

オルソポジトロニウム崩壊におけるガンマ線スペクトル測定

大和田健太、難波俊雄^A、浅井祥仁、小林富雄^A

東京大学理学系研究科、東京大学素粒子物理国際研究センター^A

第49回 アイソトープ・放射線研究発表会

東京大学

1. ポジトロニウムを使った未知粒子探索

ポジトロニウムは粒子と反粒子の束縛系であり
未知の物理に感度がある



ポジトロニウムを使って、未だに弱い制限しか付けられていない
短寿命な未知粒子(寿命 $10^{-15} \sim 10^{-9}$ s)を探す

ブランチ比($\Gamma(o\text{-Ps} \rightarrow \gamma X) / \Gamma(o\text{-Ps} \rightarrow 3\gamma)$) 質量30keV~300keV : 3×10^{-4}
に対する既存のupper limit 300keV~900keV : 1.5×10^{-4}

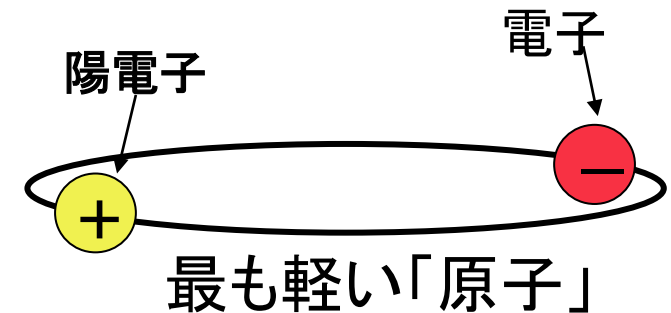
質量が1MeV以下の短寿命未知粒子

→ スペクトルにピークができる

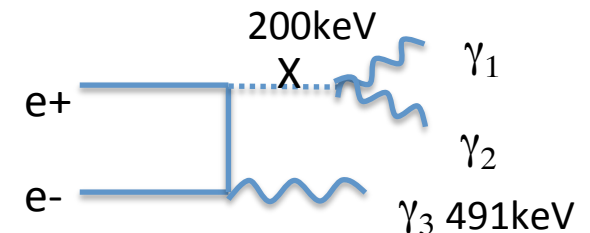
未知粒子とともに出てくる単色の γ 線(γ_3)を探す。
(γ_1 、 γ_2 はドップラー効果によりスペクトルが広がり感度が落ちる)



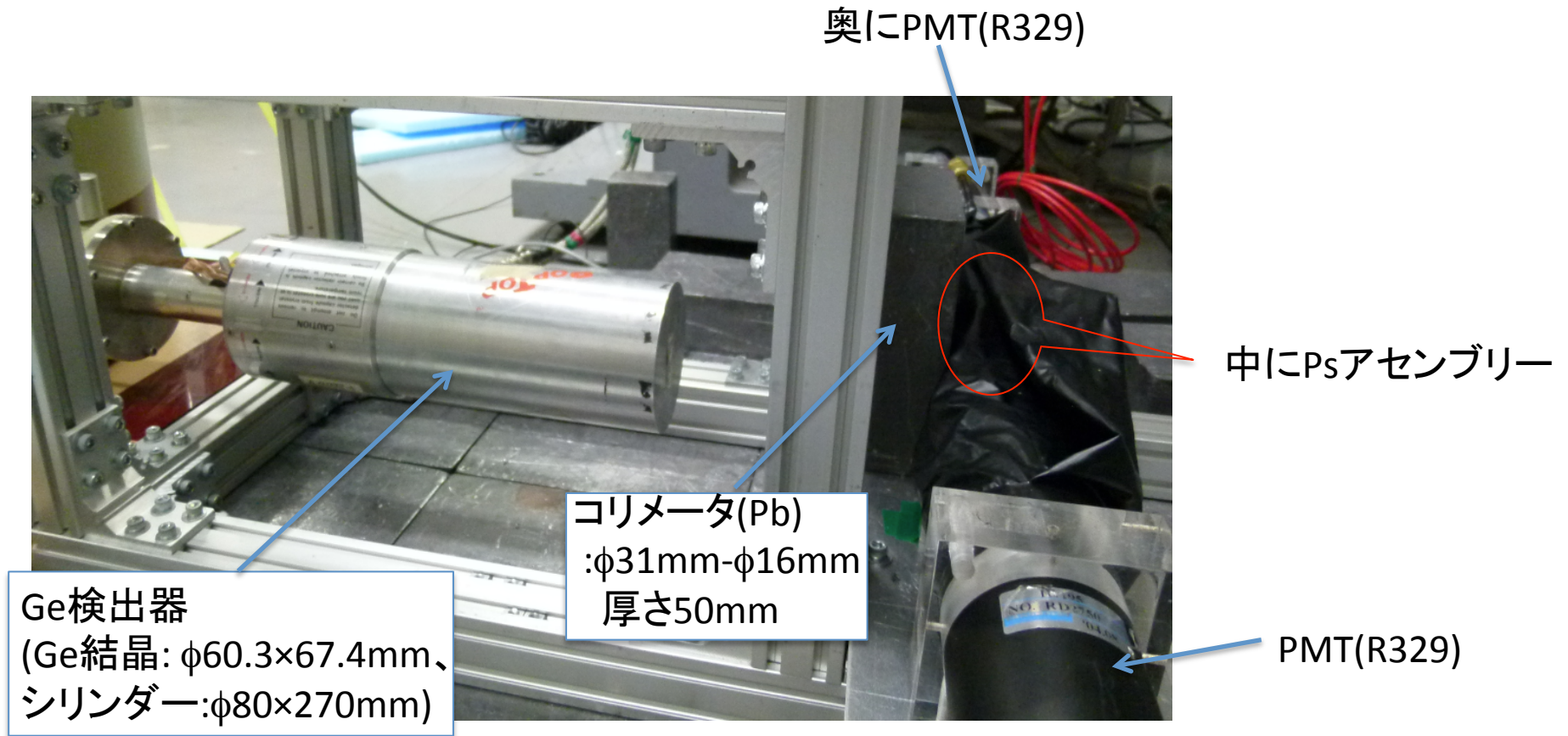
単色の γ 線を探すため、分解能の良い半導体Ge検出器を用いて、
 10^{-5} のオーダーの制限をつけることをめざす。



