

KOTO 実験 2016-2018 年データ解析 PRL に論文が出版されるまで

KEK 素粒子原子核研究所

塩見 公志

shiommi@post.kek.jp

大阪大学（現所属 KEK）

篠原 智史

sshino@post.kek.jp

大阪大学（現所属 千葉大学）

清水 信宏

shimizu@hepburn.s.chiba-u.ac.jp

2021 年（令和 3 年）11 月 1 日

1 2019 年 8 月 31 日

その日、クマゼミがやかましく鳴く大阪の夏は幾分その勢いを失っていたが、それでも豊中市・待兼山に登ると汗が吹き出した。阪急蛸池駅から大阪大学まで至るにはこの坂道を超えねばならない。自転車での登頂を諦めた学生が愛車を引きずるのは毎度の光景である。しかし、二つの「箱開け」を予定していた我々の意気込みはいつもと少し違っていた。KOTO 実験は 2016-2018 年に取得したデータから二つの崩壊モード、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ と $K_L \rightarrow \pi^0 \gamma$ の解析を進めており、9 月初めに行われる KAON2019 国際会議で preliminary results を発表するために必死で準備をしてきたのである。ここから壮絶な一年間が待ち受けていることなど知る由もないコレレータはこの日のために大阪大学に集結した。海外の仲間も各大学に集まり、各々の思いを馳せながらその時を待っていた。

KOTO 実験は稀崩壊 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ を通じて新物理を探索している。その手法としてブラインド解析を採用している。この方法は、人間の恣意が入らないように、信号が期待される物理量の領域を隠し、事象選別を最適化する。「箱開け」とは事象選別を最終決定し、信号領域を開けることを意味する。「箱開け」の結果、観測数が 0 であれば信号事象の多寡を上限値として制限することになる。観測数が 1 以上の場合、信号事象であると強く信じられる時は分岐比を中央値とするが、そうでない時はやはり上限値として制限をつけることになる。しかし、上限値としては 0 事象の場合より緩いものとなる。そのため、予想される信号事象の数が 1 より小さい現状では、背景事象の期待値も 1 より十分小さくなるように設定する。少数統計の揺らぎによって結果が大きく変わるという意味で、ギャンブル的性質をもつ手法である。だからこそ、この日の意気込みはいつもと違っていた。

我々にとって前回の「箱開け」は 2015 年に取得したデータを解析したときであった。当時のデータはそのさ

らに一つ前に解析したデータに比べて統計量が 10 倍で、「箱開け」には特に気を遣った。ソフトウェアの整備に多くの時間を要し、結果を出すまでの道は険しかったが、信号領域をあけた結果は 0 事象であった。新物理を探索する立場でこのような表現をするのもどうかと思うが、いわば「平和に」解析が終わった。さらに、当時の解析で支配的だった背景事象は、後に述べるように保守的な評価をしていたことが判明していたので、今回のデータ解析における背景事象はかなり小さい、というのが解析に携わっていた人々の素直な感覚であった。「事象はでないであろう」そんな言葉が頭をよぎる中で始まった夏の日であった。

前日、清水は自らが主導していた $K_L \rightarrow \pi^0 \gamma$ の「箱開け」をあえて先に行うべく、Indico¹のスロットを一番に予約した。本崩壊はローレンツ不変性を破る崩壊で、いわゆるパイプロの解析である [1]。期待される背景事象は 0.3 程度あった。それでも、世界で初めての探索であったし、冒険したいという気持ちが勝っていたので、信号領域をあける覚悟を決めたのである。この解析の「箱開け」もそれなりに議論を巻き起こした。1 時間近い議論をしたのち、ついに「箱開け」をするという同意が得られ、大勢の目の前で信号領域の中が明らかになった。結果、事象は見つからなかった。この瞬間、皆の心配、期待はたちまち収束した。 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の「箱開け」もこの流れに乗って収束させていこう、というような雰囲気ですぐ午前前半を終えた。

後半は $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の番である。流れはあるとはいえ、信号領域をさらに厳しくするかという議論が白熱した。 $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ 崩壊による背景事象を落とすためのカットをどう充てるかで選択肢があり混迷したのである。絶対的に正しい方向性があるなら困らないが、それがないからこそみな理屈を求めた。1 時間はかかっただろうか、最終的にどのカットを用いるかの同意が得られ、

¹CERN で開発された web ベースの会議支援システムで、プレゼンの資料を置くのに使用。

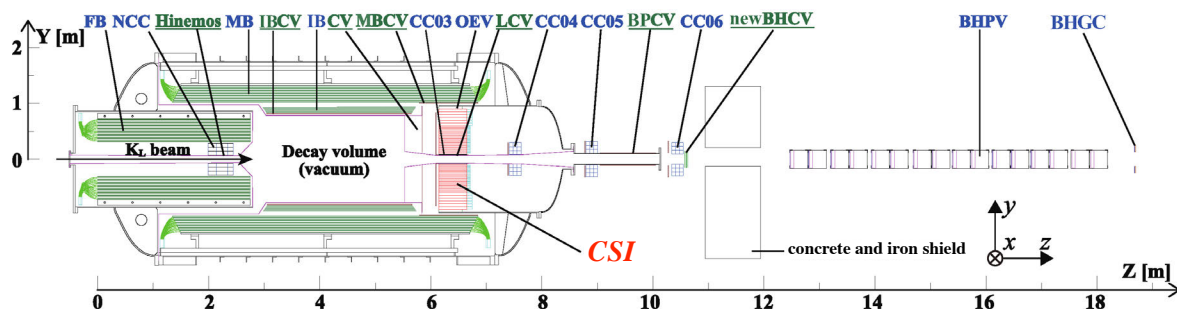


図 1: KOTO 検出器の断面側面図。図の左から中性ビームが入射し, "Decay volume"と記された領域で起こる K_L の崩壊をとらえる。ビーム中心軸を Z 軸とし, 検出器の最上流端を $Z=0$ として定義している。

いざ「箱開け」の時が来た。期待される背景事象の数は 0.05 である。篠原が解析のマクロを実行し, とうとう信号領域の「中」が露わになる。結果, **箱の中には 4 つの事象が鎮座していた。** たかが素粒子の崩壊が, 複数の人間/KOTO 実験の未来を大きく変えた, その瞬間だった。アメリカのコラボレータは「Jesus」, 「Oh, my god」と訴え, アジア人コラボレータはただただ唖然とする。物理学者もこんなに感情的になれるのかと感心してしまうような時間が 30 分ほど流れた。最終的に Physical Review Letters (PRL) に論文 [2] を出版することになるのであるが, 一年以上後である。本記事では, 論文には書かなかったことも含め, この日に新たなスタートを切ったレースの軌跡を示そうと思う。

