

Detection of high energy muons with sub-20 ps timing resolution using L(Y)SO crystals and SiPM readout

高エネルギー ミューオンを用いた L(Y)SO 結晶と SiPM による 20 ps 以下の時間分解能での検出

Task Hara

Particle physics Laboratory, Kobe university

October 27, 2025

Abstract

高時間分解能へのモチベーション

- 将来の高エネルギー加速器実験では、イベントパイルアップが課題
- 解析において、時間分解能が極めて重要になる
 - ▶ $\sigma = 20 - 30 \text{ ps}$ ほどが必要か

セットアップと得られた結果

- 検出器として、L(Y)SO と SiPM の組み合わせに着目
- CERN SPS の 150 GeV ミューオンビーム を用い、時間分解能を評価した
- タイムウォーク補正を適用後、コインシデンス時間分解能 (CTR) は $(14.5 \pm 0.5) \text{ ps}$ を達成した¹

¹特段の言及がない場合、本論文では「時間分解能」を σ で書く。

検出器の構成について

- PET (陽電子放出断層撮影) 分野の技術を！
 - ▶ シンチレーション結晶と SiPM(シリコン光電子増倍管) の組み合わせを試してみたい
- シンチレーション結晶：2種類の結晶を評価した
 - ▶ LYSO:Ce Crystal Photonic, Inc. 製。長さが，5, 10, 20, 30 mm の 4種類²
 - ▶ LSO:Ce,Ca Agile Technologies, Inc. 製。Ca を 0.4% 添加している。結晶長 5 mm³
- ▶ SiPM : 2種類の SiPM をそれぞれの結晶と接続した
 - ★ TSV MPPC LYSO:Ce 結晶に接続した。Hamamatsu 製。約 5cm のケーブルで基板に接続
 - ★ NUV-HD SiPM LSO:Ce,Ca 結晶に接続した。FBK 製。基板に直接接続

⇒ 各組合せについて時間分解能を測定する。

²ルテチウム・イットリウムオルトケイ酸塩

³ルテチウムオルトケイ酸塩

実際の検出器 1

- 各結晶はテフロンに包まれ, SiPM に接着された
 - 接着剤の屈折率 $n = 1.68$
- 同種, 同長の結晶を対にして, テフロンの枠に固定され, 軸を一致させた (右図)

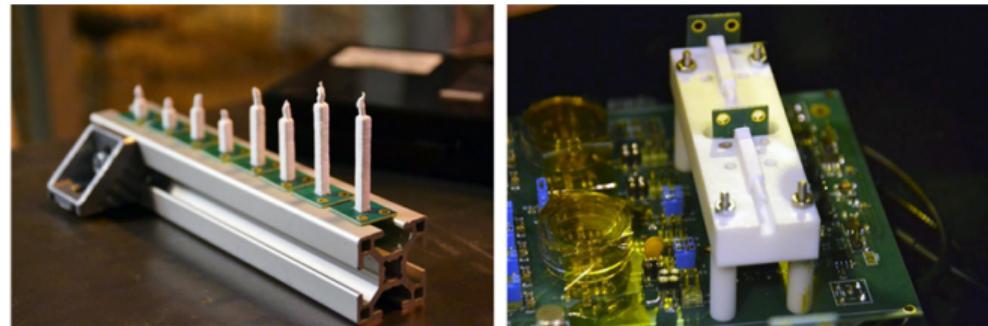


Figure: LYSO 結晶 (5, 10, 20, 30 mm) と実際の検出器

実際の検出器 2

- エネルギー情報を時間情報を独立に読みだせる
- エネルギー情報はアンプから
- 時間情報は、閾値 520 mV として、信号の立ち上がりの 1/2 で測定
 - ▶ およそ光子 4 個分
- 読み出し回路系の固有時間分解能は

