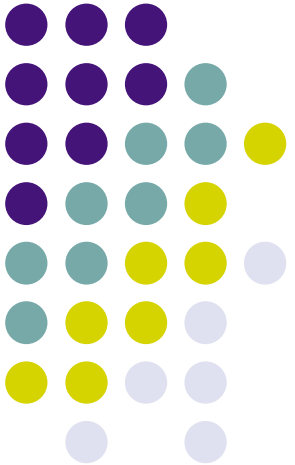
o-Ps を用いた CP の破れの探索 I

-概要と検出器設計-

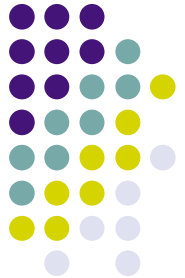
難波俊雄

富島佑允、西原一幸、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



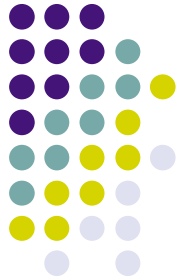
CP の破れ?



世の中、CP は破れている

- クォークセクター (CKM 行列):
  - B、K の物理 ~10^{-3}
- レプトンセクター (MNS 行列):
  - まだ未確認、ニュートリノの人たち頑張れ

CP の破れ?



世の中、CP は破れている

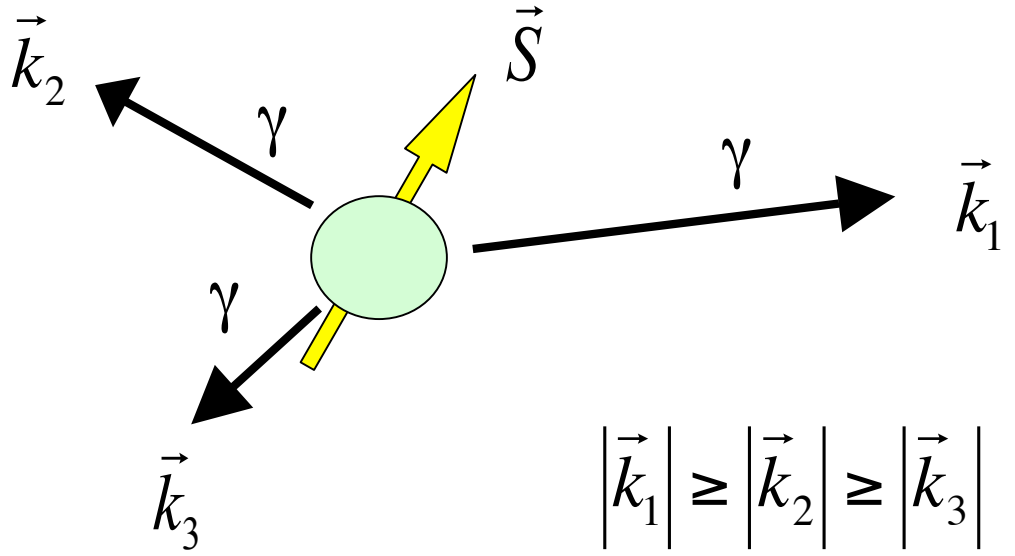
- クォークセクター (CKM 行列):
  - B、K の物理 ~10^{-3}
- レプトンセクター (MNS 行列):
  - まだ未確認、ニュートリノの人たち頑張れ

- 荷電レプトンで何とか頑張れないか?
- o-Ps を使った測定: 2% までしか検証されてない
  →10^{-3} まで頑張ろう

o-Ps の 3 体崩壊を利用した CP 測定

- o-Ps のスピンの向きと、崩壊時に放出される 3 本のガンマ線で、CP odd なパラメータ

$\left(\hat{s}\cdot\hat{k}_1\right)\left(\hat{s}\cdot\hat{k}_1\times\hat{k}_2\right)$: 分布に偏りがあれば CP 保存



$$\left|\vec{k}_1\right| \geq \left|\vec{k}_2\right| \geq \left|\vec{k}_3\right|$$

