

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^A、浅井祥仁、小林富雄^A

東京大学理学系研究科、東京大学素粒子物理国際研究センター^A

日本物理学会 2009年秋季大会 @ 甲南大学 2009年9月13日

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 1.5×10^{-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)

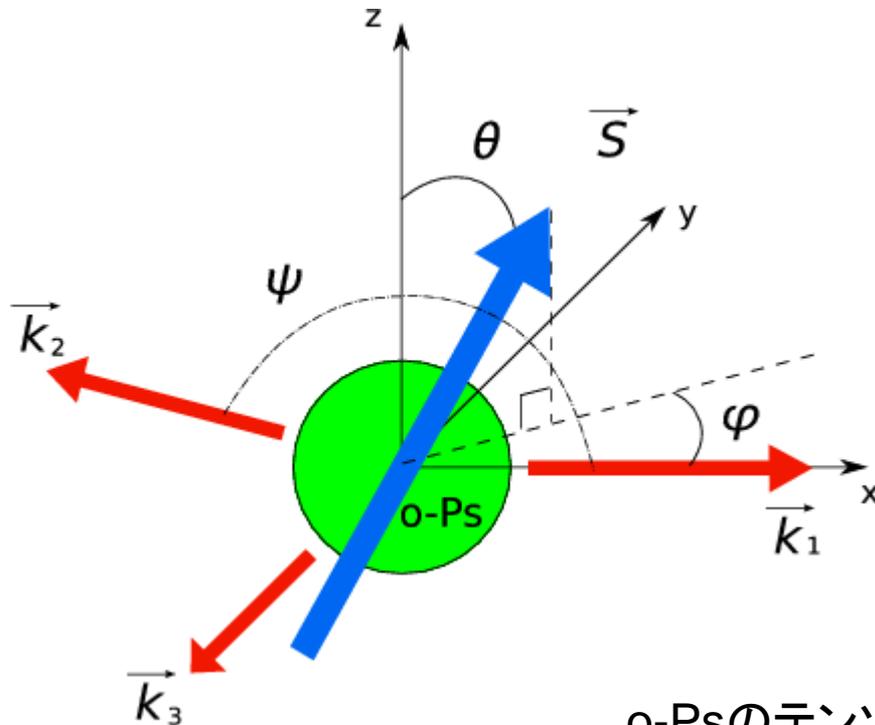
- 電子と陽電子の束縛状態
- β^+ ソースから放出された陽電子をターゲット中で静止させることで生成
- $\sqrt{s} = 1022\text{keV}$
- 全スピンによってp-Psとo-Psに分けられる

	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 α_{EM} により崩壊率に約1000倍の差

o- $P_s \rightarrow 3\gamma$ 崩壊におけるCP対称性の破れ

- CP対称性が破れている場合、o- P_s の崩壊で出てくる 3γ は以下の式で表わされる角度依存性を持つ



$$N^{3\gamma} = N_0^{3\gamma} (1 + C_{CP} (\hat{S} \cdot \hat{k}_1) \cdot (\hat{S} \cdot \hat{k}_1 \times \hat{k}_2))$$

$$= N_0^{3\gamma} (1 + C_{CP} Q)$$

C even, P odd, T odd, **CP odd**, CPT even

CP対称性が破れていると C_{CP} がnon-zero

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

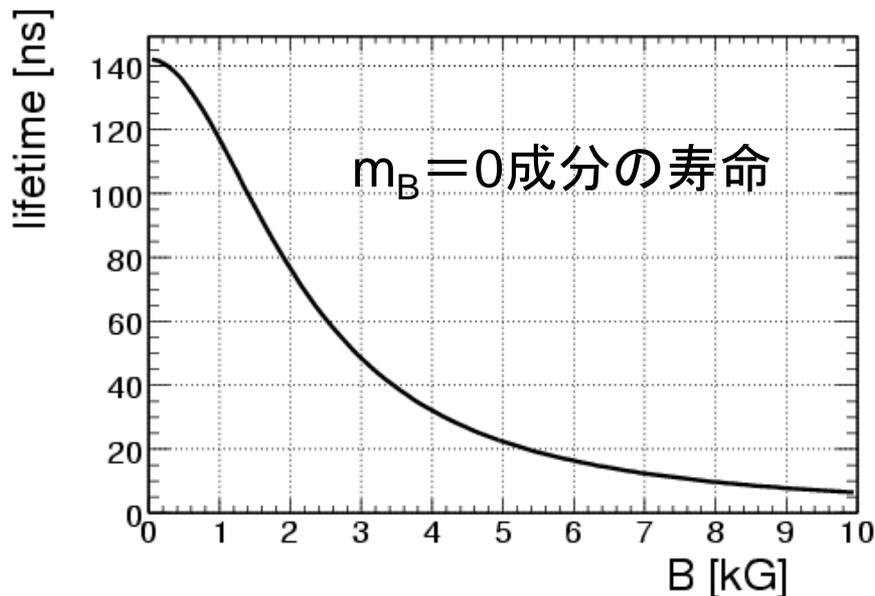
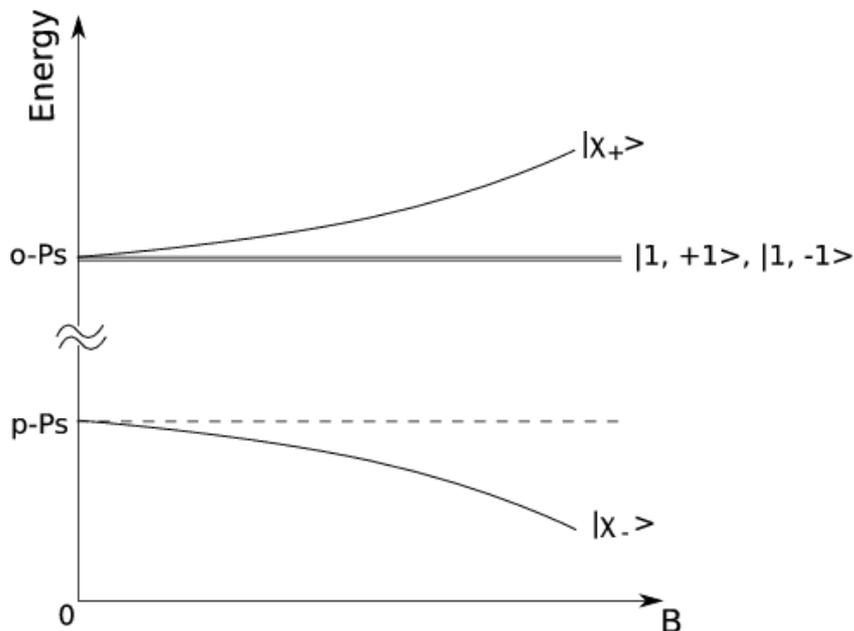
$$P_2 = \frac{N_{+1} - 2N_0 + N_{-1}}{N_{+1} + N_0 + N_{-1}}$$

