

ポジトロニウムを用いた 弱結合スカラー粒子の探索

風間 慎吾 (M1)

東京大学理学系研究科

1.1 Positronium(Ps)

- ◆電子と陽電子が電磁相互作用で束縛された状態
- ◆全スピン S により $S=0$ のpara-positronium (p-Ps)と $S=1$ のortho-positronium(o-Ps)に分類される
- ◆C変換に対する変換性を保存するために
 - o-Psは奇数本のガンマ線(主に3本) \longrightarrow 連続スペクトル
 - p-Psは偶数本のガンマ線(主に2本)に崩壊 \longrightarrow 単色のback to back 511keV
- ◆ phase space と α_{EM} の数の違いからp-Psとo-Psで約1000倍寿命が異なる

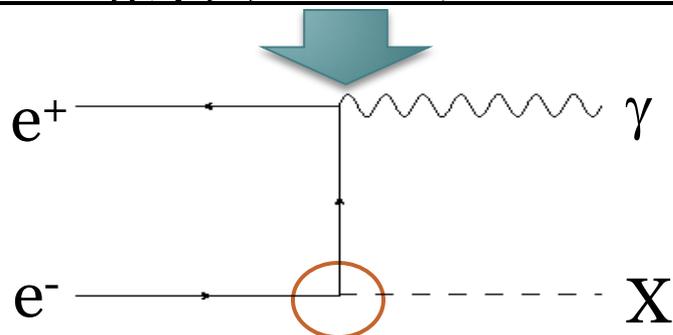
	p-Ps	o-Ps
全スピン S	0($m_z=0$)	1($m_z=0, \pm 1$)
荷電共役 $C=(-1)^{L+S}$	+1	-1
崩壊モード	$2\gamma(4\gamma, 6\gamma, \dots)$	$3\gamma(5\gamma, 7\gamma, \dots)$
寿命	125(ps)	142(ns)

← 相対軌道角運動量は $L=0$ の基底状態のPsを扱う

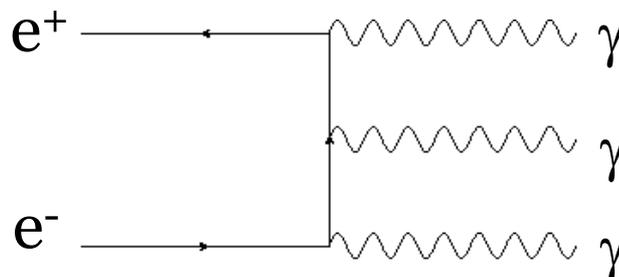
Psは粒子・反粒子の系であり、o-Psは長い寿命を持つため新粒子Xにsensitive

1.2 Xを含むo-Psの崩壊モード

探索する主な崩壊モードは、Xが以下のようにtree levelで電子と結合するようなモード



通常のo-Ps \rightarrow 3γ 崩壊のダイアグラム



質量が軽く電子に弱く結合する粒子を探索する!(結合定数:g)



Ex) Axion, Dilaton, Unparticle...

◆目標

- $\Gamma(o\text{-Ps} \rightarrow \gamma + X) / \Gamma(o\text{-Ps} \rightarrow 3\gamma) < 10^{-7} \sim 10^{-8}$ の感度
- Xが(pseudo)scalarの時の結合定数 $\tilde{\alpha} (= g^2 / 4\pi)$ として $10^{-12} \sim 10^{-13}$ の感度

2.1 検出原理

o-Ps \rightarrow γ +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)

