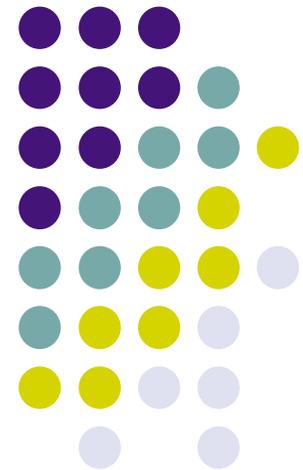


# o-Ps→invisible 崩壊の探索 I —概要と検出器設計—

難波俊雄

是木玄太、兼田充、浅井祥仁、小林富雄  
東京大学素粒子物理国際研究センター

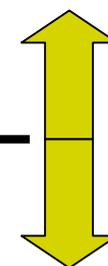




# あらすじ

1. オルソポジトロニウムの不可視粒子への崩壊
2. 検出器の概要
3.  $\beta^+$  線トリガまわりの設計

- 
4. ガンマ線カロリメータの設計
  5. 現状
  6. 到達感度見積もり



このトーク

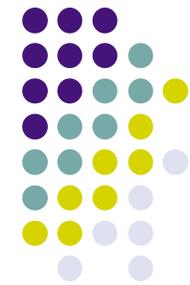
次のトーク



# 1. オルソポジトロニウム (o-Ps)

- ポジトロニウム
  - $e^+ e^-$  束縛系
  - 単純できれいな系
  - $\sqrt{s} = 2m_e = 1022 \text{ keV}$
- オルソポジトロニウム (o-Ps)
  - スピン三重項 ( $^3S_1$ ) 状態のポジトロニウム
  - C 変換に対する変換性が奇
    - ⇒  $3\gamma$  ( $5\gamma$ ,  $7\gamma$ ...) にしか崩壊できない
    - ⇒ 長寿命:  $\tau = 142 \text{ ns}$
- o-Ps → 不可視粒子への崩壊を探しましょう
- 目標:  $10^{-7} \sim 10^{-8} \Gamma_{3\gamma}$  の感度  
(cf. 現在のリミット:  $2.8 \times 10^{-6}$ )

# 不可視粒子への崩壊を通して、 何が見えるか (1)



- 標準模型

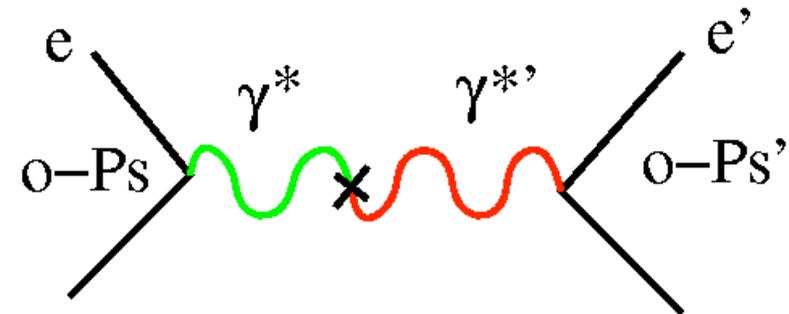
$$\Gamma(o\text{-Ps} \rightarrow \nu\nu) \approx 6 \times 10^{-18} \Gamma_{3\gamma}$$

とても小さいので気にしない

- ミラーワールドの探索

- ミラーワールド:

- 重力以外では見えないセクター
- 暗黒物質の候補の一つ
- 両方の電荷をもつ粒子を介して、光子 $\leftrightarrow$ パラ光子混合



$$\mathcal{L} = \varepsilon F_{\mu\nu} G^{\mu\nu}$$

ミキシング  $\rightarrow$   $\varepsilon$   $\rightarrow$   $F_{\mu\nu}$  (光子場)  $\rightarrow$   $G^{\mu\nu}$  (パラ光子場)

- $P(o\text{-Ps} \rightarrow o\text{-Ps}') = \sin^2 \omega t$ ,  $\omega = 2\pi\varepsilon \times 87\text{GHz}$
- $\varepsilon < 10^{-6}$  の領域は未探索

# 不可視粒子への崩壊を通して、 何が見えるか (2)



- ミリチャージド粒子の探索

- 電子より軽く、電荷  $\varepsilon e$  の粒子  $f$  が存在した場合、

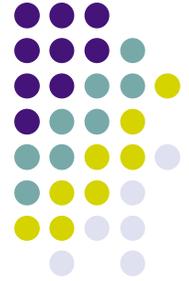
$$\Gamma(\text{o-Ps} \rightarrow \text{ff}) = \frac{3\pi \varepsilon^2}{4\alpha(\pi^2 - 9)} \sqrt{1 - \left(\frac{m_f}{m_e}\right)^2} \left\{ 1 + \frac{3A-1}{4} \left(\frac{m_f}{m_e}\right)^2 \right\} \Gamma_{3\gamma} \quad \varepsilon \sim 10^{-5} \text{ の領域を探索可能}$$

