

# オルソポジトロニウムの稀崩壊を用いた 余剰次元探索実験

日本物理学会第63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、浅井祥仁<sup>A</sup>、小林富雄

謝辞:この研究はKEK(小松原先生、小林正明先生)よりNaI(Tl)シンチレーターを貸して頂き行いました。ありがとうございました。

# オルソポジトロニウムの崩壊

## オルソポジトロニウム(o-Ps)

- $e^+e^-$  束縛系の $^3S_1$ 状態、スピン1なのでSMでは殆どが $E_{\text{Tot}}=2m_e$ の $3\gamma$ 崩壊
- 比較的長寿命 $\tau=142\text{ns}$  (p-Ps:  $\tau=125\text{ps}$ )
- 余剰次元があると仮想光子を通して余剰次元に崩壊する可能性がある  
→o-Psが消えた様に見える: 不可視崩壊

## 標準模型では:

- $\Gamma(\text{o-Ps} \rightarrow \nu \bar{\nu}) \sim 6 \times 10^{-18} \Gamma_{3\gamma}$  と非常に小さくて問題にならない
- TeVスケールにコンパクト化された余剰次元を考えると、仮想光子がこの余剰次元へ行く崩壊率は0で無くなり

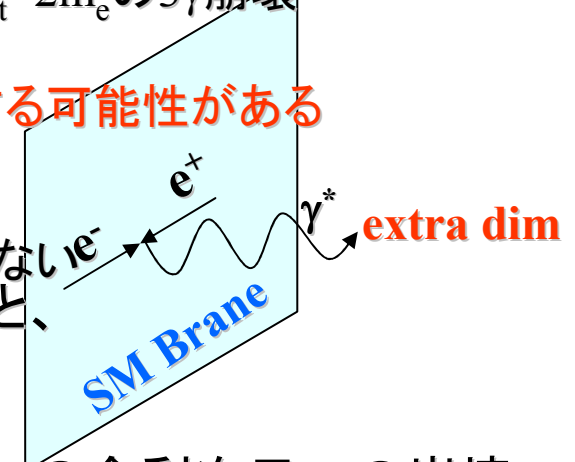
$$\Gamma(\gamma^* \rightarrow \text{extra dim}) = a(n) m_{\gamma^*} (m_{\gamma^*}/k)^n$$

$n$ (コンパクト化されて余剰次元の数)=2を考えると、o-Psの余剰次元への崩壊比は( $n=1$ はすでに否定された領域)

$$\begin{aligned} \Gamma(\text{o-Ps} \rightarrow \gamma^* \rightarrow \text{extra dim}) &\approx 1.2 \times 10^5 (m_{\text{o-Ps}}/k)^2 \Gamma_{3\gamma} \\ &\approx 1.2 \times 10^{-7} (1\text{TeV}/k)^2 \Gamma_{3\gamma} \end{aligned}$$

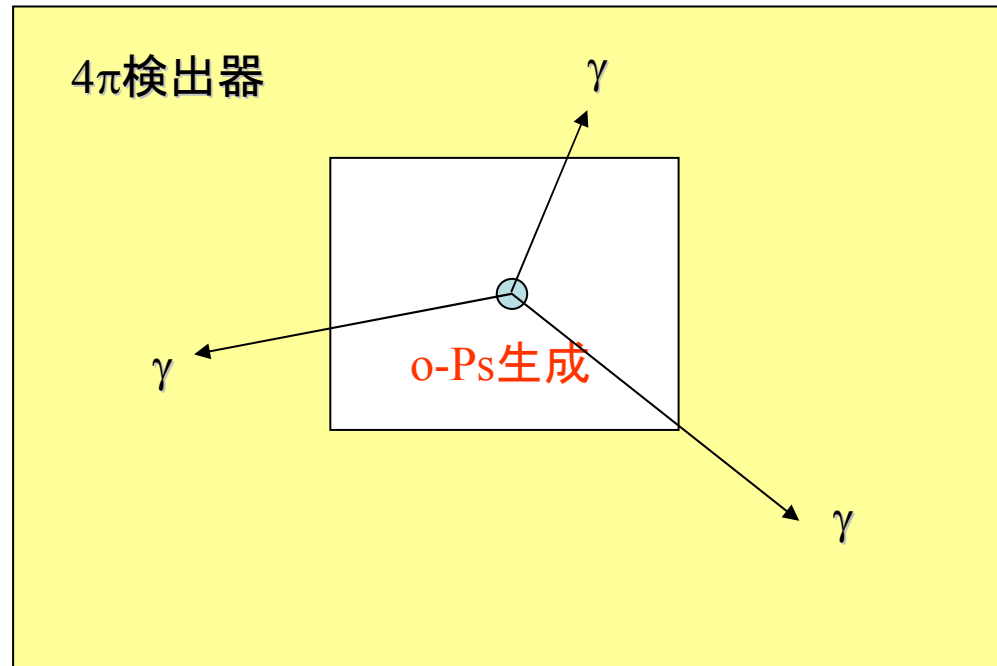
$k \sim \text{TeV}$ 程度で $10^{-7}$ の崩壊が起こる

