

ポジトロニウムを用いた 弱結合スカラー粒子Xの探索

風間慎吾, 川崎瑛生, 難波俊雄^A, 浅井祥仁, 小林富雄^A

東京大学大学院理学系研究科, 東京大学素粒子物理国際研究センター^A

第47回 アイソトープ・放射線研究発表会
2010/7/8@日本科学未来館

1. 電子と結合する弱結合スカラー粒子Xの探索

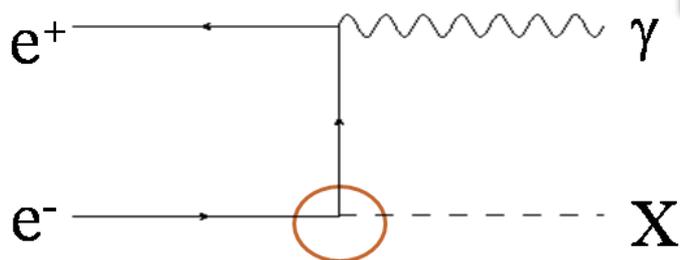
質量が軽く、電子に弱く結合する新粒子Xを探索する(結合定数: $\tilde{\alpha}$)

Ex) **Axion, Dilaton**などの擬南部ゴールドストーンボソン

質量と結合定数が対称性の破れのエネルギースケールに反比例

より質量が軽く、結合の弱い粒子Xを探索することで、間接的にLHCを越えたエネルギースケール($\gg 0(1)\text{TeV}$)の物理の探索が可能

$o\text{-Ps} \rightarrow 3\gamma$ は3体崩壊ゆえ、崩壊が極めて抑制されており
寿命が長い(142ns) \rightarrow $o\text{-Ps}$ は新粒子Xにsensitive



$o\text{-Ps}$ が $\gamma+X$ の2体に崩壊するモードを用いて新粒子Xを探索する

◆目標

● $\Gamma(o\text{-Ps} \rightarrow \gamma + X) / \Gamma(o\text{-Ps} \rightarrow 3\gamma) < 10^{-7} \sim 10^{-8}$ の感度
(過去のlimit 1.1×10^{-6})

● Xが(pseudo)scalarの時の電子との結合定数 $\tilde{\alpha}$ として
 $10^{-12} \sim 10^{-13}$ の感度

2.1 検出原理

$o\text{-Ps} \rightarrow \gamma + X$ の崩壊では

Xは電磁相互作用をしないため検出できない
もしあれば一体の γ に崩壊したように見え

$$E_\gamma = m_e \left[1 - \left(\frac{m_X}{2m_e} \right)^2 \right] \text{と単色になる}$$