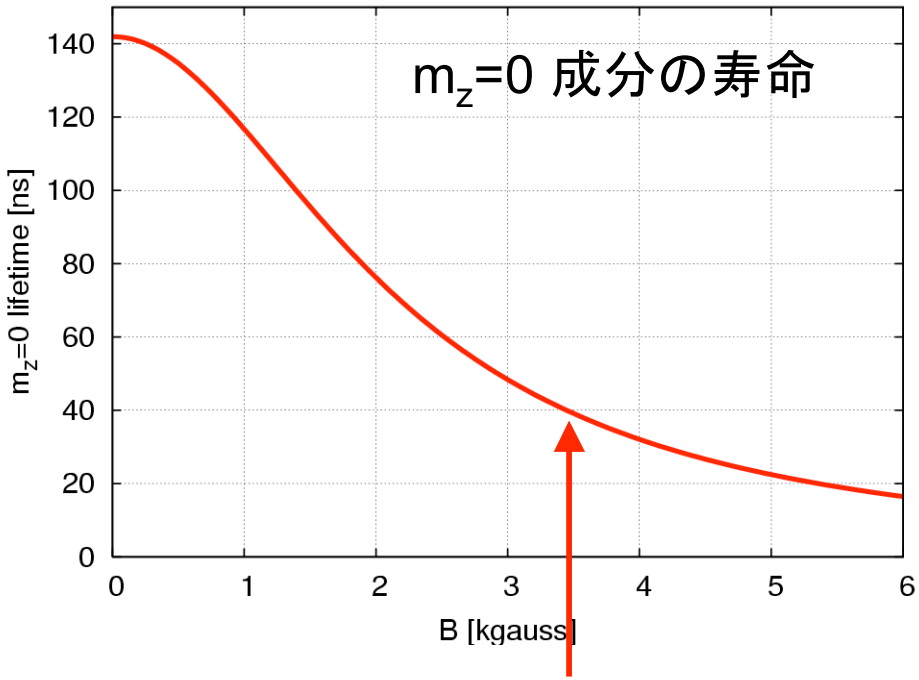
o-Ps のスピンをどうするか

$$\left(\hat{s}\cdot\hat{k}_1\right)\left(\hat{s}\cdot\hat{k}_1\times\hat{k}_2\right)$$

- 磁場の利用 (~3.5kgauss)
- ただし、スピンが 2 回出てくるので、ベクトル偏極である必要はない (テンソル偏極)
- $m_z=\pm1$ の成分を選択的に取り出してやる
  ($m_z=0$ のものを取り除いてやる)
  ⇒オルソ-パラミキシングの利用

