

# ポジトロニウムを用いた CP対称性の破れの探索

山崎 高幸、  
難波俊雄、浅井祥仁<sup>A</sup>、小林富雄

東京大学素粒子物理国際研究センター、東京大学理学系研究科<sup>A</sup>

# Outline

- 概要
- 実験原理
- 実験装置
- データ解析
- まとめ

# 序論

- CP対称性の破れ→物質・反物質の非対称性
  - クォークセクターにおいてはK中間子で $O(10^{-3})$ 、B中間子で $O(10^{-1})$ のCP対称性の破れ
  - レプトンセクターにおけるCP対称性の破れは未発見
  - ポジトロニウムを用いて $10^{-3}$ の精度で探索する(M. Skalseyらの実験では $1.5 \times 10^{-2}$ の精度で未発見)
  
  - クォークセクターにおけるCP対称性の破れの高次ループを通じた影響は $10^{-9}$ のオーダーで無視できる
  - MNS行列によるCP対称性の破れは $(m_\nu/m_W)^4$ に比例するため、感度がない
- 本実験におけるCP対称性の破れの発見は new physics の存在を意味する

# ポジトロニウム(Ps)

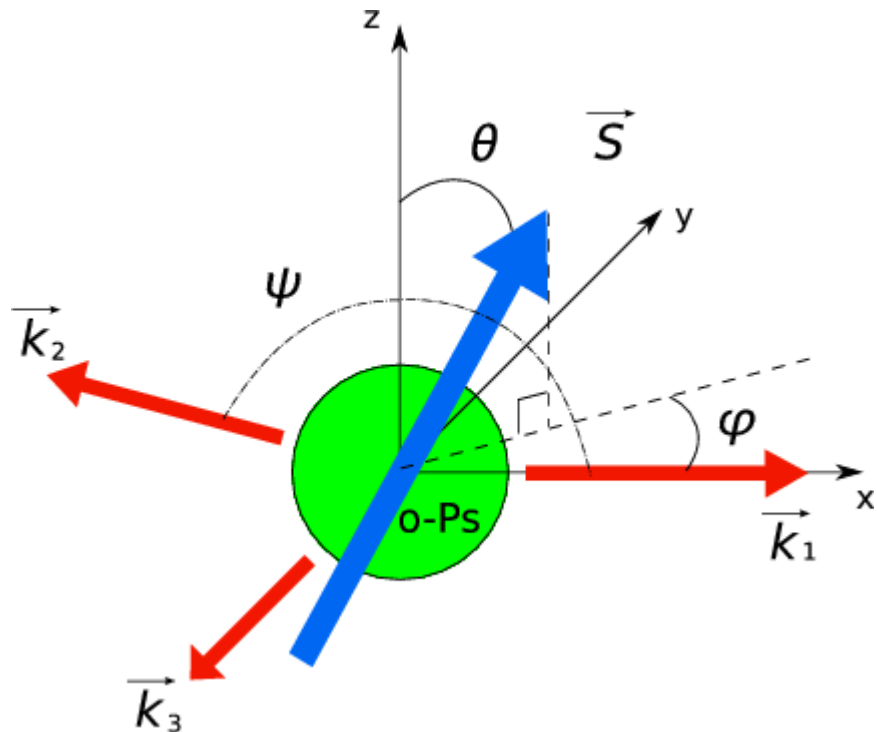
- 電子と陽電子の束縛状態
- $\beta^+$ ソースから放出された陽電子をターゲット中で静止させることで生成
- $\sqrt{s} = 1022\text{keV}$
- 全スピンによってp-Psとo-Psに分けられる

	p-Ps	o-Ps
全スピン S	0 ( $m_B = 0$ )	1 ( $m_B = 0, \pm 1$ )
荷電共役 C	+1	-1
崩壊モード	$2\gamma(, 4\gamma, 6\gamma, \dots)$	$3\gamma(, 5\gamma, 7\gamma, \dots)$
寿命	125 ps	142 ns

Phase Space と  $\alpha_{EM}$  により崩壊率に約1000倍の差

# o-Ps → 3γ崩壊におけるCP対称性の破れ

- o-Ps → 3γ崩壊のイベント数がCP対称性を破る角度依存性を持っていないか調べる



CP対称性が破れているとnon-zero

$$N = N_0(1 + C_{CP} \underline{(\hat{S} \cdot \hat{k}_1) \cdot (\hat{S} \cdot \hat{k}_1 \times \hat{k}_2)})$$

