

ポジトロニウムを用いた CP 対称性の破れの探索

難波俊雄、山崎高幸*、浅井祥仁*、小林富雄

東京大学素粒子物理国際研究センター

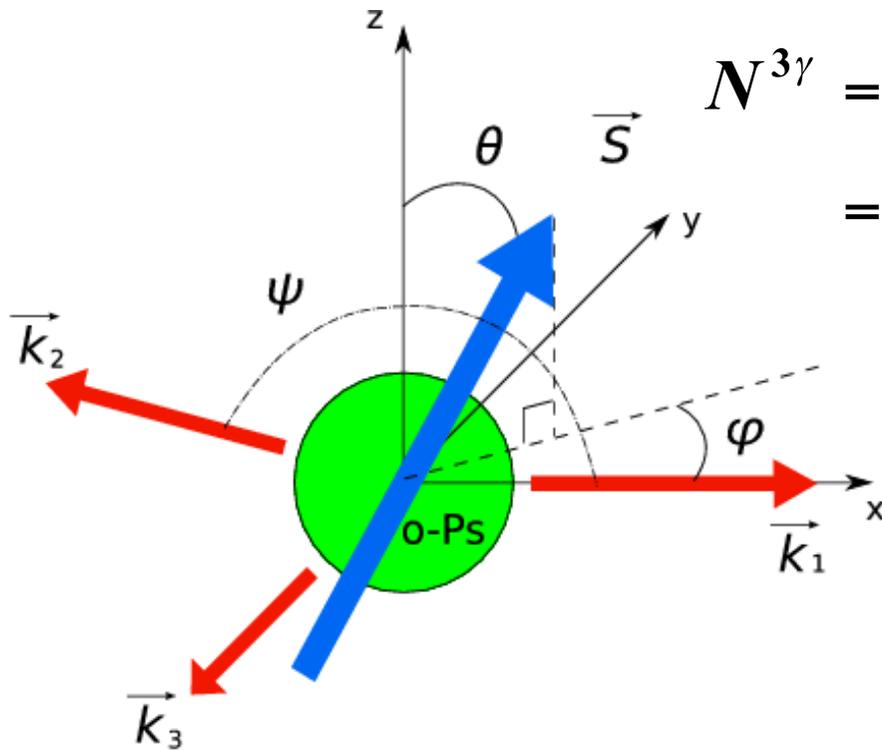
*東京大学理学系研究科物理学専攻

イントロダクション

- CP 対称性 (C 変換: 粒子と反粒子の交換、P 変換: 空間反転)
- 宇宙の物質/反物質のアンバランスを解く鍵?
- クォークセクター: 小林-益川理論
(K 中間子で $O(10^{-3})$ 、B 中間子で $O(10^{-1})$ の破れ)
- レプトンセクター: 未発見 (MNS 理論?)
(ニュートリノの将来大規模実験で検証)
- 宇宙のバリオン数を説明するためには、現在まで見つかってない新しい破れがどこかに潜んでいるはず
- ポジトロニウムでは、1.5% の感度までしか検証されていない!!

ポジトロニウムを用いての CP 対称性の検証

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



o-Psのテンソル偏極度

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

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

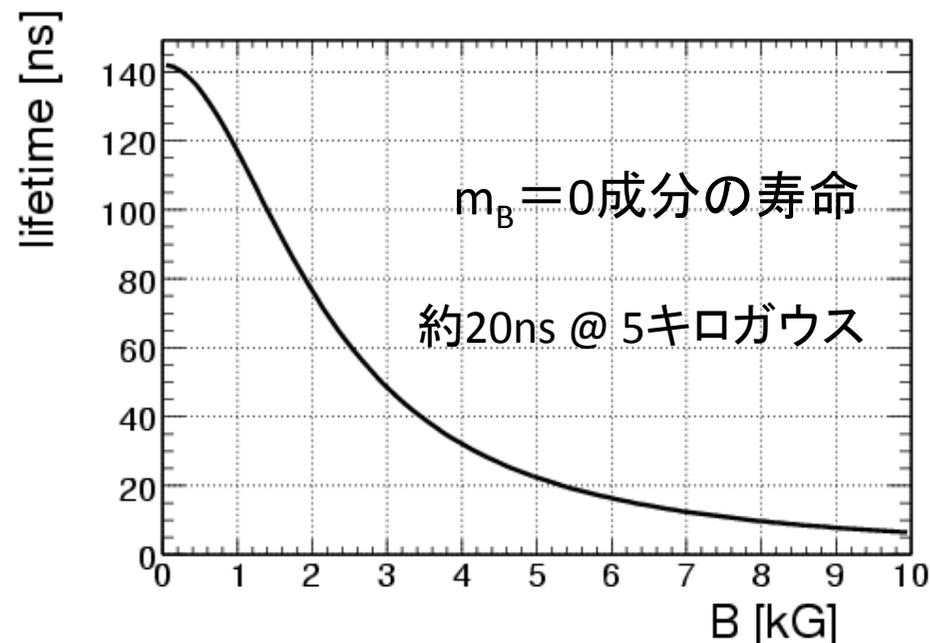
C even, P odd, T odd, CP odd, CPT even

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

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

ゼーマン効果を用いたテンソル偏極

- この実験で必要なのは、ベクトル偏極ではなく、テンソル偏極
- $m_B = \pm 1$ の成分を選択的に取り出せればよい ($m_B = 0$ を排除すればよい)