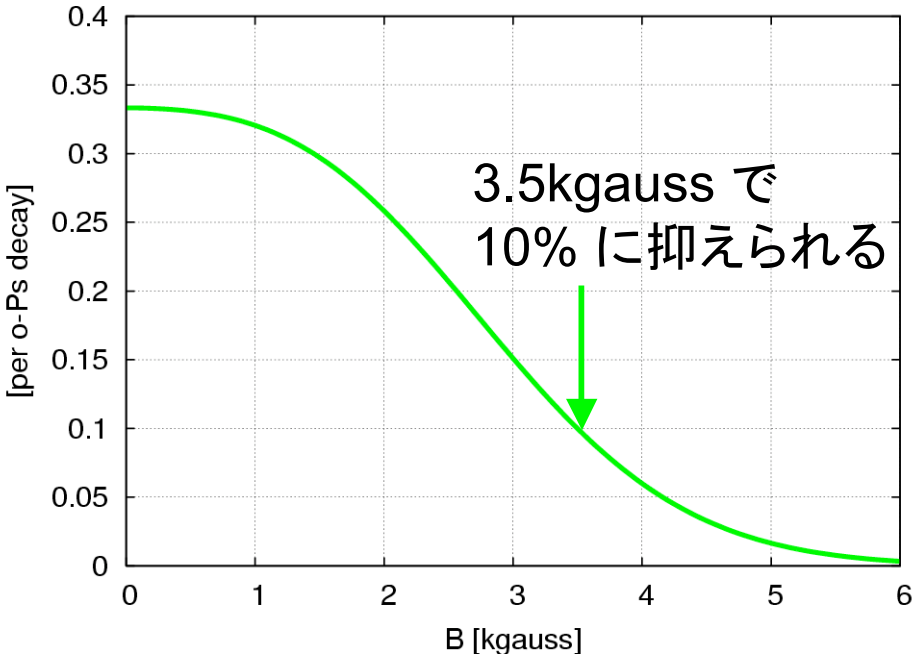
オルソ-パラミキシング

- o-Ps に磁場をかけると、m_z=0 のものは p-Ps とミキシング
  ⇒ 寿命が短くなる
- Timing window によって除去可能

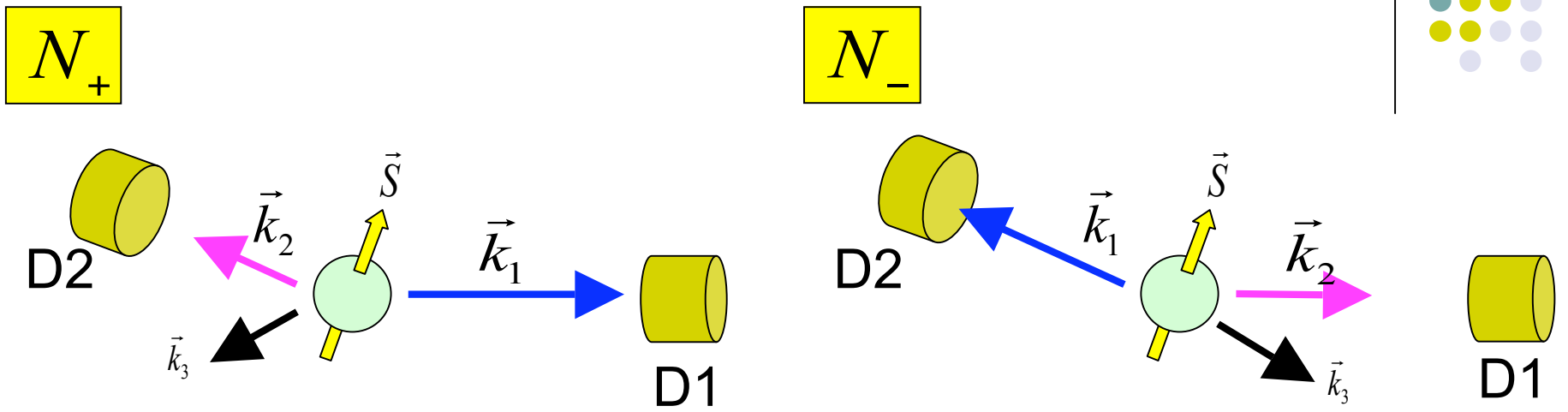


3.5kgauss で 40ns

100-270ns の
window への混入率



一方、ガンマ線の検出は簡単?

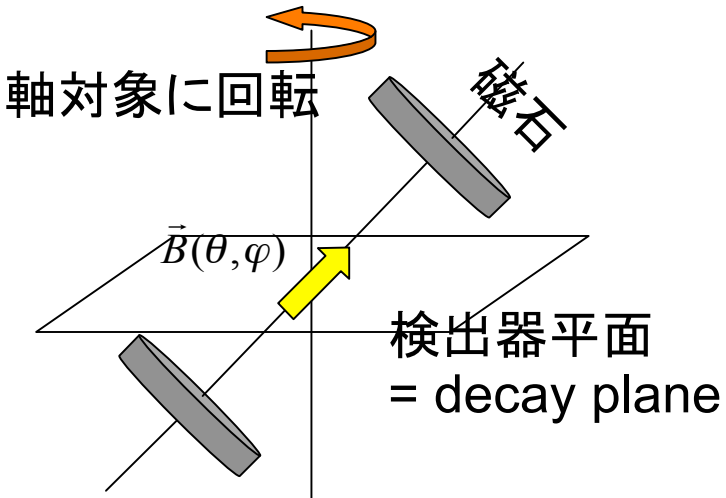


$$\left(\hat{s}\cdot\hat{k}_1\right)\left(\hat{s}\cdot\hat{k}_1\times\hat{k}_2\right)$$

- 同じ検出器を 2 個置くだけ
- スピンの向きを D1 と D2 の真ん中にしてやる
  (赤い項を 2 つの検出器に対してそろえる)
- 後は、k_1 と k_2 が飛び込んで来るのを待てばよい
  (どっちが大きなガンマ線をとらえるかで、緑の項の符号が決まる)
- N_+ と N_- の差がそのまま CP の破れに