$$= N_0(1 + C_{CP} Q) \quad \text{CP odd, CPT even}$$

$$Q = P_2 \cdot \frac{1}{2} \sin 2\theta \sin \psi \cos \phi$$

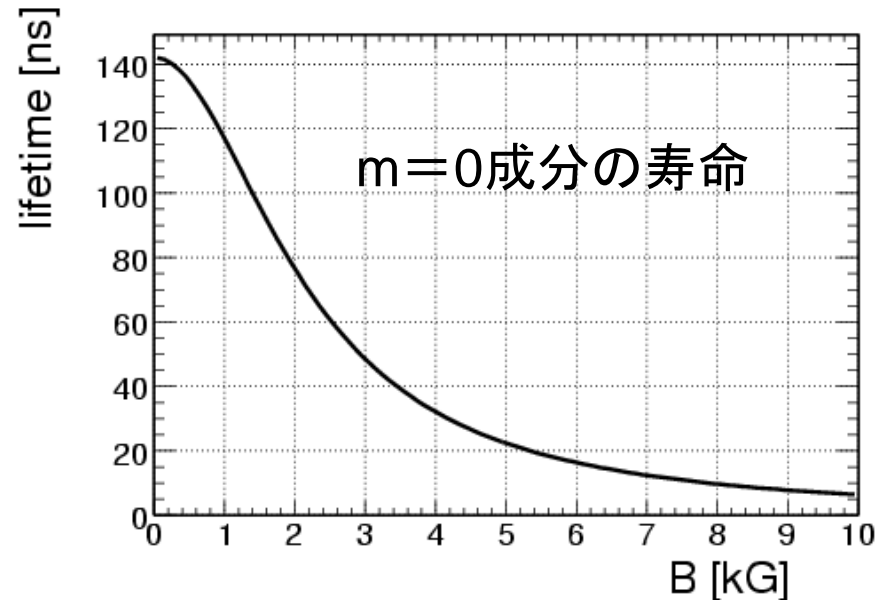
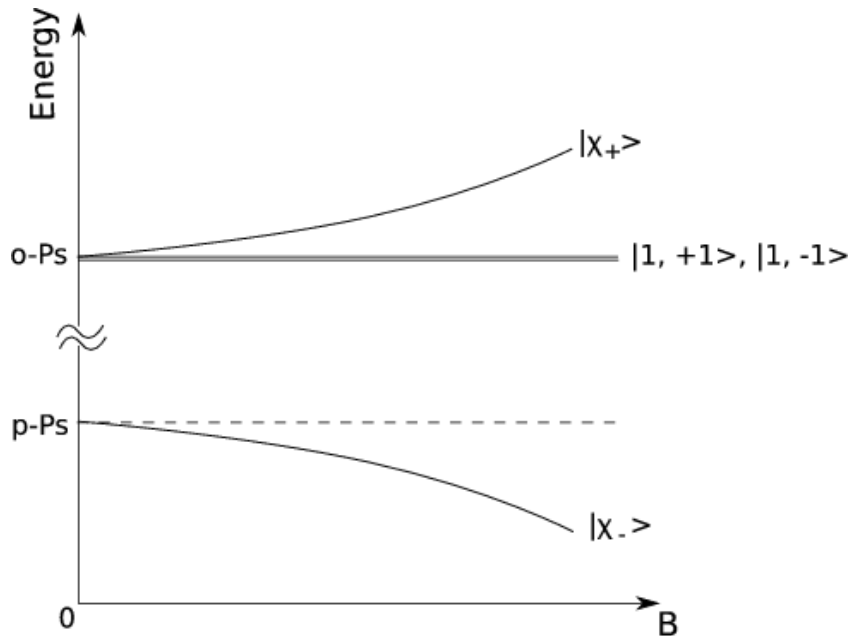
$$P_2 = \frac{N_{+1} - 2N_0 + N_{-1}}{N_{+1} + N_0 + N_{-1}} \quad (\text{テンソル偏極度})$$

通常 $N_{+1}$ 、 $N_0$ 、 $N_{-1}$ は同じ数なため、 $P_2=0$

→ o-Psをテンソル偏極させなければならない

# Zeeman効果を用いたPsのテンソル偏極

- 磁場をかけることでPsの $|0, 0\rangle$ 成分と $|1, 0\rangle$ 成分が混合

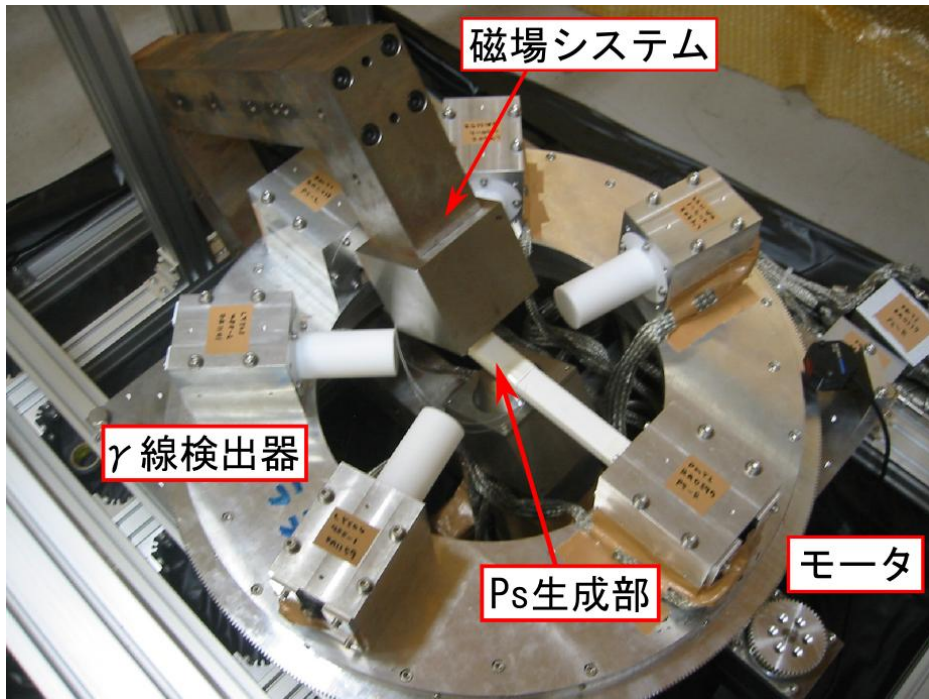


$|1, \pm 1\rangle$ 成分の寿命は142nsのまま

$m=0$ 成分(上図の $|X_+\rangle$ )の寿命は5kGで約20ns

→Timing Window (50~130nsec)により  $|1, \pm 1\rangle$ 成分を enhanceし、テンソル偏極度  $P_2$  を1に近づけることができる

# 実験装置

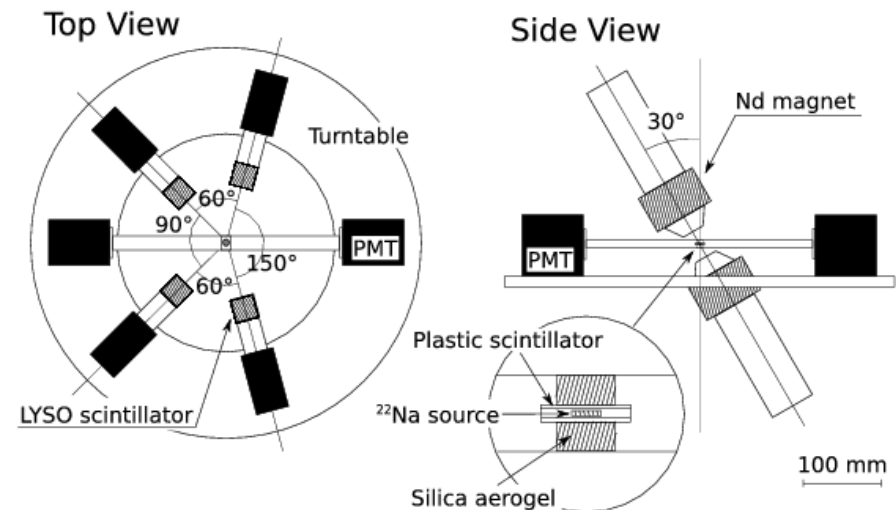


- 検出器は回転テーブル上に固定
- $\phi$ が $180^\circ$ 異なる点のイベントレートをを用いて非対称度 $A$ を出し、 $Q$ で割ることでCP対称性の破れの強さ $C_{CP}$ を求める

