

# オルソポジトロニウムの寿命測定による 束縛系QEDの実験的検証

東大素粒子センター

片岡洋介, 浅井祥二, 小林富雄

# I Introduction

# Introduction

- オルソポジトロニウム(o-Ps)
  - spin tripletの $e^+$ ,  $e^-$ の束縛系、約142nsで3 $\gamma$ に崩壊する
  - 崩壊率は、ほぼ完全にQEDによって記述される
  - 束縛系QEDのよいプローブ
- o-Ps崩壊率の計算
  - 束縛系は自由粒子と異なり非摂動的、高次補正の計算が難しい
  - 近年の計算手法の発達で $O(\alpha^2)$ 補正項の計算が可能になった

2000 G.S.Adkins et. al.  $O(\alpha^2)$ 補正項 = 240ppm  $\sim$  現在の実験精度
- 本実験の動機
  - さらに実験精度を向上させ、 $O(\alpha^2)$ の補正項を検証する

# 測定手法

- 基本的な測定法
  - 陽電子をターゲットの物質へ入射、o-Psを生成
  - o-Psの崩壊  $\gamma$  線(3  $\gamma$  体崩壊)を検出
  - この時間差を計る

- バックグラウンド

**pick-off annihilation** ~物質との相互作用による対消滅  
観測される崩壊率:  $\lambda_{\text{obs}} = \lambda_{3\gamma} + \lambda_{\text{pick}}$

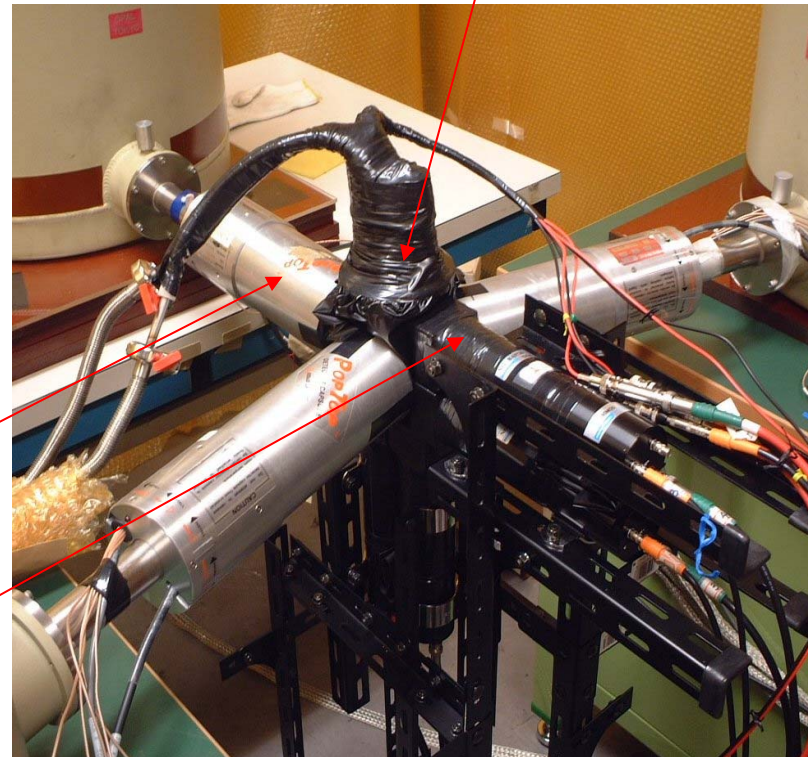
- 東大のアプローチ

**pick-off 2  $\gamma$  と3  $\gamma$  崩壊の**  
エネルギー分布の違いを利用して  
定量的にこの寄与を測定

2種類の  $\gamma$  線検出器

- **Ge検出器** (pick-off測定)
- **シンチレータ** (タイムスペクトラム測定)  
→ 後述

positronium  
formation assembly



# 今回のセットアップ

特徴: ボトルネックであった統計誤差を克服する

- ポジトロニウム生成効率の改善
- 高統計に適した高速無機シンチレータの導入

## ① positronium formation assemblyの最適化

### • 陽電子線源

前回の測定  $^{22}\text{Na} \rightarrow ^{68}\text{Ge}$  (Endpoint 1.7MeV)

