

# K中間子の稀な崩壊で探る素粒子新物理とその技術



技術解説

南 條 創\*

Search for new physics in particle physics with kaon rare decays and technologies therein

Key Words : Technologies in particle physics experiment, Kaon rare decay

## はじめに

「生産と技術」の技術解説ということで、素粒子物理の実験と、そこで使われている技術を紹介する。読者の方には馴染みが薄いかもかもしれないが、共通点や相違点を見つけて、興味を持って頂ければ幸いである。

## 素粒子物理学の標準理論

素粒子物理学における標準理論は、素粒子の種類と反応を記述する。標準理論における素粒子の構成は、物質を構成するスピン 1/2 の粒子と、力を媒介するスピン 1 の粒子、質量の源となるスピン 0 のヒッグス粒子である。これらの間の結合のルールが反応を記述する。

例として水を構成する粒子を考える。水は水素と酸素の原子からなり、原子は電子と原子核からなり、原子核は陽子と中性子からなり、これらはアップクォークとダウンクォークからなる。この電子、クォークの仲間に、ニュートリノを加えたものが、スピン 1/2 の素粒子である。

図1のように電荷が  $-e$  (素電荷) の電子(e)の仲間に、 $\mu$  粒子 ( $\mu$ )、 $\tau$  粒子 ( $\tau$ ) があり、それぞれ電子に比べ質量が 210 倍、3500 倍と大きい、相互作用の性質は同じである。中性のニュートリノにも、対応して電子ニュートリノ ( $\nu_e$ )、 $\mu$  ニュートリノ ( $\nu_\mu$ )、

$\tau$  ニュートリノ ( $\nu_\tau$ ) と 3 種類あり、こちらも相互作用の性質は同じである。 ( $\nu_e, e$ )、 ( $\nu_\mu, \mu$ )、 ( $\nu_\tau, \tau$ ) と対になって 3 世代あると考える。これらを合わせてレプトンと呼ばれる。クォークについては、アップクォーク (u) は電荷が  $+2/3e$ 、ダウンクォーク (d) は電荷が  $-1/3e$  と、ニュートリノと電子の関係と同様、 $1e$  だけ電荷が違う。これをペアにして 1 世代と考える。2 世代目は、チャームクォーク (c)、ストレンジクォーク (s)、3 世代目はトップクォーク (t) とボトムクォーク (b) であり、世代が大きいと質量も重くなる。また、それぞれの粒子には、対応して反粒子がある。

	粒子	反粒子
レプトン	0	$\bar{\nu}_e \bar{\nu}_\mu \bar{\nu}_\tau$
	$-e$	$e^+ \mu^+ \tau^+$
クォーク	$2/3e$	$\bar{u} \bar{c} \bar{t}$
	$-1/3e$	$\bar{d} \bar{s} \bar{b}$

図1 スピン 1/2 の素粒子の種類

力を媒介する粒子には、光子 ( $\gamma$ )、W ボソン ( $W^\pm$ )、Z ボソン ( $Z^0$ )、グルオン (g) がある。W ボソンは、図1のレプトンの上下や、クォークの上下の間を媒介し、唯一素粒子の種類を変える。他の相互作用では (同種の粒子と反粒子の対生成を含め) 粒子の種類は変化しない。光子は電荷を持つ粒子と結合する。Z ボソンはニュートリノを含め全ての粒子と結合する。グルオンはクォークとのみ結合する。

いくつか議論となっているものを除き、これまでの素粒子実験の結果は、標準理論により矛盾なく理解できている。



\* Hajime NANJO

1974年9月生まれ  
 東京大学大学院 理学系研究科 物理学  
 専攻博士後期課程 (2005年)  
 現在、大阪大学大学院 理学研究科 物  
 理学専攻 教授 博士(理学)  
 専門/素粒子物理学実験  
 TEL : 06-6850-5356  
 FAX : 06-6850-5532  
 E-mail : nanjo@champ.hep.sci.osaka-u.ac.jp

