

# オルソポジトロニウムの稀崩壊を用いた 余剰次元の探索

日本物理学会 第62回年次大会  
東大素粒子センター, 東大理学系研究科<sup>A</sup>

兼田充、是木玄太

難波俊雄、小林富雄、浅井 祥仁<sup>A</sup>

## 概要

- o-Psの不可視崩壊
- 検出器
- データ解析
- 結果、まとめ

謝辞: この研究はKEKよりNaI(Tl)シンチレーターを貸していただき行ないました。  
ありがとうございました。

# o-Psの不可視崩壊

## o-Ps

- e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>束縛系であるポジトロニウムのスピン3重項(<sup>3</sup>S<sub>1</sub>)状態
- τ=142nsで3γに崩壊
- このo-Psの不可視崩壊を探索する

## 標準模型では:

- $\Gamma(o\text{-Ps} \rightarrow \nu \bar{\nu}) \sim 6 \times 10^{-18} \Gamma_{3\gamma}$   
と非常に小さくて問題にならない

## 余剰次元への崩壊:

- 標準理論の階層性問題解決のため、TeVスケールに余剰次元が考えられている。
- 余剰次元の数n=2の時

$$\Gamma(o\text{-Ps} \rightarrow \gamma^* \rightarrow \text{add dim}) \approx 1.2 \times 10^5 \left( \frac{m_{o\text{-Ps}}}{k} \right)^2 \Gamma_{3\gamma} \quad \text{余剰次元のスケール}$$

$$\approx 1.2 \times 10^{-7} \left( \frac{1\text{TeV}}{k} \right)^2 \Gamma_{3\gamma}$$

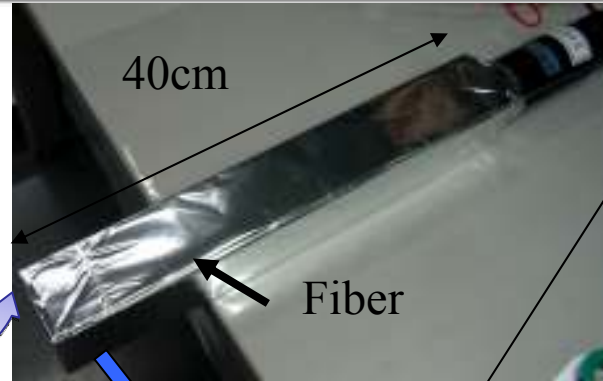
■ 現在のリミットETH Zurich:  $4.2 \times 10^{-7}$  (2006)

## 他の可能性:

- ミラーワールド、ミリチャージド粒子など



# 線源周りのセットアップ



シリカエアロゲル  
 この中に $e^+$ が入り、  
 ポジトロニウムを生成される  
 この部分には酸素によるpick-offを防ぐため、窒素を流入している

CsI(Tl)

