## 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における 高次補正の初検証

First test of  $O(\alpha)$  correction on the energy spectrum in the orthopositronium decay

理学系研究科物理学専攻 浅井研究室 安達 俊介

修士論文審査会 2015/01/21(水)

#### 目次 1/2

- ◆ はじめに
  - ポジトロニウムについて
  - 検証の方針
- ◆ 実験方法
  - 実験セットアップ
  - Monte Carlo シミュレーション(MC)
  - 背景事象の除去
  - 測定と MC の比較方法
- ◆ MC の系統誤差
- ◆ 結果

#### 目次 2/2

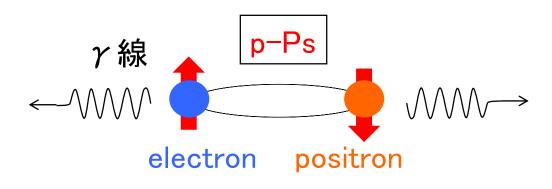
#### さらに…

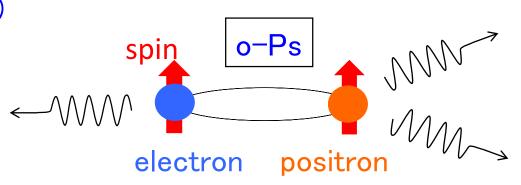
- ◆ 未知粒子探索
  - 未知粒子探索の背景
  - 未知粒子探索の結果
- ◆ まとめ

# はじめに

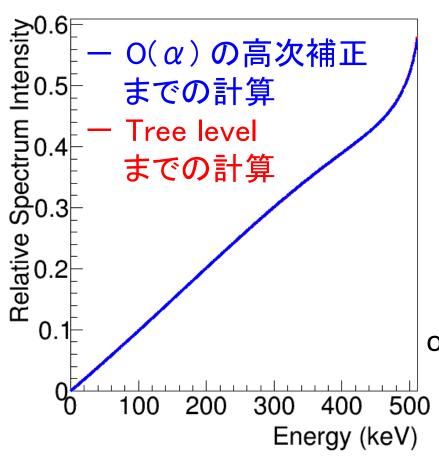
#### ポジトロニウム(Ps)

- 陽子と電子の束縛系
- パラポジトロニウム(p-Ps)
   スピン1重項(S=0)状態
   2本のγ線に崩壊
   短寿命(125ps)
- オルソポジトロニウム(o-Ps)スピン3重項(S=1)状態3本のγ線に崩壊
  - ⇒・連続スペクトル
    - •長寿命(142.05ns)





## o−Ps崩壊γ線のエネルギースペクトル (QED計算)



\*Tree level = 最低次の計算

- ① O(α)のスペクトルは未だに 測定・検証されていない
- ② 新物理に感度を持つ

スペクトル ⇔ <u>微分反応断面積</u> 微分情報を持つ



精密に測定されている o-Ps寿命(⇔全反応断面積)とは異なる

本実験ではスペクトルに対する  $O(\alpha)$ の補正を測定・検証する

#### 難しさ①:スペクトルに対する検出器の影響

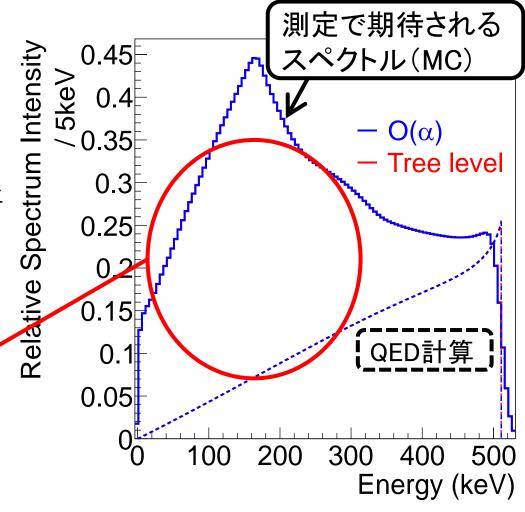
実際の測定では、

- 検出器のレスポンス
- 周囲の物質での散乱の影響

でスペクトルは変化

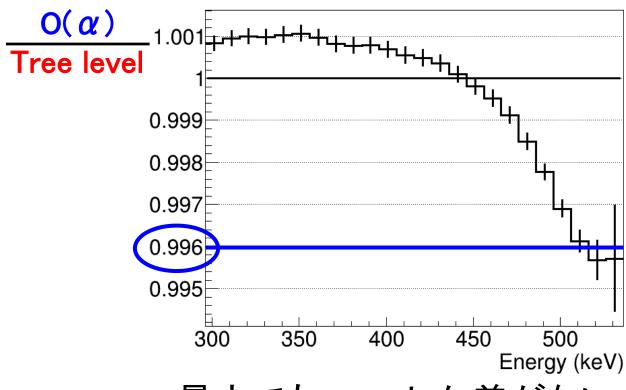
特に、<u>コンプトン散乱</u>によって 低エネルギー側は大きく変化

\*検出器については後述



## 難しさ②: Ο(α) の補正が小さい

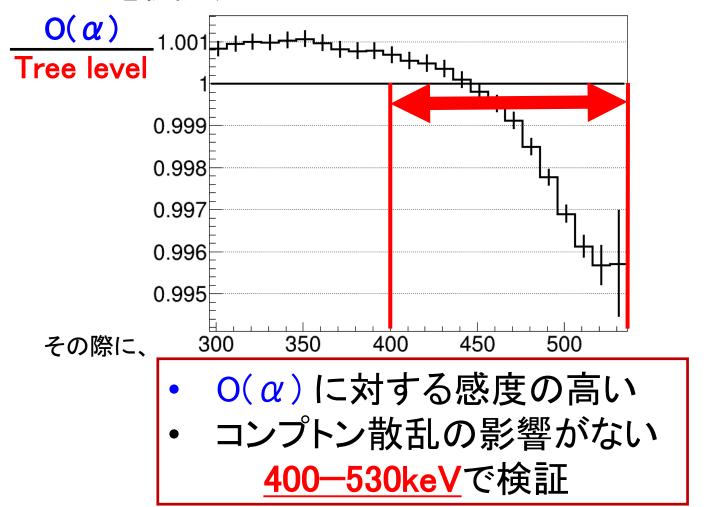
 $O(\alpha)$ の補正は500keV付近で大きい 測定で期待されるスペクトルにおける  $O(\alpha)$  / Tree level は、



最大でも <u>0.4%</u> しか差がない

## O(α) の検証の方針

検出器の影響を Monte Carlo シミュレーション (MC) で推定して、 QED計算 & MCから得られるスペクトル と <u>測定スペクトル</u> を比較して  $O(\alpha)$  を検証する



 $O(\alpha)$  OQED計算 Tree level

O QED計算

①o-Ps由来の事象の選択

②アクシデンタルイベントの推定と除去

MC シミュレーション (検出器の影響)

真空中 スペクトル

ピックオフ崩壊事象の除去

o-Ps崩壊事象の 測定スペクトル

 $O(\alpha) O$ MCスペクトル MCスペクトル

Tree level O

期待される測定スペクトル

比較 O(α) の検証

# 実験方法

 $O(\alpha) O$ QED計算

Tree level

O QED計算

①o-Ps由来の事象の選択

②アクシデンタルイベントの推定と除去

MC シミュレーション (検出器の影響)

真空中 スペクトル

ピックオフ崩壊事象の除去

o-Ps崩壊事象の 測定スペクトル

 $O(\alpha) O$ MCスペクトル || MCスペクトル

Tree level o

期待される測定スペクトル

比較 O(a) の検証

#### 実験セットアップ

<u>4ケ月run: 5.6×10<sup>9</sup> events 取得</u>



真空容器 厚さ1mm・

プラスチック

シンチレータ

β +線源 <sup>22</sup>Na (0.2MBq)

エアロゲル 0.13g/cc

(Ps生成)

Ps生成部 (真空容器断面)

3cm

β + **タ**グ用PMT Ps生成部 真空容器 Ф3cm 30cm γ線検出器LaBr<sub>3</sub> 高エネルギー分解能・高時間応答

スペクトルの変化を減らすために

- 壁や床から1m離した
- Ps生成部の低物質量化 テフロンより軽い物のみで構成

 $O(\alpha)$  OQED計算 Tree level

O QED計算

①o-Ps由来の事象の選択

②アクシデンタルイベントの推定と除去

MC シミュレーション (検出器の影響)

真空中 スペクトル

ピックオフ崩壊事象の除去

o-Ps崩壊事象の 測定スペクトル

 $O(\alpha) \mathcal{O}$ MCスペクトル || MCスペクトル

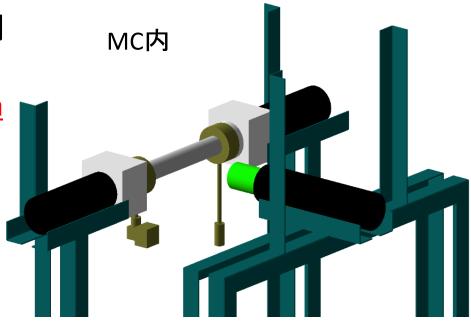
Tree level 0

期待される測定スペクトル

比較 O(a) の検証

#### Monte Carlo シミュレーション (MC)

- シミュレーションにGEANT4を使用
- 検出器を精密に再現
  - o−Ps生成部やLaBr<sub>3</sub> は<u>0.1mm</u> <u>単位</u>で
  - LaBr<sub>3</sub>は 0.5mm厚の外装や内部の反射材まで再現し、実測とMCで質量が一致することを確認



	実測	мс内
LaBr <sub>3</sub> の質量	323.4g	324.0g

- O(α)、Tree level のQED計算から得られるエネルギー分布に おのおの従う3本のγ線を o-Ps生成部(エアロゲル)から放射して、γ線がLaBr<sub>3</sub>で落とすエネルギーをシミュレート
- 統計精度を上げるため 各統計量: <u>約2.2×10<sup>11</sup>回</u>

 $O(\alpha) O$ QED計算 Tree level

O QED計算

①o-Ps由来の事象の選択

②アクシデンタルイベントの推定と除去

MC シミュレーション (検出器の影響)

真空中 スペクトル

ピックオフ崩壊事象の除去

o-Ps崩壊事象の 測定スペクトル

 $O(\alpha)$  OMCスペクトル MCスペクトル

Tree level O

期待される測定スペクトル

比較 O(a) の検証

 $O(\alpha) O$ QED計算 Tree level

O QED計算

①o-Ps由来の事象の選択

②アクシデンタルイベントの推定と除去

MC シミュレーション (検出器の影響)