2 KOTO 実験

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の物理と実験手法について簡単に紹介する。ビームライン, 実験装置の詳細は過去の高エネルギーニュースに掲載されているので, そちらも参照されたい [3, 4]。

2.1 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の物理

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊は "CP-" の K_L が "CP+" の終状態に移り, 直接的に CP 対称性を破る。フレーバーを変える中性カレント (FCNC) を通じて, ストレンジクオークがダウंकオークに遷移する。FCNC は小林益川行列の特徴的なフレーバー階層構造により GIM 機構で抑制され, 標準理論の $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊分岐の予想値は $(3.0 \pm 0.3) \times 10^{-11}$ と非常に小さい [5]。不定性の大半は小林益川行列のパラメーターの測定誤差であり, 理論的不定性は 2% と小さい。そのため, 新物理からの小さな寄与でも標準理論の寄与から分離出来る。標準理論を超える様々なモデルで分岐比計算がされ, 一桁以上大きく予言するものもある [6, 7]。

実験的な困難さから, これまでの分岐比上限値は KOTO 実験が 2015 年に取得したデータ解析によって与

えられた $B(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) < 3.0 \times 10^{-9}$ (90% C.L.) である [8]。KOTO 実験は標準理論予想値までの 2 桁の未開の地を探索し, 新物理発見を目指している。

2.2 実験原理と装置

J-PARC の Main Ring (MR) で 30 GeV に加速された陽子は, 遅い取り出し方式により 2 秒間かけてハドロン実験施設へ取り出される。陽子は金標的に入射し, K_L を生成する。生成された K_L はビームの形を整えるための 2 台のコリメーターと荷電粒子を排除するための 1 台の電磁石からなる中性ビームラインを通して, 実験エリアに導かれる。ビームラインの長さは 21 m, 立体角は $7.8 \mu\text{sr}$ である。実際にはコリメーター等で散乱し立体角以上に拡がった粒子も実験エリアに飛来し, そうした粒子群を本稿ではビームハローと呼ぶ。

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊事象の特徴は「 π^0 からの 2γ 以外は何もないこと」である。そのため, KOTO の検出器は図 1 のように, π^0 からの 2γ のエネルギーと位置を測定するための電磁カロリメーター (CSI) と, 2γ 以外何もないことを保証するための Veto 検出器群からなる。電磁カロリメーターは長さ 50 cm の undoped CsI 結晶を 2756 本積み上げて構成されている。中央部 (ビーム中心から ± 60 cm) は 2.5 cm 角, その外側は 5 cm 角断面の結晶である。入射 γ 線による電磁シャワーは複数の結晶にまたがり発展するので, クラスター (エネルギーが検出された結晶の一群) の詳細が分かる。電磁カロリメーターの上流に, 荷電粒子を捉えるための CV (Charged Veto) を置いている。崩壊領域の大部分を覆う円筒部には IB (Inner Barrel), MB (Main Barrel) 光子 Veto 検出器があり, 上流部には FB (Front Barrel) 光子 Veto 検出器がある。これらはプラスチックシンチレーターと鉛のサンドイッチカロリメーターである。電磁カロリメーターには中性ビームが通過するビームホールがあるため, そこを抜けて逃げる粒子を捕まえるためのビーム周縁部検出器 (CCxx; Collar Counter) をカロリメーター下流部に配置している。最下流には中性ビーム中にも検

出器 (BHPV, BHGC) を設置し、崩壊領域から逃れてくる粒子の検出効率を高めている。

KOTO 実験では全ての検出器の信号波形を記録している。ビーム中の検出器と IB 光子 veto 検出器はサンプリング周波数 500 MHz でダイナミックレンジ 12 ビットの ADC モジュールを、それ以外の検出器は 125 MHz で 14 ビットの ADC モジュールを使用している。

2.3 解析手法

解析では、電磁カロリメーターで測定された 2 つの γ 線のエネルギーと位置情報を使用して K_L の崩壊位置を再構成する。2 つの γ が π^0 崩壊由来と仮定して、不変質量が π^0 の質量と等しくなる Z 位置 (図 1 とキャプション参照) をビーム軸上から算出する。得られた Z 位置情報を基に π^0 の横方向運動量 (P_T) を計算する。ニュートリノ対がエネルギーを持ち去るので、信号事象には比較的大きな P_T を要求する。信号領域は P_T と Z の 2 次元プロットに定義される。Veto 検出器に信号がないこと、幾つかの運動力学的な条件、電磁カロリメーター上のクラスターの γ 線らしさ等の事象選別条件を課した後、信号領域内に残った事象を $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 候補事象とする。事象選別条件の決定は信号領域外の事象のみを用いて行う。

3 2016-2018 年物理ラン

KOTO 実験 2016-2018 年に行った物理ランのデータ取得と「箱開け」に至るまでの道のりを紹介する。

3.1 データ取得とトリガー

図 2 に蓄積データ量とビームパワーを示す。2016-2018 年の物理ランでは 2015 年に行った物理ランの約 1.5 倍のデータを取得した。ビーム強度は加速器グループの尽力により 2015 年では 42 kW だったものが 2018 年には 50 kW まで増加した。

KOTO 実験のトリガーは 2 段構成である。レベル 1 トリガーでは CSI 全体に 550 MeV 以上のエネルギーと veto 検出器には緩い veto 条件を課す。レベル 2 トリガーでは CSI のエネルギー重心位置 $R_{\text{COE}} = |\sum e_i \mathbf{r}_i| / \sum e_i > 165 \text{ mm}$ (e_i と $\mathbf{r}_i$ は各 CSI 結晶のエネルギー損失と位置) を課していた (COE²トリガー)。ビームが細く絞られているため、missing particles のある K_L 崩壊モードでは R_{COE} が大きいという特徴を利用している。一方、COE トリガーを課すと missing particles のない崩壊モード (例えば $K_L \rightarrow \pi^0 \gamma \gamma$ や

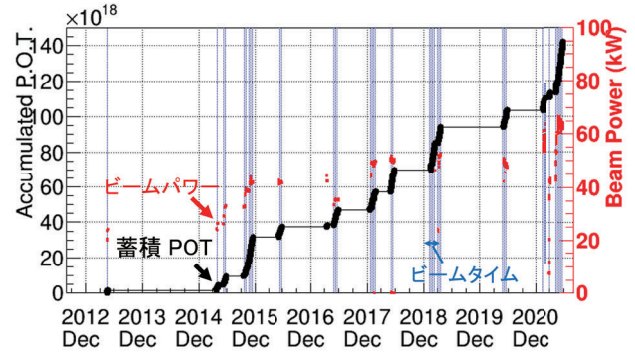


図 2: 蓄積 POT (protons on target; 左軸) とビームパワー (右軸)。水玉模様の領域はビームタイム期間。KOTO 実験は 2018 年以降もデータ取得を続けている。2021 年の J-PARC MR 主電磁石更新後にデータ取得を再開する。

