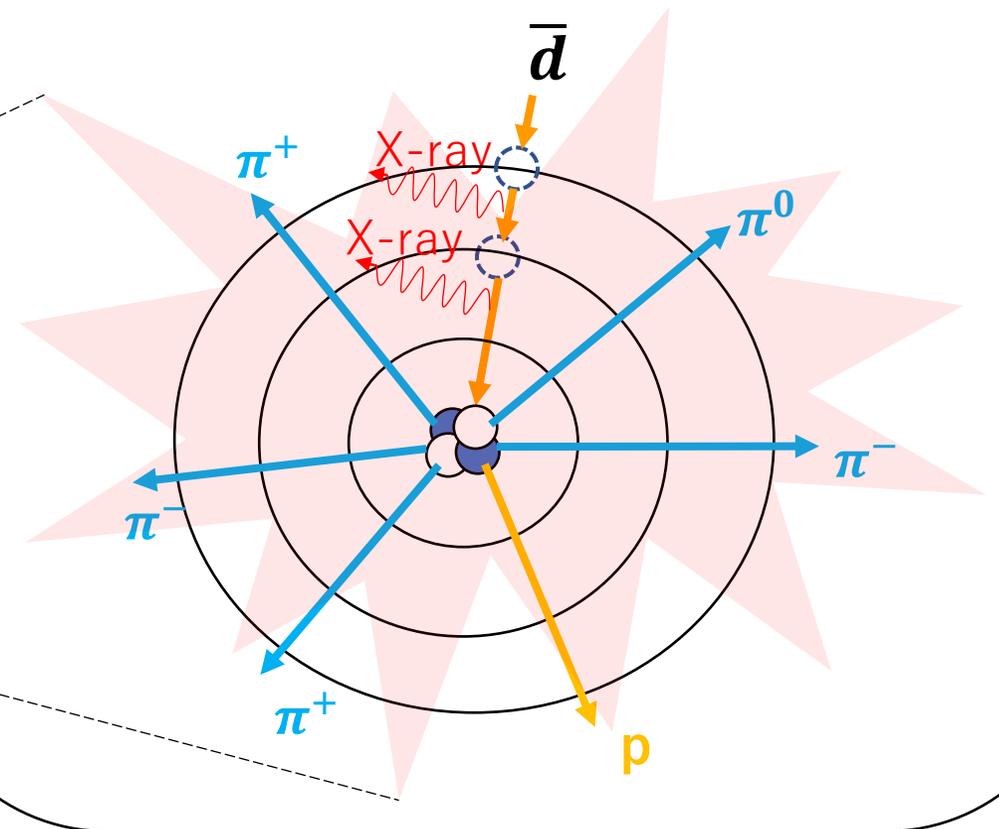
原子核捕獲事象検出原理

1. 負電荷ハドロンがLArにエネルギーを落とし、停止
 2. Ar原子に捕獲される(エキゾチック原子を形成)
 3. Exotic Atomの脱励起に伴い、電子or特性X線を放出
 4. 脱励起後、原子核と対消滅によって π, p 等が放出
- 対消滅後のHadronと特性X線を信号として捉える**



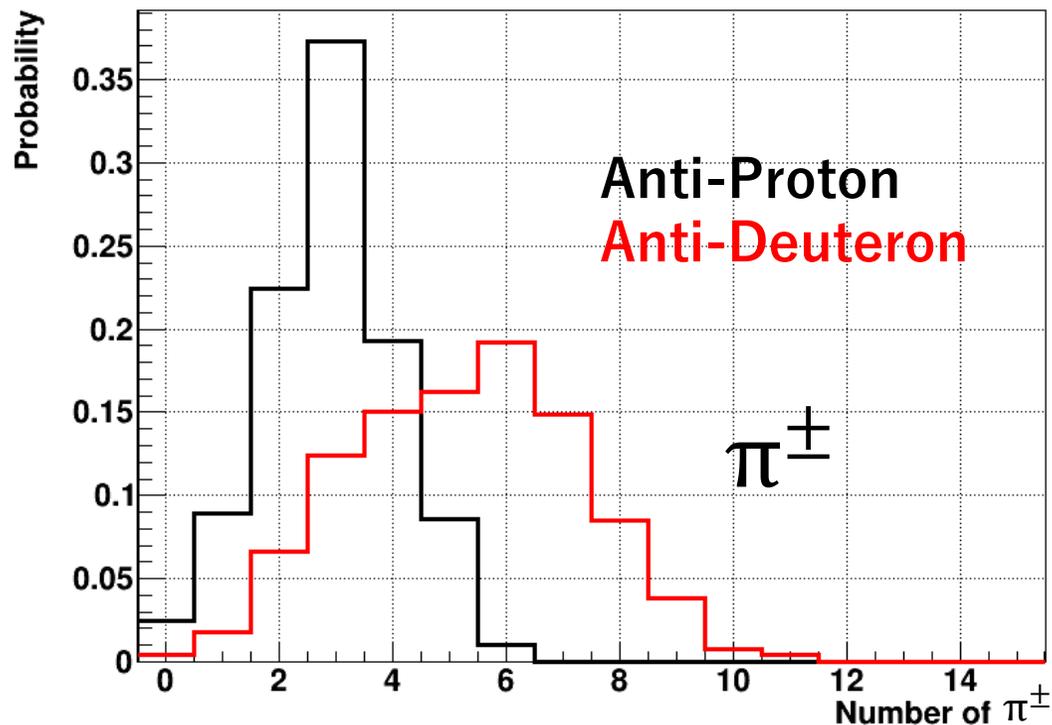
エキゾチック原子 遷移モデル

$$\text{X線のエネルギー} : E_{a,b} = zZ^* \frac{M^*}{m_e^*} R_H \left(\frac{1}{n_a} - \frac{1}{n_b} \right)$$

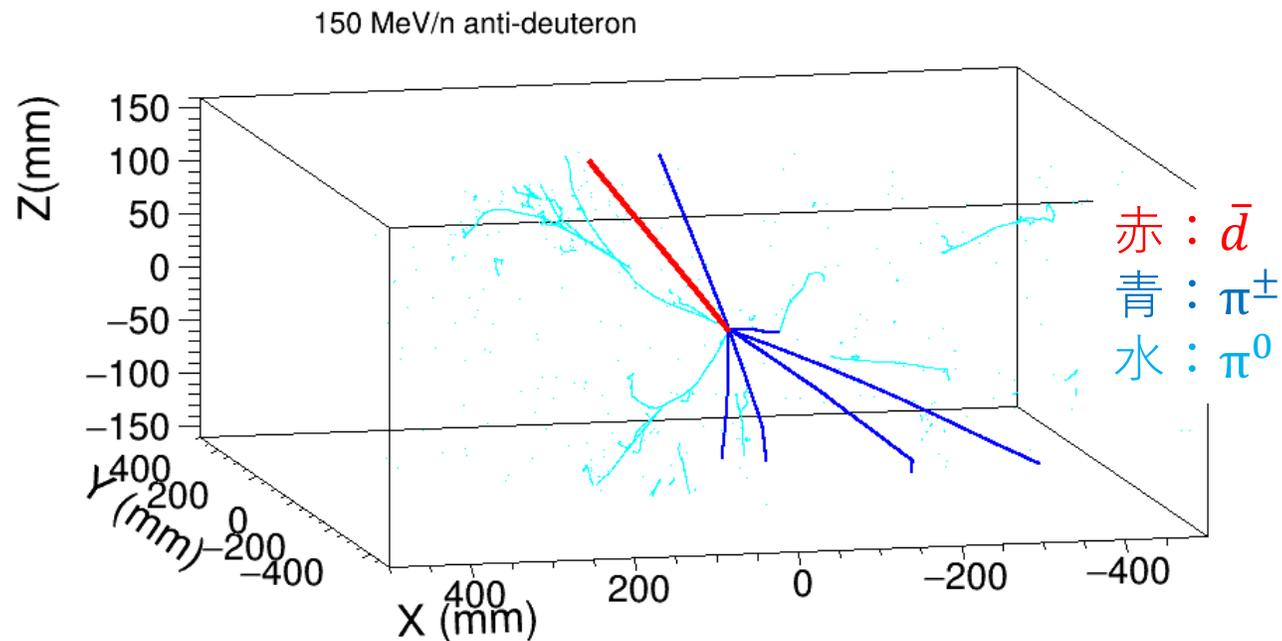


反陽子(反重陽子)ビームテスト計画

GEANT4 Simulationによる信号事象の検証



対消滅で放出される π^\pm 数

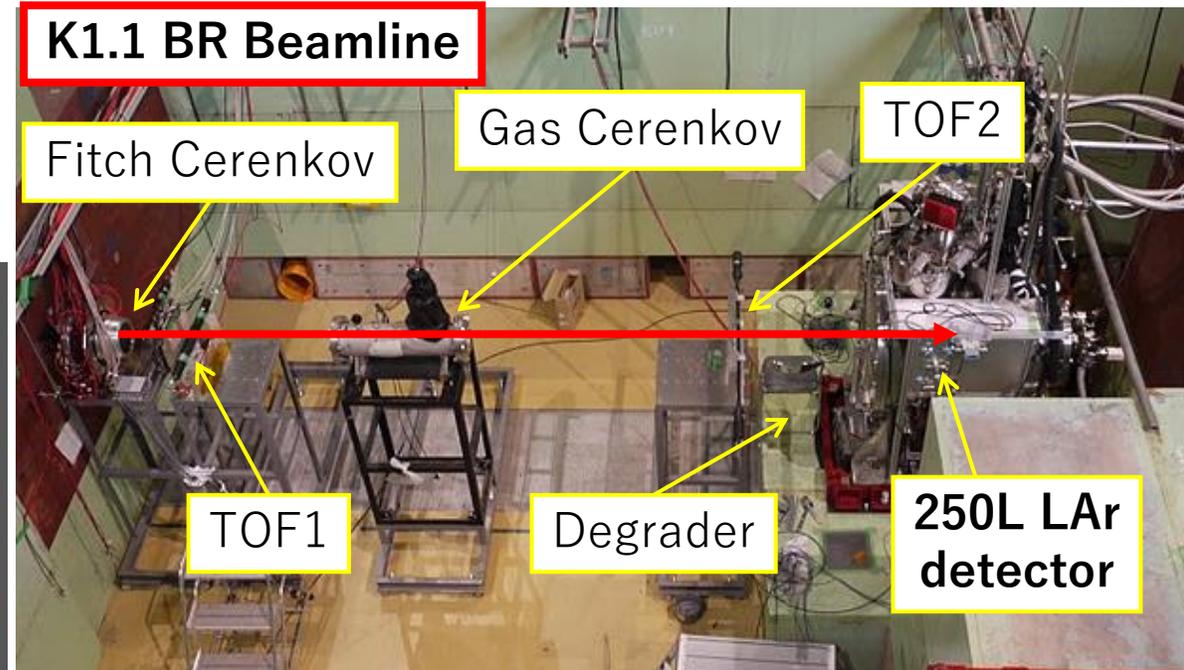
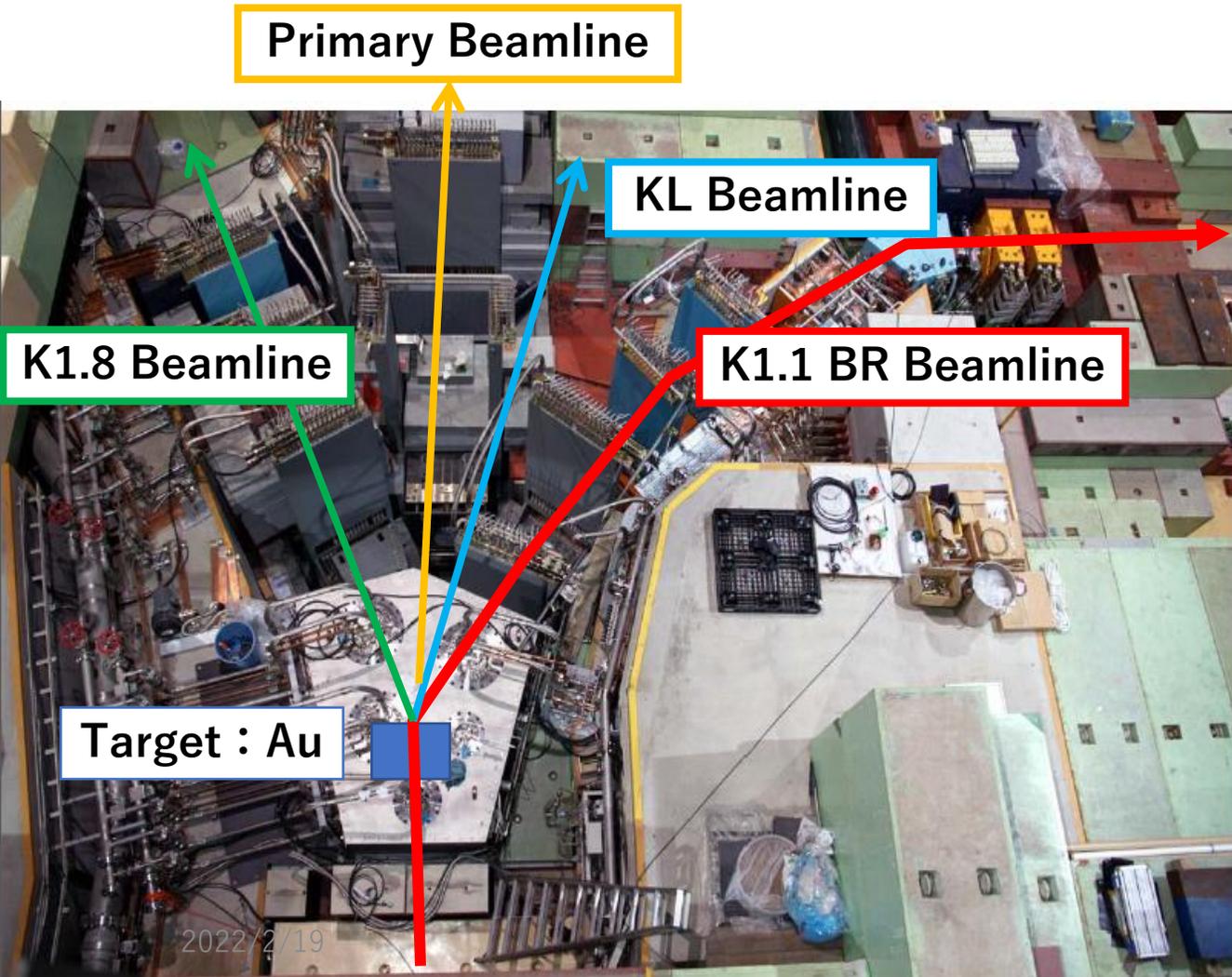


Antideuteron capture event

LArTPC中での原子核捕獲事象は実データでの検証がされていない
→反陽子(反重陽子)ビームを用いた捕獲事象の検証が必要

Test Beam at J-PARC(K1.1BR) in 2010 (T-32 Experiment)

