

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^A、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^A

日本物理学会 第64回年次大会 @立教大学 2009年3月27日

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

 - 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 $(m/m_W)^4$ に比例するため、感度がない
- 本実験においてCP対称性の破れが発見されれば、新しい物理の発見ということになる

ポジトロニウム(Ps)

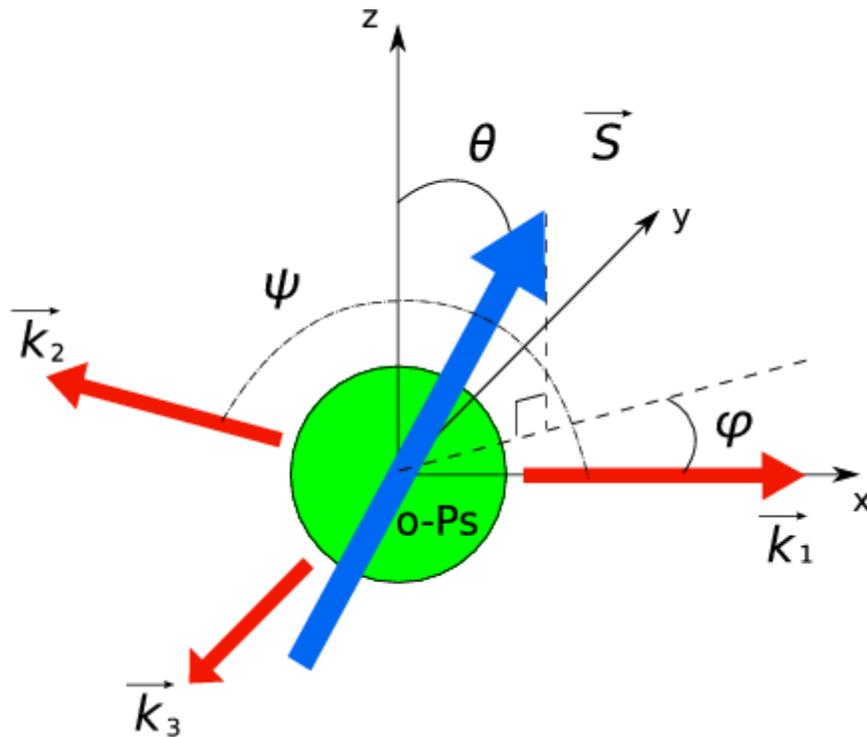
- 電子と陽電子の束縛状態
- +ソースから放出された陽電子をターゲット中で静止させることで生成
- 全スピンによってp-Psとo-Psに分けられる

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

Phase Space と EM により崩壊率に約1000倍の差

o-Ps 3 崩壊におけるCP対称性の破れ

- o-Ps 3 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

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

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

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

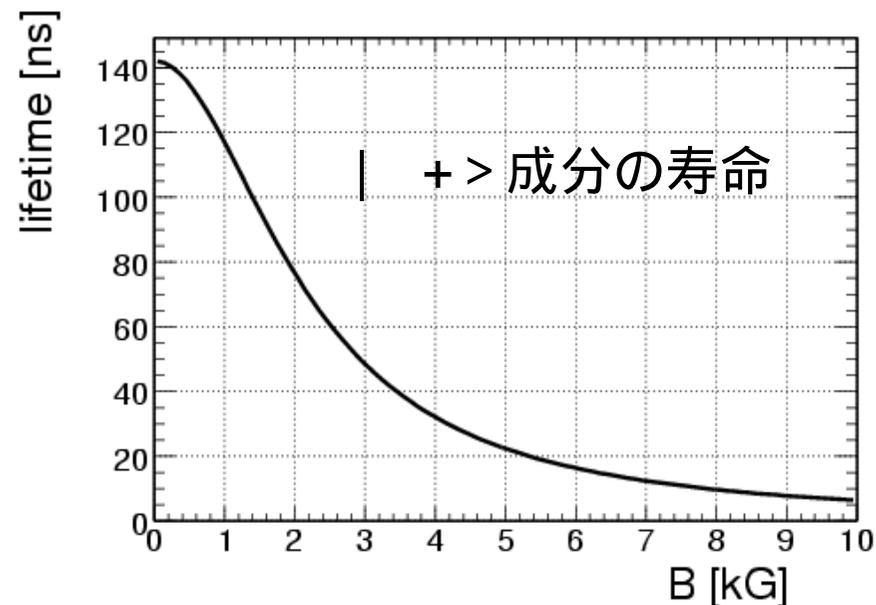
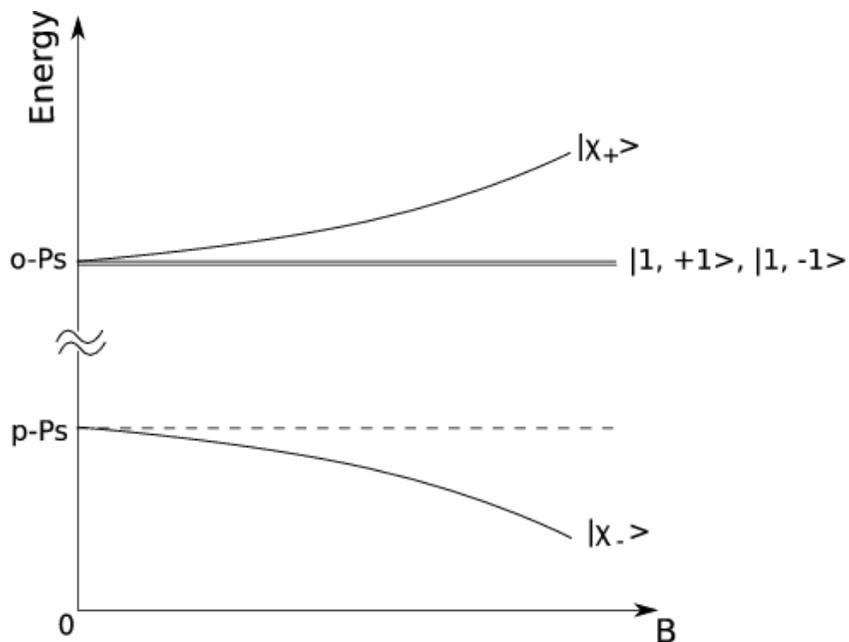
$$P_2 = \frac{N_{+1} - 2N_0 + N_{-1}}{N_{+1} + N_0 + N_{-1}} \quad (\text{テンソル偏極度})$$