前述の $K_L \rightarrow \pi^0 \gamma$ のデータが収集できない。そこで台湾大学とシカゴ大学のグループが中心となり、2017 年にレベル 2 トリガーシステムを更新した。新システムではカロリメーターで観測したクラスター数をオンラインで計算し³、各クラスター数に prescale をかけられるよう自由度を持たせた。このしくみを CDT⁴トリガーと呼んでいる。 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 探索では、COE 要求を無くしても、2 クラスターを要求することで、ビームスピルあたり 2 k のトリガー数 (ビームパワー 50 kW の時) に抑制できる。ビームスピルあたりの許容されるトリガー数は 11 k であるため、その他別のクラスター数を要求する物理事象を効率的に取得できるようになった。

3.2 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 探索解析

解析ではまず検出器の健全性確認や検出器の詳細な較正を行う。検出器の健全性は同タイミングで発光する LED やレーザーを用いて確認する。検出器のエネルギー較正は宇宙線などを用いて行う。その後 $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ コントロールサンプル等を用いて検出器応答を確認する。図 3 は 2016-2018 物理ランから新たに導入した IB 検出器のエネルギー損失の分布で、検出器応答をよく理解できていることが分かる。

実験感度 (Single Event Sensitivity; SES) は信号事象アクセプタンスと収集した K_L 数から求める。アクセプタンスは GEANT4 をベースにしたシミュレーションを用いて算出する。実験環境を再現するため、シミュレーションの出力には偶発事象データをランダムに足し合わせている。収集 K_L 数は $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ 崩壊から算出する。(データ解析から $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ 崩壊の事象数を求め、シミュレー

²Center of energy の略。

³FNAL KTeV 実験で開発したアルゴリズムを用いている [9]。

⁴Clock distribution and trigger の略。詳しくは [10]。

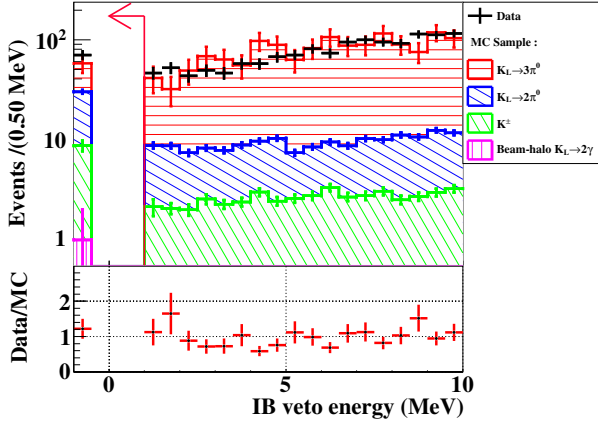


図 3: IB 検出器のエネルギー損失。MC sample のヒストグラムは下から順にビームハロー $K_L \rightarrow 2\gamma$, $K^\pm$, $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$, $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0$ を積み上げている。閾値である 1 MeV 以下のエネルギー損失は -1 MeV のビンにまとめている。

ションから求めた $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ 崩壊のアクセプタンスを求める) 実験感度は $(7.20 \pm 0.05_{\text{stat}} \pm 0.66_{\text{syst}}) \times 10^{-10}$ と見積もった。これは 2015 年データ解析の感度よりも 1.8 倍高い感度である。

KOTO 実験の背景事象は K_L 崩壊由来とビームハロー由来に大別される。 K_L 崩壊に由来する背景事象数は崩壊モード毎にシミュレーションサンプルを用意し、信号事象選択後に残存する事象数を評価する。 $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ 崩壊 (分岐比 8.64×10^{-4}) による背景事象数は < 0.08 (90% C.L.) と見積もった。分岐比の大きい崩壊モードはシミュレーションサンプルの用意に膨大な時間がかかるため、状況を限定して評価した。例えば $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0$ 崩壊 (分岐比 19%) は、 4γ が veto に使用可能なため検出器の光子不感率を考えると背景事象にはなりにくい。しかし実際にはビーム環境が引き起こす光子不感率がある。そこでビーム環境に由来する背景事象に絞り評価した。ビーム環境では図 4 のように偶発事象が本来 veto すべき信号を隠してしまう可能性があり、背景事象の要因となりうる。解析ではこの重複波形に由来する背景事象を効率的に削減するため、フーリエ変換を用いて波形の重複を判定するアルゴリズムを導入し、重複していると判定した場合にのみ veto window⁵ を広げるようにした。この方法を用いることで $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0$ 背景事象を 0.01 ± 0.01 事象と低く抑えつつ、従来の解析方法と比較して信号事象アクセプタンスを 10% 改善した。

ビームハロー由来の背景事象として重要なのが中性子が由来するものである。特に図 5 のようにビームハロー

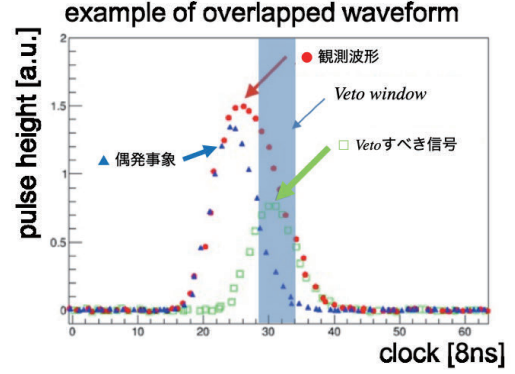


図 4: 重複波形が光子不感を引き起こす概念図。Veto すべき信号の波形と偶発事象に由来する信号の波形を足し合わせたものが観測波形となる。Veto は波形の頂点が veto window (紺の領域) 内にあるかで判断している。図では veto すべき波形が重複波形によって隠され、観測波形の頂点が veto window の外へ出てしまい、不感事象となる。Veto window を広げることで不感率を下げる事が可能である。