- 他にもミラーワールド、ミリチャージド粒子などにより不可視崩壊が起こる可能性がある  
(現在のリミットETH Zurich:  $4.2 \times 10^{-7}$  (2006))



# 実験原理

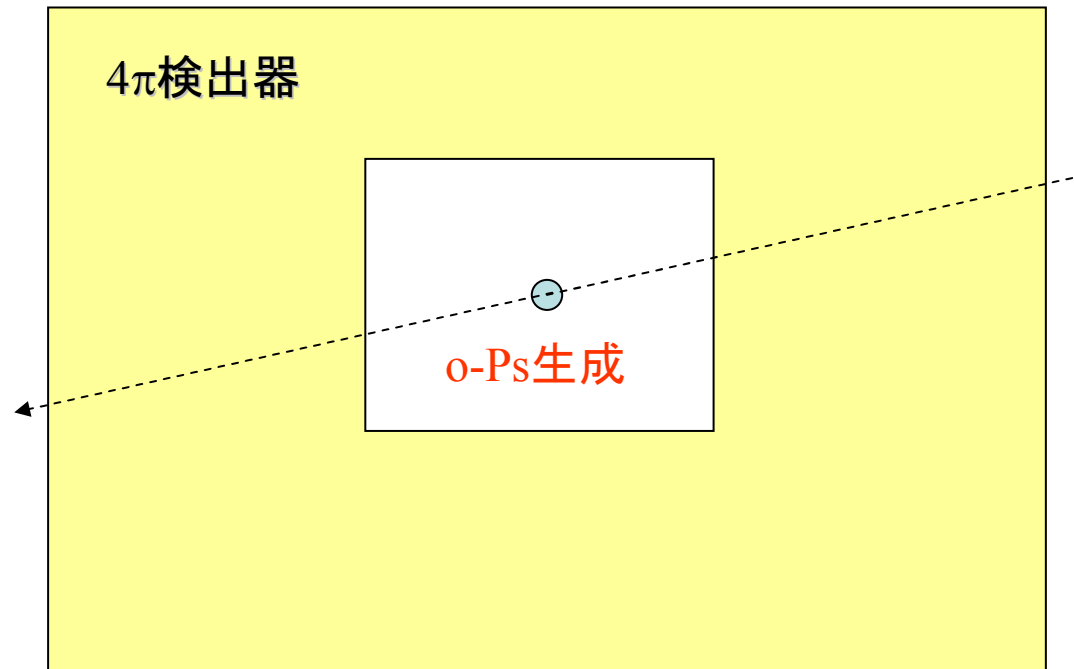
通常の $3\gamma$ 崩壊



- o-Ps生成源の周りを4π検出器で囲う
- o-Psが生成されると通常は $3\gamma$ (計1022keV)
- 崩壊し、それを周りの4p検出器で検出する