$$N = N_0(1 + C_{CP}Q)$$

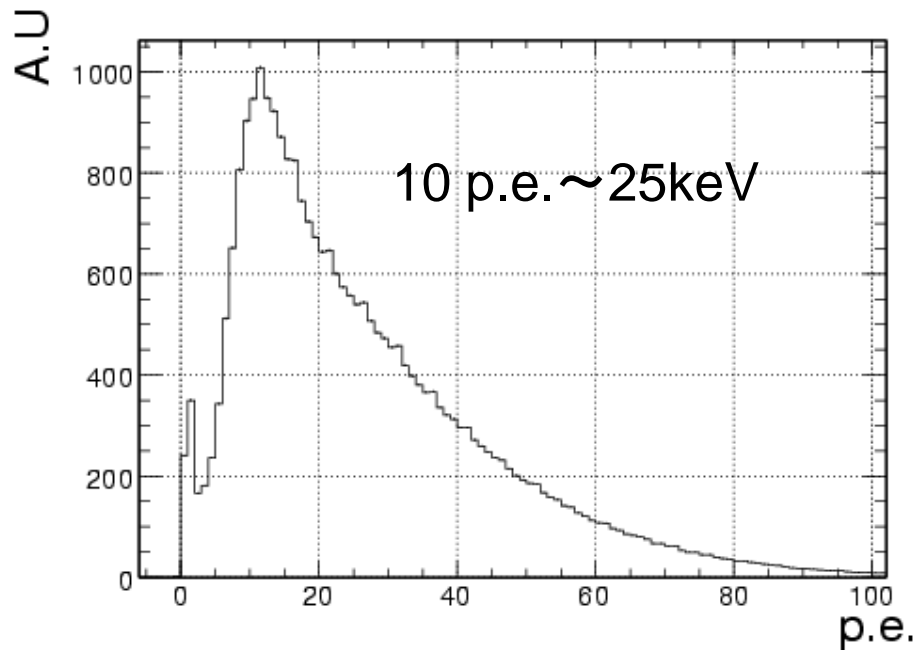
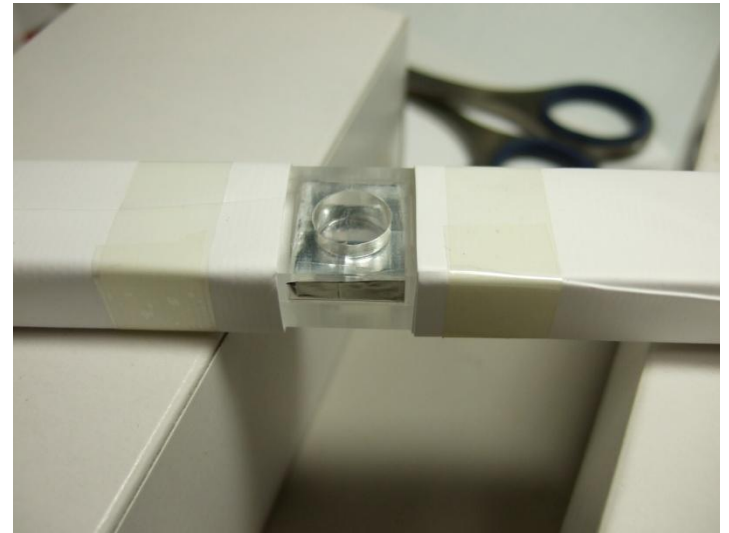
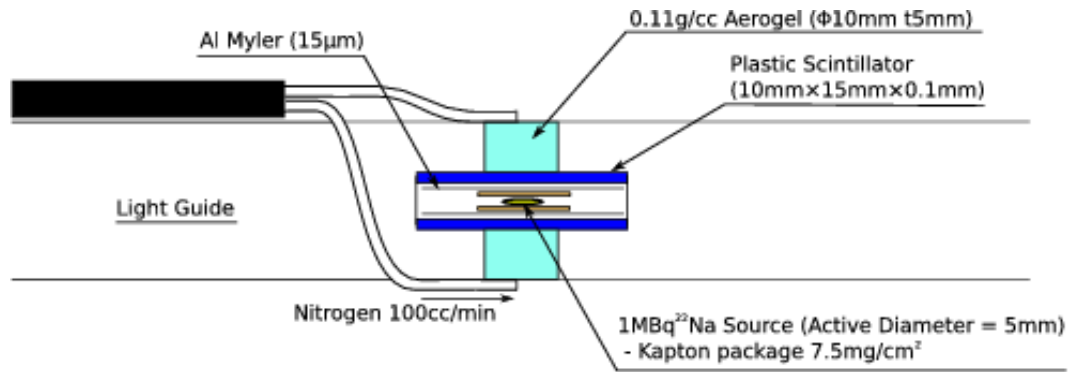
$$Q = P_2 \cdot \frac{1}{2} \sin 2\theta \sin \psi \cos \phi$$

$$A = \frac{N(\phi) - N(\phi + 180^\circ)}{N(\phi) + N(\phi + 180^\circ)} = C_{CP}Q$$