中性子が CSI に直接入射しハドロン相互作用を起こしてクラスターを作った後、別の中性子が放出されさらに別のクラスターを作ることがある (ハドロンクラスター背景事象)。この背景事象は 2015 年解析で最大の背景事象であった。中性子の相互作用をシミュレーションで再現するのは困難であったため、コントロールサンプルを用いて背景事象数を評価した。コントロールサンプルは KOTO 検出器上流にアルミ板の標的を挿入した特別なラン (アルミ標的ラン) で収集し、ビーム中の中性子を積極的に散乱させ背景事象の状況を再現した。このアルミ標的ランの CSI 波形を畳み込みニューラルネットワークやフーリエ変換を用いて解析し、中性子事象と光子事象を弁別する手法を開発した。また中性子事象の削減能力が上がるにつれ、アルミ標的で散乱した K_L への注意が必要となった。散乱され P_T を持った K_L がビーム軸上から離れた場所で $K_L \rightarrow 2\gamma$ 崩壊を起こすと、高い P_T をもった π^0 と再構成されうる。こうした事象は中性子由来ではないため、コントロールサンプルには適さない。解析ではこの混入事象の影響を避けるような解析手法に改めた。結果、ハドロンクラスター背景事象数を 0.017 ± 0.002 と見積り、また背景事象数は十分抑えられていると判断し、信号領域を拡張して信号事象アクセプタンスを 16% 回復させた。

その他背景事象もまとめ、全背景事象数が 0.1 事象以下と十分小さく抑える信号選択条件を決定し、「箱開け」の準備が整った。そして迎えたその日が冒頭の 2019 年 8 月 31 日である。

⁵Veto 判定を行う時間幅。検出器ごとに決められた時間幅の中に信号が存在するかを判定する。

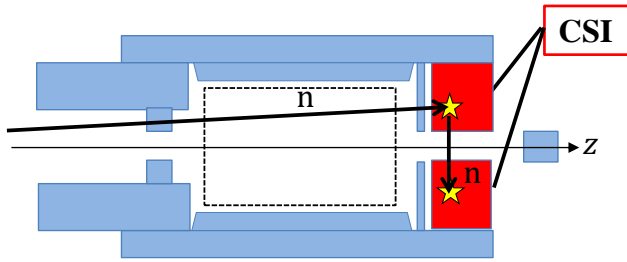


図 5: ハドロンクラスター背景事象

4 「箱開け」の余波

4.1 KAON2019

冒頭に述べたように、4 事象が信号領域内に観測された。コラボレーションで手分けしその素性を調査したが判然としない。緊迫した空気の中、結果を二週間後に控えた国際会議 KAON2019⁶で報告するかが議論となった。“素性の分からないものを発表してもよいのか”がテーマであったが、“ブラインド解析をしている以上「箱開け」後の情報は全て詳らかにすべきである。発表内容は観測された事象については信号事象とは特定せず、対応する分岐比も出さない。”という意見でコラボレーションがまとまった。腹を括り、急ぎ発表資料をまとめイタリアへ。混乱を招かないよう言葉使いには慎重を期した。そのため発表会場は落ち着いた雰囲気であった（と思う）。国際会議後は世話人の方のご厚意で貸して頂いたペルージャ大の一室にて緊急会議を開き方針などを議論した。

4.2 KOTO Anomaly?

KAON2019 での発表は理論分野にも影響を与えた。会議終了後から 2 週間経たずして、信号領域内事象を信号事象と見做し理論的に考察する論文が arXiv に上がった [11]。そして、KOTO Anomaly という言葉が arXiv 上に見られるようになった。信号領域内の事象数から $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の分岐比を計算すると、理論的には 2 つの驚きがあった。第一に、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の分岐比が標準理論の予想から 2 桁も大きいということ。次に、 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊の分岐比測定から間接的に得られる $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の分岐比の上限値（Grossman-Nir Bound と呼ばれる [12]）より大きかったことである。この間接リミットは、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の分岐比が $s \rightarrow d$ 遷移の振幅の複素成分の 2 乗に比例するのに対して、 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊の分岐比が $s \rightarrow d$ 遷移の振幅の絶対値の 2 乗に比例することに由来する。これにより、 K_L と K^+ の寿命の違いを

考慮すると、 $\mathcal{B}(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) < 4.3 \times \mathcal{B}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu})$ の関係式が成り立つ。これは $\Delta I = \frac{1}{2}$ 反応のアイソスピン対称性のみを仮定しており、この間接リミットを超える $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の分岐比を预言する理論モデルを構築することは難しい。

提唱されたモデルは、未知の軽いスカラー粒子が関与する $K_L \rightarrow \pi^0 X$ 二体崩壊の寄与である。ニュートリノ対は測定できないので、横方向運動量を持ち去っている粒子の正体はニュートリノ対でない可能性もある。この崩壊に対しても Grossman-Nir Bound の関係式は維持され、 $K^+ \rightarrow \pi^+ X$ からの強い制限を受けるが、2 つの抜け穴があることが指摘されたのである。一つは 2015 年の Fuyuto-Hou-Kohda の論文 [13] で既に指摘されていたもので、 X の質量が π^0 質量付近にある場合に、 K^+ では実験感度が悪くなるとの指摘である。これに $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ 崩壊からの背景事象が問題となるからである。それに対し、 K_L の測定では π^0 付近でも実験感度を維持できる。もう一つの抜け穴は、 X の寿命が 0.01 ns から 0.1 ns の間にある場合である。 K_L 崩壊を探索する KOTO 実験と K^+ 崩壊を探索する CERN の NA62 実験では、使用する K_L , K^+ の運動量や検出器の大きさが異なる。そのため、 K^+ では X が検出器内で γ 対や電子陽電子対に崩壊し検出されるのに対し、KOTO では X が崩壊せずに検出器の外に逃げる事が出来るというものだ。スカラー粒子の導出方法は様々な方法が提唱され [14, 15]、ミューオンの異常磁気モーメントとの関係性を議論する論文もあった [16, 17]。また、 $\Delta I = \frac{3}{2}$ の反応により、崩壊振幅自体が Grossman-Nir Bound よりも大きくなる可能性を指摘する論文もある [18]。

これらの理論の盛り上がりに対するコラボレーターの反応は様々だったが、共通して言えることがある。 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊探索から得られる知見について議論があるのは良いことだが、それは結果や仮定を明確にした上である。KAON2019 での発表は、ブラインド領域の中を確認したという経過報告であり、物理の結果としては発表していない。それをあたかも新しい物理結果のように記述する論文があったことが残念であった。そのため、間違った印象を広げないために、KAON2019 の Indico に KOTO の立場を明らかにする文章を追記した。

5 “Charged K はどうでしょう”

