

ポジトロニウムを用いた CPT 対称性の検証

2009年9月13日(日) 日本物理学会秋季大会

東大理, 東大素セ^A

山口博史, K.S. Khaw^A, 風間慎吾^A, 山崎高幸^A,
難波俊雄^A, 浅井祥仁, 小林富雄^A

発表項目

1. 概要
2. フィージビリティチェック
 - Set up
 - イベントセレクション
 - 実験結果
3. 本実験に向けて
4. まとめ

o-Ps $\rightarrow 3\gamma$ におけるCPT対称性

CPT 対称性が破れている場合、o-Psの崩壊率に補正項が存在

$$N = N_0 \left[1 + C_{CPT} S \cdot (k_1 \times k_2) \right]$$

$$= N_0 (1 + C_{CPT} Q)$$

Analyzing Power $Q = P \cdot \sin \psi$ P : 偏極度

$S \cdot (k_1 \times k_2)$ はCPT odd

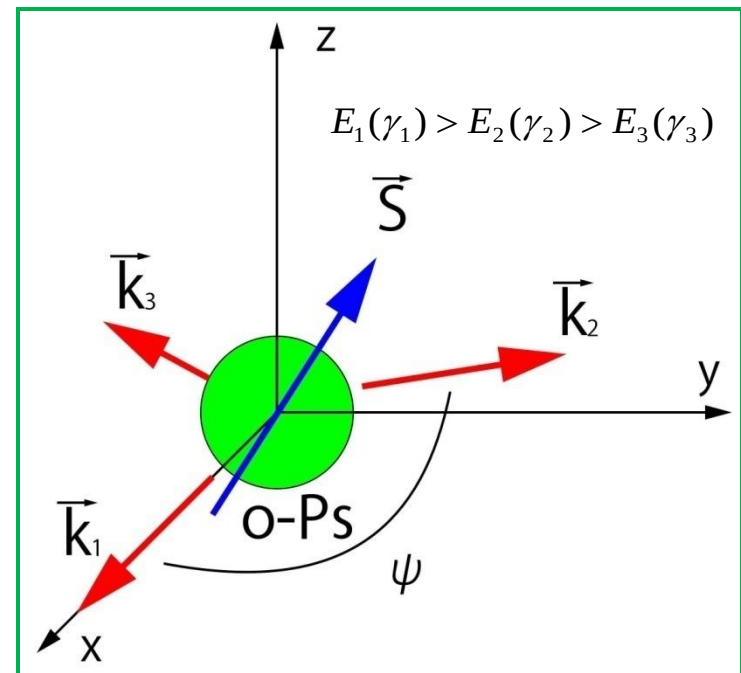
CPT対称性が破れている場合 $C_{CPT} \neq 0$ になり、o-Ps $\rightarrow 3\gamma$ の崩壊に角度依存性が生まれる。

$S \cdot (k_1 \times k_2)$ の符号が $\begin{cases} \text{正のイベントを } N_+ \\ \text{負のイベントを } N_- \end{cases}$

として、非対称度Aを導入する

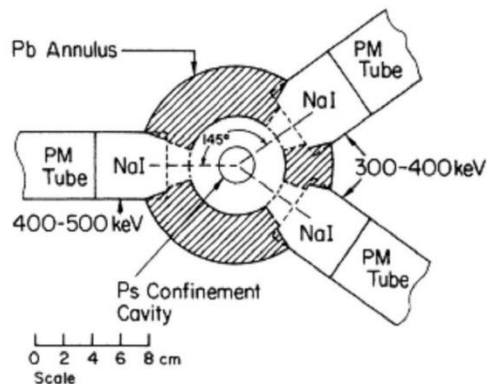
$$A = \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-}$$

$$C_{CPT} = \frac{A}{Q}$$



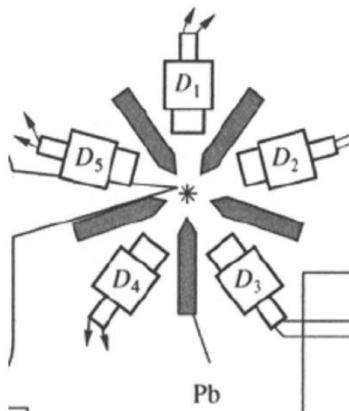
$\Rightarrow$ o-Ps $\rightarrow 3\gamma$ を検出して $S \cdot (k_1 \times k_2)$ の非対称度を求めれば、係数 C_{CPT} を評価できる

過去の実験



Mark Skalsey
Univ. of Michigan
(1992)

Polarized slow- e^+ beam
 $C_{\text{CPT}} = (2.0 \pm 2.3) \times 10^{-2}$



Andrukhovich, et. Al
Belarussian Academy
(1999)

^{22}Na $3.2 \times 10^5 \text{ Bq}$
 $C_{\text{CPT}} = (1.4 \pm 1.9) \times 10^{-2}$



Paul Vetter
UC Berkeley
(2003)

^{22}Na
 $C_{\text{CPT}} = (-0.06 \pm 0.92) \times 10^{-2}$
 ^{68}Ge
 $C_{\text{CPT}} = (1.34 \pm 0.83) \times 10^{-2}$
Both
 $C_{\text{CPT}} = (0.71 \pm 0.62) \times 10^{-2}$

フィージビリティチェック

$C_{\text{CPT}} \sim 10^{-4}$ の感度を目指す

C_{CPT} を精度よく評価するには、誤差をより小さくすることが必要

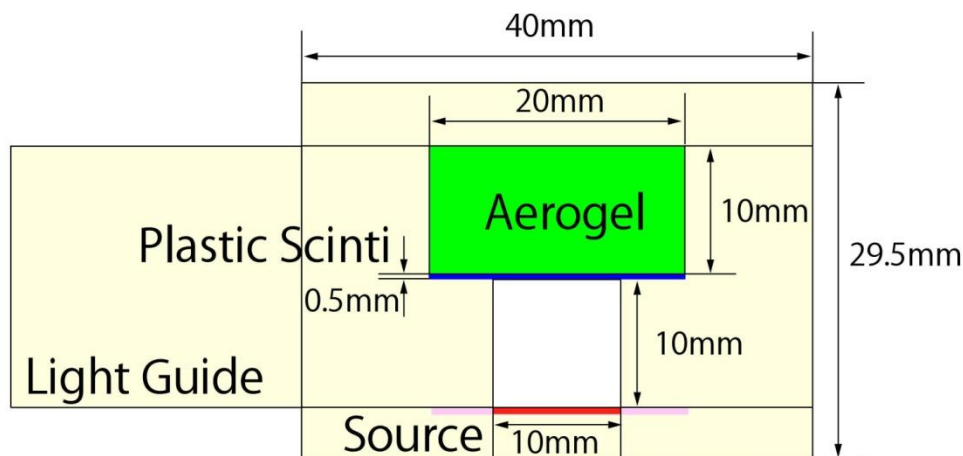
統計誤差：イベント数を増やす ($\Delta C_{\text{CPT}} \propto N^{-1/2}$)