$$\sigma_{CTR} = 7 \text{ ps}$$

であった

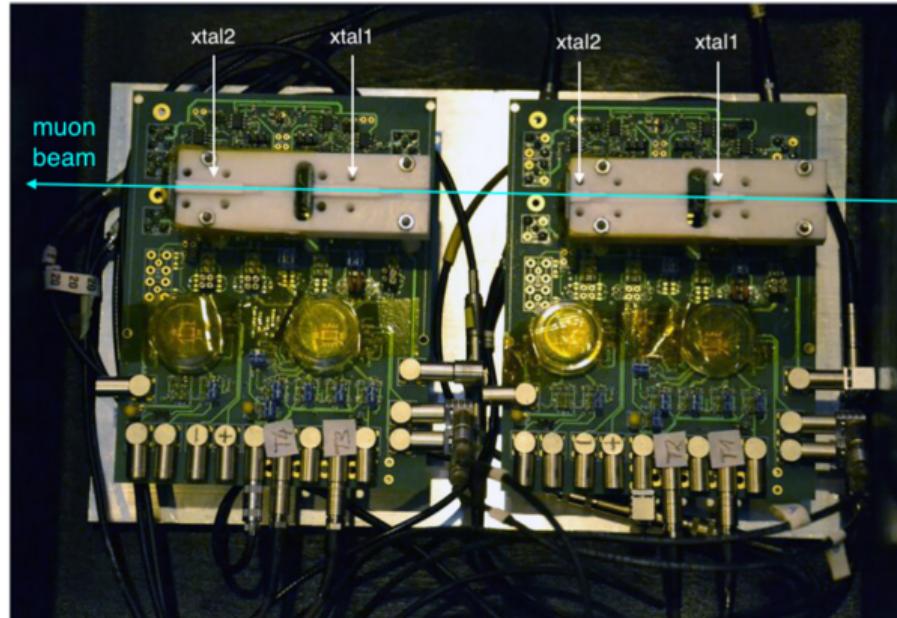


Figure: 実際の検出器。時間分解能の評価には、CERN の SPS 陽子加速器で生成された muon を用いた。

観測されたエネルギー分布について

- muon が結晶全体を走った事象に対応する明瞭なピークがある
- 結晶長全体を走らなかった事象が連続分布している
- 解析に用いた範囲を 2 本の垂直線で示している

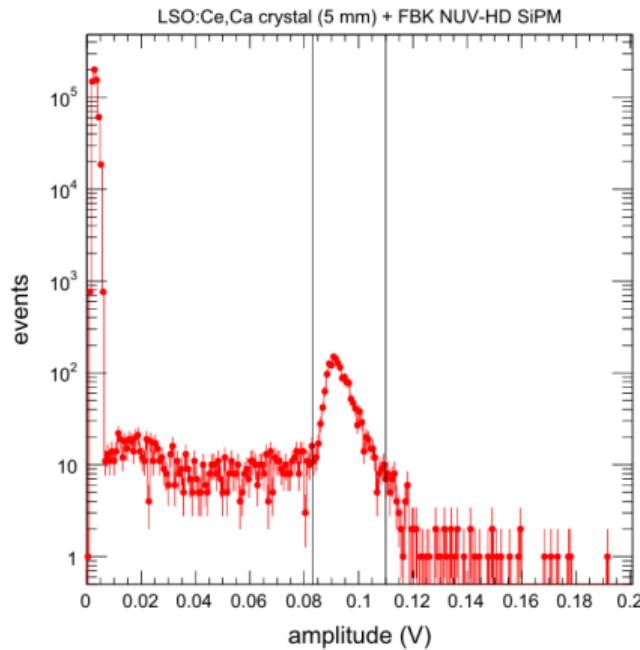


Figure: LSO 結晶 (5mm) で観測されたエネルギー分布

時間分解能の評価の前に…タイムウォーク補正

- 時間分解能は図 2 における $\Delta t = t_{\text{xtal2}} - t_{\text{xtal1}}$ をもって算出
 - muon が失うエネルギーは統計的ばらつきをはらむ
 - ▶ Landau fluctuation
 - 測定された t と信号の振幅とに依存関係がある
 - ▶ 時間情報は閾値と振幅で読みだした
- ⇒ タイムウォーク効果