5.1 容疑者の特定

時は KAON2019 から帰国した時点に戻る。イタリアから帰国すると、落ち着く間もなく日本物理学会が始まった。4 事象観測したという事実は参加者の間で大きな話題となった。そのさなか、解析の中心となっていた

⁶数年に一度 K 中間子オタクが集まる国際会議である。2019 年は 9/10–13 にペルージャ大学（イタリア）で行われた。次回は 2022 年に大阪大学で開催予定である。

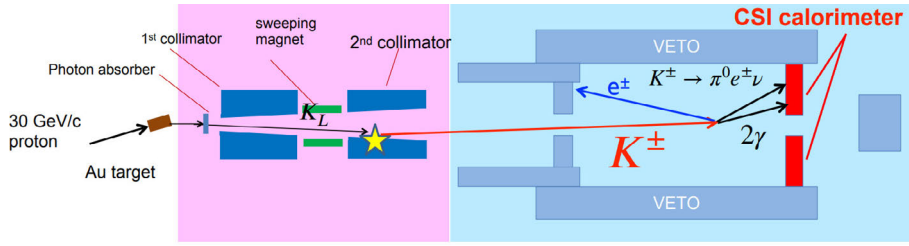


図 6: KOTO ビームラインと $K^\pm$ が背景事象になる状況を示した図。

メンバーに向けて、コラボレーターの野村氏から一通のメールが届けられた。タイトルは“Charged K はどうでしょう？”であった。

そのメールの内容は、荷電 K 中間子 ($K^\pm$) が背景事象になるのでは、という驚くべき考察であった。図 6 に KOTO ビームラインの概念図と、 $K^\pm$ が背景事象になる状況を示す。通常、電荷を帯びた粒子は Sweeping Magnet によって取り除かれ、KOTO 検出器に入っていない。しかし、ビームに大量に含まれる K_L がこの磁石より下流のビームライン壁に当たると、Charge Exchange 反応により $K^\pm$ が生成され、検出器へと侵入しうる。さらに $K^\pm \rightarrow \pi^0 e^\pm \nu$ 崩壊（分岐比約 5%）が起き、 $e^\pm$ を検出できなかった場合、観測にかかるのは $\pi^0 (\rightarrow 2\gamma)$ のみとなり背景事象となる。中性である K_L の崩壊で π^0 のみが観測される状況を作るには、基本的に二つの粒子が不感にならねばならないのに対し、 $K^\pm$ に関しては一つ ($e^\pm$) でよいというのが痛いポイントであった。さらに、キネマティクスは $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ と類似しているため、事象選別の条件を満たす可能性が高い。

日本物理学会後、すぐに $K^\pm$ の検証がはじめられた。GEANT3 を用いたビームラインのシミュレーションにより、KOTO 検出器の崩壊領域（図 1 の Decay Volume と示されている領域）に侵入する $K^\pm$ のレートは、 K_L 比で $R(K^\pm)/R(K_L) = 6.4 \times 10^{-6}$ と見積もられた。さらに、このシミュレーションで検出器に侵入した $K^\pm$ の運動量の情報を種として用い、KOTO 検出器のシミュレーションを行った結果、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の事象選別後に残る量は 2016-2018 年解析のデータ量において約 0.3 事象と見積もられた。件の 4 事象を説明するにはまだ遠いが、 $\mathcal{O}(1)$ の事象数を無理なく説明できる初めての候補となった。

5.2 Minimum Bias data の解析

$K^\pm$ の寄与として評価された 0.3 という数字は、危険視すべき重要な敵と分類するには十分であったが、その中央値は信用するようなものではなかった。Charge Exchange 反応の断面積が GEANT3 にどれほど正しく入れられているかもわからなかったし、ましてやビームライン壁に当たる K_L のフラックス、生成された $K^\pm$ の運動

量分布など、あまりにシミュレーションに依存し過ぎているからである。そこで、 $K^\pm$ のフラックスの実測を試みるのは自然な流れであった。

K_L に比べて $\mathcal{O}(10^{-5})$ しかないと思われる $K^\pm$ を飛跡検出器のない KOTO 検出器で測定できるのか？というのは皆が抱いた疑問であった。特に、KOTO のカロリメータは γ や $e^\pm$ に関しては精度よくヒット位置、エネルギーを求められるものの、 $K^\pm$ の崩壊の終状態に含まれる $\pi^\pm$ や $\mu^\pm$ に関しては、ヒット位置を決められても飛跡は測定できず、粒子識別のような芸当もできない。このような制約の中で最終的にターゲットとしたのは、分岐比が 25% と大きい $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0$ 崩壊である。 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ と同様、 π^0 の不変質量を仮定し、ビーム軸上での崩壊を仮定すると崩壊位置を計算できる。また、 $\pi^\pm$ のヒット位置がわかれば、 π^0 との横方向の運動量の保存によって $\pi^\pm$ の運動量も計算でき、 $K^\pm$ の質量を仮定することなく、 $\pi^\pm \pi^0$ の不変質量 ($M_{\pi\pi^0}$) を求められる。再構成して得られた事象は、 $K^\pm$ の崩壊 Z 位置と $M_{\pi\pi^0}$ の二次元平面上で理解を行う。考えられる背景事象は、大きな崩壊比 (13%) をもつ $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ 崩壊である。 $\pi^\pm$ の一方が消失すると、見かけ上終状態の粒子が同じになることによる。

再構成の手法が定まったため、2016-2018 年に取得したデータで $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0$ 崩壊の探索を試みた。しかし、大きな問題が一つあった。それまでのデータ取得では、トリガーの段階で CV にエネルギーを落とした事象を排除していたため、終状態に $\pi^\pm$ を含む $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0$ 崩壊の探索に用いることができなかった。唯一、キャリブレーションのために取っていたできるだけオンラインによるカットをかけていないデータ (Minimum Bias) が役に立ったが、トリガーは 1/300 に prescale されていたので十分な統計が見込めなかった。図 7 に 2016-2018 年に取得したデータを用いて得られた Z 位置、 $M_{\pi\pi^0}$ の二次元プロットを示す。中央部の線で囲われた領域が、 $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0$ の信号領域として定義したものである。枠の下部に示す領域に分布しているのは $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ 崩壊によるもので、 $\pi^\pm$ の一方が検出器下流などに向かい消失すると、見かけの $K^\pm$ の質量が小