実は、それほど簡単でもない

- 10^{-3} の感度のためには、D1 と D2 の geometry が ~μm の精度で一致していなくてはならない
- 磁場を回転させることにより、N_+/N_- の自分自身の変化を測定する



$$\left(\hat{s}\cdot\hat{k}_1\right)\left(\hat{s}\cdot\hat{k}_1\times\hat{k}_2\right)$$

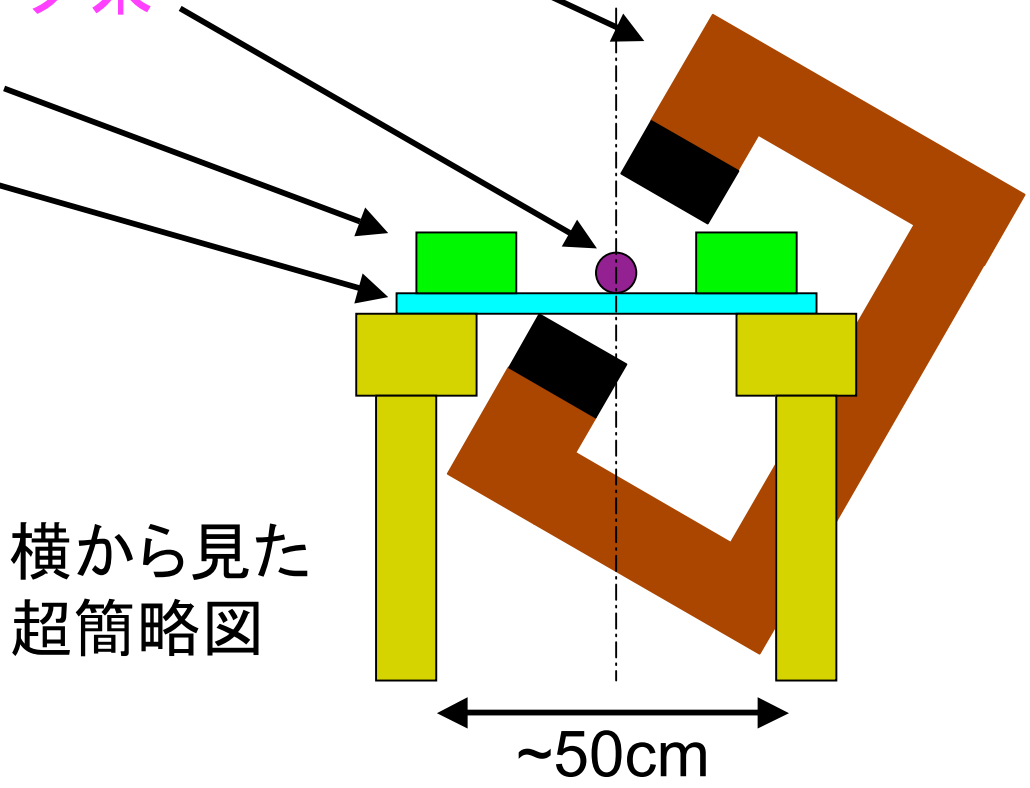
前の項だけが変化

10^{-2} の CP 破れを仮定した場合

自分自身とのさっぴきにより、システマティックエラーをなくす

検出器設計

