

オルソポジトロニウムの寿命測定 による束縛系QEDの精密検証

東大素粒子センター 片岡洋介

2006.6.12 岡山大学

contents

I. イントロダクション

- オルソポジトロニウム(o-Ps)について
- o-Psの寿命測定の手法について

II. セットアップ

- 現在進行中の実験について

III. 解析

- 寿命測定の詳細
- systematic error
- 現状と今後

I. イントロダクション

- table-topの小さい実験です
- 原理的にも簡単で学生実験にもなります
- 精度を上げるとQEDの高次輻射補正が見られます

束縛系QEDの精密検証

- **positronium** (e^+e^- の束縛系)を扱う利点
 - 質量が小さく、強い力、弱い力の影響は無視できる
 - 純粹にレプトンの系、束縛系QEDで完全に記述される
 - 実験的にも、生成しやすい、寿命が長い
 - 束縛系QEDのテスト(寿命、HFS)や
 - 新しい物理の探索(exotic decay、CP)に使用されてきた
- **束縛系QED**
 - 非常にシンプルな系であるが、理論的にはたいへん難しい
 - 自由粒子と異なり基本的に非摂動的
 - 高次輻射補正の計算が困難
 - 水素原子とも違う (annihilation processなど)
- **NRQED** (Nonrelativistic quantum electrodynamics)
 - 計算手法の発達。高次輻射補正の計算が可能になった
 - relativistic part($\sim m$)、nonrelativistic part($\sim m\alpha$)を分離して計算
 - 2000年、 o -Ps崩壊率 $O(\alpha^2)$ by Adkins et al

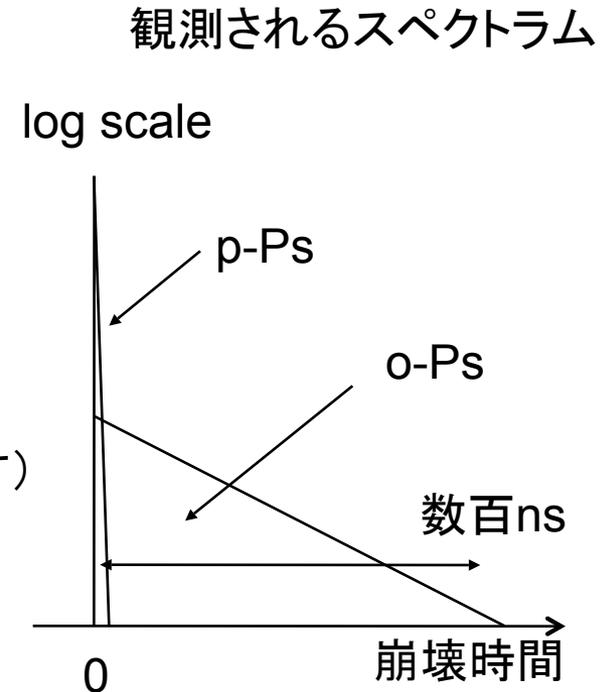
オルソポジトロニウムの性質

- positronium ~ 電子・陽電子の束縛系
 - スピン1重項(S=0) ... p-Ps (parapositronium)
 - スピン3重項(S=1) ... o-Ps (orthopositronium)
 - 違いは明瞭、崩壊する γ の個数が違う

- C変換性と崩壊
 - p-Ps (C=even) → $2\gamma, 4\gamma, \dots$ (偶数個)
 - o-Ps (C=odd) → $3\gamma, 5\gamma, \dots$ (奇数個)

- Psの寿命
 - p-Ps → 2γ 125ps 短い。o-Psと容易に分離される
磁場をかけて間接的に測定
(200ppm程度で測られています)

- o-Ps → 3γ 142ns 長い。直接測定が可能
↓
今回、こっちを測ります



オルソポジトロニウムの崩壊率

- o-Ps崩壊率(計算値)

$$\lambda_{o-Ps} = \lambda_0 \left\{ 1 + A \left(\frac{\alpha}{\pi} \right) + \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^2 \left[\frac{\pi^2}{3} \ln \alpha + B \right] + \dots \right\}$$

$$\lambda_0 = \frac{2(\pi^2 - 9)\alpha^6 m_e}{9\pi}$$

$$A = 10.286606$$

- O(α)補正項 約2.4%は実験的にもestablished

- 長い間不明であったO(α^2)、2000年に計算完了(by G.S.Adkins et. al.)

- B = 44.52. → 240ppmの補正 ~ 現在の実験精度と同程度

- O(α^3)の計算はまだだが、実験精度と2桁の差



$$\lambda_{o-Ps} = \underline{7.039979 \mu s^{-1}}$$

次の実験: 50~100ppmを目指して

o- P_s 寿命測定 of 歴史

70、80年代

オルソポジトロニウムの寿命問題

- exotic decay ?
- large $O(\alpha^2)$?
- systematic error ?

東大の測定では一致

- 鍵は測定手法の差 (あとで説明)

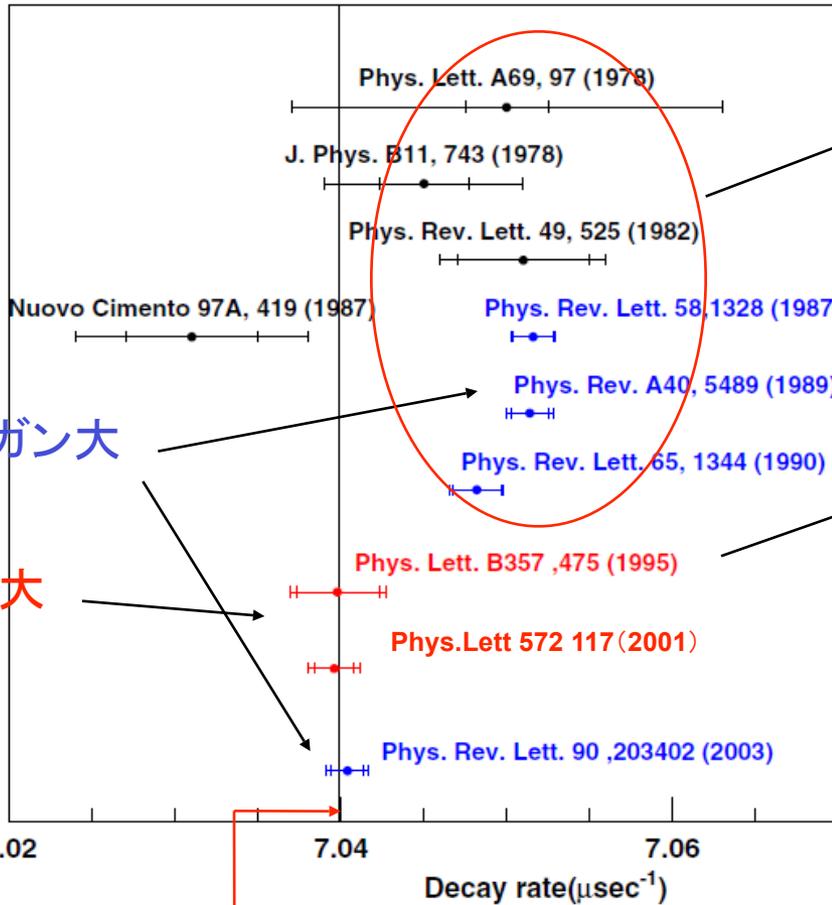
現在では解決

- o- P_s の熱化過程の扱いに関する systematicなエラー

最近は2グループ、

- 東大 $\lambda_{\text{exp}} = 7.0396(12)_{\text{stat}}(11)_{\text{syst}}$
- ミシガン大 $\lambda_{\text{exp}} = 7.0404(10)_{\text{stat}}(8)_{\text{syst}}$

実験精度 $\sim 200\text{ppm}$



QED $O(\alpha^2)$

ミシガン大

東大

測定手法の前に

o-Psの生成から崩壊

• オルソポジトロニウムの一生

1. **陽電子の供給**
 - β^+ 線源(^{22}Na , ^{68}Ge) or 陽電子ビーム
2. ターゲット(SiO_2 , MgO)中で**Ps生成**
 - o-Ps:p-Ps = 3:1
 - p-Psは速やかに 2γ 崩壊
3. ターゲット**物質中を拡散**
 - 一部は物質中で対消滅 $T_{\text{SiO}_2} \sim 2\text{ns}$
4. **フリースペースへ放出** $\sim \text{eV}$
 - ここで寿命を過ごす
 - 物質と衝突しながら熱化 $\sim 0.03\text{eV}$
5. **3γ に崩壊**

この間で

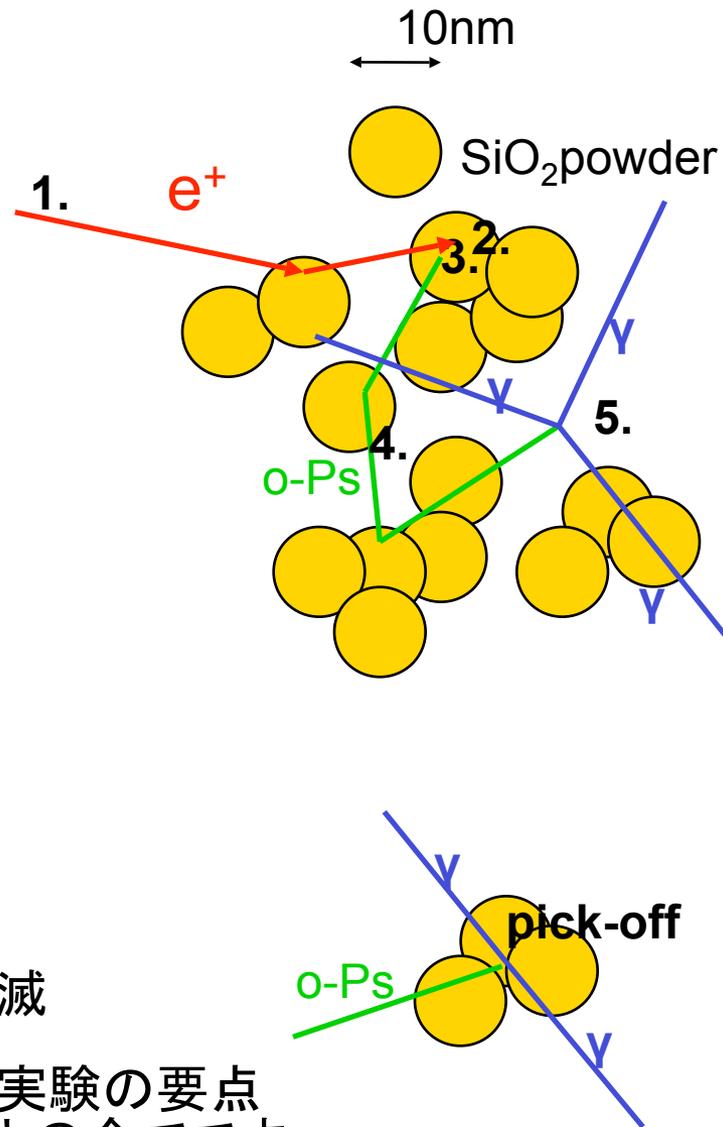
問題は、

• **pick-off** \sim 物質との相互作用による対消滅

- 観測される**崩壊率は必ず大きくなる**

- $\lambda_{\text{obs}} = \lambda_{3\gamma} + \lambda_{\text{pick}}$

この見積もりが実験の要点
ほとんどやることの全てです



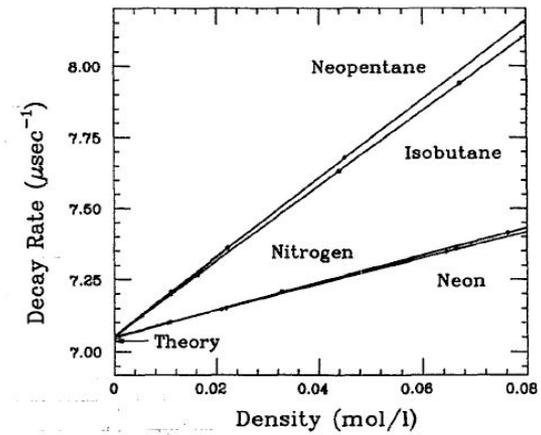
外挿によるpick-offの補正

- Ps生成に物質が必要なのでpick-offをなくすことは不可能
- 物質の密度などを変えて真空の値まで外挿～自然な発想

Gas '89 michigan

- gas ...ガス密度 ρ (mol/l)
- cavity(MgO表面) ...cavityの大きさ S/V (cm^{-1})

- 問題は、単純に密度に対してlinearか?

