

暗黒物質起源の宇宙線反粒子観測 に向けた液体アルゴンTPCの開発

第2回 地下宇宙若手研究会

2021/11/25-26

青山一天

早稲田大学 寄田研究室

GRAMS: Gamma-Ray and AntiMatter Survey

1

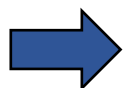
地下宇宙若手研究会

気球搭載LAr-TPC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

today's topic

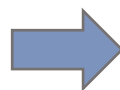
Anti-Proton/Deuteron/Helium観測



暗黒物質間接探索

MeV- γ 線

核ガンマ線の観測



重元素合成プロセスの解明
@SNR/BH/中性子性

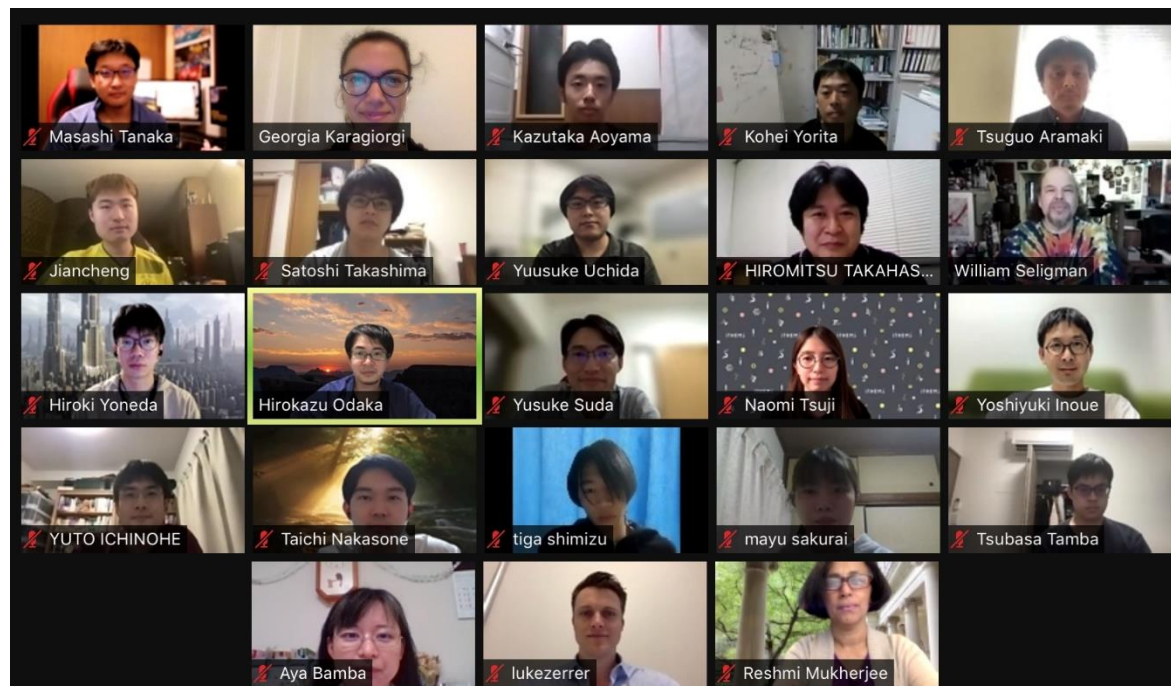


参加研究機関 (日米協力実験)

GRAMS collaboration meeting (2021 September)

- 早稲田大学 (昨年度参加)
- 東京大学
- 大阪大学
- 理研
- 立教大学
- 広島大学
- Northeastern University
- Barnard College
- Columbia University
- MIT
- Oak Ridge National Lab
- UT Arlington

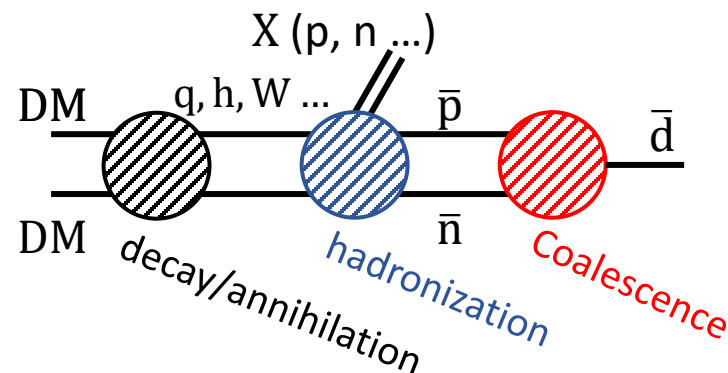
(増加中)



Anti-Deuteron

暗黒物質のプローブとして、反重陽子 (Anti-Deuteron) に特に注目

- Anti-Deuteron (\bar{d})
 - \bar{p} と \bar{n} の束縛状態
(※ e^+ は回っていない)
 - 電荷: $-1e$



□ 観測の現状

in 加速器実験

- 1965年にCERN Proton-Synchrotronで初観測
(beryllium+19.2 GeV/c proton)
- 生成モデルなどの検証が進んでいる

in 宇宙線観測

- 2021/11/26 現在で未観測
- ただし、以下の事象をソースとして飛来することが予測される
 - 2次宇宙線
 - 超新星爆発 (SNR)
 - dark matter decay/annihilation
 - ... etc

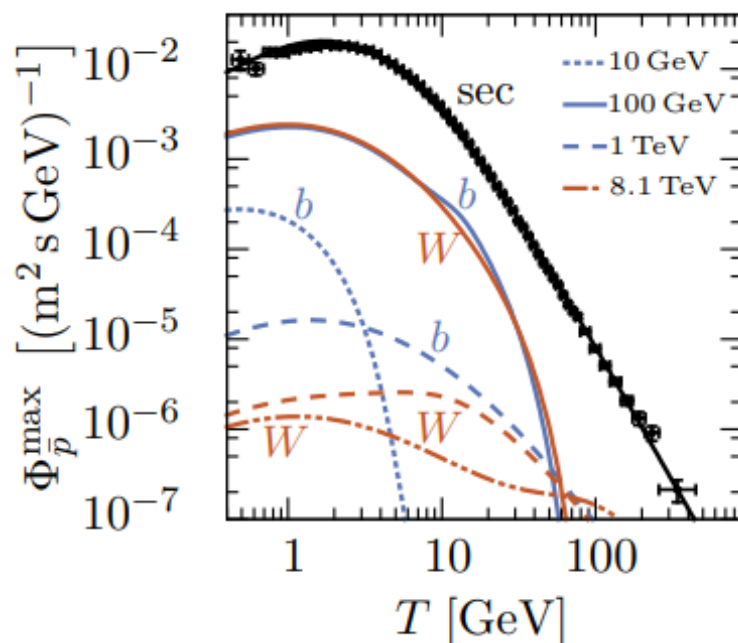
なぜAnti-Deuteronか

- e^+ , \bar{p} , γ は2次宇宙線のBGにDM由来の信号が埋もれる
→ 正確なモデルと精密観測が必要
- Anti-Deuteronは低運動エネルギーで2次宇宙線が抑制