o- P_s のテンソル偏極度

N_{+1} 、 N_0 、 N_{-1} は同じ数ずつできるため、 $P_2 = 0$ となる。しかし、 **$m_B = +1$ or $m_B = -1$** と **$m_B = 0$** を分離できれば一方のイベントのみを用いることで C_{CP} を測定することができる

Zeeman効果を用いたPsのテンソル偏極

- 磁場をかけることで $|0, 0\rangle$ (p-Ps)と $|1, 0\rangle$ (o-Psの $m_B = 0$ 成分)が混合



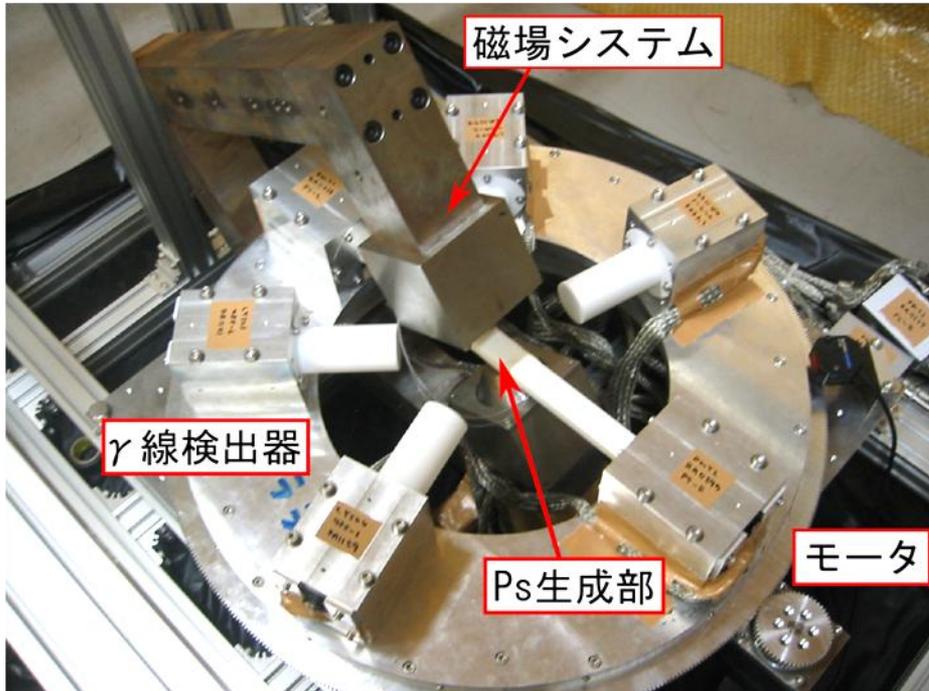
$m_B = \pm 1$ 成分の寿命は142nsのままであるが、

$m_B = 0$ 成分(上図の $|X_+\rangle$)の寿命は5kGの磁場で約20nsに減少

p-Psの寿命は125psからほとんど変化しない

→Timing Window (50~130ns)により $m_B = \pm 1$ 成分をenhanceし、テンソル偏極度 P_2 を実効的に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。回転させることで検出器の個体差等の系統誤差をキャンセルさせる

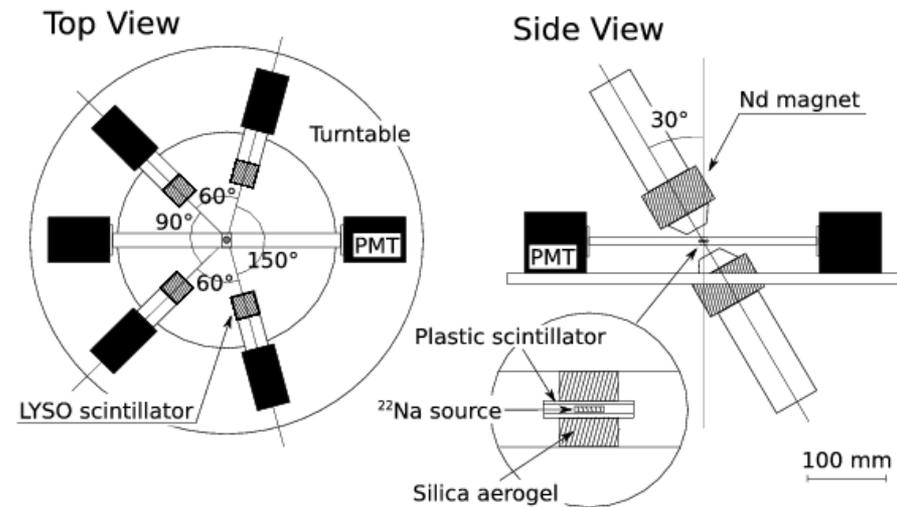
- ϕ が 180° 異なる点のイベントレートを用いて非対称度 A を出し、 Q で割ることでCP対称性の破れの強さ C_{CP} を求める