- TeVスケールの余剰次元の探索

- 3+1 次元に加えて、 $n (\geq 2)$  次元の余剰次元があるかも
- 質量を持つ粒子は、トンネル効果を通して余剰次元に逃げる事が可能
- $n=2$  の時、

$$\Gamma(\text{o-Ps} \rightarrow \gamma^* \rightarrow \text{add dim}) \approx 1.2 \times 10^5 \left( \frac{m_{\text{o-Ps}}}{k} \right)^2 \Gamma_{3\gamma} \quad \text{余剰次元のコンパクト化のスケール}$$

$$\approx 1.2 \times 10^{-7} \left( \frac{1\text{TeV}}{k} \right)^2 \Gamma_{3\gamma}$$



## 2. 検出原理とセットアップ

- 本当は、o-Ps 生成でタグをしたいが、それは難しいので、、
- 「 $^{22}\text{Na}$  が  $\beta^+$  を放出したにも関わらず、陽電子起源の  $\gamma$  線が検出されない」事象を探す
- 検出器セットアップ
  - $^{22}\text{Na}$  線源 ( $T_{1/2}=2.6\text{y}$ 、 $E_{\text{end}}=546\text{keV}$ ) からの  $\beta^+$
  - $\beta^+$  ストップ、o-Ps 作成用のシリカエアロゲル
  - $\beta^+$  タグ用のプラスチックシンチレータ (SciFi)
  - $\gamma$  線検出用の  $4\pi$  カロリメータ (NaI(Tl)、CsI(Tl))

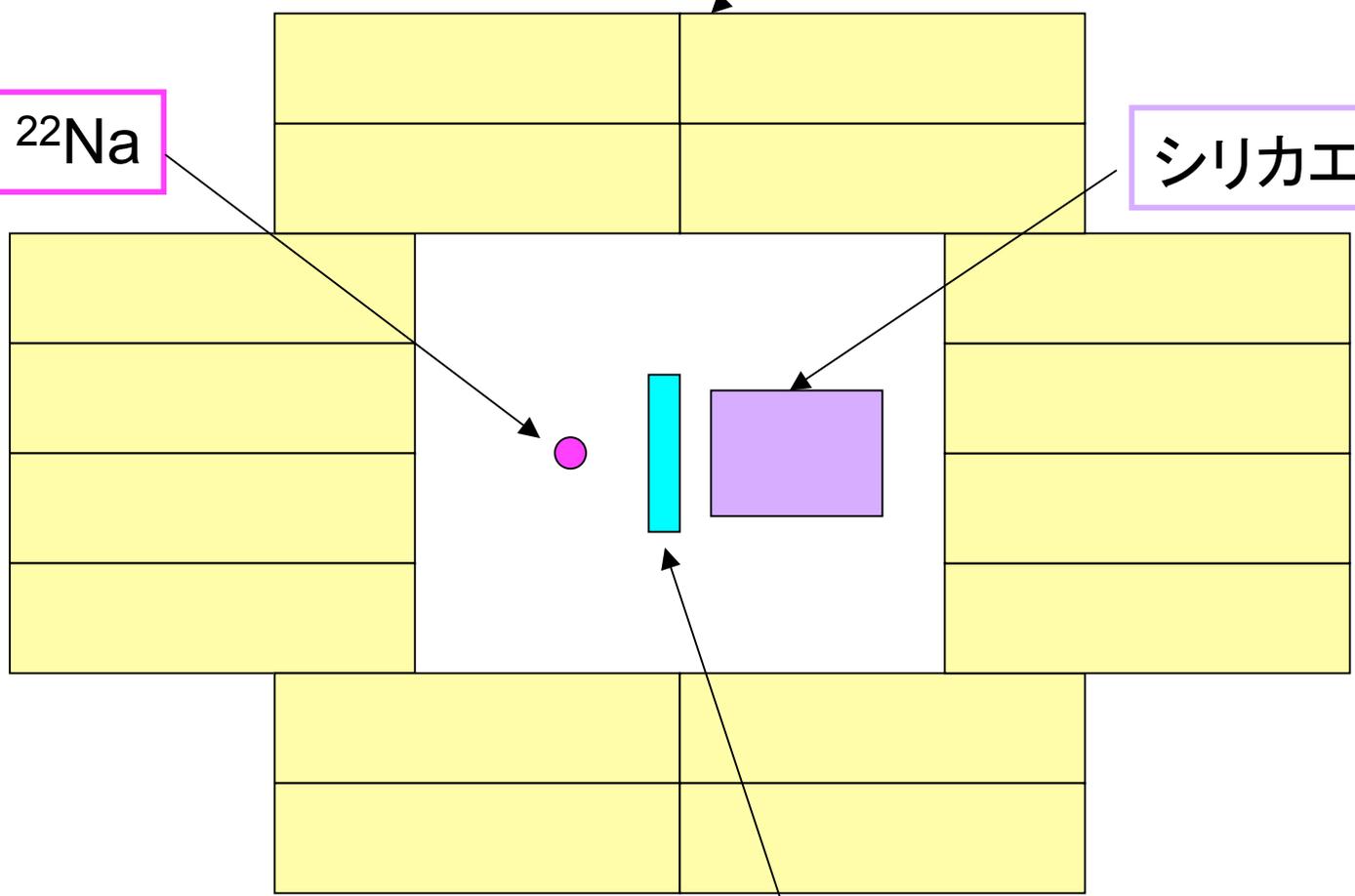
# 検出器セットアップ

4 $\pi$  カロリメータ  
NaI(Tl) or CsI(Tl)