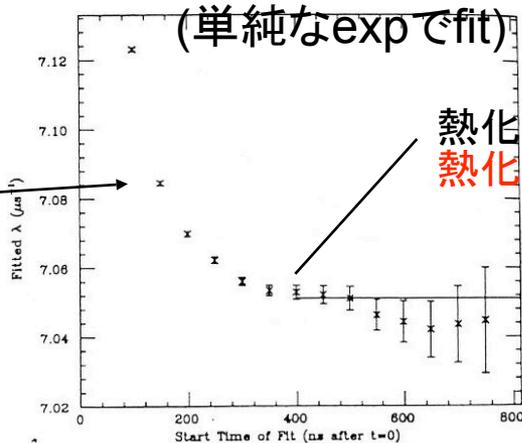


pick-offの寄与 $\lambda_{\text{pick}} = d\sigma v(t)$

d: density
 σ : annihilation cross section
 v: o-Ps velocity

- o-Psの熱化過程を反映
- 熱化しきらないと一定でない
 - 物質密度に強く依存 (低密度で熱化が遅い)

fitting start time依存性
 (単純なexpでfit)



熱化すれば一定。
 熱化時間のとり方に不定性

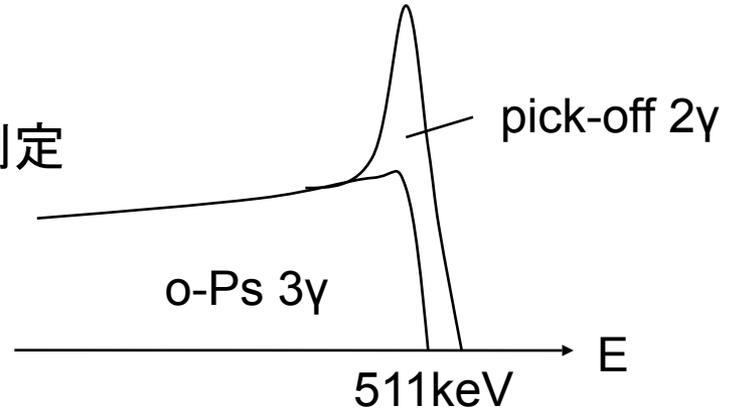
実際、熱化時間を
 小さく取り過ぎていた

pick-offの直接測定

- $\lambda_{pick}(t)$ を時間依存性を含めて直接評価できないだろうか？

- γ 崩壊のトポロジーの違いを利用してpick-offを分離する
 - pick-off $\rightarrow 2\gamma$ (**monochromatic**) $E_\gamma=511\text{keV}$
 - o-Ps崩壊 $\rightarrow 3\gamma$ (**continuous**)

エネルギー Spektrum
 $\longleftrightarrow \sim 2\text{keV}$



- **Ge検出器**を用いた γ 線エネルギーの精密測定
 2γ 、 3γ の数を時間毎にカウント

$$\left(\frac{n_{pick}(t)}{n_{3\gamma}} \right) \xrightarrow{\varepsilon(\text{efficiency})} \left(\frac{\lambda_{pick}(t)}{\lambda_{3\gamma}} \right)$$

o-Ps 個数:

$$N(t) = N_0 \exp \left(-\lambda_{3\gamma} \int_0^t \left(1 + \frac{\lambda_{pick}(t')}{\lambda_{3\gamma}} dt' \right) \right)$$

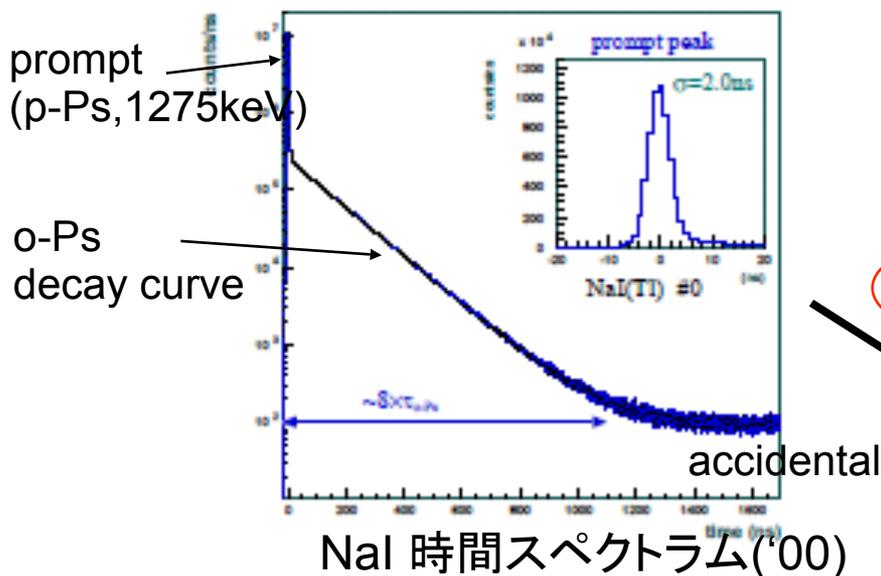
- **シンチレータ検出器**による時間スペクトラムの測定
 測定値

真空での崩壊率

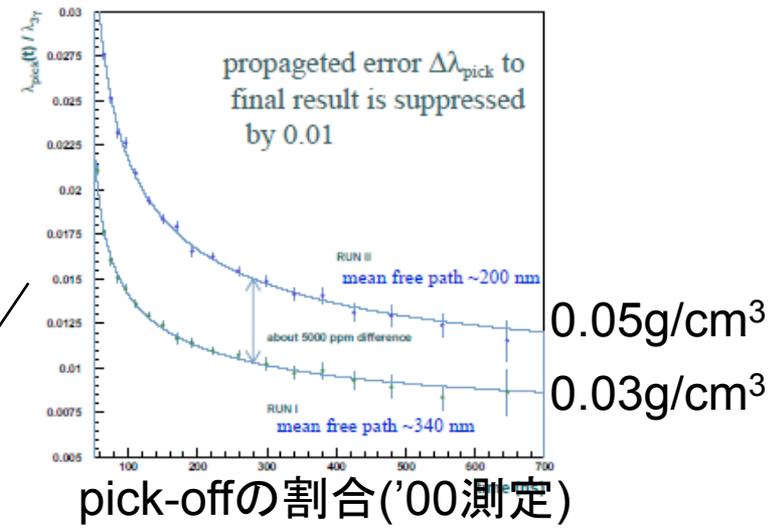
これまでの東大の測定

'95、'00、2度の測定

- Ge半導体を用いたpick-offの直接測定
- シンチはそれぞれCsl、NaI



fitting

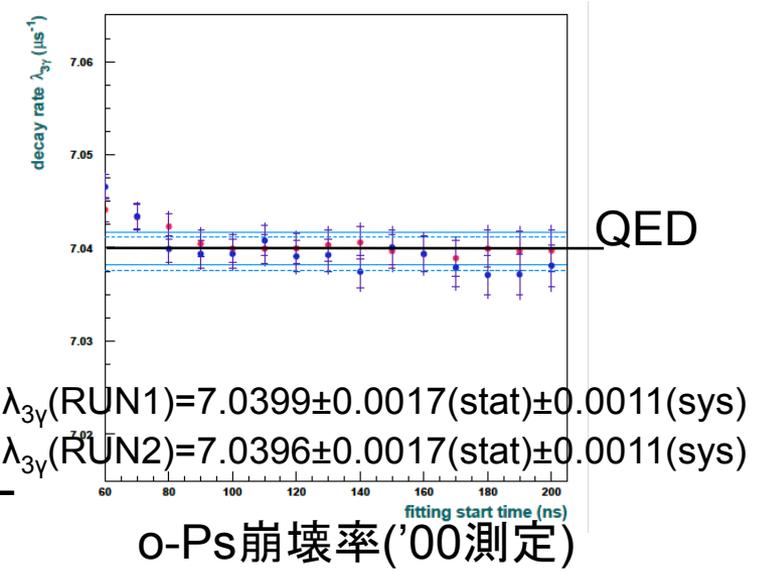


結果

- QED計算とコンシステント
- 物質(シリカパウダー)の密度にもよらない

問題点

- 崩壊時間の小さい所(<100ns)でunknownなエラー
- O(α^2)補正をみるには、統計(170ppm)が足りない



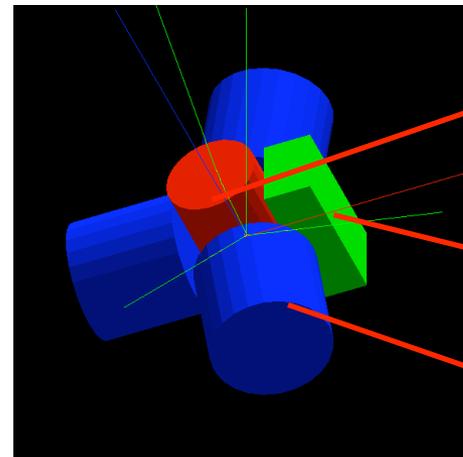
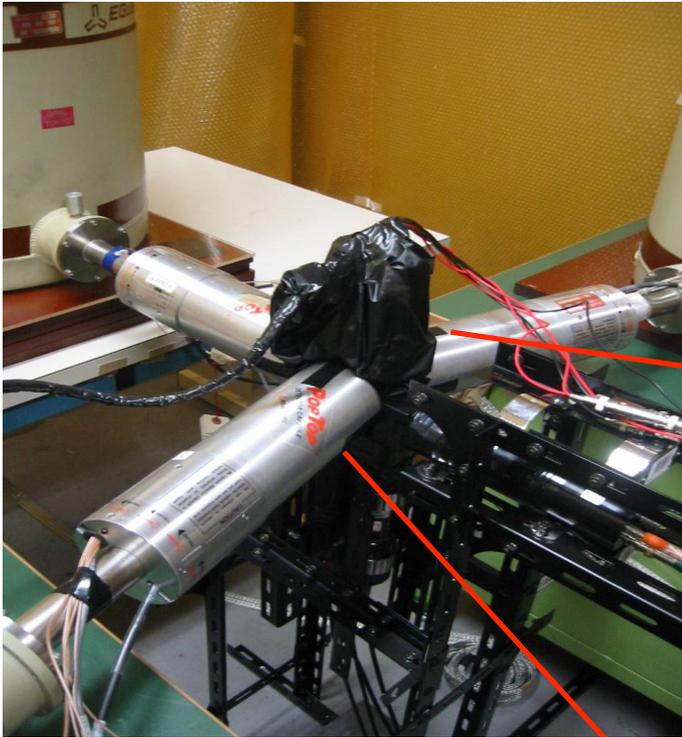
II. セットアップ

