

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 μ 崩壊

1. はじめに

Geant4でシミュレーションした結果 μ^- の崩壊によるCsI結晶内エネルギー損失分布が説明できなかった。Muon captureで説明できるのだろうが、我々が理解していなかったため詳細を詰めることにした。また実験結果においてエネルギーしきい値が20 MeVに設定されたため隣に制動放射等で漏れたエネルギーが観測できないバグを報告した。宇宙線の μ^+/μ^- 比を観測しエンドポイントを決める必要がある。本稿はこれらの問題についてアプローチして解析した。

2. μ^- 崩壊の解釈

μ^+ は弱い相互作用によって崩壊する:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

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。陽電子は結晶内で対生成や制動放射(Bremsstrahlung)を繰り返して γ 線のシャワーと成長し結晶から抜ける。 μ^- は弱い相互作用によって崩壊するチャンネル

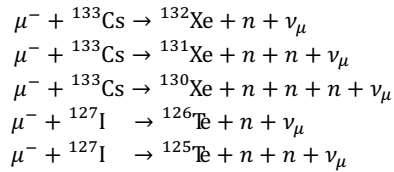
$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

に加え原子核によるミュオン捕獲(muon capture)

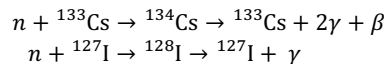
$$\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu$$

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き結晶内エネルギー分布が陽性時とは異なる(図1右)。

各崩壊チャンネルに割り振るために計算上生成された粒子ごとに判別した。各種によって異なった振る舞いが図1右に示された。 $\bar{\nu}_e$ が生成された場合は弱い相互作用なので判別は容易で赤線で示される。生成された ^{132}Xe はCsI結晶内の ^{133}Cs がミュオン捕獲で核内の陽子が中性子に変換したと解釈できる。他の各種についても同様に考えられ以下に示すような崩壊が考えられる。



これらの生成核種の頻度を図1左に示す。陽子も放出して2段階原子番号Zを下げる事象も数%の割合で起こる事もシミュレートされた。計算上100%以上の頻度を示す ^{133}Cs , ^{134}Cs , ^{127}I , ^{128}I はミュオン捕獲後に放出された中性子を吸って質量数が1上昇し崩壊して元に戻る事象



であると考えられる。

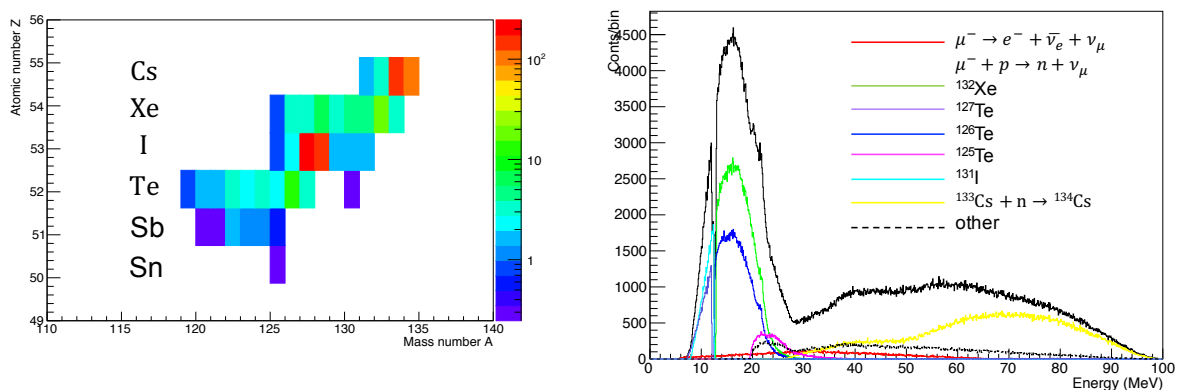


図1. 崩壊チャンネル生成割合分布(左)、崩壊チャンネルにおけるエネルギー分布(右)