$\psi = 150^\circ$  のペアが6通りできる配置

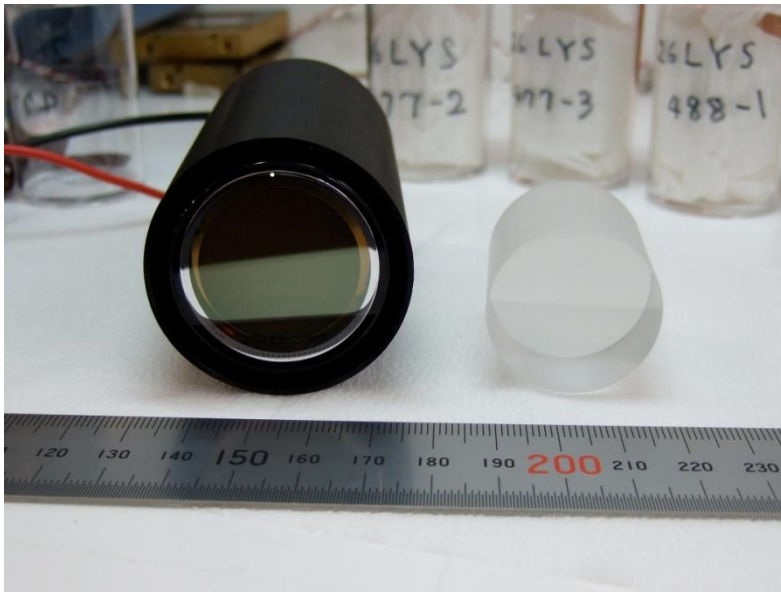
# Ps生成部



- プラシンを鳴らした $e^+$ のうち、約40%がエアロジェル中で静止
- このうち約15%が $o$ -Psに

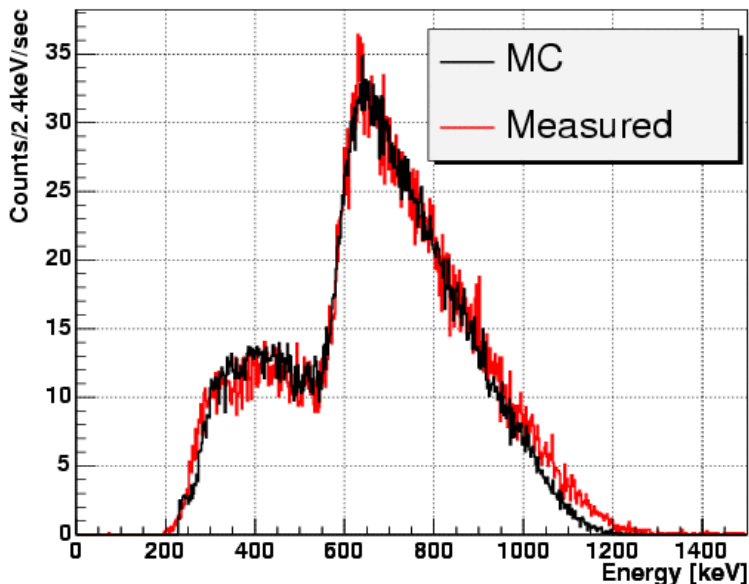


# γ線検出器



- LYSO( $\text{Lu}_{1.8}\text{Y}_{0.2}\text{SiO}_5$ )結晶
- $Z=71$ ,  $\rho=7.1\text{g/cm}^3$
- 立ち上がり10ns, 減衰時間40ns
- FWHM 約12% @ 511keV

176Lu Background

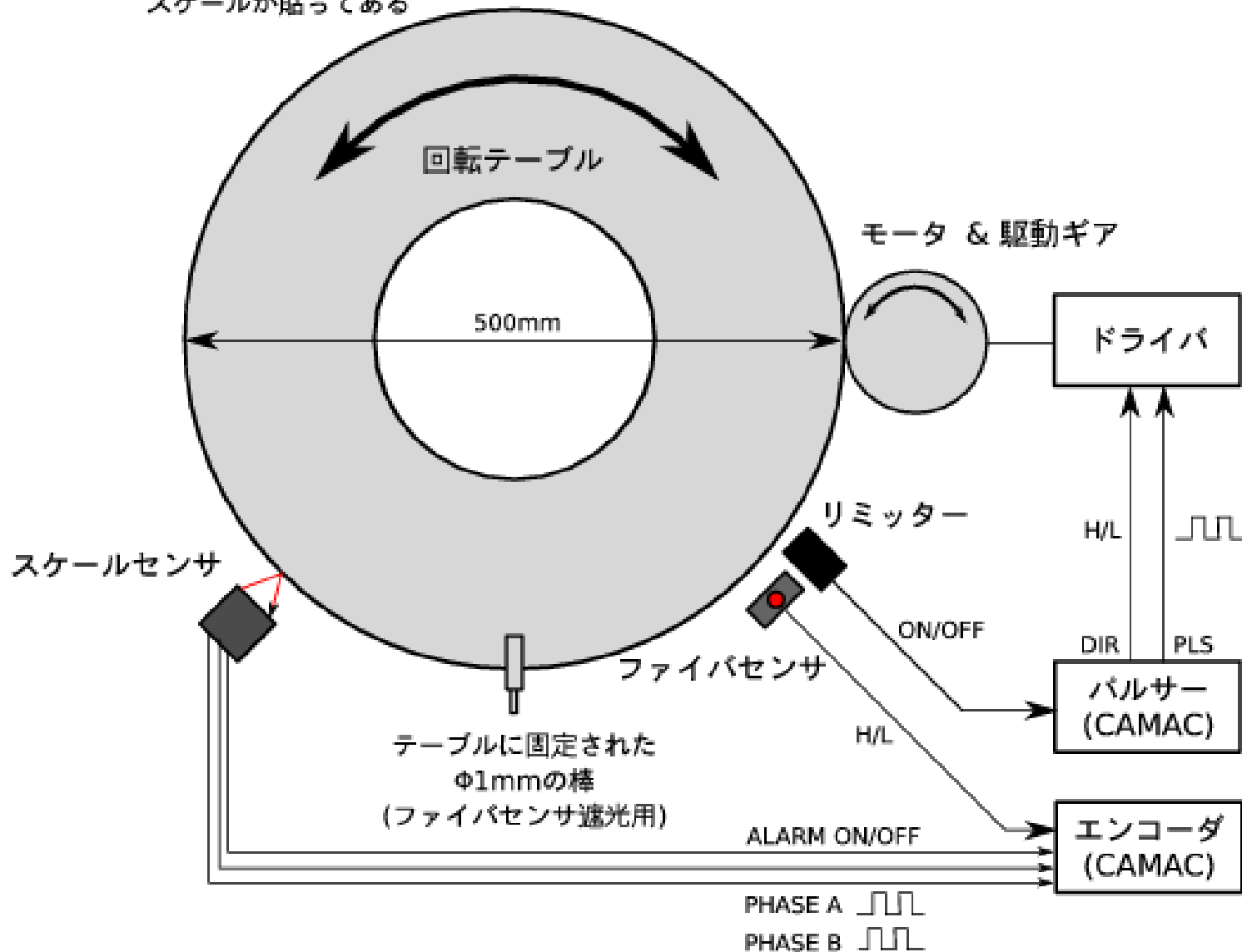


- $^{176}\text{Lu}$ がβ線、γ線を放出
- self triggerで5.6kHz
- プラシン、LYSO $\geq 2/4$ 本のコインシデンスで大きく抑制される

