

GRAMS実験に向けた 気球搭載型液体アルゴンTPCの開発

ICEPPシンポジウム
早稲田大学 修士1年
2022/02/21

櫻井真由

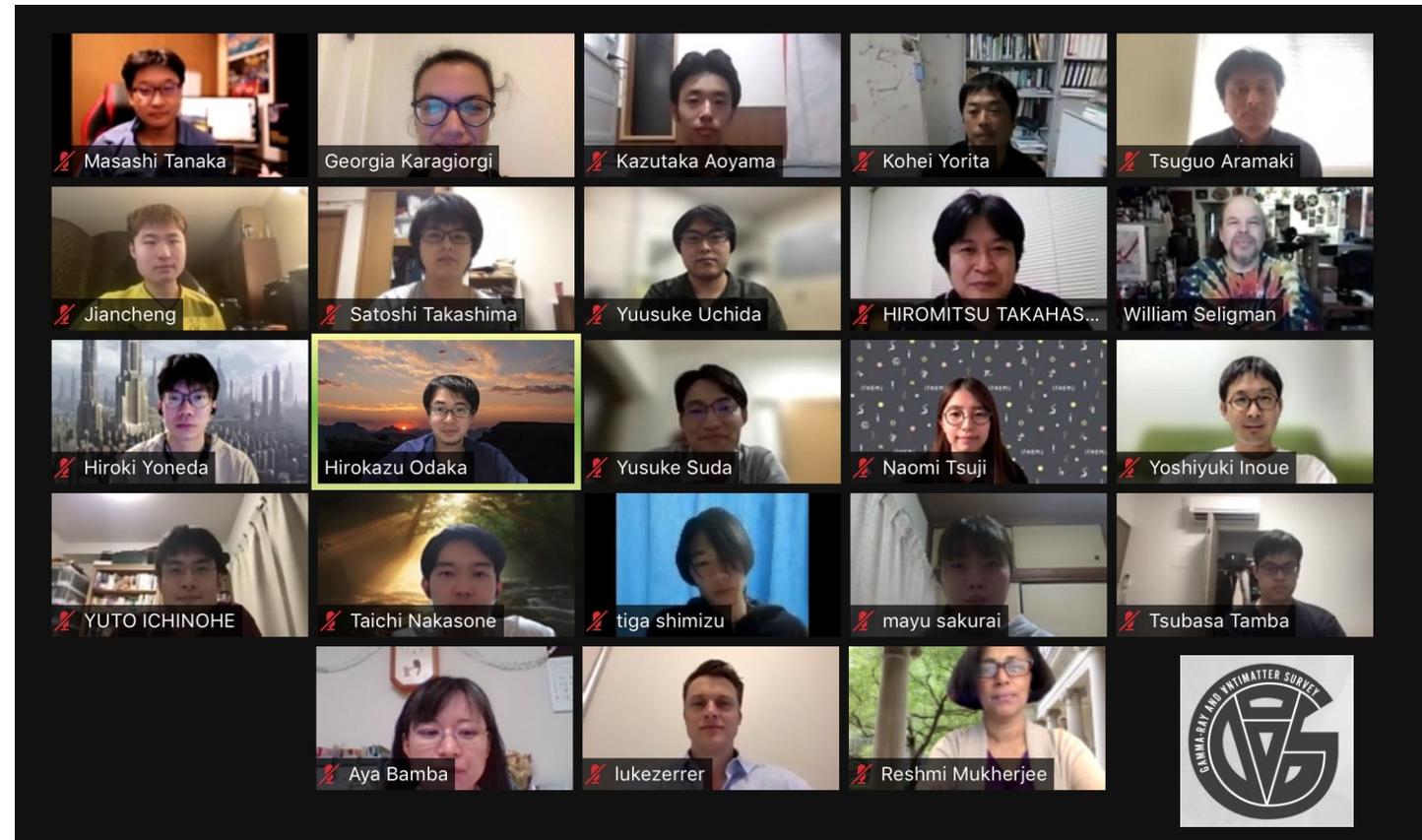
GRAMS実験(Gamma-Ray and AntiMatter Survey)

物理目標

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

GRAMSコラボレーション

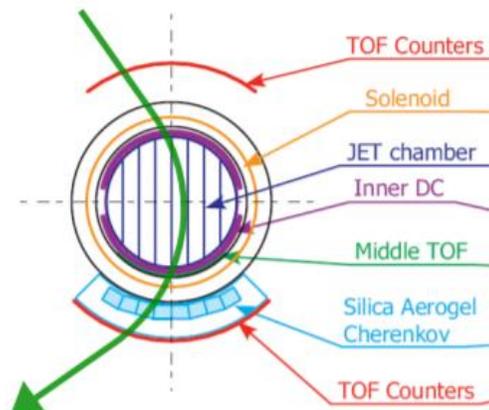
- 日米協力実験
- 参加研究機関
 - 早稲田大学
 - 東京大学
 - 大阪大学
 - 理研
 - 立教大学
 - 広島大学
 - Northeastern University
 - Barnard College
 - Columbia University
 - MIT
 - Oak Ridge National Lab
 - UT Arlington



宇宙反粒子観測(反陽子)

BESS実験

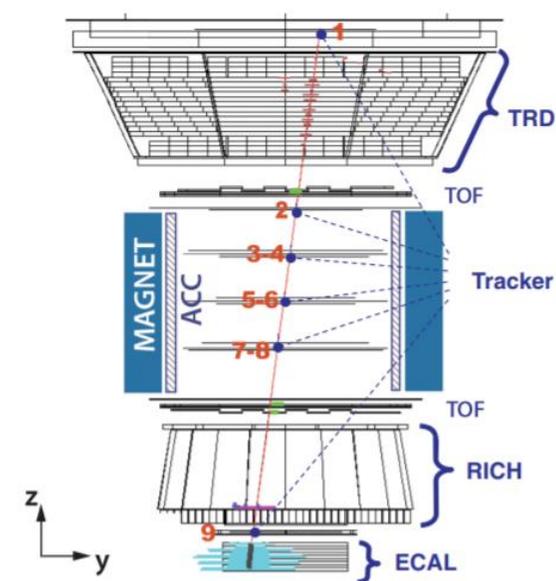
- 反粒子探索のための気球実験
- 超電導マグネットを使用
- 2004年と2007-8年に二回南極での長期フライトを実施 (BESS-Polar, BESS-Polar II)



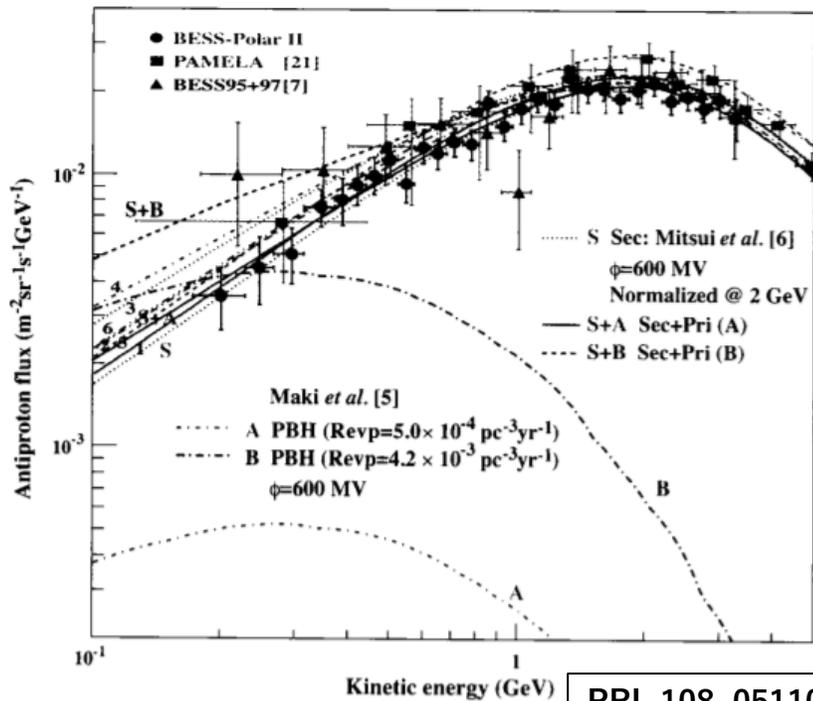
BESS実験の検出器概要

AMS-02実験

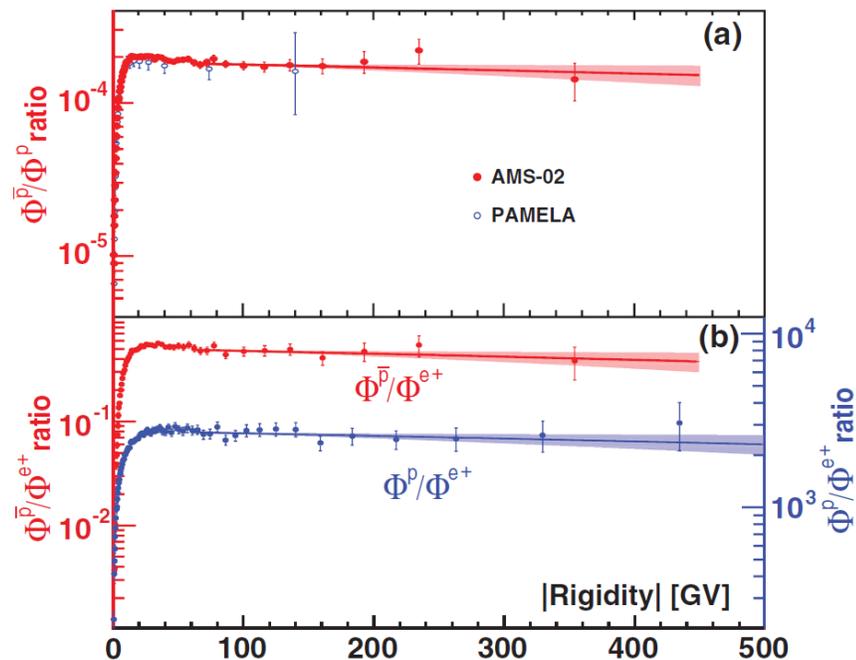
- 反粒子探索を行う衛星実験
- 常伝導マグネットを使用
- 2011年からISSで観測開始



AMS-02実験の検出器概要



PRL 108, 051102

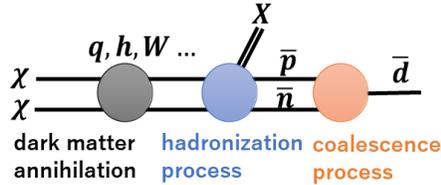


PRL 117, 091103

宇宙反粒子探索(反重陽子)

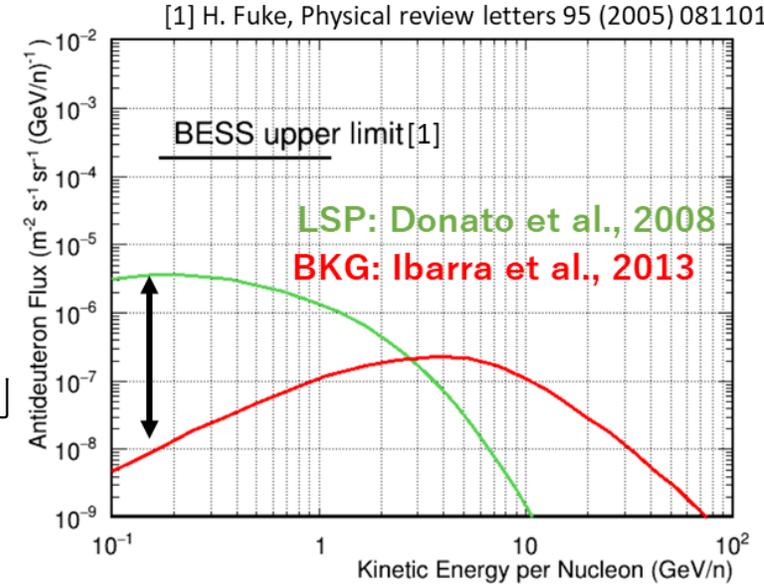
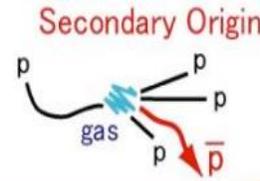
一次起源反粒子(信号事象)

- DMの対消滅
- PBHの蒸発
- 超新星爆発



二次起源反粒子(背景事象)

- 一次宇宙線と星間物質の相互作用
- $$p(CR) + H(ISM) \rightarrow p + H + p + n + \bar{p} + \bar{n}$$



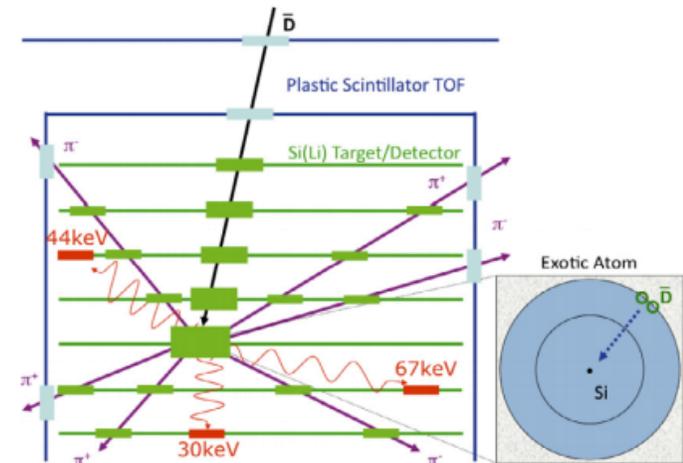
- 運動学的な抑制を受けない
- 二次起源反粒子と区別できる可能性

→運動学的な制限より低エネルギーは抑制

- 宇宙反重陽子は未だ検出されていない
- 予測される信号事象が二次起源反粒子のフラックスより3桁程度高い
- 1eventでも観測出来たら新物理の強い証拠となる

GAPS実験

- 反粒子観測のための気球実験
- Si飛跡検出器+プラスチックシンチレータ
- 原子核捕獲事象の観測により反粒子を同定
- 2022年にNASAの南極周回気球で長時間フライトを予定

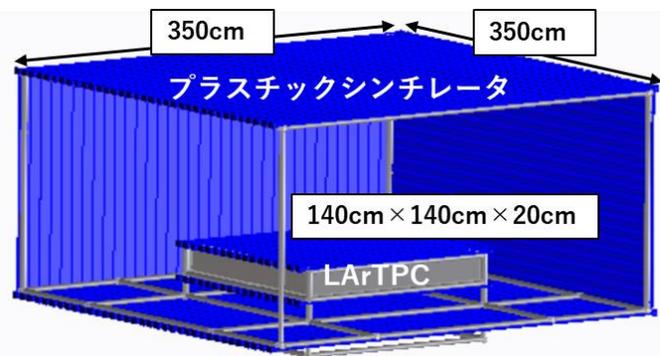


GRAMS検出器

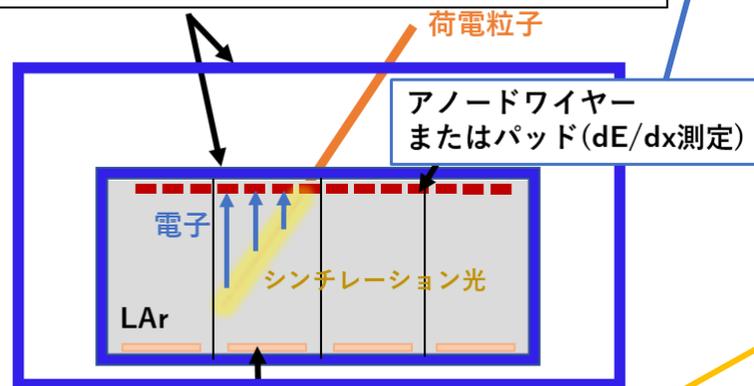
- GRAMS実験は南極周回気球を用いた長時間の気球観測を目指し、その後は衛星実験を目指す
- 検出器の概念はGAPS実験を踏襲

検出器の構成

- 2層のプラスチックシンチレータ
 - 入射粒子の速度測定
- 液体アルゴンTPC
 - 液一相型
 - 粒子飛跡トラッカーかつカロリメータ
 - ほとんど不感領域がない



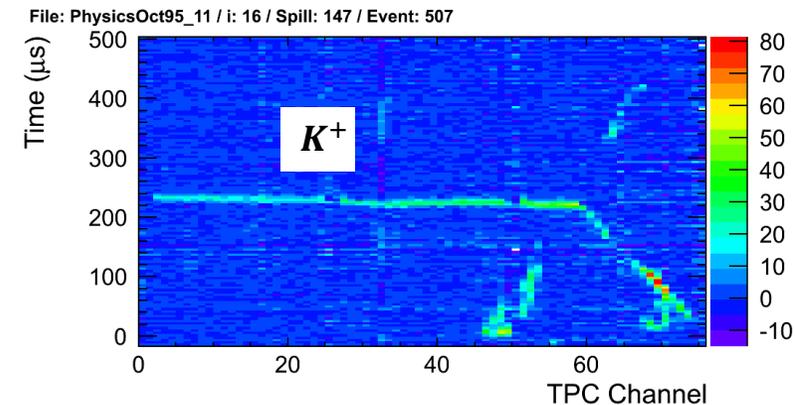
2層のプラスチックシンチレータ(荷電粒子β測定)



SiPMまたはPMT(シンチ光測定)

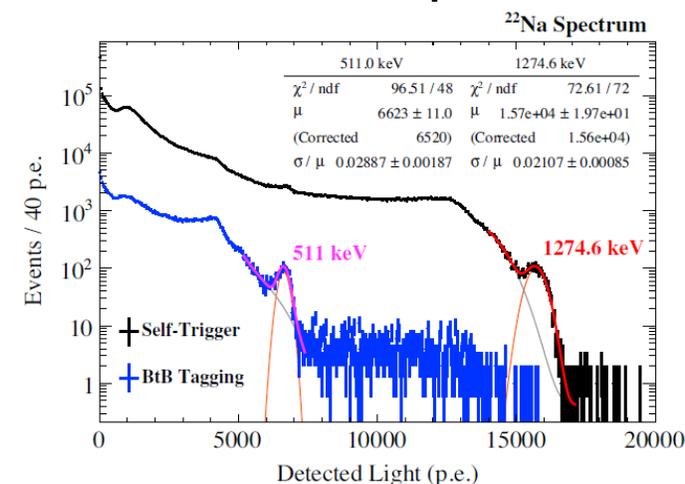
Beam test@J-PARC(2010)

- 陽子崩壊 $p \rightarrow K^+ \nu$ からの K^+ の識別実証を目的とした実験
- 検出器内で停止した $K^+ \rightarrow e^+ \nu \pi^0$ の信号例(実データ)



