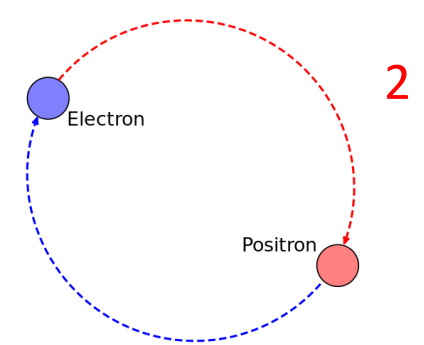


改良型UNI検出器を用いた ポジトロニウム5光子崩壊事象の観測

吉川 広陽
首都大学東京

ポジトロニウム(Ps)



- ・電子と陽電子の電磁相互作用による束縛状態⇒レプトン系
- ・質量1022 keV⇒低エネルギー

→強い相互作用, 弱い相互作用の影響が少ない
量子電磁力学のみで記述できる

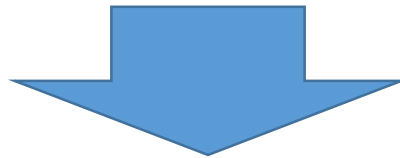
	パラポジトロニウム	オルソポジトロニウム
スピン	0 (一重項)	1 (三重項)
真空中の寿命	125 ps	142 ns
崩壊光子数	偶数個(主に2光子)	奇数個(主に3光子)

実験目的

オルソポジトロニウムの崩壊分岐比の理論値

$$\frac{\lambda_{5\gamma}}{\lambda_{3\gamma}} = (0.9591 \pm 0.0008) \times 10^{-6}$$

[Toshihiro Matsumoto et al., Phys. Rev. A54(1996)1947-1951.]



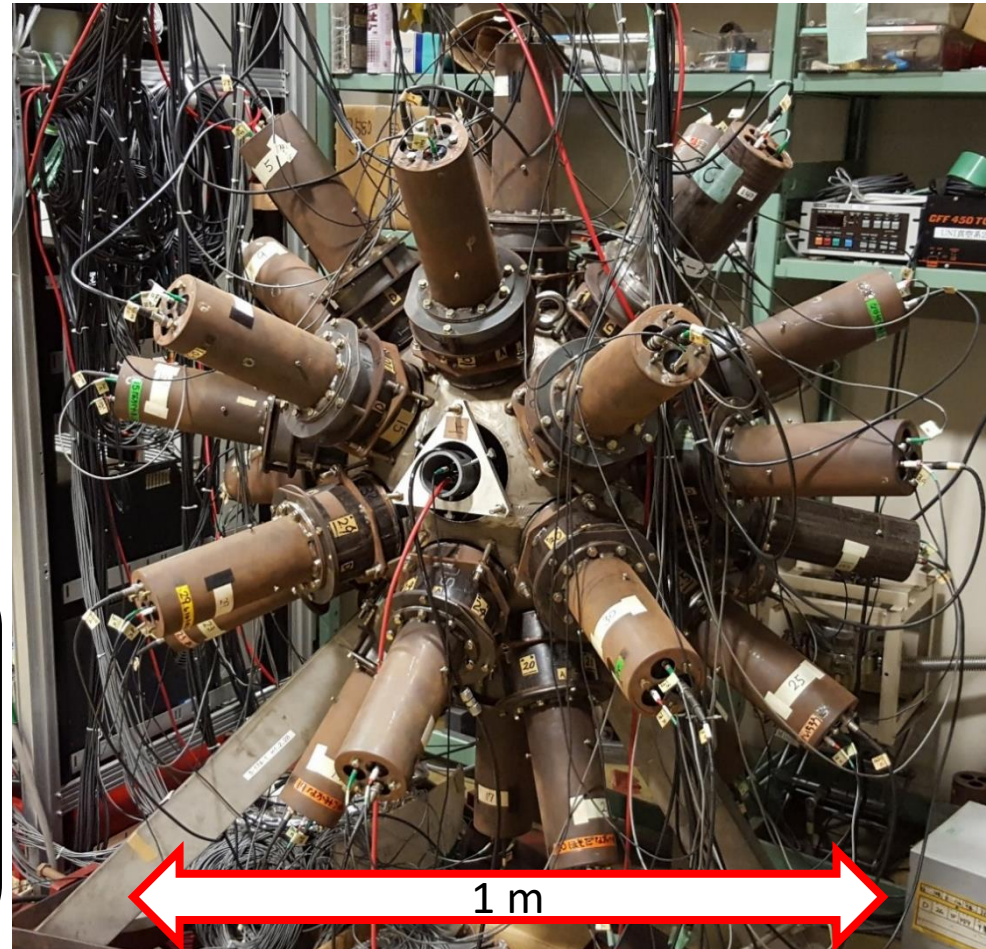
世界でもまだ検出されていない
ポジトロニウム5光子崩壊事象の検出を目指す。
純粋な高次QEDのみを検証可能

UNI検出器

- 32面体(サッカーボール構造)
- 30面にNaIシンチレーター
(直径3インチ, 厚み4インチ)
- 中心にポジトロニウム生成部

ポジトロニウムの崩壊光子
を30本のNaIでとらえる

崩壊光子のエネルギー和は1022 keV
運動量和は 0 keV/c

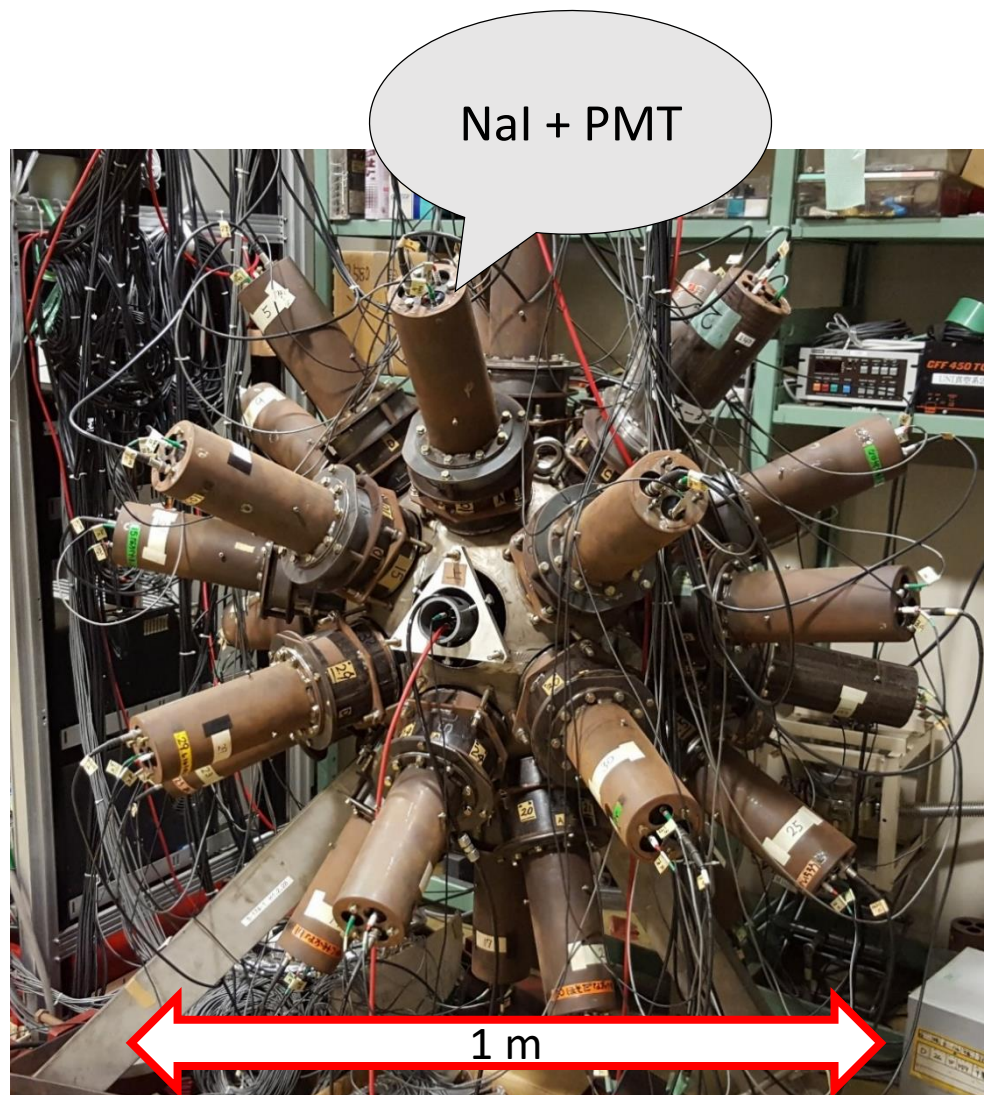


UNI検出器

- 32面体(サッカーボール構造)
- 30面にNaIシンチレーター
(直径3インチ, 厚み4インチ)
- 中心にポジトロニウム生成部

ポジトロニウムの崩壊光子
を30本のNaIでとらえる

崩壊光子のエネルギー和は1022 keV
運動量和は 0 keV/c



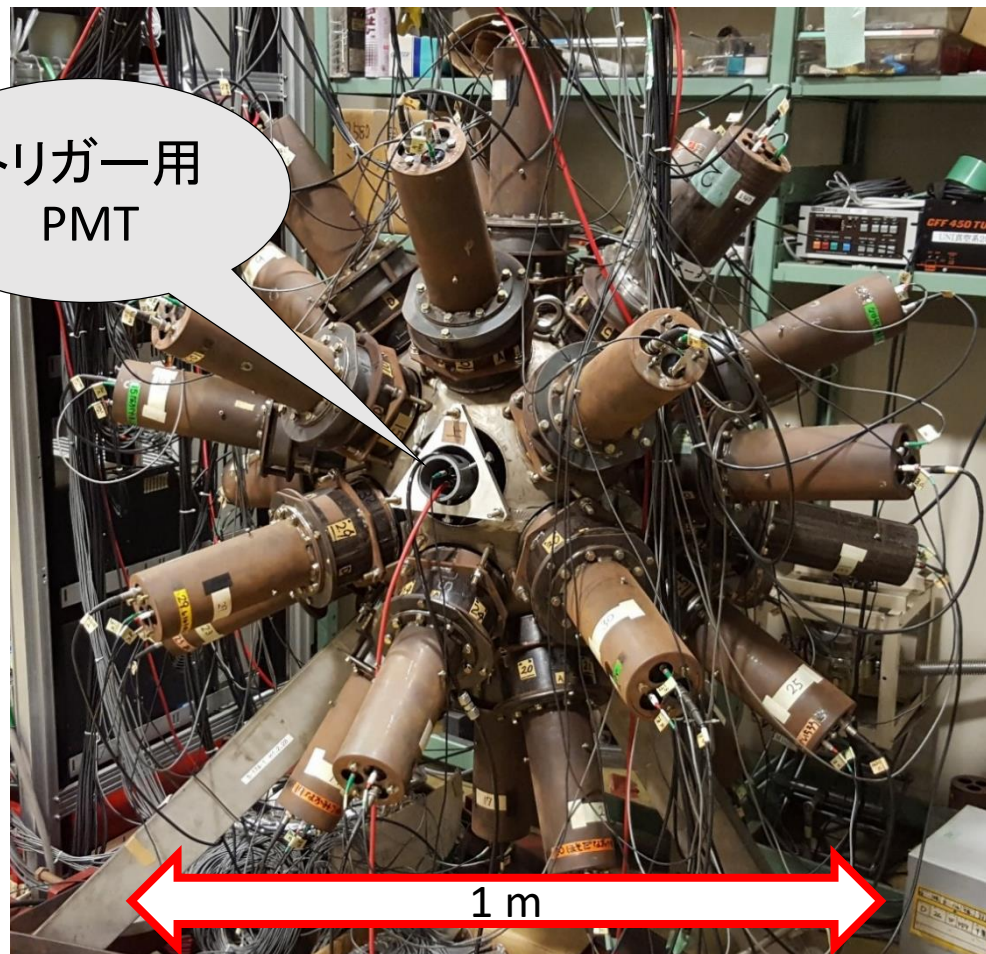
UNI検出器

- 32面体(サッカーボール構造)
- 30面にNaIシンチレーター
(直径3インチ, 厚み4インチ)
- 中心にポジトロニウム生成部

ポジトロニウムの崩壊光子
を30本のNaIでとらえる

崩壊光子のエネルギー和は1022 keV
運動量和は 0 keV/c

トリガー用
PMT



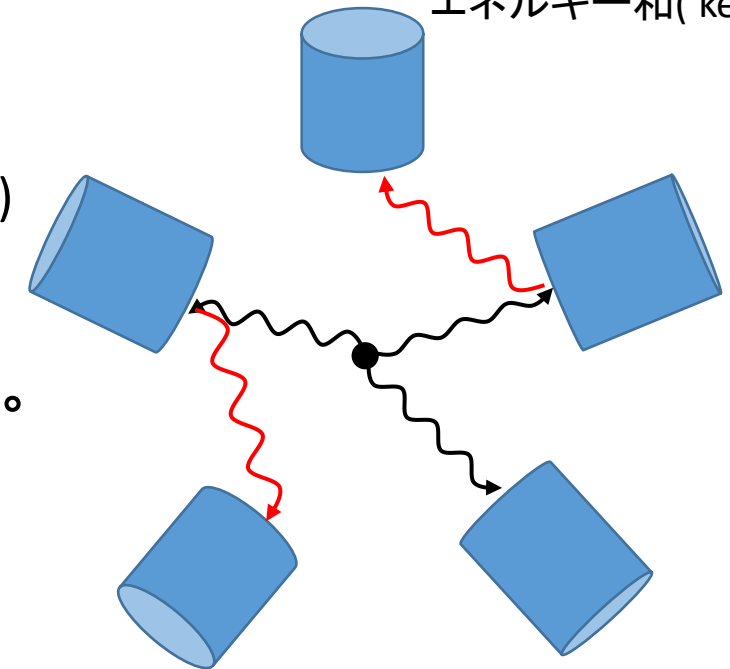
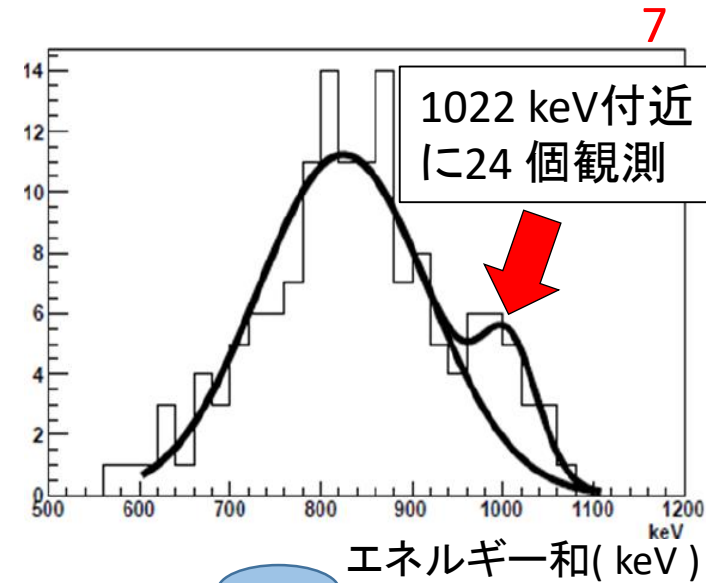
これまでの実験結果

- 10^{10} オルソ-Ps相当のイベントを取得 (2006年～2014年)
➡ 1022 keV付近に24 個のイベントが観測されたが...
- GEANTシミュレーションによる期待値
 - 5光子崩壊事象
0.035 個 (セクション後)
 - 3光子崩壊によるバックグラウンド (BG)
20 個 (セクション後)

➡ 観測されたイベントは全てBGと解釈できる。

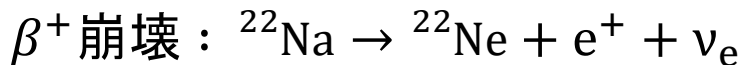
- ・期待される信号数が少ない
- ・BGが非常に大きい

検出装置の改良を行った

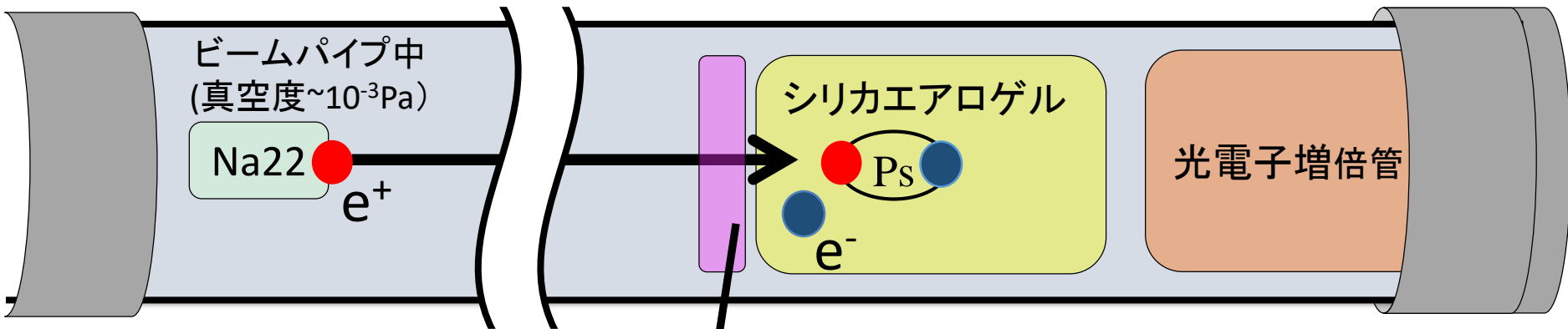


↑ 主なBG事象
(3光子崩壊 ➡ コンプトン散乱 ➡ 5Hit)

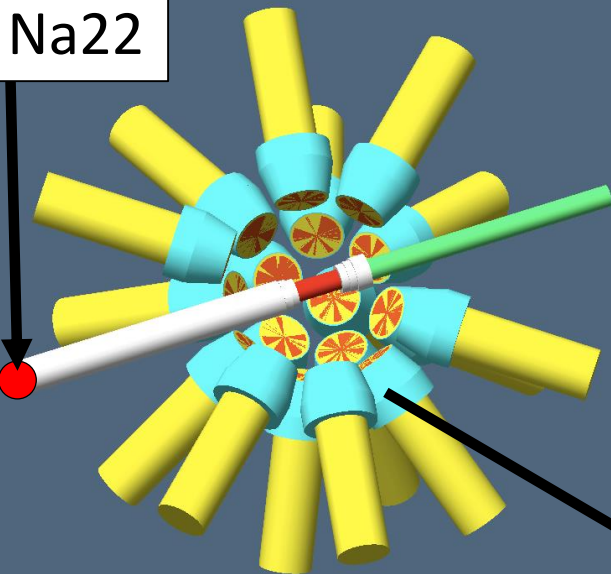
ポジトロニウム生成部(改良前)



陽電子を多孔質(シリカエアロゲル)に入射し、ポジトロニウムを生成できる



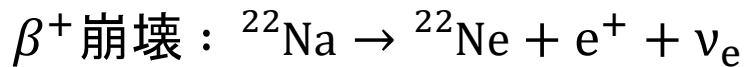
シンチレーター



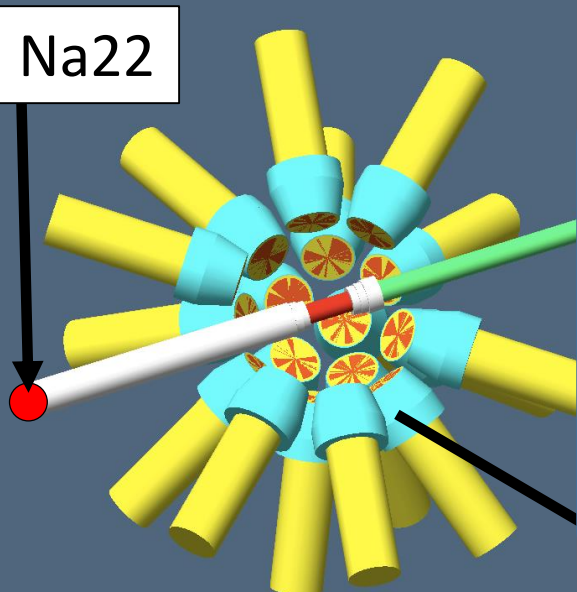
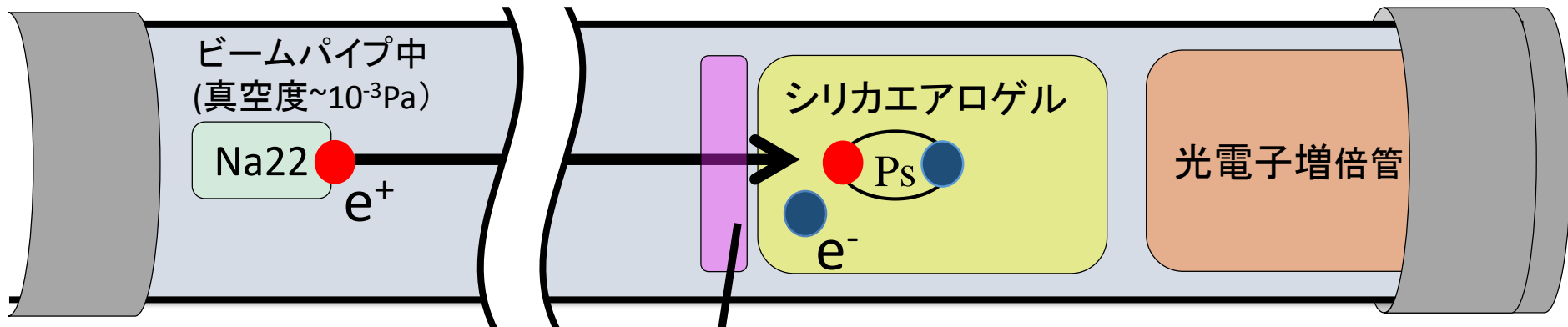
鉛シールド