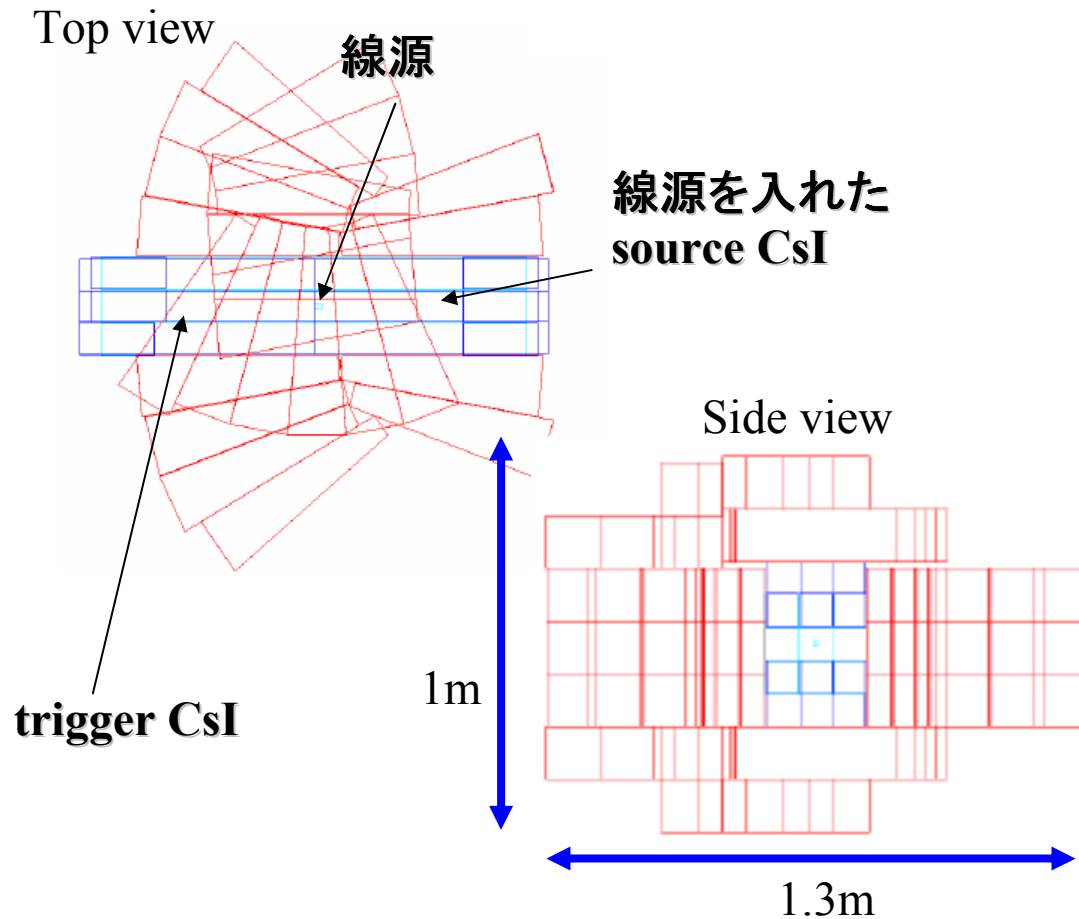


$^{22}\text{Na}$ 線源

ファイバーによって光を外へ導くことにより  
 デッドマテリアルを最小限に抑えた

# 検出器の全体像

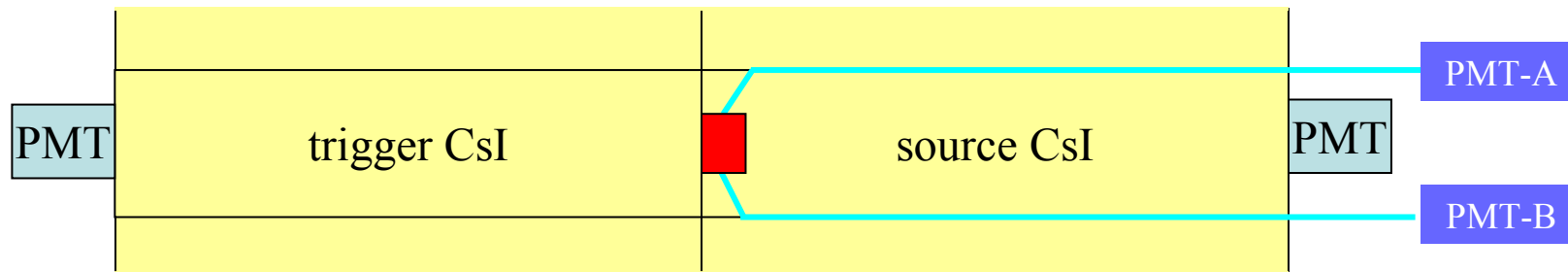
■Gant4を用いてシミュレーションを行い、線源から全方位に対し、back-to-backの単色 $\gamma$  511keV2発 が反応せずに通り抜ける割合が**10<sup>-9</sup>以下**になるように設計した。



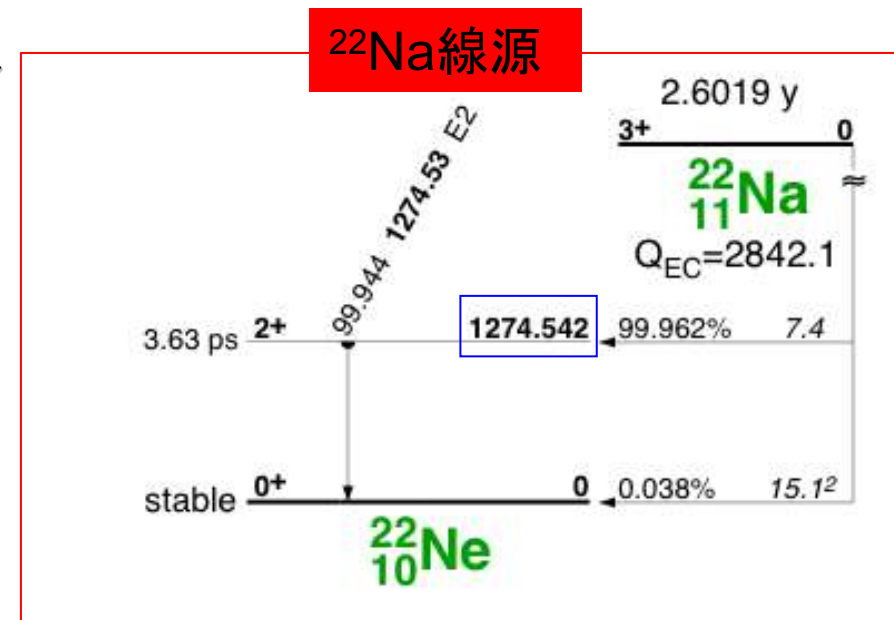
赤: NaI x 62      青: CsI x 30

Total 1t のシンチレーターを使用

# トリガー関係

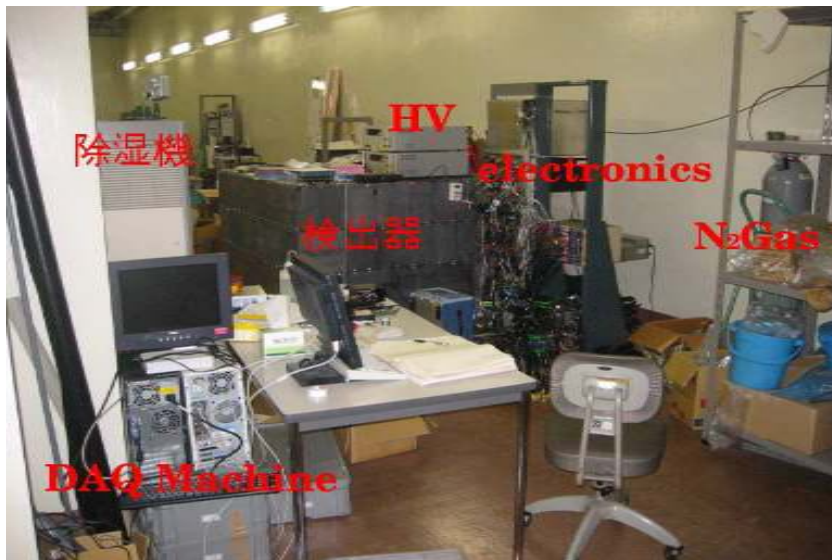


- ファイバーを除く2本のPMTのコインシデンスを用いることにより、fakeを減らす
- さらに、 $^{22}\text{Na}$ が $\beta^+$ と同時に放出する、 $1275\text{keV}$ の $\gamma$ 線をトリガーに用いることで、正しい $\beta^+$ 放出イベントを選ぶ