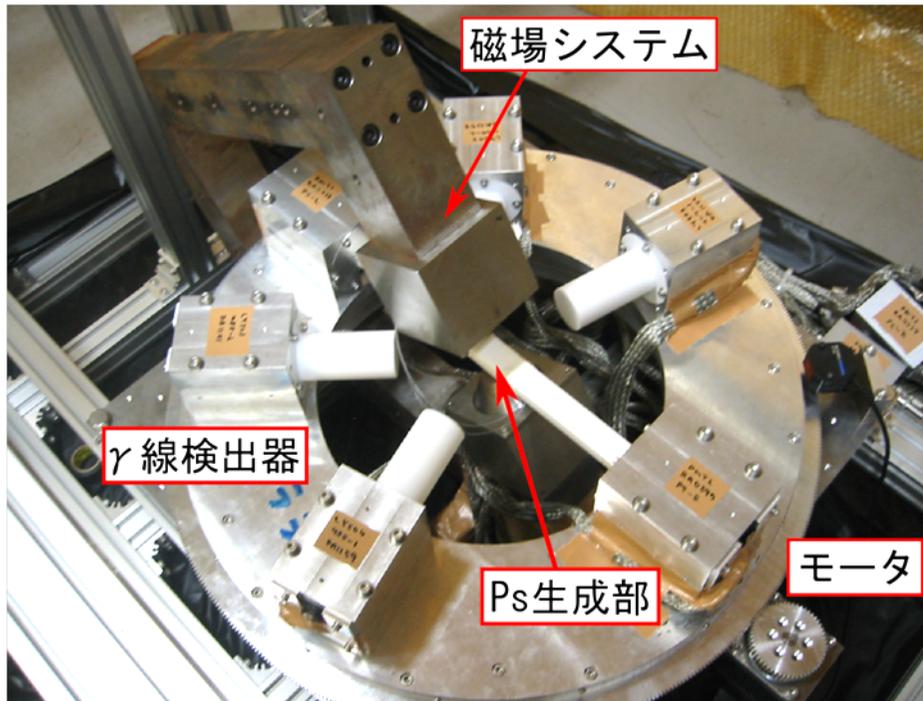
ゼーマン効果によるオルソとパラの混合を利用

$m_B = \pm 1$ 成分の寿命は142nsのままであるが、

$m_B = 0$ 成分の寿命は5kGの磁場で約20nsに減少

→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



テーブルの回転
により変化

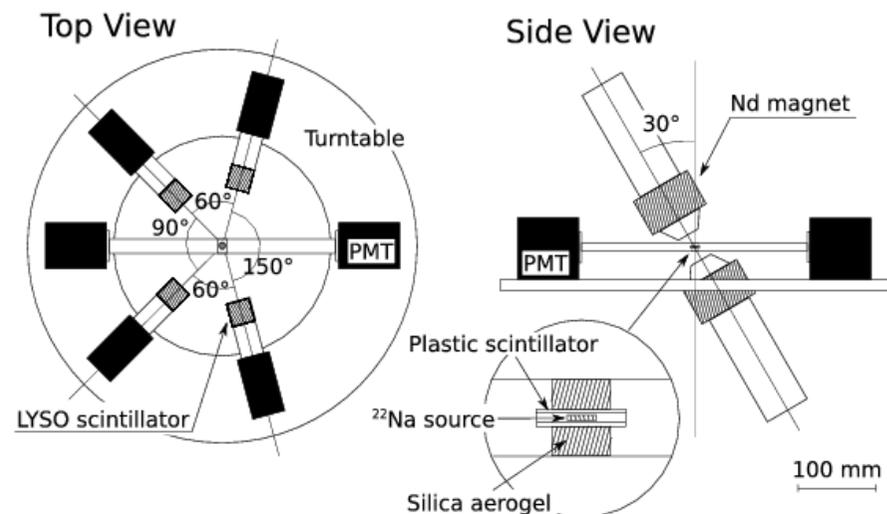
$$N^{3\gamma} = N_0^{3\gamma} (1 + C_{CP} Q)$$

