

オルソポジトロニウム崩壊ガンマ線の エネルギースペクトル精密測定

安達俊介, 山道智博, 石田明, 難波俊雄^A, 浅井祥仁, 小林富雄^A
東大理, 東大素セ^A

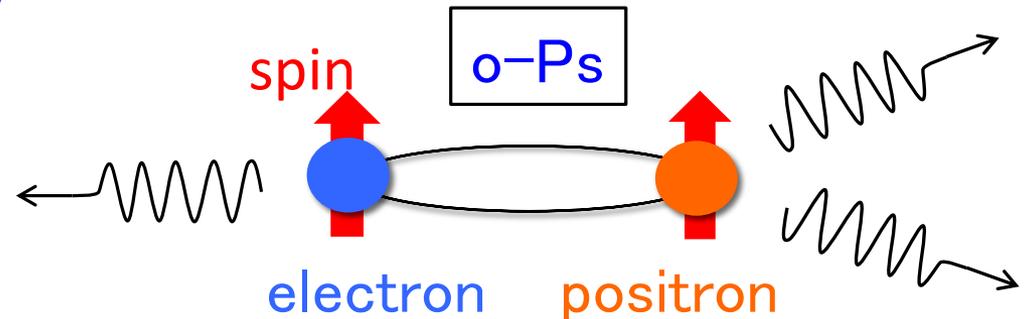
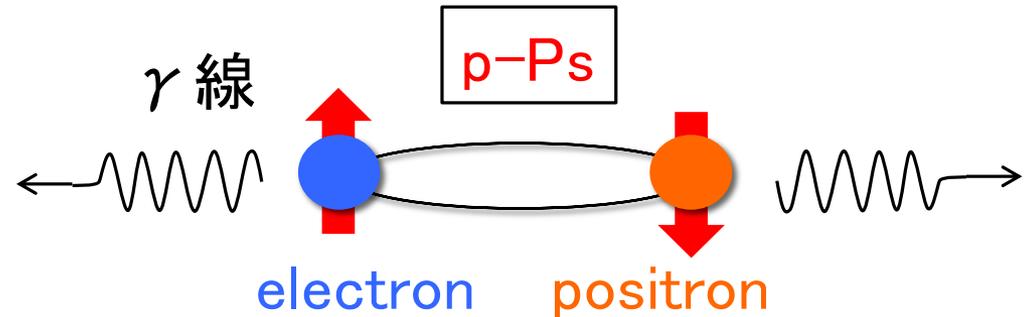
平成26年9月18日 日本物理学会 2014年秋季大会 @ 佐賀大学

目次

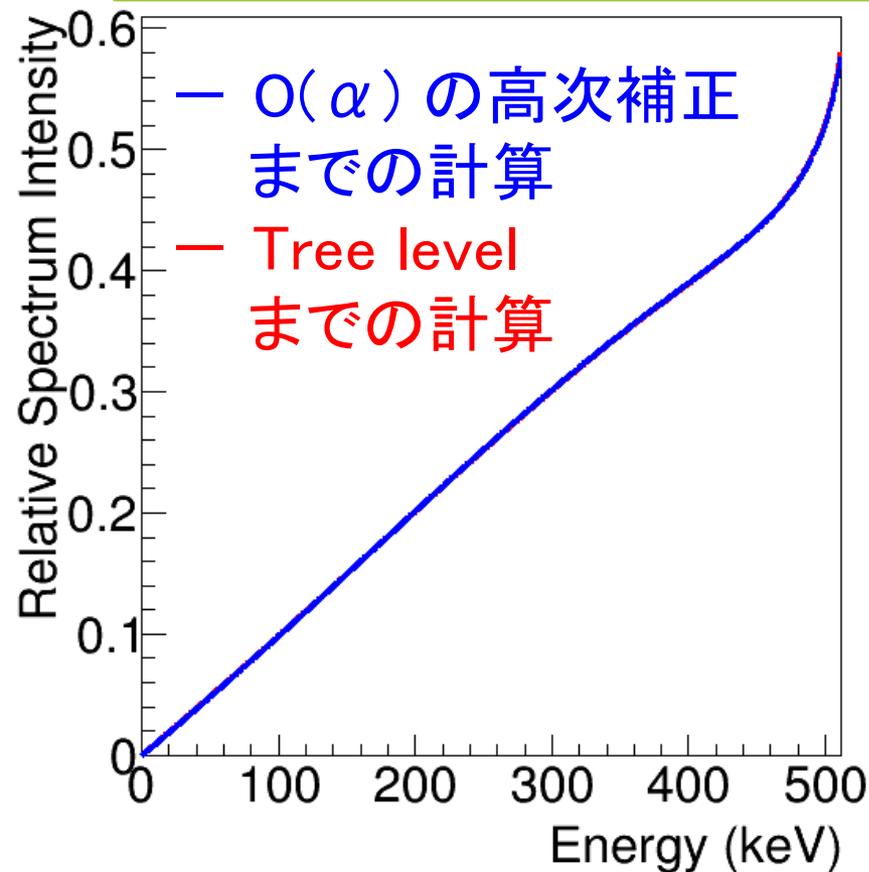
- ◆ イン트로ダクション
- ◆ 実験セットアップ
- ◆ バックグラウンドの除去
- ◆ Monte Carlo シミュレーション
- ◆ 解析方法
- ◆ 結果
- ◆ まとめ

ポジトロニウム (Ps)

- 陽子と電子の束縛系
- パラポジトロニウム (p-Ps)
 - spin singlet ($S=0$) 状態
 - 2本の γ 線に崩壊
 - 短寿命
- オルソポジトロニウム (o-Ps)
 - spin triplet ($S=1$) 状態
 - 3本の γ 線に崩壊
 - ⇒ 連続スペクトル
 - ・長寿命



オルソポジトロニウム ($o\text{-Ps}$) 崩壊 γ 線のエネルギースペクトル (QED 計算)