Ex.)未知粒子Xの質量が200keVのときの崩壊



2.1セットアップ



Ge検出器の性能

エネルギー分解能(FWHM):
 1.305 ± 0.002 @ 356keV

線源からGe検出器までの距離 170mm

2.2 γ 線検出器(Ge)

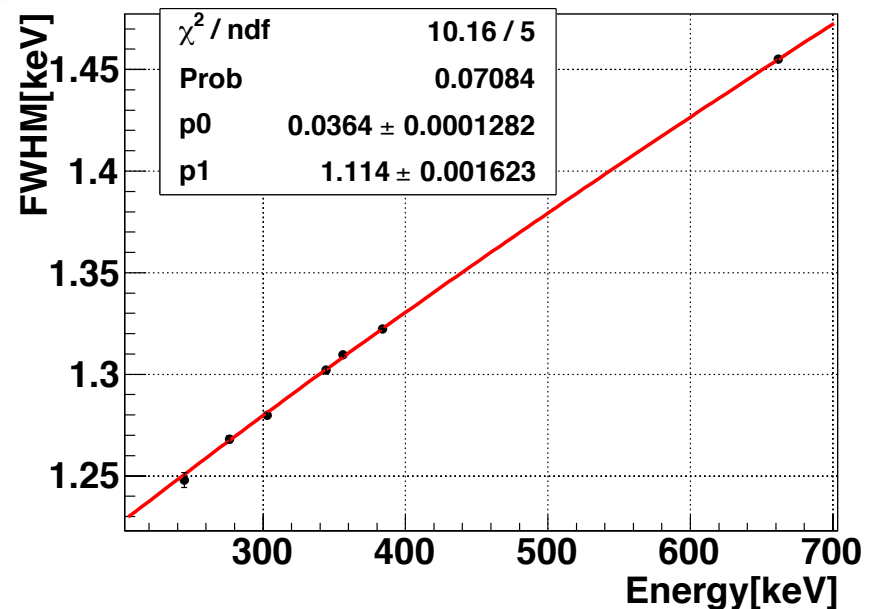
液体窒素タンク



Ge結晶: $\phi 60.3 \times 67.4 \text{ mm}$

型番: 28-TP10096

Ge検出器でのエネルギー分解能(FWHM)