- 永久磁石およびリターンヨーク
- o-Ps 生成/タギング系
- ガンマ線検出系
- 回転ステージ

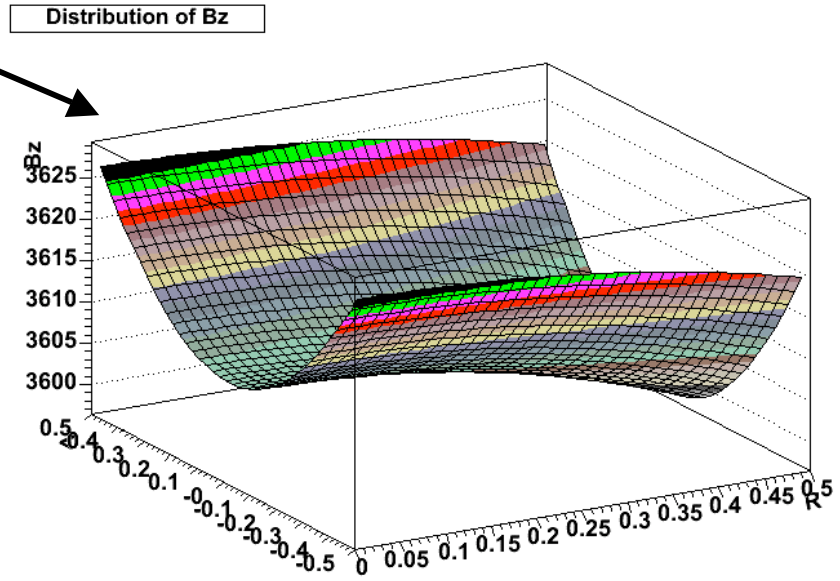


永久磁石およびリターンヨーク

- 検出器平面に 30° の角度で磁場を印可
- 3.5 kgauss: 市販のネオジム磁石で十分可能
- ただし、巨大なリターンヨーク (~50kg) が必要

- 磁石を回転させるのではなく、検出器を回転させる (~毎時 1 回転)

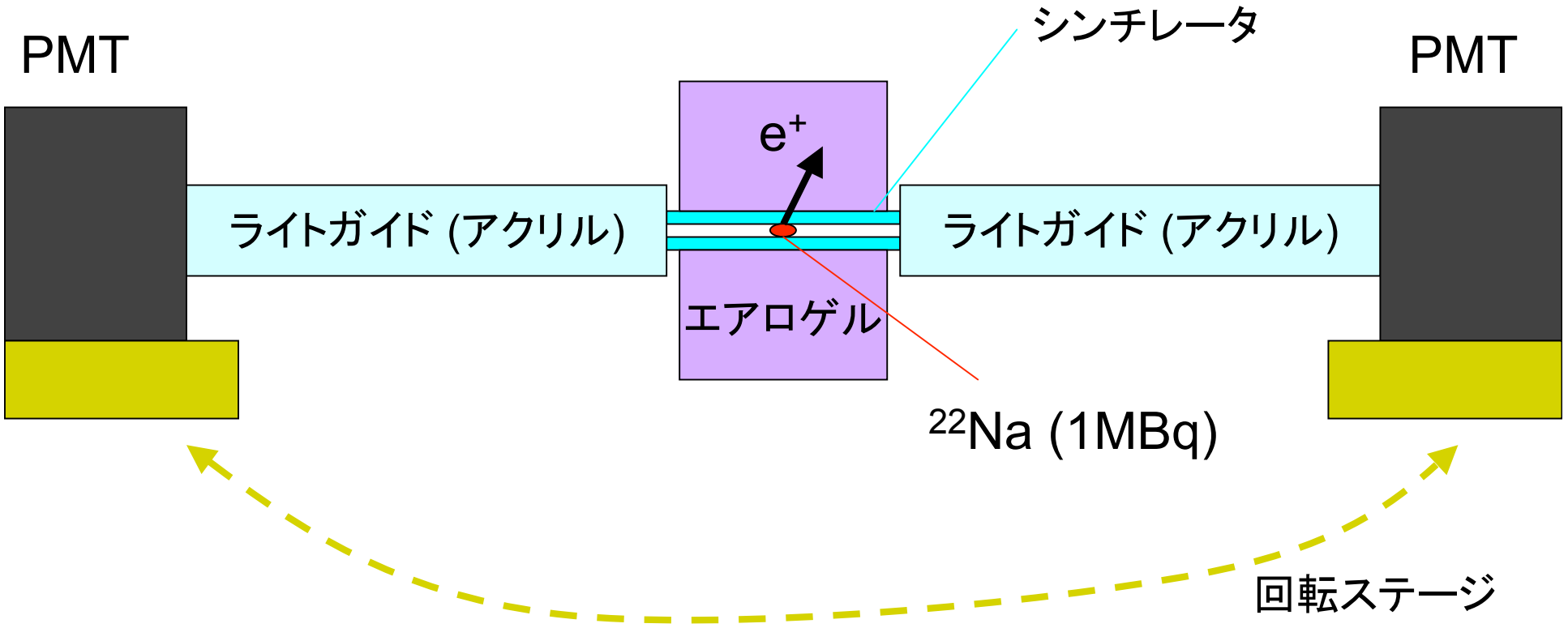
直径:8cm×長さ: 5cm の
永久磁石 2 個
7cm 離して置いた時の中心磁場
(リターンヨーク付き)