- $O(\alpha)$ のスペクトルは未だに
測定・検証されていない

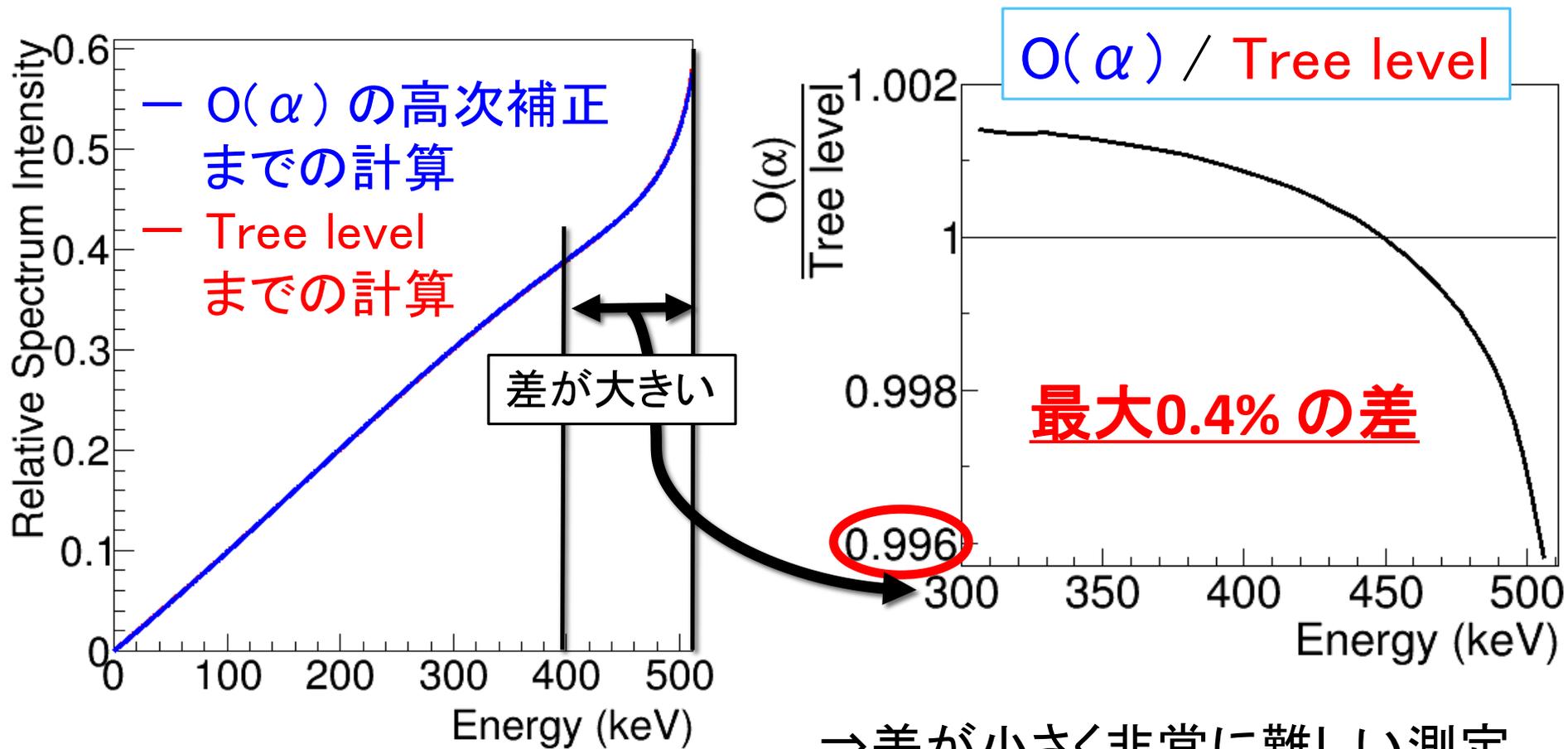
スペクトル \Leftrightarrow 微分反応断面積
微分情報を持つ



精密に測定されている
 $o\text{-Ps}$ 寿命 (\Leftrightarrow 全反応断面積) とは違い、
新物理に異なった感度を持つ

本実験では $O(\alpha)$ のスペクトル
を測定・検証する

オルソポジトロニウム (o-Ps) 崩壊 γ 線のエネルギースペクトル (QED 計算) の差



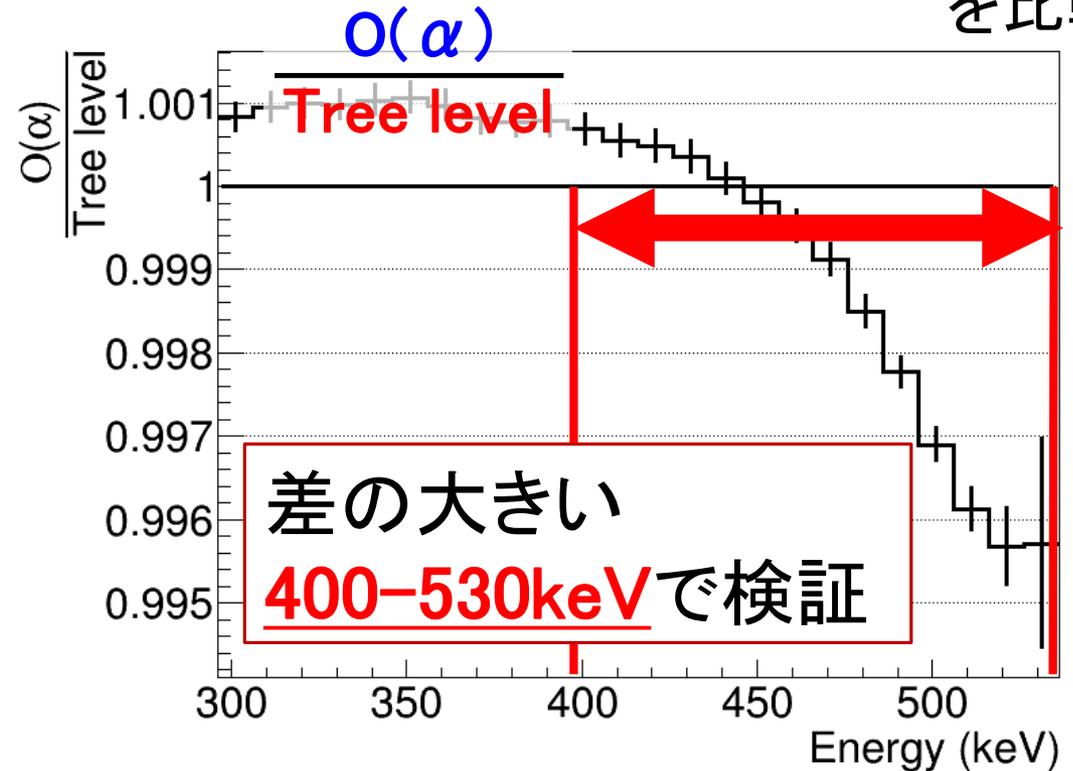
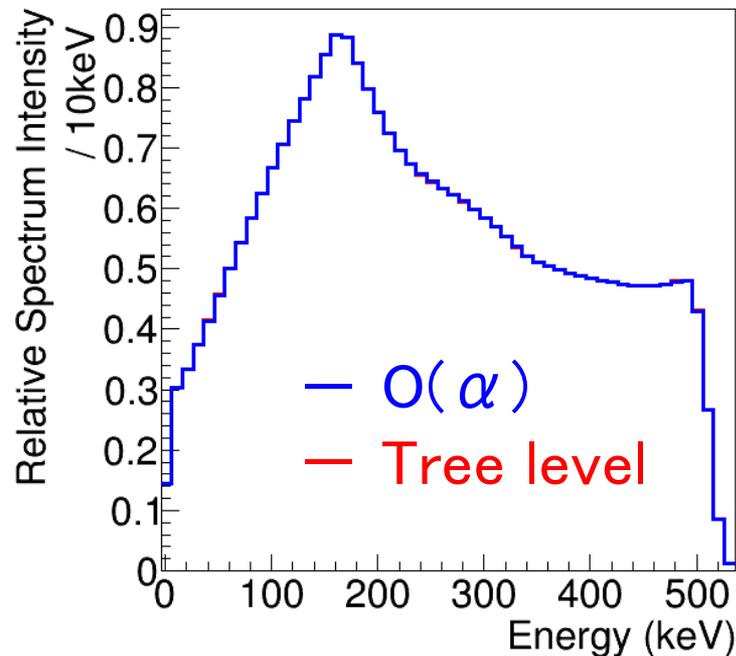
⇒ 差が小さく非常に難しい測定