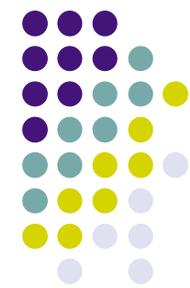


$^{22}\text{Na}$

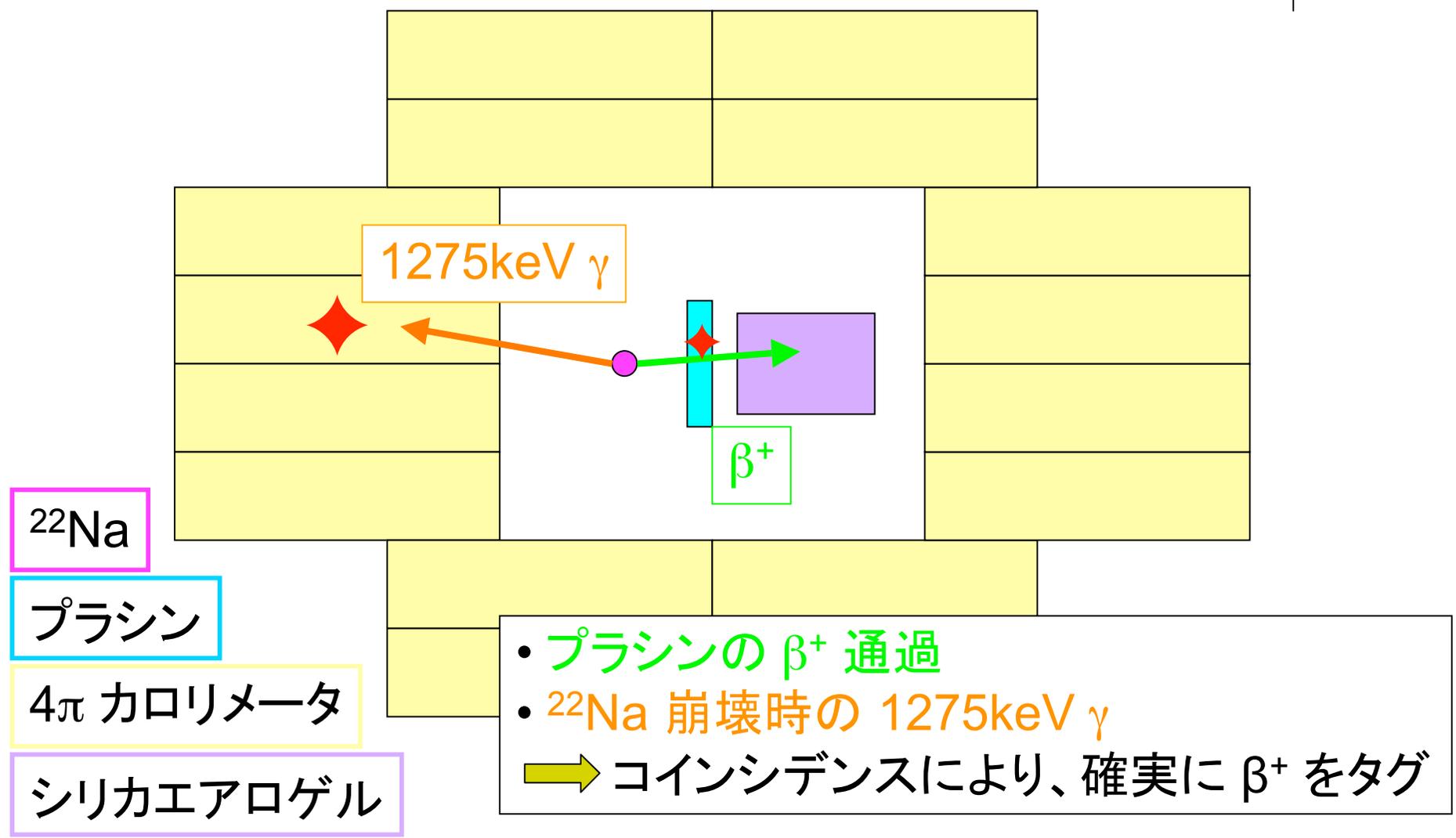
シリカエアロゲル

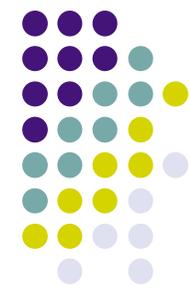


プラスチックシンチレータ