検出器外部で発生した陽電子を輸送、検出器中心でポジトロニウムを生成

ポジトロニウム生成部(改良前)



陽電子を多孔質(シリカエアロゲル)に入射し、ポジトロニウムを生成できる



問題点

- 厚さ0.1 mmのステンレス真空パイプを使用
→物質が多い
- 構造上、鉛シールドを長くできない
- 生成した陽電子のうち、ターゲットに到達するものが少ない
→ポジトロニウム生成数が少ない

鉛シールドの強化

コンプトン散乱による
BG事象を減少

10

左:従来の鉛シールド
右:強化後の鉛シールド



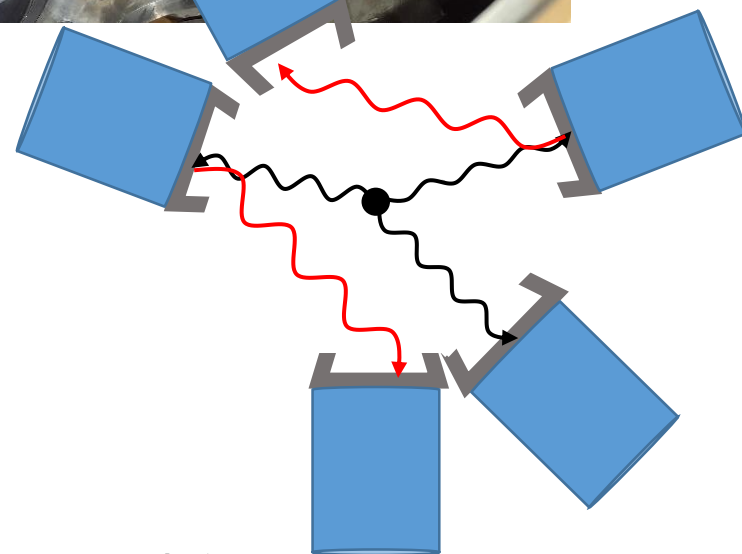
Nalの距離を離す必要がある
→立体角によるアクセプタンスの減少

Ps 生成部, Nal間 距離	160 mm	260 mm
アクセプタンス	42.5 %	16.1 %

- 5光子崩壊事象検出期待値 $\Rightarrow 10^{-1}$ 倍
- 3光子崩壊BG $\Rightarrow 10^{-5}$ 倍

(シミュレーション結果)

効果的なBG排除が可能



↑ 主なBG事象
(3光子崩壊 \Rightarrow コンプトン散乱 \Rightarrow 5Hit)

鉛シールドの強化

コンプトン散乱による
BG事象を減少

11

左:従来の鉛シールド
右:強化後の鉛シールド



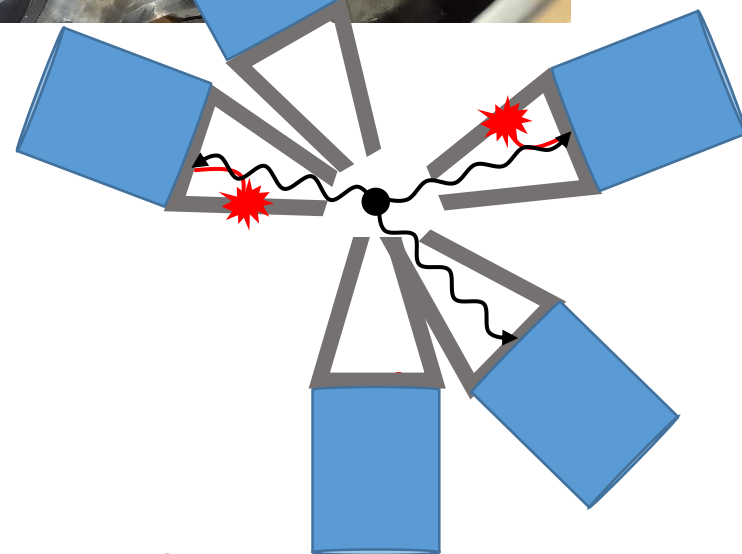
Nalの距離を離す必要がある
→立体角によるアクセプタンスの減少

Ps 生成部, Nal間 距離	160 mm	260 mm
アクセプタンス	42.5 %	16.1 %

- 5光子崩壊事象検出期待値 $\Rightarrow 10^{-1}$ 倍
- 3光子崩壊BG $\Rightarrow 10^{-5}$ 倍

(シミュレーション結果)

効果的なBG排除が可能



↑ 主なBG事象
(3光子崩壊 \Rightarrow コンプトン散乱 \Rightarrow 5Hit)

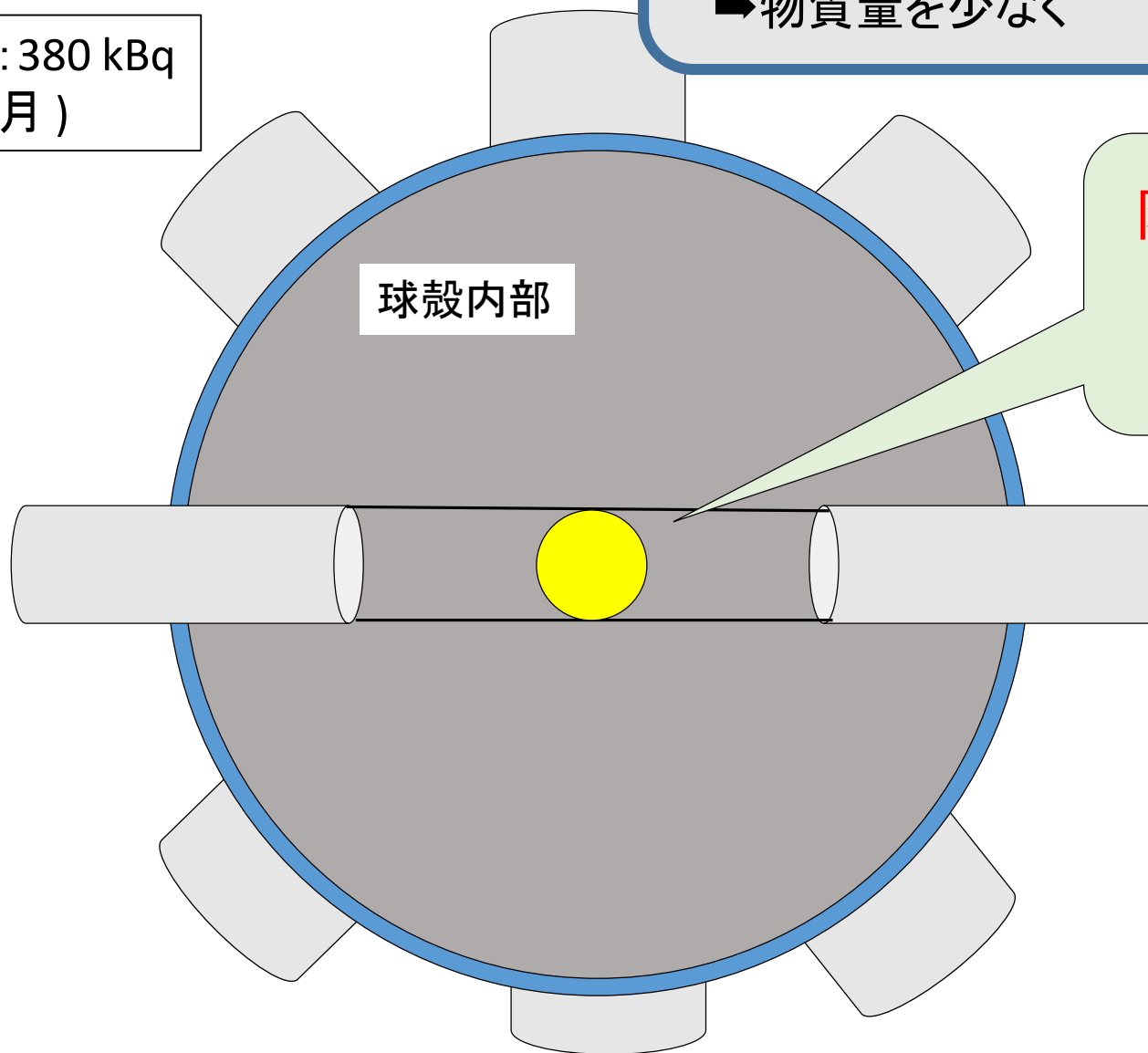
Ps生成部の改良

12



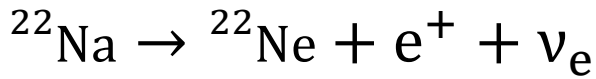
線源強度: 380 kBq
(2017年2月)

- イベント数の増加
➡ 検出器内部に陽電子線源
- コンプトン散乱の低減
➡ 物質量を少なく



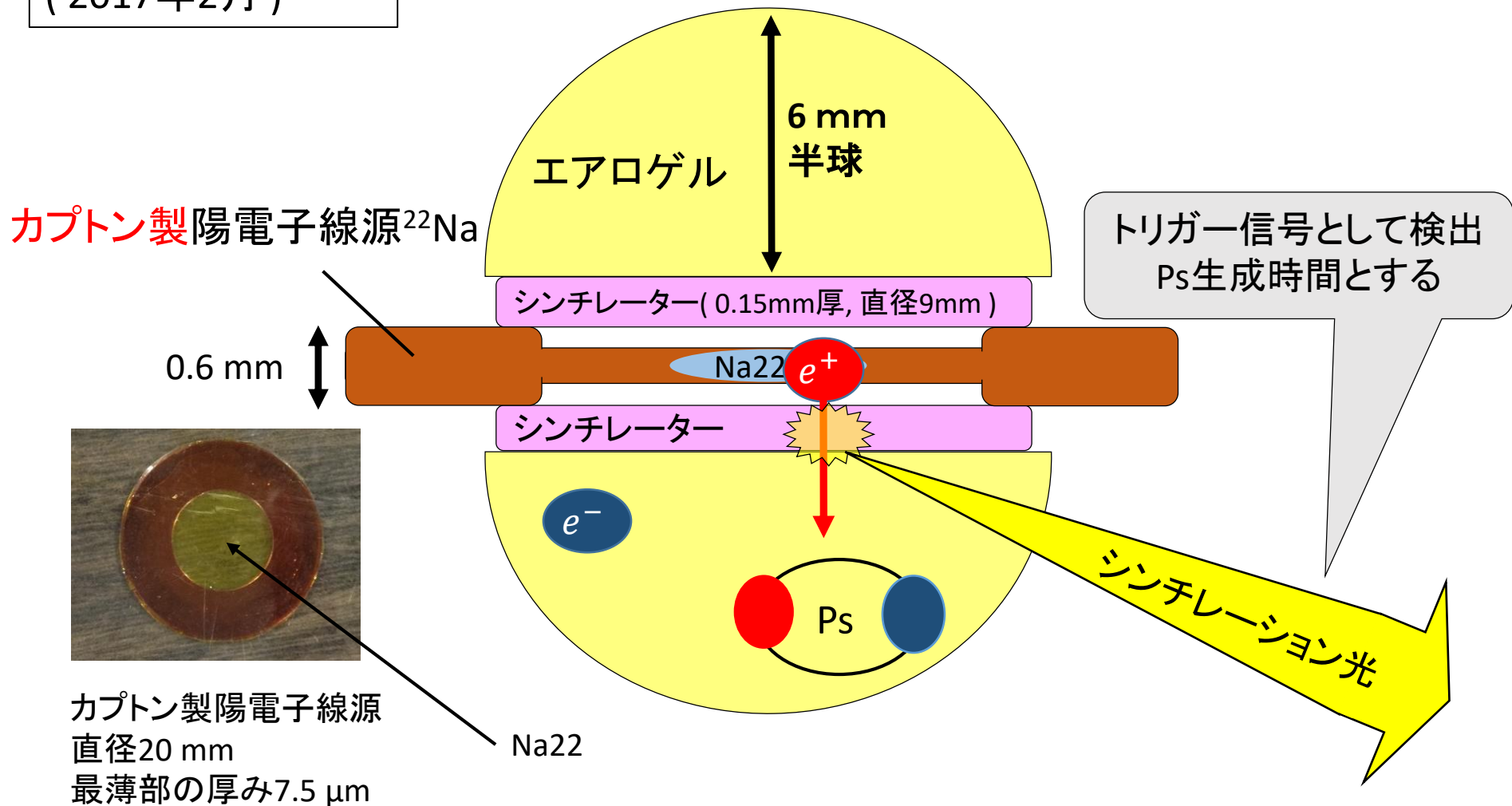
陽電子線源
+
Ps生成部

Ps生成部の改良



線源強度: 380 kBq
(2017年2月)

- イベント数の増加
➡ 検出器内部に陽電子線源
- コンプトン散乱の低減
➡ 物質量を少なく



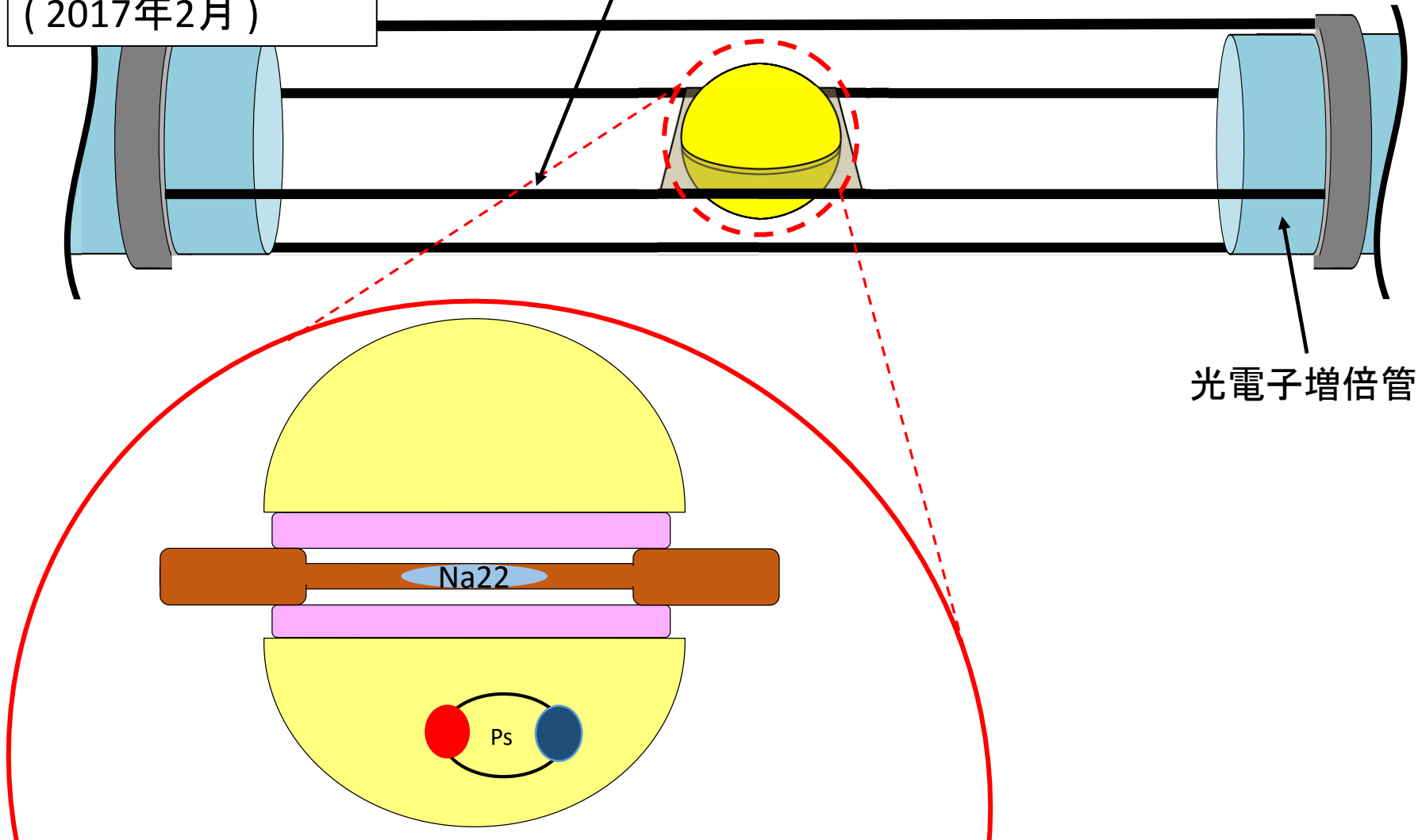
Ps生成部の改良



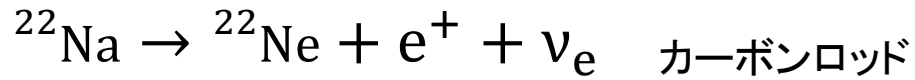
カーボンロッド
($\Phi 0.15$ mm)

線源強度: 380 kBq
(2017年2月)

- イベント数の増加
➡ 検出器内部に陽電子線源
- コンプトン散乱の低減
➡ 物質量を少なく



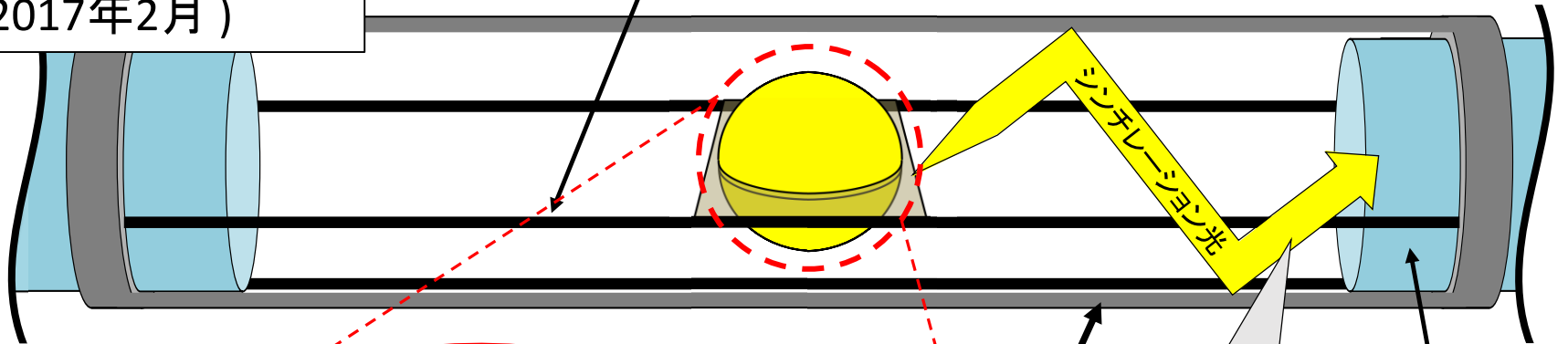
Ps生成部の改良



線源強度: 380 kBq
(2017年2月)

カーボンロッド
($\Phi 0.15$ mm)

- イベント数の増加
➡ 検出器内部に陽電子線源
- コンプトン散乱の低減
➡ 物質量を少なく



アルミナイズド
マイラー (15 μm 厚)

光電子増倍管

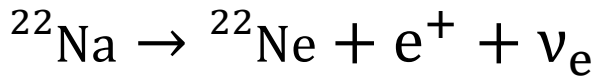
トリガー信号として検出
Ps生成時間とする

アルミナイズドマイラーで全体を巻く



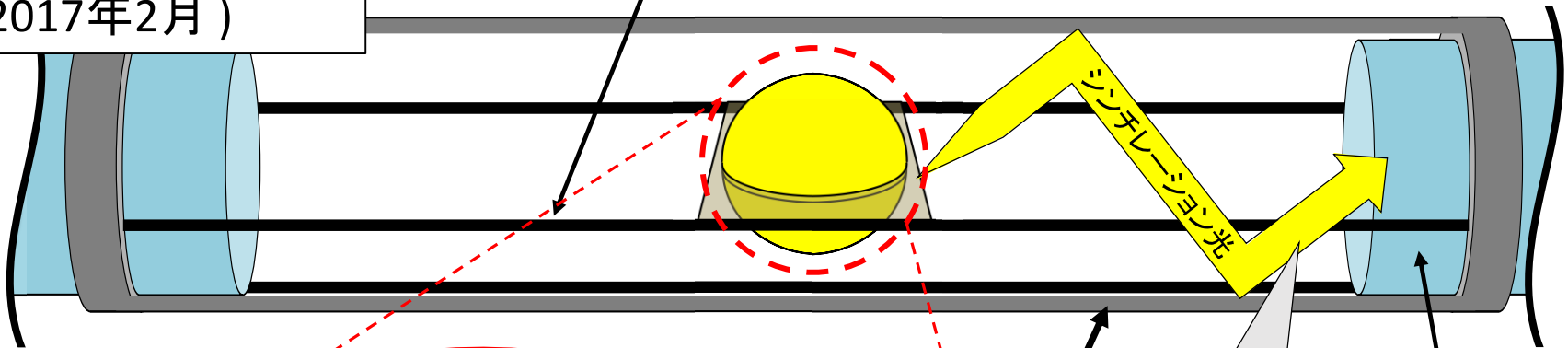
Ps生成部の改良

- イベント数の増加
➡ 検出器内部に陽電子線源
- コンプトン散乱の低減
➡ 物質量を少なく



カーボンロッド
(Φ0.15 mm)

