

J-PARC ハドロン施設の現状報告

J-PARC ハドロン実験施設の現状を報告する。今回は特に KOTO 実験の進捗状況に焦点を当てる。

J-PARC ハドロン実験施設の現況

J-PARC ハドロン実験施設では、MR 加速器の電源更新のための 2 年にわたる長期シャットダウンの後、2 月から 3 月にかけて 8 GeV 陽子を輸送する新ビームライン (C ライン) のコミッショニングおよび施設検査が、6 月に 30 GeV 調整運転が行われた。3 月の 8 GeV 運転期間には COMET 実験のコミッショニング及び Phase- α ランが行われた。6 月の 30 GeV 運転では、高運動量ビームライン (B ライン) の性能改善のための一次陽子ビームラインの新しいビーム輸送光学のテストが、各二次ビームラインでは E70 (@K1.8; E^- ハイパー核分光)、T98 (@K1.8BR; LArTPC のテスト)、KOTO (@KL) の実験コミッショニングが行われた。MR 加速器の電源調整やビーム調整に十分な日数をかけることができていなかったため、電源更新によって期待されるビーム強度増強や時間構造の改善は次回以降のビームタイムに持ち越しとなったが、ビームサイクル 5.2 秒、ビーム強度 50 kW にて数日間の各種調整運転が行われた。

ビーム運転を続けていた 6 月 22 日にハドロン電源棟で一次ビームライン電磁石電源の転極器での発火事象が起り、以降、夏前のビーム運転は取りやめとなった。本報告では詳細には触れないが、原因究明や対策の検討、電気機器全般の点検などが行われている。

KOTO 実験

KOTO 実験 (K0 at Tokai の略) は、J-PARC のハドロン実験施設において進行中の実験で、CP 対称性を破る中性 K 中間子の稀崩壊過程 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の探索を行っている。標準理論によれば、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊は約 300 億回の K_L 崩壊に対して一度の確率で起こる (分岐比 3×10^{-11}) と予想されているが、異なる枠組みの新しい物理が存在すれば、大きな確率で崩壊する可能性もある。もし標準理論の予想と異なる結果が実験で得られれば、新しい物理効果の発見となる。

KOTO 実験では、細く絞った中性 K 中間子ビームを円筒型の測定装置(図 1)に導き、崩壊領域内で起こる $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊中の中性パイ中間子 (π^0) がさらに崩壊して現れる二つの γ 線のエネルギーや位置を電磁カロリメータで測定し、 π^0 の運動学変数を再構成して信号を同定する。崩壊領域を囲む検出器群により、この崩壊に伴う粒子が他に何も出ていないことを確認する。