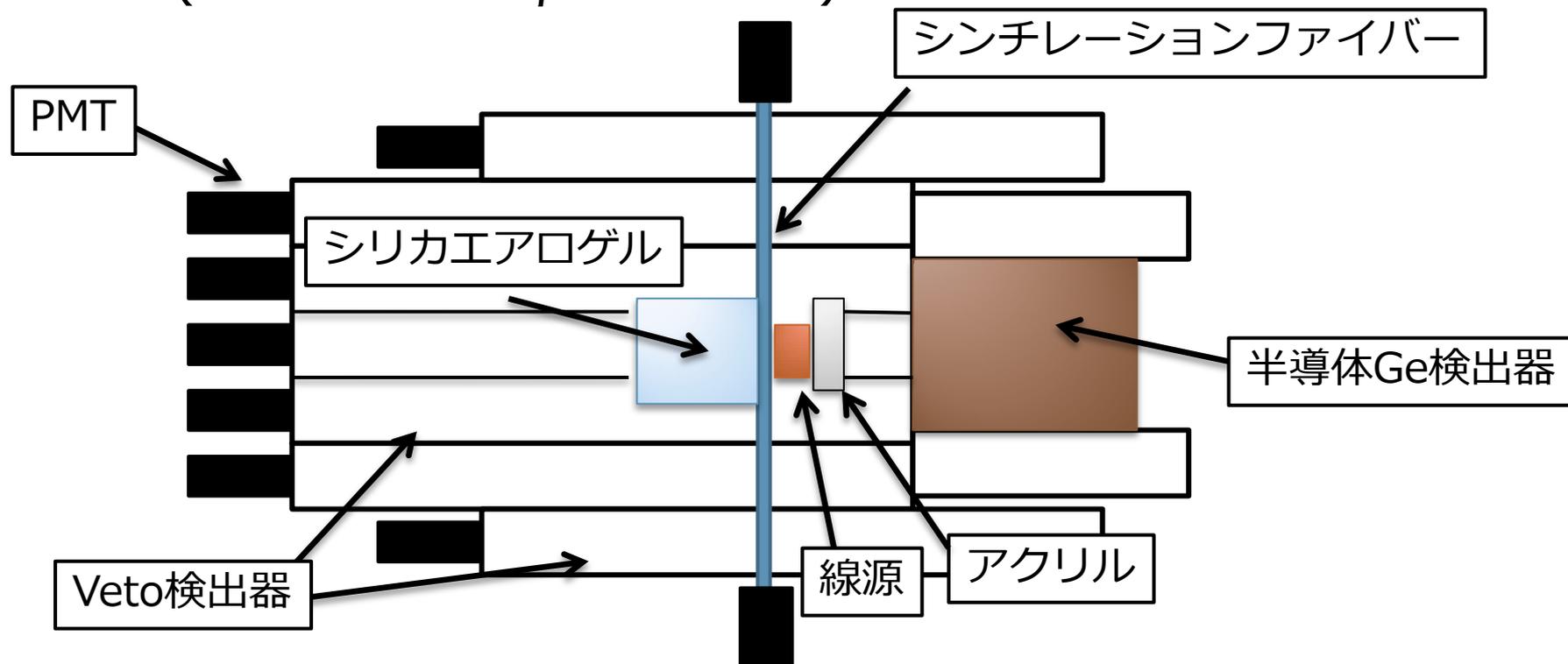

軽い m_X に対しては、ほぼ m_e (511keV)
(pick off反応などのBackground事象と区別するには
高いエネルギー分解能の検出器が必要)

探索する事象は

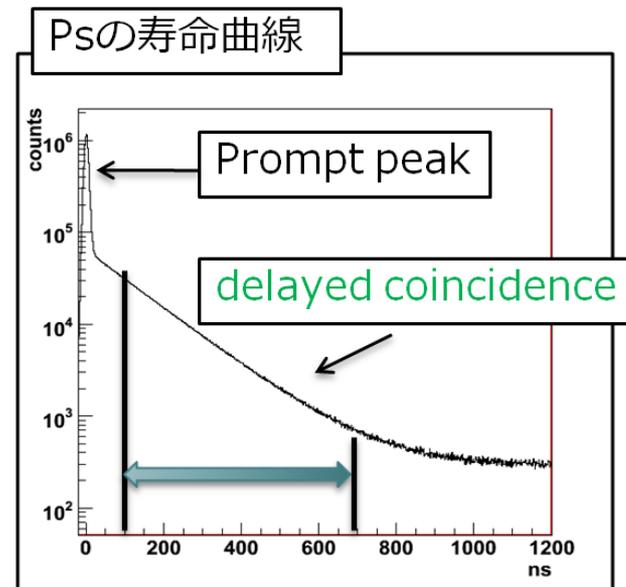
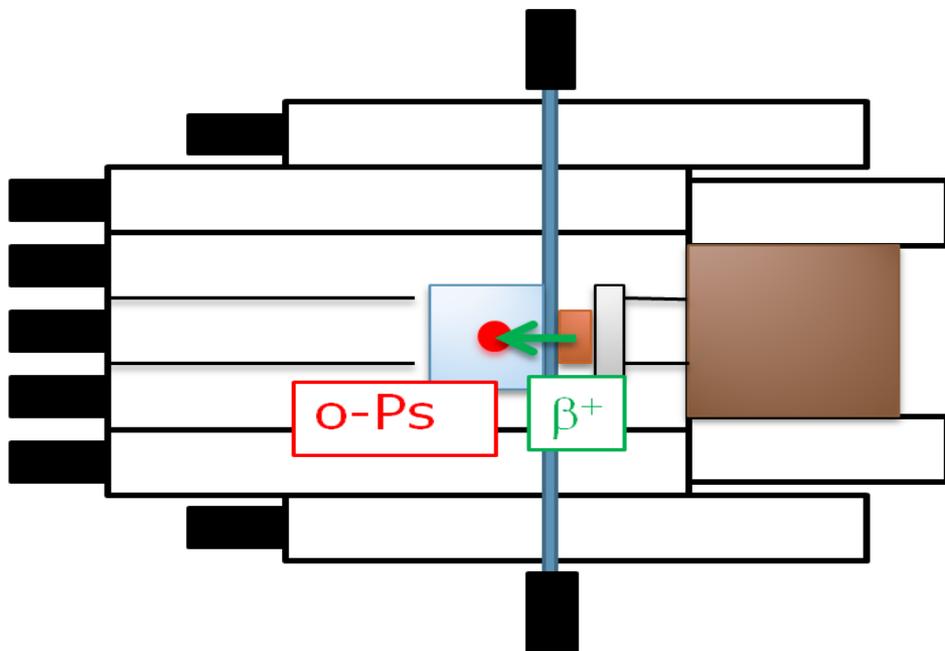
『 $o\text{-Ps} \rightarrow 3\gamma$ 崩壊の中で一体のモノクロの γ に崩壊』 するような事象