系統誤差：検出器の個体差・アライメントのずれ等

今回はフィージビリティチェックを行う

- 統計誤差に注目し、 $o\text{-Ps} \rightarrow 3\gamma$ の $\gamma_1 \cdot \gamma_2$ 検出効率(イベントレート)を求める。
- 得られたイベントレートをもとに、目標を達成するためのセットアップ・期間等を求め、本実験へ繋げる。

Set up (線源・Ps生成)



・線源

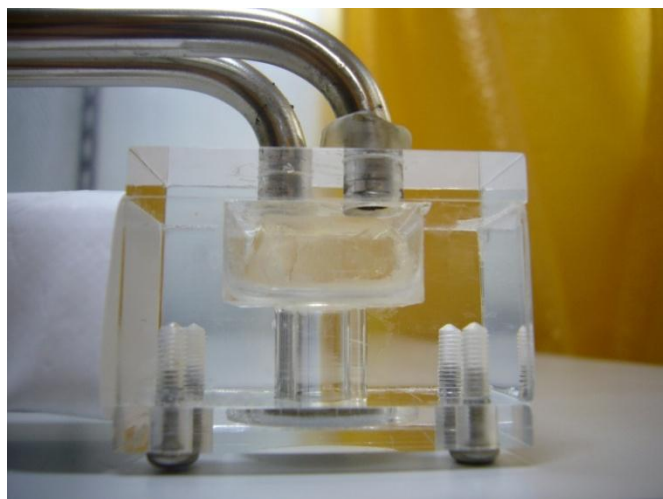
$^{68}\text{Ge} - ^{68}\text{Ga}$ 23kBq ($\tau=270.8\text{day}$)
 $E_{\text{ep}}=1.899\text{MeV}$ (88%)
 β^+ はWeak decayにより生成
→ β^+ は高い偏極度
→ o-Ps の偏極度も高くなる

・プラスチックシンチレータ

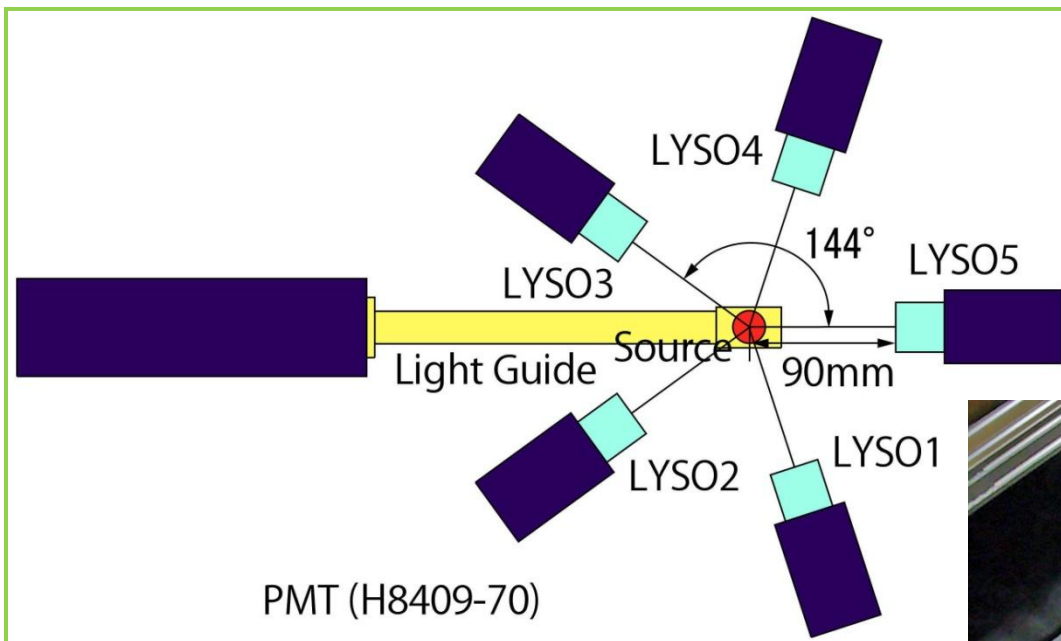
- 厚さ 0.5mm
- トリガー信号として使用

・シリカエアロジェル

- 密度 0.1 g/cm^3
- Aerogelには100ml/minの窒素を流入しpick-offを減らす



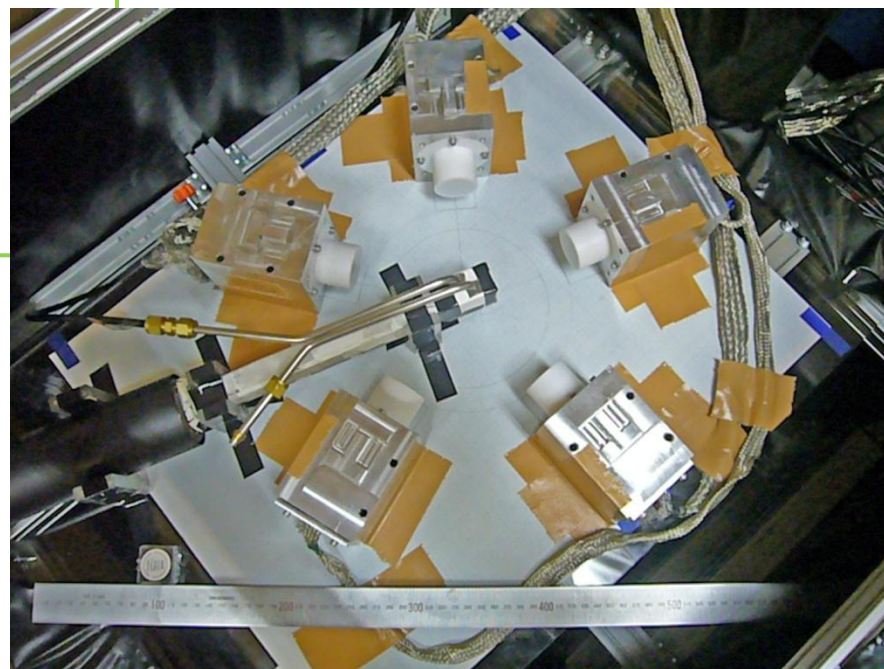
Set up (検出器)