真空中 スペクトル

ピックオフ崩壊事象の除去

o-Ps崩壊事象の 測定スペクトル

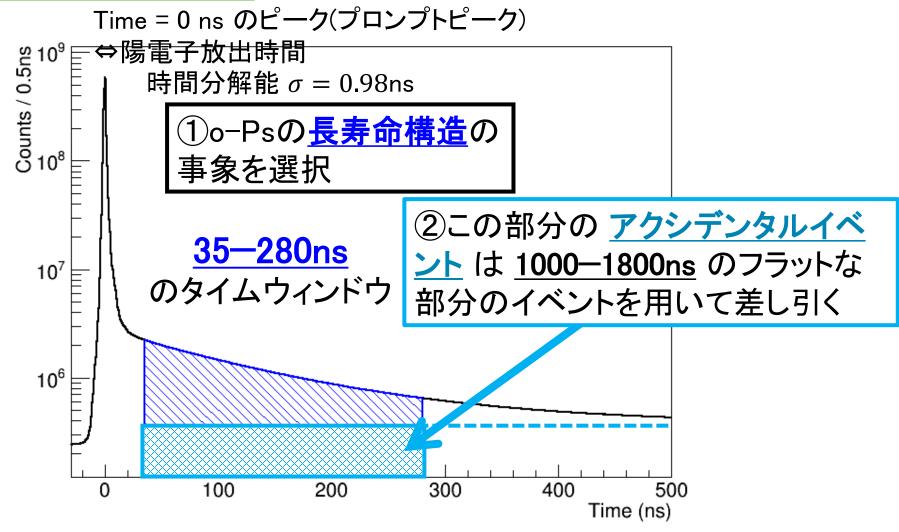
 $O(\alpha) O$ MCスペクトル || MCスペクトル

Tree level o

期待される測定スペクトル

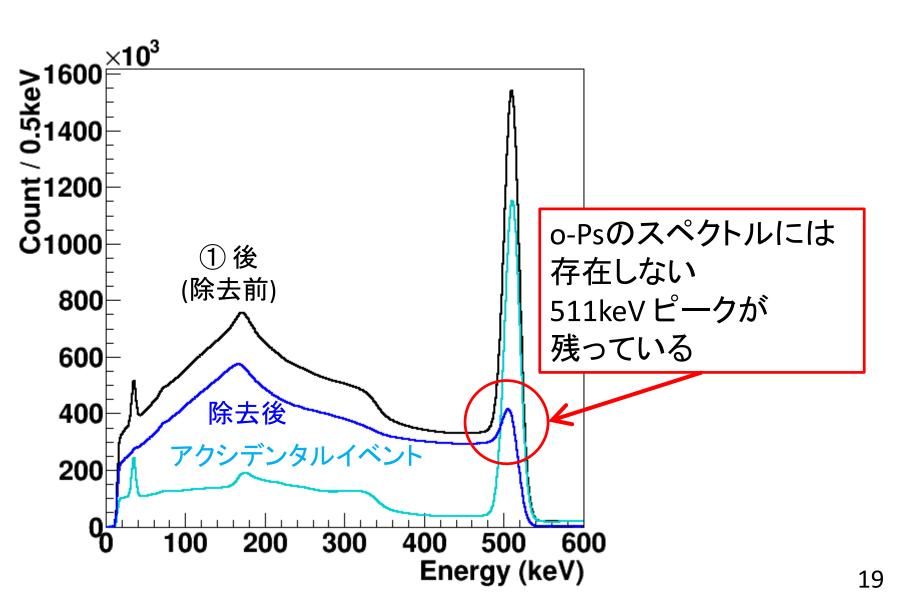
比較 O(a) の検証

#### 時間スペクトル



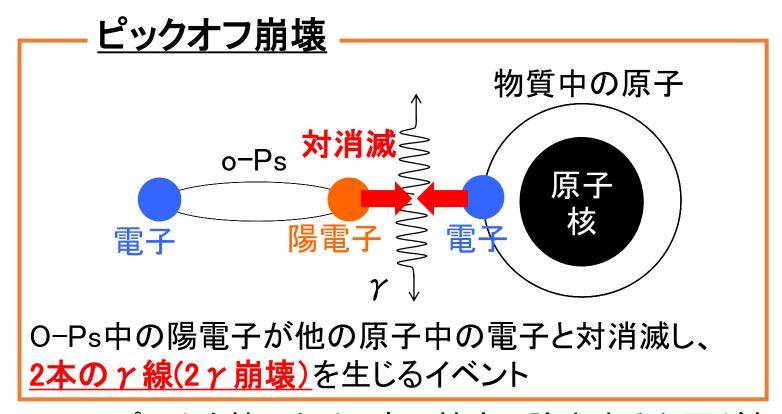
測定寿命: 130 ns

#### ②アクシデンタルイベントの除去 (エネルギースペクトル)



#### ピックオフ崩壊による背景事象

511keVのピークは ピックオフ崩壊による背景事象が残っているため



511keVにピークを持つため、高い精度で除去する必要がある  $\Rightarrow 2\gamma$  崩壊が増加する 酸素ガス中の測定から $2\gamma$  崩壊のエネルギースペクトルを求めた

酸素ガス中で の測定データ

 $O(\alpha) O$ QED計算 Tree levelo QED計算

①o-Ps由来の事象の選択

②アクシデンタルイベントの推定と除去

MC シミュレーション (検出器の影響)

真空中 スペクトル 酸素ガス中 スペクトル

ピックオフ崩壊事象の除去

o-Ps崩壊事象の 測定スペクトル

 $O(\alpha) O$ MCスペクトル || MCスペクトル

Tree level o

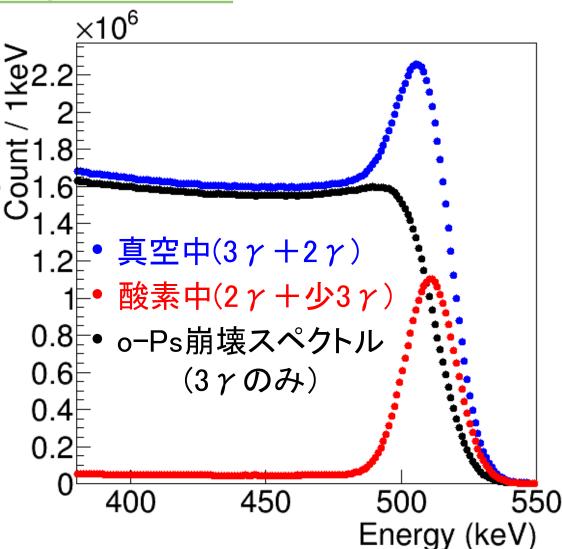
期待される測定スペクトル

比較 O(a) の検証

#### ピックオフ崩壊事象の除去方法

真空中の測定スペクトル / 1 (3 γ ) o-Ps崩壊スペクトル(3 γ ) O ...

\*酸素スペクトルを 差し引く量(縦のスケール)に ついては後述



酸素ガス中で の測定データ

 $O(\alpha) O$ QED計算 Tree level

O QED計算

①o-Ps由来の事象の選択

②アクシデンタルイベントの推定と除去

MC シミュレーション (検出器の影響)

真空中 スペクトル 酸素ガス中 スペクトル

ピックオフ崩壊事象の除去

o-Ps崩壊事象の 測定スペクトル

 $O(\alpha) O$ MCスペクトル MCスペクトル

Tree level O

期待される測定スペクトル

比較 O(α) の検証

23

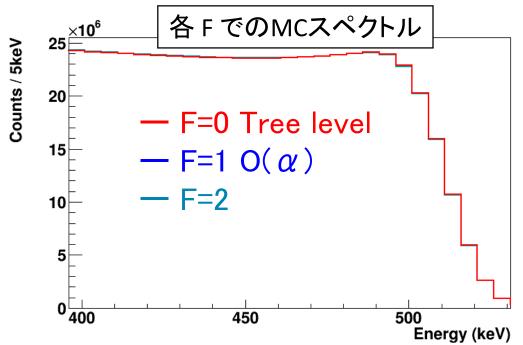
#### O(α)と Tree level の比較をするために

MCスペクトル に以下の parameter F を導入

```
[MCスペクトル] =
F \times [O(\alpha) \text{ omc } \text{A of } \text{hu}]
+ (1-F) × [Tree level of omc A of hu]
```

F=0: Tree level F=1:  $O(\alpha)$ 

MCスペクトルを測定スペクトルに $\chi^2$  fitting して F を求めて、測定スペクトルが Tree level に沿うか、 $O(\alpha)$  に沿うかを見る。



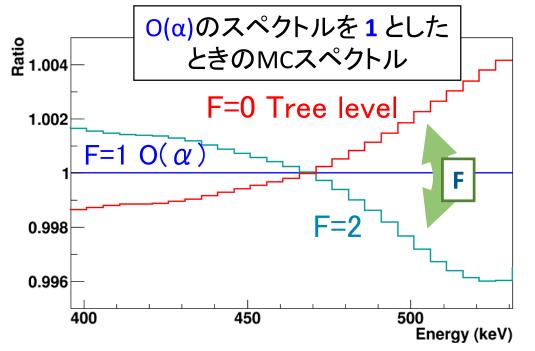
#### O(α)と Tree level の比較をするために

MCスペクトル に以下の parameter F を導入

```
[MCスペクトル] = F \times [O(\alpha) \text{ omc } \text{Composition}] + (1-F) × [Tree level of omc Aペクトル]
```

F=0: Tree level F=1:  $O(\alpha)$ 

MCスペクトルを測定スペクトルに $\chi^2$  fitting して F を求めて、測定スペクトルが Tree level に沿うか、 $O(\alpha)$  に沿うかを見る。



F ⇔ 500keV付近の傾き

# o-Ps測定スペクトルとMCスペクトルの $\chi^2$ fitting 方法

- 比較領域は400-530keV
  - ✓ O(α)に対する感度が高い
  - ✓ 検出器の影響が小さい
- MCスペクトルは比較領域の <u>総事象数でnormalize</u> して測定スペクトルに高さを合わせる
- 測定スペクトル と MCスペクトル との x<sup>2</sup> fitting をするときの free parameter は以下の3つ;
  - ① O(α)か Tree level かを表す <u>"F"</u>
  - ② MCスペクトルでの Smear量(検出器のエネルギー分解能)
  - ③酸素スペクトルを差し引く量(ピックオフ崩壊事象の割合)
  - ⇒ MCスペクトルのfittingとピックオフ崩壊事象の除去を同時に

酸素ガス中で の測定データ

 $O(\alpha) O$ QED計算 Tree level

O QED計算

①o-Ps由来の事象の選択

②アクシデンタルイベントの推定と除去

MC シミュレーション (検出器の影響)