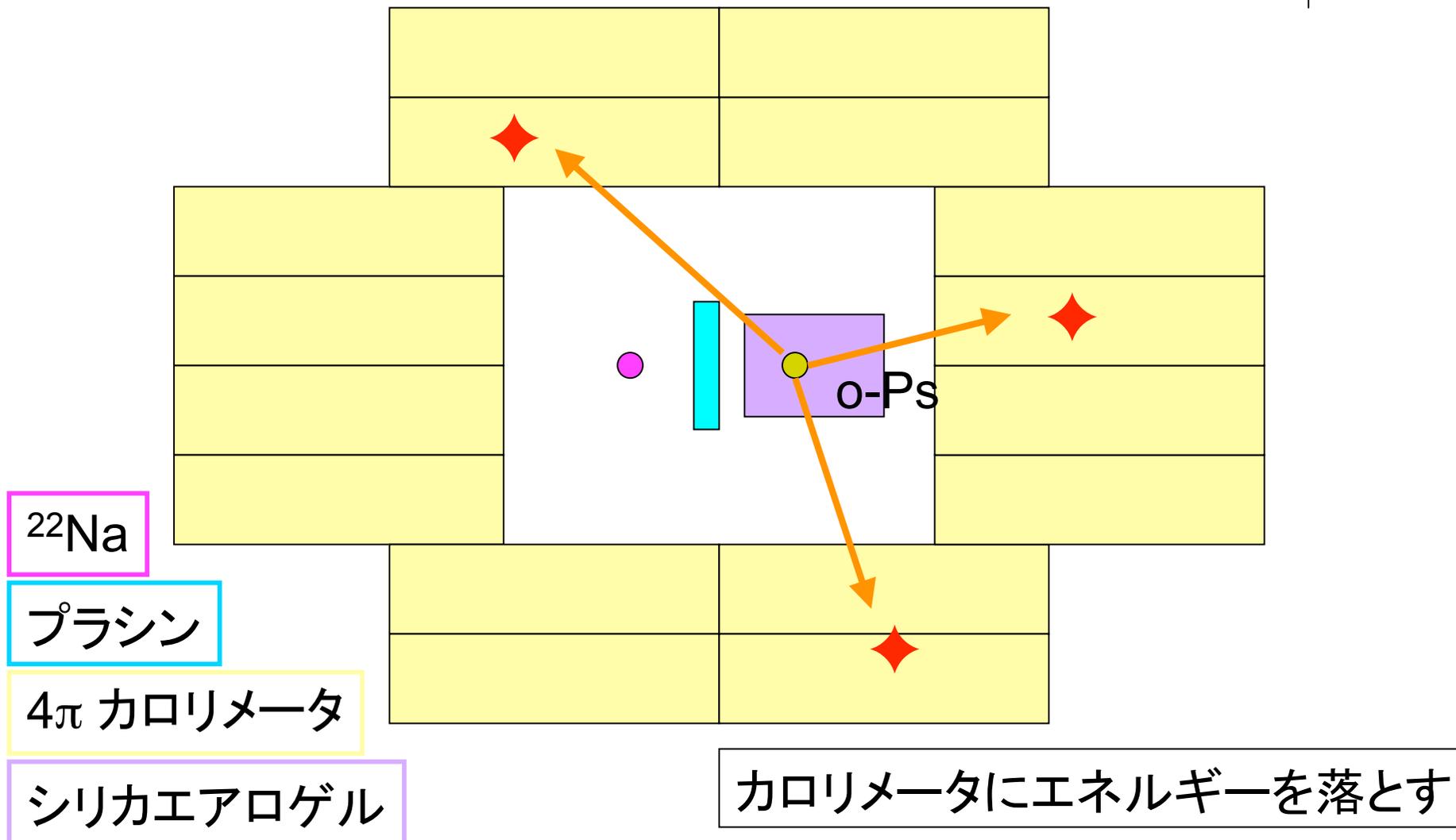
# $^{22}\text{Na}$ からの $\beta^+$ 崩壊のタグ





その後、o-Ps が生成され、3 $\gamma$  に崩壊

(o-Ps 生成確率:  $\sim 55\% \times 3/4 = 41\%$ )