探索する事象は

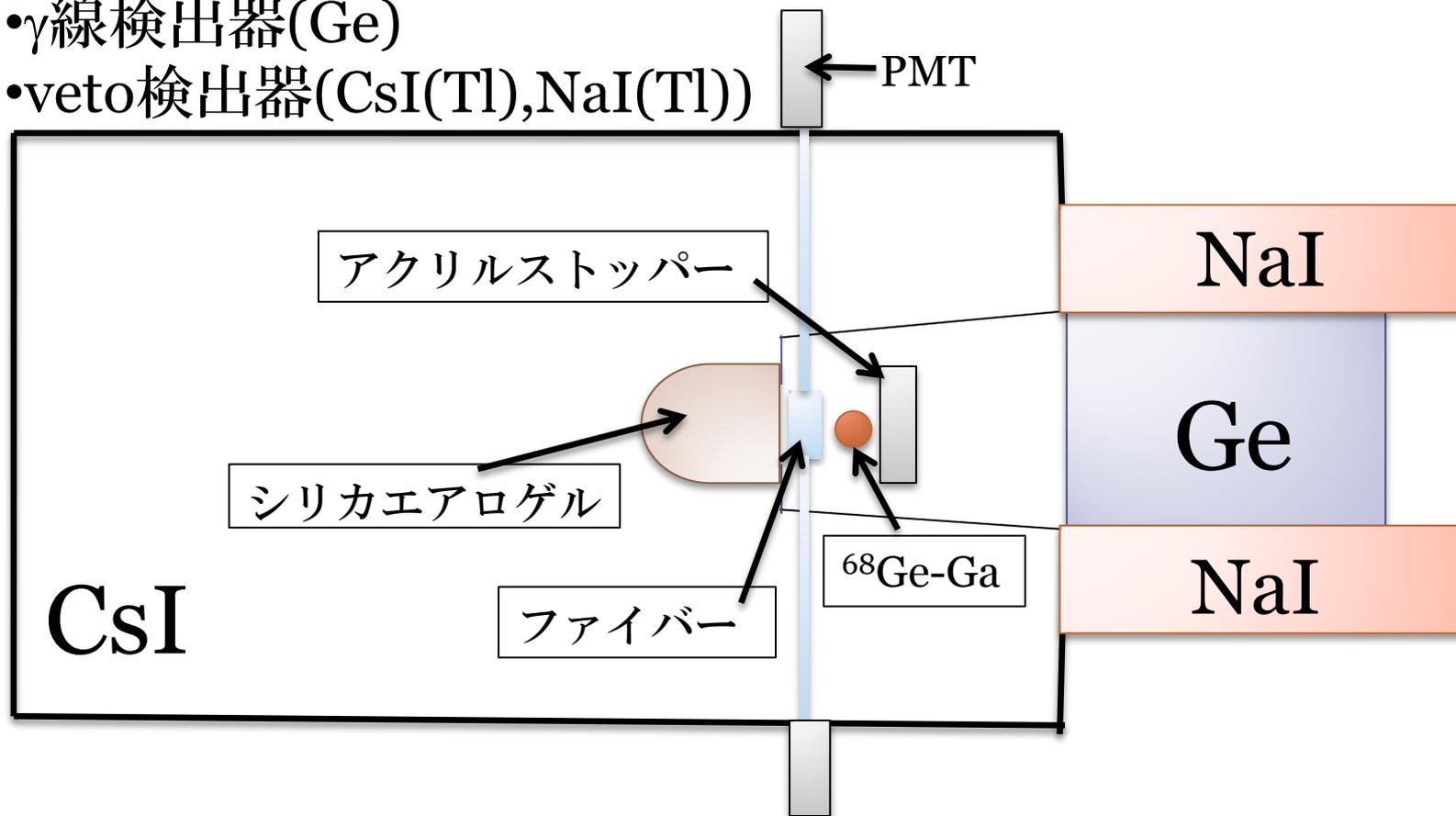
『o-Ps \rightarrow 3 γ 崩壊の timing window の中で一体の γ に崩壊』
するような事象



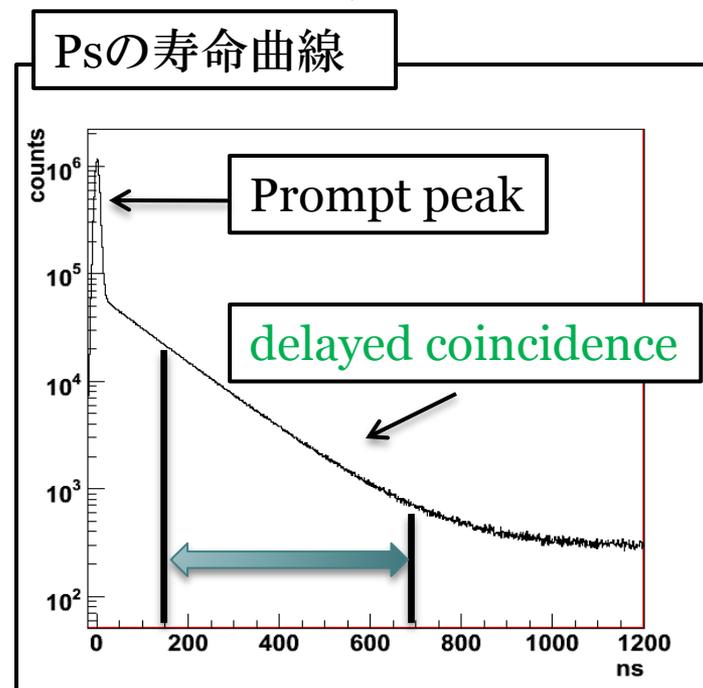
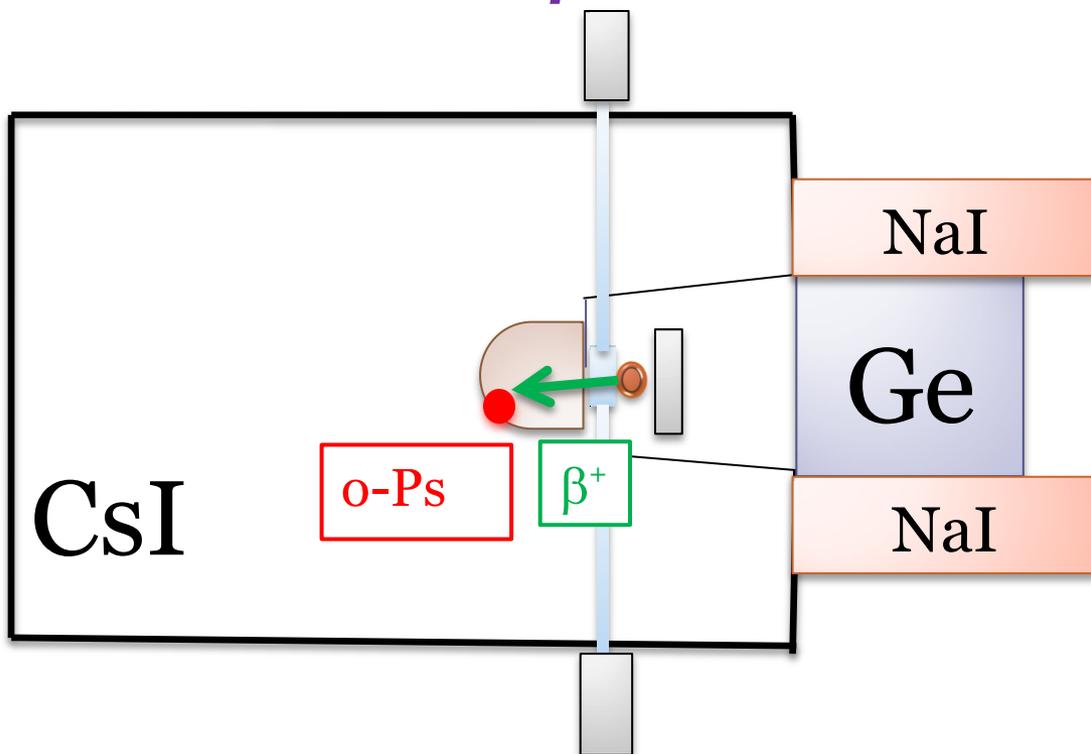
『o-Ps \rightarrow γ +X の崩壊のうち、 γ をエネルギー分解能の良い
半導体Ge検出器でとらえ、他に何もでなかったことを示すた
めCsI(Tl),NaI(Tl)を用いて4 π を囲む』