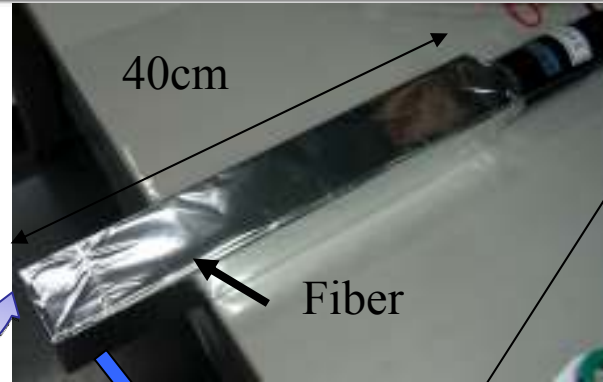
# 実験原理

## 不可視崩壊



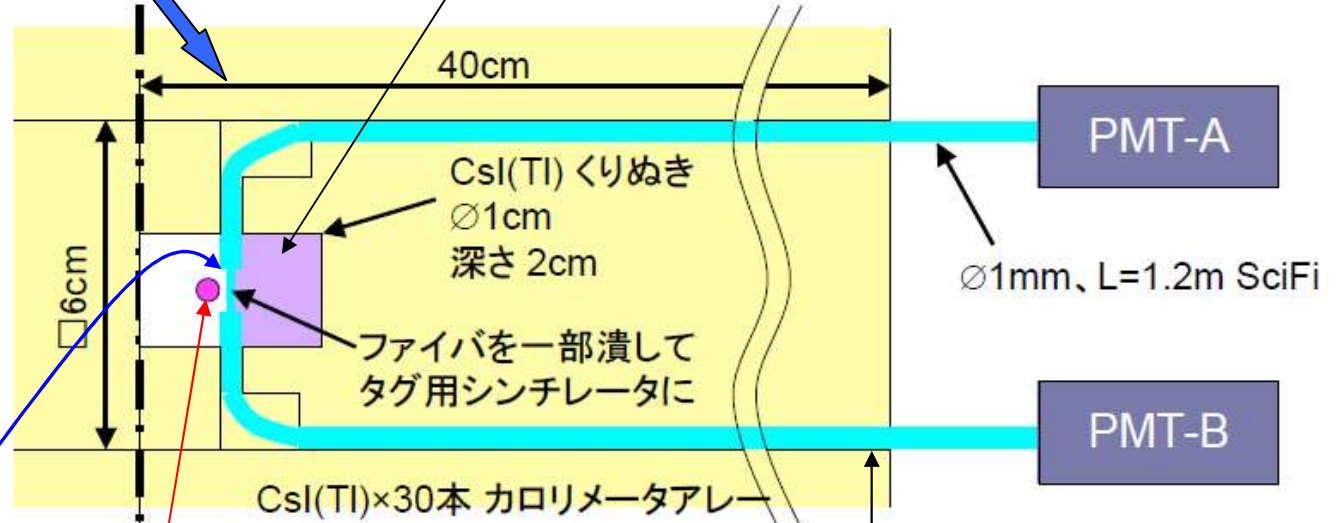
- o-Ps生成源の周りを4 $\pi$ 検出器で囲う
- o-Psが生成されると通常は3 $\gamma$ (計1022keV)
- 崩壊し、それを周りの4 $\pi$ 検出器で検出する。もし、o-Psが生成されたにも関わらず、周りの検出器でエネルギーが観測されなければ不可視崩壊である