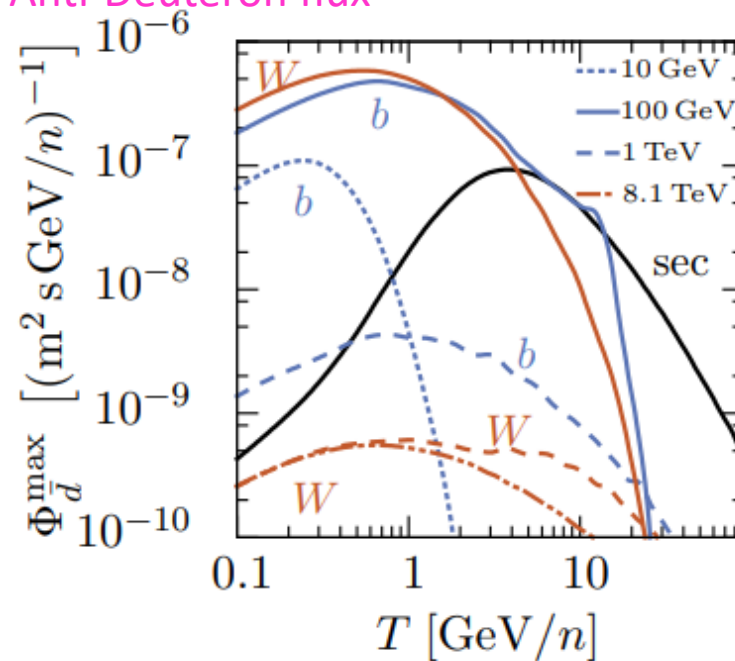
➔

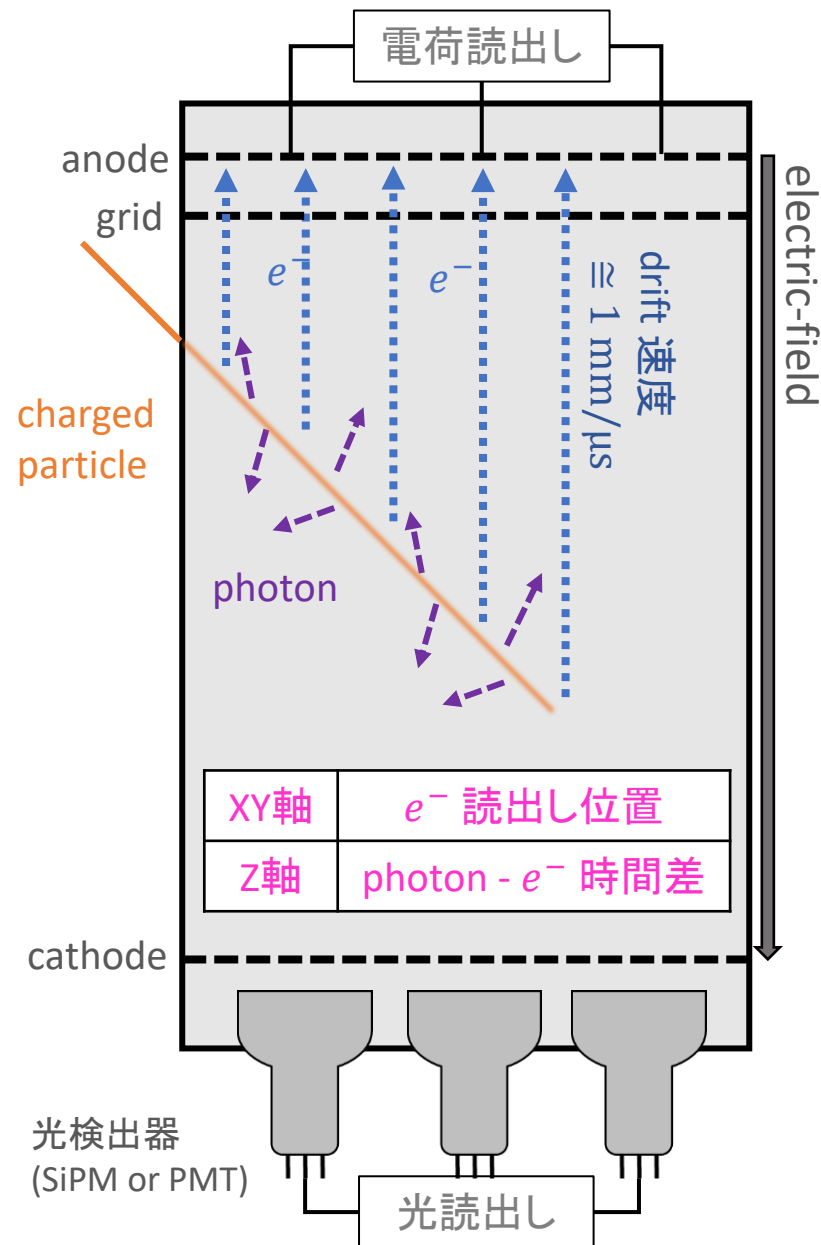
 - 0 backgroundで観測可能
 - 1 eventの観測が大きなインパクトになる

Anti-Proton flux



Anti-Deuteron flux





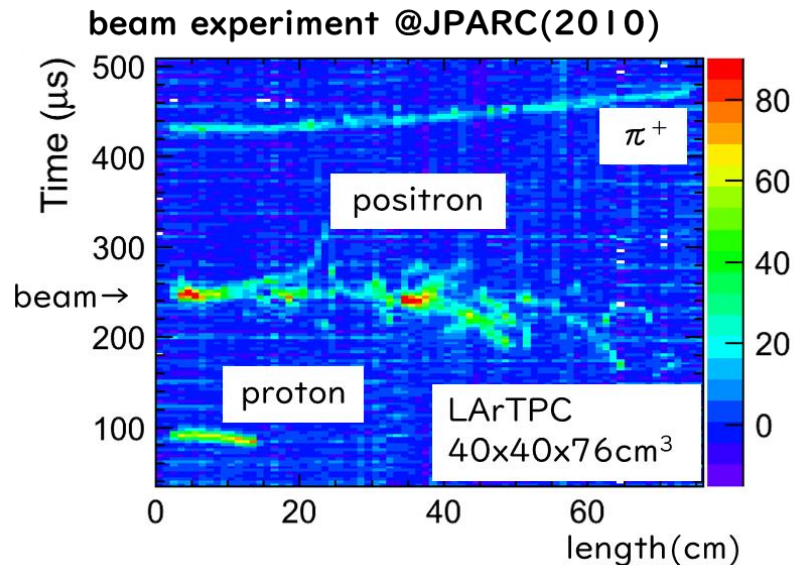
□ LAr-TPC運用の難点

- 極低温環境の維持 (沸点-186°C, 融点-189°C)
- 不純物がLAr信号に大きく影響する

| | |
|--|---|
| N_2 | $> 0.5 \text{ ppm} \rightarrow \text{Ar}$ 蛍光を減衰 |
| $\text{O}_2, \text{H}_2\text{O} \dots$ | ドリフト電子を吸着・減衰 $\text{O}_2 \text{ 1 ppb} \rightarrow \tau_{e^-} = 300 \mu\text{s}$ |