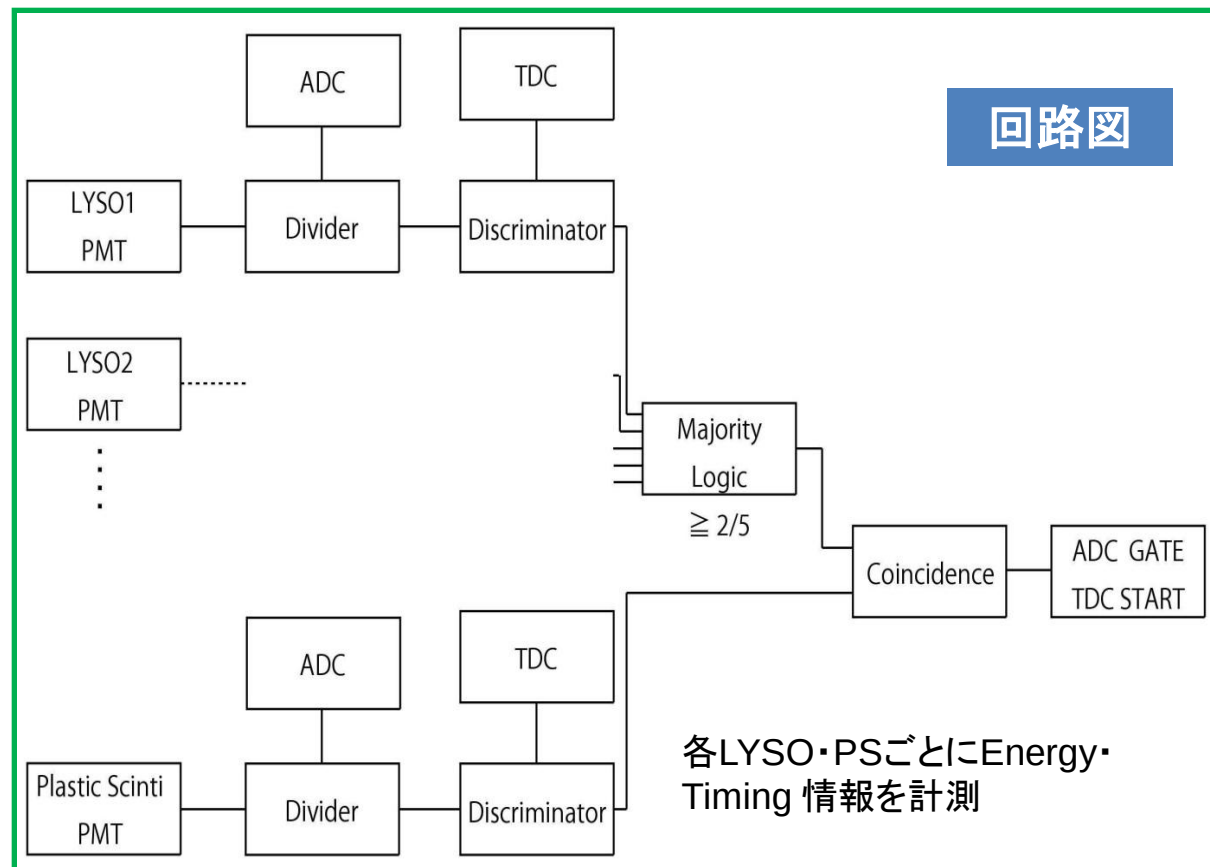
γ 線検出器

- PMT : H8409-70
- LYSO($\text{Lu}_{1.8}\text{Y}_{0.2}\text{SiO}_5$)結晶
 $\phi 30\text{mm} \times t 30\text{mm}$
- LYSO1個のアクセプタンス
 6.9×10^{-3}

- 検出器5個を線源中心に正五角形状に配置
→ 144° ペアが5つ
→ 個体差を打ち消せる
- 線源と検出器は90mm
→ 検出器を直線上に置かない



Set up (回路)



