

日本物理学会 第 72 回年次大会 発表成果報告書

19pK34-7

J-PARC E36 実験: $\Gamma(K^+ \rightarrow e^+\nu_e)/\Gamma(K^+ \rightarrow \mu^+\nu_\mu)$ 測定による
 レプトン普遍性破れ探索実験のガンマ線測定 最適化の研究

目次

1. 研究背景：レプトン普遍性破れ探索研究
2. J-ARC E36 実験と検出器
3. Radiative Decay Channel
4. CsI(Tl)カロリメータ
5. 波形解析による時間分解能評価
6. $K\pi 2$ 崩壊事象による波形解析の妥当性
7. 結論
8. まとめと今後の課題

1. 研究背景：レプトン普遍性破れ探索研究

K^+ 中間子(以降 K^+)のセミレプトニック過程における2体崩壊は親核子の形状因子 f_K とレプトンの g_l 因子、そしてフェルミ定数 G 、質量 m の関係で計算されることがよく知られている。

$$\Gamma = g_l^2 \left(\frac{G^2}{8\pi} \right) f_K^2 m_K m_l^2 \left\{ 1 - \left(\frac{m_l^2}{m_K^2} \right) \right\}^2$$

素粒子標準模型(SM)ではこの g_l がレプトンの種類によって等しいと仮定して計算されるため、崩壊仮定($K^+ \rightarrow e^+\nu_e$)と($K^+ \rightarrow \mu^+\nu_\mu$)との比は g_l, f_K, G がキャンセルされ分岐比 R_K は以下で与えられる。

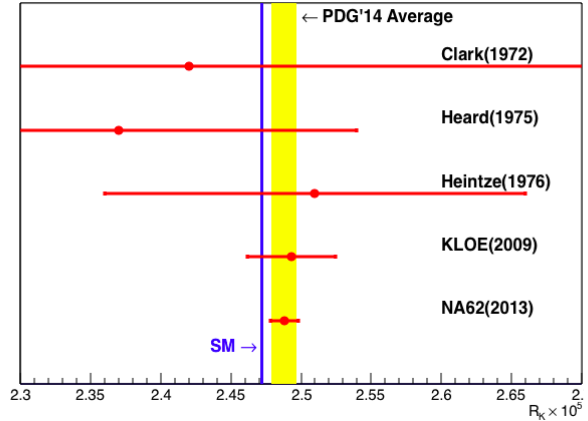
$$\begin{aligned} R_K &= (K^+ \rightarrow e^+\nu_e)/(K^+ \rightarrow \mu^+\nu_\mu) \\ &= \frac{m_e^2}{m_\mu^2} \left(\frac{m_K^2 - m_e^2}{m_K^2 - m_\mu^2} \right)^2 (1 + \delta_r) \\ &= (2.477 \pm 0.001) \times 10^{-5} \end{aligned}$$

ここで、 δ_r は制動放射の補正を示す。つまり R_K は親核子、娘核子の質量の関係だけでほぼ精密決定される単純な値である。

しかし g_l がどのレプトンでも等しいという仮定が成り立たなければ、 R_K はSM値からずれるはず。そこで R_K を精密に測定してSM値から統計的優位に逸脱した結果が得られた場合、この R_K に標準模型を超える新たな物理を含んでいる。

1972年から R_K は測定されており、2013年にNA62実験グループが報告した結果が最新版で測定制度は世界記録を達成した。その値は

$$R_K^{\text{exp}} \times 10^5 = 2.488 \pm 0.007(\text{stat}) \pm 0.007(\text{sys})$$



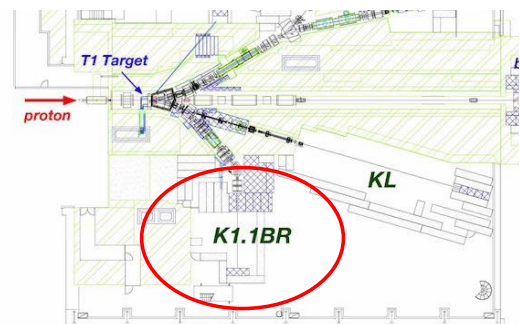
で、測定制度は0.40%だ。この結果では統計優位は 1.1σ であり、まだ優位にSMから逸脱しているとは言えない。測定制度をあげて探索する余地が残されている。J-PARCE36実験では測定制度0.25%未満を目標にしている。