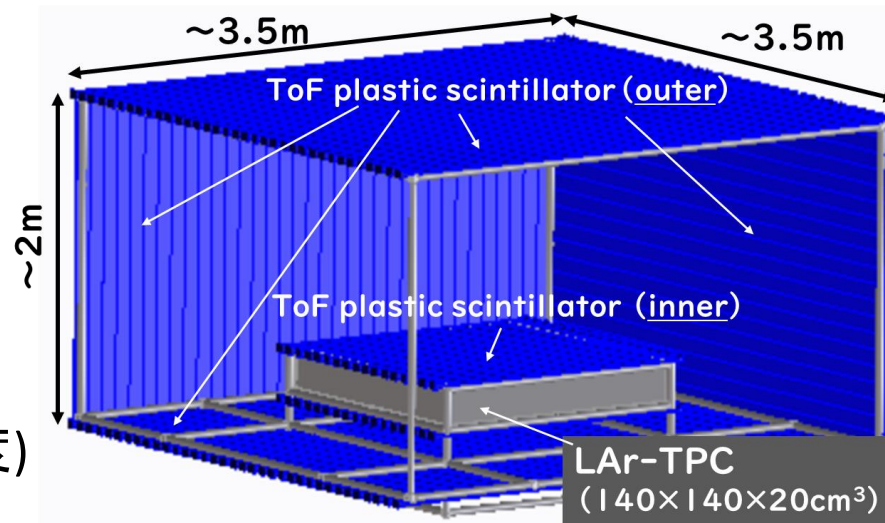
- LAr蛍光波長が短い(128 nm) \rightarrow 波長変換が必要

□ trackingとdE/dXによる粒子識別



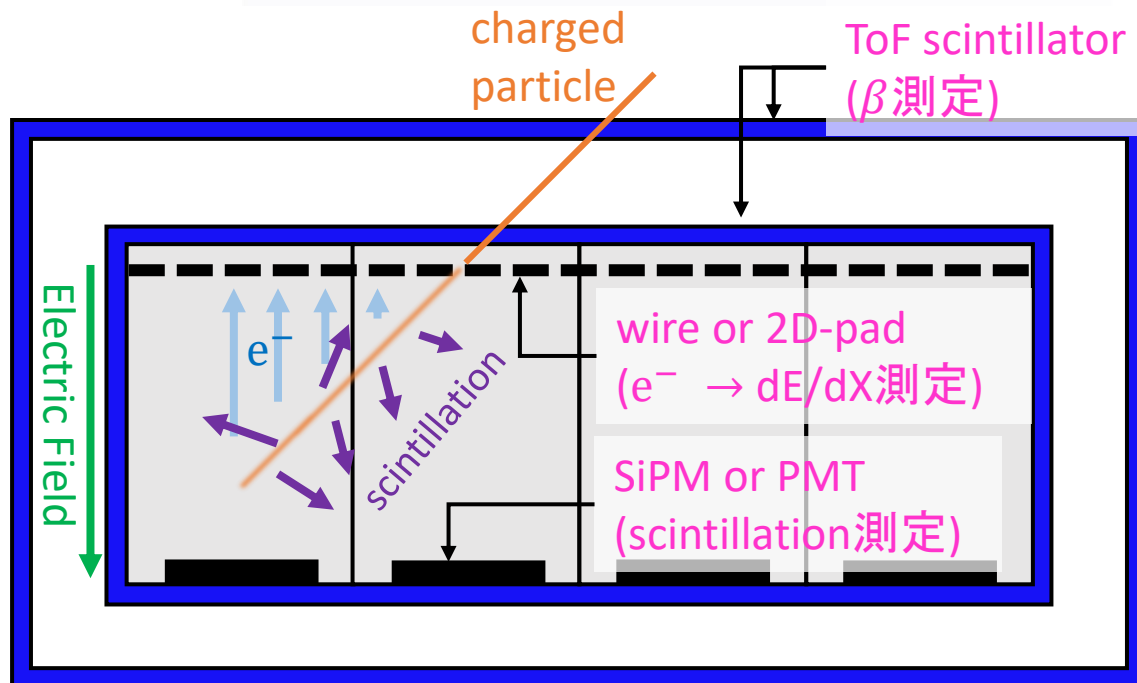
□ 検出器の構成

- long duration balloon (NASA or JAXAに依頼)
- 2層のToF plastic scintillator
- LAr-TPC ($140 \times 140 \times 20 \text{ cm}^3$ 程度)