### 素粒子物理学の謎

一方で、標準理論では解決できない謎もある。高温だった宇宙初期には、粒子と反粒子が同数あったとされるが、現在の宇宙は粒子ばかりで、反物質はない。宇宙の歴史のどこかで、粒子と反粒子の相互作用の差から、粒子が生き残り、物質ばかりの宇宙ができたとされる。素粒子の標準理論でも、粒子と反粒子の反応はわずかに違うのだが、この違いでは残る物質の量が10桁ほど少なくなってしまう、現在のような宇宙ができない。このため、より大きい粒子と反粒子の違いを生み出す新しい物理が必要である。他にも、宇宙には暗黒物質と呼ばれる、電磁相互作用はしないが、重力相互作用に寄与する粒子がある。ニュートリノは、質量が小さく速度が早すぎ、宇宙の構造をかき乱してしまうので、暗黒物質の候補にはならない。このため、暗黒物質に対応する粒子は標準理論には含まれず、新粒子の探索が続いている。また、スピン1/2粒子が3世代を構成することを見たが、なぜ世代があるのか、それぞれの粒子の質量はなぜこの値なのかなど、より根源的な問題もある。

### K 中間子とこれを用いた素粒子新物理の探索

中間子はクォークと反クォークが結合してできる。

$$\begin{array}{l}
 K^0 : d\bar{s} \\
 \bar{K}^0 : \bar{d}s \\
 K_S : \sim (K^0 + \bar{K}^0)/\sqrt{2} \\
 K_L : \sim (K^0 - \bar{K}^0)/\sqrt{2} \\
 K^+ : u\bar{s} \\
 K^- : \bar{u}s \\
 \pi^0 : (u\bar{u} - d\bar{d})/\sqrt{2}
 \end{array}$$

図2 中間子の例

K 中間子は、s クォークと、 $\bar{u}$ か $\bar{d}$ の反クォーク、もしくは $\bar{s}$ クォークと、uかdのクォークからなる。このうち電荷が中性なものは、(d,  $\bar{s}$ )もしくは( $\bar{d}$ , s)であり、図2に示すようにそれぞれ $K^0$ 中間子、反 $K^0$ 中間子と呼ばれる。 $K^0$ 中間子と反

$K^0$ 中間子お互いに行き来できるので、実際に実現する状態は、両者の混合状態としての、 $K_L$ と $K_S$ である。我々はこのうち $K_L$ を用いる。この粒子の質量は陽子の半分、寿命は50nsである。上記の理由でこの粒子は $K^0$ 中間子と反 $K^0$ 中間子の混合した量子重ね合わせ状態にある。この粒子が、 $\pi^0$ 中間子( $u\bar{u}$ ,  $d\bar{d}$ の混合)とニュートリノ反ニュートリノ対へと崩壊する、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊を我々は探索している。標準理論によると、この崩壊分岐比は $3 \times 10^{-11}$  ( $10^{11}$ の $K_L$ の崩壊につき、3回起こる)

と計算される。この計算の不定性は5%であり、精度が高い。このため、実験による分岐比の測定結果と、標準理論の予測との差から、新物理を探索しやすい。

また、この反応は $K^0$ からも反 $K^0$ からも起こり、この粒子反応と反粒子反応の差により引き起こされる。粒子と反粒子の新たな差を発見できるかもしれない、物質ばかりの宇宙の謎を解く鍵となると期待している。実験によるこの崩壊の探索が続いているが、稀な反応なのでまだ観測例はない。現在我々が次に説明するKOTO実験<sup>1),2)</sup>により、世界最高感度で $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊を探している。最新の状況としては、2021年に取得したデータを用い、分岐比が $2.1 \times 10^{-9}$ 以下であることを90%の信頼度で示し<sup>3)</sup>、論文投稿を準備している。