もしレプトン普遍性が破れているとしたら、候補としてレプトン数保存則の破れをもったSUSY模型¹⁾が予言されていて、以下のように補正される。

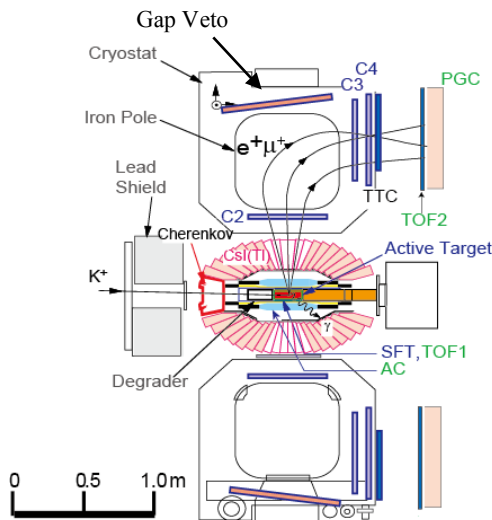
$$\begin{aligned} R_K^{\text{LFV}} &= R_K^{\text{SM}} \left(1 + \frac{m_K^4}{M_{H^+}^4} \frac{m_\tau^2}{m_e^2} \Delta_{13}^2 \tan^6 \beta \right) \\ &= R_K^{\text{SM}} (1 + 0.013_{\text{max}}) \end{aligned}$$

2. J-ARC E36 実験と検出器

J-PARC E36実験はKLOEやNA62実験とは異なり静止 K^+ を用いて R_K を測定する点が特徴的で、2015年10月から12月にかけてJ-PARCハドロンホールK1.1BRビームラインで物理実験が行われた。下図にビームラインの配置図を示す。



検出器は KEK-PS E246 実験で使用した検出器をアップグレードして開発された。トロイダル磁石に 12 対称性になるようにセグメント化して、装置を配置した。横から見たものは検出器を輪切りにした断面図。左から K^+ が入射し、Which Cherenkov Counter でビームの π^+/K^+ 識別をして K^+ を選択する。Active Target で K^+ は静止するが、Target は 3mm 四方で短冊状のプラスチックシンチレータに波長変換ファイバーを埋め込み、その方側末端に MPPC を貼り付けて、静止した K^+ の位置と発生したレプトンの軌道を観測する。粒子識別は屈折率 1.08 のシリカエアロゲルを用いた Aerogel Cherenkov Counter とプラスチックシンチレーション検出器 TOF1(スタート)と TOF2(ストップ)の時間差(Time of Flight)、鉛ガラスチェレンコフ検出器で e^+/μ^+ 識別する。 K^+ の Radiative Decay Channel で放射されたガンマ線は CsI(Tl) カロリメータと鉛サンドウィッチカロリメータで観測される。



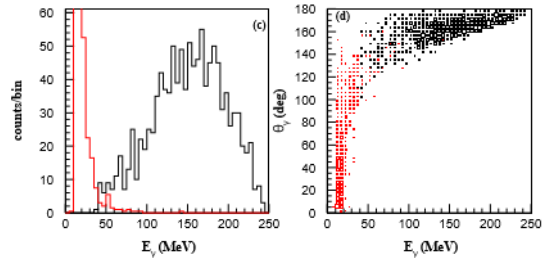
3. Radiative Decay Channel

終状態ガンマ線を放出する崩壊チャンネルの内、内部制動放射(IB: Internal Bremsstrahlung)は R_K の計算に含み、SD: Structure Dependent な崩壊チャンネルは含まない。以下に式を示す。

$$R_K = \frac{\Gamma(K_{e2}) + \Gamma(K_{e2\gamma}(IB))}{\Gamma(K_{\mu2}) + \Gamma(K_{\mu2\gamma}(IB))}$$

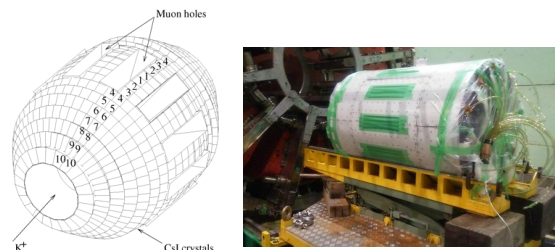
SD は分岐比がおよそ 9.4×10^{-6} で IB に比べ 100 倍程度多い。そのためオフライン解析で分離する必要がある。下に Geant3 モンテカルロシミュレーションで計算した結果を示す。ここで赤が IB で黒