# 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)

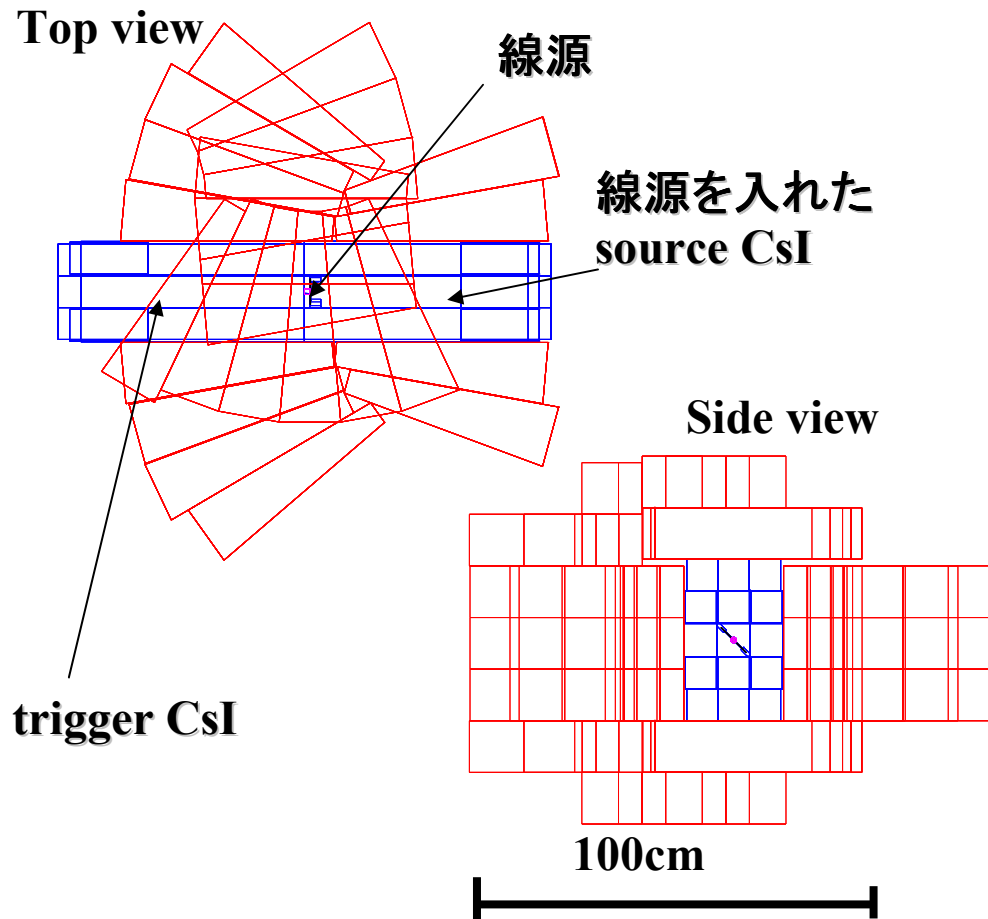


$^{22}\text{Na}$ 線源

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

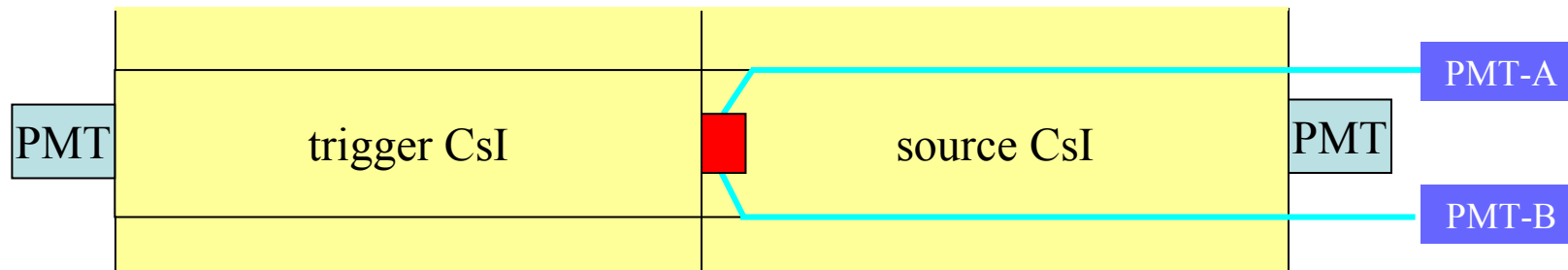
# 検出器の全体像

■ 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 $10^{-9}$ 以下になるように設計した。

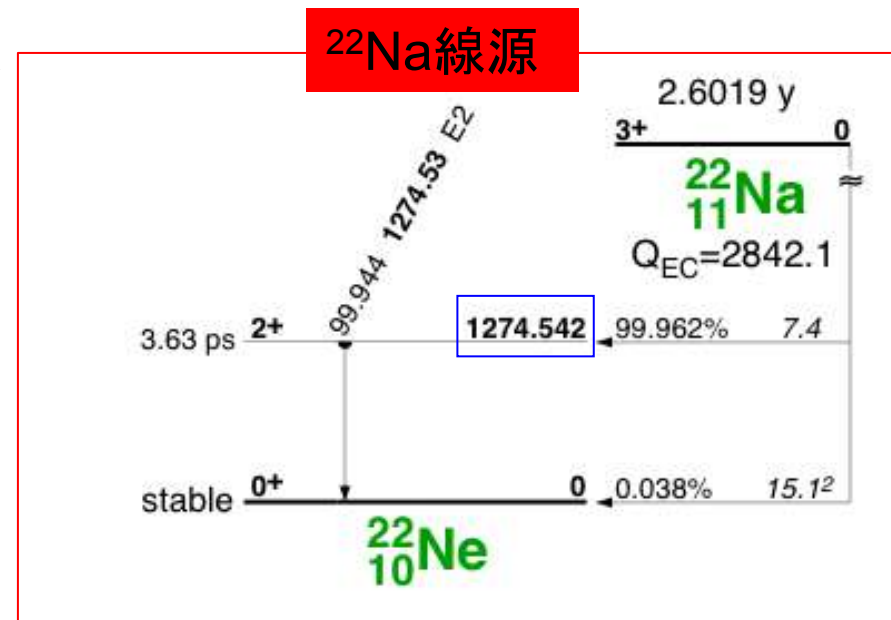


赤: NaI x 62      青: CsI x 30  
Total ~1000kg のシンチレーターを使用

# データ取得



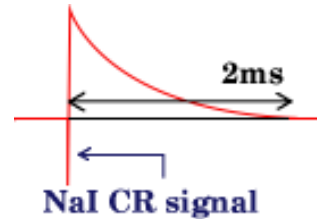
- ファイバーを除く2本のPMTのコインシデンスを用いることにより、fakeを減らす
- さらに、 $^{22}\text{Na}$ が $\beta^+$ と同時に放出する、 $1275\text{keV}$ の $\gamma$ 線をトリガーに用いることで、正しい $\beta^+$ 放出イベントを選ぶ
- データはこれらのコインシデンスでトリガーを作り、約半年間の実験で $8.43 \times 10^8$ イベントを取得



# イベントセレクション1

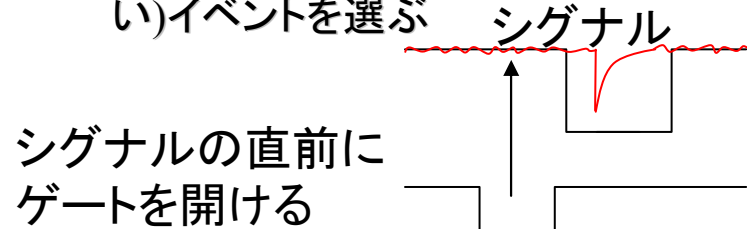
## 宇宙線veto (オフラインでカット)