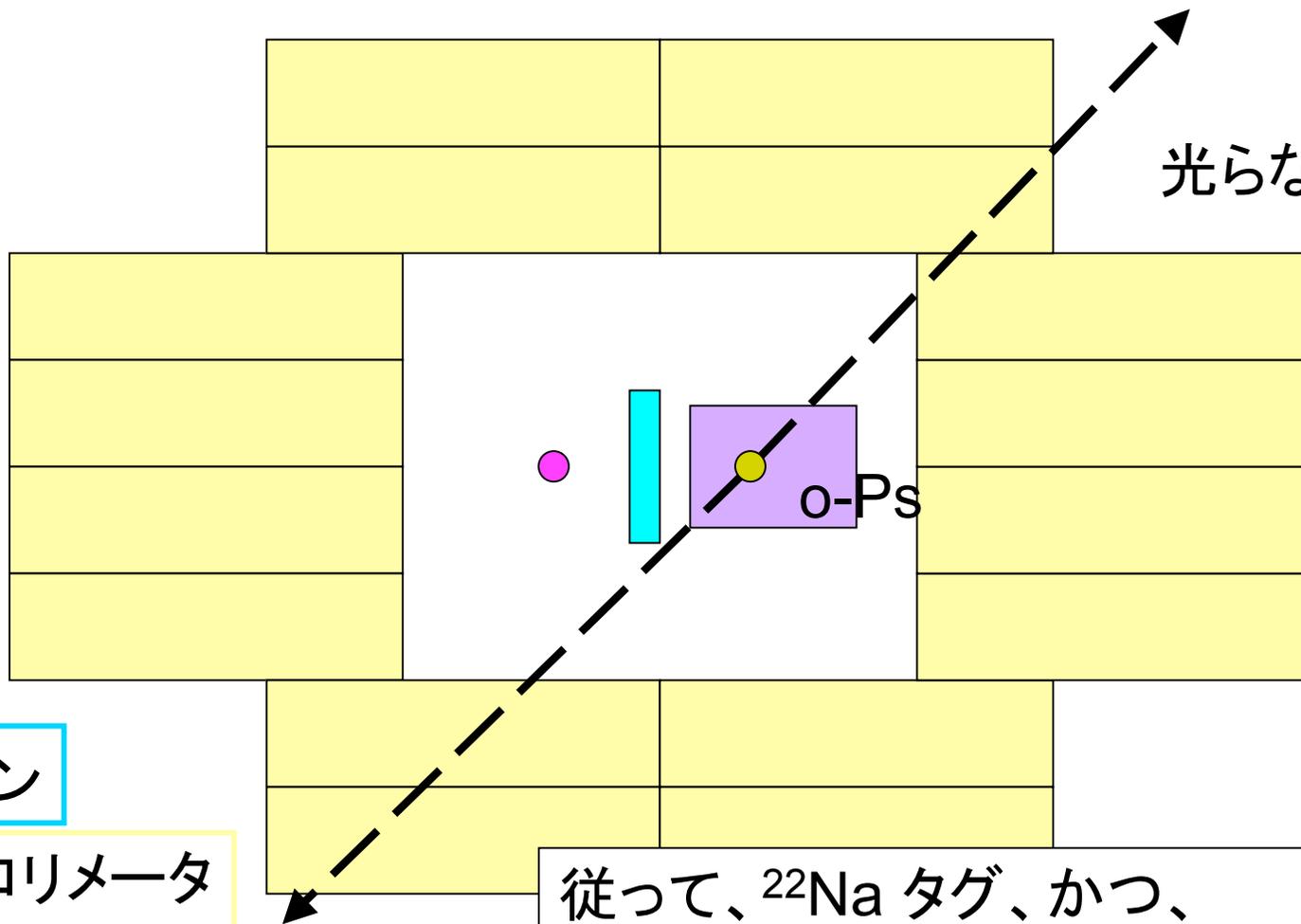
不可視粒子に崩壊すれば、



光らない!!