期待される測定スペクトル(シミュレーション)

- 検出器のレスポンス
- 周囲の物質での散乱の効果
で測定されるスペクトルは変化

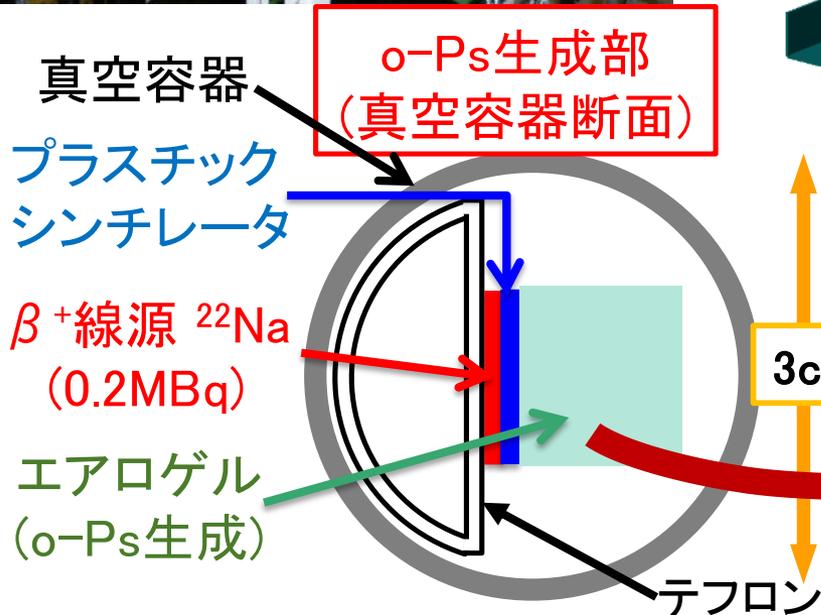
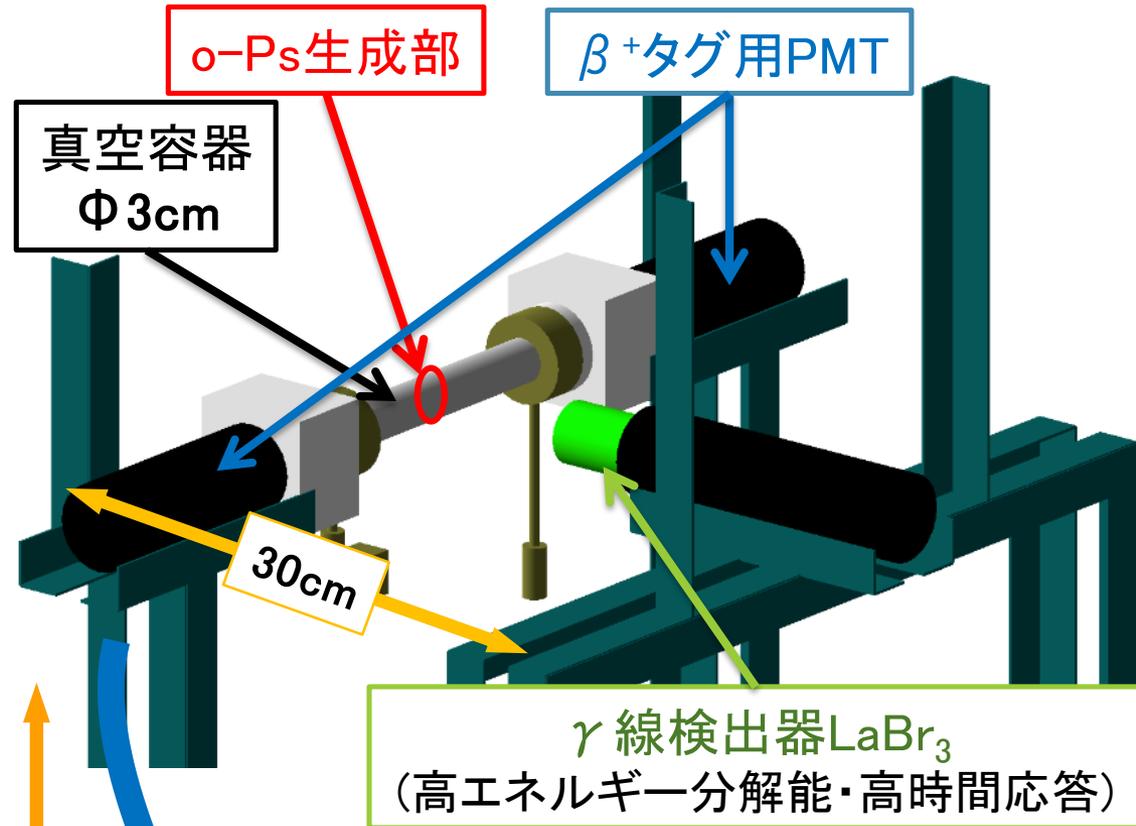
左の効果を Monte Carlo
シミュレーションで求めて、
QED計算&シミュレーションから得られるスペクトルと測定スペクトル