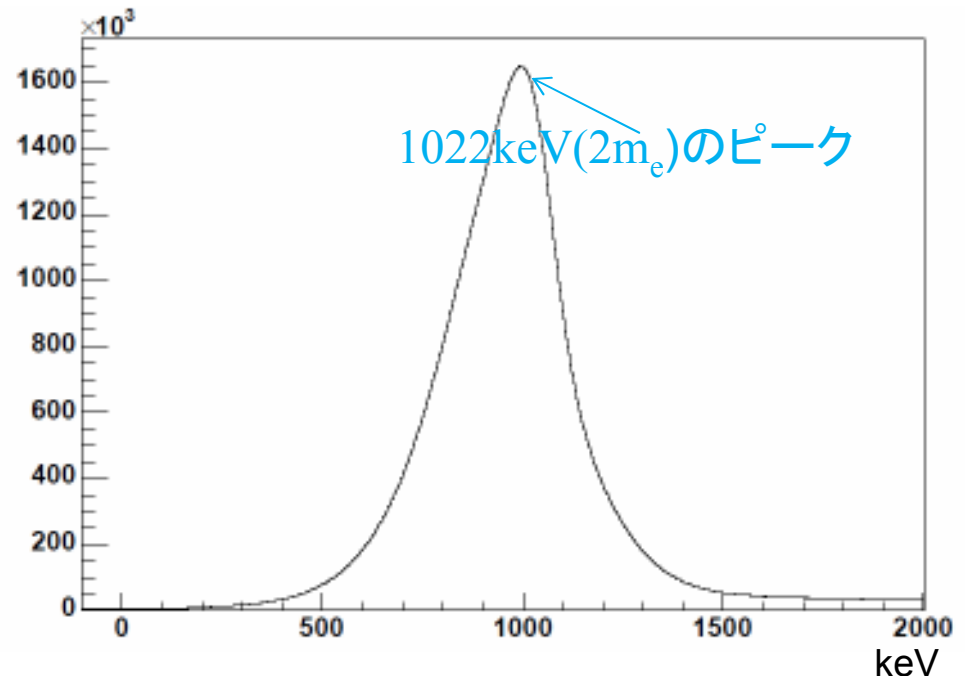


# データ取得

- 2007年5月から約4ヶ月のデータ取得により  $5.9 \times 10^8$  イベントのデータを取得

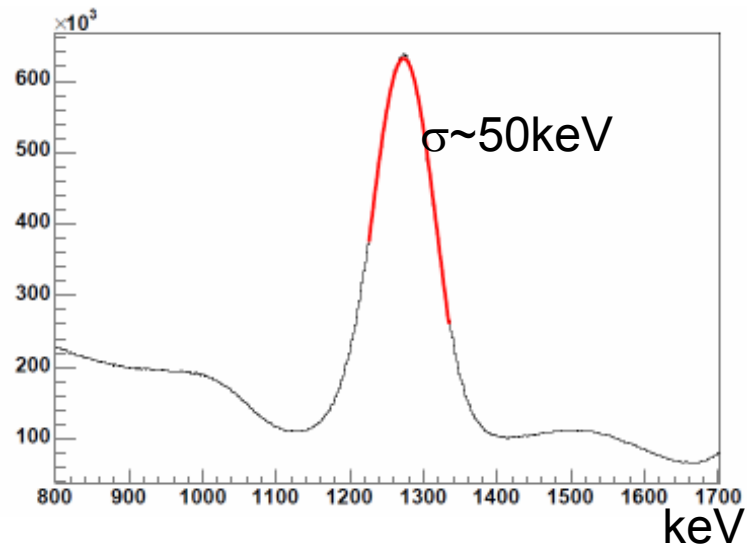


実験室の様子  
検出器は5mmの鉛で囲ってある



trigger CsI以外のシンチレーターの和  
(no cutの分布)

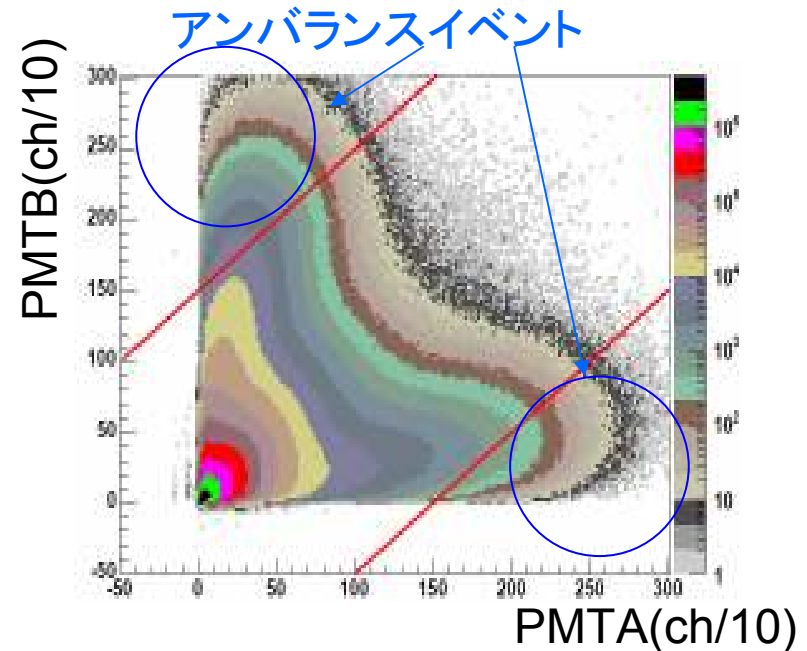
# イベントセレクション1



trigger CsI

- 1275keV  $\gamma$  を選ぶため  $1275\text{keV} \pm 50\text{keV}$  でカット

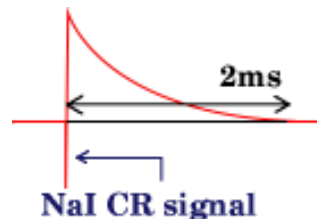
- $\beta^+$  がタグ用シンチレーターの中心に当たっていれば二つのファイバーからの信号は近い値になるはず
- 大きくずれてるイベントは、ファイバー部分に当たり、エアロゲルへ入っていない可能性が大きいいため落とす



# イベントセレクション2

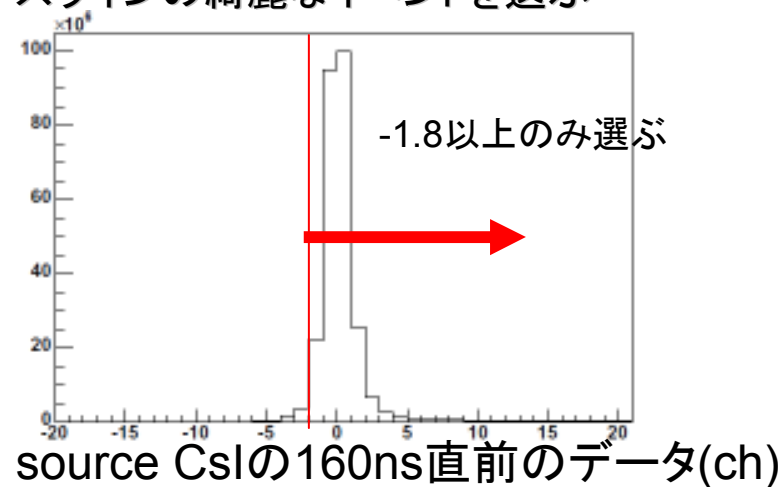
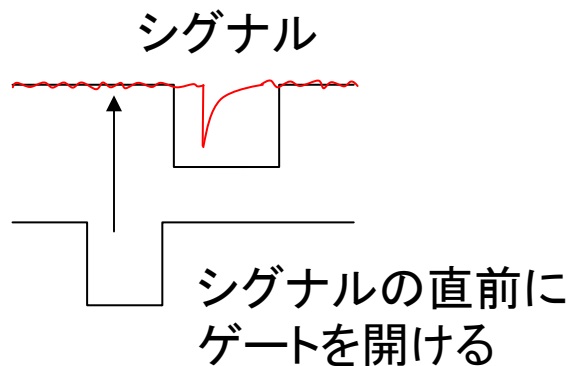
## 宇宙線veto (オフラインでカット)

- CsI total 11.5MeV 1ms (24Hz)
- NaI total 5MeV 2ms (70Hz)



## ベースラインカット

- データ取得直前のエネルギー情報を用いてベースラインの綺麗なイベントを選ぶ



## シンチレーター毎のカット

- 各シンチレーターを監視し、NaIについては-17keV(3 $\sigma$ )、CsIについては-2keV(2 $\sigma$ )より小さくエネルギーを出した際にはイベントを捨てる