中心磁場 3.6kgauss
半径 5mm 以内で 0.5% の一様性

o-Ps 生成/タギング系

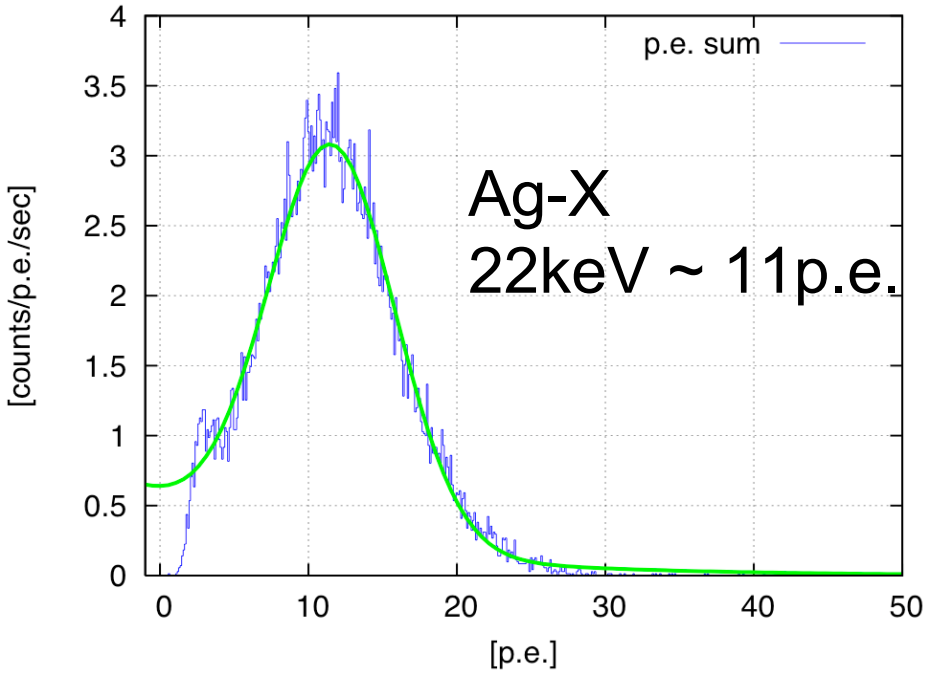
- ^{22}Na 線源 (1MBq) を 100μm のプラシンで挟み込む
- ライトガイドで回転ステージ上の PMT まで導いてコインシデンス
- e^+ は外側のエアロゲルで止めて Ps 生成



おもちゃで光量テスト

プラスチックシンチレータ
(^{t}100μm)

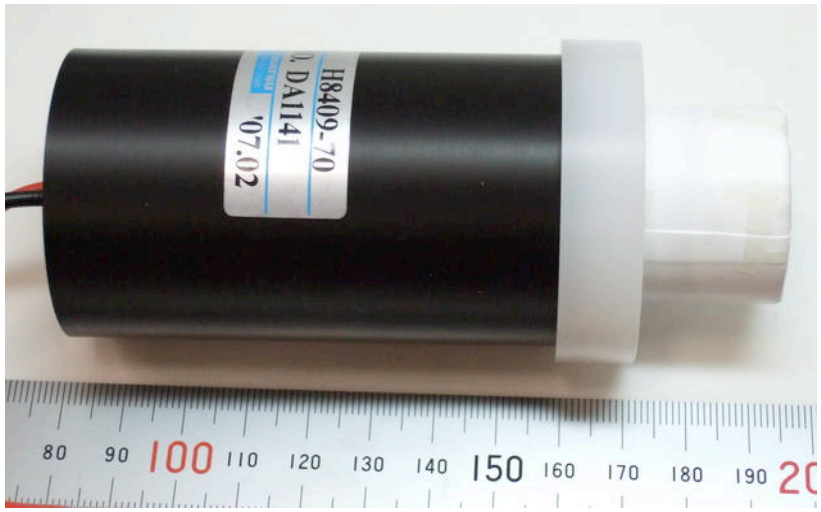
- 100μm のプラスチックシンチレータに長さ 30cm のライトガイドを接続
- ^{109}Cd からの Ag-X 線で光量確認