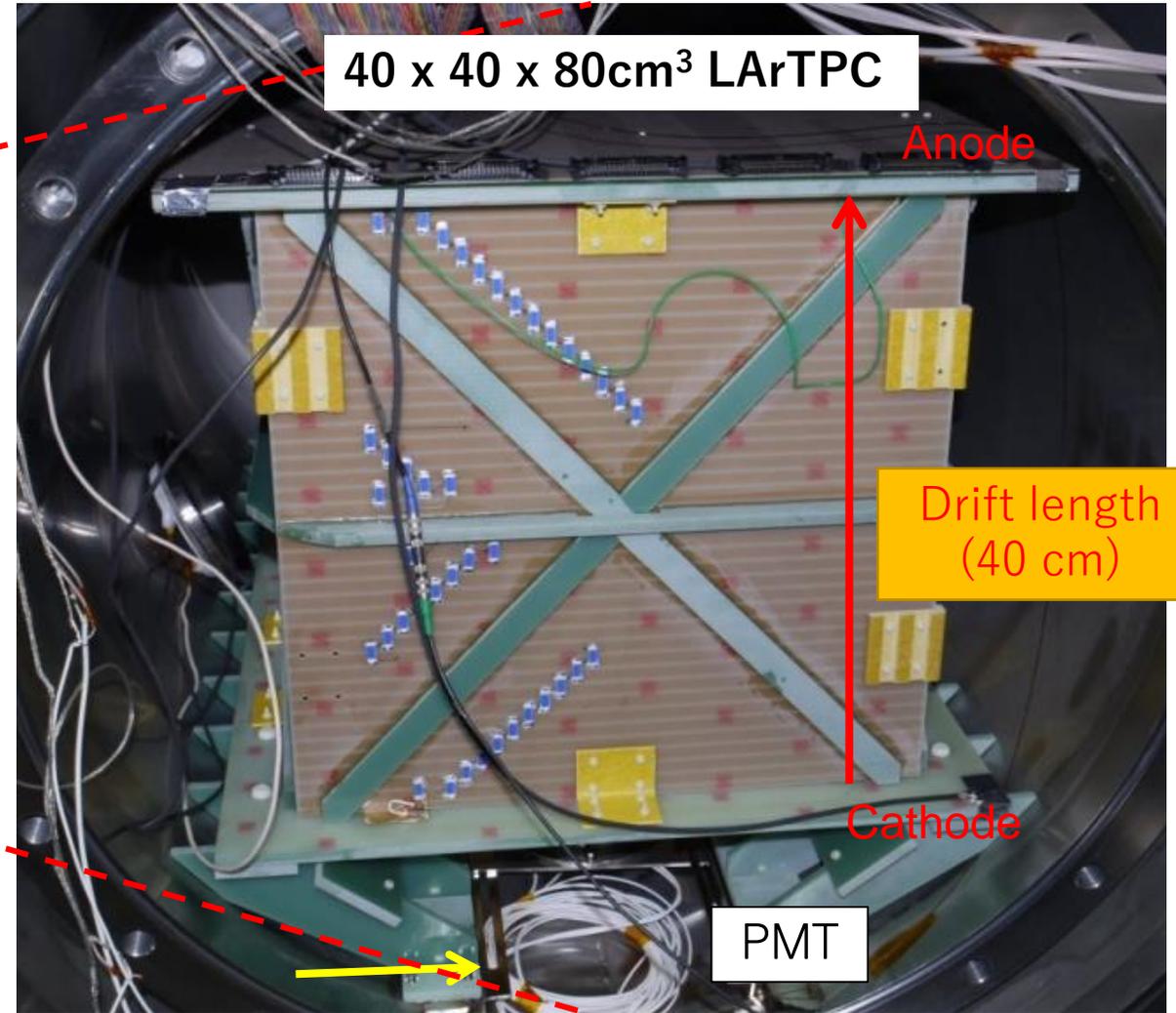
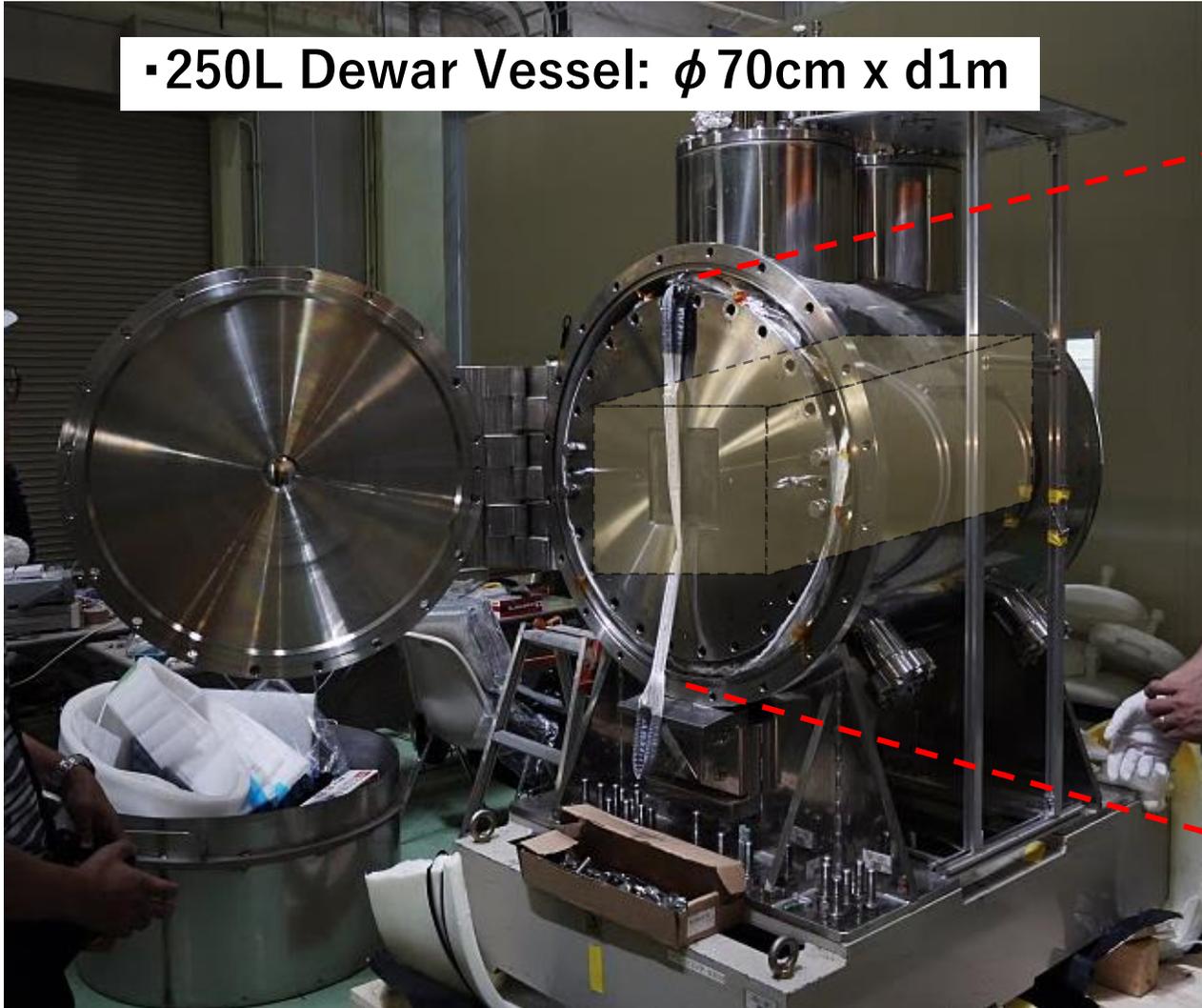
arXiv:1105.5818



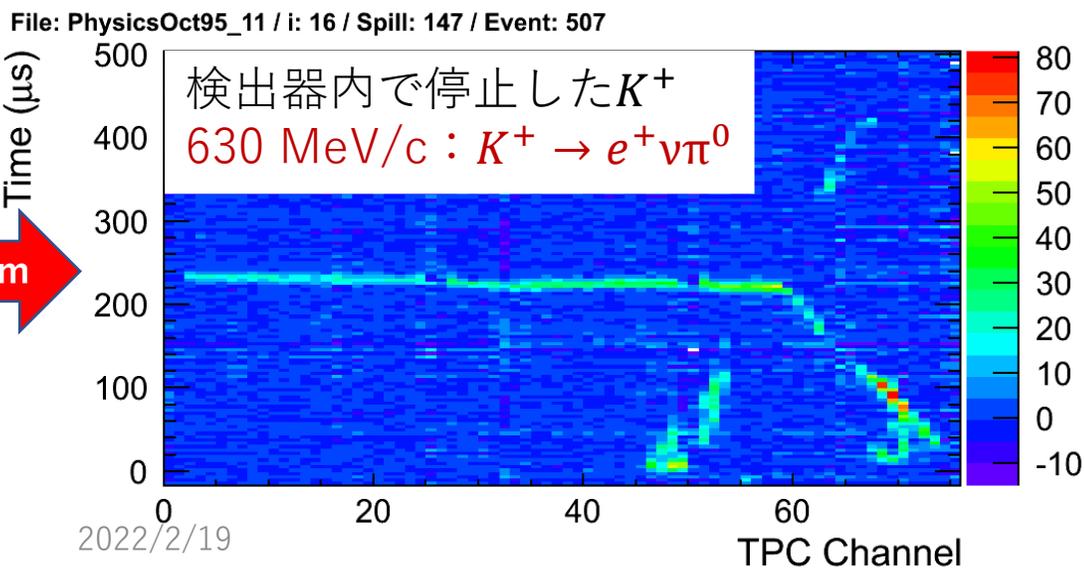
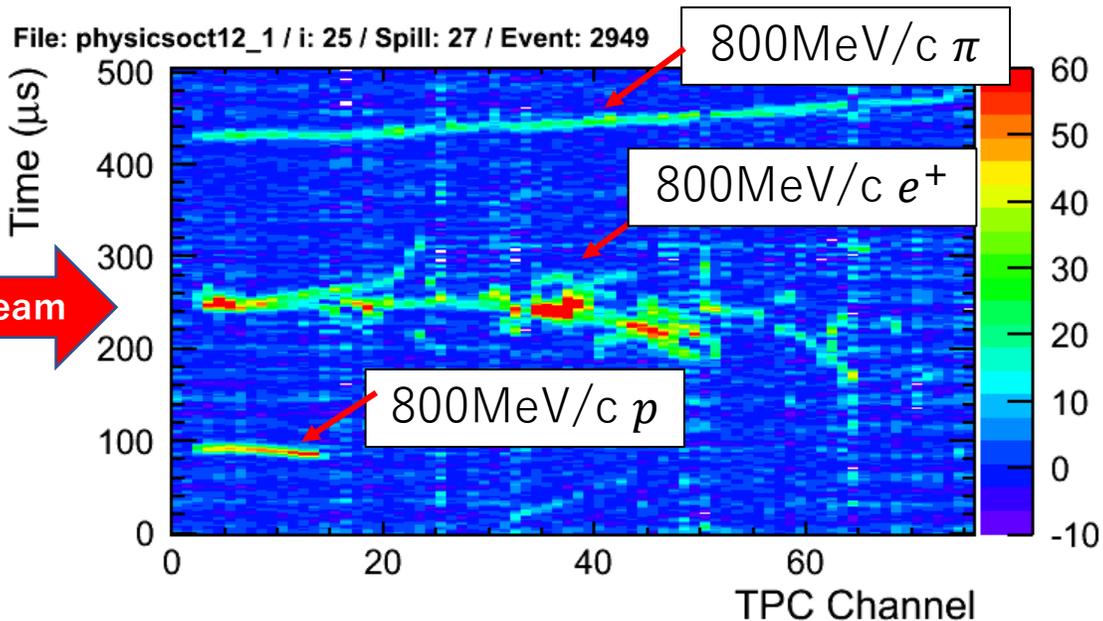
- P- \rightarrow K ν 崩壊による $\sim 340\text{MeV}/c$ のK粒子探索を目的としたLArTPCの性能評価試験(早稲田 & KEK)
- 使用ビーム
200 \sim 800MeV/c (Well defined particles (K⁺, π^+ , p, e))
- 検出器
250L detector (LArTPCサイズ : 40cm \times 40cm \times 80cm)

250L Detector(T32 Experiment)

• 250L Dewar Vessel: $\phi 70\text{cm} \times d1\text{m}$



Data Taking



2022/2/19

Oct/2010 Run: Data Taking

- 2010, Oct/6-23
 - Preparation at K1.1Br
- Oct/24
 - LAr Filling
 - achieved ~0.5 ppb LAr purity
- Oct/25-Oct/31
 - Data acquisition



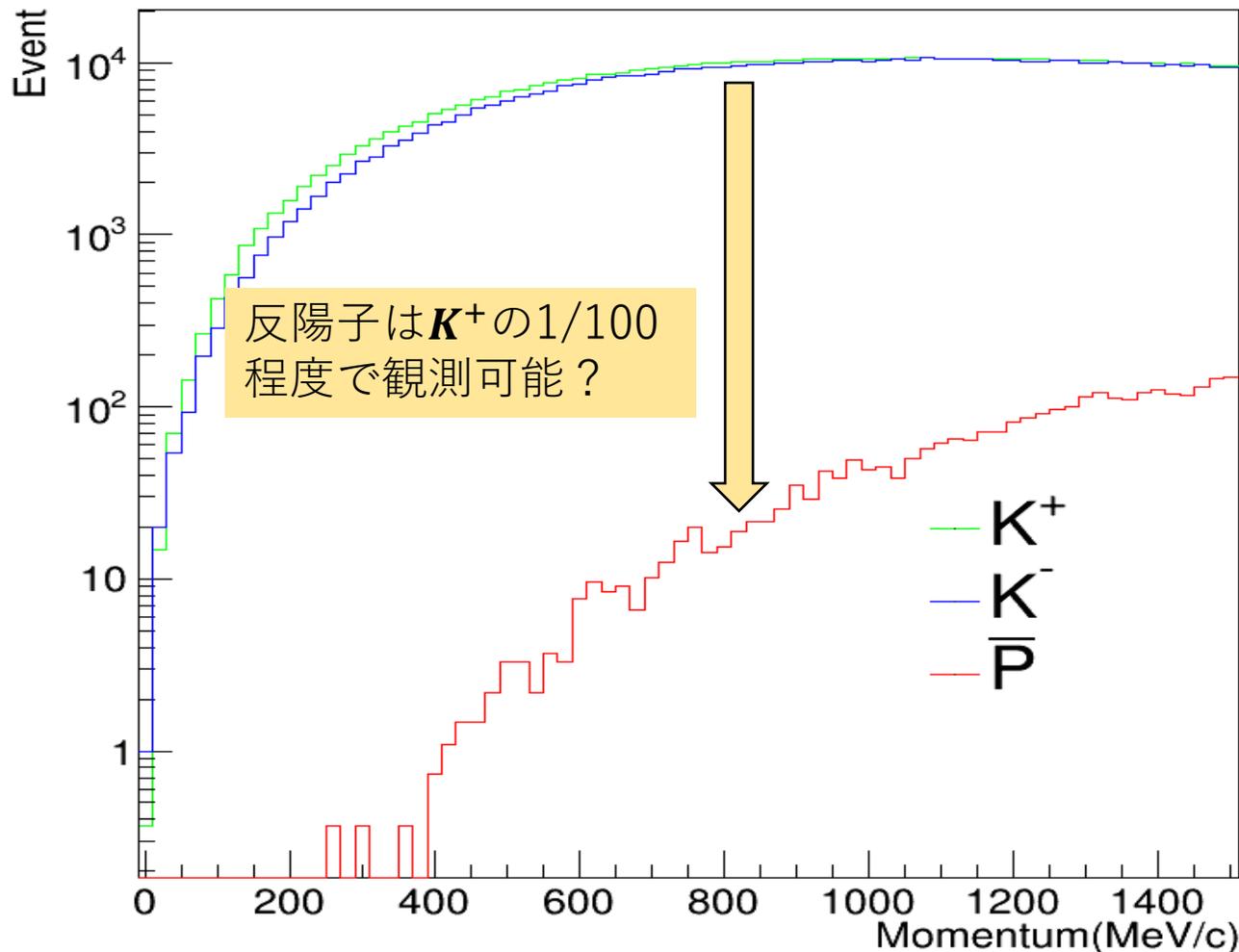
Event Category		No. of events
K^+	800 MeV/c with degrader \rightarrow 540 MeV/c	7,000
K^+	800 MeV/c with degrader \rightarrow 630 MeV/c	40,000
K^+	800 MeV/c with degrader \rightarrow 680 MeV/c	35,000
π^+	200 MeV/c	70,000
e^+	800 MeV/c	2,500
P	800 MeV/c	1,500
e^+	200 MeV/c	10,000
π^+ dominant	800 MeV/c	\sim 3,000
total		\sim 170,000

数時間で取得した K^+
データ量

2010年J-PARCビームテスト (T-32実験)

- LArTPCによる電子読み出し手法の確立
- 1時間で1万eventの K^+ のデータ取得に成功

反陽子生成量(CRMC1.8.0(EPOS-LHC))



- **Cosmic Ray Monte Carlo package**を使用
<https://web.ikp.kit.edu/rulrich/crmc.html>
- **30GeV陽子を金ターゲットに衝突させた時の反陽子生成量をプロット**
- **800MeV/cの K^+ Event数= 1万Event/h**
at J-PARC
 - ① K^+ のEvent数を1万Eventへスケール
 - ② 反陽子についても K^+ のスケールファクターをかける。
- **反陽子の生成は高運動領域で起こる**
特に反陽子 $\geq 20\sim 30$ Event/h @800MeV/c

