K 中間子の物理

発表：藤原 庸博
報告：野村 正

1　はじめに

高エネルギー物理学研究室の標榜する一方の柱「CP 非保存」の研究では、K 中間子、B 中間子の両面からのアプローチを行っている。今回は K 中間子の稀崩壊過程を通じたフレーバー物理の探求に絞り、京都グループの関わるプロジェクトをピックアップして報告する。

標準理論においてクォークセクタの混合および CP 非保存位相の導入を司る小林–益川行列は、フレーバー物理の骨格をなす存在となっている。したがって、その行列要素の確認や複素位相の存在を精査することは、標準理論の検証のみならず、さらに背後に隠れている「Beyond the Standard Model」への足掛かりであり、また、レプトンセクタでの研究の方向性に示唆を与えるものとなる。京都グループでは、B 中間子での研究と相補的な位置にある K 中間子の稀崩壊過程を通した検証に取り組んでいる。理論計算による不定性が少ない $K \to \pi\nu\bar{\nu}$ の測定は、観測結果を直接的に小林–益川行列へと結びつけることの可能なチャネルであり、非常に困難な実験であるものの、そのチャレンジに見合うだけの物理成果が期待できる。

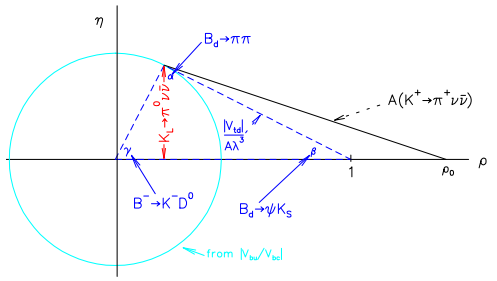

図 1: 小林–益川行列のユニタリ条件を示す三角形と関連物理過程。

ここでは $K \to \pi\nu\bar{\nu}$ を軸に展開している当グループの関連プロジェクト、BNL-E787 とその増強版である E949 実験 (荷電 K 中間子)、KOPIO 実験 (中性 K 中間子) について報告する。最後に、E787 実験のバイプロダクトで、博士課程の藤原が精力的に解析を進める輻射過程 $K^+ \to \pi^0\mu^+\nu\gamma$ にも触れる。

2　$|V_{td}|$ の測定：$K^+ \to \pi^+\nu\bar{\nu}$ (BNL-E787/E949 実験)

2.1　BNL–E787 実験

K 中間子における $K \to \pi\nu\bar{\nu}$ 過程はクォークのフレーバーが s(ストレンジ) から d(ダウン) へと変わる中性カレントによって起こるが、標準模型ではそのような直接的遷移は存在しないため、トップクォークなどを含むループダイアグラムからの寄与を観測することになる。この場合、ループを回る粒子の質量が重い方が寄与が大きく、したがって荷電 K 中間子の稀崩壊過程である $K^+ \to \pi^+\nu\bar{\nu}$ モードではトップのループとの混合カップリング定数 V_{td} の絶対値情報を得ることができる。(但し、チャームの寄与も存在する。) 他の実験結果から制限付けられたパラメータを使った時の標準理論による予想値は 0.8×10^{-10} となっている。

アメリカ・ブルックヘブン研究所で行われた BNL-E787 実験は、この過程を 10^{-10} の感度、つまり理論予想値周辺まで探索し、観測をめざす実験である。K^+ ビームを標的中で静止させ、その崩壊による π^+ をとらえ、かつ、他には何も崩壊粒子がないことを保証することでイベントの同定を行う。

但し、粒子の不在を証明する検出器 (ヴィトカウンター) の検出効率がバックグラウンドの個数評価に直結してしまうので、それのみに依拠する危険を避けるため、また、検出効率を実験的に評価し続けるために、荷電粒子の情報 (エネルギー、運動量、レンジ) を測定して運動学的な側面からもイベント同定を行えるようにしている。この冗長性は信号イベントやバックグラウンド事象の個数評価に信頼性を持たせるものとなっている。

