

液体キセノン検出器を用いた オルソポジトロニウムの インビジブル崩壊の探索実験 の提案

水原慎一, 浅井祥仁, 難波俊雄^A, 石田明, 稲田聡明^A

東大理, 東大素セ^A

日本物理学会2020春季大会
16aG20-12@名古屋大学 2020/3/16

目次

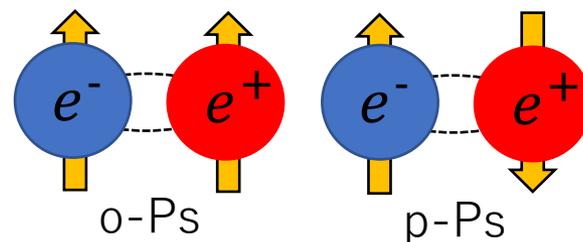
1. ポジトロニウムの性質
2. オルソポジトロニウムのインビジブル崩壊
3. 検出器とセットアップ、trigger条件
4. Geant4 シミュレーションによるバックグラウンド評価
5. まとめ

ポジトロニウムの性質

ポジトロニウム(Ps)：電子と陽電子の束縛系準粒子

➤ スピン三重項：オルソポジトロニウム(o-Ps)

➤ スピン一重項：パラポジトロニウム(p-Ps)



● 質量： $m_{Ps} = 1022 \text{ keV}$

● QEDにおける厳密なC不変性

→ 崩壊モード $\left\{ \begin{array}{l} \text{o-Ps} \rightarrow 3\gamma, 5\gamma, \dots \text{ (奇数本のガンマ線)} \\ \text{p-Ps} \rightarrow 2\gamma, 4\gamma, \dots \text{ (偶数本のガンマ線)} \end{array} \right.$

● 寿命： $\left\{ \begin{array}{l} \Gamma_{\text{o-Ps}} = 142.05 \text{ ns} \\ \Gamma_{\text{p-Ps}} = 125 \text{ ps} \end{array} \right.$

o-Psはp-Psの約1000倍の寿命

o-Psのインビジブル崩壊の可能性

- 標準模型でのインビジブル崩壊

$$o\text{-Ps} \rightarrow \nu\bar{\nu}$$

分岐比は主要崩壊 $o\text{-Ps} \rightarrow 3\gamma$ の 10^{-17} 未満。観測不可。

- 標準模型を超えたエキゾチックなインビジブル崩壊

a) 余剰次元 b) ミリチャージ粒子 c) 軽い新ベクトルゲージボソン d) Mirror Matter (ダークマターの候補)

a)について触れる。

余剰次元へのインビジブル崩壊（1）

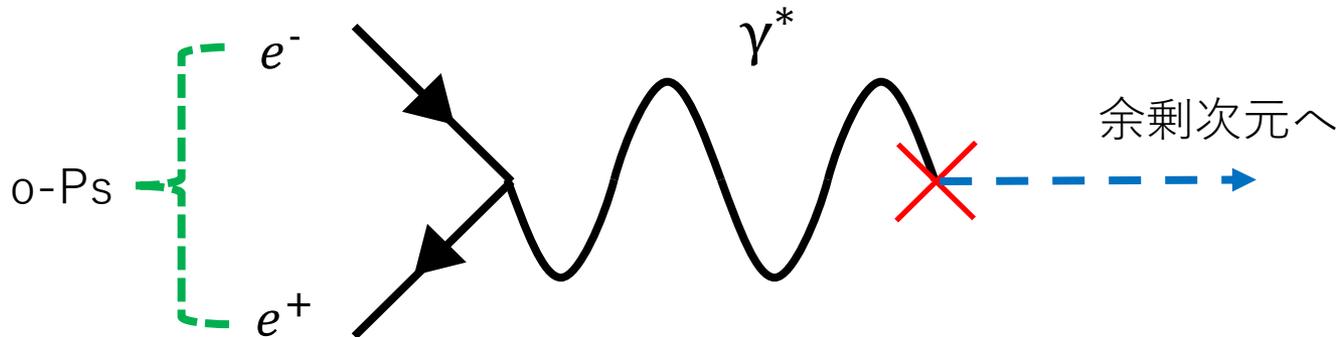
- ▶ Randall-Sundrum typeの余剰次元モデル
(R-S brane-world models)