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

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

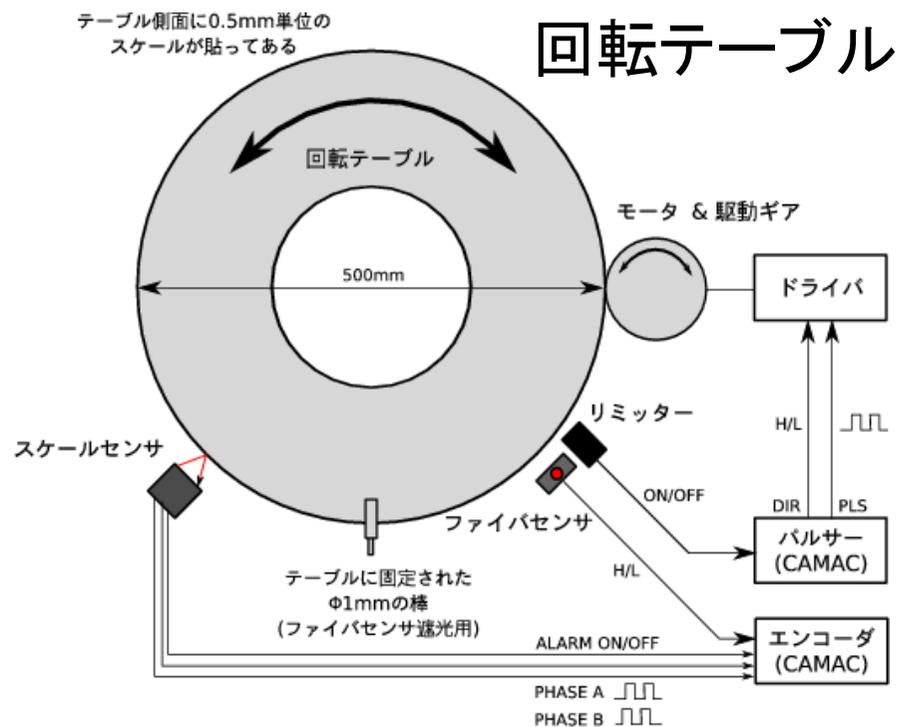
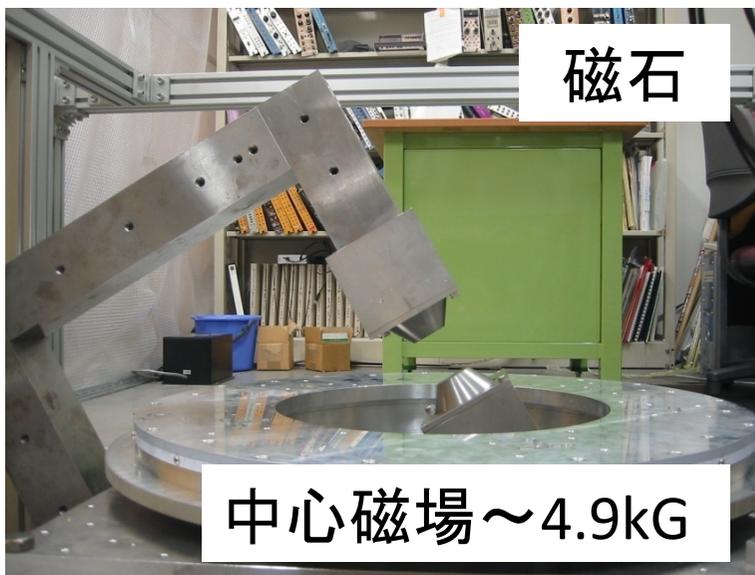
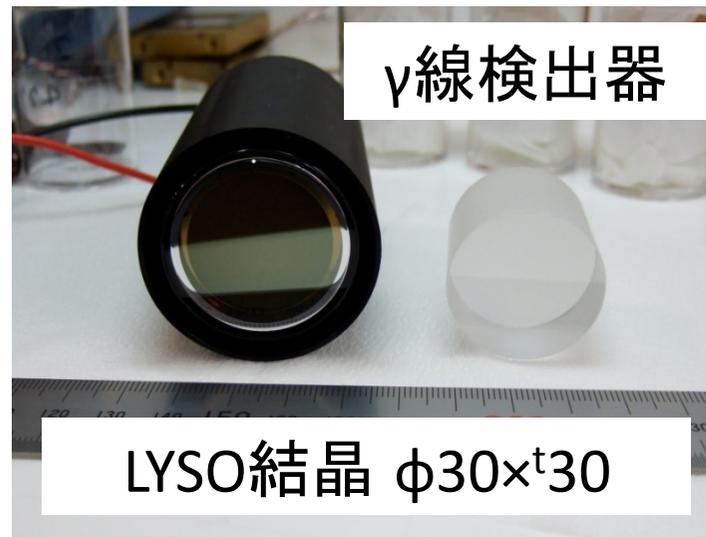
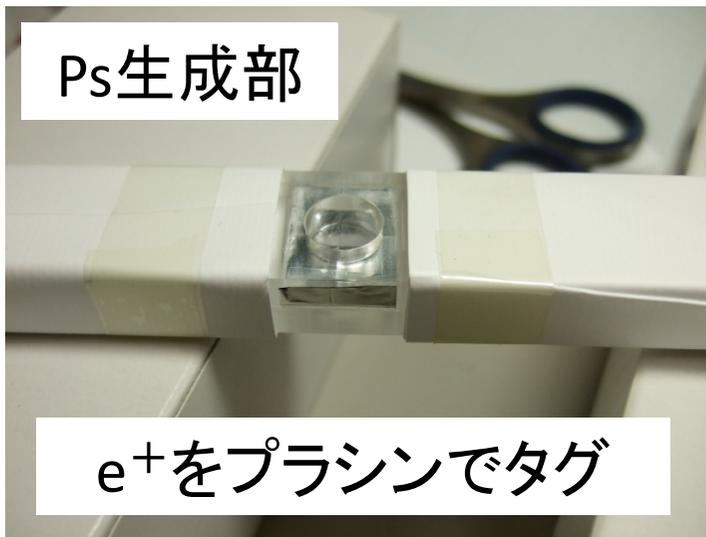
- 検出器は回転テーブル上に固定。回転させることで検出器の個体差等の系統誤差をキャンセルさせる