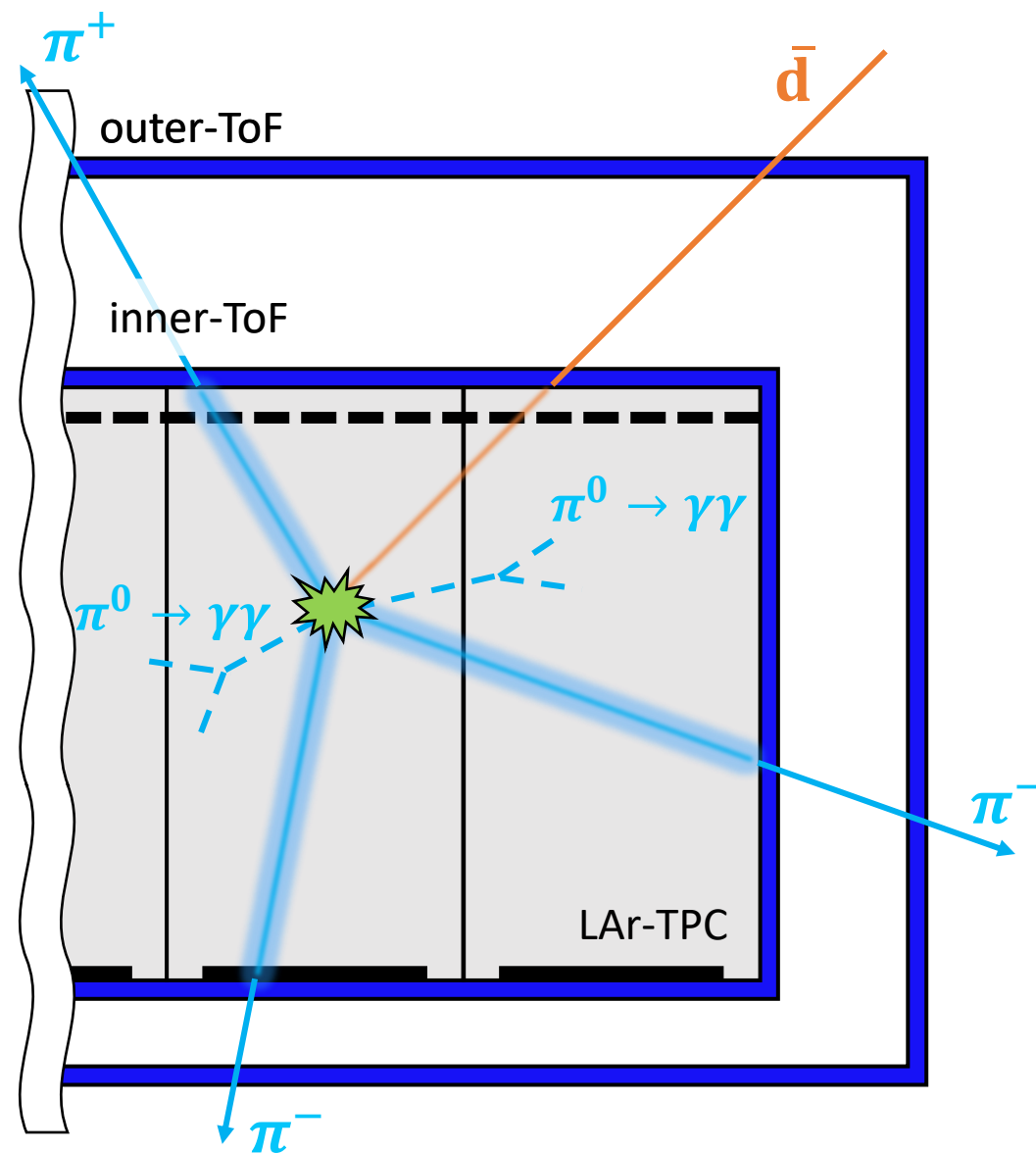
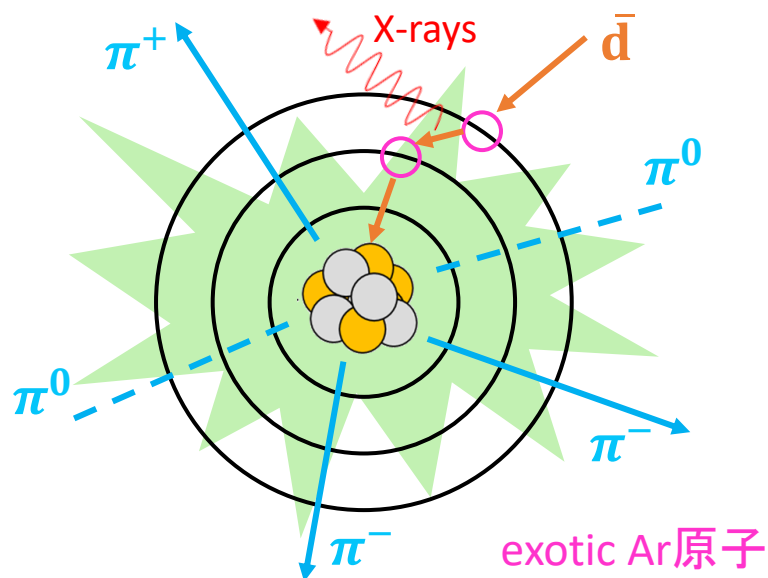
□ LAr-TPC

- 1相型
- 荷電粒子は飛跡再構成。ガンマ線に対してはComptonカメラとして機能
- 光学的にsegment → e^- がドリフト中にpileupするのを抑制



検出器とAnti-Deuteronの反応 (Golden-event)

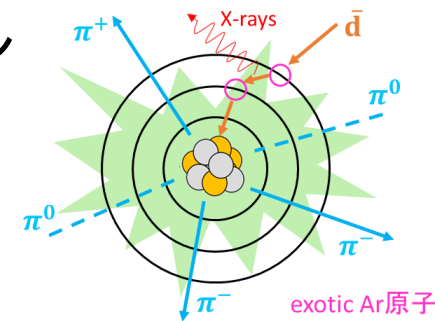
1. ToF scintillator
 - β 測定
2. ionization/excitation of LAr
 - tracking \rightarrow dE/dX
3. Ar原子に捕獲
 - \rightarrow 脱励起 w/特性X線
4. Ar核子と対消滅 \rightarrow ハドロン生成



Production from exotic Ar atom

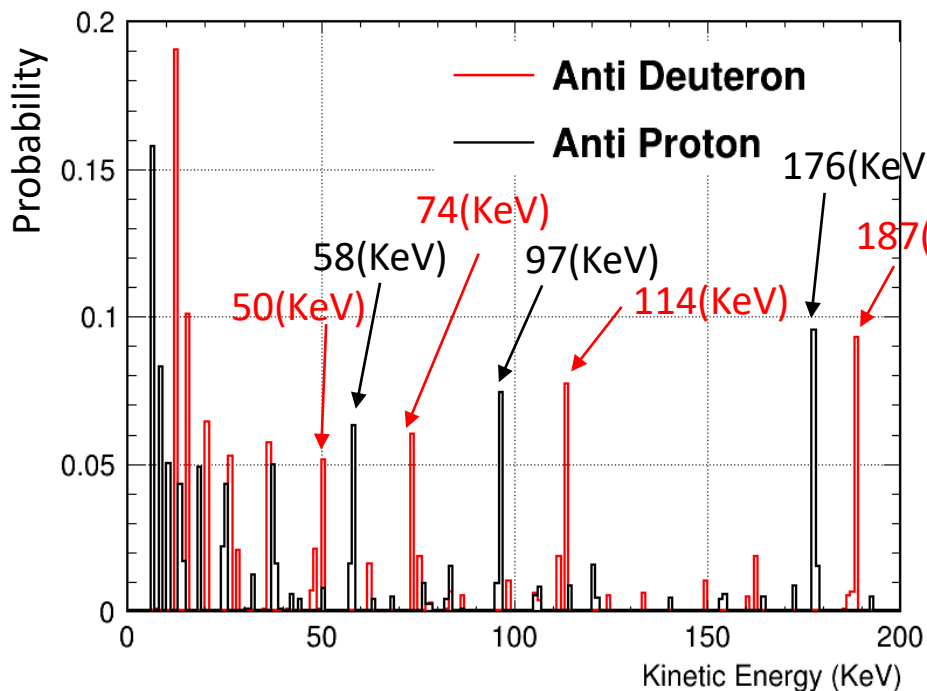
exotic Ar原子からの放出粒子をGeant4を用いてシミュレーション

- \bar{p} と \bar{d} 異なる特性X線、 π^\pm を放出
→ PIDとして使用可能
- 検出器シミュレーションと組み合わせてPID能力を検討中