線源強度: 380 kBq
(2017年2月)



アルミナイズド
マイラー (15 μm厚)

光電子増倍管

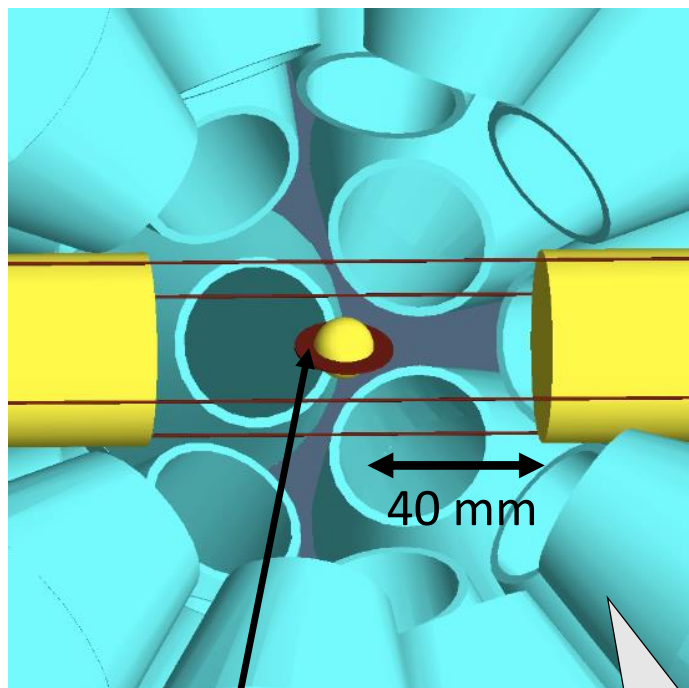
トリガー信号として検出
Ps生成時間とする

窒素ガス

アルミナイズドマイラーで全体を巻く



Ps生成部の改良



カプトン製陽電子線源 ^{22}Na

NaIと線源間の
物質量が極小



改良前

(2013年12月)

改良後

(2017年2月測定)

トリガーレート

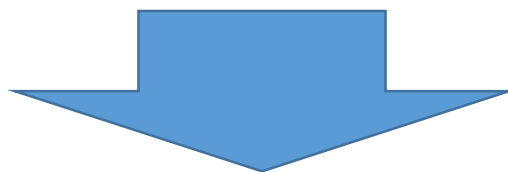
0.42 kHz

230 kHz

改良前後比較

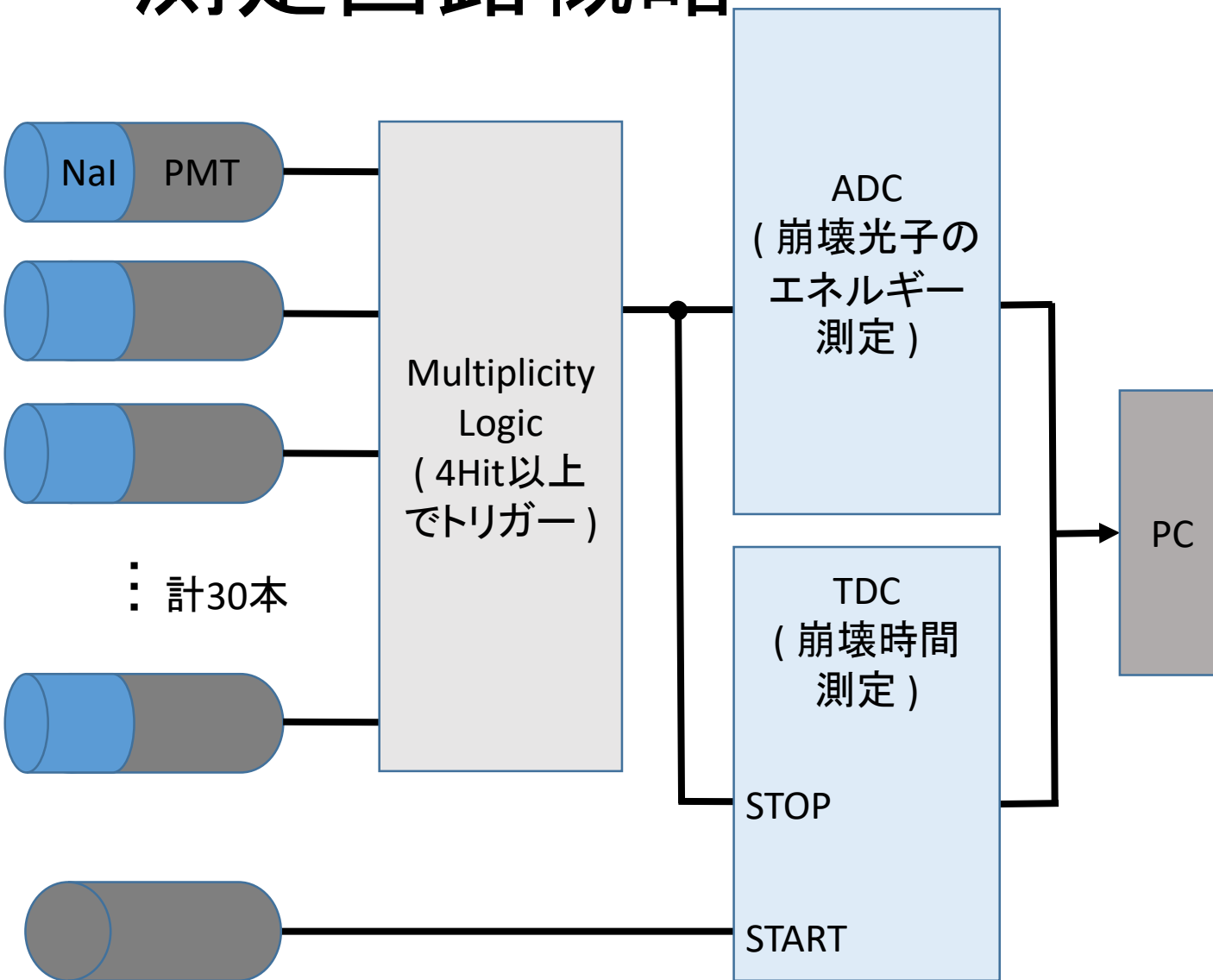
鉛シールドの強化

ポジトロニウム
生成部の改良

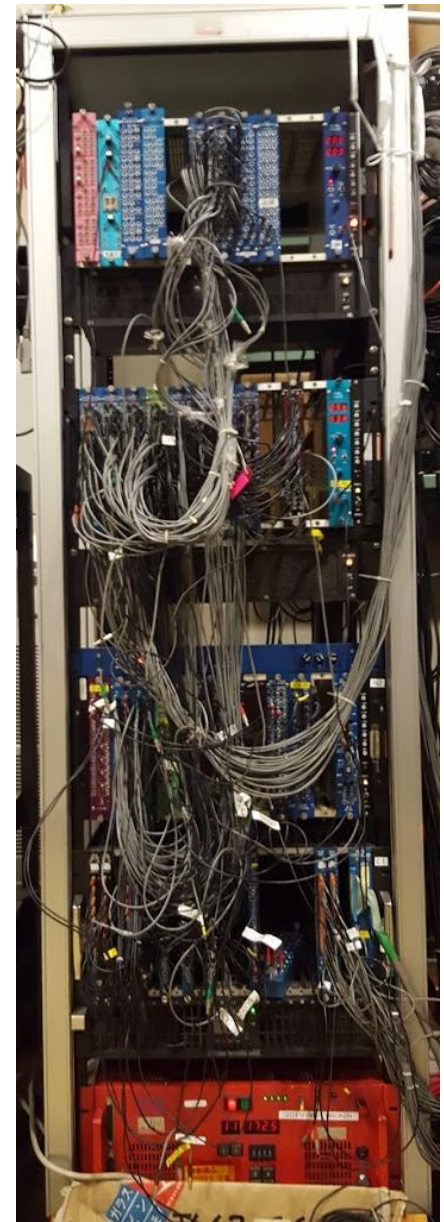


(年間)	改良前	改良後
期待される 5光子崩壊事象数	0.0043個	6.8 ± 2.6個
BGの数	2.5個	0.66個
S/N	0.0018	10

測定回路概略



トリガー用PMT(ポジトロニウム生成信号)



データの取得を開始

検出装置の改良を終え、
2017年1月からデータの取得を開始した。

性能評価のための

3光子崩壊の解析

稀崩壊事象観測

5光子崩壊の解析

データの取得を開始

検出装置の改良を終え、
2017年1月からデータの取得を開始した。

性能評価のための

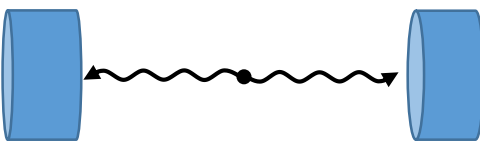
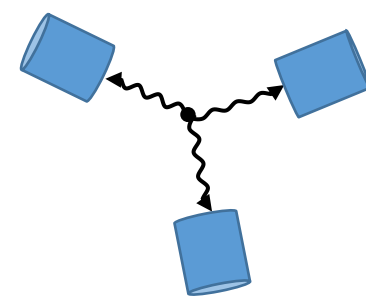
3光子崩壊の解析

稀崩壊事象観測

5光子崩壊の解析

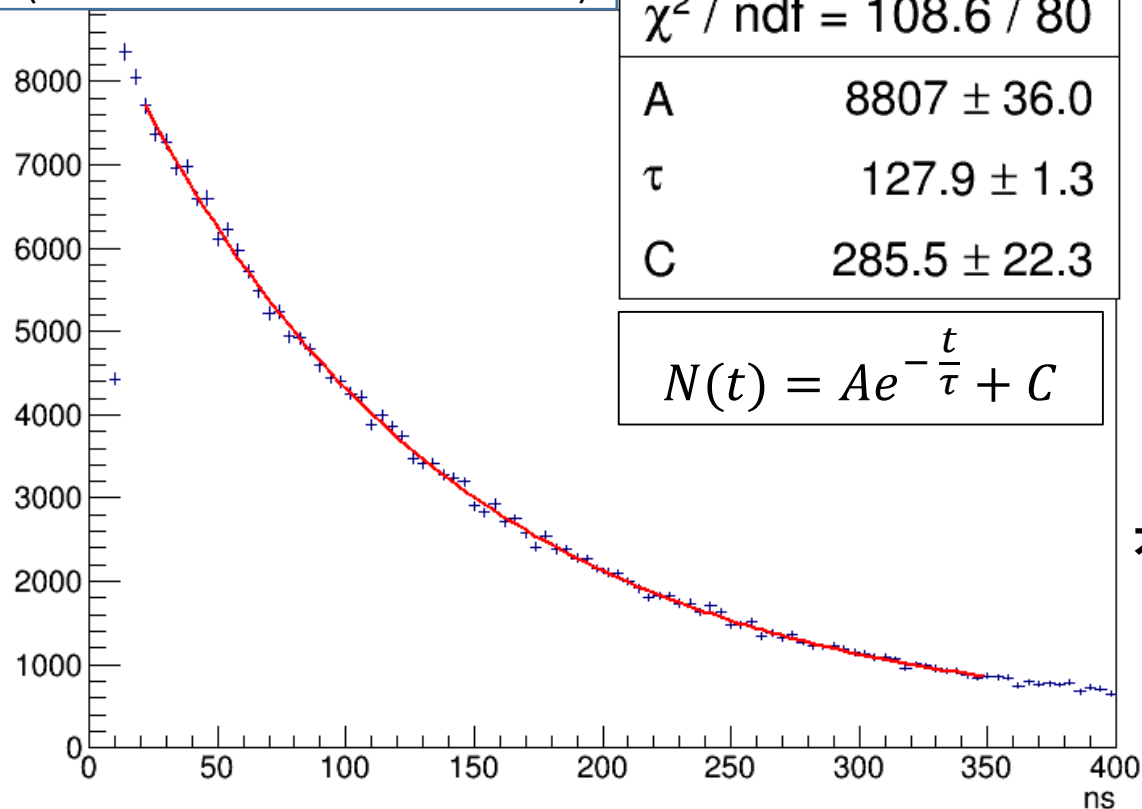
3光子崩壊事象の解析 22 (3Hit以上でTrigger)

測定データ(約18時間)から3光子崩壊と思われる事象を選んでいく

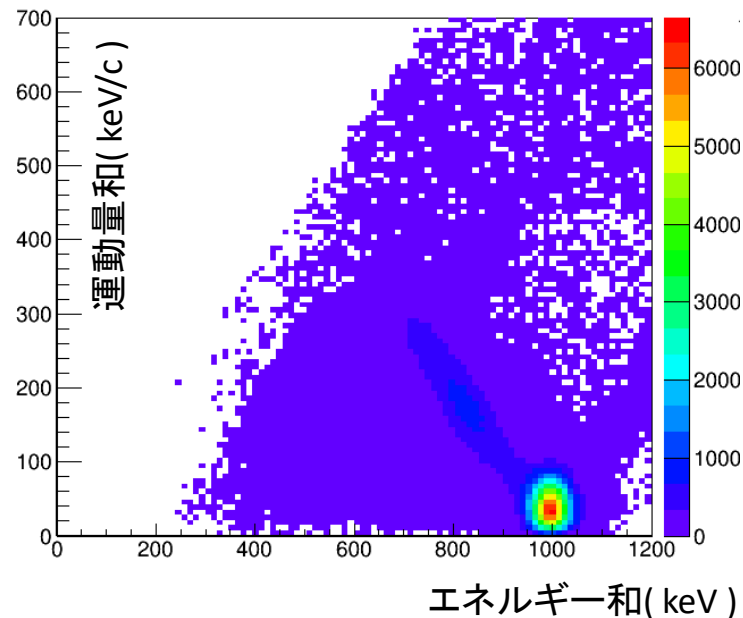
	イベント数	
 <p>2光子崩壊は Back-to-Backに 崩壊する</p>	解析した全イベント数 4,150,000	
	3Hitのイベント数 2,607,912	
	Back-to-Backを排除 (Trigger時にも排除している)	2,413,454
 <p>3光子崩壊は 同一平面に 崩壊する</p>	同一平面Hitを選択 801,177	
	崩壊時間 > 10 ns, Hit時間のばらつき < 7.5 nsを選択 522,608	
	運動量和 < 90 keVを選択 304,800	
	922 keV < エネルギー和 < 1122 keVを選択 289,431	

3光子崩壊事象の解析

3光子崩壊と思われる
事象の崩壊時間分布
(Ps生成信号とNaIヒット時間差)