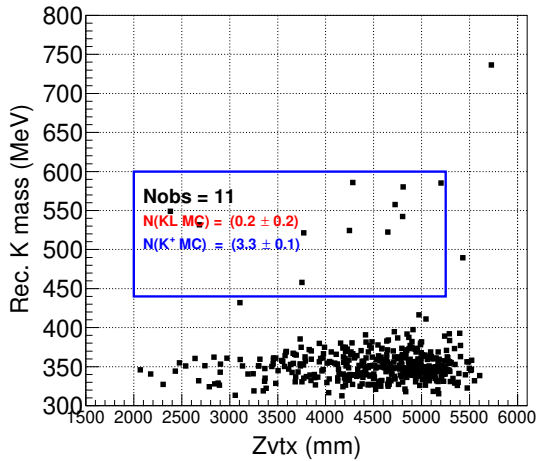


図 7: 2016-2018 年に取得した Minimum Bias データを解析して得られた $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0$ の再構成プロット。横軸は再構成された Z 位置、縦軸は $\pi^\pm \pi^0$ の不変質量である。 $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0$ の信号領域内に含まれるデータの事象数は 11, $K^\pm$ による寄与は 3.3, K_L による寄与は 0.2 と見積もった。

さくすることによる。信号領域の中の観測事象の数は 11, シミュレーションによる予想は 3.3 であり、データ/シミュレーション比を素直に求めるとデータは約三倍大きいことを示していた。加えて、 K_L の崩壊の寄与は 0.2 と小さいことが予想された。しかし、統計誤差が大きいことは認めるとしても、11 事象が本当に $K^\pm$ なのか、確信を持てない根拠はなかった。この統計数ではまともに分布を比較することができないからである。2016-2018 年解析の結論を出すためには、過去のデータによる検証ではなく、2020 年以降のビームタイムでの新たな試みが必要なが明らかになった。すなわち、 $K^\pm$ の直接測定と $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0$ 事象の統計量の増大である。

5.3 $K^\pm$ の直接測定, UCV1 の開発

$K^\pm$ の存在を最も単純に明らかにする方法は、KOTO 検出器上流部 (図 1 のおよそ $Z = -0.6$ m の辺り) のビーム中に荷電粒子の検出器を配置することである。中性ビーム中に検出器を置くことは冒険であるが、 $K^\pm$ の存在が明らかになった後はそれ排除する Veto 検出器としても機能することを期待し、Upstream Charged Veto 1 (UCV1) と名付け、開発をおこなった。1 は初号機であることを意味する。UCV1 に求められる性能は、①ビーム中の粒子が散乱して新たな背景事象を作らないようにできる限り物質量を小さくすること、②ビーム中という高いレート (数 MHz) に耐えられるフロントエンドを持つこと、③ UCV1 内部で $K^\pm$ が作られる可能性を検証する

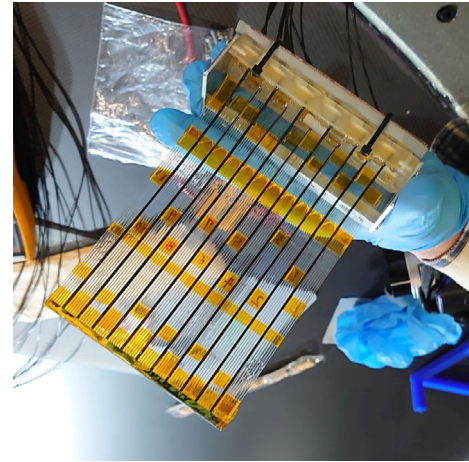


図 8: UCV1 の写真。1 mm 角のプラスチックシンチレータファイバーを並べシート状にした有感領域を持つ。写真右上の (タイで止められている) 部分は 3D プリンターで製作した構造体で、ファイバーと読み出しセンサである MPPC を支えている。

ため、ビームから逃げられる機構を有すること、④ 2020 年のビームタイムに間に合わせるために 1 か月以内に開発すること、などであった。図 8 に開発した UCV1 の写真を示す。1 mm のプラスチックシンチレータファイバーをシート状に並べ、片側を 6 mm 角の MPPC で読み出す構造である。MPPC の波形は 100 ns 程度と長く②の条件を満たさないで、MPPC のバイアス回路内にコイルとコンデンサを用いた微分回路を設け、波形を短くする工夫をした。検出器は真空内を動く特別なステージによって遠隔で出し入れできるようにした。限られた時間と厳しい性能要求ではあったが、時間内に開発することに成功した。

5.4 2020 年ラン, $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0$ を集めよ!

2020 年度のビームタイムは、 $K^\pm$ による背景事象を理解するための特別なデータ取得という位置付けであった。4 事象の理解と対策を行うことが急務である。トリガーのファームウェアを改良し、CV のヒット数をトリガーのロジックで数える機能を設け、prescale をかけることなしに $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0$ 崩壊を取得することができるようにした。

ハードウェア・ソフトウェア両者のアップデートを終え、2020 年 5 月、ビームタイムが実現した。長く待たされたこともあり⁷こちらは準備万端である。ビームタイム中にデータが増えると同時に、すぐさま結果が明らかになっていく興奮は今でも忘れられないものである。図 9 は、

⁷当初 2 月開始を予定としていた 2020 年のビームタイムは、諸事情により 5 月に遅れた。

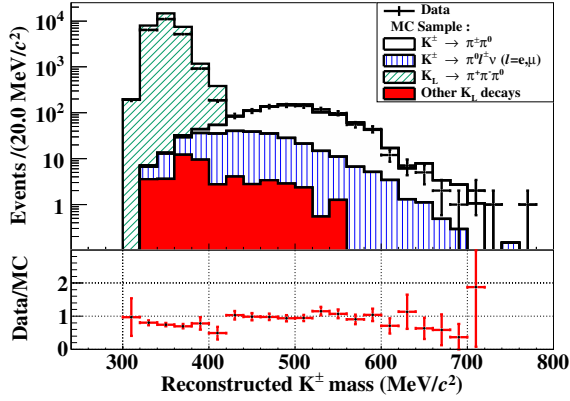


図 9: 2020 年度取得したデータを用いて得られた $M_{\pi\pi^0}$ の分布。

2020 年データを解析して得られた $M_{\pi\pi^0}$ の分布である。斜めのハッチのついたヒストグラムが $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ の寄与、ハッチなしの寄与が $K^\pm \rightarrow \pi^\pm\pi^0$ である。分布の形は、 $K^\pm \rightarrow \pi^\pm\pi^0$ のシミュレーションと気味悪いほどに一致していた。さらに、 $K^\pm \rightarrow \pi^\pm\pi^0$ の信号領域にある事象のうち、70%に UCV1 にヒットがあることが判明した。30%は UCV1 の不感率によるものであることがのちの検証によりわかった。実験によって得られた $K^\pm \rightarrow \pi^\pm\pi^0$ の収量は、シミュレーションの 3.0 ± 0.1 倍であった。UCV1 を取り外してデータ取得も行い、無矛盾な結果 3.0 ± 0.3 を得ている。これは、UCV1 内での $K^\pm$ の生成が有意でないことを示している。