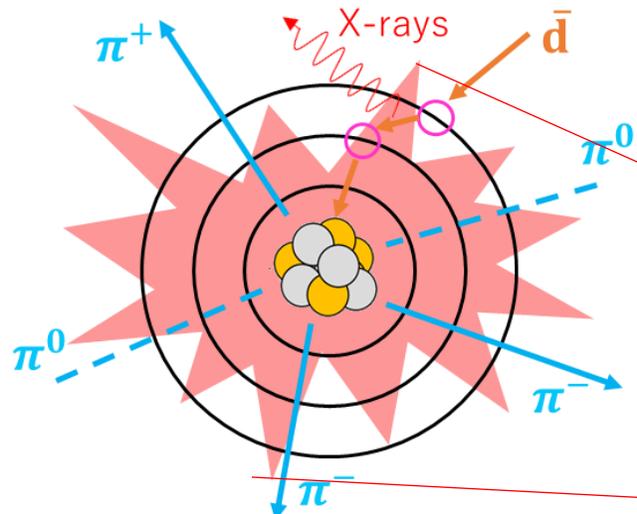
液体アルゴンset up@早稲田大学

- 世界最高検出光量12.8[p.e./keVee]達成



信号事象の反応と粒子識別方法

プラスチックシンチレータ

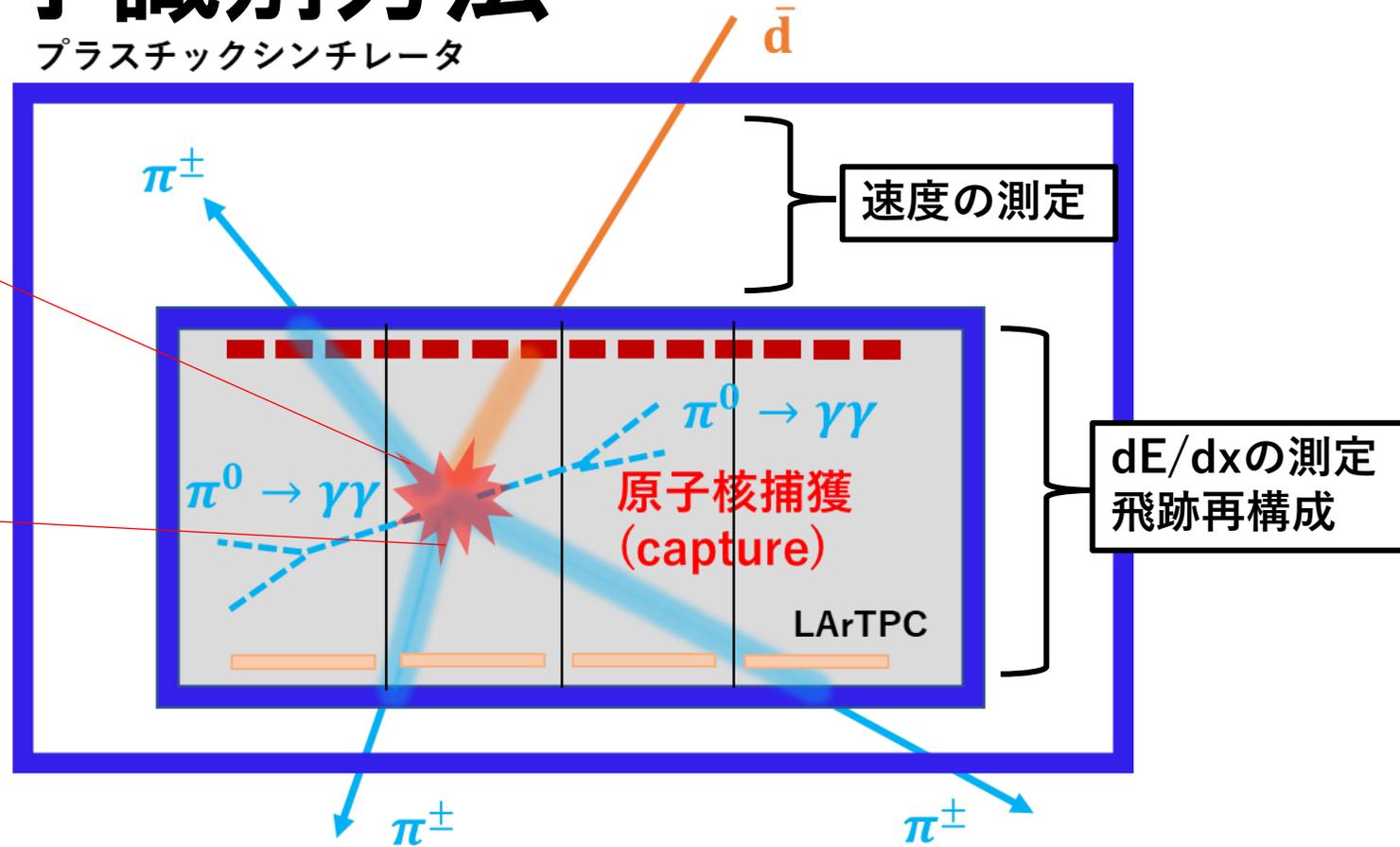


信号事象(原子核捕獲)

- 検出器中で停止した負電荷粒子はアルゴン原子核とエキゾチック原子を構成
- 脱励起過程で特性X線を放出
- 最終的に原子核と対消滅し複数のハドロン(主に π 中間子)を生成

粒子識別方法

- 入射速度とエネルギー損失→**粒子質量**の同定
- 原子核捕獲事象の観測→**粒子の電荷**の同定



GRAMS気球実験に向けて

1. 最適化された検出器の構築

- 検出器のアクセプタンス
- 粒子識別能力
 - 液体アルゴンTPC性能
 - プラスチックシンチレータ性能

 シミュレーション情報から検出器デザインの最適化を行う

2. 検出器の運用技術の確立

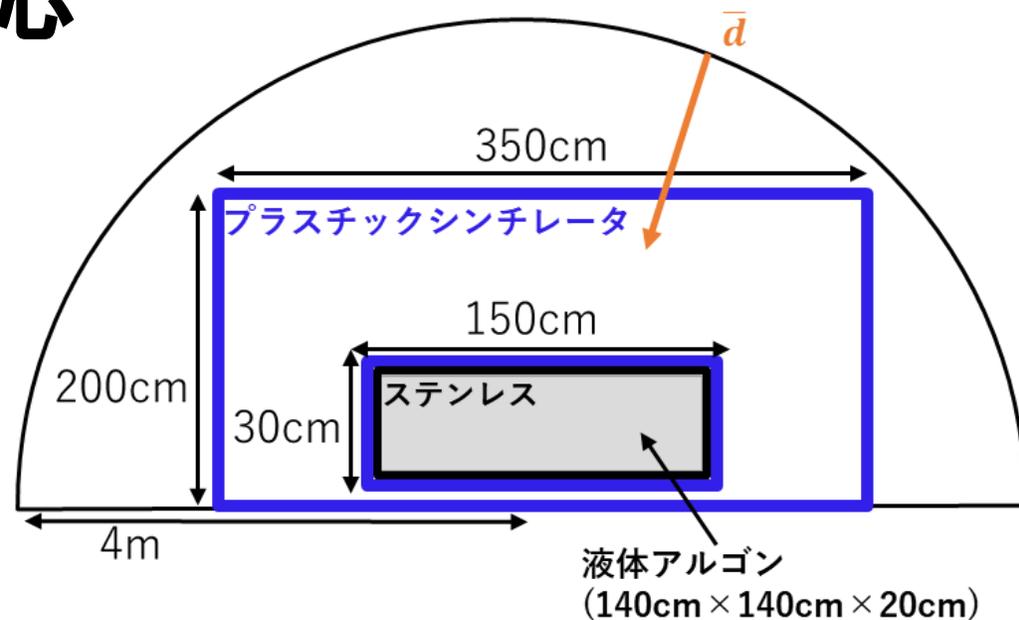
- 液体アルゴンの保持
- 上空での気圧・圧力変化への対応
- DAQ・電圧印加システム等

 気球工学試験を行い、運用技術を確立する

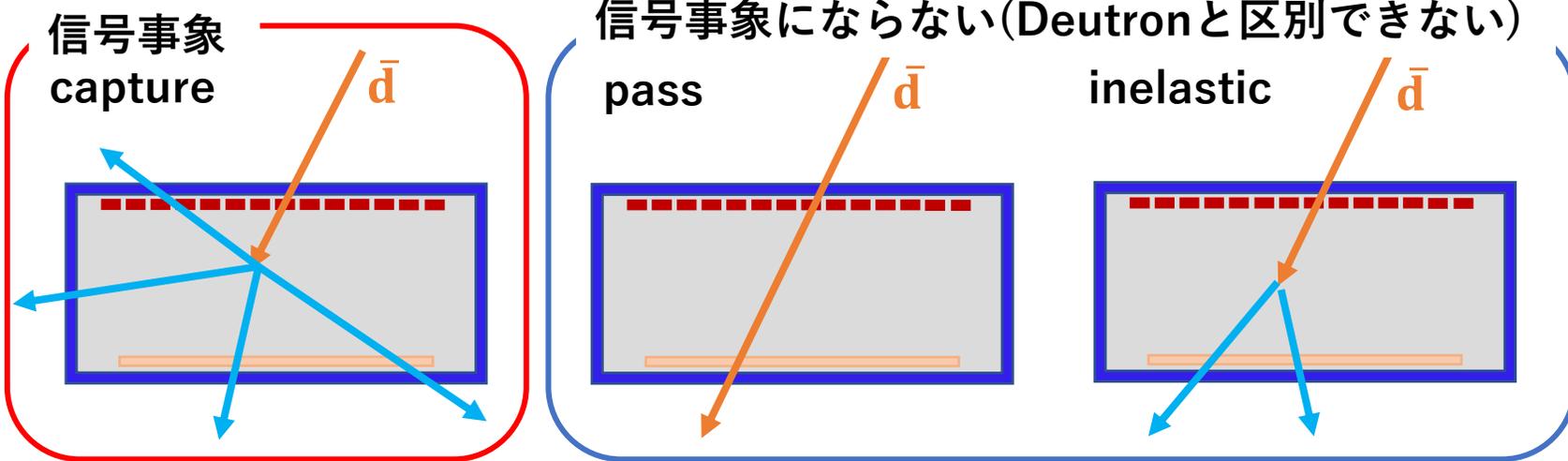
液体アルゴン中の反重陽子の反応

シミュレーション条件

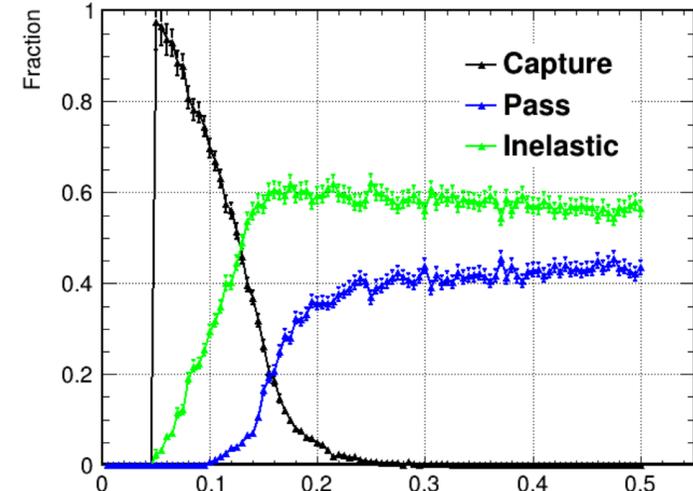
- 液体アルゴン(140cm × 140cm × 20cm) + ステンレス6mm + プラスチックシンチレータ6mm × 2層
- 半球面上からEXPACS(<https://phits.jaea.go.jp/expacs/jpn.html>)を使用して反重陽子を入射
 - 場所は南極(南緯77.5、東経166.4)
 - 上方向からの粒子のみ入射



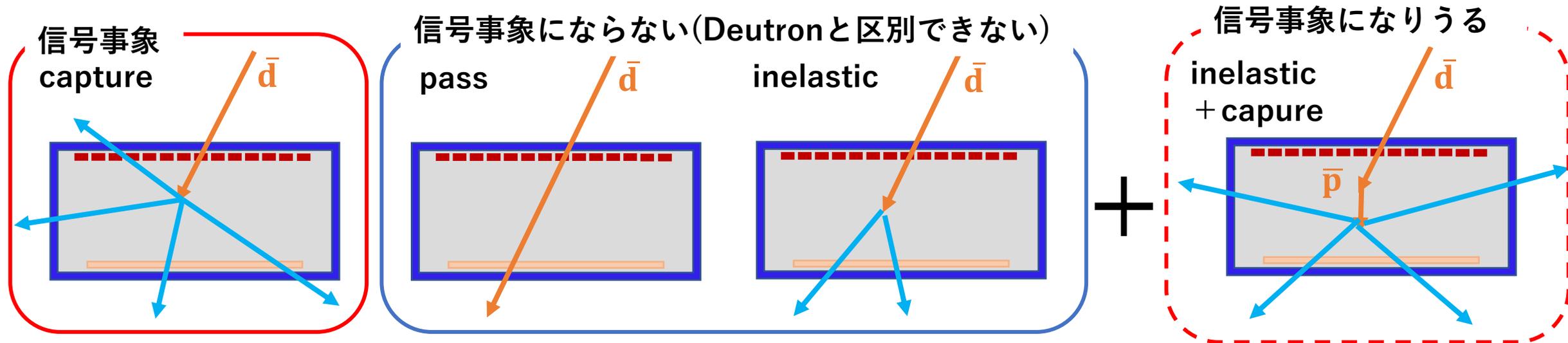
液体アルゴン中での主な反重陽子の反応



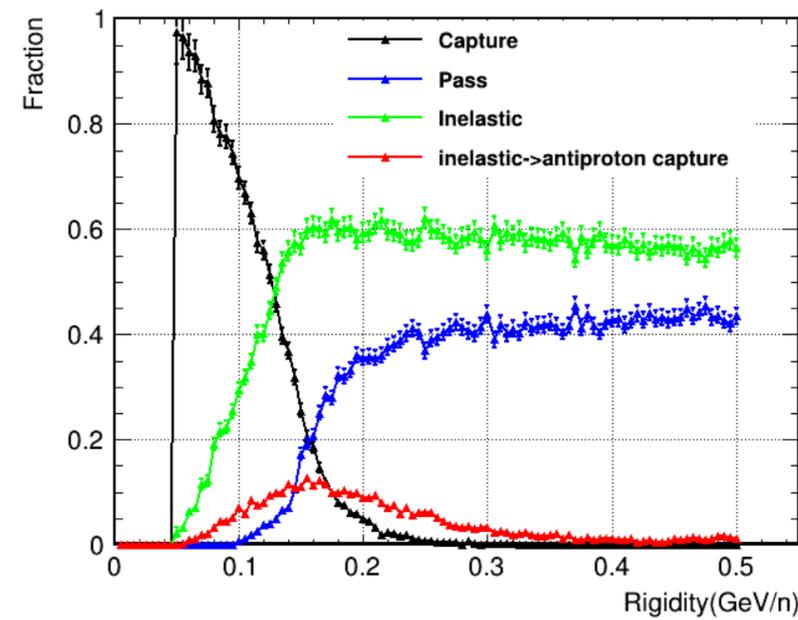
液体アルゴン中での反重陽子の反応割合



高エネルギー側の信号事象



- 高エネルギー側で信号事象になる反応を検討
→反重陽子がinelasticした後に反陽子がcaptureされる事象
- 信号事象として
 - capture事象
 - 反重陽子がinelastic後に反陽子がcaptureされる事象
 を選択し検出感度の比較を行う



検出感度予測

- 理想的な場合の予測感度を算出
 - 液体アルゴン内に5cm以上飛跡を残すイベント
 - 140cm×140cm×20cmの液体アルゴン
 - プラスチックシンチレータ6mm×2層+ステンレス6mm
 - 30日間の気球実験
 - **粒子識別能力100%**

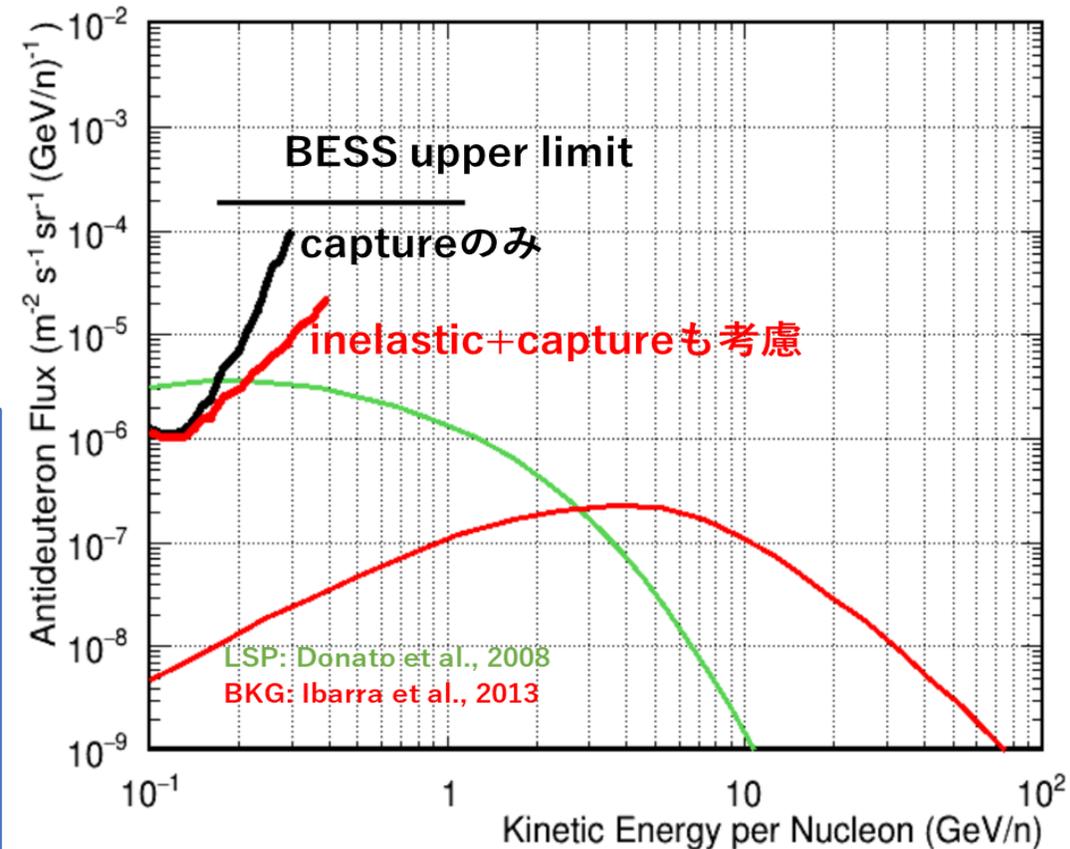
感度算出方法

$$Flux[m^2/s/sr/(GeV/n)] = \frac{N}{S[m^2] \times T[s] \times \Omega[sr] \times E[GeV/n]}$$

(N : イベント数, S : 大円の面積= $4 \times 4 \times \pi$, T : 時間 = 30日 \times 24 \times 3600)
 E : エネルギー, Ω : 立体角 = 2π)

$$Sensitivity[m^2/s/sr/(GeV/n)] = \frac{Flux[m^2/s/sr/(GeV/n)]}{P \times \varepsilon}$$

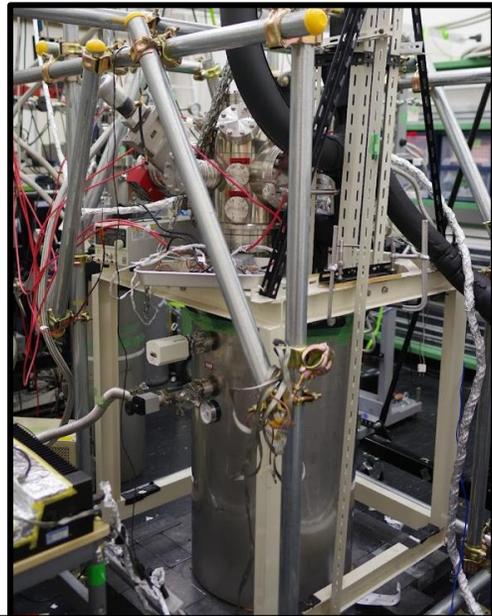
(P : 信号事象の割合, ε : ID Efficiency = 1)