2.2 検出原理(セットアップ)

- γ 線検出器(半導体Ge検出器(直径5.8cm,長さ7.4cm,pure-Ge))
- 4π veto検出器(CsI(Tl),NaI(Tl))
- $^{68}\text{Ge-Ga}$ 線源($T_{1/2}=271\text{d}$, $E_{\text{end}}=1.9\text{MeV}$)からの β^+
- シンチレーションファイバー(β^+ トリガー用,クラレSCSF-78M)
- シリカエアロゲル(β^+ ストップ&Ps生成用,密度0.1g/cc)
- アクリル(反対側に出た β^+ ストップ)

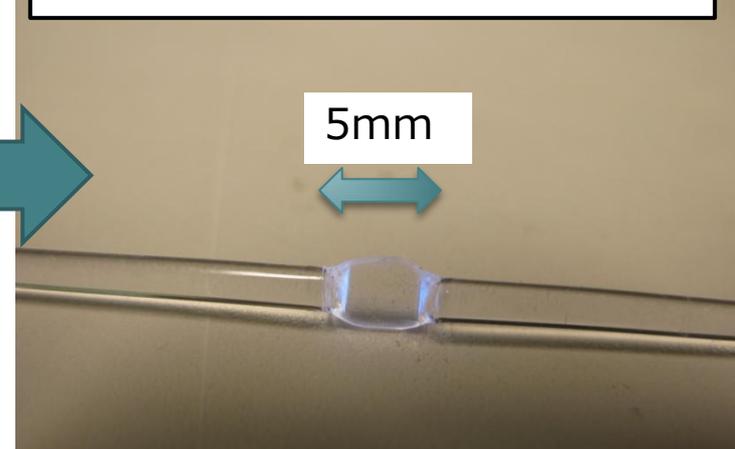


2.3 検出原理(β^+ 崩壊からo-Ps生成まで)