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

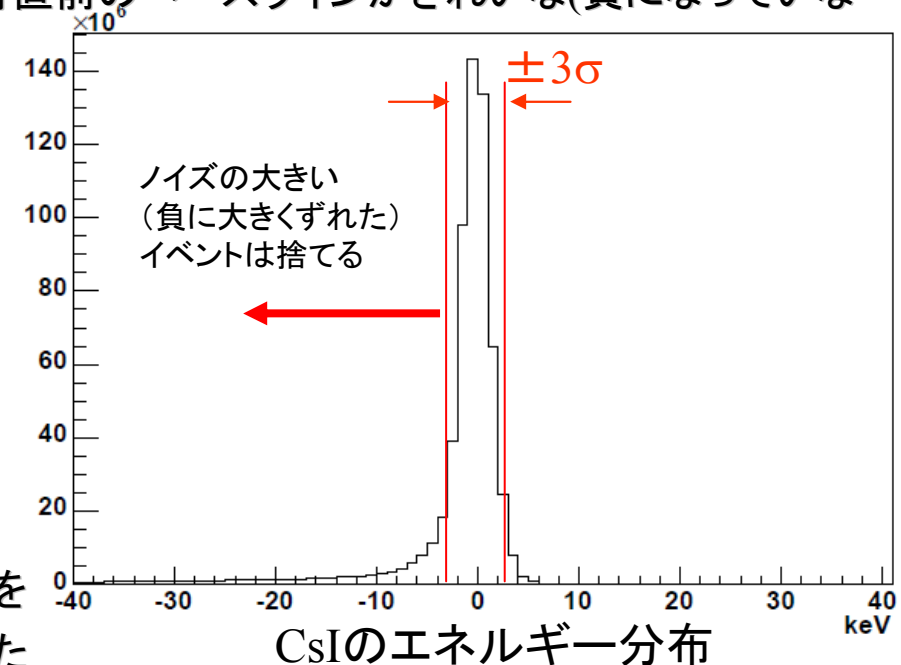


## ベースラインカット

- Trigger CsIについて、エネルギーデータ取得直前のベースラインがきれいな(負になっていない)イベントを選ぶ



- $0 \pm 3\sigma$ 以内のエネルギーはノイズ起源とし、そのシンチレーターのエネルギーは0keVと換算する

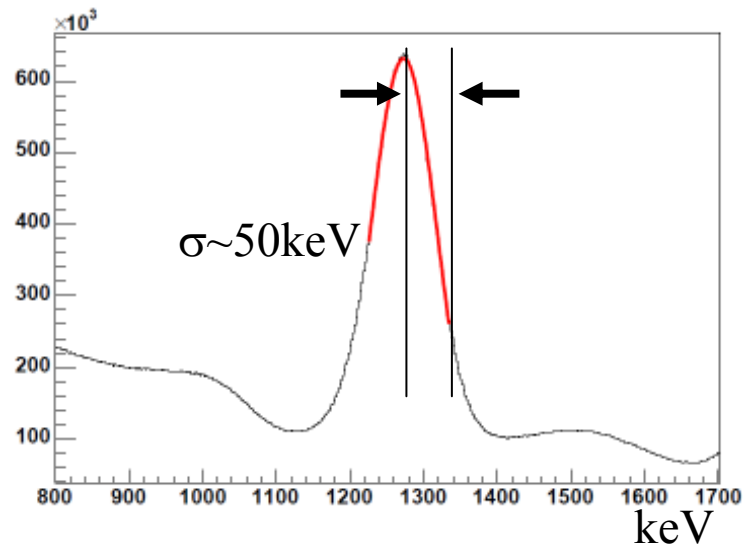


## シンチレーター毎のカット

- 特に重要な内側の18つの各シンチレーターを監視し、 $3\sigma$ より負に大きくエネルギーを出した際にはイベントを捨てる
- さらに、一番良くエネルギーを落とすsource CsIについては0keV以下のイベントを捨てる

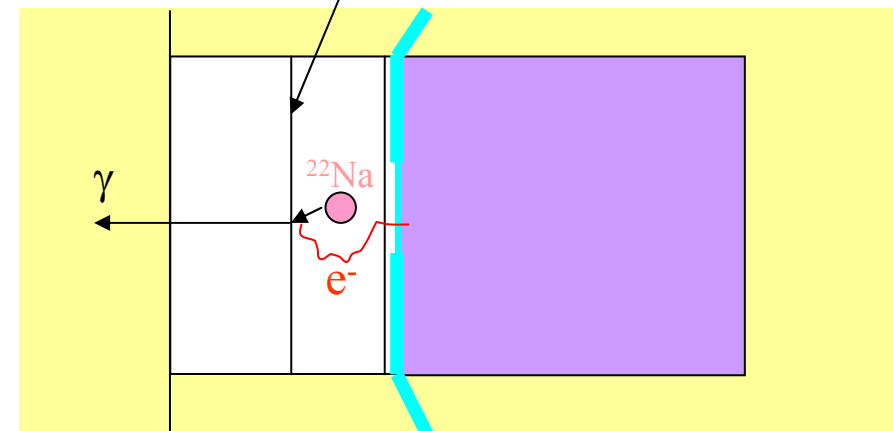


# イベントセレクション2



- 1275keV  $\gamma$  を選ぶため  
1275keV~1325keVでカット  
(エネルギーの低い側は、EC起源  
フェイクを抑えるために落とす。)

