

## J-PARC E36 実験用 CsI(Tl)カロリメータのエネルギー校正測定

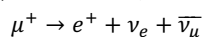
結晶内静止  $\mu$  崩壊シミュレーション

## 1. はじめに

J-PARC E36 実験用 CsI(Tl)カロリメータのエネルギー校正測定を終わり、全 768 チャンネル中 715 チャンネルの校正係数と分解能が得られた。波形模型関数を開発し、生データとの比較から  $\delta A = 4.48 \times 10^{-3}$ ,  $\delta S = 9.35 \times 10^{-4}$ ,  $\delta T = 2.04 \times 10^{-2}$  の性能が得られた。この結果二重波形の分離、パイルアップ補正、オーバーレンジ補正が可能になった。宇宙線ミューオンが結晶内で静止し電子( $e^-$ )または陽電子( $e^+$ )とニュートリノ 2 個( $2\nu$ )が放出される。二重波形の 2 つ目の信号波高分布は  $e^+$  の運動エネルギーに相当するが、相対論的量子力学で説明できるエネルギースペクトラムに一致しなかった。宇宙線を用いたエネルギー校正法を確立させるためにはエンドポイントを決定する必要がある。

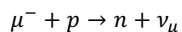
## 2. GEANT 4 シミュレーション

CERN が開発したモンテカルロシミュレーションである GEANT4 version 10.02 を用いて CsI 結晶内での  $\mu$  崩壊の振る舞いを計算した。結晶模型は E36 実験で使用された実機サイズの仕様を採用し、図 1 に示す。結晶中心で  $\mu$  を崩壊させて結晶内で落とし全エネルギーを崩壊毎に測定する。 $\mu^+$  は弱い相互作用



によって崩壊する。ニュートリノは結晶を通過しエネルギーをほとんど落とさない。陽電子が放出した後結晶内で対生成、制動放射(Bremsstrahlung)によって  $\gamma$  線のシャワーと成長していく。無電荷粒子では結晶から抜ける可能性があり、有限の体積を持つ検出器の場合は陽電子がもつ全エネルギーより低く換算される。

$\mu^-$  は弱い相互作用によって崩壊するチャンネルに加え原子核捕獲



が起こり原子番号に依存した短時間の寿命で崩壊するチャンネルが開く。そのため  $\mu^+/\mu^-$  比がエネルギースペクトラムに大きく影響してくる。

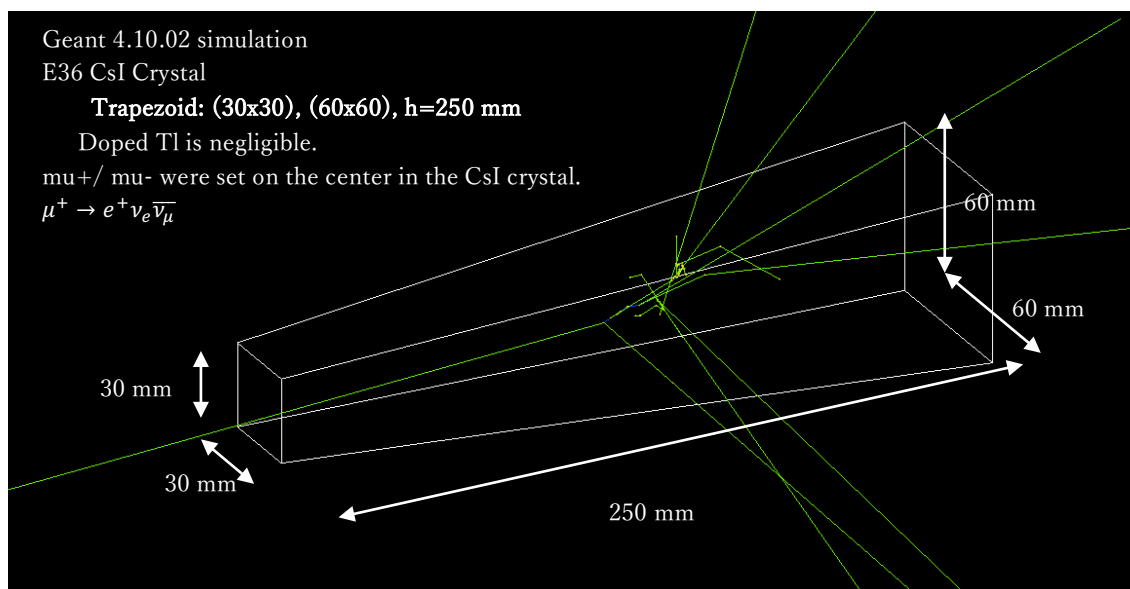


図 1. E36 CsI Crystal model in Geant 4 simulation.