期待通りポジトロニウム
崩壊事象を観測できた。



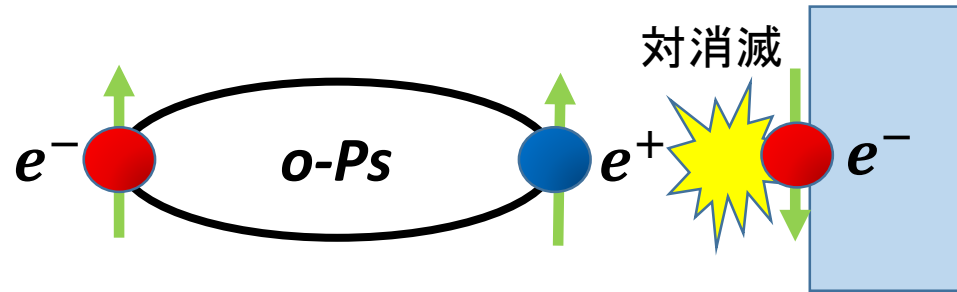
オルソポジトロニウムの寿命(真空中)
142 ns

結果から得られた寿命
 127.9 ± 1.3 ns

物質効果により
寿命が短くなる

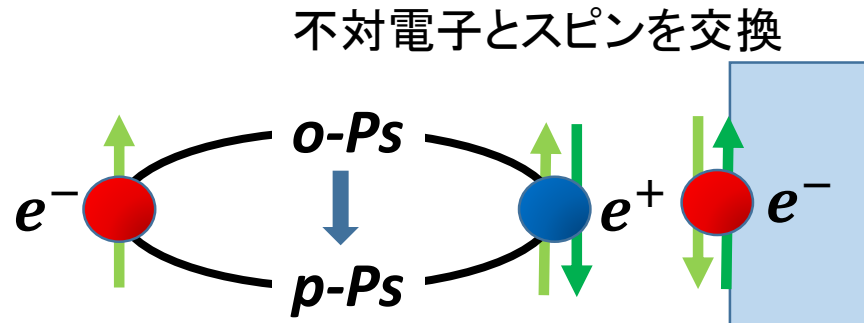
ポジトロニウムと物質効果

ピックオフ消滅



物質の密度が大きいほど確率増大

スピン交換



大気中では酸素が不對電子を持つ

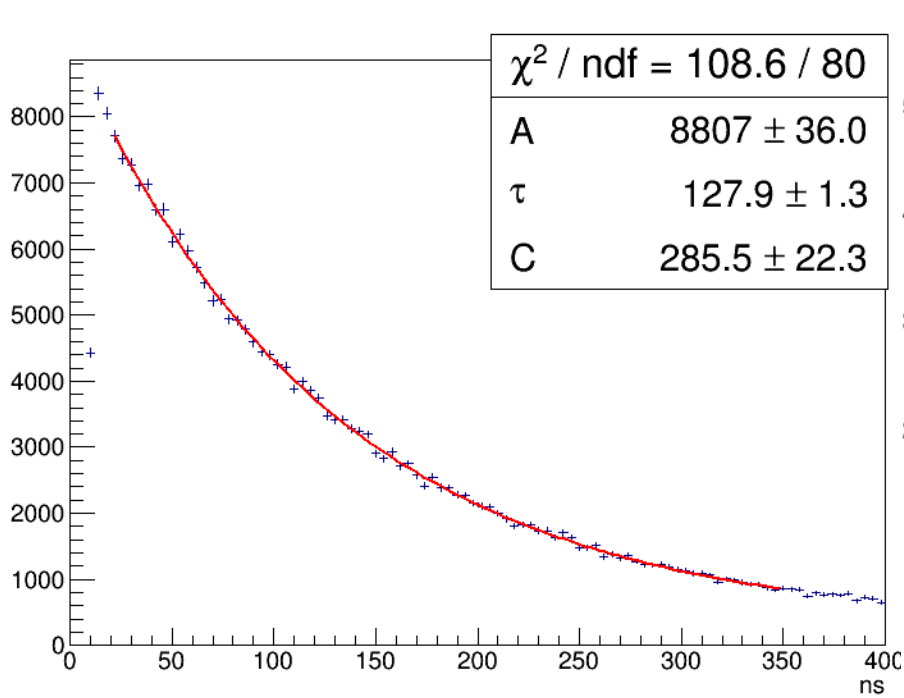
主に上記の反応により物質中では真空中より短い寿命で崩壊する

3光子崩壊事象の解析

物質効果の寿命への影響

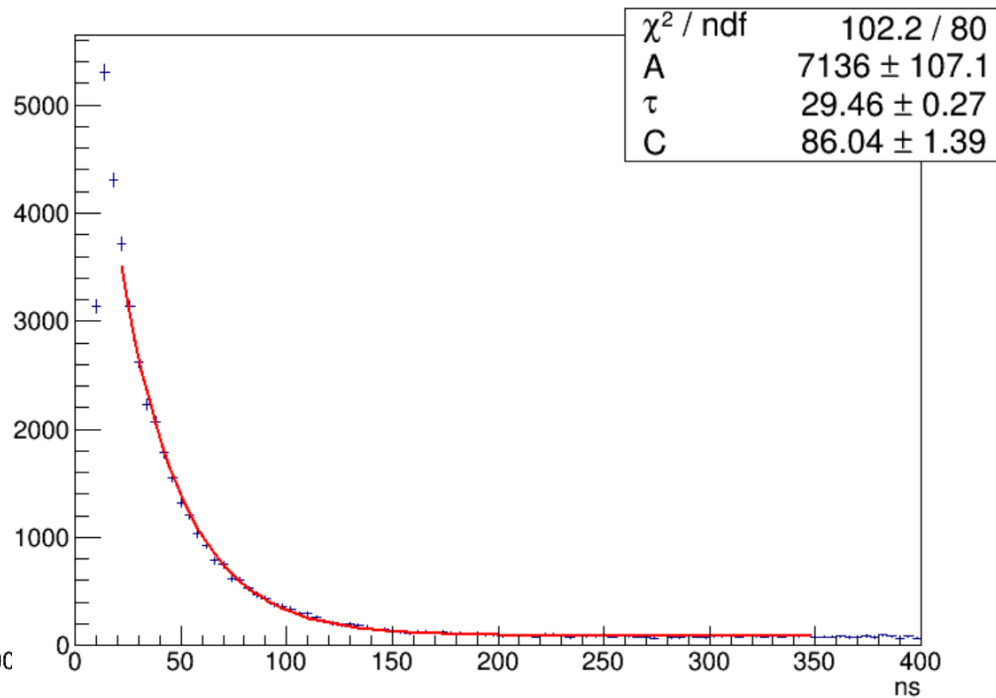
酸素は不対電子を持つ
実験では窒素を流している。

スピン交換: o-Ps \rightarrow p-Ps \rightarrow 崩壊



窒素ガスを流した結果

128 ns



酸素ガスを流した結果

29 ns

データの取得を開始

検出装置の改良を終え、
2017年1月からデータの取得を開始した。

性能評価のための

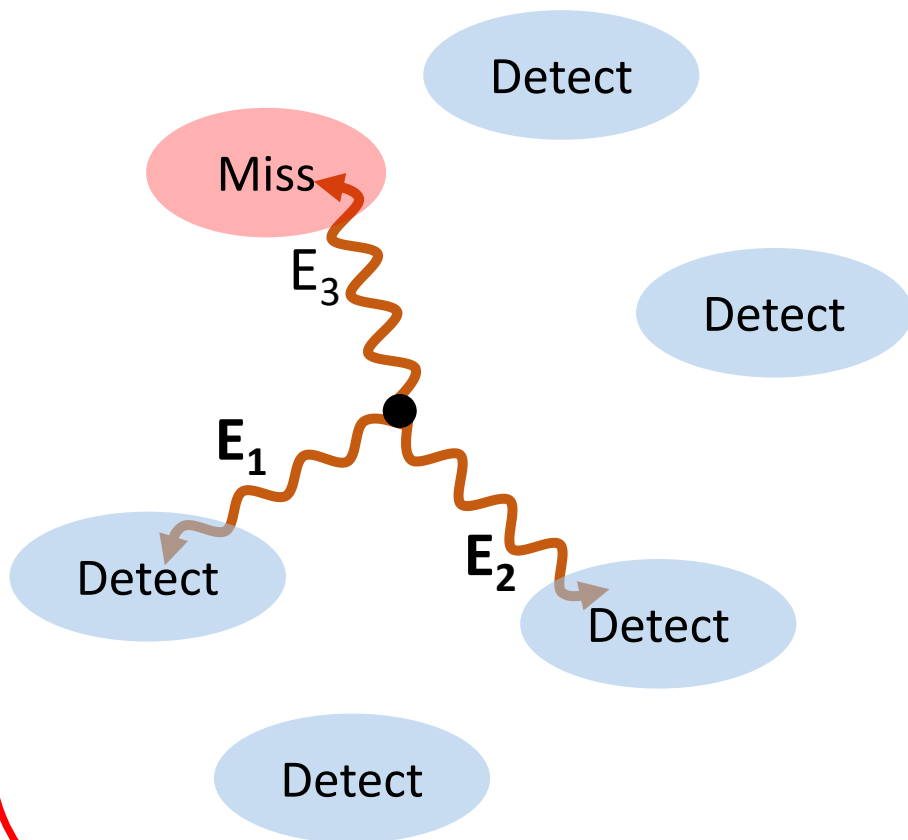
3光子崩壊の解析

希崩壊事象観測

5光子崩壊の解析

BG排除方法の改良

BG事象: 2Hitが3光子崩壊由来



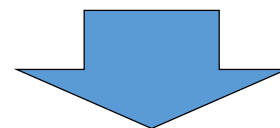
運動量保存から

$$|\vec{P}_1 + \vec{P}_2| = |\vec{P}_3| = E_3$$

3光子崩壊再構成エネルギー

$$E_1 + E_2 + |\vec{P}_1 + \vec{P}_2| = 1022 \text{ keV}$$

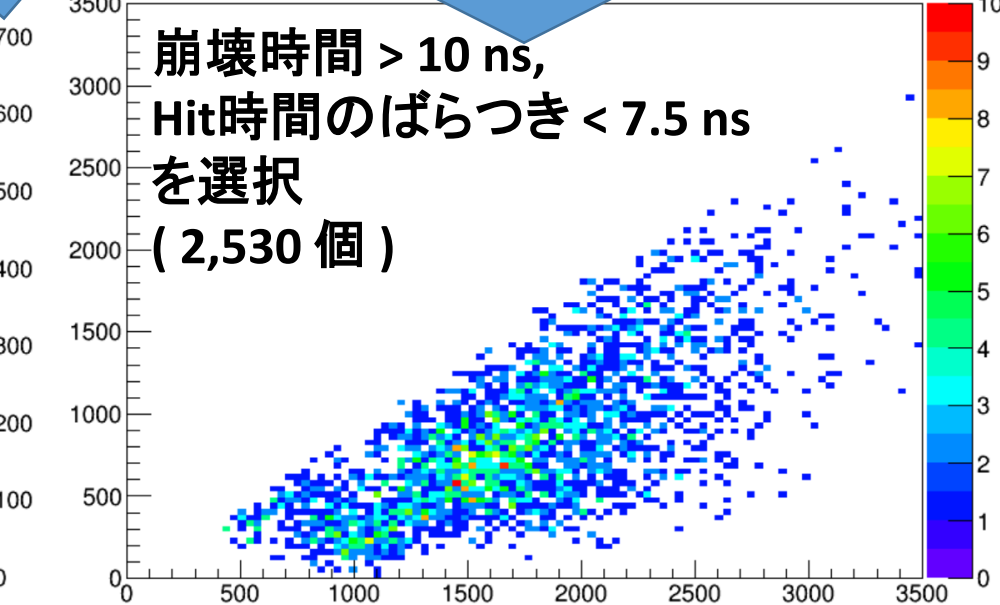
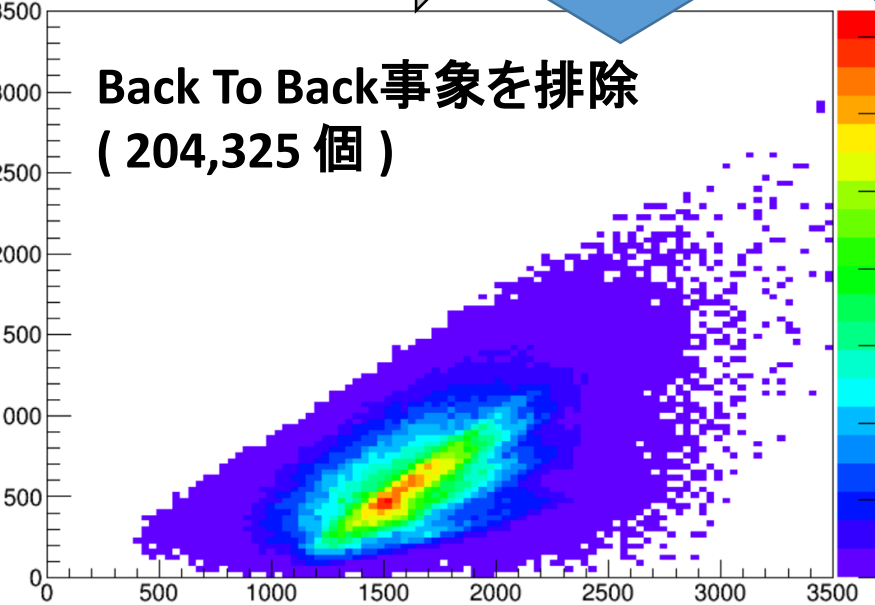
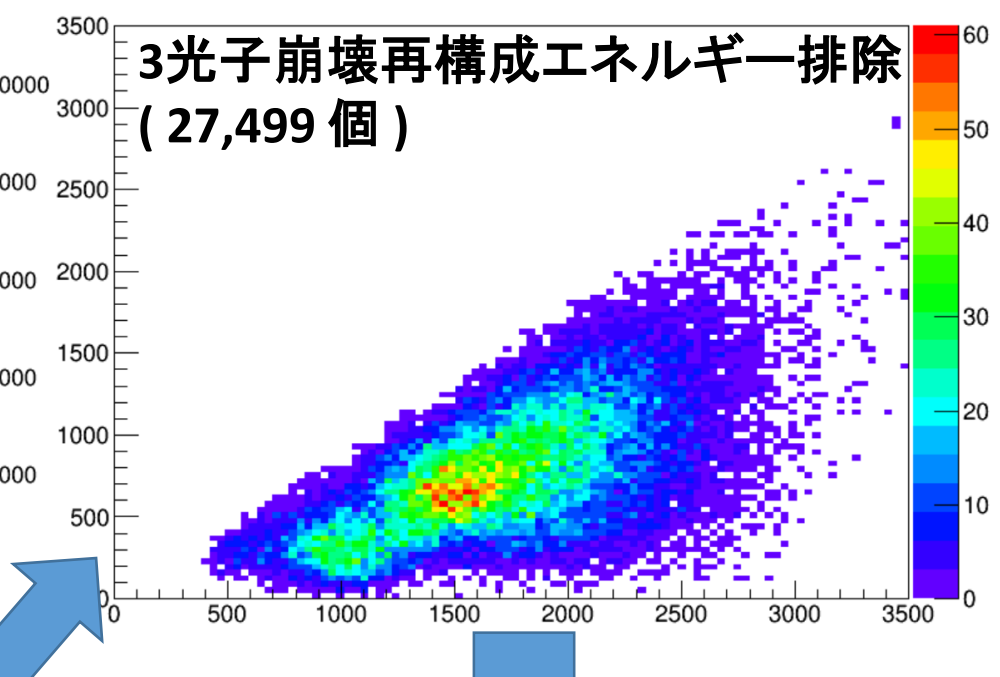
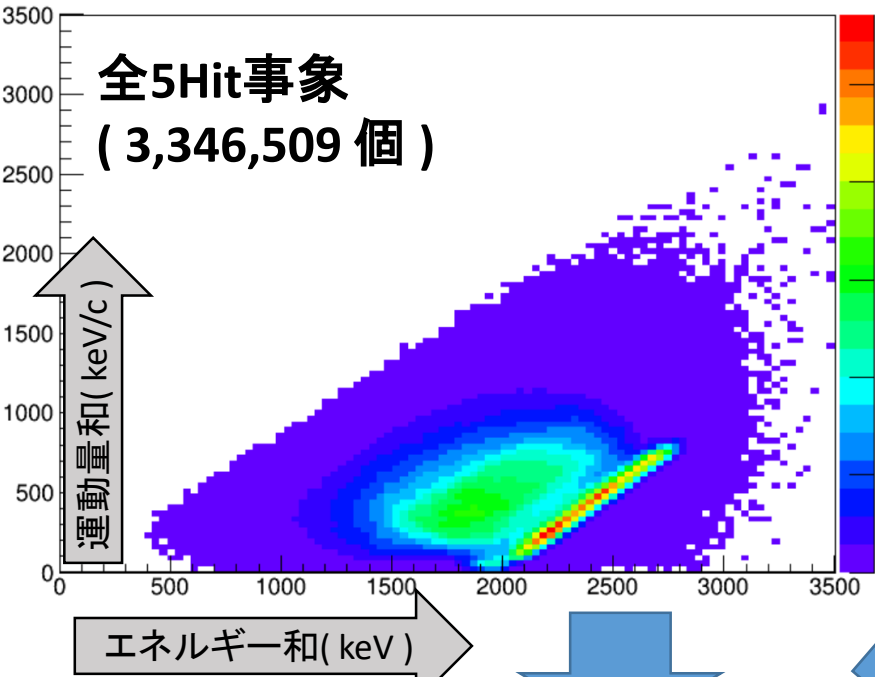
全ての2Hitの組み合わせ (${}_5C_2$)
でこれを確認



同一平面3Hitを排除するより
検出効率の高いBG排除方法
(5光子崩壊事象は同一平面Hitも含み得る)

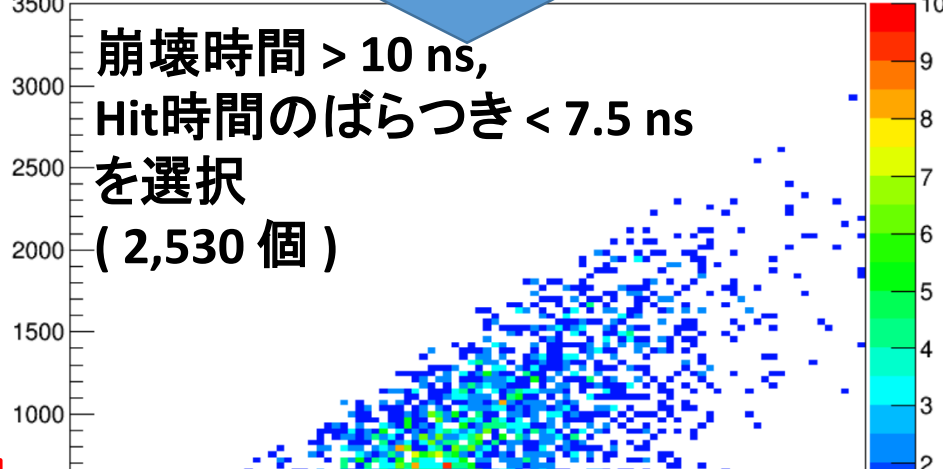
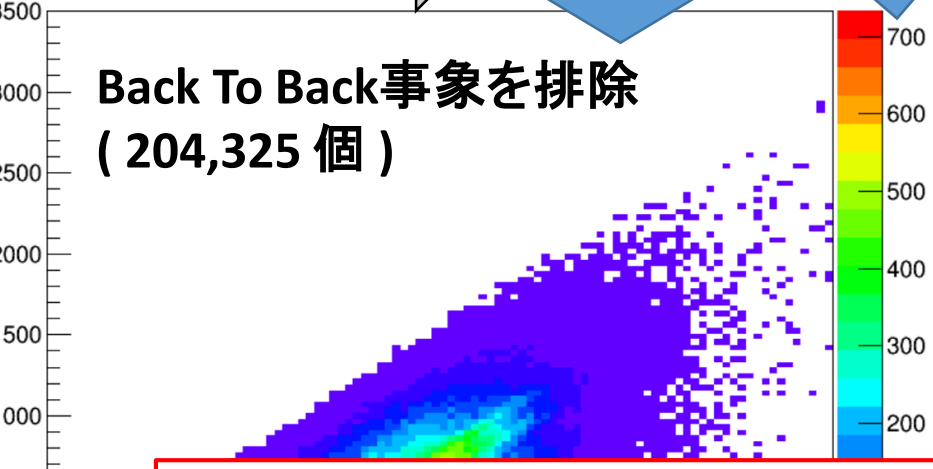
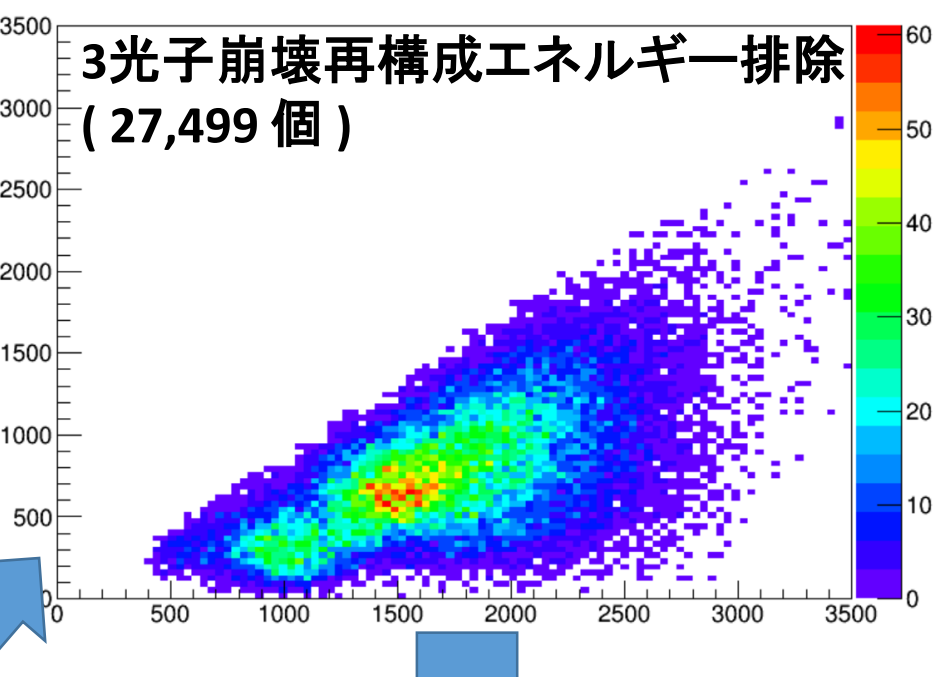
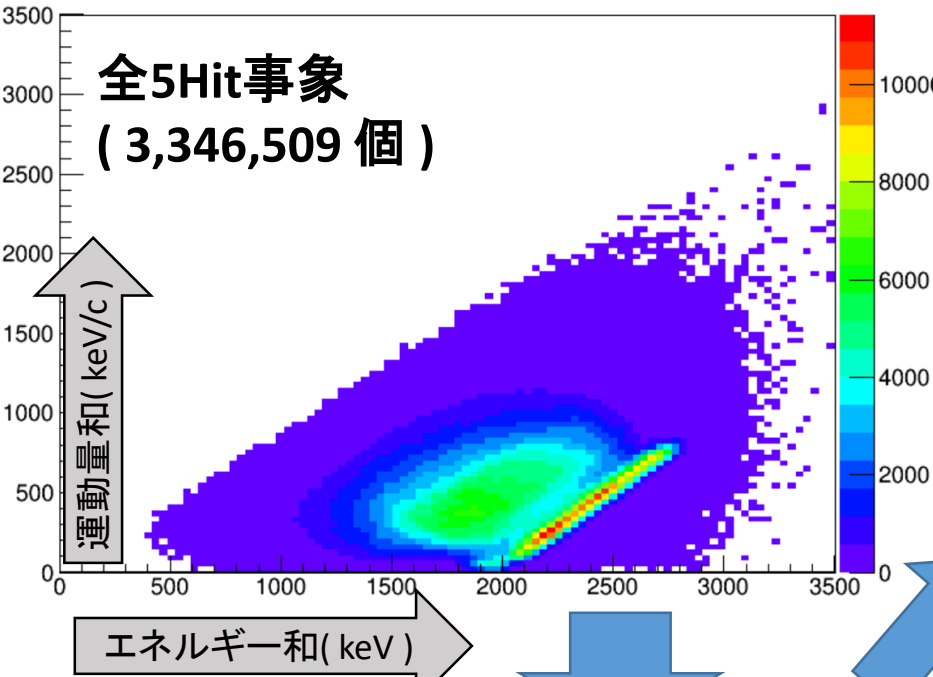
5光子崩壊の解析

データ(約4か月分)から5光子崩壊と思われるデータを選ぶ



5光子崩壊の解析

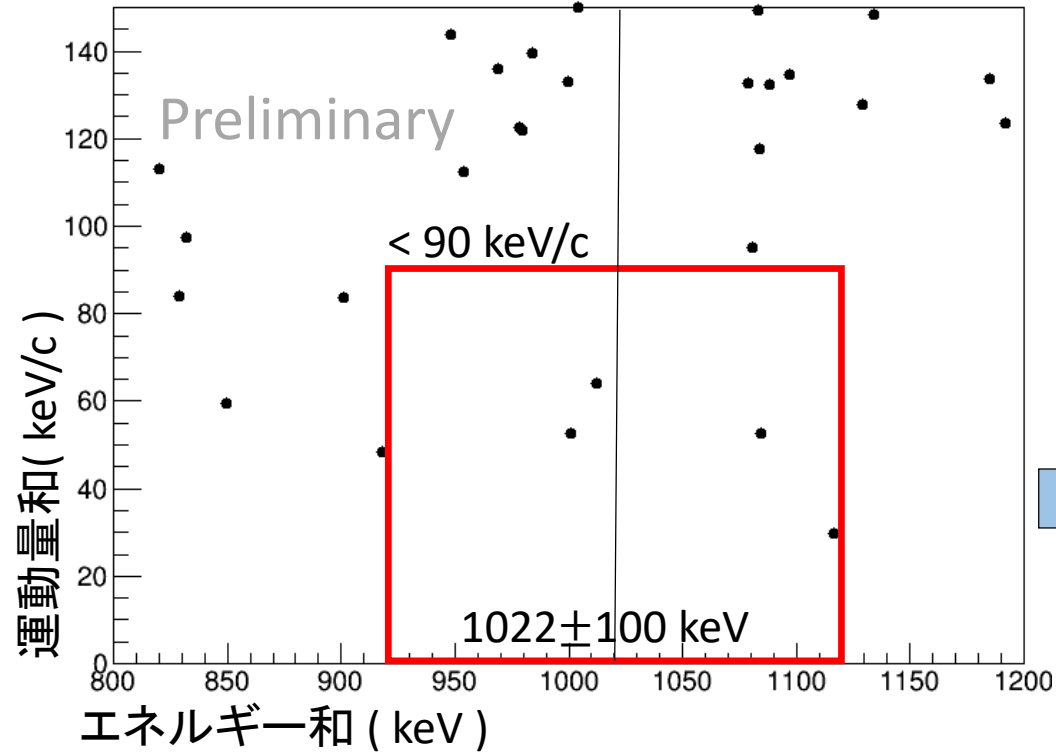
データ(約4か月分)から5光子崩壊と思われるデータを選ぶ



さらに
運動量和、エネルギー和で選択

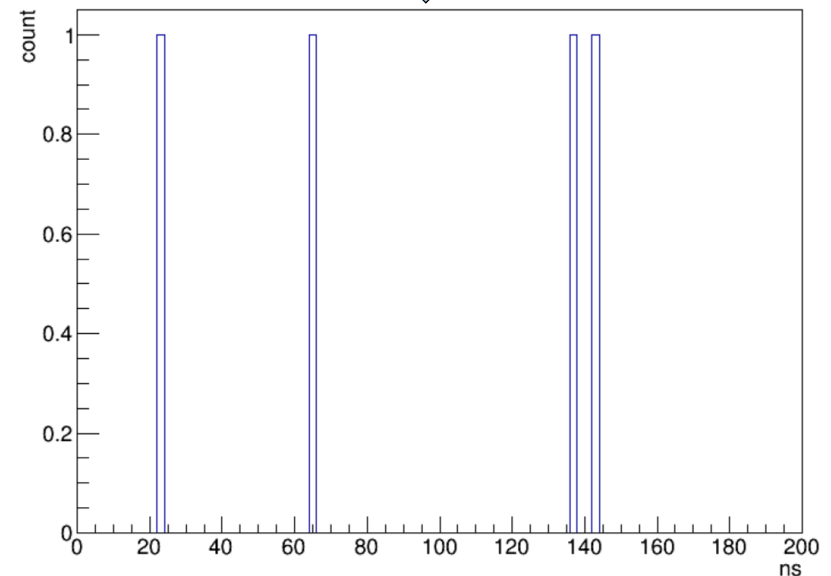


5光子崩壊の解析



4個の5光子崩壊事象の候補
(MCシミュレーションでは2個)