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

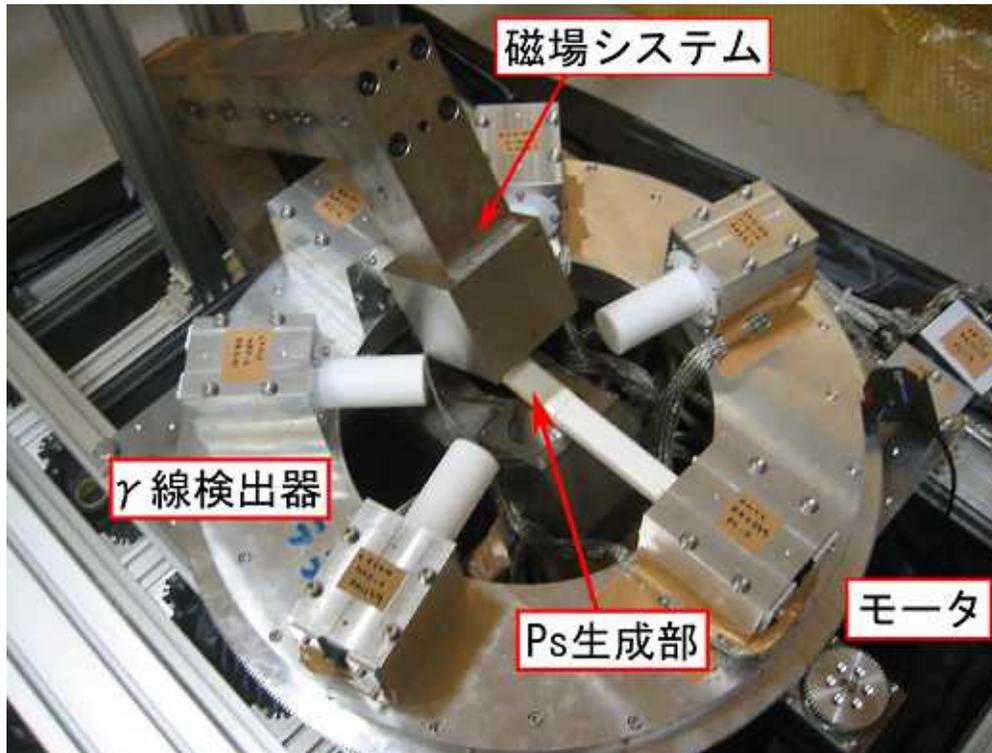


$|1, \pm 1\rangle$ 成分の寿命は142nsのまま

$|x_+\rangle$ 成分(もと $|1, 0\rangle$ 成分)の寿命は5kGで約20ns

Timing Window (50 ~ 400nsec)により $|1, \pm 1\rangle$ 成分のみを取り出し、テンソル偏極度 $P_2=1$ にする

実験装置

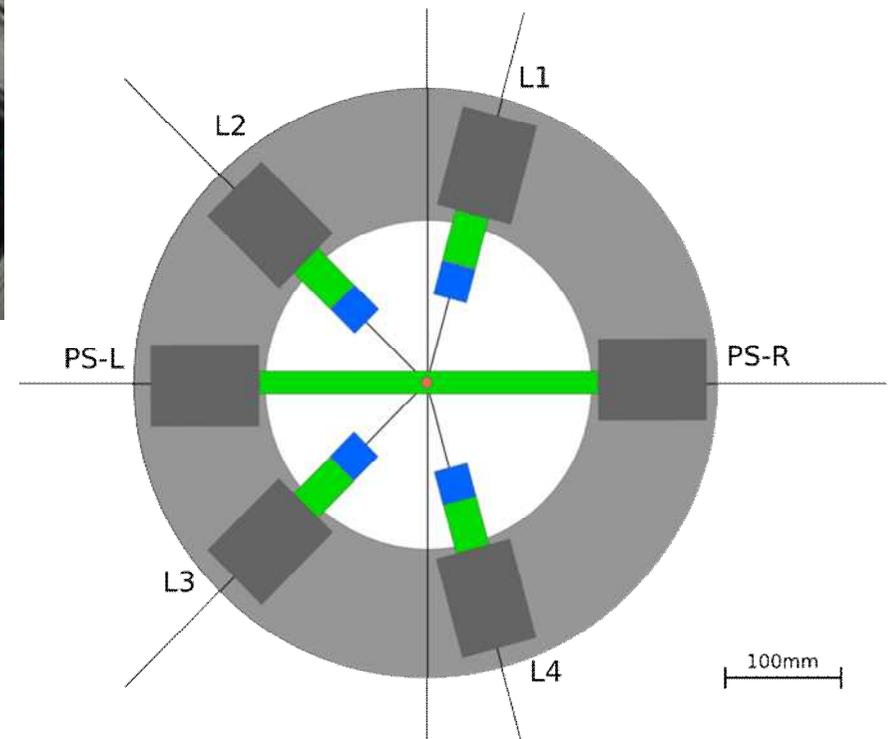


$$N = N_0(1 + C_{CP}Q)$$

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

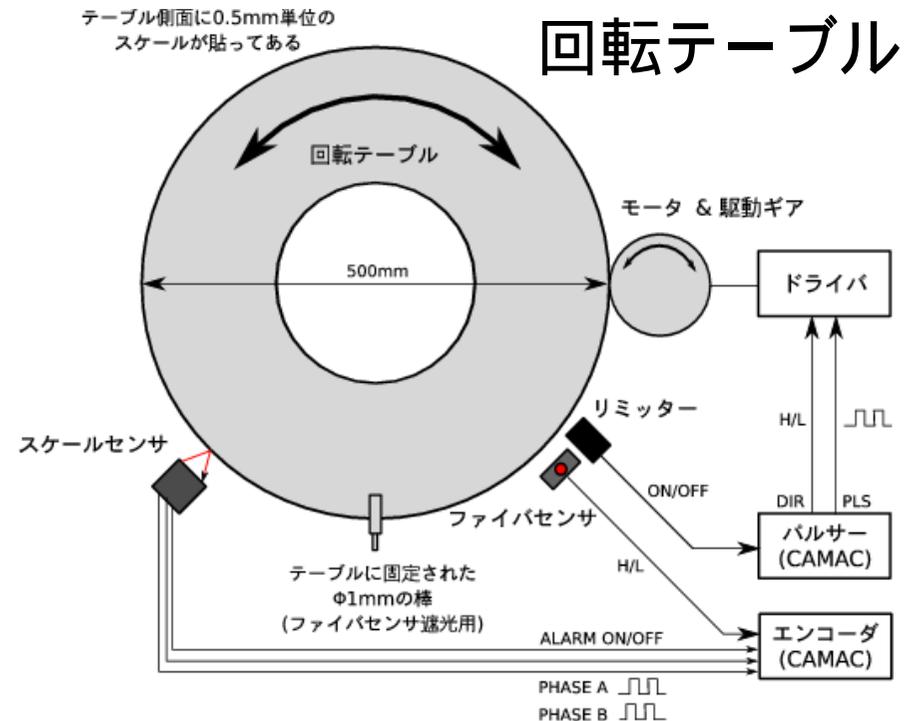
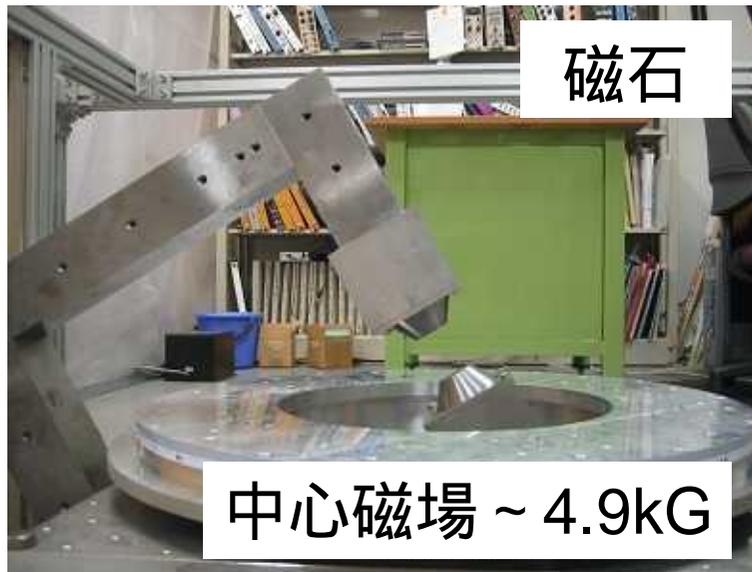
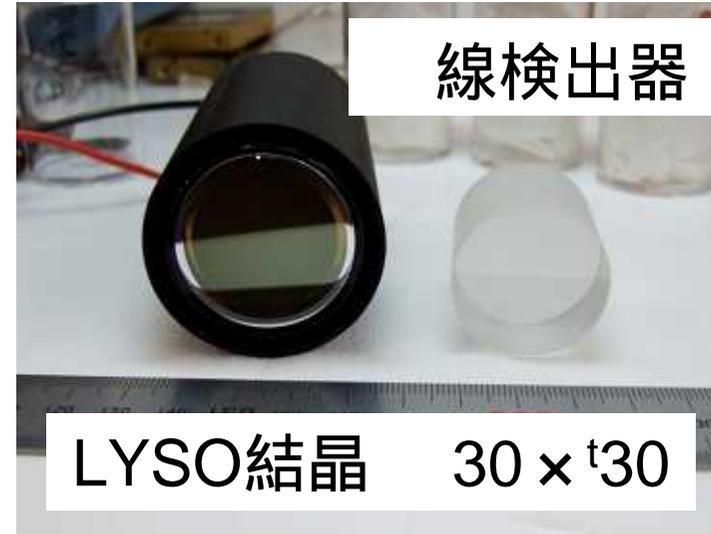
$$A = \frac{N(\phi) - N(\phi + 180^\circ)}{N(\phi) + N(\phi + 180^\circ)} = C_{CP}Q$$