- 東大で3度目の実験立ち上げ
- 100ppmを目指して

セットアップ概要

- 今回のセットアップ

- 測定手法: pick-offの直接測定
- 陽電子: β^+ 線源 ^{68}Ge
- 減速材: SiO_2 パウダー
- 2種類の γ 線検出器:
 - Ge検出器 (pick off測定用)
 - YAPシンチレータ (寿命測定用)



真空容器
(線源、減速材)

YAPシンチレータ(4台)

Ge検出器(3台)

検出器は立体角のみ考慮(γ 線1本)
Ge約20%、YAP約30%

線源周りのセットアップ

•β+線源

^{22}Na ($E_{\text{endpoint}}=0.5\text{MeV}$)はトリガープラシン中で9割が対消滅

^{68}Ge ($E_{\text{endpoint}}=1.9\text{MeV}$)に変更

線源強度 約 $0.2\mu\text{Ci}$

半減期 288日

同時γ線 1077keV (3%)

要求: 陽電子を止めずに、
確実にトリガー

•トリガー 時間軸の基準

薄いプラシン($200\mu\text{m}$ 厚)で線源を挟む

アルミナイズドマイラー($50\mu\text{m}$)のコーンで光収集

•アンチトリガーを導入

^{68}Ge の採用で約半数の e^+ がシリカを抜ける

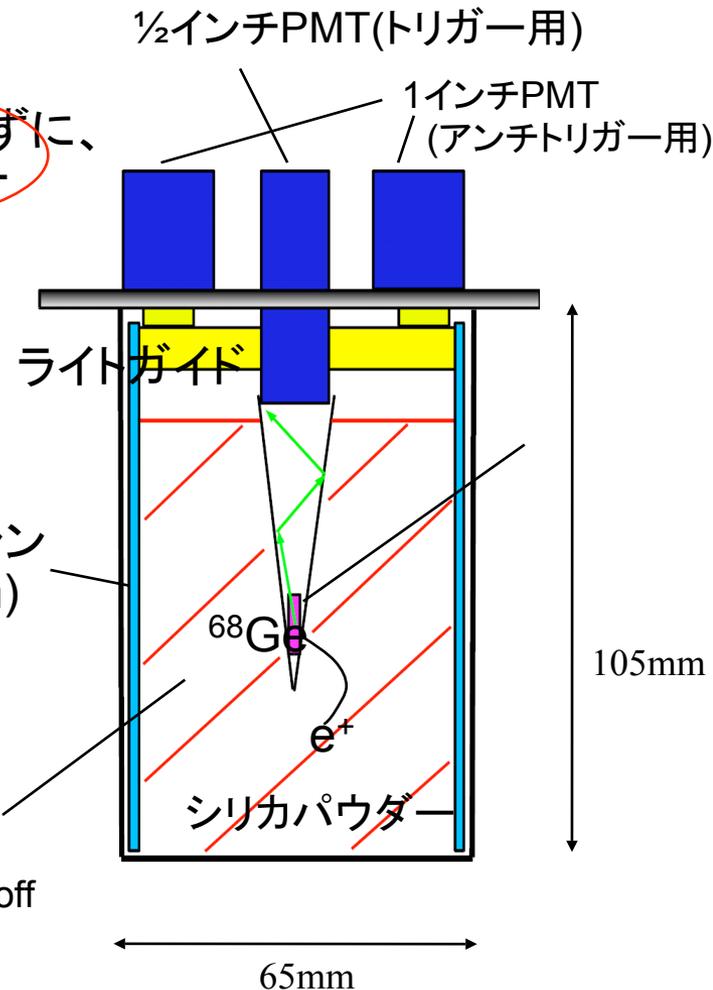
→ DAQレートを圧迫

円筒形プラシン(1mm 厚)で陽電子を捕捉

→ トリガーをveto

•トリガーレート 約 4kHz

真空 $6 \times 10^{-2}\text{Torr}$
→ 空気によるpick-off
は小さい



減速材

- シリカパウダー、シリカエアロジェル
 - o-Ps生成効率、pick-offを決める重要な要素

AEROSIL R972CF (日本アエロジル)

- 密度 0.03g/cm^3
- 一次粒子平均径 16nm
- 比表面積 $110\pm 20\text{ m}^2/\text{g}$
- 疎水処理

- pick-offの割合 ~ 補正中

- 直接測定では原理的に問題とならないが、エラーが伝播するのでなるべく小さく

- 平均自由行程 ($L \sim 300\text{nm}$) で決まる

- R972CFで1%、エアロジェル(0.03g/cm^3) 3%

$$L = \frac{4}{3} \left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right) R \quad \rho_0 = 2.2\text{g/cm}^3$$

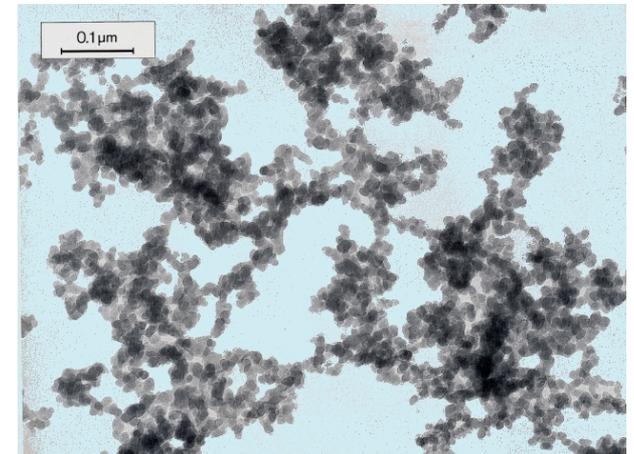
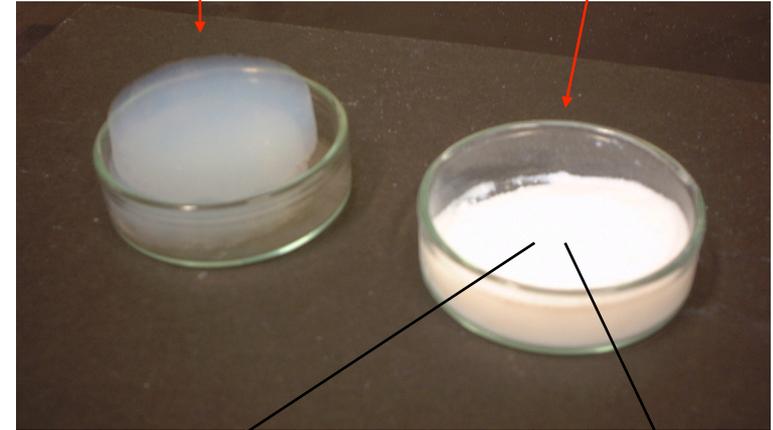
- o-Ps生成効率

- 粒子径が大きすぎると、フリースペースに

→ サンプルを変えてpick-off補正の性能をみる

シリカエアロジェル

シリカパウダー



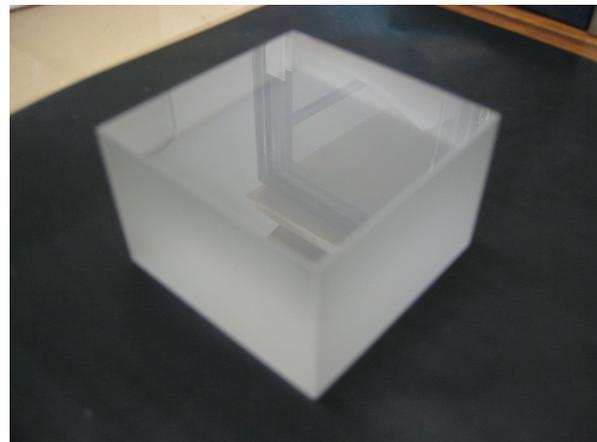
γ線検出器 (シンチレータ)

- 高統計な測定に適したYAPシンチレータを導入

今回使用したYAPの結晶
5cm×5cm×3.3cm

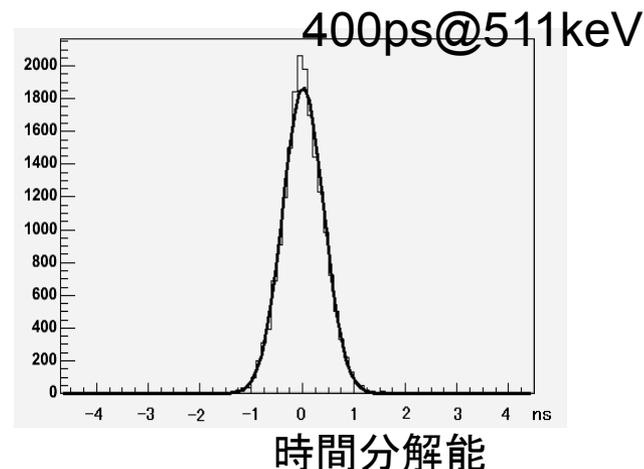
YAP (YAIO₃)シンチレータ (チェコ製)

- 減衰時間 30ns
- 光量 40% (NaI比)
- 少し青い 370nm
- Z=39
- 物性: 潮解性がなく、硬くきれいな結晶
- 光の減衰長 ~ 20cm



- NaI(減衰時間230ns)と比べて
pile up が大幅に減少 → 高統計化
- 優れた時間分解能(~400ps)