真空中 スペクトル 酸素ガス中 スペクトル

ピックオフ崩壊事象の除去

 $O(\alpha)$  O

Tree level O MCスペクトル MCスペクトル

o-Ps崩壊事象の 測定スペクトル

同時に行う時される測定スペクトル

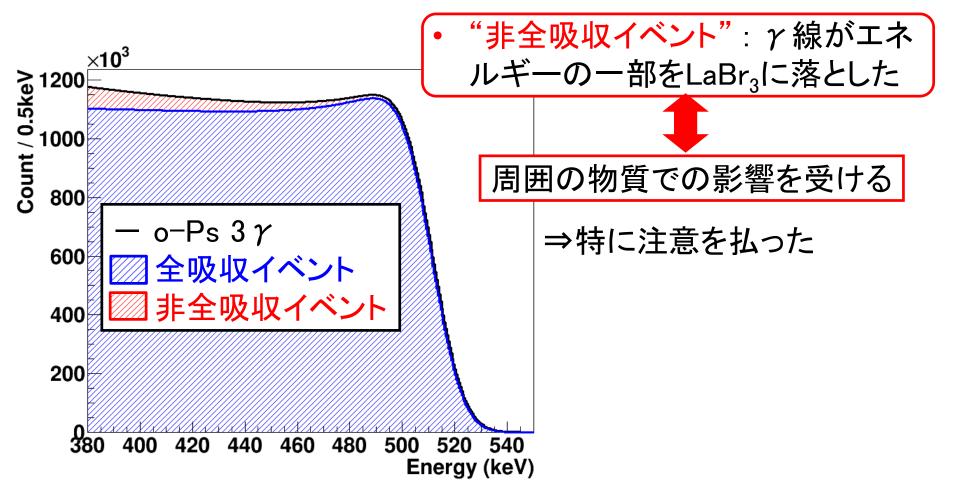
比較

O(α) の検証

## 比較結果の前に... MCの系統誤差について

#### イベントの分類

 "全吸収イベント": γ線が全ての エネルギーを LaBr<sub>3</sub> に落とした



#### 非全吸収イベント

- 400-530keVでの非全吸収イベントは、多重散乱の他にエアロゲルとLaBr<sub>3</sub>の間にある物質での散乱過程をもつ
  - ⇒物質の影響を受け、不定性が大きい
- 400keV以上はコンプトンエッジ以上のエネルギー領域
- 単色線源では、コンプトンエッジから光電吸収ピークの間("コンプトンフリー領域")が同じ過程を持つ

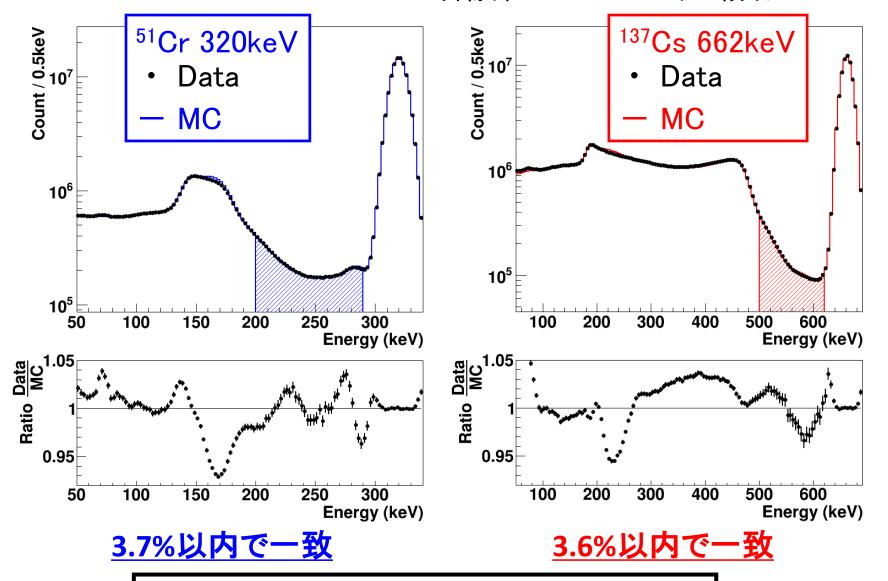
400-530keV前後の2つの単色線源で測定とMCを比較

- 51Cr 320keV
- <sup>137</sup>Cs 662keV

単色線源でMCが合うように、Physics model のcheckや物質の再現の確認を行っていった

#### 単色線源の比較

\* 光電吸収ピークでnormalizeしている 斜線部がコンプトンフリー領域



⇒ 非全吸収イベントの誤差は3.7%

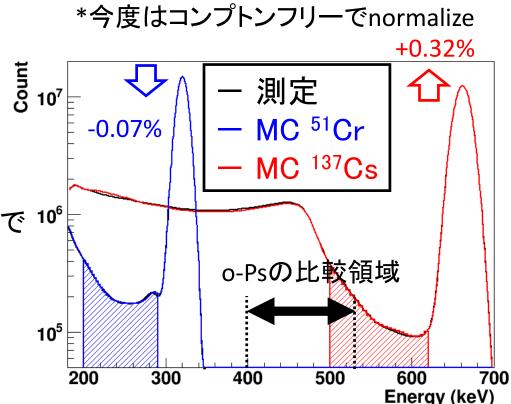
#### 全吸収イベントの誤差

"全吸収イベント": γ線が全てのエネルギーを LaBr<sub>3</sub> に落とした

周囲の物質での散乱の 過程を含まない

⇒ LaBr<sub>3</sub> のパラメータのみが 問題になり、シミュレーションの 不定性は小さい

⇒ MCスペクトルの高さはnormalizeで 10<sup>6</sup> 測定スペクトルに合わせるので、 主に問題になるのは全吸収係数の エネルギーに対する傾きの誤り



<sup>51</sup>Cr 320keV、<sup>137</sup>Cs 662keV の間での傾きの誤りを求めた

⇒ <u>0.4%</u>の傾きがありうる ⇒ 400-530keV に内挿して<u>0.15%</u>

#### MCの系統誤差

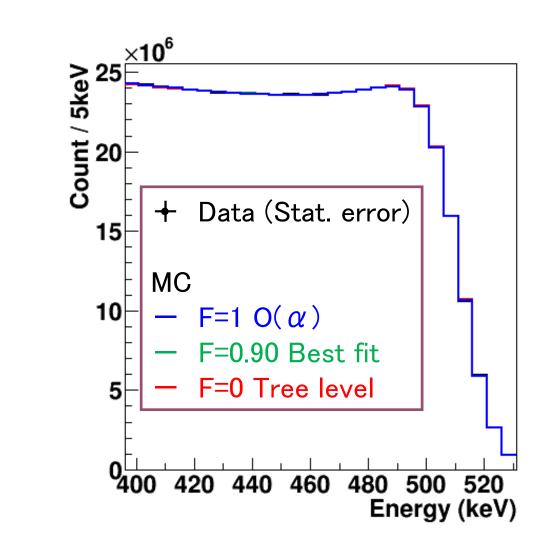
シミュレーションの系統誤差には主に

- ・ 非全吸収イベント・・ 単色線源の3.7%の誤差 非全吸収イベントの全事象に対する割合
  - **⇒ 400keV以上 で <u>5%以下</u>**
  - ⇒ スペクトルの高さに対して 3.7%×5% 以下 = 0.19%以下
- 全吸収イベント ・ 400-530keVの間で0.15%ずれる誤差
   を計上 MC の 系統誤差

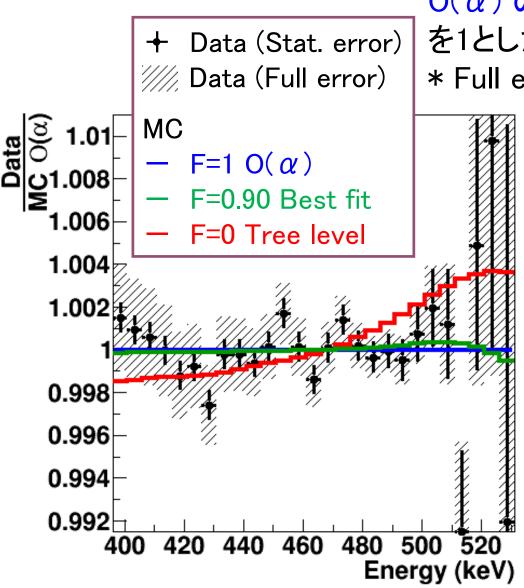
エネルギー	@400keV	@500keV	@530keV
非全吸収イベント	0.19%	0.02%	0.16%
全吸収イベント	0.15%	0.04%	~0%
Simultaneous hits (3本の $\gamma$ 線のうち複 数本がLaBr <sub>3</sub> に入る イベント)	~0%	0.03%	0.48%
計	0.24%	0.06%	0.51%

# 結果

#### 比較結果



#### 比較結果



#### 左図:

#### $O(\alpha)$ $O(\alpha)$

を1としたときのエネルギースペクトル

\* Full error がMCの系統誤差を含む

#### 結果

$$\chi^2/n = 14.5 / 23$$

 $1 F = 0.90 \pm 0.64$ (@68.3% C.L.)

F > 0 (@92% C.L.)

その他の free parameter

② Smear量:

 $\sigma = 9.26 \pm 0.05 \text{keV} \oplus 511 \text{keV}$ 

⇒単色線源のσと無矛盾

③ ピックオフ崩壊の割合: 13.35±0.04%

36

#### ピックオフ崩壊事象の割合の吟味

- ピックオフ崩壊によってo-Psがクエンチされるので、測定 寿命は短くなる
- ⇒ <u>測定寿命からピックオフ崩壊の割合が求められる</u>
- 事象選択で用いたタイムウィンドウ35-280nsでは、測 定寿命は128-131ns
  - この寿命幅はピックオフ崩壊の割合が熱化によって<u>時間に依</u> <u>存</u>して変わるため
- ⇒この測定寿命から得られるピックオフ崩壊の割合は

11.4—14.3%



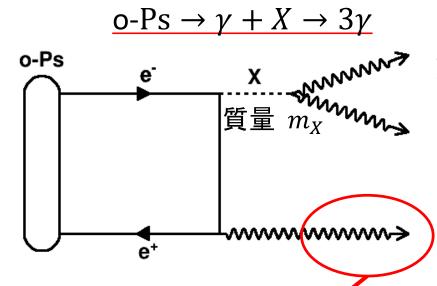
Fitting 結果: 13.35±0.04%

さらに...
未知粒子探索

#### o-Psスペクトルに影響する異常崩壊過程

- 得られたエネルギースペクトルを用いて、未知粒子Xの崩壊の ピークサーチを行った
- 未知粒子 Xの仮定する崩壊過程は

X:短寿命な 中性ボソン



\*Xは検出器内で 2γに崩壊する 短寿命な粒子と仮定

**3**γ

ピークエネルギー  $E_p$ 

Xの質量を m<sub>X</sub> とおくと保存則より

$$X$$
 と反対の  $\gamma$  のエネルギー  $E_p=m_e^2\Big\{1-\Big(rac{m_X}{2m_e}\Big)^2\Big\}$  と一意に決まる