を比較



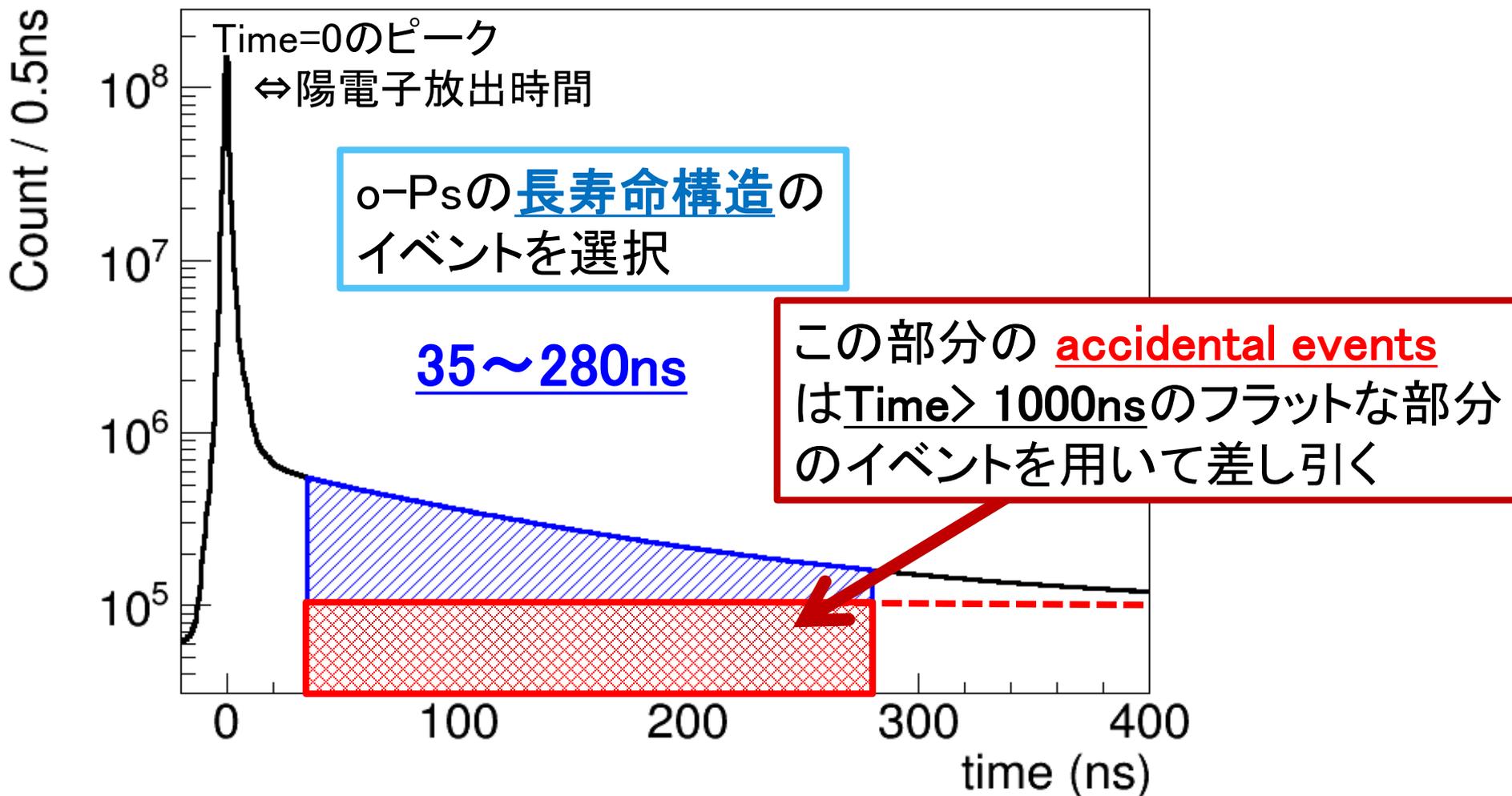
実験セットアップ

4ヶ月run : 5.6×10^9 events 取得



- スペクトルの変化を減らすために
- 床から1m離れた
 - o-Ps生成部の低物質量化
テフロンより軽い物のみで構成

時間スペクトルによる selection

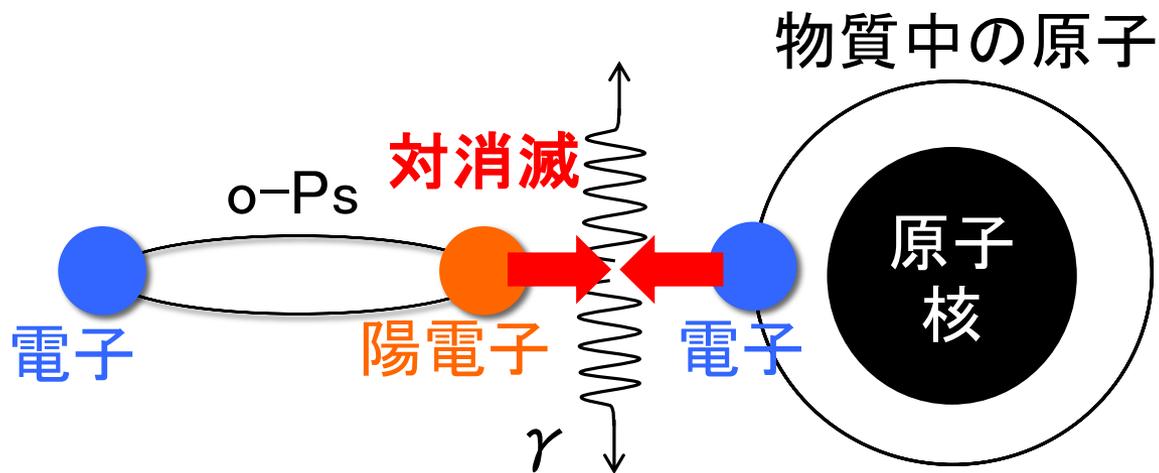


測定寿命 : 129 ± 1ns (o-Ps の寿命 : 142.05ns)