BNL-E787 実験は 1995 年のランの結果より、世界で初めてこのイベントを観測し、2001 年 11 月には 95 年から 98 年に収集された全データを合わせた結果として、2 イベントの観測とそれに基づく分岐比 $1.57^{+1.75}_{-0.82} \times 10^{-10}$ を発表している[1]。なお、バックグラウンド数の期待値は 0.15 イベントと評価されている。

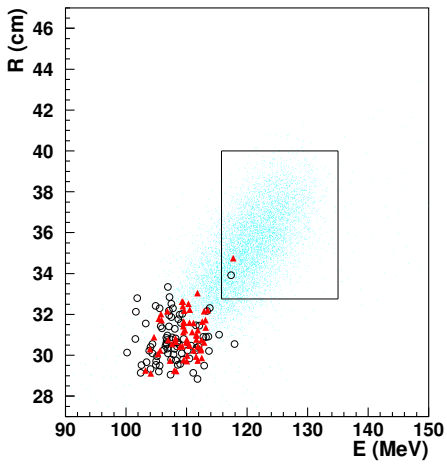

図 2: E787 実験の最終結果を示すプロット。(Phys.Rev.Lett.**88**, 041803 (2002) より)

2.2 BNL–E949 実験

E787 実験の結果は標準理論の予想値に対して、約 2 倍の分岐比を与えている。もちろん少数統計であるので、いまだ理論との差を議論できる状況にはなく、さらに感度の高い実験で確認をしなければならない。E949 実験は E787 測定器を基礎として約 10 倍の感度を目指す実験である。$K^+ \to \pi^+\nu\bar{\nu}$ イベントをビームの強度を高くする、トリガーシステムの改良など、単位時間あたりのイベント感度を増すエフォートと同時に、ヴィトカウンターの増強やビームカウンターやレンジカウンターの改良など、バックグラウンド排除能力の向上の両面からグレードアップをはかっている。2001 年 9 月からの 2ヵ月のエンジニアリング・ランによる調整を終えた後、2002 年初めから 6 月第 1 週まで物理データを収集した。現在、詳細なキャリブレーションなど、物理解析のための準備段階にある。E949 実験は 2003 年 1 月よりデータ収集を再開し、さらに 1 ~ 2 年のランを予定している。

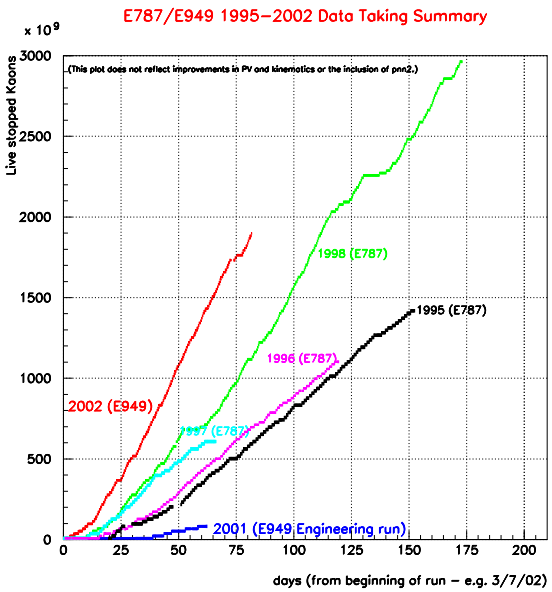

図 3: E949 実験のデータ収集状況。

京都グループは、検出器の増強の内、荷電粒子のエネルギーとレンジを測定するレンジスタックカウンターのゲイン変動モニターの建設を担当し、ラン中でのゲイン変動をつぶさにモニターすることを可能にした。実際、ビーム強度に依存したゲイン変動をとらえることができており、このモニターデータを使った補正により、エネルギー分解能の改善、ひいてはバックグラウンド排除能力の改善、あるいはイベントアクセプタンスの増加を期待されている。

[1] E787 実験のメインは京都グループ参加前のため、貢献はなく Authorship はない。

3　CP 非保存複素位相の測定：$K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ (KOPIO 実験)

中性 K 中間子が K^0 と $\bar{K^0}$ の混合状態であることから、$K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 過程では V_{td} の複素成分 (Wolfenstein パラメータでの η) の 2 乗に比例する分岐比を持ち、したがって、この測定は CP 非保存位相の情報を直接狙うものとなっている。標準理論による予想値は 3×10^{-11} であり、やはり野心的な実験となる。