線源強度 約10kBq

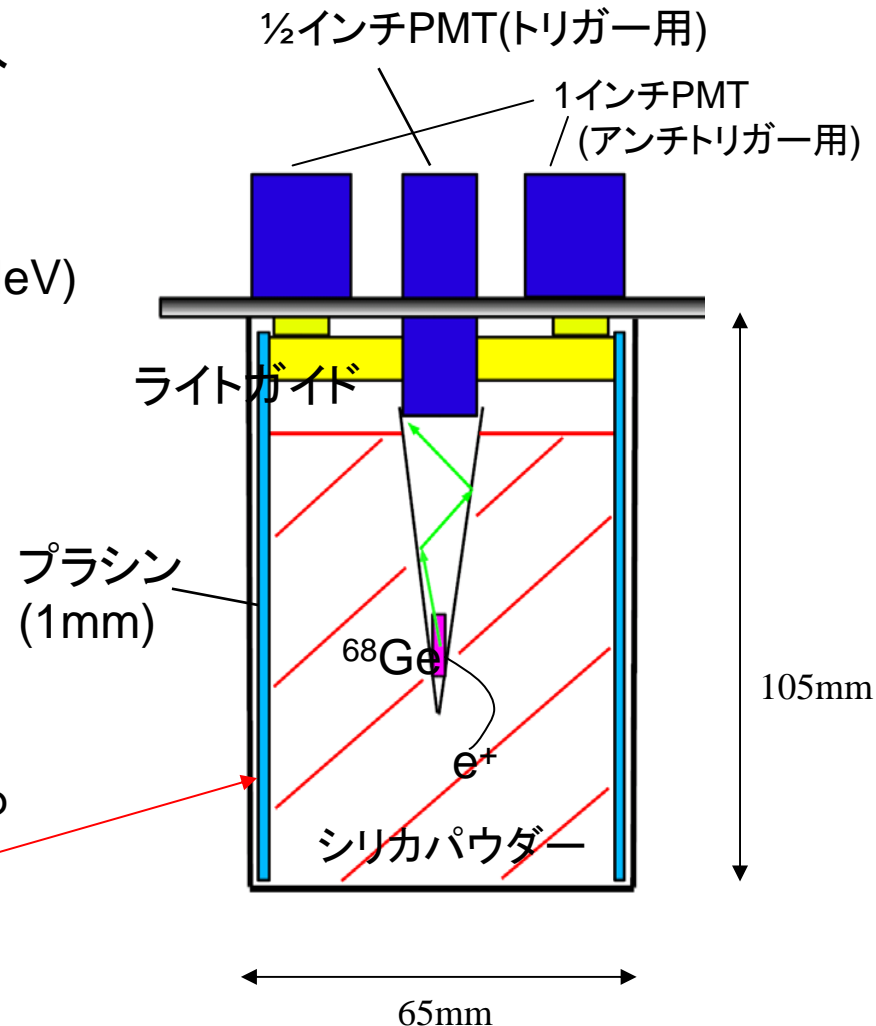
この線源に基づいてassemblyを設計

### • トリガー

- 薄いプラシン(200  $\mu\text{m}$ )で線源を挟む
- アルミナイズドマイラーで光収集

### • アンチトリガー

- 約半数の $e^+$ がターゲットのシリカを抜ける  
→ DAQLートを圧迫
- 円筒形プラシン(1mm)で陽電子を捕捉  
トリガーをveto



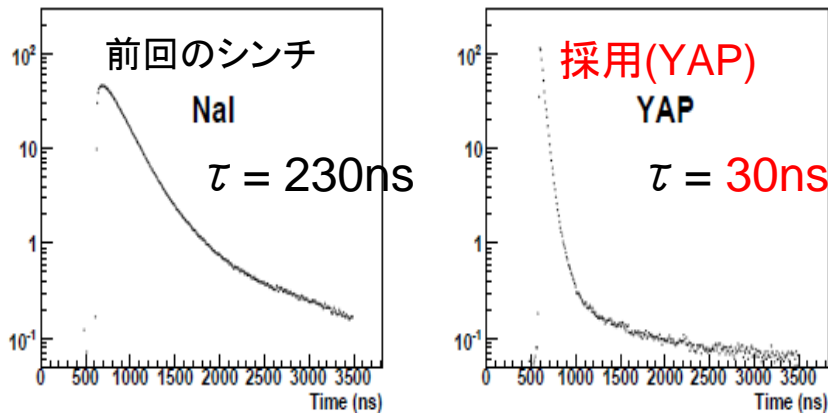
## ② 高速無機シンチレータの導入

今回の測定の要求

- 高統計化(線源強化)のためにpile upを減らす
- 時間分解能をさらに小さくする

高速無機シンチレータを測定、比較  
遅い(シンチレータ光)成分の小さなシンチ

signal shape (FADC)

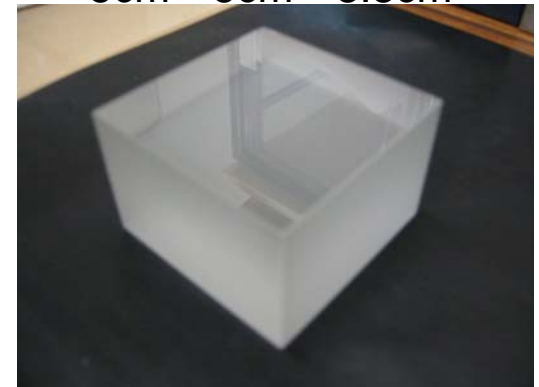


- YAPシンチレータを採用
  - pile upを一桁抑制
  - 時間分解能 1ns ( $E > 150\text{keV}$ )