ワープ余剰次元 ($z: \exp^{-k|z|}$ のワープ因子)により階層性問題
(Planckスケールと電弱スケール(TeV)の乖離)を解決

- ▶ $4+n+1$ 次元のコンパクト化&ワープ余剰次元モデル

(n :コンパクト化された余剰次元)

仮想光子から余剰次元へ崩壊($o\text{-Ps} \rightarrow \gamma^* \rightarrow \text{add. dim.}$)



余剰次元へのインビジブル崩壊（2）

Gninenko, Krasnikov, Rubbiaら(文献[1])はこのモデルをo-Psに適用しインビジブル崩壊への分岐比を与えた。

$$\text{Br}(o\text{-Ps} \rightarrow \gamma^* \rightarrow \text{add. dim.}) \propto \left(\frac{m_{o\text{-Ps}}}{k}\right)^n$$

✓n=1は既に排除された。

n=2の時、

$$\text{Br}(o\text{-Ps} \rightarrow \gamma^* \rightarrow \text{add. dim.}) \approx 1.2 \times 10^{-7} \times \left(\frac{1 \text{ TeV}}{k}\right)^2$$

→ $10^{-7} \sim 10^{-8}$ オーダーの分岐比に興味がある。

現状のo-Psインビジブル崩壊への制限

▶過去のo-Ps invisible実験 (文献[2])

$$\text{Br}(o\text{-Ps} \rightarrow \text{invisible}) \leq 4.2 \times 10^{-7} (90\% \text{ C.L.})$$

▶余剰次元への実験的に推定される制限

LEPによるZ bosonのinvisible分岐比

$$\begin{cases} \text{indirect測定}(e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow \text{invisible}) \rightarrow \Gamma_{\text{inv}} = 499.0 \pm 1.5 \text{ MeV} \\ \text{direct測定}(e^+e^- \rightarrow \gamma Z \rightarrow \gamma \text{ invisible}) \rightarrow \Gamma_{\text{inv}} = 503 \pm 16 \text{ MeV} \end{cases}$$

二つの結果によるパラメータ k への制限から

$$\text{Br}(o\text{-Ps} \rightarrow \text{invisible}) \leq \begin{cases} 0.4 \times 10^{-9} (\text{indirect}) \\ 10^{-8} (\text{direct}) \end{cases}$$