2.2 検出原理 (セットアップ)

- ^{68}Ge -Ga線源($T_{1/2}=271\text{d}$, $E_{\text{end}}=1.89\text{MeV}$)からの β^+
- シンチレーションファイバー(β^+ トリガー用)
- シリカエアロゲル(β^+ ストップ&Ps生成用)
- アクリル(反対側に出た β^+ ストップ)
- γ 線検出器(Ge)
- veto検出器(CsI(Tl), NaI(Tl))

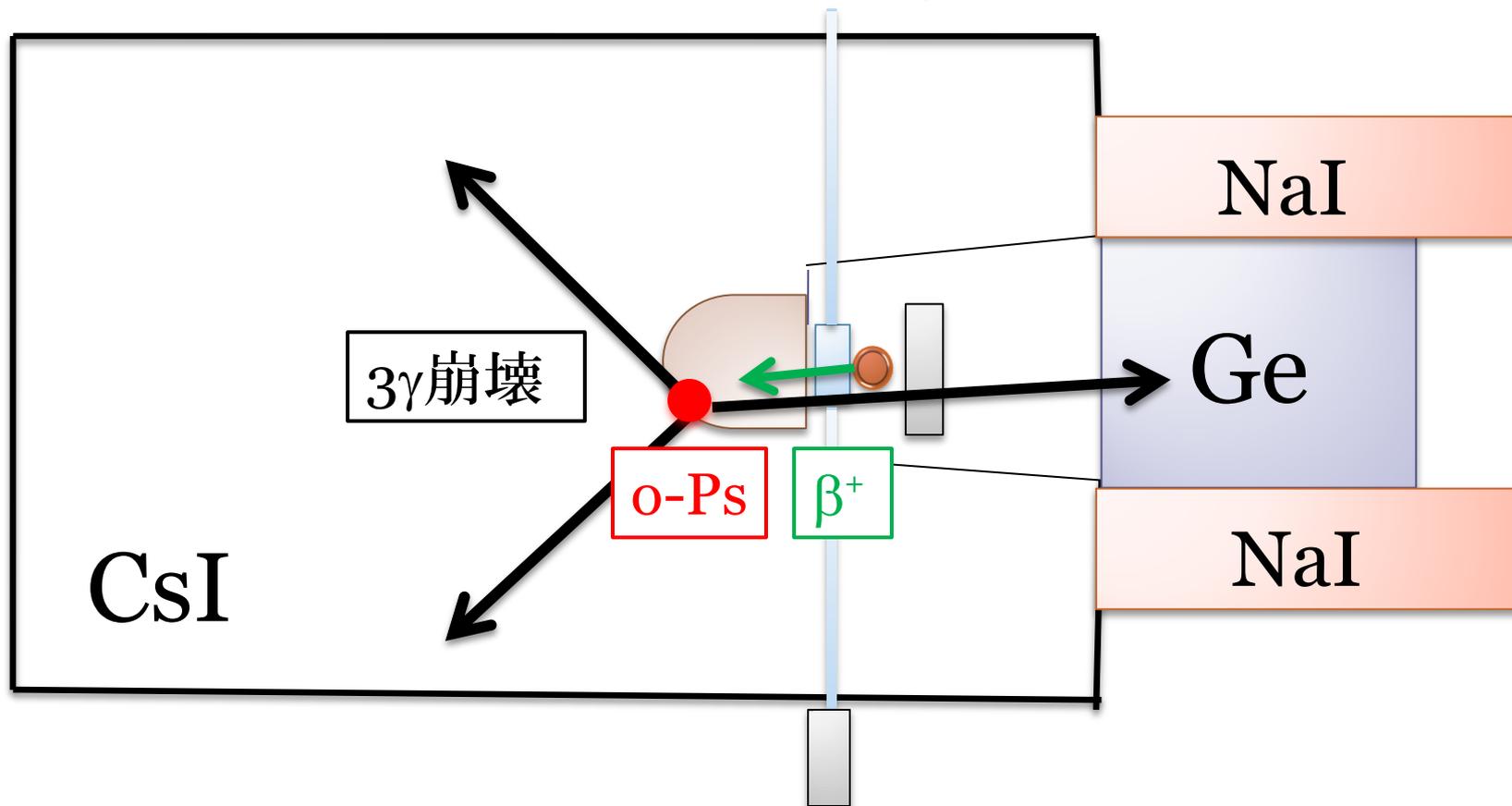


2.3 検出原理 (β^+ 崩壊からo-Ps生成まで)



