

トリウム線源を用いた 液体キセノン検出器の新しい 較正法の基礎研究について

Contents

1. XMASS実験
2. Thソースを用いた較正
 - 較正法
 - 実証実験
3. まとめ

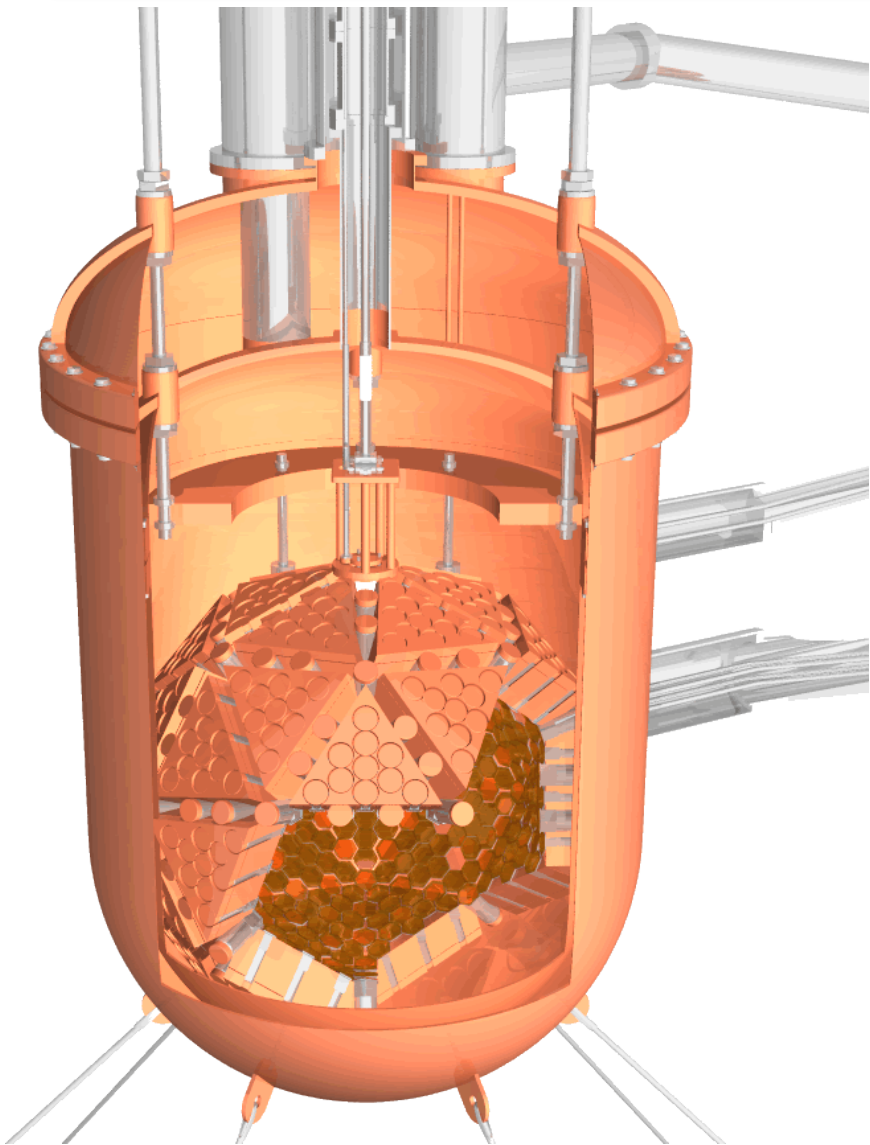
東京大学宇宙線研究所
神岡宇宙素粒子研究施設
修士2年 小林雅俊

XMASS実験



- 岐阜県神岡鉱山内で行われている、暗黒物質探索実験
 - 液体キセノン
 - 1層型
- キセノンと暗黒物質とが衝突する際のシンチレーション光をPMTで観測
- 642本のPMTが60面体に設置されている

XMASS実験



- 岐阜県神岡鉱山内で行われている、暗黒物質探索実験
 - 液体キセノン
 - 1層型
- キセノンと暗黒物質とが衝突する際のシンチレーション光をPMTで観測
- 642本のPMTが60面体に設置されている

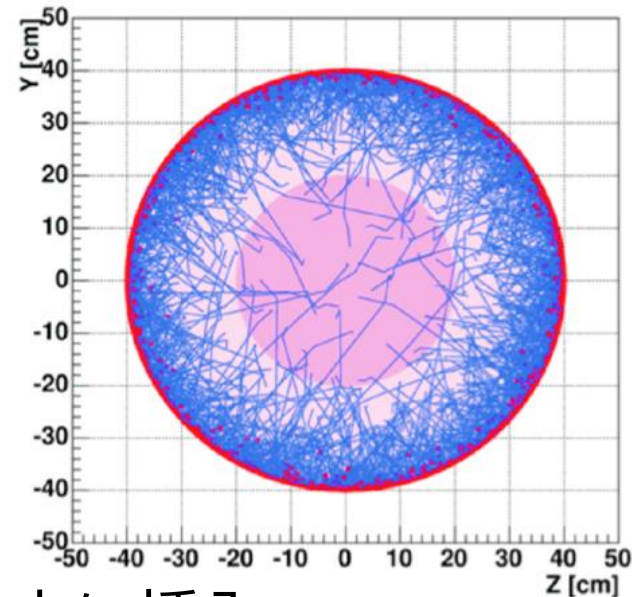
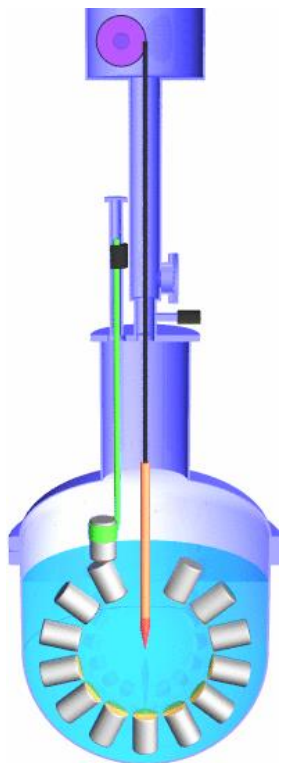
XMASS実験



- 岐阜県神岡鉱山内で行われている、暗黒物質探索実験
 - 液体キセノン
 - 1層型
- キセノンと暗黒物質とが衝突する際のシンチレーション光をPMTで観測
- 642本のPMTが60面体に設置されている

XMASS実験

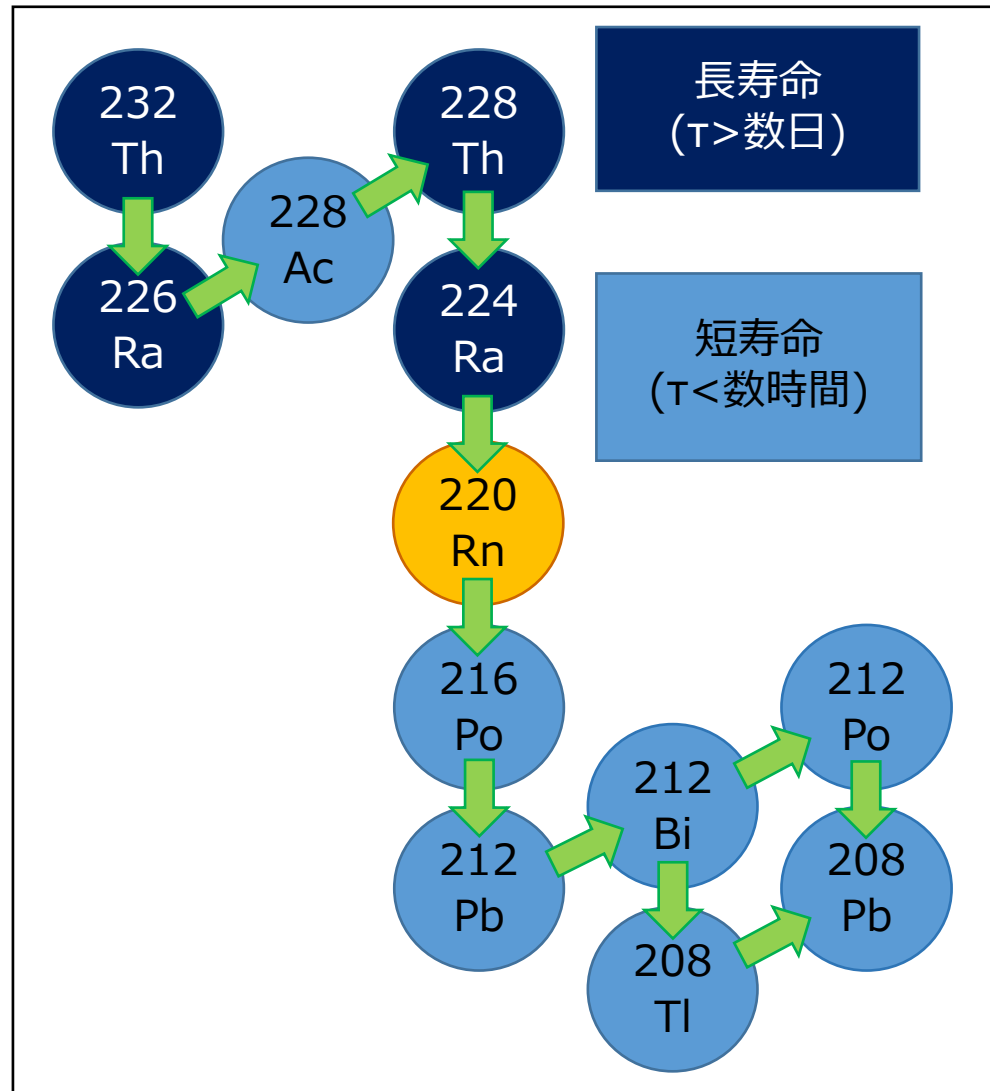
- XMASS検出器:
大質量キセノンの自己遮蔽
 - イベント位置の再構成が重要



- 現在の較正装置：線源を中に挿入
 - 位置が確定できる
 - 様々なエネルギーの線源
 - 低エネルギーでは構造体が邪魔
- 事象位置の再構成に対する評価
 - 実機では122keV γ のみ
 - より低エネルギーを評価したい！

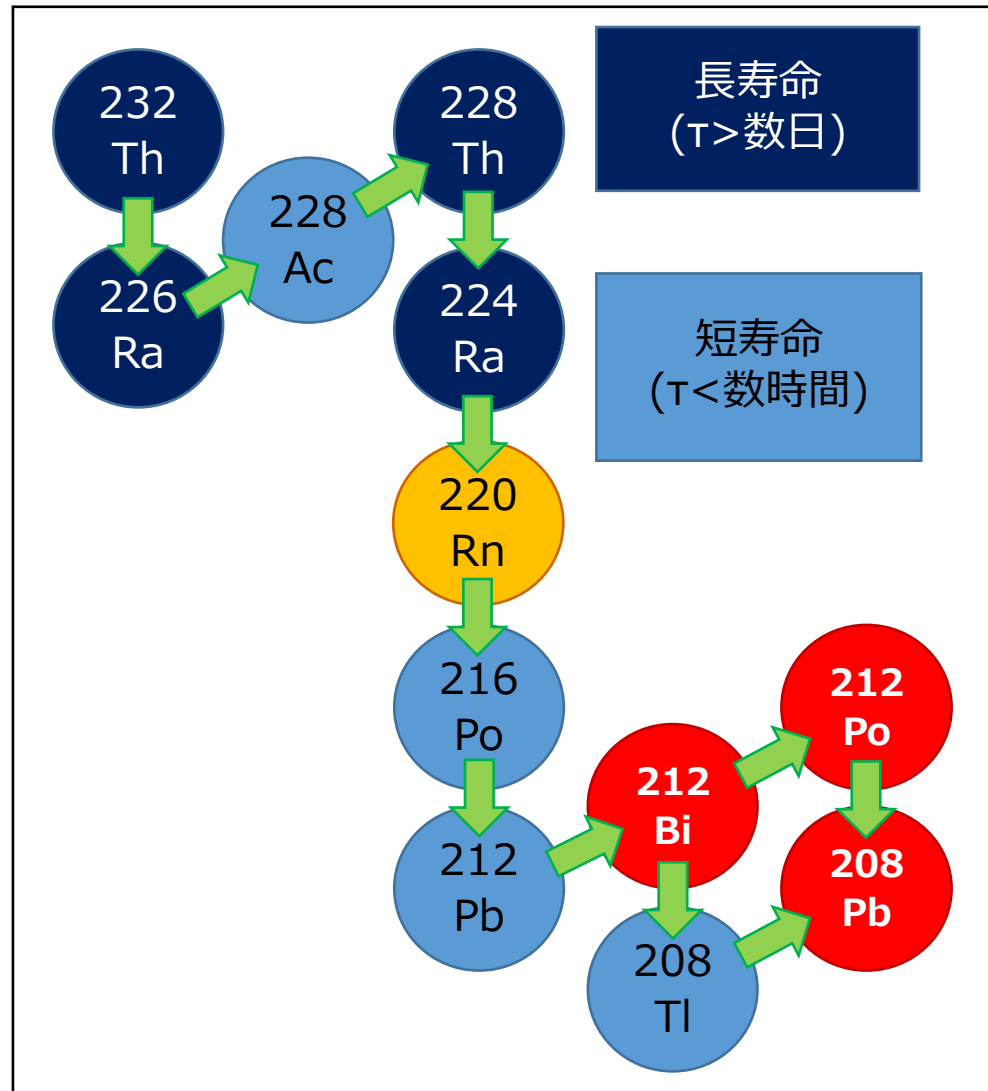
Thソースによる較正法

- Th系列から発生する **Rn220(トロン, Tn)** を検出器に導入
- Tn以下のTh系列は短寿命(max: 212Pb, 10.6h)
→ **BGにならない**
- 較正には下流にある **212Bi** と **212Po** を利用

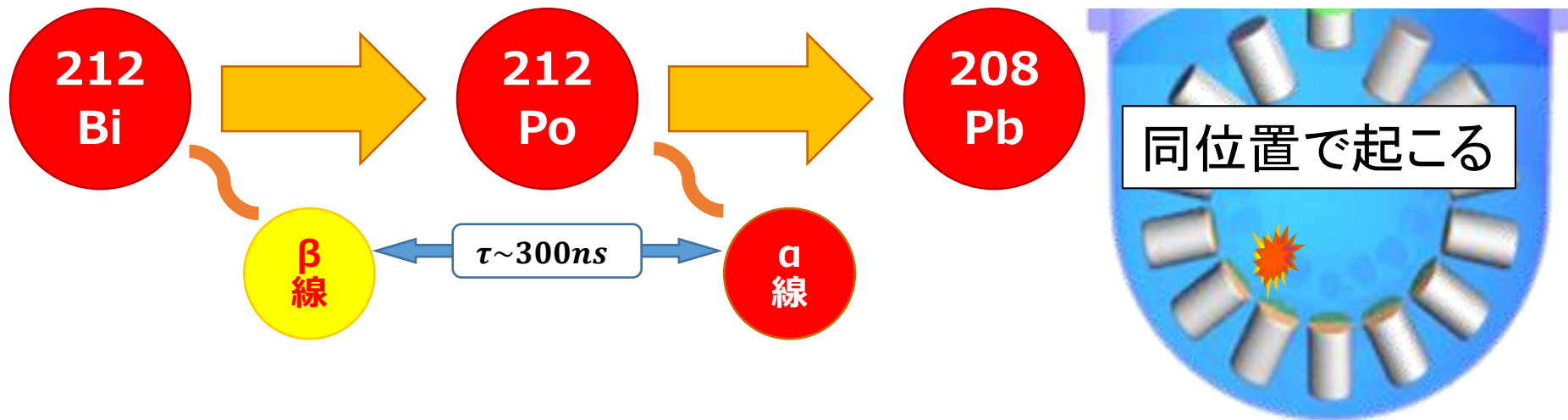


Thソースによる較正法

- Th系列から発生する $Rn220$ (トロン, Tn) を検出器に導入
- Tn 以下のTh系列は短寿命(max: $212Pb$, 10.6h)
→ BG にならない
- 較正には下流にある $212Bi$ と $212Po$ を利用