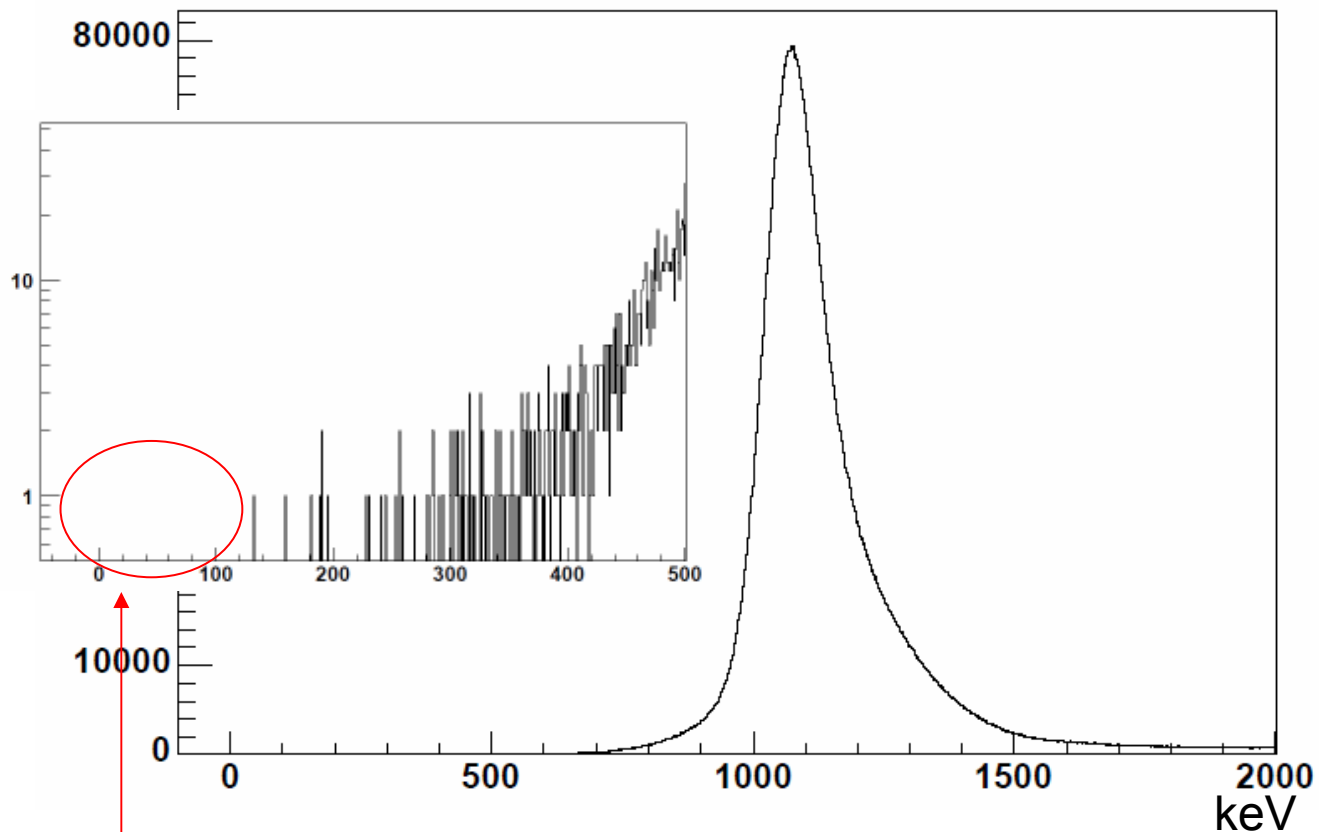


## イベントサマリ

	イベント数	efficiency
セレクション前	$5.9 \times 10^8$	100%
trigger CsI カット	$3.5 \times 10^8$	59%
$\beta$ タグカット	$3.4 \times 10^8$	58%
タイミングカット	$3.2 \times 10^8$	54%
宇宙線veto	$2.6 \times 10^8$	44%
ベースライン、 シンチレータ毎のカット	$1.7 \times 10^7$	2.9%

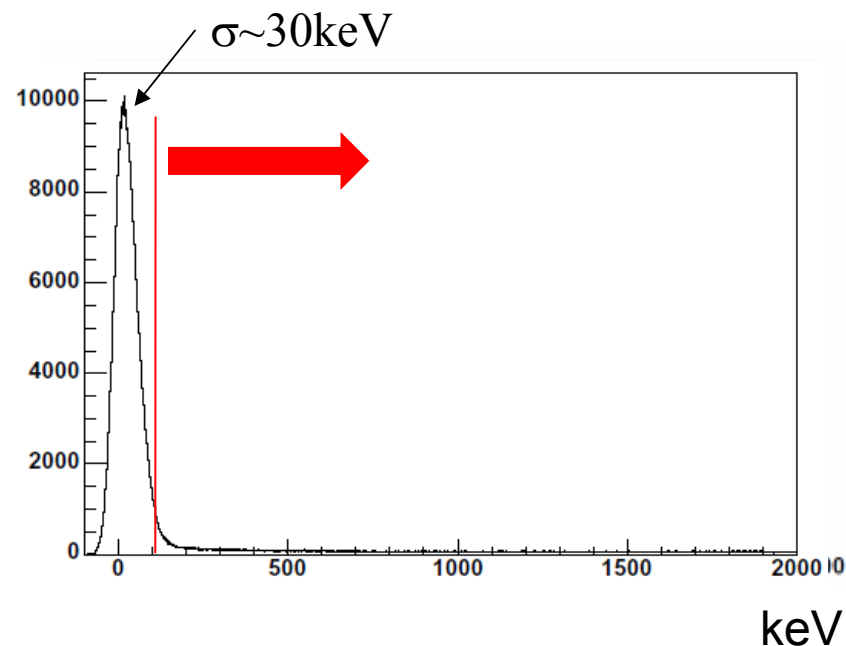
- オンラインでtrigger CsIとプラシンのコインシデンスでトリガーをかけているが、それぞれの時間を測定し、エネルギーによるwalkの補正を加え、両者の反応が20ns以内であることを要請

# Totalのエネルギー分布



セレクション後のTotalのエネルギー分布(trigger CsI以外の全ての和)  
不可視イベント(100keV以下)は観測されていない

# 0keV付近の広がり



- 不可視イベントをパイルアップ等によって不可視で無く見えてしまう割合を求めるために、ランダムトリガーによって0点付近の広がりを調べた。
- パイルアップ等の効果で100keV以上となる確率:20%  
->不可視イベント検出効率80%

Totalのエネルギー分布(trigger CsI以外の全ての和)  
(ランダムトリガー)  
宇宙線とベースラインに関するカットは通常の解析と同じものを使用

# o-Ps寿命と生成率

- source CsIでエネルギーを落としたタイミングを測ることにより、o-Psの寿命を測定し、o-Psの生成率を求める

- Fitting 関数

$$A \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + B$$

- 求められた寿命:

