

# Calibration of the CsI(Tl) detector using Cosmic muons for E36 Experiment in J-PARC

2016.03.25

## 概要

宇宙線ミュオンを用いた多チャンネル電磁カロリメータのエネルギー校正方法を確立した。TREK グループは 2014-2016 年に J-PARC E36 実験を実施し、静止  $K^+$  の 2 体崩壊分岐比の精密測定からレプトン普遍性の破れと暗黒光子(dark photon)の探索を研究する。E36 実験の検出器は KEK-PS E246 実験の検出システムを基に改良し設計された。CsI(Tl)検出器のキャリブレーションは FADC によって波形データを取得し、宇宙線  $\mu^+$  が結晶内で静止し放出される  $e^+$  の信号、つまりダブル波形を解析することで最大 53 MeV からエネルギーを校正する。また  $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$  事象における  $\mu$  の最大 153 MeV と比較し矛盾しない結果が得られた。

## 目次

1	はじめに	1
2	CsI(Tl)検出器の信号波形と波形模型	2
3	宇宙線ミュオン静止事象	3
4	結果	4
5	まとめと今後の展望	4

## 1. はじめに

J-PARC E36 実験は静止  $K$  中間子の 2 体崩壊分岐比  $R_K$  の精密測定からレプトン普遍性の破れと暗黒光子探索を研究する。物理測定は 2015-2016 に J-PARC ハドロンホール BR1.1 ビームラインで実施された。検出器は KEK-PS E246 実験の検出システムを元に改良し設計された。CsI(Tl) 検出器は 768 個の CsI(Tl)結晶と PIN ダイオードから構成されており、荷電粒子測定用の 12 つ、ビーム入射とダンプのために 2 つの穴が空いている。CsI(Tl)結晶は上底面  $3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$  で下底面  $6\text{ cm} \times 6\text{ cm}$ 、高さ 25 cm のサイズを持つ。このため CsI(Tl) 検出器は 75% のアクセプタンスをもつ。信号読み出しは Shaping Amplifier で波形整形した後、Flush ADC (FADC)によって波形データを記録する。Shaping Amplifier は CLEAR PULSE 株式会社が製造したモデル 4042、FADC は KEK-VME/COPPER 100 MHz FADC FINESSE (used as 50MHz sample)を使用した。

## 2. CsI(Tl)検出器の信号波形と波形模型

CsI(Tl)検出器の信号の波形は縦軸 ADC channel、横軸 TDC channel を示し、それぞれ電圧と時間を表している。25 MHz サンプリングなので1 TDC チャンネル当たり 40 ns の時間幅をもつ。宇宙線ミューオンがいくつもの結晶を通過した事象は同じ時刻に信号が現れる。そして結晶内で静止した場合、平均寿命 2.2  $\mu$ s で崩壊し陽電子を放出する。そのため、あるチャンネルには2つ目の信号が出現する。

波形模型は以下の式で定義される：

$$F(t) = \frac{A}{f(t_0)} \text{Freq}\left(\frac{t - \tau_0 - d}{\lambda}\right) \left\{ \frac{t - \tau_0}{\tau_1} \exp\left(1 - \frac{t - \tau_0}{\tau_1}\right) + \varepsilon \frac{t - \tau_0}{\tau_2} \exp\left(1 - \frac{t - \tau_0}{\tau_2}\right) \right\} \theta(t - \tau_0) + v_{min}$$

$$f(t_0) = \frac{\varepsilon \tau_1 (\varepsilon \tau_1 + \tau_2)}{\varepsilon \tau_1^2 + \tau_2^2} \exp\left(1 - \frac{\tau_1 (\varepsilon \tau_1 + \tau_2)}{\varepsilon \tau_1^2 + \tau_1^2}\right) + \frac{\tau_2 (\varepsilon \tau_1 + \tau_2)}{\varepsilon \tau_1^2 + \tau_2^2} \exp\left(1 - \frac{\tau_2 (\varepsilon \tau_1 + \tau_2)}{\varepsilon \tau_1^2 + \tau_2^2}\right),$$

ここで、Freq 関数は

$$\text{Freq}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp(-t^2/2) dt$$

で定義され、 $\theta$  関数は階段関数を示す。波形模型は実験的に以下のように導いた。ここで A は波高振幅、 $f(x_0)$  は規格化定数、d と  $\lambda$  は立ち上がりの形状を決める要因、 $\tau_0$  は立ち上がり時刻、 $\tau_1$  と  $\tau_2$  は減衰項そして  $\varepsilon$  は2つの発光特性の比を示す。