- 検出器は回転テーブル上に固定
- が180°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



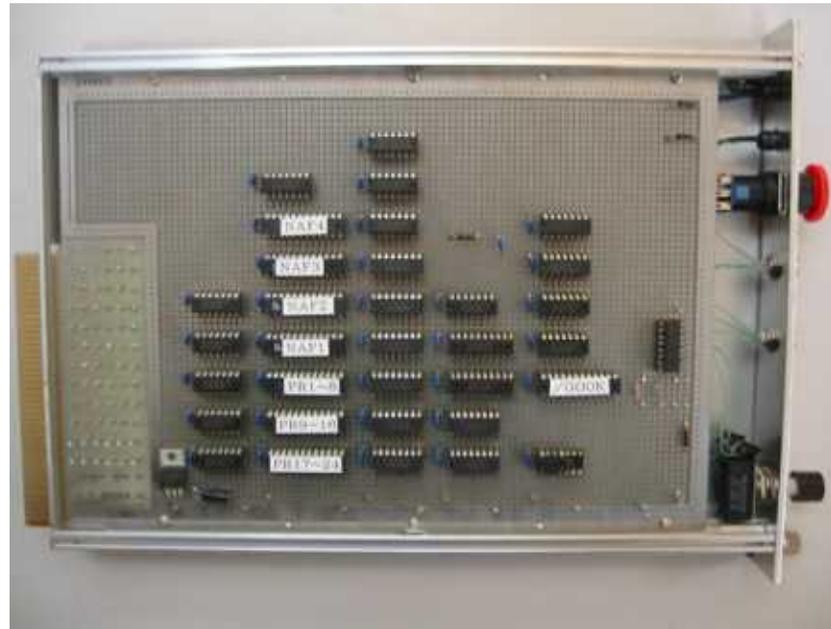
= ±150°の組が6通りできる配置

実験装置

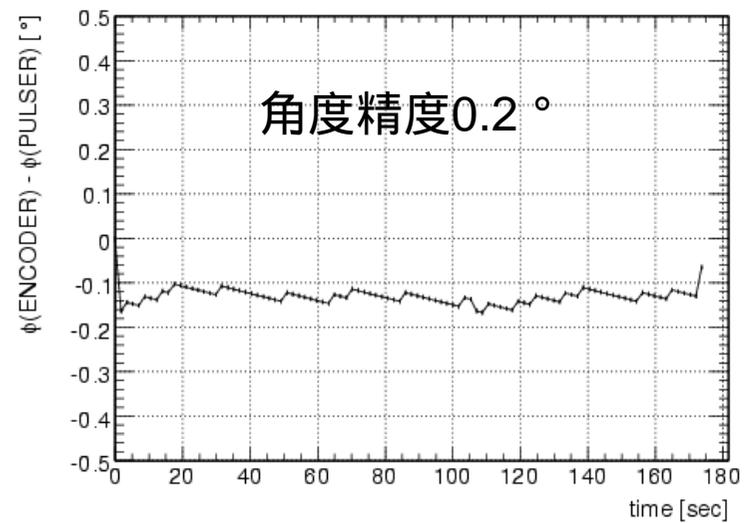
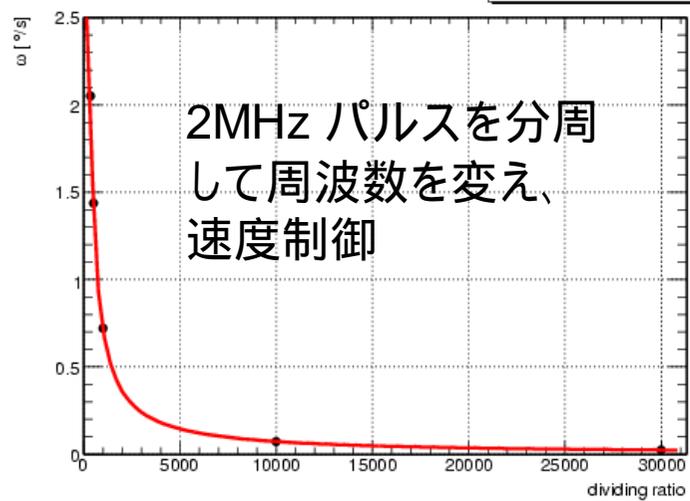


回転テーブル

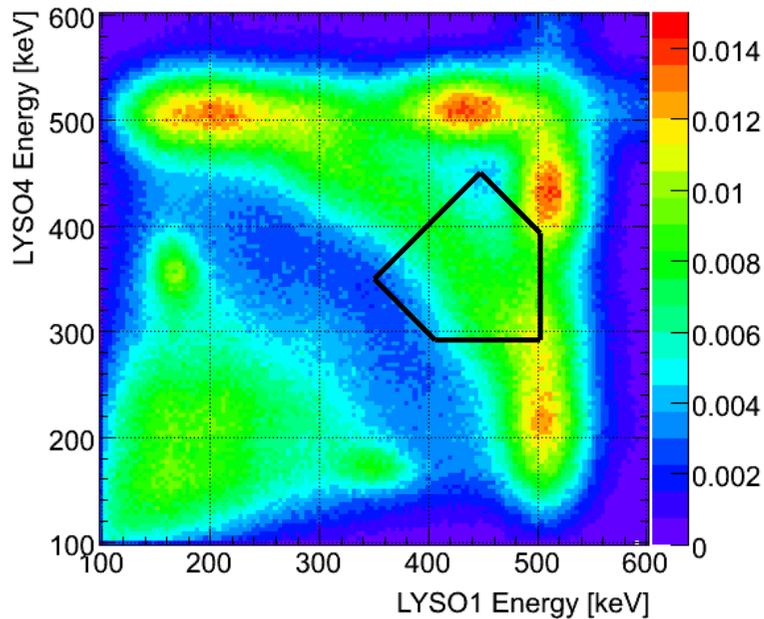
TTL、GAL(プログラマブル)で組んだ



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

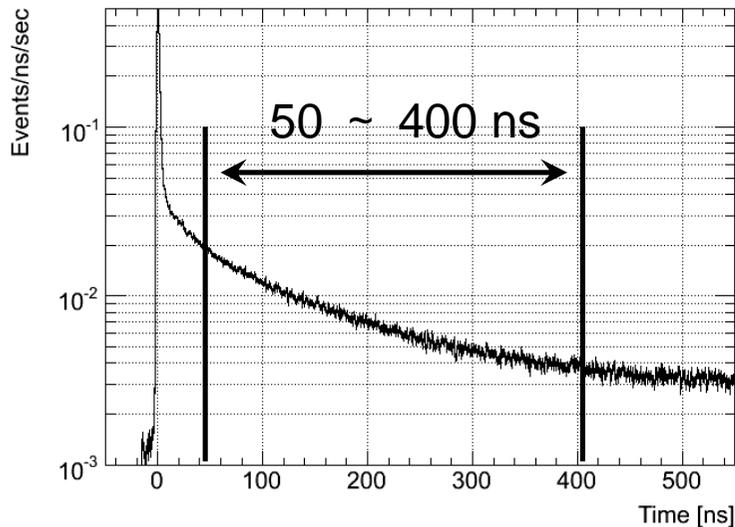


イベントセレクション



- Energy Windowにより3 イベントを選び出す

$$\left\{ \begin{array}{l} E_1 > E_2 \\ 700 \text{ (keV)} < E_1 + E_2 < 900 \text{ (keV)} \\ E_1 < 500 \text{ (keV)}, E_2 > 300 \text{ (keV)} \end{array} \right.$$