# 回転テーブル

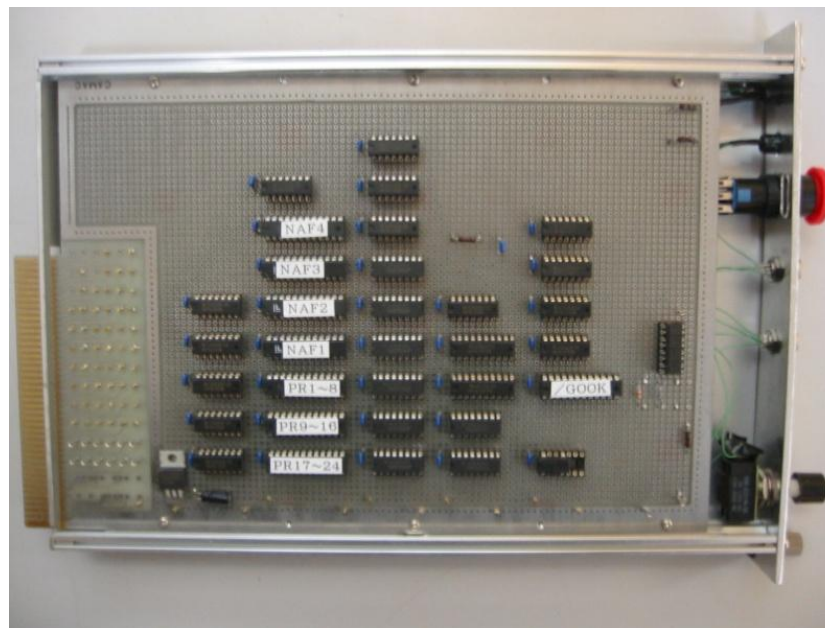
回転方向、速度制御可能

テーブル側面に0.5mm単位の  
スケールが貼ってある

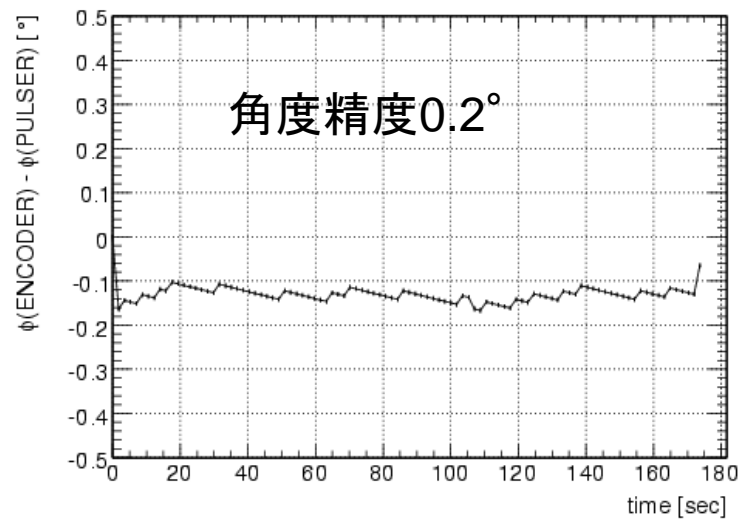
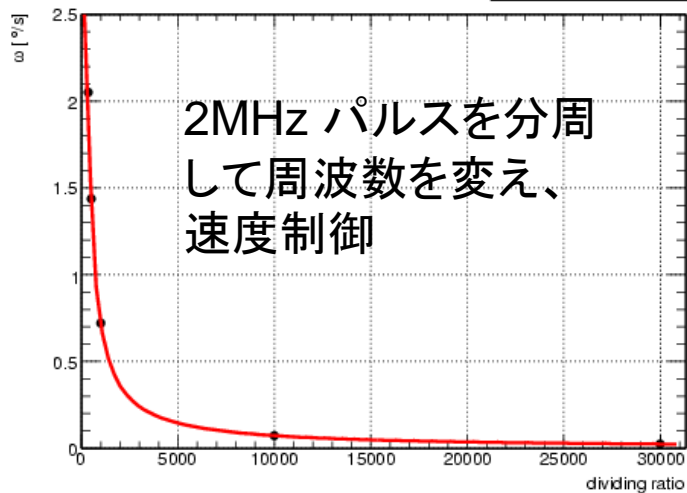


# 回転テーブル

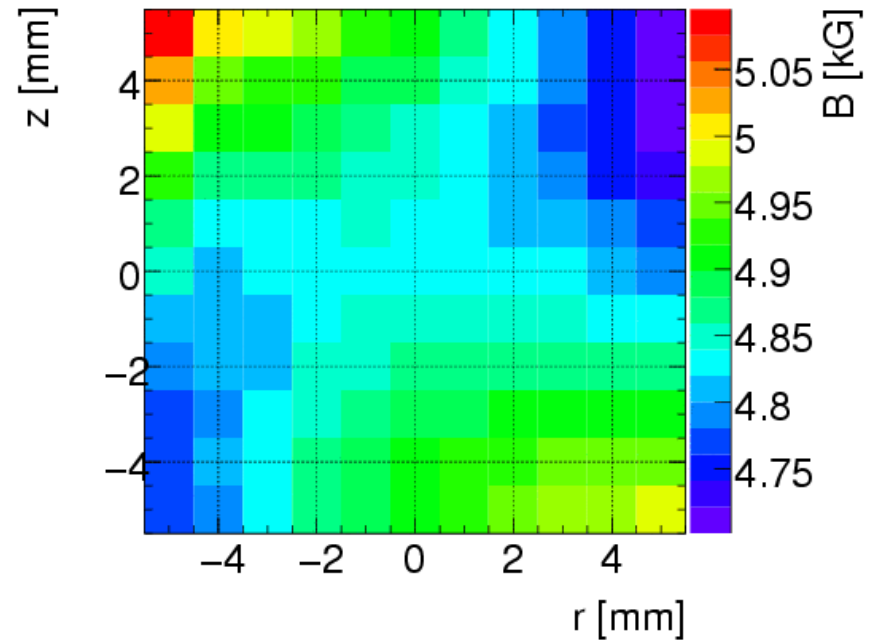
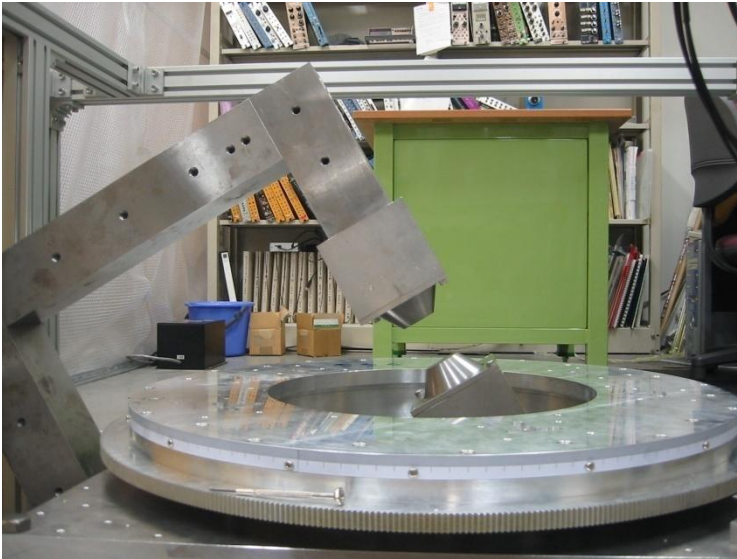
TTL、GAL(プログラマブル)で組んだ