$$N^{3\gamma} = N_0^{3\gamma} (1 + C_{CP} Q)$$

$$Q = P_2 \cdot \frac{1}{2} \sin(2 \times 30^\circ) \sin(150^\circ) \cos\phi$$

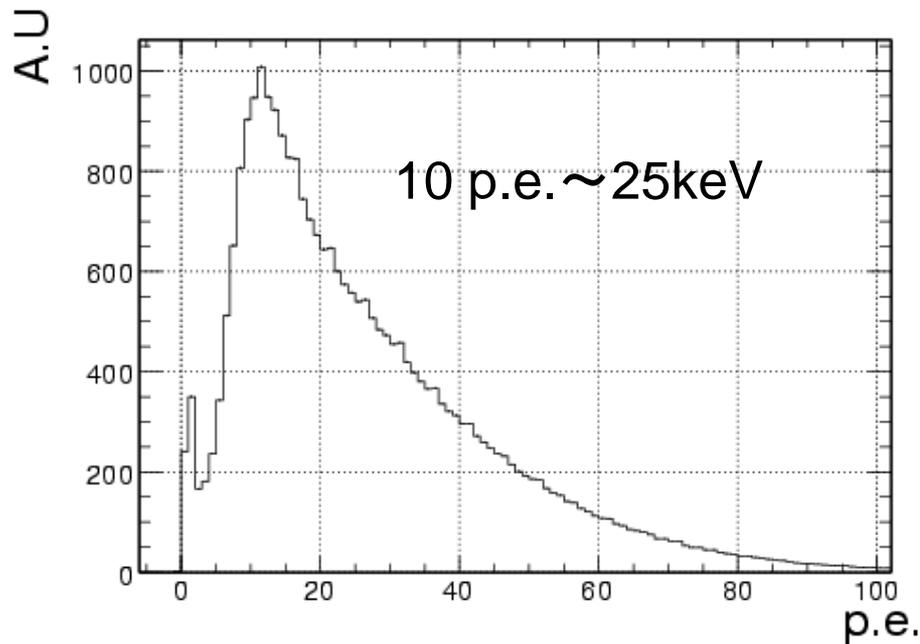
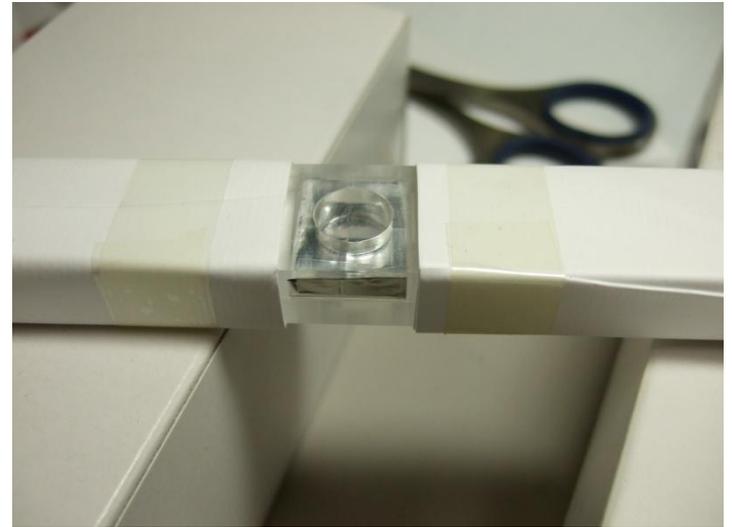
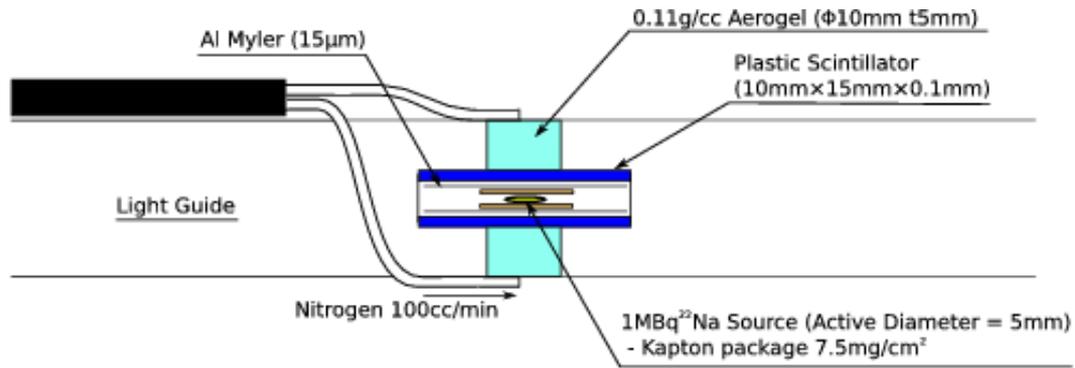
$$A = \frac{N^{3\gamma}(\phi) - N^{3\gamma}(\phi + 180^\circ)}{N^{3\gamma}(\phi) + N^{3\gamma}(\phi + 180^\circ)} = C_{CP} Q$$