※二つの精度の差はそれぞれの実験期間に依る

→ **10^{-8} オーダーの分岐比を目指す!**

検出原理とセットアップの提案

●検出原理

「o-Ps生成にタグ付けし崩壊 γ 線が検出されない」
イベントを探したいが、o-Psのタグ付は困難。

→ 「o-Psに必要な β^+ にタグ付けし崩壊 γ 線が検出されない」
イベントを探す！

●セットアップの提案

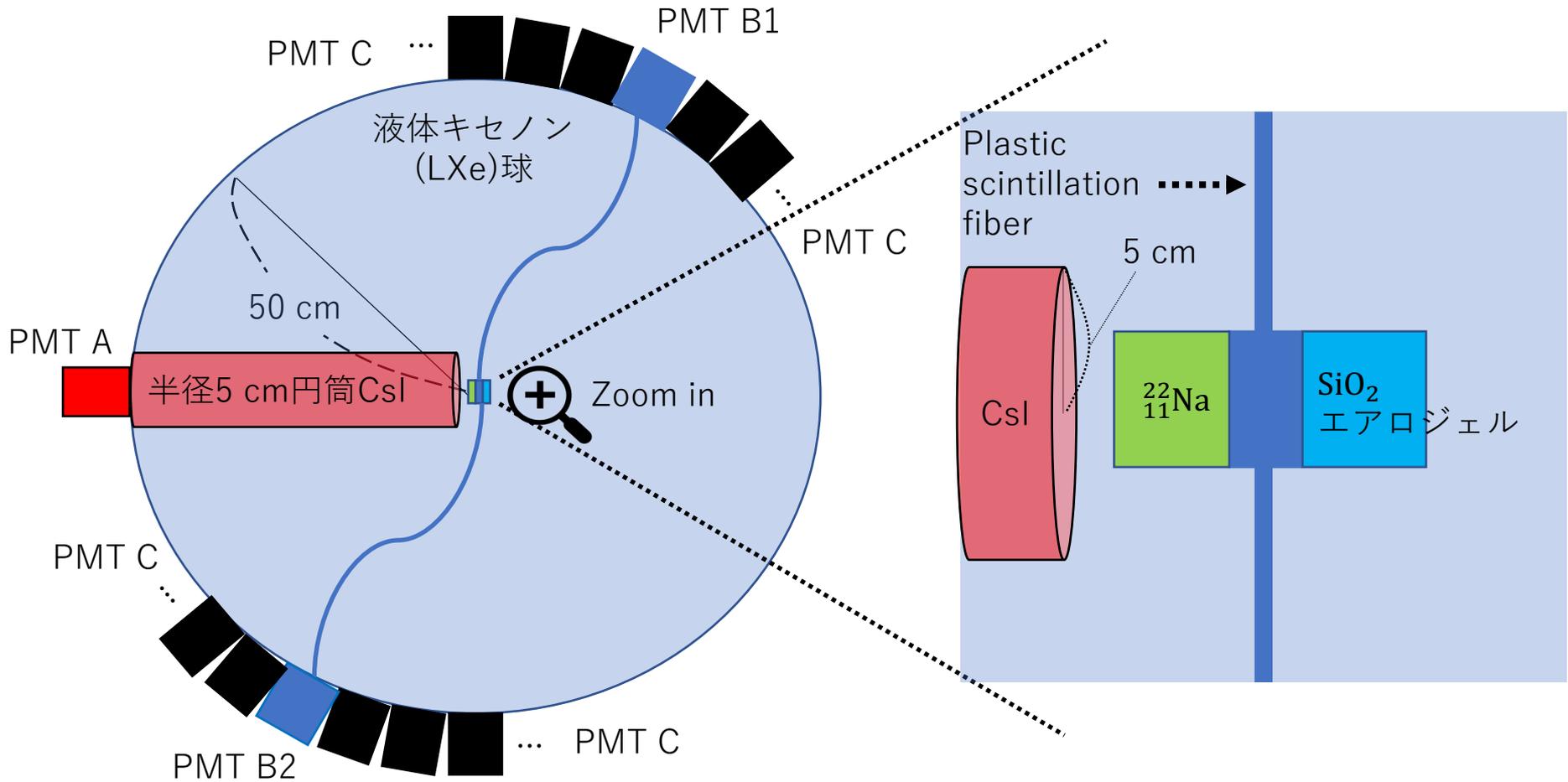
- 半径50 cm球 液体キセノン検出器：崩壊 γ 線の吸収
- 半径5 cm 円筒CsI： $^{22}_{11}\text{Na}$ のTrigger γ 線 1275 keVの吸収
- $^{22}_{11}\text{Na}$ ： β^+ 線源、 γ 線 1275 keVの放出
- Plastic Scintillation Fiber： β^+ 生成のタグ
- SiO_2 エアロジェル： β^+ のストッパー、o-Ps生成
- PMT