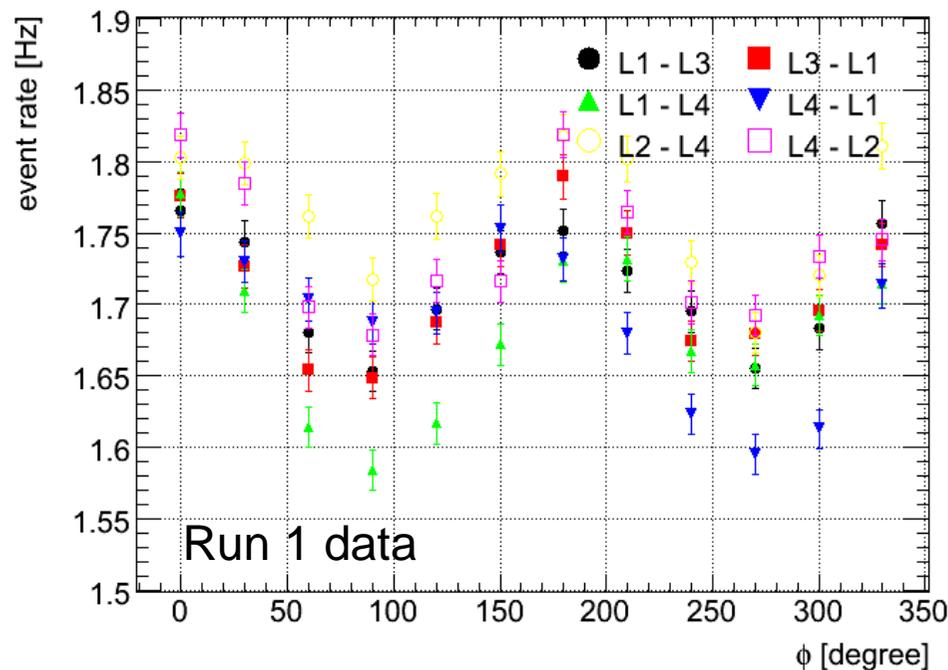
- Timing Windowによって $|1, \pm 1 \rangle$ 成分を取り出し、テンソル偏極度 $P_2=1$ にする

$$f(t) = c_0 + c_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + c_2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right)$$

accidental $|1, \pm 1 \rangle$ $|_+ \rangle$

イベントレート

- 検出器ペア、角度 ごとにEnergy WindowおよびTiming Windowをパスしたイベントレートを求める



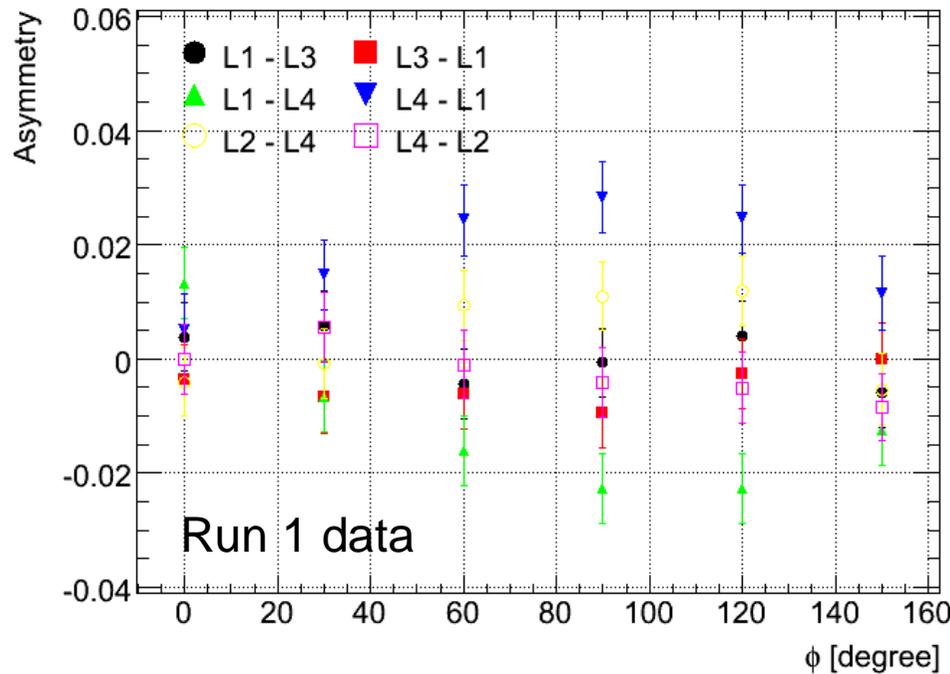
$$N = N_0(1 + C_{CP}Q)$$

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

- 180° 周期の角度依存性はPs生成部周辺の磁場システムによるコンプトン効果によって理解できる。この効果は ϕ と $\phi + 180^\circ$ で等しいので、この2点を用いて非対称度Aを求める

非対称度A

- $N(\phi)$ と $N(\phi + 180^\circ)$ から非対称度Aを求めると、以下のようなになる



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

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

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

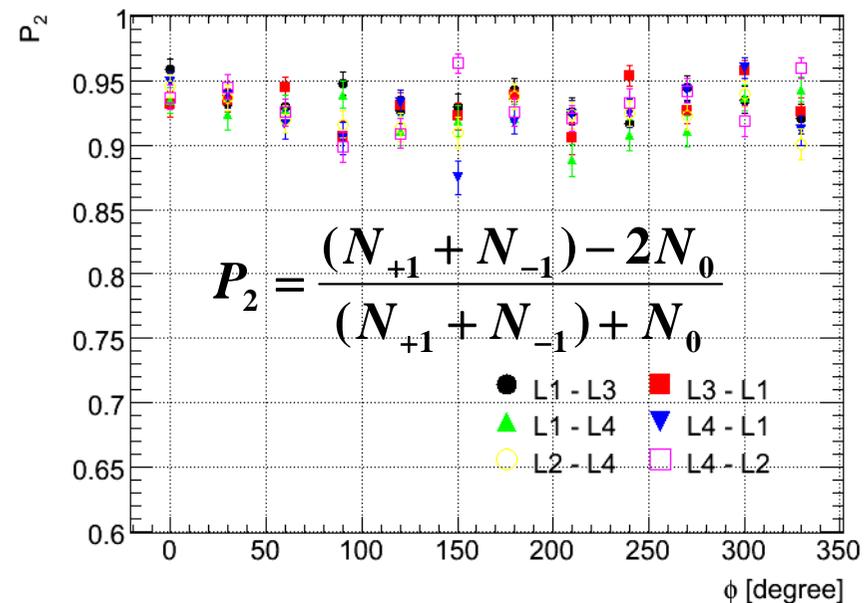
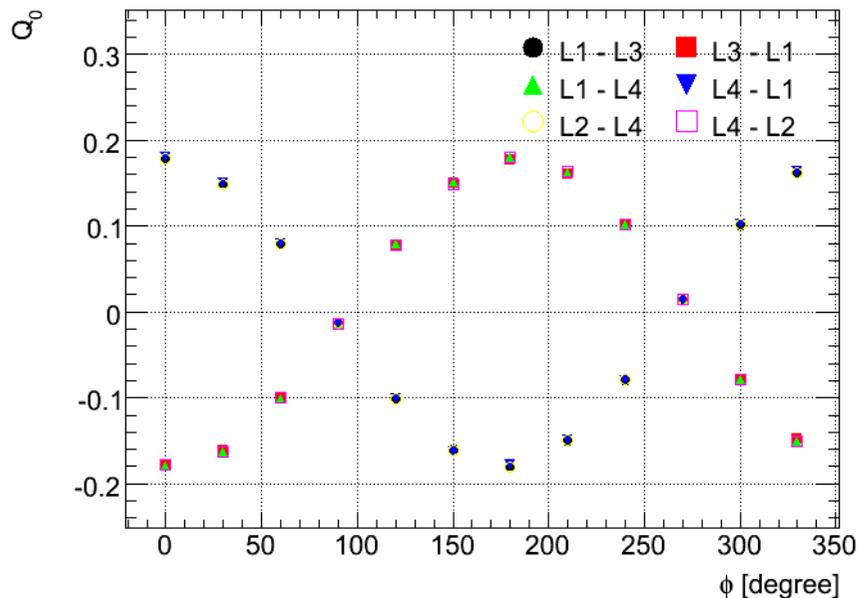
- (L1 - L4), (L4 - L1)ペア以外では0とconsistentな結果が得られている

- systematicなずれについては調査中だが、検出器を交換したrunにおいてもジオメトリカルに同じ位置にあるペアで生じているため、何らかのジオメトリカルな原因によると考えられる。とりあえず、 \cos の角度依存性ではなく、CP対称性の破れとは無関係であるのは明らか