が SD を示す。左図はガンマ線のエネルギー分布、右図は横軸ガンマ線のエネルギー、縦軸レプトンとガンマ線との開口角度のスキッタプロットである。明らかに IB はエネルギーが 0-50 MeV の領域で角度は 0-80 度に分布している傾向があり、SD はエネルギーが 50-250 MeV と比較的高く、角度も 140-180 度で崩壊する傾向がある。これによって IB と SD を分離する。



4. CsI(Tl)カロリメータ

ガンマ線は 768 個の CsI(Tl)結晶で構成されたカロリメータで観測される。このカロリメータは直径約 1.0 m で奥行き 1.4 m 約 1.7 t の重量、そして K^+ ビームの入射窓、12 個のミュオンホールの特徴をもつ。



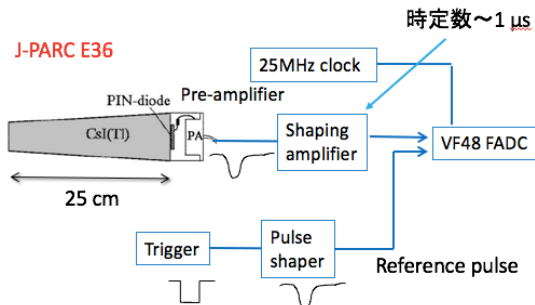
上底面 3 cm x 3 cm、下底面 6 cm x 6 cm、奥行き 25 cm の四角円錐台の CsI(Tl)結晶の下底面に PIN ダイオードを貼り付け、シンチレーション光を読み出す。

信号は Pre Amplifier で増幅される。KEK-PS E246 実験では増幅後は 2 系統に分岐して、一方は Fast Amplifier で整形された後、CFD で論理信号にして TDC で時刻を読み出され、他方は Shaping Amplifier で整形された後、ピークホールド ADC によってエネルギーを読み出された。

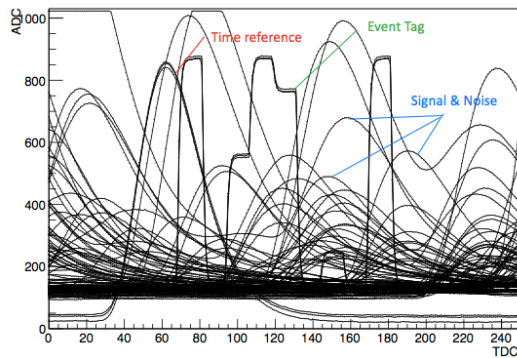
J-PARC の実験ではビーム強度が 100 倍ほど増加することが予期された経緯からパイルアップが無視できなくなり、Flash ADC で波形解析によってパイルアップを分離補正し時間とエネルギーを測定する方法が採用された。E246 と比較して Pre Amp. までは同じで時定数 $1 \mu s$ に設定された Shaping Amp. で波形整形され VF48(FADC)で読

み出される。VF48 は 25 MHz サンプリングレートに設定され、同時にトリガー信号も reference として VF48 に入力することで 40 ns の clock 間を補間することができる仕様にした。そもそも CsI(Tl)からのシンチ光は遅く、1 μ s の Amp.の信号を波形解析によってどこまで時間分解能が向上するか、そこが解析において挑戦的なポイントである。

下に 1 イベントの波形データを示す。タイミングが揃っている 3 つの波形はトリガー信号で clock 間を補間する。矩形な波形はイベントタグでイベント



ントスリップしているかを確認できる仕様。他の波形はほとんどがビーム由来のノイズで信号は 60-65 TDC の領域に 1 つ存在する。E36 実験では高い統計量が要求されているため、トリガーゲートを広げて雑音が入ることのジレンマのなかで CsI(Tl)のゲート幅は 10 μ s に設定された。



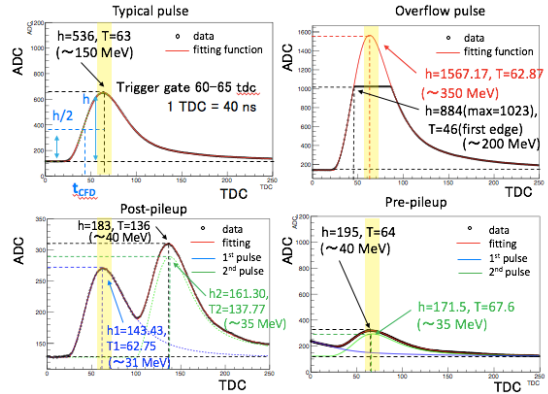
5. 波形解析による時間分解能評価

典型的な波形は下図に示されている。黒丸がデータ点、赤線がフィッティング関数をそれぞれ示している。この模型関数を利用してオーバーフロー波形を再構成することに成功、さらにパイルアップした波形についても分離識別することに成功している。