液体キセノン(LXe)を用いる利点

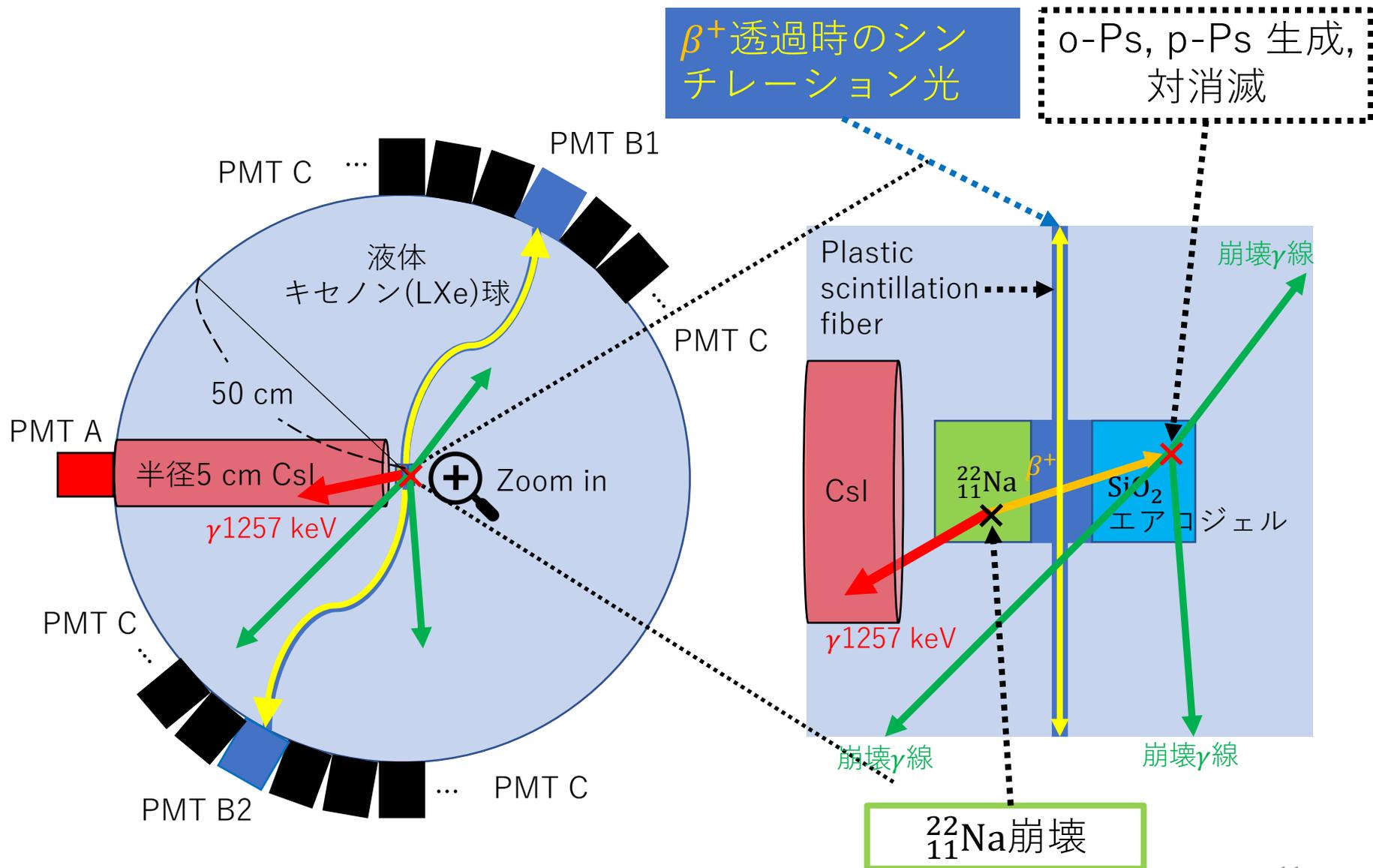
[液体キセノン検出器]

- 高密度 $\rho = 2.95 \text{ g/cm}^3$ 、大きな原子番号 $Z=54$
→ γ 線を吸収しやすい
- NaI(Tl)と同程度の発光量 $42,000 \text{ photons/MeV}$ (url[3])
→ 高いエネルギー分解能
- 相変化を利用した蒸留による低バックグラウンド
- 不感物質や隙間が存在しない→崩壊 γ 線の予期しないインビジブルイベントを防ぐ

検出器の構造



各プロセス



Triggerについて

[Trigger条件]