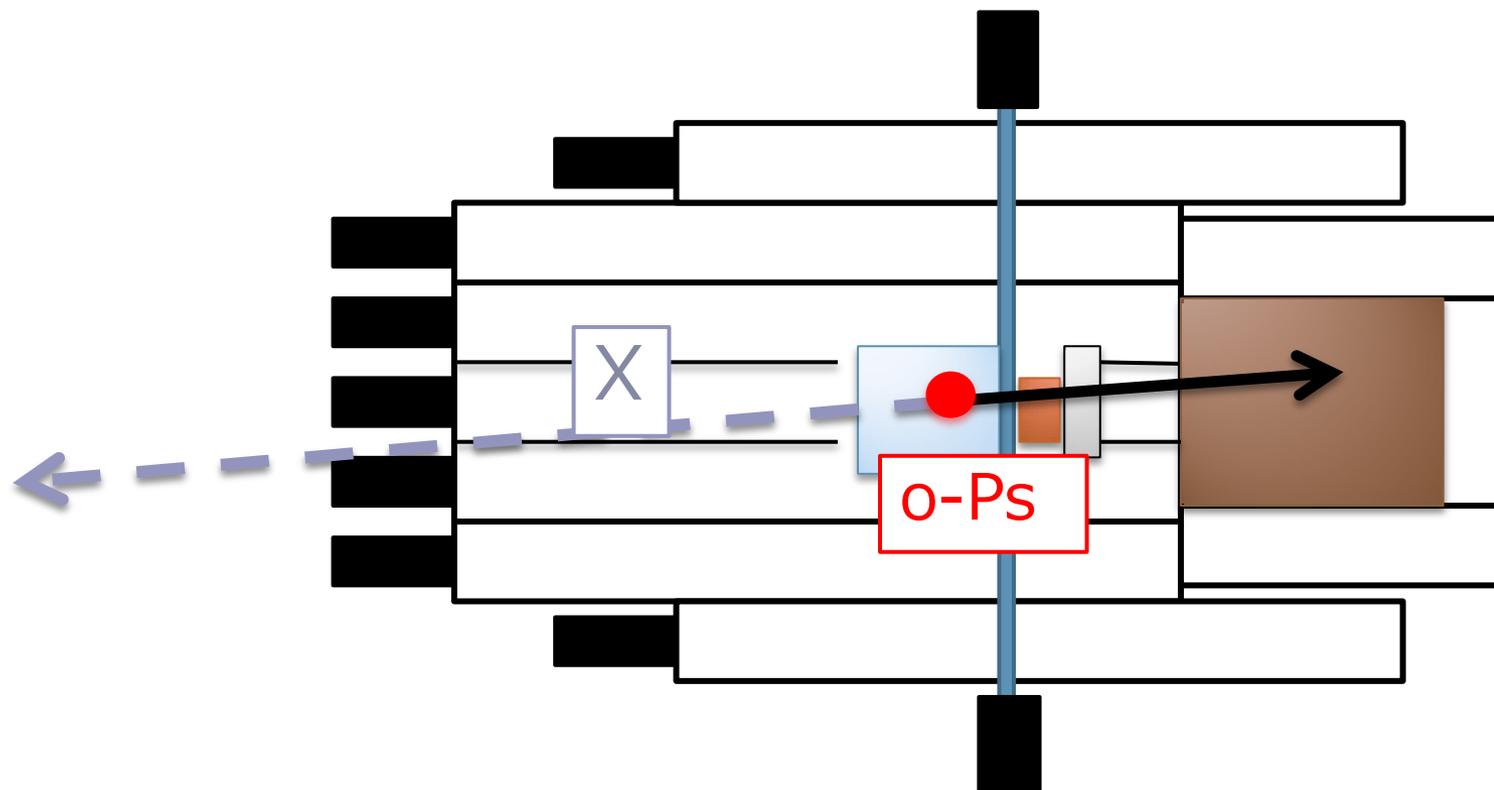


- ◆ β^+ のシンチレーションファイバー通過により、 $^{68}\text{Ge-Ga}$ の β^+ 崩壊をタグする
(シンチレーションファイバーを潰して β^+ 線タグとして用いている)
- ◆この信号がPsの生成時刻となり、これとGeの信号とでdelayed coincidenceを取ることによってo-Psの事象を選択的に取り出す

シンチレーションファイバー



2.4 検出原理(o-Pos $\rightarrow \gamma + X$ 崩壊)



- ◆ $\gamma + X$ 崩壊をすれば、Xは検出器と相互作用しないので β^+ がタグされ、遅れてGeでEnergyDepositがあった時に veto検出器でEnergyDepositがないイベントを探す

3.1 Background事象(1)

エアロゲルでのo-Psのpick offの 2γ 崩壊起源

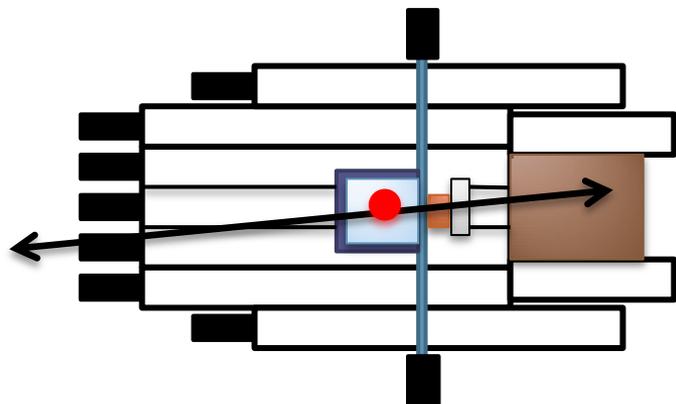
GeでEnergyDeposit>0&veto検出器で全くEnergyDepositのないイベント