### J-PARC KOTO 実験の概要

茨城県東海村にJ-PARCという加速器施設がある。ビームの強度が世界最大級の陽子加速器があり、陽子を30 GeVまで加速し、ハドロン実験室にある金の標的に衝突させる。この際、 $K_L$ ができる。 $K_L$ 以外にも様々な粒子ができる。4m長さの鉄のコリメータを2台用いて、20m長のビームラインの出口で8cm角のサイズになるようにビームを絞る。途中の電磁石により荷電粒子を排除すると、長寿命の中性粒子である、 $\gamma$ 、中性子、 $K_L$ が残る。KOTO実験では、この中性ビーム中の $K_L$ を使って、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊を探す。標的から21.5m下流から検出器が始まる。中性ビーム中の中性子が空気と反応すると、背景事象を作るので、検出器の大部分は直径4m、長さ10mの真空タンク(図3)の中にある。



図3 KOTO 検出器真空タンク

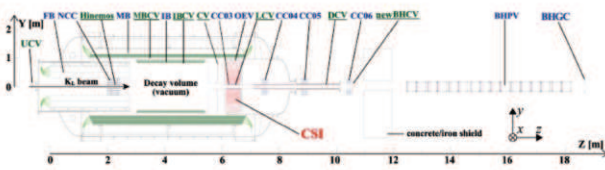


図4 KOTO 検出器断面図

我々は  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊を次のように検出する。真空タンク中央に崩壊領域 (図4の Decay volume) を用意し、そこで崩壊する  $K_L$  を対象とする。 $\pi^0$  が2個の光子に崩壊するので、真空タンクの下流にある直径1.9mのカロリメータ (図4の CSI) でこの2光子を検出する。ビームラインで8cm角にビームを絞っているので  $\pi^0$  はビーム軸上で崩壊したと仮定できる。ビーム軸上のどこかに崩壊位置を仮定すると、カロリメータで測定した2光子の位置とエネルギーを使って、 $\pi^0$  の質量を計算できる。この質量が実際の  $\pi^0$  の質量になるように、崩壊位置を決定する。崩壊位置が決まると  $\pi^0$  の運動量を計算できる。この崩壊ではニュートリノが運動量を持ち去るので、 $\pi^0$  の横方向運動量 (ビーム軸に垂直方向の運動量成分) が大きいという特徴がある。このため  $\pi^0$  の横方向運動量を用いて信号事象を選択する。

さらに、この崩壊では他には検出できる粒子がない。他のほぼ全ての  $K_L$  の崩壊では、余分に粒子ができたり、荷電粒子ができたりする。崩壊領域周囲を検出器で囲い、崩壊から出てくる粒子を逃すことがないように検出し、他の崩壊事象を排除する。

例を挙げると、 $K_L$  が分岐比0.1%ほどで2個の  $\pi^0$  に崩壊し、終状態に4つの光子ができる。このうちの2光子をカロリメータで検出し、残りの2光子を検出し損なうと、背景事象となり得る。目指す信号事象に比べ、 $10^8$  倍も多く起こるので、余分な光子を捕まえることで8桁削減する。典型的には1光子を99.99%以上の確率で検出せねばならない。2016年には円筒状の検出器を追加し (図4のIB)、検出器を増強した。

他にも分岐比40%で  $K_L$  が荷電パイ中間子 ( $\pi^\pm$ )、電子、ニュートリノへ崩壊する。カロリメータでは荷電粒子か光子か弁別できないので、この2つの荷電粒子をカロリメータで検出すると、背景事象になり得る。これを削減するため、カロリメータの直前に荷電粒子検出器 (図4の CV) がある。直径

1.9m、厚み3mmのプラスチックシンチレータによる検出器を2層使い、この背景事象を12桁以上削減した。

さらに2016-2018年に取得したデータの解析では、新たに荷電K中間子  $K^\pm$  による背景事象も見つかった。ビームラインの電磁石の下流のコリメータに  $K_L$  があたることなどから、 $K^\pm$  ができる。中性子と光子が大量に存在する中性ビーム中に荷電粒子検出器 (図4の UCV) を設置し、 $K^\pm$  の侵入を検知することで、この背景事象を削減した。