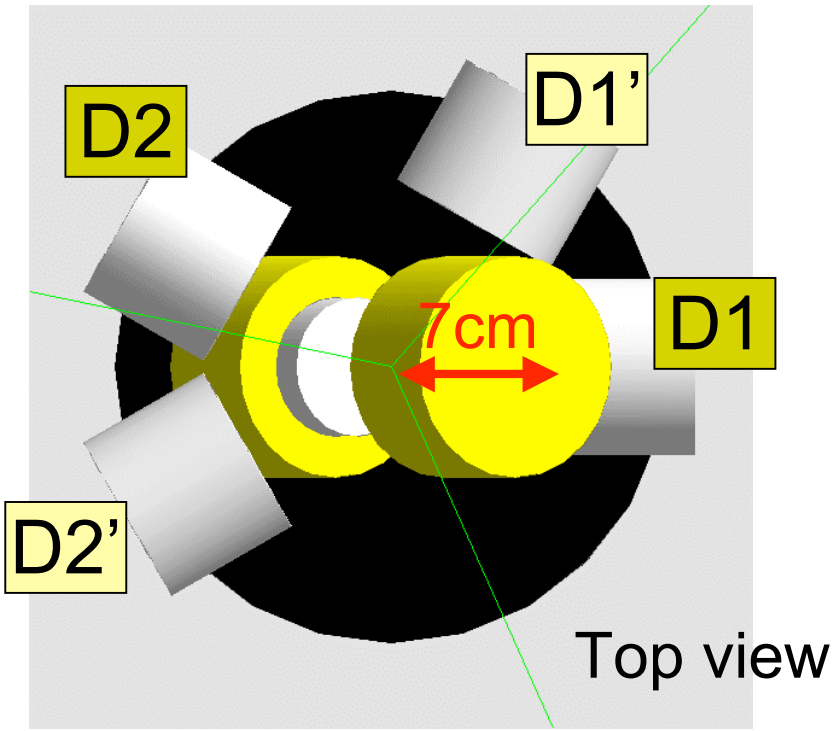


e^+ 通過~30keV は確実にタグできる

ガンマ線検出系

- 回転ステージの上の LYSO 結晶 (直径 3cm、長さ 3cm) によって行う
- 150° の位置に配置した検出器ペア × 2 組 (統計量 up)
- LYSO についての詳細は次のトークで





皮算用

- レート計算 N_+/N_-: 各 4Hz で測定可能
  ⇒一年で各 10^8 事象、$\Delta N_{+-} \sim 10^{-4}$
  - ^{22}Na 強度: 1MBq
    o-Ps($m_z=\pm1$) の生成確率: 8%
    Timing window に入る割合: 30%
    D1、D2 の energy window に入る割合: 0.015%
- 一方、CP の破れ (C_{CP}) に対する感度は、角度の設計値から決まる

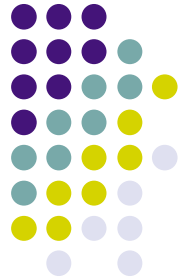
$$C_{\mathrm{CP}}\left(\hat{s}\cdot\hat{k}_1\right)\left(\hat{s}\cdot\hat{k}_1\times\hat{k}_2\right)=\frac{1}{2}C_{CP}\sin2\theta\sin\psi\cos\phi$$