Thソースによる較正法

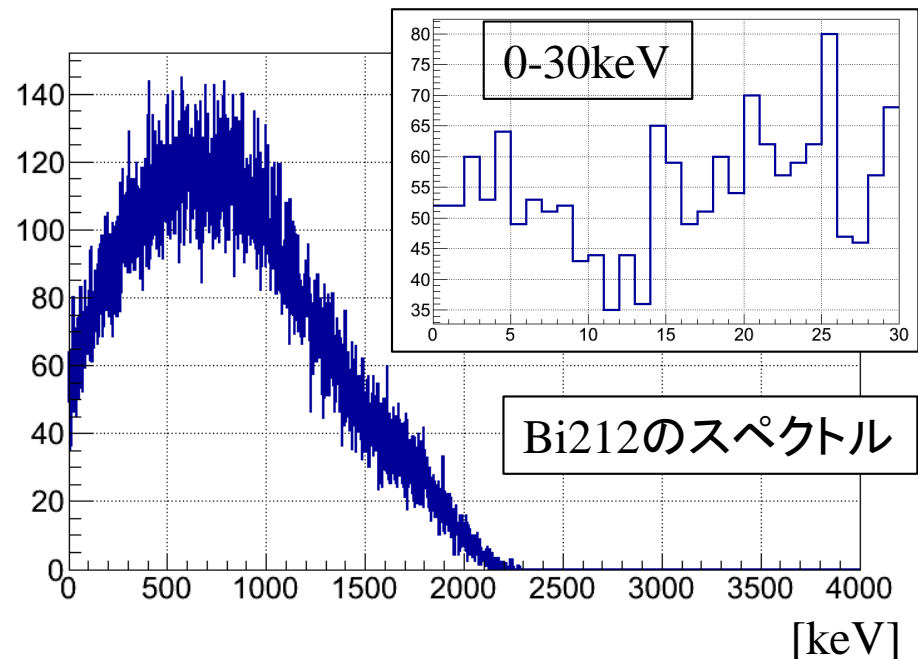


- ^{212}Bi と ^{212}Po ：半減期300ns
 - 二つのイベントが検出器の同位置で起こる
- β 線イベントの位置と α 線イベントの位置とを比較
 - 低エネルギーにおける位置決定精度を、大光量で確かめることができる

Thソースによる較正法

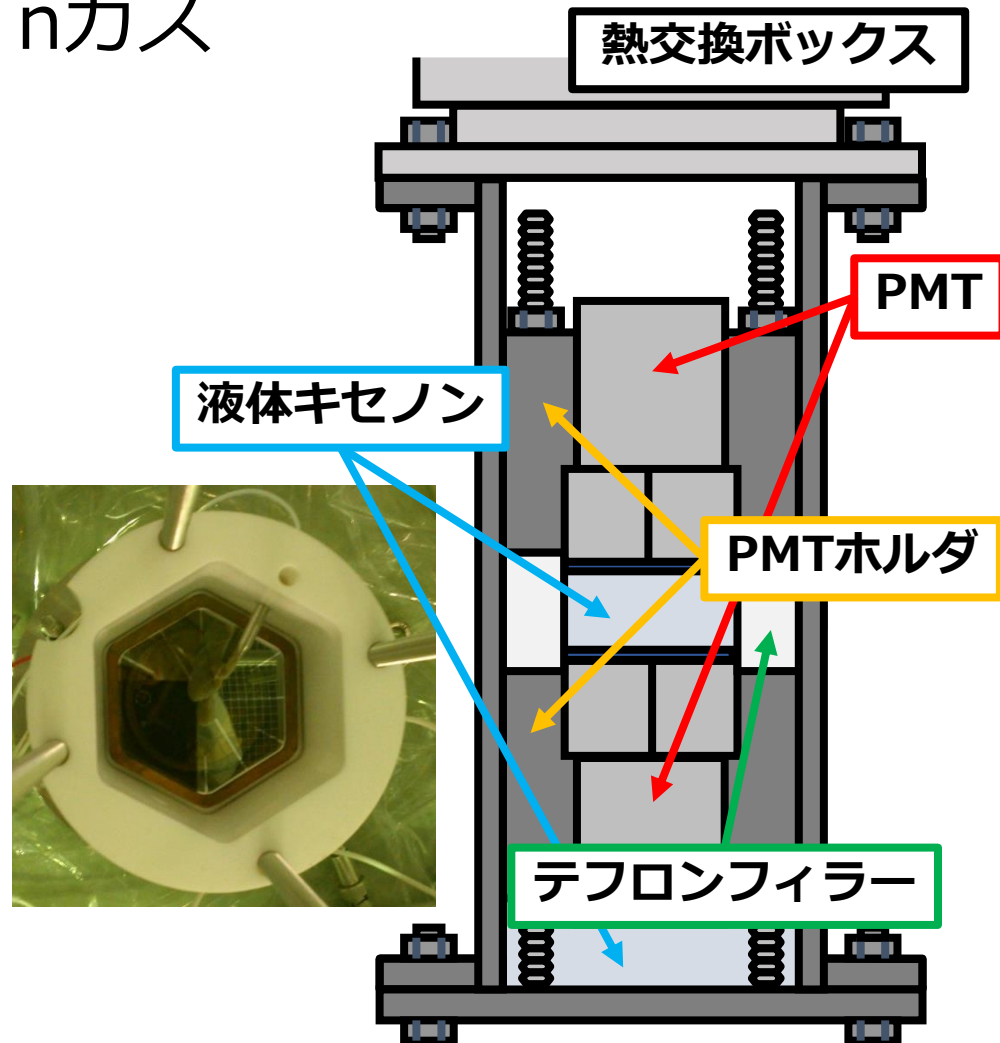
- XMAS S 検出器に対する較正として、
30keV以下のイベントについて、有効体積($R < 20\text{cm}$)
で10%程度の誤差での評価
を目標とする
=>30keV以下で、検出器全体で800イベント

- MCでのスペクトルから、
全体で必要なイベント数
 1.3×10^5 イベント



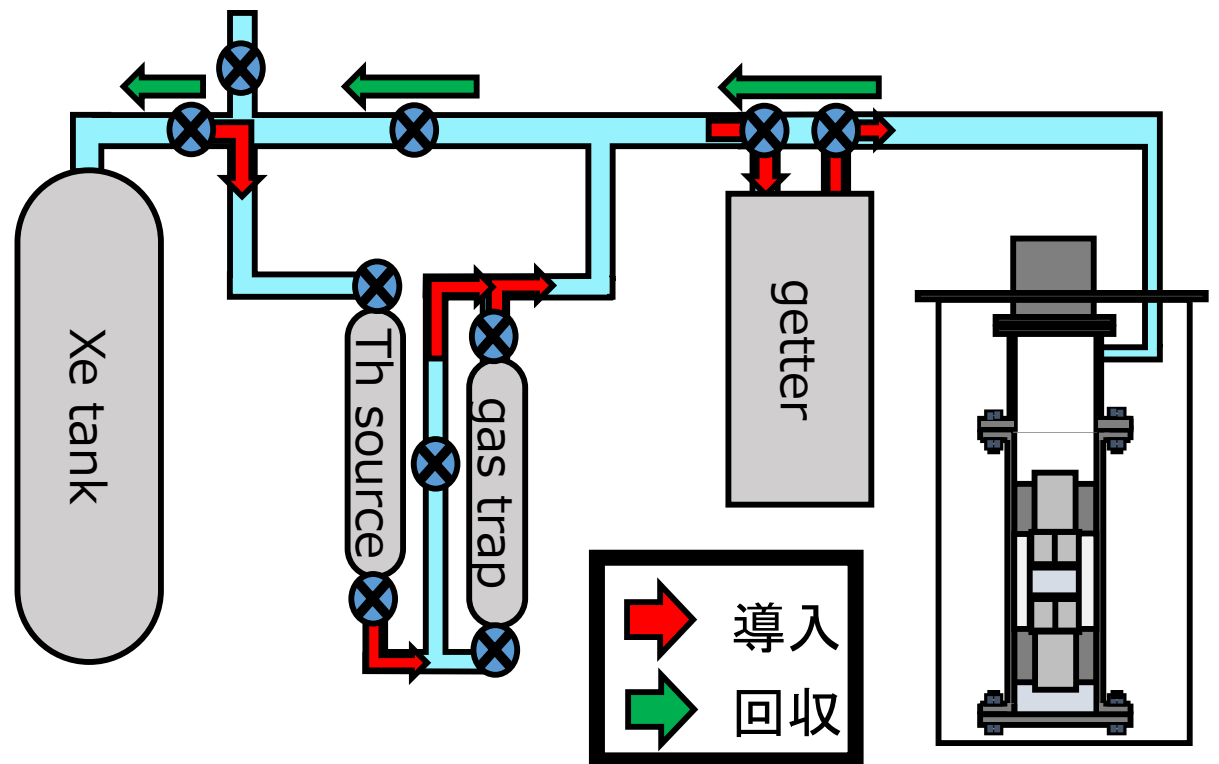
テストベンチを用いた実証実験

- テストベンチを用い、Tnガスの導入を行った
- 液体キセノンによる検出部を、PMT2本で挟み込む構造
- およそ2kgのキセノン



テストベンチを用いた実証実験

- Thソースとしてランタンマントルを使用
- 50個のマントルからのガスを検出器内に導入して測定した
 - 流速2[l/min]
 - 総量2[l]



崩壊事象の測定

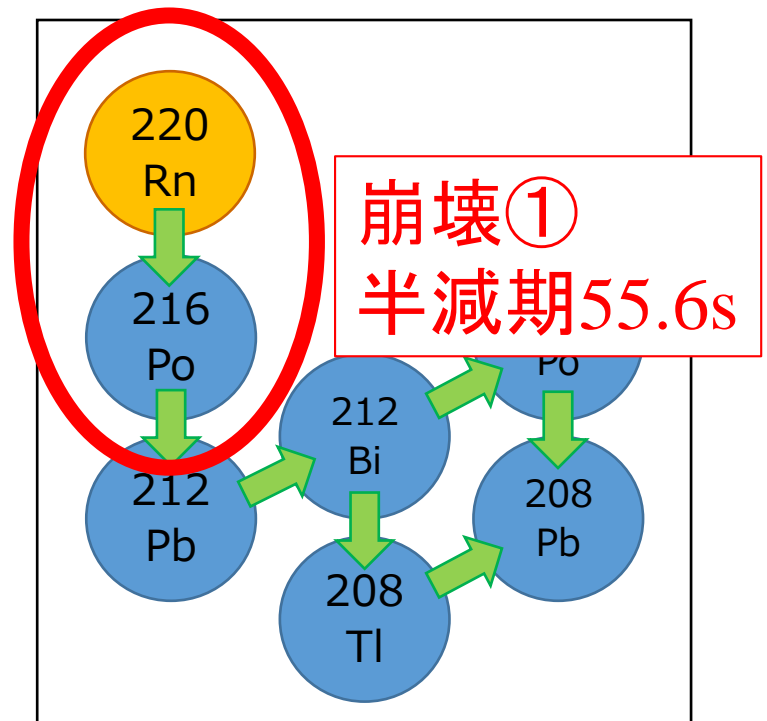
- Tnの半減期が1分、 ^{212}Pb の半減期が10時間
- 導入されたTnガスは一度すべて ^{212}Pb に崩壊した後、10時間かけて崩壊する

1. Tnと娘核の ^{216}Po

- 二つの α 線

2. ^{212}Bi - ^{212}Po

- 先発の β ・後発の α



崩壊事象の測定

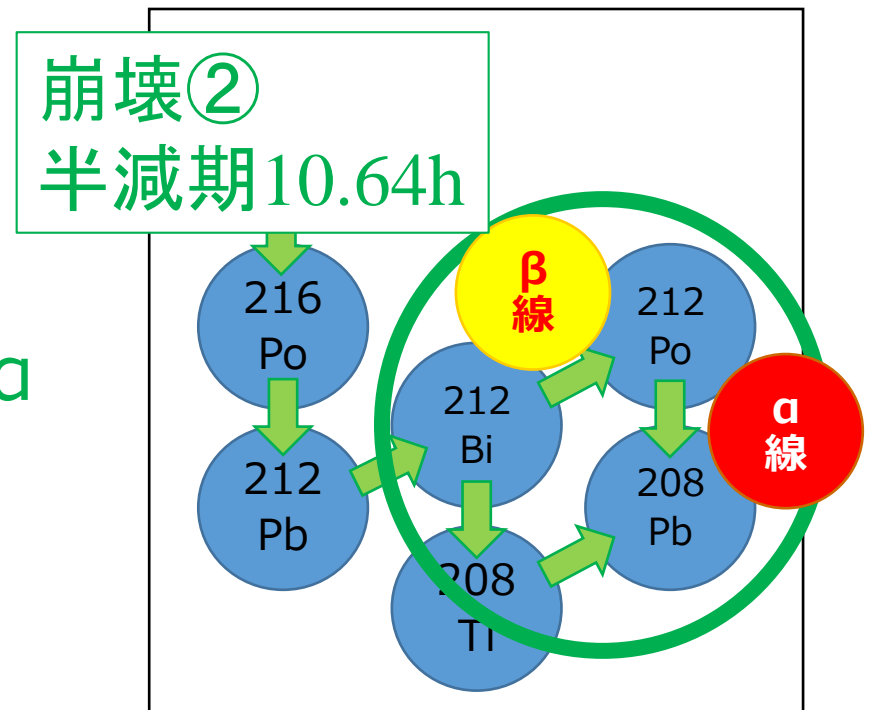
- Tnの半減期が1分、 ^{212}Pb の半減期が10時間
- 導入されたTnガスは一度すべて ^{212}Pb に崩壊した後、10時間かけて崩壊する