^{137}Cs 、 ^{133}Ba 、 ^{152}Eu 線源を用いて測定

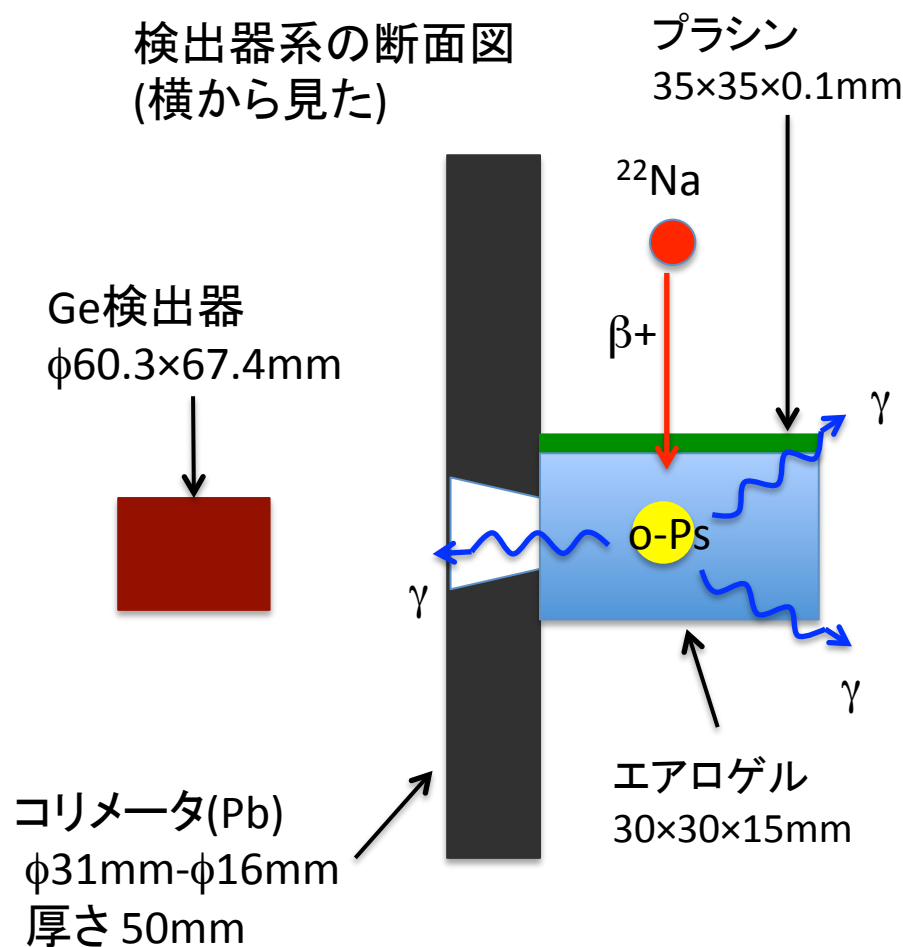
FWHM 1.310 ± 0.002 @ 356keV

1.455 ± 0.001 @ 662keV

Fitting 関数は

$$(\text{FWHM}) = (p0^2 \times E(\text{keV}) + p1^2)^{1/2}$$

2.3 Psアセンブリ



線源から検出器までの距離 170mm

- ^{22}Na 線源で β^+ を生成する。
 - プラスチックシンチレータで β^+ をタグしてPsの生成時間を求める。
- ↓
- Ge検出器とdelayed coincidenceをとり
o-Psのイベントを選択する
- 窒素ガスで満たしたエアロゲル中でo-Psを生成
 - 線源をプラシンから離してコリメートすることにより、線源から直接Ge検出器に入らないようにした

3. 測定

- 約190日間の測定を行った。
 - 線源 ^{22}Na : 340kBq
 - プラスチックシンチレータとGe 検出器を幅 $2\mu\text{s}$ でコインシデンスをとってトリガーをかける。
(プラスチックシンチレータとGe検出器のエネルギーと時間情報を取得)
trigger rate 200Hz
 - 3.3×10^9 eventを得た。これにセレクションをかける