### 3. 結晶内損失エネルギー

$\mu^+$ 崩壊後放射される陽電子の運動量はミッシュェルスペクトラムと呼ばれる特有なスペクトラムが得られることが知られている。シミュレーション結果を図2に示す。黒ヒストグラムは陽電子が生成する $\gamma$ 線シャワーの漏れが無視できる結晶サイズに設定した場合における $\mu^+$ 崩壊後結晶に落とすエネルギー総和の分布を示す。 $e^+$ の無視できる質量からエネルギー分布 MeV はすなわち運動量分布 MeV/c と近似でき理論値として理解される。緑ヒストグラムは同様な大きな結晶における $\mu^-$ 崩壊後の全エネルギー分布を示す。 $\mu^+$ と打って変わって2つの要素を持つ。一つは平均15 MeVにピークを持ち、もう一つは最大100 MeVにテイルを伸ばす。青ヒストグラムと赤ヒストグラムはそれぞれ、実際に使用したE36 CsI結晶モデルサイズにおける $\mu^+$ と $\mu^-$ の全エネルギー分布を示す。 $\mu^+$ 崩壊後の陽電子が生成する $\gamma$ 線シャワーは結晶から漏れて全エネルギー検出されず20 MeVにピークを持つような分布を持つ。 $\mu^-$ 崩壊については結晶が小さくなったことでエネルギーが漏れる事象が増えることは理解できるが、そもそもの2つの要因が理解できていない。

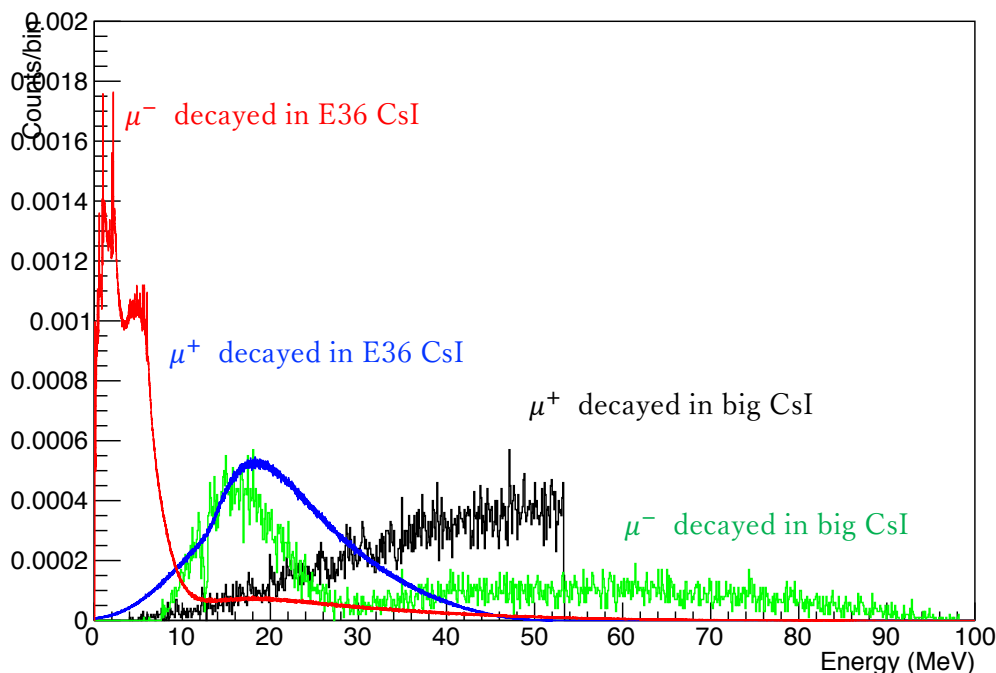


図2. Energy spectrum for  $\mu^+/\mu^-$  in each CsI crystal.