YAPシンチレータの性質

name	YAP ( $\text{YAIO}_3$ )
atomic number	39
density	$5.37 \text{ g/cm}^3$
emision peak	370 nm
light output	40% of NaI
decay constant	<b>30 ns</b>
光の吸収長	15~20 cm

今回使用したYAPの結晶  
5cm × 5cm × 3.3cm

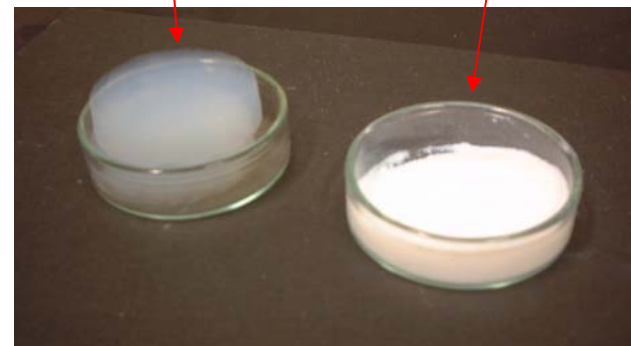


## II Analysis

Data sample	period	target
• <b>RUN I</b> 2006 autumn	2.3ヶ月	シリカエアロジェル
• <b>RUN II</b> 2007 spring	3.1ヶ月	シリカパウダー

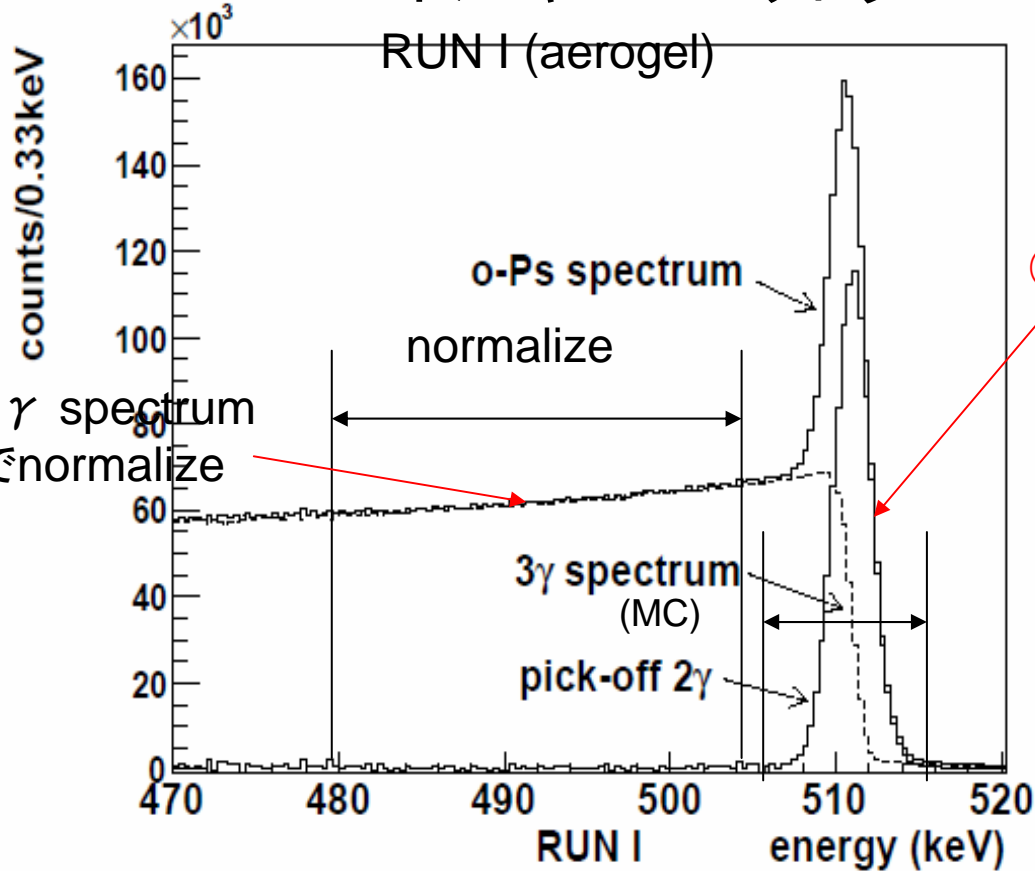
シリカエアロジェル  
( $0.03\text{g}/\text{cm}^3$ )

シリカパウダー  
( $0.035\text{g}/\text{cm}^3$ )