### J-PARC KOTO 実験の検出器

KOTO 実験で使っている検出器を紹介する。

#### 電磁カロリメータ (CSI)

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊における  $\pi^0$  からの2光子を捉える直径1.9mの検出器である。50cm長のドープしていないCsI結晶について、2.5cm角のものを2240個、5cm角のものを476個、円筒状に積み上げたものである。光子や荷電粒子が入射すると、結晶へのエネルギー損失に応じて、シンチレーション光が発生する。これをそれぞれの結晶の下流に取り付けた光電子増倍管 (PMT) と、上流には取り付けられた半導体光センサー (MPPC) により検出する。この検出器の置かれる領域の真空度は  $10^{-3}$  Pa である (ビーム通過領域と崩壊領域の真空度は、アウトガスの多い検出器の領域とはメンブレンで仕切られ、 $10^{-5}$  Pa である)。この真空中で1.5kV程度の高電圧を3000本弱のPMTに印加する。PMTには、例えば1.5kVから5段階に降圧した複数の電圧が要る。これを抵抗分割により実現すると、抵抗に十分な電

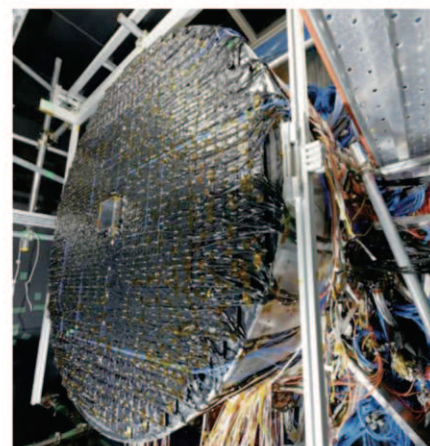


図5 カロリメータ (増強中の頃)

流を流し安定な電圧を得るため、消費電力が大きくなる。KOTO 実験では、真空中で稼働するコックコロフト・ウォルトン型の高電圧生成モジュールを企業と開発し、このチャンネル数分を PMT の近くに設置している。これにより、複数の電圧を発生しつつ、真空中での低消費電力を実現した。また、真空タンクの外からは低電圧電源とコントロール信号を送るのみとし、真空タンク内部へのケーブル導入を減らした。2019 年には、MPPC を結晶上流端に導入し、検出器を増強した。結晶の上下流でのシンチレーション光検出時間の差を使い、結晶の奥行き方向の発光位置を測定できるようにした。これには、MPPC を 4080 個使用し、回路基板などを設計、製作した。鉛直な結晶の面に、MPPC を光学接着していくことも困難が予想されたが、接着手法やシステムを開発し、接着作業を 2 ヶ月で終えた。

#### 荷電粒子検出器 (CV)

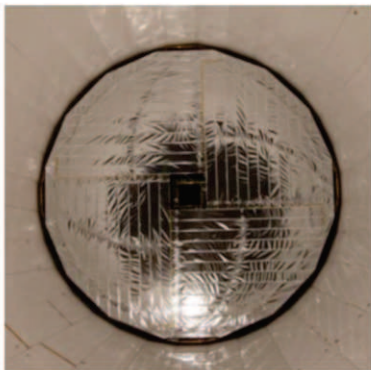


図 6 荷電粒子検出器 (CV)

CV はカロリメータの直前に 2 層あり、荷電粒子を検出し、背景事象を排除する。光子や中性子によるヒットを避けるために物質量が少ない。1 層あたり 3 mm 厚みのプラスチックシンチレータを用い、1 層で荷電粒子を 99.998% の確率で検出できる (見逃す確率が  $1.5 \times 10^{-5}$ )。この実現のためには、シンチレータの発光を光センサーで受けとる光量をできるだけ大きくする努力があった。また、1 層は 7 cm 幅のストリップ 48 枚、もしくは 44 枚から成る。隙間なくこのストリップを配置し、形状を維持することも重要であった。プラスチックシンチレータの層の背面には、0.8 mm 厚みの一枚の CFRP 板によるサポート構造がある。これに穴をあけ、テフロン糸でシンチレータのストリップを取り付けている。薄い大面積の CFRP シートを作る企業の技術に助けられた。この CFRP シートを外縁部のアルミチャンネルのみで支え、強度を維持する点でも、構造計算と企業の協力を助けられた。