### 4. 結果と考察

実験データと比較して $\mu^+$ と $\mu^-$ のエネルギーを図3に示すように比較する。黒点は実験データを示し、CsI検出器でHitCrystalが1つでかつダブル波形である事象を選択し、その時のSecond Pulseの波高値を出力している。青破線は $\mu^+$ のエネルギー分布、赤破線は $\mu^-$ のエネルギー分布を示し、その和をマゼンタ実線で示す。 $\mu^+/\mu^-$ の電荷比を1としてフィッティングした場合、 $\chi^2$ が良くない結果が得られた。また、電荷比に関しては1~1.3が予想されたが、自由パラメータとして設定するとフィットパラメータ限界に振り切れてしまいうまくいかなかった。シミュレーションが実験の状況と一致していないのではないかという懸念が生まれる。一つは結晶の中心で崩壊させたが、宇宙線は結晶一様にヒットしているはずだ。その条件を入れるべきではないか。

実験データの事象選択でHitCrystal=1を条件にすると一つの結晶で全ての陽電子からエネルギーを落としているはず。なのに分布がミッシュェルスペクトルに近づいていない。隣の結晶に漏れているがしきい値を超えないために検出器で感知されていないと考えられる。つまり、フィットが合わないのは見ている状況が違うといえる。

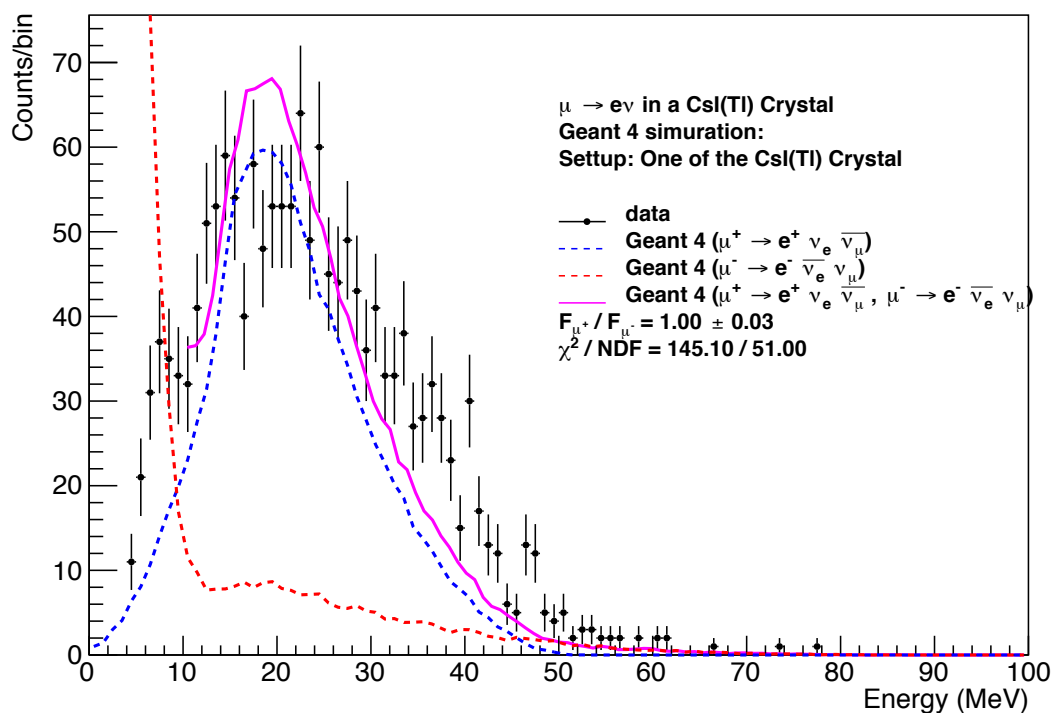


図3. E36 CsI Crystal model in Geant 4 simulation

### 5. まとめと今後の課題

Geant 4 を用いて CsI 結晶内ミュオンの崩壊を調べ、実際の現象と比較した。ヒストグラム由来の自由関数を定義しフィット関数に採用する技術を研究室単位で確立しシミュレーション値とのフィットを成功させた。今回の仕事から今後の課題が見えてきた。

- (1)  $\mu$  崩壊の2つの要素について理解すること:
  - > 図2の緑ヒストグラムの曲線は見たことがない
  - > 電子の運動量と結晶内損失エネルギーの違いがあるのだろう。(Geant4)
  - > 崩壊してできる原子核との差はあるか?
- (2) 実験データを二重波形のみを選択して同様にフィットしてみる。
  - > 持ってくるデータを選んでくる。(itohiro in kek 計算機)
  - > フィッティング(ROOT)
- (3) 他の結晶にエネルギーが漏れている事象についてのアプローチ:
  - > 他の結晶にも検出器を個別に用意し tree で格納する。(Geant4)
  - > 他の結晶に漏れた場合、事象選択除去の条件を 20 MeV 以上に設定してみる(Geant4)