- ① β^+ 放出：PMT B1, B2のコインシデンス($< \sim \text{ns}$)と発光量
- ② $^{22}_{11}\text{Na}$ から γ 1275 keV 放出：
CsI (PMT A) で $1275 \pm 1\sigma (=80)$ keVでcut
→ PMT A, Bのコインシデンス($< \sim \text{ns}$)でTrigger

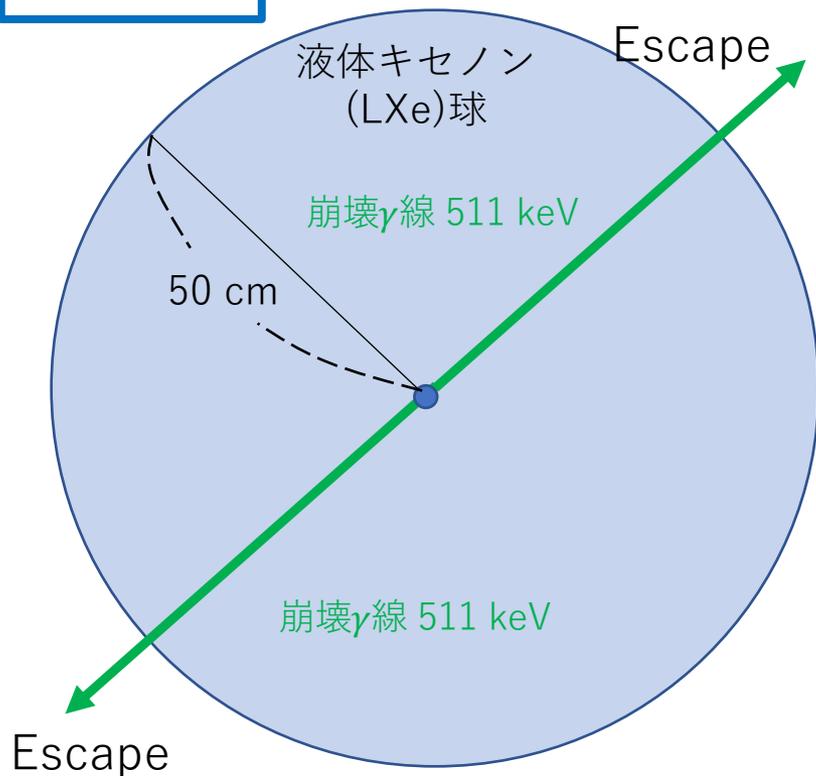
このTrigger条件によって確実に
「 β^+ が生成している」ことを保証!

[o-PsのTriggerに占める割合]