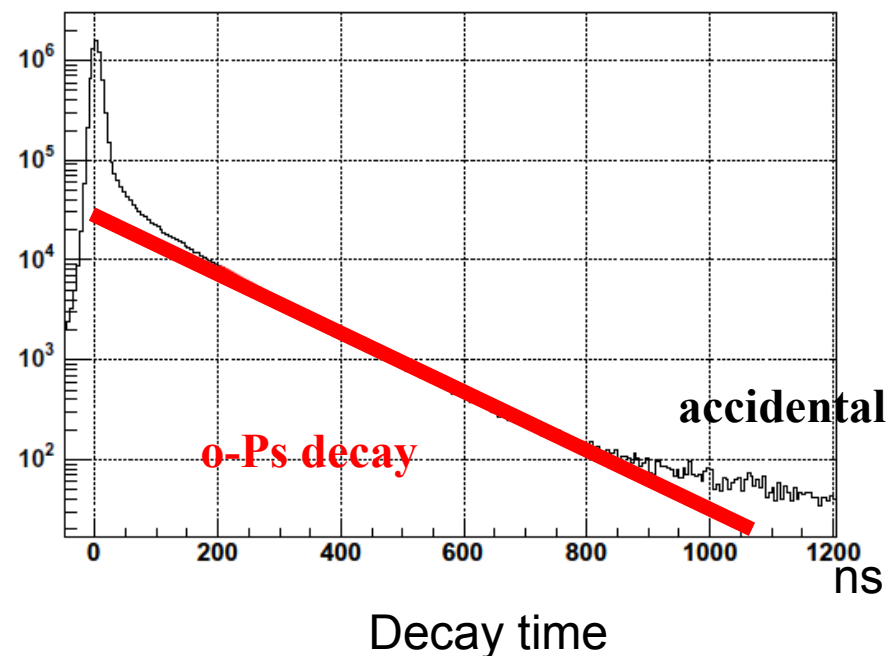
$$\tau = 126 \text{ ns}$$

- これより、o-Ps生成率:

$$P_{\text{o-Ps}} = 14 \%$$

N<sub>2</sub>ガスを線源まわりに100cc/minの流量でパージし、酸素によるpick-off(7 μs<sup>-1</sup>)を抑えているが、上記の寿命は、1気圧のN<sub>2</sub>中の寿命とコンシステント

p-Ps & e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>対消滅



# 結果

■  $e^+e^- \rightarrow \text{invisible}$  の確率 (90% C.L.)

$$\begin{aligned} Br(e^+e^- \rightarrow \text{invisible}) &< \frac{2.3}{1.7 \times 10^7 \times 0.8} \\ &< 1.7 \times 10^{-7} \end{aligned}$$

■  $o\text{-Ps} \rightarrow \text{invisible}$  の確率 (90% C.L.)

$$\begin{aligned} Br(o\text{-Ps} \rightarrow \text{invisible}) &< \frac{2.3}{1.7 \times 10^7 \times 0.8 \times 0.14} \\ &< 1.2 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

■ 東大:  $2.8 \times 10^{-6}$  (1993)

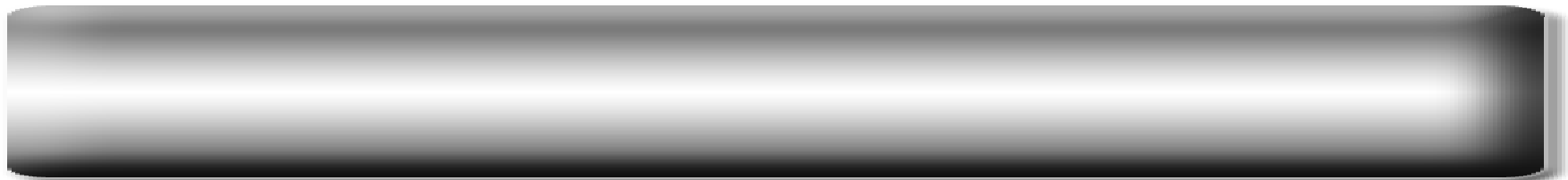
■ ETH Zurich:  $4.2 \times 10^{-7}$  (2006)

■ 余剰次元のスケールへの制限:

**$n=2$  の時:  $k > 0.32 \text{ TeV}$**

## まとめ

- ➡ o-Psの不可視崩壊を用いて余剰次元を探索するため、高感度で検出する検出器を設計作成し、実験を行った。
- ➡ これまでの約4ヵ月の測定では不可視崩壊は見つからず、 $\text{Br}(o\text{-Ps} \rightarrow \text{invisible}) < 1.2 \times 10^{-6}$ のリミットを得た。また、余剰次元のスケールに対し、**n=2の時、 $k > 0.32 \text{ TeV}$** の制限を得た。
- ➡ データはまだ取り続けており、セレクションの最適化もさらに進め、もう一桁近く改善をする予定である。



# バックアップ

# オルソポジトロニウム (o-Ps)

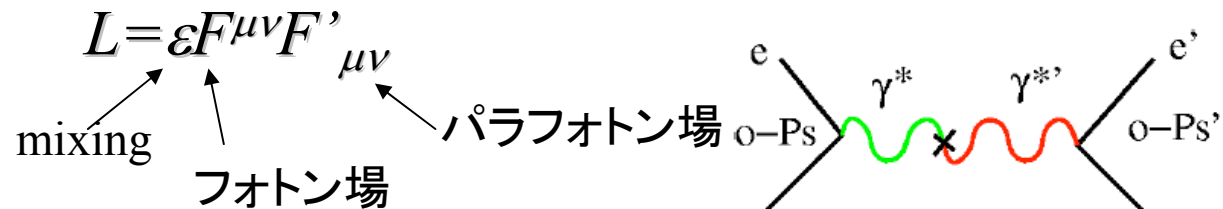
- ポジトロニウム
  - $e^+e^-$  束縛系
  - 単純な系
  - $\sqrt{s}=2m_e=1022\text{keV}$
- オルソポジトロニウム (o-Ps)
  - スピン3重項 ( $^3S_1$ ) 状態のポジトロニウム
  - C変換に対する変換性が奇
    - $3\gamma(5\gamma, 7\gamma)$  にのみ崩壊
  - 長寿命:  $\tau=142\text{ns}$
- このオルソポジトロニウムの不可視崩壊を探す実験を行った
- 目標感度:  $10^{-7} \sim 10^{-8} \Gamma_{3\gamma}$ 
  - 1993年に東大が  $2.8 \times 10^{-6}$  のリミットを出した
  - 昨年、ETH Zurichが  $4.2 \times 10^{-7}$  まで更新