TimeWalk補正が悪く、
時間情報が正確ではない
→今後改善し、検証が必要

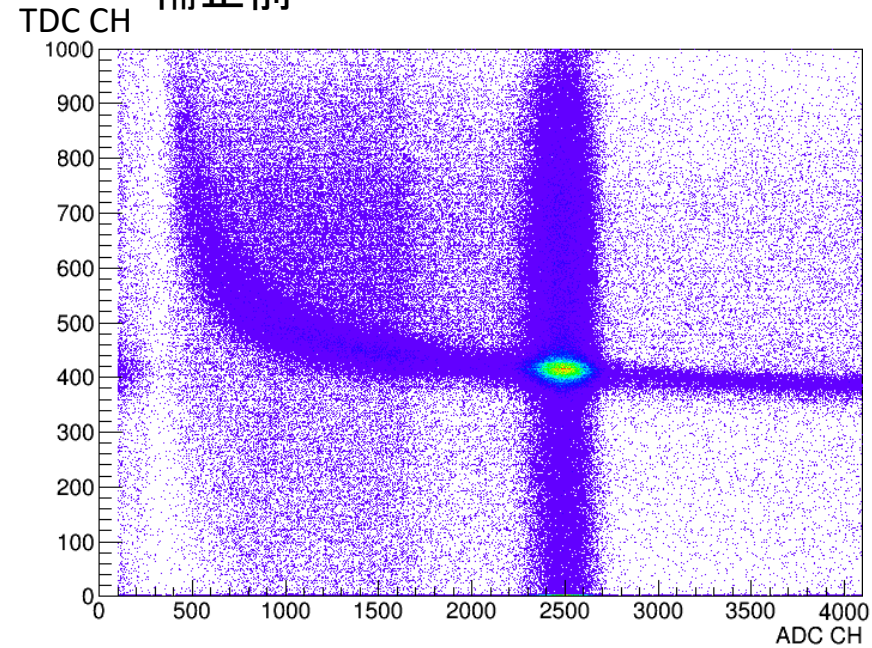


4事象の崩壊時間分布 (ns)

今後

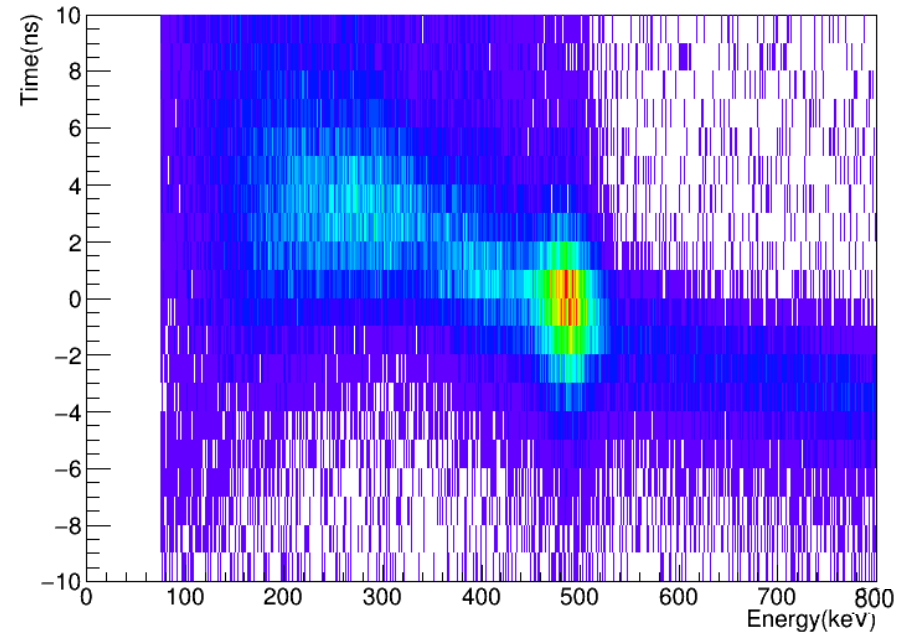
TimeWalk補正の改善

補正前



20ns程遅れる

補正後



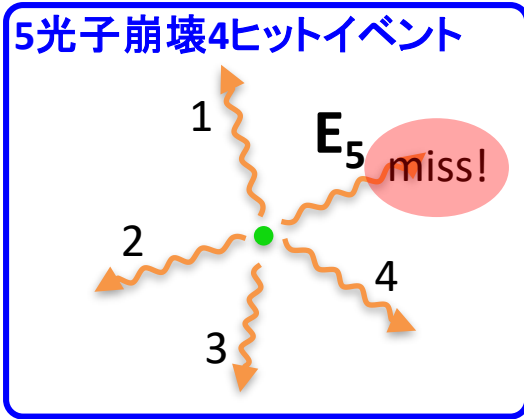
4ns程遅れる

これを改善 → 時間情報の改善

今後

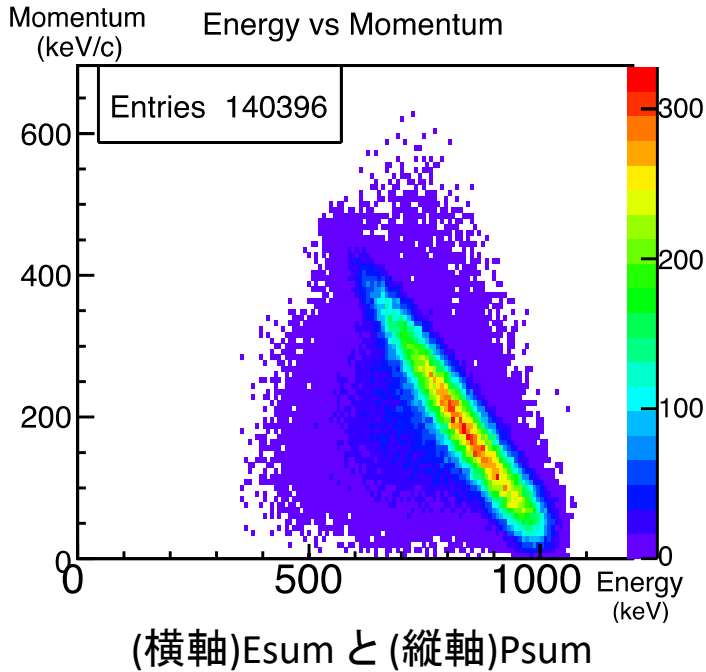
5光子崩壊4Hit事象の利用

$$E_5 = |\vec{P}_1 + \vec{P}_2 + \vec{P}_3 + \vec{P}_4|$$




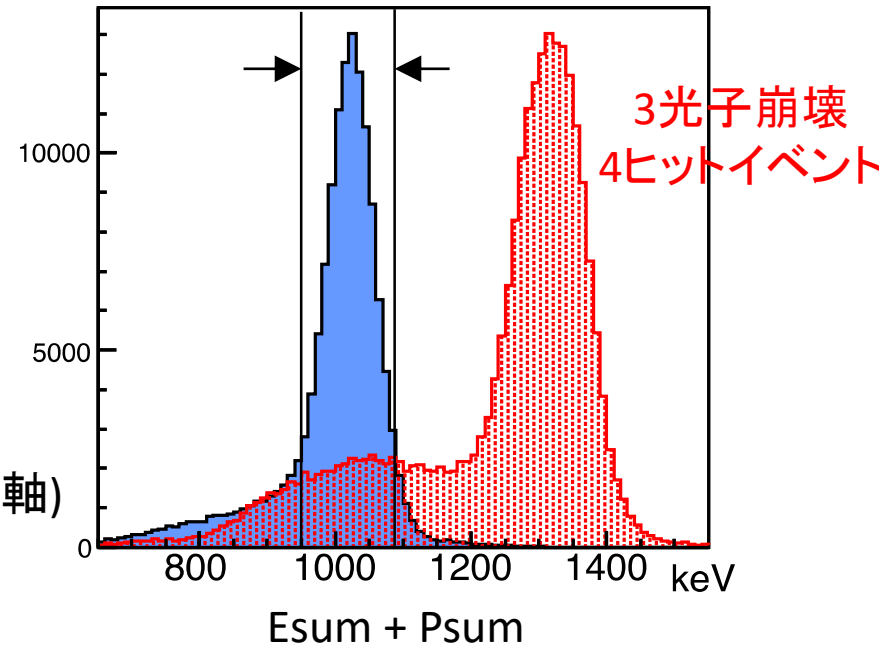
5光子崩壊再構成エネルギー

$$\sum_i^4 E_i + \left| \sum_i^4 \vec{P}_i \right| = 1022 \text{ keV}$$



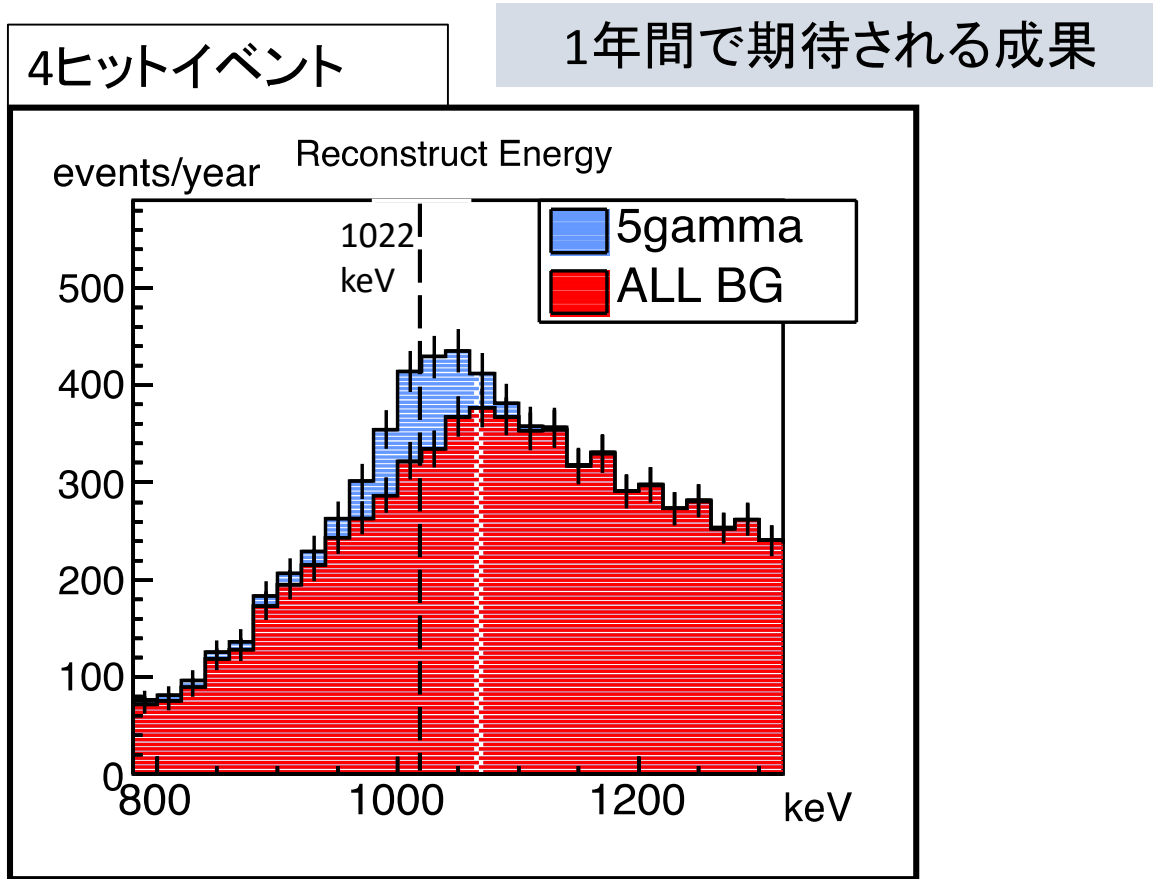
Reconstructed Energy

再構成

 X(横軸)+Y(縦軸)



今後

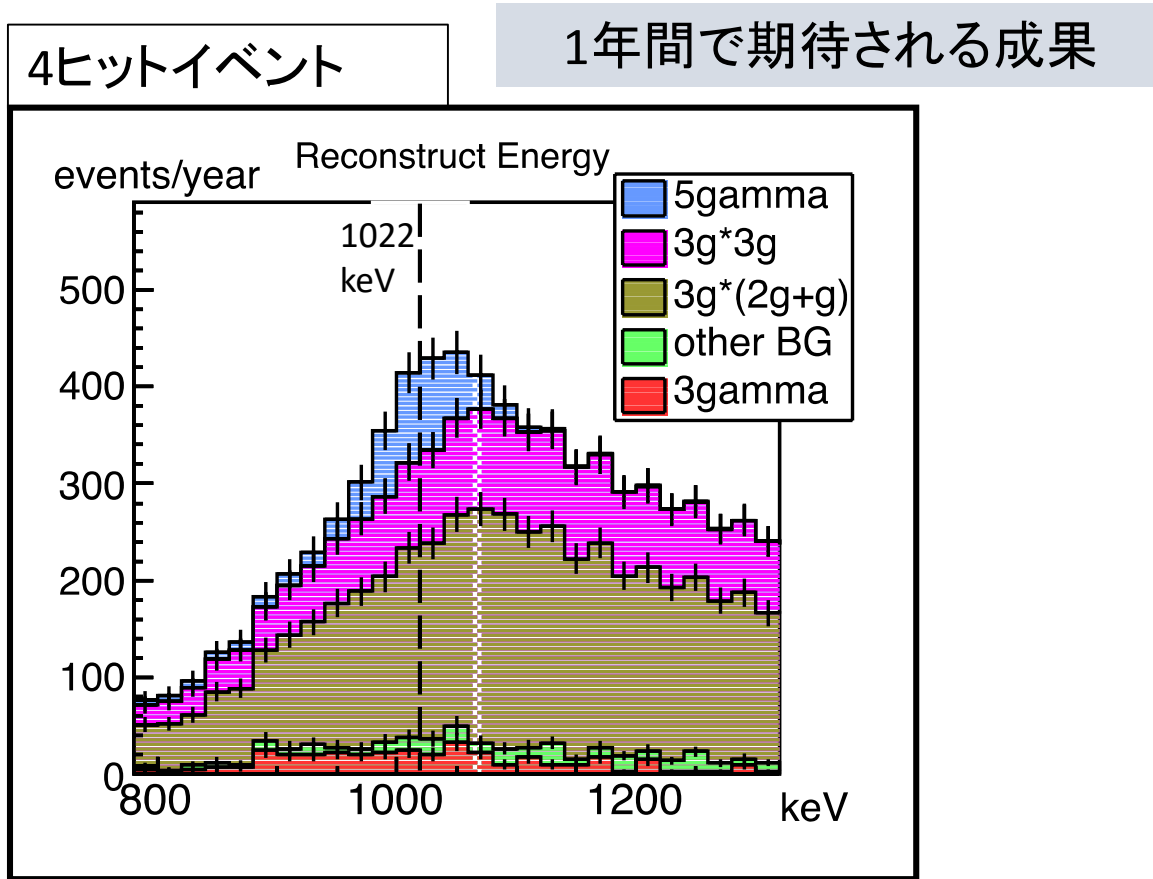
5光子崩壊4Hit事象の利用



	5Hitイベント	4Hitイベント
イベント数	6.4 ± 2.6	413 ± 47
S / N	10	0.2

今後

5光子崩壊4Hit事象の利用

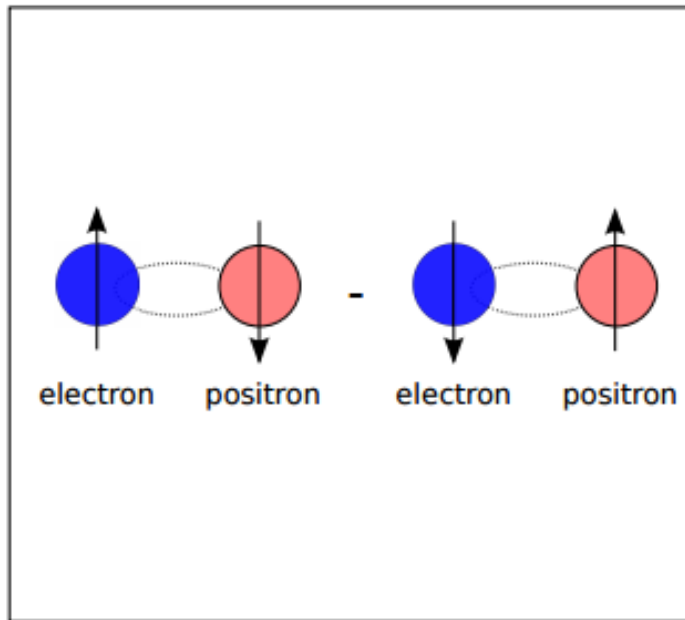


	5Hitイベント	4Hitイベント
イベント数	6.4 ± 2.6	413 ± 47
S / N	10	0.2

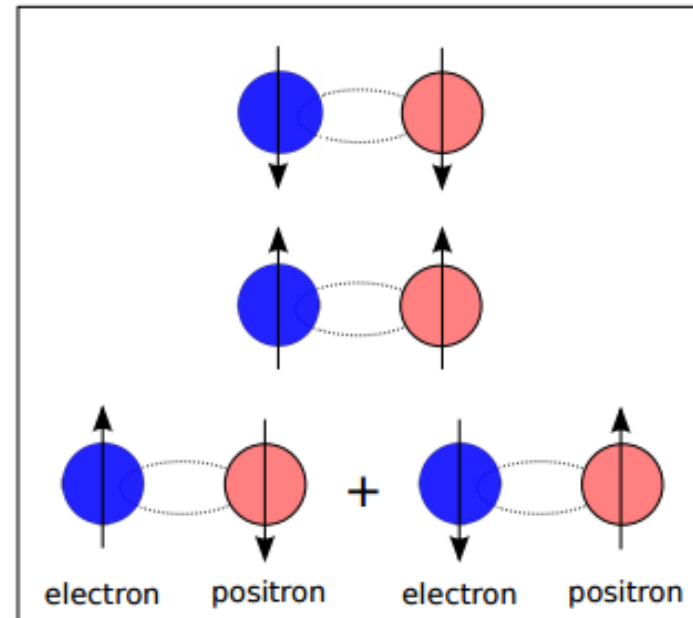
まとめ

- 以下の検出装置の改良を行った。
 - 鉛シールドの強化によるBGの減少
 - ポジトロニウム生成部の改良によるイベント数の増加
- データの取得を開始し、3光子崩壊、5光子崩壊について解析を行った。
- 3光子崩壊事象解析から期待通りのオルソポジトロニウムの寿命が観測できた。
- 5光子崩壊事象解析から、現時点で4個の5光子崩壊事象候補を観測。
- 1年間の測定で6個ほどの5光子崩壊事象の検出が期待される。

ポジトロニウム



para Positronium



ortho Positronium

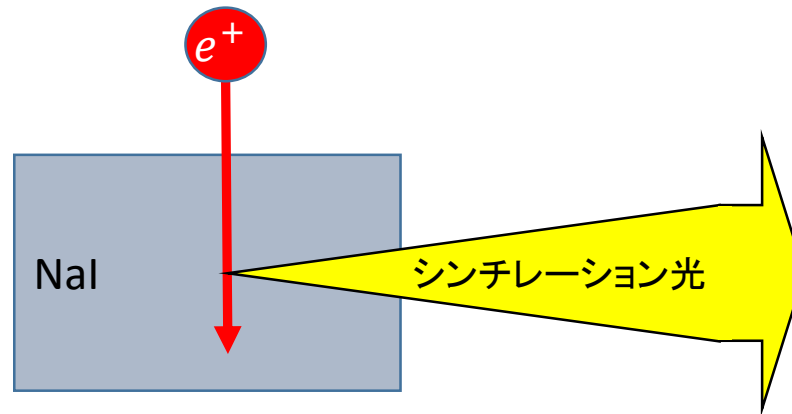
荷電共役変換の固有値 C

	パラポジトロニウム	オルソポジトロニウム
スピン	0 (一重項)	1 (三重項)
寿命	125ps	142ns
崩壊光子数	偶数個(主に2光子)	奇数個(主に3光子)
C	1	-1