補正のために、 Δt と振幅との関係をプロットして評価。

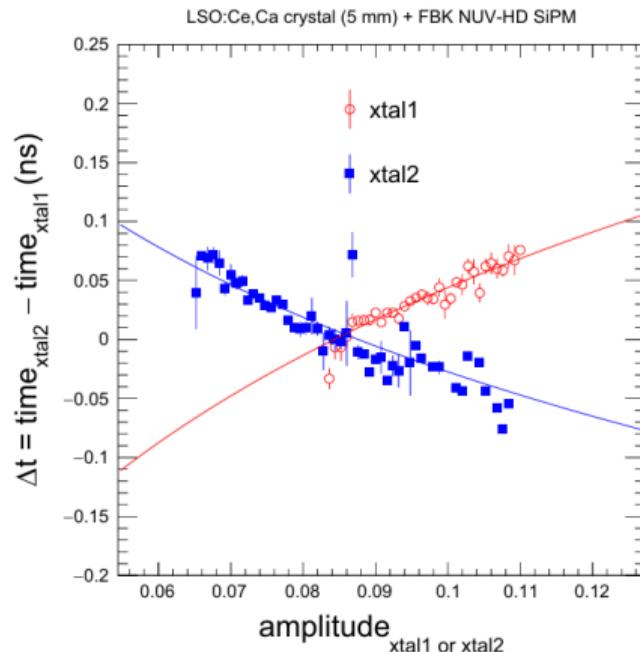


Figure: Δt を amplitude の函数としてプロット。対数函数でフィッティングしている。

各構成における σ_{CTR} について～LYSO:Ce + TSV MPPC の場合

• 補正前 σ_{CTR}

- ▶ 結晶長が長くなるにつれて、改善傾向
 - ★ 多くのシンチレーション光子

• 補正後 σ_{CTR}

- ▶ 結晶長に依らない ($\approx 27 \text{ ps}$)
 - ★ 時間能向上に有効な結晶長は 10 mm 以下か

• 基板にケーブル接続

- ▶ 影響を評価するのは容易でないが、無視はできなそう

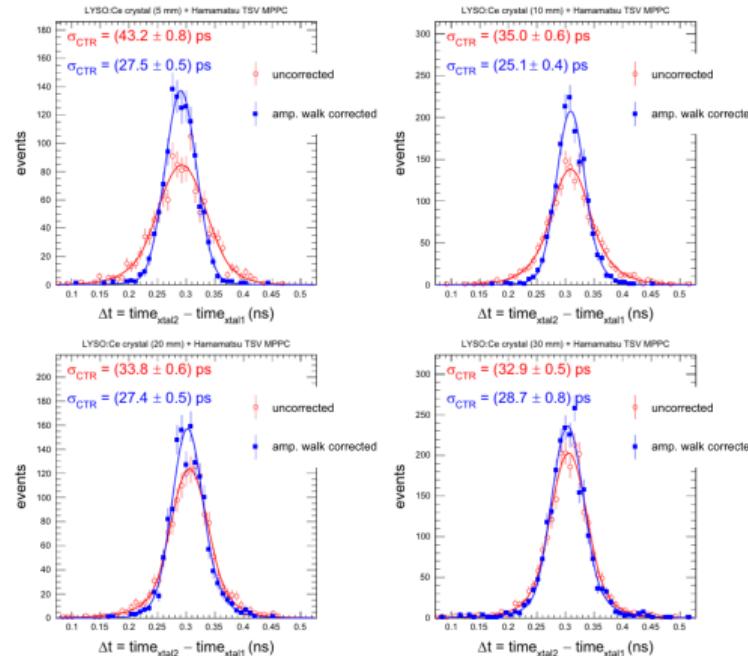


Figure: LYSO:Ce + TSV MPPC のプロット。赤中抜き円が補正前、青塗りつぶし四角が補正後の値である。

各構成における σ_{CTR} について～LSO:Ce,Ca + FBK MPPC の場合

- LSO:Ce,Ca が CTR_{max}
 - ▶ Ca の共ドープによる, decay time の短縮
★ (30 ps vs. 40 ps)
 - ▶ FBK SiPM の高性能
 - ▶ 基板に直接ついていて, 低ノイズ