# o-Psの不可視崩壊 2

## ■ミラーワールドへの崩壊:

- 重力以外では見えないセクターであるミラーワールドへの崩壊
- 暗黒物質の候補のひとつ
- 電荷を持つ”mixing particle”を介して光子とパラフォトンが結合



$$\blacksquare P(o\text{-Ps} \rightarrow o\text{-Ps}') = \sin 2\omega t, \quad \omega = 2\pi \varepsilon \times 87\text{GHz}$$

## ■ミリチャージド粒子への崩壊:

- 電子より軽い電荷 $\varepsilon e$ の粒子 $f$ が存在した場合

$$\Gamma(o\text{-P} \rightarrow ff) = \frac{3\pi\varepsilon^2}{4\alpha(\pi^2 - 9)} \sqrt{1 - \left(\frac{m_f}{m_e}\right)^2} \left\{ 1 + \frac{3A-1}{4} \left(\frac{m_f}{m_e}\right)^2 \right\} \Gamma_{3\gamma}$$

# 検出器セットアップ

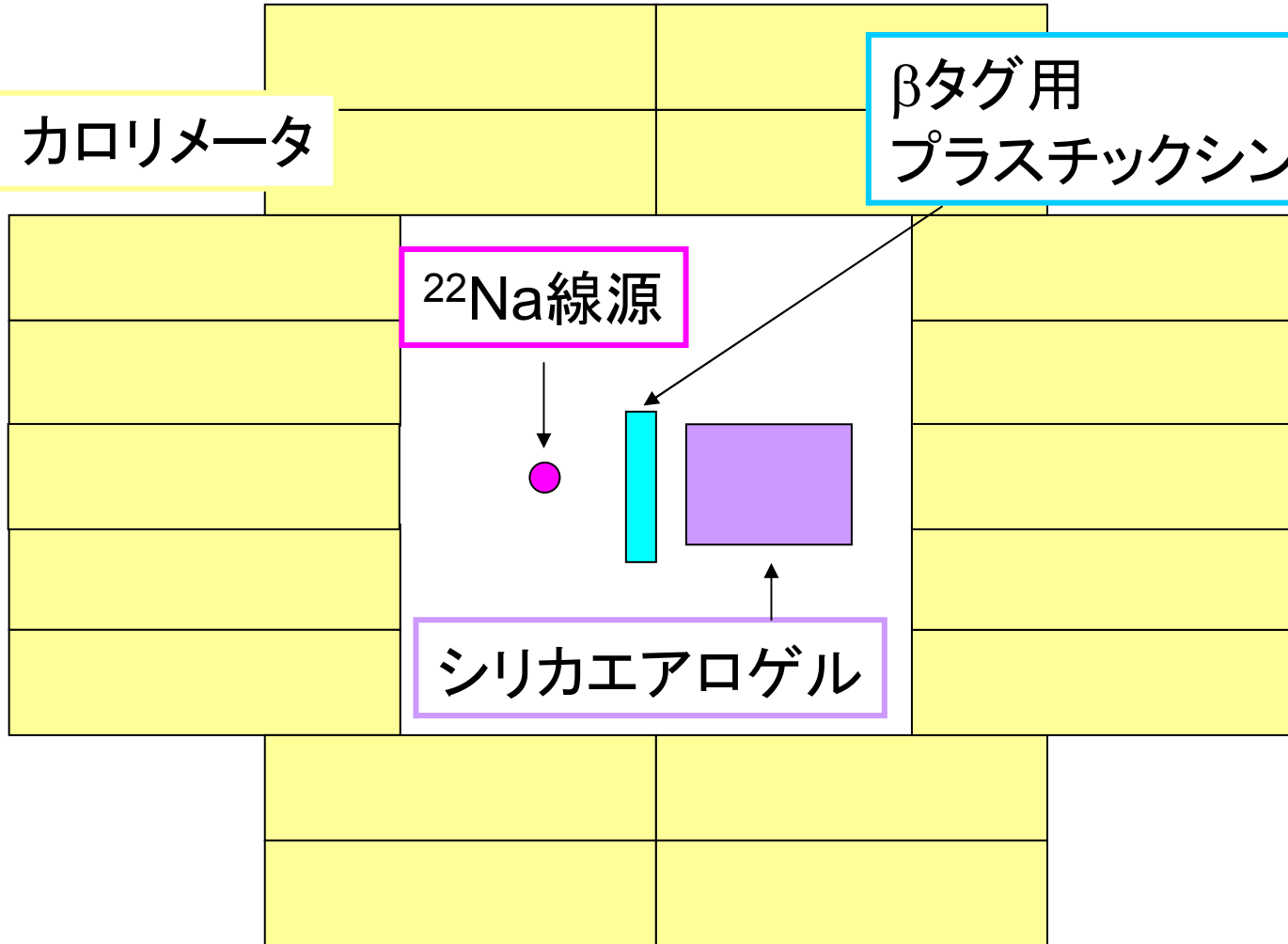
( $^{22}\text{Na}$  からの  $e^+$  崩壊のタグ  $\rightarrow$   $o\text{-Ps}$  生成  $\rightarrow$   $o\text{-Ps}$  崩壊)