Trigger

Majority Logic で、同時にどれか2個以上のLYSOの信号が来た場合に信号を出す。

この信号とPSの信号のコインシデンスをトリガーにする。

測定レート

LYSO	9kHz
PS	1.3kHz
Trigger	1.4Hz
DAQ	1.4Hz

イベントセレクション

11日間の測定で、 1.34×10^6 イベント
これにイベントセレクションを課す

Time Window

- 50ns-250nsでカットを掛ける

Energy Window

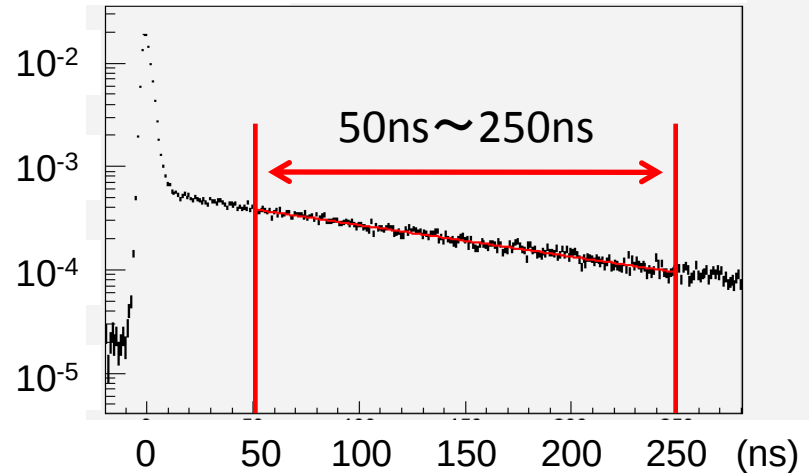
- 検出されたイベントから $\gamma_1 \cdot \gamma_2$ を識別する。
- 144° ペアのLYSOエネルギー分布を用いる
→ $E_1 \cdot E_2$ のエネルギー分布から $\gamma_1 \cdot \gamma_2$ を識別
 - γ_1 : $400\text{keV} < E_1 < 500\text{keV}$
 - γ_2 : $300\text{keV} < E_2 < 400\text{keV}$
 - $E_1 - E_2 > 50\text{keV}$
- $\gamma_1 \cdot \gamma_2$ のなす角度から $s \cdot (k_1 \times k_2)$ の正負を決定

{

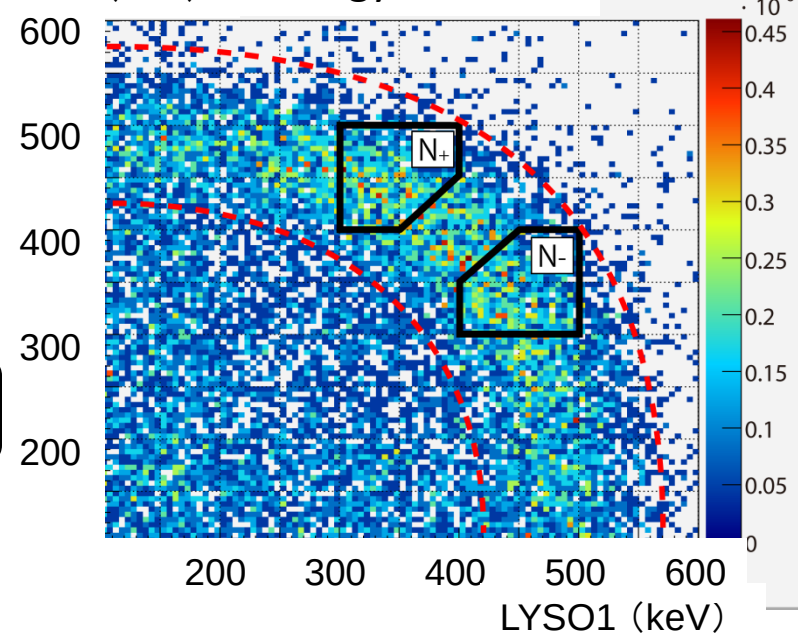
線源とエアロジェルの位置関係から
 o-Ps のスピンの向きは上向き(+)と仮定

正の場合は" N_+ "にカウント
負の場合は" N_- "にカウント
- $N_+ \cdot N_-$ から非対称度を求める

(events/ns/sec) o-Ps Time Spectrum



LYSO3 (keV) Energy Window



結果 (1)

イベントセレクションを課して残った
イベントから C_{CPT} を求める

測定期間	11日間(8/9～8/20)
Livetime	$9.5 \times 10^5 \text{ sec}$
N	$1.1 \times 10^4 \text{ events}$
イベントレート	0.012Hz

144° pair		N_+	N_-	N	A	ΔA
LYSO1	LYSO3	1090	1085	2175	0.23×10^{-2}	2.2×10^{-2}
LYSO2	LYSO4	1059	1008	2067	2.5×10^{-2}	2.2×10^{-2}
LYSO3	LYSO5	1107	970	2077	6.6×10^{-2}	2.2×10^{-2}
LYSO4	LYSO1	1222	1201	2423	0.87×10^{-2}	2.0×10^{-2}
LYSO5	LYSO2	1095	1200	2295	-4.6×10^{-2}	2.1×10^{-2}
Total		5573	5464	11037	0.99×10^{-2}	0.95×10^{-2}

$$A = (1.0 \pm 1.0) \times 10^{-2}$$

結果 (2)

非対称度

$$A = (1.0 \pm 1.0) \times 10^{-2}$$

Analyzing Power

o-Ps 偏極率 $\langle P \rangle = 0.57$

$$Q = \langle P \rangle \langle \sin \psi \rangle = 0.57 \times \sin(144^\circ) \\ = 0.34$$

係数

$$C_{CPT} = \frac{A}{Q} = (2.9 \pm 2.8) \times 10^{-2}$$

今回の測定では統計誤差のみ考慮
系統誤差は現在評価中

本実験に向けて

$$\Delta C_{CPT} \sim 10^{-4} \text{ の精度を目指すには } \Delta C_{CPT} = \frac{\Delta A}{Q} \approx \frac{1/\sqrt{N}}{Q} \sim 10^{-4}$$

$$Q \approx 0.3$$

$$N \sim 10^9 \text{ のイベントが必要}$$

- ・線源周りの改良 エアロジェルを線源に密着させることで立体角を大きくする
・立体角 5% → 50%
- ・線源強度を上げる 今回23kBq → 1MBq
- ・LYSOを線源に近づける 現在の90mmから70mmにするとアクセプタンスは約2倍

この改良でイベントレートは 10^3 倍になる

今回	イベントレート	0.012Hz → 10Hz
	DAQレート	1.4Hz → 1.4kHz
1年間測定		$10\text{Hz} \times 3 \times 10^7\text{sec} \sim 3 \times 10^8 \text{ events}$