$\chi^2 / \text{ndf}$	0.02089 / 4
p0	720 ± 0.02051



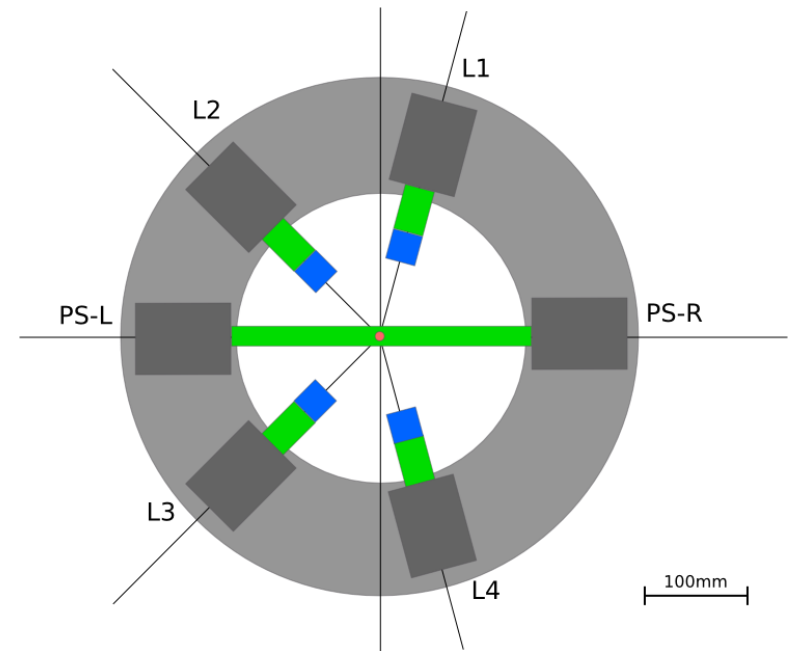
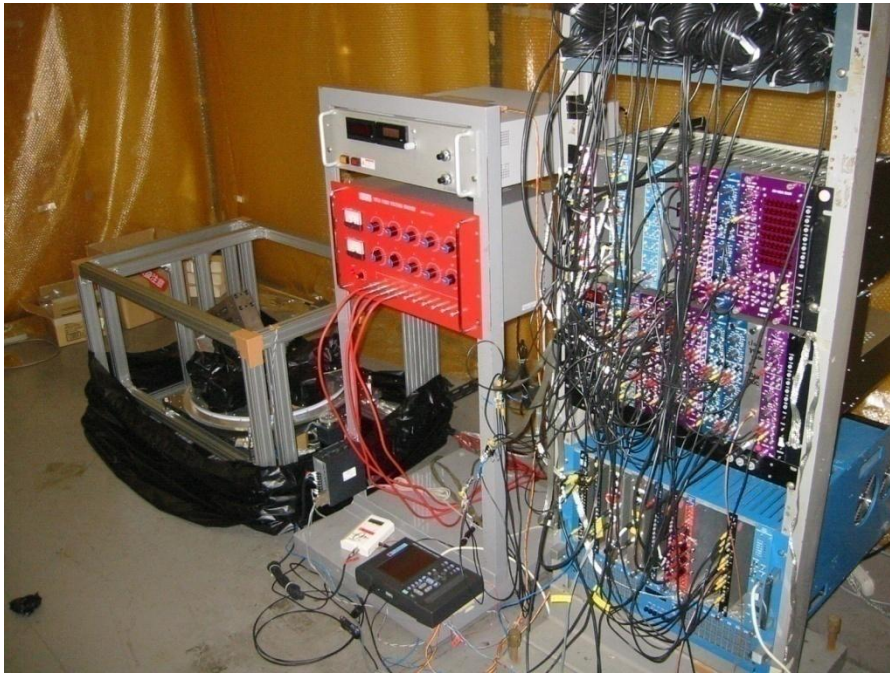
# 磁石



- $\phi 80\text{mm} \times t 50\text{mm}$ のネオジム磁石を2つ使用
- $\theta = 30^\circ$
- Ps生成位置における平均磁場  $4.93 \pm 0.05\text{kG}$
- $m=0$  (短寿命) 成分の寿命は約  $23\text{ns}$
- PMT位置では  $100\text{G}$ 程度

# データ取得

- 検出器配置等を変えて5回Run。約半年間

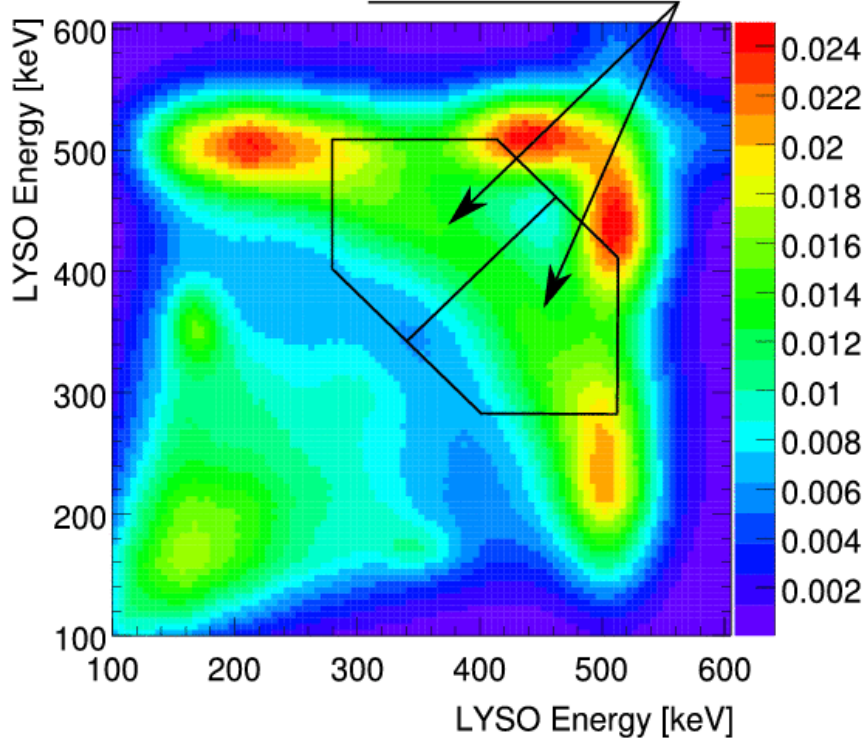


- プラシンが鳴ってから  $-100\text{ns} \sim +600\text{ns}$  の間に  $\geq 2/4$ 本の $\gamma$ 線検出器が鳴るとトリガー (trigger rate = 1.3kHz)