Geant4 Simulation

◆ 反陽子捕獲事象を捉える一番最適な検出器サイズをSimulationにより検証する

・ シミュレーションツールキット

-GEANT4 ver.4.10.07

・ **Detector Construction**

-LArTPC : 30cm × 30cm × 60cm

-Degrader : 30cm × 12cm × 12cm

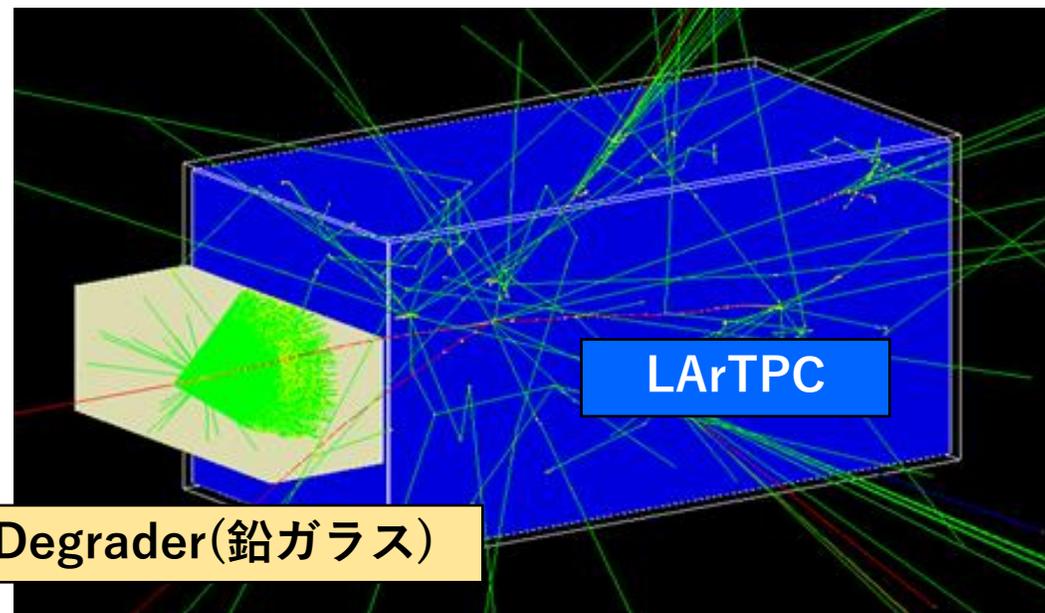
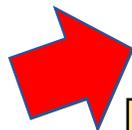
(鉛ガラス, 密度5.20[g/cm³], Cerenkov光検出器)

・ **使用ビーム**

反陽子

・ 鉛ガラス(KEKから4個譲渡して頂いた)

: 30cm × 12cm × 12cm (1module)

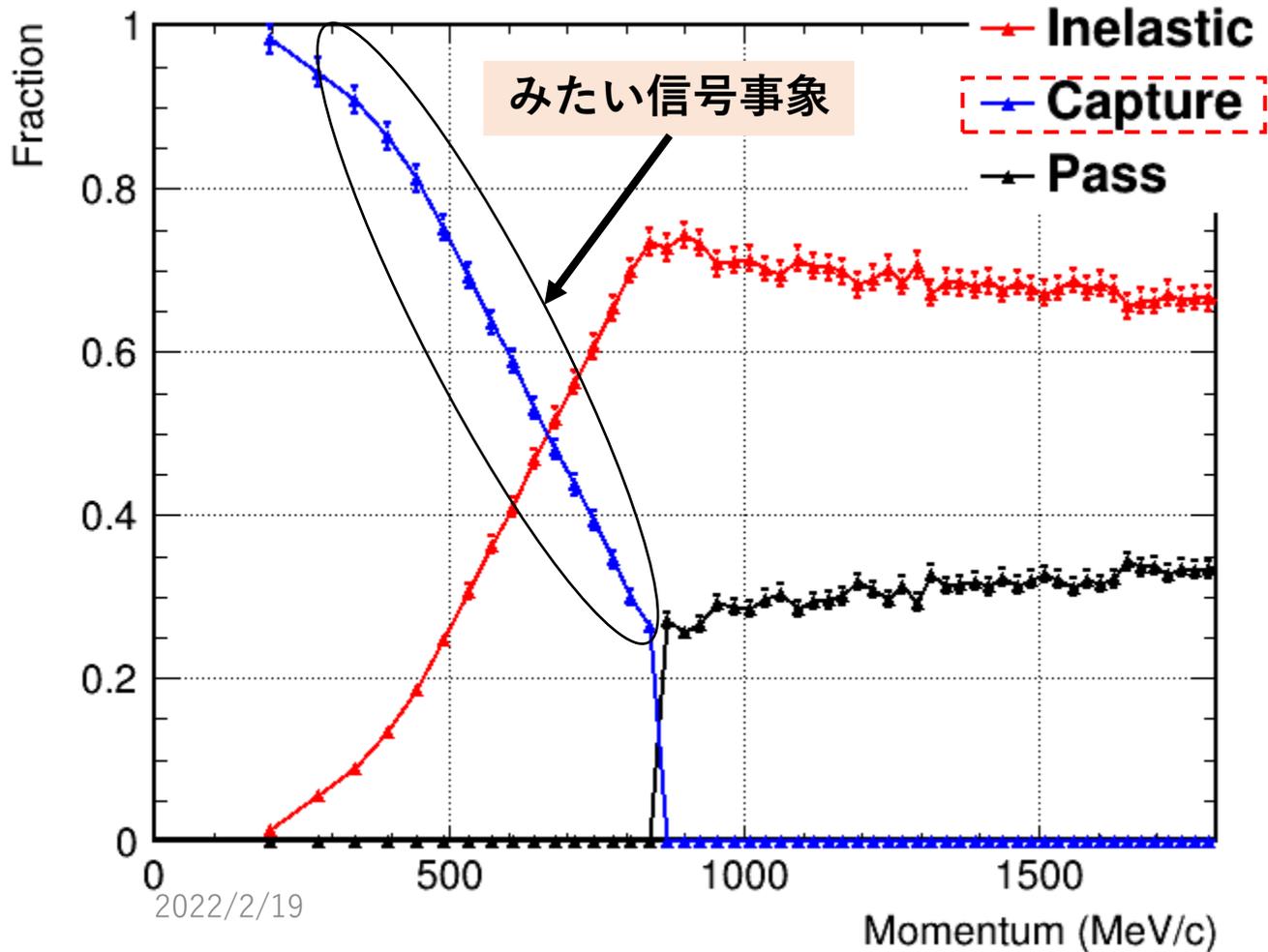


反陽子が液体アルゴンでCaptureされる確率

Set up

鉛ガラス : なし

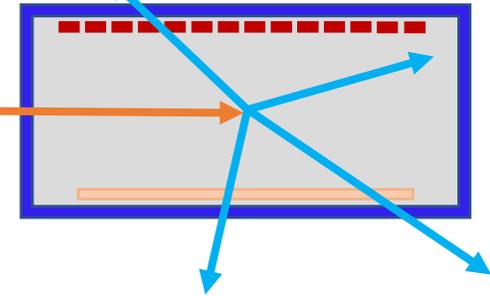
液体アルゴン : $30_x \times 30_y \times 60_z [cm]$



信号事象

capture

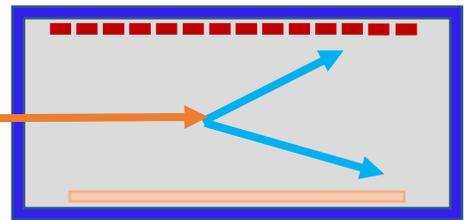
\bar{p}



信号事象にならない(Protonと区別できない)

inelastic

\bar{p}



pass

\bar{p}

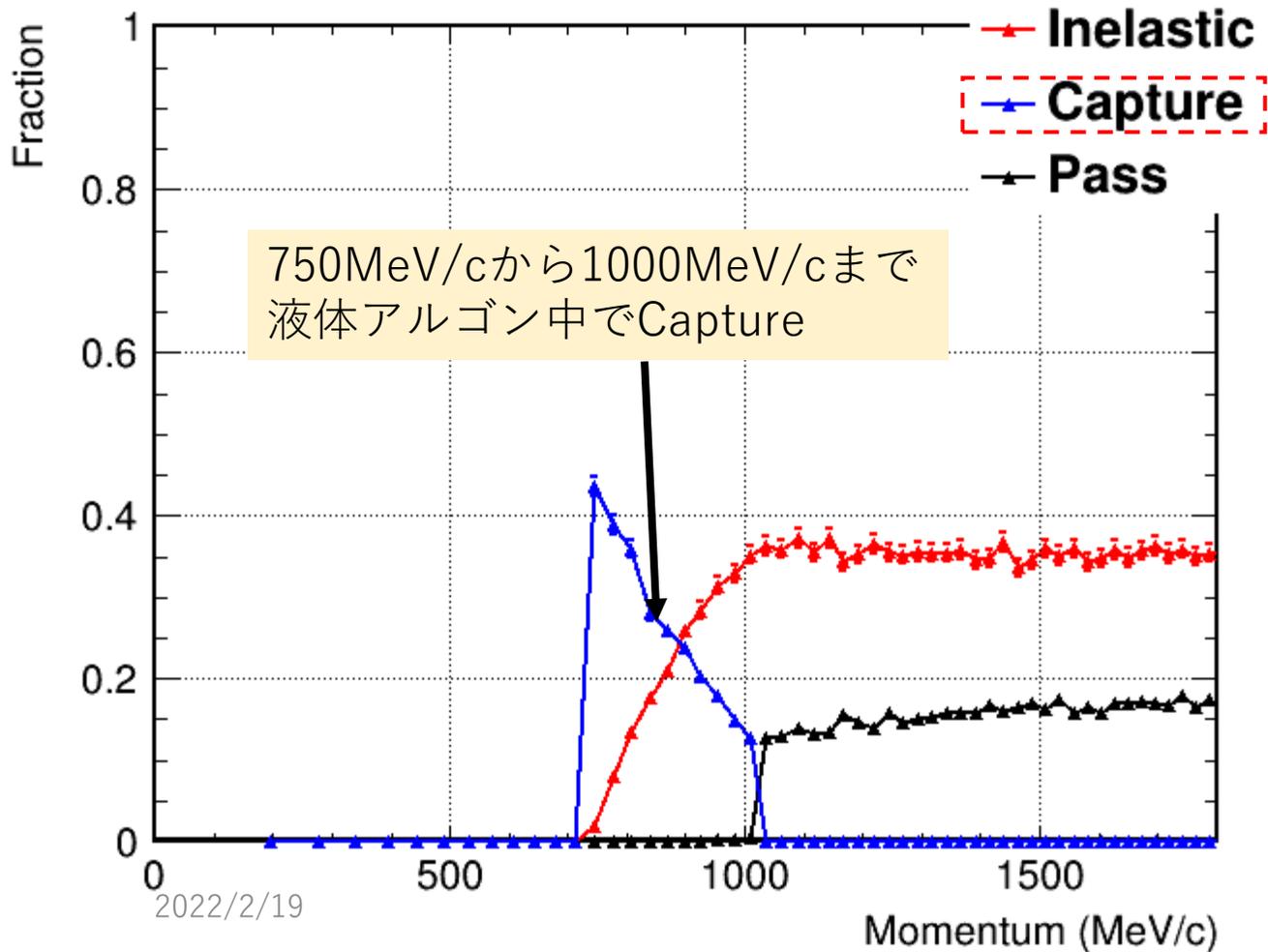


反陽子が液体アルゴンでCaptureされる確率

Set up

鉛ガラス : $30_x \times 12_y \times 12_z$ [cm]

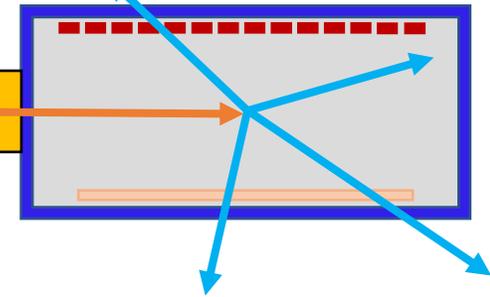
液体アルゴン : $30_x \times 30_y \times 60_z$ [cm]



信号事象

capture

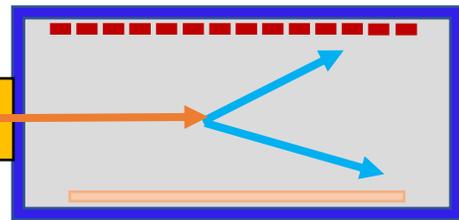
\bar{p}



信号事象にならない(Protonと区別できない)

inelastic

\bar{p}



pass

\bar{p}

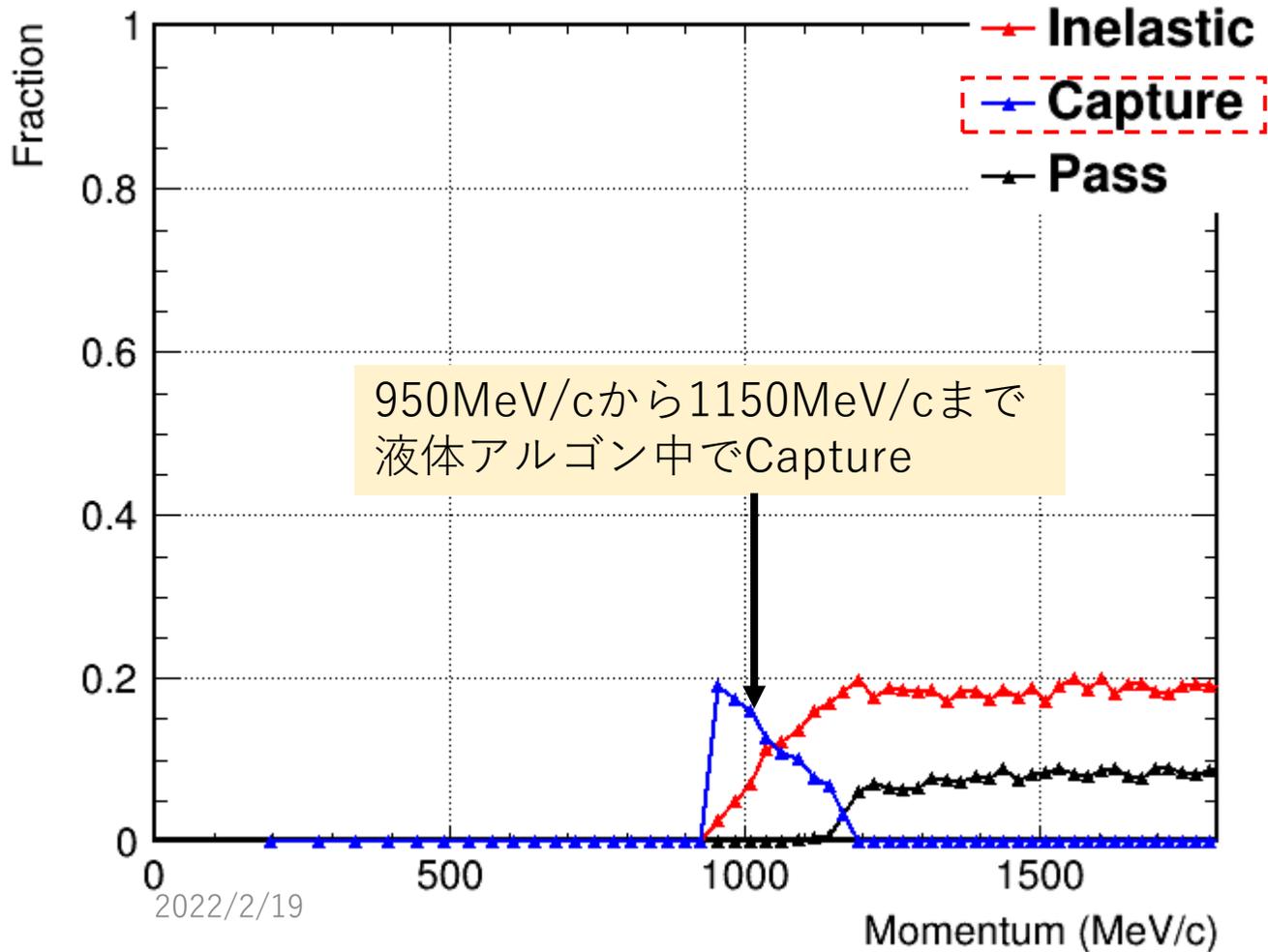


反陽子が液体アルゴンでCaptureされる確率

Set up

鉛ガラス : $30_x \times 12_y \times 24_z$ [cm]