- $^{22}\text{Na}$
- プラシン
- 4 $\pi$  カロリメータ
- シリカエアロゲル

従って、 $^{22}\text{Na}$  タグ、かつ、  
カロリメータが鳴らないイベントを探す





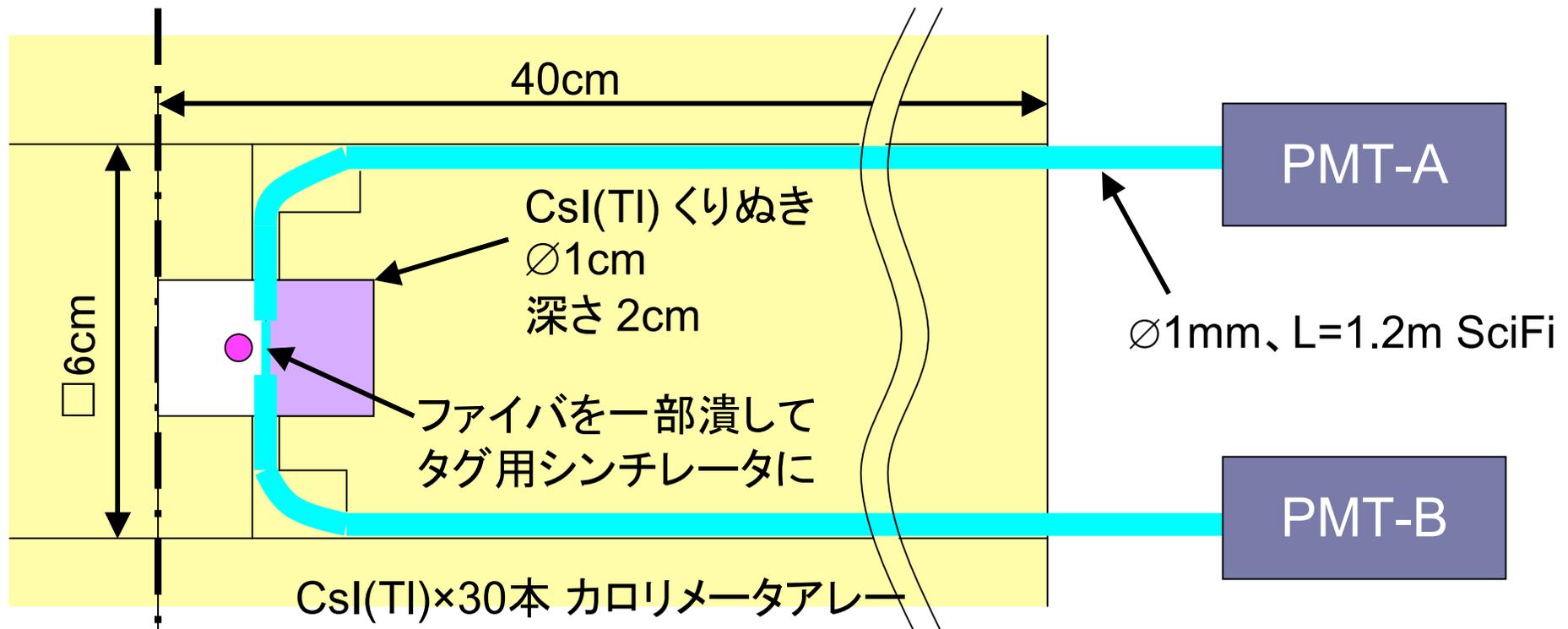
## ただし、問題がある

- カロリメータ内部の物質による  $\gamma$  線吸収を極限まで抑える必要あり  
(特に、 $\beta^+$  線タグ関係)
  - ➡ よけいな物は中に持ち込めない
- カロリメータからの  $\gamma$  線エスケープをどこまで抑えられるか  
(特に、p-Ps 崩壊、対消滅によって生じる 511keV  $\gamma$  をどこまで検出できるか)
  - ➡ こっちは次のトークで

# 3. $\beta^+$ 線トリガまわりの設計

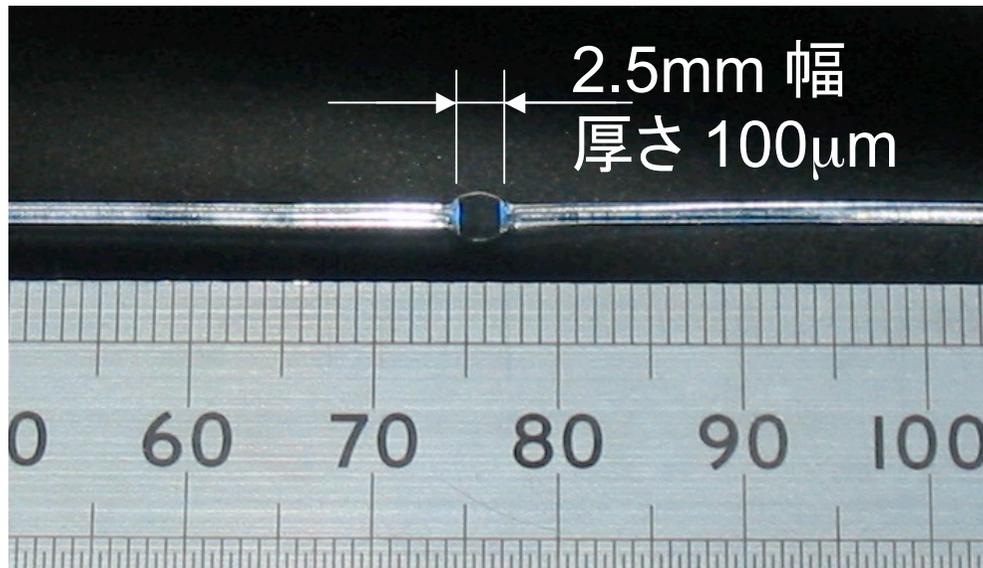


- カロリメータの CsI(Tl) をくりぬき、 $^{22}\text{Na}$  線源、 $\beta^+$  線タグ、シリカエアロゲルを中に
- シンチレーションファイバの一部を薄く潰して、 $\beta^+$  線タグとして使用
- ファイバの両端をカロリメータの外まで連れ出し、PMT でのぞく
- 2 本の PMT のコインシデンスにより、2 p.e. のしきい値



実物

ダミーの CsI(Tl)