→ 低エネルギーの時間測定にはbest solution



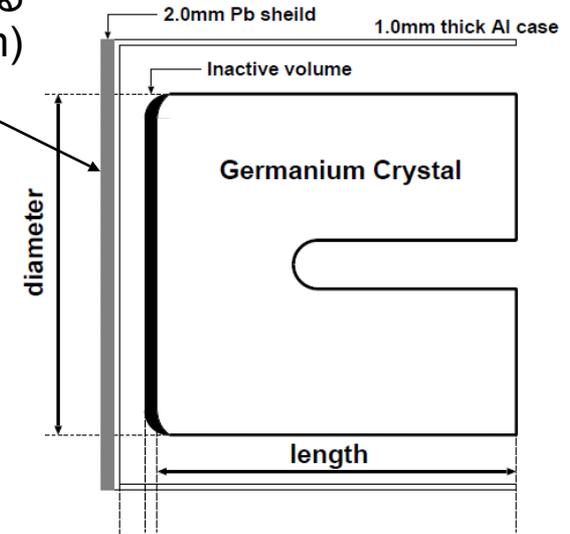
γ線検出器 (Ge検出器)

- エネルギーを正確に測定し pick-offの寄与を直接評価

円筒同軸型HPGe (Ortec GEM38195)

- 直径6cm×長さ7cm
- HV=2600V
- エネルギー分解能
 $\sigma = 0.5 \sim 0.6 \text{ keV} @ 0.5 \text{ MeV}$

2γ同時hitを抑える
Pbシールド(2mm)



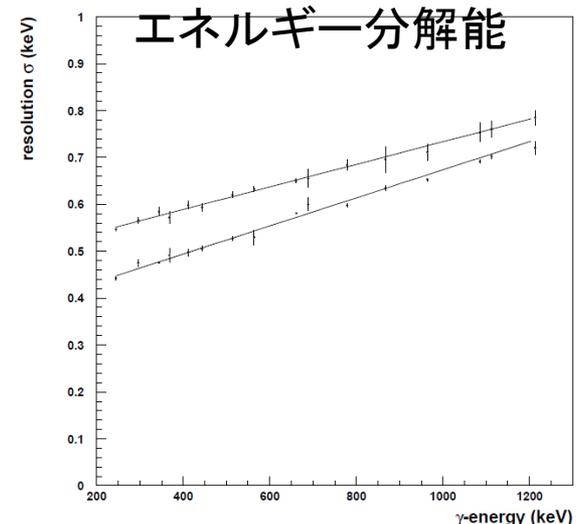
pick-off 511keV
 $\sigma = 1 \text{ keV}$ (ドップラー効果)

- 時間依存性をみるために時間分解能も必要

- 遅い立ち上がり~200ns → 大きなtime walk
- 電場が複雑で立ち上がりが一様でない (キャップ部)

立ち上がりの時間を測定してtime walk補正

- 時間分解能 $\sigma = 5 \text{ ns}$



III. 解析

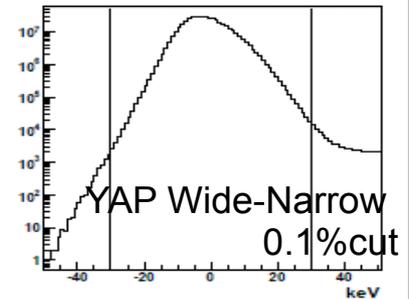
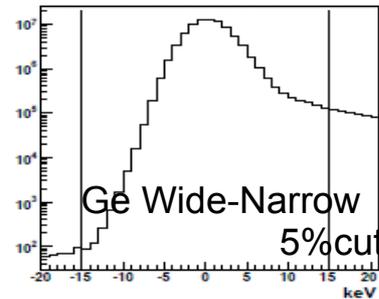
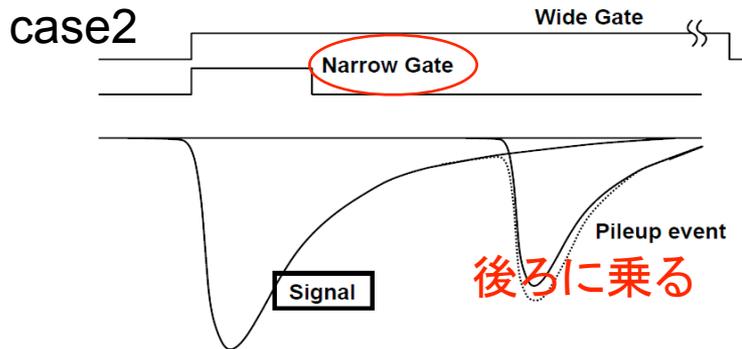
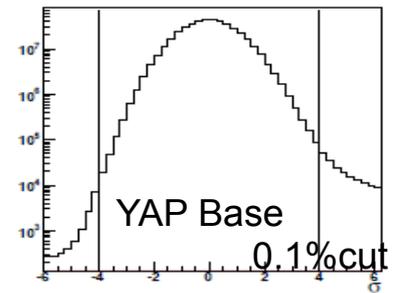
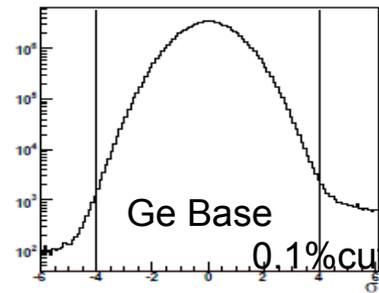
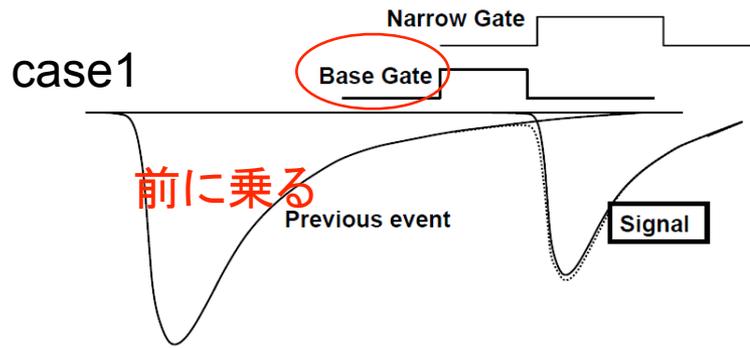
- 長期ラン開始
- 現在、2ヶ月のデータ収集
- systematic errorの評価はこれから

解析の前に

Event selection (pile up除去)

- エネルギースペクトラム、time walkを歪めるpile upイベントを除く
(ヒットレート Ge: 500Hz YAP: 1kHz)
- 基本的にaccidentalはトリガーと相関がないので問題ない
- Pile upのないきれいなイベントを選別
3つのADC情報 (Base, Narrow, Wide)

| | YAP | Ge |
|-------------|-------|-------------|
| Base gate | 50ns | 100ns |
| Narrow gate | 150ns | 1.5 μ s |
| Wide gate | 500ns | 55 μ s |



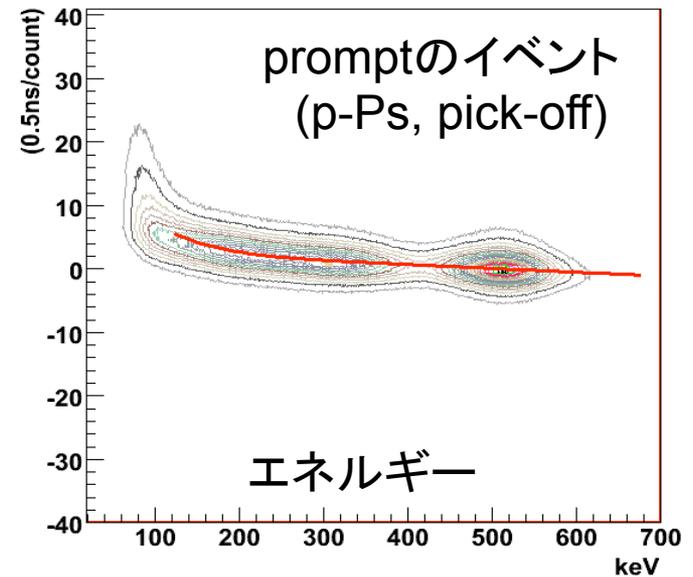
Time walkの補正

- YAPのtime walk補正

- 速い立ち上がり
- γ 線のエネルギーで補正

promptイベント ($t \sim 0$ のp-Ps, pick-off)

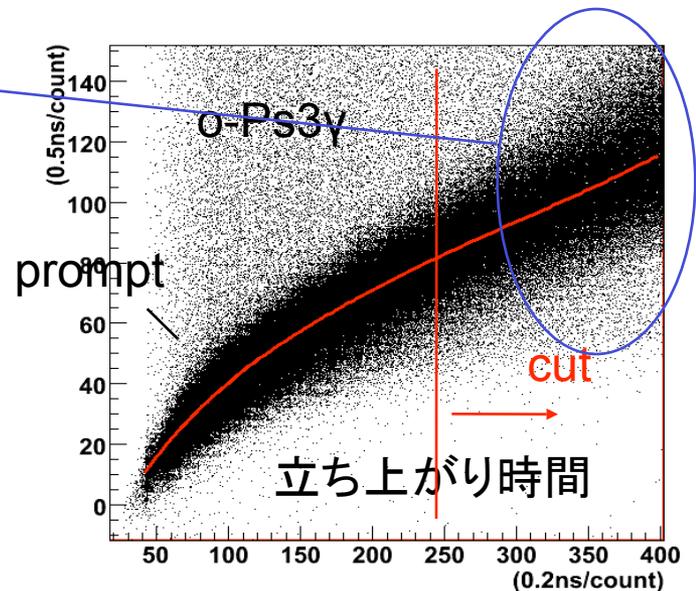
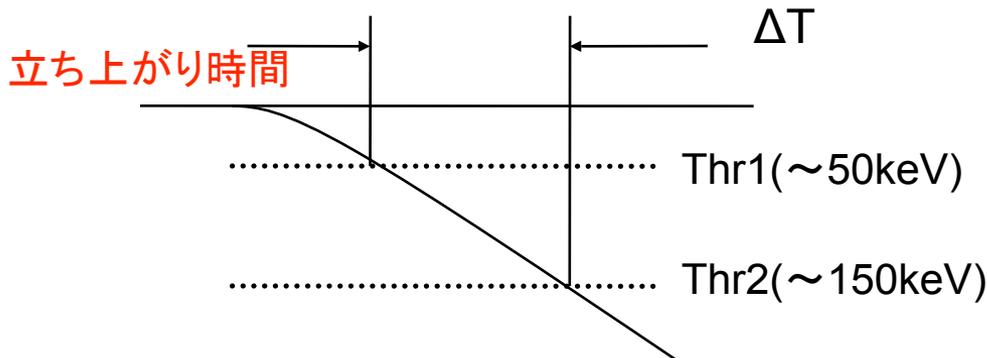
→ $\sigma = 1\text{ns}$