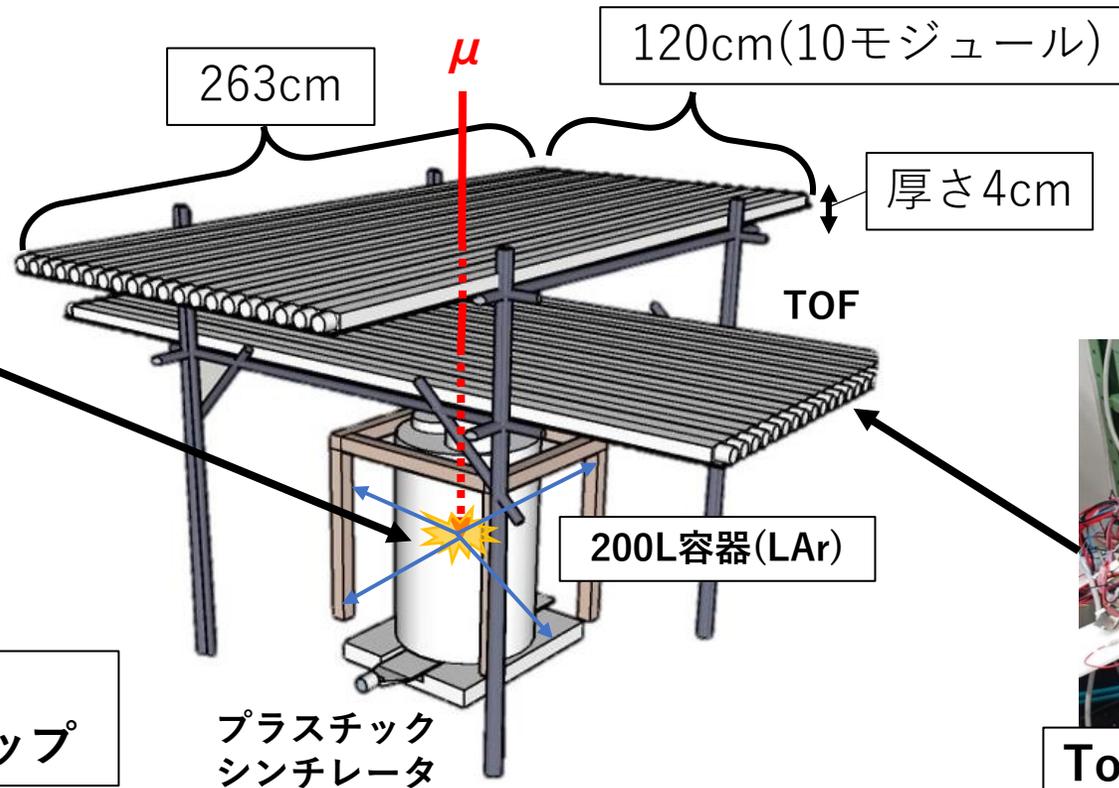
- 理想的な条件では**信号事象のフラックスに到達可能**

地上での粒子識別試験@早稲田

- ▶ 液体アルゴンTPC(30cm × 30cm × 30cm) + プラスチックシンチレータで宇宙線を観測する
 - ミュー粒子の原子核捕獲事象の観測
 - 宇宙線を用いた粒子識別能力の検証

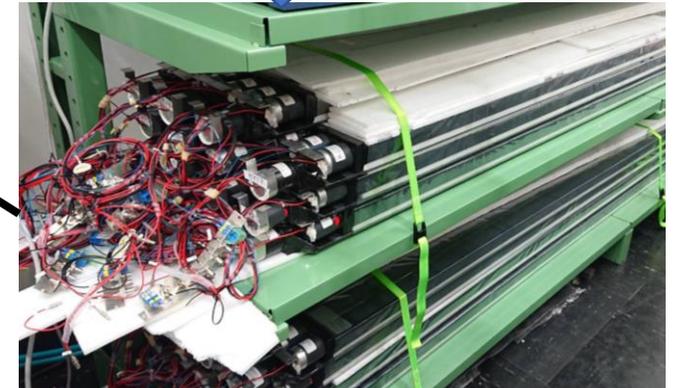


早稲田大学での
液体アルゴン実験セットアップ



プラスチック
シンチレータ

Belle実験で使用されていた
プラスチックシンチレータ



ToF 30モジュール保有@早稲田

地上実験setup概要図@早稲田

気球実験における課題

- 気球高度での液体アルゴンの保持方法の確立

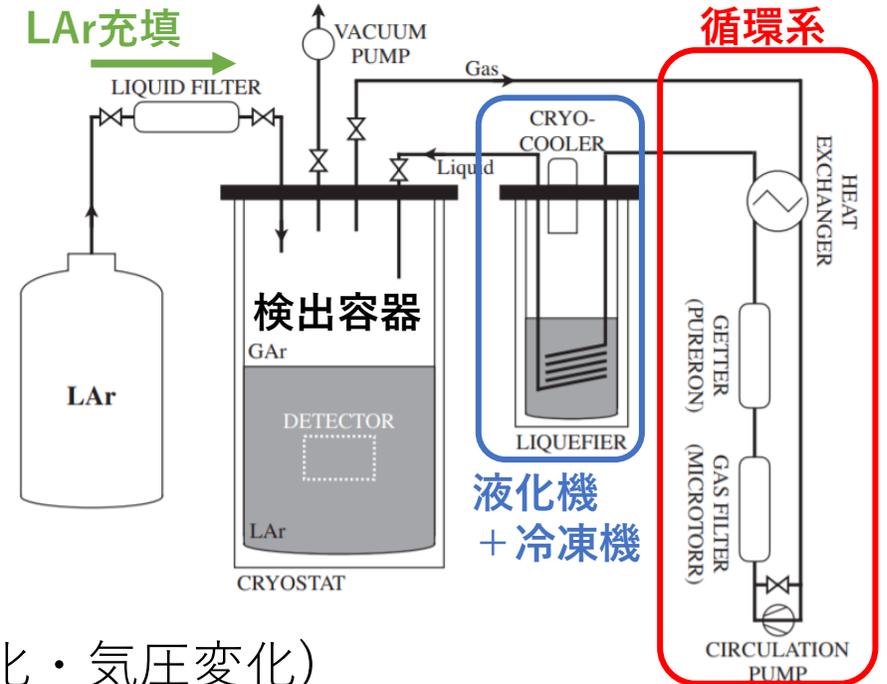
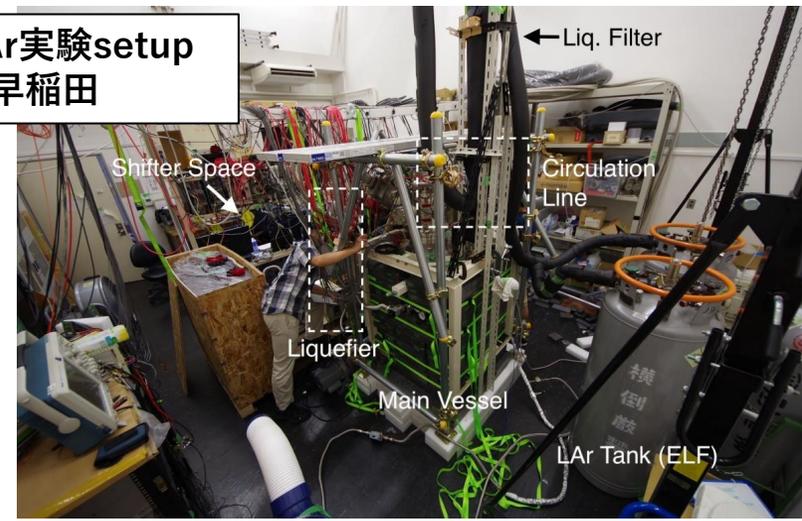
液体アルゴンの性質

沸点	87K(-186度)
融点	84K(-189度)
密度	1.4g/cm ³

- 低温の維持 + 純度の維持が必要
(不純物があると電子を吸収する)
- 地上では低温・純度を保った安定した運用が
できている
 - 真空断熱容器 + 冷凍機
 - ガス循環で純度を維持

- 気球高度38kmの環境に耐えうる検出容器の設計(温度変化・気圧変化)
- 重量・電力の制限
- 振動・傾き等への対応

LAr実験setup
@早稲田



気球工学試験に向けて

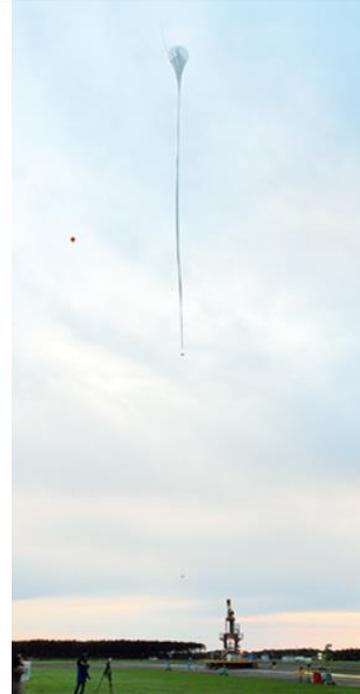
- ▶ JAXAの大気球実験グループと日本で短時間の観測用気球を飛翔できる (<https://www.isas.jaxa.jp/missions/balloons/>)

気球工学試験の目的

- 検出器の運用方法を確立
 - 気球高度での液体アルゴンの維持
 - 気球高度での小型液体アルゴンTPC + プラスチックシンチレータの動作試験
 - データ通信システムの試験
- 気球高度で実際に宇宙線・ガンマ線のデータを取得

JAXAと北海道大樹町での気球工学試験に向けて協議中

- 10cm角程度の液体アルゴンTPC
- 気球システム全体で約500kg
- 高度30kmで1時間程度の飛行



まとめと今後の展望

まとめ

- GRAMS実験はMeVガンマ線観測と**宇宙反粒子探索**を目的とした気球実験
 - **液体アルゴンTPCとプラスチックシンチレータ**を使用した検出器
- 検出器のアクセプタンスをシミュレーションを用いて評価
→理想的な条件で**信号が予測されるフラックスまで感度が到達可能**
- 気球実験には様々な課題がある
(液体アルゴンの保持, 圧力温度変化, 重量・電力制限, 傾き・振動への対応…)

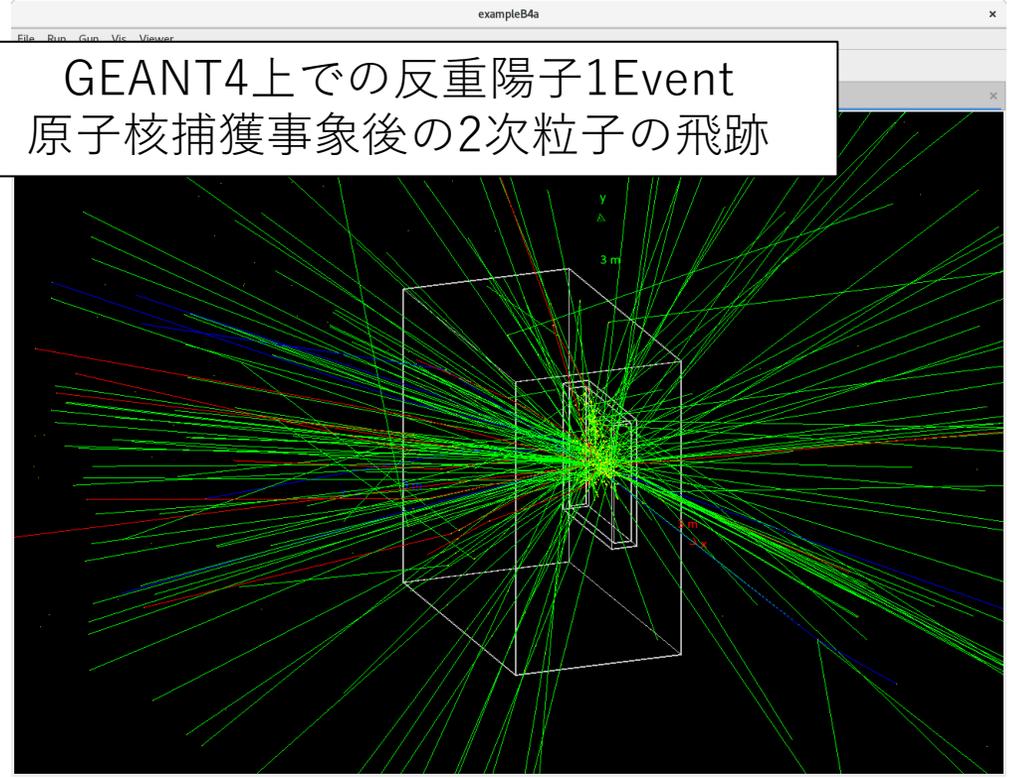
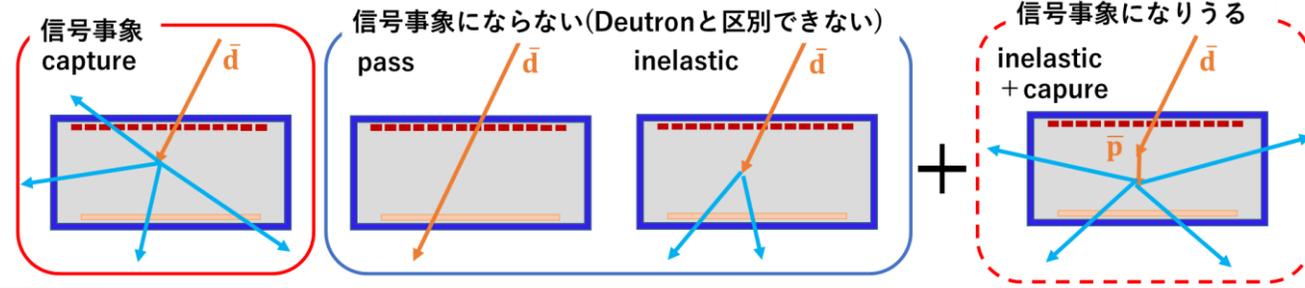
今後の展望

- 早稲田で液体アルゴンTPC+プラスチックシンチレータを用いた**地上での粒子識別試験**を行う
- 小型の液体アルゴンTPCを用いて, **大樹町で気球工学試験**を行う
→JAXAと相談を開始

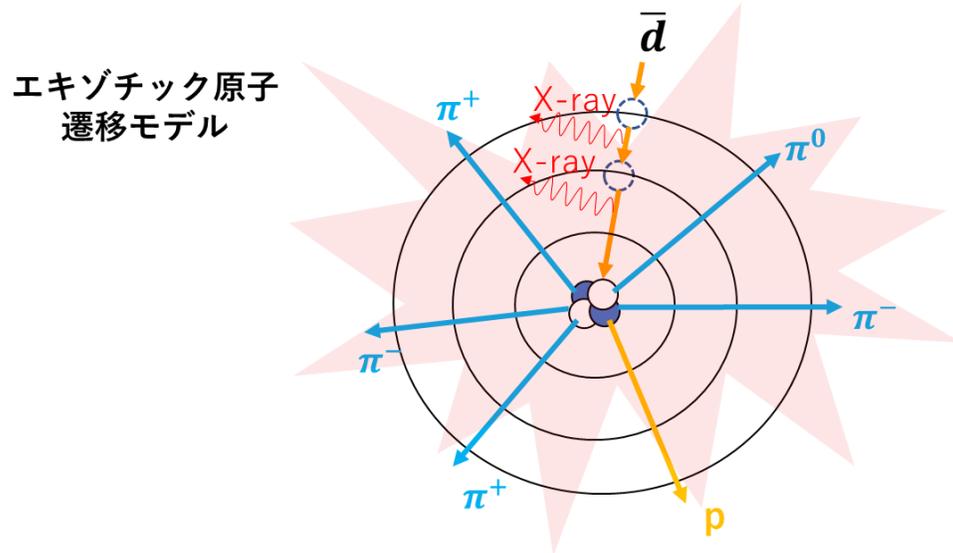
Backup

信号事象

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**



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



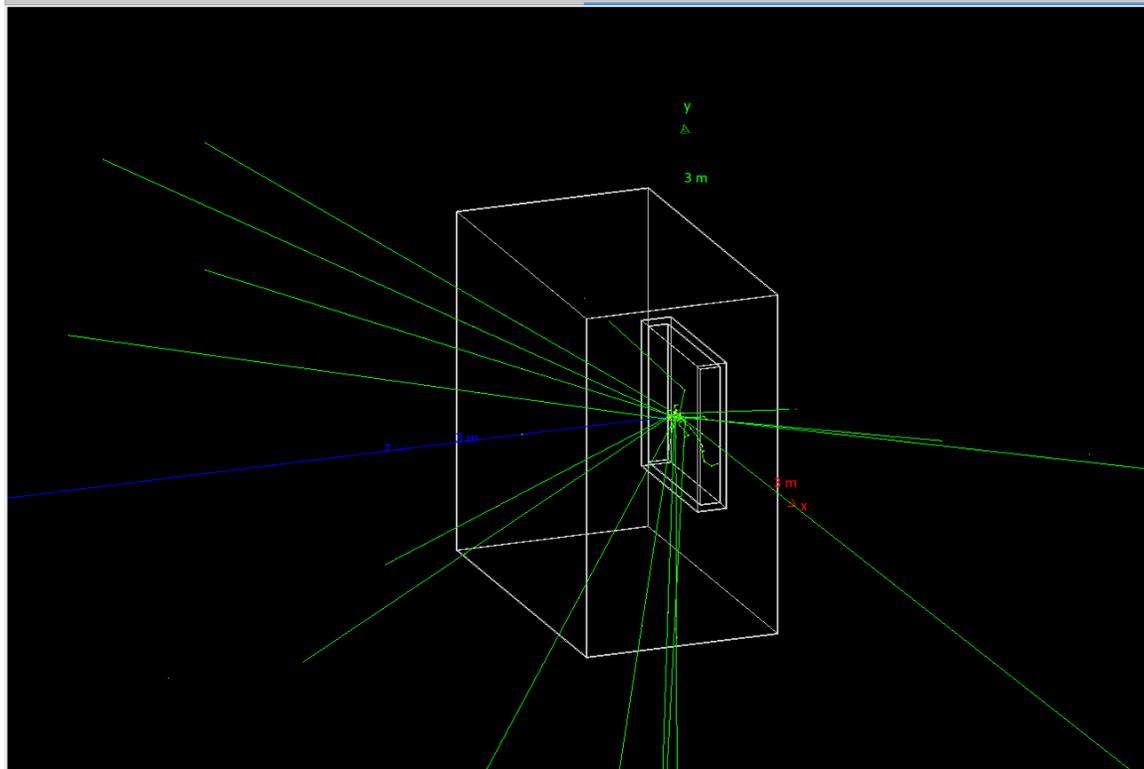
エキゾチック原子
遷移モデル

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

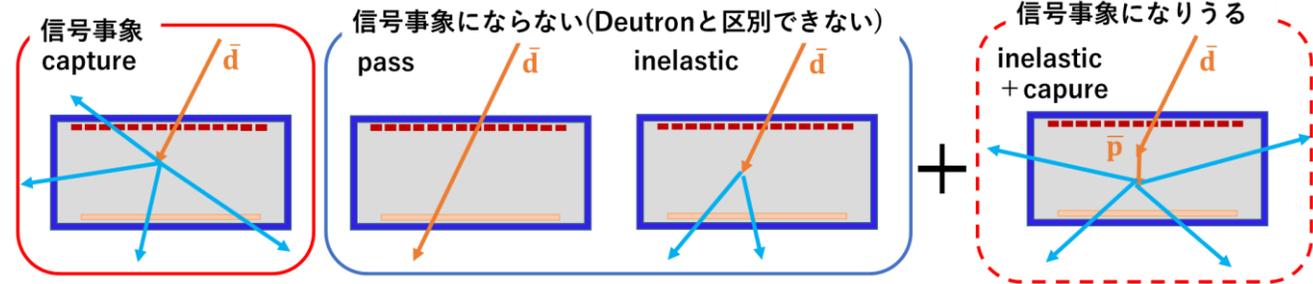
X線のエネルギー：
$$E_{a,b} = zZ^* \frac{M^*}{m_e^*} R_H \left(\frac{1}{n_a} - \frac{1}{n_b} \right)$$