# pick-off ratioの測定

## Geエネルギースペクトラム



③ pick-off ratio

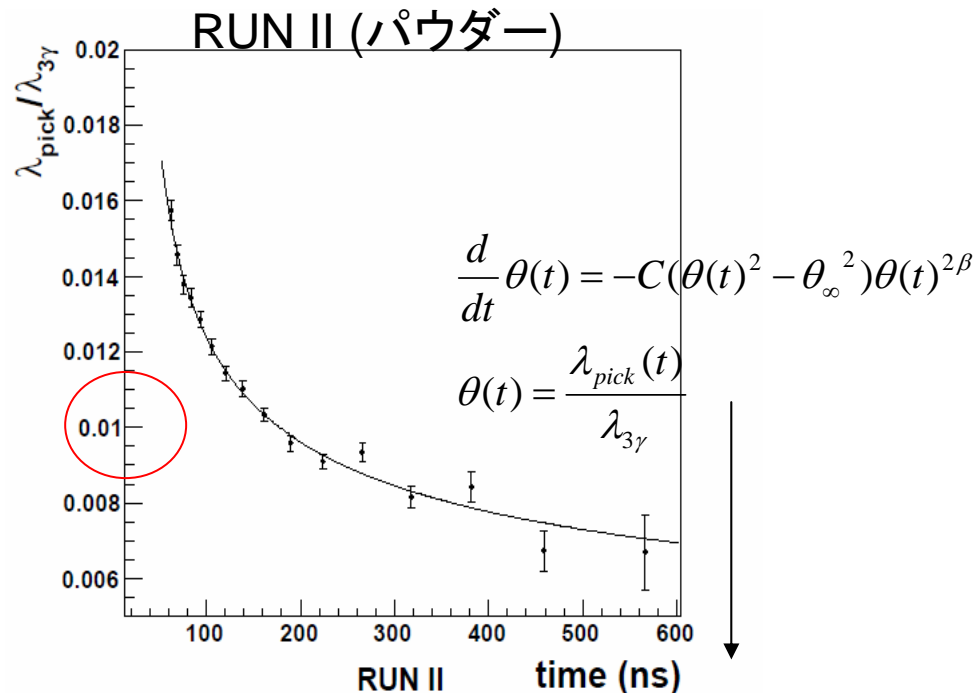
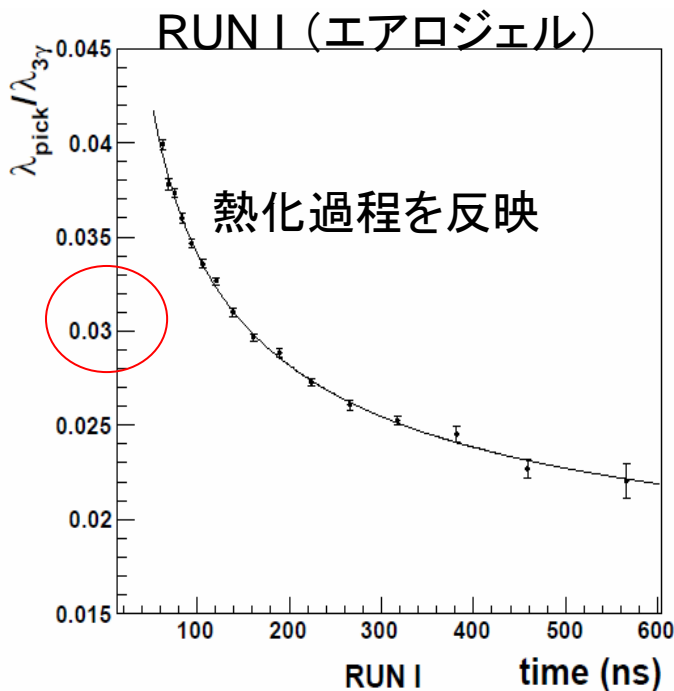
$$\frac{\lambda_{pick}}{\lambda_{3\gamma}} = \frac{N_{pick}(511keV \pm 4keV)}{N_{3\gamma}(480keV \sim 505keV)} \times F, \quad F = \frac{\epsilon_{3\gamma}}{\epsilon_{pick}} \sim 0.14 \text{ (MCで評価)}$$