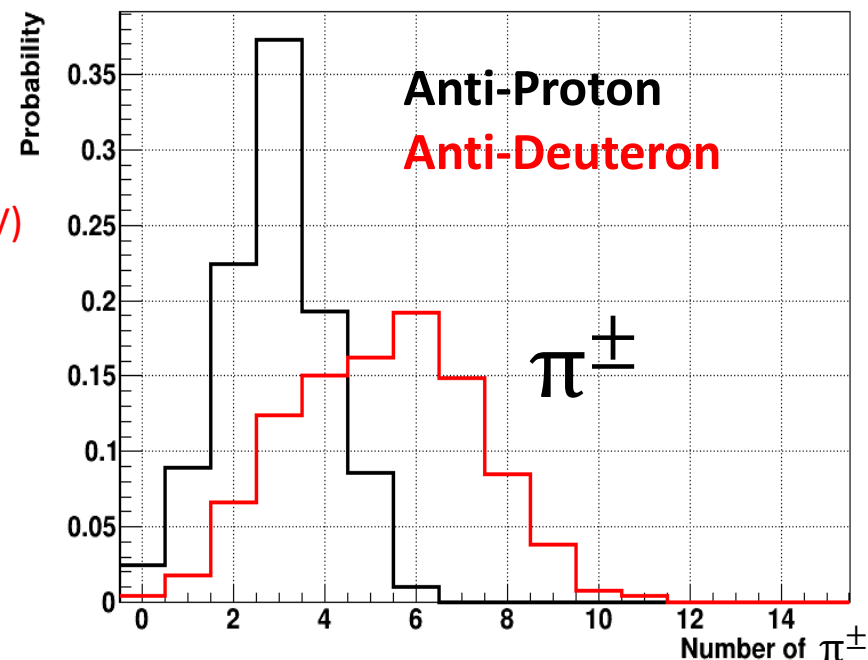


※原子核屋がモデルをよく検証しているが、LArのデータはない → 要実機検証

特性X線スペクトラム (G4EmCaptureCascade)



π^\pm Multiplicity (FTF model)



1. 地下実験で培った LAr技術を気球実験用に改良

□ LAr運用@地上→気球高度

LArの極低温維持/高純度の維持

➡ 気球環境でも使用できるように

- 気圧/温度変化や衝撃対応
- 通信(リモートコントロール)
- 電力量の削減/最適化
- データ管理

□ 信号検出の基礎技術確立

- LAr scintillation
 - 波長変換
 - 極低温駆動 photodevice
- LAr drift electron
 - wire/pad 筐体
 - electronics
- ToF scintillator

2. 反粒子(+MeV- γ 線)探索に最適化した検出器の構築

□ 検出器最適化 by simulation

\bar{d} や \bar{He} 探索でも以下を最大化する必要

- アクセプタンス
- PIDによる背景事象の分離
- pileup eventの抑制

➡ シミュレーションの情報を用いて
検出器設計を最適化

□ LAr vs 反粒子反応の検証

反粒子 vs LAr反応は実機検証されていない

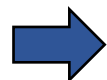
➡ ビームラインを用いた試験の
検討を始めている

- \bar{d} 生成やAr反応シミュレーション
- 使用可能な加速器調査

1. 地下実験で培った LAr技術を気球実験用に改良

□ LAr運用@地上→気球高度

LArの極低温維持/高純度の維持



気球環境でも使用できるように

- 気圧/温度変化や衝撃対応
- 通信(リモートコントロール)
- 電力量の削減/最適化
- データ管理

□ 信号検出の基礎技術確立

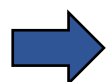
- LAr scintillation
 - 波長変換
 - 極低温駆動 photodevice
- LAr drift electron
 - wire/pad 筐体
 - electronics
- ToF scintillator