- ・統計の面では、ほぼ目標を達成できるイベント数
- ・CAMAC も対応できる

まとめ

- フィージビリティチェックを行った

- 本実験では今回のセットアップを基準として

[	・線源強度を50倍 ・エアロジェルの立体角を10倍 ・LYSOのアクセプタンスを2倍
---	--

にし、イベントレートを 10^3 倍にする

→ 統計誤差は、このセットアップでほぼ目標を達成できる

→ 系統誤差については現在評価中

⇒ 本実験では $\Delta C_{\text{CPT}} \sim 10^{-4}$ の感度を目指す

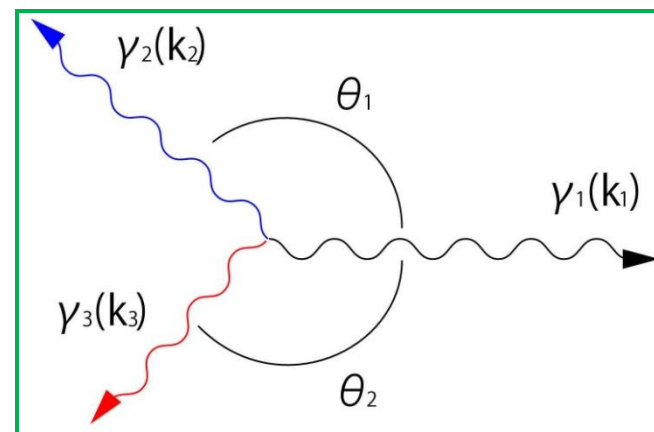
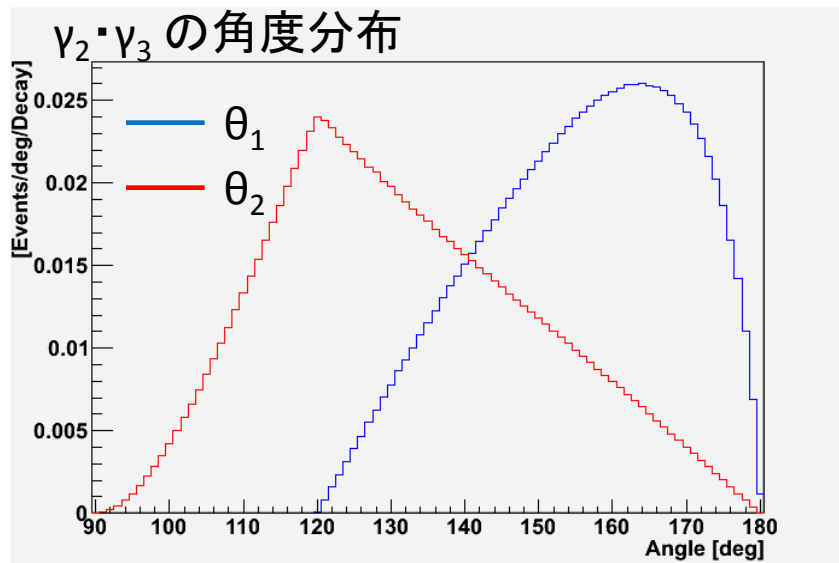
Back up

Set up (検出器)

o-Ps を効率よく検出するためには、 γ 線検出器の配置が重要になる。

$k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$ によって $\gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3$ の角度分布が決まる

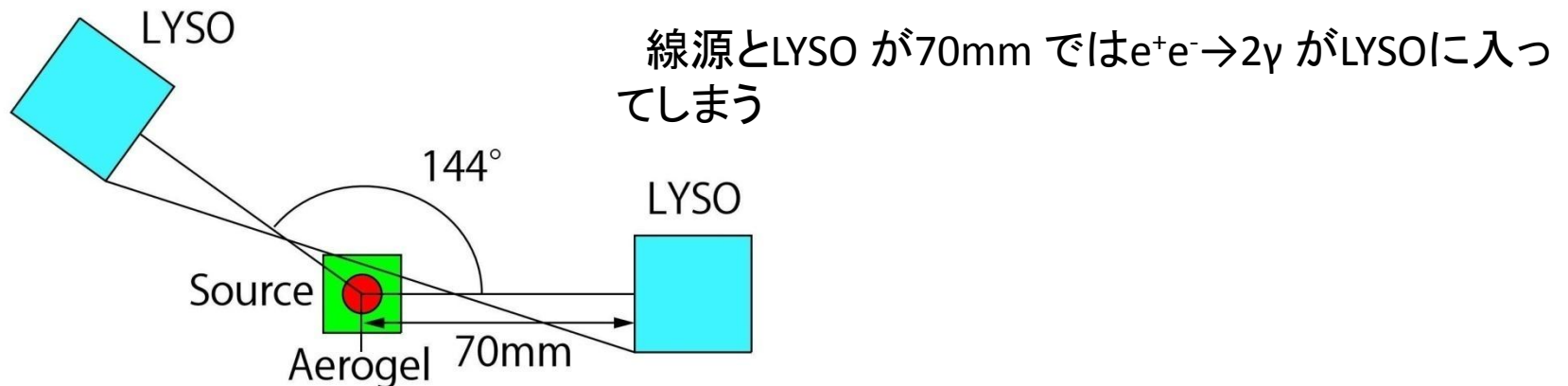
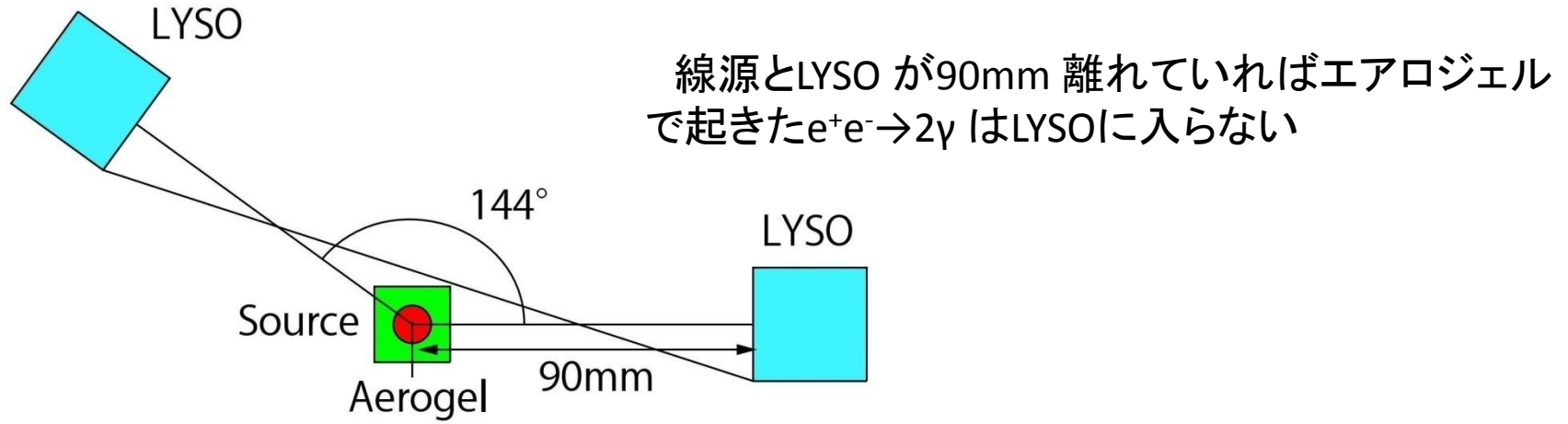
↓
検出器のジオメトリによって検出効率が変わる