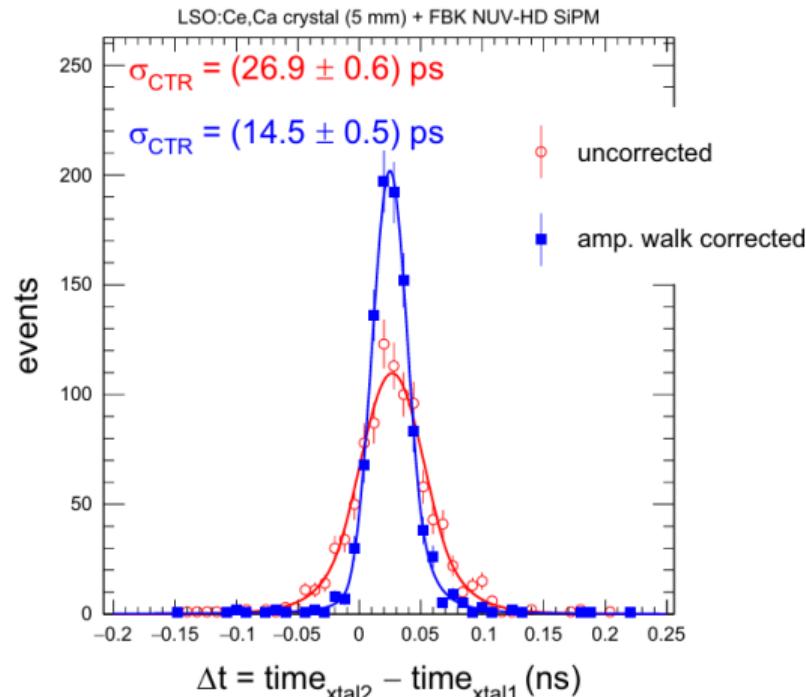


Figure: LSO:Ce,Ca + FBK MPPC のプロット。

時間分解能の評価

すべての組み合わせについて、補正前後の結果を示す。

Table: 測定された時間分解能の一覧。

結晶	CTR (補正前)	CTR (補正後)	Single TR (補正後)
5 mm LYSO:Ce	(43.2 ± 0.8) ps	(27.5 ± 0.5) ps	(19.4 ± 0.4) ps
10 mm LYSO:Ce	(35.0 ± 0.6) ps	(25.1 ± 0.4) ps	(17.7 ± 0.3) ps
20 mm LYSO:Ce	(33.8 ± 0.6) ps	(27.4 ± 0.4) ps	(19.4 ± 0.3) ps
30 mm LYSO:Ce	(32.9 ± 0.5) ps	(28.7 ± 0.8) ps	(20.3 ± 0.6) ps
5 mm LSO:Ce,Ca	(26.9 ± 0.6) ps	(14.5 ± 0.5) ps	(10.3 ± 0.4) ps

- Single TR は $CTR/\sqrt{2}$ で算出している⁴

$$\rightarrow \sigma_{CTR}^2 = \sigma_{single1}^2 + \sigma_{single2}^2 \wedge \sigma_{single1} = \sigma_{single2}$$

⁴対となる結晶の性能は等しいと仮定し、単一検出器換算する。

総論

- 通過した muon に対する検出効率は 100% を達成した
- どの検出器も, $\text{CTR}_{\text{single}} < 20 \text{ ps}$ であった
 - ▶ $\sigma = 20 - 30 \text{ ps}$ を達成
- LSO:Ce,Ca 結晶と FBK SiPM が CTR_{max}
 - ▶ $\sigma_{\text{single}} \simeq 10 \text{ ps}$
 - ★ 同様のセットアップ（クォーツチエレンコフ放射体と浜松 SiPM, 120 GeV の proton）で達成された $\sigma_{\text{single}} \simeq 14.5 \text{ ps}$ に比肩
 - ▶ 5 ~ 10 mm の結晶が達成した
 - ★ このコンパクトさは、今後の実験への実装において大きな利点
 - ▶ 室温 (29°C) で実験した。
 - ★ 温度制御装置の導入がなかった
 - 総じて、さらなる研究が待たれる