● veto検出器を突き抜けてしまうイベント

Ex) ①全く反応せずに突き抜けてしまうイベント

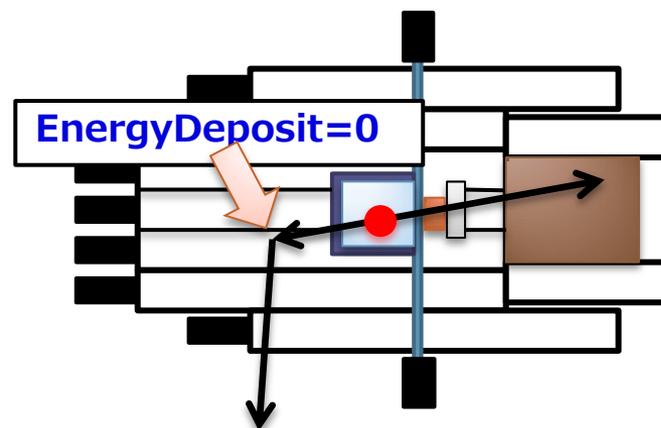
②エアロジェル,veto検出器などでRayleigh散乱するイベント

① 全く反応せずに突き抜けてしまうイベント



横幅を長くすれば長くするほど防げる。
求める感度に対してはCsI(Tl)は
約40cm必要

② Rayleigh散乱起源のイベント

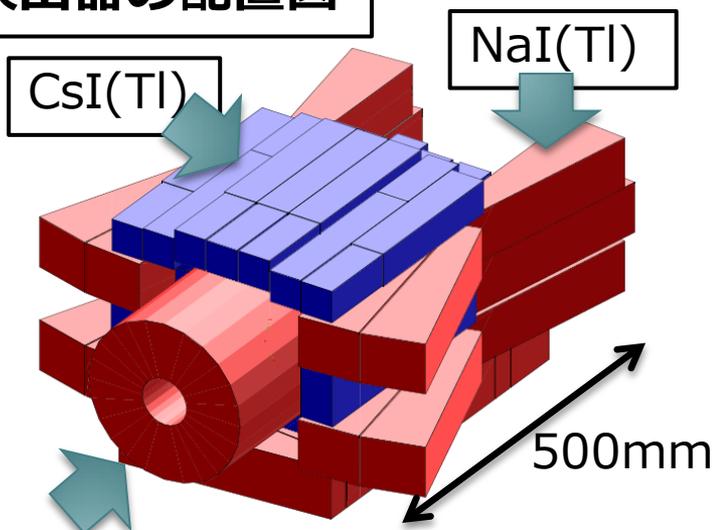


Rayleigh散乱はEnergyDeposit=0
横幅だけでなく、縦幅も長くしないと
いけない

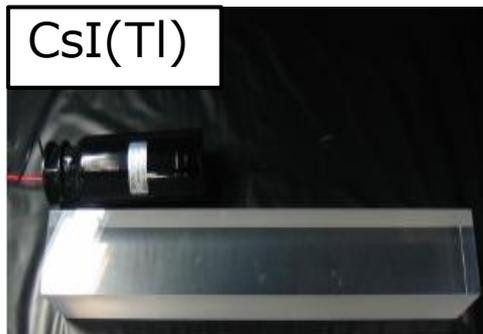
3.2 検出器の配置

シリカエアロゲルからback-to-backの511keVの γ を打ち、片方の γ がGe検出器でEnergyDeposit=511keVの時、もう片方の γ が全く反応せずに抜ける割合が、 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ になるようなCsI(Tl),NaI(Tl)の配置を考えた

検出器の配置図



円筒型NaI(Tl)でGe検出器を囲っている



用いた検出器(CsI(Tl),NaI(Tl))の内訳(基本的に今ある物ベースで考えた)

60×60×500mm	1本	57×57×300mm+57×57×141mm	12本
60×60×400mm+60×60×100mm	8本	94×60×400mm	2本
60×60×280mm+57×57×140mm	11本	(43×94)×(110×94)×377mm	22本

4. 1 Background事象(2)