Trigger条件を満たしたイベントのうちo-Psの割合が1割
(o-Ps先行実験から)と仮定
→ 10^{-8} の制限には全Trigger数 10^9 個。

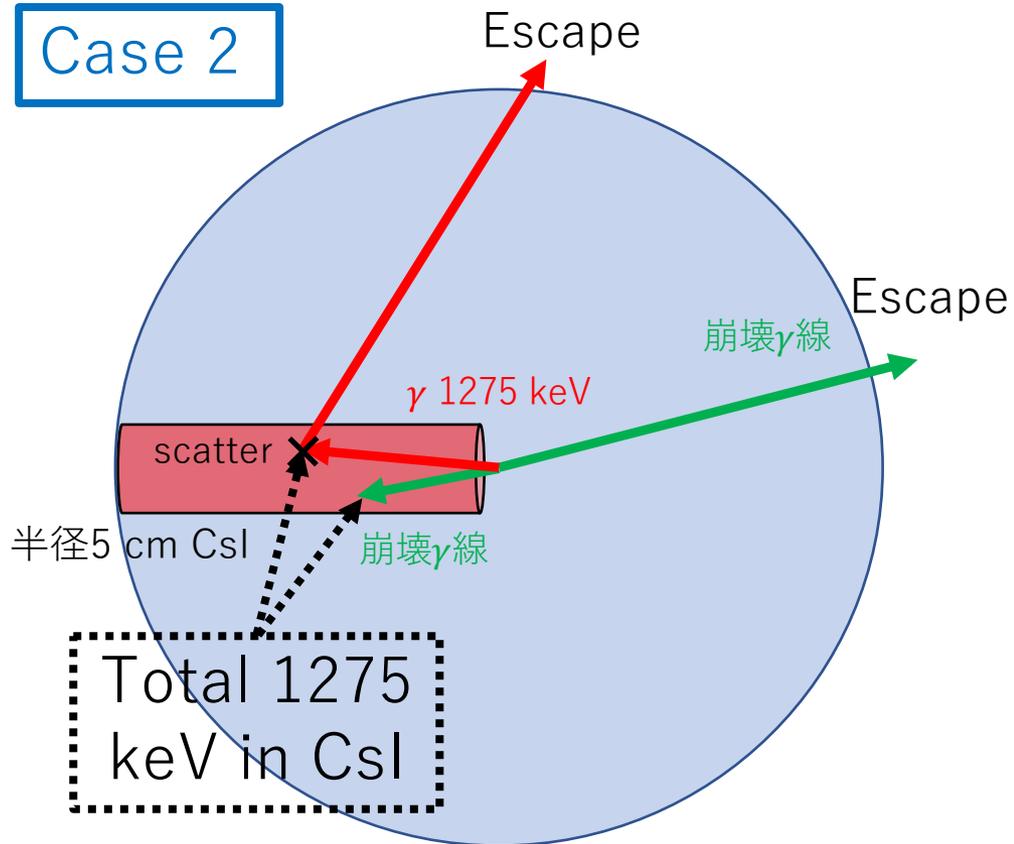
バックグラウンド

Case 1



主な崩壊 γ 線 511 keV二本
が検出器LXeをすり抜けて
しまう

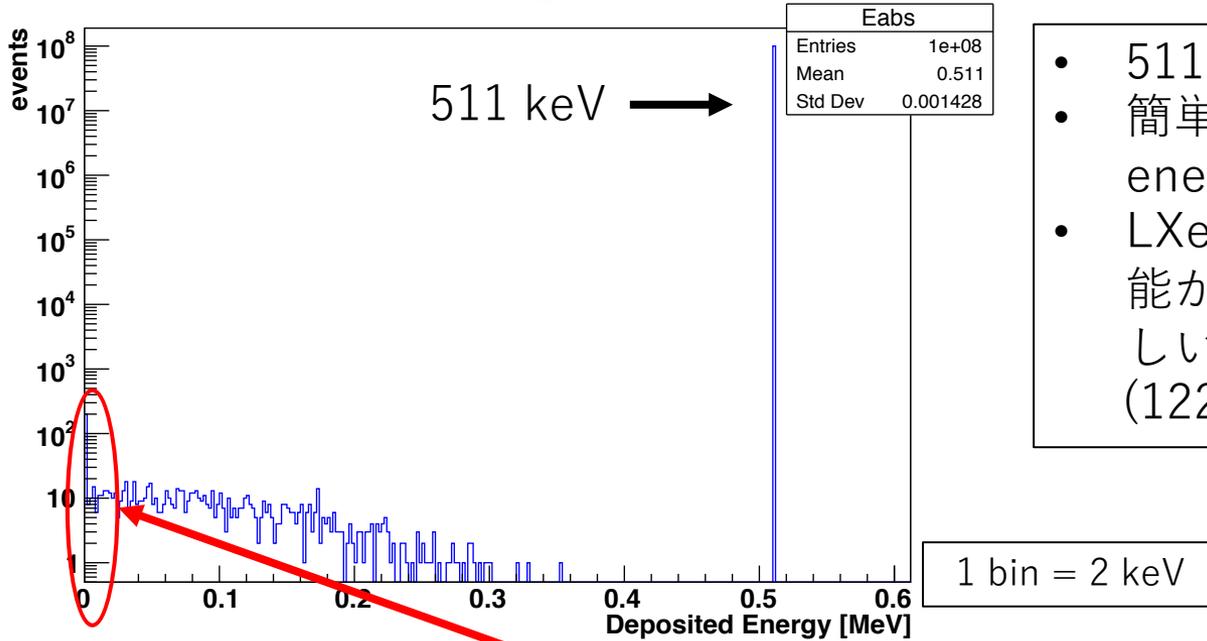
Case 2



γ 1275 keV (β^+ 線源から)
と崩壊 γ 線の一部がCsIで
1275 keV depositし、残り
がすり抜ける

バックグラウンドCase 1のシミュレーションによる評価

deposited energy in LXe



- 511 keV一本すり抜けから評価