# pick-off ratioの時間依存性

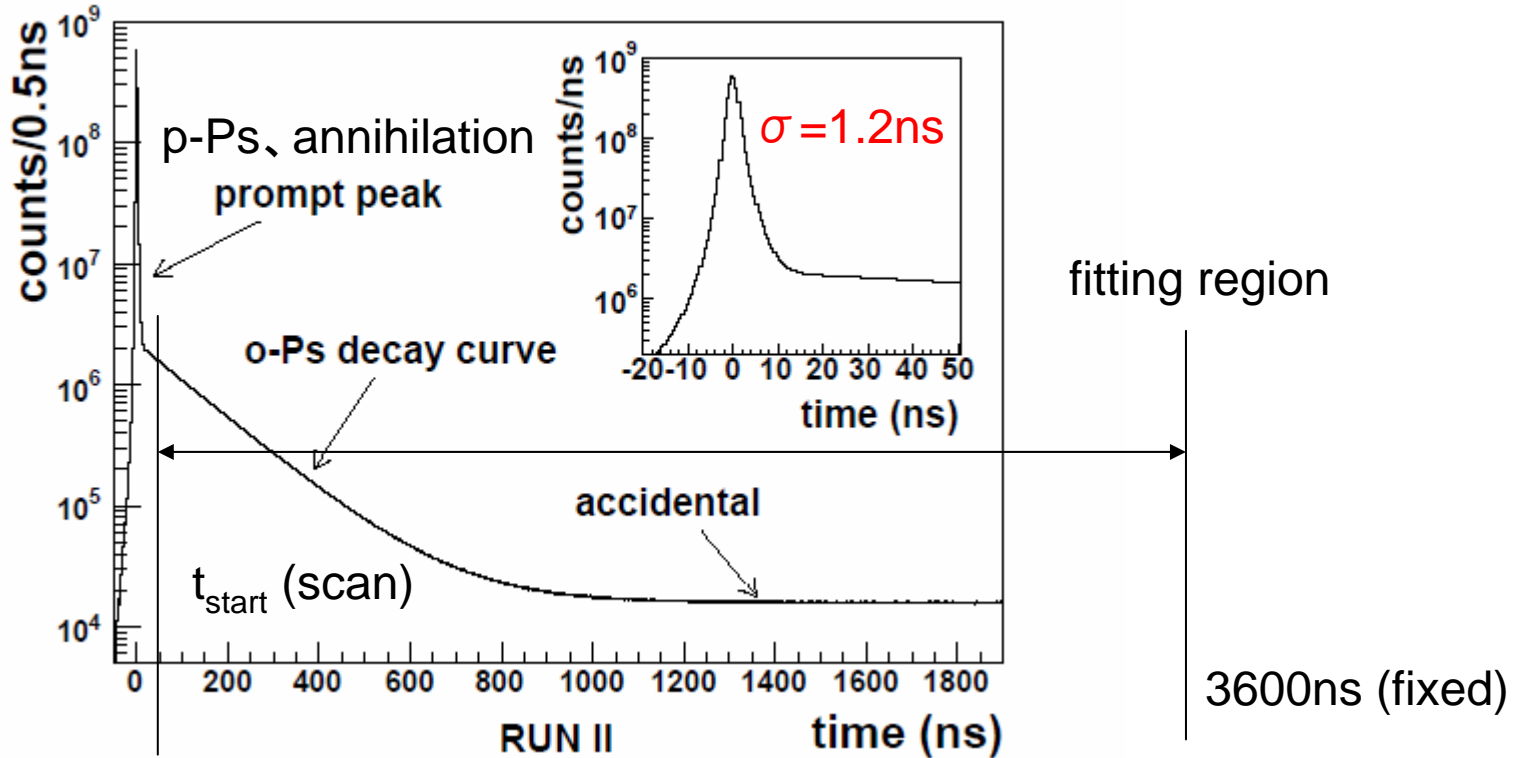
Geの検出時間 → pick-off ratioの時間依存性

- o-Psの熱化過程を反映したカーブ
- エアロジェル約3%、パウダー約1%  
→ 凝縮構造の違い(フリースペースの大きさの違い)を示唆している



タイムスペクトラムの  
フィッティング関数に組み込み

# YAPシンチレータのTime Spectrum



Fitting function:

$$N_{obs} = e^{-R_{stop}t} \left[ \left( 1 + \frac{\epsilon_{pick}}{\epsilon_{3\gamma}} \frac{\lambda_{pick}(t)}{\lambda_{3\gamma}} \right) N_0 \exp \left( -\lambda_{3\gamma} \int_0^t \left( 1 + \frac{\lambda_{pick}(t')}{\lambda_{3\gamma}} \right) dt' \right) + C \right]$$

pick-off ratio(測定値)