信号にならない事象

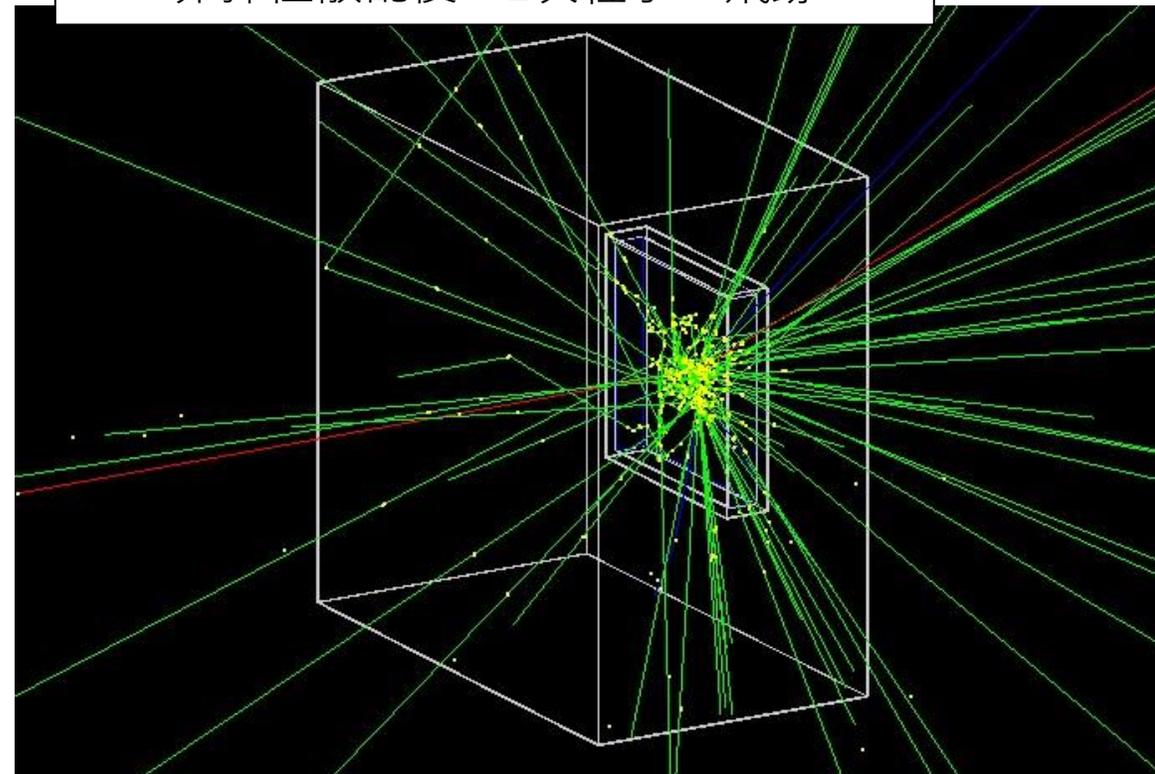
GEANT4上での重陽子1Event
非弾性散乱後の2次粒子の飛跡



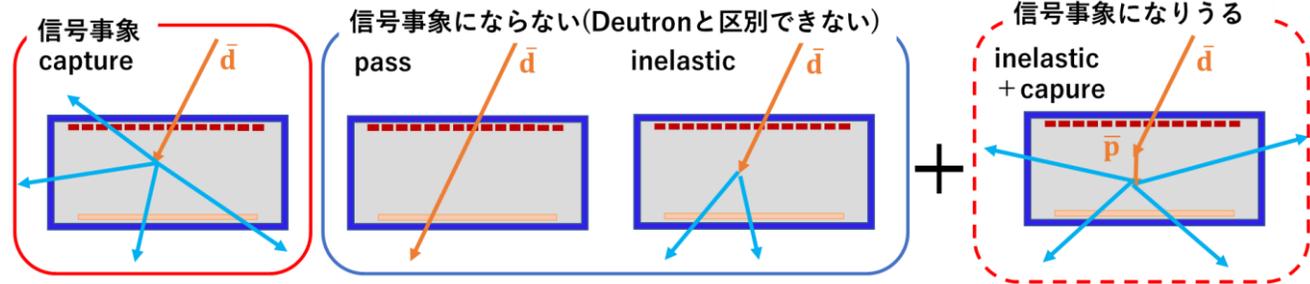
赤:負電荷粒子 π^- , e^- , \bar{d} , \bar{p}
 青:正電荷粒子 π^+ , e^+
 緑:中性粒子 γ , n



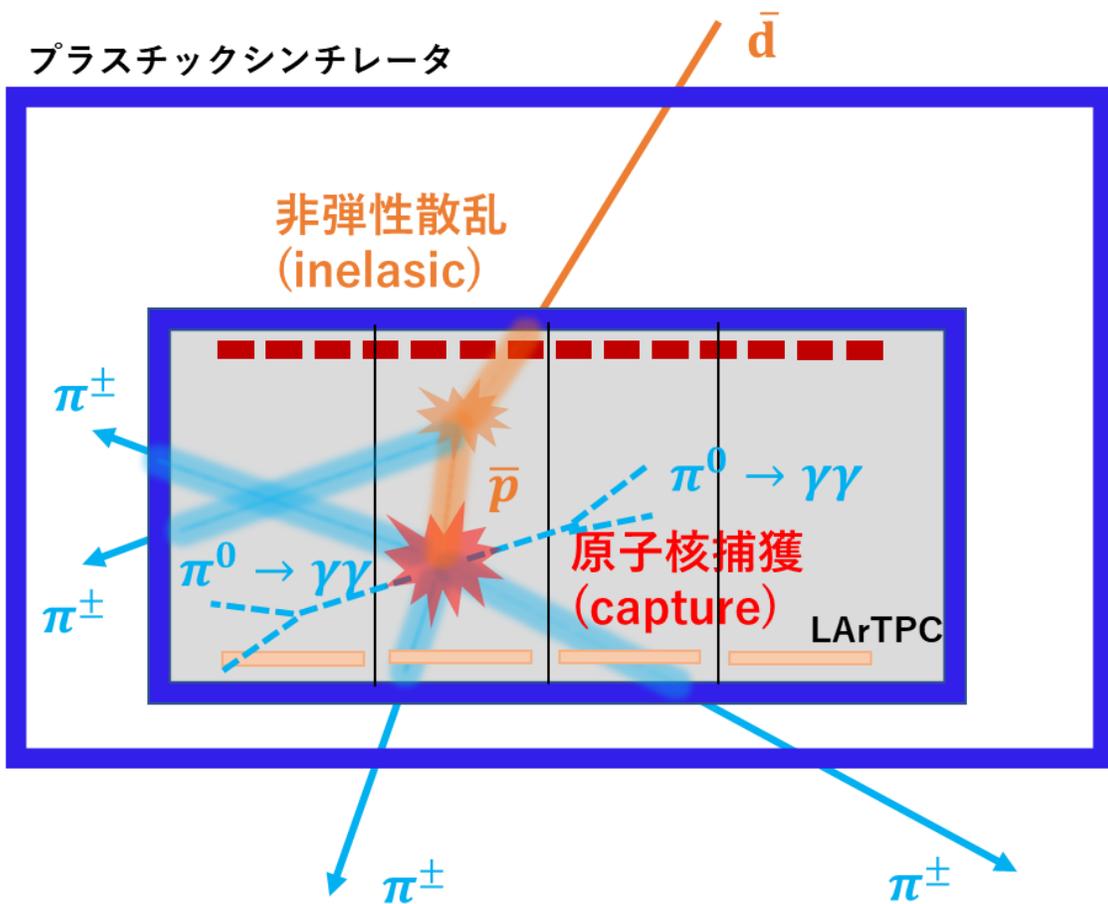
GEANT4上での反重陽子1Event
非弾性散乱後の2次粒子の飛跡



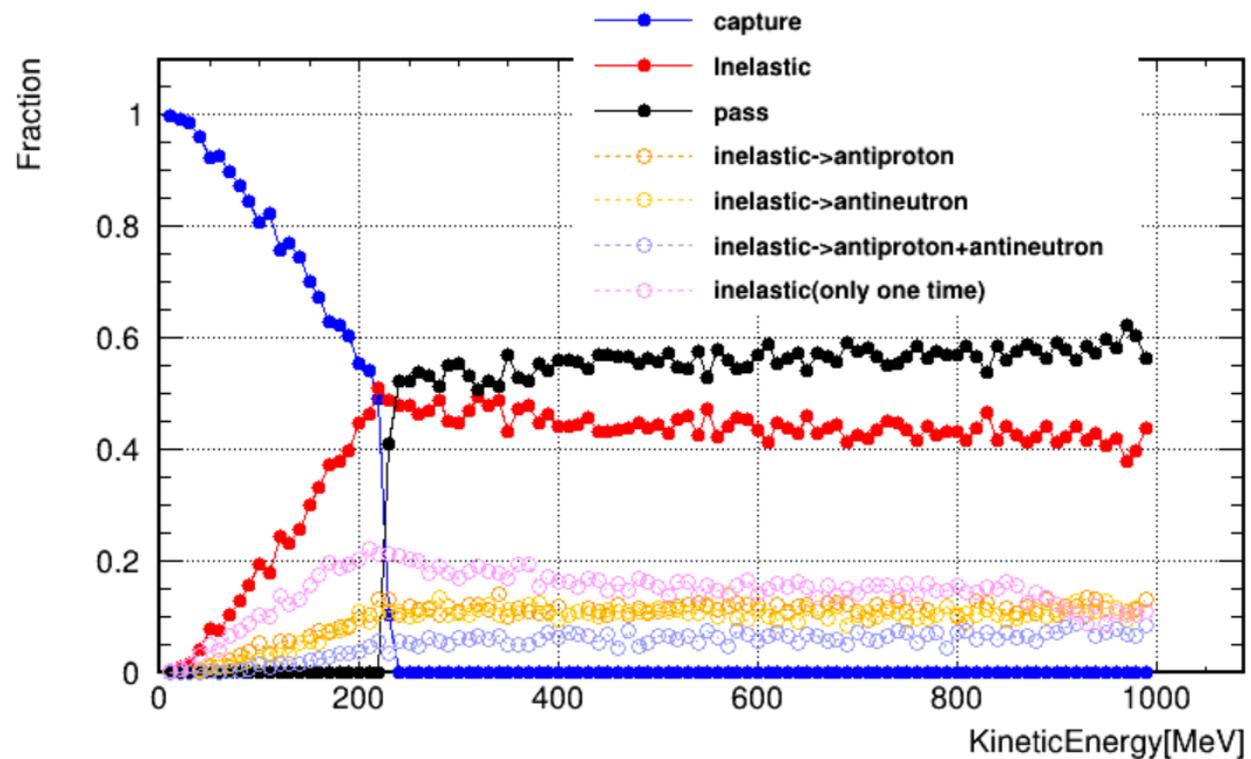
信号になりうる事象



プラスチックシンチレータ



反重陽子の反応割合

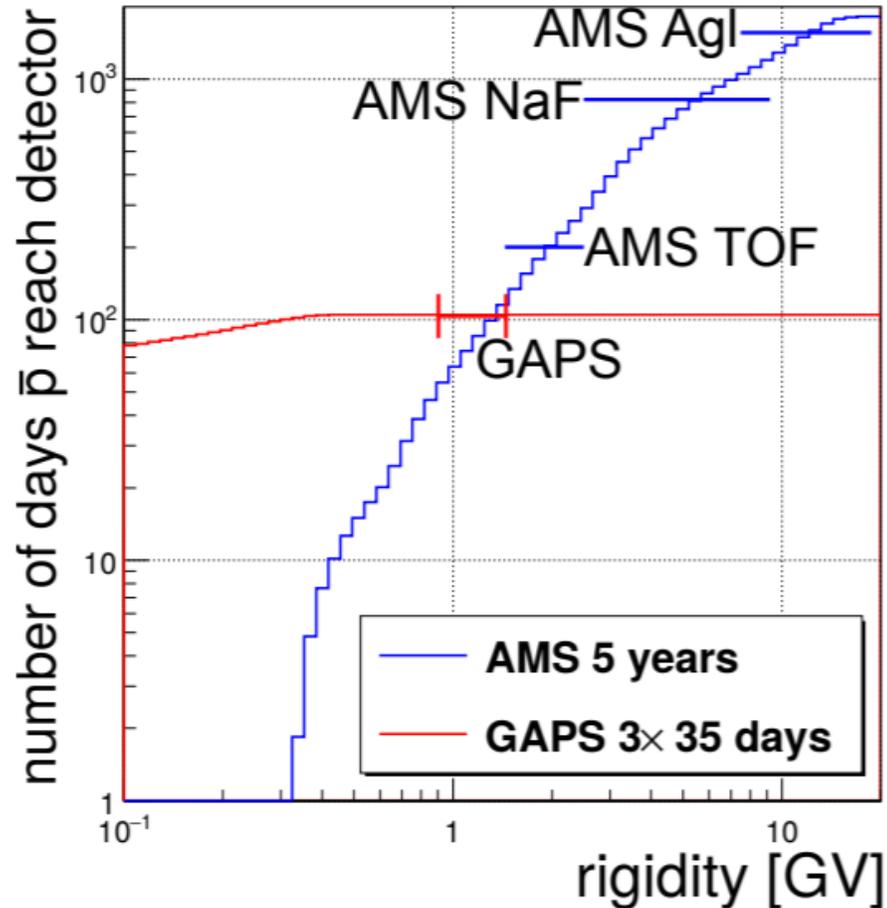


→inelastic後に反陽子と反中性子を生成するイベントが一定割合存在

南極で気球実験を行う利点

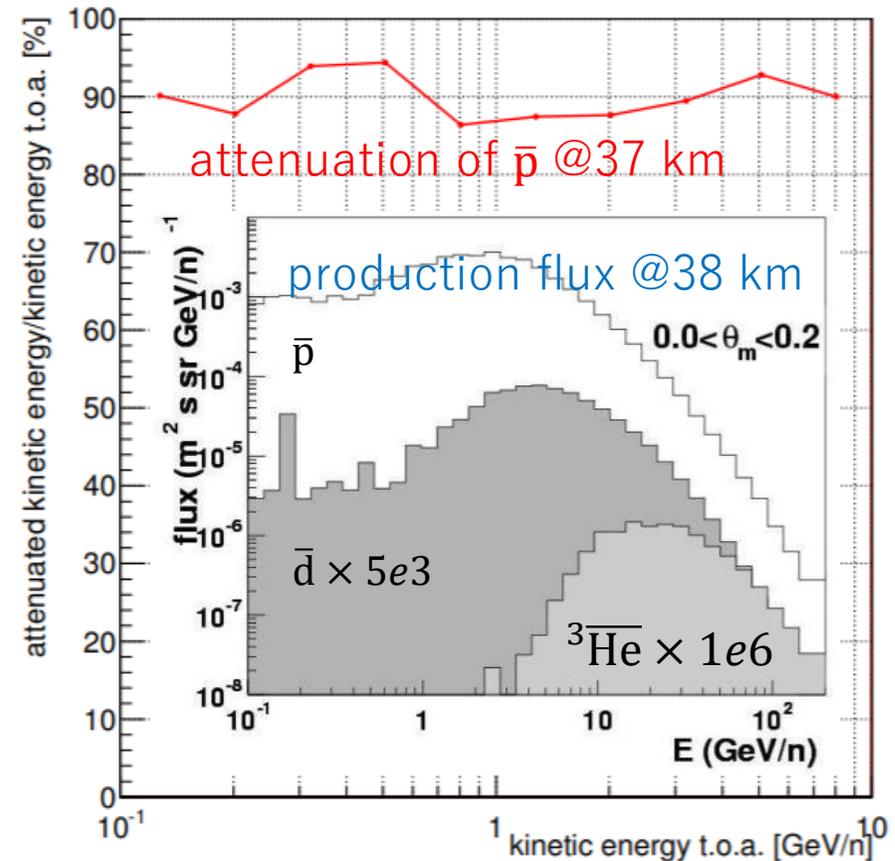
地磁気の影響

- 南北が極のdipoleで荷電粒子をシールド
- 極に行くほど、シールド能力は弱い



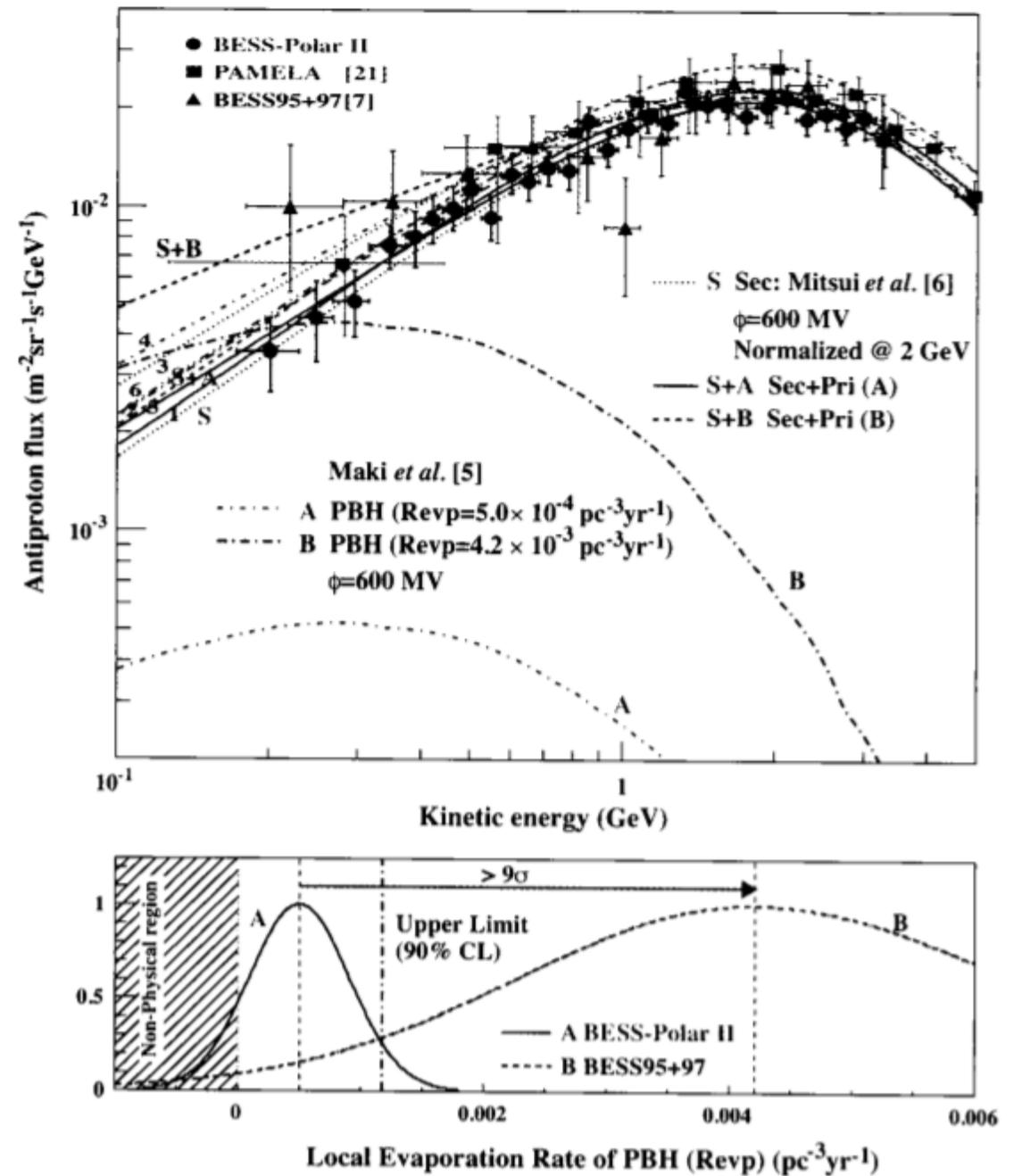
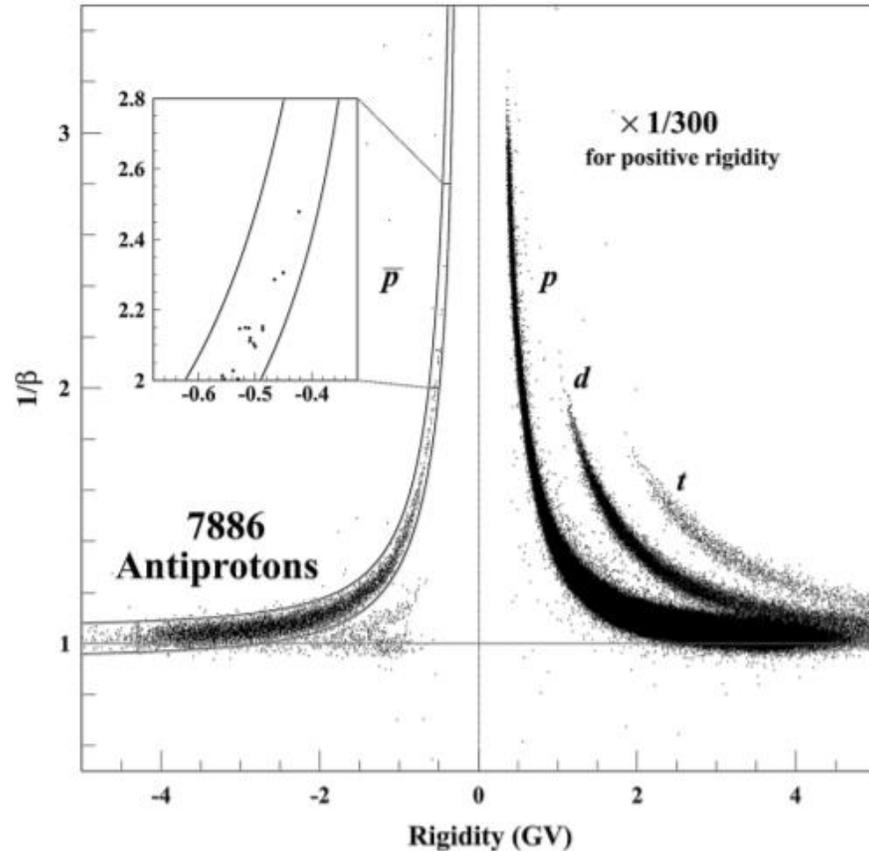
大気の影響