エアロゲルでのo-Psのpick offの 2γ 崩壊起源

GeでEnergyDeposit >0 & veto検出器で全くEnergyDepositのないイベント

● Dead materialでの γ 線吸収

Ex)エアロゲルで光電効果

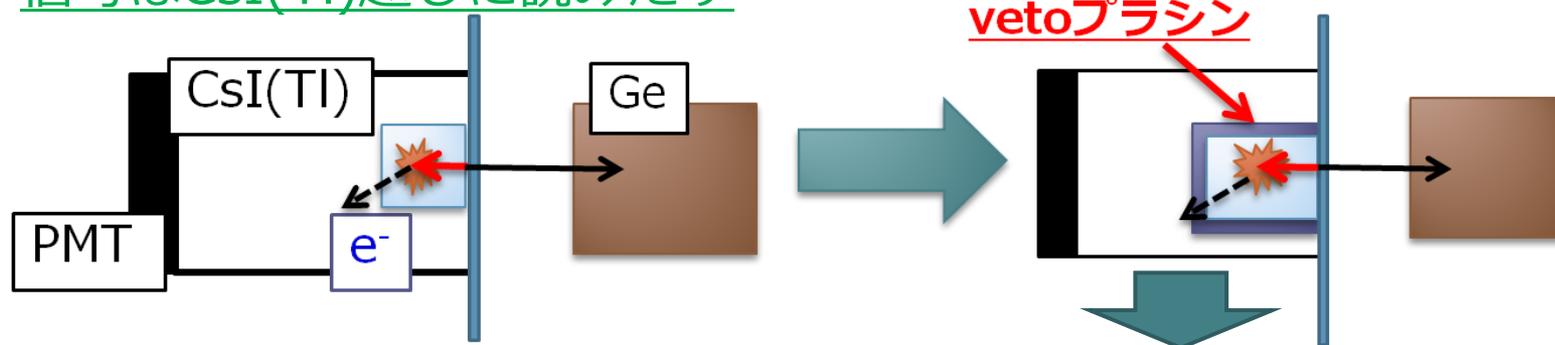
- エアロゲルでpickoffしたうち 10^{-6} の割合で存在(Geant4)
- 感度 $10^{-7} \sim 10^{-8} \Gamma_{3\gamma}$ に対しては無視できない
- 散乱電子を上手くタグしてやればよい

①CsI(Tl)の表面に0.1mm程度の薄い不感層がある可能性がある

(結晶表面の研磨の具合による)

②CsI(Tl)は原子番号Zが大きいいため、低エネルギー電子を後方散乱させてしまい、CsI(Tl)が光らない

エアロゲルの外側に不感層のないプラシンをおいてタグさせ
信号はCsI(Tl)越しに読みだす



CsI(Tl)40cm越しに見て、光量のロスは約30%であることを確認

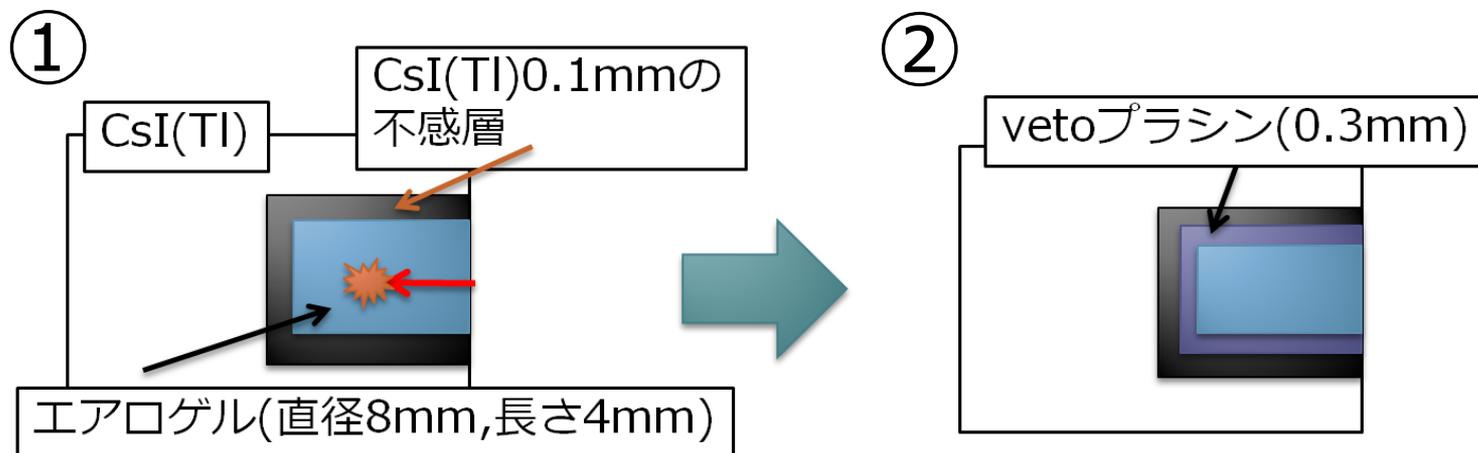
4.2 vetoプラシンの効果(Geant4 simulation)