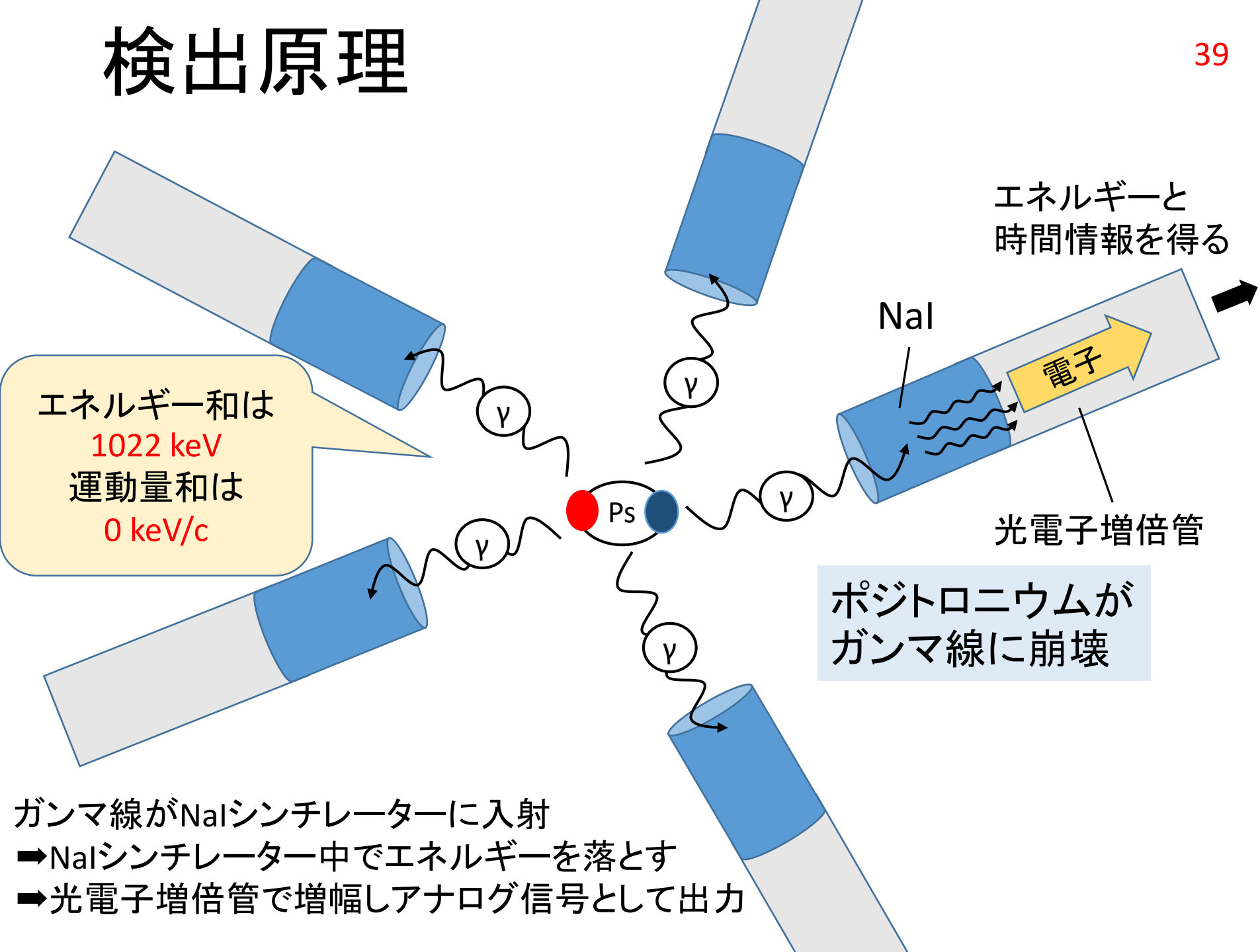
n本の γ 線に崩壊する場合の
荷電共役変換の固有値は $C = (-1)^n$

NaI(TI)シンチレーター

- NaI(Tl)の結晶に γ 線が入射すると両者の相互作用（光電子効果、コンプトン散乱、電子対生成）によって2次電子がNaI(Tl)結晶物質を励起し、励起状態が定常状態に戻る時、分子がシンチレーションと呼ばれる閃光を発生する。

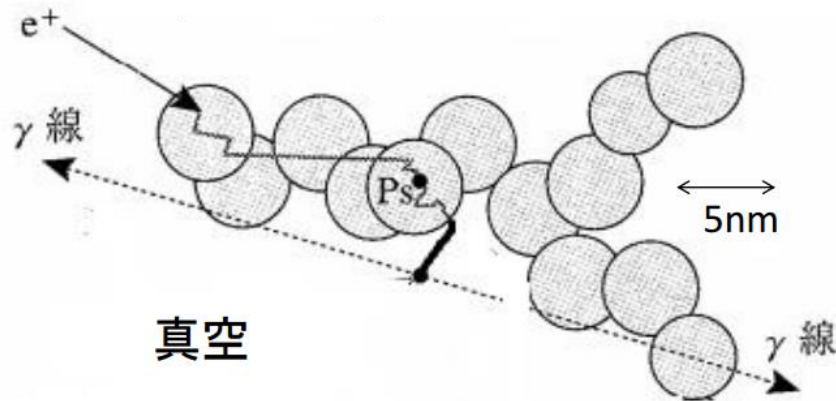


検出原理



シリカエアリゲルによるPs生成

SiO₂の鎖型構造



- ・低密度、均質、表面積が大きい。
→ポジトロニウム (Ps) の生成に適している
- ・陽電子が入射し、内部で減速した後、
表面の電子とポジトロニウムを生成。

ortho-Ps寿命

• 過去の実験結果

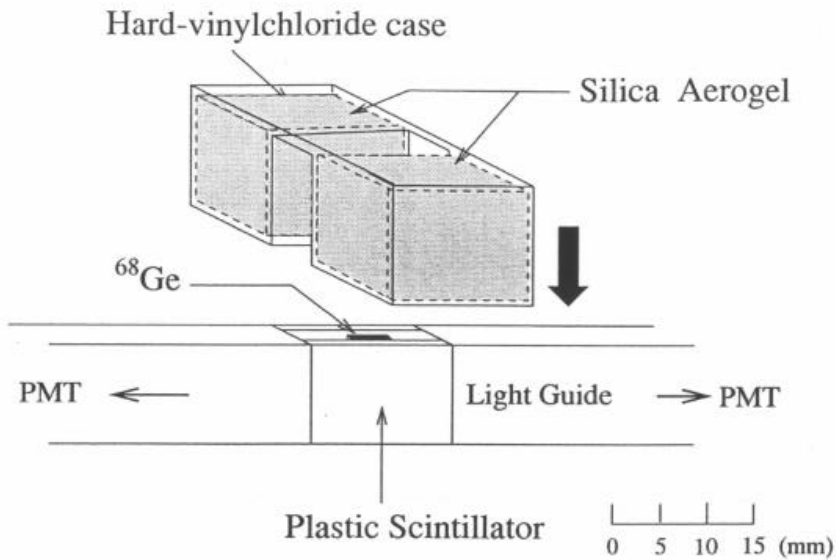


Figure 4.19: Display of P_s formation assembly.

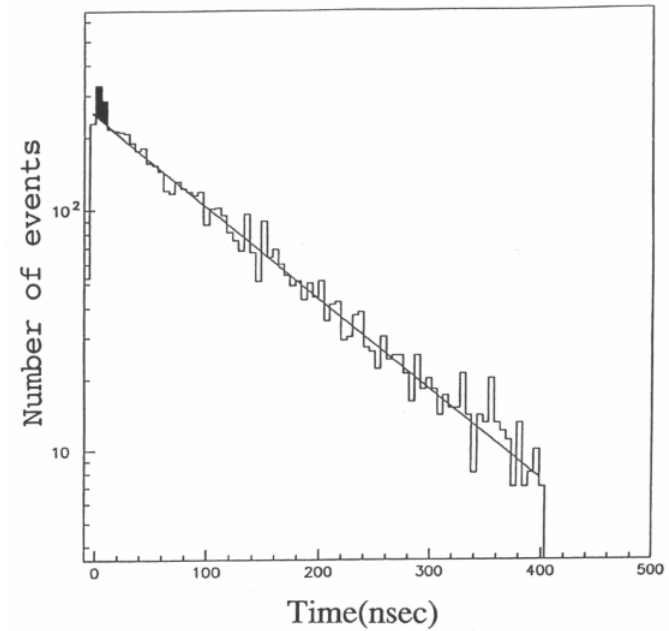


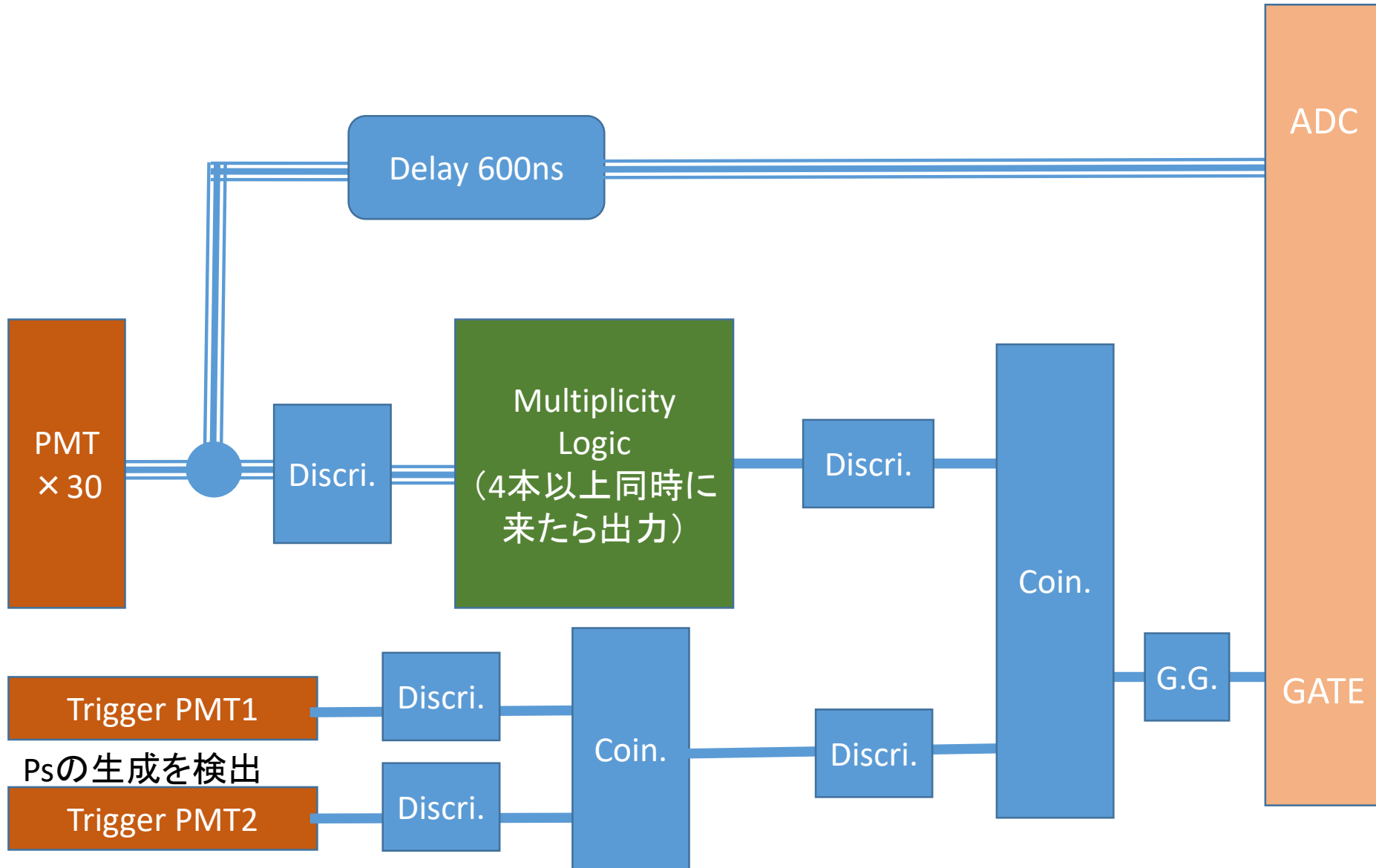
Figure 4.35: Time spectrum of three-photon annihilation events. The shaded area near 0 ns shows prompt annihilation of free electron and free positron. The line shows fitted result with the lifetime of 120.6 ± 2.0 ns.

120.6 ± 2.0 ns
(窒素中)

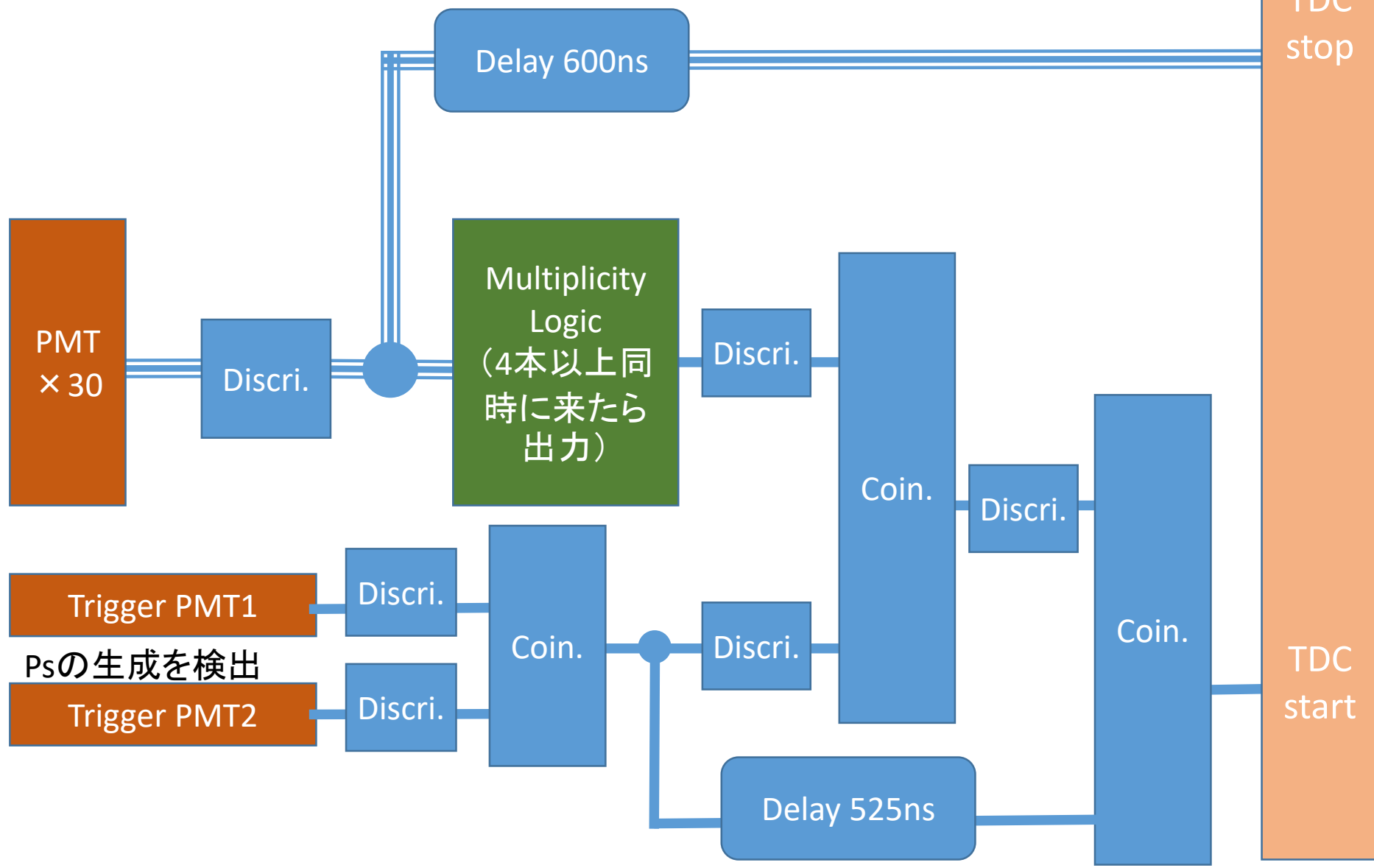
(松本利広 博士論文 1997年)

誤差/値=	2.24205E-10		
電子磁気モーメントの理論計算の α のオーダー			
$(\alpha)^{-5} =$	2.07204E-11		
ポジトロニウムの5光子消滅過程は低次を除いて高次のみの値を得られる			
$(\alpha)^{-8} =$	8.05815E-18		
ポジトロニウム原子の α^3 を除いた場合			
$(\alpha)^{-5} =$	2.07204E-11		
まとめ			
ポジトロニウムの5光子消滅過程は低次を除いても			
電子の異常磁気モーメントより1桁よい精度が得られる。			
原子の波動関数を入れると8桁精度がよい。			

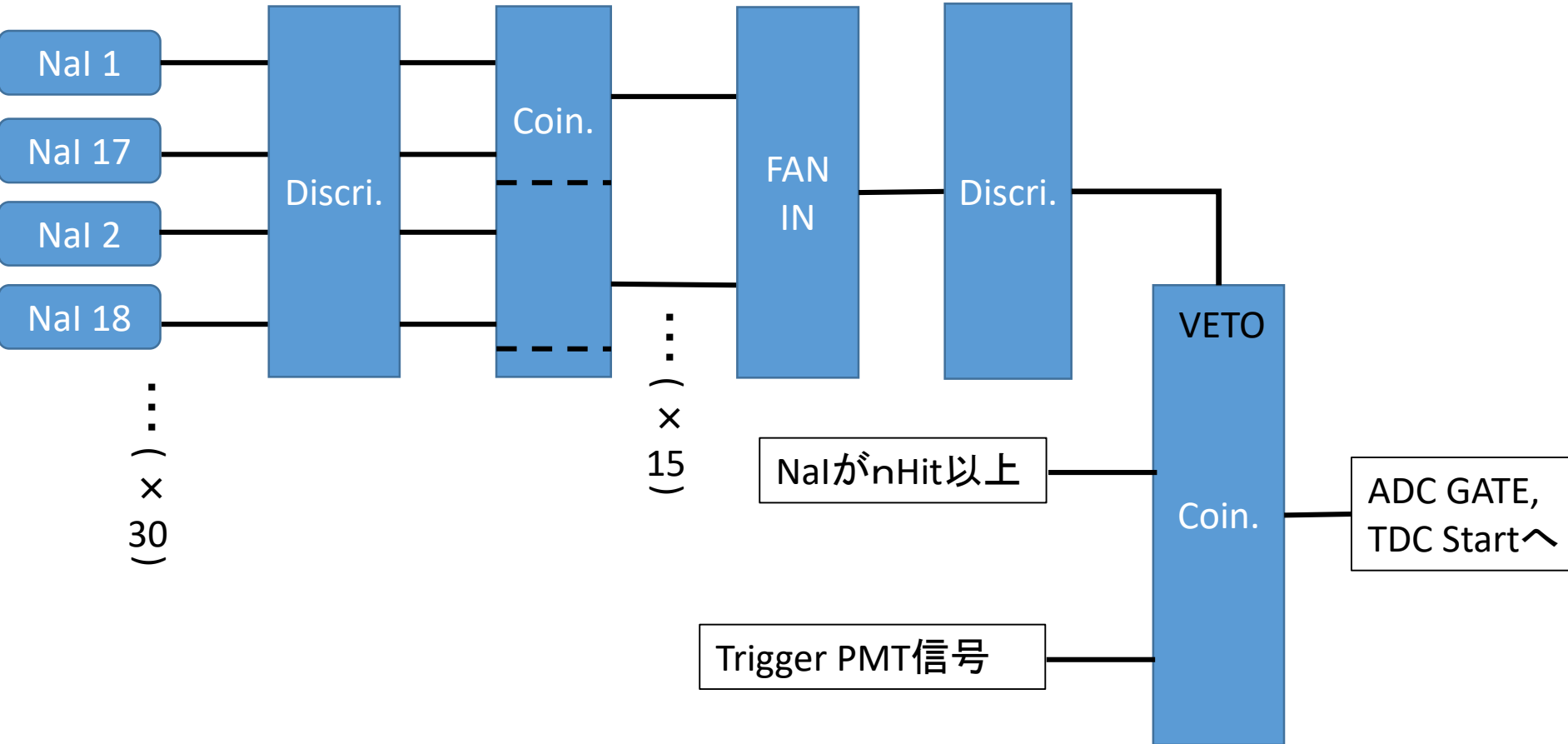
データ取得回路概略(ADC編)