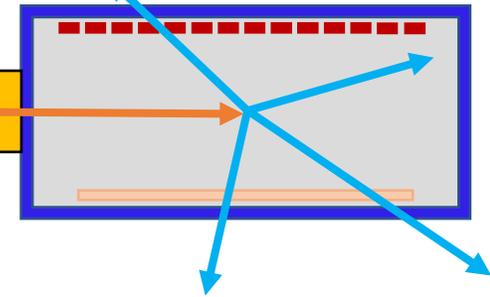
液体アルゴン : $30_x \times 30_y \times 60_z$ [cm]



信号事象

capture

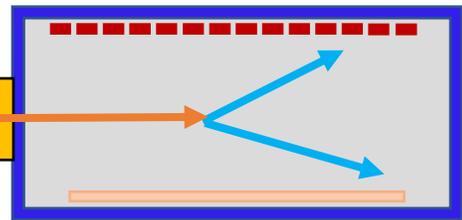
\bar{p}



信号事象にならない(Protonと区別できない)

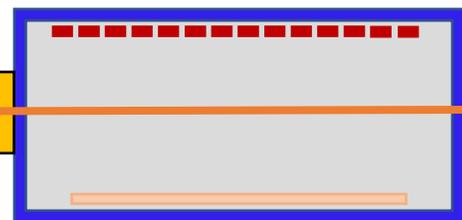
inelastic

\bar{p}



pass

\bar{p}

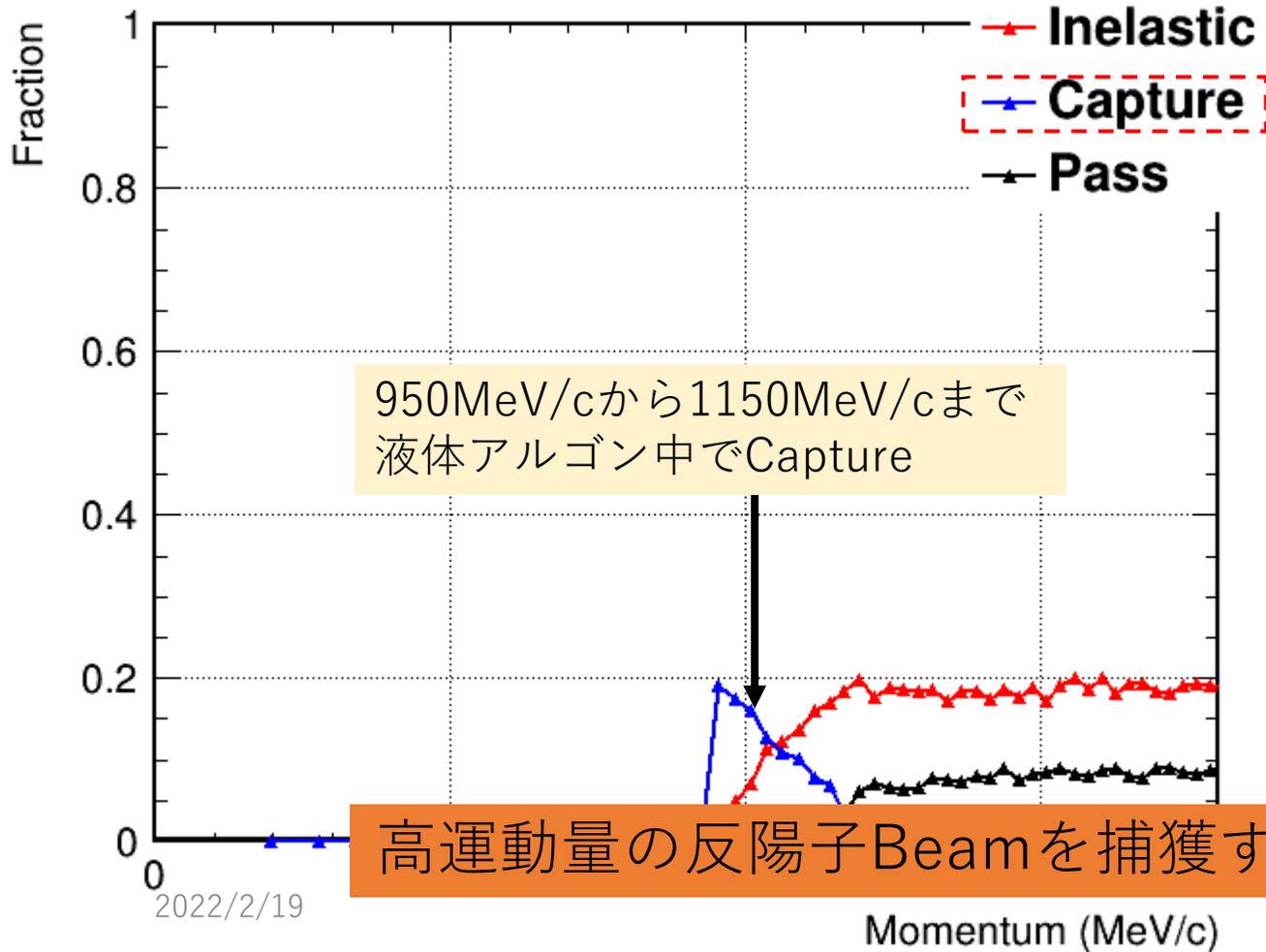


反陽子が液体アルゴンでCaptureされる確率

Set up

鉛ガラス : $30_x \times 12_y \times 24_z$ [cm]

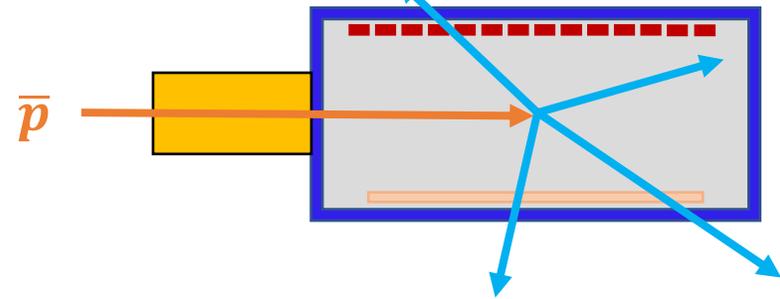
液体アルゴン : $30_x \times 30_y \times 60_z$ [cm]



信号事象

capture

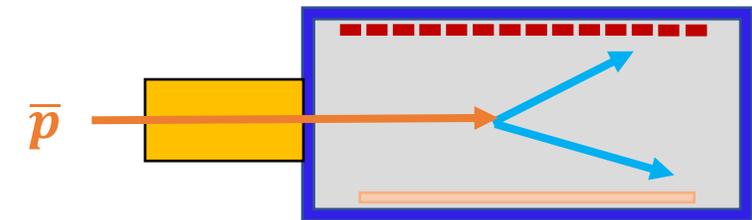
\bar{p}



信号事象にならない(Protonと区別できない)

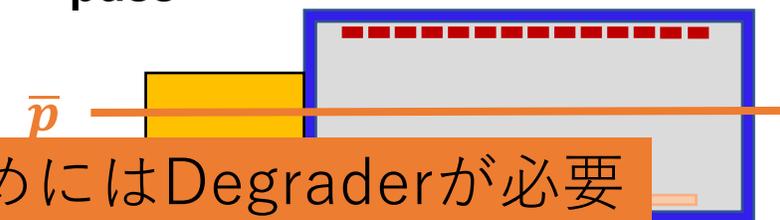
inelastic

\bar{p}

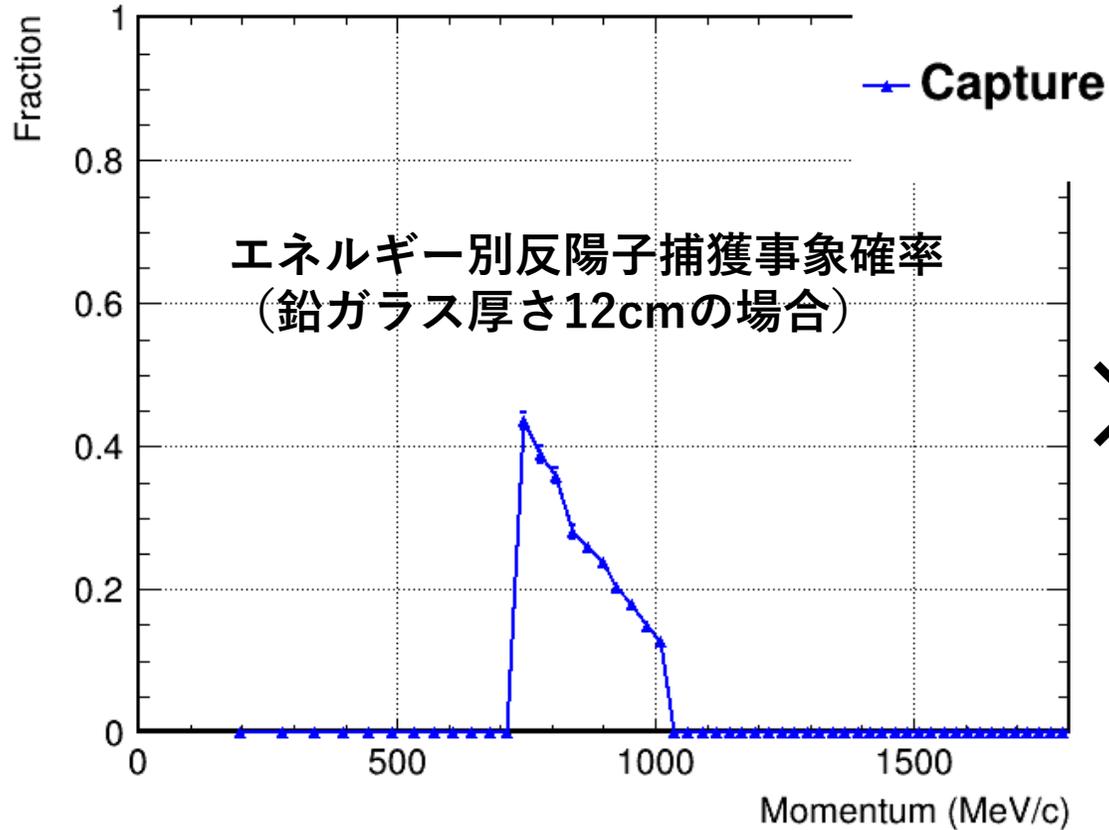


pass

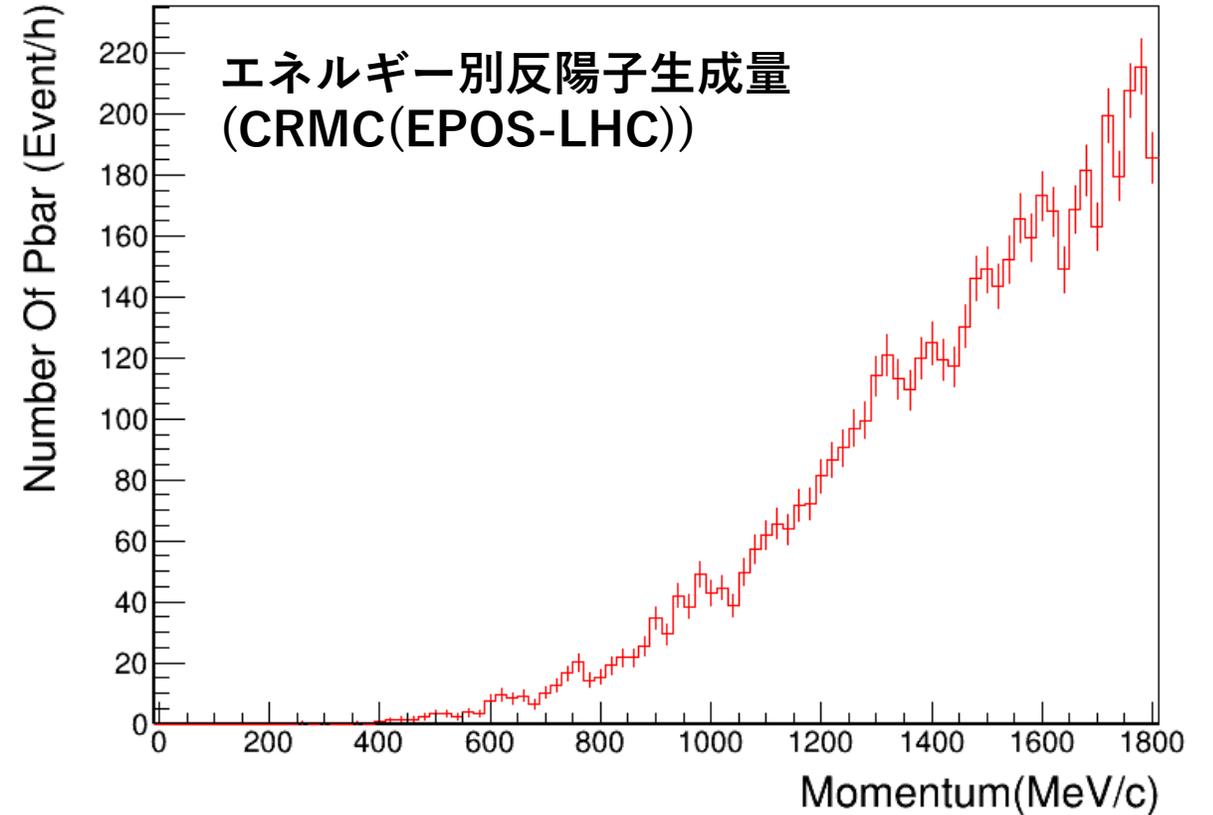
\bar{p}



反陽子が液体アルゴンでCaptureされる確率



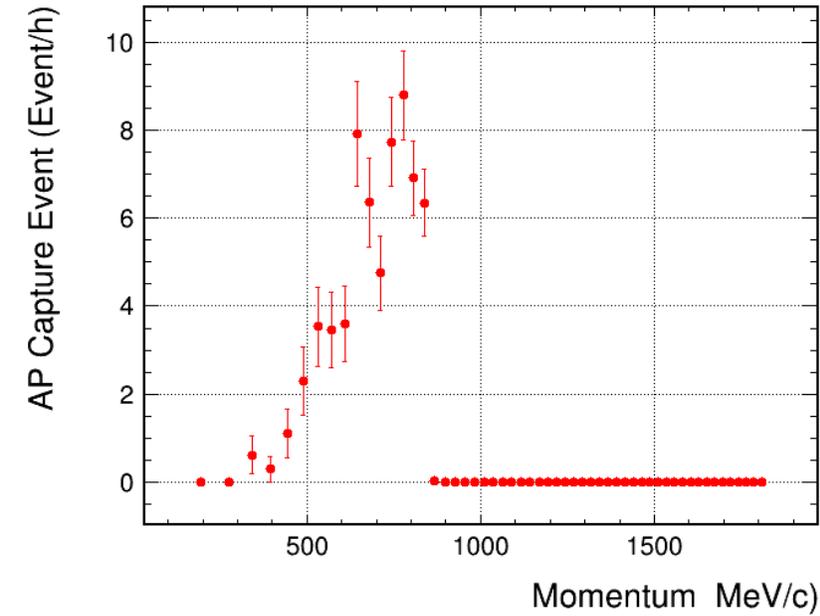
×



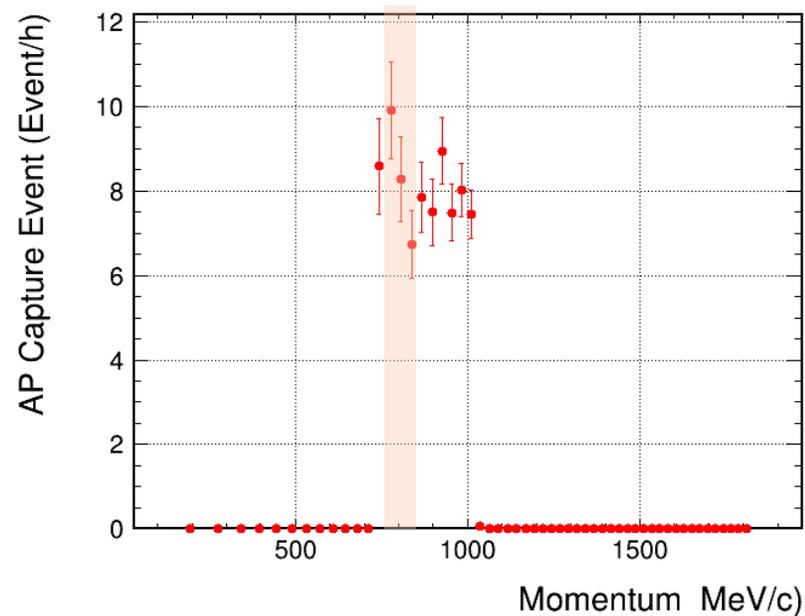
- CRMC (EPOS-LHC)の反陽子生成量結果と反陽子捕獲割合の結果の積を取ることでBeam試験における反陽子捕獲事象のRate(Event/h)を算出
- 鉛ガラス(degrader)の厚みを0cm, 12cm, 24cmと変化させ最適な鉛ガラスの厚さを検証した