1. Tnと娘核の ^{216}Po

- 二つの α 線

2. ^{212}Bi - ^{212}Po

- 先発の β ・後発の α

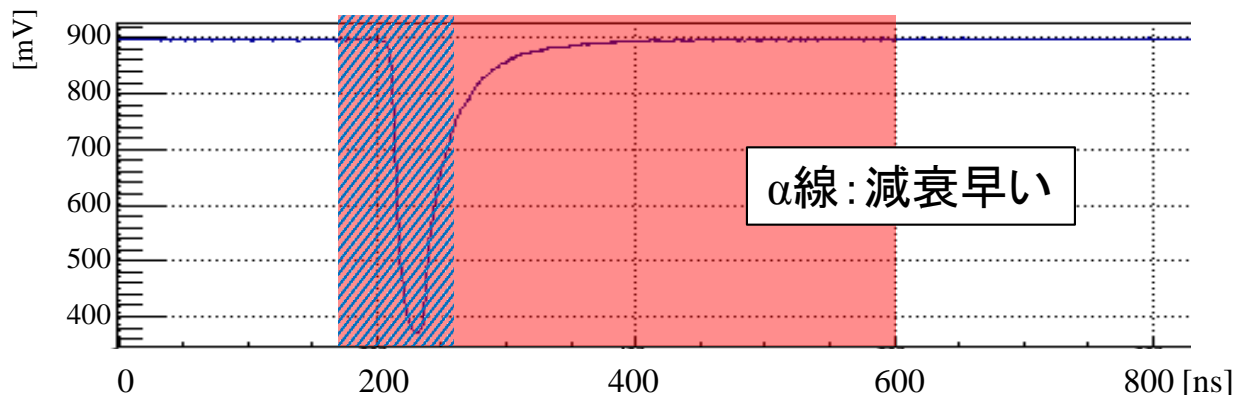
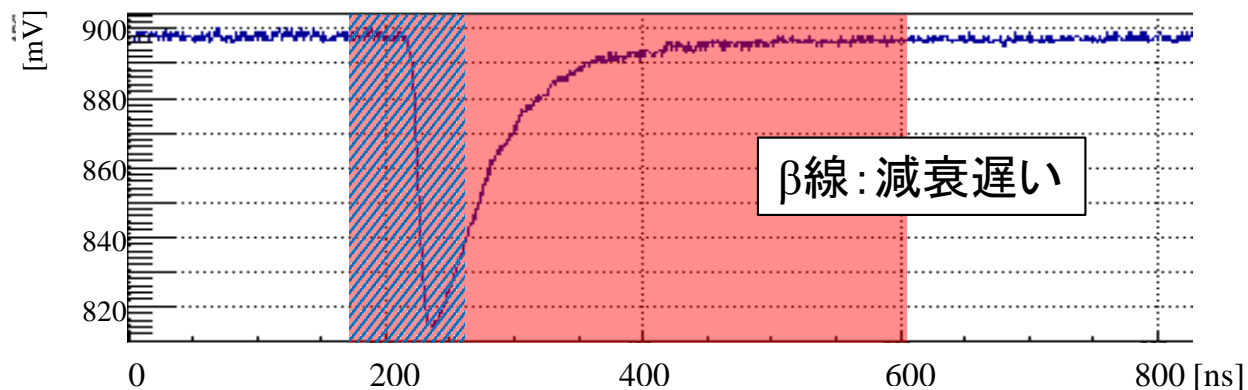


測定①：Tn由来の α 線

主なBG： β, γ 線

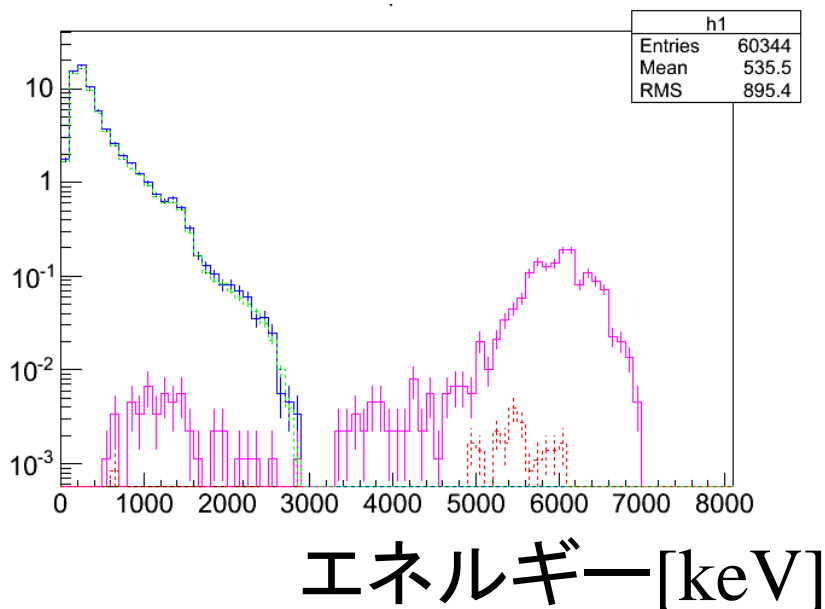
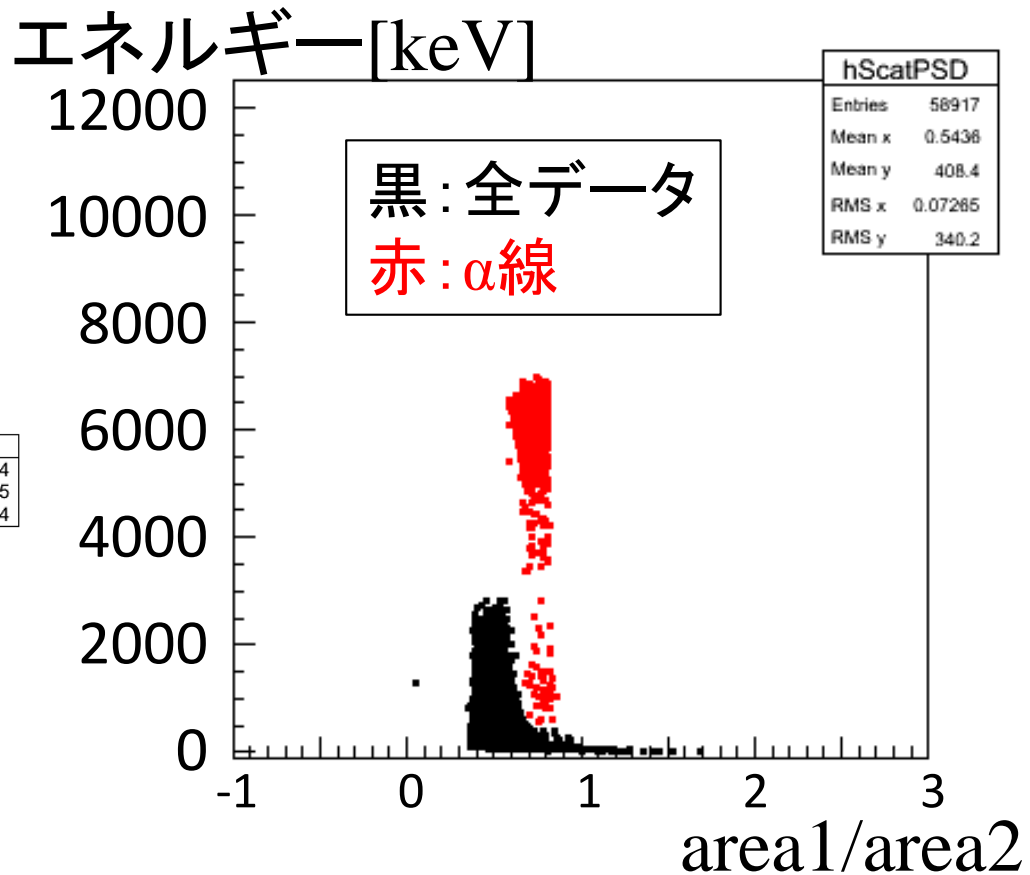
α 線と分離したい \Rightarrow シンチレーション光の減衰時間を利用
FADCのウィンドウ

- 積分範囲を変え
ること
で分離
 - 波形の先頭
 - 波形全体



測定①：Tn由来の α 線

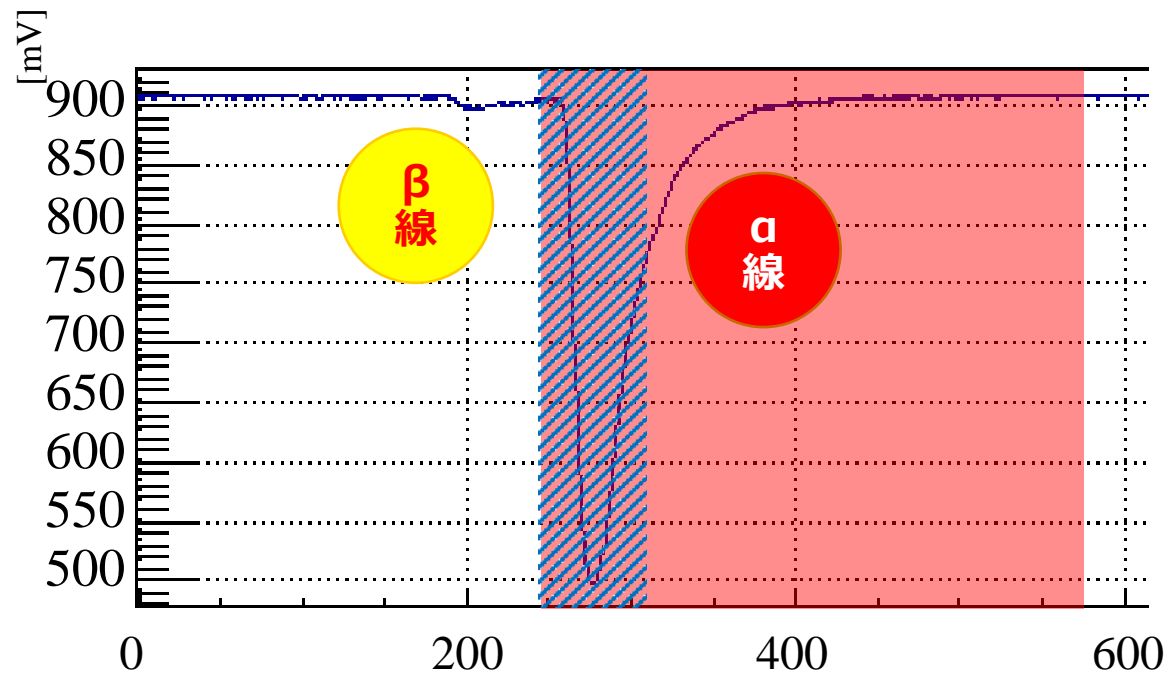
- 最初の15分間をデータ、その後1時間分をBGとした
- BGを引いた結果、1400.5イベントが残った



測定②：Bi-Po由来イベント

- Bi-Po由来のイベントに対する計測
- 波形のもっとも大きい部分の付近を積分する
[peak-30:peak+35ns]
[peak-30:peak+300ns]

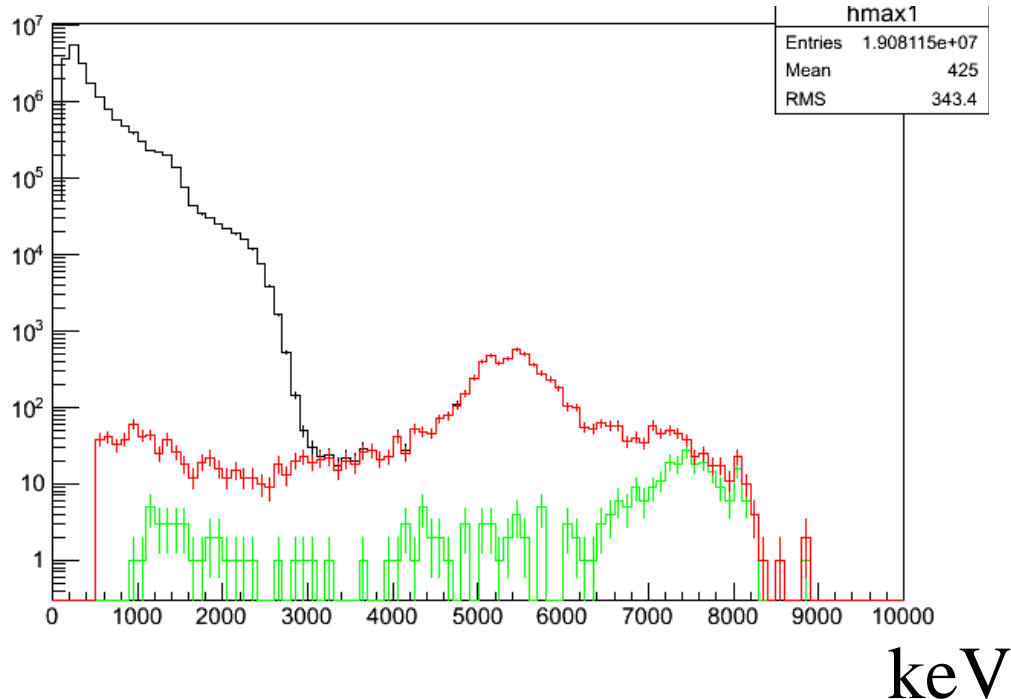
- β 線でトリガー後の α 線を選択する
 - α の最大時間がトリガー後30ns以降



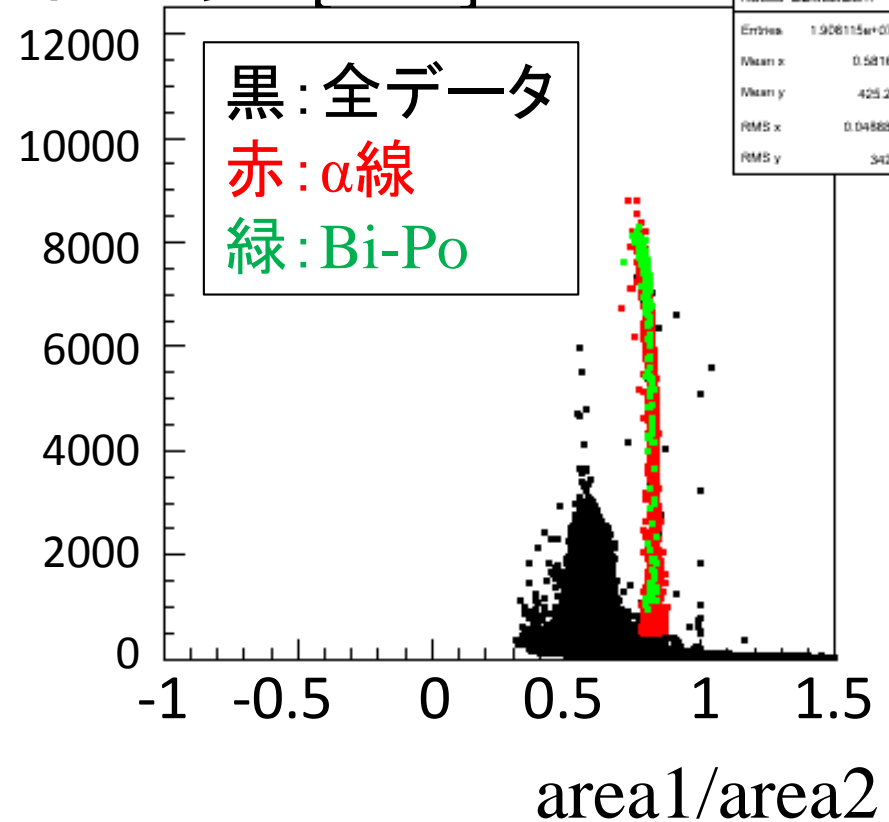
測定②: Bi-Po由来のイベント

- Bi-Poライクなイベントは292個得られた

イベント数



エネルギー[keV]