4 $\pi$  カロリメータ

$\beta$ タグ用  
プラスチックシンチレーター

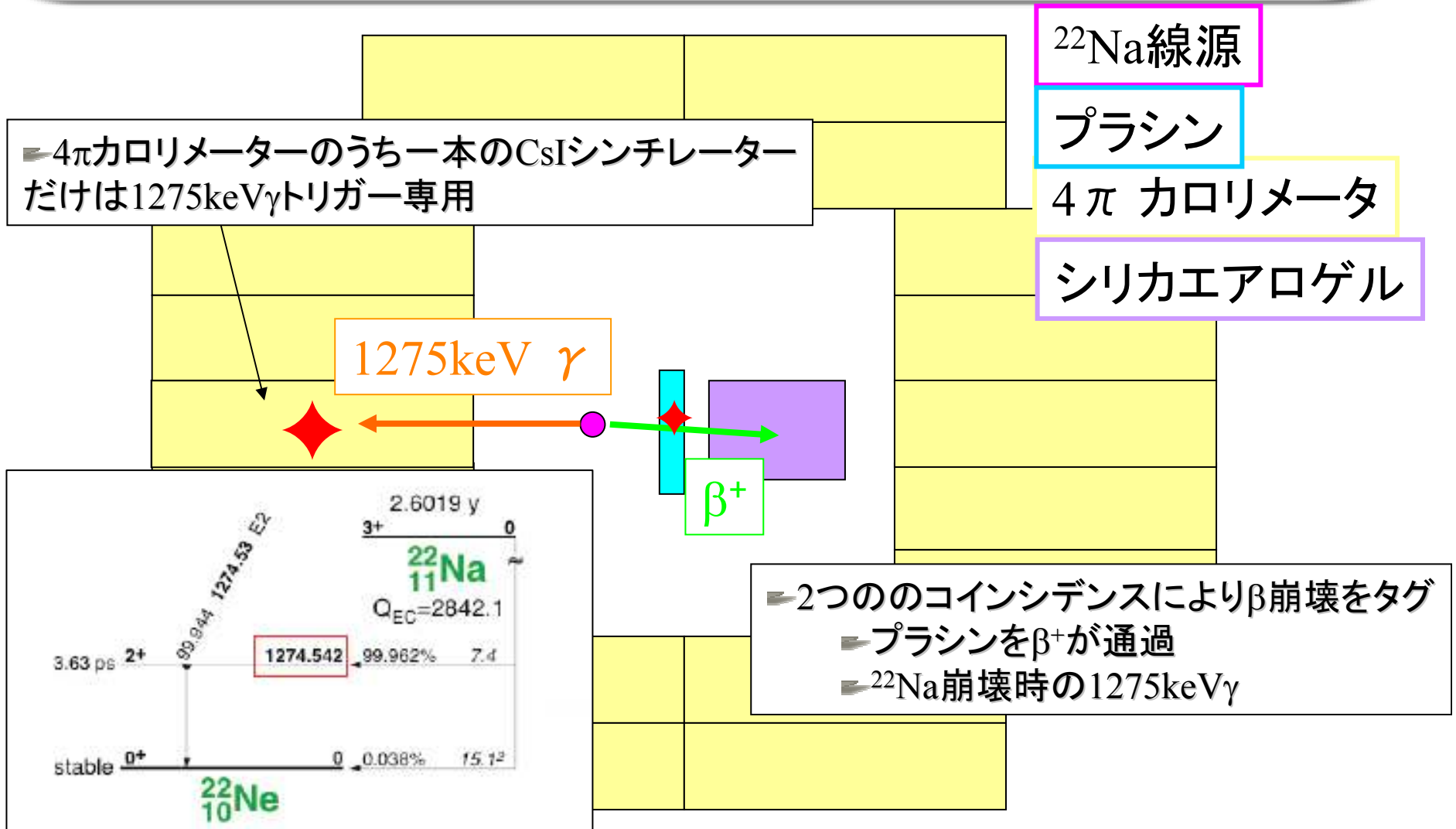
$^{22}\text{Na}$ 線源

シリカエアロゲル



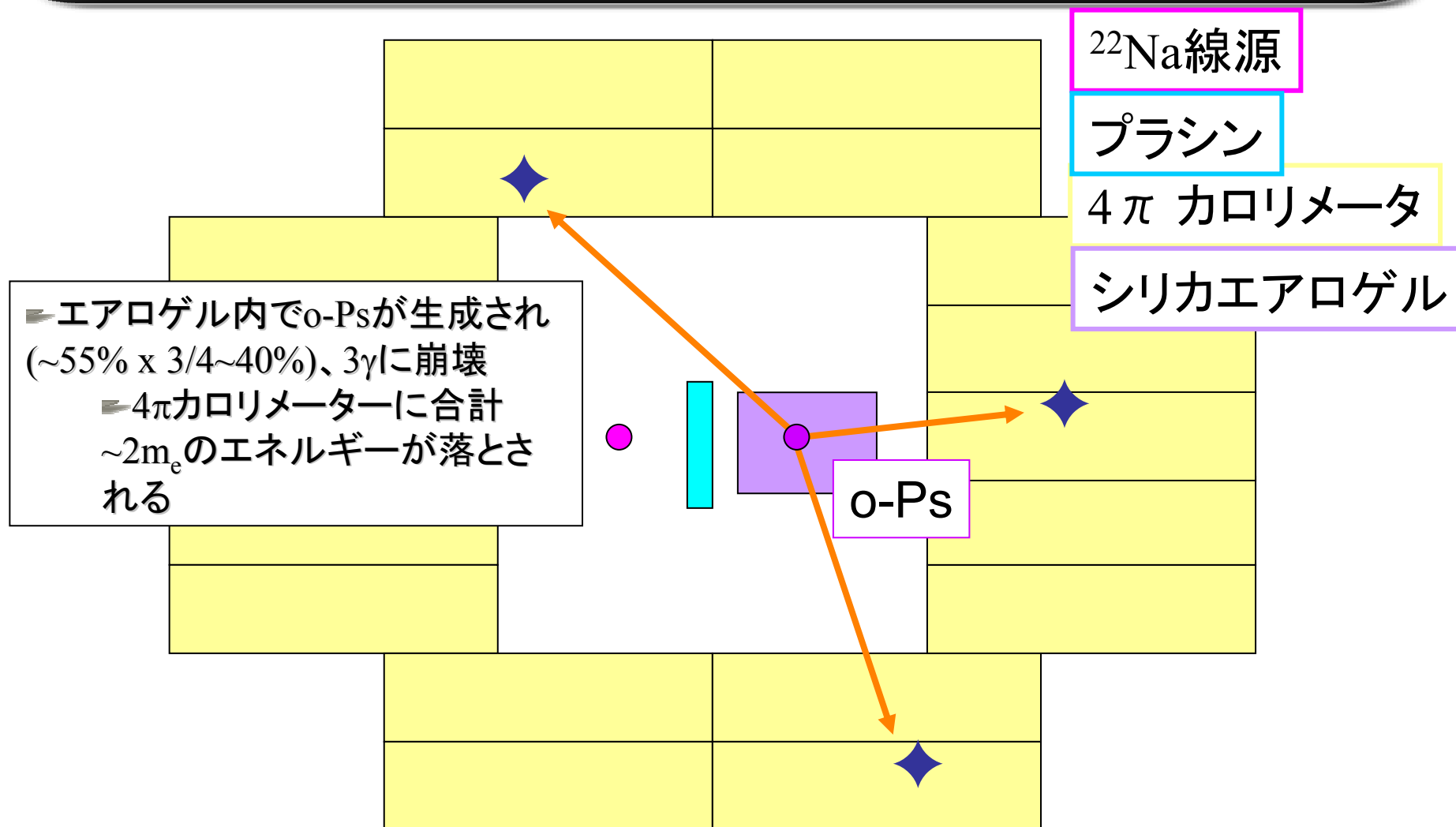
# 検出器セットアップ

( $^{22}\text{Na}$  からの  $e^+$  崩壊のタグ → o-Ps生成 → o-Ps崩壊)