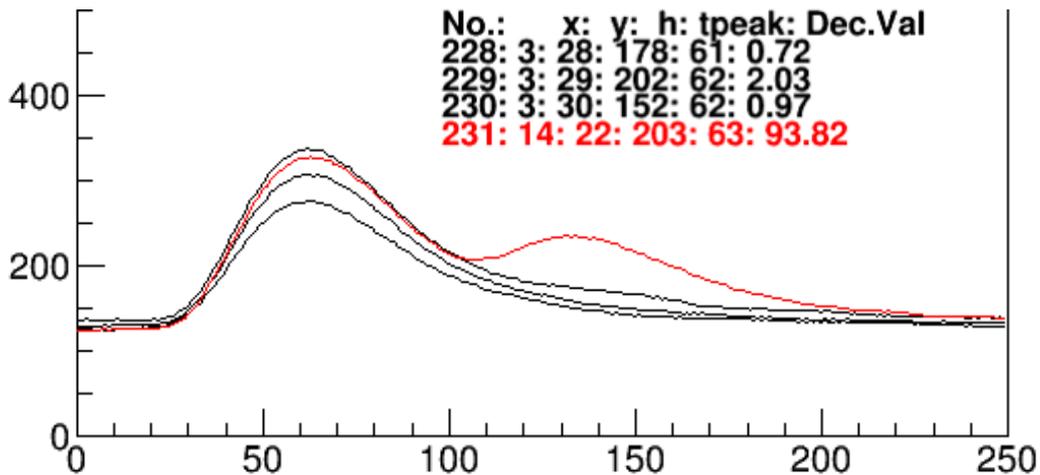


図 1. 代表的な信号波形

### 3. 宇宙線ミュオン静止事象

宇宙線がCsI(Tl)を通過した事象(図1)では231番の波形は明らかに2つ目の信号(セカンド波形)が現れていることが確認できる。シングル波形フィッティングによる $\chi^2$ と波高の関係から閾パラメータ $V_D$ :

$$V_D = \chi^2 / (0.0019 h^2 + 1.71 h - 2.3)$$

を設定し $V_D > 2$ の波形はセカンド波形が存在する可能性があるとして波形は選択される。その後同様の波形モデルが2つ存在するとしてフィッティングし、その時の $\chi^2$ を新しく $\chi'^2$ と定義する。ダブル波形フィッティングの結果を図2に示す。 $\chi'^2$ の分布から $\chi'^2 < 500$ の波形は悪くないフィッティングであろうとして選択される。