- 大気上部から気球高度(37 km)の減衰率@南極
- 大気で生成される \bar{d} は無視できる

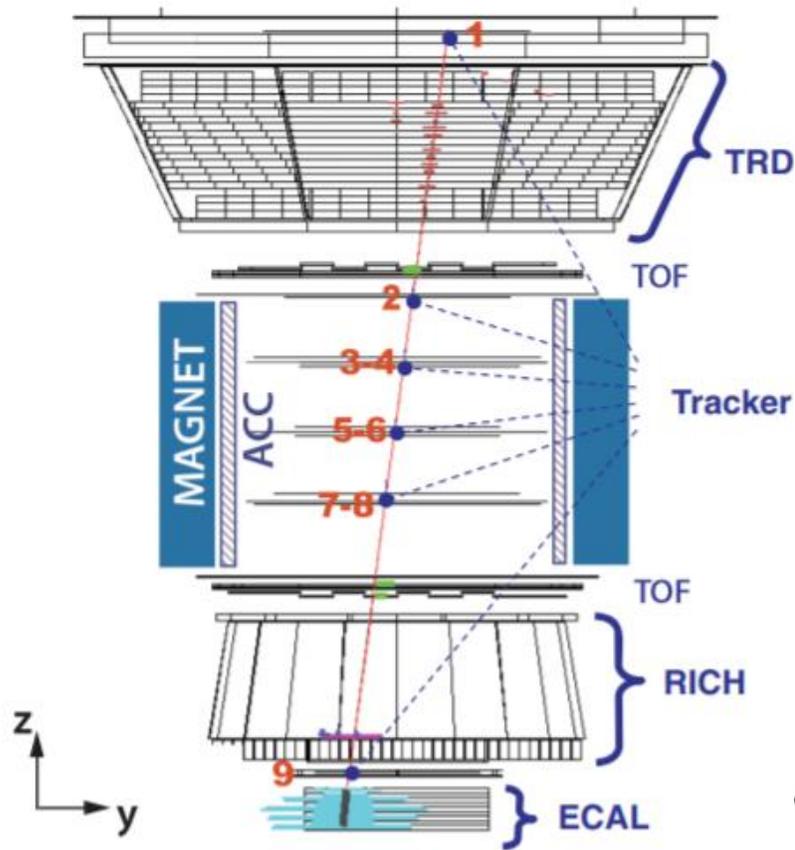


BESS実験

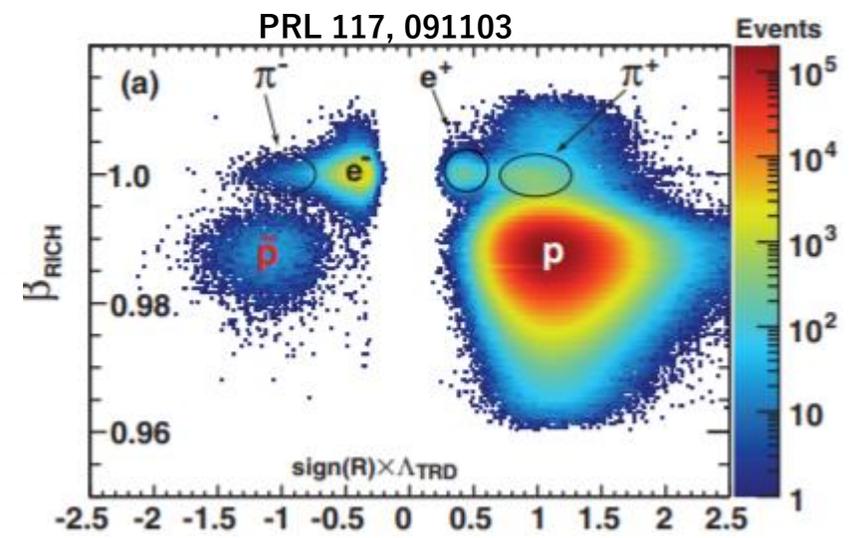
- 約24.5日間の観測期間



AMS実験

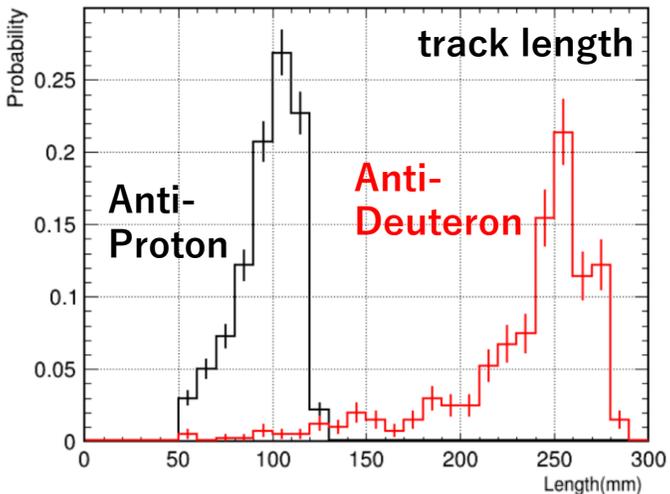
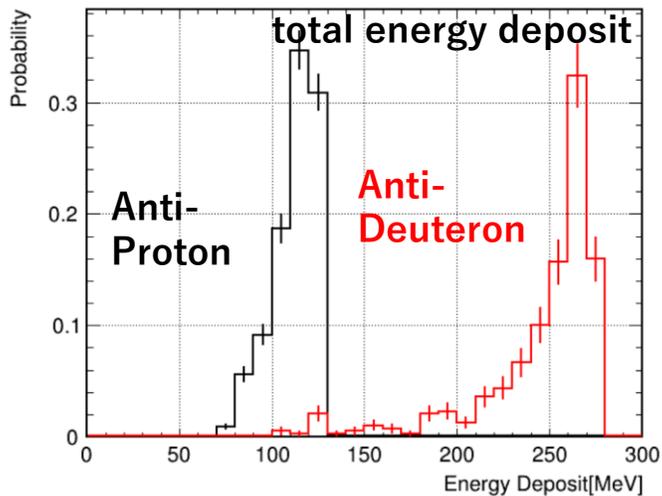
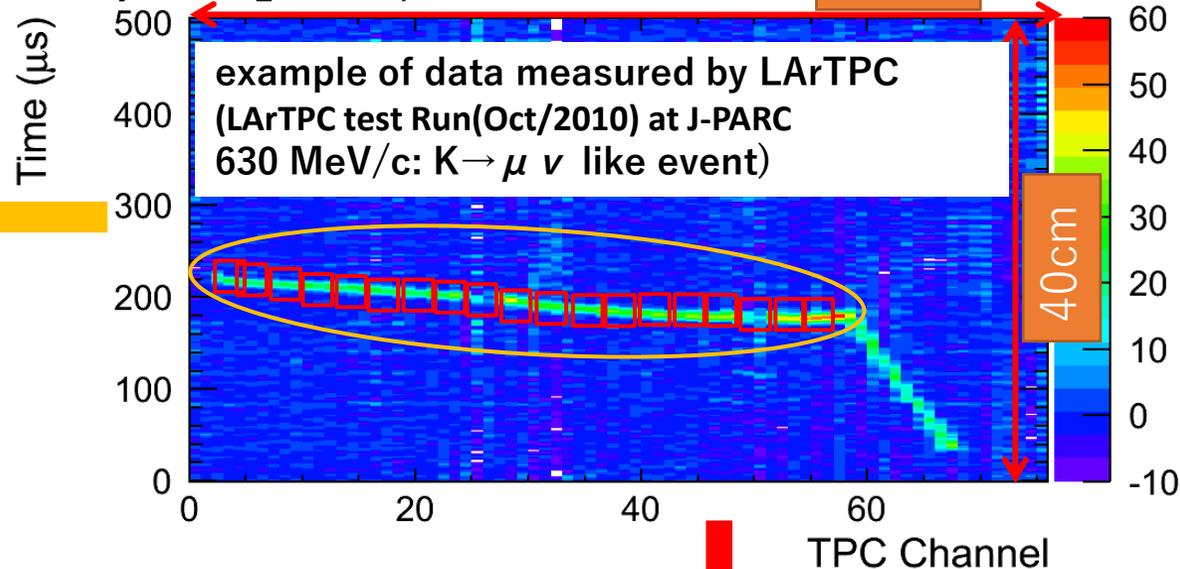


	e^-	p	He	
TRD 20 layers				e/p separation charge ($ Z $)
TOF 4 layers				trigger velocity (β) charge ($ Z $)
TRK 9 layers				momentum (p) sign ($\pm Q$) charge ($ Z $)
RICH				velocity (β) charge ($ Z $)
ECAL 20 layers				e^\pm energy e/h separation γ trigger

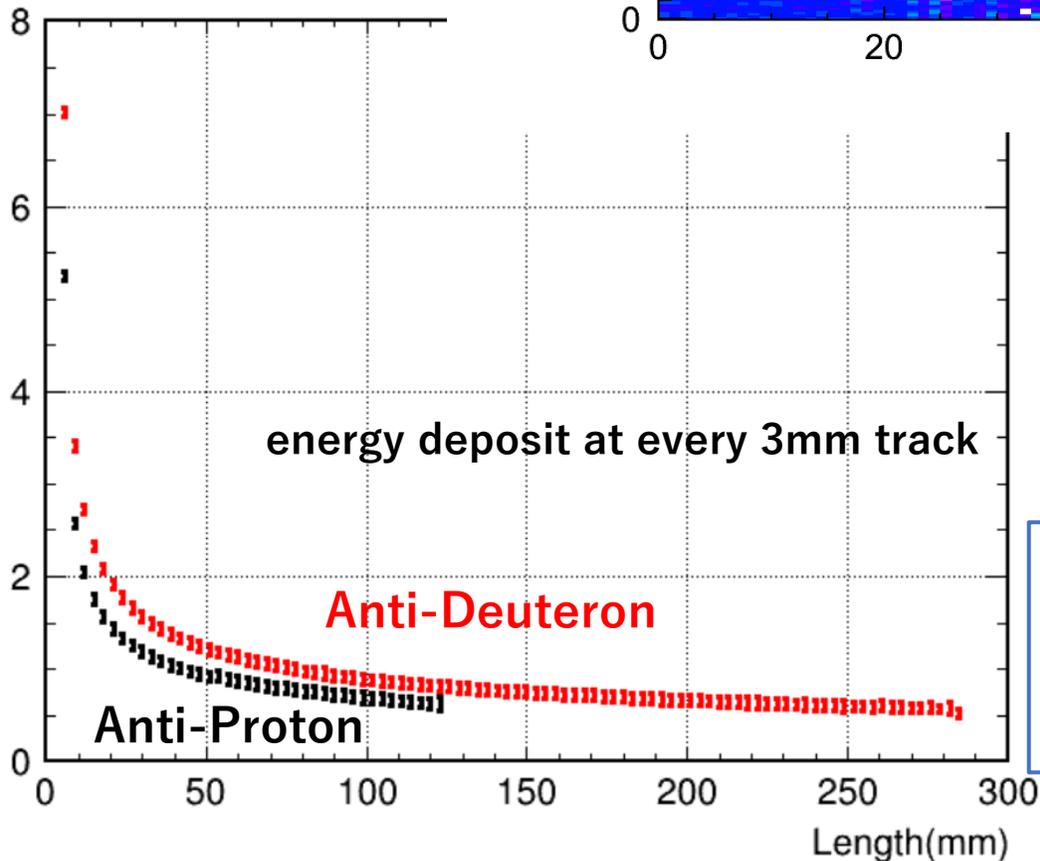


Actual process of particle ID

use total energy deposit or stopping point



dE/dx (MeV/mm)



it is possible to use each block charge

We can identify particles more specifically using both energy deposit and track

背景事象と粒子識別方法

要求される識別能力

信号事象：AnriDeutron

背景事象：Proton

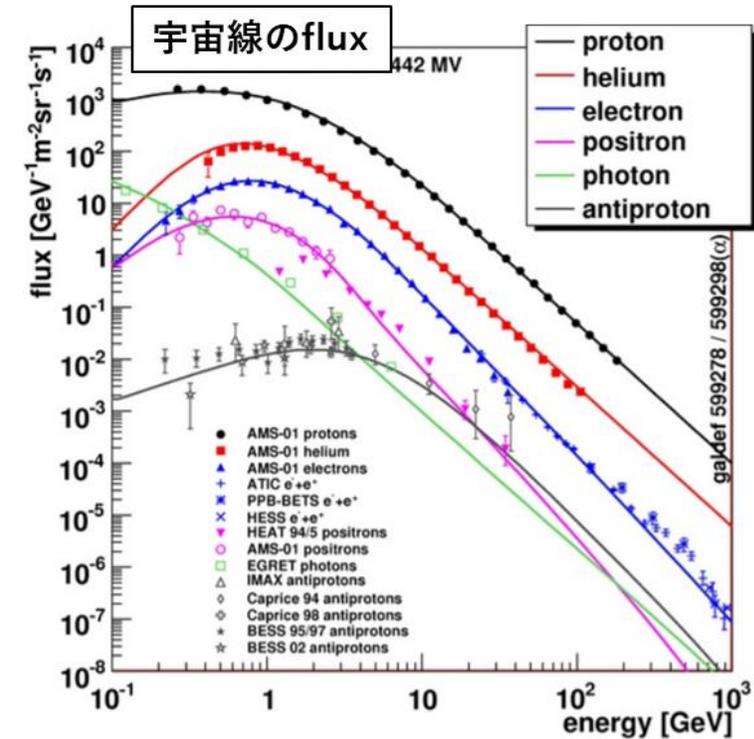
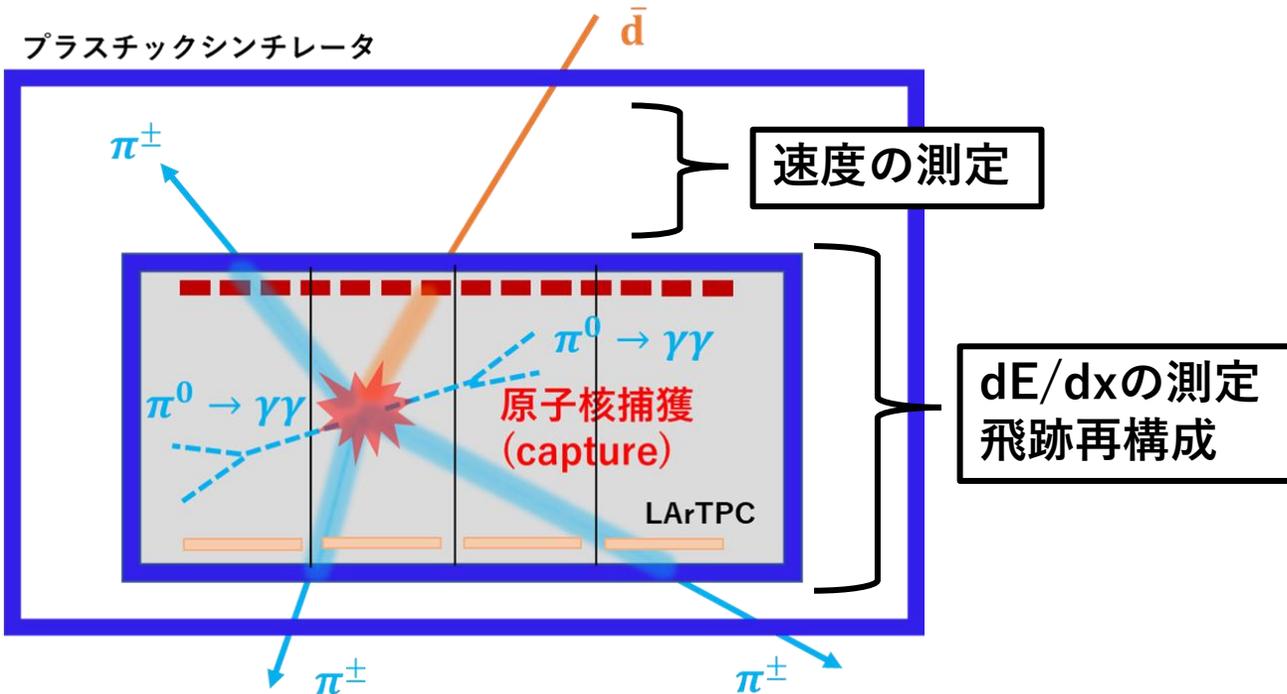
AntiProton