LArTPC内で反陽子捕獲が起こる確率

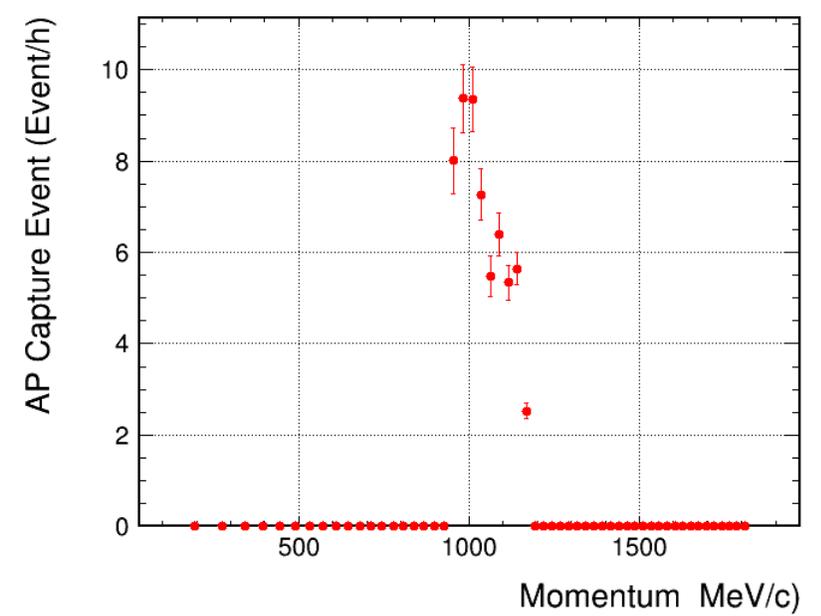
使用検討中のJ-PARC(K1.8BR)最大ビーム運動量：1.1GeV/c



液体アルゴンVolume：30×30×60cm
w/o degrader



液体アルゴンVolume: 30×30×60cm
w/ 12cm degrader



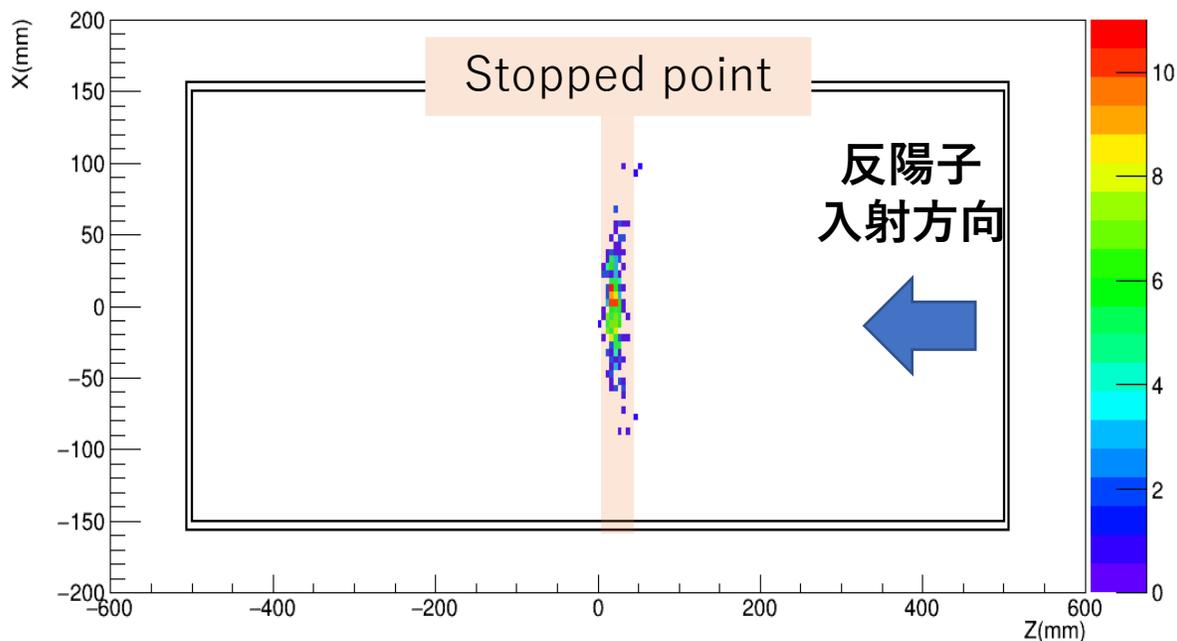
液体アルゴンVolume: 30×30×60cm
w/ 24cm degrader

- 鉛degraderを厚くすることで高運動量の反陽子を6event/h以上で捕獲可能
- 800MeV/c程度の入射反陽子エネルギーを用いるのが最もRateが高い

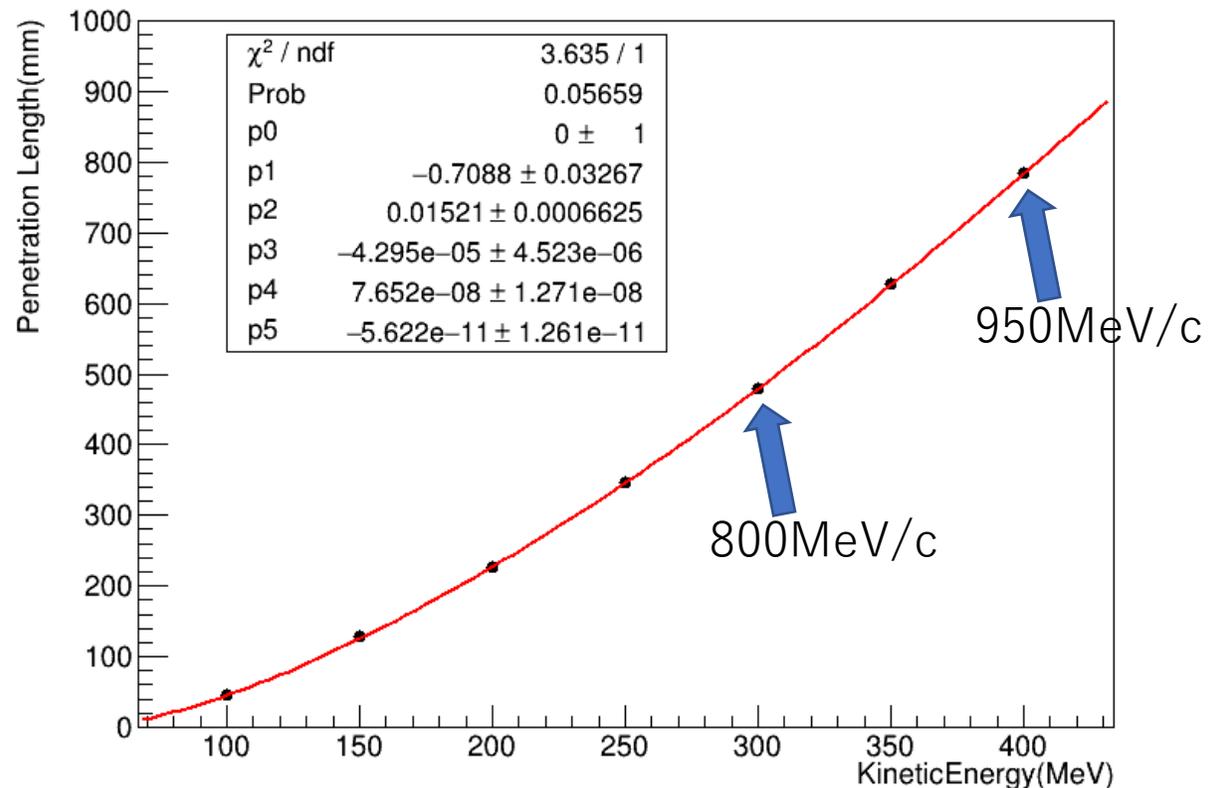
反陽子Stopping Point

- ◆ 信号の取得に際し、捕獲事象後のハドロンが等方に放射されることなどから検出器中央で反陽子を止めることを考える

入射エネルギー800MeV/c



Penetration Length(LAr) VS Kinetic Energy

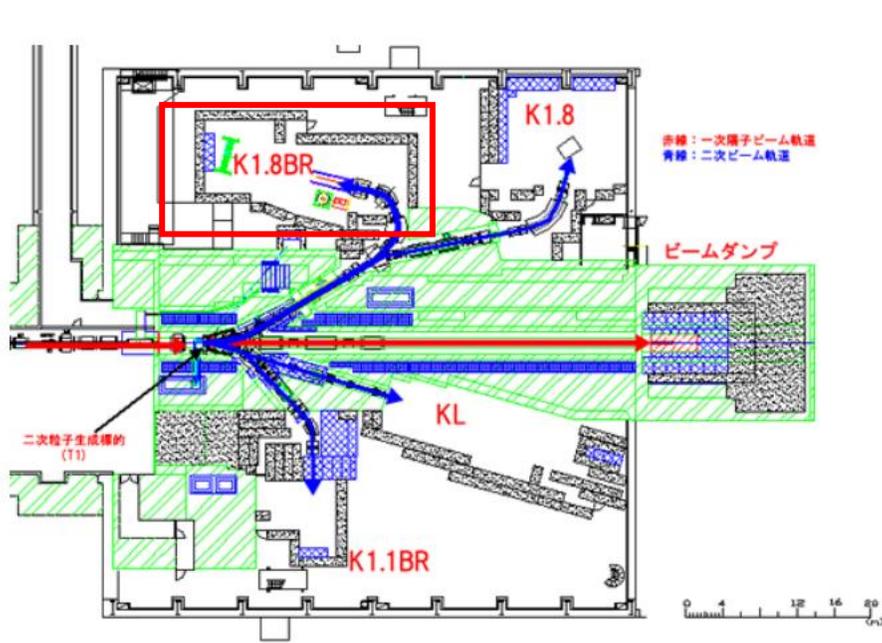


- ◆ 液体アルゴンのみ場合

最も取得効率の高い800MeV/c付近の反陽子は50cmで止まるため、最適な液体アルゴンの奥行きは100cm
→真空断熱容器の大きさの制限などから、degraderが必要

反陽子ビームテスト案

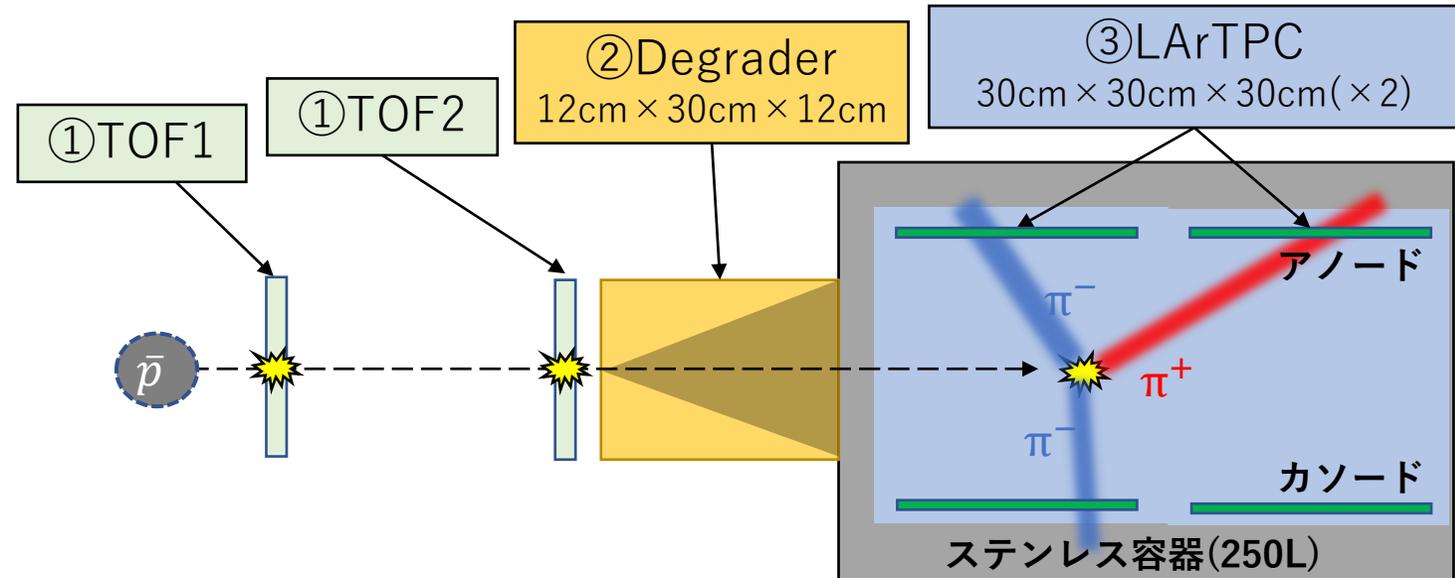
- K1.8BRの使用をKEK/JPARCの方と協議中
- 30cm × 30cm × 30cmのTPCサイズを1台または2台並べて反陽子捕獲事象を検証



J-PARCハドロンホール内

<https://j-parc.jp/c/facilities/nuclear-and-particle-physics/hadron.html>

- K1.8BR最大ビーム運動量：1.1GeV/c



現状の反陽子beamtestセットアップ案
(T-32実験のセットアップを踏襲)

- ①TOF1&2 : β により反陽子とその他の荷電粒子を識別
- ②Degrader : 反陽子の減速+Cherenkov検出器
(反陽子によるCherenkov光閾値194MeV/c)
- ③LArTPC : 反陽子捕獲事象を検出

まとめ

まとめ

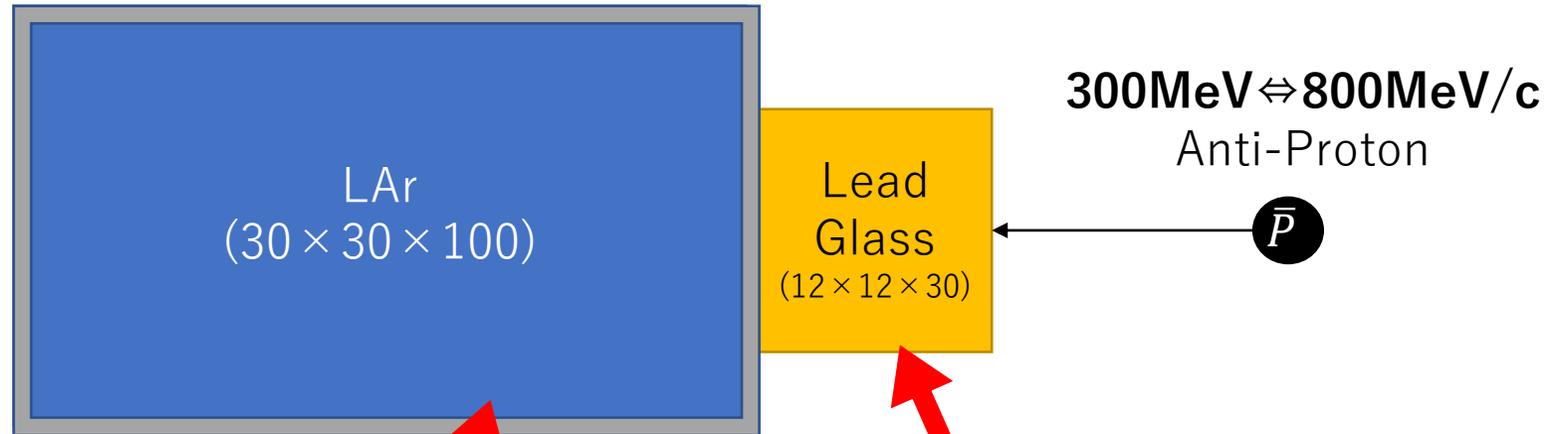
- 早稲田においては2010年J-PARCでのLArTPCでの実機経験があり、TPCでの読出しの手法はほぼ確立されている
- CRMCとGEANT4Simulationの結果より最適な入射反陽子のエネルギーは800MeV/cであると考えられる
- 現在Simulationの結果より、検出器の大きさはそれぞれ
LArTPC : 30cm × 30cm × 60cm
鉛ガラス : 30cm × 12cm × 12cm
が良いと考えられるが今後も継続して最適な大きさを議論し、決めていく