- 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



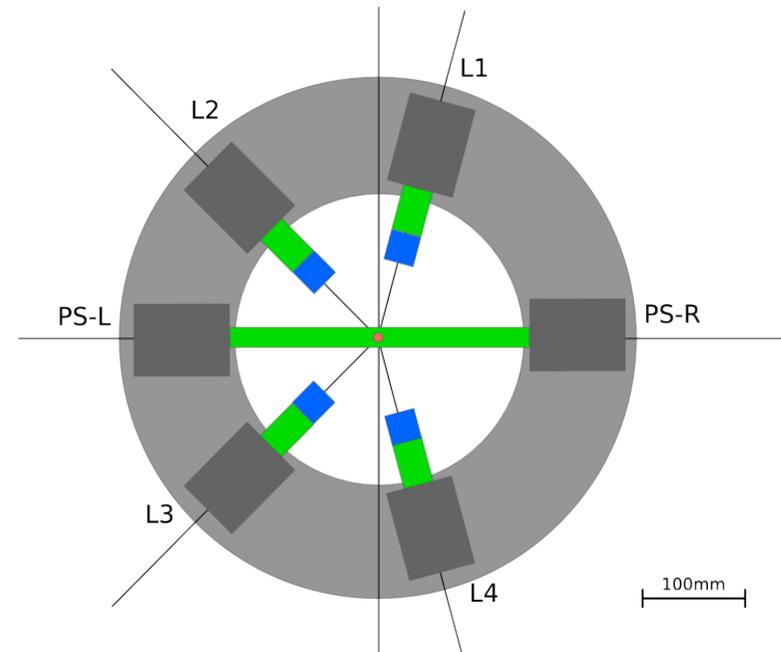
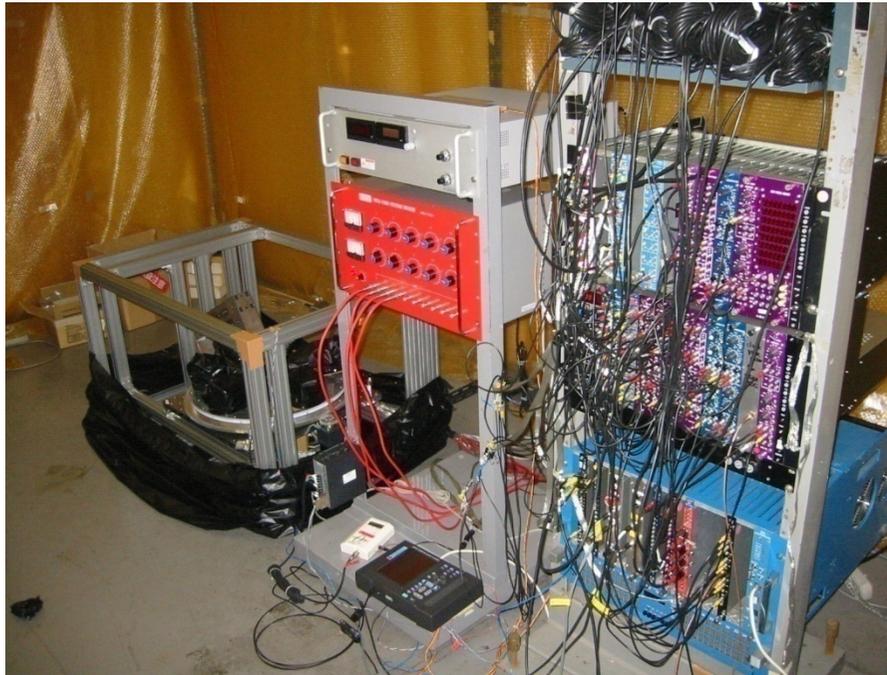
$\psi = 150^\circ$ のペアが3通りできる配置