# γ線のエネルギースペクトル

Energy Window



- 左図は $\phi = 150^\circ$  となる $\gamma$ 線検出器ペアでoffline coincidenceがとられたときに観測されたenergyの2次元分布

- エネルギー・運動量保存則から $o\text{-Ps} \rightarrow 3\gamma$ 崩壊における $E_1, E_2$ は弧を描くように分布する

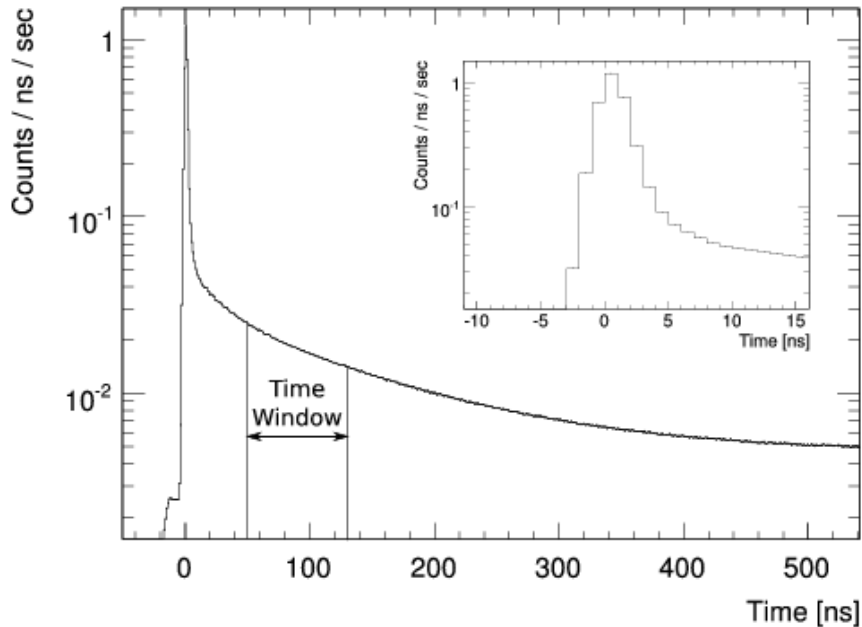
-  $N = N_0 (1 + C_{CP} (\vec{\hat{S}} \cdot \vec{\hat{k}}_1) \cdot (\vec{\hat{S}} \cdot \vec{\hat{k}}_1 \times \vec{\hat{k}}_2))$  なので $k_1, k_2$ を区別する必要がある。Energy Windowとして

$$680 < E_1 + E_2 < 920 \text{ (keV)}, \quad 280 < E_2 < E_1 < 511 \text{ (keV)}$$

を要求し、 $3\gamma$ 崩壊を取り出す。

# タイミングスペクトル

- Energy Window を課した後のPsの崩壊時間分布



- Timing Window (50~130 ns) を課し、 $|1, \pm 1\rangle$  (長寿命) 成分を enhance することでテンソル偏極度  $P_2$  を 1 に近づける

- 最後にアクシデンタルを差し引くと角度  $\varphi$ ・LYSO 検出器ペアごとのイベントレートが求まる

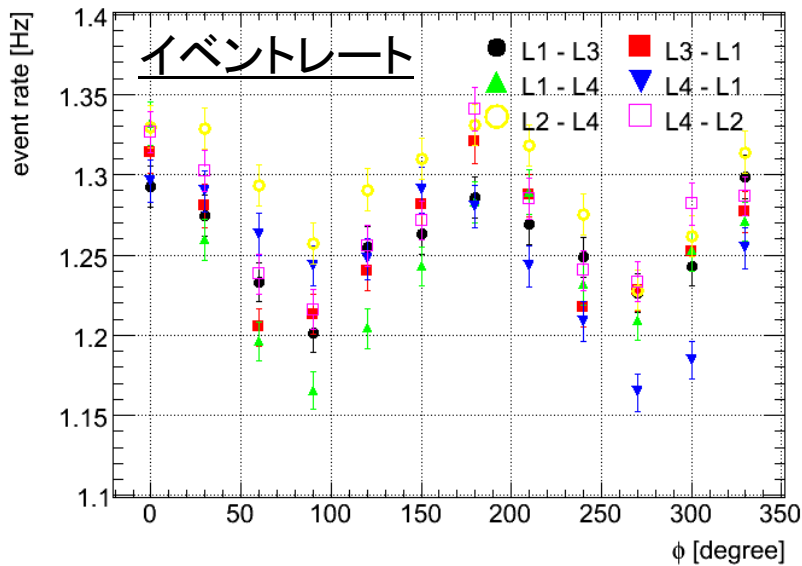
$$f(t) = p_0 + p_1 \exp\left(-\frac{t}{p_2}\right) + p_3 \exp\left(-\frac{t}{p_4}\right)$$

↑  
アクシデンタル

↑  
 $|1, \pm 1\rangle$  (長寿命)