・ γ_2 の角度分布と、 γ 線検出器のペアの数によって検出効率が決まる。

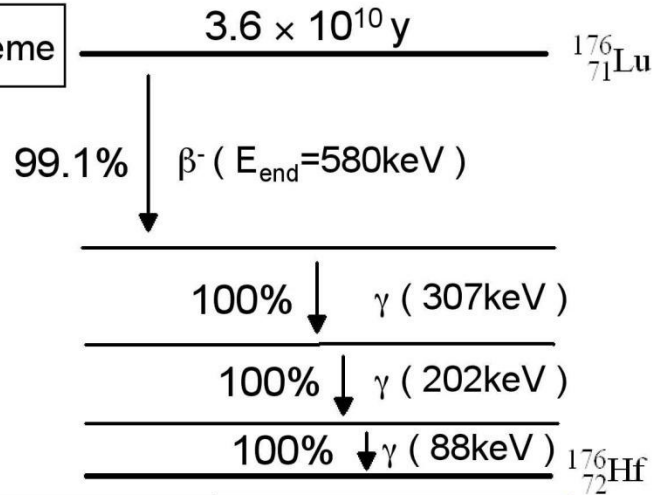
・直線上に γ 線検出器を配置しないことによって、 2γ 崩壊イベントによるコンタミを抑えることができる

ジオメトリーによる 2γ コンタミ防止



^{176}Lu の崩壊によるbackground

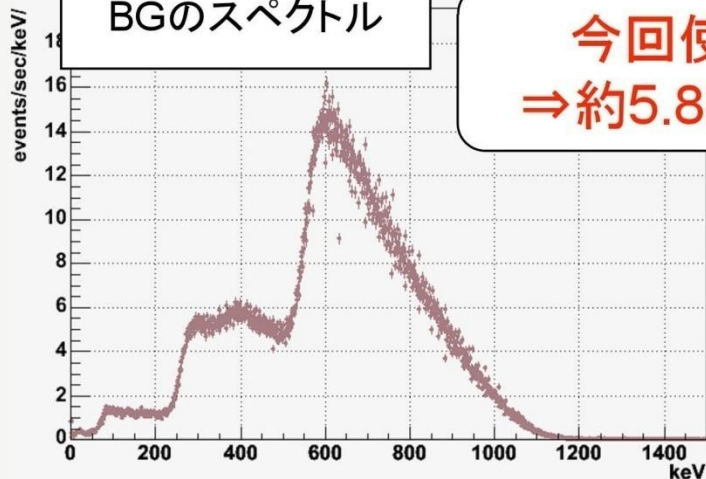
Decay scheme



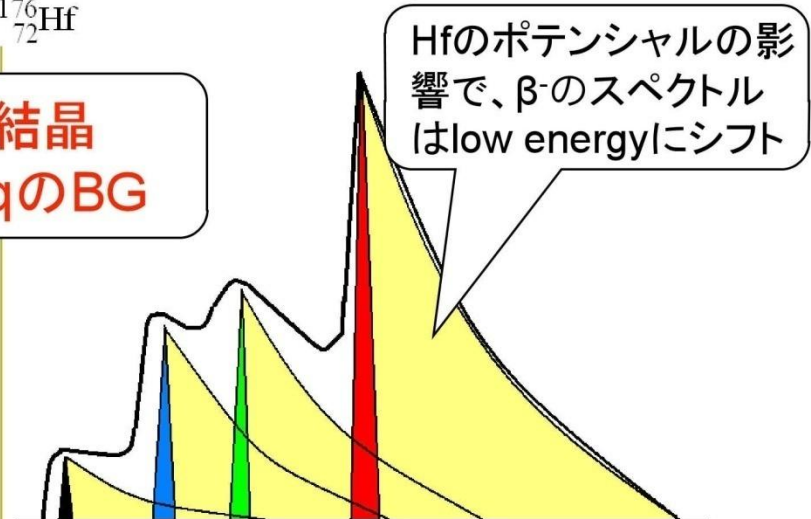
- 88+202+307keVの光電ピーク
- 88+307keVの光電ピーク
- 88+202keVの光電ピーク
- 88keVの光電ピーク
- β^- ($E_{\text{end}}=560\text{keV}$)