3. 結晶内損失エネルギー

信号検出のしきい値は約 20 MeV に設定されている。そのため漏れたエネルギーは 20 MeV を超えないと感知できない。前回のデータのフィッティングでは失敗したが、その原因はフィット領域にあったと考えられる。特にセカンドパルスが優勢の場合しきい値エネルギーは 20 MeV なので、しきい値未満の情報は不確かになる。また図 2 (左) に示す通りミュオン優勢でもポジトロン優勢でも 5 MeV が波形認識の最小限界であると考えられる。この結果からフィット領域の下限値は 20 MeV に決定した。

実験データと比較して μ^+ と μ^- のエネルギーを図 2 (右) に示す。実験データ (黒点) はダブル波形が存在する事象においてその結晶の Second Pulse の波高値を示す。 μ^+ (μ^-) は結晶に対して一様に静止し崩壊するとして計算した。 μ^+/μ^- の電荷比を自由パラメータとしてフィッティングし、 $F_{\mu^+}/F_{\mu^-} = 1.10 \pm 0.22$ が得られた。予想値である 1.0~1.3 の領域を満たし矛盾しない。これによりエンドポイントが決定され、エネルギー校正に導入できる。

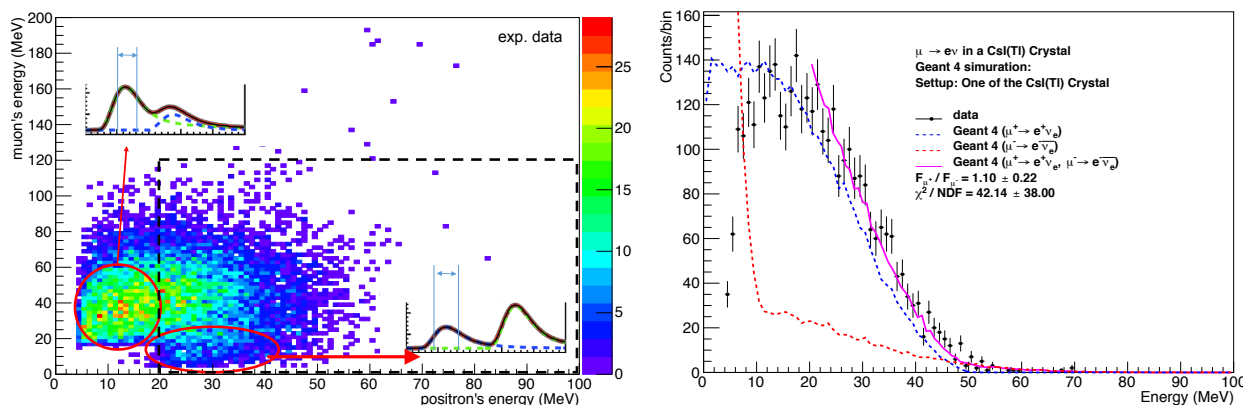


図 2. 実験データによる μ^+ と e^+ の損失エネルギー分布 (左)、 e^+ の損失エネルギーの実験データと理論計算による比較 (右)

5. まとめと今後の課題

本稿でエネルギースペクトルの問題は解決したとみている。まだエネルギーしきい値を下げたことによる漏れたエネルギーの総和によってミッシュェルスペクトラム再現の検証は課題に残す。 μ^- の崩壊における原子核のミュオン捕獲による解釈も次第に理解できるようになった。核子生成もリスト化できたがエネルギー損失においてなぜこのようなエネルギー損失か説明できていない。生成される核子によってエネルギー帯が異なる理由は何かが今後の課題だろう。

9月の日本物理学会では静止 K を用いたエネルギー校正を中心に校正係数、エネルギー分解能、ダブル波形事象を用いて S/N の向上について議論する予定。来週はそこを詰める予定。10月の IEEE NSS では宇宙線を用いた校正法について議論するのだから、今回の結果に加えて崩壊寿命について時間情報のアプローチも忘れてはいけない。今後の課題であろう。