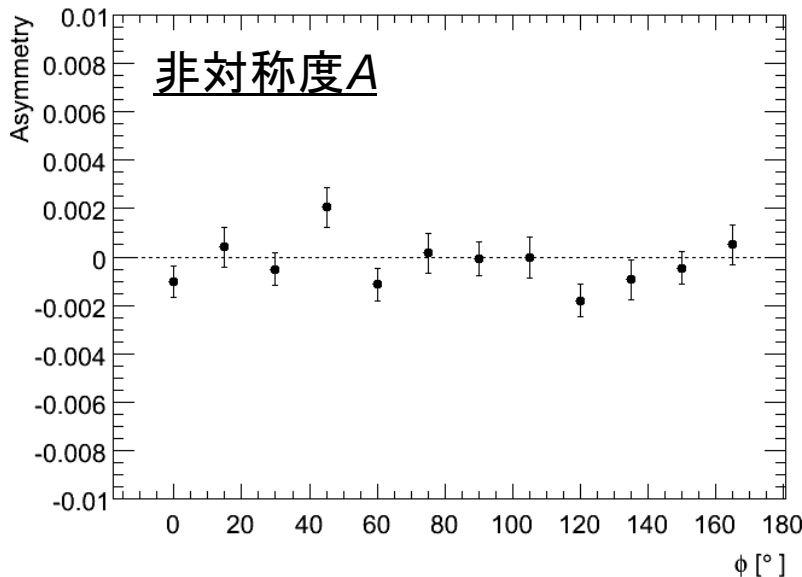
↑  
 $m=0$  (短寿命)

# 非対称度A



- Ps生成部周辺の磁場システムによるコンプトン効果の影響は $\phi$ と $\phi + 180^\circ$ で同じであるため、この2点のイベントレートから非対称度Aを求める

$$A = \frac{N(\phi) - N(\phi + 180^\circ)}{N(\phi) + N(\phi + 180^\circ)} = C_{CP} Q$$



- 同じanalyzing power Qを持つものについて平均することで残ったsystematicなずれをキャンセルさせることができる(左図)

- 非対称度Aは、CP対称性が破れていた場合  $\cos(\phi)$  の角度依存性を持つことになる

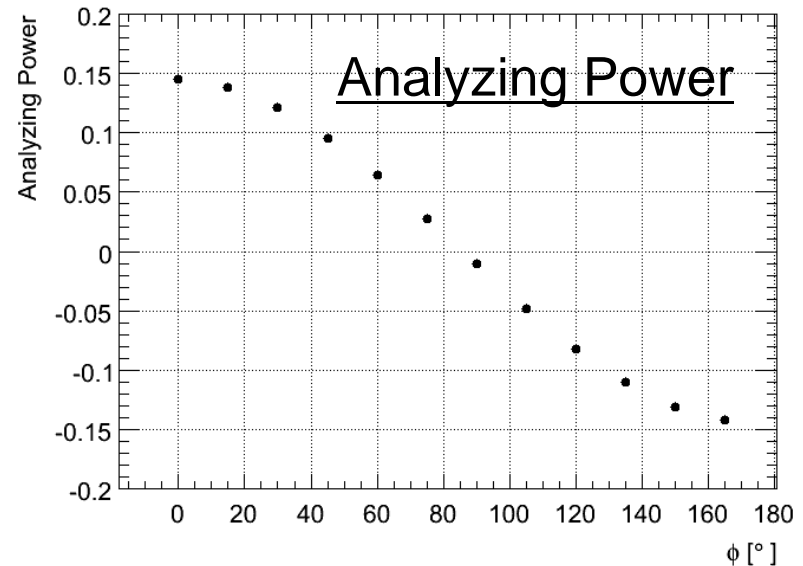


# Analyzing Power

$$Q = P_2 \cdot \frac{1}{2} \sin 2\theta \sin \psi \cos \phi = P_2 \cdot Q_0 \quad \left( P_2 = \frac{N_{+1} - 2N_0 + N_{-1}}{N_{+1} + N_0 + N_{-1}} \right)$$

- テンソル偏極度 $P_2$ はTiming Window内での $m = \pm 1$  (長寿命)成分と $m = 0$  (短寿命)成分との比から求まる。(1)崩壊率、(2)3 $\gamma$ 崩壊面のスピン量子化軸に対する角度依存性、(3)短寿命成分のうち3 $\gamma$ 崩壊する割合、を考慮にいれて計算すると  $P_2 \sim 0.9$

-  $Q_0$ の部分については、 $\gamma$ 線検出器のアクセプタンス、エアロジェル生成位置の広がり、検出器のエネルギー分解能などの効果により理想的な値より悪化する。この部分は Geant4 で評価



- こうして得られた $Q$ で非対称度 $A$ を割り、角度について加重平均をとることで  $C_{CP}$  が求まる  $\longrightarrow C_{CP} = 0.0013 \pm 0.0021(\text{stat.})$

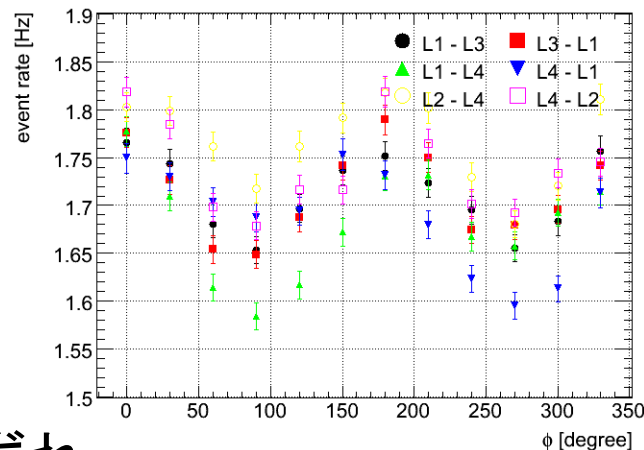
# 系統誤差 & 最終結果

- 主な系統誤差は非対称度Aに対するもので、例えば

## 1. 回転テーブルの角度精度( $< 0.2^\circ$ )

非対称度Aを求める2点の間の角度の差が $180^\circ$ からずれている場合に、compton効果の影響の差によって非対称性が生じる

$$\longrightarrow \Delta C_{CP} = \mathbf{0.00039}$$



## 2. 磁場中心と回転テーブルの中心のずれ

このずれがあるとPs生成部における磁場の平均値が角度依存する。これにより $m=0$ (短寿命)成分の寿命が回転テーブルの角度に依存するようになり、Timing Windowをパスするイベント数が角度依存することになる

$$\longrightarrow \Delta C_{CP} = \mathbf{0.00025}$$

- Analyzing Power Q に対する系統誤差が $C_{cp}$ に与える影響は極めて小さい

- 最終結果は  $C_{CP} = \mathbf{0.0013 \pm 0.0021(stat.) \pm 0.0006(sys.)}$

# まとめ

- ポジトロニウムを用いてレプトンセクターにおけるCP対称性の破れの探索を行い、約半年間のデータ取得で

$$C_{CP} = 0.0013 \pm 0.0021(\text{stat.}) \pm 0.0006(\text{sys.})$$

という0と矛盾しない結果を得た(過去の実験の約7倍の精度)