- Geのtime walk補正

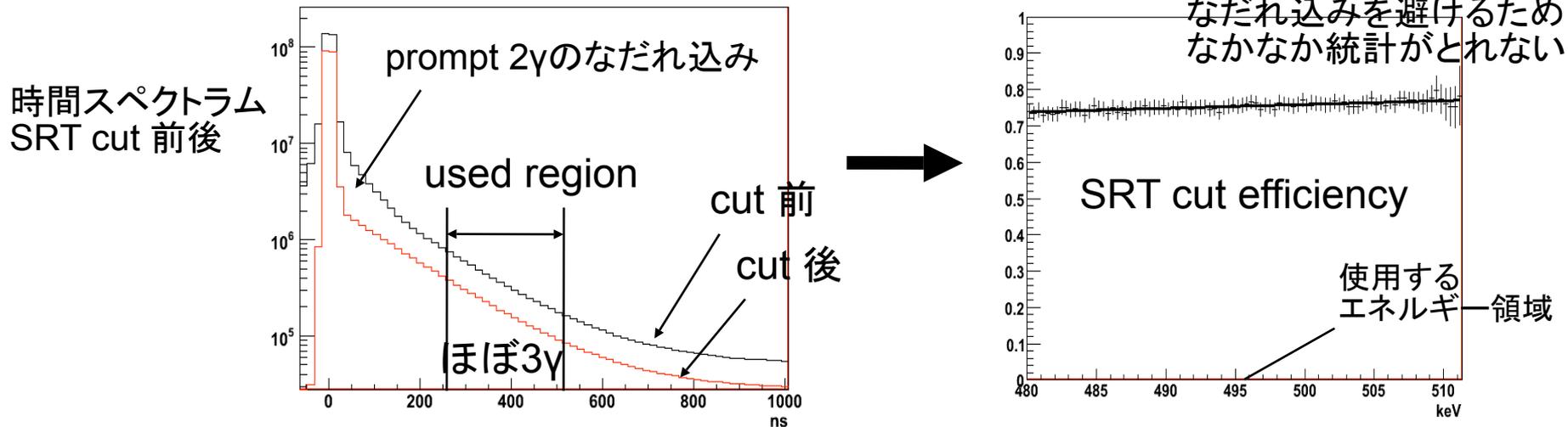
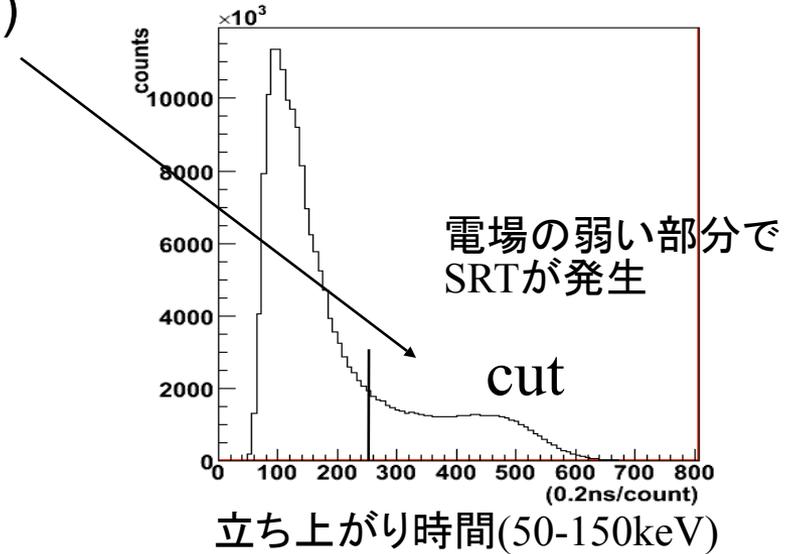
- 遅い立ち上がり ($\sim 200\text{ns}$)
- 立ち上がりの時間で補正
- 遅い立ち上がり成分をカット (約3割)

→ $\sigma = 3 \sim 5\text{ns}$



SRT cut efficiency

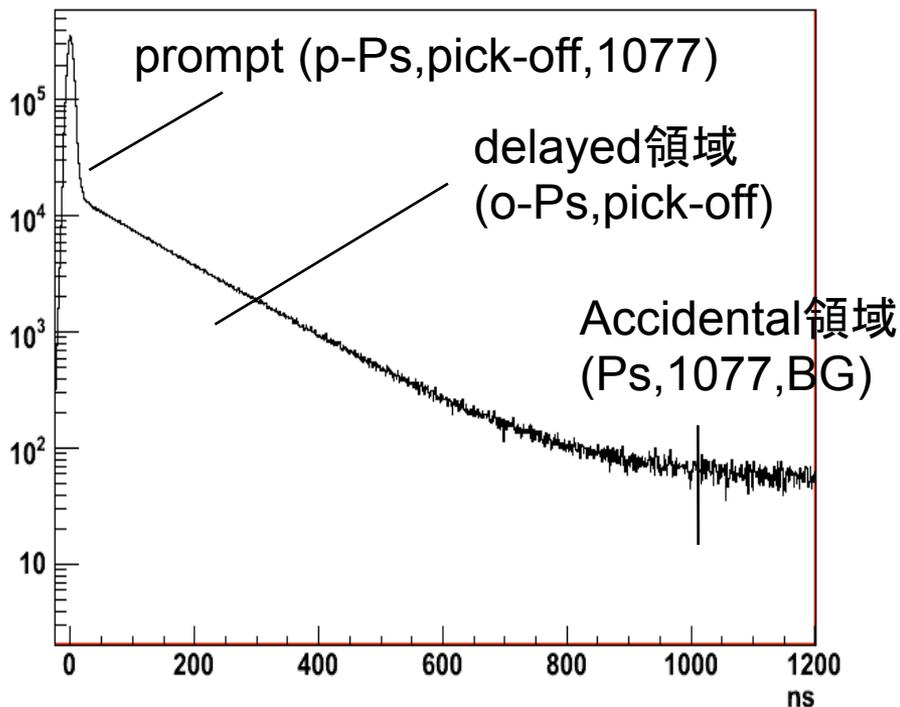
- SRT(slow risetime)はカットする(約3割)
ただし、**3 γ の正確なefficiencyが必要**
 - モンテカルロで作る3 γ のスペクトラム
 - pick-offの割合の算出(efficiency)
- **SRT cut efficiencyの評価**
 - エネルギー (波高)依存性、
 - Ge位置(電場)依存性などで複雑



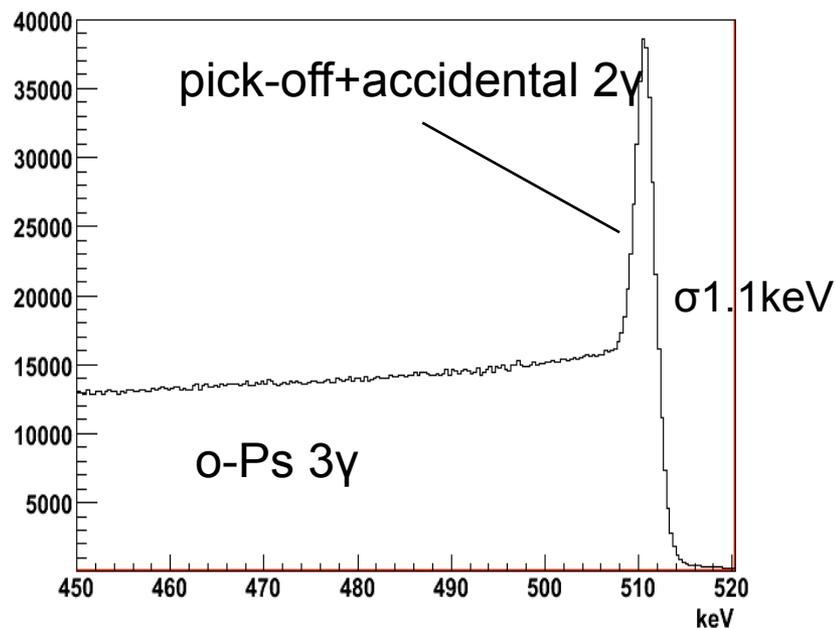
ここまでで得られた

Ge spectrum

Ge 時間スペクトラム



Ge エネルギースペクトラム

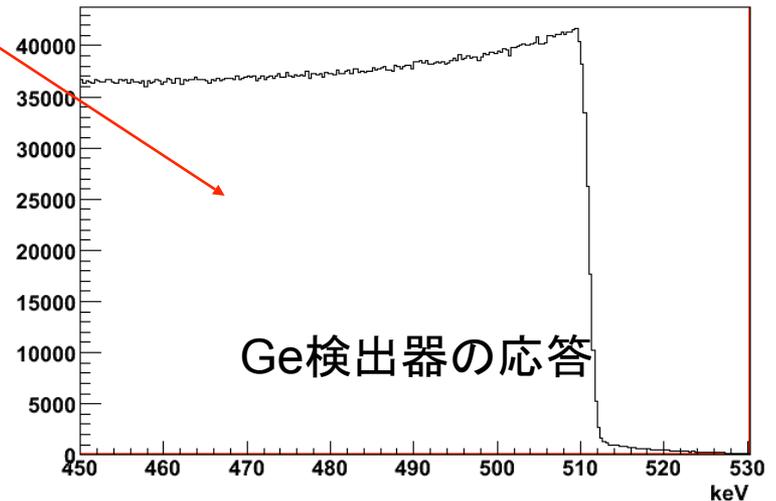
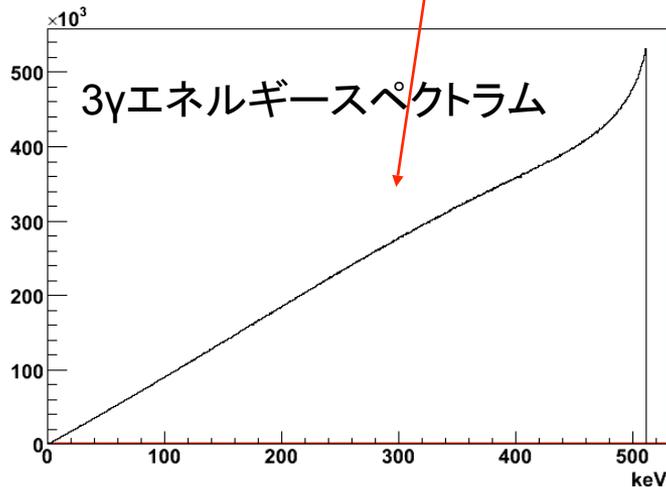
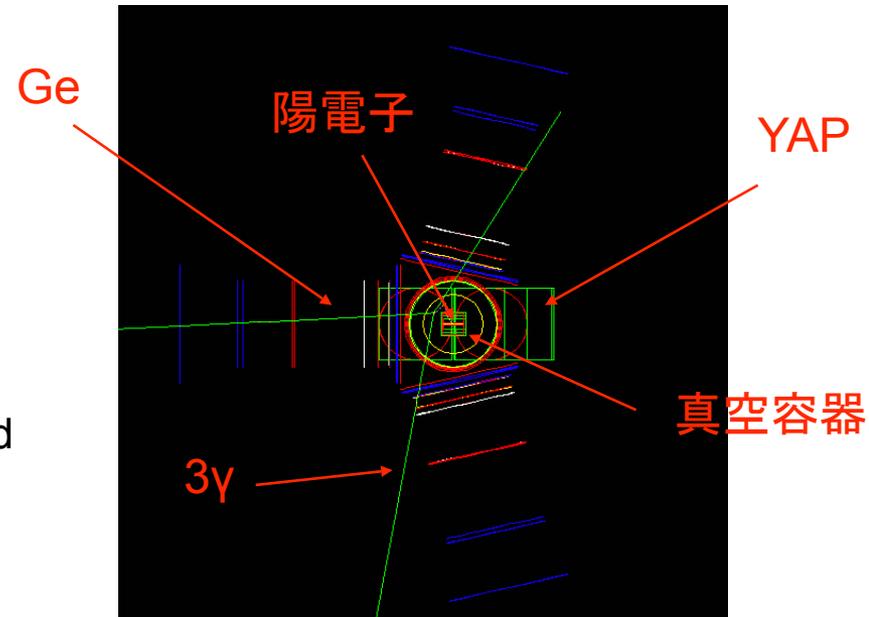