パイルアップ波形には Post-pileup, Pre-pileup の 2 種類が存在する。前者は信号の後に雑音が入り込むもので、小さい雑音ならば信号に悪影響を与えないのだが、大きくなると波形解析しなけれ

ば雑音のタイミングとエネルギーを返すため邪悪である。また、後者は信号の前に雑音に乗る事象で、たとえ小さい雑音でも信号を底上げするため、分離してエネルギーと時刻を補正する必要がある。そのため、波形解析は重要になる。

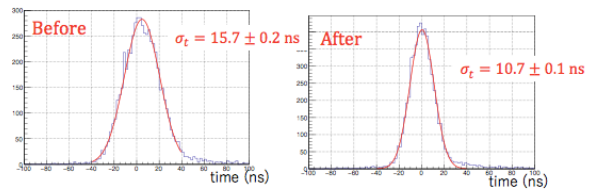
前回の学会発表で波形模型関数の開発とエネルギー校正測定に関しては報告済なので、本稿では



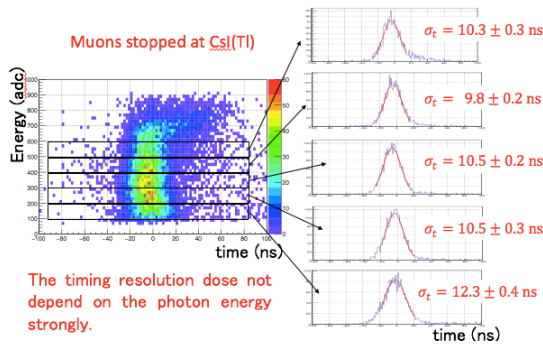
波形解析による時間分解能評価について報告する。ガンマ線のタイミングは波形のピーク値をとるよりも立ち上がり時刻を用いたほうが分解能がよくなることはよく知られているのでちょうど波高の半分になる時刻を採用した。同じく time reference の時刻も波高の半分になる立ち上がり時刻を採用している。clock 間を補間するためにガンマ線のタイミングは

$$t = t_{\text{sig}}^{\text{CFD}} - t_{\text{ref}}^{\text{CFD}}$$

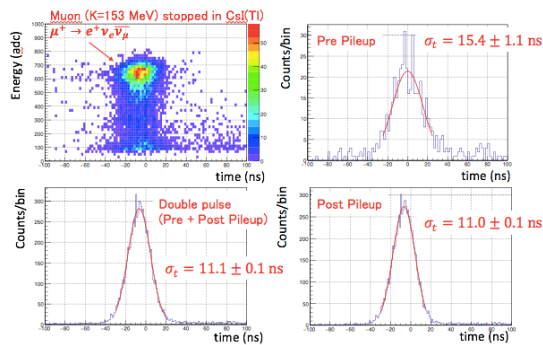
で定義される。下に補正前と補正後の比較を示すが、補正前は標準偏差 15ns の分解能、補正後は標準偏差 10ns で明らかに向上している。



まずシングル波形だけに関して分解能を評価した。時間分解能のエネルギー依存性は下図のスキッタプロットからあまりないように思える。ここでプロットの高エネルギー領域(700 adc 以上)は明らかなビームからの雑音であるため分解能評価では省いている。100-600 adc の領域で輪切りして分解能のヒストグラムを確認すると、低エネルギー領域では 12ns と悪いが、それ以上高い領域は 9.8-10.5ns で安定している。

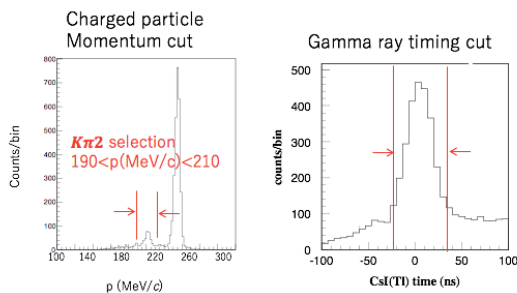


次に二重波形に関して分解能を評価した。下図にスクヤットしたプロットを示す。600-700 ADCの分布はミュオンが CsI(Tl)結晶内で静止した事象を示し、陽電子を放出したことで二重波形になっていることから説明できる。同様に射影してヒストグラムをみると分解能が 11 ns と評価された。これは Post, Pre-pileup どちらも含んでいるので、別々に評価すると、Post-pileup は変わらず標準偏差で 11 ns、Pre-pileup は標準偏差 15 ns で性能が悪い。やはり雑音を含んでしまうことで悪化し、再構成の限界なのであろう。