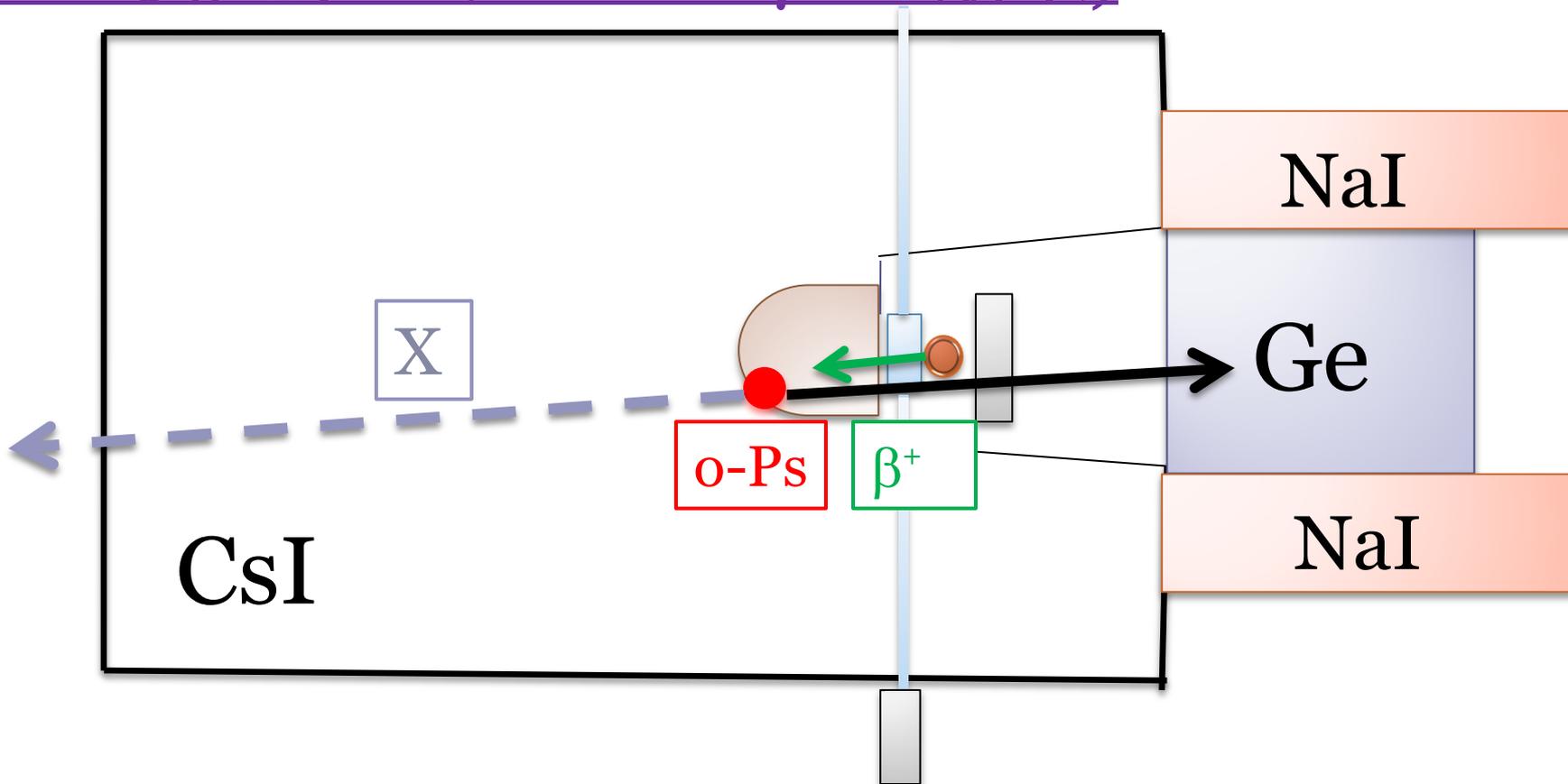
- ◆ β^+ のファイバー通過により、 $^{68}\text{Ge-Ga}$ の β^+ 崩壊をタグ
この信号がPsの生成時刻となり、これとGeの信号とで
delayed coincidenceを取ることでo-Psの事象を選択的に
取り出す
- ◆ Dead materialを減らすためファイバーを用いる

2.3 検出原理 (o-Ps \rightarrow 3γ 崩壊)



- ◆ o-Psが生成されると、通常は 3γ 崩壊しCsI, NaIなどのveto検出器で検出される
- ◆ 3体崩壊なのでGeのエネルギースペクトルは連続となる