BG

BGのスペクトル



今回使う結晶
⇒約5.8kBqのBG



Hfのポテンシャルの影響で、 β^- のスペクトルはlow energyにシフト

γ -ray detectors

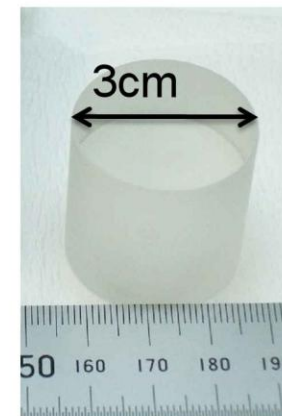
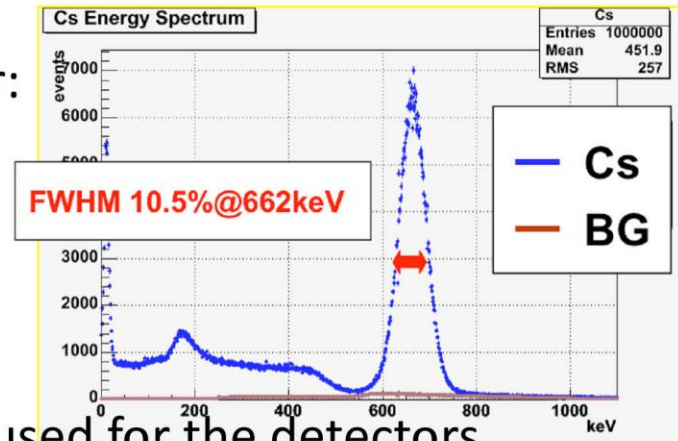
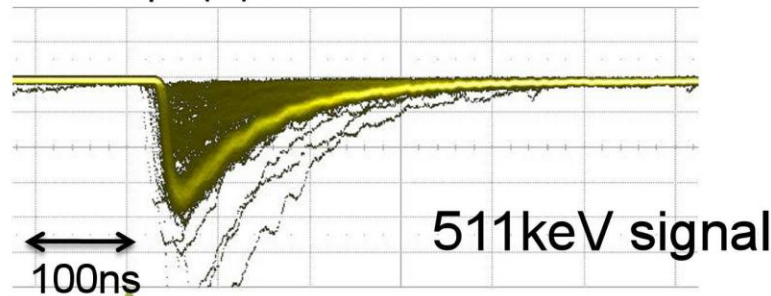
- Requirements for the γ -ray detector:

- Large stopping power for $\sim 500\text{keV}$ γ 's
- Good energy resolution
- Good timing resolution

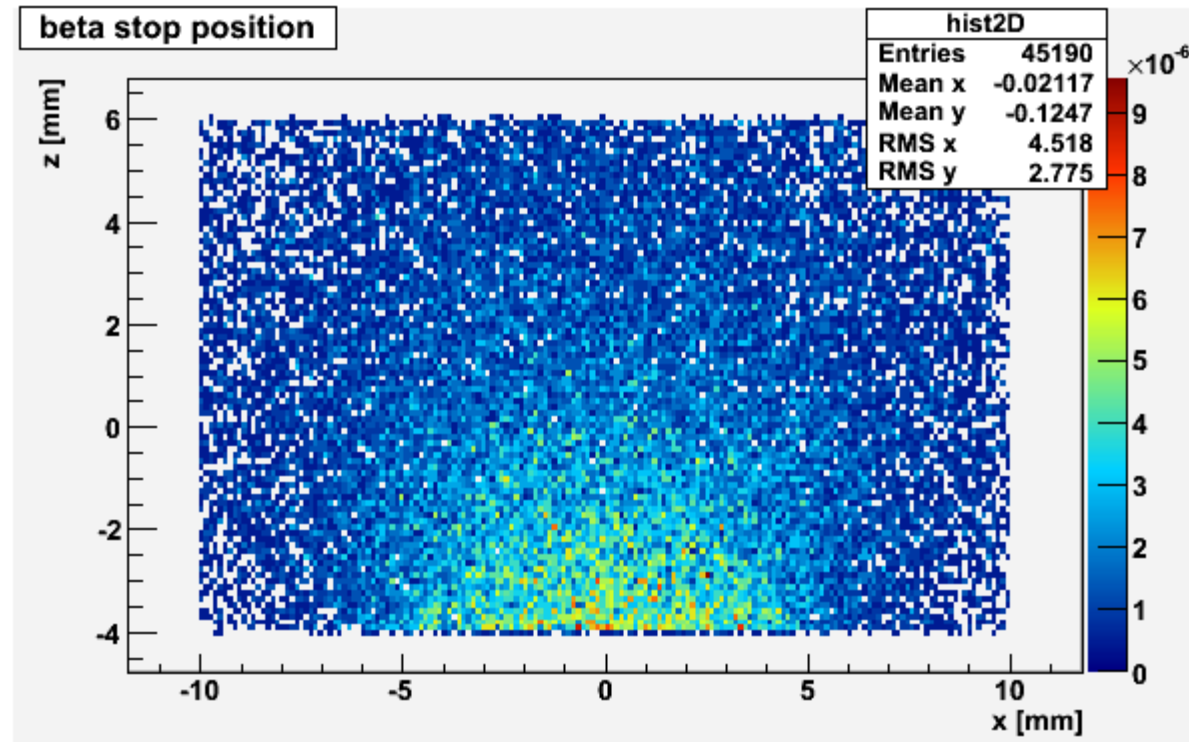


- LYSO ($\text{Lu}_{1.8}\text{Y}_{0.2}\text{SiO}_5$) scintillators are used for the detectors

- Large Z, high density (Atomic number of Lutetium=71, $\rho=7.1$)
- $\Delta E=10\%$ (FWHM) at 662keV
- Short decay time 40ns
- $\Delta T=150\text{ps}$ (σ) at 511keV