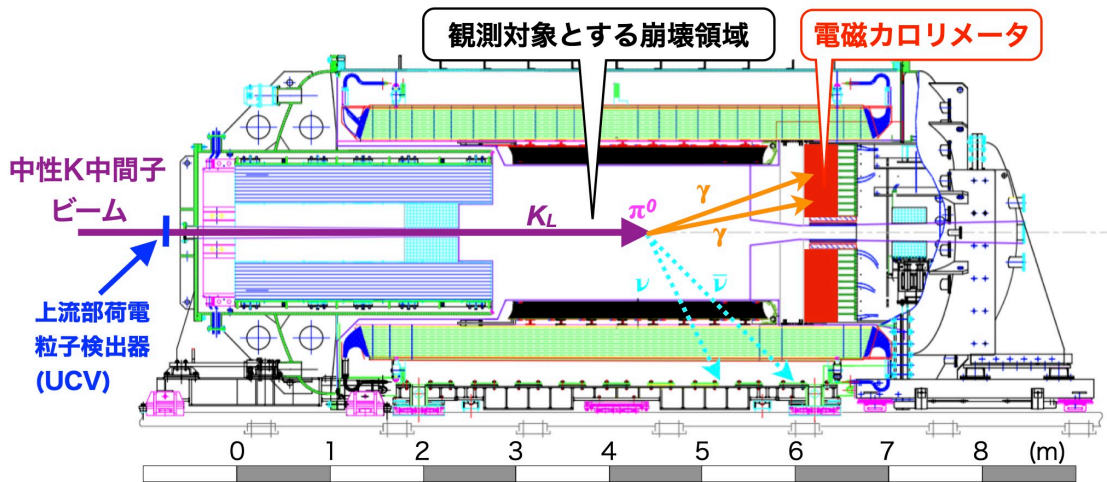


図 1 KOTO 実験測定装置の主要部の断面図。ビーム進行方向を Z 軸としている。

現在、KOTO 実験では 2021 年に取得したビームデータの解析を精力的に行っている。2016-18 年に取得したデータの解析では、中性ビーム中にごくわずかに混入する荷電 K 中間子に起因する背景事象、および、通常のビーム領域から外れて飛来する中性 K 中間子 (ハロー K_L と呼ばれる) に起因する背景事象が大きな寄与となることが新たに判明した。この結果を受け、2021 年のデータ収集時には荷電粒子を捉えるカウンターを KOTO 測定装置の最上流部に導入し (図 1 ; UCV)、荷電 K 中間子起因の事象を排除できるようにしている。また、データ解析では、ハロー K_L 崩壊に起因する事象を排除する手法を導入すると共に、他の背景事象についてもこれまで以上に精密な評価を行うための新たな解析手法を開発してきた。現在は解析の最終段階で、2021 年データの感度 (Single Event Sensitivity) は 8.7×10^{-10} 、信号領域内の背景事象数の予測値は図 2 に示すように 0.26 (統計誤差 (図中の値) と系統誤差を合わせた誤差は約 0.09) と評価され (preliminary)、2016-18 年データ解析の感度 7.2×10^{-10} に匹敵し、背景事象予測値は 1.22 から大きく削減されている。近日中に、信号領域内の確認を経た 2021 年データの解析結果を示す見込みである。

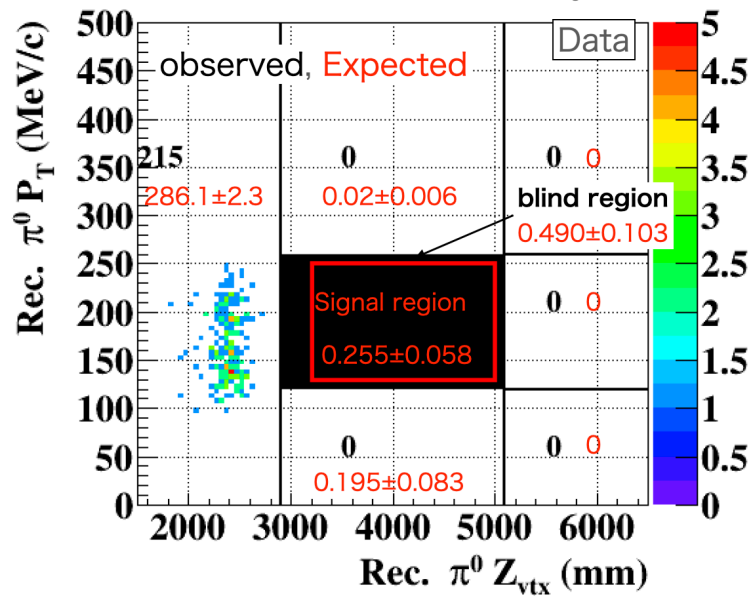


図 2 2021 年に収集したデータの解析状況 (preliminary)。横軸は再構成された π^0 の崩壊点、縦軸は π^0 の横方向運動量を示している。黒字はデータでの観測数、赤字は各領域での背景事象の予測値を示す。黒く覆われた部分はイベント選択条件を最終決定するまでデータを見ない領域 (ブラインド領域)、赤枠線内は信号領域である。

KOTO 実験では更なる背景事象の削減のための研究も進めている。2021 年ランでは UCV として 0.5mm 角ファイバーシンチレーターと MPPC 読み出しによって構成された検出器を用いたが、それに代わり、0.2mm 厚のフィルム状のプラスチックシンチレーター、アルミナイズドマイラーによる集光システム、14 本の光電子増倍管から成る新たな検出器 (Film UCV) を開発し、導入した。東北大学でのビームテストでは検出効率 99.9%以上を達成し、2023 年ビームタイムから KOTO 測定装置に導入している。さらに、ビームライン最下流部に永久磁石を設置する作業が今夏より進められており、これによって崩壊領域内に到達する荷電 K 中間子量を 10 分の 1 に減らすことができる見込みである。この他、2023 年ランからは高速データ転送や GPU によるデータ圧縮などを実装した新データ収集システムの運用を開始し、物理データと同時に、より多くの背景事象コントロールデータを収集できるようになった。今後のデータ収集により、より良い実験感度への到達と共に、背景事象削減のための解析手法のさらなる開発や事象評価数の実証が可能となる。