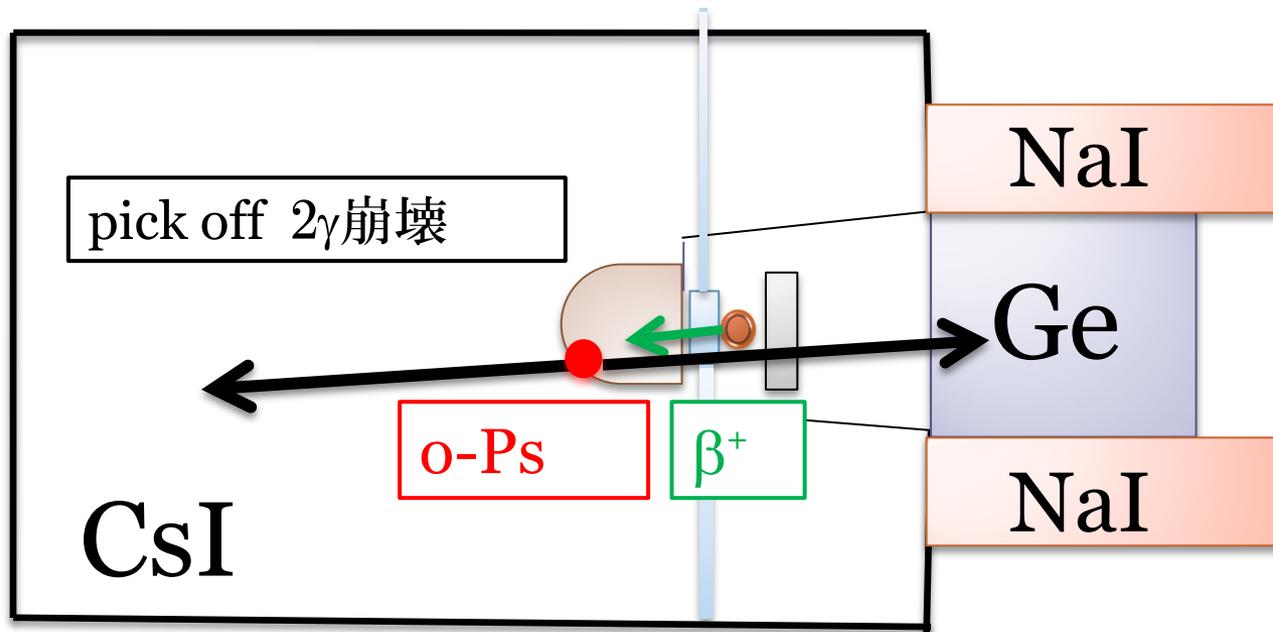
2.4 検出原理 (o-Ps \rightarrow γ + X崩壊)



- ◆ γ +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でエネルギー損失があった時にCsI,NaIなどのveto検出器でエネルギー損失がないイベントを探す!

3. 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



- ◆ 3γ 崩壊する前に、物質や物質の不对電子と相互作用して外殻電子と陽電子が対消滅したり、不对電子のspinをフリップさせp-Psとなり 2γ 崩壊してしまうもの
- ◆o-Ps \rightarrow 3γ 崩壊のtiming windowの中に混ざる
- ◆単色のback to back 511keV

3. Background事象(2)

Pick off起源のBackgroundとしては以下の3種類が考えられる

- I. veto検出器を突き抜けるイベント → 防ぐには単純に検出器を大きくすればよい
- II. エアロジェル、CsIなどでRayleigh散乱をし、Ge検出器側の守りが弱い方に大きく散乱 → Ge検出器をNaI検出器で囲んでvetoする

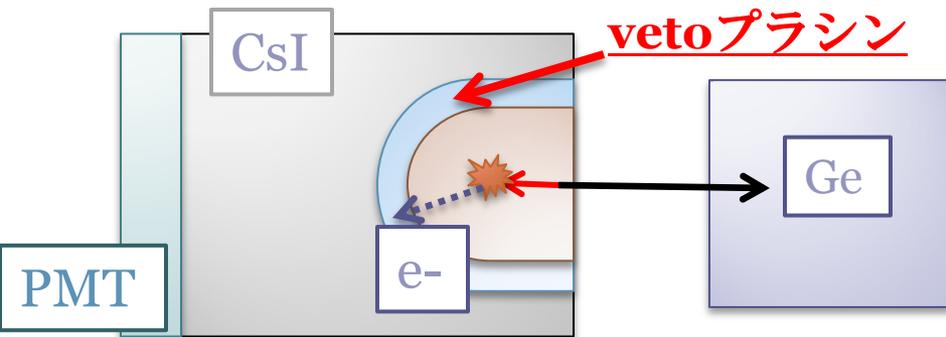
511keVの γ に対する各物質での散乱断面積

物質	$\mu/\rho(\text{cm}^2/\text{g})$ @Compton	$\mu/\rho(\text{cm}^2/\text{g})$ @PhotoElec	$\mu/\rho(\text{cm}^2/\text{g})$ @Rayleigh
エアロジェル (SiO_2)	8.61×10^{-2}	9.23×10^{-5}	4.28×10^{-4}
プラシン (C_9H_{10})	9.35×10^{-2}	5.91×10^{-6}	1.36×10^{-4}
CsI	7.08×10^{-2}	2.00×10^{-2}	5.31×10^{-3}

3. Background事象(3)

Ⅲ. Dead materialでの γ 線吸収

イベントの例(エアロゲルで光電効果)



511keVの電子の飛程はエアロゲル中で約1.5cm, CsI(Tl)中では約0.4mm (CsI(Tl)に辿り着くまでにエアロゲルでEnergy lossをするので、CsI(Tl)で実際に走る長さは0.4mmよりも短い!)