Analyzing Power Q

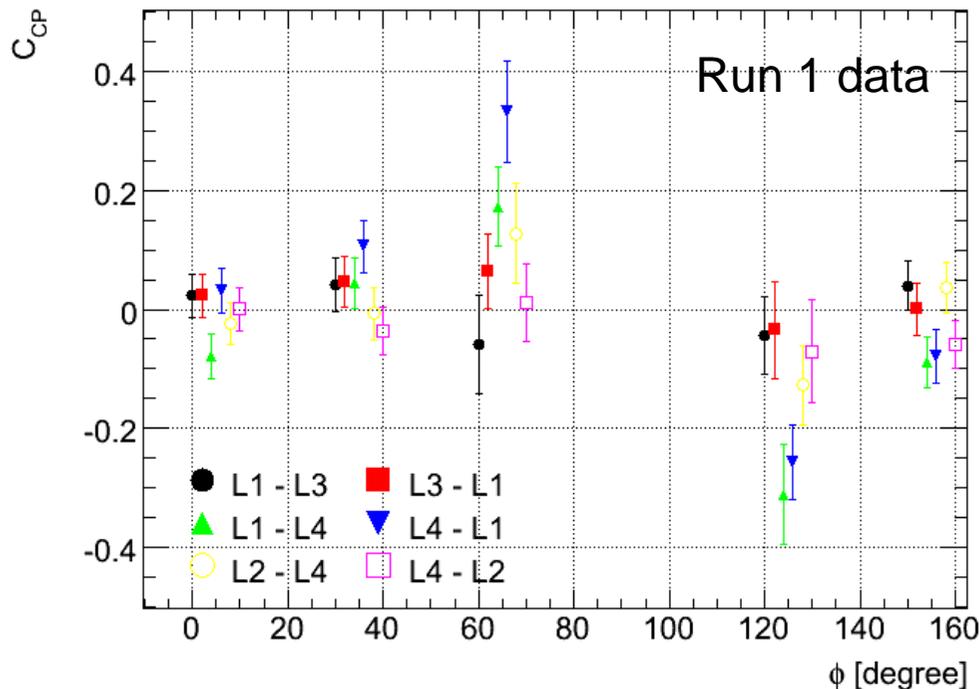
$$Q = P_2 \cdot \frac{1}{2} \sin 2\theta \sin \psi \cos \phi = P_2 \cdot Q_0$$

- P_2 はdecay rateのフィッティング結果から求まる
- Q_0 については 線検出器のアクセプタンス、Ps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で理想的な値に比べて減少するため、Geant4を用いて評価



CP対称性の破れの強さ C_{CP}

- 非対称度 A を analyzing power Q で割ることで CP 対称性の破れの強さを表すパラメータ C_{CP} が得られる。



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

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

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

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

- analyzing powerの小さい 160° 、 120° の点ではずれが大きい。 90° では analyzing power が 0 になってしまう。
- 最終的には全ての点の加重平均をとって C_{CP} を求める

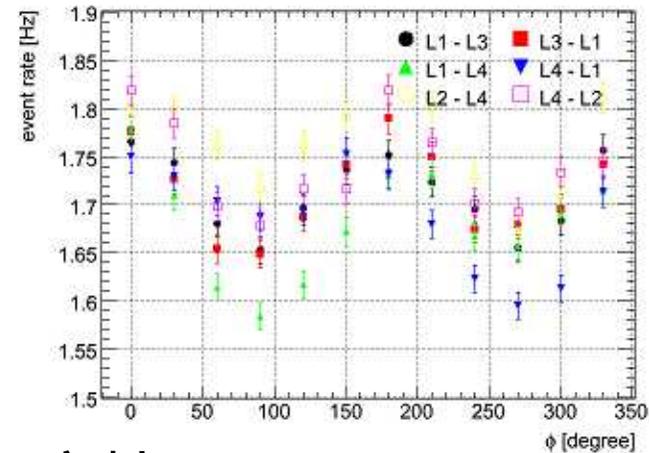
系統誤差および結果

- 主な系統誤差は非対称度Aに対するもので、原因としては

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° 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

$$\longrightarrow \Delta A = \pm 1 \times 10^{-4}$$



2. Ps生成領域における磁場の強さの不定性

Ps生成部における磁場の強さの平均値が角度依存すると、 $| \psi_+ \rangle$ 成分の寿命が変化し、Timing Windowをパスするイベント数が角度依存してしまう $\longrightarrow \Delta A = \pm 1 \times 10^{-4}$

- 系統誤差を含めた結果は、約3ヶ月間のデータ取得で

$$C_{CP} = 0.0011 \pm 0.0039 \text{ (stat.)} \pm 0.0011 \text{ (sys.)}$$

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対称性の破れを探索している
- これまで約3ヶ月間のデータを取得し、CP対称性が破れていない場合とコンシステントな

$$C_{CP} = 0.0011 \pm 0.0039 \text{ (stat.)} \pm 0.0011 \text{ (sys.)}$$

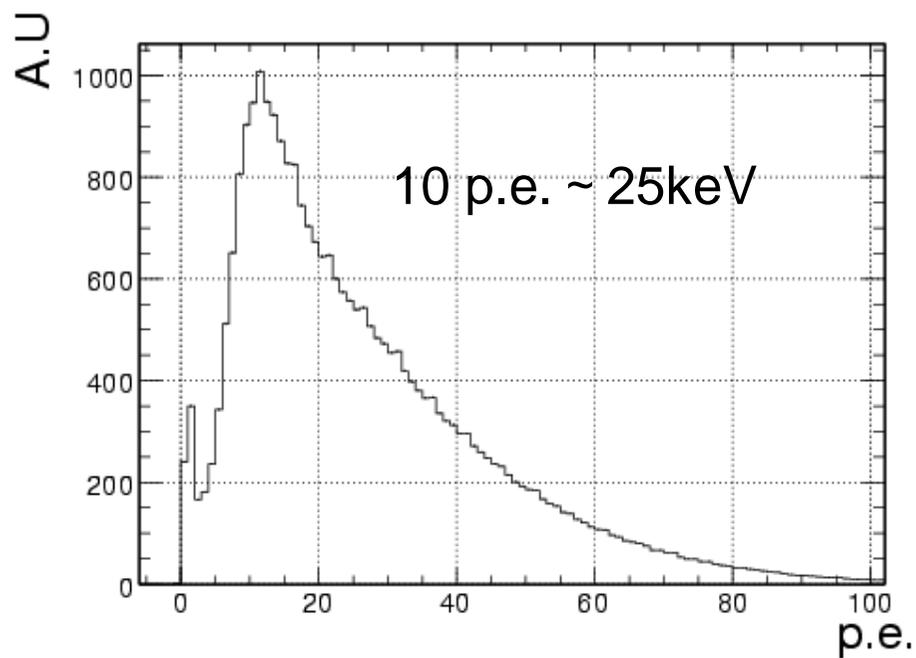
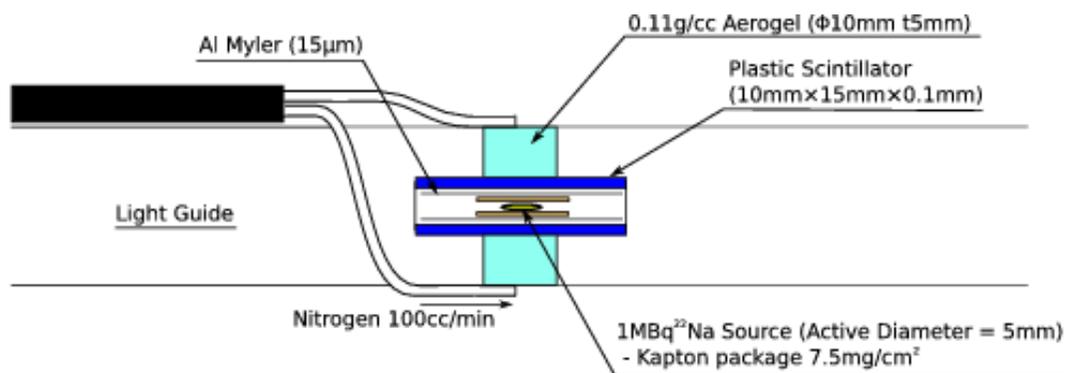
という結果を得た