⇒ スペクトル上にピークをつくる

#### 本実験によるピークサーチの利点

- ① 背景事象であるピックオフ崩壊事象を取り除くことができている 先行実験では除いていなかった
- $\Rightarrow E_p = 511 \text{ keV に近い領域}$ も探索できる
  - ① 短寿命未知粒子X1の探索
- ② MCによってo-Psの3γ崩壊によるスペクトル(ピークサーチでの背 景事象)が精密に推定できている

先行実験では背景事象はピーク前後を多項式で fit することで推定し、 ピーク幅の狭いものしか探索できなかった

⇒ 幅の広いピークも探索できる

崩壊幅 Γ<sub>X₂</sub>をもつ(O(1)keV)

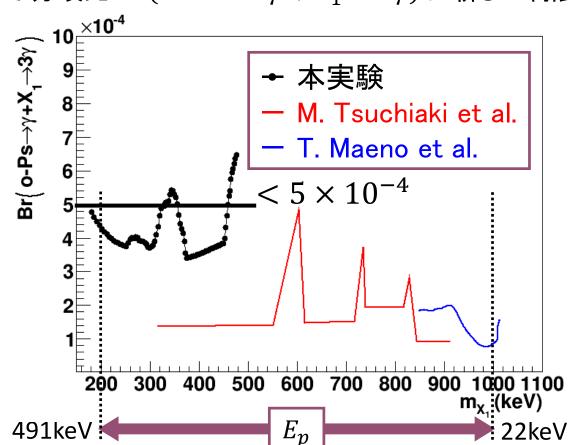
② 超短寿命未知粒子X2の探索

## ① 短寿命未知粒子X1 の探索

" $p_0 \times [O(\alpha) \cap MCスペクトル] + p_1 \times [ ガウシアン(E_p)]$ "で 測定スペクトルを fit して、

 $p_1$ から  $400 < E_p < 492$  keV の範囲でのピークの大きさを求めた.

残念ながら有意なピークは見られなかったが、今までに制限されていない質量領域で 分岐比  $Br(o - Ps \rightarrow \gamma + X_1 \rightarrow 3\gamma)$  に新しい制限(90%C.L.)をつけられた

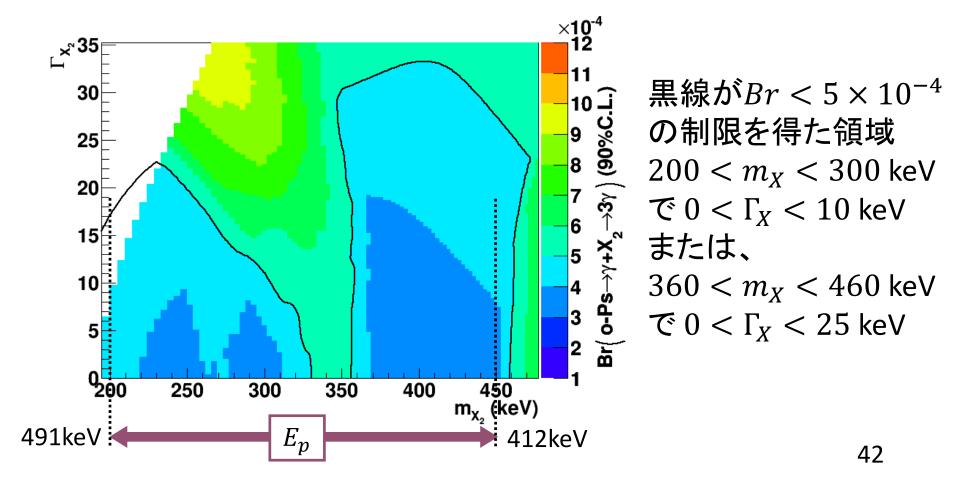


参考値としては  $200 < m_X < 300 \text{ keV }$ で  $Br < 5 \times 10^{-4} \text{ (90% C.L.)}$  の制限を得た

## ② 超短寿命未知粒子X2 の探索

 $E_p(m_X)$  だけでなく崩壊幅も  $0 < \Gamma_{X_2} < 35$  keV の範囲で変えて 超短寿命な未知粒子  $X_2$  の探索を行った

残念ながら有意なピークは見られなかったが、今までに制限されていない崩壊幅を持つ領域で 分岐比  $Br(o-Ps \rightarrow \gamma + X_2 \rightarrow 3\gamma)$  に新しい制限(90%C.L)をつけられた



## まとめ

- O-Ps崩壊γ線のエネルギースペクトルで、初めて<u>O(α)の補正</u>の 測定・検証を試みた
- MCシミュレーションで高い精度(400-510keVで0.24%以下)を達成
- <u>400-530keV</u> での χ² fitting の結果、
  - $F = 0.90 \pm 0.64$  となり  $O(\alpha)$ に無矛盾、Tree level のスペクトルを 92%C.L.で棄却する結果を得た
- 得られたエネルギースペクトルを用いて、 $o-Ps \rightarrow \gamma + X \rightarrow 3\gamma$ と崩壊する短寿命未知粒子Xを探索した結果、 $m_X$ の低い場合と、Xが崩壊幅 $\Gamma_X$ を持つ場合で分岐比に対する新しい制限を得た

## Backup

#### p-Ps & o-Ps

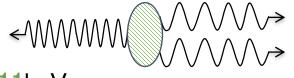
 $\Rightarrow$  L=0では、 $(-1)^{S} = (-1)^n$ 

$$S=0$$
  $|0;0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle - |\downarrow\rangle|\uparrow\rangle) \cdots 1^{1}S_{0}$  スピン1重項 パラポジトロニウム  $(p-Ps)$ ,  $S=1$   $|1;+1\rangle = |\uparrow\rangle|\uparrow\rangle$   $|1;0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle + |\downarrow\rangle|\uparrow\rangle)$   $\cdots 1^{3}S_{1}$  スピン3重項 オルソポジトロニウム  $(o-Ps)$ .  $|1;-1\rangle = |\downarrow\rangle|\downarrow\rangle$   $\cdots$   $E[S]$   $E[S]$ 

45

#### Tree level と O( $\alpha$ ) の効果

#### QEDの効果で頻度が高くなるdecay

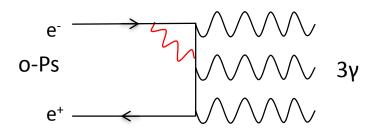


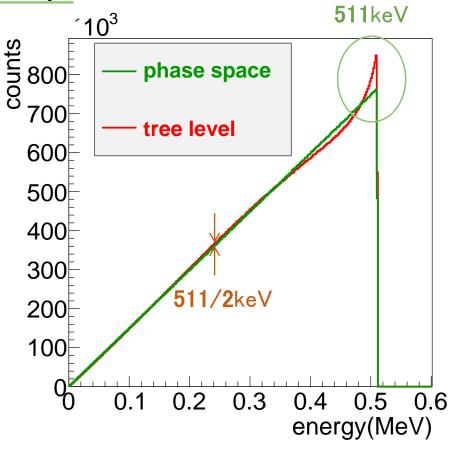
**511**keV

511/2 keV×2本

QEDでスピンの効果を考えると、 上図のような運動量をもった 3本の  $\gamma$  線への崩壊イベントが 多くなるため、phase space に比べて tree level は511keVと 511/2keVのイベントが多くなる

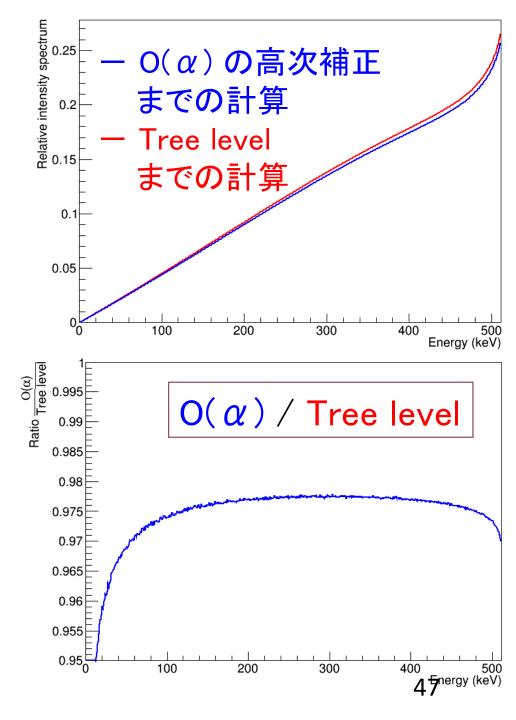
#### O(α)の Feynman diagram の例



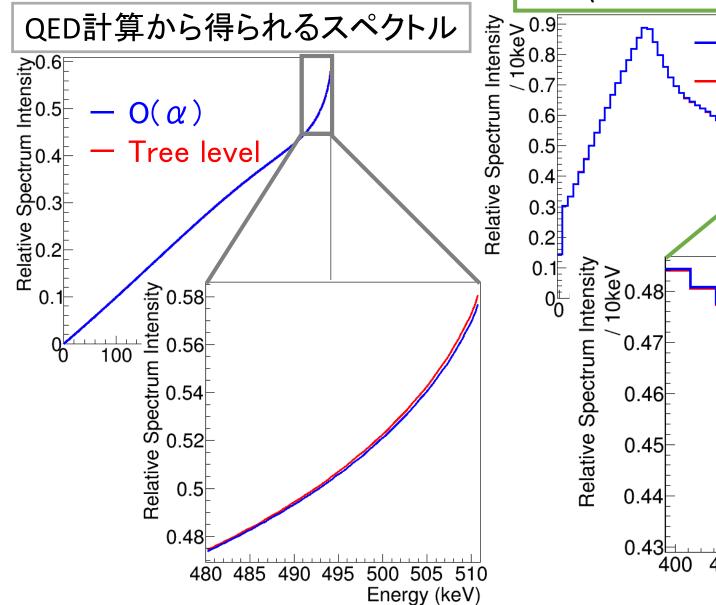


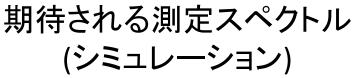
tree level と O(α) のずれは 左図のような photon の1-loop によって生じる オルソポジトロニウム (o-Ps)崩壊γ線の エネルギースペクト ル(QED計算)の絶対 的な差