pick-off算出のstrategy

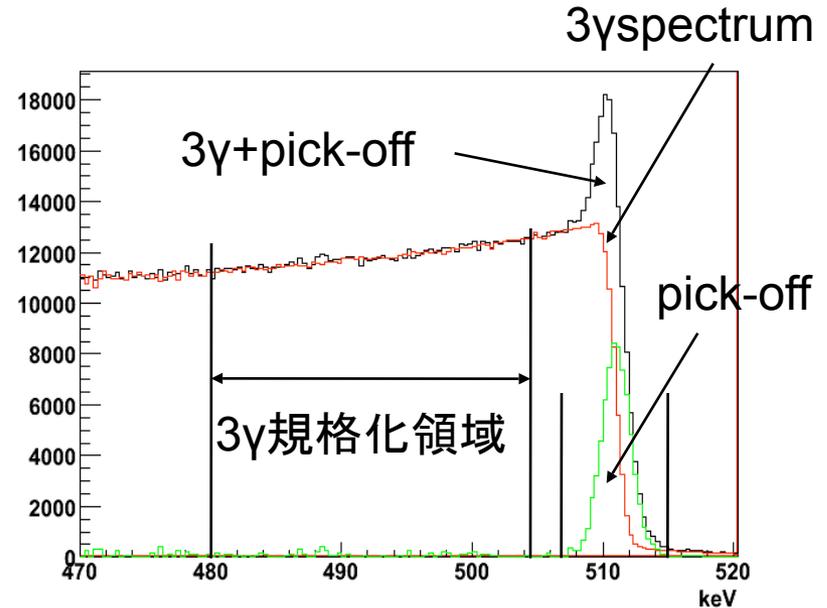
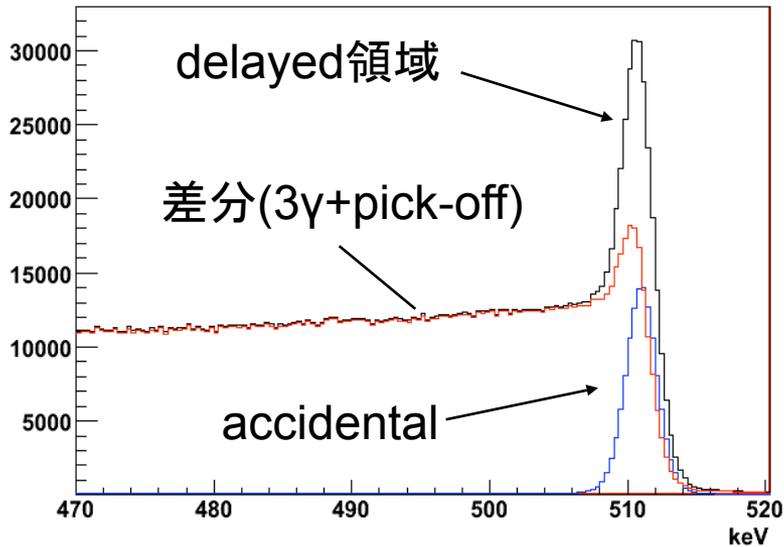
1. accidentalの差引き
2. 3 γ スペクトラム(MC)を連続部で規格化
3. 2 γ 数、3 γ 数をカウント
4. efficiencyを掛けて $\Lambda_{pick}/\Lambda_{3\gamma}$
5. 1~4を時間区分毎に

o-Ps 3 γ spectrum

- Simulation(**Geant4**)で形を決める
 - 陽電子(^{68}Ge)
 - トリガーを鳴らす
 - アンチトリガーは鳴らさない
 - シリカパウダーで止まったイベント
 - 3 γ
 - 陽電子が止まった位置で崩壊
 - $O(\alpha)$ のMatrix Element ← established
 - 検出器の応答
 - 分解能は測定値
 - SRT cut efficiencyも測定データから



2 γ 、3 γ の分離



Accidentalの差引き

- Accidental領域(2000ns~3600ns)をdelayed領域($t_1 \sim t_2$)に規格化して差引き

$$\text{factor: } \frac{t_2 - t_1}{3600 - 2000} \times \exp(R_{\text{stop}} t)$$

R_{stop} : 約500Hz

3 γ の差引き

- 480keV~505keVで3 γ spectrumを規格化 (pick-offのコンプトンは約3%)
- 3 γ spectrumを差引きしてpick-offを出す
- pick-off(2 γ)、3 γ 数のカウント

N_{pick} : 507keV~515keV

$N_{3\gamma}$: 480keV~505keV

Pick-offの評価

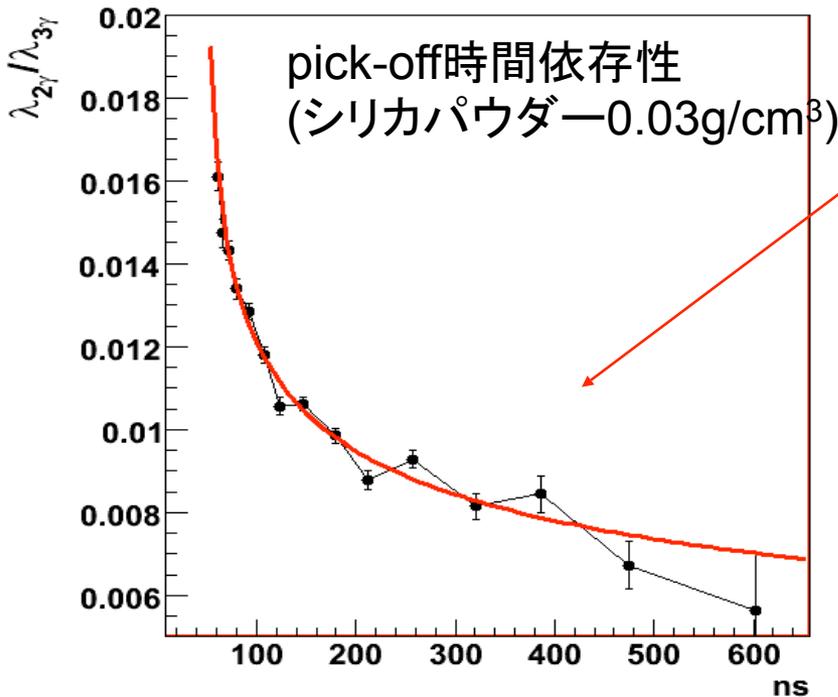
測定データのカウント数

$$\frac{\lambda_{pick}}{\lambda_{3\gamma}} = \frac{N_{pick}}{N_{3\gamma}} \times \frac{\epsilon_{3\gamma}}{\epsilon_{pick}}$$

simulation(Geant4)で評価 ~0.14

$\epsilon_{3\gamma}$: 3 γ efficiency (480keV~505keV)

ϵ_{pick} : 2 γ efficiency (507keV~515keV)



- 熱化過程を反映した減衰曲線
- 熱化時間~600ns
- Pick-offの割合は約1%

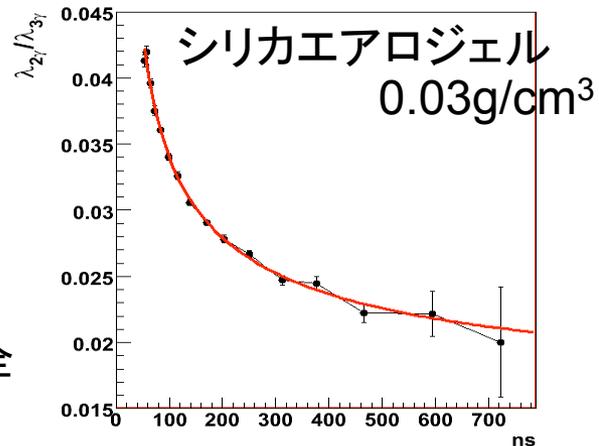
ちなみに、同じ密度のエアロジェル

- pick-off 約3倍
- 一次粒子径の差?

外挿法より
直接測定が安全

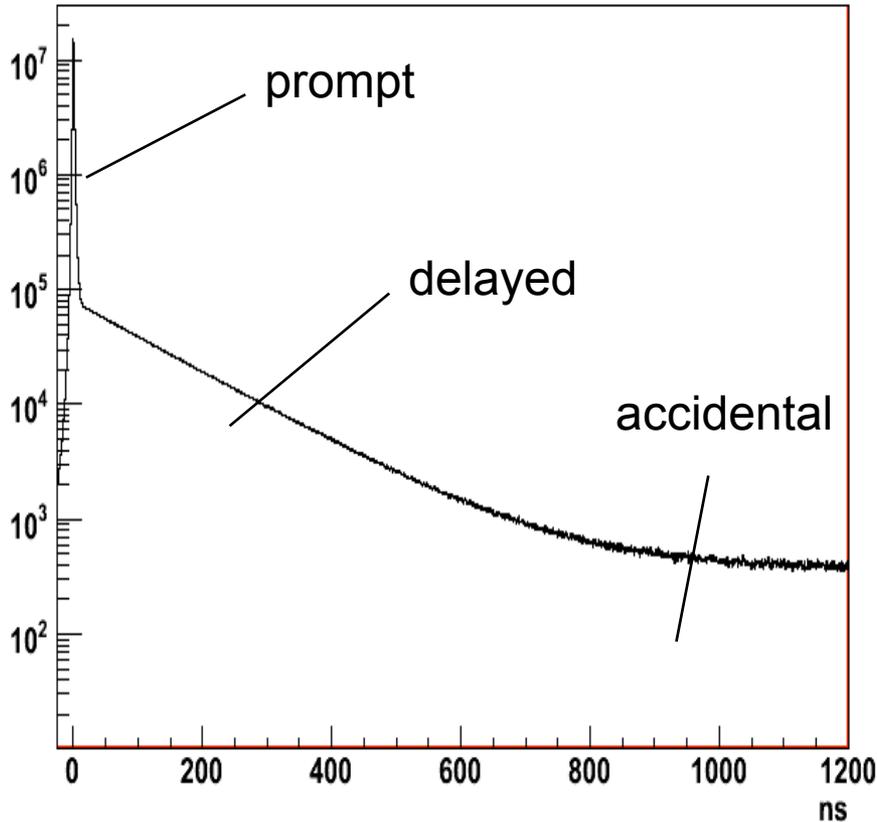
$$\frac{d}{dt} \theta(t) = -C(\theta(t)^2 - \theta_{\infty})\theta(t)^{2\beta}$$