可変



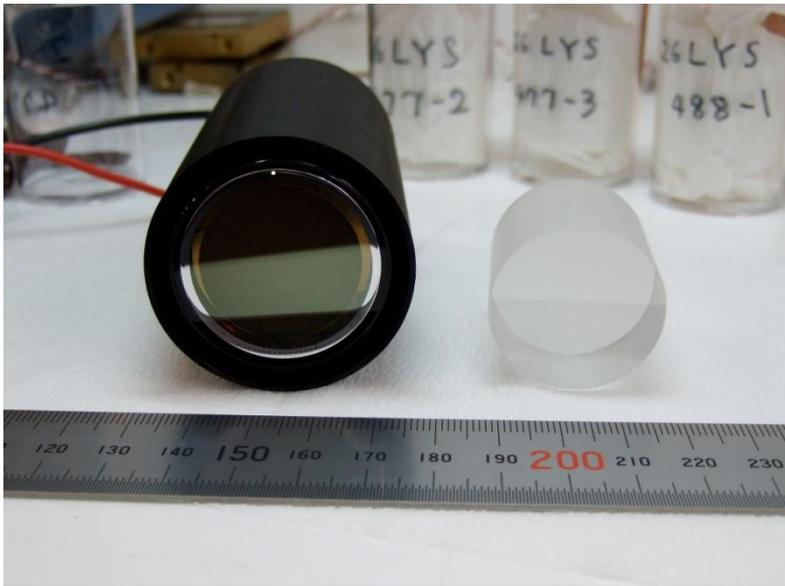
$\psi = 150^\circ$ のペアが3通りできる配置

Ps生成部



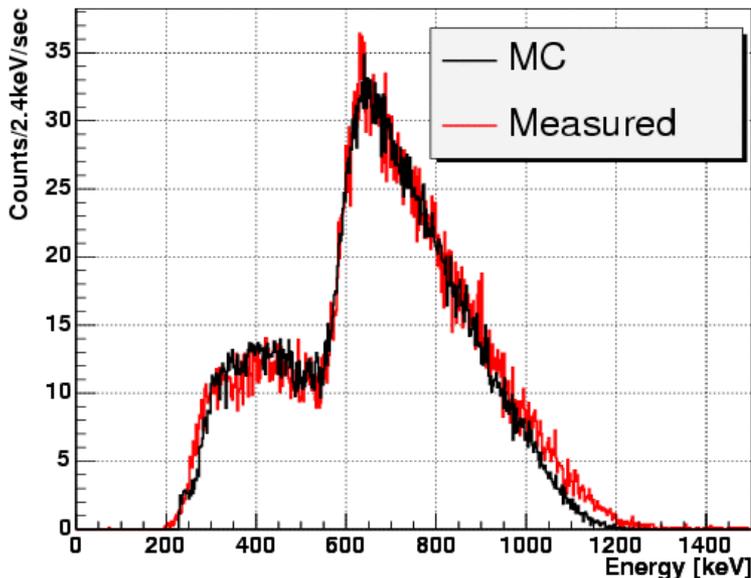
- プラシンを鳴らした e^+ のうち、約40%がエアロジェル中で静止
- このうち約15%が o -Psに

γ線検出器



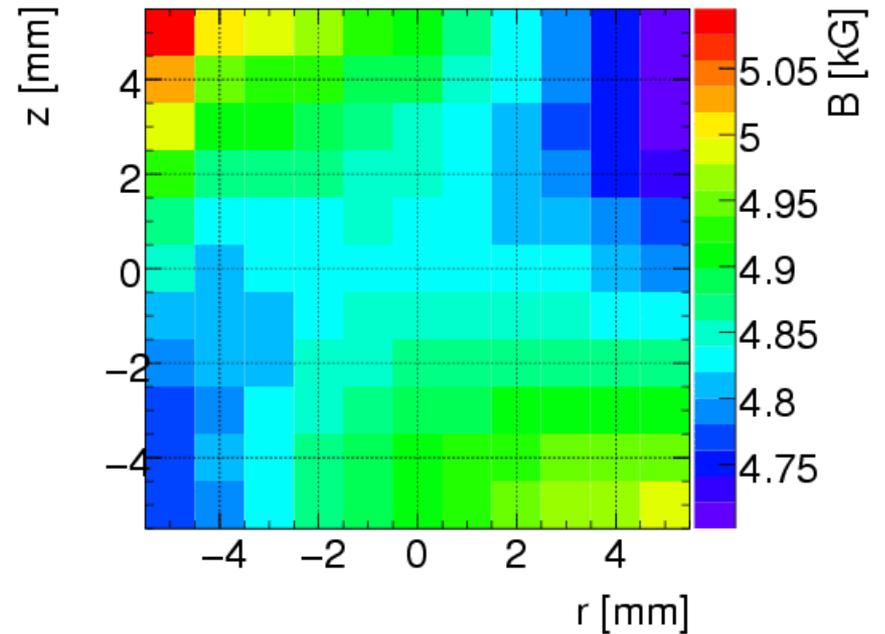
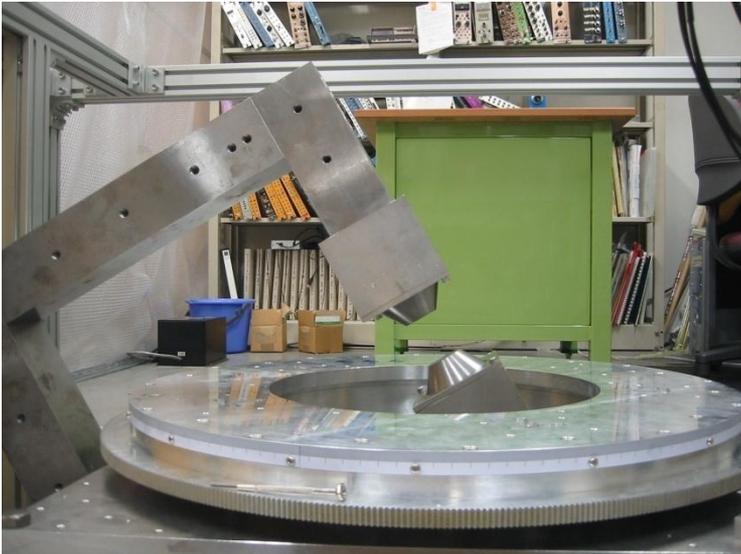
- LYSO($\text{Lu}_{1.8}\text{Y}_{0.2}\text{SiO}_5$)結晶
- $Z = 71$, $\rho = 7.1\text{g/cm}^3$
- 立ち上がり10ns, 減衰時間40ns
- FWHM 約12% @ 511keV