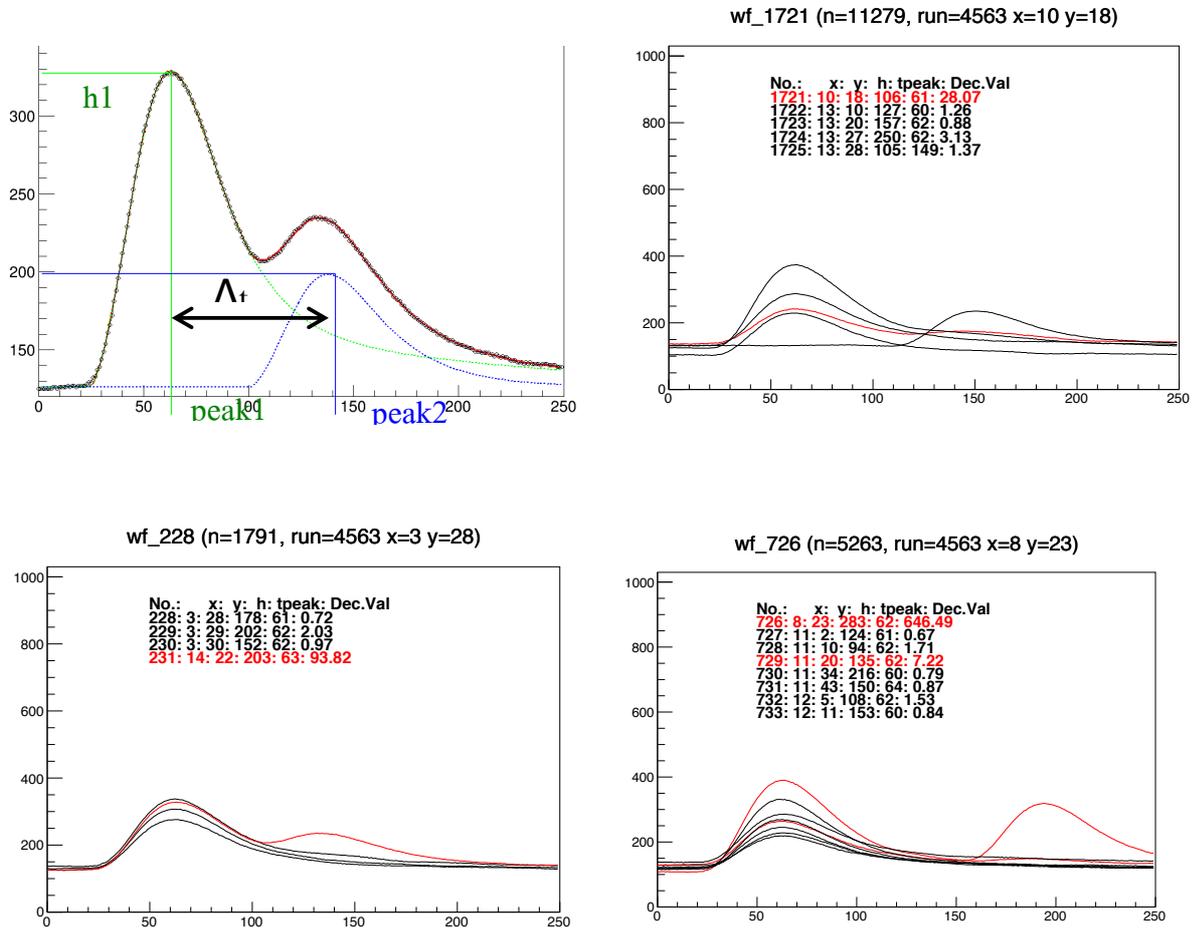


図2. ダブル波形のフィッティングの様子とイベントディスプレイ

## 4. 結果

ダブル波形は以下の条件で決定した。

$$V_D > 2 \otimes 55 < t_{\text{peak}} < 65 \otimes \chi^2 < 500 \otimes h_2 > 20 \otimes \Delta t > 2.4 \text{ us}$$

図3に結果を載せる。Kmu2によるキャリブレーション測定の校正係数を当てて、最大53 MeVのエネルギー分布が観測されたことから、矛盾していない結果が得られた。しかし、ミッシュェルスペクトラムに近似できない分布である。なぜか。

右図は2つの波形ピークの時間差分布を示す。これはミューオンの平均寿命を示し、ちょうど指数関数でフィッティングすると2usの減衰が観測できた。

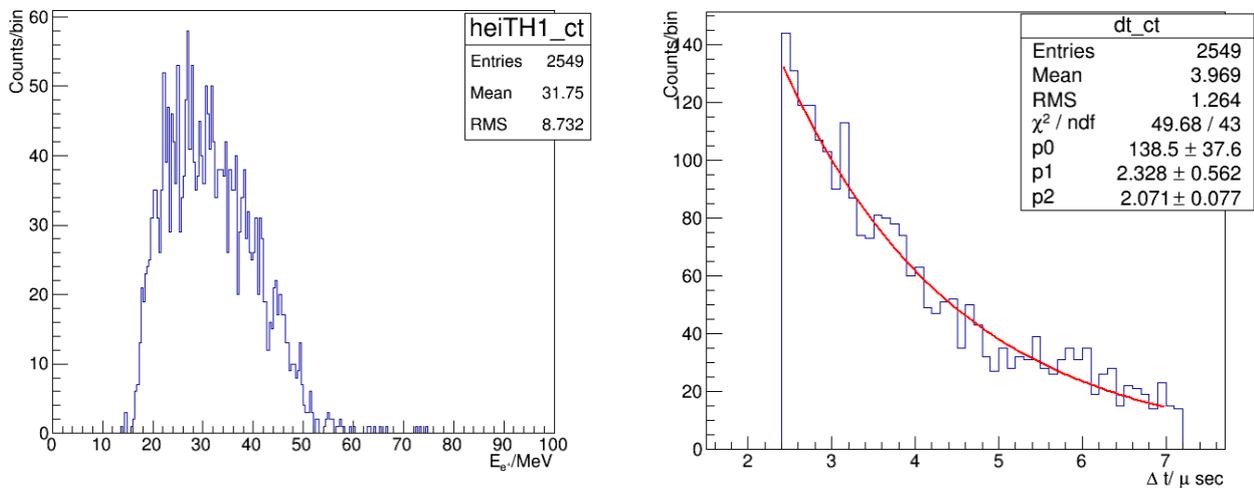


図3. セカンド波形の波高分布とピーク時間差分布

## 5. まとめと今後の展望

波形だけを見てダブル波形フィットして2つ目の波形情報を取得するとミューオン崩壊時に放出される陽電子の最大エネルギー53 MeVが観測できた。ミッシュェルスペクトラムに近似できなかったのは、イベント番号 n=11279 のイベントディスプレイに示すように同じイベント内で2つ目の波形が隣の結晶で見られることがあり、それらの和を取らなければ本来の陽電子全エネルギーは得られない。そのため高エネルギー領域(40-50 MeV)が低く見えてしまう。

今後はイベントごとにいくつもの波形を見ていきダブル波形があるのか、そして2つ目の波形があるところにシングルでも波形が存在するかを確認する。これでミッシュェルスペクトラムを得られるか調べる。