2020 年ランによって $K^\pm$ の存在は疑う余地のないものとなり、学会後に評価したシミュレーションは $K^\pm$ の背景事象を 3 倍小さく見積もっていたことが分かった。この知見により、 $K^\pm$ 由来の背景事象の期待値は約 0.9 へアップデートされ、観測事実との矛盾が解消された。さらに、その後のデータ取得において $K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊探索の感度を向上させるための鍵となる UCV の基礎評価を行うことができた。

5.5 UCV2 の開発

2016-2018 年の解析とは直接の関わりはないが、UCV はその後も進化を続けており、手短に紹介をする。

2020 年ランによって、UCV1 には 30%の不感率があることが判明した。その要因として、シンチレーションファイバーの不感領域、限られた有感面積、MPPC の放射化、エレクトロニクス性能の四つが挙げられた。限られた時間の中で開発した UCV1 を改善すべく、2020 年秋に大阪大学の学生が中心となり、新たな改良機 UCV2 を製作した。以前よりも小さい 0.5 mm のファイバーを、斜めに並べた構造を持つ。物質量を下げつつ、不感率を

5%まで下げることに成功している [19, 20]。UCV2 は物質量に関しては及第点であるが、MPPC の放射化という課題は据え置いたままであり、性能維持のために MPPC は年一回程度の交換が必要となる。そこで、さらに物質量を小さくしつつ長寿命化をはかるために、0.2 mm のプラスチックシンチレーター板と、板の外に漏れるシンチレーション光を反射集光するアルミ蒸着フィルムと PMT を組み合わせた新型の検討を進めている。ビームテストにより十分な性能を持つことが示されているので、現在、アルミ蒸着フィルムの性能評価や、真空中で用いる PMT と構造体の設計を進めている。

6 2016-2018 のポストブラインド解析

$K^\pm$ の解析以外にも重要な解析がアンブラインド後に様々行われた。

6.1 信号領域内の事象について

信号領域内の事象の 1 つは NCC 検出器に重複波形と思われる波形が記録されていた。そこで重複波形による背景事象の見積もりに誤りがないかも一度徹底的に調査した。しかし重複波形事象を強調するような選択条件で信号領域内の挙動を調べても、シミュレーションはデータを再現していた。統計的には 2.2%の確率で重複波形による背景事象は起こりうることから、観測結果と重複波形による背景事象の見積もりは矛盾しないと結論づけた。

一方で、観測した事象のうち 1 事象はタイミング設定の誤りによるものであった。本来 veto すべき波形のアフターパルスがメインの波形と誤認してしまい、veto の条件を満たしていなかったのである。原因の特定後、タイミング補正の修正を行い信号選択条件は全く変えずにデータの再プロセスを行った。結果、信号領域内の事象数は 3 となった。

6.2 ビームハロー K_L

ビームハロー中性子以外にもビームハロー K_L が問題となりうることも 2016-2018 解析で明らかになった。メカニズムとしては前述の中性子コントロールサンプルへの混入事象と同じで、 P_T をもちビーム軸上から離れた位置で $K_L \rightarrow 2\gamma$ 崩壊を起こすと高い P_T をもった π^0 として再構成されうため背景事象の要因となる。ビームハロー K_L の背景事象数評価にはビームハロー K_L のフラックスやスペクトラムが重要となる。そこで利用し

表 1: 2016-2018 年データ解析の背景事象数見積もり。

由来	背景事象数
K_L	$K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$
	$K_L \rightarrow 2\gamma$ (beam-halo)
	その他 K_L 崩壊
$K^\pm$	
中性子	ハドロンクラスタ
	その他中性子由来
合計	1.22 ± 0.26

^a 「箱開け」後に解析した背景事象。

たのが $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ サンプルにおける COE の位置分布である。Missing particles がない崩壊の場合、COE は K_L が崩壊しなかった時の CSI 到達位置と近似できるため、ビームハローの特徴をよく反映する。ビームハロー K_L を強調する選択条件のもとで解析を行った結果、シミュレーションはスペクトラムは概ね再現するもののフラックスに 7 倍程度補正が必要なことが判明した。求めた補正係数を元に、ビームハロー $K_L \rightarrow 2\gamma$ の背景事象数を 0.26 ± 0.07 と見積もった。

7 結果

2016-2018 年物理データの実験感度を $(7.20 \pm 0.05_{\text{stat}} \pm 0.66_{\text{syst}}) \times 10^{-10}$ 、全体の背景事象数を 1.22 ± 0.26 と見積もった。背景事象の内訳は表 1 に示す通りである。図 10 に再構成 π^0 の横方向運動量 (P_T) と崩壊 Z 位置を示す。信号領域内の観測事象数は 3 イベントである。背景事象を 3 事象以上を観測する確率は 13% あることから、観測事象数と背景事象数は統計的に矛盾しないと結論付けた。本データを用いて、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の崩壊分岐比の上限値をポアソン統計に実験感度の誤差を加味して算出し、 4.9×10^{-9} (90% C.L.) とした。この結果は残念ながら 2015 年に取得した物理データの解析結果を更新するものではなかった。しかし、観測事象に対する KOTO 実験の見解をいち早く正確に伝えることが重要であると判断し、上に述べた解析の経緯や結果を PRL に投稿した。論文は 2021 年の 3 月 24 日に掲載され [2], PRL の Editor's suggestion にも選ばれた。こうして「箱開け」後の暗中模索の日々はコラボレーション全員の尽力で無事に乗り越えたのである。

8 まとめと展望

幾重の検証を重ねて得た 2016-2018 年データの解析結果は、信号領域内に観測された 3 事象と予想される信号領域内の背景事象数 1.22 ± 0.26 が統計の範囲内で一致

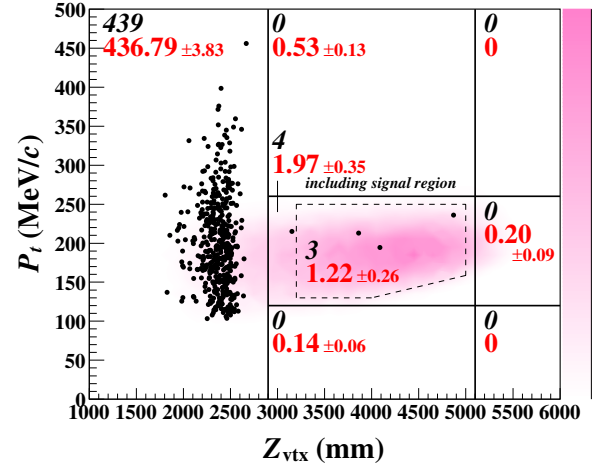


図 10: 再構成した π^0 の横方向運動量 (p_T) と崩壊 z 位置。点線内が信号領域である。図の中心にある実線で囲まれた領域が信号選択条件を決定するまでブラインドされていた。各領域には観測数 (上段) と背景事象数 (下段) が記されている。色付きの背景は MC で予測した $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 分布である [2]。