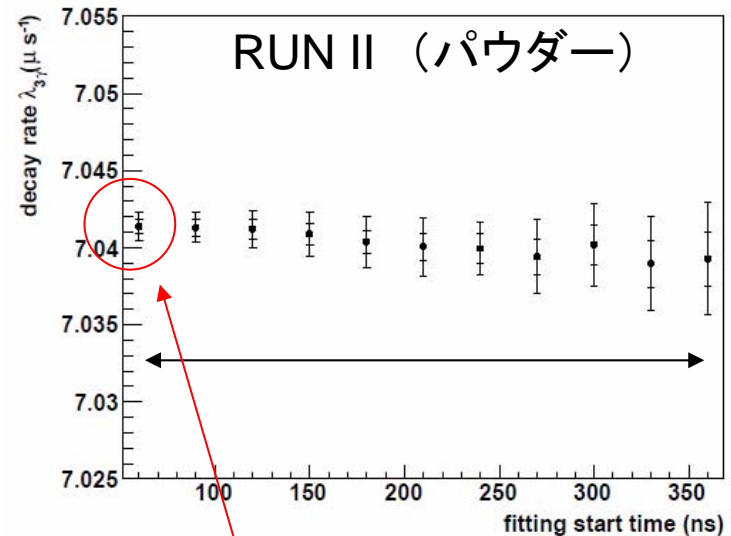
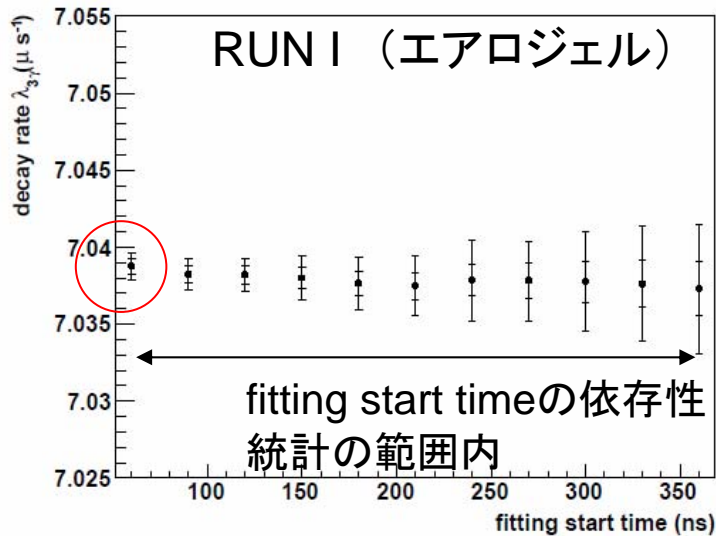
YAPのefficiency  $\sim 0.7$  (MCで評価)

free parameters:  $N_0$ ,  $\lambda_{3\gamma}$ , C

# Decay rate fitting

pick-off外挿領域

- fitting start timeを変化させてprompt(t=0)付近の振る舞いをみる



統計エラーのみ

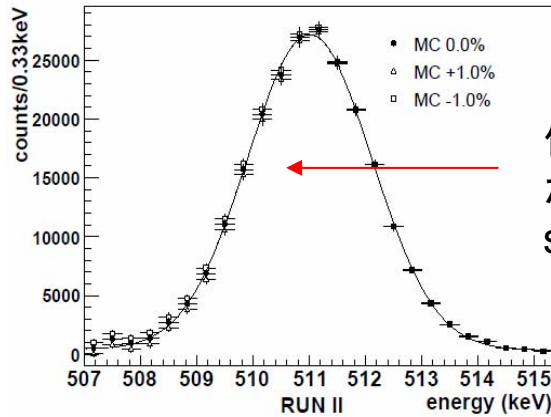
- 内側: time spectrumの統計
- 外側: pick offの関数の統計を含む