実験装置



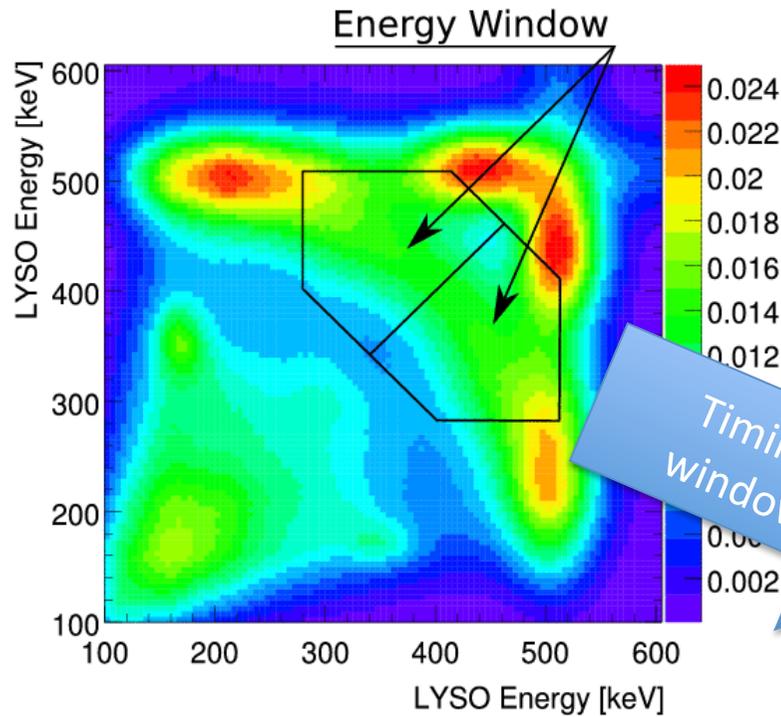
データ取得

- 検出器配置等を変えて5回Run。トータルで約半年間

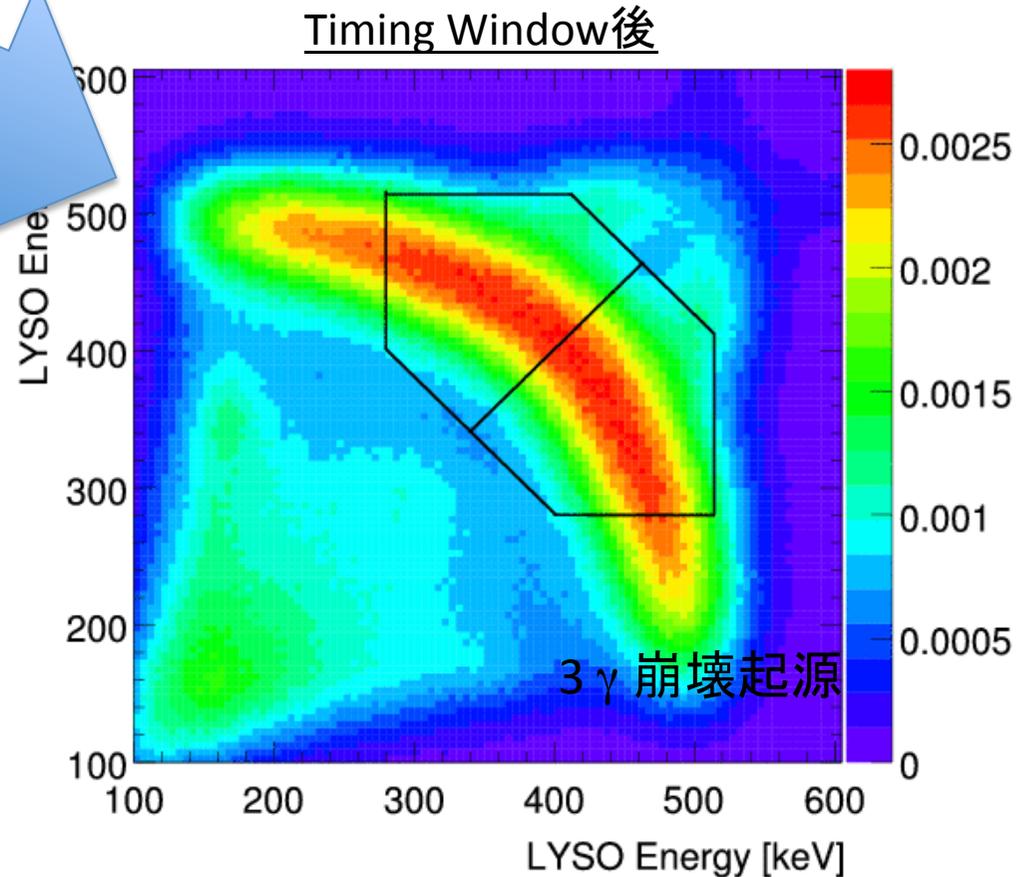


- プラシンが鳴ってから $-100\text{ns} \sim +600\text{ns}$ の間に $\geq 2/4$ 本の γ 線検出器が鳴るとトリガー (trigger rate = 1.3kHz)