$^{22}\text{Na}$ 線源は12 $\mu\text{m}$ のマイラーで包んである

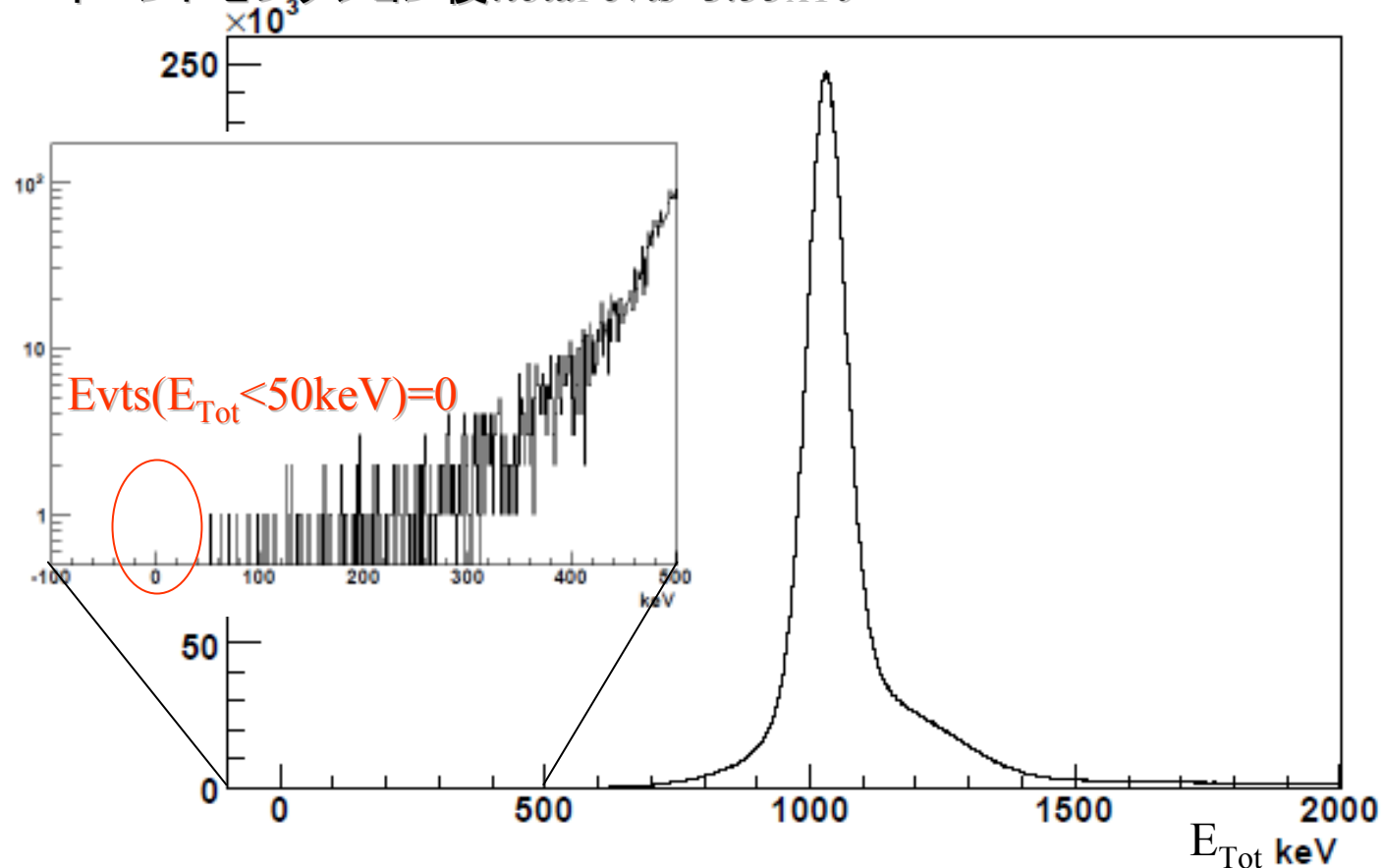


## EC起源のフェイク

1275keVの $\gamma$ がマイラーでコンプトンし  
電子を放出する  
 $\gamma$ は $e^-$ を放出するので、  
Trigger CsIのエネルギーは低くなる