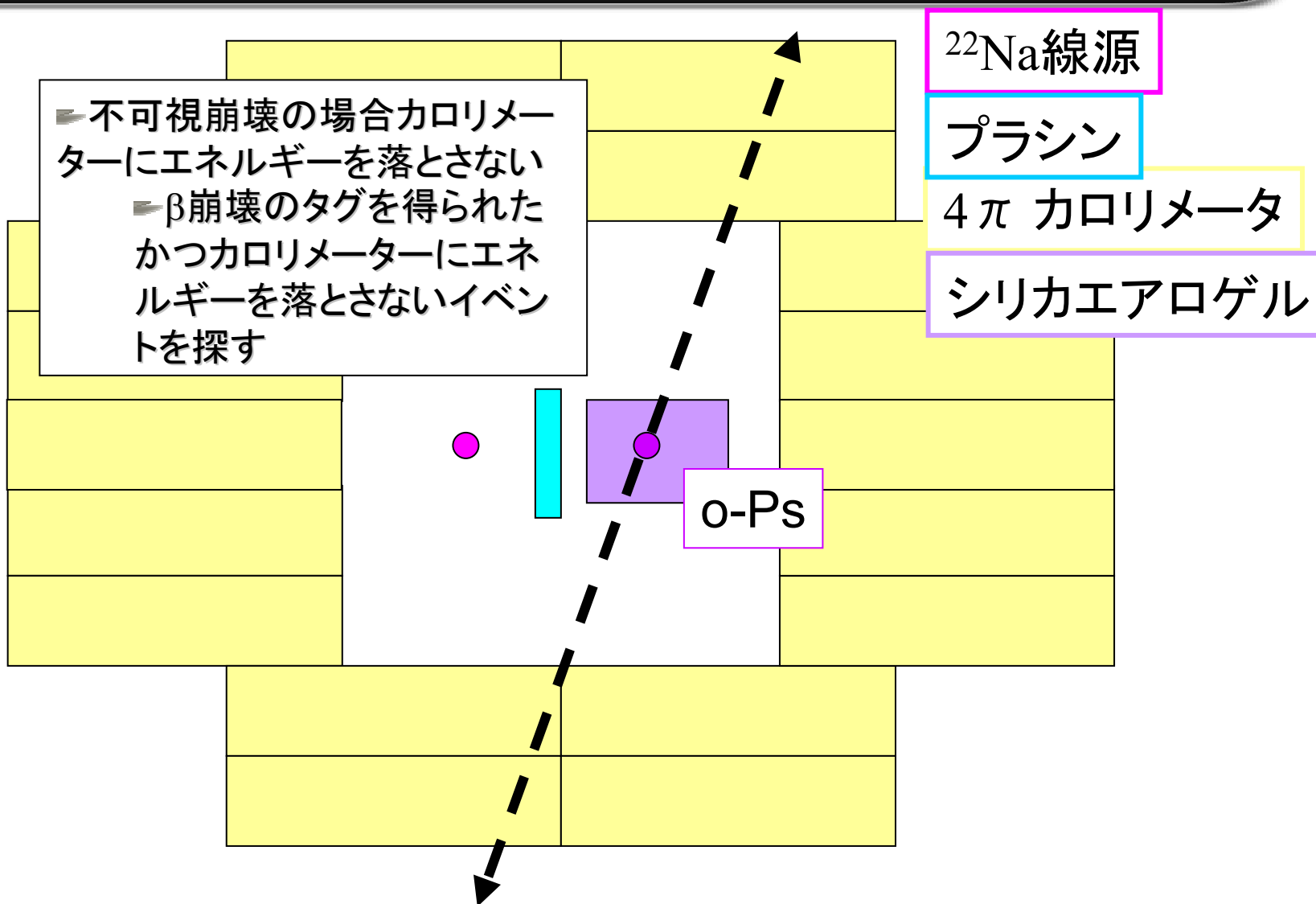
## 検出器セットアップ

( $^{22}\text{Na}$  からの  $e^+$  崩壊のタグ → o-Ps生成 → o-Ps崩壊)

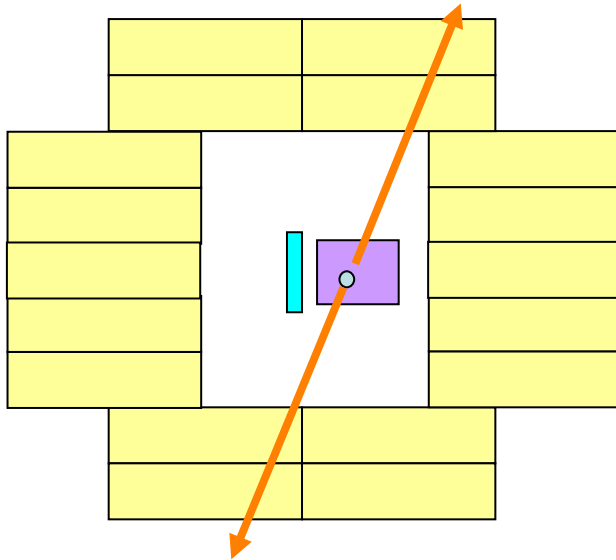


## 検出器セットアップ

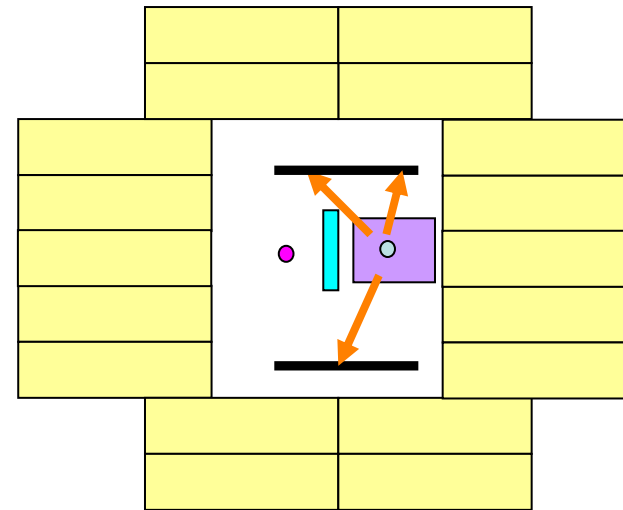
( $^{22}\text{Na}$  からの  $e^+$  崩壊のタグ  $\rightarrow$   $o\text{-Ps}$  生成  $\rightarrow$   $o\text{-Ps}$  崩壊)



# 主なバックグラウンド



case 1:  $\gamma$ 線エスケープ(実際にはo-Psが発生する割合は10%程度。p-Ps崩壊や対消滅によって生じる $2\gamma$ のエスケープが一番の問題)



case 2:  $\gamma$ 線が検出器内部にある物質で吸収されてしまう

以上、重要なのは以下の2点

1. 高い検出効率を持つ $4\pi$ 検出器で $\gamma$ 線を逃がさない
2. 内部のデッドマテリアルを極限まで減らす

# Baseline関係