γ 線のエネルギースペクトル



150°ペアでのエネルギー分布



- Energy Windowとして
 $680 < E_1 + E_2 < 920$ (keV)
 $280 < E_2 < E_1 < 511$ (keV)
を要求し、3 γ 崩壊を取り出す

タイミングスペクトル

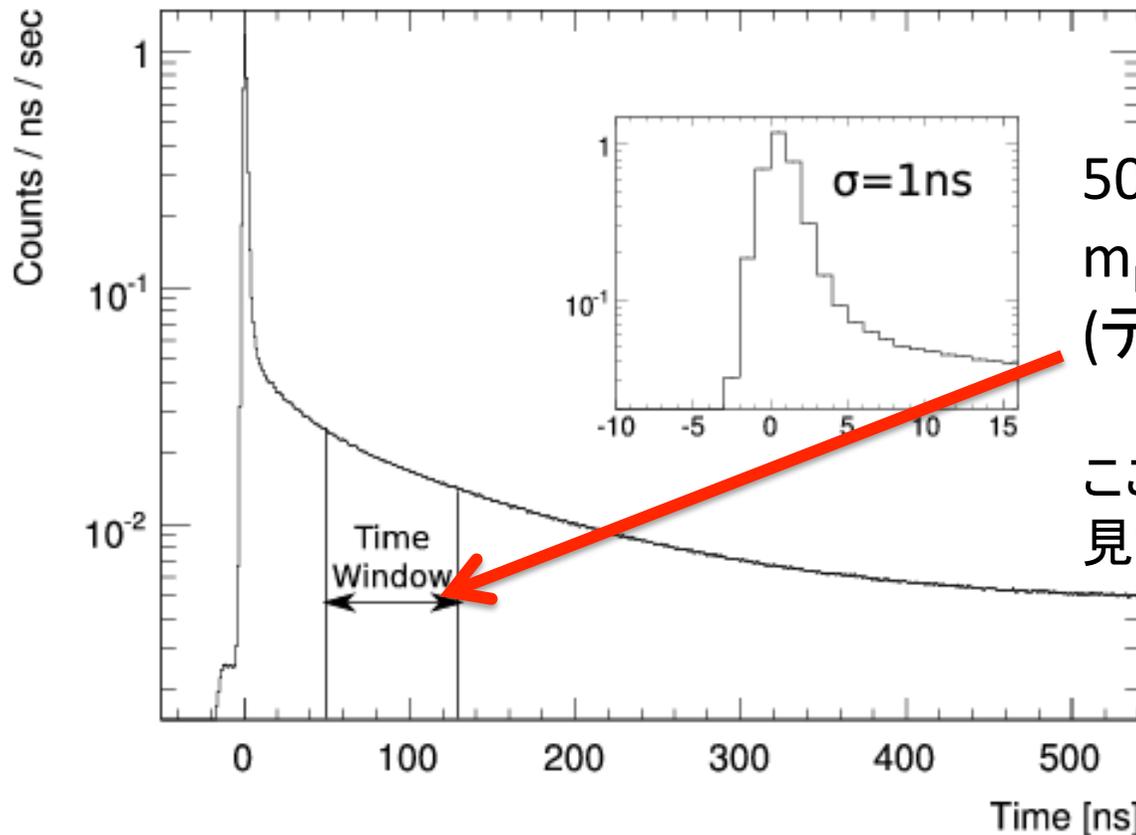
アクシデンタル + 短寿命成分 ($m_B=0$) + 長寿命成分 ($m_B=\pm 1$)