考察：イベントの検出効率

- Tn由来のイベント数:700
- これに対し、イベントのロスの要因として以下を考えた

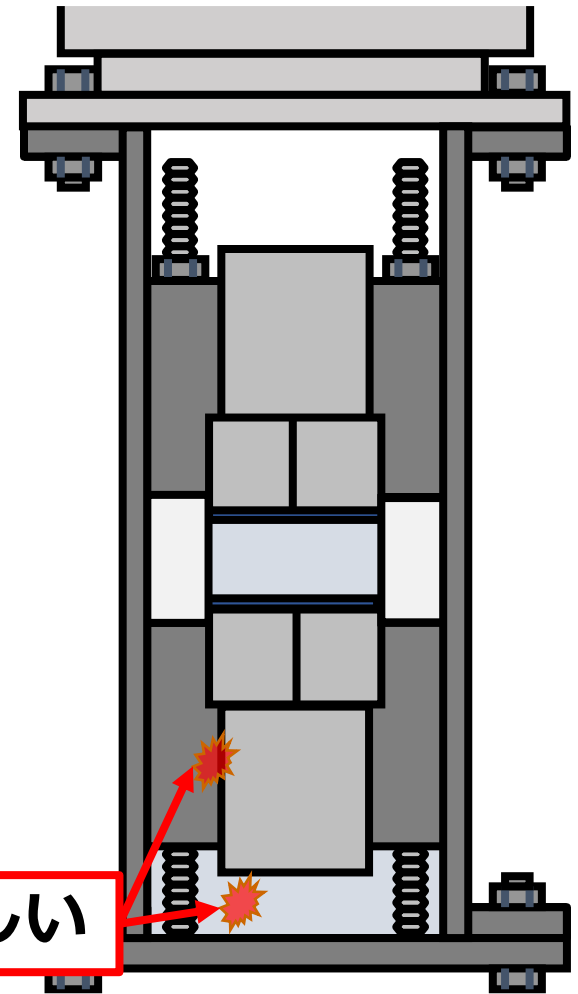
- Bi212の分岐比
- FADCウィンドウ幅のロス
- 測定時間のロス

要因	効率
分岐比	64%
イベントウィンドウ	81%
測定時間	93%
全体	48%

- それぞれの要因の結果、全体の効率は48%
- Bi-Poイベントの期待値
 $700 \times 0.48 = 336$ イベント

考察：イベントの検出効率

- 実際に測定されたBi-Poイベント：
292個 \Leftrightarrow 336個
- 以下の様な要因でイベント数が□
スしている可能性がある
 - 壁に付着するなど検出器の内部構造
 - 液体キセノンの内外比
 - トリガー生成にかかる時間の補正



検出が難しい

考察：本検出器に対する較正

- ランタンマントルの実験によって得たイベント数：700イベント
- 本検出器の場合にはイベントウインドウ幅や測定時間に関するロスは無視できる
- 神岡にあるマントル300枚をすべて今回の実験の効率で導入に使用した場合
 $700 \times 0.64 \times 300 / 50 = 2640$ イベント
- 1-2時間程度の導入を行うことで、目標の 10^5 イベントを得ることが期待

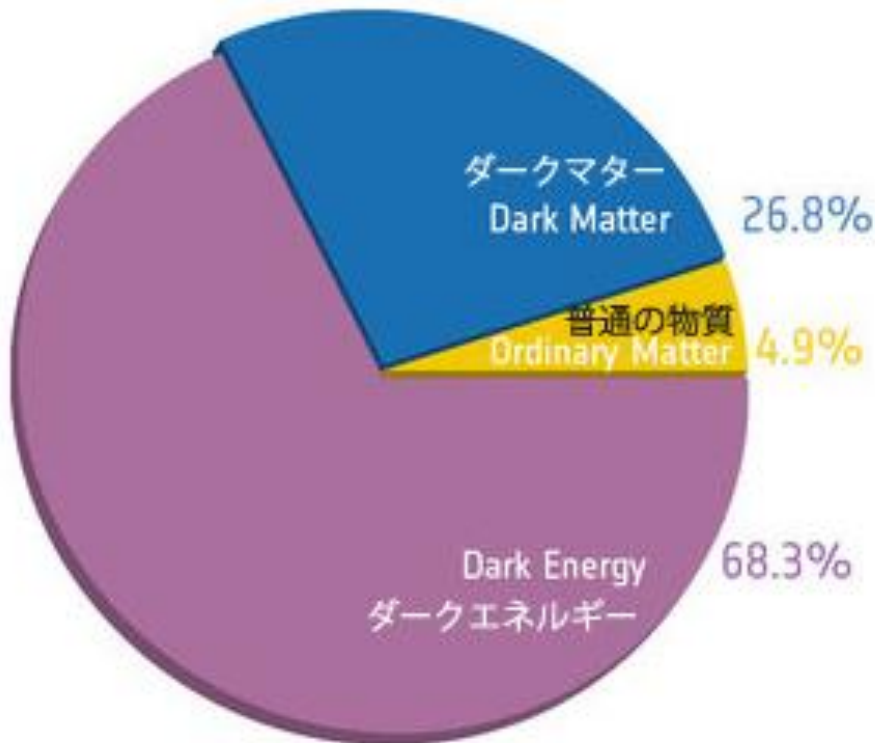
まとめ

- XMASS検出器に対する新しい位置較正
 - ThソースからのRn220ガスを導入、Bi-Po崩壊の β 線と α 線を利用
- テストベンチを用い、ランタンマントルから292個のBi-Poイベントを得ることができた
- XMASS検出器に同程度の効率で1-2時間ガスを導入すれば、有効体積内で10%程度の位置評価という目標が達成
- 今後は導入法の工夫により、効率をより高めることを目指していく