- 簡単のため蛍光は抜きにして energy depositのみ考える
- LXeの分解能：0 keV近傍の分解能が、50 keVの分解能3 keVと等しいと仮定 (122 keVの分解能5 keV、文献[4])

[シミュレーション結果]

グラフから 0 keV~3 keVの領域に $203 \pm \sqrt{203}(7\%)$ 個

→ γ 511 keV 1本のすり抜け確率 2.0×10^{-6}

→ γ 511 keV 2本のすり抜け確率

$(2.0 \times 10^{-6})^2 = 4.0 \times 10^{-12} \ll 1 / (\text{全trigger数})$

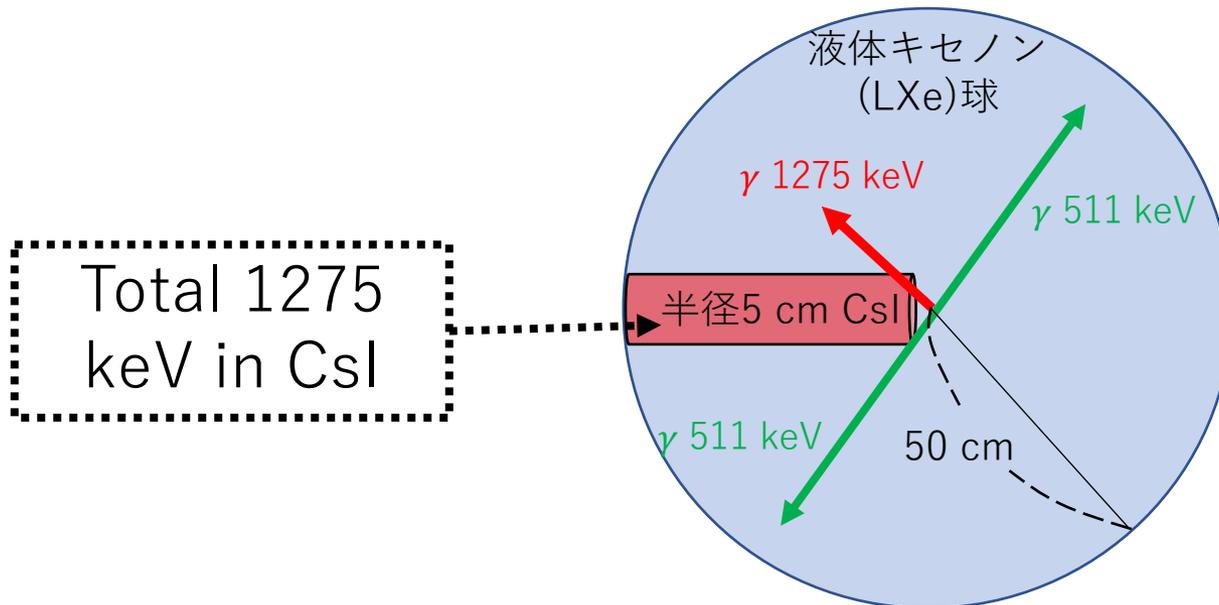
Case 1 の目標値を達成!