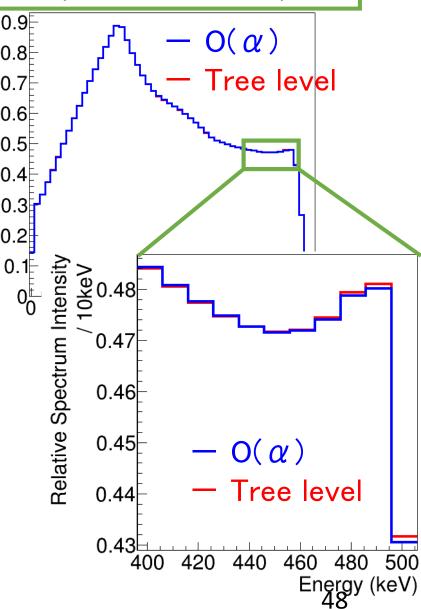
> 形としては0.4%の 差しかないが、 絶対的には-2%程 全体的に低くなる



## O(α)の差(Zoom)

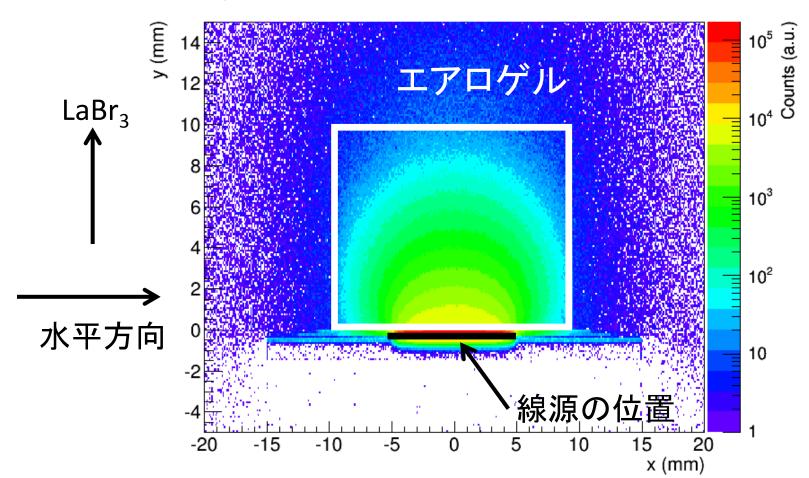




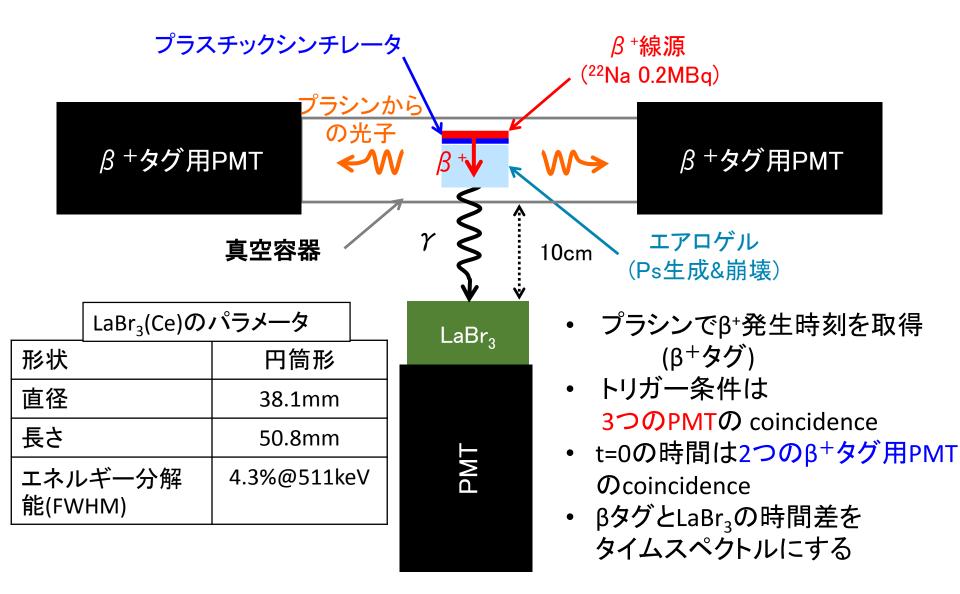


#### MC での o-Ps 崩壊γ線の出射位置

o-Ps崩壊 $\gamma$ 線の出射位置はMCで陽電子をシミュレートして求めた。

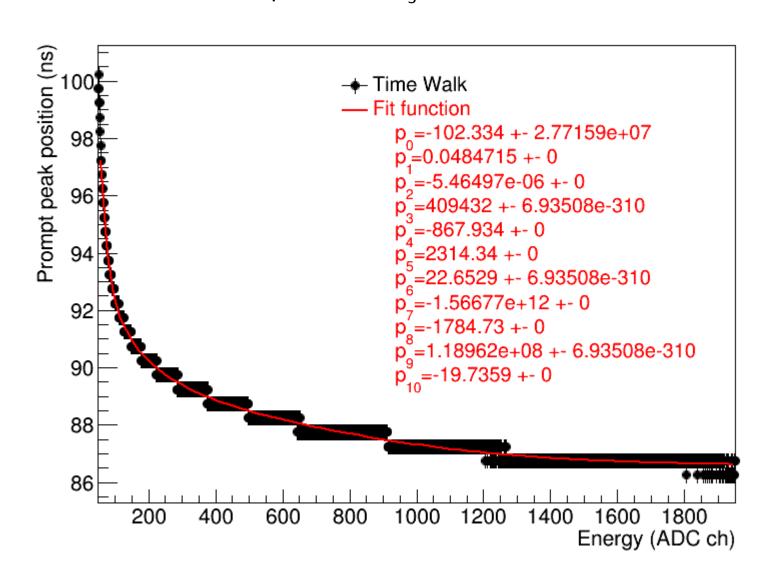


#### 実験セットアップ(平面図)

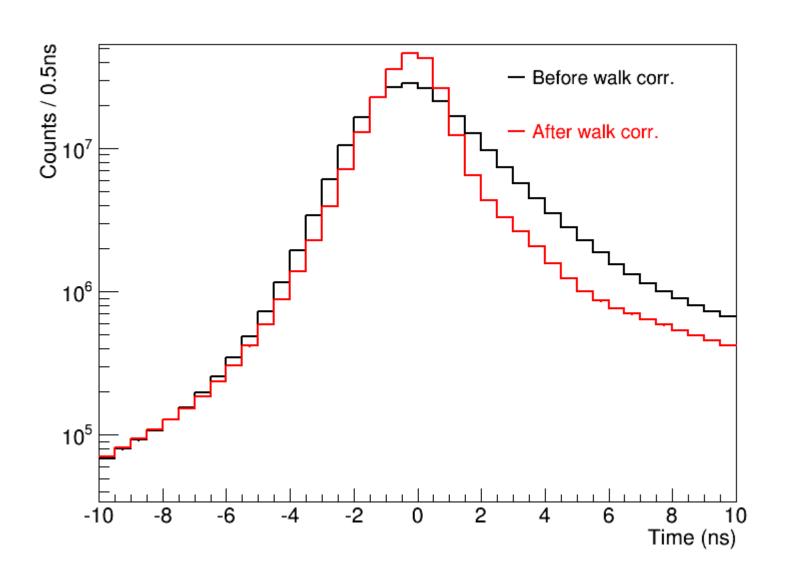


#### ウォーク補正

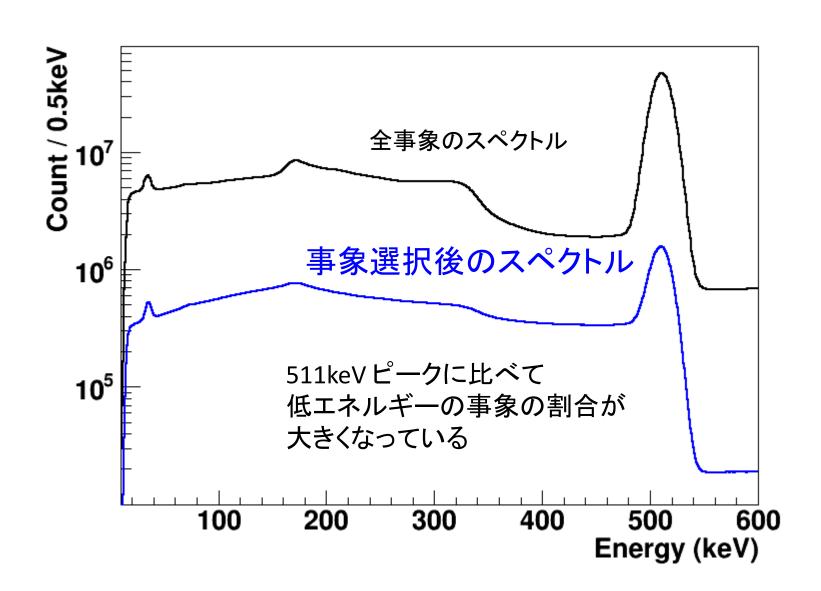
電圧値が高いほどLa $Br_3$ のDiscriminatorでの threshold を超えるときの時間が速くなるので、 $\beta$ +タグとLa $Br_3$ の時間差が短くなる



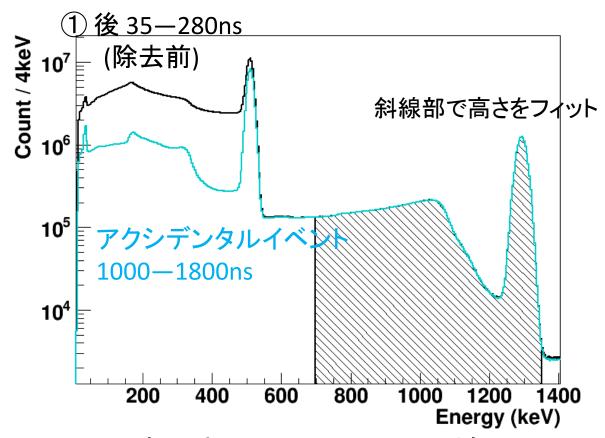
### ウォーク補正前後でのプロンプトピーク



#### 事象選択後のエネルギースペクトル



#### ②アクシデンタルイベントの除去の方法



<sup>22</sup>Na からβ+ と同時に生じる1275keVの γ 線は
① 後のスペクトルとアクシデンタルのスペクトルで同じ
⇒ 1275keV のフィットから ① 後のスペクトルにおけるアクシデンタルイベントの量を求めた

#### 熱化

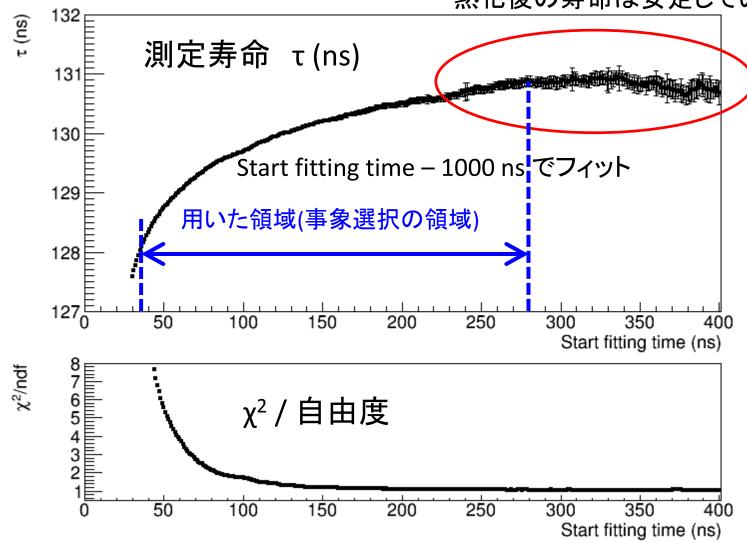
熱化とは、Psが熱平衡状態になるまで周囲の物質と衝突して速度を失っていく過程

- ⇒ Psの速さが遅くなる
- ⇒ ピックオフ崩壊率(∝速さ)が小さくなる (物質との衝突回数が減るため)
- ⇒ <u>時間に依存</u>して<u>測定寿命が変化する</u>