#### 上流荷電粒子検出器 (UCV)

ビーム中で運転するため、中性子や光子に不感となるように物質量を減らした。0.2 mm 厚みのプラスチックシンチレータを用い、外に漏れるシンチレーション光を、12  $\mu$ m 厚みのアルミ蒸着フィルムで PMT に集める (図 7)。この低物質量にもかかわ

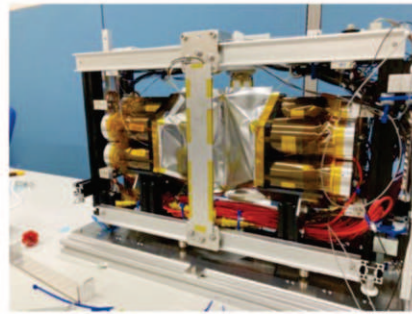


図 7 上流部荷電粒子検出器

らず、荷電粒子に対しては 99.95% の検出効率を得た。この検出器により荷電 K 中間子背景事象を十分に削減できる。

#### 将来の展望

KOTO 実験は 2013 年から物理解析用のデータ取得を始めた。J-PARC からのビーム供給量にもよるが、あと 4、5 年すると背景事象の寄与と、観測事象の統計量が少ないことから、探索感度の改善速度が鈍くなる。そこで KOTO 実験の 100 倍の感度を目指す KOTO II 実験を検討している<sup>4)</sup>。図 8 のようにカロリメータの直径は 3 m、真空タンクは 20 m を超える大きさになる。紹介したような検出感度の高い粒子検出器も必要であり、工夫のしどころでもある。2035 年頃の実験開始に向けて、検出器の性能の強化、より大きな構造と真空領域をどのように作るかなど検討を進めている。まさに、「生産と技術」の力も必要であり、読者のみなさまからのサポートをお願いしたい。KOTO II 実験では、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊の分岐比が  $3 \times 10^{-11}$  であれば、一

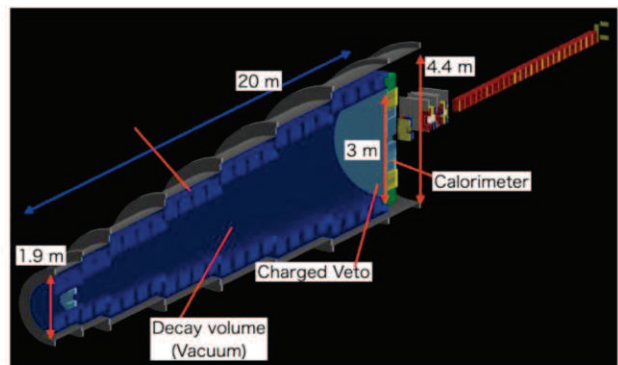


図 8 KOTO II 実験検出器

年間実験を続けると 35 事象を得られる予定であり、世界初観測を期待している。ここで得られる分岐比が、標準理論の予測と異なる可能性があり、新たな粒子と反粒子の差が見えるかもしれない。物質ばかりの宇宙の謎を生んだドラマの解明をいつか報告したい。

#### 参考文献

- 1) T. Yamanaka, Prog. Theor. Exp. Phys. 2012, 02B006 (2012).
- 2) 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 Vol.32 No.2 「J-PARC KOTO 実験」
- 3) J. Redeker ICHEP2024 会議発表  
[https://indico.cern.ch/event/1291157/contributions/5896367/attachments/2898931/5083214/JRedeker\\_ICHEP\\_2024\\_KLpi0nunu.pdf](https://indico.cern.ch/event/1291157/contributions/5896367/attachments/2898931/5083214/JRedeker_ICHEP_2024_KLpi0nunu.pdf)
- 4) G. Anzivino et al. *Eur.Phys.J.C* 84 (2024) 4, 377