- 安全のためpick-offの内挿領域を使用  
 $T_{\text{start}}=60\text{ns}$  を採用

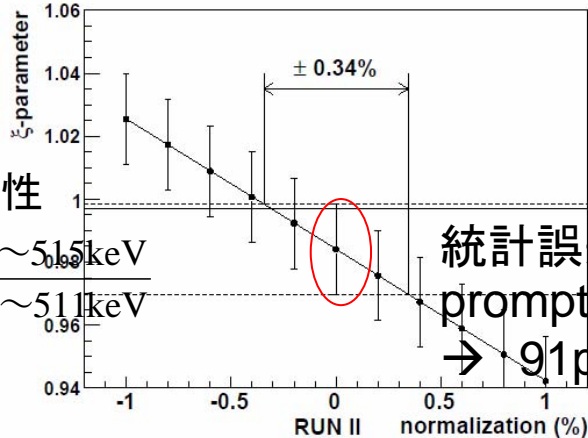
# systematic error

## ① 2 $\gamma$ ・3 $\gamma$ の分離

pick-offスペクトラムの  
511keVピークの非対称性で評価



低エネルギー側  
が3 $\gamma$ の差引きに  
sensitive



非対称性

511keV $\sim$ 515keV

507keV $\sim$ 511keV

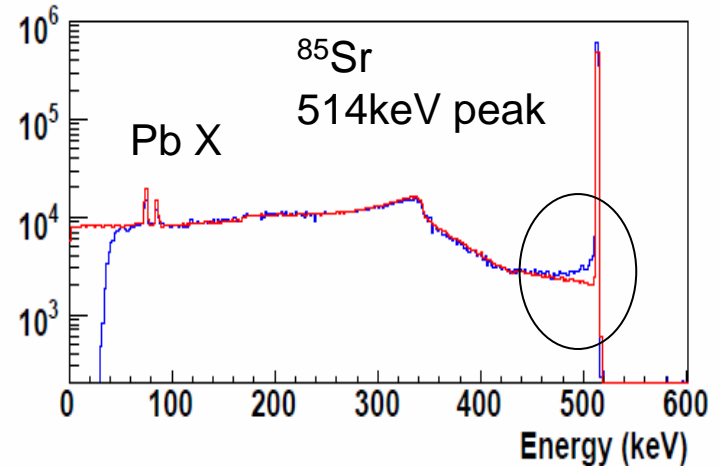
統計誤差の範囲で  
prompt イベントと一致  
→ 91ppmに相当

3 $\gamma$  (MC) のnormalization

## ② detection efficiency

MC(Geant4)の不定性を  
 $^{85}\text{Sr}$  514keV  $\gamma$  線で評価

- 基本的に再現性はよい
- 光電ピークに約1%のテール  
(不完全な電荷収集)

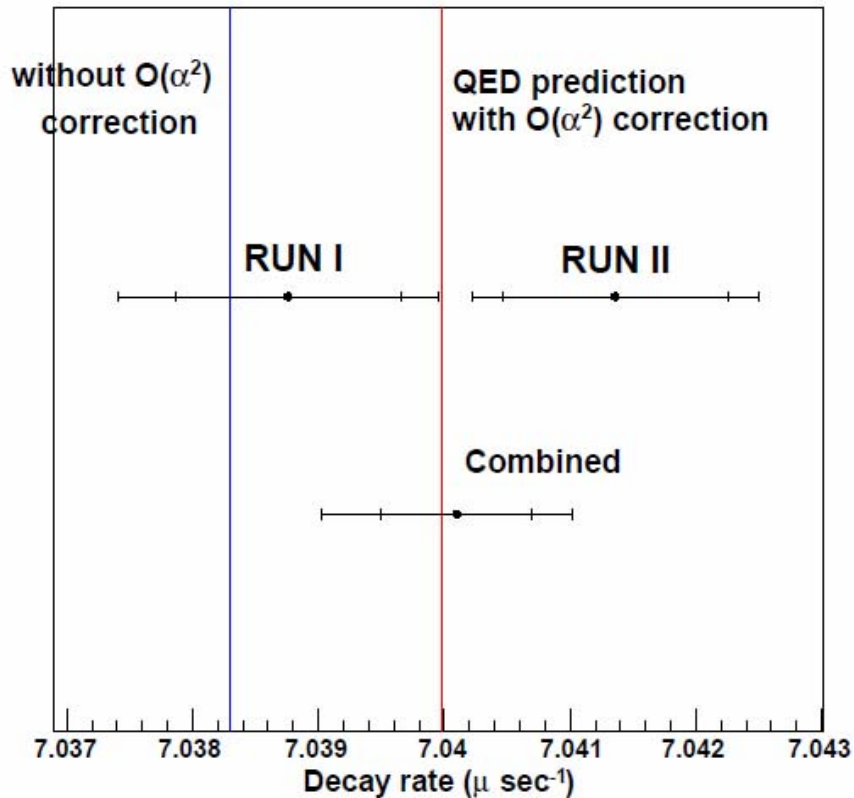


exponentialでfitし、  
response functionとして取り込む

→ 28 ppm

# III Result

# 測定結果



全体 : total error  
内側 : statistic error

For RUN I

$$\lambda_{o-Ps} = 7.0388 \pm 0.0009 (stat.) \begin{matrix} + 0.0008 \\ - 0.0010 \end{matrix} (sys.) \mu s^{-1}$$

For RUN II

$$\lambda_{o-Ps} = 7.0414 \pm 0.0009 (stat.) \begin{matrix} + 0.0007 \\ - 0.0007 \end{matrix} (sys.) \mu s^{-1}$$