Pick-off 崩壊によるバックグラウンド

測定寿命が小さいのは選択したイベントに
pick-off崩壊によるバックグラウンドが含まれているため

Pick-off 崩壊



O-Ps中の陽電子が他の原子中の電子と対消滅し、
2本のγ線(2γ崩壊)を生じるイベント

511keVにピークを持つため、高い精度で除去する必要がある
⇒測定から2γ崩壊のエネルギースペクトルを求めた

2 γ 崩壊エネルギースペクトルの測定

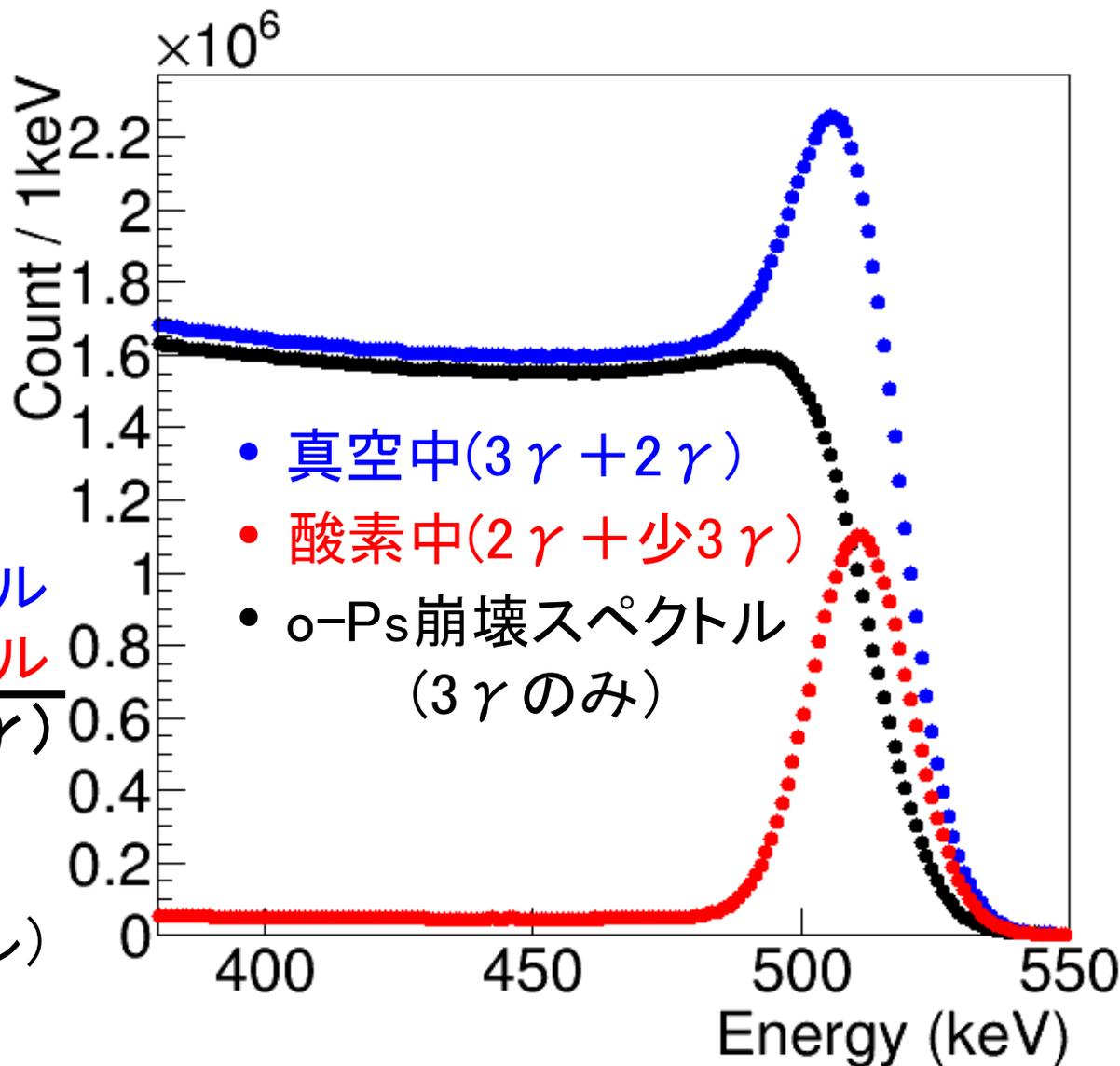
酸素中で2 γ 崩壊が増加
⇒真空容器に酸素ガスを封入して別測定を行い、2 γ 崩壊のエネルギースペクトルを求めた

真空中の測定スペクトル

一) 酸素中の測定スペクトル

o-Ps崩壊スペクトル(3 γ)