- クラレ SCSF-78M
- 直径 1mm
- $\sim 110^{\circ}\text{C}$  に熱して潰す

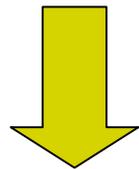
Hamamatsu H7195×2



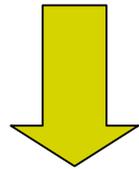
# 本当に光るのか？



- $^{241}\text{Am}$  の  $\alpha$  (5.5MeV) を照射
  - クエンチ、空気の吸収により、450~500 keV<sub>ee</sub> 相当
  - 2本のPMTの和で、~16 p.e. 相当のピーク

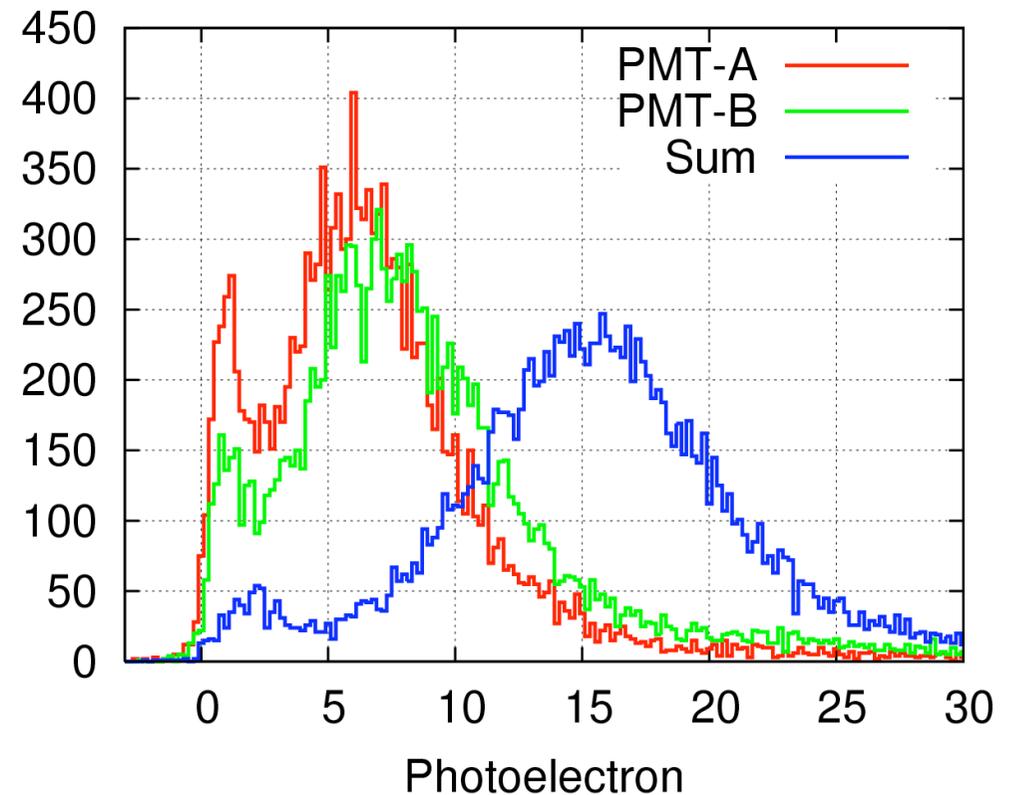


- 光量は ~30keV/p.e.

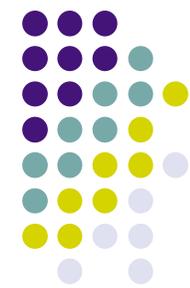


- $\beta^+$  ( $E_{\text{dep}} \sim 50\text{keV}$ ) もそれなりに見えるでしょう

A.U.