今後

- Systematicなずれの理解。
- 現在エラーは統計がメイン。 2×10^{-3} を目指す

Backup Slides

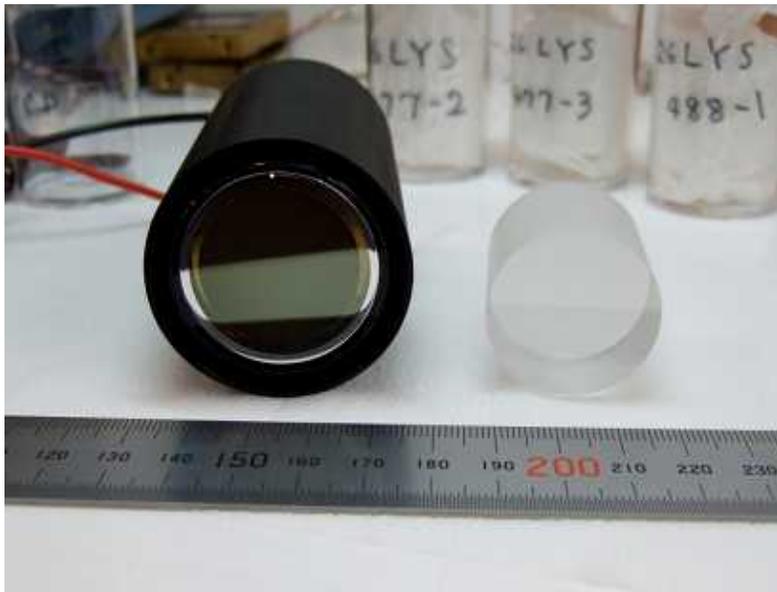
Ps生成部



- プラシンが鳴ったもののうち、
約40%がエアロジェル中で陽
電子が静止

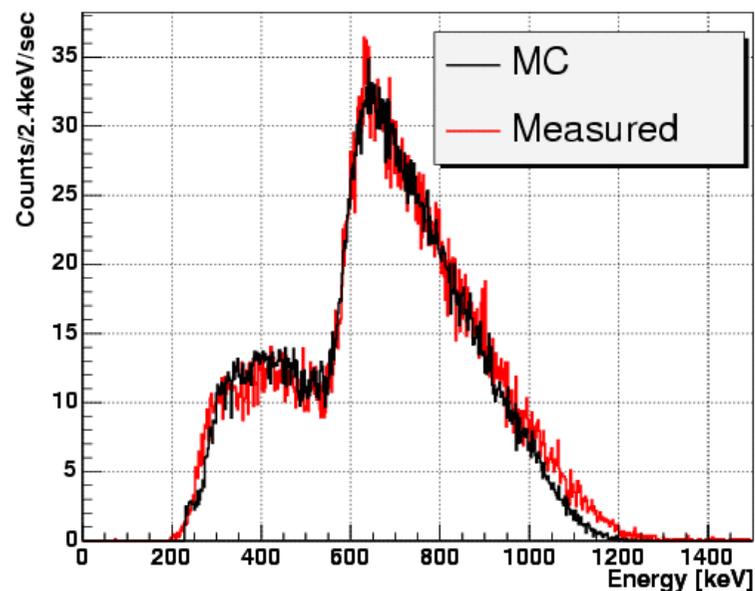
- このうち約15%がo- Ps に

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

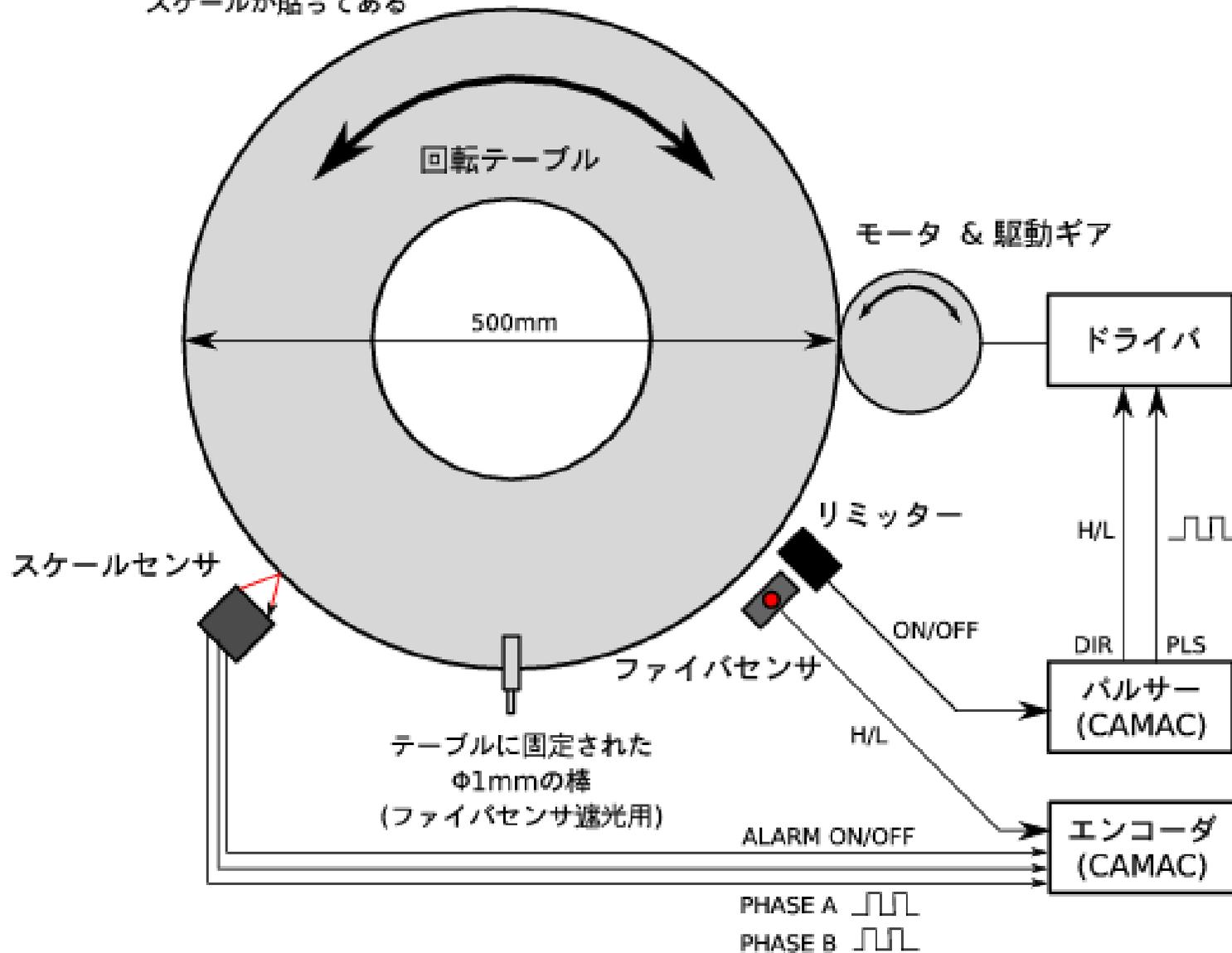


- ^{176}Lu が γ 線、 β 線を放出
- self triggerで5.6kHz
- プラシン、LYSO 2/4本のコインシデンスで大きく抑制される

回転テーブル

テーブル側面に0.5mm単位の
スケールが貼ってある

回転方向、速度制御可能



磁石