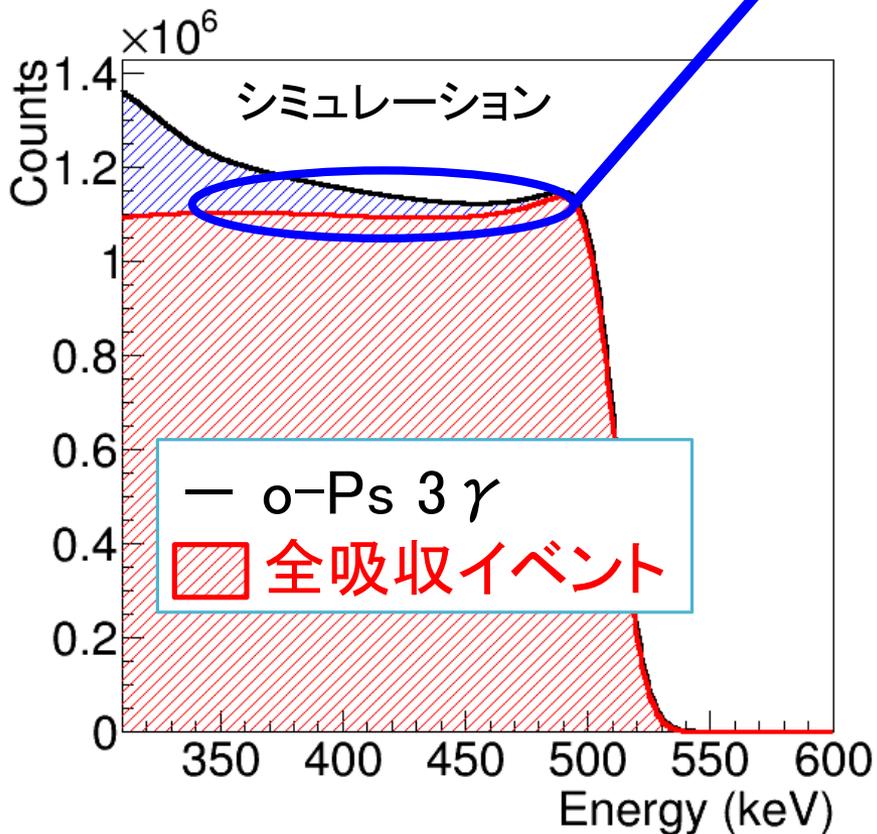
* 酸素スペクトルを差し引く割合(縦のスケール)については後述



シミュレーションの主な不定性

シミュレーションは
GEANT4を使用

LaBr₃に落としたエネルギーが元の
 γ 線のエネルギーより小さいイベント



特に周囲の物質での散
乱といった複雑な過程

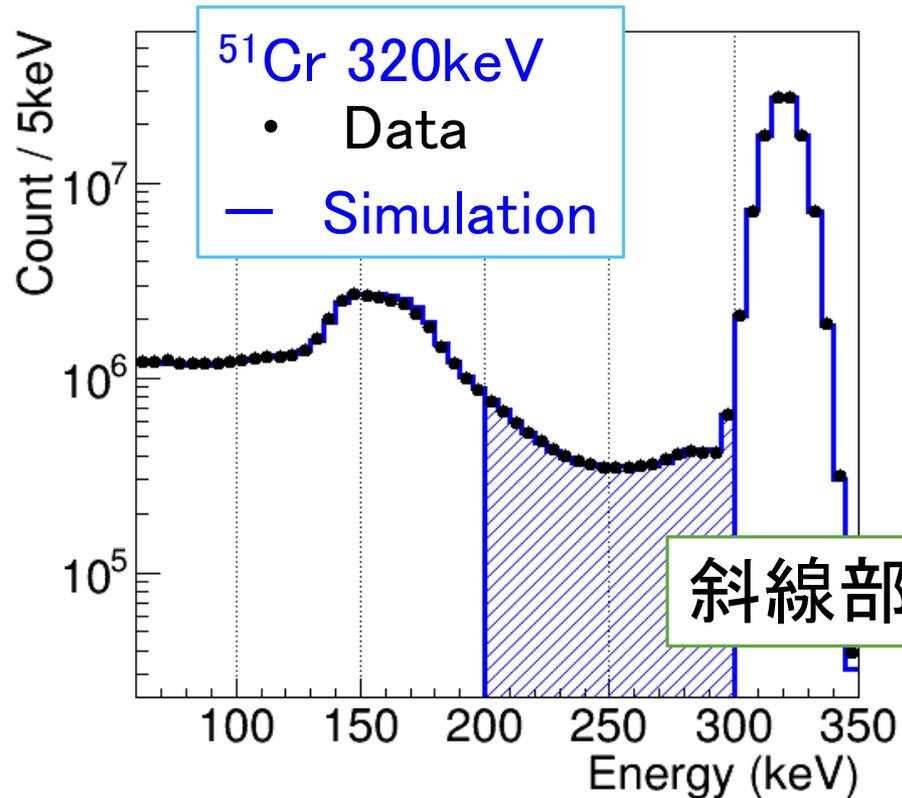
⇒シミュレーション
の不定性が大きい

以下の2つの単色線源で
コンプトンエッジから全吸収ピーク
にかけてシミュレーションと実測を
比較した

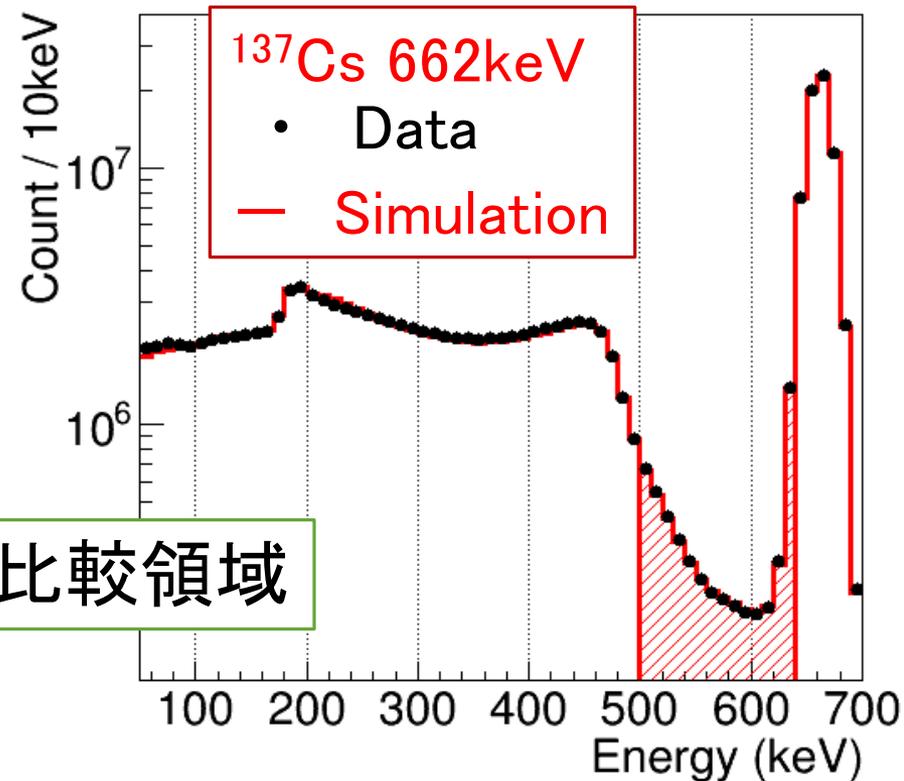
- ⁵¹Cr 320keV
- ¹³⁷Cs 662keV

単色線源の比較

* 全吸収ピークでnormalizeしている



3.4%以内で一致