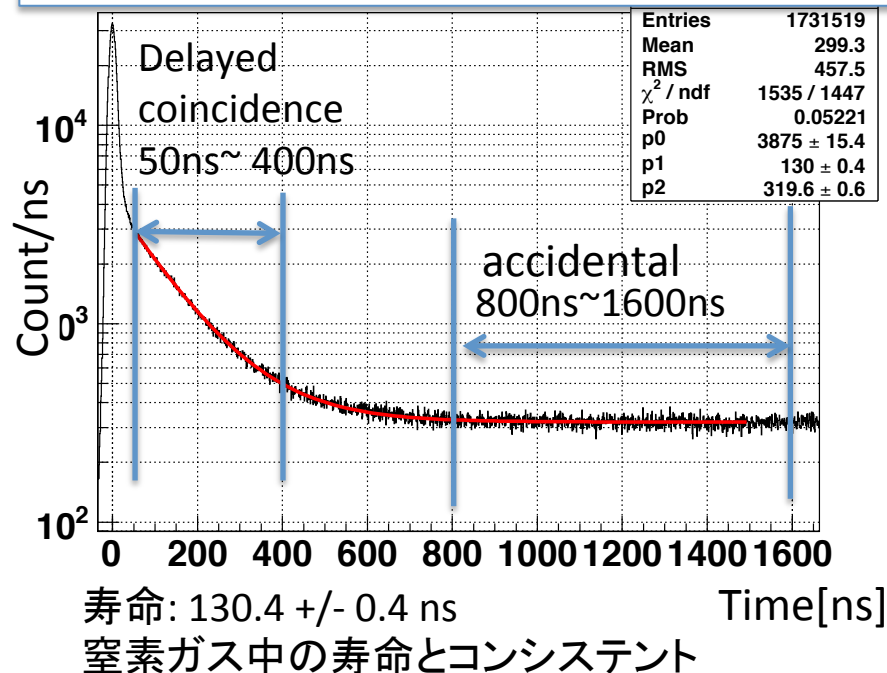
4.1 イベントセレクション

Slow rise time cut : Ge検出器の電場の非一様性による立ち上がりの遅い信号をカットして、タイミングを正確に求める。

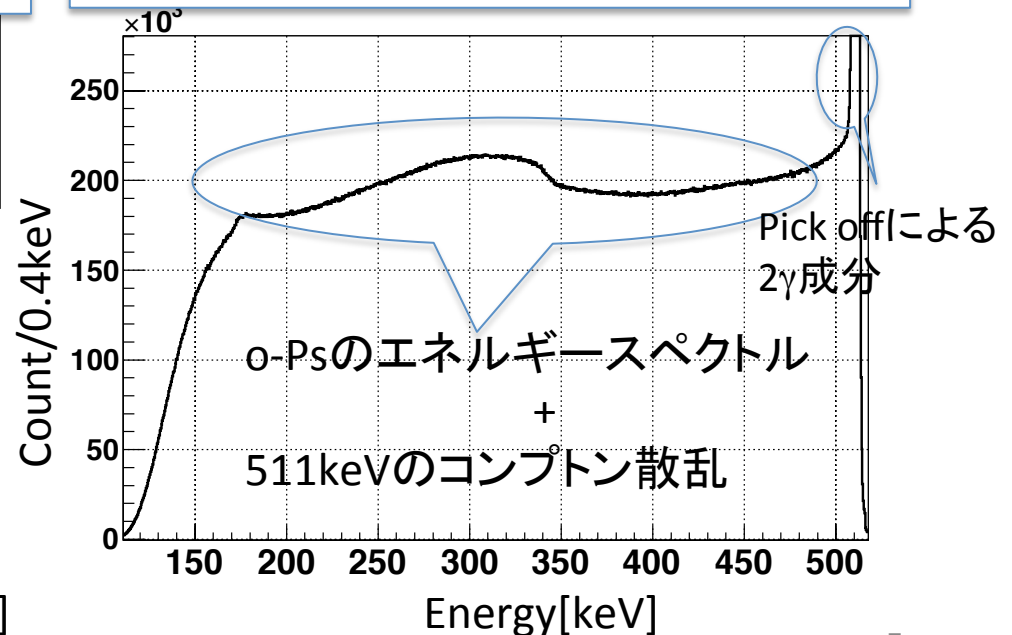
Delayed coincidence : プラスチックシンチレータとGe検出器のdelayed coincidence (50ns~800ns)とり、o-Psのイベントを選択的に選ぶ