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

$p_2 = 127.0 \pm 0.3 \text{ ns}$
 $p_4 = 22.4 \pm 0.2 \text{ ns}$

エアロジェル0.1g/cc, 窒素1
気圧、磁場4.9kGのときに予
想される値とコンシステント

エネルギーウィンドウ内のイベントのタイミングスペクトル

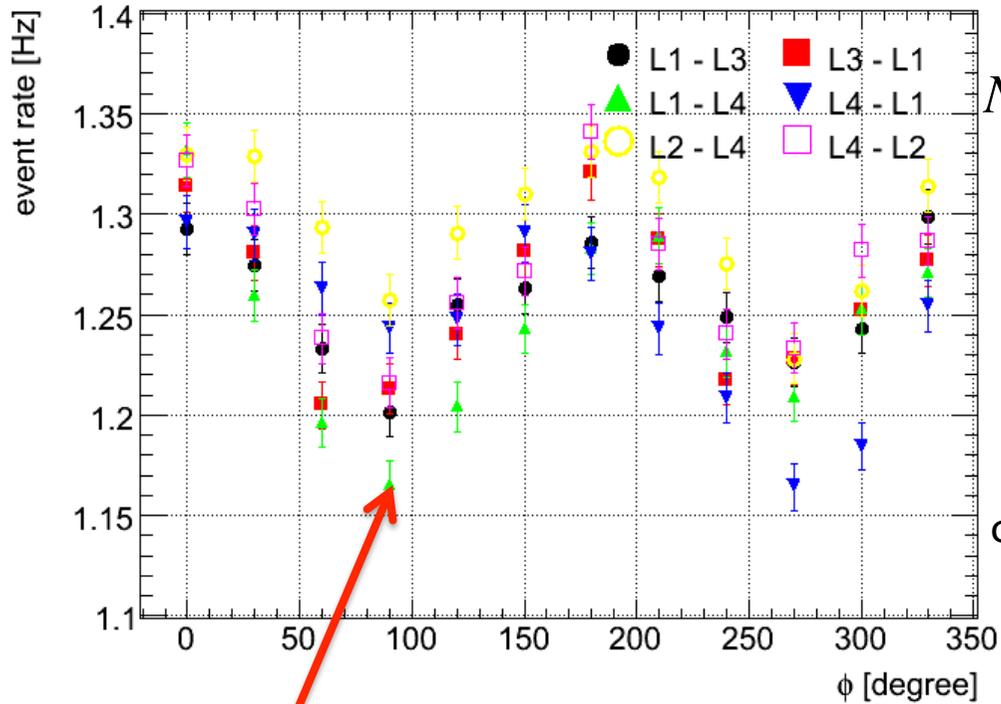


50~130ns のタイミングに
 $m_B=0$ はほとんど含まれない
(テンソル偏極度 $P_2 \sim 1$)

ここからアクシデンタルを引く事で、
見たいイベントレートを算出

イベントレート

各検出器ペアでのレートの角度依存性

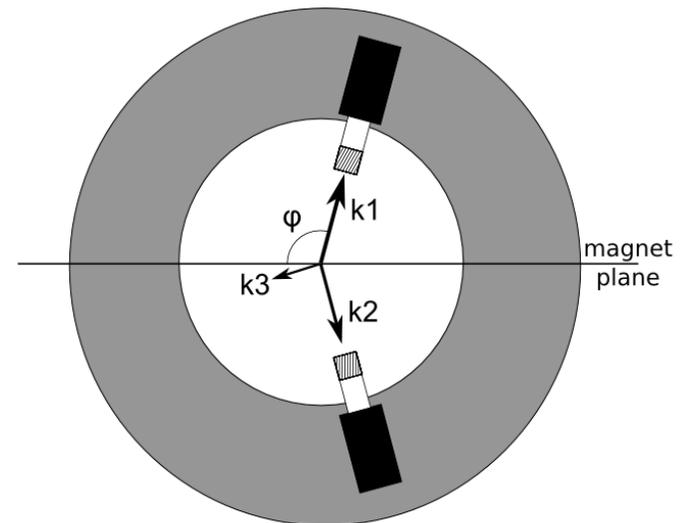


$$N^{3\gamma} = N_0^{3\gamma} (1 + C_{CP} (\vec{S} \cdot \vec{k}_1) \cdot (\vec{S} \cdot \vec{k}_1 \times \vec{k}_2))$$

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

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

ϕ : 回転テーブル上で、k1 検出器が
磁場のテーブル面成分に対して成す角度



- レートに ϕ 依存性！
- CP の破れ? あるいは、他の要因??
(磁石によるコンプトン散乱等)