●CsI(Tl)の表面に0.1mmの不感層を入れ、散乱電子のタグ効率を評価
エアロゲルから511keVのガンマ線を 2π ランダムに 10^8 個打ち、**エアロゲルで光電効果を起こした内、CsI(Tl)(またはvetoプラシン)で20keV以上のEnergyDepositがあるイベントの割合**をvetoプラシンなし(①)、あり(②)で比較した

	エアロゲルで光電効果 を起こしたイベント数	タグ効率
①vetoプラシンなし	616	62%
②vetoプラシンあり	604	98%



vetoプラシンありだと、ほぼ100%のvetoをかけることができる



5. 1 Background の評価(Geant4 simulation)

pickoff起源のBackgroundをGeant4で見積もった

← back-to-backの511keVの γ をエアロジェルから 4π ランダムに 10^9 個打った
(そのうちGeでEnergyDepositがあるのは約10%)

特にGeでのEnergyDepositが511keVのイベント
(Xのmassが軽い時のBackground)について考えた

I. veto検出器を突き抜けるイベント

- ①EnergyDeposit@veto < 20keV
- ②EnergyDeposit@veto プラシン < 20keV

10⁷イベントに対しては
0.7±0.3発期待される
(全てレイリー散乱起源)

II. Dead materialでの γ 線吸収はどれくらい?

- ①EnergyDeposit@veto < 20keV
- ②EnergyDeposit@veto プラシン < 20keV
- ③不感層で γ がstopする

10⁷イベントに対しては
1.1±0.3発期待される
(γ がエアロジェルでコンプトン散乱してGe側に行き、Geの不感層でstopしたイベント起源)

↑
エアロジェルで光電効果したイベントは155発あり、
その全てがvetoプラシンでEnergyDeposit > 20keV

5.2 期待されるo-Psの生成率 & 1年のRunでの感度の評価

① トリガーでのEnergyDeposit > 15keV
& エアロゲルで β^+ がstop
& 止まる前にveto検出器でそれぞれ20keV以下のDeposit

1.4%

② o-Psの生成率

$1.4\% \times 0.4 (\text{Ps生成効率}) \times 3/4 \rightarrow 0.42\%$

③ 3γ の内ひとつの γ がGeに入る

$0.42\% \times 3 (3つの\gamma) \times 0.4 (\text{Geのefficiency}) \times 0.1 (\text{アクセプタンス}) \times 1/3 (\text{TimingWindow}) \rightarrow 0.02\%$

④ 1年のRunで得られる
o-Ps $\rightarrow 3\gamma$ の数

$\sim 10^8$ (30kBqの $^{68}\text{Ge-Ga}$ の使用を仮定)

⑤ 1年のRunでのpickoffの数
(N_2 ガス中では $\text{Br} \doteq 10\%$)

$\sim 10^7$

1年のRunでBackgroundの
候補が約2発いる

1年のRunで $10^{-7}\Gamma_{3\gamma}$ の感度を達成できる

veto検出器の増設や不感層のない検出器を用いることにより $10^{-8}\Gamma_{3\gamma}$ を目指す

6. まとめ

- ◆ $o\text{-Ps} \rightarrow \gamma + X$ の崩壊を通じて、質量が軽く電子に弱く結合する粒子を探索する
- ◆ $^{68}\text{Ge}\text{-Ga}$ 崩壊時の β^+ でタグされ、遅れて Ge で Energy Deposit があった時に veto 検出器で Energy Deposit が無いイベントを探す
- ◆ Background を減らすための veto プラシンの信号は CsI(Tl) 越しにも見えた
- ◆ Geant4 で Background を見積もり、1年のRunで $10^{-7}\Gamma_{3\gamma}$ の感度を達成できる。
- ◆ veto 検出器の増設や不感層のない検出器を用いることにより $10^{-8}\Gamma_{3\gamma}$ を目指す