CsI(Tl)には表面に0.1mm程度の薄い不感層がある可能性があり、電子をタグできなくなる可能性がある(結晶表面の研磨の具合による)

エアロジェ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越しに読みだす

Greant4 simulationからエアロゲルでpickoffしたうち 10^{-6} の割合で存在

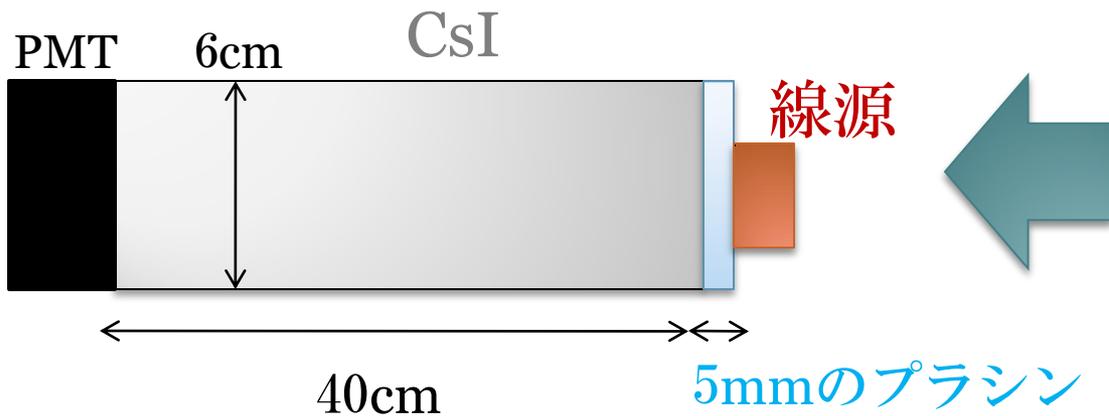
求める感度 $10^{-7} \sim 10^{-8} \Gamma_{3\gamma}$ に対しては無視できない

これを防ぐには出てきた電子をタグすればよい

CsI越しにプラシンの信号が見えるのかどうか
テスト実験を行った(後述)

4.1 veto プラシンの信号はCsI越しに見えるのか？

^{109}Cd 線源($T_{1/2}=461.4\text{d}$)をプラシンの前に置き、
プラシンでの22keVのX線のピークがCsI越しに見えるのかテスト
実験を行った



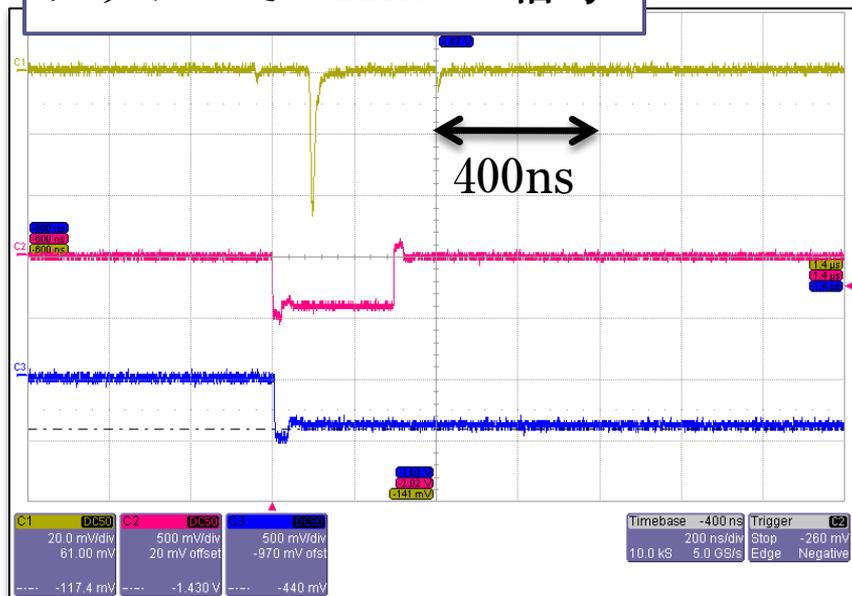
プラシンの信号とCsIの信号を区別するため二つのGateを用いた

4.2 LongGateとShortGateの関係(1)

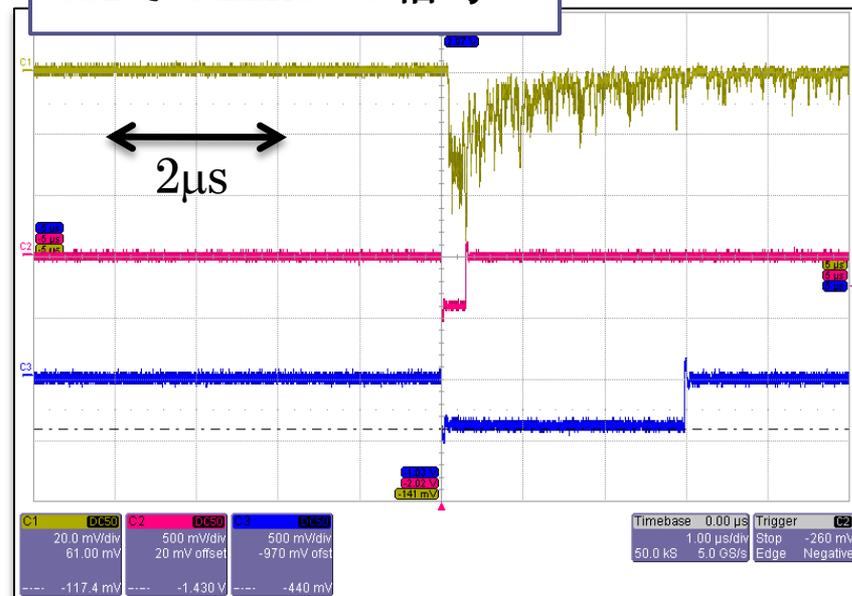
- ◆ ShortGate(300ns) → プラシンの信号用
- ◆ LongGate (3 μ s) → CsIの信号用