Back up

暗黒物質

- 暗黒物質：宇宙に存在する物質の内、光学的に観測できない成分

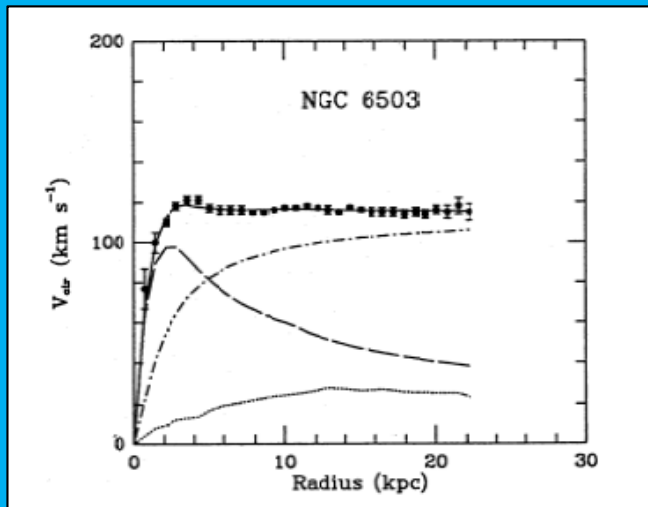


- 宇宙に存在する質量のほとんどは暗黒物質
 - 水素、ヘリウムなど通常の物質の5倍程度存在

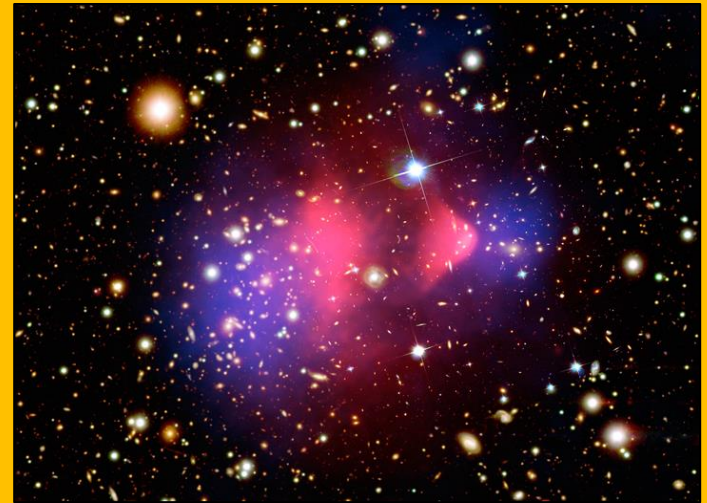
観測的証拠

- 主に重力による現象

渦巻銀河の回転速度



重力レンズ効果



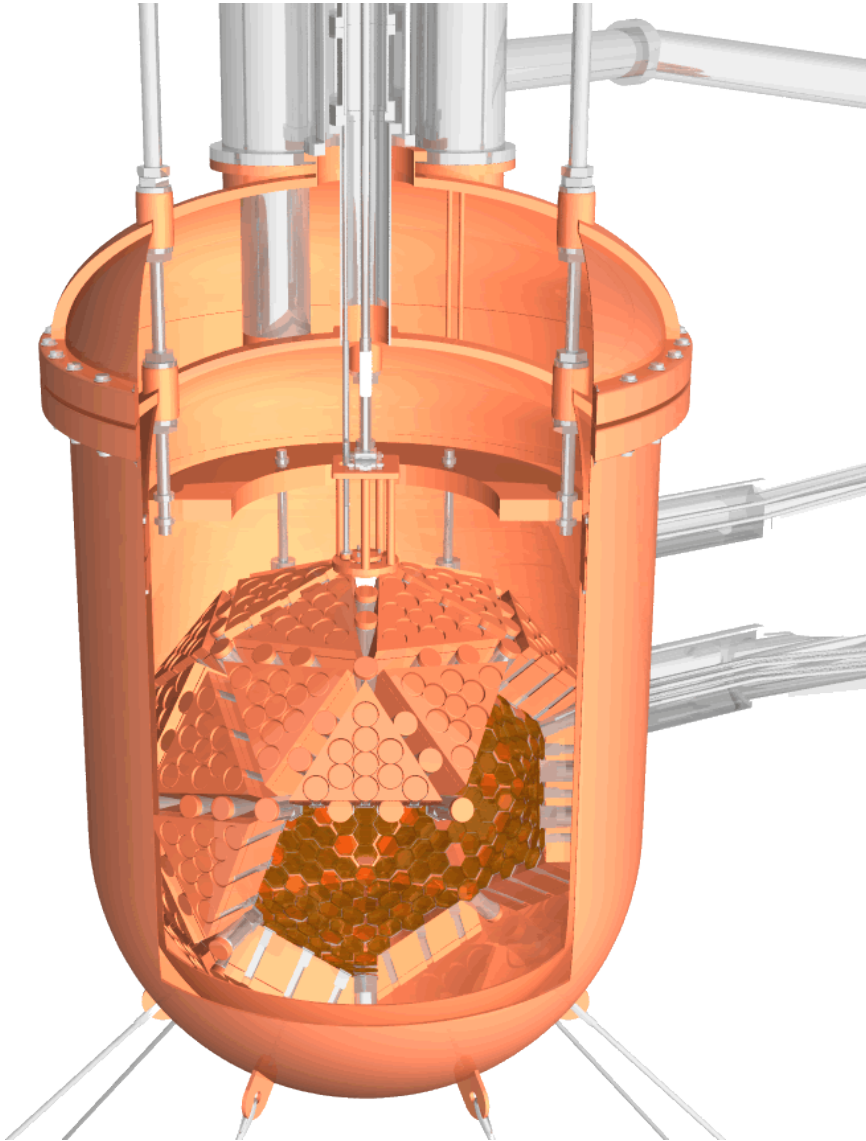
- 有力な候補：WIMPs
→ XMASS実験
のターゲット

XMASS実験



- 液体キセノンを用いた暗黒物質探索実験
- キセノンと暗黒物質とが衝突する際のシンチレーション光をPMTで観測
- 642本のPMTが60面体に設置されている

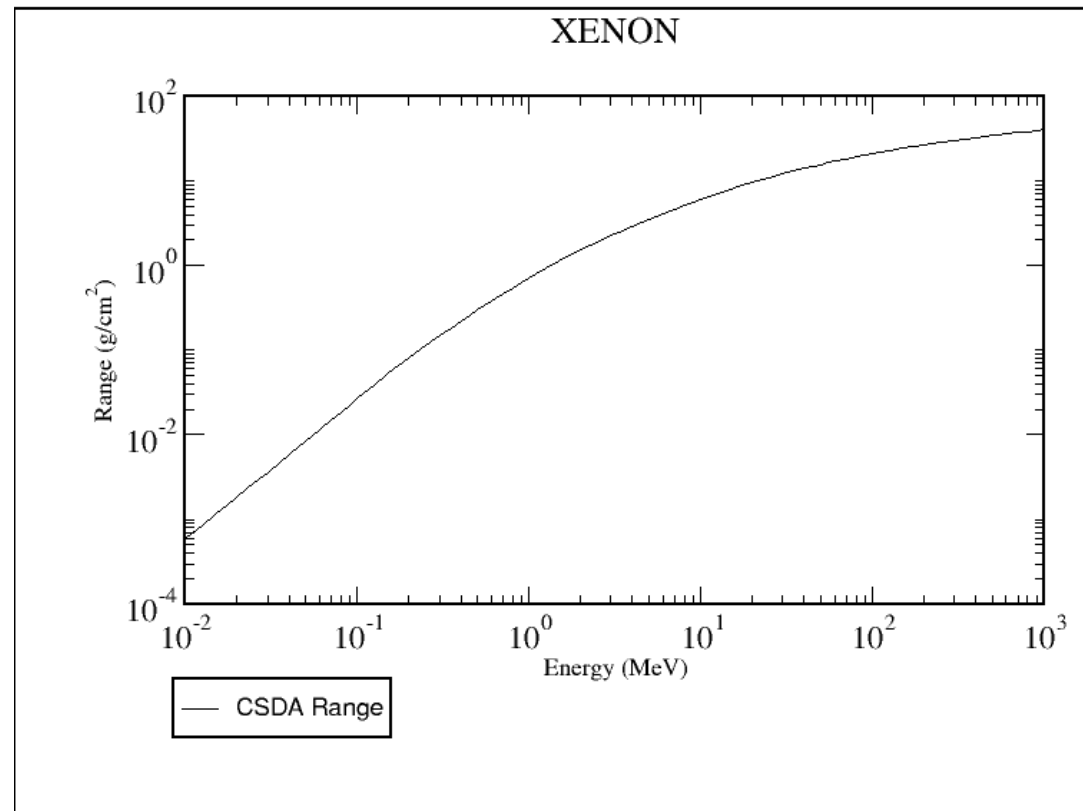
XMASS実験



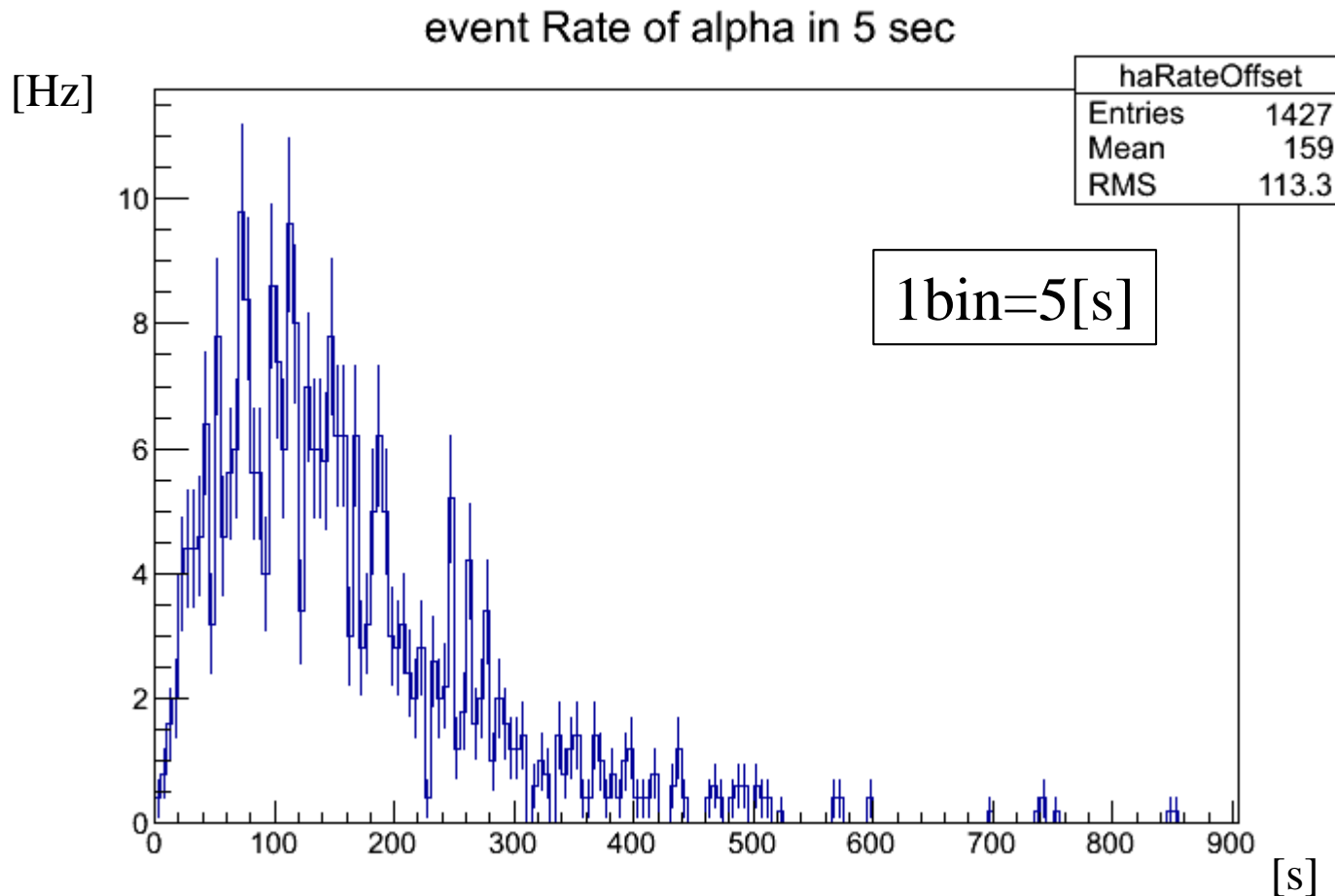
- 現在は約1トンの液体キセノンを用いて暗黒物質探索を行っている
- 将来的には大型化することで様々な物理現象の観測を目指す
 - 二重ベータ崩壊
 - 暗黒物質
 - 太陽ニュートリノ

β線の飛程

- NIST estarより
- 液体キセノン
2.89g/cm³から
 - 10keV→0.001mm
 - 100keV→0.1mm
 - 2MeV→30mm



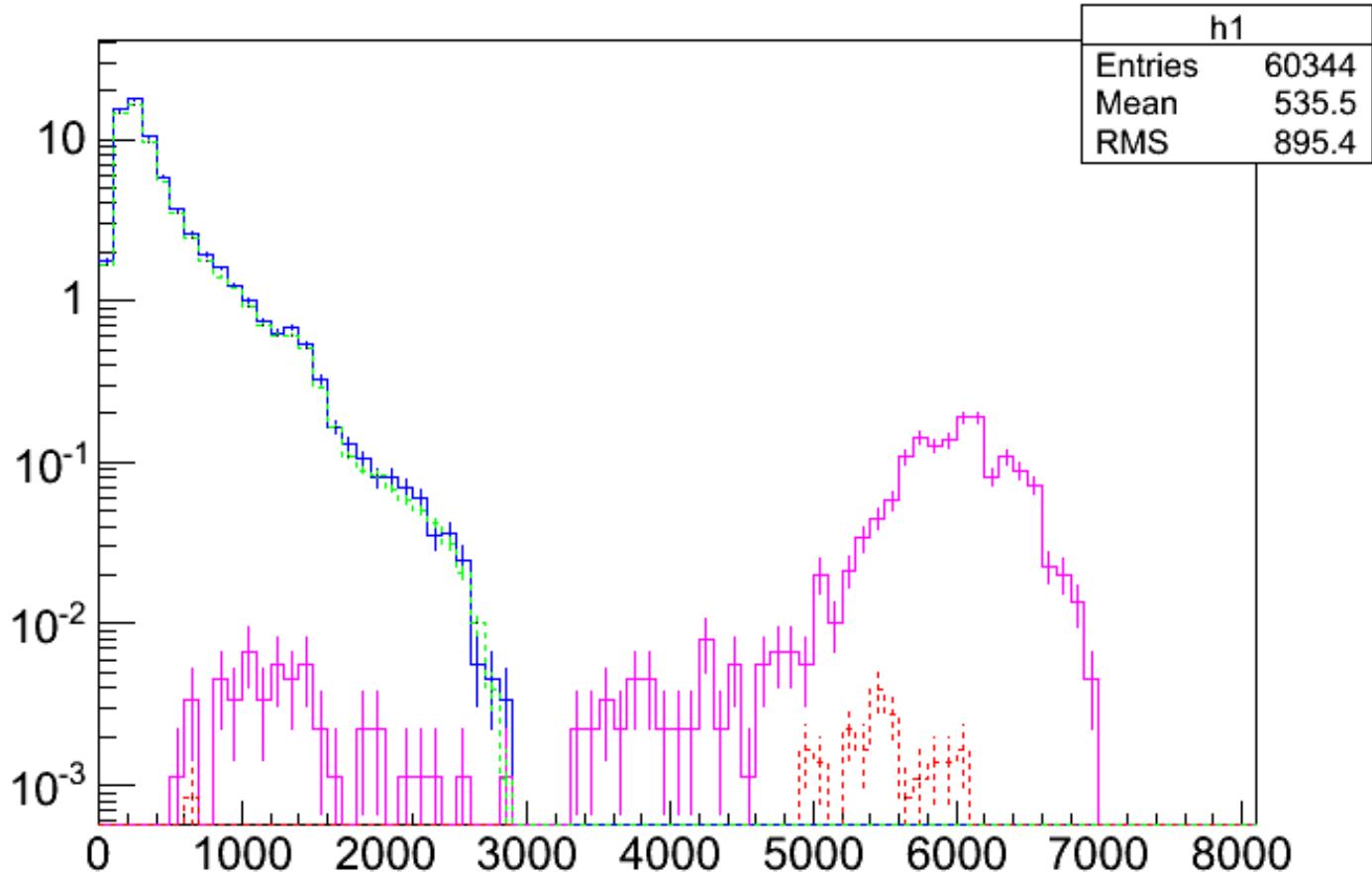
Tn由来のα線のレート (ランタンマントル)



- 最大で10Hz程度になったため、二つのαの時間差を見ることは難しい

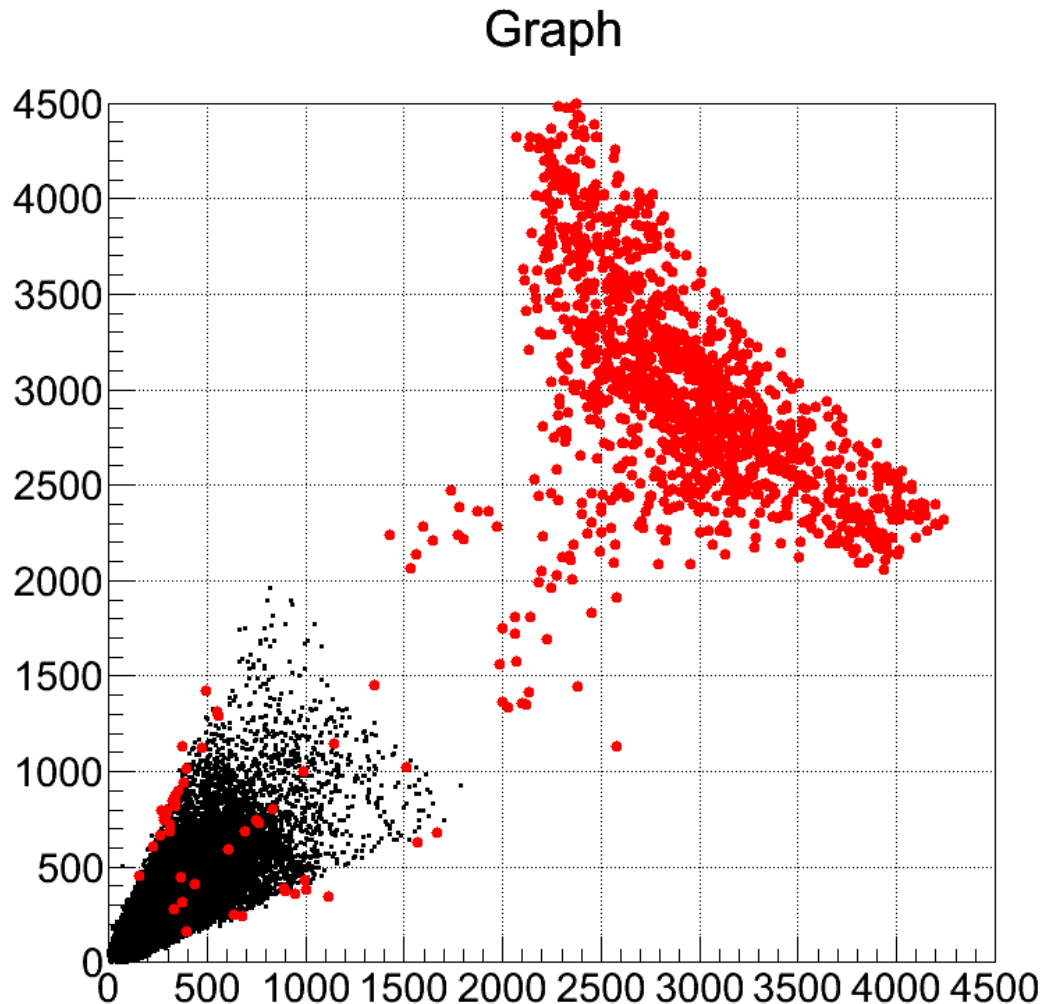
Tn aのスペクトル

Total spectrum



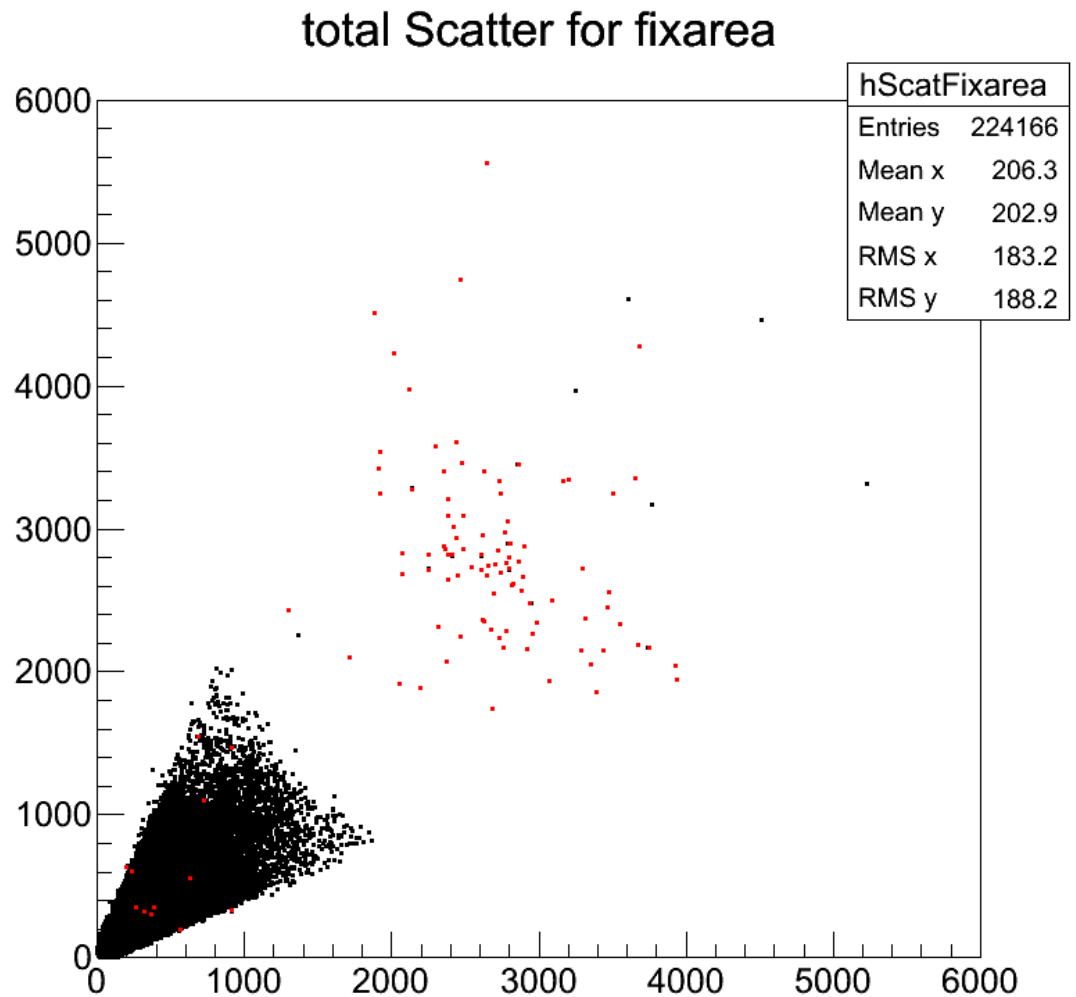
a線の分布(PMTごとの偏り)

- Tn由来のaイベントの分布



α 線の分布(PMTごとの偏り)