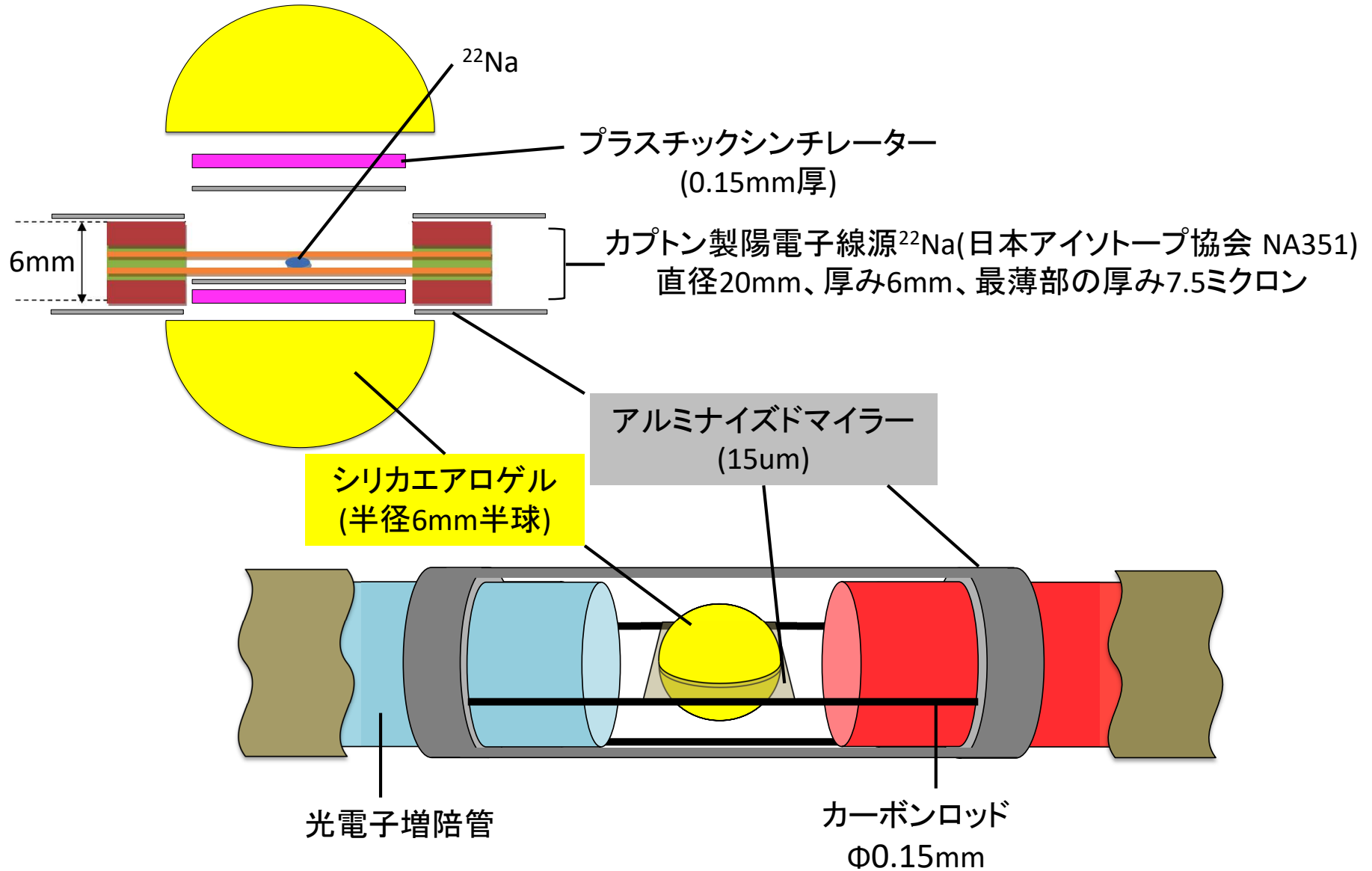
データ取得回路概略(TDC編)

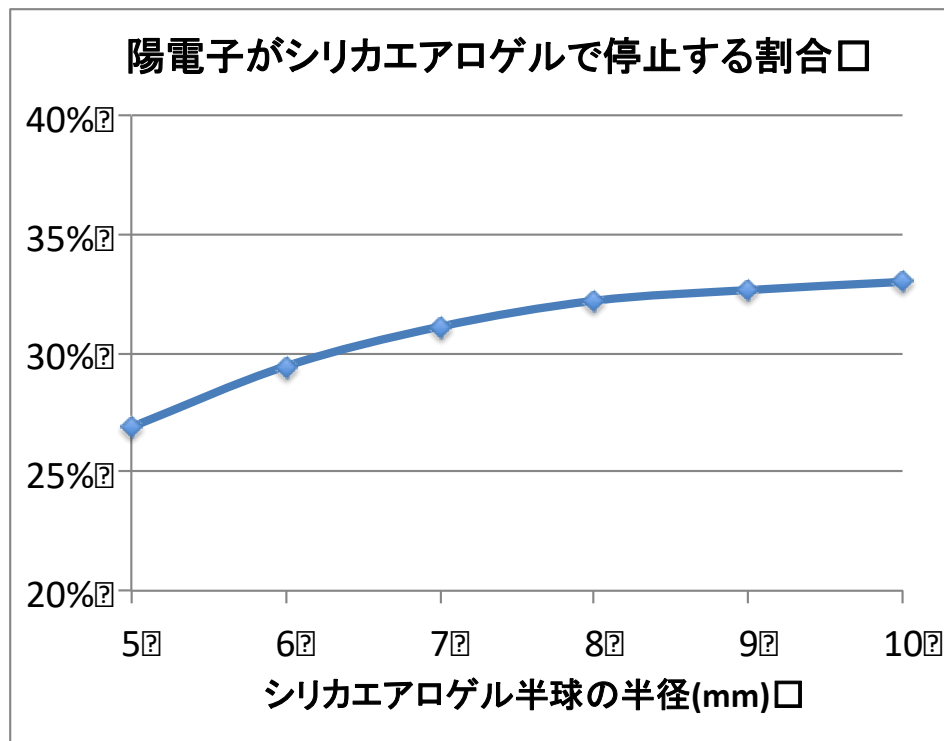


BackToBack排除回路



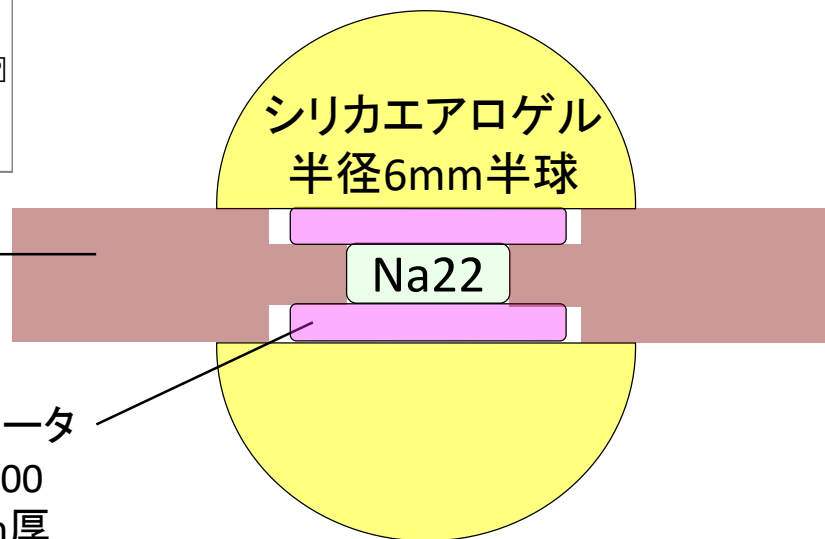
ポジトロニウム生成部





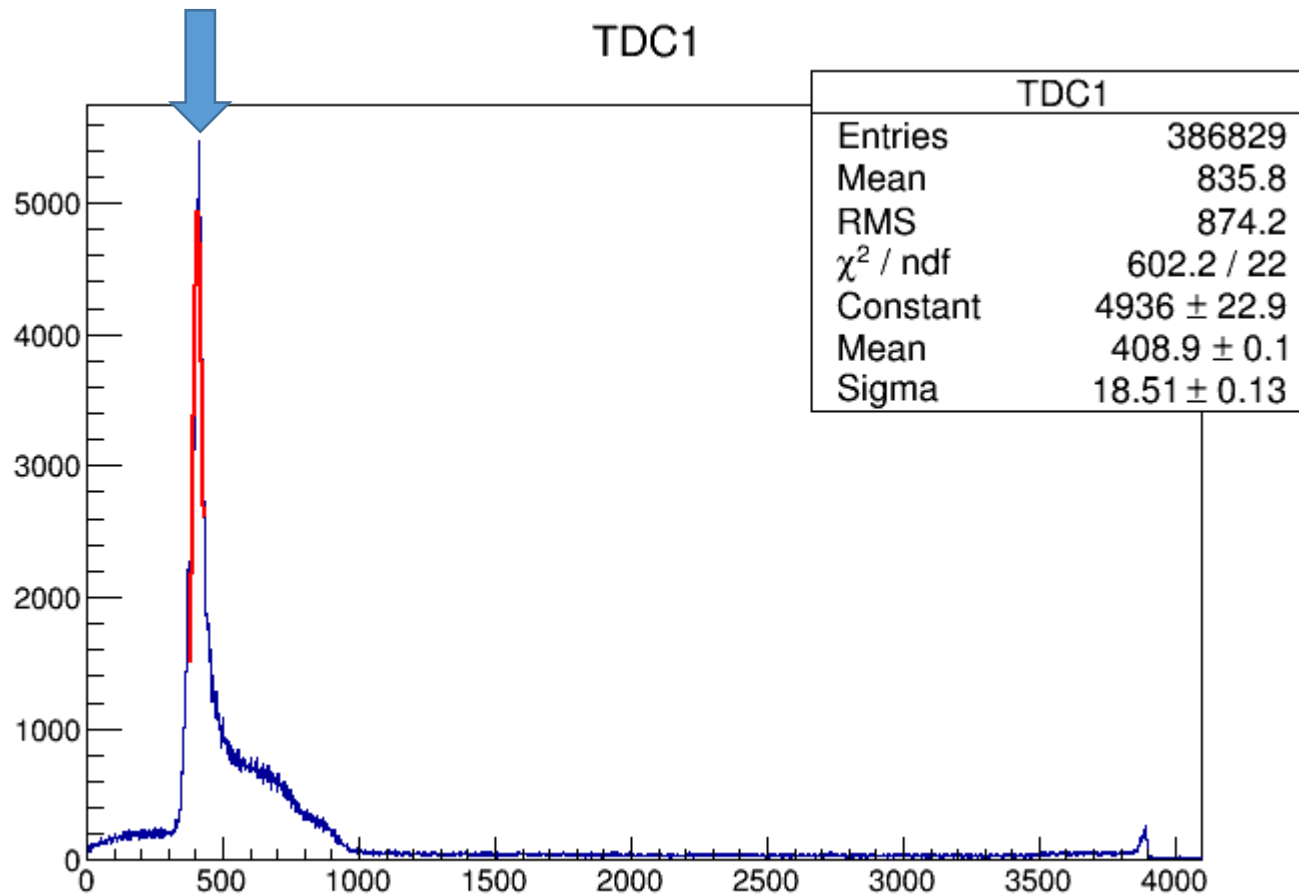
カプトン製陽電子線源²²Na
 (日本アイソトープ協会 NA351)
 直径20mm、厚み6mm、薄膜の厚さ7.5ミクロン

プラスチックシンチレータ
 Saint Gobain製BC400
 直径9mm、0.15mm厚

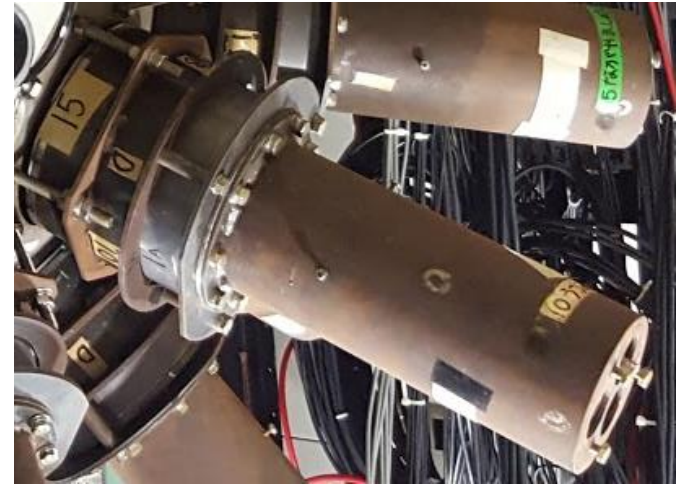
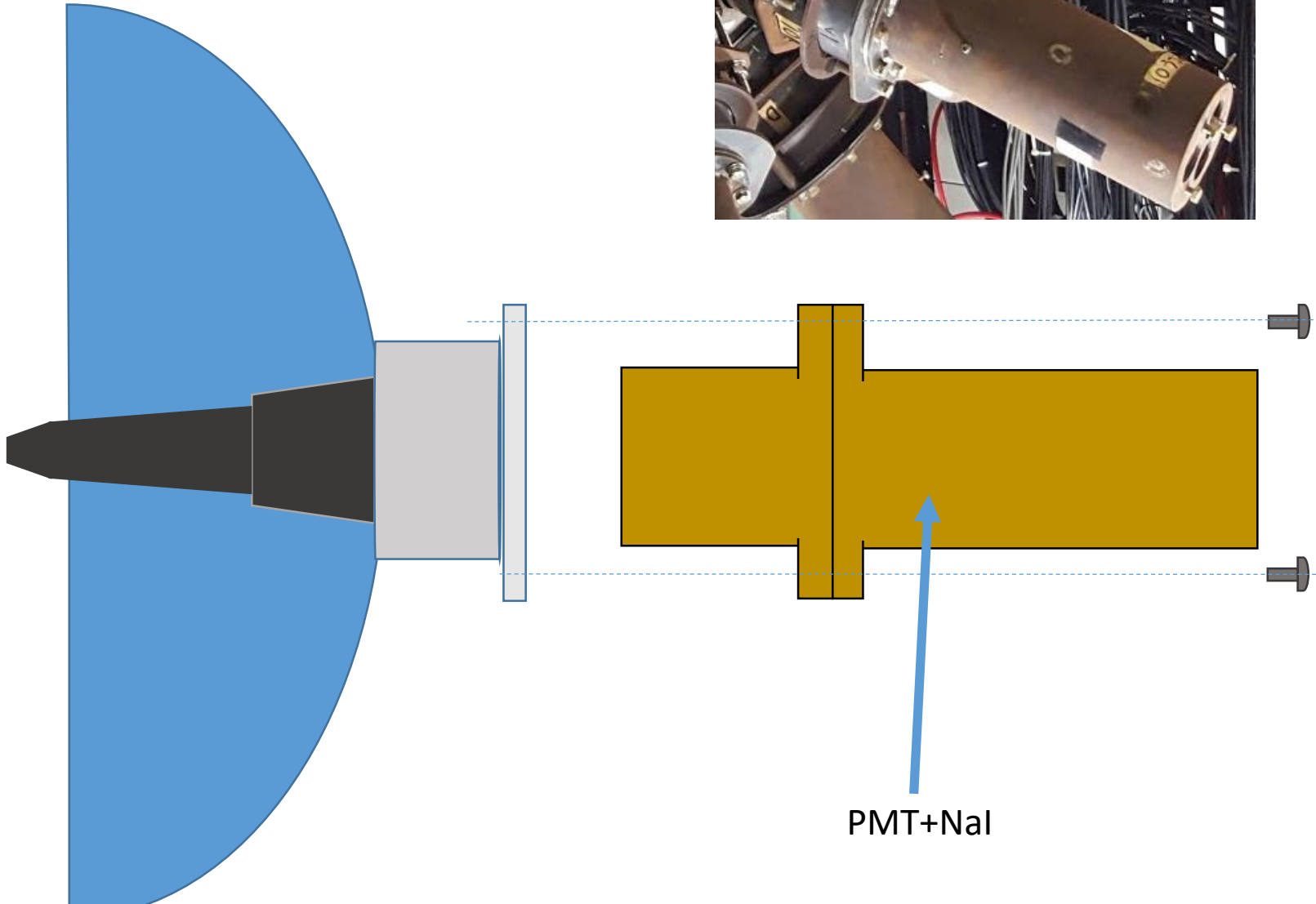


崩壊時間測定

Psの即時崩壊 → Ps生成タイミングとする(0 ns)