熱化の途中では、ピックオフ崩壊率が変化するので、 測定寿命からピックオフ崩壊の割合を正確に求める のは難しい

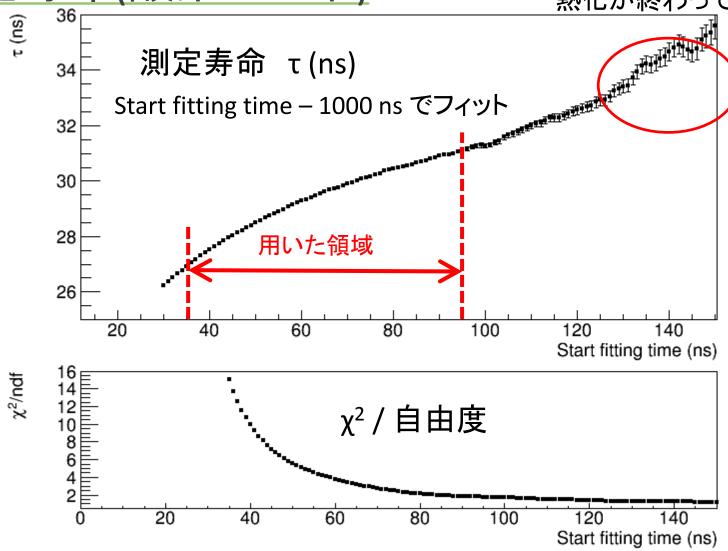
#### 測定寿命(真空中)

熱化後の寿命は安定している



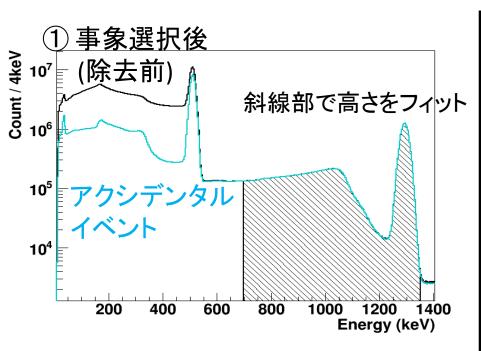
熱化過程でのピックオフ崩壊の割合の変化によって 測定寿命はフィット領域に依存して変化する 測定寿命(酸素ガス中)

熱化が終わっていない

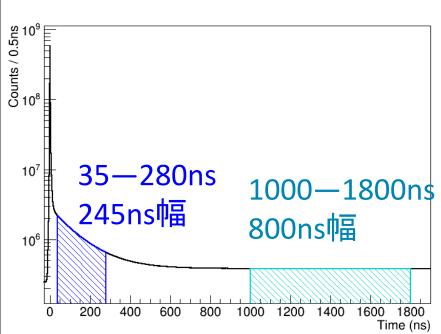


熱化過程でのピックオフ崩壊の割合の変化によって 測定寿命はフィット領域に依存して変化する

#### ②アクシデンタルイベントの除去のスケール



1275keVのフィットから得られるスケール <u>0.3072±0.0002</u>



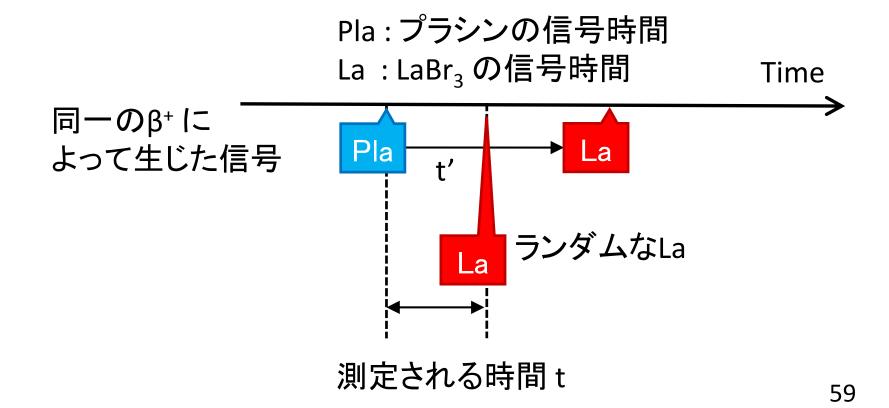
事象選択での時間範囲の幅から 得られるスケール 245/800=<u>0.3062</u>

おおよそ一致しているが、多少の差が存在する (この差ではfitting結果のFの値は変わらず、F=0.9±0.64) これは、アクシデンタルイベントの分布が<u>実は完全な平坦でないため</u>

#### アクシデンタルイベントの生成過程の一例

Start の Pla が stop の La を作るもので、 Stop の La が 相関の無い La の場合

tが短い方が許されるt'の範囲が広くなり起こりやすくなる ⇒時間スペクトル上で右下がりの効果



#### アクシデンタルイベントについて

前ページのようにアクシデンタルイベントは平坦から ずれる

さらに、NIM回路上のトリガー生成の方法によってもアクシデンタルイベントの分布は変化するので、分布の推定は難しい

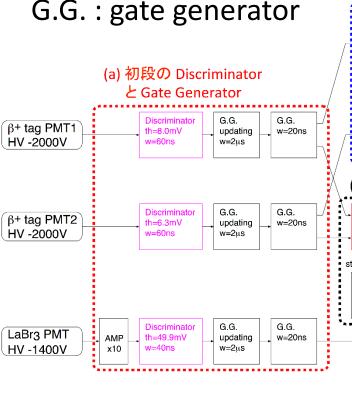
⇒ 本実験ではエネルギースペクトルでアクシデンタ ルイベントの量を推定した

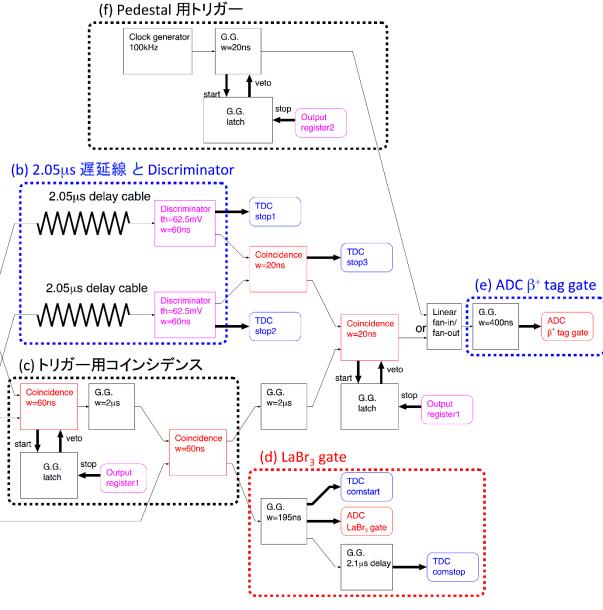
#### NIM回路

th:threshold 値

w: 出力パルス幅

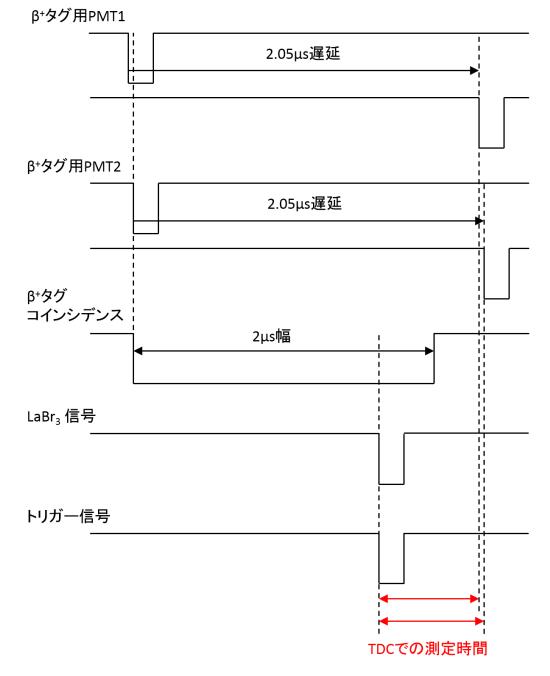
G.G.: gate generator





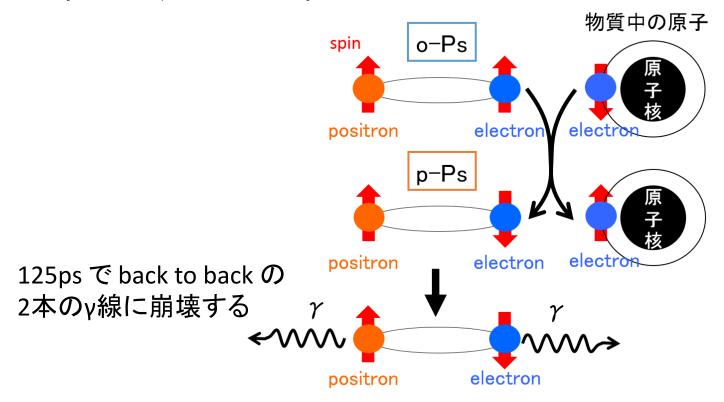
#### トリガー生成の タイミングチャート図

トリガーは 2つのβ+タグ用PMTの コインシデンスを 2μs 幅に広げたものと LaBr<sub>3</sub> のコインシデンスと した (LaBr<sub>3</sub> のタイミングで決まる)