プラシンでの22keVの信号

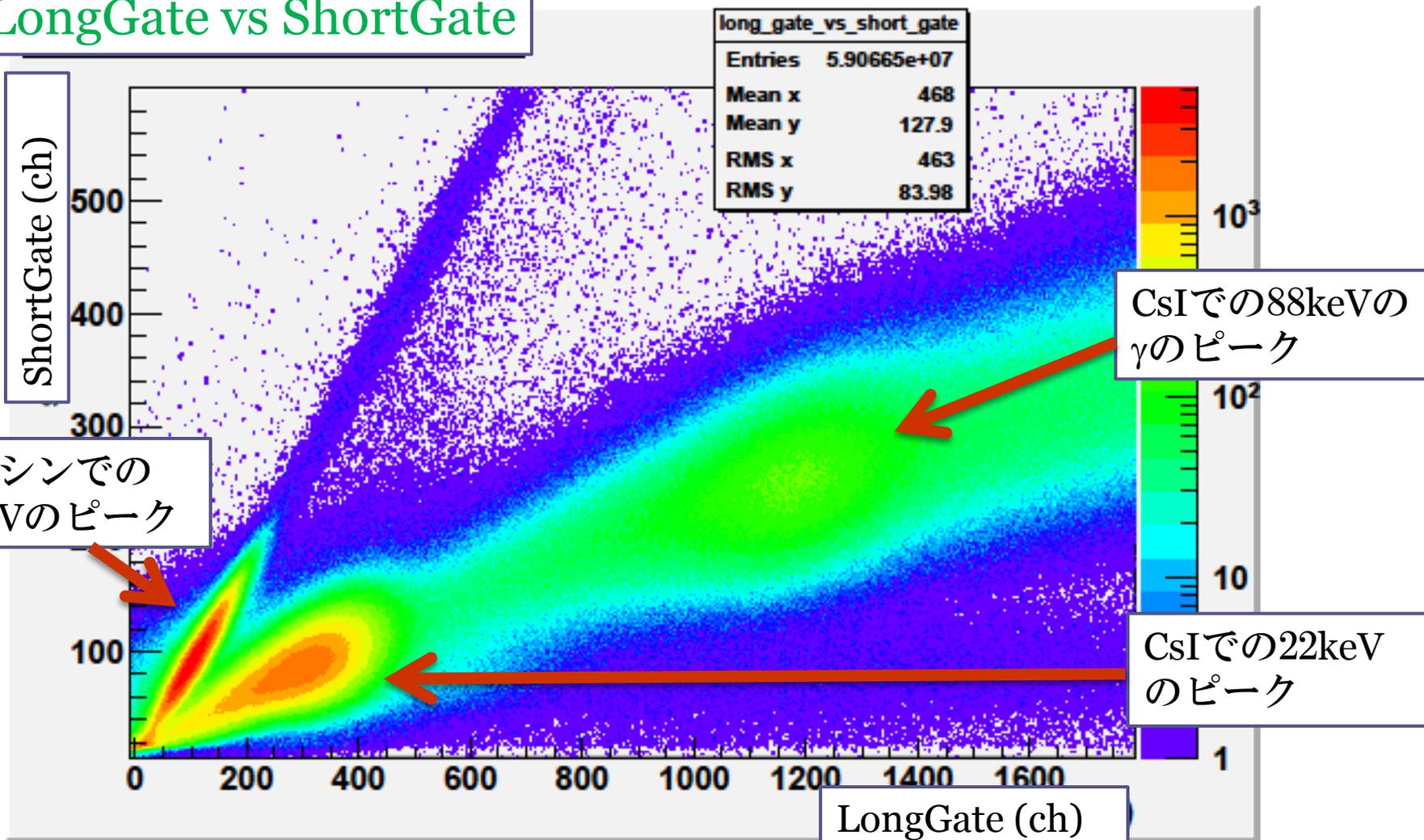


CsIでの22keVの信号



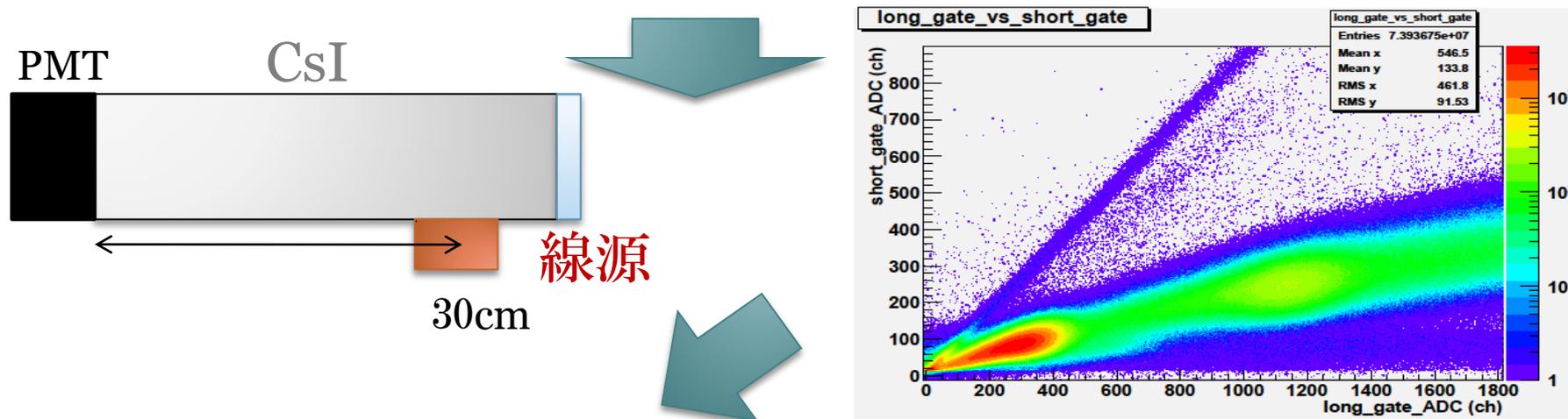
4.2 LongGateとShortGateの関係(2)

LongGate vs ShortGate



4.4 本当にプラシンでのピークなのか？

①CsIのsideから線源を当ててプラシンでのピークが消えるか？



プラシンの信号だと思われるピークが消えた!