- BGの α イベントの分布

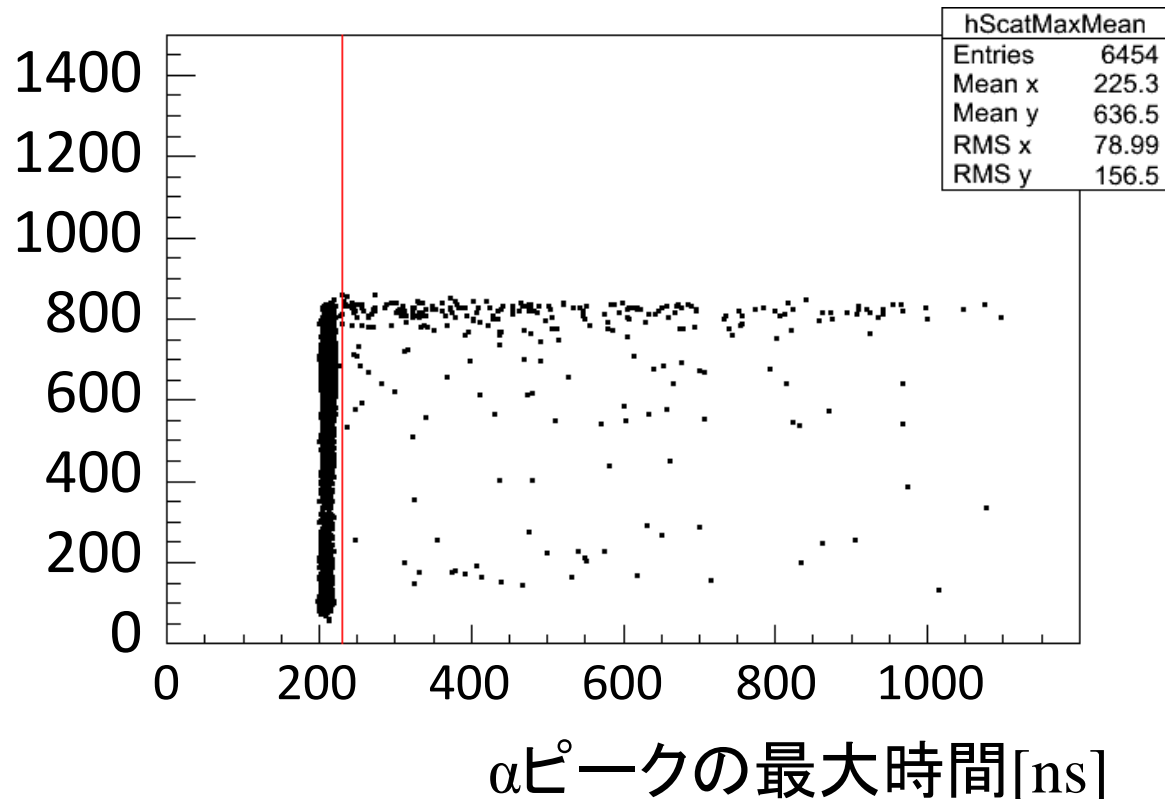


測定結果

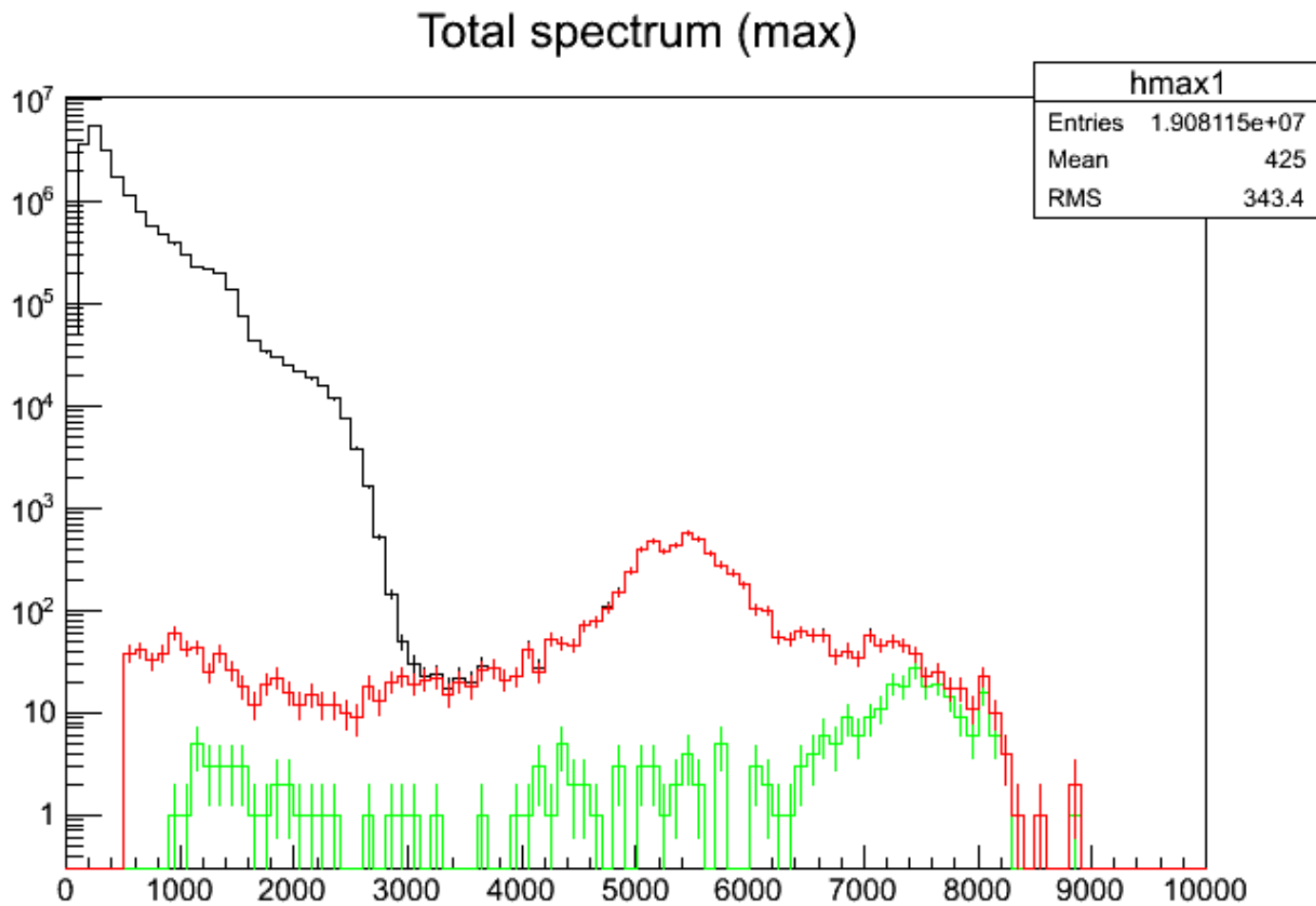
- α イベントの選択を行った後、ウィンドウ内でのピーク時間を用いる

α ピークが最大になる時間の分布

- β 線でトリガー後の α 線を選択する
 - α の最大時間がウィンドウの230ns以降

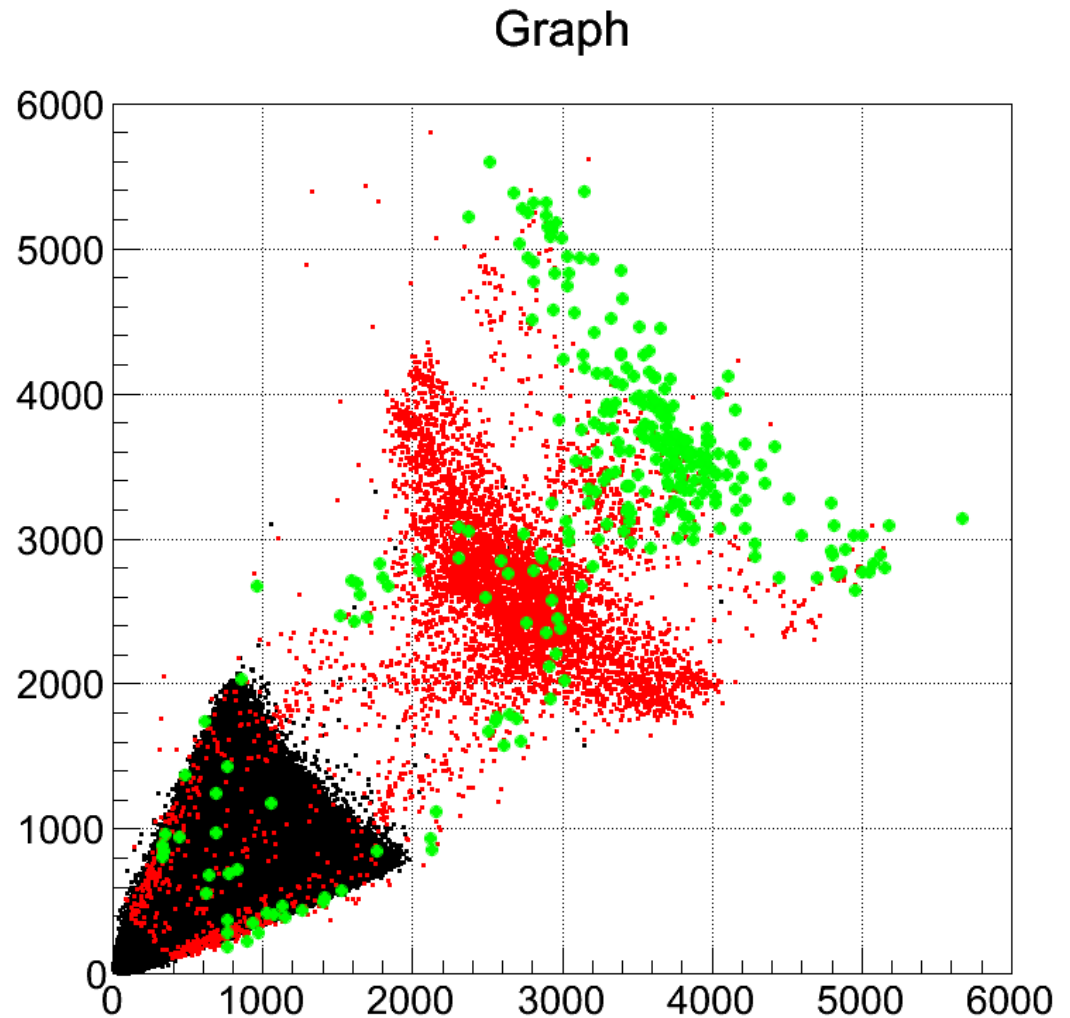


Po212 aのスペクトル



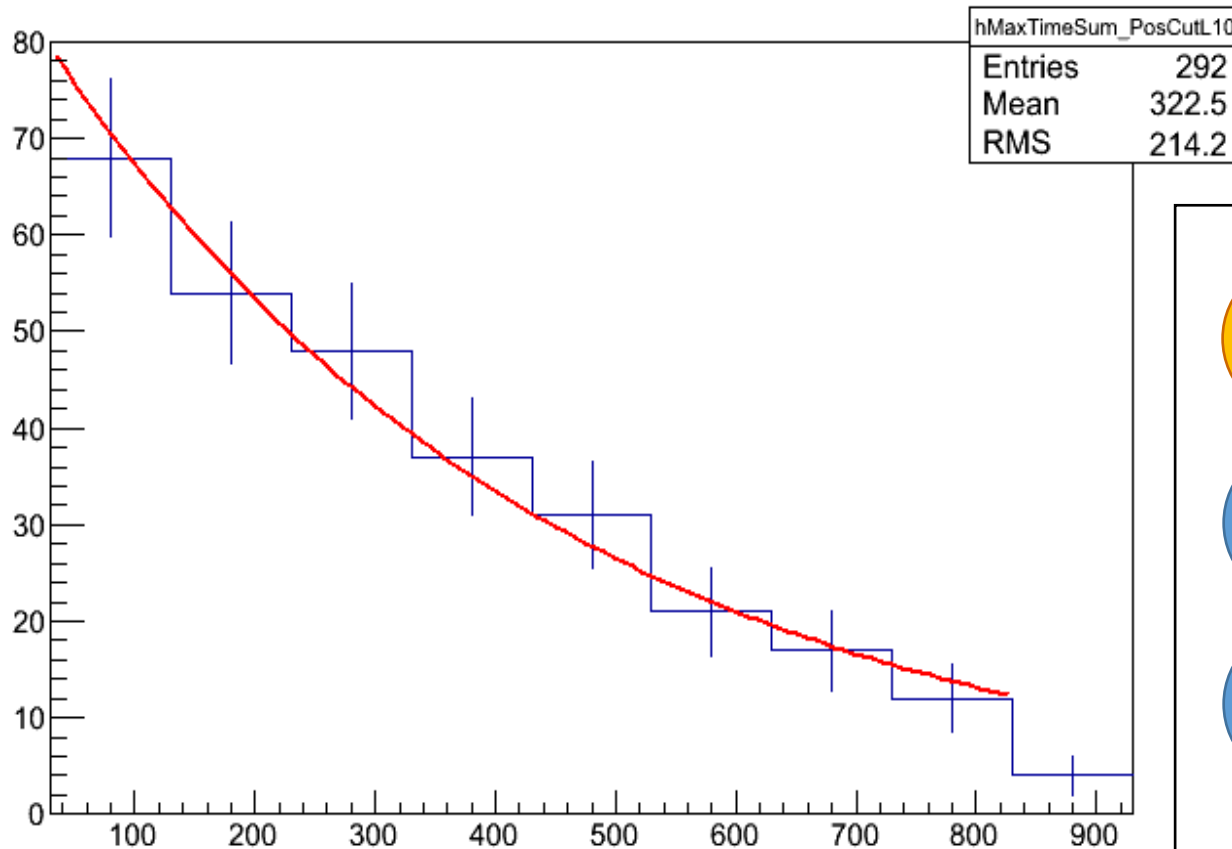
a線の分布(PMTごとの偏り)

- aイベント、Bi-Poイベントの上下のPMT分布

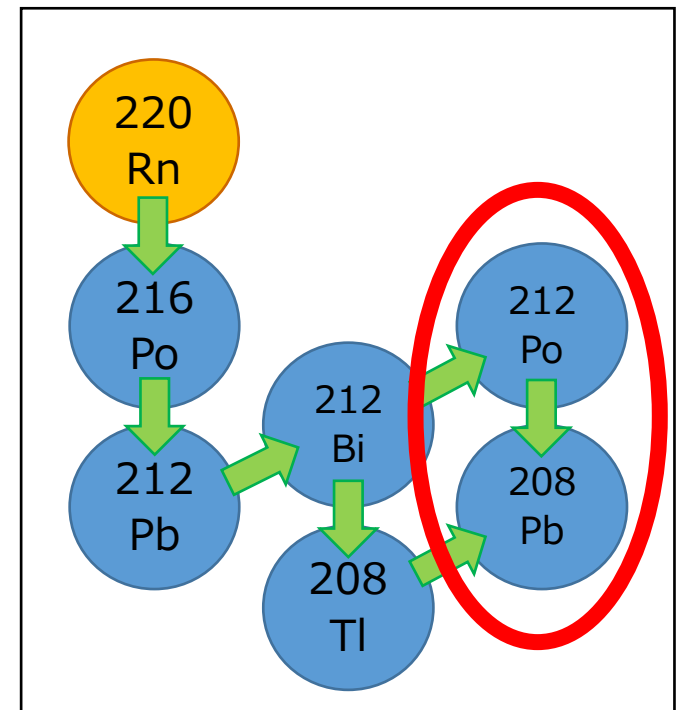


測定結果

- Po212の半減期(299ns)との比較

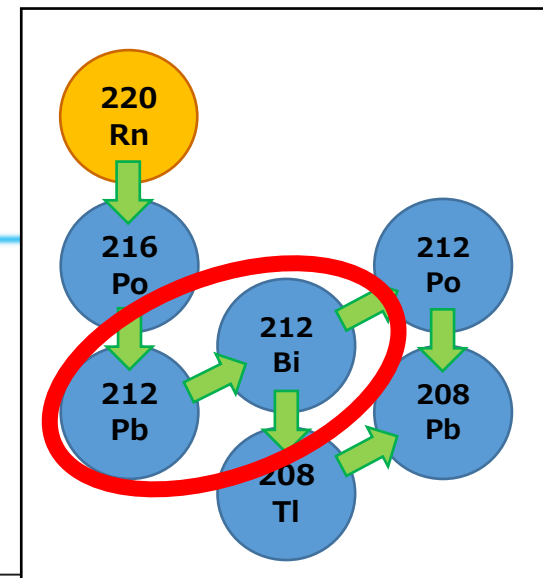


- フィットの結果
 297 ± 34 [ns]