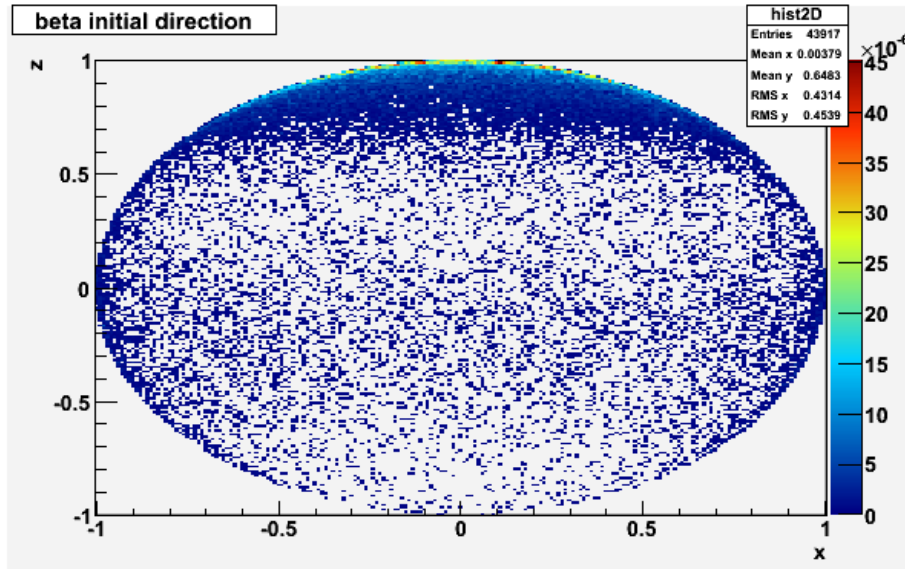


Aerogel中の β^+ 停止位置



β^+ の停止位置の平均は、Aerogel下面から上に2.8mmの位置になる。

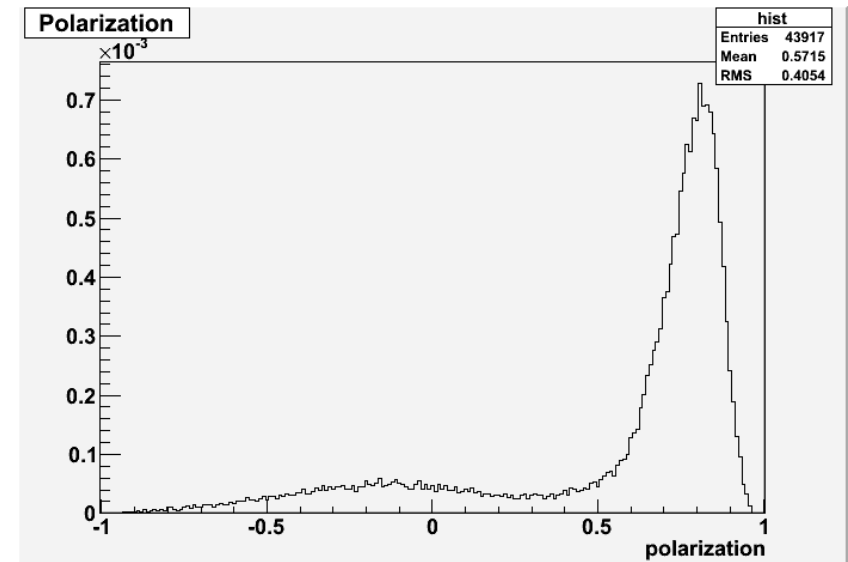
β^+ の放射方向と偏極度



エアロジェルで止まった β^+ の線源放出時の(規格化された)ベクトル方向

線源から下に出た β^+ がアクリル等で反射し、エアロジェルに入っている

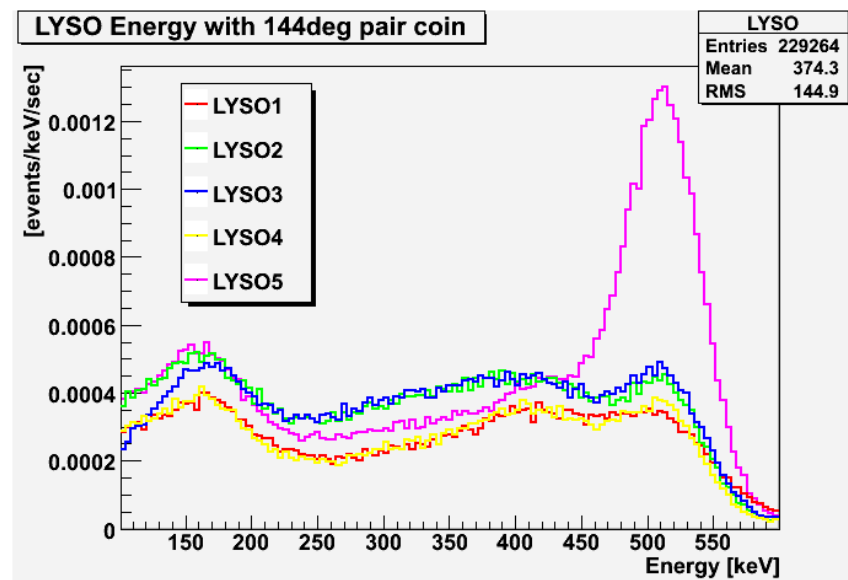
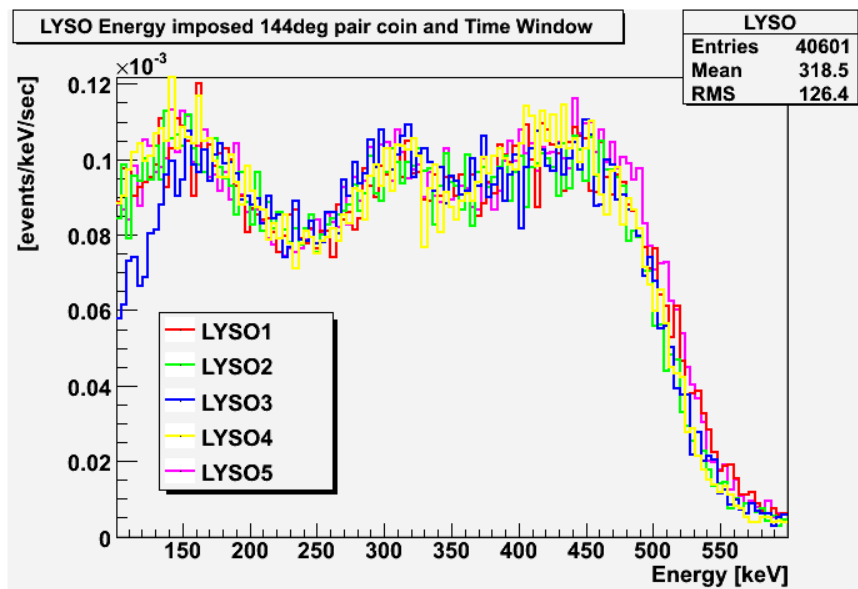
- ・反射してエアロジェルに入った β^+ によって、 β^+ 偏極率が悪化している。
- ・今回は線源から下向きに出た β^+ を無視
- ・偏極度を0.85としている



144° ペア コインシデンス

LYSOごとのEnergy Spectrum
(144° LYSOペア 5ns コインシデンス)

- ライトガイドに対称な位置にあるLYSOのヒストグラムは類似している
- LYSO1~LYSO4には511keVのイベントが少ない
→コンプトン散乱後にLYSOに入ってきている



LYSOごとのEnergy Spectrum
(上のヒストグラムにTime Windowを課したもの)

- o-Ps のシグナルはLYSOの位置による相関は見られない