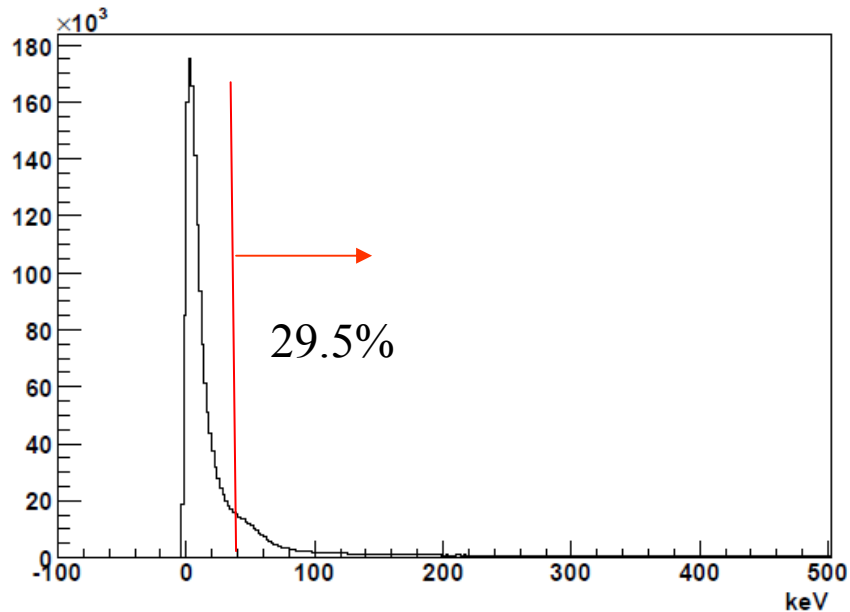
# $E_{\text{Tot}}$ 分布

イベントセレクション後: total evts =  $3.55 \times 10^7$



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(50keV以下)は観測されていない

# 不可視崩壊検出効率



- Pile-up等で50keV以上に見えてしまう割合(ランダムトリガーイベントでの見積もり、左図):29.5%
- 通常の崩壊で、放出されてポジトロンのエネルギーがCsIIに感知されてしまう割合(モンテカルロでの見積もり):6.4%  
(この場合はPsは出来ないので $e^+e^-$  →invisible(このみ適用))

ランダムトリガーで収集したイベントの  
 $E_{Tot}$ 分布

トリガー以外のカットは全て通常と同じカットを課してある

# o-Ps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:

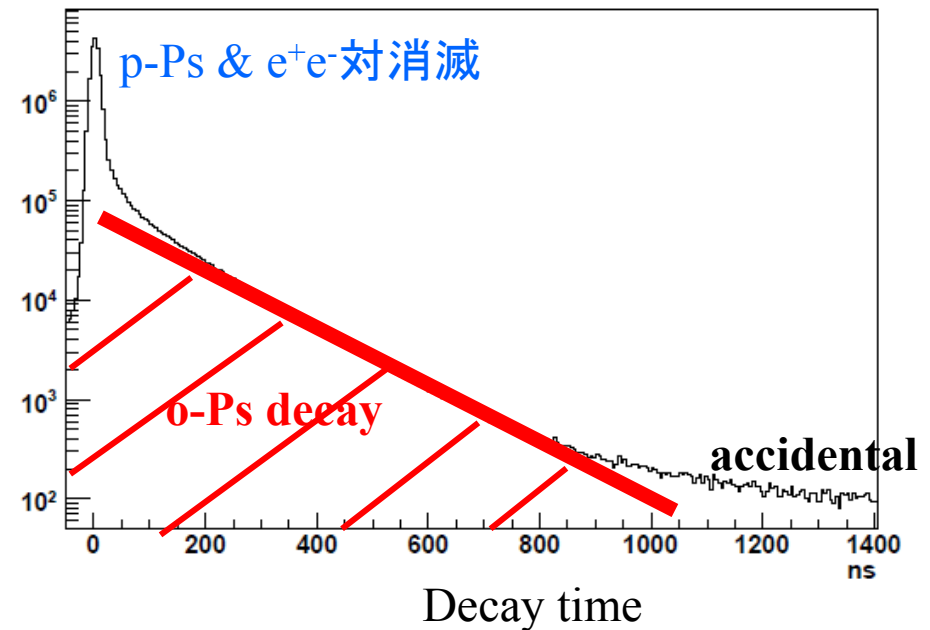
$$\tau = 130 \text{ ns}$$

- これより、o-Ps生成率:

$$P_{\text{o-Ps}} = A\tau / N\Delta t = 13.4\%$$

(N:全イベント、 $\Delta t$ :bin幅)