3.1%以内で一致

シミュレーションの系統誤差

の部分

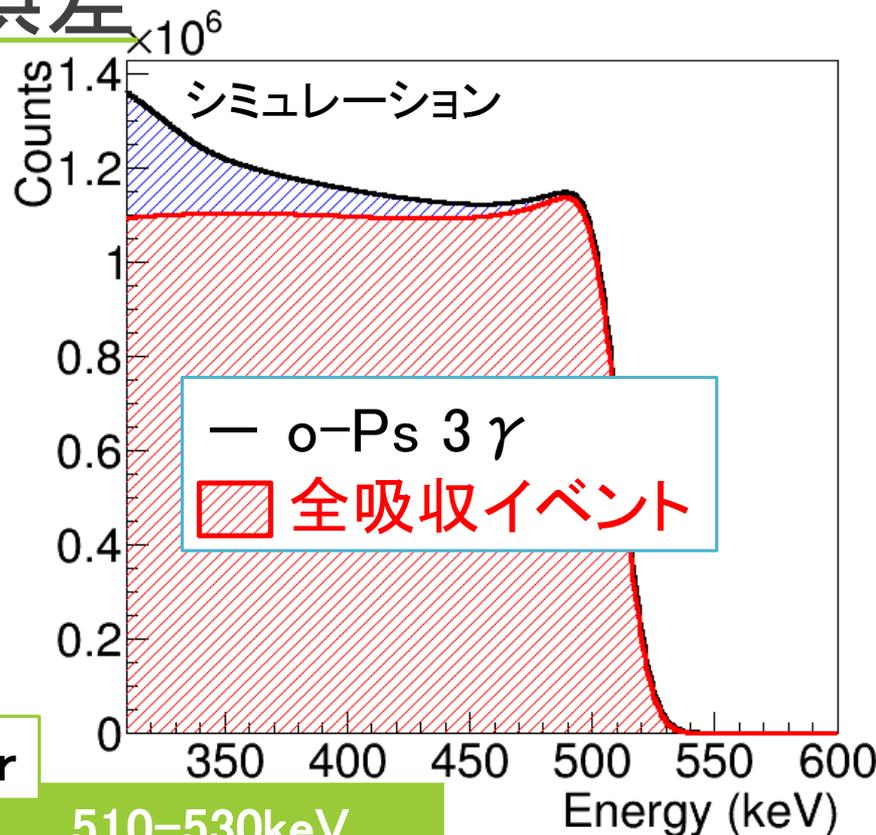
⇒ 400keV以上で 5%以下

シミュレーションの系統誤差には

1. の部分 単色線源の3.4%の誤差

2. の部分 LaBr₃の位置の誤差
 =位置±2mmによる変化
 (シミュレーションで求めた)

を計上



シミュレーションの error

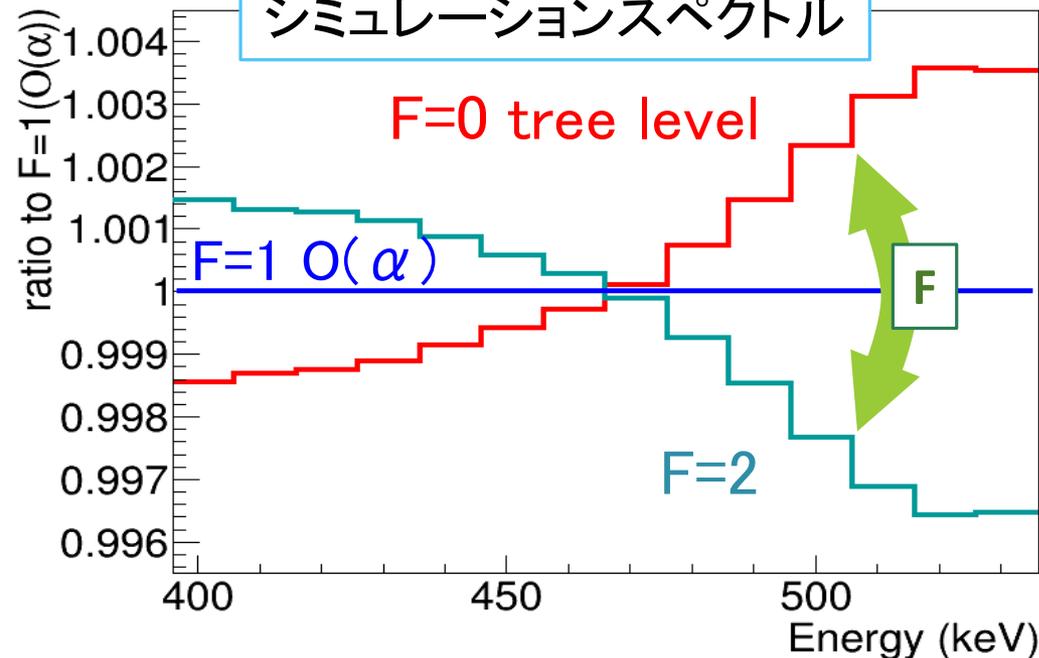
エネルギー領域	400-500keV	510-530keV
1. の sys. error	0.17-0.02%	0.02-0.30%
2. の sys. error	<0.02%	
Stat. error	~0.01%	0.02-0.09%
Total error	0.17-0.03%	0.03-0.31%