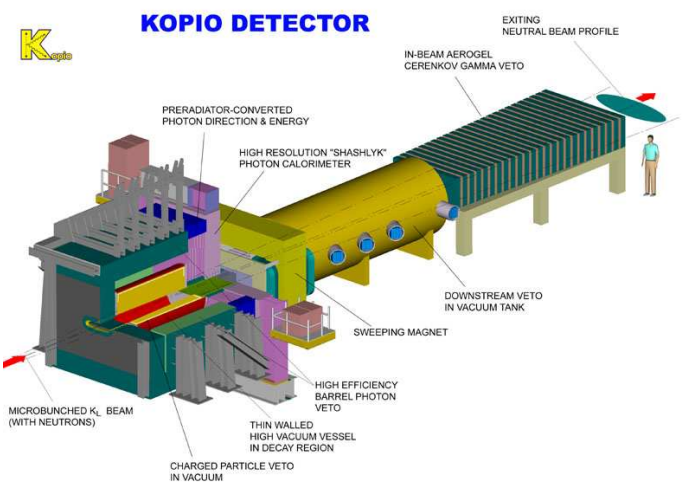

図 4: KOPIO 実験セットアップ。

KOPIO 実験は E787 実験と同様、ヴィトカウンターの排除能力にのみ依ることのないように、できるだけ多くの運動学量を測定しようというポリシーに立っている。親粒子、崩壊粒子 (π^0 さらにその崩壊の γ) ともに中性であることから、さらに困難を極める。ここではキーワードを挙げるに留めるが、マイクロバンチ構造を持つ陽子ビームと低運動量 K_L を利用した TOF 法、γ 線のエネルギーと方向の両方の測定、これによる運動学量の冗長性とヴィト能力との双方向チェックを通したバックグラウンド個数評価の多重性などが特徴となっている。現在、アメリカの NSF(National Science Foundation) において次期大型研究開発の物理部門でのトッププライオリティに位置しており、建設予算のアロケートを待っている状況にある。NSF より R&D のための予算はついており、日米協力事業やカナダでの予算などと合わせ、コラボレーション各機関で徐々に準備を進めている。

京都グループは、主に「in-beam」の光子 (ヴィト) 検出器を担当しており、中性子不感型の光子検出器の開発を行っている。鉛コンバータとエアロジェルチェレンコフ放射体の組合せを基本構造としたデザインが有力で、荷電パイオンによる光量測定、陽子による対中性子レスポンスの類推実験などの原理テストを行い、実機製作へのステップを着実に進んでいる。

4　カイラル摂動論の検証：$K^+ \to \pi^0\mu^+\nu\gamma$ (E787 実験)

E787 実験はメインモードの他にも様々な荷電 K 中間子の研究が可能で、多くのバイプロダクト物理が産み出されている。その中で、日本グループでは特に γ 線を含む過程の解析を精力的に進めている。

一般に荷電粒子を終状態に含むモードに輻射が加わる場合、内部的な制動放射による過程と K 中間子自身の構造によって直接放射される過程に分類できる。この内の直接放射過程を詳細に調べることで、低エネルギーでの有効場理論であるカイラル摂動論の検証をすることができる。荷電 K 中間子の輻射過程 $K^+ \to \pi^0\mu^+\nu\gamma$ は加えて π、μ、γ の運動量方向からなる三重積の非対称性を調べることで、時間反転対称性の破れを含む物理の寄与を探ることのできる可能性を持った興味深い崩壊モードである。実験的には

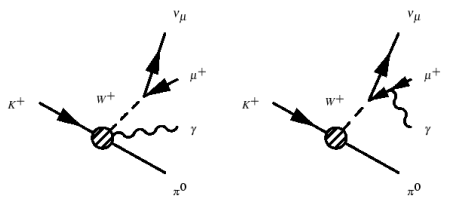

図 5: $K^+ \to \pi^0\mu^+\nu\gamma$ に寄与する内部制動放射と直接放射のダイアグラム。

現在までにイベントは観測されていない (分岐比上限値 6×10^{-5}) が、98 年までに収集された E787 実験のバイプロダクトトリガーによるデータ中に数百イベント含まれていると見積もられており、世界初のイベントの観測と直接放射過程の抽出、カイラル摂動論との比較を目標に解析を進めている。