Electron

Positron

粒子識別方法

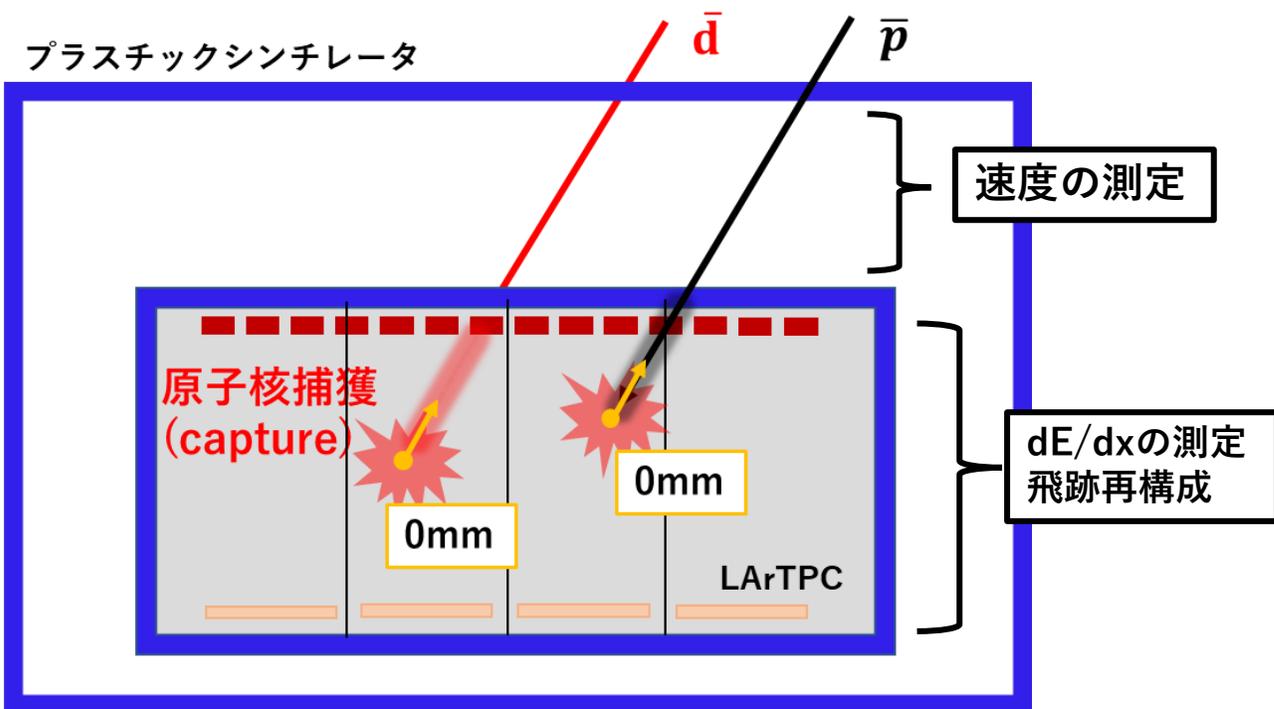
プラスチックシンチレータ



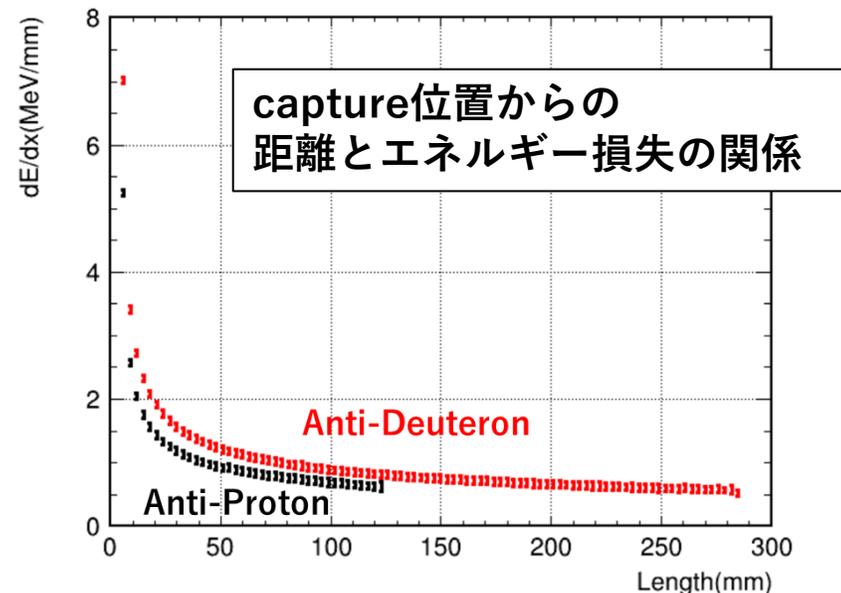
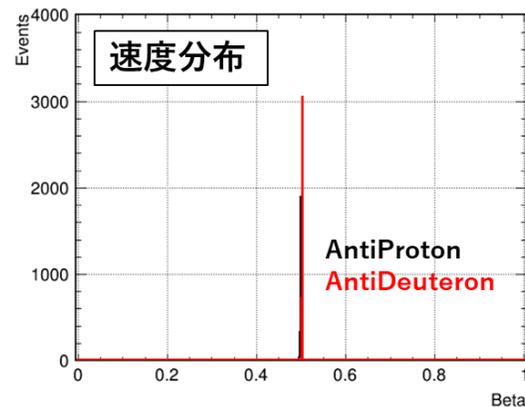
1. 入射速度とエネルギー損失
→ **粒子質量**の同定
(AntiProton, Electron)
2. 原子核捕獲事象の観測
→ **粒子の電荷**の同定, 粒子種の同定
(Deutron, Proton, Positron...)

入射速度とエネルギー損失を用いた粒子識別

検出器に150MeV/nの反重陽子と反陽子を入射



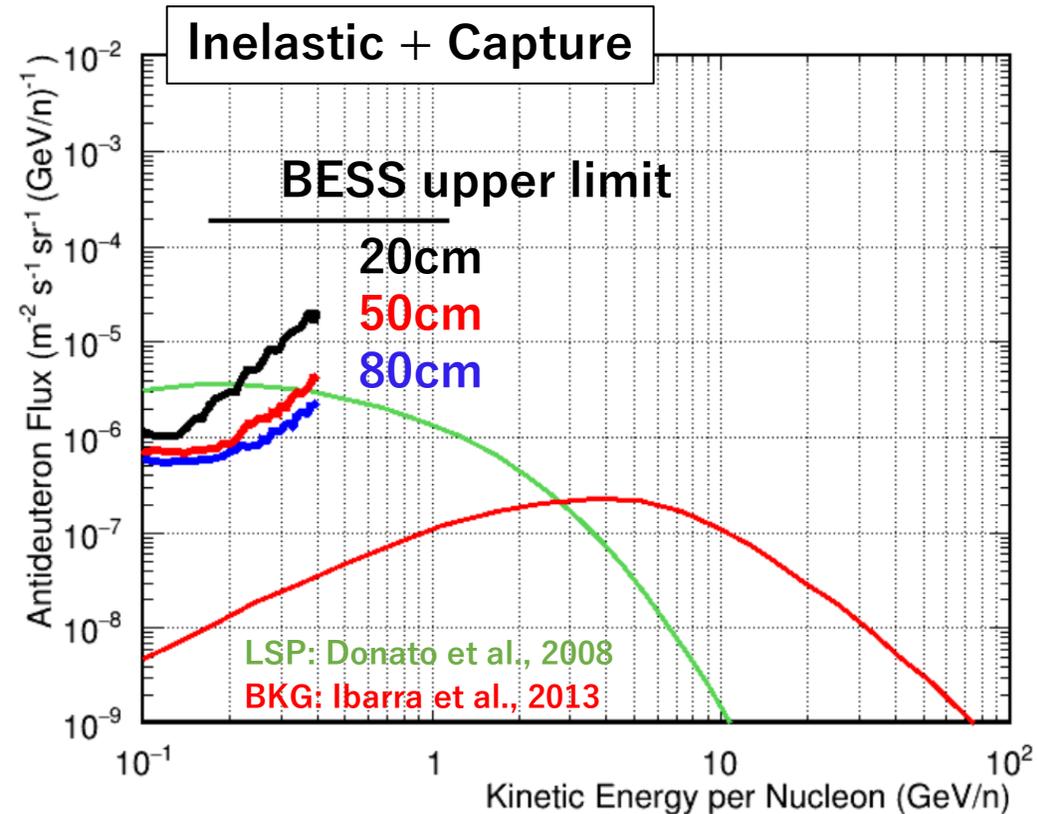
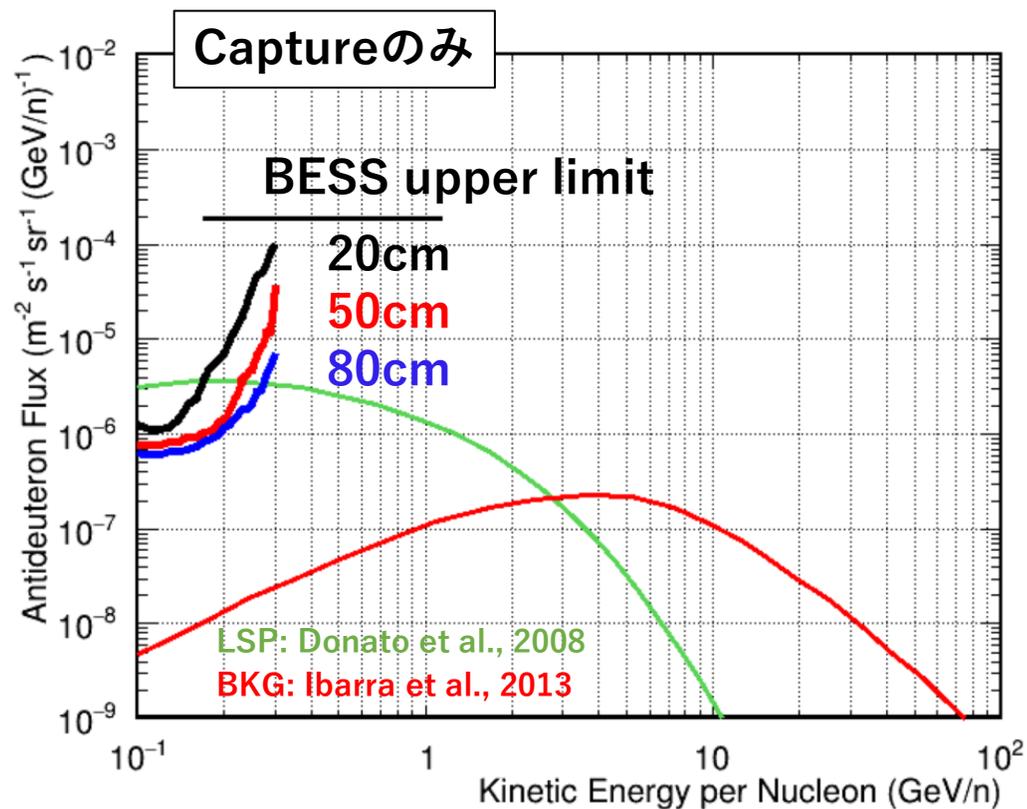
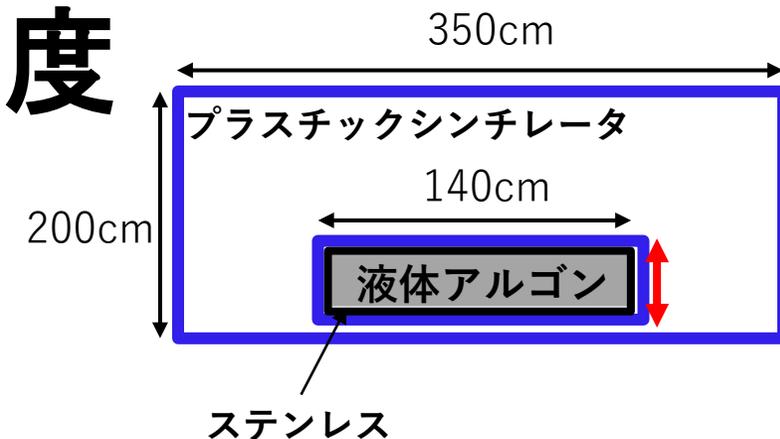
同じ速度の入射粒子のエネルギー損失を比較することで粒子質量の同定が可能



→今回はプラスチックシンチレータ性能の粒子識別に対する影響をシミュレーションで評価

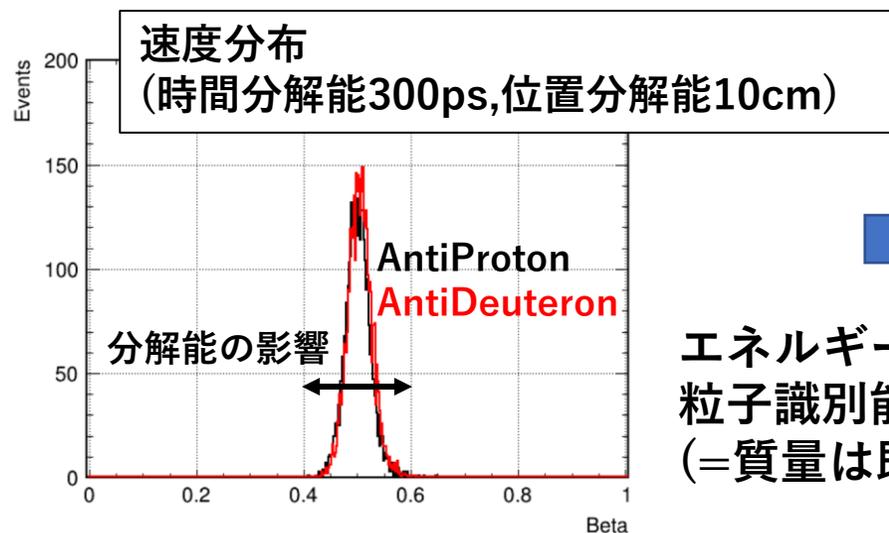
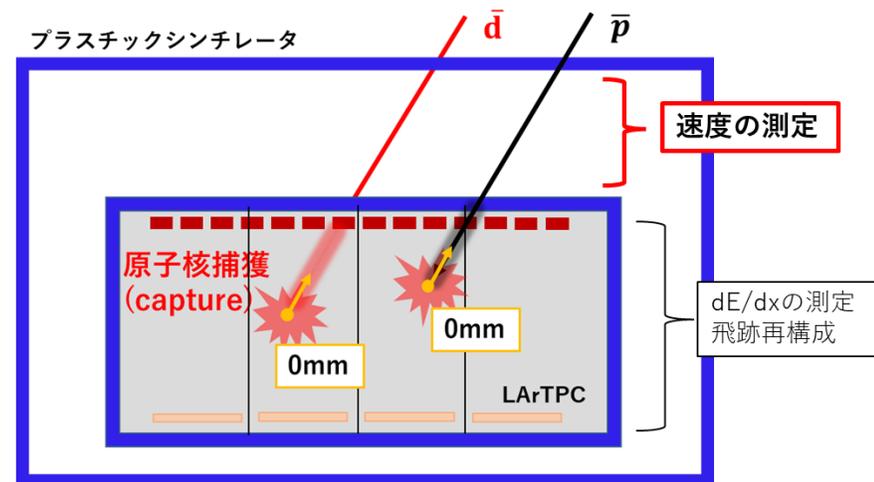
検出器の厚さを変えた際の検出感度

➤ 検出器の厚さを変えて検出感度を算出

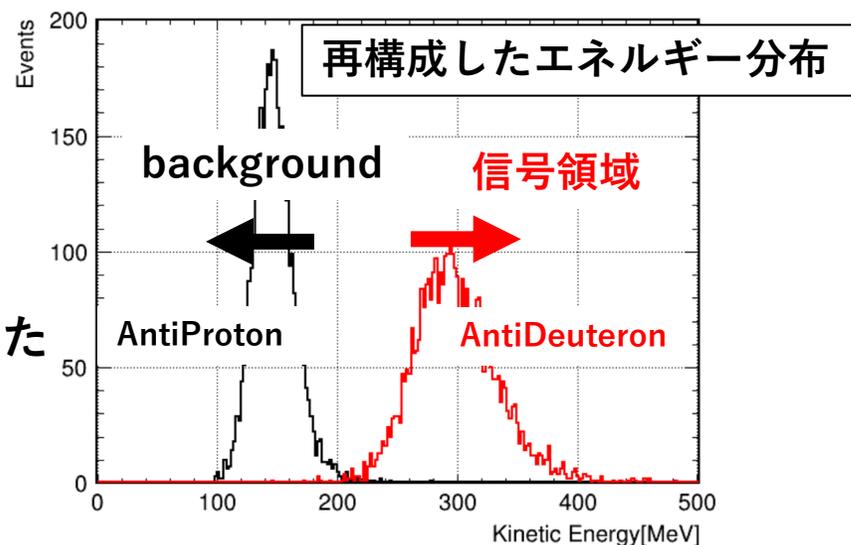


粒子識別能力の評価方法

- 150MeV/nの反陽子・反重陽子を入射
- 液体アルゴンに到達した粒子について
時間分解能・位置分解能を考慮して速度を再構成



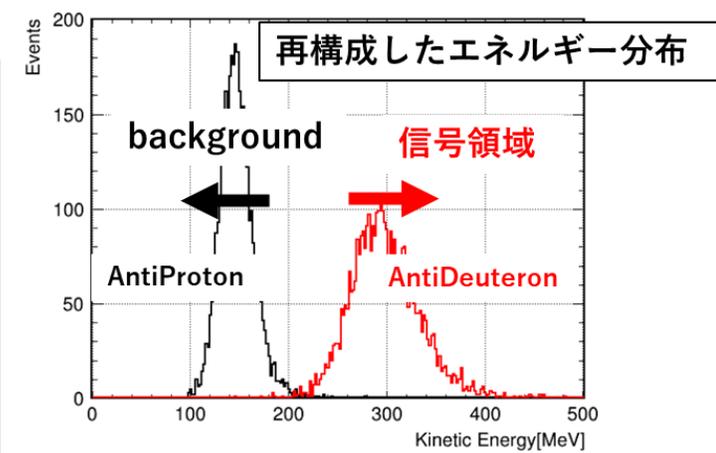
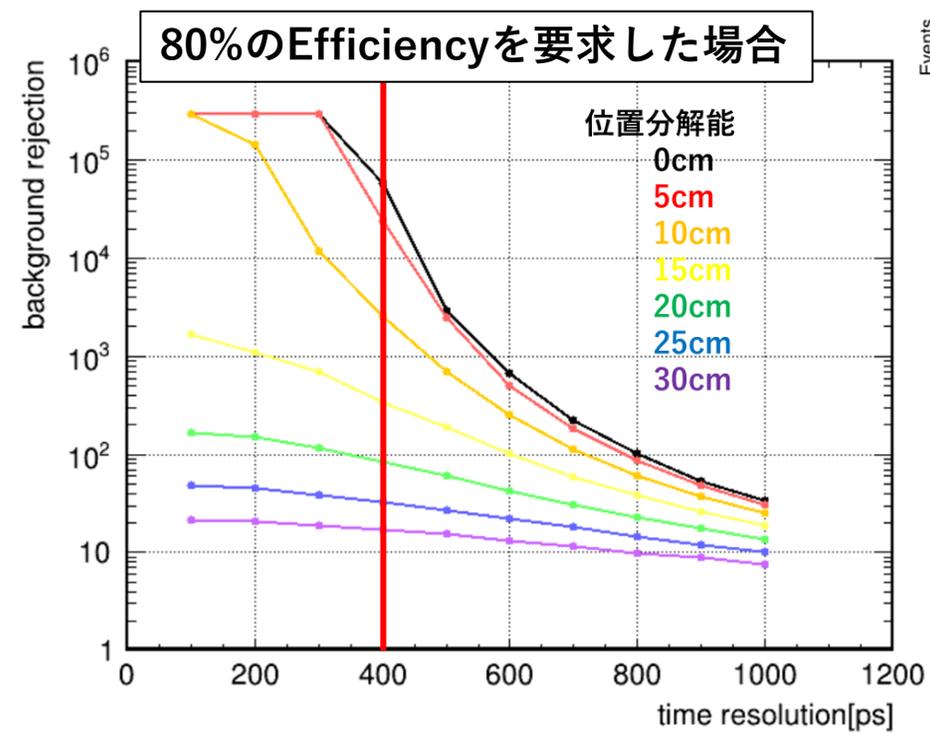
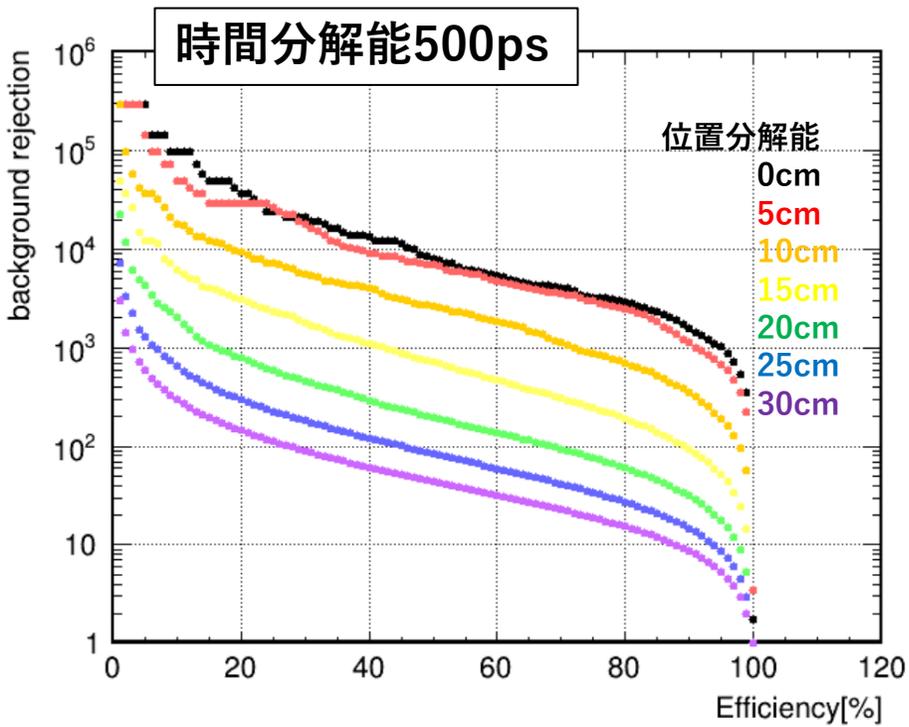
エネルギー損失を用いた
粒子識別能力100%
(=質量は既知)



$$Efficiency[\%] = \frac{\text{信号領域のAntiDeuteronイベント数}}{\text{全AntiDeuteronイベント数}}$$

$$background\ rejection = \frac{1}{\text{信号領域のAntiProtonイベント数/全AntiProtonイベント数}}$$