$O(\alpha)$ と tree level の比較をするために

シミュレーションスペクトルに以下の **parameter F** を導入

$$\begin{aligned} (\text{シミュレーションスペクトル}) = & \\ & \mathbf{F} \times (\mathbf{O}(\alpha)\text{のシミュレーションスペクトル}) \\ & + (1-\mathbf{F}) \times (\text{tree levelのシミュレーションスペクトル}) \end{aligned}$$

$O(\alpha)$ のスペクトルを1とした
シミュレーションスペクトル



F=0: tree level に従うスペクトル

F=1: $O(\alpha)$ に従うスペクトル

$F \Leftrightarrow$ 500keV付近の傾き

シミュレーションスペクトルを測定スペクトルに χ^2 fitting して F を求めて、測定スペクトルが **tree level** を支持するか、 **$O(\alpha)$** を支持するかを見る。

O-Ps測定スペクトルとシミュレーションスペクトルの χ^2 fitting 方法

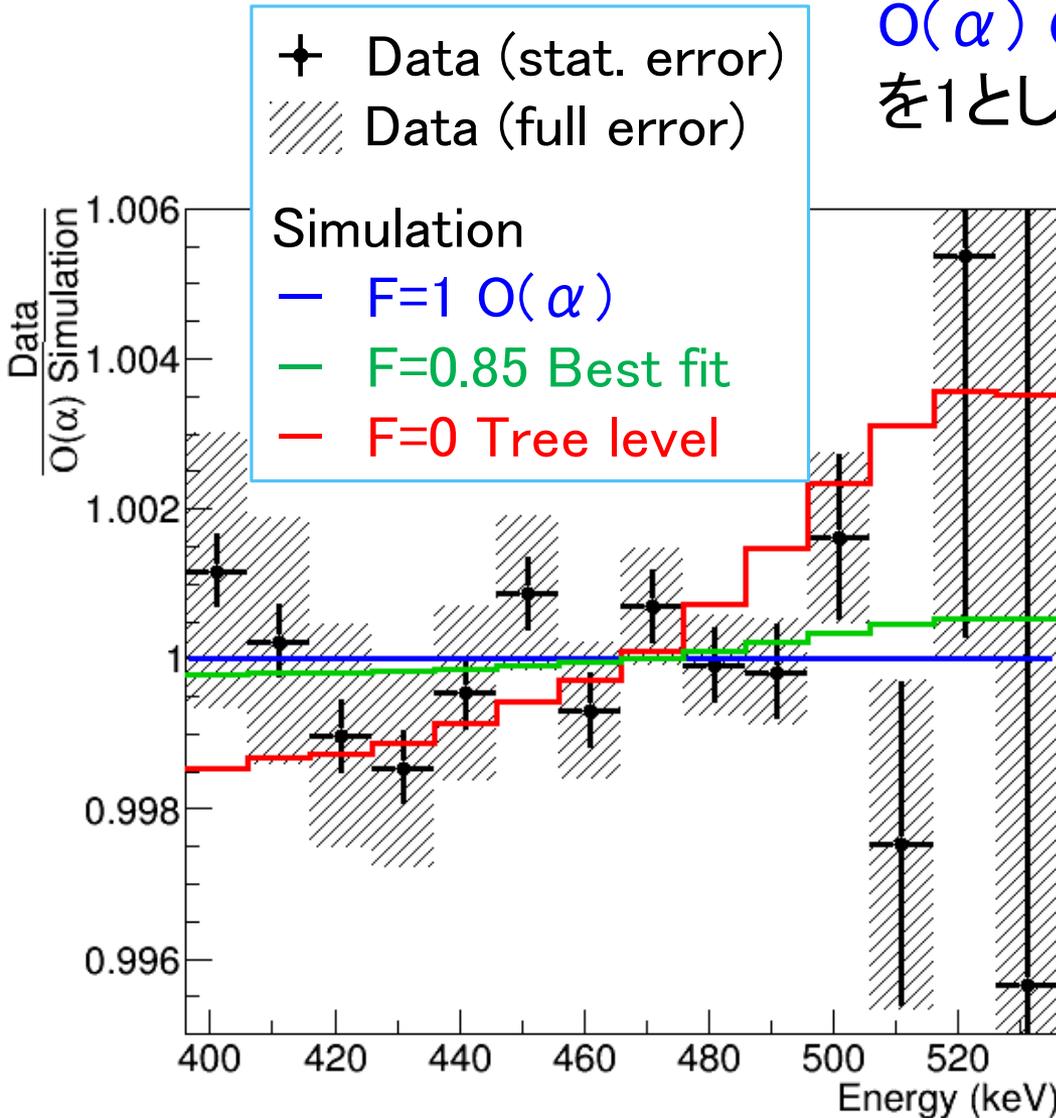
- 比較領域は400–530keV
 - ✓ $O(\alpha)$ の寄与が大きい
 - ✓ 周囲の物質による不定性が小さい
- 測定スペクトルとシミュレーションスペクトルは比較領域の総イベント数でnormalizeして縦を合わせる
- 測定スペクトルとシミュレーションスペクトルとの χ^2 fitting をするときの free parameter は以下の3つ;
 - ① $O(\alpha)$ か **tree level** かを表す “F”
 - ② 検出器の resolution による シミュレーションスペクトルの smear量
 - ③ 酸素スペクトルを差し引く割合(pick-off崩壊イベントの割合)

χ^2 fitting 結果

左図：

$O(\alpha)$ のシミュレーション

を1としたときのエネルギースペクトル



結果

$$\chi^2 / n = 8.79 / 10$$

① $F = 0.85 \pm 0.62$
(@68.3% C.L.)

$F > 0.02$ (@90% C.L.)

その他の free parameter

② Smear量：

$$\sigma = 9.27 \pm 0.05 \text{ keV} @ 511 \text{ keV}$$

⇒ 単色線源の σ と無矛盾

③ Pick-off崩壊の割合：

$$13.70 \pm 0.04\%$$

⇒ 測定寿命と無矛盾

まとめ

- O-Ps崩壊 γ 線のエネルギースペクトルで、初めての $O(\alpha)$ の高次補正までの測定・検証を試みた
- シミュレーションで高い精度(0.1%程度)を達成
- 400–530keV での χ^2 fitting の結果、
 $F = 0.85 \pm 0.62$ となり $O(\alpha)$ に無矛盾、
tree levelを90%C.L.で棄却する結果を得た