### スピン交換

o-Ps が酸素中の電子とスピン相互作用をしてスピンが反転し、短寿命(125ps)で2γ崩壊するp-Psに換わる現象

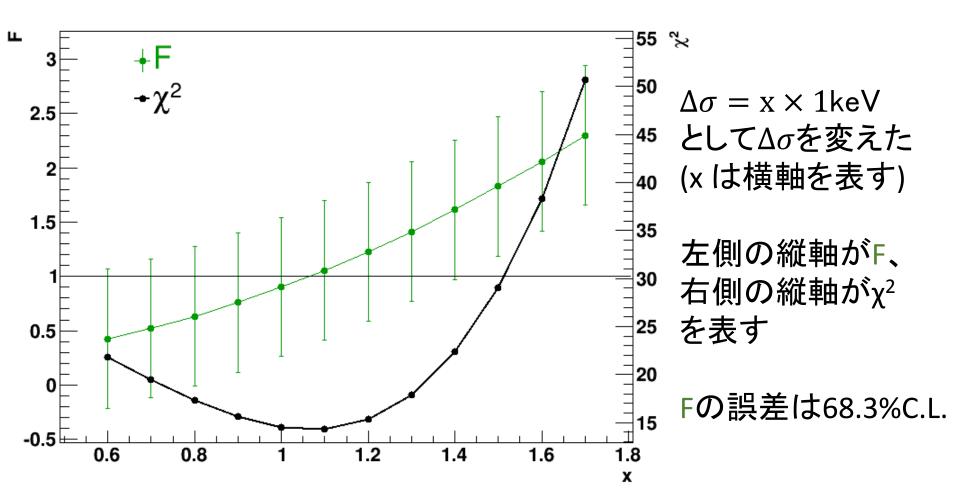


酸素のような常磁性のガスが存在する場合、スピン交換は起こりや すくなる

#### ピックオフ崩壊とスピン交換の違い

- ピックオフ崩壊は他の物質中の電子と反応するので、
- 相手の電子の運動量の影響をうける
- ⇒ ピックオフ崩壊後の2 γ のエネルギーが変わる
- ⇒ γ 線のエネルギー511keV に電子の運動量分の幅を持つ
- 一方、スピン交換は p-Ps の崩壊なので厳密に511keVの  $\gamma$  線を出す
- この差は以下の論文の値を用いて補正した(酸素ガス中スペクトルのピーク幅を smear して広げた[ $\Delta \sigma = 1 \text{keV}$ ])
- S.Orito, et al, PRL 63 (1989) 597-600
- S. Asai, et al, PRL 66 (1991) 1298–1301

#### 酸素ガス中スペクトルのピーク幅補正の吟味

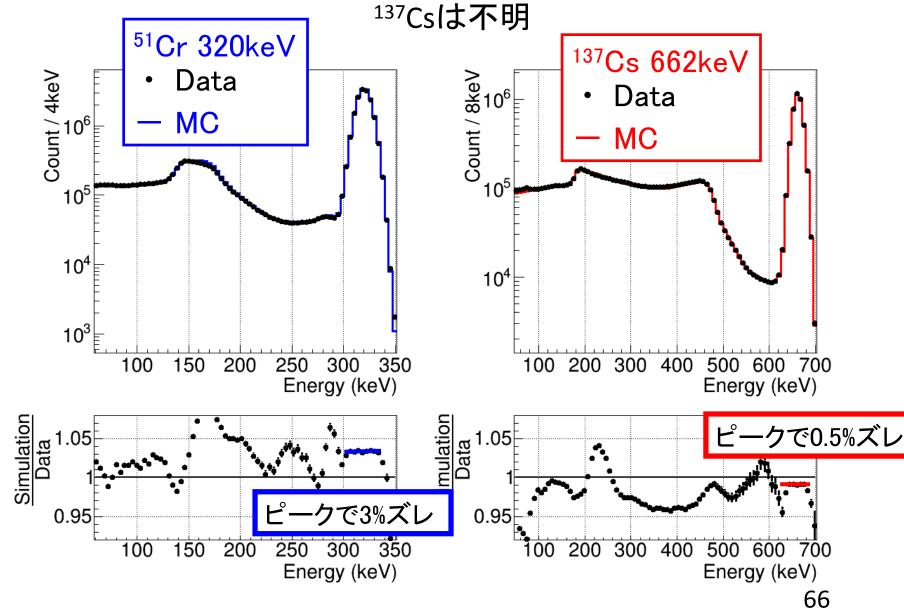


ピーク幅を広げる量を変えて fitting 結果の $F \ge \chi^2$  を確認 x=1 付近で $\chi^2$  は最小値をとり、補正量は妥当といえる

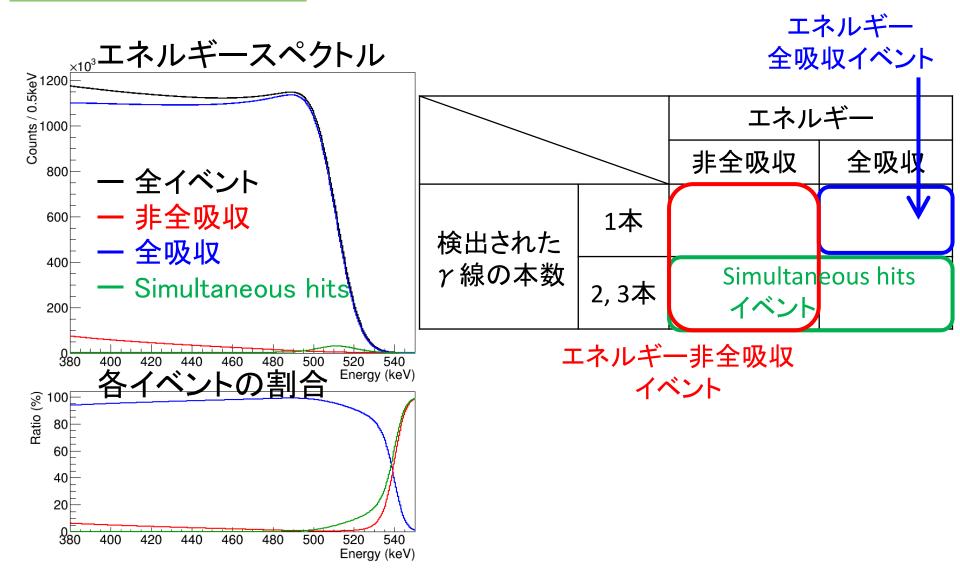
#### 単色線源の比較2

#### 線源強度で合わせた測定とMCの比較

\*線源強度に51Crは2.2%の誤差がある



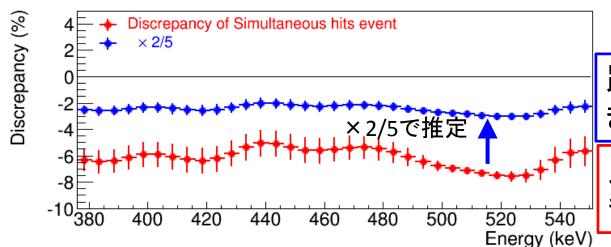
#### イベントの分類



#### Simultaneous hits イベントの誤差

Simultaneous hits イベント: o−Ps 崩壊の 3ァの内の複数本がLaBr<sub>3</sub>にエネルギーを落としたイベント

- ⇒ 単色線源には存在しないイベントなので、別途誤差を見積もった
- ⇒ 複数本LaBr3に入るには、アクセプタンスが重要になる
- (直接LaBr $_3$ に複数本の  $\gamma$  線が入ることのできる kinematics はアクセプタンスに依存して変化するので)
- ⇒ LaBr₃とエアロゲルの距離の誤差2mmで変化しうるスペクトルの変化をこのイベントの誤差とした



#### 約2%のズレ

距離を<u>2mm</u>変化させたと きのスペクトルの変化量

距離を<u>5mm</u>変化させたと きのスペクトルの変化量

#### Free parameter の 吟味

② <u>検出器の resolution の smear量</u> 単色線源の比較から得られる smear量で確認

	<sup>51</sup> Cr	<sup>137</sup> Cs	Fitting 結果
σ (keV)@511keV	$9.205 \pm 0.003$	$9.233 \pm 0.005$	$9.26 \pm 0.05$

#### ③ Pick-off 崩壊の割合 時間スペクトルから得られる測定寿命から確認

測定寿命	測定寿命から 得られる pick-offの割合	Fitting 結果	
128—131ns	11.4—14.3 %	13.35±0.04 %	

#### 比較領域 の結果への影響

前後10keVで変えた場合

比較領域 (keV)	400—530	390—530	410—530	400—540	400—520
χ²/自由度	14.5/23	14.9/25	13.7/21	17.4/25	13.2/21
F @68.3%C.L.	0.90	0.98	0.77	0.85	0.95
	±0.64	±0.60	±0.69	<u>±</u> 0.64	<u>±</u> 0.66
ローエのは印度の本ルにムナンノーのハナナナナフ					

Fに $\pm 0.1$ 程度の変化しかなく、 $O(\alpha)$ を支持する

大きく範囲を変えた場合

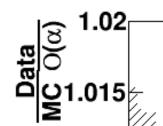
比較領域 (keV)	350—580	350—530	375—530	400—580	450—530
χ²/自由度	46.4/43	25.1/33	17.6/28	35.1/33	11.1/13
F @68.3%C.L.	1.62 ±0.50	1.65 ±0.51	1.21 <u>+</u> 0.56	0.88 <u>+</u> 0.64	1.22 ±1.10