Delayed coincidence領域 と accidental 領域のエネルギースペクトルの引き算によって o-Psのエネルギースペクトルを得る

360keV~500keVのイベントのタイミングスペクトル



イベントセレクション後のエネルギースペクトル



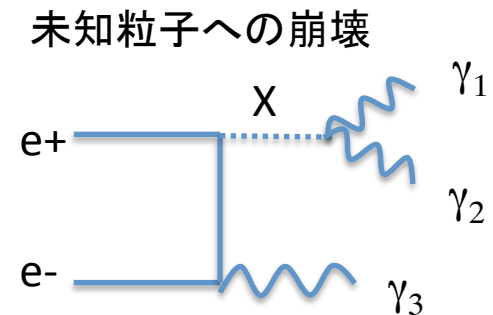
4.2 ピークサーチ

1MeV 以下の未知粒子が存在した場合、スペクトルにピークが出来る。



フィッティングによってピークを探す。

未知粒子とともに出てくる γ 線(γ_3)を、
狭い範囲をフィットして探す。



探索範囲 : 270keV~505keV (質量700keV~110keV)

ピークの中心から ± 7 keVの範囲を

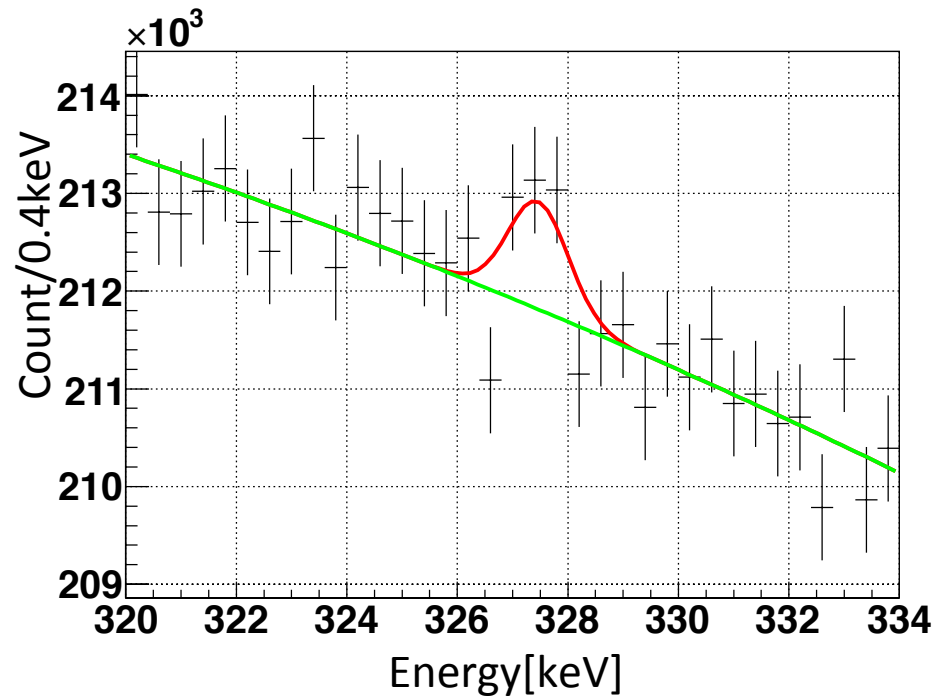
$$\underbrace{C_1 \exp\left(-\frac{(E - \text{mean})^2}{2 \times \sigma^2}\right)}_{\text{ピーク}} + \underbrace{C_2 + C_3 \times E + C_4 \times E^2}_{\text{o-Ps のスペクトルの近似}} \text{ でフィット。}$$