$$\theta(t) = \frac{\lambda_{pick}(t)}{\lambda_{3\gamma}}$$



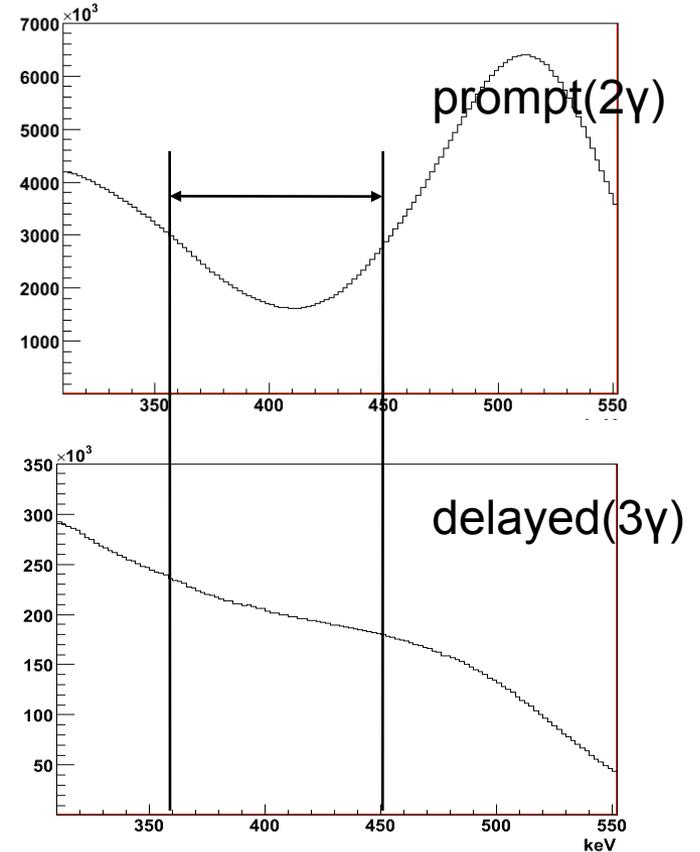
YAP spectrum

YAP時間スペクトラム



weak source(0.2 μ Ci)
→ Decay curve $\sim 5\tau$

YAPエネルギースペクトラム



2 γ /3 γ 比の小さなエネルギー領域を選択
360keV \sim 450keV
→ $\epsilon_{2\gamma}/\epsilon_{3\gamma} \sim 0.4$ (simulationで評価)

o-Ps崩壊率

Fitting function:

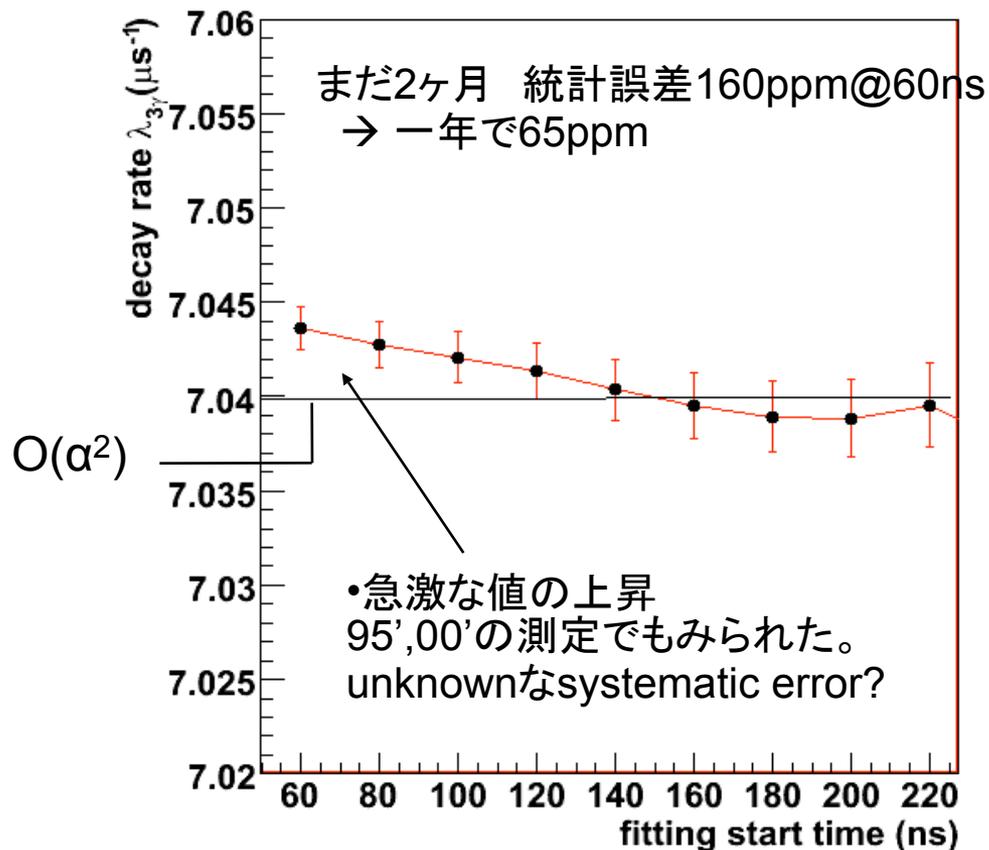
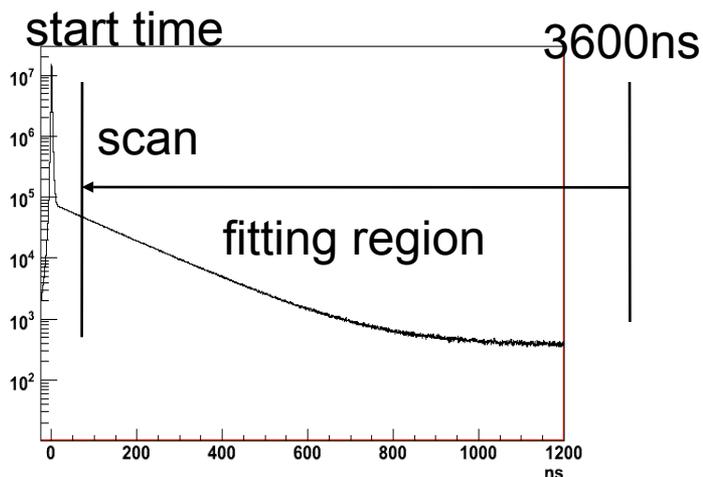
pick-offの割合(測定値)

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

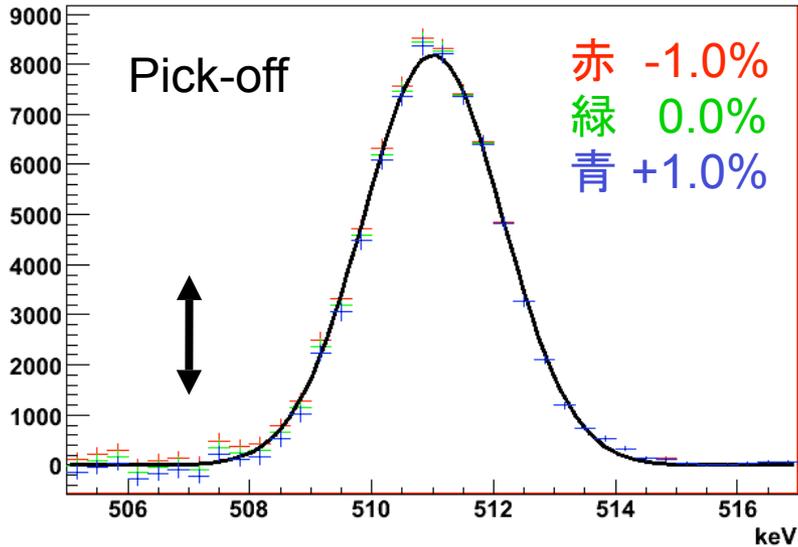
$R_{stop} \sim 1000\text{Hz}$

$\epsilon_{pick}/\epsilon_{3\gamma} \sim 0.4$

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



systematic error



pick-off 2 γ
= delayed領域 - 3 γ スペクトラム(MC)

3 γ スペクトラムのnormalizationを変化

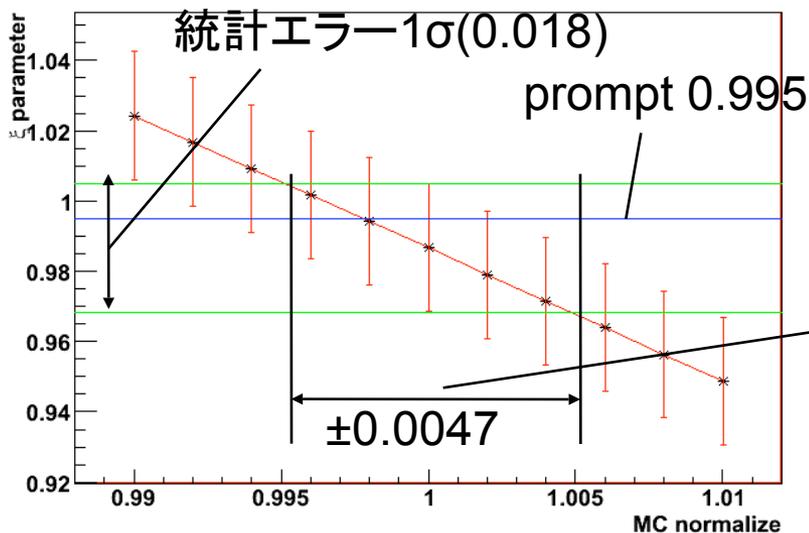
pick-off 光電ピークの対称性が変化

ξ parameter

$$\xi_{asym} = \left(\sum_{E=507keV}^{E<511keV} N(E) \right) / \left(\sum_{E>511keV}^{E=515keV} N(E) \right)$$