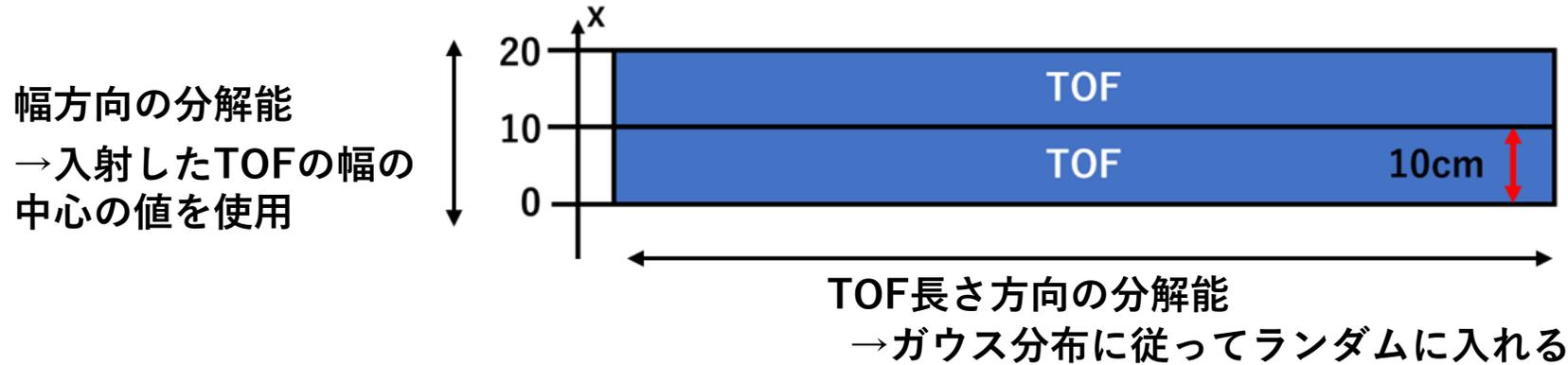
プラスチックシンチレータ分解能と粒子識別能力



時間分解能・位置分解能の考慮

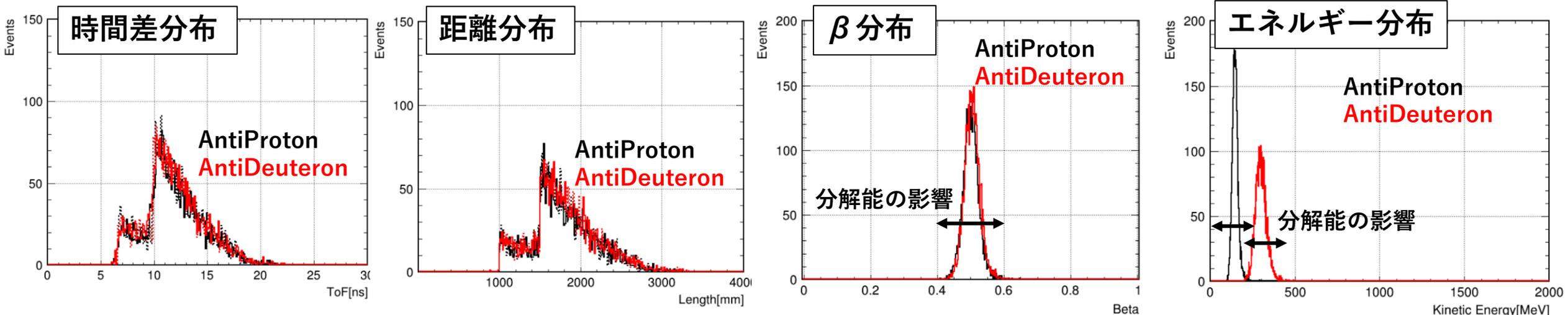
分解能の入れ方

- 時間分解能→ガウス分布に従って入れる
- 位置分解能→長さ方向と幅方向で分解能の入れ方を変える



xの位置
 → x=10~20cmに入射 → x=15cm
 → x=0~10cmに入射 → x=5cm

例) 時間分解能300ps, 幅10cm, 長さ方向の位置分解能10cm

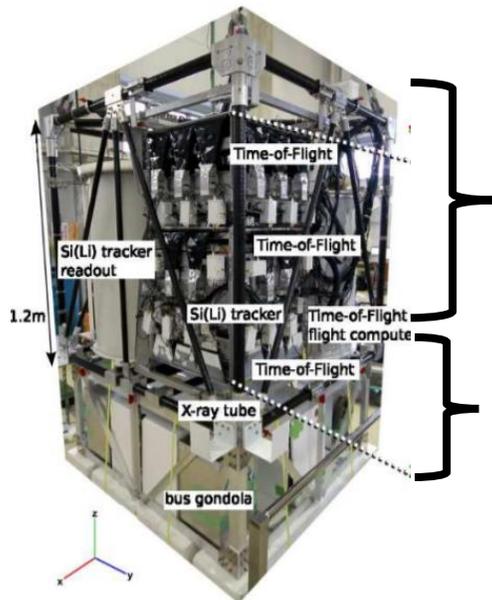


気球工学試験

➤ 気球実験の技術確立のため、短時間フライトの気球工学試験を行う

pGAPS実験

- GAPS実験の検出器基本動作を気球高度で実証
- 2012年に大樹町で約6時間のフライト
- 検出器の重さ:合計510kg



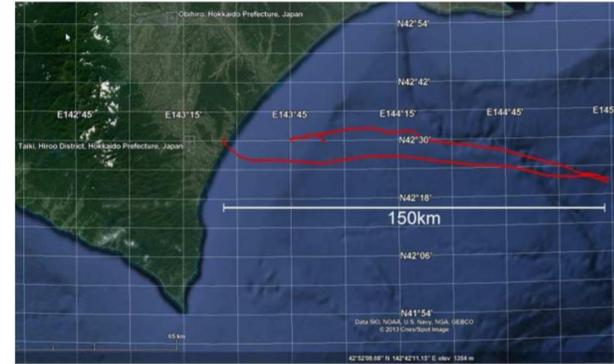
Science part 308kg

- TOF(プラシン+PMT)
- Si tracker
- 読み出し機器

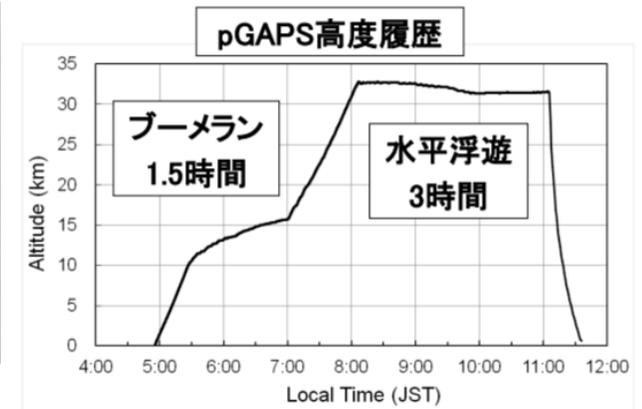
bus gondola 202kg

- 遠隔操作システム
- バッテリー
- バラスト
- ヒートパイプ

合計510kg



pGAPS実験の飛行経路



小型の液体アルゴンTPC(10cm角程度)を気球高度で動作させたい



気球工学実験に向けて

- 検出器の重さは**200kg程度**
- **約6時間**のフライトで液体アルゴンを保持を満たす容器の検討を行う

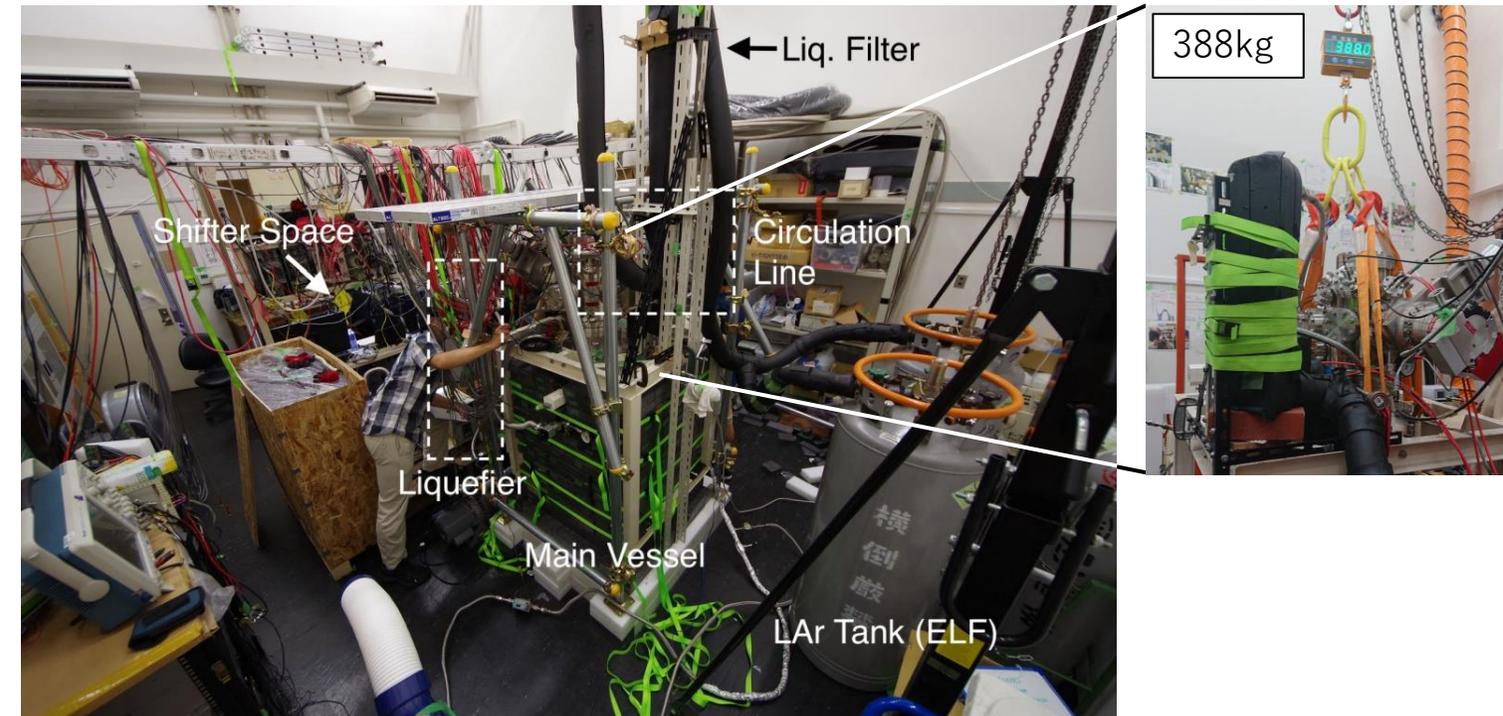
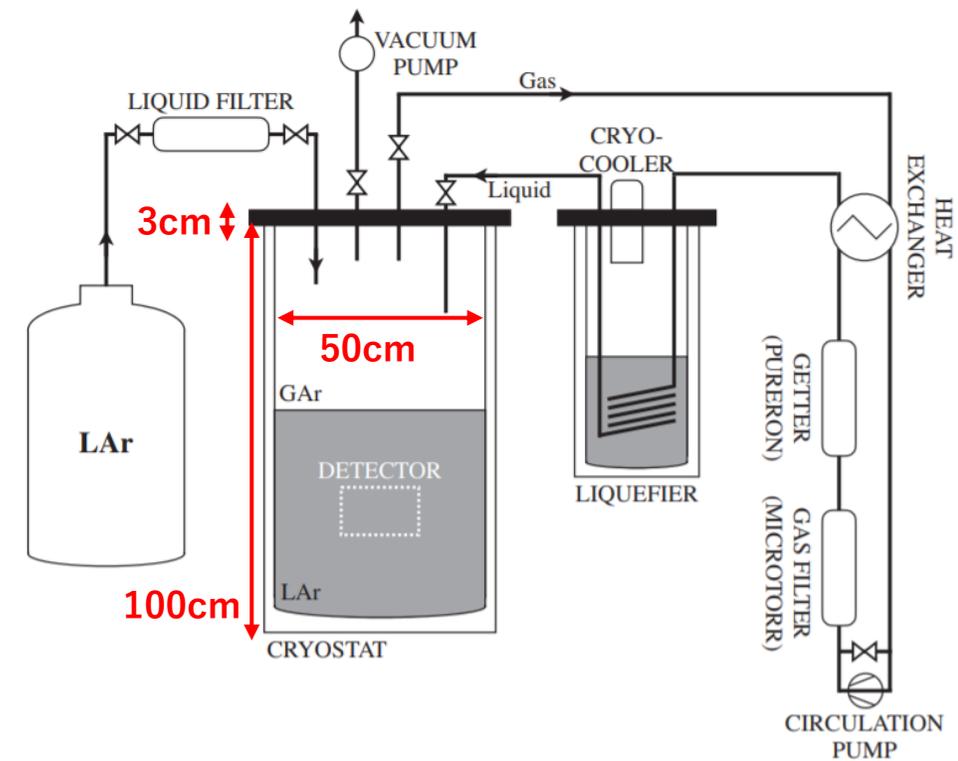
容器の重量

➤ 地上では安定的に液体アルゴンを運用@早稲田大学
→現在のsetupを参考に容器を検討

➤ 現在の容器(200L)の重さ

真空断熱容器 + 熱交換器 + フレームで388kg

→液体アルゴンの重さ(200Lで約270kg)を加えると約650kg程度



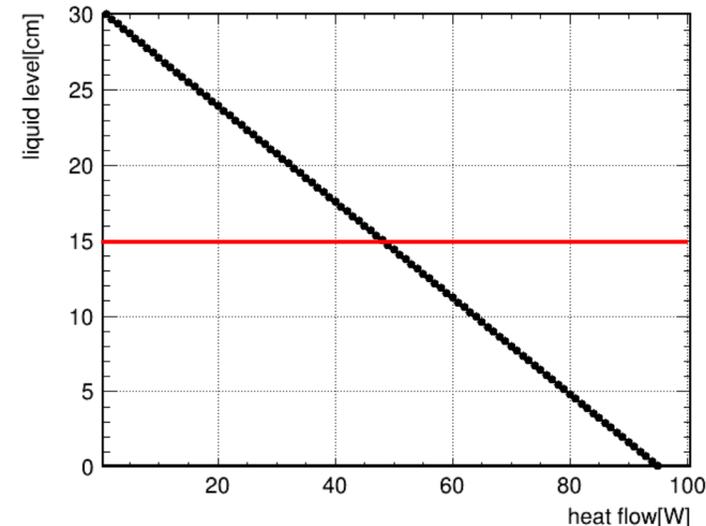
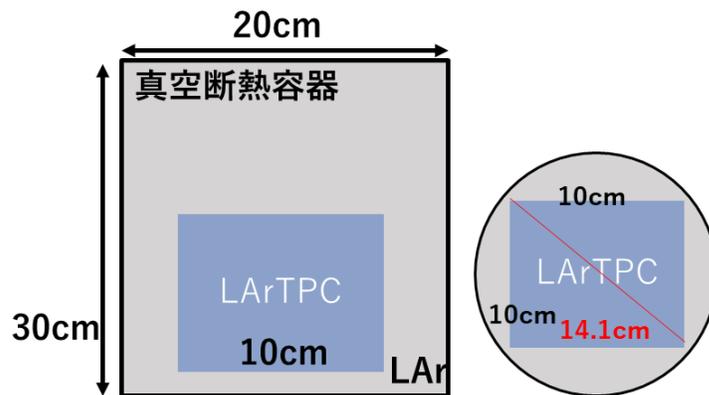
液体アルゴンの保持(容器の熱流入)

許容可能な熱流入量

- 液体アルゴン：
 - 187度, 60Wの熱流入で1L/hの蒸発
- 6時間のフライト後の液面の高さを計算

→直径20cm, 高さ30cmの容器の場合, 50W以下の熱流入になるようにする必要がある

気球工学試験用容器案



熱流入と6時間後の液面の高さの関係

現在の早稲田セットアップでの熱流入

- 熱伝導, 放射熱を考慮して液面ごとの熱流入を計算

熱伝導

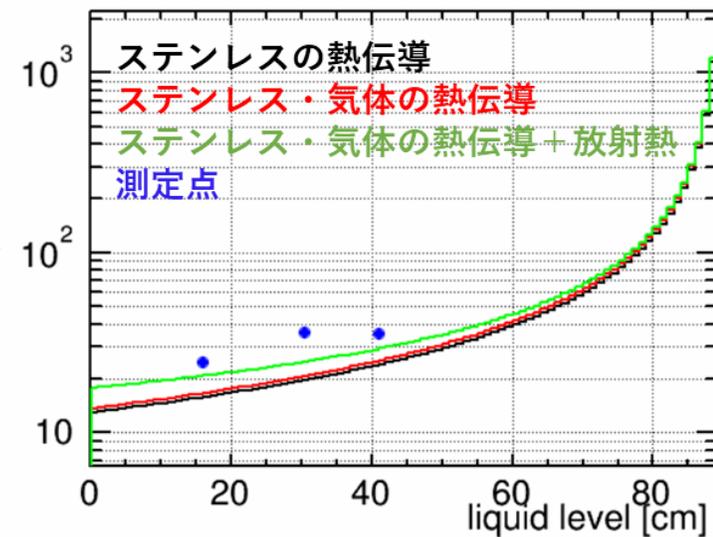
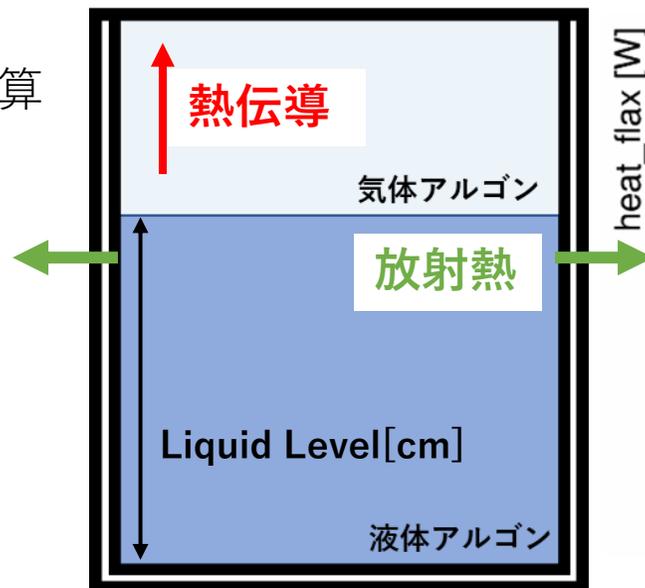
$$Q = \lambda \frac{S \cdot T}{L}$$