2. 反粒子(+MeV- γ 線)探索に最適化した検出器の構築

□ 検出器最適化 by simulation

\bar{d} や \bar{He} 探索でも以下を最大化する必要

- アクセプタンス
- PIDによる背景事象の分離
- pileup eventの抑制



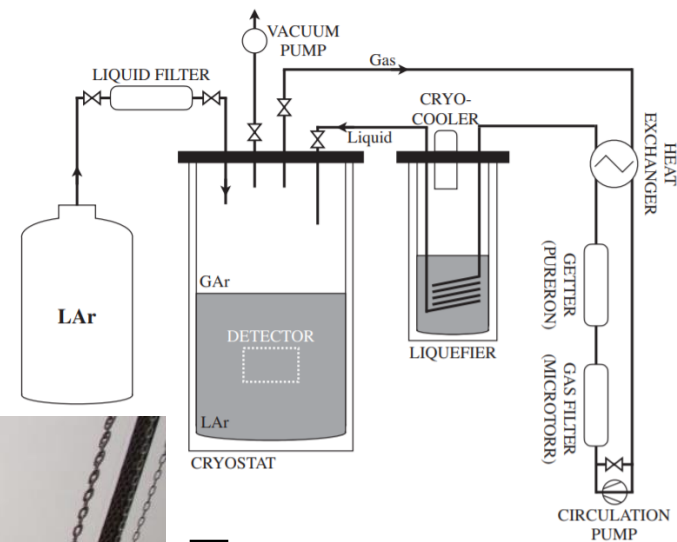
シミュレーションの情報を用いて
検出器設計を最適化

□ LAr vs 反粒子反応の検証

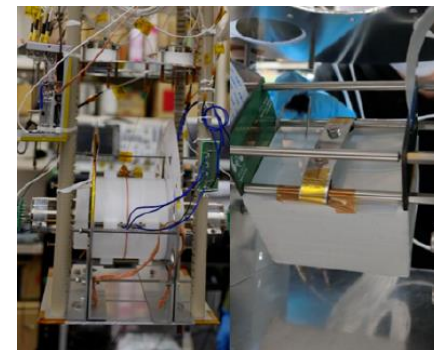
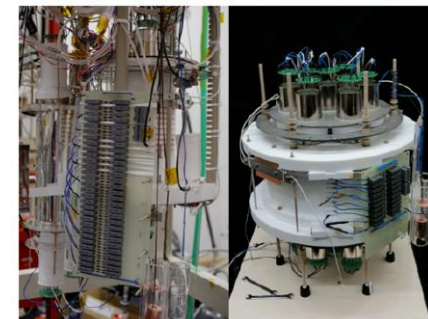
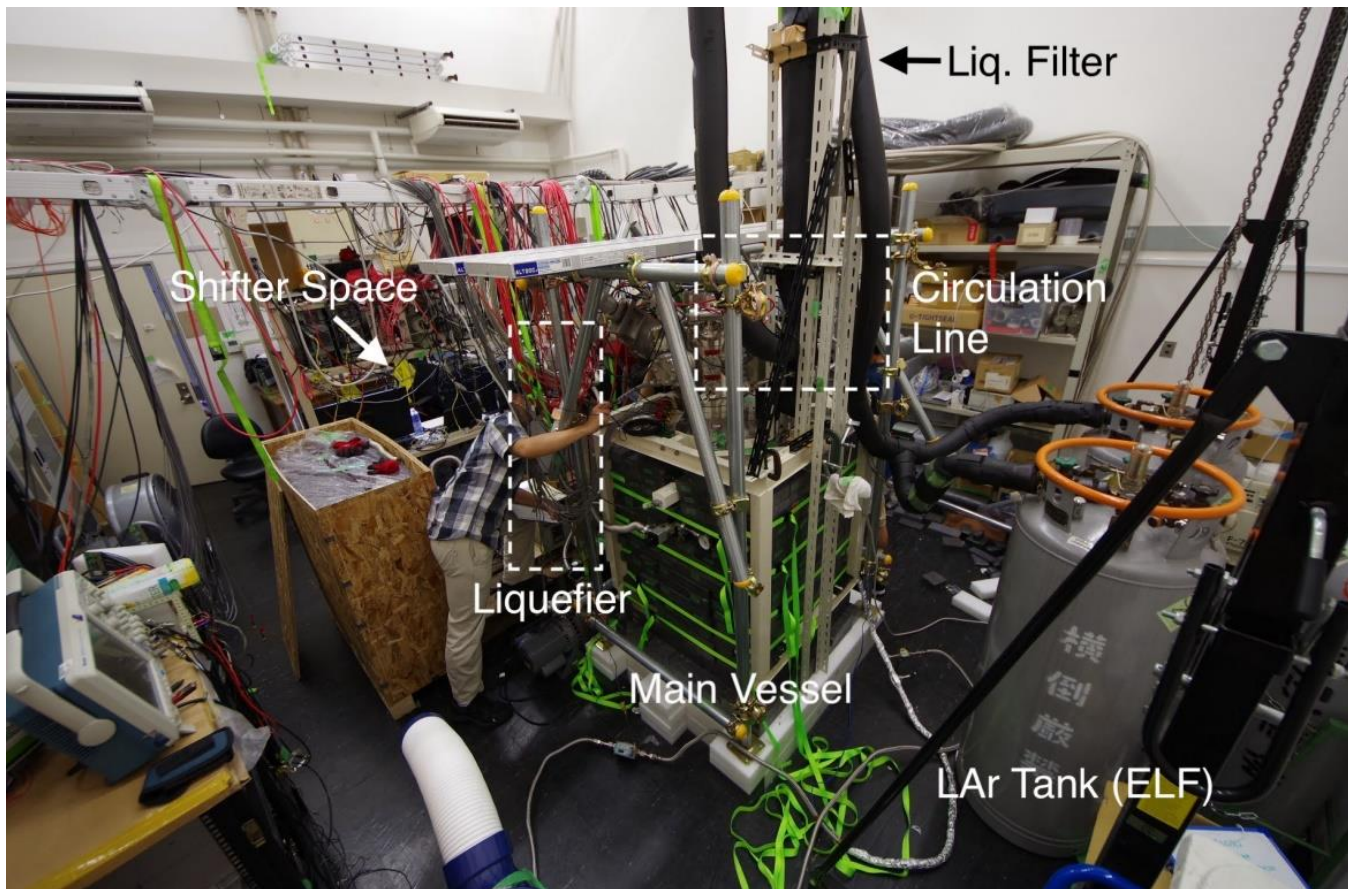
- 反粒子 vs LAr反応は実機検証されていない
- ビームラインを用いた試験の検討を始めている
- \bar{d} 生成やAr反応シミュレーション
 - 使用可能な加速器調査