ξ parameterの感度

0.0047 \rightarrow 130ppm

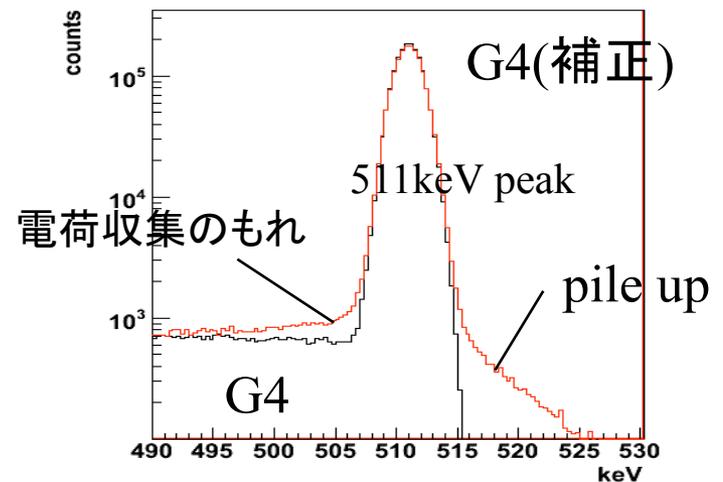
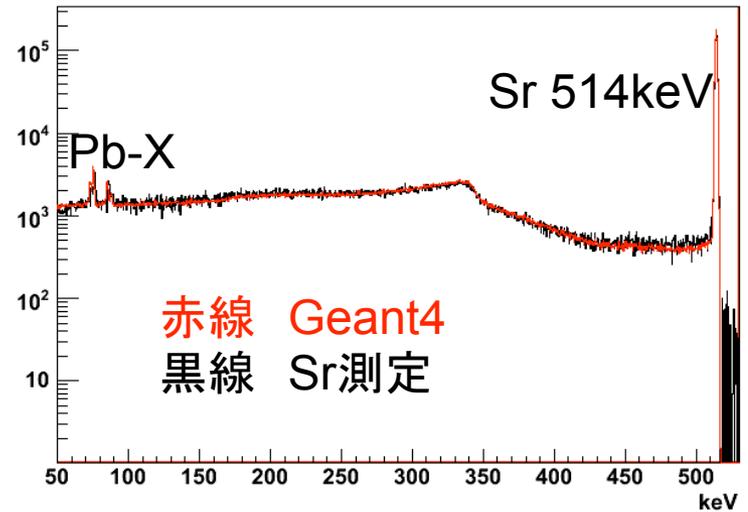


MC Ge検出器

- **Geant4** (with G4LECS)
 - 基本的に良く合う
 - 光電ピーク周辺を微調整
 - 電荷収集の不足
 - pile up
- systematic error
 - pick-offの割合を経由して伝播
 - 480keV以下は効かない
 - ピークとコンプトンフリーの比が重要

$$\frac{\lambda_{pick}}{\lambda_{3\gamma}} = \frac{N_{pick}}{N_{3\gamma}} \times \frac{\epsilon_{3\gamma}}{\epsilon_{pick}}$$

1% → 100ppm



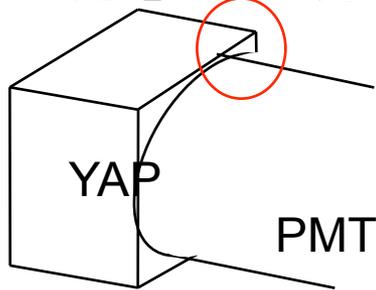
MC YAPシンチレータ

- Geant4
- 分解能 $\sigma=30\sim40\text{keV}@511\text{keV}$
- 分解能以上に形が合わない

→ 光収集が悪い? 減衰長約20cm

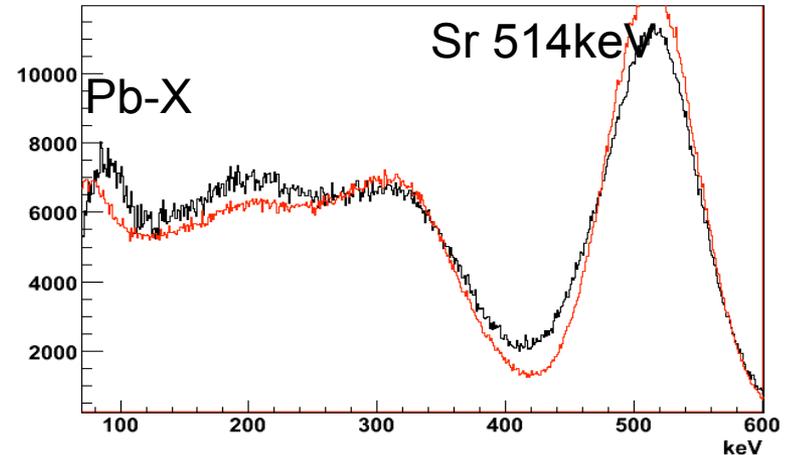
- Optical photonのシミュレーション(Geant4)

光電面の死角で約3割のロス

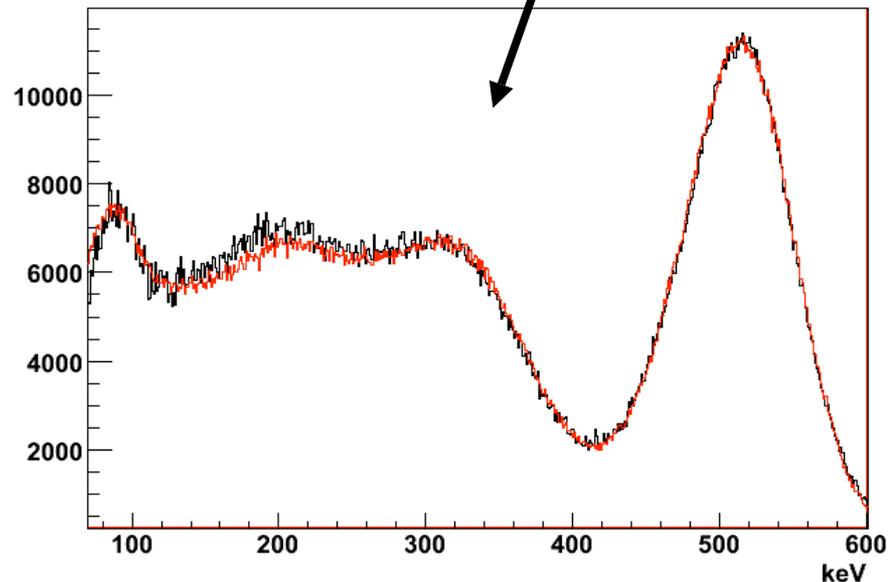


$$\left(1 + \frac{\varepsilon_{pick} \lambda_{pick}(t)}{\varepsilon_{3\gamma} \lambda_{3\gamma}}\right) \frac{1}{j} N_0 \exp() \dots$$

2% → 20ppm程度



光収集を考慮



Stark shift

•Stark Shift

物質の電場による崩壊率の変化

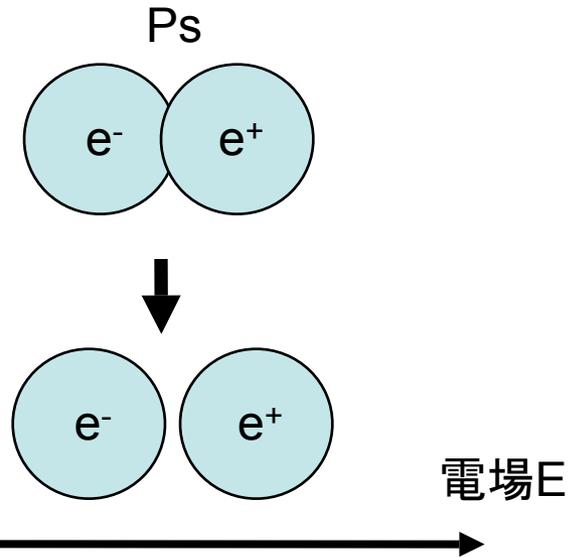
$$\lambda_{3\gamma} \propto \text{Flux Factor} \propto |\psi(r=0)|^2$$

摂動 $\psi = \psi_0 + E\psi_1 + E^2\psi_2 + \dots$

$$\frac{\Delta\lambda_{3\gamma}}{\lambda_{3\gamma}} = E^2 \frac{|\varphi_1|^2}{|\varphi_0|^2} = 248 \times \left(\frac{E}{E_0} \right)^2$$

電場の2乗

$$(E_0 = 5.14 \times 10^9 \text{ V/cm})$$



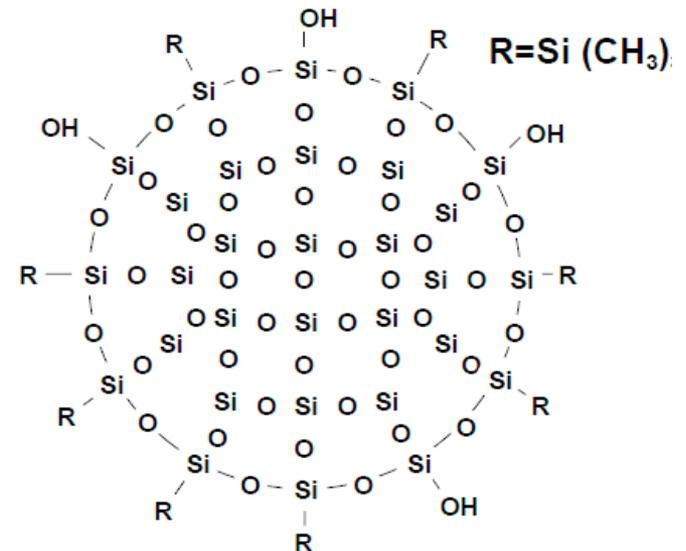
1. Charge up

シリカエアロジェル 400~500 $\mu\text{C/g}$

$\rightarrow 2 \times 10^{-2} \text{ ppm}$

2. dipole moment (Si-OH)

$\rightarrow 20 \text{ ppm}$



systematic error ('00)

まとまってないので、前回の結果を引用

KEK TDC
2GHz clock type → good Integral Linearity



| Source of the Contributions | For RUN I (ppm) | For RUN II (ppm) |
|--|-----------------|------------------|
| TDC module dependence | | |
| - Calibration | < 1 | < 1 |
| - Stability | 2 ~ 3 | 2 ~ 3 |
| - Integral Non Linearity | < 15 | < 15 |
| - Differential Non Linearity | Negligible | Negligible |
| Cut condition dependence | | |
| - Energy Selection | not assigned | not assigned |
| - Base Line Selection | -17 and +89 | -11 and +23 |
| - WD-NW condition | -6 and +45 | -20 |
| - Trigger threshold | not assigned | not assigned |
| Monte Carlo dependence | | |
| - Normalization | ±99 | ±113 |
| - Relative efficiency of NaI(Tl) scintillator | ±7 | ±7 |
| - In-uniformity of SiO ₂ powder | < ±55 | < ±88 |
| Other Sources | | |
| - Stark effect | -21 | -6 |
| - $n = 2$ excited state | +19 | +19 |
| Total | -118 and +153 | -146 and +148 |

3 σ の差引き
SRT cut efficiencyなど

パウダーの密度(±10%)に対して
efficiencyの変化

Excited state $n=2$: 3×10^{-4}
低い崩壊率 $\lambda_{o-PS}/8$

まとめ

- o- P_s 寿命測定は200ppmのレベルに達している
 - 熱化過程に関するズレ(o- P_s 寿命問題)は解決
 - もう少し精度が上がれば $O(\alpha^2)$ の補正がみられる
- 新しく実験を立ち上げて、現在データ収集中
 - 統計は格段に向上
 - prompt付近、unknownなズレの解明が必要
 - 系統誤差の洗い出しと詰めはこれから