6. $K\pi^2$ 崩壊事象による波形解析の妥当性

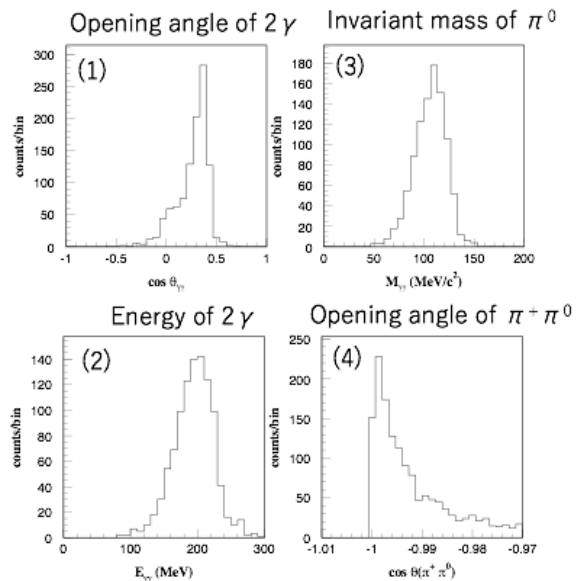
CsI(Tl)の波形解析におけるガンマ線測定が妥当であるか $K\pi^2$ 崩壊事象にガンマ線情報を導入して検証した。スペクトロメータで測定した運動量領域は $190 < p(\text{MeV}/c) < 210$ の領域で事象選択し、そしてガンマ線の CsI(Tl)到達時刻は $-25 < t(\text{ns}) < 35$ の領域で事象選択した。ここでさらに素性が良い結果を出力するため、 π^+ と π^0 が反対方向に放射したことを要請し、 $\cos \theta < -0.97$ で事象選択している。



以下に結果を示す。(1) 2つのガンマ線の開口角度 (Opening Angle) は π^0 の運動学的な性質から $\cos \theta = 0.4$ にピークを持ち、 $-0.5 < \cos \theta < 0.5$ の連続的な分布を持つ。これは π^0 から崩壊した 2 gamma は back to back にランダムで崩壊するが、Lorentz boost によって連続的な角度分布を説明することができる。(2) 2 ガンマ線のエネルギー和の分布。(3) π^0 の Invariant mass は 2つのガンマ線のエネルギー和と運動量の関係から質量を計算したもので以下の式で現れる。

$$M_{\gamma\gamma} = \sqrt{2E_1E_2(1 - \cos\theta)}$$

ここで E_1, E_2 は 2つのガンマ線のエネルギーを示す。139 MeV/c²にピークがないのは結晶内でのシャワーリークが原因でシミュレーション結果とも一致する。(4)そして π^+ と π^0 の開口角度である。Back to Back に崩壊しているものだけを選出している。実は $\cos \theta$ に関してテイルが存在し、それらを含めると以上の分布が悪化する。おそらくビームもヒット時刻にまぎれてしまうためと考えられ、これから以下に雑音波形を抑制するかが鍵になってくる。



7. 結論

1 μs の shaping amp.を使用した波形解析でシングル波形に関しては 9.8-10.5 ns(σ)、post-pileup に関しては 11 ns(σ)、pre-pileup は 15 ns(σ)の時間分解能が得られた。

K π^2 崩壊事象にガンマ線の情報を組み込んで検証した結果、妥当な分布が得られたので CsI(Tl)カロリメータは正常にガンマ線を観測していることが証明された。

8. まとめと今後の課題

E36 実験の検出器解析において CsI(Tl) の波形解析は非常に重要で radiative decay channel を分離するために必要不可欠である。今回の学会では波形解析における時間分解能の評価結果を報告し、Kpi2 崩壊事象で確認し妥当であると証明した。

pre-pileup で分解能が 15ns と悪く、シングル波形においても 10ns しか分解能が出ない理由として波形模型関数の不完全性が挙げられる。特に立ち上がりの不連続性を解消することでより分解能は向上するだろう。そして SD 解析において形状因子の決定を行い、RK のバックグラウンドの研究をすすめることが今後の課題だ。