176Lu Background



- ^{176}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

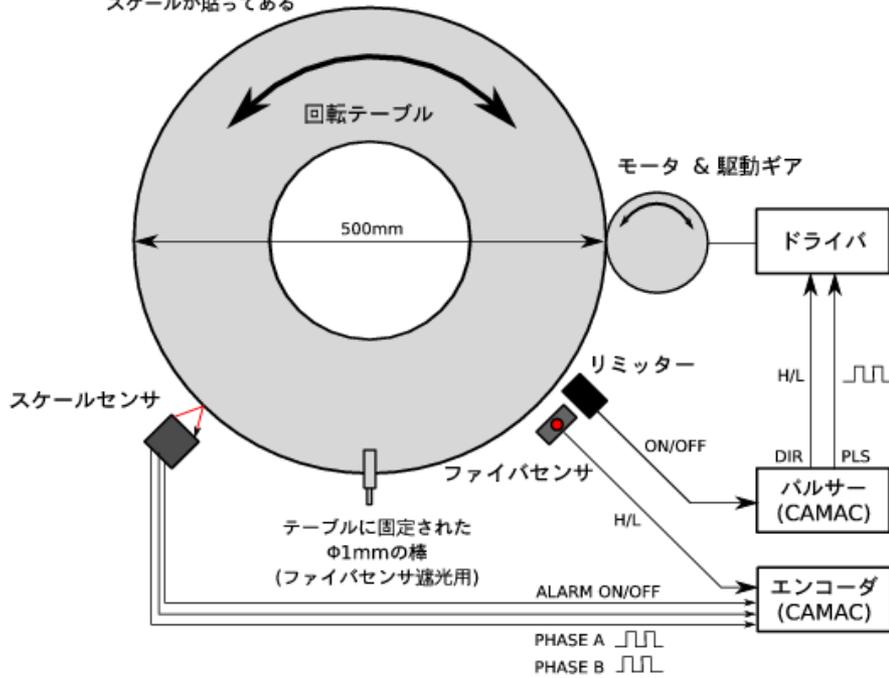
磁石



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

回転テーブル

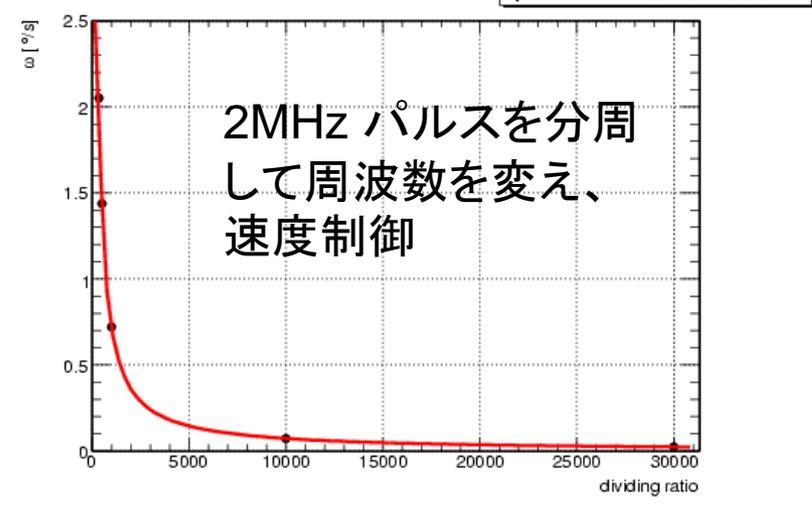
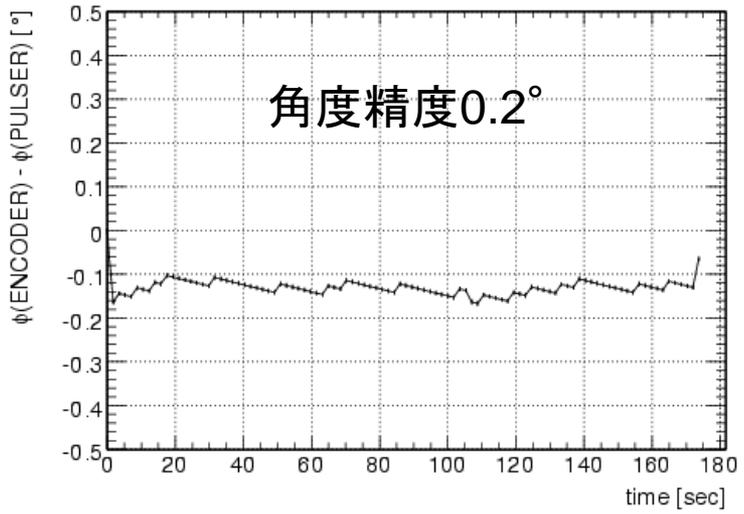
テーブル側面に0.5mm単位の
スケールが貼ってある