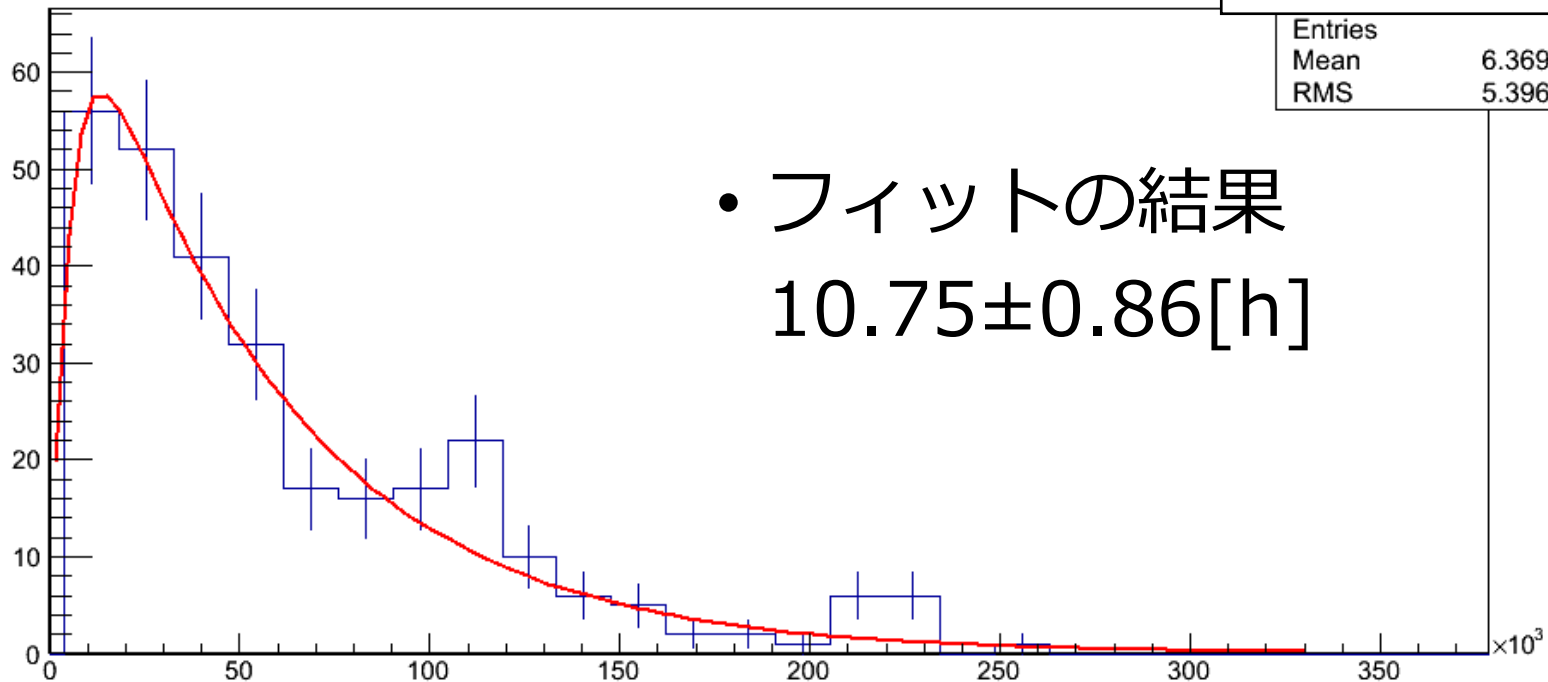


測定結果

- Pb212の半減期(10.64[h])との比較



Entries	27
Mean	6.369e+04
RMS	5.396e+04

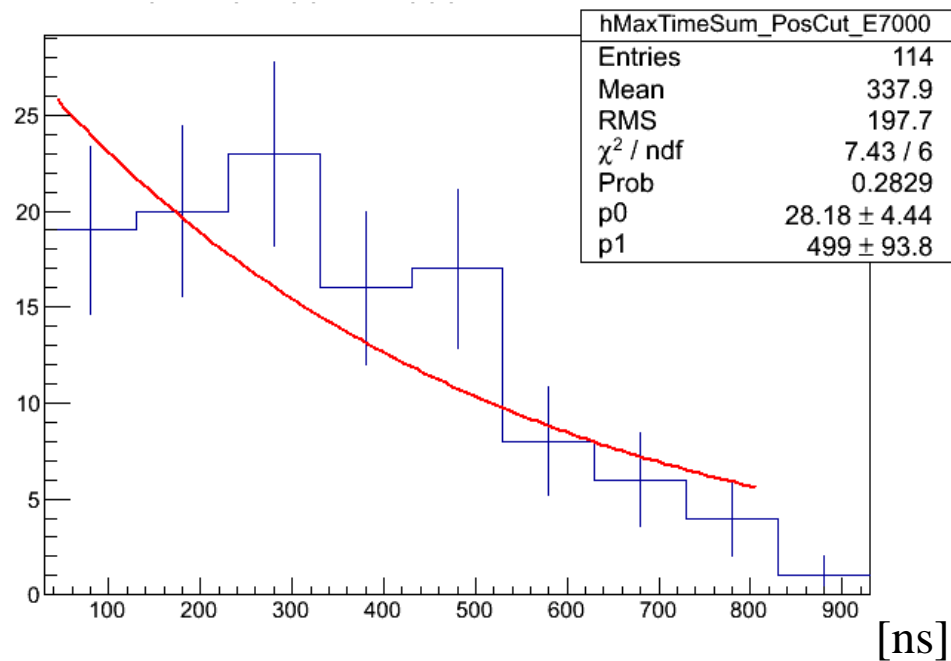
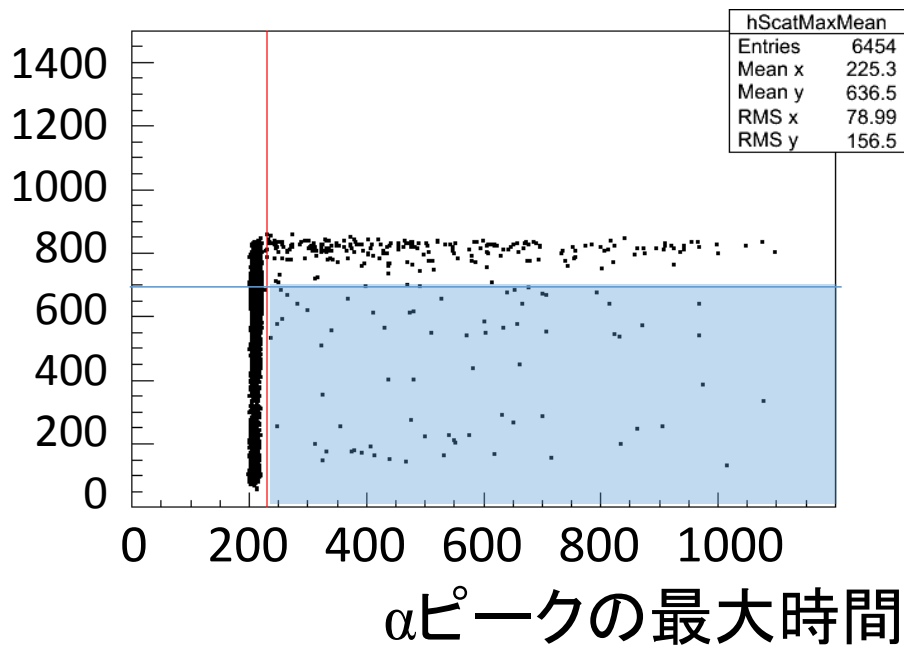


- フィットの結果
10.75 \pm 0.86[h]

- 立ち上がりはBi212の半減期(1.01[h])で固定

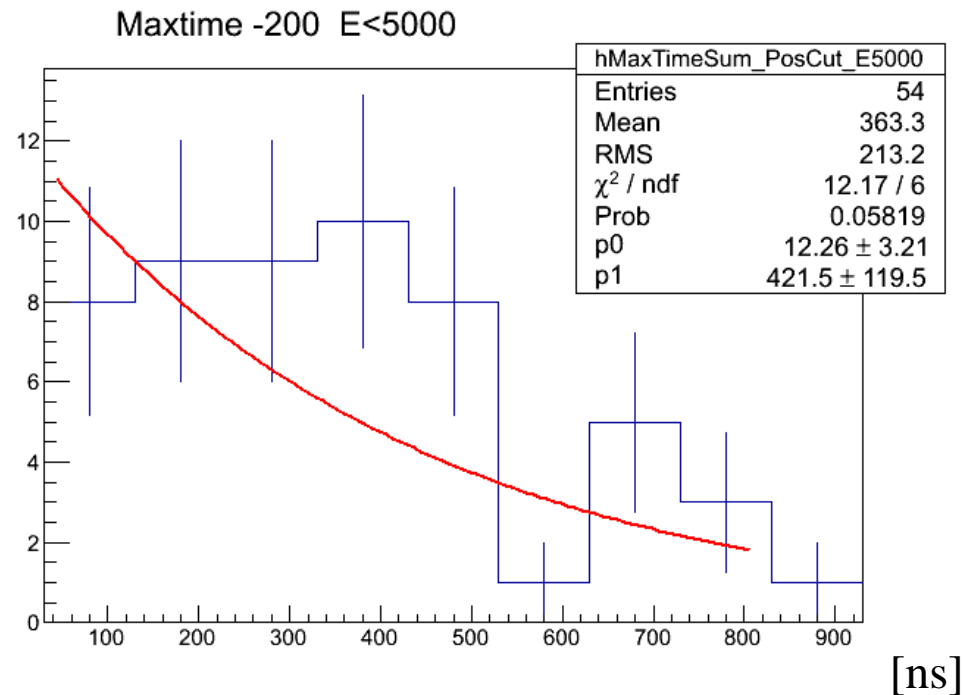
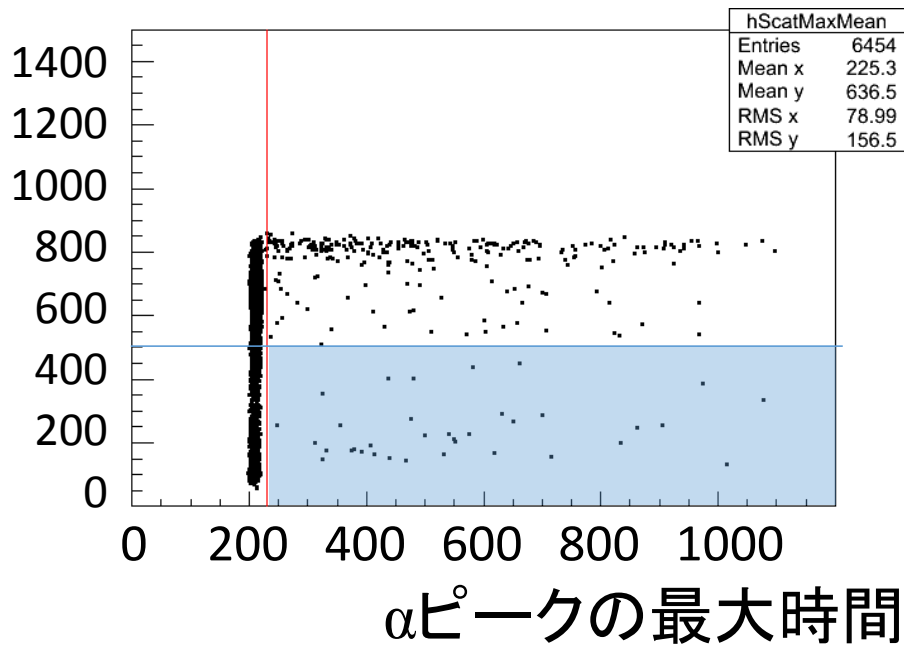
Po212の崩壊時間

- E < 7000の場合



Po212の崩壊時間

- E<5000の場合

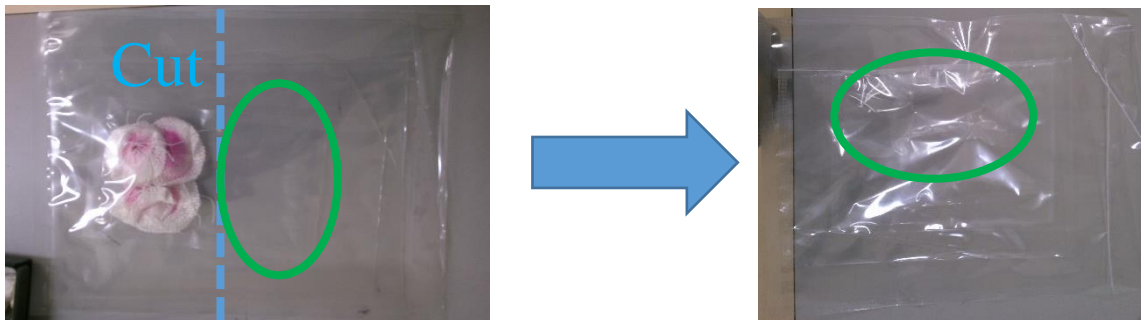


Bi-Poイベントの効率

- 期待される336イベントに対し、実際には292イベントが検出
- 壁に付着する、検出器の隙間に入るなど、構造による検出効率の低下
 - 長期間のRunでRn222、Po218やPo210由来のイベント数や分布を比較するなどの方法で検証できる可能性
- トリガー時間
 - LEDなどでトリガー生成時間を測定し、補正を入れることで検証できる

考察 1 : ガスの導入効率

- Ge検出器を用い、以下の様にマントルから出るTnガスの量を見積もった
 1. マントルをEVOHの袋に入れる
 2. 放出されたTn以下の核種が平衡になるまで静置
 3. 袋の一部分を切り離し、測定