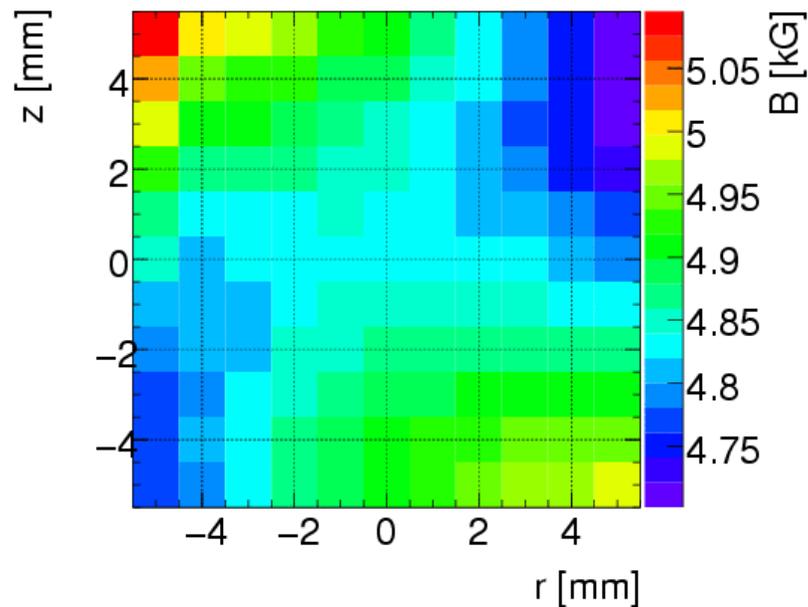
- 80mm × t50mmのネオジウム磁石を2つ使用

- $\theta = 30^\circ$

- Ps生成位置における平均磁場 $4.93 \pm 0.11 \text{ kG}$

- $| \uparrow_+ \rangle$ 成分の寿命は約23ns

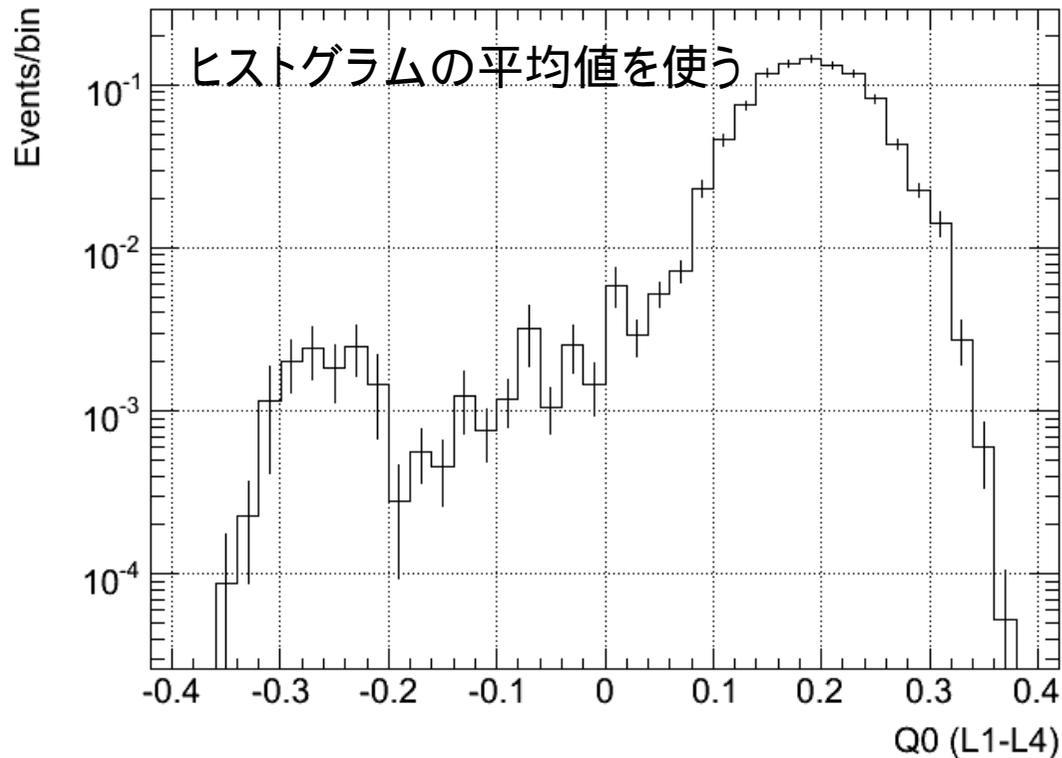
- PMT位置では100G程度



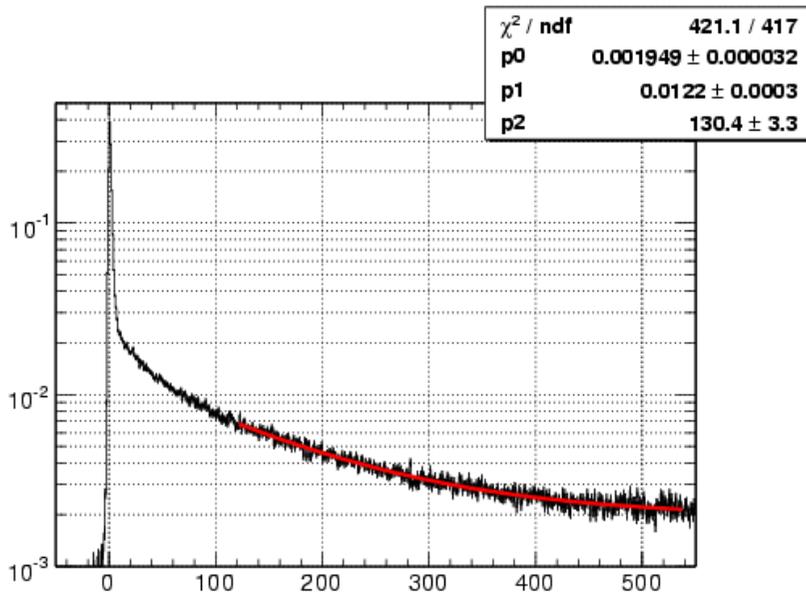
Analyzing Power Q

$$Q = P_2 \cdot \frac{1}{2} \sin 2\theta \sin \psi \cos \phi = P_2 \cdot Q_0$$

- Q_0 については 線検出器のアクセプタンス、 P_s 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で理想的な値に比べて減少するため、Geant4を用いて評価