(λ : 熱伝導率, S : 面積, T : 温度差, L : 長さ)

放射熱

$$Q = \frac{\sigma f_{Al} f_S (T_L^4 - T_H^4)}{2f_{Al} + 19f_S}$$

ステンレス容器

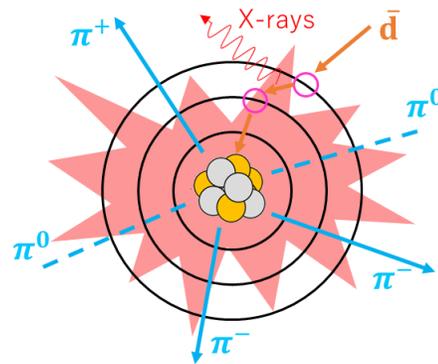
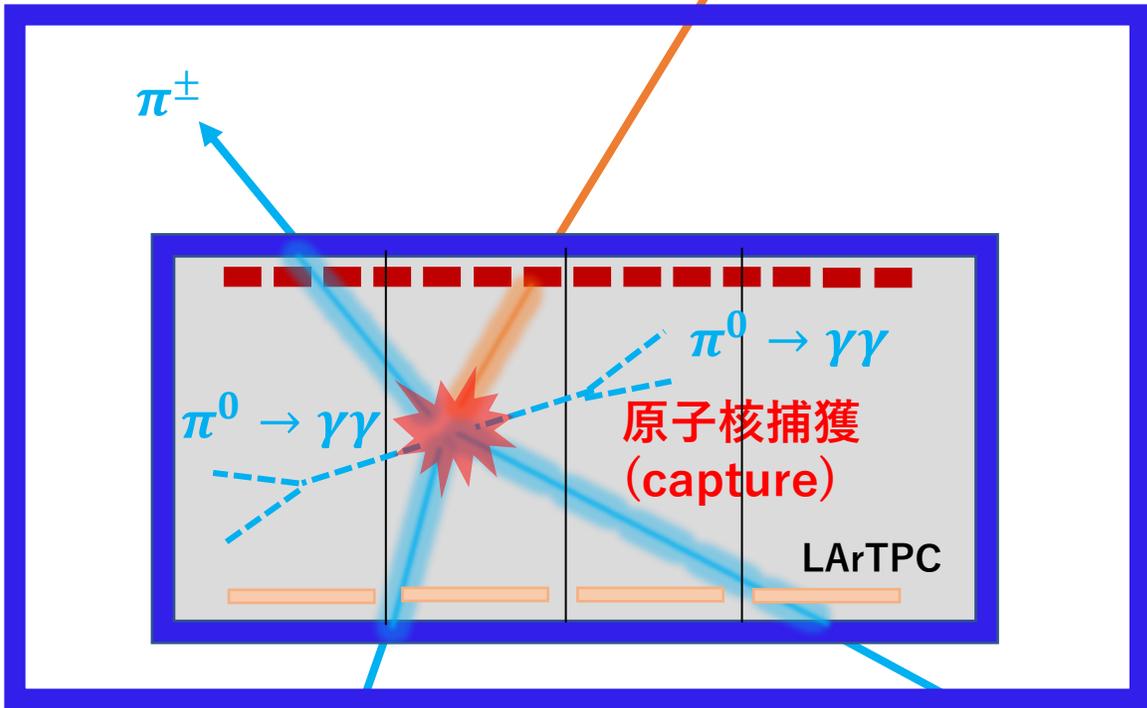


熱流入の計算値と測定データ

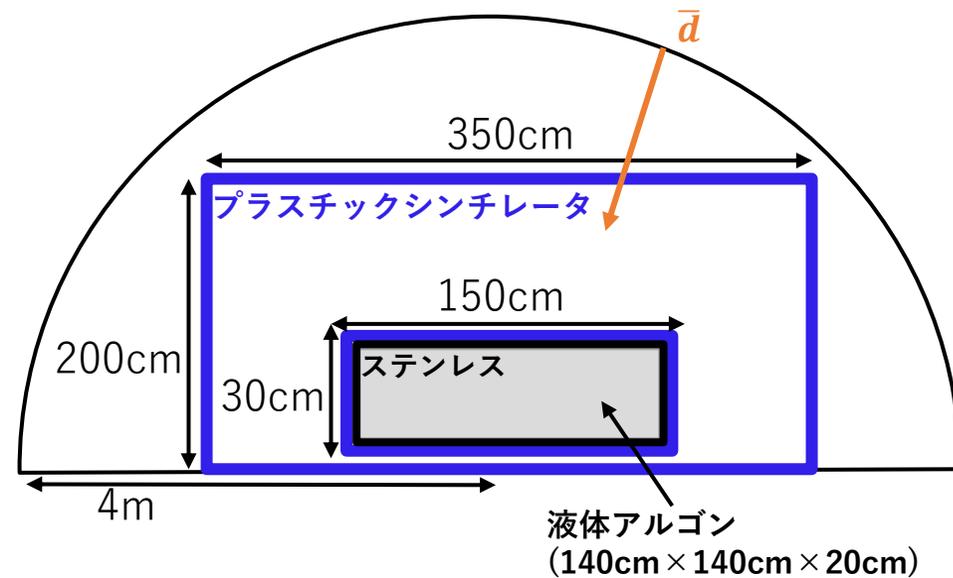
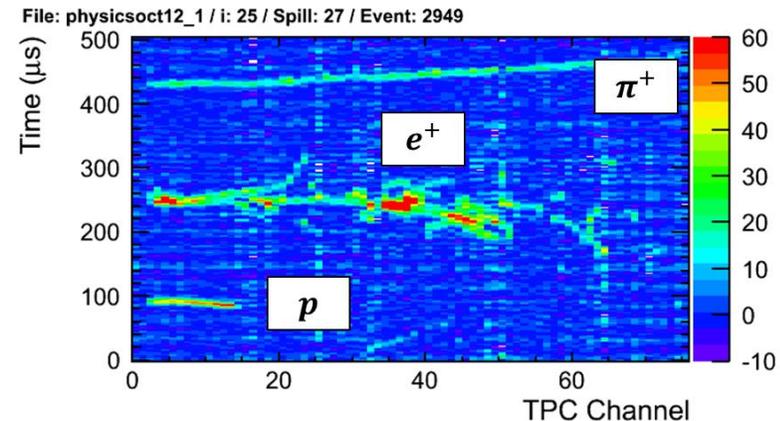
- 今後気球高度環境での熱流入の見積もりを行う

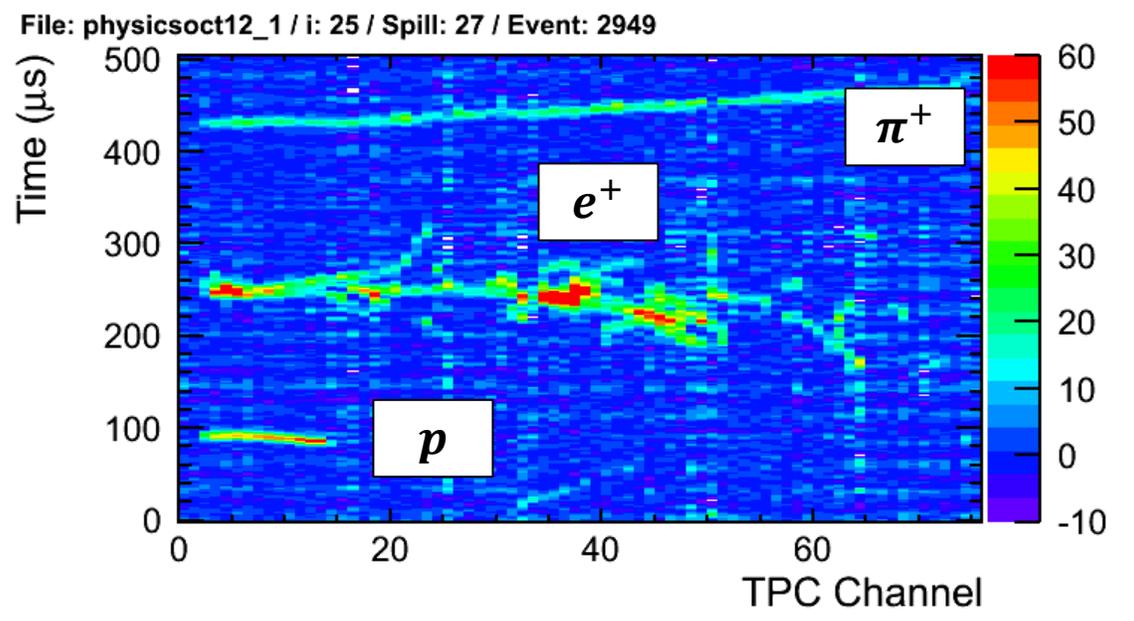
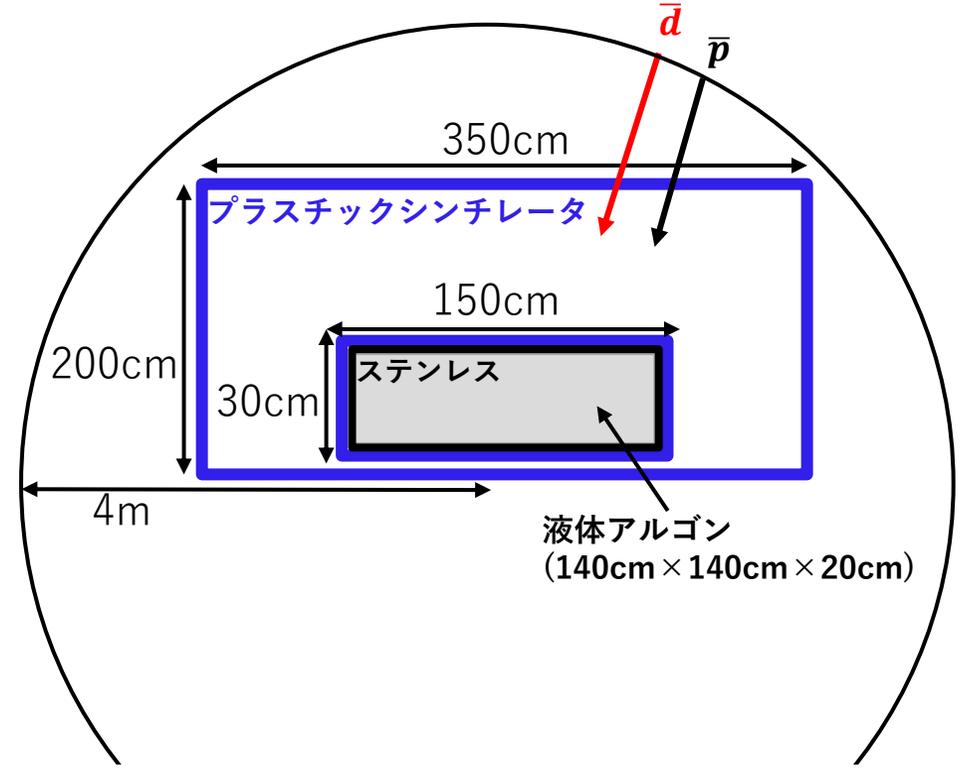
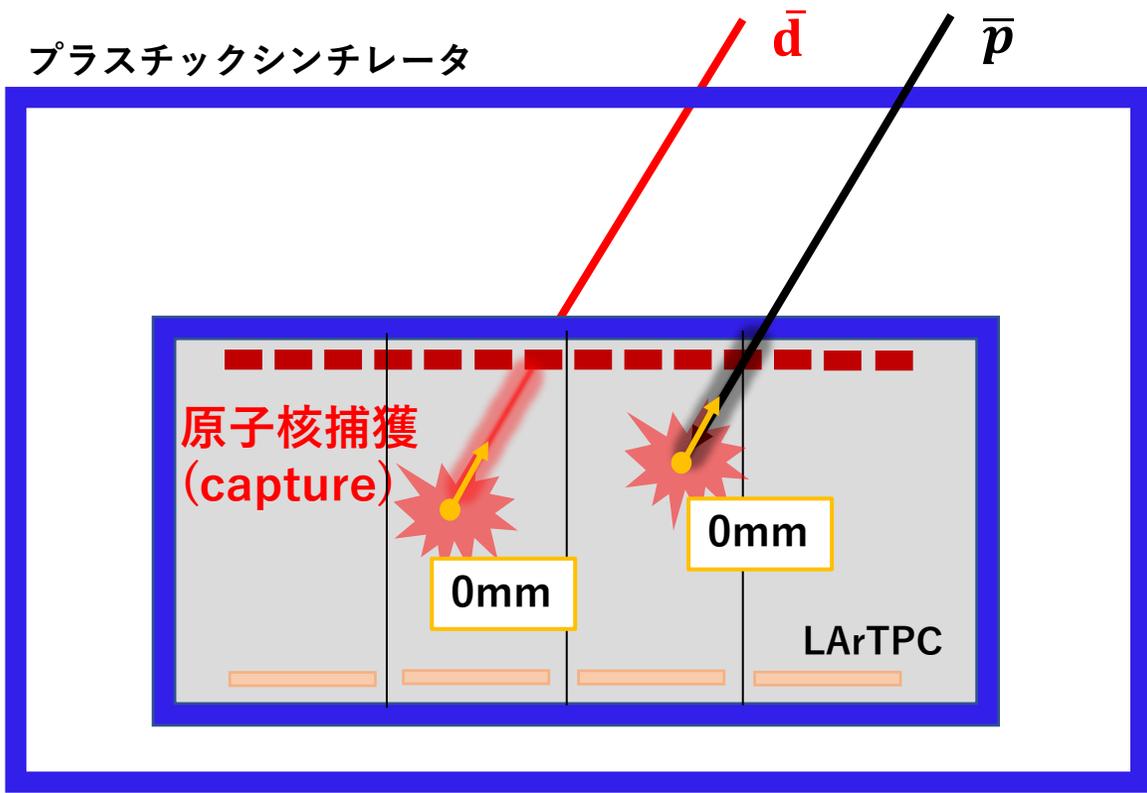
信号事象の反応

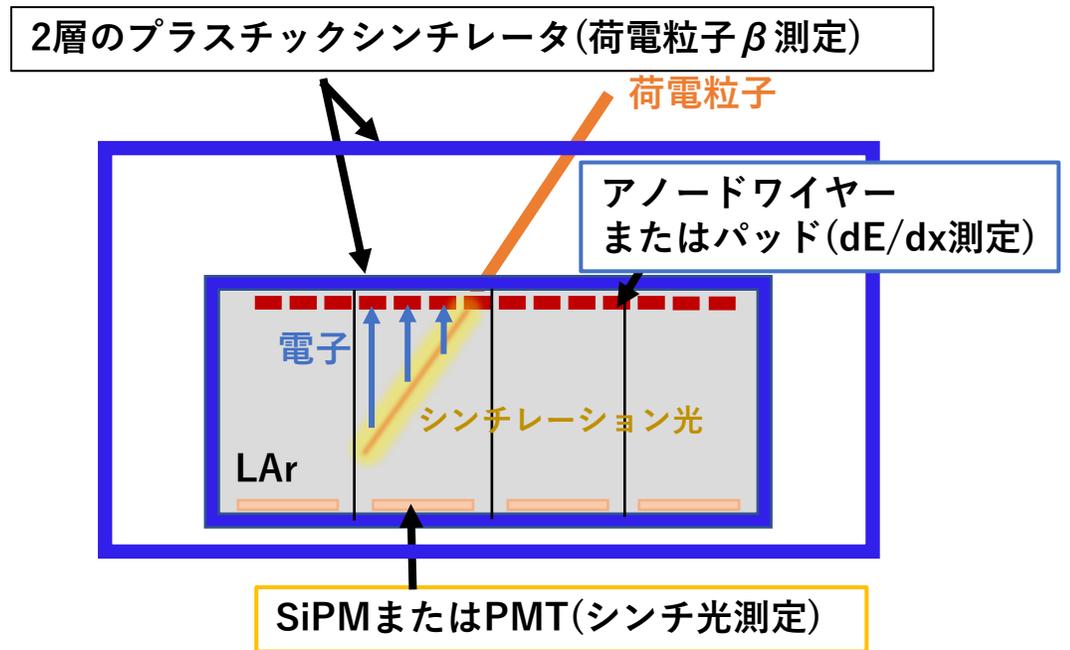
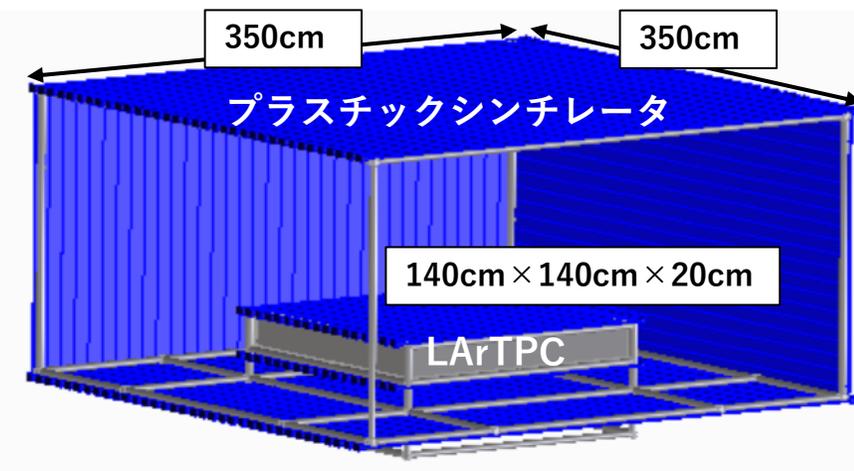
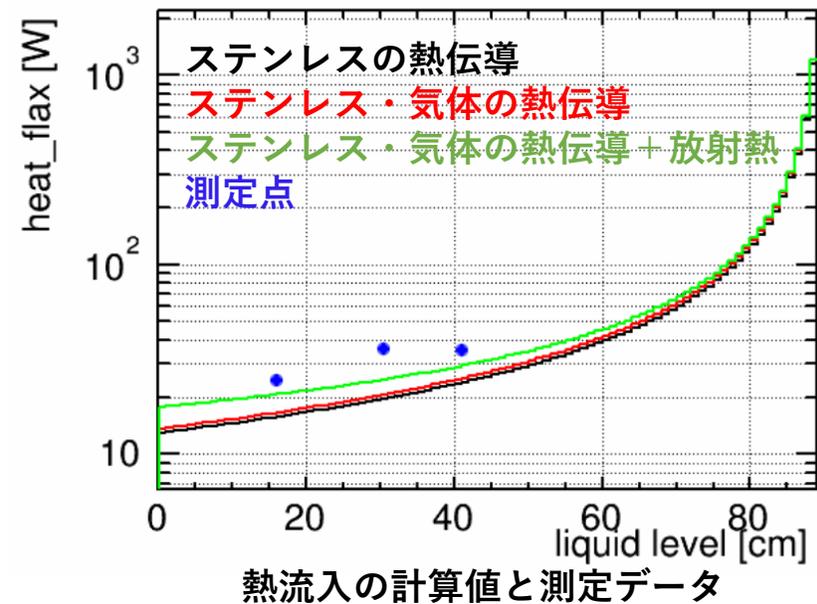
プラスチックシンチレータ



beam experiment@ J-PARC(2010)







プラスチックシンチレータ

\bar{d}

非弾性散乱
(inelastic)

π^\pm

π^\pm

$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

\bar{p}

原子核捕獲
(capture)

$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

LArTPC

π^\pm

π^\pm