E787 実験では崩壊荷電粒子をとらえ、そのエネルギーとレンジ、運動量を測定しており、三者の関係により π^+ であるか、μ^+ であるかの識別が可能である。また、3 つの γ 線 (輻射 γ と $\pi 0$ 崩壊) はバレル方向の光子検出器 ($K^+ \to \pi^+ \nu \bar{\nu}$ ではヴィトとして使われているもの) によりとらえられ、エネルギーと位置の情報を残す。この過程のイベント同定は、μ^+ および 3γ の存在と π^0 の最構築が可能であることによってなされる。ここで重要なことは、例えば輻射のない崩壊 $K^+ \to \pi^0 \mu^+ \nu$(分岐比 3%) は見たい過程 (分岐比予想値 2×10^{-5}) に対して非常に大きく、アクシデンタルヒットやシャワーの分派によって γ 線を余分に数えてしまうと大きなバックグラウンド源となる。また、 $K^+ \to \pi^+ \pi^0 \pi^0$(分岐比 6%) で粒子識別を誤り、かつ、逆に γ 線を見逃したり、または重なってしまったりして数を少なく間違えると、やはりバックグラウンドとして残ってしまう。従って、十分なバックグラウンド排除能力が必要であると同時に、残ってしまうバックグラウンド事象数の正確な見積りが重要である。E787 実験の特徴は二つの独立なカットを用意して、その各々を反転して残量を見積もることで、シミュレーションに強く依らない、測定に基づいたバックグラウンド排除能力を得られる点にある。例えば $K^+ \to \pi^+ \pi^0 \pi^0$ によるバックグラウンドの評価する場合は、μ でなく π であると認定されたイベントをわざと選び出してこのバックグラウンドをエンハンスした上で、γ 線の個数によるカットの排除能力を求める、逆に 4γ を含むイベントを選んでエンハンスした上で、荷電粒子識別カットによる排除能力を求める、という手法をとる。

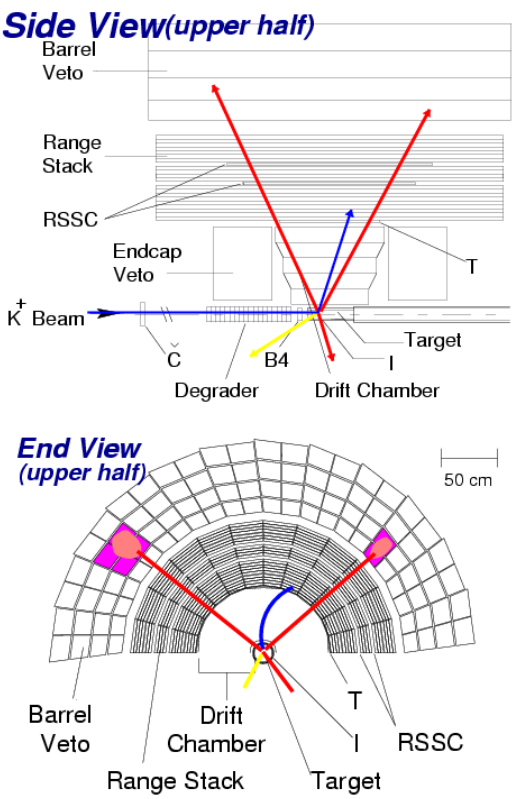

図 6: E787 検出器と $K^+ \to \pi^0 \mu^+ \nu \gamma$ 崩壊のイベントトポロジーの例。

現在までのところ、全体の $1/3$ のサンプルをモニターとして取り出し、これらの手法でイベント数とバックグラウンド数を評価しており、最終的には 100 イベント程度の観測、10 程度の S/N 比が見込まれている。このモードは博士課程の藤原が精力的に解析を進めており、今後、分岐比の算出や直接放射過程の抽出へと進んでいく予定である。