

# K 中間子稀崩壊探索による新物理へのアプローチ



塩見 公志

高エネルギー加速器研究機構  
shiohara@post.kek.jp



野村 正

高エネルギー加速器研究機構  
tadashi.nomura@kek.jp



山中 卓

大阪大学大学院理学研究科  
taku@champ.hep.sci.osaka-u.ac.jp

K 中間子の崩壊を対象とした実験研究は素粒子物理学において大きな役割を果たしてきている。1950年代に観測された正電荷を持つ K 中間子 ( $K^+$ ) の 2 種類の崩壊は、弱い相互作用でパリティ (P) が破れていることを示すきっかけとなった。1964年の CP 対称性の破れの発見 (粒子と反粒子の交換に対して物理現象が同じでないことの発見) は、長寿命の中性 K 中間子 ( $K_L^0$ ) が二つのパイ中間子に崩壊する過程の観測によるものである。CP 対称性の破れを説明する数多くの理論が現れたが、1990年代の K 中間子の精密測定と 2001 年の B 中間子崩壊での CP 対称性の破れの発見を経て、素粒子標準理論による説明 = 小林・益川理論の正しさが証明された。

様々な検証に対して正しさを誇る素粒子標準理論だが、物質が圧倒的に優勢な現在の宇宙の成り立ちを説明しうるほどには粒子と反粒子の振る舞いに差を生まないことも知られている。より高いエネルギースケールではなんらかの新物理が存在していることが示唆される。新粒子を直接作り出して観測できれば明快であり、欧州・CERN では現在到達しうる最高エネルギーを持つ LHC 加速器で新粒子探索が行われているが、残念ながら未だ発見の知らせはない。間接的な手法ながら、不確定性原理によって中間状態に短時間だけ現れうる重い新粒子の効果を精密測定によって捉えるアプローチの重要性が増してきたとも言える。

CP 対称性を破る K 中間子崩壊  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  は、理論計算の不定性が非常に小さく、素過程で生じる標準理論以外の寄与の存在を探す上で格好の対象である。標準理論によ

る予測分岐比が  $3 \times 10^{-11}$  であるように非常に稀な上、測定にかからないニュートリノが終状態に存在するため信号の同定に明確さがなく、難しい実験ではあるが、今やその観測を目指すことが現実味のあるものとなっている。茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC を利用した探索実験 (名称: KOTO 実験) が進行中である。

KOTO 実験は 2013 年に数日間、そのうち施設の休止を経た 2015 年に約 4 か月の物理データ収集を行った。KOTO 実験にとって初めての本格運転であったため特に慎重にデータ解析を行い、考える背景事象の残存数が十分少なく抑えられていることを評価した上で、2018 年 7 月にこれまでの世界記録を 1 桁更新する分岐比上限値  $3.0 \times 10^{-9}$  (90% 信頼水準) を与える結果を発表した。

2016 年以降これまで、年に 2 か月ほどのビーム利用期間を得てデータ収集を続けており、新物理の効果が現れうる領域まで探索範囲を広げつつある。とはいえ、目標感度に向け 1 桁 2 桁と改善するのは単純ではない。詳細なデータ解析で明らかになった背景事象に対し、将来の感度を見据えて削減策を講じる必要があり、時として大掛かりな検出器改良も伴う。信号の選別条件にもまだ改善の余地がある。加速器の運転強度の増強やビーム利用期間の確保が必須であることは言うまでもない。

新物理の鉱脈はどこに眠っているかわからない。K 中間子の稀崩壊研究は一点のみを深く掘削していくマニアックなアプローチとも言えるが、何かが吹き出して新しいパラダイムを開く糸口になればと、日々工夫して掘り続けている。

## — Keywords —

### K 中間子 (Kaon) :

ストレンジ (s) クォークとアップ (u) またはダウンクォーク (d) から成る中間子で、電荷を持つ  $K^+$  ( $us$ ) と  $K^-$  ( $\bar{u}s$ )、中性の  $K^0$  ( $s\bar{d}$ ) と  $\bar{K}^0$  ( $s\bar{s}$ ) がある (バー記号は反粒子を表す)。中性 K 中間子は  $K^0$ ,  $\bar{K}^0$  の組み合わせを固有状態として崩壊し、長寿命の中性 K 中間子 ( $K_L^0$ ) は CP 変換によって符号を変える組み合わせ (CP 固有値 -1) になっている。

### 崩壊分岐比 :

粒子の崩壊パターンは幾種類もある。各々の終状態への遷移確率に応じて崩壊が起こり、その総和によって粒子の寿命が決まる。崩壊分岐比は 1 崩壊に対して各々の終状態をとる確率を示す。たとえば分岐比  $3 \times 10^{-11}$  とは、およそ 300 億回の崩壊に対して 1 回の確率で起こることを意味する。

### 新物理の間接探索 :

粒子の崩壊過程などの中間状態では、不確定性原理によって短時間だけ重い粒子が存在しうる。たとえば中性 K 中間子の崩壊に関わる s から d への遷移はトップクォークなどを介して起こるが、さらに標準理論の枠外の粒子が存在すれば、標準理論の予測分岐比からずれると期待される。精密測定が新物理を探る手立てとなる。