$$\sim 0.23\ C_{\mathrm{CP}}$$

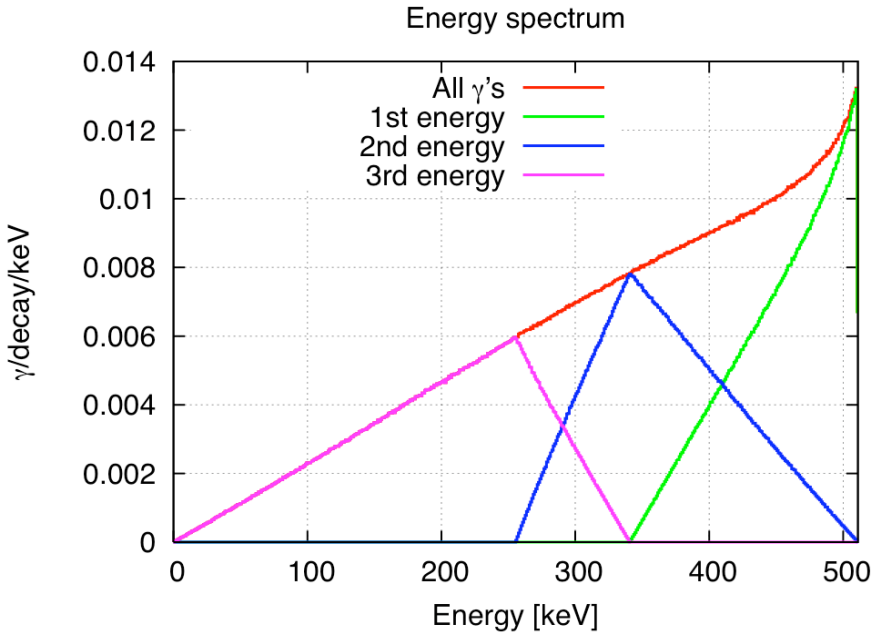
θ: 磁石の角度 (30°)
ψ: D1 と D2 の角度 (150°)
ϕ: 磁石と D1 の角度 (可変)

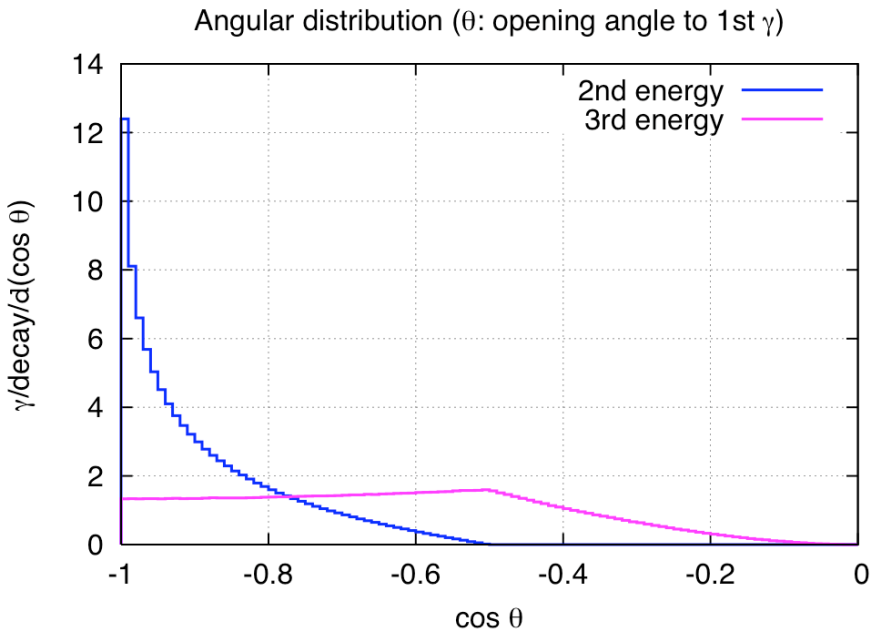
- 従って、一年で $\Delta C_{CP}<10^{-3}$ を検証可能

まとめ



- o-Ps の三本のガンマ線への崩壊から CP の破れを探索する実験
- 磁場と timing window を使ってスピンを選択し、LYSO を用いたガンマ線検出器を用いてキネマティクスを決定 ⇒ CP odd なパラメータ
- 自分自身とのさっぴきによるシステマティックエラーの削減
- 1 年の測定で、10^{-3} の感度で CP の破れを検証


Energy spectrum
All γ's
1st energy
2nd energy
3rd energy
γ/decay/keV
Energy [keV]
0.014
0.012
0.01
0.008
0.006
0.004
0.002
0
0
100
200
300
400
500


Angular distribution (θ: opening angle to 1st γ)
2nd energy
3rd energy
γ/decay/d(cos θ)
cos θ
14
12
10
8
6
4
2
0
-1
-0.8
-0.6
-0.4
-0.2
0