バックグラウンドCase 2のシミュレーションによる評価(1)

[シミュレーション条件]

- CsIとLXeの構造のみ取り入れる。
- back-to-back γ 511 keV 2本と γ 1275 keVをランダム方向にLXe球の中心から発生。

→ 「CsIに $1275 \pm 1\sigma (=80)$ keV depositし、LXeにdepositしない」
確率を調べる。



バックグラウンド Case 2のシミュレーションによる評価(2)

Energy deposit in LXe

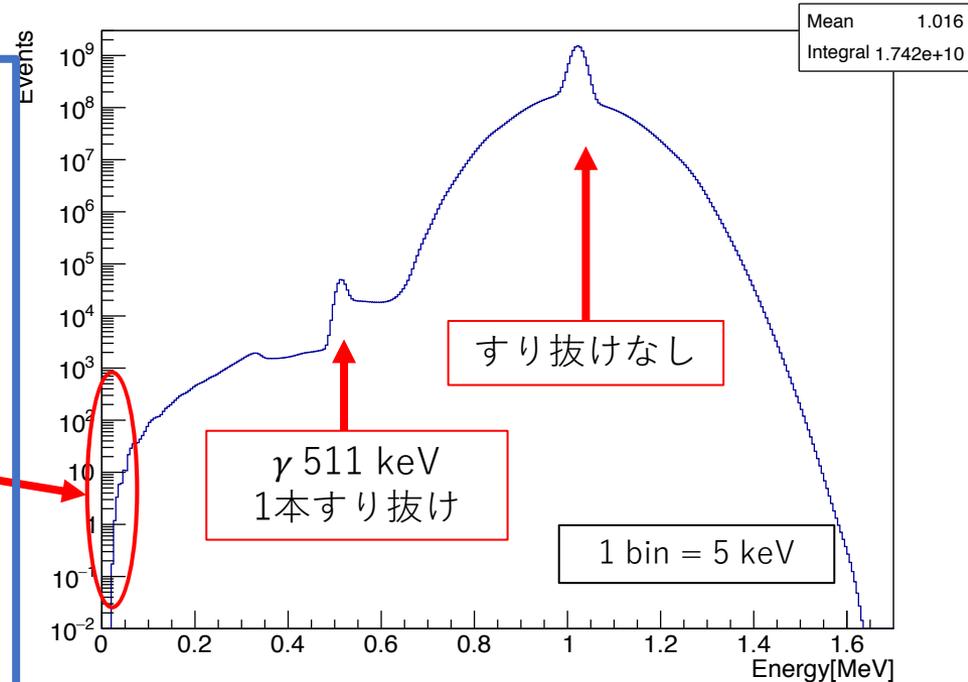
[シミュレーション結果]

全trigger数 1.74×10^{10} に対して depositが 0 keV~3 keV のイベントはなかった。

→実験で起きるCase 2のイベントの数は

$$\frac{2.3}{1.74 \times 10^{10}} \times 10^9 = 0.13 \text{ 個未満} \\ \text{(90\% C. L.)}$$

実験に必要なtrigger数



※図は得られた結果をLXeの分解能で gaussianのsmear済み。

Case 2 の目標値を達成!

今後の課題

- β^+ タグ付けミスによるバックグラウンドの評価
- 各内部構造の最適なパラメータの決定
- pile up イベント (daq system) による Trigger 効率
- CsI と LXe のシンチレーション光の分離
(by decay time or 幾何学的に)

まとめ

[提案]

o -Psのinvisible崩壊の 10^{-8} オーダーの検出によって、エキゾチックな新物理の起源（例：余剰次元）を探索

[検出器の提案]

半径50 cmの液体キセノン球に円筒CsIを埋め込んだ前述の構造

[バックグラウンドの評価]

崩壊 γ 線のすり抜けと、trigger γ 線1275 keVの混入によるバックグラウンド2つを抑えることができた。

[今後の課題]

さらなる構造とバックグラウンドの評価

引用・参考文献

[1] Gninenko, S. N., N. V. Krasnikov, and A. Rubbia. "Extra dimensions and invisible decay of orthopositronium." *Physical Review D* 67.7 (2003): 075012.

[2] Badertscher, A., et al. "Improved limit on invisible decays of positronium." *Physical Review D* 75.3 (2007): 032004.

[3] <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/xmass/dispatches/presentations/index.html>

[4] "XMASS detector", The XMASS Collaboration (K. Abe et al.)