②プラシンを直に貼った場合との光量の比較



Resolutionの比較からCsIを通すと光量は70%になることが分かった

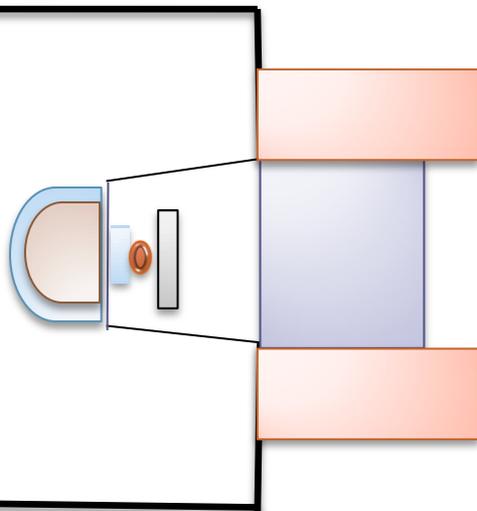
プラシン



プラシンの22keVのピークを見ていると思われ、CsIを通しててもプラシンの信号は十分みられる

5.1 期待されるo- Ps の生成率

Geant4を用いてo- Ps の生成率を見積もった



Geant4に入れているパラメータ

- ファイバー (直径6mm, 厚さ0.3mmの円板)
- アクリル (直径13mm, 厚さ5mmの円板)
- エアロゲル (半径6mmの半球)
- veto プラシン (厚さ0.5mmの半球殻)
- 線源 (直径5.08mmの円板)
- CsI (50cm×50cm×50cmの立方体)
- NaI (肉厚15cm, 長さ30cmの円筒)

①トリガーでの EnergyDeposit > 50keV
& エアロゲルでstop
& 止まる前にveto検出器でそれぞれ30keV以下のDeposit

3.1%

②o- Ps の生成率

$3.1\% \times 0.4$ (Ps生成効率) $\times 3/4$ \rightarrow 0.93%

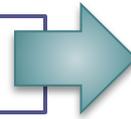
5.2 100日runで得られるo-Psとpickoffの数

③o-Ps \rightarrow 3γ のうちひとつの γ がGeに入る



$$\begin{aligned} &0.93\% \\ &\times 3 (3つの\gamma) \times 0.4 (\text{Geのefficiency}) \\ &\times 0.1 (\text{アクセプタンス}) \\ &\rightarrow \underline{0.11\%} \end{aligned}$$

⑤100日Runで得られるo-Psの数



$$\sim \underline{10^8}$$

⑥100日Runでのpickoffの数
(N_2 ガス中では $\text{Br} \doteq 10\%$)



$$10^8 \times 0.1 \sim \underline{10^7}$$

この数のpickoffがどのくらいBackgroundになってしまうかをGeant4で見積もった

5.3 Background & 感度の評価

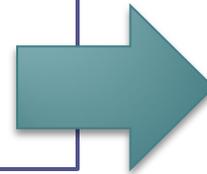
100日runで予想されるpickoff起源のBackgroundを見積もった
(pickoffイベントを予想される量の15倍発生させた)

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

① veto検出器を突き抜けるイベントはあるか?

イベントの定義

- ① EnergyDeposit@CsI < 30keV
- ② EnergyDeposit@veto プラシン < 30keV
- ③ EnergyDeposit@NaI < 30keV
- ④ 他の物質でのEnergyDeposit = 0

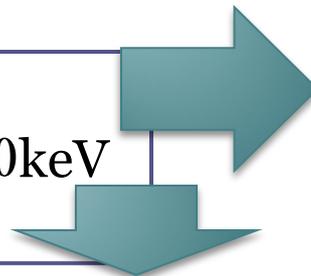


突き抜けたイベントはなし

② Dead materialでの γ 線吸収はどれくらい?

イベントの定義

- ① EnergyDeposit@CsI < 30keV
- ② EnergyDeposit@veto プラシン < 30keV
- ③ EnergyDeposit@NaI < 30keV



0.7 ± 0.2 発期待される

100日runで $10^{-8}\Gamma_{3\gamma}$ の感度を達成できる

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でエネルギー損失があった時にCsI、NaIなどのveto検出器でエネルギー損失がないイベントを探す
- ◆ Backgroundを減らすためのvetoプラシンの信号はCsI越しにも見えた
- ◆ Geant4でBackgroundを見積もった
- ◆ 100日runで $10^{-8}\Gamma_{3\gamma}$ の感度を達成できる

Ge



CsI



NaI



CsI(type-J)	60×60×400	7本
CsI(type-a)	60×60×280 + 57×57×140	10本
CsI(type-b)	57×57×300 + 57×57×141	12本
CsI(type-d)	60×60×301 + 57×57×140	1本
NaI	(43×94)×(110×94)×377 (TFE:0.4mm, Al:1mm)	62本

これらの検出器を用いて組み立てる予定です