自作の制御用CAMACモジュール

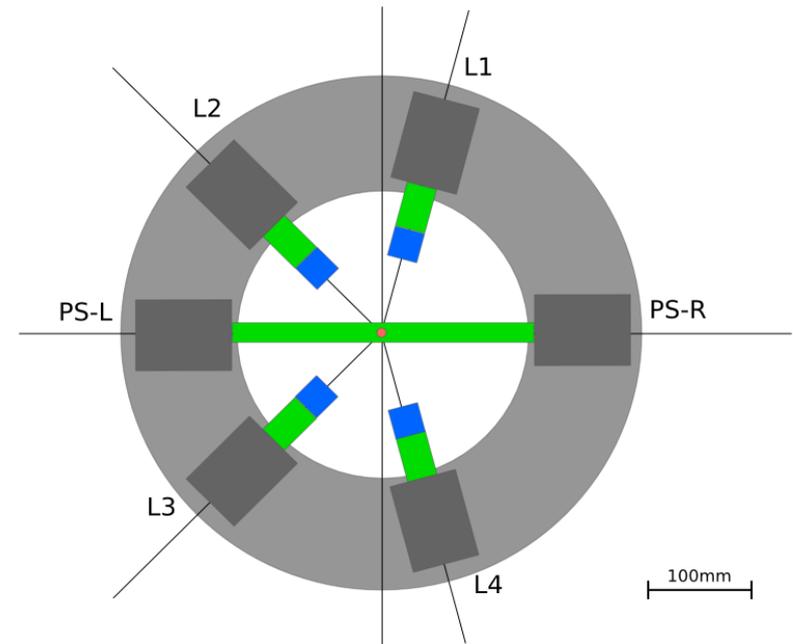
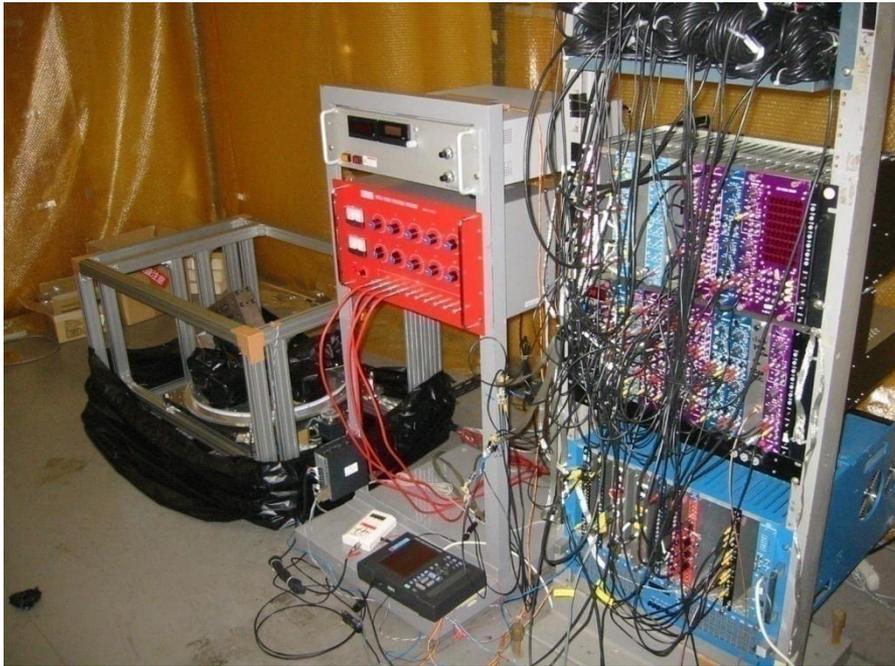


χ^2 / ndf 0.02089 / 4
p0 720 ± 0.02051



データ取得

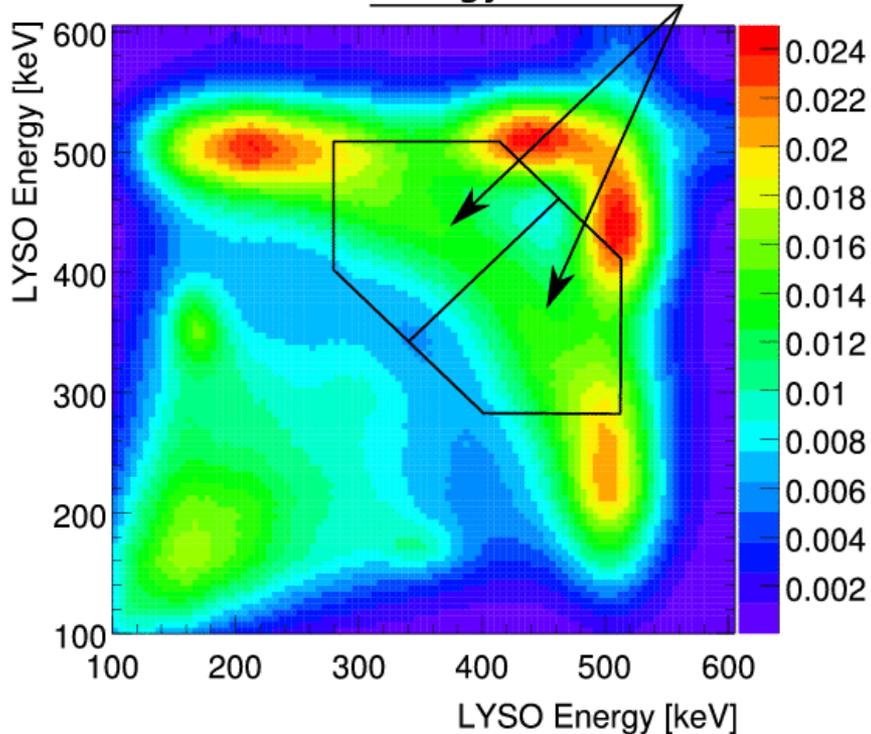
- 検出器配置等を変えて5回Run。トータルで約半年間



- 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 γ 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 $\psi = 150^\circ$ となる γ 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