今後の展望

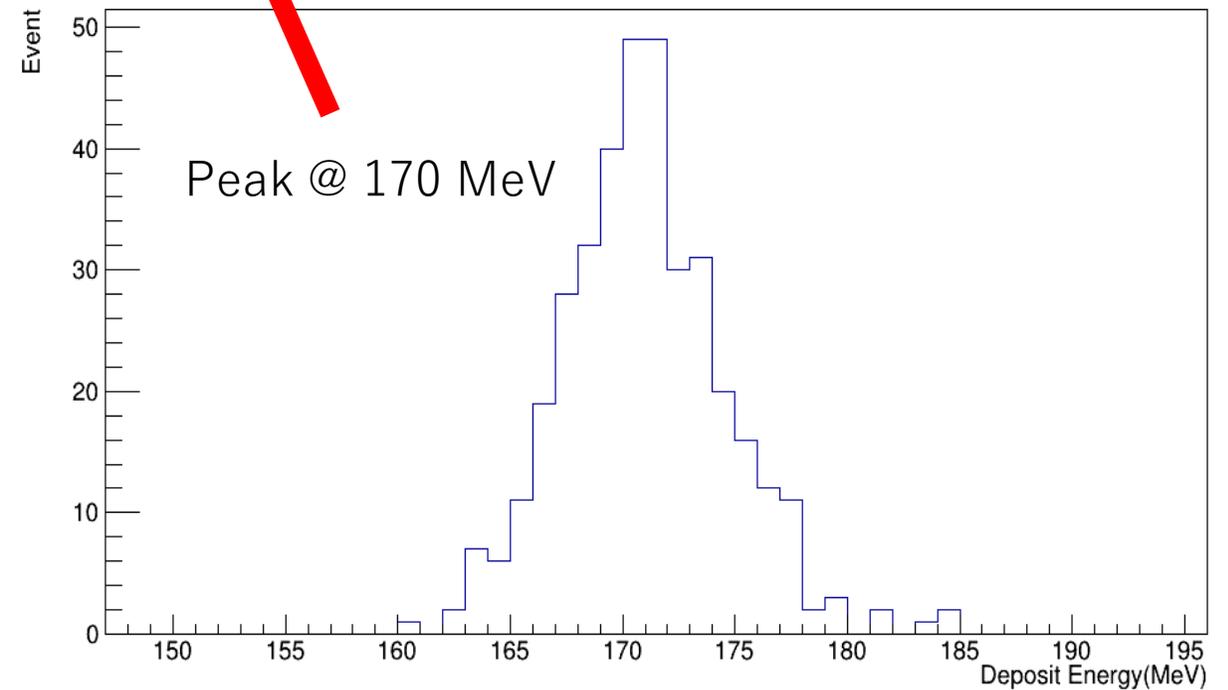
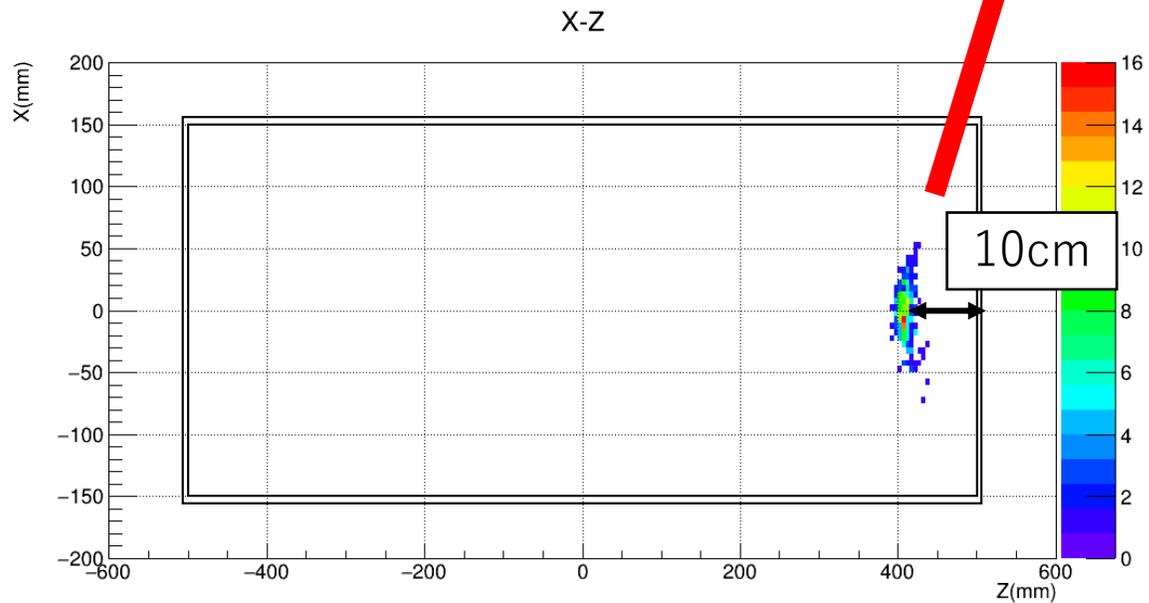
- KEK/JPARCの方と加速器試験実施について協議中であり、反陽子は可能なことを確認（反重陽子は要検討）。
現在、JPARCでのテスト実験に向けて、プロポーザルを準備中。
- 早稲田LArテストスタンドによる宇宙線ミュオン粒子捕獲事象の測定(TPCの試験)

Back up

Degrader performance

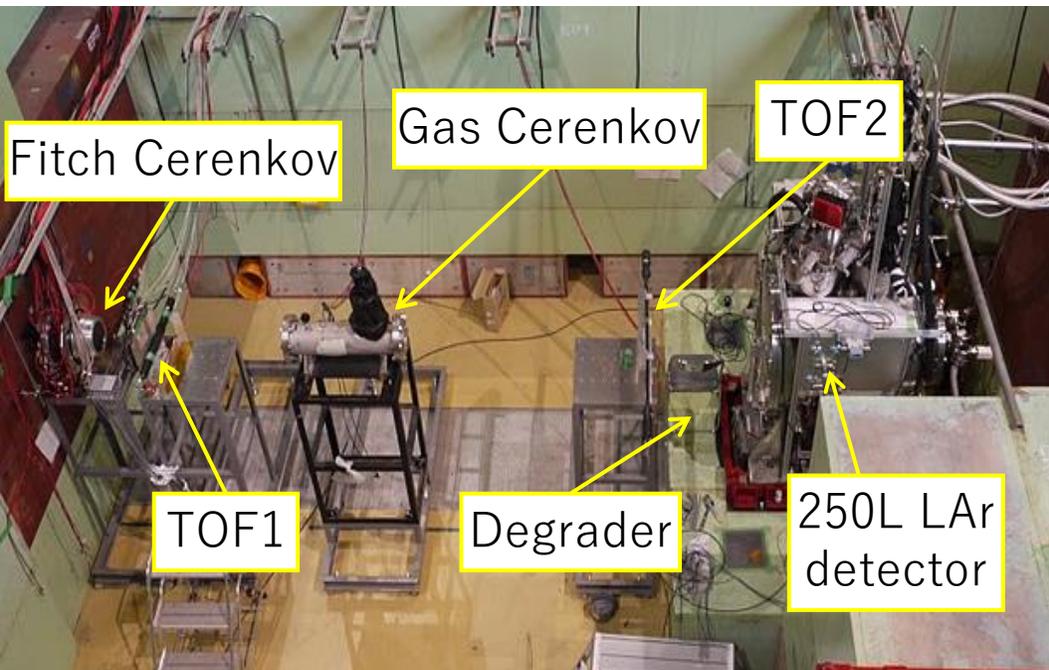


Total dE/dX inside Lead Glass

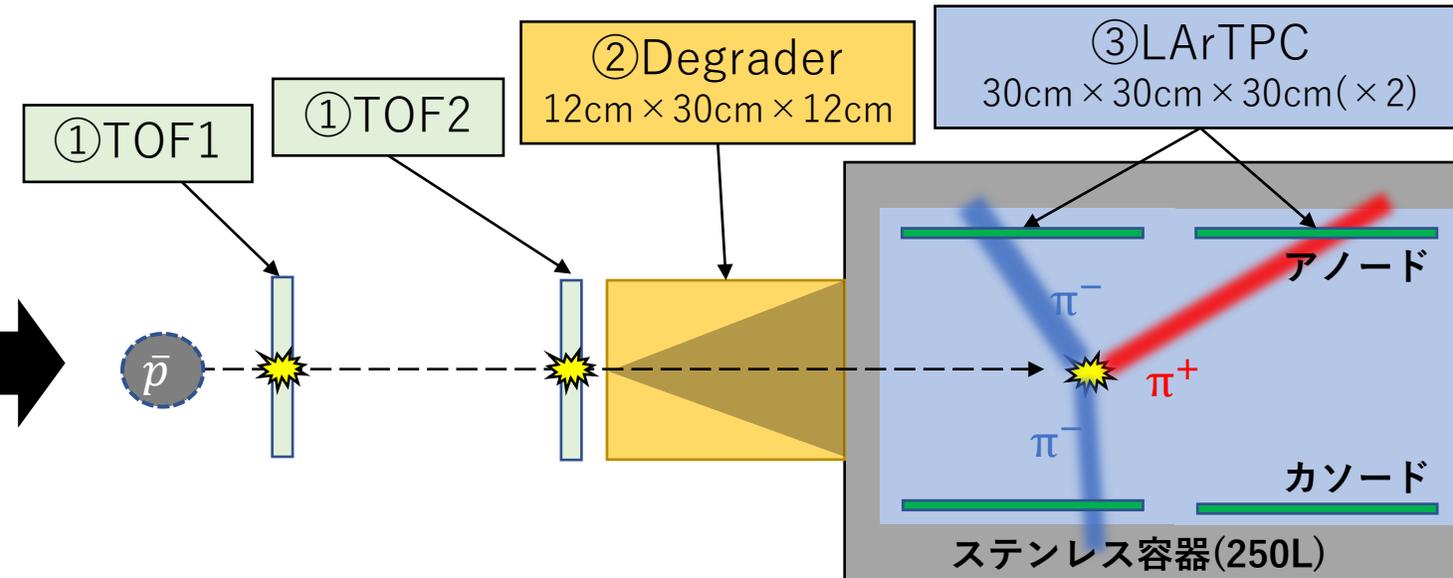


検出器セットアップ案(preliminary)

- 30cm × 30cm × 30cmのTPCサイズを1台または2台並べて反陽子捕獲事象を検証
- 電子読み出しに重きを置いた検出器を設計



2010年(T-32)K1.1BRセットアップ図



現状の反陽子beamtestセットアップ案
(T-32実験のセットアップを踏襲)

- ①TOF1&2 : β により反陽子とその他の荷電粒子を識別
- ②Degradar : 反陽子の減速+Cherenkov検出器
(反陽子によるCherenkov光閾値194MeV/c)
- ③LArTPC : 反陽子捕獲事象を検出

GRAMS実験

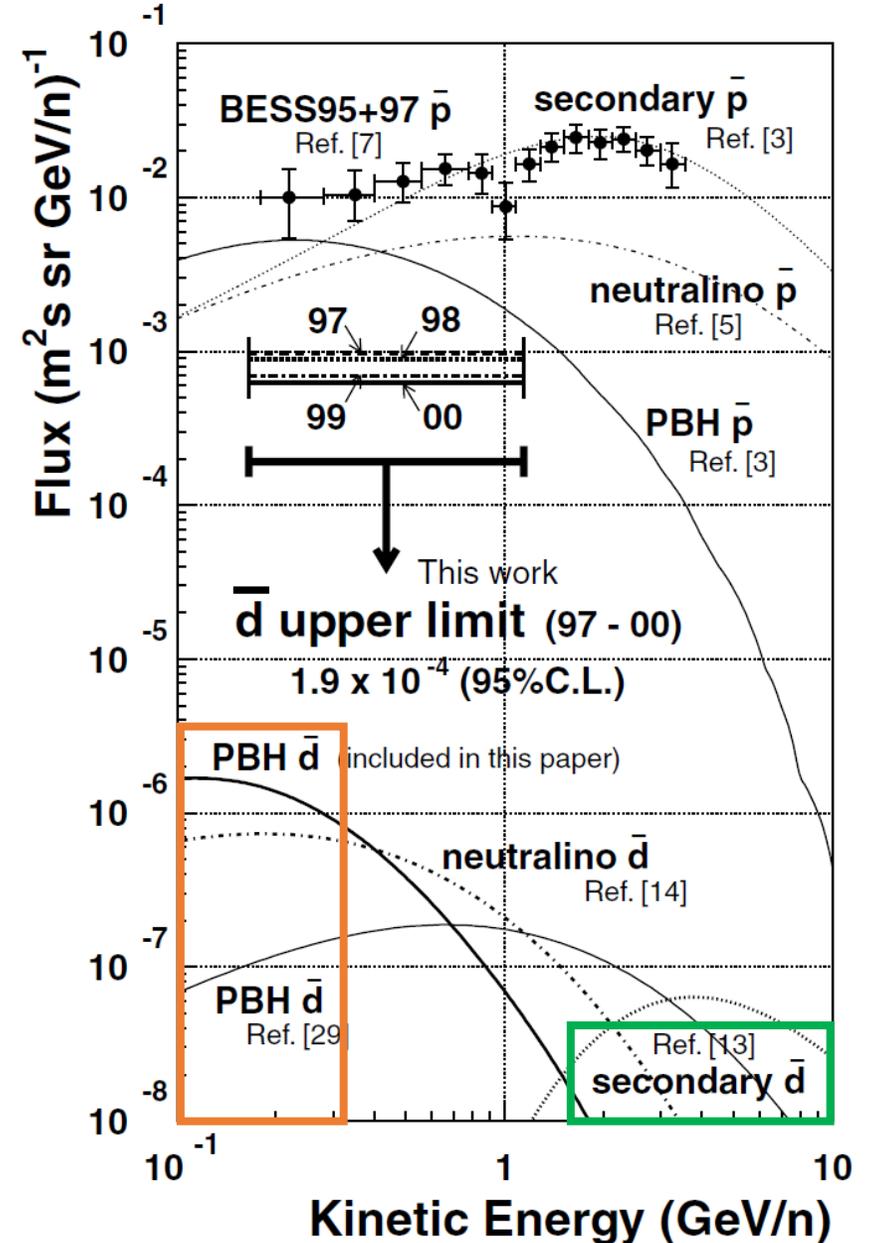
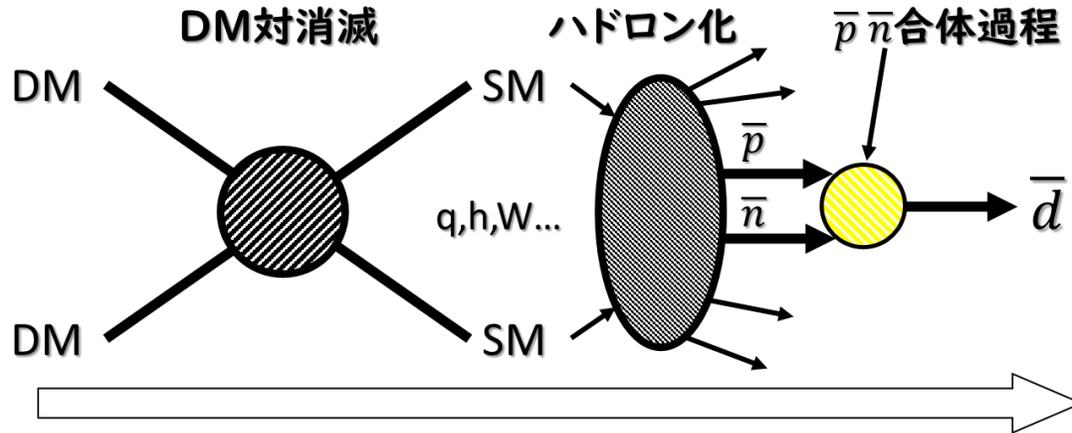
◆ GRAMS(Gamma Ray and Anti Matter Survey)実験物理目標