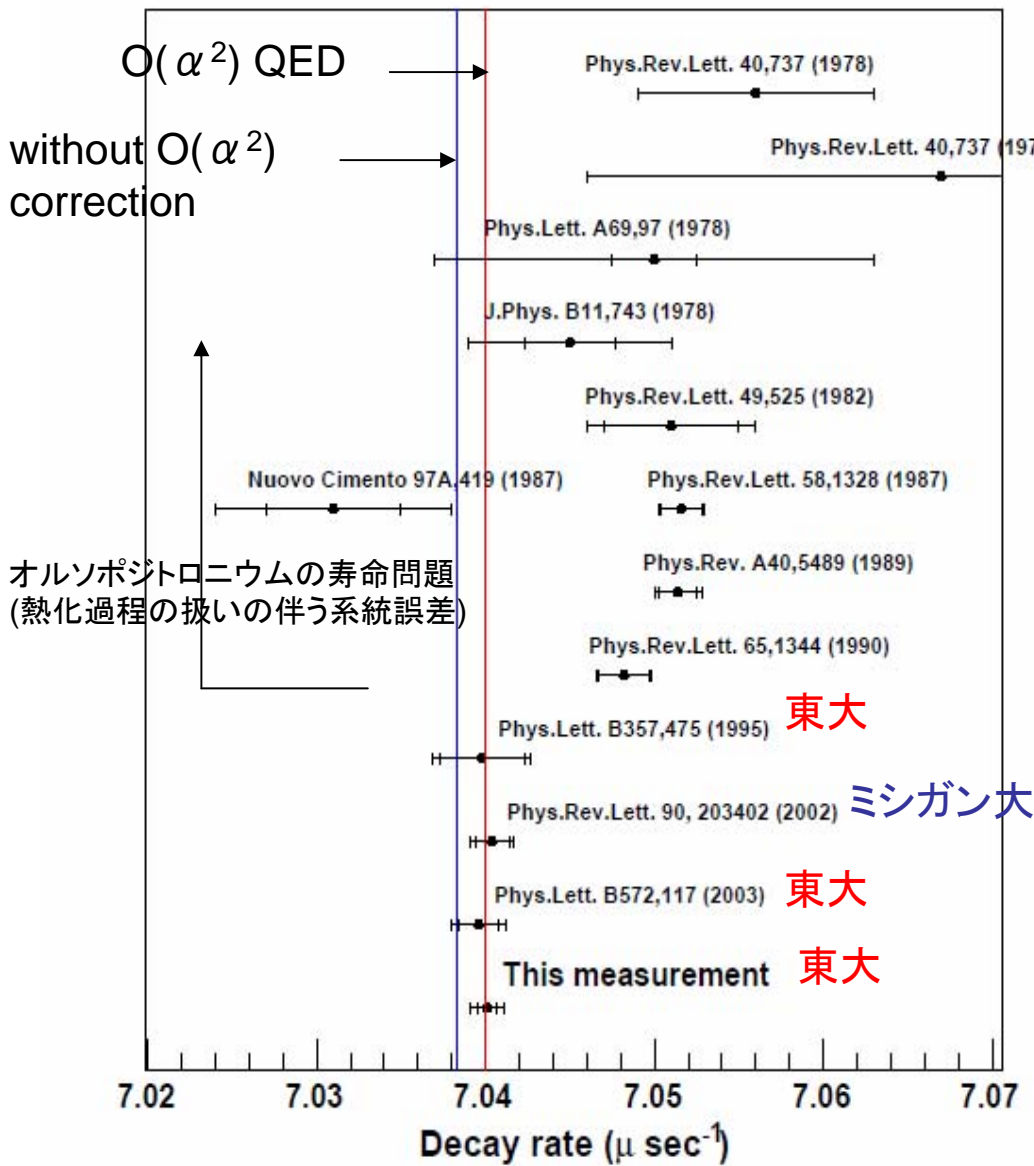
→ 2つのRUN 1.6σ でコンシステント

Combined

$$\lambda_{o-Ps} = 7.0401 \pm 0.0006 (stat.) \begin{matrix} + 0.0007 \\ - 0.0009 \end{matrix} (sys.) \mu s^{-1}$$

- total error 150ppm
- $O(\alpha^2)$  QED計算値とコンシステント
- $O(\alpha)$ とは1.7σの差

# 今回の測定結果と崩壊率測定の世界



## 今回の測定

$$\lambda_{o-Ps} = 7.0401 \pm 0.0006 (stat.)_{-0.0009}^{+0.0007} (sys.) \mu s^{-1}$$

- 過去3つの実験とコンシステント



## 1995以降4実験のcombine

$$\lambda_{o-Ps} = 7.0401 \pm 0.0007 (total.) \mu s^{-1}$$

$O(\alpha)$ 計算値と $2.6\sigma$ の差  
 $\rightarrow O(\alpha^2)$ 補正項を支持

オルソポジトロニウムの寿命問題  
 (熱化過程の扱いの伴う系統誤差)

# IV Summary



# まとめ

- pick-offを直接補正する実験手法に基づき、  
パウダー、エアロジェルを用いた2回の測定を行った  
→ 2つのRUNでコンシステントな測定値を得た
- combined resultの実験精度は約150ppm  
過去3実験の測定値、及び  $O(\alpha^2)$  QED計算値とコンシステント
- $O(\alpha)$ QED計算値との差は $1.7\sigma$ 、  
過去3実験の結果と合わせると $2.6\sigma$   
→ 実験結果は $O(\alpha^2)$ 補正項を支持