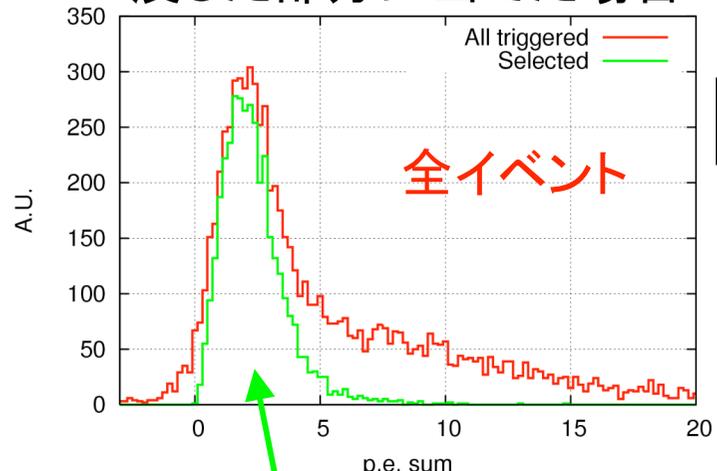


# ただし、腕のファイバーも光るので、 2本のPMTの光量比によるカットは必要

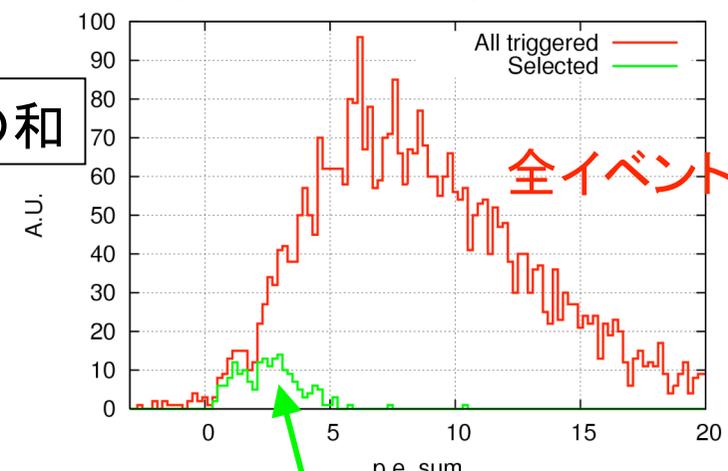


$^{68}\text{Ga}$  からの  $\beta^+$  線 ( $E_{\text{end}}=1.9\text{MeV}$ ) をコリメートして照射

潰した部分に当たった場合

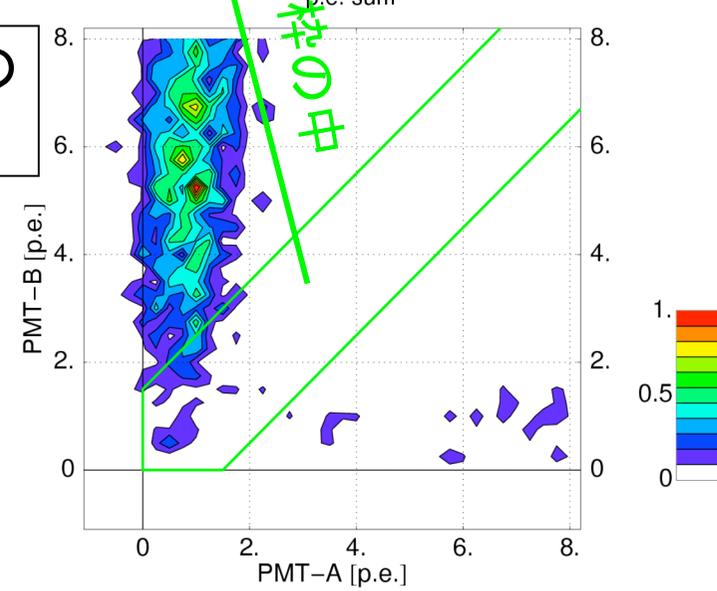
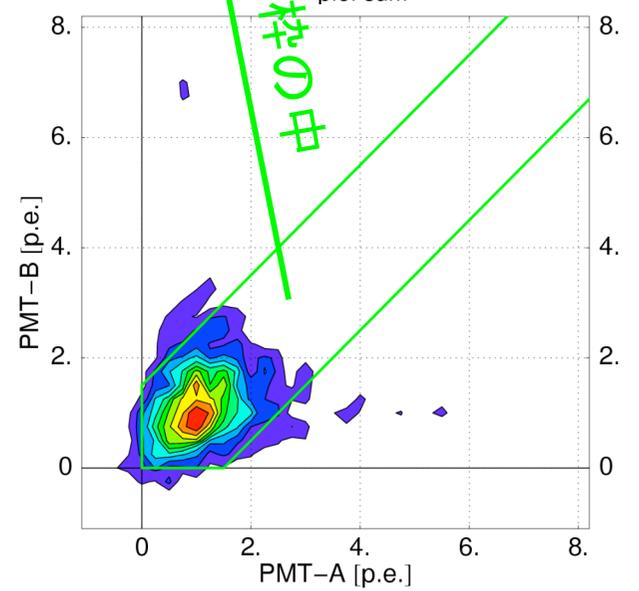


5mm離れた腕の部分に当たった場合

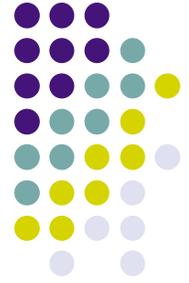


光量の和

PMT 毎の  
光量分布



単純なカットでも十分機能している



## まとめ

- o-Ps の不可視粒子への崩壊を通じて、未発見の物理現象を探る事が可能
- $^{22}\text{Na}$  崩壊時の  $\beta^+$  と  $1275\text{keV}$   $\gamma$  でタグ、カロリメータで何も見えないイベントを探す
- カロリメータ内部の物質を極限まで減らしたいため、シンチレーションファイバを利用
- 熱して潰す事により、 $30\text{keV/p.e.}$  の光量を達成
- カロリメータの話と、最終到達感度は次のトークで