- MeVガンマ線観測(重元素合成プロセスの解明)
- 宇宙反粒子探索(暗黒物質の間接探索)

◆ 宇宙反粒子探索

- 反重陽子探索についてはBESS実験がLIMITを引いている
- 低エネルギー($\sim 0.2\text{GeV}/n$)の反重陽子は星間物質との相互作用で生成されるFluxよりも暗黒物質起因のFluxの割合が2桁程度大きい

→信号領域で検出できれば新物理の強い証拠



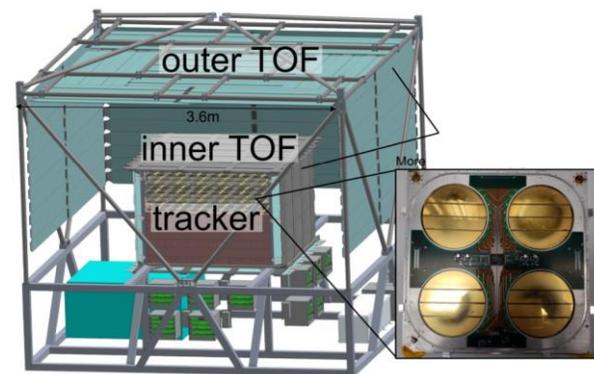
GRAMS検出器

◆GRAMS実験検出器

LArTPCをToF2層で囲む構造

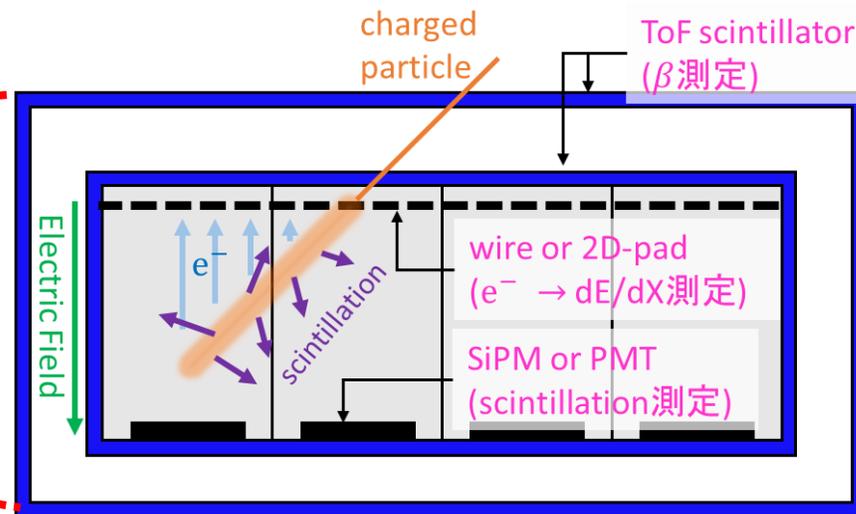
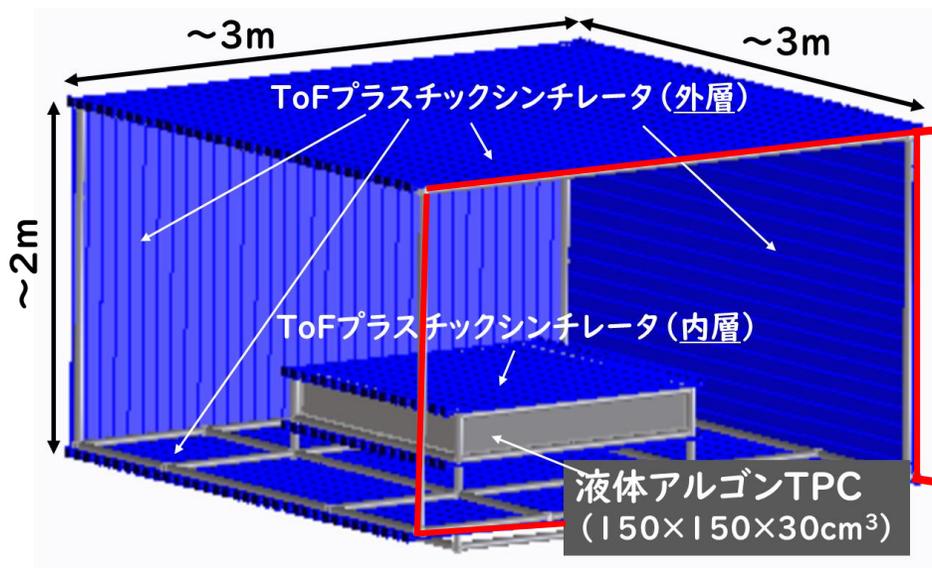
先行実験GAPS(General Anti-Particle Survey)の手法を採用→

- **ToF**：粒子速度
- **LArTPC**：エネルギーと飛跡を測定
- **磁場**：なし（反粒子信号として原子核捕獲事象を用いる）



Si検出器

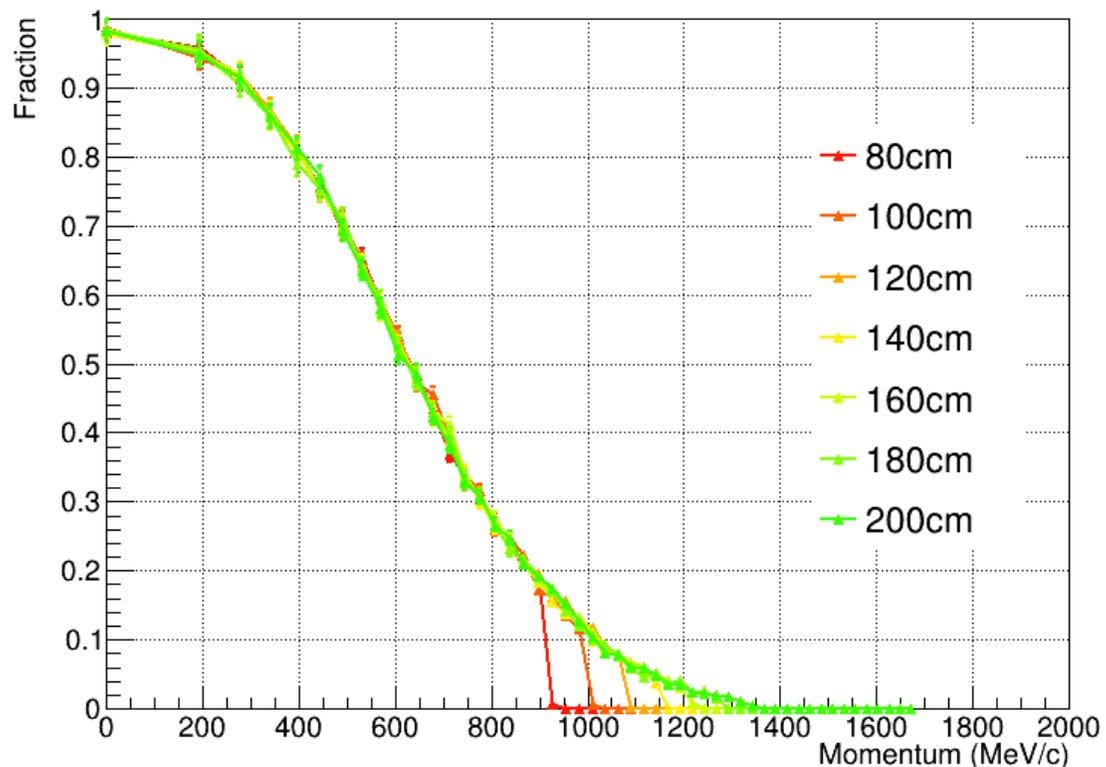
優れたエネルギー分解能
→特性X線の検出に特化



LArTPCの特徴：Dead Volumeが小さく荷電粒子の完全な飛跡再構成が可能

反陽子がCaptureされる確率

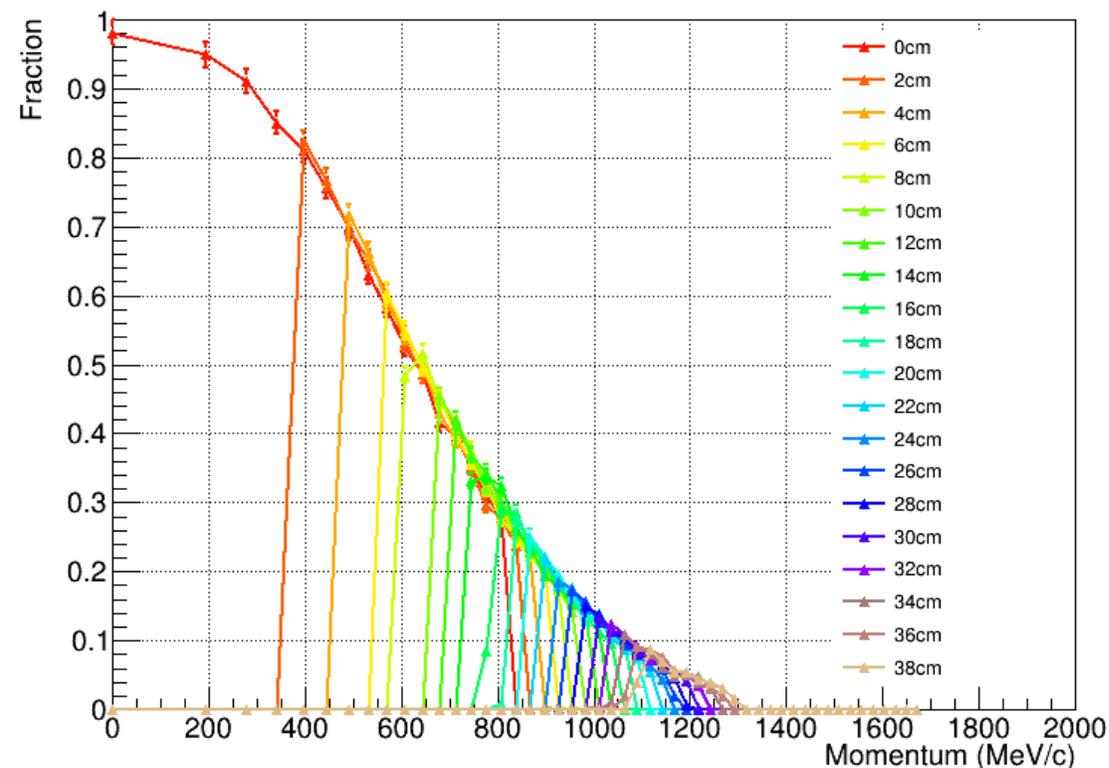
LArThickness VS Pbar_CaptureRate



Set up

鉛ガラス : なし
液体アルゴン : $30_x \times 30_y \times \text{variable}_z [cm]$
ステンレス容器 : なし

LeadGlass_Thickness VS AP_CaptureRate



Set up

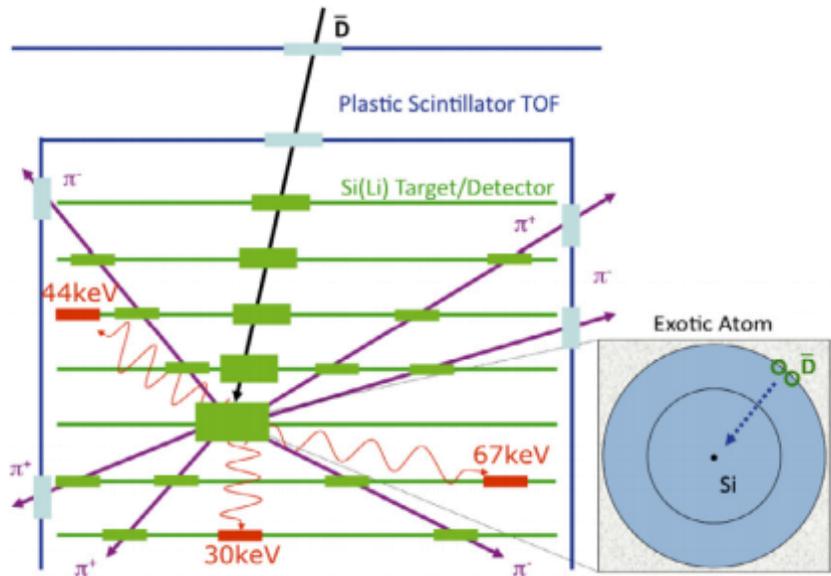
鉛ガラス : $30_x \times 12_y \times \text{variable}_z [cm]$
液体アルゴン : $30_x \times 30_y \times 60_z [cm]$
ステンレス容器 : なし

・鉛ガラスを置く前後で反陽子が捕獲される確率は変わらない

先行研究(GAPS実験)

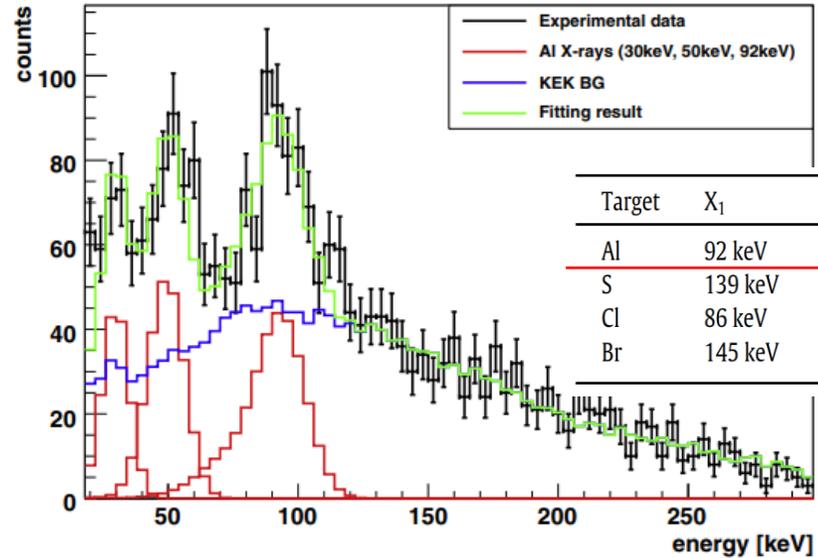
- ◆ セグメント化された多層Si検出器とTOFによる**特性X線**や**対消滅後のHadron**の検出に特化した反重陽子探索実験

- ◆ 反陽子の捕獲によるX線に関してはKEKのビームテストで確認されている(原子核捕獲事象の有力な証明の一つ)



GAPS検出器概要

(T. Aramaki, Astroparticle Physics 49 (2013) 52-62)



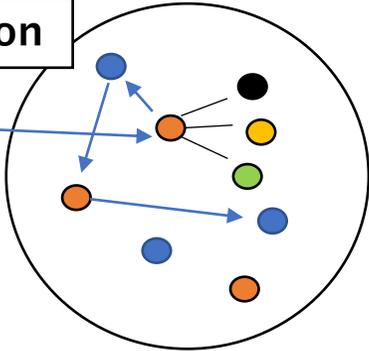
KEKのBeam testで実際にX線が観測された結果
(標的原子: Al, 入射粒子: 反陽子)

- ◆ GRAMS実験はGAPS実験の手法を採用
→ LArTPCを用いたGRAMS実験は不感領域が少ないため対消滅後のHadronの完全な飛跡再構成により反粒子を同定できる