σ は中心のエネルギーに対するGe検出器の分解能で固定。
中心は0.5keVの範囲内で動けるようにしてフィットする。

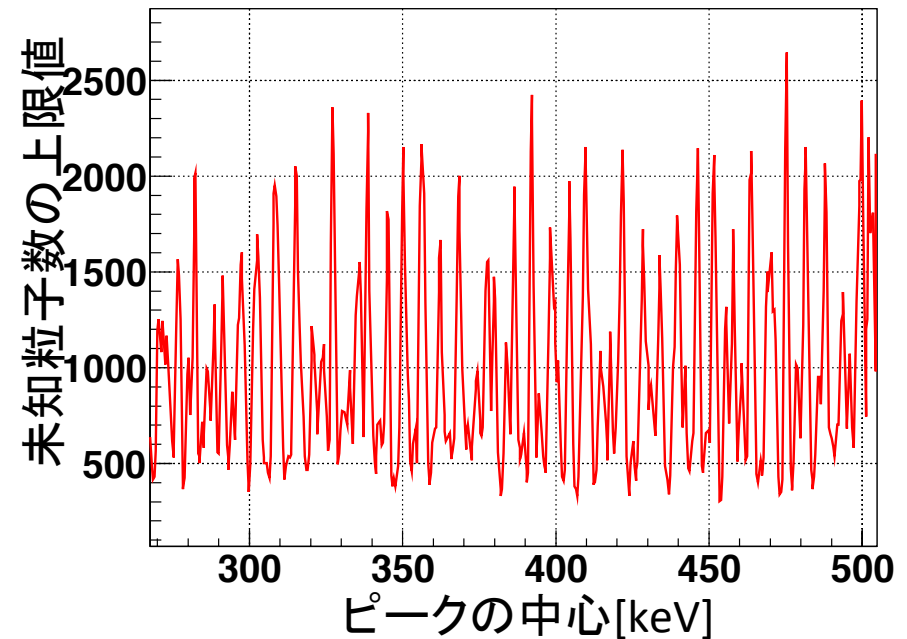
4.3 フィット結果

270keV~505keVまでのフィット結果(未知粒子の質量700keV~110keV)

Fittingの例(中心 327keV)



未知粒子数の上限値(CL90%)



最大のエクセスは 3.5σ

4.4 peakの検出効率

フィット結果のガウシアン面積とGe検出器の検出効率を用いて生成された未知粒子の数を求める。

Ge検出器の検出効率

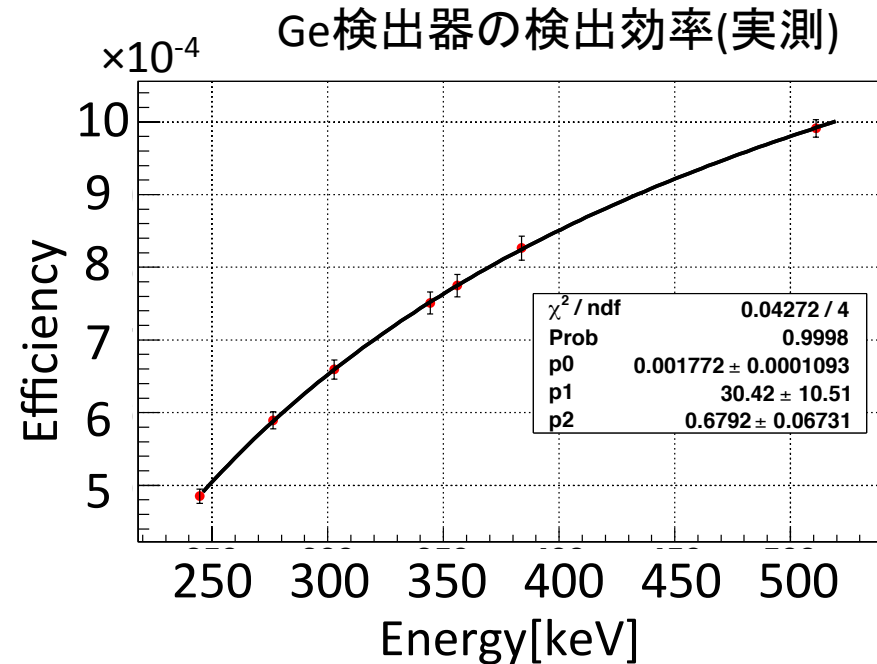
^{68}Ge 、 ^{133}Ba 、 ^{152}Eu 線源での実測データから求めた(右図)

検出効率

$(4.850 \pm 0.097) \times 10^{-4}$ @ 244keV

$(8.26 \pm 0.16) \times 10^{-4}$ @ 384keV

$(9.91 \pm 0.12) \times 10^{-4}$ @ 511keV



$$(\text{検出効率}) = p_0(1 - p_1/E^{p_2})$$

4.5 生成されたo-Psの数

o-Psの量 の求め方

1. o-Psのスペクトルの400keV~500keVの数を求める

$$5.0 \times 10^7 \text{ event}$$

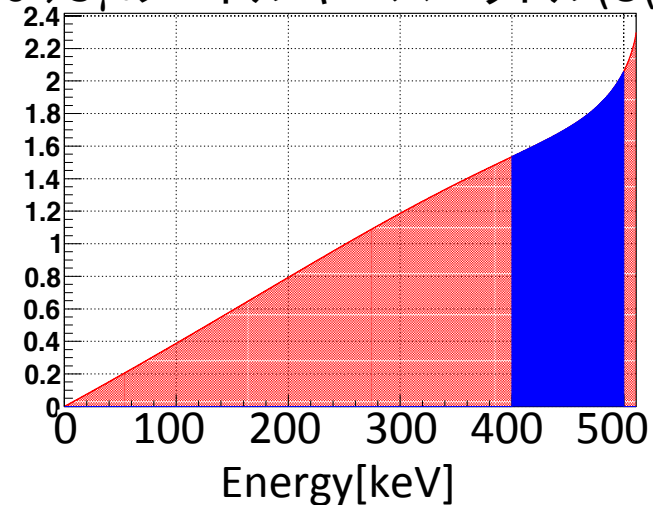
2. 1.の数とGe検出器の検出効率を用いて、400keV~500keVの生成されたo-Psの量を求める