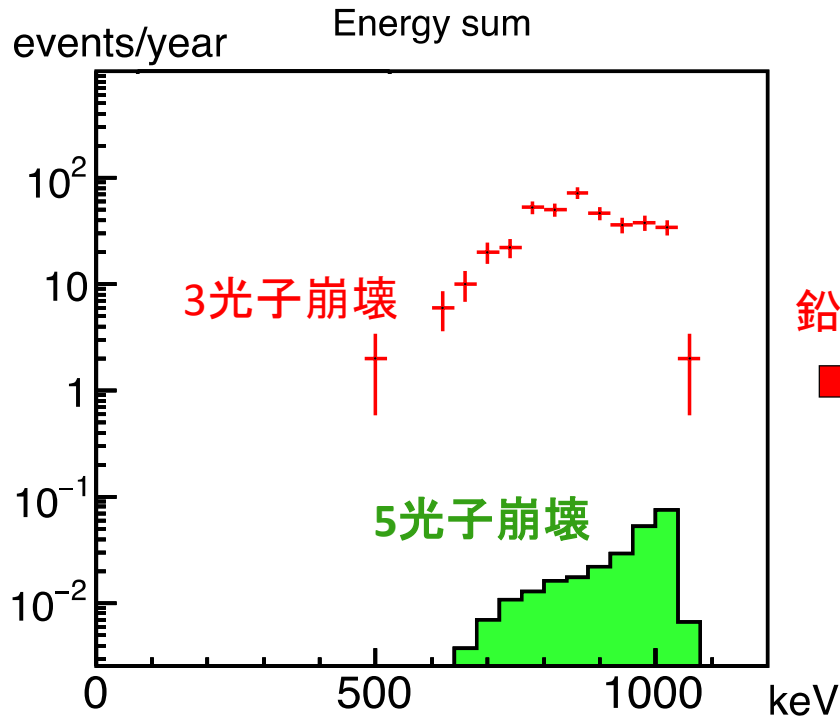


PMT+NaIの取り付け



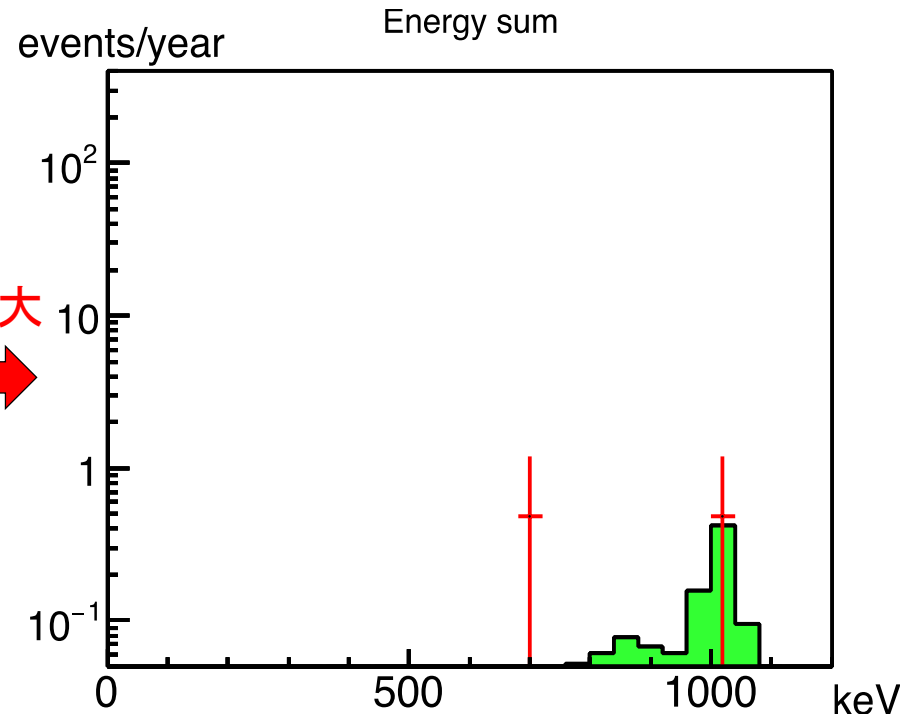
鉛の拡大の効果

陽電子トリガー12kHzを仮定したときの5ヒットイベントで得られる年間期待値

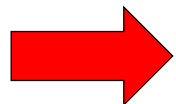


※複数の選別条件を適用後

鉛を拡大

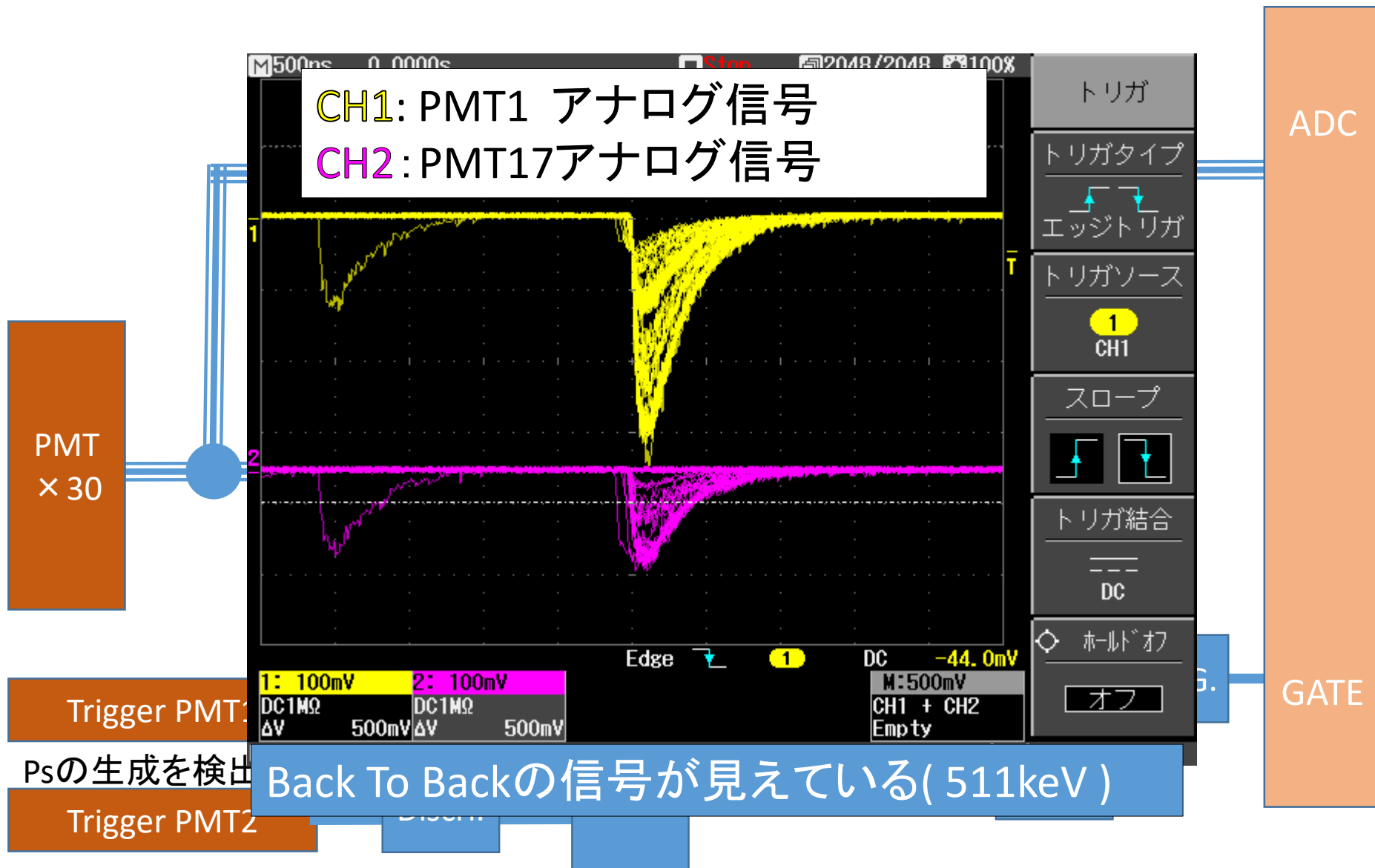


※ヒット数カットのみ



ヒット数とエネルギーで3光子崩壊によるBGを大幅に落とせる

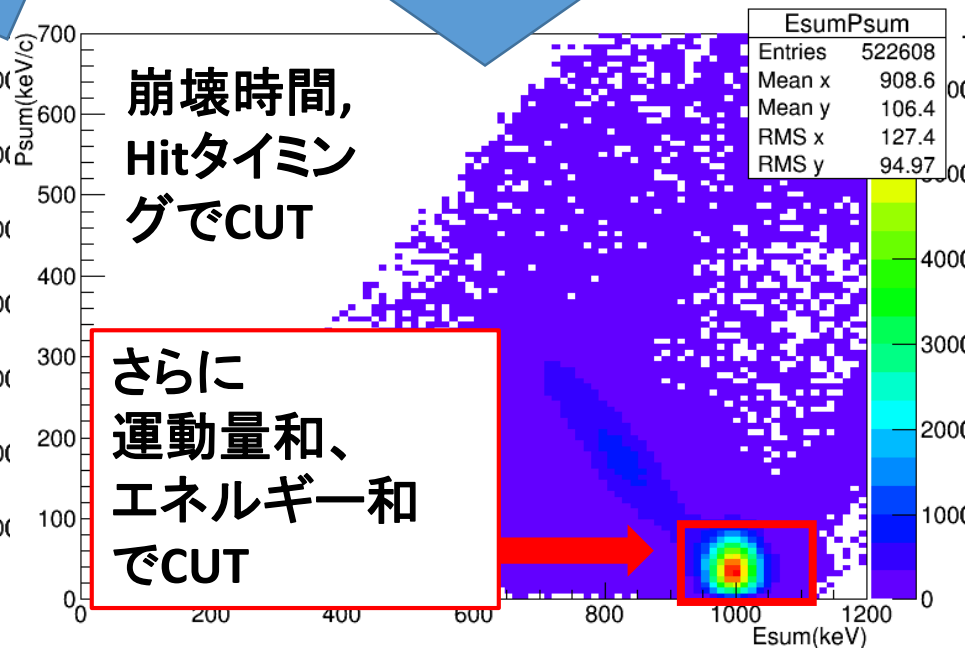
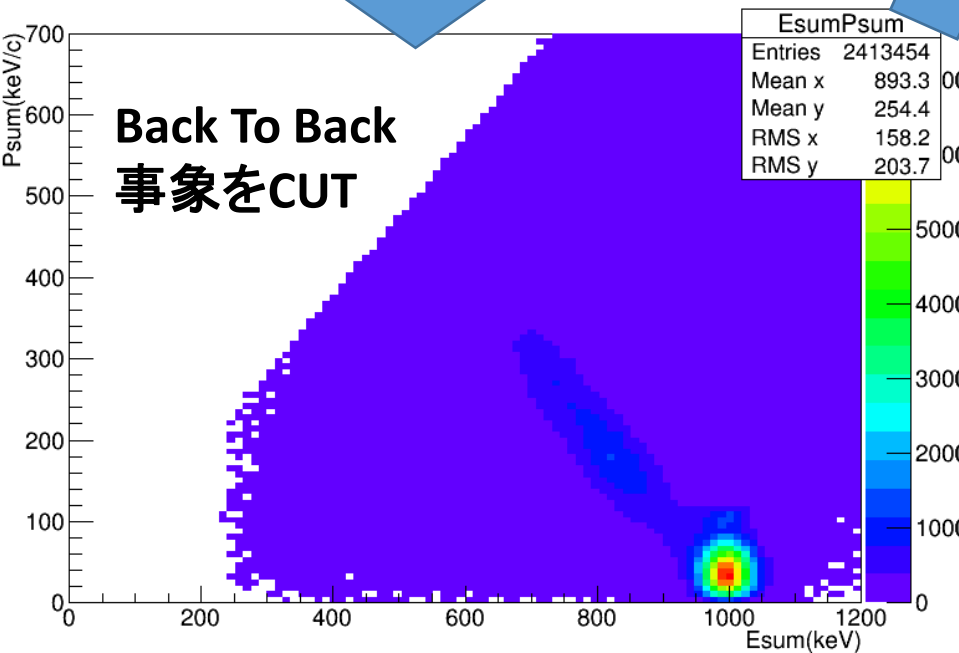
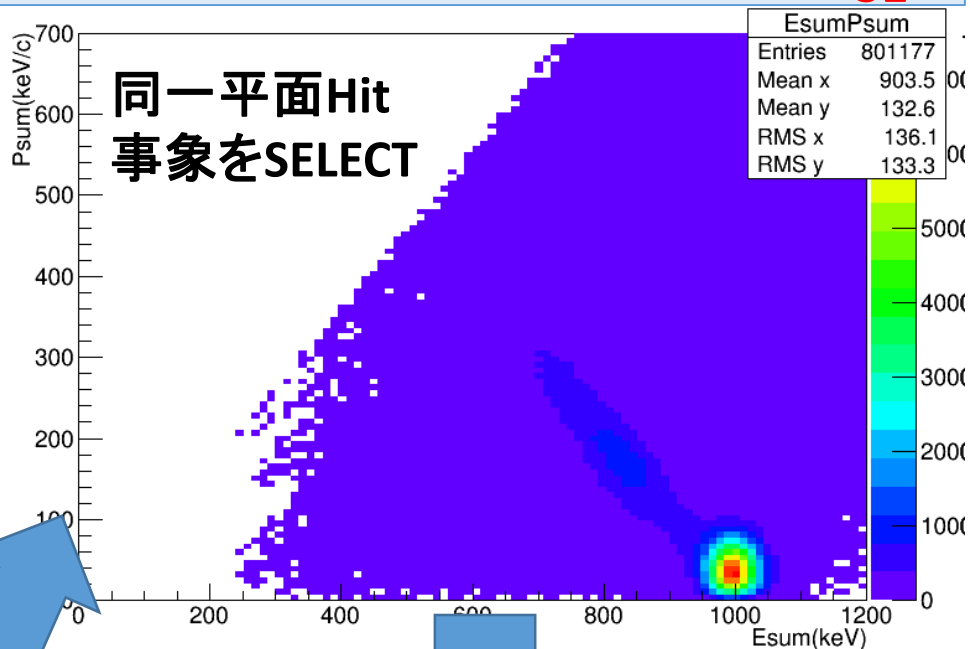
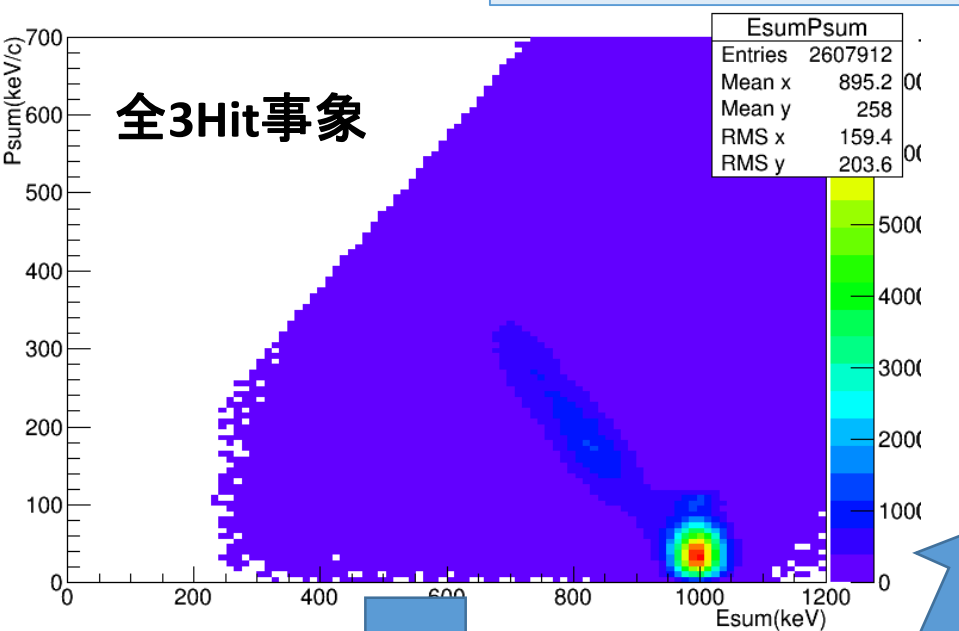
データ取得回路概略(ADC編)

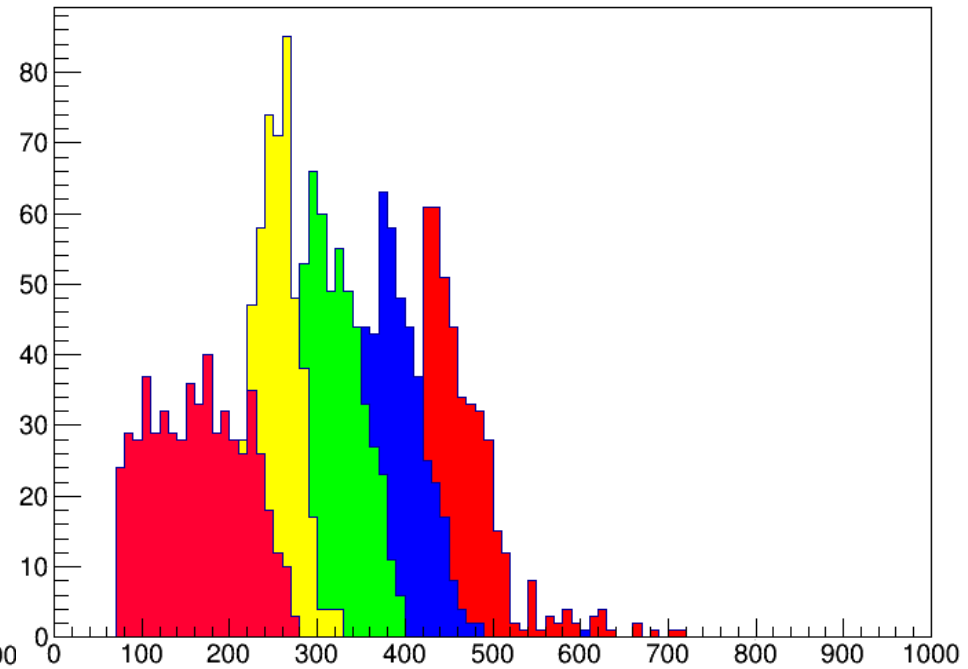
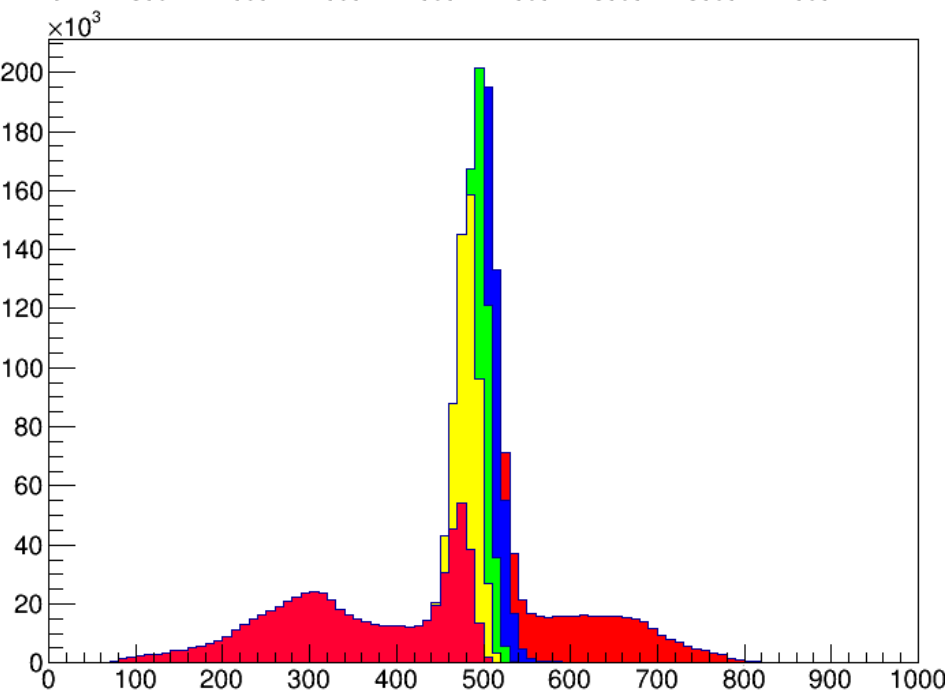
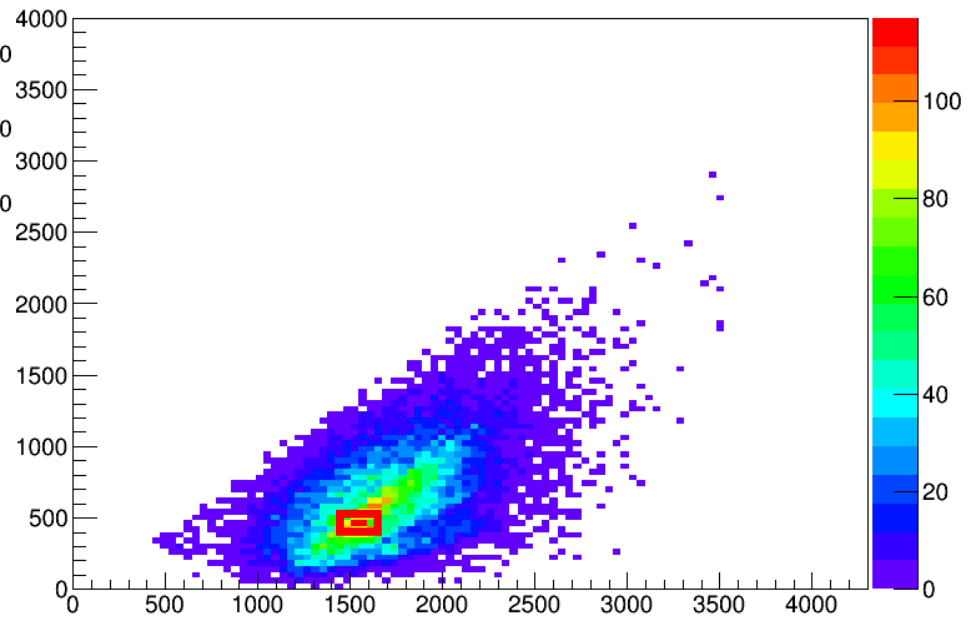
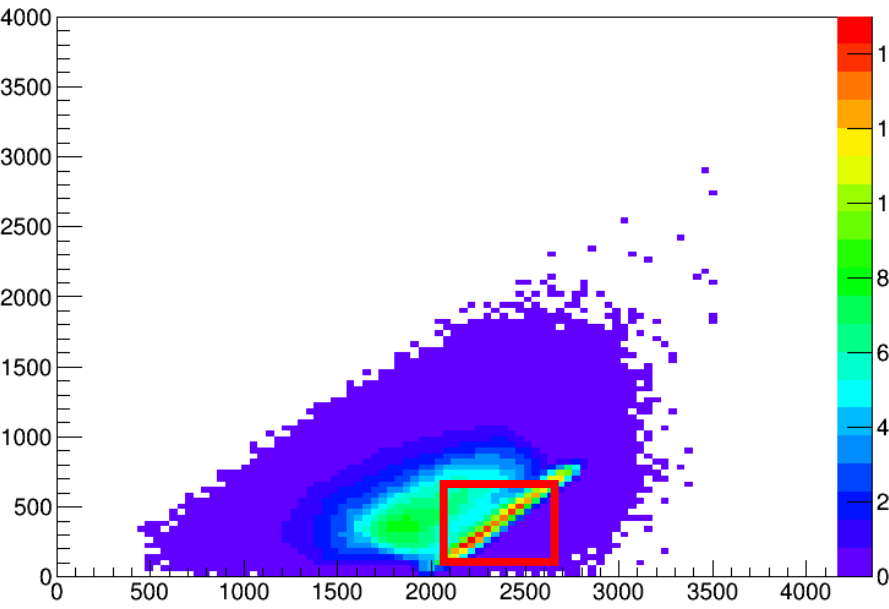


3 γ 崩壊の解析

得られたデータから3ガンマ崩壊と思われるデータを選ぶ

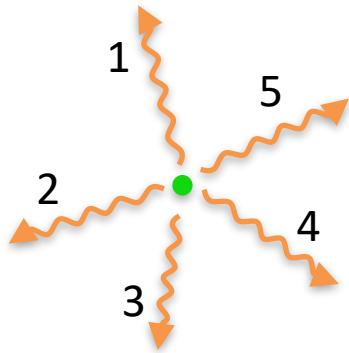
52





5光子崩壊事象選別条件

5光子崩壊5ヒットイベント



- ① ヒット数 = 5
- ② 運動量和に対して

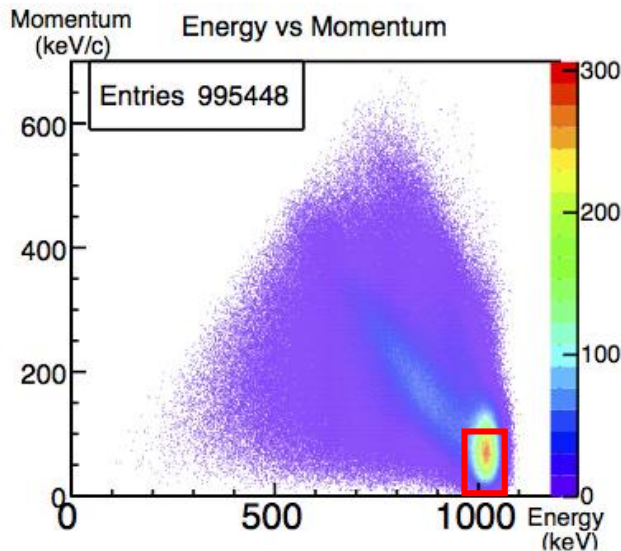
$$|S_{i=1}^5 \vec{P}_i| \leq 90 [keV/c]$$

- ③ 崩壊エネルギー

$$= m_{e^-} + m_{e^+} = 1022 [keV]$$

トータルエネルギーに対して

$$962 [keV] \leq S_{i=1}^5 E_i \leq 1082 [keV]$$



(横軸)トータルエネルギーと(縦軸)運動量和