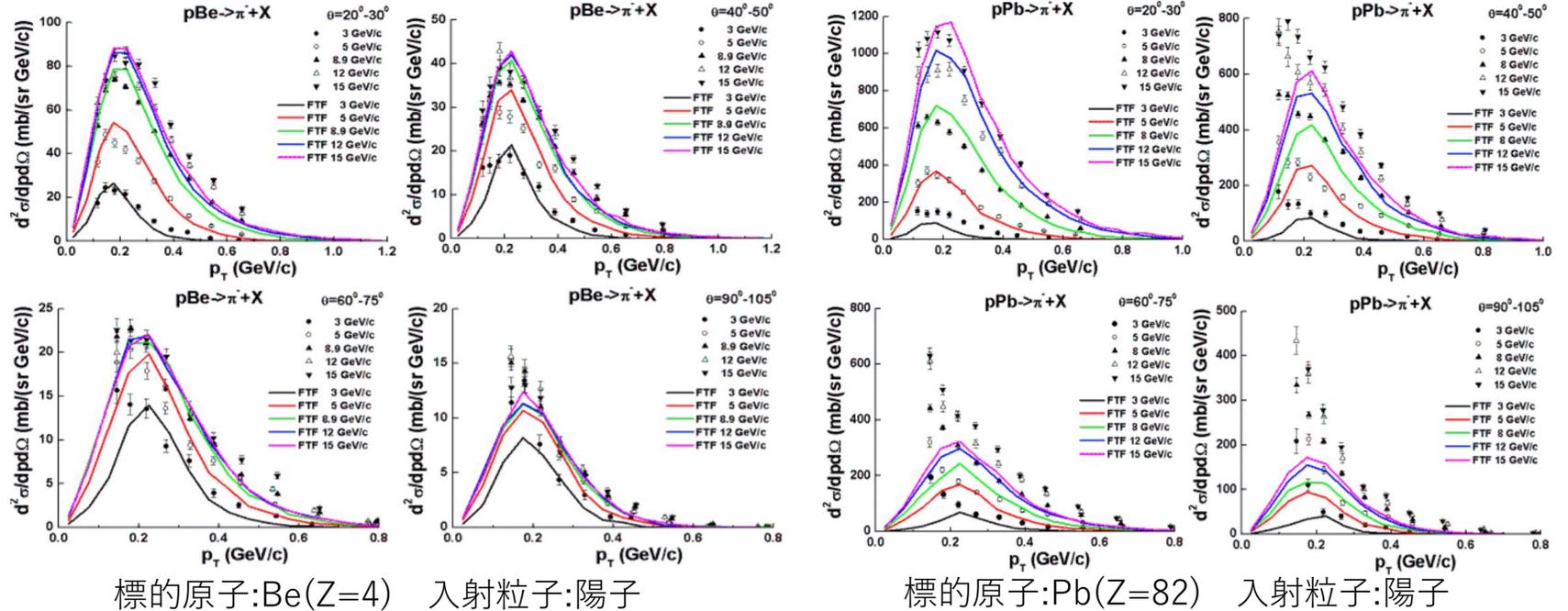
多重ハドロン生成

GEANT4で原子核捕獲事象に使われるモデル(FTF(Fritiof) model)

Incident hadron



✓ 入射したハドロンが核内で非弾性散乱, 回折, 対消滅等を行うことによってクォークの交換が行われ, ハドロンが生成されるモデル



モデルにより再現される放出角度別の π 粒子の運動量

Vladimir UZHINSKY, Development of the Fritiof Model in Geant4, October 17-21, 2010

但し, $\pi^\pm p, K^\pm p, pp, p\bar{p}$ の相互作用による粒子の生成を前提としたモデルのため, FTFモデルを用いたGEANT4による反重陽子の原子核捕獲事象の妥当性は自明ではない

GEANT4 Event Log

◆ 粒子の反応座標, Kinetic Energy, Deposit Energy, ステップサイズ, 反応事象名の詳細

```

*****
* G4Track Information: Particle = anti_deuteron, Track ID = 1, Parent ID = 0
*****
Step#  X(mm)  Y(mm)  Z(mm) KinE(MeV)  dE(MeV) StepLeng TrackLeng  NextVolume ProcName
  0      0      0      0          1          0          0          0      World   initStep
  1      0      0      0.0359      0          1  0.0363  0.0359  Detector  hIoni
  2      0      0      0.0359      0          0          0  0.0359  Detector  hFritiofCaptureAtRest
:----- List of 2ndaries - #SpawnInStep= 15(Rest=15,Along= 0,Post= 0), #SpawnTotal= 15 -----
:      0      0      0.0359  0.00464          e-
:      0      0      0.0359  0.0521          gamma
:      0      0      0.0359  0.0442          gamma
:      0      0      0.0359  0.126           e-
:      0      0      0.0359  0.626          gamma
:      0      0      0.0359  38.9          eta_prime
:      0      0      0.0359   71          kaon+
:      0      0      0.0359  188          pi0
:      0      0      0.0359  64.2          kaon-
:      0      0      0.0359  37.9          pi+
:      0      0      0.0359  43.2          pi0
:      0      0      0.0359  237          pi0
:      0      0      0.0359  185          pi+
:      0      0      0.0359  96.7          pi-
:      0      0      0.0359  0.585          S38
:----- EndOf2ndaries Info -----

```

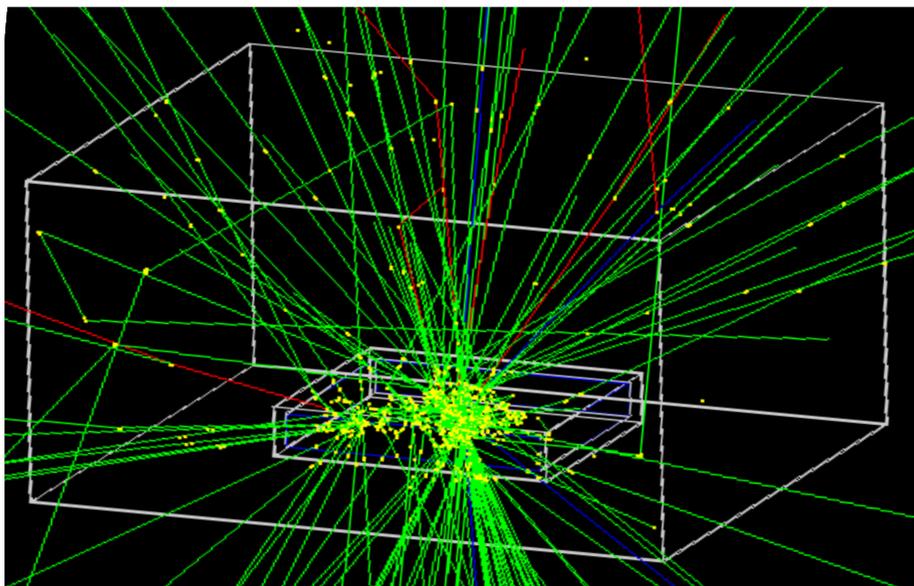


FritiofモデルによりAnti-deuteronが原子に捕獲されたという情報

エキゾチック原子の脱励起、対消滅で生じた2次粒子

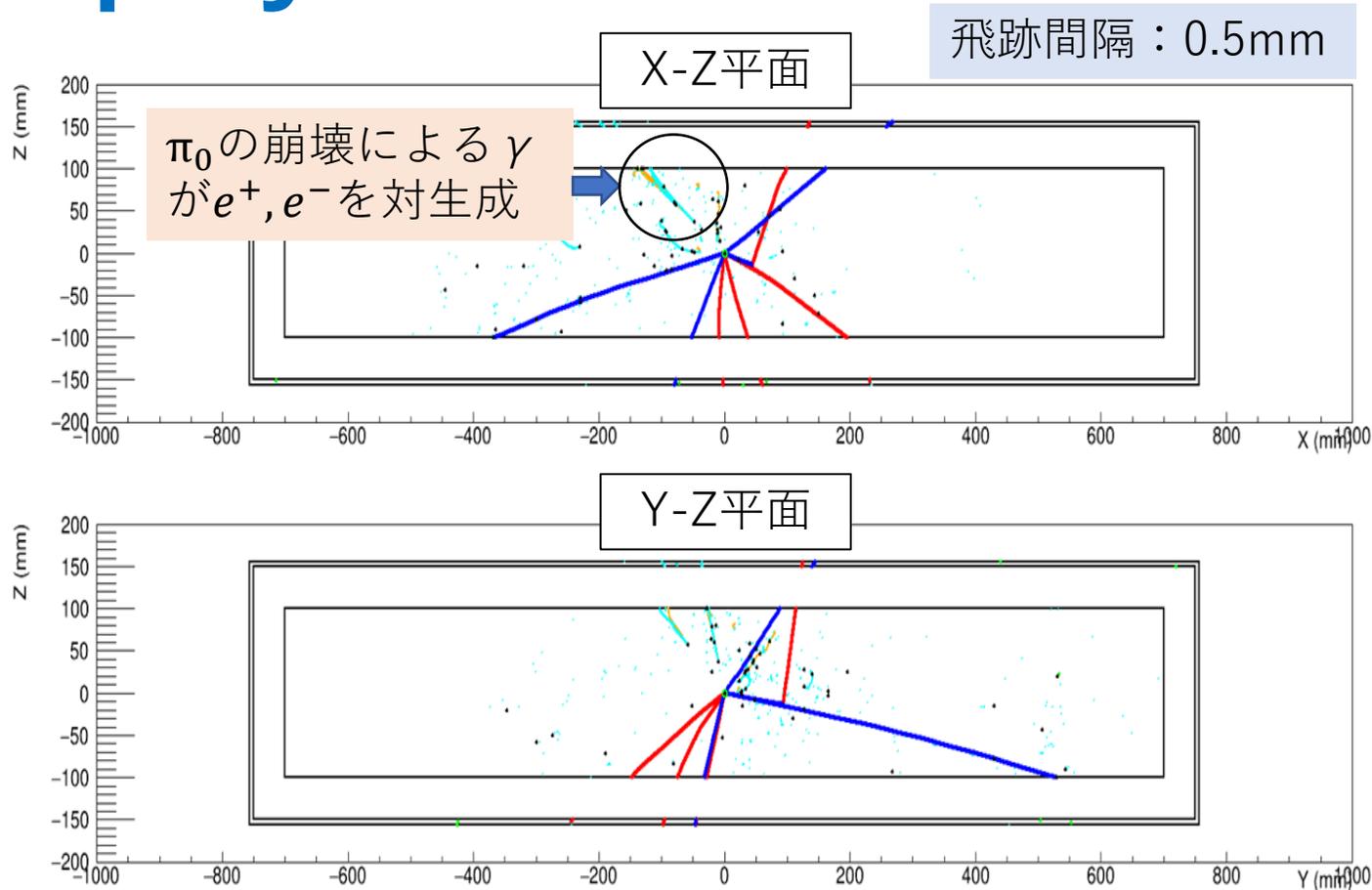
→ これらの粒子の数, エネルギーの特徴を調べる

GEANT4 Event Display



GEANT4上での反重陽子1Event
原子核捕獲事象後の2次粒子の飛跡

赤:負電荷粒子 π^- , e^- , \bar{d} , \bar{p}
青:正電荷粒子 π^+ , e^+
緑:中性粒子 γ , n



粒子別に描き直した2次粒子の2D飛跡図
(赤: π^+ 青: π^- 橙: e^+ 水: e^- 黒: γ)

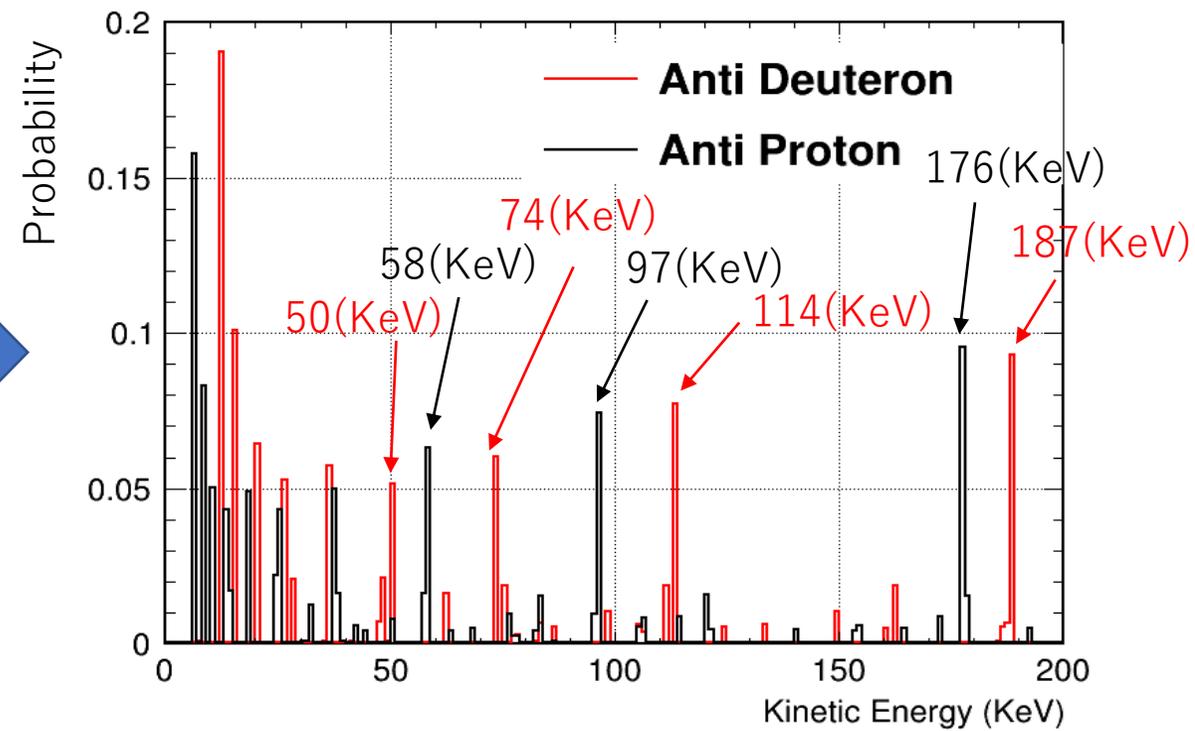
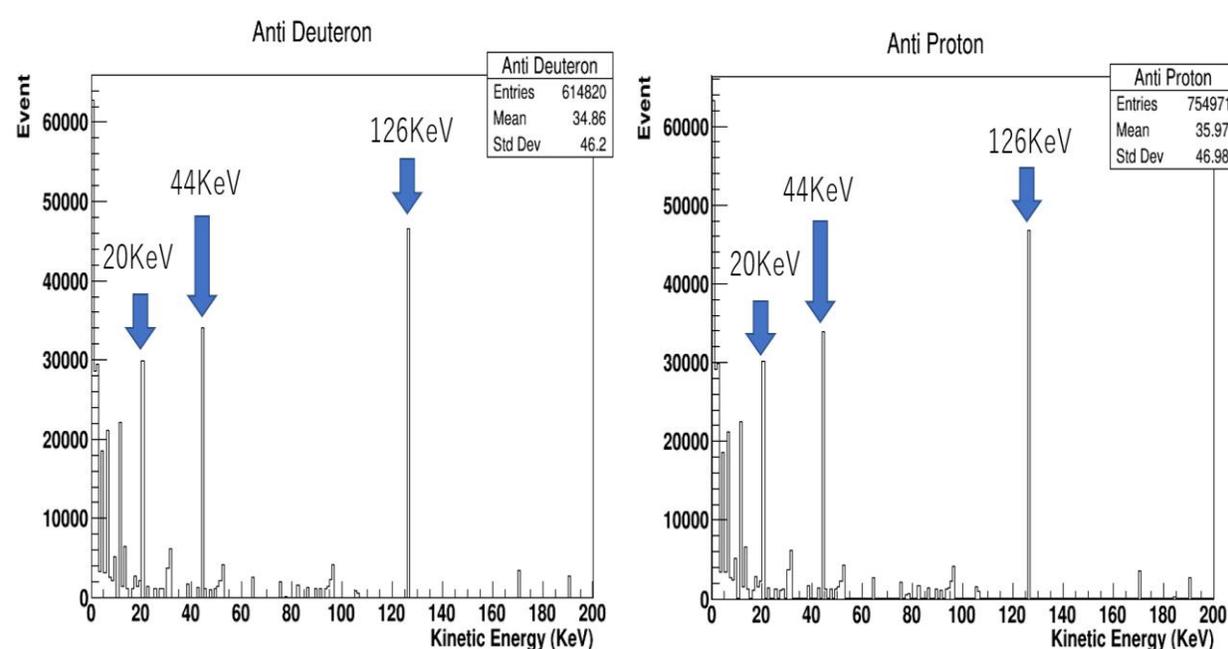
特性X線のSimulation

- ◆ デフォルト設定では反陽子, 反重陽子のX線のエネルギーは**muonic atom**のものとして放出される

遷移ごとのエネルギー (μ)	エネルギー (KeV)
$E_{2,3}$	126
$E_{3,4}$	44
$E_{4,5}$	20

遷移ごとのエネルギー (反重陽子)	エネルギー (KeV)
$E_{5,6}$	187
$E_{6,7}$	114
$E_{7,8}$	74
$E_{8,9}$	50

遷移ごとのエネルギー (反陽子)	エネルギー (KeV)
$E_{4,5}$	176
$E_{5,6}$	97
$E_{6,7}$	58



→ソースコードG4EmCaptureCascadeの**Mass**を μ 粒子から反陽子, 反重陽子のものへ変換

- ◆ 理論式に従うエネルギー分布を実装