低エネルギー側はFが少し1からずれる→コンプトン散乱の影響

#### 広範囲のo-Psスペクトルの 測定とMC比較

#### 右図:

O(α) 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



1.005

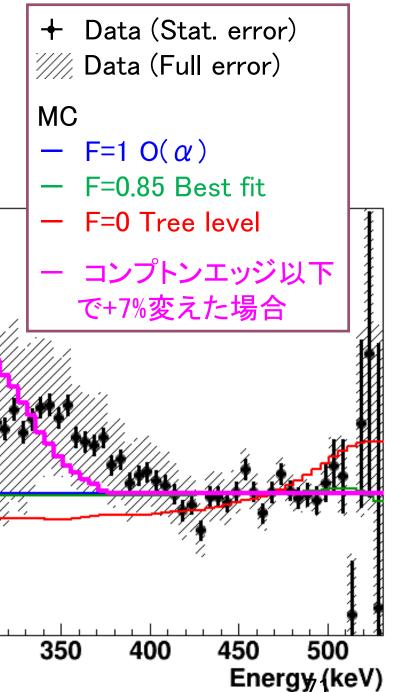
400keV以下の低エネルギーでは 1.0

コンプトンエッジ(341keV@511keV

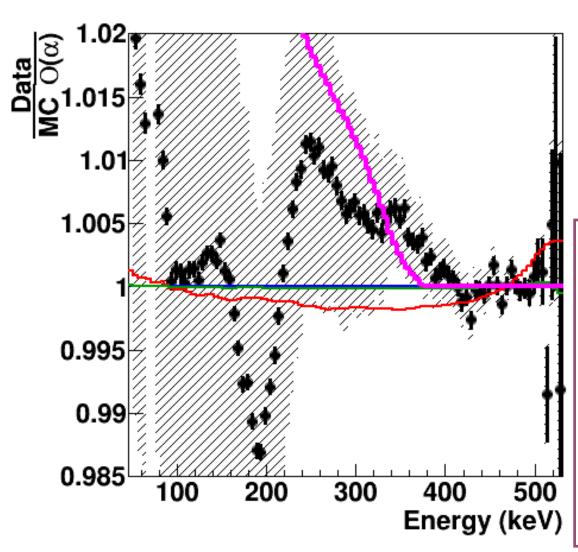
ピーク) も影響してくる

⇒ ズレが大きくなる

特に、51Crのコンプトンエッジでは7% ずれていたので、 コンプトンエッジ以下のスペクトルを+7% ずらすと桃色線になる



#### 広範囲のo-Psスペクトルの 測定とMC比較 2



#### 左図:

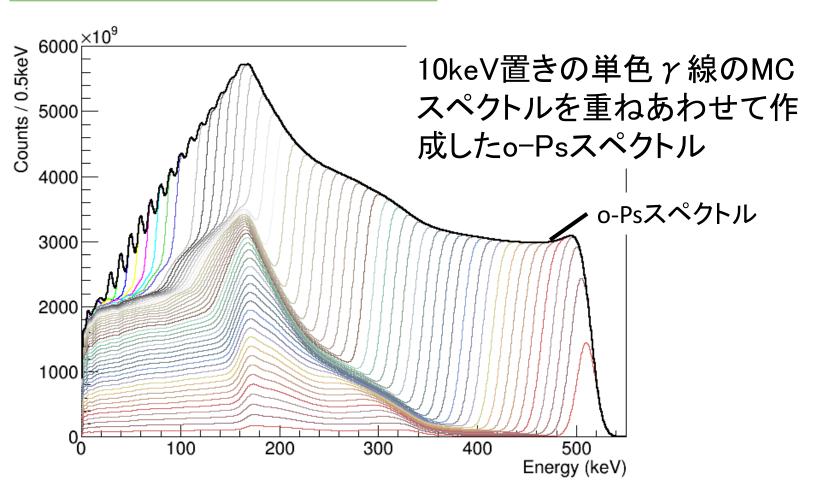
O(α) のシミュレーション を1としたときのエネルギー スペクトル

- → Data (Stat. error)
- //// Data (Full error)

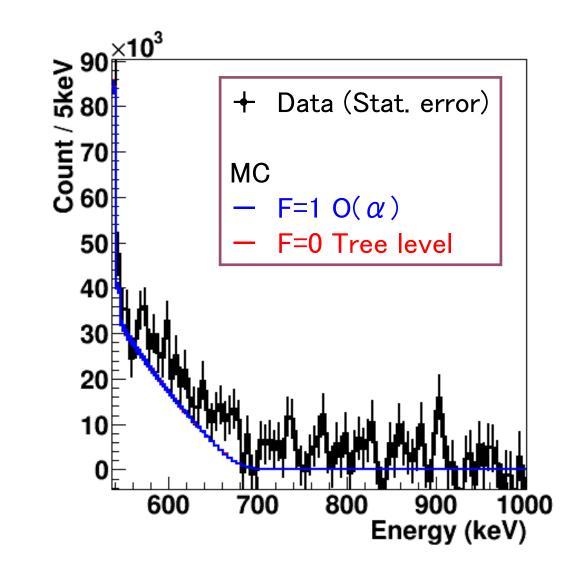
#### MC

- F=1 O( $\alpha$ )
- F=0.85 Best fit
- F=0 Tree level
- ー コンプトンエッジ以下 で+7%変えた場合

# 単色線源の重ねあわせから作成したo-Psスペクトル



## 540keV以上でのo-Psスペクトルの測定とMC比較



測定スペクトルが 誤差の範囲で MCスペクトルと一致して いるのがわかる

#### 2γ崩壊エネルギースペクトル

酸素ガス中スペクトルから真空スペクトルを差し引くことで、2  $\gamma$  崩壊のエネルギースペクトルを求められる。

この比較でもピックオフ崩壊 の割合を free parameter に して  $\chi^2$  fitting した

得られた

ピックオフ崩壊の割合は:

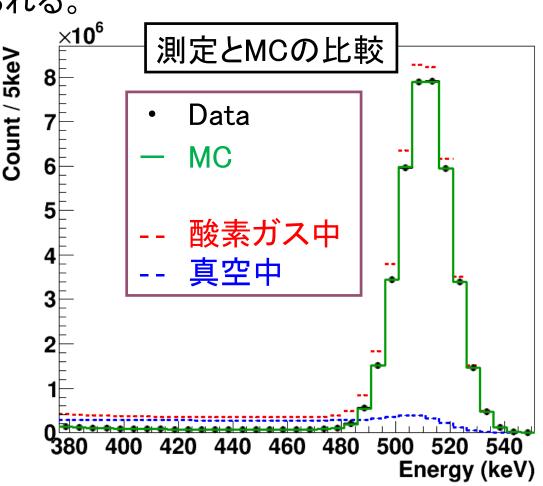
 $86.33 \pm 0.07\%$ 

Smear 量 は:

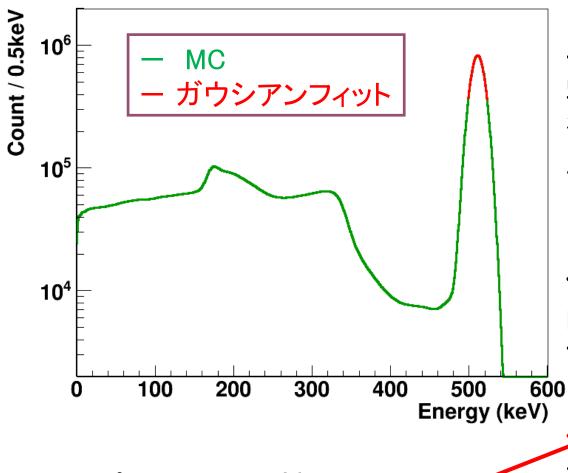
9.33 ± 0.01keV @ 511keV

ピーク位置の補正は:

 $-(8.6 \pm 2.5) \times 10^{-3} \%$ 



#### ピーク位置の補正(エネルギー較正の補正)



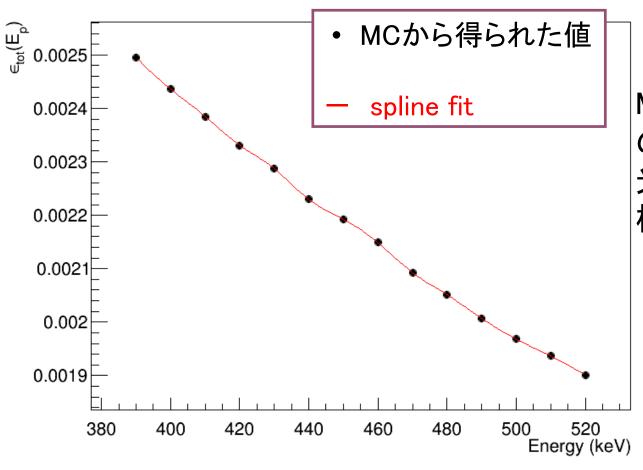
エネルギー較正のための 511keVのガウシアンフィットで 得られたピーク位置は 真の位置から微小にずれる

例えば、 MCスペクトルでガウシアン 」フィットした場合も、 600同様に511keVから

<sub>7</sub> ー (6.6 ± 0.5) × 10<sup>-3</sup> % だけずれた値(510.966keV) が得られる

ピーク位置の補正量 - (8.6 ± 2.5) × 10<sup>-3</sup> % と無矛盾

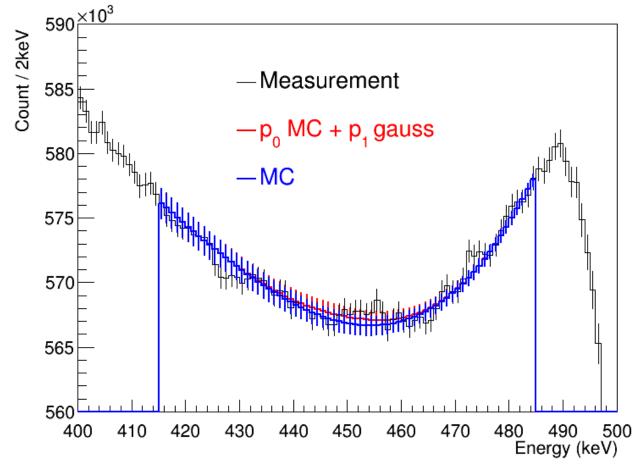
#### 光電吸収ピークの検出器効率



MC で各エネルギー の γ 線を生成して、 光電吸収ピークの 検出器効率を求めた

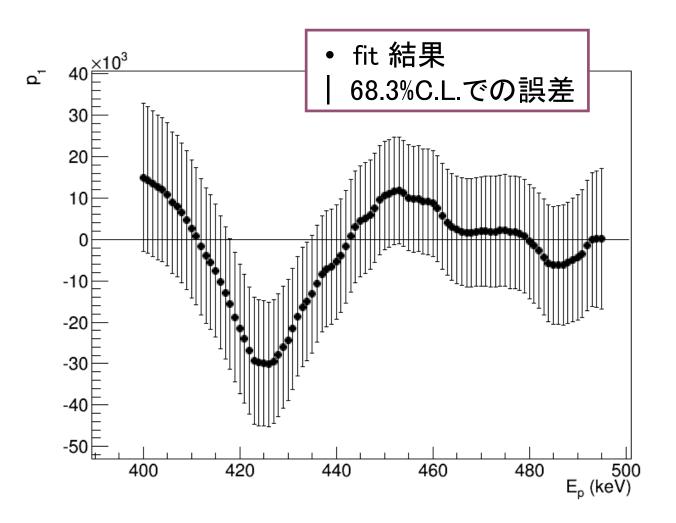
#### ピークフィットの方法

" $p_0 \times [O(\alpha)$ のMCスペクトル] +  $p_1 \times [ ガ ウシアン(E_p)]$ "で 測定スペクトルを fit する様子



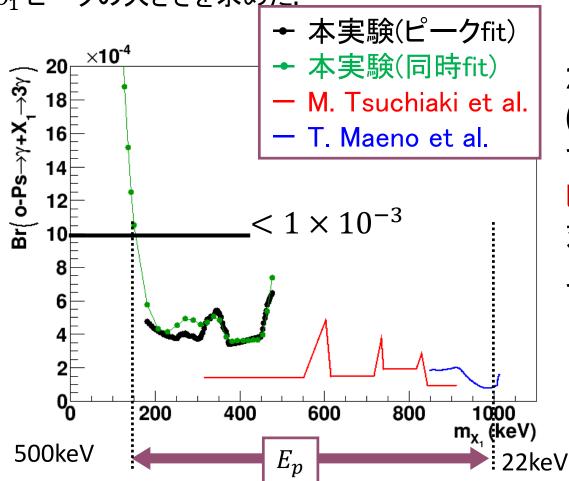
 $E_p = 450 \text{keV}$   $\sigma = 8.68 \text{keV}$  での fit

## <u>p</u>1 の結果



### ① 短寿命未知粒子 $X_1$ の探索(同時fitで)

p<sub>1</sub>ピークの大きさを求めた.



 $200 \text{ keV} < m_X$   $(E_p < 491 \text{keV})$  では、 ピックオフ崩壊の割合に 対して大きな相関は 見られない

## 137Csのコンプトンフリーのパス