非対称度A

ϕ が 180° ずれた位置にいる自分は、全く反対の CP の破れを持つはず

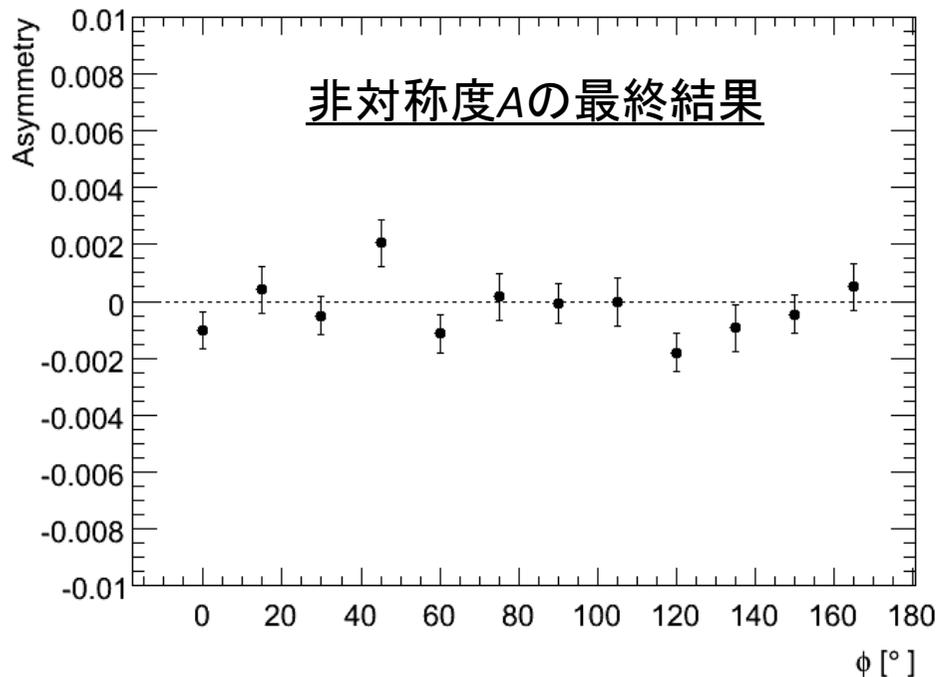
→ 180° ずれた自分とさっ引く事で、CP の効果のみを抽出

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

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

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

さらに、同じ位置関係を持つ検出器ペアを平均して、系統誤差を除去



• 角度に依存せず、非対称性が無くなった

($0^\circ \sim 180^\circ$ で積分しても 0)

• あとは、 Q で割れば、 C_{CP} の値が求まる

Analyzing Power Q

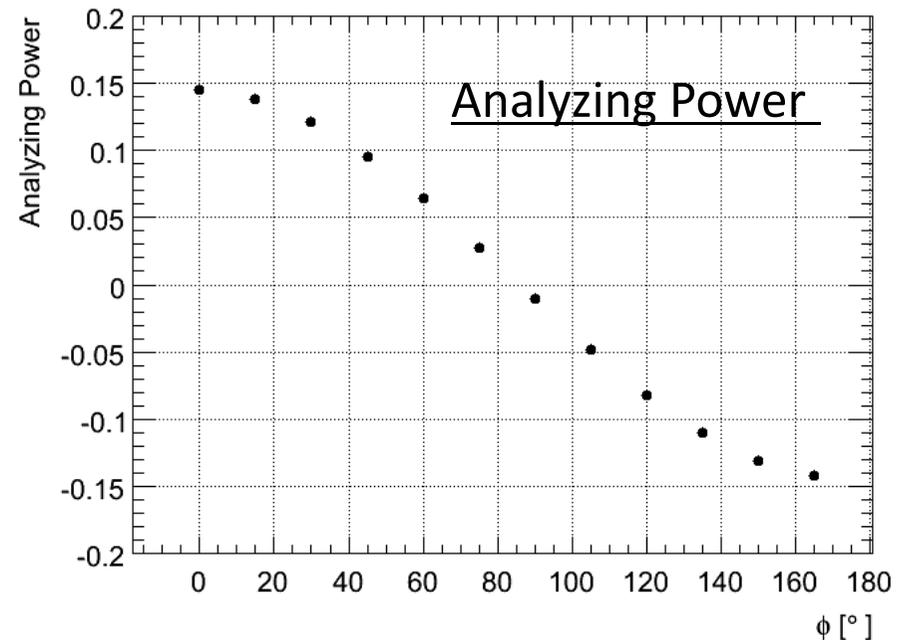
C_{CP} に対する感度は、テンソル偏極度 P_2 と
検出器配置で決まる Q_0 によって決まる

$$Q = P_2 \cdot \frac{1}{2} \sin(2 \times 60^\circ) \sin 150^\circ \cos \phi = P_2 \cdot Q_0 \cdot \cos \phi$$

- $P_2 = \frac{N_{+1} - 2N_0 + N_{-1}}{N_{+1} + N_0 + N_{-1}} = 0.87$

主に $m_B=0$ 成分の混入で決まる

- 正確な Q_0 は、シリカエアロゲル/検出器の大きさ/検出器のレスポンス等を加味して、Geant4 により計算



- 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 $\longrightarrow C_{CP} = 0.0013 \pm 0.0021$ (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を求める際、2点間の角度差が 180° でないと、磁石でのコンプトン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 $C_{CP} = 0.0013 \pm 0.0021$ (stat.) ± 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)