- 平衡状態でマントル1枚から29.8BqのTnが放出されることがわかった

考察 1 : ガスの導入効率

- Ge検出器の結果を基に計算すると、50枚のマントルから出ているTn原子の数は

$$29.8 \times 50 \times 55.6 / \ln 2 = 1.19 \times 10^5 \text{個}$$

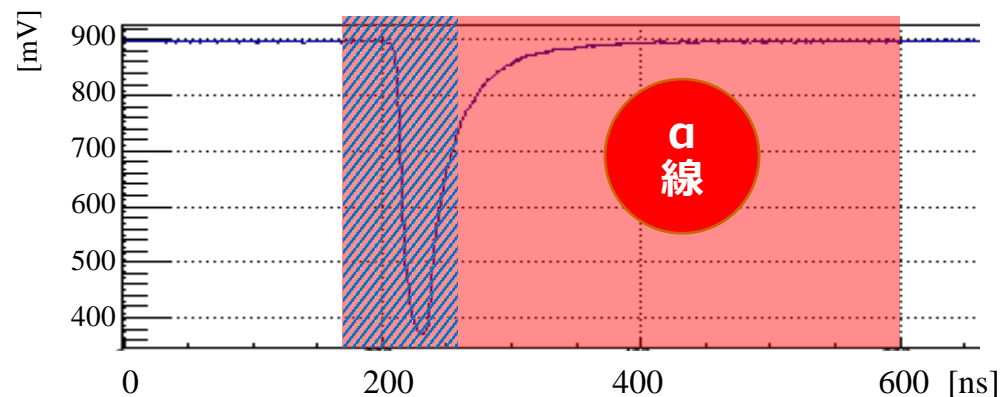
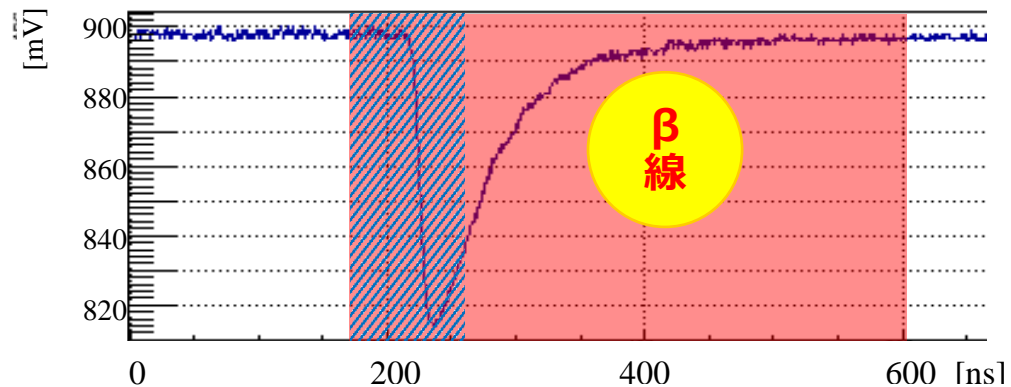
となる。

- 実際に導入された数700個から、導入効率は0.6%と見積もられる

解析： α 線の分離

- 発光の減衰時間の関係から、波形に対する二つの積分範囲の比を利用する
 - 波形全体の積分
 - 波形の先頭部分の積分

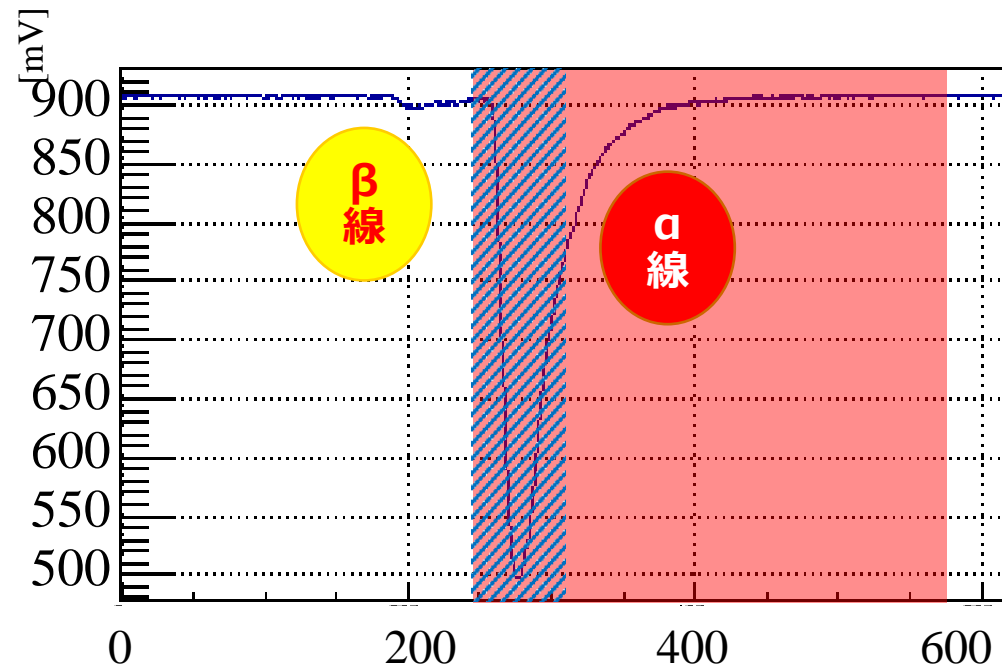
FADCのウィンドウ



解析：Bi-Poの分離

- Bi-Poイベントは、
- トリガー時間と α 線のピーク時間の違いも利用した
 - 先発の β と後発の α の時間差が30ns以上

FADCのウィンドウ

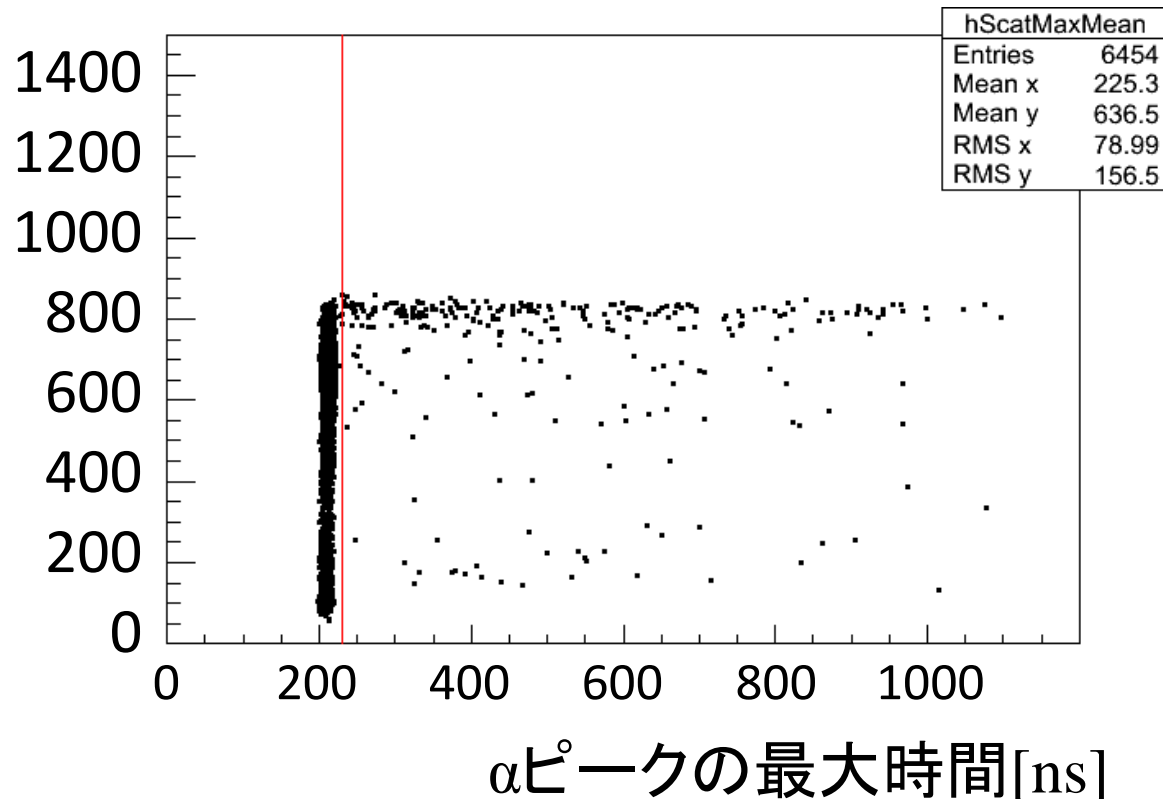


測定②：Bi-Po由来イベント

- α イベントの選択を行った後、ウィンドウ内でのピーク時間を用いる

α ピークが最大になる時間の分布

- β 線でトリガー後の α 線を選択する
 - α の最大時間がウィンドウの230ns以降



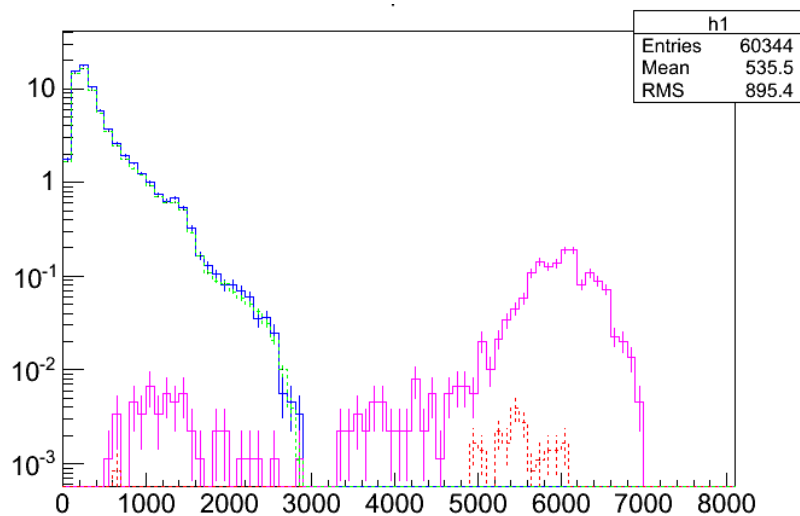
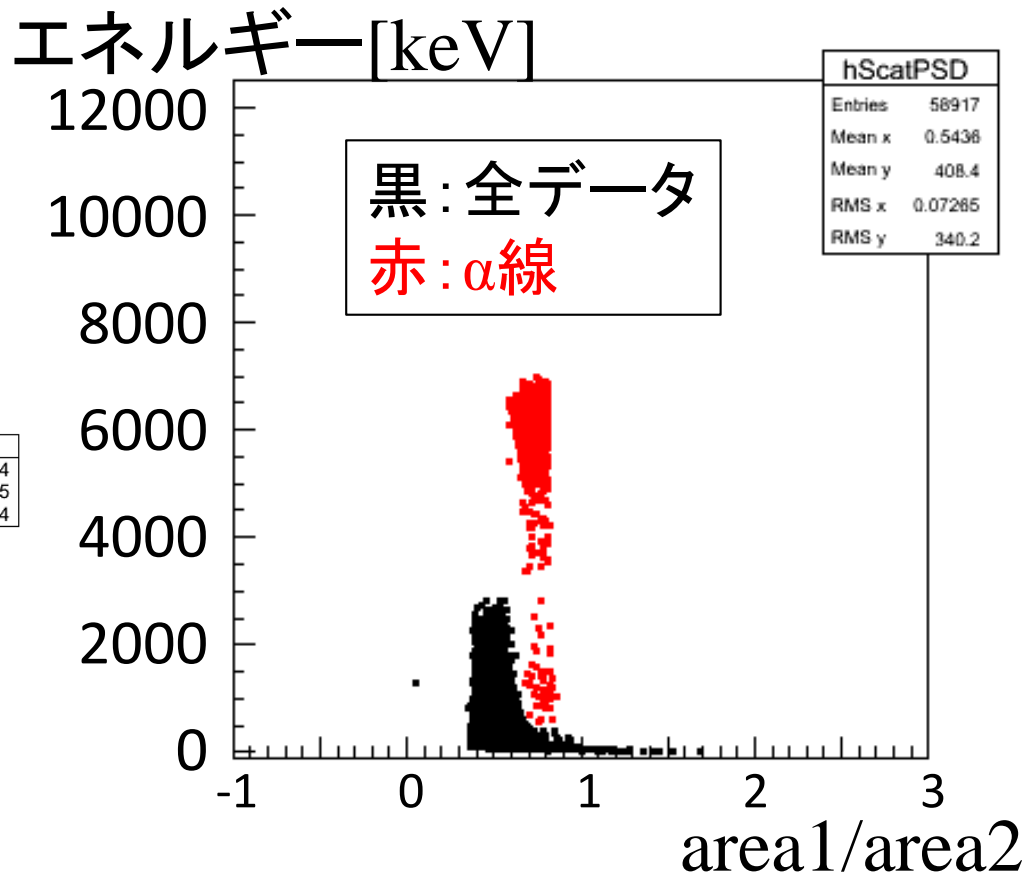
PMT

- Low-BG PMT
- 液体キセノン温度 (-100°C)の低温で安定動作
- Xeのシンチレーション光(~175nm)に感度を持つ
- 六角形の窓で内部の被覆率を高める



測定①：Tn由来の α 線

- $E > 800$ かつ $R > 0.85$
- BGを引いた結果、1400.5イベントが残った

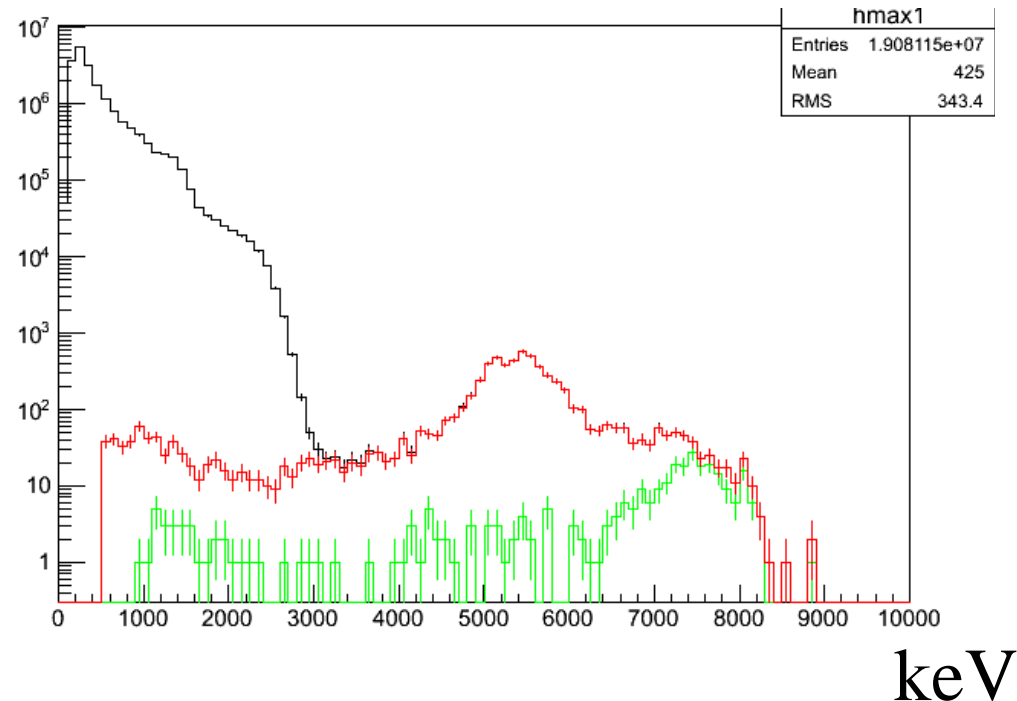


エネルギー[keV]

測定②: Bi-Po由来のイベント

- $0.71 < R < 0.85$ かつ
 $E > 600$

イベント数



エネルギー[keV]