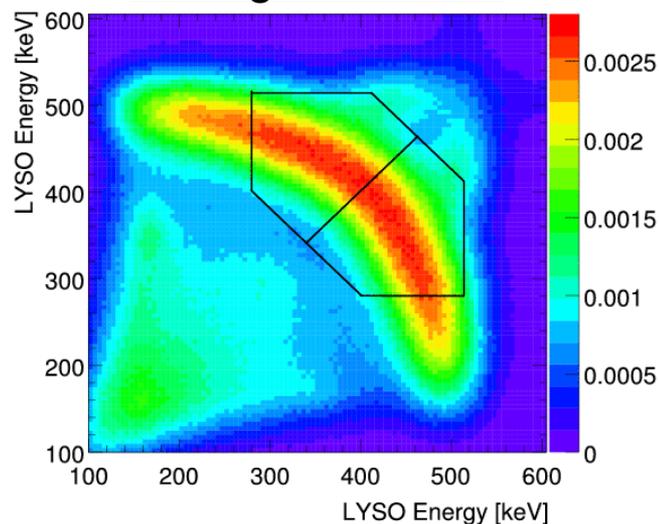
- Energy Windowとして

$$680 < E_1 + E_2 < 920 \text{ (keV)}$$

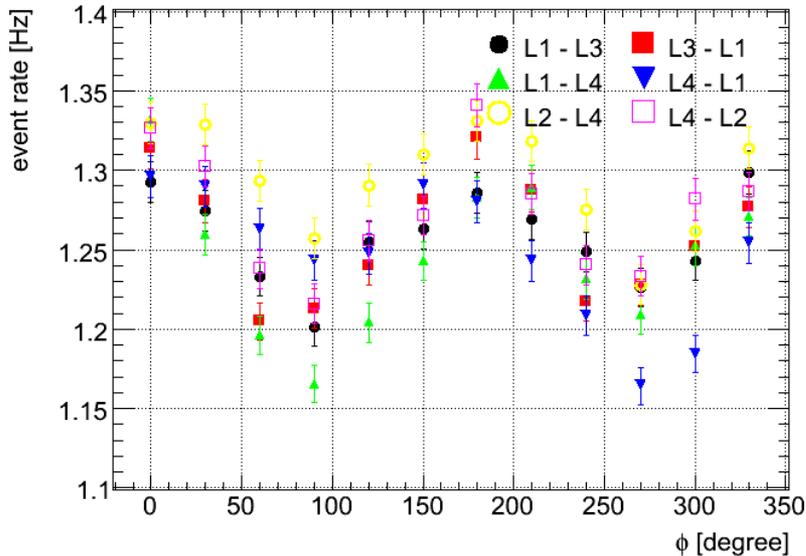
$$280 < E_2 < E_1 < 511 \text{ (keV)}$$

を要求し、 3γ 崩壊を取り出す

Timing Window後



イベントレート



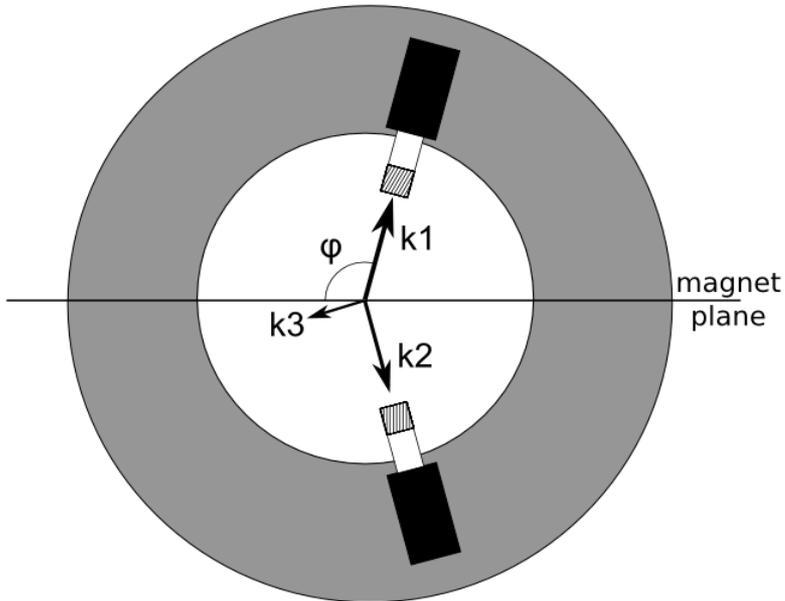
- 左図は角度 ϕ ・LYSO検出器ペアごとのイベントレート。 ϕ は左下の図にあるように定義されていた。

$$N^{3\gamma} = N_0^{3\gamma} (1 + C_{CP} (\vec{\hat{S}} \cdot \vec{\hat{k}}_1) \cdot (\vec{\hat{S}} \cdot \vec{\hat{k}}_1 \times \vec{\hat{k}}_2))$$