LAr setup at 早稲田大学

- 真空断熱容器や冷凍機
+ 温度、圧力等のモニター系

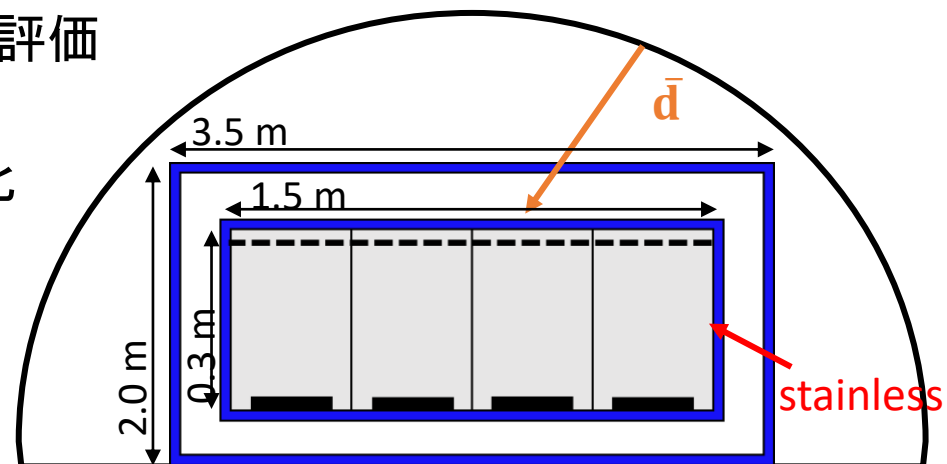


- detectors

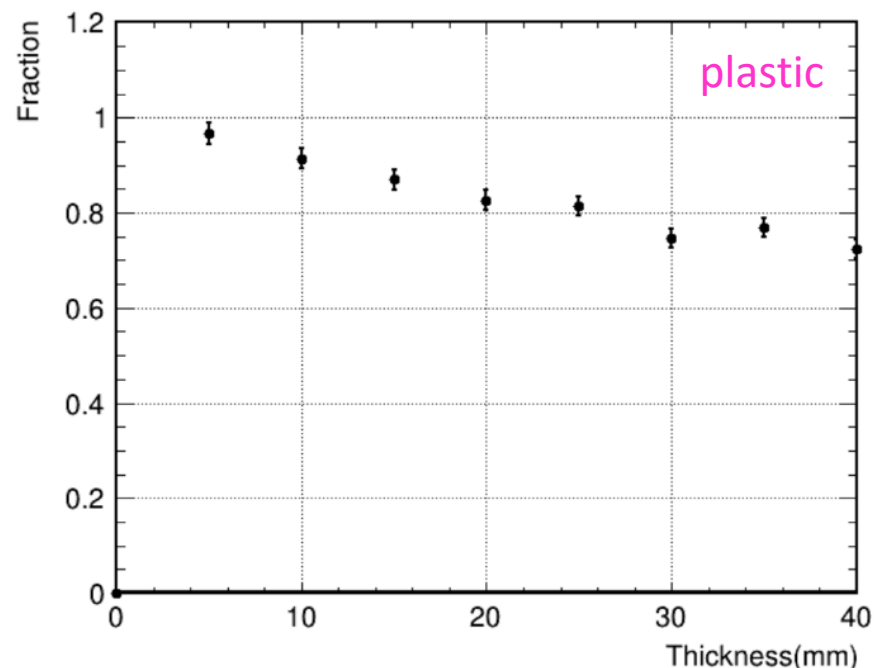
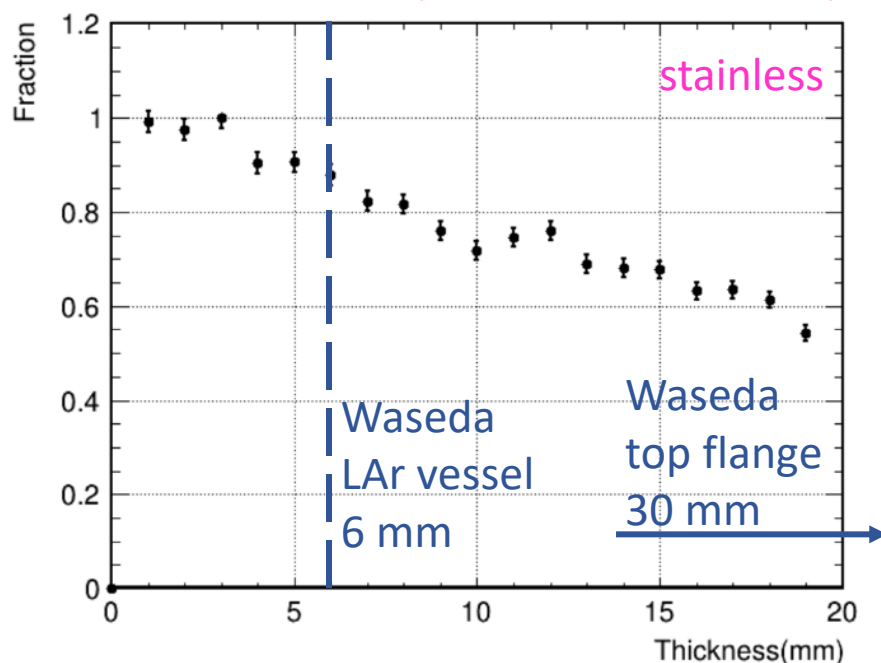


周辺部材で止まる確率 (Anti-Deuteron)

- Geant4を用いてLArに到達する確率を評価
 - 検出器を覆う半球殻上から入射
 - ToF, LArステンレス容器の厚さを変化
- 検出器設計上のトレードオフ
 - ToF厚 \leftrightarrow 強度、時間分解能
 - 容器厚 \leftrightarrow 強度

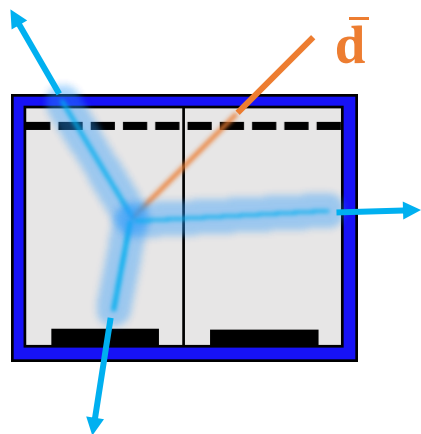


LArに到達する確率 (\bar{d} , 150 MeV/nucleon)

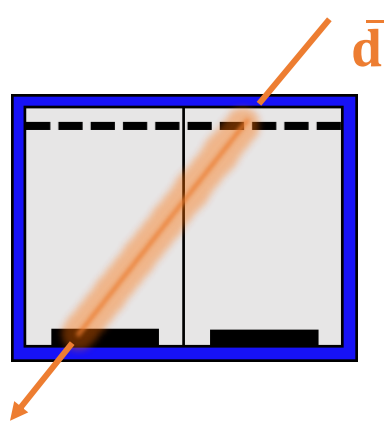


LAr-TPCとAnti-Deuteronの反応 (実際)