するということである。最も支配的な背景事象は $K^\pm$ 背景事象であり、感度向上にはこの背景事象を削減する必要がある。また、ビームハロー $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象の対策も必要である。ここでは今後の展望として、2019 年から 2021 年のデータ解析の状況及び、今後のデータ取得の予定について述べる。

8.1 2019 年から 2021 年取得のデータ解析

我々は既に $K^\pm$ 背景事象の削減のために UCV1 を 2020 年、UCV2 を 2021 年にインストールした。UCV1, UCV2 の荷電粒子検出効率それぞれ、70%, 95%であることをビームデータで確認している。そのため、2020 年、2021 年のデータに関しては $K^\pm$ 事象は十分削減可能である。しかし、2019 年データは UCV1 インストール前であり、 $K^\pm$ 背景事象の削減方法を考案する必要がある。現状は多変数解析、Deep learning 等を使って運動力学的変数を基に信号事象との区別が出来ないかを検討している。

ビームハロー $K_L \rightarrow 2\gamma$ に関しては、 π^0 質量仮定での崩壊位置の再構成と K_L 質量仮定での崩壊位置の再構成で得られた、2 つの γ 線の電磁カロリメーターへの入射角度とクラスタの形状を基に Likelihood Ratio を計算することで信号事象と分離できることがわかった。多変数解析による事象選択と合わせることで、信号事象の検出効率を 90% に維持しつつ、ビームハロー $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象を 7% 以下に削減できることがわかった [21]。

また、2019 年ランの前には電磁カロリメーターの改良

による中性子と γ 線の識別能力の向上 [22, 23] や, $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ 崩壊事象対策のための新たな荷電検出器の導入をしており, 事象識別手法の最適化による信号検出効率の改善も見込まれる。1 年以内に結果をまとめるべく, 鋭意解析中である。

8.2 今後のデータ取得について

J-PARC は現在, MR (Main Ring) の電源交換のための長期シャットダウン期間中であり, 来年度の秋からビームが再開される。ビーム再開後は段階的にビームパワーが 60 kW から 100 kW に増強される。また, 電源のリプルノイズに起因するスパイク状のビーム構造も低減されるはずで, KOTO 実験としては偶発事象による信号損失の削減が見込まれる。

この大強度ビームの恩恵を最大限にすべく, KOTO 実験では現在 DAQ システムの改良が進められている。新たな事象構成ボード, ソフトウェアトリガーのための新たな PC クラスターの構築を行い, より高いトリガーレートに対応出来るようにする。PC クラスターでは GPU を使った高速処理の実装も行う予定である。また, $K^\pm$ 背景事象を更に削減すべく, 低物質質量&高寿命化した UCV3, ビームライン下流で $K^\pm$ を排除するための磁石の設置, FB 検出器の改良も進めている。4 年のデータ取得で 10^{-11} 台の実験感度の達成を見込む。並行して, 次世代プロジェクトとして, 拡張されたハドロン実験ホールで 60 事象の $K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊事象の観測を目指した, KOTO step2 実験の計画も進められている。

稀崩壊実験では実験感度を上げるたびに新たな問題が見える可能性がある。そのたびに打ちのめされそうにもなるが, 原因を特定し対処できた時の喜びはこの上ない。どうですか, KOTO 実験に参加して $K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$ 発見を一緒に目指してみませんか?

参考文献

- [1] N. Shimizu *et al.*, (KOTO collaboration), Phys. Rev. D **102**, 051103 (2020).
- [2] J. K. Ahn *et al.*, (KOTO collaboration), Phys. Rev. Lett. **126**, 121801 (2021).
- [3] 渡辺丈晃, GeiYoub Lim, 野村正, 小松原健, 高エネルギーニュース **28-4**, 262 (2010).
- [4] 塩見公志, 杉山泰之, 外川学, 山中卓, 南條創, 野村正, 高エネルギーニュース **32-2**, 83 (2013).
- [5] A. J. Buras, D. Buttazzo, J. Girrbach-Noe, and R. Knegjens, JHEP **11** 033 (2015).
- [6] A. J. Buras *et al.*, JHEP **1511**, 166 (2015).
- [7] M. Tanimoto and K. Yamamoto, Prog. Theor. Exp. Phys. **1015**, 053B07 (2015).
- [8] J. K. Ahn *et al.*, (KOTO collaboration), Phys. Rev. Lett. **122**, 021802 (2019).
- [9] M. J. Haney, G. D. Gollin and T. Yamanaka, IEEE Conference on Nuclear Science Symposium and Medical Imaging, **1** 338 (1992).
- [10] C. Lin *et al.*, J. Phys. Conf. Ser. **1526**, 012034 (2020).
- [11] T. Kitahara *et al.*, Phys. Rev. Lett. **124**, 07181 (2020).
- [12] Y. Grossman and Y. Nir, Phys. Lett. B **398**, 163 (1997).
- [13] K. Fuyuto *et al.*, Phys. Rev. Lett. **114**, 171802 (2015).
- [14] Y. Liao *et al.*, Phys. Rev. D **102**, 055005 (2020).
- [15] D. Egana-Ugrinovic *et al.*, Phys. Rev. Lett. **124**, 191801 (2020).
- [16] X. Liu, Y. Lin and B. Zhu, JHEP **2020**, 197 (2020).
- [17] B. Utta, S. Ghosh, and T. Li, Phys. Rev. D **102**, 055017 (2020).
- [18] Xiao-Gang He *et al.*, JHEP **2020**, 34 (2020).
- [19] 白石諒太, 2021 年 3 月 修士論文 (大阪大学).
- [20] Taylor Cassidy Nunes, 2021 年 9 月 Master's thesis (Osaka University).
- [21] 乃一雄也, 2021 年 3 月 修士論文 (大阪大学).
- [22] 小寺克茂, 清水信宏, 南條創, 高エネルギーニュース, **39-2**, 64 (2020).
- [23] M. Osugi, JINST **15** C05067 (2020).