- $N_{\text{o-Ps}} = 4.76 \times 10^6$  イベント



# リミット

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

$$\begin{aligned} Br(e^+e^- \rightarrow \text{invisible}) &< \frac{2.3}{3.55 \times 10^7 \times 0.705 \times 0.936} \\ &< 9.8 \times 10^{-8} \end{aligned}$$

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

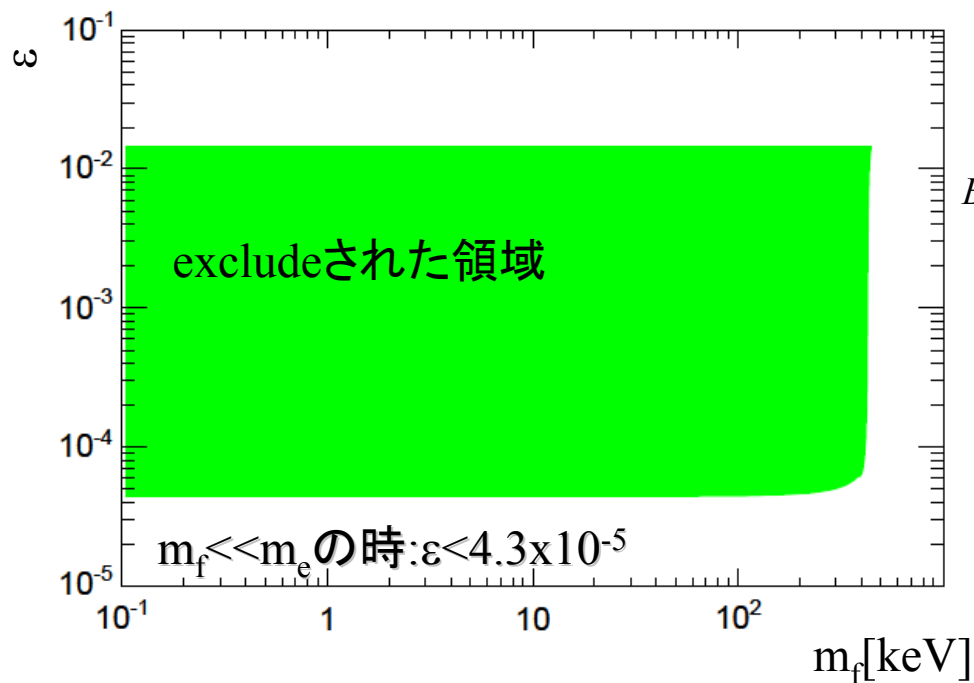
$$\begin{aligned} Br(o\text{-Ps} \rightarrow \text{invisible}) &< \frac{2.3}{4.76 \times 10^6 \times 0.705} \\ &< 6.9 \times 10^{-7} \end{aligned}$$

- 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:  $k > 0.42 \text{ TeV}$**

# その他のInterpretation



milli-charged particleへの制限

$$Br(o-Ps \rightarrow f\bar{f}) = \frac{3\pi\varepsilon^2}{4\alpha(\pi^2-9)} \sqrt{1 - \left(\frac{m_f}{m_e}\right)^2} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{m_f}{m_e}\right)^2 \right\}$$

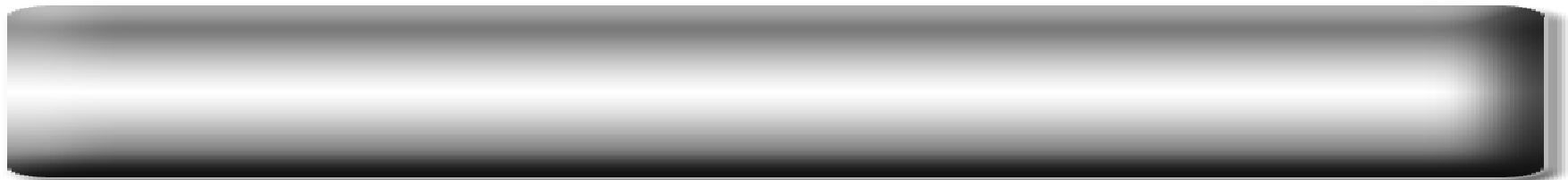
f: milli-charged particle

ε: charge ratio of milli-charged particle

ε < 1.5 × 10<sup>-2</sup> では milli-charged particle は  
この検出器では反応しない

## まとめ

- 余剰次元の理論から予言されている、 $o$ -Psの不可視崩壊を探索するため、高感度の検出器を設計、製作し実験を行った。
- 約半年間の実験の測定を行い、 $4.76 \times 10^6$ イベントの $o$ -Psイベントが得られ、この中で不可視崩壊は発見されなかった。
  - 得られたリミット：
    - $\text{Br}(o\text{-Ps} \rightarrow \text{invisible}) < 6.9 \times 10^{-7}$
    - $k > 0.42 \text{ TeV} (n=2)$



# *Back up*