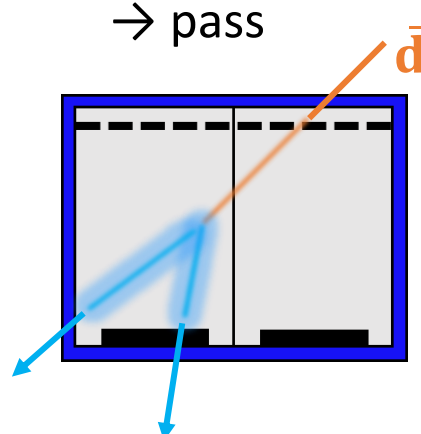
1. capture



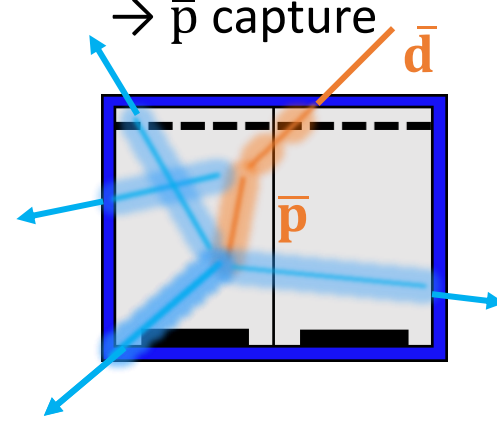
2. pass



3. inelastic
→ pass



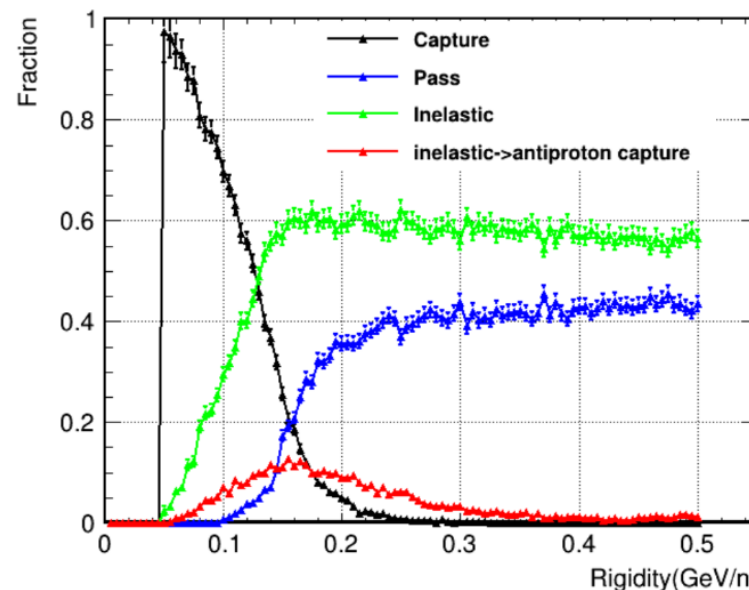
4. inelastic
→ p-bar capture



□ LAr-TPC内の主な反応 (140 × 140 × 20 cm³)

- 高エネルギー側で inelastic の確率が高い

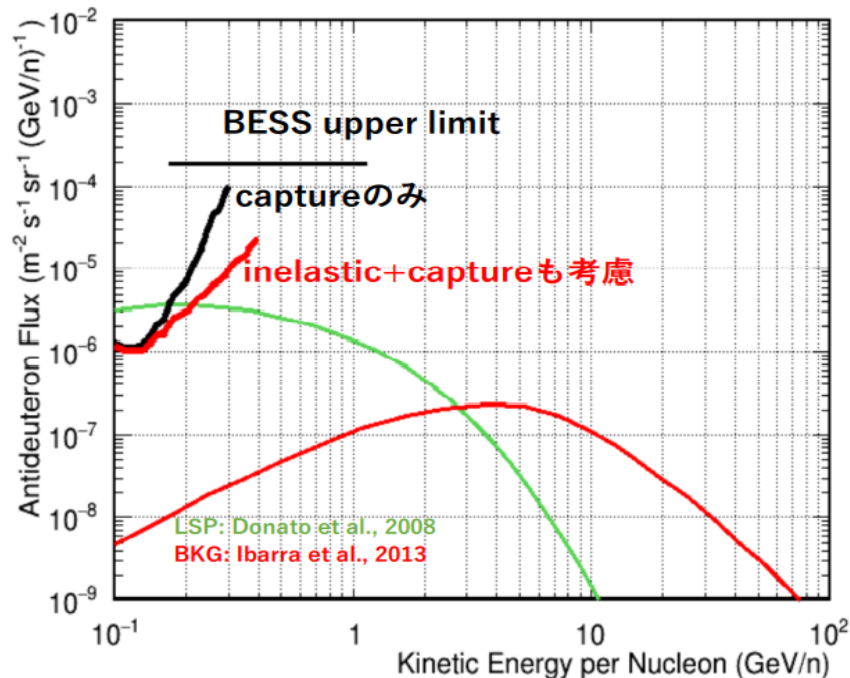
| | |
|---------------------------------|-----------------------------------|
| 1. capture | golden event |
| 2. pass | Deuteron/Anti-Deuteronを 分離できない |
| 3. inelastic → pass | |
| 4. inelastic → p-bar capture | 全てのtrackを 再構成できれば救える |



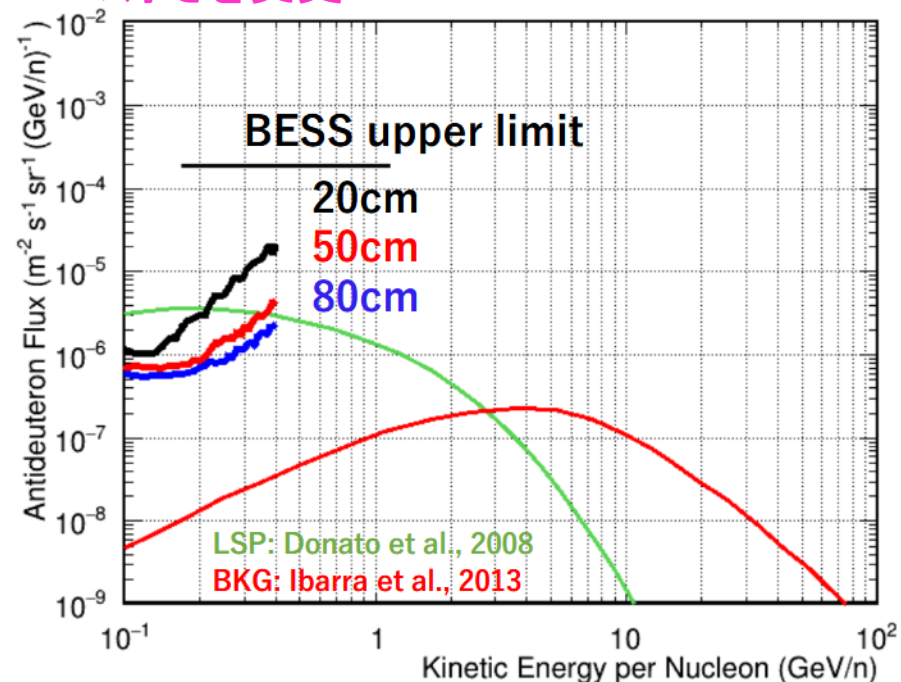
理想的な検出感度

- 検出器の条件
 - 観測時間 = 30日間
 - LAr容器 = 6 mm, ToF = 6 mm × 2層
 - 粒子識別能力 = 100%
 (※LAr-TPC内に5 cm以上飛跡を残すことを要求)
- 理想的な条件では、DM fluxに到達可能
→ 背景事象などを考慮した現実的な感度を算出中

LAr: $120 \times 120 \times 20 \text{ cm}^3$



LArの厚さを変更



まとめと今後の展望

□ まとめ

- GRAMS実験は、「宇宙反粒子 (\bar{d} , $\bar{\text{He}}$)」と「MeV- γ 線」の探索を目指し、LAr-TPCを用いて南極気球実験を行う
- \bar{d} , $\bar{\text{He}}$ をプローブとした暗黒物質探索では、星間物質由来の背景事象が少なく、0 Backgroundの探索が可能
- 今年度から、気球実験に向けて準備を開始した

□ 今後の展望

- まずは、小型最低限のLAr-TPCを用いて、工学フライトを行うことを目指す (@大樹町?)

バックアップ