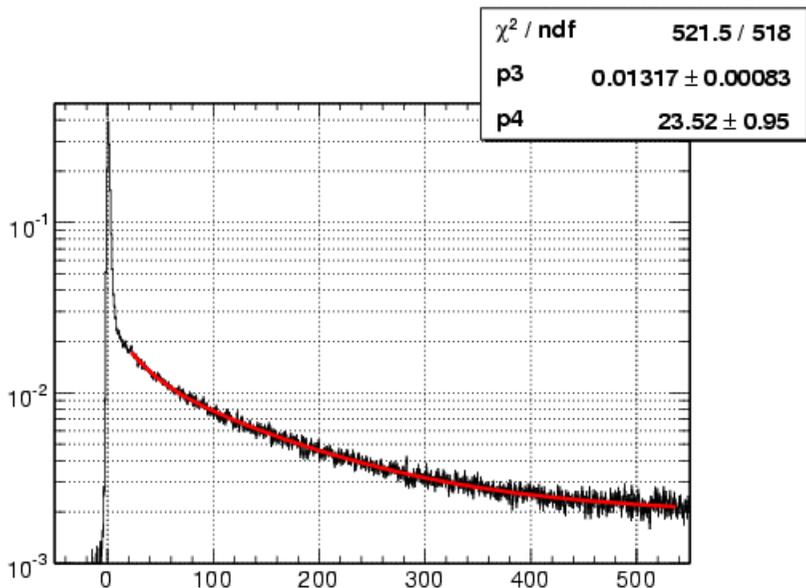
フィッティング



- まずはアクシデンタルおよび長寿命成分のみを決める

$$p_0 + p_1 \exp(-t / p_2)$$

- 130 ± 3 nsは窒素1気圧、エアロジェル0.1g/cc中の値とコンシステント

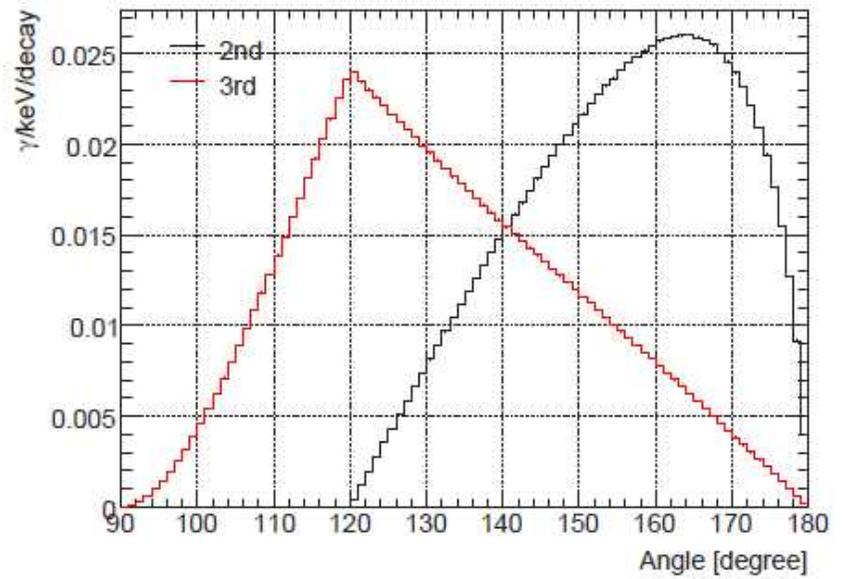
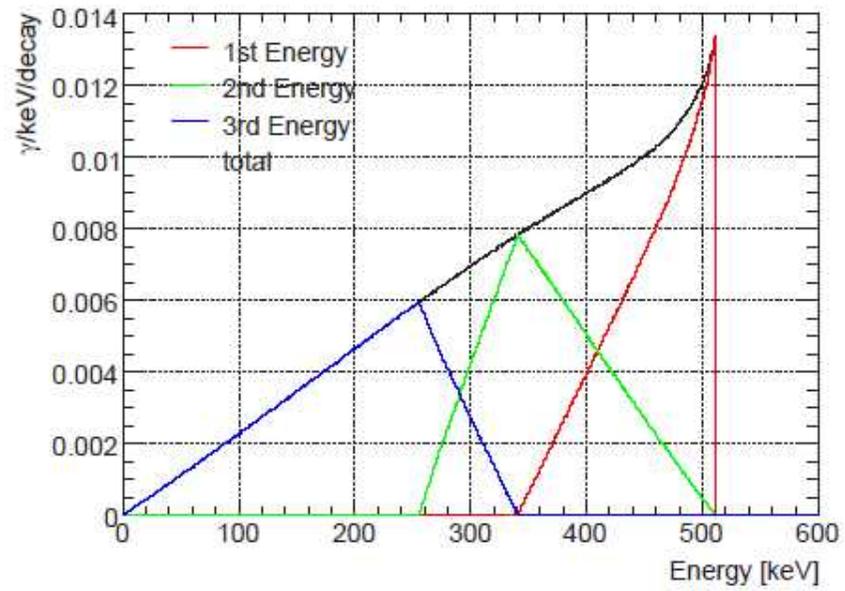


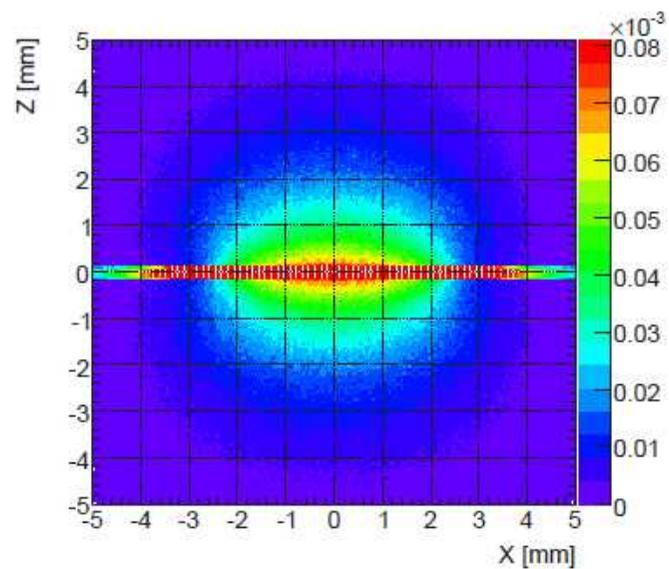
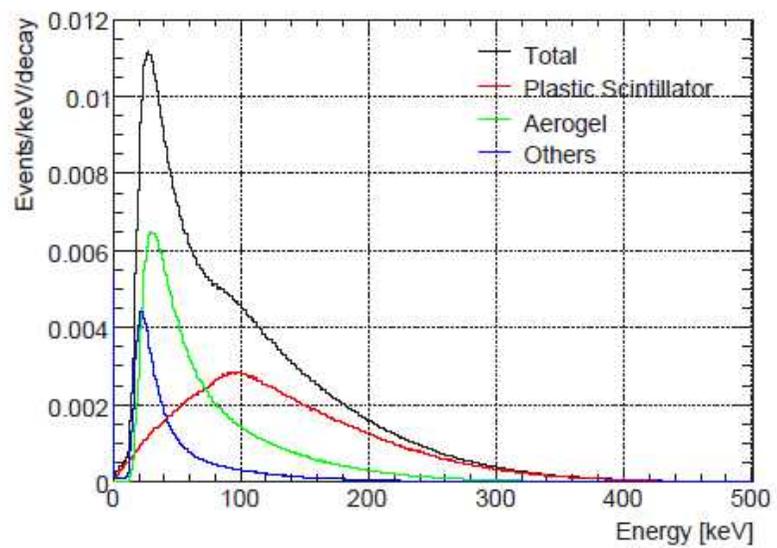
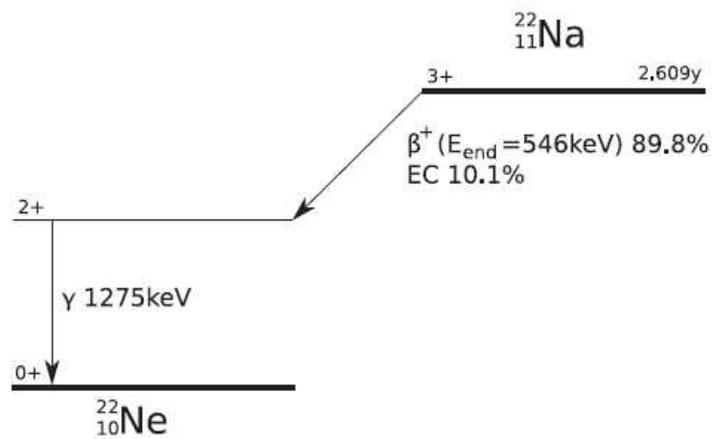
- 次にp0, p1, p2を固定してフィッティング

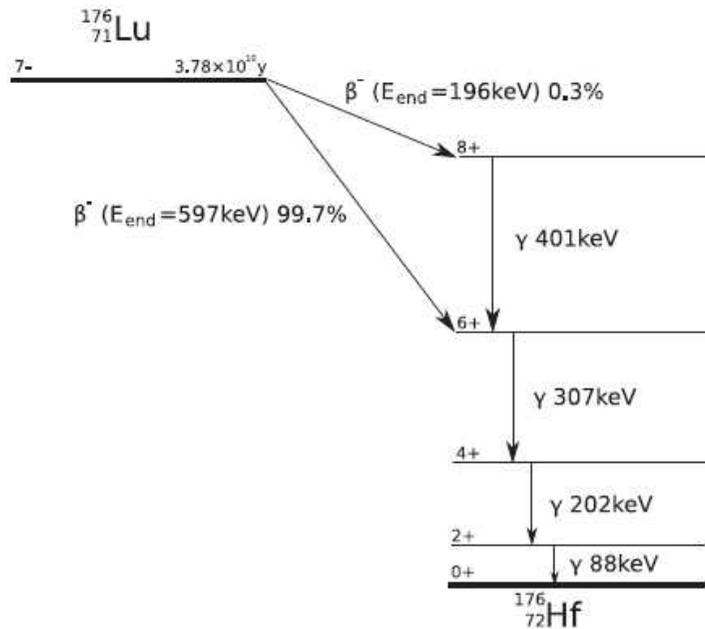
$$\underline{p_0 + p_1 \exp(-t / p_2)} + p_3 \exp(-t / p_4)$$

ここは固定

- $| \quad + \quad >$ の寿命 23.5 ± 1.0 nsは磁場から求まる値とコンシステント







	LYSO ($\text{Lu}_{1.8}\text{Y}_{0.2}\text{SiO}_5$)
Atomic Number (Z)	71
Density	7.1 g/cm^3
Emission Peak	420 nm
Light Output	32 photons/keV
Attenuation Length (511keV)	1.2 cm
Refractive Index	1.81
Decay Constant	40 ns