$$= N_0^{3\gamma} (1 + C_{CP} Q)$$

$$Q = P_2 \cdot \frac{1}{2} \sin(2 \times 60^\circ) \sin 150^\circ \cos \phi$$

$$P_2 = \frac{N_{+1} - 2N_0 + N_{-1}}{N_{+1} + N_0 + N_{-1}}$$



- 180° 周期の角度依存性は磁石でのコンプトン散乱によって生じる

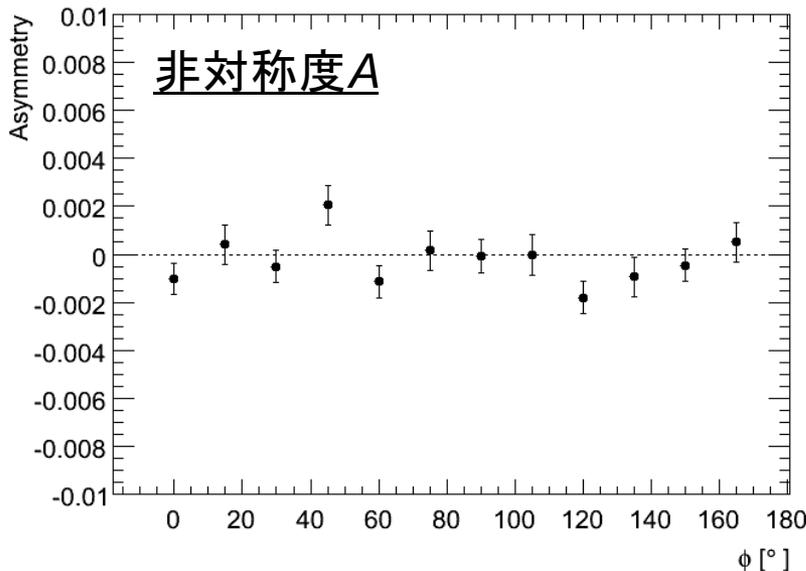
非対称度A

- 磁石と回転テーブルとのアライメントが完璧であれば、磁石でのコンプトン効果の影響は ϕ と $\phi + 180^\circ$ で同じ。また、この2点ではanalyzing power Q の符号のみが異なるため、以下のように定義した非対称度AはCP対称性の破れの強さ C_{CP} とanalyzing power Q との積で表すことができる

$$A = \frac{N^{3\gamma}(\phi) - N^{3\gamma}(\phi + 180^\circ)}{N^{3\gamma}(\phi) + N^{3\gamma}(\phi + 180^\circ)} = C_{CP}Q$$

$$N^{3\gamma} = N_0^{3\gamma} (1 + C_{CP}Q)$$

$$Q = P_2 \cdot \frac{1}{2} \sin(2 \times 60^\circ) \sin 150^\circ \cos \phi$$



- さらに、同じanalyzing power Q を持つものについて平均することでsystematicなずれをキャンセルすることができ、最終的に左図を得る

- CP対称性の有無に関わらず、非対称度Aの値を $0 \sim 180^\circ$ に渡って積分すると0になるはず (null asymmetry)。左図から十分0に近いことが確認できる

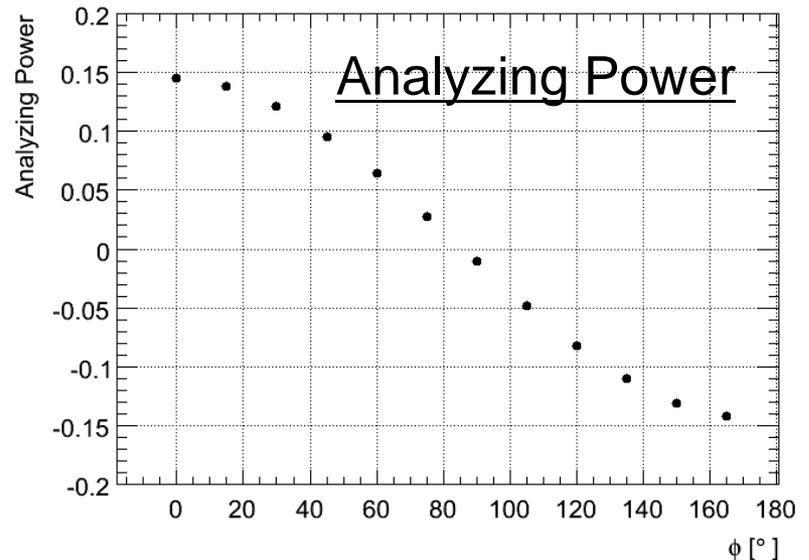
- あとは Q で割れば C_{CP} が求まる

Analyzing Power

$$Q = P_2 \cdot \frac{1}{2} \sin(2 \times 60^\circ) \sin 150^\circ \cos \phi = P_2 \cdot Q_0 \quad \left(P_2 = \frac{N_{+1} - 2N_0 + N_{-1}}{N_{+1} + N_0 + N_{-1}} \right)$$

- テンソル偏極度 P_2 (の実効値) は Timing Window 内での $m_B = \pm 1$ 成分と $m_B = 0$ 成分との比から求まる。(1) 崩壊率、(2) 3γ 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 3γ 崩壊する割合、を考慮に入れて計算すると $P_2 = 0.87$ となる

- Q_0 の部分については、 γ 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°)

非対称度Aを求める際、2点間の角度差が180° でないと、磁石でのcompton散乱の影響の差から非対称が生じる

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

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 $m_B = 0$ 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してしまう

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

- 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

- その他もろもろの系統誤差をまとめると、

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

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)