$$\int_{400}^{500} \frac{\text{Count}(E)}{3 \times \text{Efficiency}(E)} dE = 1.8 \times 10^{10} \quad \text{o-Ps} \rightarrow 3\gamma \text{ のエネルギースペクトル } (O(\alpha))$$

3. 400keV~500keVのo-Psの量から全体のo-Psの量を求める

$$1.8 \times 10^{10} \times \underline{2.9} = 5.1 \times 10^{10} \text{ event}$$

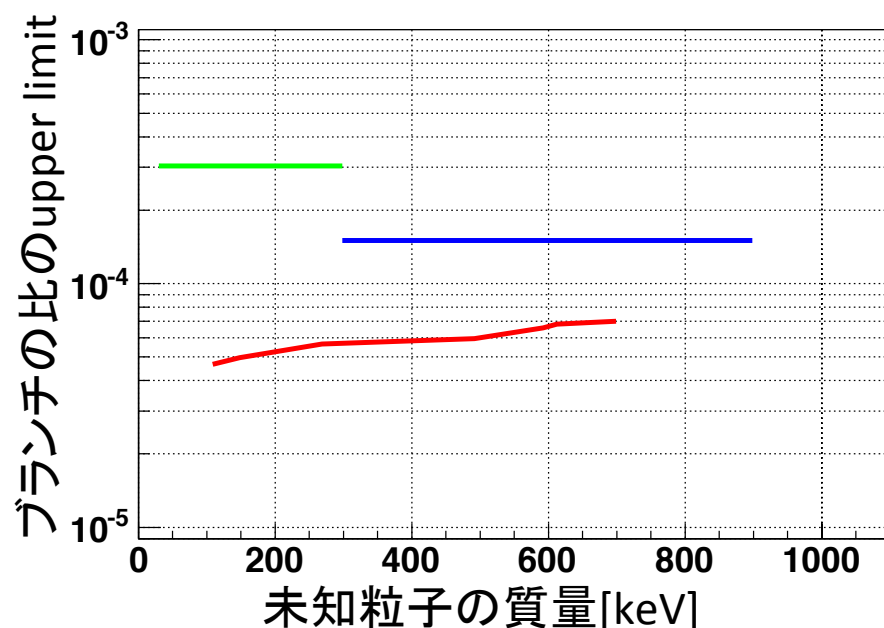
右図の赤色部分と青線で囲まれた部分の面積比



4.6 ブランチ比の上限

質量 110keV~700keVに対する未知粒子崩壊と 3γ 崩壊の
ブランチの比に対するupper limit (CL 90%)

$$\Gamma(o\text{-Ps} \rightarrow \gamma X) / \Gamma(o\text{-Ps} \rightarrow 3\gamma) < 6.9 \times 10^{-5} \text{ (系統誤差 7\%を含む)}$$



系統誤差

- Ge検出器の検出効率 : 3%
- フィット : 5%
- o-Psの量 : 3%

- : 今実験のlimit
- : 30keV~300keVでの既存のlimit(3×10^{-4})
- : 300keV~900keVでの既存のlimit(1.5×10^{-4})

110keV~300keVの範囲 : 既存のlimitを約5倍更新

300keV~700keVの範囲 : 既存のlimitを約2倍更新

まとめ

- ポジトロニウムを用いて短寿命未知粒子の探索を行った
- 約190日間の測定で得られたエネルギースペクトルに対し、ピークサーチを行い未知粒子の上限を求めた
- 110keV~700keVの未知粒子を探索し、CL90%でのブランチ比のupper limit は
$$\Gamma(o\text{-Ps} \rightarrow \gamma X) / \Gamma(o\text{-Ps} \rightarrow 3\gamma) < 6.9 \times 10^{-5} \text{ (系統誤差7\%を含む)}$$